

セメント安定処理土の繰返しせん断強度と養生時間の関係

山本哲朗 (社会建設工学科)

鈴木素之 (社会建設工学科)

松尾 晃 (社会建設工学専攻)

伊達明彦 (㈱エイトコンサルタント)

Relationship between Cyclic Shear Strength and Curing Time of Cement-Treated Soils

Tetsuro YAMAMOTO (Department of civil engineering)

Motoyuki SUZUKI (Department of civil engineering)

Akira MATSUO (Department of civil engineering)

Akihiko DATE (Eight consultant Co.,Ltd)

A new method is proposed for estimating an ultimate cyclic shear strength of cement-treated soils after a long-term curing. Shaking table tests are performed on cement-treated Toyoura sand and Ube masado with different curing periods. It was found from the tests that a hyperbolic curve can be applied to approximate a relationship between the cyclic shear strength and the curing time, so that the ultimate cyclic shear strength is determined as an the asymptotic value of the hyperbola. In addition, it was clarified that an ultimate cyclic shear strength curve, which is considered as a maximum effect of cementation, is experimentally obtained.

Key Words : *Cement-treated soil, Curing time, Shaking table test, Cyclic shear strength, Toyoura sand, Masado*

1. はじめに

セメント安定処理工法は砂質土にセメントを添加・混合して液状化の発生を抑制する液状化対策工法の一つである。養生時間が経過するほど土粒子間のセメント水和物の生成が進み、相当な固結力を有する地盤材料に改良される。Photo. 1にセメント安定処理後14日間養生したまさ土の微細構造を示す。撮影試料は再液状化実験を行った後のものである。土粒子間にセメント水和物(エトリンサイト)の生成が顕著に見られる¹⁾。このことから改良した実地盤では、合理的・経済的な設計をする上で安定処理後の時間経過に伴う強度増加を見込む必要がある。しかし、現在のところ室内で実施可能な養生時間の下での試験結果からセメント安定処理土の強度増加を簡便に推定する手法は整備されていない。配合試験における養生日数は長くても28日間程度であり、その後の強度増加に対する検討は十分に行われていない。そこで、本研究では養生日数を変え

た安定処理土の振動台実験を行い、得られた繰返しせん断強度の実測値に対して双曲線近似を適用し、その漸近値をもって長期養生後の繰返しせん断強度を推定する手法を提案した。さらに、セメント安定処理した豊浦砂およびまさ土の実験結果に基づいて、その手法の妥当性を検証した。

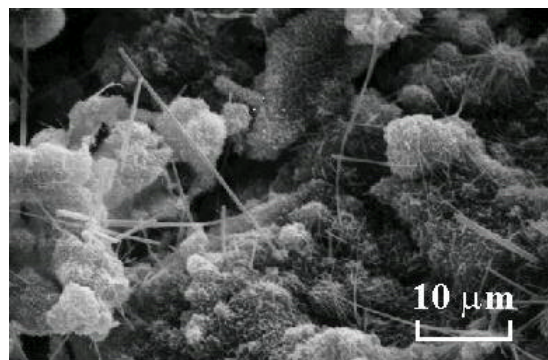
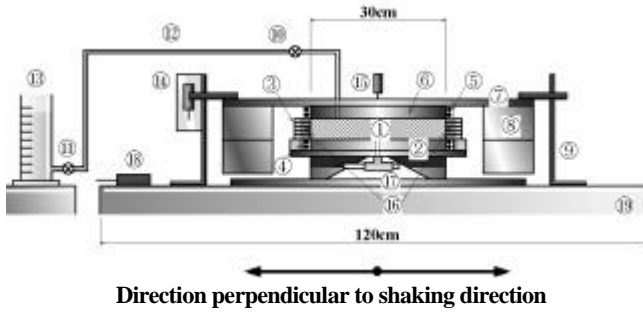


Photo. 1 Microstructure of cement-treated Ube masado (×2000)



- | | |
|--------------------------|--------------------------------|
| Specimen | Shear box |
| Polyvinyl chloride rings | O-rings |
| Rubber membrane | • Loading plates |
| Lead weights | Stoppers |
| • Valves | Rigid pipe |
| Measurement cylinder | • Displacement transducer |
| Pressure transducer | Pore water pressure transducer |
| Accelerometer | Shaking table |

