

石灰系・セメント系安定材により 処理した大道粘土の繰返しせん断強度

廖 峰¹・山本哲朗²・川島洋史³・鈴木素之²

¹ ライト工業㈱

² 社会建設工学科

³ 大学院理工学研究科社会建設工学専攻

軟弱地盤を改良する有効な手法の一つとして、安定材による化学安定処理工法がある。本研究では、粘性土の安定材による動的改良効果を安定材の種類および土粒子構造との関係から調べた。2種類の粘性土である大道粘土に石灰系およびセメント系安定材を加えて安定処理土を作り、繰返しせん断および静的せん断強度を求める実験を行った。両安定材の添加率(C)は5%である。

実験によってセメント系安定材よりも石灰系安定材の方が大道粘土の繰返しせん断強度の増加をより大きくもたらすことが明らかになった。さらに、石灰系およびセメント系安定処理土の土粒子構造は未処理土に比べてより密で、より堅固になっていることが分かった。

Key words: stabilizers, cementation, lime, cement, clay, cyclic shear strength, soil particle structure

1. まえがき

化学的安定処理工法を軟弱地盤の静的強度の増加、あるいは地盤支持力の向上^{1),2)}を期待して施工している例は多く見られる。しかし粘性土地盤、特に軟弱なそれを石灰系およびセメント系安定材により処理した場合の繰返しせん断強度に関する研究は、それほど多く行われておらず、いまだに多くの課題が残されている。粘性土地盤では、圧密沈下とあいまって強度の予測をすることは極めて困難であるだけでなく、どのような方法を用いれば、繰返しせん断強度を増加されることができかを明らかにするには、なお多くの実際的な研究が待たれる。

そのため安定処理した粘性土の圧密沈下挙動およびセメンテーションの影響を定量的に明らかにする必要がある。また、粘性土試料の未処理土と安定処理土の強度がどのような関係にあるかを究明することは地盤工学上、重要かつ興味ある問題である。

本研究では、2種類の粘性土である大道粘土に石灰系およびセメント系安定材を加えて安定処理土を

作り、それらの動的安定処理の効果を調べることを目的として、繰返しせん断強度、さらに静的せん断強度を求める試験を行った。また、これらの粘性土の未処理土と石灰系およびセメント系安定処理土における土粒子構造の差異について検討した。

2. 土試料および安定材

各々の改良対象となる粘性土に対して、安定材の種類や使用量が改良効果に大きく影響を及ぼすことが広く知られている。本実験には2種類の粘性土を用いた。すなわち、山口県防府市大道産の大道粘土1、大道粘土2である。両者は採取した場所が若干異なるが、ともに比較的均質な粘性土である。それぞれの物理特性値をTable 1に示す。Fig.1には両方の粒径加積曲線を示す。また、安定材として石灰系安定材に生石灰(以下、QLと略記する)、セメント系安定材に高炉セメントB種(以下、BCと略記する)を用いた。

Table 1 Physical properties of samples

Sample	Gs	W _L (%)	W _p (%)	I _p	FC(%)
Daido clay 1	2.526	49.6	21.8	27.8	87.0
Daido clay 1 + QL	2.418	70.8	49.0	21.8	67.0
Daido clay 1 + BC	2.577	55.6	36.3	19.3	79.2
Daido clay 2	2.589	59.9	25.2	34.7	95.2
Daido clay 2 + QL	2.308	69.1	42.1	27.0	91.8
Daido clay 2 + BC	2.546	55.9	35.4	20.5	74.6

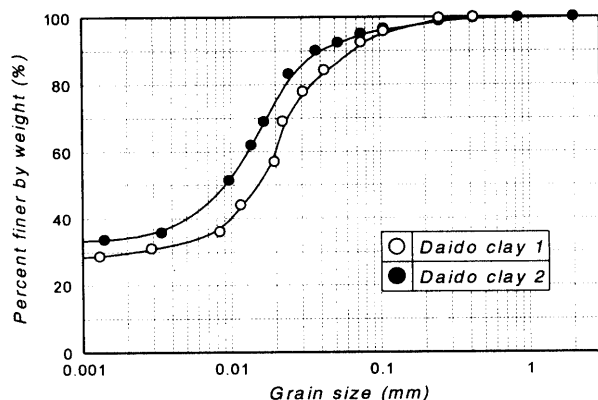


Fig.1 Grading curves of untreated samples

3. 供試体の作製および実験方法

試料は、異物などを取り除いた後、所定の含水比になるように試料調整を行った。未処理土、QL および BC 処理土の 3 試料の実験をするために、調整した試料をスラリー状(大道粘土 1 : 含水比 $w = 106\%$, 大道粘土 2 : $w = 142\%$)にしてミキサーで十分に攪拌し、一日静置した後、3 等分にしておく。安定処理土を作製する際に、乾燥した安定材をスプーンで徐々に投下しながら、試料と安定材が十分に均等になるようにミキサーで 20 分間程度攪拌を行った。その後、試料と安定材がなじむように 1 日静置した。ただし、QL は添加した後にその急激的な脱水効果に加え、高温高熱を発生するため、安定処理土作製上の都合で静置しなかった。さらに、試料中に含まれる空気を取り除くため 30 分間真空脱気を行った。その後、試料を直径 31cm の圧密タンクに詰め、3 段階の荷重に分けて所定の圧密時間で圧密した。すなわち、圧密圧力 p は 19.6kPa (1 day)、49.0kPa (1 day) および 98.0kPa (28 days) の 3 段階とした。このようにして作製した供試体を長さ

