

圧密養生した安定処理土の強度特性 に及ぼす応力履歴の影響

田口 岳志 (社会建設工学専攻)
鈴木 素之 (社会建設工学科)
山本 哲朗 (社会建設工学科)
藤野 秀利 ((株)宇部三菱セメント研究所)
岡林 茂生 ((株)宇部三菱セメント研究所)
藤本 哲生 (社会建設工学専攻)

Influence of consolidation stress history on unconfined compressive strength of cement-stabilized soil

Takeshi TAGUCHI (Graduate school of Civil Engineering)

Motoyuki SUZUKI (Department of Civil Engineering)

Tetsuro YAMAMOTO (ditto)

Hidetoshi FUJINO (Ube-Mitsubishi Cement Research Institute Co.)

Sigeo OKABAYASHI (ditto)

Tetsuo FUJIMOTO (Graduate school of Civil Engineering)

Unconfined compression tests were performed on a cement-stabilized soil that was cured under an overburden pressure using a newly developed device. The influence of the loading time on unconfined compressive behavior was investigated based on the test results on a cement-stabilized kaolin. The test showed that the consolidation settlement and the undrained shear strength remarkably increased with the increasing of the loading time up to about 90 minutes. Furthermore, the wet density and water content of the specimen was almost constant the curing time after unloading.

Key Words: stabilizer, soil improvement, cement stabilization, unconfined compressive strength, overburden pressure, consolidation, curing

1. はじめに

安定処理土地盤においても地中の土要素は拘束圧を受けた状態にあり，固化開始前の施工の初期段階では圧密現象が生じて非排水強度が増加する^{1)~4)}。

著者ら⁵⁾は，セメント安定処理土が施工後の原位で受ける応力状態を再現するために開発したモールド型圧密養生装置を用いて，土の種類，改良

材の種類と添加量，安定処理時の含水比，上載圧，養生時間，安定処理後に上載圧を載荷するまでの時間を変化させて上載圧下で養生した安定処理土の圧密沈下特性と一軸圧縮強度特性を調べた。その結果，安定処理土は固化開始前の初期材齢で圧密に伴う密度増加が認められ，これとセメンテーションの進行との相乗効果により，その後に発揮され

る強度・変形特性が従来の大気圧下養生の場合と比べて著しく相違することを明らかにした。

上記の要因のうち、上載圧が供試体に有意な密度変化を生じさせる時間として養生時間を最大 14 日間に設定しており、それ以降の一軸圧縮強度の経時変化を必ずしも十分に把握しておらず、今後の課題として残された。また、上載圧の載荷時間の影響は取り上げておらず、このことを明らかにすることは上載圧による密度増加と水和反応によるセメンテーションの発達が同時に進行する安定処理地盤において未圧密過程の強度増加特性を評価する上でたいへん重要である。

本文では、セメント安定処理した粘性土を上載圧下で養生した後、一軸圧縮試験を実施した結果について述べるとともに、特に一軸圧縮強度に及ぼす載荷時間および養生時間の影響について検討する。

2. 試験方法

(1) モールド型圧密養生装置⁵⁾

Fig.1 に著者らが開発したモールド型圧密養生装置の模式図を示す。本装置は鉄（一部ステンレス）製であり、底板（縦 200 mm，横 300 mm，厚さ 20 mm）に据え付けた載荷板案内軸、載荷板、重錘、カラー、鉛直変位測定用ダイヤルゲージおよびモールドから構成されている。モールド内に安定処理土試料が収められる。載荷板とモールドの底部にはポーラスストーンが取り付けられており、土試料の両端面から排水させることができる。載荷可能な上載圧 v は 49, 98, 147 kPa の 3 通りであり、これらはそれぞれ深度 5, 10, 15 m 程度の有効土被り圧を想定してのものである。圧密容器として通常の二つ割りモールドを用いているので、養生後、試料は容易に脱型することができ、試料に及ぼす機械的乱れの影響を少なくすることができる。ここで注意すべき点として、三軸圧縮試験における供試体は等方圧密条件下にあるのに対して、本装置におけるモールド内の供試体は一次元圧密条件下にあることである。特に K_0 三軸試験を実施しない限り、原位置で普通にみられる応力・変形状態を再現している点でモールドを用いる本装置の方がより適していると考えられる。しかも、三軸圧縮試験では固化処理直後に自立した供試体を作製することは一般に困難であるが、本装置では固化処理直後の安定処理土に上載圧を載荷でき、固化未了の養生初期段階から拘束圧を作用させることができる。

