

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

山本哲朗¹・鈴木素之²・松尾 晃³・伊達明彦⁴

¹正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

²正会員 博(工) 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (同 上)

³学生会員 山口大学大学院理工学研究科博士前期課程 社会建設工学専攻 (同 上)

⁴正会員 修(工) (株)エイトコンサルタント (〒790-0054 愛媛県松山市空港通 2-9-29)

養生日数が十分に経過した時点でのセメント安定処理土の繰返しせん断強度を推定する手法を提案した。豊浦砂およびまさ土のセメント安定処理土に対する振動台実験結果に基づいて、繰返しせん断強度と養生日数の関係は一つの双曲線で近似できることが明らかになった。また、その双曲線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ことができ、さらに、長期養生後の繰返し強度曲線を一義的に決定できることを示した。

Key Words : *Cement-treated soil, Curing time, Shaking table test, Cyclic shear strength, Toyoura sand, Ube masado, Hyperbolic curve approximation*

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。改良した実地盤での動的性質を評価・検討する際には養生時間が十分に経過した時点での強度・変形パラメータを得ることが不可欠であるが、それを室内で実施可能な養生時間の下での試験結果に基づいて簡便に推定する手法は十分に整備されていない。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。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。

2. セメント安定処理土の振動台実験

(1) 実験装置の概要

図-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 a_h (m/s²)、せん断変位 ΔH (cm)、鉛直変位 ΔV (cm)、供試体側面に作用する4方向の水平応力 σ_x (kPa)、間隙水圧 u (kPa)である。実験装置の詳細については文献1)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。図-2に両土試料の粒径加積曲線を示す。両土試料の物理的性質は豊浦砂の場合、土粒子の密度 $\rho_s=2.655\text{g/cm}^3$ 、最大粒径 $D_{\max}=0.850\text{mm}$ 、平均粒径 $D_{50}=0.185\text{mm}$ 、均等係数 $U_c=1.82$ 、最大および最小間隙比 $e_{\max}=0.929$ 、 $e_{\min}=0.619$ 、細粒分含有率 $F_c=0.2\%$ であり、まさ土の場合は $\rho_s=2.624\text{g/cm}^3$ 、 $D_{\max}=4.750\text{mm}$ 、 $D_{50}=0.840\text{mm}$ 、 $U_c=16.62$ 、 $e_{\max}=0.902$ 、 $e_{\min}=0.569$ 、 $F_c=11.2\%$ である。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たしたせん断箱内に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。

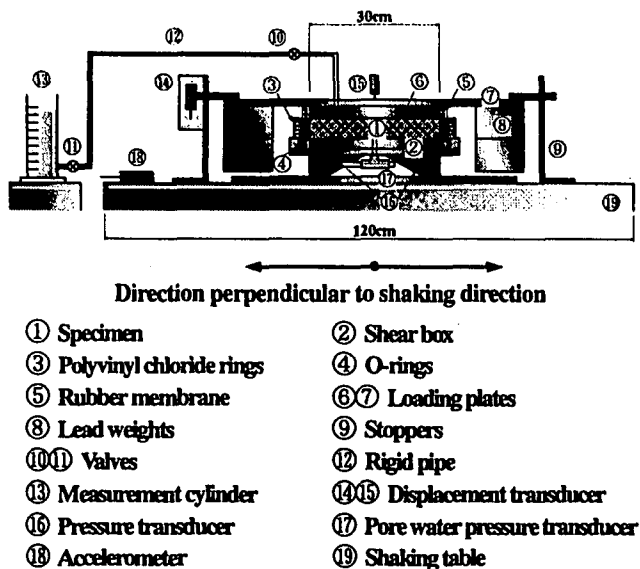


図-1 振動台実験装置 (模式図)

