

# 液状化対策工法の展望

東京電機大学理工学部建設環境工学科教授 安田 進

## 1. はじめに

液状化被害が広く認識されその対策工の開発が始まってから45年になる。この間、近接施工の問題やレベル2対策など、問題がいくつか発生し、そのつど新しい考えの対策方法が開発されてきた。現在は性能設計をどのように取り入れて合理的に対策工の設計をするかとか、既設構造物をどのように対策するかといったことが重要な課題となっている。このような液状化対策工法開発の歴史を振り返り、今後の展望に関して述べてみる。

## 2. 液状化対策工法開発の経緯

地震時の液状化が着目され研究が始められる契機になったのは1948年福井地震であるが、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。

表-1 液状化を防止する対策工法の種類

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、パイプロローテーション工法、コンパクショングラウチング工法、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、注入固化工法、事前混合処理工法
粒度の改良	置換工法
飽和度低下（地下水位低下）	ディーブウェル工法、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

東海道新幹線の盛土では鋼矢板で、道路橋は増し杭で、また、東京都の護岸は鋼矢板でと、液状化しても被害を受け難くする方法でも対策がとられるようになってきた。

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いる。例えば、サンドコンパクションパイル工法では、砂杭の打設による水平土圧の増加による液状化強度の増加の効果を考慮しようとの試みが行われている。また、液状化しても構造物の機能が損なわなければならな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。

## 3. 液状化対策工法の種類

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。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パイプロ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コンパクショングラウチング工法がある。これは、既設構造物の床からも施工でき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、構造物に近接して施工できる工法として注入固化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、井戸から常時地下水を汲み上げる必要があるため、なかなか一

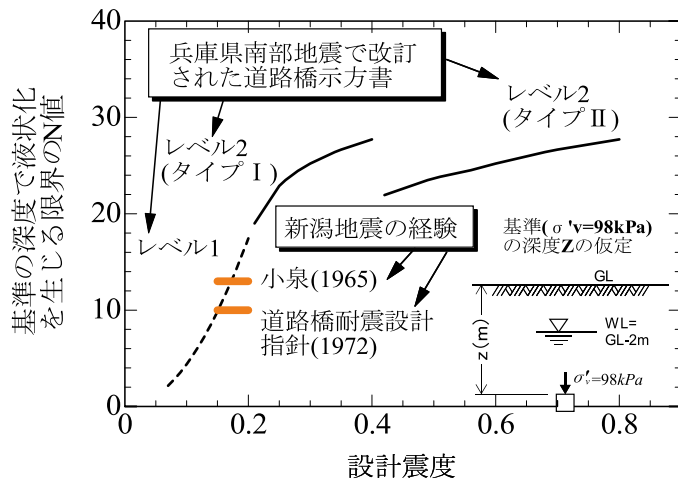


図-1 液状化が発生する限界のN値と地震動の関係の試算例

般に行われていない。ただし、傾斜地盤では排水管を埋設して自然流下によって地下水位を下げるができる。現在、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が適用されつつある。

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。

#### 4. 性能設計に向けた取組みと対策工の合理的な設計

液状化の発生の予測方法は1995年頃にはかなり確立されてきていた。その当時までの液状化に対する設計震度（地表最大加速度を重力加速度で除した値と同じ意味を持つ）は0.2前後（現在で言うレベル1地震動）に設定される構造物が多く、図-1に示すように液状化が発生するか否かの限界N値は10前後であった。

ところが、1995年に発生した兵庫県南部地震で大きな震動を受けたため、耐震設計にレベル2地震動を考慮する必要があるが出てきた。このレベル2地震動のもとで道路橋示方書・同解説<sup>1)</sup>で用いられている判定手法で、きれいな砂地盤において液状化が生じる限界のN値を試算すると、図-1に示すように20～25程度となってしまう。したがって、例えば地盤を締め固めてN値が10以上になるように対策をとっていても液状化の発生を防止出来ないことも起きてくる。ただし、N値が10～25の地盤が液状化するとしても、地盤はある程度密なため、そこにある構造物が大きく沈下したり浮き上がるこ

