

平成12年鳥取県西部地震におけるシルト質土地盤の液状化挙動とそのセメント安定処理

山本 哲朗¹・鈴木 素之²・千田 隆行³

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)

平成12年鳥取県西部地震(M7.3)の際、境港市ではシルト質土埋立地盤が広範囲にわたり液状化した。今回液状化した低塑性シルト質土は過剰間隙水圧の消散が遅いため、余震による再液状化の危険性も指摘される。著者は当該地域の2地点で採取したシルト質土に対して繰返し三軸試験を実施し、液状化・再液状化強度特性を調べるとともに、液状化対策工の一つであるセメント安定処理の有効性を検討した。その結果、1)シルト質土の液状化強度および再液状化強度は他のシルト質土と比較して小さい、2)セメント安定処理による液状化強度の顕著な増加は試料の粒度に依存すること、3)安定処理土の一軸圧縮強度と液状化強度の間には良好な直線関係があることが明らかになった。

Key Words : Tottoriken-Seibu earthquake, Liquefaction, Reliquefaction, Silt, Cyclic triaxial test, Cement stabilization

1. はじめに

平成12年鳥取県西部地震では沿岸部の埋立地盤において発生した液状化により建物の不同沈下などの多岐にわたる被害が発生した(図-1参照)。地震直後の現場調査結果によると、液状化によって地表へ噴出した土は低塑性シルトであり、液状化土層がシルト質土である可能性が大きい。低塑性シルト質土の液状化については1993年北海道南西沖地震等で既に報告されており、過剰間隙水圧の消散が遅い

ことから余震時の再液状化の危険性も指摘されている¹⁾。そこで、著者らは繰返し三軸試験機を用いて採取したシルト(採取地点を図-1に記載)の液状化強度および再液状化強度を求めるとともに、液状化対策工としてのセメント安定処理を実施し、その強度増加を粒度特性の観点から検討した。また、処理土の液状化強度と一軸圧縮強度の相関性を調べるとともに、処理土の微細構造を走査型電子顕微鏡により観察した。

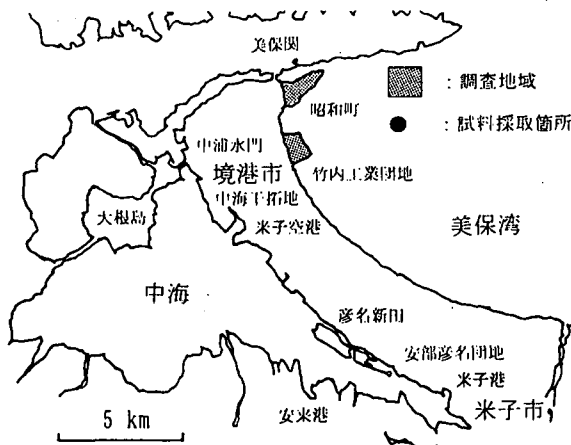


図-1 竹内工業団地の噴砂

2. 試料および試験概要

試料は、噴砂・噴泥現象がみられた竹内工業団地および昭和町で採取したシルト質土の2試料(以下、“竹内工業団地シルト”、“昭和町シルト”と呼ぶ)とした。表-1に物理定数、図-2に粒径加積曲線を示す。図-2中には「港湾の施設の技術上の基準²⁾」で定義されている“特に液状化の可能性あり”および“液状化の可能性あり”の範囲も記載している。両試料とも“液状化の可能性あり”の範囲に属しており、液状化の危険性がある地盤であることがわかった。これら試料に対して応力制御式繰返し三軸試験を実施した。供試体は水中落下法で作製した。セメ

