

平成 23 年 8 月 7 日

## 液状化した戸建て住宅の復旧方法の種類と特徴（素案）

地盤工学会関東支部 造成宅地の耐震対策に関する研究委員会

### 1. はじめに

本年 3 月に発生した東日本大震災では東北から関東にかけて広い範囲で液状化が発生した。特に東京湾岸の埋立地では千葉県から東京、神奈川県にかけて多くの地区で液状化が発生し、戸建て住宅やライフラインに甚大な被害を与えた。戸建て住宅は液状化によって沈下しさらに傾いたことによってその中で住み難くなっているが、沈下や傾斜を修正して復旧すれば今後も使用できる状態にあるものが多い。ただし、今後の余震や将来の地震が発生した場合、何らかの対策を施した復旧を行っておかないと、再び液状化によって被災する可能性もある。

液状化に対する対策方法はこれまでに数多く開発され、大型の構造物には適用されてきた。ただし、戸建て住宅に対する対策工法の開発は遅れている。このため、復旧にあたっていくつかの工法から選定するほどまでは至っていないが、今回の地震を受けて復旧時に可能な対策方法もいくつか提案されてきつつある。そこで、宅地の面からみて、液状化対策を施した復旧方法に関し、現状をまとめ、提案されている工法をまとめてみた。

### 2. 一般的な液状化対策工法の種類

地震時の液状化が広く認識されるようになったのは 1964 年新潟地震である。この地震では液状化による被害が多く発生したが、同時に、地盤を締め固めてあったタンクが被害を受けなかったため、地盤を締め固めると液状化対策になることも明らかになった。この経験は早速生かされ、八戸の製紙工場で重要な施設の基礎地盤を締め固めて建設されたところ、1968 年十勝沖地震の際に液状化による被害を免れた。

これらが液状化対策工法開発の黎明期の話であるが、その後、設計基準類への液状化の導入や改訂、地震による新たな問題点の提起などに応じて、多くの対策工法が開発されてきた。まず、締め固めが有効であることが分かった後、砂杭などで締め固める工法がいくつか開発されてきた。ところが、既設構造物の近くでは振動や土圧による悪影響があるため、グラベルドレーン工法などの近接施工が可能な地盤改良工法が次に開発された。設計基準類への液状化の導入にともなって、新設構造物は勿論のこと、既設構造物の補強をするケースもいくつか出てきた。

1995 年兵庫県南部地震では強い地震動を受けたため、以降、レベル 2 地震動を耐震設計で考慮することになった。液状化も同様で、設計用の地震動レベルが 2~3 倍に引き上げられた。これに伴って、それまで開発されてきた液状化対策工法では不十分なものが出てきた。そこで、対策効果の余裕分の見直しが行われてきている。また、液状化しても構造物の機能が損なわなければ良いとの考えが広まり、液状化対策にも性能設計の考えを導入する動きが活発になってきている。

これまでに開発されてきている液状化対策工法は、①液状化を防止する工法と、②構造的な対策工法（液状化が発生しても被害を受けないようにする工法）に大別される。これらの工法の概要を巻末資料 1 に示す。また前者に関してこれまで開発されてきた工法を挙げると表—1 となる。

液状化を防止する工法で最も古い歴史を持つのは密度増大工法である。新潟地震や十勝沖地震

の際に締め固めていて成功した工法はバイプロフローテーション工法である。その後、より確実に締め固める工法としてサンドコンパクションパイル工法が開発され、広く適用されるようになった。当初はケーシングの貫入や打戻しに振動を用いる動的締め固め方

表 1 液状化を防止する対策工法の種類（文献 1 をもとに作成）

改良原理	工法
密度の増大	サンドコンパクションパイル工法（動的締め固め、静的締め固め）、振動棒工法（通常型、吸水型）、重錘落下方法、バイプロフローテーション工法、圧入締め固め工法（コンパクショングラウチング工法等）、パイプロタンパー工法、転圧工法、発破工法、群杭工法、生石灰工法、プレローディング工法
固結	深層混合処理工法、薬液注入工法、事前混合処理工法、高圧噴射攪拌工法
粒度の改良	置換工法
飽和度低下（地下水水位低下）	ディープウェル工法、排水溝工法
間隙水圧抑制・消散	グラベルドレーン工法、人工材料系ドレーン工法、周辺巻立てドレーン、排水機能付き鋼材
せん断変形抑制	地中連続壁

法が用いられていたが、近接施工の際に問題になるため、その後、回転で行う静的締め固め方法が開発された。最近でも我が国ではサンドコンパクション工法が最も多く用いられている。密度増大工法には表に示すように他に数種類あるが、そのうち最近良く用いられるようになってきた工法として圧入締め固め工法がある。これは、既設構造物の床からも施工でき、直下の改良が出来るといった利点がある。

固結工法では攪拌翼を用いてセメントを地盤の深くまで混合させる深層混合処理工法が近年開発され、対策効果が確実に出ることもあり、良く用いられるようになってきている。さらに、構造物に近接したり、直下の改良ができる工法として薬液注入工法や高圧噴射工法の利用も広がっている。

地下水位の低下工法はある広さを有した敷地全体で地下水位を下げると有効であり、川崎のコンビナートで適用されたことに始まるが、新潟県中越沖地震で被災した傾斜地盤の復旧にあたってこの方法による対策も行われた。

間隙水圧の消散工法は上述した柱状のグラベルドレーンの開発に始まり、その後、共同溝などで、施工時に周囲にグラベルを巻き立てる工法が多く適用されるようになってきている。

### 3. 地盤改良の必要な範囲に関して

地盤改良が必要な範囲に関しては、巻末資料 2 に示すようにタンクを対象にして規定されたものや、その他のいくつかの提案がある。一般には深さ方向には液状化層の下端まで、水平方向には構造物の周囲のある範囲までを改良する。ただし、液状化による構造物の沈下量に関して 2002 年に行われた一斉解析によると、深さ方向や水平方向の改良範囲によって沈下量が変化することも明らかにされてきている。ここでは 1995 年阪神・淡路大震災で液状化したポートアイランドの地盤を対象にし、タンク下の地盤の改良範囲をいくつか変えて解析が行われた<sup>2)</sup>。その結果を図 1 に示す。これに示すように、液状化層下端まで改良しない場合でも沈下量が小さくなって対策効果がある程度あることが分かる。また、空港の滑走路などではその変状が予測できる範囲においては構造物周囲の範囲（余改良）を縮小できるとされている<sup>3)</sup>

