

2023年10月 改訂

液状化に係わる被害のメカニズム と名称を考える委員会 成果報告書

2023年3月

地盤工学会・関東支部
液状化に係わる被害のメカニズムと名称を考える委員会

目 次

1	はじめに	1
2	液状化のメカニズム	2
2.1	限界間隙比, 限界 N 値	2
2.2	過剰間隙水圧が先か, 有効応力が先か	2
2.3	液状化した砂は固体か液体か	4
2.4	液状化に伴う流動	8
2.5	そのほかの要因	12
2.5.1	被圧水により噴水が発生したのではないかと考えられる事例	12
2.5.2	水膜	18
2.5.3	構造物直下の地盤	20
2.5.4	二次液状化	21
2.5.5	再液状化	23
2.5.6	深層地下水の噴き上げにより噴水が発生したのではないかと考えられる事例	27
2.5.7	液状化した地盤の揺動現象	30
2.5.8	液状化後の沈下	34
3	液状化の定義	42
3.1	液状化発生の判定	42
3.2	液状化強度の補正	45
3.3	液状化を説明する文章	47
4	液状化に関連する用語	50
4.1	北米の研究	50
4.2	Liquefaction という用語の履歴	52
4.3	過去の委員会活動で議論された名称	53
4.3.1	液状化メカニズム・予測法と設計法に関する研究委員会 ¹⁾	53
4.3.2	地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関する研究委員会	54
4.3.3	レベル2地震動による液状化研究小委員会	54
4.4	名称に関するまとめ	56
4.4.1	各種の用語とメカニズム	56
4.4.2	用語と簡単な説明	58
5	文献に示される用語と被害	61
5.1	図書・報告書など	61
5.2	地盤工学会年次大会	70
5.2.1	液状化が生じるメカニズム	70
5.2.2	液状化による被害事例	72
5.3	土木学会地震工学研究発表会	77
5.3.1	統計結果	77
5.3.2	主な用語の使われ方	80

委員会名簿

会務	氏名	所属	WG
委員長	吉田 望	関東学院大学	
顧問	石原 研而	中央大学	
幹事	石川 敬祐	東京電機大学	
幹事	平松 登史樹	基礎地盤コンサルタント（株）	
委員	加藤 一紀	(株) 大林組	①
委員	石川 明	清水建設(株)	②
委員	笛岡 里衣	鹿島建設(株)	②
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	②
委員	沢津橋 雅裕	(一財) 電力中央研究所	①
委員	安達 夏紀	(株) 竹中工務店	①
委員	清田 隆	東京大学	②
委員	三上 武子	基礎地盤コンサルタント(株)	
委員	安田 進	東京電機大学	
委員	菊本 統	横浜国立大学	
委員	原田 健二	(株) 不動テトラ	①
委員	飛田 善雄	東北学院大学	
委員	澤田 純男	京都大学	
委員	加藤 謙吾	佐藤工業(株)	②
オブザーバー	青柳 悠大	国立研究開発法人 土木研究所	

WG①：文献調査 WG, 地盤工学研究発表会

WG②：文献調査 WG : 土木学会地震工学研究発表会

執筆担当

章・節・項	担当者
1	吉田
2.1～2.4	吉田
2.5.1	安田, 石川(敬)
2.5.2～2.5.4	吉田
2.5.5	石川(敬)
2.5.6, 2.5.7	安田
2.5.8	原田
3	吉田
4	吉田, 飛田
5.1	吉田
5.2	沢津橋, 加藤(一), 安達, 原田
5.3	加藤(謙), 石川(明), 笛岡, 大矢, 清田

1 はじめに

液状化に関する研究がはじまったのは、1964年に日米で発生した、新潟地震とアラスカ地震であったことは地盤工学の専門家の間ではよく知られている。しかし、1983年日本海中部地震の後にNHKで放映された「日本海中部地震の謎」という番組では、「この現象を専門家は地盤の液状化と呼びます」と説明している様に、まだ一般用語ではなかった。その後たとえば政界液状化¹⁾などマスコミで一般用語としても使われるようになり、「液状化」という用語は一般社会でも利用されるようになったようである。

新潟地震やアラスカ地震後の液状化に関する理解はかなり単純で、地盤（土）が液体状に振る舞うので、せん断抵抗や支持力がなくなるというものであった。しかし、研究が進むにつれ、港湾岸壁の被害、緩斜面の流動など多くの多くの現象が液状化と関係づけられるようになった。これに対応して新しい用語が使われることもある。ここで問題なのは、同じ用語が複数の意味を持つ可能性があることである。この場合、実際とは異なる情報が伝達される可能性がある。技術者の使う用語は、誤解がないように伝わる必要があり、そのために、用語を定義し、定義に基づいて利用することは重要である。

液状化にかかわる用語に関しては、筆者の知る範囲では3つの委員会でまとめられている。地盤工学会では、「液状化メカニズム・予測法と設計法に関する研究委員会」²⁾、「地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関する研究委員会」³⁾、さらに土木学会「レベル2地震動による液状化研究小委員会」⁴⁾で用語のまとめが行われている。しかし、最後の取りまとめから20年以上が経過しており、その間に認識された新しい現象もある。

ある現象を表現する名称は、当然、メカニズムと関係している。従って、本委員会でも、メカニズムも明らかにするように心がけた。当然、研究が進んでくれば、これまで同じメカニズムと考えられていたものは別のメカニズムと考えられることもある。その場合、これらに更に別の名前をつけるか、というとそこにも問題がある。メカニズムの細分化と利用すべき用語が増えることは、専門家以外の知的負担を増加させることになる。

前述の「地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関する研究委員会」で用語を整理する際、石原、吉見、Finnなどという液状化の研究で指導的役割を果たしてきた先達に新しい名前を作ることについて意見を伺ったことがある。驚いたことに、新しい名前をつけるな、必要ならその論文で定義して使えば良いというのが全員の共通した意見であった。上記の事情を考えると、これが一番良さそうな方法であろうと考えられる。そこで、本委員会では、メカニズムに関してはなるべく多くのケースを、一方用語については現在使われているものを調査し、まとめることとした。

液状化に係わる被害のメカニズムと名称を考える委員会

参考文献

- 1) 衆院選に問う(上)政界液状化 見極める目を、日本経済新聞,
<https://www.nikkei.com/article/DGKKZO21525660W7A920C1MM8000/> [2023.01]
- 2) 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、1999
- 3) 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集、1998
- 4) 土木学会地震工学委員会：レベル2地震動による液状化、レベル2地震動による液状化研究小委員会活動報告書、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、2003

2 液状化のメカニズム

はじめにでも述べた様に、液状化現象は当初は土が液体状になるという事であったように考えられる。しかし、以下に示すように、この単純なとらえ方であっても、そのメカニズムについては共通の認識にはなっていない様に考えられる。以下では、歴史的な経緯も含め、いくつかのメカニズムを示す。

2.1 限界間隙比、限界 N 値

液状化研究の先駆者的一である Seed と Lee¹⁾によると、液状化が発生する条件を最初に示したのは、Casagrande²⁾である。彼は、Critical void ratio (限界間隙比ⁱ) にある砂は排水せん断に対して体積変化しないことを示した。限界間隙比より間隙比が大きい砂は、せん断力の作用下で体積が減少するが、体積変化が起きない非排水条件下では有効応力が減少し、液状化が発生するわけである。その後、限界間隙比は拘束圧の関数である事がわかった。すなわち、拘束圧が大きくなると限界間隙比は小さくなり、液状化する可能性がある。

一方、日本では限界 N 値が求められた。小泉³⁾は地震前後の N 値を比較し変わっていないところが限界間隙比の状態にあるとして、これを限界 N 値と名付けた。限界 N 値はその後多くの研究者によって求められているが、研究者により値が異なっている（たとえば、中川⁴⁾参照）。

ただし、これらの方には地震による外力の大きさが考慮されていない。その意味で、液状化の可能性を示しているだけで、液状化発生予測に使えるわけではない。また、繰返し載荷時の挙動に関しては触れられていない。すなわち、十分な実証に基づくものではなく、わかりやすさを重視した概念的な提案であると判断できる。

2.2 過剰間隙水圧が先か、有効応力が先か

現象としては過剰間隙水圧の上昇と有効応力の減少は同時に起こっているが、液状化のメカニズムを考える上では、過剰間隙水圧が先か、有効応力の減少が先かの議論は重要である。Seed & Lee は、次の様に述べている¹⁾。

The cause of liquefaction of sands has been understood, in a qualitative way, for many years. If a saturated sand is subjected to ground vibrations, it tends to compact and decrease in volume; if drainage is unable to occur, the tendency to decrease in volume results in an increase in pore-water pressure, and if the pore-water pressure builds to the point at which it is equal to the overburden pressure, the effective stress becomes zero, the sand loses its strength completely, and it develops a liquefied state. (砂の液状化の原因は長年にわたり定性的にのみ理解されてきた。飽和した砂が地盤の振動を受けると、圧縮されて体積が減少する傾向があり、排水ができないと、体積減少の傾向によって間隙水圧が上昇し、間隙水圧が上載圧と等しくなると、有効応力がゼロになり、砂の強度が完全に失われて液状化するのである)。すなわち、先に過剰間隙水圧が上昇し、その結果、有効応力が減少するというのがメカニズムである。

日本でもこの考えが受け入れられてきたと考えられる。たとえば、先に挙げた小泉³⁾はその論文中で次の様に書いている。

新潟市では最近の地盤沈下の影響もあって、海岸砂丘の地域を除けば地下水位は高く、地表から1~2m のところに存在する。限界間隙比よりもゆるい状態の砂が水で飽和されている場合には、振動作用をうけると間隙水圧が狭められようとし、間隙水圧に存在する水の圧力が上昇する。間隙水圧の上昇によって粒子間に作用している有効応力が減少するから摩擦抵抗は著しく減少する。一般に、土、とくに砂質土が振動作用を受けるとせん断抵抗が減少するのである⁵⁾が、飽和した砂が比較的小さな加速度で流動化するのは上述のようなせん断変形に伴う余剰間隙水圧の

ⁱ 限界間隙比と呼ばれることがある。

上昇に基づくものと考えられる⁶

筆者の知る限り、これに対して異なるメカニズムを唱えたのは三笠である。前記の小泉の論文の後に、大崎の司会による討論が口述筆記されている。参加者は、小泉、三笠、山村、谷本、箭内、荒木である。この中で三笠は小泉のメカニズムに対して次の様に述べている。

「13ページの左欄の中ほどに『前段の記述』という表現がございます。テルツアギ・ペック (Terzaghi-Peck) の本にも同じような表現があり、一般に行なわれている説明のしかたかと思います。しかし私は、この表現にはあいまいなところがある、そのままでは少しまずいということを機会あるごとにお話しているのです。同ゲキ水圧の上昇が原因であって、それによって有効応力が減少し、さらにそれによってせん断抵抗が減るという論法は、ぜんぜん逆だと私は思うのです。どうせ一緒に起こるのだからどちらが先でもいいじゃないか、つまらないことを議論するものだとお思いかも知れませんが、考え方の順序が逆になりますと、いろいろな混乱が起ころまいりますので、もう一度申し上げます。

初めのところに「振動作用を受けると間ゲキが狭められようとして……」とありますが、ここですでに土の骨組みに何か変化が起きている、あるいは起ころうとしている、という意味が含まれている。それによって間ゲキ水圧が上昇するという順序になっております。その後で間ゲキ水圧が上昇して、そのために有効応力が減少したと書かれているのは逆戻りではないかと思います。つまり、ここでとられている解釈は、飽和したゆるい砂がせん断を受けると、限界間ゲキ比よりゆるいため、ダイレイタンシーが負であって、収縮しようとする。のために間ゲキ水圧が上昇することだと思うのです。それでしたら、土の骨組みがせん断を受けて構造が変わり、有効応力が減る、そのため、釣合条件をみたすべく上載荷重のうち有効応力でさえ切れないものが間ゲキ水圧にかたがわりし、その結果として間ゲキ水圧が上昇することになるわけで、間ゲキ水圧が先であるという表現は正しくないと思います。もし間ゲキ水圧がすべての原因であるとしますと、骨組みのことは考えず、間ゲキ水圧の上昇の原因として何かほかのものを探さなければならぬはずで、こういった限界間ゲキ比の概念では説明できることになると思います。以上、私の意見を申しあげたわけあります」

これに対して、現在の考え方からみると、次の様に考えるのが妥当であろう。液状化のメカニズムとして、図2.1の様な表現が非常に多くのテキストなどで使われている。振動（繰返しせん断応力）を受けると、(a)の振動前の状態から、排水条件（乾燥）下では(b)の様に体積変化が起こるが、非排水条件下では体積変化が許されないため、(c)の様に土粒子が間隙水の中に浮遊し、せん断抵抗が失われる。これが液状化のメカニズムである。振動後充分な時間が経過すれば、間隙水が領域外に流出するため、(d)の様に地盤が沈下する。

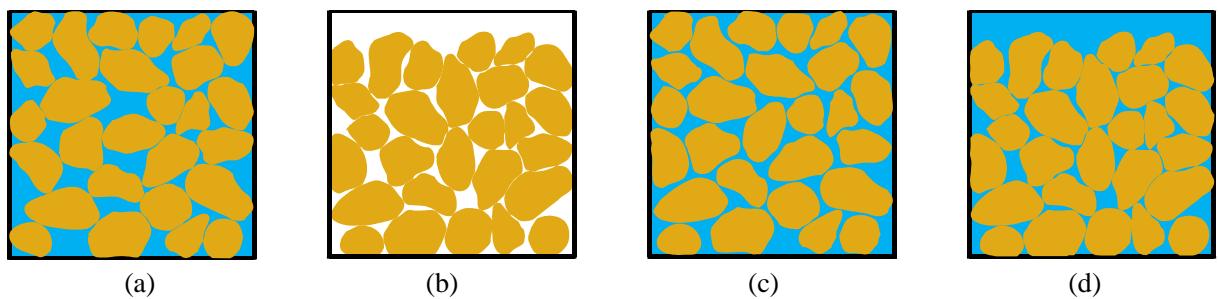


図2.1 液状化のメカニズム⁷⁾

ここで、土骨格のかみ合わせが外れ、土粒子が間隙水の中に浮いていることが、三笠の言っている「土の骨組みがせん断を受けて構造が変わり、有効応力が減る」というのが実際に起こっている現象であろう。すなわち、Seed らの議論は、ダイレイタンシーにより体積が減少しようとする、というところから始まっているが、その前に、粒子のかみ合わせが外れ、間隙に落ち

ようとする、という現象があるわけで、これが粒子の接点力の減少、すなわち、有効応力の減少を引き起こし、一方、外力（上載圧）は変わらないので、有効応力が減少した分、間隙水圧が受け持ち、その結果、過剰間隙水圧が上昇するというのが、実際に起こっているメカニズムと考えられる。

なお、この考えは、砂を粒状体と考えなければ出てこないもので、連続体としての発想では出てこない。砂を粒状体として考えるような研究は1970年代に始まっている。したがって、当初、過剰間隙水圧が増加するのが先と考えたのも仕方なかったのかもしれない。

2.3 液状化した砂は固体か液体か

液状化は、元々、土が液体状になるという意味であろう。しかし、液状化前は明らかに固体である。では、どのような条件で固体として存在し、どのような条件で液体としてふるまうのであろうか。液状化時の挙動を解析するためには重要な事項である。ここでは、いくつかの実験などから、その挙動を検討する。

(1) 固体としての挙動

図2.2は液状化強度試験と同じ試験で、液状化した後もさらに載荷を続けた後に非排水条件下で単調にひずみを増加させたときの応力ーひずみ関係⁸⁾である。図の F_L は液状化に対する抵抗率で、1の時ちょうど液状化したことを表し、これより数字が小さくなるほど液状化してからの載荷量（繰返し回数）が大きいことを表している。液状化した材料では、ひずみが小さい時には剛性はほとんど0であるが、ひずみが大きくなると剛性が回復している。このとき過剰間隙水圧も小さくなっていることから、液状化した砂であっても、ひずみが大きくなると正のダイレイタンシーが起きたことがわかる。このような液状化後の挙動は液状化研究の初期からの興味深い事項であったようで、Seed & Lee によっても行われ¹⁾、ひずみが20%程度になると正のダイレイタンシーのために剛性が回復することが報告されているが、図2.2からわかるようにこのひずみは液状化以後の載荷量に依存する。

図2.2(a)では初期のせん断応力はほとんど0であるが、(b)のように縦軸を200倍に拡大すると有限の剛性があることが分かる。これは、液状化して骨格構造が形成されていないといつても、わずかではあるがせん断応力を伝える機構が残っていることに相当している。このような挙動を見ると、液状化しても砂は固体として挙動しているように見える。

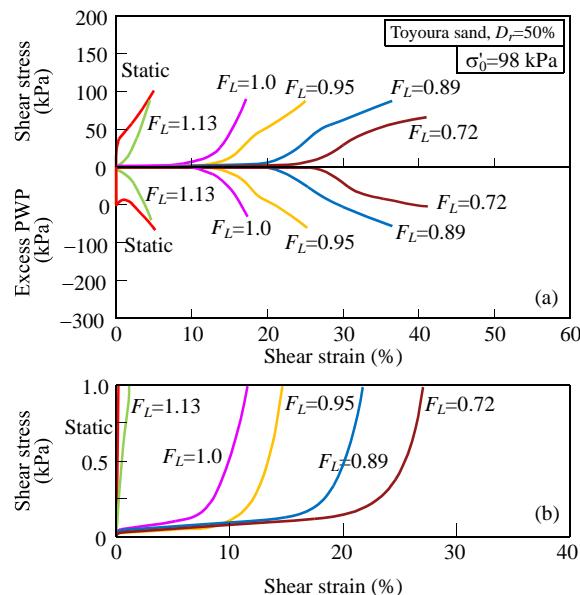


図2.2 液状化後も繰返し載荷を受け、その後に単調にひずみを増加した時の応力ーひずみ関係⁸⁾

(2) 液体としての挙動

図2.3は液状化した地盤でよく見られる噴砂であり、砂を含む水が地表に湧き上がってきた後である。これを見ると、液体として挙動しているように見える。図2.4は傾斜した地盤中においてた杭の実験⁹⁾である。液状化すると変位が発生し地盤が平らになったところで止まるが、この間杭に作用する力は一旦大きくなりその後小さくなる。すなわち、杭に作用する力は変位に依存するのではなく、速度に依存しているように見える。せん断抵抗が速度に依存する物体は、流体としてとらえられるので、この挙動でも、液状化した土は液体として挙動しているようである。

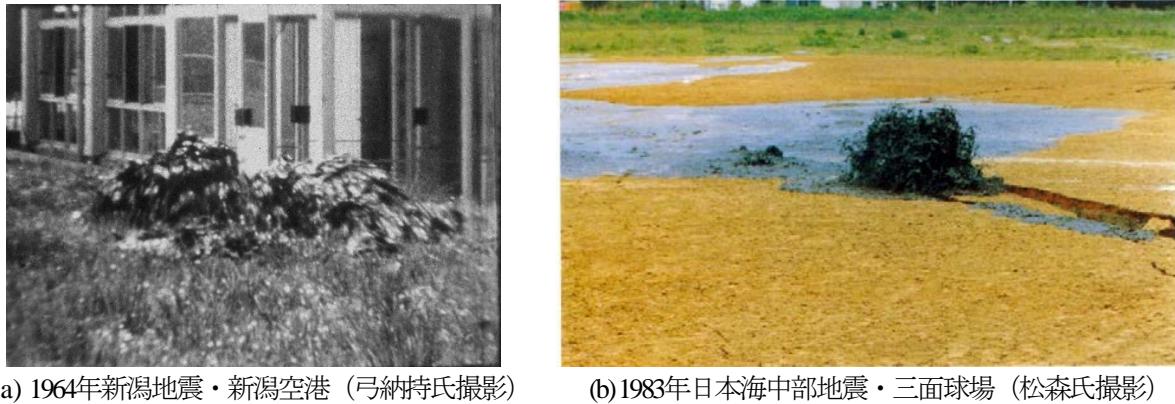


図2.3 噴砂の例

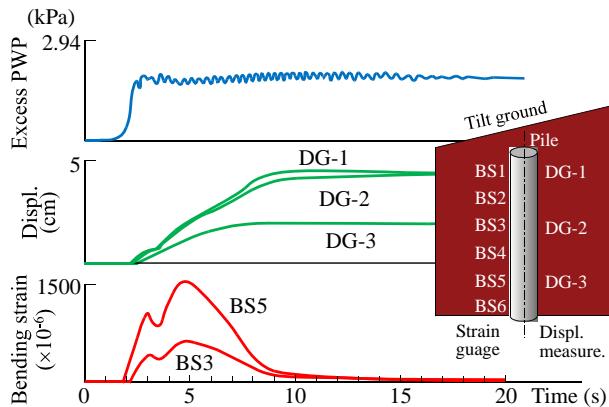


図2.4 傾斜地盤中の杭の実験（濱田・大友ら⁹⁾に加筆）

(3) 駆動力と液体挙動

液体状としての挙動と固体としての挙動の違いは、次のように考えることで理解できる¹⁰⁾。液状化したとはいっても、粒子間に働いている力は完全に0とはいはず、非常に小さい力が作用している。しかし、非常に弱い力であるから、土粒子で構成される骨格構造は不安定で、少しでも外力が加わると壊れてしまう。ここで、外力が少しであれば、構造の乱れも小さく、少し変形すればまた新しい骨格ができる。外乱が大きいときには骨格の形成、破壊の過程が連続して発生し、それを全体として見ると、見かけは粘性係数の非常に大きい流体のように挙動すると考えられる。ここで骨格を壊すような力を駆動力（driving force）と呼ぶことにする。

つまり、図2.1(c)で示したように、粒子が間隙水に浮き上がったような状態というわけではなく、図2.1(a)の形状に近いが、接触力がほとんど0になっている状態というわけである。

それではどのような力が駆動力になるのであろうか。図2.5は傾斜した地盤に関する加振実験¹¹⁾である。載荷加振後5秒程度で過剰間隙水圧比が1になり、それ以後は液状化状態が継続している。しかし、液状化しているにもかかわらず、小さい振動があるときは変位が進み、振動を止めると

変位も止まっている。すなわち、この例では小さい振動が駆動力として作用したことが分かる。また、加振の加速度が大きいほど変位の増加度が大きい事から、流体として挙動する際の粘性係数は加振力（＝駆動力）の大きさにも依存していることが分かる。

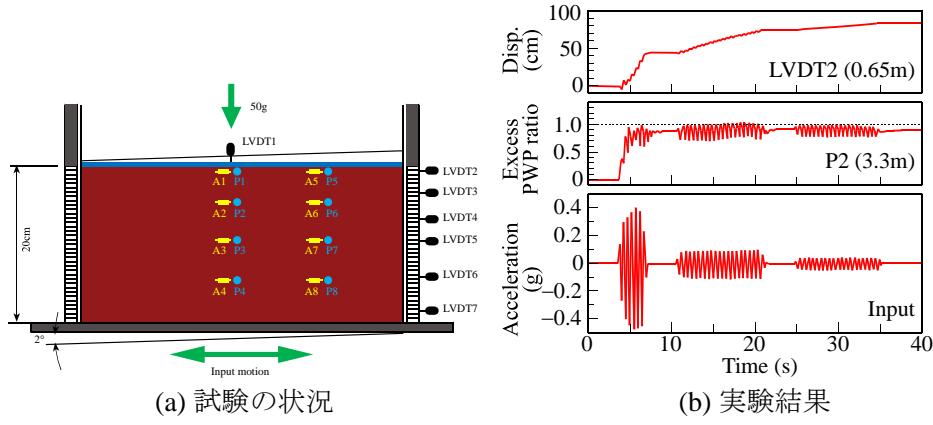


図2.5 傾斜した地盤の加振実験¹¹⁾

液体状であり続けるための駆動力の存在を想定すると、それまでに行われてきた振動台実験の疑問がかなり解消する。まず、振動台で行われた実験では加振を止めると流動も止まってしまったが、これは駆動力がなくなったこと、さらに振動台では液状化層厚も薄いので過剰間隙水圧の消散が早く起こり、摩擦抵抗が回復したことが原因であろう。また、液体としての粘性係数を求めるような実験では、本項の後半に示すように実験ごとに得られた粘性係数に大きな差があった。液体の状態を維持するためには加振を続ける必要があり、その加振力が違うためであると考えると納得できる。図2.4の実験では地表がほぼ水平になるまで（水平変位が止まるまで）加振を続けたので、流動中は液体として挙動したと考えられる。

駆動力としては、ほかに過剰間隙水圧が上方に消散する過程で発生する上向き浸透流が考えられる。上向き浸透流による動水勾配 i は次の式で表される。

$$i = \frac{dh}{dz} = \frac{dp}{\gamma_w dz} \quad (2.1)$$

ここで、 h は全水頭（地盤工学では圧力水頭と位置水頭の和として近似する）、 p は過剰間隙水圧、 γ_w は水の単位体積重量である。この動水勾配による透水力（浸透力） f は次のようにある。

$$f = i\gamma_w = \frac{dp}{dz} \quad (2.2)$$

液状化した地盤から過剰間隙水圧が消散する際には、液状化層上部の過剰間隙水圧が上昇し、有効応力は0になる事がある。この時には、 p は初期有効上載圧と等しいので、透水力は次式となる。

$$f = \frac{dp}{dz} = \gamma'_t - \gamma_w \quad (2.3)$$

ここで、 γ'_t は土の（湿潤）単位体積重量である。ここ透水力が骨格の抵抗力より大きければ、土は液体として挙動する。この状態は、液状化層厚が厚いほど長く続く。また、シルトが多い砂では透水係数が小さくなり、過剰間隙水圧の消散により時間がかかるので、はやり液体として挙動する時間が長くなる。

また、図2.3のような噴砂は、亀裂のある部分とない部分とで上載圧の差が発生し、これが駆動力として作用した結果を考えることもできよう。これは、メカニズムとしてはクイックサンドによるボイリングと同じ現象である。ただし、亀裂の発生などを予測することは現状の技術では困難であることから、これを解析するのは現状では不可能に近い。場所の予測はできないが、仮

定すれば消散に要する時間を計算することは可能であろう¹²⁾。

元に戻って、図2.2に示したような準静的な実験では振動もしていないし、動水勾配もほとんどない。すなわち、駆動力が作用しないために、固体として挙動したと考えられる。図2.2で、もう一つ特徴的なことは、ひずみが大きくなると剛性が急激に回復するということである。つまり、液状化したからといって変形が無限に続くわけではない。このように限界のひずみより大きくなれば剛性が回復するという状況は液体として挙動すると考えても変わらない。図2.2で、もう一つ重要なことは、剛性が回復するひずみの値は、液状化したあとさらに振動を受けた量に依存しており、たくさんの載荷を受けた砂ほど低剛性の領域が大きくなることである。駆動力も液状化後の載荷量に加えるべきということは、これまでの説明から理解できよう。

液状化現象は地盤の破壊現象とみなされてきたが、このような現象を見ると、液状化の発生とは応力-ひずみ関係が連続的に変化していく過渡的な状態の一瞬であるということができる。ただし、一方では、液状化の発生前後を境として応力-ひずみ関係が急激に変化することも確かである。その意味でこの状態を安定問題に対する設計値と考えることも意味がある。

(4) 液体挙動時の粘性係数

液状化地盤を液体と考えると、粘性係数の値が重要になる。この値は、液状化地盤中で球状などの物体を移動させ、その抵抗力から求めることができる。たとえば、佐藤・濱田ら¹³⁾は液状化地盤中で球とパイプを移動させ、粘性係数の値を求め、液状化の程度が激しくなる (F_L が小さくなる) と、粘性係数の値が小さくなることを示している。また、大友¹⁴⁾は地表面が傾斜した地盤に杭を設置して粘性係数を求めている。図2.6に実験例を示す。ちなみに、水の粘性係数は温度にもよるがおよそ 1×10^{-6} kPa·s、マヨネーズが 8×10^{-3} kPa·s であるので、液体状の砂の粘性係数はずいぶん粘度が大きい。

杭のようなものを液状化地盤中で移動させると、前面では大きなせん断ひずみが発生し、ダイレイタンシーにより抵抗領域が形成される可能性がある。粘性係数が大きく計測されるのはこのような要因が影響しているのかもしれない。

濱田・若松¹⁵⁾は振動台実験の結果をふまえ、粘性係数がひずみ速度の増加とともに減少する、擬塑性体の性質を持っているとし、見かけの粘性係数が液状化層厚の $3/2$ 乗に比例するとした。これに基づき、地表面変位を液状化層厚、粘性係数、密度、地表面勾配および流動の継続時間の関数として表し、能代市の事例に適用し、流動の継続時間、実験値の延長、秋田港の記録から3つの方法で求めた流動時間に基づいてそれぞれのケースの粘性係数を図2.7のように示した。ただし、この図は地盤材料が実験値と同じとしたケースで、実地盤では粒度組成や締固めの度合いが異なっているので、図の粘性係数は実地盤のものではないとしている。また、流動の継続時間を地震動の継続時間（最長で95秒）としているが、流動は地震の振動が終わった後でも続いていることが考えられるが、その点には触れられていない。

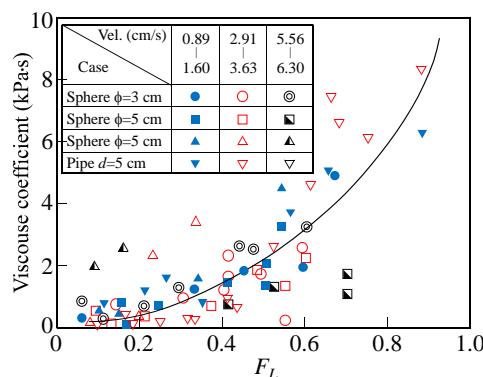


図2.6 粘性係数の実験値の例¹⁶⁾

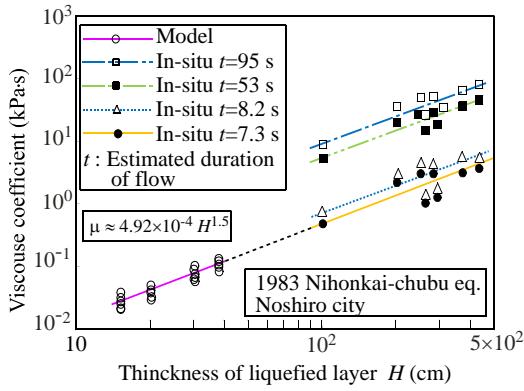


図2.7 層厚依存の粘性係数と実地盤の対応¹⁵⁾

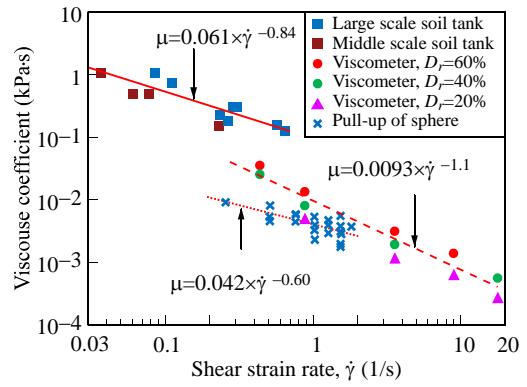


図2.8 ビンガム流体としての粘性係数¹⁵⁾

その後、液状化した砂が液体のように挙動するときには、ひずみ速度によって粘性係数が変化するビンガム（Bingham）流体として挙動することが分かってきた。図2.8はその一例である。国松・神宮司ら¹⁷⁾は、既往の研究で求められた粘性係数の値は0.3～8183Pa·sの間にある事を示し、また、既往の計測方法とは異なる粘度計を用いてレオロジー特性を測定し、液状化した砂地盤の流動特性は上向き浸透流の流速によって大きく異なり、流速が早くなるにつれて擬塑性流体的挙動からニュートン流体的挙動を示すことを示した。

これらの結果を概観すると、液状化した土の粘性係数は一義的に決められるものではなく、さまざまな要因、たとえば加振の強さ、上向き浸透流（したがって流動の継続時間）などに左右されることから、流体としての解析を行うのであれば、これらにある程度の目処をつける必要がある。

2.4 液状化に伴う流動

この現象に対する研究は、日本では1983年日本海中部地震の後、能代市前山で発生した大きな水平変位が確認されたことが契機となった（図2.9）。地震前後の航空写真よりその間の変位を求める、数mに及ぶ変位が確認された¹⁸⁾¹⁹⁾。その後、多くの過去の地震について同じ手法が適用され、普遍的な現象であることが分かった。また、その後の地震についても調査が行われている。ただ、筆者の知る範囲では、1995年兵庫県南部地震を最後としてこの様な調査が行われていない。

一方、北米での契機は、1971年サンフェルナンド地震によるLower San Fernando damの被害であろう（図2.10）。

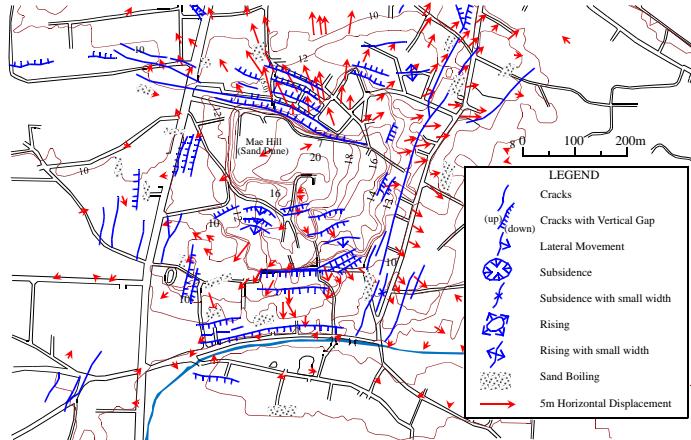


図2.9 能代市前山の被害²⁰⁾

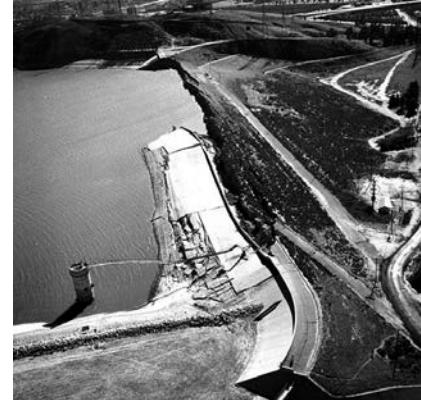


図2.10 Lower San Fernando ダムの被害²¹⁾

これら、契機になった被害が影響しているのか、日米では流動に関する考え方があるようである。すなわち、北米では残留強度が着目され、日本では応力ーひずみ関係が着目されているように考えられる。

(1) 残留強度による方法

Seed・Seed²²⁾は、Lower San Fernando ダムの被害に関して、図2.11のイメージを示した。図で、実線は土に作用するせん断応力、破線は土の強度である。地震前には土の強度は作用せん断応力より大きいが、地震により強度が低下してくる。そして、せん断強度が残留強度より低下すると流動が起り、この後地面が平らになると地盤に作用しているせん断応力も減少し、最終的に地盤の強度と作用力が同じになるところで流動が止まるとしている。図2.12は Seed・Harder²³⁾による残留強度の逆算値である。この図のオリジナルは Seed²⁴⁾によるものであるが、範囲を表すバーが付いているのが新しい。17地点の結果が示されているが、そのうち9地点がダムである。また日本のデータとして川岸町アパート、羽越線盛土（1964年新潟地震）、甲田村鉄道盛土（1968年十勝沖地震）、持越鉱滓ダム（1978年伊豆大島地震）が入っている。このうち、甲田村は、鉄道盛土と示されているが、オリジナルの出展²⁵⁾を見ると、Koda Mura, Tenmabayashi, Pref. Road とあるので、道路盛土（県道8号線、現在の七戸町甲田地区）であるⁱⁱ。

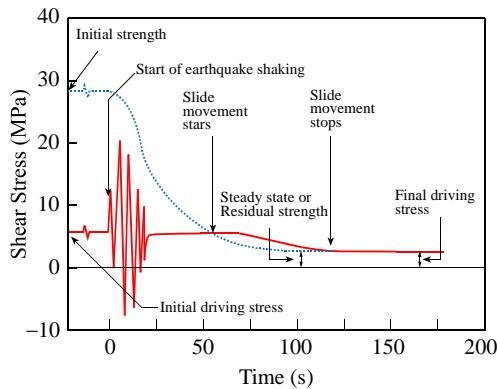


図2.11 液状化後の変位発生のメカニズム²²⁾

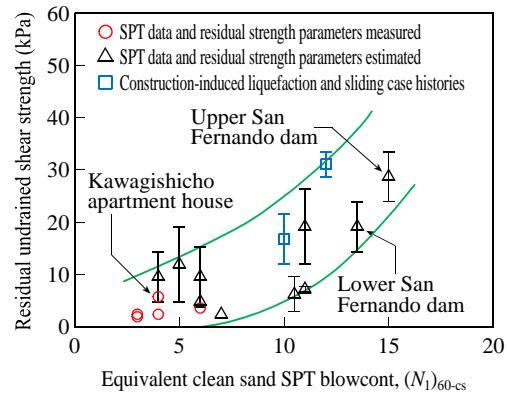


図2.12 残留強度²³⁾

(2) ほぼ水平地盤における流動

一方、日本では勾配が1/100程度と非常に勾配が小さい流動も発生していることが知られている。たとえば、図2.13は1964年新潟地震の際、7m以上の水平変位が発生した新潟市海老ヶ瀬地区である。図(b)の断面図に縮尺を示したように、水平距離400mに対して地表の不陸は2m以下で、現地を歩いてみると、ほとんど水平と感じるところである。

そこで、たとえば勾配を1/100、地下水位が地表とすると、GL-5mの深さで作用している初期せん断応力は土の湿潤単位体積重量を20kN/m³として $10 \times 5 \times 0.01 = 0.5\text{ kPa}$ である。この値は図2.12に比べればずいぶん小さい。すなわち、この様な変状は残留強度の考えでは求められない。

(3) 安定問題と変形問題

液状化後の流動を含む挙動に関しては、これまで図2.14のようなイメージで議論されることが多かった。すなわち、応力ーひずみ関係で見ると液状化によりせん断応力は低下するものの、ある程度ひずみが発生すると残留強度を維持するものと再び強度が上昇するものがあり、前者では無限のひずみ、すなわち流動が発生し、後者では流動量が限定的である。図2.14(b)ではさらに詳

ⁱⁱ 七戸町役場で確認した

しく、液状化しても強度が低下しない例を示しているが、意図は同じである。このイメージは図2.11、図2.12で示したものと整合している。

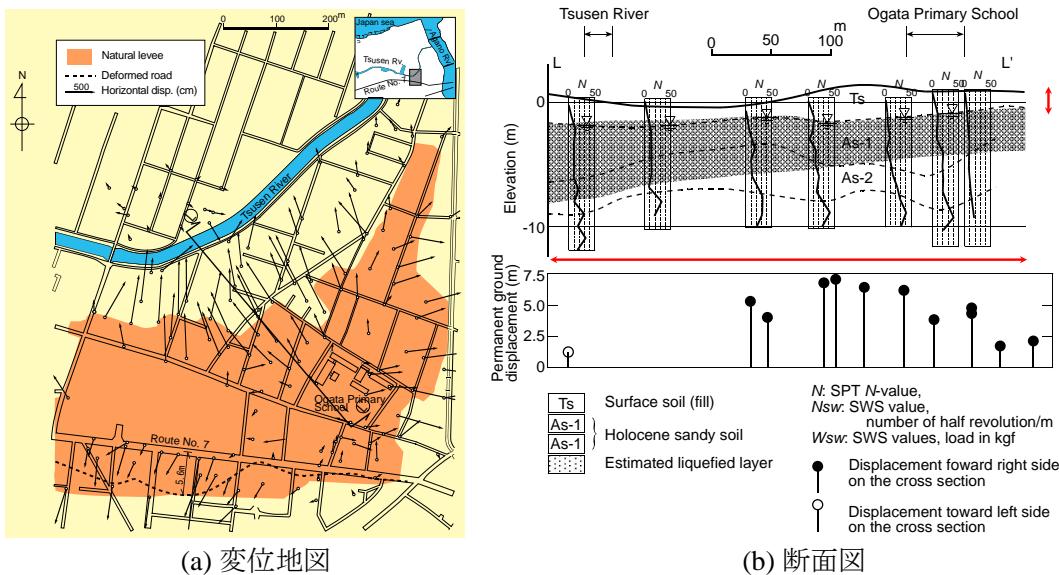


図2.13 1964年新潟地震の際の海老ヶ瀬地区の変位（文献20を修正）

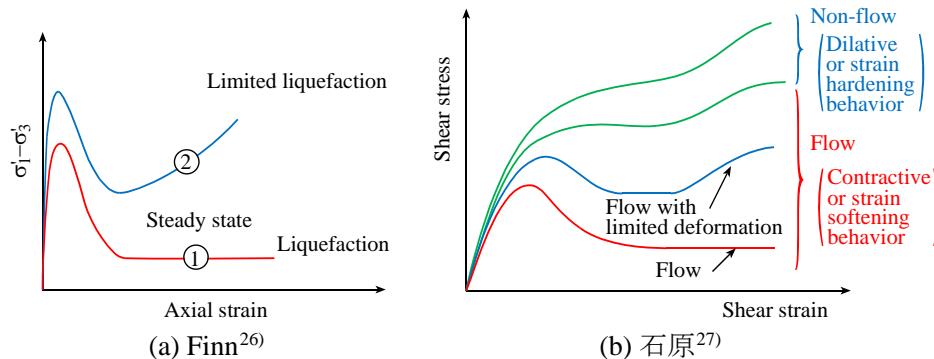


図2.14 液状化後の挙動のイメージ

これらの図のイメージは単調載荷時の土の挙動に基づいているように思われる。そこで、まず単調載荷時の挙動を見てみる。

図2.15は緩い豊浦砂に対する非排水載荷の例である。図2.15(a)の応力-ひずみ関係には、図2.14(b)に見られるような限定的流動型の応力-ひずみ関係が見られる。一般的に、初期有効拘束圧が大きいほどピーク強度が大きく、流動を起こすような形状になっているが、拘束圧が小さいと応力は単調に変化していくようになる。また、いずれのケースでも最終的に定常状態に至って以後、同じせん断応力を維持して変形するようになる。残留強度はこの状態のせん断応力である。

ところで、この図では、流動時の最小の軸差応力は約30kPa、残留強度は70kPaである。先に述べたように地表面勾配1/100程度の流動を考えると、初期せん断応力は1kPa以下で、したがって流動は起こらないという結果になる。さらに、実地盤の相対密度の最小値は35～40%程度であり、図2.15はこれよりずっと緩い材料である。次に、図2.16は相対密度 D_r をパラメータとした試験結果である²⁸⁾。相対密度が大きくなるほどピーク荷重から強度が落ちるという現象は見られなくなる。

また、図2.15、図2.16を見るとピーク荷重時のせん断ひずみは1%程度である。しかし、液状化強度試験の結果、たとえば、図2.2を見ても、もっと大きいひずみでも応力-ひずみ関係は単調

載荷のようなイメージにはならない。また、液状化後に単調載荷した図2.2の応力ーひずみ関係を見ても、図2.14とは異なっている。すなわち、単調載荷と繰返し載荷では、その挙動は大きく異なるととらえるのが自然である。

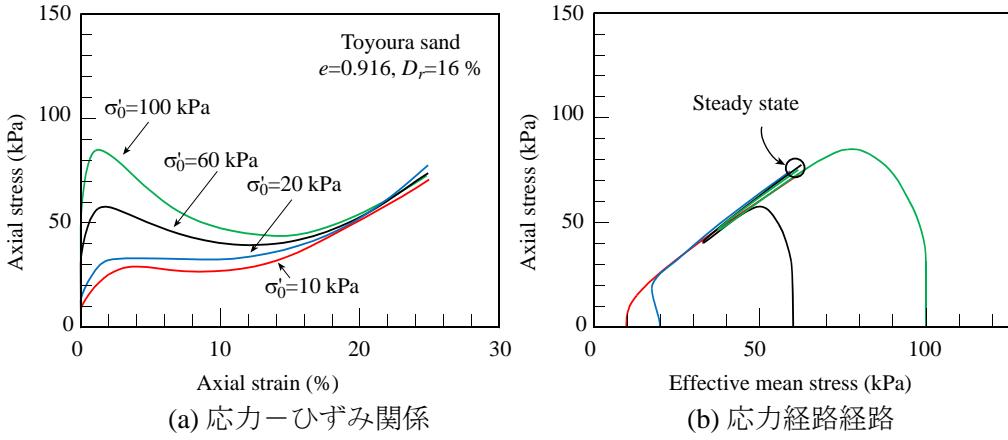


図2.15 緩い豊浦砂の非排水載荷時の挙動²⁹⁾

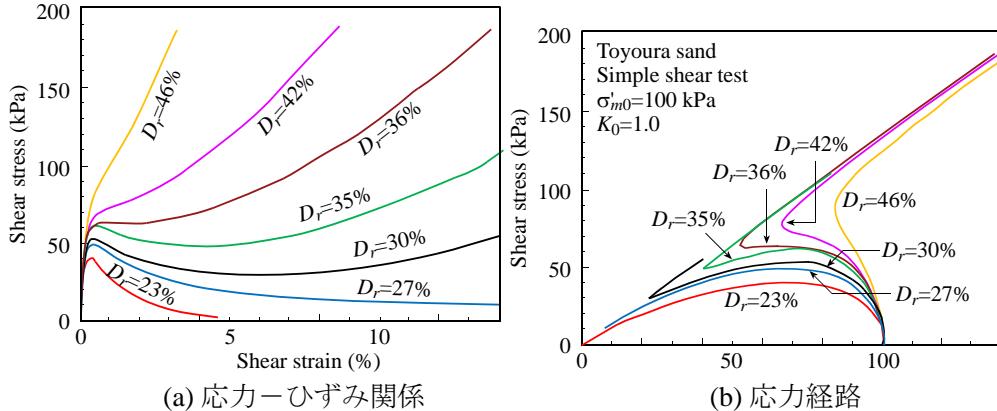


図2.16 相対密度の異なる試料の単調載荷実験の結果²⁸⁾

図2.14の説明でもう一つ欠けているのは、図2.11で示されたような初期せん断に対する考慮がされていないことである。つまり図2.14は、ひずみを単調に増やすような実験で得られる応力ーひずみ関係に挙動を限定したものといえる。

これらを考えると、図2.17のような発想ができる³⁰⁾。なお、図は非常に模式的で、本来異なる曲線もメカニズムとして同じなら同じように描いている。ここで、曲線OABCDとOABCEは図2.14で流動、限定的流動に対応する曲線である（以後、これを骨格曲線とよぶ）。また、図には点線でOB、OCも描かれているが、これらは図2.2に示したような、繰返し載荷を受け液状化した後の応力ーひずみ関係である（以後、これを繰返し後曲線とよぶ）。図2.2の実験ではせん断応力の載荷は約100kPa程度までしか行われていないので、さらに載荷を続けると、図2.14の状態になるのかは不明であるが、ここではその状態に至ると仮定する。

