

平成 12 年鳥取県西部地震におけるシルト質土の液状化強度特性とセメント安定処理

山口大学大学院 学 ○千田隆行

山口大学工学部 正 山本哲朗 正 鈴木素之

1. はじめに 近年、日本各地で地震が頻発している。平成 12 年鳥取県西部地震では埋立地盤で液状化現象が発生し、建物の不同沈下などの多岐にわたる被害が発生した。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指摘された。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による余震の再液状化の危険性も指摘されている¹⁾。著者らは、境港市周辺の埋立地 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の効果について粒度特性および一軸圧縮強度の点から検討した。

2. 試料および試験概要 試料は、噴砂・噴泥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 試料とした。物理定数は竹内工業団地が $\rho_s=2.636\text{g/cm}^3$, $U_c=2.00$, $D_{50}=0.046\text{mm}$, $F_c=97.4\%$, $F_{\text{clay}}=3.6\%$, 昭和町が $\rho_s=2.640\text{g/cm}^3$, $U_c=3.00$, $D_{50}=0.045\text{mm}$, $F_c=98.7\%$, $F_{\text{clay}}=3.6\%$ とほぼ同じである。図-1 に粒度加積曲線を示す。図-1 中には「港湾の施設の技術上の基準²⁾」で定義されている液状化の可能性の範囲を記載している。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と判定される。

これら試料に対して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 $\sigma'_{30}=98\text{ kPa}$ 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。また、別途セメント安定処理土に対しては一軸圧縮試験を実施した。

3. 液状化強度曲線 図-2 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、横軸には破壊までの繰返し回数 N_f 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。未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} 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^{3), 4)}。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が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 $N_f=20$ における繰返しせん断応力比 $R_{20,R}$ は、再圧密に伴う供試体の間隙比減少のため、 $R_{20,R}=0.16$ で、初回の液状化強度 R_{20} より大きくなった。再液状化試験では初回の液状化試験で発生した過剰間隙水圧が消散するまで多少の時間を要し、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⁴⁾と符合する。

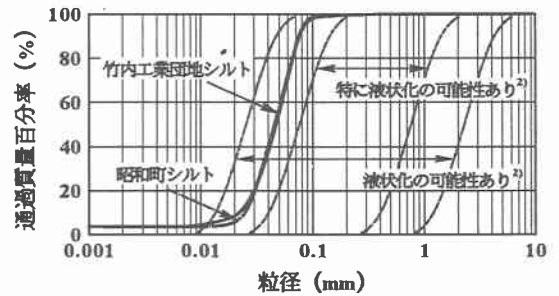


図-1 粒度加積曲線

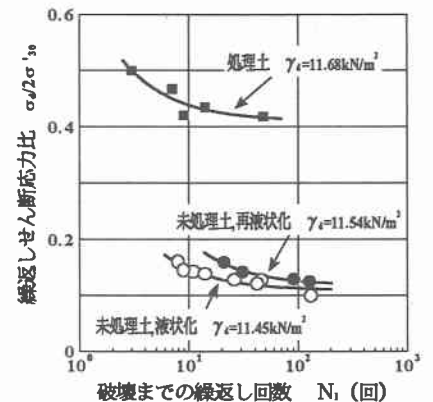


図-2 液状化強度曲線（竹内工業団地）

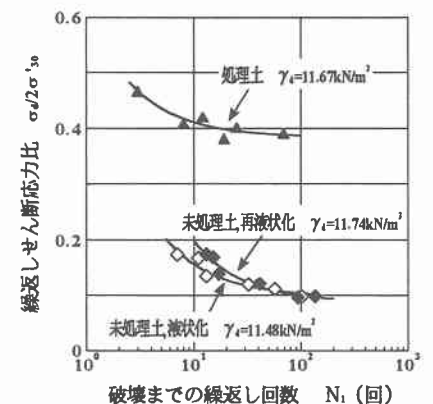


図-3 液状化強度曲線（昭和町）

処理土の液状化強度曲線より得られた $N_1=20$ 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-3 に昭和町シルトの各種液状化強度曲線を示す。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。これは前述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割合は土の粒度特性に依存する⁵⁾。そこで、セメント安定処理効果を表す指標として次式(1)のような液状化抵抗増加比 RL が提案

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

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 D_{10} と RL の間に良い相関があることが指摘されている⁵⁾。図-4 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⁵⁾が定めたもので、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みとめられる。図-5 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⁶⁾と山本ら⁵⁾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量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 $q_u=86.8$ kPa、昭和町シルトでは $q_u=88.0$ kPa が得られた。本データは善ら⁶⁾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 に昭和町シルトの処理土の走査型電子顕微鏡写真を示す。これより、土粒子間を結合させるセメント水和物（エトリンガイト）の生成が確認できる。

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。
- ③2 試料にセメント添加したところ、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) 森ら：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第 3 部，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.204-205，1969。3) 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。4) 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(地盤工学会誌)，Vol.49, No.1, pp.36-40，2001。
 5) 山本ら：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。6) 善ら：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—，港湾技術資料，No.579, pp.141，1987。

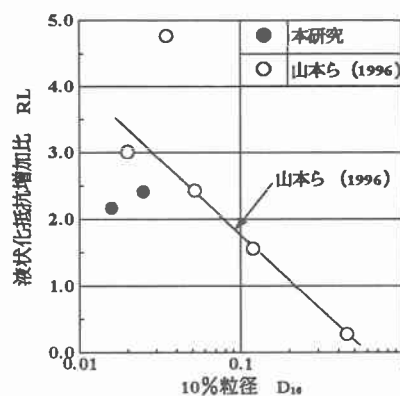


図-4 RL と D_{10} との関係

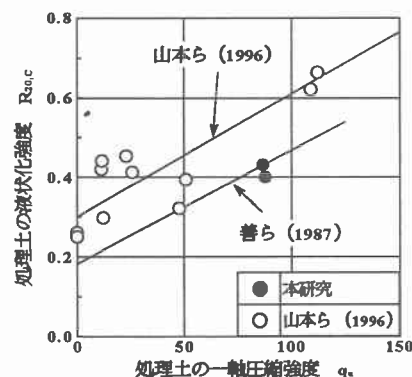


図-5 $R_{20,c}$ と q_u との関係

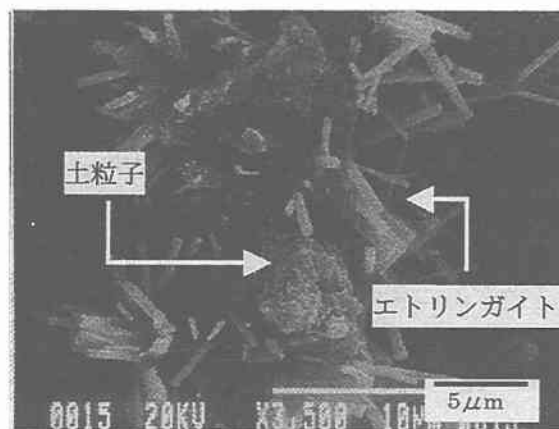


写真-1 昭和町シルト
(処理土 C=5%)