以上は荷重が大きい大型構造物を対象としており、戸建て住宅のような軽い構造物ではこのよ

	未改良	全面改良	直下改良	余改良(3m,10m)
模式図				

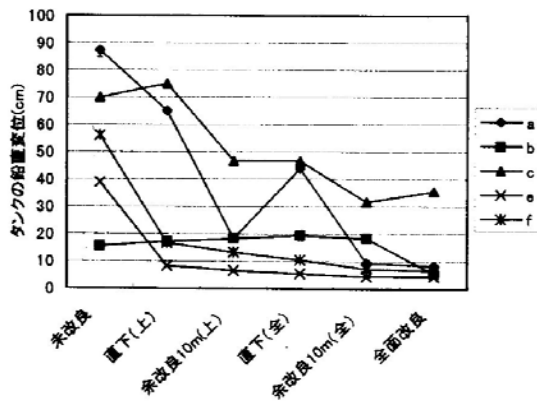


図1 地盤改良効果に関する一斉解析<sup>2)</sup>

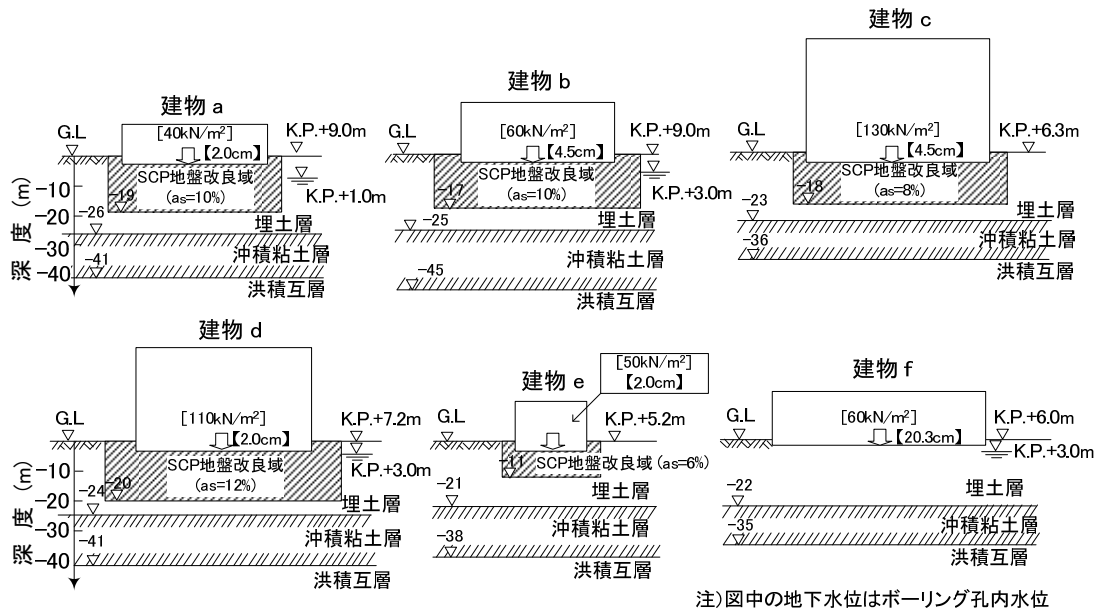


図2 地盤改良範囲と沈下量の関係調べられた例<sup>4)</sup>

うな広い範囲まで改良が必要でない可能性もある。実際に建築物を対象に種々の深さまで改良してあったところに 1995 年阪神・淡路大震災が襲って周囲地盤が液状化ケースに関して、加倉井らが調査を行っている<sup>4)</sup>。そこでは図2に示すように、改良なしの場合には建物の地震時の沈下量が 20cm 程度の沈下であるのに対し、改良した場合には改良範囲によって数 cm 程度の沈下量になったことが示されている。

ところで、地下水位上の層は直接液状化することはないので、もしこの層厚が厚いと下部の層が液状化したとしても地表面には噴水は達せず、また地表の構造物は被害を受けにくい。このような考えで、石原<sup>5)</sup>は液状化層厚と非液状化層厚と被害の関係を図3に示すように提案している。対策を施す時の設計地震動をレベル1地震動と考え、200Galと設定すると、GL-7mまで液状化する場合、表層に3mの非液状化層があれば良いことになる。

その他、日本海中部地震の際に秋田市で液状化した地区の戸建て住宅を調べてみると、地下水位が1.5mより深かった場合には被害を受けていないことが示されている<sup>6)</sup>。また、2000年鳥取県西部地震で被災した安倍彦名団地では地下水位が浅いほど戸建て住宅の傾斜角が大きく、地下水位が1.6m程度より深いと傾斜角は1/100程度以下になり生活に支障がなくなってくることを示されている<sup>7)</sup>。2007年新潟県中越沖地震で被災した柏崎市橋場町では地下水位が浅いほど家屋への被害は甚大であった<sup>8)</sup>。

以上、いくつかの事例を示してきたが、図1に示したように、解析によってある程度沈下量が推定出来るようになってきている。このような解析を行うと、液状化下端まで改良しなかった場合の沈下量を推定することもできる。

#### 4. 新設の戸建て住宅に対する液状化対策

##### 4.1 団地全体の広い範囲での液状化対策

団地全体の広い範囲で住宅を建てる前に液状化対策を施す場合には、表1に示した各種地盤改良工法が適用できる。実際に浦安市においてもサンドコンパクションパイル工法で締め固めてあった団地は液状化が発生しなかったことが報告されている<sup>9)</sup>。まだ調査が行われている段階であるが、他の地盤改良工法も液状化対策効果があったようである。

一方、地盤が液状化しても、液状化層下の支持層に杭で支えておけば住宅の沈下は防げる。したがって杭による工法も可能である。ただし、住宅が沈下しなくても周囲地盤が液状化して沈下するとライフラインに被害が生じたり、家の入口の段差ができたりするので、できれば液状化しないように地盤改良を施すことが望まれる。

