

応力履歴を与えた砂質土のせん断波速度と液状化強度の関連について

地盤工学研究室 松岡知弥
指導教員 豊田浩史

1. はじめに

低コストかつ非破壊で地盤構造を求めることができる波動伝播特性を利用した表面波探査試験（以下、RWI 試験）が近年注目を集めている。この試験から得られるせん断弾性波速度 V_s は N 値や土の物性値と関係性の高いパラメータであるため、その関係を活用した健全度評価システムの開発が進められている。特に、液状化被害が発生した地域を中心に RWI 試験を実施し、液状化被害とせん断弾性波速度関係図から予測される液状化判定結果と比較して、液状化危険度評価手法の適用性を検討する研究が進められており^{1,2)}、液状化予測手法の適用性に関する検討は、大規模な地震に備えて急務であるといえる。本来、砂地盤において原位置の液状化強度を求めるためには、不攪乱試料を凍結サンプリングする必要があるが、調査費用が高いことが問題となっており、凍結サンプリングに替わる簡便かつ安価な調査手法が模索されている。液状化強度は既往の研究より、密度や拘束圧（土被り圧、 K_0 値）、過去の履歴（過圧密、せん断履歴、異方圧密）、堆積年代効果などに影響することが明らかにされている。一方で、 V_s は間隙比や拘束圧に依存していることが既往の研究より明らかにされているが、応力履歴によって V_s にどれだけの影響をもたらすかという研究報告はほとんどない。

本研究では、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、応力履歴（過圧密履歴、せん断履歴、異方圧密）を受けた地盤を想定して室内試験を行い、 V_s と液状化強度比 R_L の関係を求めた。そして、応力履歴が V_s に影響するのか、また、 V_s は液状化予測手法の判断材料として有用であるかの実験的検討を行った。

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 の相関関係を求めることを目的とし、応力履歴（過圧密履歴、せん断履歴、異方圧密）に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。

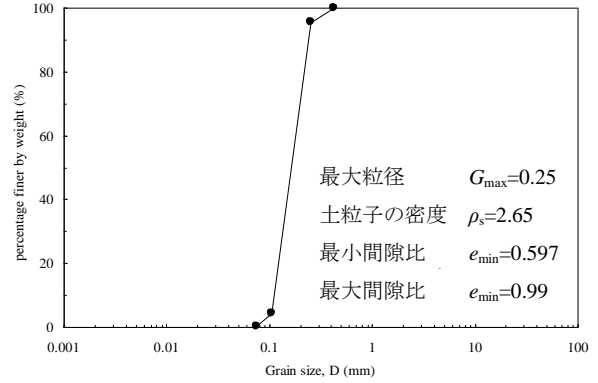


Fig. 1 豊浦砂の粒径加積曲線

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。また、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、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、応力を載荷、その後に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

応力履歴のケース	初期相対密度 D_r (%)	過圧密比 OCR	備考	
等方圧密	40	1, 2, 6		
	60	1, 2		
	75			
せん断履歴	$q=75 \text{kPa}$ $q=100 \text{kPa}$	40	1	K=0.5
異方圧密	40	2		

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 を用いた試験方法は、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 間の距離の取り方、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おり、現在は基準化が検討されているところである。本研究では、過去の採用実績をふまえ³⁾、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 試験は応力履歴を与えない初期状態と応力載荷状態および応力を除荷した状態で行い、応力履歴が V_s に与える影響を調べた。

2.4 試験手順

2.4.1 過圧密履歴を与える試験手順

過圧密履歴を与える試験手順フローを Fig. 2 に示し、OCR=2 の試験ケースの軸差応力 q - 平均有効主応力 p' の関係を示した応力履歴経路図を Fig. 3 に示す。OCR=1 のケースでは背圧載荷後に $p'=100\text{kPa}$ 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=2 のケースでは OCR=1 のケースと同様に $p'=100\text{kPa}$ まで上昇させ、排水量が安定してことを確認した後、 $p'=200\text{kPa}$ まで上昇させた。その後、 p' を 100kPa まで除荷して、繰返し載荷過程に移行した。

OCR =6 のケースでは OCR =1, 2 のケースと同様に $p'=100\text{kPa}$ まで上昇させ、排水量が安定してことを確認した後、 $p'=600\text{kPa}$ まで上昇させた。その後、 p' を 100kPa まで除荷して、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が V_s に与える影響を調べた。