Fig. 1 Essential features of test apparatus

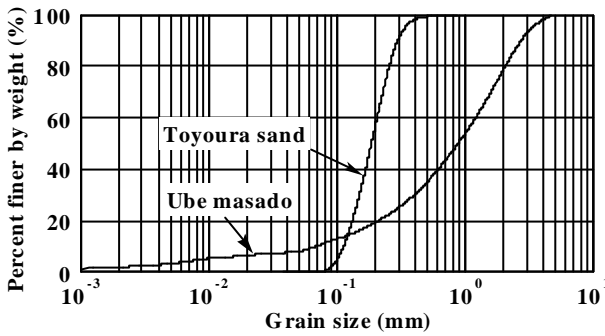


Fig. 2 Grain size distribution curves of soil samples

Table 1 Physical properties of soil samples

	Toyouira sand	Ube masado
Specific gravity G_s	2.655	2.624
Maximum grain size D_{max} (mm)	0.850	4.750
Average grain size D_{50} (mm)	0.185	0.840
Uniformity coefficient U_c	1.82	16.62
Maximum void ratio e_{max}	0.929	0.902
Minimum void ratio e_{min}	0.619	0.569
Fines content F_c (%)	0.2	11.2

2. セメント安定処理土の振動台実験

(1) 実験装置の概要

Fig. 1に実験装置の概要を示す。振動台上にケルマン型単純せん断箱（直径 30cm, 高さ 6cm）が固定されている。測定項目は水平加速度 α_h 、せん断変位 H 、鉛直変位 V 、供試体側面に作用する 4 方向の水平応力 σ_r 、間隙水圧 u である。実験装置の詳細については文献 2) を参照されたい。

(2) 土試料および安定材

土試料として豊浦標準砂（以下、豊浦砂と略す）および宇部市内で採取したまさ土（以下、まさ土と略す）を用いた。Fig. 2に両土試料の粒径加積曲線を示す。また、両土試料の物理的性質を Table 1に示す。セメント系安定材には高炉セメント B 種を用いた。

(3) 供試体の作製方法および実験条件

供試体を以下の手順で作製した。まず、乾燥状態の土試料に質量比で 5% に相当する安定材を添加し十分に混合した後、分離防止剤溶液（濃度 100mg/kg）を加え、脱気しつつ攪拌した。この混練試料を分離防止剤溶液を満したせん断箱内に 3 層に分けて詰めた。次いで、供試体上面に有効鉛直応力 $\sigma'_{v0}=49\text{kPa}$ を作用させ、排水条件の下で所定の時間圧密・養生させた。養生

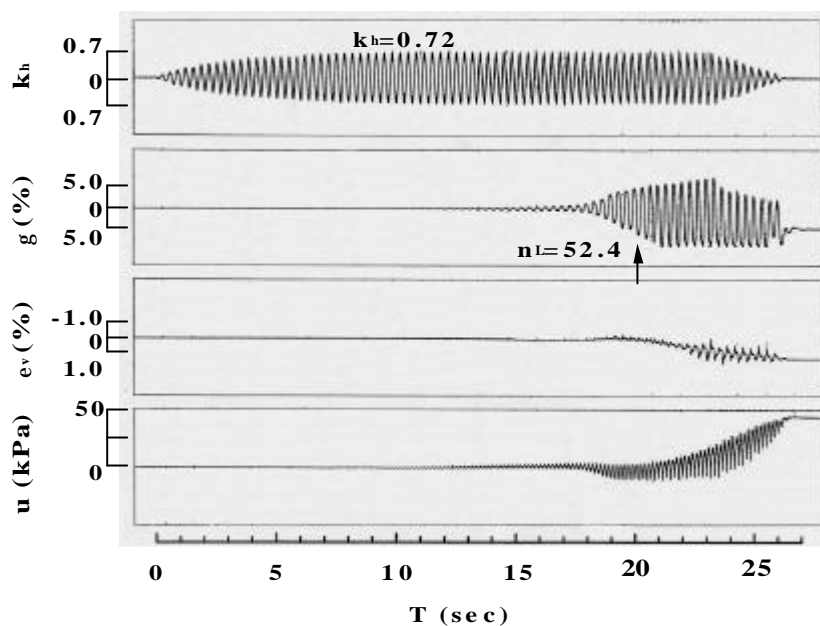
日数は 0, 1, 3 および 14 日間とした。各養生日数後、直ちに振動台を所定のせん断応力比 τ/σ'_{v0} が得られるような水平加速度で駆動させた。なお、比較のために未処理土に対しても同様な実験を行った。