##### 4.2 既設の住宅団地内の個々の住宅における狭い範囲での液状化対策

既設の住宅地において1戸だけを新設する時、液状化しないように地盤改良を施す場合には、

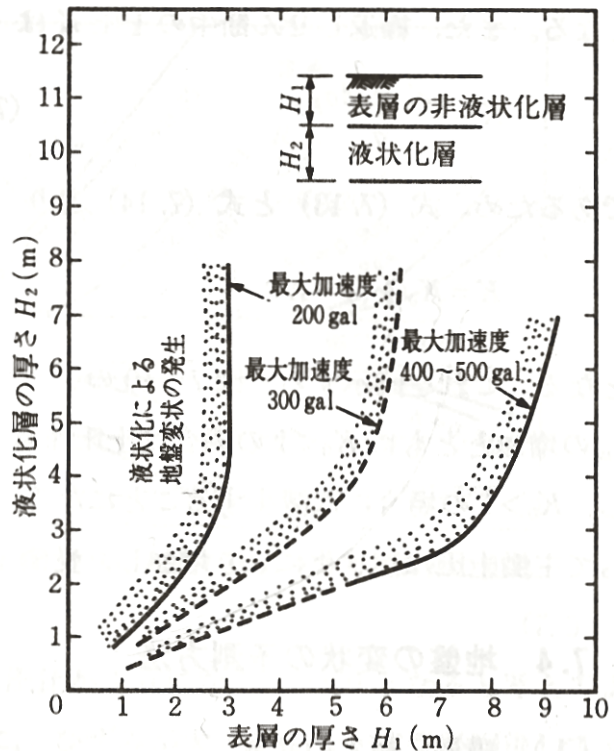


図3 液状化層厚と表層の厚さと被害の関係<sup>5)</sup>

既設の住宅が近接しているのでそれに影響を与えないように地盤改良を施す必要がある。特に密度増大工法ではこの点を注意する必要がある。ただし、このような近接施工に関しては低騒音・低振動でさらに既設構造物に影響を与えない施工技術が進んできているので、この点に留意して工法を選定すれば良い。

また、液状化層下の支持層に杭で支える工法も有効である。ただし、上述したように周囲の地盤は液状化することに留意する必要がある。

## 5. 既設の戸建て住宅に対する液状化対策

### 5.1 既設の直接基礎の構造物に対する対策事例

新設構造物に比べて既設構造物では構造物直下の地盤を液状化しないように地盤改良することが出来にくい。また、周囲に住宅がある場合には近接施工になるので、上記のように近接施工時の注意が必要となってくる。このような制約があるため、なかなか既設の構造物に対する対策は行われてきていなかったが、最近は対策事例も増えてきた。これまでに行われた事例を模式的に示すと図4となる<sup>10)</sup>。直接基礎の構造物ではその下の地盤を液状化させないことが最も効果あるので、床に孔をあけそこから地盤を固化することが行われるようになってきた。一方、構造物内からの地盤改良が困難な場合には、周囲から斜めに孔をあけ注入固化することも行われている。また、構造物周囲を鋼矢板などで囲むことも行われている。こうすると液状化の発生をさせ難くすると同時に、構造物下の地盤が液状化しても側方に押し出されないため、構造物の沈下量が少なくなる。木造家屋のように重くないものでは、周囲に杭を打ちそれで支えることも行われている。

### 5.2 戸建て住宅で液状化の発生を防止する場合の対策方法

既設の戸建て住宅で個々に液状化の発生を防止する場合には、住宅直下の地盤を改良する必要がある。この直下改良として表1に示すうちで現在大型構造物で実績があるのは下記のような工法であり、これを宅地用に使用できれば対策が可能である。

#### (1) 圧入締固め工法

予めボーリングで孔をあけておき、所定の深度に流動性の低いモルタルを静的に圧入し、周囲地盤を締め固める工法である。コンパクトな設備で、無振動、無騒音のため周辺への影響が少ない。

#### (2) 薬液注入工法

予めボーリングで孔をあけておき、所定の深度に薬液を流し込んで周囲の地盤を固結させる工法である。コンパクトな設備で、無振動、無騒音のため周辺への影響が少ない。

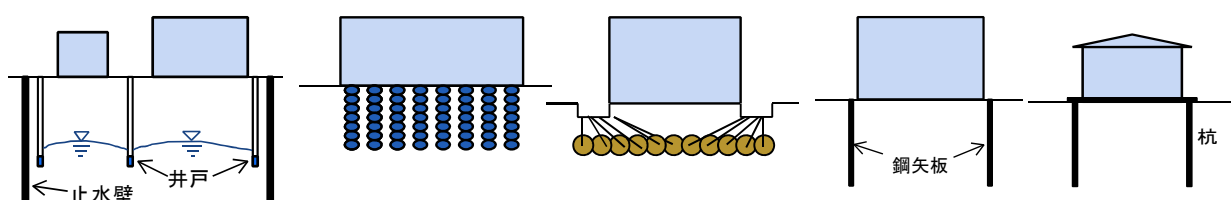


図4 既設構造物の液状化対策事例の模式図

### (3) 高圧噴射攪拌工法

予めボーリングで孔をあけておき、所定の深度に液体状の固化材を高圧で噴射し、地盤を切削・攪拌しながら固化材を混ぜて地盤を固結させる。砂層だけでなく粘性土層も確実に改良できる。低振動、低騒音、地盤変状が少ないため周辺への影響が少ない。

## 5.3 戸建て住宅で液状化が発生しても被害を軽減する場合

タンクで行われているように、建物の周囲に矢板を打設し沈下を防ぐといったアイデアはあるが、まだ実現化されていない。

## 5.4 地域全体の液状化の防止を防ぐ場合

道路や敷地内に溝を掘りその中に穴あきのパイプを設置し集めた水をどこかに放流すれば、地域全体の地下水位が下がって有効な対策になる。実際、2007年新潟県中越沖地震の復旧にあたって、柏崎市の山本団地ではこの方法がとられた。ここは砂丘背後斜面に位置し、その傾斜を利用して斜面下の川に放流することで適用が可能となった。

## 6. 液状化した戸建て住宅の復旧方法

### 6.1 復旧にあたっての考え方

沈下・傾斜した戸建て住宅は元の高さ以上に戻し、また、水平化する必要がある。このような作業を沈下修正と呼んでおく。これで通常の生活に戻れるが、将来のことを考えると十分ではない。今回の地震は規模が大きいので余震が長く続く可能性があり、また、東京湾岸直下地震の襲来も予想されており、再度このような地震が襲って液状化した場合には、今回と同様な被害を受ける可能性がある。

そこで、今後の地震に対して液状化しないような対策をとるとか、液状化しても被害を軽減させる対策をとるといったことが望ましい。さらに、沈下修正と同時に液状化対策まで行える工法だと都合が良い。よって、復旧にあたってはいくつかの考え方の選択肢があることになる。以下には、最上の方法から沈下修正のみの場合に分けて、現在可能と思われる工法を挙げてみる。それらの模式図を図5に示し、各企業でこのような工法をホームページで紹介している部分を参考に巻末資料3に示す。なお、沈下修正だけに比べて液状化対策を施すと経費は一般に高くなる。また、今回の地震を受けて現在いくつかの新しい工法が開発されつつあるので、それらの動向を注目しておく必要がある。