まず、作用している初期せん断応力が τ_0 と比較的大きいケースを考える。この場合には、地震による応力により点Aを超えてしまうと、大きな変形が発生する可能性がある。地震による過剰間隙水圧の発生により対象とする骨格曲線がOBのような繰返し後曲線になっているかもしれないものの状況は同じである。また、ひずみが大きくなるとたとえば傾斜地盤が平らになってくるなどして作用せん断応力が小さくなってくることも考えられるが、議論の本質にはあまり関係がない。

地震により状態点が A (または B) を超えると、抵抗力より作用せん断応力が大きいので不安定になる。図では、応力が一定の値になるところに点 Fを設けているが、点 Fの残留強度より作用せん断応力が大きいと不安定になる。すなわち、点 Fのせん断強度で判定して、安定問題として捉えることができる。もちろん、CE のようにせん断強度が回復する場合には、限定的流動となるが、安定問題として考えることは同じである。

ところが、初期せん断応力が τ_2 のように小さいと、地震時の載荷量によって OB, OC など繰返し後曲線は変化するものの、作用せん断応力は残留強度より小さいので、安定問題ではなく、変形問題として取り扱える。したがって、変形も求まる。OC の事例は図2.2にみることが出来る。

このように考えると、図2.12は安定問題として捉えたときの残留強度を扱っており、一方、図2.2は変形問題を扱っていることがわかる。そして、日本の流動の事例では初期せん断応力が非常に小さいケースも多いので、変形を求めることができるということになる。

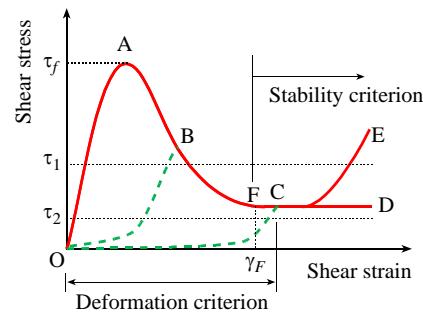


図2.17 液状化・流動挙動の模式図³⁰⁾

2.5 そのほかの要因

2.5.1 被圧水により噴水が発生したのではないかと考えられる事例

台地や段丘の際や扇状地の末端などで、地表面下数m～数十mの深さに砂礫層や砂質土層が堆積し、表層に難透水層が堆積している場合、背後の山地に降った雨が地中に浸みこんで流れてきて、砂礫層内の地下水の圧力が静水圧より高くて被圧している箇所が多くある。このような箇所が地震動を受けると繰返しせん断力による通常の液状化が発生しなくとも、表層の難透水層に発生したクラックなどを通って被圧水が地表に噴き出していくことがあると考えられる。また、被圧しているため有効上載圧が小さく、砂礫層や砂質土層が繰返しせん断力によって液状化し易くなっていて液状化し、地表に噴水・噴砂が生じる可能性も考えられる。

このような台地や段丘の際や扇状地の末端で地震時に噴水・噴砂が発生し、それを現地で詳細に調べられた事例は、1964年新潟地震で液状化が広く認識されて以降国内で殆ど無いと言えよう。それに対し、2016年熊本地震時の際に、益城町の台地の際でこのようなことが発生したのではないかと思われる所以、以下にその事例を示す。ただし、筆者達は熊本地震の本震発生半日後にこの付近に調査を行ったものの、益城町内では震動による倒壊が激しく、秋津川沿いの一部しか液状化の調査が出来ていない。それに対し、7月2日には徒步により液状化が発生した可能性がある地区を調査してまわったので、以下の資料はこれらの調査結果に基づいて、図2.18に示す安永・惣領・福富・広崎地区におけるいくつかの地点の噴水・噴砂発生状況及び住宅の被害状況について考察したものである。

なお、益城町で多くの建物が甚大な被害を受けた原因として、i) 強い地震動による建物の変形・崩壊、ii)擁壁の倒壊などに伴う宅地地盤の変状による建物の変形、iii)液状化による建物の沈下、といったものが挙げられている。そして、これらのうちの複数の原因で建物が被災している可能性もあり、液状化だけによる被害かどうかの判断は難しいと言えよう。

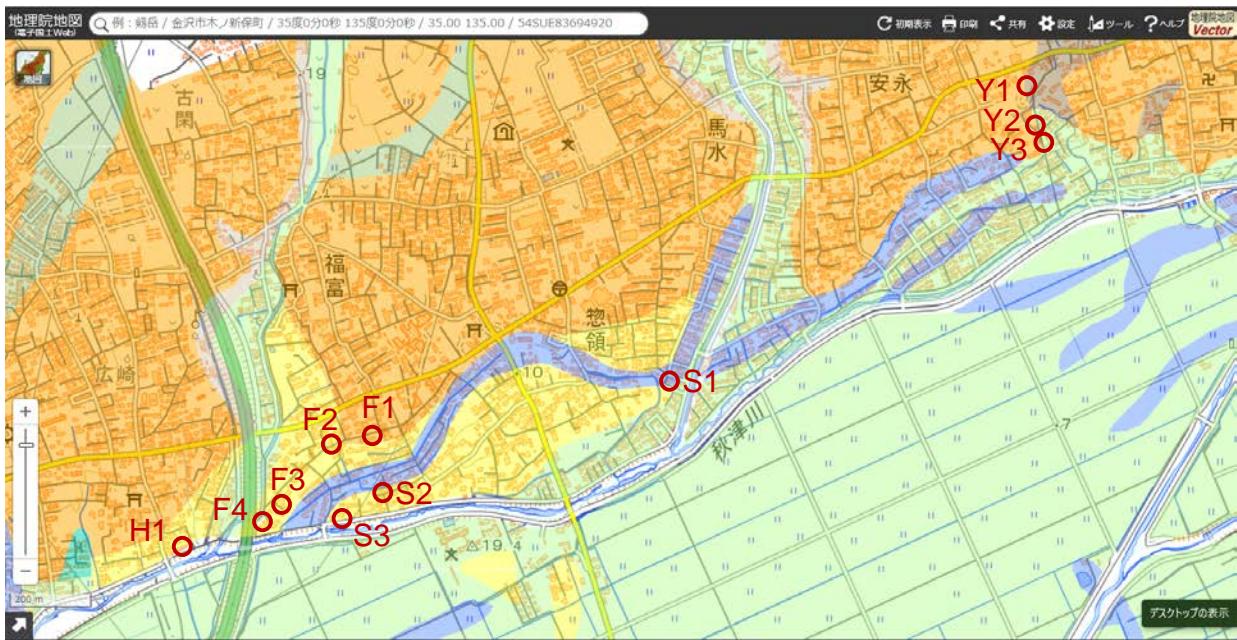


図2.18 噴水・噴砂発生状況及び住宅の被害状況を考察した地点（地理院地図³¹⁾に追記）

(1) 安永地区

安永地区で標高が高い方から Y1, Y2, Y3地点の被災状況を写真2.1～写真2.3に示す。Y1は図2.18の地形分類では山麓堆積地形となっているが、明治～大正時代の旧版地形図にはため池らしい記載があり、そこを埋めて公園にした所ではないかと思われる。7月の時点では公園は整地し直されていて噴砂は見当たらなかったが、公園の北側や東側に隣接する建物が震動だけとは違うような被害も受けており、液状化が発生したのではないかと推定される。Y2, Y3は図2.18の地形分類では台地際や氾濫平野に分類されているが、Y1から下っていく小さな沢のような地形である。Y2と Y3とも塀がめり込み沈下し、Y3やその周辺では噴砂らしき砂も見られたので、これらの地点では液状化したのではないかと推定される。その場合は小さな沢を埋めた砂が液状化したのかもしれない。



写真2.1 Y1地点

写真2.2 Y2地点

写真2.3 Y3地点

(2) 惣領地区

惣領地区のうち S1地点の被災状況を写真2.4に示す。塀のめり込み沈下状況から液状化したのではないかと推定される。マンホールの浮上りや電柱の傾斜も発生していた。ここは図2.18の地形分類図で旧河道と分類されている。ただし、旧版地形図を見ると明治時代～1960年代までは自然地形の畠のようになっており、特に明瞭な旧河道があつたわけではないと



写真2.4 S1地点

思われる。したがって、旧河道堆積物か、畑から宅地化する際に砂で盛土してそれが液状化したのかもしれない。

ボーリング柱状図

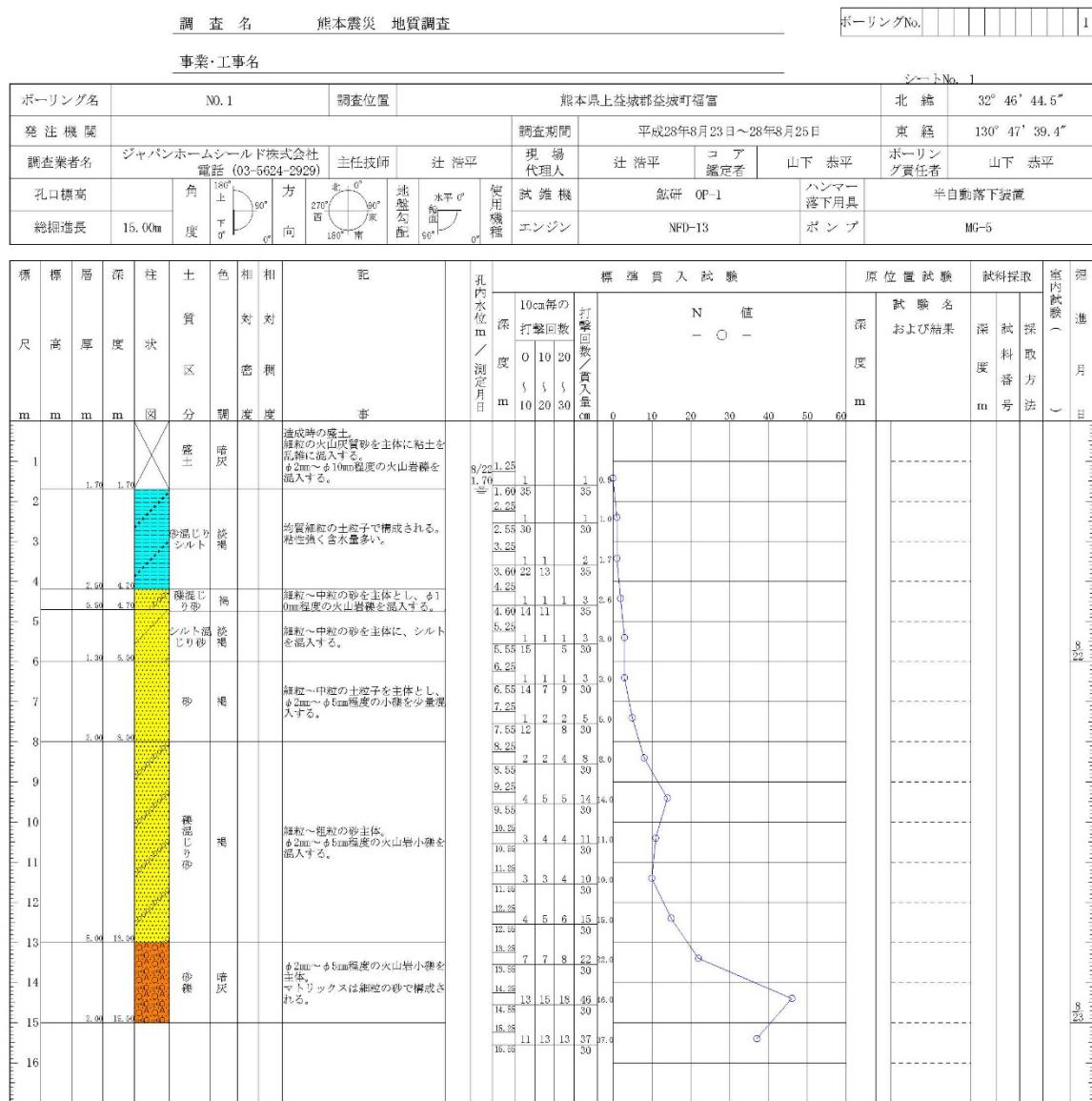


図2.19 F4と秋津川との間で地震後に行われたボーリングデータ（ジャパンホームシールドによる）

(3) 福富地区

S2地点は地名が惣領であるが、地形分類的には福富地区の東端として扱った方が良いと思われる。そこで、福富地区に入れて他地点と比較してみる。S2, F1～F5の被災状況を写真2.5～写真2.10に示す。各地点の大まかな標高は、S2で9m, F1で9.5m, F2・F3で8.5m, F4で9m、堤防付近で8mと多少のアップダウンがある。地形分類図ではF1が台地でF1～F4は自然堤防になっているが、あまり差がないと感じられる。S2の少し北側は旧河道であり現在も水路がある。まず、F1の第1保育園では、写真2.5に見られるように園庭に地割れが生じ、噴砂もあったようで、液状化が発生したのではないかと考えられている。

F3地点を7月に訪れた時、写真2.6に示すように家の周りに水があふれ出していた。住民の方に聞くと、井戸で地下水を探っていたが、そこから水が噴き出してきていたとのことであった。井戸が壊れたので被圧水が出てきたのではないかと推定しておられた。この近くの秋津川護岸付近でボーリング調査が行われていたので現地で聞いたところ、GL-40m付近で被圧地下水が確認されたとのことであった。近隣のF4と秋津川との間で地震後に行われたボーリングデータを図2.19に示す。これによると表土の下にGL-4m付近までN値が1~2の軟弱な砂混じりシルトが堆積し、その下部にGL-8mまでN値が3~5のシルト混じり砂~砂層、GL-13mまでN値が10~14の砂層、そしてその下部に砂礫層が続いている。この砂礫層に標高が高い所から流れてくる地下水が被圧しているのではないかと考えられる。



写真2.5 F1地点



写真2.6 F3地点



写真2.7 F2地点



写真2.8 S2地点



写真2.9 S2地点



写真2.10 S2地点北隣の水路

F2地点では写真2.7に示すように地下水が湧き出して路面に水が流れでていた。2012年のGoogleストリートビューを見ると路面に水は流れていない。この地点と秋津川との間のS2地点付近でも、写真2.8、写真2.9に示すように道路や庭に同様に水が湧き出していた。S2とF2の間には図2.18に示すように旧河道があり、現在は狭い水路となっている。水路には写真2.10に示すように護岸に設けられて排水パイプから水が勢いよく噴き出し、さらに擁壁との境からも水が浸みだしていた。熊本地震前の2012年1月や2013年12月、2015年2月のGoogleストリートビューを見ると、湿ってはいるもののこのように水が勢いよくは出でていない。以上のようなことより、この地区では、液状化で地下水が噴き出したのではなく、下部の砂礫層を覆っていた難透水層の一部に地割れが発生するなどして、被圧水が湧き出したり噴き出したりしたのではないかと推測される。なお、F2やS2地点付近では地下水は湧き出しているものの、塀や住宅が大きくめり込み沈下したような形跡はなかった。したがって、被圧した地下水が噴き出すだけでは建物の沈下被害は生じないのではないかと考えられた。

一方、F4地点の建物の被害状況を写真2.11に示す。ここでは建物が西側に大きくめり込み沈下し、傾いていた。この2015年2月のGoogleストリートビューを写真2.12に示す。熊本地震の1年2ヶ月前の写真であるが、畑が宅地



写真2.11 F4地点

用に整地された状態になっており、この時点では自然地形を掘削埋め戻しなどの人工的な改変を行っているように思われる。また、この写真の後に建物が建てられたはずであるが、その際に人工改変されたのかどうか分からぬ。自然のままとすると、F2やS2と違ってなぜめり込み沈下や傾斜が生じたのであろうか。考えられる原因を挙げてみると以下のようなになる。



写真2.12 2015年2月のF4地点のGoogleストリートビュー



写真2.13 2016年4月22日（本震の6日後）に清田隆博士が撮影された時の被災状況

1) 写真2.13に清田博士によって本震6日後に撮影された写真を示す。西側（写真右側）の塀の傍に盛り上がっている土が噴砂のようにも見えなくはない。ただし、北側（写真手前）の塀が沈下しているわけでもないので、液状化したとは思えない。また建物基礎が汚れていないので、地震直後に宅地内に地下水が噴き出したような痕跡も見あたらない。したがって、ここは液状化や被圧水に起因した地下水が地表面に噴出しなかったか、湧出したとしても少量だったのではないかと考えられる。そして、地下水の噴出によりめり込み沈下が生じたのではない、と考えられる。

2) 熊本地震の翌月に Google ストリートビューで撮影されているこの建物の被災状況（写真2.14）を見てみると、西側の塀が西側に孕み出し、建物が西側につんのめるように沈下・傾斜している。また、さらに西隣の建物の西側の道路を南側から見た写真2.15によると西隣の西側の塀も西向きに多少孕み出している。ただしその量が小さい。これらの2棟の間には写真2.16に示すように2m程度の幅の道路があるが、西側に向かって道路が大きく移動したような感じは受けない。したがって、写真2.13の建物の西側の塀が孕み出したのは建物が西側へ大きくめり込み沈下して塀を押したためではないかと考えられる。なお、後述するようにこの地区の地盤全体は南側（写真奥側）の秋津川に向かって流動している。



写真2.14 2016年5月のF4地点のGoogleストリートビュー



写真2.15 2016年5月のF4地点西隣の家の西側 Google ストリートビュー



写真2.16 2016年5月のF4地点における2棟間の道路 Google ストリートビュー

3) 図2.19に示したボーリング調査箇所の位置が近接しているので、同様の土層構成と考えられる。そうすると、地表～GL-4.2 mまで軟弱層があるため、建物が強い西向きの震動を受け、西側に向かってつんのめるように地盤にめり込み沈下したのではないかと推定される。また、図2.19によると GL-1.7～-4.2 mの軟弱層は粘性と記述されているが、砂混じりシルトであるため、震動によって強度や剛性が少し低下し、建物がめり込み沈下し易くなった可能性も考えられる。

さて、福富地区の秋津川右岸沿いでは、写真2.17に示すように秋津川の河道内が隆起している状況が本震翌日（2016年4月16日）の現地調査において確認された。このような河道内が隆起している箇所に接する宅地内には、写真2.18に示すように宅地内に無数のクラックが秋津川に沿って入っており、堤内側の宅地が秋津川に向かって流動していることが伺える。ただし、このような地盤変状が確認された付近において液状化の痕跡となる噴砂は確認されておらず、秋津川沿いの戸建て住宅においてもめり込み沈下や抜け上がりといった戸建て住宅の支持層となる表層地盤の液状化に起因する被害は確認できていない。



写真2.17 秋津川の河床の隆起 (S3地点)



写真2.18 秋津川沿いの亀裂 (S3地点)

(4) 広崎地区

九州自動車道を挟んで秋津川右岸の下流側に位置する広崎地区では、写真2.19や写真2.20に示すように埋設管の埋戻し土の地盤変状が確認された。写真2.20では、アスファルト舗装が噴出した噴水あるいは噴砂によって変色していることから埋戻し土が液状化したことで同被害を生じたものと推察される。



写真2.19 埋戻し土の変状 (H1地点)



写真2.20 埋戻し土の液状化被害 (H1地点)

2.5.2 水膜

過剰間隙水圧の消散が始まると、間隙水は一般に地表に向かって、液状化した土から、隣接する土に移動する。このとき、隣接する土の透水係数が液状化した土の透水係数より小さいと、液状化した土から排出された間隙水より上の層に浸透する間隙水の方が小さいので、上の層に浸透できない間隙水は隣接する土との境界で蓄積され、水の層ができることになる。これを水膜 (Water film) 現象という。

図2.20は遠心力載荷試験の結果³²⁾で、図(a)に試験体を、図(b)に過剰間隙水圧の分布を示す。この実験は50g の遠心力を加えて行われているので、モデルのスケールは実物の1/50であるが、図では全て実物換算の数値が使われている。この試験は液状化する砂の上に、透水係数の低いシルトがあるのが特徴である。

加振は約6秒行われているが、砂層では5秒で過剰間隙水圧はほぼ有効上載圧に等しくなり、液状化している。加振が終わると過剰間隙水圧が消散を始めるが、消散は先にも書いたように、下から上に間隙水が移動する現象であるので、過剰間隙水圧は下から小さくなり、逆に上方では間隙水が供給されるので、仮に液状化していなかったとしても有効応力が0となる。すなわち、過剰間隙水圧の分布は台形状になるのが一般的であり、図2.20(b)でもそのようになっている。この台形の平坦部は15秒でシルト層下端に達しているものの、それから3.5分まで液状化層の過剰間隙水圧の分布はほとんど変わらず、その後地盤全体として徐々に減少している。最終的に過剰間隙水圧がなくなるのは加振後40分で、15秒後で砂層下端の過剰間隙水圧が約半分になったのに比べると長い時間がかかっている。

図2.21にこの挙動を模式的に示す。図では砂層部分のみが示され、(a)は過剰間隙水圧分布、(b)は(a)で A, B, C として示した異なる深さの過剰間隙水圧時刻歴、(c)はシルト層下端と砂層上端の変位 (沈下) の時刻歴である。砂層が全体として液状化したとすると、過剰間隙水圧分布は図2.21(a)の左端のように、初期有効上載圧 σ'_0 分布と重なる。この時点の過剰間隙水圧は初期有効上載圧と同じであるので、図2.21(b)の A, B, C の水圧の違いは深さの違いである。これから過剰間隙水圧の消散が始まるが、間隙水は上方に動くので、まず深い位置 C から過剰間隙水圧が小さくなるが、A, B はしばらくは値が変わらない。そして、深さ C の水圧が B, A の初期有効上載

圧と同じになった時点で、このB、Aの水圧も動き始める。その間、シルト層に流れる水量は少ないので、図2.21(c)に示すようにシルト層の下端と砂層の上端の間に間隙水が溜まる。フェーズ1として示されたこの状態では、貯まった水（水膜）の厚さは厚くなっていく。なお、シルト層の下端が時間と共に沈下しているのは、少ないとはいえシルト層の中に間隙水が流入し、水膜の厚さが薄くなるためである。

そして、台形の間隙水圧が長方形分布となるとき、すなわち、A、B、Cの過剰間隙水圧が砂層上部の初期有効上載圧と同じになった時点では、砂層の間隙水圧の変化は止まってしまう。実験では15秒～3.5分の挙動である。この間、砂層からの水膜への間隙水の供給はないが、シルト層からの間隙水の消散はあるので、フェーズ1と同様、シルト層下端に沈下は続くので、水膜の厚さは薄くなっていく。フェーズ2は水膜の厚さが0になったときに終わりとなり、その後はシルト層内の透水に対応するように、地盤はゆっくり沈下していく。これが実験の3.5分～40分の挙動である。

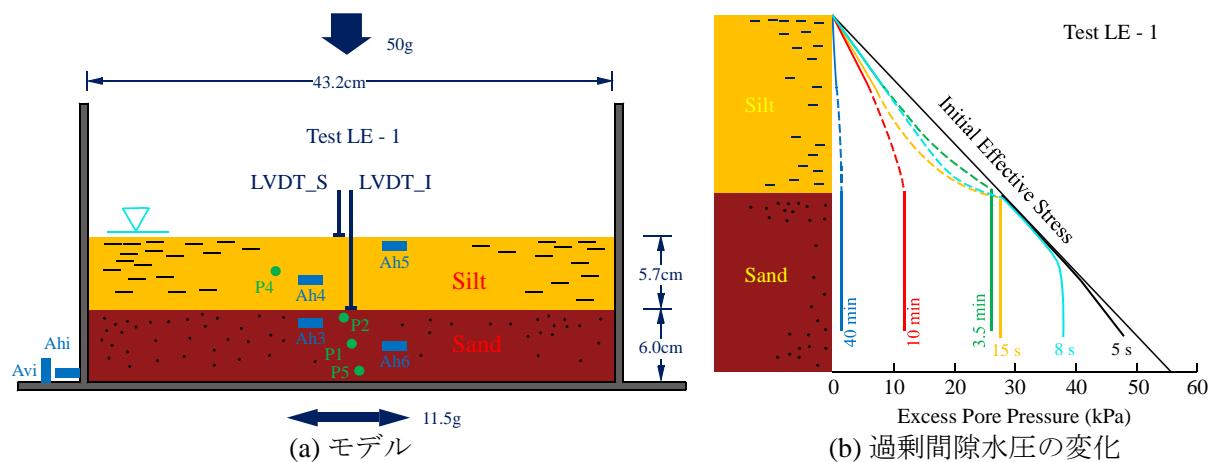


図2.20 水膜現象の発生³²⁾

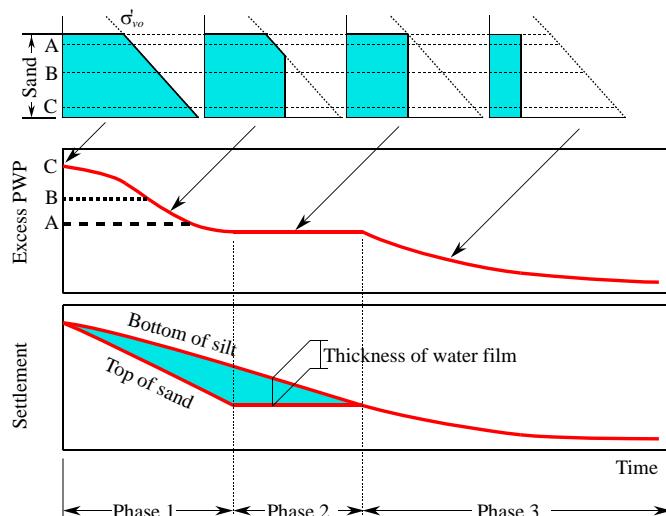


図2.21 水膜現象のメカニズム³³⁾

このような挙動は、最初フィルダムに対する遠心力載荷試験で見つけられた。フィルダムでは中央部に不透水層があるが、その砂層との境界部で間隙比が大きくなり、それが崩壊の原因となるというわけである³⁴⁾。そのメカニズムがよりわかりやすくなったのが図2.20の実験である。

2.5.3 構造物直下の地盤

直接基礎の建物やケーソンのように重量構造直下では上載圧が大きいので、液状化強度は高く液状化が起こりにくい。それ以外にも起こりにくいメカニズムがある。

話を簡単にするために、図2.22に側方の変位（ひずみ）を拘束したケース（一次元の地盤に相当）と側方の応力を一定にしたケースを考える³⁵⁾。図2.22(a)は側方のひずみが拘束されている要素 ($d\varepsilon_h=0$)、(d)は応力が一定の要素 ($d\sigma_h=0$) で、その下の図はこれらが繰返せん断を受けたときの応力状態と変形を表している。これらの要素は地震前には鉛直、水平にそれぞれ $\sigma_{v0} = \sigma'_{v0} + u$, $\sigma_{h0} = \sigma'_{h0} + u = K_0 \sigma'_{v0} + u$ の応力が作用している。ここで、 u は静水圧である。この状態のモール円は直径が $(1 - K_0)\sigma'_{v0}$ で K_0 が1より小さいので、円は有限の大きさである。この状態から過剰間隙水圧が発生すると考え、その途中、 $\tau_{vh}=0$ の状態で考える。

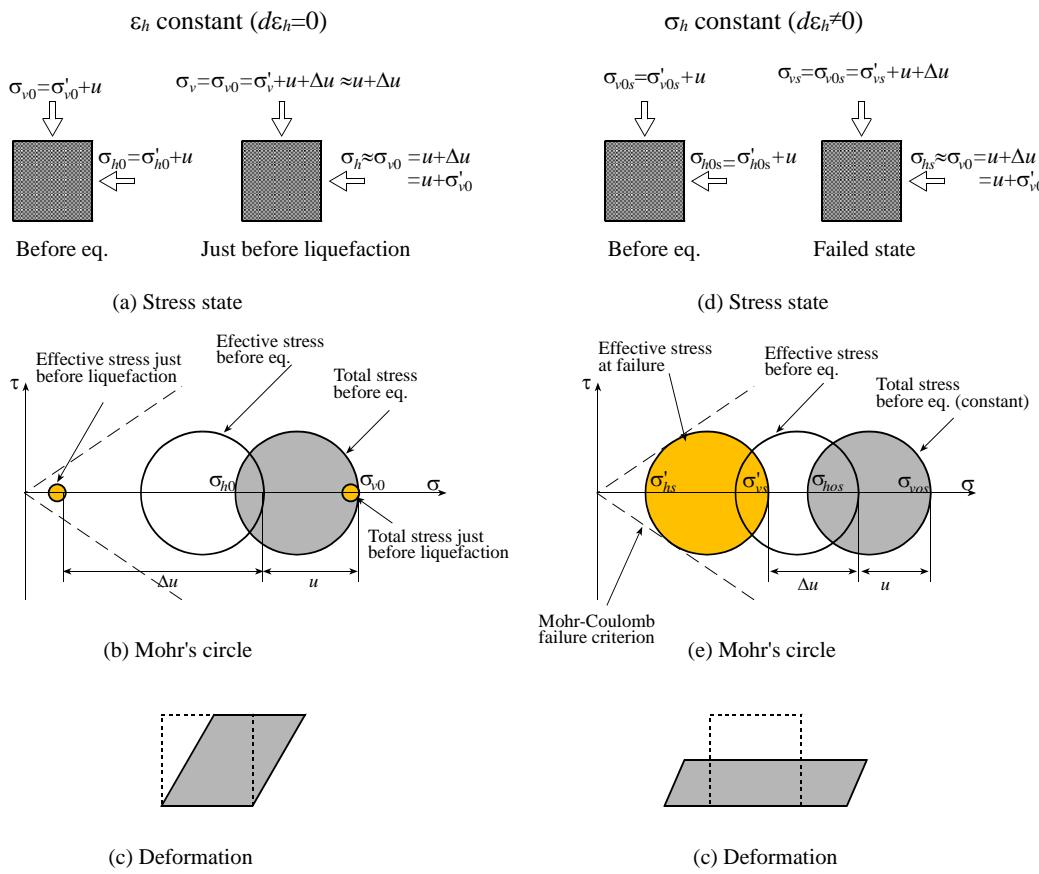


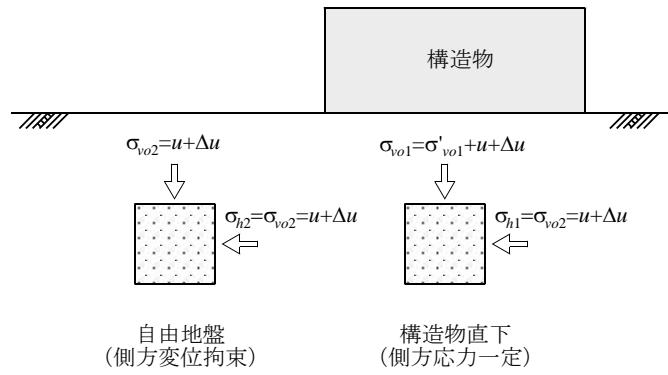
図2.22 側方ひずみ一定と応力一定の挙動の比較

$d\varepsilon_h=0$ の場合には、載荷により側圧が増加するので、 σ_v と σ_h は等しくなっていく。さらに、過剰間隙水圧は等方に作用するので、 σ'_v と σ'_h も同じになり、図2.22(b)に示すようにモール円はほとんどの点になるので、拘束圧0の地点まで移動することができ、液状化が発生する。一方、 $d\sigma_h=0$ の条件では、全応力に対するモール円の半径は変わらない。したがって、有効応力に対するモール円のサイズも変わらないので、過剰間隙水圧が発生しても図2.22(e)に示すように、有効応力のモール円はモール・クーロンの破壊規準に当たったところより左に動くことはできない。すなわち、液状化の定義を有効応力が0になったときとするのであれば、この要素は液状化しない。ただし、モール円が破壊線に接しているので、せん断破壊が生じており、大きな変形が発生する。この例のように、単純な条件では図2.22(f)に示すように繰り返せば要素は次第に扁平になる。

図2.23は構造物直下と側方自由地盤の破壊時の応力状態を示している。構造物側方の自由地盤

では $d\varepsilon_h=0$ の条件がほぼ成立するので、液状化し、側圧は上載圧まで上昇する。構造物直下では上載圧は自由地盤の上載圧より大きいのに対して、側圧は最大でも自由地盤の上載圧までしか上昇しない。つまり、図2.22(e)の $d\sigma_h=0$ 条件と同じような現象が発生するので、液状化が発生しないことになる。

実挙動との対応をみるために、危険物保安技術協会で行われた実験³⁶⁾を紹介する。この実験は、1995年12月に行われた消防法の改正により既存タンク直下でも液状化対策が必要になったことを受け、液状化対策の効果を確認するための実験の一部で、無改良の地盤の上に重量構造物を置いた実験である。図2.24に過剰間隙水圧の時刻歴を示す。図に実線で示した自由地盤では液状化が発生しているのに対して、点線で示した構造物直下では液状化には過剰間隙水圧の発生量は小さく、その意味で液状化は起こっていない。



液状化時の応力状態（自由地盤で有効応力 =0）

図2.23 構造物直下と自由地盤の応力挙動³⁵⁾

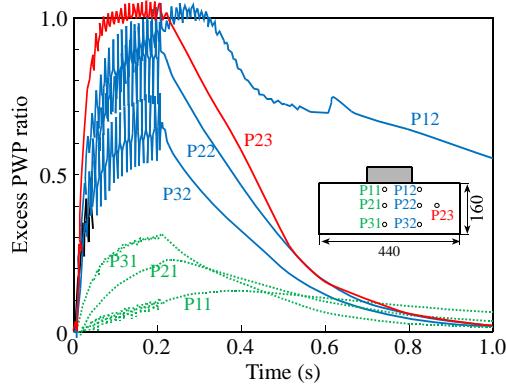


図2.24 構造物直下が液状化しない例³⁶⁾

2.5.4 二次液状化

地震の際に発生した過剰間隙水圧は時間と共に消散する。たとえば、図2.20の実験では、上部のシルト層は加振終了後に過剰間隙水圧が上昇している。過剰間隙水圧の消散は水平成層ではこの例のように鉛直上方に起こるので、過剰間隙水圧が多く発生した層の上では有効応力が0になる可能性がある。このように、過剰間隙水が伝播して液状化状態になる現象を三上ら³⁷⁾は二次液状化 (Secondary liquefaction) と名付けた。この用語は一般的というわけではなく、7ICEGEにおける発表³⁸⁾の際でも、海外の研究者とは同意が取れなかった。一般的な名称とすれば、浸透に伴う液状化 (Seepage-induced liquefaction) の方が現象をよく表しているかもしれない。

実務では、たとえば、杭の設計では液状化層より上層の砂層は全て液状化層と評価して地盤反力係数を低減させた設計が行われる場合もある。また、液状化対策をした場合には、側方で液状

化した地盤から間隙水が浸透してくるため、図2.25³⁹⁾に示すよう、有効応力が小さくなり強度や剛性が小さくなる領域（劣化領域）が現れるので、液状化対策領域に作られる基礎の支持力を求める際には劣化領域の抵抗は考慮しないことの提案もある。なお、この領域は井合ら⁴⁰⁾による解析に基づいている。彼らは、振動台実験による液状化対策領域の過剰間隙水圧が上昇することを確認した後、定常浸透解析を行った。結果、過剰間隙水圧比が0.5未満であればひずみは大きくならないとして、0.5以上の領域を求めるに図2.25のABCDの四角形になるが、このうち、上の三角形ACDが振動台実験で特に不安定な挙動を示すことからこの領域を液状化したとして取り扱うことが妥当であるとした。

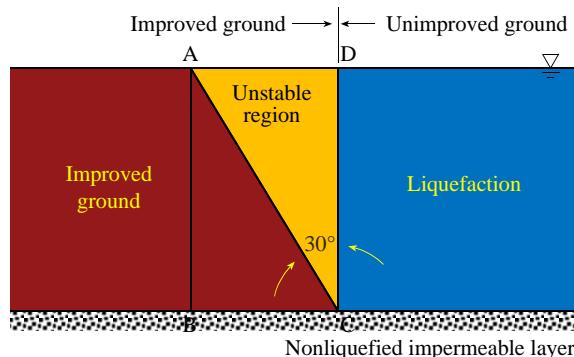


図2.25 改良地盤が軟化する領域

二次液状化した地盤の力学特性を定量的に計測したものとして、三上・吉田ら³⁷⁾の研究がある。ここでは、三軸試験で繰返し載荷により過剰間隙水圧をある値まで発生させ、その後背圧を調整して有効応力を0にした後、単調載荷による応力-ひずみ関係を求めた。ケース1～ケース6の6つのケースの実験が行われた。ケース1は繰返し載荷も背圧の操作も行われていない単調載荷のみ、ケース2も繰返し載荷は行わないが有効応力は0にした場合、ケース3～6は繰返し載荷により過剰間隙水圧比を0.2, 0.4, 0.6, 1.0に上げた後有効応力を0にしたケースである。ケース2～ケース5が二次液状化のケースである。

図2.26に試験で得られた応力-ひずみ関係と応力経路を示す。繰返し載荷の応力経路を見ると、載荷した部分では4つの結果はほぼ完全に一致しており、良好な試料が作られていることがわかる。図の単調載荷部分を見ると、ケース1（普通の単調載荷）とケース6（液状化させたケース）を除く、二次液状化と設定した試料はほぼ似たような挙動で、かつケース1、ケース6とは全く異なっている。これを設計に用いるような割線剛性で、ケース1と比較したものが図2.27(a)である。縦軸が対数軸になっていることに注意すると、液状化させたケース6の剛性は非常に小さいことがわかる。これに対して、二次液状化試料の剛性はひずみによっては異なるものの、ほぼ同じ剛性であり、ひずみが大きくなると繰返し載荷のないケース1に近づいていく。これは、図2.26に見られるように、これらのケースでは繰返し載荷中に発生しているせん断ひずみが非常に小さいことが関係していると考えられる。そこで、図2.27(b)にケース2で正規化したものを示す。剛性比はほとんど1である。これより、過剰間隙水圧が発生したといえ、ひずみが小さい間は土の構造が乱されていないので、ケース2の挙動で二次液状化の挙動を代表させることができる。土骨格が乱されるのは、サイクリックモビリティが現れる頃と考えられる。

なお、過剰間隙比0.8のケースの実験ができなかったのは図2.26(b)の結果を見れば明らかで、過剰間隙水圧比が0.8となった同じサイクルで過剰間隙水圧比が1.0になってしまったためである。

ちなみに、液状化のメカニズムのところで、発生した過剰間隙水圧が消散して土の体積が減少することを述べた。体積ひずみを ε_v 、液状化した層厚を h とすると、単位面積あたり $\varepsilon_v h$ の間隙水が土から絞り出され、液状化層より上の層に流入する。簡単のため、地下水の直下の層が液状化するとすれば、この間隙水はすべて地下水より上の層に吸収される。層の間隙率を n （間隙比

$e=n/(1-n)$) とすれば、地下水の上昇量 h_w は次式となる。

$$h_w = \varepsilon_v h / n \quad (2.4)$$

これは、地下水より上の層が完全に乾燥していた時のケースで、もし、水分が含まれ、飽和度が S_r であれば、

$$h_w = \varepsilon_v h / S_r \quad (2.5)$$

が地下水の流入量になる。例として、 $\varepsilon_v=3\%$ 、 $h=5\text{ m}$ 、 $n=0.5$ 、 $S_r=50\%$ とすれば、 $h_w=60\text{ cm}$ となる。ずいぶん地下水が上昇することが理解できる。なお、この計算は地下水が均等に上昇することを前提としているので、噴砂などは別の話である。

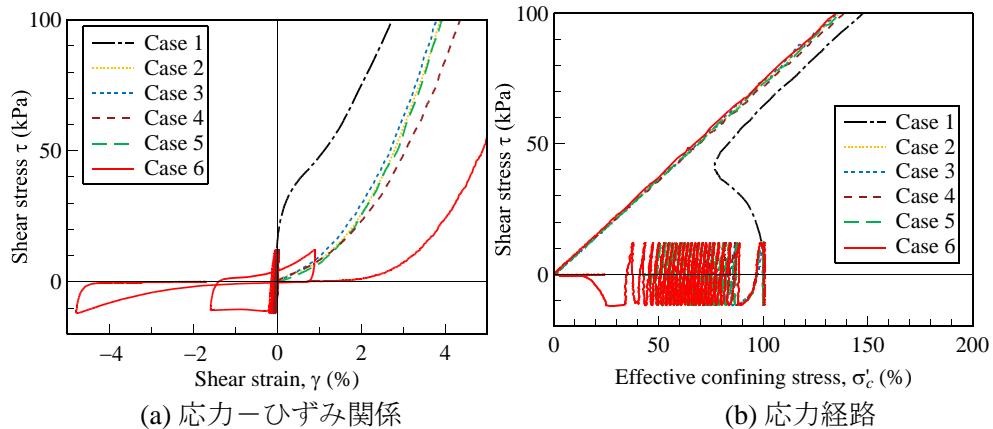


図2.26 試験結果 (相対密度 $D_r=50\%$) ³⁷⁾

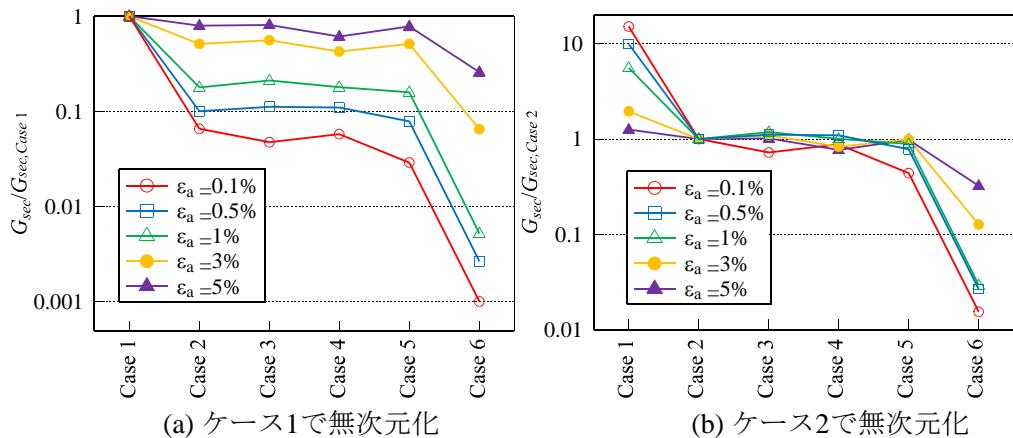


図2.27 割線剛性比のひずみ依存性³⁷⁾

2.5.5 再液状化

一度、液状化した地盤は、地盤内に生じた過剰間隙水圧の消散にともない図2.1(d)のように地盤が密になり、次の地震に対しては再び液状化しにくいと考えられてきた。しかし、国内外において、過去の被害事例から同じ場所で再び液状化が生じていることが知られている。

全国の過去(745~2008年)の再液状化履歴については、若松により詳細に報告されている⁴¹⁾。それによると、液状化履歴地点16,536地点から繰り返し液状化した箇所は150地点が同定され、その分布は北海道41か所、新潟県28か所、秋田県16か所、宮城県10か所と東北日本が多く、それらはここ数十年余りの間に複数回の大地震に見舞われた地域であることを指摘している。これらの国内の再液状被害において、例えば、安田・陶野によって1983年日本海中部地震の際に本震で

液状化した同一箇所が約一月後の余震で再液状化した事例が述べられている⁴²⁾。また、若松⁴³⁾によって2011年東北地方太平洋沖地震による再液状化地点の微地形などの地盤条件や地震外力について詳細に述べられている。

海外においても、1989年ロマプリエタ地震の事例は吉田・若松⁴⁴⁾により報告され、Youd⁴⁵⁾は1979年 Imperial valley earthquake の地震の際の事例を報告している。近年では、ニュージーランドのカンタベリー地震の際のクライストチャーチ地域の事例が挙げられる。この地域では、2010年9月の Darfield 地震（本震）で液状化が生じ、これを皮切りに2011年2月および同年6月の余震の際に液状化し、1年弱の期間において3度も液状化が生じていることが報告されている⁴⁶⁾。

このように、液状化した地盤が再び液状化する再液状化は各地で観察されており、再液状化が発生する原因はいろいろと考えられる。以下ではそのいくつかを紹介する。

(1) 室内要素試験による液状化後の挙動

Finn ら⁴⁷⁾は、繰返し三軸試験を用いて Ottawa 砂に対する再液状化試験を行っている。まず、非排水状態で一定の繰返し応力を与え、供試体が完全に液状化した状態において軸差応力がゼロになった時点での繰返し試験を終了している。その後、過剰間隙水圧の消散を行い、有効鉛直応力を1回目と同等に調整し、非排水状態で同レベルの繰返し応力を与えている。図2.28は、代表的な時刻歴図であり、両者の時刻歴挙動は大きく異なる。再液状化試験では一度目の液状化後の再圧密において供試体の密度は密実化しているにもかかわらず、繰返し試験直後から過剰間隙水圧は急激に上昇し、軸ひずみも急増しており液状化強度が小さくなることを示している。また、過去のひずみ履歴を受けていなければ液状化強度は一意的に決まるが、ひずみ履歴を受けていると、一意的には決まらない。図2.29が示すように±0.5% 15回の載荷で液状化強度は低下し、±2% 15回の載荷で劇的に低下する。

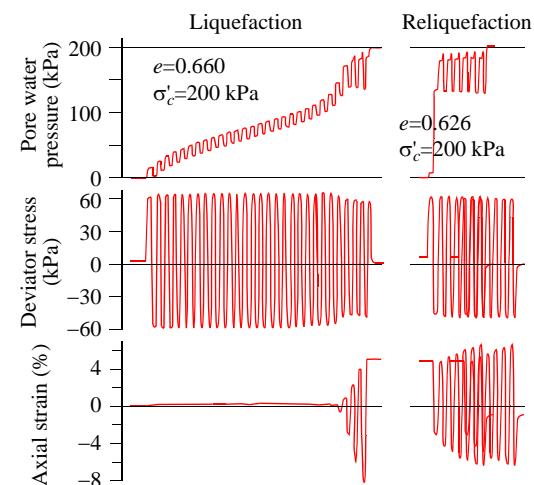


図2.28 オタワ砂の繰返し三軸試験結果

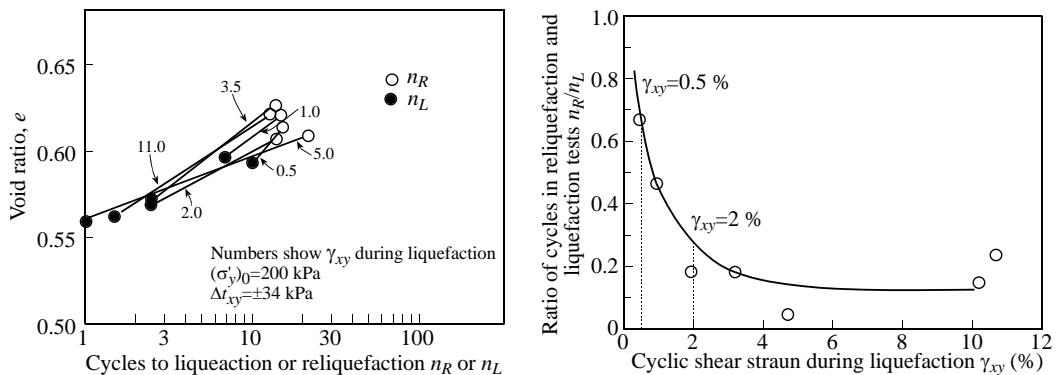


図2.29 最大せん断ひずみ履歴を受けた供試体の再液状化時の繰返し回数の変化

石川ら⁴⁸⁾は、繰返し中空ねじりせん断試験を用いて豊浦砂に対する再液状化試験を行っている。同試験は、前述の Finn らの実験と同じように非排水状態で一定の繰返しせん断応力を与え、供試体の両振幅せん断ひずみが10%に至った際にせん断応力がゼロの状態で繰返し試験を終了してい

