

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

山本哲朗¹・山内智也²・堀淵幸司³

¹正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台2557)

²正会員 工修 (株) 鴻池組 東京本社 (〒101 東京都千代田区神田駿河台2-2-11)

³工修 大分県 臼杵土木事務所 (〒875 臼杵市臼杵洲崎72-254)

砂～シルト地盤に対する液状化対策工としてのセメント安定処理の効果をもとに土の粒度特性から調べるために、砂からシルトの範疇にある6種類の土試料を対象にして三軸セル室で1日間圧密した処理土について液状化実験を実施した。その結果、安定処理の効果を表す指標として定義した液状化抵抗増加比 RL は土の有効径 D_{10} ともっとも良い相関にあつて、両者の関係はセメント添加率に強く依存することが明らかにされた。

Key Words : liquefaction, cement fixing agent method, grain size distribution, sand, silt

1. まえがき

近年、飽和砂地盤の液状化防止対策としてセメント安定処理工法を開発し、利用するという立場からセメント安定材の種類と添加量、養生(圧密)日数といった諸因子に着目して、それらが特定の砂の液状化抵抗に与える影響を調べるための基礎実験が実施されている^{1)~8)}。

特に最近、細粒分の多い埋立地盤に対してセメント安定処理液状化対策工が実施されている^{9), 10)}ことを勘案すれば、土の粒度の違いによってセメント安定処理の効果がどのように変化するかを把握しておくことが必要である。さらに、土の粒度のどういった指標とセメントの添加による土の液状化抵抗の増加が関係するかを室内実験で予め検討しておけば、セメント安定処理工法を実地盤の液状化対策に採用しようとする場合に基本となり、しかも有益な指針が得られるはずである。

本研究は、こういう観点から液状化対策としてのセメント安定処理の効果をもとに土の粒度との関係から明らかにすることを主目的にして繰返し三軸試験機を用いた液状化実験を行った。そのため、粒度分布のかなり異なり、砂からシルトの範疇にある6種類の土試料を用いた。セメントには2種類のものを用いて、その添加量を変えた。

本論文では最初にセメント処理土の液状化に達するまでの有効応力経路、応力ひずみ関係を未処理土のそれと比較しながら考察した。その後、処理土の液状化抵抗の増加比を表す指標として定義した RL といくつかの土の粒度指標との関係を調べ、それはセメント添加率ごとに10%粒径(有効径) D_{10} と良い相関にあることを明らかにした。

さらに、処理土の液状化抵抗と一軸圧縮強度の関係、処理土の土粒子構造および粒度分布に見られる特徴を述べる。

2. 実験に用いた土試料およびセメント

粒度特性がかなり相違する6種類の試料を用いた。表-1はそれぞれの土の粒度指数を示し、図-1は粒度曲線を示す。表-1に記した順序、すなわち新宮砂、豊浦砂、シルト、宇部岬シルト質砂、宇部西沖シルト、宇部まさ土の順に粒度分布は悪い。シルト以外の土は炉乾燥後、表-1の最大粒径 D_{max} で示す大きさのふるいによって粒度調整して得られた。以下に各土試料について簡単に説明する。

新宮砂は福岡県新宮町産の海浜砂であり、豊浦砂は山口県豊浦町産の海浜砂である。現位置のシルトとして、宇部西沖シルトしか入手できなかったため、豊浦砂をバンタムミル粉砕機で粉砕して人工的に得

表-1 土試料の諸物理定数

	Shingu sand	Toyoura sand	Silt	Ubemisaki silty sand	Ubenishioki silt	Ube decomposed granite soil
G_s	2.640	2.642	2.643	2.665	2.430	2.635
U_c	1.69	1.71	1.90	3.46	17.2	55.0
D_{10} (mm)	0.45	0.12	0.035	0.052	0.005	0.02
D_{50} (mm)	0.81	0.21	0.066	0.15	0.074	0.775
D_{max} (mm)	2.00	0.84	0.106	2.00	2.00	4.75
W_L (%)	NP	NP	35.8	NP	29.2	28.8
W_P (%)	NP	NP	NP	NP	26.5	NP
I_P	NP	NP	NP	NP	2.7	NP
e_{max}	0.851	0.941	1.261	1.027	1.518	0.950
e_{min}	0.624	0.643	0.722	0.658	0.852	0.673
F_{clay} (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	5.0
FC (%)	0.0	0.0	62.5	13.3	51.7	16.4
	SP	SP	ML	SM	ML	SM

石膏を添加したものである。両方のセメントとも比重は3.13である。

3. 実験装置および方法

(1) 液状化実験装置

実験には応力制御方式の繰返し三軸試験機を用いた。この試験機では直径約5cm、高さ12cmの供試体に作用させる正弦波状の繰返し軸差応力(σ_d)は、復動式エアシリンダーの上下の圧力室に所定の大きさの空気圧を交差的に送り込んで発生させられる。その他の仕様の詳細は先の研究¹⁾に譲る。

実験時には供試体に作用させる繰返し軸差応力、供試体に生じる過剰間隙水圧（以下、間隙水圧という）および軸方向変位振幅を、それぞれロードセル（容量：490N）、間隙水圧計（容量：980kPa）、ダイヤルゲージ式変位計（容量：20mm）で測定した。

(2) 実験方法

a) 液状化実験

供試体の作製は以下の方法で行った。所定量の土試料に脱気水を満たし、良く攪拌しながら2時間ほど湯煎煮沸を行い、土粒子間の空気を除去する。セメントを添加しない未処理土の場合には、この脱気した土試料を水中落下法でゴムスリーブに詰めて飽和供試体を作製した。一方、セメントを添加した処理土の場合には、所定量のセメントを混合した土試料を同様の方法で詰めて飽和供試体を作製した。その際にはセメントと土とが均質になるように混合し、それを少量ずつゴムスリーブに詰めて、均質なセメント混合処理土を得よう心がけた。

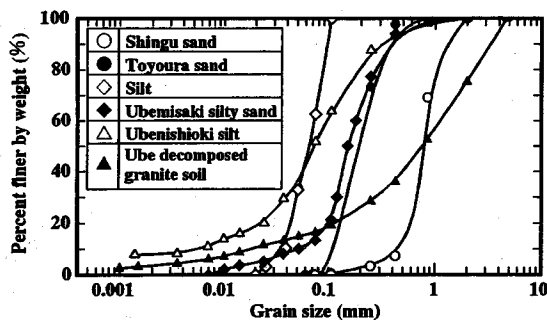


図-1 試料の粒度分布曲線

られたシルト（粒径38~106 μm ）も実験に用いることにした。このシルトの細粒分含有率 FC は62.5%で、他の土試料に比べてかなり大きい。宇部岬シルト質砂は山口県の当地区の海底浚渫土である。宇部西沖シルトは、当地区の埋立地盤においてボーリングコアから得られたものである。宇部まさ土は広島型花崗岩の風化したまさ土である。

土粒子形状の特徴として豊浦砂を粉砕して得られたシルトは著しく角ばっているが、その他の土はやや角ばっているか、丸味を帯びていることが挙げられる。

セメントには、普通ポルトランドセメント（以下、 OPC と言う）および $UKC-H$ （株）カルシード製の2種類を用いた。 $UKC-H$ は軟弱地盤に対する安定処理材として開発され、 OPC に少量の

セメント添加率 C は土試料の乾燥重量に対するセメントの重量百分率で表わすことにし、通常の実験では $C=2\%$ および 5% の 2 通りとした。すべての供試体の乾燥単位体積重量 γ_d は $12\sim 15\text{kN/m}^3$ の範囲にあった。

