地盤と建設 Vol.11, No.1, 1993

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

Cement Fixing Agent Method for Preventing Liquefaction of Saturated Silty Sand Deposit

> 山本哲朗* (Tetsuro Yamamoto) 大原資生** (Sukeo Ohara) 堀渕幸司*** (Kohji Horibuchi) 鈴川俊道**** (Toshimichi Suzukawa)

施和シルト質砂地盤の液状化と類似した破壊に対する対策としてセメント安定処理工法を講じることにし、その有効性を調べるための実験が行われている。粘土分が5.8%および9.0%の2種類のシルト質砂について所要量のセメントを加え、所定の時間圧密して作製した飽和供試体に対して、繰返し三軸試験機を用いた液状化実験が行われている。セメント添加率(c)は0、1、2、4%の4とおりに変え、圧密時間(1)は6hr、1、7dayに変えた。結論として、c=1%の場合でも1日間圧密を行うことで、砂の液状化が生じるような通常の応力比の下ではシルト質砂供試体には破壊が生じることがなく、僅かなセメント添加による安定処理が有効であるという結果が示されている。その原因は、セメントを添加した供試体の土粒子の微視的構造の走査型電子顕微鏡による観察結果にもとづいて考察されている。

キーワード: 圧密、液状化、シルト質砂、セメント、土質安定処理(IGC:D7/D10)

1.まえがき

周知のように新潟地震(1964)、日本海中部地震(198 3)を初めとする多くの地震の際、飽和した緩い砂地盤 に液状化が生じて基大な地盤災害が発生した。

飽和砂地盤の液状化の場合と同ように、僅かな粘土 分を有する飽和したシルト質砂地盤でも、地震時に砂 地盤の液状化に似た破壊が生じる可能性が高いことが 指摘されている。

1991年周防灘地震(M=5.9)の際には、山口県宇部市東 須恵の軟弱地盤の一部に比較的大きな地震動が発生し て小規模の地割れが発生したことが確認されている¹⁾。 今後この地域に発生する地震としては大きいクラスの 地震(M=6級)が発生した場合には、この地域の近傍に堆 積している厚さ3~4mの飽和シルト質砂からなる埋立地 盤には液状化に似た破壊が生じることが懸念された²⁾。

砂地盤の液状化対策としてはすでに多くの工法が実 施されているが、本研究ではこのシルト質砂地盤の液 状化対策としてセメント系安定材(以下セメントとい

*山口大学工学部社会建設工学科 助教授 ***山口大学大学院 う)を用いた土質安定処理工法を実施するに当り、そ の効果に関する基礎的資料をえることを目的として液 状化実験が行われている。

実験では、セメントの添加率(c)と圧密時間(t)を数 通りに変えて、それらがシルト質砂の繰返しせん断抵 抗さらに一軸圧縮強度の増加に与える影響が調べられ ている。また、セメントを添加したシルト質砂の土粒 子の微視的骨格構造の観察を行っている。

2. 実験装置

実験には従来の飽和砂の液状化実験に用いてきたものと同じ応力制御式の繰返し三軸試験機を用いた。試験機の外観図はFig.1に示すが、その仕様の詳細は先の論文³⁾を参照されたい。

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交番的に 圧縮空気を送り込んだり排気したりすることで発生さ れる。送気・排気の周期の制御は電磁弁とそれを駆動す

**宇部工業高等専門学校 校長

****宇部興産コンサルタント(株) 課長

るリレー回路によって行われ、その空気圧の大きさは 減圧弁によって加減される。

供試体に作用させる軸差応力、供試体に生じる間隙 水圧および軸方向変位振幅はそれぞれロードセル(容量 :490N)、間隙水圧変換器(容量:980kPa)、変位変換器 (容量:20mm)によって測定される。また、圧密時の供試 体からの排水量はビューレット内の水位の変化によっ て測定される。

すべての測定値の処理はマイクロコンピューターを 用いて行った。



Fig. 1 Cyclic triaxial test apparatus

3.実験に用いた試料

今回の実験に用いた粘土分含有率が異なる2種類のシ ルト質砂は、同じ埋立地盤のボーリングコアから採取 して得たものであり、炉乾燥した後、網目2mmのふるい を通過させて粒度調整したものである。

