

砂の液状化強度に与える長期圧密の影響

地盤工学研究室 白井 翔也

指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

1.1 研究背景

土の液状化強度に影響を与える要因は密度、細粒含有率、飽和度、拘束圧など様々な要因がある。その中でも、地盤が堆積年代を経ることによって液状化強度が上昇する現象のことを、年代効果(aging)と呼ぶ。年代効果の影響が現れた災害として、近年では2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震や2010年から2011年にニュージーランドで発生した一連の地震が挙げられる。これらの地震により、大規模な液状化や再液状化による被害が多数報告された^{1),2),3),4)}。この報告によると、同じ埋立地盤でも施工年代の違いにより被害程度に差がみられ、施工から数百年経過した古い埋立地盤では、年代効果の影響により液状化強度が大きくなることが知られている⁵⁾。しかし、数百年程度では砂質土の固結がそれほど進行しているとは考えられず、年代効果のメカニズムや学術的背景は明らかとなっておらず、年代効果を考慮した液状化強度推定手法は確立されていない。

したがって、液状化被害の削減および被害軽減を目的とし、年代効果を考慮した液状化強度推定手法の確立が重要な課題となっている。

1.2 研究目的

本研究では、年代効果のメカニズムを明らかにするため、圧密時間を変化させた飽和砂供試体に対して飽和非排水繰返し三軸試験、ベンダーエレメント(以下、BEと称す)試験および静的貫入試験を実施した。これより、液状化強度とせん断波速度の圧密時間効果の発現、貫入抵抗値の強度変化を調査し、長期圧密させた液状化

強度のメカニズムについて検討する。

また、長期圧密により得られた繰返し载荷回数 N_c から、液状化強度曲線の予測を行い、得られた液状化強度比 R_L と通常圧密の R_L との比を取り、長期圧密に関する液状化強度比を算出する。また、既往研究である Tatsuoka ら⁶⁾の結果も同様に液状化強度比の予測を行う。これらの結果より、液状化強度増加を推測し、予測した液状化強度から、仮想地盤における液状化予測判定を実施する。

2. 試験方法

2.1 使用試料

試料は、標準砂である豊浦砂を全試験で用いた。豊浦砂の粒径加積曲線および土粒子密度 ρ_s を Fig. 1 に併せて示す。また、豊浦砂の物理特性を Table. 1 に示す。

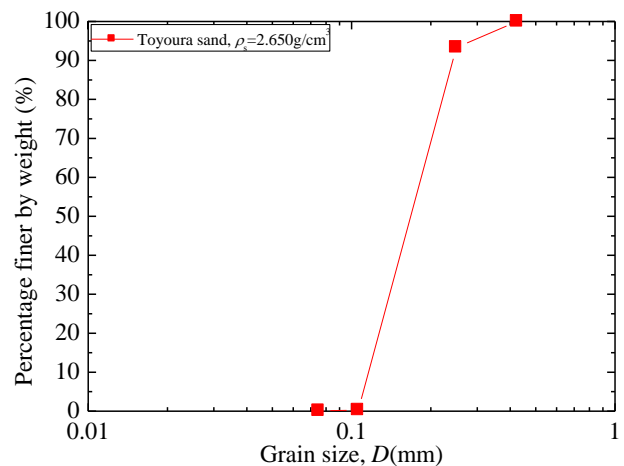


Fig. 1 豊浦砂の粒径加積曲線

Table. 1 豊浦砂の物理特性

	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	最小乾燥密度 $\rho_{dmin}(g/cm^3)$	50%粒径 $D_{50}(mm)$	均等係数 U_c	曲率係数 U'_c
豊浦砂	1.645	1.335	0.18	1.58	0.86

2.2 飽和非排水繰返し三軸試験

本研究で用いた三軸試験装置の模式図を Fig. 2 に示す. 供試体は気乾状態の試料を用い, 高さ $H=123\text{mm}$, 直径 $D=50\text{mm}$ のモールドで漏斗堆積法により作製した. 本研究では, 供試体を長期圧密させるため, これに準じた試験方法を用い, 背圧を作用させていない⁷⁾. 二重負圧法により供試体の飽和化を促進して通水した後, 間隙圧係数 B 値 >0.95 であることを確認し, 平均有効主応力 $p'=50\text{kPa}$ により等方圧密後, 軸ひずみ速度 0.1mm/min のひずみ速度で所定の繰返し片振幅 σ_d を設定し, 繰返し载荷を行った. また, 1 日以上 of 圧密時間を要する場合, 供試体内への空気の進入を防ぐため, 二重セルを設置してその中に脱気水を入れ, 油により封をしており, 飽和非排水繰返し三軸試験後に B 値が低下していないことも確認している.