る。その後、過剰間隙水圧の消散を行い、非排水状態で1回目より若干小さいせん断応力で2回目の繰返し試験を実施し、同過程を経て3回目の繰返し試験を実施している。図2.30は、各試験時のストレスパスと応力ひずみ関係である。これより、大きなせん断ひずみ履歴 ($\gamma_{DA}=10\%$) を受けた供試体では、2回目の繰返し載荷の1波目において過剰間隙水圧が急激に上昇し、有効拘束圧に達している。この特徴は、再々圧密後の3回目の繰返し載荷試験でも確認され、一度液状化した供試体はその後の繰返し載荷において、載荷直後にサイクリックモビリティ挙動を示し、このことが要因となり液状化強度が小さくなることを示した。

青柳ら⁴⁹⁾は、多層リングせん断試験装置を用いて、実際の地震と同様に大小さまざまな液状化履歴を与えた場合の砂地盤の複数回液状化特性の変化を詳細に求めている（図2.31参照）。液状化履歴を多く与えると供試体の密度は密実化し、大きなせん断ひずみを受けるほど密度は増加する。しかし、液状化強度の著しい低下は、それまでの液状化履歴に係わらず直前に大きな液状化履歴を受けた後に生じる結果を示している。また、有効応力経路が変相線に到達するまでの載荷履歴は強度増加をもたらし、到達後の履歴は強度低下を引き起こすことを指摘している。再液状化過程における挙動は、直前の液状化履歴に起因する異方性などの影響を大きく受け、相対密度の大きさやその変化傾向とは必ずしも対応しないことを示した。

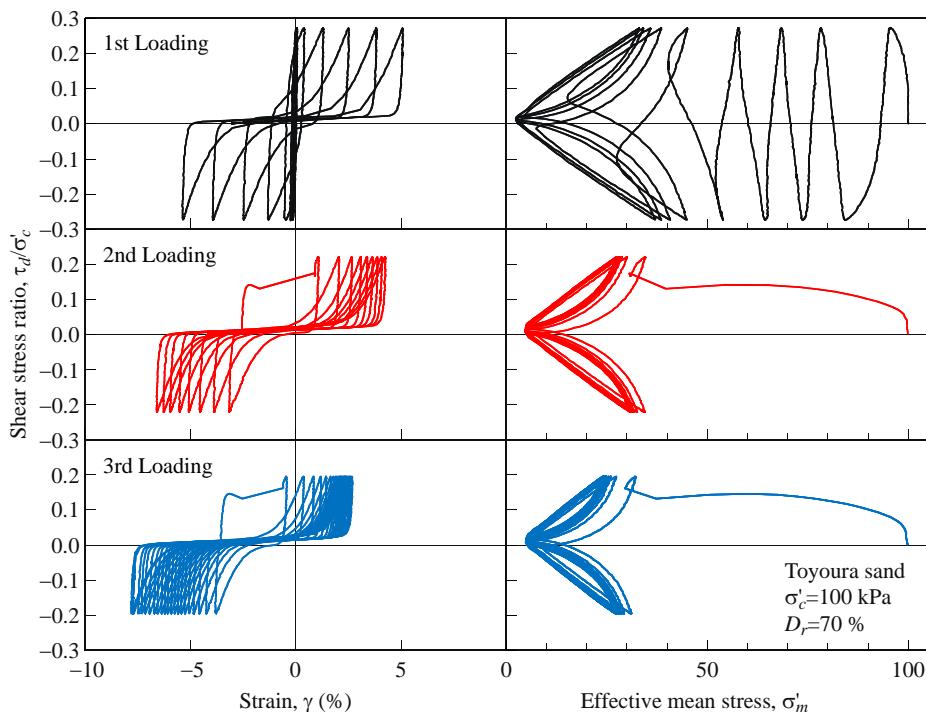


図2.30 繰返しねじりせん断試験による豊浦砂（相対密度70%）の再液状化試験結果

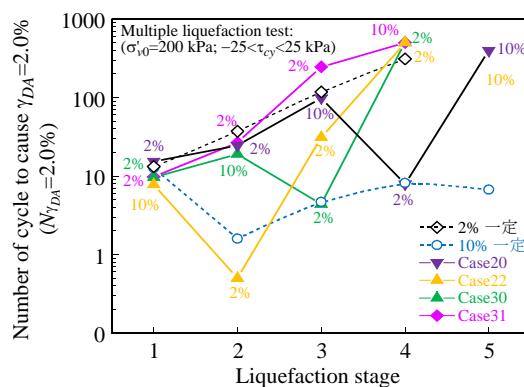


図2.31 液状化履歴による液状化強度の変化

(2) 模型試験による液状化後の挙動

佐々木ら⁵⁰⁾は、幅12m、深さ3m、奥行き2mの大型土槽による振動台実験を行い、加振前と加振後でのコーン貫入試験を実施し、液状化および再液状化によるコーン貫入抵抗を測定している。これによると液状化前後で模型地盤の浅部（深度1.2m）とそれ以深でコーン貫入抵抗に違い生じていることを指摘している。模型地盤の浅部ではコーン貫入抵抗が液状化さらには再液状化により減少し、一方、模型地盤の浅部以深では浅部とは逆に液状化履歴を加えるほどコーン貫入抵抗が増加している。このことから液状化後の再堆積の過程では液状化履歴前よりゆるく、または密に堆積し、砂地盤の粒子構造は深度方向に不均一に再構成されることを実験的に求められている。

脇中ら⁵¹⁾は、地震履歴に着目した再構成砂に対する動的遠心模型実験を行い、数多くの地震履歴を与えた状態と地震履歴を与えていない状態での液状化のし易さの違いについて述べている。段階的に多くの地震履歴を受けた模型地盤と一度強い地震履歴または地震履歴を受けていない模型地盤の液状化抵抗の深度分布を比較すると、段階的に多くの地震履歴を受けた模型地盤の液状化抵抗が最も大きくなるが、その一方で、一度強い地震履歴を受けた模型地盤では地震履歴を受けていない地盤の液状化強度を模型地盤の浅部で下回る結果となっており、大地震により著しく液状化した直後の水圧消散過程において、地表付近の砂地盤が再圧密する際に粒子構造の安定性が低下していることを物語る結果である。

(3) 原位置試験・調査による液状化後の挙動

菅野・中澤⁵²⁾は、実物大の空港施設を用いて制御発破により地盤の液状化現象を再現し、各種構造物へ及ぼす影響について検討するために、現場実大実験を実施した。そのなかで液状化後の過剰間隙水圧消散に伴う地表面沈下の経時変化が示されている（図2.32）。これより、液状化後の過剰間隙水圧の消散に伴う地盤の沈下は、過剰間隙水圧の顕著な消散過程である発破数時間後に生じ、発破後1週間ほどではほぼ収束する傾向であることが示されている。一方、 N 値は過剰間隙水圧が消散した時でも、実験前まで回復せず、過剰間隙水圧と N 値の経時変化に違いがあることが示されている。

京川ら⁵³⁾⁵⁴⁾は、2011年東北地方太平洋沖地震で液状化した浦安市弁天町の同一宅地において、地震前後のSWS試験の比較を行った。図2.33に N 値換算した貫入抵抗の変化を示すが、地震発生1週間後に計測された貫入抵抗は地震前に比べて大きく低下し、特にGL-4m以線の低下の程度が大きいことを示している。その後経時にサウンディング試験が実施され、当該地盤では地震発生から約1～2か月で概ね安定に至ったと結論付けられている。

安田・橋本⁵⁵⁾は、2011年東北地方太平洋沖地震で液状化した我孫子市において、地震前後の N 値の変化について述べている。図2.34に示すように、ここでは3地区において N 値の深度分布が地

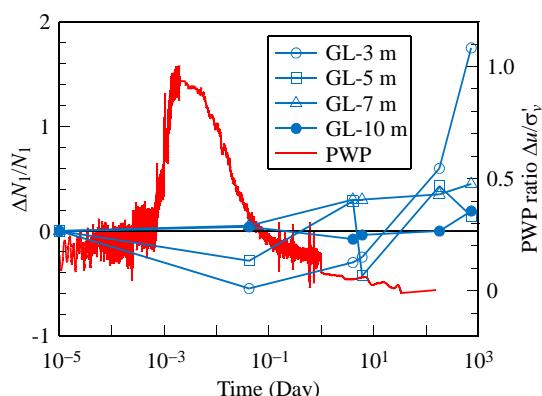


図2.32 液状化後の N 値の変化 (ΔN) と過剰間隙水圧比の変化

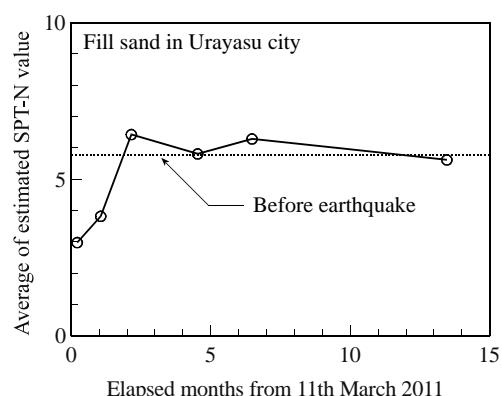


図2.33 地震後の N 値の変化（浦安市）⁵⁴⁾

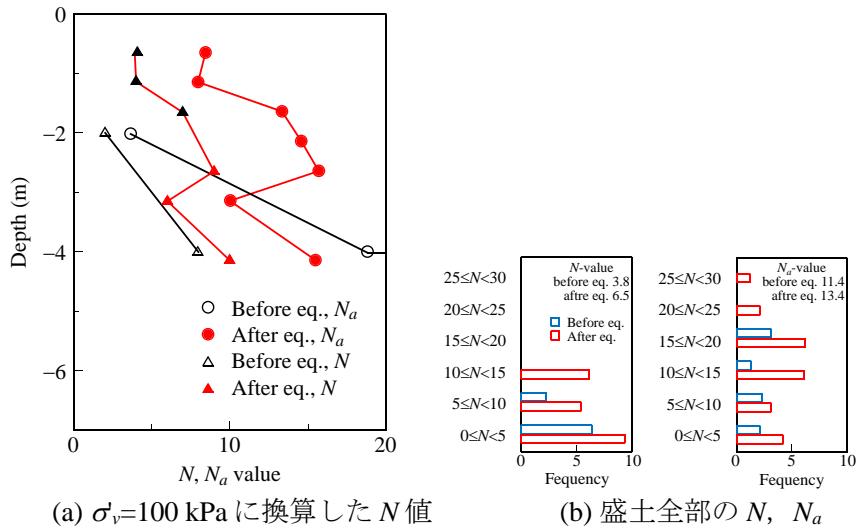


図2.34 地震前後のN値の比較

震前後で比較されており、地区によって違いはあるものの地震前に比べて地震後のN値が大きい傾向であることが示されている。

高橋・谷本⁵⁶⁾は、1995年兵庫県南部地震で液状化した人工島のポートアイランドにおいて、地震前後のN値の頻度分布の変化について述べている。これより地震前後のN値の変化は、地下水位より上と下で異なり、地下水位より浅い層はN値が減少し、地下水位より深い層はN値が増加することが示されている。また、N値の増加は特に下層が顕著となり、有効土被り圧が大きいほど密度上昇が大きくなることが結論付けられた。

一度液状化した地盤が再び液状化するか否かのメカニズムについては諸説あるが、これまでの被害事例や研究成果を鑑みて再液状化が生じる要因には、地震動の強さおよび揺れの継続時間や、一度液状化した地盤の再堆積時には不均一に密度が変化していることや、液状化した地盤に生じる残留ひずみにより誘導異方性が発達していることや、さらに続成作用（堆積物の化学的・物理的・生物的変化を受けて固結する作用）によって土粒子間の結合が進展していたが強い地震による液状化によりその効果を喪失していること等の理由が考えられる。従って、再液状化の発生メカニズムは非常に複雑であり、現時点ではそのメカニズムを断定するに至っていない。

2.5.6 深層地下水の噴き上げにより噴水が発生したのではないかと考えられる事例

兵庫県の有馬温泉は、フィリピン海プレートの沈み込みのスラブから脱水を起源とし、その超臨界流体の水が浅部まで上昇してきて、地表近くの地下水に希釈されて湧出している温泉と考えられている。一方、新潟県の松之山温泉はジオプレッシャー型の温泉と考えられている。ジオプレッシャー型熱水系は、海底に泥や砂が堆積する際に厚い堆積層の間隙に閉じ込められた海水に由来している。貯留層が難透水性の厚い泥岩や頁岩の層に覆われていると、間隙水圧はうまく排出されず静水圧を大きく上回る異常高圧状態にある熱水となっている⁵⁷⁾。

このように深部にある被圧した地下水やガスが、地震の際に噴出したと考えられる事例を3つ挙げる。

(1) 松代群発地震（文献58), 59), 60)から抜粋して引用)

長野市松代地域では1965年より群発地震が発生し、松代群発地震と名付けられた。この群発地震は多い時には一日に数百回発生した。群発地震以前にこの地域に存在した湧水・温泉は湧出量・水温等に大きな変化がみられ、さらに群発地震によりこの地域一帯に新たな湧水が多く発生した。一連の群発地震は地下深部から松代断層沿いに上昇してきた深層地下水が引き起こしたと言われている。

地震活動に伴って湧水が各所で起り、地割れ・地すべり等が多数現れた。また、皆神山付近を中心に土地が顕著に隆起した。皆神山北東側には地下の断層によると思われる北西方向の地割れ帯も現れた。1966年9月17日には牧内地区で幅100mにわたる地すべりが発生した。この地すべりは現地で調査中だった研究者によって予測されていたので、住民は避難していて無事であった。

(2) 1999年トルコ・コジャエリ地震

1999年に発生したトルコ・コジャエリ地震では総延長約150 kmの右横ずれ地震断層系が出現した。これに沿ったイズミット湾沿岸では *Değirmendere* (デイールメンデレ) より西側の各地で海岸の地盤の崩壊が、*Gölcük* (ギョルジュック) より東側の各地で海岸の地盤の沈降が発生した。デイールメンデレでは写真2.21と図2.35に示すように海岸線の間口250~300 m, 奥行き100mあまりの地盤が海側に向かって流失し、公園やホテルなどの構造物を巻き込んで数百人の人的被害を出していた⁶¹⁾。その西側でもいくつかの地区で同様な海岸の地盤が流失した。図2.36にデイールメンデレで行われた水深の調査結果を示す。図には海図から読み取った地震前の水深も示してあるが、10~20 m程度の厚さで海底の滑りが発生していた。この原因として、①背後の高い山からの土砂の供給により海岸に扇状地性の砂礫層が堆積し、②安息角に近い勾配で堆積していたところに、③地震により砂礫層に慣性力が加わり透水性が悪い場合には過剰間隙水圧も発生して、海底地盤がすべてたのではないかとまず考えられた。

ところが、地震後に住民の方々からヒアリングが行われた結果⁶¹⁾によると、流失した建物にいた多くの人が行方不明になった（地震発生は夜中）が、助かった従業員などから以下のような証言が得られていた。

- 1) 海水温度が40度位の高温であった。
- 2) 海に流され生還した人が背中に火傷を負って治療を受けた。その人の話によると、①轟音を聞きつけて海の方を振り返ると海が割れ夕焼けのような赤い光が見えた、②直後に波にさらわれ木か電柱につかまっていたところ熱い泥のような波に運ばれて陸にたどり着いた、③全身泥まみれで漁師に助けられて応急措置を受けた、④海に投げ出されたときあたりに沸騰していない湯をかけられた時のような火傷を負った、とのことである。
- 3) 地震と同時に海中からなにか火山爆発のような熱い物が吹き上げた。

したがって、断層に沿って地震時に熱水が噴き出してきたと言えよう。そして、そのために地下水の噴き上げで海岸地盤の滑りが発生したのではないかとの考えが出てきている⁶²⁾。



写真2.21 デイールメンデレで流失した海岸

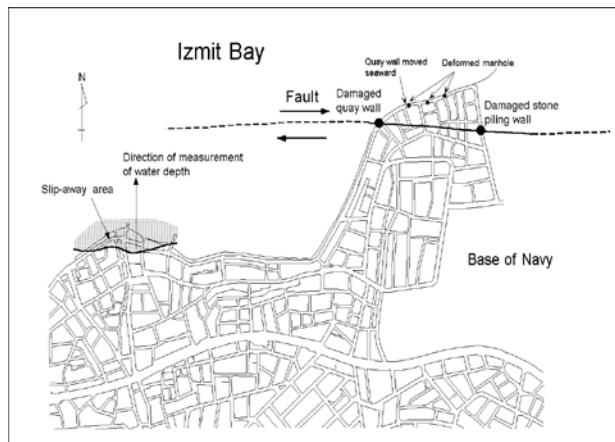


図2.35 デイールメンデレの海岸流失箇所⁶¹⁾

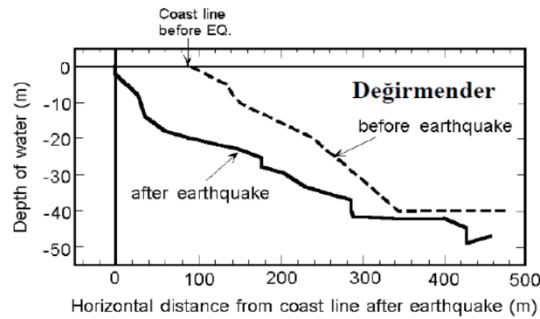


図2.36 デイールメンデレの地震前・後の水深⁶¹⁾

(3) 2018年インドネシアの地震

2018年9月28日にインドネシアのスラウェシ島で発生した地震により、パル市の数地区の緩やかな傾斜地盤で長距離流動が発生した。地震とともに大量の地下水も噴き出した。被害のメカニズムの解明や今後の防災のためにJICAで「インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト」の調査の一環として検討が進められた。検討結果の詳細は国内支援委員会の検討書⁶⁵⁾に記されている。その中から流動したと考えられる砂質土の力学特性の試験結果⁶³⁾と、発生メカニズムに関する一考察を述べた⁶⁴⁾ものから一部を抜粋して以下に示す。

パル市はスラウェシ島の中部に位置する。この付近は三つのプレートの三重会合点にあたり、時計回りに回転し、左横ずれの断層が生じている。2018年の地震では最大約5 mの変位が発生した。断層に伴うプレアパート堆積盆にあたる沈降帯により、図2.37に示すように、北北西から南南東にかけて最大幅10 km程度の細長い平野が形成されている。平野中央部の深い所では約300 mの厚さで第四系堆積物が堆積している。平野の西側には2,000 m級の山が、東側には1,000 m級の山が北北西から南南東に連なっている。中央には南から北へPalu川が流れしており、東西両側から川に向って1~3%程度の緩やかな傾斜地盤が形成されている。この表層は東西両側の山から流出した土砂で形成されている。

地震によって西側の1地区、東側の4地区の緩やかな傾斜地盤で、長さ1~3 km、幅数百 mの表層土（厚さ数 m）が滑って下流側に向かって流動し住民に甚大な被害を与えた。自宅とともに流された住民の方の動画や種々の痕跡から判断すると、数百 mといった驚くべき長い距離を自転車の速さ程度のスピードで土塊が流れていっている。写真2.22に地震から3か月半後に撮った写真を示す。JICAのプロジェクトでは種々の地盤調査、土質試験、ヒアリング、解析が行われた。そのうち、流動範囲の際で流動の滑り面になったと判断された層から乱れの少ない試料を採取し液状化試験を行った結果によると、特に液状化し易いとかし難いとかなど、特殊な土とは思われない試験結果となった。地震時に流動範囲内や近傍にいた住民からのヒアリングによると、図2.38に示すように、①地震の主要動の水平揺れが終わったと同時に10秒程度大きな鉛直動や盛り上がりが発生した、②地盤の唸りや壊れる音が発生した、③水平動が終ったと同時とか2分程度以内に地下水（一部は温水）が噴き上げたり湧き出した、④同じ頃に地盤の流動変位も発生したようである、といった証言が得られた。また流動範囲内には傾斜に直交する線上に湧水帯が形成され常時地下水が湧き出ているが、地震後に採水した湧水の水質検査の結果（水素・酸素同位体比の関係図）によると、Jono Ogeの湧水は天水線から少し「有馬型」の深部のスラブ起源流体と古海水の間に寄る結果となった。

さて、ヒアリング結果にも示されているように、地震とともに大量の地下水が噴き出したり湧き出しており、この地下水が長距離流動を発生させたと考えられている。ただし、JICAのプロジェクトではそのメカニズムとして、①浅層地盤が液状化して地下水が噴き出した、②東や西の背後の山や灌漑用水から流れてくる浅層の地下水が被圧していて噴き出した、③横ずれ断層の割目や破碎帶にあった被圧水が噴き出した、といった三つの可能性が考えられ、国内支援委員会の

検討書⁶⁵⁾ではこれらが併記されている。

これらのうち③のような稀にみる特異な現象が起きたのではないかと考えられる理由は以下の通りである。まず、常時から形成されている湧水は、図2.39に示すように、i) 深部に海洋プレートが沈み込んでいてスラブ起源流体による、ii) 平野の下には堆積岩が存在しジオプレッシャーが貯留している、iii) 断層面に接して下部に高温の花崗岩が貫入していて比較的浅部の地下水が沸騰してそれが地表に向かって湧き出している、といった三つの発生源の可能性があるのでないかと考えられる。そして、この深層の地下水が地震の際に地下水が噴き出したメカニズムとして以下の二つが考えられる。

- a) 地震時に断層変位が急速に発生したことにより、温泉などの流体が通る岩盤内のクラックが突然繋がって、深部の高い圧力が浅部に急速に伝わり、その加圧によって浅部の地下水を押し上げて噴出した。
- b) 断層の急速な動きで浅層の砂礫層内で正のダイレタンシーが生じて地下水の圧力が急減し、沸点が下がって沸騰して蒸気が発生し、それが浅部の地下水を押し上げて噴出が生じた。

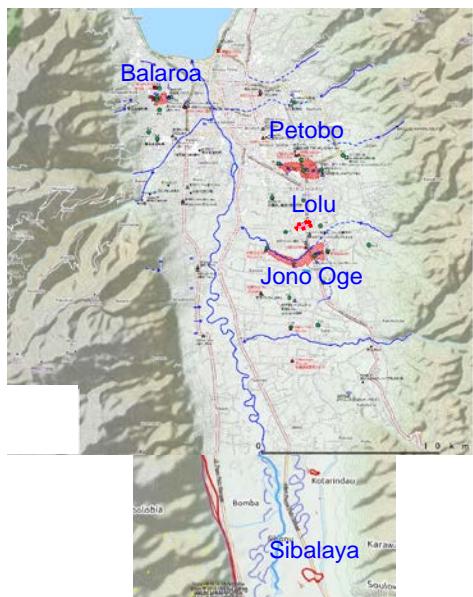


図2.37 長距離流動が発生した地区⁶⁵⁾



写真2.22 Palu で長距離流動を生じた Jono Oge 地区 (3ヶ月半後)

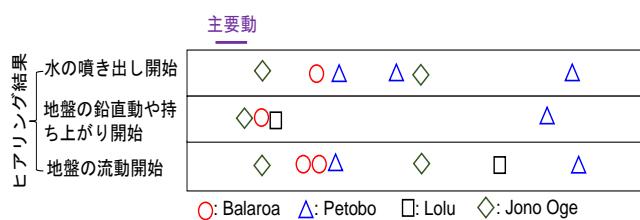


図2.38 ヒアリングで分かった発生した現象の時系列^{[64)}

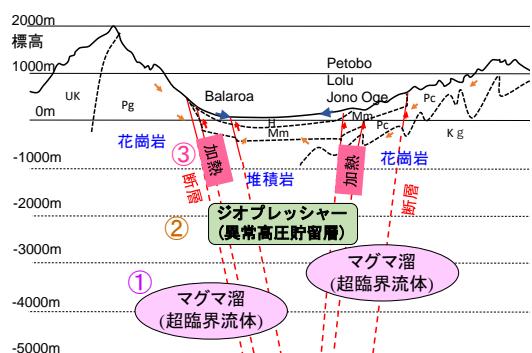


図2.39 深層水の発生源の概念図^{[64)}

2.5.7 液状化した地盤の揺動現象

2011年東日本大震災では東京湾岸の埋立地など広い範囲で液状化し種々の被害が発生した。そのうち上下水道・ガスでは埋設管は継手が抜けたり、マンホールではズレが発生するなど、特異

な被害が発生した。平面道路においても突き上げが各地で発生するといったこれまで見られなかった被害が発生した。これらの特異な被害は、地震規模が巨大で揺れの継続時間が極端に長かつたため、液状化した後も地盤が大きく揺すられ続けた「揺動」現象が生じたためではないかと考えられた。

まず図2.40に K-net 稲毛⁶⁶⁾における加速度波形と、それから計算した速度波形、変位波形、速度波形の非定常スペクトル⁶⁷⁾を示す。K-net 稲毛の観測所では地震によって噴砂が発生し液状化したと考えられているが、加速度波形を見ると120秒を過ぎたあたりでサイクリックモビリティと考えられるスパイク状の波が生じ、その後、振幅は急減している。この時刻あたりで液状化が発生したと考えられるが、速度波形を見てみるとその後も揺れは長く続いており、20cm/s程度の大きな速度振幅も生じている。変位波形ではさらに、130秒～170秒付近で振幅が大きくなり、両振幅で30cm程度の変位が数波も発生したようである。非定常スペクトルを見ると130秒～160秒付近で4秒前後の長い周期が卓越している。一方、図2.41に K-net 浦安⁶⁶⁾の同様の波形を示す。この観測地点は浦安の中でも噴砂・噴水は発生しなかった範囲に位置しており、稲毛と違って加速度振幅はあまり急減していない。変位振幅は150秒～190秒付近で大きくなるが、両振幅で20cm弱程度と稲毛より小さい。非定常スペクトルを見ると130秒付近では2秒程度が卓越している。このように液状化した地盤では液状化しない地盤より大きな変位振幅で、ゆっくりと30秒前後揺すられ続けたのではないかと考えられる。

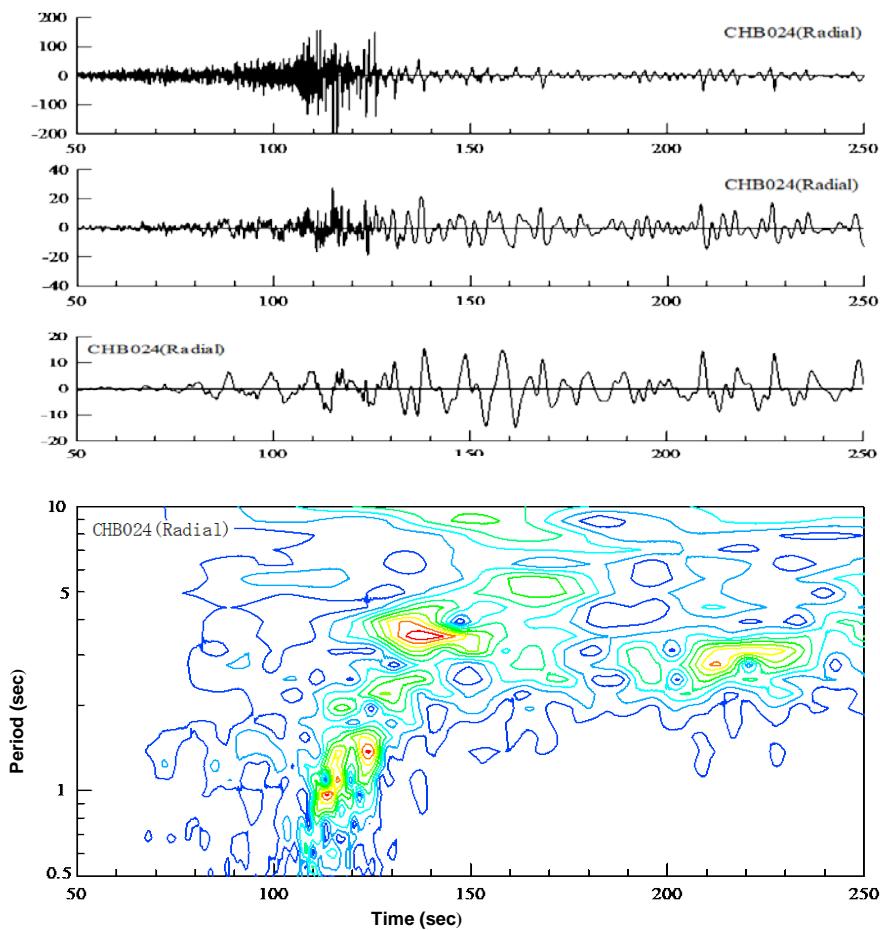


図2.40 K-net 稲毛における加速度記録と速度、変位、非定常スペクトルの分析⁶⁷⁾

東日本大震災では地震直後の貴重な動画がいくつか撮られている。その内の一つとして K-net 稲毛から約4 km 西の千葉市美浜区ひび野の幕張海浜公園の歩道で撮影された動画「地震で波打つ

歩道」には4秒前後の周期で歩道が繰り返しゆっくりと突き上げる現象が撮影されている。撮影者は地震当時自転車に乗っておられて、この動画は大きな揺れが収まった直後から約20秒間撮影されたとのことである。正確な時間は分からぬが、例えば加速度振幅が急減した時から20秒程度と考えると、図2.40では130秒から150秒あたりになり、非定常スペクトルを見ると丁度この時刻あたりは4秒前後の周期が卓越している時に該当する。また、変位振幅も大きくゆっくりと大きく揺すられていた時のようなである。

このような“揺動現象”が原因と考えられる幹線道路の歩道や生活道路の突上げが各地で発生した。浦安市と千葉市で突き上げが発生したと判断される箇所を図2.42、図2.43に示す。写真2.24は浦安市高洲8丁目の歩道で地震の翌日撮影したものであり歩道が盛り上がっていた。右手は幹線道路で左には低い擁壁がある。写真2.25は浦安市今川1丁目の生活道路で舗装が横断方向に押されたように突き上げていた。右手は戸建住宅があり、左手には中層ビルとさらに向こうに京葉線高架橋がある。写真2.26は浦安市舞浜3丁目の生活道路で撮影されたもので、舗装が縦断方向に押されたように突き上げているようである。路面が突き上げたメカニズムとしては、図2.44に示すように地盤に水平方向に大きな繰返し圧縮・引張りひずみが発生し、圧縮した時に突き上げて盛り上がった後、伸張した時に元に戻りきれずに盛り上がったまま残ってしまったと考えられる。地表面が水平で液状化層も均質な水平成層であれば、大きく揺すられ続けてもこのような水平方向の圧縮・引張りひずみは生じない。これに対し、図2.45に示すように水平方向に何等かの境界があった場合にこのような大きな圧縮・引張りひずみが発生したのではないかと考えられる。

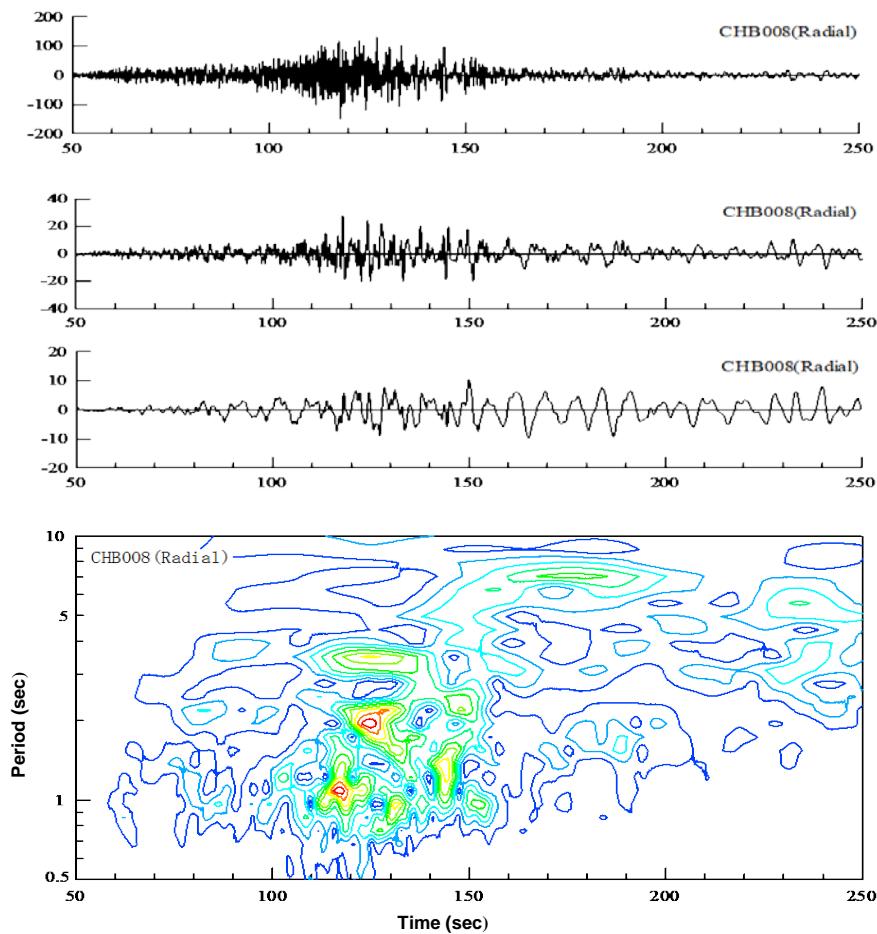


図2.41 K-net 浦安における加速度記録と速度、変位、非定常スペクトルの分析⁶⁸⁾

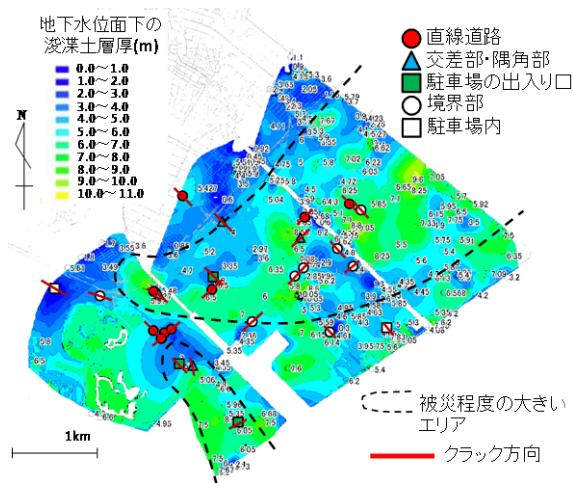


図2.42 浦安で突き上げた箇所と浚渫土層厚⁶⁹⁾

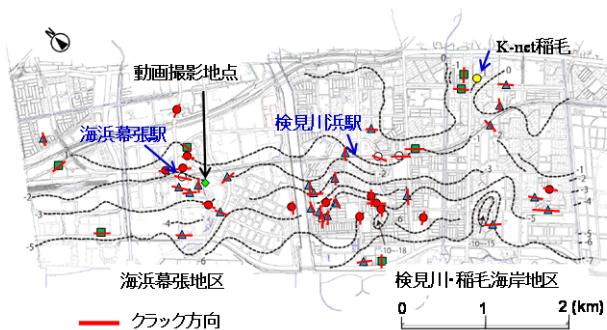


図2.43 千葉で突き上げた箇所⁶⁹⁾

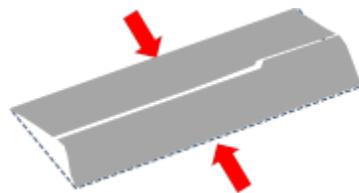


図2.44 水平方向の圧縮ひずみによる突き上げの説明図⁶⁹⁾

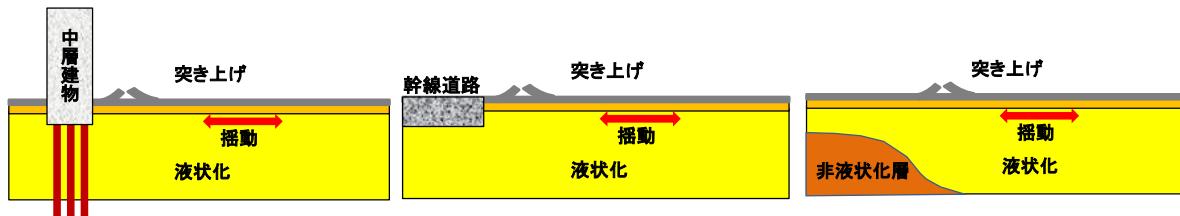


図2.45 突き上げが生じたと考えられる境界条件⁶⁹⁾

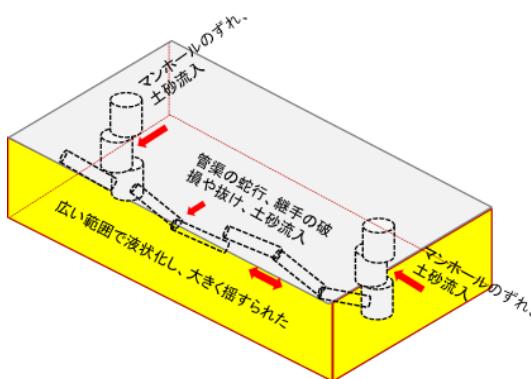


図2.46 埋戻し土と周辺地盤が液状化して生じた下水道施設の被害⁶⁹⁾



写真2.23 水道管の継手の抜け（千葉県による）⁶⁹⁾



写真2.24 浦安市高洲8丁目



写真2.25 浦安市今川1丁目

写真2.26 浦安市舞浜3丁目
(小川氏の撮影による)

下水道、ガス導管等のライフラインでも揺動による特異な被害が発生した。下水道施設では、図2.46に示すように、リングを重ねて建設されていた下水道マンホールがズレ、下水管が蛇行し、継手がはずれるといった特異な被害が発生していた。マンホールがズレたり管渠の継手がはずれた箇所からは液状化した砂が入り込んで、管渠やマンホールを閉塞し、復旧に困難をきたした。逆に過去の地震で多く発生してきた浮き上がりは少なかった。水道管やガス導管にも写真2.23に示すように継手が破損したり抜けるといった被害が発生した。

さて、地盤が液状化した後にさらに地震動が入力し続けて揺動が発生したと考えると、液状化によって低下した一定値のせん断剛性を用いて、FLUSHで挙動を再現できる可能性がある。このように考えて、水道管で発生した被害に解析を行ったところ、引張りひずみの解析結果が大きくなっている箇所付近で水道管漏水被害が発生していた⁷⁰⁾。また、この手法による液状化層の地盤剛性は、微小ひずみ時のせん断剛性 G_0 に対し $1/200 \sim 1/300$ 低下させ、減衰定数を 20% とすると K-NET 稲毛の観測値と整合することがわかった⁷¹⁾。

2.5.8 液状化後の沈下

液状化の過程で発生した過剰間隙水圧の消散に伴って、液状化層が圧縮して沈下を生じる。このような沈下は、盛土構造物などの直接構造物に変形に伴う亀裂などの被害を生じさせ、杭基礎構造物についても周辺地盤が沈下すると杭の抜け上りによりライフラインなどに損傷を与えることがある。液状化後の沈下量の大きさは、被害の程度と関連しているので、これを予測することは被害の程度を予測する上で重要であるが、現行の指針に沈下の予測方法が記載されているのは建築基礎構造物設計指針⁷²⁾においてのみである。本節においては、“液状化後の沈下”に関する既往の研究をまとめ、実用的な沈下の予測法を示す。

(1) 既往の研究

1964年に発生した新潟地震とアラスカ地震を契機に日米で液状化に関する研究が始まったが、液状化後の沈下に関する最初の研究報告は、日本では1975年の Yoshimi et al.⁷³⁾によるもの、米国では1974年の Lee and Albaisa⁷⁴⁾によるものである。それ以後、日本では安田ら⁷⁵⁾ (1981)、國生ら⁷⁶⁾ (1983)、Tatsuoka & Sasaki⁷⁷⁾ (1984) や Ishihara and Yoshimine⁷⁸⁾ (1992) らが単純せん断試験装置や三軸試験装置などの室内実験による実験的な研究を中心に行われている。現在までの研究について列挙したものが表2.1である。同表にまとめた液状化後の沈下に関する研究の歴史について順を追って主なものを以下に概説する。

Tatsuoka & Sasaki⁷⁷⁾は、浅間山砂を使った中空ねじりせん断試験装置により相対密度 D_r と体積ひずみの関係を調べた。その結果、液状化後の再圧密によって発生する体積ひずみは図2.47に示すように、両振幅せん断ひずみと沈下指數（沈下量×相対密度）に一意的な関係あるとした。

Tokimatsu & Seed⁷⁹⁾は、Lee & Albaisa, Tatsuoka et al., Yoshimi et al.による室内試験結果を図2.48のようにまとめて、体積ひずみ、せん断ひずみと相対密度（換算 N 値、 $(N_1)_{60}$ ）の関係（同図(a)）を示した。さらに、この図を使って繰返しせん断応力比と換算(N)₆₀値(N_1)₆₀および体積ひずみの

関係図（図2.49）に変換し、実際の地震後の調査により推定された体積ひずみ（沈下量より）をプロットして妥当な曲線であることを示した。

表2.1 液状化後の沈下に関する研究の歴史

年代	日本	米国
1970	Yoshimi et al. (1975)	Lee & Albaisa (1974)
1980	安田ら (1981) 國生ら (1983) Tatsuoka & Sasaki (1984)	
1990	Ishihara & Yoshimine (1992) 吉田・安田・規矩 (1995)	Tokimatsu & Seed (1987)
2000	Tsukamoto & Ishihara (2004) 仙頭・風間・渦岡 (2004)	
2010	仙頭ら (2013) Ishihara et al. (2016)	

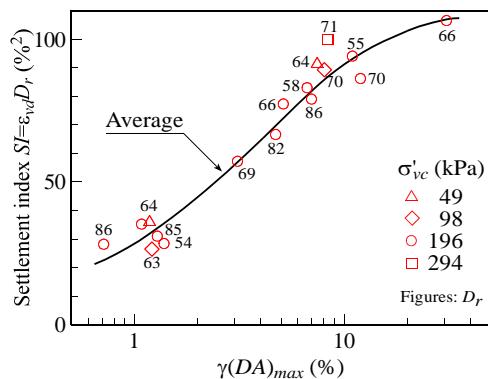


図2.47 最大せん断ひずみ振幅と沈下指数の関係

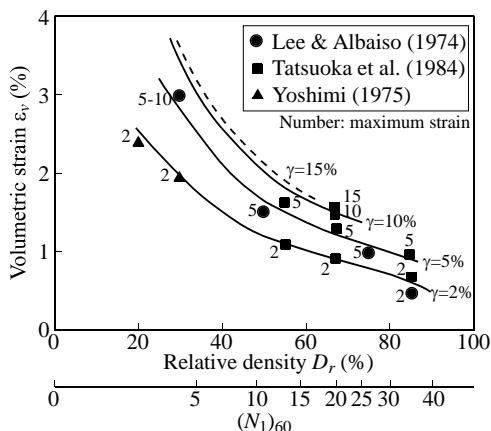


図2.48 砂の体積ひずみとひずみおよび相対密度の関係

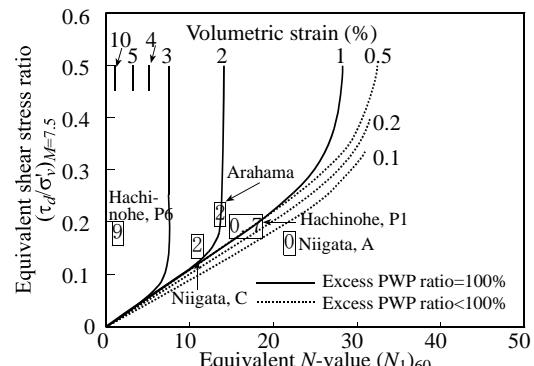


図2.49 飽和砂の繰返しせん断応力比と $(N_1)_{60}$ および体積ひずみの関係

Ishihara and Yoshimine⁷⁹は、富士川砂について単純せん断試験装置を用いて Nagase and Ishihara⁸⁰が実施した実験結果を最大せん断ひずみ γ_{max} と体積ひずみの関係（図2.50）で整理した。そして、液状化安全率 F_L を使って図2.51に示すきれいな砂に対する設計チャートを提案した。

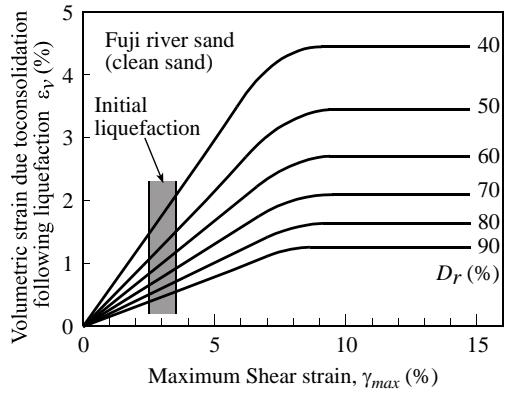


図2.50 最大せん断ひずみと体積ひずみの関係

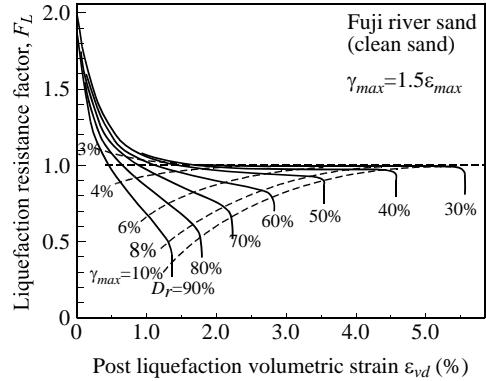


図2.51 液状化安全率と体積ひずみの関係

吉田ら⁸¹⁾は、Yasuda et al.⁸²⁾による実験結果に基づいて体積ひずみについて式(2.6)のように定式化し、図2.52に示すように実験値と計算値がよく一致することを示した。また、仙頭ら⁸³⁾は、豊浦砂に対する繰返しぜり単純試験（ハイブリッドオンライン試験）を実施し、同様の式で定式化しているが、あらたな知見として、体積ひずみは最大せん断ひずみではなく、累加せん断ひずみによくあうとしている。

$$\frac{p'}{p'_0} = \frac{e^{\epsilon_{v0}/c} - 1}{e^{\epsilon_{v0}/c} - 1} \quad (2.6)$$

ここで、 p' ：有効拘束圧、 p'_0 ：初期有効拘束圧、 ϵ_{v0} ：過剰間隙水压消散後の体積ひずみ、
 $c = 0.053\epsilon_{v0} + 0.0007$

