

# 中空ねじりによる液状化強度試験の 高精度化に関する研究委員会

## 成果報告書

2024年3月31日

地盤工学会関東支部  
中空ねじりによる液状化強度試験の  
高精度化に関する研究委員会

## 目 次

1	はじめに.....	4
2	利用状況に関するアンケート.....	7
2.1	まえがき.....	7
2.2	アンケート概要.....	7
2.3	アンケート結果.....	8
2.3.1	試験の実施状況および試験機の保有状況.....	8
2.3.2	実施目的と試験より取得した情報.....	9
2.3.3	試験の対象試料.....	10
2.3.4	試験条件の設定方法と基準化への要望.....	11
2.3.5	利用拡大に向けた要望.....	12
2.4	まとめ.....	12
3	一斉試験の試験概要, 試験仕様.....	13
3.1	概要.....	13
3.2	一斉試験のケース構成と実施状況.....	13
3.3	まとめ.....	23
4	一斉試験の結果と考察.....	25
4.1	密度の影響.....	25
4.1.1	はじめに.....	25
4.1.2	試験条件.....	25
4.1.3	空中落下法による落下高さ.....	25
4.1.4	各機関の圧密に伴う密度の変化.....	26
4.1.5	液状化試験結果に及ぼす密度の影響.....	29
4.1.6	再圧密時の体積ひずみに及ぼす密度の影響.....	34
4.1.7	まとめ.....	36
4.2	試料寸法の影響.....	37
4.2.1	供試体寸法.....	37
4.2.2	寸法による液状化強度の違い.....	39
4.2.3	液状化強度の増加率.....	49
4.2.4	せん断ひずみ, 過剰間隙水圧比の発生の違い.....	50
4.2.5	再圧密時の体積ひずみ.....	55
4.2.6	まとめ.....	56
4.3	平均せん断ひずみ, 平均せん断応力の定義の影響.....	57
4.3.1	中空ねじりせん断試験におけるせん断ひずみと平均せん断応力の不均質性.....	57
4.3.2	平均せん断応力・平均せん断ひずみの式.....	57
4.3.3	各式により算出されるせん断応力・せん断ひずみ値の相違とその影響.....	59
4.3.4	まとめ.....	61
4.4	軸固定の影響.....	63
4.4.1	軸力一定条件と軸変位固定条件を両方実施した試験機関の分析.....	63
4.4.2	全試験機関の分析.....	88
4.4.3	まとめ.....	116
4.5	繰返し制御方法の影響.....	117
4.5.1	制御方法による違い.....	117

4.5.2	載荷周波数による違い .....	119
4.5.3	まとめ .....	119
4.6	ゴムスリーブ厚・張力補正の影響 .....	119
4.6.1	ゴムスリーブ厚について .....	119
4.6.2	ゴムスリーブ張力補正について .....	120
4.6.3	その他の影響 .....	125
4.6.4	考察と基準案を考慮したまとめ .....	126
4.6.5	参考資料：各機関の結果 .....	127
4.7	リブの高さ，個数の影響 .....	127
4.7.1	一斉試験参加機関保有の中空ねじりせん断試験機におけるリブの状況 .....	128
4.7.2	液状化試験におけるリブの影響分析 .....	135
4.7.3	まとめ .....	148
4.7.4	リブが無い場合の試験結果について（参考） .....	148
5	一斉試験参加機関に対するアンケート調査 .....	152
5.1	一斉試験に関するアンケートの調査結果 .....	152
5.2	中空ねじり試験装置を用いた液状化試験一般に関するアンケートの調査結果 .....	154
5.2.1	液状化試験の実施形態に関する質問 .....	154
5.2.2	中空円筒供試体の作製方法 .....	156
5.2.3	最も多く用いる供試体寸法と実施可能寸法（外径・内径・高さ） .....	156
5.2.4	供試体の外径・内径・高さの計測方法 .....	157
5.2.5	ろ紙の材質・厚さ .....	158
5.2.6	繰返し載荷（中）の軸荷重の動力源と軸変位制御方法 .....	159
5.2.7	繰返し載荷（中）のねじり力の制御方法，載荷機構，動力源，載荷位置 .....	159
5.2.8	セル外に設置している計測機器と補正方法 .....	160
5.2.9	応力制御（周波数一定）とする場合の載荷周波数 .....	161
5.2.10	ひずみ制御とする場合のひずみ速度 .....	161
5.2.11	実施可能な載荷波形の種類 .....	162
5.2.12	軸ひずみとせん断ひずみの計測方法 .....	162
5.2.13	使用しているセンサーの仕様 .....	162
5.2.14	データ計測におけるノイズ対策・処理 .....	164
5.2.15	せん断応力とせん断ひずみの計算式 .....	165
5.2.16	試験室の温度の調整法 .....	166
5.2.17	繰返し載荷中のせん断応力振幅の精度を保つための制御・工夫の有無とその方法 .....	166
5.2.18	繰返し載荷中の軸荷重を一定にするための工夫の有無とその方法 .....	166
5.2.19	メンブレンペネトレーションの影響が危惧されるような粗粒土を用いた中空ねじり液状化試験を実施した経験の有無，せん断力の補正の有無 .....	166
5.2.20	メンブレン張力補正の有無 .....	166
5.2.21	CO <sub>2</sub> 通気時間，脱気水通水時間，背圧放置時間 .....	167
5.2.22	脱気，通水時の初期有効拘束圧 .....	167
5.2.23	圧密時に供試体に作用させることができる応力状態 .....	168
5.2.24	不攪乱試料の圧密時の応力状態 .....	168
5.2.25	非排水繰返しせん断時の有効拘束圧設定の計算方法 .....	168
5.2.26	初期有効拘束圧（供試体自立時の負圧相当の拘束圧）から圧密時の有効拘束圧まで拘束圧を増加させていく際の載荷方法 .....	168
5.2.27	圧密終了の判断基準 .....	169
5.2.28	供試体に対して載荷可能な最大角度と最大両振幅せん断ひずみ .....	170
5.2.29	非排水繰返しせん断試験（液状化試験）終了の判断基準 .....	170
5.2.30	中空ねじり試験装置を用いて非排水繰返しせん断試験後に実施したことがある追加検討事項 .....	170

5.2.31	中空ねじり液状化試験法の基準化の必要性とその理由.....	171
5.3	まとめ.....	172
6	委員会活動記録.....	173
6.1	委員会の概要.....	173
6.2	主な活動内容.....	177
6.2.1	文献調査.....	177
6.2.2	利用状況に関するアンケート.....	177
6.2.3	一斉試験.....	178
6.2.4	一斉試験参加機関に対するアンケート.....	179
6.2.5	第58回地盤工学研究発表会ディスカッションセッション（全国大会 DS）.....	180
6.2.6	成果報告書.....	181
6.2.7	科研費への応募.....	181
6.2.8	対外発表.....	182
7	まとめ.....	183
	付録.....	185
付録1.	利用状況に関するアンケート.....	186
付録2.	中空ねじりによる一斉液状化試験 マニュアル.....	189
付録3.	一斉試験参加機関に対するアンケート.....	197
付3.1	一斉試験に関するアンケート.....	197
付3.2	中空ねじり試験装置を用いた液状化試験一般に関するアンケート.....	199



## 1 はじめに

地盤の液状化現象がエンジニアの着目を浴びるようになったのは、1964年のアラスカ地震と新潟地震である事はよく知られている。これから約60年が経過しているにも関わらず、近年の地震でも液状化とそれを原因とする被害は多く発生している。地盤材料は鋼やコンクリートなどの他の構造用材料と違って自然材料であり、場所によって性質が異なる。また、原位置での試験が困難であることから、原位置から採取した試料や試験室で調整した試料を用いた試験を行わざるを得ない。

土質材料のもう一つの特徴として、挙動が複雑で、ごく小数の試験で得られた特性により土の性質を得られる訳ではなく、必要な特性に応じて色々な試験法が考えられている。土質の試験法は、地盤工学会の試験法の本<sup>1)</sup>(いわゆる赤本)に示されているが、1281ページもある。これに加え、原位置の地盤を調査するための方法<sup>2)</sup>(いわゆる青本)が1259ページもある事を考えれば、土の挙動をとらえることが難しいことが理解できる。

地震時の土の挙動を求める代表的な試験は、繰返しせん断試験と液状化強度試験であろう。両者の違いは前者が繰返しせん断を受けたときの応力-ひずみ関係を求めるのに対して、後者は液状化の発生を予測するという点にある。これは液状化の発生は大きな被害を発生させる可能性があると言うことでその予測が重要であった、過去のなごりである。現在では液状化の発生も許容し、その後の変形も予測する事が重要になっているが、残念ながらこれについては赤本にも示されていない。ただし、目的は異なるが、繰返しせん断を作用させるという意味では同じである。そこで、ここでは両者を合わせて土のせん断試験と呼ぶことにする。

土のせん断試験では試料を用意することが難しいことに加え、地震時の応力状態を再現するように載荷する事も難しい。たとえば、一次元の地盤で地震によるせん断力を受けると、土は水平方向のせん断応力を受けるが側方の相対変位は発生しない(水平方向の直ひずみが0)。このような状態は単純せん断と呼ばれており、それを実現する単純せん断試験という方法がある。単純に言えば、平行四辺形になるように試料を変形させる試験であるが、あまり実務では使われていない。これは、単純せん断変形は試料が平行四辺形に変形することであるが、そのまま平行四辺形に変形する直方体の試験機では変形したときに試料の隅角部が不均質になること、攪乱試料をケースに詰めると、静止土圧係数の制御が出来ない事などが原因である。

Seed & Lee<sup>3)</sup>はほぼ水平な地盤の挙動は単純せん断挙動である事を認識した上で、三軸試験でも同じようなせん断挙動を表現できるとして、三軸試験を用いて液状化強度を求める方法を示した。これより、北米では三軸試験で液状化強度を求めることが一般的になっている。なお Peacock & Seed<sup>4)</sup>は三軸試験と単純せん断試験では液状化強度が大きく違うことを示したが、Finn ら<sup>5)</sup>はせん断応力振幅を有効上載圧で無次元化するのが問題で、二次元状態の有効拘束圧で無次元化することにより両者が同じになることを示している。

一方、繰返しせん断特性を求める試験では、Hardin & Drnevich は地震時の原位置の土の挙動は単純せん断であるが、中空ねじり試験で同じ挙動が再現できるとし<sup>6)</sup>、これを  $G-\gamma$ ,  $h-\gamma$ 関係で表し、実験式を示している。彼らは、同じ題目の論文を ASCE にも投稿しており<sup>7,8)</sup>、日本ではこちらを引用している論文が多い。Seed & Idriss<sup>9)</sup>は  $G-\gamma$ ,  $h-\gamma$ 関係を室内試験で直接求める方法として、三軸試験、単純せん断試験、ねじりせん断試験をあげている。彼らは、多くの研究を集め、 $G-\gamma$ ,  $h-\gamma$ 関係にまとめているが、まとめの中に試験法が記述されていないことから、試験法による違いは気にしていなかったと考えられる。

日本の状況を赤本で確認すると、1979年版<sup>10)</sup>には繰返しせん断試験に関する記述はない。1990年版<sup>11)</sup>になって「せん断試験」という大項目が作られ、その中に「土の繰返し非排水三軸試験」として液状化試験の方法が示された。ここでは、報告事項として両振幅軸ひずみ  $DA=1, 2, 5\%$  に対応する繰返し回数を示すことが示されているが、事例には、 $DA=10\%$ 、過剰間隙水圧比  $\Delta u/\sigma'_v=0.95$  に対応する繰返し回数も示されている。 $\Delta u/\sigma'_v=0.95$  はいわゆる初期液状化に対応するものと考えられる。なお、繰返しせん断特性(当時は、動的変形特性と呼んでいた)と繰返しね

じりせん断試験については、基準化されていない試験法として示されているだけであった。2000年版<sup>12</sup>でも、液状化に関しては、「土の液状化強度特性を求めるための繰返し非排水三軸試験」として示されている。一方、繰返しせん断特性に関しては「変形特性を求めるための繰返し試験」の中に、「繰返し三軸試験」と「中空円筒供試体による繰返しねじり試験」が示されている。すなわち、三軸試験は液状化強度試験にも繰返しせん断特性試験にも記述されているのに対して、中空ねじり試験は繰返しせん断特性試験だけしか記述されていない。この状況は現在まで変わっていない。

これから分かるように、液状化強度試験は三軸試験で行うのが主流であった。しかし、実挙動の再現という観点で見ると、三軸試験ではせん断応力を発生させるためには軸方向力を作用させるが、するとせん断応力と共に拘束圧も変化するという実地盤とは異なる載荷方式である。また、非排水である事から等体積であるとして、ポアソン比も0.5と仮定してせん断ひずみを求めている。これに対して、中空ねじり試験は、先にも述べたように載荷方法が実地盤に相当しているし、実地盤と同様な初期異方圧密状態、初期せん断応力などを実現するのも比較的容易である。このためか、中空ねじり試験機による液状化強度試験はかなり行われており、論文もある。しかし、赤本に示されていないことから、方法は試験機関ごとに異なっている可能性がある。一般に解析の実務では試験法の違いが意識されることはほとんど無いので、異なる試験法で求められた試験結果は液状化判定、解析などにも影響を与える。また、三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度に関する同じという報告（たとえば深井ら<sup>13</sup>）と異なるという報告（たとえば、澤田ら<sup>14</sup>）がある様に、まだ、中空ねじり試験機による液状化強度試験が十分に認知されているとはいえないところもある。実地盤に似た初期条件、載荷条件が実現できるということから、今後も中空ねじり試験による液状化強度試験が行われると考えられる。すると、従来の試験法と比べて何が違うのか、何が同じなのかをはっきりさせておく必要があると考えられる。

もう一つの問題は、試験方法である。液状化強度試験という名前の通り、液状化強度試験は液状化強度を求めるのが目的である。しかし、特に1995年兵庫県南部地震を契機として、液状化の発生を許容する設計が可能になってきている。しかし、現行の液状化強度試験では液状化以後の挙動に対する適切な出力方法が設定されておらず、実務の要求に応えられているとはいえないところもある。

本委員会はこれら二つの問題に対して議論を深めるために設立された。次章以下に示されるように、前者に対してはアンケート調査、一斉試験などを通して、現在の中空ねじり試験機による液状化強度試験の現実を明らかにされたと考えている。ただし、後者に対しては時間の制約もあり、十分な議論が出来たとはいえないところもある。

なお、この委員会の成果を基に2024年3月から開催される基準部室内試験規格・基準委員会のWG4（力学特性）で中空ねじり試験機による液状化試験法の基準化に向けた議論が行われることになっている。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会室内試験規格・基準委員会：地盤材料試験の方法と解説 [第一回改訂版]，地盤工学会，1281pp., 2020.
- 2) 地盤工学会 地盤調査規格・基準委員会：地盤調査の方法と解説，地盤工学会，1259pp., 2013
- 3) Seed, H.B. and Lee, K.L.: Liquefaction of saturated sands during cyclic loading, Proc, ASCE, Vol. 92, No. SM6, pp. 105–134, 1966
- 4) Peacock, W.H. and Seed, H. B.: Sand liquefaction under cyclic loading simple shear conditions, Proceedings of the American Society of civil engineers, Vol. 94, No. SM3, pp. 689–708, 1968
- 5) Finn, W. D. L., Bransby, P. L. and Pickering, D. J.: Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Shear Tests, J. SM, Vol. 97, No. SM4, pp. 639–659, 1971
- 6) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.: Shear Modulus and Damping in Soils: I. Measurement and Parameter Effects; II. Design Equations and Curves, Technical Reports UKY 27-70-CE 2 and 3, College of Engineering, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, 1970
- 7) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.: Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects, Proc. of the

- American Society of civil engineers, Vol. 98, No. SM6, pp. 603–624, 1972
- 8) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.: Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 98, No. SM7, pp. 667–692, 1972
  - 9) Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Soil moduli and damping Factors for dynamic response analyses, Report No. EERC70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 40pp., 1970
  - 10) 土質工学会：土質試験法－第2回改訂版－，1979，757pp
  - 11) 土質工学会：土質試験の方法と解説，土質工学会，615pp., 1990
  - 12) 地盤工学会：土質試験の方法と解説－第1回改訂版－，925pp., 2000
  - 13) 深井晴夫，大島昭彦，岡二三生，他：繰返し三軸試験と繰返しねじり試験における液状化強度の比較，第50回地盤工学研究発表会，pp.479-480，2015；同（第2報），第51回地盤工学研究発表会，pp.463-464，2016
  - 14) 澤田俊一，三上武子，吉田望，竹島康人，藤井紀之：過剰間隙水圧の発生過程が地盤の地震応答に与える影響，レベル2地震動による液状化に関するシンポジウム論文集，pp. 397-400，2003

## 2 利用状況に関するアンケート

### 2.1 まえがき

液状化の発生や液状化に伴う被害を高い精度で予測するためには、地盤の液状化強度や液状化後の変形特性を適切に把握する必要がある。土の液状化強度を求める試験は、「土の繰返し非排水三軸試験法（JGS0541-2020）」に準じた三軸試験により実施されることが多い。一方、近年では、より実地盤の応力状態に近い中空ねじりによる液状化試験が実務でも行われている。このような背景から、地盤工学会関東支部「中空ねじりによる液状化強度試験の高精度化に関する研究委員会」では、中空ねじりによる液状化試験の基準化に向けた検討を進めており、試験の普及状況や実務における利用実績、試験基準化の要望を把握することを目的としてアンケート調査を実施した。

### 2.2 アンケート概要

アンケートはオンライン方式とし、地盤工学会関東支部のHPに掲載するとともに、地盤工学会のメールニュース等で一般に向け広く展開を図ったものである。アンケート調査では、まず問1で中空ねじりによる液状化試験の利用実績について回答を求め、問2で中空ねじりによる液状化試験に対する意識調査を行った。問2の意識調査において、「試験に興味がある」と答えた回答者を対象に問3以降の試験の実績本数や試験機の保有状況、試験目的および所属機関等について回答を求めた。アンケート回答数の百分率はすべて少数第二位を四捨五入して結果整理を行った。表2.2.1に機関別の回答状況を示す。アンケートの総回答数は200件であった。回答者の所属機関はコンサルタントが最も多く32.5%、次いで大学・高専22.0%、建設会社17.0%であった。その他の回答者には資材メーカー等が含まれている。回答者の所属機関にやや偏りはあるものの、幅広い機関から回答を得ることができている。図2.2.1に中空ねじりによる液状化試験に対する意識調査（問2）の結果を示す。意識調査では、回答者の80.0%にあたる160名が「中空ねじりによる液状化試験に興味がある」と回答している。

表2.2.1 機関別の回答状況

所属機関	回答数	割合 (%)
大学・高専	44	22.0
国・自治体	1	0.5
公的研究機関	4	2.0
建設会社	34	17.0
コンサルタント	65	32.5
地質調査会社	4	2.0
試験器メーカー	3	1.5
その他	5	2.5
無回答（試験に興味がない）	40	20.0
合計	200	100.0

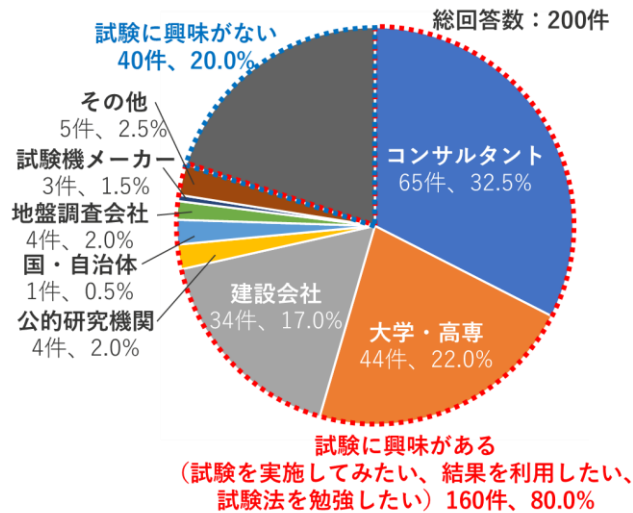


図2.2.1 中空ねじりによる液状化試験に対する意識調査

## 2.3 アンケート結果

### 2.3.1 試験の実施状況および試験機の保有状況

図2.3.1に中空ねじりによる液状化試験の利用実績と実績本数を示す。a) 利用実績はアンケート調査の全回答者200名の回答である。b) 実績本数は「利用実績がある」と回答した104名のうち、意識調査で「試験に興味がある」と回答した92名の回答を示している。全回答者200名のうち52.0%は、試験を実施したり、試験結果を利用したことがあると回答している。アンケート時点までの試験実績本数は「20本以上」という回答が最も多く全体の59.3%を占めており、各機関において多くの試験実績を有していることがわかる。特にコンサルタントや大学・高専において試験実績が多い傾向にある。図2.3.2に「試験に興味がある」と回答した160名の中空ねじり試験機の保有状況を示す。46.9%が「現在保有している」と回答しており、8.7%が「今後導入したい」と回答している。所属機関の重複により実際の保有状況とは乖離がある可能性があるが、現状でも一定数の機関が試験機を保有しており、今後も保有台数が増加すると考えられる。

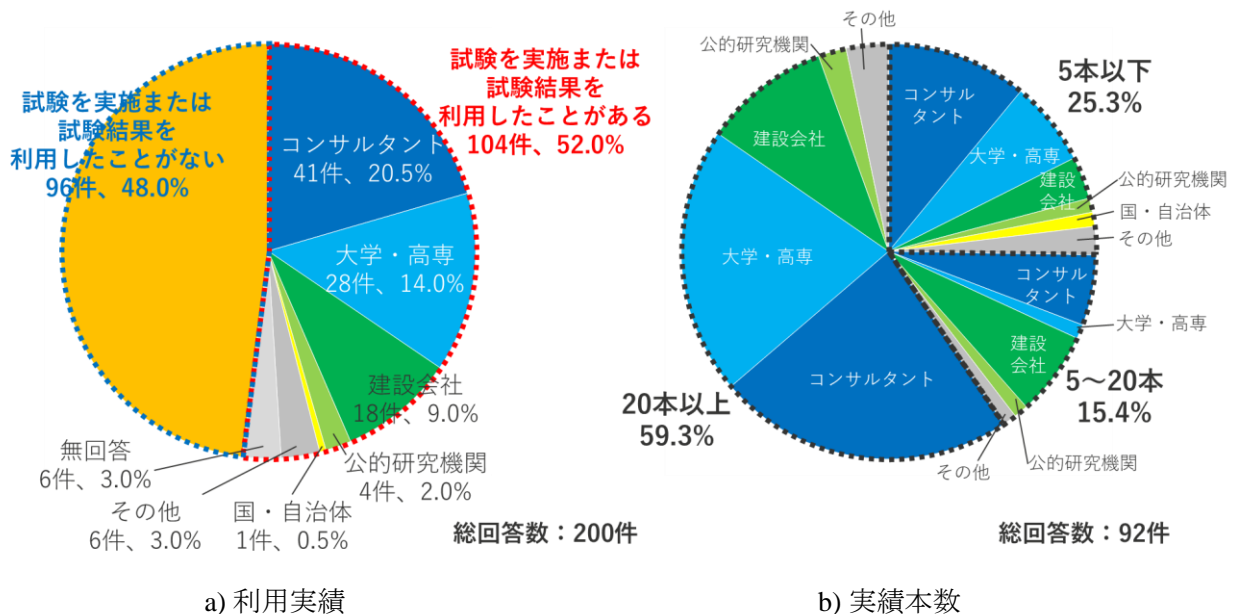


図2.3.1 中空ねじりによる液状化試験の利用実績と実績本数

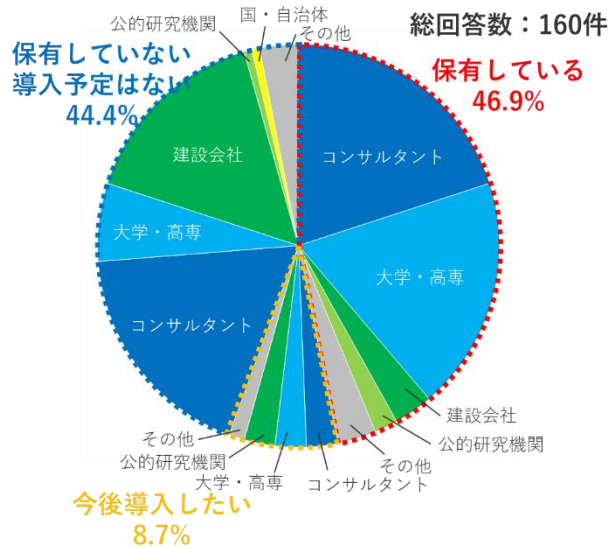


図2.3.2 中空ねじり試験機の保有状況

### 2.3.2 実施目的と試験より取得した情報

図2.3.3に試験目的と試験より取得した情報を示す。本設問は複数回答可とし、a) 試験目的およびb) 取得情報の総回答数は、それぞれ206件と504件であった。実施目的として最も多いのは学術／研究で全体の45.6%であり、次いで設計業務で28.6%，技術開発で14.1%であった。学術／研究と技術開発を合わせると59.7%が研究開発を目的としている。特に学術／研究については大学・高専が多い傾向にある。一方で、設計業務や施工時／検証時の合計は38.3%であり、実務においても中空ねじりによる液状化試験が多く活用されていることがわかる。特にコンサルタントにおいて設計業務で試験の利用実績が多い傾向にある。試験時に取得した情報を見ると、やはり液状化強度曲線が最も多く全体の22.9%を占めており、三軸液状化試験でも取得する波形記録、応力-ひずみ関係、応力経路図などは概ね同時に取得されている。液状化後の体積ひずみを取得する件数はやや少なく全体の14.4%に留まった。所属機関ごとに大きな差はなく、同様の傾向を示している。表2.3.1に試験より取得した情報のうち、その他の回答を示す。その他の回答は、アンケート回答のまま記載している。

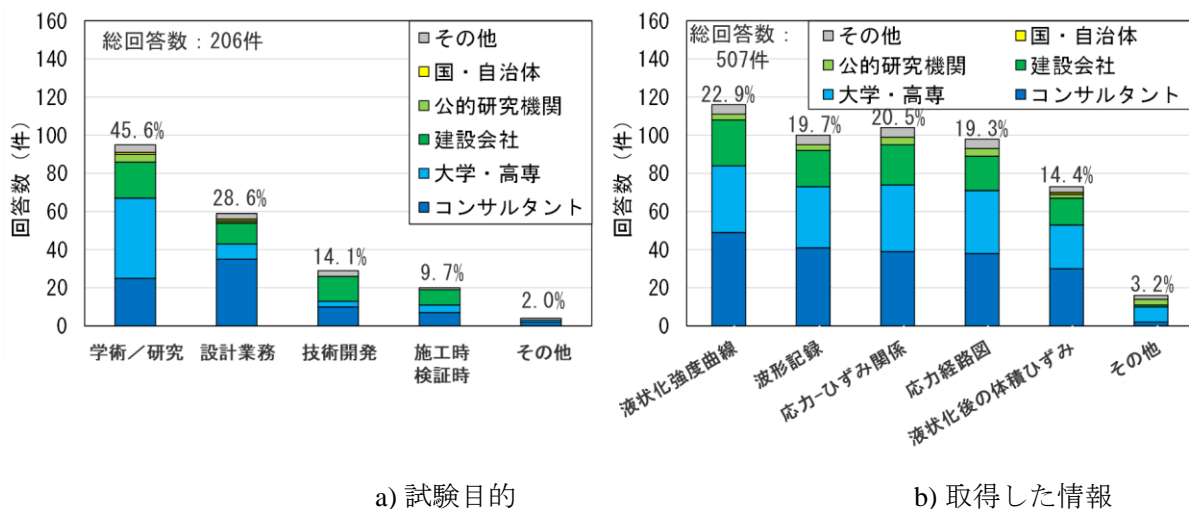


図2.3.3 試験の実施目的と試験より取得した情報（複数回答可）

表2.3.1 試験より取得した情報のその他の回答一覧

1	流動域のせん断応力
2	K0圧密時の応力状態
3	改良土の一軸強さと液状化強度の関係
4	繰返し载荷後の単調载荷
5	剛性低下率
6	初期剛性
7	損失エネルギー法による係数
8	体積圧縮係数の算出
9	地盤内の複雑な応力状態の再現
10	土要素が液状化に至るまでの累積損失エネルギーや累積せん断ひずみなど
11	動的変形試験によるせん断弾性係数および減衰定数

### 2.3.3 試験の対象試料

図2.3.4に試験の対象試料と入手方法を示す。本設問は複数回答可とし、a) 対象材料およびb) 材料の状態、入手方法の総回答数は、それぞれ220件と229件であった。材料の入手方法のうち、複数市販材料とは、数種類の市販材料を用いて再構成した混合土のことである。対象試料は砂質土が最も多く55.5%を占めている。次いで中間土24.1%、改良土10.0%であった。試料の入手に関する設問では、室内再構成試料（単一市販材料）が最も多く34.9%であり、次いで、「乱れの少ない試料（以下、不攪乱試料と記す）」が27.5%であった。原位置における採取試料（不攪乱、攪乱）と市販材料を用いた再構成試料は同程度であり、室内における基礎的な検討に加え、原位置試料を対象とした検討にも本試験が用いられていることがわかる。表2.3.2に対象試料と入手方法のうち、その他の回答を示す。その他の回答は、アンケート回答のまま記載している。

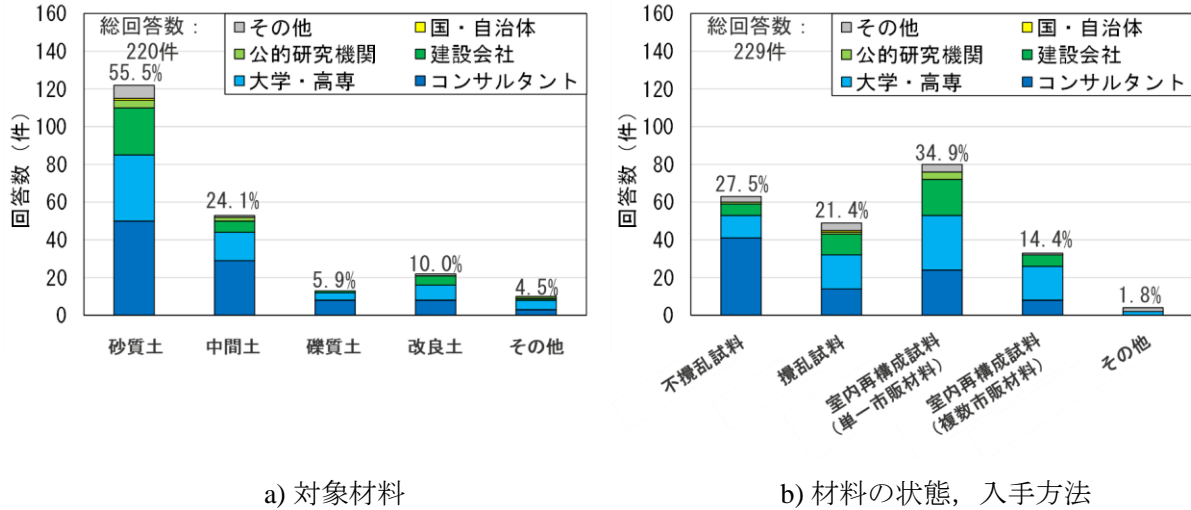


図2.3.4 試験対象材料と材料の状態，入手方法（複数回答可）

表2.3.2 その他の試験対象材料

1	粘性土
2	シラス，砂混り粘土
3	火山灰質土
4	硬質地盤

表2.3.3 その他の材料入手方法

1	現地より採取した試料の改良体
2	客先より受領
3	室内再構成試料の冷凍供試体

### 2.3.4 試験条件の設定方法と基準化への要望

図 2.3.5 に試験条件の決定方法を示す。本設問は複数回答可とし、総回答数は 190 件であった。試験条件の決定方法では、文献や既往の試験方法を参考にして決定しているという回答が 63.7% を占めている。一方で、独自に決定したという回答が 22.1% であり、試験基準がないことにより試験条件が実施機関ごとに異なっていると考えられる。図 2.3.6 に試験方法の基準化に対する要望を示す。回答者のうち 95.6% が試験の基準化が必要であると回答しており、基準化に向けた強い要望があることがわかる。表 2.3.4 に基準化が不要、またはその他と回答した理由を示す。回答理由は、アンケート回答のまま記載している。

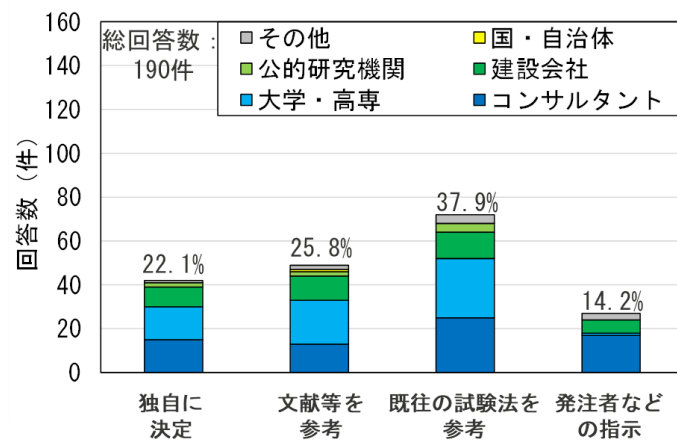


図2.3.5 試験条件の決定方法 (複数回答可)

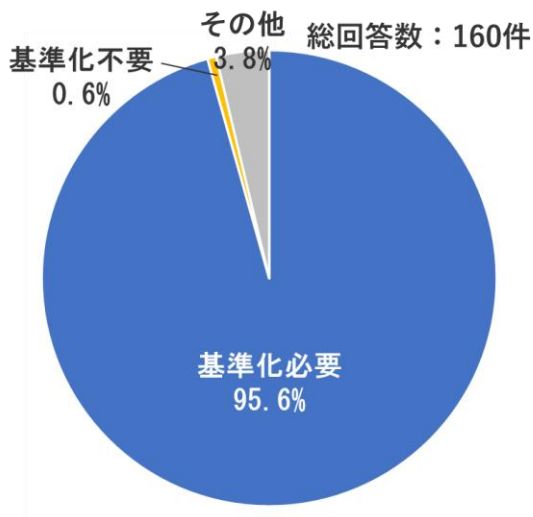


図2.3.6 試験方法の基準化の要望



表2.3.4 基準化が不要またはその他与回答した理由

1	基準化の範囲が不明のため判断できない。
2	試験経験がなくわからない。
3	試験数が増えれば基準化は必要だが、現状では実験事例が少なく判断が難しい。
4	単純に基準化するだけでなく、現状の液状化判定の補完的な位置づけとする。
5	基準化しても比較的難しい試験なので広く普及するか疑問である。
6	基準化で得られる試験値と実際の地盤の強度・変形特性が一致している必要がある。

### 2.3.5 利用拡大に向けた要望

図2.3.7に中空ねじりによる液状化試験の利用拡大に向けた要望について示す。本設問は自由記述とし、総回答数74件の回答を図中の11項目に分類した。試験の普及に向けた要望として、最も多かったのは、三軸試験に対する優位性や使い分けを明確にすることであった。その他、試料採取や供試体作製方法の整理やデータの蓄積、試験結果の解釈などの要望があり、試験の基準化が中空ねじりによる液状化試験の普及にもつながると考えられる。

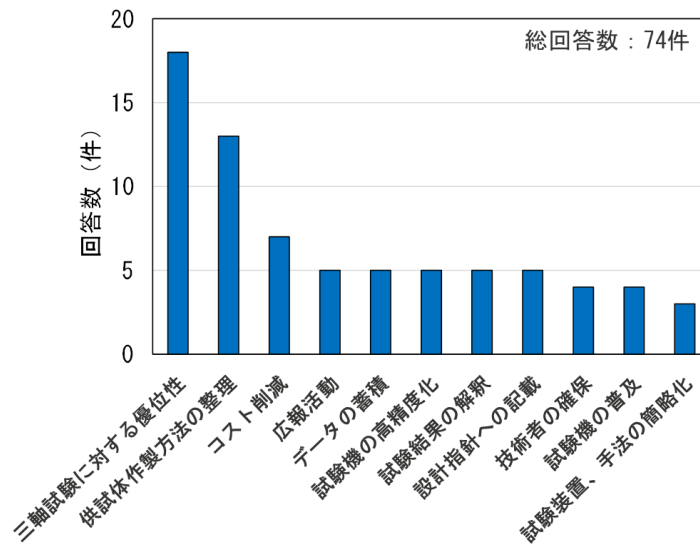


図2.3.7 利用拡大に向けた要望 (複数回答可)

## 2.4 まとめ

本報告は、中空ねじりによる液状化強度試験の高精度化に関する研究委員会の活動の一環として実施した利用状況アンケートの結果を取りまとめたものである。アンケートにより、中空ねじりによる液状化試験の各機関での実施状況や実務での利用状況などを確認することができた。また、アンケートの結果、試験の基準化に向けた強い要望があることが確認できた。

### 3 一斉試験の試験概要, 試験仕様

#### 3.1 概要

本委員会では中空ねじり試験装置を用いた飽和砂の繰返し非排水せん断試験による液状化試験の基準化を目指している。そこで、その問題点や工学上の意義を種々の観点から検討することを目的として、所定の要領に基づいて一斉試験を計画し、国内機関に広く参加を呼びかけた。

このとき、計測される液状化抵抗に対する以下の影響要因を明らかにすることを主な目的とした。

- ・軸制御方法（荷重一定、変位固定）の影響
- ・供試体寸法や使用器具（リブ、メンブレンなど）等の影響
- ・その他、試験機関による試験結果のばらつき

また、繰返し非排水せん断後に排水させ再圧密試験を行い、その結果に及ぼす影響要因も確認した。実施した中空ねじり試験による液状化試験に関する一斉試験の要領は下記のとおり。

- 1) 試料（瑞浪珪砂7号）は委員会から提供する（運搬費等は各自実費負担）。
- 2) 供試体の相対密度は50%ならびに80%とする。
- 3) 試験本数は、1相対密度につき4本以上とする。
- 4) 募集期間は、2022年3月11日から2022年4月20日とする。
- 5) 試験期間は、2022年5月11日から2022年9月30日とする。

#### 3.2 一斉試験のケース構成と実施状況

一斉試験のケース構成と各参加機関の実施状況を表3.2.1, 表3.2.2に示す。一斉試験に参加した機関は、宇都宮大学, 応用地質株式会社, 川崎地質株式会社, 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 A, 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 B, 京都大学大学院, 京都大学防災研究所, 関東学院大学, 株式会社セントラル技研, 株式会社東京ソイルリサーチ, 中部土質試験共同組合, 東京大学生産技術研究所, 日本大学工学部, 日本大学理工学部, 山口大学, ライト工業株式会社（五十音順）の18機関である。これらのうち、試験結果の報告がなされたのは A~R のうち G を除く17機関である。機関 J と P では一斉試験との比較のために三軸試験も実施された。また関連する地盤工学会基準とそれらの一斉試験マニュアルにおける略称を表3.2.3に示す。

中空ねじりによる液状化試験では、緩い供試体において軸変位固定条件の場合にひずみが局所化する懸念があることや、密な供試体においても正負対称に変形が進展する利点などが考えられることから、これらを確認できるように、各機関が2パターンの相対密度  $D_r$  について試験を実施した。

軸制御としては、軸力を一定とする方法が一般的であるが、軸変位を固定したケースとの差異を比較できるように、一部の機関が軸変位固定のケースを実施するように全体ケース構成を調整した。なお一斉試験の結果と比較するための繰返し非排水三軸試験 ( $D_r=50\%$ ,  $80\%$ ) を代表機関が実施した。このとき、供試体の作製, 圧密, 繰返し载荷の方法や報告事項については、中空ねじり一斉試験の標準仕様に準拠することとする。

一斉試験に用いた試料は瑞浪珪砂7号である。委員会内の3機関で物理試験を実施し、試験結果の平均値を試料の物理特性として参加機関に提示した。試料の物理試験結果および粒径加積曲線を表3.2.4, 図3.2.1に示す。なお、比較のために図3.2.1には豊浦砂の結果も併せて示している。

表3.2.1 参加機関と試験内容（中空ねじり）

参加機関	供試体サイズ cm				目標相対密度 %		繰返し载荷の制御		軸力一定 軸変位固定 の有無		波形		周波数の 影響確認
	内3 外7 高7	内3 外7 高10	内6 外10 高10	内6 外10 高20	50	80	応力制御	ひずみ速度一定 応力制御	無 軸力 一定	有 変位 一定	正 弦 波	三 角 波	
A			○*		○	○	○		○		○		
B				○	○	○		○	○			○	
C	○				○	○	○		○		○	○	
D	○				○	○	○		○		○		
E		○			○	○	○		○		○		
F			○		○	○	○		○		○		
G													
H				○	○	○	○		○		○		
I	○				○	○	○		○	○	○		
J		○			○	○	○		○		○		○
K			○		○	○	○		○		○		
L		○			○	○	○		○		○		
M	○				○	○	○		○		○		
N		○			○	○	○	○	○		○		
O		○			○	○	○		○		○	○	
P		○			○	○	○		○	○	○		
Q			○		○	○	○		○		○		
R			○		○	○	○		○		○		

※：高さ12cm

表3.2.2 参加機関と試験内容（三軸）

参加機関	供試体サイズ cm	目標相対密度 %		繰返し载荷の制御		軸力一定 軸変位固定 の有無		波形		周波数の 影響確認
		径5 高10	50	80	応力制御	ひずみ速度一定 応力制御	無 軸力 一定	有 変位 一定	正 弦 波	
A										
B										
C										
D										
E										
F										
G										
H										
I										
J	○	○	○	○		○		○		
K										
L										
M										
N										
O										
P	○	○	○	○		○		○		
Q										
R										

表3.2.3 参照する地盤工学会基準と略称

基準番号※	規格・基準名	略称
JGS 0542	土の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法	[三軸変形基準]
JGS 0541	土の繰返し非排水三軸試験方法	[三軸液状化基準]
JGS 0550	土のねじりせん断試験用中空円筒供試体の作製・設置方法	[ねじり供試体基準]
JGS 0551	土の中空円筒供試体によるねじりせん断試験方法	[ねじり CUB/CD 基準]
JGS 0543	土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法	[ねじり変形基準]

※ 地盤工学会基準は2020年版を参照

表3.2.4 試料（瑞浪珪砂7号）の物理試験結果

瑞浪珪砂7号の物理試験							
試料番号			機関1	機関2	機関3		
土粒子の密度	$\rho_s$	$g/cm^3$	2.656	2.650	2.644		
			2.655	2.638	2.639		
			2.651	2.639	2.642		
			2.646				
最小密度	$\rho_{dmin}$	$g/cm^3$	1.205	1.175	1.188		
			1.204	1.173	1.187		
			1.206	1.173	1.187		
			1.204	1.174	1.188		
			1.205	1.173	1.187		
1.189							
最大密度	$\rho_{dmax}$	$g/cm^3$	1.541	1.508	1.553		
			1.542	1.507	1.553		
			1.547	1.506	1.553		
			1.508				
1.532							
$D_r=50\%$ のときの乾燥密度		$g/cm^3$	1.339				
$D_r=80\%$ のときの乾燥密度		$g/cm^3$	1.448				
粒度	礫分 ( 2 ~ 75mm ) %		0.0	0.0	0.0		
	砂分 ( 0.075 ~ 2mm ) %		99.1	98.0	98.6		
	シルト分 (0.005~0.075mm) %		0.9	2.0	1.4		
	粘土分 (0.005mm未満) %						
	細粒分含有率 $F_c$		%		1.4		
	最大粒径		mm		0.425	0.850	0.425
				0.850			
	均等係数 $U_c$				1.9	1.81	1.9
			1.9				
50% 粒径 $D_{50}$		mm		0.3075	0.3024	0.2511	
			0.2870				

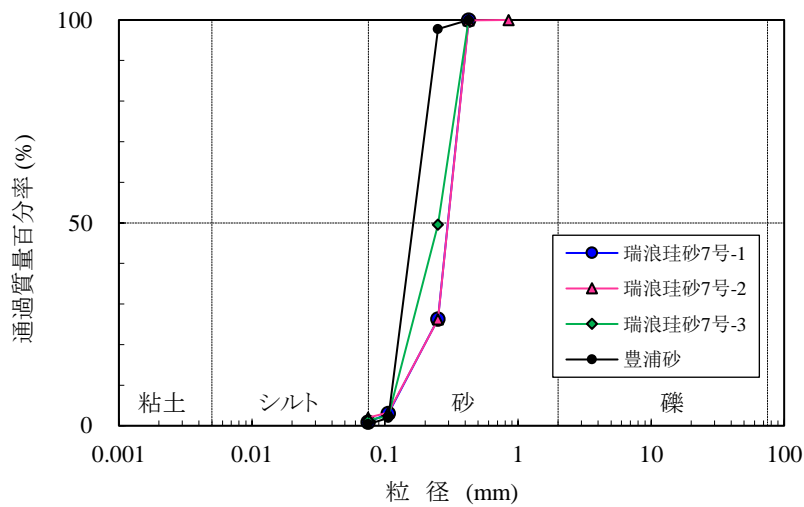


図3.2.1 試料（瑞浪珪砂7号）の粒径加積曲線

### 3.2.1.1 中空ねじり試験結果

軸力一定の場合の相対密度  $Dr=50\%$ 、80%の液状化強度曲線を図3.2.2、図3.2.3に、軸変位固定の場合の相対密度  $Dr=50\%$ 、80%の液状化強度曲線を図3.2.4、図3.2.5にそれぞれ示す。軸力一定の場合の相対密度  $Dr=50\%$ 、80%の試験結果一覧を表3.2.5、表3.2.6に、軸変位固定の場合の相対

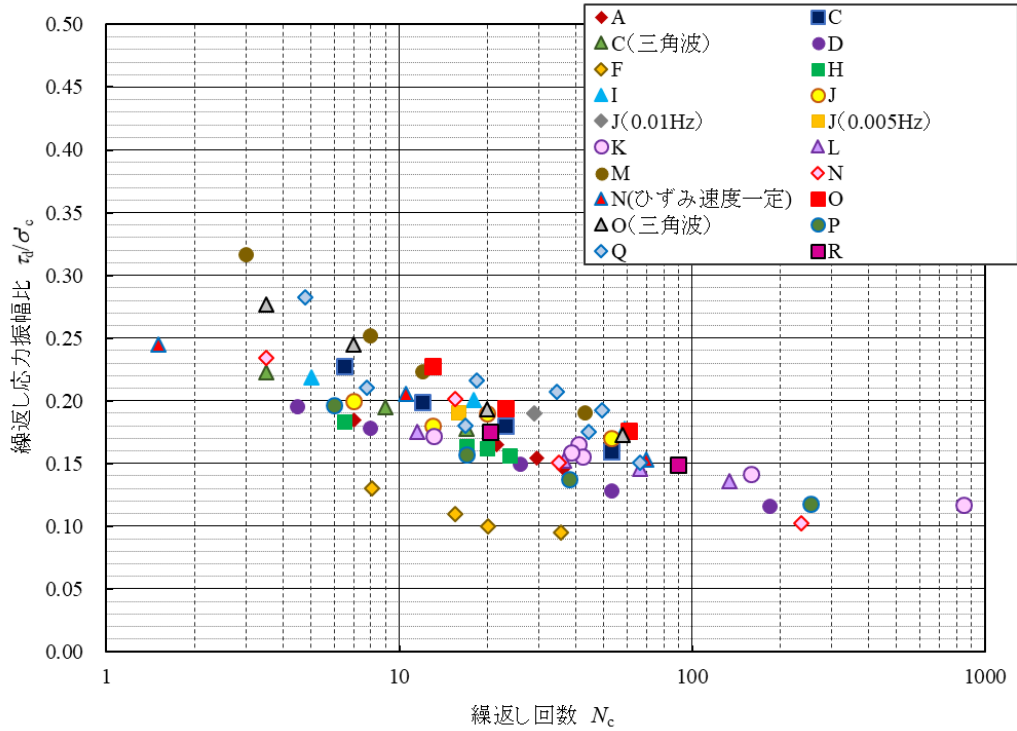


図3.2.2 液状化強度曲線（相対密度  $Dr=50\%$ 、両振幅せん断ひずみ  $\gamma_{DA}=7.5\%$ 、軸力一定）

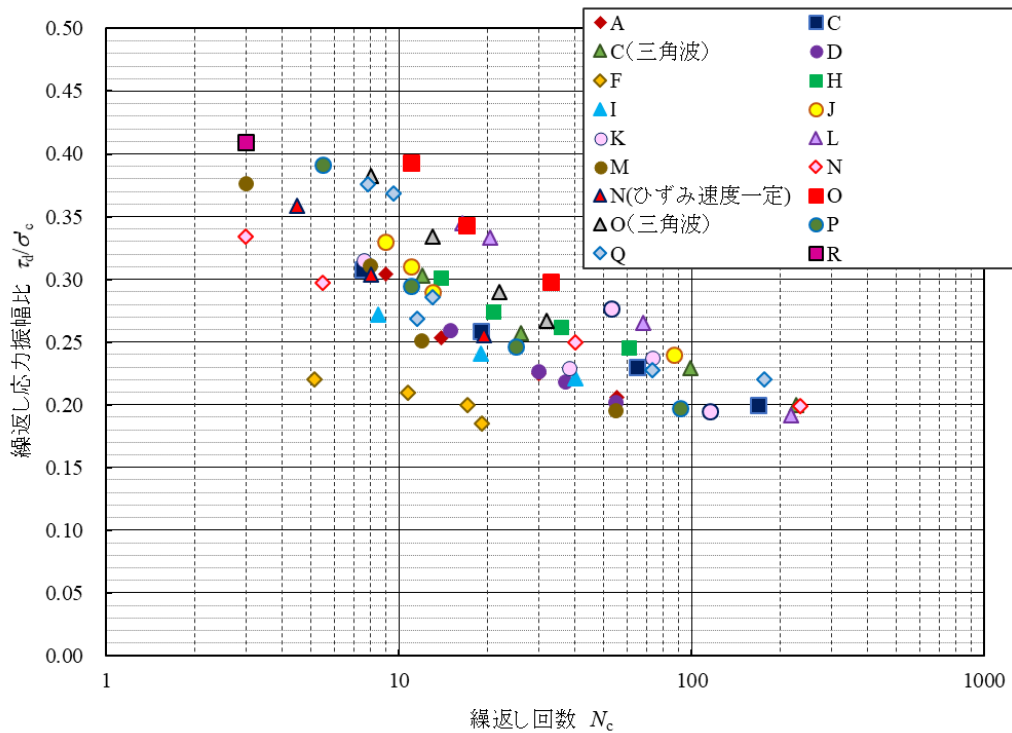


図3.2.3 液状化強度曲線（相対密度  $Dr=80\%$ 、両振幅せん断ひずみ  $\gamma_{DA}=7.5\%$ 、軸力一定）

密度  $Dr=50\%$ ，80%の試験結果一覧を表3.2.7，表3.2.7にそれぞれ示す。

機関I，M，Rは，供試体外径，内径を実測せず，所定の値をそのまま利用しており，他機関のばらつき具合を踏まえると， $Dr$ が5~10%程度変わる可能性がある。

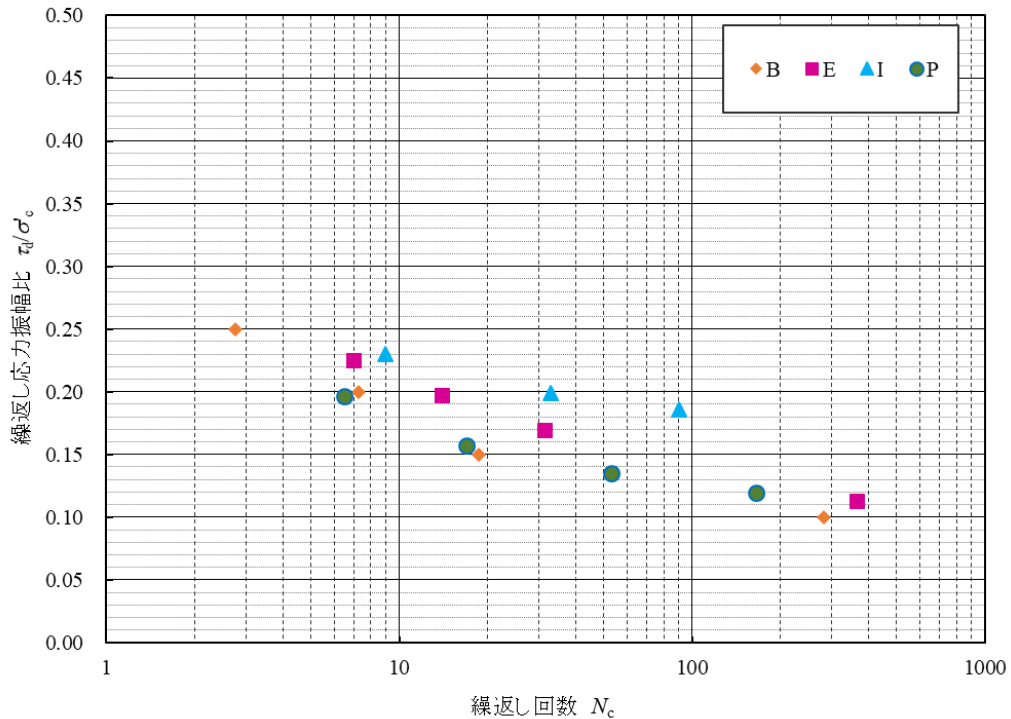


図3.2.4 液状化強度曲線（相対密度  $Dr=50\%$ ，両振幅せん断ひずみ  $\gamma_{DA}=7.5\%$ ，軸変位固定）

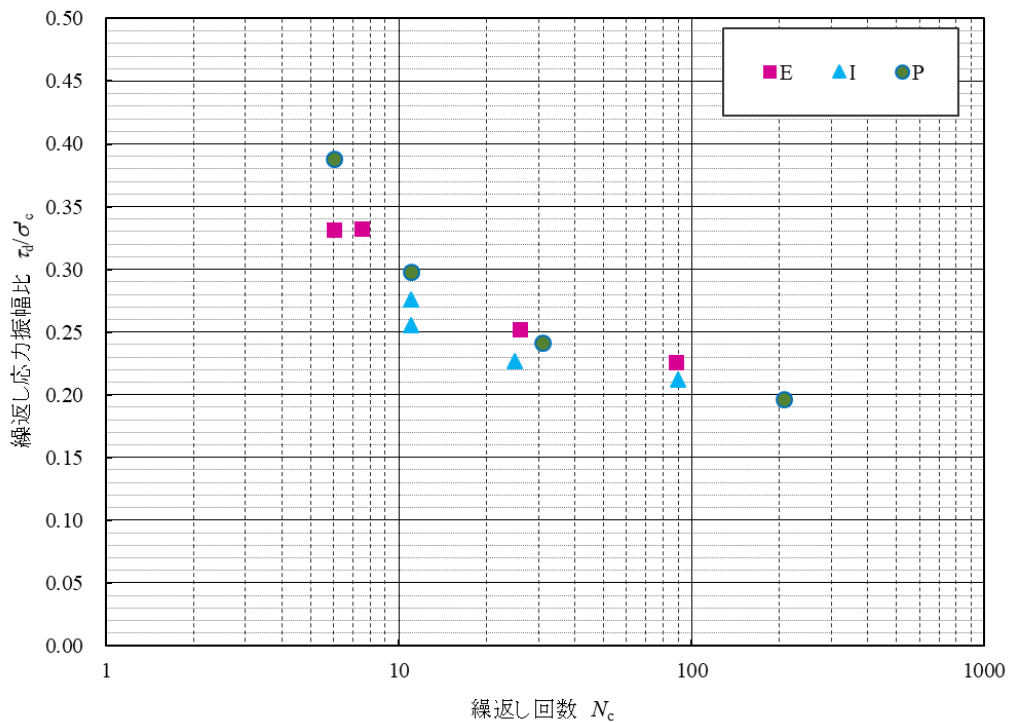


図3.2.5 液状化強度曲線（相対密度  $Dr=80\%$ ，両振幅せん断ひずみ  $\gamma_{DA}=7.5\%$ ，軸変位固定）

表3.2.5 中空ねじりによる一斉液状化試験結果一覧 (相対密度  $D_r=50\%$ , 軸力一定)

機関 No.	試料 No.	供試体 No.	初期状態										圧密前		圧密後					繰返し非排水せん断過程										再圧密過程		備考			
			外径 $D_{i1}$ (mm)	内径 $D_{i2}$ (mm)	高さ $H_i$ (mm)	供試体体積 $V_j$ (mm <sup>3</sup> )	乾燥質量 $m_s$ (g)	相対密度 $D_{r0}$ (%)	B値 -	相対密度 $D_{r1}$ (%)	B値 -	軸変位量 $DH_c$ (mm)	排水量 $DV_c$ (mm <sup>3</sup> )	せん断応力振幅					繰返し応力振幅比 $\tau_d/\sigma'_c$ -	繰返し回数					正負せん断応力振幅の比					液状化強度比 $R_{L20} (\gamma_{DA}=7.5\%)$ -	片振幅最大せん断ひずみ $\gamma_{SA,max}$ (%)		両振幅最大せん断ひずみ $\gamma_{DA,max}$ (%)	供試体体積 $V_{rc}$ (mm <sup>3</sup> )	体積ひずみ $\epsilon_{v,rc}$ (%)
														$\gamma_{DA}<1.5\%$	$\gamma_{DA}=1.5\%$	$\gamma_{DA}=3\%$	$\gamma_{DA}=7.5\%$	$\gamma_{DA}=15\%$		$N_c$	$\gamma_{DA}=1.5\%$	$\gamma_{DA}=3\%$	$\gamma_{DA}=7.5\%$	$\gamma_{DA}=15\%$	$r_u=95\%$	$\gamma_{DA}<1.5\%$	$\gamma_{DA}=1.5\%$	$\gamma_{DA}=3\%$	$\gamma_{DA}=7.5\%$						
A	50P-A	2	100.00	59.46	119.45	606473	804.10	46.1	0.98	48.1	0.98	0.094	3020	15.495	13.961	13.961	12.983	12.983	0.154	28.50	29.00	29.50	30.00	29.00	1.0028	0.9904	0.9904	0.9085	0.9085	0.162	9.103	17.242	583483	3.309	
		3	100.03	60.03	119.40	600395	804.50	50.3	0.98	52.4	0.98	0.114	3200	18.540	16.437	16.437	16.437	11.101	0.185	6.50	6.50	7.00	7.50	7.00	1.0027	0.9210	0.9210	0.9210	2.0810	11.286	9.031	575995	3.550		
		4	99.93	59.63	119.70	604523	807.00	48.8	0.99	50.7	0.99	0.113	2850	16.629	15.080	15.080	14.248	14.248	0.165	20.50	21.00	21.50	22.00	21.00	1.0039	0.9618	0.9618	0.9114	0.9114	12.578	17.788	579213	3.733		
		5	100.00	60.15	119.43	598630	804.20	51.3	0.98	53.4	0.98	0.110	3070	14.570	12.365	12.365	9.370	9.370	0.146	35.50	36.00	36.50	37.00	36.00	1.0043	0.9549	0.9549	0.6086	0.6086	8.718	15.920	576200	3.200		
C	50P-C	1	70.19	29.80	70.00	222033	298.20	51.4	0.96	53.3	0.96	0.053	1100	15.963	15.357	15.357	14.391	13.293	0.160	52.00	53.00	53.00	54.00	54.00	1.0169	1.0469	1.0469	1.1078	1.1845	0.186	-13.436	23.605	213107	3.509	
		2	70.24	29.80	70.00	222419	298.40	50.9	0.96	52.9	0.96	0.064	1100	17.954	17.500	16.590	16.590	15.561	0.180	22.00	22.00	23.00	23.00	23.00	1.0059	1.0244	1.0244	1.0701	1.1365	-12.411	21.610	213543	3.480		
		3	70.16	29.80	70.00	221802	298.30	51.8	0.96	53.4	0.96	0.052	900	19.884	19.147	19.147	18.103	18.103	0.199	11.00	12.00	12.00	12.00	12.00	1.0133	1.0438	1.0438	1.1087	1.1087	-10.630	16.748	215173	2.581		
		4	70.14	29.80	70.00	221648	298.20	51.9	0.96	53.7	0.96	0.052	1000	22.841	22.285	22.285	21.348	20.478	0.228	5.50	6.00	6.50	7.00	6.50	0.9982	1.0103	1.0103	1.0583	1.0871	-12.478	22.432	213348	3.308		
C	50P-TW-C	1	70.30	29.80	70.00	222883	298.20	49.8	0.98	51.8	0.98	0.062	1100	15.925	13.963	13.963	11.988	11.988	0.159	38.00	38.00	39.00	40.00	39.00	1.0182	1.0687	1.0687	1.0687	1.3701	-11.469	21.299	213116	3.879		
		2	70.35	29.80	70.00	223270	298.70	49.8	0.98	52.0	0.98	0.066	1250	17.799	15.951	15.951	14.659	14.659	0.178	16.00	17.00	17.00	18.00	17.00	1.0076	1.0509	1.0509	1.1445	1.1445	-11.945	19.500	215003	3.131		
		3	70.38	29.80	70.00	223502	298.70	49.3	0.98	51.1	0.98	0.062	1050	19.511	17.618	17.618	16.238	16.238	0.195	8.00	8.50	9.00	9.50	9.00	1.0126	1.0380	1.0380	1.0380	1.1766	-12.301	21.963	214202	3.709		
		4	70.29	29.80	70.00	222806	298.30	50.1	0.98	52.1	0.98	0.077	1150	22.333	21.240	19.832	19.832	19.832	0.223	2.50	3.00	3.50	4.00	3.50	1.0267	1.0724	1.0724	1.0570	1.0570	-10.551	16.776	215418	2.798		
D	50P-D	1	69.77	29.70	70.20	219755	294.80	51.4	0.99	53.7	0.99	0.080	1260	11.622	11.013	11.013	10.415	9.144	0.116	182.00	183.00	184.00	185.00	183.00	0.9946	1.0185	1.0185	1.0279	1.0278	-9.565	18.278	210919	3.301		
		2	70.00	29.70	70.20	221527	296.70	50.8	0.98	53.1	0.98	0.140	1300	12.820	12.315	11.907	11.332	10.733	0.128	51.00	51.00	53.00	54.00	52.00	1.0167	1.0357	1.0357	1.0566	1.0571	-9.714	18.522	212849	3.184		
		3	69.93	29.70	70.20	220987	296.90	52.2	0.97	54.4	0.97	0.160	1200	14.894	14.552	14.260	13.675	12.977	0.149	24.00	25.00	26.00	27.00	26.00	0.9911	1.0117	1.0117	1.0285	1.0311	-10.833	20.390	212715	3.009		
		4	69.90	29.70	70.20	220756	296.60	52.6	0.99	54.9	0.99	0.160	1300	17.771	17.419	16.993	16.504	15.851	0.178	6.50	7.00	8.00	9.50	8.50	0.9884	1.0010	1.0089	1.0025	1.0065	-8.927	16.290	213296	2.468		
		5	69.90	29.70	70.20	220756	296.60	52.2	0.99	54.2	0.99	0.130	1100	19.534	19.100	19.100	18.528	17.885	0.195	3.50	3.50	4.50	6.00	5.00	1.0162	1.0256	1.0256	1.0351	1.0409	-11.371	21.371	215884	1.506		
F	50P-F	1	99.90	59.40	99.60	504685	672.60	48.2	0.99	49.4	0.99	0.256	1527	12.731	12.439	12.439	11.845	10.909	0.130	7.71	7.71	8.07	8.52	8.00	1.0001	1.0000	1.0000	1.0000	1.0002	-14.214	20.732	490221	2.571		
		2	99.90	59.65	99.40	501348	670.10	49.3	0.97	51.5	0.97	-0.562	2803	11.053	10.464	10.464	10.464	9.173	0.110	15.24	15.24	15.57	16.02	15.52	1.0001	1.0009	1.0009	1.0009	1.0000	15.382	24.396	498372	0.035		
		3	99.90	59.65	99.40	501348	670.10	49.3	0.99	51.5	0.99	-0.124	2717	9.986	9.412	9.412	8.882	8.284	0.100	19.70	19.71	20.06	20.52	20.00	0.9991	1.0001	1.0001	1.0000	1.0000	-13.058	21.578	485689	2.596		
		4	99.80	59.80	100.00	501398	669.50	48.9	0.97	51.1	0.97	0.441	2682	9.272	8.923	8.923	8.271	6.386	0.095	35.20	35.24	35.58	36.02	35.52	1.0004	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	15.489	24.145	483567	3.038		
H	50P-H	1	100.13	60.28	195.23	980261	1312.55	49.4	0.98	51.5	0.98	0.155	5200	18.324	16.648	16.648	15.648	14.849	0.183	5.50	6.00	6.50	7.00	7.00	0.9803	0.9351	0.9351	3.4634	3.4634	9.260	15.279	955161	2.191		
		2	100.30	60.33	194.05	978430	1312.93	50.4	0.99	52.5	0.99	0.159	5200	16.326	15.391	15.391	13.730	6.855	0.163	16.00	16.00	17.00	18.00	17.00	0.9000	0.9383	0.9383	0.0000	0.0000	10.475	18.591	954730	2.032		
		3	100.23	60.24	194.90	982187	1315.34	49.4	0.98	51.6	0.98	0.163	5400	16.138	15.396	15.396	13.986	13.986	0.161	19.00	20.00	20.00	20.00	20.00	0.9702	1.0005	0.9702	0.8519	0.8519	7.152	14.132	956987	2.197		
		4	100.29	60.41	194.80	980567	1316.59	50.7	0.99	52.7	0.99	0.163	4900	15.619	14.638	14.638	13.272	6.010	0.156	23.00	23.00	24.00	25.00	24.00	0.9289	0.9758	0.9758	0.8090	2.2546	9.884	16.548	956467	2.078		
I	50P-I	1	70.00	30.00	70.00	219911	293.90	53.9	0.95	62.0	0.95	0.426	4510	20.060	19.550	18.980	18.980		0.201	17.00	18.00	18.00	18.00	18.00	1.0100	1.0300	1.0300	1.0300		7.234	12.440	207437	2.546		
		2	70.00	30.00	70.00	219911	295.25	54.8	0.97	62.8	0.95	0.599	4420	21.830	21.180	21.180	20.420		0.218	3.50	4.00	5.00	5.00	5.00	1.0100	1.0300	1.0300	1.0500		5.407	9.377	208988	2.076		
		3	70.00	30.00	70.00	219911	293.74	53.0	0.97	59.7	0.95	0.406	3710	17.790	17.030	17.030	16.440		0.178	58.00	58.00	59.00	59.00	59.00	0.9900	1.0100	1.0100	1.0200		6.346	10.400	210364	1.715		
J	50P-J	1	69.93	29.85	100.00	314095	421.10	50.5	1.00	53.2	1.00	0.147	2127	18.325	17.814	17.814	17.097	15.723	0.180	12.00	12.00	13.00	14.00	13.00	1.0103	1.0162	1.0162	1.0014	1.0249	-13.684	25.279	311968	3.046		
		2	69.90	30.03	100.00	312907	420.50	51.5	0.99	53.7	0.99	0.157	1738	18.225	17.883	17.883	17.269	16.284	0.190	19.00	20.00	20.00	21.00	20.48	1.0121	1.0039	1.0039	1.0111	1.0146	-12.534	22.778	311169	3.634		
		3	69.93	29.85	100.00	314095	423.10	52.4	0.97	54.8	0.97	0.138	1897	16.939	16.718	16.442	16.216	14.671	0.170	51.00	52.00	53.00	55.00	52.00	1.0121	1.0132	1.0091								



表3.2.6 中空ねじりによる一斉液状化試験結果一覧（相対密度  $D_r=80\%$ ，軸力一定）

機関 No.	試料 No.	供試体 No.	初期状態					圧密前		圧密後			繰返し非排水せん断過程										液状化強度比 $R_{L20}(\gamma_{DA}=7.5\%)$	再圧密過程				備考							
			外径 $D_a$ (mm)	内径 $D_i$ (mm)	高さ $H_0$ (mm)	供試体体積 $V_j$ (mm <sup>3</sup> )	乾燥質量 $m_s$ (g)	相対密度 $D_{r0}$ (%)	B値	相対密度 $D_{rc}$ (%)	B値	軸変位量 $DH_c$ (mm)	排水量 $DV_c$ (mm <sup>3</sup> )	せん断応力振幅 $\tau_d$ (kN)					繰返し応力振幅比 $\tau_{d1}/\sigma'_c$	繰返し回数 $N_c$					正負せん断応力振幅の比 $\tau_{d1}/\tau_{d2}$					片振幅最大せん断ひずみ $\gamma_{SA,max}$ (%)	両振幅最大せん断ひずみ $\gamma_{DA,max}$ (%)	供試体体積 $V_{rc}$ (mm <sup>3</sup> )	体積ひずみ $\epsilon_{v,rc}$ (%)		
														$\gamma_{DA}<1.5\%$	$\gamma_{DA}=1.5\%$	$\gamma_{DA}=3\%$	$\gamma_{DA}=7.5\%$	$\gamma_{DA}=15\%$		$\gamma_{DA}=1.5\%$	$\gamma_{DA}=3\%$	$\gamma_{DA}=7.5\%$		$\gamma_{DA}=15\%$	$r_d=95\%$	$\gamma_{DA}<1.5\%$	$\gamma_{DA}=1.5\%$		$\gamma_{DA}=3\%$					$\gamma_{DA}=7.5\%$	$\gamma_{DA}=15\%$
A	80P-A	1	100.07	59.51	119.80	609008	876.96	77.8	0.99	79.1	0.99	0.087	2140	20.603	20.252	20.116	19.741		0.206	2140	51.00	52.50	55.50	52.50	0.9980	0.9934	0.9866	0.9770		0.247	10.188	9.916	596648	1.684	
		2	100.10	59.34	120.00	612495	876.25	75.4	0.99	76.8	0.99	0.076	2230	25.439	24.823	24.693	24.318		0.253	9.50	10.50	14.00	10.00	0.9948	0.9762	0.9715	0.9661			8.297	14.951	599515	1.762		
		3	100.10	59.77	120.00	607668	880.00	79.9	0.98	81.3	0.98	0.078	2250	30.530	30.094	29.912	29.688		0.304	5.00	6.50	9.00	7.00	0.9980	0.9883	0.9814	0.9754			9.257	13.870	591938	2.227		
		4	100.10	59.43	120.00	611488	874.60	75.3	0.98	76.7	0.98	0.082	2210	22.564	21.948	21.818	21.242		0.225	26.00	27.00	30.00	27.50	0.9967	0.9826	0.9762	0.9480			8.674	14.765	594178	2.478		
C	80P-C	1	70.30	29.80	70.00	222883	323.40	80.6	0.98	82.1	0.98	0.063	900	22.950	22.658	22.575	22.141	21.345		0.230	60.00	62.00	65.00	70.00	63.00	1.0063	1.0131	1.0236	1.0662		0.265	-9.030	16.095	216083	2.658
		2	70.40	29.80	70.00	223657	323.40	79.4	0.96	80.9	0.96	0.038	900	25.886	25.608	25.507	24.981	24.225		0.259	15.00	17.00	19.00	25.00	18.00	1.0014	1.0109	1.0175	1.0548			-8.903	16.578	216707	2.716
		3	70.38	29.80	70.00	223502	323.30	79.5	0.98	80.7	0.98	0.048	750	19.955	19.743	19.565	19.072	18.388		0.200	163.00	165.00	168.00	174.00	166.00	1.0194	1.0516	1.0628	1.1054			8.253	16.442	217802	2.222
		4	70.30	29.80	70.00	222883	323.40	80.6	0.96	82.0	0.96	0.054	800	30.817	30.655	30.532	30.022	29.217		0.308	4.00	5.00	7.50	13.00	6.50	1.0128	1.0136	1.0159	1.0499			-9.783	16.117	216733	2.409
C	80P-TW-C	1	70.31	29.80	70.00	222960	323.20	80.3	0.98	81.8	0.98	0.063	900	22.895	22.238	22.022	21.190	18.494		0.229	94.00	96.00	99.00	106.00	98.00	1.0203	1.0310	1.0579	1.1165		0.277	8.114	16.110	215460	2.972
		2	70.45	29.80	70.00	224044	323.80	79.2	0.98	80.6	0.98	0.050	850	25.677	24.932	24.880	24.538	22.571		0.257	21.00	23.00	26.00	31.00	24.00	1.0130	1.0215	1.0338	1.0804			-8.915	16.523	217394	2.599
		3	70.31	29.80	70.00	222960	323.20	80.3	0.96	81.8	0.96	0.077	900	20.041	19.373	19.288	18.872	17.205		0.200	222.00	224.00	227.00	234.00	225.00	1.0409	1.0638	1.0746	1.1155			-8.355	16.204	215560	2.927
		4	70.37	29.80	70.00	223424	323.20	79.5	0.96	81.0	0.96	0.058	900	30.320	29.932	29.938	29.486	27.763		0.303	8.00	9.50	12.00	19.00	11.00	1.0068	1.0113	1.0223	1.0669			-8.702	16.415	216524	2.696
D	80P-D	1	69.87	29.70	70.20	220525	319.40	80.3	0.97	82.0	0.97	0.060	1000	20.224	19.999	19.849	19.286	18.372		0.202	49.00	51.00	55.00	63.00	53.00	0.9941	0.9933	1.0082	1.0016		0.245	-8.593	16.584	213536	2.644
		2	69.93	29.70	70.20	220987	320.00	80.2	0.96	82.5	0.96	0.060	1400	21.825	21.614	21.393	20.767	19.967		0.218	31.00	33.00	37.00	44.00	36.00	0.9983	1.0063	1.0040	1.0132			-8.754	16.176	214298	2.325
		3	69.87	29.70	70.20	220525	319.80	80.9	0.96	82.7	0.96	0.060	1100	22.567	22.304	22.186	21.618	20.753		0.226	24.00	26.00	30.00	36.00	28.00	0.9934	0.9998	1.0070	1.0044			-8.863	16.665	213742	2.464
		4	69.90	29.70	70.20	220756	320.00	80.6	0.99	82.3	0.99	0.060	1000	25.878	25.665	25.529	24.928	24.042		0.259	9.00	11.00	15.00	21.00	13.00	0.9944	1.0005	0.9944	1.0028			-8.519	16.363	214167	2.459
F	80P-F	1	99.90	59.80	100.25	504224	728.30	79.0	0.98	80.3	0.98	-0.003	1874	21.480	21.417	21.242	21.032	20.126		0.220	2.22	3.15	5.14	8.63	4.01	1.0003	1.0001	1.0004	0.9997		0.190	-8.012	15.694	492865	1.888
		2	99.90	59.65	100.80	508409	733.40	74.5	0.94	75.9	0.94	-0.112	1852	20.495	20.391	20.227	19.846	19.243		0.210	6.21	7.65	10.70	17.66	9.01	1.0000	0.9993	0.9999	0.9997			8.078	16.015	502137	1.933
		3	99.85	59.80	99.97	502015	727.80	80.3	0.99	81.6	0.99	0.941	1688	19.552	19.429	19.277	18.899	18.309		0.200	12.67	14.16	17.21	22.66	15.51	1.0000	1.0001	0.9997	0.9999			8.819	16.293	490542	1.956
		4	99.75	59.80	100.63	503785	724.40	76.1	0.96	77.4	0.96	-0.080	1859	18.373	18.243	18.114	17.605	16.981		0.185	15.71	16.72	19.18	23.65	17.52	1.0000	1.0000	1.0004	0.9999			8.329	15.475	501748	0.369
H	80P-H	1	100.37	60.02	195.07	991502	1444.26	81.7	0.98	82.8	0.98	0.083	3200	24.530	24.351	24.310	23.905		0.245	47.00	51.00	61.00	62.00	52.00	1.0170	1.0104	1.0127	0.9910		0.280	6.495	11.384	977002	1.253	
		2	100.35	60.14	195.80	992378	1438.89	79.9	0.98	81.2	0.98	0.139	3600	30.083	29.956	29.827	29.368		0.301	5.00	7.50	14.00	9.00	0.9869	0.9855	0.9867	0.9866			9.239	14.624	977378	1.283		
		3	100.34	60.11	195.52	991057	1440.88	80.9	0.98	82.2	0.98	0.107	3500	27.407	27.254	27.077	26.744	20.128		0.274	12.00	14.00	21.00	28.00	16.00	0.9755	0.9931	0.9833	0.9854			9.351	15.461	976857	1.204
		4	100.40	60.17	195.54	991883	1445.31	81.7	0.98	83.0	0.98	0.103	3500	26.200	26.053	25.904	25.130		0.262	22.00	25.00	36.00	27.00	1.0268	1.0210	1.0212	1.0076			5.057	19.615	977283	1.243		
I	80P-I	1	70.00	30.00	70.00	219911	318.36	83.3	0.97	88.8	0.95	0.234	3340	24.060	23.780	23.530	22.730		0.241	9.00	11.00	19.00		13.00	1.0100	1.0200	1.0100	1.0200		0.239	5.355	10.683	210398	1.911	
		2	70.00	30.00	70.00	219911	318.73	83.5	0.95	88.5	0.95	0.207	2990	22.130	21.770	21.580	21.080		0.221	32.00	34.00	40.00		33.00	0.9900	1.0000	1.0000	0.9900			5.715	11.288	209242	2.652	
		3	70.00	30.00	70.00	219911	317.62	81.8	0.95	92.9	0.95	0.400	6650	21.360	20.960	20.690			0.214	188.00	200.00			0.9800	0.9800	0.9800			1.579	3.135	207645	1.853			
		4	70.00	30.00	70.00	219911	319.03	83.7	0.97	90.4	0.95	0.328	4010	27.220	26.870	26.670	25.610		0.272	3.00	4.00	8.50		6.00	1.0100	1.0100	1.0100			5.732	10.735	209817	1.962		
J	80P-J	1	70.07	29.85	100.00	315634	459.30	81.7	0.99	83.9	0.99	0.131	1918	33.215	33.193	33.206	33.213	32.832		0.300	3.00	5.00	9.00	26.00	7.24	1.0023	1.0033	1.0043	1.0064		0.287	8.228	15.940	313716	2.211
		2	70.03	29.85	100.00	315194	459.10	82.0	0.98	84.1	0.98	0.124	1738	31.318	31.320	31.302	31.033	30.010		0.310	5.00	6.00	11.00	28.00	8.30	1.0030	1.0024	1.0043	1.0051			8.355	16.026	313456	2.308
		3	70.10	29.85	100.00	315965	460.50	82.3	0.98	84.2	0.98	0.131	1682	29.361	29.315	29.284	29.177	28.680		0.290	7.00	9.00	13.00	30.00	10.95	1.0040	1.0026	1.0029	1.0054			8.281	16.043	314283	2.296
		4	70.00	30.03	100.00																														



表3.2.7 中空ねじり試験結果 (相対密度  $D_r=50\%$ , 軸変位固定)

機関 No.	試料 No.	供試体 No.	初期状態					圧密前		圧密後					繰返し非排水せん断過程										液状化強度比 $R_{L20}(\gamma_{DA}=7.5\%)$	再圧密過程				備考				
			外径 $D_{oi}$ (mm)	内径 $D_{ii}$ (mm)	高さ $H_i$ (mm)	供試体 体積 $V_i$ ( $\text{mm}^3$ )	乾燥質量 $m_s$ (g)	相対 密度 $D_{r0}$ (%)	B値 -	相対 密度 $D_{rc}$ (%)	B値 -	軸変位量 $DH_c$ (mm)	排水量 $DV_c$ ( $\text{mm}^3$ )	せん断応力振幅 $\tau_d$ (kN)					繰返し 振幅比 $\tau_d/\sigma'_c$ -	繰返し回数 $N_c$						正負せん断応力振幅の比 $\tau_d/\tau_d$								
														$\gamma_{DA}<1.5\%$	$\gamma_{DA}=1.5\%$	$\gamma_{DA}=3\%$	$\gamma_{DA}=7.5\%$	$\gamma_{DA}=15\%$		$\gamma_{DA}=1.5\%$	$\gamma_{DA}=3\%$	$\gamma_{DA}=7.5\%$	$\gamma_{DA}=15\%$	$r_u=95\%$		$\gamma_{DA}<1.5\%$	$\gamma_{DA}=1.5\%$	$\gamma_{DA}=3\%$	$\gamma_{DA}=7.5\%$		$\gamma_{DA}=15\%$			
B	S0D <sub>CRS</sub> -B	1	100.00	60.00	200.00	1005310	1364.33	55.3	0.99	56.8	0.98	0.002	3750	25.520	25.580	25.590	25.600	25.730	0.250	1.25	1.75	2.75	3.75	2.00	1.0023	0.9980	1.0011	0.9999	0.9962	0.155				
		2	99.78	59.90	200.00	1000383	1326.27	46.1	0.97	48.6	0.97	0.002	6265	15.990	15.900	15.970	16.150	15.710	0.150	17.75	18.25	18.75	19.25	18.50	1.0055	0.9976	0.9976	0.9983	1.0060					
		3	99.87	60.00	200.00	1001134	1334.08	48.1	0.99	46.1	0.99	-0.008	-4917	10.260	10.260	10.110	10.400	10.020	0.100	280.75	281.25	281.75	282.25	281.00	1.0014	0.9974	0.9979	1.0050	0.9987					
		4	99.73	60.00	200.00	996933	1340.41	51.6	0.99	54.4	0.99	-0.007	6999	20.730	20.280	20.510	20.280	20.730	0.200	6.25	6.75	7.25	7.75	7.00	0.9977	1.0009	1.0009	1.0025	1.0026					
E	S0D-E	1	69.90	29.50	98.20	309720	416.41	52.7	1.00	54.7	1.00	0.135	1524	16.913	15.500	15.500	14.864	13.888	0.169	30.50	31.00	31.50	33.00	31.50	0.9853	1.0300	1.0300	1.0349	1.0632	0.185				
		2	70.00	30.00	98.40	309133	416.31	53.5	0.99	55.6	0.99	0.163	1656	22.510	21.416	21.010	21.010	19.246	0.225	6.00	6.50	7.00	8.50	7.00	0.9820	1.0010	1.0011	1.0011	1.0188					
		3	69.90	29.50	100.30	316343	418.60	45.6	0.98	45.6	0.98	0.075	2	11.294	10.085	9.412	7.981	7.981	0.113	366.00	366.50	367.50	368.00	366.00	0.9771	0.9838	0.9758	0.9087	0.9087					
		4	69.90	29.40	98.80	312069	419.34	51.6	0.98	53.5	0.98	0.090	1555	19.678	18.566	17.901	17.901	16.756	0.197	13.00	13.50	14.00	15.00	13.00	0.9946	1.0336	1.0428	1.0428	1.0556					
I	S0D-I	1	70.00	30.00	70.00	219911	294.82	55.1	0.95	61.1	0.95	0.275	3310	19.930	19.490	19.260	18.990	0.199	31.00	32.00	33.00	33.00	33.00	0.9800	0.9900	0.9900	0.9900	0.9900	0.216					
		2	70.00	30.00	70.00	219911	293.55	52.6	0.97	58.7	0.95	0.207	3400	23.030	22.560	22.560	22.140	0.230	7.50	8.00	9.00	9.00	9.00	0.9900	0.9900	0.9900	0.9900	0.9900						
		3	70.00	30.00	70.00	219911	295.02	54.7	0.97	60.9	0.95	0.239	3460	18.590	18.160	17.960	17.340	0.186	87.00	88.00	90.00	88.00	88.00	1.0100	1.0200	1.0200	1.0300							
P	S0D-P	1	70.43	29.68	100.02	320466	431.18	54.2	0.99	56.4	0.99	0.115	1778	19.629	19.001	19.001	18.128	17.489	0.196	6.00	6.00	6.50	7.50	6.50	0.9996	0.9676	0.9676	0.9232	0.8906	0.154				
		2	70.47	29.66	100.12	321323	429.86	51.9	1.00	54.3	1.00	0.101	1935	15.714	15.223	13.928	13.928	12.713	0.157	16.00	17.00	17.00	18.00	17.00	1.0011	0.9698	0.8873	0.8873	0.8099					
		3	70.50	29.65	100.05	321477	430.57	52.5	1.00	54.9	1.00	0.118	1956	13.522	12.620	12.620	11.644	11.644	0.135	52.00	52.00	53.00	53.00	52.00	0.9988	0.9322	0.9322	0.8601	0.8601					
		4	70.47	29.66	100.12	321323	430.30	52.4	0.99	55.0	0.99	0.099	2071	11.982	11.418	11.418	10.478	9.714	0.120	164.00	164.00	165.00	166.00	165.00	0.9966	0.9497	0.9497	0.8715	0.8079					

表3.2.8 中空ねじり試験結果 (相対密度  $D_r=80\%$ , 軸変位固定)

機関 No.	試料 No.	供試体 No.	初期状態					圧密前		圧密後					繰返し非排水せん断過程										液状化強度比 $R_{L20}(\gamma_{DA}=7.5\%)$	再圧密過程				備考				
			外径 $D_{oi}$ (mm)	内径 $D_{ii}$ (mm)	高さ $H_i$ (mm)	供試体 体積 $V_i$ ( $\text{mm}^3$ )	乾燥質量 $m_s$ (g)	相対 密度 $D_{r0}$ (%)	B値 -	相対 密度 $D_{rc}$ (%)	B値 -	軸変位量 $DH_c$ (mm)	排水量 $DV_c$ ( $\text{mm}^3$ )	せん断応力振幅 $\tau_d$ (kN)					繰返し 振幅比 $\tau_d/\sigma'_c$ -	繰返し回数 $N_c$						正負せん断応力振幅の比 $\tau_d/\tau_d$								
														$\gamma_{DA}<1.5\%$	$\gamma_{DA}=1.5\%$	$\gamma_{DA}=3\%$	$\gamma_{DA}=7.5\%$	$\gamma_{DA}=15\%$		$\gamma_{DA}=1.5\%$	$\gamma_{DA}=3\%$	$\gamma_{DA}=7.5\%$	$\gamma_{DA}=15\%$	$r_u=95\%$		$\gamma_{DA}<1.5\%$	$\gamma_{DA}=1.5\%$	$\gamma_{DA}=3\%$	$\gamma_{DA}=7.5\%$		$\gamma_{DA}=15\%$			
E	S0D-E	1	70.00	29.40	98.80	313155	457.45	83.3	0.99	84.7	0.99	0.050	1227	33.267	32.932	32.819	32.099	31.510	0.333	4.00	5.00	7.50	12.00	6.00	0.9909	0.9969	0.9886	1.0021	1.0026	0.267				
		2	69.90	29.40	98.80	312069	452.42	80.3	0.99	81.8	0.99	0.062	1260	22.599	21.998	21.705	21.170	20.350	0.226	81.50	83.50	88.50	105.50	83.00	0.9879	1.0004	0.9941	0.9986	1.0005					
		3	70.00	29.40	99.10	314106	452.63	78.4	0.98	80.0	0.98	0.084	1303	33.150	32.841	32.651	32.244	31.200	0.331	3.00	4.00	6.00	9.50	5.00	0.9883	0.9875	0.9814	0.9883	1.0012					
		4	70.00	29.50	99.40	314597	456.14	80.7	0.96	82.1	0.96	0.086	1222	25.199	24.539	24.508	23.944	23.020	0.252	21.50	23.00	26.00	33.50	23.00	0.9888	0.9943	0.9983	1.0078	1.0173					
I	S0D-I	1	70.00	30.00	70.00	219911	318.01	82.9	0.95	92.1	0.95	0.354	5530	21.230	21.050	20.830	20.320	0.212	70.00	77.00	90.00	82.00	82.00	0.9900	1.0000	0.9900	1.0000	1.0000	0.238					
		2	70.00	30.00	70.00	219911	319.18	84.0	0.97	95.0	0.95	0.275	6560	22.640	22.400	22.240	21.600	0.226	8.00	12.00	25.00	25.00	25.00	1.0000	1.0000	1.0100	1.0000							
		3	70.00	30.00	70.00	219911	318.22	82.5	0.95	88.2	0.95	0.309	3410	25.560	25.420	25.130	24.740	0.256	3.00	5.00	11.00	6.00	1.0200	1.0200	1.0200	1.0200	1.0200							
		4	70.00	30.00	70.00	219911	318.31	82.9	0.97	88.9	0.95	0.344	3590	27.620	27.420	27.420	26.800	0.276	2.50	4.00	11.00	7.00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000								
P	S0D-P	1	70.47	29.66	100.19	321547	466.32	82.6	0.99	84.2	0.99	0.086	1325	38.970	38.876	38.727	38.326	37.461	0.388	1.50	2.50	6.00	25.00	3.50	1.0000	0.9976	0.9938	0.9835	0.9613	0.257				
		2	70.47	29.66	100.09	321227	464.90	81.8	1.00	83.7	1.00	0.095	1687	30.064	29.917	29.685	29.224	28.256	0.298	5.00	6.50	11.00	32.00	7.00	0.9988	0.9940	0.9863	0.9709	0.9388					
		3	70.47	29.66	100.18	321515	465.72	82.2	0.99	83.7	0.99	0.076	1353	24.296	24.155	23.929	23.398	22.604	0.241	21.00	24.00	31.00	71.00	23.00	0.9984	0.9926	0.9833	0.9615	0.9289					
		4	70.50	29.65	100.13	321734	466.32	82.2	1.00	83.9	1.00	0.072	1457	19.704	19.477	19.295	18.768	17.930	0.196	199.00	201.00	207.00	232.00	201.00	1.0005	0.9890	0.9797	0.9529	0.9104					

※三角波:TW, 0.01Hz:0.01, 0.001Hz:0.001, ひずみ速度一定:CRS, 三軸試験:CTX

### 3.2.1.2 三軸試験結果

相対密度  $Dr=50\%$ ， $80\%$  の液状化強度曲線を図3.2.6，図3.2.7にそれぞれ示す。また相対密度  $Dr=50\%$ ， $80\%$  の試験結果一覧を表3.2.9，表3.2.10にそれぞれ示す。

いずれの相対密度の場合でも，三軸試験の方が，中空ねじり試験よりも液状化強度が小さくなる傾向にあった。

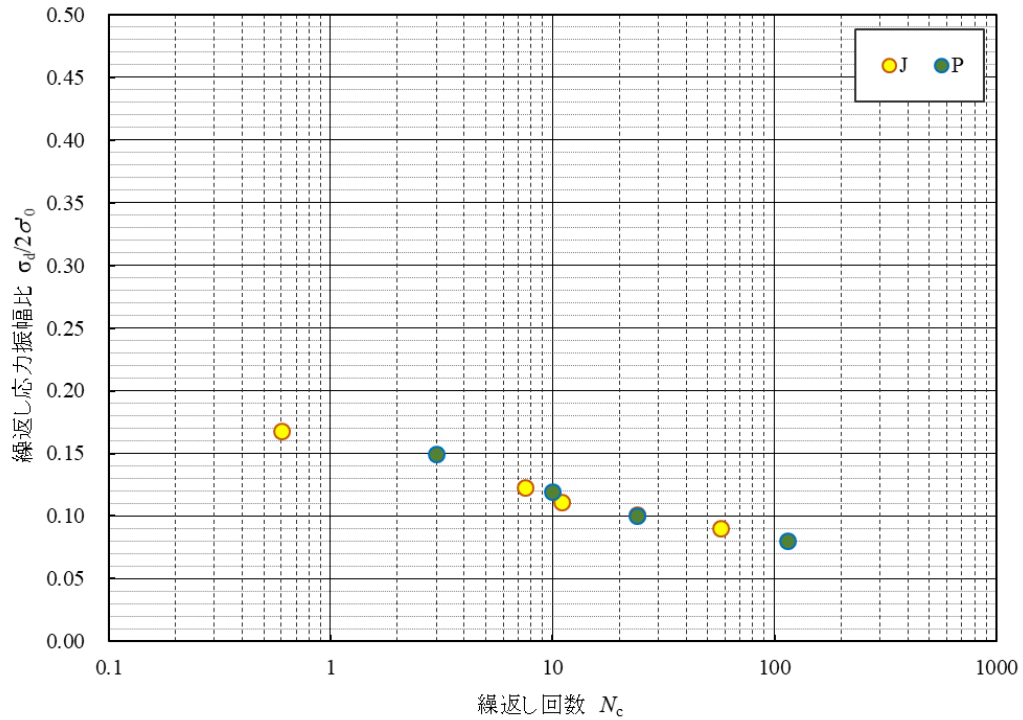


図3.2.6 液状化強度曲線（相対密度  $Dr=50\%$ ，両振幅軸ひずみ  $\varepsilon_{DA}=5.0\%$ ，三軸試験）

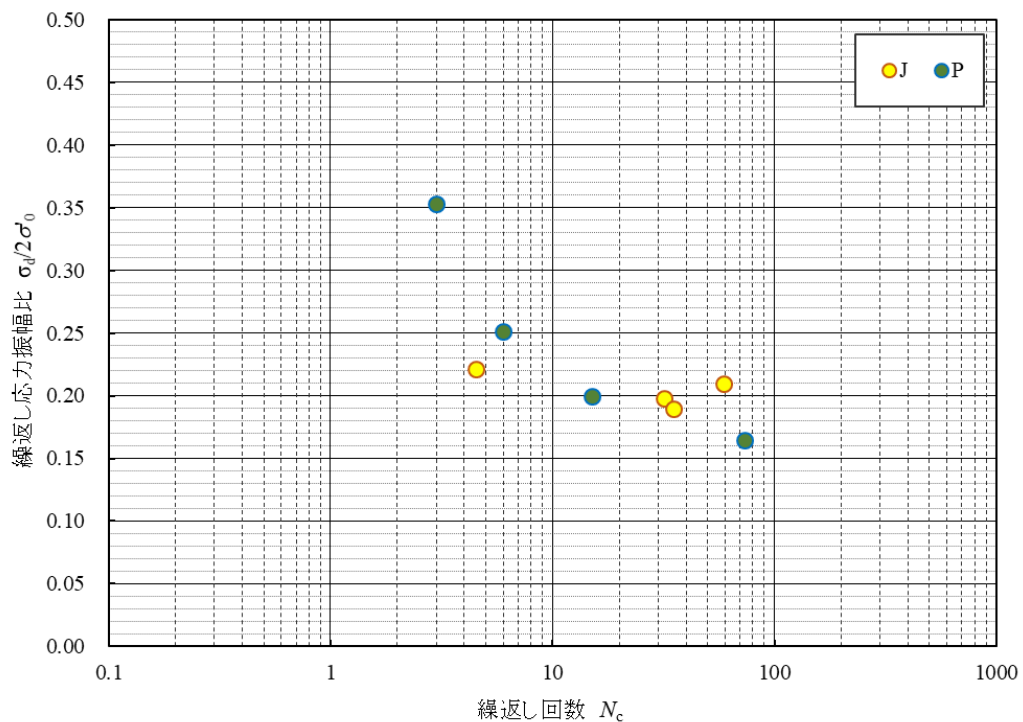


図3.2.7 液状化強度曲線（相対密度  $Dr=80\%$ ，両振幅軸ひずみ  $\varepsilon_{DA}=5.0\%$ ，三軸試験）



### 3.3 まとめ

本章では、中空ねじり試験装置および三軸試験装置を用いた一斉試験の概要について記載した。まず試験のケース構成や準拠する基準，用いた試料の物理特性について示し，各機関より提出された液状化試験結果に基づいて液状化強度曲線を求め，一覧表を作成した。その結果，三軸試験の方が，中空ねじり試験よりも液状化強度が概ね小さくなる傾向が確認された。

最後に一斉試験の報告データを整理するにあたり難儀した内容や問題点を以下にまとめる。

#### セル間のデータ不整合

各機関の試験結果は委員会が指定したエクセルファイルを使用して報告された。その際，「供試体の寸法」や「繰返し回数」など，シート或いはファイルを跨いで同じ値の入力が求められた試験データにおいて，セル間で値が一致していない事例が多く発生した。特に供試体の情報をまとめたエクセルと試料の情報をまとめたエクセルの間で，値が一致していない事例が多かった。数字をセルに直接入力して報告している場合は，試験担当者にどの値が正しいのか直接確認する必要があったため時間を要した。

##### 3.3.1.1 単位ミス

特に mm と cm を間違える事例が多かった。報告用エクセルでは長さの単位を mm 或いは m で統一していたが，普段 cm を用いて試験データを整理している機関が多いためか間違いが発生したと思われる。特にゴムスリーブ厚の単位ミスが多かった。

##### 3.3.1.2 数字の転記ミス

試験データをエクセルに入力する際に，タイプミス（キーボードの隣の数字をタイプしてしまう，数字を1つタイプし忘れて1桁小さい値になってしまう）などによる数字の転記ミスの事例があった。検算することで転記ミスのデータを抽出する必要が生じたため時間を要した。

##### 3.3.1.3 供試体の状態の間違い

例えば圧密“後”の間隙比を入力すべきセルに，圧密“前”の間隙比が入力されている事例があった。

##### 3.3.1.4 データの上書き忘れ

別の供試体や試験で作成した報告用エクセルをコピーして利用したためか，一部のデータが対象の供試体や試験の情報に上書きされておらずコピー元の値のままである事例があった。

##### 3.3.1.5 サンプルデータの消し忘れ

報告用エクセルには参考としてサンプルデータが入力されていた。未測定の試験データについては対象のセルを空欄とすべきところを，サンプルデータを残したままにしてあったため，試験データとして採用してしまう間違いが発生した。

##### 3.3.1.6 エクセルの数式の間違い

エクセルの関数を用いて試験値を算定する際に，数式が誤っている事例があった。

##### 3.3.1.7 エクセルの参照セルの間違い

エクセルの関数を用いて試験値を算定する際に，参照元のセルが誤っている事例があった。

##### 3.3.1.8 試験データの入力セル番地の間違い

試験データを入力すべきセルではなくその隣のセルに入力している事例があった。そのため目

視によるチェックが必須となった。

### 3.3.1.9 報告漏れ

試験担当者が報告対象である試験データを見落としていたため、測定データがあるにも関わらず報告から漏れていた事例があった。

### 3.3.1.10 与条件とは異なる物性値の使用

試料の物理特性のうち土粒子の密度、最小乾燥密度、最大乾燥密度、50%粒径、均等係数、細粒含有率について、委員会より与条件として指定した値ではなく独自の値を使用している事例があった。

### 3.3.1.11 データ修正に伴う関連データの更新漏れ

試験データの修正が発生した際に、その試験データと関連する他のデータを再計算し忘れる事例があった。

### 3.3.1.12 端数処理の方法

計算で求めた試験データについて、機関ごとに端数処理の方法が異なっていた。ただし、有効桁数がある程度確保しておけば計算結果への影響は小さい。

### 3.3.1.13 設置・飽和過程後（圧密前）の供試体体積の求め方

圧密前の供試体の求め方が機関ごとに異なっていた。

設置・飽和過程の軸変位や体積変化を0とした機関があった。しかし軸変位が0になることはありえないので、恐らく変位計がないため軸変位が測定できず軸変位なしとして処理したものと考えられる。

また軸変位を固定して飽和している機関もあった。これは一軸圧縮にあたるものと考えられる。高さが自由に变化できる状態で飽和を行わなければならないが、ハード上の制約がある試験機も存在する。

一方で飽和後の軸変位だけではなく直径も実測して体積を算定している機関もあった。

以上の内容を踏まえ、一斉試験の整理を円滑にするための対策を以下の通り提案する。

- (1) データ不整合を抑制するために、同じ試験値を入力する回数（セル数）は最低限に抑える。
- (2) 試験担当者用のチェックリストを用意する。チェック項目としては、例えば「セル間にデータの不整合がないことを確認した（対象となる試験値もリストにして提示することが望ましい）」、「単位ミスがないことを確認した」、「転記ミスがないことを確認した」、「圧密前、圧密後など供試体の状態を確認した上で値を入力した」、「ファイルのコピーを利用した際はコピー元のデータが残っていないことを確認した」、「サンプルデータは全て削除した」、「エクセルの関数を利用した際には数式に間違いがないことを確認した」、「エクセルの関数を利用した際には参照セルに間違いがないことを確認した」、「データを入力する際にはセル番地を間違えていないことを確認した」、「試験により得られた測定、算定データはすべて入力した」、「与条件の物性値を使用した」、「データを修正した際は関連データについても修正が反映されていることを確認した」などが挙げられる。

