

# せん断と圧密履歴を受けた セメント安定処理土の一軸圧縮強さ

鈴木 素之 (社会建設工学科)

山本 哲朗 (社会建設工学科)

平岡 真樹 (社会建設工学専攻)

## Unconfined compressive strength of cement stabilized soil subjected to shear and consolidation histories

Motoyuki SUZUKI (Department of Civil and Environmental Engineering)

Tetsuro YAMAMOTO (Department of Civil and Environmental Engineering)

Masaki HIRAOKA (Graduate school of Civil and Environmental Engineering)

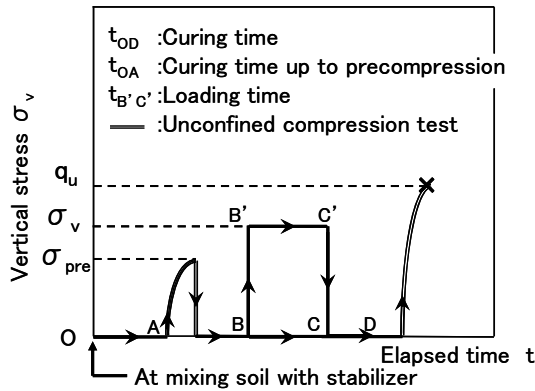
A cement stabilized soil may be subjected to undrained shearing under an in-situ stress condition, so that a cementation is formed and destroyed simultaneously. Unconfined compression test was performed on a specimen in order to precompression in early curing period. Immediately after the precompressed specimen was cured under the atmosphere or an overburden pressure, the specimen was again compressed in unconfined compression test. Main conclusions are as follows. As curing time up to precompression became shorter, the unconfined compressive strength was increased. On the contrary, as the curing time became longer, the strength was decreased. When the overburden pressure was considerably high, a specimen subjected to any shear history caused a consolidation settlement and an increase of unconfined compressive strength. An increase rate of unconfined compressive strength of specimen with shear history was very low as compared to that without shear history.

**Key Words** : cement stabilized soil, unconfined compression strength, shear stress history, consolidation history

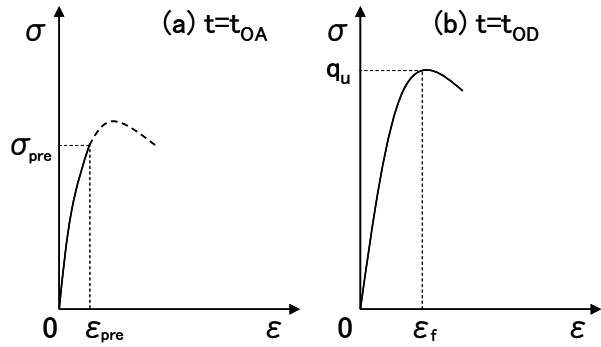
### 1. はじめに

セメント安定処理土の力学的性質に及ぼす影響因子には土の種類や状態, 安定材の種類や添加量, 土と安定材の混合度, 温度や湿度, 養生時間などとともに, 処理土が養生中に受ける応力状態や応力履歴の影響が考えられる. 著者ら<sup>1),2)</sup>はモールドで拘束した一次元圧密状態において一定上載圧下で養生した場合, 一軸圧縮強さはセメント水和反応と養生初期の圧密に伴う密度増加によって増加することを明らかにしている. また, 上載圧を載荷するまでの大気圧下での養生時間すなわち遅延載荷時間や上載圧の載荷時間, 段階載荷における上載圧増分や次の載荷までの放置時間が処理土の一軸圧縮強さに及ぼ

