

養生初期のせん断履歴を有する セメント安定処理土の強度・変形特性

鈴木 素之 (社会建設工学科)

河原 陽子 (社会建設工学専攻)

山本 哲朗 (社会建設工学科)

平岡 真樹 (社会建設工学専攻)

Strength and deformation properties of cement stabilized soil with shear stress history at early curing time

Motoyuki SUZUKI (Department of Civil Engineering)

Yoko KAWAHARA (Graduate school of Civil Engineering)

Tetsuro YAMAMOTO (Department of Civil Engineering)

Masaki HIRAOKA (Graduate school of Civil Engineering)

This paper describes influence of shear stress history on unconfined compressive strength of a cement treated soil. Unconfined compression test was performed on a specimen subjected to initial undrained shear in early curing period. A specimen with 10 cm in height and 5 cm in diameter was cured under the atmosphere. Immediately after a curing period, the specimen was compressed until the axial strain attained a required value. Then a new specimen with 6 cm in height and 3 cm in diameter was cut from the compressed specimen. Subsequently the small specimen was recompressed. Main conclusions are as follows. 1) As the curing time before first compression becomes shorter, the unconfined compressive strength and the modulus of deformation at recompression increased with increasing the added axial strain at the first compression. 2) This tendency for the treated soil is different from that for untreated soil.

Key Words : cement stabilized soil, unconfined compression strength, shear stress history, modulus of deformation

1. はじめに

筆者らは、セメント安定処理土が養生中に受ける応力状態や応力履歴の影響について検討しているが、中にはせん断履歴の影響も含まれる。Fig. 1 に模式的に示すように、安定処理土も原位置においては異方応力状態 (σ_h' , σ_v') に置かれ、段階施工など施工方法によっては養生初期に非排水せん断される可能性が考えられる。

粘性土や砂質土に対する静的せん断履歴の影響については、亀井ら¹⁾により詳細に検討されており、飽和土に対する非排水三軸圧縮試験の結果に基づいて、過圧密比および初期せん断ひずみの増加に伴い、非排水せん断強

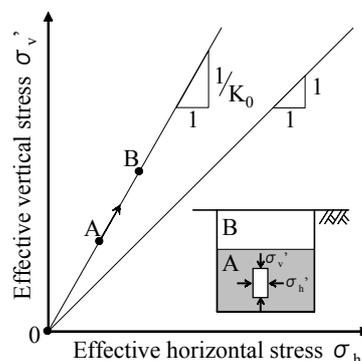


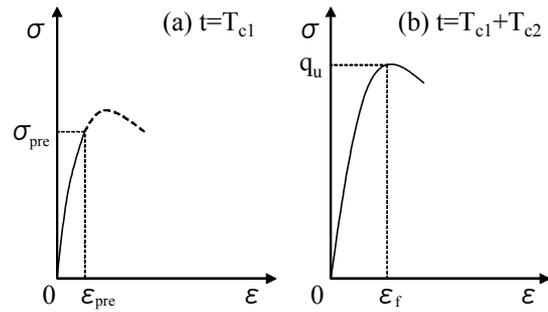
Figure 1 Schematic diagram of in-situ stress condition in ground improved by cement stabilization

度および変形係数がそれぞれ増加することを示している。しかし、セメント安定処理土の場合、処理後の養生時間によって強度・変形特性が著しく異なることから、せん断履歴を与える時期やその大きさによって、その後の非排水せん断挙動は変化するものと考えられる。すなわち、セメンテーションの発達段階において受ける事前圧縮によってセメンテーションが破壊されるか否かは物理的にも工学的にも興味深い。

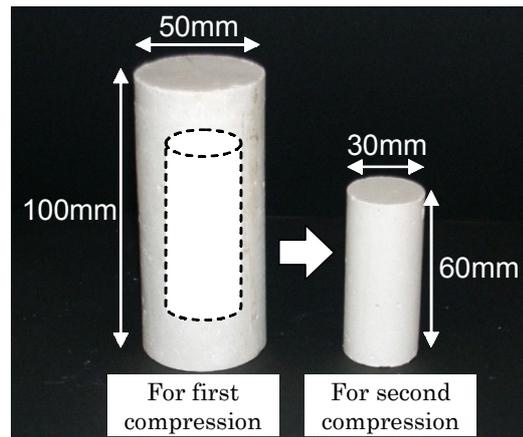
本研究では、一軸圧縮試験に用いた供試体から新たに切り出した小型の供試体に対して一軸圧縮試験を再度実施し、様々なせん断履歴を与えた固化処理土の強度・変形特性について検討した。