(2) 試験ケース

Fig.2 に上載圧 v と経過時間 t の関係を模式的に示

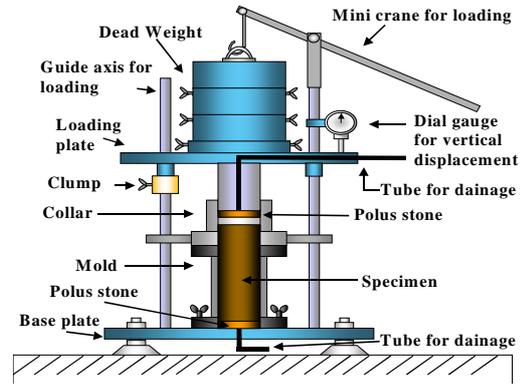


Figure 1 Mold type consolidation apparatus for stabilized soil

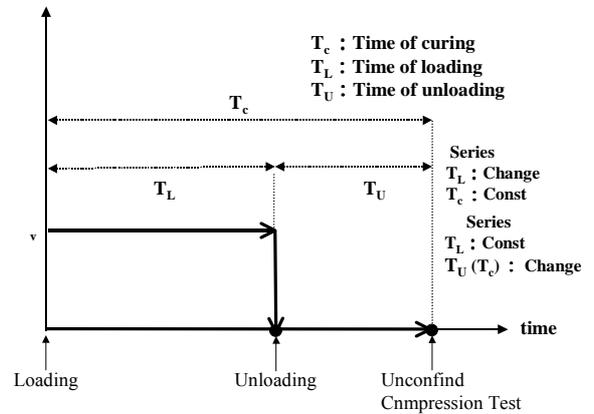


Figure 2 Schematic diagram of test procedure

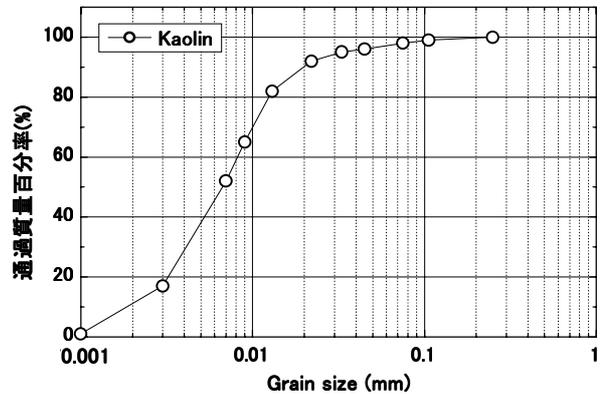


Figure 3 Grading curve of kaolin

す。図中の記号のうち、 T_L は v の載荷時間、 T_U は大気圧下 ($v=0$ kPa) における放置時間、 T_C は土試料に固化材を添加してからの養生時間である。以下の 2 シリーズの試験ケース および を立案した。まず、試験シリーズとして未圧密過程における短期強度特性を調べるために、 $T_C=7$ days に固定し、 T_L を 0, 1, 5, 10, 20, 30, 90, 1440 および 10080 min (7 days) の 9 通りに変化させた。ついで、試験シリーズとして圧密終了後の長期強度特性を調べる

