

液状化現象について

谷 茂*

最近マスコミの報道などで，“液状化”あるいは“流動化”という言葉をよく聞くようになりました。ここ数年だけでも，1988年12月のソ連アルメニア（スピタク）地震，1989年10月のサンフランシスコ（ロマ・プリエタ）地震，1990年7月のフィリピン，ルソン島での地震がありました。特に，サンフランシスコ地震，フィリピン地震では，液状化が地震被害

害の主な原因とされています。

日本においても，新潟地震（1964）以来，液状化による地震被害が注目され，これを契機として液状化現象，およびその対策工が研究されてきました。

本文では，液状化現象¹⁾についての質問に御答えします。

〔問1〕液状化現象とは，どのような現象ですか。

〔回答〕 地震によって砂質土からなる盛土，あるいは地盤の飽和領域（水に浸っている部分）で，間隙水圧（土中水の圧力）が上昇するために土が強度を失ない，盛土および地盤があたかも液体のような現象を液状化（Liquefaction）といいます。

飽和砂の強度（せん断抵抗， τ_i ）は，有効応力による内部摩擦角（土の種類によって決まる定数， ϕ' ）によって，一般に次のように表わされます。

$$\tau_i = \sigma' \tan \phi' = (\sigma - u) \tan \phi'$$

上式において，地震による繰返し力のために間隙水圧（ u ）が上昇すると，全応力（ ϕ ）との差で示される有効応力（ ϕ' ）が減少し，せん断抵抗は減少することになり，大きなひずみを生じて被害が発生します。1964年に発生した新潟地震では液状化現象による被害が注目され，特に昭和大橋の落橋，



写真-1 八郎潟干拓堤防の被害（日本海中部地震）

県営住宅の転倒は有名です。写真-1は八郎潟干拓堤防（正面堤防）の写真で，盛土は1.0～1.5m沈下
*農業土木研究室副室長

しました。

なぜこのような現象が生じるのかを次に説明いたします。砂のようなつぶつぶの集まりである粒状体

では、地震による繰返しせん断に伴って体積の変化する性質、すなわちダイレイタンスと呼ばれる性質があります。

今、緩い砂の状態を図-1(a)のようにモデル化してみます。この状態で一方のせん断を加えると、どうなるでしょうか。砂の粒子は、せん断変形に伴

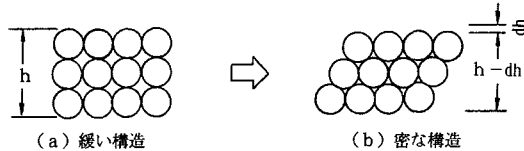


図-1 せん断変形による体積収縮

い図-1(b)のような密な状態に移行していき、全体として dh だけ沈下し、体積の収縮が起こります。すなわち、せん断に伴う“体積収縮”が発生したことになります。緩い砂を入れた容器をたたくと、砂がよく詰まって締まることは誰もが経験していることです。せん断変形による体積収縮は砂の密度が小さいほど生じやすく、また、一方のみのせん断変形

よりも、せん断方向が変化する繰返しせん断の方が体積収縮は生じやすいです。

さて、液状化は、この体積収縮とどのような関係にあるのでしょうか。飽和された緩い砂に、地震力のような繰返しせん断変形が加えられたとします。非常にゆっくりとした载荷であれば、体積の収縮に伴い飽和砂からの間隙水の排出が自由に行われるために体積収縮が起こるだけで、間隙水圧は上昇しません。ところが、地震動のような場合には、急速な载荷が繰返して行われ、水が自由に排水されないために体積収縮が困難となります。このため、間隙水圧が上昇し、しかも累積していく結果、前述の式からも明らかなように有効応力は減少していきます。最終的には、砂は液体状になってまったくせん断抵抗を失うことになります。これが、液状化のプロセスです。よく締まった砂の場合には間隙水圧が上昇しても、‘ゆっくり’と変形が進む“Cyclic mobility 現象”がありますが、これについては述べません。

〔問2〕液状化現象を予測するには、どのような方法がありますか。

〔回答〕 地盤の液状化を予測する場合には、最終的に液状化するかどうかを予測する方法と、液状化にいたるまでの変形や間隙水圧の変化などの挙動を含めて液状化を予測する方法に大別できます。最近では、液状化に至るプロセスを詳細に追おうとした解析法もいくつか提案されてきています。