2. 試験方法

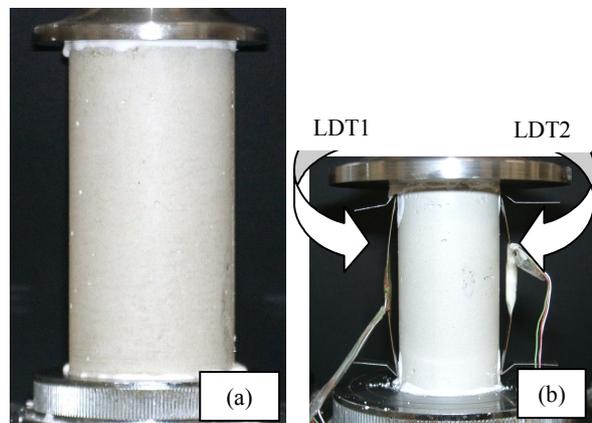
Figs. 2 に模式的に示すように、まず養生初期(経過時間 $t=T_{c1}$)に所定の軸ひずみ ϵ_{pre} まで一軸圧縮試験を実施する。その後直ちに試験後供試体から一回り小さい供試体を切り出し、所定時間($t=T_{c1}+T_{c2}$)経過した時点で再度一軸圧縮試験を実施する。せん断履歴の与え方は亀井ら¹⁾のように三軸圧縮試験の一連の過程の中で初期せん断する方法と矢田部ら²⁾のようにせん断破壊した供試体を三軸セルから取り出し、一回り小さく再成形し、それに対して再せん断する方法がある。今回は試験の簡便さから、後者の方法を採用した。なお、両供試体に寸法効果がないことは文献³⁾で確認している。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^3 である。固化材の成分は SiO_2 : 15~25%, Al_2O_3 : 3.5%以上, CaO : 40~70%, SO_3 : 4.0%以上である。土試料と安定材の配合手順は地盤工学会基準「安定処理土の締固めをしない供試体作成方法(JGS0821-2000)」⁴⁾に準じた。以下に試験手順を示す。①土試料にスラリー状の固化材を添加量 50 kg/m^3 ほど加えて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、気泡除去のため床にモールドを軽く打ちつける。③所定期間 T_{c1} 大気圧下養生した後、モールドから試料を脱型する。④供試体を一軸圧縮試験装置にセットして、供試体の両端面を石膏によりキャッピングする。石膏が硬化(15分程度放置)した後、軸ひずみ速度 $1.0\%/min$ で所定の圧縮ひずみ ϵ_{pre} までせん断履歴を与える(以後、先行圧縮と称す)。⑤先行圧縮した供試体から直径30 mm, 高さ60 mmの供試体を切り出す(**Photo.1** 参照)⑥所定期間 T_{c2} 大気圧下養生する。⑦一軸圧縮試験装置に供試体を再セットして供試体の両端面をキャッピングし、LDTを左右2カ所取り付け。⑧軸ひずみ速度 $1.0\%/min$ で一軸圧縮試験を実施する(以



Figures 2 (a) first compression and (b) second compression



Photograph 1 comparison of specimen size



Photographs 2 Specimens during (a) first compression and (b) second compression

後、再圧縮と称す)。キャッピングには歯科用焼石膏を用いた。

Table 1 に試験結果の一覧を示す。実験の都合上、先行圧縮過程では LDT ではなく外部変位計を用いて軸変位を計測しているため、応力 σ ・ひずみ ϵ 曲線はベディンゲエラーを含んでいる。したがって、先行圧縮過程で与える軸ひずみ ϵ_{pre} は公称値であり、それを各々0.2%

Table 1 Test results

First compression				Second compression					
Axial strain ϵ_{pre} (%)	Curing time T_{c1} (min)	Compressive stress at ϵ_{pre} q_{upre} (kPa)	Curing time T_{c2} (days)	Total curing time $T_c (=T_{c1}+T_{c2})$ (days)	Unconfined compressive strength q_u (kPa)	Axial strain at failure ϵ_f (%)	Modulus of deformation (MPa)		
							E_{50}	E_{max}	
0.2	180	40.9	7	7	327.0	0.82	269.6	206.6	
	360	96.8	7		391.1	1.06	265.0	413.9	
	1440	165.0	6		344.4	1.25	230.1	366.3	
0.5	180	68.3	7		352.8	0.65	252.0	277.5	
	360	111.1	7		445.0	0.62	392.3	436.5	
	1440	202.8	6		349.1	0.83	300.9	406.1	
ϵ_f	180	63.4	7		451.9	1.49	175.0	93.9	
	360	111.6	7		402.7	0.96	165.0	251.9	
0.2	180	48.6	28		28	528.7	0.38	489.9	447.9
	360	100.1	28			634.2	1.59	140.3	191.3
	1440	156.2	27			547.0	0.99	299.5	375.0
	10080	294.2	21			526.0	0.69	349.3	342.7
	20160	390.2	14			524.8	0.93	416.6	355.1
0.5	180	62.4	28			483.4	0.43	814.1	1013.0
	360	116.6	28			711.8	1.53	315.0	267.0
	1440	205.8	27	666.0		0.82	356.2	391.1	
	10080	330.4	21	559.2		0.58	466.0	530.7	
	20160	383.2	14	389.9		0.39	252.7	247.7	
ϵ_f	180	55.1	28	400.2		0.45	312.2	330.4	
	10080	291.2	21	522.0		0.36	377.7	590.3	