6cm × 幅 6cm × 高さ 13cm 程度の大きさに切り出して、含水比の変化が生じないように密閉包装した後、湿潤箱に保存しておく。

QL、BC による改良効果を調べるために、各々の供試体に対して、一軸圧縮試験、非排水三軸試験および非排水繰返し三軸試験を実施した^{3),4)}。一軸圧縮試験および非排水三軸試験における供試体の破壊は、せん断強度がピーク値に達した時点、あるいは、軸ひずみが 15%に達した時点とした。一方、非排水繰返し三軸試験における供試体の破壊は、両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ に達した時点とした。また、安定処理前後の土粒子構造の微視的観察を走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて行った。

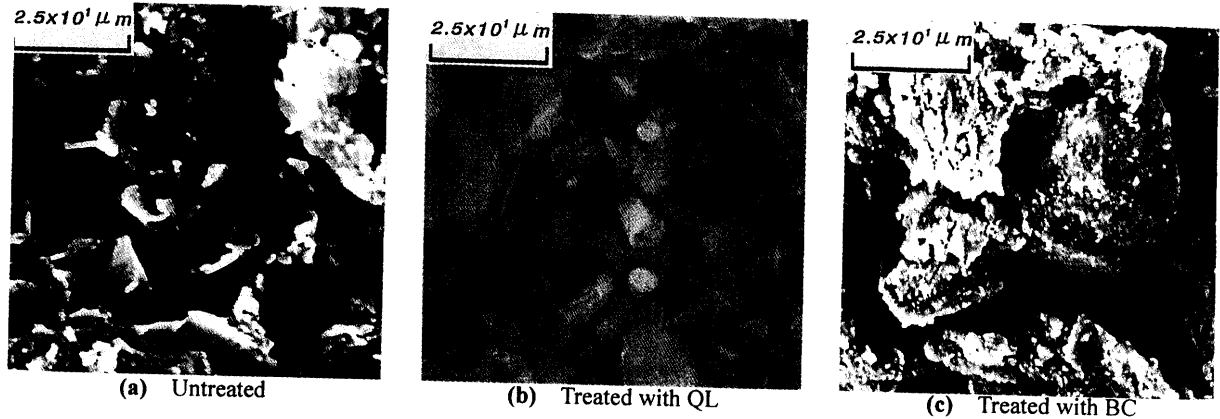
4. 処理土の土粒子構造

化学的安定処理によるセメンテーション作用によって、土粒子構造に変化が生じ、土粒子の結合が単一な構造から、より複雑で多様な配列パターンに変化する。それを確認するため、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて土粒子構造の微視的観察を行った。

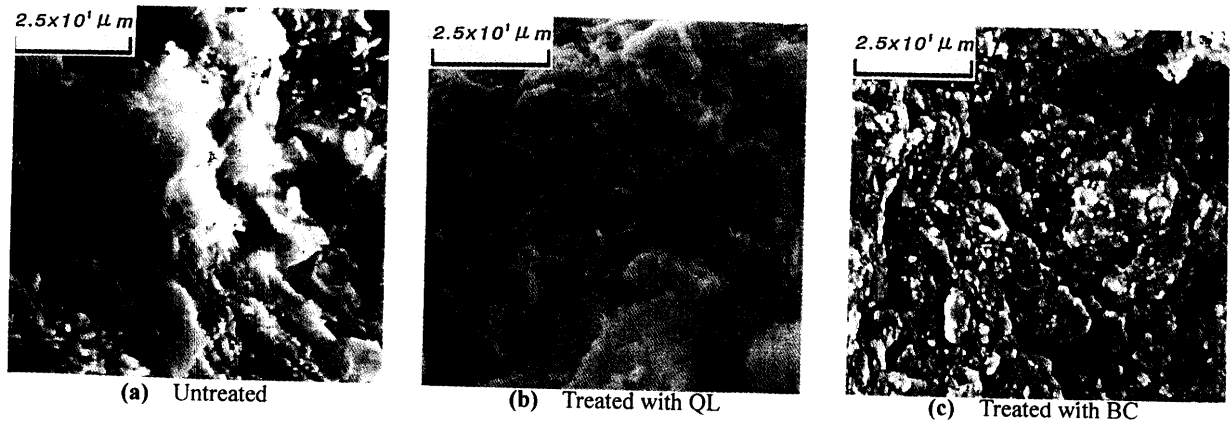
Photos. 1 (a)~(c) はそれぞれ未処理土および処理土の圧密前の SEM 写真である。QL または BC の添加により、土粒子の団粒化や炭酸塩類などの水和反応生成物が生じ、それらによって土粒子間の空隙が充たされ、未処理土よりも処理土の方が土粒子構造はより密である。