## 4 一斉試験の結果と考察

### 4.1 密度の影響

#### 4.1.1 はじめに

地盤工学会関東支部「中空ねじりによる液状化強度試験の高精度化に関する研究委員会」では、中空ねじり試験を用いた液状化試験の適切な試験方法を基準化することを目的とした活動を行ってきた。この一環として、中空ねじりによる一斉液状化試験が実施された。この一斉液状化試験では、供試体の密度、寸法、軸制御方法（荷重一定、変位固定）、载荷速度、周波数の影響要因を明らかにすることを目的として実施されたものである。本節では、中空ねじりによる液状化試験に及ぼす供試体の密度の影響について考察した。

#### 4.1.2 試験条件

試料には、本委員会から提供した瑞浪珪砂7号（ $\rho_s = 2.646 \text{ Mg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{dmin}} = 1.189 \text{ Mg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{dmax}} = 1.532 \text{ Mg/m}^3$ ,  $F_c = 1.4\%$ ）が用いられた。供試体は、供試体作製時の相対密度が50%と80%となるように、炉乾燥状態の試料を用いた空中落下法にて作製されている。この際のノズルは、本委員会から提供された共通仕様のものを使用している。表4.1.1は、参加機関の供試体寸法と载荷波形、軸応力制御の一覧である。各機関の供試体寸法は、外径が100と70 mm、内径が60と30 mmであり、供試体の肉厚は20 mmであるが内径外径比は0.60と0.43と異なる。供試体の高さは、70~200 mmが用いられており、高さ外径比で1.0~2.0となり、いずれの機関も外径以上の高さが用いられている。有効拘束圧は100 kN/m<sup>2</sup>の等方応力状態であり、繰返し非排水せん断過程は0.1 Hzの正弦波あるいは三角波による応力制御とひずみ速度一定の载荷波形が用いられている。また、非排水繰返し载荷中の軸制御は荷重一定あるいは軸変位固定である。なお、詳細な試験仕様は3章を参照して頂きたい。

表4.1.1 各機関の供試体寸法および载荷波形・軸制御

試料No.	外径	内径	高さ	内径/外径	高さ/外径	载荷波形	軸制御
	Do (mm)	Di (mm)	H (mm)	Di/Do	H/Do		
P-C, P-D, P-I, P-M	70.0	30.0	70.0	0.43	1.00	正弦波	荷重一定
D-I	70.0	30.0	70.0	0.43	1.00	正弦波	変位固定
P <sub>TW</sub> -C	70.0	30.0	70.0	0.43	1.00	三角波	荷重一定
P-J, P-L, P-N, P-O, P-P	70.0	30.0	100.0	0.43	1.43	正弦波	荷重一定
D-E, D-P	70.0	30.0	100.0	0.43	1.43	正弦波	変位固定
P <sub>TW</sub> -O	70.0	30.0	100.0	0.43	1.43	三角波	荷重一定
P <sub>CRS</sub> -N	70.0	30.0	100.0	0.43	1.43	ひずみ	荷重一定
P-F, P-K, P-Q, P-R	100.0	60.0	100.0	0.60	1.00	正弦波	荷重一定
P-A	100.0	60.0	120.0	0.60	1.20	正弦波	荷重一定
P-H	100.0	60.0	200.0	0.60	2.00	正弦波	荷重一定
D <sub>CRS</sub> -B	100.0	60.0	200.0	0.60	2.00	ひずみ	変位固定

#### 4.1.3 空中落下法による落下高さ

この一斉試験では、空中落下法にて供試体を作製することが定められていることから、各機関の空中落下法による供試体作製時の落下高さの間隙比の関係を図4.1.1に示す。各図は、供試体の内外径比の違いを示しており、左図は内外径比が0.43、右図は内外径比が0.60の各機関のキャリブレーション結果の集積図である。内外径比が0.43での相対密度50%の落下高さは10~45 cmに

分布し、相対密度80%の落下高さは40~120 cmに分布する。一方、内外径比が0.60での相対密度50%の落下高さは10~30 cmに分布し、相対密度80%の落下高さは30~100 cmに分布する。これより、各機関の空中落下法による供試体の間隙比の変化は、落下高さが増すほど間隙比は減少し密実化することは共通する。一方、同一の試料および同一のノズル形状を利用しているが、所定の間隙比での落下高さは機関毎に大きく異なる結果となった。

内外径比が0.43の試験機関のデータに着目すると、相対密度80%相当の間隙比での落下高さのばらつきは、高さ外径比が1.43の機関が大きくなっているようである。この要因として、試料を中空モールド内に空中落下させるときに試料がモールドに接触したことが考えられ、今回の一斉試験では内外径比が小さく、高さ外径比が大きくなるとその影響が大きくなったと推察される。なお、内外径比が0.60の試験機関のデータにおいては、機関数が少ないため高さ外径比の影響は明瞭ではない。また、機関Lはモールドの側面を打撃して密度調整したため、他機関とは異なる手法となっている。機関Fにおいても相対密度50%と80%の落下高さの差が少なく、相対密度80%では他機関に比べて落下高さが低くなっている。

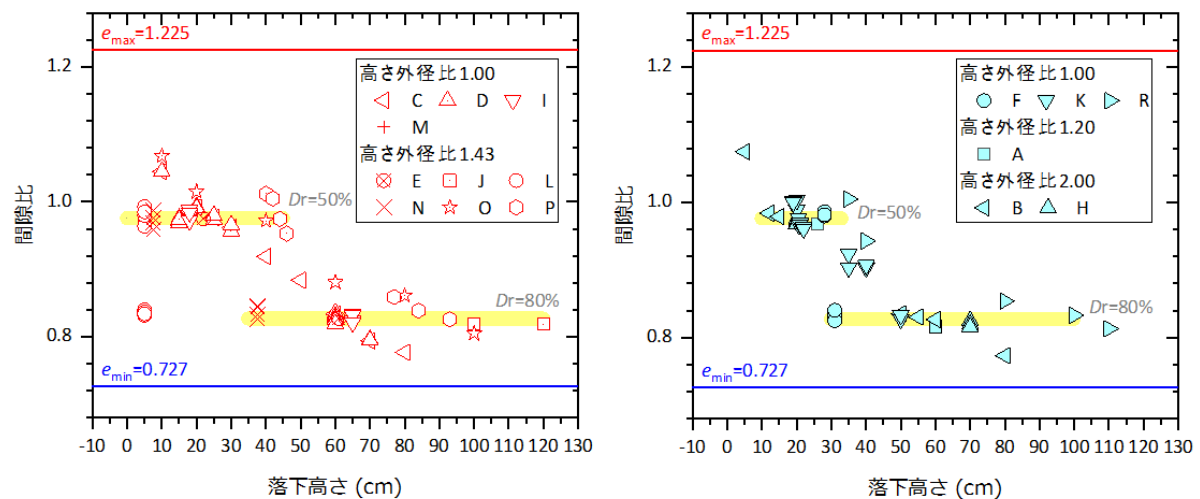


図4.1.1 空中落下法による落下高さと間隙比の関係

(左図：内外径比0.43, 右図：内外径比0.60)

#### 4.1.4 各機関の圧密に伴う密度の変化

供試体作製時の相対密度50%および80%における各機関の供試体の圧密に伴う乾燥密度変化の関係を図4.1.2~図4.1.3に示す。各図は、供試体の内外径比の違いを示しており、左図は内外径比が0.43、右図は内外径比が0.60である。供試体作製時の相対密度が50%では、有効拘束圧下での圧密に伴う密度変化は、+0.01Mg/m<sup>3</sup>程度であり、供試体の形状の違いによらず同程度の密度変化であることがわかる。ただし、機関I(内外径比0.43)においては他機関に比べて圧密に伴う密度変化が大きいようである。また、機関Rや機関B(内外径比0.60)の一部の供試体においては、圧密に伴う密度変化がないか、あるいは膨張するといった結果も示されていた。供試体作製時の相対密度が80%と密な状態では、有効拘束圧下での圧密に伴う密度変化は、+0.005Mg/m<sup>3</sup>程度であり、緩い状態に比べて若干小さくなり、機関や供試体の形状の違いによらず密度変化は同程度であることがわかる。ただし、機関Iにおいては緩い状態と同様に他機関に比べて圧密に伴う密度変化が大きいようである。



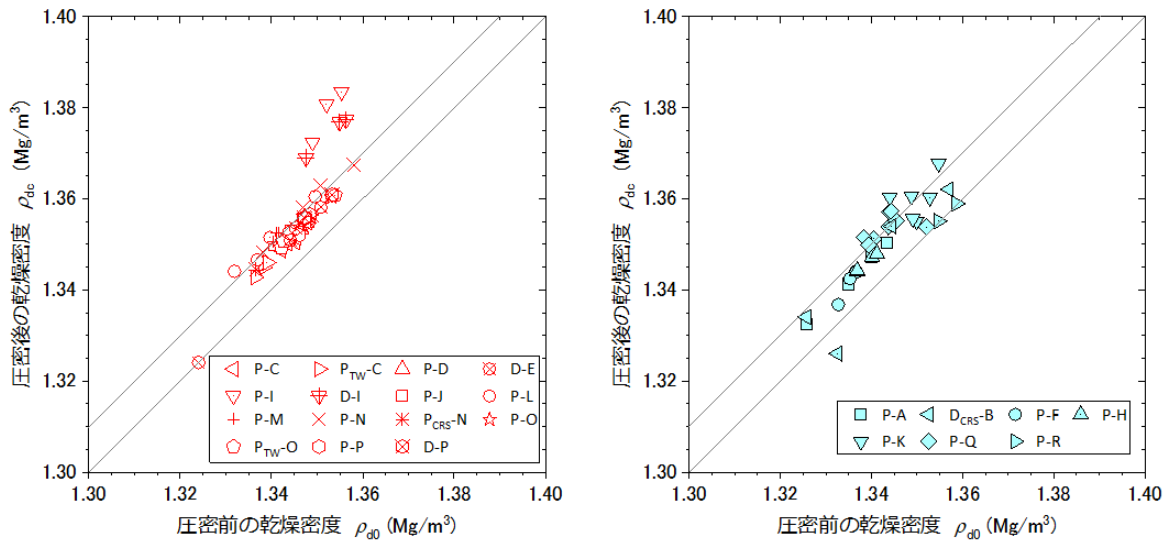


図4.1.2 各機関の供試体の圧密に伴う密度変化（相対密度50 %）

（左図：内外径比0.43，右図：内外径比0.60）

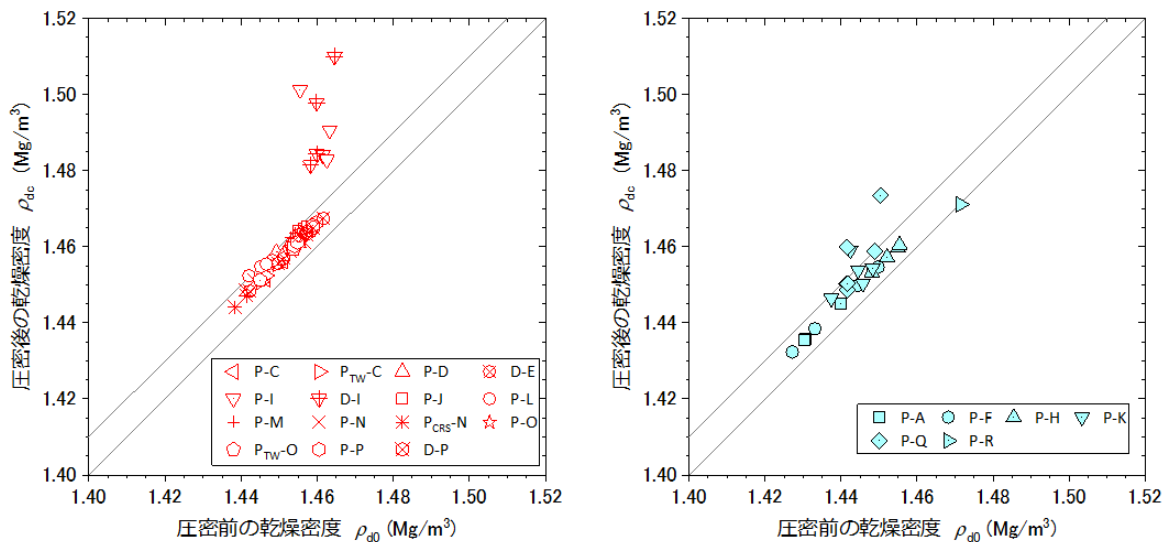


図4.1.3 各機関の供試体の圧密に伴う密度変化（相対密度80 %）

（左図：内外径比0.43，右図：内外径比0.60）

図4.1.4～図4.1.5は圧密前後の各機関の供試体密度分布の比較であり，各供試体の相対密度変化の関係を図4.1.6～図4.1.7に示す。これより，相対密度が50 %では，機関毎の圧密後の相対密度の平均値の変化は，1.5～3.2 ptの幅に分布し，平均して2.3 ptの変化であった。内外径比が0.43の各機関の圧密後の相対密度は45.6～62.8 %の範囲に分布し，その平均値は54.6 %であった。内外径比が0.60の各機関の圧密後の相対密度は46.1～58.4 %の範囲に分布し，その平均値は53.3 %と内外径比が0.43の機関とほぼ同程度の値であった。

相対密度が80 %では，機関毎の圧密後の相対密度の平均値の変化は，1.3～2.7 ptの幅に分布し，平均して1.6 ptの変化であった。内外径比が0.43の各機関の圧密後の相対密度は78.9～95.0 %の範囲に分布し，その平均値は83.6 %であった。内外径比が0.60の各機関の圧密後の相対密度は75.9～86.2 %の範囲に分布し，その平均値は80.9 %であった。また，供試体密度の違いによらず，機



関Iは圧密後の密度変化が+6~+8 pt となり、機関Rは圧密後の密度変化がほぼ無く、他機関の圧密時の供試体変化と比べると特異的な挙動を示していた。

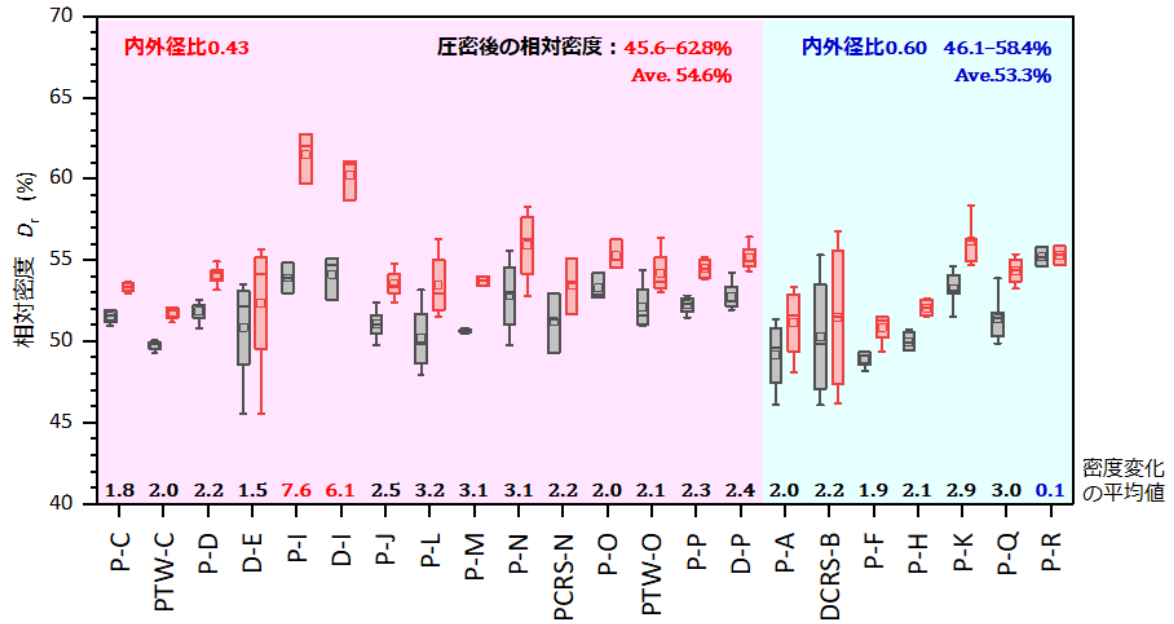


図4.1.4 各機関の供試体密度分布の比較 (相対密度50%)

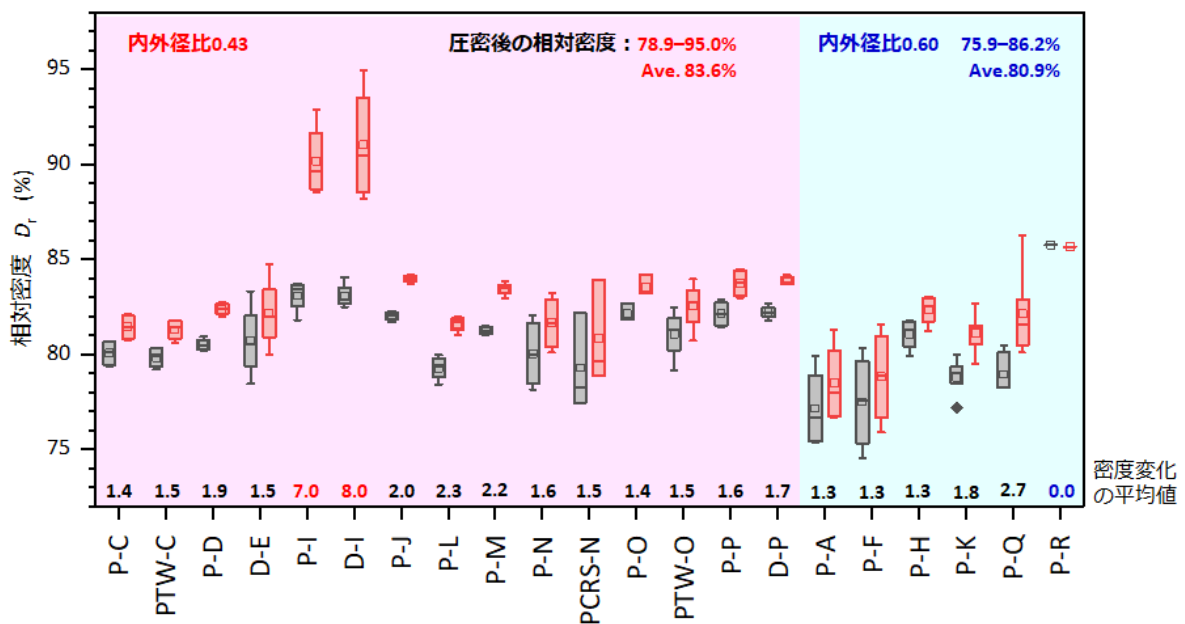


図4.1.5 各機関の供試体密度分布の比較 (相対密度80%)

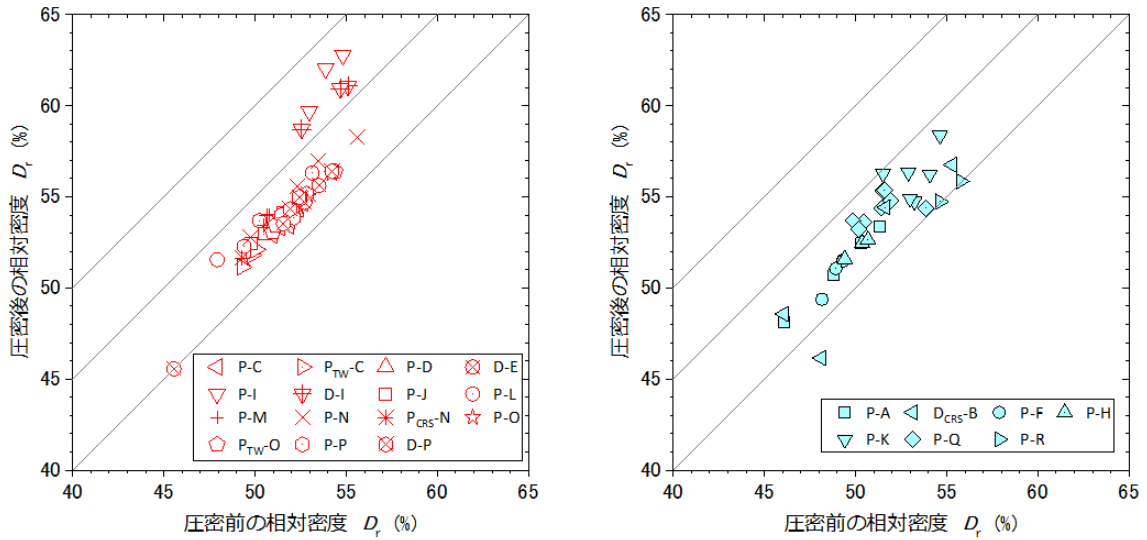


図4.1.6 各機関の供試体の圧密に伴う相対密度変化（相対密度50%）

（左図：内外径比0.43，右図：内外径比0.60）

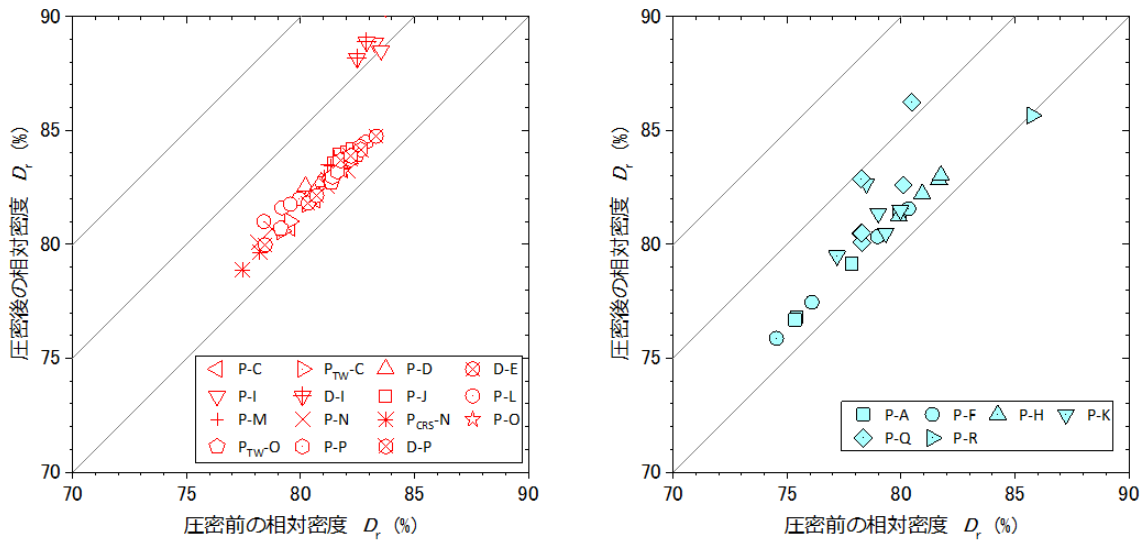


図4.1.7 各機関の供試体の圧密に伴う相対密度変化（相対密度80%）

（左図：内外径比0.43，右図：内外径比0.60）

#### 4.1.5 液状化試験結果に及ぼす密度の影響

図4.1.8および図4.1.9は、各機関にて実施された液状化試験結果を相対密度別に集積したものである。左図は、両振幅せん断ひずみが7.5%に至る際の繰返し回数と繰返しせん断応力比の関係である。右図は、過剰間隙水圧比が0.95に至る際と同関係である。繰返しせん断応力比は、両振幅せん断ひずみが1.5%に至るまでの正側および負側のせん断応力比の平均値である。なお、各供試体の繰返しせん断応力の載荷波形は両振幅せん断ひずみが3.0%に至るまで $0.9 \leq \tau_r/\tau_l \leq 1.1$ の範囲で制御されていることを確認している。また、同図中の塗潰しプロットは内外径比が0.60であり、中抜きプロットは内外径比が0.43である。そして図中の色調は各供試体の圧密後の相対密度を表しており、全供試体の圧密後の平均値をカラーバーの中央値に設定している。従って、図中の緑色のプロットは、平均値 $\pm 2\%$ の変動幅を示している。

図4.1.8より、圧密後の供試体密度が46~63%の中密状態では液状化試験結果のばらつきに及ぼす供試体密度の影響は大きくなく、一部の機関を除いて繰返し回数が20回時の繰返しせん断応力

比は0.16～0.21の範囲に分布することが確認された。また、液状化時の定義の違いによらず中密状態であれば、せん断ひずみあるいは過剰間隙水圧比による評価はほぼ同様な結果となっていることがわかる。一方、図4.1.9は、圧密後の供試体密度が76～95 %の密な状態の液状化試験結果の集積図であるが、中密な状態に比べて各機関の液状化試験結果のばらつきは大きく、一部の機関を除いて繰返し回数が20回時の繰返しせん断応力比は0.24～0.34の範囲に分布することが確認された。そして、液状化の時点をせん断ひずみで評価した方が過剰間隙水圧比による評価に比べて若干大きい値となっていることがわかる。

図4.1.10および図4.1.11は、繰返し三軸試験による液状化試験結果を相対密度別に集積したものである。左図は、両振幅軸ひずみが5.0 %に至る際の繰返し回数と繰返し応力振幅比の関係である。右図は、過剰間隙水圧が0.95に至る際と同関係である。圧密後の供試体密度が52～61 %の中密状態では繰返し回数が20回時の繰返しせん断応力比は0.103～0.105に分布する。図4.1.12は、圧密後の供試体密度が81～93 %の密な状態の液状化試験結果の集積図であり、繰返し回数が20回時の繰返しせん断応力比は0.191～0.205に分布する。中空ねじりによる繰返し回数が20回時の各繰返しせん断応力比は繰返し三軸試験よりも大きく、中密状態では1.5～2.0倍に分布し、密な状態では1.2～1.6倍に分布する。なお、液状化試験結果を近似曲線で表した曲線（以下、液状化強度曲線とする）の形状は、中密状態では繰返し回数の違いによる繰返し応力振幅比の変化は小さくなる。一方、密な状態では繰返し回数が少ないときの繰返し応力振幅比が大きくなり、繰返し回数10回付近で曲率に変化するようである。

図4.1.12の左図は、繰返し三軸試験による一斉試験から得られた液状化試験結果の集積図である。この一斉試験における個々の供試体の圧密後の乾燥密度は、目標相対密度71 %に対して±3%の変動に収まる供試体は68 %となり、残りの32 %の供試体は±3%以上の変動を有する試験結果となっている。従って、各機関の圧密後の乾燥密度が個々の供試体で必ずしも目標値になっていないことに起因してデータにはかなりばらつきが含まれると述べられている。それに対して図4.1.12の右図は、 $\rho_{ac} = 1.538 \text{g/cm}^3$ （目標相対密度71 %）に対する密度補正が実施された結果である。これより、2～3機関のデータを除き、密度の変動の影響を補正することによってデータのばらつきが少なくなっていると述べられている。しかし、密度の変動の影響を補正してもばらつきは少なくなく、これらのばらつきは他の要因にかなりの程度依存していると考えられている。今回の中空ねじりによる一斉試験と繰返し三軸による一斉試験では、試料や密度の違いがあるため直接比較することは難しいが、中密～密な状態の繰返し三軸試験では繰返し回数が少ない時の応力比が非常に大きくなることで液状化強度曲線の傾きが大きくなることがある。龍岡ら<sup>2)</sup>によれば、繰返し三軸試験において同じ供試体作製方法による異なる相対密度に対する液状化強度曲線は、ある応力比付近で最大曲率を持つ類似した形状となることが述べられている。従って、この応力比より小さい範囲では液状化強度曲線の傾きは小さく、応力比が大きい範囲では傾きが大きくなる。しかし、今回の中空ねじりによる相対密度80 %の液状化試験結果ではそのような特徴は見られず、液状化強度曲線の形状は各機関ともに滑らかな形状となっていることは、せん断力を直接供試体に与えることができる中空ねじり試験の特徴であると考えられる。

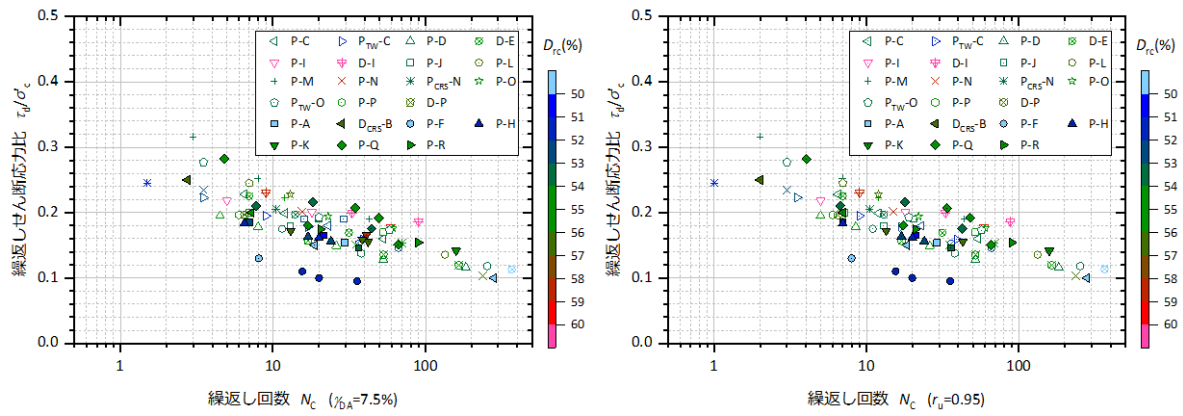


図4.1.8 相対密度50%の液状化試験結果

(左図：せん断ひずみ7.5%，右図：過剰間隙水圧比0.95)

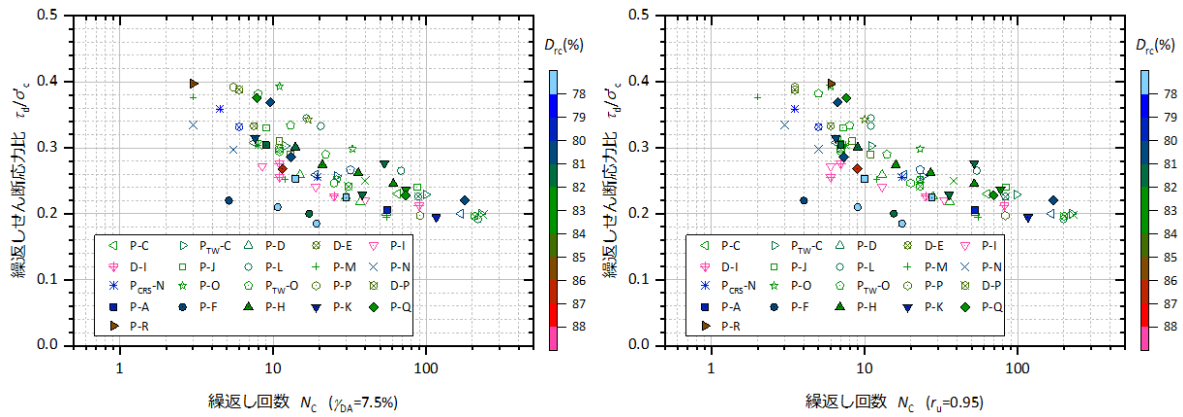


図4.1.9 相対密度80%の液状化試験結果

(左図：せん断ひずみ7.5%，右図：過剰間隙水圧比0.95)

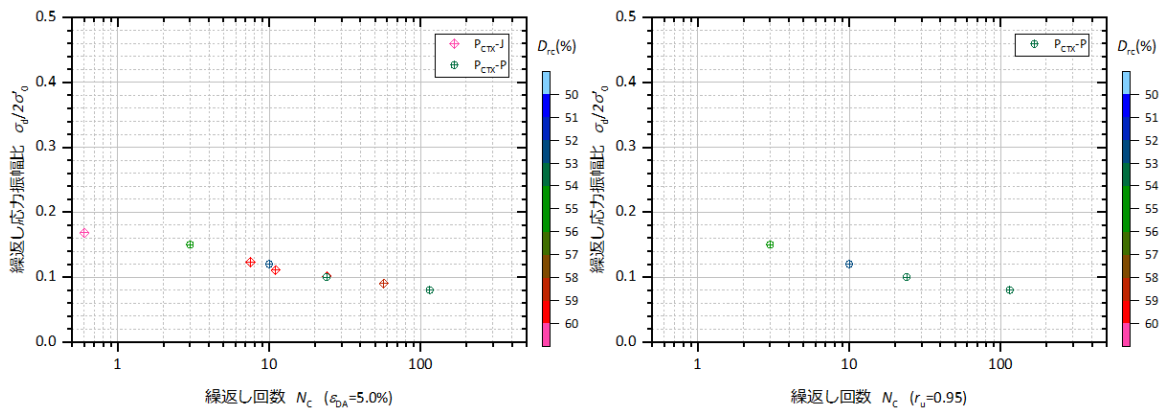


図4.1.10 相対密度50%の繰返し三軸試験による液状化試験結果

(左図：軸ひずみ5.0%，右図：過剰間隙水圧比0.95)

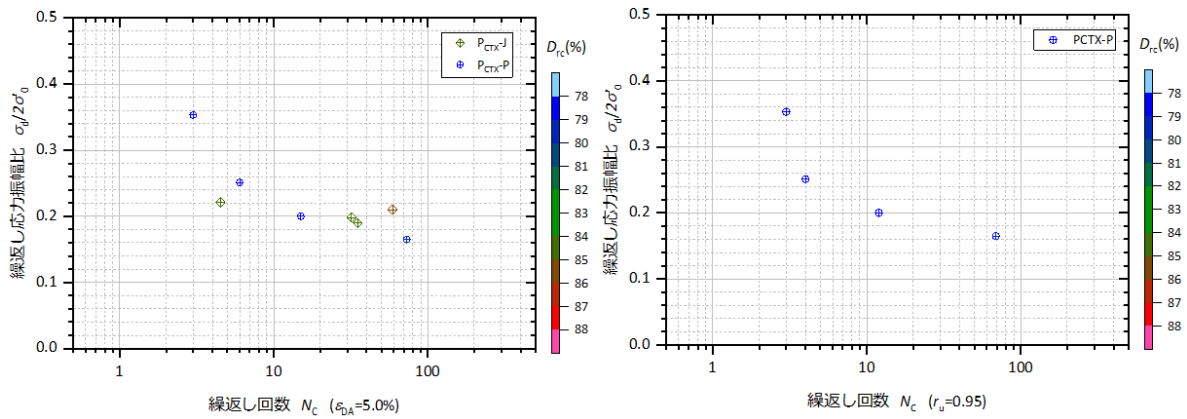


図4.1.11 相対密度80%の繰返し三軸試験による液状化試験結果  
(左図：軸ひずみ5.0%，右図：過剰間隙水圧比0.95)

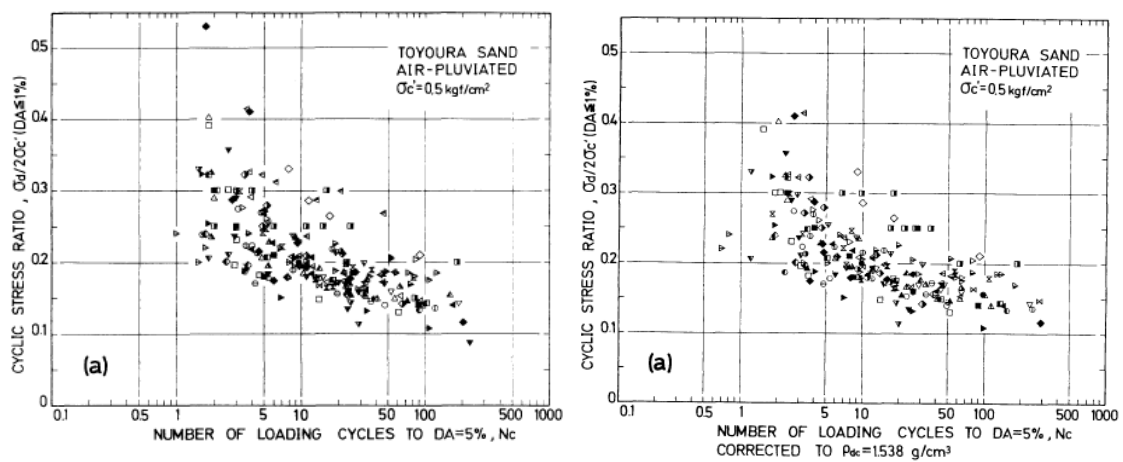


図4.1.12 繰返し三軸試験による液状化試験結果<sup>[1]</sup>  
(左図：密度補正前，右図：密度補正後)

図4.1.13は、各機関の圧密後の相対密度の平均値と液状化強度比の関係である。液状化強度比 ( $R_{L20}$ ) は、図4.1.8および図4.1.9の各機関の液状化試験結果に対してべき乗関数で近似した際の繰返し回数20回時の繰返しせん断応力比である。左図は、両振幅せん断ひずみ7.5%に対する液状化試験結果から得られた液状化強度比 ( $R_{L20, \gamma_{DA}=7.5\%}$ ) であり、右図は過剰間隙水圧比0.95に対する液状化強度比 ( $R_{L20, ru=0.95}$ ) である。図中の数値は、内外径比0.43 (赤字) と内外径比0.60 (青字) の最大、最小、平均値である。

これより、相対密度が50%程度の中密状態である際の液状化強度比は、一部の機関を除いて多少のばらつきはあるが供試体の形状や液状化時の定義の違いによらず  $R_{L20}$ は0.155～0.212の範囲となっている。これに対して、相対密度が80%程度の密な状態になると  $R_{L20}$ は、過剰間隙水圧による液状化強度比に対してせん断ひずみによる液状化強度比は若干であるが0.01ほど大きくなっている。そして、供試体の内外径比が0.43の機関のデータ (図中の赤印) に着目すると高さ外径比が1.43の機関 (E, J, L, N, O, P) の液状化強度比は、高さ外径比が1.0の機関 (C, D, I, M) に比べて大きくなっているようである。

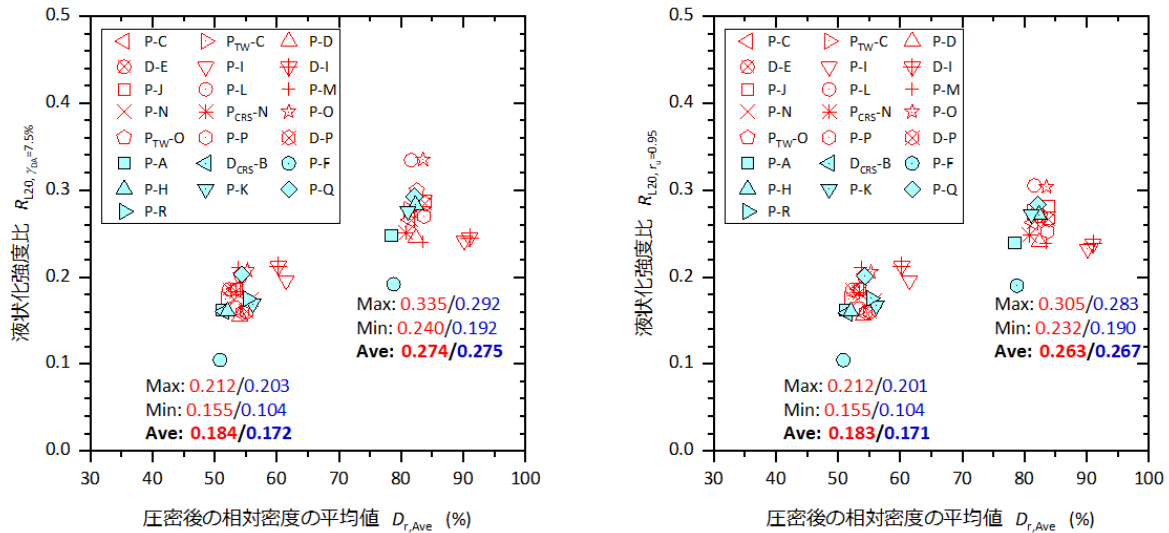


図4.1.13 各機関の圧密後の相対密度の平均値と液状化強度比の関係  
(左図：せん断ひずみ7.5%，右図：過剰間隙水圧比0.95)

図4.1.14は、各機関の圧密後の相対密度の平均値と液状化強度比の報告値の関係である。液状化強度比の報告値は、3章の中空ねじり試験結果に示されている両振幅せん断ひずみ7.5%に対する液状化試験結果から得られた液状化強度比 ( $R_{L20, \gamma_{DA}=7.5\%}$ ) である。図4.1.15は、液状化強度比の報告値とべき関数でフィッティングして求めた値の比較である。これより、各機関の液状化強度比は、べき関数でフィッティングして求めた値と同程度であることがわかり、中空ねじり試験による液状化強度曲線は供試体の密度や形状の違いによらず均質な砂であればべき関数で液状化強度曲線をフィッティングしている機関が多いことがわかる。

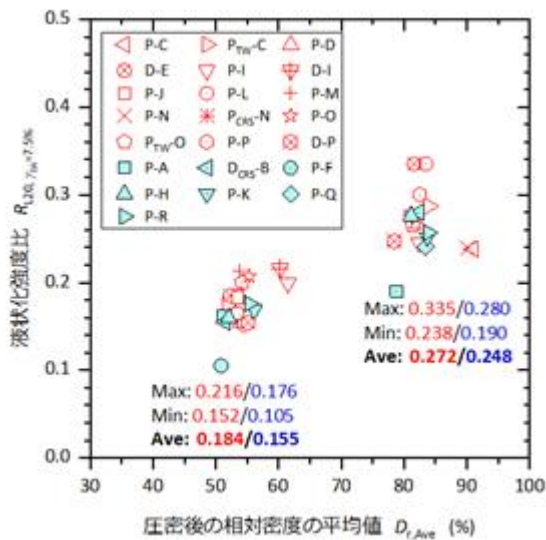


図4.1.14 各機関の圧密後の相対密度の平均値と液状化強度比（報告値）の関係

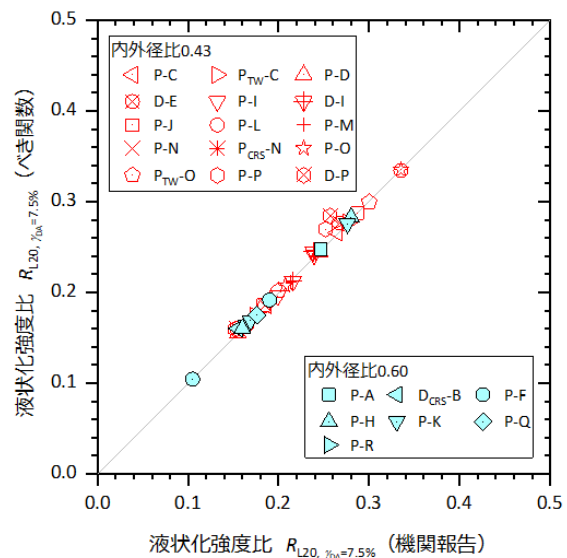


図4.1.15 各機関の液状化強度比（報告値）とべき関数でフィッティングして求めた値の比較

図4.1.16は、各機関の液状化強度曲線の形状を比較するために、各機関の液状化試験結果をべき乗関数で近似した際の係数  $A$  とべき乗  $B$  について各機関の圧密後の相対密度の平均値で整理し



たものである。係数  $A$  は液状化強度曲線の繰返しせん断応力比の位置を示し、係数  $B$  は液状化強度曲線の形状を示す。なお、各係数は両振幅せん断ひずみ7.5%に対する液状化強度曲線から得た値である。これより、係数  $A$  は相対密度が50%の中密状態においては0.2~0.4の範囲に分布するのに対して、相対密度が80%の密な状態においては0.3~0.7の範囲に分布し、供試体の密度が中密状態から密な状態になると液状化強度曲線の縦軸の位置に関する係数  $A$  のばらつきは内外径比0.43の方が大きくなるようである。一方、べき乗  $B$  は相対密度が50%の中密状態においては-0.06~-0.23の範囲に分布し、相対密度が80%の密な状態においても-0.11~-0.26の範囲に分布し、供試体の密度の違いによる液状化強度曲線の傾きを示すべき乗  $B$  のばらつきはあまり大きくないようである。また、同じ密度状態で各機関の係数  $A$  やべき乗  $B$  のばらつきの要因として、供試体形状の違いが考えられる。相対密度80%の内外径比0.43 (図中、赤印) のデータに着目すると、同じ内外径比に対して高さ外径比が大きい機関では、係数  $A$  が大きく、べき乗  $B$  は小さいようである。

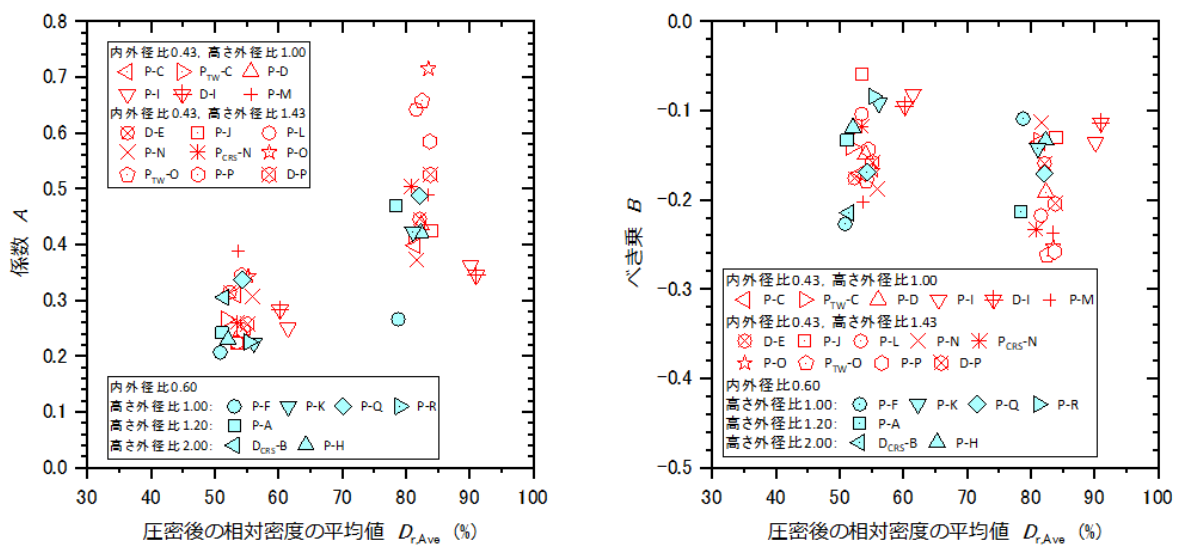


図4.1.16 各機関の両振幅せん断ひずみ7.5%に対する液状化強度曲線の形状比較

#### 4.1.6 再圧密時の体積ひずみに及ぼす密度の影響

図4.1.17~図4.1.18は、液状化試験後に再圧密した際の各機関の供試体相対密度の比較である。図中の色調は、液状化試験における両振幅最大せん断ひずみを表している。図4.1.19~図4.1.20は、各機関の液状化試験前後の相対密度変化の分布である。

相対密度が50%の中密状態では、機関毎の液状化試験後の再圧密による相対密度の平均値の変化は、8.1~21.3 ptの幅に分布し、平均して12.4 ptの変化であった。内外径比が0.43の各機関の再圧密後の相対密度は60.1~83.0%の範囲に分布し、その平均値は67.0%であった。内外径比が0.60の各機関の圧密後の相対密度は51.7~93.6%の範囲に分布し、その平均値は67.4%と内外径比が0.43の機関とほぼ同程度の値であった。各供試体の両振幅最大せん断ひずみが8.8~54.6%と完全に液状化に至っていることから、液状化後の再圧密時の相対密度の変化が同程度となったと考えられる。ただし、機関Qは供試体毎の再圧密時の体積ひずみに違いが大きく、機関Rは供試体数が少ないが他機関に比べて体積ひずみは小さい。

相対密度が80%の密な状態では、機関毎の液状化試験後の再圧密による相対密度の平均値の変化は、4.5~14.4 ptの幅に分布し、平均して8.6 ptの変化であった。内外径比が0.43の各機関の再圧密後の相対密度は87.1~105.3%の範囲に分布し、その平均値は92.5%であった。内外径比が0.60の各機関の圧密後の相対密度は78.8~113.6%の範囲に分布し、その平均値は88.6%と内外径

比が0.43の機関とほぼ同程度の値であった。各供試体の両振幅最大せん断ひずみが9.6~34.2%と完全に液状化に至っていることから、液状化後の再圧密時の相対密度の変化が同程度となったと考えられる。

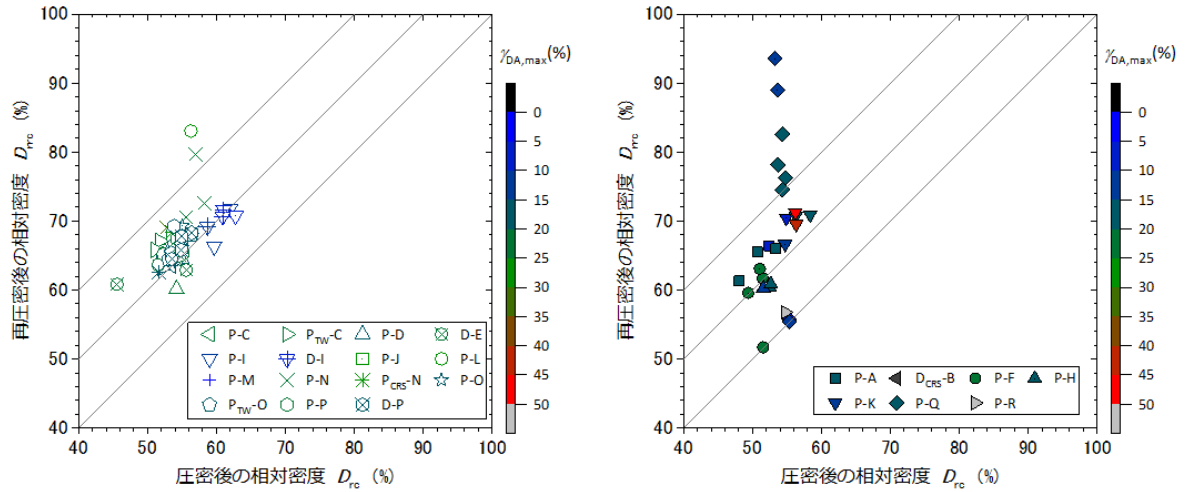


図4.1.17 各機関の液状化試験後の再圧密に伴う相対密度変化（相対密度50%）

（左図：内外径比0.43，右図：内外径比0.60）

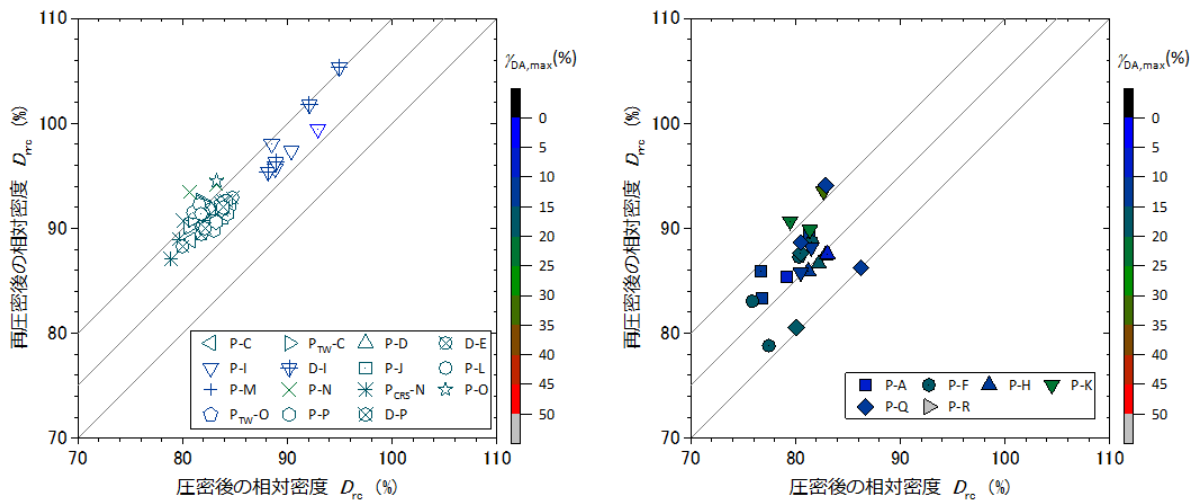


図4.1.18 各機関の液状化試験後の再圧密に伴う相対密度変化（相対密度80%）

（左図：内外径比0.43，右図：内外径比0.60）



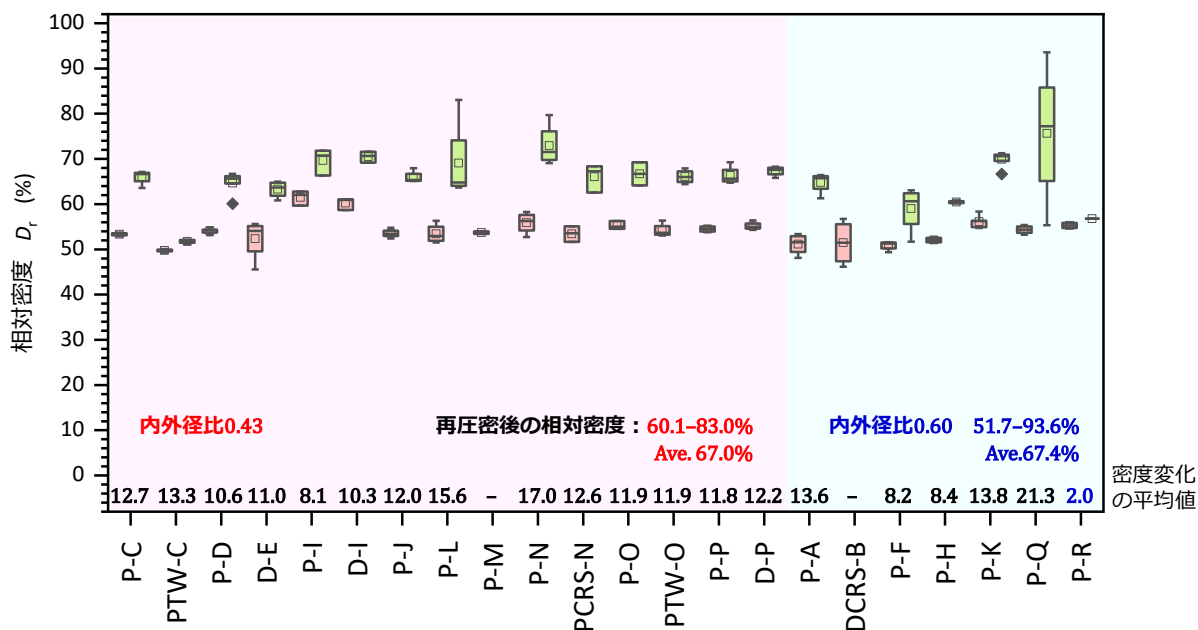


図4.1.19 各機関の液状化試験前後の供試体密度分布の比較（相対密度50%）

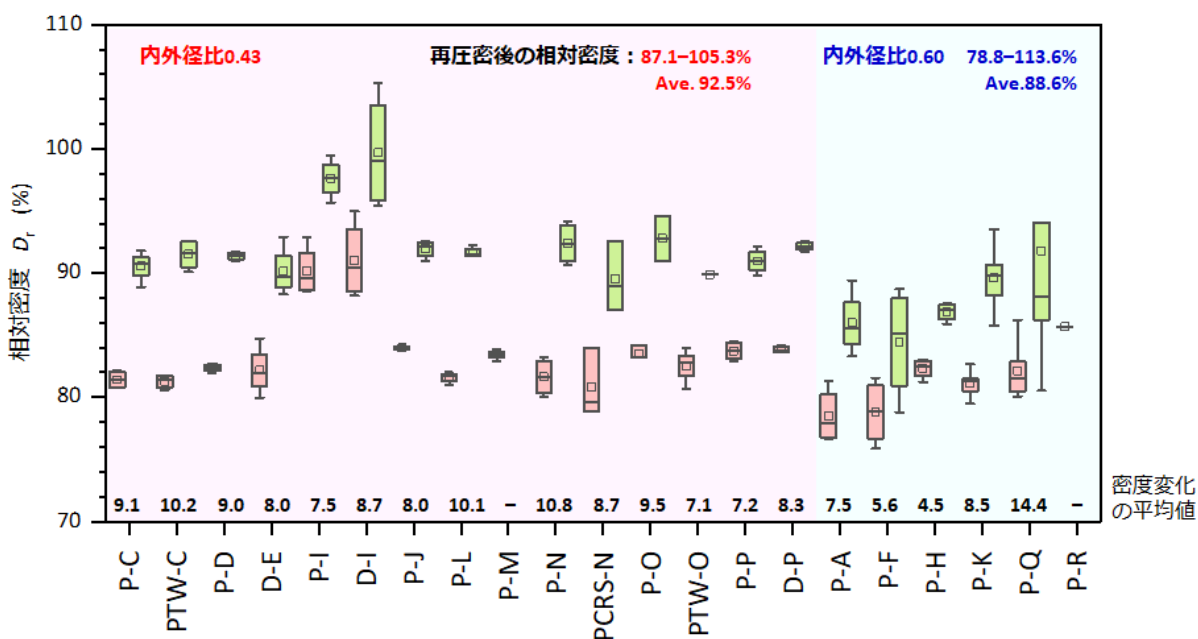


図4.1.20 各機関の液状化試験前後の供試体密度分布の比較（相対密度80%）

#### 4.1.7 まとめ

本項は、中空ねじり試験による一斉試験結果を用いて供試体の密度の影響要因について分析を行い、得られた知見を以下に示す。

##### (1) 空中落下法による供試体作製

各機関の空中落下法のキャリブレーション結果より、供試体外径が小さいほう（内外径比0.43）が機関毎の落下高さに違いを生じており、供試体の高さが高い（高さ外径比1.43）場合の落下高さが大きくなる傾向であった。また、供試体の密度が大きくなると、供試体の形状の違いによらず機関毎の落下高さの違いは大きくなり、その傾向は内外径比が小さ

- いほうが大きくなる。
- (2) 圧密による密度変化  
供試体の形状の違いによらず、各機関の有効拘束圧による体積変化量は概ね同じであった。ただし、一部の機関で大きな体積変化あるいは体積変化が生じていないことも確認された。
- (3) 液状化強度比  
機関毎の違いによらず相対密度50 %の中密状態での液状化強度比は、ほぼ同程度（0.16～0.21）となることが確認された。  
供試体の密度が高くなると、供試体の高さ外径比の違いにより液状化強度比は変化し易いことが確認された。
- (4) 液状化強度曲線の形状  
相対密度が80 %と密な状態において、繰返し三軸試験のような液状化強度曲線の勾配が大きくなる傾向は今回の一斉試験結果からは確認されなかった。そして液状化強度曲線の形状は各機関ともに滑らかな形状となっており、せん断力を直接供試体に与えることができる中空ねじり試験の特徴であるといえる。また、供試体の外径が小さく、高さが高いほど、液状化強度曲線の傾きは大きくなるような傾向がある。なお、繰返し三軸試験による液状化試験結果では、相対密度が80 %と密な状態においては繰返し回数10回付近で液状化強度曲線の曲率に変化する。
- (5) 液状化試験後の再圧密による密度変化  
相対密度が50 %と中密状態において、完全に液状化した後の再圧密による相対密度の変化は、機関毎の違いによらず12 pt ほど増加することが確認された。相対密度が80 %と密な状態において、同値は8.2 pt ほど増加することが確認され、供試体密度が高くなると相対密度変化は小さくなる。

## 4.2 試料寸法の影響

### 4.2.1 供試体寸法

今回の一斉試験で実施した供試体寸法を表 4.2.1 に示す。外径は 70mm と 100mm、内径は 30mm と 60mm の 2 種類となっており、肉厚はいずれも 20mm となっている。また、高さは 70mm～200mm の 4 種類となっている。

また、参加機関向けのアンケート結果より、保有しているまたは実施可能な供試体寸法を表 4.2.2 に示す。各供試体寸法の機関の内訳では、外径70mm は試験会社やコンサルタントが多く、外径100mm は大学や（一社）研究所が多い傾向が確認できた。これは、試験会社やコンサルタントが、現地から乱れの少ない試料を採取するためのシンウォールサンプラーで採取された試料（サンプリング径：74mm 程度）でも試験に対応出来るように外径70mm の試験装置を保有しているためと考えられる。

内径や高さについては、豊浦砂を用いた変形特性を求めるための繰返しねじり試験の一斉試験、および圧密排水ねじりせん断試験の一斉試験で採用されている寸法を参考にされていると思われる。一方で、内外径比については、内外径比が0.60以下ではせん断抵抗角が大きく変化することが示されているため、大学や研究所では内外径比0.60を採用している機関が多いと思われる<sup>3</sup> [1]。

表4.2.1 一斉試験での供試体寸法

外径 (mm)	内径 (mm)	高さ (mm)	内径/外径	高さ/外径	機関数 (参加機関 記号)
70	30	70	0.43	1.00	軸応力一定 : 4 (C, D, I, M) 軸変位固定 : 1 (I)
70	30	100	0.43	1.43	軸応力一定 : 5 (J, L, N, O, P) 軸変位固定 : 2 (E, P)
100	60	100	0.60	1.00	軸応力一定 : 4 (F, K, Q, R)
100	60	120	0.60	1.20	軸応力一定 : 1 (A)
100	60	200	0.60	2.00	軸応力一定 : 1 (H) 軸変位固定 : 1 (B)

※一つの機関で複数の試験装置を保有している場合は、1機関とした

表4.2.2 保有しているまたは実施可能な供試体寸法

外径 (mm)	内径 (mm)	高さ (mm)	内径/外径	高さ/外径	機関数	内訳
70	30	70	0.43	1.00	4	試験会社2 コンサルタント2
70	30	100	0.43	1.43	6	コンサルタント3 ゼネコン1 大学2
100	0	100	0.00	1.00	1	(一社) 研究所1
100	20	100	0.20	1.00	1	(一社) 研究所1
100	40	100	0.40	1.00	1	(一社) 研究所1
100	60	100	0.60	1.00	7	試験会社1 ゼネコン1 (一社) 研究所1 大学4
100	0	120	0.00	1.20	1	(一社) 研究所1
100	20	120	0.20	1.20	1	(一社) 研究所1
100	40	120	0.40	1.20	1	(一社) 研究所1
100	60	120	0.60	1.20	1	(一社) 研究所1
100	60	200	0.60	2.00	2	大学2

※一つの機関で複数の試験装置を保有している場合は、1機関とした

## 4.2.2 寸法による液状化強度の違い

今回の一斉試験では供試体作製密度は  $D_r=50\%$  と  $D_r=80\%$  の2種類、また、軸方向の制御方法として軸応力一定と軸変位固定の2種類で実施している。各機関の繰返し回数－繰返し応力振幅比関係を図4.2.1～図4.2.9に示す。なお、図中の凡例の Ave は、同一条件で実施した全ケースの液状化強度 ( $\gamma_{DA}=7.5\%$ ,  $N_c=20$ ) の平均値としている。

内外径比による液状化強度の違いについては、図4.2.1より、軸応力一定で実施した場合には、各機関でバラつきは見られるが、 $D_r=50\%$ 、 $D_r=80\%$  どちらも内外径比が小さいほうが液状化強度が大きい傾向が見られた。ただし、その他の試験機関と比べて液状化強度が小さい機関の結果 (赤▲) を除外すると、明瞭な差異は見られなかった。

また、供試体高さ100mmの供試体同士で内外径比による液状化強度の比較をした。図4.2.2より、図4.2.1と同様に、その他の試験機関と比べて液状化強度が小さい機関の結果 (赤▲) を除外すると、明瞭な差は見られなかった。

図4.2.3より、軸変位固定で実施した場合には、 $D_r=50\%$  においてサンプル数は少ないが、内外径比が小さいほうが液状化強度が大きい傾向が見られたが、内外径比0.60の機関はひずみ速度一定で実施しており、供試体高さも200mmという特殊な条件で実施しているため、明瞭な差異があるとまでは言えない。

次に、高さ外径比による液状化強度の違いについて、図4.2.4より軸応力一定条件では  $D_r=50\%$ 、 $D_r=80\%$  いずれにおいてもバラつきが大きく、高さ外径比による影響の傾向は見られない。また、内外径比が同じもの同士で高さ外径比による液状化強度の比較をした。図4.2.5、図4.2.6より、サンプル数が少ないため明瞭な差は見られないが、内外径比0.60、 $D_r=50\%$  のケースで、その他の試験機関と比べて液状化強度が小さい機関の結果 (紫▲) を除外すると、高さ外径比が小さいほうが液状化強度が大きい傾向が確認できた。また、図4.2.7より、軸変位固定条件でも、サンプル数は少ないが  $D_r=50\%$  において、高さ外径比が小さいほうが液状化強度が大きい傾向が見られた。

供試体高さによる液状化強度の違いについては、図4.2.8、図4.2.9より  $D_r=50\%$  において、軸応力一定、軸変位固定のどちらの条件でも供試体高さが小さいほうが液状化強度が大きい傾向が見られた。 $D_r=80\%$  ではそのような傾向は確認できない。なお、その他の試験機関と比べて液状化強度が小さい機関の結果 (緑▲) を除外しても同様の傾向であった。

供試体高さが小さいほうが液状化強度が大きいのは上下ペDESTALキャップによる拘束やリブの貫入が一因として考えられる。

今回の一斉試験では、一部の機関で三軸状態での液状化試験 (JGS 0541 土の繰返し非排水三軸試験方法) を実施しており、それらの結果も併せて図示した (黒●, ■)。

図4.2.1～図4.2.9より、いずれのケースにおいても中空ねじりよりも三軸のほうが応力比が下方に位置しており、三軸試験のほうが液状化強度が小さい傾向が見られたが、どのケースで中空と三軸の結果が整合するかについては、サンプル数が少ないため今回の一斉試験では傾向が確認できなかった。

また、 $D_r=50\%$  と  $D_r=80\%$  の比較では、 $D_r=80\%$  は  $D_r=50\%$  よりも繰返し回数が少ない範囲でのバラつきが大きい傾向が見られた。これは、空中落下法で密な供試体を均質に作製することが難しいことが一因であると考えられる。

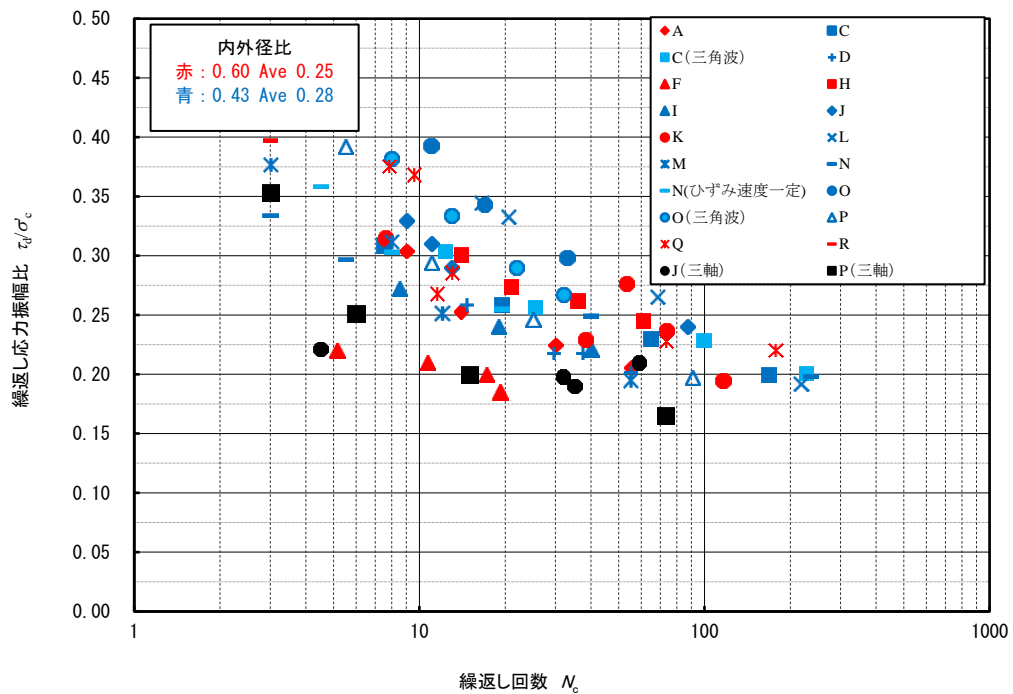
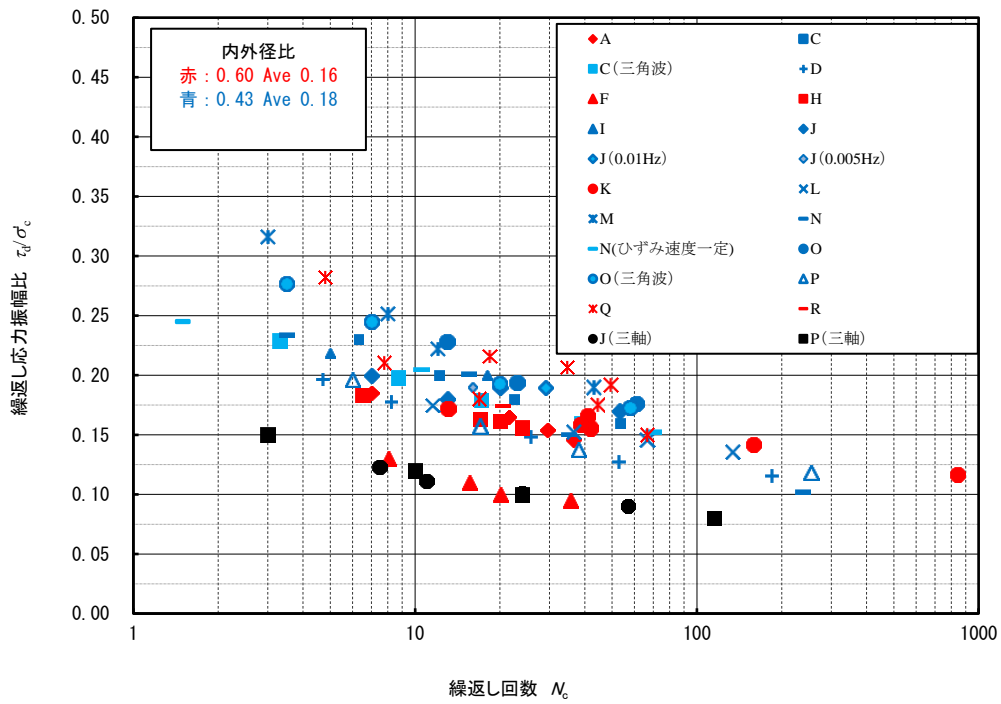
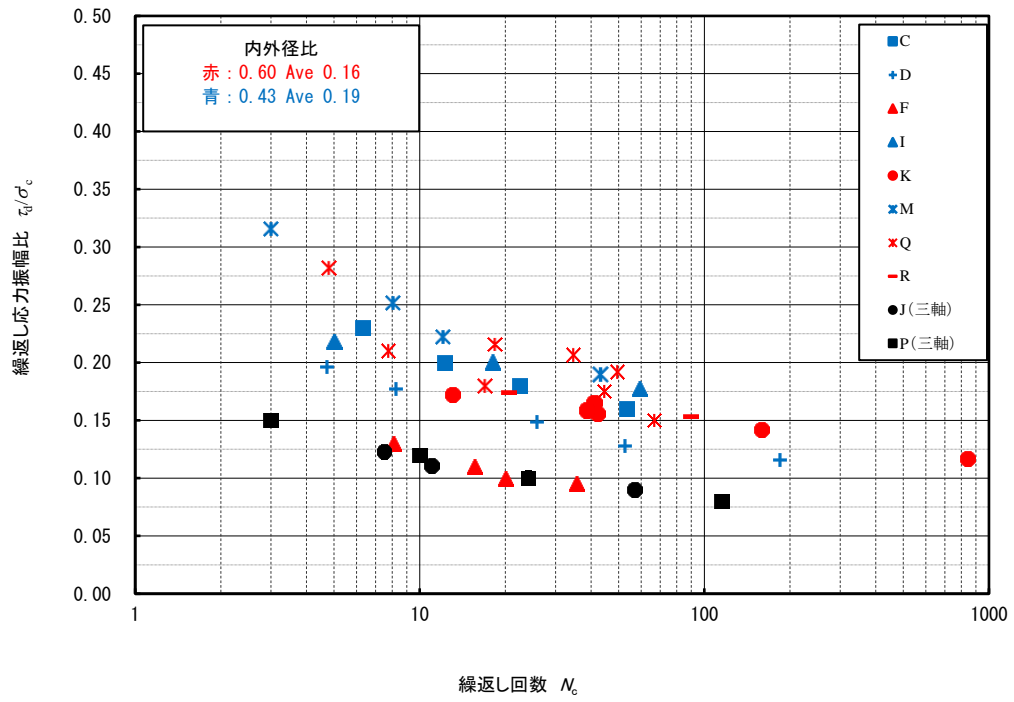
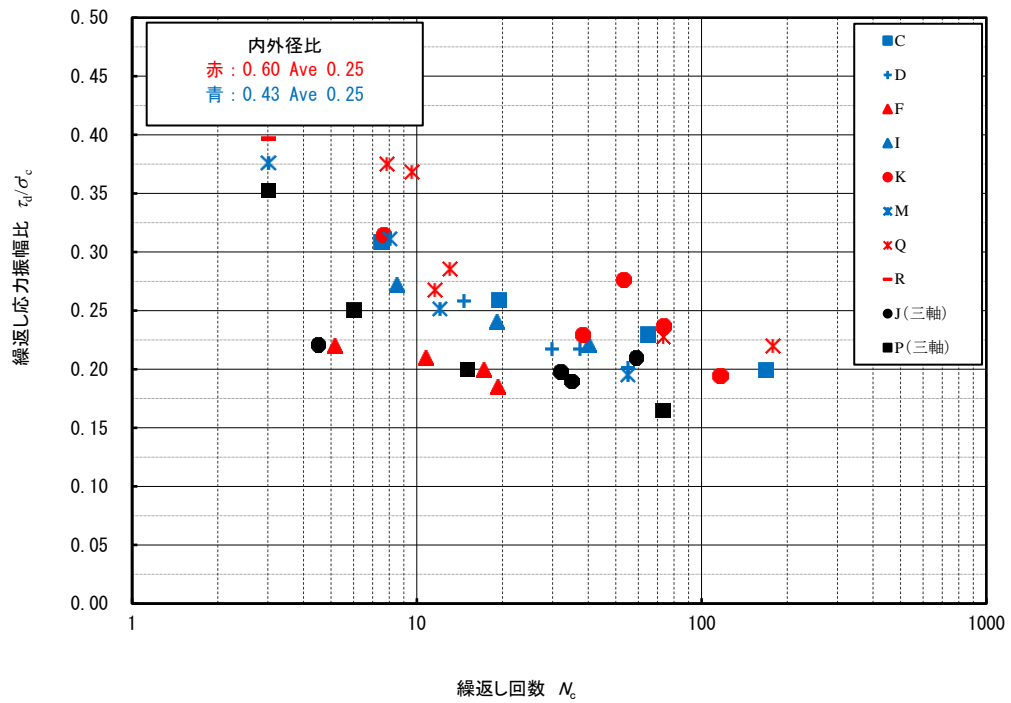


図4.2.1 内外径比による液状化強度の違い (軸応力一定)

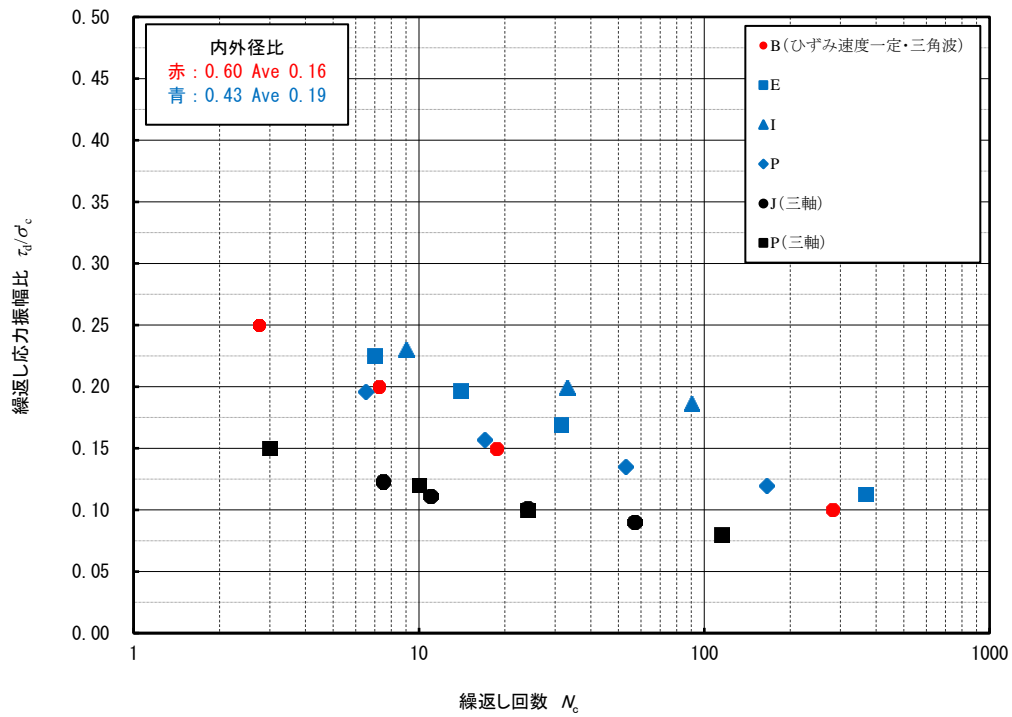


(a)  $D_r=50\%$

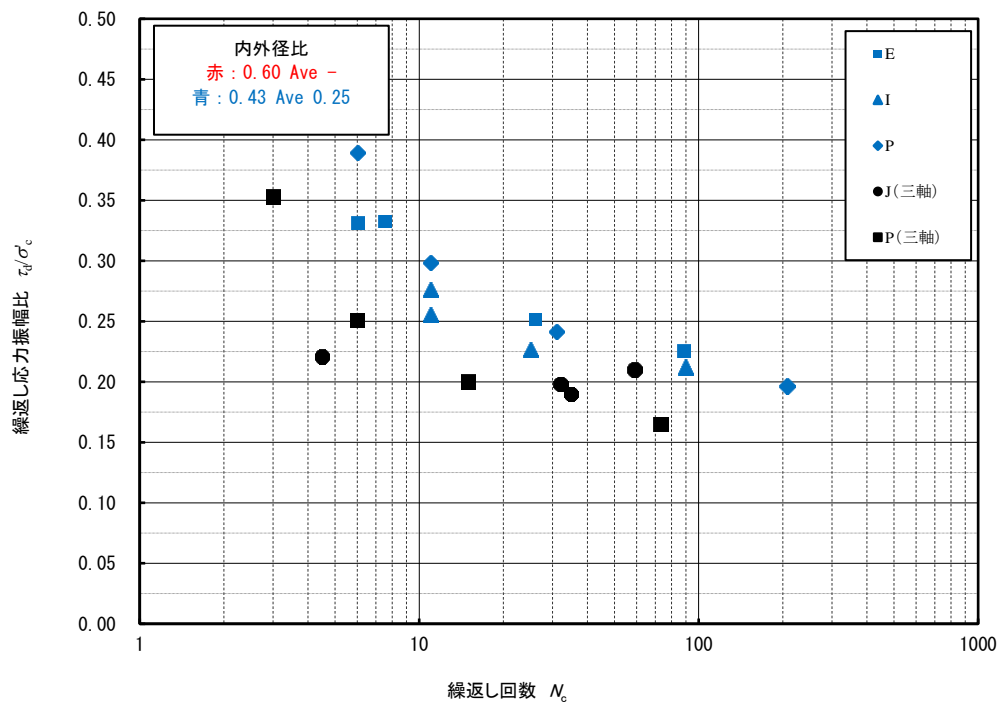


(b)  $D_r=80\%$

図4.2.2 内外径比による液状化強度の違い (軸応力一定 供試体高さ100mm)

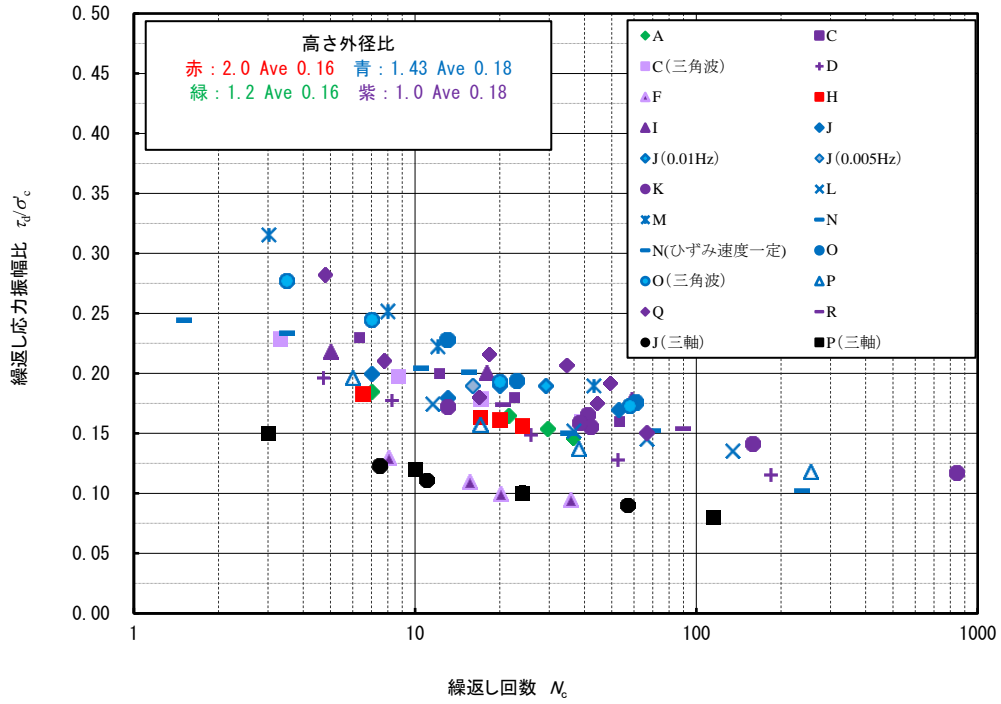


(a)  $D_r=50\%$

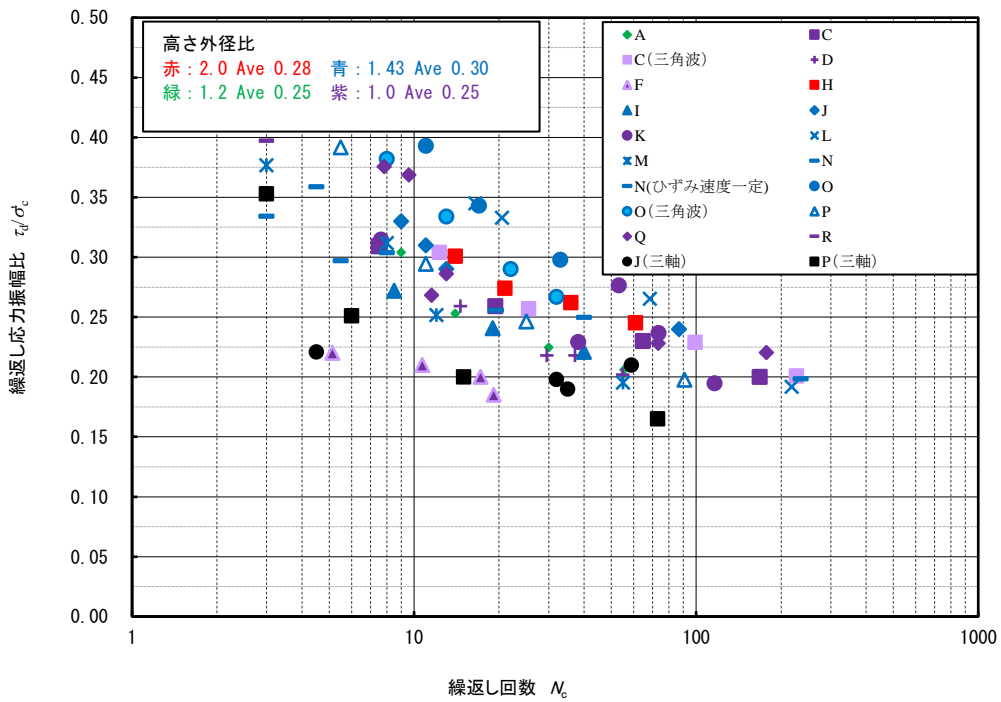


(b)  $D_r=80\%$

図4.2.3 内外径比による液状化強度の違い (軸変位固定)



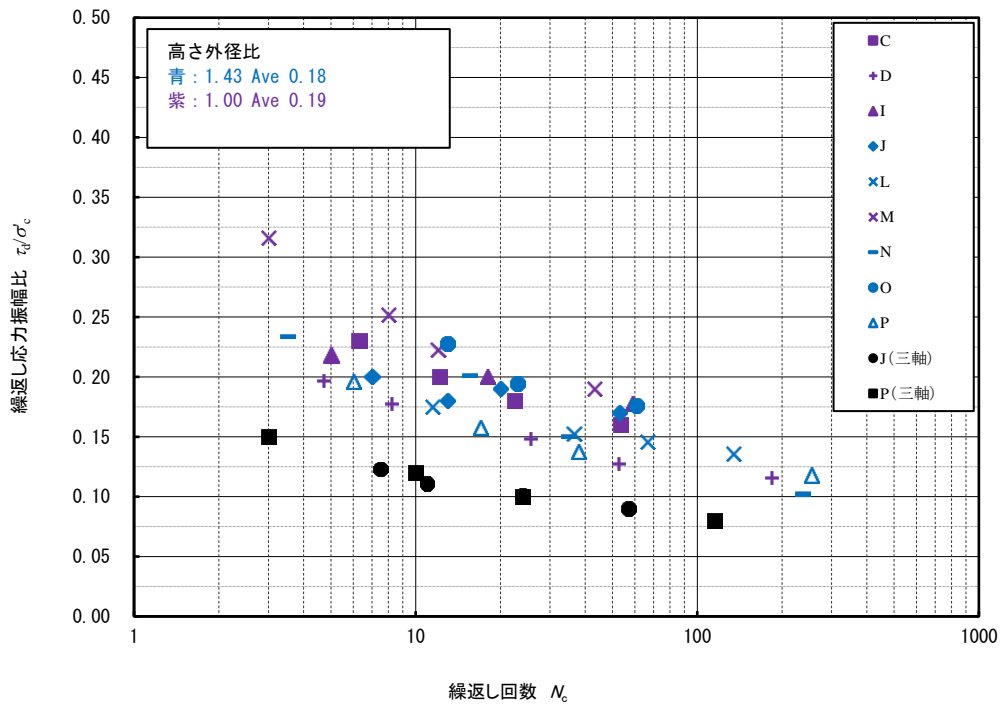
(a)  $D_r=50\%$



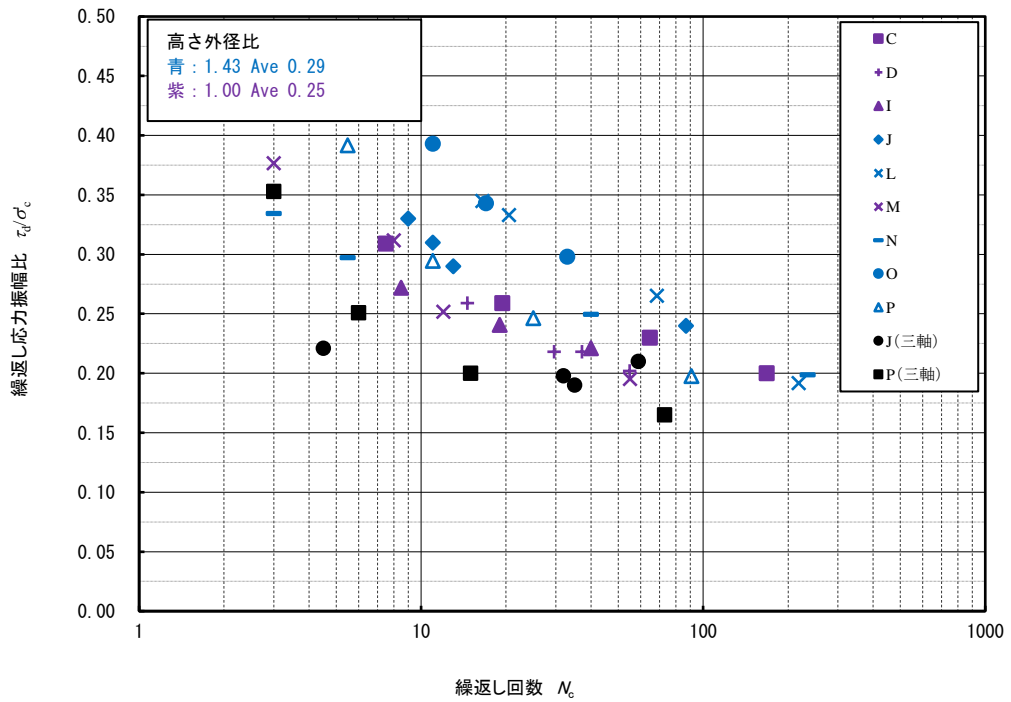
(b)  $D_r=80\%$

図4.2.4 高さ外径比による液状化強度の違い (軸応力一定)



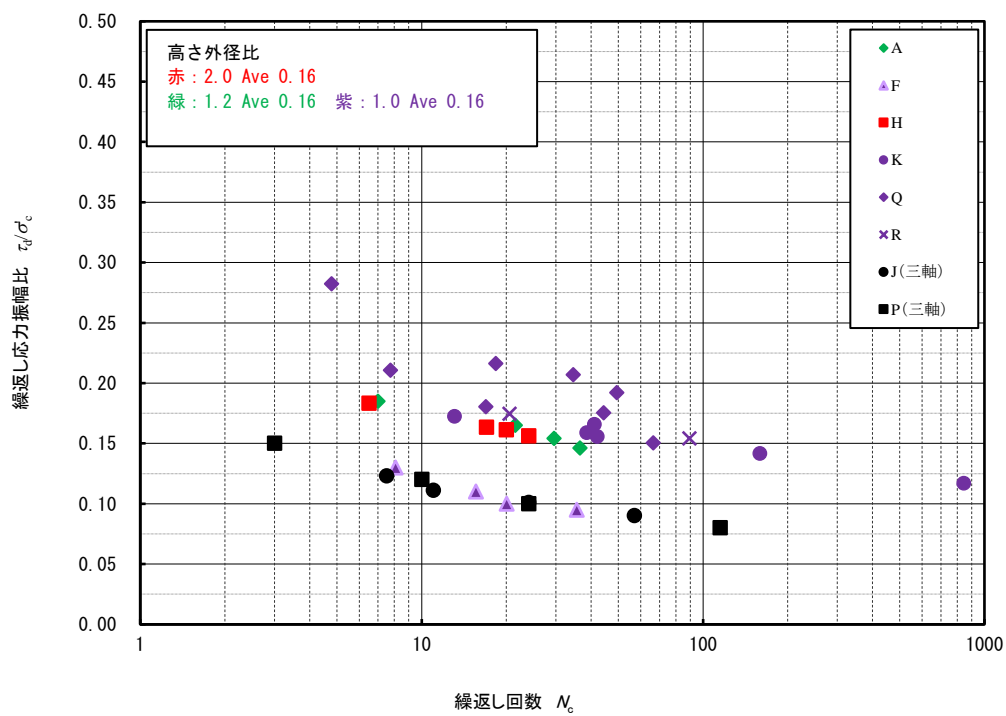


(a)  $D_r=50\%$

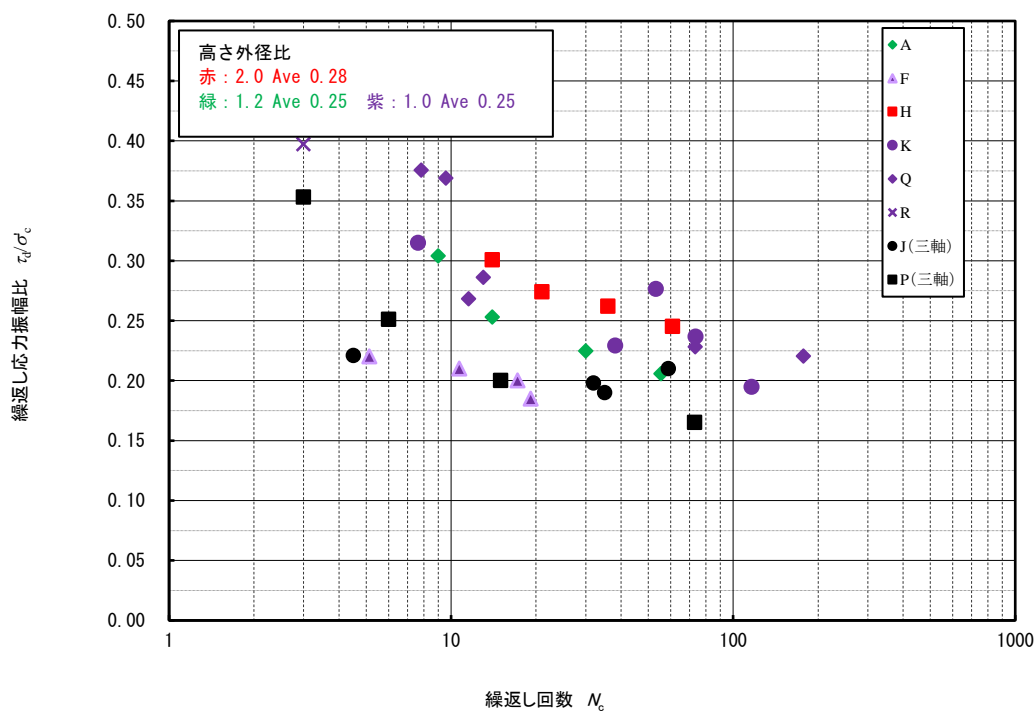


(b)  $D_r=80\%$

図4.2.5 高さ外径比による液状化強度の違い (軸応力一定 内外径比0.43)

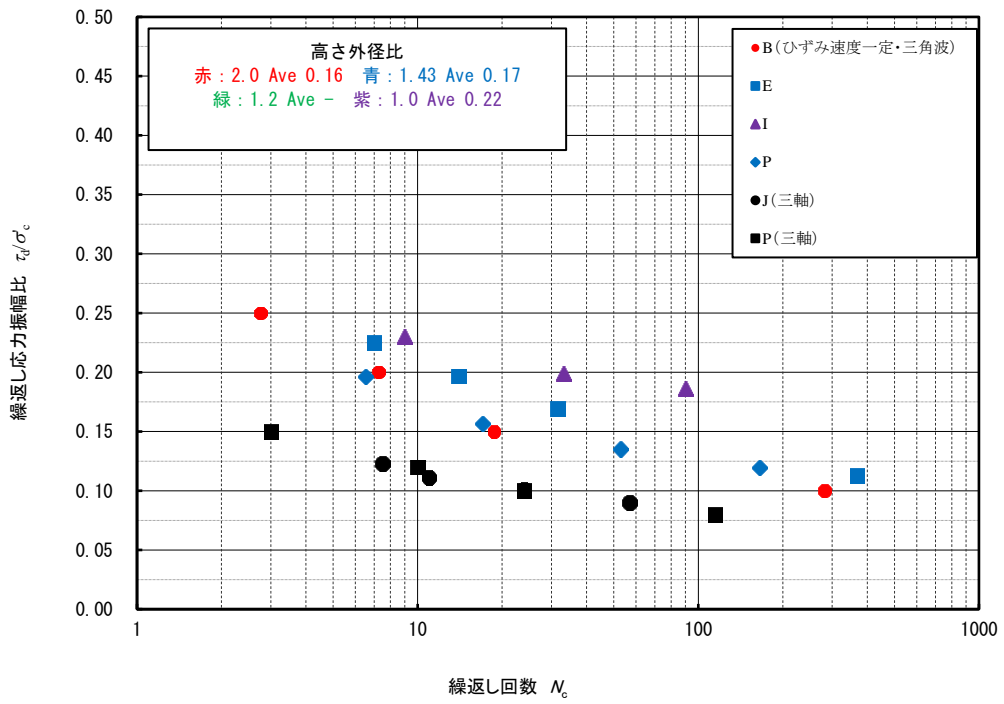


(a)  $D_r=50\%$

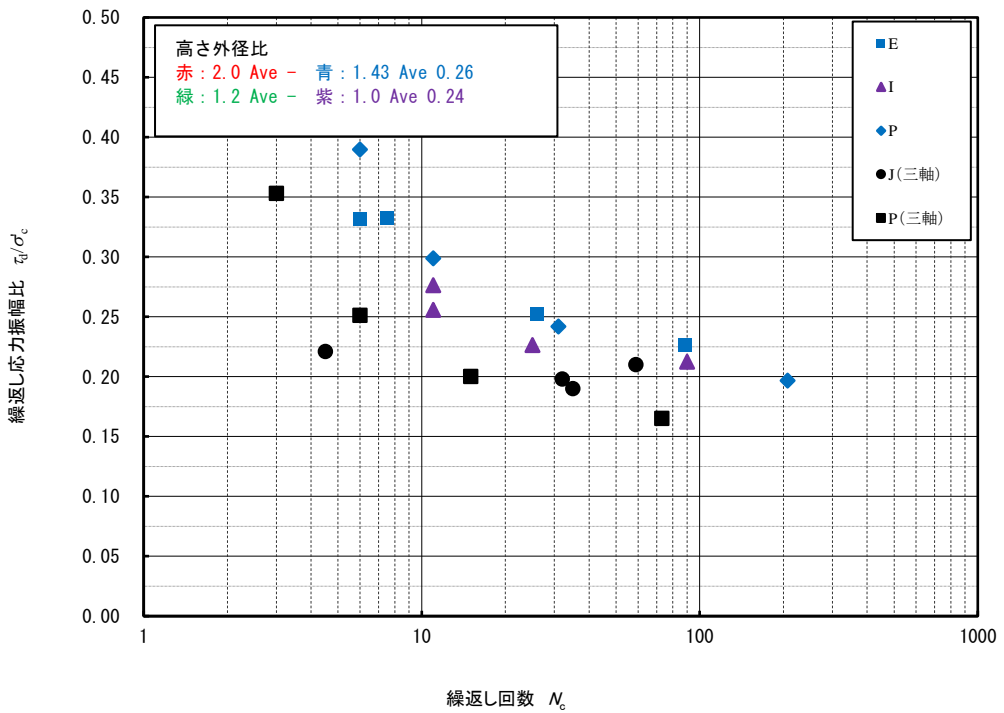


(b)  $D_r=80\%$

図4.2.6 高さ外径比による液状化強度の違い (軸応力一定 内外径比0.60)