3. セメント安定処理土の長期養生後の繰返しせん断強度

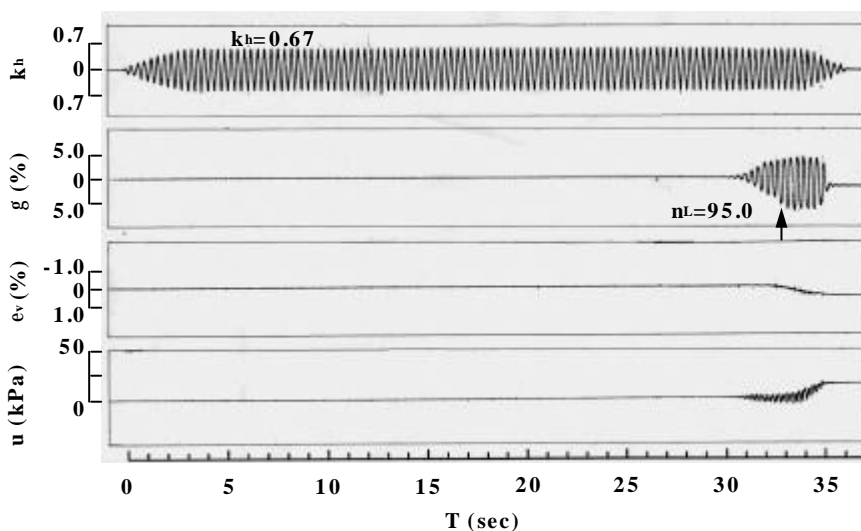
(1) 養生日数が異なる場合の繰返しせん断挙動

Fig. 3(a) および(b) に両土試料の代表的な記録波形を示す。Fig. 3(a) には安定材を添加して 3 日間養生した豊浦砂の実験結果を示している。横軸は加振時間 T (sec), 縦軸は上から順に水平震度 $k_h (= \alpha_h/g, g: \text{重力加速度})$, せん断ひずみ $(= H/H \times 100 (\%))$, H : 供試体高さ), 鉛直ひずみ $\epsilon_v (= V/H \times 100 (\%))$, 過剰間隙水圧 u (kPa) である。加振時間の経過に伴って過剰間隙水圧の振幅は徐々に大きくなり、せん断ひずみも増加している。最終的な過剰間隙水圧比 u/σ'_{v0} は 0.9 程度まで上昇しており、養生日数が 3 日間程度の処理土は液状化破壊に近い挙動を示す。なお、せん断ひずみが両振幅で 10% に達したときの繰返し回数 n_L は 52.4 であった。

Fig. 3(b) には安定材を添加して 14 日間養生したまさ土の実験結果を示す。過剰間隙水圧はほとんど上昇しない状態で、 $n_L=95.0$ の時にせん断ひずみが 10% に達



(a) Treated Toyoura sand (curing time 3 days)



(b) Treated Ube masado (curing time 14 days)

Fig. 3 Test record of cyclic shear test

している。最終的な過剰間隙水圧比 u/σ'_{v0} は 0.2 程度である。試料の種類は異なるが、処理土の過剰間隙水圧 u の発生量は養生日数によって大きく異なる。したがって、本研究における破壊の定義はせん断ひずみ が両振幅で 10% に達したときと見做した。

(2) 繰返しせん断応力比および過剰間隙水圧比と繰返し回数の関係

Figs. 4(a), (b) は豊浦砂に対して繰返しせん断応力比 τ/σ'_{v0} (k_h) および破壊時の過剰間隙水圧比 u/σ'_{v0} と破壊に至るまでの繰返し回数 n_L の関係を示したもの

である。Fig. 4(a) には豊浦砂の未処理土および処理土の養生日数ごとの繰返し強度曲線を示している。繰返し強度曲線は養生日数の大きい順に並んでおり、いずれも未処理土のそれより上方に位置している。個々の繰返し強度曲線は n_L が大きくなるほど、 τ/σ'_{v0} は小さくなり、 $n_L=500$ 以上で τ/σ'_{v0} はほぼ一定になる。Fig. 4(b) は豊浦砂の未処理土および処理土の過剰間隙水圧比と養生日数の関係を示したものである。未処理土の過剰間隙水圧比は 1.0 程度の値をとっており、液状化が生じたことを示している。養生日数が 3 日間のデータをみると過剰間隙水圧比は 0 から 0.3 程度の範囲