なお, 両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ に達した時点に液状化したものとみなしている. 飽和非排水繰返し三軸試験条件を Table. 2 に示す

2.3 BE 試験

BEを用いた試験法は, 国内外を問わず様々な研究機関で使用されているが, せん断弾性波速度 V_s を決定するための BE 間距離の取り方, せん断波伝播時間の同定方法などは機関によって異なっている. 本研究では, 過去の採用実績をふまえ, 試験条件を Table. 3 のように設定した. BE 試験は, 飽和非排水繰返し三軸試験の圧密中および圧密後に適宜実施し, 供試体の V_s は次式で求めた. また, BE の模式図を Fig. 3 に示す.

$$V_s = \frac{L}{\Delta t} \quad (1)$$

ここで, V_s : せん断波速度(m/s), L : BE 間距離(m), Δt : せん断波到達時間(s)である. L は, 対となる BE 先端間距離をとる tip-to-tip 法を採用し, Δt は, 送受信波形の立ち上がり点を結ぶ start-to-start 法を用いて波形記録より同定した.

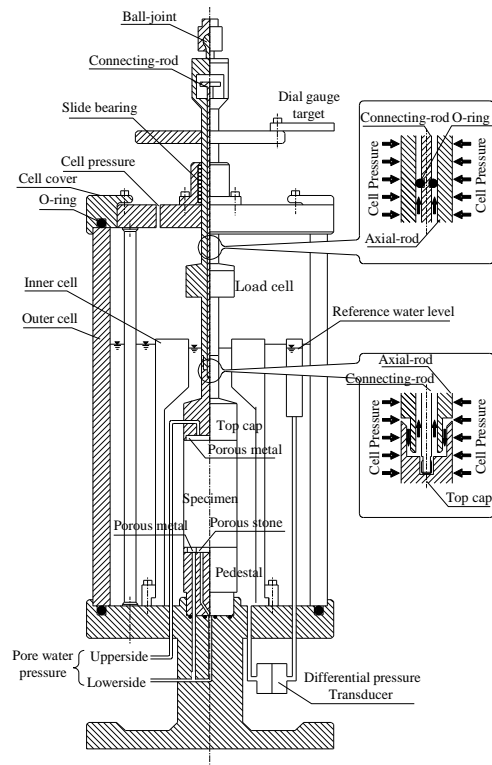


Fig. 2 三軸試験装置模式図

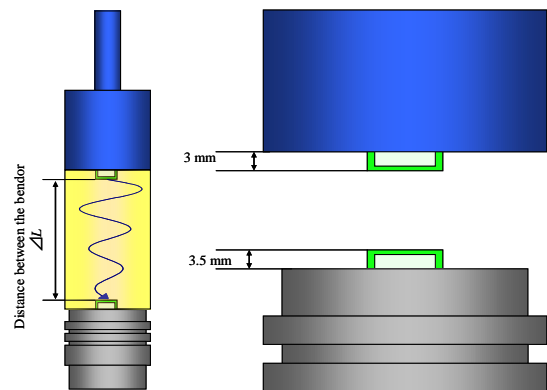


Fig. 3 BE の模式図

Table. 2 飽和非排水繰返し三軸試験条件

試料名	初期相対密度 $D_{r0}(\%)$	初期間隙比 e_0	圧密時間 t_c	設定繰返し片振幅 σ_d (kPa)
豊浦砂	40	0.835	通常, 1日, 3日, 7日, 14日, 28日	14

Table. 3 BE 試験条件

発信電圧(V)	±10
波形	sin波
波数	1波
発信周波数(kHz)	15

2.4 静的貫入試験

静的貫入試験は、高さ $H=123.5\text{mm}$ 、直径 $D=104\text{mm}$ のモールドで、漏斗体積法により作製した。供試体作製後、スペーサおよび錘を載せて上載圧 10kPa を載荷し、通水用水槽内に脱気水を入れ、モールド底面に設置してあるポーラスストーンを介して下方から通水・飽和させた。その後、貫入面がフラットな直径 10mm の貫入棒を $0.25\text{mm}/\text{min}$ の一定速度で貫入し、試験を実施した。なお、貫入抵抗値 q_c は、次式で求めた。静的貫入試験装置の模式図をFig. 4、試験条件をTable. 4にそれぞれ示す。

