

# 液状化メカニズム・予測法と設計法

## 4. 液状化判定法 (その1)

岡 二三生 (おか ふさお)

京都大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻

角 南 進 (すなみ すすむ)

㈱日建設計 中瀬土質研究所

山 本 陽 一 (やまもと よういち)

三井建設㈱ 技術研究所

### 4.1 概説

液状化の予測・判定方法は、求められる精度と目的に応じて表—4.1に挙げるような形で分けられる。このうち、判定法としては地盤の物性と適切な入力地震動があれば、詳細法の有効応力解析に基づく判定法が理想的であるが、土質に応じた解析パラメーターの情報が多くない現段階では、簡易判定によらざるを得ない。そのため、多くの構造物の設計基準類には、 $N$ 値と粒度等から液状化の可能性を予測する簡易判定法が採用されている。簡易判定法には表—4.2に示す限界 $N$ 値法やFL法があるが、限界 $N$ 値法はFL法等のより詳細な検討結果を限界 $N$ 値として表記したものも含まれる。歴史的には新潟地震(1964)後の各種耐震設計基準にまず限界 $N$ 値法が導入され、その後1980年改訂の道路橋示方書<sup>1)</sup>で初めてFL法が導入された経緯がある。

基準・指針類の液状化判定方法に $N$ 値をもとにした方法が採用されているのは、単にその方法が簡便で一般的な土質調査・試験結果を利用しているという理由だけではなく、標準貫入試験結果から求まる $N$ 値が密度、拘束圧、応力・ひずみ履歴等、飽和砂質土の液状化強度に影響を及ぼす多くの要因の影響を含んでいること、新潟地震以降の要素試験を中心とする液状化研究の発展や被害事例の蓄積による信頼性があったからだと思われる。

このように、簡易判定法はほぼ確立されたように見られていたが、1995年兵庫県南部地震では激しい液状化現象と簡易判定法の予測との相違が一部で認められた。これは、これまでの想定を超える直下型の大規模地震が主な原因ではあったが、その後多くの機関で修正・改訂の作業が行われることとなった。1996年に道路橋示方書が改定<sup>2)</sup>され、1997年に港湾関係の埋立地の液状化対策ハンドブック<sup>3)</sup>(以下、港湾の基準と略称する)、そして、2001年に建築基礎構造設計指針(以下、建築の指針と略称する)が改定<sup>4)</sup>され、主だった基準類の改定が一段落した。

本章では、同地震以降改訂された各種構造物に対する設計基準類の液状化判定法のポイントとその経緯を判定対象土、液状化強度に与える要因の取り扱い、判定用地震時外力について整理し解説する。

表—4.1 液状化予測・判定法の分類

グレード	予測方法	目的・適用
概 略	地理地形情報と液状化履歴に基づく方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 広域の液状化予測やゾーニング</li> <li>• 液状化マップ作成</li> </ul>
簡 易	$N$ 値および粒度等に基づく方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 特定地域・構造物に対する液状化可能性の予測</li> <li>• 液状化による構造物への影響評価</li> <li>• 地盤変位の予測</li> <li>• 構造形式・対策工法の検証</li> </ul>
詳 細	室内液状化試験や地震応答解析を行う方法 土の液状化モデルを用いて応答解析(有効応力解析)を行う方法	
特 殊	模型振動台実験による方法 原位置試験・測定による方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 対策工法の効果検証</li> </ul>

表—4.2 簡易液状化判定法の種類

方法	概 要
限界 $N$ 値法	原位置での $N$ 値を、定められた限界 $N$ 値と比較して、それより小さく、また、液状化しやすい粒度組成であれば液状化の可能性があると判断する。
FL法	地盤内のある深さの液状化強度比 $R$ を $N$ 値や粒度等から推定する。地震により発生する繰返しせん断応力比 $L$ を設定、もしくは算定し、両者の比で液状化に対する安全率(抵抗率) $F_L$ を求める。 $F_L \leq 1$ で液状化の可能性があると判定

### 4.2 液状化判定対象土

各基準類の液状化判定法では、まず判定の対象となる土・地盤の条件を述べたあと、判定方法が記述されるのが普通である。一般的には、対象土は液状化メカニズムからみて飽和した砂質土であるが、さらに細かい条件をみると基準類で相違が見られる。

#### (1) 対象土質

1996年道路橋示方書<sup>2)</sup>は原則として沖積砂質土を検討の対象土としている。1996年の改定で「原則として」が入ったことにより、検討対象土の範囲が広がったともいえる。一方、建築の指針<sup>4)</sup>では対象土を沖積層としている。洪積砂質土が液状化した事例はほとんどないので、とくに問題はないかと思われるが、砂質土では沖積と洪積層の区別は地質学的同定を必要とすることがあるため、実施が困難な場合もあり、洪積層でも $N$ 値が低い砂質土では液状化判定の対象とするのが良い。

#### (2) 検討対象深度

液状化の検討深度は、多くの基準類で20 m以内であるが、1997年水道施設耐震工法指針<sup>5)</sup>(以下、水道の判

講 座

定法と略称する)では地表面より25 m以浅としている。この理由は地震動レベル2を対象とした場合、下部まで大きな応答をすることと、兵庫県南部地震では25 m以深の砂層で急激な水圧上昇が見られたという報告<sup>6)</sup>があり、25 m前後まで液状化したと推定されて設定されている。

液状化の程度、液状化した層の変形性能や液状化した場合の構造物に影響を与える程度を考慮して、検討対象構造物に応じた深さまでを液状化検討の対象深さとするが合理的と考えられる(例えば<sup>3)</sup>)。そして、基準類はその適用構造物に応じた深度を設定していると考えられる。