Table 1 Test cases and results

Seriase	Test No.	Type and content of stabilizer Q_c (kg/m ³)	Consolidation load ν (kPa)	Loading Time T_L (min)	Curing time T_c (day)	Consolidation strain ν^* (%)	Water content w_c (%)	Wet Density ρ_t (g/cm ³)	Unconfined of consolidation q_u (kPa)	Axial strain at failural ϵ_f (%)	Modulus of deformation E_{50} (MPa)
固化材	1-1-1	50	49	0	7	-	65.8	1.55	339.1	0.50	156.4
	1-1-2			1		0.70	66.7	1.56	358.5	0.72	164.8
	1-1-3			5		1.80	64.7	1.57	377.9	0.60	156.7
	1-1-4			10		2.73	64.3	1.57	365.7	0.42	183.0
	1-1-5			20		3.82	62.4	1.58	444.2	0.39	148.7
	1-1-6			30		5.04	61.8	1.59	515.6	0.46	197.7
	1-1-7			90		5.36	61.0	1.60	566.6	0.55	256.4
	1-1-8			1440		5.37	61.0	1.61	510.3	0.35	212.5
	1-1-9			10080		5.35	61.7	1.62	529.0	0.40	181.9
	1-2-1		0	98	7	-	66.2	1.56	315.0	0.80	78.0
	1-2-2		1			1.21	65.1	1.56	337.9	0.69	80.0
	1-2-3		3			2.42	64.4	1.57	387.9	0.95	61.0
	1-2-4		10			4.57	62.3	1.58	412.3	0.60	137.0
	1-2-5		40			8.01	57.8	1.60	612.1	0.55	155.0
	1-2-6		90			8.51	57.7	1.61	630.0	0.90	95.0
	1-2-7		1440			8.55	57.7	1.63	671.0	0.40	268.4
	1-2-8		10080			8.58	57.5	1.63	668.6	0.33	283.5
	1-3-1		0	147	7	-	66.7	1.55	335.5	0.67	105.6
	1-3-2		1			1.41	65.4	1.56	338.4	0.65	116.0
	1-3-3		5			4.33	63.9	1.58	416.5	0.40	228.9
	1-3-4		10			6.55	60.9	1.60	468.9	0.40	137.6
	1-3-5		20			8.92	59.1	1.62	609.0	0.30	305.0
	1-3-6		30			9.99	57.7	1.62	660.4	0.42	220.7
	1-3-7		90			11.11	56.2	1.63	741.8	0.54	196.3
	1-3-8		1440			11.24	55.0	1.64	793.0	0.40	330.4
	1-3-9		10080			11.34	55.6	1.64	790.0	0.25	380.0
	2-1-1		0	0	1440	3	-	66.1	1.55	296.2	0.59
2-1-2	7	-	65.8			1.57	372.5	0.63	167.3		
2-1-3	14	-	66.8			1.57	435.3	0.40	221.0		
2-1-4	28	-	67.9			1.55	518.0	0.70	138.4		
2-1-5	56	-	65.1			1.58	704.5	0.56	160.1		
2-1-6	91	-	65.8			1.56	775.6	0.63	148.1		
2-2-1	3	49	1440	7	4.69	62.2	1.61	431.3	0.50	151.8	
2-2-2	7			5.37	61.0	1.60	510.3	0.35	212.5		
2-2-3	14			4.72	61.2	1.61	627.1	0.50	209.1		
2-2-4	28			5.18	62.1	1.59	759.3	0.47	224.1		
2-2-5	56			5.19	61.0	1.60	943.1	0.52	260.8		
2-2-6	91			4.68	61.3	1.59	1009.8	0.53	230.4		
2-3-1	3	98	1440	7	7.49	58.6	1.63	517.4	0.38	197.7	
2-3-2	7			8.55	57.7	1.62	671.0	0.40	268.4		
2-3-3	14			7.37	58.4	1.62	756.3	0.50	199.0		
2-3-4	28			7.65	60.1	1.61	844.3	0.65	114.1		
2-3-5	56			7.28	56.8	1.62	1076.9	0.45	335.0		
2-3-6	91			7.28	58.0	1.61	1170.0	0.50	265.9		
2-4-1	3	147	1440	7	9.39	56.9	1.64	594.4	0.43	196.7	
2-4-2	7			11.24	55.0	1.66	793.0	0.40	330.4		
2-4-3	14			9.47	55.7	1.65	864.1	0.42	238.9		
2-4-4	28			10.15	56.7	1.63	1006.0	0.56	211.7		
2-4-5	56			9.36	55.6	1.65	1227.7	0.46	320.5		
2-4-6	91			9.82	54.9	1.63	1351.9	0.52	340.0		