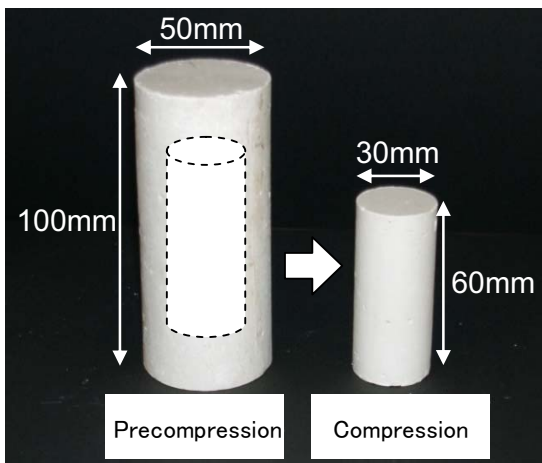
す影響について検討し, 大気圧まで含めて段階載荷時の次の載荷までの放置時間が長くなるほど, 沈下ひずみが小さく, それに伴って一軸圧縮強さが小さくなることを示した. 実際, 安定処理土は原位置において異方応力状態に置かれ, 段階施工など施工順序によっては養生初期に非排水せん断された後, 次の施工時の荷重増分による再圧密の可能性が考えられる. すなわち, セメンテーションの発達段階における事前圧縮によって密度が増加するのか, あるいはセメンテーションが損傷するのか, また, その後の上載圧増分によって供試体の密度増加が起こるのか, またその際にセメンテーションの再損傷はないのかなど不明な点は多い. 安定処理土の非排水せん断履歴の影響については一部検討しており<sup>3)</sup>, 処理後の約



Figures 1 Sketch of loading paths to produce shear and consolidation histories



Figures 2 Schematic diagrams of stress and strain curves in (a) pre compression and (b) compression



Photograph 1 Comparison of specimen size used in precompression and compression tests



Photograph 2 Consolidation apparatus for cement stabilized soil

6 時間経過した時点で事前圧縮を受けると大気圧下養生すなわちせん断履歴の無い供試体よりも高い一軸圧縮強さを示す。逆に、約 14 日間経過した時点で事前圧縮を受けると、大気圧下養生よりも低い一軸圧縮強さを示すことが分かっている。

本論文では、新しい試験結果を追加してせん断履歴の影響をさらに検討するとともに、上述のように養生時間が 360 min および 14 days 経過した時点でせん断履歴を与えた後、上載圧を再載荷し、それによって圧密沈下および一軸圧縮強さがどのように変化するのか調べた結果について述べる。

## 2. 試験手順

せん断履歴および圧密履歴の与え方を Fig.1 に模式的に示す。土試料を安定処理した後、期間  $t_{OA}$  が経過した時点で所定の軸ひずみ  $\epsilon_{pre}$  (以下、先行圧縮ひずみと称す) まで一軸圧縮試験を実施する(以下、先行圧縮と称す)。

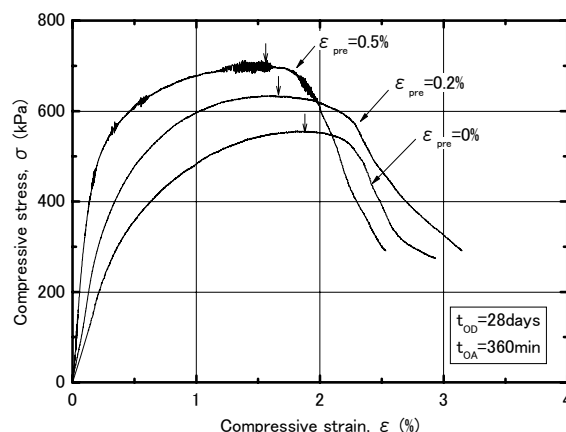
引き続き、圧密履歴を与えない場合には期間  $t_{OD}$  を通じて大気圧下養生を行った後、一軸圧縮試験を再び実施する(以下、本圧縮と称す)。圧密履歴を与える場合には期間  $t_{B', C'}$  に所定の上載圧  $\sigma_v$  を載荷する。なお、安定処理した後、先行圧縮の有無に関わらず、本圧縮までの養生時間  $t_{OD}$  を全養生時間として定義する。Figs. 2 に先行圧縮および本圧縮時における一軸圧縮試験の応力・ひずみ関係を模式的に示す。Photo.1 に示すように、先行圧縮後の供試体から切り出した一回り小さい供試体を本圧縮試験に用いる。せん断履歴の与え方は亀井ら<sup>4)</sup>のように三軸圧縮試験の一連の過程の中で初期せん断する方法と矢田部ら<sup>5)</sup>のようにせん断破壊した供試体を三軸セルから取り出し、一回り小さく再成形したものに対して再せん断する方法がある。今回は試験の簡便さから、後者の方法を採用した。なお、両供試体に寸法効果がないことは確認している<sup>6)</sup>。土試料はカオリン( $\rho_s=2.662 \text{ g/cm}^3$ ,  $w_L=62.0 \%$ ,  $I_p=21.8$ ,  $F_{clay}=98.0 \%$ )、安定材は一般軟弱土用固化材(以下、固化材と称す)である。カオリンの初期

