

函館高専環境システム工学専攻	学生会員	○堀田 崇由
函館高専環境都市工学科	国際会員	片岡沙都紀
北見工業大学社会環境工学科	国際会員	川口 貴之
港湾空港技術研究所	国際会員	田中 政典
興亜開発株式会社	国際会員	富田 龍三
興亜開発株式会社	正会員	中島美代子

1. はじめに

気泡混合処理土とは、浚渫土や建設残土などの原料土に界面活性剤系や動物タンパク系の起泡剤を用いて作製した気泡とセメント系の固化材を添加・混合した地盤材料のことである。近年、土圧軽減や沈下抑制を目的として気泡混合処理土を用いた施工事例が増えており、このような港湾・空港における軽量性・安全性・リサイクル性などの付加価値を有し、特に気泡を混合した新地盤材料はスーパージオマテリアル（以下、「SGM」）と呼ばれている¹⁾²⁾。しかし、SGM は使用する原料土によって強度や剛性の発現に大きな差がみられ、施工時には事前配合試験を行って添加・混合する固化材や気泡の量が決定されており、配合目標強度は設計基準強度に対して大きな安全率が使われている³⁾。

著者らが行ってきたこれまでの研究成果から、設計上想定された範囲内ではあるが原料土として使用した浚渫土の違いによって、同一養生日数での一軸圧縮強さ q_u やベンダーエレメント（以下、「BE」）試験から得られたせん断弾性波速度 V_s （あるいはせん断弾性係数 G ）に差があること、SGM 強度の大小には原料土として使用した浚渫土中の粘土鉱物の組成や有機物の種類、含有量が一因となっている可能性が示唆された⁴⁾⁵⁾。そこで本研究では、特に原料土内の粘土鉱物の組成やその含有量に着目し、これらを変化させた SGM 試料を室内にて作製し、養生日数に伴う強度・剛性との関係を一軸圧縮試験、BE 試験によって検討した。さらに、強度や剛性の違いと内部構造の関係を把握するため、走査型電子顕微鏡（以下、「SEM」）による観察を行った。

2. 気泡混合処理土の作製に使用した原料土について

本研究では、原料土に市販粘土である笠岡粘土（土粒子密度 $\rho_s=2.66\text{g/cm}^3$ ，粘土分含有量 60.6%，液性限界 $w_L=55.4\%$ ）とクニボンド（ $\rho_s=2.70\text{g/cm}^3$ ，粘土分含有量 28.5%，液性限界 $w_L=133.1\%$ ）の 2 種類を使用した。笠岡粘土、クニボンド内部に含有する粘土鉱物の同定を行うために実施した X 線回折結果（チャート図）を図 1 に示す。なお、両試料とも「粘土鉱物判定のための試料調整方法（JGS 0251-2009）」⁶⁾に則して採取した粘土鉱物に、試料内部の粘土鉱物の種類を特定するために Mg やグリセロール等で処理をして ⁷X 線回折を実施した結果となっており、これにより石英や長石などのピーク強度が強いものが除かれて粘土鉱物がより鮮明に判別することが可能となっている。図 1 に示すように、笠岡粘土ではスメクタイト、イライト、カオリナイトの存在、クニボンドではスメクタイトの存在

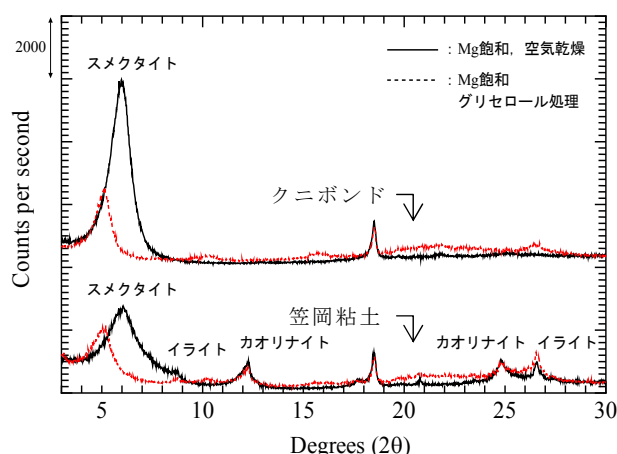


図 1 笠岡粘土、クニボンドの X 線回折結果

The relationship between clay-minerals in the dredged soil and unconfined compression strength - elastic shear modulus of air-form treated lightweight soil: HORITA Takayuki, KATAOKA Satsuki (Hakodate National College of Technology), KAWAGUCHI Takayuki (Kitami Institute of Technology), TANAKA Masanori (Port and Airport Research Institute), TOMITA Ryuzo and NAKAJIMA Miyoko (Koa Kaihatsu Corporation)

