

## 上載圧下で養生したセメント安定処理土の強度発現に及ぼす排水距離の影響

Effect of Drainage Distance on Strength Development of Cement-Stabilized Soil Cured Under Overburden Pressure

藤本哲生 Tetsuo FUJIMOTO (大阪工業大学工学部都市デザイン工学科)  
 寺嶋 瞬 Shun TERAJIMA (元大阪工業大学工学部都市デザイン工学科)  
 大迫将輝 Masaki Osako (元大阪工業大学工学部都市デザイン工学科)  
 山下凌平 Ryohei YAMASHITA (元大阪工業大学工学部都市デザイン工学科)  
 鈴木素之 Motoyuki SUZUKI (山口大学大学院創成科学研究科)

本研究では、上載圧下で養生したセメント安定処理土の強度発現に及ぼす排水距離の影響を明らかにするために、著者らが開発した小型圧密養生装置を用いて片面排水条件により上載圧を作用させながら養生した安定処理土供試体を作製し、所定期間経過後に供試体側面において針貫入試験を行った。その結果、上載圧下で養生した安定処理土は一次元圧密時の排水距離の影響により含水比だけでなく針貫入勾配、すなわち、発現される強度も変化することを明らかにした。

キーワード：セメント安定処理，上載圧，針貫入試験，排水距離 (IGC : D-10)

## 1. はじめに

軟弱地盤対策工法の一つであるセメント安定処理工法は、土試料にセメントを添加・混合することにより短期的に発現される物性の改良とセメントの水和反応による硬化、さらに、長期的に発現されるポゾラン反応による硬化によって強度や剛性の改善を図る工法である<sup>1)</sup>。本工法のうち、例えば深層混合処理工法的设计<sup>2),3)</sup>では、室内において大気圧もしくは水中養生した供試体の一軸圧縮強度をもとに深さ方向に一定の設計基準強度を設定している。しかし、実際の安定処理地盤中の土要素には施工直後から有効土被り圧に相当する鉛直有効応力やそれに静止土圧係数を乗じた水平有効応力に相当する拘束圧が作用しており、その影響により非排水強度が深度方向に増加すると考えられる。また、それを裏付けるように、安定処理地盤から採取した供試体の密度や一軸圧縮強度が深さ方向に増加する傾向も確認されている<sup>4),5)</sup>。

このような状況を鑑み、拘束圧が安定処理土の諸特性に及ぼす影響ついて、これまでに室内試験を中心として強度・変形特性に着目した研究が行われてきた<sup>例えは6)</sup>。著者らも、安定処理土が施工直後から受ける上載圧等の拘束圧が強度・変形特性、さらに微視的構造の変化に与える影響を明らかにしてきた<sup>7)~11)</sup>。このうち、上載圧下で養生した安定処理土供試体の含水比分布については、一次元圧密時の排水距離が短い供試体端部では上載圧による排水が著しいため含水比が小さく、排水距離が長い供試体中央部では拘束圧による排水が終了する前にセメント水和反応によって間隙水が封じ込められるため、含水比が高くなることを確認している<sup>7)</sup>。ここで、上載圧下で養生した安定処理土の含水比が排水距離によって異なる

現象は、発現される強度も排水距離の影響を受けて異なる可能性があることを示唆しており、安定処理土の設計基準強度の設定に拘束圧の影響を考慮するためには強度発現に及ぼす排水距離の影響を明らかにしておく必要がある。この点について、Taguchi et al.<sup>12)</sup>はカオリン粘土を充填した円筒形土層の中心に柱状の安定処理土を作製し、排水距離が異なる位置から採取した安定処理土供試体の一軸圧縮試験を行うことにより排水距離の違いが一軸圧縮強度に及ぼす影響を調べている。しかし、得られた一軸圧縮強度や含水比は、安定処理土の自重や供試体採取時の乱れの影響を受けたと考えられる結果となっていることから、排水距離と一軸圧縮強度の関係性は明らかにされていない。