とはないと考えられる。このような事により、レベル2地震動を考慮する場合は、液状化の発生の有無だけでなく、構造物の変形、変位量で安定性を評価することが必要となってきた。

また、兵庫県南部地震頃から多くの構造物の耐震設計に性能設計の考えを導入しようとの機運が高まってきた。構造物によって性能設計の考え方も少し違っているが、液状化に関しては、過去の被災事例を見ても構造物の構造的被害は少なく構造物全体が沈下や浮上、移動することが問題なため、性能を構造物の変形量で評価することが妥当と考えられた。

以上のように、液状化に関する研究・技術開発の歴史の過程からみて、兵庫県南部地震頃から液状化による構造物・地盤の変形・変位量をもとにした性能設計を導入する必要性が出てきて、それに向かって現在研究や技術開発が盛んに行われている段階である。性能設計方法を採用し入れる場合、性能目標値の設定と性能評価方法の確立が必要となる。液状化に関しては、これらは①変形量の許容値の設定、②液状化した地盤および構造物の変形量の推定方法の確立、と言い換えることが出来る。

液状化に対する構造物の許容変形量に関してはいくつか研究が行われ、一部は設計基準類にとり入れられるようになってきた。ただし、設定にあたっては下記のような種々の事項を考慮する必要があるが、これらを考慮するのがなかなか難しいこともあり、許容値の設定が少ししか進んできていない。

- a) 構造物の構造安定上からみた許容変形量
- b) 構造物の重要度や復旧のし易さから

みた許容変形量

- c) 構造物を利用する機能上からみた許容変形量
- d) 対象構造物が近接構造物や社会生活に与える影響からみた許容変形量
- e) 地震後の緊急対応やその後の本復旧からみた許容変形量

一方、液状化した地盤および構造物の変形量の推定方法は従来至難の業とされてきたが、最近、いくつかの手法が開発されてきている。これらを大別すると表-1の3種類となる。

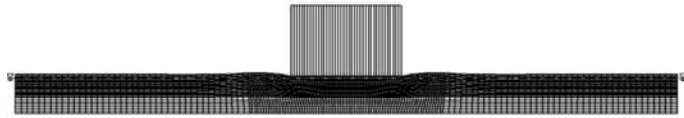
これらのうち、動的解析方法は、通常の時刻歴地震応答解析に特に液状化による変形を考慮に入れた方法である。時刻歴地震応答解析で液状化の発生を解析することに関しては既に多くの技術開発が行われているが、液状化後の大きな変形まではなかなか解析できるまでは至っていなかった。ところが最近、変形の解析の必要性が出てくるとともに、大変形まで解析できるように改善されるものが出てきている。これに対し、静的解析方法は大変形を考慮できる物性を用いて解析するように開発されており、液状化後の変形量を求め易いようになってきている。ただし、動的解析に比べて精度は良くないし、また、変形の時間変化を解析できない。

現在用いられている6つの解析手法によって液状化によるタンクの沈下量を比較検討した例<sup>2)</sup>を図-2と図-3に示す。これは、有効応力解析による地震応答解析コード“FLIP”、“STADAS”、“LIQCA”、“DIANA”、“NUW2”、“STADAS2”によって、同じ地盤条件とタンク荷重で解析を行ったものである。さらに、より簡易な解析手法として、静的解析手法“ALID”によっても解析を行っている。これらの手法でゆるい砂地盤に加え、締固めによる地盤改良を行ったいくつかのケースで解析が行われた。図-2と図-3は、非改良地盤および基礎地盤を全面改良した場合に対して、上記の7つのプログラムで解析したタンクの沈下量と入力地震動の関係を示している。非改良地盤に比べて改良地盤では、どの解析手法でも半分から1/4程度に沈下量が減少している。ただし、各解析コードによる沈下量自体はまだ2～4倍も違っている。