Photos.2(a)~(c) はそれぞれ $p=98.0\text{kPa}$ の下で 28 日間の圧密を行った未処理土、処理土の SEM 写真である。圧密前の土粒子構造(Photos. 1 (a), (b), (c))と比較して、明らかにより緻密でより堅固な土粒子構造を呈した。また、Photo. 2 (a)より、未処理土は配向構造を示していることが分かる。これは、一次元的な圧密をおこなったことに加え、この土試料の主要粘土鉱物であるカオリナイトは活性度が低く、淡水中で配向構造を示す⁵⁾ことによると考えられる。

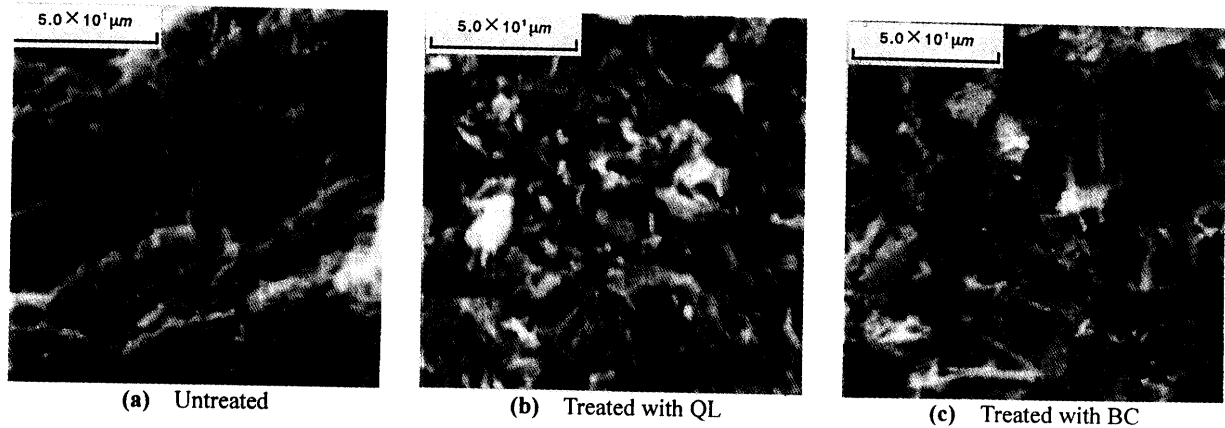
Photos.3(a)~(c)は、安定材の添加による生成物の観察を行った SEM 写真である。Photo.3(b)より、QL の添加により土粒子間の空隙に水和物が生成しているのが分かる。この水和物は土粒子相互の結合材として働く。また、Photo.3(c)より、BC の添加によりエトリンサイト ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)が生成していることが分かる。エトリンサイトは、針状の結晶でネット状に絡み合い、土粒子の移動を拘束する。また、反応の過程で多量の水分を固定し、含水比を低下させる。



Photos.1 Soil particles structures (unconsolidated)



Photos.2 Soil particles structures (consolidated)



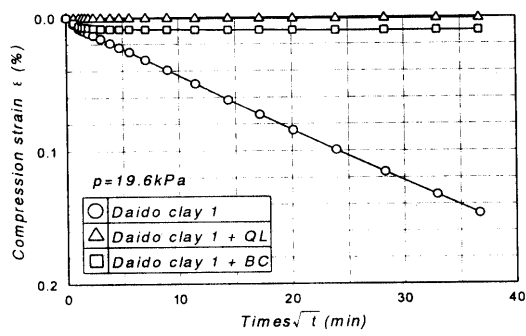
Photos.3 Soil particles structures (consolidated)

5. 処理土の圧密特性

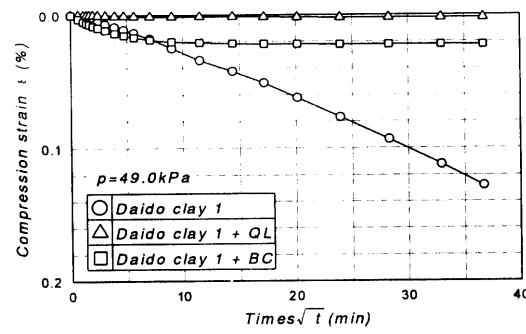
Figs.2(a)~(c)に大道粘土 1 の未処理土および処理土のタンク圧密における圧密曲線を示す。未処理土は $p=19.6\text{kPa}$ および $p=49.0\text{kPa}$ の両荷重段階において一次圧密は終了せず、 $p=98.0\text{kPa}$ の荷重段階の圧密開始から約 60 時間後に一次圧密を終了し

た。これに対し、両処理土はいずれの荷重段階においても短期間で一次圧密を終了し、また、圧密量もかなり小さくなっている。

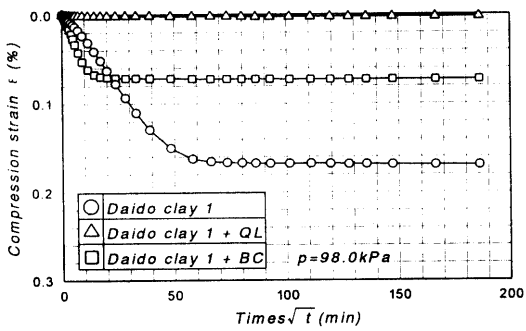
Figs.3(a)~(c)に大道粘土 2 の未処理土および処理土の圧密曲線を示す。いずれの処理土も約 2 時間後に一次圧密が終了している。これに対し、未処理土は大道粘土 1 と同様に $p=19.6\text{kPa}$ および