仙頭ら⁸⁴⁾は、珪砂5号について実験装置により、図2.53に示すように、液状化試験中に排水すると、非排水条件で行われたこれまでの実験による体積ひずみよりも多くの体積ひずみが生じることを示した。

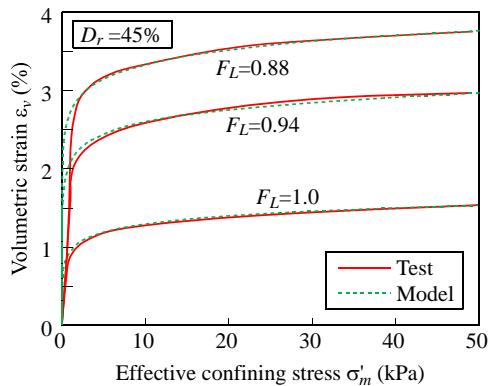


図2.52 過剰間隙水压消散時の体積変化特性

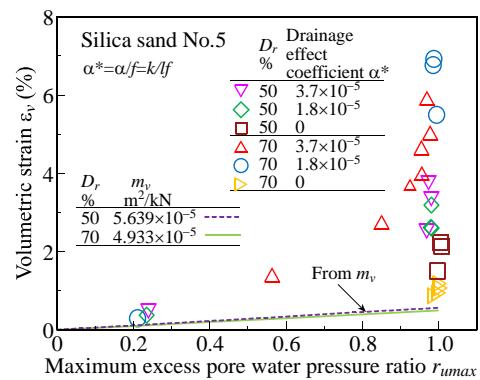


図2.53 最大過剰間隙水压比と体積ひずみの関係

Ishihara et al.⁸⁵⁾は、きれいな砂についての F_L を使った沈下の予測チャート（図2.51）を細粒分を含む砂へ適用拡大するにあたって以下の3つの点を考慮した沈下予測法を提案した。

1) Tsukamoto et al.⁸⁶⁾による ϵ_v の正規化した関係図の使用

図2.51における D_r 毎の ϵ_v に対して、これを最大体積ひずみ ϵ_{vmax} で正規化した $\epsilon_v/\epsilon_{vmax}$ とすることにより同図の複数の曲線を一本の近似曲線で F_L との関係図（図2.54）として使用する。

2) 細粒分を含んだ砂の相対密度である D_r^* の定義と N_1 値と F_c からの推定

まず、細粒分含有率 F_c を考慮した相対密度（補正相対密度）として式(2.7)を定義し、 N_1 値と D_r の関係式である Cubrinovski & Ishihara⁸⁷⁾による提案式において C_D を C_D^* 、 e_{min} を e_{min}^* に置き換えても適用可能として式(2.8)を使用する⁸⁸⁾。式(2.8)中の $e_{max} - e_{min}^*$ は式(2.9)の F_c との関係（図2.55）が示されているので N_1 値と F_c を使って D_r^* を推定することができる。

$$D_r^* = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}^*} \quad (2.7)$$

ここで、 e_{max} : 最大間隙比、 e_{min}^* : 締固め試験から求められた最小間隙比

$$N_1 = C_D^* \cdot D_r = \frac{9}{(e_{max} - e_{min}^*)^{1.7}} D_r^2 \quad (2.8)$$

$$e_{max} - e_{min}^* = \begin{cases} 0.43 + 0.00867 F_c & F_c \leq 5 \\ 0.00096 F_c^2 + 0.01539 F_c + 0.394 & 5 < F_c \leq 30 \\ 0.75 + 0.0064 F_c & F_c > 30 \end{cases} \quad (2.9)$$

3) きれいな砂と細粒分を含む砂に区分した攪乱・不攪乱試料の実験結果による最大体積ひずみ ε_{vmax} の推定

ε_{vmax} の推定にあたっては、沖積層は不攪乱試料の結果（図2.56(a), (b)）を用い、埋立層は攪乱試料の結果（図2.56(c), (d)）を用いて使い分ける。同図(a)は沖積層の砂、(b)は沖積層の細粒分を含む砂、(c)は埋立層の砂、(d)は埋立層の細粒分を含む砂の場合の補正相対密度と最大体積ひずみの関係である。

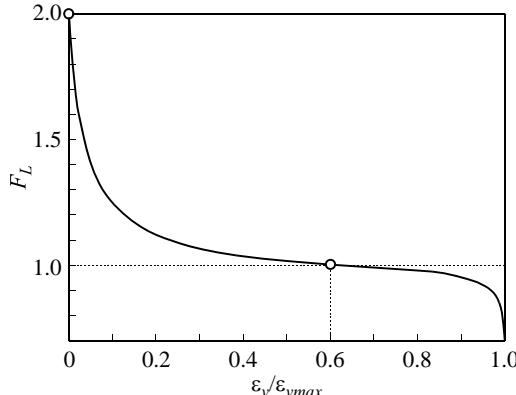


図2.54 D_r と体積ひずみの関係

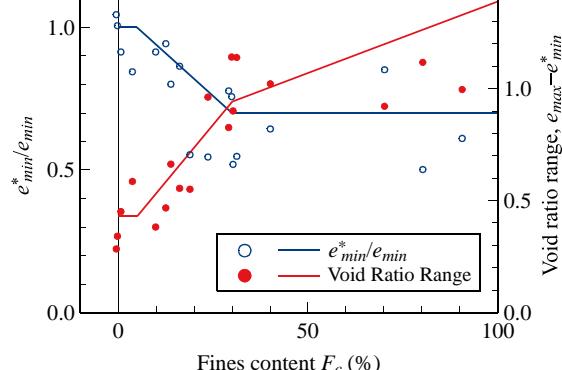


図2.55 e_{min}^*/e_{min} 、 $e_{max} - e_{min}^*$ と F_c の関係

(2) 実用的な沈下の予測方法

表2.1に示した液状化後の沈下に関する研究のうち、柱状図による N 値と細粒分を考慮して沈下予測できる実用的な方法としては、Tokimatsu and Seed の研究に基づいた建築基礎構造設計指針⁷²⁾に示されている方法と Ishihara et al⁸⁵⁾による方法である。

(a) 建築基礎構造設計指針による方法

建築基礎構造設計指針では液状化後の沈下の予測について図2.57のように補正 N 値と応力比の関係が示されている。補正 N 値は N 値から有効土被り圧により換算 N 値 N_1 に、さらに細粒分含有率により補正されて求まり、せん断応力比は等価せん断応力比として地表面加速度がわかれれば繰返しせん断ひずみが求まる。したがって、このひずみを体積ひずみと置き換えて層厚に乗ずれば沈下量を求めることができる。

前述したように、図2.49に示した繰返しせん断応力比と換算(N)₆₀値(N_1)₆₀および体積ひずみの関

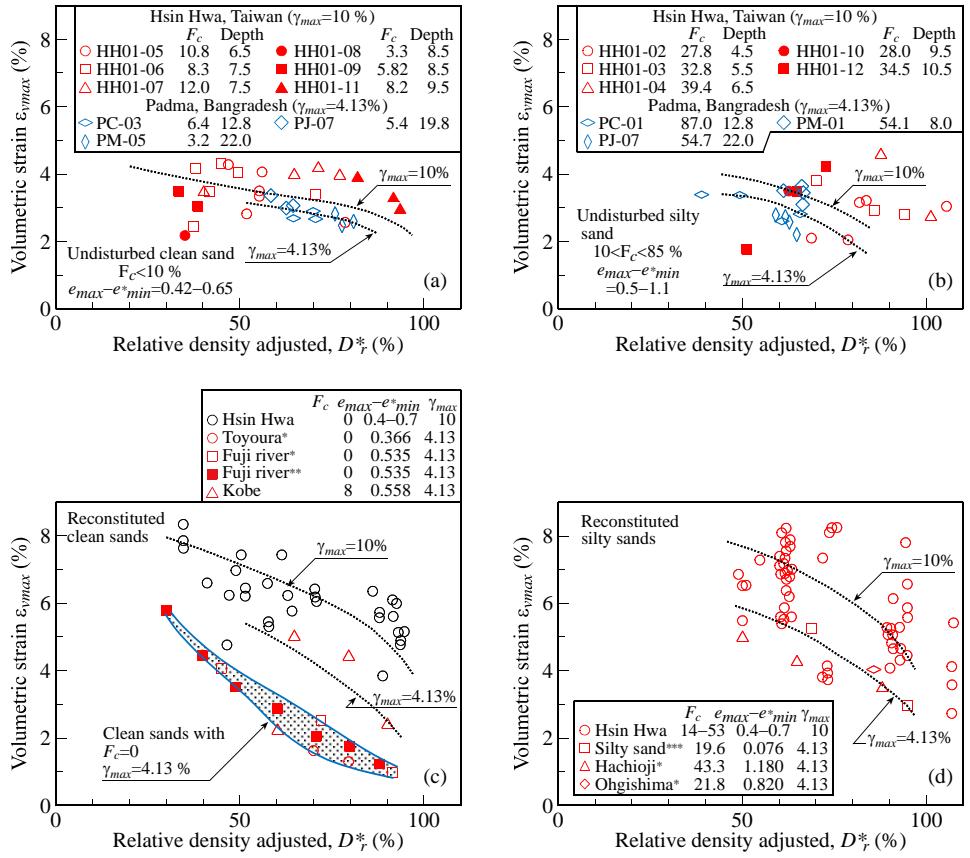


図2.56 攪乱/不攪乱の砂/細粒分を含む砂の最大体積ひずみと相対密度の関係

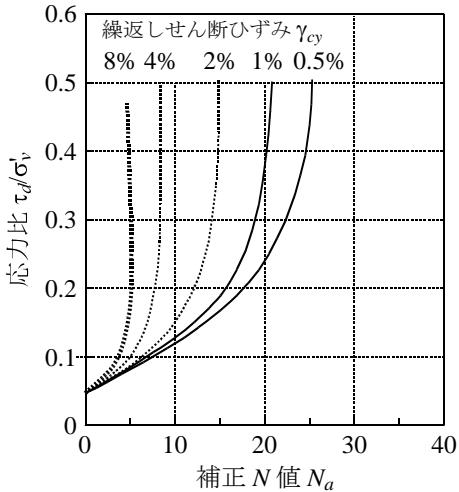


図2.57 補正 N 値と応力比の関係

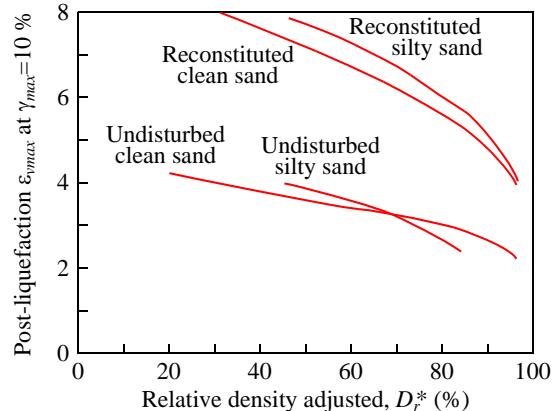


図2.58 補正相対密度と最大体積ひずみの関係

係図において、実際の地震後の調査結果がプロットされており、妥当な曲線であることが示されている。

(b) Ishihara et al.による方法

N_1 値と F_c がわかれば、式(2.9)を使って D_r^* を求めることができる。これに柱状図による層区分と土質分類がわかれば、図2.56(a)-(d)をまとめた図2.58⁸⁹⁾を使って ε_{vmax} を推定できるので図2.54の F_L と $\varepsilon_v / \varepsilon_{vmax}$ の関係図により ε_v が求まり、層厚に乗ずれば沈下量を求めることができる。

この方法の妥当性は、2011年東北地方太平洋沖地震時の浦安において、自然地盤と締固めによ

る改良地盤における実測沈下量とボーリング柱状図による N 値および F_c から求めた推定値がよく一致していることにより検証されている⁸⁵⁾。

参考文献

- 1) Seed, H.B. and Lee, K.L.: Liquefaction of saturated sands during cyclic loading, Proc, ASCE, Vol. 92, No. SM6, pp. 105–134, 1966
- 2) Green, P. A. and Ferguson, P. A. S.: On liquefaction phenomena by professor A. Casagrande: report of lecture, Geotechnique Engineering, Vol. XXI, No. 3, pp. 197–202, 1971
- 3) 小泉安則：新潟地震における砂の密度の変化，土と基礎，第13巻2号，pp. 12–15, 1965
- 4) 中川誠志：砂層液状化の実用的判定法（上），橋梁と基礎，Vol. 12, No. 10, pp. 31–35, 1978
- 5) Mogami, T. and Kubo, K.: The behavior of sand during vibration, Proc. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.152–155, 1953.
- 6) 石井靖丸, 土田肇: 含水砂の振動性状に関する研究, 第1回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 195–200, 1962
- 7) 吉田望：液状化現象メカニズムから数値解析まで, 森北出版, 372pp., 2020
- 8) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫: 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No. 638/III-49, pp. 71–89, 1999
- 9) Hamada, M., Ohtomo, K., Sato, H., Iwatake, T.: Experimental Study of Effects of Liquefaction-induced Ground Displacement on In-ground Structures, Proc., 4th Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-92-0019, Vol. 1, pp. 481–492, 1992
- 10) 吉田望, 永瀬英生, 三浦均也: 講座・液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響, 地盤の流動化に伴う発生のメカニズムと解析法（その1）, 土と基礎, Vol. 47, No. 8, pp. 47–52, 1999
- 11) Okamura, M., Abdoun, T. H., Dobry, R., Sharp, M. K. and Toboada, V. M.: Effects of sand permeability and weak aftershocks on earthquake-induced lateral spreading, SF, Vol. 41, No. 6, pp. 63–77, 2001
- 12) 吉田望: 噴砂が過剰間隙水圧の消散に及ぼす影響, 第43回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 450–451, 1988
- 13) Sato, H., Hamada, M. and Doi, M.: A Study on mechanical properties of liquefied soil as a fluid, Proc. 5th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Chicago, Illinois, pp. 189–198, 1994
- 14) 大友敬三: 地中構造物に及ぼす地盤側方流動の荷重特性評価, 土木学会論文集, No. 591/1-43, pp. 283–297, 1998
- 15) 濱田政則, 若松加寿江: 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, No. 596/III-43, pp. 189–208, 1998
- 16) 土居賢彦, 佐藤博, 浜田政則, 湯浅明: 液状化している砂の物性に関する実験的研究, 第28回土質工学研究発表会, pp. 1187–1190, 1993
- 17) 国松直, 神宮司元治, 今泉博之: 液状化した砂試料の粘性係数に関する一考察, 土木学会論文集, No. 659/III-52, pp. 277–285, 2000
- 18) 浜田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本克利: 液状化による地盤の永久変位の測定と考察, 土木学会論文集, No. 376, III-6, pp. 211–220, 1986
- 19) 浜田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本克利: 液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 376, No. III-6, pp. 221–229, 1986
- 20) Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K.: Study on liquefaction induced permanent ground displacements, Association for Development of Earthquake Prediction, 1986
- 21) The San Fernando Valley Earthquakes, February 9, 1971, and January 17, 1994, USGS, Product No. 647-A11-020,
- 22) Seed, H. B., Seed, R. B., Harder, L. F. and Jong, H. –L.: Re-evaluation of the slide in the Lower San Fernando Dam in the earthquake of February 9, 1971, Report No. UCB/EERC-88/04, University of California, Berkeley, 1988
- 23) Seed, R. B. and Harder Jr., L. F.: SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength, Proc., H. Bolton Seed Memorial Symposium, University of California, Berkeley, Vol. 2, pp. 351–376, 1990
- 24) Seed, H.B.: Design problems in soil liquefaction, J. GT, Vol. 113, No. 8, pp.827–845, 1987
- 25) Mishima, S. and Kimura, H.: Characteristics of landslides and embankment failures during Tokachioki earthquake, SF, Vol. 10, No. 2, pp. 39–51, 1970
- 26) Finn, W. D. L.: State-of-the-art of geotechnical earthquake engineering practice, SDEE, Vol. 20 2000, Special Issue, the 9th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, pp. 1–15, 2000
- 27) Ishihara, K.: Soil behavior in Earthquake Geotechnics, Oxford Engineering Science Series 46, Oxford Science Publications, 1996.
- 28) Hosono, Y. and Yoshimine, M.: Liquefaction of sand in simple shear condition, Proc. of the 3rd International Conference on Cyclic Behavior of Soils and Liquefaction Phenomena, pp. 129–136, 2004, 2004
- 29) Ishihara, K.: Soil behavior in Earthquake Geotechnics, Oxford Engineering Science Series 46, Oxford Science Publications, 1996.
- 30) Yoshida, N., Yasuda, S. and Ohya, Y.: Two criteria for liquefaction-induced flow, Proc., Geotechnical Earthquake Engineering Satellite Conference, Osaka, Japan, pp. 109–116, 2005
- 31) 国土地理院: 地理院地図,

- https://maps.gsi.go.jp/#15/38.045742/140.912683/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f0&d=m
- 32) Liu, L. and Dobry, R.: Centrifuge earthquake modelling of liquefaction and its effect on shallow foundations, Dept. of Civil and Environmental Eng., RPI, New York., 1993
- 33) Yoshida, N. and Finn, W. D. L.: Simulation of liquefaction beneath an impermeable surface layer, SDEE, Elsevier, Vol. 19, No. 5, pp. 333–338, 2000
- 34) Arulanandan, K., Seed, H.B., Yogachandran, C., Muraleetaran, K.K., Seed, R.B. and Kabiramany, K.: Centrifuge study on volume changes and dynamic stability of earth dams, J. GT, Vol. 119, No. 11, pp. 1717–1731, 1993
- 35) 吉田望, 永瀬英生, 三浦均也 : 講座・液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響, 地盤の流動化に伴う発生のメカニズムと解析法 (その1), 土と基礎, Vol. 47, No. 8, pp. 47–52, 1999
- 36) 危険物保安技術協会 : 屋外貯蔵タンク地盤の安全性に関する調査研究報告書 (平成6年度) タンク地盤の液状化に関する調査検討, 1995
- 37) 三上武子, 吉田望, 小林恒一 : 二次液状化による変形係数の変化, 第42回地盤工学研究発表会平成19年度発表講演集, pp. 1871–1872, 2007
- 38) Yoshida, N. and Mikami, T.: Behavior of sand during secondary liquefaction, proc. 7ICEGE (7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering), pp. 5784–5791, 2019
- 39) 液状化対策工法, 地盤工学・実務シリーズ18, 地盤工学会, 513pp., 2004
- 40) 井合進, 小泉勝彦, 倉田栄一 : 液状化対策としての地盤の締固めの範囲, 土と基礎, Vol.39, No.2, pp. 35–40, 1991
- 41) 若松加寿江 : 日本の液状化履歴マップ745-2008, pp.23–27, 東京大学出版会, 2011
- 42) Yasuda, S. and Tohno, I.: Sites of reliquefaction caused by the 1983 Nihonkai-chubu earthquake, Soils and Foundations, Vol. 28, No. 2, pp. 61–72, 1988
- 43) 若松加寿江 : 2011年東北地方太平洋沖地震による地盤の再液状化, 日本地震工学会論文集, Vol. 12, No. 5, pp. 69–88, 2012
- 44) Yoshida, N. and Wakamatsu, K.: Re-liquefaction of fill land - a comparison between the Loma Prieta earthquake and Japanese earthquake, Proc., International Symposium of Safety of Urban Life and Facilities, Lessons Learned from the 1989 Loma Prieta Earthquake, pp. 3.1–3.15, 1990
- 45) Youd, T. L.: Recurrence of liquefaction at the same site, Proc., 8th World Conf. on Earthquake Engineering, San Francisco, Vol. 3, pp. 231–238, 1984
- 46) 地盤工学会2011年 Christchurch 地震による被害に対する災害緊急調査団 : 2011年ニュージーランド Christchurch 地震による被害に対する災害緊急調査団報告書, 公益社団法人地盤工学会, 2011.
- 47) Finn, W. D. L., Bransby, P. L. and Pickering, D. J.: Effect of strain history on liquefaction of sand, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.96, No.SM6, pp.1917–1934, 1970.
- 48) 石川敬祐, 及川晃介, 安田進 : 砂の液状化後の体積ひずみに液状化履歴が及ぼす影響, 第56回地盤工学研究発表会, 論文番号13-1-6-06, 2021
- 49) 青柳悠大, Wahyudi, S., 古閑潤一, 佐藤剛司, 宮下千花 : 大小様々な液状化ひずみ履歴を与えた複数回液状化試験と消散エネルギーを用いた分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4 (地震工学論文集第35巻), pp. I_167–I_176, 2016
- 50) Sasaki, Y. and Taniguchi, E.: Shaking table tests on gravel drains to prevent liquefaction of sand deposits, Soils and Foundations, 22(3), 1, 1982
- 51) 脇中康太, 谷本俊輔, 石原雅規, 佐々木哲也 : 地震履歴が砂の液状化強度およびコーン貫入抵抗に及ぼす影響に関する動的遠心模型実験, 日本地震工学会論文集, 第15巻, 第6号, pp. 44–59, 2015
- 52) 菅野高弘, 中澤博志 : 液状化対策に関する実物大の空港施設を用いた実験的研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1195, 2009
- 53) 京川裕之, 清田隆, 近藤康人, 小長井一男 : 東北地方太平洋沖地震による浦安市埋立地盤の液状化被害調査, 地盤工学ジャーナル, 7(1), pp.265–273, 2012
- 54) Kiyota, T., Ikeda, T. Yokoyama, Y. and Kyokawa, H.: Effect of in-situ sample quality on undrained cyclic strength and liquefaction assessment, SF, Vol. 56, No. 4, 691–703, 2016.
- 55) 安田進, 橋本隆雄 : 東日本大震災で液状化した地盤における地震前後の N 値の比較, 第52回地盤工学研究発表会, No.0799, pp.1595–1596, 2017
- 56) Takahashi, Y., Tanimoto, K.: Change of SPT N-values measured on reclaimed land due to the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Third Kanasai International Geotechnical Forum; KIG Forum 2000, pp.95–104, 2000
- 57) 大沢信二・西村進編 : 温泉と地球科学, ナカニシア出版, 189pp., 2016.
- 58) 奥澤保・塚原弘昭 : 松代群発地震地域に湧出する地下水の直下地震にともなう化学成分変化, 温泉化学, 第51巻, 第4号, pp.147–163, 2002.
- 59) 松田時彦 : 松代地震から50年—謎のまま残った—, 地震ジャーナル, 60号, pp.24–29, 2015.
- 60) 気象庁 : 松代群発地震50年特設サイト, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/matsushiro/mat50/disaster/higai.html>
- 61) 地盤工学会 : 1999年トルコ・コジャエリ(Kocaeli)地震調査報告書, 2000.
- 62) 安田進 : コジャエリ地震等における地下水の噴出による傾斜地盤の滑りや流動, 日本地震工学会2021大会, 2021.
- 63) 石原研而・安田進・東畑郁生・古市久士・若杉護 : 地震で長距離流動した砂質土の特性に関する試験, 第56回地盤工学研究発表会講演集, 13-9-1-03, 2021.
- 64) 安田進 : 地震による長距離流動の発生メカニズムに関する一考察, 第76回土木学会年次学術講演会講演集,

III-307, 2021.

- 65) JICA : 液状化地すべり（内陸部）に関する国内支援委員会技術検討書，インドネシア国中部スマラウェン州復興計画策定及び実施支援プロジェクト，2021。
- 66) (独)防災科学技術研究所：強震ネットワーク K-NET, <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 67) Yasuda, S., Suetomi, I. and Ishikawa, K.: Effect of long duration of the main shock and a big aftershock on liquefaction-induced damage during the 2011 Great East Japan Earthquake, *Perspective on Earthquake Geotechnical Engineering, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, No.37, Springer, pp.343-364, 2015.
- 68) Yasuda, S., Suetomi, I. and Ishikawa, K.: Effect of long duration of the main shock and a big aftershock on liquefaction-induced damage during the 2011 Great East Japan Earthquake, *Perspective on Earthquake Geotechnical Engineering, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, No.37, Springer, pp.343-364, 2015.
- 69) 安田進・石川敬祐・五十嵐翔太・石原瞳・鴨下匡一：地盤液状化した地盤の揺動がライフラインと道路に与えた影響，地盤工学会特別シンポジウム東日本大震災を乗り越えてー，pp. 518-526, 2014.
- 70) 安田進・石川敬祐・五十嵐翔太・田中佑典・畠中哲夫・岩瀬伸朗・並木武史・斎藤尚登：東日本大震災における浦安市の水道管被害メカニズムの解明，日本地震工学会論文集，第16巻，第3号，pp.183-200, 2016., https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaee/16/3/16_3_183/_pdf-char/ja
- 71) 石川敬祐・安田進：液状化に伴う地盤揺動に対する地震応答解析の有効性の検証，第70回土木学会年次学術講演会講演集, III, pp.561-562, 2016.
- 72) 建築構造物設計指針：第3章 敷地地盤の安全性，3.2節 地盤の液状化，pp 66-67, 2019
- 73) Lee, K. L. and Albaisa, A.: Earthquake induced settlements in saturated sands, *J. GT, ASCE*, Vol. 100, No. GT4, pp 387-406, 1974
- 74) Yoshimi, Y., Kuwabara, F., and Tokimatsu, K. : One-dimensional volume change characteristics of sands under very low confining stresses, *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 3, pp 51-60, 1975
- 75) 安田進，山口勇，田中猛：液状化と沈下量，過剰間隙水圧，第16回土質工学研究発表会，pp 94-95, 1981
- 76) 國生剛治，吉田保夫，西好一，江刺靖行：密な砂地盤の地震時安定性評価法の検討ー（その1）な砂の動的強度特性，電力中央研究所報告，研究報告，No. 353025, 1983
- 77) Tatsuoka, F., Sasaki, T., Yamada, S.: Settlement in saturated sand induced by cyclic undrained simple shear, *Proc., 8WCEE*, Vol. 3, pp 95-102, 1984
- 78) Tokimatsu, K. and Seed, H. B.: Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking, *J. GT*, Vol. 113, No. 8, pp 861-878, 1987
- 79) Ishihara, K. and Yoshimine, M.: Evaluation of Settlements in sand deposits following liquefaction during Earthquakes, *SF*, Vol. 32, No. 1, 173-188, 1992
- 80) Nagase, H. and Ishihara, K.: Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, *SF*, Vol. 28, No. 1, pp 65-76, 1988
- 81) 吉田望，安田進，規矩大義（1995）：砂の液状化後の挙動のモデル化，第30回土質工学研究発表会，pp. 789-792
- 82) Yasuda, S., Masusa, T., Yoshida, N., Nagase, H., Kiku, H., Itafuji, S., Mine, K. and Sato, K.: Torsional shear and triaxial compression test on deformation characteristics of sand before and after earthquake, *Proc., 5th Japan and US Workshop on earthquake resistant design of lifeline facilities and countermeasures against soil liquefaction*, Technical report NCEER-94-0026, pp. 249-265, 1994
- 83) 仙頭紀明・風間基樹・渦岡良介：非排水繰返しせん断履歴後の再圧密実験と体積収縮特性のモデル化，土木学会論文集，No. 764, III-67, pp. 307-317, 2004
- 84) 仙頭紀明，斎藤正平，海野寿康，大野康平：過剰間隙水圧消散工法を適用した地盤の繰返しせん断に伴う体積ひずみの予測法，第48回地盤工学研究発表会，pp. 1769-1770, 2013
- 85) Ishihara, K. and Harada, K. W. F. Lee, C.C. Chan and A. M. M. Safiullah: Post-liquefaction settlement analyses based on the volume change characteristics of undisturbed and reconstituted samples, *Soils and Foundations*, Vol. 56, No. 3, pp. 533-546, 2016
- 86) Tsukamoto, Y., Ishihara, K. and Sawada, S.: Settlement of silty sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundations*, Vol. 44, No. 5, pp. 135-148, 2004
- 87) Cubrinovski, M. and Ishihara, K.: Empirical correlation between SPT *N*-value and relative density for sandy soils, *Soils and Found.*, Vol. 39, No. 5, pp. 61-71, 1999
- 88) 原田健二，石原研而：攪乱・不攪乱試料に基づく簡易な液状化による沈下予測法，第68回土木学会学術講演会講演集，pp. 107-108, 2013
- 89) Tsukamoto, Y. and Ishihara, K.: Advances in soil liquefaction engineering, Springer, 185pp., 2022

3 液状化の定義

液状化の定義は、2つの意味がある。1つは、液状化とはどういう現象かと定義すること、もう一つは力学的に定義することである。前者については、2章で説明しているので、ここでは、後者を重点に議論する。ただし、両者は互いに関連しているところもあるので、完全に分離することは出来ない。

3.1 液状化発生の判定

液状化に関する初期の Seed らの論文には、液状化強度曲線は示されているが、液状化の判定をどのようにしたのかの記述はみられない。これは、液状化が有効応力が0になることと考えられていたので、初期液状化が常識であったためであろう。

日本の設計指針でも、最初の指針、たとえば1972年の道路橋耐震設計指針¹⁶⁾、1974年の建築基礎構造設計指針¹⁹⁾では限界 N 値法が用いられているので、液状化の定義は不要であった。なお、建築基礎構造設計指針では F_L 法が提案されている Seed & Idriss¹⁾ の記述もあるが、単に名前が示されているだけで、説明はまったくない。

北米の指針の下となつたのは、Seed & Idriss^{2,3)} (1981, 1983年) であるが、ここでは、Ishihara & Koga⁴⁾ の新潟の砂に対する液状化強度曲線を引用しており、ここでは、液状化判定として間隙水圧による液状化、 $DA=5$ 、10%データが示されている。Seed らがこのうちどれを用いたのか分からなかった。

Tokimatsu & Yoshimi⁵⁾ (1983年) は建築基礎構造設計指針の元になった論文で、凍結サンプリングによる実験式を提案している。ここでは実験結果を図3.1の様にまとめ、

$$\frac{\sigma_d}{2\sigma'_c} = a \left\{ \frac{D_r}{100} + \left(\frac{D_r}{C} \right)^n \right\} \quad (3.1)$$

が良い近似式であるとしている。ここで、 a 、 n は定数で、 $a=0.45$ 、 $n=14$ を用いれば、 C の値として次が得られる。

$$C_a = 97 - 19 \log DA \quad (\text{三軸試験, } DA : \%)$$

$$C_s = 94 - 19 \log \gamma \quad (\text{単純せん断試験, } \gamma : \%) \quad (3.2)$$

建築基礎構造設計指針（1988年版より）はこのうち、単純せん断試験の $\gamma=5\%$ を用いている。

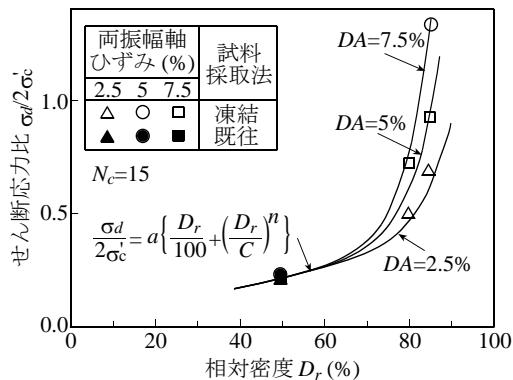


図3.1 液状化強度と相対密度の関係

Seed & Peacock⁶⁾ (1971年) は液状化に与える種々の条件の比較などを行っているが、ここでも、液状化判定法は示されていない。Seed & Tokimatsu⁷⁾ (1985年) では N 値と液状化強度の関係を示しているが、せん断ひずみ振幅3, 10, 20%が示されている。

北米の技術者がよく用いる液状化判定法 (F_L 法) の1つである Idriss & Boulanger⁸⁾では、 N 値と液状化強度の式は示されており、De'Alba⁹⁾の論文（過剰間隙水圧比 $r_u=100\%$ ）や Yoshimi ら¹⁰⁾の論文 ($DA=5\%$)、Vaid & Sivathayalan,¹¹⁾ ($\gamma=3\%$) が引用されているが、最終的にどれを用いているのか分からなかった。もう一つの液状化判定法である、NCEER の Workshop¹²⁾では図3.2(a)の様に示されているが、この元は(b)に示す Seed ら⁷⁾の液状化強度曲線をきれいな砂の基準曲線を引用している。(c)の様に両者を比較すると、 $\gamma=3\%$ の曲線と NCEER の基本となるきれいな砂の液状化強度が一致しているので、せん断ひずみ $\gamma=3\%$ が用いられていると判断できる。

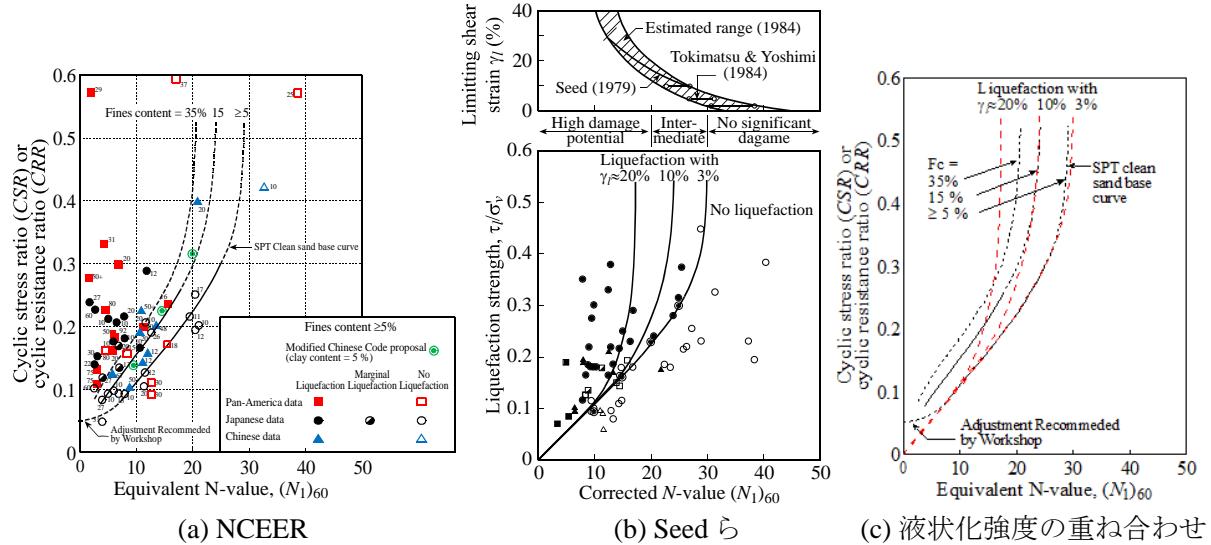


図3.2 NCEER Workshop による液状化判定

安田¹³⁾は、昔は、緩詰めの試料を用いた試験が行われたので、判断方法にもあまり注意が払われなかつたとしているが、これが、上に述べた様に液状化発生の判断が描いていない理由であろう。彼は、本の執筆時点（1988年）での液状化判定法を表3.1の様にまとめている。また、最近は $DA=5\%$ がよく用いられるが、これは本来構造物の耐力との兼ね合いで決めるべきものとしている。

表3.1 液状化時点の判断方法

着目点	液状化時点の判断方法	判断方法がとられている理由
ひずみ	ひずみ振幅の急増点	破壊現象が生じ始めるとの考え
ひずみ	軸ひずみ両振幅 ($DA=5\%$)	構造物が被害を受けるひずみに達したのではないかとの考え
ひずみ	軸ひずみ両振幅 $10\sim25\%$	大ひずみが生じ、構造物は必ず被害を受けるのではとの考え
間隙水圧	急増し始める時点	液状化し始めたとの考え
間隙水圧	飛び出し現象が生じ始める時点	液状化し始めたとの考え
間隙水圧	$u/\sigma'_0 = 1.0$ (または、一定値) に達した時点	有効拘束圧が0となり液状化したとの考え

道路橋示方書では、2015年道路橋示方書の参考資料¹⁴⁾で $DA=5\%$ が記述された。それ以前には、判定基準は示されていない。これは、道路橋示方書で最初に F_L 法が採用された1980年版の元になった石原の論文¹⁵⁾は図3.3に示すように過去のいくつかの実験結果を集めたものであることから、いくつか違った液状化判定法のデータが示されている可能性がある。 $DA=5\%$ が明瞭に示されたのは1996年版で、新しい判定法の経緯を示している松尾¹⁶⁾には5%と書いてある。ただし、1996年版には書いていない。

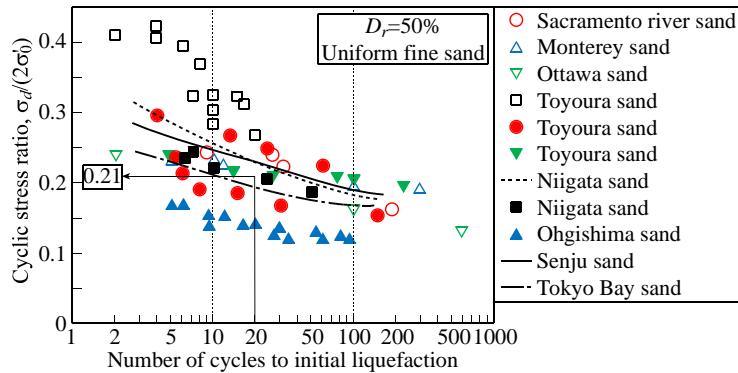


図3.3 相対密度50%の砂の液状化強度曲線

地盤工学会の土質試験の方法と解説では1979年版には記述なし。1990年版¹⁷⁾では、 $DA=5\%$ （ただし、せん断応力振幅は $DA=1\%$ の平均値。これ以上だとせん断応力振幅を一定に保ちにくい）が記述されている。ただし、 $DA=5\%$ を唯一の値としているわけではなく、図3.4に示すように、いくつかの基準が示されている。なお、載荷過程については $DA=1, 2, 5\%$ 、必要に応じて 10% と過剰間隙水圧比が95%の記述があるが、報告事項の中には、 $DA=1, 2, 5\%$ の出力が記述されているだけで、過剰間隙水圧比95%の記述はない。

地盤工学会の指針では、液状化強度試験の記述は三軸試験についてのみで、中空ねじり試験についてではない。現在、地盤工学会関東支部で、中空ねじりによる液状化強度試験委員会が作られ、検討中であるが、試験法の本に採用されるかは未知である。

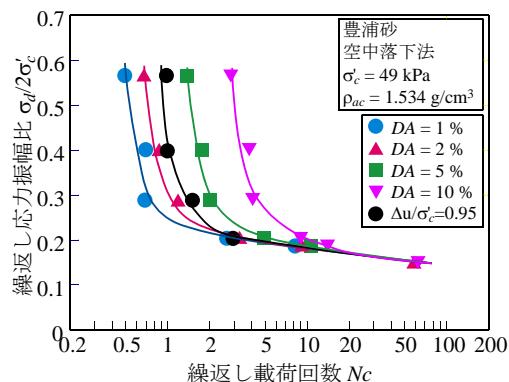


図3.4 液状化強度試験の整理例¹⁷⁾

以上に示したように、最近の傾向として、液状化発生の判断はひずみで行われることが一般的になっている。しかし、ひずみでは判断することが出来ない事もある。たとえば、振動台実験や遠心力載荷試験では、変位の計測は困難で、過剰間隙水圧の発生量で液状化の判断をしている。また、地震の被害調査の際の液状化発生の判断は噴砂で行われており、有効応力が0になることで判断していると考えられる。被害位置で変位を計測することはほとんど不可能である。仮に、地震計があって記録が得られているとしても、加速度記録を積分することになるので、一般には残留変位を求める事が出来ない。

従って、間隙水圧による液状化判定とひずみによる液状化判定の両方が必要と考えられる。一方、どちらか片方を判定基準とすると、ボイリングやせん断破壊も液状化発生と扱う必要性が生じてくる。

3.2 液状化強度の補正

前節で示したのは、ほとんどが三軸試験で、等方応力状態に対する試験に基づいている。しかし、実地盤はこの状態とはかなり異なっている。

(1) 単純せん断变形条件

地盤工学会の試験法では、水平成層と比べて次の違いがあるとしている¹⁷⁾。

表3.2 水平地盤内の土の応力および変形の状態の比較

	地震時の水平地盤内	三軸、等方試験
初期応力	異方	等方
繰返し荷重の波形	不規則であり、水平面内で多方向に加わる。	正弦波であり、供試体内の任意の面でのせん断方法は二方向にしか変わらない。
繰返し時の変形状態	要素の高さ、および水平面の形と面積は一定（単純せん断变形）の状態に近い。	単純せん断变形条件は満たされていない。

このうち、単純せん断条件との違いについては、液状化研究のはじめから意識されていたようで、剛土層の中央部を単純せん断条件と考えたり、単純せん断試験機を作成したりしてその違いが求められた。たとえば、Peacock & Seed¹⁸⁾は両者の違いを、1)単純せん断条件では主応力軸の回転が起こる、2)原位置では K_0 応力状態にある、3)原位置の応力状態は平面ひずみ状態、4)繰返し載荷に対して、単純せん断条件では挙動が対称になるのに対して三軸試験では圧縮側と伸張側で非対称になる、などをあげ、単純せん断試験機を作成し、図3.5(a)の結果を得て、単純せん断条件の液状化強度は三軸試験に比べて著しく小さいことを示した。これに対して、Finn ら¹⁹⁾は単純せん断試験で応力比を初期有効上載圧 σ'_v で正規化するのは好ましくないとして、代わりに、初期有効拘束圧で正規化すべきと考え、 $1/2 \cdot (1 + K_0) \sigma'_{v0}$ （二次元状態を考えている）で正規化し、図3.5(b)に示すように、三軸試験と単純せん断試験が同じ線上に載ることを示した。その後、Ishihara らは三次元状態の初期有効拘束圧 $1/3 \cdot (1 + 2K_0) \sigma'_{v0}$ で正規化することにより図3.6の様に K_0 の影響を除くことが出来る事を示し、現在ではこれが一般的な補正法となっている。

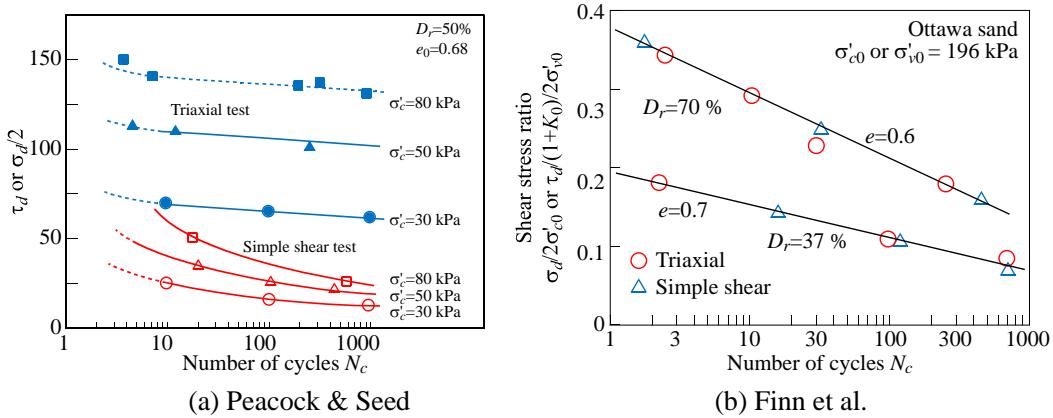


図3.5 単純せん断条件と三軸試験の違い

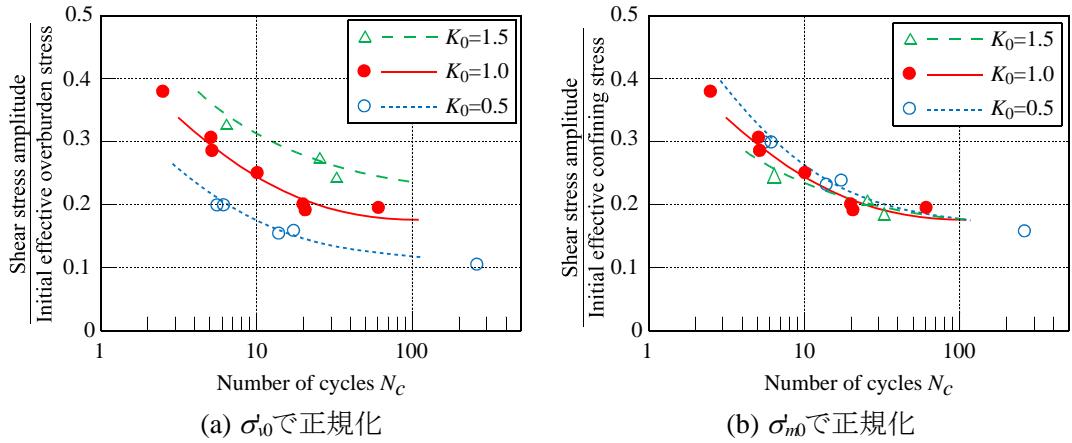


図3.6 K_0 状態の補正²⁰⁾

(2) 初期せん断

これまでの議論は、水平成層に関するものであった。しかし、斜面などでは、初期せん断応力が作用している。

初期の研究では、Lee & Seed²¹⁾は三軸試験で初期せん断を作用させた実験を行い、繰返し載荷される応力の符号が変化しなければ液状化は起こらないこと、初期せん断が大きいほど液状化強度は大きくなることなどを示している。

Seed & Idrissにより提案された F_L 法²²⁾は液状化判定に広く用いられている。この方法は、液状化強度を標準貫入試験の N 値などを用いて液状化強度を求めていている。Seed²³⁾はダムの液状化解析について初期せん断を考慮すべきとして、次の補正法を示した。

$$\left(\frac{\tau_c}{\sigma'_0} \right)_\alpha = \left(\frac{\tau_c}{\sigma'_{\text{v}0}} \right)_{\alpha=0} K_\alpha \quad (3.3)$$

ここで、 α は初期せん断応力 τ_{st} の有効上載圧 $\sigma'_{\text{v}0}$ に対する対する比 $\alpha = \tau_{\text{st}} / \sigma'_{\text{v}0}$ であり、図3.7で示されている。なお、図の赤線が Seed によるもの、その他は Harder & Boulanger²⁴⁾が Seed の研究を引用した際のものである。NCEER の Workshop²⁵⁾²⁶⁾では Harder & Boulanger が K_α に関するまとめを報告した。その中では、いろいろな過去の研究が紹介され、最終的に図3.8を提案したが、ばらつきが大きいからということで、Workshop の推奨には入らなかった。これに対して、Idriss & Boulanger⁸⁾では