表 1 原料土中に占める粘土分含有量と各構成粘土鉱物の相対的な割合

原料土の配合割合 (%)		原料土中の 粘土分含有量 (%)	粘土分中に占める各構成鉱物の割合 (相対量, %)		
笠岡粘土	クニボンド		スメクタイト	イライト	カオリナイト
0	100	28.5	28.5	0.0	0.0
30	70	38.1	33.4	1.6	3.2
50	50	44.5	36.6	2.6	5.3
70	30	51.0	39.9	3.6	7.4
100	0	60.6	44.8	5.2	10.6

が確認できた。スメクタイトは鉱物層間に水を取り込んで膨張する膨張型粘土鉱物であること⁸⁾、実際に施工現場では採取した原料土中に砂質土系が多い場合には、スメクタイト（ベントナイト）を添加して材料分離を防ぐことが実施されている³⁾現状を踏まえ、本研究は笠岡粘土とクニボンドの配合割合を変えることで原料土内部のスメクタイト含有割合を人工的に変化させた SGM 試料を作製し、このことが SGM の強度や剛性に与える影響について検討した。

表 1 は、原料土の配合割合を変えた際の、原料土全体に占める粘土分含有量、および粘土中の各粘土鉱物の相対的な構成割合を示したものである。なお、粘土分含有量は粒度試験より得られた粒径加積曲線から算出し、各粘土鉱物の構成割合は X 線回折より得られた図 1 の回折線強度を積分することにより算出した⁷⁾⁹⁾。本研究では、笠岡粘土とクニボンドの配合割合（質量換算）が 0 : 100, 30 : 70, 50 : 50, 70 : 30, 100 : 0 の計 5 種類の試料を原料土とした。表 1 から、配合割合によって含有する粘土分含有量は 28.5 ~ 60.6% の範囲で変化していること、粘土鉱物はスメクタイトで 28.5 ~ 44.8% の範囲で変化していることなどがわかる。ここで、クニボンド内にはスメクタイトが多く存在していることはチャート図より確認できたが、粒度試験より得られたクニボンド内部に占める粘土分含有量が 28.5% と低いので、原料土中の粘土鉱物の割合は表 1 のように笠岡粘土の割合が多くなるとスメクタイト量も増加するという結果となっている。なお、本文では笠岡粘土の配合割合をとって、笠岡粘土 0, 30, 50, 70, 100% という表記に省略している。

3. SGM 作製方法と試験条件

SGM 試料作製のフローチャートを図 2 に示す。練混水には函館で採取した海水、固化材には高炉セメント B 種、気泡には動物性加水分解タンパク質を約 20 倍に希釈後、事前発泡方式により発泡させた気泡を使用した。これらと 425 μ m ふりを通過させた原料土を図 2 に示すような手順に沿って各々配合し、高さ $h=10$ cm 内径 $\phi=5$ cm のプラスチック製モールド内に充填して上面をラップで密封した後、所定の材齢になるまで気中養生した。

作製した全ての SGM 試料において、目標湿潤密度 ρ_t は水中施工において目標密度とされることが多い $\rho_t=1.1\text{g/cm}^3$ とし、単位体積当たりには占める固化材の量を一定とした。ここで、図 3 には配合した各原料土より得られた w_L と、各原料土の w を海水で調整した後の試料（以下、「調整土」）、および固化材と気泡を配合した後に行った SGM 試料のフロー値を示したものである。 w_L を見ると、各原料土の w_L は含まれるクニボン

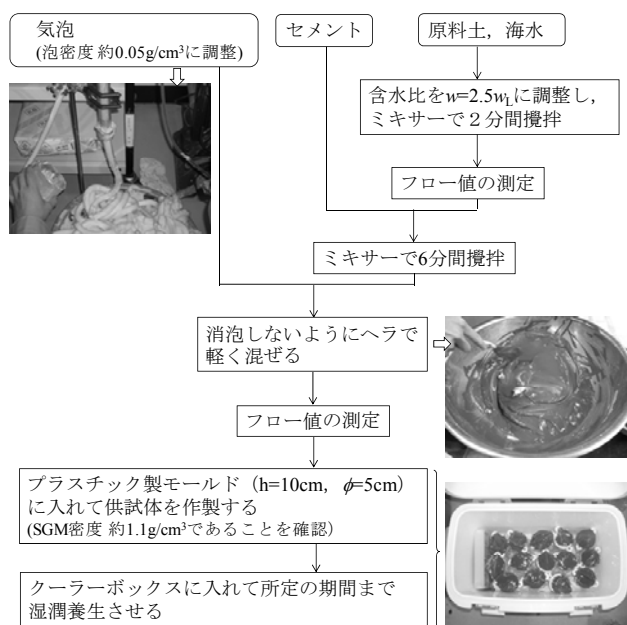


図 2 SGM 作製のフローチャート

ドの割合とともに増加する傾向がある．ここで SGM 試料の作製にあたっては，SGM 試料の w を一定として SGM 試料内の原料土，海水，固化剤，気泡の割合を等しくすることで原料土が SGM の強度や剛性に与える影響を検討するという考え方もあるが，図 3 において原料土によっては w_L が 2 倍以上も異なること，一般的には SGM 施工時に使用する原料土は w_L の約 2.5 倍を目安として調整土の初期含水比としていることを考慮し，本研究で SGM を作製する際の初期含水比は $w=2.5w_L$ となるように調整した．