その後、拘束圧 $\sigma_{30}=98\text{kPa}$ 、背圧 $\sigma_b=49\text{kPa}$ を供試体に作用させて、その際の間隙圧係数 (B 値) は 0.96 以上であることを確認した。この B 値はセメントを添加しない供試体のそれと同程度であった。その後、有効拘束圧 $\sigma'_{30}=49\text{kPa}$ の下で 1 日間供試体の圧密を行った。圧密終了後に、周期 2 秒で振幅の大きさが一定の繰返し軸差応力を供試体に液状化が生じるまで作用させた。本文では一般に行われているように、供試体の軸ひずみ両振幅が 5% に達した時をもって液状化による破壊が発生したものと判定した。

通常、飽和砂地盤の液状化は 10m 以浅で発生することが多いので、 σ'_{30} は 49kPa に設定した。また、圧密ないし養生日数の増加に伴ってセメント処理土の液状化抵抗は増加する⁶⁾ことが分かっているが、本実験では多くの種類の土について多くのデータを得なければならないという必要性からすべての実験で圧密日数は 1 日に限定した。

b) 一軸圧縮試験

処理土の液状化抵抗と一軸圧縮強度の関係を調べるために、一軸圧縮試験を行った。液状化実験の場合と全く同様に 1 日圧密によって処理土供試体を作製した後、ゴムスリーブをカッターナイフで注意深く切り裂いて得られた供試体を実験に用いた。軸ひずみ速度は $1\%/\text{min}$ とした。

c) 走査型電子顕微鏡観察

処理土の土粒子構造を見るために走査型電子顕微鏡観察を行った。

4. 結果および考察

(1) 処理土および未処理土の典型的な液状化実験記録

6 種類の土試料の中でセメント添加による液状化抵抗の増加が最も寡少であった新宮砂について、未処理土および処理土供試体の典型的な液状化実験記録波形をそれぞれ図-2(a), 2(b) に示す。両方の実験とも応力比 $\sigma_d/2\sigma'_{30} \approx 0.2$ で行われた。処理土は OPC を $C=2\%$ 添加したものである。記録線は上から順に、供試体の軸ひずみ ϵ_1 、繰返し軸差応力 σ_d 、間隙水圧 u を示す。軸ひずみおよび軸差応力の符号は圧縮側が正、伸張側が負である。

両図を比べて分かるように、両方の供試体において繰返し載荷回数に伴う軸ひずみおよび間隙水圧の上昇の様子はきわめてよく似ている。このように、新宮砂のように比較的粗い粒子からなる粒度分布の悪い砂では OPC を $C=2\%$ 程度添加してもセメントによる土粒子間の固結は生じないため、液状化抵抗は増加しないと言える。

一方、人工的に作ったシルトを除いてセメントの添加による液状化抵抗の増加が最も顕著であった宇部西沖シルトについて未処理土および処理土の典型的な記録波形をそれぞれ図-3(a), 3(b) に示す。この未処理土では小さい繰返しせん断応力 ($\sigma_d/2\sigma'_{30}=0.121$) の下で液状化が発生している。これに対して、処理土では大きな繰返しせん断応力 ($\sigma_d/2\sigma'_{30}=0.632$) を作用させているため、せん断初期から軸ひずみ振幅は漸増する傾向が見られるものの、液状化後も間隙水圧は決して有効拘束圧に等しくならない。また、正のダイレイタンシーによって一時的に間隙水圧は負またはゼロとなり、土粒子間の有効応力は初期状態の値まで回復している。この現象は密な砂あるいは粘性土の液状化実験の時に観察されるサイクリックモビリティと同じものである。この原因は後述するように、セメントの添加によって特に細かい土粒子間が固結して土粒子構造が安定となるためと考えられる。

(2) 処理土および未処理土の有効応力経路、応力-ひずみ関係

図-4(a), 4(b) はそれぞれ新宮砂の未処理土および処理土供試体の有効応力経路を示す。同様に、図-5(a), 5(b) は繰返し軸差応力-軸ひずみ関係を示す。これらの図中、有効平均主応力 p' および軸差応力 q は式 (1) で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} p' &= \frac{\sigma'_a + 2\sigma'_r}{3} \\ q &= \sigma'_a - \sigma'_r \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで (σ'_a, σ'_r) はそれぞれ有効応力表示による軸方向応力および半径方向応力である。

図-4(a), 4(b) から分かるように、セメントの添加による液状化抵抗の増加の見られない新宮砂の処理土の場合、未処理土と同様に有効応力が繰返し載荷回数に伴って減少し、液状化時にほぼゼロとなる。この実験も含め、以下の実験での有効応力経路図がやや上方に位置するのは、圧縮側の繰返し軸差応力が引張り側よりも若干大きいためである。また図-

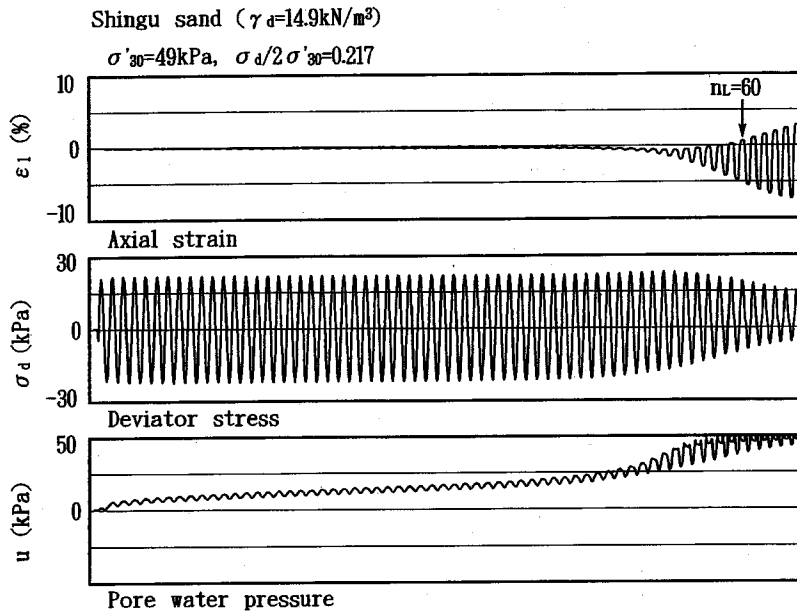


図-2(a) 新宮砂未処理土の液状化実験の記録波形

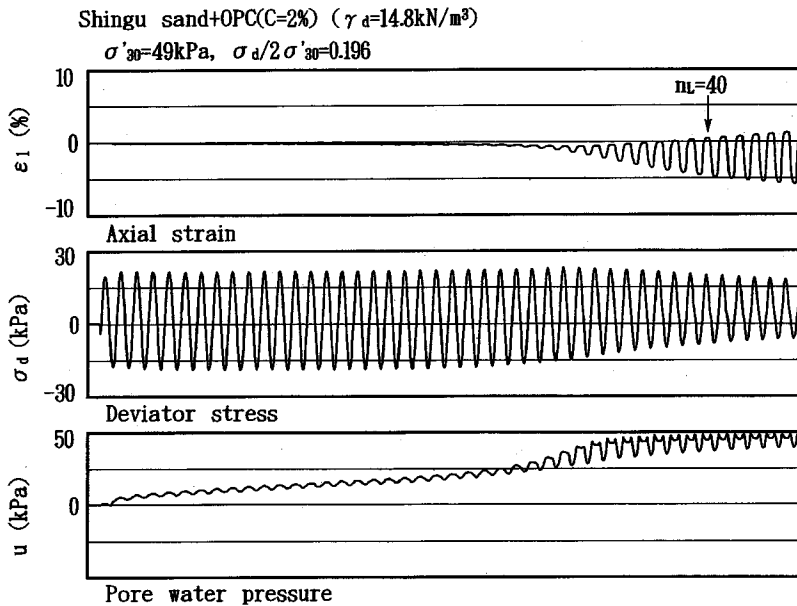


図-2(b) 新宮砂処理土 (OPC(C=2%)) の液状化実験の記録波形

5(a), 5(b)から分かるように、未処理土、処理土の違いはほとんどなく、ともに軸ひずみは伸張側に増加する。

図-6(a), 6(b)はそれぞれ宇部西沖シルトの未処理土および処理土供試体の有効応力経路を示す。図-

7(a), 7(b)は軸差応力-軸ひずみ関係を示す。図-7(a), 7(b)を比較して分かるように、セメントの添加による液状化抵抗の増加の著しい処理土では、上述した理由によって有効平均主応力は消失することはない。