ために、 $T_L=1$ days に固定し、 $T_C=3, 7, 14, 28, 56, 91$ days の 6 通りに変化させた。なお、試験シリーズ および とともに、上載圧は $\nu=0, 49, 98, 147$ kPa の 4 通りとした。Table 1 に試験ケースと試験結果の一覧を示す。表中には、改良材の種類と添加量 Q_c 、上載圧 ν 、載荷時間 T_L 、養生時間 T_C 、最終沈下ひずみ ν^* 、圧密養生後の供試体含水比 w_c 、湿潤密度 ρ_t 、一軸圧縮強度 q_u 、破壊ひずみ ϵ_f 、変形係数 E_{50} を示している。

(3) 土試料・試験手順

土試料はカオリン(土粒子密度: $\rho_s=2.618$ g/cm³、最大粒径: $D_{max}=0.2$ mm、液性限界: $w_L=62$ %、塑性指数: $I_p=21.8$ 、細粒分含有率: $F_c=56.4$ %) を初

期含水比 $w_0=70$ % で用いた。Fig. 3 に土試料の粒径加積曲線を示す。改良材は一般軟弱土用固化材(以下、“固化材”と略す)を水セメント比 $w/c=80$ % のスラリー添加とし、添加量 Q_c は 50 kg/m³ としている。固化材の成分は $SiO_2: 15 \sim 25$ %、 $Al_2O_3: 3.5$ % 以上、 $CaO: 40 \sim 70$ %、 $SO_3: 4.0$ % 以上である。一連の試験手順を以下に簡単に記す。カラーを取り付けたモールド(直径: 50 mm、高さ: 100 mm)内面にシリコングリースを塗布したフィルムを装着し、やや多めに安定処理土を充填する。このときモールドを軽く打撃して気泡を除去する。モールドを本装置底板に設置した後、恒温・恒湿条件下(温度 20 °C、相対湿度 95 %) の養生箱に移動する。載荷板、ダイヤルゲージ、ストッパー、重錘を順に

