

## 上載圧下で養生した安定処理土の微細構造

### Microstructure of Stabilized Soil Subjected to Overburden Pressure during Curing Period

藤野 秀利	Hidetoshi FUJINO	(宇部興産コンサルタント (株))
鈴木 素之	Motoyuki SUZUKI	(山口大学工学部)
藤本 哲生	Tetsuo FUJIMOTO	((株) 建設企画コンサルタント)
田口 岳志	Takeshi TAGUCHI	((株) 藤井基礎設計事務所)
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)

これまで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は通常の方法すなわち大気圧下で湿潤養生した安定処理土のそれよりも大きくなることがわかっている。本論文では、養生時上載圧による強度増加のメカニズムを解明するため、上載圧を受けた安定処理土の微細構造の変化に着目し、水銀圧入型ポロシメーターによる間隙径分布の測定および走査型電子顕微鏡による微細構造の観察を行った。その結果、間隙径分布は安定処理土と原土で明瞭な差異があることが分かった。また、上載圧下で養生した安定処理土の微細構造は密実に変化していることを確認した。

キーワード：安定処理土，養生，一軸圧縮試験，間隙径分布，走査型電子顕微鏡 (IGC : D02, D03)

#### 1. はじめに

セメント系固化材により改良された安定処理土は、施工後の初期段階に処理土の自重や上載荷重によって圧密が起こり、長期的に強度あるいは変形特性が著しく変化することが予想される。著者らは、通常のモールドを用いて、上載圧を作用させながら安定処理土を養生することができる「圧密養生装置」を試作し、種々の土を対象にして養生時に上載圧を受けた安定処理土の力学的性質に関する基礎データを収集している。これまで、養生時に上載圧を受けた安定処理土の一軸圧縮強度は通常の方法すなわち大気圧下の湿空養生で作製した安定処理土のそれよりも大きくなることがわかっている。

近年、地盤工学においても水銀圧入型ポロシメーターや走査型電子顕微鏡（以下、SEM とする）による観察によって土粒子の集合体としての微細構造の定性・定量的評価の方法が検討されつつある<sup>1),2)</sup>。しかしながら、安定処理土の微細構造を検討した研究報告は必ずしも多くはない<sup>3)</sup>。さらに、上載圧下で養生した安定処理土の微細構造については未解明なのが現状である。

本文では、上載圧下で養生した安定処理土の強度増加のメカニズムを微細構造の観点から解明するため、水銀圧入型ポロシメーターによる間隙径分布の測定および SEM 観察を行った結果について報告する。

なお、本研究では、安定処理土に上載圧を作用させた結果、圧密による密度増加が生じて、安定処理土の強度が増加することを「圧密養生効果」と定義する。

#### 2. 試験概要

土試料として既報<sup>4)</sup>で用いたものと同じ、山口県宇部市で採取した粘性土を用いた。その物理特性を表-1に示す。また、安定材は一般軟弱土用セメント系固化材を用い、処理土の一軸圧縮強さの目標値が 300 kPa 程度になるように安定材添加量を 50 kg/m<sup>3</sup>とした設定した<sup>5)</sup>。土試料および安定処理土は「安定処理土の締固めをしない供試体作製」(JGS 0821-2000)に準じ、室内配合試験用のモールド(直径: 50 mm, 高さ: 100 mm)に型詰した後、圧密養生装置に設置し、所定の上載圧  $\sigma_v$  (49, 98, 147 kPa) を作用させて、圧密養生の影響による強度の違いが検討できる 7 日間<sup>4)</sup>を恒温・恒湿条件下(温度 20°C, 相対湿度 R.H 95%)で圧密養生を行った。

表-1 土試料の物理特性

工学的分類	粘質土
自然含水比	45.0 %
湿潤密度	1.80 g/cm <sup>3</sup>
土粒子密度	2.69 g/cm <sup>3</sup>
細粒分含有率	56.0 %
液性限界	47.4 %
塑性指数	19.9