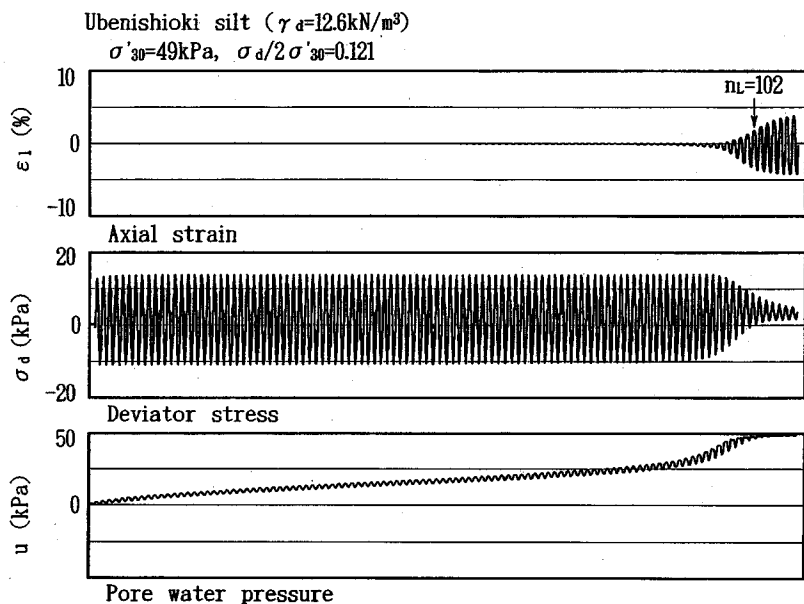


図-3(a) 宇部西沖シルト未処理土の液状化実験の記録波形

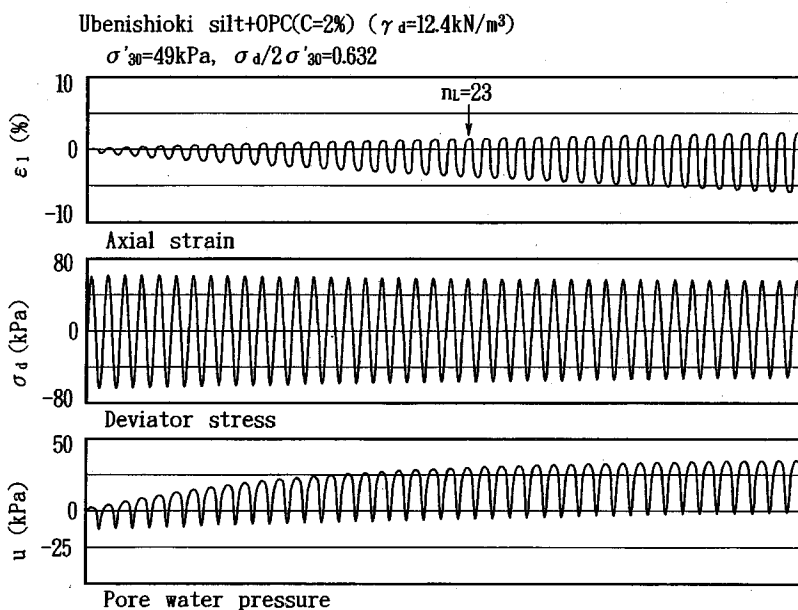


図-3(b) 宇部西沖シルト処理土 (OPC(C=2%)) の液状化実験の記録波形

また、図-7(a)の未処理土の場合、ある繰返し載荷回数で軸ひずみは急増し始め、液状化後は軸差応力振幅の減少は顕著となるが、図-7(b)の処理土の場合には図-3(b)のところで述べたように、この実験で繰返しせん断応力が大きいために大きな軸ひず