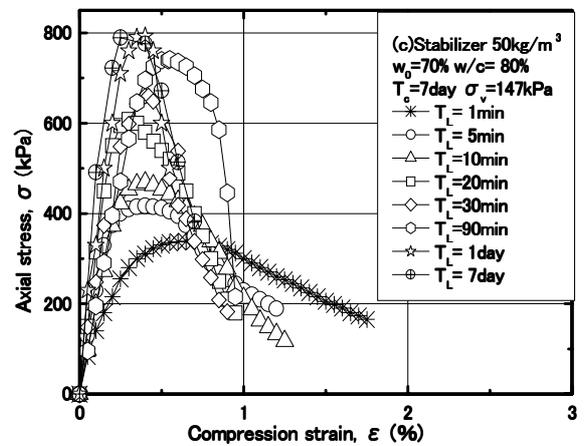
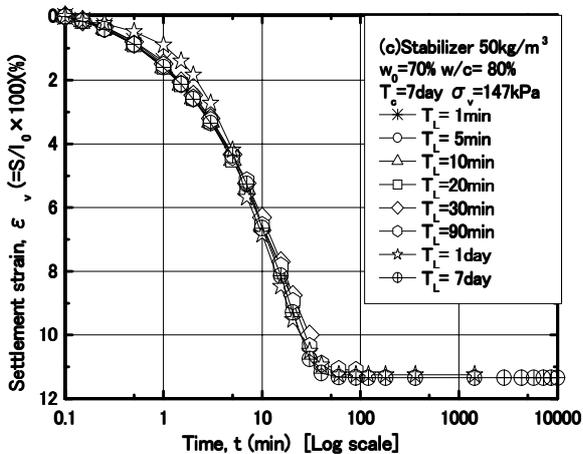
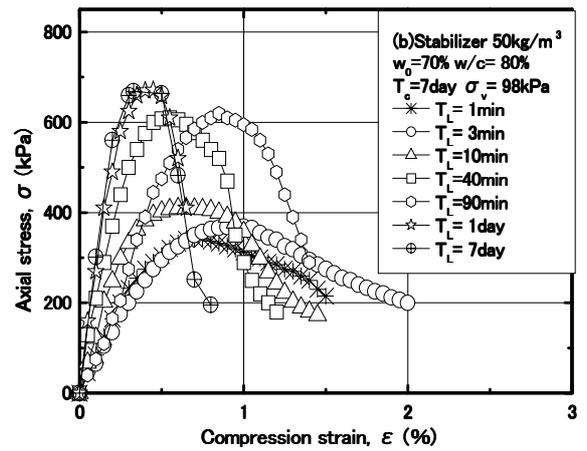
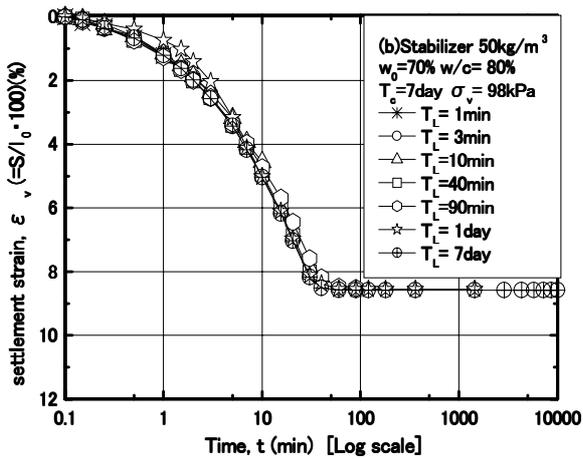
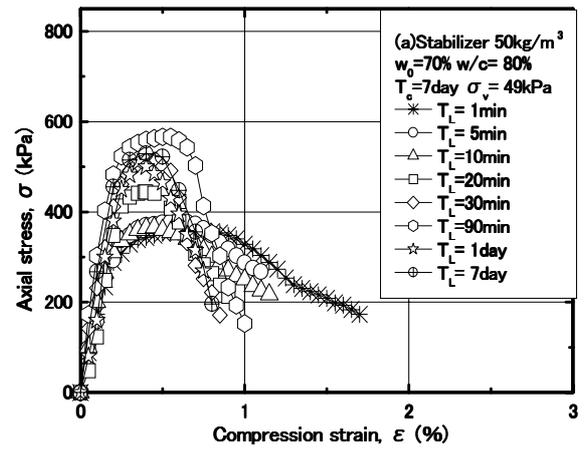
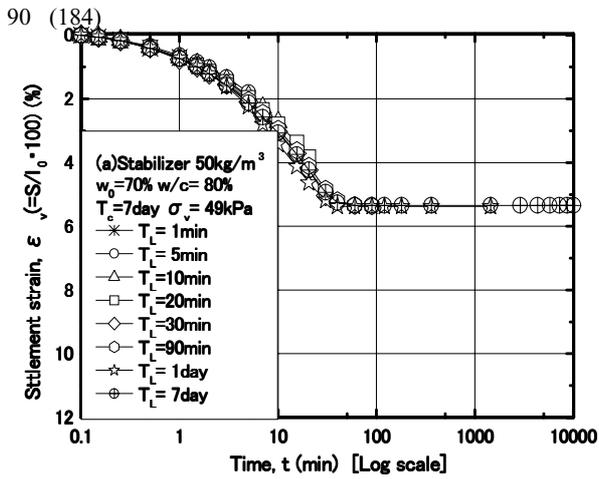


