

◆ 特集：最近の地震対策技術 ◆

# 土構造物の地震時変形照査に用いる 液状化土の地盤定数の簡易推定法

谷本俊輔\* 杉田秀樹\*\* 佐々木哲也\*\*\*

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

レベル2地震動に対する土構造物の耐震設計では、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。一般に、自然材料から構成される土構造物の地震時挙動は十分に解明されておらず、変形解析には困難を伴う場合があるが、新設の重要構造物や既存構造物の耐震対策の検討などの場面において、変形量に基づいた照査が行われる機会が増えつつある。例えば、河川堤防はレベル2地震動に対して、地震後も河川の流水を河川外へ越流させないという機能を確保すべく、地震後の堤防高さが耐震性能の照査において考慮する外水位を下回らないことを照査するため、堤体および基礎地盤を対象とした地盤変形解析が行われる<sup>1)</sup>。

近年、液状化に関する様々な変形解析手法<sup>2)~4)</sup>が提案されているが、これらの手法で適切な解析結果を得るためには、液状化土の力学特性を適切に表現する必要がある。しかし、液状化土の力学特性を調べるための不攪乱試料の採取は一般に困難ないしは高価であるため、地盤調査結果から簡易に液状化土の特性を評価する手法の開発が望まれている。また、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原位置不攪乱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、液状化土の様々な力学特性を表す繰返しせん断応力比  $R$  - 繰返し回数  $N_c$  関係に関する統計的な分析を行い、土の粒度等との関係や標準貫入試験結果に基づく簡易推

定法について検討した。

### 1.2 $R-N_c$ 曲線とその物理的意味

液状化土の力学特性を調べるためには、非排水繰返し三軸試験、非排水繰返し中空ねじり試験といった室内土質試験が行われる。これら液状化試験では、原地盤から採取した供試体に対して規則的なせん断応力振幅を繰返し与え、発生したひずみ振幅や過剰間隙水圧比が所定の値となるなど、ある特定の状態に達したときの繰返し回数が結果として得られる。これを複数の供試体（一般に4供試体程度）に対して行い、同じ状態となったときのせん断応力振幅と繰返し回数の関係を図-1のように結んだ曲線は、土の液状化に関するいくつかの重要な特性を表す。本報ではこれを  $R-N_c$

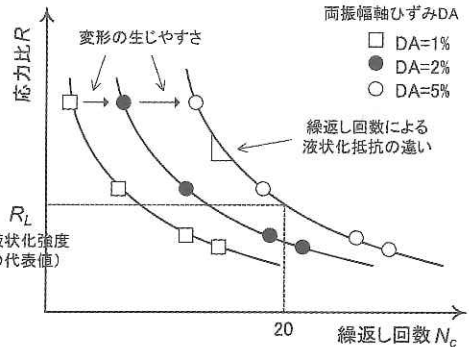


図-1 液状化試験で得られる土の  $R-N_c$  関係

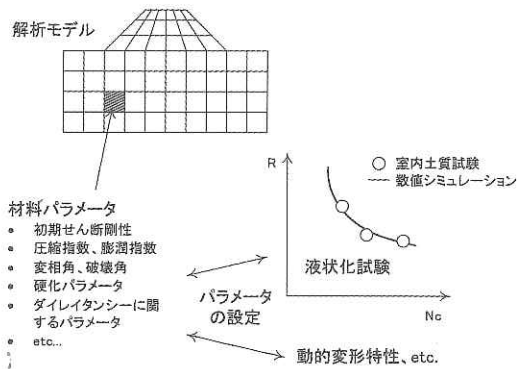


図-2 土構造物の変形解析におけるパラメータ設定方法のイメージ

Estimating Method of  $R-N_c$  Curve of Liquefied Soils for the Deformation-Based Seismic Design of Soil Structures