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \times 10^{-6} \quad (2)$$

ここで、 q_c ：貫入抵抗値(MPa)、 Q_c ：貫入力(N)、 A_c ：貫入棒断面積(m^2)である。

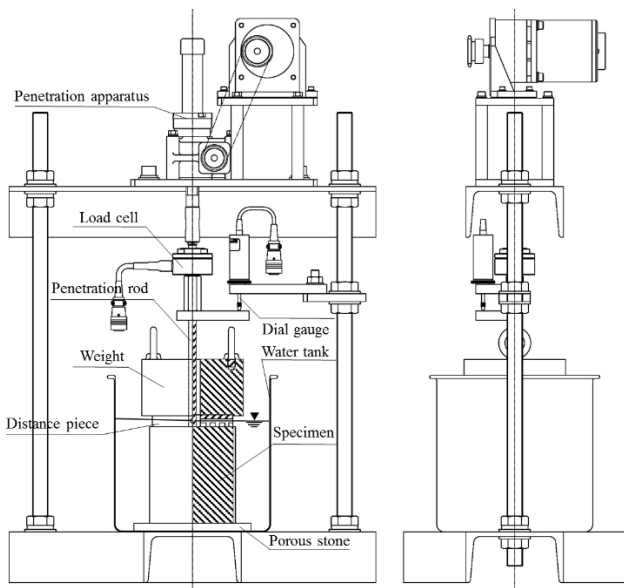


Fig. 4 静的貫入試験装置模式図

Table. 4 静的貫入試験条件

試料名	初期相対密度 $D_{r0}(\%)$	初期間隙比 e_0	養生時間 t_c
豊浦砂	40	0.835	通常, 1日, 3日, 7日, 14日, 28日

3. 試験結果および考察

3.1 圧密・養生時間の異なる豊浦砂の諸特性

3.1.1 液状化強度特性

豊浦砂の圧密時間を変化させて実施した飽和非排水繰返し三軸試験より得られた、圧密時間 t_c と繰返し載荷回数 N_c の関係をFig. 5に示す。また、プロット上の数字は、各圧密日数の試験回数を示している。

図より、通常圧密から7日圧密までの N_c はほぼ変化していないが、14日、28日圧密で急激に N_c が上昇していることがわかる。この結果、7日から28日圧密において、液状化強度増加の何らかの要因がある可能性が示唆される。

Tatsuoka ら⁶⁾の研究においても、豊浦砂の長期圧密による N_c が、1時間圧密と比較して1630時間(68日間)の期間で上昇していることが示されている。また、 $D_r=50$ 、80%の2種類の密度で比較を行っており、 $D_r=80\%$ の密な供試体と比較して、 $D_r=50\%$ の緩い供試体の方が長期圧密による N_c の変化が顕著であることが示されている。また、 $D_r=50\%$ の緩い供試体において、本研究と同等の繰返し応力振幅比に着目すると、1時間圧密と1630時間圧密の N_c は、1.3から12.6と多大に上昇しており、本研究の28日圧密よりも上昇量が大きくなっている。これより、今後更に長期間の圧密を実施することで、 N_c の上昇量が増える可能性が考えられる。

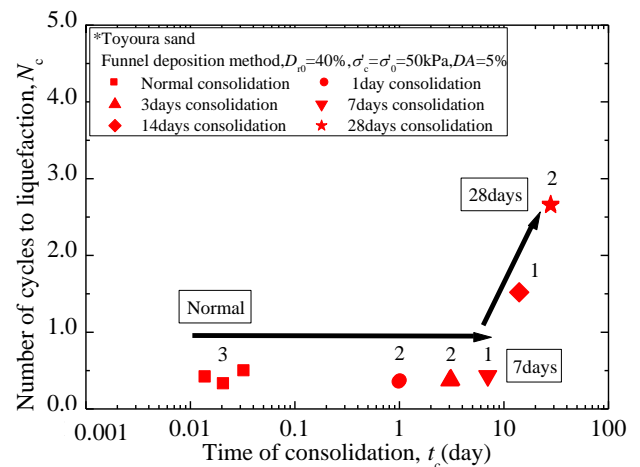


Fig. 5 豊浦砂の t_c と N_c の関係

3.1.2 せん断波速度伝播特性

14日、28日圧密における液状化強度の上昇メカニズムを解明するため、長期圧密中に適宜実施していたBE試験から得られたせん断波速度 V_s も液状化強度の上昇と同様の傾向となるのか検討する。14日、28日圧密の圧密時間におけるせん断波速度 V_s の推移をFig. 6に示す。