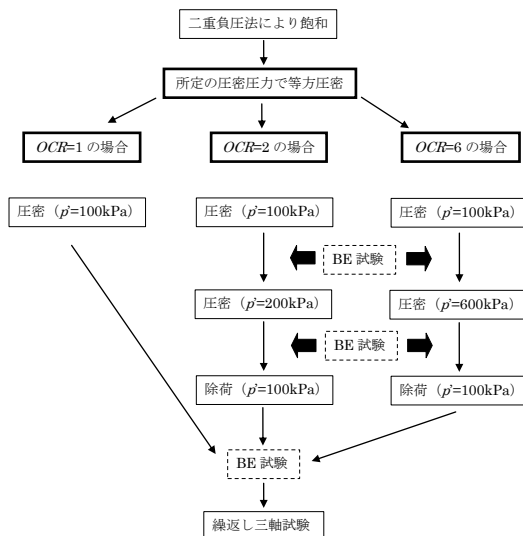


Fig. 2 過圧密を与える試験手順

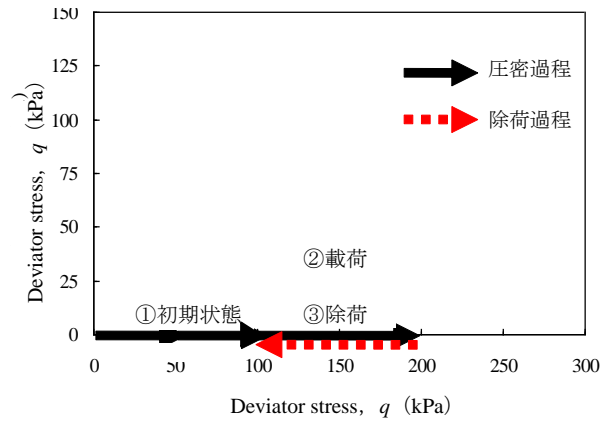


Fig. 2 応力履歴経路図

2.4.2 せん断履歴を与える試験手順

本研究では三軸試験機の制御方法を変えることにより 2 種類のせん断履歴（軸差応力 $q=75\text{kPa}$, $q=100\text{kPa}$ ）を供試体を与えた。その試験手順フローを Fig. 3 に示す。

a) せん断履歴 (p' 一定) の場合

はじめに、応力履歴経路図を Fig. 4 に示す。軸差応力 $q=75\text{kPa}$ を与える場合ではまず、 $p'=100\text{kPa}$ で等方圧密した後に BE 試験を実施する。その後 $p'=100\text{kPa}$ を維持したまま q が 75kPa になるまで載荷 ($K=0.5$ となる) し、BE 試験を実施する。次に q が 0kPa ($K=1$) になるまで除荷、BE 試験を実施し、繰返し三軸試験を行った。

b) せん断履歴 (セル圧一定) の場合

はじめに、応力履歴経路図を Fig. 5 に示す。軸差応力 $q=100\text{kPa}$ を与える場合ではまず、 $p'=100\text{kPa}$ で等方圧密した後に BE 試験を実施する。その後、セル圧を一定で q を 100kPa になるまで単調載荷して ($K=0.5$ となる)、BE 試験を実施する。次に q が 0kPa になるまでセル圧一定で単調除荷して、BE 試験を実施し、繰返し三軸試験を行った。

2.4.3 異方圧密を与える試験手順

異方圧密で履歴を与える試験手順フローは Fig. 6 に示し、応力履歴経路図を Fig. 7 に示す。まず、 $p'=50\text{kPa}$ で等方圧密して、その後、 $p'=50\text{kPa}$ を維持したまま軸差応力 $q=38\text{kPa}$ を載荷して $K=0.5$ とする。次に $K=0.5$ を維持したまま $p'=100\text{kPa}$ まで圧密して、BE 試験を実施する。次に $K=0.5$ を維持したまま $p'=200\text{kPa}$ まで圧密して BE 試験を実施する。次に $K=0.5$ を維持したまま $p'=100\text{kPa}$ まで除荷して BE 試験を実施する。そして q を 0kPa になるまで除荷して ($K=1$)、BE 試験、繰返し三軸試験を行うという流れで行った。