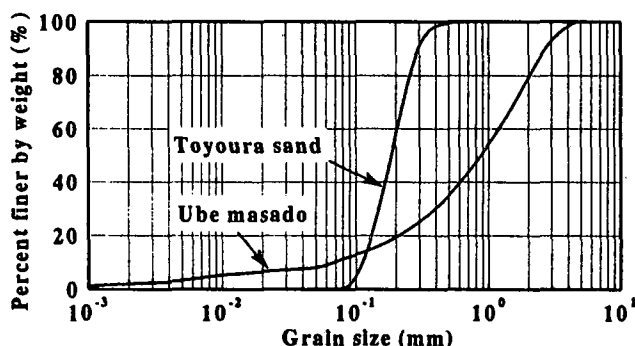


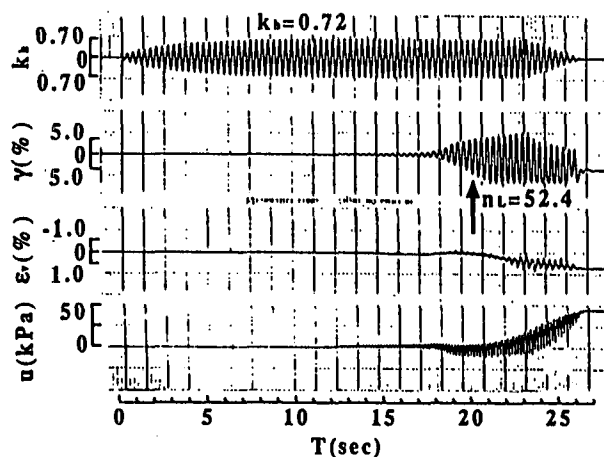
図-2 両土試料の粒径加積曲線

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

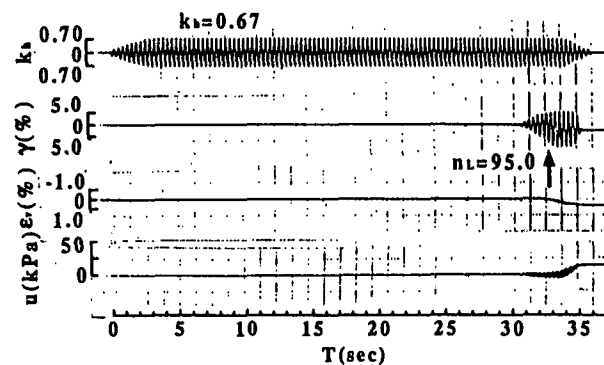
(1) 養生日数が異なる場合の繰返しせん断挙動

図-3(a) および(b) に両土試料の代表的な記録波形を示す。図-3(a) には安定材を添加して3日間養生した豊浦砂の振動台実験の場合を示している。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 : 重力加速度), せん断ひずみ γ ($=\Delta H/H \times 100$ (%), H : 供試体高さ), 鉛直ひずみ ϵ_v ($=\Delta V/H \times 100$ (%)), 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'_v 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% に達した時の繰返し回数 n_L は 52.4 であった。

図-3(b) には安定材を添加して14日間養生したまさ土の場合を示す。過剰間隙水圧はほとんど上昇しないまま, $n_L=95.0$ でせん断ひずみが 10% に達している。最終的な過剰間隙水圧比は 0.2 程度である。試料の種



(a) 豊浦砂



(b) まさ土

図-3 両土試料の記録波形

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 γ が両振幅で 10% に達したときとした。

(2) 繰返しせん断応力比と繰返し回数の関係

図-4(a), (b) はともに繰返しせん断応力比 τ/σ'_v ($=k_h$) 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。図-4(a) には豊浦砂の処理土および未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'_v は小さくなり, $n_L=500$ 以上で τ/σ'_v はほぼ一定になる。

図-4(b) にはまさ土の処理土および未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, 図-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。

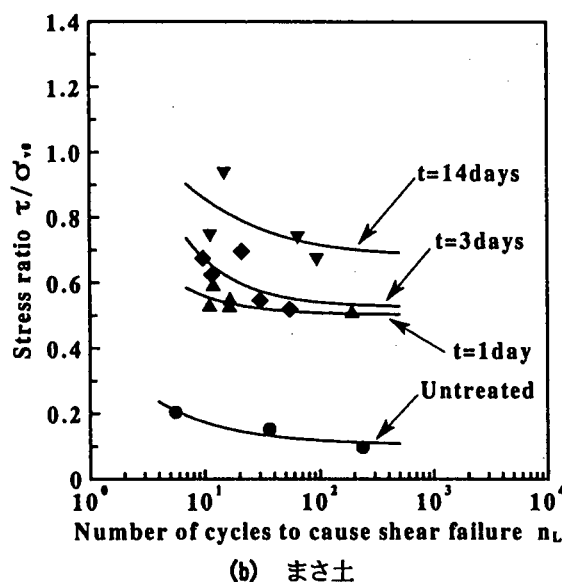
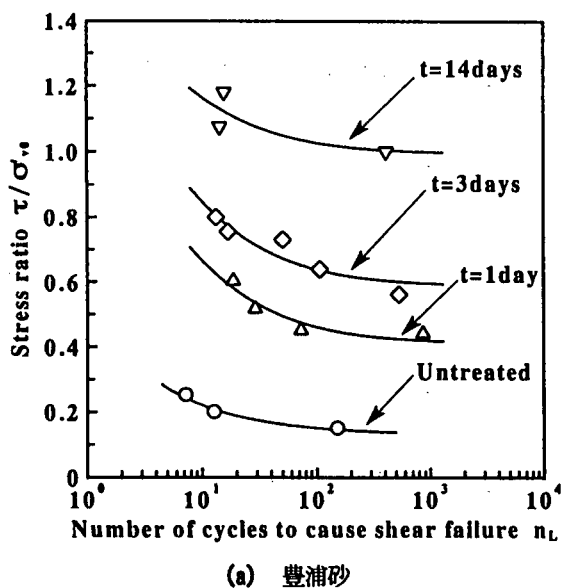