### 3. 既往の研究

前述した試料をもとに、上載圧下で養生した安定処理土の代表的な試験結果を図-1 および 2 に示す<sup>4)</sup>。

図-1 は原土と安定処理土を対象とした圧密養生時の載荷時間  $t$  と沈下ひずみ  $\epsilon_v$  の関係を示している。 $\sigma_v=49$  kPa の場合、安定処理土の沈下曲線は  $t=40$  分以内では、原土の沈下曲線の沈下挙動とほぼ同じだが、 $t=100$  分以降で  $\epsilon_v$  はほぼ一定になっている。また、この沈下挙動はいずれの上載圧においても同じ傾向となる。この現象は、安定材の硬化作用が  $t=100$  分以降で圧密現象よりも優勢となり、上載圧による圧密沈下が抑制されたものと推察される。また、最終的な沈下ひずみは  $\sigma_v$  が大きいほど増加しているが、原土の最終沈下ひずみに比べて  $1/4 \sim 1/2$  程度となっている。

図-2 は圧密養生後に実施した一軸圧縮試験結果を養生時の  $\sigma_v$  別に示す。 $\sigma_v=49$  kPa を作用させた安定処理土の一軸圧縮強度  $q_u$  は、通常の養生方法 ( $\sigma_v=0$  kPa) で養生したものよりも著しく増加し、 $\sigma_v$  が大きくなるにつれて  $q_u$  は増加している。また、応力-ひずみ曲線は  $\sigma_v$  を作用させることにより、一軸圧縮開始時の傾きが大きくなり、脆性的な破壊挙動を示している。

### 4. 試験結果および考察

#### 4.1 含水比減少量とセメント水和生成物

安定処理土の圧密養生効果は a) 圧密による密度増加と b) セメント水和反応によるセメンテーションの発達の二要因に大きく影響を受けているものと考えられる。そこで、試験中の各段階における安定処理土の土粒子・水・セメント・空気の四層を図-3 に示すようにモデル化し、試験中において測定した含水比変化からセメント水和生成物の定量化を試みた。図-3(a)~(d)には安定処理土の試料調整時、初期段階、圧密終了後および養生終了時をモデル化している。そして、圧密終了時の含水比  $w_2$  (鉛

直変位の実測値より計算した値)と養生終了時に測定した含水比  $w_c$  (実測値)の差  $\Delta w_{hyd} (=w_2-w_c)$  から安定処理土中に生成されるセメント水和物量を結合水量 (図-3 (c), (d)参照) として算出した。図-4 に本試料の  $w_2$  と  $w_c$  の関係を示す。これより、ばらつきはあるものの、 $w_2$  の方が  $w_c$  よりも総じて大きい。含水比減少量  $\Delta w_{hyd}$  がセメント水和反応によってセメントと結合した間隙中の水分とみなしている。 $\Delta w_{hyd}$  と安定材添加量  $Q_c$  および養生時間  $t_c$