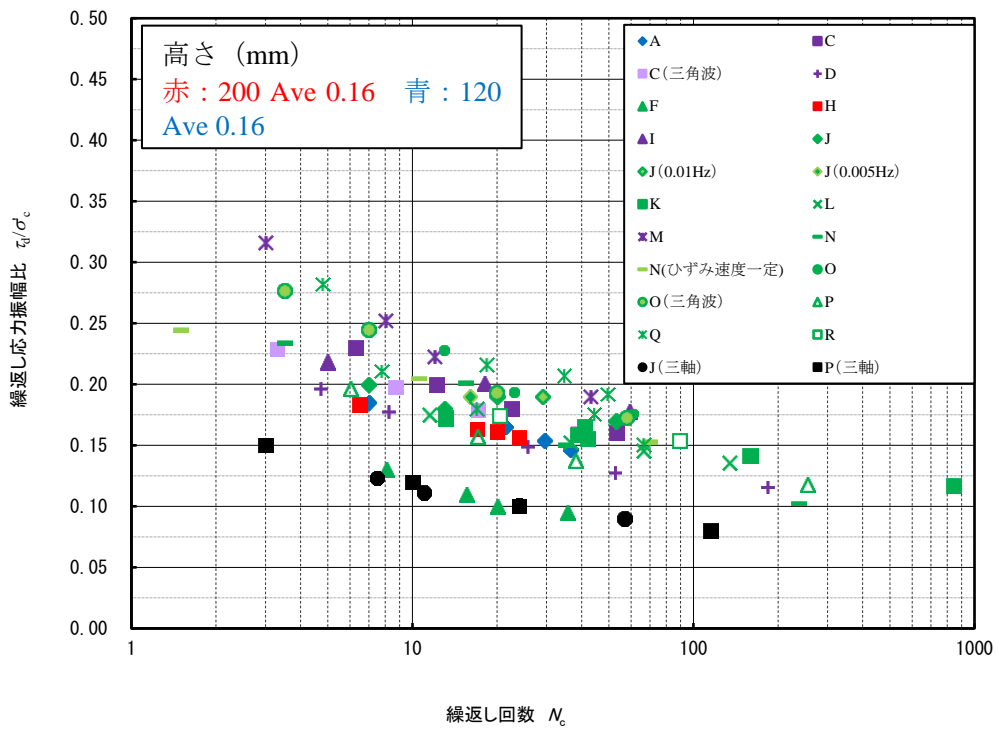


(a)  $D_r=50\%$

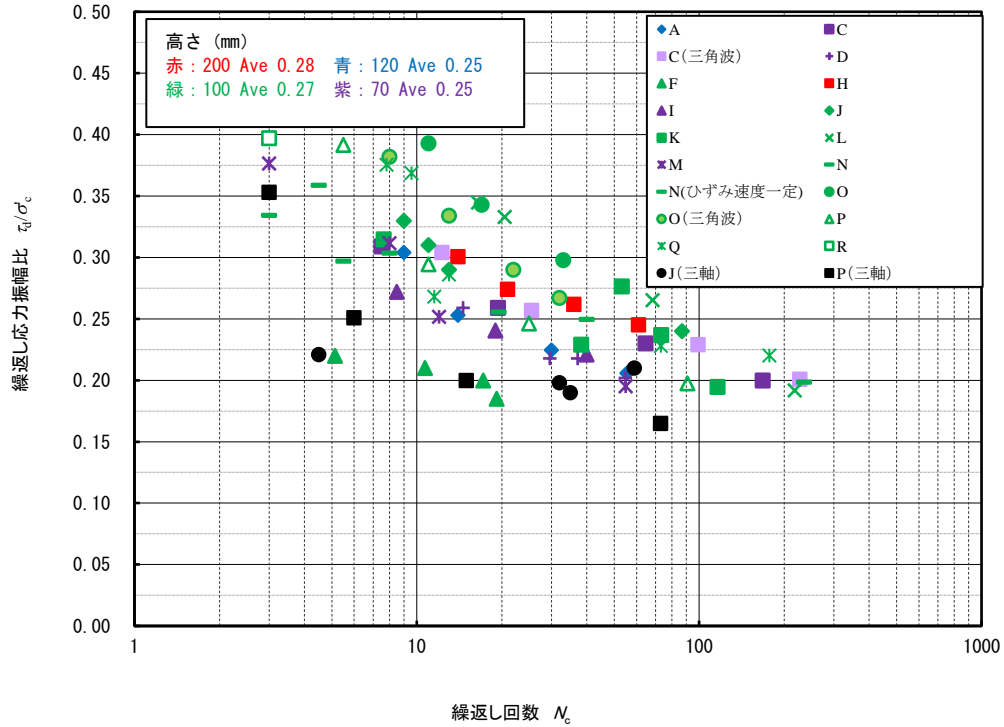


(b)  $D_r=80\%$

図4.2.7 高さ外径比による液状化強度の違い (軸変位固定)

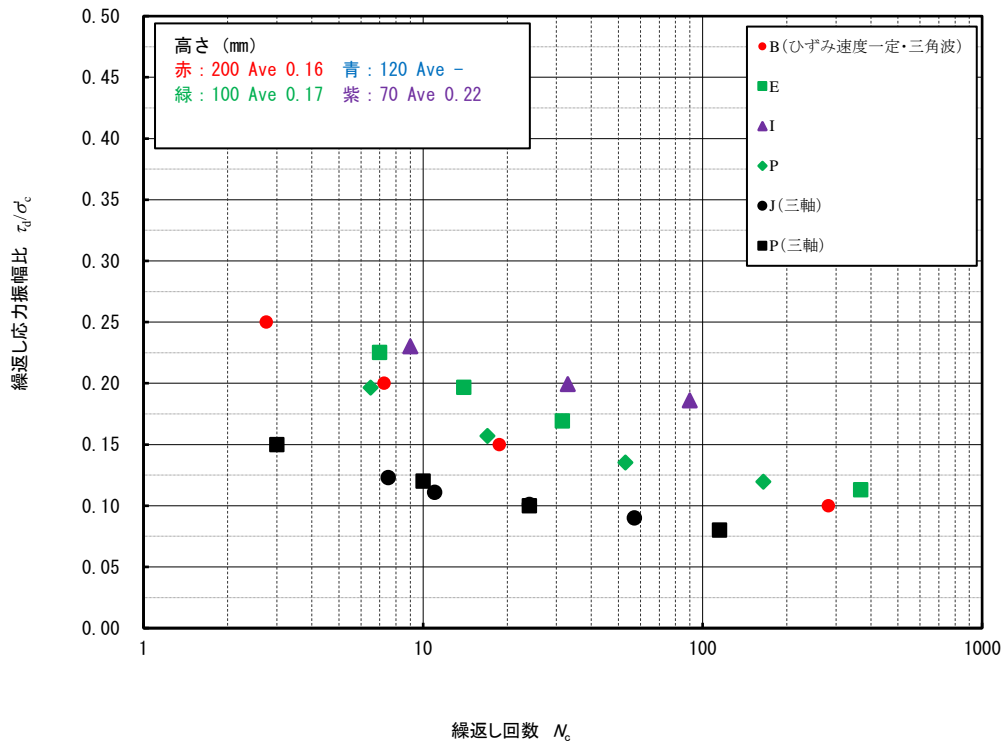


(a)  $D_r=50\%$

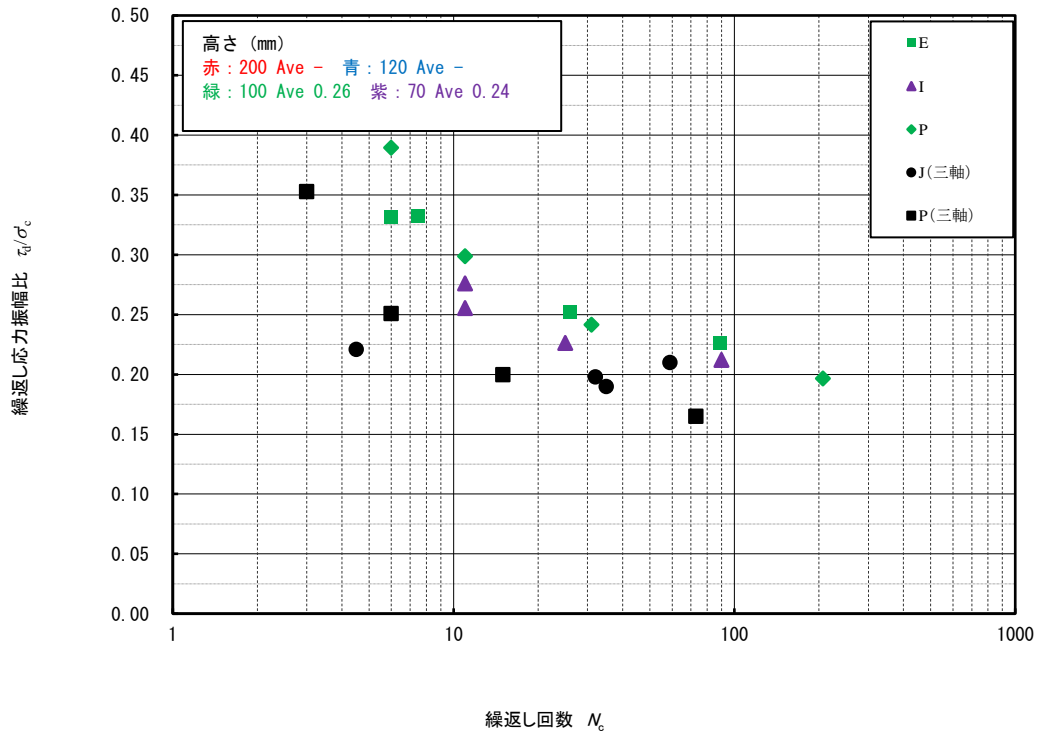


(b)  $D_r=80\%$

図4.2.8 供試体高さによる液状化強度の違い (軸応力一定)



(a)  $D_r=50\%$



(b)  $D_r=80\%$

図4.2.9 供試体高さによる液状化強度の違い (軸変位固定)

### 4.2.3 液状化強度の増加率

$D_r=50\%$ と $D_r=80\%$ での液状化強度増加の比率 ( $R_L(D_r=80\%)/R_L(D_r=50\%)$ ) を図4.2.10～図4.2.12に示す。内外径比の違いによる液状化強度の比較では、内外径比0.43では密度による液状化強度増加率は1.1～2.0程度であり、内外径比0.60 (1.4～1.8) と比べてバラつきが大きい傾向が見られる。

繰返し载荷の際のひずみの均一性を考えた場合は、せん断ひずみの求め方の計算式から、内外径比が小さいと供試体内側と外側で与えられるせん断ひずみの差が大きくなり、ひずみが均一でなくなる。そのため、内外径比はより大きいほうが良いと考えられるが、今回の結果からも内外

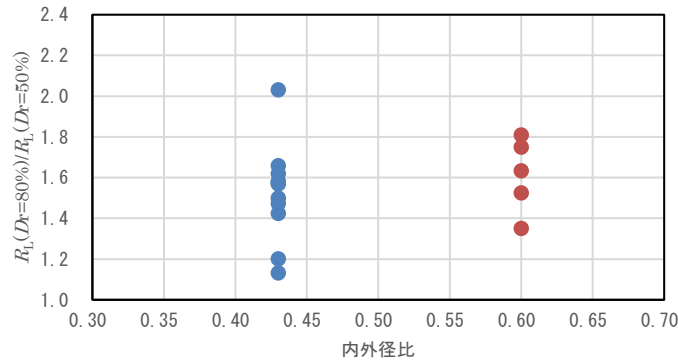


図4.2.10 液状化強度増加率（内外径比による違い：軸応力一定）

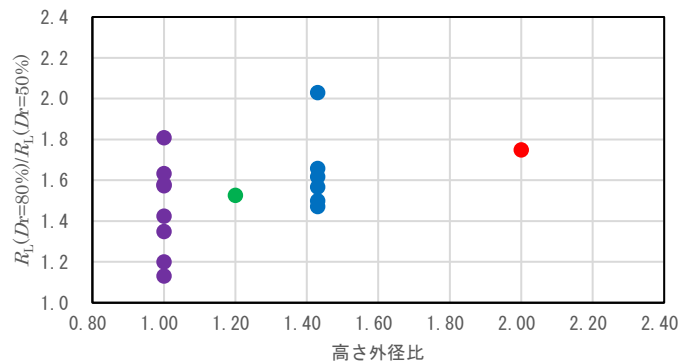


図4.2.11 液状化強度増加率（高さ外径比による違い：軸応力一定）

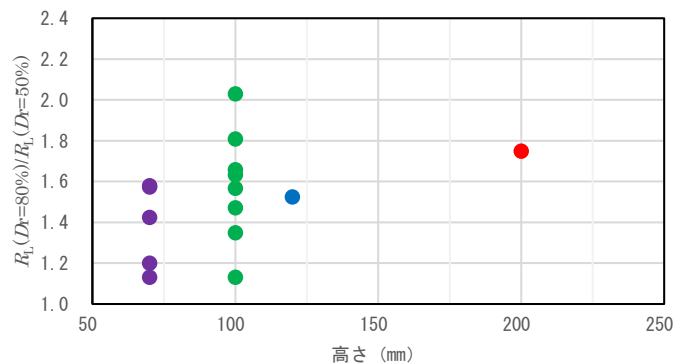


図4.2.12 液状化強度増加率（高さによる違い：軸応力一定）

径比の大小が結果に影響している可能性がある。

高さ外径比および供試体高さによる液状化強度増加率の違いについては、サンプル数が少ないため明瞭な傾向は確認できない。

#### 4.2.4 セン断ひずみ、過剰間隙水圧比の発生の違い

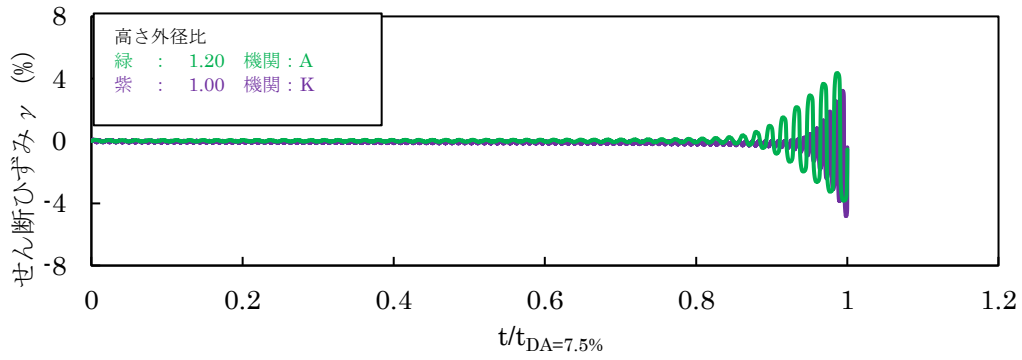
供試体寸法の違いが繰返しせん断時のせん断ひずみや過剰間隙水圧比に与える影響を確認するために、同一の条件で実施したケースでせん断ひずみと過剰間隙水圧比の波形を比較した。繰返しせん断時に与えた応力比が同程度のサンプル数が少ないものの、『軸応力一定・ $D_r=80\%$ ・外径100mm』のケースで、高さ外径比の違いによって特徴的な傾向が確認できた。

図4.2.13にせん断ひずみの波形を、図4.2.14に過剰間隙水圧比の波形を示す。それぞれ繰返しせん断時に与えた応力比が同程度のもの同士を比較しているが、液状化強度に達する時間（繰返し回数）が異なるため、同一条件で比較するために $DA$ が7.5%に達した時を1として時間を正規化した。また、比較として特徴的な傾向が確認できなかったケースとして『軸応力一定・ $D_r=80\%$ ・外径70mm』を図4.2.15、図4.2.16に示す。

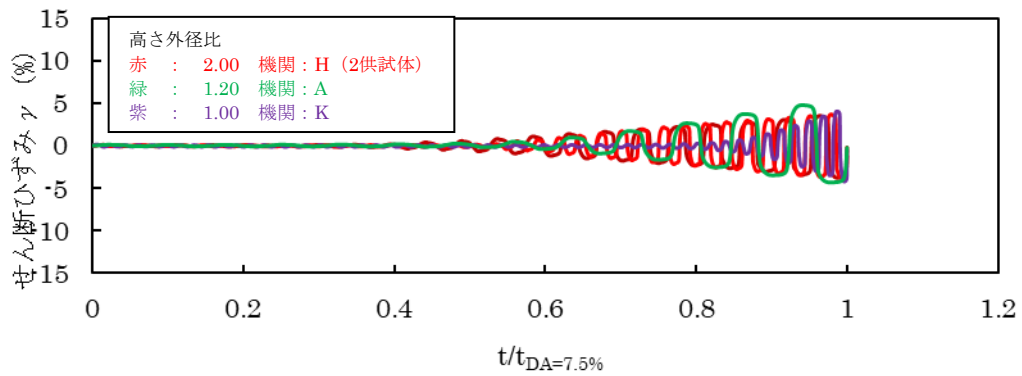
高さ外径比が大きいものほど早い段階からせん断ひずみや過剰間隙水圧比が上昇する傾向が見られた。その他のケース（ $D_r=50\%$ や外径70mm）についてはこのような傾向は確認が出来なかったため、何かしらの原因があると考え、その理由について考察する。

外径100mmは外径70mmに比べて供試体高さが高くなる（表4.2.3参照）。今回の一斉試験は供試体は空中落下法で作製しているため、供試体高さが大きいものを密な状態（ $D_r=80\%$ ）に均質に作製するのが難しいのではないかと考えられる。そのため、結果的に密な供試体（ $D_r=80\%$ ）ではせん断ひずみや過剰間隙水圧比の波形がその他のケースとは違う傾向となり、さらに、液状化強度もバラつきが大きくなる一因になっていると考えられる。

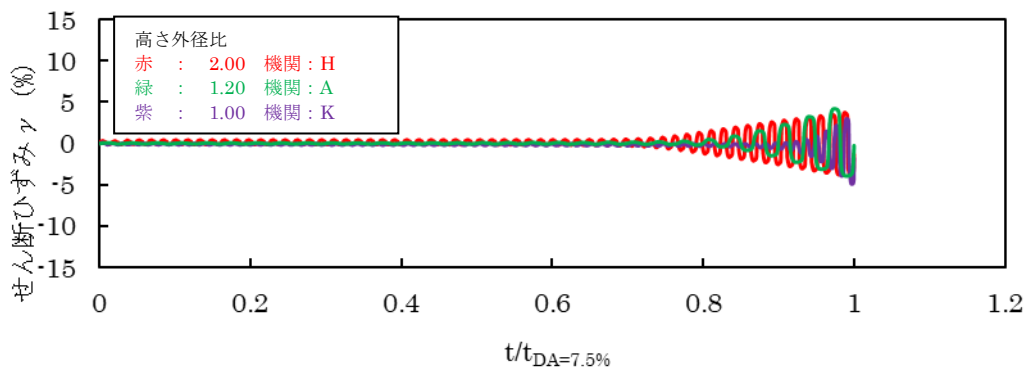
また、前節の「密度の影響」の空中落下法による落下高さでも報告があったとおり、 $D_r=80\%$ は $D_r=50\%$ よりも供試体作製の際の落下高さが、各機関によって差が大きい結果となっている。同じ密度の供試体を作製してはいるが、落下高さによって供試体の初期構造異方性が変化し、それが波形の形状や液状化強度の違いに影響を与えているのではないかと考えられる。



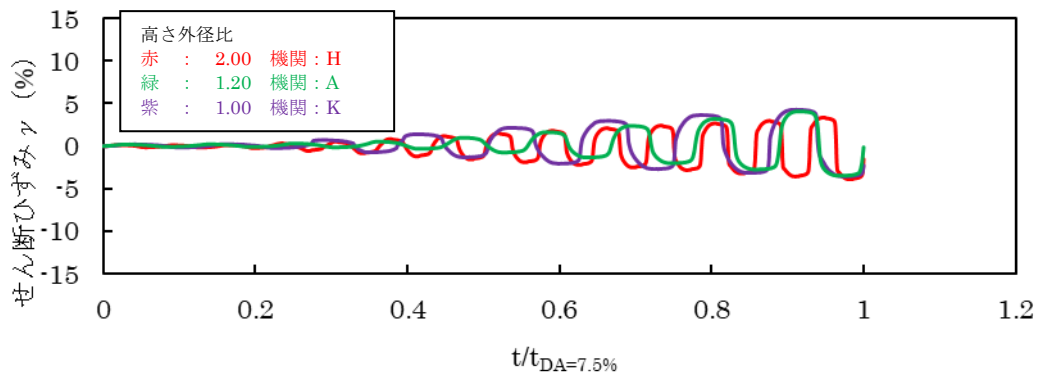
(a)  $\tau_d/\sigma'_c=0.20\sim0.21$ 程度



(b)  $\tau_d/\sigma'_c=0.25\sim0.28$ 程度



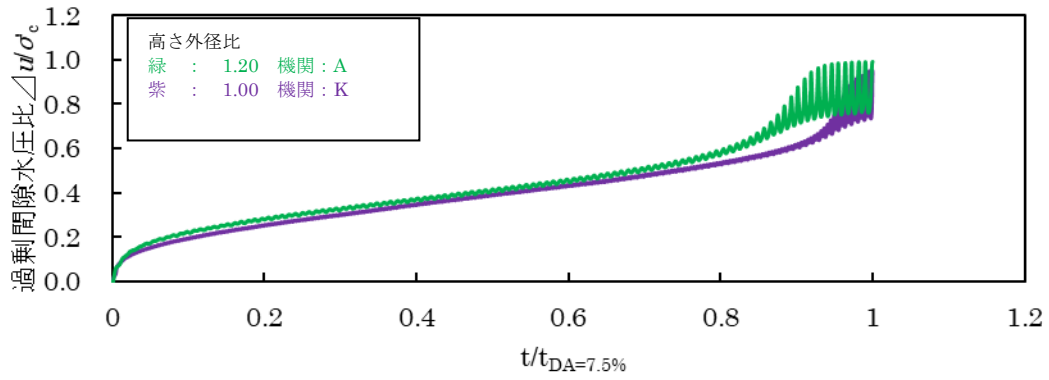
(c)  $\tau_d/\sigma'_c=0.24\sim0.25$ 程度



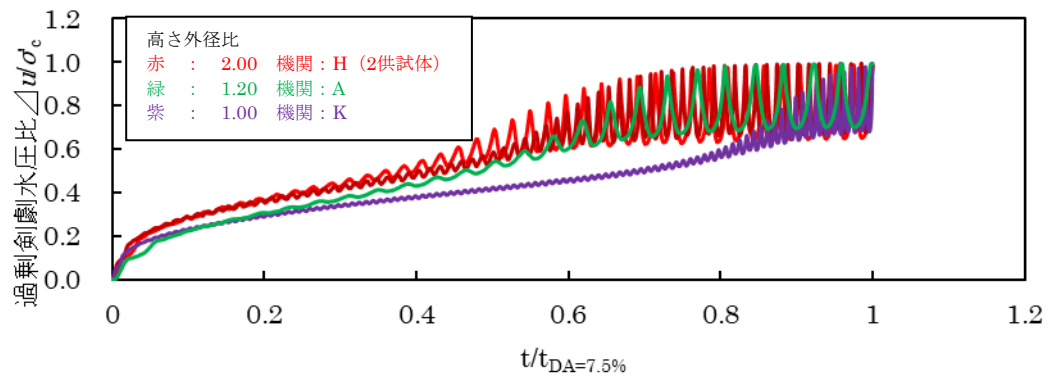
(d)  $\tau_d/\sigma'_c=0.30\sim0.32$ 程度

図4.2.13 せん断ひずみ波形 (外径100mm)

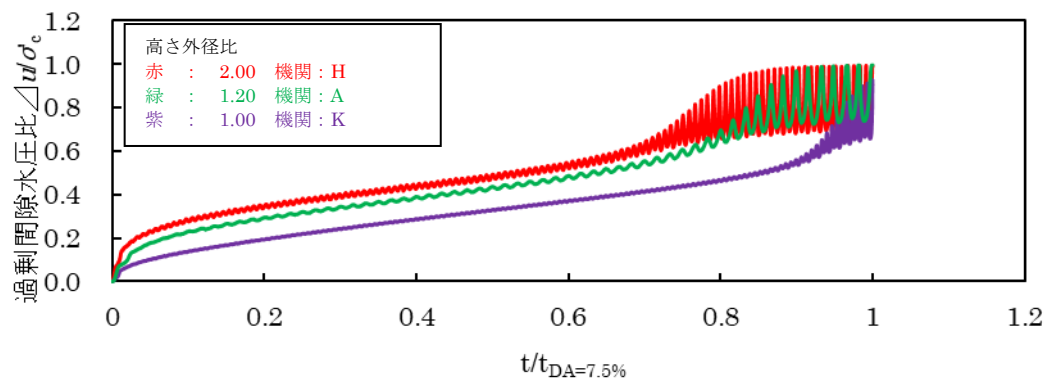




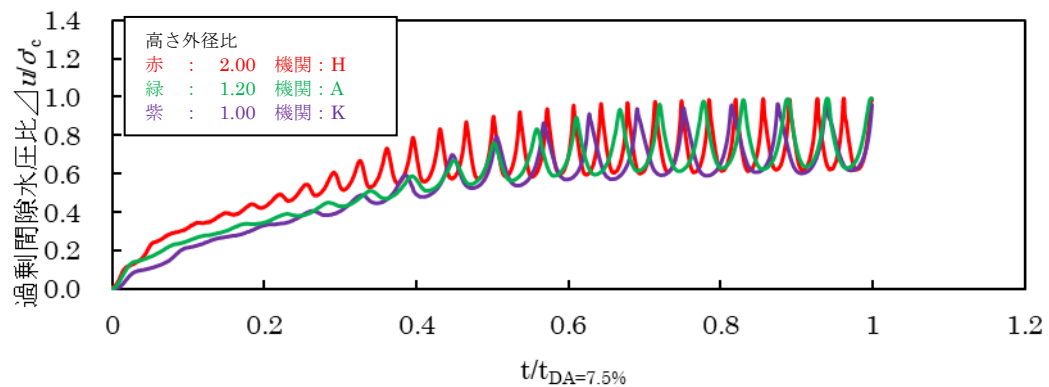
(a)  $\tau_d/\sigma'_c=0.20\sim0.21$ 程度



(b)  $\tau_d/\sigma'_c=0.25\sim0.28$ 程度

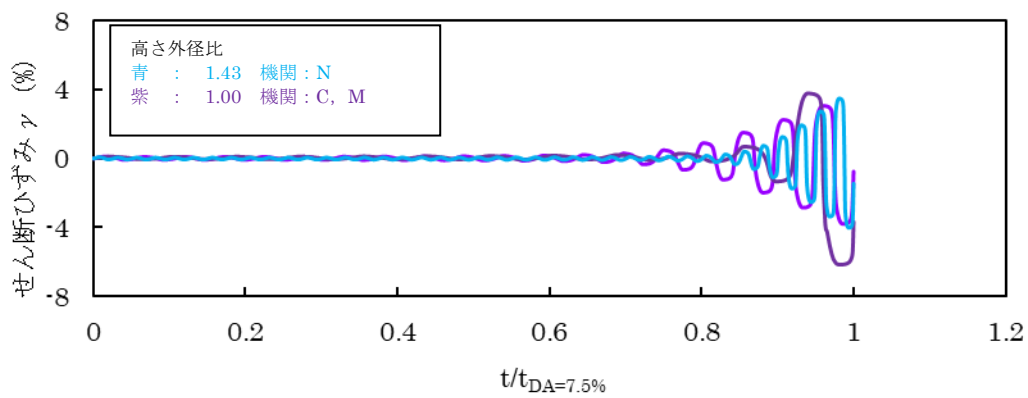


(c)  $\tau_d/\sigma'_c=0.24\sim0.25$ 程度

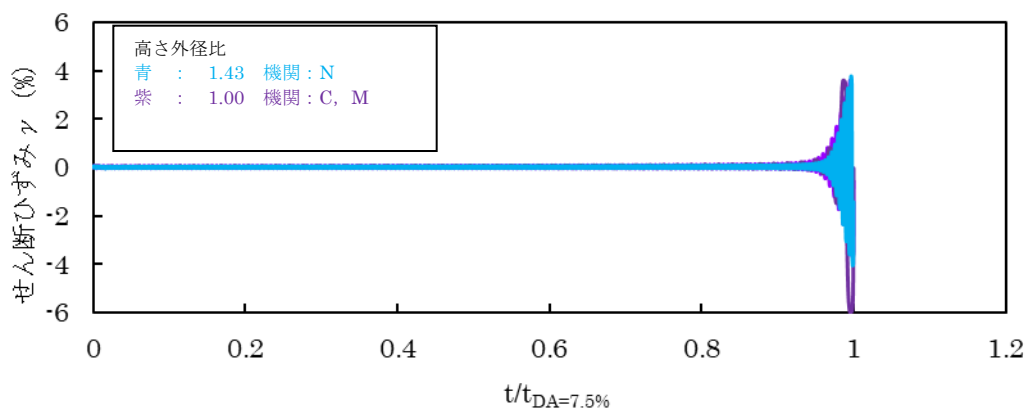


(d)  $\tau_d/\sigma'_c=0.30\sim0.32$ 程度

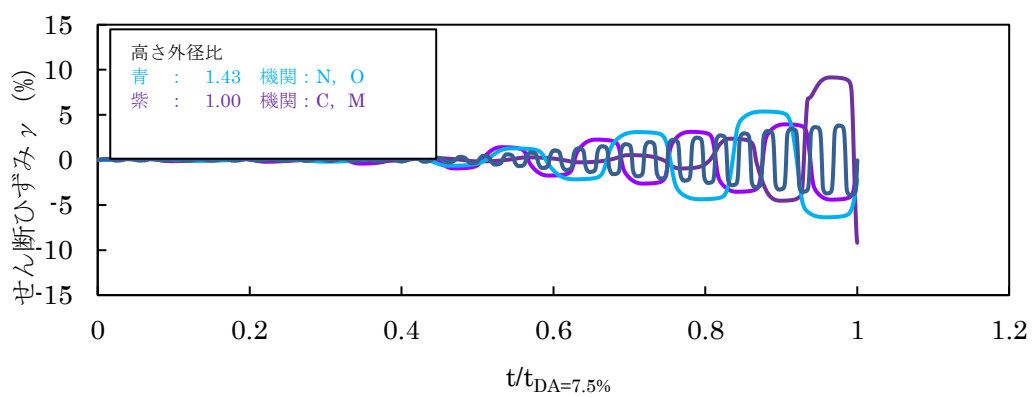
図4.2.14 過剰間隙水圧比波形 (外径100mm)



(a)  $\tau_d/\sigma'_c=0.25\sim0.26$ 程度

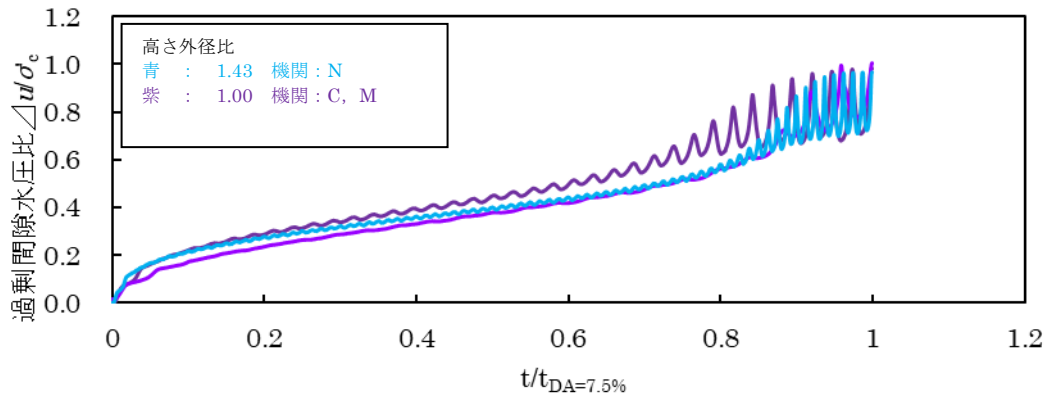


(b)  $\tau_d/\sigma'_c=0.19\sim0.20$ 程度

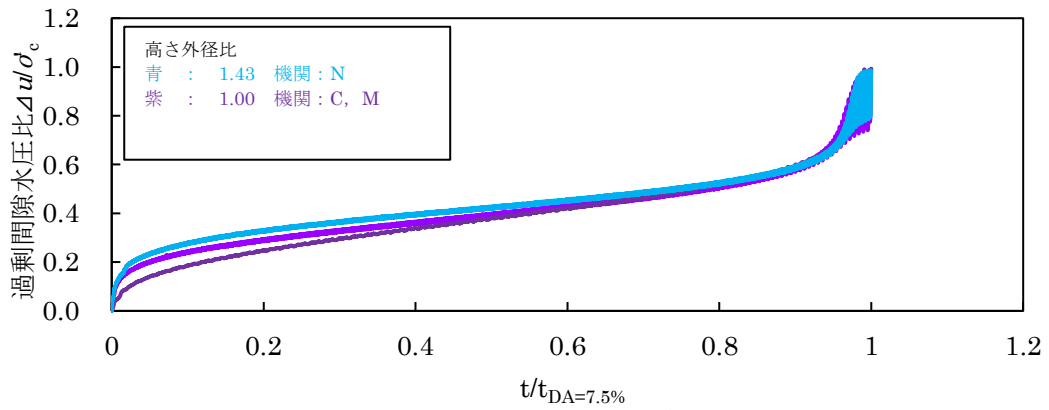


(c)  $\tau_d/\sigma'_c=0.30\sim0.31$ 程度

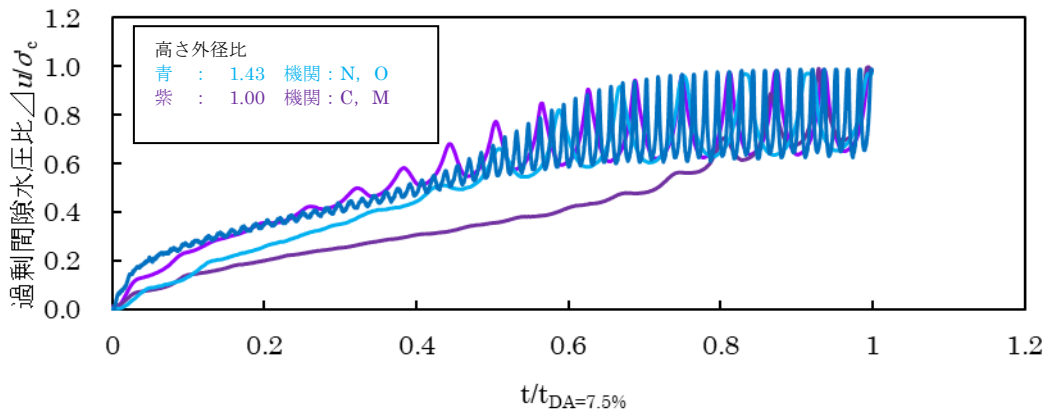
図4.2.15 せん断ひずみ波形 (外径70mm)



(a)  $\tau_d/\sigma'_c=0.25\sim0.26$ 程度



(b)  $\tau_d/\sigma'_c=0.19\sim0.20$ 程度



(c)  $\tau_d/\sigma'_c=0.30\sim0.31$ 程度

図4.2.16 過剰間隙水圧比波形 (外径70mm)

表4.2.3 供試体寸法

外径 (mm)	内径 (mm)	高さ (mm)	内径/外径	高さ/外径
70	30	70	0.43	1.00
70	30	100	0.43	1.43
100	60	100	0.60	1.00
100	60	120	0.60	1.20
100	60	200	0.60	2.00

#### 4.2.5 再圧密時の体積ひずみ

今回の一斉試験では、繰返し載荷後（液状化後）に圧密排水量を計測している。横軸に繰返しせん断時の両振幅最大せん断ひずみを、縦軸に体積ひずみをプロットし、内外径比、高さ外径比、高さ毎にまとめたグラフを図4.2.17～図4.2.19に示す。なお、図4.2.17～図4.2.19は、サンプル数の多い軸応力一定条件のみを抽出した。

再圧密時の体積ひずみについては、いずれのパターンでも明瞭な傾向は見られず、全体的に繰返し載荷時の両振幅最大せん断ひずみが大きいほうが再圧密時の体積ひずみが大きくなる傾向が見られる。

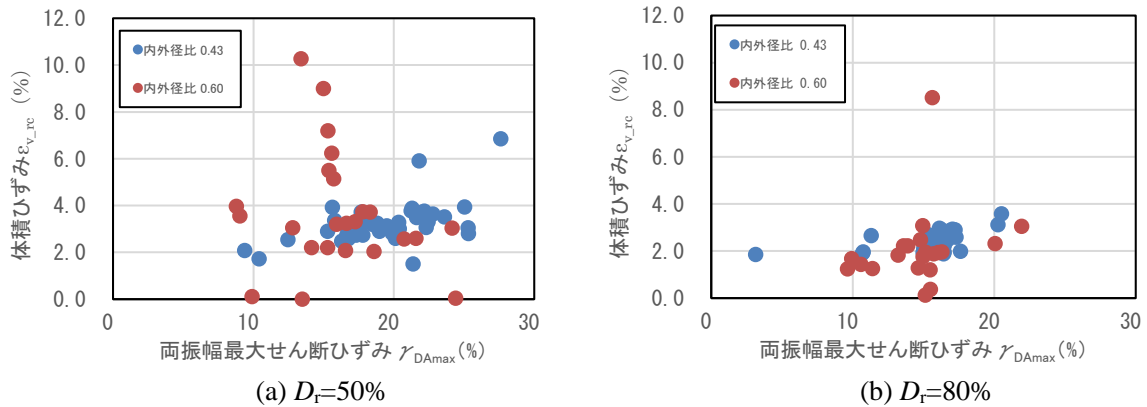


図4.2.17 再圧密時の体積ひずみ（内外径比による比較）

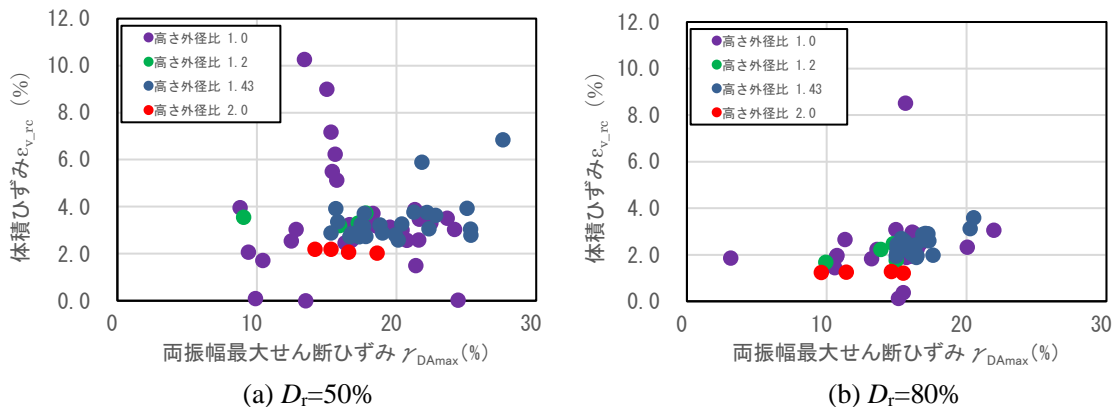


図4.2.18 再圧密時の体積ひずみ（高さ外径比による比較）

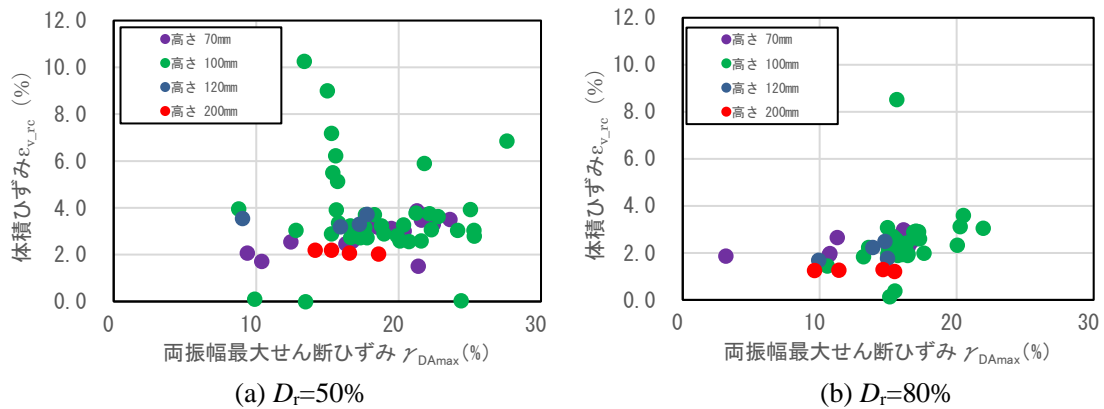


図4.2.19 再圧密時の体積ひずみ（供試体高さによる比較）

#### 4.2.6 まとめ

中空ねじりによる液状化試験の一斉試験結果から供試体の寸法による影響について得られた知見についてまとめる。

(1) 内外径比の違いによる液状化強度の影響について

内外径比の違いによる液状化強度は、今回の一斉試験では明瞭な影響は確認できなかった。

なお、内外径比が小さいほうが密度による液状化強度増加率  $R_L(D_r=80\%)/R_L(D_r=50\%)$  のバラつきが大きくなる傾向が見られた。

そのため、バラつきを考えるとなるべく内外径比を大きくしたほうが良いと考えられる。

(2) 高さ外径比（高さ）の違いによる液状化強度の影響について

一部（軸変位固定で実施したケース）で高さ外径比（高さ）が小さいほうが液状化強度が大きい傾向が見られた。

(3) 中空ねじりと三軸での液状化強度の違いについて

中空ねじりで実施した液状化強度は、三軸で実施した場合と比べて液状化強度が大きい傾向が見られた。

(4) せん断ひずみと過剰間隙水圧比の形状について

高さ外径比（高さ）が大きいほうがせん断ひずみや過剰間隙水圧比が早い段階から発生するが、上昇の度合いはゆるやかなケースが確認できた。

供試体高さが大きい供試体は、空中落下法で密に均質に作製するのが難しい可能性がある。

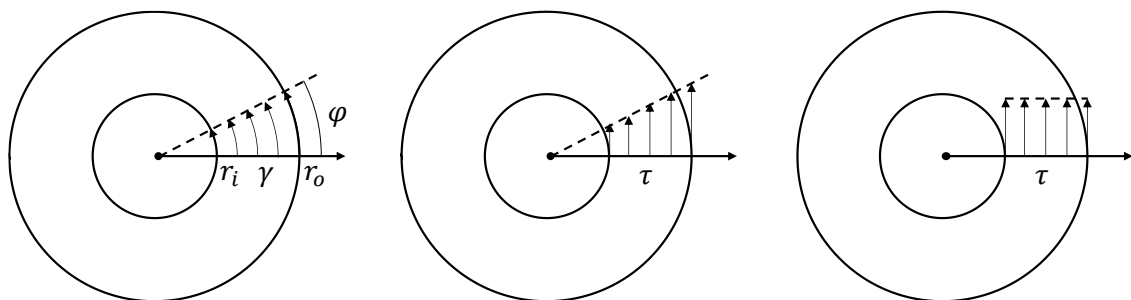
(5) 再圧密時の体積ひずみについて

繰返し载荷後の再圧密では、供試体寸法（形状）の影響は確認できなかった。繰返し载荷時の両振幅最大せん断ひずみが大きいほうが、再圧密時の体積ひずみも大きくなる傾向が確認できた。

### 4.3 平均せん断ひずみ，平均せん断応力の定義の影響

#### 4.3.1 中空ねじりせん断試験におけるせん断ひずみと平均せん断応力の不均質性

地震時の成層地盤内のように，水平方向にせん断応力が卓越する载荷モードを再現できるのが繰返し中空ねじりせん断の利点であり，（ねじり）せん断応力 $\tau$ と（ねじり）せん断ひずみ $\gamma$ が同試験における主要な変数となる。中空供試体の水平断面にトルク $T$ が付加されねじり変形（ねじり角 $\varphi$ ）が起るとき，水平断面においてせん断応力 $\tau$ が生じ，またそれに対応したせん断ひずみ $\gamma$ が生じる。図4.3.1に示すように，供試体の曲率により $\gamma$ は供試体外壁（ $r = r_o$ ，ただし $r$ は半径方向座標）にて最大，内壁（ $r = r_i$ ）にて最小となり，この間で線形に変化する。このせん断ひずみ分布および土試料の構成関係にしたがって $\tau$ も半径方向に一般に非線形変化する。過去にはIshibashi & Sherif<sup>4)</sup>のように供試体高さを外径側で大きくした形状を採用することでせん断応力，せん断ひずみを均一にする試みもあったが，逆に軸ひずみが不均一になるなどの問題により，この方法は一般化していない。よって，中空ねじりせん断試験を要素試験として解釈し，その結果を代表的なせん断応力 $\bar{\tau}$ およびせん断ひずみ $\bar{\gamma}$ （以下，それぞれ平均せん断応力，平均せん断ひずみと呼ぶ）で記述する際には，このような水平断面内での変化を考慮した平均値を用いることになる。この平均の取り方にはいくつかの考え方があり，本節では，まず中空ねじりせん断試験で一般的に用いられている $\bar{\tau}$ と $\bar{\gamma}$ の式とその由来を整理し，その選択により具体的にどの程度の値の差異が生じるかを検討した。そのうえで，今回実施した珪砂7号の一斉試験結果に鑑みて，液状化強度を求める際の $\tau$ と $\gamma$ の式の影響を考察する。



(a) せん断ひずみ分布 (b) せん断応力分布（線形弾性） (c) せん断応力分布（塑性が卓越）

図4.3.1 中空供試体水平断面内のせん断応力とせん断ひずみの分布

#### 4.3.2 平均せん断応力・平均せん断ひずみの式

中空ねじりせん断試験において平均せん断応力・平均せん断ひずみの式として一般的に文献で用いられているものを表4.3.1にまとめた。いずれの式でも，供試体の水平面内の形状の影響は内径 $r_i$ と外径 $r_o$ の比 $r_i/r_o$ のみで表されている。

表4.3.1 中空ねじりせん断試験における平均せん断応力・平均せん断ひずみの式

平均せん断応力	平均せん断ひずみ
$\bar{\tau} = \frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \quad (4.3.1)$	$\bar{\gamma} = \frac{2\varphi(r_o^3 - r_i^3)}{3H(r_o^2 - r_i^2)} \quad (4.3.4)$
備考：Hightら <sup>5)</sup> などで採用。JGS 0551で採用	備考：Hightら <sup>5)</sup> などで採用
$\bar{\tau} = \frac{4T(r_o^3 - r_i^3)}{3\pi(r_o^4 - r_i^4)(r_o^2 - r_i^2)} \quad (4.3.2)$	$\bar{\gamma} = \frac{\varphi(r_o - r_i)}{2H} \quad (4.3.5)$
備考：Sayao & Vaid <sup>6)</sup> ，Wijewickreme & Vaid <sup>7)</sup> などで	備考：JGS 0543・JGS 0551で採用

採用	
$\bar{\tau} = \frac{T}{\pi(r_o^2 + r_i^2)(r_o - r_i)} \quad (4.4.3)$	
備考 : JGS 0543で採用	

式(4.3.1), 式(4.3.4)は中空ねじりせん断試験の古典的論文として影響力が大きい Hight ら<sup>5)</sup>に示されており, 国際的によく採用されている。これら式は以下のように,  $\bar{\tau}$ は局所的なモーメントの総和と全体的なトルク $T$ のつり合い,  $\bar{\gamma}$ は局所的なひずみ $r\varphi/H$ の面積平均によって導かれる。

$$T = \int_{r_i}^{r_o} \int_0^{2\pi} \bar{\tau} r^2 dr d\theta \quad (4.3.6)$$

$$\bar{\gamma} = \int_{r_i}^{r_o} \int_0^{2\pi} \frac{r\varphi}{H} r dr d\theta / \int_{r_i}^{r_o} \int_0^{2\pi} r dr d\theta \quad (4.3.7)$$

ここで,  $H$  : 供試体高さ,  $\varphi$  : ねじり回転角である。式(1)(4)を用いると,

$$\bar{\tau}\Delta\bar{\gamma} = \frac{T\Delta\varphi}{\pi H(r_o^2 - r_i^2)} \quad (4.3.8)$$

ここで,  $\pi H(r_o^2 - r_i^2)$ は供試体体積 $V$ なので,

$$\bar{\tau}\Delta\bar{\gamma} \times V = T\Delta\varphi \quad (4.3.9)$$

よって, 単位体積要素あたりの仕事増分 $\times$ 体積 = 外力 (トルク) と変形 (ねじり) による仕事増分となるので, 式(4.3.1)と式(4.3.4)の組み合わせは要素レベルでのエネルギーと境界力でなされる仕事の整合が担保された組み合わせである。他の式を用いた場合, 一般にこれは担保されない。なお, Wijewickreme & Vaid<sup>7)</sup>, Iwasaki ら<sup>8)</sup>, 吉嶺充俊<sup>9)</sup>などは, 上記(4.3.6)式において水平断面内で一定値 $\bar{\tau}$ を積分していることから, これにより導かれる式(4.3.1)をせん断応力一定状態, つまり完全塑性状態と解釈している (図4.3.1(c))。今回の一斉試験では, 付録2の表-2中の「7. 試験結果の整理」にあるように, 式(4.3.1)(4.3.4)を用いて結果を整理している。

式(4.3.2)はせん断応力 $\tau$ がせん断ひずみと同様に半径方向に線形に分布 ( $\tau = \tau_0 r$ ) する (図4.3.1(b)) と仮定して導出されるものである。このとき,

$$T = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} \tau_0 r^3 dr d\theta \quad (4.3.10)$$

であるから,

$$\tau_0 = \frac{2T}{\pi(r_o^4 - r_i^4)} \quad (4.3.11)$$

これを用いて式(4.3.7)と同じように $\tau = \tau_0 r$ を面積分すると (つまり式(4.3.7)で $r\varphi/H$ を $\tau_0 r$ で置き換えて $\bar{\tau}$ を求めれば) 式(4.3.2)が得られる。式(4.3.2)とせん断ひずみの式(4.3.4)を組み合わせると,

$$\frac{\Delta\bar{\tau}}{\Delta\bar{\gamma}} = \frac{2H\Delta T}{\pi\Delta\varphi(r_o^4 - r_i^4)} \quad (4.3.12)$$

となる。ここで, せん断剛性を $G$ とするとトルク増分 $\Delta T$ は線形弾性仮定時には

$$\Delta T = \int_{r_i}^{r_o} G \frac{r\Delta\varphi}{H} \cdot r \cdot 2\pi r dr = G \frac{\pi\Delta\varphi(r_o^4 - r_i^4)}{2H} \quad (4.3.13)$$

なので, 式(4.3.12)より

$$\frac{\Delta\bar{\tau}}{\Delta\bar{\gamma}} = G \quad (4.3.14)$$

となる。よって式(4.3.2)と式(4.3.1)の組み合わせは、微小ひずみ変形時の線形弾性的なせん断剛性 $G$ を正しく与えるものである。

式(4.3.5)はせん断ひずみの式として地盤工学会基準 (JGS 0543・JGS 0551) で採用されているものであり、中間半径 $r = (r_o + r_i)/2$ でのせん断ひずみに相当する。よってこの式によるせん断ひずみは、厳密には水平断面内での(面積)平均値ではなく中間値ということになる。せん断応力の式として、JGS 0551では式(4.3.1)を採用しているが、JGS 0543では式(4.3.3)を用いている。式(4.3.3)は、線形弾性変形を仮定し、せん断応力が $\tau = \tau_o r$ として表されるとして、 $\tau_o$ に式(4.3.11)、 $r$ に上記の中間半径 $r = (r_o + r_i)/2$ を用いたものである。つまり、式(4.3.3)は線形弾性変形時の中間半径でのせん断応力を表すものである。

以上に見るように、いずれも異なる前提に基づいたものであり、どれが正しい、というものはないため、理想的にはどの式を用いても算出される値が大差ないような試験条件が望ましく、これは先述のように、理論的にはもっぱら供試体の内外径比 $r_i/r_o$ で決まり、 $r_i/r_o$ が1に近づくほど、つまり肉薄の供試体ほど応力・ひずみ分布は均一となり、全ての式からの値が収束する。

#### 4.3.3 各式により算出されるせん断応力・せん断ひずみ値の相違とその影響

表4.3.1に示した各式により算出されるせん断応力・せん断ひずみ値の相違を、それぞれ式(4.3.1)、式(4.3.4)を基準とした比の形で評価すると、いずれも $r_i/r_o$ のみの関数となり、図4.3.2のように示される。地盤工学会基準 JGS 0550による中空ねじり試験用供試体の作製方法によれば、砂質土については外径70mm以上、内径30mm以上を標準とする、と記述があるが、これに従えば $r_i/r_o$ は1未満のあらゆる値をとり得ることになる。しかし、一斉試験報告にもみられるように、実際には国内では $r_i/r_o=30\text{mm}/50\text{mm}=0.60$  (16機関中6機関)あるいは $r_i/r_o=15\text{mm}/35\text{mm}=0.43$  (同10機関)が事実上の標準となっているようである。これには、原位置不攪乱試料を用いる場合は採取試料寸法の制約上、外径70mmよりも大きな供試体を用意するのが困難であるという理由もあると思われる。図4.3.2に示すように、特にせん断応力については式(4.3.1)と式(4.3.3)の相違は $r_i/r_o=0.43$ では9.2%にも達している。一方、せん断ひずみについては、式(4.3.4)と式(4.3.5)の相違は $r_i/r_o=0.43$ でも5.0%程度である。平均せん断応力・平均せん断ひずみを求める際に用いる式の相違が液状化強度曲線に与える影響については以下のように議論できる。標準的な液状化試験は(平均)せん断応力振幅制御で行うため、制御すべき平均せん断応力の算出法が異なる場合、異なる条件で試験をすることになるが、これは結果として得られる液状化強度曲線(応力比 $\tau/\sigma'_o$ —液状化までのサイクル数 $N$ :ただし $\sigma'_o$ 'は初期有効応力)が縦軸( $\tau/\sigma'_o$ 軸)方向にシフトすることに対応し、読み取る $R_{L20}$ の値がその分だけずれることになる。つまり、平均せん断応力値の不確定性はそのまま $R_{L20}$ の不確定性となる。



せん断ひずみが算出法によって異なる値として得られる場合、これはせん断ひずみ振幅に基づく液状化発生判断のタイミングの読み取り、つまり液状化までのサイクル数 $N$ の解釈に影響を与えることになる。しかし、せん断ひずみ振幅の不確定性の影響は一般に小さいといえる。これは、図4.3.3に示す例より説明される。図4.3.3は $r_i/r_o=0.43$ 、相対密度50%あるいは80%の条件より、応力振幅が大きいケースと小さいケースでのせん断ひずみ時刻歴の例である。ここではせん断ひずみ両振幅 $\gamma_{DA}=7.5\%$ を液状化発生の基準としたが、いずれの例においても $N$ のカウントが $\bar{\gamma}$ の式に影響されることはない。図4.3.3(c)(d)のように密度が高い条件ではせん断ひずみの増加が緩やかであり、用いる平均せん断ひずみ式によって $N$ の読み取りが $\pm 1$ 異なって判定される可能性もあるが、このようなケースではそもそも $N$ が大きいいため、その影響は小さい。また、図4.3.3(a)(b)のように密度が低い条件では、液状化が発生するサイクルのひずみ発展は急激であるため、5%程度の平均せん断ひずみの不確定性は $N$ の読み取りに影響しない。なお、当然ながら過剰間隙水圧増加量に基づいて液状化判定を行う場合は平均せん断ひずみの定義はその判定に無関係である。

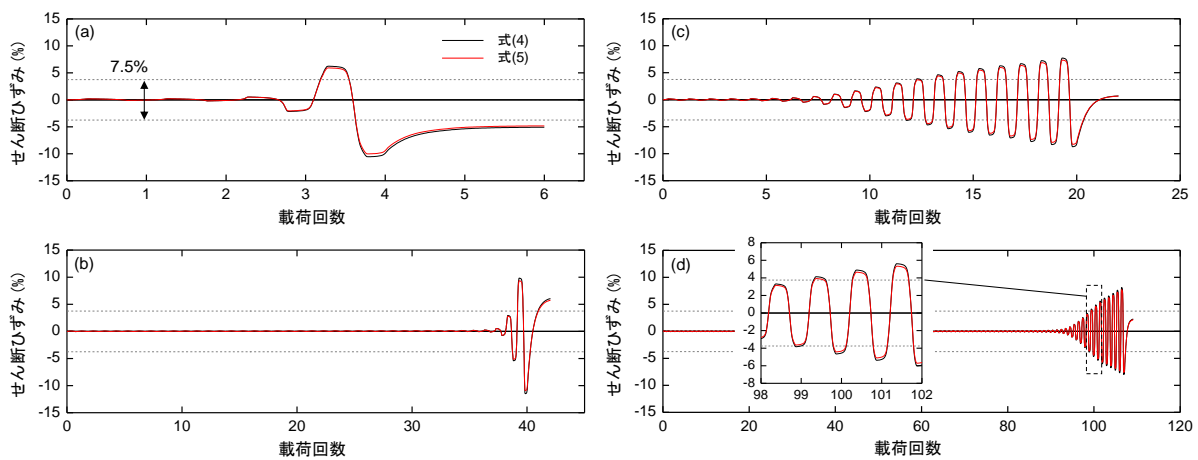


図4.3.3 せん断ひずみの時刻歴の例

(a)  $D_r=50\%$ ,  $\tau/\sigma'_0=0.229$ , (b)  $D_r=50\%$ ,  $\tau/\sigma'_0=0.160$ , (c)  $D_r=80\%$ ,  $\tau/\sigma'_0=0.309$ , (d)  $D_r=80\%$ ,  $\tau/\sigma'_0=0.229$

一斉試験の結果から得られた $R_{L20}$  ( $\gamma_{DA}=7.5\%$ ) を $r_i/r_o$ に対してまとめたものが図4.3.4である。ここでは式(4.3.1), (4.3.4)に基づいて平均せん断応力・平均せん断ひずみを計算している。なお、外径に対して高さが必ずしも統一されていないため、 $H/r_o$ も変数として結果への評価を検討すべきであるが、供試体寸法の影響の議論は4.1, 4.2節に譲る。図4.3.4では、全体として相対密度  $D_r$

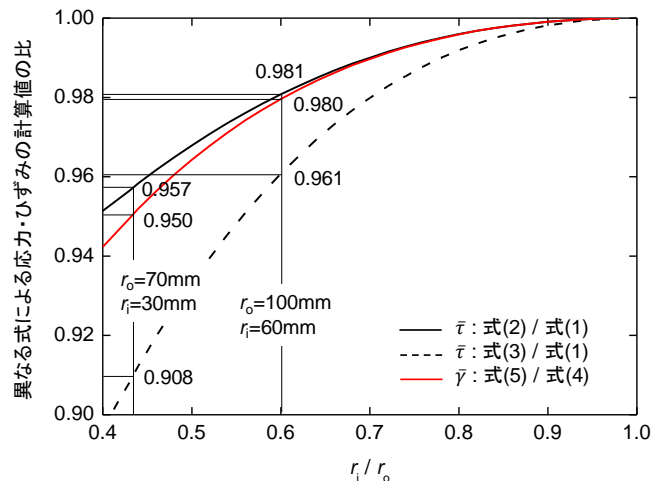


図4.3.2 異なる導出式による $\bar{\tau}$ および $\bar{\gamma}$ の比較

が50%・80%のケースともに、 $r_i/r_o$ の増加によって液状化強度が減少しているようにも見えるが、 $r_i/r_o=0.60$ を採用した1機関（機関 F）が例外的に低い液状化強度を報告していることに留意が必要である。この1データセットを除くと $r_i/r_o=0.43$ と $0.60$ で液状化強度の平均値はより近いものになる。平均せん断応力を計算するにあたり、仮に式(1)のかわりに式(4.3.3)を用いると、せん断応力は図4.3.2にしたがって $r_i/r_o=0.43$ で9%、 $r_i/r_o=0.60$ で4%小さく計算される。これをふまえて式(3)に基づいて $R_{L20}$ の平均値を計算したものを表4.3.2に示す。式(4.3.3)の適用によって $r_i/r_o$ による $R_{L20}$ の相違は小さくなる。しかし、供試体作製の過程も含め、供試体寸法や $r_i/r_o$ が違うことによる液状化強度の相違が実際に存在する可能性もあり、 $r_i/r_o$ による $R_{L20}$ の相違が小さくなること自体が必ずしも式の優位性を示すものではない。

#### 4.3.4 まとめ

以上では、平均せん断応力・平均せん断ひずみの式を通して $r_i/r_o$ が液状化強度 $R_{L20}$ に与える影響を見るために一斉試験結果を $r_i/r_o$ に対してまとめた。これらの式の組合せによる特徴と適用の現状をまとめると表4.3.3のようになる。実験結果から解釈される液状化強度が結果として $r_i/r_o$ の影響を受けづらくなる、という点では式(4.3.3)の適用に利点があるようにも思えるが、これを式(4.3.3)の適用を推奨する根拠とするには、表4.3.2に示す通りデータ数が限定的である。各式には前述のようにそれぞれ一長一短があるものの、液状化発生時には供試体全体が塑性状態になっていること、またエネルギーの整合性は本質的な物理からの要件であることをふまえると、式(4.3.1)、式(4.3.4)の採用が少なくとも理論的には推奨されるべきと考えられる。長期的には、他の地盤工学会基準（JGS 0543, JGS 0551）との整合性もふまえ、中空ねじりせん断試験に関わる基準全てにおいて方針を再整理することが望まれる。

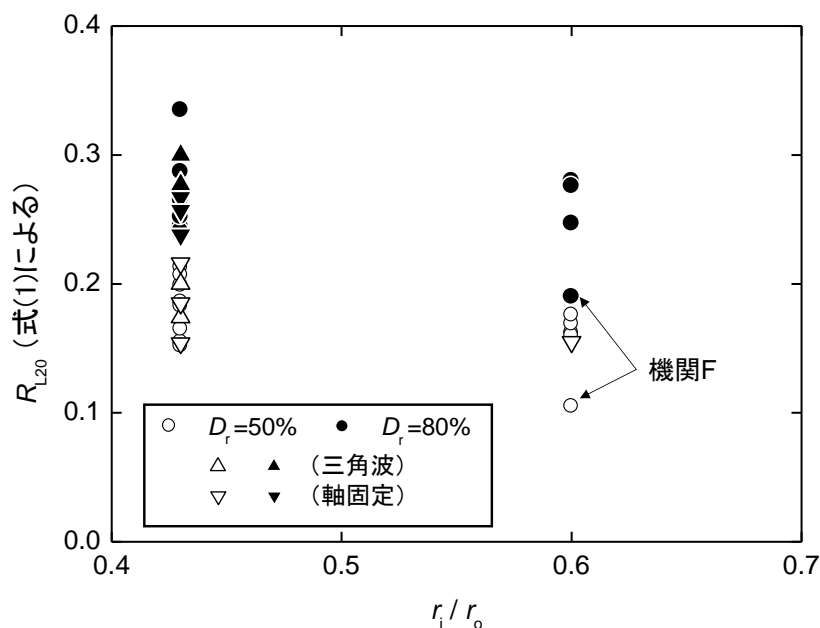


図4.3.4 一斉試験の結果からの $R_{L20}$  ( $\gamma_{DA}=7.5\%$ ) と $r_i/r_o$ の関係  
平均せん断応力の計算は式(4.3.1)に基づく

表4.3.2 一斉試験の結果からの $R_{L20}$ の平均値：式(4.3.1)・式(4.3.3)を用いた場合

$r_i/r_o$	$D_r = 50\%$		$D_r = 80\%$	
	式(4.3.1)	式(4.3.3)	式(4.3.1)	式(4.3.3)
0.429	0.184 <13>	0.167 <13>	0.272 <13>	0.248 <13>

0.600	0.155 <6>	0.149 <6>	0.248 <4>	0.238 <4>
0.600 (機関 F を除く)	0.164 <5>	0.157 <5>	0.267 <3>	0.256 <3>

機関 F を除く  $\gamma_{DA}=7.5\%$  による液状化判定。軸応力一定・軸変位固定条件，正弦波・三角波入力全て含む。<内はサンプル数。

表4.3.3 平均せん断応力・平均せん断ひずみの式の組合せの特徴と現状

平均せん断応力	平均せん断ひずみ	特徴／現状
式(4.3.1)	式(4.3.4)	エネルギー・仕事の整合性担保。国際的に広く適用。応力への内外径比の影響が比較的小さい
式(4.3.2)	式(4.3.4)	微小変形時の記述に適合
式(4.3.1)	式(4.3.5)	JGS0551で採用。応力への内外径比の影響が比較的小さい
式(4.3.3)	式(4.3.5)	JGS0543で採用。応力への内外径比の影響が大きい

## 4.4 軸固定の影響

中空ねじりによる液状化試験における軸制御の方法としては、軸力を一定とする方法（以下、軸力一定）と、軸変位を固定する方法（以下、軸変位固定）の2通りがある。本節では、軸力一定と軸変位固定の試験結果を比較し、軸固定の影響について検討する。

### 4.4.1 軸力一定条件と軸変位固定条件を両方実施した試験機関の分析

#### 4.4.1.1 試験条件

試験機関間の結果のばらつきが大きいため、まずは軸変位固定と軸力一定の両方の試験を実施している試験機関 I および P の結果を詳細に検討した。表4.4.1に試験機関 I および P の主要な試験条件を示す。両機関の試験条件の違いとしては、試験機関 I の供試体高さは70mm であるが、試験機関 P では100mm であることが挙げられる。また、圧密後の相対密度  $D_{rc}$  は、試験機関 I のほうが試験機関 P よりも5%程度高い。なお、軸変位固定方法については、機関 I は、載荷ピストンを載荷装置上部のフレームにネジ止めすることで固定しており、ねじり方向は自由に回転するような構造となっている。軸力一定条件とは、軸力を与えるベロフラムの圧力を繰返し載荷中も試験前から変化させず、フィードバック制御も行っていないことを指す。機関 P はモーターを用いて軸力の載荷を行っており、そのモーターの電源を OFF にする形で軸変位を固定しており、軸力一定条件においてはフィードバック制御で軸力を制御している。

表4.4.1 試験条件

試験機関	外径(mm)	内径(mm)	高さ(mm)	圧密後平均 $D_{rc}$ (%) (目標50%)	圧密後平均 $D_{rc}$ (%) (目標80%)
I	70	30	70	60.9	90.6
P	70	30	100	54.8	83.8

#### 4.4.1.2 液状化強度

応力比一繰返し回数との関係（両振幅せん断ひずみ  $\gamma_{DA} = 7.5\%$ ）を図4.4.1、図4.4.2に示す。なお、軸変位固定の試験のみを実施している試験機関（機関 B および E）の結果も併せて示している。軸変位固定および軸力一定の両方の試験を実施している試験機関 I および P について、軸変位固定と軸力一定の応力比一繰返し回数との関係はほぼ合致しており、試験機関が同じ場合、軸変位固定の有無の影響は認められない。詳細にみると、 $D_r = 50\%$ における試験機関 I の試験結果では、軸変位固定のほうが軸力一定よりもわずかに上側にある。ばらつきの範囲内ともいえるが、試験機関 I の  $D_r = 50\%$ ・軸力一定の試験の動画において載荷とともに供試体が軸方向に潰れていくような挙動を観察でき、この挙動が液状化強度に影響を与えた可能性もある。試験機関毎の液状化強度（表4.4.2）を比較すると、 $D_r = 50\%$ の場合は試験機関 I のほうが高いが、 $D_r = 80\%$ の場合は試験機関 P のほうがわずかに高い。

両振幅せん断ひずみ  $\gamma_{DA} = 7.5\%$ 以外の定義での応力比一繰返し回数との関係を加えたものを図4.4.3、図4.4.4に示す。凡例の EPWPR95%は、過剰間隙水圧比95%を意味する。なお、試験機関 I については、両振幅せん断ひずみ  $\gamma_{DA} = 15\%$ まで到達していないため、両振幅せん断ひずみ  $\gamma_{DA} = 15\%$ 基準の曲線は表示していない。 $D_r = 50\%$ に関しては、各定義での液状化強度曲線がほぼ重なっており、先述した両振幅せん断ひずみ  $\gamma_{DA} = 7.5\%$ と同様の傾向といえる。 $D_r = 80\%$ に関しても、各定義に応じた応力比一繰返し回数との関係が描けるが、試験機関が同じ場合、いずれの定義においても軸変位固定と軸力一定の応力比一繰返し回数との関係はほぼ合致しており、差もばらつきの範囲内で明瞭な傾向は確認できず、軸固定の影響は観察されない。

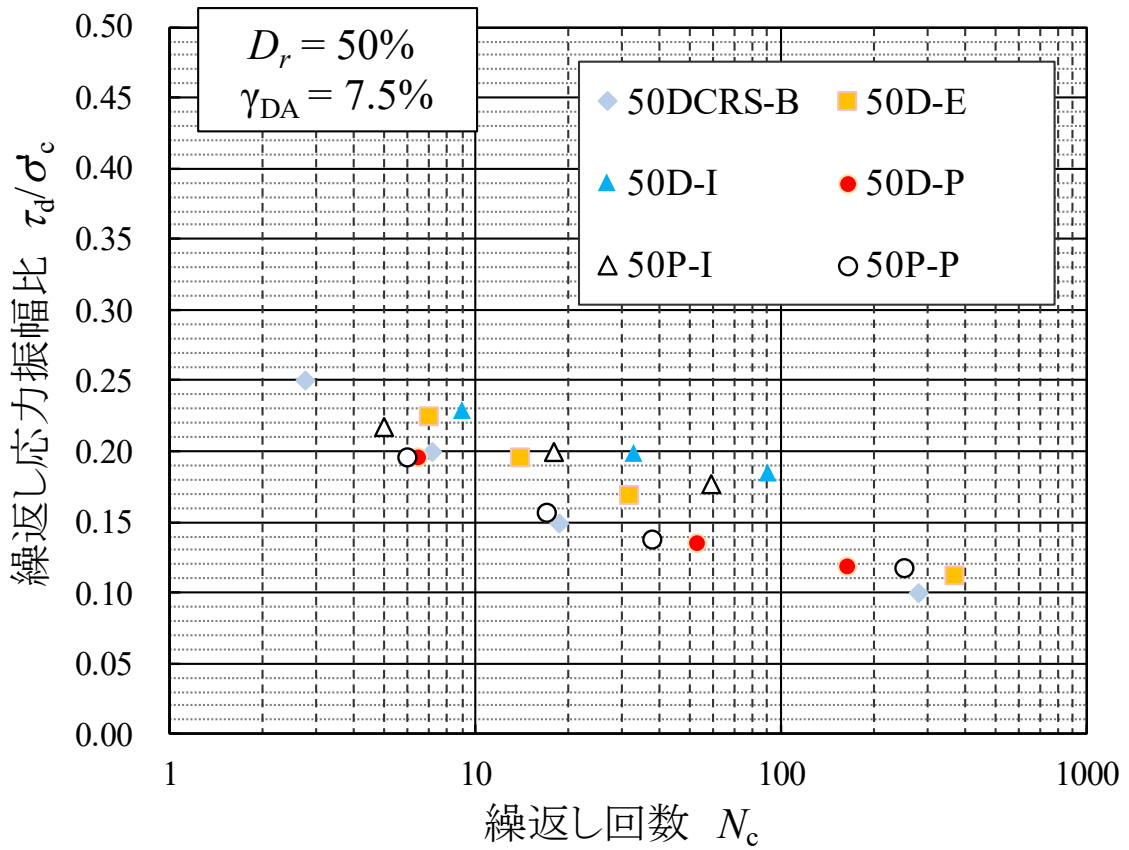


図4.4.1 応力比—繰返し回数 ( $D_r = 50\%$ )

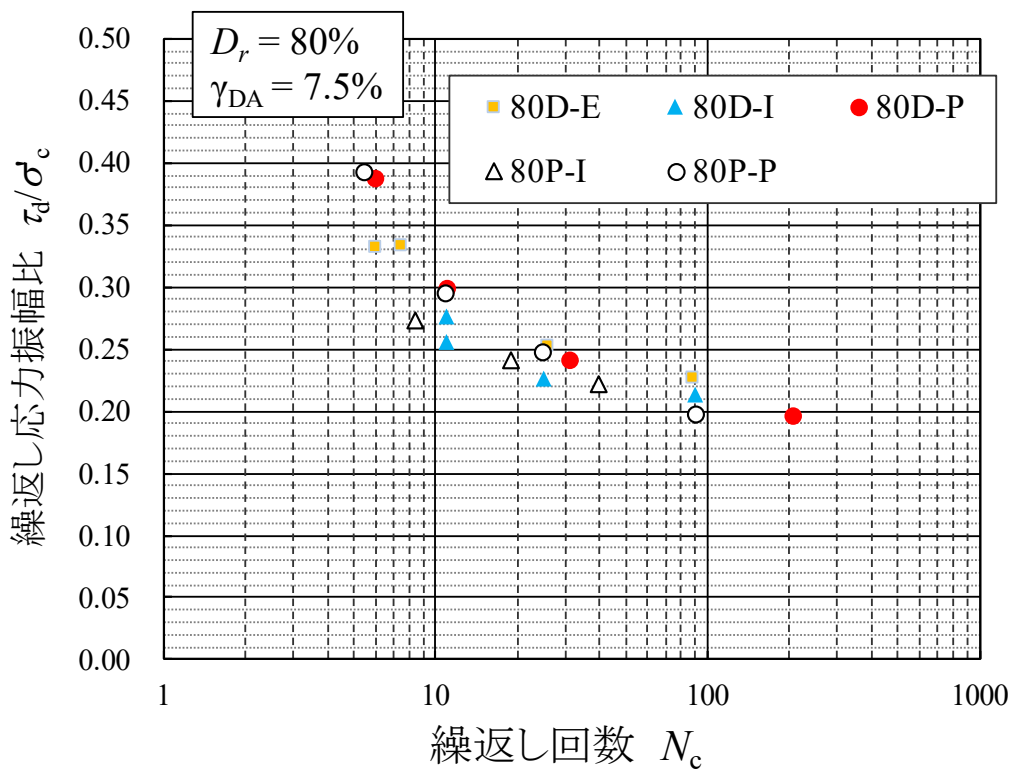


図4.4.2 応力比—繰返し回数 ( $D_r = 80\%$ )

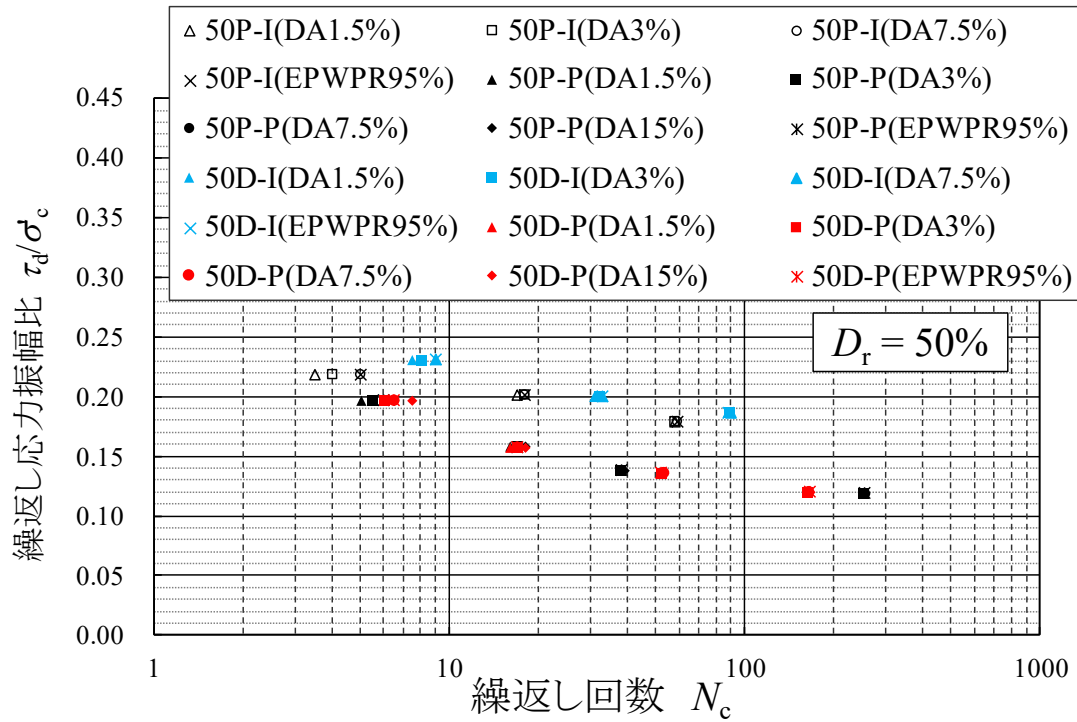


図4.4.3 応力比—繰返し回数 ( $D_r = 50\%$ )

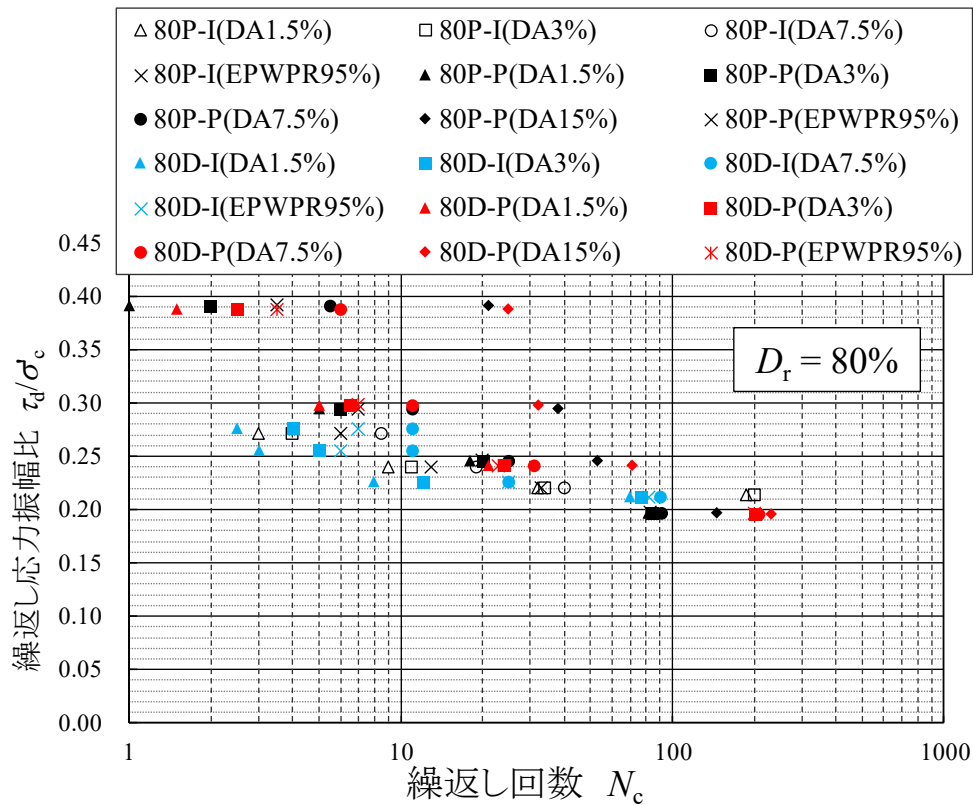


図4.4.4 応力比—繰返し回数 ( $D_r = 80\%$ )

表4.4.2 液状化強度の対応表

試験機関	50P (軸力一定)	50D (軸変位固定)	80P (軸力一定)	80D (軸変位固定)
I	0.199	0.216	0.239	0.238
P	0.152	0.154	0.252	0.257

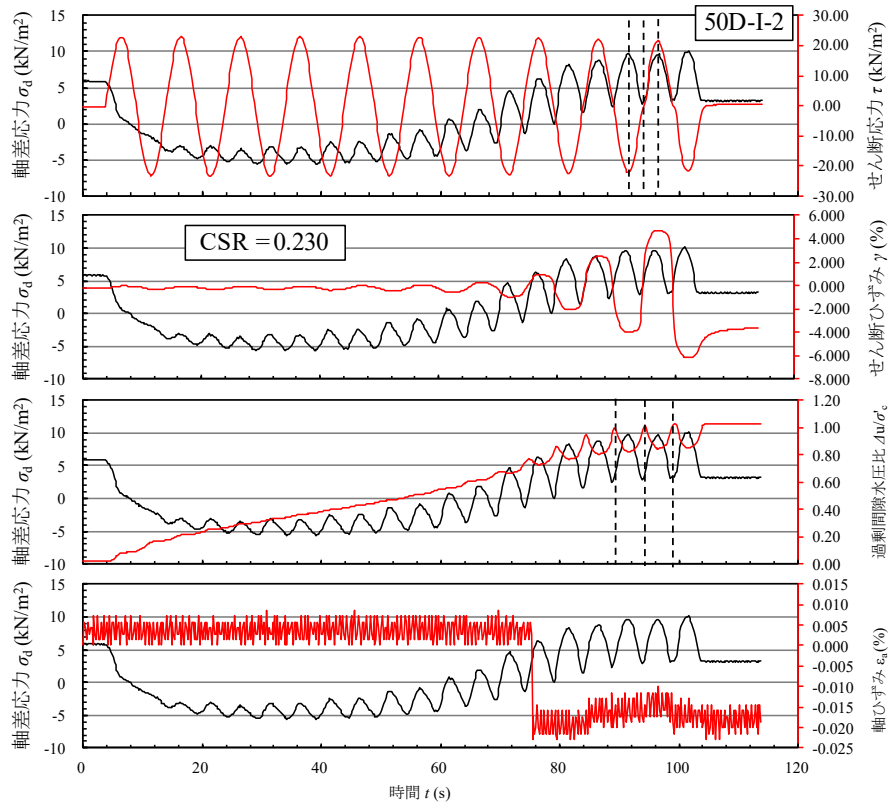
注：液状化強度は両振幅せん断ひずみ  $\gamma_{DA} = 7.5\%$ ，繰返し回数  $N_c = 20$ 回で定義

#### 4.4.1.3 時刻歴

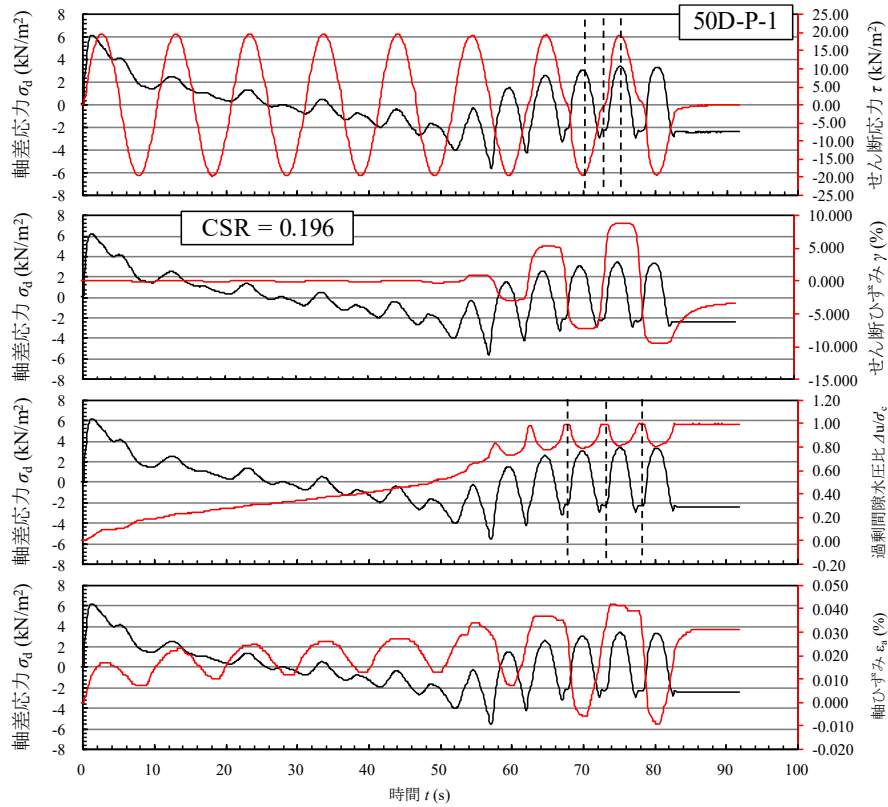
相対密度  $D_r = 50\%$  のケースで，繰返し回数が少ない軸変位固定の実験結果の例を図4.4.5(a), (b) に示す。なお，黒線は左縦軸の計測項目，赤線は右縦軸の計測項目に対応している。非排水繰返し載荷によって過剰間隙水圧比が増加するにつれて，軸差応力が増減を繰返しながら変化している。試験機関 I (50D-I-2,  $CSR = 0.230$ ) と P (50D-P-1, 繰返しせん断応力比  $CSR = \tau/\sigma'_c = 0.196$ ) で初期軸差応力の与え方が異なり，50D-I-2では6kN/m<sup>2</sup>程度，50D-P-1はほぼゼロとなっている。繰返し載荷の開始後，初期軸差応力を与えている50D-I-2では初期軸差応力が徐々に低下していった。一方，初期軸差応力がほぼゼロの50D-P-1では載荷開始直後に6kN/m<sup>2</sup>程度まで増加し，徐々に低下していった。過剰間隙水圧比が増加していくと，いずれのケースでも軸差応力は低下傾向から増加傾向へと変化し，過剰間隙水圧比が1.0に到達するまで増減を繰返しながら増加していった。なお，軸変位固定条件であるものの，50D-I-2では過剰間隙水圧比が0.8程度に到達した段階で0.02%程度の軸ひずみが急激に発生し，50D-P-1では軸差応力に比例するような形で，振幅にして0.05%程度の変動が生じている。両機関の軸固定方法の違い（機関Iは載荷ピストンを載荷上部のフレームにねじ止めすることで，機関Pはモーターの電源をOFFにすることで軸変位を固定している）と，固定する際のあそびが影響しているものと推察される。軸ひずみの変動は-0.02%~0.04%の範囲に収まっており，上記の固定方法によって，軸変位固定がおおむね達成できているといえる。

軸差応力の増減のタイミングを見ると，過剰間隙水圧比が極大値（有効応力が極小値）を取るタイミングで極小値を取り，過剰間隙水圧比が極小値を取るタイミングで極大値をとることから，ダイレイタンスーによって軸差応力が生じていると考えられる。また，せん断応力が極大・極小を取るタイミングで軸差応力は極大値を取り，せん断応力がゼロクロスするタイミングで軸差応力は極小値を取る。

以上は  $D_r = 50\%$  での実験結果であったが， $D_r = 80\%$  での結果の一例を図4.4.5(c), (d)に示す。全体の傾向としては  $D_r = 50\%$  と同様であるが，過剰間隙水圧比が1.0に到達した後の軸差応力の振幅が， $D_r = 50\%$  の50D-I-2と50D-P-1では6kN/m<sup>2</sup>程度だが， $D_r = 80\%$  の80D-I-3では8kN/m<sup>2</sup>程度，80D-P-1では12kN/m<sup>2</sup>程度と増大している。また，過剰間隙水圧比が1.0に到達した後の振幅および変動成分を除いた値はほぼ一定となっている。 $D_r = 50\%$  と同様に微小な軸ひずみが発生しており，80D-I-3では過剰間隙水圧比が0.8程度に到達した段階で軸ひずみが急激に生じている点は50D-I-2と同様であるが，それ以降の繰返し載荷の過程で，0.03%程度の振幅で軸ひずみ変動している。このように，軸変位固定の実験においても軸ひずみが生じているが，絶対値にして0.05%の範囲で軸変位が固定できている。

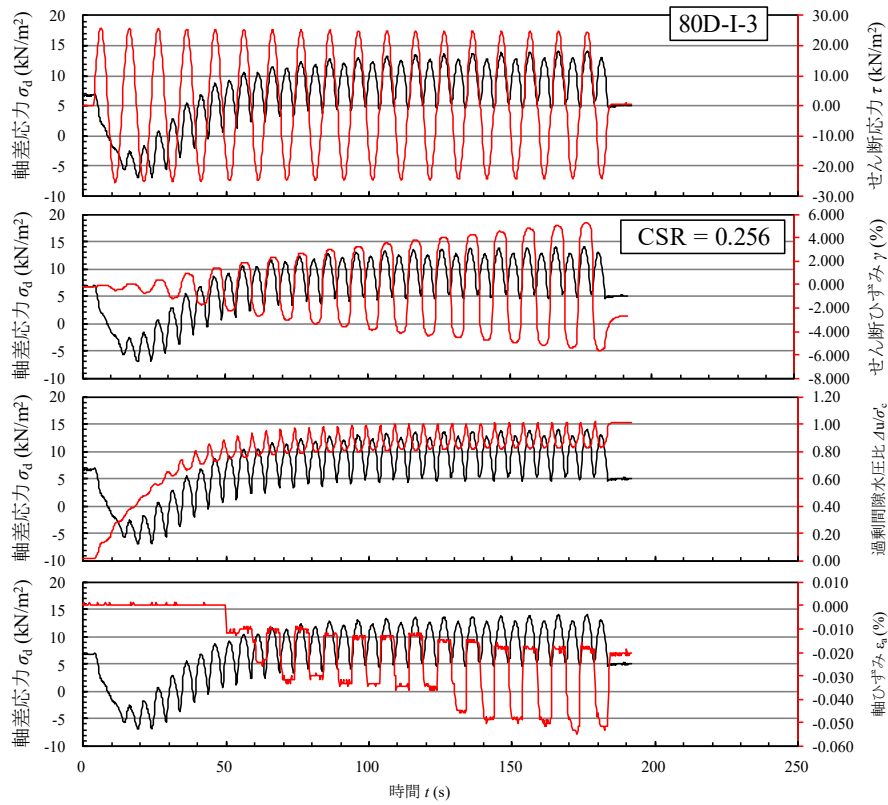


(a) 50D-I-2

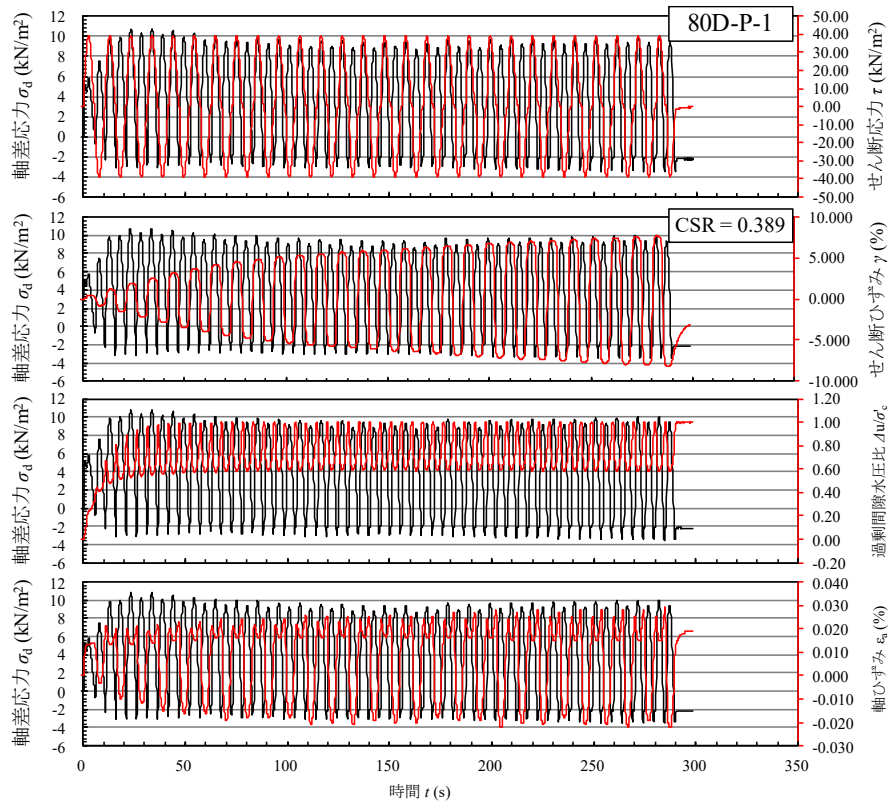


(b) 50D-P-1





(c) 80D-I-3



(d) 80D-P-1

図4.4.5 軸変位固定の時刻歴

繰返し回数の多い軸変位固定の実験結果の例を図4.4.6に示す。初期軸差応力を与えている50D-I-3（図4.4.6(a)）における軸差応力の経時変化は、過剰間隙水圧比の上昇の仕方に対応する形で3つに区分される。過剰間隙水圧比は、①過剰間隙水圧比が0.2程度になるまでは上に凸の形で増加し、②過剰間隙水圧比が0.6~0.7程度になるまでは直線的に徐々に増加し、③過剰間隙水圧比が0.6~0.7以上になると下に凸の形で急激に増加し、1に近づくと過剰間隙水圧比の増減（サイクリックモビリティ）が見られるようになる。これに対応する形で軸差応力は、①下に凸の形で急激に低下し、②過剰間隙水圧比が0.4程度になるまでは緩やかに低下した後に徐々に増加し、③軸差応力が上に凸の形で急激に増加し、過剰間隙水圧比が1に近づくと軸差応力の振幅も大きくなる。一方、初期軸差応力がほぼゼロの50D-P-4（図4.4.6(b)）に関しては、①は荷重開始直後に軸差応力が5kN/m<sup>2</sup>程度まで増加したこと以外は同様の傾向が確認できたものの、②では軸差応力は一貫して低下していき増加には転じず、③で振幅が拡大するという、50D-I-3とは異なる挙動が観察された。初期軸差応力の有無や試験機関（試験装置）の違いなどが影響しているものと推察される。

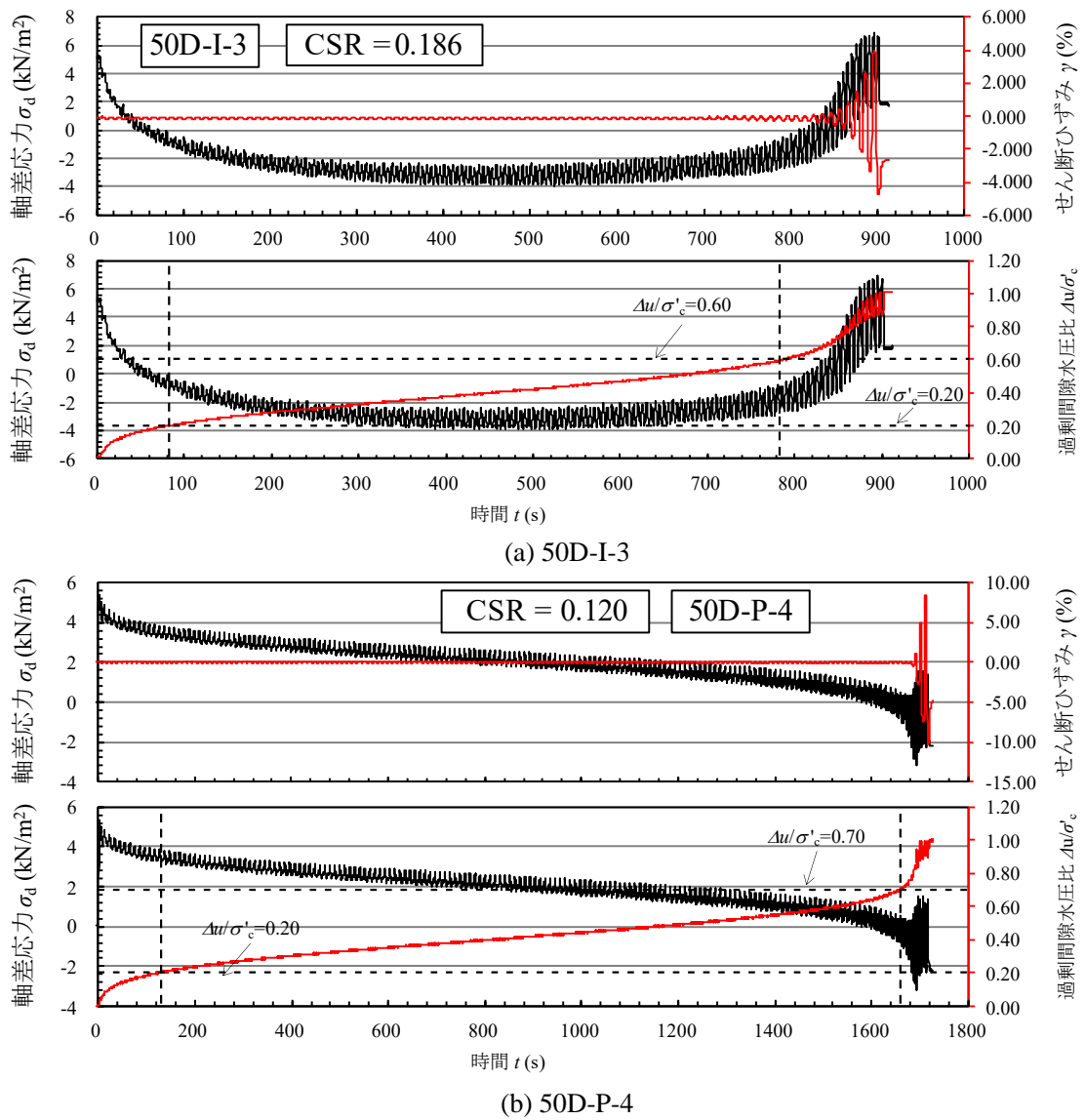


図4.4.6 軸変位固定の時刻歴

以上は  $D_r = 50\%$  の結果であったが、 $D_r = 80\%$  の結果を図4.4.7に示す。相対密度が変化しても、 $D_r = 50\%$  と同様の傾向を示している。

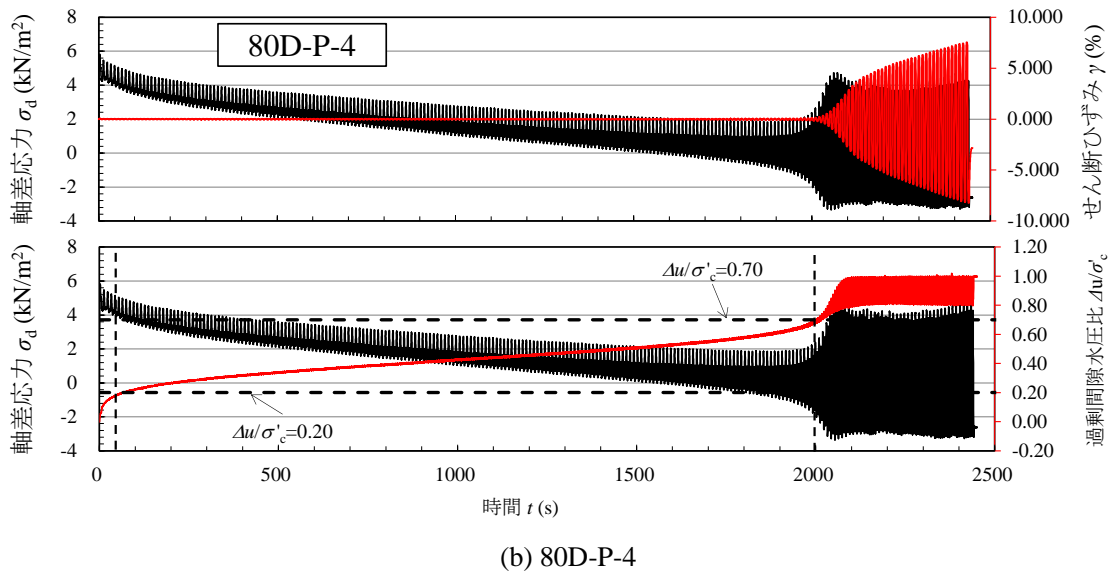
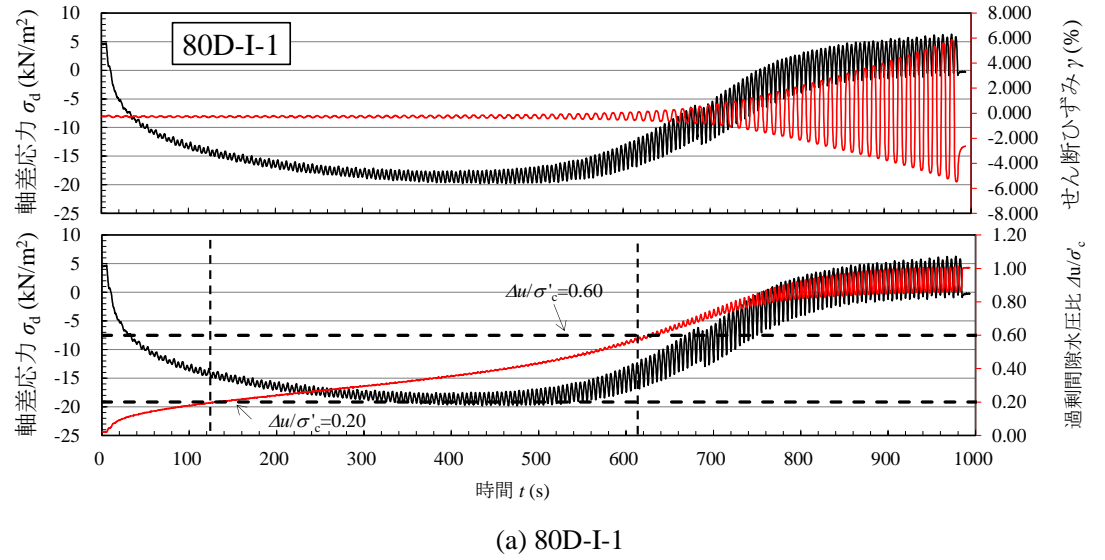


