

## 耐震設計のための液状化土の物性評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 15～平 18

担当チーム：振動チーム

研究担当者：杉田 秀樹、佐々木哲也、  
谷本 俊輔

### 【要旨】

レベル2地震動に対する耐震設計では、地震後に構造物に求められる機能に応じて要求性能を設定し、地震時の変形量により照査を行うのが合理的である。液状化地盤における構造物の耐震性能を変形量で評価する手法として、残留変形解析の重要性が高まっている。例えば、有効応力解析においては、室内土質試験から得られる繰返し強度曲線などを満足するように土の材料パラメータを設定するが、建設地点ごとに不撓乱試料を採取し、室内土質試験を行うのは容易でない。そこで、本研究は、標準貫入試験などの地盤調査結果から液状化した土の物性を評価する方法を提案することにより、さらなる耐震設計の合理化を図ることを目的として行ったものである。

本研究では、凍結サンプリング試料の液状化試験結果を収集してデータベースを作成し、土の繰返し強度特性及びひずみ増加特性と原位置地盤調査結果との関係を分析した。その結果、きれいな沖積砂質土の応力比  $R$ -繰返し回数  $N_c$  関係と標準貫入試験  $N$  値の相関関係を明らかにし、両ひずみ振幅  $DA=1\%$ 、 $2\%$ 、 $5\%$ 、 $10\%$  に対する沖積砂質土の  $R$ - $N_c$  曲線の簡易推定法を提案した。

キーワード：液状化、繰返し強度特性、ひずみ増加特性、残留変形解析、凍結サンプリング

### 1. はじめに

レベル2地震動に対する耐震設計では、地震後に構造物に求められる機能に応じて要求性能を設定し、地震時の変形量により照査を行うのが合理的である。河川堤防を例にとると、堤防には地震後においても河川の流水を河川外へ越流させないという機能が要求されることから、地震後の堤防高さが外水位を下回らないことの照査が行われる<sup>1)</sup>。

そのような状況の中で、液状化地盤における構造物の耐震性能を変形量で評価する手法として、残留変形解析の重要性が高まっている。近年、様々な残留変形解析手法<sup>2)3)4)</sup>が提案されており、設計実務においても適用される場面が増えつつある。これらの手法で適切な解析結果を得るためには、土の地震時変形特性を考慮したパラメータを与える必要がある。例えば、有効応力解析の場合、土の非線形材料構成則のための数多くのパラメータを入力する必要があり、液状化に至るまでに必要な応力と載荷回数の関係（繰返し強度特性）、液状化後の繰返しせん断による変形特性（ひずみ増加特性）といった力学特性を正しく評価し、材料パラメータの設定に反映させることが重要である。一般にそれらのパラメータは試験結果から一意的に決定されず、要素レベルでの数値シミュレーション結果が室内土質試験結果を再現

するように与えられるため、構造物の建設地点で不撓乱試料を採取し、室内土質試験を行うことにより、はじめて要素シミュレーションの参照データが得られることになる。土の液状化特性を調べるための不撓乱試料の採取は一般に困難であることから、地盤調査結果などに基づいて簡易に液状化土の物性を評価する手法の開発が望まれている。

一方で、液状化に関する従来の研究は、液状化発生の有無の評価に重点を置いたものが多く、耐震設計上大きな影響を及ぼす液状化した土の力学特性については必ずしも十分に解明されていない。そこで、本研究では、土木研究所等で過去に行われた凍結試料の液状化試験結果を収集してデータベースを作成し、地盤調査結果との相関関係を明らかにするとともに、きれいな沖積砂質土を対象とした繰返し強度特性、ひずみ増加特性の簡易推定法を提案した。

