

セメント安定処理した種々の土質の圧密に伴う強度・変形特性

Strength and Deformation Characteristics of Cement Stabilized Various Soils
Subject to Consolidation during Curing Period

藤本 哲生	Tetsuo FUJIMOTO	(株)建設企画コンサルタント)
鈴木 素之	Motoyuki SUZUKI	(山口大学工学部)
山本 哲朗	Tetsuro YAMAMOTO	(山口大学工学部)
岡林 茂生	Shigeo OKABAYASHI	(株)宇部三菱セメント研究所)

セメント安定処理地盤中の土要素が施工直後より受ける応力状態を室内試験において再現するため、モールド型圧密養生装置を開発し、それを用いて圧密を伴いながら養生した安定処理土の強度・変形特性を検討している。本論文では土の物性の違いと圧密による強度増加に着目し、対象土として実施工で特に問題となるローム、浚渫土および泥炭を用い、安定材添加量および安定材の種類を変化させて試験を行った。その結果、同じ安定材添加量でも、対象とする土質の差異により圧密による強度増加の度合いは異なり、それを表す指標 α 、 β と塑性指数の間には相関がみられ、両指標は塑性指数の増加に対して減少することが明らかになった。

キーワード：セメント安定処理、ローム、浚渫土、泥炭、圧密、養生

(IGC : D10)

1. はじめに

軟弱地盤改良工法の一つにセメント系固化材を用いた安定処理工法が挙げられる。この工法において、対象土と安定材の配合設計では土の種類や状態、安定材の種類や添加量、温度や湿度、養生時間、土と安定材の混合度などの不確定要素を考慮して、室内で大気圧下養生した安定処理土供試体の一軸圧縮強度が原位置におけるそれよりも数倍以上になることを目標としている。しかし、現状では原位置における養生時の応力・変形状態はほとんど配合設計において考慮されていない。今後、経済的、合理的な配合設計を行うには、原位置に近い条件で養生した安定処理土の実際に発揮される強度・変形特性を明らかにすることが必要である。

このような現状を鑑みて、著者らが高炉セメントB種により改良された地盤から採取した不攪乱土の一軸圧縮強度の深度分布を調べた結果、一軸圧縮強度は深度方向に増加傾向が認められ、これより初期材齢における圧密に伴う強度増加の可能性があることを指摘した¹⁾。このことを詳細に検討するために、モールド型圧密養生装置を開発し、それを用いて上載圧下で圧密を伴いながら養生した安定処理土の一軸圧縮強度特性について検討した¹⁾。その結果、養生時における上載荷重の載荷により、安定処理土の一軸圧縮強度は著しく変化することが明らかになった¹⁾。このような圧密に伴う密度増加に起因した安定処理土の強度増加を“圧密養生効果”と呼んでいる。しかし、これまで実施工で問題となる特殊土のデータはほとんど蓄積され

ておらず、土の物性の違いによる圧密養生効果の発現の仕方は解明されていない。

本論文は、特殊土に分類されるローム、浚渫土および泥炭を対象として、安定材の種類と添加量を変化させ、圧密を伴いながら養生した安定処理土に対して一軸圧縮試験を実施し、その結果を既存の粘性土および砂質土の結果と比較し、種々の土質の強度・変形特性について考察したものである。

2. 試験概要

2.1 モールド型圧密養生装置

写真-1 に著者らが開発したモールド型圧密養生装置¹⁾を示す。本装置は、安定処理地盤の原位置で受ける応力状態を近似的に再現するため、一定の上載圧の作用下で安定処理土を養生することを目的としている。本装置では、圧密容器として通常の鋳鉄製の二つ割りモールド(直径50 mm、高さ100 mm)を用いているので、モールドを脱型する際の供試体に与える乱れを小さくすることができる。載荷可能な上載圧 σ_v は49.98および147 kPaの3通りであり、同写真は $\sigma_v=147$ kPaを載荷している様子である。本装置におけるモールドおよびカラー内の供試体(初期高さ130 mm)は両面排水条件下(排水距離65 mm)の一次元圧密状態であり、圧密沈下量は側方に取り付けられたダイヤルゲージによって測定される。本装置において安定処理土供試体は、所定の期間、恒温・恒湿条件において上載圧下で養生した