図より、14日、28日圧密ともに、 t_c の進展に伴う V_s の変化はほぼ見られず、液状化強度の上昇傾向とは異なる傾向を示した。これより、 V_s の変化から液状化強度の上昇要因を解明することはできなかった。

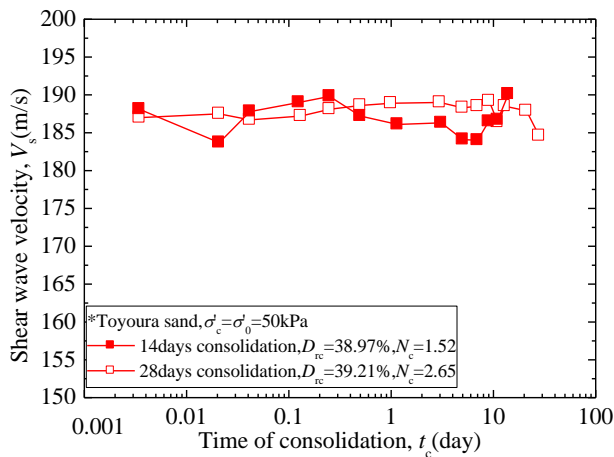


Fig. 6 豊浦砂の t_c と V_s の関係

3.1.3 静的貫入特性

14日、28日圧密における液状化強度の上昇メカニズムを解明するため、別途実施した静的貫入試験から得られる貫入抵抗値 q_c が、液状化強度の上昇と同様の傾向となるのか検討する。各養生時間における貫入抵抗値 q_c の推移をFig. 7に示す。

図より、養生時間の進展に伴う q_{c30} の上昇傾向は見られず、 V_s の結果と同様の傾向になった。しかし、養生時間が長期になるにしたがって q_{c30} の値に開きが見られているため、今後、試験結果の再現性を確認する必要がある。

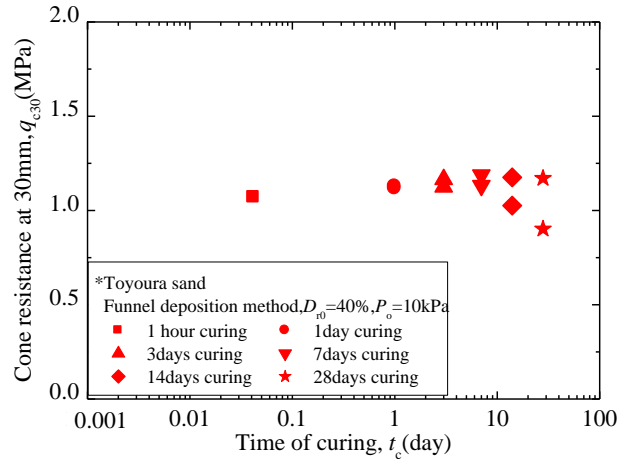


Fig. 7 豊浦砂の t_c と q_{c30} の関係

3.2 仮想豊浦砂地盤の予測液状化判定

3.2.1 豊浦砂の予測液状化強度曲線

14日、28日圧密において N_c の上昇が見られたため、上昇した N_c から両圧密日数における液状化強度曲線を予測し、得られた液状化強度比 R_L から液状化強度増加を推測することで、液状化予測判定を実施した。豊浦砂の予測液状化強度曲線をFig. 8に示す。なお、予測液状化強度曲線は、通常圧密における液状化強度曲線と同様の傾きになると仮定して描いた。また、液状化強度比 R_L は、両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ における繰返し载荷回数 $N_c=20$ 回で定義した。