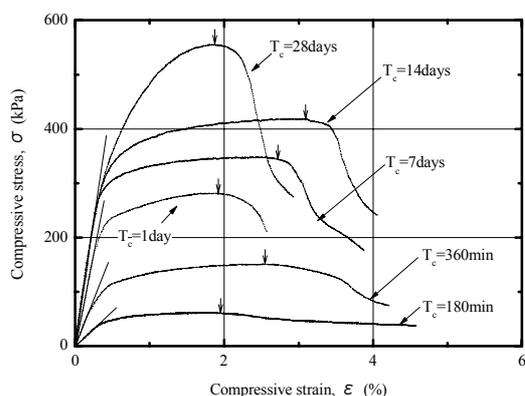


Figure 3 Stress-strain curves without stress history

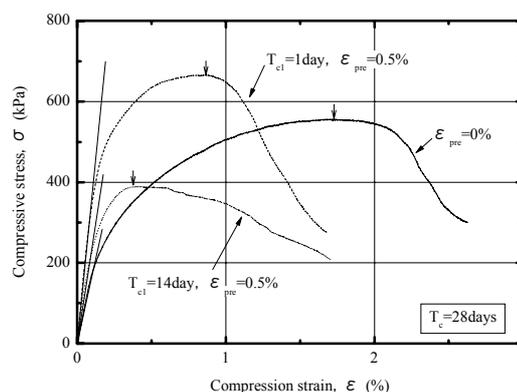


Figure 4 Stress-strain curves with and without stress history

0.5 %, 破壊ひずみ ϵ_f までの 3 通りに変化させた。先行圧縮および再圧縮過程を通じての養生時間 $T_c (=T_{c1}+T_{c2})$ は 7, 28 days の 2 通りとし、先行圧縮までの時間 T_{c1} は 180, 360, 1440 min, 7, 14 days の 5 通りとした。また、**Photos. 2(a)**に $\epsilon_f = \epsilon_{pre}$ まで与える先行圧縮が終了した時点の供試体を示す。この場合においては供試体にすべり線は見られず、一様な圧縮変形モードであるといえ、再圧縮時用の供試体を切り出す際には供試体中央部から切り出すことが可能となる。**Photos. 2(b)**には再圧縮中の供試体を示している。

3. 試験結果と考察

Fig. 3 にせん断履歴を与えず、かつ T_c が異なる場合の応力 σ とひずみ ϵ の関係を示す。 T_c の増加とともに、

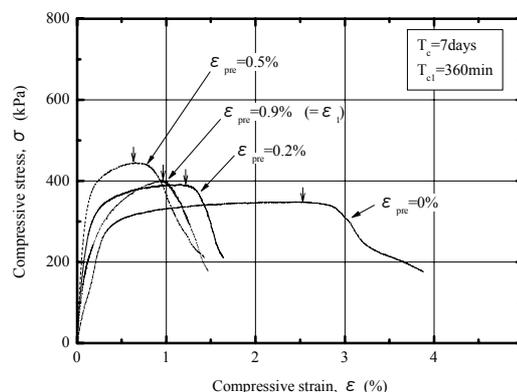


Figure 5 Stress-strain curves under condition of $T_c=7$ days and $T_{c1}=360$ min.

