

砂の液状化による過圧密効果の喪失について

地盤工学研究室 森田 雅也
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

一度液状化した緩い砂地盤は、その後、排水を伴って密になる。したがって、液状化した地盤は、液状化しにくくなると考えられる。しかし、実際には、過去に液状化した地盤が再液状化した事例が報告されている。その報告の中には、以前に液状化した地震よりも小さい地震で再液状化が発生した事例も示されている。例えば、1983年5月の日本海中部地震¹⁾、2003年5月の三陸南地震²⁾等で実例が報告されている。最近では、2011年2月のクライストチャーチ地震によって、2010年9月の地震と同じエリアで液状化が起きたと報告されている。さらに、若松は、液状化履歴地点約1万6500地点の中の150ヶ所で複数地震による繰返し液状化が発生したと報告している³⁾。このように、一度液状化が発生しても、必ずしも液状化しにくくなるとは言い切れない。

再液状化に関する既往の研究では、砂質土は液状化後、排水によって密度が増加したにもかかわらず、液状化前よりも著しく液状化しやすくなるという現象が Finn et al.⁴⁾ などによって示されている一方で、砂質土は液状化履歴を受ければ液状化しにくくなるという報告も存在する。飽和砂地盤における再液状化時の液状化特性を明らかにすることは、過去の地震による液状化の情報を有益に利用するためにも急務であるといえる。

飽和砂の再液状化のしやすさは、初回の液状化時に砂に生じるせん断ひずみの大きさ、液状化後の残留ひずみの大きさおよび砂の密度、排水条件などといった多くの因子が関与することが明らかになっている。しかし、応力履歴を考慮した再液状化に関する研究はこれまでにほとんどなされていない。原地盤は、実際には様々な応力履歴を受けているため、原地盤への有効な液状化対策方法を考える上では、応力履歴を考慮する必要性は高いといえる。

本論文では、上記の趣旨に基づき、液状化を起こす固結していない地盤のうち、過圧密履歴を受けた地盤を想定して室内試験を行い、再液状化時の液状化強度比 R_L を求めた。そして、過圧密履歴によって増加した R_L が、液状化試験時における平均有効主応力 p' の低下によってどのように変化するののかの実験的検討を行った。また、本論文では、土の物性値と関係性が高いせん断波速度 V_s にも着目し、過圧密履歴と V_s の関係についても検討を行った。

2. 実験概要

本研究では、豊浦砂を用い飽和非排水繰返し三軸圧縮試験とベンダーエレメント（以下、BE）試験を組み合わせる実験を行い、液状化強度比 R_L とせん断弾性波速度 V_s の相関関係を求め、過圧密履歴にも着目して研究を進めた。なお各応力ケースの試験手順については2.4で述べる。

2.1 供試体作製方法

砂試料供試体は、初期含水比 $w=5\%$ に調整した後、負圧法を用いて $\phi 5 \times 12.5 \text{cm}$ のモールド内で締固める（10層突き固め）方法によって所定の間隙比となるように作製した。なお、試料には豊浦砂を用い、粒径加積曲線および物性値を Fig.1 に示す。