### 2. 研究方法

#### 2.1 凍結試料の液状化試験データの収集とデータベースの作成

土の液状化強度特性は、密度や粒度分布のみならず、土粒子の微視的な骨格構造に依存することが知



られていることから、原位置の繰返し強度特性、ひずみ増加特性を正確に調べるためには、乱れの影響の少ない試料採取法を選択する必要がある<sup>5)</sup>。最も乱れの影響を受けにくいとされているサンプリング方法として凍結サンプリング<sup>6)</sup>があり、本研究においては、凍結サンプリングにより採取された試料の液状化試験結果を対象にデータ整理を行っている。

本研究では、土木研究所等によって行われたわが国における多くの凍結サンプリング試料の液状化試験結果を収集し、データベースを作成した。データベースには、以下の項目が記載されている。

- 試料に関する情報（採取地点、採取深度、堆積区分、有効上載圧）
- 原位置試験データ（標準貫入試験結果、PS 検層結果、ペネ試料の粒度分布など）
- 物理試験データ（室内試験試料の粒度分布、相対密度など）
- 室内試験データ（両ひずみ振幅 DA=1%、2%、5%、10%に達するときの応力比  $R$  - 繰返し回数  $N_c$  関係など）

データベースに記載された試料は全 170 試料であり、その内訳は、表-1のとおりである。

表-1 データベースに記載された試料数の内訳

土質分類	堆積区分			
	沖積土	埋立土	改良土	洪積土
砂	49	21	43	27
砂礫	22	3	0	5
シルト・粘土	0	0	0	0

ここで、改良土とは、砂杭の打設による締固め工法で改良された地盤における砂杭または杭間で採取された試料を表す。また、シルト・粘土に関するデータはデータベースに全く含まれていない。これは、後述のように、透水係数の小さな土は、間隙水の凍結による体積膨張の影響によって土の骨格が乱され、原位置の液状化特性を精度よく調べることが困難であるためである。

## 2.2 データ整理の方法

次に、データベース化した試験結果から、液状化土の物性に関する整理を行った。一般に、土の液状化強度特性の把握には非排水繰返しせん断試験が行われ、あるひずみ振幅に達するまでの応力比  $R$ -繰返し回数  $N_c$  の関係（以下、 $R-N_c$  関係という）が整理さ

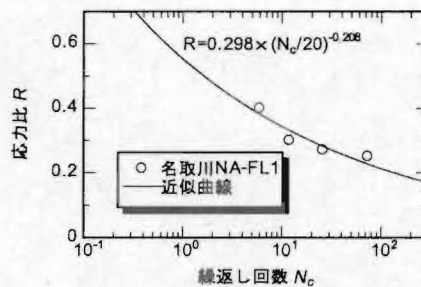


図-1  $R-N_c$  関係の近似の例

れる。実務設計における土の液状化強度特性の評価は、20 回の繰返し回数で両振幅軸ひずみ DA=5% に達するときの応力比  $R_L$  のみで評価され、それは  $R-N_c$  曲線上の 1 点でしかない。しかし、 $R-N_c$  曲線の傾きが液状化に至るまでの土の繰返し強度特性を表現し、各ひずみ振幅に対する  $R-N_c$  曲線が液状化後の土のひずみ増加特性を表現しており、これらが地盤の残留変形解析において考慮されるのが合理的である。以降のデータ整理は、このことを念頭に行っている。

本研究では、あるひずみ振幅に達するときの  $R-N_c$  曲線を次式により近似した。

$$R = a \left( \frac{N_c}{20} \right)^{-b} \quad \text{-----(1)}$$

ここに、 $a$ 、 $b$  はフィッティングパラメータである。式(1)では繰返し回数  $N_c$  が 20 回で正規化されているため、両振幅ひずみ DA=5% の場合、パラメータ  $a$  は繰返し三軸強度比  $R_L$  と等価となる。また、パラメータ  $b$  は  $R-N_c$  曲線の傾きの程度を表す。式(1)による  $R-N_c$  関係の近似結果の例を図-1に示す。このような  $R-N_c$  関係の近似を全試料に対して行い、パラメータ  $a$ 、 $b$  に及ぼす要因を系統的に分析した。ここで、分析の対象とした  $R-N_c$  曲線は、両振幅ひずみ DA=1%、2%、5%、10%に関するものである。