3. 試験結果

3.1 液状化強度曲線について

Fig. 8 に過圧密履歴を与えた場合、Fig. 9 にせん断履歴を与えたケースおよび異方圧密で履歴を与えたケースの軸方向ひずみ $DA=5\%$ のときの繰返しせん断応力比 $\sigma_d'/2\sigma_c'$ と繰返し載荷回数 N_c の関係を示す。

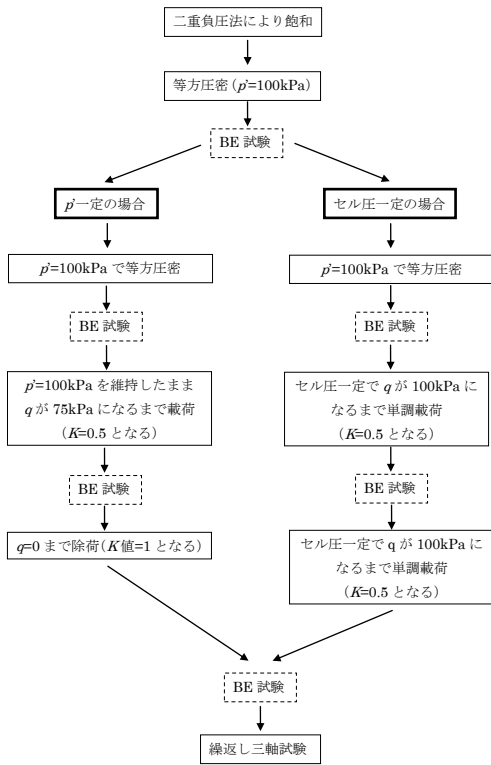


Fig. 3 せん断履歴を与える試験手順

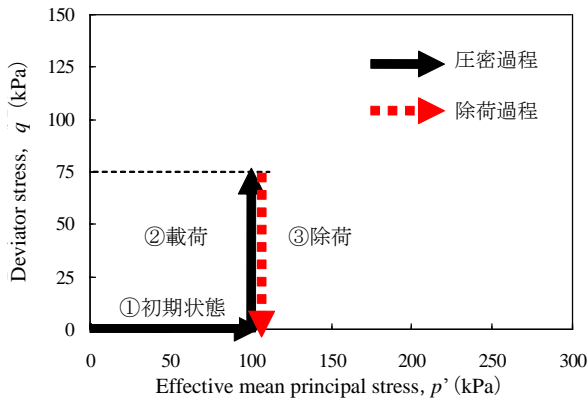


Fig. 4 応力履歴経路図 ($q=75\text{kPa}$)

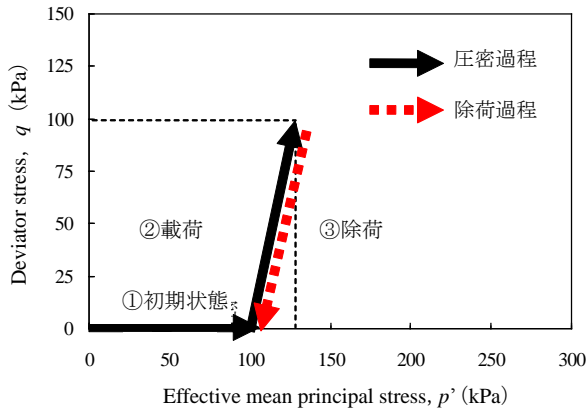


Fig. 5 応力履歴経路図 ($q=100\text{kPa}$)