(3) 粒 径

1990年の道路橋示方書<sup>7)</sup>では、平均粒径  $D_{50}$  が0.02~2.0 mmの沖積砂質土とされてきた。これは主に1964年の新潟地震の事例に基づいて決められたとされる。1994年北海道南西沖地震や1995年兵庫県南部地震で、礫を含むより大きな粒径でも液状化しうることが確認された。そこで、1996年の道路橋示方書では、貫入試験の際の粒子破碎等により、原位置より粒径がさらに細くなることも考慮して、標準貫入試験の試料から得られる平均粒径  $D_{50}$  が10 mmを検討対象土の上限とされた。港湾の基準<sup>3)</sup>は図-4.1に示すように粒径加積曲線の範囲を示しているが、これに礫を多く含む土のことを考慮できるように透水係数が  $k=3 \text{ cm/s}$  以上であれば液状化しないとしている。同図の凡例にある道路は1996年道路橋示方書<sup>2)</sup>、建築は建築の指針<sup>4)</sup>で、線上をとる粒径加積曲線の土が判定対象土となることを示す。

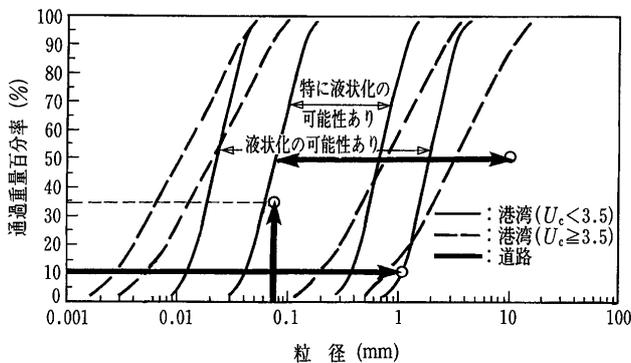


図-4.1 各判定法の対象土の粒径比較

(4) 細粒分含有率, 塑性指数, 粘土分含有率

表-4.3に現行の指針類における細粒土側の液状化対象土の範囲についてまとめた。指針により若干の違いはあるが、細粒分含有率については35%以下、粘土分含有率では10~15%以下、塑性指数  $I_p$  については15以下を液状化対象土として取り扱っており、これらの数値が目安となる。

1996年道路橋示方書<sup>2)</sup>、建築の指針<sup>4)</sup>、1999年鉄道構造物設計標準<sup>8)</sup>(以下、鉄道の基準と略称する)では細粒分含有率は近年の研究をもとに上限値を35%としている。細粒分含有率が35%を越えていても低塑性のシルトでは液状化の事例があるということから  $I_p$  が15以下でも対象土に含めている。水道の基準では細粒分含有

表-4.3 基準類の液状化対象土(細粒土側)

基準類	細粒分含有率	粘土分含有率	塑性指数
道路, 下水, 河川, ダム	35%以下	—	15以下
鉄 道	35%以下	15%以下	
水 道	30%以下	—	
建 築	35%以下	(10%以下)	(15以下)

( ) は埋土層に適用

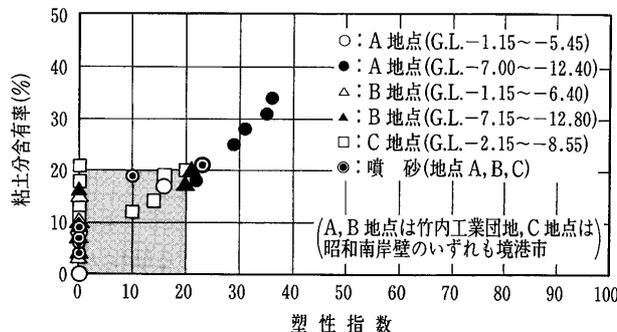


図-4.2 鳥取県西部地震における噴砂と同地点における埋土層の粘土分含有率と塑性指数の比較<sup>10)</sup>

率が30%以下としているが、これは神戸層で埋め立てられた六甲アイランド等では液状化が相対的に著しくなかったことから決定している<sup>5)</sup>。

2000年鳥取県西部地震では、境港市の埋立地で浚渫したシルトの液状化が確認され問題となった。噴砂の中には塑性指数が20程度のものが含まれており<sup>9)</sup>、その後の調査・試験結果からおおむね粘土分含有率20%以下、塑性指数20以下の範囲の埋土層で液状化が生じた可能性がある指摘されている(図-4.2)<sup>10)</sup>。この範囲は、現行基準類の対象土の範囲を大きく逸脱するものではないが、細粒土の取り扱いには慎重な判断が必要である。

4.3 液状化強度に影響を及ぼす要因の取り扱い

1995年兵庫県南部地震以降の基準の改訂で問題となった点は、直下型の大規模地震動に対する地盤液状化の予測であろう。液状化判定で考慮される地震動による繰返しせん断応力が引き上げられることによって、液状化予測の対象土は必然的にこれまで液状化しにくい(液状化強度が高い)と考えられていた密な砂質土(締め固まっている砂質土)や細粒土を多く含んだ砂質土、そして、礫質土にまでその適用が広がった。これらの土に共通する液状化強度の特徴は、最も液状化しやすい緩いきれいな砂に比べて強度が高くなるということだけでなく、液状化強度を定義するひずみの大きさや繰返し回数(特に少ない回数)によっては強度が大きく異なることが挙げられよう。直下型の地震動を想定することにより、これらの特徴を無視することができなくなっている。

したがって、同地震以降改訂された液状化判定基準のポイントは、密度( $N$ 値)の高い領域、細粒土、礫質土、地震動波形(繰返し回数)に関する取り扱いに代表されるものと思われる。そこで、本章ではこれらの要因に対する判定基準での取り扱いについて説明する。

(以下次号につづく)