後、モールドから脱型され、直ちに一軸圧縮試験用の供試体に成形される。本装置の詳細は文献 1) を参照されたい。

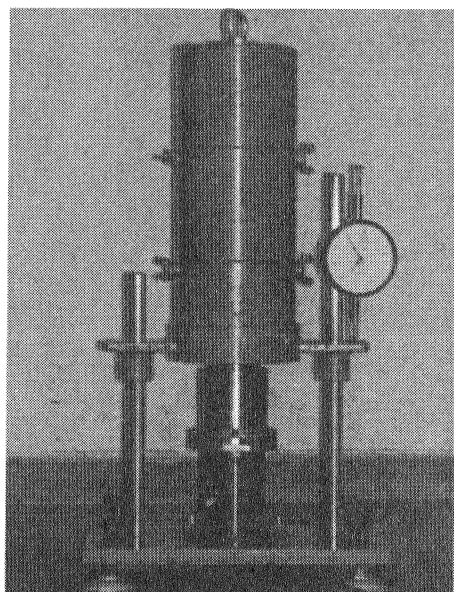


写真-1 モールド型圧密養生装置

2.2 土試料および安定材

本試験で用いた土試料はそれぞれ千葉県、静岡県、北海道で採取されたローム、浚渫土、泥炭である。表-1 に土試料の物理定数を、図-1 に粒径加積曲線を示す。比較のために用いた粘性土と砂質土のデータも併記している。特殊土の中でも、特に泥炭の強熱減量値 L_i が 39.1 % であり、有機物を多量に含んでいるといえる。また、安定材は普通ポルトランドセメント (以後、“OPC” とする) および一般軟弱土用固化材 (以後、“固化材” とする) を用いた。表-2 に安定材の化学的成分を示す。固化材は OPC と比較して SO_3 が多く、石こう量が多いのが特徴である。

2.3 試験手順および試験ケース

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製方法 (JGS0821-2000)」²⁾ に準じており、安定材はスラリー添加している。試験手順を以下に簡単に記す。①カラーを取り付けたモールド内面にシリコングリースを塗布したフィルムを装着し、所定量の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。②モールドを本装置底板に設置した後、恒温・恒湿条件 (温度 20 °C、相対湿度 95 %) の養生箱に移動する。③ストッパー、ダイヤルゲージ、載荷板、重錘の

表-1 土試料の物理定数

土試料 (採取地)	ローム (千葉県)	浚渫土 (静岡県)	泥炭 (北海道)	粘性土 (山口県)	砂質土 (山口県)
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.718	2.675	1.987	2.687	2.693
自然含水比 w_n (%)	113.1	108.1	296.3	45.0	16.3
最大粒径 D_{max} (mm)	0.425	0.85	0.85	2.0	4.8
細粒分含有率 F_c (%)	92.9	91.2	84.4	61.0	18.9
液性限界 w_L (%)	173.8	144.1	304.9	45.4	36.6
塑性指数 I_p	80.2	82.3	163.2	25.3	14.2
強熱減量 L_i (%)	29.8	17.2	39.1	—	—
土質分類	VH ₂	OH	Pt	CL	SF-G

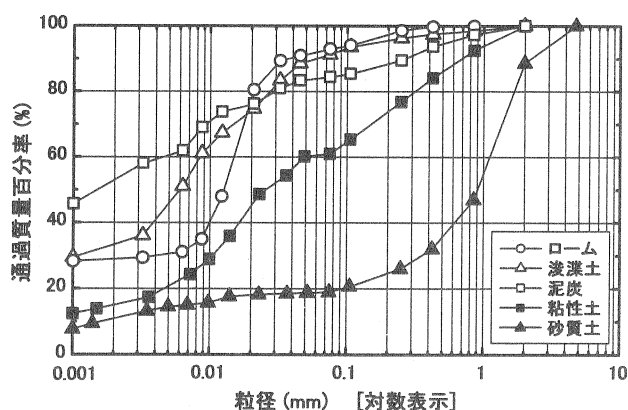


図-1 土試料の粒径加積曲線

表-2 安定材の化学的成分

成分	種類	OPC	固化材
SiO_2 (%)		21.2	19.2
Al_2O_3 (%)		5.3	4.5
Fe_2O_3 (%)		2.8	2.6
CaO (%)		64.5	60.5
MgO (%)		1.1	1.3
SO_3 (%)		2.0	4.5