そこで、本研究では小型圧密養生装置を用いて上載圧下で養生した安定処理土供試体を作製し、所定期間経過後に供試体側面の複数箇所において針貫入試験を行うことにより、発現される強度に及ぼす一次元圧密時の排水距離の影響を実験的に調べた。

## 2. 試験条件

## 2.1 小型圧密養生装置

写真-1に、本研究で使用した小型圧密養生装置<sup>10)</sup>を示す。本装置は、安定処理地盤中の土要素が原位置で受ける応力状態を近似的に再現するために、一定の上載圧の作用下で供試体を養生させることを目的として著者らが開発したものである。本装置では、圧密容器として鋳鉄製の二つ割りモールド(内径 30 mm, 高さ 60 mm)とその上部に取り付けたカラー(内径 30mm, 高さ 50mm)を用い

ており、圧密容器から供試体を脱型する際の乱れを小さくすることができる。圧密容器の供試体には空圧制御により載荷板を介して上載圧を載荷する構造となっており、載荷可能な上載圧は 784 kPa までである。上載圧の載荷により一次元圧密状態となった供試体の排水条件については、上端は常に排水、下端は排水もしくは非排水とすることができる。なお、一次元圧密による沈下量は、載荷板の側方に取り付けたダイヤルゲージによって測定することができる。

## 2.2 土試料および安定材

本研究で用いた土試料は初期含水比  $w_0=70\%$  に調整した工業用カオリンであり、土粒子密度  $\rho_s=2.663\text{ g/cm}^3$ 、最大粒径  $D_{max}=0.048\text{ mm}$ 、液性限界  $w_L=52.3\%$ 、塑性指数  $I_p=18.8$ 、細粒分含有率  $F_c=100\%$  である。また、安定材は普通ポルトランドセメント(OPC)であり、安定材添加量は  $Q_c=150\text{ kg/m}^3$  とした。

## 2.3 試験方法

### 2.3.1 小型圧密養生装置による一次元圧密養生試験

上載圧下で養生した安定処理土供試体は、安定処理土の締固めをしない供試体作製方法(JGS-0821-2009)<sup>13)</sup>を参考として以下の手順で作製した。なお、試験室は  $20\pm 3^\circ\text{C}$  の恒温条件とした。1)土試料に安定材を粉体添加し、5 分間攪拌・混合する。2)圧密容器の内面に周面摩擦軽減のためのシリコングリースを塗布したフィルムを装着し、その中へ安定処理土を所定の高さまで投入する。なお、供試体の初期湿潤密度は  $\rho_t=1.6\text{ g/cm}^3$  とする。3)圧密容器を軽く打撃して安定処理土中の気泡を除去したうえで小型圧密養生装置に設置する。4)安定処理から 30 分後、所定の上載圧  $\sigma_v$  を載荷する。このとき、供試体の排水条件は上端からの片面排水条件とし、一次元圧密による沈下量をダイヤルゲージにより測定する。なお、 $\sigma_v=0\text{ kPa}$  の供試体は、供試体上端部をラップで覆い、乾燥を防止して養生する。5) $\sigma_v$  の載荷から 1 日後、安定処理土供試体の沈下量が概ね一定であることを確認し、 $\sigma_v$  を除荷する。なお、既往の研究<sup>9)</sup>において安定処理直後の供試体に  $\sigma_v$  を載荷する時間を 1, 7 日間とした場合、同一養生時間を経過後の供試体の一軸圧縮強度や圧密養生効果指標  $\alpha$  が同程度となることが確認されていることから、本研究では  $\sigma_v$  の載荷時間を 1 日間としている。6)圧密容器から供試体を脱型後、ラップに包んで乾燥を防止して所定の養生時間まで大気圧下で養生する。7)所定の養生時間が経過後、供試体質量、直径、高さを測定後、後続の針貫入試験を行う。