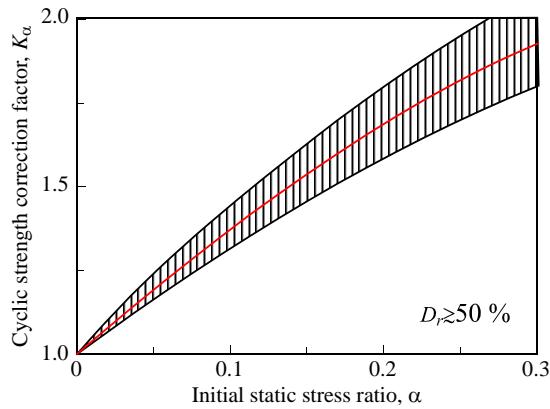


図3.7 初期せん断に対する補正係数 K_α

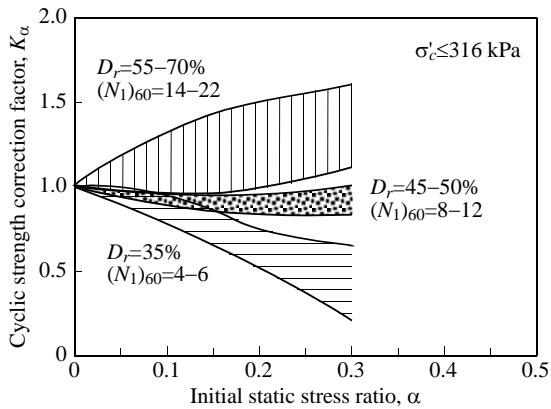


図3.8 K_α の提案²⁴⁾

$$K_\alpha = a + b e^{-\xi_R/c} \quad (3.4)$$

を提案している。ここで

$$\begin{aligned} \alpha &= 1267 + 636\alpha^2 - 634e^\alpha - 632e^{-\alpha} \\ b &= e^{-1.11+1.23\alpha^2+1.61\ln(\alpha+0.0001)} \\ c &= 0.138 + 0.126\alpha + 2.52\alpha^2 \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\xi_R = \frac{1}{Q - \ln\left(\frac{100(1+2K_0)\sigma'_{vx}}{3P_a}\right)} - \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{46}} \quad (3.6)$$

である。ここで、 Q は粒子形状によるパラメータでおおよそ 10 (石英, 長石), 8 (石灰岩), 7 (無煙炭), 5.5 (白亜) 程度の値です²⁷⁾。

既往の研究は、先の Harder & Boulanger²⁴⁾にも示されているが、細野によるまとめ²⁸⁾の方が分かり易い。図3.9に示す。

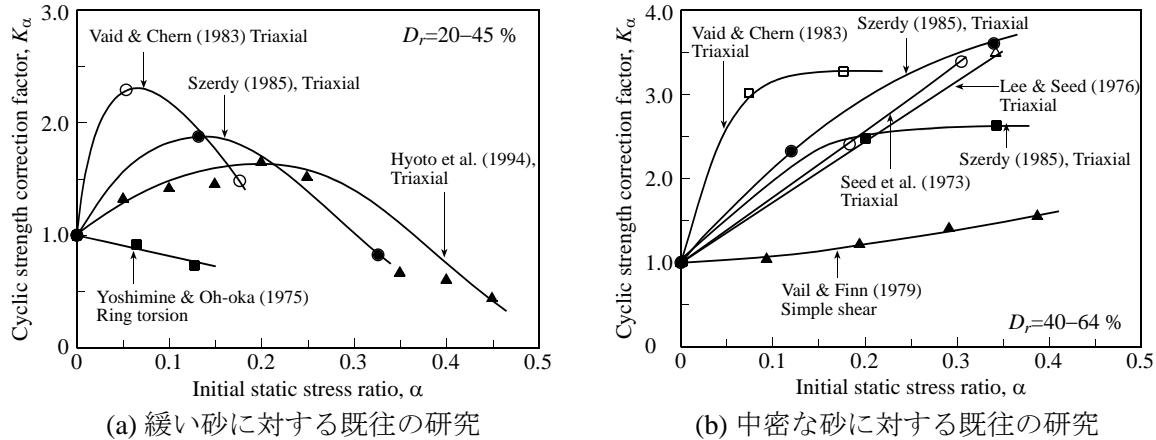


図3.9 K_α に関する既往の研究まとめ²⁸⁾

これまでに見たように、既往の研究では、ばらつきが大きく、その影響を定量的に議論するのには時期尚早と考えられる。さらに、これまでの研究は三軸試験によるものがほとんどであり、実地盤とは対応しない。地盤の堆積状況と初期応力の作用方向が異なることに関しても研究は少ない。さらに、構造物直下のように、水平方向には応力境界になっているようなケースに関する研究はない。

これらについては、今後の研究が期待されるところである。

3.3 液状化を説明する文章

5章に示されるように、液状化に関する説明はいろいろである。しかし、中には古い考えに基づくものもある。また、ほとんどがメカニズムの説明を引用なしでしている。しかし、これまでに示したように、出版物によっても異なるメカニズムが示されていることから分かるように、常識というわけでもない。そこで、ここでは、現在の知見に基づくメカニズムが分かりやすいすべり面に沿った粒子の運動を考える「すべりモデル」によるメカニズムで説明する。このすべりモデルでは、砂の繰り返し載荷時の挙動を説明できないことは粒状体力学の分野では認識されているようである。なお、これまで議論してきたように、液状化と呼ばれる現象にはいろいろなメカニズムがあり、以下で示すのは水平成層で液状化が発生する、いわば一番単純なケースに限られている。

(1) 短い説明

飽和した土が繰返しせん断に伴い、粒子構造が壊れ、有効応力が減少し、破壊する現象

(2) やや長い説明

砂のような粒状体は、緩く堆積した状態でせん断変形を受けると粒子が間隙に落ち込み体積が減少しようとするが、間隙が水などで飽和していると体積変化が起きにくく、水平方向にずれた土粒子が間隙水に浮いた状態になり、粒子構造が壊れ、有効応力が減少し、破壊する現象。

(3) 長めの説明

砂のような粒状体（粒子が接触点の摩擦抵抗により形を保つ物質）が地震の様な水平方向の力を受け、接触力が摩擦抵抗を超えて接点を消失し、接触面に沿った方向に移動し、粒子の間の隙間に落ち込んだり、隣接する粒子に乗り上がったりする必要がある。前者では体積が縮小し、後者では体積が増加する。このようにせん断変形に対して体積が変化する現象をダイレイタンシーといい、粒状体に特徴的な現象である。しかし、間隙が水で飽和されていると、粒子の自由な運動は阻害されるため、たとえば体積変化が起きなくなる。粒子が緩く堆積していると、粒子間のかみ合わせがはずれやすく、間隙中に粒子が浮いているような状態となる。すると、接触点を介しての粒子間力、すなわち、有効応力が減少し、地震前に作用していた力（外力）を受け持てなくなる。外力の大きさが変わらないとすれば、この減少分を間隙水が負担することになり、過剰間隙水圧が発生する。多数の粒子がこのような状態になれば、土粒子が外力を受け持つ力が失われ、飽和砂は全体的挙動としては液体状に挙動するので、これを液状化と呼ぶ。一方、隣接する粒子に乗り上げる、すなわち、体積膨張（正のダイレイタンシー）が起こる場合は、粒子間の力が増大し、有効応力が増加する。そのため、間隙水圧が減少する。これはサイクリックモビリティといわれる現象である

参考文献

- 1) Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249–1273, 1971
- 2) Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Ground motions and soil liquefaction during earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute Monograph, Oakland, 134pp., 1982
- 3) Seed, H. B., Idriss, I. M. and Arango, I.: Evaluation of liquefaction potential using field performance data, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol 109, No 3, pp 458–482, 1983
- 4) Ishihara, K and Koga, Y.: Case Studies of Liquefaction in the 1964 Niigata Earthquake, Soils and Foundations, Vol. 21, No. 3, pp. 35–52, 1981.
- 5) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. : Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, SF, Vol. 23, No. 4, pp. 56–74, 1983
- 6) Seed, H. B. and Peacock W. H.: Test procedures for measuring soil liquefaction characteristics, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No. SM8, pp. 1099–1119, 1971.
- 7) Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F. and Chung, R. M.: Influence of SPT procedure in soil liquefaction resistance evaluations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 12, ASCE, pp. 1425–1445, 1985
- 8) Idriss, I. M. and Boulanger, R. W.: Soil liquefaction during earthquakes, EERI Publication No. MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, 237pp., 2008
- 9) Alba, P. D., Seed, H. B., M. ASCE and Chan, C. K.: Sand liquefaction in large-scale simple shear tests, J. GE, ASCE, Vol. 102, No. GT9, pp. 909–927, 1976
- 10) Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., Kaneko, O. and Makihara, Y.: Undrained cyclic shear strength of a dense Niigata sand, Soils and Foundations, Vol. 24, No. 4, pp. 131–145, 1984
- 11) Vaid, Y. P., and Sivathayalan, S.: Static and cyclic liquefaction potential of Fraser Delta sand in simple shear and triaxial tests, Canadian Geotechnical Journal Vol. 33, No. 5, pp. 281–289, 1996
- 12) Proc. of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Salt lake City, Utah, Technical Report NCEER-97-0022
- 13) 安田進：液状化の調査から対策工まで，鹿島出版会，243pp., 1988
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計に関する参考資料，日本道路協会，302pp., 2015
- 15) Ishihara, K.: Simple method of analysis for liquefaction of sand deposits during earthquake, SF. Vol. 17, No. 3, pp 1–17, 1977
- 16) 松尾修：道路橋示方書における地盤の液状化判定法の現状と今後の課題, 土木学会論文集 No.757, III-66, pp.1-

20,2004

- 17) 土質工学会：土質試験の方法と解説，土質工学会，1990，615pp
- 18) Peacock, W.H. and Seed, H. B.: Sand liquefaction under cyclic loading simple shear conditions, Proc, American Society of civil engineers, Vol. 94, No. SM3, pp 689–708, 1968
- 19) 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
- 20) Ishihara, K., Iwamoto, S., Yasuda, S. and Takatsu, H.: Liquefaction of anisotropically consolidated sand, 9ICSMFE, Vol. 2, pp 261–264, 1977
- 21) Lee, K. and Seed, H. B.: Dynamic strength of anisotropically consolidated sand, Proc. ASCE, Vol. 93, SM5, pp. 169–190, 1967
- 22) Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249–1273, 1971
- 23) Seed, H.B.: Earthquake-Resistant Design of Earth Dams, Proc. 1st Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, pp. 1157–1173, 1981
- 24) Harder, L.F., Jr and Boulanger, R.: Application of K_σ and K_α correction factors, Proc. of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Salt lake City, Utah, Technical Report NCEER-97-0022, pp. 167–190, 1997
- 25) Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.O., Liao, S.S.C., Marcuson III, W. F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., and Stokoe II, K.H.: Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, J. GT, Vol. 127, No. 10, Paper No. 22223., pp. 817–833, 2001
- 26) Proc. of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Salt lake City, Utah, Technical Report NCEER-97-0022
- 27) Boulanger, R.W.: High Overburden Stress Effects in Liquefaction Analyses, Jour. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No. 12, pp. 1071-1072, 2003
- 28) 細野康代：初期せん断荷重を受ける砂の液状化強度と流動解析，東京都立大学学位論文，2007

4 液状化に関連する用語

地盤工学会「液状化メカニズム・予測法と設計法に関する研究委員会」では教科書、専門書を集めて液状化という用語がどのように定義されているのか調べている¹⁾。その結果、使われ方が文献により少しづつ異なっていることが分かった。その原因の一つは、現象を短い言葉で表現しようとしたとき、重点の置き方が人により異なることであろう。また、多くの人は、用語の定義など考えることなく、安易に利用しているということも考えられる。

以下では、液状化に関連する用語のこれまでの使われ方を紹介する。

4.1 北米の研究

(1) Seed らの認識

液状化は、これまで述べてきたように、当初は土が液体のようになると考えられていた。液体であれば、せん断応力には抵抗しない。たとえば、Seed & Lee²⁾は次の様に述べている。

A soil may be considered to have liquefied when its resistance to deformation is zero over a wide strain amplitude. In sands, this can occur only when the effective confining pressure is also zero. (液状化とは、大きいひずみ振幅において、土の変形抵抗がゼロになることである。砂の場合は、有効拘束圧がゼロになって初めて液状化が起こる。)

たとえば、図4.1は繰返し載荷の結果であるが、彼らは、

The stress versus strain relationships for cyclic strain tests are slightly different from those in constant stress amplitude tests since the resistance of the specimen decreases progressively. Thus the hysteresis curves of stress versus strain become progressively flatter, ultimately becoming horizontal when the sand liquefies (繰返しひずみ試験の応力ーひずみ関係は、試料の抵抗が徐々に減少するため、一定の応力振幅の試験の場合とは若干異なる。そのため、応力ーひずみ関係は徐々に平坦になり、最終的には砂が液化したときに水平になる。)

これからわかるように、液状化は有効応力が0でせん断に抵抗しない状態と考えられていた。

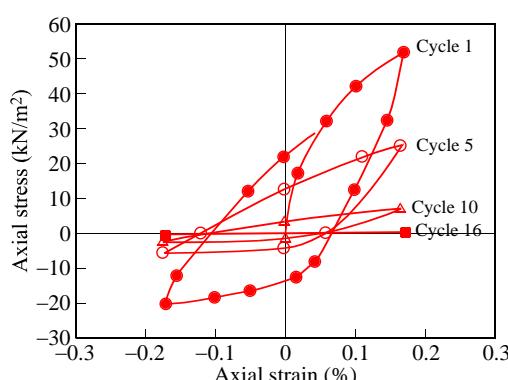


図4.1 液状化に至る繰返し載荷結果²⁾

彼らは、液状化に伴う現象を次の様に定義した

- ・崩壊 (Failure) : ひずみが過剰になった時。ひずみが例えば20%の両振幅に達したときに発生したと考えるのが妥当であるが、多くの場合、より小さな値がより適切であろう。この基準では、飽和した砂が全く液状化せずに破壊することも考えられるが、実際にはそのようなことはあり得ない。
- ・完全液状化 (Complete liquefaction) : 広いひずみ範囲、例えば20%の両振幅の範囲で、土が変形に対して抵抗を示さない（あるいは無視できる）状態をいう。したがって、飽和した砂

が完全に液状化した場合は、必ず実用上の崩壊となる。

- ・部分液状化 (Partial liquefaction) : 破壊すると考えられているよりも小さいひずみ範囲で変形に対する抵抗を示さない状態。飽和した砂が部分的に液状化しても、採用する破壊基準によっては破壊しないこともある。
- ・初期液状化 (Initial liquefaction) : 繰り返し荷重をかけたときに、土が初めて部分的な液状化を起こしたこと。部分液状化の定義から、飽和した砂は相当数の応力繰返しの間、部分的に液状化した状態になる可能性があることがわかる。したがって、部分液状化の開始を初期液状化と呼ぶのが好都合である。

Castro³⁾はこれを次の様にまとめた。

- ・ひずみが1%以下では繰返しによるひずみの増加は非常に小さいが過剰間隙水圧は単調に増加する。
- ・軸差応力が0の状態で間隙水圧が初期有効拘束圧と等しくなる事があり、Seed・Lee の用語に従えば、部分液状化 (partial liquefaction) の発現と捉え、初期液状化⁴⁾とよび、この状態に至る繰返し回数は間隙比、有効拘束圧、軸差せん断ひずみの大きさに依存している。
- ・部分液状化の間には、繰返しに伴いひずみは大きくなる。この間で、軸差応力が0の状態で有効応力が0になる状態がある。
- ・ひずみが20%になった状態を完全液状化とよぶ。

すなわち、実験結果から繰返し載荷に伴い破壊状態に至るケース（液状化）と、過剰間隙水圧が減少し強度を回復するケース（サイクリックモビリティ）があるので、混乱を避けるために、両者に異なる名前をつけた方がよいとの意見を出した。すなわち、図4.2(a)の点線に示すように、単調載荷試験では、排水試験ではせん断応力が単調に増加するのに対して、非排水載荷（aとb）ではピーク後応力が急激に減少し、残留強度に至る。繰返し載荷（c）でもその後の単調載荷で同様な挙動を示す。しかし、図(b)に示すように、繰返し後に強度が増加する（サイクリックモビリティ）ものがあり、両者を区別しようというものである。

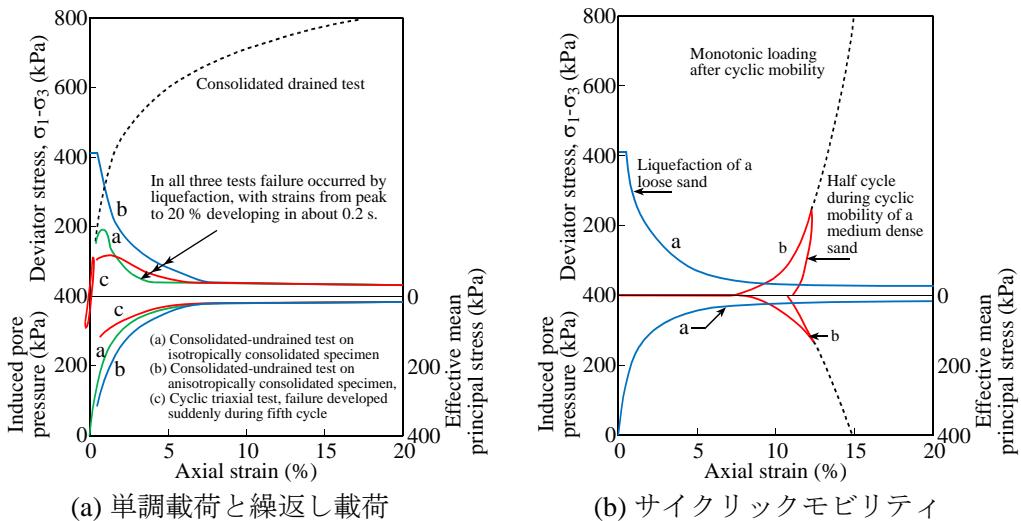


図4.2 非排水載荷による液状化とサイクリックモビリティの応力ーひずみ関係

Castro の議論は、単調載荷と繰返し載荷を同列に扱うなど、今の目からみるとなじめないところもあるし、材料、試験条件も明瞭ではないので、詳細な議論は困難である。しかし、Seed & Lee の論文、Castro の Seed らの研究に対するまとめ、などをみると、液状化とは、せん断剛性が0であり、液体として挙動しているときと定義していると考えられる。この観点で見ると、使われている用語は、次の様に理解できる。

- ・完全液状化（Complete liquefaction）：液体状になる。ひずみ20%が目安。ただし、この数値は固定ではなく、事例とした実験結果によるだけ。単に液状化と言うときにはこの状態を指す。
- ・初期液状化（Initial liquefaction）：有効応力が最初に0になったとき。液状化するのは有効応力が0になる必要があるので、液状化の入り口を表す
- ・部分液状化（Partial liquefaction）：初期液状化から（完全）液状化に至る間の部分。
ただ、この考えは現在の液状化に対する考え方とは異なっており、その意味で、現在も使われている初期液状化以外は、適用出来ないと考えられる。

(2) 現在の認識

アメリカでは NCEER の主催で地震工学委員会が作られてワークショップが開催され、その成果が「Liquefaction of soils during earthquake」という本にまとめられている⁵⁾。このワークショップには先の Seed, Castro をはじめ、この分野で活動している北米の多くの研究者が参加している（日本からは石原研而、吉見吉昭の二人が参加）。この報告書の Overview の冒頭に以下が示されている。

The shaking of the ground may cause a loss of strength or stiffness during earthquakes that result in the settlement of buildings, landslides, the failure of earth dams, or other hazards. The process leading to such loss of strength or stiffness is called soil liquefaction. It is a phenomenon associated primarily, but not exclusively, with saturated cohesionless soils. (地震の際の地盤の振動は、建物の沈下、斜面崩壊、アースダムの崩壊、そのほかの災害を起こすような強度や剛性が失われる。この強度や剛性の低下を引き起こす過程を土の液状化とよぶ。この現象は飽和した粘着力のない土で主に引き起こされるがこれ以外の土を排除するものではない。)

さらに、その後、理解されている点として、以下を挙げている。

The word liquefaction, as generally used, includes all phenomena involving excessive deformations or movements as a result of transient or repeated disturbance of saturated cohesionless soils. Thus, both flow failures and deformation failures are said to be liquefaction failures. (一般的に使われている液状化という用語は、飽和した粘着力のない土に過渡的または繰返しによる外乱が作用した結果生じる過剰な変形や移動を含むすべての現象を表すものとして使われている。したがって、流動破壊や変形による破壊はすべて液状化による破壊であるといえる。)

ということで、現在使われている意味での液状化とほぼ同じ内容が示されている。これらの議論でのキーポイントは「飽和した粘着力のない土=砂」で「繰返しにより強度や剛性の低下」が引き起こされ、「液状化破壊と呼ばれるような流動破壊や変形破壊を伴う」被害を発生させるという事である。

4.2 Liquefaction という用語の履歴

液状化（Liquefaction）という用語は、1964年以前にも使われていたが、流砂、ボイリングなどの事を指しており、現在の液状化（繰返し載荷による現象）の意味では使われていない。たとえば、1964年新潟地震のあと作られた害地域の木造建物の調査⁶⁾では、家屋被害の原因を地盤変状や流砂現象と描いていることからわかるように、液状化という用語は日本では一般的ではなかった。

英語の Liquefaction という用語を現在の意味で初めて使ったのは、最上・久保ではないかと考えられる。彼らは、1953年に上下動による液状化に関する論文を書いているが⁷⁾、そこで Liquefaction という用語を使っている。最上⁸⁾によると、liquefaction という用語は知らなかつたが、この論文で引用符（"）付きで液状化（liquefaction）としたとしており、繰返せん断による液状化（現在使われている液状化の意味）の最初の呼び名と思われる。そして、この用語が米国で使われるようになり、それが日本に逆輸入される形で液状化という用語が使われるようになったと

考えられる⁹⁾。

ところで、この論文では1951年の地震の際の Amagasaki の噴砂が示されているが、理科年表にはこの年の地震は載っていない。勝又¹⁰⁾は1951年には4つの地震（千葉県中部 M6.2、長崎県温泉岳 M5.4、新潟県南部 M5.2、青森県北東沖 M6.5）を報告しているのみである。Amagasaki は地名辞典¹¹⁾で調べると、兵庫県尼崎市、京都府伏見区のある町名しかなく、地震との対応がつかない。尼崎が正しいとすれば、1944年東南海地震が対応しそうに思われ、著者らが勘違いをしたのかもしれない。

1964年新潟地震の後、いくつかの被害報告が出版されている。たとえば、建築研究所¹²⁾、林野庁¹³⁾、港湾技術研究所¹⁴⁾、土木学会¹⁵⁾などである。このうち、林野庁は流砂という用語を使っているが、他の報告では流動化という用語が使われた。たとえば、道路橋関係で最初に液状化が取り上げられた、道路橋耐震設計指針¹⁶⁾（1972年）、道路橋示方書と名前が変わった1980年版¹⁷⁾では流動化の用語が使われており、1990年版¹⁸⁾より液状化と用語が変わった。一方、建築基礎構造設計指針では初めて液状化が取り上げられた1974年版¹⁹⁾では液状化という用語が使われている。なお、吉見²⁰⁾は「1960年に改訂された“建築基礎構造設計規準・同解説²¹⁾”には、緩い砂が液状化する可能性について述べられていたが、やや遠慮がちな表現だったためか、深刻に受け取られなかつたことは残念でした」と述べている。1960年版には「特に緩い砂地では地震時に浅い基礎下の土が流動しやすくなり側方に逃げるため基礎が沈没し」という記述があり、これを指しているのであるⁱⁱⁱが、ここで流動とあるのも、流砂現象のことで、現在の液状化という現象とは少し意味が違うと考えられる。このあたりの議論は文献²²⁾に詳しい。

文献¹⁾によれば、流動化の用語は1970年代前半までは液状化を示す用語として使われる場合があり、1968年十勝沖地震、1973年根室沖地震、1978年宮城県沖地震と、液状化が発生した地震が起こったことから流動化という用語は次第に用いられなくなったとある。ここで、液状化と言っているのは、液状化しても流動しないという意味である。

その後、2.4で述べた様に、液状化により大きな水平変位が生じる現象が問題になり、「液状化に伴う流動」という用語が使われるようになった。

4.3 過去の委員会活動で議論された名称

4.3.1 液状化メカニズム・予測法と設計法に関する研究委員会¹⁾

この章の最初で述べた委員会報告では、使われ方に関する調査の結果、液状化に関してよく用いられる用語として以下を示している。

(1) 使用頻度の高い用語

- ・ 初期液状化：過剰間隙水圧が初期有効拘束圧に等しくなった時。ただし、地盤工学会の液状化の判定では95%となっている
- ・ 完全液状化：土が大きなひずみを受け、液体状に挙動する。
- ・ サイクリックモビリティ：繰返し載荷を行うと、有効拘束圧が0に近づいてから、載荷時のせん断剛性の回復と除荷時の有効応力の減少を繰返し、次第に液状化に近づいていく現象。このため、有効応力が0に近くなったとしても剛性回復のため、大きいひずみが発生しない。
- ・ 再液状化：一度液状化した地盤が次の地震により再び液状化する現象

(2) 使用頻度は高くないが、特殊な現象を表すために使用されている用語

- ・ 突発的液状化：極めて緩い飽和砂質土がごく軽微な刺激により液状化する現象
- ・ 進行性液状化：液状化によって斜面付近の砂層が順次崩壊していく現象

ⁱⁱⁱ 著者に確認した

- ・準液状化：過剰間隙水圧は上昇しているが、初期有効拘束圧にまで至っていないので、せん断強度がある程度残っている状態。
- ・不完全液状化：過剰間隙水圧が上昇を始めてから、最大間隙水圧に至るまでの状態
- ・永久変位、側方流動：地盤が一旦液状化すると、急な勾配ではなくても地盤全体がある方向に動き出す現象
- ・側方移動：液状化した地盤が横に向かって移動する現象
- ・斜面の流動的崩壊：斜面内の土が液状化した場合の崩壊形態（崩壊土砂は遠くまで到達する）

(3) そのほかの土および地盤の動的特性を表す用語

- ・初期せん断力：斜面地や構造物の周辺地盤に作用しているせん断力を想定したもの。 K_0 応力状態もせん断応力が作用した状態ではあるが、初期せん断力とはいわないようである
- ・繰返し軟化：繰返しにより土のせん断剛性が低下する現象（たとえば、高塑性の土に対して用いる用語。ただし、液状化する場合にも用いることができる）
- ・繰返し強度：ある回数の繰返しせん断によって、ある破壊規準を満たす状態になるとき、たとえば、せん断ひずみがある値（たとえば、両振幅5%）に達するときや過剰間隙水圧比がある値（たとえば、0.95）になるとときのせん断応力振幅
- ・動的強度：以前は、繰返しのことを動的とよんだので、繰返し強度と同じ意味。現在では、載荷速度の依存性を見るときなどに使われる。

4.3.2 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関する研究委員会

地盤の液状化に関して、もう一つの問題は、これまでの議論の後で見つけられた、1983年日本海中部地震を契機として現れた液状化に伴う流動現象である。この現象が問題となった頃、地盤工学会で「地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関する研究委員会」²³⁾が作られ、表4.1に示すように現象が整理された²⁴⁾。

このときの議論は、土要素としての現象と地盤で起こる現象を分けた方がよいというものであった。なお、表で述べられている駆動力は液状化した土が液体として挙動するのに必要な外乱という意味ではなく、たとえば、斜面などで初期せん断が作用しているなどの力を表している。

表4.1 委員会でまとめられた液状化に伴う流動の用語²⁴⁾

土要素の液状化		地盤の液状化		
液状化していない土	液状化している土		液状化していない地盤	液状化している地盤
準液状化 Pre-liquefaction phase	液状化 Liquefaction	駆動力なし No driving stress	非流動 No flow	非流動 No flow
非流動化 No flow	非流動性液状化 No flow liquefaction	駆動力あり Driving stress	限定期的流動 Limited flow	限定期的流動 Limited flow
	限定期的流動性液状化 Limited flow liquefaction		側方流動 (側方移動) Lateral spread	(限界なし) 流動性液状化 Flow
	(限界なし) 流動性液状化 Flow liquefaction			

ところで、これらの議論は繰返し載荷が契機となって液状化が発生するというキーワードはあるが、液状化してさらに振動を受けた場合の挙動を余り考えていないようにも思われる。

4.3.3 レベル2地震動による液状化研究小委員会

土木学会地震工学委員会の小委員会²⁵⁾で検討されている。まず、4.1(2)で述べた NCEER の Workshop の記述が紹介され、「ここで注目すべきことは、液状化は地盤の強度または剛性の低下により沈下や破壊が起こる現象であり、飽和した砂地盤に限定していないことである。つまり、

極端なことを言えば粘土地盤でもよいのである。このようなことから、液状化のメカニズムで必ず説明に使われる過剰間隙水圧という言葉も使用していない。間隙水圧の上昇・蓄積には関係なく、とにかく地震荷重により地盤の強度や剛性が低下して、沈下や破壊が起こる現象すべてをいっているのである。」とまとめている。さらに、一般に使われている用語の例として、広辞苑の記事「砂の地盤が地震の衝撃で流れ易くなる現象。砂粒の間に飽和していた水の圧力の変化で水が動き、砂の粒間結合が破られて、砂全体が液体のようにふるまうと考えられる。地震動が大きいと液状化のため建物が被害を受け、砂が地上に噴出し噴砂となる。特に埋立地などで見られる。」を紹介し、一般の人の液状化という現象に対するイメージが「恐らく通常はしっかりとしている地盤が地震時には液体状になることがある」という事であろうと推測している。その後、これまでに示した委員会の紹介をしている。

この小委員会では NSF の Workshop の記述にある液状化の定義について、対象材料については、あらゆる地盤材料を対象としていて、被害現象については、ひずみ増加に伴うあらゆる地盤変形を対象としていて、かなり広義な範囲を液状化の対象と解釈しているといえる。

この後、液状化の定義をしているが、そこでは、広義の液状化と狭義の液状化があることを紹介し、単に液状化と言うときには狭義の液状化を指すとしている。これらを含め、次の用語が紹介されている。

- (狭義の) 液状化：(狭義の) 液状化は、地震の繰返せん断力など、によって、飽和した砂や砂礫などの緩い非粘性土からなる地盤内で間隙水圧が上昇・蓄積し、有効応力がゼロまで低下し液体状となり、その後地盤の「流動」をともなう現象、または「流動ポテンシャル」をもった地盤となる現象。
- 広義の液状化：広義の液状化は、緩い砂地盤や砂礫地盤に限定せず、密な砂地盤や密な砂礫地盤さらに粘性土地盤でも地震などを含む種々の外力によって有効応力が低下し、地盤の強度または剛性の低下により有害な沈下や変形などが起こる現象。一般に飽和地盤が多いが、不飽和地盤においても起こる類似の現象（ただし、そのメカニズムは必ずしも解明されていない）も含むものとする。
- 繰り返し軟化、サイクリック・ソフトニング (Cyclic softening)：繰り返し載荷による間隙水圧上昇と剛性低下によりせん断ひずみが発生し、それが繰り返し回数とともに徐々に増大するが、土のもつダイレタンシー特性や粘性のためにひずみは有限の大きさにとどまり、大きなひずみ範囲にいたるまでの流動は起きない。
- サイクリック・モビリティ (Cyclic mobility)：繰り返し載荷において土が「繰り返し軟化」する過程で、限られたひずみ範囲ではせん断抵抗が小さくなってしまっても、ひずみが大きく成長しようとすると、正のダイレタンシー特性のためにせん断抵抗が急激に作用 (mobilize) し、せん断ひずみの成長に歯止めがかかる現象。主に、密な砂や礫質土、過圧密粘土のように正のダイレタンシー特性が著しい土において顕著に現れる。
- 流動または流動ポテンシャル：狭義の液状化のところで既にこれらの用語を用いているが、その定義は実は漠然としている。一般的に流動の真の意味は液体のように無限のひずみまで抵抗無く流れることであるが、要素試験によれば実地盤ではあまり見られない相対密度が30%以下の緩い砂でも、液状化後の非排水せん断により10~20%程度のせん断ひずみで抵抗が回復することが知られている。一方、実地盤ではもっと大きなひずみまで液体のように流動したケースも多く知られており、そのメカニズムについては未だ議論の多いところである。したがって、流動あるいは流動ポテンシャルを明確な定量的条件により定義づけることは現時点ではできないが、多くの液状化判定基準で用いられている軸ひずみ両振幅5%（せん断ひずみ両振幅7.5%）をはるかに越えたひずみが発生する場合に対して、流動するあるいは流動ポテンシャルを有するという用語を使うべきであるといえよう。
- 広義の液状化=「(狭義の) 液状化」+「繰り返し軟化」（「サイクリック・モビリティを含む」）+「その他」のような関係になる（図4.3参照）。ただし、「その他」については

類似の幅広い現象に液状化の用語を適用できる自由度を残すため付け加えている（例えば、不飽和地盤での広義の液状化等）。

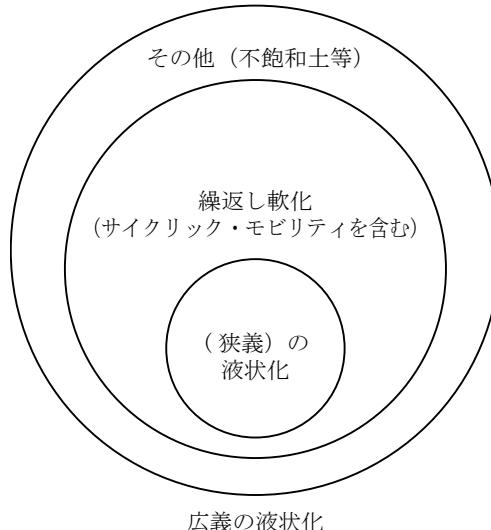


図4.3 液状化の定義

4.4 名称に関するまとめ

用語については、すでに3つの委員会でまとめられている。ただ、まとめ方が異なるところもあるし、現在多く使われている用語と異なる所もある。そこで、これまでの用語を整理する事を試みる。このまとめの目的は、液状化にかかる用語について、すべての関連分野で共通認識があるわけではないことを解説し、可能な範囲で普遍的な用語の利用法を定めていく必要性を論じ、正確な現象の表現のためには、文章中の用語を自分で定義することの必要性を示すものである。よって、この委員会報告での記述をもって「正しい用語としての認知」を求めるものではない。

4.4.1 各種の用語とメカニズム

(1) 水平成層の液状化

室内試験や、水平成層の液状化については、次のようなステージがある。まず、

- ①過剰間隙水圧が全く（ほとんど）発生しない状態（おおむねひずみが 10^{-4} 以下）
- ②過剰間隙水圧が発生を始めるが初期液状化になる前の状態（おおむねひずみが数%以下）
- ③初期液状化以後の挙動

このうち、①については液状化とは関係ない。繰返し軟化 (Cyclic softening) の様な用語が適切であろう^{iv}。②は液状化は発生しない状態である。既往の論文等では、不完全液状化、準液状化、部分液状化などの用語が使われてきている。ただし、充分に認知されている用語とはいえない。この原因の1つは、初期の Seed & Lee²⁶⁾ や Castro²⁷⁾ が考えたように液状化を液体の様に挙動する様になった状態と考えるのか、それとも、初期液状化 (Initial liquefaction) になったとき以後を液状化した状態と考えるのかということにあると考えられる。既往の用語の中では部分液状化 (Partial liquefaction) が最も適当な用語と考える。これは、均質な材料として見れば、初期液状化が液状化した時点が液状化の開始かもしれないが、粒状体として見れば、たとえば過剰間隙水圧比が1になっている所もあるであろうという意味である。ただし、Partial liquefactionは最初に述べた様に、初期の研究では初期液状化以後の挙動を表す意味に使われたので、使う際には、たとえば、「過剰間隙水圧が発生したが、液状化に至る前の状態」の様な説明をつけるのが必要である。

^{iv} ②、③でも軟化は起こっているので、繰返し軟化といえないことはない。そこで、使い際には、「過剰間隙水圧の発生がほとんどない」などの用語を加えると、他と区別しやすい。

ろう。このことは、他の用語についても同様である。

初期液状化以後の挙動を液状化と呼ぶことには、これ以後の挙動について新たな用語は必要ではない。ただ、液状化の発生と液状化以後の挙動を区別したいときには、液状化状態の様に説明を加えることも可能であろう。

完全液状化という用語が使われることもある。これも充分に認知されている用語とはいえない。おそらく、液体状に挙動することを指していると思われるが、2.3節で述べた様に、液体として挙動するには駆動力が必要である。したがって、この用語も使う際には説明が必要であろう。

(2) 広義と狭義の液状化

4.3.3項でも論じられていたが、液状化には広義と狭義の使い方がある。広義の方は、一番極端なのは、過剰間隙水圧が発生したらすべて液状化という使い方であろうが、このような定義だと、ダイレイタンシーが起きない土はないと考えられるので、すべての破壊現象を液状化と呼ぶことも可能であり、工学的にはあまり意味がない。さらに、社会的な混乱をもたらす可能性もあるものと懸念される。

4.1(2)項には NCEER の使い方が示されている。日本語に訳した部分のみを取り出すと、次のようなである。「地震の際の地盤の振動は、建物の沈下、斜面崩壊、アースダムの崩壊、そのほかの災害を起こすような強度や剛性の低下を引き起こす。この強度や剛性を引き起こす過程を土の液状化とよぶ。この現象は飽和した粘着力のない土で第一義的に引き起こされるがこれ以外の土を排除するものではない。」

これが、広義の液状化の用語として適切なように思える。大事なのは、「地震により災害を引き起こすような強度や剛性の低下が起きる」ということである。なお、NCEER には、これに引き続き、「一般的に使われている液状化という用語は、飽和した粘着力のない土に過渡的または繰返しによる外乱が作用した結果生じる過剰な変形や移動を含むすべての現象を表す。」という文章があるが、ここで、粘着力の無い土といふ方は問題である。細粒分が入っていると粘着力は現れるし、年代効果により粘着力が生じることもある。従って、材料は、粘着力のない土に限る必要はない。また、NCEER の定義には「建物の沈下、斜面崩壊、アースダムの崩壊」のように例が挙げられているが、当然、これ以外の施設でも被害が起きる。

これらを考えると、広義の液状化の定義は次の様するのが妥当であろう。「地震などによる地盤の振動により有効応力が減少し、強度や剛性の低下が起きる現象で、砂、砂礫などに典型的に見られるが、細粒分や粘土分を含む材料でも発生する」

次に、狭義の液状化は、4.3.3項では「液状化は、地震の繰返せん断力など、によって、飽和した砂や砂礫などの緩い非粘性土からなる地盤内で間隙水圧が上昇・蓄積し、有効応力がゼロまで低下し液体状となり、その後地盤の「流動」をともなう現象、または「流動ポテンシャル」をもった地盤となる現象」の様に定義されている。しかし、液体状に挙動するには駆動力が必要であり、材料のみの挙動として定義することはできない。流動ポテンシャルという用語は「可能性」を示す意味で用いられており、量の定義がなされておらず、有用性はない。

そこで、狭義の液状化の定義は次の様にする。「地震などによる地盤の振動により有効応力がきわめて0に近くなり、ないしはひずみが大きくなり、地盤の抵抗力がほとんど0になること。この状態では駆動力の作用により液体状に挙動する事もある」

(3) 初期せん断、流動

傾斜地盤では初期せん断力が作用している。現在の所、3.2(2)項で示したように、初期せん断力が働くときの適当な液状化の定義法はない。ただし、地盤が傾斜していると大きな変形が生じることがあり、液状化に伴う流動 (Liquefaction-induced flow) と呼ばれる。この際、2.4節で述べられているように、初期せん断が大きいと液状化時の残留強度が問題になる。また、初期せん断が小さい時には、地震動の大きさや継続時間（繰返し数）などが流動の駆動力として作用するた

め、変位の大きさに影響する。駆動力には、このほか、過剰間隙水圧の消散に伴う、浸透力などがある。

液状化に伴う流動は、以前は側方流動（Lateral spreading）と呼ばれていた。側方流動を地盤工学用語辞典²⁸⁾では、次の様に説明している。

「軟弱地盤上に盛土などの荷重が載荷された場合、その荷重の大きさが地盤の極限支持力に近づくと、地盤が塑性変形を生じ、側方方向に大きく変形することがある。」

側方流動はもともとこの現象を指し、一般に粘性土地盤で起こることが多い。しかし、近年では、地震時に傾斜した地盤や岸壁などの背後地盤で液状化が発生し、地盤が大きく流動して構造物に多大な被害をもたらすことが明らかになり、この現象も側方流動と呼ばれるようになった。後者の現象は粘性土地盤の側方流動と区別するために、地盤の流動（flow of ground）と呼ばれることが多い。また、永久変位（permanent ground displacement）と呼ばれることもある。」

これからわかるように、側方流動は元は別の現象を表すものであった。同じ名前を異なる現象に用いると、誤った印象を与えることもあるので、本来は避けるべき事項である。そこで、液状化の流動を扱った、4.3.2項で述べた委員会では、「液状化に伴う流動」という用語を提案している。これを用いれば、混乱が起きることもない。ただし、側方流動の用語は一般的にも多く使われているという現実がある。地盤工学用語辞典でもこの点を考慮し、二つの言い方を書いていると考えられる。また、海外でも Lateral spreading がよく用いられている。従って、この語を使わないようにと言うのは現実的ではない。ただし、使う際には二つの異なる現象をあらわしているということを意識して、説明を加えるのが好ましい。例えば、推奨するわけではないが、液状化に伴う側方流動のような表現であれば、誤解を生じる可能性は大きく低減される。

類似の現象であるが、最近では、非常に緩い傾斜した地盤で発生する崩壊を、静的液状化（Static liquefaction）と呼ぶこともある（たとえば、文献29）。ただし、まだ一般的ではないと考えられるので、説明付きで使う用語であろう。

(4) 要素と地盤

4.3.2項でも論じられたように、液状化に関しては、要素挙動と（空間的広がりと境界をもつ）地盤とを分けて考えるのが妥当であろう。たとえば、構造物直下で1cm の層で（狭義の）液状化が発生したとしても被害は発生しないであろう。すなわち、液状化する範囲が充分小さければ構造物被害には結びつかない。

残念ながら、これらを適切に定義する用語は提案されていない様である。

(5) その他の用語

第2章ではいろいろな液状化にかかわる現象とメカニズムを示した。これらには、用語として示されているものと示されていないものもある。示されているにしろ、一般に認知されていない用語もある。したがって、当面は説明（定義）付きで使っていくべきであろう。

4.4.2 用語と簡単な説明

前項では用語とメカニズムについて説明した。これらをまとめ、簡単な説明を加えると以下の様になる。

(1) 特に説明無く使える用語

液状化：飽和した土が繰返しせん断に伴い、土内部の粒子構造が壊れ、有効応力が減少し、破壊する現象。破壊している状態を指すこともある。

初期液状化：液状化の状態になったとき。一般的には有効応力が0（または、過剰間隙水圧比が0.95）になる状態、または、ひずみが所定のひずみ（ $DA=5\%$, $\gamma=3$, 5%など）にな

った状態が使われる。

液状化に伴う流動：液状化により大きな水平変位が発生する状態

二次液状化：過剰間隙水圧の消散に伴い、隣接要素に間隙水が流入し、その要素の有効応力が0になる状態

再液状化：同じサイトで複数回の液状化が発生すること

サイクリックモビリティ：液状化した状態からひずみがより大きくなり、再び骨格構造が形成され、せん断抵抗が発揮されること

水膜：液状化した層の上部に透水性の小さな層が存在するとき、液状化層から流出した間隙水が蓄積する現象

駆動力：液状化した土が液体状の挙動を継続するために必要な力で、地震による振動、浸透力などがある

(2) 説明をして使う用語

揺動：大きな範囲で液状化した地盤が大きな振幅でゆっくり動く現象。

部分液状化：過剰間隙水圧が発生しているが、初期液状化以前の状態。

準液状化、不完全液状化：部分液状化と同じ現象。部分液状化を使うのが好ましい

静的液状化：非常に緩く堆積した斜面が滑る現象

突発的液状化：非常に緩い地盤で衝撃力のような力で液状化する現象

参考文献

- 1) 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp.22-26, 1999
- 2) Seed, H.B. and Lee, K.L.: Liquefaction of saturated sands during cyclic loading, J. SM, Vol. 92, No. SM6, pp. 105-134, 1996
- 3) Castro, G.: Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands, J. GT, Vol. 101, No. GT6, pp. 551-569, 1975
- 4) Seed, H.B. : Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquakes, Liquefaction problems in geotechnical engineering, Proc., ASCE Annual Convention and Exposition, pp. 1-104, 1976
- 5) Committee on earthquake Engineering, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council: Liquefaction of soils during earthquakes, National Academy Press, 1985.
- 6) 山井良三郎、高見勇、西原実、井上衛、近藤孝一、中井孝：新潟地震における木造建物の調査、林業試験場研究報告、第187号、pp.129-161+写真、1966
- 7) Mogami, T. and Kubo, K.: The behavior of sand during vibration, Proc. 3rd ICSMFE, Vol.1, pp.152-155, 1953.
- 8) 最上武雄：過去点描、最上武雄博士論文選集、1973、技報堂出版、pp.1-35
- 9) 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp.22-26, 1999
- 10) 勝又護：最近の顕著な地震の表（1951年～1960年）、験震時報、第26巻第4号、pp. 21-25, 1962
- 11) 地名辞典オンライン、<https://chimei.jitenon.jp/data/search.php?getdata=尼崎&how=part&page=1>
- 12) 建設省建築研究所：新潟地震による建築物の被害、建築研究報告、No. 42、建設省建築研究所、180pp., 1965
- 13) 山井良三郎、高見勇、西原実、井上衛、近藤孝一、中井孝：新潟地震における木造建物の調査、林業試験場研究報告、第187号、pp.129-161+写真、1966
- 14) 港湾技術研究所構造部 編集：新潟地震港湾被害報告、第1部、港湾技術研究所、104pp., 1964；第2部、249pp., 1965
- 15) 昭和39年新潟地震震害調査報告、土木学会新潟震災調査委員会編、土木学会、903pp.
- 16) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針・同解説、日本道路協会、156pp., 1972
- 17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編、日本道路協会、159pp., 1980
- 18) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編、日本道路協会、224pp., 1990
- 19) 日本建築学会：建築基礎構造設計基準、日本建築学会、667pp., 1974
- 20) 吉見吉昭：地盤と建築構造のはなし、技報堂出版、149pp., 2006
- 21) 日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説、486pp., 1960
- 22) 吉田望：液状化現象 メカニズムから数値解析まで、森北出版、372pp., 2020
- 23) 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するワークショップ資料集、地盤工学会、106pp., 1996
- 24) 安田進：講座をはじめるにあたって、講座：液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響、土と基礎、Vol. 47, No. 5, pp.53-54, 1999
- 25) 土木学会地震工学委員会：レベル2地震動による液状化、レベル2地震動による液状化研究小委員会活動報告

- 書, 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, 2003
- 26) Seed, H.B. and Lee, K.L.: Liquefaction of saturated sands during cyclic loading, J. SM, Vol. 92, No. SM6, pp. 105–134, 1996
 - 27) Castro, G.: Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands, J. GT, Vol. 101, No. GT6, pp. 551–569, 1975
 - 28) 地盤工学会用語辞典改訂編集委員会：地盤工学用語辞典，丸善，661pp., 2006
 - 29) Sadrekarimi, A.: Prediction of Static Liquefaction Landslides, Civil and Environmental Engineering Presentations. 4, <https://ir.lib.uwo.ca/civilpres/4>, 2019