含水比は 70 %, 湿潤密度は 1.543 g/cm<sup>3</sup> である。固化材の成分は SiO<sub>2</sub> : 15~25 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 3.5 % 以上, CaO : 40~70 %, SO<sub>3</sub> : 4.0 % 以上である。土試料と安定材の配合は地盤工学会基準「安定処理土の締め固めをしない供試体作成方法 (JGS0821-2000)」<sup>7)</sup> に準じた。以下に試験手順を示す。

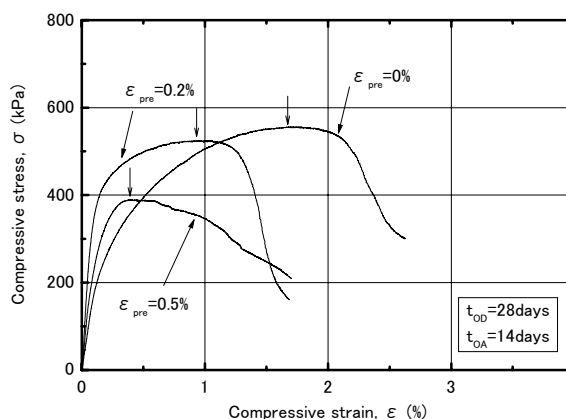
- ① 土試料に添加量 50 kg/m<sup>3</sup> の固化材をスラリー添加し、加えて 10 分間攪拌・混合する。
- ② モールド (直径 50 mm, 高さ 100 mm) に安定処理土を 4 層に分けて充填し、空隙除去のため床にモールドを軽く打ちつける。
- ③ 期間  $t_{0A}$ , 大気圧下養生した後, モールドから試料を脱枠する。
- ④ 供試体を一軸圧縮試験装置に据え付け, 供試体の両端面を歯科用焼石膏によりキャッピングする。石膏が硬化 (15min 程度放置) した後, 軸ひずみ速度 1.0 %/min で所定の  $\epsilon_{pre}$  まで軸圧縮する。
- ⑤ 先行圧縮した供試体から直径 30 mm, 高さ 78 mm の供試体を切り出す。
- ⑥ **Photo.2** に示す小型圧密養生装置に供試体をセットし所定の  $\sigma_v$  を載荷して圧密する。
- ⑦ 所定期間後, 小型圧密養生装置より供試体を取り出す。
- ⑧ **Photo.1** に示すように供試体を直径 30 mm, 高さ 60 mm に成形する。
- ⑨ 一軸圧縮試験装置に供試体を再び据え付け, 供試体の両端面を石膏によりキャッピングし, LDT を左右 2 カ所取り付け。
- ⑩ 軸ひずみ速度 1.0%/min の下で一軸圧縮試験を実施する。ただし, 圧密履歴を与えない場合には手順④の後, 供試体を直径 30 mm, 高さ 60 mm に成形し, 所定期間大気圧下養生を実施する。その後手順⑨および⑩を実施する。