両方のシルト質砂の物理定数および粒度曲線はそれ ぞれTable 1、Fig. 2に示す。シルト質砂(1)の粘土分含 有率F_{e1ay}は5.8%で、シルト質砂(2)のそれは9.0%であ る。Table 1 に示すように両者のシルト質砂には、微 粒子の石炭ガラが多く含まれているため土粒子の比重 が 2.135~2.430となり、通常のシルト質砂のそれに比 べてかなり小さいことが特徴である。またTable 1およ びFig.2には比較実験を行った豊浦砂の諸定数も一緒に 示している。

試料を採取したボーリングコアの柱状図の一例を Fig.3 に示すが、斜線部が試料を取り出した箇所を示 す。図より明らかなようにこの地盤のN値は最高でも4 程度であり、極めて軟弱な地盤といえる。

Table 1 Physical properties of sample





Fig. 2 Grain size distribution curve of sample



Fig.3 An example of collected sample

4. 実験方法

飽和シルト質砂供試体は次の方法で作製した。まず、 脱気水を入れたビーカー内に所定量の試料を入れ、よ く攪拌しながら2時間ほど湯煎煮沸を行って試料の脱 気を行った。それに所要量のセメントを添加し、十分 に攪拌した後、水中落下法を用いてモールドに固定し 脱気水を満たしたゴムスリーブ内に試料を詰め、直径 約5.0cm、高さ約12cmの飽和供試体を作製した。

試料に対するセメントの重量百分率で表したセメントの添加率(c)は、0%、1.0%、2.0%、4.0%の4通りとした。 c=0%の供試体はセメントを加えていない供試体を意味 する。

その後、側圧 σ_{30} =147kPa、背圧 u_{b} =49kPaすなわち有 効拘束 $E\sigma'_{30}$ =98kPaを供試体に作用させて圧密を行っ た。本実験において、すべての供試体の間隙圧係数(B値) は0.96以上であった。圧密時間(t)は 6時間、1日、7日 の3通りに変えた。

圧密終了後に周期2秒で振幅一定の繰返し軸差応力を 供試体に作用させて液状化実験を行った。シルト質砂 (1)の場合には、供試体の破壊が生じない程度の繰返し 軸差応力を200回供試体に与えた。実験後には供試体を セル室から取り出して一軸圧縮試験を行い、また土粒 子の構造を走査型電子顕微鏡によって観察した。一方、 シルト質砂(2)の場合、供試体が破壊する程度の軸差応 力を用いた実験を行って繰返しせん断抵抗を求めた。

5.実験結果および考察

Figs. 4(a)、(b)はそれぞれシルト質砂(1)およびシル ト質砂(1)にc=1%のセメントを添加し、t=1日間圧密を 行った供試体の液状化実験の記録波形を示す。両方の 供試体の乾燥単位重量γ。は10.3kN/m³である。 Fig. 4(a)のシルト質砂(1)の場合には、繰返し軸差応 力 σ 。の載荷にともない軸ひずみ ε_1 および間隙水圧u が増加して繰返し回数 n_1 =20回の時に砂の液状化に似た 破壊が生じていることがわかる。破壊は軸ひずみ両振 幅 ε_{1D} =5%の時と見做した。破壊時の間隙水圧は間隙水 圧比(u/σ'_{30})に換算して0.98である。なお、この実験 を終了した時の ε_{1D} は約15.0%である。

シルト質砂(1)には粘土分が5.8%含まれているために、 間隙水圧がかなり上昇しても土粒子間に粘着力が作用



Fig. 4(a) Triaxial test record of silty sand



Fig. 4(b) Typical test record of silty sand(1) of c=1.0% and t=24hr

するため砂の液状化の場合のように土粒子が水中に浮 遊することがなくて、上述のように間隙水圧は側圧に 決して等しくなることはなかった。

一方、Fig. 4(b)のc=1%、t=1dayのセメントを添加し たシルト質砂(1)供試体の場合には、繰返し回数n=200 回の時でも ε_{1p} は0.05%で極めて小さく、またu/ σ 'soは 0.08ときわめて僅かしか増加しておらず、液状化に似 た破壊は発生していない。このことはセメントの添加 によってシルト質砂(1)の繰返しせん断抵抗が増加した ためである。