表-3 試験ケースと試験結果

Test No.	土試料	安定材の種類と添加量 Q_c (kg/m ³)		上載圧 σ_v (kPa)	養生時間 T_c (day)	最終沈下 ひずみ ε_v^* (%)	圧密終了 時間 t_c^* (min)	圧密養生後の 含水比 w_c (%)	湿潤密度 ρ_{tc} (g/cm ³)	一軸圧縮 強度 q_u (kPa)	破壊 ひずみ ε_f (%)	変形係数 E_{50} (MPa)
1	ローム	50	OPC	0	7	-	-	110.0	1.43	24	15.0	0.3
2				49		3.90	2050	105.3	1.42	48	15.0	1.8
3				98		5.64	1160	102.3	1.45	61	9.0	6.3
4				147		7.01	1140	100.0	1.43	76	6.5	6.3
5		100	OPC	0		-	-	101.3	1.46	37	15.0	0.6
6				49		2.89	1500	98.6	1.45	56	9.5	3.7
7				98		4.36	900	95.5	1.46	71	10.0	5.2
8				147		5.50	780	94.0	1.47	87	5.7	6.4
9		200	OPC	0		-	-	90.1	1.49	78	4.1	4.5
10				49		1.15	200	89.3	1.49	100	3.3	8.1
11				98		2.02	205	87.6	1.50	122	3.3	10.1
12				147		2.48	190	86.7	1.50	142	2.7	11.3
13		100	固化材	0		-	-	102.8	1.43	62	9.4	2.3
14				49		2.50	705	100.0	1.45	83	7.5	5.5
15				98		4.26	900	97.2	1.46	103	5.8	9.7
16				147		5.26	720	95.3	1.46	122	4.2	11.8
17	浚渫土	100	OPC	0	7	-	-	100.3	1.45	20	6.5	1.1
18				49		12.36	510	83.1	1.49	53	3.7	5.7
19				98		16.83	720	64.3	1.53	93	4.0	7.8
20				147		18.62	400	68.9	1.55	140	3.4	10.0
21		100	固化材	0		-	-	101.6	1.42	37	5.3	3.9
22				49		15.71	570	81.2	1.50	95	4.1	8.6
23				98		17.44	450	76.3	1.51	179	2.5	18.3
24				147		17.75	410	71.0	1.54	234	2.1	33.4
25	泥炭	100	OPC	0	7	-	-	215.7	1.24	13	15.0	0.1
26				49		17.57	2000	173.7	1.25	43	7.5	2.5
27				98		23.61	1700	152.2	1.27	84	6.0	5.9
28				147		26.07	1300	143.0	1.29	110	5.4	6.7
29		100	固化材	0		-	-	227.2	1.21	23	10.1	0.8
30				49		15.55	1700	179.1	1.24	63	6.2	4.2
31				98		24.09	2000	158.2	1.27	103	4.8	7.9
32				147		27.92	1500	143.5	1.29	170	3.9	10.8

順にセットする。④試料に衝撃を与えないように上載圧を載荷し、沈下量を計測開始する。⑤7日間養生後、モールドから供試体を脱型する。⑥供試体の高さを100mmに仕上げ、上下端面を十分に平滑化した後、直ちに一軸圧縮試験(軸ひずみ速度:1.0%/min)を実施する。なお、セメント安定処理土に対する一軸圧縮試験および三軸圧縮試験では、石こう等によるキャッピングの必要性が指摘されている³⁾。本試験では、安定材を土試料に添加した後、上載圧を速やかに載荷するため、供試体の端面成形では石こうによるキャッピングは行わず、直ナイフを用いて上下端面を成形し十分に研磨することにした。

表-3に試験ケースと結果を示す。安定材添加量 Q_c の影響を検討するために、土試料はローム、安定材はOPCを用い、 $Q_c=50, 100$ および 200 kg/m^3 の3通りで変化させている。また、安定材の種類の影響を検討するために、土試料はローム、浚渫土および泥炭を用い、OPCと固化材をそれ

ぞれ 100 kg/m^3 添加している。なお、上載圧を作用させることで安定処理土に圧密の影響が顕著に現れるのは養生初期である¹⁾ことから、すべての試験ケースにおいて養生時間 $T_c=7 \text{ days}$ とし、圧密終了時間 t_c^* は3t法による圧密打ち切り時間を示している。

3. 試験結果と考察

3.1 安定処理した特殊土の圧密沈下挙動および一軸圧縮挙動

図-2にモールド型圧密養生装置における圧密沈下ひずみ ε_v と経過時間 t の関係を示す。 ε_v は圧密養生装置で測定した圧密沈下量 ΔH 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り、 t は σ_v の載荷後の経過時間である。土試料はロームであり、安定材はOPC($Q_c=100 \text{ kg/m}^3$)である。