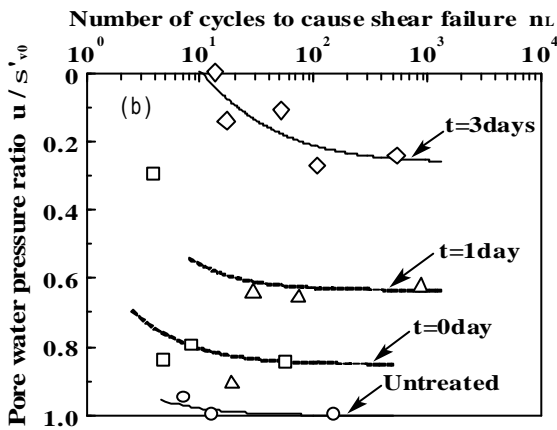
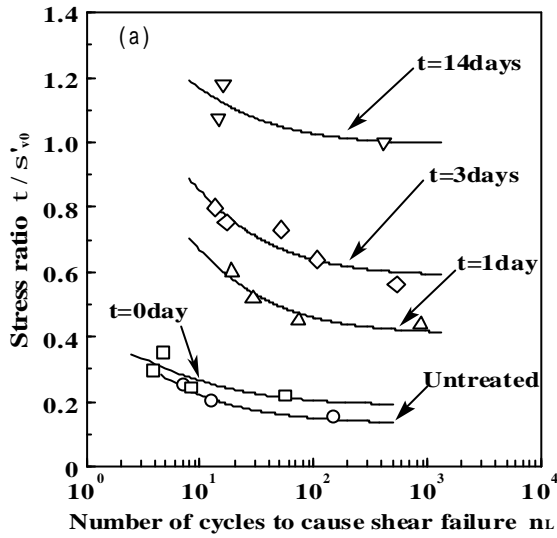


Fig. 4 Relationships of n_L to τ/σ'_{v0} and u/σ'_{v0} for Toyoura sand

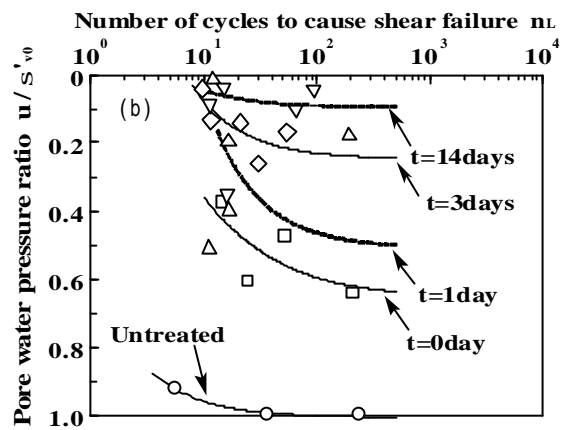
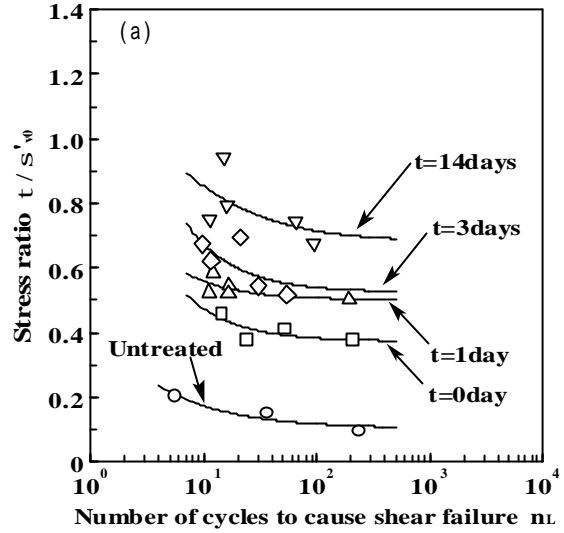


Fig. 5 Relationships of n_L to τ/σ'_{v0} and u/σ'_{v0} for Ube masado

にある。過剰間隙水圧比は養生日数が増加するにしたがい減少する傾向にある。 $u/\sigma'_{v0} \sim n_L$ 曲線を見ると n_L が大きくなるほど u/σ'_{v0} は大きくなる傾向にあり、 $n_L=500$ 以上で u/σ'_{v0} はほぼ一定になる。この挙動は $\tau/\sigma'_{v0} \sim n_L$ 関係でみられたものと類似している。なお、14日間養生した供試体には負圧が発生したため図中には示していない。