み振幅が1サイクル目から発生し、伸張側にその振幅が漸増するものの、軸差応力の振幅の減少はそれほど生じない。

このように、セメントの添加によって液状化抵抗の増加が顕著に見られる宇部西沖シルトの場合には

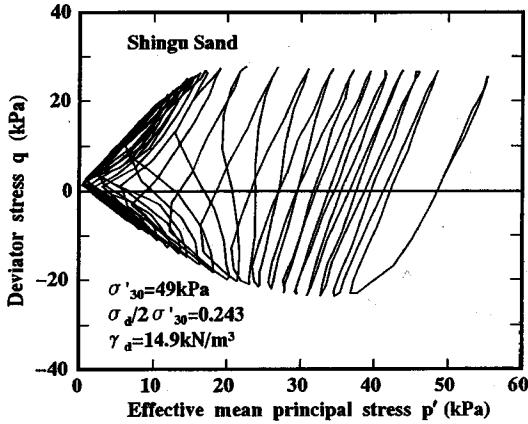


図-4(a) 新宮砂の有効応力経路

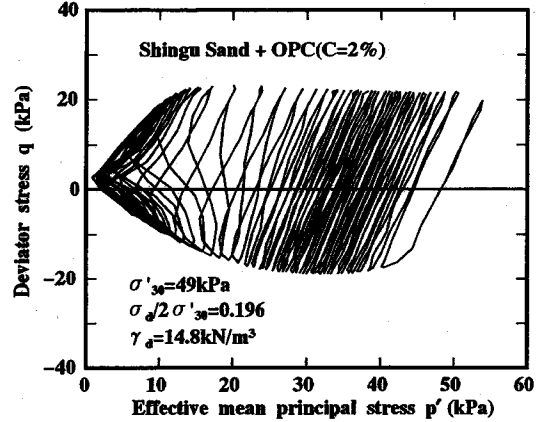


図-4(b) 新宮砂 (OPC(C=2%)) の有効応力経路

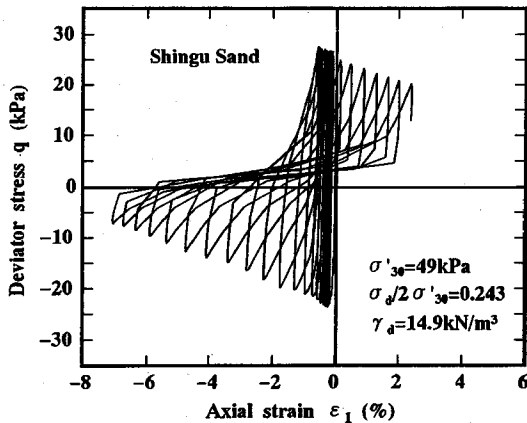


図-5(a) 新宮砂未処理土の軸差応力-ひずみ曲線

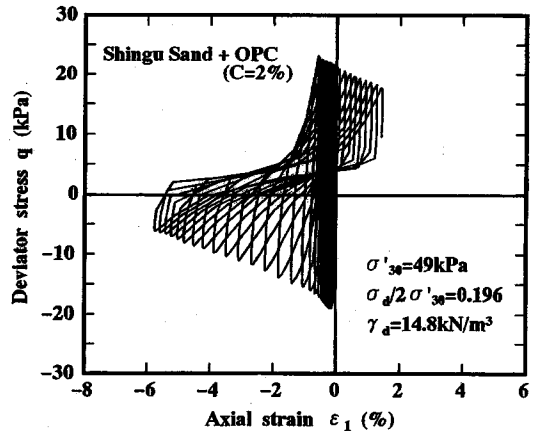


図-5(b) 新宮砂処理土 (OPC(C=2%)) の軸差応力-ひずみ曲線

処理土の有効応力経路および繰返し軸差応力-軸ひずみ曲線は未処理土の場合と著しく相違することが明示された。

(3) 各処理土の $\sigma_d/2\sigma'_{30}$ と n_L の関係

各土試料毎に OPC および UKC-H をそれぞれ $C=2\%$, $C=5\%$ 添加した処理土の一連の液状化実験から得られた応力比 $\sigma_d/2\sigma'_{30}$ と液状化を生じるまでの繰返し載荷回数 n_L の関係 (以下、液状化抵抗曲線と呼ぶ) を図-8(a)~8(f) に示す。なお、宇部西沖シルトについては $C=1\%$ および $C=2\%$ に対する関係が示されている。これらの図には比較のため、未処理土 ($C=0\%$) の結果も示す。なお、処理土では

土粒子間の隙間に僅かな量のセメントが均質に混入された状態での相対密度を正確に決定することは困難である。そのため、結果の整理ではそれに代わり乾燥単位体積重量 γ_d を用いた。

以下に、個々の土試料毎に結果を少し詳しく述べる。最初に図-8(a) に示した新宮砂においては、OPC および UKC-H を $C=2\%$ 添加した処理土の液状化抵抗曲線はセメントの種類にかかわらず未処理土のそれと全く同じであり、 $n_L=20$ 回の応力比で与えられる液状化抵抗 R_{20} はセメントの添加によって全く増加しないことが分かる。また、OPC を $C=5\%$ 添加した場合には処理土の液状化抵抗は僅かに増加するが、他の土試料に比べてその割合は

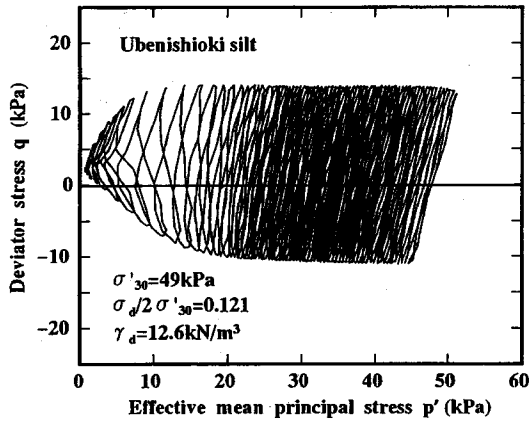


図-6(a) 宇部西沖シルト未処理土の有効応力経路

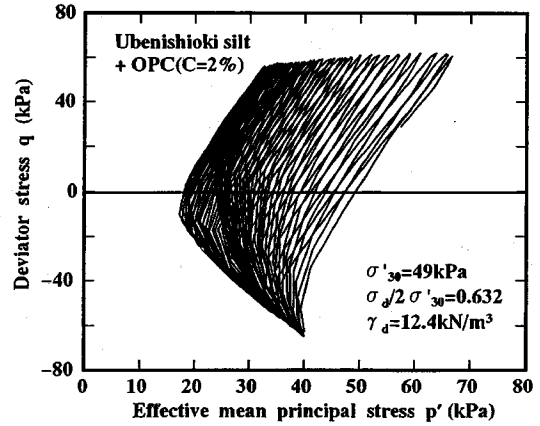


図-6(b) 宇部西沖シルト処理土 (OPC (C=2%)) の有効応力経路

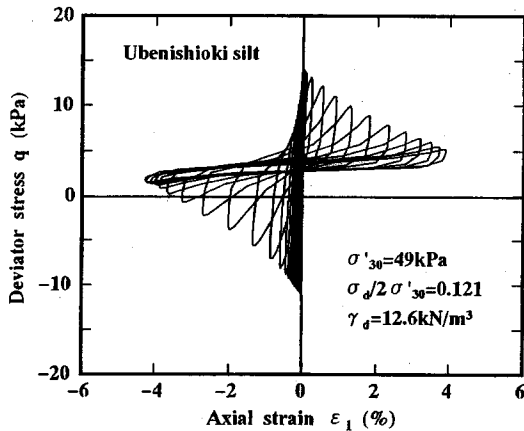


図-7(a) 宇部西沖シルト未処理土の軸差応力-ひずみ曲線

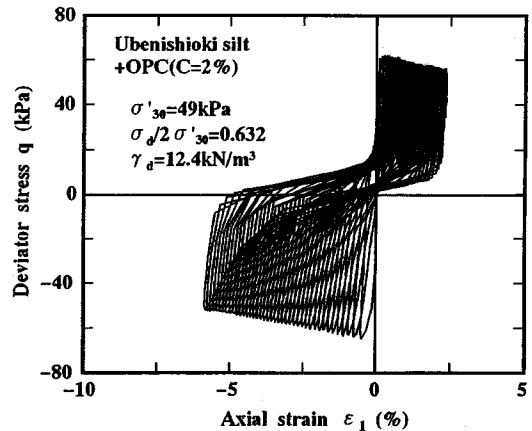


図-7(b) 宇部西沖シルト処理土 (OPC(C=2%)) の軸差応力-ひずみ曲線

もっとも小さい。

図-8(b)の豊浦砂においては、処理土の液状化抵抗曲線は未処理土のそれよりもかなり上位にあることが分かる。そしてUKC-HあるいはOPCをC=2%だけ添加した処理土の液状化抵抗は未処理土の場合に比べて1.6倍、1.3倍ほど大きいことが分かる。

図-8(c)のシルトの場合は、他の土試料に比べてC=5%の処理土の液状化抵抗曲線は未処理土のそれよりもかなり上位にあるのが注目される。すなわち、OPCを添加した場合は未処理の場合よりも4.1倍、UKC-Hを添加した場合は5.6倍ほど液状化抵抗は大きい。この原因はシルトは豊浦砂を粉砕して人工的に作った土試料であるので、破碎した土粒子表

面が新鮮で、しかも凹・凸に富んでいるためにセメントによる土粒子間の固結の度合いが他の土試料と比較して著しく大きいためと考えられる。

図-8(d)の宇部岬シルト質砂の場合は他の土試料とは異なり、UKC-HよりもOPCを添加した方が液状化抵抗の増加が大きくなっている。例えばOPC、UKC-HをそれぞれC=5%添加した処理土の液状化抵抗は未処理土よりも4.0倍、3.3倍大きい。このシルト質砂は現位置で採取した時点ではpH=3程度であったが、他の土と同じようにpH=6程度となるように水酸化ナトリウムを加えたために、このような結果が得られたのか、あるいは他の理由によるものかは今の段階では明らかにすることはできなかった。