次に調整土，SGM 試料のフロー値を見ると，調整土のフロー値では笠岡粘土 100%でわずかに低くなっており， w_L の違いによる初期含水比の影響が出ているものと思われるが，その他の試料を見るとおおむね同じようなフロー値が得られており，調整土の含水比が大きく異なっている割には各配合割合時のフロー値には影響を与えていない．一方で，SGM 試料のフロー値は傾きが緩やかではあるものの笠岡粘土 0%と 100%ではフロー値に約 10cm の差があった．

本研究で実施した試験については，養生期間に伴う強度と剛性の変化を検討するために，養生期間が 3，7，28 日目の時点で養生容器から供試体を 2 本取り出し，一軸圧縮試験と BE 試験を実施した．なお BE 試験は，上下方向に BE を挿入し，水平方向に振動しながら鉛直方向に伝播するせん断弾性波速度を測定した．そのうち 1 本の供試体に対しては，側面にも BE を挿入して振動・伝播方向ともに水平のせん断弾性波速度 (V_{vh} , V_{hh}) の測定も行った．また，BE 試験より得られた測定値と供試体の ρ_t から，せん断弾性係数 $G_{vh} (= \rho_t \times V_{vh}^2)$ ， $G_{hh} (= \rho_t \times V_{hh}^2)$ を算出した．さらに，各養生日数での SGM 試料内部の様子については SEM を用いて観察を行い，強度発現と微視的構造の変化について検討した．

4. 試験結果・考察

4.1 養生日数に伴う強度・剛性の変化

図 4 は各原料土より作製した SGM 試料の，養生日数に伴う q_u と BE 試験より算出した G_{vh} の変化を示したものである．どの SGM 試料においても q_u ， G_{vh} は片対数紙上において，養生日数に対してほぼ直線的に増加する傾向が見られる．しかし，各養生日数に伴う SGM 試料の強度増加量は笠岡粘土の配合割合によって異なる．ここで笠岡粘土 0%，100% の 2 種類の原料土に関しては，初期含水比 $w=285\%$ として SGM 試料内の配合量を一定とした試料も作製し，強度や剛性の測定も実施している（図 4 中●，▼）．これらを同じ配合割合で $w=2.5w_L$ で作製した SGM 試料（図 4 中○，▽）と比較すると，笠岡粘土 0%では同一養生日数において強度の差はあまりないが，笠岡粘土 100%ではその差が大きい．これは