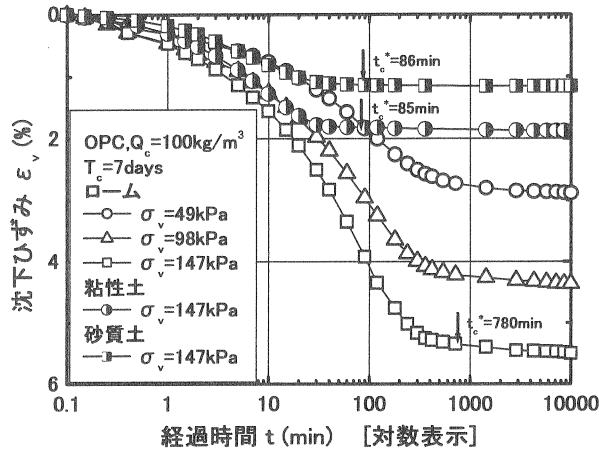


図-2 沈下ひずみ ε_v と経過時間 t の関係

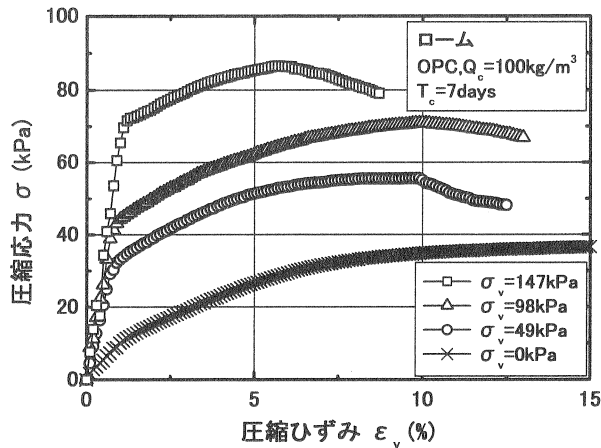


図-3 圧縮応力 σ と圧縮ひずみ ε の関係

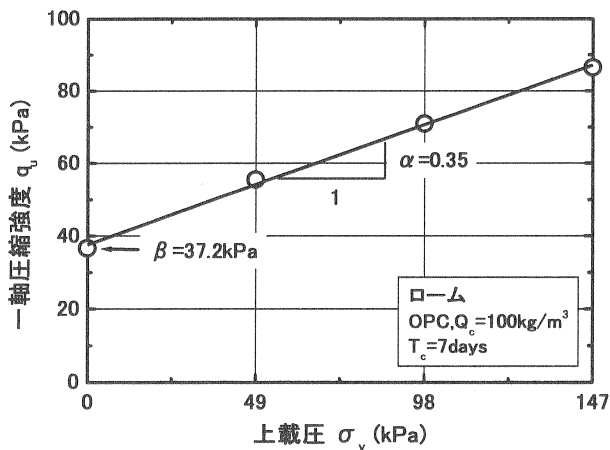


図-4 一軸圧縮強度 q_u と上載圧 σ_v の関係

図中の記号は養生時上載圧 σ_v の値によって異なる。比較のために粘性土および砂質土のデータも記載する。ロームの場合、 $\sigma_v=147$ kPaの圧密終了時間 t_c^* は780 minであるのに対し、粘性土および砂質土の t_c^* は85, 86 minであることから、ロームは比較した両試料よりも圧密の進行は遅いといえる。また、粘性土および砂質土では安定材の凝結

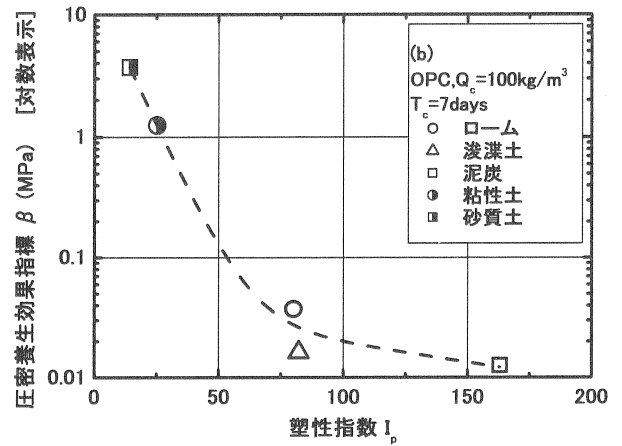
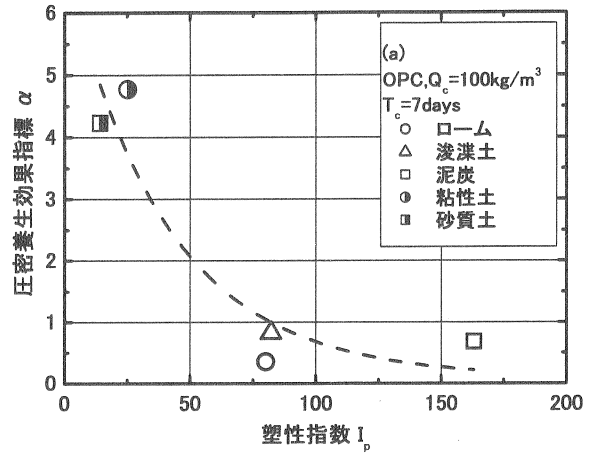