(a) $p=19.6\text{kPa}$

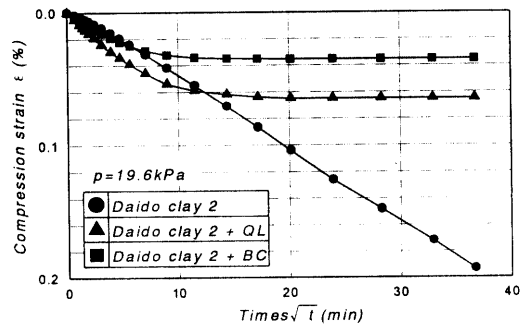


(b) $p=49.0\text{kPa}$

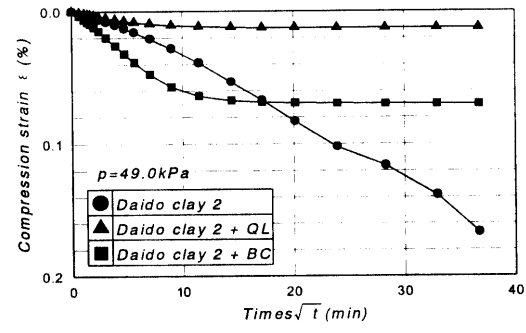


(c) $p=98.0\text{kPa}$

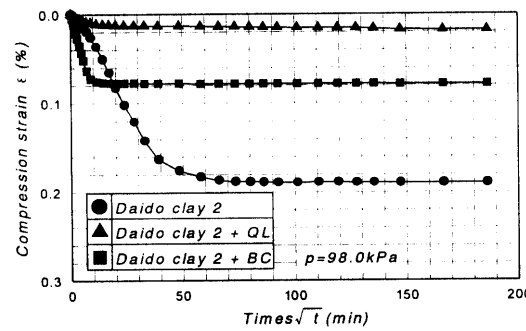
Figs.2 Relationship between consolidation time and settlement of Daido clay 1



(a) $p=19.6\text{kPa}$



(b) $p=49.0\text{kPa}$



(c) $p=98.0\text{kPa}$

Figs.3 Relationship between consolidation time and settlement of Daido clay 2

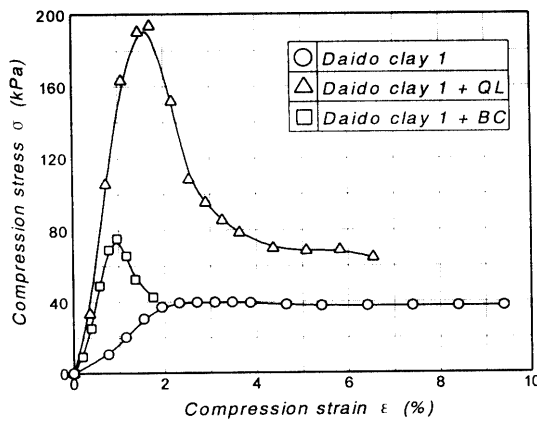


Fig.4(a) Stress-strain curves for untreated Daido clay 1 in uniaxial compression tests

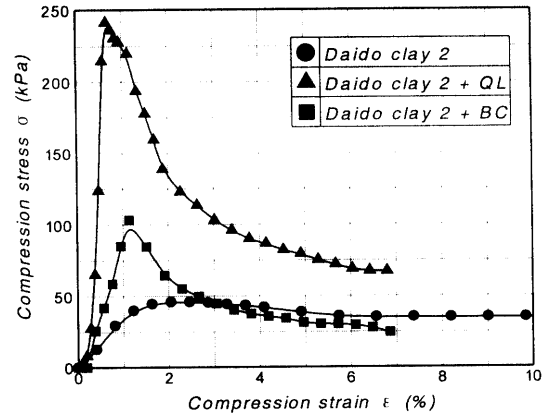
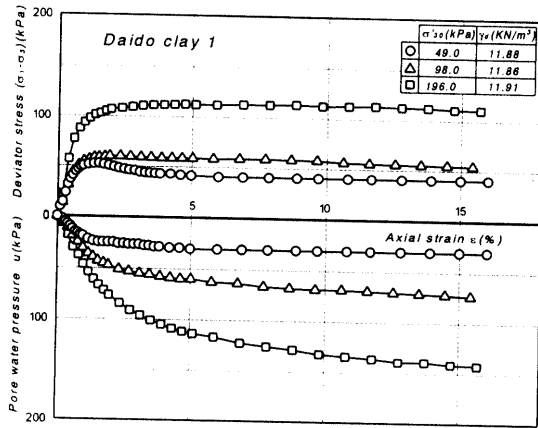
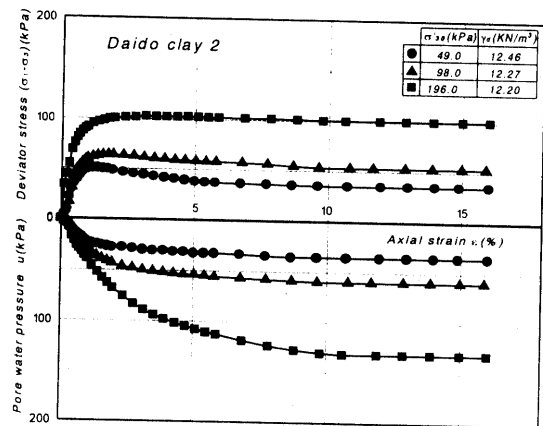