想定される地震動のもとで、土構造物あるいは地盤が液状化するかどうかを予測する方法は種々ありますが、ここでは次のような分類を行いました。

- (1)地形・地質・粒度分布・ N 値による予測：過去の液状化事例から地形・地質、粒度分布、標準貫入試験による N 値（土の硬さを表す指数）などと過去の液状化の発生の有無との関係を用いる方法
- (2)現位置試験による予測：杭の打設などによる振動によって、発生する加速度および間隙水圧から、液状化抵抗を推定する方法や、最近、時松らによって実用化されたレーリー液探査を用いた液状化危険度を予測する方法などの原位置試験による方法
- (3)振動台による模型実験：振動台を用いた地盤の模型実験によって検討する方法

- (4)地盤内せん断応力と土の液状化抵抗との比較による予測：地震時に発生する地盤内せん断応力を簡易式または地震応答解析から求める一方、地盤の液状化抵抗を N 値または室内せん断試験から求めて比較する方法で、簡易液状化解析と一般的に呼ばれる方法です。

- (5)詳細な予測方法：土の構成モデルを用いて有限要素法などにより、時々刻々の液状化過程を求める方法で、有効応力による地震応答解析と呼ばれるものです。

以下に、各々の方法について説明いたします。

- (1)地形・地質・粒度分布・ N 値による予測

過去の地震時に液状化が発生した地点を調べておけば、その地形・地質と類似の地盤では将来液状化を起こすことが予想されます。

例えば、土の粒度分布からも液状化の可能性を知ることができます。粘土のような細かい土では、粘着力があるため間隙水圧が上昇し有効拘束圧がゼロになっても、粒子がばらばらにならないので液状化しにくいことになります。また、礫材のような粗い土の場合も、透水性のよいため液状化し

にくいのです。このため、この中間の粒度が液状化しやすいことになり、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」²⁾を例にとると、液状化しやすい粒度は図-2のようになります。

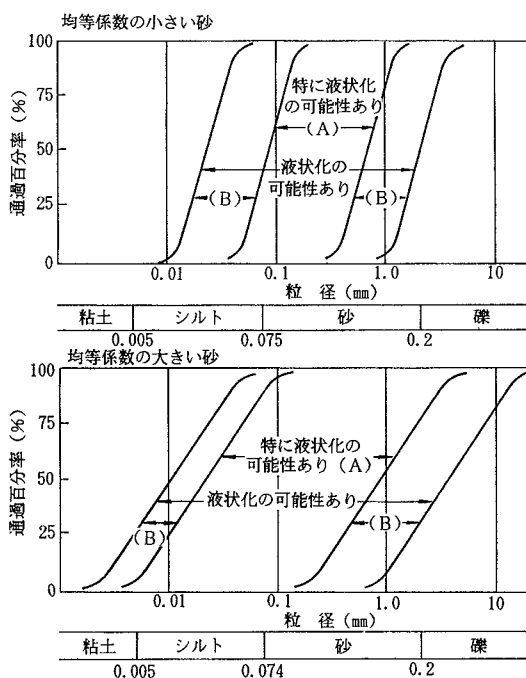


図-2 液状化の可能性のある粒度²⁾

小泉は、新潟地震の前後において行った標準貫入試験によるN値を比較し、ある限界のN値より小さい場合で、事後のN値より小さい場合は事後のN値に増加が認められたとして、このN値が液状化を生じる限界を与えるものとししました³⁾。岸田は、新潟地震の際の建物の被害調査から事前のN値がある限界のN値より小さかった地盤では、被害が大きかった(50cmを超える沈下または 1.0° を超える傾斜)として、この限界N値で液状化の判定ができると考えました⁴⁾。図-3は、これらの結果およびその後報告された基準を一括して示したものです。

(2)原位置試験による予測

地盤の改良効果をみるために試験杭を加震させ、付近に埋めた計器で加速度および間隙水圧を測定したところ、未改良地盤と改良地盤では大きな差のあることが明らかになったという報告があります⁵⁾。この方法では、定量的に液状化抵抗を測ることはむずかしいのですが、対策工法の効果の有無を調べるには有効な手法と考えられています。