図-5 圧密養生効果指標 α および β と塑性指数 I_p の関係

開始時間である $t=100$ min 程度⁴⁾ で ε_v が一定値となるのに対して、ロームでは σ_v によらず圧密を打ち切る $t=7$ days まで増加し続けている。このことから、今回の供試体条件下(寸法: 50×130 mm, 排水距離: 65 mm)においては、OPCを 100 kg/m^3 添加した場合、上載圧による圧密沈下を短期間で抑制することはできない。 $t=7$ daysにおける最終的な圧密沈下ひずみ ε_v^* も両試料のそれより大きい。これは土試料の初期状態における含水比の違いによるものである。また、 σ_v の増加に伴い、 ε_v^* は大きくなっている。図-3にこれに引き続く一軸圧縮試験における圧縮応力 σ と圧縮ひずみ ε の関係を示す。 σ_v の増加に伴い、 $\sigma \sim \varepsilon$ 曲線は上方に位置するが、 $\Delta q_u / \Delta \sigma_v = 0.34$ となり、粘性土および砂質土の 4.57, 3.91 と比較して上載圧による強度差は大きくないようである。図-4にこのときの一軸圧縮強度 q_u と σ_v の関係を示す。 q_u は σ_v に対して直線的に増加する傾向にある。この近似直線より定まる勾配 $\alpha (= \Delta q_u / \Delta \sigma_v)$ および切片 β は圧密による強度増加を示す指標(以下の各図では“圧密養生効果指標”と表記)であり、著者らが以前に提案したものである¹⁾。ロームの場合、 $\alpha=0.35$, $\beta=37.2$ kPa となり、粘性土の場合における $\alpha=4.77$, $\beta=1242.9$ kPa, 砂質土の場合における $\alpha=4.23$, $\beta=3702.1$ kPa と比較すると α , β ともに小さくなっている。浅瀬土