5 文献に示される用語と被害

液状化を扱っている図書、設計指針、報告書、論文などをチェックし、どのように定義されているかをまとめた。液状化の定義（説明）は基本的に以下の4つにまとめられる。なお、例えば、設計指針のように、液状化が既知のものとして扱っているものは除いている。液状化のメカニズムに関して説明があるもののみに限っている。

- ① ダイレイタンシーにより、体積が減少→非排水なので、体積が減少できない→荷重を支えるために過剰間隙水圧が発生→有効応力が減少
- ② 粒子間のかみ合わせが外れる→粒子が間隙水中に浮く（有効応力が減少）→全応力を支えるために過剰間隙水圧が発生する。論文によっては最初のみもある
- ③ クイックサンド（quick sand）、ボイリング（boiling）
- ④ 上向き浸透流

5.1 図書・報告書など

合計109の図書、学位論文、設計指針、報告書などに記述されている液状化のメカニズムを調査した。メカニズムは上に示す①～④に分類して示した。結果を表5.1に示す。なお、各文献の関連部分を引用しているが、本文中の図や式の引用番号は理解を妨げない範囲で除いている。なお、室内試験の結果を基に現象を説明している場合には、①、②の区別をせずに説明することも可能である。この様なケースは以下のまとめには含めていない。二次液状化は、④として分類している。なお、液状化時に上向き浸透流が起こるということは多くの論文で述べられているが、非液状化層が上向き浸透流で液状化するという記述は多くない。

結果は、①80、②29、③2、④2であり（複数書いてあるものもある）、圧倒的に①が多い。これは、Seed & Lee の論文（文献97）によるところが大きいのかもしれない。

もう一つ、特徴的なのは、メカニズムの説明で、文献を引用していないものがほとんどであるという事である。(1)常識と考えている、(2)文献を引用するまでもないと考えている、(3)なんとなく、書いている、などが原因と考えられるが、これまでに示されてきたように、いろいろなメカニズムがあり、常識となっているとは考えにくい。既に2.2節で示したように、①と②は連続体としてとらえるか、粒状体としてとらえるかの違いである。砂が粒状体である事を考えると、②の説明の方が好ましいと考えられる。

表5.1 液状化の定義一覧

文献番号	ページ	定義	コメント
1	1291	①	土が液状化すると、それに伴って過剰間隙水圧が発生
2	61	①	地震動による飽和砂の繰返せん断→負のダイレイタンシー特性による圧縮の傾向→非排水のゆえに圧縮できない→砂層を支えるための過剰間隙水圧の発生と累積→有効拘束圧の減少→粒子間のかみ合わせがはずれる→せん断抵抗を失う→液状化する
3	103	①	地震などの外的作用によって、地盤を形成している砂質土層で、間隙水圧の上昇のために有効応力が減少してせん断抵抗を急激に失い、地下水位以深であたかも液体のようになる現象を液状化（liquefaction）という。液状化は粘性質土でも生じるといわれているが、一般には、飽和砂について考えるのが普通である。
4	18-19	②	砂の中に閉じ込められた水は、外部へ流れ出る代わりに、圧力を発生する。これを過剰間隙水圧と呼ぶ。図2.3はもともと、過剰間隙水圧の発生機構を説明するための図である。全応力一定という排水条件の下で、繰返せん断するなら砂の体積が徐々に収縮し（負のダイレイタンシー）、間隙比 E が小さ

文献番号	ページ	定義	コメント
			くなる (A→B)。ところが同じせん断が非排水条件の下で起こったなら、体積が一定なので間隙比は変化することができない。そこで負のダイレイタンシーと同時に砂の中で有効応力も減少し、砂は膨潤曲線 BC を左上に向かつて動き、間隙比を元の {直に戻す。こうして砂の有効応力は次第に減少し、せん断強さや硬さも損なわれてしまう。これが液状化のプロセスである。
5	11	②	飽和した緩い砂が地震などの繰返せん断力を受けることによって、粒子間のかみ合わせがはずれ、粒子が間隙水の中に浮いた状態となる現象。有効応力が消失する結果、土はせん断強さを失い、土かぶり圧と同じ大きさの間隙水圧状態となる。
6	214	①	土要素の液状化とは、固体状の土において、非排水条件下で地震等による繰返せん断応力 (cyclic shearstress) が作用して間隙水圧が蓄積する、あるいは静的条件下で地下水の浸透流により間隙水圧が発生することによって、有効拘束圧 (effective confining pressure) がほとんどゼロの状態となり、土が液体状に変化する現象である。
7	85	①	飽和した緩い砂等が、地震等による激しい繰返せん断応力を受けることによって粒子の噛合せが外れ、間隙水圧が上昇して有効応力が減少し、せん断強さを失う現象。粒子が間隙水の中に浮いた状態となる。完全な液状化は有効応力0の状態に対応しており、そのとき間隙水圧は全応力に等しくなる。
8	16	②	地震時に繰り返せん断力を受けると、負のダイレイタンシー特性により土粒子の骨格構造が次第に崩れていく。それに伴って有効応力が減少して、ついにはせん断強度が失われて液体状になる。
9	32	②	地下水で飽和された緩い均等な細砂層の地盤が、地震動等の衝撃を受けて砂層中に過剰な間隙水圧が発生した場合、砂粒子の剪断抵抗がゼロとなるため、液体のような挙動を示す現象。
10	113	①	砂質層が地下水で飽和している場合、すなわち砂粒子間の間隙がすべて水で満たされている場合に、強い地震動が繰り返し加わると、間隙水の圧力 u が次第に高まっていく。この間隙水圧が垂直応力 σ に等しいという状態に達すると、上式に従ってせん断強さ τ は0となる。
11	443	③	The loss of strength with remolding accounts for the phenomenon of liquefaction in quick clays and very loose sands. If a hillside of such a material starts to slide, the soil loses its strength and flows away like a liquid
12	4	②	When sandy soil deforms due to shear stress caused by vibration during an earthquake, contact between the particles is lost as shown in Figure 2.1 b. Then, the force originally supported in a vertical direction through the contact points is instead transmitted through the pore water. This condition corresponds to a state of 'liquefaction'.
13	13	②	地震がやってくると、図(c), (d) のように繰返せん断を受け、それにより粒子構造(配列)が壊されてゆく。今、ゆる詰めの土を想定しているため、繰返せん断により土粒子のかみ合わせが徐々にはずれてゆくことになる。これは粒状体の持つ負のダイレイタンシー特性に起因している。そして、遂には (e) のように、土粒子のかみ合わせが完全にはずれることになる。これは水の中に粒子が浮いている“泥水”と同様であり、 $\sigma'=0$ となるため $\tau_f = c$ となり、 c を持たない砂質土ではせん断強度が0になる。これが完全に“液状化”した状態である。 σ'_{v0} , σ'_{h0} は周囲から依然加わっているため、これを間隙水の圧力で支えなければならなくなり、間隙水圧は過剰に σ'_{v0} だけ上昇する
14	1	②	飽和状態にある粒径が揃った緩い砂質土が地震等によって揺られた場合、砂粒子間に存在する間隙水の水圧が次第に上昇し、ついには砂粒子のかみ合わせがはずされてしまう。したがって、砂粒子は水の中に浮いた状態となる。このように、荷重が繰り返し作用して砂質土が液体状になる現象を液状化現象と呼んでいる。
15	1	①	“液状化” (liquefaction) という用語は、広い意味では、土が飽和しているか乾燥しているかを問わず、せん断強さを失って液体のようにふるまう現象を指すことがある。例えば、1g をこえる鉛直加速度で振動する乾燥砂では、粒子が自由落下する瞬間があり、そのとき、有効応力(粒子間垂直応力)がゼロになる結果、砂はせん断強さを失っている。しかし、本書では、対象を

文献番号	ページ	定義	コメント
			飽和砂質土に限定し、間隙水圧が上昇して有効応力が減少する結果、せん断強さを失う現象を液状化と呼ぶことにする。
16	232	③	砂質土の液状化 (liquefaction) について、古くからま日られているのはクイックサンド(quick sand) であろう。……液状化現象のもう1つの例としては、河川の下流や海岸付近の低地に存在する非常にゆるい砂質土が、静的条件で自然にスペリ出すことが古くから知られている。これもクイックサンドとよばれているが、自然の液状化 (Spontaneous liquefaction) ともよばれる。……シートパイルで、締切られた砂地盤や、ケーソン内の砂質土を掘削していくときに見られるボイリング現象 (Boiling) も、液状化の一種と考えてよい。これもクイックサンドとよばれている。
	233	②	まず、セン断力により粒子間の接触がはずされる。しかし。いきなり新しいより密な構造に移行するわけにはいかないから、おのおのの砂粒子は、一時、間ゲキ水の中に浮いた状態となる。これが砂の液状化にはかならない。このとき、もともとは粒子接点を通して伝えられていた上部の砂の重みは。その支持を失うので、水によってさえられることになる。粒子接点を通して伝わる力、つまり、有効応力が消えうせ、その代りに間ゲキ水圧がその分だけ増加してくるわけである。
17	276	②	間隙水の中に土粒子が一時的にうたい状態になる。つまり図(a)では土粒子の間に間隙水が存在していたものが(b)では間隙水の中に土粒子が浮いた泥水の状態になる。こういう液状化を完全液状化と呼んでいる。
	277	①	したがって、間隙水圧が増加すると、逆にセン断強さは減少することになる。……間隙水圧が完全に拘束圧 σ まで上昇し終わらない状態で地震動が停止した場合においても、やはりセン断強さは地震前乗りいくらか減少することになる。この様な原書を不完全液状化と呼ぶことがある。
18	146	①	地下水で飽和しているゆるい砂地盤は、平常時は安定しているが、地震動による振動や衝撃的な力を受けると、砂の粒子が密に詰まろうとする。……地震時のように短時間の動的な力によって、間隙水が移動できないような急激なせん断を受ける場合非排水の条件と同じようになり、過剰間隙水圧が発生する。この水圧の発生で粒子間の有効応力が利かなくなり、せん断抵抗がなくなることにより、その部分の砂層はあたかも液体のように流動する。この現象を砂の液状化という。
19	145	①	ゆるく堆積した砂地盤が地震動を受けると、繰り返しせん断によって負のダイレイタンシーが発生し、体積が減少する傾向を示すが、間隙水の移動が十分でないと、間隙水圧が上昇する。この時、有効応力が減少、消失し、砂地盤は液体状となる。これが地震による砂地盤の液状化である。
20	第3編	①	地震などによって砂粒が揺すられ、砂粒の間にある水の圧力が上がると、砂粒は水中に浮いているのと同じ状態になります
21	234	①	地下水で飽和された緩い砂層地盤が地震による振動を受けた場合、粒子間のかみ合せがはずれる。この場合は粒子が土中に浮遊した状態となり、地盤が液体状になる現象を液状化(liquefaction) という。……緩い状態の砂が地震による振動を受けた場合にはその体積が収縮する。地盤が飽和していると土中水は地震の早い挙動に追随できず、非排水状態の等体積変化となる。このため間隙水圧が上昇して有効応力が減少し、せん断抵抗力が低下する。
22	351	①	The loose sample would attempt to undergo volume decrease and thereby throw pressure into the water.
23	112	②	①液状化前のゆる詰めの砂（砂の粒子はかみ合っている）②液状化した瞬間、砂の粒子はあたかも地下水の中で浮遊したような状態で液状化する。
24	166	①	間隙水をゴム袋のなかに閉じ込める、つまり体積の収縮を妨げた結果、間陣、水圧がこれに肩代りするといつてもよいでしょう。
25	202	④	スペリが二、三の特別に透水性の大きな層中の間ゲキ水圧の増加によって起きたり、斜面の下の土を液状化する衝撃によって起きたりする。
	400-401	④	盛土のノリ先近くの地中から湧き出す泉から内部へと進行する侵食のために、パイピング (piping) によって破壊が起こることがある。最後に非常にゆるい砂の層の上にある盛土の下では、その砂の突発的な液状化のために底部破壊が生ずることがある。しかし、この型の破壊は大地震の場合を除いては

文献番号	ページ	定義	コメント
			非常にまれである。
26	346	①④	これらのことを考えると地震時の S 波による表層内の繰り返しせん断変形のため、排水状態、の砂地盤はゆり込み作用が起こり密度は増すはずである。しかし実際の砂地盤の多くは飽和しており、しかも地震動の継続時間はたかだか数分であるから非排水状態で繰り返しせん断を受けることとなる。その結果、砂中の過剰静水圧はだんだんと上昇してゆき、有効応力が減少する。このとき、ゆるい地盤内から上向きの透水が生じ、それが限界動水勾配に至れば有効応力は 0 となって地盤は支持力を失う。
27	117	②	液状化現象とは、飽和した緩い砂質土層が地震などの震動を受けることによって、地盤の強度を喪失して液体のような状態になることである。
28	10-11	①	(水で、飽和された) 土の液状化とは、固体状の砂質土において、外力(地震等による繰り返しせん断力)が作用すると、間隙水圧が上昇するが、透水係数が小さいため実質的に非排水状態に近い状態となる。このため、実質的に土の変形を支配する有効応力は減少して、ほとんどゼロの状態になる。この時、土のような粒子からなる粒状体は各粒子がばらばらとなり、固体状から液体状へ相変化する。このような現象を水で飽和された砂質地盤の液状化と呼ぶ
29	5	②	とくにゆる詰めの砂質土があると、地震動により液状化を生じやすい。このとき、砂粒子のかみ合わせがはずされて、粒子は周辺の間隙水の中に放り出されてその中に浮いたような状態になるので、その分だけ間隙の水圧が上昇してくる。
30	9	②	ここに地震が襲って、S 波により土が左右にせん断変形させられる。そうすると、土粒子のかみ合わせが徐々にはずされていく。そして遂には、土粒子どうしが接触しないばらばらの状態で水の中に浮遊した状態になる。これが液状化した時の状態である
31	39	①	砂の間げきが完全に飽和しており、その粒度組成が細砂から中砂の分類に入るとき、ゆるい状態にあると動的作用(発破による震動、動的浸透作用など)によって、液状化といわれている現象が起こる。砂の液状化現象は砂の密度が小さければ小さいほど、圧縮応力に対する抵抗が小さければ小さいほど、そして動的作用が強ければ強いほど起こりやすい。砂の液状化現象とは、粒子が互いにおしあい、間げきが水で満たされていたゆるい砂が、突然ある瞬間に液体の中に砂粒子が浮いているような状態に変化することである。このような状態になると、当然砂質土はその表面にある物体の荷重に耐えることができず、そのため物体は粘性液体の中に沈むように沈下してゆく
32	130	①	せん断中に全く体積変化がない状態の砂の密度があるはずである。このときの間隙比を臨界間隙比(critical void ratio)と呼び <i>ecrit</i> で表す。したがって、…飽和した砂を非排水条件でせん断すると、臨界間隙比より緩い砂では正の間隙水圧が発生し、有効拘束圧力は減少する。
33	64	①	地震時のせん断波のような大きなせん断応力がゆるい砂地盤に繰り返し働くと、負のダイレイタンシーにより砂地盤は体積収縮しようとする。しかし、載荷速度が速い地震波の場合、過剰間隙水圧の消散が起きにくいので、正の過剰間隙水圧が発生する。この正の過剰間隙水圧が繰り返しせん断力によつて蓄積すると有効応力は徐々に減少し、液状化が発生する。
34	23	①	このような状態で地震による繰り返しせん断力を受けると、負のダイレイタンシーのため体積収縮が起こる。ところが、地震は短い時間で起こるから、地震時にはこのような体積収縮が起らないと考えるため、非排水条件が保たれるとみなす。そうすると、砂粒子の骨格は収縮しようとしても粒子間にある間隙水が排水されないため、その代わりに砂粒子間に作用していた応力(有効応力)を間隙水が分担するようになる。
35	248	①	If a saturated sand is subjected to ground vibrations it tends to compact and decrease in volume; if the sand cannot drain rapidly enough, the decrease in volume results in an increase in pore pressure. When the pore pressure increases until it is equal to the overburden confining pressures, the effective stress between soil particles becomes zero, the sand completely loses its shear strength, and enters a liquefied state.

文献番号	ページ	定義	コメント
36	12	①	The loading of the soil by $\tau(t)$ is undrained (the pore water pressure dissipation and redistribution within the soil mass are disregarded within the time frame of the event). Therefore, the pore water pressure in the element in excess of the hydrostatic pressure increases with duration of shaking
37	74	②	地震の揺れのように地盤の内部にずれを生じさせるような力（「せん断力」と言います）が繰り返しかかると、砂粒間のかみ合わせが一時的に外れて、地下水の中に砂の粒子が浮いた状態になり、支持力がなくなります。地盤が液体に変化したのです。
38	57	①	水で飽和したゆるい砂地盤が地震動や衝撃をうけて、過剰間隙水圧が急激に上昇し有効上載圧と等しくなったために、地盤のせん断抵抗が失われる現象を、とくに液状化現象（liquefaction）といいます。
39	96	①	地震以前には砂粒の間の空隙は水で満たされているため、水はそこから外へ抜け出ようとしても、急には抜け切れない。このため砂粒と砂粒との間にあら水の圧力（間隙水圧）が瞬間に非常に高くなって、砂粒は水に浮いた状態になり、粒子と粒子との間の絡み合いが外れて、砂粒はバラバラの状態になってしまいます。
40	45	①	飽和状態にある緩い砂質土が地震によって揺すられた場合、砂粒子間に存在する間隙水の水圧が次第に上昇し、ついには砂粒子のかみ合わせがはずされ、砂粒子が水の中に浮いた状態となる。このような砂質土が液体状になる現象を液状化現象と呼んでいる。
41	195	②	液状化現象をわかりやすく表現すれば、緩く詰まった砂の粒子のかみ合いが震動によりはずれ、水中に浮いた懸濁状態となってせん断強度が失われ、液体と似た挙動を示す現象といえよう。
42	1	①	In geotechnical-engineering terminology, liquefaction refers to the state of the soil in which the effective stresses between individual soil grains vanish and the water-sediment mixture as a whole, therefore, acts like a fluid. Under this condition, the soil fails, therefore precipitating failure of the supported structure such as pipelines, sea outfalls, breakwaters, seawalls, pile structures, gravity structures, rock berms, etc.
	11	①	These cyclic shear stresses cause the soil to undergo cyclic shear deformations, in exactly the same way as in the case of waves, leading to pressure buildup, and eventually liquefaction if the soil is "undrained" (silt, fine sand, and even medium sand).
43	435	①	When shear occurs under undrained conditions, pore water cannot be drained out, and develops pressure. This pressure is called the excess pore water pressure 過剰間隙水圧 and is defined as the pore water pressure minus the hydrostatic pressure that existed before earthquake;
44	10	②	このようにふだんは砂粒同士はしっかりとスクラムを組んで建物を支えています。しかし、地震がくるとこのスクラムがゆり動かされ、ついにはスクラムがはずれてしまいます。スクラムがはずれると砂粒はバラバラの状態になります、建物を支える力を失ってしまいます。これがまさに液状化の状態です。
45	137	②	飽和した砂質土では、地震などの急激な外力によって構造が乱されると、間隙水が排出し終わるまで一時的に b→c のような経過をたどる。このとき構造の低位化の度合いが大きいと c 点の有効圧力はほとんど 0 となり、粒子がバラバラに水中に浮遊したいわゆるクイックサンド、あるいは液状化の現象を示す。
46	667	①	これによると、ひずみパルスの数を増大させると試料中の間隙水圧は増大し、ひずみの1サイクル中の全段階で計測水圧は一定値すなわち側圧に等しくなる。またこのとき試料の有効応力はゼロになり、砂は変形に対して全然抵抗しないようになる。これを同じ図の(b)図で示すと、砂の抵抗がゼロになったときは、応力-ひずみ曲線がまったく扁平になった16サイクルのときであることがわかる。 完全な液状化はこのように変形に対して砂が全く抵抗しなくなったときを指し、(b)図の結果からわかるように、それは1サイクル中の全部にわたって有効応力がゼロのときとみることができる。前述したように ゆるい飽和砂では砂の完全な液状化は容易におこしうるが、密な飽和砂では完全な液状化に達

文献番号	ページ	定義	コメント
			するまでにはかなりの数の周期的応力を与えなければならない。
47	26	①	揺れを振動台に加えると間隙水圧が増え始め、上昇しきったところで液状化に達する。液状化すると砂粒の間を伝わる力はなくなり、お互いにバラバラになって振動中は砂粒が水中に浮いたような状態になる。なぜ浮いたような状態が持続可能かといえば、液状化すると砂層の中に上向きの水の流れが起き、本来水より重い砂粒を押し上げるからである。振動が停止すると同時に、液状化した砂層全体がほぼ同じ速度で沈下しながら底の方から砂粒の堆積が起こる。その堆積面はゆっくり上昇し、表面にまで達した時点で液状化が終了する。砂層の表面は当然最初よりも沈下しているので、表面は水の層で覆われる。
48	65-67	①	The basic cause of liquefaction of sands has been understood, in a qualitative way, for many years. If a saturated sand is subjected to ground vibrations, it tends to compact and decrease in volume; if drainage is unable to occur, the tendency to decrease in volume results in an increase in pore water pressure, and if the pore water pressure builds up to the point at which it is equal to the overburden pressure, the effective stress becomes zero, the sand loses its strength completely, and it develops a liquefied state.
49	42	②	密に締まった砂地盤では砂の粒子が動くためには、図2.24のようにその上の土粒子を持ち上げなければならない（これをダイレタンシイといっている）。したがって、密な砂地盤では有効応力がゼロになることはなく、せん断強度もゼロにはならないことになる。ところが緩い砂地盤では、間隙が大きいために砂の粒子が浮いた状態になり、せん断強度がなくなり、水といっしょに動くようになる。これが砂地盤が液状化した状態である。
50	10	①	砂が飽和している場合は、粒子間に介在する水が、砂がより密に詰まろうとするのを妨げるため、間隙水圧が上昇し、それに伴って有効応力が低下する。極端な場合として、有効応力がゼロになれば、せん断強さもゼロになり、砂は定義によって液状を呈することになる。地震または衝撃荷重による液状化は、このようなメカニズムによって発生する。
51	21-22	①	In an undrained cyclic loading test, the sand matrix or skeleton can tend to contract under the cyclic loads, but the resulting rearrangement of sand particles instead transfers normal stresses from the sand matrix to the pore water (i.e., σ stays constant, while σ' decreases and u increases).
52	129	②	緩い砂層では、土粒子が図6-1(1)のような状態で、土粒子の接触面の摩擦により辛じて安定を保っているが、振動が加わると摩擦が切られるため、上部から加わる荷重を水で負担することになり水圧が上昇して、最終的には $\sigma=u_w$ となって全く強度を失ってしまう。このような状態を液状化という。
53	9	②	S波により土が左右にせん断変形させられる。そうすると、土粒子のかみ合わせが徐々にはずれていく。そして遂には、(e)のように土粒子どうしが接触しないばらばらの状態で水の中に浮遊した状態になる。これが液状化した時の状態である。泥水と化しており、強度を失ってしまうので、地表にある建物などは沈下し、地中にある埋設管などは浮き上がる。また、上には相変わらず土や建物の荷重が加わっているものの土粒子では支えられないで、間隙の水で支えざるを得なくなって、水圧がその分上昇する。そして上昇した過剰間隙水圧で逃げ場を探し圧力の小さな地表に向かつて噴き出していく。
54	119	①	飽和した緩い砂地盤が地震時に非排水条件（状態）で繰り返しせん断を受けると、過剰間隙水圧が発生し、そして蓄積して、ついには初期の有効拘束圧と同じ値に達する。その結果、有効応力がゼロになり、砂地盤はせん断抵抗を失って、水中に砂が浮かぶような状態になる。
55	37-40	②	Decreases in volume caused by cyclic loading cannot occur if a soil is saturated with an incompressible fluid and movement of the fluid within or from the soil is prevented. Instead, the tendency to decrease in volume is counteracted by a decrease in effective stress.
56	6-7	②	砂の粒子の間が地下水によって完全に満たされている状況（飽和状態という）を考えてみよう。地震前には砂の粒子が互いに連結し、この連結によって地盤自体の重さおよび地盤の上に建設されている構造物の重さを支えてい

文献番号	ページ	定義	コメント
			る。これが地震の揺れによって砂の粒子の連結がはずれ、ばらばらになって水の中に砂の粒子が浮いているような状況になる。このように地盤が水と砂とが混、ぎりあった液体のような状態になることを液状化現象と呼んでいる。
57	3	②	地震の揺れのような繰り返しせん断を受けると、砂粒間のかみ合わせが一時的に外れて。③のように地下水の中に砂の粒子が浮いた状態になり、支持力を発揮できなくなる。このとき地下水が砂粒の代わりに外力（土や、地盤が支持している構造物の重さ）を受けもつたため、間隙水圧（粒子の間にある水の水圧）が大きくなる。
58	6	①	土の間隙に水が飽和状態になっていると、せん断応力によってコントラクション(負のダイレイタンシー)が起きても、間隙水が排除されない限り土は収縮できないので、過剰間隙水圧が発生しその分だけ粒子間に働く有効応力が減少するとし寸現象が起きる。
59	102	①	体積収縮しようとする全応力に等しい圧力が間隙水圧として作用して、この u に等しい有効応力の値が低下してせん断強さを消失して液体のようになる。これが砂の液状化である。
60	150	①	反対に、砂が緩く詰まった試料はせん断にともなって収縮しようとするが、体積変化が止められているため、間隙水圧が上昇する。これは有効応力の低下を招き、試料の剛性が低下し、低い最大せん断強さしか示さない。間隙水圧が全応力（側方向応力）に等しくなる($u=\sigma_r$)まで上昇すると、有効応力は $\sigma_r=s-u=0\text{ kN/m}^2$ となり、砂には粘着力がないので強さを完全に失う。この現象を液状化と呼ぶ。
61	113	②	粘着力が小さいか、あるいはまったく粘着力がない砂質土では、振動によって粒子の構造が乱される。このさい砂質土においてみられるかみ合わせ結合は、微小な振動に対しても十分な抵抗を発揮することができず、内部摩擦が減少してあたかも液体の動きのような挙動をとる。これを砂質土の液化現象というが、この状態になると砂質土のせん断強さがいちじるしく低下する。
62	95	①	地表面に荷重が作用すると、粒子間を介して力が伝わる。地震が発生すると、地盤にせん断力が作用し、砂粒子の噛合せが外れ、砂粒子が間隙に落ち込もうとする（体積が減少しようとする）。砂の粒子が間隙に落ち込もうとしても土粒子の間隙にある水がその邪魔をし、間隙水が砂粒子を支える状態になる。この状態では粒子間力が作用しないためせん断強度が0に近くなり、液体状になってしまふ。これが液状化である。
63	91	①	この地盤に地震動が及んで、慣性力によって土粒子が振動攪乱されるようになると、それまでの水圧を超える過剰間隙水圧が生じ始めます。
64	12	①	地震による振動で地盤が揺さぶられると、不安定な土粒子の噛み合わせが少しずつ外れ、土粒子同士で支えていた力を水で支えることになり、水圧が徐々に上がります。振動が続くと、ついには土粒子がすべて水中に浮いた泥水のような状態になるのです。これが液状化の発生するメカニズムです
65	230-231	①	もし排水がスムーズに行われない条件にあるときには、上部地盤の沈下力（衝撃圧）によって有効上載荷相当の過剰間隙水圧が発生する。
66	198-199	①	先ほどの条件（水で飽和+ゆるく堆積）がそろった砂地盤が地震動を受けると、間隙水圧が上昇して有効応力が減少します。
67	234	①	地盤が飽和していると土中水は地震の早い挙動に追随できず、非排水状態の等体積変化となる。このため間隙水圧が上昇して有効応力が減少し、せん断抵抗力が低下する。
68	36	①	地震動によって繰り返し応力が働くと、接触し合っていた砂粒子が崩れて水圧が上昇し、砂粒は浮遊状態となる。これが液状化である
69	212	①	静的にある程度のせん断強度をもつ飽和砂が地震による繰り返しせん断を受けて土中の間隙水圧が上昇し、砂粒子の有効応力が減少して最終的に砂粒子が最初にもっていた拘束圧がすべて間隙水圧に転嫁される。
70	209	②	飽和した緩い砂が地震などの繰り返しせん断力を受けることによって、粒子間のかみ合わせがはずれ、粒子が間隙に浮いた状態となる現象。有効応力が消失する結果、土はせん断強さを失い、土被り圧と同じ大きさの過剰間隙水圧状態となる。

文献番号	ページ	定義	コメント
71	1	①	地震が発生すると、接触していた砂粒子はその地震動でせん断応力を受け、負のダイレイタンシーにより隙間が変形しようとする。ところがその隙間には間隙水があり、水は非圧縮性であることから容易に体積圧縮することができない。そのため間隙水圧は上昇し、その分、土の有効応力は減少してしまう。有効応力がゼロになったときには砂粒子間の抵抗は失われ、砂はあたかも流体であるかのように浮遊する状態（液状化）となる。
72	18	①	粒状体である砂には隙間があり、地下水位より深い地盤では、その隙間中は水で充たされており、砂の体積変化により、地盤中の地下水圧が上昇する。その大きくなった地下水圧を過剰間隙水圧と言う。その過剰間隙水圧の大きさが土重量相當になると、土が水の中で浮遊している様な状態となる。その様な現象を、一般的に液状化と言っている。
73	28	②	液状化現象が発生する前の砂の地層は地下水で満たされて（飽和されて）いて、上からの荷重は砂粒子の骨格構造で支えられています。その砂の地層が緩いと、大地震による大きな水平方向のせん断力（ひずみ）で骨格構造が崩れます。すると、それまで荷重を支えていた砂粒子間の力（有効応力）は失われて上からの荷重は粒子間の水に押し掛かりことになります。
74	62	①	矢印の方向に力を加えると配置が変わることに伴って体積が変わりますが、このような現象を“ダイレイタンシー”と言います。左から右に変わると、砂糖が揺されたときのように隙間が小さくなろうとしますが、飽和砂では、間隙水がすぐには排出されなくて、砂が詰まろうとすることを妨げる結果、水圧が上昇し、それによって、有効応力が低下します。
75	88	①	地盤の液状化とは、一般に地盤の浅部の飽和状態にある緩い砂質土が地震時の振動により砂粒子間に存在する間隙水の水圧が上昇し、砂粒子間のかみ合せがはずれてしまう現象のことを言う。
76	4	①	常に形成されている砂粒子からなる地盤は、地震時の震動によってせん断応力を受け、せん断変形を生じようとする。せん断変形する時の粒子間の隙を見てみると、隙間が小さくなることがわかる。もし、間隙水の逃げ道がないと水圧が上昇することが容易に理解できる。せん断変形が非常にゆっくりと進行するならば、過剰間隙水圧は消散していくが、地震のように非常に速くせん断変形が繰返し発生する場合には、水圧の上昇と消散のバランスの関係から過剰間隙水圧が上昇していくことになる。
77	6	①	飽和した砂質地盤が、地震動による間隙水圧の急激な上昇により、せん断強度を著しく減じ、土および地盤に大きな変形または流動的な破壊を生じる現象。
78	6	①	地震などの振動により砂質土がせん断応力を受けてせん断変形し、粒子間の接触が失われると、それまでこれらの接触点を通じて伝えられていた鉛直方向の力は、間隙水を通じて伝えられる状態に変化する。この状態が液状化の状態に相当する。
79	Q6	②	液状化とは、地下水位以下の緩い砂等の地盤が強い地震動により土粒子間のかみ合せが外れて泥水のようになり、地盤としての強さを失ってしまう現象のことをいいます。
80	2	①	地震動による間げき水圧の急激な上昇により、飽和した砂質土層がせん断強度を失うこと
81	4	①	地震などの繰返しせん断によって、水で飽和した砂質土中の間隙水圧が上昇し、有効応力がゼロの状態となり、地盤が液体状に変化する現象。
82	4	①	飽和した砂質地盤において、地震動により間隙水圧が上昇し、地盤がせん断強度を失い土の構造が破壊すること
83	132	①	密度の低い飽和砂地盤が地震時のように短時間内にほぼ非排水状態でくり返しせん断応力を受けると、砂粒子のかみ合せの変化による体積収縮傾向によって間隙水圧が上昇し、有効応力が0となった段階で、地盤のせん断抵抗がほぼ失なわれ、液体のように非常に大きいひずみが生じるようになるが、この現象を液状化と呼ぶ。
84	5	①	地震動による間隙水圧の急激な上昇により、飽和した砂質土層がせん断強度を失い、土の構造に破壊が生じること
85	4	①	地震動による間げき水圧の急激な上昇により、飽和した砂質土層がせん断強度を失うこと

文献番号	ページ	定義	コメント
			度を失い、土の構造に破壊が生じる現象をいう
86	14	①	飽和した砂質地盤が、地震動による間隙水圧の急激な上昇により、せん断強度を失い、土の構造の流動的な破壊が生ずること
87	5	①	飽和した緩い砂等が、地震動による激しい繰返しせん断応力を受けることによって粒子のかみ合わせが外れ、間隙水圧が上昇して有効応力が減少し、せん断強さを失う現象
88	3.31	①	間隙水圧が上昇することにより、土のせん断強度や剛性が大幅に低下する現象で、これにより地盤基礎構造物や地盤のせん断抵抗の著しい低下ないし地盤変位が発生することがあるもの
89	2	①	固体状の土が間隙水圧の上昇に上って液体状となり、外力に対する抵抗を失う現象が液状化である。
90	83	①	固体状の土が間隙水圧の上昇に上って液体状となり、外力に対する抵抗を失う現象が液状化である。
91	50	①	繰返し載荷に伴い過剰間隙水圧が少しづつ増加し、水圧がほぼ初期有効拘束圧に等しくなったとき、軸ひずみが急激に増加する。
92	13章	①	地盤の液状化は、地下水で満たされた縮まりのゆるい（空隙の多い）砂質層が強い地震動を受けると起こります。震動により繰返し揺すられると、砂粒子は配列を変えて寄り集まり、全体としての体積を小さくしようします。これに対し水は気体と違い圧縮されにくいので、体積縮小に対して強く抵抗します。この結果として間隙を満たしている地中水の水圧が高まります。配列を変え相互の支え合いがはずれた砂粒子は、圧力を高めた水の中にばらばらになって浮いた状態になります。これが地盤の液状化です
93	12章	①	縮まりがゆるい状態でこの砂が積み重なっているとき、砂粒子はお互いに角を接触させ、いわば突っ張りあって全体を支えています。粒子間には広い隙間があり、互いにつながっています。地下水面が高いと、この隙間は水で完全に満たされます。ここに地震動が加わって砂粒子が繰り返し揺されるると、お互いの支えがしだいにはずれ、やがては砂粒子間の接触はなくなり、水圧を高めた水の中にばらばらになって浮いた状態になります。これが地盤の液状化です
94	13	①	地盤の液状化は、ゆるく堆積した飽和砂が地震によるせん断波を受けて砂粒子の骨格構造の噛み合いが外れ、地盤内の過剰間隙水圧が全応力にまで上昇し有効応力の値が極端に小さくなつた状態である
95	6	②	砂が飽和している場合には、粒子間の接触力が切れて、有効応力が減少していくのと同時に、間隙水圧が上昇してくる。砂の有効応力が減少することでせん断強度が消失して、砂地盤は外力に対して抵抗できなくなる。
96	15	①	However, this reduction in volume can not occur immediately since the duration of cyclic application is so short in comparison to the time required for drainage of pore water to occur. Consequently, in order to maintain constant volume of the contracting sand, the existing effective confining stress is reduced with the corresponding increase of equal magnitude of the pore water pressure.
97	105–106	①	The cause of liquefaction of sands has been understood, in a qualitative way, for many years. If a saturated sand is subjected to ground vibrations, it tends to compact and decrease in volume; if drainage is unable to occur, the tendency to decrease in volume results in an increase in pore-water pressure, and if the pore-water pressure builds to the point at which it is equal to the overburden pressure, the effective stress becomes zero, the sand loses its strength completely, and it develops a liquefied state.
98	II - 1	①	飽和している土に、非排水状態で繰り返しせん断力が加わった時、間隙水圧が上昇してゆき、有効応力が減少して液状化が生じる
99	12	①	地盤の液状化とは、緩い飽和地盤が地震などの外力を受けることで過剰間隙水圧が上昇して有効応力が減少したかも液体のようになる現象である。
100	4	①	飽和した土層が地震の影響を受けると、砂の粒子は体積が収縮して高密度の状態を形成する傾向があります。排水が不可能な場合、この収縮傾向により過剰な間隙水圧が増加します。
101	7	①	A state where soil loses its strength as a result of increase in pore water pressure is defined as liquefaction.

文献番号	ページ	定義	コメント
102	4	①	地震前の要素では、緩く堆積し間隙はすべて、満たされている状態で、ある。非排水条件で繰返し載荷を受けることにより、過剰間隙水圧の上昇によりかみ合わせがはずれ、粒子同士が水中に浮いている状態になる
103	111	①	飽和した砂地盤が揺らされているうち、負のダイレイタンシーにより体積が減少しようとして水に圧縮力を加えるため、間隙水圧が増加します。この反作用として土骨格は水から引張り力を受け、粒子間力（有効応力）が減少します。振動が継続すると、粒子間力はどんどん減少し、ついには0になってしまいます。粒子間力がなくなるということは、骨格構造を形成する力がなくなったわけで、この結果、粒子が水中に浮いても不思議でなくなります
104	2	①	地盤の液状化とは、飽和した砂質地盤の間隙水圧が上昇し有効応力が低下して地盤のせん断力が失われ、あたかも地盤が液体のように振る舞う現象をいう
105	37, 40	①	Decreases in volume caused by cyclic loading cannot occur if a soil is saturated with an incompressible fluid and movement of the fluid within or from the soil is prevented. Instead, the tendency to decrease in volume is counteracted by a decrease in effective stress
106	16	①	Earthquake-induced liquefaction refers to the phenomena of seismic generation of excess porewater pressures and consequent softening of saturated granular soils. The material is typically sand, and less commonly silt or gravel.
107	191	①	①砂層はその体積を減少しようとする負のダイレイタンシー（Dilatancy）特性により圧縮しようとする傾向を生じる。しかし②砂層は非排水状態にあって、間隙水の排水が行われないので圧縮されない。したがって③上方砂層の荷重により過剰間隙水圧が発生し、この水圧が砂層の有効応力に等しくなるまで上昇する。④砂粒子はそのかみ合わせがはずれて水中に遊離した状態となる。⑤砂層はせん断抵抗を失って液状化する。この現象をリクイファクション（Liquefaction）という。
108	41	①	地下水位が高く緩い砂地盤では、地震時に繰返し荷重が作用すると、地盤に過剰間隙水圧が発生して有効応力が低下し、地盤はせん断強さを失って液体のような泥水状態になる
109	112	②	間隙物質が水の場合には話は簡単ではない。それは、体積が減少するということは間隙物質が領域の外に出て行くということである。しかし、水は空気のようにすぐには出ていかないからである。隙間に落ち込むという、体積変化を起こす現象（ダイレイタンシー）は発生しているので、粒子が水中に浮かんでいるような状態となる。この状態では、土骨格が荷重を支えることができなくなっている。しかし、作用している荷重（たとえば、構造物の重量や上載土の重量）は変わらないので、荷重は間隙水で受け持たなくてはならなくなり、間隙水圧が上昇する。

5.2 地盤工学会年次大会

本文献調査では、2010年度～2022年度の地盤工学研究発表会発表講演集を主な対象として調査を実施した。直近の10年程度を調査対象としたのは、各年度で1000件を超える投稿論文を限られた人員と時間で調査する制約を踏まえつつ、液状化が生じるメカニズムに関する最近の考え方および直近の液状化の被害事例を把握したいと考えたためである。調査対象外の文献も一部記載されているが、有益な情報であると調査者が判断したものである。

5.2.1 液状化が生じるメカニズム

文献調査結果を表5.1に示す。液状化が生じるメカニズムとして、5.1節の①過剰間隙水圧の発生、②有効応力の減少、③クイックサンド、ボイリング、④上向き浸透流、の4つの区分に加え、①～④のいずれにも該当しないものとして⑤その他を追加している。液状化に係る研究は活発になされており、例えば2019年度においては、タイトルや本文中に「液状化」という用語が使われている文献は193件存在した。しかし、表5.2に示す通り、液状化が生じるメカニズムについて記

述されている文献は少ない。1件当たり2ページという文章量の制約によって定義が省略されやすいことも影響していると推察されるが、液状化のメカニズムが既知のものとして扱われていることが多いといえる。

図5.1に、区分毎の液状化の定義の度数を示す。5.1節と同様に、①の「過剰間隙水圧の発生」が最も度数が多かった。④の「上向き浸透流」は、前田らの研究グループ（文献リスト6, 8）が、浸透による堤防の破壊現象におけるパイピングのメカニズムとして考察している際に述べられているものである。⑤の「その他」は、砂層の下に分布する粘性土層に蓄積された波動エネルギーが砂層を振り動かすことによって液状化が生じると考察しており、①～④のいずれにも該当しないと判断して「その他」に分類した。

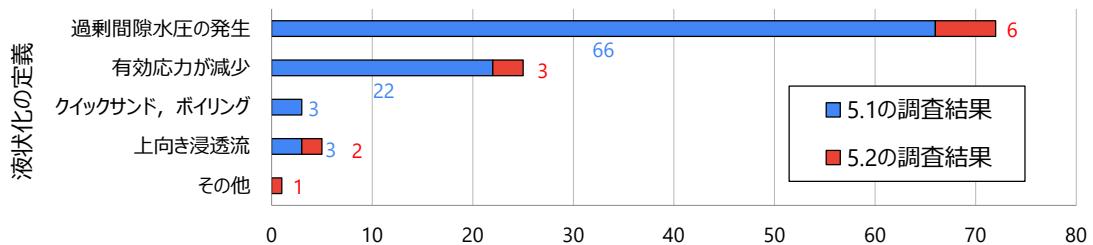


図5.1 液状化の定義の度数

表5.2 液状化の定義一覧および引用箇所

文献番号	定義	引用部分
110	⑤	沖積地盤上の飽和砂層が地震時に液状化する現象は砂層の下に分布する歪み追従性の高い粘性土層に起因する。すなわち、基岩から伝わる地震波動が堆積層の間で重複反射を繰り返しながら表層地盤に達する過程で、表層近くの粘性土層に留まり、蓄えられた波動エネルギーが上部の緩い飽和砂層を振り動かして液状化現象を惹起する。
111	②	ところで、非排水繰返せん断による有効拘束圧の低下メカニズムは、図-5に示すように、負のダイレイタンシーの累積(体積収縮)と体積膨張の重ね合わせとして解釈できることが古くから知られている。したがって、土の体積を一定に保持した状態で繰返せん断を与えれば、排水条件とは無関係に、土の有効拘束圧は累積的に低下することとなる。 (中略) 地震時における土の負のダイレイタンシーの累積は、液状化の発生メカニズムのそのものである。
112	②	砂質土の平均有効拘束圧(p')が0になると液状化現象が発生すると知られている
113	②	飽和土の力学においては、一次元的な水位変動は全応力と水圧の増分が等しくなるため有効応力変動に寄与しないが、波浪外力により海底地盤の有効応力が変動する理由としては、以下の3つが考えられる。 ① 地盤内の空気の存在 3) : 地盤内に間隙空気が存在する場合、(飽和地盤ではないが、) 水圧変動による空気の体積変化により、非排水条件においても土骨格は体積変化可能であり、それに伴って有効応力も変動する ② 波浪場の多次元性: 多次元波浪場においては、(飽和地盤でも) 水位差に起因するせん断が海底地盤内に作用する ③ 境界流速の影響: 海底面における地盤に平行な流速によるせん断 本稿では、海底液状化の要因①、②を想定し、数値解析を通して、地震時の液状化と同様、地盤の初期状態が密であるほど、また波浪振幅が大きいほど平均有効応力が大きく低下することを示す。
114	①	液状化とは、飽和砂質土において地震によるせん断応力が繰返し作用することにより、間隙水圧が上昇して有効応力が減少する結果、飽和砂質土がせん断強さを失うことをいう
115	④	多量の流砂量(浮遊砂)の発生要因の一つとして、水位上昇時の地盤極表層で生じる水圧上昇に

文献番号	定義	引用部分
		起因した、表面土粒子の有効応力の低減、液状化が挙げられる。
116	①	液状化は、地下水位が地表面に近く、緩い砂地盤に生じやすいとされている。このような地盤に、地震動や建設工事などによる振動が加わると、地盤内の間隙水圧が上昇し砂同士の結合力が弱くなり、土粒子と水が分離した様な状態になる。
117	④	複層の場合のパイピングの進展挙動はおおまかに以下のように理解される。 ① 堤内地では鉛直上向き浸透によって土粒子骨格には上向きに透水力が作用し、上層細砂層は液状化状態になる。 ② 鉛直方向に噴砂が発生し、いわゆるボイリングが発生するとともに、対流が発生する。 ③ 噴砂箇所では間隙水圧水頭が低下するため基礎地盤内全体では圧力勾配は急になり、高い間隙水圧は法尻へと移動し、堤体下の動水勾配は高くなり、ゆるみが生じ、限界状態を超えると局所化した土砂流が斜めに生じる。実験で観察される土砂流れは、噴出が続く場合には Justin の限界流速相当もしくはそれを超える流速が観察される。この場合、上載荷重が大きい場合にはゆるみが生じ難い。 ④ 斜め土砂流れのみが生じ、継続すると基礎地盤上層の砂が流れその上層の砂が流れに引き込まれ、ゆるみと流動、流出とそれに伴う沈下が生じる。複層の下層からの間隙水の流入によって、土砂流れの流量は流れ方向に増加する。 ⑤ 堤体の強度が高い場合には、堤体底面と基礎地盤上層の上面との間に空洞が生じ土砂の流出に従って、さらに空洞が上流側に延伸する。一方、堤体強度が低い場合には、堤体が沈下、小規模な崩壊によって空洞を埋める。ただし、この場合には堤体と基礎地盤上層とのサイズ効果が生じる
118	①	地盤の液状化は、非排水条件下で土粒子がせん断変形を受けることで、過剰間隙水圧が上昇し、それに伴いせん断剛性の著しい低下を引き起こす。
119	①	液状化現象とは、地下水位が高く緩い砂地盤が地震によって大きな揺れが与えられると、下層では密（圧密現象）になり、上層では場所によって噴砂（細粒分）を生じながら液体状になる現象である (中略) 液状化とは振動によって非排水状態の地盤が一時的に液体になってしまう現象である。地盤が正規圧密状態と仮定すると、全応力 σ は一定であり、振動によって間隙水圧 u_w が増加する $\sigma'=\sigma-u_w$ より有効応力 σ' が減少していき、最終的にゼロになることで液状化が発生する。たとえばコーヒーの粉を瓶に詰め替えるとき、粉が入りきらないときは瓶を少し叩いて振動を与えると粉がよく詰ってもう少し入るようになる。これは瓶を叩くことによって粒同士のかみ合いがずれ、粒子間の空隙に瞬間的に落ち込み体積が減少する。乾燥した土でも同じことが起こる。しかし、砂が飽和している場合は粒子間にある水が、砂が密に詰ろうとすることを妨げるため間隙水圧が増加し、それに伴って有効応力が低下する。有効応力がゼロになれば、せん断強さもゼロになり砂は液状になる。
120	①	地震動を受けた飽和地盤は、その地震動により間隙水圧が徐々に上昇し、有効応力が失われ液状化に至る。
121	①	一般に地震に伴う地盤の液状化現象は、飽和砂地盤が非排水条件化で繰返しせん断をうけることにより、過剰間隙水圧が上昇し有効拘束圧がゼロになった状態