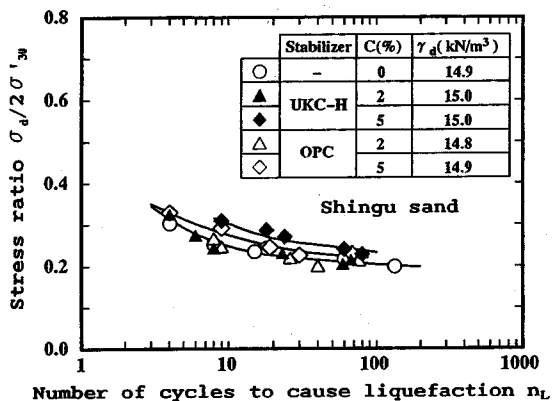


図-8(a) 新宮砂

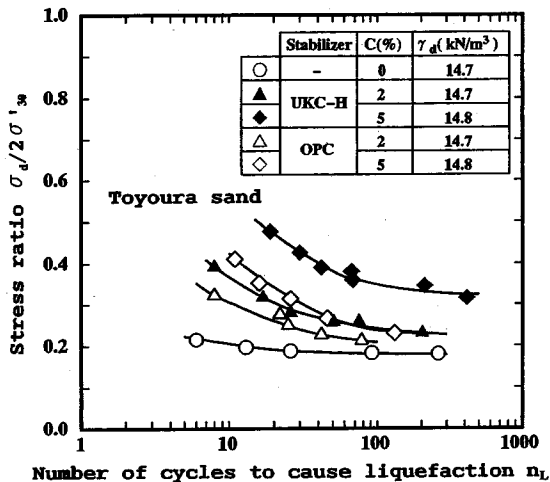


図-8(b) 豊浦砂

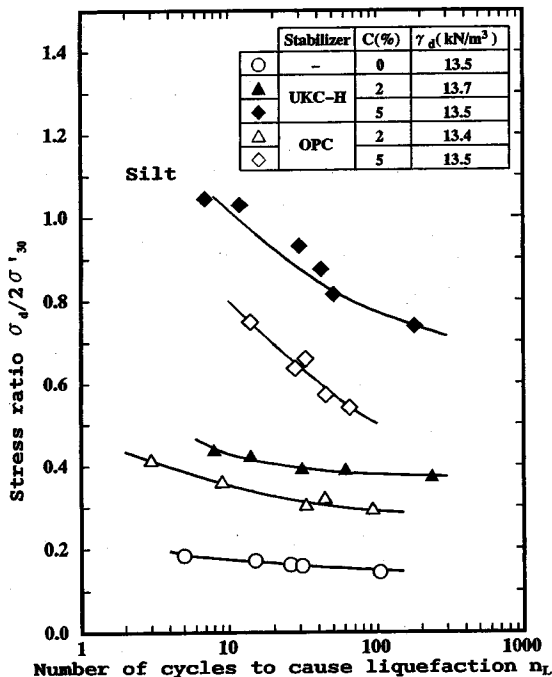


図-8(c) シルト

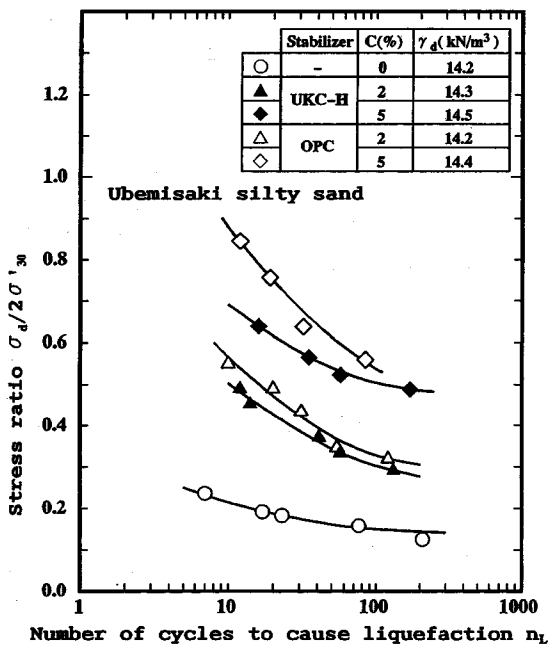


図-8(d) 宇部岬シルト質砂

図-8(a)～(f) セメントの種類および添加率 C を変えた各土試料に対する繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma'_{30}$ と液状化を生じるまでの繰返し載荷回数 n_L の関係

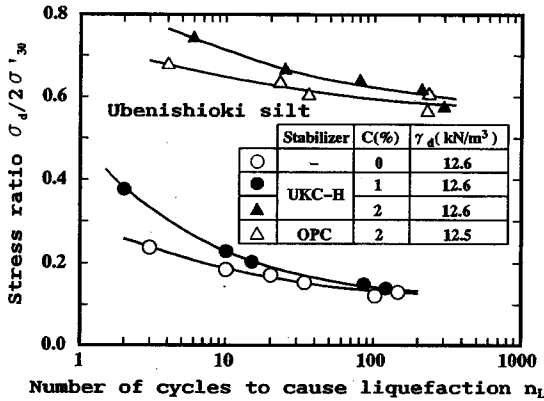


図-8(e) 宇部西沖シルト

図-8(e)の宇部西沖シルトではUKC-HおよびOPCをC=2%添加した場合の液状化抵抗は、それぞれ未処理土よりも4.0倍、3.8倍大きくなっており、既に述べたように、人工のシルトを除いて本実験で用いた土試料の中で最もセメント安定処理の効果は大きい土試料である。

最後の図-8(f)のまさ土の場合はセメントの種類によって液状化抵抗の増加には差異はほとんど見られない。すなわち、C=2%および5%の両方のセメントによる処理土の液状化抵抗は未処理土よりもそれぞれ2.8倍、3.9倍大きい。

以上の実験結果から、細粒分が多くて粒度の良い宇部西沖シルトではC=2%の場合でも液状化対策としてのセメント安定処理の効果は顕著であるが、粗粒分が多くて粒度の悪い新宮砂ではC=5%でもその効果はあまり期待できないという結論が得られた。

また、シルトに見られるように土粒子の表面状態によって、あるいは宇部岬シルト質砂に見られるように土のpH値によってセメント安定処理の効果異なる可能性のあることが示された。この点は今後さらに検討を要する。

(4) 処理土の液状化抵抗増加比RLに關する 粒度指数についての検討

(3)の検討でセメントの添加による液状化抵抗の増加の程度は本質的には土の粒度に依存することが示唆された。次に、その増加が土の粒度のどういった指数に關与しているか検討を行った。

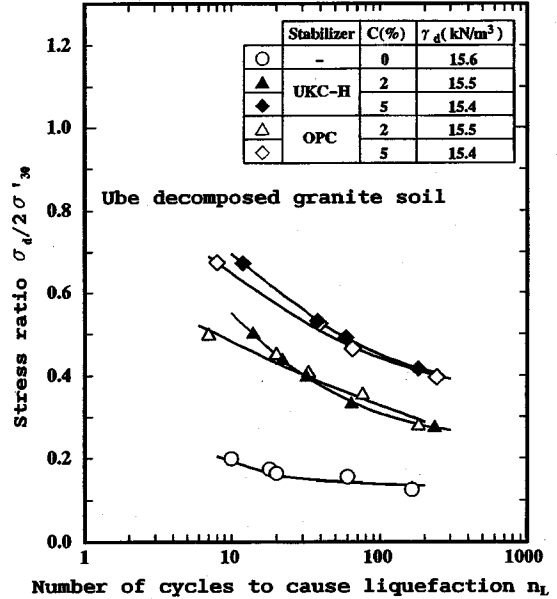


図-8(f) 宇部まさ土

セメント安定処理の効果を表す指標として液状化抵抗増加比RL(式(2))を定義し、これと均等係数 U_c 、細粒分含有率FC、平均粒径 D_{50} および有効粒径 D_{10} との関係を調べ、それぞれ図-9~12に示した結果を得た。

$$RL = \frac{(R_{20})_C - (R_{20})_{C=0}}{(R_{20})_{C=0}} \quad (2)$$

ここで、 $(R_{20})_C$ 、 $(R_{20})_{C=0}$ はそれぞれ処理土および未処理土供試体の液状化抵抗を表す。

図-9, 10, 11からRLはそれぞれ U_c 、FC、 D_{50} とは良い相関関係にないことが分かる。なお、ここには図示していないが、最大粒径 D_{max} とも良い相関はなかった。