このような変形量をもとにすると対策範囲の設計を合理的に行うことができる。図-4は兵庫県南部地震の際に液状化に

表－2 液状化による構造物や地盤の変形推定手法の種類

手法の分類	手法の概要	手法の特徴
経験にもとづいて推定する方法	過去の地震時における被災事例や模型実験などから経験式を導き出す方法	簡易であるが、精度は良くなく、また、適用できる構造物が限定される。
解析を行って推定する方法	静的解析方法	静的FEMなどを利用し、最終変形量だけを推定する方法
	動的解析方法	時刻歴地震応答解析を利用し、変形量の時刻歴を詳細に解析する方法



図－4 LPガスタンクの液状化による変形推定結果<sup>3)</sup>

起因して沈下したLPガスタンを対象に必要な対策範囲の検討を行った例<sup>3)</sup>である。このタンクの基礎地盤は締固めで地盤改良を行ってあったが、その改良の程度（範囲や密度）が不十分で平均的に60cm沈下したと見られている。そこで、地盤改良範囲や密度をいくつか変えて、沈下量を推定し、改良の程度と沈下量の関係を検討してみた結果が図－5である。ここでは表－2のうち静的解析に分類されるALIDで解析してみた。また、改良の程度を表す指標として下式に示す締固め領域比を考案してみた。

$$Ar = \frac{B \times D_{r2} + (A - B) \times D_{r1}}{A \times D_{r1}}$$

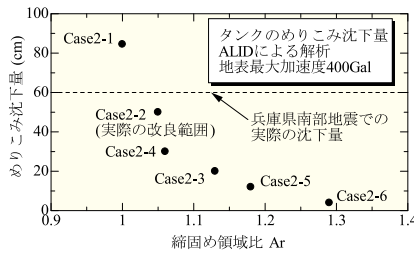
ただし、Aは構造物の沈下に影響を与えらると思われる地盤の範囲（体積）であり、Bは改良を施した範囲（体積）である。また、 $D_{r1}$ はAの範囲の相対密度で、 $D_{r2}$ はBの範囲の相対密度である。

図－5に示されるように締固め領域比が大きくなると沈下量が少なくなる結果となった。このような結果を利用すると許容沈下量から必要な地盤改良の範囲と締固め度の設計ができるようになって考えられる。

## 5. 既設構造物に対する対策工法の開発

新設構造物に比べて既設構造物の液状化対策には以下のような制約がある。

- ① 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。
- ② 構造物を使用しながら対策工を施さねばならず、施工機械などの制約を受ける。



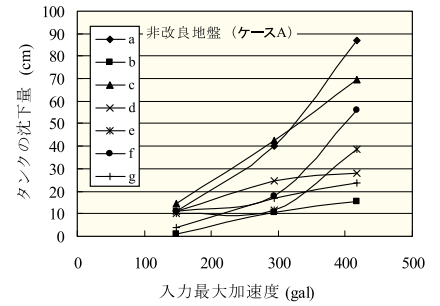
図－5 締固めの程度とめりこみ沈下量の解析結果<sup>3)</sup>

- ③ タンクヤードや住宅地など、対象とする構造物の近傍に構造物があることが多く、近傍の構造物へ影響を与えない施工方法を選定する必要がある。
- ④ 既設直下の地盤調査を行えないので液状化の判定を行い難い。

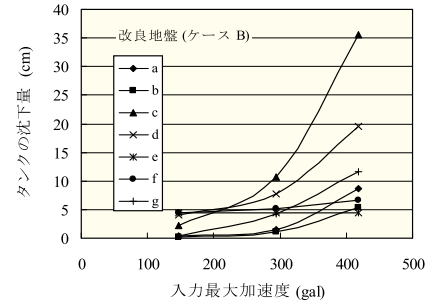
このような制約により、既設構造物の液状化対策の場合は、構造物や敷地ごとに適切な工法が異なる。設計にあたっては、単に液状化の発生を抑制する工法だけでなく、液状化を許容する工法もいくつか考案し、適切な工法を選定していく必要がある。液状化を許容する対策工法を検討する場合、構造物の機能を考えた上述したような性能設計を導入して、沈下量や浮上り量などで対策効果を評価する必要がある。