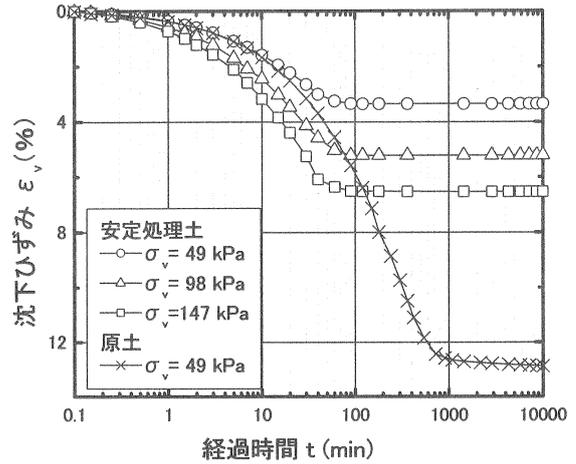


図-1 圧密養生の沈下ひずみ曲線

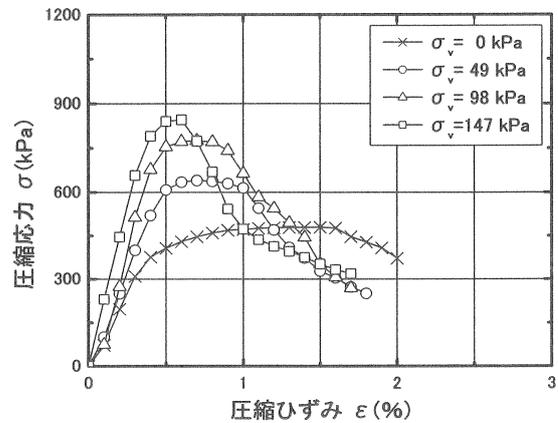


図-2 安定処理土の一軸圧縮試験結果

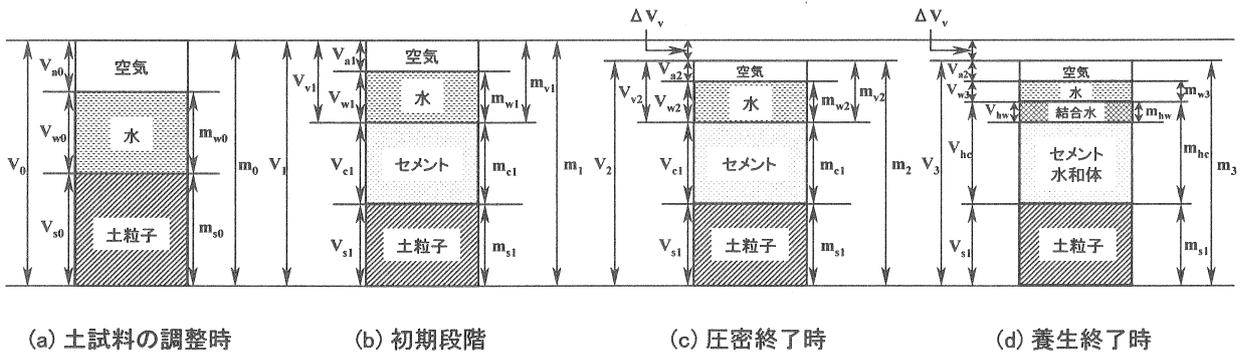


図-3 各試験段階における安定処理土のモデル図

の関係を図-5 および図-6 にそれぞれ示す。

図-5 から、 $Q_c$  の増加に伴い  $\Delta w_{hyd}$  は概ね大きくなっていくことがわかる。ただし、供試体の初期飽和度が低い場合、 $w_2$  には一次元圧縮に伴う空隙の減少量が含まれる。 $\Delta w_{hyd}$  の算出に用いる  $w_2$  の精度の検証は今後の課題と考えている。

図-6 から、 $T_c=1\text{day}$  の  $\Delta w_{hyd}$  が大きく得られているが、これは一軸圧縮試験中に供試体周面から少量の排水が生じたため  $w_c$  が小さく、つまり  $\Delta w_{hyd}$  が大きく算出されたことによると考えている。 $T_c=3\text{days}$  以降のデータをみると  $T_c$  の増加に伴い  $\Delta w_{hyd}$  は大きくなる傾向がみられる。

これは、 $Q_c$  および  $t_c$  の増加に伴って、セメント水和反応により結晶化された水分量の増加を示している。以上のことから、図-3 に示した安定処理土のモデルによりセメント水和生成物等の目安を推定することが可能となる。

#### 4.2 水銀圧入型ポロシメーターによる細孔径分布の測定

水銀圧入型ポロシメーターによって上述した試料の間隙径分布を測定した。本装置の仕様は、測定範囲：400～0.0034  $\mu\text{m}$ 、水銀接触角：140°、水銀表面張力：480 dyn/cm である。試料の作製方法は供試体を液体窒素で瞬間凍結させたものをテンションクラックで所要の大きさに破断し、真空凍結乾燥法（以下、フリーズドライ法とする）により乾燥させた<sup>6),7)</sup>。フリーズドライ法は種々の材料を氷点下の温度で凍結させ、その状態のまま昇華させて乾燥させる方法である。既往の文献において報告されているように、炉乾燥(110±5°C)よりも乾燥に伴う体積収縮を抑制することができる。なお、後述する走査型電子顕微鏡による観察に用いた試料もこのフリーズドライ法によって作製している。