一方、図-12から若干のデータのばらつきはあるが、セメントの種類によらずC=2%および5%のセメント添加率毎に、 D_{10} が小さいほど、RLは大きくなるという良い相関が両者間に認められる。前述したように、人工的に作ったシルトについてはセメント安定効果が他の現位置の土試料よりも高いので、そのRL値は他より突出している。

RLが D_{10} と良い相関にあるのは以下のように解

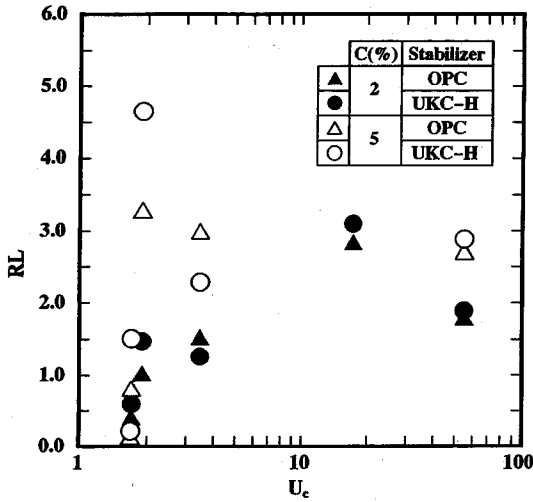


図-9 処理土の RL と U_c の関係

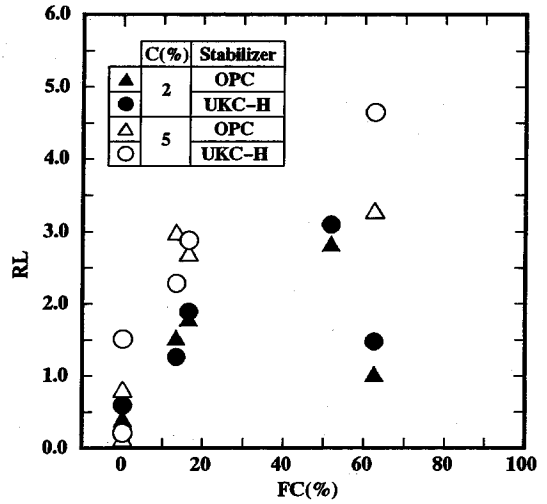


図-10 処理土の RL と FC の関係

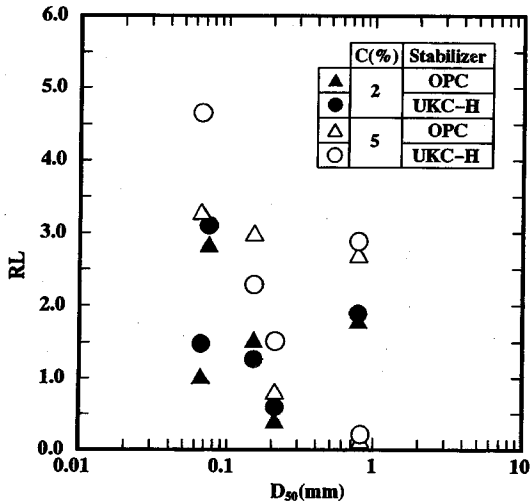


図-11 処理土の RL と D_{50} の関係

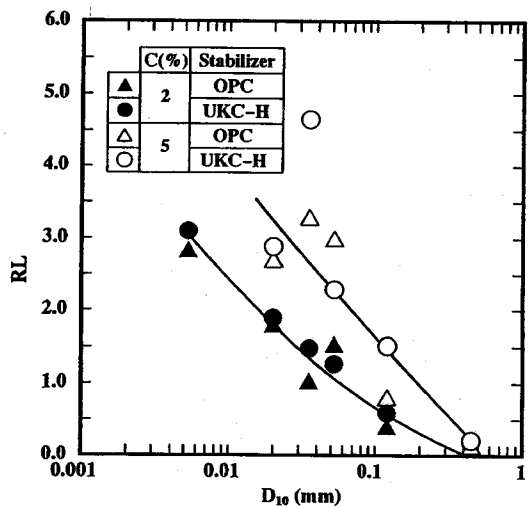


図-12 処理土の RL と D_{10} の関係

積される。後述の土粒子構造の走査型電子顕微鏡写真に見られるように、セメントを添加した土粒子表面およびその間にはセメント水和物が生成して、土粒子間が固結される。C=2%あるいは5%というようにセメント添加率があまり大きくない場合には土粒子径が小さいほど、この固結の度合いが大きく、土粒子構造が安定になるため、液状化を生じ難くになると考えられる。土の粒度指数の内では D_{10} は他よりも細かい粒子の大きさを代表する指標であるので、こ

れがRLに関与すると考えられる。

なお、土の間隙比の大きさ、言い換えると土の骨格構造に関する砂の透水係数は D_{10} を用いて簡易的に推定される。

以上のように、本実験においてRLは D_{10} と最も良い相関があるという興味ある結果が得られたので、過去に他の研究者によって得られた実験結果についても同様に検討した。その結果は図-13に示す。すべての結果はC=2%のものである。しかし、表-2に

表-2 過去の研究における試料,セメントおよび試験条件

Sample	Stabilizer	σ_{so} (kPa)	t (days)	Reference No.
a	Niigata EP sand	PBSC typeB	?	34 (2)
b	Toyoura sand	OPC	98	2 (3)
c	Monterey No. 0/30	PType II	?	14 (4)
d	Monterey No. 0	PType I	98	15 (5)
e	Toyoura sand	OPC	49	1 (7)
f	Toyoura sand	OPC	49	7 (7)
g	Toyoura sand	OPC	49	28 (7)
h	Toyoura sand	Sorstar	49	1 (7)
i	Toyoura sand	Sorstar	49	7 (7)
j	Toyoura sand	Sorstar	49	28 (7)
k	Chiba Mt. sand	OPC	49	7 (7)
l	Chiba Mt. sand	Sorstar	49	7 (7)
m	Decomposed granite	OPC	49	7 (7)
n	Decomposed granite	Sorstar	49	7 (7)