図4.4.7 軸変位固定の時刻歴

せん断ひずみと軸差応力の関係の例を図4.4.8に示す。载荷開始とともに軸差応力が低下し、それ以降は剛性が回復してせん断ひずみが極大値・極小値を取るタイミングで軸差応力も極大値を取る形で増減を繰り返している。そして、過剰間隙水圧比と軸差応力の関係で見られた試験機関間の違いが、せん断ひずみの振幅が±1%程度に留まっている際に軸差応力が急減して極小値を取るか（図4.4.8(a), (c)）否か（図4.4.8(b), (d)）という形で、より明瞭となっている。

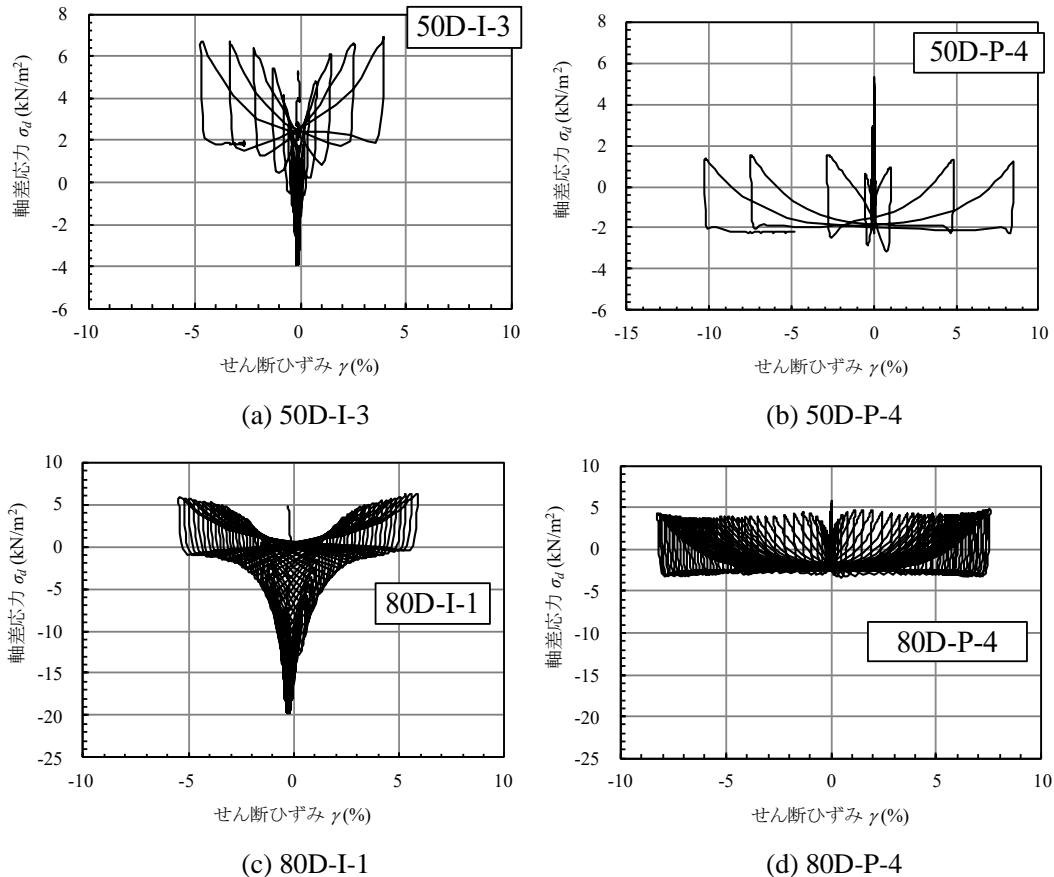


図4.4.8 せん断ひずみ－軸差応力（軸変位固定）

過剰間隙水圧比と軸差応力の関係を図4.4.9に示す。試験機関 I（図4.4.9(a), (b)）では、過剰間隙水圧比の増加とともに軸差応力が徐々に低下していくが、過剰間隙水圧比が0.4程度になると増加に転じる。軸差応力の低下度合いは、80D-I-1では極小値として-20kN/m<sup>2</sup>程度であるのに対し、80D-I-3では-10kN/m<sup>2</sup>程度であるなど、試験によってばらつきが見られた。一方、試験機関 P（図4.4.9(c), (d)）では、軸差応力は载荷直後に増加した後は徐々に低下していき、過剰間隙水圧比が1.0近くになってから増加に転じる。载荷直後の軸差応力の増加の度合いも、50D-P-1では6kN/m<sup>2</sup>程度だが、50D-P-3では2kN/m<sup>2</sup>程度となり、試験によってばらつきが見られた。また、過剰間隙水圧比が1.0に到達した後の軸差応力の振幅は、試験機関 P では  $D_r = 80\%$  のほうが  $D_r = 50\%$  よりも大きくなっているが、試験機関 I ではおおよそ同等であった。相対密度で場合分けすると、相対密度が高いほうが軸差応力の最大値と最小値の差が大きくなる傾向が確認できた。

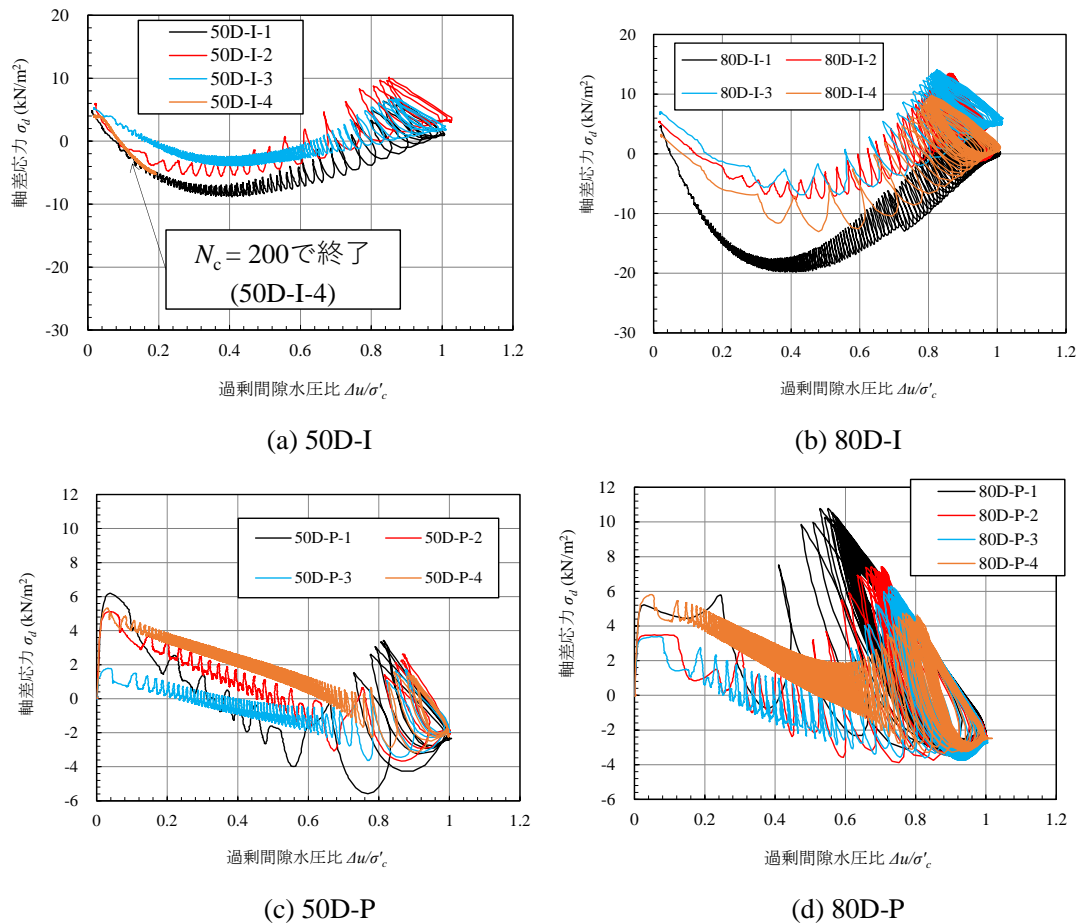
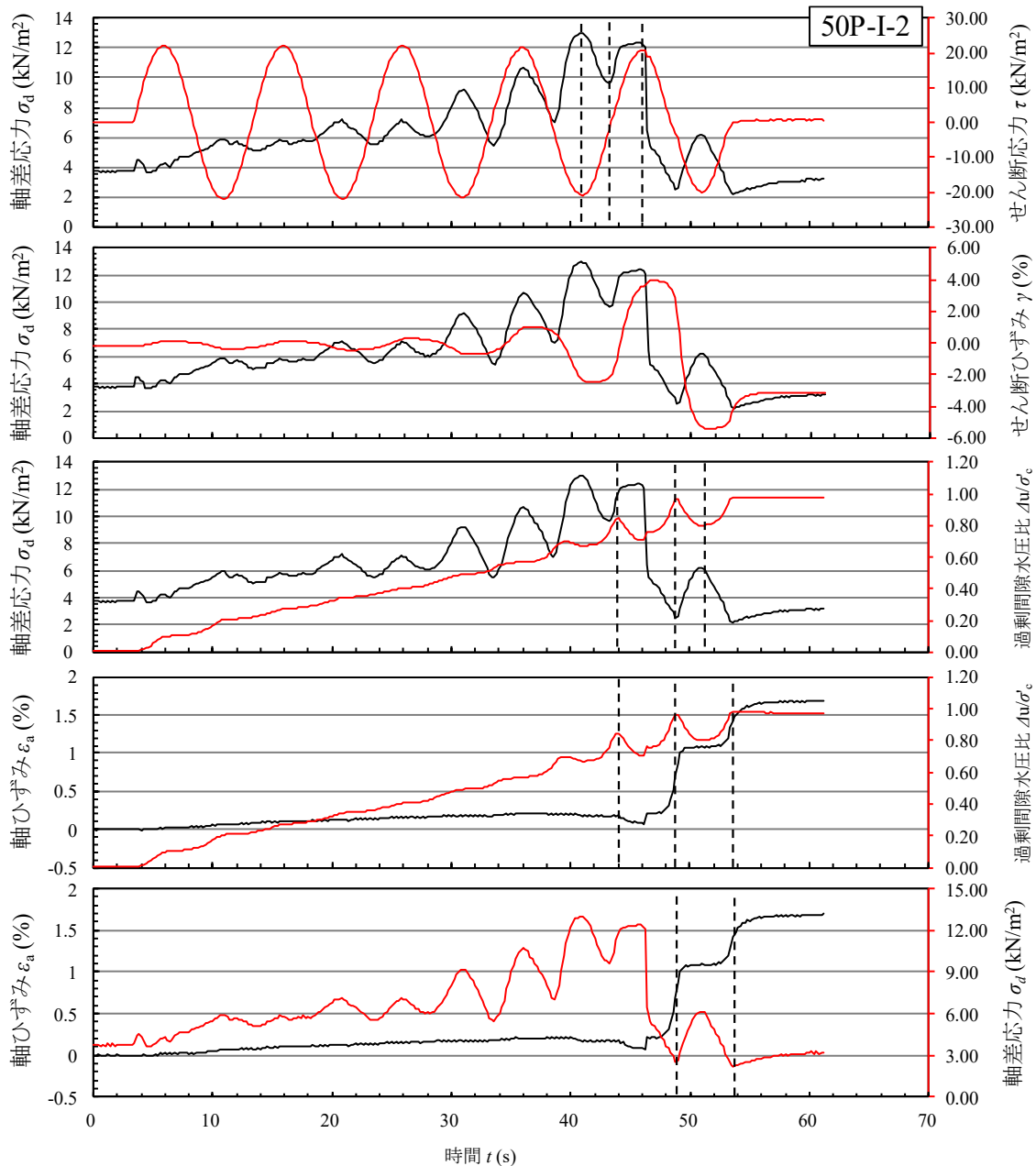


図4.4.9 過剰間隙水圧比と軸差応力（軸変位固定）

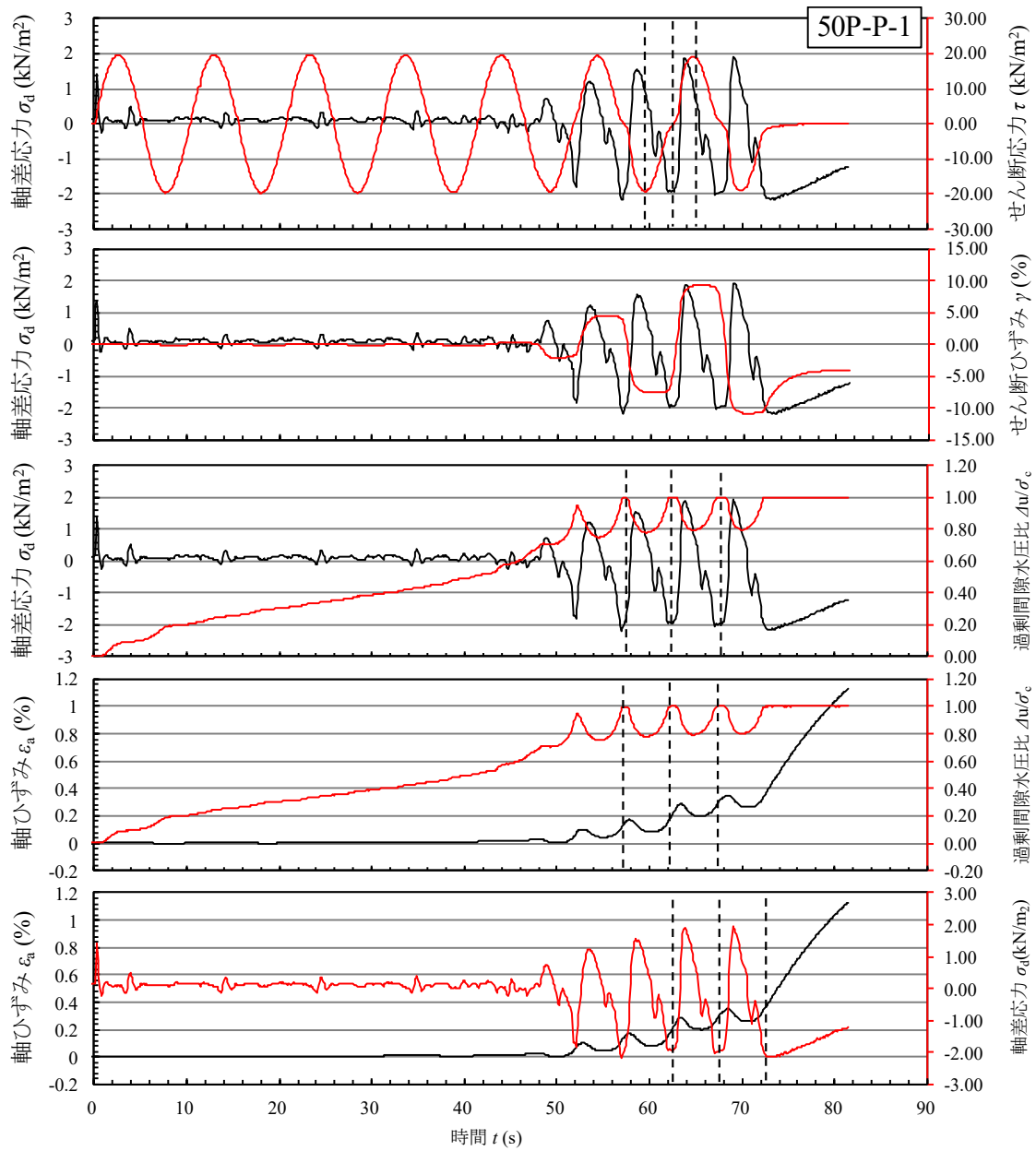
以上は軸変位固定条件の結果であったが、軸力一定条件について、繰返し回数が少ない試験結果の例を図4.4.10に示す。軸力一定であるものの、非排水繰返し载荷中の供試体の応答によって、軸ひずみだけではなく軸差応力も変動している。軸変位固定と同様に、試験機関 I (50P-I-2) と P (50P-P-1) で初期軸差応力の与え方が異なり、50P-I-2では4kN/m<sup>2</sup>程度、50P-P-1はほぼゼロとなっている。繰返し载荷の開始とともに、初期軸差応力を与えている50P-I-2では軸差応力および軸ひずみが徐々に増加していくが、初期軸差応力がほぼゼロの50P-P-1では、過剰間隙水圧比が1.0に近づくまでは軸差応力および軸ひずみはほぼゼロのままであった。過剰間隙水圧比が1.0に近づくとき軸差応力の増減および軸ひずみの増加が顕著になり、50P-I-2では軸差応力が増加から減少に転じるが、50P-P-1では振動成分が発生し始めたものの、振動成分を除いた値はほぼゼロのままであった。また、繰返し载荷を止めてせん断応力がゼロになった後の挙動を見ると、50P-I-2では軸ひずみおよび軸差応力の変化が収束して一定値となっているが、50P-P-1では変化が収束しておらず、軸ひずみが単調に増加し続けている。

軸差応力の増減のタイミングを見ると、過剰間隙水圧比が極大値（有効応力が極小値）を取るタイミングで極小値を取り、過剰間隙水圧比が極小値を取るタイミングで極大値を取るという、軸変位固定と同様の傾向を示した。一方、せん断応力との関係については、50P-I-2では軸変位固定の場合と同様にせん断応力が極大・極小を取るタイミングで軸差応力は極大値を取っているが、50P-P-1ではせん断応力が極大・極小を取るタイミングよりも早く軸差応力が極大値を示している。試験機関 P は軸力一定となるようにフィードバック制御を行っているということであり、その影響が出ているものと考えられる。一方、せん断応力がゼロクロスするタイミングで軸差応力が極小値を取ることは軸変位固定の場合と同様であった。

軸ひずみを見ると，過剰間隙水圧比が1.0に到達するタイミングで軸ひずみが急増しており，サイクリックモビリティによって過剰間隙水圧比が1.0から低下している間は軸ひずみは一定（50P-I-2）もしくは低下（50P-P-1）している。また，軸差応力と対比すると，軸ひずみが急増するタイミングで軸差応力が極小値を取っている。



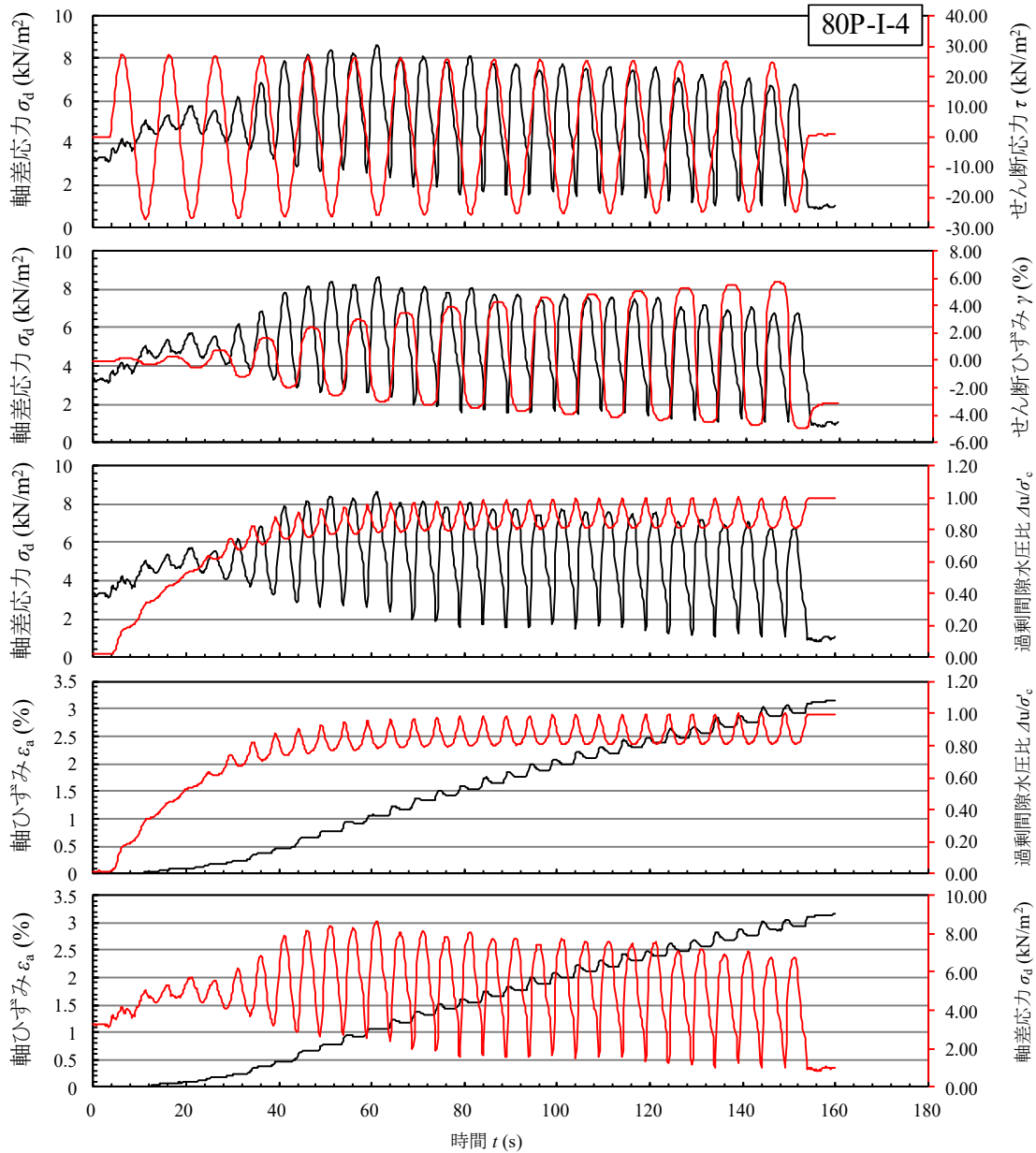
(a) 50P-I-2



(b) 50P-P-1

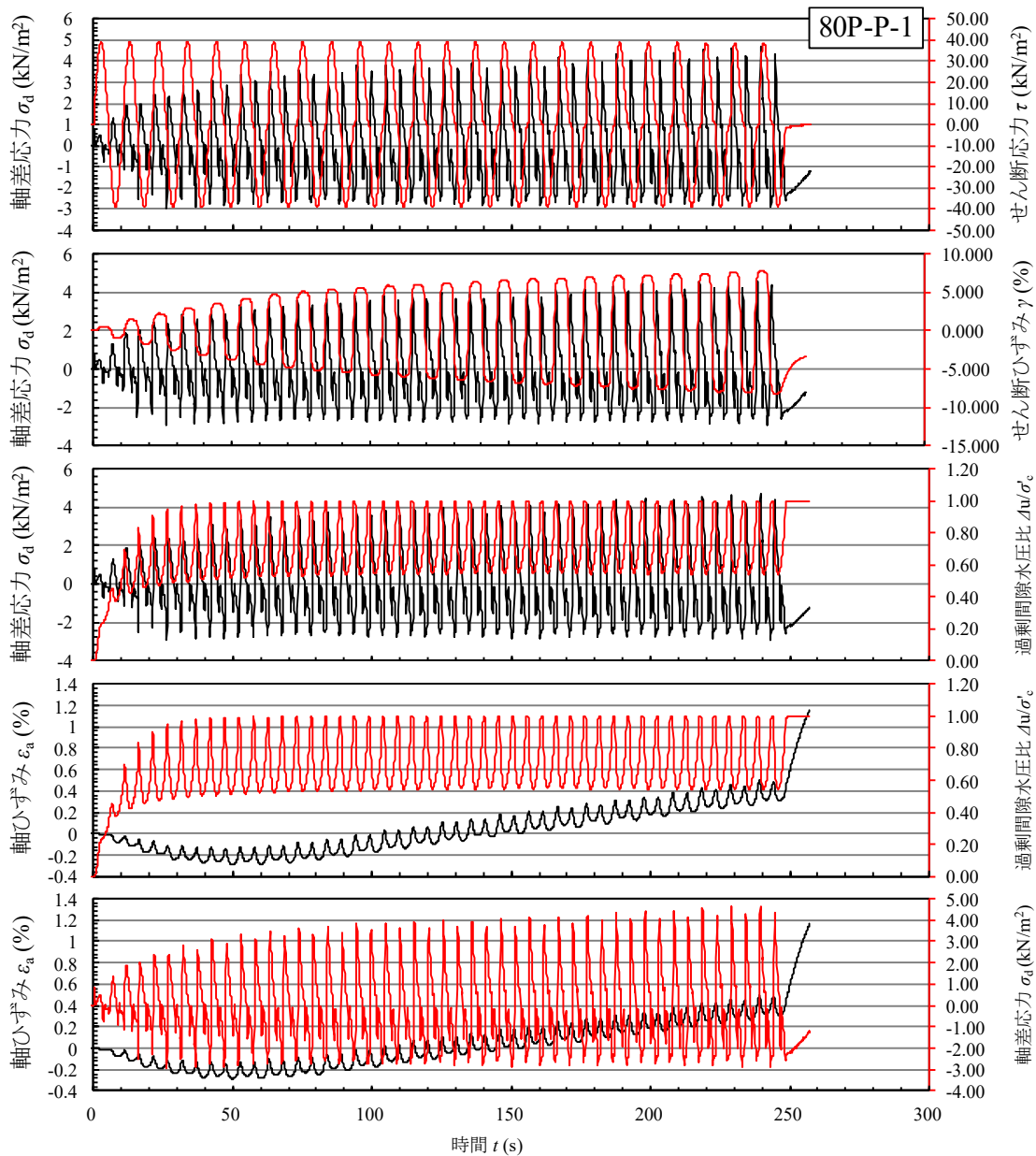
図4.4.10 軸力一定の時刻歴

以上は  $D_r = 50\%$  での実験結果であったが、 $D_r = 80\%$  での結果の一例を図4.4.11に示す。全体の傾向としては  $D_r = 50\%$  と同様であるが、初期軸差応力がほぼゼロの試験機関 P において、 $D_r = 80\%$  (80P-P-1) では荷重開始から50秒程度までは軸ひずみが低下しており、過剰間隙水圧比が1.0に到達するまでは軸ひずみがほぼゼロであった  $D_r = 50\%$  のケース (50P-P-1) とは異なる傾向を示している。



(a) 80P-I-4





(b) 80P-P-1

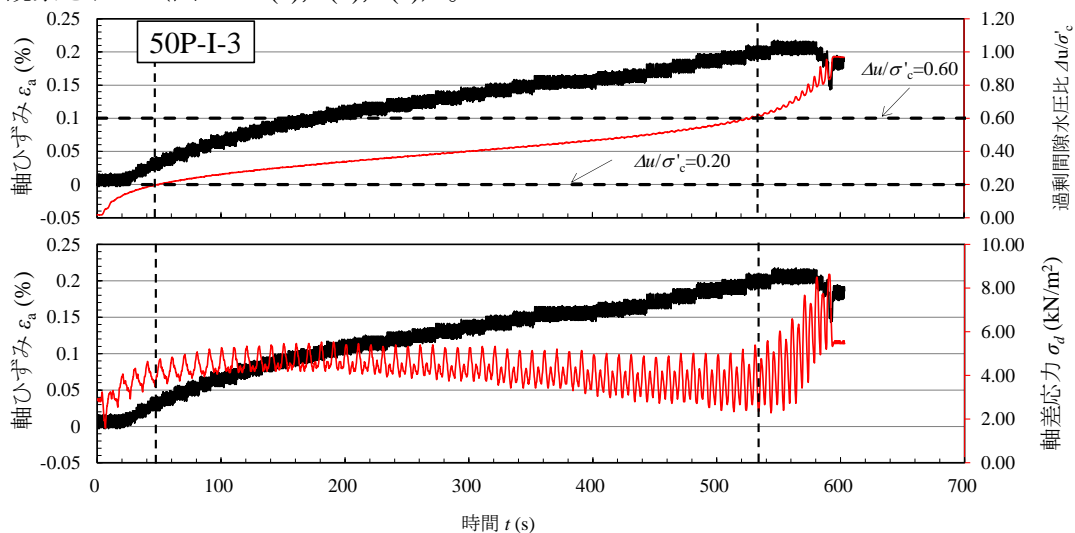
図4.4.11 軸力一定の時刻歴

繰返し回数の多い軸力一定の実験結果の例を図4.4.12に示す。初期軸差応力を与えている50P-I-3における軸差応力の経時変化は、過剰間隙水圧比の上昇の仕方に対応する形で3つに区分される。過剰間隙水圧比は、①過剰間隙水圧比が0.2程度になるまでは上に凸の形で増加し、②過剰間隙水圧比が0.6~0.7程度になるまでは直線的に徐々に増加し、③過剰間隙水圧比が0.6~0.7以上になると下に凸の形で急激に増加し、1.0に近づくと過剰間隙水圧比の増減（サイクリックモビリティ）が見られるようになる。これに対応する形で軸差応力は増減を繰返しながらか①増加し、②過剰間隙水圧比が0.3程度になるまでは緩やかに増加した後に徐々に低下し、③過剰間隙水圧比が0.6~0.7以上になると再び増加していき、軸差応力の振幅も大きくなる。また、軸ひずみに関しては、①②過剰間隙水圧比が0.6程度になるまでは徐々に増加していき、それ以降はほぼ一定となっている。一方、初期軸差応力がほぼゼロの50P-P-3に関しては、軸差応力と軸ひずみは①②微小な増減を繰返しながらもほぼゼロを維持し、③過剰間隙水圧比が0.8を超えると軸ひずみお

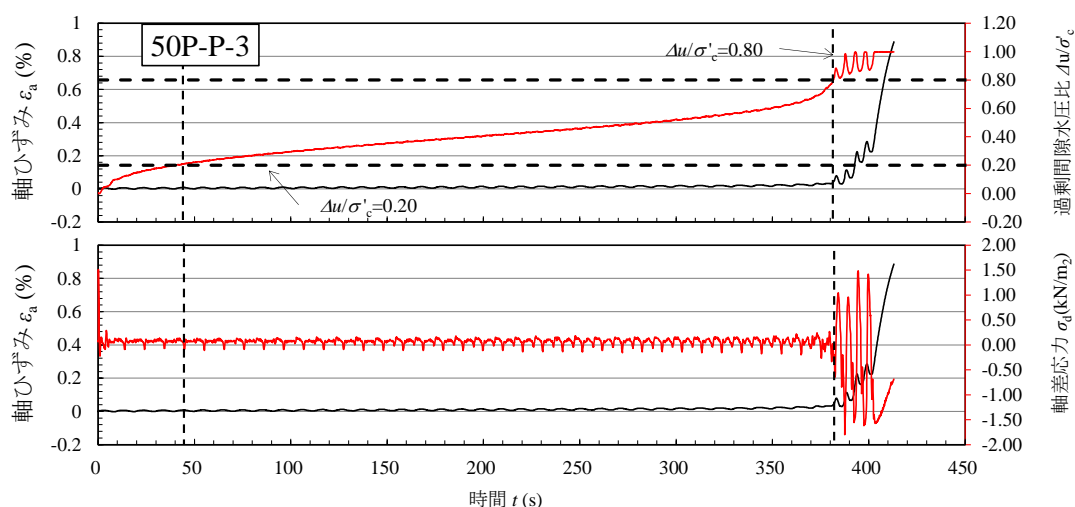
よび軸差応力の振幅が急増するという、50P-I-3とは異なる挙動が観察された。初期軸差応力・フィードバック制御の有無や、試験機関（試験装置）の違いなどが影響しているものと推察される。

以上は  $D_r = 50\%$  の結果であるが、 $D_r = 80\%$  の結果を図4.4.13に示す。基本的な傾向は  $D_r = 50\%$  と同様であるが、試験機関 I に関しては、 $D_r = 80\%$  (80P-I-2) では過剰間隙水圧比が0.6以上になると軸ひずみの増加度合いが増加しており、軸ひずみが一定となった  $D_r = 50\%$  (50P-I-3) とは異なる傾向を示している。 $D_r = 50\%$  では過剰間隙水圧比が1.0に到達した直後に試験を終了（両振幅せん断ひずみが所定の値に到達）しているが、 $D_r = 80\%$  では過剰間隙水圧比が1.0に到達した後もせん断ひずみが徐々にしか増加しないために試験を継続していることが影響していると考えられる。

せん断ひずみと軸差応力、軸ひずみの関係の一例を図4.4.14、図4.4.15にそれぞれ示す。試験機関 P に関しては、せん断ひずみと軸差応力の関係が、軸変位固定の場合（図4.4.8(b), (d)）と類似しているが、軸力一定（図4.4.14(b), (d)）のほうが形状がやや歪んでいる。軸力のフィードバック制御が影響しているものと推察される。試験機関 I も同様の傾向であるが、軸変位固定の場合（図4.4.8(a), (c)）で見られた軸差応力の極小値が、軸力一定では不明瞭（図4.4.14(a)）もしくは見られなくなっている（図4.4.14(c)）。また、過剰間隙水圧比が1.0に到達した直後に試験を終了した50P-I-3を除いて、せん断ひずみの累積とともに、軸ひずみも徐々に増加していく傾向が共通して観察された（図4.4.15(a), (b), (c)）。

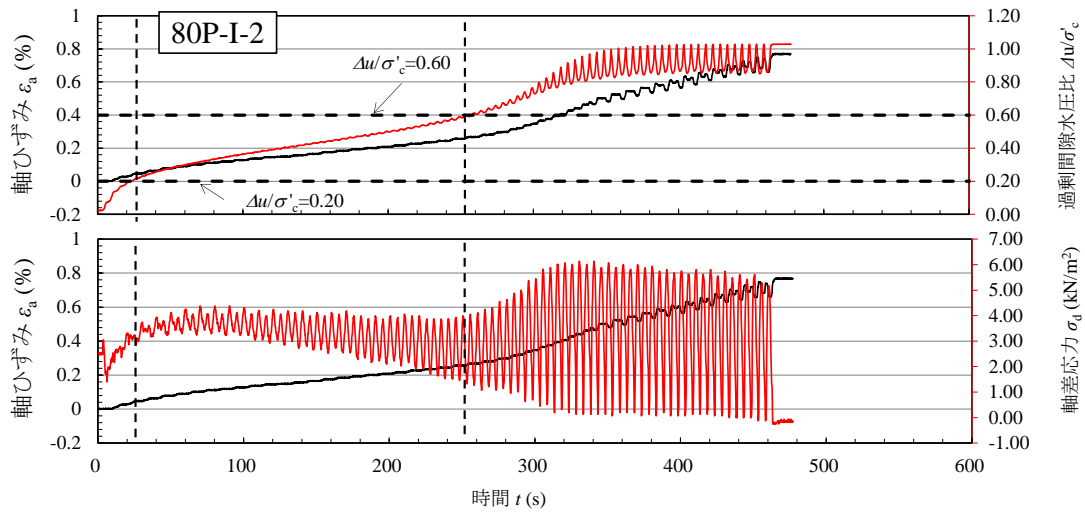


(a) 50P-I-3

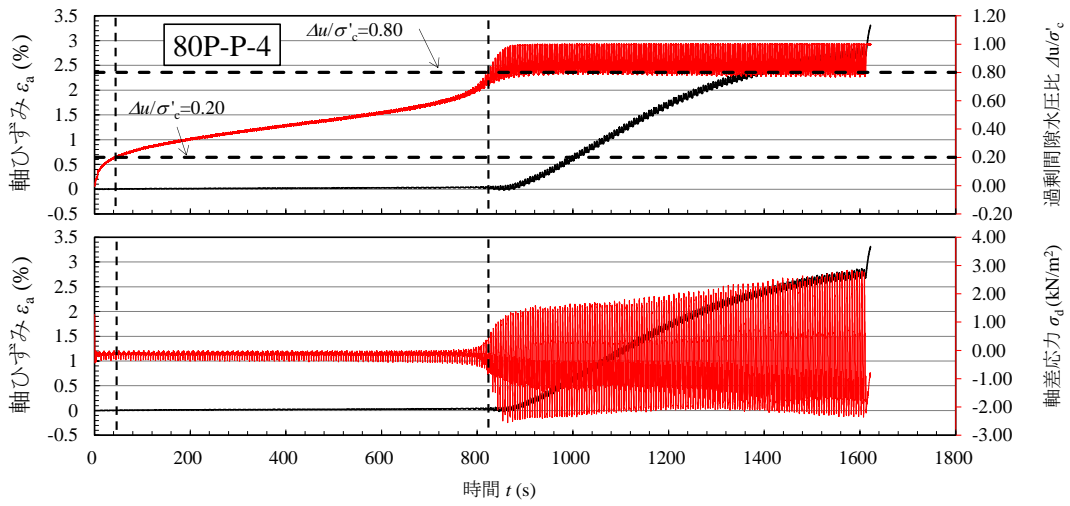


(b) 50P-P-3

図4.4.12 軸力一定の時刻歴

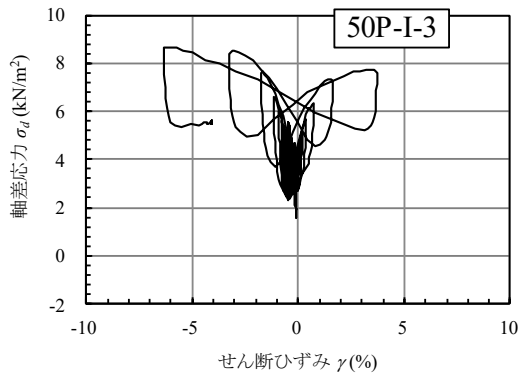


(a) 80P-I-2

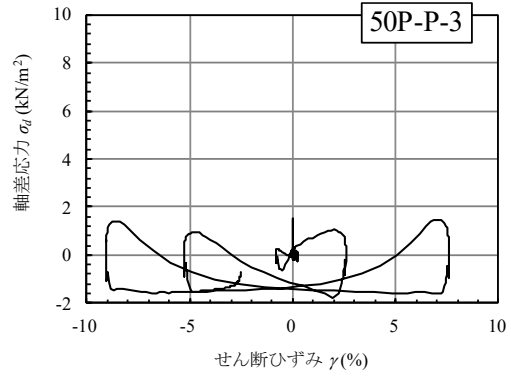


(b) 80P-P-4

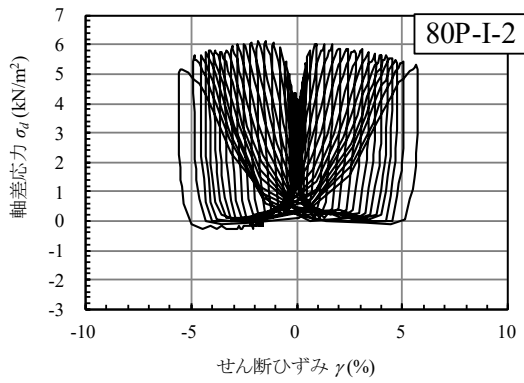
図4.4.13 軸力一定の時刻歴



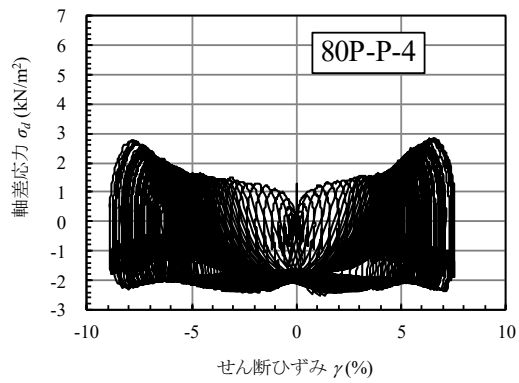
(a) 50P-I-3



(b) 50P-P-3

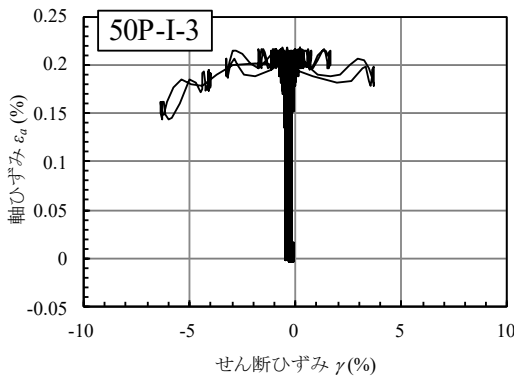


(c) 80P-I-2

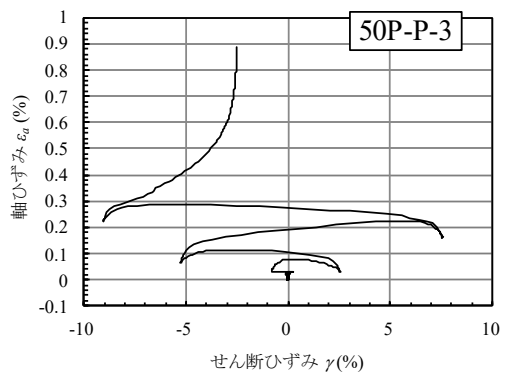


(d) 80P-P-4

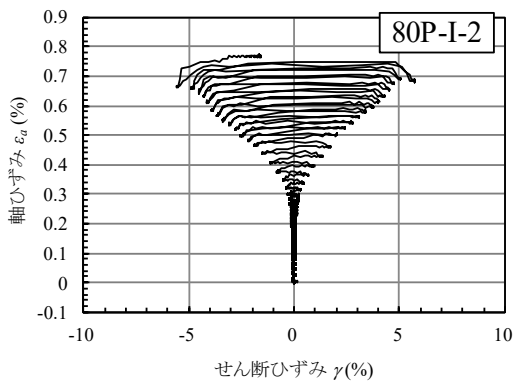
図4.4.14 せん断ひずみ－軸差応力（軸力一定）



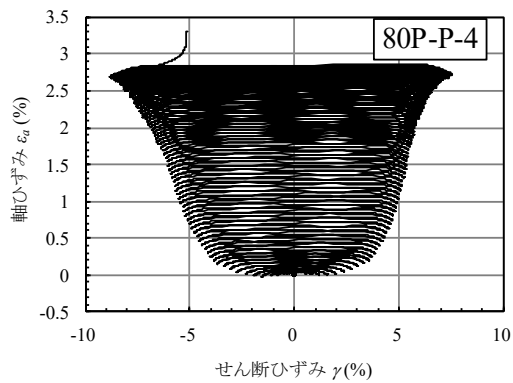
(a) 50P-I-3



(b) 50P-P-3



(c) 80P-I-2



(d) 80P-P-4

図4.4.15 せん断ひずみ－軸ひずみ（軸力一定）

過剰間隙水圧比と軸差応力の関係を図4.4.16に示す。試験機関 I (図4.4.17(a), (b)) では、ばらつきは大きいものの、载荷開始直後は軸差応力がわずかに低下するが、過剰間隙水圧比0.2~0.3前後までは軸差応力が増加して極大値を取る。それ以降は軸差応力が低下していくが、過剰間隙水圧比が1に近づくと振幅の増大とともに再び増加に転じている。一方、試験機関 P (図4.4.17(c), (d)) では、過剰間隙水圧比が0.5~0.8を超えるまでは軸差応力はほぼゼロであり、それ以降は過剰間隙水圧比の増減に伴って増減を繰り返すようになる。また、相対密度が高いほうが軸差応力の振幅が大きくなっている。試験機関 P は軸力のフィードバック制御を行っているということだが、過剰間隙水圧比が1.0に近づくと制御が難しくなることが窺える。

過剰間隙水圧比と軸ひずみの関係を図4.4.17に示す。初期軸差応力を若干与えている試験機関 I (図4.4.18(a), (c)) では、軸ひずみは過剰間隙水圧比が0.8程度になるまでは直線的に増加していき、過剰間隙水圧比が0.8を超えるとループを描きながら増加していく。初期軸差応力がほぼゼロの試験機関 P (図4.4.18(b), (d)) では、過剰間隙水圧比が高くなるとループを描きながら軸ひずみが増加していくという点は共通だが、過剰間隙水圧比が高くなるまでに生じる軸ひずみはほぼゼロである。初期軸差応力の与え方や試験装置の違いなどが影響していると考えられる。

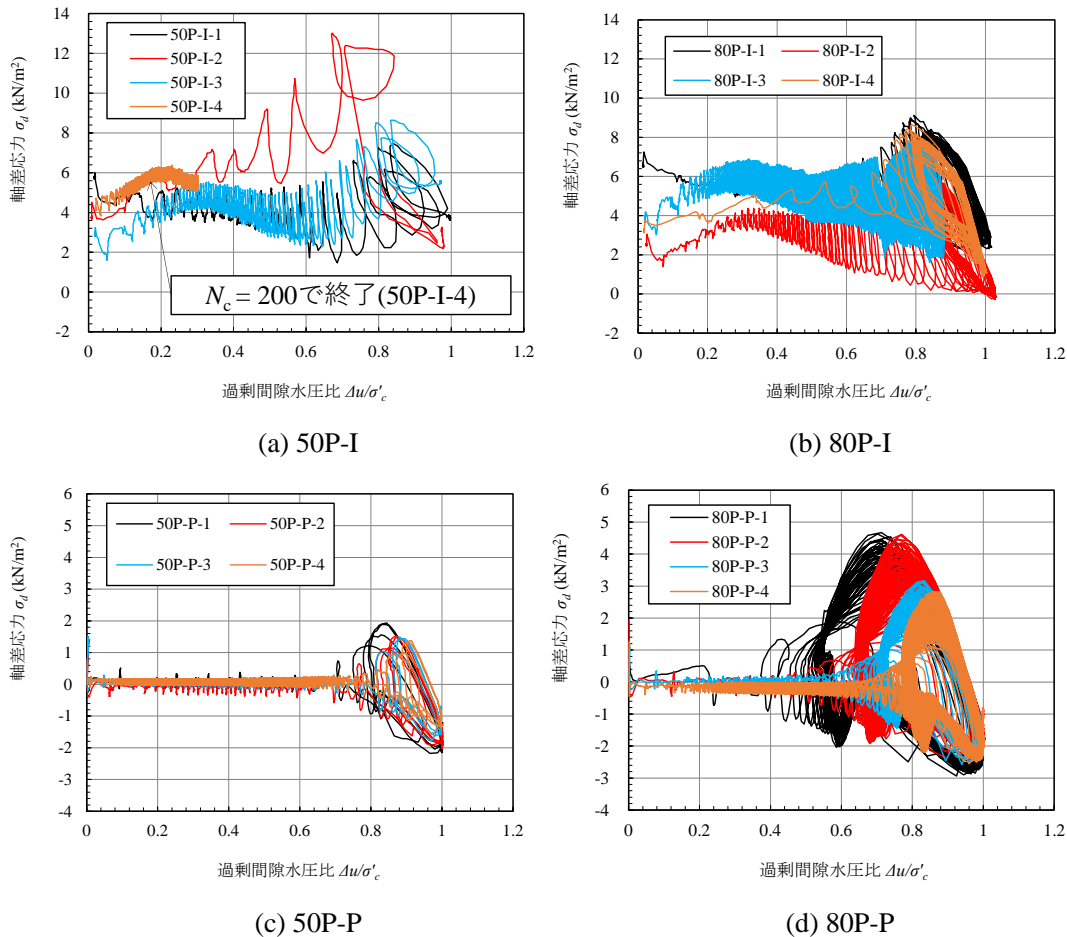
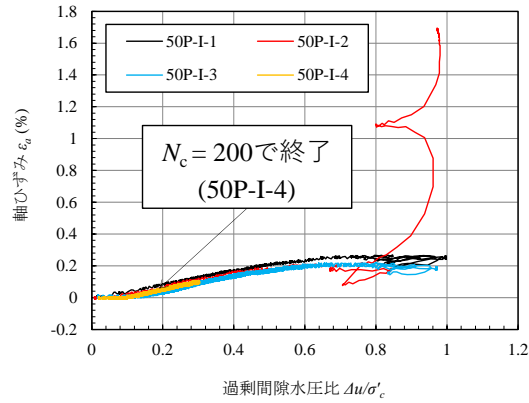
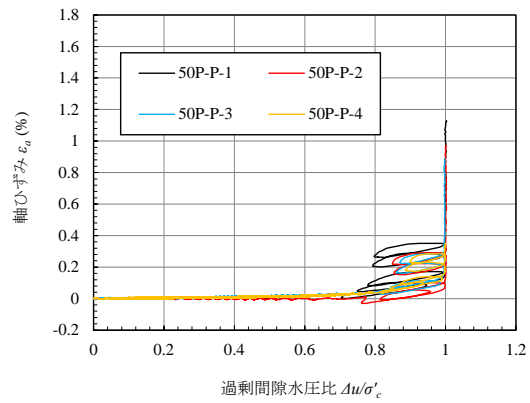


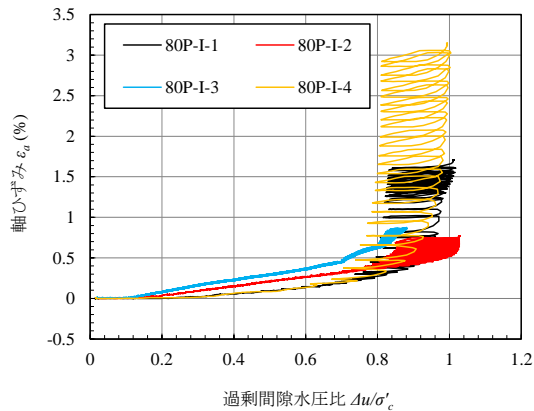
図4.4.16 過剰間隙水圧比と軸差応力 (軸力一定)



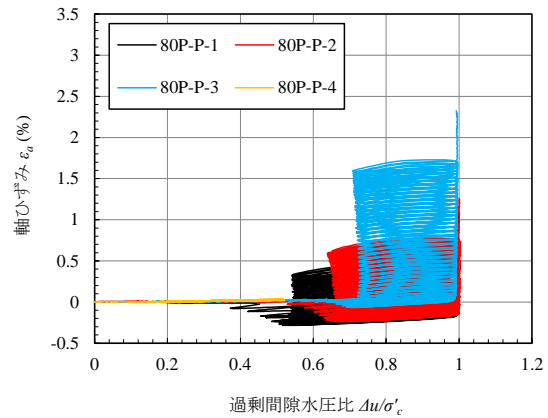
(a) 50P-I



(b) 50P-P



(c) 80P-I



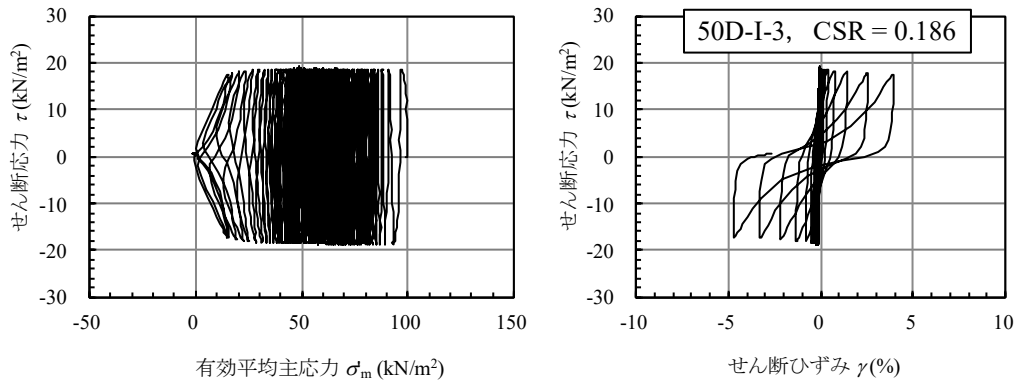
(d) 80P-P

図4.4.17 過剰間隙水圧比と軸ひずみ（軸力一定）

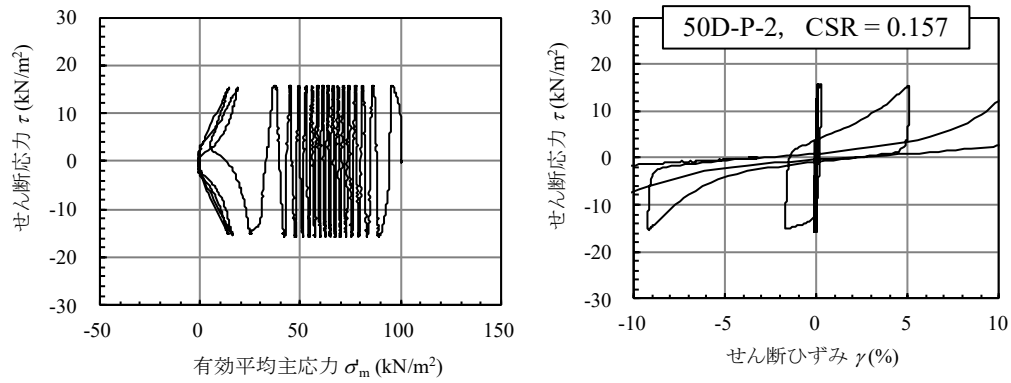
#### 4.4.1.4 有効応力経路と応力ひずみ関係

軸変位固定条件の有効応力経路とせん断応力-せん断ひずみ関係を図4.4.18に示す。試験機関 I（図4.4.18(a)）では、有効応力経路、繰返し毎のひずみ量、履歴曲線は軸力一定条件（図4.4.19(a)）と違いが認められる。一方、試験機関 P（図4.4.18(b), 図4.4.19(b)）では軸固定条件による有効応力経路と応力-ひずみ関係の違いは認められず、軸力一定条件と同様にせん断応力が小さい範囲でひずみが大きく発生し、逆S字となっている。

軸力一定条件の有効応力経路とせん断応力-せん断ひずみ関係を図4.4.19に示す。試験機関 I（図4.4.19(a)）では、 $\gamma_{DA} = 7.5\%$ に到達したサイクルの曲線は、前のサイクルとおおよそ相似形状となっている。一方、試験機関 P（図4.4.19(b)）では、 $\gamma_{DA} = 7.5\%$ に到達したサイクルの曲線は、前のサイクルの履歴曲線の形状と異なり、せん断応力が小さい範囲でひずみが大きく発生し、逆S字となっている。

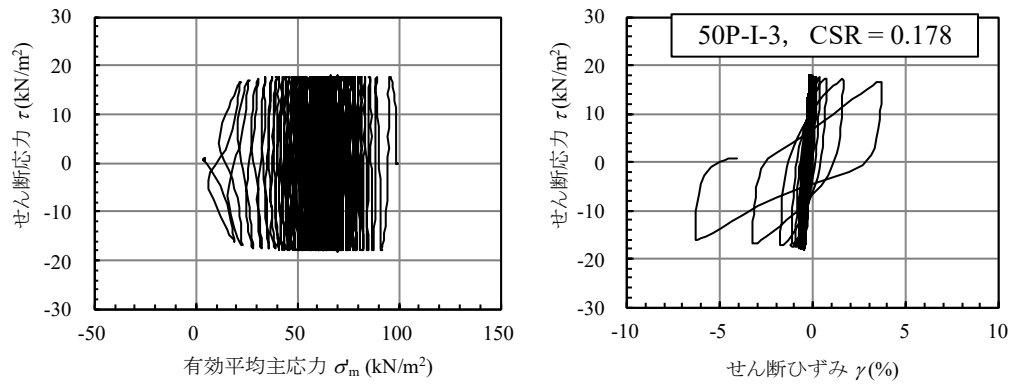


(a) 50D-I-3

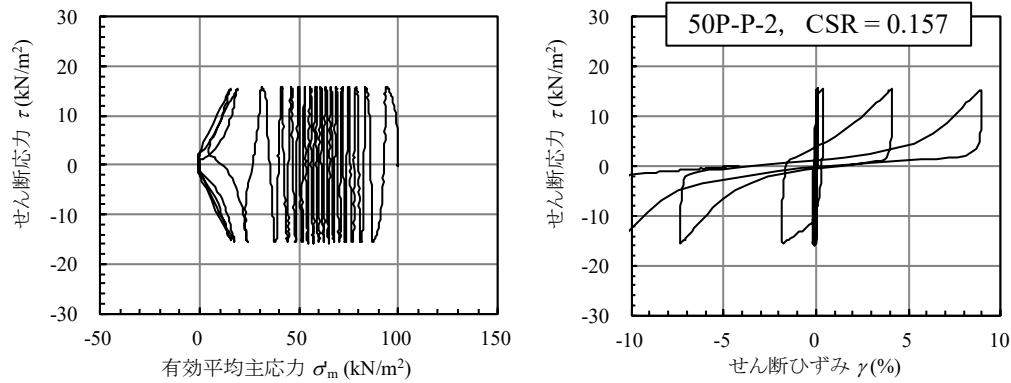


(b) 50D-P-2

図4.4.18 有効応力経路とせん断応力-せん断ひずみ (軸変位固定)



(a) 50P-I-3



(b) 50P-P-2

図4.4.19 有効応力経路とせん断応力-せん断ひずみ (軸力一定)



#### 4.4.1.5 試験前後の供試体の様子

試験前後の供試体の写真の一例を図4.4.20に示す。試験機関 P の前後の様子（図4.4.20(a-1)～(b-2)）を比較すると、メンブレンにしわが入るほどの大変形をした場合でも、供試体はおおよそ一様に変形しており、ネッキングが生じている様子は観察されなかった。しかし、メンブレンの色やしわで内部の状況を観察しにくいのが実情であり、内側でネッキングしている可能性は否定できない。一方、試験機関 I は、試験機関 P と概ね同様の傾向を示しているが、軸変位固定のケース50D-I-3（図4.4.20(d)）では、試験後にキャップ近傍にメンブレンのしわが集中しており、ネッ

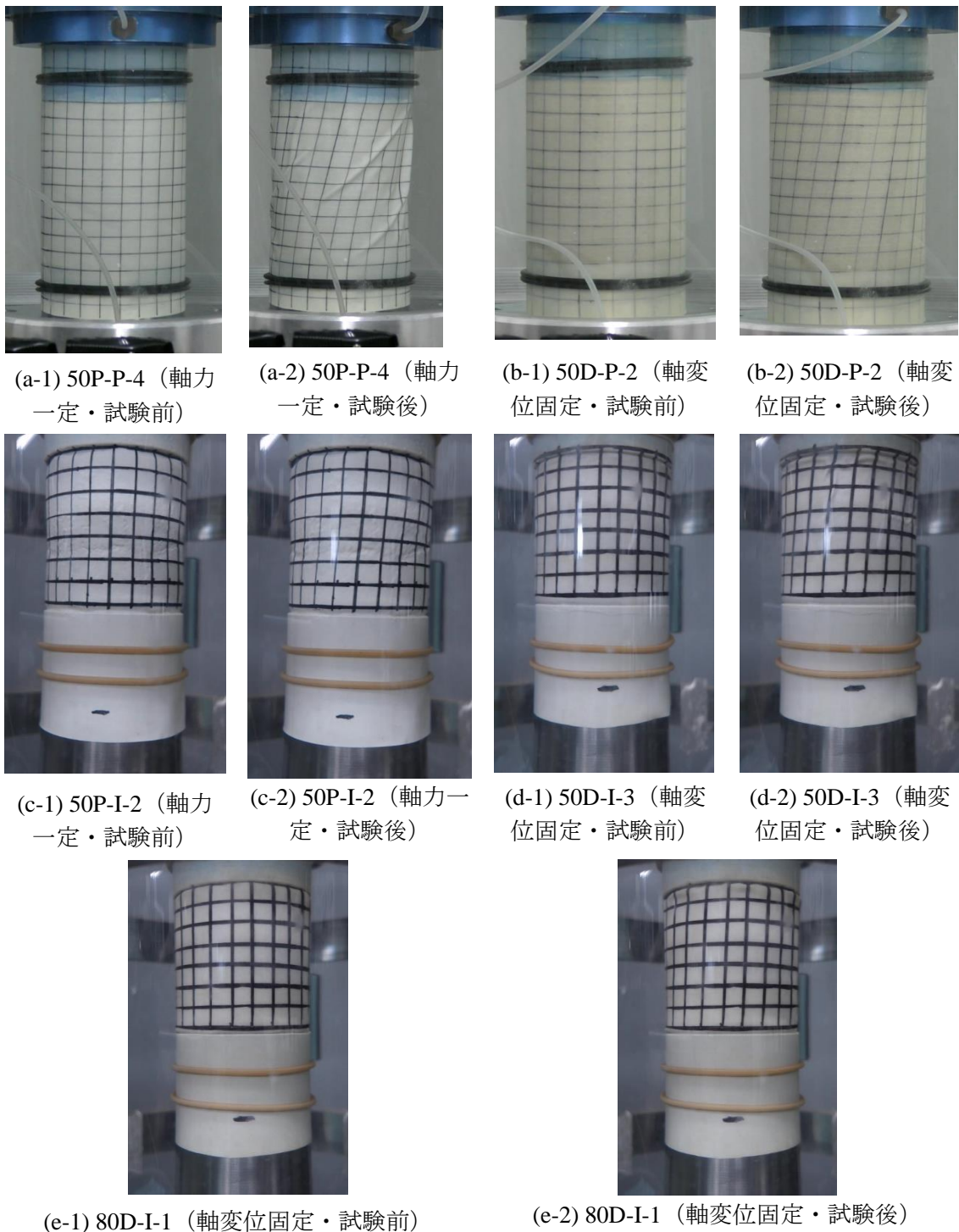


図4.4.20 試験前後の供試体の写真

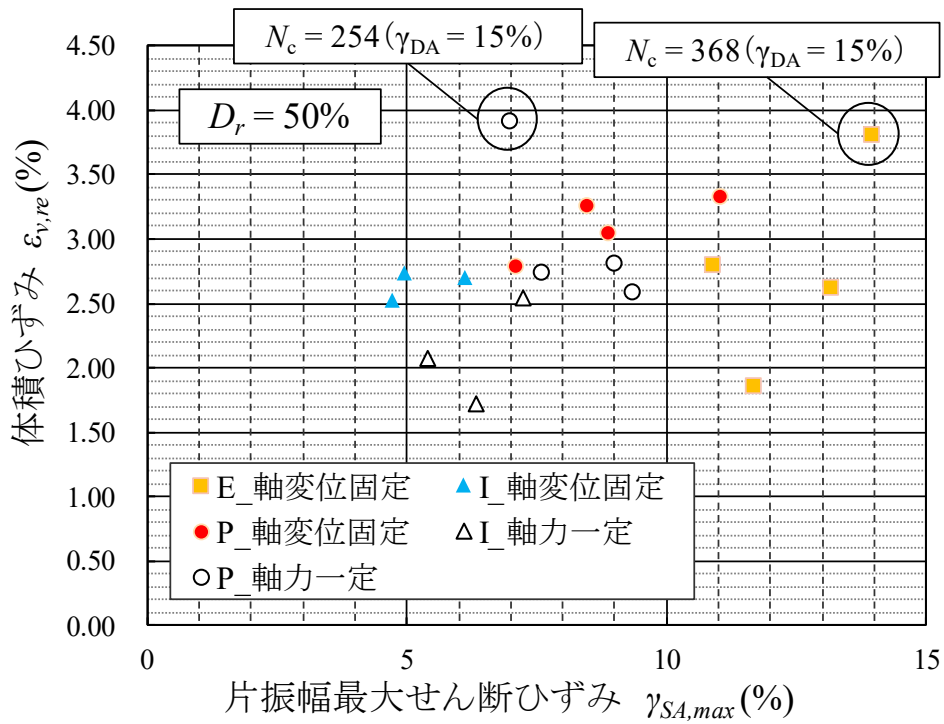


キングのような現象が生じている様子が観察された。50D-I-3の試験前の写真を見ると、試験前からキャップの直径よりも供試体上部の直径が小さくなってネッキングのような様子を示しており、繰返し载荷によってその箇所が弱点となって破壊が生じたともとらえられる。なお、試験後にキャップ近傍にメンブレンのしわが集中している現象は、軸変位固定のケース80D-I-1（図4.4.20(e)）でも見られたが、試験前の供試体においては、50D-I-3のようなネッキングのような様子は見られなかった。國生ら<sup>10),11)</sup> [1][2]は、鉛直変位固定・等方圧密条件での非排水繰返し中空ねじり試験において、側方変形の下膨れを抑制したりキャップの刃を取り外したりする工夫をしたうえで、内セルから発光ダイオードによるライトを照射することで、供試体上部での水膜の生成を観察している。上記のような工夫がない本一斉試験においては、軸変位固定条件であっても水膜が形成されているような様子が供試体の写真や動画からは観察することはできなかった。

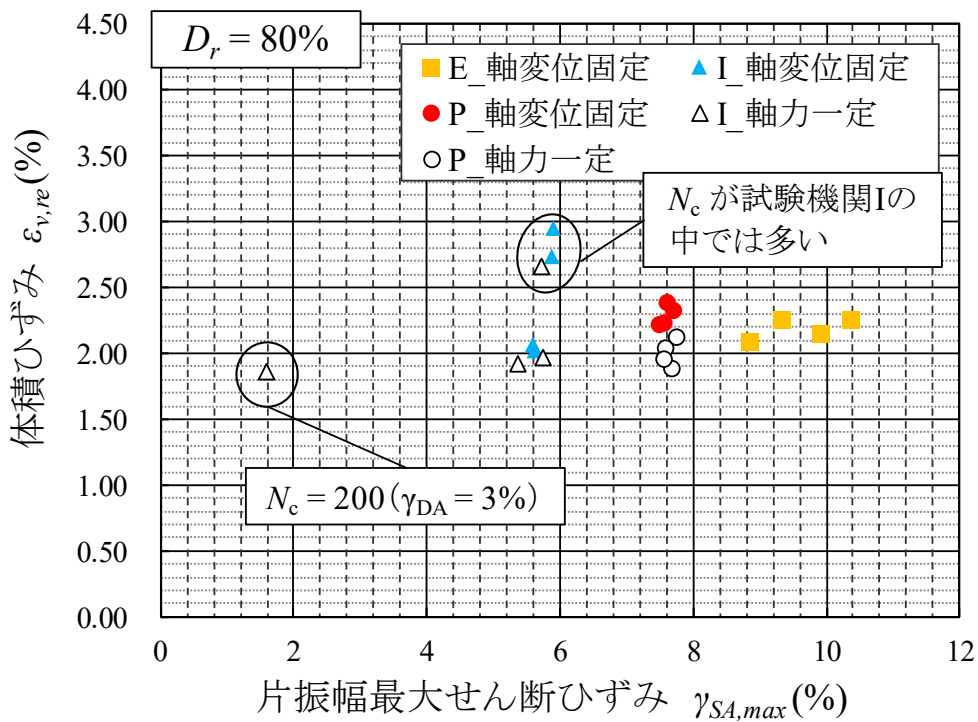
#### 4.4.1.6 再圧密時の体積ひずみ

片振幅最大せん断ひずみと再圧密時の体積ひずみの関係を図4.4.21に示す。参考として、軸変位固定条件で試験を実施した機関 E の結果も併せて示している。ばらつきはあるものの、 $D_r = 50\%$ の場合は体積ひずみ2.5%~3.0%程度で、 $D_r = 80\%$ の場合は体積ひずみ2.0%~2.5%程度の範囲に分布しているものが多い。軸変位固定と軸力一定を比較すると、片振幅最大せん断ひずみが同程度の場合、軸変位固定のケースのほうが、軸力一定のケースよりも体積ひずみが大きい傾向が認められる。非排水繰返し载荷後の残留せん断ひずみが大きくなると再圧密体積ひずみが過小評価されるという知見<sup>12)</sup>を踏まえると、軸力一定条件下での非排水繰返し载荷時に発生する、軸ひずみの影響によるものと考えられる。

上記の考察の妥当性を検証するために、残留せん断ひずみ $|\gamma_{res}|$ および残留軸ひずみ $\varepsilon_{a, res}$ と体積ひずみの関係を整理したものを図4.4.22、図4.4.23に示す。ここでいう残留せん断ひずみ $|\gamma_{res}|$ および残留軸ひずみ $\varepsilon_{a, res}$ とは、非排水繰返し载荷終了後にせん断応力をゼロに戻した時に残留するせん断ひずみ（絶対値）および軸ひずみを指す。図4.4.22の残留せん断ひずみと体積ひずみの関係において、点に隣接して記載されている数値は残留軸ひずみ $\varepsilon_{a, res}$ （%）である。残留せん断ひずみについては、試験機関が同じ場合、軸力一定と軸変位固定で類似の分布をしており、残留せん断ひずみに対する軸固定の影響は観察されなかった。残留軸ひずみに関しては、軸変位固定ではほぼゼロであるが、軸力一定の場合、0.2%~1.7%（ $D_r = 50\%$ ）、0.8%~3.3%（ $D_r = 80\%$ ）程度生じている。残留せん断ひずみおよび残留軸ひずみと体積ひずみの間に相関関係は認められなかった。 $D_r = 50\%$ の機関P（軸力一定）が右下がりとなっているように見えるが、繰返し回数が254回とひずみ履歴が顕著に大きい外れ値が影響しており、残留軸ひずみの影響によるものとは断定できない。ひずみ履歴や圧密後相対密度などの試験条件のばらつきによって、残留せん断ひずみおよび残留軸ひずみの影響が埋没してしまったと推察される。残留軸ひずみの影響を検証するためには、試験条件（相対密度など）およびひずみ履歴（最大せん断ひずみや累加せん断ひずみなど）を揃え、残留軸ひずみだけが異なるような試験を実施する必要がある、その検証は今後の課題である。

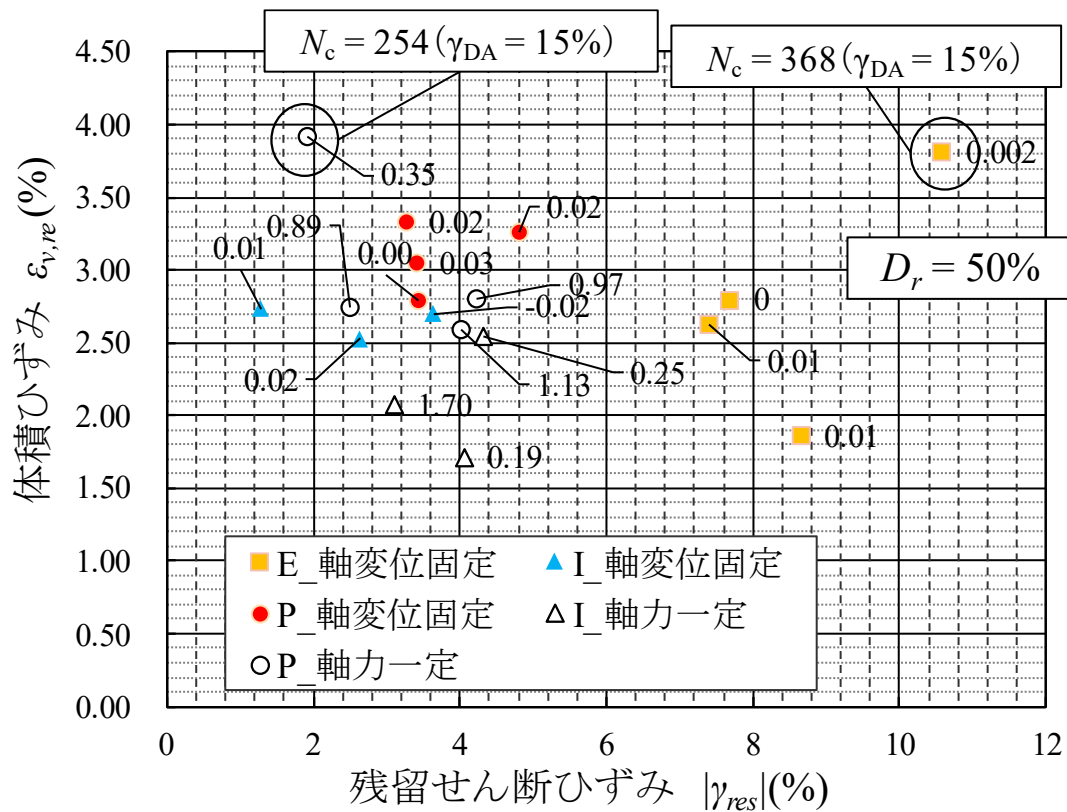


(a)  $D_r = 50\%$

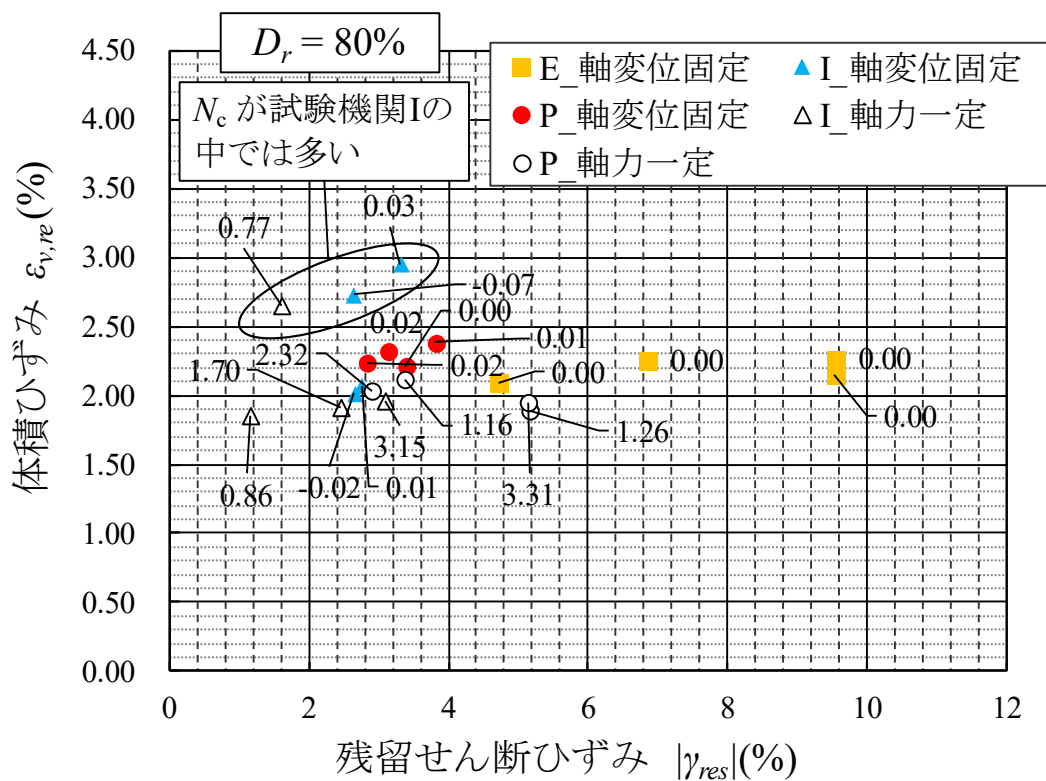


(b)  $D_r = 80\%$

図4.4.21 片振幅最大せん断ひずみ-体積ひずみ

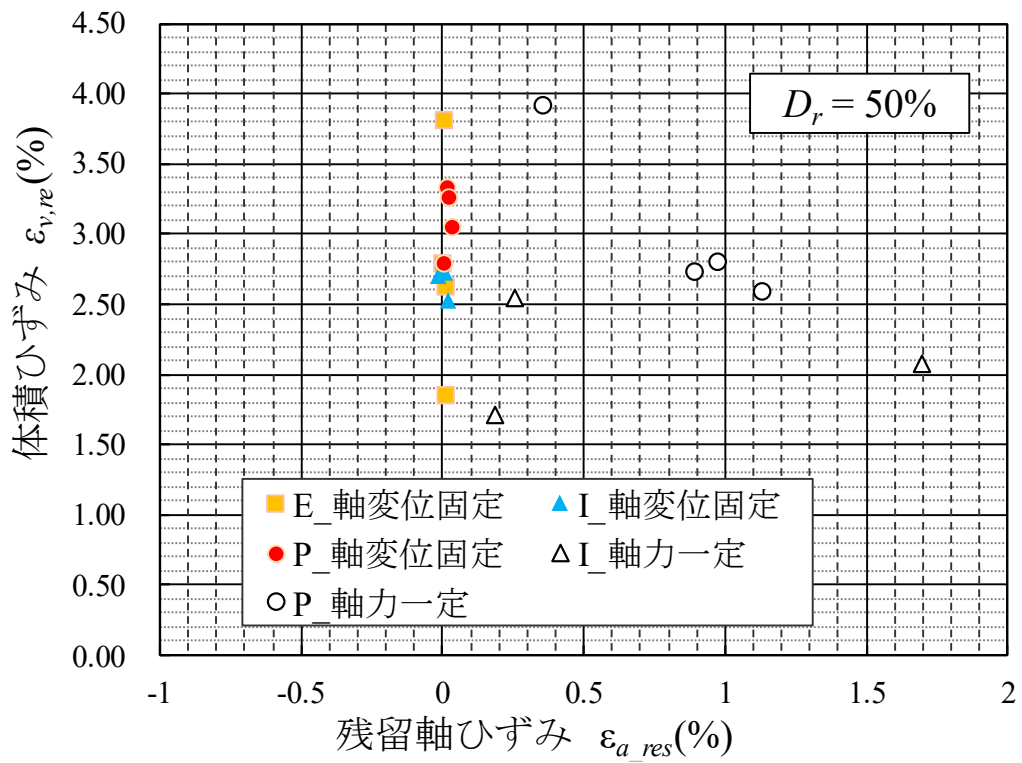


(a) (50P, 50D)

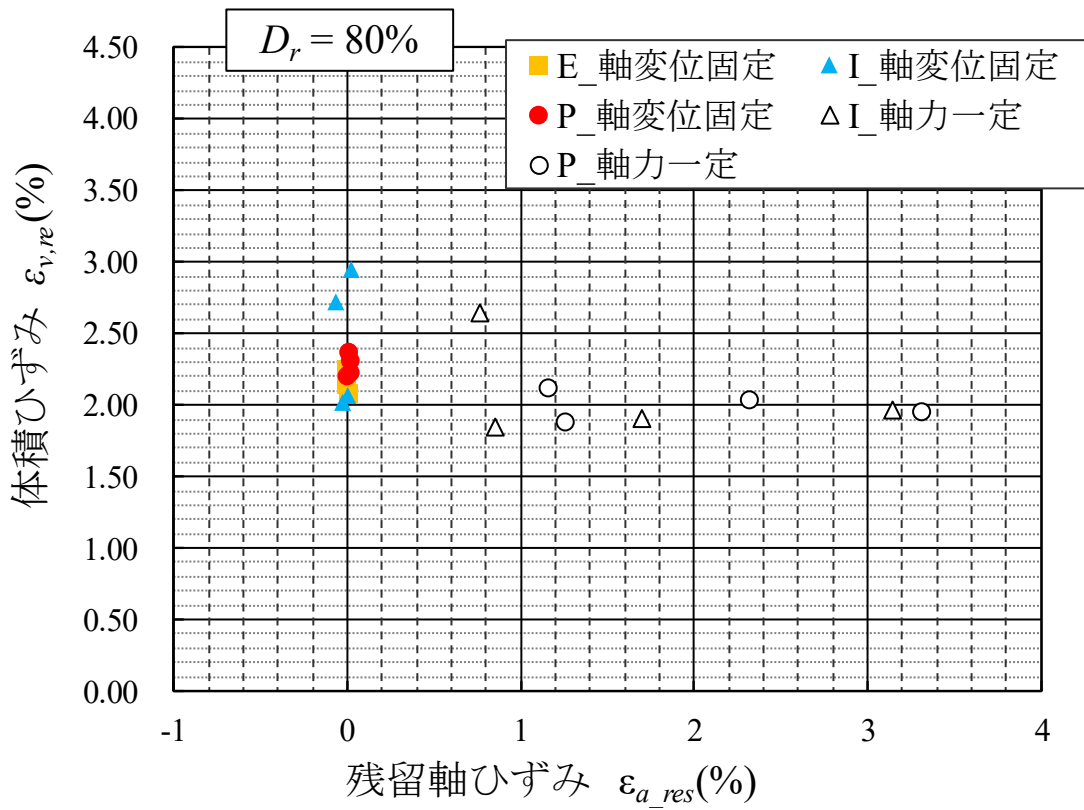


(b) (80P, 80D)

図4.4.22 残留せん断ひずみ-体積ひずみ



(a) (50P, 50D)



(b) (80P, 80D)

図4.4.23 残留軸ひずみ-体積ひずみ

#### 4.4.2 全試験機関の分析

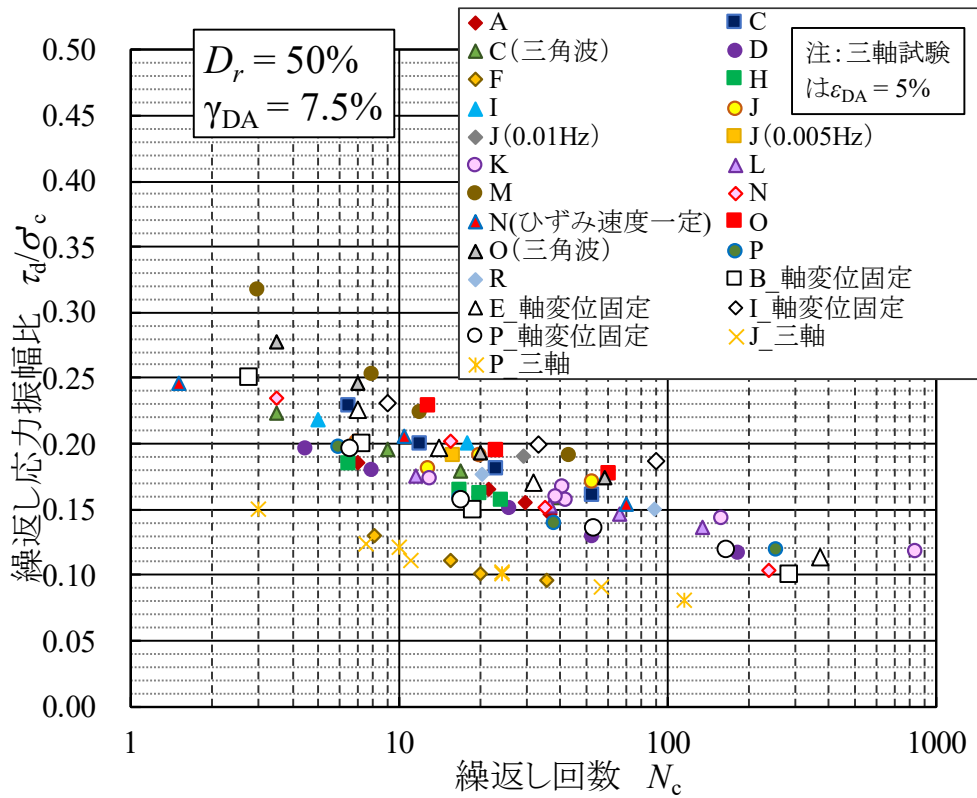
軸変位固定条件と軸力一定条件の両条件の試験を実施した試験機関 I および P で見いだされた傾向が他試験機関でも成り立つかを検討するため、軸変位固定、または軸力一定のどちらかのみを実施している他試験機関も含めた分析を行った。

##### 液状化強度曲線

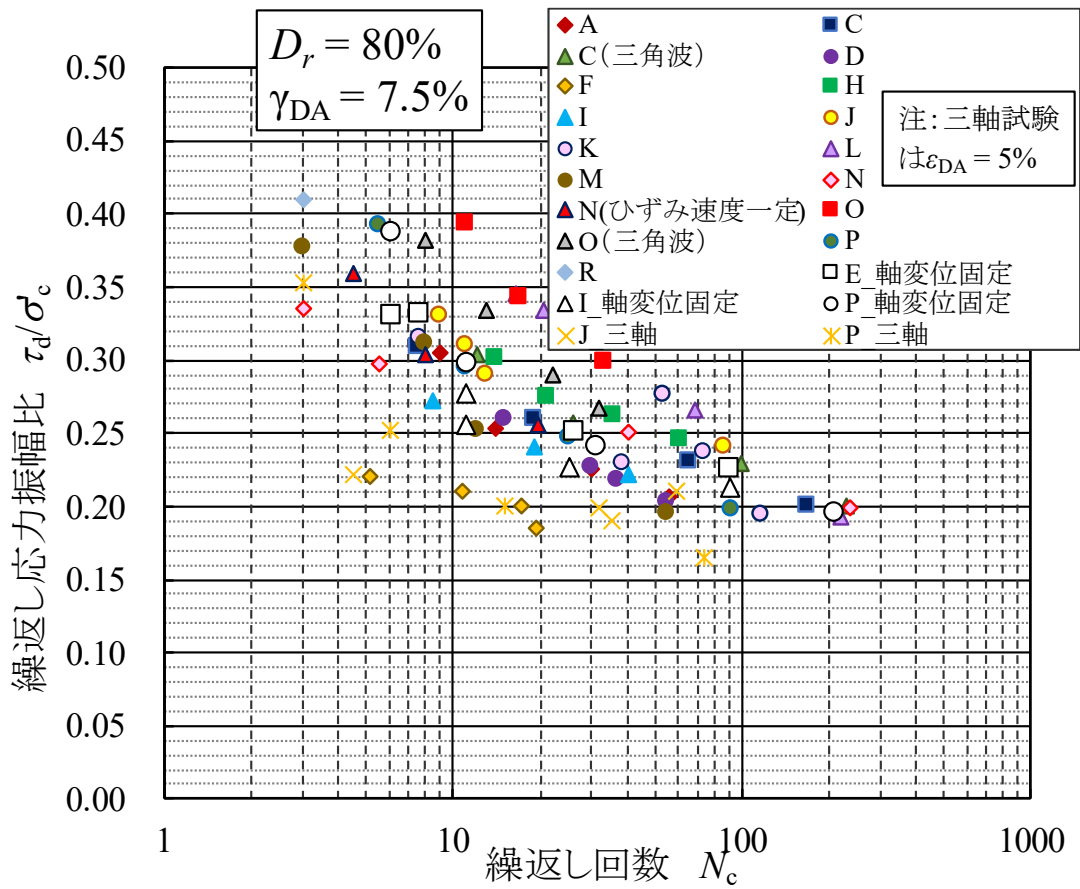
全試験機関の応力比—繰返し回数の関係を図4.4.24に示す。図中の色付きのものが軸力一定、白抜きのが軸変位固定で実施したものを指す。軸変位固定のケースの内、 $D_r = 50\%$ で試験機関 I が上側に位置しているものの、それ以外は軸力一定の平均的な範囲に収まっているといえる。試験機関 I は、軸力一定条件でも上側に位置しているため、軸固定の影響は軽微であると考えられる。

圧密後の平均相対密度または軸固定条件および相対密度条件で場合分けした液状化強度比の関係を図4.4.25に示す。参考として、三軸試験の結果も併せて示している。軸力一定のほうが外れ値が多いように見えるが、軸変位固定のケース数が少ないため、軸力一定のほうがばらつきが大きいとは必ずしも言えない。多くの試験機関において、 $D_r = 50\%$ では0.15~0.20に、 $D_r = 80\%$ では0.24~0.29に分布しており、相対密度の違いの影響が認められる。軸変位固定と軸力一定での液状化強度に差は見られず、軸固定の有無の液状化強度への影響は観察されなかった。また、三軸試験の結果は、各相対密度における液状化強度の下限値付近に分布している。

古田ら<sup>13)</sup>は、高さ4cm の再構成深草粘土を用いて、鉛直変位の拘束条件を可変とした異方圧密非排水繰返し中空ねじり試験を実施し、鉛直変位を非拘束とした場合、せん断ひずみよりも鉛直変位が卓越し、鉛直変位を拘束した場合よりも過剰間隙水圧比の上昇やひずみの増加が抑制されると報告している。供試体高さ（4cm であるため、端面拘束の影響が大きいと考えられる）や粘性土であるという点に留意が必要であるものの、本一斉試験は等方応力条件下で実施したものであり、異方応力条件などによって軸ひずみが生じやすい場合、応力比—繰返し回数の関係に違いが生じる可能性がある。

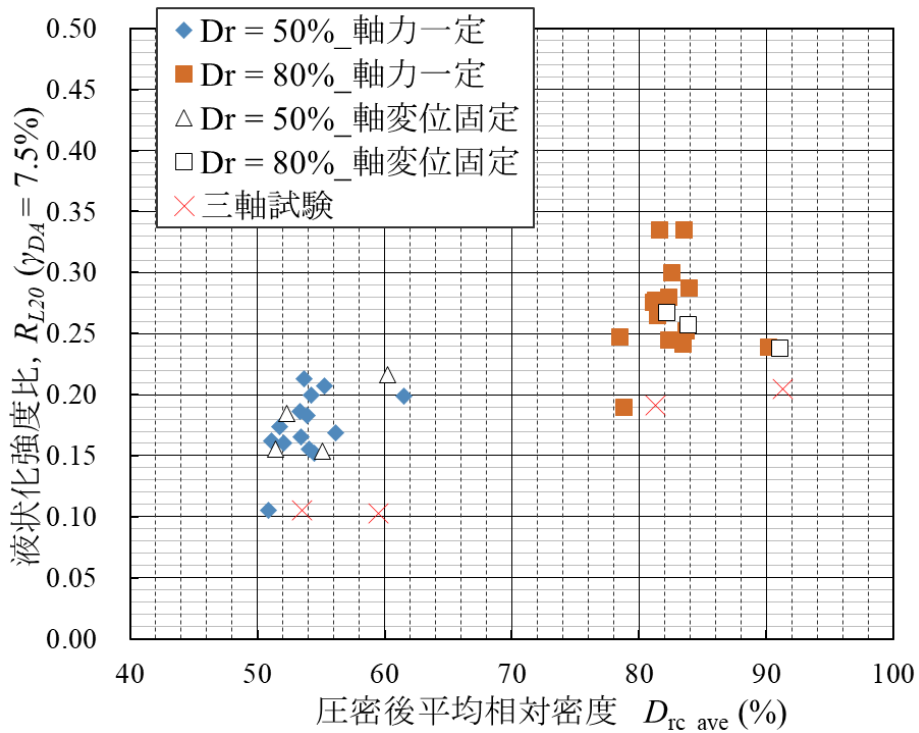


(a)  $D_r = 50\%$

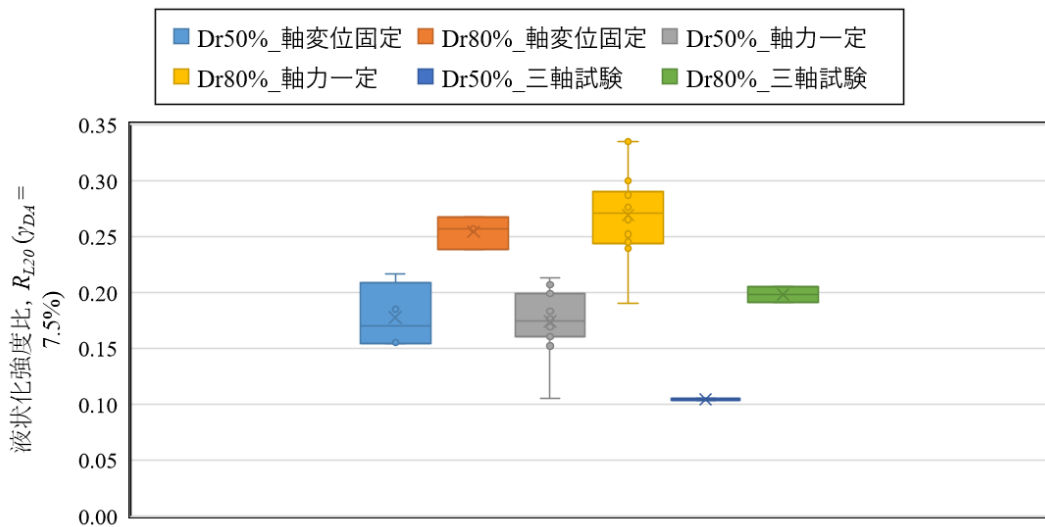


(b)  $D_r = 80\%$

図4.4.24 応力比—繰返し回数の関係



(a) 圧密後平均相対密度との関係



(b) 軸固定条件と相対密度条件での場合分け

図4.4.25 液状化強度比と軸固定条件

#### 4.4.2.1 再圧密時の体積ひずみ

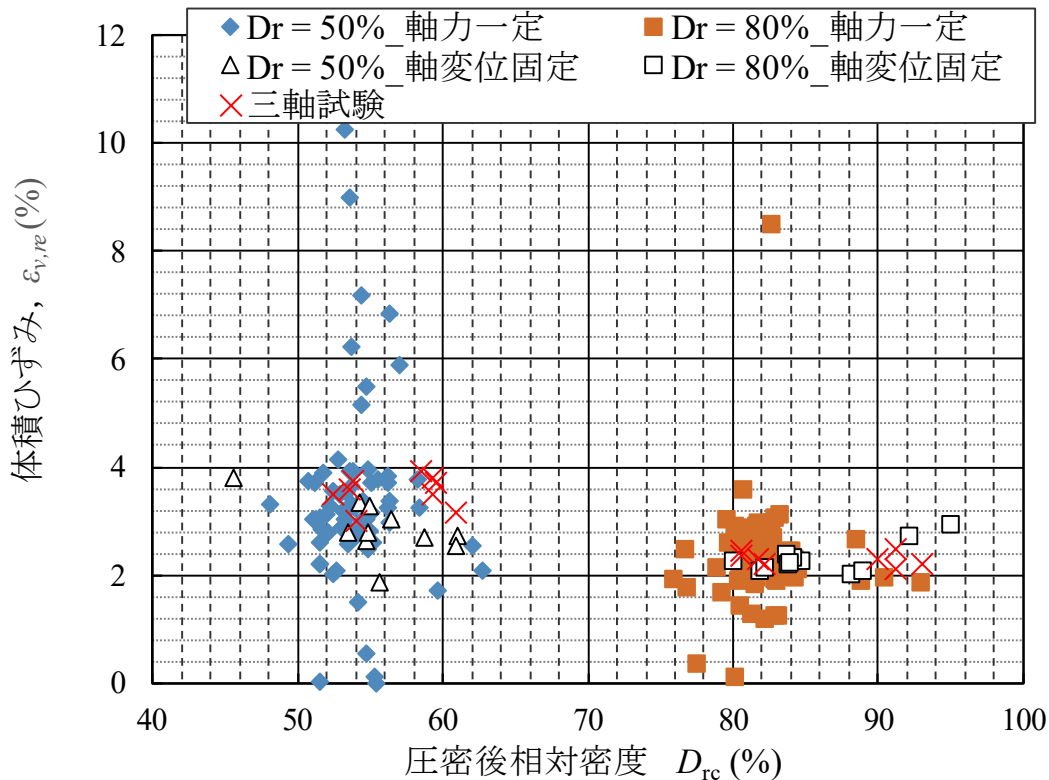
軸固定条件および相対密度条件で場合分けした体積ひずみを図4.4.26に示す。軸力一定のほうが外れ値が多いように見えるが、軸変位固定のケース数が少ないため、軸力一定のほうがばらつきが大きいとは必ずしも言えない。多くの試験機関において、 $D_r = 50\%$ は2.6%～3.7%に、 $D_r = 80\%$ は2.0%～2.6%に分布しており、相対密度の違いの影響が認められる。試験機関を固定した場合（試験機関 I と P），軸変位固定のほうが軸力一定よりも体積ひずみが大きい傾向が認められたものの、全機関の平均値で見ると、 $D_r = 80\%$ では軸力一定（2.30%）と軸変位固定（2.31%）で体積ひずみに違いが認められなかったが、 $D_r = 50\%$ では大小関係が逆転し、軸力一定（3.36%）

のほうが軸変位固定（2.86%）よりも体積ひずみが大きい結果となった。また、三軸試験の結果は、 $D_r = 50\%$ では軸力一定に近い分布形状を示している。 $D_r = 80\%$ では、軸力一定、軸変位固定と類似した分布形状を示している。

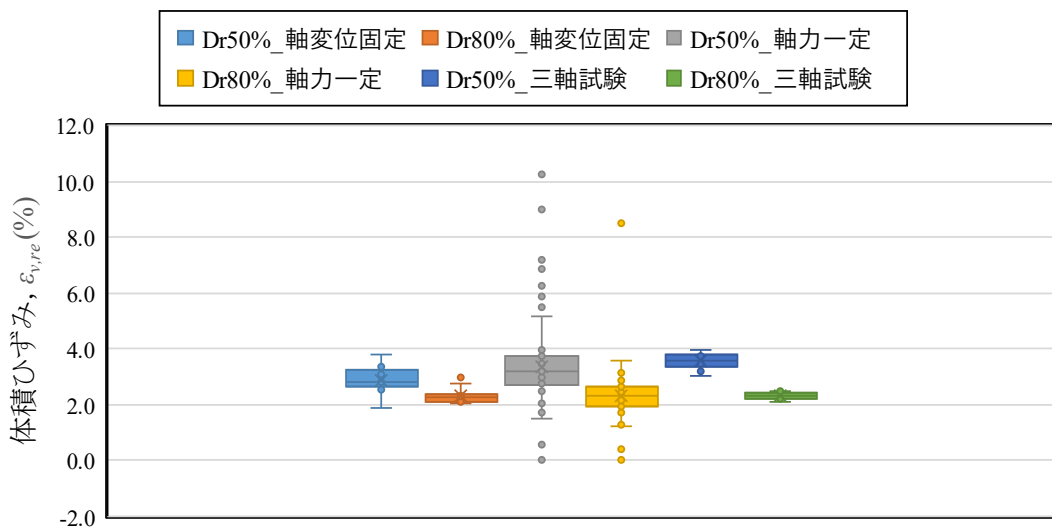
#### 4.4.2.2 時刻歴

各試験機関の過剰間隙水圧比—軸差応力および過剰間隙水圧比—軸ひずみの関係を図4.4.27～図4.4.48に示す。なお、一部の結果において、軸力一定にもかかわらず軸ひずみが欠測している（50P-K, 80P-K）ものもあったが、補正せずにあわせて作図している。

過剰間隙水圧比の増加に伴う軸差応力や軸ひずみの変化は、試験機関によって大きく異なる結



(a) 圧密後平均相対密度との関係



(b) 軸固定条件と相対密度条件での場合分け

図4.4.26 体積ひずみと軸固定条件



果となった。詳細に検討した試験機関 I および P (軸力一定) では、過剰間隙水圧比の増加に伴い軸ひずみが徐々に増加していき、軸方向に圧縮していく傾向が共通して確認できた。全試験機関を分析したところ、試験機関によっては軸ひずみが徐々に低下 (軸方向に伸張) する機関 (80P-Q, 80P-N など) が存在し、軸方向に圧縮するケースと伸張するケースが混在している試験機関 (50P-J, 80P-J など) も存在した。また、最終的に軸ひずみが10%近く生じる機関もあれば、±1%未満と比較的小さい軸ひずみに留まる機関もあるなど、軸ひずみの発生日合いにも差異が認められた。軸力一定条件での非排水繰返し载荷に伴う軸ひずみの生じ方について、一貫した傾向を見出すことは困難である。

詳細に検討した試験機関 I および P (軸力一定) では、軸力一定条件においても過剰間隙水圧比が1.0に近づくまでは軸差応力をほぼ一定に制御できる機関 P と、载荷開始段階から軸差応力が変動する機関 I のように、試験機関によって軸力の制御状況に違いが見られた。全試験機関を分析したところ、軸力の制御状況にさらに異なるパターンが認められたが、いずれの機関でも過剰間隙水圧比が1.0に近づくとも軸差応力の変動や変化が大きくなり、制御が困難になる傾向が観察できた。例えば、载荷開始段階から軸差応力が増加傾向にある機関 C、過剰間隙水圧比が1.0に近づくまでは軸差応力をほぼ一定に制御できるがそれ以降は軸差応力が低下していく機関 H、载荷開始直後から軸差応力が高振動数で変動する機関 L など、試験機関によって特徴的な挙動を示している。

軸変位固定を実施しているのは機関 B, E, I および P であり、いずれの機関も過剰間隙水圧比が1.0に近づくとも軸ひずみにわずかな振幅が生じるものの、オーダーにして0.01%レベルであり、全過程にわたって軸変位固定を達成できているといえる。なお、軸変位の固定方法としては、機関 B および I は载荷ピストンを载荷装置上部のフレームにネジ止めするような形で、機関 P は軸力を与えているモーターの電源を OFF とすることで固定している (機関 E は不明)。