図-4 両土試料の繰返し強度曲線

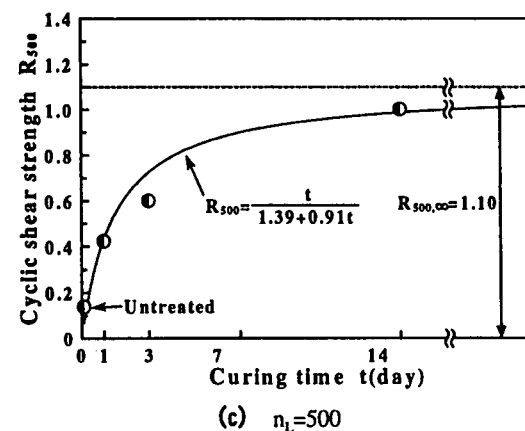
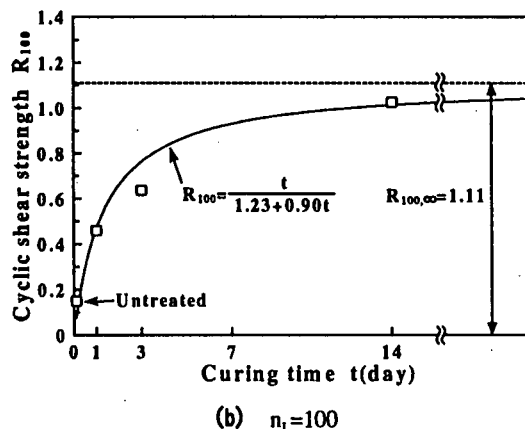
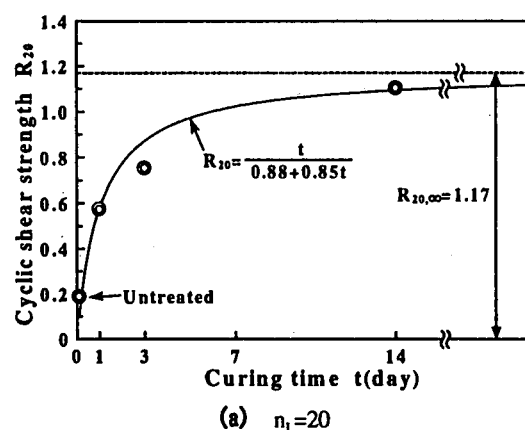


図-5 繰返し回数ごとの繰返しせん断強度と養生日数の関係 (豊浦砂の場合)

(3) 長期養生後の繰返しせん断強度の推定

図-5(a)~(c)は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 をとったものである。図-5(a)に $n_L=20$ の場合を示す。図中の点は図-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。養生日数がゼロ ($t=0$) のときの点は未処理土の繰返し強度曲線から得られた値である。養生日数が大きくなるにつれ繰返しせん断強度 R は大きくなることがわかる。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。

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

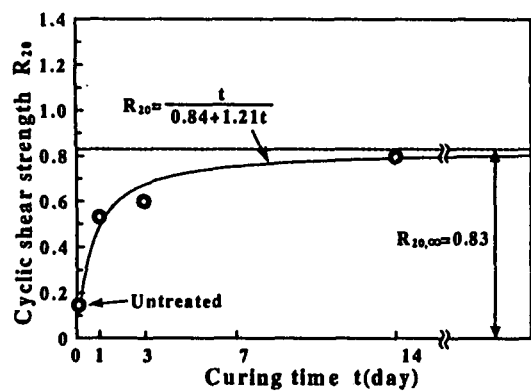
式(1)中の定数 a および b はそれぞれ $1/R$ と t の値に対して最小二乗法によりフィッティングした直線の傾きおよび切片で与えられる。式(1)と各点の適合性が良好ならば、養生日数が十分経過した時点での繰返しせん