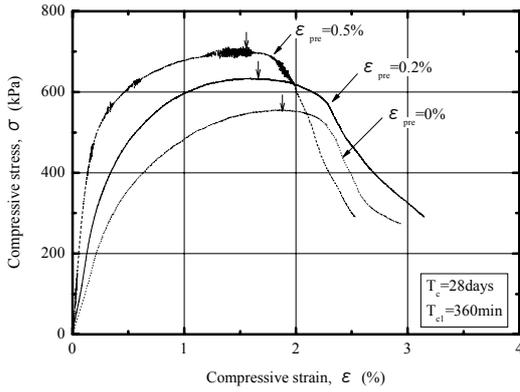


Figure 6 Stress-strain curves under condition of $T_{cl}=360$ min and $T_c=28$ days

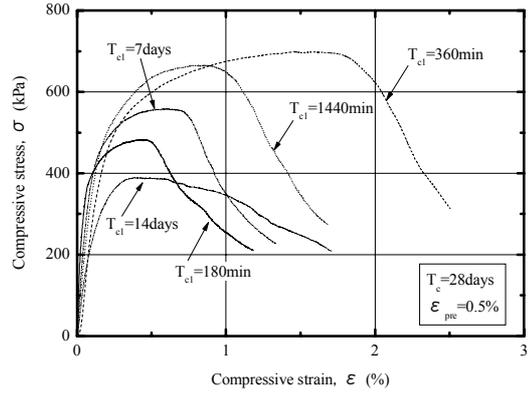


Figure 8 Stress-strain curves under condition of $T_c=28$ days and $\epsilon_{pre}=0.5\%$

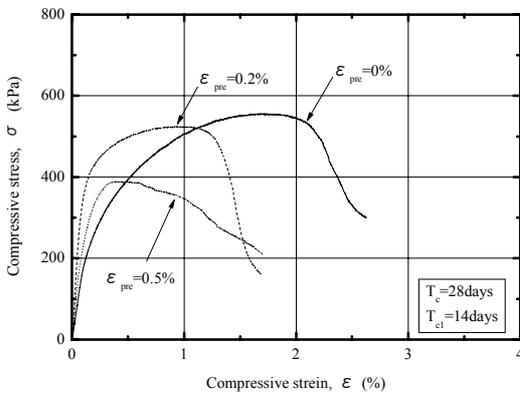


Figure 7 Stress-strain curves under condition of $T_{cl}=14$ days and $T_c=28$ days

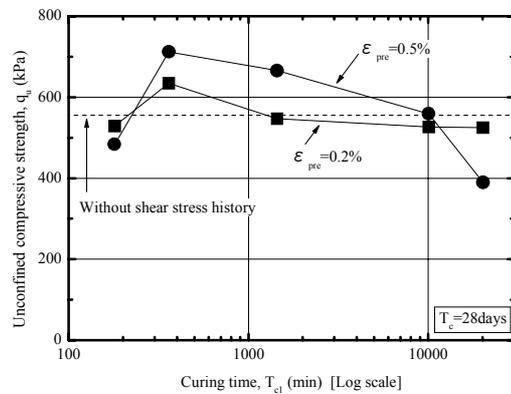


Figure 9 Relationships between q_u at 2nd compression and T_{cl}

$\sigma \cdot \epsilon$ 曲線が上方に位置し一軸圧縮強さ q_u が増加する一般的な傾向になっている。

Fig. 4 に先行圧縮した場合 ($\epsilon_{pre}=0.5\%$) と先行圧縮していない場合 ($\epsilon_{pre}=0\%$) の $\sigma \cdot \epsilon$ 関係を示す。図中のデータは一律に $T_c=28$ days であり、せん断履歴として固化処理後 1 day と 14 days が経過した時点で各々 $\epsilon_{pre}=0.5\%$ を与えたものである。先行圧縮を与えると、再圧縮時の q_u は変化し、先行圧縮の時期が早いと q_u は大きく、遅いと小さくなるようである。また、応力・ひずみ曲線の立ち上がり部の傾きが大きくなるようである。

Fig. 5 に $T_{cl}=360$ min の時点で異なる ϵ_{pre} を与えた場合の $\sigma \cdot \epsilon$ 関係を示す。図中のデータはいずれも $T_c=7$ days である。 $\epsilon_{pre}=0.9\%$ ($=\epsilon_p$) の場合を除いて、 $T_{cl}=360$ min 程度のセメンテーションの発達初期に先行圧縮したためか、 ϵ_{pre} の増加とともに q_u は増加している。これは未処理土供試体にせん断履歴を与えた場合と同じ傾向である¹⁾。

Fig. 6 に $T_{cl}=360$ min および $T_c=28$ days の条件で ϵ_{pre}

を変化させた場合の $\sigma \cdot \epsilon$ 関係を示す。**Fig. 5** と異なるのは T_c を 7 days から 28 days に延した点である。**Fig. 5** の場合と同様に、 ϵ_{pre} の増加に伴って、 q_u が増加している。すなわち、養生時間が経過しても先行圧縮による強度差はそのまま保持されることがわかる。