図より、算出した14日、28日圧密の R_L は、それぞれ0.119、0.120となった。

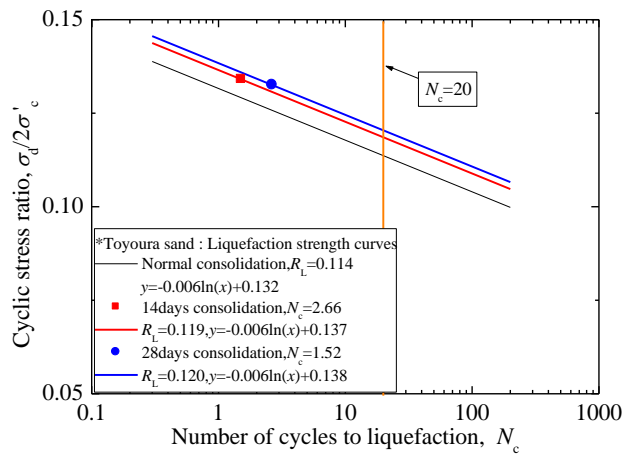


Fig. 8 豊浦砂の予測液状化強度曲線

3.2.2 豊浦砂の予測液状化強度増加

次に、前項で算出した R_L を用いて推測した液状化強度増加について述べる。得られた14日、28日圧密の R_L を通常圧密における R_L で除することにより（長期圧密液状化強度比と称す）、この値が時間の対数表示で直線的に上昇すると仮定して、1年後までの液状化強度を予測した。予測液状化強度増加を示したものをFig. 9に示す。また、 $D_r=50$ 、80%の豊浦砂において液状化試験を実施したTatsuokaら⁶⁾の研究結果と、その結果から推測された液状化強度増加も併記している。

前述したとおり、本研究は、14日圧密より液状化強度が増加しているが、Tatsuokaらの研究では、 $D_r=50$ %において2.67日から液状化強度が増加しており、強度増加発現時期に違いが見られた。しかし、Tatsuokaらの $D_r=80$ %の結果では、1時間から液状化強度の上昇が見られ、それ以降は比例的に上昇せずに横ばい傾向であった。これより、豊浦砂の年代効果は、密度の違いにより異なる強度発現時期、すなわち密な方が年代効果の発現時期が早く、ある密度以上になると液状化強度は比例的に上昇しない可能性が示されている。

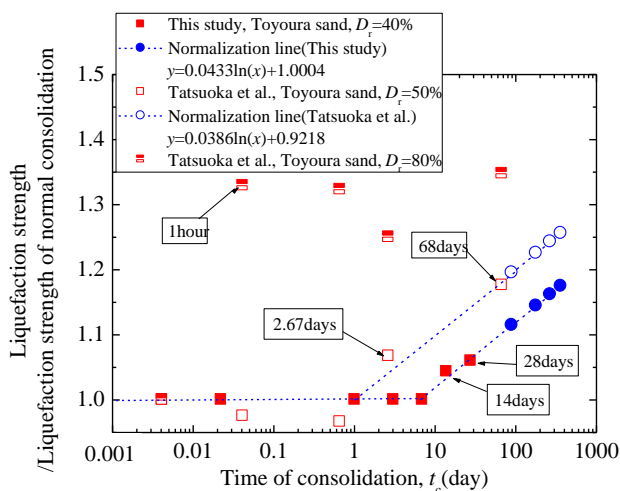


Fig. 9 豊浦砂の予測液状化強度増加

3.2.3 豊浦砂の液状化予測判定

次に、本研究結果の $D_r=40$ %とTatsuokaらの結果の $D_r=50$ %より得られた長期圧密による液状化強度増加を用い、 $D_r=40$ 、50%で造成された豊浦砂地盤を想定し、造成後100年後までの液状化予測判定を実施した。なお、液状化予測判定は、道路橋示方書⁸⁾に記載されている方法を用い、液状化抵抗率 $FL < 1.0$ となった時に液状化するものとしている。なお地震動として、レベル1地震動（新潟県を対象）を用いることとする。液状化判定条件をTable. 5に、液状化予測判定結果を、Fig. 10に示す。

レベル1地震動ではあるが、図より、 $D_r=40$ %では10年後、 $D_r=50$ %では90日で既に液状化しなくなると判定された。そのため、 $D_r=40$ 、50%のように緩い豊浦砂地盤でも、造成から10年経過することで液状化しなくなると予測される。

Table. 5 液状化判定条件

*道路橋示方書

対象試料	豊浦砂, $D_r=40,50$ %
対象地域	新潟県
地表面からの深さ	5m($p'=50$ kPaのため)