### 6.2 沈下修正と同時に液状化の発生を防ぐ方法

建物直下の地盤を改良して液状化の発生を防ぐ方法として、上述したように圧入締固め工法と薬液注入工法がある。両者とも建物直下の地盤を液状化しないように改良することができるし、さらに圧入、注入時の圧力で建物を持ち上げることができる。ただし、圧入締固め工法では改良する目的と沈下修正する目的とでは多少工事の仕方が変わる。また、薬液注入工法では改良する目的の場合には浸透固化タイプの注入材で行い、沈下修正の場合には割裂固化タイプで行う。また、沈下修正用だけだと、圧入・注入用の孔の数が少なくすむが、地盤全体を液状化しないように防止するためには所定の間隔で圧入・注入する必要がある。さらに、液状化層下端まで対策

を施すと将来の地震時に沈下量はゼロになるが、下層に液状化層を残して改良する場合には多少沈下する可能性はある。

なお、圧入締固め工法と薬液注入工法ともすでに東京湾岸で液状化被害を受けた住宅に適用されている。

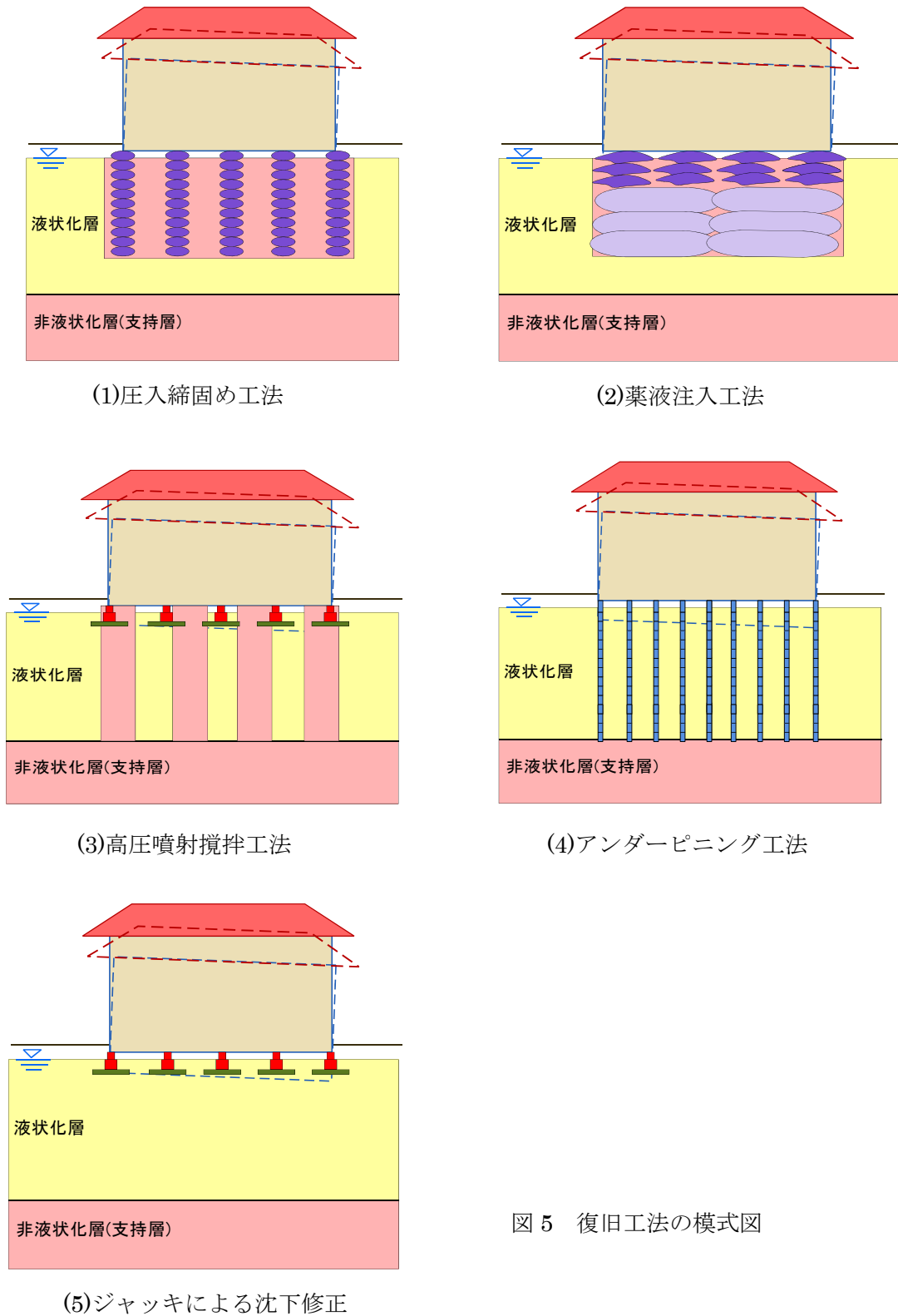


図5 復旧工法の模式図

### 6.3 沈下修正に加えて液状化による建物の沈下を防ぐ方法

建物直下の地盤を改良して液状化の発生を防ぐもう一つの方法として、上述したように高圧噴射攪拌工法がある。戸建て住宅対応の高圧噴射攪拌工法は、目的に合わせて、直径 1.0m から 3.5m の任意の円柱改良体を造成でき、また低強度から高強度まで強度設定できる。杭状の改良や液状化層全体を改良するなど汎用性が高い。改良体の強度を大きくした場合は、液状化層下端まで改良すれば周囲の地盤が液状化しても住宅を支え得る。そこでまず改良体を作成しておいて 6.6 に後述するように耐圧盤とジャッキを用いた工法などで沈下修正すれば良い。なお、この工法は今回の地震で被害が多かった東京湾岸に建てられた住宅に適用されている(適用住宅は沈下被害が非常に軽微だったのでジャッキアップは行っていない)。

その他、人工材料やグラベルによるドレーン工法も同様に適用できる可能性がある。

### 6.4 沈下修正と同時に液状化による建物の沈下を防ぐ方法

杭を用いて支えて沈下修正を行うアンダーピニング工法において、杭先端が支持層まで押し込まれ、押し込んだ杭全体で液状化が発生しても建物を支え得る場合である。ただし、この場合、将来の地震で建物は沈下しなくても周囲の地盤が液状化してライフラインや外構などに被害が生じる可能性はある。