上記の整理によって評価された土の液状化強度特性を、100kN/m<sup>2</sup> の有効上載圧に換算した  $N$  値  $N_I$  と対比することにより、液状化土の物性と地盤調査結果の相関を分析した。

## 3. 研究結果

### 3.1 液状化土の物性に影響を及ぼす要因の分析

ここでは、土の繰返し強度特性を式(1)のパラメータ  $a$ 、 $b$  で代表させ、これらのパラメータに及ぼす影響



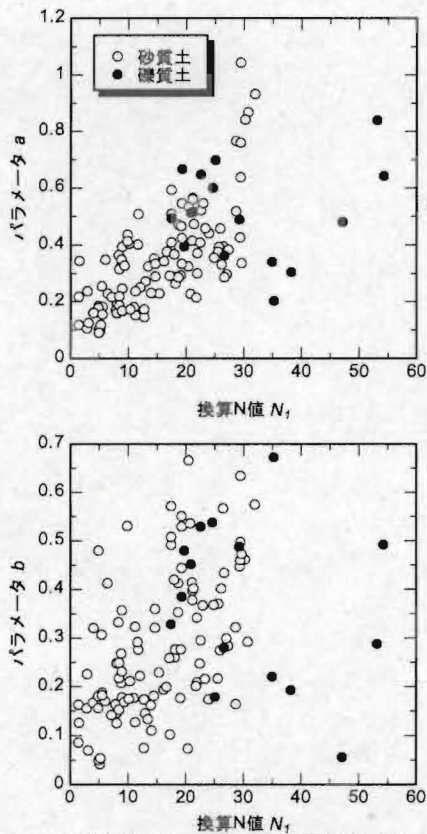


図-2 土質区分と  $a-N_e$ ,  $b-N_e$  関係 (DA=5%)

要因の分析として、土質区分、細粒分及び堆積区分の影響について検討した。

図-2のように、 $a-N_e$ ,  $b-N_e$  関係を土質分類ごとに見ると、礫質土では特にばらつきが大きいことが分かる。これは、礫質土においては貫入試験における打撃回数にばらつきが大きくなること、礫質土の力学特性がわずかな密度の差で大きく変化し<sup>7)</sup>、密度の空間的なばらつきの影響が液状化試験結果に影響を与えたことによるものと考えられる。一方、砂質土のみに着目すれば、パラメータ  $a$ ,  $b$  と  $N_e$  の間にある程度の相関関係が認められ、これを近似することによって簡易評価することができそうである。

図-3に細粒分含有率  $FC$  とパラメータ  $a, b$  の関係、すなわち  $R_L$  と  $R-N_e$  曲線の勾配の関係を示すが、細粒分含有率  $FC$  による勾配の変化は特に見られない。ただし、ここで対象としたデータには、細粒分を多く含む土のデータが少ない。また、凍結時の間隙水の膨張により土の骨格が乱され<sup>8)</sup>、原位置の液状化強度特性が正確に得られていないことも原因となっている可能性もある。このように、細粒分を多く含む土の原位置液状化強度特性の把握は難しく、今後のさらなる検討の余地が残されている。