### 2.3.2 針貫入試験

前項により作製した供試体に対し、針貫入試験方法(JGS3431-2012)<sup>14)</sup>を参考として以下の手順で針貫入試験を実施した。1)図-1 に示すように、ラップに包んだ安定処理土供試体の円周方向に  $0^\circ$  (A 列)、 $90^\circ$  (B 列)、 $180^\circ$  (C 列)、 $270^\circ$  (D 列)の位置に、養生時の供試体下端から 1

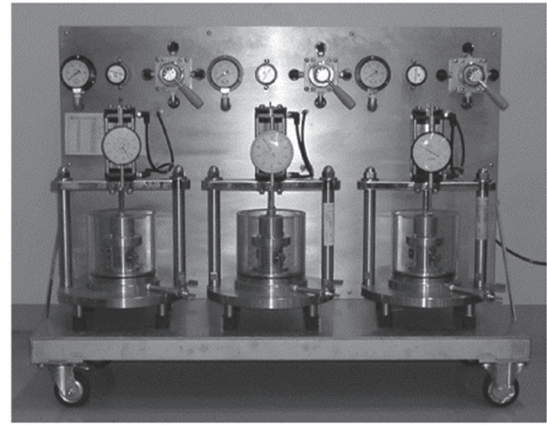


写真-1 小型圧密養生装置

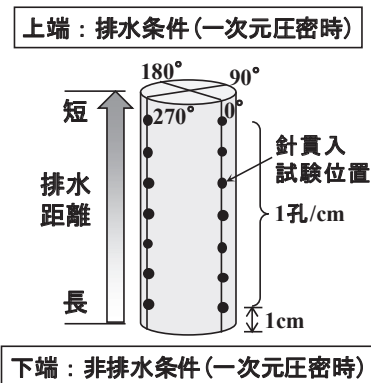


図-1 針貫入試験位置(模式図)



写真-2 針貫入試験の実施状況

表-1 試験ケースおよび一次元圧密養生試験結果

Test No.	土試料	安定材の種類と添加量 $Q_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	養生時間 $T_c$ (day)	上載圧 $\sigma_v$ (kPa)	最終沈下ひずみ $\epsilon_v^*$ (%)	圧密終了時間 $t_c^*$ (min)	養生後の湿潤密度 $\rho_{tc}$ (g/cm <sup>3</sup> )
0-1 <sup>*)2)</sup>	カオリン	無添加	7	56	20.69	1200	1.76
1-1			0	-	-	1.64	
1-2			7	56	4.45	120	1.69
1-3			83	8.59	130	1.72	
2-1			0	-	-	1.66	
2-2			28	56	3.93	110	1.69

\*1) 最終沈下ひずみ  $\epsilon_v^*$  は、 $\sigma_v$  を除荷したときの沈下ひずみである。

\*2) ケース0-1(未処理土)のみ、 $T_c=7\text{ days}$ まで  $\sigma_v$  を載荷している。

孔/cmの間隔で試験位置の目印を付ける．2)写真-2に示すように，供試体をガラス板の上に置き，円周方向に回転しないようにおもりで固定したうえで携行型針貫入試験機を用いて試験位置毎に針を貫入する．針の貫入長 $L=10\text{ mm}$ に達したときの貫入荷重 $P(N)$ を読み取り，針貫入勾配 $N_{P1}(=P/L)$ を求める．3)試験終了後の供試体を直ナイフで分割し，針貫入試験位置毎の含水比 $w_c$ を測定する．

表-1に，試験ケースと小型圧密養生装置を用いた一次元圧密養生試験結果を示す．本研究では，上載圧下で養生した安定処理土の強度発現に及ぼす一次元圧密時の排水距離の影響について， $\sigma_v$ の違いによる針貫入勾配の供試体内分布の変化を検討するために， $T_c=7\text{ days}$  および $Q_c=150\text{ kg/m}^3$ とし， $\sigma_v$ を0，56，83 kPaの3通りに変化させて試験を実施した．また， $T_c$ の違いによる針貫入勾配の供試体内分布の変化を検討するために， $Q_c=150\text{ kg/m}^3$ ， $\sigma_v=0$ ，56 kPaとし， $T_c$ を7，28 daysの2通りに変化させて試験を実施した．

### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 小型圧密養生装置による安定処理土の一次元圧密沈下挙動

本節では，小型圧密養生装置を用いて上載圧下で養生した安定処理土の一次元圧密沈下挙動について述べる．

図-2に， $T_c=7\text{ days}$  および $Q_c=150\text{ kg/m}^3$ として上載圧 $\sigma_v$ を載荷したときの安定処理土の沈下ひずみ $\varepsilon_v$ と経過時間 $t$ との関係を示す．ここで， $\varepsilon_v$ はダイヤルゲージで測定した圧密沈下量 $\Delta H$ 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り， $t$ は $\sigma_v$ の載荷後の経過時間である．同図には比較のために未処理土( $Q_c=0\text{ kg/m}^3$ )に $\sigma_v=56\text{ kPa}$ を載荷した結果も併記している．未処理土の場合， $T_c=7\text{ days}$ まで継続的な沈下がみられるが， $Q_c=150\text{ kg/m}^3$ の場合，安定材の凝結開始時間である $t=100\text{ min}$ 程度<sup>15)</sup>で $\varepsilon_v$ が概ね一定となり， $\sigma_v$ を除荷した $t=1440\text{ min}(=1\text{ day})$ における最終的な沈下ひずみ $\varepsilon_v^*$ は $\sigma_v$ の増加とともに

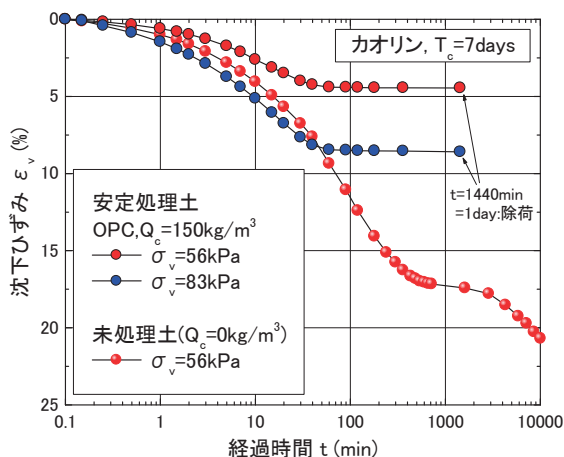


図-2 沈下ひずみと経過時間の関係

に大きくなっている． $T_c=7\text{ days}$ の養生後に測定した供試体の湿潤密度 $\rho_{ic}$ は，表-1に示すように $\sigma_v=56\text{ kPa}$ では $1.69\text{ g/cm}^3$ ， $\sigma_v=83\text{ kPa}$ では $1.72\text{ g/cm}^3$ であり，それぞれ大気圧下養生( $\sigma_v=0\text{ kPa}$ )の値よりも大きく， $\sigma_v$ の増加とともに大きくなっている．したがって，1本の安定処理土供試体としては養生時に $\sigma_v$ を載荷することにより大気圧下で養生した供試体と比較して密実な構造となっているといえる．これらの知見は一次元圧密時の供試体の排水条件を両面排水条件とした既往の研究<sup>7)</sup>で得られたものと同様である．また， $\sigma_v=56\text{ kPa}$ とし， $T_c$ を28 daysとしたときの $\varepsilon_v^*$ は， $T_c=7\text{ days}$ の値と同程度となっている．なお，全てのケースにおいて3t法による圧密打ち切り時間である圧密終了時間 $t_c^*$ が $\sigma_v$ の載荷時間(1日間)よりも短いことを確認している．

#### 3.2 針貫入勾配の供試体内分布

##### 3.2.1 上載圧の影響

本項では，上載圧下で養生した安定処理土の強度発現に及ぼす排水距離の影響について， $\sigma_v$ の違いによる針貫入勾配の供試体内分布の変化を検討した結果を述べる．