曲線と呼んでいる。ここに、 $R$  は応力比（繰返しせん断応力と有効拘束圧の比）、 $N_c$  は繰返し回数を表す。

$R - N_c$  曲線の持つ物理的な意味について考える。例えば、道路橋示方書<sup>5)</sup>において、20回の繰返し载荷によって両振幅軸ひずみ  $DA = 5\%$  に達する応力比は繰返し三軸強度比  $R_L$  と呼ばれ、液状化に対する土の強度を代表する値として簡易液状化判定法 ( $F_L$  法) などにおいて活用されている。 $R - N_c$  曲線の傾きは繰返し回数による液状化抵抗の違いを表す。道路橋示方書では、繰返し回数による土の液状化強度の違いを地震動特性による補正係数  $c_w$  という簡単な形で評価している<sup>6),7)</sup>。また、各ひずみ振幅に対する  $R - N_c$  曲線の間隔は、液状化した土の変形の進展しやすさを表し、それらの間隔が狭いほど変形が急激に進展しやすさ。このように、液状化試験から得られる  $R - N_c$  関係は、液状化土の力学特性について多くの有用な情報を与えている。

従来の実務設計において液状化の発生の有無を判定するにあたっては、上記の  $R_L$ 、 $c_w$  といった指標のみが用いられてきた。しかし、液状化が生じる地盤・土構造物の変形解析を行うためには、 $R - N_c$  関係が与えるような詳細な力学特性を可能な限り忠実に表現する必要がある。例えば、有効応力解析の場合、土要素の非線形材料構成モデルに与える数多くの入力パラメータを決定する際に、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パラメータを設定する (図-2)。そのため、パラメータ設定にあたっての要素シミュレーションを行う際には、 $R_L$  のような  $R - N_c$  曲線のうちの1点だけでなく、その勾配や変形のしやすさなども含めて参照する必要がある。本研究では、そのような詳細解析におけるパラメータ設定にあたっての目安となる  $R - N_c$  曲線を簡便に推定する方法を提案することを目的としている。

## 2. 検討方法

### 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

原位置の土の液状化特性を液状化試験で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>8)</sup>。最も乱れの影響を受け

表-1 分析対象としたデータの内訳

土質区分	堆積区分			
	沖積土	洪積土	埋立土	改良土
砂	49	16	18	28
砂 礫	18	4	0	0
シルト・粘土	0	0	0	0

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>9)</sup> 法がある。凍結サンプリング法とは、周辺地盤を凍結させた状態で試料を採取することにより、採取時に試料が受ける乱れの影響を排除し、高品質の原位置試料を採取する方法である。本研究では、土木研究所他<sup>10)~12)</sup> など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 (採取深度、堆積区分、有効上載圧など)
- ・原位置試験データ (標準貫入試験結果、PS検層結果、標準貫入試験試料の粒度分布など)
- ・物理試験データ (室内土質試験試料の粒度分布など)
- ・液状化試験データ (両ひずみ振幅  $DA = 1\%$ 、 $2\%$ 、 $5\%$ 、 $10\%$  に対する  $R - N_c$  関係など)

データベースに記載された試料は全170試料である。そのうち、 $N$  値と有効上載圧が既知であり、かつ繰返し三軸試験が行われた133試料のデータを分析対象とした。分析対象とした133試料を土質区分、堆積区分で分類すると、試料数は表-1のとおりである。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。

### 2.2 データ整理の方法

液状化試験結果から  $R - N_c$  関係を整理する方法について述べる。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。

$$R = a(N_c/20)^{-b} \quad (1)$$

ここに、 $a$ 、 $b$  はフィッティングパラメータである。パラメータ  $a$  は液状化強度を代表する値であり、繰返し回数  $N_c$  が20回で正規化されていることから、特に両振幅軸ひずみ  $DA = 5\%$  の場合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