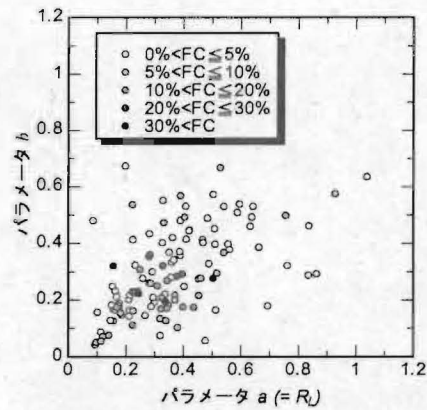


図-3 細粒分含有率  $FC$  ごとのパラメータ  $a$ ,  $b$  の関係

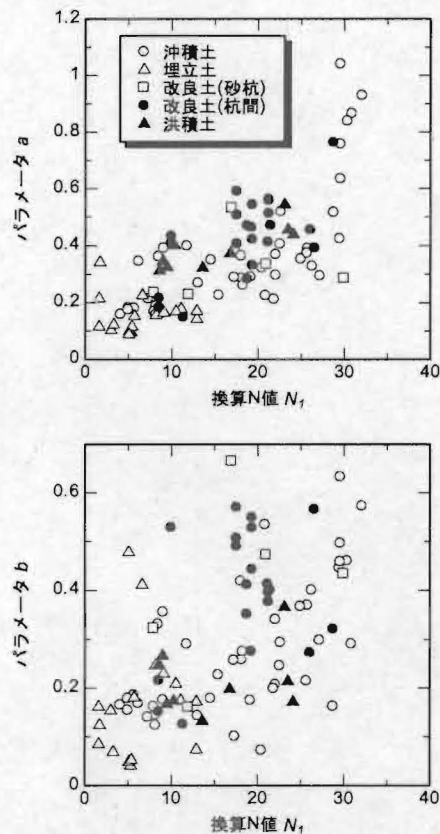


図-4 堆積区分と  $a-N_e$ ,  $b-N_e$  関係 (DA=5%)

次に、堆積区分（沖積、洪積、埋立など）による液状化強度特性の違いを分析した結果を図-4に示す。繰返し三軸強度比  $R_L$  に等価なパラメータ  $a$  と  $N_e$  の関係を見ると、洪積土のパラメータ  $a$  が沖積土のそれと比べてやや大きめであることが分かる。しかし、定量的に評価するためには、さらにデータを蓄積する必要がある。

また、改良土の液状化強度特性についても、洪積土と同様に図-4に整理した。改良土のうち、特に杭間のデータについては、パラメータ  $a$  が沖積土と比べて明らかに増加していることが分かる。砂杭打設



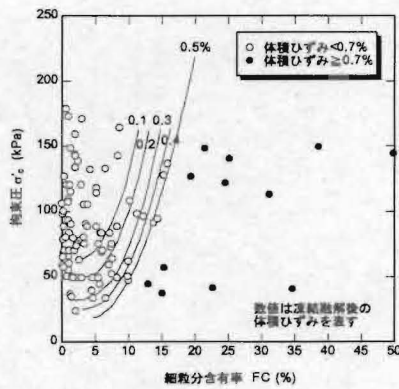


図-5 凍結・融解後の体積ひずみの影響範囲  
(文献8)に加筆

による地盤の改良効果が、密度増加による  $N_f$  の変化のみでなく、原位置で拘束圧（特に側圧）の増加の影響を受け、試験時に過圧密状態にあったため、沖積土との差が現れたものと考えられる。一方、砂杭については沖積土と比べてやや大きくなるものの、データが大きくなばらつきを有している。

### 3.2 各ひずみ振幅に対する $R-N_c$ 曲線の簡易推定式の提案

3.1に示した分析結果を踏まえ、細粒分含有率  $FC$  の小さな沖積砂質土、埋立土を対象とした  $R-N_c$  曲線の簡易推定法について検討を行った。細粒分含有率の小さなデータを対象としたのは、以下の理由による。

既往の研究では、凍結・融解後の体積ひずみと細粒分含有率  $FC$ 、拘束圧  $\sigma_c$  の関係が示されており<sup>8)</sup>、凍結・融解後の体積ひずみが0.7%以下であれば凍結による間隙水の体積膨張が液状化強度に及ぼす影響が小さいこと<sup>9)</sup>が知られている。凍結膨張による骨格の乱れの影響を受けたデータを避けるため、以降のデータ整理においては、凍結・融解後の体積ひずみが0.7%以内であると考えられるデータを検討対象とした。その結果を図-5に示す。