軸変位固定条件における軸差応力の変化としては、過剰間隙水圧比が0.4程度までは減少して以降は増加に転じる機関 (50D-B, 50D-I, 80D-I) や载荷開始直後に増加してから減少していき、過剰間隙水圧比が1.0近くになってから増加に転じる機関 P、それら2つの傾向が混在している機関 E などと、試験機関によって違いが見られた。なお、機関 B はひずみ速度一定で载荷を行っているが、0.1Hz の正弦波で载荷を行っている機関 I と類似した傾向を示しており、载荷方法の違いの影響は認められなかった。全体としては、過剰間隙水圧比の増加とともに軸差応力が低下していき、過剰間隙水圧比が1.0近くになるとサイクリックモビリティによって軸差応力が増減を繰り返すようになる傾向がある。なお、軸変位固定では水膜が生成する可能性があるが、側方変形の抑制などの工夫を伴う中空ねじり試験で水膜の形成を観察した國生ら<sup>10),11)</sup>によると、水膜が形成された場合、せん断応力や鉛直応力の伝達がなくなるという。一方、今回の軸変位固定を実施した各試験機関の時刻歴では、载荷終了時までせん断応力が伝達しており、軸差応力の変動も認められた。また、水膜の生成には砂が沈下するために液状化後にインターバルが必要とされ、一定速度での一定応力振幅繰返し载荷で液状化までの試験を実施した本一斉試験の軸変位固定条件においては、文献10)で確認された水膜の特徴は認められなかった。

試験機関 J は、周波数0.1Hz に加え、周波数0.01Hz, 0.005Hz でも試験を実施している (図 4.4.37)。試験機関 J の周波数0.1Hz の試験は、軸ひずみが圧縮方向に進展するケース (50P-J-2, 80P-J-4) と伸張方向に進展するケースが混在しており、前者は軸差応力が繰返し载荷初期から増大している。前者の試験条件を見ると、 $D_r$  が同じケースの中では、初期軸差応力や相対密度の観点からは明瞭な違いはないものの、圧密後の排水量が最も低かった (50P-J-2 : 1738mm<sup>3</sup>, 80P-J-4 : 1494mm<sup>3</sup>)。以上のことから、供試体作製時の骨格構造が他のケースと異なっていた可能性がある。周波数が異なるケースを見ると、周波数0.01Hz では、载荷初期から軸差応力が増加しており、軸ひずみも圧縮方向に20%以上生じる結果となっている。一方、周波数0.005Hz では軸差応力が载荷初期から増加しているものの、増加の割合は低く、軸ひずみも伸張方向に進展する結果となった。CSR (=0.190) および  $D_r$  (=50%) が同等の50P-J-2 (周波数0.1Hz) では、軸差応

力が荷初期から増加しており、軸ひずみも圧縮方向に1%程度生じている。以上のように、軸差応力と軸ひずみの生じ方が一貫していないため、荷周波数が軸方向の挙動に与える影響について、機関Jの試験結果だけから判断することは難しい。しかし、基本ケースである周波数0.1Hzの他ケースでは過剰間隙水圧比が1.0近くになるまでは軸差応力の変動が小さいことを考慮すると、周波数を低下させたからといって軸力の制御状況が改善されるわけではないといえる。

試験機関 N は、軸力一定条件において、ねじり力を0.1Hzの正弦波で与える試験に加え、ひずみ速度一定で与える試験も実施している。両ケースでの軸差応力と軸ひずみの変動を比較すると、軸差応力振幅の最大値という観点からは、0.1Hzの正弦波 ( $D_r = 50\%$ で7kN/m<sup>2</sup>,  $D_r = 80\%$ で10kN/m<sup>2</sup>程度) よりもひずみ速度一定 ( $D_r = 50\%$ で3kN/m<sup>2</sup>,  $D_r = 80\%$ で4kN/m<sup>2</sup>程度) のほうが小さく、軸力をより制御できているといえる。軸ひずみの変化を見ると、 $D_r = 80\%$ については、繰返し回数が顕著に大きいケース (0.1Hzの正弦波の80P-N-2:  $\gamma_{DA} = 7.5\%$ の繰返し回数が235回) を除くと、いずれも-1%程度の軸ひずみが生じている。 $D_r = 50\%$ については、0.1Hzの正弦波では-0.1%~-0.4%程度の軸ひずみが生じているが、ひずみ速度一定では-0.5%~-1.0%程度の軸ひずみが生じており、ひずみ速度一定のほうが軸ひずみの絶対値が大きい。軸差応力の最大値を低減するという観点からはひずみ速度一定のほうが優れているが、軸ひずみの観点からは周波数一定のほうが優れているといえる。以上のことから、ひずみ速度一定と周波数一定のいずれかが優れているとは一概には判断できず、試験時間の観点からは、従来の周波数一定の荷でも問題ないといえる。

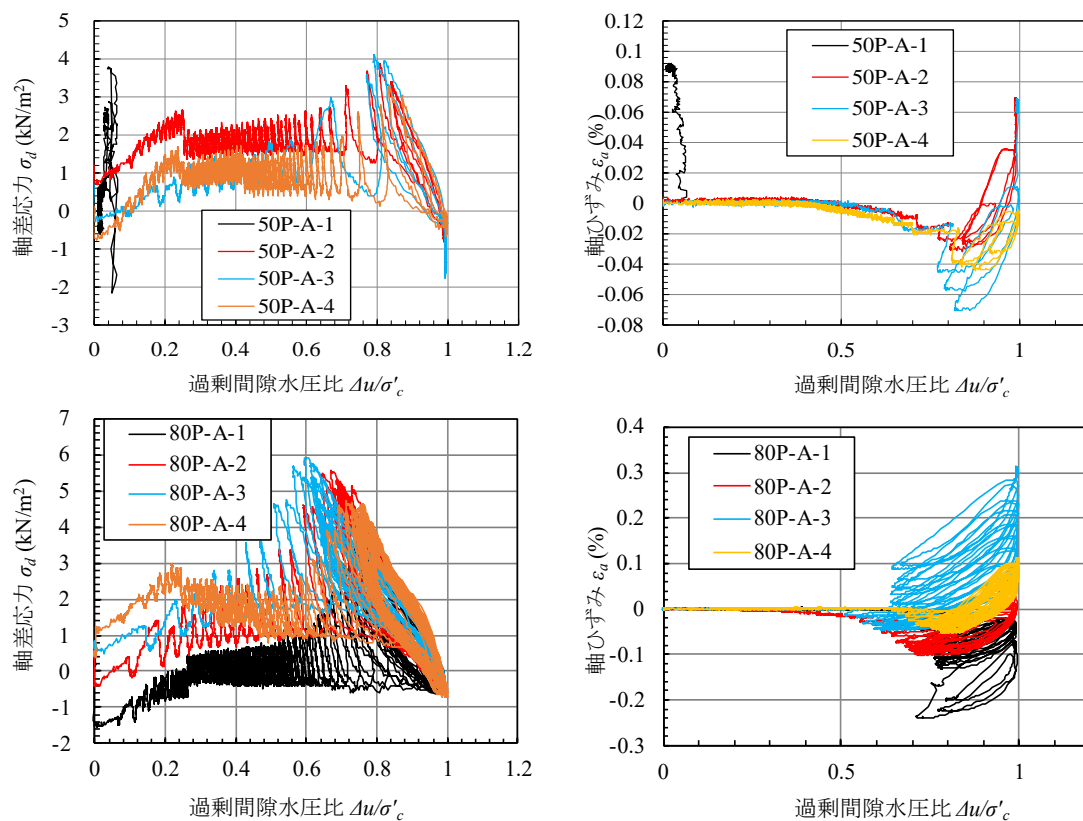


図4.4.27 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ (機関 A, 軸力一定)

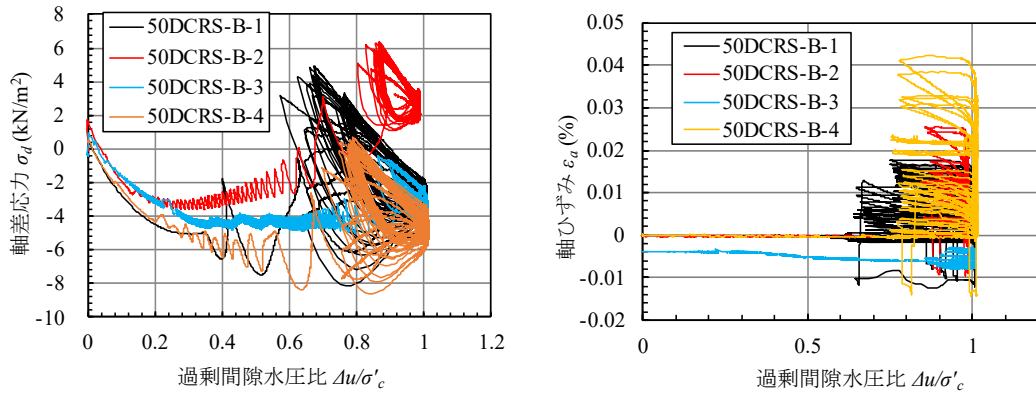


図4.4.28 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 B，軸変位固定）

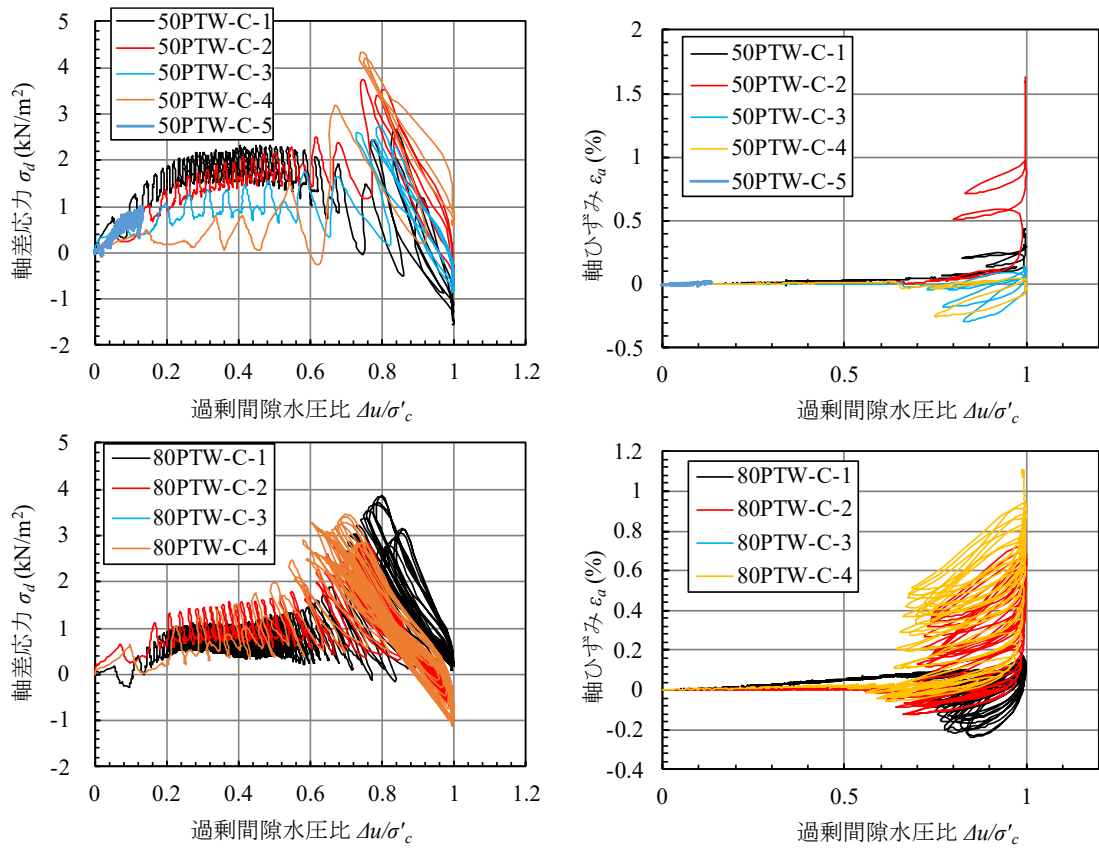


図4.4.29 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 C，三角波，軸力一定）

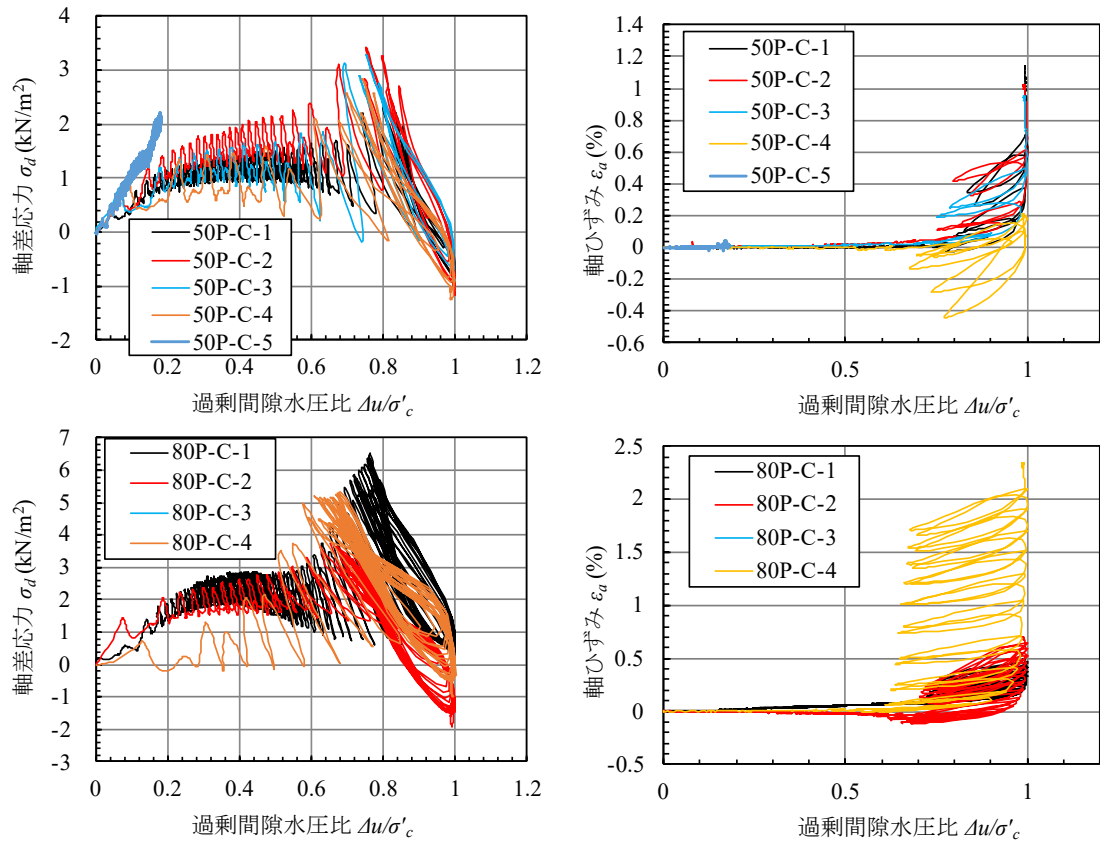


図4.4.30 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 C，正弦波，軸力一定）

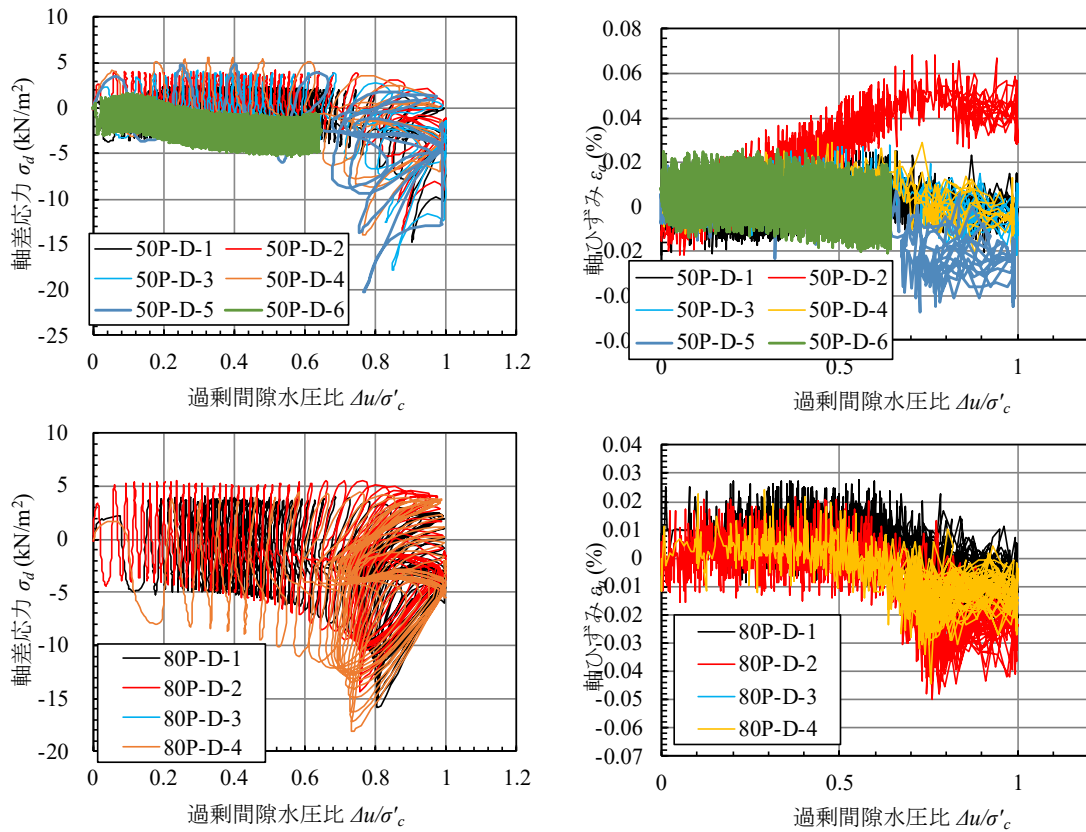


図4.4.31 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 D，軸力一定）

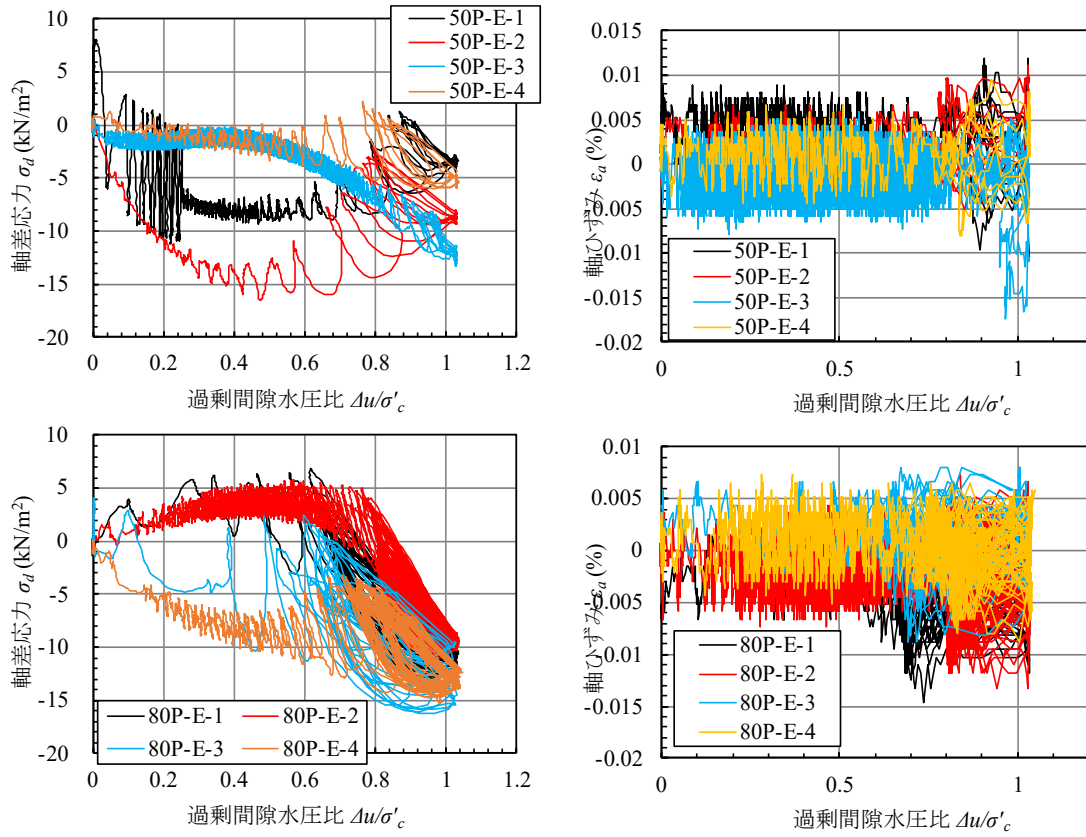


図4.4.32 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 E，軸変位固定）

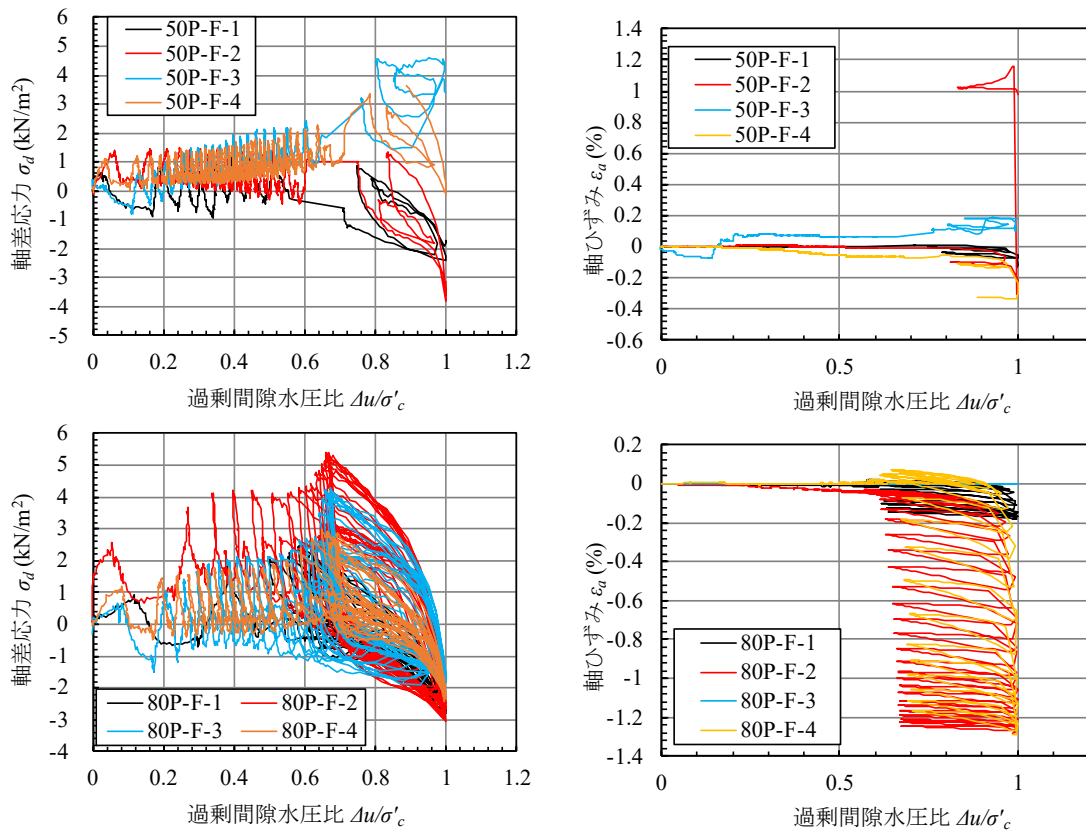


図4.4.33 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 F，軸力一定）

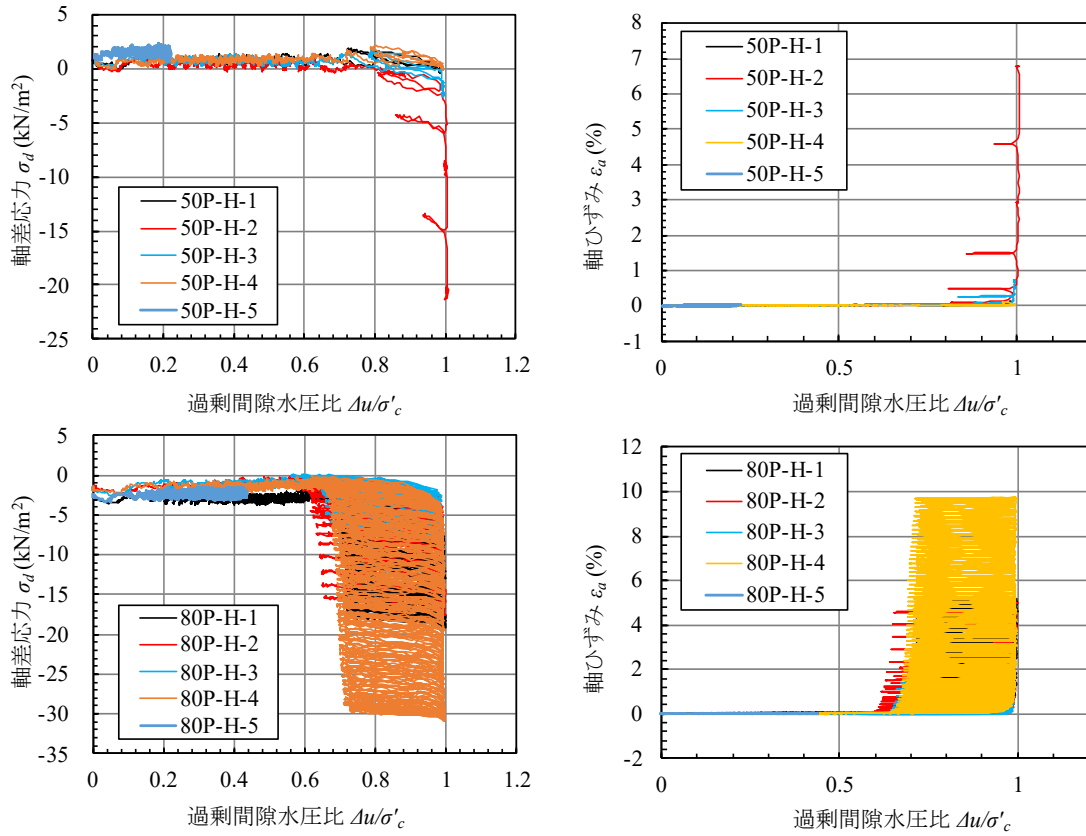


図4.4.34 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 H，軸力一定）

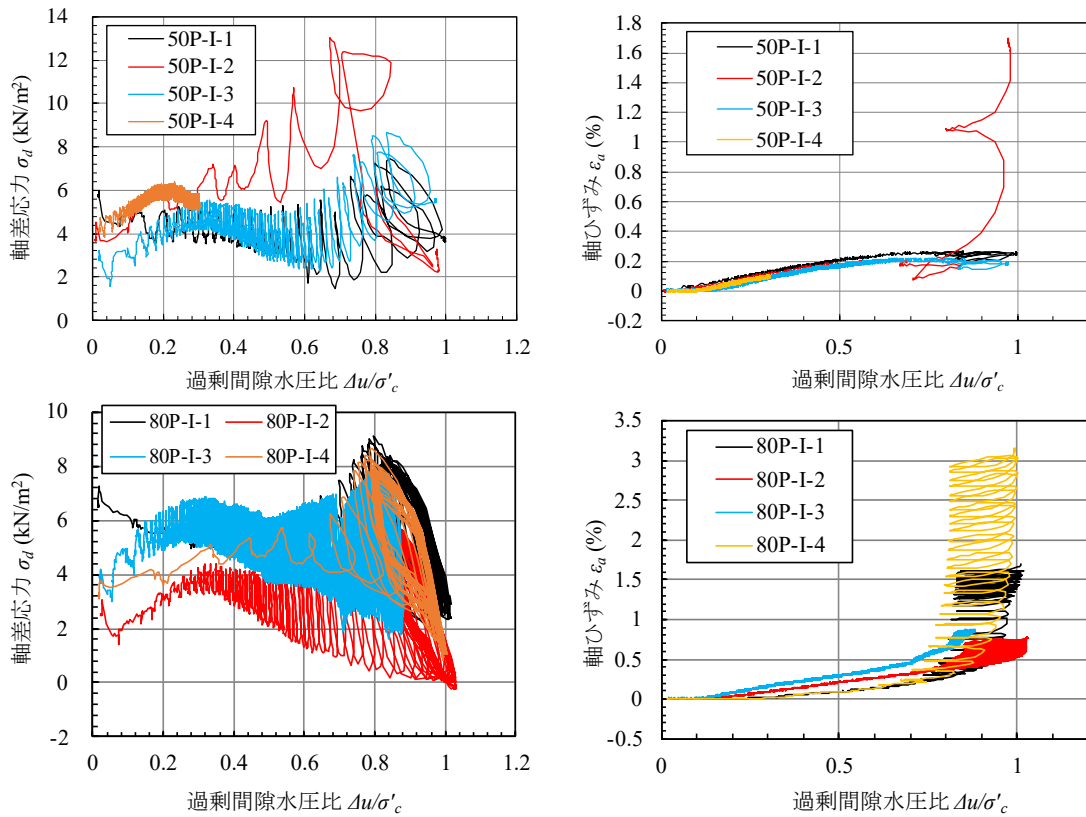


図4.4.35 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 I，軸力一定）

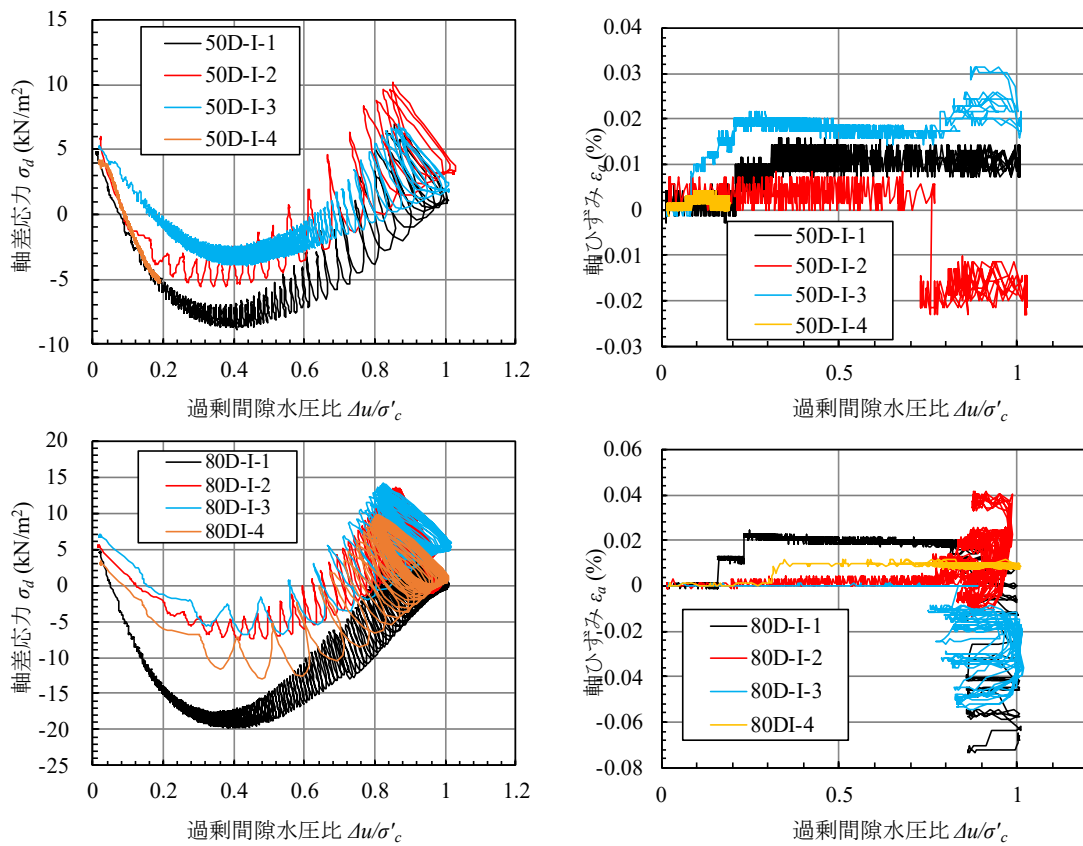


図4.4.36 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 I，軸変位固定）



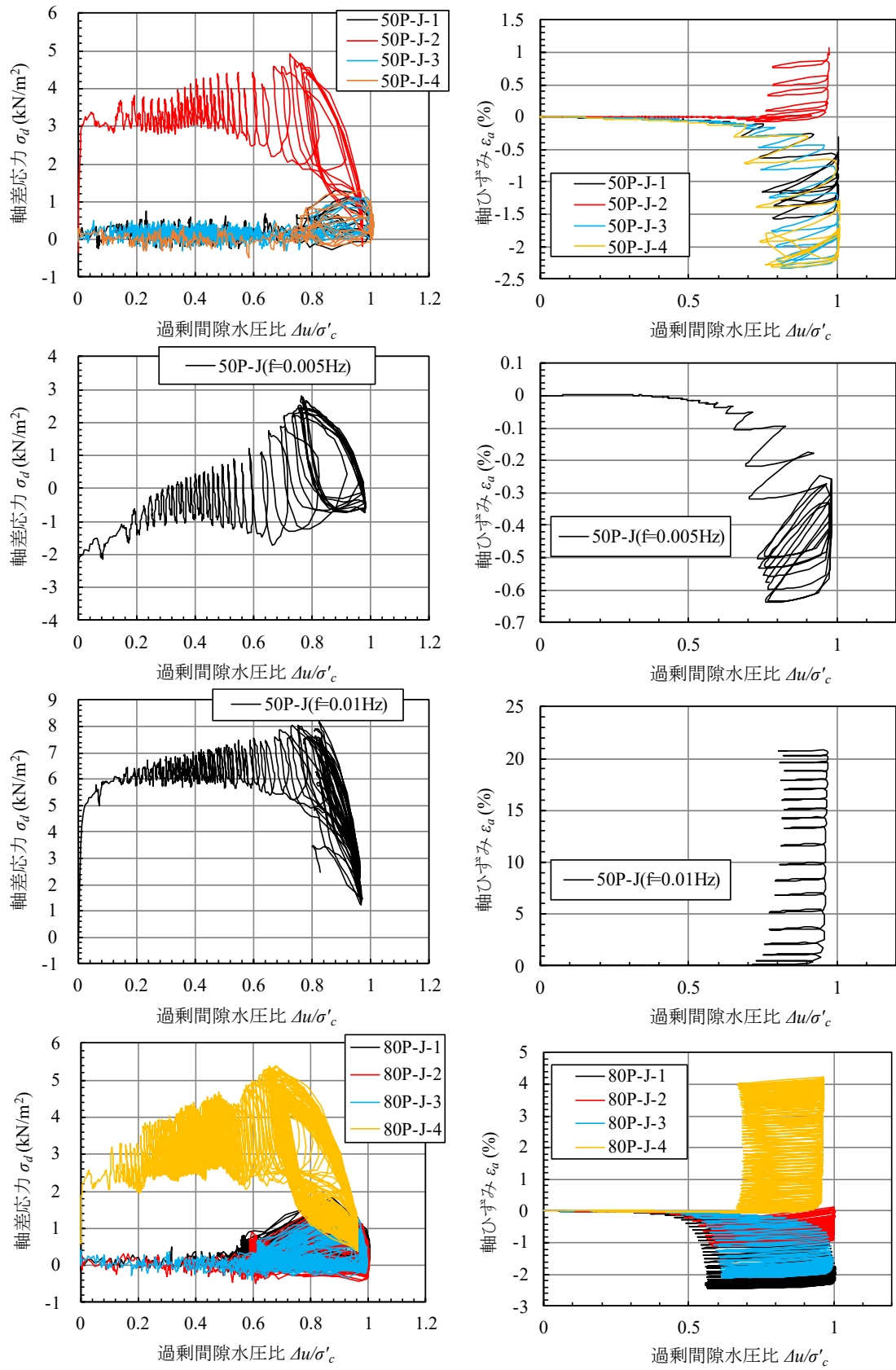


図4.4.37 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関J，軸力一定）



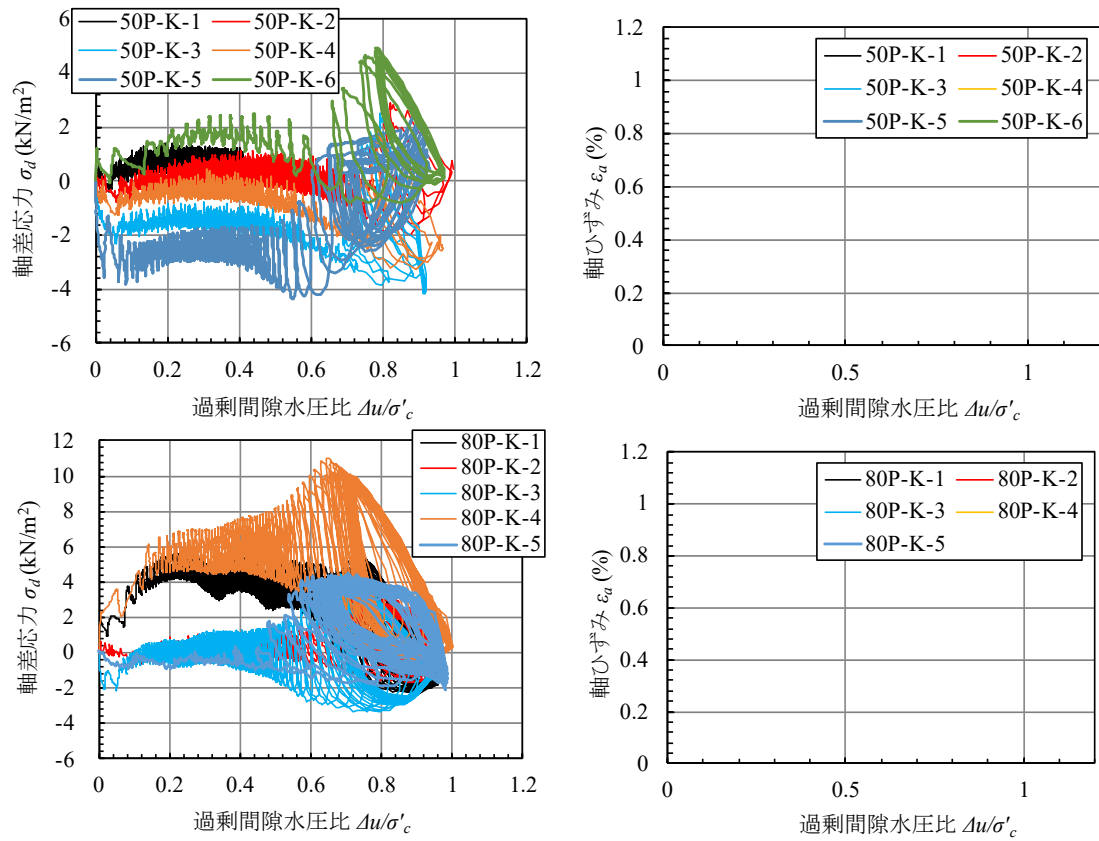


図4.4.38 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 K，軸力一定，軸ひずみは欠測）

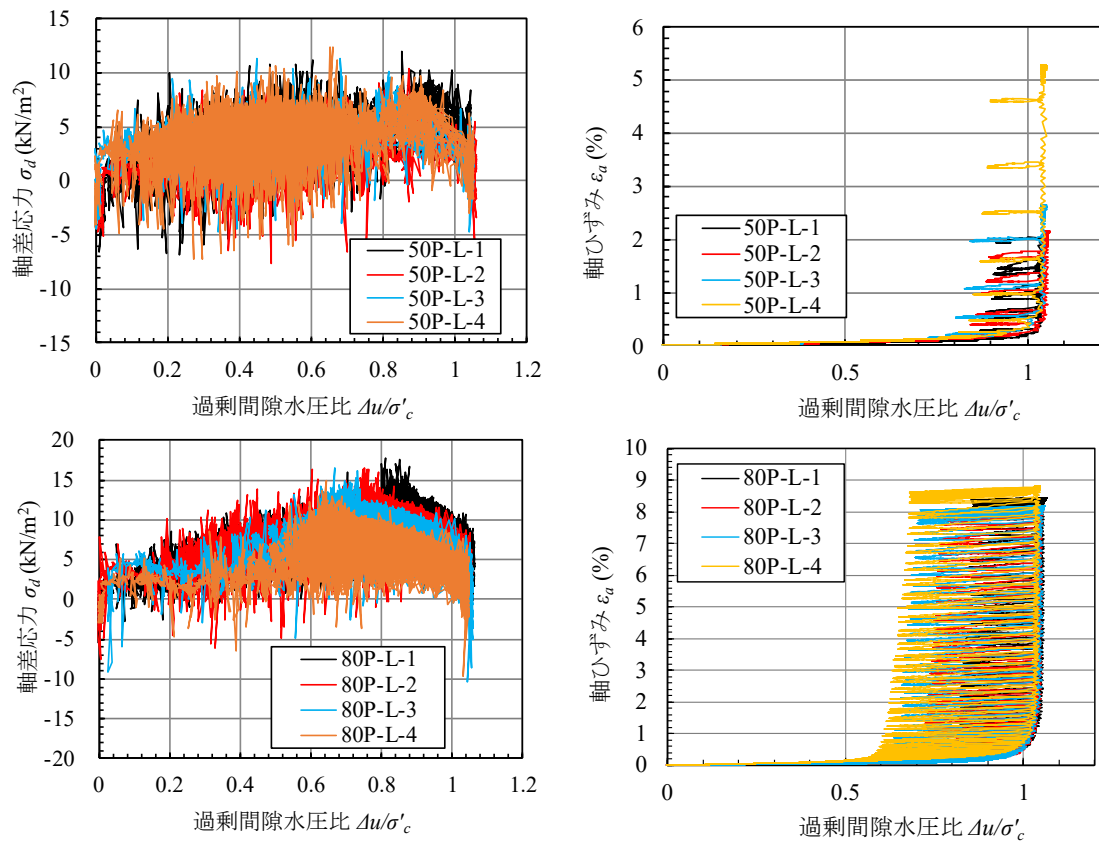


図4.4.39 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 L，軸力一定）

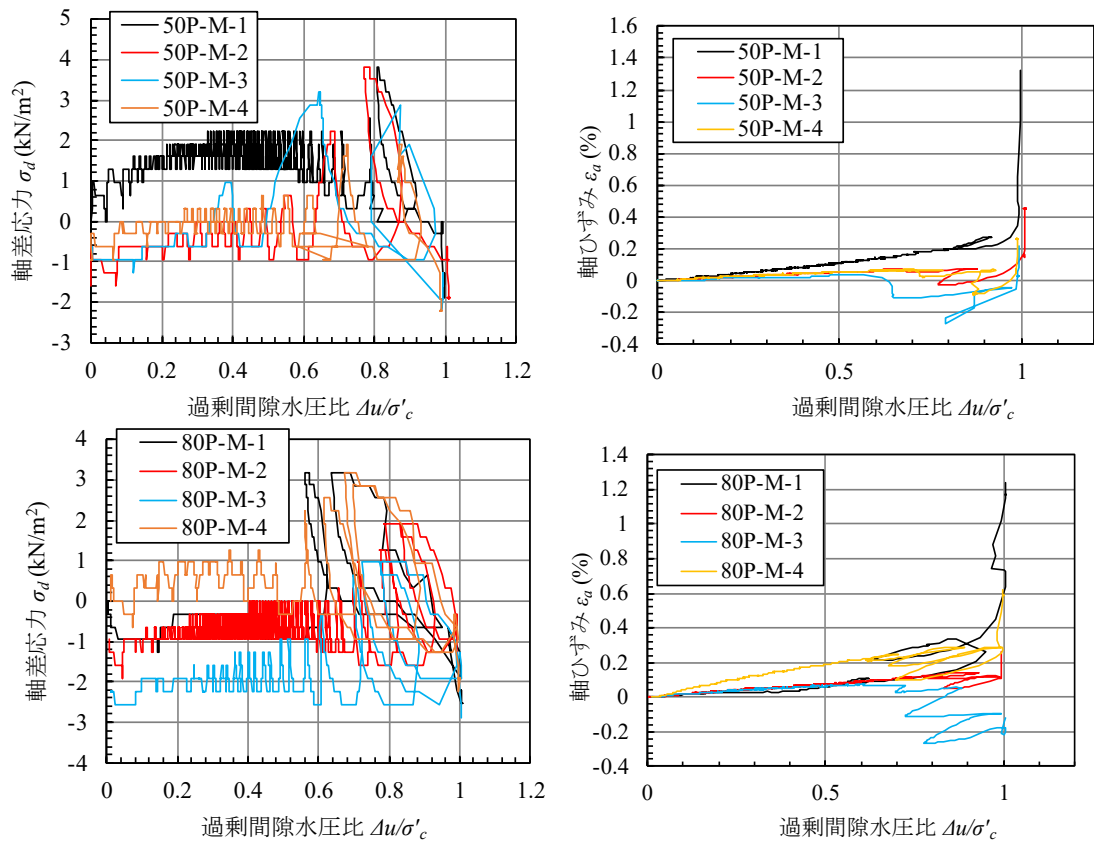


図4.4.40 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ (機関 M, 軸力一定)

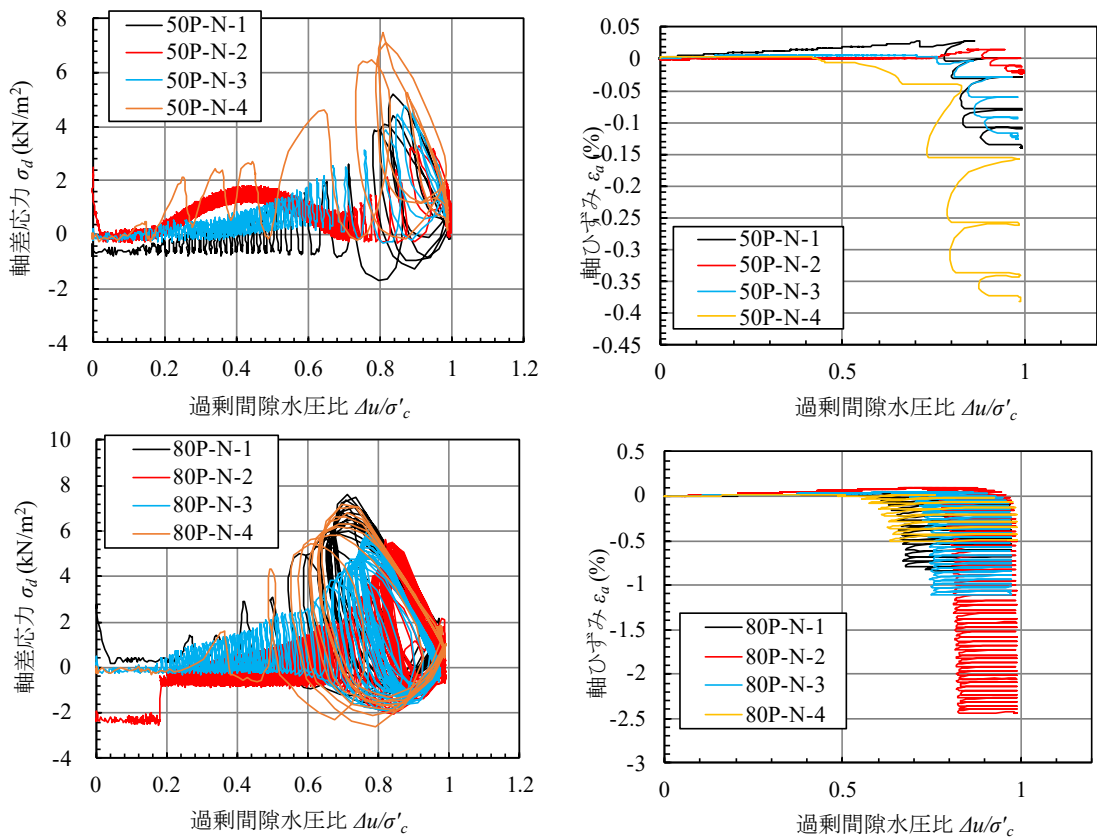


図4.4.41 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ (機関 N, 軸力一定)

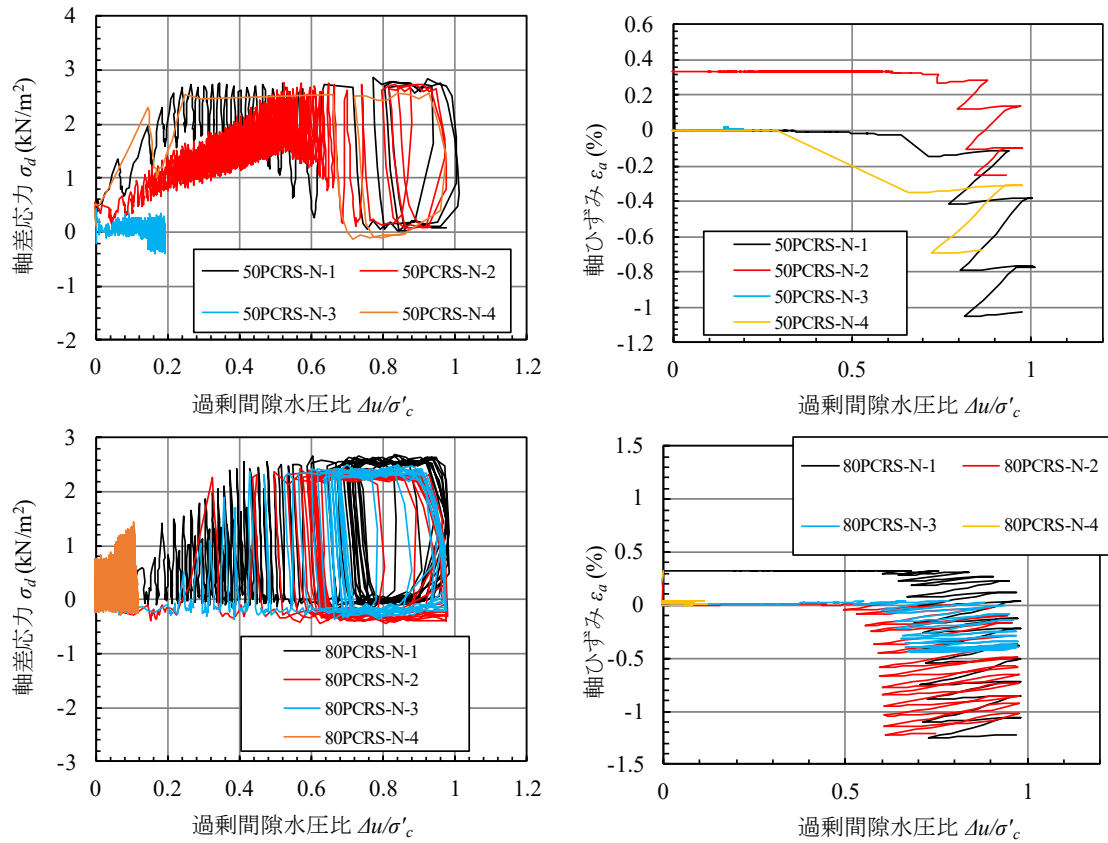


図4.4.42 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関N，ひずみ速度一定，軸力一定）

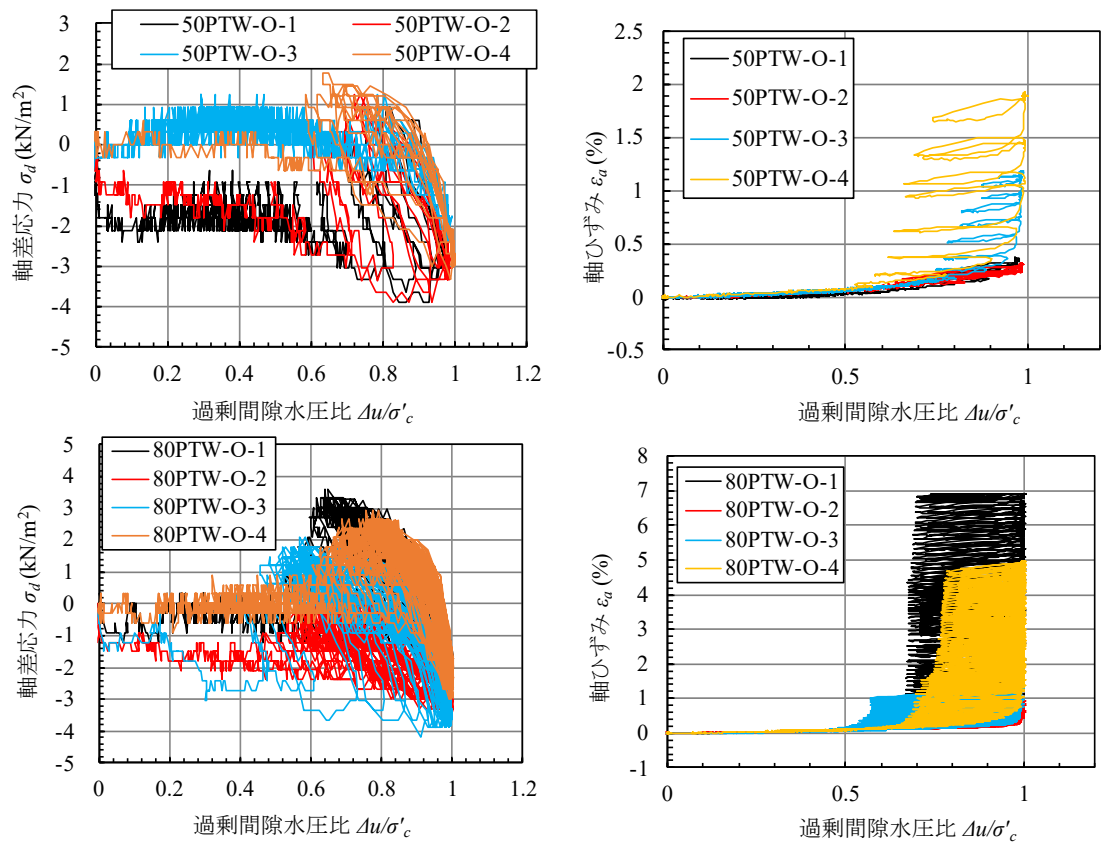


図4.4.43 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関O，三角波，軸力一定）

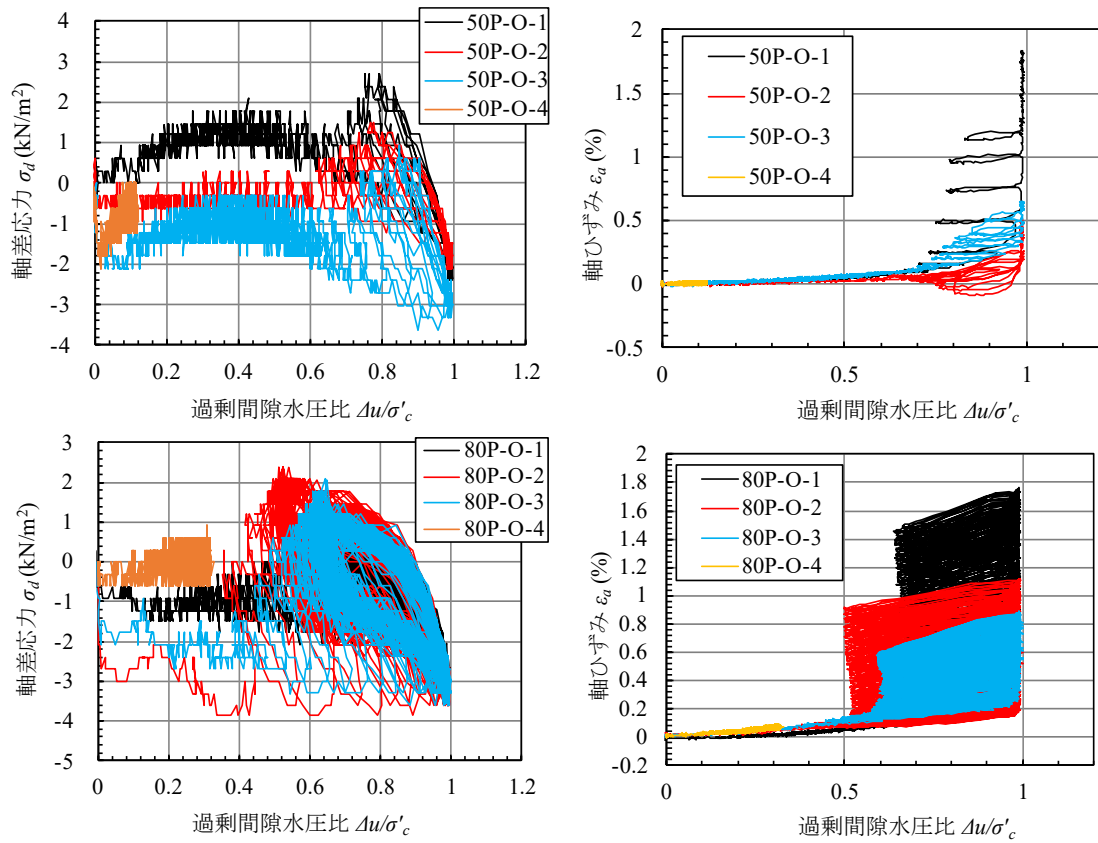


図4.4.44 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 O，正弦波，軸力一定）

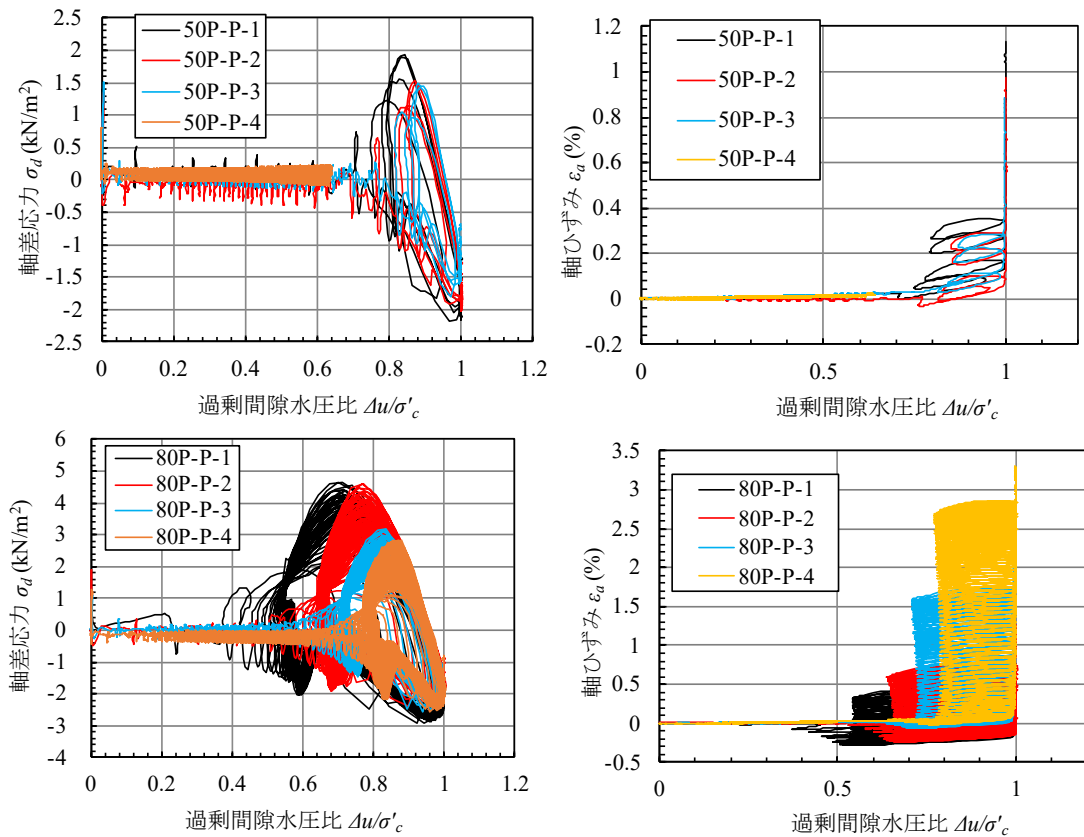


図4.4.45 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 P，軸力一定）

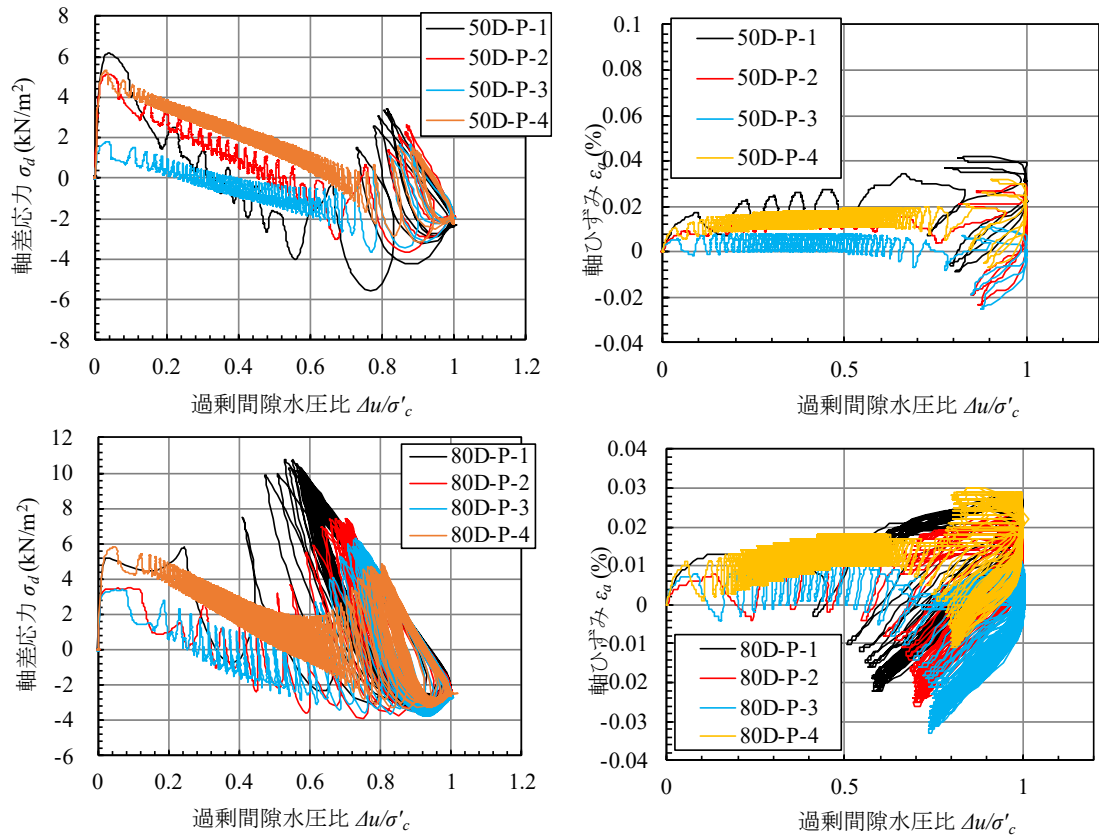


図4.4.46 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 P，軸変位固定）

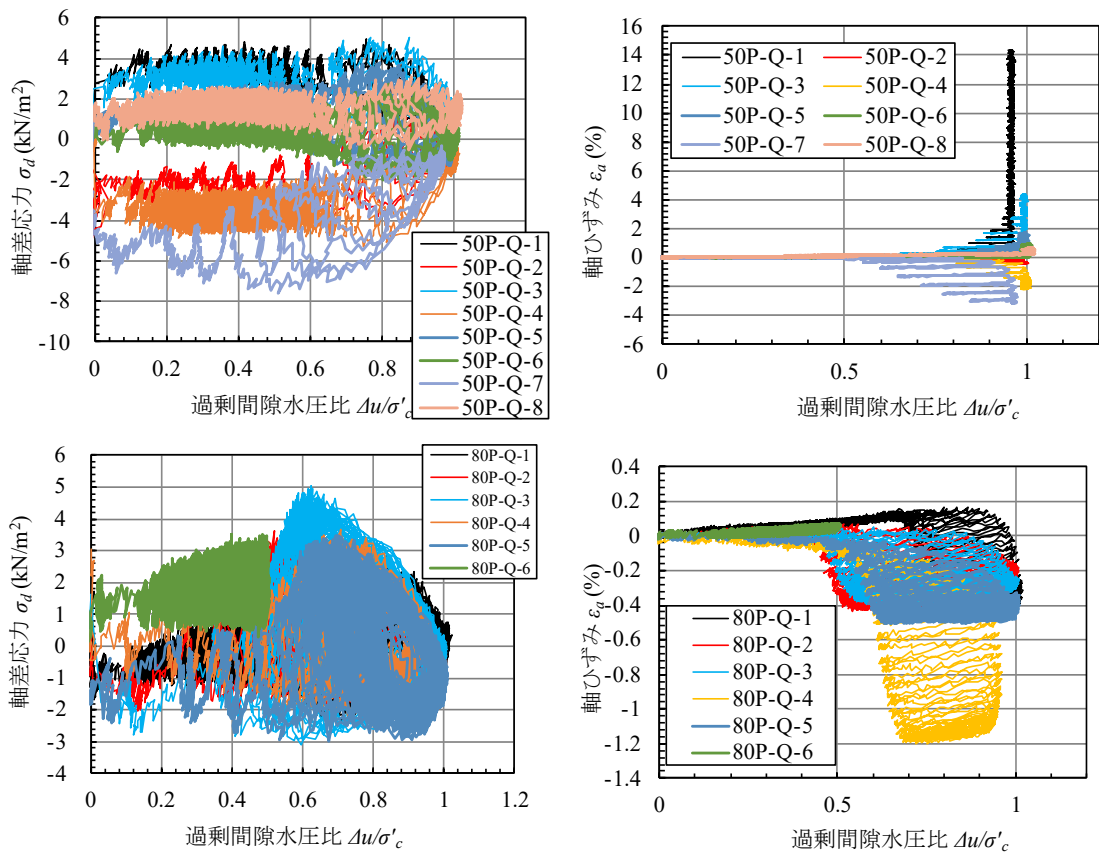


図4.4.47 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 Q，軸力一定）

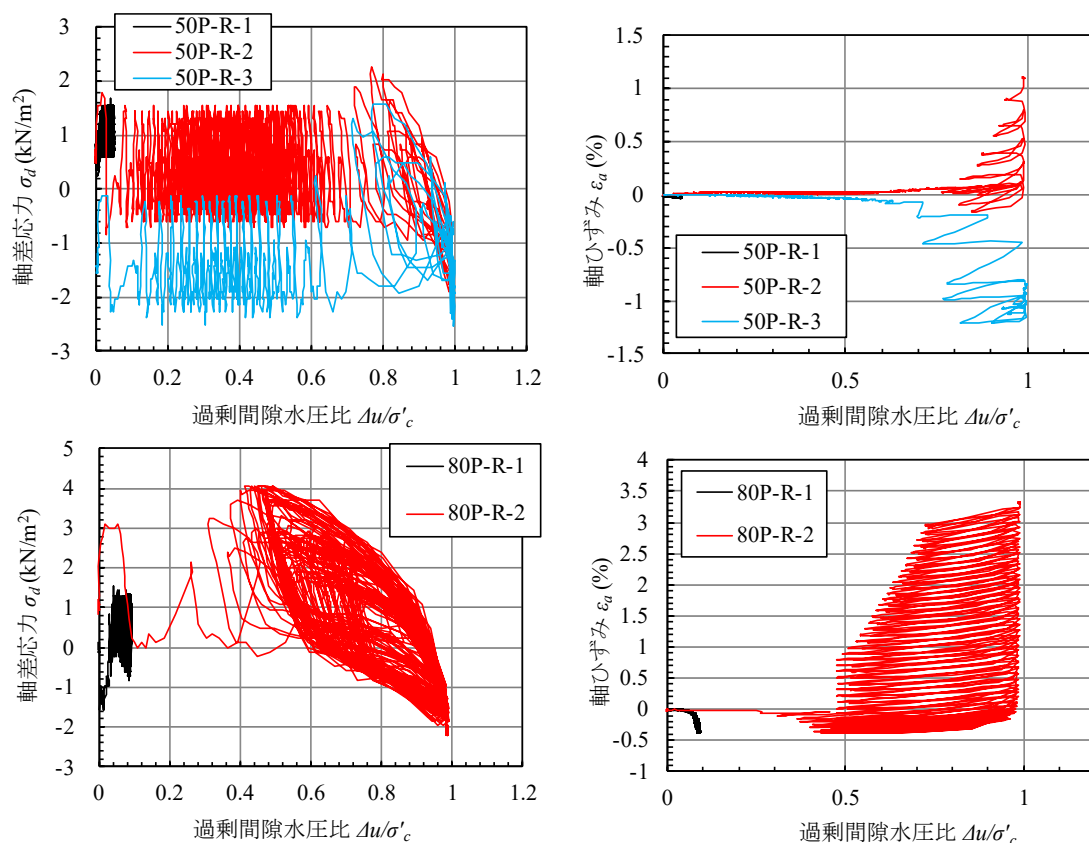


図4.4.48 過剰間隙水圧比と軸差応力・軸ひずみ（機関 R，軸力一定）

#### 4.4.2.3 試験後の供試体の様子

軸力一定において、軸ひずみが顕著に生じており、動画が入手できた試験機関（H，Q，O）について、試験前後の供試体の写真の一例を図4.4.49，図4.4.50および図4.4.51に示す。なお、試験後の写真は、試験動画から、繰返し載荷終了直前の供試体の様子を切り出したものである。試験機関Hの実験では、繰返し載荷によって、50P-H-2では6.8%の、80P-H-4では9.7%の軸ひずみ $\epsilon_a$ が生じた。試験動画（図4.4.49(a-2)，(f-2)）において、両ケースともに、供試体が軸方向につぶれていく様子が観察できた。80P-H-4については、水平方向にメンブレンのしわが形成されている様子が観察された。他のケースを確認すると、80P-H-4ほどではないが軸ひずみが比較的大きい80P-H-1，2（それぞれ $\epsilon_a = 5.2\%$ ， $5.0\%$ ）でも同様に水平方向にメンブレンのしわが形成されている様子が観察された（図4.4.49(c-2)，(d-2)）。一方、軸ひずみが比較的小さい80P-H-3（ $\epsilon_a = 1.6\%$ ）では、水平方向よりも、斜め方向のメンブレンのしわが卓越して形成されている様子が観察された（図4.4.49(e-2)）。 $D_r = 50\%$ の50P-H-2についても、80P-H-4よりも不明瞭だが、水平方向にメンブレンのしわが伸びていることが観察された（図4.4.49(a-2)）。 $D_r = 50\%$ の他のケースでは、50P-H-1，3，4については、軸ひずみが小さく（それぞれ $\epsilon_a = 0.1\%$ ， $0.7\%$ ， $0.08\%$ ），供試体を斜めに横断する形でメンブレンのしわが形成されていた。

軸ひずみが顕著に発生した50P-Q-1の時刻歴を図4.4.52に示す。50P-Q-1は最終的に軸ひずみが14.3%生じており、試験後の供試体から、キャップおよびペダスタル近傍にメンブレンのしわが集中している（図4.4.50(a-4)）。動画での時刻と計測時間がおおよそ等価であるとみなすと、目視で変形が確認できるようになった段階（図4.4.50(a-2)，195秒前後，繰返し回数19回）では供試体が均一に変形しており、過剰間隙水圧比が1.0に到達し、両振幅せん断ひずみが10%以上、軸ひ

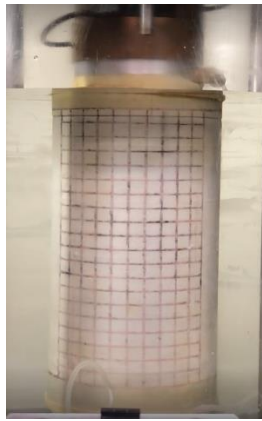
ずみが2%程度発生しており、せん断応力が徐々に低下しているものの、メンブレンのしわは発生していない。キャップ近傍にメンブレンのしわが生じ始める段階（図4.4.50(a-3), 220秒前後、繰返し回数22回）では、せん断応力がほぼゼロとなっており、両振幅せん断ひずみは190秒時点から2%程度の増加にとどまっているが、軸ひずみは5%程度生じている。以上より、50P-Q-1においては、キャップとペDESTAL近傍にメンブレンのしわが集中しているが、それはせん断帯がキャップまたはペDESTAL近傍で形成されたからではなく、非排水繰返し载荷によって軸ひずみが進展したために生じたものと考えられる。

50P-Q-3は、50P-Q シリーズの中では2番目に残留軸ひずみが大きい ( $\epsilon_a = 4.4\%$ ) が、たしかにキャップとペDESTAL近傍にメンブレンのしわが存在するが、供試体を斜めに横断する形でのメンブレンのしわも存在している（図4.4.50(b-2)）。また、残留軸ひずみが比較的大きい80P-O（三角波）の試験前後の写真を見ると（図4.4.51），残留軸ひずみが大きい80P-O-1, 4（それぞれ  $\epsilon_a = 6.9\%$ ,  $5.0\%$ ）ではキャップ近傍でネッキングが発生しており、残留軸ひずみが小さい80P-O-2, 3（それぞれ  $\epsilon_a = 0.9\%$ ,  $1.4\%$ ）ではメンブレンのしわが見られない。以上の結果も踏まえると、軸ひずみが5%以上生じている場合、軸ひずみ由来のメンブレンのしわが形成される可能性があるといえる。

一般に中空ねじり試験では、供試体を斜めに横断する形でせん断帯が形成され、それに対応する形でメンブレンのしわが斜め方向に発達する。一方、先述した通り、軸ひずみが過大な場合、メンブレンのしわが供試体のキャップ・ペDESTALに平行な水平方向に形成される可能性がある。メンブレンのしわとせん断帯は必ずしも等価ではなく、軸ひずみが過大に生じた場合、実際にはせん断帯が供試体斜め方向に形成されている場合でも、供試体の層境ですべり面が生じたと誤認する恐れがあるといえる。以上より、軸力一定での非排水繰返し载荷で生じる軸ひずみの度合いは、非排水繰返し载荷によってメンブレンのしわがどのような方向に生じるかによって評価できる可能性がある。

軸変位固定のケースは、詳細に検討した機関 I および P 以外は動画を入手できず、一部の機関では写真も入手できなかった。写真が入手できた機関についても、供試体の写真が小さく、水膜の形成の有無などが評価するのが難しい結果であった。

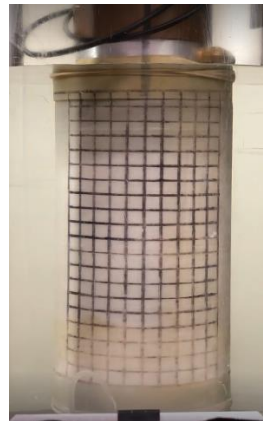




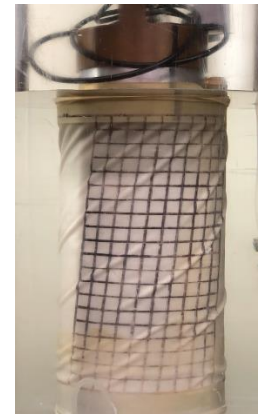
(a-1) 50P-H-2 (軸力一定・試験前)



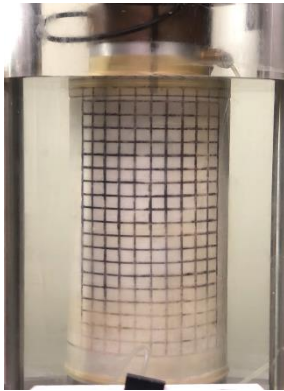
(a-2) 50P-H-2 (軸力一定・試験終了直前,  $\epsilon_a = 6.8\%$ )



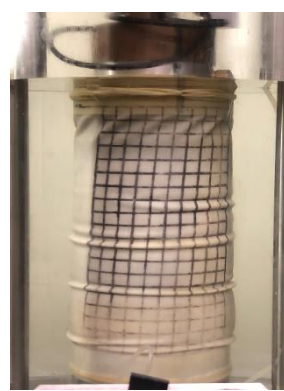
(b-1) 50P-H-4 (軸力一定・試験前)



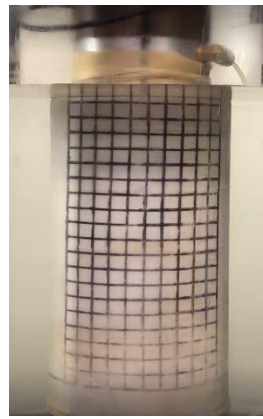
(b-2) 50P-H-4 (軸力一定・試験終了直前,  $\epsilon_a = 0.08\%$ )



(c-1) 80P-H-1 (軸力一定・試験前)



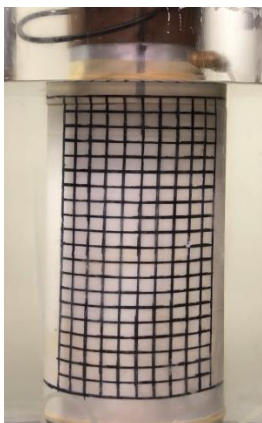
(c-2) 80P-H-1 (軸力一定・試験終了直前,  $\epsilon_a = 5.2\%$ )



(d-1) 80P-H-2 (軸力一定・試験前)



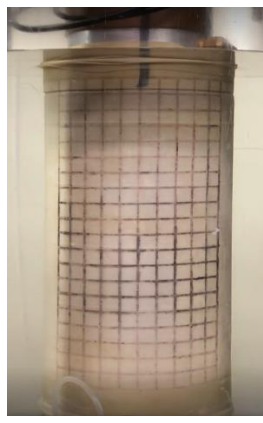
(d-2) 80P-H-2 (軸力一定・試験終了直前,  $\epsilon_a = 5.0\%$ )



(e-1) 80P-H-3 (軸力一定・試験前)



(e-2) 80P-H-3 (軸力一定・試験終了直前,  $\epsilon_a = 1.6\%$ )



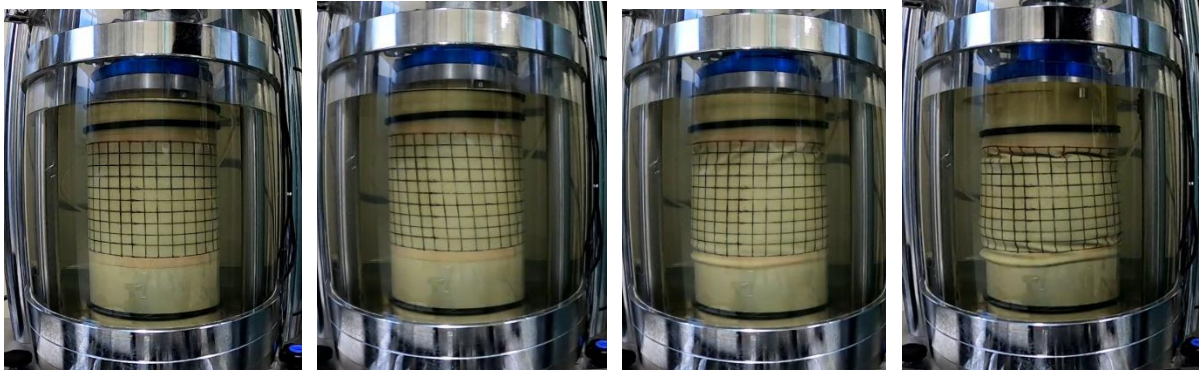
(f-1) 80P-H-4 (軸力一定・試験前)



(f-2) 80P-H-4 (軸力一定・試験終了直前,  $\epsilon_a = 9.7\%$ )

図4.4.49 試験前後の供試体の写真 (試験機関 H)





(a-1) 50P-Q-1 (軸力一定・試験前)

(a-2) 50P-Q-1 (軸力一定・動画195秒時点,  $\epsilon_a = 2\%$ )

(a-3) 50P-Q-1 (軸力一定・動画220秒時点,  $\epsilon_a = 5\%$ )

(a-4) 50P-Q-1 (軸力一定・試験後,  $\epsilon_a = 14.3\%$ )



(b-1) 50P-Q-1 (軸力一定・試験前)



(b-2) 50P-Q-3 (軸力一定・試験後,  $\epsilon_a = 4.4\%$ )

図4.4.50 試験前後の供試体の写真 (試験機関 Q)

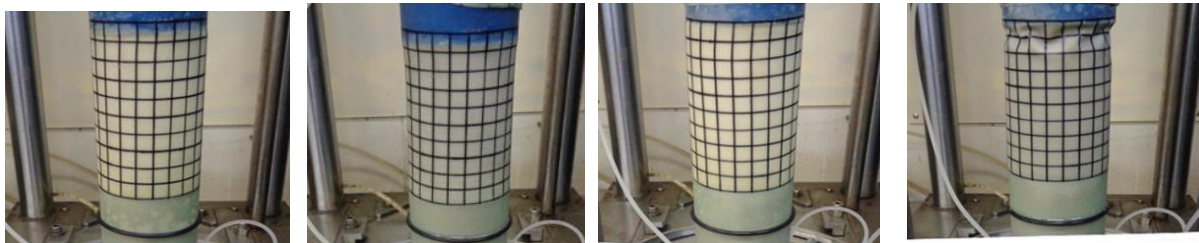


(a-1) 80P-O-1 (三角波) (軸力一定・試験前)

(a-2) 80P-O-1 (三角波) (軸力一定・試験後,  $\epsilon_a = 6.9\%$ )

(b-1) 80P-O-2 (三角波) (軸力一定・試験前)

(b-2) 80P-O-2 (三角波) (軸力一定・試験後,  $\epsilon_a = 0.9\%$ )



(c-1) 80P-O-3 (三角波) (軸力一定・試験前)

(c-2) 80P-O-3 (三角波) (軸力一定・試験後,  $\epsilon_a = 1.4\%$ )

(d-1) 80P-O-4 (三角波) (軸力一定・試験前)

(d-2) 80P-O-4 (三角波) (軸力一定・試験後,  $\epsilon_a = 5.0\%$ )

図4.4.51 試験前後の供試体の写真 (試験機関 O)

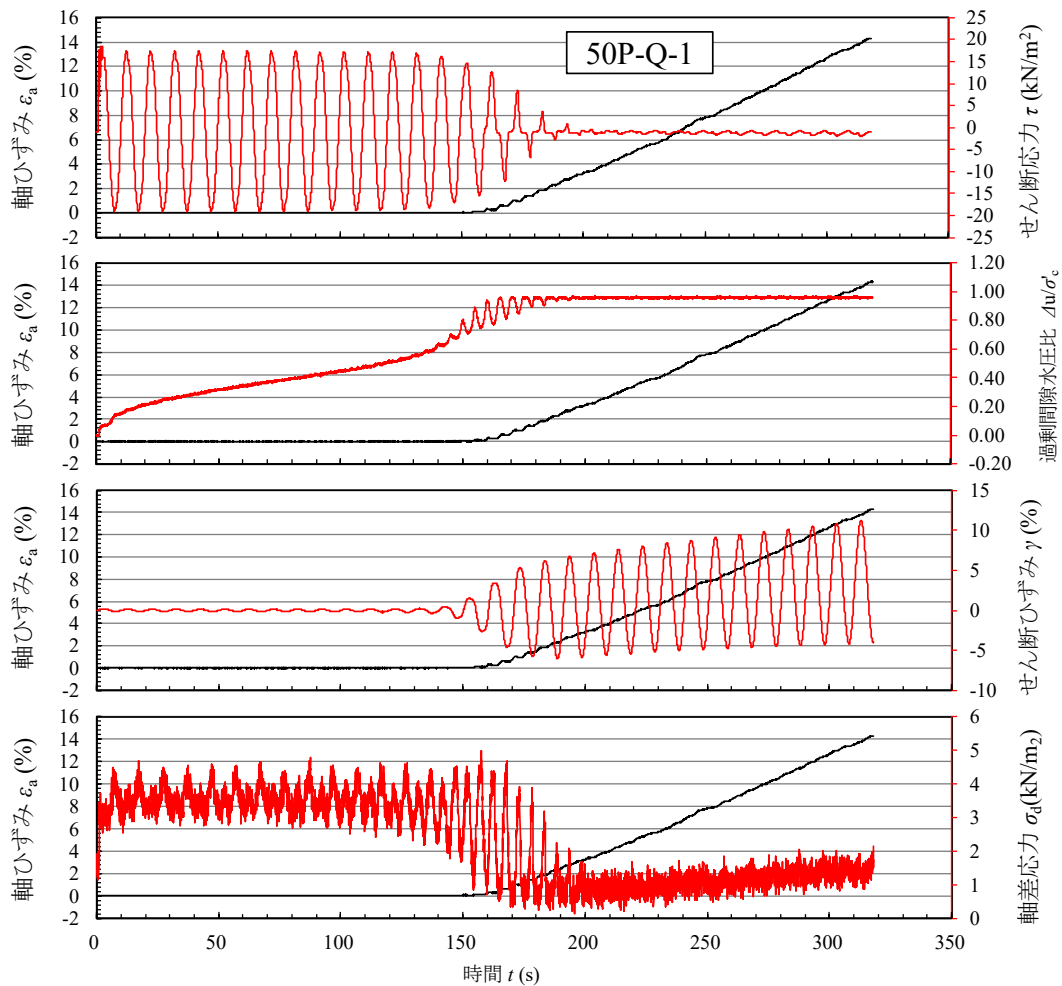


図4.4.52 軸力一定の時刻歴 (50P-Q-1) (赤線が縦軸右側)

#### 4.4.2.4 荷重過程における制御状況の分析

地盤工学会で基準化されている中空ねじり試験では、ねじりせん断時の軸方向応力を一定または軸力をせん断開始時の軸力の所定の範囲内に制御するよう規定している。具体的には、「土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法」(JGS 0543-2020)においては、「繰返しねじり力載荷時の軸方向応力は、 $200\text{kN/m}^2$ 未満では $\pm 2\text{kN/m}^2$ 、 $200\text{kN/m}^2$ 以上では $\pm 1\%$ の変動の範囲内に保つこと」と規定されている。また、「土の中空円筒供試体によるねじりせん断試験方法」(JGS 0551-2020)においては、圧密排水ねじりせん断において、「軸方向応力を一定に制御するかわりに、圧密終了時の軸力の $\pm 5\%$ の変動の範囲内で軸力を制御してもよい」としている<sup>14</sup>[5]。前者の基準は微小ひずみ～中ひずみまで、後者の基準は大ひずみまでを対象としている。大ひずみまで取り扱う液状化試験においては、後者の基準で規定されている軸力の $\pm 5\%$ 内に制御できているかが1つの目安になると考えられる。

今回の一斉試験においても、これらの基準を満たしているかを検討することとした。具体的には、試験開始時点で加わっている軸差応力である初期軸差応力、試験中の最大軸差応力および最小軸差応力の初期軸差応力からの差分、軸差応力が試験開始時点での軸方向応力(等方圧密条件である本一斉試験においては、初期有効拘束圧に相当)の $\pm 5\%$ を超過した時点の過剰間隙水圧比、軸ひずみの観点から分析した。なお、上記の基準では軸応力で規定しているが、本検討ではセル圧が一定と仮定し、軸応力の変動＝軸差応力の変動として検討している。図4.4.53(a)のセル圧の時刻歴の一例が示す通り、電気的なノイズによる変動とは言い難い変動を示すケースもある

が、その影響は軽微であると仮定している。また、上記の基準は軸力一定条件で行う試験が対象であるが、参考のため、軸変位固定条件についても同様の観点から分析を行った。

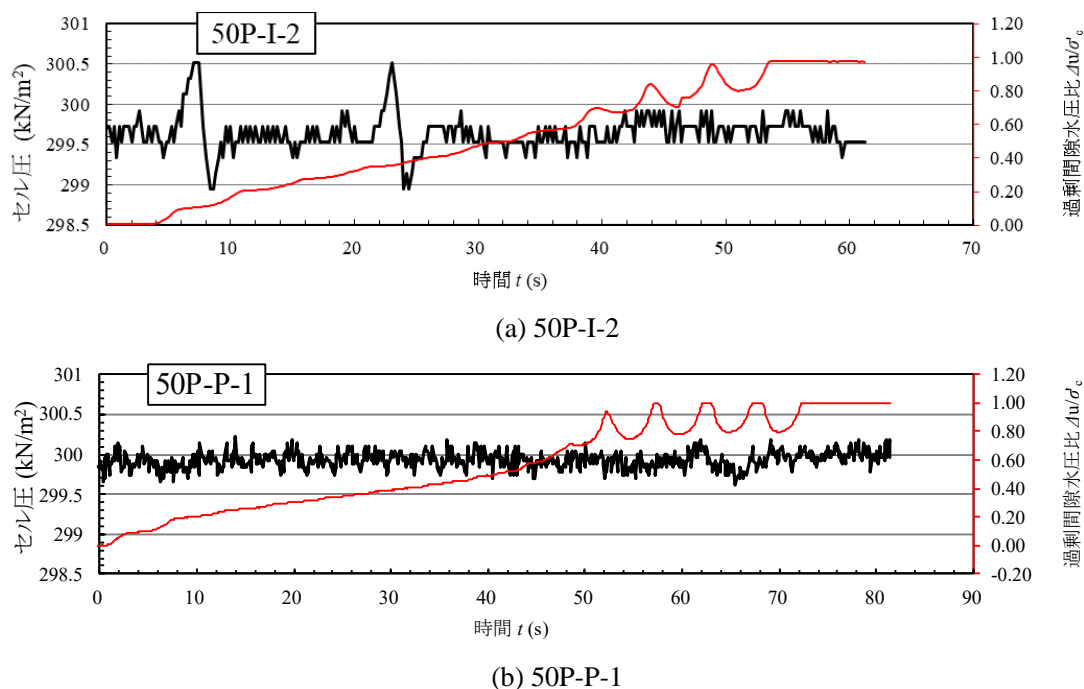
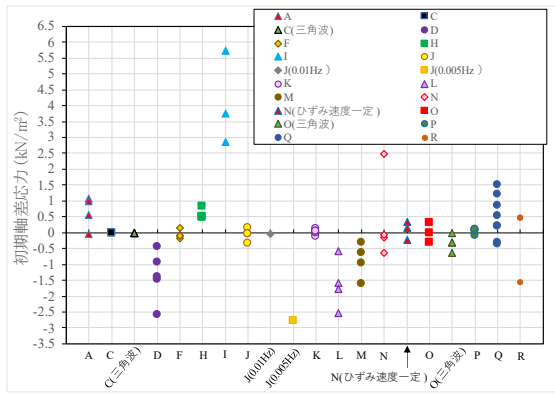


図4.4.53 セル圧の時刻歴の一例

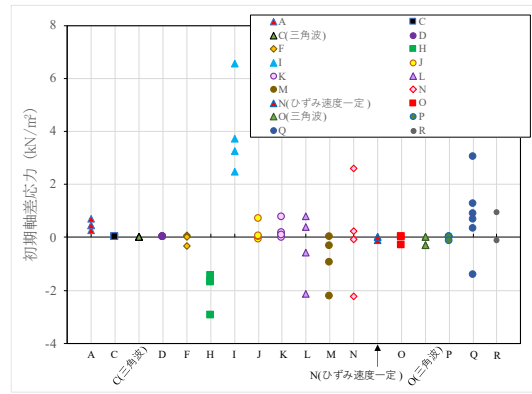
初期軸差応力を図4.4.54に示す。等方圧密条件である本一斉試験においては、初期軸差応力はゼロとなるのが理想であるが、実際には多少の軸差応力が生じることが多いことが分かる。多くの試験機関は $\pm 1\text{kN/m}^2$ 以内の初期軸差応力に留まっているが、一部の試験機関では $\pm 1\text{kN/m}^2$ を超過するような軸差応力を試験開始時点で与えている。与え方も、圧縮方向に与える試験機関（A, I, J など）もあれば、伸張方向に与える試験機関（50P-D, 50P-L, 80P-H など）、両者が混在している機関（80P-L, Q など）もあるなど、試験機関によって傾向が大きく異なる。

最大軸差応力ー初期軸差応力を図4.4.55に、最小軸差応力ー初期軸差応力を図4.4.56に示す。なお、以後は軸力を初期有効拘束圧（ $100\text{kN/m}^2$ ）として扱い、基準となる軸差応力を初期有効拘束圧の5%の $\pm 5\text{kN/m}^2$ とする。図より、多くの試験機関で最大軸差応力ー初期軸差応力または最小軸差応力ー初期軸差応力が $5\text{kN/m}^2$ という基準を上回っており、軸力の制御が難しいことが窺える。

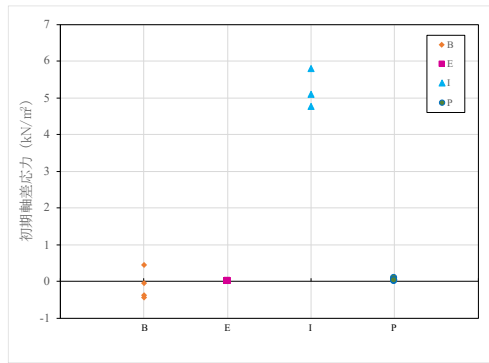
軸固定条件および相対密度条件で場合分けした最大軸差応力、最小軸差応力を図4.4.57に示す。四分位範囲の観点からは、軸力一定のほうが軸変位固定よりもばらつきが小さく、中央値の絶対値も小さくなっている。また、軸固定条件で比較した場合、 $D_r = 50\%$ のほうが $D_r = 80\%$ よりも最大軸差応力が小さくなっている。最小軸差応力については、軸力一定条件では差が見られないが、軸変位固定では $D_r = 50\%$ のほうが $D_r = 80\%$ よりも大きくなっている傾向が見られる。相対密度が大きいほど、軸差応力の変動がより大きくなると言える。



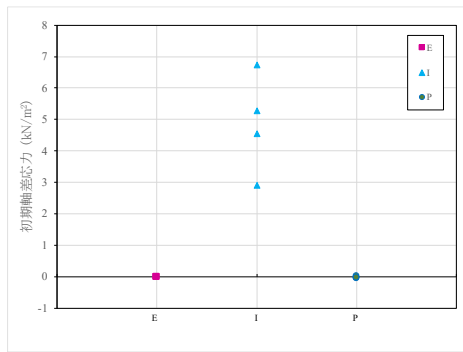
(a) 50P ( $D_r = 50\%$ , 軸力一定)



(b) 80P ( $D_r = 80\%$ , 軸力一定)

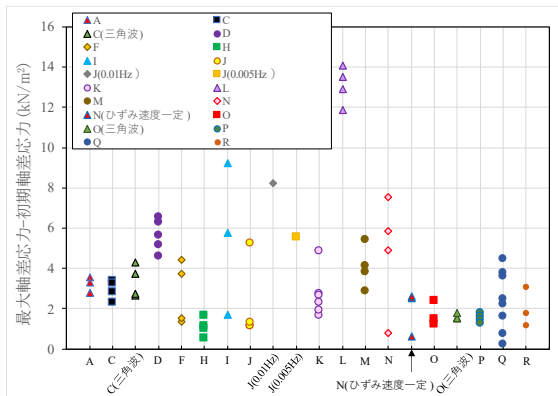


(c) 50D ( $D_r = 50\%$ , 軸変位固定)

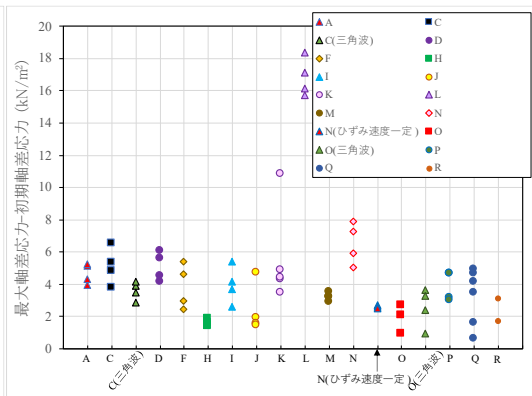


(d) 80D ( $D_r = 80\%$ , 軸変位固定)

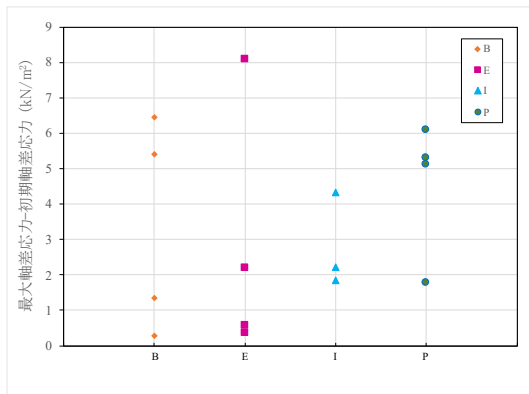
図4.4.54 初期軸差応力



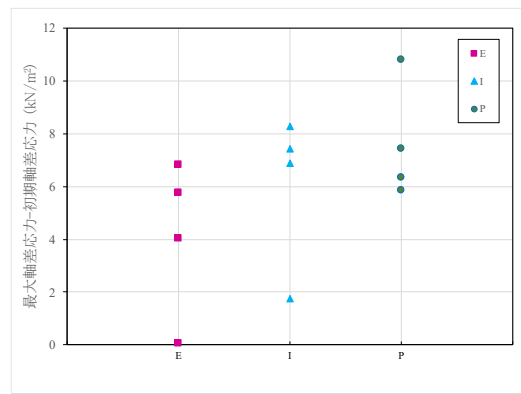
(a) 50P ( $D_r = 50\%$ , 軸力一定)



(b) 80P ( $D_r = 80\%$ , 軸力一定)

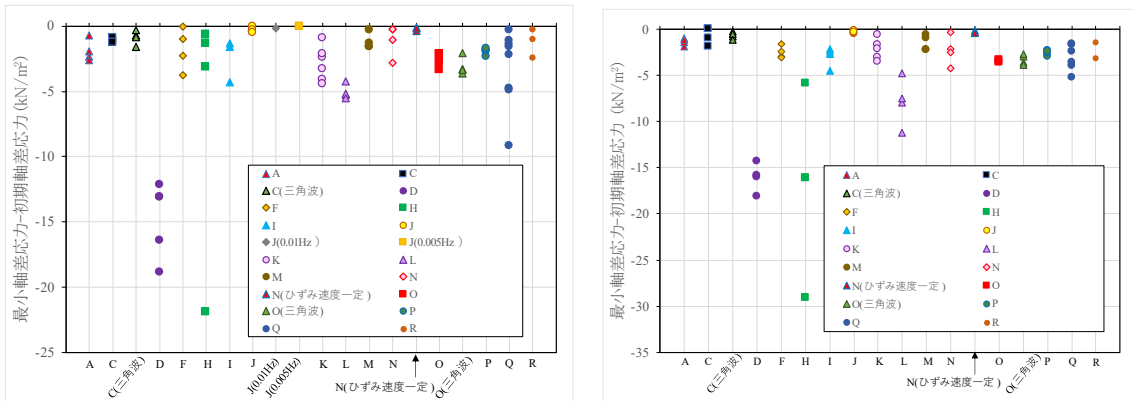


(c) 50D ( $D_r = 50\%$ , 軸変位固定)



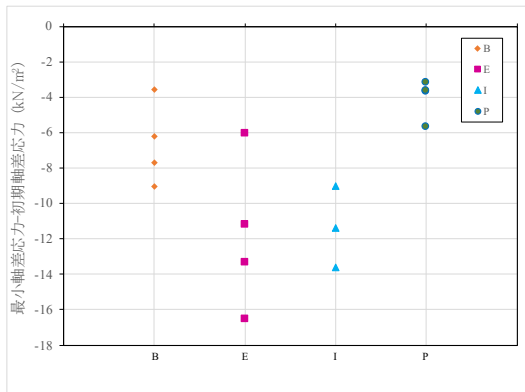
(d) 80D ( $D_r = 80\%$ , 軸変位固定)

図4.4.55 最大軸差応力-初期軸差応力

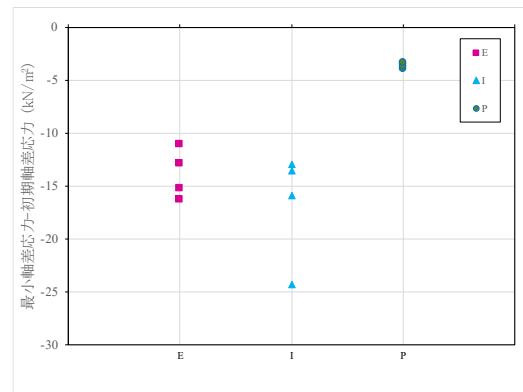


(a) 50P ( $D_r = 50\%$ , 軸力一定)