Fig. 7 に $T_{cl}=14$ days および $T_c=28$ days の条件で ϵ_{pre} を変化させた場合の $\sigma \cdot \epsilon$ 関係を示す。**Fig. 6** と異なるのは ϵ_{pre} を与える時期を 360 min から 14 days に延した点である。 $\epsilon_{pre}=0.2\%$ 、 0.5% とともに q_u は $\epsilon_{pre}=0\%$ のそれよりも小さくなっている。これは養生時間 14 日間程度で発達したセメンテーションが先行圧縮により破壊されたものと考えられるが、その後再圧縮までの 14 日間で発達する再セメンテーションにより固結構造が修復された結果、 q_u の大きな低下がみられなかったと考えられる。

次に、**Fig. 8** に $T_c=28$ days および $\epsilon_{pre}=0.5\%$ の条件で先行圧縮までの養生時間 T_{cl} を変化させた場合の $\sigma \cdot \epsilon$ 関係を示す。 $T_{cl}=180$ min の場合を除いて、 T_{cl} の増加に

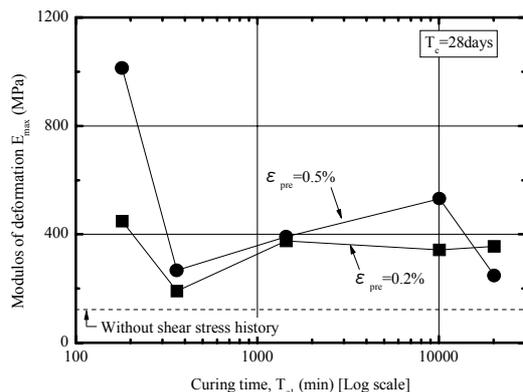


Figure 10 Relationships between E_{\max} at 2nd compression and T_{cl}

伴って、 $\sigma \cdot \varepsilon$ 曲線は左下方に移動し再圧縮時の q_u が減少している。このことは、 T_{cl} 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. 9 にこの場合と $\varepsilon_{pre}=0.2\%$ の場合における再圧縮時の q_u と対数表示の T_{cl} との関係を示す。 $T_{cl}=180\text{ min}$ の場合を除いて、 T_{cl} が増加すると、再圧縮時の q_u は減少するようである。また、 $T_{cl}=7\text{ days}$ 以前では ε_{pre} が大きいものほど q_u が大きくなっているが、 $T_{cl}=14\text{ days}$ になると ε_{pre} が大きいものほど q_u が小さくなっている。これは、 T_{cl} が小さいときは先行圧縮による強度増加が見込めるが、逆に T_{cl} が大きくなると先行圧縮によってセメンテーションが破壊され、かつ再圧縮までの養生時間が短く再セメンテーションが発達しないため、強度が減少することを示唆している。

最後に、Fig. 10 に再圧縮時の最大割線変形係数 E_{\max} と対数表示の T_{cl} の関係を示す。 E_{\max} は $\varepsilon=0.01\%$ 以下の領域での $\sigma \cdot \varepsilon$ 曲線の直線部の傾きの最大値である。 T_{cl} が増加すると、再圧縮時の E_{\max} は減少するようである。また、Fig. 9 の q_u と同様に $T_{cl}=7\text{ days}$ 以前では ε_{pre} が大きいものほど E_{\max} が大きくなっているが、 $T_{cl}=14\text{ days}$ になると逆に ε_{pre} が大きいものほど E_{\max} が小さくなっている。

以上のことから、安定処理してから先行圧縮までの養生時間が大きくなると、未処理土の場合と異なり、強度・変形係数ともに低下するようである。

4. 結論

固化処理土が受けるせん断履歴の影響について検討した結果を以下のようにまとめる。

- (1) 先行圧縮までの時間が短い場合には(例えば 6 時間)、先行圧縮ひずみが大きいほど、再圧縮時の一軸圧縮

強さは大きくなる。また変形係数についても同様な傾向である。

- (2) (1)とは逆に、先行圧縮まで養生時間が長い場合(例えば 14 日間)、先行圧縮ひずみが大きいものほど再圧縮時の一軸圧縮強さ、変形係数はともに小さくなり、せん断履歴が無いときよりも小さくなる。
- (3) 固化処理しない粘土の非排水せん断強度が初期せん断ひずみの増加とともに大きくなるという定説は、固化処理した粘土に対しては成り立たない。

謝辞：本研究を遂行する上で、山口大学工学部学生 久保田 晃氏にご助力いただいた。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) 亀井健史, 常田 亮:異なる応力履歴を受けた繰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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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 16 年 12 月 27 日受理)