Figs. 5(a) (b) はまさ土に対して τ/σ'_{v0} および u/σ'_{v0} と n_L の関係を示したものである。Fig. 5(a)にまさ土の未処理土および処理土の養生日数ごとの繰返し強度曲線を示している。まさ土の場合も豊浦砂と同様な傾向がみられるが、豊浦砂ほど安定材の添加による強度増加は大きくない。この理由として、Fig. 2に示したように、まさ土は豊浦砂に比べて粒径の大きい粒子をより多く含むため、セメントによる土粒子間での固結の度合いが豊浦砂よりも低いことが考えられる。Fig. 5 (b) はまさ土の未処理土および処理土の過剰間隙水圧比と養生日数ごとの関係を示したものである。まさ土

の場合も豊浦砂と同様な傾向がみられる。

以上の考察から、セメントによる固結効果はまさ土の方が豊浦砂よりも早期に発現するが、最終的には豊浦砂の方がまさ土よりも繰返しせん断強度が高く得られ、その処理効果は高い。この理由として、比較的均一な粒径からなる豊浦砂の方がセメント水和物による土粒子間の拘束が全体的にされやすいためと考えられる。

(3) 長期養生後の繰返しせん断強度の推定

Figs. 6(a) ~ (c) は豊浦砂に対して縦軸にある繰返し回数 n_L のときの繰返しせん断強度 $R (= \tau/\sigma'_{v0})$ 、横軸にそのときの養生日数 t をとり、両者の関係を示したものである。Fig. 6(a)に $n_L=20$ の場合を示す。図中の点は Fig. 4(a)に示す養生日数ごとの繰返し強度曲線上の $n_L=20$ に対する τ/σ'_{v0} の値である。養生日数が大きくなるに伴って繰返しせん断強度 R は大きくなることわかる。ここで、 R と t の値に対して式(1)で表される双曲線関数で近似することを試みた³⁾。