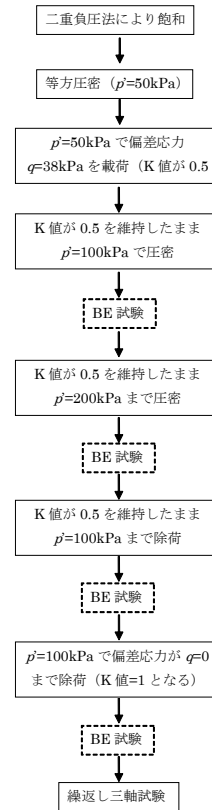


Fig. 6 異方圧密で応力履歴を与える試験手順

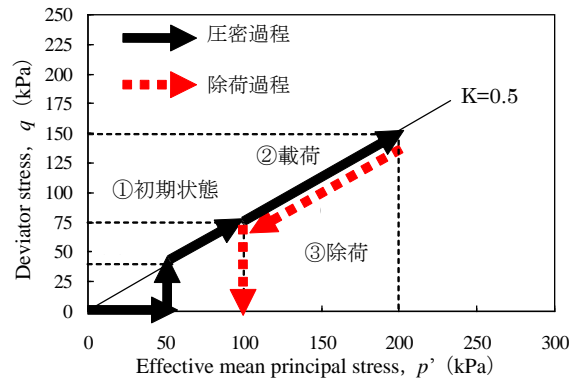


Fig. 7 応力履歴経路図

Fig. 8 からは D_r が大きいと液状化強度比が高くなることが確認できる。これは D_r が大きいと供試体が密詰め状態となり土粒子の噛み合わせが強くなるためである。また、同じ D_r の場合でも過圧密状態を経ることによって液状化強度比が高くなることが確認できる。これは過圧密状態を経ることによって土粒子の噛み合わせが強くなり強度に反映しているからである。また、今回の実験結果は既往の研究結果と同様の傾向が確認できた。

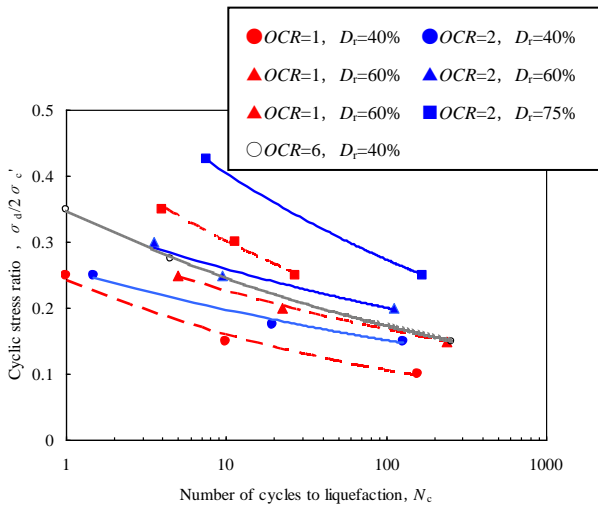


Fig. 8 液状化強度曲線 (DA=5%)

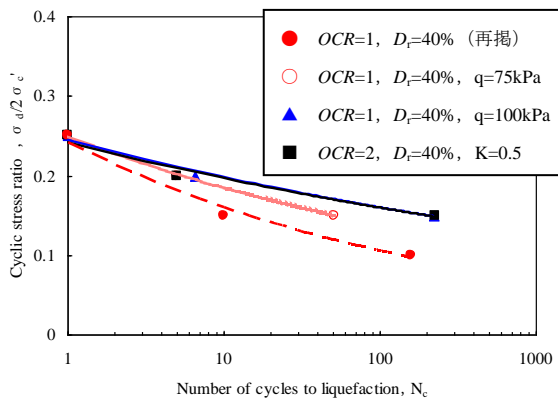


Fig. 9 液状化強度曲線 (DA=5%)