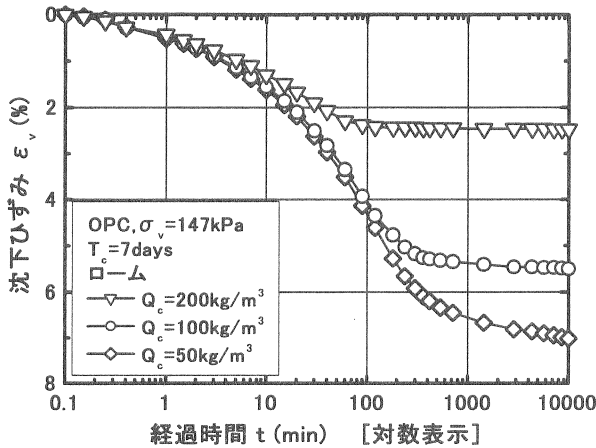


図-6 安定材添加量 Q_c が異なる場合の沈下ひずみ ε_v と経過時間 t の関係

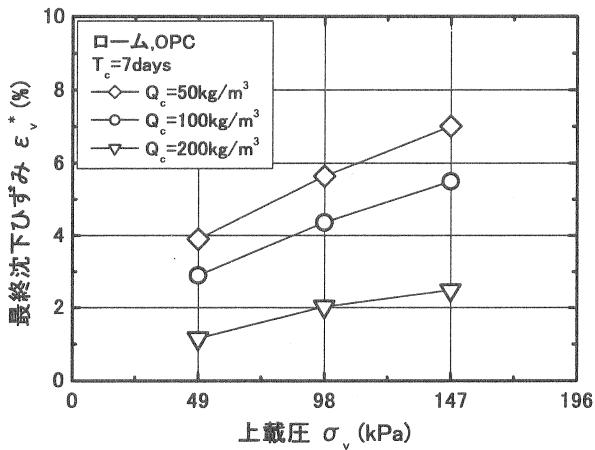


図-7 最終沈下ひずみ ε_v^* と上載圧 σ_v の関係

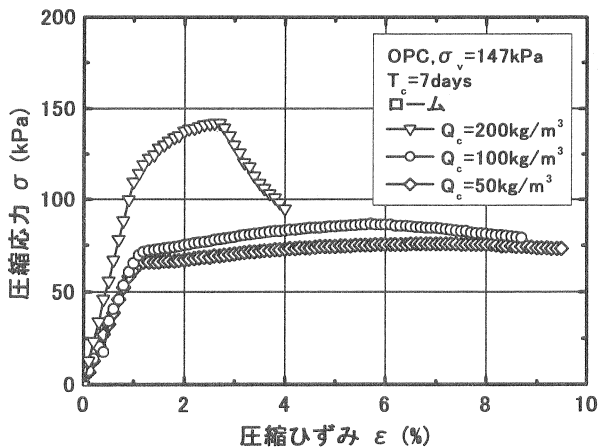


図-8 圧縮応力 σ と圧縮ひずみ ε の関係

および泥炭についても同様のことがいえることから、同じ安定材添加量でも土の種類によって圧密による強度増加の度合いは異なるといえる。また、特殊土の β が小さい理由として、今回用いた試料の強熱減量値 L_i が 17.2~39.1% と有機物を含んでいることから有機物がセメント水和を

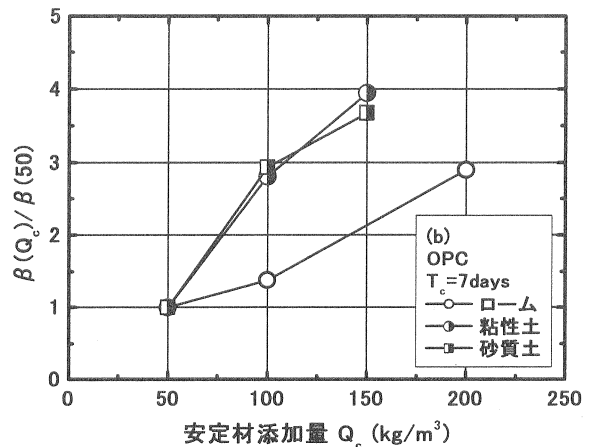
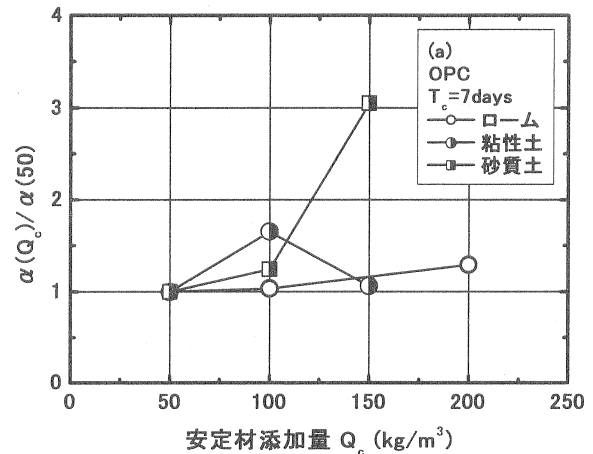


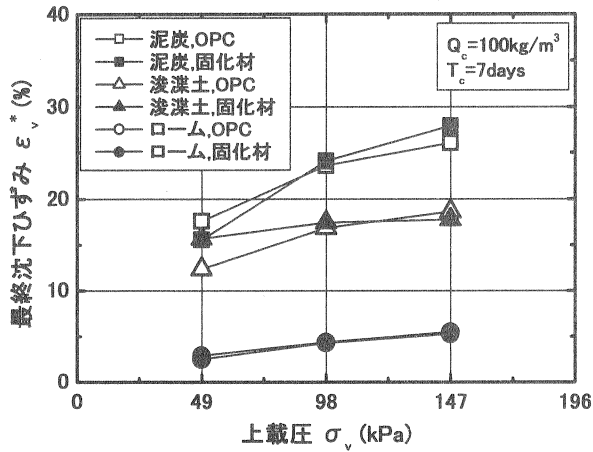
図-9 $\alpha(Q_c)/\alpha(50)$ および $\beta(Q_c)/\beta(50)$ と安定材添加量 Q_c の関係