図-3(a)～(c)に， $T_c=7\text{ days}$  および $Q_c=150\text{ kg/m}^3$ とし，養生時の $\sigma_v$ を0，56，83 kPaとしたときの針貫入試験による針貫入勾配 $N_{P1}$ の供試体内分布を示す．同図には図-1に示したように，養生時の供試体下端から1孔/cmの間隔で実施したA～D列のそれぞれの $N_{P1}$ ，A～D列の同一高さの $N_{P1}$ を平均化した針貫入勾配 $N_{P2}$ を示している．ここで，養生時の $\sigma_v$ によって一次元圧密沈下量が異なるため， $N_{P1}$ および $N_{P2}$ の供試体高さ方向の測点数が異なる点に注意が必要である．まず，大気圧下養生の場合， $N_{P1}$ は同一高さにおける各列の値にばらつきはあるものの供試体高さ $H_c$ によらず概ね一定であり，その平均値 $N_{P2}$ は概ね1.1 N/mmとなっている．なお，当該 $N_{P2}$ について，同一の配合条件および養生時間の供試体を作製し，一軸圧縮強度 $q_u$ を確認したところ $q_u=550\text{ kPa}$ であったことを参考として記す．次に， $\sigma_v=56$ ，83 kPaの場合， $\sigma_v=0\text{ kPa}$ のときと同様に $N_{P1}$ は同一高さにおける各列の値にばらつきはあるものの，排水距離が長い供試体下端から排水距離が短い供試体上端へ向かうにつれて漸増している．また，同一の $H_c$ における $N_{P2}$ は $\sigma_v$ の増加とともに大きくなっている．なお，図-3に示す $N_{P1}$ の同一高さにおける値のばらつきについて，標準偏差 $\sigma$ の最大値は0.36( $\sigma_v=56\text{ kPa}$ ， $H_c=2\text{ cm}$ のときの $N_{P1}$ )であり，主たる原因は使用した針貫入試験機が携行型であるため慎重に試験を行っているものの供試体への針の貫入速度を一定にすることができない点であると推察される．したがって，今後は貫入速度を一定にすることが可能な卓上型の針貫入試験機を用いて試験を行うなど，試験値のばらつきを抑える取り組みを行う必要があると考える．

図-4に，針貫入試験後の供試体を分割して測定した養生後の含水比 $w_c$ の供試体内分布を示す．ここで，前述したように，養生時の $\sigma_v$ によって一次元圧密沈下量が異な