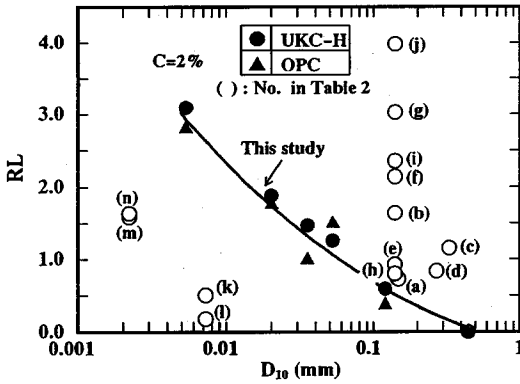


図-13 過去の研究から得られた RL と D_{10} の関係

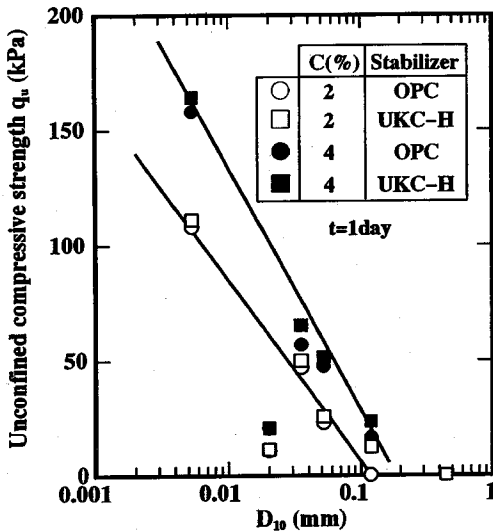


図-14 一軸圧縮強度 q_u と D_{10} の関係

示すように、個々の実験毎に用いたセメントの種類、供試体の養生または圧密日数 t および圧密圧の大きさが異なることもあって、図-13 からは RL と D_{10} の間には良い相関を得ることはできなかった。ただ、本実験と同じ豊浦砂を用いた安田らの実験⁵⁾における No. e および No. h の RL 値は本実験で得た値に近いものであった。

(5) 処理土の液状化抵抗と一軸圧縮強度の関係

$C=2\%$ および 4% の各処理土の一軸圧縮強度 q_u と D_{10} の関係を調べた結果を図-14 に示す。すべての

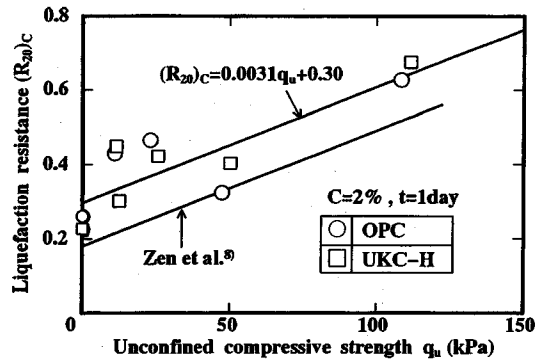


図-15 処理土の液状化抵抗と一軸圧縮強度の関係

新宮砂処理土、また OPC を $C=2\%$ 添加した豊浦砂処理土では圧密後にゴムスリーブを取り外す際に供試体は崩壊し、一軸圧縮試験を行うことができなかった。その結果は $q_u=0$ の点で示した。図-14 からそれぞれのセメント添加率に対して処理土の q_u は D_{10} の対数値に比例して減少することが分かる。また、両者の関係にはセメントの違いによってほとんど差異は見られない。セメントの添加によって一軸圧縮強度が増加するのは、一般に土粒子間に生じた固結に起因する見かけの粘着力によると考えられている^{8), 12)}。

$C=2\%$ 、 $t=1$ 日の各処理土の液状化抵抗と一軸圧縮強度の関係を調べた結果を図-15 に示す。 q_u が小さい範囲では両者の関係には若干のばらつきがあるが、セメントの種類にかかわらず、 $C=2\%$ の場合の両者の関係は次式によって与えられよう。 q_u の単位は kPa である。

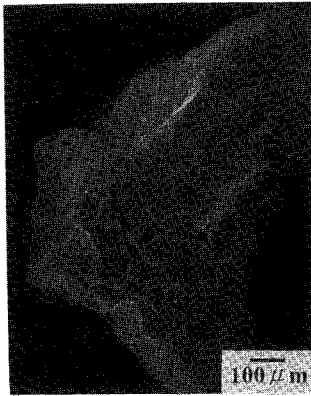


写真-1(a) 新宮砂未処理土の電子顕微鏡写真

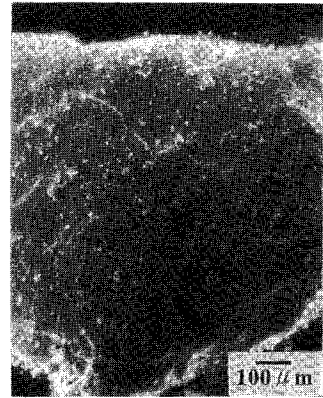


写真-1(b) 新宮砂処理土 (OPC(C=2%)) の電子顕微鏡写真

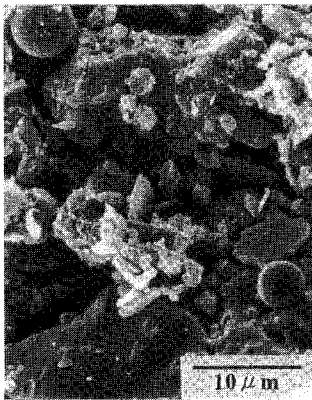


写真-2(a) 宇部西沖シルト未処理土の電子顕微鏡写真

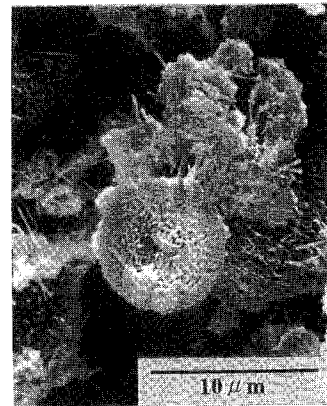


写真-2(b) 宇部西沖シルト処理土 (OPC(C=2%)) の電子顕微鏡写真

$$(R_{20})_C = 0.0031q_u + 0.30 \quad (C=2\%) \quad (3)$$

なお、セメント処理土の液状化抵抗と一軸圧縮強度の間には比例関係があることは既に善ら⁸⁾によって指摘されている。その関係を図-15 に示す。その実験では砂およびまき土の $C=2\%$ の処理土供試体は海水中で 28 日間養生された。このように、著者らと彼らの実験では試験条件が大幅に違うが、ある条件のもとではセメント処理土の液状化抵抗は一軸圧縮強度を用いてある程度予測できる可能性が示されたことは興味深い。

(6) 処理土の土粒子構造および粒度分布

走査型電子顕微鏡を用いてセメント処理土および未処理土の土粒子構造を観察した。その一例として新宮砂および宇部西沖シルトに OPC ($C=2\%$) を添加した処理土の結果を示す。

まず新宮砂については写真-1(a) に示す未処理土

の場合(倍率 100 倍)と比較して、写真-1(b) に示す処理土(倍率 100 倍)では、土粒子表面に網目状の珪酸石灰水和物(以下、 $C-S-H$ と言う)が固結しているのが分かる。この写真では、土粒子間の状況は分からないが、 $C-S-H$ によって土粒子間が固結している状態は観察されなかった。

宇部西沖シルトの場合は、写真-2(a) に示す未処理土(倍率 3,000 倍)と比較して、写真-2(b) に示す処理土の場合(倍率 4,500 倍)には、土粒子の表面に $C-S-H$ が生成し、また針状のアルミン酸硫酸石灰水和物(以下、エトリングイトと言う)が土粒子同士を結合させている様子が観察される¹³⁾。このようなエトリングイトの生成によって、土粒子が三次元的に結合され、さらに $C-S-H$ の生成によって、土粒子間の間隙が狭められて密実で堅固な土粒子構造が形成されるためにセメント処理土の強度増加が発現することは既に分かっている¹³⁾。