### 6.5 沈下修正に加えて液状化の発生防止や沈下量の軽減をする方法

表層だけで処理して沈下量を軽減する簡易な方法として、ジャッキで高く持ち上げておいて、表層を処理する方法が考えられる。コマ型基礎を敷き詰めたり、透水性の良い材料で置き換えるといった方法が挙げられる。ただし、下層は液状化するので、ある程度沈下する可能性があることは念頭においておく必要がある。

### 6.6 単に沈下の修正だけをする方法

単に沈下修正する方法としては、耐圧盤工法、土台上げ工法などがある。

## 7. 液状化の判定を行うための地盤調査・土質試験方法

### 7.1 液状化判定方法の概略と必要な地盤調査・土質試験

液状化は深いところでは発生し難いので、通常 20m 程度の深さまで 1m の深さごとに以下の液状化に対する抵抗率(安全率)  $F_L$  を求め、 $F_L < 1.0$  となる深さを液状化する可能性があるとして判断している。

$$F_L = (\text{液状化強度比}) / (\text{地震によって発生する繰返しせん断力比}) = R/L$$

これらのうちの  $R$  や  $L$  の求め方には大きく 2 つのグレードがあり、簡易判定法と詳細判定法と呼んでいる。それぞれ  $R$  と  $L$  は以下のようにして求められる。

#### (1) 詳細判定法

$R$  : 所定の深さの土の不攪乱試料をサンプリングし、液状化試験(繰返し三軸試験など)を行って  $R$  を直接求める。

$L$  : 想定される地震の地震波を用いて地震応答解析を行い、所定の深さの  $L$  を直接求める。

#### (2) 簡易判定法



$R$  : 所定の深さで標準貫入試験を行って  $N$  値を求め、同時に採取した試料の粒度試験を行う。

そして過去の液状化試験データをもとに作成された  $R \sim N$  値～粒度関係の提案式を用いて  $R$  を推定する

$L$  : 地表最大加速度を仮定し、過去の地震応答解析データをもとに作成された簡易式を用いて所定の深さの  $L$  を推定する。

ところで、液状化が発生し易い微地形や、一度液状化した箇所は再液状化し易いことが分かっている。また、最近は各自治体で液状化危険度地図も作成されてきている。既往のボーリングデータが公開されたり、250メッシュの地盤が作成されている地区もある。したがって、これらを用いて以下の手順で液状化の判定していくことが望まれる。

- ①ハザードマップや微地形、過去の液状化履歴資料をもとに、液状化の調査をする必要があるかどうか判断する。
- ②既往のボーリングデータや地盤モデルが近傍にあれば、液状化の簡易判定を行う。なお、地盤工学会では全国電子地盤図を作成中で、東京一部地域などを以下のホームページで公開している) <http://www.denshi-jiban.jp/>
- ③ボーリング(地下水位測定も含む)、標準貫入試験、粒度試験を行って簡易判定法にて液状化の判定を行う。
- ④ ③でも判断つきかねる場合にはさらに不攪乱試料採取、液状化試験、地震応答解析を行って詳細な判定を行う。

## 7.2 スウェーデン式サウンディング試験の問題点

戸建て住宅の宅地の地盤調査にあたってはスウェーデン式サウンディング試験が良く用いられている。宅地が液状化しない場合には地耐力をチェックするという意味で有効かと思われる。ただし、液状化する場合にはスウェーデン式サウンディング試験で液状化の判定を行うには、無理があるので、スウェーデン式サウンディング試験に加えてボーリング・標準貫入試験・粒度試験を行うことが望まれる。その理由は以下の通りである。

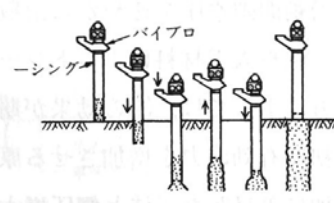
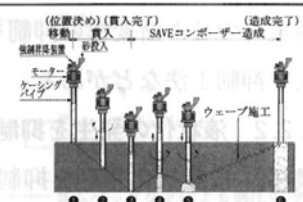
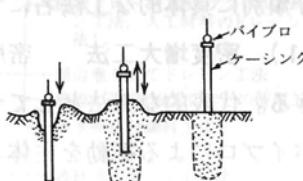
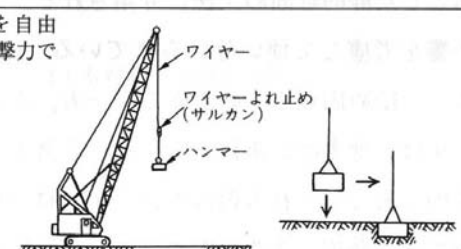
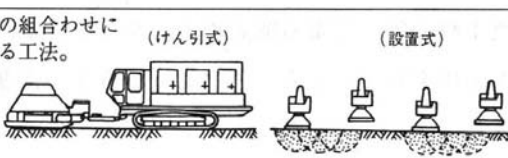
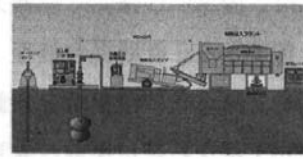
- ①液状化の簡易判定は上記のように  $N$  値と粒径、地下水位をもとに計算されるようになっている。ところがスウェーデン式サウンディング試験だと、まず粒径が分からない。地下水位も測定し難い。さらに試験結果を  $N$  値に換算する過程で誤差も生じる。
- ②スウェーデン式サウンディング試験だと深くまで調査することが困難である。さらに、地盤内に礫が含まれている場合にはその深さで貫入不能になり、液状化層下端までの調査が出来ないことがある。

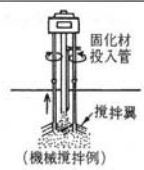
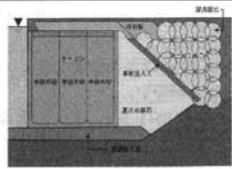
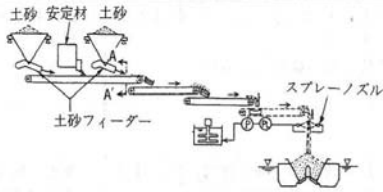
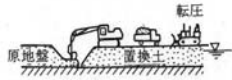