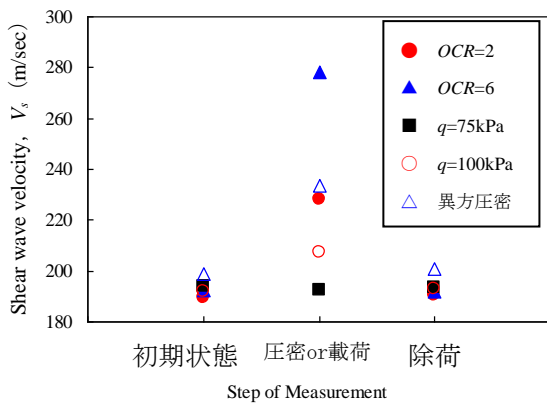


Fig. 10 せん断弾性波速度 V_s について

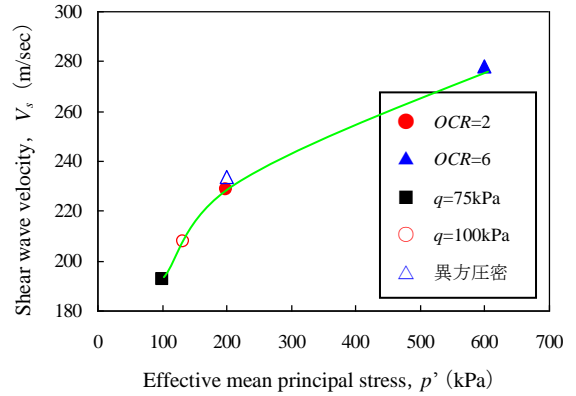


Fig. 11 V_s と p' の関係について

Fig. 9 からは、OCR=1、 $D_r=40\%$ と比べて、せん断履歴を与えた場合においても液状化強度比が大きくなることも確認できた。また、異方圧密を経た場合にも供試体の液状化強度が増加することが確認できた。これらは、前述したとおり荷重が載荷されることにより粒子同士の噛み合わせが強くなり液状化強度に反映されたからであると推測できる。なお、軸差応力の観点では $q=75\text{kPa}$ と $q=100\text{kPa}$ のケースを比較すると軸差応力が大きいケースのほうが液状化強度比も大きくなるといえる。

3.2 BE 試験結果

Fig. 10 は $D_r=40\%$ における、応力が初期状態、圧密または載荷状態、除荷状態の場合の V_s の変化を示した結果である。圧密または q が載荷されることにより V_s が上昇していることがわかるが、応力を除荷すると全ての実験ケースで V_s が初期状態とほぼ等しい値に戻るといえる。また、Fig. 11 は V_s と平均有効主応力 p' の関係を示したグラフである。これより p' の上昇とともに V_s も増加していることがわかる。よって既往の研究同様³⁾に V_s は p' に依存していることがいえる。

3.3 実験結果のまとめ

液状化試験と BE 試験の結果より液状化強度比は応力を除荷しても増加するが、 V_s は除荷することで初期状態とほぼ等しい値に戻る。つまり応力履歴は V_s に影響をもたらさないといえる。

4. 考察

4.1 液状化判定における液状化強度 R_L とせん断弾性波速度 V_s の関連性について

液状化判定における液状化強度 R_L とせん断弾性波速度 V_s の関連性について検討する方法を、Fig. 12 にフローチャートとして示して説明する。ここでは $D_r=40\%$ で作製した供試体の履歴なし、OCR=6 の試験結果を用い、採用する液状化強度比は軸ひずみ DA=2%および 5%の繰返し載荷回数 20 回とした。なお、Table 3 に各 STEP で得られた値および判定結果を示す。

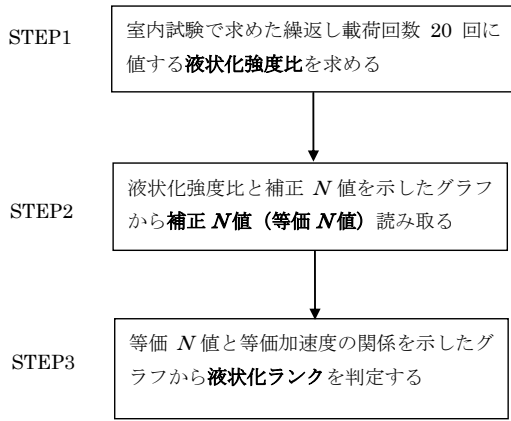


Fig. 12 検討フローチャート

4.1.1 STEP1

Fig. 13 は室内試験によって求められた液状化強度曲線である。これより繰返し载荷回数 20 回の液状化強度比を読み取ると $OCR=1$ で 0.14, $OCR=6$ で 0.21 となる。

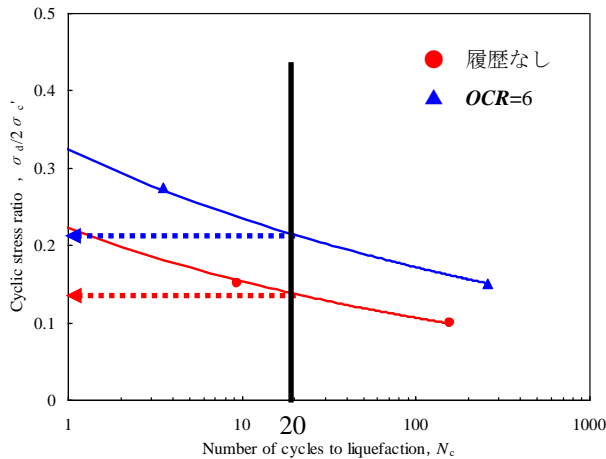


Fig. 13 液状化強度曲線 (DA=2%)