図-7 に安定処理土が飽和していると仮定して含水比

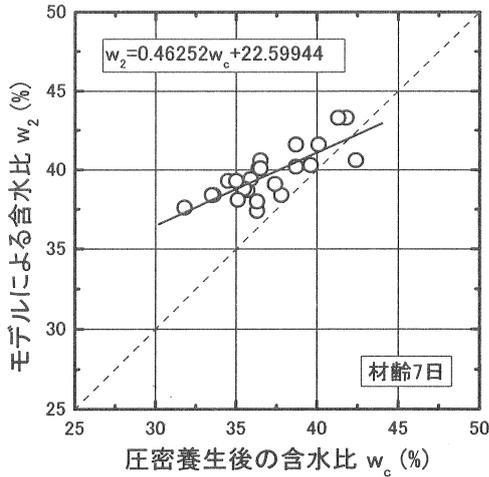


図-4 モデルによる含水比  $w_2$  と圧密養生後の含水比  $w_c$  の関係

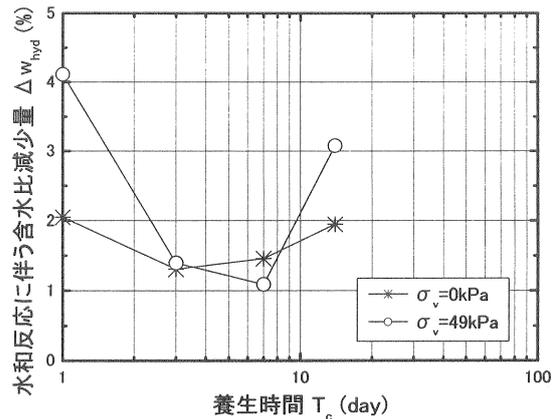


図-6 含水比減少量  $\Delta w_{hyd}$  と養生時間  $t_c$  の関係

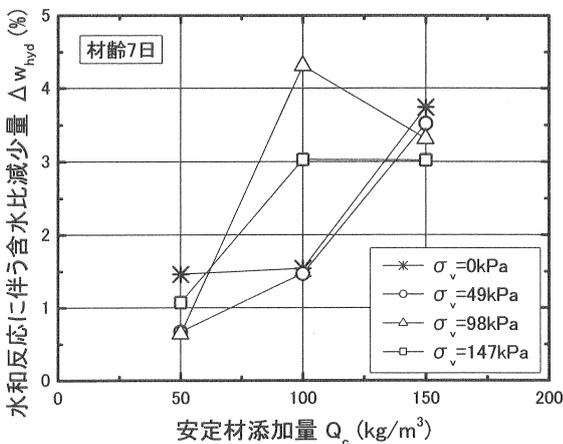


図-5 含水比減少量  $\Delta w_{hyd}$  と安定材添加量  $Q_c$  の関係

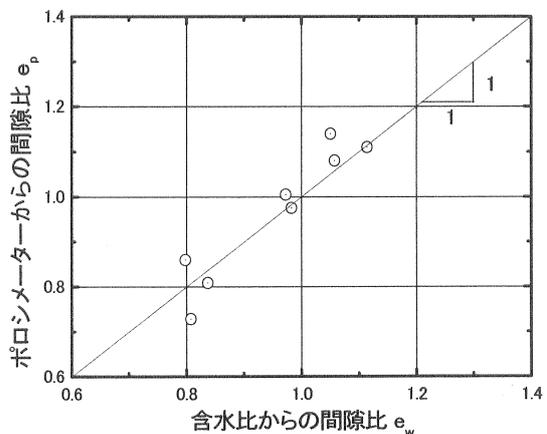
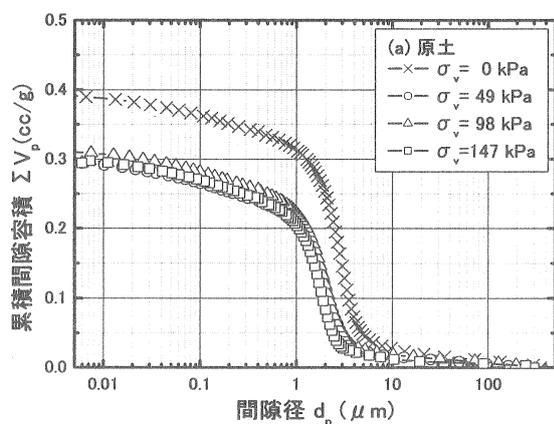