阻害したためであると推察する⁵⁾。

図-5(a), (b)に OPC を 100 kg/m³ 添加した場合の α および β と塑性指数 I_p の関係を示す。図中には浚渫土と泥炭のデータも記載している。浚渫土と泥炭の α , β はともに粘性土と砂質土のそれと比較して小さく、ロームと同程度である。また、今回用いた試料に限れば α , β と I_p の間には相関が認められ、 I_p の増加に伴い、 α , β ともに減少する傾向にある。以上のことから、粘性土および砂質土と比較して、これら特殊土の圧密養生効果は OPC を 100 kg/m³ 添加しただけではほとんど期待できない。

3.2 安定材添加量 Q_c の影響

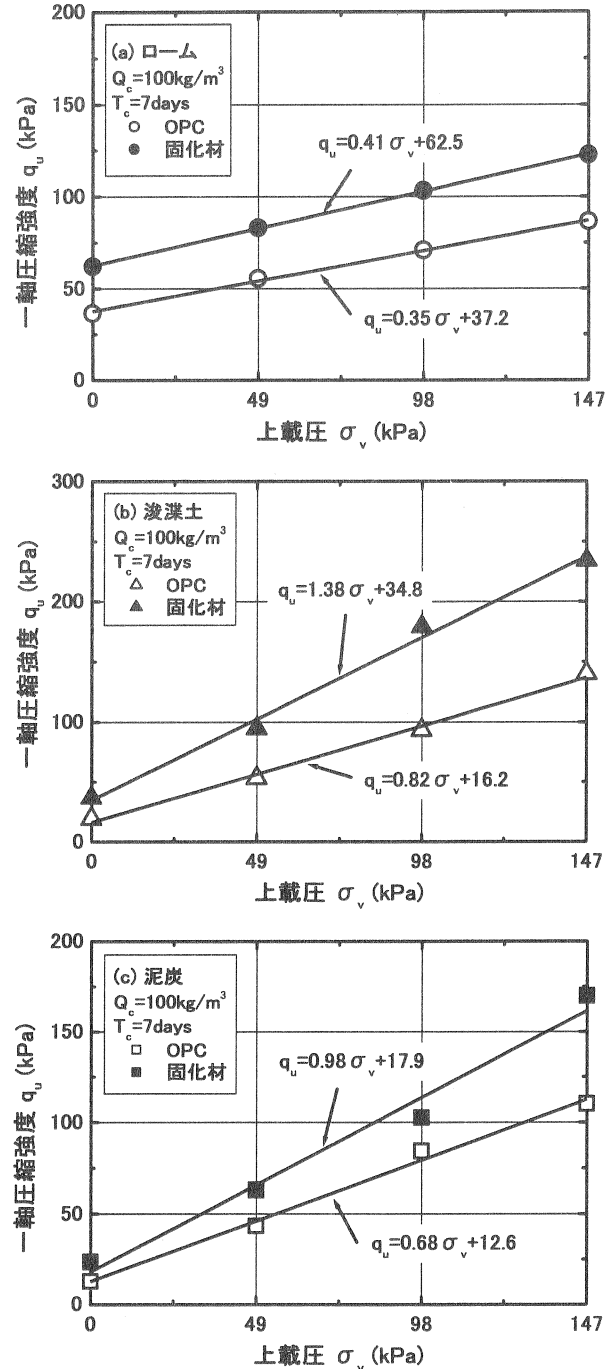
本節では安定材添加量 Q_c が強度・変形特性に及ぼす影響について述べる。図-6に Q_c が異なる場合の ε_v と t の関係を示す。土試料はローム、安定材は OPC、 $\sigma_v=147$ kPa である。ここで、前述したように $Q_c=100$ kg/m³ の場合、いずれの σ_v においても $t=7$ days まで ε_v が増加し続ける傾向がみられたが、 $Q_c=200$ kg/m³ の場合、 $t=100$ min 程度で一定値となる。これより、ロームに対して OPC を $Q_c=200$ kg/m³ 以上添加すれば、上載圧による圧密沈下を短時間で収束させることが可能である。図-7に ε_v^* と σ_v の関係を示す。い