### 3. せん断履歴を受けた場合の処理土の強度特性

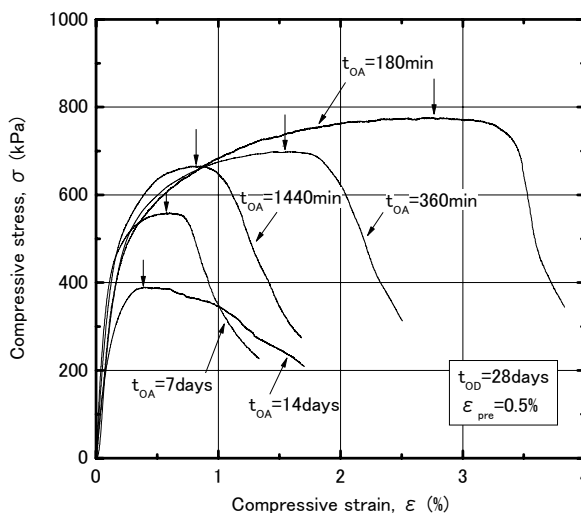
本章ではせん断履歴の影響について検討する。**Fig.3** に  $t_{0A}=360$  min の時点で  $\epsilon_{pre}=0\%$ ,  $0.2\%$ ,  $0.5\%$  の 3 通りに変化させて先行圧縮した後,  $t_{0D}=28$  days の時点で実施した一軸圧縮試験における圧縮応力  $\sigma$  と圧縮ひずみ  $\epsilon$  の関係を示す。 $\epsilon_{pre}=0.2\%$  および  $0.5\%$  の先行圧縮を与えた場合, 先行圧縮を与えない場合 ( $\epsilon_{pre}=0\%$ ) より一軸圧縮強さ  $q_u$  が増加している。**Fig.4** に  $t_{0A}=14$  days の時点で  $\epsilon_{pre}$  を変化させた場合の  $\sigma$  と  $\epsilon$  の関係を示す。 $t_{0A}=360$  min の場合とは異なり,  $\epsilon_{pre}=0.2\%$ ,  $0.5\%$  の  $q_u$  はともに  $\epsilon_{pre}=0\%$  のそれよりも小さくなっている。**Fig.5** に  $\epsilon_{pre}=0.5\%$  および  $t_{0D}=28$  days の条件で  $t_{0A}$  を変化させた場合の圧縮時の  $\sigma$  と  $\epsilon$  の関係を示す。 $t_{0A}$  の増加に伴って,  $\sigma \cdot \epsilon$  曲線は左下方に移動し  $q_u$  が低下している。このこ



**Figure 3** Stress-strain curves with different precompressive strains under condition of  $t_{0A}=360$  min and  $t_{0D}=28$  days



**Figure 4** Stress-strain curves with different precompressive strains under condition of  $t_{0A}=14$  days and  $t_{0D}=28$  days



**Figure 5** Stress-strain curves with different curing times up to precompression under condition of  $t_{0D}=28$  days and  $\epsilon_{pre}=0.5\%$