表-1 物理定数

| | 竹内工業団地 シルト | 昭和町 シルト |
|-------------------------------|---------------|------------|
| ρ_s (g/cm ³) | 2.636 | 2.640 |
| U_c | 2.00 | 3.00 |
| U_c' | 1.04 | 1.60 |
| D_{10} (mm) | 0.025 | 0.016 |
| D_{50} (mm) | 0.046 | 0.045 |
| D_{max} (mm) | 2.0 | 2.0 |
| F_c (%) | 97.4 | 98.7 |
| F_{clay} (%) | 3.6 | 3.6 |
| 土質分類 | ML | ML |

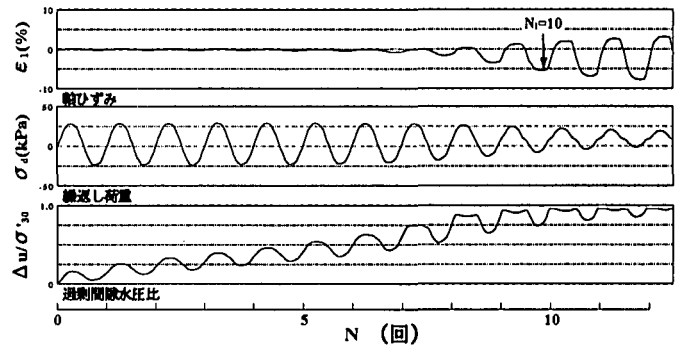


図-3 記録波形 (未処理土)

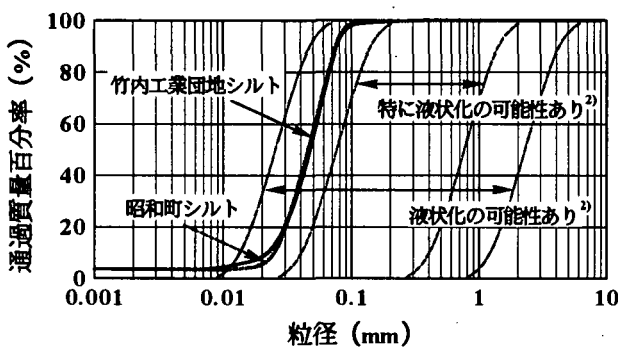


図-2 粒径加積曲線

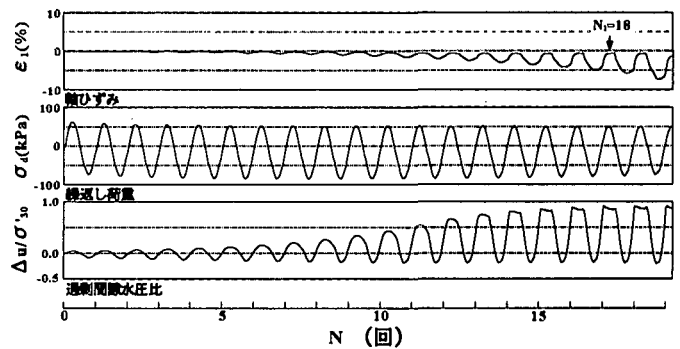


図-4 記録波形 (処理土)

ント安定処理土の場合、添加率 $C=5\%$ で一般軟弱土用固化材を用いた。初期有効拘束圧 $\sigma'_{30}=98.0$ kPa で未処理土の場合には 30 分、処理土の場合には 24 時間圧密した後、周期 10 秒の繰返し軸差応力 σ_d を供試体に作用させた。未処理土に関しては 10 分間再圧密後、再液状化試験を行った。破壊は軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$ と定義した。別途、同じ配合条件で作製したセメント安定処理土に対して一軸圧縮試験を実施した。載荷速度および破壊の定義は地盤工学会基準の土の一軸圧縮試験方法³⁾に準じて行った。

3. 液状化強度曲線

図-3 に代表的な昭和町シルトの未処理土の記録波形を示す。繰返し回数 N の増加により過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_{30}$ は徐々に大きくなり、軸ひずみ ϵ_1 も増加している。 $DA=5\%$ に近づくと過剰間隙水圧比はほぼ 1.0 まで上昇し、軸ひずみが伸張側に急激に増大して破壊が生じる典型的な液状化挙動がみられた。 $DA=5\%$ までの繰返し回数 N_1 は 10 回であった。図-4 に代表的な昭和町シルトの処理土の記録波形を