4.1.2 STEP2

Fig. 14 は建築学会における建築基礎構造設計指針の液状化強度比と補正 N 値の関係⁴⁾を示したグラフである。このグラフに先ほど得られた液状化強度比を適用すると補正 N 値が求められることができる。 $OCR=1$ で 10 回, $OCR=6$ で 22 回となる。なお、細粒分含有率が 0% であると補正 N 値と等価 N 値は等しいとみなされる。

4.1.2 STEP3

得られた補正 N 値 (等価 N 値) を Fig. 15 の港湾施設で適用されている液状化判定に照らし合わせる。なお、等価加速度は新潟県中越沖地震 (直下型地震) で観測された値をもとに 300gal と仮定した。それぞれ得られた等価 N 値と等価加速度=300gal を適用し、読み取ると、 $OCR=1$ で I (液状化する) となり、 $OCR=6$ で III (液状化しない可能性が大きい) となる。なお液状化判定には Table 2 を用いた。

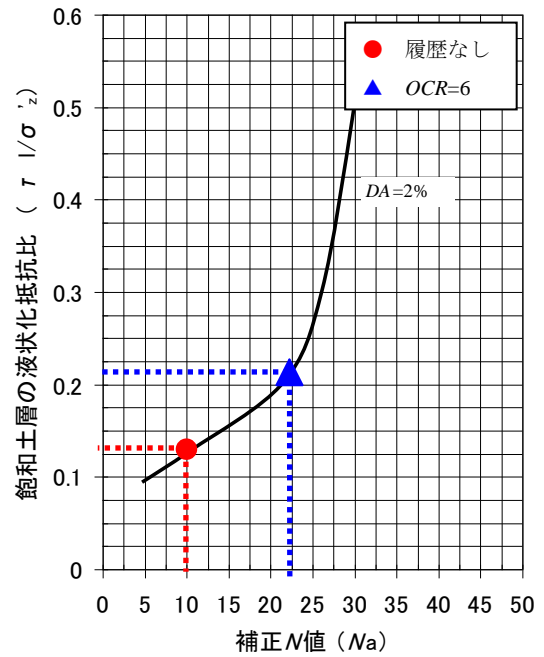


Fig. 14 液状化強度とせん断ひずみと補正 N 値の関係⁴⁾

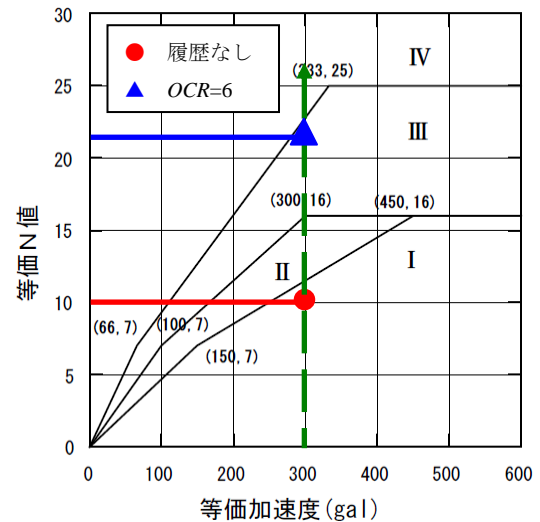


Fig. 15 等価 N 値と等価加速度の関係⁵⁾

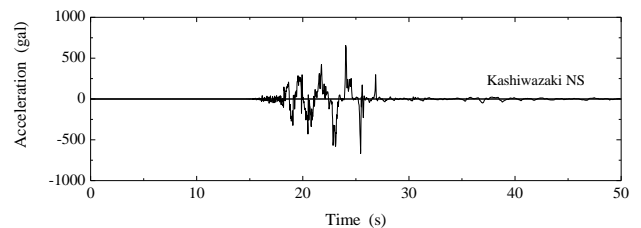


Fig. 16 新潟県中越沖地震で観測されたデータ⁶⁾

Table 2 液状化判定基準⁵⁾

図2.7.4に示す範囲	粒度とN値による液状化の予測	粒度とN値による液状化の判定
I	液状化する。	液状化すると判定。
II	液状化する可能性が大きい。	液状化すると判定するか、繰返し三軸試験により判定する。
III	液状化しない可能性が大きい。	液状化しないと判定するか、繰返し三軸試験により判定する。 構造物に特に安全を見込む必要がある場合には、液状化すると判定するか、繰返し三軸試験により判定する。
IV	液状化しない。	液状化しないと判定する。