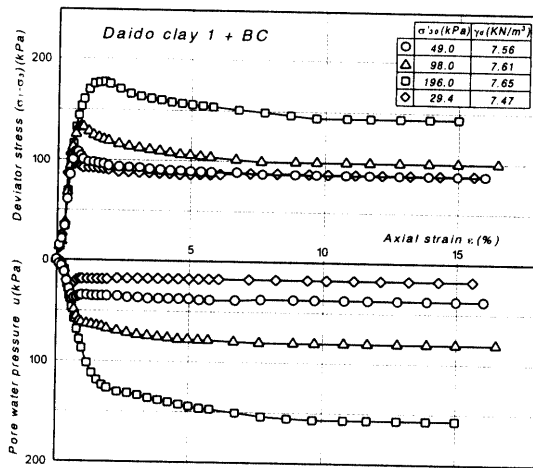
Fig.4(b) Stress-strain curves for untreated Daido clay 2 in uniaxial compression tests



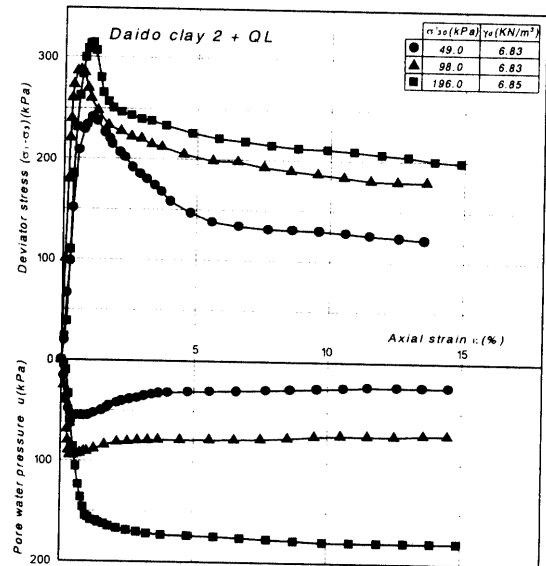
(a) Daido clay 1.



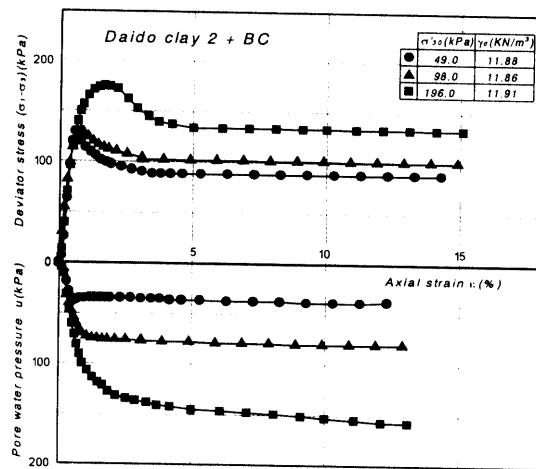
(a) Daido clay 2



(b) Daido clay 1 + BC



(b) Daido clay 2 + QL



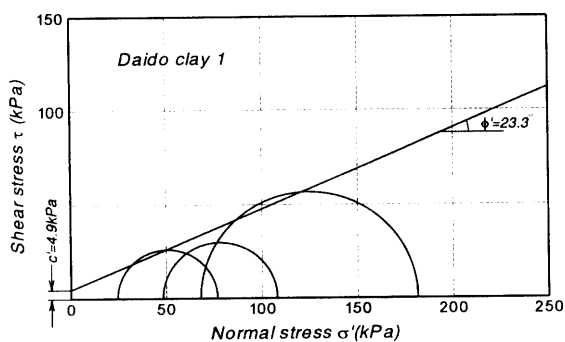
(c) Daido clay 2 + BC

Figs.5 Stress-strain curves for Daido clay 1 in triaxial compression tests

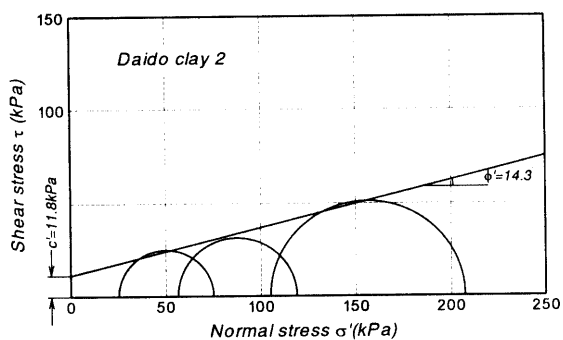
Figs.6 Stress-strain curves for Daido clay 2 in triaxial compression tests