Fig.5はシルト質砂(1)について所定のセメント量を 添加した供試体毎に砂の液状化に似た破壊が生じるま での繰返し回数(n_L)と応力比($\sigma_d/2\sigma'_{30}$)の関係を示 した図である。カッコ内の数値は圧密時間を示す。図 中の ∞ の記号は供試体に破壊が生じなかった結果を示 す。また同図には比較のため豊浦砂の結果も示してい る。

Fig.5から実験範囲内のn₁においてシルト質砂(1) (図中○印)の応力比は豊浦砂(△印)の応力比に比 べて0.05程度小さいことがわかる。なお、c=1.0%でt= 6時間の圧密を行った供試体だけは破壊が生じたが、破 壊を生じるに必要な応力比の大きさは豊浦砂の場合と 同程度までに増加はしている。その他のセメント添加 率で、所定の圧密を行った供試体はすべてn=200回にお いても間隙水圧はほとんど発生しなくて破壊には至ら なかった。従来の研究⁰¹から、c=5%以上のセメントを 添加すると砂には液状化を生じないことが明らかにさ れているが、今回の実験によってシルト質砂の場合に はc=1%のセメントの添加でも十分に長い時間圧密を行 うことで液状化に似た破壊が発生しないことがわかり、 セメント処理工法のシルト質砂の液状化対策としての 有効性が高いことが確認されたといえる。



Fig. 5 Relation between $\sigma_{\rm d}/2\sigma'_{\rm 30}$ and $n_{\rm L}$ (Silty sand(1))

Table 2はセメントを添加して破壊が生じなかったシ ルト質砂(1)の圧密後の含水比wと乾燥単位重量γ。の値 を示している。セメントの添加率が増加するにしたが って吸水の度合が増加して供試体の含水比が減少して いることがわかる。

Fig. 6はシルト質砂(2)についてc=0%およびc=2%でと もにt=24hr圧密した供試体に対する実験から得られた $\sigma_{a}/2\sigma'_{s0} \ge n_{L}$ の関係を示す。 σ'_{s0} は49kPaである。 この図からc=2%のシルト質砂(2)のせん断抵抗はc=0%す なわちセメントを加えていないシルト質砂(2)の場合に 比べて n_{L} =20回の場合には約4倍増大していることがわ かる。なお、C=0%および2%の供試体の γ_{a} はそれぞれ 12. 6kN/m³, 12. 5kN/m³であった。

Table 2 Water content and dry unit weight of silty sand(1) with required amount of cement after consolidation



Fig.7はc=2%、t=24hrのシルト質砂(2)の実験記録波 形の一例を示す。間隙水圧の波形には密な砂の繰返し せん断時に見られるCyclic mobilityの現象が顕著に認 められるが、このことはセメントの添加と圧密によっ てシルト質砂(2)の土粒子が固着して安定な土粒子構造 が形成されたことを意味する。そのために上述したよ うに破壊を生じるに必要な繰返しせん断応力が大きく なったということであろう。 Fig.8は破壊を生じなかったシルト質砂(1)供試体の 一軸圧縮強度quと圧密時間tとの関係をc=1、2、4%のそ れぞれの供試体ごとに示したものである。この図から セメント添加率が増加し、また圧密時間が長くなるほ ど供試体のquは大きくなることがわかる。とくに、c=4 %の供試体ではt=24hrの場合、圧密時間の増加による quの増加の割合が他の場合に比べて顕著になっている。

Photo.1は c=4.0%でt=24hrの圧密を行って破壊が生 じなかったシルト質砂(1)供試体から土塊を切り出し、





Fig.8 Relation between $q_{\scriptscriptstyle u}$ and consolidation time t

その土粒子構造を走査型電子顕微鏡を用いて観察した ものである(倍率200倍)。粒径が約3~10µmの細かい 粒子が粒径が約50~200µmの団粒状の大きい土粒子の 表面に固着していることがわかる。