 図-10 最終沈下ひずみ ε_v^* と上載圧 σ_v の関係

ずれの σ_v においても、 Q_c が高いほど、 ε_v^* は小さい。また、いずれの Q_c においても σ_v の増加に対する ε_v^* の増加の割合はほぼ同じである。図-8 にそれに引き続く σ と ε の関係を示す。 Q_c の増加に伴い、 $\sigma \sim \varepsilon$ 曲線は上方に位置しており、100 kg/m³ から 200 kg/m³ 添加における強度増加が顕著にみられる⁶⁾。図-9 (a), (b) に $\alpha(Q_c)/\alpha(50)$ 、 $\beta(Q_c)/\beta(50)$ と Q_c の関係を示す。ここで、 $\alpha(Q_c)/\alpha(50)$ 、 $\beta(Q_c)/\beta(50)$ とは、各 Q_c における ($\alpha(Q_c)$ 、 $\beta(Q_c)$) を $Q_c = 50$ kg/m³ の場合の ($\alpha(50)$ 、 $\beta(50)$) でそれぞれ正規化したものである。ここでは比較のために粘性土および砂質土のデータも併記している。ロームおよび粘性土の場合、 Q_c の増加に対して $\alpha(Q_c)/\alpha(50)$ はほとんど変化せず、砂質土では増加傾向にある。また、いずれの土試料においても Q_c の増加に伴い、 $\beta(Q_c)/\beta(50)$ が増加しているが、これは圧密による密度増加よりも、むしろ Q_c の増加に伴うセメンテーションの増加に起因すると考えられる。

3.3 安定材の種類の影響

本節では安定材の種類が強度・変形特性に及ぼす影響について述べる。図-10 に OPC と固化材を 100 kg/m³ 添加した場合の ε_v^* と σ_v の関係を示す。土試料はローム、浚渫土および泥炭である。浚渫土および泥炭の場合、 $\sigma_v = 49$ kPa のデータに安定材の種類による沈下特性の差異がみられるが、ロームの場合には各 σ_v においてほとんど差異はない。図-11 (a) ~ (c) に安定材の種類を変化させた場合の各試料の q_u と σ_v の関係を示す。いずれの試料においても、安定材の種類によって、 α は 0.06 ~ 0.56、 β は 5.3 ~ 25.3 の差で変化している。図-10 に示したように、ロームの場合には圧密による密度増加は安定材の種類によらず同じ程度で生じているので、この強度増加は安定材の成分の違いによる水和生成物の発達の違いに起因するものと考えられ、このことは β のみが変化していることから裏付けられる。一方、浚渫土および泥炭の場合には安定材の種類による沈下特性の差異がみられ、これが α の変化に起因したと考える。


 図-11 一軸圧縮強度 q_u と上載圧 σ_v の関係

4. 結論

本論文は、セメント安定処理した種々の土質の圧密に伴う強度・変形特性を開発したモールド型圧密養生装置を用いて実験的に検討し、その結果に基づいて考察したものである。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 養生時上載圧の増加に伴い沈下ひずみは大きくなり、それに引き続く一軸圧縮強度は養生時上載圧の増加に対して直線的に増加する。
- (2) 同じ安定材添加量でも、対象とする土質の差異により圧密による強度増加の割合は異なる。また、今回用

いた試料に限れば圧密養生効果指標 α および β と塑性指数の間には相関がみられ、両指標は塑性指数の増加に対して減少する傾向にある。

- (3) ロームに限れば、安定材添加量の増加に伴い、沈下ひずみは減少し、ある一定値以上の安定材添加量になると、その沈下は短期間で収束する。また、土質の差異により安定材添加量の増加に伴い、セメンテーションによる強度増加を示す $\beta (Q_c) / \beta (50)$ は増加傾向を示すのに対して、圧密による強度増加を示す $\alpha (Q_c) / \alpha (50)$ は一定の傾向を示さない。
- (4) ロームの場合、今回用いた安定材の種類による沈下ひずみの違いはみられず、 α にも大きな差異は生じない。一方、 β が OPC よりも固化材の方が大きくなるのは安定材の成分の違いによる水和生成物の発達の違いに起因する。

謝辞

本論文を作成する上で、(株)宇部三菱セメント研究所 田坂行雄氏、江川本隆氏、米田 修氏、宇部興産コンサルタント(株) 藤野秀利氏、(株)藤井基礎設計事務所 田口岳志氏の

各氏には多大なるご助力をいただいた。ここに記して、深く感謝の意を表す次第である。

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) 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.
- 3) 澁谷 啓, 三田地利之, 小澤 裕: セメント混合砂の変形・強度特性における時硬性および拘束圧履歴依存性, 土木学会論文集, No. 687/III-56, pp. 249-257, 2001.
- 4) 無機マテリアル学会: セメント・セッコウ・石灰ハンドブック, 技報堂出版, pp. 190-195, 1995.
- 5) 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, pp. 31-40, 1994.
- 6) 岡林茂生, 藤野秀利, 山本哲朗, 鈴木素之, 川島洋史: セメント系固化材により改良した種々の土の静的強度特性, 地盤と建設, Vol. 19, No. 1, pp. 89-93, 2001.