以上により抽出されたデータを2.2に示した方法で整理し、 $DA=1\%$ 、 $2\%$ 、 $5\%$ 、 $10\%$ に対するパラメータ  $a$ 、 $b$  と  $N_f$  の関係を式(2)により近似した。

$$a = c_1 N_f^{10} + c_2 N_f + c_3 \quad (2a)$$

$$b = c_4 e^{c_5 N_f} \quad (2b)$$

ここに、パラメータ  $c_1 \sim c_5$  は、表-2に示すように両

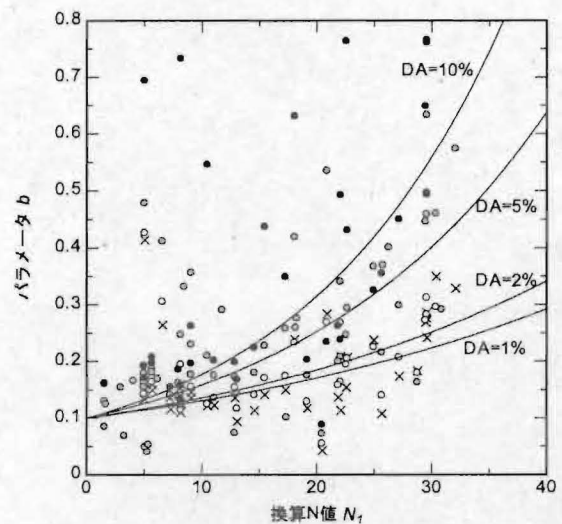
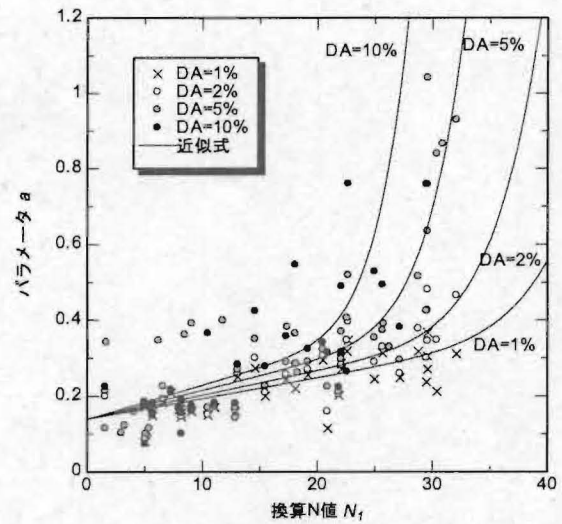


図-6 パラメータ  $a$ 、 $b-N_f$  関係とその近似

振幅ひずみ  $DA$  ごとに与えられる。近似結果を図-6に示す。

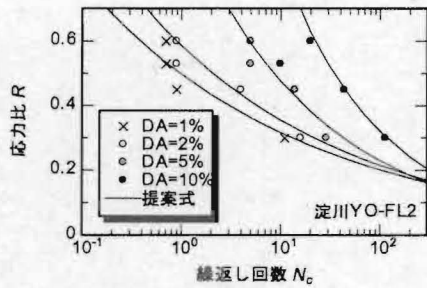
表-2 両振幅ひずみ  $DA$  ごとのパラメータ  $c_1 \sim c_5$

パラメータ	$DA=1\%$	$DA=2\%$	$DA=5\%$	$DA=10\%$
$c_1$	$1.9 \times 10^{-17}$	$9.0 \times 10^{-17}$	$5.6 \times 10^{-16}$	$2.8 \times 10^{-15}$
$c_2$	0.0054	0.0063	0.0076	0.0089
$c_3$	0.14	0.14	0.14	0.14
$c_4$	0.1	0.1	0.1	0.1
$c_5$	0.027	0.031	0.046	0.057