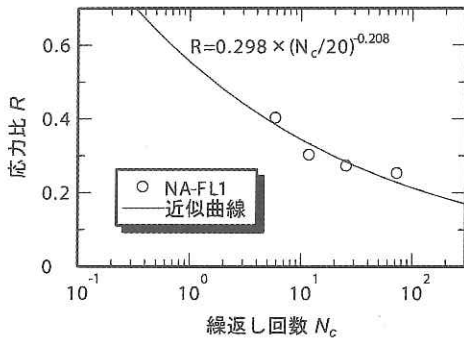


図-3 R-Nc関係の近似の例

(1) による  $R-N_c$  関係の近似の例を図-3に示す。このような近似を全試料に対して行い、パラメータ  $a$ 、 $b$  に影響を及ぼす各種要因について分析した。ここで、分析の対象とした  $R-N_c$  曲線は  $DA = 1\%$ 、 $2\%$ 、 $5\%$  および  $10\%$  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  $R-N_c$  曲線を、土の相対密度と関連の深い換算  $N$  値  $N_1$  との関係で整理することを試みた。ここに、換算  $N$  値  $N_1$  は、 $N$  値と有効上載圧  $\sigma'_{v0}$  (kPa) から次式により算出される。

$$N_1 = 170N / (\sigma'_{v0} + 70) \quad (2)$$

### 3. $R-N_c$ 関係の分析結果

#### 3.1 粒度の影響

まず、各試料の  $DA = 5\%$  に対する  $R-N_c$  曲線に関するパラメータ  $a$ 、 $b$  と換算  $N$  値  $N_1$  の関係を、砂質土と礫質土について図-4に比較する。これによれば、礫質土では明らかにばらつきが大きく、 $a-N_1$ 、 $b-N_1$  関係を近似するのは困難であると考えられる。これは、礫質土においては標準貫入試験における打撃回数が大きくばらつくこと、礫質土の力学特性がわずかな密度の差で大きく変化し、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、 $a-N_1$ 、 $b-N_1$  関係には右上がりの相関関係が認められ、密な砂ほど液状化強度が大きくなるという一般的な傾向が見られる。

なお、本報では省略するが、土の粒度の影響として、細粒分含有率  $FC$  が  $a-N_1$ 、 $b-N_1$  関係に及ぼす影響についても検討し、 $a-N_1$  関係

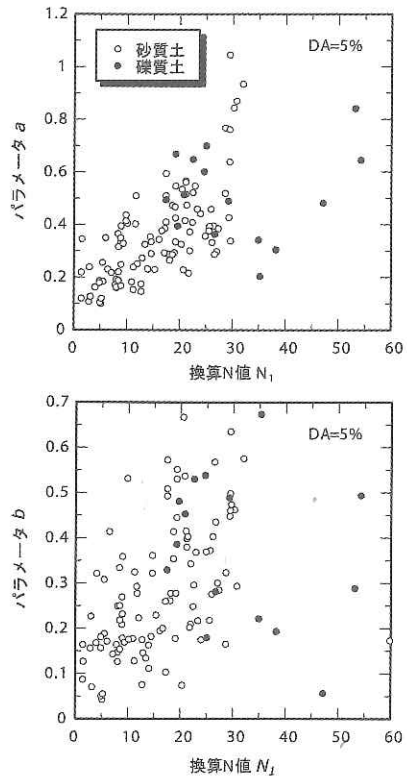


図-4 砂質土と礫質土の  $a-N_1$ 、 $b-N_1$  関係

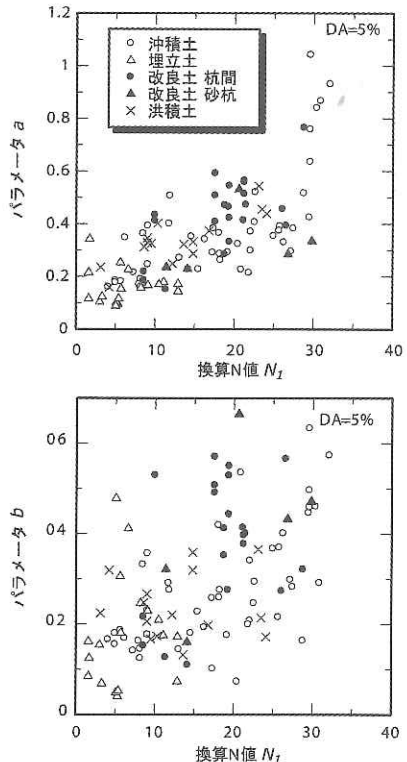


図-5 堆積区分ごとの  $a-N_1$ 、 $b-N_1$  関係

がFCによってわずかに増加する傾向が見られたものの、データ数が少なく、定量的な整理には至らなかった。また、細粒分を含む土の凍結試験は、凍結時の間隙水の体積膨張に伴い、土の骨格が乱れの影響を受けた可能性があるため、試験データの精度についてもさらなる議論の余地がある。