図-7 各間隙比の比較

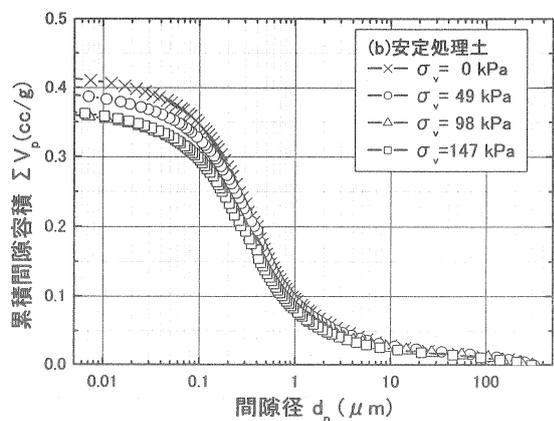
から求めた間隙比  $e_w$  とポロシメーターから求めた間隙比  $e_p$  の関係を示す。ポロシメーターから算出した間隙比は含水比から求めた間隙比にほぼ等しくなっており、両間隙比の差は約 10%以内に入っている。このことから、本装置による測定結果は間隙構造の評価に十分に利用できる。

図-8 に各試料の間隙径  $d_p$  と累積間隙容積  $\Sigma V_p$  の関係を示す。原土の  $\Sigma V_p$  は  $\sigma_v$  の作用によって約 25% 減少し、圧密による体積変化を現している。一方、安定処理土の  $\Sigma V_p$  は、 $\sigma_v$  の作用によって  $\sigma_v=98 \text{ kPa}$  の場合には約 5% 減少し、 $\sigma_v=147 \text{ kPa}$  の場合には約 14% 減少している。これは、原土の  $\Sigma V_p$  の減少量と比較すると、約 1/2 にとどまった。また、安定処理土の  $\Sigma V_p$  は原土のそれよりも大きく、このことは安定材の数時間後の水和反応によって安定処理土の土粒子間の接着構造がある程度形成されるため、上載圧の影響が軽減されたものと推察される。

図-9 に各試料の間隙頻度曲線を示す。原土の場合、 $d_p$  は直径  $1 \sim 5 \mu\text{m}$  のものが多く、この間隙は土粒子間の間隙と考えられ、 $\sigma_v$  の作用により大きさ、個数(単位面積当たり)ともに減少している。安定処理土においては、 $\sigma_v$  の有無にかかわらず、土粒子間の粗大な間隙がほとん



(a) 原土

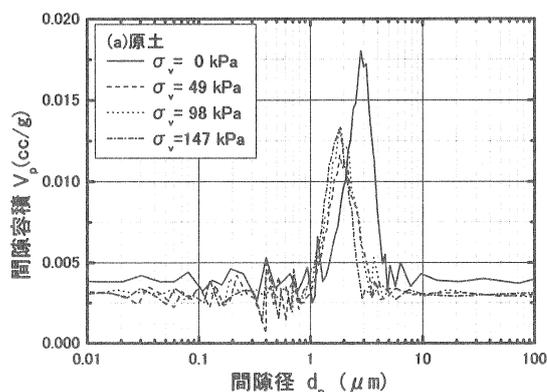


(b) 安定処理土

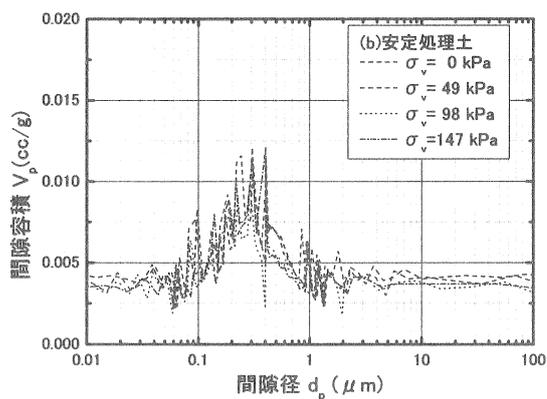
図-8 累積間隙曲線

ど存在せず、 $d_p=0.1 \sim 1 \mu\text{m}$  の間隙が大部分を占め、原土に比べてかなり小さかった。このように安定処理土においては圧密が間隙径に及ぼす影響はほとんど認められない。