p=49.0kPa の両荷重段階において一次圧密は終了せず、p=98.0kPa の荷重段階の圧密開始から約 77 時間後に一次圧密を終了している。

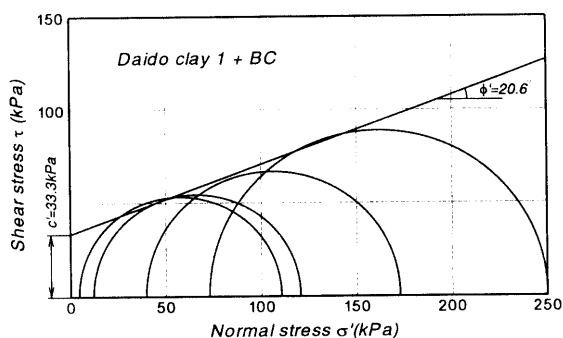
以上より、大道粘土 1 および大道粘土 2 において未処理土は一次圧密を終了しないか、あるいはきわめて長時間を経て一次圧密が終了するのに対して、両処理土は圧密開始から比較的早い段階から終了する傾向が認められた。安定材の添加によって圧密量が減少する要因として、安定材の吸水作用およびポゾラン反応による土粒子間の固結作用が挙げられる。圧密開始直後から処理効果が見られることから前者の影響が大きいと考えられる。



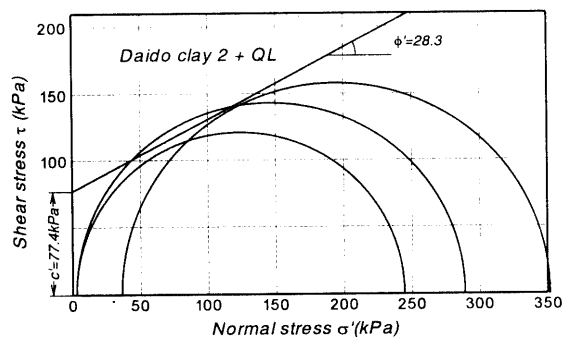
(a) Daido clay 1



(a) Daido clay 2



(b) Daido clay 1 + BC



(b) Daido clay 2 + QL

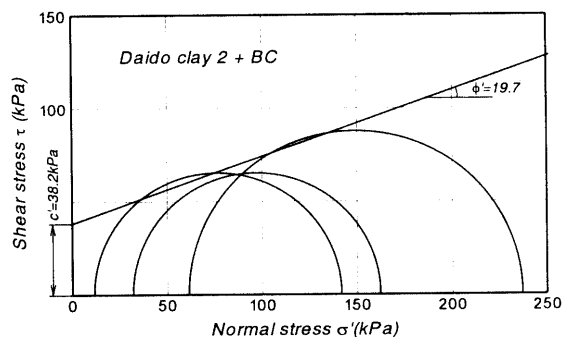
Figs.7 Mohr's stress circles and failure envelop for Daido clay 1

6. 一軸圧縮試験・非排水三軸試験の結果と考察

Figs.4(a), (b)は、それぞれ大道粘土 1、2 の未処理土および処理土の一軸圧縮応力～ひずみ曲線である。両図から、すべての処理土の一軸圧縮強度は未処理土に比べて増加した。

Figs.5(a), (b)は大道粘土 1 の未処理土と処理土の静的三軸試験から得られた応力・間隙水圧～ひずみ曲線を示す。Figs.6(a)～(c)は同様に、大道粘土 2 の場合について示す。処理土の応力～ひずみ関係と未処理土のそれを比べると、大道粘土 1、2 におけるすべての処理土の方が、未処理土よりも大きいせん断強さを示すことが分かる。また、未処理土では、軸差応力および間隙水圧の増加は、軸ひずみが約 5%前後から緩やかになるのに対して、処理土のそれらは軸ひずみが約 1～2%前後で最大となり、その後、緩やかに減少する。

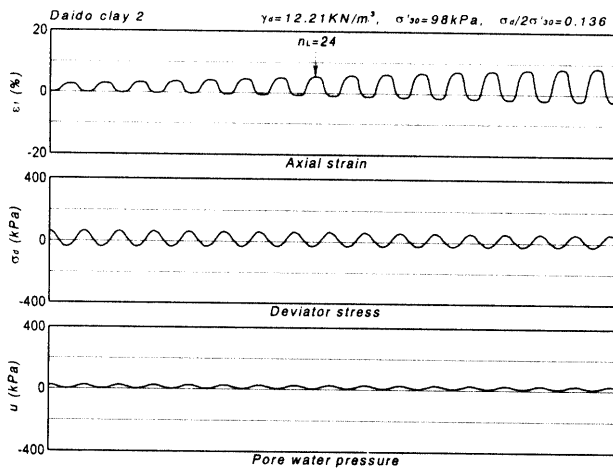
Figs.7(a), (b)は大道粘土 1 の未処理土と処理土のモール円と破壊包絡線を示す。Figs.8(a)～(c)は