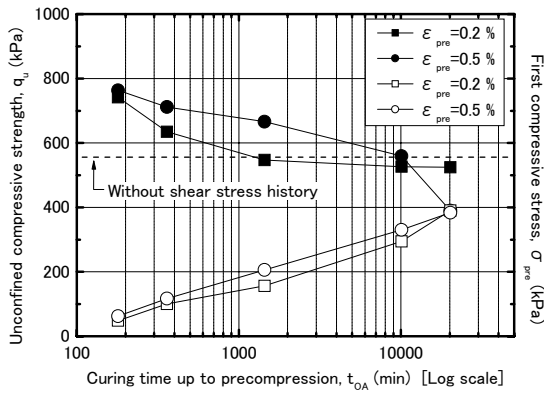


Figure 6 Relationships between  $q_u$ ,  $\sigma_{pre}$  and  $t_{OA}$

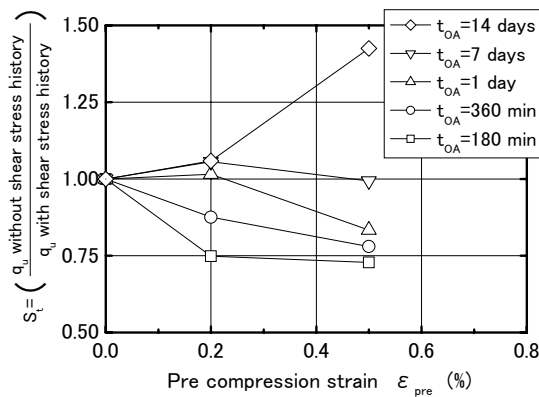
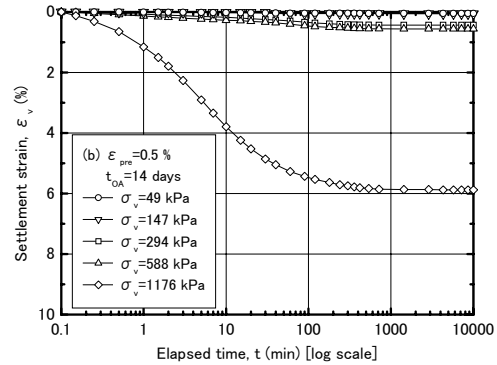
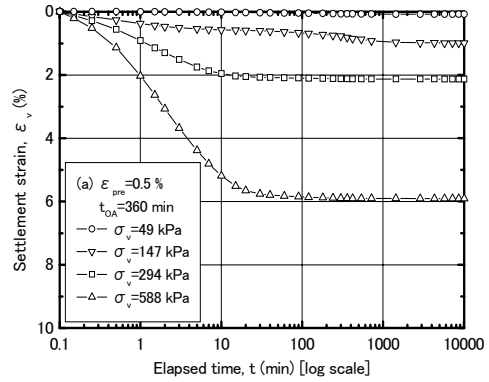


Figure 7 Relationships between  $S_t$  and  $\epsilon_{pre}$

とは、先行圧縮までの養生時間が大きいものほどセメンテーションが発達しており、先行圧縮時に破壊されるセメンテーションの比率が高くなるためと考えられる。

Fig.6 に  $\epsilon_{pre} = 0.2\%$  および  $0.5\%$  の場合における先行圧縮時の  $\epsilon_{pre}$  に対応する圧縮応力  $\sigma_{pre}$ 、本圧縮時の  $q_u$  および対数表示の  $t_{OA}$  の関係を示す。  $\epsilon_{pre} = 0.2\%$  の場合、  $t_{OA}$  が増加すると、  $\sigma_{pre}$  は増加するとともに  $q_u$  は漸次低下し、  $t_{OA} = 1440$  min のときに先行圧縮を受けていない時すなわち大気圧下養生時の  $q_u$  値とはほぼ等しくなっている。さらに、  $t_{OA} = 7$  days 以降において  $q_u$  は大気圧下養生時の  $q_u$  よりも若干低い値でほぼ一定となっている。  $\epsilon_{pre} = 0.5\%$  の場合、  $\epsilon_{pre} = 0.2\%$  の場合の傾向とはほぼ同様であり、注目すべき点として  $t_{OA} = 14$  days のときの  $q_u$  は先行圧縮していない場合の  $q_u$  値を大きく下回っている。これは先行圧縮時において  $\epsilon_{pre} = 0.5\%$  に達するまでにピーク強度が発現したためと考えられる。次に、 Fig.7 に  $S_t$  と  $\epsilon_{pre}$  の関係を示している。ここで、  $S_t$  は先行圧縮していない場合の  $q_u$  を先行圧縮した場合の  $q_u$  で除したものであり、  $S_t$  が 1 より大きい場合はせん断履歴による強度低下を、  $S_t$  が 1 より小さい場合はせん断履歴による強度増加を意味する。先行圧縮までの養生時間が長く、先行圧縮ひずみが大きいほど、強度は低下するようである。このようにせん断