(b) 80P ( $D_r = 80\%$ , 軸力一定)



(c) 50D ( $D_r = 50\%$ , 軸変位固定)



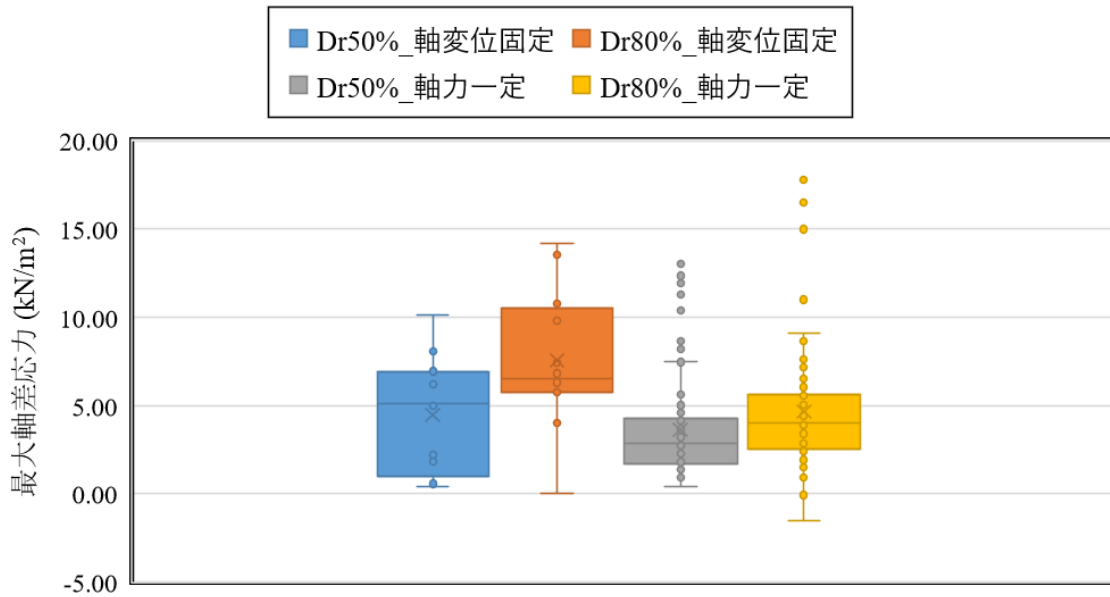
(d) 80D ( $D_r = 80\%$ , 軸変位固定)

図4.4.56 最小軸差応力-初期軸差応力

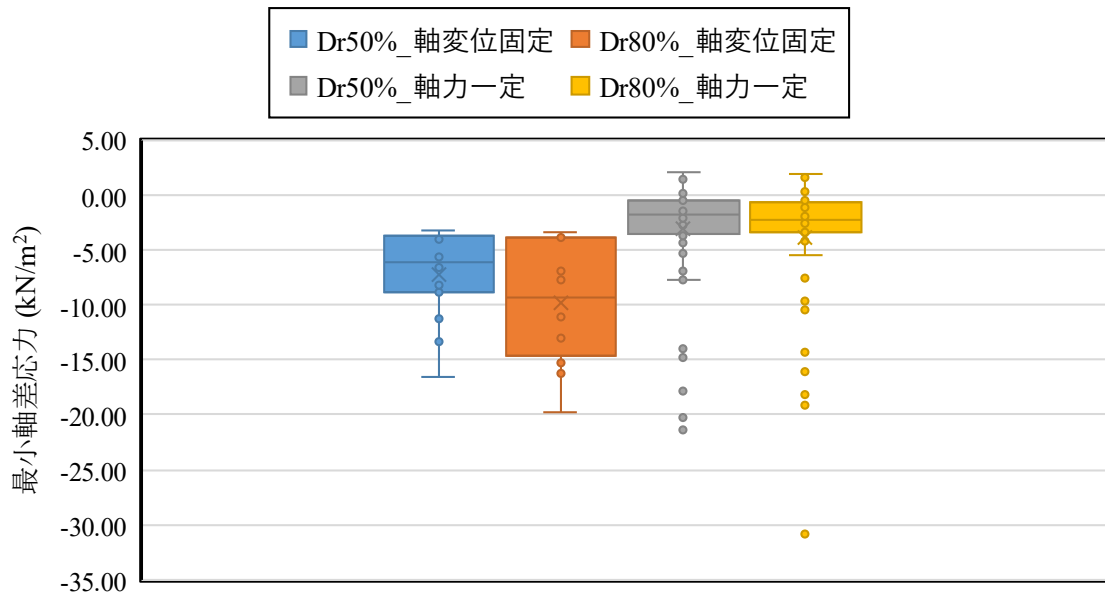
軸差応力は試験機関毎の差異が確認できたため、ここでは機関ごとに集計を行い、1供試体でも該当する場合は1機関とカウントした。軸力一定条件での全15機関ごとに集計すると、軸力一定条件であってもせん断試験終了までに、 $D_r = 50\%$ では7/15機関 (47%) で、 $D_r = 80\%$ では11/15機関 (73%) で軸差応力が初期有効拘束圧の5%を超えた。また、軸変位固定条件においては、すべての機関で軸差応力が初期有効拘束圧の5%を超過している。なお、土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法」が求める $\pm 2\text{kN/m}^2$ 以内 (軸方向応力が $200\text{kN/m}^2$ 未満の場合) という基準は、どの試験機関も満たしていない。

軸差応力が基準値を満たさないケースについて、軸差応力が初めて基準軸差応力を超える時の過剰間隙水圧比を図4.4.58に示す。過剰間隙水圧上昇による極端な剛性低下の影響が小さいと考えられる過剰間隙水圧比が0.6に到達するまでに、 $D_r = 50\%$ , 80%ともに4/14機関 (29%) で軸差応力が初期有効拘束圧の5%を超えた。 $D_r = 50\%$ では7/14機関 (50%) で、 $D_r = 80\%$ では11/15機関 (79%) で、初期液状化までに軸差応力が5%を超える結果となった。 $D_r = 80\%$ のほうが  $D_r = 50\%$ よりも初期有効拘束圧の5%を超える機関が多かったが、これは  $D_r = 80\%$ のほうが過剰間隙水圧比が1.0に到達してから所定のひずみに到達するまでの繰返し回数が多く、繰返しせん断応力振幅も大きいため、軸力の制御が難しかったためだと推察される。軸変位固定の場合、初期軸差応力において1/4機関 (25%) が初期有効拘束圧の5%を超過し、過剰間隙水圧比0.3までに全ての機関で軸力5%を超過した。





(a) 最大軸差応力



(b) 最小軸差応力

図4.4.57 最大・最小軸差応力と軸固定条件

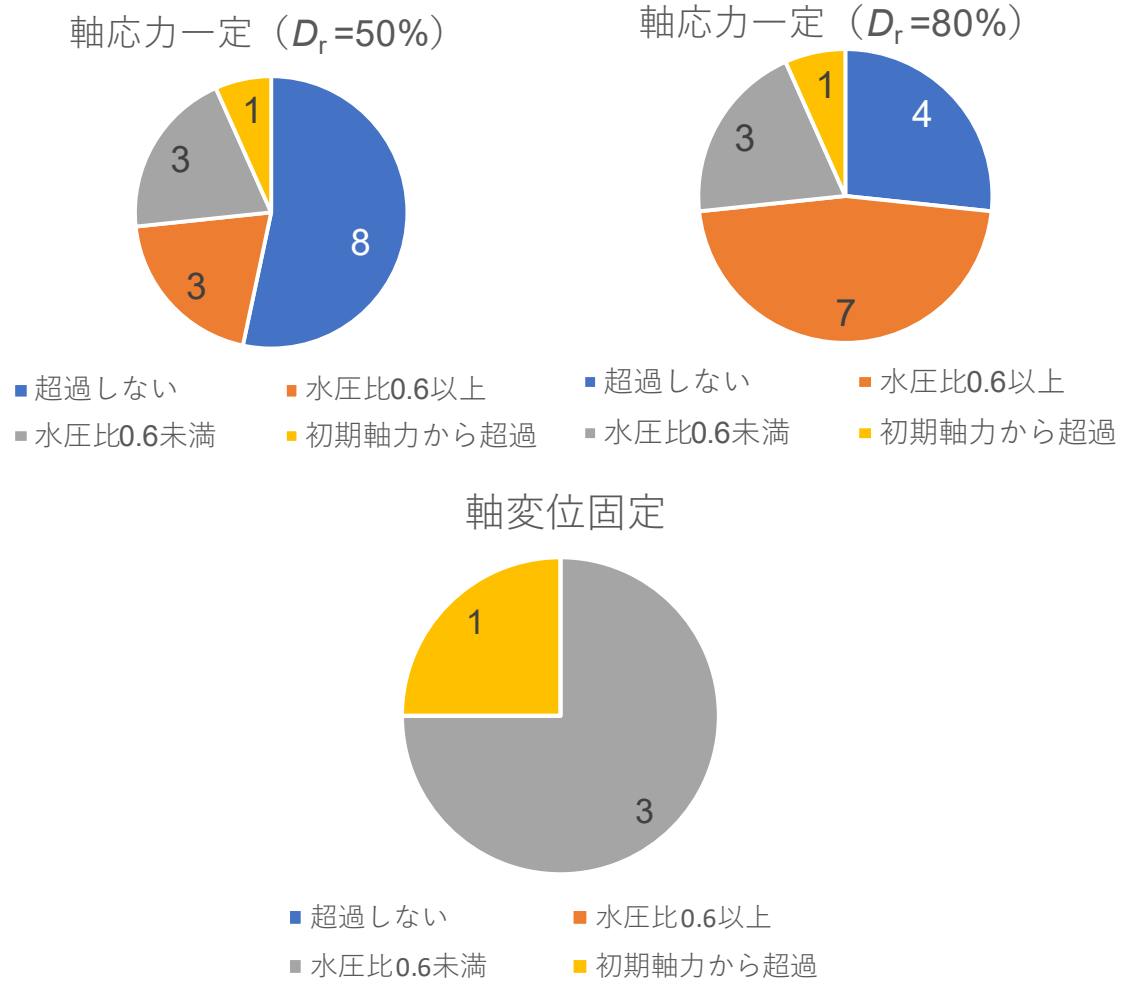


図4.4.58 軸差応力が初期有効拘束圧の5%を初めて超える際の過剰間隙水圧比の分類（数値は試験機関数）

軸力が制御できている機関の特徴を検討するために、内外径比をもとに整理した結果を図4.4.59に示す。内外径比が大きいほど応力の不均一性が低減されるが、「超過しない」および「過剰間隙水圧比0.6以上」の2つが占める割合という観点からは、 $D_r = 50\%$ 、 $80\%$ ともに、内外径比0.60（外径100mm，内径60mm）のほうが内外径比0.43（外径70mm，内径30mm）よりも軸力を制御できている傾向にある。 $D_r = 50\%$ 、 $80\%$ のいずれも軸差応力が初期有効拘束圧の5%を超過しない機関はM，O，P，Rであり，機関M，O，Pは内外径比が0.43，機関Rは内外径比が0.60であった。

繰返し载荷終了時点での残留軸ひずみを図4.4.60に示す。試験機関によって生じる軸ひずみの量および正負に違いがあることが観察される。軸力一定の場合，一部の試験機関・ケースを除くと，多くの場合圧縮方向に軸ひずみが蓄積することが確認される。軸変位固定の場合，軸力一定と比べて残留軸ひずみは小さく，外れ値を除くとほぼゼロである。

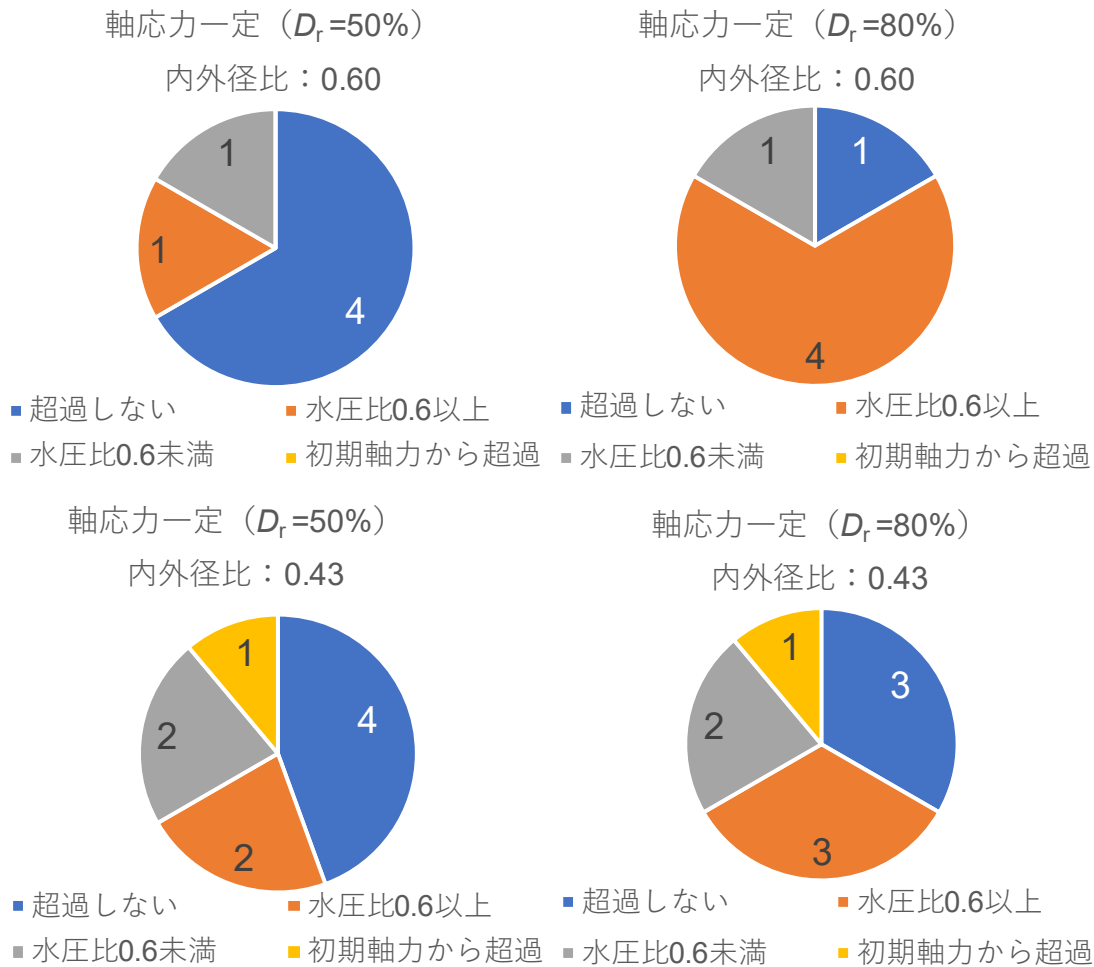
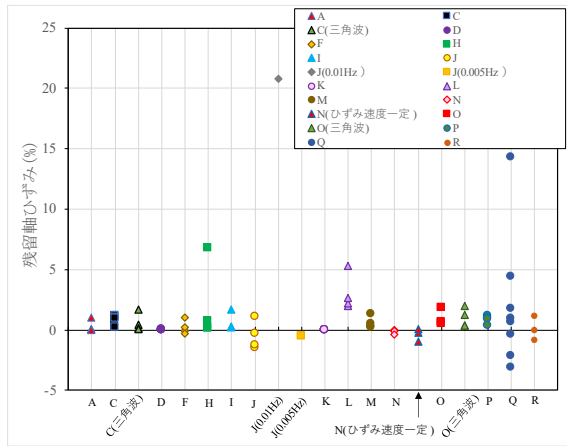


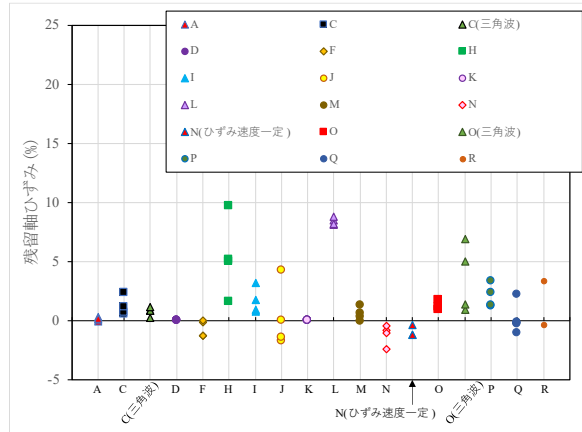
図4.4.59 軸差応力が初期有効拘束圧の5%を初めて超える際の過剰間隙水圧比の分類 (内外径比) (数値は試験機関数)

以上のように、軸力一定条件においても軸差応力が発生しており、現行の試験基準で定められている初期有効拘束圧の±5%を超過する試験機関が全体の半数以上を占める結果となった。軸差応力の増減のタイミングを見ると、過剰間隙水圧比が極大値（有効応力が極小値）を取るタイミングで極小値を取り、過剰間隙水圧比が極小値を取るタイミングで極大値をとることから、ダイレイタンスーによって軸差応力の変動が生じており、軸力を制御しきれていないと考えられる。軸力一定条件の試験においては、試験機関 I や A のように、軸力を与えるベロフラムの圧力を繰り返し载荷中も試験前から変化させず、フィードバック制御も行っていない機関が多いと推測される。軸力一定条件に近づける改善策としては、試験機関 P のように軸力のフィードバック制御を行うことや、内外径比を大きくすることが挙げられる。しかし、フィードバック制御を行った場合でも、過剰間隙水圧比が1.0に到達した後の軸差応力の変動を除去するには至っていない。また、 $D_r = 80\%$ のほうが  $D_r = 50\%$ よりも軸差応力の変動が大きくなったように、軸差応力の変動がより顕著になる地盤材料の存在も想定される。軸力一定条件を達成するための他の改善策（例えば、ベロフラムシリンダの改良や摩擦の除去）の有効性については、今後の課題である。

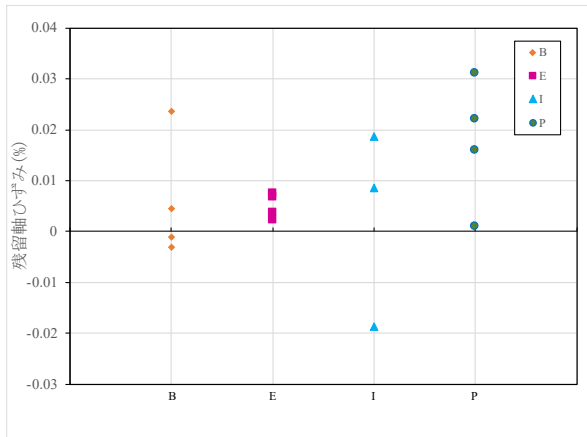




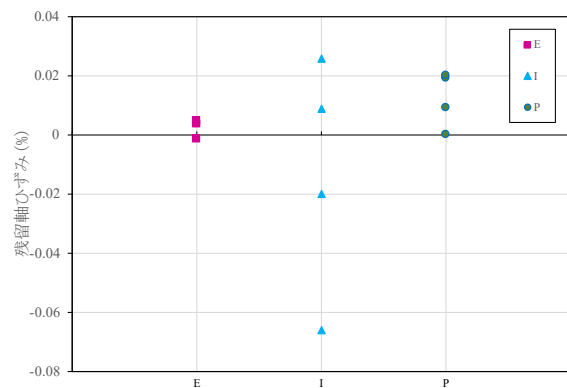
(a) 50P ( $D_r = 50\%$ , 軸力一定)



(b) 80P ( $D_r = 80\%$ , 軸力一定)



(c) 50D ( $D_r = 50\%$ , 軸変位固定)



(d) 80D ( $D_r = 80\%$ , 軸変位固定)

図4.4.60 残留軸ひずみ

#### 4.4.3 まとめ

- 1) 同一試験条件の2機関において、軸力一定と軸変位固定という軸固定の仕方による応力比—繰返し回数—の関係の違いは微小であり、ばらつきの範囲内に収まる。
- 2) 繰返し载荷前において、供試体の外観や軸差応力について試験機関による違いが認められた。
- 3) 非排水繰返し载荷に伴って、軸差応力および軸ひずみは過剰間隙水圧比の増加に対応する形で変化していく。軸変位固定の場合、軸ひずみはほぼゼロで制御できるが、軸力一定の場合、試験中に軸差応力が変動し、半数以上の試験機関で、初期有効拘束圧の±5%を超過した。変化の仕方は初期軸差応力や試験装置（試験機関）、相対密度によって異なるものの、過剰間隙水圧比が1.0に近づくと軸差応力の振幅や軸力一定時の軸ひずみが増大する傾向が共通して認められた。
- 4) 試験機関によっては、供試体に不均質な所が見られ、ネッキングが進展した破壊が見られた。
- 5) 非排水繰返し载荷後の再圧密体積ひずみに関しては、軸力一定の試験よりも、軸変位固定の試験のほうが大きい傾向が同一試験機関の比較では認められたものの、全機関でみると試験条件での差は認められなかった。

以上のように、軸力一定条件において繰返しせん断中の軸力制御は難しく、試験機関によって差が見られた。一方、軸変位固定の試験においては、繰返しせん断に伴い軸差応力は変動するものの、軸変位はほぼゼロで固定できていた。軸力変動の規定値（圧密終了時の軸力±5%）を超

過による試験結果の影響の程度は不明であるが、軸力一定条件下でも学会の基準の既定値を超過する点を考慮すると、軸固定が可能であれば、中空ねじり試験機を用いた液状化試験の軸制御方法としては、単純せん断条件に近い軸変位固定が推奨されるといえる。

軸固定の方法を合わせた場合でも、非排水繰返し载荷における軸ひずみや軸差応力の変化は機関が異なると同じ結果とならなかったため、試験条件統一の観点において原因究明は今後の課題である。

## 4.5 繰返し载荷制御方法の影響

### 4.5.1 制御方法による違い

制御方法の違いについてここでは、応力制御とひずみ制御による違いが液状化強度に及ぼす影響について示す。ひずみ制御には、ひずみ振幅を一定に制御する方法とひずみ速度一定条件で応力振幅を一定に制御する方法がある。ここでは、後者の方法について示し、以降、ひずみ速度一定試験と呼ぶ。今回実施した、ひずみ速度一定試験は、ステッピングモーター用いたベルト駆動式の载荷装置を用いて、所定のせん断ひずみ速度（1%/min）の条件でせん断ひずみを与え、せん断応力をモニターし所定の応力振幅に達したらひずみの方向を反転させ、せん断応力を除荷するようにプログラムで制御した。制御方法以外の要因が試験結果の考察に影響しないように、試験機関 N で実施した結果のみを用いて比較・検討した。供試体サイズは、いずれも外径70mm、内径30mm、高さ100mmである。応力制御では、载荷周波数0.1Hzの正弦波とした。

応力制御試験とひずみ速度一定試験の時刻歴の例を図4.5.1に示す。あわせて応力ひずみ関係および有効応力の例を図4.5.2に示す。図より同じせん断応力振幅で実施しても、結果は異なっている。特にひずみ速度一定試験では、過剰間隙水圧比が約0.7を超えたあたりからせん断ひずみ振幅が大きくなると、試験時間が長くなった。一方、応力制御試験では、このせん断ひずみ振幅の増加に対して装置の能力が不足したため、せん断応力振幅を一定に保てなくなった。この実験条件では、液状化（ $\gamma_{DA}=7.5\%$ ）に至る回数が応力制御で35回、ひずみ速度一定試験で70回となり差が生じた。この差が生じた一因にはせん断ひずみ速度の違いが影響した可能性がある。すなわち、応力制御試験では試験中のせん断ひずみ速度は非定常に変化する。具体的には、過剰間隙水圧上昇により供試体の剛性が低下するとせん断ひずみ速度が増加する。実際、 $\gamma_{DA}$ が7.5%に達したサイクルの平均せん断ひずみ速度は90%/min程度となったことから、液状化が発生すると応力制御試験のせん断ひずみ速度はひずみ速度一定試験のせん断ひずみ速度より2オーダー程度大きくなる。

図4.5.3に液状化強度曲線（ $\gamma_{DA}=7.5\%$ ）を示す。 $D_r = 50\%$ の液状化強度曲線は制御方法によらずほぼ等しいことから、制御方法の違いが液状化強度曲線に及ぼす影響はごくわずかである。ただし、詳しく見ると、液状化強度曲線の下限值、すなわち、液状化が生じる限界の応力比（限界応力比）付近では、ひずみ制御試験では液状化が発生せず、制御方法による違いが見られた。 $D_r = 80\%$ でも同様の傾向を示し、制御方法によらず液状化強度曲線はほぼ等しくなった。ただし、詳しく見ると、高い応力比においてはひずみ制御試験の方が応力制御試験よりも液状化強度を若干高めに評価した。前述のように剛性低下した供試体に対し、所定のせん断応力波形を载荷するためには、大きなせん断ひずみ速度の変化を伴い、急激な加速と減速を繰返したことが影響した可能性がある。なお、試験に要した時間を比較すると、限界応力比のケースを除けば、応力制御では10分以内、ひずみ制御では2時間強を要した。

上述のように液状化強度曲線の差がわずかであることから、試験時間の観点から応力制御を用いることは実務に適した試験といえる。一方で、サーボ機能を有するような応力制御装置を保有していない機関では、今回用いた試料及び载荷速度の条件では、ひずみ速度一定試験が応力制御試験の代替え試験になる可能性が示された。

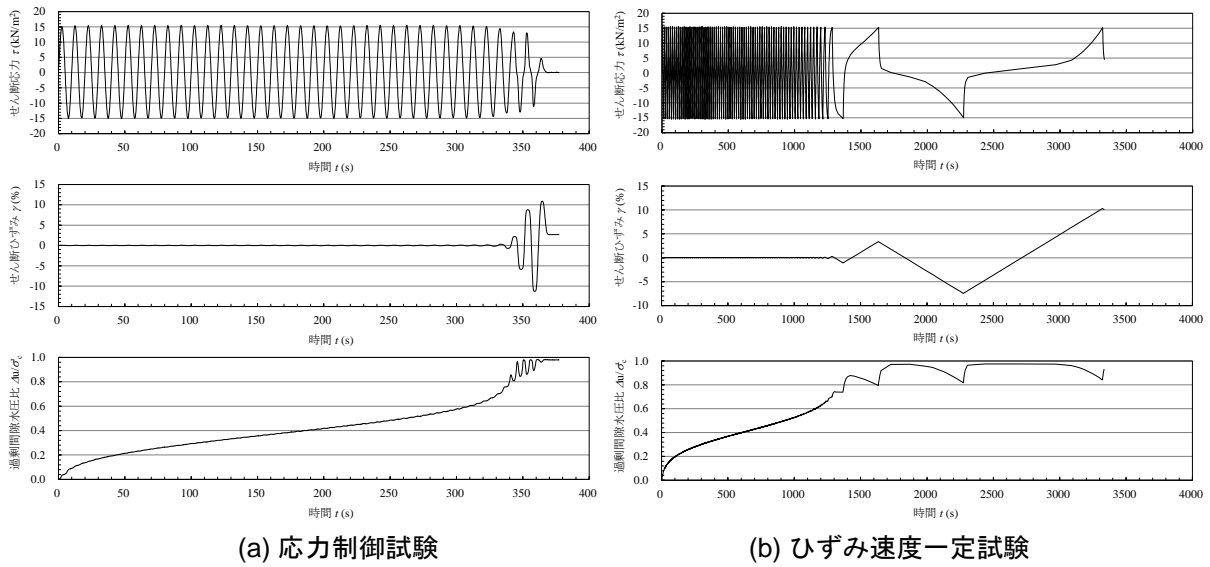


図4.5.1 試験結果の時刻歴の例 ( $D_r=50\%$ ,  $CSR=0.15$ )

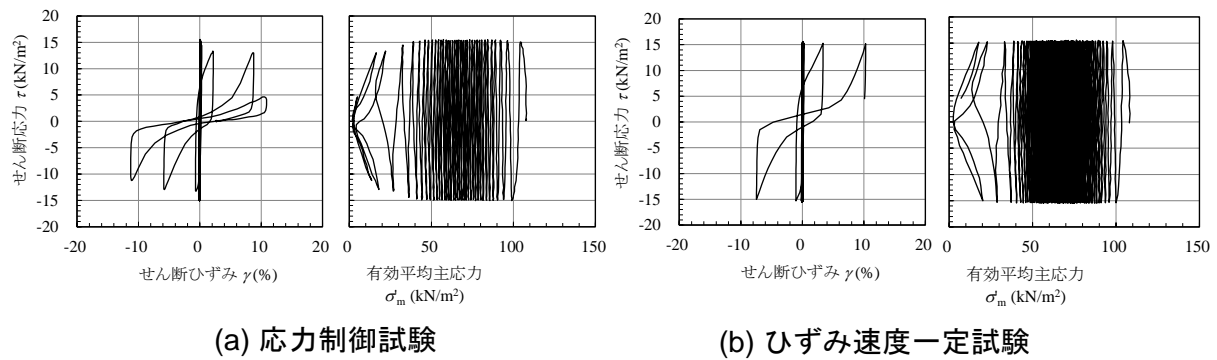


図4.5.2 応力ひずみ関係と有効応力経路の例 ( $D_r=50\%$ ,  $CSR=0.15$ )

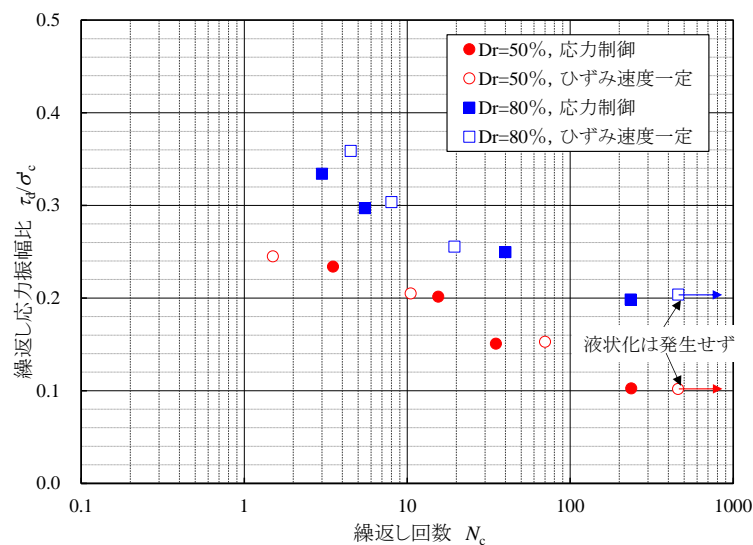


図4.5.3 応力制御試験とひずみ速度一定試験の液状化強度の違い

#### 4.5.2 載荷周波数による違い

次に応力制御における載荷周波数が液状化強度に与える影響を示す。ここでは、載荷周波数以外の要因が試験結果の考察に影響しないように、機関 J が実施した結果のみを用いて比較・検討した。供試体サイズは、いずれも外径70mm，内径30mm，高さ100mm である。載荷周波数は0.1Hzを基本として、0.01Hzと0.005Hzについて実施した。図4.5.4に  $D_r=50\%$  の液状化強度曲線を示す。図より液状化に至る回数は、載荷周波数で若干異なっているものの、他の節で示された一斉試験の全機関の試験結果（同一供試体サイズ）の変動幅と比べるとその差は小さく、今回の結果は通常の試験結果のばらつきの範囲内にあると考えられ、今回検討した供試体数量は少ないが、得られた結果から検討すると載荷周波数の影響はわずかである。

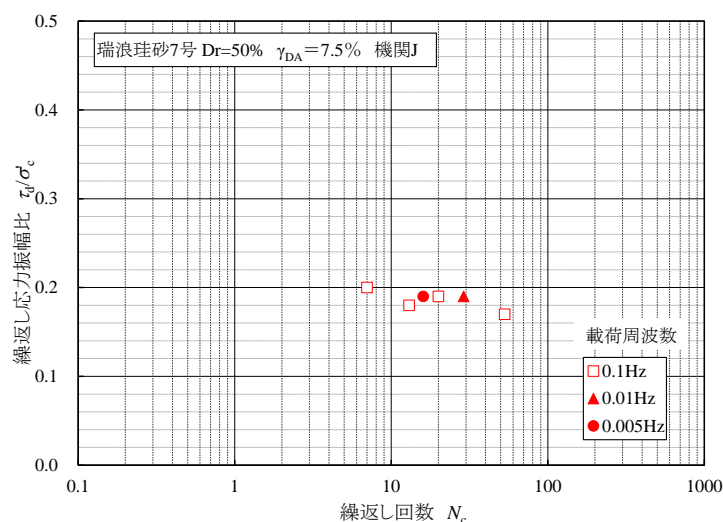


図4.5.4 載荷周波数が液状化強度に及ぼす影響

#### 4.5.3 まとめ

繰返し載荷方法の違いに着目すると、まず応力制御試験とひずみ速度一定試験では、過剰間隙水圧比が約0.7を超えるとひずみ振幅が大きくなり、ひずみ速度一定試験では、試験にかかる時間が長くなった。一方で、応力制御試験では、装置の能力に起因してせん断応力を一定に保つことができなくなった。液状化すると応力制御試験のせん断ひずみ速度はひずみ速度一定試験よりも2オーダー程度大きくなり、個々の試験結果に差が生じた。ただし、液状化強度曲線で表すと両者の差はわずかであった。

また、載荷周波数が0.1Hz～0.05Hzの実験結果を比較すると、周波数が20倍程度異なっているにもかかわらず液状化強度曲線に及ぼす影響はわずかであることがわかった。

以上の結果から、今回対象とした砂質材料であれば、0.1Hzの応力制御試験よりも、ゆっくりとしたひずみ速度および周波数の試験の液状化強度曲線を比較すると、繰返し載荷方法の違いはわずかであることがわかった。なお、細粒分を多く含む砂質土や粘性土では、結果に差が生じる可能性があるため、さらなる検討が必要である。

### 4.6 ゴムスリーブ厚・張力補正の影響

#### 4.6.1 ゴムスリーブ厚について

ゴムスリーブ張力の影響を小さくするためには、薄いゴムスリーブを使用する必要がある。一方、ゴムスリーブが薄いと、供試体の作製・設置時にゴムスリーブに穴があきやすくなり、失敗する可能性も高くなる。一般に、大きな供試体サイズや大きな粒子材料（礫など）が使われる場

合は、ゴムスリーブ厚も大きくなる。一斉試験参加の17機関の供試体サイズは、外径70 mm、内径30 mm、高さ（70 or 100）mm、または外径100 mm、内径60 mm、高さ（100 or 120 or 200）mmで、試験試料は瑞浪珪砂7号であり、平均粒径は0.287 mm である。この条件で、各機関の使用ゴムスリーブ厚は、1機関のみ0.2 mmで、他は0.3 mmで一律であった。供試体直径50 mmの三軸試験においては、厚さ0.2 mm～0.3 mmのゴムスリーブが使用されることが多く、複雑な形状（中空円筒供試体）とサイズを考慮すると、0.3 mmのゴムスリーブ厚は妥当な選択と考えられる。なお、今回の一斉試験においては、2機関が三軸試験を行ったが、ゴムスリーブ厚はそれぞれ0.3 mmと0.25 mmであった。

#### 4.6.2 ゴムスリーブ張力補正について

ここでは、ゴムスリーブ張力補正の方法とその影響についてまとめる。

##### 4.6.2.1 他試験での張力補正

他試験でのゴムスリーブ張力補正の有無を表4.6.1にまとめる。地盤工学会基準において、三軸試験ではゴムスリーブ張力補正は行わないことがわかる。圧縮試験においては、ゴムスリーブが軸方向に縮むことになるため、軸方向張力補正は必要ない。供試体が側方方向に膨張したときに、側方向応力を増加させる方向にゴムスリーブ張力が働くことになるが、この影響は小さいと考えられる。一方、伸張試験においては、供試体が軸方向に伸びることになるため、軸方向にゴムスリーブ張力が作用することとなる。伸張変形を生じる試験の中で、「JGS 0543-2020: 土の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法」に関しては、それほど軸ひずみが大きくなることより無視できる。しかしながら、「JGS 0526-2020: 土の  $K_0$ 圧密非排水三軸伸張 ( $K_0$ CUBE) 試験方法」と「JGS 0541-2020: 土の繰返し非排水三軸試験方法」においては、かなり大きな伸張ひずみが発生する可能性があるが、影響は小さいということでゴムスリーブ補正は規定されていない。

上位規格にあたる ISO 規格においては、次の三軸試験規格が整備されている。

- ISO 17892 Part 8: Unconsolidated undrained triaxial test<sup>15)</sup>
- ISO 17892 Part 9: Consolidated triaxial compression tests on water saturated soils<sup>16)</sup>

この規格においては、ゴムスリーブ張力補正が考慮されている。これは、ノルウエーから超軟弱粘土を試験するとき、ゴムスリーブ補正の有無でかなり結果が違ってくるとの発言があり、この意見を取り入れたためである（文献17)参照）。このように、強度が発現しない特殊な土や条件で試験を行う場合には、ゴムスリーブ補正は必須となる。なお、ISO 規格においては、中空ねじりせん断試験は整備されていないことより、世界的に見ても実務的な使用は少ない状況にあることがわかる。

中空ねじりせん断試験では、表4.6.1にあるように、強度定数を求める試験法（JGS 0551-2020）と変形特性を求める試験法（JGS 0543-2020）の2種類の地盤工学会基準が存在する。ねじり変形を発生させる場合は、ゴムスリーブ張力が直接的に作用することとなる。「JGS 0543-2020: 土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法」においては、発生ひずみが小さいことより、ゴムスリーブ張力補正はしていない。一方、単調載荷試験である「JGS 0551-2020: 土の中空円筒供試体によるねじりせん断試験方法」では、大きなねじり変形が発生するため、ゴムスリーブ張力補正を行うことになっている。これは、中空円筒供試体では、2枚のゴムスリーブを装着する必要があるため、三軸試験より影響が大きくなるためと考えられる。中空ねじりによる液状化強度試験においても、大きなねじり変形が発生するため、単調載荷同様、ゴムスリーブ張力補正は必須となる。

表4.6.1 参照する地盤工学会基準と略称

基準番号	基準名 (略称)	張力補正
JGS 0521～0527	土の三軸単調載荷試験各種 (UU, CU, CUB, CD, $K_0$ CUBC, $K_0$ CUBE, 不飽和) [文献18, pp. 610–623, pp. 644–651, pp. 664–669]	なし
JGS 0542	土の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法 [文献18, pp. 792–800]	なし
JGS 0541	土の繰返し非排水三軸試験方法 [文献18, pp. 769–775]	なし
JGS 0551	土の中空円筒供試体によるねじりせん断試験方法 [文献18, pp. 748–753]	考慮
JGS 0543	土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法 [文献18, pp. 808–814]	なし

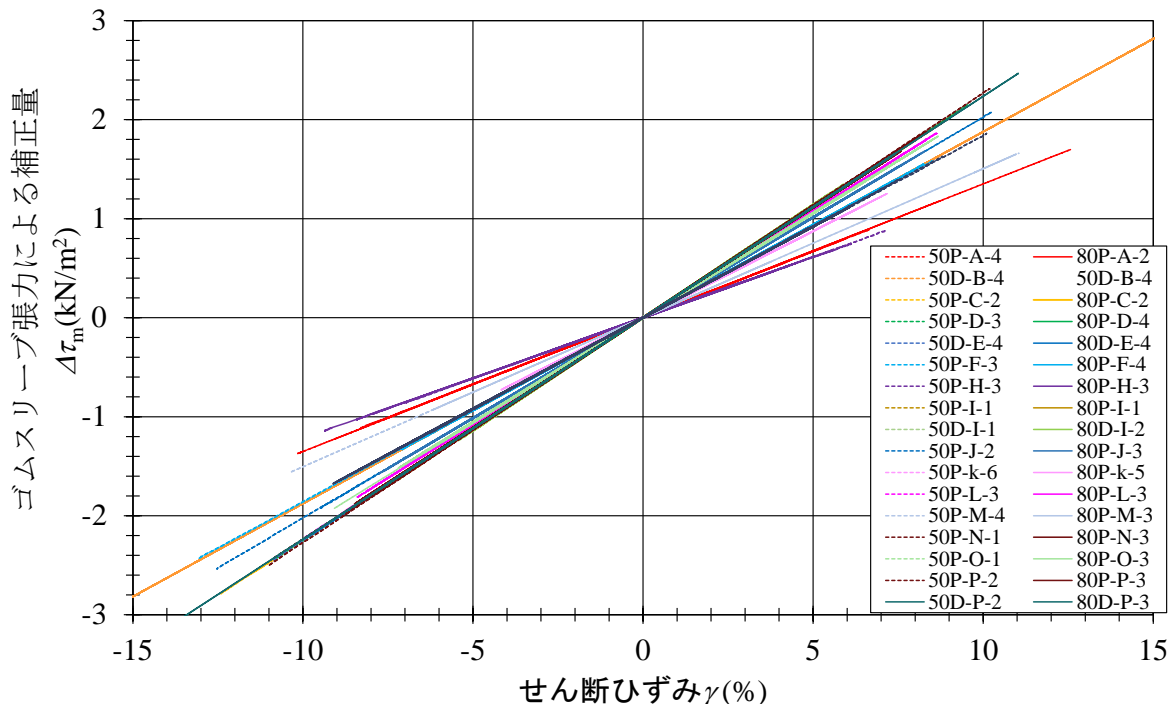
#### 4.6.2.2 ゴムスリーブ張力補正式

ゴムスリーブ張力補正式は、「JGS 0551-2020: 土の中空円筒供試体によるねじりせん断試験方法」を参考に以下のように設定した。厳密には、軸方向応力や側方向応力にもゴムスリーブ張力は作用するが、影響の大きいせん断応力のみ適用する。

$$\Delta\tau_m = \frac{2E_m t_m (r_{oc}^3 + r_{ic}^3)}{(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)(r_{oc} + r_{ic})} \gamma \quad (4.6.1)$$

ここで、 $\Delta\tau_m$ : ゴムスリーブ張力によるせん断応力の補正量 (kN/m<sup>2</sup>)、 $E_m$ : ゴムスリーブのヤング率 (kN/m<sup>2</sup>)、 $t_m$ : ゴムスリーブの厚さ (mm)、 $r_{oc}$ : 圧密後の供試体外半径 (mm)、 $r_{ic}$ : 圧密後の供試体内半径 (mm)、 $\gamma$ : せん断ひずみ、である。

得られたせん断応力より $\Delta\tau_m$ を引くことにより張力補正を行う。上式より、 $\Delta\tau_m$ は $\gamma$ に比例することになる。 $E_m$ 、に関しては実測値か、実測値がない場合は標準値として1600 kN/m<sup>2</sup>を使用するとしたところ、各機関標準値を使っていた。 $t_m$ に関しては0.3 mm (機関 M のみ0.2 mm) が使われ



※50D-B-4は未実施のためデータなし

図4.6.1 ゴムスリーブ補正量とせん断ひずみの関係

ていた。その他、 $\Delta\tau_m$ に影響を与える因子は、供試体サイズ ( $r_{oc}$ ,  $r_{ic}$ ) となる。図4.6.1に式(4.6.1)で算出した各機関のゴムスリーブ補正量とせん断ひずみの関係を示す。各機関の代表的なケース（繰返し回数20回程度でせん断ひずみ7.5%に達したケース）について、せん断ひずみとゴムスリーブ張力による補正量の関係を整理してある。その結果、図4.6.1のとおり、機関ごとに小さなばらつきがみられるが、これは供試体サイズの影響（1機関、ゴムスリーブ厚（0.2 mm）の影響）と考えられる。供試体サイズの影響については、4.6.4節において議論する。ゴムスリーブ厚の影響については、式(4.6.1)より、厚さに応じて比例関係にあることがわかる。

例えば、式(4.6.1)において、 $E_m=1600 \text{ kN/m}^2$ ,  $t_m=0.3 \text{ mm}$ ,  $r_{oc}=35 \text{ mm}$ ,  $r_{ic}=15 \text{ mm}$ ,  $\gamma=7.5\%$ で、 $1.7 \text{ kN/m}^2$ の張力補正となる。この諸元のゴムスリーブと供試体サイズを用いた場合、両振幅せん断ひずみ15%の実験で、張力補正による応力の低下を5%以内とするには、 $34 \text{ kN/m}^2$ 以上の繰返し応力で実験を行う必要がある。拘束圧が $100 \text{ kN/m}^2$ の場合の繰返し応力比は0.34となる。

#### 4.6.2.3 ゴムスリーブ張力補正の影響

#### 4.6.2.4 通常のひずみレベルでの繰返し載荷試験（片振幅せん断ひずみ15%以内を目安）

一斉試験マニュアル（3章）に記載したゴムスリーブ張力補正式（式(4.6.1)）は、均一にねじり（せん断）変形した弾性材料を仮定して組み立てられている。したがって、液状化前の通常ひずみレベルの試験（例えば、「JGS 0551: 土の中空円筒供試体によるねじりせん断試験方法」に規定されている範囲）での使用は問題ない。しかしながら液状化後については、ゴムスリーブがたわんだり、局所的なせん断変形（例えば供試体上部のみ）が発生したりする場合は考えられるが、この影響については無視している。

図4.6.2に代表的な試験結果を示す。左側が  $D_r=50\%$ 、右側が  $D_r=80\%$ の結果である。上からそれぞれ、応力経路、応力ひずみ関係、せん断応力の時刻歴、せん断ひずみの時刻歴となっている。オレンジ色の線がゴムスリーブ補正前、青色が補正後の結果である。応力経路と応力ひずみ関係より、補正前後で、差が見てわかるようになるのは、変相点およびサイクリックモビリティに達して、ひずみが大きくなった後である。さらに、繰返しせん断応力の小さい  $D_r=50\%$ のケースで、結果に及ぼす影響が大きいことがわかる。また、以上のことは、せん断応力とせん断ひずみの時刻歴からも見て取れる。さらに、サイクリックモビリティの勾配で定義できるせん断抵抗角であるが、ゴムスリーブ張力補正することで、勾配が緩やかになっていることも見てとれる。



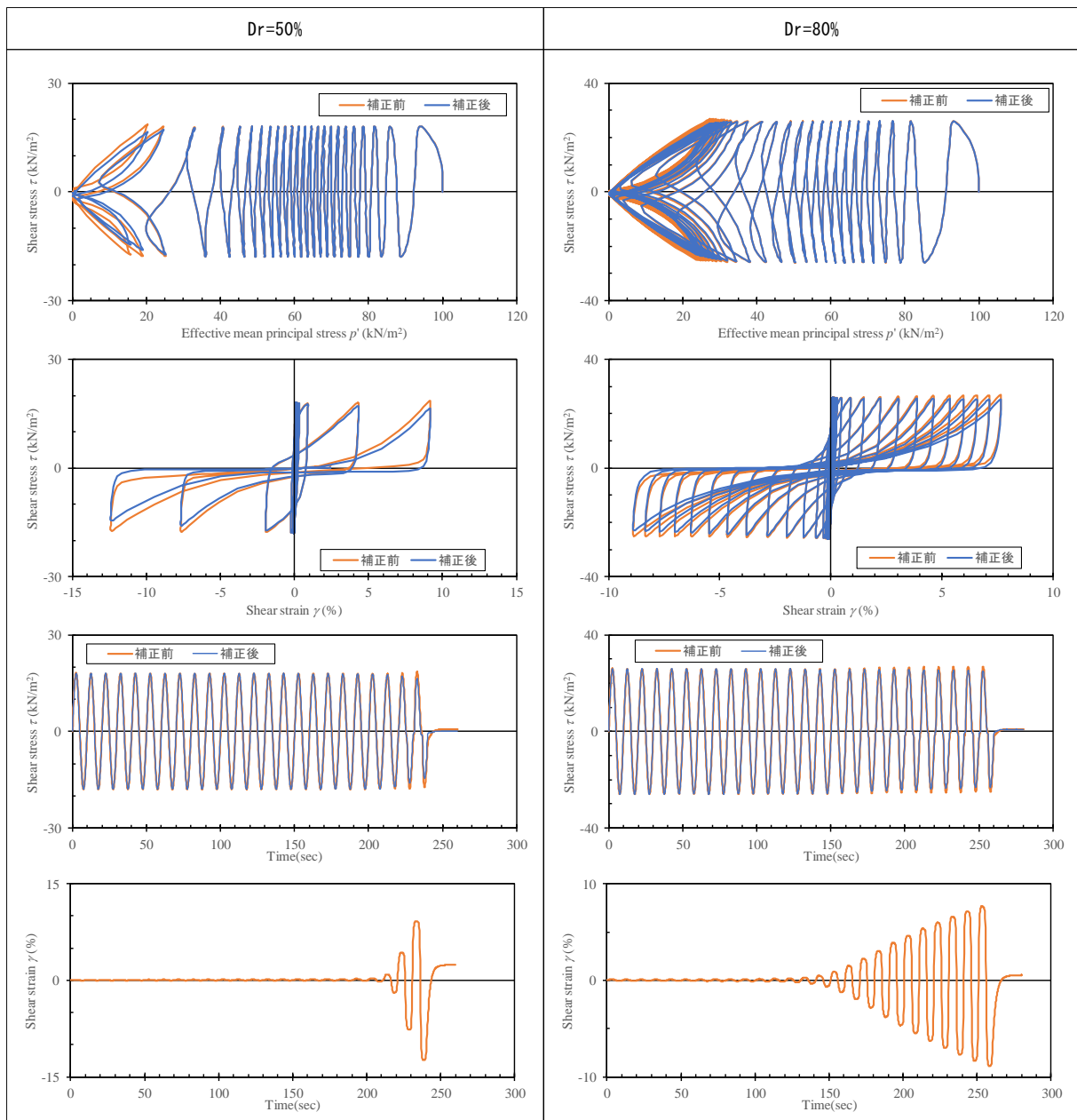


図4.6.2 代表的な試験結果の例

#### 4.6.2.5 大ひずみまで対応させた繰返し载荷試験（片振幅せん断ひずみ15%以上）

ここで取り扱う内容は、一斉試験のマニュアル記載内容を超えたものとなるが、一斉試験において、大ひずみまで取り扱った結果も提出されたため、少し掘り下げて検討してみる。大ひずみまで対応した実験では、ゴムスリーブ張力が大きくなるため、その補正は必須となる。大ひずみまでひずみが進展するのは、液状化後（サイクリックモビリティ時）となるが、ゴムスリーブが均一なねじり変形をしない可能性がある。したがって、ゴムスリーブ内を土供試体ではなく水で満たして、ゴムスリーブ張力のキャリブレーションを行った結果を図4.6.3に示す。式(4.6.1)による補正量も同時に示してある。図4.6.3のとおり、キャリブレーションによるゴムスリーブ補正量は非線形挙動を示し、特にせん断ひずみが概ね30%程度から非線形性が顕著に現れる傾向にある。なお、式(4.6.1)とキャリブレーション結果によるゴムスリーブ補正量を比較すると、ひずみが大きくなるに従い両者の差は大きくなり、せん断ひずみ $\gamma_{sa}$ が3.75%では補正量は $0.47 \text{ kN/m}^2$ 程度の差



異にとどまるものの、10%では1.3 kN/m<sup>2</sup>程度、20%では2.6 kN/m<sup>2</sup>程度、40%に至ると5.5 kN/m<sup>2</sup>程度の差異となる。以上より、理論式から得られるゴムスリーブ張力の補正量は、ゴムスリーブが均一なねじり変形とならない場合、大きめに評価されていると考えられる。

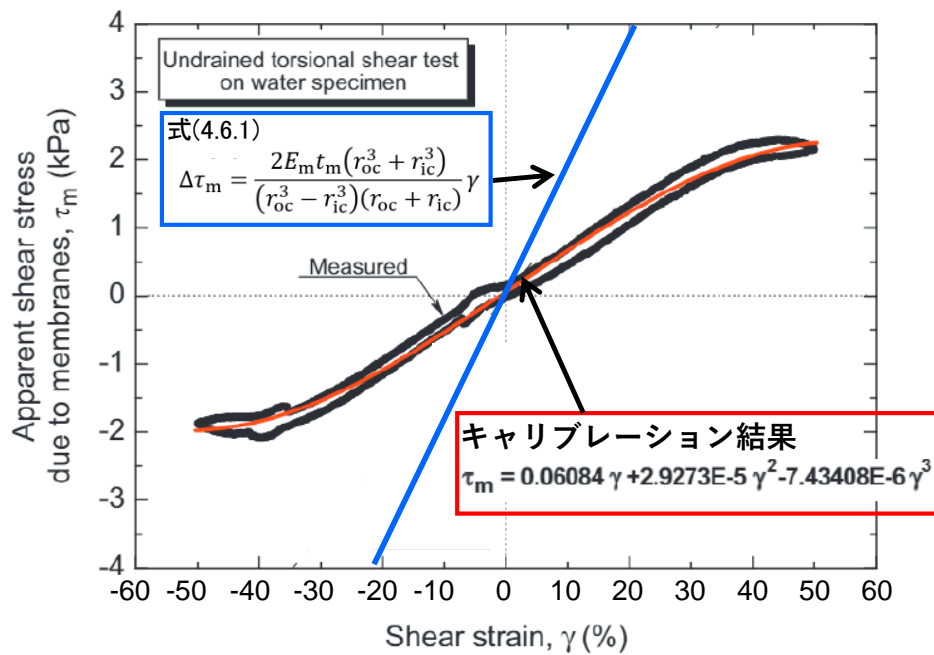


図4.6.3 大ひずみに対応したゴムスリーブ張力のキャリブレーション結果（文献19に追記）

図4.6.4（左側：オレンジ色）に、 $D_r=50\%$ で大ひずみまで実験を継続した特殊な試験結果を示す（一斉試験以外の結果を使用）。この実験はひずみ速度一定で行われており、実験中に逐次、図4.6.3に示したゴムスリーブ張力補正量（キャリブレーション結果）を読み取り、その分をせん

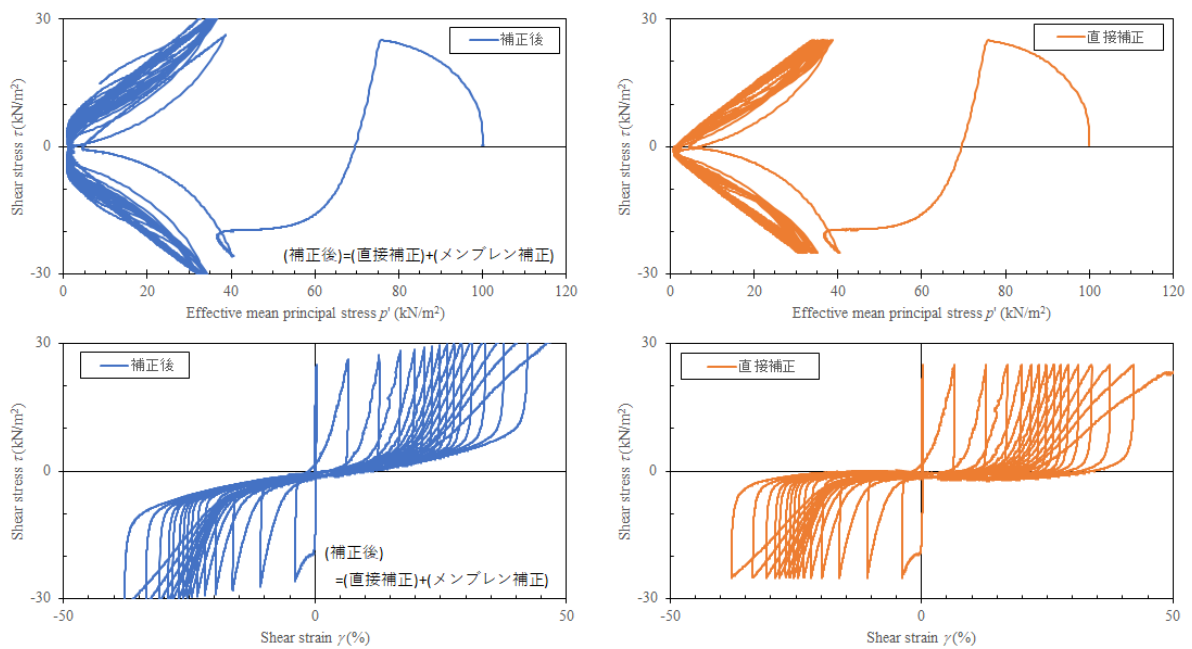


図4.6.4 実験中にゴムスリーブ張力補正を行った結果

左側（青色）：実際の結果（張力補正済み）+張力補正量、つまり張力補正無しの結果  
 右側（オレンジ色）：実際の結果（張力補正済み）

断応力に加えた値で繰返しせん断応力を制御してある。オレンジ色が実験結果となるが、この方法により、大ひずみでも所定の正確なせん断応力を供試体に作用させることができる。すでに張力補正された結果であるため、大ひずみではどの程度の張力補正量になるかはわからない、そこで、参考までに、実際の実験値に今回使用したゴムスリーブ張力補正量（式(4.6.1)）を足し合わせた結果（左側：青色）と、実際の実験値を右側の図（オレンジ色）に示した。張力補正されている結果を、さらに張力補正したため正しい結果では無いが、大ひずみでは張力補正量が大きく影響することが理解できる。

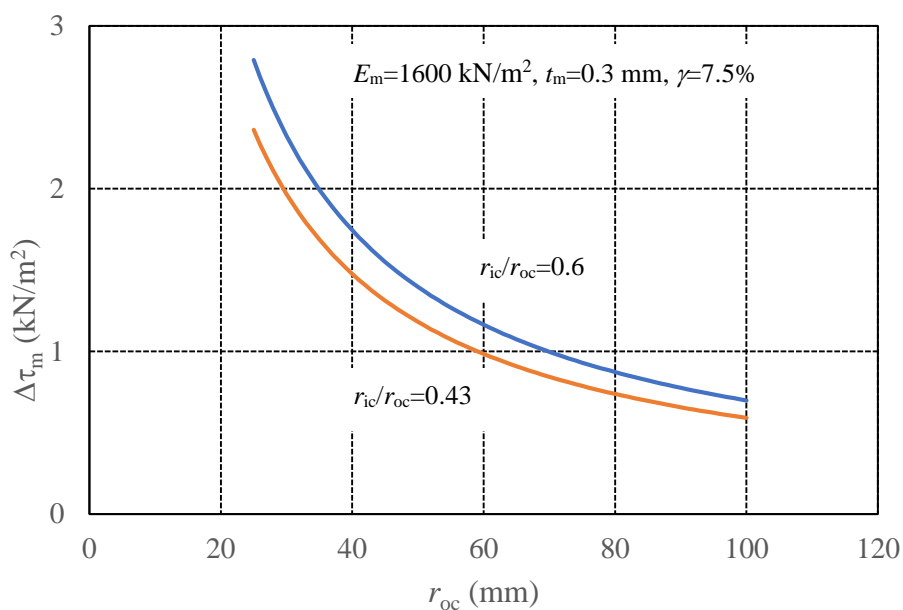


図4.6.5 ゴムスリーブ張力補正量の供試体サイズによる変化（ $\gamma$ は片振幅ひずみ）

### 4.6.3 その他の影響

#### 4.6.3.1 せん断応力振幅の保持

ゴムスリーブ張力補正以外での、せん断応力振幅の保持状況については、一斉試験結果を取りまとめた「4.6.7 参考資料」に掲載した図を参照していただきたい。応力制御では、せん断ひずみが大きくなった場合、せん断応力振幅の保持が難しくなる。これは制御方法（油圧、空圧、モータ）やそのシステムによるところが大きく、一概にこのひずみレベルまでせん断応力振幅を保持できる、とは決められない。試験装置の設計時に考慮すべき項目であるが、ゆるい砂の場合は、液状化で急激に剛性率が低下し、大ひずみまで剛性率回復がないため、大変厳しい条件となる。例えば、「4.6.7 参考資料」の50P-Q-3, 80P-Q-5, 50P-R-3, 80P-R-2は、せん断ひずみが大きくなるとせん断応力振幅が小さくなってしまっている。現在の繰返しせん断試験の基準（JGS 0541, JGS 0543）には規定されていないが、せん断応力振幅保持の観点からは、ひずみ速度一定条件を基準に規定することが望ましい。

#### 4.6.3.2 応力対称性

ここでは、応力対称性：せん断方向（ねじり方向でいうと、時計回りと反時計回り）が変わっても、せん断応力が対称となっているか、について検討する。応力対称性が維持できているかは、一斉試験結果を取りまとめた「4.6.7 参考資料」に掲載した図を参照していただきたい。供試体にねじり方向の異方性がなければ、せん断方向が変わっても、せん断応力が対称となるはずである。

今回の一斉試験の供試体作製法では、このような異方性は発生しないため、せん断応力ゼロで線対称となるべきである。対称になっていない場合は、試験装置システム（回転方向で何らかの抵抗が発生など）の問題やトルクロードセルのゼロ点のずれなどが考えられる。例えば、「4.6.7 参考資料」の80D-E-4はせん断応力が少し上方向にシフト、50D-I-1はせん断応力が少し下方向にシフトしている。

#### 4.6.3.3 サイクリックモビリティ時の有効応力経路の形状

ここでは、サイクリックモビリティ時の有効応力経路の形状を載荷周波数や制御方法（応力とひずみ制御）で比較を行う。サイクリックモビリティ時の有効応力経路の形状については、一斉試験結果を取りまとめた「4.6.7 参考資料」に掲載した図を見ていただきたい。基本的に大ひずみ時の挙動となるため、実験での制御は容易ではない。はっきりした原因はわからないが、各機関で同じ形状が出ているとは言いがたい（例えば、80P-A-2はサイクリックモビリティが大きく膨らんでいるが、80P-J-3はそれほどでもない）。「4.6.3.1 せん断応力振幅の保持」と同様、制御方法（油圧、空圧、モータ）やそのシステムによるところが大きいと考えられる。今回の一斉試験では事例が少ないが、ひずみ速度一定制御では、大ひずみまで安定した結果が得られている（50D-B-4）。一方、応力制御の50P-M-4はサイクリックモビリティの形をしておらず、50P-R-3はせん断応力が正の方で垂直に立ち上がる（有効応力が変化しない）、不安定な結果となっている。データが少ないため、制御方法についてはさらなる検討が必要である。

#### 4.6.4 考察と基準案を考慮したまとめ

図4.6.1に示したように、現在日本で使用される一般的な供試体サイズやゴムスリーブにおいて、ゴムスリーブ張力補正量は、せん断ひずみに比例したほぼ同一の関係となる。ゴムスリーブ張力補正は実験後に行われるため、繰返しせん断応力振幅の制御値に反映させることは出来ない（ひずみ制御で張力補正を行う特殊な試験を除く）。そこで、基準では制御値よりどこまでずれを許容するのかが問題となる。条件を「両振幅せん断ひずみ15%で、張力補正によるせん断応力の低下を5%以内」とした場合は、28 kN/m<sup>2</sup>以上の繰返し応力で実験を行う必要がある。なお、張力補正量はせん断ひずみに比例するので、他のせん断ひずみでも簡単に計算できる。繰返し応力が小さくなる低拘束圧やゆるい供試体の場合には、上述の条件を担保できなくなる場合もありうる。その場合は、ゴムスリーブ張力の影響を小さくする措置や補正值をフィードバックして試験を行う必要がある。

次に、供試体サイズによって、ゴムスリーブ張力補正量がどの程度影響を受けるかを検討する。特殊な供試体サイズ等を考える時の参考としていただきたい。ゴムスリーブ張力補正式(4.6.1)からもわかるように、 $\Delta\tau_m$ は $\gamma$ に比例することになる。機関Mを除き、同じ $E_m$ 、 $t_m$ が使われていたことより、 $\Delta\tau_m$ に影響を与える因子は、供試体サイズ（ $r_{oc}$ 、 $r_{ic}$ ）となる。式(4.6.1)の分母に着目すると、究極の状態として、供試体外径が内径と一致した場合、 $\Delta\tau_m$ は無量大となる。つまり、外径と内径の差が大きい（供試体肉厚が大きい）ほどゴムスリーブ張力補正は小さくなる。しかしながら、外径と内径の差が大きいと（つまり、内外径比が小さい）、供試体内に発生する応力やひずみが不均一になるのは周知の事実である。

今回の一斉試験では2種類の内外径比（0.6と0.43）が利用されていた。そこで、ゴムスリーブ張力補正式(4.6.1)を用いて、 $E_m=1600$  kN/m<sup>2</sup>、 $t_m=0.3$  mm、 $\gamma=7.5\%$ に固定して、内外径比はそれぞれ0.6および0.43に固定した状態で、供試体外半径を25 mmから少しずつ大きくしていった時のゴムスリーブ張力補正量 $\Delta\tau_m$ の変化を図4.6.5に示す。この図より、供試体サイズを大きくすることで、ゴムスリーブ張力補正量がどの程度小さくなるか、定量的に把握できる。

以上議論してきた結果を、まとめると以下のようなになる。

- (1) 外径70 mm、内径30 mmの中空供試体において、 $E_m=1600$  kN/m<sup>2</sup>、 $t_m=0.3$  mmのゴムスリーブが使われる場合、34 kN/m<sup>2</sup>以上の繰返し応力で液状化試験を行うことが推奨される。（両振

幅せん断ひずみ15%で、張力補正による応力の低下を5%以内に抑える条件)

- (2) 両振幅せん断ひずみ15%を大きく超えるような特殊な試験においては、ゴムスリーブ張力補正を行いながら実験できる、ひずみ速度一定条件が推奨できる。また、大ひずみにおいて、ゴムスリーブが均一な変形をしなくなると、ゴムスリーブ張力補正式(4.6.1)より補正量は小さくなる。
- (3) せん断応力振幅の保持やサイクリックモビリティ時の有効応力経路の形状の観点からは、ひずみ速度一定条件の方が応力制御（繰返し周波数一定）よりも好ましいと考えられる。

4.6.4節のこれまでの議論は、ゴムスリーブ張力補正式(4.6.1)を使用した場合を考えている。この補正式は、均質なひずみを仮定したものであり、実際の土供試体は均質に変形しない場合もある（例えば、液状化後や大変形時のひずみの局所化など）。液状化に着目して、水供試体でゴムスリーブ張力を実験で求める方法も紹介した<sup>19)</sup>。しかしながらこの手法の普及から見て、現時点では、式(4.6.1)による補正で基準化するのが妥当と思われる。

#### 4.6.5 参考資料：各機関の結果

各機関の一斉試験結果（ $D_r=50\%$ と  $D_r=80\%$ をそれぞれ1ケースずつピックアップ）をグラフにまとめたものを掲載する。

#### 4.7 リブの高さ、個数の影響

中空ねじりせん断試験の荷重方法は、中心部分を省いたドーナツ状の断面を持った供試体に対し、供試体上部あるいは下部（殆どの試験装置が供試体の上部）を振ることでせん断を与える。この為、せん断（荷重）方法により供試体上下に接合する上部キャップ、下部ペDESTALのポーラスストーンには、密着性と荷重力を確実に伝達する為の金属製治具（リブ/ブレード）が取り付けられている。

図4.7.1には、中空ねじり試験装置のトップキャップと下部ペDESTALの例（機関J所有装置）を示している。本節では、一斉試験結果を基に、例示したような治具の影響について報告する。なお、治具部品の名称・定義は下記の通りとした（図4.7.2参照）。

- ・リブ：金属製の治具自体を指す。供試体上部のトップキャップ、下部のペDESTALに装着されたポーラスストーン、ポーラスメタルにそれぞれ付与されている。
- ・ブレード（刃）：リブにおいて、ポーラスストーン／ポーラスメタル表面から突出し、供試体に直接挿入される部分を指す。



図4.7.1 上部トップキャップ（左）および下部ペDESTAL（右2つ）に設置されるリブ付き中空ねじりせん断試験用ポーラスストーンの一例

※一般的には、トップキャップとペDESTALには同じものが使用されている。

金属片全体をリブと称し、ポーラスストーンより突出している歯の部分をブレードと称する。

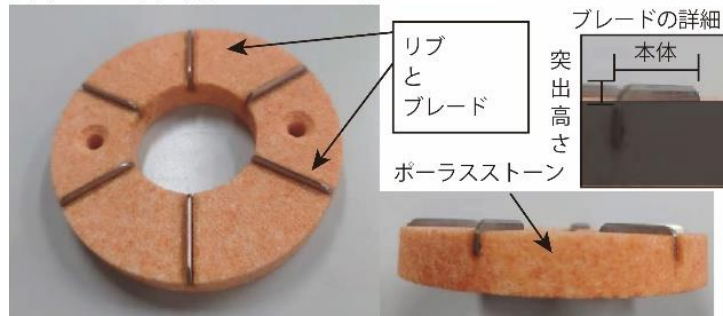


図4.7.2 ポーラスストーンに取り付けられたリブ/ブレード

#### 4.7.1 一斉試験参加機関保有の中空ねじりせん断試験機におけるリブの状況

一斉試験参加機関で保有する中空ねじりせん断試験機が装備する、ポーラスストーンのリブ諸元と供試体諸元を表4.7.1に示す。試験装置の製造メーカーが数社と限られるためか、参加機関が保有する試験装置のリブの枚数、厚さ、ブレードの突出高さは、供試体の断面積の寸法別に表4.7.2の3種類に大別される。なお、①のタイプで供試体高さが20mmの機関は、突出高さが3mm、枚数が8枚である。現状で、リブの枚数、厚さ、ブレードの突出高さなどの諸元は、製造メーカーの独自判断で決められているようである。今回の一斉試験参加機関では、ほぼ同じ諸元の装置を保有していることが確認された。

表4.7.1 一斉試験に使用したリブ種類と供試体諸元

参加機関	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	K	L	M	N	O	P	R
ブレード有無	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有
リブ数(枚) <sup>*1</sup>	6	8	6	6	6	6	6	8	6	6	6	8	6	7	6	6	6	8
リブ厚さ(mm) <sup>*4</sup>	0.5	2	1	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.5	1	1	1	2
ブレード突出高さ(mm)	1.8	2	1.5	2	2	1	1.5	3	3	2	1	2	2	1.2	2	2	2	3
供試体内直径(mm) <sup>*2</sup>	60	60	30	30	30	60	60	60	30	30	30	60	30	30	30	30	30	60
供試体外直径(mm) <sup>*2</sup>	100	100	70	70	70	100	100	100	70	70	70	100	70	70	70	70	70	100
供試体高さ(mm) <sup>*2</sup>	100	200	70	70	100	100	100	200	70	100	70	100	100	70	100	100	100	100
供試体断面積(cm <sup>2</sup> ) <sup>*2</sup>	50	50	31	31	31	50	50	50	31	31	31	50	31	31	31	31	31	50
供試体体積(cm <sup>3</sup> ) <sup>*2</sup>	503	1005	220	220	314	503	503	1005	220	314	220	503	314	220	314	314	314	503
ブレード体積(cm <sup>3</sup> ) <sup>*3</sup>	0.216	0.320	0.180	0.240	0.240	0.120	0.180	0.480	0.360	0.240	0.120	0.320	0.240	0.168	0.240	0.240	0.240	0.480

※1：キャップ面又はペダスタル面の片面枚数

※2：標準供試体の公称値で供試体実測値と異なる

※3：ブレード体積＝(ブレード枚数×突出高さ)×2

※4：厚さ0.2～0.7mmの△山形を平均として暫定表示

表4.7.2 代表的な供試体寸法とリブ/ブレード諸元

代表的種類	内径(mm)	外径(mm)	高さ(mm)	リブ枚数(枚数)	リブ厚さ(mm)	ブレード突出高さ(mm)
①	60	100	100	6	1	2
②	30	70	100	6	1	2
③	30	70	70	6	1	2

※上記は片面における数量である。トップキャップと下部ペダスタルで異なる枚数、サイズである旨を解答した機関は無いため、実際の供試体に対する数量は2倍となる。

上記の代表的な種類である①、②、③について、それぞれ

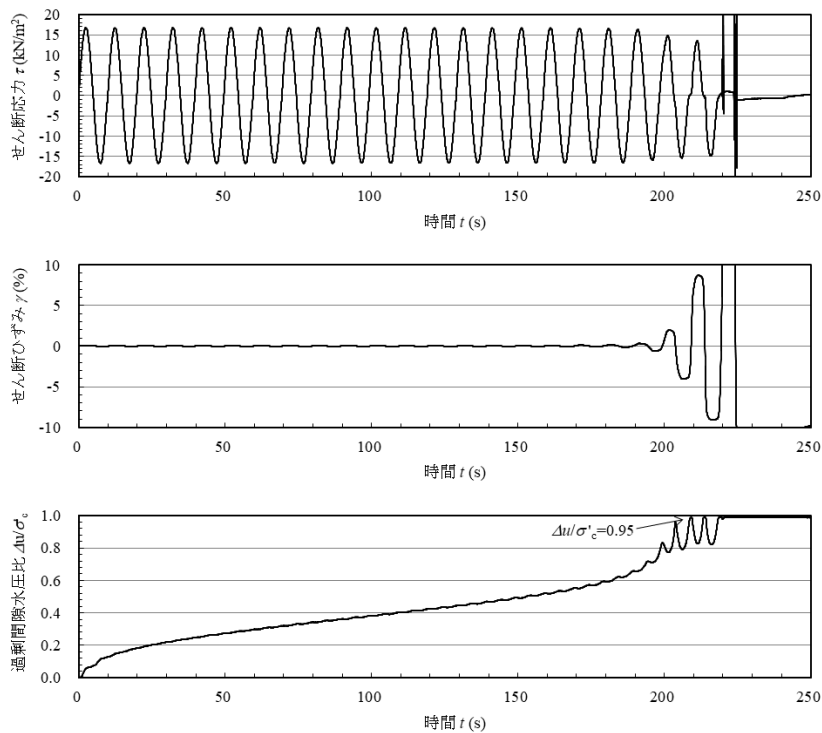
- ・代表的種類①：試験機関 A (50P-A-4, 80P-A-3)
- ・代表的種類②：試験機関 J (50P-J-2, 80P-J-3)

・代表的種類③：試験機関 C (50P-C-2, 80P-C-4)

を代表例として、図4.7.3～図4.7.8にせん断応力の最大値に近い供試体のせん断応力、せん断ひずみ、過剰間隙水圧比の時刻歴を示とともに、図4.7.9～図4.7.14に同じ試験ケースの有効応力経路と応力-ひずみ関係を示す。

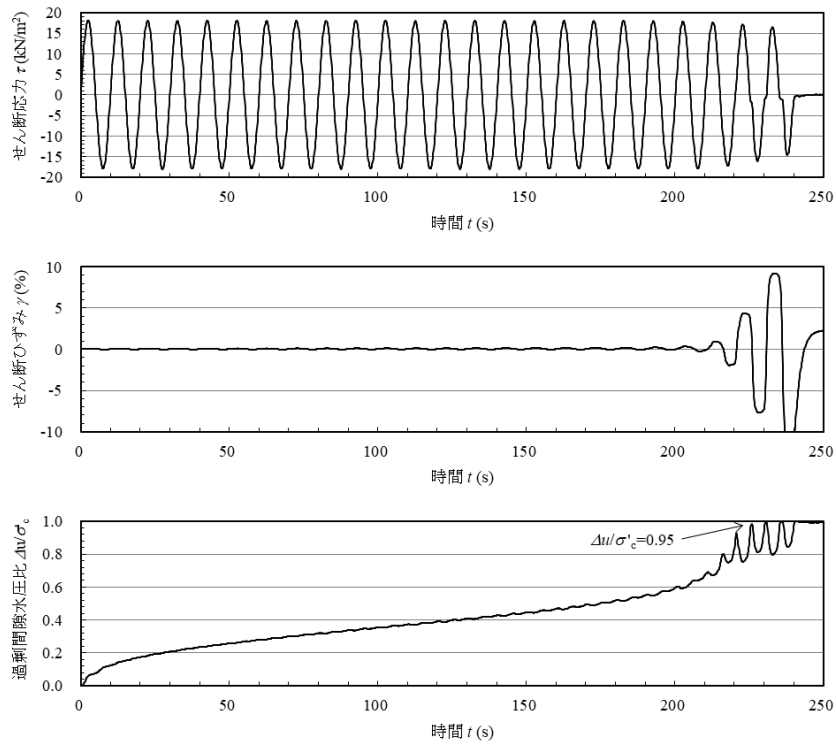
これら供試体条件の異なる①～③の各試験について、せん断ひずみの発生挙動や過剰間隙水圧比の上昇に関する挙動を見ると、特に相対密度  $D_{ri}=50\%$  (目標値) の供試体では、試験機関 A, J, C ともにせん断ひずみや過剰間隙水圧の発生・上昇する挙動はせん断波の回数を含め非常に良く似た軌跡を描いており大きな差はない。この挙動は有効応力経路、応力-ひずみ関係でも同様である。

相対密度  $D_{ri}=80\%$  (目標値) の供試体では、試験機関 A と C は、せん断ひずみ、過剰間隙水圧比の軌跡は類似しているが、試験機関 J のみせん断ひずみの発生と過剰間隙水圧比の上昇が他の 2 機関よりも遅いため、載荷回数が多くなっており差が生じている。ただし、有効応力経路や応力-ひずみの結果を見ても類似した形状を示すことや相対密度  $D_{ri}=50\%$  の結果や試験機関 A と C の結果を考慮した場合には、A と J の差がリブやブレードの違いによるものとは考えにくく、この為、試験機関毎の挙動の差は、他の要因が大きいとここでは判断した。その点について、次にもう少し詳しく整理する。

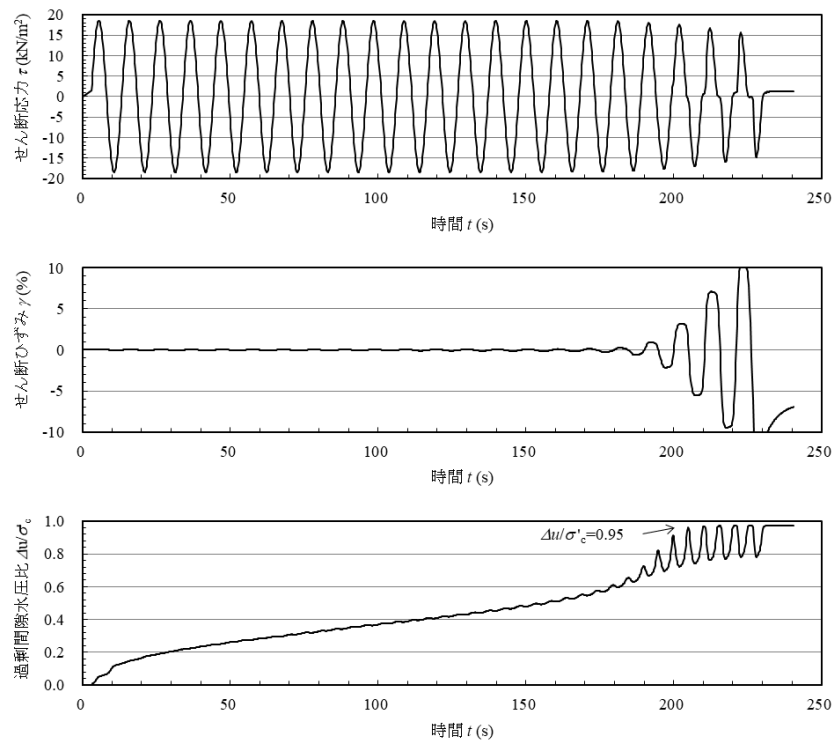


上：せん断応力，中：せん断ひずみ，下：過剰間隙水圧比

図4.7.3 代表的種類① 試験機関 A の結果 50P-A-4  $D_{ri}=48.8\%$

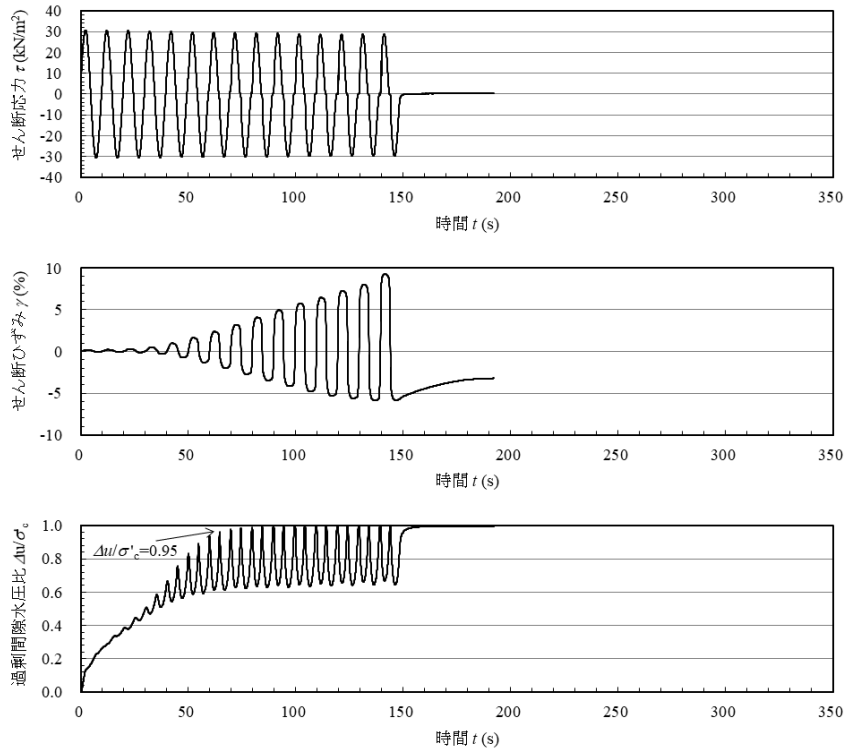


上：せん断応力，中：せん断ひずみ，下：過剰間隙水圧比  
 図4.7.4 代表的種類② 試験機関J 50P-J-2  $D_{ri}=48.3\%$

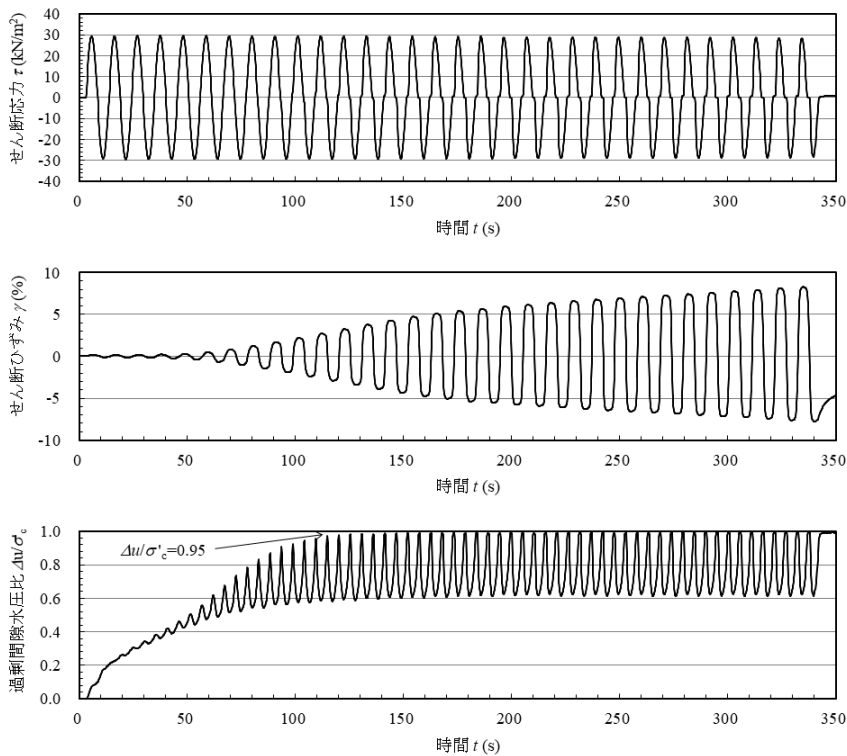


上：せん断応力，中：せん断ひずみ，下：過剰間隙水圧比  
 図4.7.5 代表的種類③ 試験機関Cの結果 50P-C-2  $D_{ri}=50.8\%$



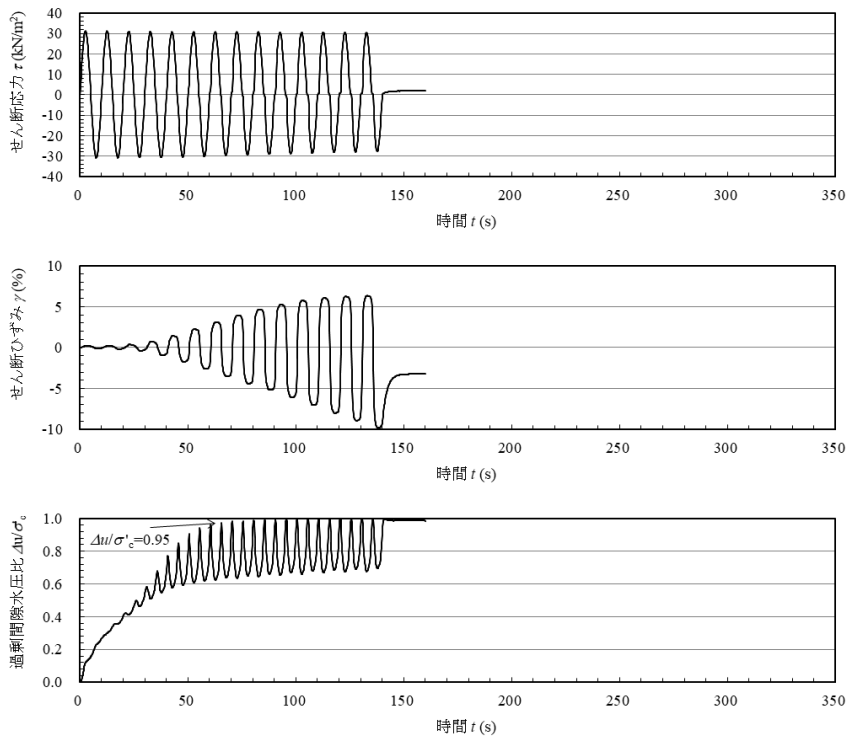


上：せん断応力，中：せん断ひずみ，下：過剰間隙水圧比  
 図4.7.6 代表的種類① 試験機関 A の結果 80P-A-3  $D_{ri}=79.7\%$

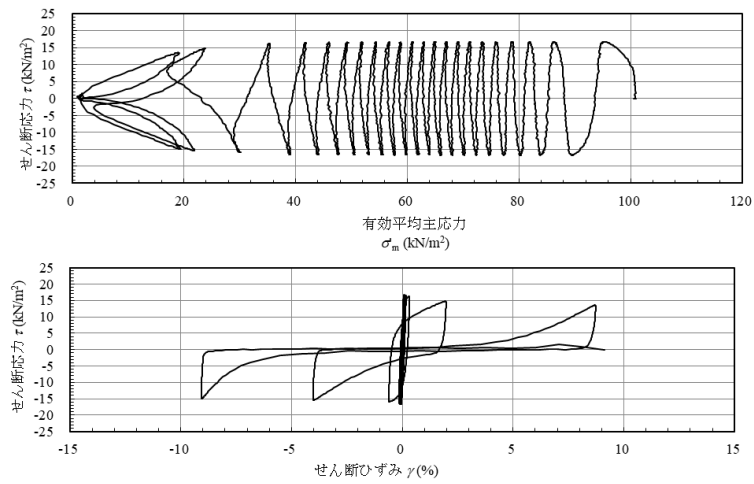


上：せん断応力，中：せん断ひずみ，下：過剰間隙水圧比  
 図4.7.7 代表的種類② 試験機関 J の結果 80P-J-3  $D_{ri}=78.7\%$

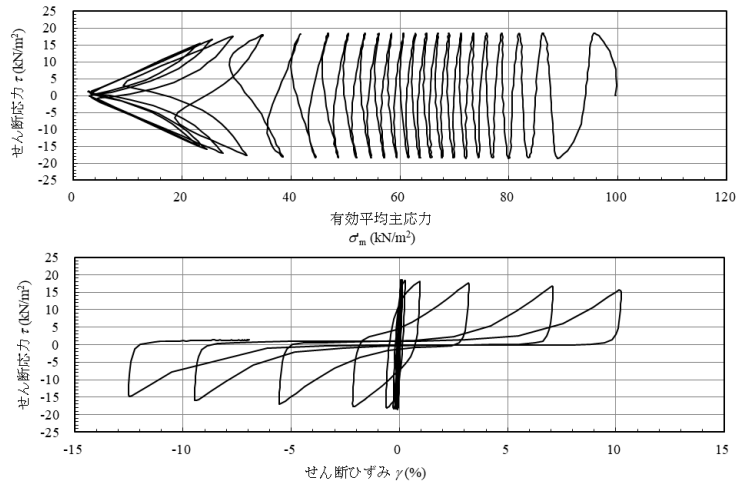




上：せん断応力，中：せん断ひずみ，下：過剰間隙水圧比  
 図4.7.8 代表的種類③ 試験機関Cの結果 80-C-4  $D_{ri}=80.6$

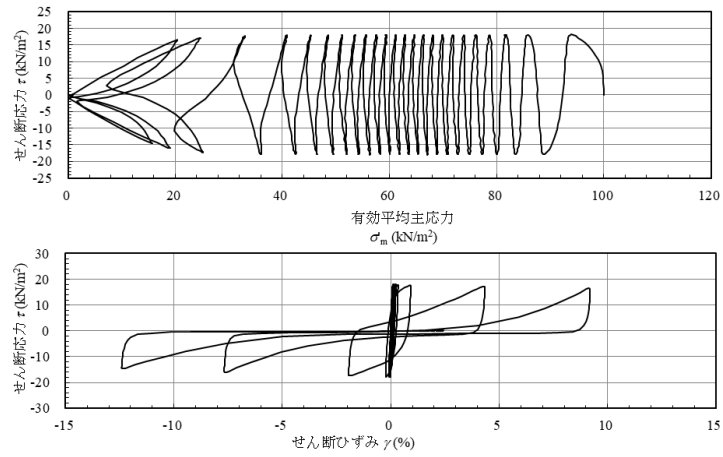


上：有効応力経路 下；応力-ひずみ関係  
 図4.7.9 代表的種類① 試験機関Aの結果 50P-A-4  $D_{ri}=48.8\%$



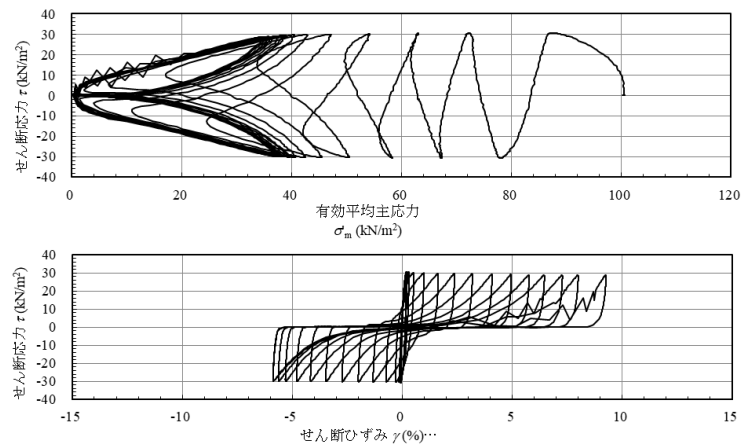
上：有効応力経路 下；応力-ひずみ関係

図4.7.10 代表的種類② 試験機関Jの結果 80P-J-3  $D_{ii}=78.7\%$



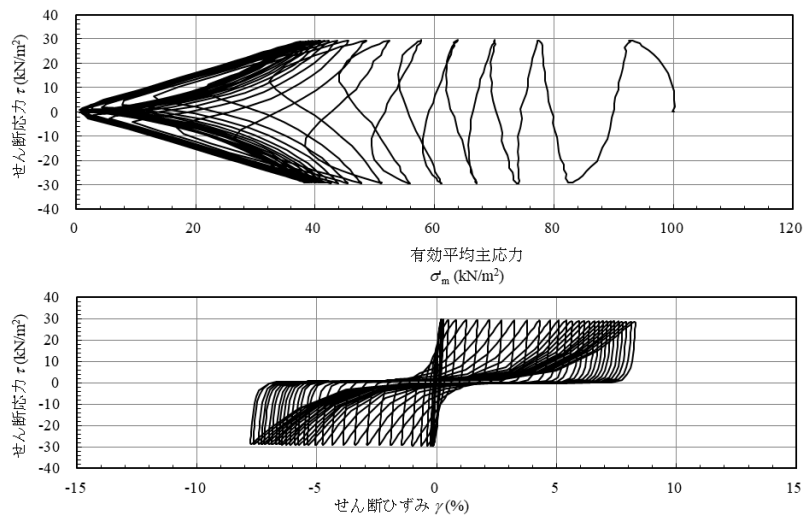
上：有効応力経路 下；応力-ひずみ関係

図4.7.11 代表的種類③ 試験機関Cの結果 50P-C-2  $D_{ii}=50.8\%$



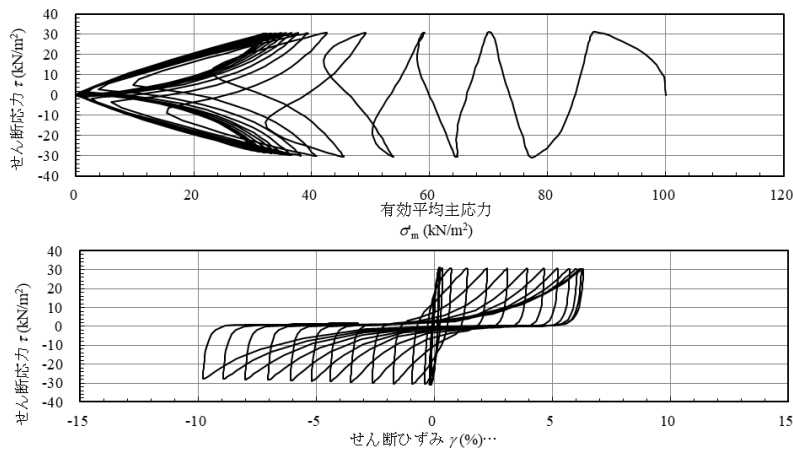
上：有効応力経路 下；応力-ひずみ関係

図4.7.12 代表的種類① 試験機関Aの結果 80P-A-3  $D_{ii}=79.7\%$



上：有効応力経路 下；応力-ひずみ関係

図4.7.13 代表的種類② 試験機関Jの結果 80P-J-3  $D_{ii}=78.7\%$



上：有効応力経路 下；応力-ひずみ関係

図4.7.14 代表的種類③ 試験機関Cの結果 80-C-4  $D_{ii}=80.6\%$

図4.7.15には、供試体の断面積に対するリブの枚数を整理して示す。2つの断面積に対してブレードの枚数は2種類ずつあるが、供試体体積の大きい内径：60mm・外径：100mmの装置では、枚数が6枚と8枚の機関が存在する（内径：30mm・外径：70mmでは、1機関のみリブの枚数が7枚）。同様に供試体高さに対するブレードの突出高さを整理して図4.7.16に示す。供試体高さ20mm，100mm，70mmの3種類に対し、ブレードの突出高さは1mm～3mmの間でのみ存在している。

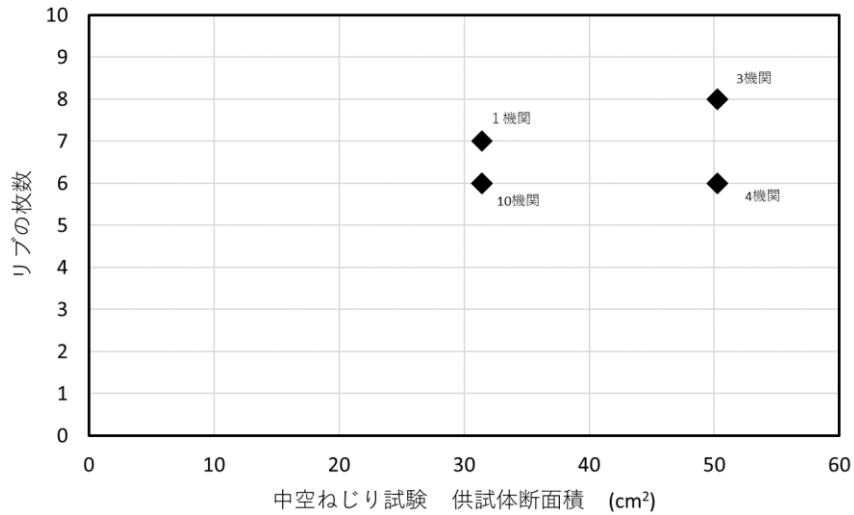
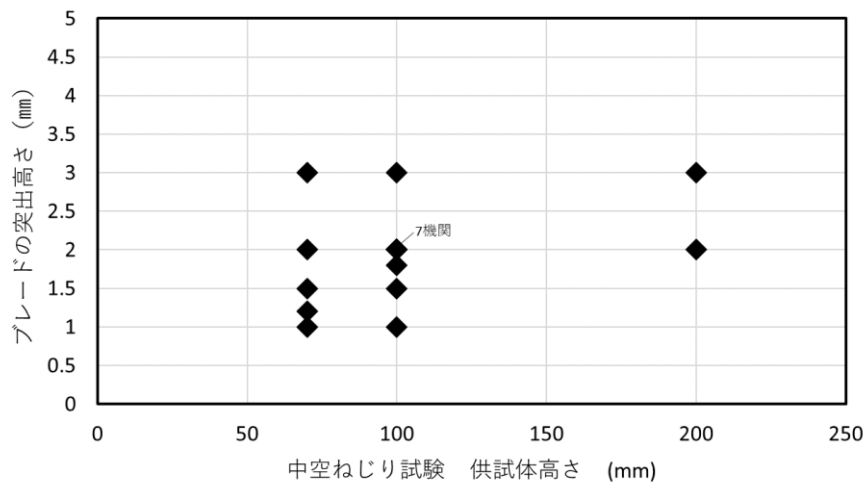


図4.7.15 中空ねじり試験供試体断面積とリブ枚数



※一部のプロットは値が同一の為、重複していることに注意  
 図4.7.16 中空ねじり試験供試体断面積とブレードの突出高さ

※一部のプロットは値が同一の為、重複していることに注意

#### 4.7.2 液状化試験におけるリブの影響分析

リブの諸元が液状化強度に与える影響を検討するにあたり、前述の通り一斉試験参加機関の試験供試体サイズは大別して2種の装置しかないため、結果に偏りがあることを記載しておく。

##### (1) 液状化強度に対するリブの枚数の影響

一斉試験参加機関における液状化強度  $R_{L20}$  とリブの枚数の関係を図4.7.17に示す。ここで  $R_{L20}$  は、各参加機関の報告値、又は試験結果の  $\gamma_{DA}7.5\%$  に達する繰返し回数20回相当の応力比を仮判読したものである。なお、同図中は種類①～③表示は、前述表4.7.2の代表的な供試体寸法区分を示す。

供試体の作製時の相対密度の条件が  $D_r=80\%$  (目標値) と  $D_r=50\%$  (目標値) の2つであるが、それぞれ、リブの枚数が6枚の場合、 $D_r=80\%$  (目標値) : 0.34~0.18程度、 $D_r=50\%$  (目標値) : 0.10~0.20程度。リブの枚数が8枚の場合、 $D_r=80\%$  (目標値) : 0.27程度、 $D_r=50\%$  (目標値) : 0.16~0.17程度となり、6枚と8枚の結果で大きな差は見られず、バラつきの範囲内に収まる程度

と考えられる。また、リブ枚数と供試体寸法の種類との関係にも、明瞭な差異は確認できない。これらの結果から、今回の一斉試験の試験条件範囲内では、リブの枚数（6枚、7枚、8枚）による液状化強度への影響はほとんどないと言えそうである。