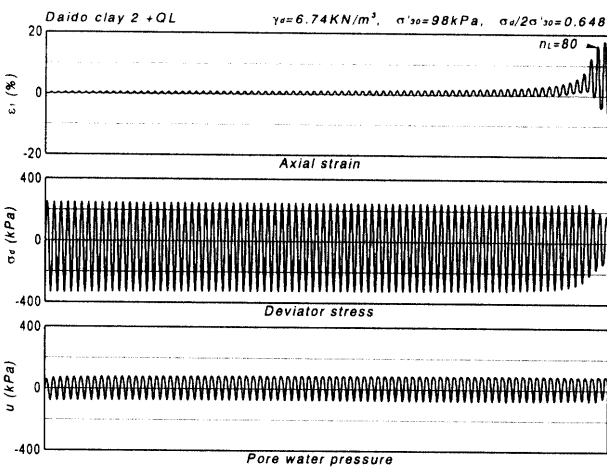
(c) Daido clay 2 + BC

Figs.8 Mohr's stress circles and failure envelop for Daido clay 2

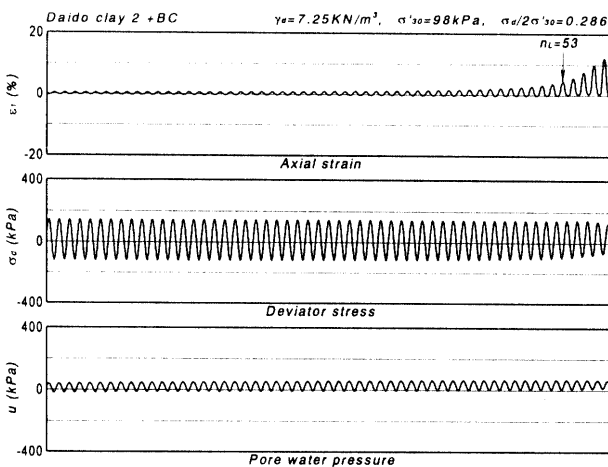
同様に、大道粘土 2 の場合について示す。これらの図から明らかなように、粘着力については、大道粘土 1 および大道粘土 2 ではないずれも処理土の方が大きい値を示した。内部摩擦角については、大道粘土 2 では未処理土より処理土の方が増加する傾向を示した。大道粘土 1 は逆に減少した。



(a) Daido clay 2

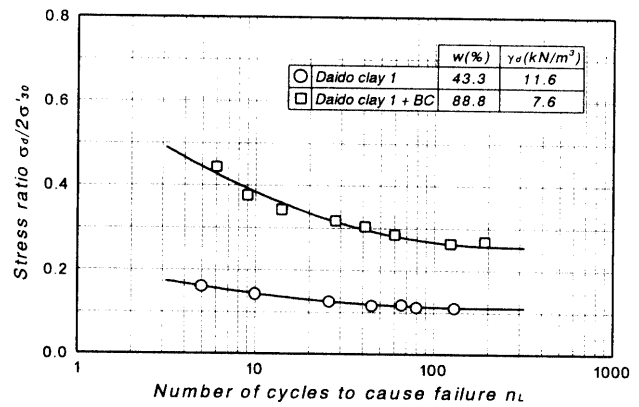


(b) Daido clay 2 + QL

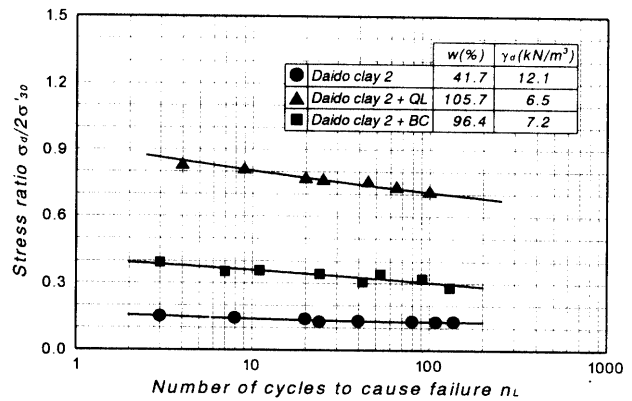


(c) Daido clay 2 + BC

Figs.9 Experiment records of cyclic shear tests for Daido clay 2



(a) Daido clay 1



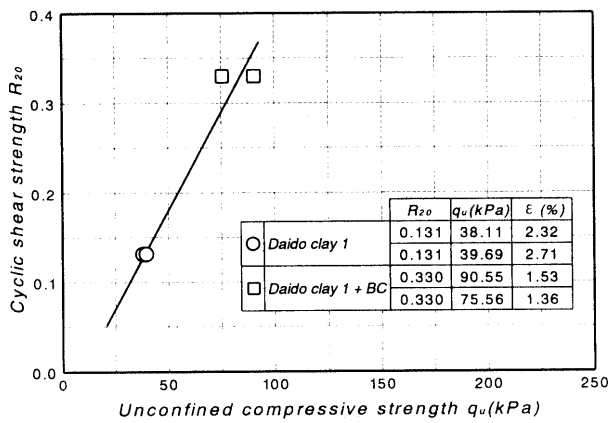
(b) Daido clay 2

Figs.10 Relationship between stress ratio and number of cyclic to cause failure n_L for treated samples