今回の観察の範囲においては、新宮砂のように粗

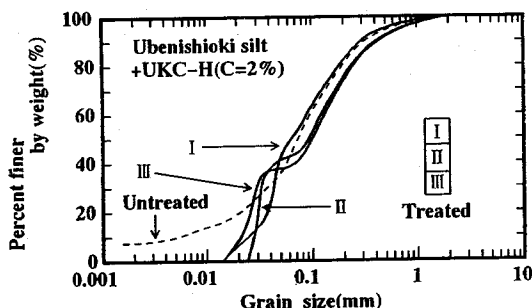


図-16 宇部西沖シルト処理土の粒度分布曲線

い粒子から成る土の処理土では $C-S-H$ だけが生成し、一方、宇部西沖シルトのような細かい粒子を多く含む土の処理土では $C-S-H$ の他にエトリングイトが生成していることが確認された。 $C-S-H$ は土粒子の表面を覆うように生成することを考慮すると、新宮砂のように粒径が大きく、均等な土試料では間隙が大きいために、 $C-S-H$ の生成によって間隙が減少する割合は小さい。その結果、すでに述べたように、この砂の処理土の液状化抵抗の増加はほとんどなく、また一軸圧縮強度はゼロであると理解される。

次に、セメントの添加によって粒度分布に最も顕著な変化が認められた宇部西沖シルトについてセメント添加前後における粒度曲線の一例を図-16に示す。3本の実線の曲線は処理土供試体の上部(I)、中央部(II)、下部(III)に対するものである。破線は未処理土のそれを示す。この図から分かるように、処理土では粒径 0.015mm 以下の細粒分が消失し、階段状粒度分布になっている。一方、当然のことながら新宮砂のセメント処理土では顕著な粒度変化は見られなかった。

5. 結論

砂～シルト地盤の液状化対策としてのセメント安定処理の効果を土の粒度との関係から調べることを主目的にして繰返し三軸試験機による液状化実験を行った。粒度分布の著しく異なる6種類の土に2種類のセメントを所要量添加し、三軸室で1日圧密した処理土供試体を実験の対象にした。

また処理土の応力～ひずみ関係、液状化抵抗と一軸圧縮強度の関係の他に処理土の土粒子構造、粒度分布を調べた。得られた結果は、以下のように要約することができる。

- (1) 粗い粒子からなる粒度の悪い新宮砂の場合、

セメント添加率 $C=5\%$ の場合でもセメント処理の効果が小さく、せん断時には負のダイレイタンスによって間隙水圧が容易に増加して有効応力がゼロとなり、液状化に至る。これに対して、細粒分に富み粒度の良い宇部西沖シルトの場合、 $C=2\%$ の場合でもセメント処理効果が大きいため、正のダイレイタンスが発生して、有効応力が一時的に回復して決して有効応力がゼロとなることはない。

(2) 今回の実験の範囲では処理土の液状化抵抗増加比 RL (式(2)) は、有効径 D_{10} ともっとも良い相関関係にあり、 D_{10} が小さいほど RL は増加し、その関係はセメント添加率に依存することが明示された。また、その関係は、今回使用したポルトランドセメントおよび $UKC-H$ の場合にほとんど同じものであった。

(3) $C=5\%$ であっても新宮砂では安定処理の効果は期待できないが、逆に $C=2\%$ であっても宇部西沖シルトではその効果は期待できる。

(4) 処理土の一軸圧縮強度は D_{10} と良い相関にある。また、処理土の液状化抵抗 $(R_{20})_c$ と一軸圧縮強度 q_u (単位は kPa) の関係は、 $(R_{20})_c = 0.0031q_u + 0.30$ ($C=2\%$ の場合) なる直線で近似される。

(5) 走査型電顕観察によってセメント水和物が細かい土粒子間を固結させて土粒子構造が安定するために、処理土の液状化抵抗および一軸圧縮強度が増加すると考えられた。したがって、それらの増加は粒度指数の中で細かい土粒子の大きさを代表する指数 D_{10} と良い相関関係にあると理解された。

今後は圧密日数を変えた実験を行い、より実用的であると考えられるセメント安定処理土の液状化抵抗を求めることが必要である。

謝辞：セメント安定材 ($UKC-H$) を提供して頂いた(株)カルシード、また、実験とその結果の整理を手伝って頂いた畑岡直樹君(山口大学大学院)、北村朋子さん(山口大学工学部)に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) Saxena, S.K., Reddy, K.R. and Avramidis, A.S. : Liquefaction Resistance of Artificially Cemented Sand, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.114, No.12, pp. 1395-1413, 1988.
- 2) Clough, G.W., Iwabuchi, J., Rad, N.S. and Kuppasamy, T. : Influence of Cementation on Liquefaction of Sands, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.115, No.8, pp. 1102-1117, 1989.
- 3) 渡辺則雄, 森 利弘, 濱田尚人 : セメント懸濁液を用いた液状化対策に関する振動台実験 (その1 要素試

- 験による液状化特性), 第 27 回土質工学研究発表会講演集, pp.1157-1158, 1992.
- 4) 奥村哲夫, 成田国朝, 大根義男: 人工的にセメンテーション効果を与えた砂の非排水繰返し強度, 土質工学会論文報告集, Vol. 29, No. 2, pp. 169-180, 1989.
 - 5) 安田 進, 永瀬英生, 古関功一, 島 宏, 松枝弘喜: 石灰, セメントを混合した土の液状化強度特性, 第 26 回土質工学研究発表会講演集, pp. 853-854, 1991.
 - 6) 山本哲朗, 大原資生, 堀渕幸司, 鈴川俊道: シルト質砂地盤の液状化対策としてのセメント安定処理, 地盤と建設, Vol. 11, No. 1, pp. 83-88, 1993.
 - 7) 液状化対策の調査・設計から施工まで編集委員会編: 液状化対策の調査・設計から施工まで, 土質工学会, 1993.
 - 8) 善 功企, 山崎浩之, 佐藤 泰: 事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性, 港湾技術研究所報告, 第 29 巻, 第 2 号, pp. 85-118, 1990.
 - 9) 善 功企, 山崎浩之, 渡辺篤史, 芳沢秀明, 玉井章友: セメント混合した砂質土埋立工法に関する研究 - 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.
 - 10) 善 功企: 事前混合処理による埋立地盤対策, 土と基礎, Vol. 42, No. 2, pp. 37-42, 1994.
 - 11) Ōhara, S. and Yamamoto, T.: A Practical Method for Obtaining Correction Factor of Liquefaction Resistance for Membrane Penetration, *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 2, pp. 188-196, 1991.
 - 12) 善 功企, 館下 徹, 佐渡篤史, 永井誠二: 事前混合処理工法の現地実験における処理地盤の静的および動的特性, 土木学会第 48 回年次学術講演会概要集, pp. 500-501, 1993.
 - 13) 日本材料学会, 土質安定材料委員会編: 地盤改良工法便覧, 日刊工業新聞社, pp. 142-149, 1991.

(1995. 8. 4 受付)

EFFECT OF GRAIN SIZE CHARACTERISTICS ON THE EFFECTIVENESS OF CEMENT FIXING AGENT METHOD FOR PREVENTING LIQUEFACTION OF SAND TO SILT DEPOSITS

Tetsuro YAMAMOTO, Tomoya YAMAUCHI and Kouji HORIBUCHI

To examine the effectiveness of a cement fixing agent method for preventing liquefaction of sand to silt deposits in relation to the characteristics of grain size of soil, liquefaction tests are performed on six cement treated soils consolidated for 1 day in a triaxial cell. Four sands and two silts are treated with ordinary portland cement (OPC) or UKC-H with cement content (C) of 2 % and 5 %, respectively.

It is shown that there exists a good correlation between the ratio of increase of liquefaction resistance RL for the treated soils and the effective grain size D_{10} , and that the relation depends on content of cement. Furthermore, it is found that the relationships between the liquefaction resistance and the unconfined compressive strength for the treated soils have a linearity