示す。過剰間隙水圧比は載荷直後から破壊まで負圧が生じており、 $DA=5\%$ に近づくると軸ひずみは伸張側に徐々に増大し、 $N_1=18$ 回であった。

図-5 に竹内工業団地シルトの各種液状化強度曲線を示す。縦軸には繰返しせん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_{30}$ を、横軸には N_1 をとっている。図中のデータは未処理土 (○, ●) および処理土 (■) のものである。なお、未処理土の再液状化試験のデータ (●) の数は、今回追加実施した液状化試験時に併せて行ったため、液状化試験データよりも少ない。図中の γ_d は試験直前の乾燥単位体積重量である。未処理土の液状化強度曲線より得られた $N_1=20$ 回における繰返しせん断応力比 R_{20} を求めると、 $R_{20}=0.13$ となる。同一地域で採取した別の試料のデータは $R_{20}=0.14, 0.12$ と報告されている^{4,5)}。これら試料の物理的性質に多少の差異があるものの、各試料の R_{20} はほぼ同じ値であり、これらシルト質土の液状化強度は総じて小さいことが注目される。再液状化強度曲線より得られた $N_1=20$ 回における繰返しせん断応力比 $R_{20,R}$ は、 $R_{20,R}=0.16$ で、初回の液状化強度 R_{20} より大きい。これは再圧密に伴う供試体の間隙比の減少によると考えられる。再液状化試験では初回の液状化試験で発生

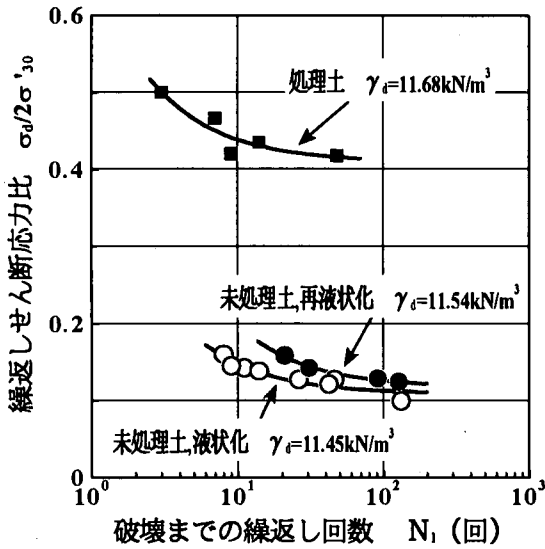


図-5 液状化強度曲線 (竹内工業団地)

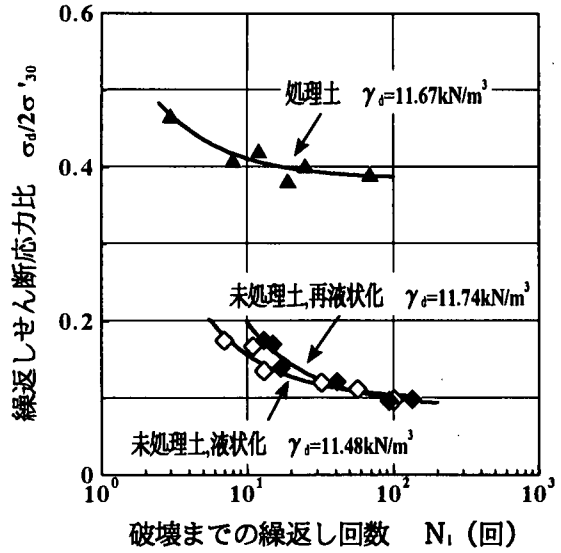


図-6 液状化強度曲線 (昭和町)