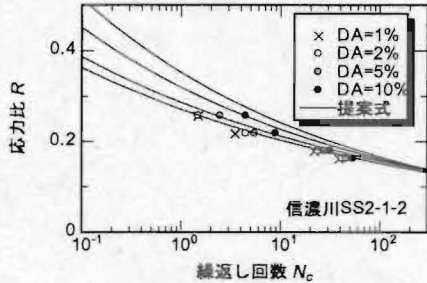
以上に示した式(1)、(2)および表-2のパラメータにより、各ひずみ振幅に対する  $R-N_c$  曲線を換算  $N$  値  $N_f$  から推定することができ、土の繰返し強度特性、ひずみ増加特性が評価される。前述のように、提案式は細粒分含有率  $FC \leq 10\%$  の沖積砂質土・埋立土に対して適用することができる。

なお、今回の提案式で平均的な  $R-N_c$  曲線を求めた





(a) 淀川 ( $N_T=25.0$ )



(b) 信濃川 ( $N_T=8.6$ )

図-7 提案式の適用例

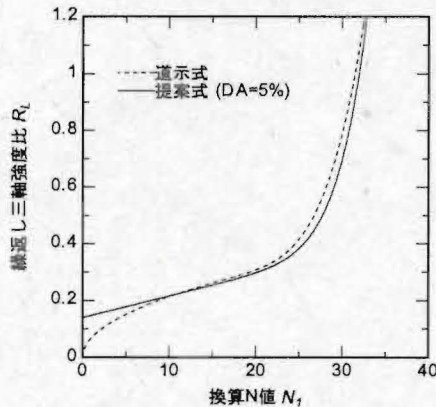


図-8 道示式と提案式の比較

ものであるが、試験結果のばらつきを分析し、 $R-N_c$  曲線を安全側に小さく評価するような推定式を提案することも考えられる。しかし、地盤材料のばらつきが大きいことに加え、液状化強度を過度に小さめに見込むことにより、地盤の変位量が大きめに算出される代わりに地盤の応答加速度が過小評価されるなど、 $R-N_c$  曲線を小さめに評価しておくことが必ずしも安全側の結果を与えるわけではないことから、本研究では、 $N$  値から推定される平均的な  $R-N_c$  曲線を与えることとした。

提案式による  $R-N_c$  曲線と実際の試験結果を比較した例を図-7に示す。換算  $N$  値  $N_1$  の大小関係によらず、提案式は試験結果をよく再現していることが分かる。なお、繰返し回数が 100 回を超える領域で、 $DA=5\%$  の  $R-N_c$  曲線より  $DA=10\%$  の  $R-N_c$  曲線の方が小さくなるなど、提案式による  $R-N_c$  曲線の大小関係

が逆転することがあるが、実際の地震で 100 回以上の繰返し回数を考える必要はないことから、実用上は問題ない。

次に、現行の道路橋示方書<sup>10)</sup>で用いられている  $N$  値に基づく繰返し三軸強度比  $R_L$  を推定するための式(8) (以下、道示式という) を  $DA=5\%$  に対する提案式と比較する。

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{N_a/1.7} & (N_a \leq 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \cdot 10^{-6}(N_a - 14)^{4.5} & (14 < N_a) \end{cases} \quad (3)$$

前述のように、繰返し三軸強度比  $R_L$  は  $DA=5\%$  に対するパラメータ  $a$  と等価である。 $N_a$  は補正  $N$  値であり、細粒分含有率  $FC < 10\%$  の砂質土に対しては換算  $N$  値  $N_1$  と等しい。

道示式と提案式の関係は図-8のとおりであり、 $N_1$  が 10 を超える部分ではほぼ整合していることが分かる。 $N_1$  が 5 以下の小さな部分で差が生じているが、道示式のうち  $N_a \leq 14$  の部分は、 $N_1$  が小さくなるにつれて  $R_L$  もゼロに近づくのに対し、図-6からも分かるように、実際の土は  $N_1$  が小さくなくても  $R_L$  がゼロに近づくわけではない。