5.2.2 液状化による被害事例

文献調査結果を表5.3に示す。収集情報としては、被害形態、地質、場所、誘因（地震）、補足的な内容とした。地質については、「砂質土」や「盛土」、「沖積平野」などとカテゴリーが統一されていないが、文献で述べられている情報を忠実に記載することとした。2018年北海道胆振東部地震による札幌市清田区里塚地区や2018年スラウェシ島地震による大規模な地盤流動のように、ある1被災事例について複数の文献が取り上げているケースが存在するものの、液状化による被害事例を取り扱っている59文献、39被災事例を収集することができた。図5.2に、被害事例の誘因の度数を示す。速報性の高い地盤工学研究発表会を対象としているため、2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震、2018年北海道胆振東部地震など、調査年度（2010年度～2022年度）中に発生した地震による液状化被害事例を取り扱った文献が多いが、1964年新潟地震や

「その他」に含まれる1968年十勝沖地震のように、古い年代における被害事例を取り扱っている文献も散見された。

図5.3、図5.4に、被害事例の主な地質、被害形態の度数をそれぞれ示す。地質と被害形態については、同一の被害事例を扱っている文献の重複を除いた39の被災事例について、該当のキーワードを含む事例をカウントしている。「盛土（砂質土、火山灰質土）」や「沈下・傾斜」のように、1地点で複数のキーワードを含むことがあるため、合計は39を超えており、地質については、砂が過半数の21事例を占めており、盛土も10事例と25%近くを占めている。「その他」に含まれる地質としては、泥炭層や鉱滓、軽石、埋立土などが挙げられる。被害形態については、沈下が過半数の21事例を占めている。「その他」に含まれる被害形態としては、路面のうねり被害や堤防の陥没破壊、不陸、空洞化などがある。

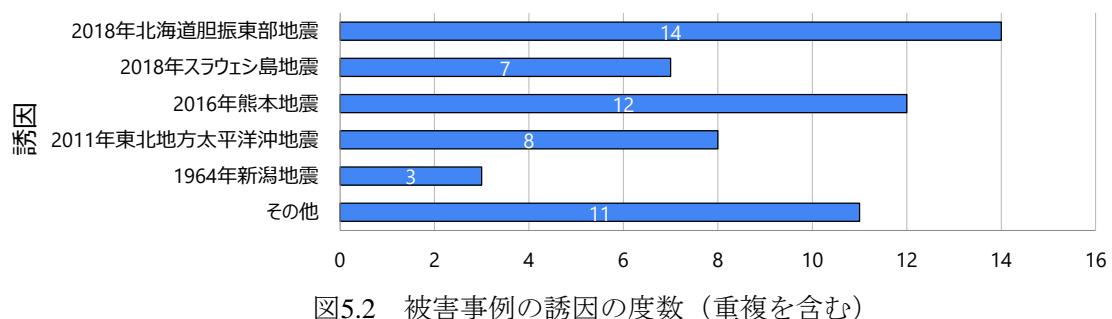


図5.2 被害事例の誘因の度数（重複を含む）

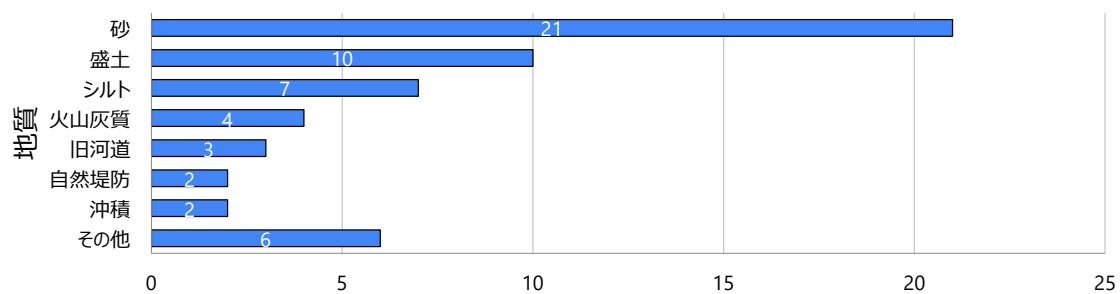


図5.3 被害事例の地質の度数（重複を含まない）

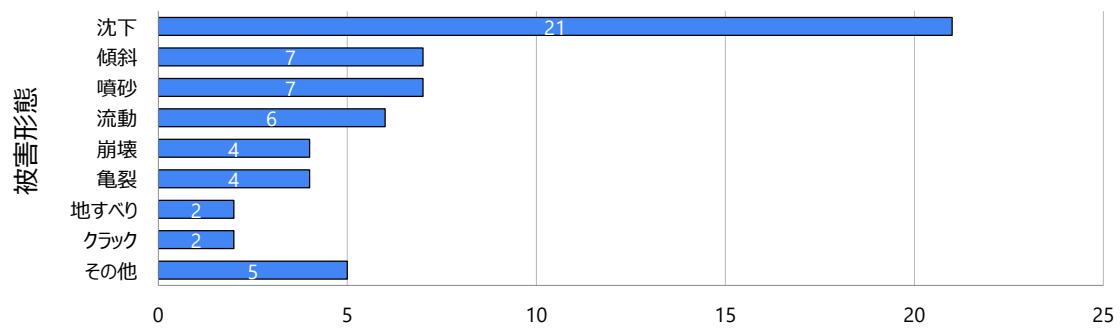


図5.4 被害事例の被害形態の度数（重複を含まない）

表5.3 液状化による被害事例

番号	文献番号	被害形態	地質	場所	誘因	内容
1	122	岸壁のせり出し	埋立土	相馬港	2021年福島県沖	

番号	文献番号	被害形態	地質	場所	誘因	内容
		ヒエプロン部の沈下			地震	
2	123		火山灰質土、砂質土	札幌市清田区	2018年北海道胆振東部地震	1968年、2003年の十勝沖地震でも液状化被害が発生
3	124	地盤の流動・住宅の沈下・傾斜	盛土（火山灰質土）	札幌市清田区里塚地区	2018年北海道胆振東部地震	
4	125	地盤の流動・住宅の沈下・傾斜	盛土（火山灰質土）	札幌市清田区里塚地区	2018年北海道胆振東部地震	
5	126		火山灰質土、砂質土	札幌市清田区	2018年北海道胆振東部地震	
6	127	地盤の流動・住宅の沈下・傾斜	盛土（火山灰質土）	札幌市清田区里塚地区	2018年北海道胆振東部地震	
7	128	地盤の流動・住宅の沈下・傾斜	盛土（火山灰質土）	札幌市清田区里塚地区	2018年北海道胆振東部地震	
8	129	地盤の流動・住宅の沈下・傾斜	盛土（火山灰質土）	札幌市清田区里塚地区	2018年北海道胆振東部地震	
9	130	地盤の流動・住宅の沈下・傾斜	盛土（火山灰質土）	札幌市清田区里塚地区	2018年北海道胆振東部地震	
10	131	地盤の流動・住宅の沈下・傾斜	盛土（火山灰質土）	札幌市清田区里塚地区	2018年北海道胆振東部地震	
11	132	斜面崩壊	火山灰質土	北海道勇払郡厚真町	2018年北海道胆振東部地震	
12	133	路面の沈下・陥没、噴砂	埋戻し土	札幌市東区・北区	2018年北海道胆振東部地震	
13	133	堤防法面の沈下、側方流動による護岸のはらみ出し	不明（盛土？）	石狩市・石狩放水路堤防	2018年北海道胆振東部地震	
14	133	噴砂とアスファルト面の亀裂	砂質シルト	苫小牧西港	2018年北海道胆振東部地震	
15	133	噴砂と沈下	不明（盛土？）	むかわ町・鶴川橋付近の堤防	2018年北海道胆振東部地震	
16	134	大規模な地盤流動	沖積平野	インドネシア・スマラウェシ島	2018年スマラウェシ島地震	
17	135	地盤流動		インドネシア・スマラウェシ島	2018年スマラウェシ島地震	
18	136	大規模な地盤流動	扇状地の末端部(砂質土)	インドネシア・スマラウェシ島	2018年スマラウェシ島地震	
19	137	大規模な地盤流動	砂礫層・シルト層	インドネシア・スマラウェシ島	2018年スマラウェシ島地震	
20	138	大規模な地盤流動	砂とシルト	インドネシア・スマラウェシ島	2018年スマラウェシ島地震	

番号	文献番号	被害形態	地質	場所	誘因	内容
21	139	大規模な地盤流動	砂とシルト	インドネシア・スマラウェン島	2018年スマラウェン島地震	
22	140	大規模な地盤流動	砂質土	インドネシア・スマラウェン島	2018年スマラウェン島地震	
23	141	住宅の不同沈下	自然堤防(砂質土)	熊本市	2016年熊本地震	
24	142	側方流動	砂質土	秋津町秋田地区	2016年熊本地震	
25	143	側方流動・家屋全壊	旧河道	秋津町秋田地区	2016年熊本地震	
26	144	側方流動	砂質土	秋津町秋田地区	2016年熊本地震	
27	145	路面のうねり被害、段差・亀裂	旧河道部・砂利採取場跡など	九州自動車道	2016年熊本地震	うねり被害が発生した箇所とは、路面がうねるように沈下している箇所、沈下していない箇所が連続している範囲のことを指す。
28	146	低層建物の沈下・傾斜	砂質土	熊本市近見地区	2016年熊本地震	
29	147	低層建物の沈下・傾斜	砂質土	熊本市近見地区	2016年熊本地震	
30	148	噴砂・地割れ	自然堤防	熊本市南区	2016年熊本地震	
31	149	地すべり	乙ヶ瀬軽石	火の鳥地区地すべり	2016年熊本地震	最大加速度 450.6gal の地震により、ACP4 層内で過剰間隙水圧が発生し、ACP4 層のせん断抵抗が低くなることで、土塊の自重および地震の慣性力によるせん断力に耐えきれず地すべりが発生したものと推測される。
32	150	建物の沈下・傾斜	砂質土	熊本市南区	2016年熊本地震	
33	151	噴砂・地割れ	砂質土	白川河口部付近の堤防	2016年熊本地震	
34	152	天端の沈下・縦断クラック、噴砂	シルト混じり砂・火山灰質細砂	加勢川水門脇の堤防	2016年熊本地震	
35	153	住宅の沈下・傾斜	埋立土	千葉市美浜区	2011年東北地方太平洋沖地震	
36	154	地盤沈下		茨城県水戸市偕楽園	2011年東北地方太平洋沖地震	
37	155	農業用管路の不陸	砂質土	福島県須賀川市外	2011年東北地方太平洋沖地震	
38	156	路面下の空洞化	砂質土	東京都新木場地区	2011年東北地方太平洋沖地震	
39	157	河川堤防の流動破壊	砂質シルト・粘性土	千葉県印旛郡栄町請方地先、中谷地先、三和地先	2011年東北地方太平洋沖地震	

番号	文献番号	被害形態	地質	場所	誘因	内容
				の利根川右岸 河川堤防		
40	158	河川堤防の流動破壊	砂質シルト・粘性土	千葉県印旛郡 栄町請方地先, 中谷地 先, 三和地先 の利根川右岸 河川堤防	2011年東北地方 太平洋沖地震	
41	159	盛土の沈下	盛土支持地盤	成田線安食・ 小林間盛土	2011年東北地方 太平洋沖地震	
42	160	家屋の不同沈下・傾斜	盛土（山砂）	神奈川県	2011年東北地方 太平洋沖地震	
43	161	住宅の沈下・傾斜	砂質土（三角州）	柏崎市松波2丁目	2007年新潟県中 越沖地震	
44	162	堤防の沈下・クラック	盛土	信濃川, 鯖石川	2007年新潟県中 越沖地震	
45	163	盛土の流動崩壊	盛土	能登有料自動車道	2007年能登半島 地震	
46	164	噴砂	シルト	弓ヶ浜北部竹内地内	2000年鳥取西部 地震	
47	165	堤防の沈下	沖積砂質土	淀川左岸の西島地区	1995年兵庫県南部 地震	
48	166	盛土の沈下	泥炭層	釧路川左岸 KP9.85	1993年釧路沖地震	
49	167	泥流を伴う大規模地すべり	風成シルト層（レス土）：崩壊性土	タジク共和国	1989年タジク地震（M5.5）	原因は、数年にわたる灌漑によって湿った多孔質のレス質シルトがコラボス現象を起こし、これに地震力が加わって大規模地すべりが生じたものと考えられている。
50	168	盛土の崩壊	シルト質砂	千葉県長南町 長南中学校	1987年千葉県東方沖地震（M5.5）	原因としては、盛土部で発生した液状化のため地盤が変状し、そのために斜面崩壊や亀裂などの被害となつたと考えられている。
51	169	溜池堤体の亀裂や沈下	砂質土が多い	青森県内の溜池	1983年日本海中部地震	
52	170	ダムの液状化と堆積物の流出	鉱さい	持越鉱さいダム	1978年伊豆大島近海地震	
53	171	盛土の崩壊（枝谷の軟弱地盤箇所）	細砂を主体とする砂質土	青森県 (STA.648+300, STA.671+600)	1968年十勝沖地震（M7.8）	盛土法面の崩壊の原因は、地震直前の豪雨により砂質土からなる法面は、含水飽和の状態になっていて、これに変位振幅の大きな地震動が比較的長い継続時間作用したため、法面内に隙間水圧が増大し、せん断抵抗が著しく低下し、液状化の崩壊を生じた。
54	159	盛土の沈下	下部盛土	羽越線出戸・ 西目間盛土	1964年新潟地震	羽越線の事例は泥炭土上の盛土が沈下し盛土のり尻に滯水して下部盛土が液状化したと推定され、その他は盛土支持地盤の液状化に起因する沈下と考えられている。

番号	文献番号	被害形態	地質	場所	誘因	内容
55	159	盛土の沈下	盛土支持地盤	越後線白山・関屋間盛土	1964年新潟地震	
56	172	建物の全半壊や沈下・傾斜、地盤の亀裂、地割れなど	盛土地に属する旧河道域で被害が多いとされている	新潟県	1964年新潟地震	1964 年の新潟地震の被害記録より、建物被害面積と地盤変状長さをトレースし、50m メッシュ毎に被害を定量化し、両方の被害を総合した被害評価を試みた。

5.3 土木学会地震工学研究発表会

本節では、土木学会地震工学論文集に掲載された文献の中で液状化現象に関連する用語をまとめる。調査対象の文献は、1957年～2020年に掲載された文献のうち、液状化に関連する文献173)～380)である。なお、分類方法については、調査者の主観にもとづき判断していることに留意されたい。

5.3.1 統計結果

(1) 液状化の定義

表5.4に文献中に用いられた液状化の定義を示す。これらを分類すると、①過剰間隙水圧比の大きさで液状化の発生を定義したもの、または、②両ひずみ振幅の大きさで液状化の発生を定義したものに分けられる。多くの文献では、「液状化」という用語を定義せずに用いていた。これは、液状化現象自体が一般的に認知されていることに起因しているからかもしれない。

表5.4 文献中に用いられた液状化の定義

文献番号	定義	
174	①, ②	(中略) 一般に液状化現象とは、地下水位下にある砂地盤の間隙水圧が、何らかの原因で上昇していわゆる過剰間隙水圧を生じ、砂の粒子と粒子を圧する有効応力が消滅して、砂地盤がせん断抵抗力を失う現象をいう。
357	①	(中略) 液状化は非排水に近い条件下での繰返せん断履歴に対するダイレ イタンシーの累積によって生じる。
359	②	(中略) 両振幅せん断ひずみ DA=2% となった状態を「液状化」として取り扱う
360	①, ②	(中略) 地震発生中における地盤の過剰間隙水圧の上昇に伴うせん断抵抗の低下 (中略)

(2) 液状化のメカニズム

図5.5に、文献に記載された液状化メカニズムの割合を示す。メカニズムを記載している文献、および、メカニズムに関する明確な記載がない場合であってもその記載から著者が考えるメカニズムを判断できる文献のみをカウントしている。図中の番号は、本章の初めに定義した液状化メカニズムの番号に対応する。なお、図の結果は、実被害報告および模型実験結果報告の両方を含む。また、同一文献において、メカニズム①および②の両方が記載されている場合など、複数のメカニズムを報告している場合、それぞれを一回としてカウントした。

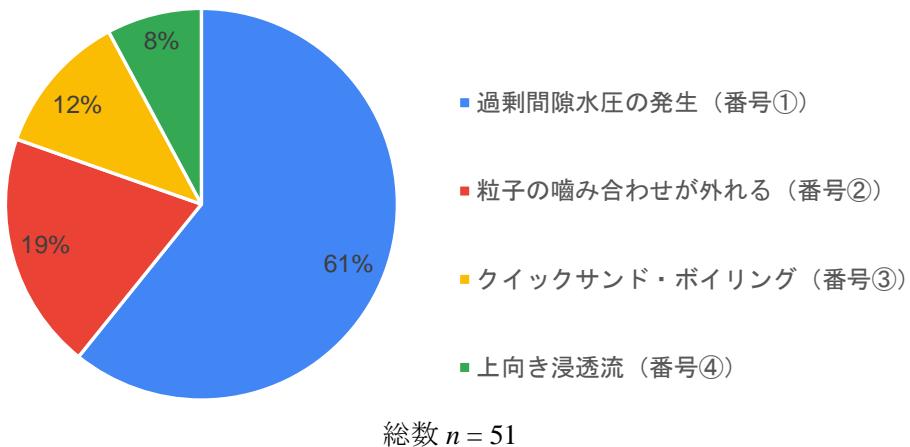


図5.5 液状メカニズムに関する統計結果

過剰間隙水圧の発生（番号①）が最も多く、次いで、粒子の噛み合わせが外れる（番号②）が多くかった。複数の文献では、上記の両方のメカニズムを合わせて液状化現象を説明していた。また、噴砂に関する記述のある文献では、ボイリング現象（番号③）と説明するものが多かった。

(3) 被害形態

図5.6に、文献に記載された実被害における被害形態を示す。文献には、「宅地の沈下」や「盛土の沈下」等の記載がされていたが、ここでは構造物を区別せず、沈下に関連する記載があった場合にはそれらを一つにまとめている。また、傾斜による被害についても、多くの記載が沈下と並べて記述してあったことから沈下・傾斜と一つにまとめている。斜面被害については、崩落、崩壊、すべり破壊等の表現が用いられていたが、ここではそれらの被害を斜面崩壊・地すべりにまとめている。

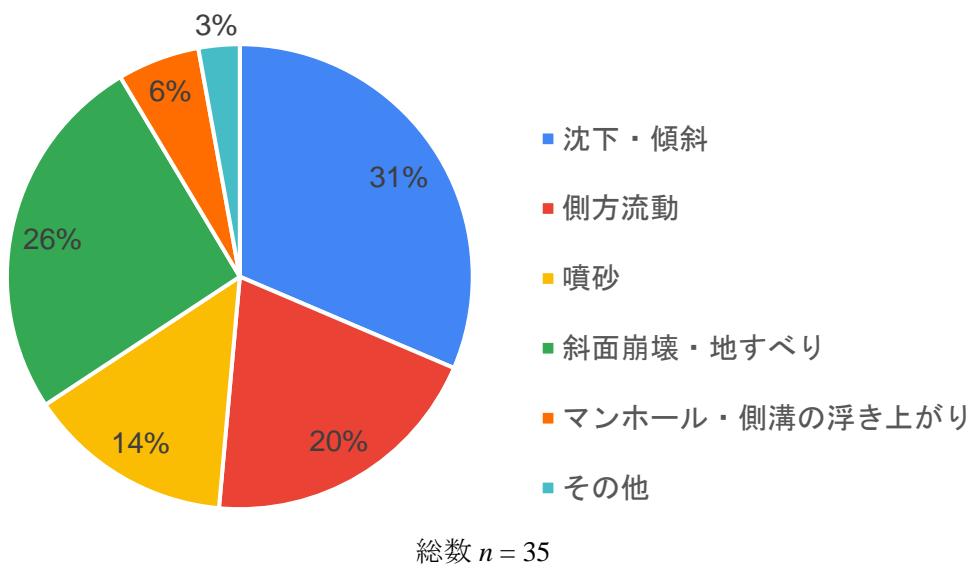


図5.6 被害形態に関する統計結果

「沈下・傾斜」および「斜面崩壊・地すべり」による被害形態を合わせると全体の50%を超えた。住宅地での液状化現象による被害が多く報告されていること、および、斜面被害・地すべりが発生すると被害が拡大する傾向にあることなどが理由に挙げられる。また、速報流動による被害報告は全体の20%であった。「マンホール・側溝の浮き上がり」および「噴砂」による被害は

合計で20%であり、報告された被害形態としては少数であった。

(4) 液状化、流動、その他液状化現象に関連する用語

表5.5～表5.7に、文献中に用いられた液状化、流動およびその他の液状化現象に関連する用語を示す。「突発的液状化」、「不完全液状化」、「中間液状化」、「初期液状化」、「完全液状化」は、状態を表す用語として使われており、「複数回液状化」および「再液状化」は現象を表す用語として用いられている。「流動」および「流動状態」は、状態を表す用語として用いられており、「流動化」は現象を表す用語として用いられている。流動圧および流動力は、構造物に作用する液状化現象により流動した土の土圧の意として用いられている。その他液状化現象に関連する用語については、主に液状化により構造物等に生じた現象を表す用語として、それぞれ用いられている。

表5.5 文献中に用いられた液状化に関連する用語

用語	文献番号	引用部分
突発的液状化	174	(中略) 後者は地震によって砂地盤が突発的に流動化する場合などであって、砂のせん断抵抗が正常な値から0近くにまで急激に減少したために生じるもので、このような現象を突発的な液状化と言い、浸透水圧の増大が直接の原因であるクイックサンドとは通常区別して取扱われる。
不完全液状化、中間液状化	180	(中略) 地盤の液状化する過度的な状態(不完全液状化)。(中略) 軟化(不完全液状化)するだけで、完全に液状化しない。
初期液状化	182	液状化の定義としては、過剰間隙水圧が有効応力と等しくなった時点を初期液状化とし、(中略)
	197	(実記録+数値解析) ウィルドライフの地震記録: 解析で過剰間隙水圧比が1に達した時点を「初期液状化」とし、その後を「液状化後」とした。液状化後の波形の長周期化が表現できるのは有効応力解析のみ(等価線形解析で液状化後の残留せん断剛性を1%,2%にするとちょっとよい)(中略)
完全液状化	180	(中略) 液状化すると応答は見られなくなる。(応答波形の特徴から判断)
	181	(中略) 完全液状化時には有効上載圧がゼロになることが分かる。
	182	(中略) 軸ひずみが両振幅で10%となった時点を完全液状化とした。
	185	(中略) 盛土周辺の地盤では、0.7～1.0と高く、特に周辺地盤においては完全液状化の状態に近いことが分かる。
複数回液状化、再液状化	321	(中略) (1993年と2007年能登半島地震) 飯田港では液状化が認められなかつたが、鵜飼魚港、正院町熊谷、正院町正院で数十メートル程度の範囲のほぼ同地点で再液状化が認められた。
	359	(中略) 短期間に複数回発生したマグニチュードの大きい地震によって同一の地点が複数回液状化する現象(中略)
	364	(中略) 過去に液状化した地盤で、地下水に流れが存在する環境で堆積する地盤は、ゆるく堆積して液状化しやすい。

表5.6 文献中に用いられた流動に関連する用語

用語	文献番号	引用部分
流動、 流動化、 流動状態	6	(中略) 飽和砂が振動を受けるとき、砂の間隙比がある限界値以下であれば安定を保つ。しかし、限界値以上であれば粒子の再配列を起こし、より強固な粒子骨格を形成し、間隙比は減少する。この限界値は砂の種類、振動の加速度等の関数と思われる。透水性の悪い砂で粒子の再配列が急激に行われたとすると、間隙水の流出が間に合わず、砂粒子は水で支えられた形となり、流動状態にいたる。
	6	(中略) この点は飽和状態ではほぼ流動化する場合に相当する。つまりこの点において砂粒子の構造が変化し間隙水圧の上昇が生じるため、流動化するのではないかと考えられる。
	360	(中略) 地震終了後に地盤の支持力が低下した状態が継続すること。
流動圧、 流動力	256	地盤が側方に流動し、橋脚がそれに伴う側方流動圧を受けて水路側に移動したためと考察されている。

表5.7 文献中に用いられたその他の液状化現象に関連する用語

用語	文献番号	引用部分
液状化フロント	375	(中略) 激しい波浪負荷を受けた海底砂質地盤が液状化し、液状化領域が地盤深部へと伝播していく現象。
水膜現象 (Water Film Effect)	232	(中略) 透水性の低い層に液状化に伴う上昇流の流れが阻害されて水膜ができる現象を1g模型実験で再現した。
揺れ込みせん断変形	380	(中略) 防波堤本体の沈下 → 基礎地盤の「揺れ込みせん断変形」
浮き上がり	290	(中略) $D_r=90\%$ の浮き上り。埋戻し土が液状化しても液状化強度、累積損失エネルギーが大きければ液状化は生じない。
過剰間隙水圧の再分配	363	(中略) 低透水層を有する地盤が地震動などによって加振されると、間隙流体が低透水層と直下の砂層境界部で停滞し、土粒子と間隙流体が再分布する。流体が退延する層のせん断抵抗力は低下する。

5.3.2 主な用語の使われ方

表5.5～表5.7に示すように、異なる用語であってもその内容が似通っている場合が多い。液状化現象や実験結果を説明するときに、書き手の解釈で各用語を用いているためと思われる。表5.8および表5.9に、文献中に用いられた用語および被害形態の種類をまとめた。

表5.8 文献中に用いられた用語のまとめ

用語	用語
液状化関連	液状化、液化、突発的液状化、不完全液状化、初期液状化、完全液状化、完全な液状化、完全液状化土、中間液状化、複数回液状化、再液状化、液状化度、液状化フロン、液状化抵抗強度、液状化の時間経過
流動関連	流動、流動化、流動状態、流砂、側方流動、側面流動、側方移動、地盤流動、地盤流動化、流動圧、流動力、流動特性、流動現象、流動破壊
地盤変位関連	永久変位、残留変位、沈下、地盤ひずみ、流動変位、側方流動変位、側方流動量、水平残留変位、残留変形量
メカニズム関連	サイクリックモビリティ、臨界間隙比、過剰間隙水圧の再配分、限界せん断ひずみ、累積損失エネルギー、繰り返しエネルギー強度、速度依存性、水平地盤反力係数、不整形性、局所的增幅特性、相変化、粒子破碎、土粒子の沈降、限界状態、固結力、土粒子間固着力、平均骨格応力、多線返し領域、初期有効応力
現象関連	クイックサンド、浮き上がり、噴砂、即時沈下量、水膜現象、残留変形、揺れ込みせん断変形、液性状態、軟化

表5.9 文献中に記載された被害形態の種類

	被害形態
実被害	噴砂, 川への側方流動(移動), 埋設管路の被害, 杭基礎構造物の傾斜, 道路橋, 鉄道橋の流動, 杭基礎構造物の被害, 境港の液状化現象の再現, 埋立土の沈下, 盛土の流動すべり, 壁体の前傾, 盛土の崩落, 堤防の縦断亀裂, はらみだし, すべり破壊, 宅地の隆起, 噴砂, 宅地のり面, 自然斜面の滑落・崩壊, 盛土の斜面崩壊, 流れ盤すべり, 斜面崩壊(受盤, 流盤, 黄盤), 斜面崩壊(表層崩壊, 岩盤崩壊, 盛土崩壊), 側方流動, 亀裂, 地盤沈下, 不同沈下, マンホールの浮上, 傾斜, 沈下, 地すべり, 大量の噴砂, 戸建て住宅, 電柱などの傾斜, 不同沈下, 道路の沈下・亀裂, 埋設管・水路の浮き上がり, 護岸堤防のはらみ出し・沈下, ゆすり込み沈下, 側溝の変形, 浮き上がり, 大規模な噴砂, 住宅の傾斜, 沈下
模型実験	埋設管の側方流動による被害, ケーソン岸壁の変位, 側方流動による杭基礎構造への影響, ケーソン支持力喪失, 背面地盤の流動, 斜面崩壊, 護岸の移動に伴う橋脚基礎への影響, 地中管路の変位, ケーソン基礎の水平移動, 混成式防波堤の沈下, 下水道管渠に浮上り力, 既設石油タンクの沈下, 支持地盤の液状化に伴う盛土の沈下, 液状化時に杭に作用する力
数値解析	直接基礎の沈下, 河川堤防の沈下, 埋設管被害

377378379380

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤工学ハンドブック， 1999
- 2) 土質工学会：土質基礎工学ライブラリ24 土質地震工学， 土質工学会， 371pp., 1983
- 3) 土質・基礎工学のための地震・耐震入門， 入門シリーズ10， 地盤工学会， pp. 239, 1985（第6刷1997）
- 4) 液状化対策工法， 地盤工学・実務シリーズ18， 地盤工学会， 513pp., 2004
- 5) 土質工学会：土質工学標準用語集， 土質工学会， 163pp., 1990
- 6) 地盤工学会用語辞典改訂編集委員会：地盤工学用語辞典， 丸善， 661pp., 2006
- 7) 土木学会編：土木用語大辞典， 技報堂， 1656pp., 1999
- 8) 日本自然災害学会， 防災事典， 築地書館， 543pp., 2002
- 9) 町田貞， 井口正男， 貝塚爽平， 佐藤正， 樋根勇， 小野有五：地形学辞典， 二宮書店， 767pp., 1981
- 10) 岡田義光 編：自然災害の事典， 朝倉書店， 694pp., 2007
- 11) Lambe, T. W. and Whitman, R. V.: Soil mechanics, SI version, John Wiley & Sons, 553pp., 1969
- 12) Port and Harbour Research Institute ed.: Handbook on liquefaction remediation of reclaimed land, Balkema, 1997
- 13) 安田進：液状化の調査から対策工まで， 鹿島出版会， 243pp., 1988
- 14) 国土庁防災局震災対策課：小規模建築物等のための液状化マップと対策工法， ぎょうせい， 120pp., 1994
- 15) 吉見吉昭：砂地盤の液状化， 技報堂， 159pp., 1980
- 16) 石原研而：土質動力学の基礎， 鹿島出版， 303pp., 1976
- 17) 浅田秋江：土質力学・同演習および土質地盤工学， 東北工業大学， 1990
- 18) 安川郁夫， 今西清志， 立石義孝：絵とき土質力学， 改訂3版， オーム社， 243pp. 2013
- 19) 岡二三生：土質力学演習， 基礎土工学シリーズ16， 森北出版， 292pp., 1996
- 20) 実務者のための地盤解析法， 地盤工学会中国支部， 1999
- 21) 澤孝平， 渡辺康二， 沖村孝， 青木一男， 佐野博昭：地盤工学， 森北出版， 265pp. 1999
- 22) Tayler, D. W.: Fundamentals of soil mechanics, John Wiley & Sons, 7th Printing, 700pp., 1948; Tayler, D. W.: Fundamentals of soil mechanics, Modern Asia Edition, Charles E. Tuttle Company, 700pp., 1972
- 23) 地盤工学会編：おもしろジオテク， 技報堂出版， 126pp., 1997
- 24) 土質工学会土のはなし編集グループ：土のはなしIII， 技報堂出版， 216pp., 1979
- 25) 星埜和， 加藤涉， 三木五三郎， 榎波昭 共訳：新版テルツアギ・ペック土質力学， 基礎編， 丸善， 1969
- 26) 山口柏樹：改訂増補 土質力学， 技報堂， 389pp., 1975
- 27) 藤井衡， 金哲鎬， 渡辺佳勝：住宅地図がわかる本－安全な地盤の基礎・設計の考え方－， オーム社， 271pp., 2014
- 28) 岡二三夫：地盤液状化の科学， 近未来社， 176pp., 2001
- 29) 石原研而：地盤の液状化－発生原理と予測・影響・評価－， 朝倉書店， 108pp., 2017
- 30) 造成宅地の耐震対策に関する研究委員会：液状化から戸建て住宅を守るための手引き， 地盤工学会関東支部， 209pp., 2013
- 31) 赤井浩一， 大草重康：フローリンの土質力学第I巻， 森北出版， 444pp., 1969
- 32) 河上房義：土質力学， 第7版， 森北出版， 276pp., 2001
- 33) 安田進， 片田敏行， 後藤聰， 塚本良道， 吉嶺充俊：わかる土質力学220問， 理工図書， 213pp., 2003
- 34) 地盤・土構造物のリスクマネジメント-, エヌ・ティー・エス， 290pp., 2019
- 35) Hunt, R., E.: Geologic Hazards, A field guide for geotechnical engineers, Taylor & Francis, 323pp., 2005
- 36) Dobry, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R.M. and Powell, D.: Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method, NBS building science series 138, 150pp., 1982
- 37) 若松加寿江：そこで液状化が起きる理由 被害の実態と土地条件から探る， 東京大学出版会， 252pp., 2018
- 38) 山肩邦男：建築基礎構造， 朝倉書店， 295pp., 1990
- 39) 今村遼平：安全な土地， リーブルテック， 200pp., 2013
- 40) 宅地地盤調査マニュアル2014， 全国地質調査業連合会， 2014
- 41) 国生剛治：地震地盤動力学の基礎 エネルギー的視点を含めて， 鹿島出版会， 384pp., 2017
- 42) Sumer, B. M.: Liquefaction around marine structures, Advanced series on ocean engineering, Volume 89, World Scientific, 453pp., 2014
- 43) Towhata, I.: Geotechnical Earthquake Engineering, Springer, 684pp., 2008
- 44) 渡辺具能：液状化はこわくないーメカニズムと対策 Q&A－， 山海堂， 185pp., 1995
- 45) 土質工学ハンドブック， 土質工学会， 1317pp., 1965
- 46) 最上武雄編， 土質力学， 土木学会， 1036pp., 1969
- 47) 国生剛治：液状化現象巨大地震を読み解くキーワード， 山海堂， 269pp., 2005
- 48) Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Ground motions and soil liquefaction during earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 134pp., 1982
- 49) 田中終身 監修：建築基礎 土を掘る技術と固める技術， 建築技術， 298pp., 1992
- 50) 吉見吉昭・福武毅芳：地盤液状化の物理と評価・対策技術， 技報堂， 330pp., 2005
- 51) Idriss, I. M. and Boulanger, R. W.: Soil liquefaction during earthquakes, EERI Publication No. MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, 237pp., 2008

- 52) 阪口埋：全訂新版 建築地盤工学，理工図書，241pp., 1984
- 53) 造成宅地の耐震対策に関する研究委員会，戸建て住宅の液状化対応に関する手引き書，地盤工学会関東支部
- 54) 畠中宗憲，加倉井正昭：建築基礎構造[改訂版]，東洋図書，275pp., 2010
- 55) Committee on earthquake Engineering, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council: Liquefaction of soils during earthquakes, National Academy Press, 1985
- 56) 濱田政則：液状化の脅威，叢書 震災と社会，岩波書店，167pp., 2012
- 57) 若松加寿江：日本の液状化履歴マップ745-2008，東京大学出版，71pp. & DVD, 2011
- 58) 米倉亮三，小林精二編著，井出政憲，岡田進，高坂信章，近藤義正，佐々木隆光，高橋強，手塚広明，仲家純次 著：事例に見る地盤の液状化対策－被害を防止・修復する工法－，近代科学社，257pp., 2013
- 59) 正垣孝晴：技術者に必要な地盤灾害と対策の知識，鹿島出版会，146pp., 2013
- 60) 内村太郎：ゼロから学ぶ土木の基本地盤工学，オーム社，218pp., 2013
- 61) 赤井浩一：土質力学，朝倉土木工学講座5，朝倉書店，268pp., 1966
- 62) 富永晃司：建築基礎構造，建築学構造シリーズ，オーム社，228pp., 2013
- 63) 稲田倍穂：技術者からみた日本列島の地震と地盤，鹿島出版会，107pp., 2014
- 64) 住まいの液状化対策研究会：Q&Aで知る住まいの液状化対策，創樹社，108pp., 2015
- 65) 済木幸平：これだけは知っておきたい地盤工学の基礎知識，鹿島出版会，248pp., 1987
- 66) 菊本統，西村聰，早野公敏：図説わかる土質力学，学芸出版社，205pp., 2015
- 67) 澤孝平，渡辺康二，沖村孝，青木一男，佐野博昭：地盤工学，建設工学シリーズ，森北出版，204pp., 2002
- 68) エクスナレッジ編集：Q%Aで一発回答！地震に負けない地盤がわかる本，エクスナレッジ，125pp., 2012
- 69) 河野伊一郎，八木則男，吉国洋：土の力学，技報堂，264pp, 1990
- 70) 直井正之：住宅を作るための「住宅基礎の地盤」がわかる本，建築技術，223pp., 2002
- 71) 住宅地盤リスク普及協会：住宅を対象とした液状化調査・対策の手引き書，レジリエンスジャパン推進協議会，143pp., 2016
- 72) 堀江博：地より火でる 地下ガスによる液状化現象と地震火災－迷宮入り科学解明とパラダイムシフト－，高文研，255pp., 2017
- 73) 塩井幸武：見直しが求められる地震工学，総合土木研究所，113pp., 2017
- 74) 吉見吉昭：地盤と建築構造のはなし，技報堂，149pp., 2006
- 75) 都市基盤整備公団：宅地耐震設計マニュアル（案），2002
- 76) 運輸省港湾局監修：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），沿岸開発技術研究センター，421pp., 1997
- 77) 東京港埋立地における液状化対策手引き書，東京都，1990
- 78) 運輸省港湾局監修：埋立地の液状化対策ハンドブック，沿岸開発センター，285pp., 1993
- 79) 地震対策について，中部電力，<http://www.chuden.co.jp/torikumi/atom/hamaoka/jishin.html>[2008/08/285]
- 80) レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル，国土交通省水管管理・国土保全局治水課，2012
- 81) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2019改訂，506pp., 2019
- 82) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説，2012
- 83) 原子力基準調査委員会：原子力発電所耐震設計技術指針，JEAF4601-1987，日本電気協会
- 84) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説・設計事例集，2009年版，2009
- 85) 日本下水道協会：下水道の地震対策マニュアル，1997
- 86) 造成宅地における耐震調査・検討・対策の手引き－地震から既存の住宅を守るために－，地盤工学会関東支部，造成宅地の耐震調査・検討・対策方法に関する検討委員会，2007
- 87) (社)日本ガス協会：高圧ガス導管液状化耐震設計指針，同資料編，2001
- 88) ISO 23469: Bases for design of structures — Seismic actions for designing geotechnical works
- 89) 国土庁防災局震災対策課：液状化地域ゾーニングマニュアル，1999
- 90) 柴田徹。岡二三生：液状化のメカニズム，土と基礎，Vol. 29, No. 9, pp. 83–91, 1981
- 91) 永瀬英生，岡二三生：液状化のメカニズムと定義，土と基礎，Vol. 50, No. 8, pp. 47–50, 1981
- 92) 防災基礎講座 災害はどこでどのように起きているか，防災科学技術研究所，2007
- 93) 防災基礎講座，自然災害について学ぼう，防災科学技術研究所，<http://www.bosai.go.jp/library/publication.htm>, 2004
- 94) 本多剛：液状化被害の軽減技術向上のための模型実験と個別要素法解析，東京大学学位論文，2007
- 95) 規矩大義：液状化による地盤の永久変位に関する研究，九州工業大学学位論文，1993
- 96) Orense, R. P.: Modeling of permanent displacement of liquefied ground and its effects on structures, A Thesis in the Department of Civil engineering Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Engineering, University of Tokyo, 1992
- 97) Seed, H.B. and Lee, K.L.: Liquefaction of saturated sands during cyclic loading, Proc, ASCE, Vol. 92, No. SM6, pp. 105–134, 1966
- 98) 安田進不規則荷重を受ける飽和砂の液状化，東京大学学位論文，(974)
- 99) 沼田淳紀：過去の地震による液状化土の特徴と細粒な土に対する液状化評価法，中央大学学位論文，2004
- 100) 連紜震：動態離心模型試験探討含薄沉泥夾層の砂層之液化機制，中央大學（台灣）学位論文，2010
- 101) Kim, J.: Deformation properties of liquefied soils with fines, Theses submitted to Tohoku University for the degree of

doctor of philosophy of the Tohoku University

- 102) 細野康代：初期せん断荷重を受ける砂の液状化強度と流動解析，東京都立大学学位論文，2007
- 103) 知っておきたい地盤の被害一現象，メカニズムと対策一，地盤工学会，pp. 107-151, 2003
- 104) 関東地質調査業協会液状化研究会編：絵とき 地震による液状化とその対策，オーム社，210pp., 2012
- 105) Committee on earthquake Engineering, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council: Liquefaction of soils during earthquakes, National Academy Press, 1985
- 106) Committee on State of the Art and Practice in Earthquake Induced Soil Liquefaction Assessment; Board on Earth Sciences and Resources; Division on Earth and Life Studies; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine: State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences, The National Academies Press, Washington, DC, 2016
- 107) 石井義明，芹生正己，福本武明，久武勝保，竹下貞雄，桑山忠，西原晃，畠山直隆：最新土質力学，朝倉書店，212pp., 1992
- 108) 現場における地盤調査の基本～ジオエンジニア養成塾～編集委員会：現場における地盤調査の基本～時尾エンジニア養成塾～，ジオテクノート16，地盤工学会，280pp., 2014
- 109) 吉田望：液状化現象 メカニズムから数値解析まで，森北出版，372pp., 2020
- 110) 塩井幸武：沖積地盤上の地震波動と液状化現象の発生メカニズム，第57回地盤工学研究発表会発表講演集，20-11-2-02, 2022.
- 111) 谷本俊輔，佐々木哲也：振動式コーン・定点振動試験法による地盤の液状化強度の検出メカニズムに関する考察，第57回地盤工学研究発表会発表講演集，20-11-3-04, 2022
- 112) 大坪正英，桑野玲子，京川裕之，古関潤一：異なる重力環境下での液状化挙動に関する DEM 解析，第57回地盤工学研究発表会発表講演集，DS-5-03, 2022
- 113) 飯島琢臣，野田利弘，豊田智大：圧縮性間隙流体と多次元波浪に着目した海底地盤の液状化現象解明に向けた弾塑性 u-p 解析，第56回地盤工学研究発表会発表講演集，12-9-3-03, 2021
- 114) 星野愛子，柳川一心，石橋孝通，今枝潤志：液状化判定に用いる地盤応答解析手法の適用性に関する一考察，第55回地盤工学研究発表会発表講演集，21-5-3-06, 2020
- 115) 安江絵翔，前田健一，鈴木悠真，丹羽俊介：急激な水位変動を伴う水平開水路流れが飽和地盤の洗掘に及ぼす影響，第55回地盤工学研究発表会発表講演集，23-5-4-06, 2020
- 116) 木下慶三，塚本良道，野田翔兵：小ひずみの非排水繰返せん断履歴と相対密度が液状化抵抗に及ぼす影響，第54回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1611-1612, 2019
- 117) 前田健一，西村征哉，高辻理人：マルチなスケールでみた河川堤防のパイピング破壊のダイナミクス，第53回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1735-1736, 2018
- 118) 桐山貴俊，福武毅芳，肥後陽介：二相系 MPM を用いた地震時液状化地盤の過剰間隙水圧の上昇および消散シミュレーション，第52回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1583～1584, 2017
- 119) 金成雅季，金澤伸一，坂本将吾：被災確率に基づく液状化判定の構築，第51回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1679～1680, 2016
- 120) 中川健太郎，末政直晃，佐々木隆光，小山忠雄，島田俊介：繰返し三軸圧縮試験による薬液改良土の液状化強度特性の把握，第47回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.795～796, 2012
- 121) 社本康広：排水効果を利用した液状化に伴う地盤の進行性破壊の防止対策（その1）液状化に伴う地盤の進行性破壊現象，第47回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1383～1384, 2012
- 122) 江見和泰，森伸一郎：2021年福島県沖の地震における被災地点での余震観測，第56回地盤工学研究発表会発表講演集，13-9-5-01, 2021
- 123) 工藤僚子，山下聰：再液状化特性とせん断剛性に及ぼす堆積構造の影響，第57回地盤工学研究発表会発表講演集，20-4-3-04, 2022
- 124) 山下聰，小川かける，川尻峻三，川口貴之，渡邊達也：北海道胆振東部地震で被災した火山灰造成宅地の液状化特性，第54回地盤工学研究発表会発表講演集，1723-1724, 2019
- 125) 新井洋，柏尚稔，久世直哉，大橋征幹，戸松誠，竹内慎一，千葉隆史，廣瀬亘：2018年北海道胆振東部地震による札幌市里塚地区の宅地被害，第54回地盤工学研究発表会発表講演集，1577-1578, 2019
- 126) 渡部要一，佐々木 将仁，畠山 正則，持田 文弘：札幌市里塚地区的火山灰質盛土材の液状化特性に与える締固め条件の影響，第57回地盤工学研究発表会発表講演集，20-4-3-05, 2022
- 127) 小笠原明信，川尻峻三，川口 貴之，佐々木 将仁，須志田 健：宅地造成盛土の S 波速度と切盛境界および地表面沈下量の関係，第56回地盤工学研究発表会発表講演集，12-2-4-01, 2021
- 128) 佐藤 真吾，佐々木 将仁，須志田 健，後藤 雄平，山本 淳司，藤永 壮毅，櫻井 英文：北海道胆振東部地震における札幌市里塚地区の造成宅地被害について，第55回地盤工学研究発表会発表講演集，DS-10-04, 2020
- 129) 小川 かける，門傳 賢太，川尻 峻三，川口 貴之，山下 聰：札幌市里塚地区で採取した火山灰質土の動的特性，第55回地盤工学研究発表会発表講演集，23-1-2-04, 2020
- 130) 小笠原 明信，川尻 峻三，佐々木 将仁，須志田 健，佐藤 真吾，川口 貴之，山下 聰：北海道胆振東部地震で被災した宅地造成盛土の S 波速度と N 値および応急危険度判定の関係，第55回地盤工学研究発表会発表講演集，22-6-2-08, 2020
- 131) 門傳賢太，川尻峻三，川口貴之，山下聰：北海道胆振東部地震で被災した札幌市里塚地区における原位置試験と液状化特性，第56回地盤工学研究発表会発表講演集，13-4-5-02, 2021