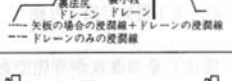
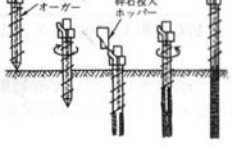
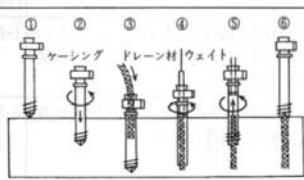
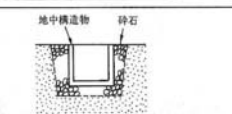
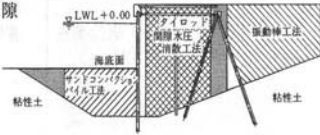
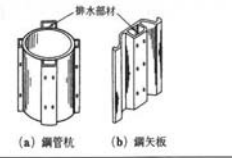
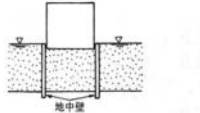
## 参考文献

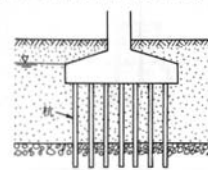
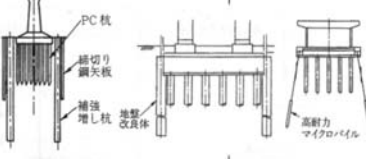
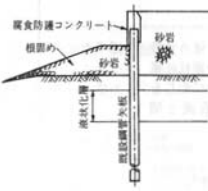
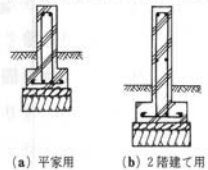
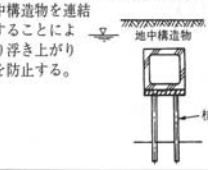
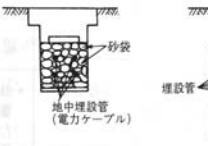
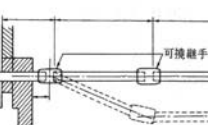
- 1) 地盤工学会：液状化対策工法，513p.，2002.
- 2) Sento, N., Yasuda, S., Yoshida, N. and Harada, K. : Case studies for oil tank on liquefiable sandy ground subjected to extremely large earthquakes and countermeasure effects by compaction, 13<sup>th</sup> WCEE, Paper No.1259, 2004.
- 3) 財団法人港湾空港建設技術サービスセンター：空港土木施設構造設計要領及び設計例,平成 20 年 7 月.

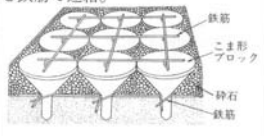
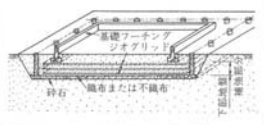

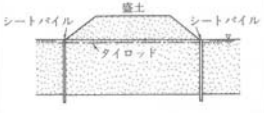
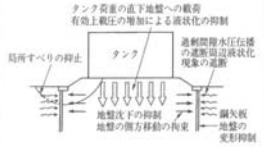
- 4) 加倉井正昭・青木雅路・平井芳雄・俣野博：埋立て人工島における直接基礎の挙動，土と基礎，44-2，pp.64-66，1996.
- 5) Ishihara, K.: Stability of natural deposits during earthquakes, 11<sup>th</sup> *I.C.SMFE.*, Vol.1, pp.321-376, 1985.
- 6) 秋田市：1983年日本海中部地震秋田市新屋松美町地震被害調査報告書，1985.
- 7) 安田進・橋本隆雄：鳥取県西部地震における住宅の液状化による沈下について，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，□-515,pp.1029-1030,2002
- 8) 安田進，有山裕亮，井上貴文，豊田浩史：2007中越沖地震による宅地の液状化被害と地盤調査結果—橋場町その2—，第43回地盤工学研究発表会発表講演集，No. 881, pp. 1763-1764, 2008.
- 9) 稲垣秀輝・吉富宏紀：地盤改良が明暗を分かち，建築知識，Np.679，pp.23-24，2011.
- 10) 安田進：既設建造物の基礎と地盤の耐震補強，土と基礎，Vol. 56, No. 3, pp. 1-5, 2008.

巻末資料 1 各液状化対策工法の概要 1)