Figures 8 Settlement strain – elapsed time relations

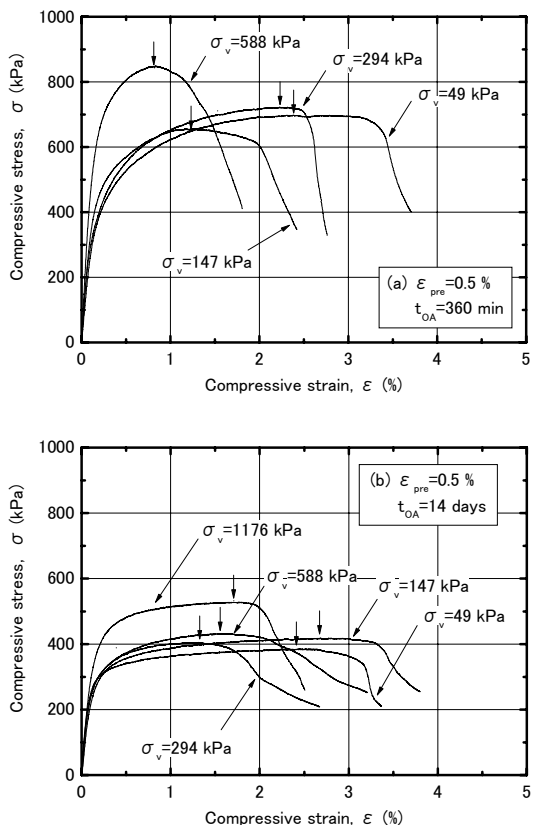
履歴を受ける時期とその大きさによって強度発現が異なる。

#### 4. せん断履歴と圧密履歴を受けた場合の処理土の強度特性

せん断履歴として処理土に先行圧縮ひずみ  $0.5\%$  を与える時期によって全養生時間 28 days が経過した時点の一軸圧縮強さに差が生じることがわかった。すなわち、360 min が経過した時点に先行圧縮した場合の  $q_u$  は先行圧縮を与えない場合のそれよりも大きくなり、逆に 14 days が経過した時点に先行圧縮した場合は小さくなる。本章では、このような両条件でせん断履歴を与えた供試体に対して所定の上載圧を再載荷し圧密させた安定処理土の強度特性について検討する。

Figs.8 (a), (b) にそれぞれ  $t_{OA} = 360$  min および 14 days の時に  $\epsilon_{pre} = 0.5\%$  のせん断履歴を与えた後、  $\sigma_v$  を再載荷した場合の沈下ひずみ  $\epsilon_v$  と経過時間  $t$  の関係を示す。  $\sigma_v = 49$  kPa の場合にはほとんど沈下はみられないが、  $\sigma_v$  を増加させると最終的な沈下ひずみ  $\epsilon_v^*$  は増加し、  $\sigma_v = 588$  kPa の場合には  $\epsilon_v^* = 6\%$  である。(b) に示す  $\sigma_v = 49, 147$  kPa の場合にはほとんど沈下が生じず、  $\sigma_v = 294, 588$  kPa の場合、  $\epsilon_v^*$  はわずかであり、  $\sigma_v = 1176$  kPa の場合にたかだか  $\epsilon_v^* = 6\%$  である。

Figs.9(a), (b) にそれぞれ Figs.8(a), (b) に対応する本圧縮時の  $\sigma$  と  $\epsilon$  の関係を  $\sigma_v$  ごとに示す。(a) に示す



Figures 9 Stress - strain curves with different overburden pressures

$t_{OA}=360$  min の場合、上載圧レベルが  $\sigma_v=294$  kPa までは  $q_u$  に大きな差はみられないが、 $\sigma_v=588$  kPa を超えると  $q_u$  は明らかに大きくなる。(b) に示す  $t_{OA}=14$  days の場合は  $\sigma_v=1176$  kPa を前後して  $q_u$  は一定から増加に転じる。

Fig.10 に  $q_u$  と  $\epsilon_v^*$  の関係を示す。 $t_{OA}=360$  min, 14 days に先行圧縮を与えた場合にも、先行圧縮を与えない場合と同様に、 $\epsilon_v^*$  の増加に伴って  $q_u$  が増加している。このことは先行圧縮を受けた後に上載圧の荷重により密度の増加が生じたため  $q_u$  が増加したものと考えられる。

Fig.11 に本圧縮時の破壊ひずみ  $\epsilon_f$  と  $\epsilon_v^*$  の関係を示す。ばらつきがみられるが、先行圧縮を与えた場合、 $\epsilon_v^*$  の増加に伴って  $\epsilon_f$  は減少する傾向がみられる。

Fig.12 に  $q_u$  と本圧縮前の湿潤密度  $\rho_t$  の関係を示す。Fig.10 に示したように  $\rho_t$  の増加に伴って  $q_u$  が増加する傾向がみられる。