実際に施工された事例を集めて模式的に表すと図－6となる<sup>4)</sup>。紙面の都合上、簡単に紹介してみる。

直接基礎の構造物に対しては、上述したようにタンクヤード全体の地下水を下げるのが約20年前に行われた。個々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



図－2 非改良地盤における7種の解析コードによる沈下量の推定結果<sup>2)</sup>



図－3 改良地盤における7種の解析コードによる沈下量の推定結果<sup>2)</sup>

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。

杭基礎ではフーチングを拡げて増し杭をして補強することがよく行われる。高張力マイクロパイルを周囲に打設して補強することもある。兵庫県南部地震で被災した高架橋基礎に対して周囲の地盤を改良して補強することも行われている。

土構造物では、東海道新幹線の盛土ののり尻にシートパイルを打ちタイロッドで結んだのが、対策を施した最初であろう。直接基礎の沈下と同様に、土構造物下の地盤が液状化したとしても、側方へ押し出されるのを防ぐと沈下量も減少できる。最近では河川堤防でもシートパイルを打設して側方への変形を抑えることが行われ、また、のり尻部の地盤を締め固めたり、固化することも行われている。

岸壁・護岸では背後地盤の改良や、地震の復旧時に事前混合処理工法等で裏込めすることが行われてきている。控え工

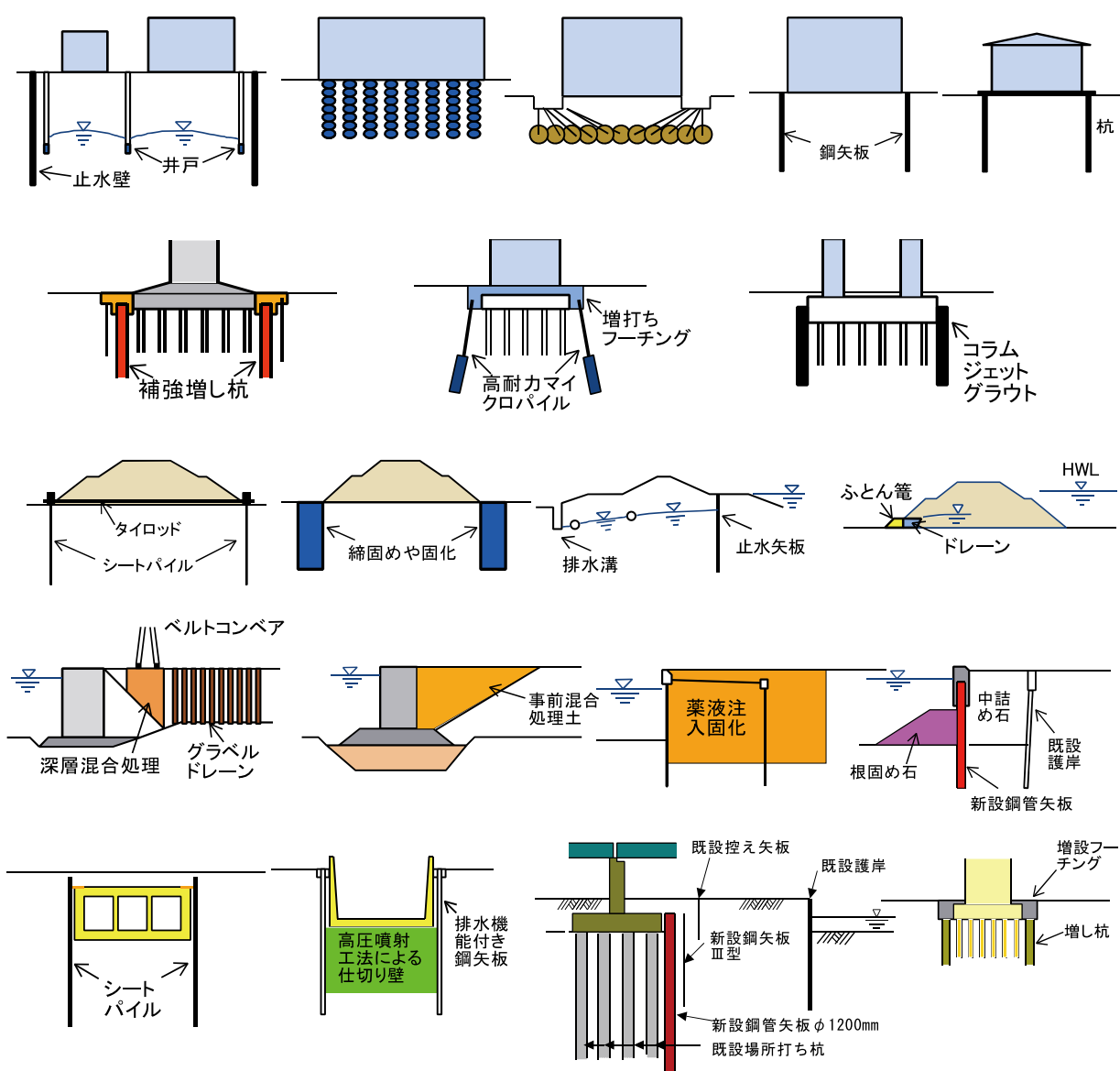


図-6 既設構造物の液状化対策事例の模式図<sup>4)</sup>

などが複雑に配置されている場合には薬液注入固化が有効とされている。一方、東京の内部護岸ではゼロメートル地帯の地震水害を防ぐために、前面に鋼管矢板を新設し、根固めも施して補強する対策が実施されつつある。

地中構造物が液状化によって被災するパターンはいくつかあって複雑であるが、そのうちの浮上りはメカニズムが明らかなので対策がとられるようになってきている。共同溝では両側にシートパイルを打設することが行われている。このようにすると、直接基礎の沈下と同様のメカニズムで、液状化した土が構造物下に回り込むことができなくなり、その結果として浮上り量を小さく抑えることができる。また、地下鉄の底部から孔を明け、下部の地盤を改良することも行われている。