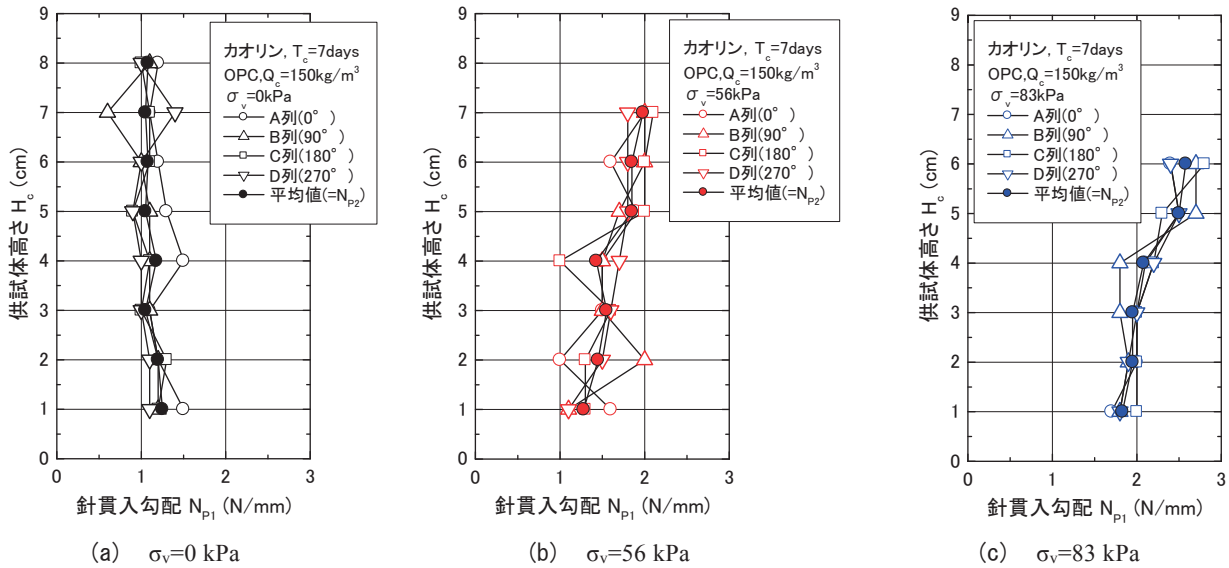


図-3 養生時の上載圧  $\sigma_v$  が異なる場合の針貫入勾配  $N_{P1}$  および  $N_{P2}$  の供試体内分布

るため、 $w_c$  の供試体高さ方向の測点数が異なっている点に注意が必要である。同図には、比較のために未処理土に  $\sigma_v=56$  kPa を载荷した場合の結果も併記しているが、 $H_c$  によらず  $w_c=43$  %程度であり  $\sigma_v$  の载荷よって初期含水比  $w_0=70$  %からの大幅な含水比の減少がみられる。一方、 $Q_c=150$  kg/m<sup>3</sup> の安定処理土の場合、土試料に安定材を添加することによって大気圧下養生の供試体でも  $H_c$  によらず  $w_c=55$  %程度まで含水比が減少している。さらに、 $\sigma_v$  の増加とともに  $w_c$  が全体的に減少しているが、 $\sigma_v=56, 83$  kPa では排水距離が短い供試体上端から排水距離が長い供試体下端へ向かうにつれて  $w_c$  が漸増している。これは、供試体の下端は上端と比べて排水距離が長く一次元圧密による供試体からの間隙水の排水が遅くなるため、セメント水和反応によって下端に近いほど多くの間隙水が供試体内に封じ込められたことを意味している。したがって、排水距離の影響によって供試体内の  $w_c$  に差異が生じたことが前述した  $N_{P1}$  および  $N_{P2}$  の供試体内の差異の原因であると推察される。

以上のことから、上載圧下で養生した安定処理土は一次元圧密時の排水距離の影響により、含水比だけでなく針貫入勾配、すなわち、発現される強度も変化することが明らかになった。

### 3.2.2 養生時間の影響

本項では、上載圧下で養生した安定処理土の強度発現に及ぼす排水距離の影響について、 $T_c$  の違いによる針貫入勾配の供試体内分布の変化を検討した結果を述べる。

図-5(a), (b)に、 $Q_c=150$  kg/m<sup>3</sup>、養生時の  $\sigma_v$  を 0, 56 kPa とし、 $T_c=7, 28$  days としたときの針貫入試験による  $N_{P2}$  および養生後の含水比  $w_c$  の供試体内分布を示す。大気圧下養生の場合、 $N_{P2}$  および  $w_c$  は  $H_c$  によらず概ね一定であり、 $T_c$  の増加とともに安定材のセメント水和反応やポズラン反応によると思われる  $N_{P2}$  の増加や  $w_c$  の減少がみられる。一方、養生時の  $\sigma_v=56$  kPa の場合、 $T_c$  によらず排水距離が長い供試体下端から排水距離が短い供試体