Fig.13 にせん断履歴を与えず処理後直ちに  $\sigma_v$  を荷重したケース、 $t_{OA}=360$  min および 14 days の時点で  $\epsilon_{pre}=0.5\%$  のせん断履歴を与えたケースの  $q_u$  と  $\sigma_v$  の関係を示す。処理後直ちに  $\sigma_v$  を荷重すると、 $q_u$  は  $\sigma_v$  の増加に対して直線的に増加している。せん断履歴を与えたときの  $q_u$  は、せん断履歴を与えていないときの  $q_u$  よりも、 $\sigma_v=0$  kPa の時点において、 $t_{OA}=360$  min の場合には高く、 $t_{OA}=14$  days の場合には低くなっている。いずれの  $t_{OA}$  に

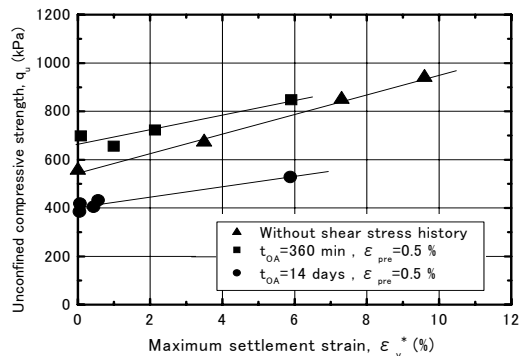


Figure 10 Relationships between  $q_u$  and  $\epsilon_v^*$

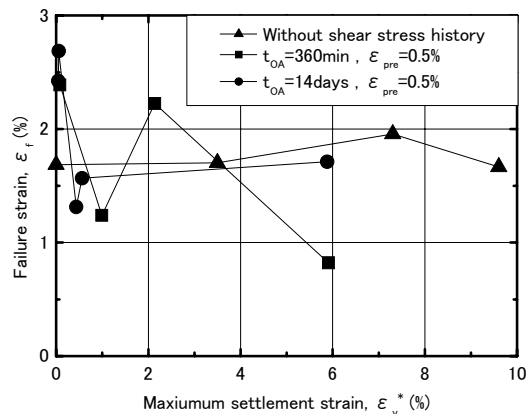


Figure 11 Relationships between  $\epsilon_f$  and  $\epsilon_v^*$

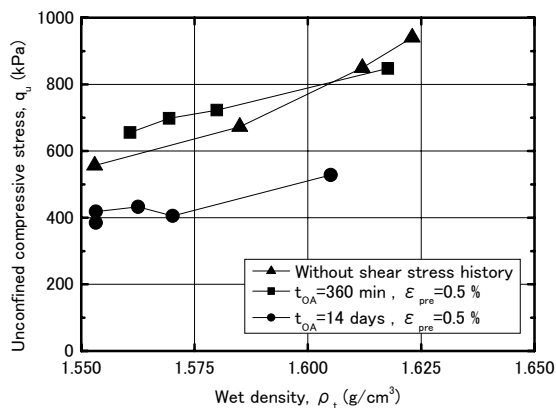


Figure 12 Relationships between  $q_u$  and  $\rho_t$

おいても  $\sigma_v$  を増加させてもそれほど  $q_u$  の増加はみられないが、 $t_{OA}=360$  min の場合には  $\sigma_v=300$  kPa 程度を超えると、 $t_{OA}=14$  days の場合には  $\sigma_v=400$  kPa を超えると、 $q_u$  の増加がみられる。しかし、 $\sigma_v$  の増加に対する  $q_u$  の増加の割合はせん断履歴がないケースよりも小さく、 $t_{OA}=14$  days の場合には  $\sigma_v=1176$  kPa を与えても、せん断履歴による強度低下分を回復するまでに至っていない。