- 132) 緑川雄介, 海野寿康, 吉直卓也, 加村晃良, 風間基樹, 仙頭紀明 : 被災地で採取した火山灰質土の物理特性及び力学特性の把握, 第54回地盤工学研究発表会発表講演集, 1721-1722, 2019
- 133) 潤川直寛, 堀田洋之, 平井卓海, 大和田英生, 安達厚平 : 平成30年北海道胆振東部地震における石狩, 東胆振地域の液状化被害, 第54回地盤工学研究発表会発表講演集, 1579-1580, 2019
- 134) 横山芳春, 市川清治, Adi Maulana, 岩本武志, 先名重樹 : 2018年スマラウェン島地震で発生した大規模な地盤流動化地域における微動探査の事例, 第56回地盤工学研究発表会発表講演集, 13-9-1-01, 2021
- 135) 清田隆, 片桐俊彦, 志賀正崇 : 砂の非排水せん断試験結果に及ぼす間隙水温度の影響, 第57回地盤工学研究発表会発表講演集, 20-4-1-05, 2022
- 136) 清田隆, Risqi HIDAYAT, Hasbullah NAWIR : 2018年スマラウェン島地震による長距離地盤流動の発生メカニズムに関する中空ねじりせん断試験, 第55回地盤工学研究発表会発表講演集, 21-11-5-06, 2020
- 137) 田中涼太郎, 岡村未対, 小野耕平 : 2018年スマラウェン島地震での大規模地盤流動域から採取した砂の単調及び繰返せん断特性, 第55回地盤工学研究発表会発表講演集, 21-11-5-07, 2020
- 138) 大西宏実, 飛田哲男, 井合進, Irsyam Masuyur : 緩斜面の遅れ流動破壊現象に対する数値解析的検討, 第56回地盤工学研究発表会発表講演集, 13-9-1-02, 2021
- 139) 村田宗一郎, 一井康二, SUJATMIKO Karina Aprilia : スマラウェン島 Jono-oge 地区の液状化地すべりの再現解析, 第56回地盤工学研究発表会発表講演集, 13-9-1-04, 2021
- 140) 石原研而, 安田進, 東畑郁生, 古市久士, 若杉護 : 地震で長距離流動した砂質土の特性に関する試験, 第56回地盤工学研究発表会発表講演集, 13-9-1-03, 2021
- 141) 北澤聖司, 原忠 : 自然堤防の地盤特性を考慮した地域レベルにおける液状化危険度評価, 第56回地盤工学研究発表会発表講演集, 12-9-3-07, 2021
- 142) 中野瞳, 中尾邦彦, 藤井紀之, 塚元伸一, 清田康友 : 熊本地震により発生した秋津町秋田地区の側方流動メカニズム, 第55回地盤工学研究発表会発表講演集, 21-11-5-03, 2020
- 143) 渡邊大樹, 中野瞳, 中尾邦彦, 塚元伸一, 清田康友 : 熊本地震により被害が発生した地区における電気探査による旧河道の調査例, 第55回地盤工学研究発表会発表講演集, 21-11-5-02, 2020
- 144) 中尾邦彦, 花岡俊久, 藤井紀之, 塚元伸一, 清田康友 : 熊本地震により発生した側方流動対策工法の検討, 第55回地盤工学研究発表会発表講演集, 21-11-5-04, 2020
- 145) 中澤正典, 日下寛彦, 呂佩哲, 眞野基大, 村上豊和 : 熊本地震における高速道路盛土被害のマクロ分析, 第54回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1077-1078, 2019
- 146) 渡邊大樹, 中野瞳, 中尾邦彦, 塚元伸一, 安部順二 : 熊本市の地下水位低下工法実証実験, 第54回地盤工学研究発表会発表講演集, 1643-1644, 2019
- 147) 中尾邦彦, 中野瞳, 塚元伸一, 安部順二 : 熊本市における宅地液状化対策について, 第54回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1641-1642, 2019
- 148) 北澤聖司, 原忠, 中島昇, 棚谷南海彦, 林聖淳 : 熊本地震における河成地形と液状化の関係性, 第53回地盤工学研究発表会発表講演集, 1877-1878, 2018
- 149) 長谷川陽一, 柴崎達也, 和田大祐, 三角悠真, 村井勇介, 村津匠, 川嶋睦義 : 熊本地震火の鳥地区地すべりの液状化強度特性と地すべり発生機構, 第53回地盤工学研究発表会発表講演集, 1945-1946, 2018
- 150) 辻浩平, 末政直晃, 田中剛, 菅野安男, 前田裕介 : 熊本地震発生前後の SDS データの比較, 第52回地盤工学研究発表会発表講演集, 125-126, 2017
- 151) 岡二三生, 市原浩司, 野尻峰広, 北田奈緒子, 木元小百合 : 2016年熊本地震での白川河口付近の黒色調の液状化による噴砂とその組成について, 第52回地盤工学研究発表会発表講演集, 387-388, 2017
- 152) 地蔵智樹, 谷本俊輔, 佐々木哲也 : 加勢川水門における熊本地震の鉛直アレー記録の分析, 第52回地盤工学研究発表会発表講演集, 1773-1774, 2017
- 153) LONG KUNTHEAMALIH, 辻浩平, 関口徹 : 美浜区における簡易地盤調査法に基づく液状化危険度判定, 第56回地盤工学研究発表会発表講演集, 12-9-3-01, 2021
- 154) 鍋島康之, 石内鉄平 : 東北地方太平洋沖地震による水戸偕楽園の地盤被害調査と今後の地盤工学の関わり方, 第47回地盤工学研究発表会発表講演集, 81-82, 2012
- 155) 有吉充, 毛利栄征, 堀俊和, 松島健一, 上野和広 : 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による農業用パイプラインの被災と復旧, 第47回地盤工学研究発表会発表講演集, 1429-1430, 2012
- 156) 瀬良良子, 小池豊, 佐々木基成, 米本幸子, 武石夢 : 路面下空洞の発生状況に関する考察(その2)特に東日本大震災で確認された空洞の特徴, 第47回地盤工学研究発表会発表講演集, 1459-1460, 2012
- 157) 黒阪直生, 塚本良道, 兵動太一, 片山浩明, 中務勝等 : 試料サンプリング併用型 SWS 試験による利根川三和河川堤防のすべり崩壊の調査, 第53回地盤工学研究発表会発表講演集, 227-228, 2018
- 158) 黒阪直生, 塚本良道, 兵動太一, 稲川雅人 : 2011年東日本大震災における液状化による利根川三和河川堤防の崩壊箇所の調査, 第52回地盤工学研究発表会発表講演集, 137-138, 2017
- 159) 中村宏, 油谷彬博, 三平伸吾 : 今後の土構造物耐震補強における液状化対策の考え方(案), 第54回地盤工学研究発表会発表講演集, 1627-1628, 2019
- 160) 高橋一紀 : 東北地方太平洋沖地震による神奈川県内の地盤変状事例, 第53回地盤工学研究発表会発表講演集, 1767-1768, 2018
- 161) 布川博一, 大塚悟, 磯部公一, 木村泰之 : 液状化地盤における建物基礎の不同沈下機構に関する実験的検

- 討, 第46回地盤工学研究発表会発表講演集, 1639-1640, 2011
- 162) 高橋千明, 蔡飛: 基礎地盤の液状化を対象とした河川堤防変形性能照査手法の比較, 第46回地盤工学研究発表会発表講演集, 1663-1664, 2011
- 163) 岡崎真也, 永瀬英生, 廣岡明彦, 岩國英紀: 排水速度を制御した場合の液状化砂の変形特性, 第46回地盤工学研究発表会発表講演集, 1677-1678, 2011
- 164) 田村拓海, 沼田淳紀, 宮島昌克, 平田慈英: シルトを用いた丸太打設による地盤の盛り上がりに関する模型実験, 第55回地盤工学研究発表会発表講演集, 22-11-1-04, 2020
- 165) 肥田達久, 中藤智徳, 水谷享二: 兵庫県南部地震を後世に～復旧から復興～, 第46回地盤工学研究発表会発表講演集, 1803-1804, 2011
- 166) 山木正彦, 橋本聖, 畠山乃, 林宏親: 泥炭の地震時剛性低下を考慮した自重変形解析の試行, 第55回地盤工学研究発表会発表講演集, 23-1-2-03, 2020
- 167) Kenji Ishihara, Shigeyasu Okusa, Norio Oyagi, Anatoliy Ischuk: Liquefaction-induced flow slide in the collapsible deposit in Soviet Tajik, Soils and Foundations, Vol. 30, No. 4, 1990, 73-89, 1990
- 168) Kenji Ishihara, Susumu Yasuda, Yoshitada Yoshida: Liquefaction-induced flow failure of embankments and residual strength of silty sands, Soils and Foundations, Vol. 30, No. 3, 1990, 69-80, 1990
- 169) 朝倉紀樹, 森洋: 青森県内にある溜池分布特性と堤体材料について, 第53回地盤工学研究発表会発表講演集, 239-240, 2018
- 170) 石川啓考, 岡村未対: 地震により液状化した鉱さいダムの安定性評価, 第46回地盤工学研究発表会発表講演集, 1067-1068, 2011
- 171) 日本国有鉄道: 十勝沖地震調査報告, 鉄道技術研究所報告, No.650., 1968
- 172) 保坂吉則: 新潟地震の建物被害と地盤変状の分布に関する定量評価, 第53回地盤工学研究発表会発表講演集, 1883-1884, 2018; .江見和泰, 森伸一郎: 2021年福島県沖の地震における被災地点での余震観測, 第56回地盤工学研究発表会発表講演集, 13-9-5-01, 2021
- 173) 篠原登美雄, 倉田進, 林聰, 久保浩一, 宮島信雄: 新潟地震による港湾の被害, 土木学会地震工学研究発表会, No. 7, pp.7-8, 1964
- 174) 大崎順彦: 新潟地震について 一鉄筋コンクリート造建築物の被害と地盤の挙動-, 土木学会地震工学研究発表会, No. 7, pp. 35-38, 1964
- 175) 斎藤迪孝: 新潟地震について, 土木学会地震工学研究発表会, No. 7, pp. 39-44, 1964
- 176) 福岡正巳: 新潟地震について, 土木学会地震工学研究発表会, No. 7, pp. 45-48., 1964
- 177) 土田肇: 地盤の非線型せん断振動について, 土木学会地震工学研究発表会, No. 8, pp. 7-8., 1965
- 178) 荒井秀夫, 梅原靖文: 飽和砂層の振動性状, 土木学会地震工学研究発表会, No. 9, pp. 87-90., 1967
- 179) 大原資生, 鈴岡直彦: 振動による飽和砂の液化に対する載荷重の影響について, 土木学会地震工学研究発表会, No. 11-4, 1971, pp
- 180) 片田敏行: 液状化地盤中の構造物の挙動, 土木学会地震工学研究発表会, No. 15, pp. 1-4., 1979
- 181) 常田賢一, 木全俊雄, 後藤勝志: 液状化する砂質地盤と杭基礎の模型振動実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 16, pp. 241-244, 1981
- 182) 荒川直士, 近藤益央, 木全俊雄: 部分排水条件下における砂質土の液状化強度, 土木学会地震工学研究発表会, No. 17, pp. 279-282, 1983
- 183) 東畑郁生: 液状化による地盤のすべり量の解析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 18, pp. 357-360, 1985
- 184) 土田肇, 大内久夫, 宮本正敏: 1985年3月3日の Chile, Algarrobo 地震による港湾施設被害, 土木学会地震工学研究発表会, No. 18, pp. 441-444, 1985
- 185) 佐々木康, 松本秀應, 近藤益央: 盛土の地震時変形量に与える液状化層厚の影響に関する模型振動実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 18, pp. 409-412, 1985
- 186) 当麻純一, 大友敬三, 川井伸康: 密な飽和砂層への強震時応答に関する大型振動台実験と解析（その1）, 土木学会地震工学研究発表会, No. 19, pp. 409-412, 1987
- 187) 若松加津江, 吉田望, 田嶺隆, 浜田正則: フィリピン・ルソン島地震におけるリンガエン湾沿岸地域の液状化被害と地盤条件, 土木学会地震工学研究発表会, No. 21, pp. 1-4, 1987
- 188) 栄木均, 当麻純一, 大友敬三, 田中幸久, 小峯秀雄, 福田聰之, 安保秀範: 締固めによる埋設管の液状化対策についての研究（その1）－振動台実験による浮上がり防止効果の検討-, 土木学会地震工学研究発表会, No. 21, pp. 249-252, 1991
- 189) 北浦勝, 宮島昌克, 安藤康二: 液状化の程度に注目した地盤永久変位に関する実験的研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 21, pp. 261-264, 1991
- 190) 森利弘, 佐々木康, 常田賢一, 松本秀應, 佐谷祥一: 液状化に伴う盛土周辺地盤の流動特性に関する検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 21, pp. 265-268, 1991
- 191) 森利弘, 佐々木康, 常田賢一, 松本秀應, 佐谷祥一: 液状化に伴う盛土周辺地盤の流動特性に関する検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 21, pp. 265-268, 1991
- 192) 松本秀應, 常田賢一, 佐谷祥一: 液状化に伴う地盤の流動特性に与える境界条件の影響の検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 21, pp. 269-272, 1991
- 193) 大友敬三, 岩橋敏広, 浜田正則: 地中構造物に作用する側方流動の荷重特性に関する実験的検討, 土木学会

- 地震工学研究発表会, No. 21, pp. 273–276, 1991
- 194) 宮坂享明, 三浦房紀, 坂尾和男: 液状化に起因する地盤の側方移動を受ける PHC 杣の応答, 土木学会地震工学研究発表会, No. 21, pp. 361–364, 1991
 - 195) 小池武, 金子忠男, 渕田邦彦, 秋吉卓: 液状化の時間経過を考慮した共同溝の応答解析について, 土木学会地震工学研究発表会, No. 21, pp. 297–300, 1991
 - 196) 安田進, 板藤繁, 規矩大義, 増田民夫: 繰返しねじりせん断試験による液状化砂の強度・変形特性, 土木学会地震工学研究発表会, No. 22, pp. 19–22, 1993
 - 197) 三輪滋, 森伸一郎: ワイルドライフの地震動記録の有効応力解析法による検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 22, pp. 39–42, 1993
 - 198) 森伸一郎, 三輪滋, 関宝琪: 液状化した地盤の地震時挙動に関する検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 22, pp. 51–54, 1993
 - 199) 永瀬英生, Hon-Yim Ko, Hundert Law, Ronald Y.S.Pak: 遠心力載荷装置を用いた砂地盤の永久変位に関する振動台実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 22, pp. 83–86, 1993
 - 200) 佐藤博, 土居賢彦, 浜田正則, 中村孝明: 液状化による側方流動の数値解析と考察, 土木学会地震工学研究発表会, No. 22, pp. 87–90, 1993
 - 201) 佐藤博, 土居賢彦, 浜田正則: 液状化による側方流動地盤の挙動と物性に関する実験的研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 22, pp. 91–94, 1993
 - 202) 大友敬三, 岩橋敏広, 清水幹夫, 朱牟田善治, 浜田正則: 杣基礎に作用する側方流動の荷重特性, 土木学会地震工学研究発表会, No. 22, pp. 95–98, 1993
 - 203) 安田進, 永瀬英生, 石川利明, 有松卓也: 砂礫地盤の液状化被害に関する振動台実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 22, pp. 115–118, 1993
 - 204) 規矩大義, 安田進: 液状化に起因した構造物の沈下に関する簡易解析法, 土木学会地震工学研究発表会, No. 22, pp. 123–126, 1993
 - 205) 鈴木信久, 矢野達夫, 松山英治: 液状化地盤の側方変位による埋設パイプラインの変形, 土木学会地震工学研究発表会, No. 22, pp. 663–666, 1993
 - 206) 渕田邦彦, Wang L.R.L, 秋吉卓: 液状化地盤の大変形を受ける管路挙動のパラメータ解析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 22, pp. 723–726, 1993
 - 207) 安藤広和, 佐藤栄, 島村一訓: 部分的な液状化による地盤の動的応答が埋設管に及ぼす影響に関する検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 22, pp. 727–730, 1993
 - 208) 沼田淳紀, 森伸一郎, 三輪滋: 1995年兵庫県南部地震における液状化調査, 土木学会地震工学研究発表会, No. 23, pp. 221–224, 1995
 - 209) 菅野高弘, 三藤正明, 稲富隆昌: 兵庫県南部地震により被災したケーン式岸壁に関する実験的研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 23, pp. 257–260, 1995
 - 210) 金本昌也, 北浦勝, 宮島昌克, ヨウ恩地, 柚村孝彦: 上下地震動が液状化地盤の挙動に及ぼす影響に関する実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 23, pp. 289–292, 1995
 - 211) 片原道男, 宮島昌克, 北浦勝, 中川浩明: レキ混じり砂層の液状化に関する振動台実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 23, pp. 317–320, 1995
 - 212) 永瀬英生, 安田進, 柳畠亨: 超緩詰め砂の液状化特性に関する非排水三軸試験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 23, pp. 325–328, 1995
 - 213) 佐藤博, 土居賢彦, 大保直人, 本田満彦, 吉迫和生: 動的遠心模型実験装置を用いた砂地盤の流動現象のメカニズムに関する基礎実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 23, pp. 337–340, 1995
 - 214) 渕田邦彦, 秋吉卓, 松本英敏: 地中パイプラインに対する SCP 地盤改良の側方流動防止効果, No. 23, pp. 345–348, 1995
 - 215) 森伸一郎, 三輪滋: 新しい液状化対策杭の振動台実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 23, pp. 357–360, 1995
 - 216) 宮島昌克, 北浦勝, 長谷川正道, 吉田雅穂: 液状化による地盤の側方流動を受ける埋設管路の挙動解析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 23, pp. 365–368, 1995
 - 217) 大谷泰昭, 李銀生, 濱田政則: 側方流動による埋設管の変形と対策, 土木学会地震工学研究発表会, No. 23, pp. 369–372, 1995
 - 218) 大友敬三: 側方流動による洞道・杭基礎系への外力, 土木学会地震工学研究発表会, No. 23, pp. 373–376, 1995
 - 219) 福岡篤信, 安達直人, 宮本裕司, 酒向裕司: 液状化地盤における杭基礎の遠心模型実験とシミュレーション解析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 23, pp. 377–380, 1995
 - 220) 悅永賢司, 濱田政則, 濱谷武弘: 北海道南西沖地震・後志利別川流域における液状化と地盤変状, 土木学会地震工学研究発表会, No. 23, pp. 557–560, 1995
 - 221) 氏家禎男, 磯山龍二, 後藤誠: 北海道南西沖地震・後志利別川流域における地盤の永久変位と埋設管等の被害, 土木学会地震工学研究発表会, No. 23, pp. 561–564, 1995
 - 222) 伊東周作, 兵動正幸: 不攪乱中間土の繰返しせん断特性, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 421–424, 1997

- 223) 塩井幸武, 五瀬信吾, 松尾隆志, 橋詰豊: 砂地盤の液状化現象と地層構成, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 449–452, 1997
- 224) 風間基樹, 増田昌昭, 山口晶, 柳澤栄司: 神戸ポートアイランドまさ土層の液状化強度の推定, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 465–468, 1997
- 225) 山本哲朗, 松永雄紀, 伊達明彦: 生石灰パイプ打設地盤の液状化特性に関する振動台実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 485–488, 1997
- 226) 水谷崇亮, 穴井啓二, 中村滋, 東畑都生: 鋼矢板式護岸の振動模型実験及び地震時変位予測, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 509–512, 1997
- 227) 酒見卓也, 末岡徹, 森川孝義, 長山秀昭: 液状化土槽中の鋼矢板模型に作用する地盤反力の変化, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 513–516, 1997
- 228) 岩下友也, 館野悟, 吉田等, 津國正一: 粗粒材料の動的せん断強度とダイレイタンシー特性の関係, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 529–532, 1997
- 229) 岩下友也, 吉田等, 津國正一: 非線形有効応力解析によるロックフィルダムの地震時残留変位の推定, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 533–536, 1997
- 230) 福島聰一郎, 宮島昌克, 吉田雅穂, 北浦勝: 液状化領域を考慮した永久変位量の予測に関する研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 537–540, 1997
- 231) 石原研而, 安田進, 井合進: 液状化にともなう岸壁・護岸背後地盤の流動の簡易予測方法, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 541–544, 1997
- 232) 國生剛治, 渡邊一洋: 液状化地盤の側方流動に及ぼす水膜現象 (WFE) の影響, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 545–548, 1997
- 233) 仙頭紀明, 藤木広一, 柳澤栄司: 側方流動により護岸近傍の杭に作用する分布荷重の評価実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 553–556, 1997
- 234) 東拓生, 田村敬一: 流動化に伴う地盤変位及び橋梁基礎に作用する力に関する研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 557–560, 1997
- 235) 小笠原政文, 角田浩, 牧田篤弘, 五瀬伸吾, 佐藤正義, 宮田和: 液状化にともなう流動化に関する遠心模型実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 605–609, 1997
- 236) 立石章, 大矢敏雄, 名合牧人, 大津宏康, 堀越研一: 兵庫県南部地震により被災した既成杭の地盤流動による損傷メカニズムの一考察, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 657–660, 1997
- 237) 佐藤博, 大保直人, 吉迫和生: 側方流動地盤内に存在する杭に作用する荷重評価に関する動的遠心模型実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 665–668, 1997
- 238) 濱田政則, 三野栄作, 小松宏至: 側方流動が地中壁に及ぼす外力に関する実験的研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 685–688, 1997
- 239) 廣岡明彦, 永瀬英生, 坂本賢司: ケーソン岸壁とこれに近接する重力場振動台実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 725–728, 1997
- 240) 菅野高弘, 三藤正明, 稲富隆昌, 宮田正史: 兵庫県南部地震におけるケーソン式防波堤の被災メカニズムに関する模型振動実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 729–732, 1997
- 241) 古池章紀, 立石章, 名合牧人: 地中構造物の液状化を考慮した動的相互作用解析と地震荷重に関する一考察, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 741–744, 1997
- 242) 張鋒, 山口直紀, 北嶋武彦, 太田擴, 坂口隆雄, 西田允俊: 有効応力時刻歴動的解析による地下構造物に対する液状化の影響検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 745–748, 1997
- 243) 渕岡良介, 八嶋厚, 川上哲太郎: 側方流動により地中構造物に作用する流動圧のシミュレーション, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 749–752, 1997
- 244) 片田敏行, 末政直晃, 佐藤恭孝, 長野正: 液状化・側方流動に対する地中連壁を用いた杭基礎補強, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 793–796, 1997
- 245) 吉澤睦博, 鬼丸貞友, 畑中宗憲, 内田明彦, 中澤明夫, 難波伸介: LPG タンク基礎および周辺地盤の地震による影響についての考察, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 1149–1152, 1997
- 246) 濱田政則, 若松加樹江, 目堅智久: 事例分析による側方流動の予測法に関する基礎的研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 1153–1156, 1997
- 247) 秋吉卓, 渕田邦彦, 高畠浩二: 地中管路の液状化時大変形防止のための対策工法の効果, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 1349–1352, 1997
- 248) 濱田政則, 秋岡義史: 側方流動による地盤ひずみと埋設管路の被害, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 1353–1356, 1997
- 249) 濱野雅裕, 磯山龍二: 地中構造物の浮き上がり判定方法, 土木学会地震工学研究発表会, No. 24, pp. 1357–1360, 1997
- 250) 秋吉卓, 渕田邦彦, 尻無濱昭三, 田嶋秀一: 不整形性と液状化による地盤の局所的增幅特性への影響, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 189–192, 1999
- 251) 斎藤由紀子, 松尾修, 佐々木哲也(単純斜面の地震時流動破壊に関する動的遠心模型実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 349–352, 1999)
- 252) 濱田政則, 柳瀬和俊, 河野暁, 那須太郎: 傾斜地盤の側方流動量の予測法に関する実験的研究, 土木学会地

- 震工学研究発表会, No. 25, pp. 353–356, 1999
- 253) 湊岡良介, 久保哲夫, 三原正哉, 足立有史: 金属凝固の概念を応用した液状化地盤の流動予測, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 357–360, 1999
- 254) 吉田雅穂, 宮島昌克, 北浦勝: 兵庫県南部地震における地表水平変位の方向性に関する検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 361–364, 1999
- 255) 東拓生, 田村敬一: 流動化に伴う地盤変位及び地盤反力特性に関する検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 365–368, 1999
- 256) 田藏隆, 佐藤正義, 真野英之: 1995年阪神大震災によって生じた橋脚基礎から放射状に伸びる地盤亀裂の発生原因について, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 369–372, 1999
- 257) 濱田政則, 飯田康史, 志摩美裕貴, 山田隆一: 側方流動地盤が杭に及ぼす外力に関する模型実験と数値解析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 373–376, 1999
- 258) 森光太郎, 田村敬一, 東拓生, 小林寛: 液状化地盤における水平地盤反力の速度依存性に関する実験的研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 377–380, 1999
- 259) 安田進, 吉田望, 規矩大義, 宇田将人: 液状化に伴う残留変形解析手法の河川堤防への適用, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 381–384, 1999
- 260) 若松加寿江, 濱田政則, 野勢辰也, 大塚真一: 側方流動が発生する地盤条件の検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 421–424, 1999
- 261) 浦野和彦, 三原正哉, 足立有史, 湊岡良介: 液状化時の盛土沈下量に及ぼす地震動の影響に関する一検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 425–428, 1999
- 262) 森伸一郎, 沼田淳紀: 液状化した埋立シルト地盤における杭基礎の被害の進展過程, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 553–556, 1999
- 263) 伊藤浩二, 森拓雄: 重力式岸壁の遠心模型実験と有効応力解析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 969–972, 1999
- 264) 一井康二, 佐藤幸博, 井合進, 劉漢龍: 重力式岸壁の地震時残留変形量の簡易評価, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 973–976, 1999
- 265) 塩崎禎郎, 菅野高弘, 山本俊介, 田中剛, 関口宏二: 長フーチングを有するケーソン式岸壁の地震時挙動について, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 977–980, 1999
- 266) 三藤正明, 北澤壮介, 真鍋昌司, 秋山義信, 龍田昌毅: ケーソン式岸壁の耐震補強工法に関する実験的研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 981–984, 1999
- 267) 安田進, 佐藤正行: 2001年エルサルバドル地震による斜面崩壊と液状化被害の調査, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 41–44, 2001
- 268) 藤村尚, 坂口雅範: 鳥取県西部地震における液状化被害, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 65–68, 2001
- 269) 宮島昌克, 吉田雅穂, 北浦勝: 2000年鳥取県西部地震における上水道管路網の被害分析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 69–72, 2001
- 270) 福井次郎, 西谷雅弘, 中山学, 板谷裕次: 護岸近傍に位置する基礎杭の地震時被害に関する一考察, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 73–76, 2001
- 271) 沖村孝, 荒木繁幸, 木村裕之, ラザビゾヘル: 地震応答解析に基づく地表ひずみ分布と埋設管被害分布との関連について, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 77–80, 2001
- 272) 文龍, 佐藤忠信, 湊岡良介: 流弾塑性モデルによる液状化した地盤の流動過程に関する考察, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 461–464, 2001
- 273) 安田進, 清水善久, 小金丸健一, 入澤恒裕, 松本浩一: 東京低地における傾斜地盤および護岸背後地盤の流動の簡易解析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 489–492, 2001
- 274) 井合進, 杉山弥, 小堀治, 竹島康人, 沢田俊一: 1993年北海道南西沖地震で被災した河川堤防の解析検証事例, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 545–548, 2001
- 275) 井合進, 竹島康人, 沢田俊一, 杉山弥, 小堀治: 1995年兵庫県南部地震で被災した河川堤防の解析検証事例, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 549–552, 2001
- 276) 原田健二, 安田進, 山本実: レベル2地震動における締固めによる改良地盤の液状化強度の評価について, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 585–588, 2001
- 277) 澤田俊一, 桜庭了一, 大向直樹, 三上武子: 液状化強度に与える K_0 値の影響度合い, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 589–593, 2001
- 278) 安田進, 原田健二, 丹羽俊輔: シルト質砂における静止土圧の増加が N 値および液状化強度に与える影響, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 593–596, 2001
- 279) 山脇大輔, 兵動正幸, 吉本憲正, 岡林巧, 松岡昇: しらすの非排水繰返せん断特性に及ぼす細粒分の影響, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 597–600, 2001
- 280) 吉本憲正, 兵動正幸, 伊東周作, 山本陽一, 藤井照久: 初期せん断応力作用下の中間土の非排水繰返せん断特性, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 601–604, 2001
- 281) 松田博, 山本智一, 櫻谷慶治: 繰返せん断方向が粘土層・砂層の沈下特性に及ぼす影響, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 605–608, 2001

- 282) 山本陽一, 兵動正幸, 吉本憲正, 藤井照久, 伊東周作 : 2000年鳥取県西部地震における液状化したシルトの液状化強度と物理特性の関連について, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 609–612, 2001
- 283) 鶴見哲也, 中澤博志, 水本邦男 : 砂地盤の液状化現象とそれに伴う地盤の挙動に関する研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 621–624, 2001
- 284) 原忠, 國生剛治, 平岡良介 : 細粒分を含む砂礫材料の液状化特性と損失エネルギー, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 633–636, 2001
- 285) 濱田政則, 島村一訓, 増井仁, 中村正樹 : 液状化土の流動特性に関する研究(1)一重力場での模型実験一, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 641–644, 2001
- 286) 濱田政則, 島村一訓, 山田真一, 田中淳寛 : 液状化土の流動特性に関する研究(2)一遠心載荷場での模型実験および中空ねじり試験一, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 645–649, 2001
- 287) 濱田政則, 若松和寿江, 島村一訓, 榆達郎 : 液状化地盤の水平変位量の予測法に関する研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 649–652, 2001
- 288) 今村眞一郎, 石原研而, 今広人, 平田吉伸, 塚本良道, 萩原敏行 : 遠心模型振動実験による傾斜地盤の側方流動特性, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 653–656, 2001
- 289) 樋口俊一, 松田隆, 三浦房紀 : 側方流動地盤中の杭に作用する外力の特性, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 661–664, 2001
- 290) 佐々木哲也, 松尾修, 田本修一 : 下水道管渠の地震時浮上がりに及ぼす埋戻し材料の影響, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 665–668, 2001
- 291) 高橋章浩, 竹村次朗, 溝口敦司 : 薬液注入により固化された飽和砂地盤上の既設タンクの地震時沈下挙動, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 697–700, 2001
- 292) 山本哲朗, 鈴木素之, 千田隆行 : 平成12年鳥取県西部地震におけるシルト質土地盤の液状化挙動とそのセメノ安定処理, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 709–712, 2001
- 293) 深沼淳紀, 嶋本栄治, 染谷昇, 國生剛治 : 杭打設とともにK0の増加に関する実験的検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 713–716, 2001
- 294) 澤田亮 : 液状化地盤における抗土圧構造物の挙動に関する実験的研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 737–740, 2001
- 295) 井合進, 龍田昌毅, 小堤治, 潤幸生, 山本裕司, 森浩章 : 地盤の初期応力条件が矢板式岸壁の地震時挙動に与える影響の解析的検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 809–812, 2001
- 296) 岡由剛, 三輪滋, 石倉克真, 平岡慎司, 松田英一, 吉田晃 : 鋼矢板岸壁の被災事例による有効応力解析における初期応力状態のモデル化手法の検証, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 813–816, 2001
- 297) 三村衛, 嘉門雅史, 西村正生, 渡岡良介 : 重力式岸壁の地震時挙動に関する遠心模型実験と数値解析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 825–828, 2001
- 298) 萩原敏行, 新井寿昭, 阿世賀宏 : 大型せん断土槽による地上式タンク基礎の液状化実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 853–856, 2001
- 299) 高田至郎, 小川安雄, 小口憲武, 北野哲司, 佐藤清, 松田隆, 松本真明 : 液状化に伴う側方流動による埋設管の変形挙動について(その1), 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 1301–1304, 2001
- 300) 高田至郎, 小川安雄, 小口憲武, 北野哲司, 松本真明, 岡村一男, 佐藤清 : 液状化に伴う側方流動による埋設管の変形挙動について(その2), 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 1305–1308, 2001
- 301) 高田至郎, 小川安雄, 小口憲武, 北野哲司, 松本真明, 岡村一男, 桑嶋健 : 液状化に伴う側方流動による埋設管の変形挙動について(その3), 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 1309–1312, 2001
- 302) 高田至郎, 小池武, 小川安雄, 小口憲武, 北野哲司, 松本真明, 田島知治 : 地盤変状を受ける埋設管の弾塑性はり解析手法の検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 1313–1316, 2001
- 303) 高田至郎, 小川安雄, 小口憲武, 北野哲司, 松本真明, 岡村一男, 藤田周亮 : 曲管の大変形特性のパイプファクターによる定式化, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 1317–1320, 2001
- 304) 高田至郎, 鈴木崇伸, 小池武, 小川安雄, 小口憲武, 北野哲司, 松本真明, 藤田周亮 : 地盤変状を受ける埋設管の変形計算式の検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 1321–1324, 2001
- 305) 高田至郎, 小川安雄, 小口憲武, 北野哲司, 松本真明, 上野淳一, 田島知治 : 液状化および基盤不整形の影響を受ける埋設管の応答に関する考察, 土木学会地震工学研究発表会, No. 26, pp. 1325–1328, 2001
- 306) 張至鎬, 濱田政則, 樋口俊一 : 杭基礎に作用する側方流動の外力特性に関する研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 27, pp. 76, 2003
- 307) 佐藤清, 樋口俊一, 松田隆 : 非液状化層の流動力低減による杭基礎構造物の側方流動対策に関する遠心模型実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 27, pp. 79, 2003
- 308) 金口義胤, 弥勒綾子, 大木基裕, 澤田亮 : 間隙水圧の上昇に伴う盛土の挙動に関する実験的検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 27, pp. 93, 2003
- 309) 浜田友康, 松井保 : 液状化に伴う地盤流動の杭に及ぼす影響評価法に関する研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 27, pp. 106, 2003
- 310) 足立有史, 三浦均也, 三原正哉, 浦野和彦(2003) : 非液状化層を有する地盤の液状化流動を受ける杭基礎構造物の模型振動実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 27, pp. 178.
- 311) 森伸一郎, 曽我部繁之 : 境港の液状化地点での地震動に及ぼす深い地盤の增幅特性の影響, 土木学会地震工

- 学研究発表会, No. 27, pp. 229, 2003
- 312) 権永哲, 浅野隆司, 仙頭紀明, 渡岡良介, 風間基樹: 液状化過程における砂の体積弾性係数の拘束圧依存性, 土木学会地震工学研究発表会, No. 27, pp. 256, 2003
- 313) 木村真也, 兵動正幸, 吉本憲正, 河村志郎, 藤山敦: 細粒分を含む成層地盤の液状化の評価に関する研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 27, pp. 260, 2003
- 314) 高橋祐治, 濱田政則, 張至鎬: 護岸の水平移動に起因する液状化地盤の流動変位に関する研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 27, pp. 292, 2003
- 315) 濱田政則, 佐藤貴俊: 液状化砂の流動特性に関する実験的研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 27, pp. 304, 2003
- 316) 岡村未対: 山岳盛土擁壁の簡易な耐震性点検法に関する研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 28, pp. 3, 2003
- 317) 田中智宏, 安田進, 原田健二, 丹羽俊輔, 内山純一: レベル2地震動下における締固め砂杭および碎石ドレン工法の有効性に関する検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 28, pp. 132, 2005
- 318) 橋本隆雄, 宮島昌克: 年代別地形図及び過去の被災履歴に基づく2003年十勝沖地震の河川堤防被害分析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 28, pp. 157, 2005
- 319) 橋本隆雄, 宮島昌克: 2004年新潟県中越地震による液状化が発生した高盛土上宅地地盤条件の分析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 28, pp. 160, 2005
- 320) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 地盤の透水性と地震動の継続時間を考慮した緩傾斜式護岸構造物の耐震性能評価, 土木学会地震工学研究発表会, No. 28, pp. 185, 2005
- 321) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 2007年能登半島地震における液状化, 土木学会地震工学研究発表会, No. 29, pp. 185, 2007
- 322) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 2005年3月28日のスマトラ島沖地震におけるインドネシア・ニアス島の地震被害, 土木学会地震工学研究発表会, No. 29, pp. 185, 2007
- 323) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 2003年三陸南地震における消防団員の宅地被害調査と被災宅地危険度判定の比較, 土木学会地震工学研究発表会, No. 29, pp. 185, 2007
- 324) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 継続時間の違いによるケーソン式岸壁の振動台実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 29, pp. 185, 2007
- 325) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 液状化強度にばらつきを有する固化処理地盤の地震時沈下予測に関する振動台実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 29, pp. 185, 2007
- 326) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 能登半島地震における崩壊盛土の物理力学的特性, 土木学会地震工学研究発表会, No. 29, pp. 185, 2007
- 327) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 1939年秋田県男鹿地震での斜面崩壊の痕跡についての現地調査, 土木学会地震工学研究発表会, No. 29, pp. 185, 2007
- 328) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 粘性土地盤中の埋戻し砂の液状化によるマンホールの浮上りと対策, 土木学会地震工学研究発表会, No. 29, pp. 185, 2007
- 329) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 細粒土層における液状化時の変位特性および間隙水挙動に関する考察, 土木学会地震工学研究発表会, No. 29, pp. 185, 2007
- 330) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 泥炭地盤上盛土の耐震性に関する遠心模型実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 29, pp. 185, 2007
- 331) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 新潟県中越地震における斜面災害の要因分析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 29, pp. 185, 2007
- 332) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 秋田県仙北地震における布又地区地すべり現場の調査報告, 土木学会地震工学研究発表会, No. 29, pp. 185, 2007
- 333) 中原知洋, 一井康二, 三藤正明, 秋本哲平: 福岡県西方沖地震での斜面崩壊, 土木学会地震工学研究発表会, No. 29, pp. 185, 2007
- 334) 三好俊康: グラウンドアンカーで補強された矢板式岸壁の耐震性について, 土木学会地震工学研究発表会, No. 30, pp. 345–353, 2009
- 335) 橋本隆雄: 2007年能登半島地震による建物被害と宅地地盤特性の関係—輪島市門前町道下地区の事例—, 土木学会地震工学研究発表会, No. 30, pp. 827–836, 2009
- 336) 橋本隆雄: 2007年能登半島地震による能登有料道路の大規模盛土斜面崩壊原因の分析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 30, pp. 850–863, 2009
- 337) 濱田政則, 横口俊一: 液状化地盤の流動抑制工法に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 66, No. 1, pp. 84–94, 2010
- 338) 山田和弘, 中澤博志, 菅野高弘, 藤井照久: アスファルト舗装直下における液状化地盤の支持力に関する基礎的実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), I_331-I_3, 2012
- 339) 藤田大樹, 小濱英司, 竹信正寛, 吉田誠, 規矩大義: 直杭式桟橋の地震時変形特性に関する模型振動台実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, I_343-I_35, 2012
- 340) 大矢陽介, 小濱英司, 高橋英紀, 伊勢勉, 吉田誠: 海底面の傾斜がケーソン式護岸の地震時応答に与える影響に関する大型模型振動実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, I_355-I_3, 2012

- 341) 宇野州彦, 大塚久哲, 三藤正明 : 液状化地盤における中間部免震杭基礎の耐震性に関する振動台実験及び有効応力解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, I_584-I_5, 2012
- 342) 樋口俊一, 堀内隆広, 大塚林菜, 伊藤浩二, 江尻譲嗣 : RC 造杭基礎構造物の遠心模型振動実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, I_642-I_, 2012
- 343) 三輪滋, 筒井雅行, 本山寛, 池田隆明, 沼田淳紀 : 2011年東北地方太平洋沖地震における関東地方の液状化被害調査, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, I_1250-I_1, 2012
- 344) 橋本隆雄, 安田進 : 2011年東北地方太平洋沖地震による潮来市日の出地区の液状化被害分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, I_1266-I_12, 2012
- 345) 橋本隆雄 : 2011年東北地方太平洋沖地震による館ニュータウン大規模盛土滑動崩落被害の原因分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 4, I_148-I_1, 2013
- 346) 楠謙吾, 中澤博志, 菅野高弘, 大久保陽介, 規矩大義, 藤田大樹 : 液状化後地盤性状の長期的変化に関する室内模型実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 4, I_326-I_33, 2013
- 347) 中原知洋, 井合進, 飛田哲男, 三藤正明, 佐々木広輝, 井瀬肇 : 傾斜式護岸の溶液型薬液改良による耐震対策の最適化および韌性評価に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, I_44-I_65., 2014
- 348) 大矢陽介, 小濱英司, 菅野高弘, 今井政之, 東中邦夫, 佐伯嘉隆 : 格子間隔が広い格子状改良直上のアスファルト舗装の変形に関する模型振動実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, I_227-I_241, 2014
- 349) 加藤一紀, 濱田政則 : 矢板壁による側方流動抑止効果の検証と外力評価に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, I_242-I_25, 2014
- 350) 橋本和樹, 安井良介, 下窪邦裕, 高見沢和俊, 鈴木崇伸 : 模型実験における電柱の液状化対策工法の効果検証, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, I_285-I_294, 2014
- 351) 梶尾辰史, 片岡正次郎, 金子正洋, 谷本俊輔, 佐々木哲也 : 河川の特殊堤の地震被害に関する事例分析と動的遠心模型実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, I_718-I_733, 2014
- 352) 宇野州彦, 大塚久哲, 三藤正明 : 杭中間部にゴムを挿入した免震杭基礎の側方流動地盤における有効性に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, I_1004-I_1017, 2014
- 353) 沼田淳紀, 村田拓海, Saima RIAZ, 三村佳織, 原忠 : 大型振動実験による丸太打設の液状化対策効果, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 4, I_274-I_283, 2015
- 354) 橋本隆雄, 安田進, 庄司学 : 東日本大震災による神栖市深芝・平泉地区的採掘跡地における液状化被害の分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 4, I_376-I_386, 2015
- 355) 片岡正次郎, 長屋和宏, 松本幸司 : 新潟県中越地震時の道路盛土被害の分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 4, I_568-I_576, 2015
- 356) 梶尾辰史, 谷本俊輔, 片岡正次郎, 松本幸司, 佐々木哲也, 庄司学 : 動的遠心模型実験による河川特殊堤の耐震対策工の作用力モデルに関する考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 4, I_790-I_809, 2016
- 357) 谷本俊輔, 地蔵智樹, 川口剛, 荒木裕行, 佐々木哲也 : 堆積年代の古いシルト質砂とその再構成試料の繰返しせん断特性, 土木学会地震工学研究発表会, No. 35, pp. 752_1-9, 2015
- 358) 川中島寛幸, 藤原寅士良 : 鉄道沿線における液状化の発生と構造物被害に関する考察, 土木学会地震工学研究発表会, No. 35, pp. 756_1-7, 2015
- 359) 青柳悠大, Seto WAHYUDI, 古関潤一, 佐藤剛司, 宮下千花 : 大小様々な液状化履歴を与えた複数回液状化試験と消散エネルギーを用いた分析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 35, pp. 757_1-6, 2015
- 360) 森田年一, 矢萩優樹, 脇田杏子 : 地震動により流動状態となった土砂の地盤特性評価, 土木学会地震工学研究発表会, No. 35, pp. 772_1-5, 2015
- 361) 粟津進吾, 本田秀樹, 塩崎禎郎 : 製鋼スラグを用いて SCP 改良された重力式岸壁の耐震性能評価, 土木学会地震工学研究発表会, No. 36, pp. 961_1-6, 2016
- 362) 芹川由布子, Hendra Setiawan, 中村満, 宮島昌克, 吉田雅穂 : 2016年熊本地震による住宅の液状化被害に関する調査的研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 36, pp. 986_1-5, 2016
- 363) 玉泉聰士, 上田恭平, 渡岡良介 : 過剰隙間水圧の再分配に着目した細粒分を含む砂質傾斜地盤の側方流動, 土木学会地震工学研究発表会, No. 38, pp. 1257_1-4, 2018
- 364) 一井康二, 木戸口拓海 : 地盤液状化後の再堆積過程における地下水流れの影響, 土木学会地震工学研究発表会, No. 39, pp. 1409_1-5, 2019
- 365) 楊勇, 谷本俊輔, 桐山孝晴 : 地震時に側方流動の影響を受ける軟弱粘性土地盤上の橋台の挙動に関する実験的研究, 土木学会地震工学研究発表会, No. 39, pp. 1420_1-9, 2019
- 366) 上田恭平, 澤田凱人, 渡岡良介 : 盛土圧密進行中に地震作用を受ける粘性土地盤の動的挙動に関する遠心模型実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 39, pp. 1442_1-8, 2019
- 367) 北澤聖司, 原忠, 中島昇, 柴原隆, 林伸二郎 : 熊本地震における微地形と液状化要因の関係性, 土木学会地震工学研究発表会, No. 39, pp. 1445_1-11, 2019
- 368) 山本航, 飛田哲男 : 2018年スマウェシ島地震における緩斜面すべりの発生メカニズムに関する解析的検討, 土木学会地震工学研究発表会, No. 40, 1596_1-7, 2021

- 369) 楊勇, 谷本俊輔, 桐山孝晴: 液状化地盤における既設橋台杭基礎の各種補強対策の効果に関する動的遠心模型実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 40, pp. 1600_1-10, 2021
- 370) 金井勇介, 中瀬仁, 富田真之, 山田理紗, 末広俊夫: 硬質な洪積砂層の液状化特性に着目した再現実験と個別要素法による検証, 土木学会地震工学研究発表会, No. 40, pp. 1634_1-15, 2021
- 371) 志賀正崇, 清田隆, 片桐俊彦: セメンテーションを付加した砂試料の圧密時におけるせん断波速度の変化と液状化特性, 土木学会地震工学研究発表会, No. 39, pp. 1649_1-6, 2021
- 372) 松丸貴樹, 海野寿康: 2018年北海道胆振東部地震で被害を受けた火山灰質土の不飽和液状化試験の数値解析, 土木学会地震工学研究発表会, No. 39, pp. 1665_1-10, 2021
- 373) 石川敬祐, 安田進: 東北地方太平洋沖地震による東京湾岸エリアの噴砂特性に関する考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, I_274-I_281, 2012
- 374) 福武毅芳, 張至鎬: 2011年東北地方太平洋沖地震における浦安地区の地盤の有効応力解析による検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, I_293-I_304, 2012
- 375) 奥村与志弘, 加藤亮輔, 岡二三生: 津波による地盤の液状化に関する1次元解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, I_1171-I_117, 2012
- 376) 三輪滋, 筒井雅行, 本山寛, 池田隆明, 沼田淳紀: 2011年東北地方太平洋沖地震における関東地方の液状化被害調査, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, I_1250-I_1265, 2012
- 377) 三神厚, 辻野典子, 齋藤剛彦: 昭和南海地震による高知市の河川堤防被害と被害要因の再評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 4, I_1034-I_1048, 2013
- 378) 加藤一紀, 濱田政則: 矢板壁による側方流動抑止効果の検証と外力評価に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, I_242-I_251, 2013
- 379) 井澤淳, 上田恭平, 室野剛隆: 低加速度・長継続時間地震動による地盤の液状化に関する解析的検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, I_513-I_519, 2013
- 380) 楊勇, 谷本俊輔, 桐山孝晴: 混成式防波堤の地震時変状に関する基礎的実験, 土木学会地震工学研究発表会, No. 25, pp. 1001-1004, 1999