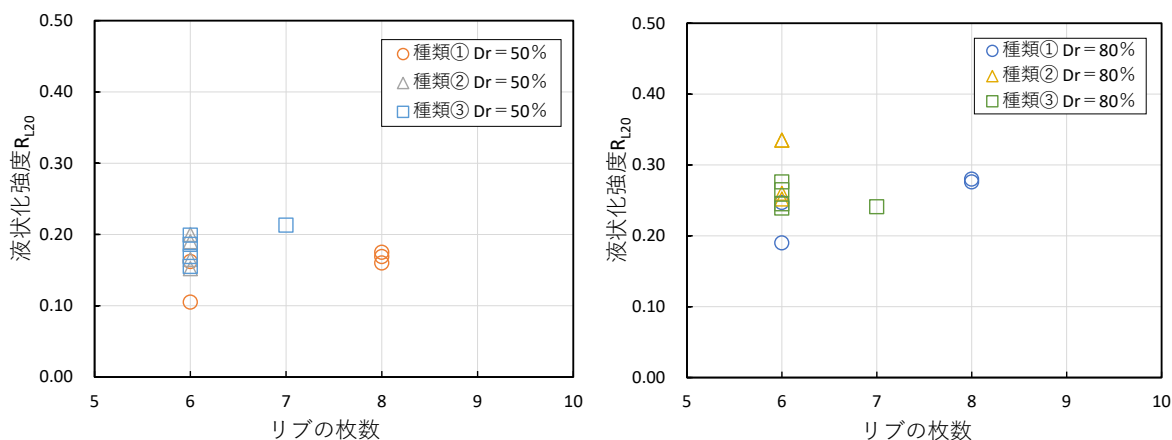


図4.7.17 液状化強度  $R_{L20}$  とリブ枚数の関係

※一部のプロットは値が同一の為、重複していることに注意

### (2) 液状化強度に対するリブの厚さの影響

一斉試験参加機関における液状化強度とリブの厚さの関係を図4.7.18に示す。リブの厚さは、0.5mm～2mm の範囲であった。この項目も供試体作製時の2種類の相対密度  $D_r=80\%$ （目標値）と  $D_r=50\%$ （目標値）について、試験結果を整理した。この結果からも、 $D_r=80\%$ （目標値）と  $D_r=50\%$ （目標値）ともに液状化強度のバラつきに対して、リブの厚さによる影響があるような結果にはなっていない。また、リブ厚さと供試体寸法の種類との関係にも、明瞭な差異は確認できない。よって、今回の一斉試験の試験条件範囲内では、リブの厚さによる液状化強度への影響はほとんどないと言えそうである。

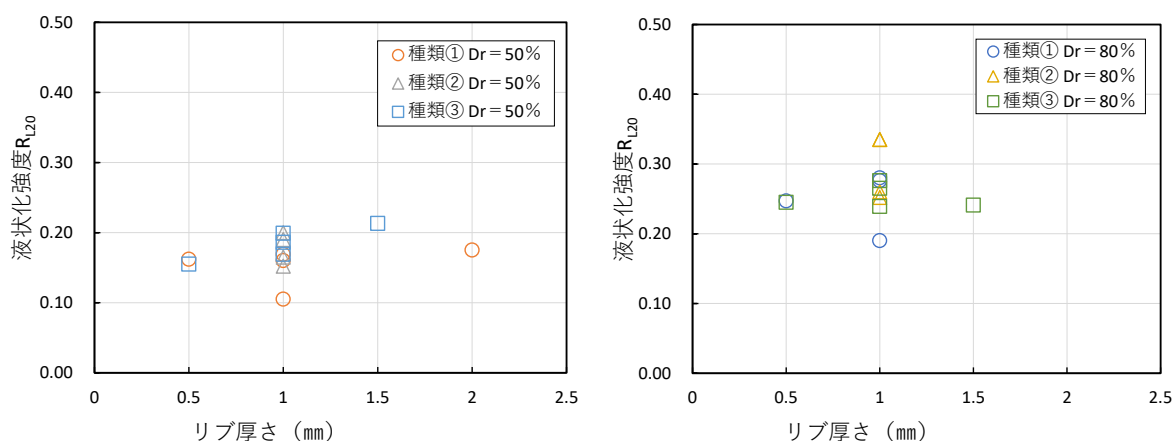


図4.7.18 液状化強度  $R_{L20}$  とリブの厚さの関係

※一部のプロットは値が同一の為、重複していることに注意

### (3) 液状化強度に対するブレード突出高さの影響

一斉試験参加機関における液状化強度とブレードの突出高さの関係を図4.7.19に示す。ブレードの突出高さは、1mm～3mm の範囲であった。この項目も供試体作製時の2種類の相対密度

$D_r=80\%$ （目標値）と  $D_r=50\%$ （目標値）について、試験結果を整理した。この結果からも、 $D_r=80\%$ （目標値）と  $D_r=50\%$ （目標値）とも液状化強度のバラつきに対して、ブレードの突出高さによる影響があるような結果にはなっていない。また、ブレードの突出高さと同供試体寸法の種類との関係にも、明瞭な差異は確認できない。よって、今回の一斉試験の試験条件範囲内では、ブレードの突出高さによる液状化強度への影響はほとんどないと言えそうである。

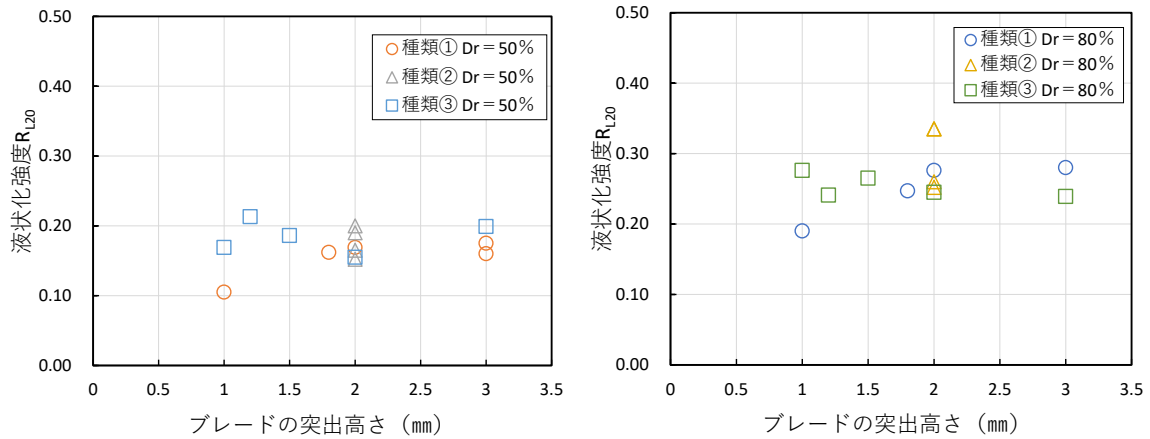
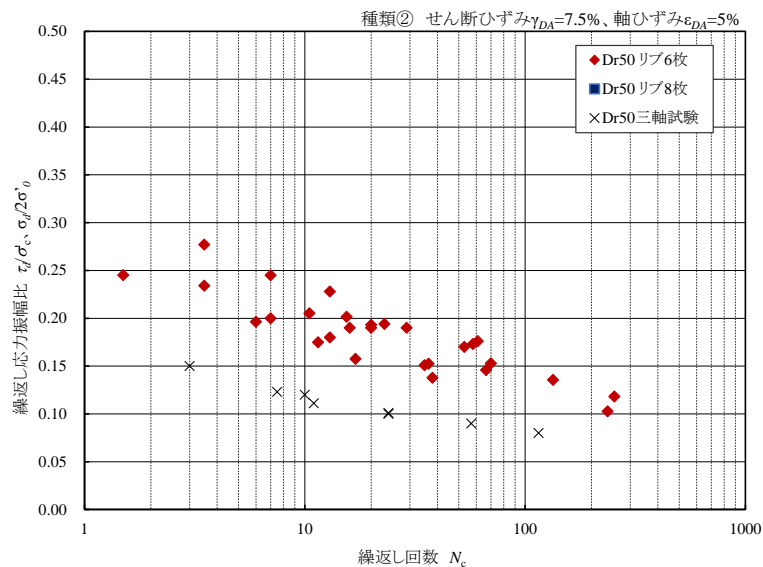


図4.7.19 液状化強度  $R_{L20}$  とブレードの突出高さの関係  
 ※一部のプロットは値が同一の為、重複していることに注意

次に図4.7.20(1), (2)並びに図4.7.21(1), (2)は、一斉試験より得られた応力比—繰返し回数関係におけるリブ枚数の比較および、ブレード突出高さの比較をそれぞれ示したものである。これらの結果からも、前述同様にリブ/ブレードの影響による特徴的な差異は認められない。

また、同図の内、供試体寸法別に比較したものを  $\gamma_{DA}=7.5\%$  の例として



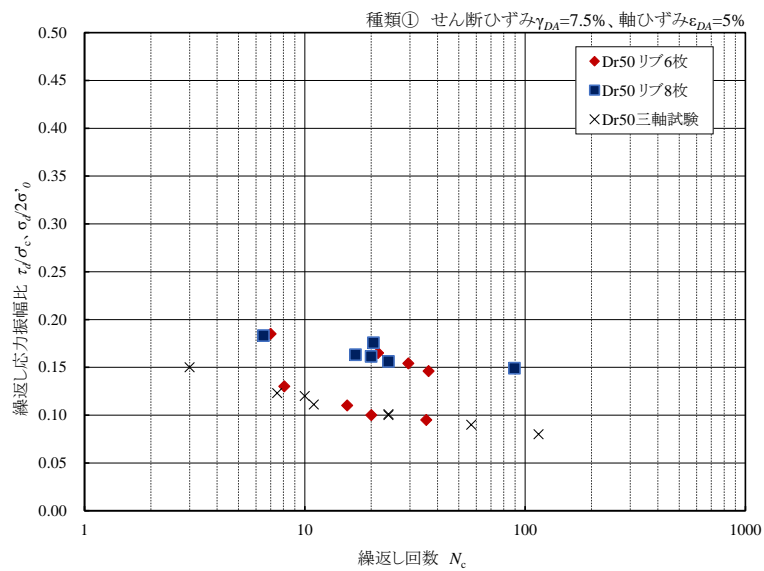
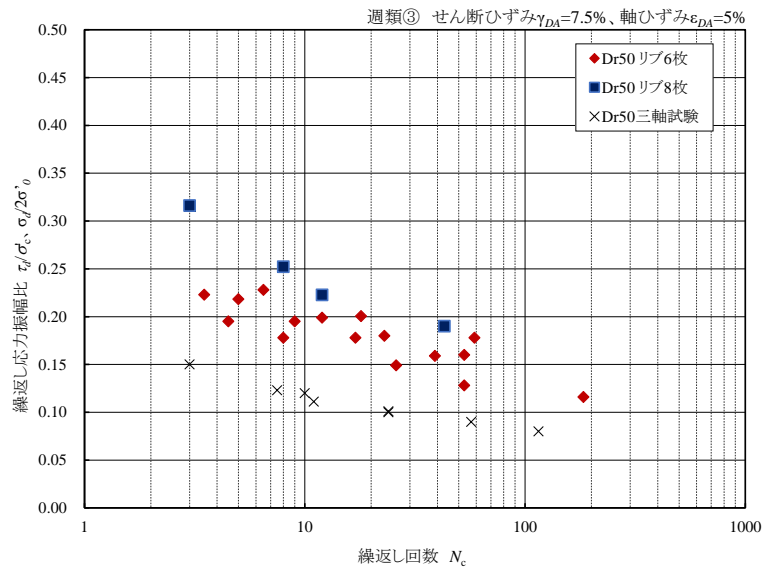


図4.7.22(1), (2)並びに図4.7.23(1), (2)に示す。これらの結果も、前述同様にリブ/ブレードの影響による特徴的な差異は認められない。

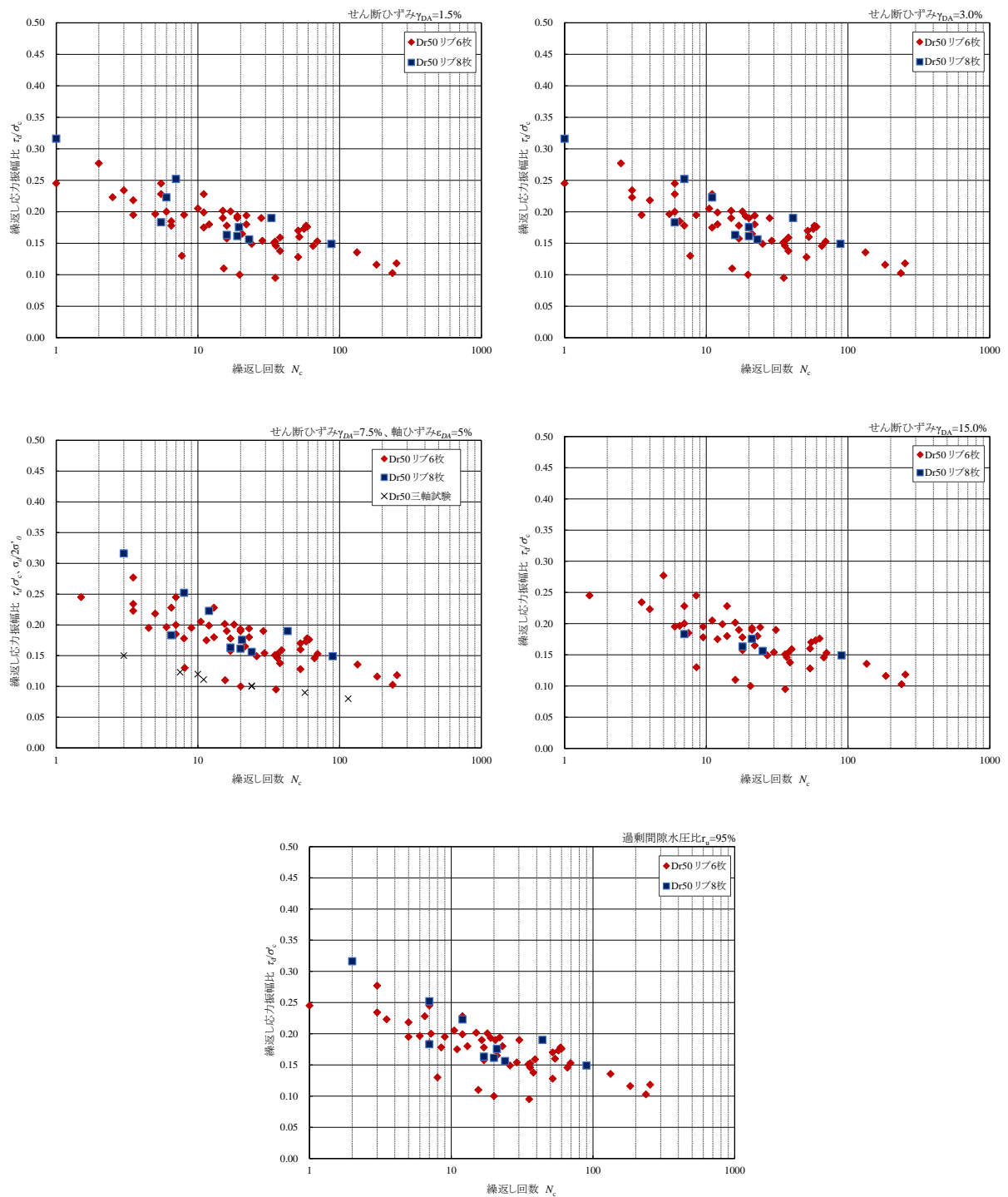


図4.7.20(1) 応力比—繰返し回数関係におけるリブ枚数の比較 (Dr=50%)



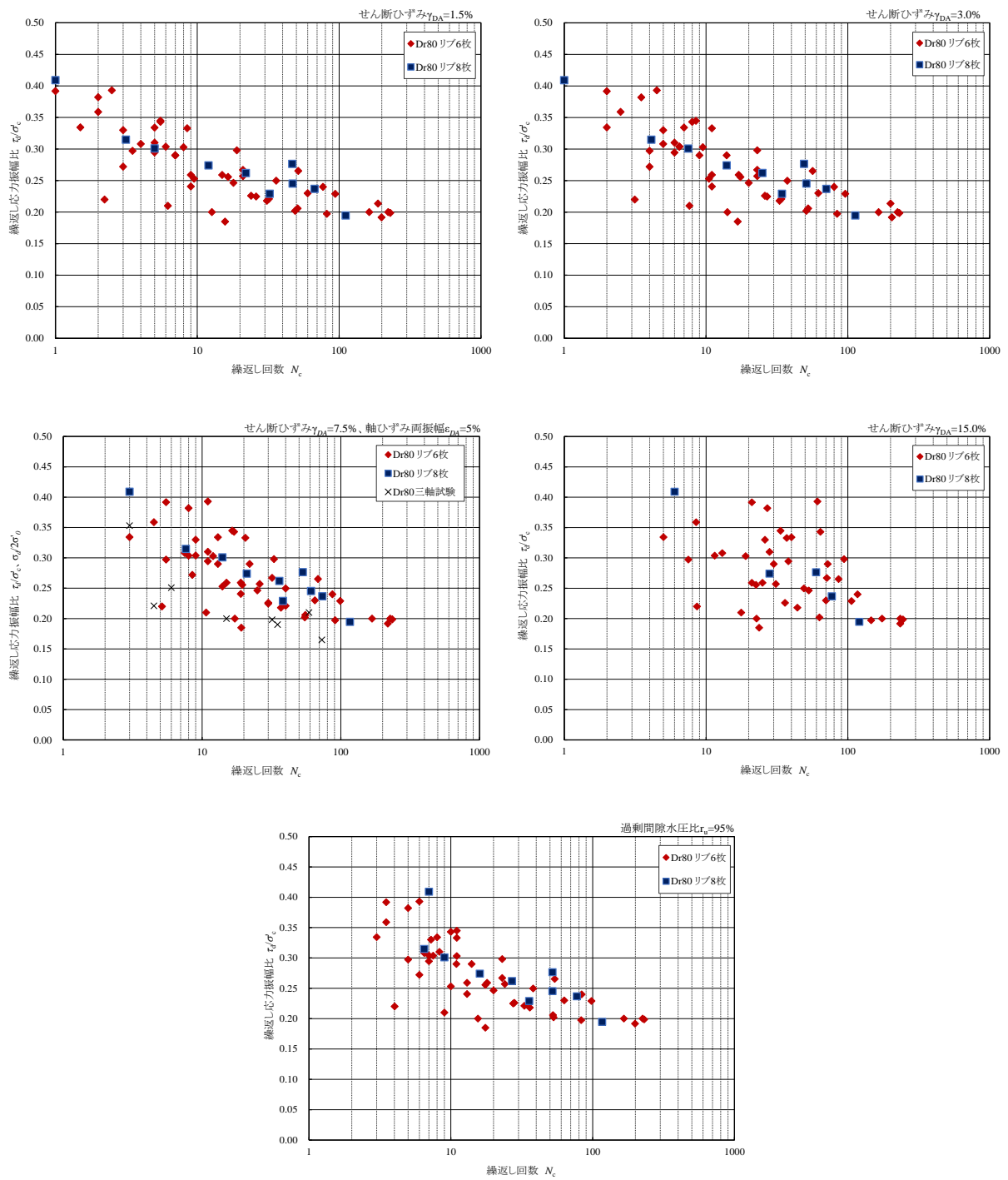


図4.7.20(2) 応力比－繰返し回数関係におけるリブ枚数の比較 (Dr=80%)

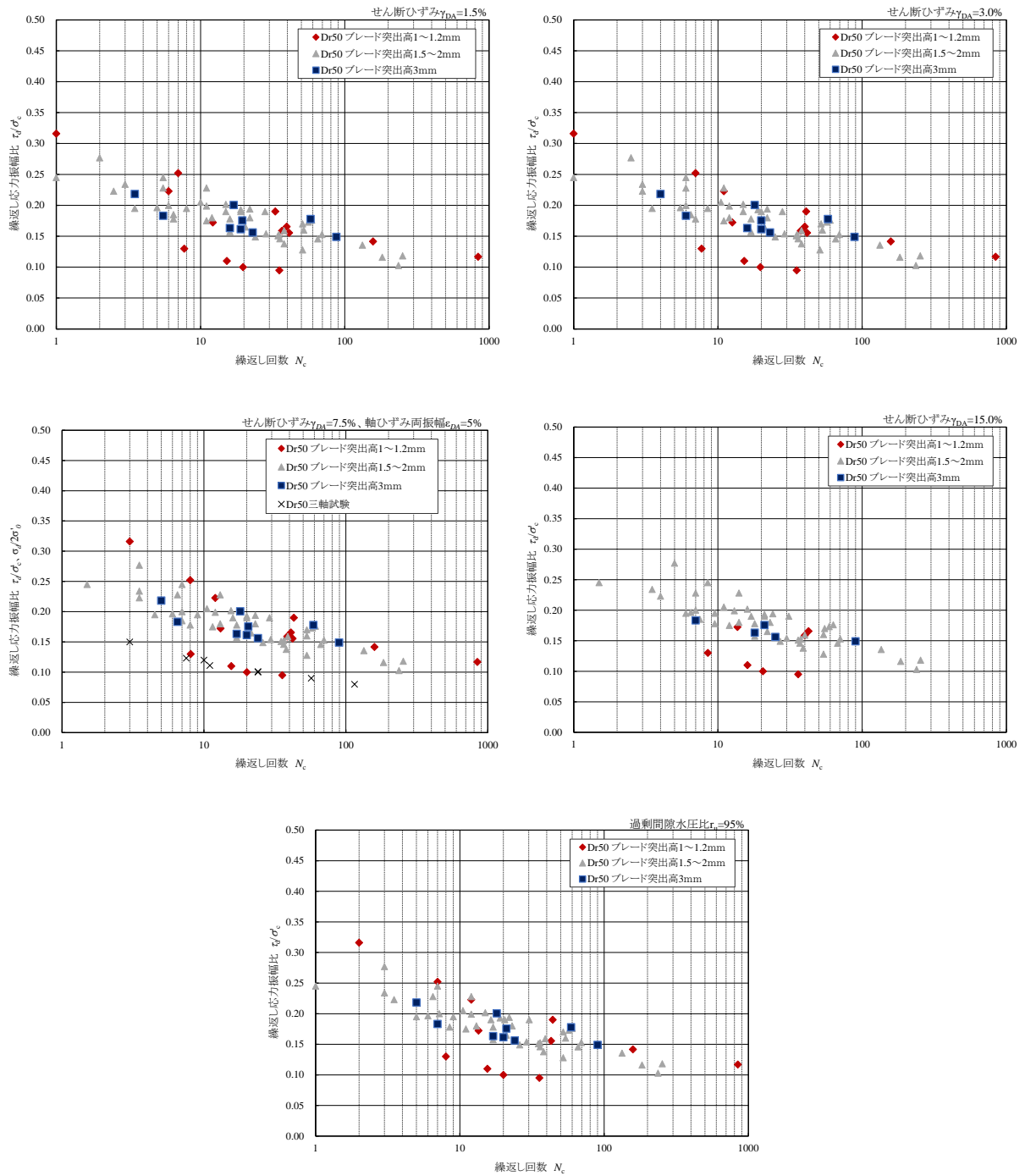


図4.7.21(1) 応力比—繰返し回数関係におけるブレードの突出高さの比較 ( $Dr=50\%$ )

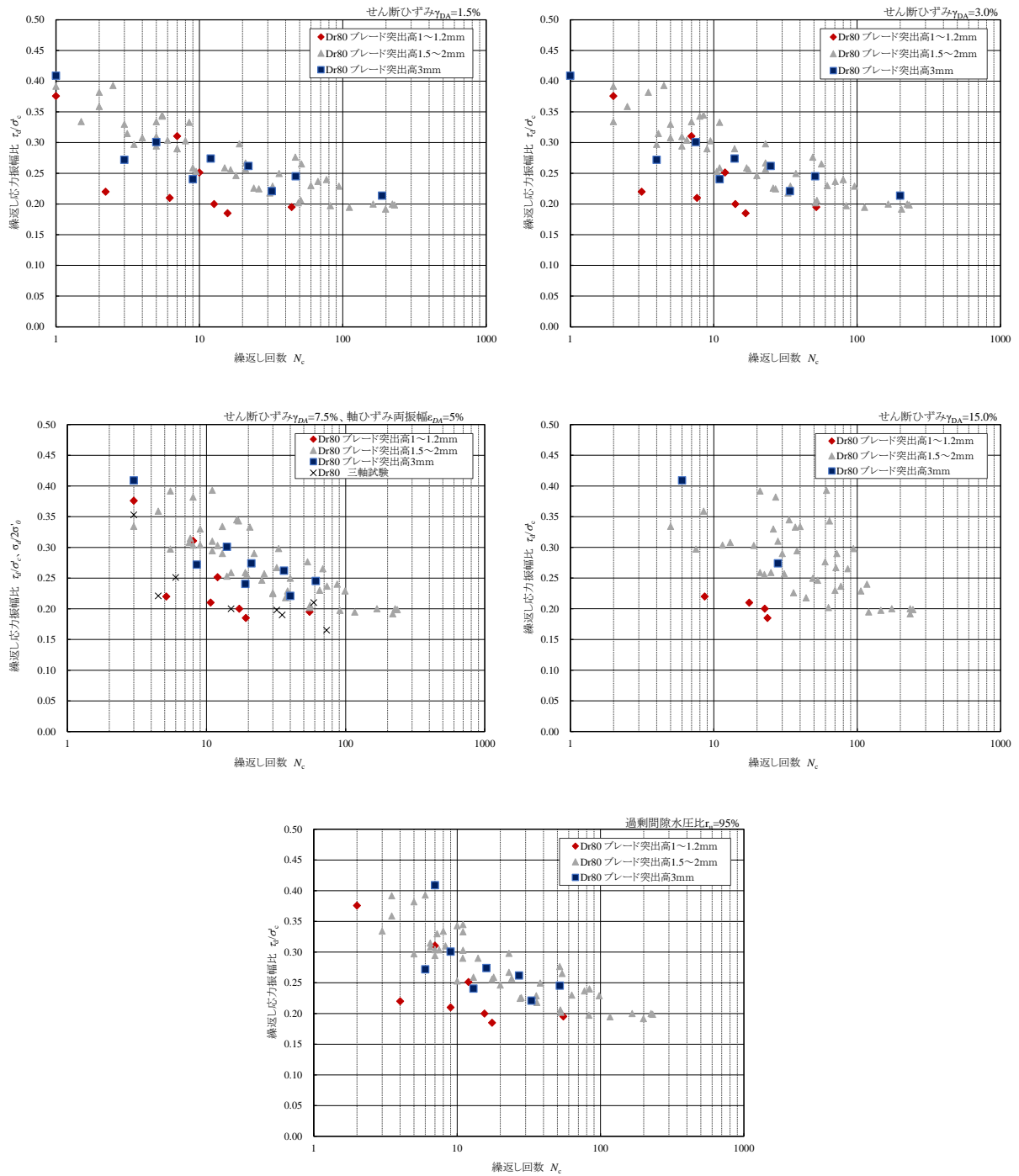


図4.7.21(2) 応力比—繰返し回数関係におけるブレードの突出高さの比較 ( $D_r=80\%$ )

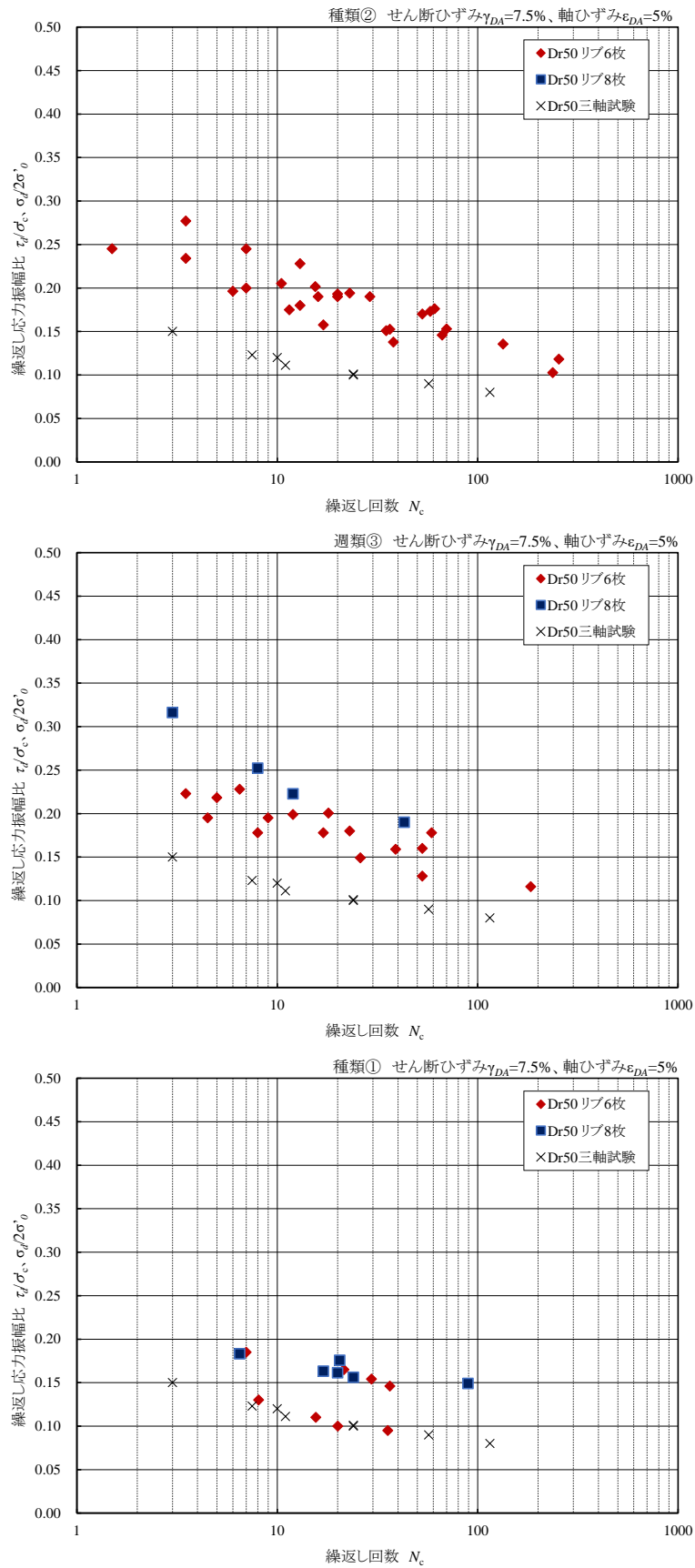
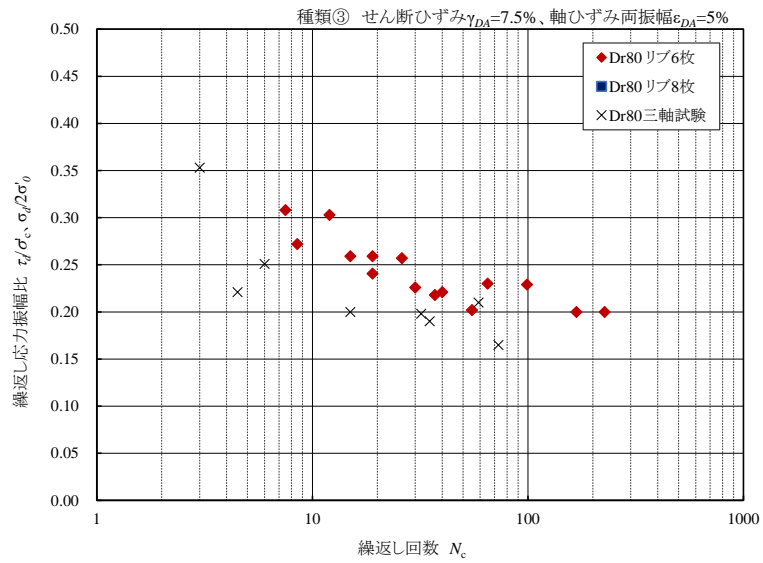
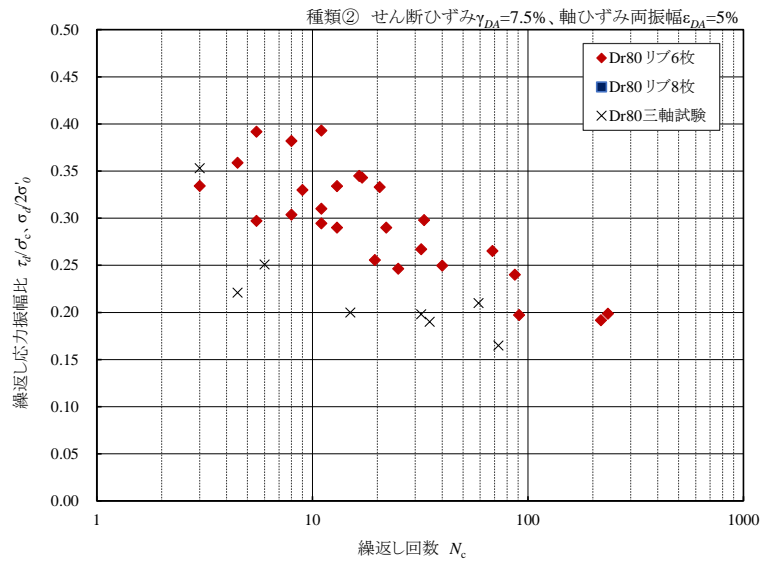
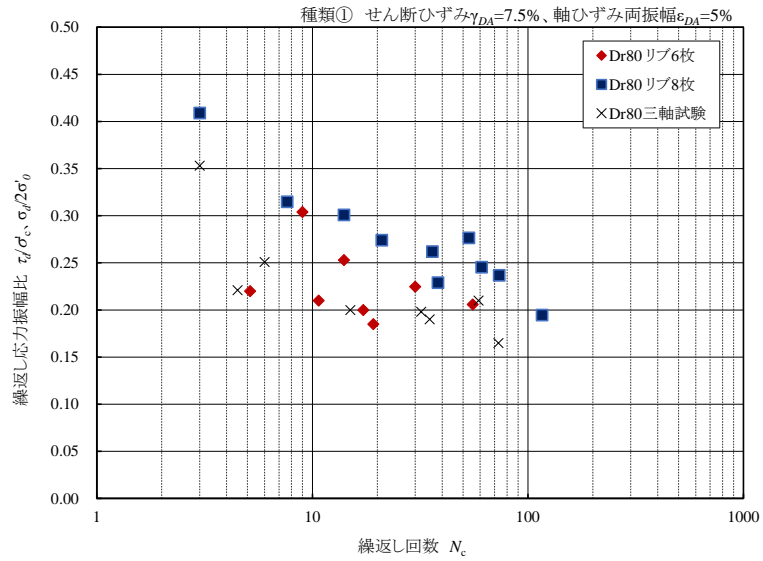


図4.7.22 (1) 応力比-繰返し回数関係におけるリブ枚数の比較 ( $D_r=50\%$ )  
供試体寸法の種類別表示



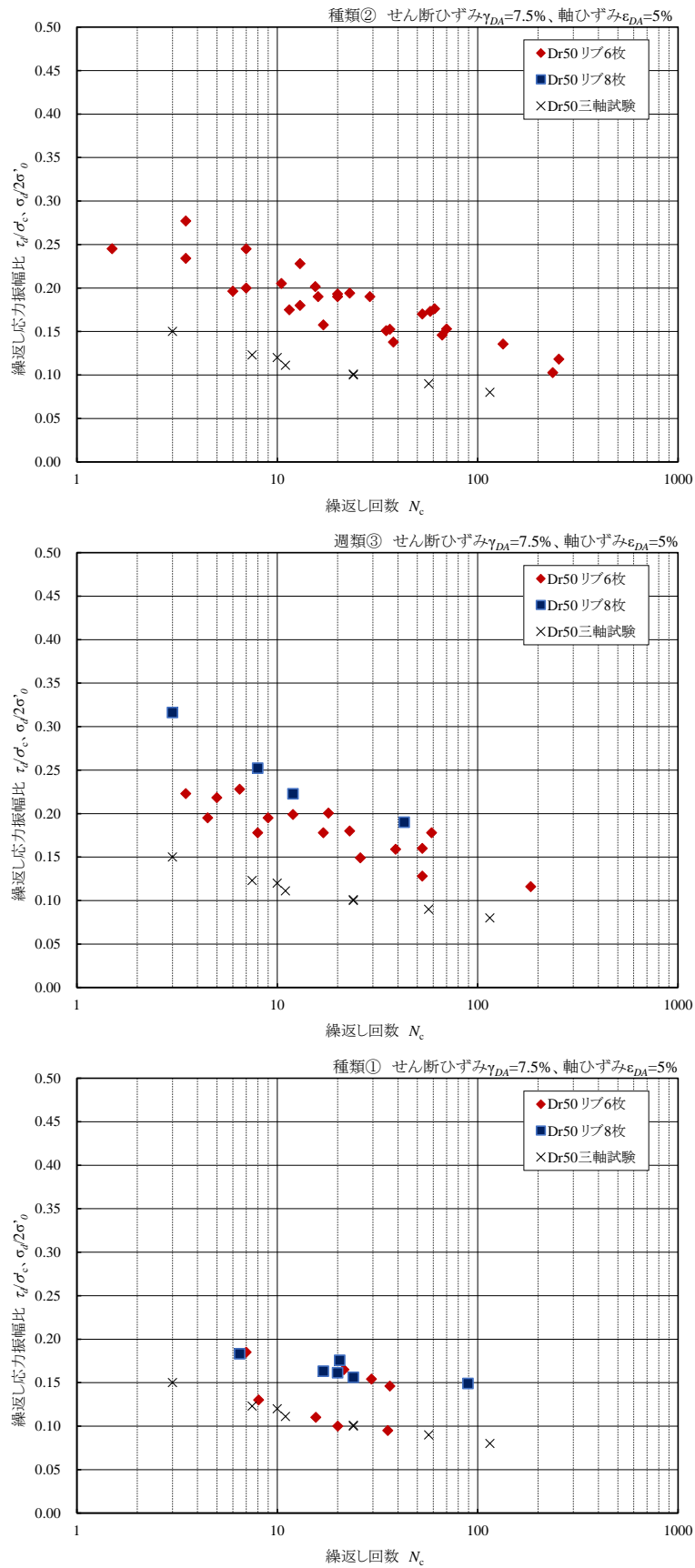


図4.7.22 (2) 応力比-繰返し回数関係におけるリブ枚数の比較 ( $D_r=80\%$ )  
 供試体寸法の種類別表示

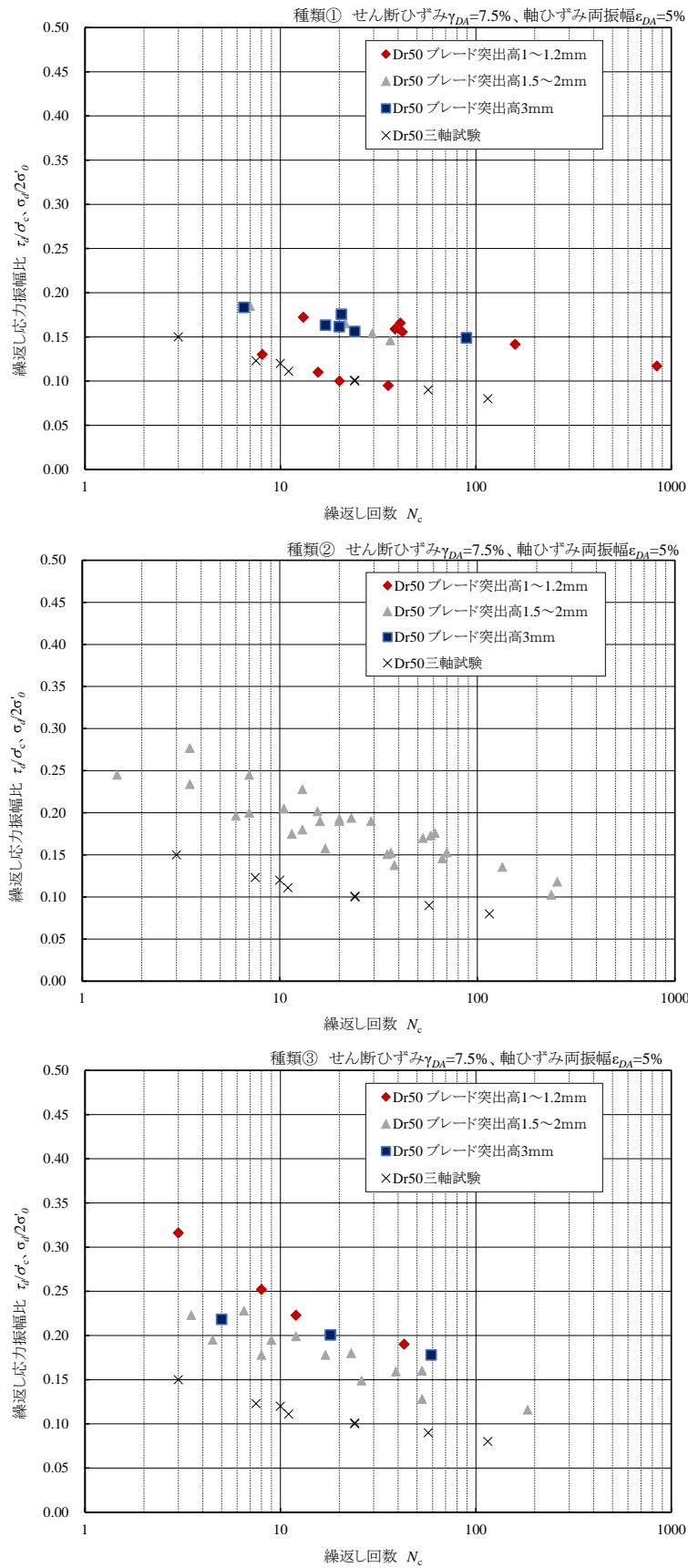


図4.7.23(1) 応力比—繰返し回数関係におけるブレードの突出高さの比較 ( $D_r=50\%$ )  
供試体寸法の種類別表示

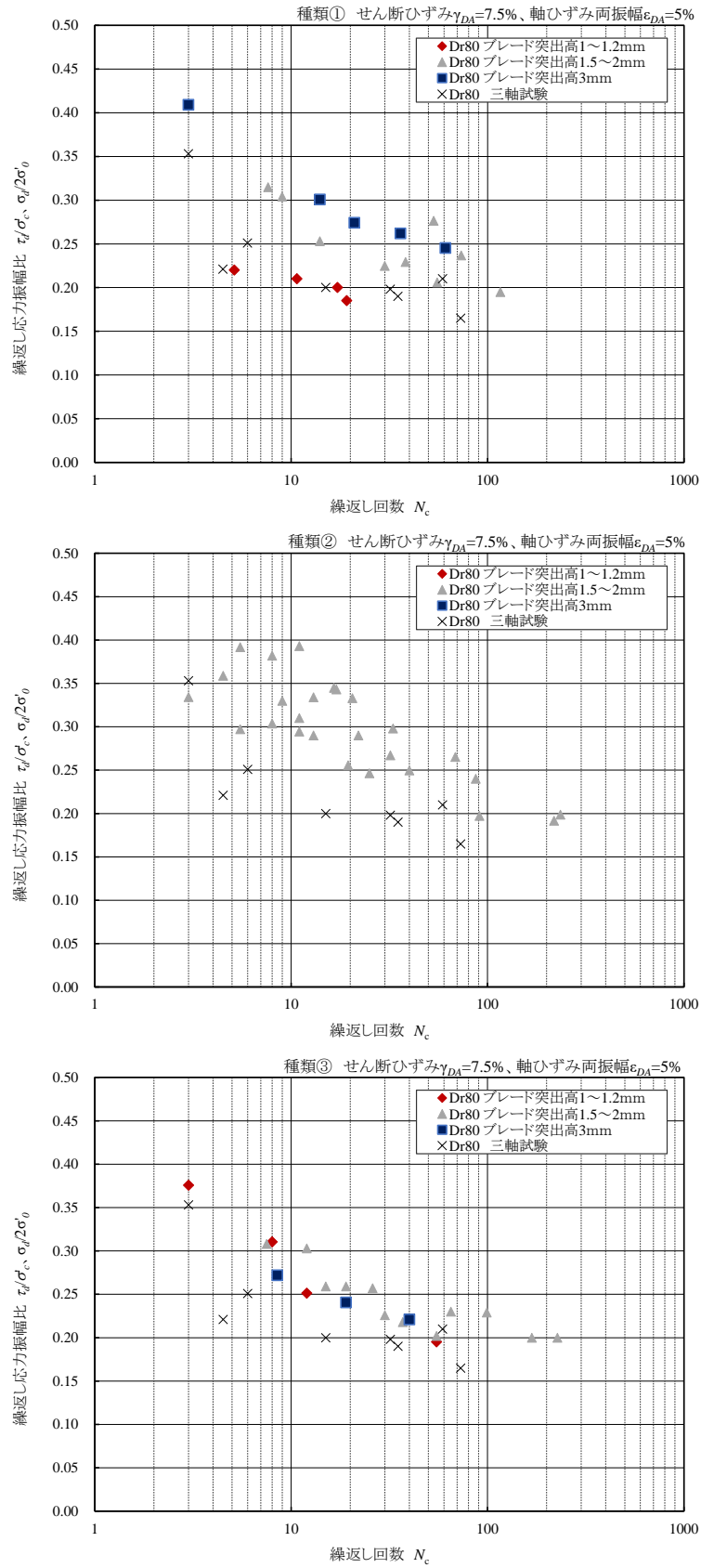


図4.7.23(2) 応力比—繰返し回数関係におけるブレードの突出高さの比較 ( $D_f=80\%$ )  
供試体寸法の種類別表示



### 4.7.3 まとめ

本節では、一斉試験結果を基に、リブ/ブレードの影響について検討した。今回の一斉試験条件下に限り、供試体上下に配置されたリブ/ブレードは、供試体作製時の相対密度に依らず、液状化強度に与える影響がほとんどない結果となった。

### 4.7.4 リブが無い場合の試験結果について（参考）

前述の通り、本一斉試験における試験条件においては、リブ/ブレードの液状化強度への影響はほとんどない結果となった。そこで、図4.7.24に示すようなリブが無いポーラスメタルを準備し、供試体上面のみ、リブの無い状態で繰返し载荷を与え、リブの有無による試験への影響を観察した。行った試験は、一斉試験の瑞浪珪砂7号  $D_r=50\%$ （目標値）の試験条件と同じ条件とし、繰返し载荷の振幅もほぼ等しいせん断応力を载荷させ、過剰間隙水圧の上昇の様子やひずみの出方を観察した。（軸力：一定、载荷方法：正弦波、载荷周波数：0.1Hz）

図4.7.25はトップキャップのリブ有無の各試験装置により得られた繰返し载荷試験の結果である。また、その時の供試体の様子として、図4.7.26はリブ無しトップキャップを用いた载荷試験時の供試体の様子、図4.7.27はリブ有りトップキャップを用いた载荷試験時の供試体（一斉試験

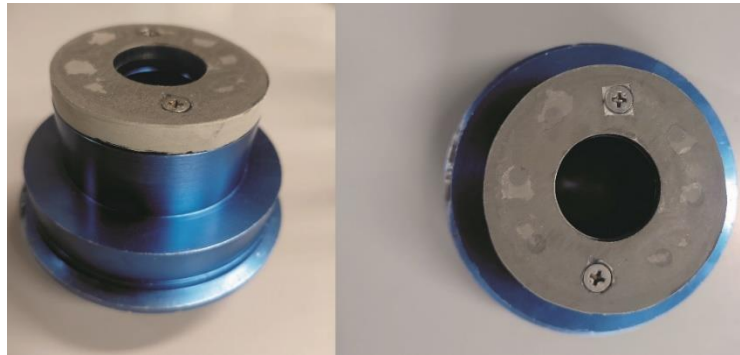
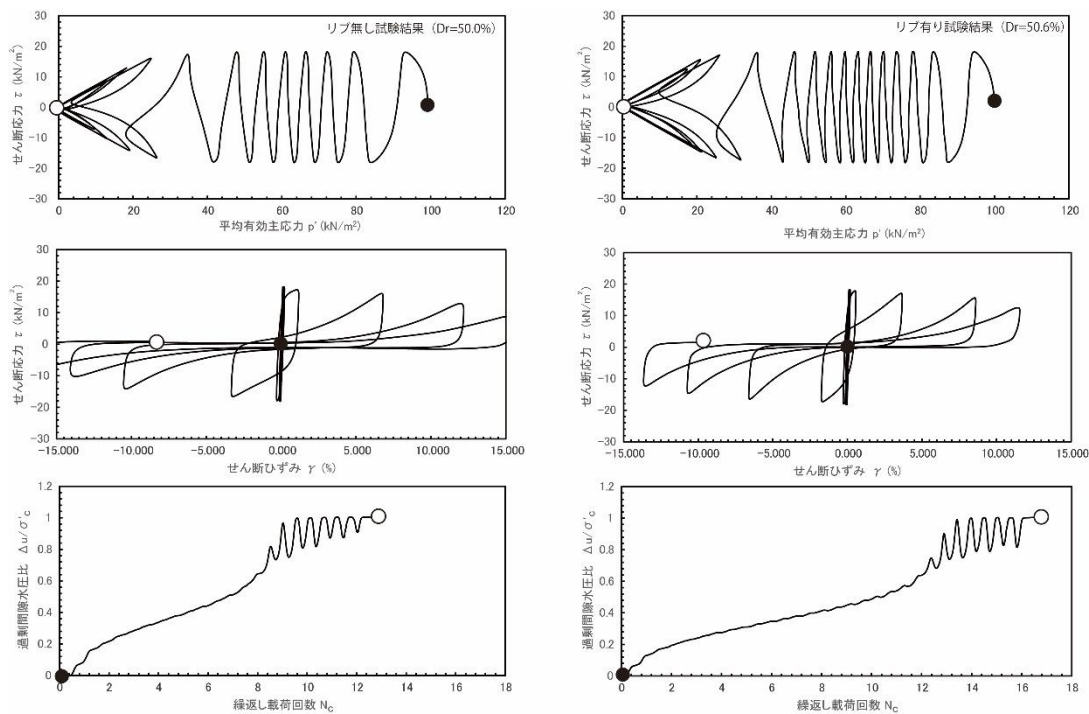


図4.7.24 リブ無しポーラスメタル付きトップキャップ



a) リブ無しトップキャップ使用結果      b) リブ有りトップキャップ使用 (50P-J-3)

図4.7.25 リブの有無装置による繰返し载荷試験結果  
（有効応力経路と応力-ひずみ関係、過剰間隙水圧の時刻歴）

50P-J-3)の様子を示す。



図4.7.26 リブ無しトップキャップを使用した繰返し载荷試験時の供試体の様子  
(左側：圧密終了後载荷前の状況 右側：繰返し载荷終了後の供試体の様子)  
リブが無くてもトップキャップと供試体に乖離は無く、滑る等の様子は見られない。



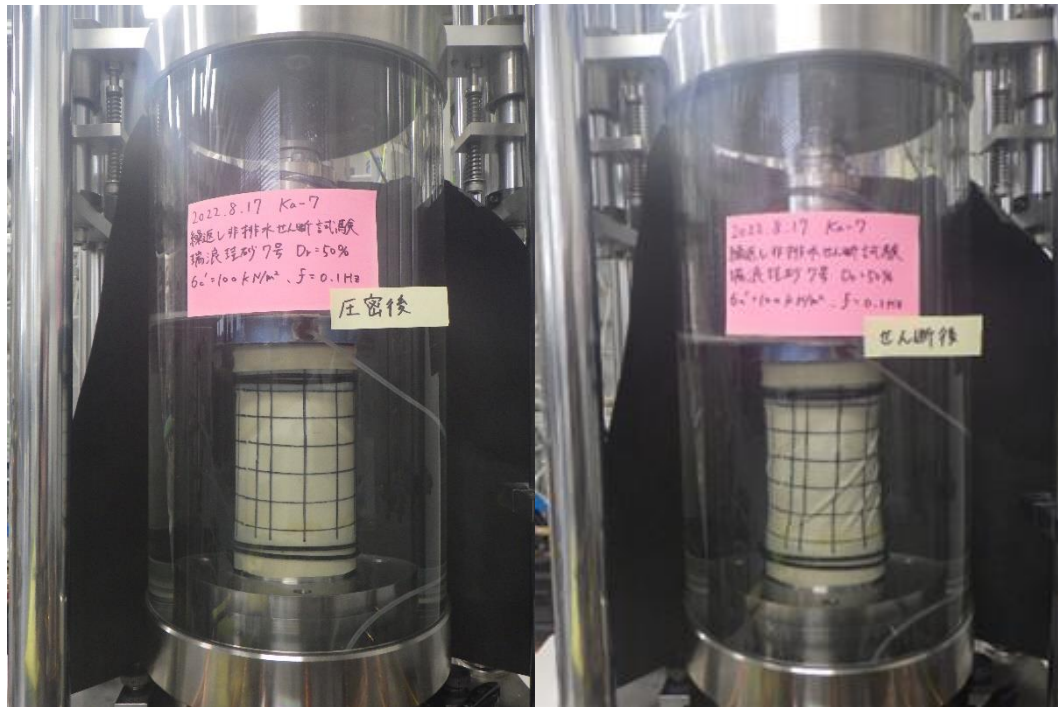


図4.7.27 リブ有りトップキャップを使用した繰返し載荷試験時の供試体（50P-J-3）の様子  
（左側：圧密終了後載荷前の状況 右側：繰返し載荷終了後の供試体の様子）

試験の結果、リブの有り・無しで繰返し載荷による初期液状化に至るまでの載荷回数は、若干リブ有りで増加する傾向があるものの、過剰間隙水圧の上昇挙動に目立って大きな差は無く、せん断ひずみ発生過程もほとんどリブの有るものと無いもので変わらない。個々のデータを詳しく比較した場合、2つの供試体ではリブが無い供試体の方がせん断ひずみの発生量は大きい結果となった。これはリブが無いためトップキャップと供試体上部で密着性が低く滑っている可能性も考えられるが、10%以上の大きなせん断ひずみ量ではない為、液状化回数に対して大きく影響を及ぼすほどではないと考える。

これらの計測データに対して、写真による供試体の様子を見た場合、一見、リブ無しの供試体を撮影した図4.7.26を見ると試験後は供試体上部の外径が小さくなりキャップ上部に水平のしわが寄っていることが観察されるが、このような様子は、リブ有りの供試体である図4.7.27にも同様のしわは確認でき、計測データのせん断応力やせん断ひずみ、過剰間隙水圧比に差が生じたことと明確にリンクする様子は確認できなかった。

以上の結果より、液状化試験の条件としてのリブ/ブレードは、必須条件とは異なるものと判断される。加えて、供試体の粒径や礫混入の影響などで、リブ/ブレードと供試体間に隙間が生じる懸念がある場合は、リブ/ブレード無しの条件を選択できる可能性が示唆される。但し、その場合には供試体に対するせん断応力が大きくなると、供試体端面で滑りが生じる場合<sup>20)</sup>もあるため、載荷中の端面滑り発生の有無を確認することが推奨される。

## 参考文献

- 1) 飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会：飽和豊浦沙の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験の結果について、土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム発表論文集，pp.1-35，1988.
- 2) Tatsuoka F., Ochi K., Fujii S. and Okamoto M.: Cyclic Undrained Triaxial and Torsional Shear Strength of Sands for Different Sample Preparation Methods, Soils and Foundations, Vol. 26, No. 3, pp. 23-41, 1986.
- 3) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説（第一回改訂版），p. 744，2020
- 4) Ishibashi, I. and Sherif, M. A.: Soil liquefaction by torsional simple shear device. ASCE Journal of Geotechnical

- Engineering Division Vol. 100, GT 8, pp. 871–888, 1974
- 5) Hight, D. W., Gens, A. and Symes, M. J. P. R.: The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils. *Géotechnique*, Vol. 33, No. 4, pp. 355–384, 1983
  - 6) Sayao, A. and Vaid, Y. P.: A critical assessment of stress nonuniformities in hollow cylinder test specimens. *Soils and Foundation*, Vol. 31, No. 1, pp. 60–72, 1991
  - 7) Wijewickreme, D. and Vaid, Y. P.: Stress nonuniformity in hollow cylinder torsional specimens. *Geotechnical Testing Journal*, Vol.14, No.4, pp.349–362, 1991
  - 8) Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y.: Shear modulus of sands under cyclic torsional shear loading. *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 1, pp. 39–56, 1978
  - 9) 吉嶺充俊：単調載荷による飽和砂の非排水流動変形に関する研究。東京大学博士論文，1996
  - 10) 國生剛治，吉川太郎，鈴木広太，岸本隆：中空ねじりせん断機を用いた水膜生成メカニズムの基礎的研究その1（試験法の開発），第36回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 2195–2196，2001
  - 11) 國生剛治，吉川太郎，鈴木広太，岸本隆：中空ねじりせん断機を用いた水膜生成メカニズムの基礎的研究その2（試験結果と考察），第36回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 2197–2198，2001
  - 12) 仙頭紀明，後藤直紀：液状化後の残留せん断ひずみと再圧密体積ひずみの関係，日本地震工学会論文集，19巻，5号，pp. 5\_88–5\_95，2019
  - 13) 古田竜一，竹内法道，加藤浩隆，八嶋厚，張鋒，沢田和秀，渦岡良介：鉛直変位1拘束条件を可変とした粘性土の中空ねじり試験，第35回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 537–538，2000
  - 14) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説（第一回改訂版），p. 750, 811, 2020
  - 15) ISO 17892 Part 8: Unconsolidated undrained triaxial test. <https://www.iso.org/standard/70790.html> [2023.11.11]
  - 16) ISO 17892 Part 9: Consolidated triaxial compression tests on water saturated soils. <https://www.iso.org/standard/70954.html> [2023.11.11]
  - 17) 豊田浩史：ついにはじまる，室内土質試験の国際統一化 - 第11回 CEN/TC341/WG6（室内土質試験）会議参加報告（その2），地盤工学会誌，Vol. 62, No. 9, p. 38, 2014
  - 18) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説（第一回改訂版），1281pp., 2020
  - 19) Chiaro, G., Koseki, J. and Sato, S.: Effects of initial static shear on liquefaction and large deformation properties of loose saturated Toyoura sand undrained cyclic torsional shear tests, *Soils and foundations*, Vol. 52, No. 3, pp. 498–510, 2012
  - 20) 安浩輝，堀越信夫，吉田正安：中空ねじり液状化試験における端面ブレード有無の比較例，第58回地盤工学研究発表会，論文番号 DS-3-07，2023

## 5 一斉試験参加機関に対するアンケート調査

本章では一斉試験に参加した機関に対して試験方法の実態を把握するために実施したアンケート調査の結果について記す。アンケートは「一斉試験に関するアンケート」と「中空ねじり試験装置を用いた液状化試験一般に関するアンケート」の2つの種類に分けた。

参加機関は合計で18機関であり、内訳はそれぞれ産官学で8機関、1機関、9機関であった（図5.1）。また民間(産)の種別においては地質調査業の割合が最も多く7機関が参加し、大学(学)の種別においては私立大学が5機関と最も多かった。なお一部の機関から回答を得ることができなかったため、以後の集計結果で機関数の合計が18とまらない場合がある

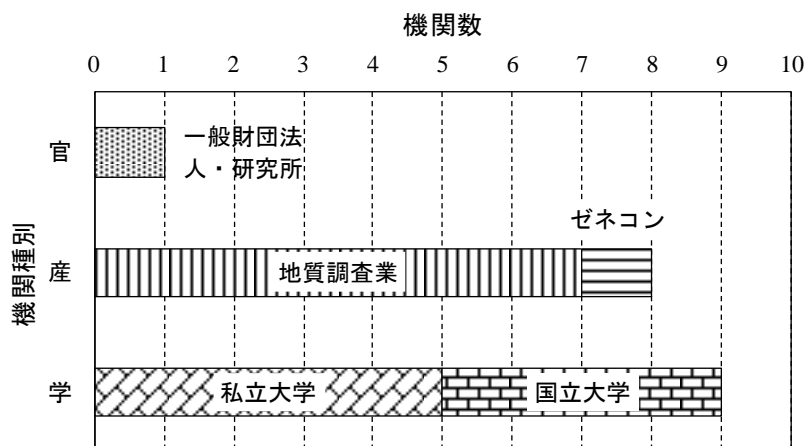


図5.1 参加機関の種別

### 5.1 一斉試験に関するアンケートの調査結果

本節では一斉試験に関するアンケートの調査結果を示す。中空ねじり試験装置を用いた液状化試験一般に関するアンケートの調査結果については次節において示す。

図5.1.1に試験者のねじり試験の経験年数を示す。回答の有効数は18機関であり、回答形式は単回答形式とした。一番割合として多かったのは1年以内と10年～40年の経験年数であり、回答機関数はいずれも5機関であった。また未経験の人数は2人であった。

データ計測時のサンプリング速度分布を図5.1.2に示す。回答の有効数は16機関であり、回答形式は単回答形式とした。サンプリング速度については、回答の単位にばらつきが見られたため、本一斉試験での繰返しせん断時の載荷周波数が0.1Hzであることを考慮した場合の1サイクルあたりのサンプル数（単位: S/cycle）で記述する。サンプリング速度で最も割合が多かったのは100S/cycle以上50S/cycle未満の9機関であった。一方で10S/cycle未満の機関も17機関中6機関存在した。なお「土の繰返し非排水三軸試験方法」(JGS 0541-2009)で推奨されている基準は、40S/cycle以上であり、同じ基準を本試験でも当てはめれば16機関中15機関がこの条件を満たしていることとなる。

図5.1.3に一斉試験時の室内温度を示す。回答の有効数は11機関であり、回答形式は単回答形式とした。室内温度は、25度の機関が最も多く計測していた11機関中4機関を占めた。また全ての計測温度は20度から25度以内に収まっていた。

一斉試験時に使用したメンブレンの厚みについては、1機関だけ0.2mmと0.3mmの両方を使用した機関があった。この機関を含めて、0.2mmを使用した機関が17機関中2機関、0.3mmを使用した機関が17機関中16機関であった。



端面材質については17機関中16機関がポーラスストーンを使用していた。また残りの1機関のみ、ポーラスメタルとアクリルプレートを用いていた。

端面ブレードに関する回答結果を図5.1.4から図5.1.6に示す。ブレードの枚数については18機関が回答し、ブレードの厚さと突出高さについては17機関が回答した。

ブレードの有無についてはすべての18機関が有りとして回答した。またブレードの枚数については図5.1.4に示すように6枚ブレードを使用している機関が最も多く14機関存在した。また1つの機関においては、キャップとペダスタルでブレードの枚数を6枚と8枚で使い分けている事例も存在した。

ブレード厚さについては図5.1.5に示すように、17機関中13機関が1mmの厚さのものを使用していた。ブレードの突出高さについては2mmを採用している機関が8機関と一番多かったが、1mm～3mmまでの範囲で使用している機関も見られる(図5.1.6)。またキャップとペダスタルで突出高さを変えている機関も存在した。

供試体の飽和方法に関する回答の有効数は17機関であり、回答形式は単回答形式とした。17機関中15機関が二酸化炭素置換法を用いており、2機関が二重負圧法を用いていた。

圧密前の初期有効拘束圧に関する回答の有効数は17機関であり、回答形式は単回答形式とした。結果は20kN/m<sup>2</sup>としている機関が14機関、10kN/m<sup>2</sup>としている機関が3機関であった。

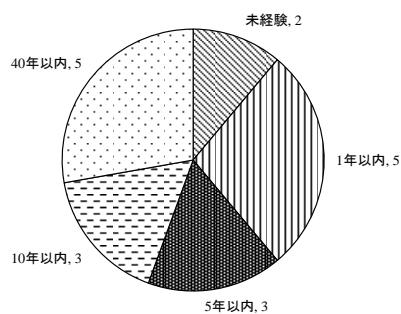


図5.1.1 試験者のねじり試験の経験年数 (有効回答数18)

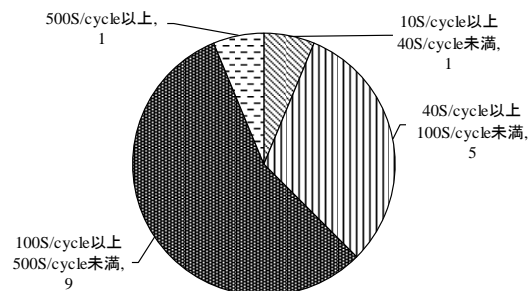


図5.1.2 データ計測時のサンプリング速度 (有効回答数16)

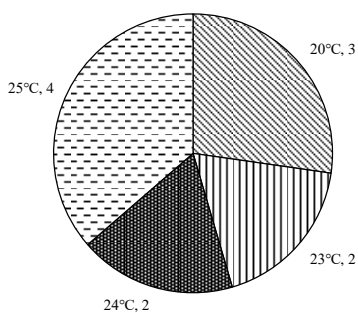


図5.1.3 一斉試験実施時の温度 (有効回答数11)

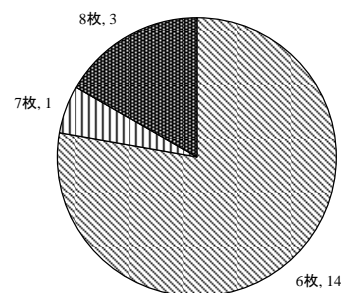


図5.1.4 ブレードの枚数 (有効回答数18)

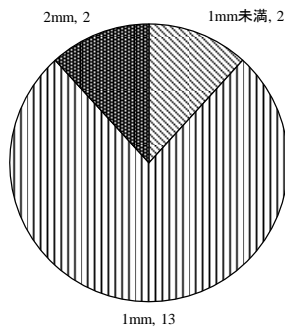


図5.1.5 ブレードの厚さ (有効回答数17)

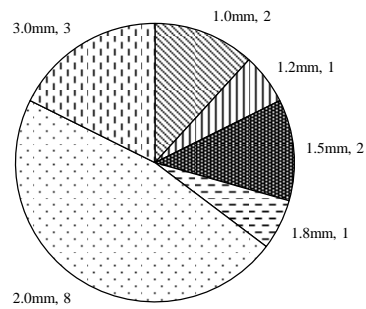


図5.1.6 ブレードの突出高さ (有効回答数17)

## 5.2 中空ねじり試験装置を用いた液状化試験一般に関するアンケートの調査結果

本節では中空ねじり試験装置を用いた液状化試験一般に関するアンケートの調査結果を示す。なお一斉試験に関するアンケートの調査結果については前節において示した。

### 5.2.1 液状化試験の実施形態に関する質問

各試験機関において液状化試験が可能な試験装置の保有台数を図5.2.1～図5.2.3に示す。回答の有効数は17機関であり、回答形式は単回答形式とした。三軸試験装置に関しては3台以上保有している機関が過半を占めているのに対し、中空ねじり試験装置に関しては1台のみ有する機関が17機関中12機関を占めた。また単純せん断試験機に関しては液状化試験が可能な試験機構を有するものは17機関中13機関が所持していないという結果となった。またその他に液状化試験が可能な試験装置に関しては、小型振動台試験装置を挙げている機関が存在した。

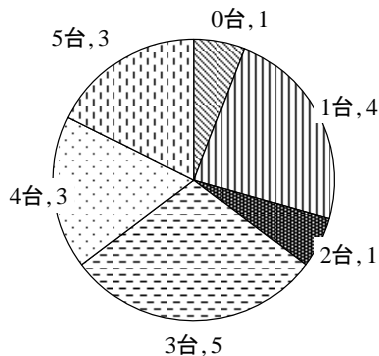


図5.2.1 三軸試験機の保有台数 (有効回答数17)

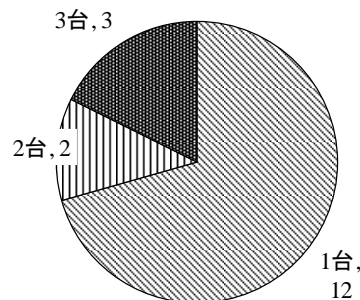


図5.2.2 中空ねじり試験装置の保有台数 (有効回答数17)

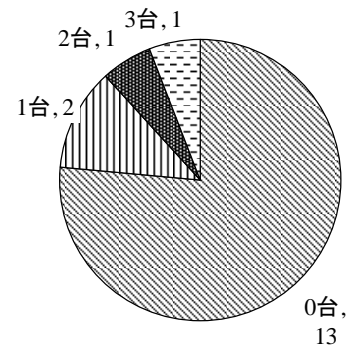


図5.2.3 単純せん断試験機の保有台数 (有効回答数17)

各試験機関において上記の液状化試験が可能な試験装置において実施している、1週間当たりの試験本数(供試体本数)を図5.2.4と図5.2.5に示す。回答の有効数は三軸試験装置と中空ねじり試験装置のそれぞれについて15機関と17機関であった。また回答形式は単回答形式とした。

三軸試験装置に関しては週当たり0本、6本以上10本以下、11本以上20本以下の機関が17機関中それぞれ3機関存在した。また、中空ねじり試験装置については週当たり4本実施している機関が最も多かった。また単純せん断試験装置については実施している3機関の平均値は4.3本であった。

図5.2.6と図5.2.7に機関種別ごとの機関種別ごとの三軸試験機，ならびに中空ねじり試験装置での週あたりの液状化試験本数を示す。三軸試験機では週当たり11本以上実施しているのは民間(産)のみであった。また中空ねじり試験装置では週当たり4本以上実施している6機関のうち，5機関が民間(産)の種別であった。

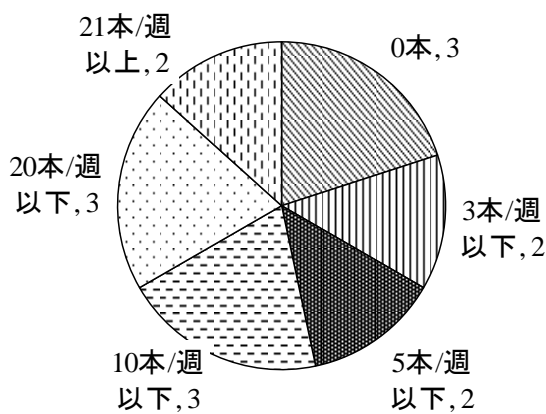


図5.2.4 三軸試験機での週あたりの液状化試験本数 (有効回答数15)

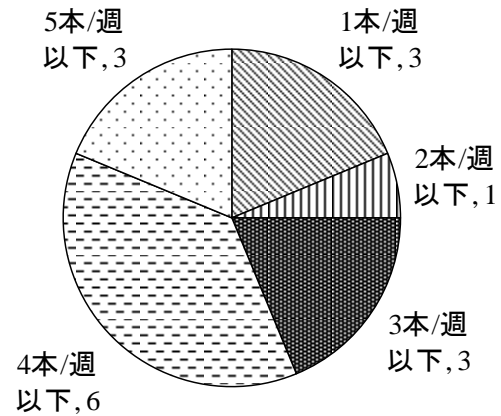


図5.2.5 中空ねじり試験装置での週あたりの液状化試験本数 (有効回答数17)

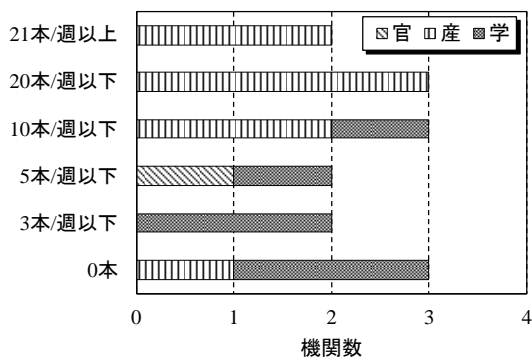


図5.2.6 機関種別ごとの三軸試験機での週あたりの液状化試験本数(有効回答数15)

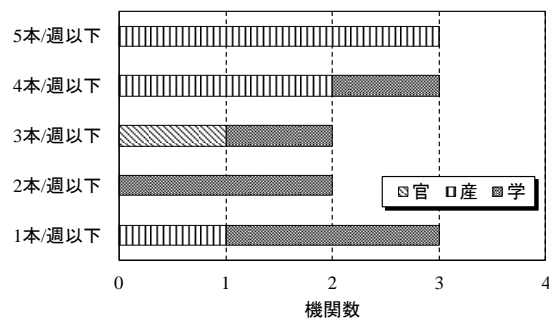


図5.2.7 機関種別ごとの中空ねじり試験装置での週あたりの液状化試験本数(有効回答数17)

中空ねじり試験装置を利用する理由の結果を図5.2.8に示す。回答の有効数は17機関であり，回答形式は複数回答形式とした。最も多い使用理由は研究目的であり14機関が回答した。ついで液状化判定(7機関)，液状化による地盤の変形予測(5機関)という回答数であった。

中空ねじり試験装置において液状化強度曲線を評価するために必要な最低限の本数に関する回答結果を図5.2.9に示す。回答の有効数は17機関であり，回答形式は単回答形式とした。最も多かった回答は4本であり8機関が回答した。また時点で7機関が回答した3本であった。また5本や6本と回答した機関も1機関ずつ存在した。

機関種別ごとに見た場合の液状化強度曲線を評価するために必要な最低限の本数に関する回答結果を図5.2.9に示す。必要な最低限の本数は，大学(学)では4本と回答した機関が5機関と最も多く，民間(産)では3本と回答した機関が5機関で最多であった。



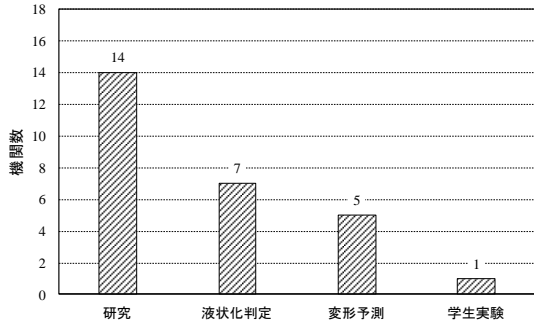


図5.2.8 中空ねじり試験装置での液状化試験の目的（有効回答数17）

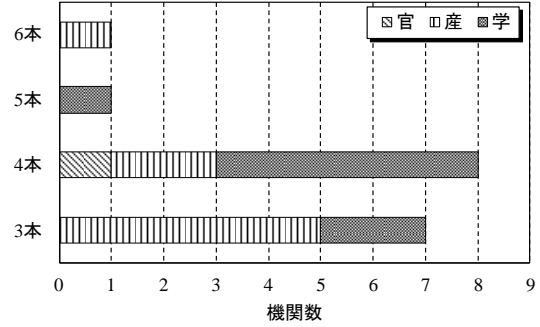


図5.2.9 中空ねじり試験装置による液状化強度曲線を評価するために必要な最低限の本数（有効回答数17）

### 5.2.2 中空円筒供試体の作製方法

図5.2.10～図5.2.12において緩い再構成試料，密な再構成試料，細粒分を含む再構成試料の作製方法に関する回答結果を示す。回答の有効数は17機関であり，回答形式は単回答形式とした。緩い再構成試料については空中落下が最も多く利用されており全機関で利用されていた。次点で不飽和突固めが5機関で利用されていた。密な再構成試料でも同様の傾向であったが，空中落下の利用機関数が15機関となり，不飽和突固めの利用機関数が9機関となった。また細粒分を含む再構成試料の場合は，不飽和突固めの利用機関数が11機関と最も高くなった。空中落下では高い密度を出しにくく，細粒分が分離してしまうことが，不飽和突固めの利用機関数が多くなった理由であると考えられる。

また，不攪乱試料の供試体作製方法については，専用のマイターボックスやドリルを用いた機関が10機関と最多であり，ワイヤーソーを用いた機関は3機関であった。

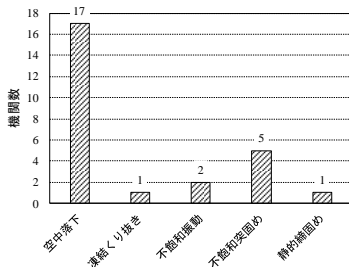


図5.2.10 緩い再構成試料の作製方法（有効回答数17）

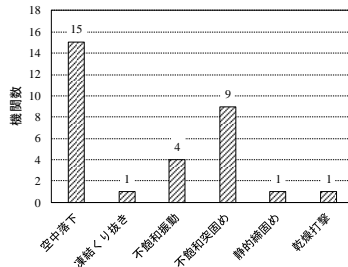


図5.2.11 密な再構成試料の作製方法（有効回答数17）

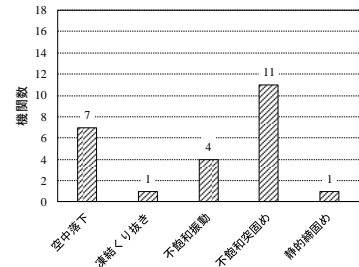


図5.2.12 細粒分を含む再構成試料の作製方法（有効回答数17）

### 5.2.3 最も多く用いる供試体寸法と実施可能寸法（外径・内径・高さ）

図5.2.13から図5.2.16に最も多く用いる供試体寸法と実施可能な寸法を内径と高さに分けて示す。回答の有効数は17機関であった，最も多く用いる供試体寸法は単回答形式としたが，再構成供試体と不攪乱供試体で分けて記載している機関が1つ存在したため，その機関はそれぞれの寸法を回答数に組み込んだ。実施可能な寸法は複数回答形式とした。

最も多く用いる内径は10機関が30mmを挙げており，次いで7機関の60mmであった。実施可能内径も30mmと60mmの2つを挙げている機関がそれぞれ10機関と9機関存在した。最も多く用いる高さに関しては100mmを挙げた機関が11機関存在し，また実施可能高さとして挙げた機関も100mmが最多で13機関存在した。最も多く用いる外径は10機関で70mmを採用しており，9機関

で100mmを採用していた。また外径150mmを実施可能とした機関も1機関存在した。全体として最も多く用いられる内外径の組み合わせは(30mm, 70mm)と(60mm, 100mm)であった。

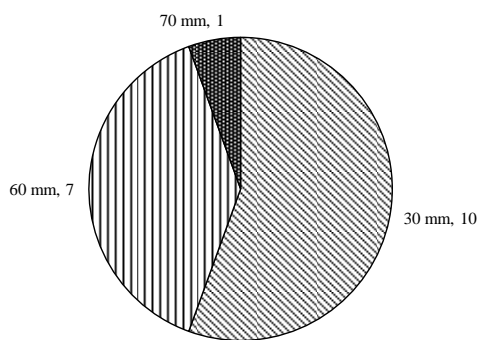


図5.2.13 最も多く用いる供試体寸法(内径, 有効回答数17)

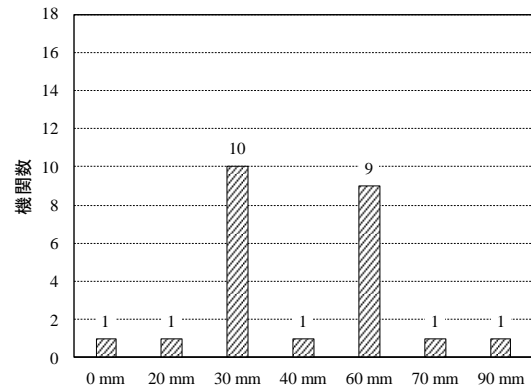


図5.2.14 実施可能寸法(内径, 有効回答数17)

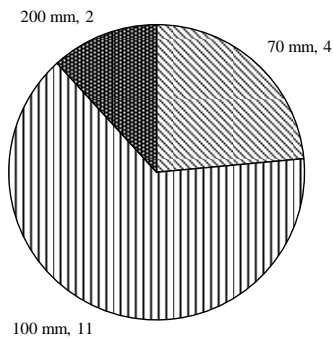


図5.2.15 最も多く用いる供試体寸法(高さ, 有効回答数17)

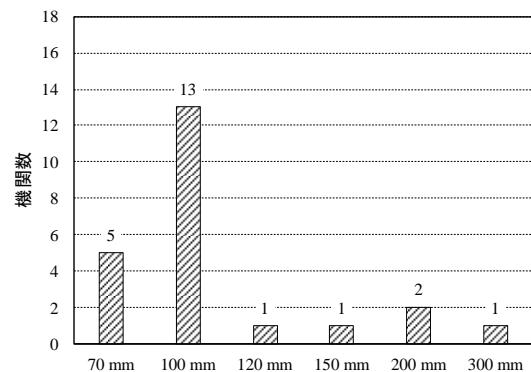


図5.2.16 実施可能寸法(高さ, 有効回答数17)

#### 5.2.4 供試体の外径・内径・高さの計測方法

図5.2.17, 図5.2.18, 図5.2.19にそれぞれ供試体の外径, 内径, 高さの計測方法についての回答結果を示す。回答の有効数は17機関であり, 回答形式は複数回答形式とした。外径についてはノギスの利用は11機関と最も多く, 次点で8機関がパイメータを利用していた。内径の計測方法はキャリパーゲージを利用している機関が8機関存在し, 次いでモールドサイズから仮定を行っている機関が6機関, ノギスを使用している機関が5機関存在した。また高さの計測方法は15機関がノギスを使用していた。

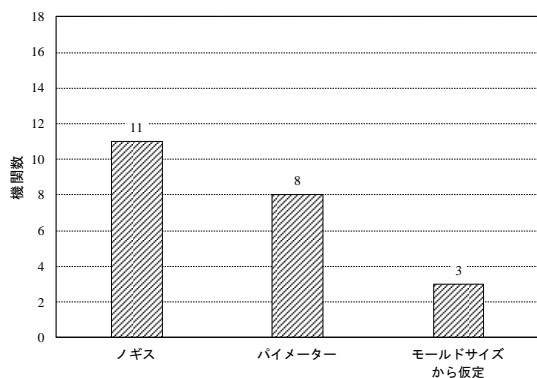


図5.2.17 供試体の外径の計測方法（有効回答数17）

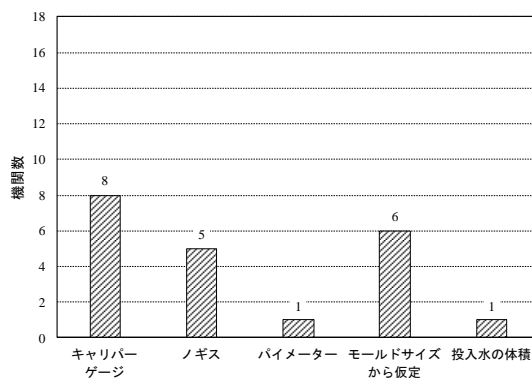


図5.2.18 供試体の内径の計測方法（有効回答数17）

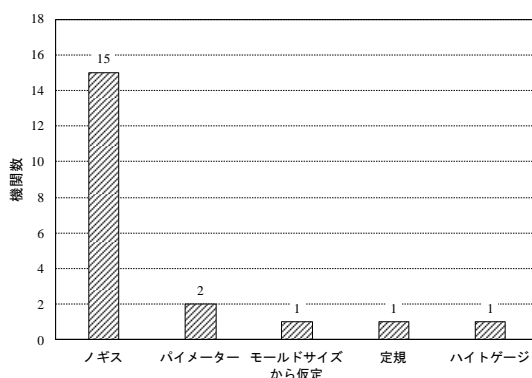


図5.2.19 供試体の高さの計測方法（有効回答数17）

### 5.2.5 ろ紙の材質・厚さ

図5.2.20は端面ろ紙の材質の回答結果である。回答の有効数は17機関であり、回答形式は複数回答形式とした。端面ろ紙を使用していない機関が12機関と最も多く、セルロース繊維を用いている機関が4機関であった。また不織布を使用している機関も1機関だけ存在した。ろ紙の厚さは有効回答数5機関のうち、最も薄い機関が0.10mmであった。他の4機関は0.20mm（2機関）、0.21mm（1機関）、0.26mm（1機関）であった。

図5.2.21は側面ろ紙の材質の回答結果である。回答の有効数は13機関であり、回答形式は単回答形式とした。回答ではセルロース繊維が7機関と最も多かった。また厚さについて複数回答形式で回答を依頼したところ7機関から回答を得られた。0.26mmが2機関、0.25mmが1機関、0.2mmが1機関、0.1mmが3機関であった。

また形状について複数回答形式で回答を依頼したところ7機関から回答を得られた。結果は短冊状に切り取っている機関が6機関と最も多く、稲妻型の機関も1機関存在した。

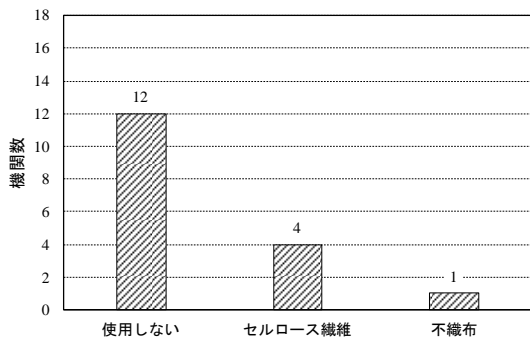


図5.2.20 端面ろ紙の材質（有効回答数17）

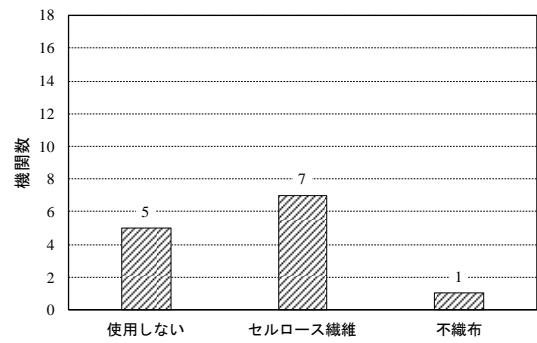


図5.2.21 側面ろ紙の材質（有効回答数13）

### 5.2.6 繰返し载荷（中）の軸荷重の動力源と軸変位制御方法

繰返し载荷中の軸荷重の動力源と軸変位の制御方法を図5.2.22から図5.2.24に示す。回答の有効数は17機関であり、回答形式は単回答形式とした。軸荷重の動力源は空圧のペロフラムシリンダーを用いている機関が17機関中11機関存在した。またモーター制御を行っている機関は合計で5機関であった。また実施可能な軸変位の制御方法は、軸応力一定あるいは軸変位固定のどちらかのみ実施可能とした機関が6機関であり、両方可能とした機関が11機関であった。また指定がない場合には17機関中12機関が軸応力一定で制御していると回答した。

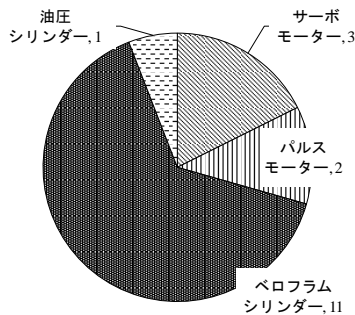


図5.2.22 繰返し载荷（中）の軸荷重の動力源（有効回答数17）

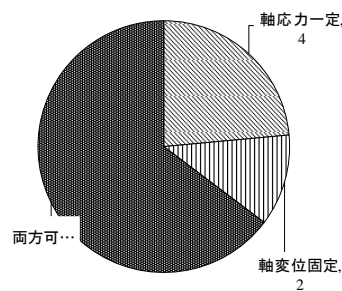


図5.2.23 実施可能な軸変位の制御方法（有効回答数17）

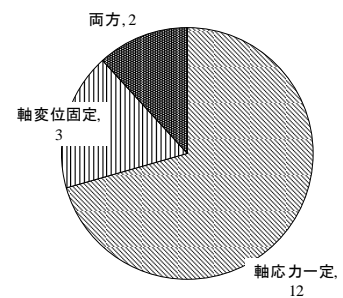


図5.2.24 指定がない場合の軸変位の制御方法（有効回答数17）

### 5.2.7 繰返し载荷（中）のねじり力の制御方法、载荷機構、動力源、载荷位置

図5.2.25から図5.2.27に回答機関が所有する中空ねじり試験装置で実施可能な繰返し载荷時のねじり力の制御方法と、中空ねじり試験装置の载荷機構、動力源を示す。

制御方法の結果を図5.2.25に示す。回答の有効数は17機関であり、回答形式は複数回答形式とした。なおこの項での応力制御あるいはひずみ制御とは、応力またはひずみの指令波形を与条件として入力する制御方法を指す。「応力制御」と回答があったもののひずみ速度と周波数のどちらを一定にしたのかが明示されていない場合には一般的な「応力制御（周波数一定）」として集計を行った。また、「ひずみ制御」と回答があったもののひずみ速度と周波数のどちらを一定にしたのかが明示されていない場合には、一般的な「ひずみ制御（ひずみ速度一定）」として集計を行った。

最も一般的であるのは応力制御（周波数一定）であり、17機関中16機関が実施可能と回答した。またひずみ制御（ひずみ速度一定）についても9機関が実施可能と答えた。また1機関が応力制御（ひずみ速度一定）、2機関がひずみ制御（周波数一定）、2機関が不規則波（オンライン実験含

む) が可能であるとした。

ねじり力の载荷機構に関する回答の有効数は16機関であり、回答形式は単回答形式とした。ラックアンドピニオン機構を採用している機関が11機関と最も多かった(図5.2.26)。

動力源に関する回答の有効数は15機関であり、回答形式は単回答形式とした。結果はモーター制御を用いている機関が8機関、シリンダー(空圧・油圧)を用いている機関が7機関であった(図5.2.27)。

ねじり力を载荷する位置については上部と回答した機関が17機関中16機関と多数を占めた。

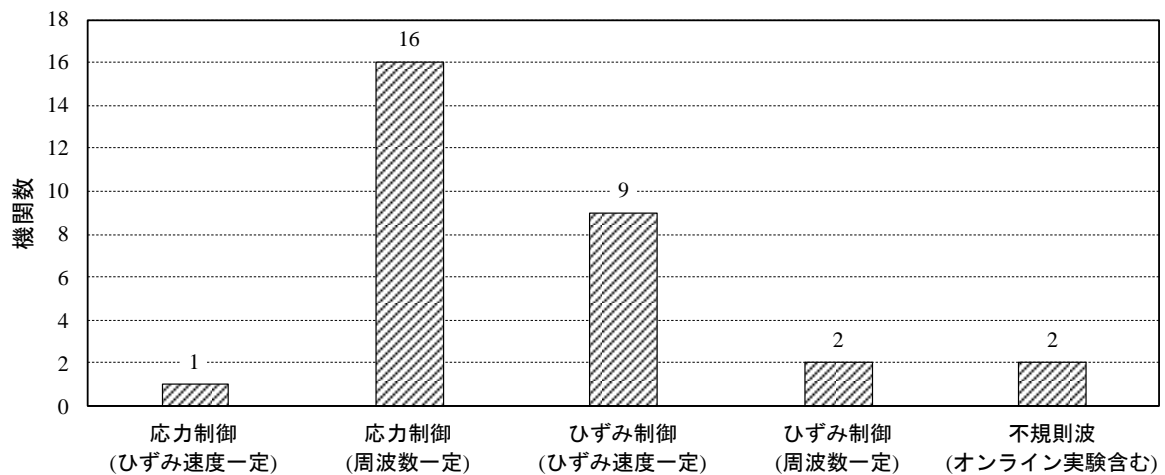


図5.2.25 回答機関が所有する中空ねじり試験装置で実施可能な繰返し载荷時のねじり力の制御方法(有効回答数17)

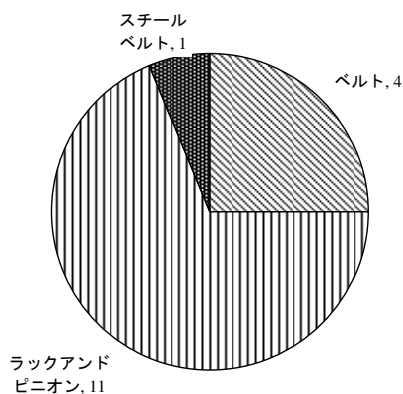


図5.2.26 ねじり力の载荷機構(有効回答数16)

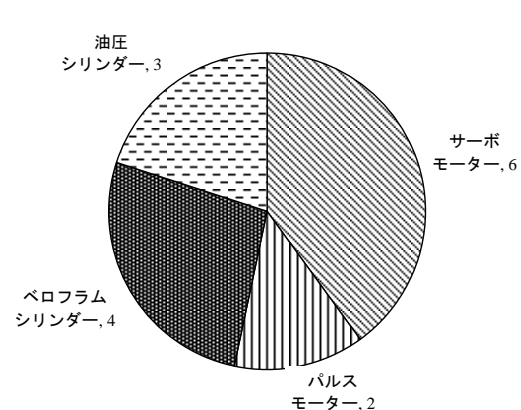


図5.2.27 ねじり力の動力源(有効回答数15)

### 5.2.8 セル外に設置している計測機器と補正方法

図5.2.28にセル外に設置している計測機器の集計結果を示す。回答の有効数は18機関であり、回答形式は複数回答形式とした。セル外への設置が最も多かった機器は軸変位計の9機関であり、次いで回転角計の8機関であった。またこれらの計測機器についての補正方法については「(回転角計に対して)各試験ごとに校正係数をかける」「(回転角計に対して)内部の微小変位計を基準に補正」「(ロードセルに対して)载荷軸の固定ネジの締め付けによりゼロ点を調整」と回答した機関それぞれ1機関ずつ存在した。

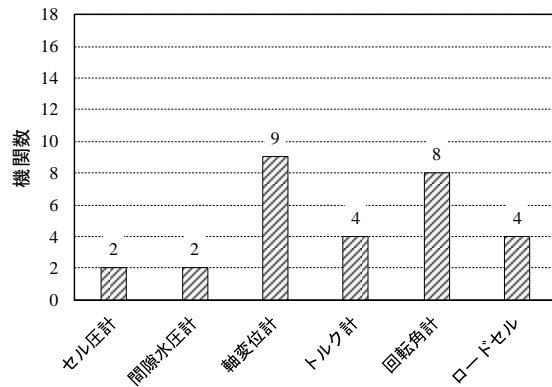


図5.2.28 セル外に設置している計測機器（有効回答数18）

### 5.2.9 応力制御（周波数一定） とする場合の载荷周波数

図5.2.29に応力制御の場合の载荷可能周波数の範囲と常用している周波数を示した。回答の有効数は15機関であった。◇の両端が载荷可能周波数の上限と下限を示している。2機関の回答で「1Hz 以下」としたものがあつたため、その場合には下限は示していない。また常用周波数は□で示した。载荷可能周波数は1Hz を上限としている機関が8機関と最も多く、下限は0.001Hz とした機関が4機関で最大であつた。また常用周波数は0.1Hz を選択している機関が12機関と最も多かつた。

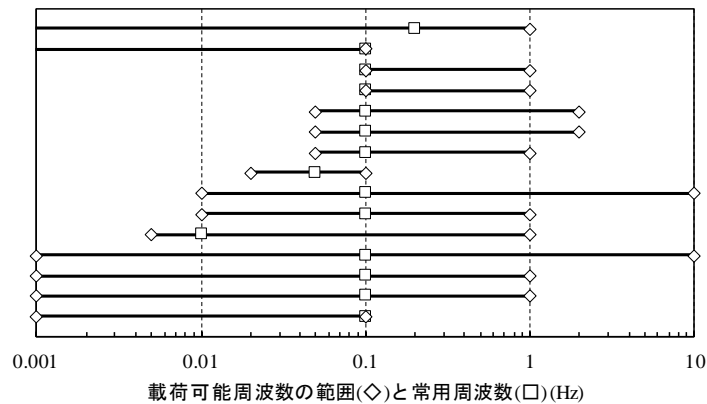


図5.2.29 応力制御（周波数一定） とする場合の载荷周波数（有効回答数15）

### 5.2.10 ひずみ制御とする場合のひずみ速度

ひずみ制御とする場合の標準的に採用しているひずみ速度については、5.2.7項でひずみ制御（ひずみ速度一定）と回答した9機関のうち6機関が回答した。標準的に採用しているひずみ速度は、6機関が回答したものをすべて挙げると、「0.01%/min」「0.098%/min」「0.1%/min」「0.1～0.5%/min」「1%/min」「2～3%/min」であつた。

また実施可能なひずみ速度については9機関中4機関が回答した。回答値をすべて挙げると「0.005～10%/min」「0.01～10%/min」「0.049～9.817%/min」「～5%/min程度」であつた。

### 5.2.11 実施可能な载荷波形の種類

図5.2.30に実施可能な载荷波形の種類の結果を示す。回答の有効数は16機関であり、回答形式は複数回答形式とした。回答で最も多かったのは正弦波の14機関であり、その次に三角波（11機関）、不規則波（8機関）の順であった。

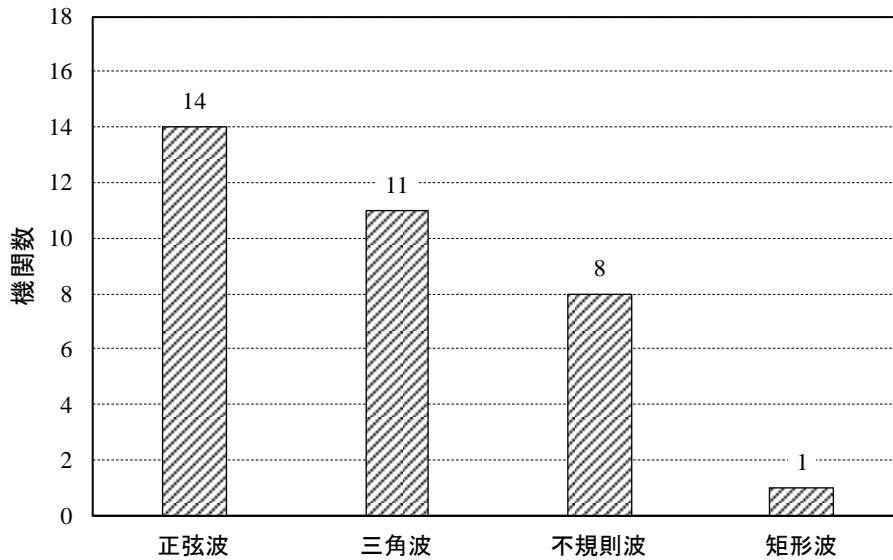


図5.2.30 実施可能な载荷波形の種類（有効回答数16）

### 5.2.12 軸ひずみとせん断ひずみの計測方法

軸ひずみとせん断ひずみの実施可能な計測手法を図5.2.31と図5.2.32に示す。回答の有効数は15機関であり、回答形式は複数回答形式とした。軸ひずみについては接触式変位計を用いた計測が最も多く12機関で実施可能であった。またせん断ひずみの計測にはポテンシオメーターが最も多く10機関で実施可能であった。

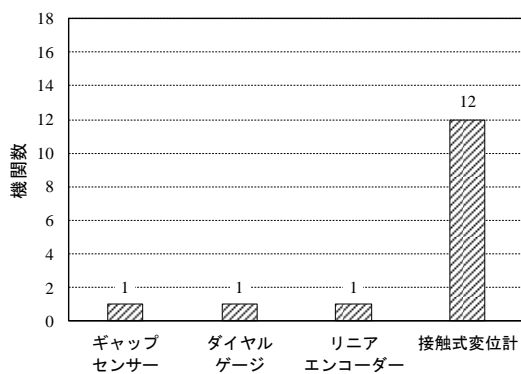


図5.2.31 実施可能な軸ひずみの計測方法（有効回答数15）

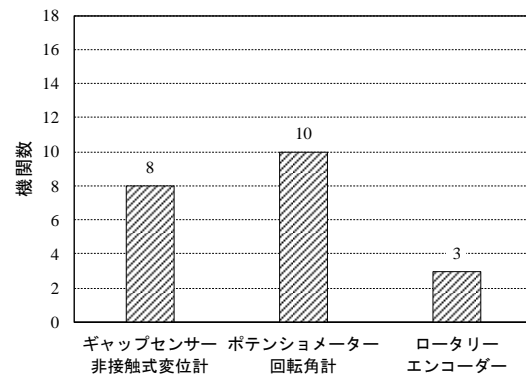


図5.2.32 実施可能なせん断ひずみの計測方法（有効回答数15）

### 5.2.13 使用しているセンサーの仕様

本設問ではセンサーの製作会社、型番、容量、最小分解能、設置位置の5つについて回答を募集した。しかしセンサーの製作会社と型番については、試験機製造会社とセンサー製造会社の判断ができなかったため、集計からは除外した。本設問は複数回答可とした。また該当するセンサ

一については、トルク計、荷重計、回転角計、軸変位計、間隙水圧計（高・中差圧計）、体積変化計（低差圧計）とした。また容量や最小分解能で単位や回答値が常識的な範囲外にある場合には、適切な単位や値に変換を行った。同一機関で複数のセンサーを所持している場合は別々に集計している。

#### 5.2.13.1 トルク計

図5.2.33にトルク計の容量を示す。有効回答数は12種類であった。容量は $20\text{N}\cdot\text{m}$ を利用している機関が8機関と最も多かった。また最小分解能については、機関ごとの回答にばらつきがあり一概に比較はできないが、 $0.01\sim 0.1\text{N}\cdot\text{m}$ 程度であると考えられる。また設置位置に関してはセル内と回答した機関が8機関、セル外と回答した機関が1機関であった。