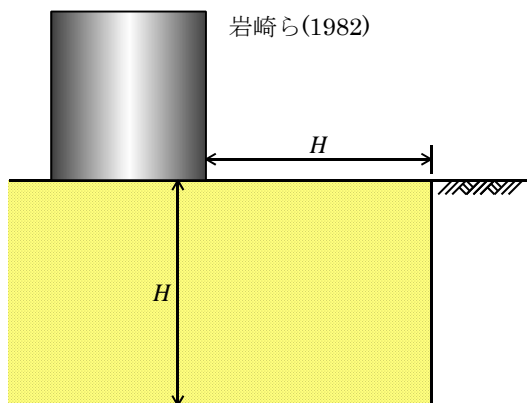
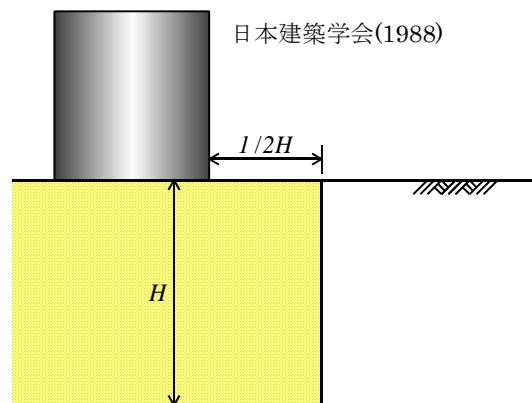
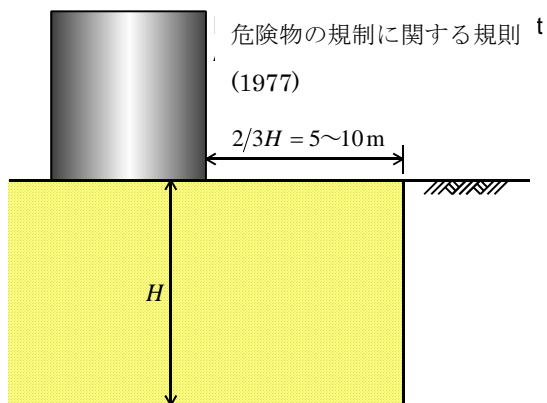
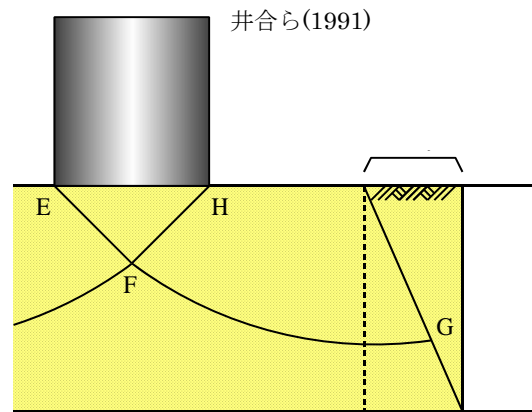
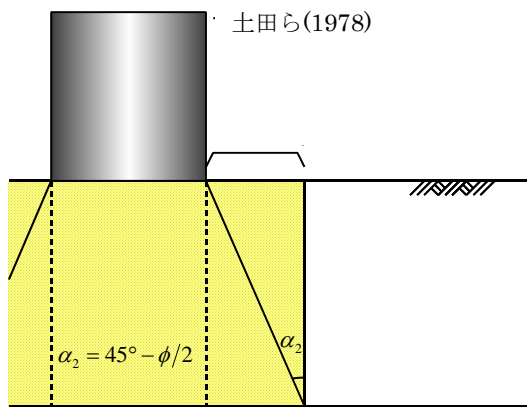
密度増の増工大法	動的締固め サンドコンパクションパイル工法	鋼管ケーシングを先端閉塞の状態地中に貫入させる。所定の深さに達したところで、ケーシング内に砂を入れ、砂を地中に圧入しながらケーシングを引抜き、締め固められた砂杭を形成する。このとき、周辺地盤を側方に圧縮するとともに、振動締固めを行う。 (補給材：砂、碎石、再生碎石などのリサイクル材)	
	静的締固め パイル工法	強制昇降装置と回転駆動装置などを用いて、鋼管ケーシングを先端閉塞の状態地中に貫入させ、所定の深さに達した後に材料を排出しながら引き抜き、打ち戻しを細かく繰り返して地中によく締った砂杭を造成し、周辺地盤を締固める。 (補給材：砂、碎石、再生碎石などのリサイクル材)	
	振動棒工法	各種の特殊圧入ロッドを振動圧入することにより、緩い砂質地盤を締め固める工法。その先端および側面の突起には各種のものがある。ケーシングには鋼管あるいはH鋼を使用する。 (補給材：砂、碎石)	
	重錘落下締固め工法	50~300 kNの重り（ハンマー）を自由落下させることにより発生する衝撃力で地盤を締め固める工法。	
	パイロタ ンバー工法	強力な振動機とタンバーとの組合わせにより、表面地盤を締め固める工法。	
密度増の増工大法	コンパクショングラウチング	流動性の極めて小さいソイルモルタルを地盤中に圧入し、球根状の固結体を連続的（串団子状）に造成する工法で、この固結体による締固め効果で周辺地盤を圧縮強化する工法である。 (補給材：セメントモルタル)	
	バイプロフロン工法	バイプロフロットと呼ばれるバイブレーターを内蔵した鋼管を先端ノズルから水を噴出させながら地中に鉛直に貫入させる。所定の深さに達したらバイブレーターにより、管を振動させながら徐々に引き上げる。振動によって地盤が締め固められた結果、バイプロフロットの周囲にできた間隙に砂利、鉱さい、砂などの粗粒材を流し込む。 (補給材：砂利、鉱さい、砂)	
	工法 転圧	まき出し層ごとに転圧することにより相対密度を上昇させる。	
	工法 発破	地中にてダイナマイトなどを爆発させその衝撃により土中の相対密度を上げる。	
	工法 群杭	杭を打ち込むことによる地盤の締固め効果と杭によるせん断変形抑制効果を併せもつ。	
密度増の増工大法	杭工法 生石灰	生石灰と水砕スラグ・石こうなどを混合した材料を地盤中にパイル状に造成し、パイル打設時の圧入力と生石灰の膨張圧によりパイル間地盤の密度を増大し側方拘束圧を増大する工法。 (補給材：生石灰、水砕スラグ、石こうの混合材)	
	ドレロー工法	盛土などの荷重をあらかじめ載荷し、地盤を過圧密状態とすることによって、液状化強度を増加させる工法。	

固結工法	深層混合処理工法	<p>固化材と原地盤を攪拌混合し、地盤を固化させる。</p> <p>深層混合           <ul style="list-style-type: none"> <li>機械攪拌               <ul style="list-style-type: none"> <li>スラリー系</li> <li>粉体系</li> </ul> </li> <li>高圧噴射               <ul style="list-style-type: none"> <li>グラウト系</li> <li>エアール・グラウト噴射系</li> <li>水・エアール・グラウト噴射系</li> </ul> </li> </ul> </p> <p>(機械攪拌例)</p> 
	薬液注入工法	<p>緩い砂地盤に薬液を低圧で浸透注入させ、砂地盤の間隙水を薬液に置換して粘着力とせん断強さの増加を図る工法。</p> 
	事前混合処理工法	<p>埋立て土にセメントなどの改良材をあらかじめ混合した改良土をそのまま運搬し搬入する。</p> 
粒度の改良	置換工法	<p>液状化の発生しにくい材料（例えば砕石）で置換する。</p> 
	転圧	
飽和度の低下・有効応力増大	ディープウェル工法	<p>構造物の周囲を止水壁で囲い、その内部の地下水位をディープウェルなどにより低下させる。</p> 
	排水溝工法	<p>トレンチ暗渠を利用し、自然流下により地下水位を低下させる。</p> 
間隙水圧の抑制・消散	柱状ドレーン	<p>ケーシングオーガーを所定の位置に回転貫入させた後、砕石を地中に排出させながらケーシングを引き上げ、地中に砕石パイルを造成する。地震時に発生する過剰間隙水圧の上昇を抑制する。</p> 
	人工材料のドレーン	<p>ケーシングを圧入あるいは回転貫入させ人工材料のドレーン材を地中に設置し、地震時に発生する過剰間隙水圧の上昇を抑制する。ドレーン材の周辺はフィルター材で覆い目詰まりなどを防止する。</p> 
	周辺巻立てドレーン	<p>地中構造物の周辺埋戻しに礫・砕石材料を用いて、構造物直下の地震時の過剰間隙水圧の上昇を抑制し、浮き上がりを防止する。</p> 
	工などとの併用	<p>締固め工もしくは矢板工などと併用して間隙水圧消散工を施工する。</p> 
	付き鋼材	<p>杭もしくは矢板の周辺側面に排水部材を取り付け、地震時に発生する間隙水圧の上昇を抑制する。</p>  <p>(a) 鋼管杭 (b) 鋼矢板</p>
せん断変形抑制工法	連続地中壁	<p>建物の外周に剛性の大きい連続地中壁を設置し、せん断変形を抑制する。杭と併用して地震時の変形を抑える。</p> 