した過剰間隙水圧が消散するまで1時間程度要し、このことは現場で観察された噴砂・噴泥現象が地震発生後2日間続いたという報告例⁹⁾と符合する。処理土の液状化強度曲線より得られた $N_f=20$ における繰返しせん断応力比 $R_{20,C}$ は 0.43 となり、未処理土の R_{20} の約 3.3 倍になる。図-6 に昭和町シルトの各種液状化強度曲線を示す。図中のデータは未処理土(◇, ◆)および処理土(▲)のものである。未処理土および処理土の液状化強度曲線は竹内工業団地シルトとほぼ同じであり、 $R_{20}=0.13$, $R_{20,R}=0.14$, $R_{20,C}=0.40$ となる。これは表-1 および図-2 で示した物理的性質で大きな差異がないためと考えられる。両試料とも、再圧密による密度増加により、再液状化強度は液状化強度よりも増加するが、いずれにせよ再液状化強度も小さいことから、セメント安定処理工法等の地盤改良が必要である。

4. セメント安定処理土の液状化抵抗増加比

セメント安定処理によって液状化強度が増加する度合いは土の粒度特性に依存する⁹⁾。そこで、セメント安定処理効果を表す指標として式(1)のような液状化抵抗増加比 RL が提案されており、粒度分布の著しく異なる6種類の土に対して10%粒径 D_{10} と RL の間に良い相関があることが指摘されている⁹⁾。

$$RL = \frac{R_{20,C} - R_{20}}{R_{20}} \quad (1)$$

図-7 に今回のデータを加えた RL と D_{10} の関係を示す。図中の近似直線は山本ら⁹⁾が定めたものである。

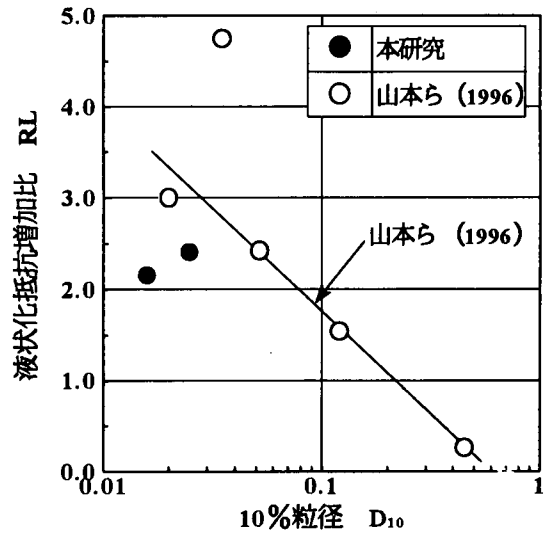


図-7 RL と D_{10} との関係

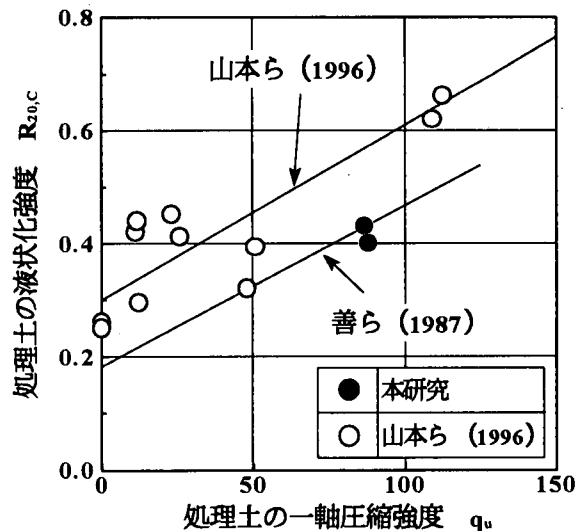
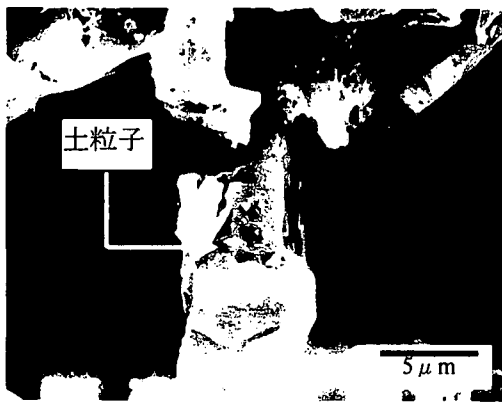