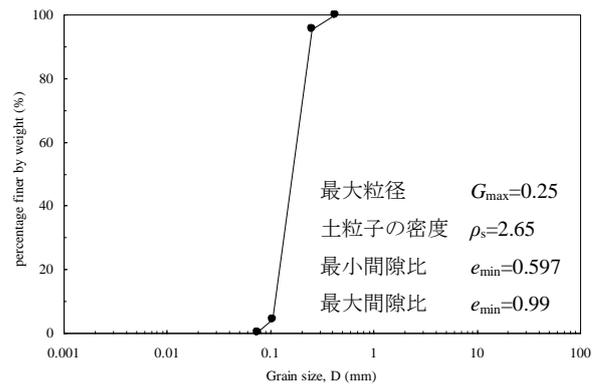


Fig. 1 豊浦砂の粒径加積曲線

2.2 飽和非排水繰返し三軸試験

飽和非排水繰返し三軸試験は、二重負圧のもと供試体下部から脱気水を通水し、平均有効主応力 $p'=50 \text{kPa}$ の状態で背圧 200kPa を載荷する方法で供試体の飽和化を促進させ、間隙圧係数 $B>0.96$ を確認した後、所定の圧密応力で等方圧密を行い、ひずみ制御のもと軸ひずみ速度 $0.1\%/min$ 、初期平均主応力 $p'=100 \text{kPa}$ で繰返しせん断する方法で行った。一回目の繰返し載荷は、片振幅応力 $\sigma_d'=30 \text{kPa}$ で行い、試験条件で示す所定の過剰間隙水圧比をおおよそ満足する、軸ひずみ $\epsilon_a=0$ に到達した時点で停止した後、平均有効主応力 $p'=100 \text{kPa}$ まで再び等方圧密を行った。また、二回目の繰返し載荷過程では軸ひずみ $DA=5\%$ に達した段階を液状化したものとみなし試験を終了することとした。なお、過圧密応力履歴を与える試験ケースについては、所定の圧密圧力で先

行圧密を行った後、排水除荷を行い排水量が定常状態に達した段階で繰返しせん断に移行することとした。なお試験条件を Table.1 に示す。

Table 1 飽和非排水繰返し三軸試験ケース

D_r (%)	OCR	過剰間隙水圧比
40	1	0.5
		0.7
	6	0.5
		0.7
		0.9
		1

2.3 BE 試験概要

本研究では、砂質土のせん断波速度 V_s を求めるため BE 試験を行った。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て、BE 試験によるせん断弾性波速度 V_s (m/sec) は次式で求めた。

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

ここで、BE 間距離 L は、対となる BE 先端間距離をとる tip-to-tip 法を採用した。また、せん断波到達時間 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することとした。さらに、せん断剛性 G_0 は次式で算定した。

$$G_0 = \rho_t \cdot V_s^2 \quad (2)$$

ここで、 ρ_t は土の湿潤密度である。

なお、BE 試験では、応力履歴が V_s に与える影響を調べた。

2.4 試験手順

本研究では豊浦砂を用いて飽和非排水繰返し三軸圧縮試験を行い、過圧密履歴を考慮した再液化化のメカニズムについて検討を試みた。また、試験過程（圧密後と除荷後、詳細は後述する）で BE 試験を行い、せん断弾性波速度 V_s を求めた。応力履歴の加え方により三軸試験機の制御方法および BE 試験を行うタイミングが異なるので試験手順フローを Fig. 2 に示す。

2.4.1 過圧密履歴を与える試験手順

OCR=1 のケースでは背圧載荷後に圧密圧力

$p'=100\text{kPa}$ まで上昇させ、排水量が安定したことを確認した後、繰返し載荷過程に移行した。OCR =6 のケースでは OCR =1 のケースと同様に圧密応力 $p'=100\text{kPa}$ まで上昇させ、排水量が安定したことを確認した後、圧密応力 $p'=600\text{kPa}$ まで上昇させた。その後、圧密応力を 100kPa まで除荷し、繰返し載荷過程に移行した。また、全てのケースの圧密後と除荷後に BE 試験を実施し、比較することにより過圧密履歴および繰返しせん断履歴が V_s に与える影響を調べた。