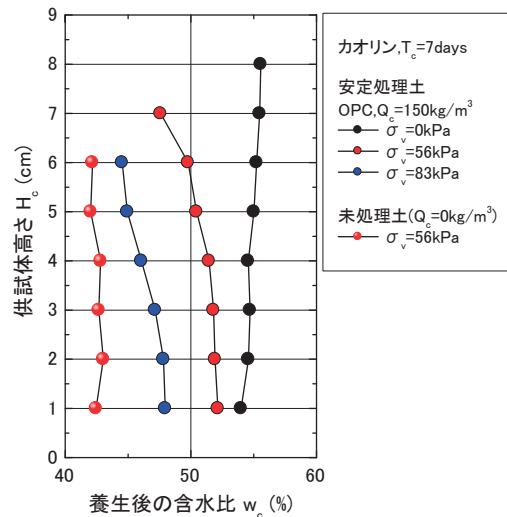


図-4 養生時の上載圧  $\sigma_v$  が異なる場合の養生後の含水比  $w_c$  の供試体内分布

上端へ向かうにつれて  $N_{P2}$  が漸増、 $w_c$  が漸減している。ここで特筆すべきは、 $T_c=28$  days の  $N_{P2}$  および  $w_c$  の供試体内分布は、ばらつきはあるものの  $T_c=7$  days の  $N_{P2}$  および  $w_c$  の供試体内分布を水平方向に移動した形状を呈している点である。このことは、上載圧下で養生した安定処理土は、前述した一次元圧密時の排水距離の影響による供試体内の強度や含水比の差異を保持したまま、養生時間の増加とともに安定材のセメント水和反応やポズラン反応による強度増加および含水比の減少が生じる可能性があることを示唆している。したがって、今後さらに長期の養生時間を経過した供試体に対して試験を行い、上記の傾向を検証する必要がある。

## 4. まとめ

本研究では、小型圧密養生装置を用いて上載圧下で養生した安定処理土供試体を作製し、その供試体側面の複

数箇所において針貫入試験を行うことにより、発現される強度に及ぼす排水距離の影響を実験的に調べた。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 一次元圧密時の供試体の排水条件を片面排水条件としても、両面排水条件の場合と同様に沈下ひずみは上載圧の載荷後 100 分程度で概ね一定となり、最終沈下ひずみは上載圧の増加とともに大きくなる。また、養生後の供試体の湿潤密度も上載圧の増加とともに大きくなる。
- (2) 安定処理土供試体内の針貫入勾配は、ばらつきはあるものの大気圧下で養生した場合は供試体高さによらず概ね一定であるのに対し、上載圧下で養生した場合は排水距離が長い供試体下端から排水距離が短い供試体上端へ向かうにつれて漸増する。また、同一の排水距離における針貫入勾配は養生時の上載圧の増加とともに大きくなる。
- (3) 上載圧下で養生した安定処理土供試体内の含水比分布は、排水距離が短い供試体上端から排水距離が長い供試体下端へ向かうにつれて漸増する。これは、供試体の下端は上端と比べて排水距離が長く一次元圧密による供試体からの間隙水の排水が遅くなるため、セメント水和反応によって下端に近いほど多くの間隙水が供試体内に封じ込められたことを意味している。
- (4) 上載圧下で養生した安定処理土は、一次元圧密時の排水距離の影響により含水比だけでなく針貫入勾配、すなわち、発現される強度も変化する。
- (5) 上載圧下で養生した安定処理土は、一次元圧密時の排水距離の影響による供試体内の強度や含水比の差異を保持したまま、養生時間の増加とともに安定材のセメント水和反応やポズラン反応による強度増加および含水比の減少が生じる可能性がある。

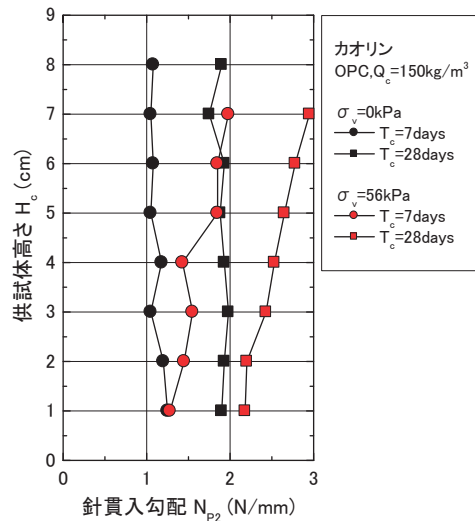
なお、本研究では携行型針貫入試験機を用いて針貫入試験を行ったことにより、貫入速度に起因すると推察される試験値のばらつきがみられたことから、今後は卓上型針貫入試験機を用いて貫入速度を一定とした試験を行うなど、試験値のばらつきを抑える取り組みを行う必要がある。