以上のことから、せん断履歴を与えた後の圧密の影響は、 $\sigma_v$  が比較的小さい場合すなわち圧密による  $\epsilon_v$  がほ

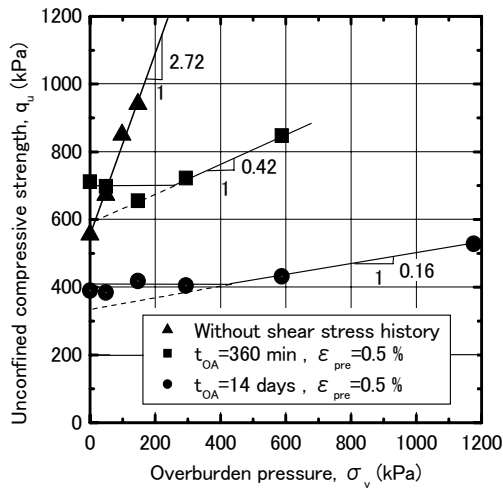


Figure 13 Relationships between  $q_u$  and  $\sigma_v$

ほとんど生じない場合、圧密沈下による強度増加やセメンテーションの損傷はどちらも生じず、 $q_u$ にほとんど影響を与えない。一方、 $\sigma_v$ が大きい場合すなわち沈下ひずみが6%程度生じる場合には強度増加が若干みられるが、強度増加の度合いはせん断履歴を与えていない場合に比べて小さい。これは、Fig.13の直線部を外挿した $q_u$ 軸上の切片は350 kPaまで低下しており、セメンテーションの破壊による強度低下が同時に発生したためと考えられる。

## 5. 結論

安定処理土に与えるせん断履歴と圧密履歴の影響について検討した結果を以下のように要約する。

- (1) 先行圧縮までの養生時間が360 min程度の場合、先行圧縮ひずみが大きいほど本圧縮時の一軸圧縮強さは大きくなる。
- (2) この逆に、先行圧縮までの養生時間が14 days程度の場合、先行圧縮ひずみが大きいものほど本圧縮時の一軸圧縮強さは小さくなる。特に先行圧縮時にピーク強度まで圧縮されると、その傾向は著しい。
- (3) 処理後360 min経過した時点で先行圧縮した場合、上載圧294 kPaまで再載荷しても、沈下ひずみ $\epsilon_v$ はほとんど生じず、一軸圧縮強さは変化しない。上載圧588 kPaまで再載荷すると、沈下ひずみは約6%になり、一軸圧縮強さの増加がみられた。
- (4) 処理後14 days経過した時点で先行圧縮した場合、

上載圧588 kPaまで再載荷しても、沈下ひずみ $\epsilon_v$ はほとんど生じず、一軸圧縮強さは変化しない。上載圧1176 kPaまで再載荷すると、沈下ひずみは約6%になり、一軸圧縮強さの増加がみられた。

- (5) 上記(3)、(4)において、先行圧縮した場合における上載圧の増加に対する一軸圧縮強さの増加の度合いは先行圧縮を与えない場合のそれより小さい。

謝辞：本研究成果は、元大学院生 河原 陽子氏(現 セントラルコンサルタント(株))ならびに大学院生 久保田 晃氏によるところが大きい。ここに記して深く感謝の意を示す次第である。

## 参考文献

- 1) 山本哲朗, 鈴木素之, 岡林茂生, 藤野秀利, 田口岳志, 藤本哲生: 上載圧下で養生したセメント安定処理土の一軸圧縮強度特性, 土木学会論文集, No. 701/III-58, pp. 387-399, 2002.
- 2) 鈴木素之, 田口岳志, 藤本哲生, 河原陽子, 山本哲朗, 岡林茂生: セメント安定処理土の強度発現における養生時上載圧の載荷条件の影響, 土木学会論文集, No. 792/III-71, pp. 211-216, 2005.
- 3) 鈴木素之, 河原陽子, 山本哲朗, 平岡真樹: 養生初期にせん断履歴を与えた固化処理土の強度・変形特性, セメント及びセメント系固化材を用いた固化処理土の調査・設計・施工方法と物性評価に関するシンポジウム発表論文集, pp.347-350, 2005.
- 4) 亀井健史, 常田 亮: 異なる応力履歴を受けた練返し粘性土の非排水せん断特性, 土木学会論文集, No. 430/III-15, pp. 87-96, 1991.
- 5) 矢田部龍一, 八木則男, 榎 明潔: 乱さない地すべり粘土のせん断特性, 地すべり, Vol.26, No.4, pp.3-9, 1990.
- 6) 鈴木素之, 山本哲朗, 河原陽子, 平岡真樹: 上載圧下で養生したセメント安定処理土の変形特性, 第6回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 205-208, 2004.
- 7) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説(第一回改訂版), 地盤工学会, pp. 308-316, 2000.

(平成17年12月28日受理)