<p>堅固な地盤による支持</p>	<p>液状化が発生しても構造物に大きな応力・変形が発生しないように杭基礎など堅固な地盤に支持させる。</p> 	<p>液状化が発生しても構造物の安定を保持できるように杭本数や杭断面を増加させる。</p>	<p>・杭施工時の振動</p>	<p>・道路橋、建築構造物に適用</p>
<p>構造的基礎の強化</p>	<p>新設では、液状化の進行を考慮し、地盤反力係数を低減させて杭基礎を設計。 既設構造物の対策として、 ・液状化時に地盤を拘束し杭の相対変位の抑制を目的とした高圧噴射攪拌工法による直下地盤の改良。 ・高耐力マイクロパイル工法による基礎の補強。</p> 	<p>液状化が発生することを前提として杭の設計を実施する。</p>	<p>・補強杭打設時の振動</p>	<p>・道路橋、建築構造物に適用</p>
<p>護岸の強化</p>	<p>護岸前面に根固め工を実施し、護岸全体の地震時の安定を図る。</p> 	<p>液状化の発生を前提として護岸全体の安定化を図る。</p>	<p>・少ない。</p>	<p>・液状化の影響を考慮した土圧の評価が重要となる。</p>
<p>布基礎の強化</p>	<p>鉄筋コンクリート造にすることなどにより布基礎の強さを増大させる。</p> 	<p>液状化に伴う布基礎下部の土の流出による基礎の破壊を防止する。</p>	<p>・少ない。</p>	<p>・小規模構造物の基礎の場合で、ごく表層が非液状化層である場合に有効。</p>
<p>構造的基礎の強化</p>	<p>周辺地盤より見掛け比重が小さい地中構造物の浮き上がり防止など。堅固な地面に支持された杭や矢板に地中構造物を連結することにより浮き上がりを防止する。</p> 	<p>堅固な地盤に支持された杭や矢板の引上げ抵抗力により、浮き上がりを防止する。</p>	<p>・杭や矢板の打設に伴う振動・騒音が発生。</p>	<p>・動水圧などを考慮し、設計。</p>
<p>構造的基礎の強化</p>	<p>液状化が発生しない砂袋などで周辺を拘束し、埋設管の沈下、浮き上がりなどを防止する。</p> 	<p>埋設管の保護</p>	<p>・少ない。</p>	<p>・地震時の埋設管の変形を液状化発生時にも拘束。</p>
<p>地盤変位への追従</p>	<p>埋設管に可撓継手を取り付けることにより、構造全体の可撓性を増大させる。</p> 	<p>液状化に伴う地盤の沈下や液状に追従し、管に生じる応力の低減を図る。</p>	<p>・少ない。</p>	<p>・液状化の程度が激しい場合には効果が明らかでない。</p>

構造化後の変位抑制策	<p>直接基礎におけるこま形基礎の設置</p> <p>こま形状をしたコンクリートブロックを設置し、ブロック間に碎石を充填し締め固めた後、ブロックの当部を鉄筋で連結。</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・軟弱地盤の沈下対策に有効なこま形基礎の液状化対策工を用いる。</li> <li>・小規模構造物に適用は可能。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・少ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・振動台実験などにより有効性を確認。</li> </ul>
	<p>ジオグリッドによる補強</p> <p>・ジオテキスタイルを層状に敷設することにより液状化抵抗を高めるとともに、沈下や変形を許容値以内に低減する。</p> <p>・遮水膜やドレーンを併設することもある。</p>  	<ul style="list-style-type: none"> <li>・小規模構造物の被害軽減策として用いる。</li> <li>・堤防の耐振補強に用いることもある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・少ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・小規模構造物については実物大実験により有効性を確認。</li> <li>・堤防の耐震補強については実地震による被害軽減実績あり。</li> </ul>
	<p>シートパイル縮切</p> <p>液状化による盛土直下および周辺地盤の強度低下に伴う流動をタイロッドとシートパイルにより防ぐことにより、盛土の沈下変形を抑制する。</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・盛土直下の地盤改良が不可能な場合に適用。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シートパイル打設時に振動が発生。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・振動実験などにより効果確認。</li> <li>・列車走行中でも施工した実績あり。</li> <li>・兵庫県南部地震後の堤防盛土に適用した実績あり。</li> </ul>
	<p>鋼矢板リングによる変位抑制</p> <p>タンク下の地盤を鋼矢板によって円形状に囲むことにより、地盤のせん断変形抑制と地盤沈下によるタンク変形を軽減する。</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼矢板によって囲むことにより、地盤のせん断変形を抑制する。</li> <li>・周辺地盤に広範囲に液状化が発生してもタンク直下地盤の側方への移動を拘束し、地盤沈下によるタンク変形を軽減する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シートパイル打設時に振動が発生。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震観測、有効応力解析、遠心模型実験などで有効性を確認。</li> </ul>

巻末資料 2 提案されている液状化対策範囲



(1) 圧入締固め工法

- ・三信建設工業（株）[地盤工学会特別会員]
- ・(株) 不動テトラ[地盤工学会特別会員]

(2) 薬液注入工法

- ・(株) 設計室ソイル[地盤工学会特別会員]

(3) 高圧噴射攪拌工法

- ・ケミカルグラウト（株） [地盤工学会特別会員]

(4) 人工材料系ドレーン工法

- ・ジオ・フロント（株） [地盤工学会特別会員]

(5) グラベルドレーン工法

- ・(株) 石井基礎工事

(6) 構造的な対策工法(コマ型基礎)

- ・全国マイコマ工業界[地盤工学会特別会員]

(7) 構造的な対策工法(アンダーピニング)

- ・ウレテックジャパン（株） [地盤工学会特別会員]
- ・報告エンジニアリング（株） [地盤工学会特別会員]
- ・大和ランテック（株）
- ・(株) 第一建商

(8) 沈下修正工法

- ・平成テクノス（株） [地盤工学会特別会員]
- ・ウレテックジャパン（株） [地盤工学会特別会員]
- ・地盤沈下対策協会
- ・(株) 第一工業
- ・(株) 岩崎組
- ・岩永開発（株）