#### 謝辞

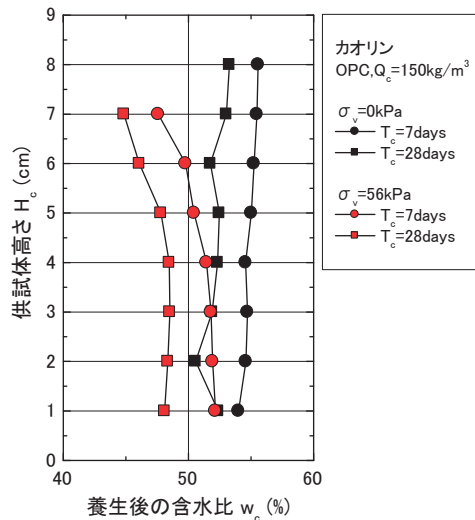
本研究は、一般財団法人(現 公益財団法人)土科学センター財団からの研究助成をもとに実施したものである。また、試験の実施にあたり、宇部興産株式会社の米田修氏および宇部三菱セメント株式会社より安定材をご提供頂いた。ここに記して関係各位に深く感謝の意を表す次第である。

#### 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4版，技報堂出版，p.36，2013.
- 2) 土木技術センター：陸上工事における深層混合処理



(a) 針貫入勾配  $N_{P2}$  の供試体内分布



(b) 含水比  $w_c$  の供試体内分布

図-5 養生時間  $T_c$  が異なる場合の針貫入勾配  $N_{P2}$  および含水比  $w_c$  の供試体内分布

工法設計・施工マニュアル改訂版，土木技術センター，pp.66-117，2004.

- 3) 沿岸技術研究センター：海上工事における深層混合処理工法技術マニュアル改訂版，沿岸技術研究センター，pp.29-93，2008.
- 4) 曾我部隆久，莊司喜博，南兼一郎，村田進：広島港(廿日市地区)における深層混合処理工法による格子状地盤改良，土と基礎，Vol.29，No.4，pp.11-18，1981.
- 5) 木山正明，奥村隆一，藤井昌弘，北脇督三：大阪北港における深層混合処理工法の施工例，基礎工，Vol.13，No.2，pp.39-45，1985.
- 6) 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Ⅱ-非排水せん断特性-，東京大学生産研究，Vol.34，No.8，pp.23-26，1982.
- 7) 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.
- 8) 藤本哲生, 鈴木素之, 山本哲朗, 岡林茂生: 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, 地盤と建設, Vol.21, No.1, pp.55-61, 2003.
- 9) 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.
- 10) 田口岳志, 鈴木素之, 平岡真樹, 藤野秀利, 藤本哲生, 山本哲朗: 養生時に上載圧の影響を受けたセメント安定処理土の微細構造, 土木学会論文集C, Vol.64, No.1, pp.67-78, 2008.
- 11) Suzuki, M., Fujimoto, T., and Taguchi, T.: Peak and Residual Strength Characteristics of Cement-treated Soil Cured under Different Consolidation Conditions, Soils and Foundations, Vol.54, No.4, pp.687-698, 2014.
- 12) Taguchi, T., Suzuki, M., Yamamoto, T., and Shimizu, M.: Difference in strength characteristics of cement-improved soil under different stress conditions, International Symposium on Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media, pp.49-53, 2006.
- 13) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, 地盤工学会, pp.426-434, 2009.
- 14) 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 地盤工学会, pp.426-432, 2013.
- 15) 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.

(2020年6月14日 受付)