Photo. 2はPhoto. 1の中の一部から土粒子間の結合や 土粒子の表面の状況をさらに詳しく見たものである (倍率10,000倍)。この写真から土粒子の表面に網目 状のセメント水和物が固着している様子や土粒子の表 面に針状の結晶(エトリンガイト)が固着している様 子を観察することができる。

Photo.3も倍率10,000倍でPhoto.2とは別の箇所を撮 影したものである。この写真から網目状のセメント水 和物によって覆われた土粒子同士がエトリンガイトに より結合されている様子を窺うことができる。

Photo.4はとくにエトリンガイトが特に密集している 箇所を撮影したものである(倍率4,500倍)。この写真 のようにエトリンガイトは供試体内に均等に形成され ているわけでなく、Photo.4のようにかなり密集してい る箇所もあれば全く存在しない箇所もあった。

以上の土粒子構造の観察結果から、セメントを添加 したシルト質砂に液状化に似た破壊が生じない理由は、 Photo.3 に見られるように、セメント水和物によって

Silty sand(2) of c=2% and t=24hr (γ_{d} =12.6kN/m³) σ'_{30} =49kPa, $\sigma_{d}/2\sigma'_{30}$ =0.64, n₁=80



Fig. 7 Typical test record of silty sand(2) of c=2.0% and t=24hr



Photo.1 Soil structure of silty sand(1) of c=4% and t=24hr (×200)



Photo. 2 Soil structure of silty sand(1) of c=4% and t=24hr (×10,000)

固着して生じた団粒状の土粒子がエトリンガイトによ って三次元的に固着して安定な土粒子骨格が形成され るためである⁵⁾。これにより通常の大きさの繰返しせ ん断応力を受けてもセメントを添加したシルト質砂に はひずみの増加が生じ難くなり、間隙水圧がほとんど 上昇せずに破壊が生じない。

6.まとめ

飽和シルト質砂地盤の液状化に似た破壊に対する対 策としてセメント系安定材を用いた土質安定処理を行 うに当たって、その有効性についての基礎的資料を得 ることを目的として液状化実験を行った。

実験によって得られた結果は次のようにまとめられ る。セメント系安定材をシルト質砂に対して重量比で 僅かに1%加え、一日間圧密することでシルト質砂には 液状化に似た破壊は生じなくなる。またセメント系安 定材の添加率を増加し、また圧密時間を長くするにつ れてセメントを添加したシルト質砂の繰返しせん断抵 抗はかなり増加する。この原因は土粒子の表面や間隙 に網目状のセメント水和物が生成され、互いの土粒子 はエトリンガイトによって三次元的に結合されること で安定な土粒子構造が形成されるためと考えられる。 最後に実験とその結果の整理を手伝って戴いた中村



Photo. 3 Soil structure of silty sand(1) of c=4% and t=24hr (×10,000)



Photo. 4 Soil structure of silty sand(1) of c=4% and t=24hr (×4,500)

剛氏(山口県)、山内智也氏(山口大学工学部学生) ならびにセメント系安定材を提供して戴いた(株)カ ルシードに深く謝意を表します。

参考文献

- 山本哲朗、鈴川俊道、大原資生(1991):1991年周 防灘地震(M=5.9)について、地盤と建設、Vol.9、 No.1、pp.155~161.
- 2)山本哲朗、大原資生、堀渕幸司(1992):西沖の山 埋立地盤の繰返しせん断強さ、山口大学工学部研 究報告、Vol. 43、No. 1、pp. 31~37.
- 3) Ohara, S. and Yamamoto, T. (1991): A practical method for obtaining correction factor of liquefaction resistance for membrane penetration, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 2, pp. 188~196.
- 4)液状化対策の調査・設計から施工までの編集委員会(1993):液状化対策の調査・設計から施工まで 現場技術者のための土と基礎シリーズ20、土質工 学会。
- 5) 土質工学会編(1982):土質工学ハンドブック、土 質工学会、pp.1016~1023.