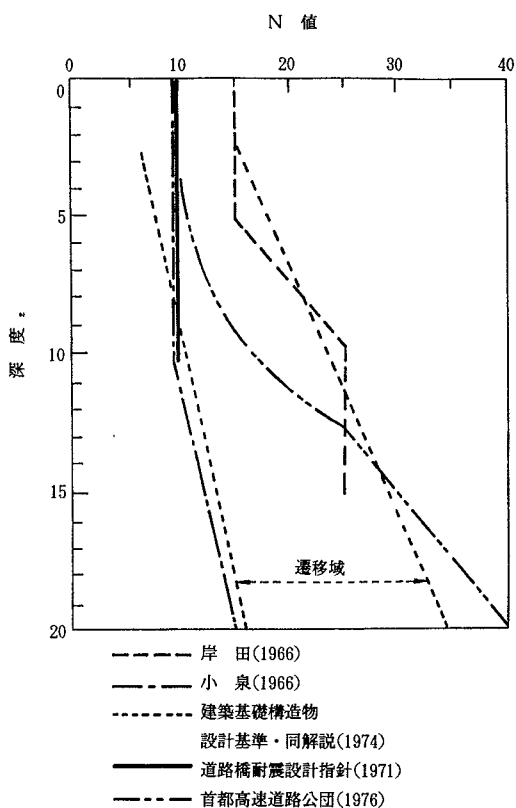


図-3 限界N値と深度の関係

また、最近では時松らによってレーリー液探査を用いた液状化危険度予測の方法が実用化されてきています⁶⁾。この方法は、ボーリング孔なしでS液速度が求められ、その結果を用いて簡便に液状化強度を推定できることから、有望な方法と考えられています。

(3)振動台による模型実験

振動台上に飽和した模型地盤を作製し、これに振動を加えて、発生する間隙水圧・変位・加速度を観測する実験です。この方法では、実験結果と実際の地盤の現象を定量的に対応づけることが困難なため、定量的な液状化の予測はむずかしいことになります。しかし、例えば砂層内に液状化を防ぐためのドレーンを設けた場合や、ジオテキスタイルによって補強された地盤や盛土の補強効果を調べる場合には有効な手段になります。また、最近では相似率を考慮することが可能な遠心载荷による振動実験も行われています。

(4)地盤内せん断応力と土の液状化抵抗との比較による予測

この方法は、地震によって地盤内に発生するせん断応力比 L と土の液状化強度比 R の求め方によって、次のように分けられます。

(a)簡易な予測法

この方法は、土の液状化強度比 R を N 値、粒度文分布、マグニチュードなどから推定し、一方、地震によって地盤内に発生するせん断応力比 L は簡易な式で求めるものです。この値から繰返しせん断抵抗率 $F_L = R/L$ を求め、この値によって液状化の可能性を判定します。ここで、 $F_L \geq 1$ であれば液状化しないと判定します。

この方法には、Seedの方法⁷⁾と岩崎・龍岡の方法⁸⁾があります。日本の基準では、主に後者の方法に準じたものが多いようです。岩崎・龍岡の方法は文献⁹⁾で液状化判定基準（簡易液状化解析）として採用されています。

(b)詳細な予測法

この方法は、室内液状化試験によって液状化強度比 R を求め、地震時最大せん断応力比 L は地震応答解析によって求めるものです。

R の決定には、繰返し三軸試験が用いられます。さらに、原位置での液状化強度比を求めるために補正を行い、液状化強度比を R とします。一方、地震応答解析によって各深さでの最大繰返しせん断応力比 L を求めます。次に、繰返しせん断抵抗

率 $F_L = R/L$ を求め、この値によって液状化の可能性を判定します。ここで、 $F_L \geq 1$ であれば液状化の可能性は少ないと判定されます。

実際の地盤では、地震時には刻々間隙水圧が上昇して有効応力は低下し、土の強度はどんどん小さくなって変形しやすくなります。しかしこの方法では、地盤内に発生する繰返しせん断応力と土の液状化抵抗を別々に求めるため、地震中の土の性質の変化は考慮できません。このような方法は、全応力解析方法と呼ばれています。

(5)土の液状化モデルを用いて応答解析を行う方法

地震時における刻々の、間隙水圧の上昇を計算し、さらに有効応力による地震応答解析を行うものであり、有効応力解析法と呼ばれています。これらの解析は、液状化予測の研究分野で最先端の問題であり、いまだ確立された方法とはなっていません。

これらの地震応答解析法の代表的なものについて、基本的な入力データをそろえて、ひとつの遠心力載荷実験についての一斉解析を行い、解析方法の特徴を調べた事例があります¹⁰⁾。表-1はこれらの解析方法の基本的な構成を示したもので、各々の構成則に特徴があり、入力するデータもさまざまです。