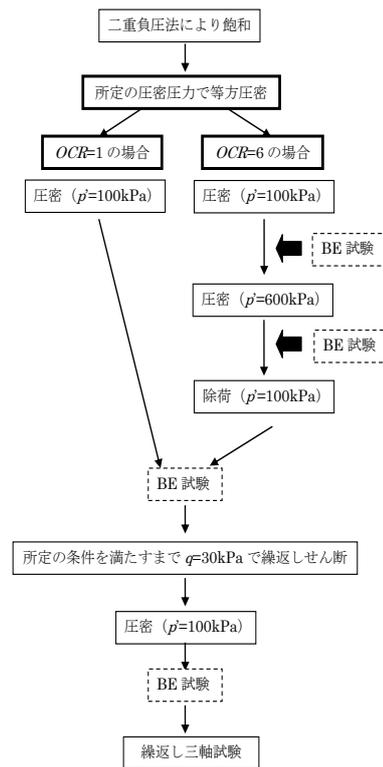


Fig. 2 試験手順フロー

2.4.2 繰返しせん断履歴を与える試験手順

繰返しせん断履歴を与える過程では、Table.1 に示した過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ に達するまで、偏差応力 $q=30\text{kPa}$ で繰返し非排水せん断を行い、その後、非排水状態で軸ひずみ $\epsilon_a=0$ の状態に戻った時点で停止した。ここで、繰返しせん断履歴を与える際の偏差応力 q が、大きすぎる場合には、急激に間隙水圧が上昇し、求めている条件下で試験を停止することが困難になる。一方で、偏差応力 q が小さすぎる場合には、試験に長時間を要してしまい、セル圧によってセル水に含まれる溶存空気がメンブレンを介して供試体内に混入し、飽和度が下がる危険性がある。そこで、本研究ではこの諸問題を発生させない適切な偏差応力として、 $q=30\text{kPa}$ を採用し、繰返しせん断履歴を与えることとした。繰返しせん断履歴を与

えた後は、再び $p'=100\text{kPa}$ で圧密排水し、前述と同様の液状化試験を実施した。ただし、 $OCR=1$ 、過剰間隙水圧比 0.7 では止められなかったため、 $q=20\text{kPa}$ で非排水繰返しせん断履歴を与えた。 $OCR=1$ のケースにおける、応力経路図、応力-ひずみ関係の例を **Fig. 3**、 $OCR=6$ のケースを **Fig. 4** に示し、 $OCR=6$ (過剰間隙水圧比 1.0) の液状化試験 ($q=30\text{kPa}$) の応力経路図と応力-ひずみ関係を **Fig. 5** に示す。

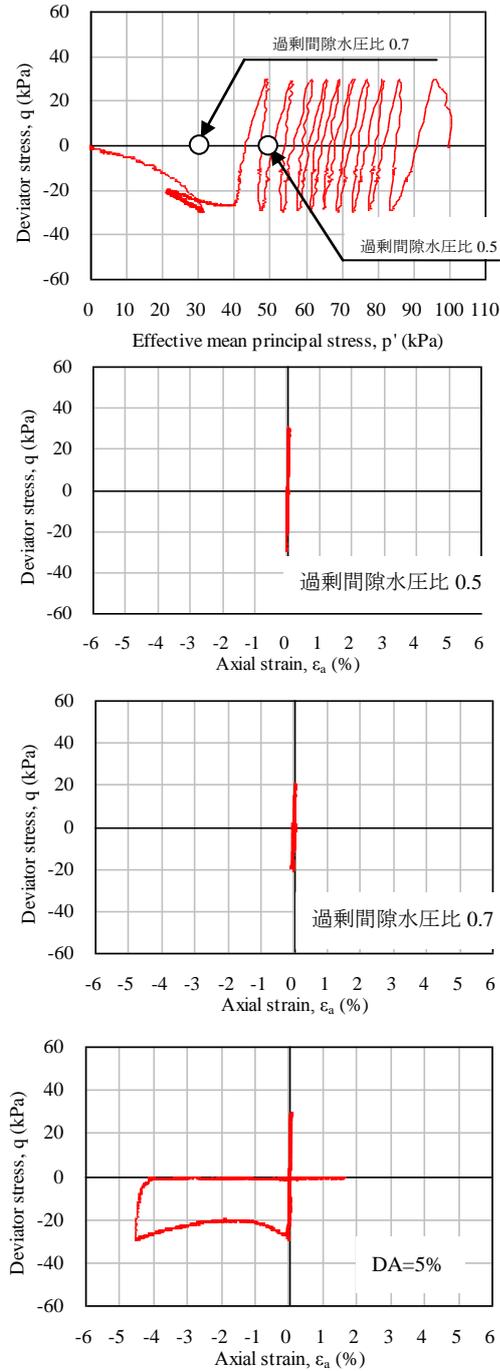


Fig. 3 $OCR=1$ の液状化試験結果($q=30\text{kPa}$) の応力経路 (応力経路図に、過剰間隙水圧比 0.5, 0.7 を記載) と応力-ひずみ