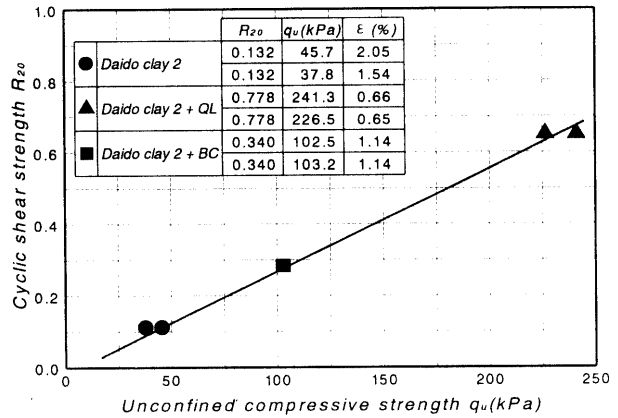
7. 非排水繰返しせん断試験結果および考察

Figs.9(a)~(c)はそれぞれ繰返しせん断試験より得られた未処理土および処理土の実験記録波形の代表例である。これらの図から、間隙水圧の上昇は極めて緩やかなことが分かる。砂質土の破壊の場合とは異なって、間隙水圧の上昇現象が見られなかった。

Figs.10(a), (b)はそれぞれ大道粘土 1, 2 の未処理土と処理土の繰返しせん断強度曲線を示す。両図から分かるように、大道粘土 1, 2 の処理土の繰返しせん断強度は、未処理土の場合よりも大きい。また、大道粘土 2 においては QL 処理土の方が BC 処理土に比べて繰返しせん断強度が大きいことが明らかにされた。すなわち、大道粘土 2 の QL 処理土の繰返しせん断強度は、BC 処理土のその約 2.2



(a) Daido clay 1



(b) Daido clay 2

Figs.11 Relationship between R_{20} and q_u

倍である。

Figs.11(a)、(b)はそれぞれ大道粘土 1、2 の繰返しせん断強度と一軸圧縮強度の関係を示す。繰返しせん断強度 R_{20} と一軸圧縮強度 q_u の関係は、大道粘土 1 および大道粘土 2 について、それぞれ以下の式で与えられた。

$$R_{20} = 4.002 \times 10^{-3} q_u - 0.042 \quad (1)$$

$$R_{20} = 3.365 \times 10^{-3} q_u - 0.012 \quad (2)$$

$(q_u : kPa)$

8. まとめ

2 種類の大道粘土に生石灰、高炉セメント B 種を添加して人工的に作製した安定処理土の繰返しせん断強度を求めるとともに、土粒子構造の微視的観察を行った。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 未処理土では、圧密が終了するまでに長時間を要する。一方、生石灰および高炉セメント B 種処理土では、いずれも早い段階でその圧密は終了、あるいは収束する傾向を示した。

(2) 処理土では、未処理土と違って一軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線にピーク値が現れる。一軸圧縮強度は未処理土より安定処理土の方が大きい。大道粘土 1、2 に対して高炉セメント B 種よりも生石灰の方が極めて大きい処理効果を示した。

(3) 生石灰および高炉セメント B 種処理土の非排水繰返しせん断強度は、未処理土のそれらに比べて大きく増加した。大道粘土 1、2 の高炉セメント B 種処理土に比べて、生石灰処理土の方が大きな改良効果を得られたことから、両方の粘性土の化学

的安定処理には、高炉セメント B 種よりも生石灰を用いた場合の方が、より有効であるといえる。

(4) 未処理土では、土粒子同士の結合は緩く、その多くはカードハウス構造、あるいはそれを主とする緩い複雑な構造パターンを形成している。一方、安定処理土の土粒子間には、生石灰および高炉セメント B 種と間隙水との水和反応によって生じた多くの水和反応生成物が侵入して、土粒子間を埋め、あるいは土粒子同士を互いに絡み合わせるにより土粒子構造がより密に、より堅固に結合していることを確認することができた。

参考文献

- 1) 寺師昌明、奥村樹郎、光本司：石灰安定処理土の基本的特性に関する研究(第 1 報)、港湾技術研究所報告、第 16 巻、第 1 号、1997。
- 2) Davidson, D.T., Mateos, M. and Barnes, H.F.: Improvement of lime stabilization of montmorillonitic clay soils with chemical additives, Bulletin No.262, Highway research BD., Natl.Research Council, Washington D.C., 1960.
- 3) 廖 峰：石灰系およびセメント系安定材により処理した粘性土の繰返しせん断強度に関する研究、山口大学大学院修士論文、1998。
- 4) 山本哲朗、山内智也、堀淵幸司：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。
- 5) 土質工学会編：土質工学用語辞典、土質工学会、pp.37、1985。

(1998.4.8 受理)

CYCLIC SHEAR STRENGTH OF DAIDO CLAYS TREATED WITH LIME OR CEMENT STABILIZERS

**Feng LIAO, Tetsuro YAMAMOTO, Hiroshi KAWASHIMA
and Motoyuki SUZUKI**

It is well known that the chemical stabilization method is useful in improving soft clayey ground. The cyclic shear strength of stabilized clay was studied in relation to the kind of stabilizer and the soil particle structure. Cyclic triaxial tests were performed on the two treated Daido clay specimens to which C=5% of quick lime or B-type blast furnace slag cement were added, and cured for 28 days.

It was found that the cyclic shear strengths of two Daido clays treated with lime are larger than that treated with B-type blast furnace slag cement. It was also shown that the two treated Daido clays have a stable soil particle structure compared with the untreated ones.