どの解析方法においても応答加速度、間隙水圧

表-1 有効応力による地震応答解析法

プログラム	構 成 則			
	タイプ	ひずみ依存性	ダイレクشنシー特性	主応力回転
TARA-3	ダイレクشنシー式	双曲線モデル	Martin-Finn-Seedモデル	* 1
DIANA-J	弾 塑 性 論	Multi-mechanismモデル		——
ALISS	粒 状 体 理 論	松 岡 モ デ ル （一部修正）		
FLIP	ダイレクشنシー式	東畑・石原モデル	井 合 モ デ ル	* 2
DIANA-J	弾 塑 性 論	Pastor-Zienkiewiczモデル		——
NAFSS	弾 塑 性 論	西モデル		
NONSOLAN	弾 塑 性 論	田中モデル	Endochronicモデル	

*1 主応力軸が回転する実験結果を用いているので、体積ひずみにはこの成分も入っていると考えられる。

*2 結果として、主応力軸の回転により体積ひずみが発生する。

についてはパラメータの修正によってある程度実験結果を予測することは可能でありました。しか

し、変形量については解析方法によってかなり異なっており、また実験結果との定量的な比較もあ

まり一致しませんでした。このように、実際の被害に結びつく変形（沈下）については、現時点ではどの解析法でも、正確に予想することは困難といえます。

一方、個別要素法という方法で、液状化のような大変形を解析しようとしている試みもあり¹¹⁾、この方法は大変形を伴う場合の解析法として将来有望なものと考えられますが、現時点では液状化の課程を詳細に行うことはむずかしく、実用的方法とはいえません。

このようなことから、詳細な解析法は特別な場合に限り行うという位置づけで行われることが多いようです。したがって、実務的には簡易的な方法によって液状化判定をしている事例が多く、実際の液状化判定の諸基準では上述した(1)および(4)を組合わせて、液状化の判定を行っています。

〔問3〕液状化を防ぐには、どのような方法がありますか。

〔回答〕 液状化の予測法によって液状化の可能性のある場合には、なんらかの液状化対策が必要となります。基礎地盤の液状化対策工の基本としては、次のような対策が考えられます。

- (1)密度の増大をはかる対策工法～バイプロフローテーション工法、サンドコンパクションパイル工法、動圧蜜工法
- (2)地下水位の低下または有効応力の増大を図る対策工法～ウエルポイント工法、デイベウエル工法、押え盛土工法
- (3)粒度改良または固結による対策工法～置換工法、表層（深層）混合処理工法
- (4)間隙水圧の消散を図る対策工法～碎石ドレーン工法、プラスチックドレーン工法
- (5)せん断変形の抑制による対策工法～連続地中壁工法、シートパイル工法

アースダムや干拓堤防の場合には、盛土部も飽和されているため、上記の液状化対策工以外に堤体部の耐震補強も必要となってきます。他の盛土構造物では飽和されていることは一般に少なく、例えば、河川堤防では地盤部のみが液状化の領域となります。

表-2は、盛土と基礎地盤についての現在行われている液状化対策工についてまとめたものです。これらの工法の中の主なものについて、次に述べます。

以上述べた方法で、(1)～(4)については地盤の液状化予測法であり、盛土構造物の液状化予測はできません。(5)の方法では、2次元問題を扱えるものであれば盛土構造物についても解析が可能です。

農林水産省関係の基準では¹²⁾、土地改良事業計画設計基準「水路工その二、パイプライン」（1977）で液状化判定法を示しています。他の基準では、道路橋示方書・同解説⁹⁾、港湾の施設技術上の基準・同解説²⁾、河川、海岸施設の耐震調査要項¹³⁾、（建設省河川局内部資料）などがあります。これらの諸準は、先に述べた(1)および(4)の考え方を基にN値、砂の粒度、地震力の大きさから、液状化の可能性を判定するものです。

これらの基準では、液状化の可能性の判定を行って、液状化の可能性があれば対策工事を施工するか、構造物の位置を変更することになります。

補強土工法は、盛土内にジオテキスタイル、鉄筋およびアンカーなどを設置して、盛土の補強を図るものです。液状化地盤上の盛土を、ジオテキスタイルで補強した場合の効果については、振動台模型実験によって沈下量抑制の効果が大きいことが確かめられています。

動圧蜜工法は、10～40 tの重錘を数10mの高さから落下させ、地盤を締固める工法です。鉤さいダムでのり尻部を締固める方法として施工された例がありますが、地盤のように拘束圧がないため、盛土構造物そのものを締固める方法としては適切とはいえません。新設の盛土の基礎地盤の締固めには、効果はあると考えられます。