### 3.2 堆積年代の影響

データベースでは、堆積年代を表す指標として、各試料を沖積土、洪積土、埋立土または改良土に区分(以下、堆積区分という)している。堆積年代が古い洪積土は、続成作用によるセメンテーションの効果や過圧密の影響により、液状化強度が大きいと考えられている。また、埋立地盤や改良地盤は、沖積地盤よりもさらに堆積年代が新しく、液状化強度が小さいと考えられている。これら堆積区分ごとの $R-N_c$ 関係を図-5に比較する。

沖積土と洪積土を比較すると、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、パラメータ $b$ も含めて定量的に評価するためには、さらにデータの蓄積が必要である。

埋立土は沖積土と比べて $N_1$ 値が小さいものが多いという特徴を有するが、 $a-N_1$ 、 $b-N_1$ 関係は沖積土と同様に扱うことができそうである。

改良土のうち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。その原因の一つとして、砂杭打設による地盤の改良効果が、密度増加による $N_1$ 値の変化のみでなく、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ことが考えられる。一方、改良土のうち砂杭については、沖積土と同様の傾向を示すものの、データ数が少なく、データのばらつきが大きいいため、定量的に評価するためにはさらなるデータの蓄積が必要である。

### 3.3 沖積砂質土の $R-N_c$ 曲線の推定式

以上の分析結果に基づき、沖積砂質土と傾向が類似するデータを選定した上で、 $N_1$ 値と $R-N_c$ 曲線の関係式を導く。本研究では、沖積砂質土と傾向が類似するデータとして、細粒分含有率 $FC < 10\%$ の沖積地盤、埋立地盤における砂質土を選定した。