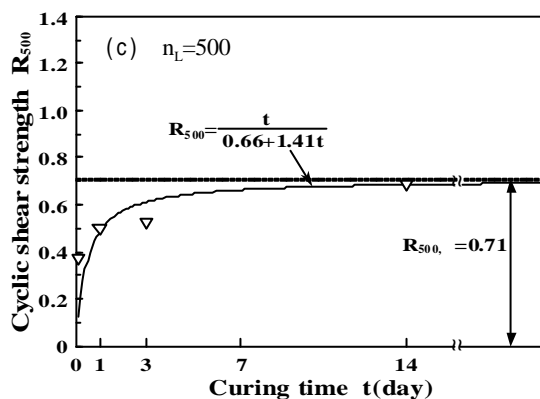
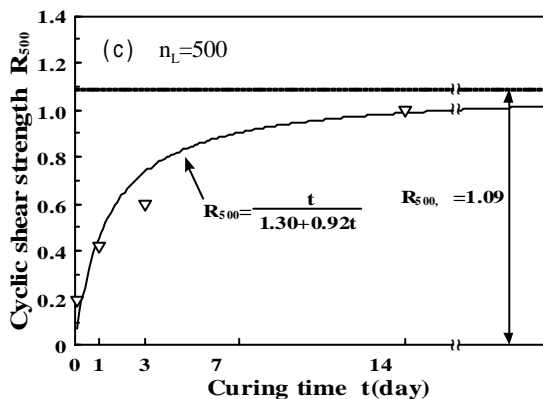
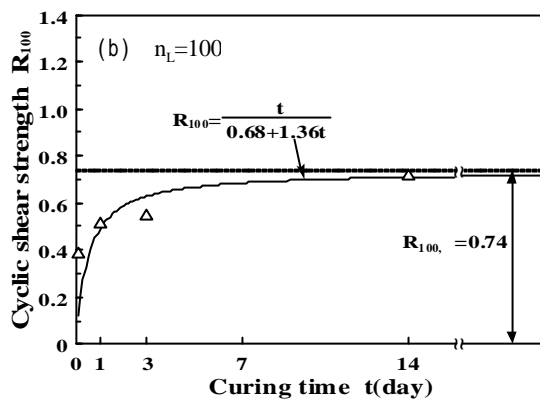
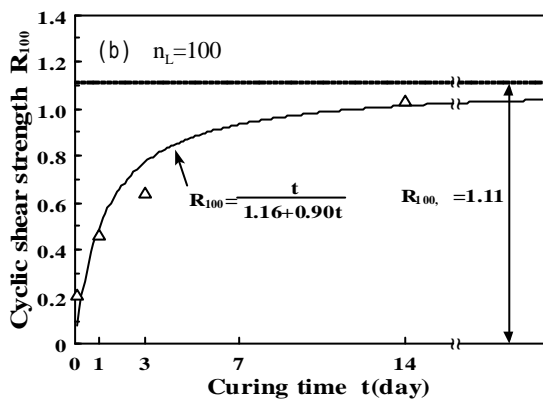
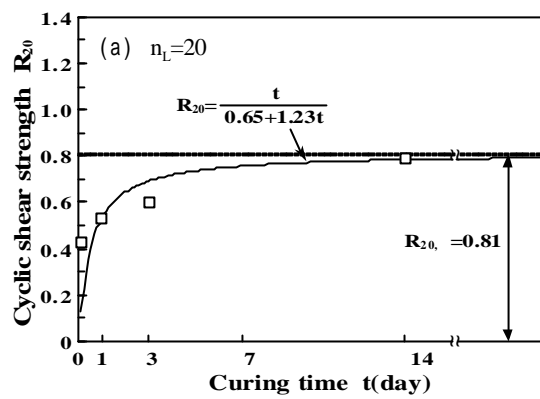
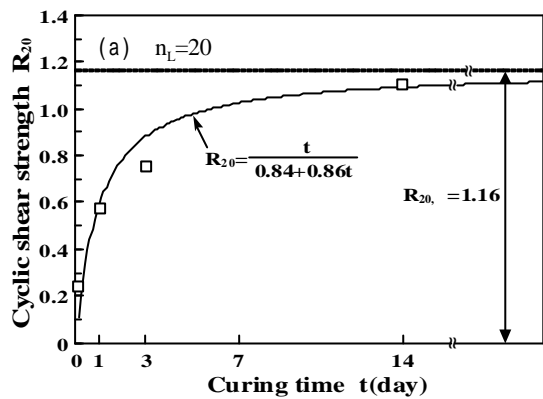


Fig. 6 Relationships between cyclic shear strength and curing time for Toyoura sand

Fig. 7 Relationships between cyclic shear strength and curing time for Ube masado

$$R = \frac{t}{a + bt} \quad (1)$$

式(1)中の定数 a および b はそれぞれ t/R と t の値に対して最小二乗法によりフィッティングした直線の傾きおよび切片で与えられる。式(1)と各点の適合性が良好ならば、養生日数が十分経過した時点での繰返しせん断強度 R は式(2)のように決定される。

$$R_{\infty} = \frac{1}{b} \quad (2)$$

Fig. 6(a) にその近似曲線が示されている。各点と近似曲線の適合性は良好であり、長期養生後の繰返しせん断強度の推定値として $R_{20} = 1.16$ が得られる。Fig. 6 (b) および(c) にそれぞれ $n_L=100$ および $n_L=500$ の場合の結果を示す。いずれも近似曲線の適合性は $n_L=20$ の場合と同様な程度で良好であり、それぞれ長期養生後の繰返しせん断強度の推定値として $R_{100} = 1.11$ および $R_{500} = 1.09$ が得られる。