図-10 に土試料および安定材の粒径加積曲線を示す。土試料中で最も多く分布している土粒子は  $0.015 \sim$



(a) 原土



(b) 安定処理土

図-9 間隙頻度曲線

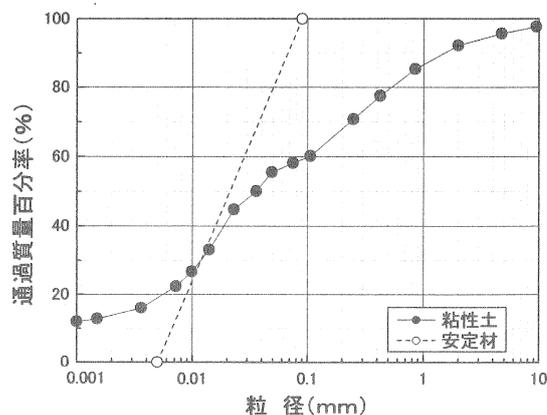


図-10 土試料と安定材の粒径加積曲線

0.020 mm のものである。この粒子が最密充填された場合、この構造で形成される間隙に入り込むことが可能な粒子サイズは図-11 に示すように 0.008 mm 以下の粒径を持ったものとなる。セメント粒子は図-10 に示すように粘性土と比較すると粗いことがわかる。したがって、セメント粒子が土粒子によって形成される間隙に入って、間隙

径を小さくする影響は少ない。以上のことから、安定処理土において減少した間隙は土粒子とセメント粒子間の間隙ではなく、セメント水和物の生成による各粒子および水和生成物間の間隙であることが推察される。

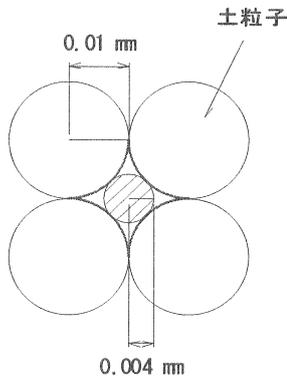


図-11 球形と仮定した土粒子が最密充填された場合の間隙のモデル図

#### 4.4 走査型電子顕微鏡による微細構造の観察

写真-1~4に各試料をSEMにより観察した結果を示す。写真-1は原土を型詰めして、7日間静置した供試体に対して観察したものである。この写真から、粘土鉱物の薄い板状粒子が比較的緩くランダムに存在していることが確認できる。写真-2は原土に $\sigma_v=147$  kPaを作用させた供試体に対して観察したものである。両写真の比較から、上載圧の作用を受けた供試体は土粒子自体に形状変化はないが、土粒子の再配列によって間隙が減少している。写真-3, 4は、 $\sigma_v$ の載荷の有無による安定処理土の微細構造の相違を示す。これらの写真から、微小ながら針状のセメント水和生成物が確認できる。また、 $\sigma_v$ の有無にかかわらず無定形の水和生成物が土粒子を接着しており、土試料を構成する粘土鉱物の薄い板状粒子を判別することはできず、組織は全体としてかなり密実な構造となっている。以上のことから、原土では圧密によって主として粘土粒子の再配列が起こり、間隙径や間隙量がある程度

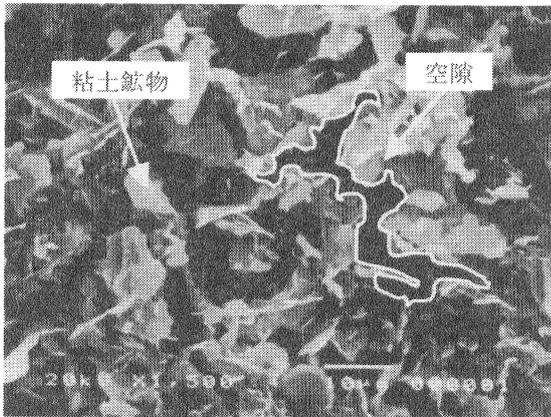


写真-1 原土 ( $\sigma_v=0$  kPa)