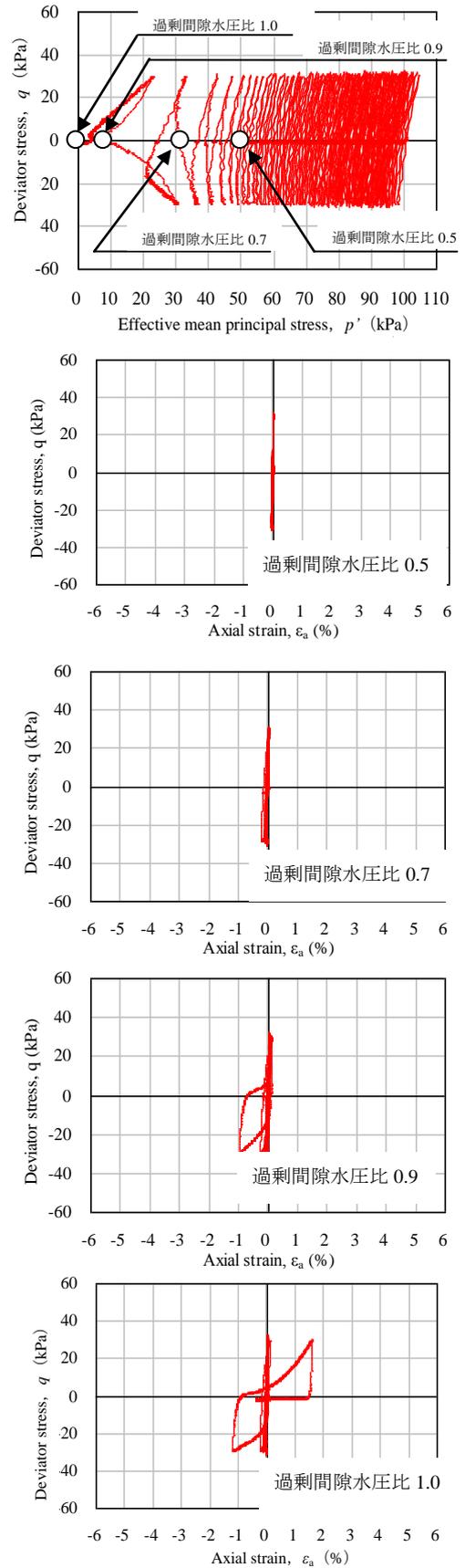


Fig. 4 $OCR=6$ の液状化試験結果($q=30\text{kPa}$) の応力経路 (応力経路図に、過剰間隙水圧比 0.5, 0.7, 0.9, 1.0 を記載) と応力-ひずみ

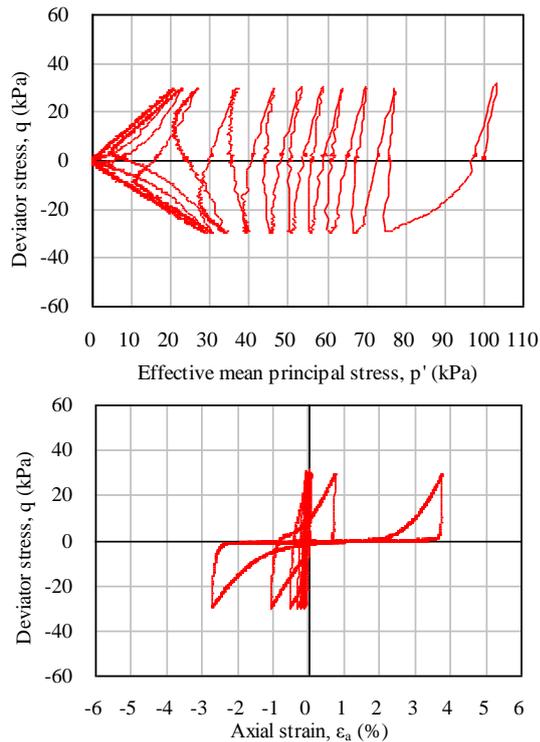


Fig. 5 OCR=6 (過剰間隙水圧比 1.0) の液状化試験結果($q=30\text{kPa}$) の応力経路図と応力-ひずみ

3. 試験結果

3.1 液状化強度曲線について

Fig. 6 は, $OCR=1$ のケースにおける飽和非排水繰返し試験の結果から得られた液状化強度曲線である。これより繰返し履歴を与えていない場合よりも液状化履歴を与えた方が, 液状化強度が大きくなっていることが分かる。