液状化に伴う地盤流動に対しては、

1995年兵庫県南部地震で高速道路の橋脚が甚大な被害を受けたため、首都圏と阪神の高速道路などでその後対策がとられている。首都圏では、護岸と橋脚の間に鋼管矢板が打設され、阪神では増し杭が打設された。前者では液状化が発生しても橋脚位置における流動変位量を小さく抑えて杭基礎を守るとの考えであり、後者は液状化しさらに流動が発生しても杭に被害が生じないように強くする考えである。

### 6. おわりに

以上みてきたように、これまで種々の構造物の液状化対策工法が開発され、実際に適用されてきた。ただし、性能設計を考慮した合理的な対策工法の設計方法の確立や、埋設管や戸建て住宅などの未検討の既設構造物に対する対策方法の開発など、まだまだ技術開発が行われるこ

とが望まれる。

#### 【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説、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, 13th WCEE, Paper No. 1259, 2004.
- 3) 安田進・原田健二・新川直利・有山裕亮・他：性能設計に向けた合理的な縮固め改良範囲に関する研究—その2：タンク基礎を対象とした場合—、第43回地盤工学研究発表会、No. 886、2008。
- 4) 安田進：既設構造物のための液状化対策の考え方、基礎工、Vol. 34, No. 4, pp. 5-7, 2006。



**安田 進**  
(やすだ すずむ)  
1948年広島県生まれ。  
1975年東京大学大学院工学系研究科博士課程土木工学専攻課程修了。1986年九州工業大学工学部助教授、1994年より東京電機大学理工学部教授。地盤工学会副会長(2006年度～2007年度)等を歴任。褒賞等：土木学会論文賞、地盤工学会功労章等。主な著書に「性能規定型耐震設計(分担執筆)」（日本地震工学会2006年）ほか。

〈連絡先：049-296-5599〉