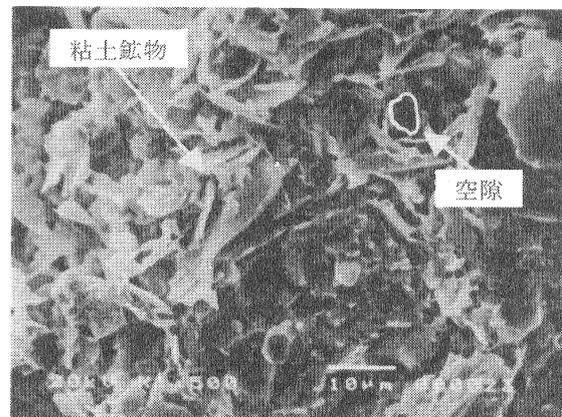


写真-3 安定処理土 ( $\sigma_v=0$  kPa)



写真-2 原土 ( $\sigma_v=147$  kPa)

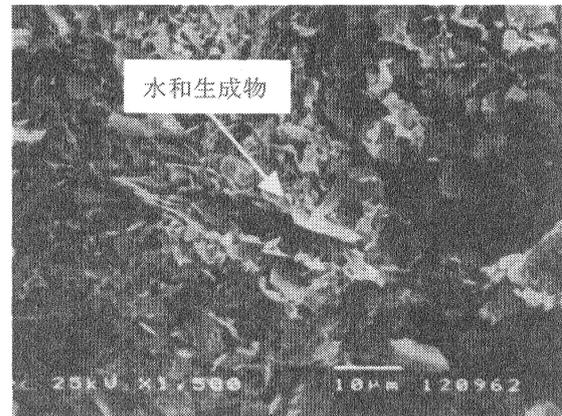


写真-4 安定処理土 ( $\sigma_v=147$  kPa)

減少する。しかし、安定処理土では安定材の水和反応により圧密の効果が軽減されるため、間隙径や間隙量の減少はほとんど確認できなかった。したがって、圧密養生した安定処理土の高強度発現は上載圧の作用により組織の緻密化が助長されるとともに、土粒子を拘束する水和生成物が効果的に発達したためと推察される。

## 5. 結論

本文では、上載圧下で養生した安定処理土の強度増加のメカニズムを検討するため、水銀圧入型ポロシメーターによる間隙径分布の測定およびSEMによる微細構造の観察を行った。主な結果は以下のとおりである。

- 1) 安定処理土モデルにおける圧密終了時と圧密養生終了時の含水比の差から、セメント水和物の生成量の目安を算定することができる。
- 2) 安定処理土を対象としたポロシメーターによる間隙径分布の測定は含水比から算出した間隙比との比較により十分に利用できる。
- 3) 原土の累積間隙容積は上載圧の作用によって約 25% 減少するのに対して、安定処理土のそれは多くても 14% 程度しか減少しなかった。
- 4) 原土の間隙径は 1~5  $\mu\text{m}$  のものが多く分布するのに対して、安定処理土の間隙径は 0.1~1  $\mu\text{m}$  のものが大部分を占めていた。
- 5) SEM 観察した結果、原土の場合、粘土鉱物の薄い板状粒子が比較的緩くランダムに存在するが、安定処理土の場合、無定形の水和生成物が土粒子を接着していることから、板状粒子を判別しにくく、組織全体としてはかなり密実な構造となっている。
- 6) 安定処理土の圧密は、セメント水和生成物による粘土粒子の拘束により抑制されるものの、結果として微細

組織はかなり密実となり、高強度を発現することが推察される。

## 謝辞

本原稿の作成にあたりご協力頂いた、山口大学工学部地盤環境工学研究室大学院生 河原陽子氏および同学生平岡真樹氏に深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 八嶋厚, 重松宏明: 土の微視的構造を探るための実験的研究(その2), 土と基礎, vol. 50, No. 3, pp. 62-67, 2002.
- 2) 山口晴幸, 池永均: 土構造物への水銀圧入型ポロシメーター装置への利用, 土と基礎, vol. 41, No. 4, pp. 15-20, 1993.
- 3) 鳥居和之, 川村満紀: 締め固めた安定処理土における強度と間隙径分布に関する研究, 土木学会論文集, No. 400/III-10, pp. 131-140, 1988.
- 4) 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.
- 5) (社)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], (社)セメント協会, pp. 53, 1994.
- 6) 加藤舜朗: 食品冷凍の理論と応用, 光琳書院, pp. 945-960, 1972.
- 7) 高野玉吉, 唯野哲男: 食品工業の乾燥, 光琳書院, pp. 223-279, 1975.