抽出したデータの $DA = 1\%$ 、 $2\%$ 、 $5\%$ 、 $10\%$ に対する $a-N_1$ 関係、 $b-N_1$ 関係とそれらを近

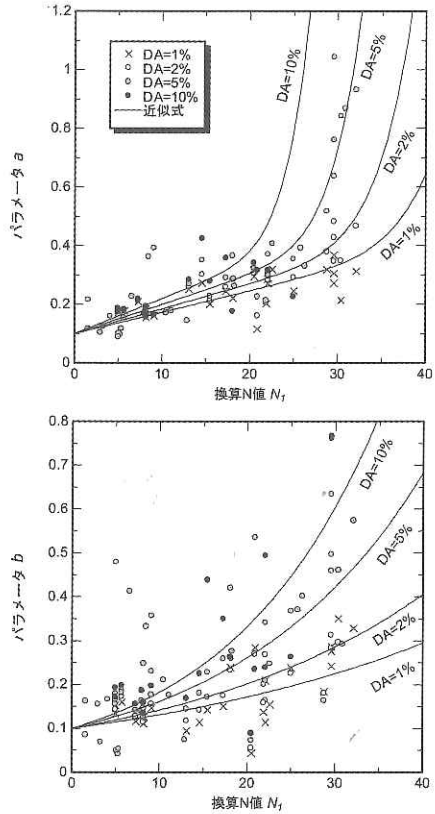


図-6  $a-N_1$ 、 $b-N_1$ 関係の近似結果

似した結果を図-6、近似式を式(3)～(6)に示す。なお、近似式は試験データの平均値を与えるものである。

< DA = 1% >

$$a = 2.4 \times 10^{-17} N_1^{10} + 0.0073N_1 + 0.1 \quad (3a)$$

$$b = 0.10e^{0.027N_1} \quad (3b)$$

< DA = 2% >

$$a = 1.1 \times 10^{-16} N_1^{10} + 0.0085N_1 + 0.1 \quad (4a)$$

$$b = 0.10e^{0.035N_1} \quad (4b)$$

< DA = 5% >

$$a = 5.6 \times 10^{-16} N_1^{10} + 0.010N_1 + 0.1 \quad (5a)$$

$$b = 0.10e^{0.048N_1} \quad (5b)$$

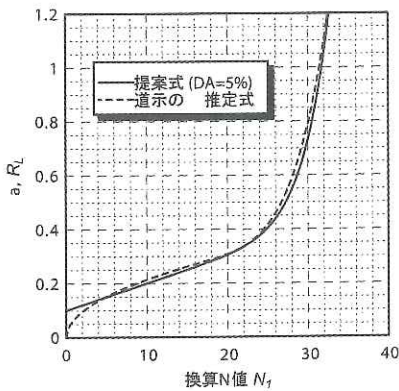


図-7 提案した  $a-N_1$  関係式 ( $DA = 5\%$ ) と道示の  $R_L$  推定式

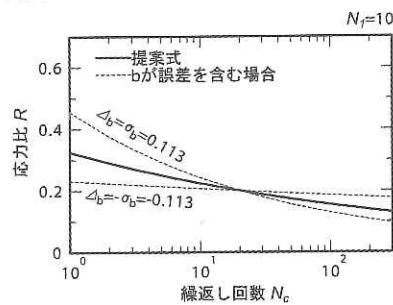


図-8  $b$  の推定誤差が応力比  $R$  に及ぼす影響

<  $DA = 10\%$  >

$$a = 4.1 \times 10^{-15} N_1^{10} + 0.012N_1 + 0.1 \quad (6a)$$

$$b = 0.10e^{0.060N_1} \quad (6b)$$

砂質土の液状化強度に関する既往の研究<sup>6), 13)</sup>によれば、換算  $N$  値  $N_1$  がどんなに小さくても、繰返し三軸強度比  $R_L$  が 0.1 を下回るものはほとんど見られない。そのため、 $a-N_1$  関係の近似にあたっては、 $a$  の下限値をひずみ振幅によらず 0.1 と仮定している。道路橋示方書の  $R_L-N_1$  関係式と式 (4a) を比較した図-7 によれば、 $N_1$  が 3 程度以下の範囲を除き、両者はほぼ一致している。

パラメータ  $b$  については、試験結果のばらつきが大きいので、提案式によるパラメータ  $b$  の推定誤差の影響を調べておく。 $DA = 5\%$  に対する  $b$  の計算値と試験データの差の標準偏差  $\sigma_b$  は 0.113 であった。提案式による  $b$  に推定誤差  $\Delta b$  が含まれている場合の  $R-N_c$  曲線の算定例を図-8 に示す。誤差  $\Delta b = \pm 1a_b$  の場合、繰返し回数 8.5 ~ 45 回の範囲では応力比の誤差が  $\pm 10\%$  以内、繰

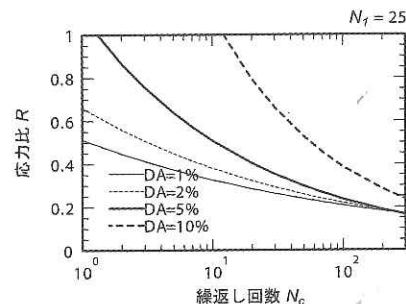
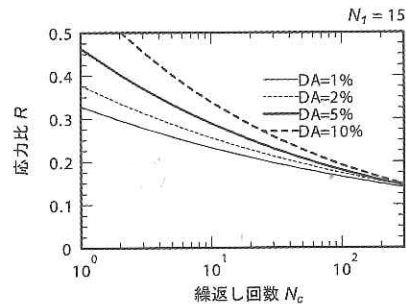
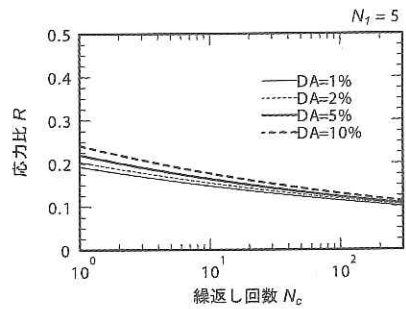