ただし、従来の液状化判定法 ( $F_L$  法) によって液状化発生の有無を判定する目的においては、式(8)を用いることは妥当であると考えられる。これは、 $N$  値の小さな緩い砂質土層では剛性低下やひずみ増加が顕著となり、設計上の安全余裕を十分に見込む必要があるためである。

#### 4. まとめ

本研究では、既往の液状化試験結果を収集・整理してデータベースを作成するとともに、液状化土の力学特性に及ぼす影響要因の分析、地盤調査結果との相関関係に関する分析を行った。結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 土木研究所他で過去に実施された 170 試料の凍結試料の液状化試験結果を収集し、データベースを作成した。室内土質試験の結果に加え、標準貫入試験などによる原位置地盤調査結果も合わせて整理した。
- (2) 作成したデータベースに基づき、液状化土の物性に関する分析を行った結果として、礫質土の液状化強度特性が大きくなばらつきを有すること、洪積土や改良土の繰返し三軸強度比が沖積土の



それと比べてやや大きいことを明らかにした。一方、細粒分含有率  $FC$  による  $R-N_c$  関係の違いは、データが少ないことにより有意な差が認められず、その影響の解明には課題が残された。

- (3) 細粒分含有率  $FC < 10\%$  の沖積砂質土・埋立土を対象とし、両振幅ひずみ  $DA = 1\%, 2\%, 5\%, 10\%$  に対する  $R-N_c$  曲線を整理し、標準貫入試験から得られる換算  $N$  値に基づく簡易推定法を提案した。

その他、液状化地盤における強震観測事例から液状化土のせん断ひずみ、剛性低下率を推定し<sup>12)</sup>、等価線形解析に適用することについても検討を行った<sup>13)</sup>が、液状化層の剛性低下率が解析結果に与える感度が高く、特に地震動が大きい場合などに安定解を得られないことから、その適用が困難であるが明らかとなった。

今後は、土の液状化強度特性に及ぼす細粒分の影響を解明するなど、提案式の適用範囲のさらなる拡大を図るとともに、提案式を用いた有効応力解析を行い、さらなる検証を進めていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課: 河川構造物の耐震性能照査指針 (案)・同解説 - II. 堤防編一, 2007.3
- 2) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ (代表 岡二三夫): LIQCA2D04 (2004 年公開版) 資料, 2004
- 3) Iai, S., Matsunaga, Y. & Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.6
- 4) 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手法, *土木学会論文集*, No.638/III-49, pp.71-89, 1999
- 5) 松尾修, 村田健司: 砂質土の試料採取法による液状化抵抗の違い, 第 32 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.711-712, 1997
- 6) 時松孝次, 大原淳良: 凍結サンプリング, *土と基礎*, Vol.38, No.11, pp.61-68, 1999
- 7) Kokuho, T. & Yoshida, Y.: SPT-N value and S-wave velocity for gravelly soils with different grain sizes distribution, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.4, pp.105-113, 1997
- 8) 佐藤雅宏, 辰井俊美, 時松孝次: 凍結における細粒分含有率の影響 (その 2), 第 23 回土質工学研究発表会, pp.1057-1070, 1987
- 9) 後藤茂, 吉見吉昭: 砂質土の原位置凍結試料の液状化強度に及ぼす凍結融解の影響とそれを踏まえた原位

置液状化強度の評価法, サンプリングに関するシンポジウム発表論文集, pp.63-70, 1995

- 10) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説、丸善、2002.3.
- 11) 石原雅規, 杉田秀樹: 現位置凍結サンプリング試料による液状化強度曲線の簡易推定式に関する検討, 第 60 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2005.9
- 12) 谷本俊輔, 杉田秀樹, 高橋章浩: 種々の強震観測事例における液状化層の最大せん断ひずみに関する等価線形解析, 第 41 回地盤工学研究発表会, 2006.7
- 13) 谷本俊輔, 杉田秀樹, 高橋章浩: 液状化地盤に対する等価線形解析の適用性に関する検討, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, 2006.11