Figure 4 Relationships between settlement and loading time

セットする。 試料に衝撃を与えないように上載圧を載荷する。 所定期間の養生後、モールドから脱型した試料の高さを 100 mm に仕上げ、上下端面を平滑化し、直ちに一軸圧縮試験（軸ひずみ速度：1.0%/min）を行った⁶⁾。

3. 試験結果と考察

(1) 一軸圧縮挙動に及ぼす載荷時間の影響

Figure 5 Stress-strain curves with different loading times

Fig.4(a) ~ (c)にそれぞれ $\sigma_v=49, 98$ および 147 kPa の場合における沈下ひずみ ϵ_v と対数表示の載荷時間 T_L の関係を示す。試験ケースは $T_L=0, 1, 5, 10, 20, 30, 90, 1440, 10080$ min (7 days) の 9 通りである。 ϵ_v は Fig.1 に示した圧密養生装置で測定した沈下量 H を供試体の初期高さ H_0 で除して百分率表示したものである。 $\epsilon_v \sim T_L$ 曲線はほぼ同じ経路を辿り、 $T_L=90$ min 以降において ϵ_v はほぼ一定になっている。

この理由として固化処理後 100 min を目安にして、それ以降でセメンテーション効果が土の圧密現象よりも優勢になり、上載圧による圧密沈下が抑制されることが考えられる。なお、このことは著者らが既に指摘した実験事実である。ちなみに、固化材自体の凝結時間・硬化開始時間は約 2~3 時間である。

Fig.5(a)~(c)にこれに引き続き実施した一軸圧縮試験の結果を示す。 T_L が大きいほど ~ 曲線は上方に位置し、剛性も高くなる傾向を示している。

Fig.6 (a)および(b) にそれぞれ一軸圧縮試験で用いた供試体の含水比 w および湿潤密度 ρ_t と載荷時間 T_L の関係を示す。含水比 w は T_L の増加に対して漸減し、 $T_L=90$ min 以降でほぼ一定になっている。 σ_v が大きいほど、 w の変化量は大きい。一方、湿潤密度 ρ_t は T_L の増加に対して漸増し、 $T_L=90$ min 以降でほぼ一定になっている。 σ_v が大きいほど、 ρ_t の変化量は大きい。

Fig.7 に圧密度 U と非排水せん断強度 $S_u (=q_u/2)$ の関係を示す U はある T_L における σ_v を $T_L=10080$ min における σ_v で除したものの百分率表示である。 S_u は U の増加に対して増加している。ここで注目すべき点として、 $U=100$ %の時点においても S_u が増加することである。このことは、 σ_v がほぼ一定になった後においても強度増加することを意味しており、上載圧による供試体の密度変化というよりもセメンテーションの発達によるものといえる。上載圧下で養生した安定処理土の場合でも、圧密の進行に伴って非排水強度が増加するといえる。

(2)一軸圧縮挙動に及ぼす養生時間の影響

安定処理土の強度特性に及ぼす上載圧下での養生時間の影響を調べるために、前節(1)で検討した結果を利用すると、 $T_L=1440$ および 10080min の両試験ケースの結果にはほとんど差異がないので、載荷時間を $T_L=1440$ min に固定し、養生時間 T_C を変化させることとした。

Fig.8(a)および(b)にそれぞれ一軸圧縮試験で用いた供試体の含水比 w および湿潤密度 ρ_t と養生時間 T_C の関係を示す。試験ケースは $T_C=3, 7, 14, 28, 56, 91$ days の 6 通りである。3.(1)で述べたように、上載圧の作用により供試体に密度変化を生じさせる時間は 100 min 程度であるので T_L を 1440 min とし、 $T_C (=T_L+T_U)$ を変化させた。図中には比較のために $\sigma_v=0$ kPa のデータも記載している。含水比 w は、 σ_v によらず、 T_C の増加に対してほとんど変化しない。