Fig. 7 は, $OCR=6$ のケースにおける飽和非排水繰返し試験の結果から得られた液状化強度曲線である。これより, 過剰間隙水圧比が 0.7 まで上昇した場合, 繰返し履歴を与えていない $OCR=6$ のケースと液状化強度はほぼ変わらず, 過剰間隙水圧比 0.7 以上上昇した場合, 過圧密履歴が喪失し, 液状化履歴を与えていない $OCR=1$ の液状化強度曲線よりも R_L が低下していることが分かる。

3.2 液状化強度比と相対密度の変化量について

Fig. 8 は, 各ケースにおける繰返し履歴付与時の過剰間隙水圧比と液状化強度比 R_L , 相対密度の変化量 ΔD_r の関係を示している。なお, 本研究において液状化強度比 R_L は軸方向ひずみ $DA=5\%$ における繰返し载荷回数 $N_c=20$ で定義している。これより, $OCR=6$ のケースでは, 繰返し履歴を与えることで相対密度は増加していくにもかかわらず液状化強度比 R_L は減少していくことが分かる。また, Fig. 3, Fig.

5 の応力経路図からは, 過剰間隙水圧比 0.6 程度までは $OCR=1$ (繰返し履歴なし) と, $OCR=6$ (過剰間隙水圧比 1.0) の液状化試験結果は近い結果となっている。しかし, それ以降のひずみの進展は, $OCR=6$ (過剰間隙水圧比 1.0) のケースが遅くなっており, 液状化することにより密になった効果が出ているようにも思われる。液状化強度曲線においては, 密になっているにもかかわらず, $OCR=1$ (繰返し履歴なし) のケースより若干小さくなっていることより, 液状化履歴は過圧密効果を喪失させるだけでなく, さらに液状化強度を低下させる要因があることを示唆している。

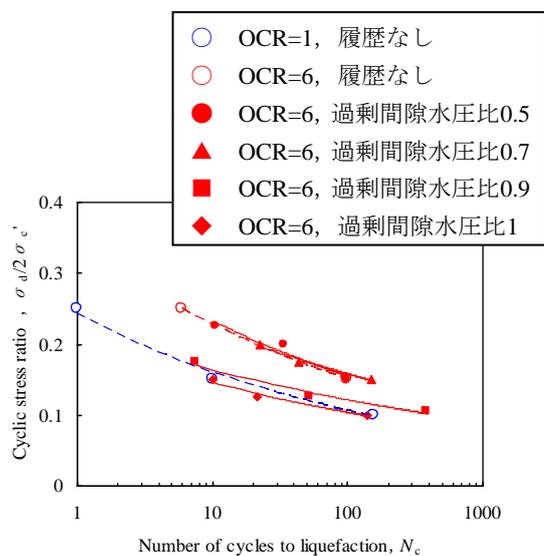


Fig. 6 液状化強度曲線 ($OCR=6$)

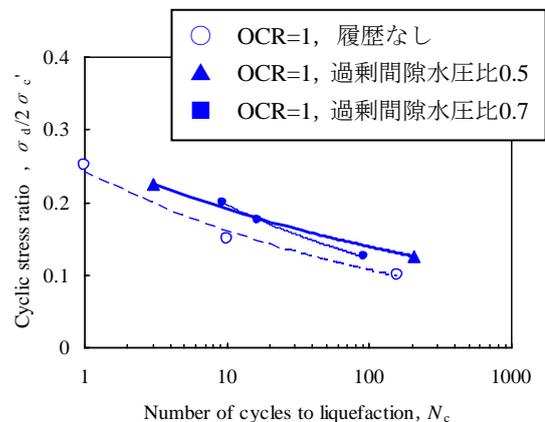


Fig. 7 液状化強度曲線 ($OCR=1$)