地盤改良工法は地盤中に石灰、セメント、高分子化合物などの地盤改良材を注入し、混合することにより地盤全体を強化するもので、深層処理混合工法が代表的なものです。この工法は比較的成本が高いことが欠点とされていますが、低コスト化、改良材・混入法が改善されればその価値は大きいと考えられます。

シートパイル工法は盛土ののり先に矢板を打設してすべり破壊の防止、地盤の測方変位の抑制および水位の低下を図るものです。八郎潟干拓堤防の日本海中部地震の際の災害復旧でもこの工法が採用され

表-2 盛土構造物の液状化対策工

対策法	主 な 工 法	検 討 事 項					備 考
		費 用	必要用地	施工実績	施 工 性	効 果	
堤 体 部	前刃金工法	A	A	A	A	C	浸潤線を下げ飽和領域を少なくする効果がある。 実績はほとんどない。 新しい工法である。
	動圧密工法	B	B	D	C	B	
	補強工法	B	A	C	B	B	
基礎地盤	動圧密工法	B	B	B	B	B	アースダムでは堤体下の全面的地盤改良が不可。 比較的成本が高い。アースダムでは全面的な地盤改良が不可。 安価で比較的效果がはっきりしている。 地盤の締固めと過剰水圧の消散。既設アースダムでは全面的な地盤改良不可。 圧密効果とせん断抵抗力の増大。既設ため池では全面的な地盤改良不可。
	地盤改良(固化)	B	A	B	B	A	
	シートパイル工法	B	A	B	A	B	
	バイプロレーション工法	B	A	A	A	A	
	サンドコンパクション工法	B	A	A	A	A	
共 通	押え盛土工法	A	C	B	A	B	貯水容量を少なくする。砂の押え盛土が液状化した例がある。

注) ただし, A:優 B:良 C:可 D:不可

ていますが、この場合には矢板は水位の低下を図る工法として採用されていて、液状化対策工としては評価はしていません。鉄道盛土では直接的な耐震補強工法として、盛土付近ののり先に矢板を打設し、その上端を盛土内を貫通したタイロッドで相互に結合して、盛土補強を行う工法が採用されています¹⁴⁾。

押え盛土工法は、盛土のすべり破壊を盛土斜面ののり先においた盛土によって有効応力を増大し、す

べりを防止する工法です。軟弱地盤の上の干拓展望などで昔からよく使われた対策工ですが、この工法は恒久的に押え盛土の用地が必要となります。以上、盛土構造物を含めた液状化対策工について述べましたが、このほかにも新しい耐震補強工法が開発されてきています。対策工法の選定に際しては、地盤条件、構造物の重要度、施工コストなどを十分考慮する必要があります。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編(谷 茂 共著);土質・基礎工学のための地震耐震入門,入門シリーズ10,1985.
- 2) 日本港湾協会;港湾の施設の技術の上基準・同解説,1979.
- 3) Koizumi,Y.; Changes in Density of Sand Subsoil Caused by the Niigata Earthquake, Soil and Foundation, Vol. VI, No2, pp. 38 ~44. 1966
- 4) Kishida, H.; Damage to Reinforced Concrete Buildings in Niigata City with Special Reference to Foundation Engineering, Soil and Foundation, Vol. VI, No. 1, pp. 71~88, 1966.
- 5) Ishihara,K. and Mitsui,S.; Field Measurement of Dynamic Pore Pressurs During Pile Driving, Proc. International Conference in Microzonation, Vol. 2, pp. 529~544, 1972
- 6) 時松孝次, 桑山晋一;レーリー波探査を用いた液状化危険度予測,土と基礎 Vol.38, No. 6, pp. 15~20, 1990
- 7) Seed, H.B.; Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level ground During Earth-quakes. Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, Vol. 105, No. Gt2, pp. 201~255, 1979.
- 8) 岩崎敏雄, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田 進;砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例,第5回地震工学シンポジウム, pp. 641~647, 1978.
- 9) 日本道路協会;道路端示方書(V耐震設計編),1980.
- 10) 土質工学会(地盤と土構造物の地震時の挙動に関する研究委員会);地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム, pp.50~136, 1989.

- 11) K.Kazuyoshi, M.Hakuno ; GRANULAR ASSEMBLY SIMULATION FOR DYNAMIC CLIFF COLLAPSE DUE TO EARTHQUAKE, 9WCEE, 1988.
- 12) 農林水産省構造改善局；土地改良事業設計指針「耐震設計」, 1977.
- 13) 建設省河川局（内部資料）；河川海岸施設の耐震調査要項, 1972.
- 14) 鉄道技術研究所他；盛土耐震補強土設計の手引（案）, 1978.

*

*

*