Figs. 7(a) ~ (c) はまさ土に対して同様な双曲線近

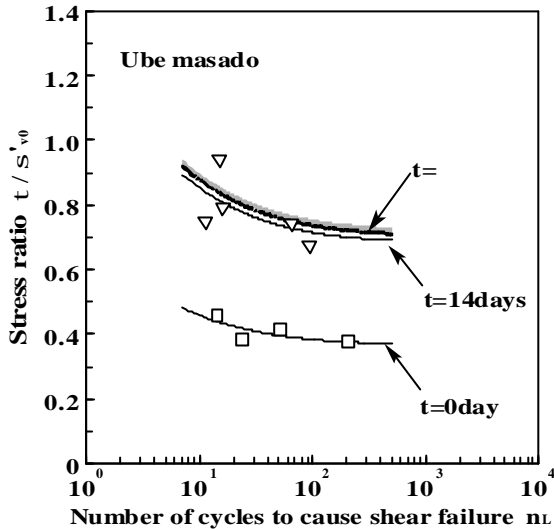


Fig. 8 Relationship between τ/σ'_{v0} and n_L for Toyoura sand

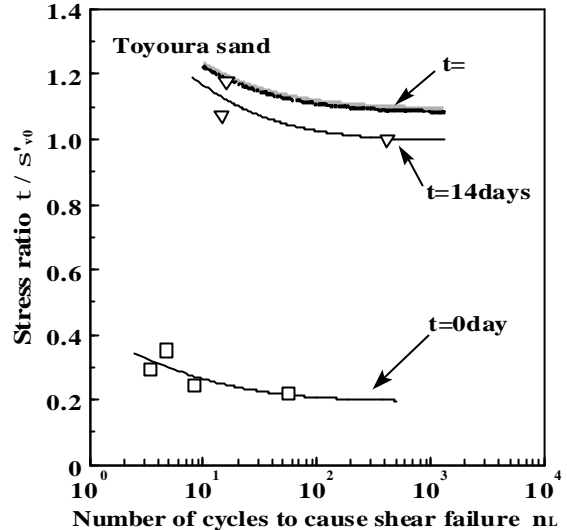


Fig. 9 Relationship between τ/σ'_{v0} and n_L for Ube masado

似を適用した結果を示したものである。いずれの繰返し回数においても各点と近似曲線の適合性は良好であり、長期養生後の繰返しせん断強度として、 $R_{20} = 0.81$ 、 $R_{100} = 0.74$ および $R_{500} = 0.71$ が推定される。なお、本手法に用いたデータ数をより多くとることにより長期養生後の繰返しせん断強度を精度良く推定できる。

(4) 推定された長期養生後の繰返し強度曲線

Fig. 8および9はそれぞれFig. 6および7から得られた長期養生後の繰返しせん断強度の推定値 R を $\tau/\sigma'_{v0} \sim n_L$ の関係で再整理したものである。図には、0日間養生後、14日間養生後および推定した長期養生後の繰返し強度曲線がそれぞれ示されている。長期養生後の繰返し強度曲線は14日間養生のそれより上方に位置しており、 $n_L=20$ における繰返しせん断強度 R は $t=14$ 日間のそれと比較して、豊浦砂の場合1.06倍、まさ土の場合1.03倍である。このように推定した長期養生後の繰返し強度曲線は養生による固結効果を双曲線近似により考慮したものであり、最大の改良効果を表す一つの目安と考えられる。ただし、この手法においても室内配合試験と改良した実地盤における養生条件の相違や安定材の処理方法における不均一性などの要因を十分に考慮することが大切である。

4. 結論

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 振動台実験においても養生日数の経過とともにセメント安定処理土の繰返しせん断強度は大きくなり、そのときの破壊の様相も液状化破壊とは異なる。
- 2) セメント安定処理土の破壊時の過剰間隙水圧比は養

生日数の増加に伴って減少する傾向にある。

- 3) セメント安定処理土の破壊時の過剰間隙水圧比は、繰返し回数が増加するに伴って、増加するという傾向がみられた。
- 4) セメント安定処理土の繰返しせん断強度と養生日数の関係の一つの双曲線関数で近似することができる。
- 5) 長期養生後の繰返しせん断強度をその双曲線関数の漸近値として決定できる。
- 6) 上記5)の結果を再整理することにより長期養生による固結効果を見込んだセメント安定処理土の繰返し強度曲線が一義的に得られる。

謝辞：実験を行う際にご助力いただいた梶川美緒氏、森 章一郎氏および千田隆行氏に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山本哲朗, 鈴木素之, 伊達明彦, 松尾 晃: セメント安定処理した砂質土の再液状化特性に関する一考察, 土木学会第54回年次学術講演会概要集, 1999(投稿中)。
- 2) 山本哲朗, 鈴木素之, 伊達明彦, 松尾 晃, 山内智也: セメント安定処理した砂質土の再液状化特性, 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム, 地盤工学会, pp.435-440, 1999.
- 3) 山本哲朗, 鈴木素之, 伊達明彦, 松尾 晃: セメント安定処理した砂質土における長期養生後の繰返しせん断強度の推定, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会地震工学委員会, 1999(投稿中)。

(平成11年7月28日受理)