断強度 R_∞ は式(2)のように決定される。

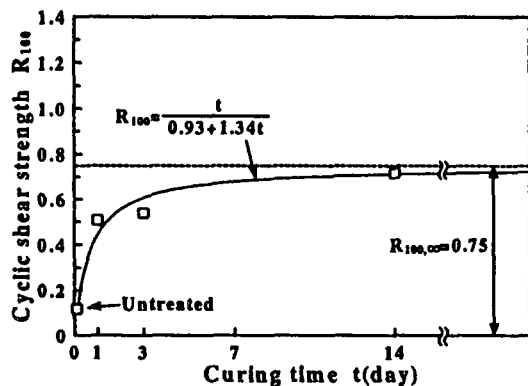
$$R_\infty = \frac{1}{b} \quad (2)$$

図-5(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 $R_{20,\infty}=1.17$ が得られる。図-5(b)および(c)には $n_L=100$ 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 $R_{100,\infty}=1.11$ および $R_{500,\infty}=1.10$ が得られる。

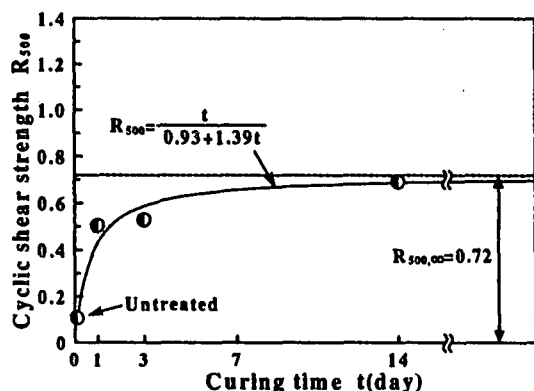
図-6(a)~(c)はまさ土に対して同様な双曲線近似を適用した結果を示したものである。いずれの繰返し



(a) $n_L=20$



(b) $n_L=100$



(c) $n_L=500$

図-6 繰返し回数ごとの繰返しせん断強度と養生日数の関係 (まさ土の場合)

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、 $R_{20,\infty}=0.83$, $R_{100,\infty}=0.75$ および $R_{500,\infty}=0.72$ が得られている。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

図-7 は図-5, 6 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 $\tau/\sigma'_v \sim n_L$ の関係で再整理したものである。図には未処理土、14 日養生後、推定した長期養生後の繰返し強度曲線が示されている。推定した長期養生後の繰返し強度曲線は 14 日養生の

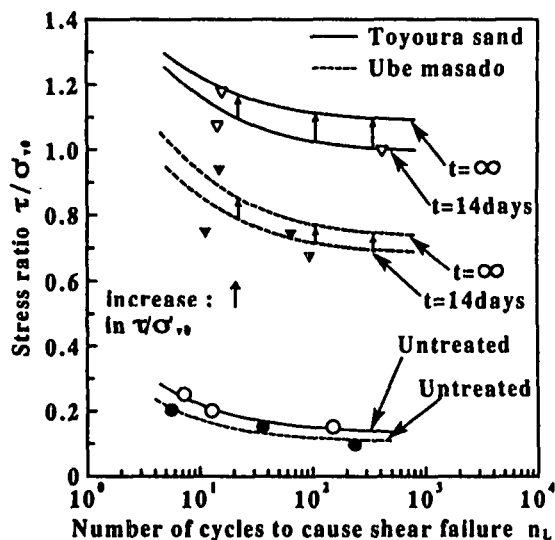


図-7 未処理土、14 日養生および推定した長期養生後の繰返し強度曲線

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 $t=14$ 日のそれと比較して、豊浦砂の場合 1.07 倍、まさ土の場合 1.08 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に示すとおりである。

- 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繰返しせん断強度と養生日数の関係を一つの双曲線関数で近似することができた。
- 3) 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。
- 4) 上記 3) 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：実験において御助力頂いた梶川美緒氏および森章一郎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, 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, pp.435-440, 1999.