図-8 $R_{20,C}$ と q_0 との関係



(a) 未処理土



(b) 処理土 C=5%

写真-1 昭和町シルト

竹内工業団地シルトでは $D_{10}=0.025\text{mm}$ に対して $RL=2.31$, 昭和町シルトでは $D_{10}=0.016\text{mm}$ に対して $RL=2.08$ が得られており, 固化材の種類および添加率が異なるものの, 本データはこの直線付近から大きくはずれておらず, 従来どおりの良好な相関があると認められる。

図-8に処理土の $R_{20,C}$ と一軸圧縮強度 q_u の関係を示す。図中には善ら⁷⁾と山本ら⁶⁾が示した近似直線を示している。今回の2試料に関して固化材添加率を同じ条件にして一軸圧縮試験を実施したところ, 竹内工業団地シルトでは $q_u=86.8\text{ kPa}$, 昭和町シルトでは $q_u=88.0\text{ kPa}$ が得られた。本データは善ら⁷⁾の近似直線のすぐ近くに位置し, 従来どおりの良好な相関性がみとめられた。

写真-1(a)および(b)に昭和町シルトの未処理土および処理土(C=5%)の走査型電子顕微鏡写真を示す。(a)では, 土粒子を結合する膠着物質は存在せず, 土粒子間の結合力は期待できない。一方, (b)では, 個々に存在している土粒子を結合するセメント水和物(エトリンガイト)の生成が明瞭に確認できる。

5. 結論

本研究から得られた結論を以下に示す。

- 1) 竹内工業団地シルトおよび昭和町シルトの液状化強度はともに小さい。
- 2) 再液状化強度は液状化強度よりも若干大きくなった。これは再圧密による試料の密度増加によるものだと考えられる。
- 3) 2試料ともセメント安定処理土の, 液状化強度は未処理土のものに比べ約3倍増加した。

- 4) セメント安定処理土に対して, 液状化抵抗増加比 RL と10%粒径 D_{10} の間には良好な相関性があった。
- 5) 液状化強度 $R_{20,C}$ と一軸圧縮強度 q_u の間には良好な相関性があった。

謝辞：本研究を遂行する上で, (株)宇部三菱セメント研究所・岡林茂生氏ならびに藤野秀利氏にご支援いただいた。また, 実験では山口大学大学院生・田口岳志氏, 藤本哲生氏にご協力いただいた。ここに記して深謝する。

参考文献

- 1) 森 伸一郎ほか：地震で液状化したシルト質浚渫埋立地盤の地震後の地下水挙動, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, pp.626-627, 1994.
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.204-205, 1989.
- 3) 地盤工学会：土質試験の方法と解説(第一回改訂版), pp.430-440, 2000.
- 4) 基礎地盤コンサルタンツ(株)：平成12年(2000年)鳥取県西部地震調査報告書(社内技術資料), 2000.
- 5) 山口大学調査団：平成12年鳥取県西部地震とその被害に関する緊急調査報告, 土と基礎, Vol.49, No.1, pp.36-40, 2001.
- 6) 山本哲朗ほか：砂～シルト地盤に対する液状化対策としてのセメント安定処理の効果に及ぼす粒度の影響, 土木学会論文集, No.541/III-35, pp.133-146, 1996.
- 7) 善 功企ほか：セメント混合した砂質土埋立て工法に関する研究—改良土の基本的特性と混合・埋立実験—, 港湾技研資料, No.579, pp.1-41, 1987.