#### 5.2.13.2 荷重計（軸ロードセル）

図5.2.34に荷重計の容量を示す。有効回答数は12種類であった。荷重計は $2\text{kN}$ が最も多く利用されており、回答があった10機関のうち7機関が所持していた。また最小分解能については幅があり、最小値は $0.1\text{N}$ 、最大値は $3\text{N}$ であり中央値は $1\text{N}$ であった。

#### 5.2.13.3 回転角計

図5.2.35に回転角計の容量を示す。有効回答数は9種類であった。回転角計は $20^\circ$ が最も多く利用されており、回答があった9機関のうち6機関が所持していた。また最小分解能については最小値は $2.0\times 10^{-4}$ 、最大値は $0.1^\circ$ であり中央値は $0.01^\circ$ であった。設置位置に関しては回答が得られた6機関のうち、セル内に設置している機関が4機関、セル外に設置している2機関であった。

#### 5.2.13.4 軸変位計

図5.2.36に軸変位計の容量を示す。有効回答数は12種類であった。軸変位計は $30\text{mm}$ が最も多く利用されており、回答があった11機関のうち5機関が所持していた。次点で $20\text{mm}$ の3機関であった。また最小分解能については最小値は $1.0\times 10^{-3}\text{mm}$ 、最大値は $1.0\times 10^{-2}\text{mm}$ であり中央値は $5.6\times 10^{-3}\text{mm}$ であった。また全ての機関がセル外に設置していた。

#### 5.2.13.5 間隙水圧計

間隙水圧計は回答があった10機関全てでセル外に設置しており、容量は $1\text{MN}/\text{m}^2$ であった。また最小分解能については、最小値は $0.01\text{kN}/\text{m}^2$ 、最大値は $1\text{kN}/\text{m}^2$ であり中央値は $0.67\text{kN}/\text{m}^2$ であった。

#### 5.2.13.6 体積変化計

図5.2.37に体積変化計の容量を示す。有効回答数は10種類であった。体積変化計は $50\text{cc}$ が最も多く利用されており、回答があった9機関のうち6機関が所持していた。また最小分解能については最小値は $1.5\times 10^{-4}\text{cc}$ 、最大値は $0.2\text{cc}$ であり中央値は $7.5\times 10^{-2}\text{cc}$ であった。設置位置に関して回答のあった4機関全てでセル外に設置されていた。



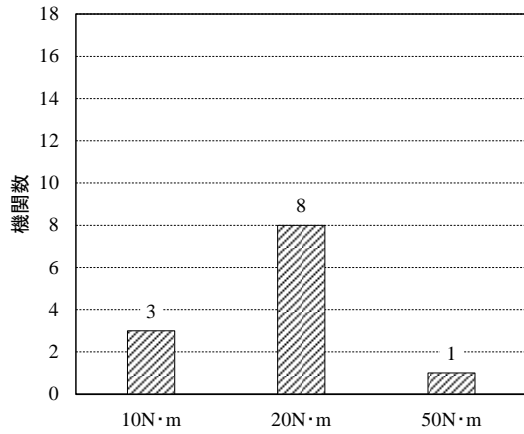


図5.2.33 トルク計の容量

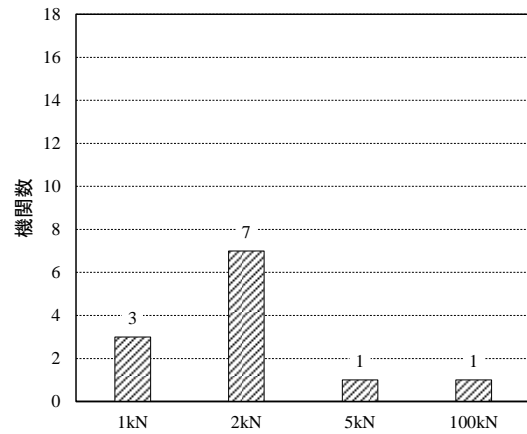


図5.2.34 荷重計（軸力ロードセル）の容量

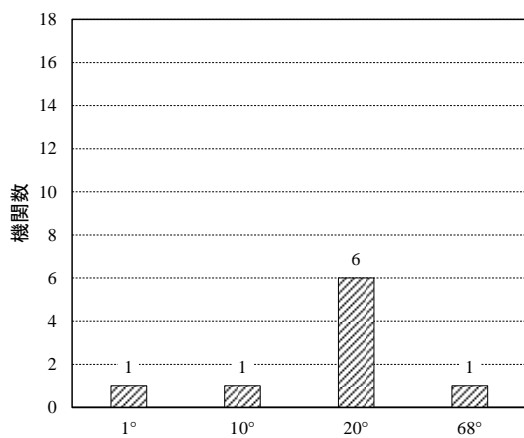


図5.2.35 回転角計の容量

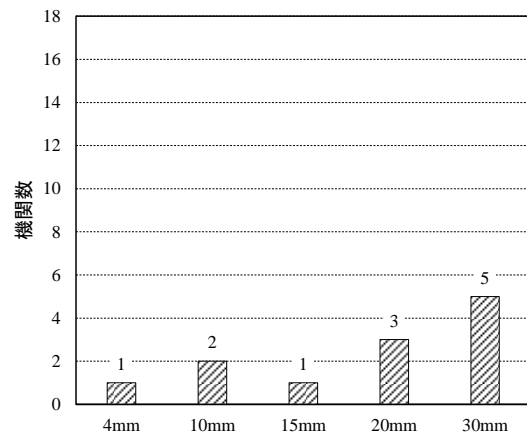


図5.2.36 軸変位計の容量

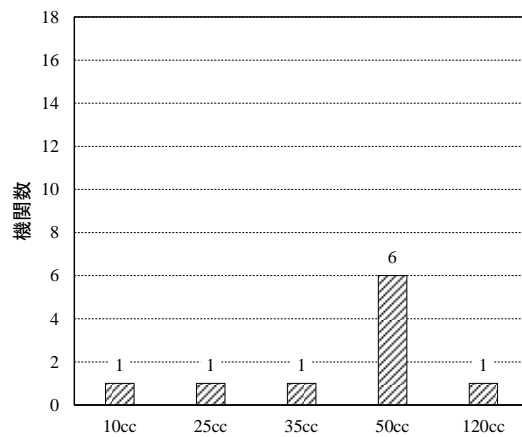


図5.2.37 体積変化計の容量

#### 5.2.14 データ計測におけるノイズ対策・処理

データ計測におけるノイズ対策・処理については8機関が回答した。回答形式は複数回答形式とした。回答の内容としては電源側での対応（3機関）と、アナログ入力側での対応（4機関），

デジタル出力側での対応（2機関）の3種類に大別できる回答があった。電源側での対応としては、3機関はそれぞれ「アイソレート電源，ノイズ対策ACアダプター，エンコーダーの利用」「アース」「フェライトコアを使用」と回答した。アナログ入力側の対応としては、4機関はそれぞれ「アンプを使用」「バッファアンプを使用（2機関）」「ロガー内の組み込み回路による」と回答があった。またデジタル出力側の対応としては、2機関はそれぞれ「LPF 使用10Hz」「フィルター処理」と回答した。

### 5.2.15 せん断応力とせん断ひずみの計算式

図5.2.38と図5.2.39にせん断応力とせん断ひずみの計算式の回答結果を示す。回答の有効数は17機関であり、回答形式は単回答形式としたが、下記の通り条件付きで場合分けをしている場合は、それぞれ1つの回答として扱った。

回答の選択肢は表5.2.1のとおりである。せん断応力については①の式を用いている機関が最も多く17機関中10機関存在した。また「①：液状化，静止試験，②：動の変形」「液状化：①，変形： $T/2\pi(r_{oc}^2 - r_{ic}^2)(r_{oc} + r_{ic})$ 」と試験ごとに式を使い分けている機関が1機関、「中空供試体が剛完全塑性体である場合の式と，線形弾性体である場合の式について，実際の中空の供試体はこれらの応力分布の中間的な挙動を示すと考えて単純平均を取っている」と回答した機関が1機関存在した。

せん断ひずみについては①の式を用いている機関は17機関中11機関であった。また，回答の補筆として「①：液状化，単調載荷試験，②：動の変形」や「微小域（ $10^{-5}$ 以下）：②，上記以外：①」など，実施する試験や歪レベルごとに式を使い分けている機関が1機関ずつ存在した。

表5.2.1 せん断応力とせん断ひずみの計算式の選択肢

せん断応力	① $\tau = \frac{3T}{2\pi(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)} - \Delta\tau_m, \Delta\tau_m = \frac{2E_m t_m (r_{oc}^3 + r_{ic}^3)}{(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)(r_{oc} + r_{ic})} \gamma$
	② $\tau = \frac{3T}{2\pi(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)}$
	③ 不明
せん断ひずみ	① $\gamma = \frac{2\Delta\theta(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)}{3H_c(r_{oc}^2 - r_{ic}^2)}$
	② $\gamma = \frac{\Delta\theta(r_{oc} + r_{ic})}{2H_c}$
	③ 不明

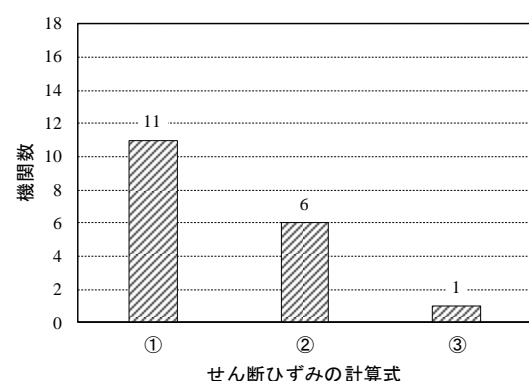
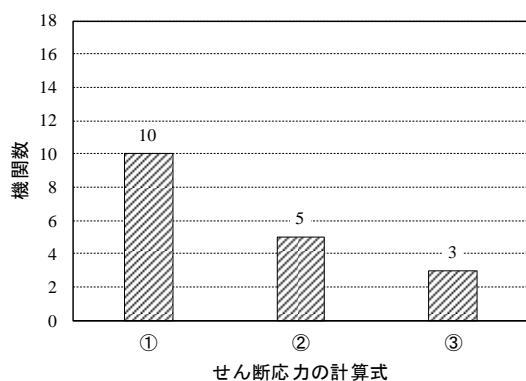


図5.2.38 せん断応力の計算式（有効回答数） 図5.2.39 せん断ひずみの計算式（有効回答数）

### 5.2.16 試験室の温度の調整法

試験室の温度コントロールについては17機関中10機関が空調設備による調節を行っていた。

### 5.2.17 繰返し载荷中のせん断応力振幅の精度を保つための制御・工夫の有無とその方法

繰返し载荷中のせん断応力振幅の精度を保つための制御の有無と工夫について、回答の有効数は17機関であった。回答形式は単回答形式とした。

せん断応力振幅の精度を保つための制御の有無について、制御有りとは回答した機関は17機関中13機関存在した。また制御の工夫については、13機関中10機関が回答した。回答をすべて挙げると「コントローラーのゲインを手動で調整」「サーボコントローラーで機械的に制御している（2機関）」「ソフト側で制御させている、場合によっては、载荷中に手動で調整」「トルク計の電圧をフィードバックして、波形形状が一定電圧になるように制御」「载荷中に手動で一部制御している」「機械的に制御（計測値のフィードバックに対してプログラムが補正）」「トルク計のキャリブレーションを実施する」「試験前に必ず機械の緩みを確認し、緩んでいる場合はきつく締めなおす」「感度をあげる」となった。

また制御なしと記載した4機関中3機関については、赤本記載の基準に準拠した報告を行うと回答した。

### 5.2.18 繰返し载荷中の軸荷重を一定にするための工夫の有無とその方法

繰返し载荷中の軸荷重を一定にするための制御の有無と工夫について、回答の有効数は17機関であった。回答形式は有無については、単回答形式とした。

繰返し载荷中の軸荷重を保つための制御について、制御有りとは回答した機関は17機関中6機関、無しとは回答した機関が10機関、「有りといえるか疑問」と回答した機関が1機関であった。また制御の方法については「有りといえるか疑問」と回答した機関を含めて7機関が回答し、個別の回答では「ベロフラムシリンダーを使用」「ソフト側で制御させている」「コントローラーのゲインを手動で調整」「サーボアンプ」「载荷中に手動で調整している」「軸力の空圧調整にハイリリーフ型のレギュレーターを使用」「なるべく感度を上げる」が挙げられた。

### 5.2.19 メンブレンペネトレーションの影響が危惧されるような粗粒土を用いた中空ねじり液状化試験を実施した経験の有無、せん断力の補正の有無

メンブレンペネトレーションの影響が危惧されるような実験経験について回答した機関は17機関であった。この17機関中2機関が実施した経験があると回答した。その中で補正ありと回答した機関は1機関であり、手法として「供試体サイズを大きくして、さらに外側は砂分のみの試料を配置することでメンブレンペネトレーションの影響を除去」と回答した。一方で、経験ありかつ補正無しとした1機関は「補正の方法は知っているものの、せん断中の条件によって対応できなくなるため補正はしていない」と回答した。

### 5.2.20 メンブレン張力補正の有無

メンブレン張力の補正有無について回答した機関は17機関であった。この内補正有りとは回答した機関は7機関であった。なお「大変形の実験では過去に実施。現状では無視。」と回答した機関も1機関存在した。

また補正方法については、大きく分けて補正式の導出方法と、補正のタイミングが機関によって異なっていた。

補正式の導出方法については5機関から具体的な回答があった。回答は、メンブレンのラテックスの弾性係数から張力補正の値を導出した4機関（例：「予備実験で求めたヤング率を用いて

補正值を設定（用いた式は一斉試験マニュアルに準ずる）」と、メンブレン内部を水で置換してせん断させた際のメンブレン張力とせん断ひずみの関係式を使用する1機関（「メンブレン補正 $\Delta\tau_m$ はメンブレン内部を水で置換したときのメンブレン張力とせん断ひずみの関係から得られた $\tau-\gamma$ の関係式を使用し、プログラム内で自動制御」）に分かれた。

また後者の補正のタイミングについては、4機関から具体的な回答があり、プログラム上でフィードバックさせつつ载荷する3機関と、試験終了後のデータ整理の段階で補正をする1機関に分かれた。

### 5.2.21 CO<sub>2</sub>通気時間, 脱気水通水時間, 背圧放置時間

図5.2.40から図5.2.42にそれぞれ CO<sub>2</sub>通気時間, 脱気水通水時間, 背圧放置時間を示す。回答の有効数は CO<sub>2</sub>通気時間のみ18機関であり, 脱気水通水時間, 背圧放置時間は17機関であった。回答形式は単回答形式とした。

CO<sub>2</sub>通気時間は5分以上10分未満とした機関が最も多く6機関存在した。また次点で30分以上60分未満であり5機関存在した。また脱気水通水時間は30分以上60分未満とした機関が最も多く, 7機関存在した。背圧放置時間については10分以上30分未満, 30分以上60分未満, 60分以上120分未満と回答した機関がそれぞれ4機関であった。

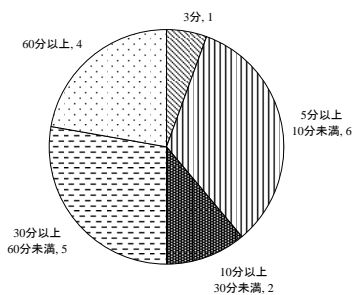


図5.2.40 CO<sub>2</sub>通気時間 (有効回答数18)

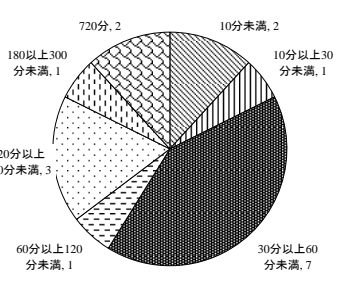


図5.2.41 脱気水通水時間(有効回答数17)

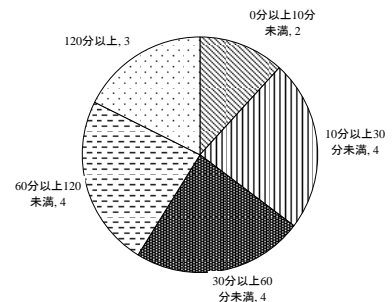


図5.2.42 背圧放置時間(有効回答数17)

### 5.2.22 脱気, 通水時の初期有効拘束圧

図5.2.43に脱気, 通水時の初期有効拘束圧の回答結果を示す。回答の有効数は17機関であり, 回答形式は単回答形式とした。最も多かった回答は12機関が回答した20kN/m<sup>2</sup>であった。また次点で4機関の10 kN/m<sup>2</sup>であった。

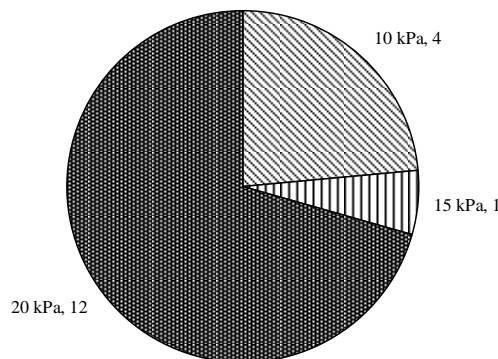


図5.2.43 脱気, 通水時の初期有効拘束圧 (有効回答数17)

### 5.2.23 圧密時に供試体に作用させることができる応力状態

供試体に作用させることができる応力状態に関しては有効回答機関数17の内、4機関が等方のみと回答した。また13機関が等方と異方の両方を作用させることができるとした。

### 5.2.24 不攪乱試料の圧密時の応力状態

不攪乱試料の圧密時の応力状態に関して、回答有効数は16機関であり、回答形式は単回答形式とした。この内、等方応力状態にすると回答した機関は6機関であった。また両方（場合による）と回答した機関も含む）と回答した機関は10機関であった。

### 5.2.25 非排水繰返しせん断時の有効拘束圧設定の計算方法

非排水繰返しせん断時の有効拘束圧設定の計算方法に関して、回答有効数は16機関であり、回答形式は複数回答形式とした。

選択肢を表5.2.2，結果を図5.2.44に示す。16機関中10機関が①と②を用いていた。また1機関が③の選択肢を選んだ。また①を選択した1機関は、補筆として「研究では慣例的に100kPaあるいは50kPaを用いることが多い」と回答した。

表5.2.2 非排水繰返しせん断時の有効拘束圧設定の計算方法の選択肢

	$K_0 = 0.5$ を仮定して $\sigma'_v$ を有効土被り圧， $\sigma'_h$ を有効上載圧の半分として
①	$\sigma'_c = \frac{\sigma'_v + 2\sigma'_h}{3}$
	から有効拘束圧 $\sigma'_c$ を計算。
②	$K_0 = 1$ を仮定して，有効拘束圧 $\sigma'_c$ を $\sigma'_c = \sigma'_v (= \sigma'_h)$ と推定
③	現地測定結果を利用

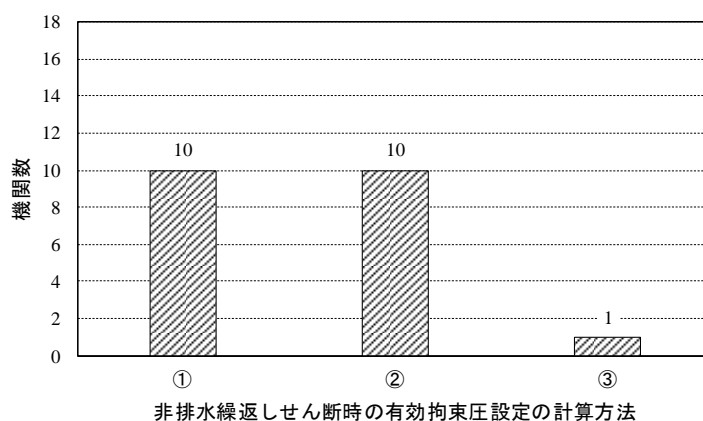


図5.2.44 非排水繰返しせん断時の有効拘束圧設定の計算方法 (有効回答数16)

### 5.2.26 初期有効拘束圧（供試体自立時の負圧相当の拘束圧）から圧密時の有効拘束圧まで拘束圧を増加させていく際の载荷方法

本設問では、以下の選択肢で各機関に回答を依頼した。回答の有効数は17機関であり、回答形式は複数回答形式とした。

- ① 排水条件下で漸増载荷（ここでは、载荷速度を設定し機械的に拘束圧を増加させていく方法を指す）
- ② 排水条件下で段階载荷（ここでは、一ステップあたり増加させる拘束圧を設定し、試験者の物理的操作によって拘束圧を増加させていく方法を指す）
- ③ 非排水条件下で圧密時の有効拘束圧まで一気に载荷
- ④ その他

回答結果を図5.2.45に示す。回答は②と③がいずれも7機関であり、①と④と回答した機関が2機関であった。また④のその他の回答は「排水条件下で試験者の物理的操作によって拘束圧を任意に増加」や「手動で少しずつ増加させる」であった。

また①と回答した2機関はそれぞれ、漸増载荷時の载荷速度については「60kPa/min」「試料による」と回答した。

②と回答した7機関に対して、段階载荷時の1ステップごとの载荷拘束圧の増分について回答を依頼した。結果として「10kPa」と回答した機関が2機関、「20kPa」と回答した機関が3機関、「25kPa」「目標の初期有効拘束圧」と回答した機関がそれぞれ1機関であった。

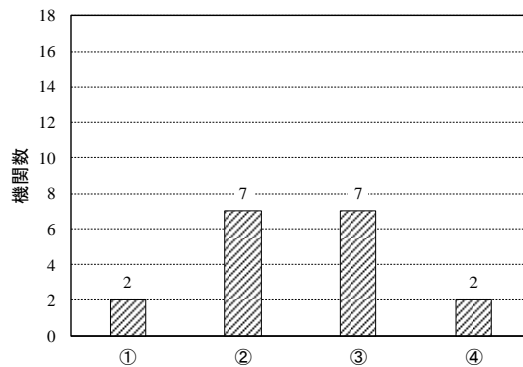


図5.2.45 拘束圧の増加方法（有効回答数17）

### 5.2.27 圧密終了の判断基準

図5.2.46に圧密終了の判断基準の回答結果を示す。回答の有効数は17機関であり、回答形式は複数回答形式とした。圧密終了の判断基準に関しては3t法を使用している機関が13機関と最も多かった。また、同様に非排水状態時に間隙水圧が発生しないという条件を設定している機関も8機関存在した。またその他の回答としては、「有効応力が一定に落ち着いたことを確認したのち（5分程度放置）」という回答が1機関あった。

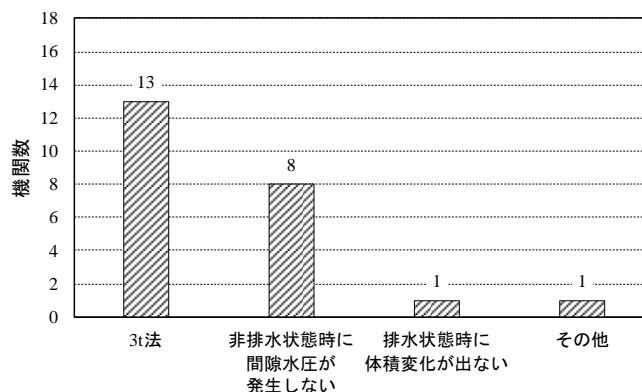


図5.2.46 圧密終了の判断基準（有効回答数17）

### 5.2.28 供試体に対して载荷可能な最大角度と最大両振幅せん断ひずみ

図5.2.47と図5.2.48に供試体に対して载荷可能な最大角度と最大両振幅せん断ひずみの回答結果を示す。回答の有効数はそれぞれ15機関と13機関であり、回答形式は単回答形式とした。最大回転角度で最も回答数が多かったのは20°以上30°未満であり、8機関であった。また最大両振幅せん断ひずみでは20%以上40%未満と回答した機関が最も多く6機関であった。

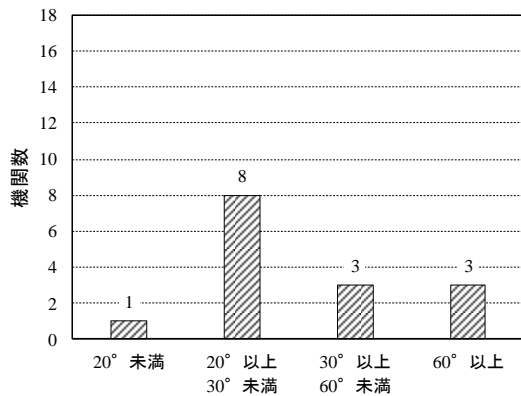


図5.2.47 载荷可能な最大角度（有効回答数15）

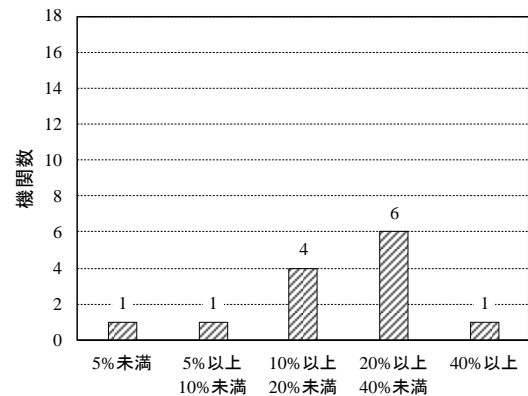


図5.2.48 载荷可能な最大両振幅せん断ひずみ（有効回答数13）

### 5.2.29 非排水繰返しせん断試験（液状化試験）終了の判断基準

図5.2.49に液状化試験終了の判断基準の回答結果を示す。回答の有効数は16機関であり、回答形式は単回答形式とした。最も多かった回答は両振幅せん断ひずみ15%であり、9機関が採用していた。また両振幅せん断ひずみ7.5%を採用している機関も6機関存在した。

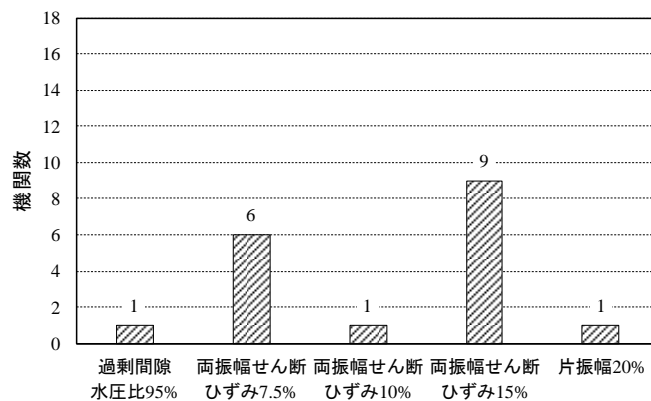


図5.2.49 液状化試験終了の判断基準（有効回答数16）

### 5.2.30 中空ねじり試験装置を用いて非排水繰返しせん断試験後に実施したことがある追加検討事項

図5.2.50に液状化試験後に実施したことがある追加検討事項の回答結果を示す。回答の有効数は16機関であり、回答形式は複数回答形式とした。回答された中では再圧密と回答した機関数が最も多く16機関であった。次いで単調载荷（9機関）、動的変形（6機関）であった。また再圧密と回答した機関に対して、せん断ひずみとせん断応力のどちらを原点に戻すかについて回答を依

頼したところ15機関から回答を得られた。なお回答形式は単回答形式であるが、1機関のみ「基本的に、せん断応力ゼロ、場合によって、せん断ひずみゼロ」と回答した機関があり、この機関は両方の回答数に加えた。結果として再圧密開始前にせん断ひずみを原点に戻すと回答した機関は8機関、せん断応力を原点に戻すと回答した機関も8機関であった。

図5.2.51は追加検討事項で単調載荷と回答した機関に対して、単調載荷の打ち切り基準となるせん断ひずみについて伺った回答結果である。回答の有効数は9機関であり、回答形式は単回答形式とした。打ち切りのひずみは22.5%と設定している機関が4機関と最多であった。またその他の回答としては「回転角あるいはトルク計の容量」「特に指定なし」としている機関も1機関ずつ存在した。

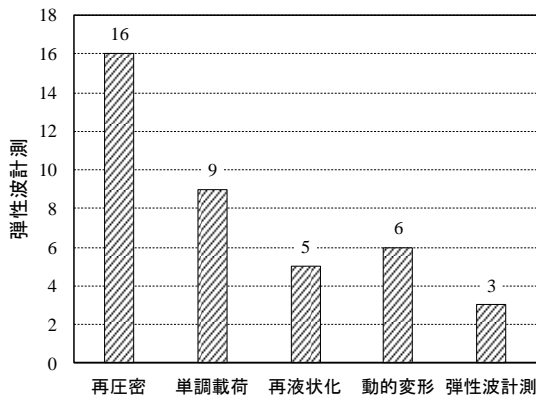


図5.2.50 追加検討事項（有効回答数16）

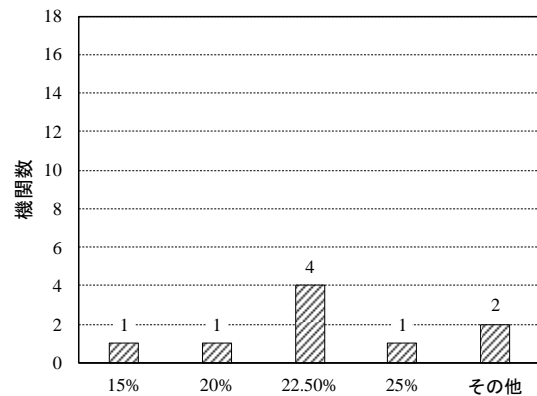


図5.2.51 単調載荷の打ち切り基準となるせん断ひずみ（有効回答数9）

### 5.2.31 中空ねじり液状化試験法の基準化の必要性とその理由

基準化の必要性については17機関全てが必要あるいはしておいたほうがよいと回答した。またそのように回答した理由を以下に記す。

- ・ しかしながら、試験機の保有機関が少ないこと、現時点では業務として受注が期待出来ず商売にならないと思われる事が問題
- ・ データの統一性の為
- ・ 解析をするうえで必要
- ・ 基準が決まっていないので他のデータと比較できない
- ・ 客観性の確保
- ・ 繰り返し三軸試験に置き換えて、業務レベルで利用する場合には統一された試験・評価方法が必要になるかと思えます。
- ・ 研究機関間での差異に与える要因を減らすため
- ・ 三軸試験の圧縮、伸長強度異方性の影響がない
- ・ 試験の説明性が向上するとともに、試験の妥当性評価および結果の採択・棄却の基準が明確となる
- ・ 試験結果に信憑性が出るため。
- ・ 試験方法、試験結果の整理方法の統一化の為
- ・ 試験方法及びデータ整理方法は同一の必要があるため
- ・ 試験法によって結果が大きく影響を受けるため
- ・ 中空ねじり試験の適用用途拡大のためにも



- ・ 実施方法の統一が必要。
- ・ 手順が複雑なため、基準化された方が試験の信頼性が高まるから
- ・ 他の基準からの流用は客先への説明などが煩雑するため
- ・ 需要が増えてきているため

### 5.3 まとめ

本章では一斉試験に参加した機関に対して、試験方法の実態を把握するために実施したアンケート調査の結果について整理をおこなった。アンケートは「一斉試験に関するアンケート」と「中空ねじり試験装置を用いた液状化試験一般に関するアンケート」の2つの種類に分け、各機関に回答を依頼した。

前者の「一斉試験に関するアンケート」では、サンプリング速度やブレードの枚数や寸法、飽和の方法などについての回答を得ることができた。また後者の「中空ねじり試験装置を用いた液状化試験一般に関するアンケート」では、各機関で実施されている中空ねじり試験装置を用いた液状化試験の実態について詳細に把握することができた。

なお、一部設問に関して質問の意図と異なる回答が出ており、複数の設問の結果を掲載できないこととなった。

## 6 委員会活動記録

### 6.1 委員会の概要

本研究委員会は、中空ねじりによる液状化強度試験法の標準化とポスト液状化試験法の確立を目指して2020年8月に関東支部の研究委員会として設立された。コロナ禍での設立であったため活動の開始が遅れたこと、すべての委員会を Zoom 会議にて開催したことなど通常とは異なる運営を強いられたため、当初、2023年3月までであった活動期間を1年間延長した。委員会の概要を下記に示す。

- ・名称：中空ねじりによる液状化強度試験の高精度化に関する研究委員会
- ・委員長：清田隆
- ・活動期間：2020年8月～2024年3月
- ・委員数：29名

本研究委員会のメンバー構成と委員会参加記録を表6.1.1に示す。土質試験に携わる研究者、実務者だけでなく土質試験データのユーザーである解析技術者、設計者や試験機の開発者など多分野のメンバーで構成されているのが特徴である。

活動は、年4回のペースで開催した委員会を中心に進めた。委員会開催記録を表6.1.2に示す。活動期間の前期では委員会内外の話題提供や文献調査により情報収集を行った。話題提供の内容を表6.1.3に示す。中期には、試験法の標準化に向けた検討資料を得るためのアンケート調査や一斉試験の準備と実施に時間を割いた。後期には、得られた成果の体外発表や成果報告書の作成を行った。主な活動内容とスケジュールを表6.1.4に示す。

表6.1.1 メンバー構成と委員会参加記録

No.	役割	氏名	所属	委員会参加記録														
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	委員長	清田 隆	東京大学	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	×	○
2	幹事	三上 武子	一般財団法人 GRI 財団	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	委員	石川 敬祐	東京電機大学	○	○	○	○	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×
4	委員	石橋 利倫	ライト工業株式会社	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	委員	岩本 哲也	東電設計株式会社	○	○	○	○	○	◎	○	○	○	○	○	○	○	×	○
6	委員	海野 寿康	宇都宮大学	×	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○
7	委員	大矢 陽介	国立研究開発法人 海上・港湾・航空 技術研究所	○	○	○	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8	委員	荻野 一彦	株式会社セントラル技研	○	◎	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○
9	委員	掛川 智仁	中央開発株式会社	○	○	○	×	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×
10	委員	金井 勇介	東電設計株式会社	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	×	×
11	委員	加茂 由紀彦	八千代エンジニアリング株式会社	○	○	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	×
12	委員	規矩 大義	関東学院大学	○	○	○	×	×	○	×	×	代	×	×	○	×	×	×
13	委員	久保 裕一	中部土質試験協同組合	○	◎	×	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○
14	委員	隈元 隆	テスコ株式会社	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×
15	委員	沢津橋 雅裕	一般財団法人電力中央研究所	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
16	委員	志賀 正崇 <sup>1)</sup>	長岡技術科学大学大学院	-	-	-	オ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
17	委員	新垣 芳一	東電設計株式会社	○	○	○	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
18	委員	仙頭 紀明	日本大学	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
19	委員	瀧原 徹也 <sup>2)</sup>	テスコ株式会社	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-
20	委員	谷本 俊輔	国立研究開発法人 土木研究所	◎	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×
21	委員	豊田 浩史	長岡技術科学大学大学院	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○
22	委員	西尾 竜文	株式会社安藤・間	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	×	○
23	委員	西村 聡	北海道大学大学院	×	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○
24	委員	野坂 知正	応用地質株式会社	○	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
25	委員	橋本 精一郎	東京試機工業株式会社	×	○	○	○	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×
26	委員	平松 登史樹	基礎地盤コンサルタンツ株式会社	○	◎	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○
27	委員	藤井 紀之	株式会社オリエンタルコンサルタンツ	○	○	○	◎	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	×
28	委員	安 浩輝	株式会社東京ソイルリサーチ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
29	委員	吉田 望	関東学院大学	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

所属は2023年4月時点

1) : 2021年5月に新任, 2) : 2023年3月で退任

◎ : 話題提供担当, オ : オブザーバー参加, 代 : 代理出席

表6.1.2 委員会開催記録

No.		開催日時	開催方法	参加人数	主な議題
1	2020年度第1回	2020/9/20 14:00~16:00	Zoom 会議	26名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 設立趣旨・活動方針の説明</li> <li>・ 話題提供1件</li> </ul>
2	2020年度第2回	2020/12/10 10:00~12:00	Zoom 会議	27名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 活動の進め方</li> <li>・ 科研費申請の報告</li> <li>・ 話題提供4件</li> </ul>
3	2020年度第3回	2021/2/18 13:00~15:30	Zoom 会議	26名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 利用状況に関するアンケートの進め方</li> <li>・ 文献調査の進め方</li> <li>・ 話題提供1件</li> </ul>
4	2021年度第1回	2021/4/28 10:00~12:00	Zoom 会議	26名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 利用状況に関するアンケートフォームについて</li> <li>・ 文献調査報告</li> <li>・ 話題提供3件</li> </ul>
5	2021年度第2回	2021/7/29 13:00~15:30	Zoom 会議	26名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 文献調査報告</li> <li>・ 一斉試験の進め方について</li> <li>・ 話題提供1件</li> </ul>
6	2021年度第3回	2021/10/25 10:00~12:05	Zoom 会議	26名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 文献調査報告</li> <li>・ 一斉試験のマニュアル（仕様書）について</li> <li>・ 話題提供1件</li> </ul>
7	2021年度第4回	2022/1/18 10:00~11:45	Zoom 会議	25名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 一斉試験のマニュアル，スケジュールについて</li> <li>・ 豊浦砂の既往データ収集・整理について</li> </ul>
8	2021年度第5回	2022/2/21 10:00~12:05	Zoom 会議	23名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 利用状況に関するアンケートの経過報告</li> <li>・ 一斉試験のマニュアル，報告フォーマット，スケジュール，分担について</li> <li>・ 豊浦砂の既往データ収集・整理の結果報告</li> </ul>
9	2022年度第1回	2022/4/8 15:00~17:00	Zoom 会議	25名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 利用状況に関するアンケート結果速報</li> <li>・ 一斉試験のマニュアル，報告フォーマットの最終確認</li> <li>・ 一斉試験応募状況速報</li> </ul>
10	2022年度第2回	2022/6/21 10:00~11:10	Zoom 会議	25名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 一斉試験の経過報告</li> <li>・ 参加機関向けアンケートの進め方について</li> <li>・ 成果報告書について</li> <li>・ 活動期間延長について</li> </ul>
11	2022年度第3回	2022/10/26 10:00~11:30	Zoom 会議	26名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 利用状況に関するアンケートの取りまとめ結果報告</li> <li>・ 一斉試験結果速報</li> <li>・ 参加機関向けアンケートの進め方について</li> <li>・ 全国大会 DS の応募について</li> </ul>
12	2022年度第4回	2023/2/8 10:00~12:00	Zoom 会議	27名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 利用状況に関するアンケートの取りまとめ結果報告</li> <li>・ 一斉試験結果速報</li> <li>・ 参加機関向けアンケートフォームについて</li> <li>・ 成果報告書各分担報告とスケジュール確認</li> <li>・ 全国大会 DS の進め方について</li> </ul>
13	2023年度第1回	2023/5/11 10:00~12:00	Zoom 会議	22名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 成果報告書各分担報告とスケジュール確認</li> <li>・ 全国大会 DS の進め方について</li> </ul>
14	2023年度第2回	2023/8/25 15:00~17:13	Zoom 会議	18名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 成果報告書各分担報告とスケジュール確認</li> </ul>
15	2023年度第3回	2024/1/23 10:00~12:00	Zoom 会議	19名	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 成果報告書1次原稿の査読結果報告とスケジュール確認</li> <li>・ 後継委員会（基準化 WG）設立報告</li> </ul>

参加人数にはオブザーバー参加者，代理出席者，外部の話題提供者を含む



## 6.2 主な活動内容

### 6.2.1 文献調査

現在実施されている中空ねじりによる液状化試験の方法・条件の把握，試験結果に及ぼす影響因子の抽出，そして一斉試験の仕様書作成に活用することを目的に文献調査を行った。また，中空ねじりによる液状化試験の利用実績の推移や目的の変遷など利用状況の時間的変化を捉える動向調査も行った。前者については4つのWGに分かれて作業を進めることとし，調査する文献に制限は設けなかった。一方，後者については2009年～2020年の地盤工学研究発表会の投稿論文を対象とした。文献調査の調査項目と分担を表6.2.1に示す。

- ・実施期間：2021/2～2021/10

表6.2.1 文献調査の調査項目と分担

WG	テーマ	調査項目	担当者
WG1	基本事項	適用土質，寸法の影響，載荷速度，応力・ひずみの定義・メンブレン張力・メンブレン貫入などの影響	◎谷本委員，◎豊田委員 石橋委員，加茂委員，隈元委員，平松委員，藤井委員
WG2	他試験との比較	三軸・平面ひずみ試験結果との比較（液状化強度，過剰間隙水圧・ひずみの発達傾向など）	◎石川委員，◎規矩委員 岩本委員，荻野委員，西尾委員，野坂委員，安委員
WG3	せん断モード	軸応力一定・軸変位固定・単純せん断など	◎大矢委員，◎西村委員 金井委員，久保委員，沢津橋委員，瀧原委員
WG4	特殊な試験	流動，初期異方性，解析との関係など	◎海野委員，◎仙頭委員 掛川委員，新垣委員，橋本委員，吉田委員
動向調査	地盤工学研究発表会（2009年～2020年）		◎吉田委員 ◎リーダー

### 6.2.2 利用状況に関するアンケート

中空ねじりによる液状化試験の普及状況や利用実績，試験法基準化の要望の把握を目的としてアンケート調査を行った。アンケートはオンライン方式とし，地盤工学会員を対象とした。地盤工学会関東支部のHPに掲載するとともに地盤工学会のメールニュースを利用してアンケートへの協力を依頼した。作業の分担を表6.2.2に示す。

- ・アンケート実施期間：2021/2/1～2021/3/31
- ・アンケート回答者数：200名

表6.2.2 利用状況に関するアンケートの分担

項目	担当者
調査票の作成	◎三上幹事，大矢委員
アンケートの実施	◎三上幹事
集計・とりまとめ	◎西尾委員，隈元委員，瀧原委員 ◎リーダー

### 6.2.3 一斉試験

中空ねじりによる液状化試験の標準的な方法を検討するための基礎データ取得を目的に一斉試験を行った。6.2.2利用状況に関するアンケートと同様に地盤工学会関東支部 HP とメールニュースで参加機関を募集したところ18機関から参加を得た。作業の分担を表6.2.3に示す。また、一斉試験の参加機関を表6.2.4に示す。ここに示す18機関には後述の一斉試験参加機関に対するアンケートにも協力していただいた。

- ・応募期間：2022/3/11～2022/4/20
- ・試験実施期間：2022/5/11～2022/9/30
- ・参加機関数：18機関

表6.2.3 一斉試験の分担

項目		担当者
マニュアル（仕様書）作成		◎谷本委員 文献調査 WG1, WG2メンバー
報告フォーマット作成		◎野坂委員 荻野委員, 久保委員, 平松委員, 三上幹事
公 募		◎海野委員 文献調査 WG4メンバー
資材準備		◎三上幹事, 清田委員長
試料調製		◎野坂委員, 三上幹事
事前試験	物理試験	荻野委員, 久保委員, 平松委員
	繰返し非排水三軸試験	海野委員, 野坂委員
集計・とりまとめ		表6.2.7の成果報告書の分担に同じ ◎リーダー

表6.2.4 一斉試験および参加機関に対するアンケートの参加機関

五十音順			
No.	機 関 名	No.	機 関 名
1	宇都宮大学	11	中部土質試験協同組合
2	応用地質株式会社	12	一般財団法人電力中央研究所
3	川崎地質株式会社	13	東京大学生産技術研究所
4	基礎地盤コンサルタンツ株式会社 A	14	東京電機大学
5	基礎地盤コンサルタンツ株式会社 B	15	日本大学工学部
6	京都大学大学院	16	日本大学理工学部
7	京都大学防災研究所	17	山口大学
8	関東学院大学	18	ライト工業株式会社
9	株式会社セントラル技研		
10	株式会社東京ソイルリサーチ		

#### 6.2.4 一斉試験参加機関に対するアンケート

一斉試験結果を分析する際の情報を充実させるため一斉試験参加機関を対象に試験設備，試験環境，試験条件等についてアンケートを行った。アンケートは「一斉試験に関するアンケート」と「中空ねじり試験装置を用いた液状化試験一般に関するアンケート」の2種類に分けて実施した。

- ・アンケート実施期間：2023/3/3～2023/3/31
- ・アンケート回答機関数：18機関（表6.2.4参照）

表6.2.5 一斉試験参加機関に対するアンケートの分担

項目	担当者
調査票の作成	◎金井委員，志賀委員，掛川委員，加茂委員
アンケートの実施	◎志賀委員
集計・とりまとめ	◎志賀委員，金井委員，掛川委員，加茂委員 ◎リーダー



## 6.2.5 第58回地盤工学研究発表会ディスカッションセッション（全国大会 DS）

委員会活動を地盤工学会員に広く周知することを目的に、2023年7月11日（火）～7月14日（金）に福岡市で開催された第58回地盤工学研究発表会にて TC101国内委員会と共催でディスカッションセッションを開催した。プログラムを表6.2.6に示す。

- ・テーマ：中空ねじりによる液状化強度試験の標準化と高精度化に向けた取組み
- ・開催日時・場所：2023年7月12日（水）9:00～12:15 第10会場
- ・座長：清田委員長，副座長：三上幹事

表6.2.6 全国大会 DS のプログラム

項目	タイトル	担当者
委員会報告①	中空ねじりによる液状化強度試験の高精度化に関する研究委員会活動報告	◎清田委員長
委員会報告②	一斉試験の実施概要・仕様	◎谷本委員
委員会報告③	中空ねじりによる液状化試験の利用状況に関するアンケート結果報告	◎西尾委員，隈元委員
委員会報告④	中空ねじりによる液状化強度試験でのせん断応力・せん断ひずみ式について	◎西村委員，久保委員
委員会報告⑤	中空ねじり試験による一斉液状化試験：密度および寸法の影響	◎石川委員，◎荻野委員 石橋委員，規矩委員
委員会報告⑥	中空ねじりによる液状化強度試験に及ぼす繰返し載荷時の種々の要因について	◎沢津橋委員，◎仙頭委員 大矢委員，平松委員
一般発表①	中空ねじり試験機による砂の液状化特性に及ぼす軸制御条件の影響	◎ひばり野圭汰（山口大学大学院），吉本憲正，中田幸男
一般発表②	中空ねじりせん断試験を用いた土の応力制御繰返しせん断後の体積収縮量の計測	◎海野寿康（宇都宮大学），吉直卓也，柳田匡慶
一般発表③	中空ねじり液状化試験における端面ブレード有無の比較例	◎安浩輝（株式会社東京ソイルリサーチ），堀越信夫，吉田正
一般発表④	液状化時の大ひずみ領域の挙動を考慮した数値解析(シミュレーション編)	◎藤井紀之（東京大学生産技術研究所），清田隆，上田恭平
一般発表⑤	小規模凍結サンプリングにより採取された中空供試体の品質評価	◎堀蓮（東京大学生産技術研究所），清田隆，謝沛宸，片桐俊彦，志賀正崇，武政学
		◎発表者

## 6.2.6 成果報告書

6.2.1～6.2.5に示す活動で得られた成果を報告書にまとめた。成果報告書の構成と執筆担当者を表6.2.7に示す。

表6.2.7 成果報告書の構成と執筆担当者

構 成	執筆担当者
1. まえがき	◎吉田委員, 清田委員長
2. 利用状況に関するアンケート	◎西尾委員
3. 一斉試験の実施概要・試験仕様	◎新垣委員, 岩本委員
4. 一斉試験の結果と考察	
4.1 密度の影響	◎石川委員, 石橋委員
4.2 試料寸法の影響	◎荻野委員
4.3 せん断ひずみ・応力の定義の影響	◎西村委員, 久保委員
4.4 軸固定の影響	◎沢津橋委員, 大矢委員
4.5 繰返し載荷制御方法の影響	◎仙頭委員, 平松委員
4.6 ゴムスリーブ厚さ・張力補正の影響	◎豊田委員, 藤井委員
4.7 リブの高さ・個数の影響	◎海野委員, 安委員
5. 一斉試験参加機関に対するアンケート	◎志賀委員, 掛川委員, 加茂委員
6. まとめ	◎吉田委員, 清田委員長
付録 委員会活動記録	◎三上幹事 ◎リーダー

## 6.2.7 科研費への応募

当初, 中空ねじりによる液状化試験結果に影響を及ぼす諸要因について詳細に検討することを目的とした委員会内での比較実験の構想があり, そのための資金を獲得するために科研費へ応募した。研究代表者の規矩委員が中心となって研究計画調書を作成し, 2021年度, 2022年度の基盤研究 (B) に申請したが, いずれも不採択であった。

## 6.2.8 対外発表

2024年4月末までの対外発表を表6.2.8に示す。

表6.2.8 対外発表一覧

年度	投稿先	タイトル	著者
2023	第58回地盤工学研究発表会	中空ねじりによる液状化試験の利用状況に関するアンケート結果報告	◎西尾委員, 隈元委員
		中空ねじりによる液状化強度試験でのせん断応力・せん断ひずみ式について	◎西村委員, 久保委員
		中空ねじり試験による一斉液状化試験：密度および寸法の影響	◎石川委員, ◎荻野委員 石橋委員, 規矩委員
		中空ねじりによる液状化強度試験に及ぼす繰返し載荷時の種々の要因について	◎沢津橋委員, ◎仙頭委員 大矢委員, 平松委員
2024	第59回地盤工学研究発表会	中空ねじりによる液状化試験に及ぼす繰返し載荷時の軸固定の影響について（投稿中）	◎大矢委員, 沢津橋委員
2024	令和6年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会	繰返し中空ねじり試験と繰返し三軸試験による砂の液状化強度（投稿中）	◎三上幹事, 吉田委員

◎発表者

## 7 まとめ

本報告書は中空ねじり液状化試験の基準化を見据え、アンケート調査と合計17機関にご協力いただき実施された一斉試験の結果を取りまとめたものである。特に後者に関しては、供試体密度・寸法、せん断応力・せん断ひずみの定義、載荷条件、メンブレン・リブの諸元等に着眼し、これらが中空ねじり液状化試験結果（主に両振幅せん断ひずみ7.5%で定義される液状化強度）に及ぼす影響について詳細に検討した。

2章で示した中空ねじり液状化試験の利用状況に関するアンケートについては、解答総数200名のうち、約半数は試験を実施または試験結果を利用したことが無いと回答されたが、8割の160名が「中空ねじりによる液状化試験に興味がある」と回答された。また、その160名のうち95%を超える人数が「中空ねじり液状化試験の基準化が必要」と回答しており、かつ自由意見でも中空ねじり試験の三軸に対する優位性を指摘されている方が多いことから、基準化に対する期待は非常に大きいものと考えられる。また、アンケートは5章でも取りまとめているが、これは一斉試験に参加いただいた機関を対象に、中空ねじり液状化試験の実態を把握するために実施したものである。各機関の試験方法や機器の特徴が把握できることから、基準化における一つの指標として役立つものと考えられる。

3章では、一斉試験の概要と試験仕様について取りまとめたが、その最後には一斉試験を実施した立場から見た課題・問題点を挙げている。将来的に、様々な試験を対象とした一斉試験が行われる場合の参考にもなるものであり、これも本委員会活動で得られた貴重な成果と言えるであろう。

4章で示した一斉試験の結果の整理・分析に当たっては、試験結果に及ぼすと考えられる要因毎にグループで分担して実施した。一方、それぞれの要因が相互的に影響し合うものも多く、本報告では各節で言及する結論のトーンは必ずしも整合していないが、大局的な結論は以下のように得られたと考える。

- ・ 空中落下で作成する供試体作成時の試料落下高さは、内外径比が小さい方が機関によるばらつきが大きい。また、供試体初期形状は機関により異なるケースもあった。
- ・ 供試体の高さ外径比、内外径比が液状化強度に及ぼす影響は密度によって異なる。緩試料（Dr 50%程度）より、密試料（Dr 80%程度）の方がそれらの影響を受けやすく、機関によるばらつきも大きい。これらの影響は、液状化試験中の間隙水圧比の増加傾向にも表れている。
- ・ 繰り返し載荷方法（応力制御試験・ひずみ速度一定試験）、および載荷速度の違いが液状化強度に及ぼす影響は小さいことが示された。しかし、応力制御で載荷速度が大きくなると、装置の能力により繰り返し載荷中のせん断応力振幅が一定に保てなくなることがある。
- ・ 供試体密度に寄らず、キャップとペダスタルに設置されるリブの枚数が液状化強度に及ぼす影響はほとんどない。また、リブが無いケースではせん断ひずみの増分が大きくなる結果も得られているが、液状化強度に有意な差を生じさせるものではなかった。
- ・ 供試体密度と液状化試験後の再圧密による体積変化の關係に及ぼす供試体寸法、および試験中の軸制御（軸力一定・軸変位固定）の影響は、全体的にみると比較的小さい。
- ・ 中空ねじり液状化試験で使用するべきせん断応力、せん断ひずみの定義式は、それぞれ式(4.3.1)、式(4.3.4)が推奨されるべきことを明言した。これは、液状化時には供試体は塑性状態であること、エネルギーの整合性に矛盾が無いことによる。
- ・ 液状化強度に及ぼす試験中の軸制御（軸力一定・軸変位固定）の影響は、軸変位固定条件の方が機関の違いによるばらつきは少ない傾向があるが、データ数をもう少し蓄積する必要がある。
- ・ 軸力一定試験として実施された実験であっても、繰り返し載荷中に軸力を一定に保つことは非常に困難であることが示された。そのため、本来の軸力一定条件と軸変位固定条件の詳細

な比較は行えていない。また、軸力一定・軸変位固定いずれの実験条件でも、既に基準化されているねじりせん断試験の軸力変化の許容値を超える結果が多い。このため、単純せん断モードに近く、かつ機関によるばらつきが低減される可能性の高い軸変位固定条件を選択することが適切であると言える。

- ・メンブレンの諸元が同じ場合、メンブレン張力がせん断応力に及ぼす影響は供試体内外径比に依存する。実験中に張力補正をフィードバックできない試験機の場合はせん断ひずみレベルと繰り返しせん断応力の値に注意する必要がある。

以上が一斉試験から得られた結論の概要であるが、液状化強度・試験後の体積変化に及ぼす影響が少ないと結論づけられた要因であっても、試験中のせん断ひずみ・過剰間隙水圧の発達傾向は異なることが確認されている。このため、実験を行う場合は検討する項目（例えば、液状化強度だけが欲しいのか、液状化に至るまでの挙動や大変形挙動も必要なのか）を明確にし、場合によっては供試体密度に応じて、適切な供試体寸法や内外径比・実験条件を設定する必要がある。

本報告が示した液状化強度に及ぼす諸要因の影響の有無とその程度は、そのすべてが統計的・客観的に分析されたものではない。基準化に向けて、例えば液状化強度に着目するなら実務上許容可能なばらつきを設定し（三軸試験のばらつきと同じだから OK とするのではなく）、その許容範囲内で多くの機関で現実的に実施可能な手法を見出す必要がある。

#### 【謝辞】

委員会活動においては、委員だけではなく、多くの方にご協力をいただきました。以下に、委員以外で協力を頂いた事項を示します。

- ・「話題提供」において、2020年度第3回委員会（2021年2月18日開催）にて株式会社地盤ソフト工場の安達健司様に「液状化に伴う地盤の変形解析」というタイトルで講演をしていただきました。
- ・「利用状況に関するアンケート」において、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所の宮田様に調査票の作成作業をサポートしていただきました。
- ・「一斉試験」に参加して下さった18機関のみなさまには、限られた時間の中で試験の実施とアンケートに協力していただきました。
- ・「一斉試験」の準備において、応用地質株式会社様には試料調製の作業場所の提供と職員のみなさまに作業をサポートしていただきました。
- ・「一斉試験」のデータ分析にあたって、大阪市立大学都市科学・防災研究センター（UReC）の大島昭彦特任教授におかれましては、過去に行われた三軸・中空ねじり液状化試験のデータをご提供いただきました。

これらの協力・活動に対して深甚なる感謝の意を表します。

最後になりましたが、「一斉試験」は中空ねじり液状化試験基準化の高い期待に応えるため実施されました。本成果が、今後基準部に設置された中空ねじり液状化試験の基準化 WG で大いに役立つことを期待いたします。

## 付録

付録1. 利用状況に関するアンケート

Q1. 中空ねじり試験機を用いた液状化試験を実施、または試験結果を利用したことはありますか？

(土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験 (JGS 0543) は対象外です。)

- 試験を実施したことがある
- 試験を実施したことはないが、試験結果を利用したことがある
- 試験の実施も結果の利用もない

Q2. 中空ねじり試験機を用いた液状化試験について興味がありますか？ (たとえば、試験を実施してみたい、試験結果を利用したい、試験結果を利用するにあたって試験方法を勉強したいなど)

- はい、
- いいえ

=====

Q3. Q1で”試験を実施したことがある”とお答えの場合、その実績 (試験本数) はどれくらいですか？

- 5本以下
- 5～20本
- 20本以上

Q4. 中空ねじり試験機を現在保有していますか？または、今後導入を考えていますか？

- 保有している
- 今後導入したい
- 保有していないし今後の導入予定もない

Q5. どのような目的で中空ねじりによる液状化試験を実施しましたか？またはする予定ですか？ (複数回答可)

- 学術／研究 (各種研究活動において使用)
- 設計業務での実施 (予測, 判定, 対策 等の各種業務にて使用)
- 技術開発での実施 (各種工法や技術開発等における業務にて使用)
- 施工時あるいは検証時での実施 (実施工や検証等の業務にて使用)
- その他

Q6. 中空ねじりによる液状化試験でどのような情報を得ましたか？または得る予定ですか？ (複数回答可)

- 液状化強度曲線
- 波形記録 (せん断応力, せん断ひずみ, 過剰間隙水圧)
- 応力-ひずみ関係
- 応力経路図
- 液状化後の体積ひずみ
- その他





その他

Q12. 中空ねじりによる液状化試験を利用拡大するために、試験法の標準化以外にどのようなことが必要でしょうか。ご意見がありましたらお聞かせください。

Q13. 貴方の所属先について教えてください。

- 大学・高専     国・自治体     公的研究機関  
 建設会社     コンサルタント     その他

Q14. 本アンケートについてお気づきの点があればご記入ください。

ご協力ありがとうございました。

## 付録2. 中空ねじりによる一斉液状化試験 マニュアル

### 本マニュアルの位置付け

本マニュアルは、中空ねじりによる液状化強度試験の高精度化に関する研究委員会（以下、「委員会」という。）が企画する中空ねじりによる一斉液状化試験（以下、「一斉試験」という。）の実施にあたり、委員会の検討目的になるべく沿った試験データを収集することを目的として、一斉試験の標準仕様等を定めたものである。

なお、試験機関によっては、本マニュアルに示す標準仕様の全てを満たす試験の実施が難しいケースも考えられるが、本マニュアルは、そのような試験機関の一斉試験への参画を制限するものではないことを付記しておく。

### 一斉試験の基本方針

中空ねじりによる液状化試験の結果に対する以下の影響要因を明らかにすることを目的として、一斉試験を実施する。

- ・ 軸制御方法（荷重一定，変位固定）の影響
- ・ 供試体寸法や使用器具（リブ，メンブレンなど）等の影響
- ・ その他，試験機関による試験結果のばらつき

また、繰返し非排水せん断後に排水させ再圧密試験を行い、その結果に及ぼす影響要因を確認する。

繰返しせん断後に単調載荷試験を実施するアイデアもあったが、試験機関によっては実施が困難であること、繰返しせん断中の最終ループにおけるデータによってある程度は代替可能であることから、単調載荷試験は実施しないこととする。

なお、土の液状化特性に関する試験方法は、すでに JGS 0541 「土の繰返し非排水三軸試験方法」にて規定されており、データの蓄積も豊富であることから、中空ねじりによる液状化試験の結果がこれと同等以上の精度を有するか否かの観点から試験結果を評価する。

### 一斉試験のケース構成

一斉試験のケース構成を下表に示す。

中空ねじりによる液状化試験では、緩い供試体において軸変位固定条件の場合にひずみが局所化する懸念があることや、密な供試体においても正負対称に変形が進展する利点などが考えられることから、これらを確認できるように、各機関が2パターンの相対密度  $D_r$  について試験を実施する。

また、軸制御としては、軸力を一定とする方法が一般的であるが、軸変位を固定したケースとの差異を比較できるように、一部の機関が軸変位固定のケースを実施するように全体ケース構成を調整する。

表-1 一斉試験のケース

相対密度	軸制御	試験機関(イメージ)
50%	軸力一定	A, B, D, …
50%	軸変位固定	B, C
80%	軸力一定	A, B, D, …
80%	軸変位固定	B, C

### 一斉試験の標準仕様

一斉試験の標準仕様を表-2、関連する地盤工学会基準とそれらの略称を表-3に示す。表-2で引用している地盤工学会基準については、2020年版を参照すること。ただし、有効数字の扱いについては、その限りではない。

一斉試験に参画する各機関の試験仕様は、原則として、表-2の標準仕様に準拠したものとする。ただし、準拠することが困難な項目がある場合は、試験結果の報告にあたり、各機関の試験仕様と標準仕様の違いを明記することとする。

表-2 一斉試験の標準仕様

試 験 の 仕 様	備 考
<p><b>1. 試料</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 試料 瑞浪珪砂7号とし、委員会が配布したものを使用することとする。なお、左記試料の物理特性は以下のとおりである。 土粒子の密度<math>\rho_s = 2.646</math> (Mg/m<sup>3</sup>) 最小乾燥密度<math>\rho_{dmin} = 1.189</math> (Mg/m<sup>3</sup>) 最大乾燥密度<math>\rho_{dmax} = 1.532</math> (Mg/m<sup>3</sup>) 50%粒径 <math>D_{50} = 0.2870</math> (mm) 均等係数 <math>U_c = 1.9</math> 細粒分含有率 <math>F_c = 1.4</math> (%)</li> <li>● 試料および供試体の数量 各機関が実施する試験の試料数は2試料 (相対密度 <math>D_r=50\%</math>および<math>80\%</math>) 以上とする。また、1試料あたり供試体数は4個以上とする。</li> <li>● 試料および供試体の名称 各試料、供試体の名称は、次のように付す。 試料名の例 : 50P-A (目標 <math>D_r=50\%</math>, 軸力一定, 機関 A) 80D-C (目標 <math>D_r=80\%</math>, 軸変位固定, 機関 C) 供試体名の例 : 50P-A-1 (目標 <math>D_r=50\%</math>, 軸力固定, 機関 A, 1供試体目) なお、試験機関の略称として用いる記号 (アルファベット) は、委員会が指定したものを使用することとする。</li> </ul>	
<p><b>2. 供試体の作製</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 供試体の寸法 [ねじり供試体基準] の規定を満たす範囲で任意とする。複数の寸法を選択することができる試験機関に対しては、採用する寸法を委員会が指定する。</li> <li>● 供試体の作製 炉乾燥状態の試料を用いて、空中落下法により作製する。このとき、ノズルは委員会が作製・配布したもの、漏斗は各機関が所有しているものを使用する。 ノズル上端に漏斗等を取り付け、そこに所量の試料を注ぐ。ノズルをゆっくりと回転させながら落下高さ (ノズル先端と堆積面との距離) が一定となるようにモールド内に試料を自由落下させる。このとき、ノズルは時計回りと反時計回りに1回ずつ交互に回転させる。また、回転方向を反転させる際は、各回の反転位置を少しずつずらすように配慮する。</li> <li>● 供試体上端面の処理 供試体の作製後、ストレートエッジをモールドの上端に沿ってすべらせて余盛砂をする。圧力室組立後のキャップの底面と供試体作製用に組み立てたモールドの上端が平行であることを確認する。</li> <li>● 供試体の測定 [ねじり供試体基準] に基づき、供試体に5~10kN/m<sup>2</sup>程度の負圧を与えてモ</li> </ul>	<p>供試体体積は実測とする (赤本に記</p>

試験の仕様	備考
<p>ールドを取り外した後、負圧を20kN/m<sup>2</sup>程度に増加させた状態で、ゴムスリーブの厚さを考慮して供試体寸法 (<math>D_{oi}</math>, <math>D_{ii}</math>, <math>H_i</math>) を測定する。このときの質量、体積等から算出される相対密度 <math>D_r</math> になるべく目標値 (<math>D_r=50\%</math>の場合は乾燥密度 <math>\rho_d=1.339\text{Mg/m}^2</math>, <math>D_r=80\%</math>の場合は乾燥密度 <math>\rho_d=1.448\text{Mg/m}^2</math>) に一致するように供試体を作製する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 多孔板およびリブ 多孔板の仕様 (ポーラスストーン, ポーラスメタル等) および金属製リブの仕様 (枚数, 高さ, 厚さ) は任意とする。</li> <li>● ゴムスリーブ ゴムスリーブの厚さは0.15~0.3mm とする。ゴムスリーブの張力の補正に用いるヤング率 <math>E_m</math> には, 既往の測定データや文献等に基づいて各機関が通常使用している値を用いる。ただし, ラテックスゴムを用いる場合でヤング率が不明な場合は <math>E_m=1,600\text{kN/m}^2</math>としてよい。 変形状態を確認しやすくするため, ゴムスリーブの表面には, 円周方向に1/4以上の範囲について, マジック等により1cm 程度の間隔でグリッドを設ける。</li> </ul>	<p>載)。 <math>D_r</math> に許容値を設けず, そのばらつきは結果分析の参考情報として扱う。</p>
<b>3. 測定</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 測定項目 測定項目は軸力, 軸変位, ねじり力, 回転角, セル圧, 間隙水圧および体積変化量とする。</li> <li>● 圧密過程の記録 圧密過程では, 少なくとも軸力, セル圧, 軸変位, 体積変化量を測定する。記録方法は, 1秒あたり1点以上の連続計測とする。ただし, この方法による記録が困難な試験機関については, データ収録点数を減じて記録する方法や, 最終値のみを記録する方法としてもよい。</li> <li>● 繰返し非排水せん断過程の記録 繰返し非排水せん断過程では, 少なくとも軸力, 軸変位量, ねじり力, 回転角および間隙水圧を連続計測する。データ収録点数は, 1サイクルあたり40点以上とする。また, 繰返し非排水せん断過程における供試体の変形状況が分かるように, 全供試体について動画を撮影する。ただし, 動画の撮影が困難な場合は, 繰返し非排水せん断過程の前後で供試体の写真を撮影する。</li> <li>● 繰返し非排水せん断後の再圧密過程の記録 繰返し非排水せん断後の再圧密過程では, 少なくとも軸力, セル圧, 軸変位, 体積変化量を測定する。記録方法は, 1秒あたり1点以上の連続計測とする。ただし, この方法による記録が困難な試験機関については, データ収録点数を減じて記録する方法や, 最終値のみを記録する方法としてもよい。</li> </ul>	
<b>4. 供試体の飽和および圧密</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 供試体の飽和 [ねじり供試体基準] に基づいて供試体を飽和させた上で, [三軸液状化基準]の方法により圧密前の <math>B</math> 値を測定し, 0.95以上であることを確認する。また, 圧力室の上方に空気を残してセル圧を8時間以上加える場合は, 圧密後の <math>B</math> 値も測定する。</li> </ul>	

試験の仕様	備考
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 供試体の圧密 [ねじり CUB/CU 基準] の方法により、100kN/m<sup>2</sup>で等方圧密する。背圧は200kN/m<sup>2</sup>とする。100kN/m<sup>2</sup>到達後の圧密時間は30分とする。</li> </ul>	<p>圧密時間が10分と30分では液状化強度が異なるため、[三軸液状化基準] に準じて30分とする</p>
5. 繰返し非排水せん断過程	
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 载荷の方法 非排水条件の下で、供試体に一定振幅のねじり力を繰返し与える。このときのねじり力の载荷波形は0.1Hz の正弦波とする。ただし、左記の波形による载荷が困難な機関（ひずみ速度一定のみ可能、など）については、当該装置の仕様の範囲内で、ねじり力の振幅の正確な制御と測定ができるように波形形状、载荷速度等を設定する。</li> <li>● 繰返しせん断応力振幅の精度 時計回りのねじり力の片振幅 <math>T_R</math> と反時計回りのねじり力の片振幅 <math>T_L</math> は、両振幅せん断ひずみ <math>\gamma_{DA} \leq 3\%</math> の範囲で以下の条件を満たすことを目標とする。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 各サイクルにおける <math>(T_R + T_L)</math> の変動が 10% 以下</li> <li>・ <math>0.9 \leq T_R/T_L \leq 1.1</math></li> </ul> </li> <li>● 繰返しせん断応力振幅の設定方法 各機関によるせん断応力 <math>\tau</math>・せん断ひずみ <math>\gamma</math> 関係やストレスパス等を同一条件で比較できるように、4供試体のうち1供試体については、以下に示す繰返しせん断応力振幅比の標準値を用いる。 <p><math>D_r=50\%</math> のケース： <math>\tau_d/\sigma_c' = 0.10</math></p> <p><math>D_r=80\%</math> のケース： <math>\tau_d/\sigma_c' = 0.20</math></p> 残り3供試体の繰返し応力振幅は、概ね5～50回で両振幅せん断ひずみ <math>\gamma_{DA} = 7.5\%</math> に達するように、各機関の判断により設定する。</li> <li>● 軸制御の方法 繰返し载荷中は、軸力を一定に保持することを基本とする。ただし、委員会が指定する機関については、軸変位を固定とする方法を用いる。</li> <li>● 繰返し非排水せん断の終了条件 以下のうちいずれかに達した時点で、繰返し非排水せん断を終了する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 両振幅せん断ひずみ <math>\gamma_{DA} = 15\%</math> に達したとき。ただし、試験装置の仕様上、両振幅せん断ひずみ <math>\gamma_{DA} = 15\%</math> に達するまで载荷を行うことが困難な場合は、可能な範囲で大きな両振幅せん断ひずみ <math>\gamma_{DA}</math> に達したときとする。</li> <li>・ 繰返し回数が 200 回に達したとき</li> </ul> なお、最終サイクルにおける繰返し非排水せん断の終了時には、ねじり力を零に戻すこととする。</li> </ul>	<p>波形や周波数等は報告事項とする</p> <p>振幅精度は[三軸液状化基準]を準用。ただし、許容値は設けず、結果分析の参考情報として扱う</p> <p>代表機関が三軸液状化試験を実施し、その20回強度を標準値とする</p> <p>解析に必要なひずみとして7.5% (<math>F_L=1.0</math>相当) は過小なので、15%を基本とする。ただし、<math>\gamma_{DA}=15\%</math> が困難な機関にも配慮</p>

試験の仕様	備考
<p><b>6. 繰返し非排水せん断後の再圧密</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 軸差応力の調整 繰返し非排水せん断を軸変位固定条件で行った試験機関は、軸変位の固定を解除し、軸差応力をゼロに戻す操作を行う。</li> <li>● 残留せん断ひずみの調整 再圧密前の残留せん断ひずみを調整するため、回転角の残留値をゼロに戻した後、ねじり力をゼロに戻す操作を一度行う。ただし、この操作が困難な試験機関は、残留せん断ひずみの調整を行わなくてもよい。</li> <li>● 再圧密 ねじり力を零に保った状態で排水コックをゆっくり開放し、再度、供試体を等方圧密させる。コック開放後の圧密時間は30分とする。</li> </ul>	<p>繰返しせん断による残留せん断ひずみが体積ひずみに影響を与えるため</p>
<p><b>7. 試験結果の整理</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 圧密前の供試体の状態 [ねじり CUB/CD 基準]に基づいて、圧密前の供試体体積 <math>V_0</math>、供試体高さ <math>H_0</math>、外径 <math>D_{o0}</math>、内径 <math>D_{i0}</math>、乾燥密度 <math>\rho_{d0}</math>、間隙比 <math>e_0</math>、相対密度 <math>D_{r0}</math>および <math>B</math> 値を算出する。これらに加え、供試体断面積 <math>A_0</math>を次式により求める。  <math display="block">A_0 = \frac{V_0}{H_0}</math> </li> <li>● 圧密過程 [ねじり CUB/CD 基準]に基づいて、圧密後の供試体体積 <math>V_c</math>、供試体高さ <math>H_c</math>、供試体断面積 <math>A_c</math>、外径 <math>D_{oc}</math>、内径 <math>D_{ic}</math>、乾燥密度 <math>\rho_{dc}</math>、間隙比 <math>e_c</math>および相対密度 <math>D_{rc}</math>を算出する。 これらに加え、軸力およびセル圧の上昇～保持中における軸ひずみ <math>\varepsilon_a</math>、体積ひずみ <math>\varepsilon_v</math>、軸方向応力 <math>\sigma_a</math>、軸差応力 <math>\sigma_d</math>を次式により算出する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>● 軸ひずみ <math>\varepsilon_a</math>  <math display="block">\varepsilon_a = \frac{\Delta H}{H_0}</math> </li> </ul> ここに、<math>\Delta H</math>：圧密過程における軸変位量。 <ul style="list-style-type: none"> <li>● 体積ひずみ <math>\varepsilon_v</math>  <math display="block">\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0}</math> </li> </ul> ここに、<math>\Delta V</math>：圧密過程における体積変位量。 <ul style="list-style-type: none"> <li>● 軸方向応力 <math>\sigma_a</math>  <math display="block">\sigma_a = \frac{P}{A_0} \cdot \frac{1 - \varepsilon_a}{1 - \varepsilon_v}</math> </li> </ul> ここに、<math>P</math>：供試体に作用している軸力、<math>A_0</math>：圧密前の供試体断面積。 <ul style="list-style-type: none"> <li>● 軸差応力 <math>\sigma_d</math>  <math display="block">\sigma_d = \sigma_a - \sigma_r</math> </li> </ul> ここに、<math>\sigma_r</math>：セル圧。 </li> <li>● 繰返し非排水せん断過程 <ul style="list-style-type: none"> <li>● 軸ひずみ <math>\varepsilon_a</math>  <math display="block">\varepsilon_a = \frac{\Delta H}{H_c}</math> </li> </ul> ここに、<math>H_c</math>：圧密後の供試体高さ、<math>\Delta H</math>：ねじりせん断過程における軸変位 </li> </ul>	

試験の仕様	備考
<p>量。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>せん断ひずみ<math>\gamma</math></li> </ul> $\gamma = \frac{2\Delta\theta(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)}{3H_c(r_{oc}^2 - r_{ic}^2)}$ <p>ここに、<math>\Delta\theta</math>：供試体の回転角。ひずみ振幅<math>\gamma_{DA}</math>および<math>\gamma_{SA}</math>の算出にあたっては、上式により算出されたせん断ひずみを用いる。ただし、参考値として [ねじりCUB/CU 基準] の下式によるせん断ひずみも算出する。</p> $\gamma = \frac{\Delta\theta(r_{oc} + r_{ic})}{2H_c}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>せん断応力<math>\tau</math></li> </ul> $\tau = \frac{3T}{2\pi(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)} - \Delta\tau_m, \quad \Delta\tau_m = \frac{2E_m t_m (r_{oc}^3 + r_{ic}^3)}{(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)(r_{oc} + r_{ic})} \gamma$ <p>ここに、<math>T</math>：ねじり力、<math>\Delta\tau_m</math>：ゴムスリーブ張力によるせん断応力の補正量、<math>E_m</math>：ゴムスリーブのヤング率、<math>t_m</math>：ゴムスリーブの厚さ。なお、参考値として下式により、ゴムスリーブ張力による補正を行わない場合の値も算出する。</p> $\tau = \frac{3T}{2\pi(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>軸方向応力<math>\sigma_a</math></li> </ul> $\sigma_a = \frac{P}{A_c}(1 - \varepsilon_a)$ <p>ここに、<math>P</math>：供試体に作用している軸力、<math>A_c</math>：圧密後の供試体断面積。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>間隙水圧増分<math>u_e</math></li> </ul> $u_e = u - u_b$ <p>ここに、<math>u</math>：供試体に作用する間隙水圧、<math>u_b</math>：背圧。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>平均有効応力<math>\sigma'_m</math></li> </ul> $\sigma'_m = \frac{\sigma_a + 2\sigma_r - u}{3}$ <p>ここに、<math>\sigma_r</math>：セル圧。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>軸差応力<math>\sigma_d</math></li> </ul> $\sigma_d = \sigma_a - \sigma_r$ <ul style="list-style-type: none"> <li>供試体の変形状況に関する静止画</li> </ul> <p>繰返し非排水せん断過程における供試体の動画撮影を行った場合は、撮影した動画から、①繰返しせん断前、②<math>\gamma_{DA}=7.5\%</math>到達時の2枚について、静止画を取り出す。なお、②については、<math>\gamma_{DA}=7.5\%</math>に到達したサイクルにおいてせん断ひずみが最大となった瞬間の写真を取り出す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 残留せん断ひずみの調整時</li> <li>● 調整後の残留せん断ひずみ<math>\gamma_{res}</math></li> </ul> $\gamma_{res} = \frac{2\Delta\theta_{res}(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)}{3H_c(r_{oc}^2 - r_{ic}^2)}$ <p>ここに、<math>\Delta\theta_{res}</math>：調整後の回転角の残留値。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 再圧密過程</li> <li>● 軸ひずみ<math>\varepsilon_a</math></li> </ul>	<p><math>\tau</math>、<math>\gamma</math>は内外のエネルギーが一致する式を基本とする。</p> <p>データ整理に用いるせん断応力は、全てメンブレン補正後の値とする。ヤング率<math>E_m</math>の設定方法は2.参照。</p> <p>ストレスパス作図のため</p> <p>トルクによるせん断とは別要因の(好ましくない)せん断をあえて確認する意味で列挙</p> <p>軸方向応力<math>\sigma_a</math>の計算</p>



試験の仕様	備考
$\varepsilon_a = \frac{\Delta H}{H_c}$ <p>ここに、<math>H_c</math>：圧密後の供試体高さ、<math>\Delta H</math>：圧密後（繰返しせん断前）からの軸変位量。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>体積ひずみ <math>\varepsilon_v</math></li> </ul> $\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_c}$ <p>ここに、<math>\Delta V</math>：圧密後（再圧密前）からの体積減少量。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>軸方向応力 <math>\sigma_a</math></li> </ul> $\sigma_a = \frac{P}{A_c} \cdot \frac{1 - \varepsilon_a}{1 - \varepsilon_v}$ <p>ここに、<math>P</math>：供試体に作用している軸力、<math>A_c</math>：圧密後の供試体断面積。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>軸差応力 <math>\sigma_d</math></li> </ul> $\sigma_d = \sigma_a - \sigma_r$ <ul style="list-style-type: none"> <li>再圧密後の供試体体積 <math>V_{rc}</math></li> </ul> $V_{rc} = V_c - \Delta V_{rc}$ <p>ここに、<math>\Delta V_{rc}</math>：再圧密前後の体積減少量。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>再圧密後の体積ひずみ <math>\varepsilon_{v,rc}</math></li> </ul> $\varepsilon_{v,rc} = \frac{\Delta V_{rc}}{V_c}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>● メンブレン貫入 (MP) の扱い</li> </ul> <p>1. に示した試料においては、試験結果に及ぼす MP の影響が十分に小さいと考えられるため、MP を考慮した試験結果の補正は行わない。</p>	<p>に用いるため</p> <p>時刻歴を報告する</p> <p>軸差応力 <math>\sigma_d</math> の計算に用いるため</p> <p>時刻歴を報告する</p> <p>最終値を報告する</p> <p>最終値を報告する</p>
<b>8. 報告事項</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 記録の方法</li> </ul> <p>以降に示す試験の仕様、結果等を、委員会が作成・配布した様式に記録する。実際の試験仕様と標準仕様に違いがある場合は、その違いが分かるように様式に記載する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 各供試体の情報</li> </ul> <p>各供試体の情報として、以下の事項を報告する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>初期状態における供試体寸法、密度等 (<math>H_i, D_{oi}, D_{ii}, V_i, \rho_{di}, e_i, D_{ri}</math>)</li> <li>圧密前の供試体寸法、密度等 (<math>H_0, D_{o0}, D_{i0}, V_0, A_0, \rho_{d0}, e_0, D_{r0}, B</math> 値)</li> <li>圧密後の供試体寸法、密度等 (<math>H_c, D_{oc}, D_{ic}, V_c, \rho_{dc}, e_c, D_{rc}</math>。必要に応じて <math>B</math> 値)</li> <li>圧密過程における測定データ (<math>\sigma_a, \sigma_r, \sigma_d, \varepsilon_a, \varepsilon_v</math>) の時刻歴</li> <li>繰返し非排水せん断過程における測定データ (<math>\tau, \gamma, \sigma_m', u_e, \sigma_d, \varepsilon_a</math>) の時刻歴、せん断応力-せん断ひずみ関係、有効応力経路</li> <li>両振幅せん断ひずみ <math>\gamma_{DA} = 1.5\%, 3\%, 7.5\%, 15\%</math>、過剰間隙水圧比 <math>r_u = 95\%</math> に達したときの繰返し回数 <math>N_c</math></li> <li>繰返しせん断応力振幅 <math>\tau_d</math> (両振幅せん断ひずみ <math>\gamma_{DA}=1.5\%</math> になるまでの正側および負側のせん断応力振幅の平均値)</li> <li><math>\gamma_{DA}=1.5\%, 3\%, 7.5\%, 15\%</math> のときのせん断応力振幅 <math>\tau_d</math> および正負せん断応力振幅の比 <math>\tau_{d+}/\tau_d</math></li> <li>繰返し非排水せん断過程における片振幅せん断ひずみの最大値 <math>\gamma_{SA,max}</math> および両振幅せん断ひずみの最大値 <math>\gamma_{DA,max}</math></li> <li>繰返し載荷試験中の供試体の動画</li> </ul>	<p>負圧 20kN/m<sup>2</sup> 載荷時を初期状態とする。</p>



試 験 の 仕 様	備 考
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 供試体の静止画 (繰返しせん断前および<math>\gamma_{DA}=7.5\%</math>到達時)</li>   <li>• 再圧密前の残留せん断ひずみ<math>\gamma_{res}</math>。残留せん断ひずみの調整を行った場合は、調整後の値を報告する。</li> <li>• 再圧密過程における軸差応力<math>\sigma_d</math>、体積ひずみ<math>\epsilon_v</math>の時刻歴</li> <li>• 再圧密後の供試体体積<math>V_{rc}</math>および再圧密による体積ひずみ<math>\epsilon_{v,rc}</math></li> </ul> <p>なお、上記内容は1供試体につき1ファイルに記載することとし、その名称は供試体名と同一とする。</p> <p style="padding-left: 2em;">例：50P-A-1.xlsx, 50P-A-2.xlsx</p> <p>動画ファイルの名称は供試体名と同一とし、ファイル形式は任意とする。</p> <p style="padding-left: 2em;">例：50P-A-1.avi, 50P-A-2.mp4</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 各試料の情報</li> </ul> <p>各試料の情報として、以下の事項を報告する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 繰返し応力振幅比<math>\tau_d/\sigma'_c</math>と、両振幅せん断ひずみ<math>\gamma_{DA} = 1.5\%, 3\%, 7.5\%, 15\%</math>および過剰間隙水圧比<math>r_u = 95\%</math>に達したときの繰返し回数<math>N_c</math>の関係図</li> <li>• 液状化強度比 (20回で両振幅せん断ひずみ<math>\gamma_{DA}=7.5\%</math>に達する繰返し応力振幅比<math>\tau/\sigma'_c</math>)</li> </ul> <p>なお、上記内容は1試料につき1ファイルに記載することとし、その名称は試料名と同一とする。</p> <p style="padding-left: 2em;">例：50P-A.xlsx, 80D-C.xlsx</p>	<p>動画撮影が困難な場合は繰返しせん断の前後の写真を報告する</p>

表-3 参照する地盤工学会基準と略称

基準番号	規格・基準名	略称
JGS 0542	土の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法	[三軸変形基準]
JGS 0541	土の繰返し非排水三軸試験方法	[三軸液状化基準]
JGS 0550	土のねじりせん断試験用中空円筒供試体の作製・設置方法	[ねじり供試体基準]
JGS 0551	土の中空円筒供試体によるねじりせん断試験方法	[ねじり CUB/CD 基準]
JGS 0543	土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法	[ねじり変形基準]

### 繰返し非排水三軸試験

一斉試験の結果と比較するための繰返し非排水三軸試験 ( $Dr=50\%, 80\%$ ) を代表機関が実施する。このとき、供試体の作製、圧密、繰返し载荷の方法や報告事項については、上記の標準仕様に準拠することとする。

付録3. 一斉試験参加機関に対するアンケート

付3.1一斉試験に関するアンケート

表-1 土粒子密度, 最大間隙比, 最小間隙比に関する情報

土粒子密度(g/cm <sup>3</sup> )	
最大間隙比	
最小間隙比	

表-2 目標相対密度50%の空中落下法のキャリブレーションに関する情報

落下高さ(cm)	間隙比	計算した相対密度(%)

表-3 目標相対密度80%の空中落下法キャリブレーションに関する情報

落下高さ(cm)	間隙比	計算した相対密度(%)

表-4 試験実施状況に関する情報

	回答欄	回答例
試験者（実際に一斉試験を実施した方）のねじり試験の経験年数をご回答ください。 （単位：年）		3年
データ計測時のサンプリング速度をご記入ください。（単位：Hz）		100
一斉試験の各試験実施時の室温を記入してください。計測していない場合は、空欄で結構です。（単位：℃）		25
メンブレンの厚みをご記入ください。（単位：mm）		0.3
キャップとペダスタルの端面材質をご記入ください。		ポーラスストーン、ポーラスメタル、アクリルプレート
端面ブレードの有無をご記入ください。		有、無
上の質問で「有」と回答した方にお聞きします。ブレードの数、厚さ、突出高さをご記入ください。	数（枚）	6,8
	厚さ(mm)	1,2
	突出高さ(mm)	3,6
上記の質問で「無」と回答した方にお聞きします。ブレードの設置以外で、繰返し载荷時の供試体と多孔板（端面）とのすべりを防止するための工夫をしている場合、その方法をご記入ください。 （空欄であれば工夫はしていない。として承ります）		端面フラットで摩擦のみ、ブレードの代わりに溝を加工など
供試体の飽和方法をご記入ください。（複数回答可）		二酸化炭素置換
脱気、通水時の初期有効拘束圧をご記入ください。 （単位：kPa）		20

付3.2 中空ねじり試験装置を用いた液状化試験一般に関するアンケート

表-5 液状化試験全般に関するご質問

カテゴリ	番号	項目	回答	回答候補 or 例	備考	
1。液状化試験全般に関するご質問	(1)	液状化試験が可能な試験装置（载荷機構数での単位）の保有台数をご記入ください。（単位：台）	三軸			
			中空			
			単純せん断			
			その他		リングせん断	
	(2)	(1)を用いて実施する1週間当たりの試験本数（供試体数）をご記入ください。（単位：本）	三軸			
			中空			
			単純せん断			
			その他		リングせん断：4	
	(3)	中空ねじり試験装置を利用した液状化試験の目的を簡潔にご記入ください。（複数回答可）			研究，液状化判定，変形予測，対策，その他	

表-6 中空ねじり液状化試験に関するご質問

カテゴリ	番号	項目	回答	回答候補 or 例	備考	
2。 試料に関するご質問	(4)	中空ねじり液状化試験において液状化強度曲線を評価するために必要だと考えられる最低限の供試体数をご記入ください。(単位：本)				
3。 供試体作製方法に関するご質問	(5)	緩いきれいな砂の再構成試料の作製方法をご記入ください。(複数回答可)		空中落下法, 不飽和振動法, 不飽和突き固め法		
3。 供試体作製方法に関するご質問	(6)	密な再構成試料の作製方法をご記入ください。(複数回答可)		空中落下法, 不飽和振動法, 不飽和突き固め法		
	(7)	細粒分を含む再構成試料の作製方法をご記入ください。(複数回答可)		空中落下法, 不飽和振動法, 不飽和突き固め法		
	(8)	不攪乱試料の供試体作製方法をご記入ください。(複数回答可)		専用のマイターボックス・ドリルによる切り出し		
	(9)	供試体サイズ条件が指定されていない場合, 最も多く用いる供試体寸法と実施可能寸法(内径・外径・高さ)をご記入ください。(単位：mm)	内径		最も多く用いる寸法 : 60 実施可能寸法 : 30, 60	
			外径		最も多く用いる寸法 : 100 実施可能寸法 : 70, 100	
			高さ		最も多く用いる寸法 : 70 実施可能寸法 : 70, 100	
	(10)	供試体の内径・外径・高さの計測方法をご記入ください。(複数回答可)	内径		モールドのサイズで仮定	
外径				パイメーター		
高さ				パイメーター		
3。 供試体作製方法に関するご質問	(11)	最も多く用いるメンブレンの厚さ・材質(外側・内側)をご記入ください。(複数回答可)	外側(単位：mm)			
			内側(単位：mm)			
			材質		ラテックス	
	(12)	端面にろ紙を使用する場合の材質・厚さ(単位：mm)をご記入ください。(複数回答可)(※使用しない場合は「-」をご記入ください)	材質			
			厚さ(単位：mm)			

表-6 中空ねじり液状化試験に関するご質問（続き）

	(13)	細粒分を含んだ試料などで側面のろ紙を使用する場合の材質・形状をご記入ください。（複数回答可）	材質			
			形状			
			厚さ			
	(14)	落下高さのキャリブレーション結果を"一斉試験に関するご質問"にご記入ください。				
	(15)	一斉試験の各供試体作製時の落下高さ（cm）を"一斉試験に関するご質問"に記入してください。				
4。 載荷機構に関するご質問	(16)	繰返しねじり力載荷時(中)の軸荷重載荷方法をご記入ください。			ベロフラムシリンダー， サーボモーター	
	(17)	実施可能な繰返しねじり力載荷時(中)の軸変位の制御方法をご記入ください。			軸応力一定， 軸変位固定， 両方可	
	(18)	軸変位条件の指定が無い場合， 通常行う軸変位の制御方法をご記入ください。			軸応力一定， 軸変位固定， 両方可	
4。 載荷機構に関するご質問	(19)	実施可能な繰返し載荷（ねじり力）の制御方法をご記入ください。（複数回答可）			応力制御（周波数一定）， ひずみ制御（ひずみ速度一定）	
	(20)	ねじり力の載荷機構をご記入ください。			ラック， ピニオン， ワイヤ	
	(21)	ねじり力の動力源をご記入ください。			ベロフラムシリンダー， サーボモーター	
	(22)	供試体に対して， ねじり力を加える位置をご記入ください。			上部， 下部	
	(23)	セル室外に設置している計測機器をご記入ください。セル外に設置している場合の補正方法（ロードセルの場合は軸応力などを併せてご記入ください。（複数回答， 適宜行を増やしてご記入下さい）（複数回答可・適宜， 行を増やして下さい）	計測機器			ロードセル， トルク計， 回転角計
設置位置						任意
補正方法						
4。 載荷機構に関するご質問	(24)	ねじり力の付与を応力制御とする場合の載荷周波数をご記入ください。（単位：Hz）	実施可能な周波数の範囲			
			標準的に採用している周波数			
(25)	ねじり力の付与をひずみ制御とする場合のひずみ速度をご記入ください。（単位：mm/min）	実施可能なひずみ速度の範囲				
		標準的に採用しているひずみ速度				

表-6 中空ねじり液状化試験に関するご質問（続き）

	(26)	ねじり力の付与をひずみ制御とする場合の周波数をご記入ください。（単位：Hz）	実施可能な周波数の範囲 標準的に採用している周波数				
	(27)	実施可能な载荷波形の種類をご記入ください。			正弦波，三角波，不規則波		
5. 計測装置に関するご質問	(28)	軸ひずみの計測において，可能な計測方法をご記入ください。（複数回答可・適宜，行を増やしてください）			接触式変位計，GS，LDT		
	(29)	せん断ひずみの計測において，可能な計測方法をご記入ください。（複数回答可・適宜，行を増やしてください）			接触式変位計，GS，ポテンシオメータ，画像解析		
	(30)	各センサーについて	トルク計 （複数回答可・適宜，行を増やしてください）	メーカー・型番			
				容量			任意
最小分解能						任意	
設置位置						任意	
		荷重計 （複数回答可・適宜，行を増やしてください）	メーカー・型番				
			容量			任意	
			最小分解能			任意	
			設置位置			任意	
		回転角計 （複数回答可・適宜，行を増やしてください）	メーカー・型番				
			容量			任意	
			最小分解能			任意	
			設置位置			任意	
		軸変位計 （複数回答可・適宜，行を増やしてください）	メーカー・型番				
			個数				
			設置位置				
			容量			任意	
最小分解能				任意			
設置位置				任意			
間隙水圧計 or 高・中差圧計 （複数回答可・適宜，行を増やしてください）	メーカー・型番						
	容量			任意			
	最小分解能			任意			
	設置位置			任意			

表-6 中空ねじり液状化試験に関するご質問（続き）

		体積変化計（低差圧計等） （複数回答可・適宜，行を増やしてください）	メーカー・型番			
			容量			任意
			最小分解能			任意
			設置位置			任意
(31)		データ計測において，ノイズ対策・処理があればご記入ください。（複数回答可）			バッファアンプを使用，フェライトコアを使用	
(32)		データ計測時のサンプリング速度をご記入ください。（単位：Hz）				
(33)		（標準的に使用している）せん断応力の計算式を選択してください。回答例以外の計算式を使用している場合は，その式と用いている理由をご記入ください。  $\tau = \frac{3T}{2\pi(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)} - \Delta\tau_m,$ $\Delta\tau_m = \frac{2E_m t_m (r_{oc}^3 + r_{ic}^3)}{(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)(r_{oc} + r_{ic})} \gamma$ $\tau = \frac{3T}{2\pi(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)}$ ③ 不明				
(34)		（標準的に使用している）せん断ひずみの式を選択してください。回答例以外の計算式を使用している場合は，その式と用いている理由をご記入ください。  $\gamma = \frac{2\Delta\theta(r_{oc}^3 - r_{ic}^3)}{3H_c(r_{oc}^2 - r_{ic}^2)}$ $\gamma = \frac{\Delta\theta(r_{oc} + r_{ic})}{2H_c}$ ③ 不明				
(35)		一斉試験の各試験実施時の室温をご記入ください。。計測していない場合は，空欄で結構です。（単位：℃）				
(36)		試験室の温度をコントロールしているかどうか，コントロールしている場合はその方法についてご記入ください。計測していない場合は，空欄で結構です。				
(37)		試験室の湿度をコントロールしているかどうか，コントロールしている場合はその方法についてご記入ください。計測していない場合は，空欄で結構です。				
6. 計測制御中の補正に関するご質問	(38)	繰返し载荷中のせん断応力振幅の精度を保つために，行っている制御・工夫の有無と，その方法をご記入ください。	制御・工夫の有無			
			方法		機械的に制御している，载荷中に手動で調整している。	



表-6 中空ねじり液状化試験に関するご質問（続き）

(39)	(38)で「無」（工夫をしていない）と回答した方にお聞きします。			赤本記載の基準を満たしていないことが確認できた場合、その旨を備考などに記入し、その供試体での結果は参考データとして位置付けしている。		
	繰返し载荷中のせん断応力振幅が一定でない結果がえられた場合（赤本記載の基準を満たしていない場合）、試験値として報告する”繰返しせん断応力振幅”あるいは”繰返し応力振幅比”をどのように評価・報告しているかご記入ください。					
	繰返し载荷中、軸荷重を一定にするための工夫の有無と、その方法をご記入ください。	有無 方法				
(40)	繰返し载荷中、軸荷重を一定にするための工夫の有無と、その方法をご記入ください。					
(41)	メンブレンの厚みをご記入ください。					
(42)	メンブレンペネトレーションの影響が危惧されるような粗粒土を用いた中空ねじり液状化試験を実施した経験の有無をご記入ください。	有無				
	上記の質問で「有」の場合、補正の有無をご記入ください。また補正をしている場合、具体的な補正方法についてご記入ください。	有無				
		補正方法			貫入量の事前キャリブレーションを実施	
	メンブレン張力の補正の有無と補正方法についてご記入ください。	有無				
		補正方法			事前にキャリブレーションを実施、制御プログラム内に埋め込まれているため不明	
	(45)	キャップとペDESTALの端面材質をご記入ください。			ポーラスストーン、ポーラスメタル、アクリルプレート	
	(46)	端面ブレードの有無をご記入ください。			有、無	
(47)	(46)で「有」と回答した方にお聞きします。	数（枚）		6, 8		
	ブレードの数、厚さ、突出高さをご記入ください。（複数ある場合には読点で区切ってご記入ください）	厚さ(mm)			1, 2	
		突出高さ(mm)			3, 6	

表-6 中空ねじり液状化試験に関するご質問（続き）

	(48)	(46)で「無」と回答した方にお聞きます。 ブレードの設置以外で、繰返し载荷時の供試体と多孔板（端面）とのすべりを防止するための工夫をしている場合、その方法をご記入ください。（空欄であれば「工夫はしていない」として承ります）		端面フラットで摩擦のみ、ブレードの代わりに溝を加工など		
7。飽和に関するご質問	(49)	供試体の飽和方法をご記入ください。（複数回答可）		二重負圧，CO <sub>2</sub> ，脱気水，全て使用している場合の順序や方法		
	(50)	指定が無い場合の背圧の設定値をご記入ください。				
	(51)	一斉試験で扱ったようなきれいな砂（珪砂，豊浦砂など）を対象とした場合の通水飽和の所要時間，背圧増加後から圧密開始までの放置時間をご記入ください。	CO <sub>2</sub> 通気時間（単位：分）			
			脱気水通水時間（単位：分）			
背圧放置時間（単位：分）						
8。拘束圧・圧密に関するご質問	(52)	圧密時に供試体に作用させることができる応力状態をご記入ください。		等方，異方，両方可		
	(53)	不攪乱試料の圧密時にはどのような応力状態とするかをご記入ください。		等方，異方，場合による		
	(54)	脱気，通水時の初期有効拘束圧をご記入ください。（単位：kPa）				
	(55)	非排水繰返しせん断時の有効拘束圧設定の計算方法をご記入ください。		上載圧，平均主応力（ $K=0.5$ もしくは，現地測定結果など）		
	(56)	初期有効拘束圧（供試体自立時の負圧相当の拘束圧）から圧密時の有効拘束圧まで拘束圧を増加させていく際の载荷方法を下記から選択しご記入ください。 ①排水条件下で漸増载荷（ここでは，载荷速度を設定し機械的に拘束圧を増加させていく方法を指す） ②排水条件下で段階载荷（ここでは，一ステップあたり増加させる拘束圧を設定し，試験者の物理的操作によって拘束圧を増加させていく方法を指す） ③非排水条件下で圧密時の有効拘束圧まで一気に载荷 ④その他（回答欄に方法をご記入ください）				
	(57)	(56)で①漸増载荷と回答した方にお聞きます。その際の载荷速度をご記入ください。（単位：kPa/min）				
	(58)	(56)で②段階载荷と回答された方にお聞きます。その際の一ステップごと载荷拘束圧をご記入ください。（単位：kPa）				
	(59)	圧密終了の判断基準をご記入ください。		3t 法，非排水状態時にした際に間隙水圧が発生しなくなるまで		

表-6 中空ねじり液状化試験に関するご質問（続き）

9。繰返しせん断に関するご質問	(60)	供試体に対して載荷可能な最大角度をご記入ください。	最大回転角度（単位：度）			
		また、その時の最大両振幅せん断ひずみも一緒にご記入ください。	最大せん断ひずみ（単位：%）			
	(61)	非排水繰返しせん断試験（液状化試験）終了の判断基準をご記入ください。			両振幅せん断ひずみ7.5%，15%	
	(62)	中空ねじり試験装置を用いて非排水繰返しせん断試験後に実施したことがある追加検討事項をご記入ください。（複数回答可）			動的変形，弾性波計測，再圧密，単調載荷，再液状化	
	(63)	(62)で「再圧密」と回答した方にお聞きします。			（空欄：原点に戻さない） せん断ひずみ，せん断応力	
		非排水繰返しせん断試験後に再圧密を実施する場合，せん断ひずみとせん断応力のどちらか原点に戻すかご記入ください。（原点に戻さない場合空欄としてください）				
	(64)	(62)で「単調載荷」と回答した方にお聞きします。				
		非排水繰返しせん断試験後に単調載荷を実施する場合，単調載荷を打ち切るせん断ひずみの数値をご記入ください。（単位：%）				
	(65)	中空ねじり液状化試験法の基準化は必要かどうか，ご記入ください。	必要性		必要，不必要	
	(66)		理由：必要と回答した方へのご質問			