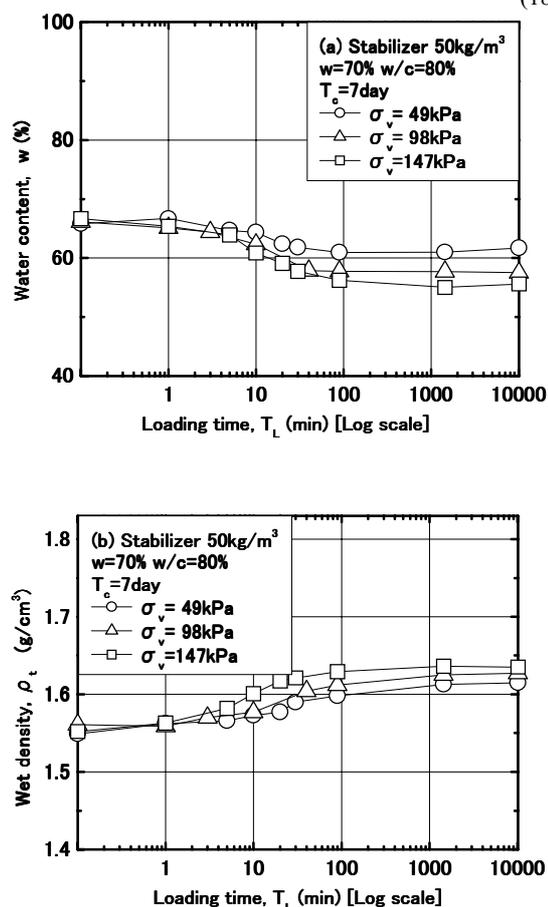


Figure 6 Changes of water content and wet density with loading time

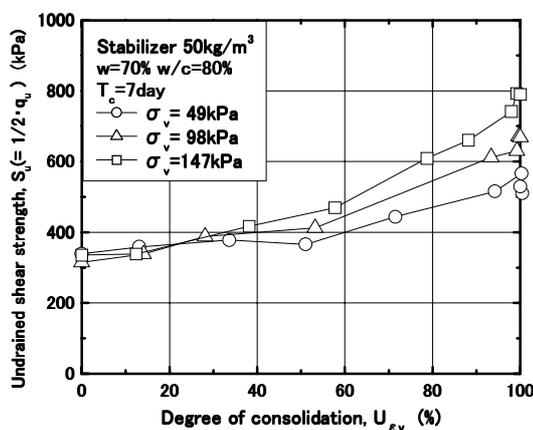


Figure 7 Relationships between undrained strength and degree of consolidation

湿潤密度 ρ_t も同様に、 σ_v によらず、 T_C の増加に対してほとんど変化しない。供試体の状態量は養生期間に依存せず、初期材齢で生じる圧密による密度増加が保持される。

Fig.9 にこれに引き続き実施した一軸圧縮試験の結果を示す q_u は T_C の増加に対して単調に増加する。ここで注目すべき点として、 $T_C=3$ days の時点にお

ける q_u の差を保持したまま, それ以降の T_c の増加に対して q_u が増加していることである. このことから, 長期材齢における一軸圧縮強度の発現は, 初期材齢における上載圧による供試体の密度変化というよりもその後のセメンテーションの発達によるものといえる.

4. 結論

本論文は上載圧下で養生したセメント安定処理土の一軸圧縮挙動に及ぼす載荷時間および養生時間の影響について考察したものである. 新たに得られた知見は以下のとおりである.

- (1) 上載圧下で養生した安定処理土の場合でも, 圧密の進行に伴って非排水強度が増加する.
- (2) 上載圧の載荷時間が 90 分までは安定処理土の圧密沈下と一軸圧縮強度を増加させるが, それ以降の載荷時間は両者に何ら影響を与えない.
- (3) 初期材齢において上載圧下で養生した安定処理土の場合, 含水比および湿潤密度は養生時間に対してほとんど変化しない.
- (4) 上載圧下で養生した場合も, 大気圧下で養生した場合と同様に, 一軸圧縮強度は養生時間の経過とともに増加する.