Table 3 判定結果

過圧密比 OCR	履歴なし (OCR=1)	OCR=6
液状化強度比	0.13	0.21
等価N値	10	22
判定領域	I	III
液状化判定	液状化する	液状化しない可能性が大きい

4.1.2 まとめ

上記の手法で過圧密履歴を受けた地盤を想定して液状化判定を行うと、過圧密履歴が異なることによって判定も異なることがわかる。しかし、 V_s の観点から見ると、これまでの実験結果より V_s は応力履歴によって変化しないことが判明している。よって、 V_s では応力履歴を受けた地盤の区別ができないため液状化判定は難しいといえる。

4.2 繰返し載荷回数 N_c が液状化判定に及ぼす影響の考察

4.1の液状化判定の検討と同様の手順を経て繰返し載荷回数 N_c が液状化判定に及ぼす影響について考察する。なお、 $D_r=40\%$ の履歴なしの実験結果を使用し、地震データは東日本大震災時に千葉県浦安市で観測されたものとする。このデータは前掲した新潟県中越沖地震で観測されたデータに比べると長時間震動の地震である。なお、等価加速度は観測データを参考に100galと仮定した。

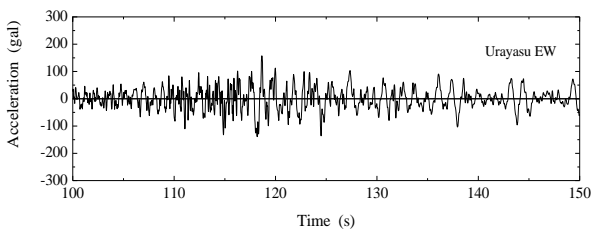


Fig. 17 新潟県中越沖地震で観測されたデータ⁶⁾

4.2.1 繰返し載荷回数 N_c を 20 回とした場合の判定結果

4.1と同様の過程で判定した結果を **Table 4** に示す。判定結果では液状化しないと判定されるが、実際には浦安市で液状化現象が報告されている。よって通常の液状化判定で使用される繰返し載荷回数 20 回の液状化強度では実現象と整合性がとれないということになる。

Table 4 繰返し載荷回数 20 回での判定結果

繰返し回数	20 回
液状化強度比	0.13
等価N値	10
判定領域	IV
液状化判定	液状化する

4.2.2 繰返し載荷回数 N_c を 100 回とした場合の判定結果

観測された地震データは長時間震動であったことを考慮して繰返し載荷回数を 100 回として判定し直したときの結果を **Table 5** に示す。結果は液状化すると判定され、実現象と一致する。

Table 5 繰返し載荷回数 100 回での判定結果

繰返し回数	100 回
液状化強度比	0.10
等価N値	5
判定領域	II
液状化判定	液状化する可能性が大きい

4.2.3 まとめ

判定結果から繰返し載荷回数が異なると液状化判定も異なることがわかった。等価加速度が小さい場合でも長時間震動することで液状化が起こる場合があるが、通常の液状化判定で使用される繰返し載荷回数 20 回では実現象と整合性がとれない場合も考えられる。その場合は読み取る繰返し載荷回数を増やすことで現象を説明できる可能性がある。

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. 既往の研究と同様に、せん断弾性波速度は拘束圧に依存する。
2. 応力履歴を与えることで液状化強度比は増加するがせん断弾性波速度は変化しない。また、応力履歴の与え方が異なっても同様のことがいえる。
3. 応力履歴の有無によって、液状化判定が異なることもあるが、せん断弾性波速度には応力履歴の影響が現れないので、表面波探査試験の情報のみでは液状化判定の精度が著しく下がると考えられる。
4. 液状化強度比を計算するための基準となる繰返し載荷回数は、地震の継続時間を考慮して設定することが望ましい。

参考文献

- 1) 時松孝次, 桑山晋一: レーリー波探査を用いた液状化危険度予測, 土と基礎, 土質工学会, Vol.38, No.6, pp.15-20, 1990.
- 2) 内田明彦, 時松孝次, 桑山晋一: 液状化危険度予測へのレーリー波探査の適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.1393-1394, 1989.

- 3) International Parallel Test on the Measurement of Gmax Using Bender Elements Organized by TC-29
- 4) 日本建築学会, 建築基礎構造設計指針, 1988.
- 5) 社団法人 日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1989.
- 6) 独立行政法人防災科学技術研究所 :
<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/> (2011年4月参照)