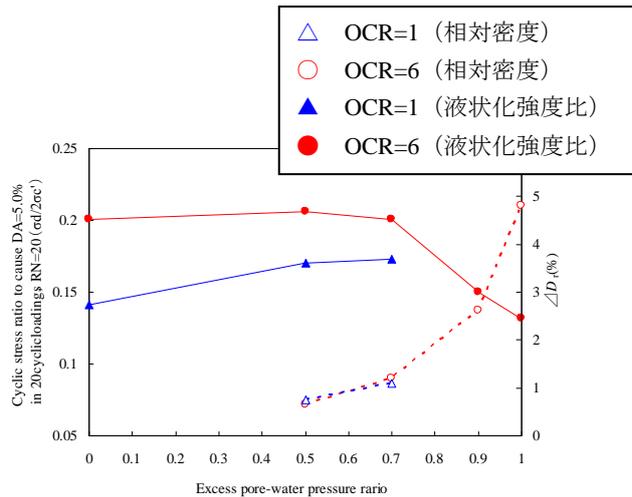


Fig. 8 過剰間隙水圧比—液状化強度比, 相対密度関

4. 液状化強度比低下の要因について

4.1 検討方法

本研究では、繰返し履歴により密度が増加しているにもかかわらず液状化強度比が低下する要因として、土粒子の堆積構造に着目した。そこで、漏斗引き上げによる方法で液状化試験を行い、液状化強度比を求めた。この結果を湿潤締め固め法による液状化試験結果と比較することにより、液状化強度比に与える堆積構造の影響を検討した。

4.2 漏斗引き上げによる方法

- ① モールド底面部中央に漏斗を立て、漏斗の中に砂試料を入れる
- ② 漏斗を一定の速さで鉛直に引き上げ、モールドの上端面全周から試料をあふれさせる
- ③ モールドの上端面の縁にナイフを乗せ、すばやく滑らせ一気に余盛り部分を除去する

4.3 液状化試験結果

Fig. 9 は、湿潤締め固め法と漏斗引き上げによる方法で作製した供試体を使用して、OCR=1 のもとで飽和非排水繰返し試験の結果から得られた液状化強度曲線である。

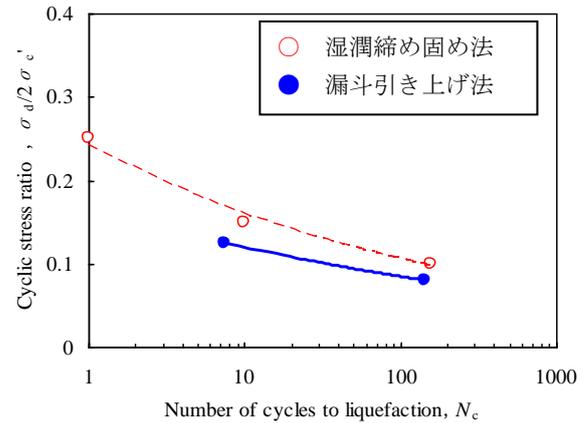


Fig. 9 作製方法別の液状化強度曲線

湿潤締め固め法により作製した供試体は、液状化試験直前の相対密度 $D_r=42.7\%$ で、 $R_L=0.141$ となり、漏斗引き上げにより作製した供試体は、 $D_r=42.0\%$ で $R_L=0.104$ となった。これより、同程度の密度であっても堆積構造によって液状化強度比は異なることが分かった。

5. 本研究の結論

本研究で得られた知見を以下に述べる。

1. 正規圧密砂は、繰返し履歴が小さいときには液状化強度比は増加する。
2. 過圧密履歴砂 (OCR=6) は、過剰間隙水圧比が 0.7 よりも上昇すると過圧密効果を喪失する。
3. 繰返し履歴を与え、過圧密効果を喪失した砂は、密になっているにもかかわらず液状化強度は低下する。これは、繰返し履歴を強く受けた場合、過圧密効果を喪失するだけでなく、土粒子が液状化抵抗の小さい堆積構造に変化しているためである。

参考文献

- 1) Yasuda, S. and Tohno, I.: Sites of reliquefaction caused by the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.2, pp.61-72, 1998.
- 2) 地盤工学会：2003 年三陸南地震・宮城県北部地震災害報告書, 2003.
- 3) 若松加寿江：2009年までの最新データによる再液状化地点および液状化発生の限界震央距離の検討, 第46回地盤工学発表会, pp. 1721-1722, 2011
- 4) Finn, W. D. L., Bransby P. L. and Pickering D. J.: Effects of strain history on liquefaction of sand, *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, Vol.96, No.6, pp. 1917-1934, 1970.