謝辞: 本研究を遂行する上で (株)宇部三菱セメント研究所宇部センターセメントグループ・田坂行雄氏, 丸屋英二氏, 米田 修氏, 宇部三菱セメント(株)金城徳一氏, 山田一義氏, (有)中原鉄工所・中原 信氏, 本研究室大学院生・川島洋史氏(現 (株)ウエスコ), 同学生・坊垣内 真氏の各氏には多大なるご援助をいただいた. ここに記して, 上記の方々に深く感謝の意を表す次第である.

参考文献

- 1) セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル[第二版], 技報堂出版, 1994.
- 2) 小林 晃, 龍岡文夫: セメント混合により改良した飽和軟弱粘性土の強度変形特性, 生産研究, Vol.34, No.11, pp.32-35, 1982.
- 3) 若槻良行, 永田孝夫, 伊藤 譲: 混合処理した海中盛土材の強度特性, 日本道路公団試験所報告, Vol.26, pp.21-32, 1989.
- 4) Consoli, N.C., Rotta, G.V. and Prietto, P.D.M.: Influence of curing under stress on the triaxial response of cemented soils, *Geotechnique*, Vol. 50, No. 1, pp. 99-105, 2000.
- 5) 岡林茂生, 藤野秀利, 山本哲朗, 鈴木素之, 田口岳志: 上載圧下で養生した安定処理土の一

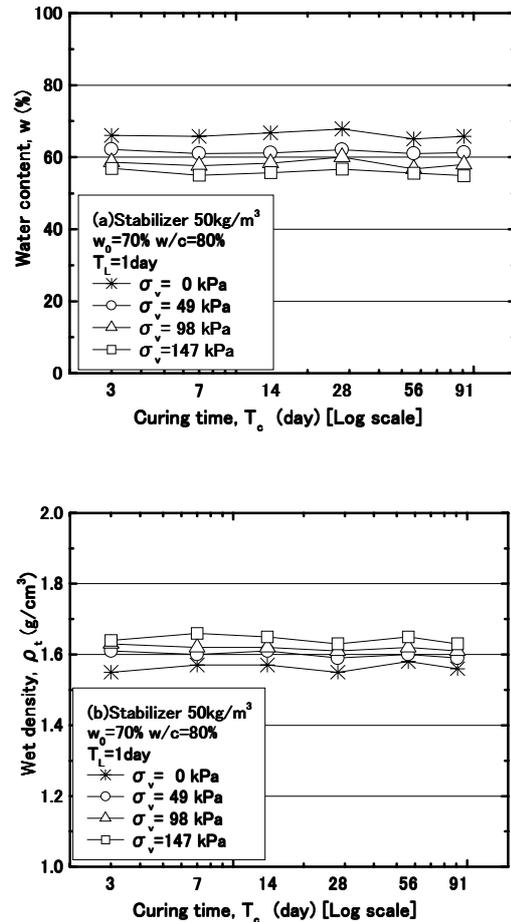


Figure 8 Changes of water content and wet density with curing time

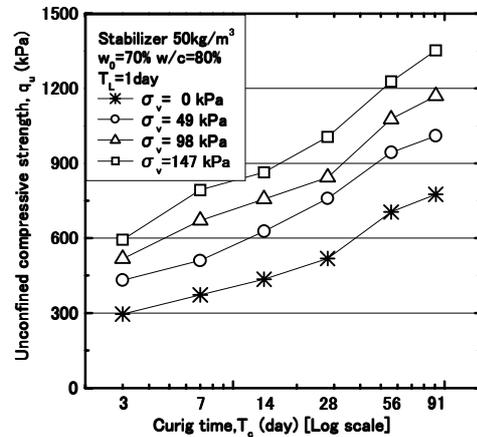


Figure 9 Relationships between unconfined compression strength and curing time

- 軸圧縮強度特性, 第 4 回地盤改良シンポジウム発表論文集, 日本材料学会, pp.95-102, 2000.
- 6) 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13年12月27日受理)