図-9 提案式による  $R-N_c$  曲線の算出例

返し回数 4 ~ 100 回の範囲では応力比の誤差が  $\pm 20\%$  以内となることが分かる。なお、同図は  $N_1 = 10$  の場合の例を示しているが、上記の誤差の大きさは  $N_1$  値の大きさによらず一定である。どの程度の誤差が許容されるかについては、今後、構造物ごとに変形解析の事例を積み重ねることによってはじめて明らかとなるが、パラメータ  $b$  の推定誤差が  $R-N_c$  曲線に及ぼす影響はさほど大きくないことが分かる。

提案式により  $R-N_c$  曲線を算定した例を図-9 に示す。換算  $N$  値  $N_1$  が大きくなるほど、 $R-N_c$  曲線の勾配が大きくなり、ひずみ振幅による繰返し回数の差が大きくなっている。これは、密な砂ほど液状化に対するねばりを有し、ひずみが増加しにくくなるという一般的な性質をよく表現している。なお、繰返し回数が 100 回を超える範囲において、 $DA = 2\%$  と  $DA = 5\%$

の  $R-N_c$  曲線が交差するなど、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。

#### 4. まとめ

本研究では、我が国で得られた多くの凍結試料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、液状化土の様々な力学特性を表す  $R-N_c$  曲線について、影響を及ぼす要因の分析を行った。その分析結果に基づき、沖積地盤、埋立地盤における細粒分含有率  $FC < 10\%$  の砂質土を対象とし、標準貫入試験の  $N$  値から各種ひずみ振幅に対する  $R-N_c$  曲線を簡便に推定する方法を提案した。

土構造物の地震時変形解析において、提案式から得られる液状化土の  $R-N_c$  曲線を参照しながら地盤定数を設定することにより、液状化土の力学特性を簡便かつ精度よく評価した上で耐震性能の照査を行うことが可能となる。

#### 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 -, [http://www.mlit.go.jp/river/wf\\_environment/structure/](http://www.mlit.go.jp/river/wf_environment/structure/), 2007.3
- 2) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. & Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999
- 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) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設

計編, 2002

- 6) 松尾 修：道路橋示方書における地盤の液状化判定法の現状と今後の課題、土木学会論文集, No.757/III-66, pp.1-20, 2004
- 7) 東 拓生、田村敬一、二宮嘉朗：地震動波形の繰返し特性を考慮した液状化判定法に関する研究、第58回土木学会年次学術講演会講演概要集, III-A98, pp.196-197, 1996
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 建設省建築研究所：砂礫地盤の原位置液状化強度の評価法に関する研究、建築研究報告, No.133, 1993.9
- 11) (財)電力中央研究所：1993年北海道南西沖地震における礫地盤液状化の原因解明（その1）-地盤調査・試験と液状化判定-, 電力中央研究所報告, U94007, 1994.7
- 12) 運輸省港湾技術研究所：ゆるい砂地盤における地震時の間隙水圧の観測と解析、港湾技研資料, No.718, 1991.12
- 13) 龍岡文夫、岩崎敏男、常田賢一：N値-有効拘束圧-平均粒径を用いた飽和砂質土の非排水動的強度の簡易推定法、第13回土質工学研究発表会, pp.477-480, 1978.6

谷本俊輔\*



独立行政法人土木研究所つくば  
中央研究所耐震研究グループ振  
動チーム研究員  
Shunsuke TANIMOTO

杉田秀樹\*\*



独立行政法人土木研究所つくば  
中央研究所耐震研究グループ振  
動チーム上席研究員, 工博  
Dr. Hideki SUGITA

佐々木哲也\*\*\*



独立行政法人土木研究所つくば  
中央研究所耐震研究グループ振  
動チーム主任研究員, 工修  
Tetsuya SASAKI