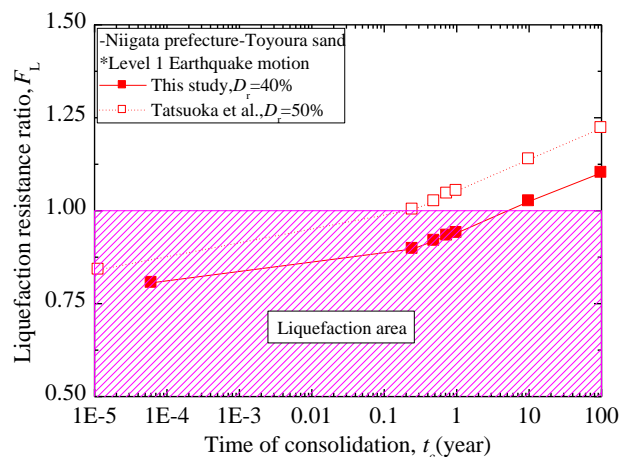


Fig. 10 仮想豊浦砂地盤の液状化予測判定

4. 本研究の結論

本研究では、豊浦砂を用いて、圧密時間の違いが地盤諸特性に与える影響について検討した。特に豊浦砂の液状化強度特性、せん断波速度伝播特性、静的貫入特性について比較・検討し、液状化強度特性を既往の研究と比較した。以下に、本研究より得られた主な知見を以下に示す。

(1)液状化強度特性

豊浦砂の長期圧密による繰返し載荷回数 N_c は、7日圧密まではほとんど変化せず、14日圧密以降において上昇することが確認された。そのため、7日圧密から14日圧密の期間で、何らかの要因が発生している可能性が考えられる。

(2)せん断波速度伝播特性

豊浦砂のせん断波速度 V_s は、圧密時間による違いがほぼ見られず、液状化強度上昇との関連は見られなかった。

(3)静的貫入特性

豊浦砂の貫入抵抗値 q_c は、養生時間による違いがほぼ見られず、液状化強度上昇との関連は見られなかった。

(4)液状化強度増加と液状化予測判定

長期圧密液状化強度比は、対数時間軸に対して、ほぼ直線的に増加していく。

$D_r=40$ 、50%の豊浦砂仮想地盤においてレベル1地震動で新潟県を対象に液状化予測判定を実施した。その結果、 $D_r=40\%$ では造成10年後、 $D_r=50\%$ では造成90日後で液状化しなくなると判定された。

本研究では、液状化強度の上昇メカニズムを解明することはできなかったため、今後、微小変形特性によるアプローチを試みるとともに、更に長期間圧密した豊浦砂の液状化強度特性を調べることで、地盤の年代効果を考慮した液状化強度推定手法の開発への貢献が期待される。

参考文献

- 1) Towhata, I., Maruyama, S., Kasuda, K., Koseki, J., Wakamatsu, K., Kiku, H., Kiyota, T., Yasuda, S., Taguchi, Y., Aoyama, S., Hayashida, T.: Liquefaction in the Kanto region during the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.54, No.4, pp.859-873, 2014.
- 2) 三輪滋, 筒井雅行, 本山寛, 池田隆明, 沼田淳紀: 2011年東北地方太平洋沖地震における関東地方の液状化被害調査, *土木学会論文集 A1*, Vol.68, No.4, pp.I_1250-I_1265, 2012.
- 3) 社団法人地盤工学会 ニュージーランド Darfield 地震災害緊急調査団: ニュージーランド Darfield 地震災害緊急調査団報告書, pp.1-30, 2010.
- 4) 社団法人地盤工学会 2011年 Christchurch 地震による被害に対する災害緊急調査団: 2011年ニュージーランド Christchurch 地震による被害に対する災害緊急調査団報告書, pp.1-39, 2011.
- 5) Yoshimi Y., Tokimatsu, K., Kaneko, O., Makihara, Y.: Undrained cyclic shear strength of a dense Niigata sand, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.4, pp.131-145, 1984.
- 6) Tatsuoka, F., Kato, H., Kimura, M. and Pradhan, T.B.S.: Liquefaction strength of sands subjected to sustained pressure, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.1, pp.119-131, 1988.
- 7) 白井翔也, 豊田浩史, 高田晋: 様々な細粒分を含む砂の液状化特性, 第32回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp.208-211, 2014.
- 8) 社団法人 日本道路協会編: 道路橋示方書・同解説(V耐震設計編), 2012.