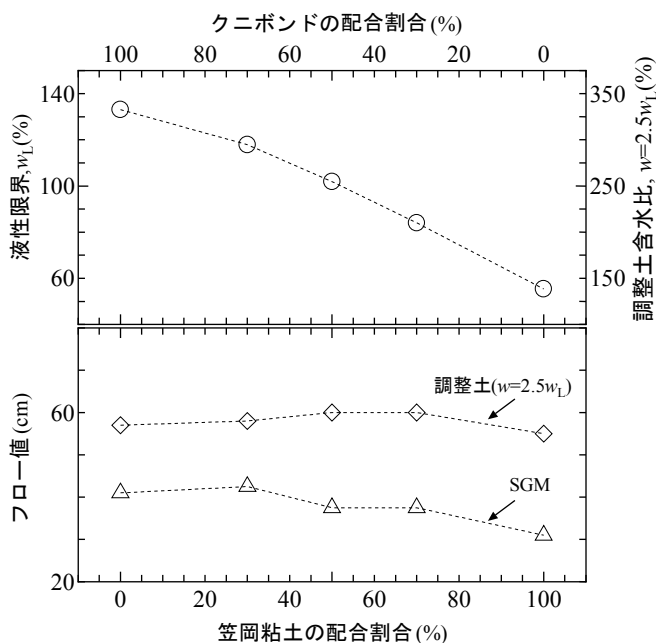


図 3 原料土の液性限界（上）と，調整土および SGM 試料のフロー値の推移（下）

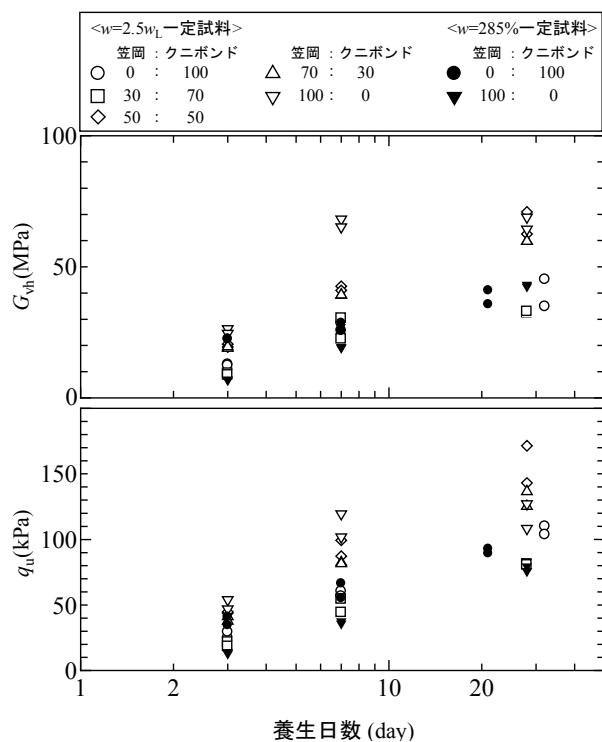


図 4 養生日数に伴う q_u ， G_{vh} の推移

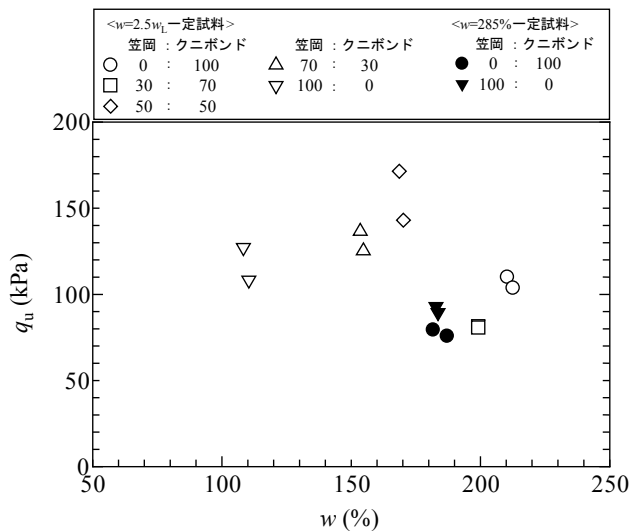


図5 w と q_u の関係（養生 28 日目）

それぞれの液性限界が，クニボンドが $w_L=133.1\%$ に対して笠岡粘土が $w_L=55.4\%$ と低く，笠岡粘土 100% では $w=285\%$ とすると $w=5w_L$ となり，図 5 に示される SGM 試料内の w と q_u との関係から見えるように，2 通りの笠岡粘土 100% (∇ , \blacktriangledown) では w に大きな差があるため，供試体内部の水分量が強度に大きな影響を与えたものと思われる。

図 4 において，笠岡粘土 100% の SGM 試料 (∇) では，養生日数 3 日目，7 日目では他の原料土の配合割合で作製した SGM 試料に比べると q_u , G_{vh} が最も高いが，養生 28 日目では大きな強度増加が見られない。ここで，養生 28 日目での強度増加の程度を他の原料土と比較するために，養生 3 日目での強度を基準として以下のような式を用いて示した。

$$\text{強度増加率} = \frac{q_{u28\text{ave}} - q_{u3\text{ave}}}{q_{u3\text{ave}}} \quad (1)$$

ここで， $q_{u3\text{ave}}$, $q_{u28\text{ave}}$ はそれぞれ養生日数毎に試験を行った 2 本の SGM 試料から得られた q_u の平均値

である。式 (1) より求めた強度増加率と笠岡粘土の配合割合との関係を図 6 に示す。これより，笠岡粘土 100% 以外の SGM 試料では強度増加率が 2.5～3.0 となっているが，笠岡粘土 100% では 1.2 となっており，他の配合条件で作製した SGM 試料に比べて低い値となった。著者らのこれまでの研究成果⁵⁾から，SGM 試料の強度増加にはセメントの水和反応によって生成される針状のエトリンガイトの生成，成長とそのリンクが寄与することがわかっている。よって，笠岡粘土 100% の試料では養生初期の段階でエトリンガイトが生成，成長するものの，その後は何らかの原因によってエトリンガイトの成長が抑制され，強度増加に至っていないことが考えられる。また，笠岡粘土 100% では粘土分中に含まれるスメクタイトの含有量が多いことから，スメクタイトが持つ特有の性質が SGM の強度増加を抑制する一因となっていることも考えられる。

図 7 は，SGM 試料のフロー値と養生 3 日目，28 日目での q_u との関係を示したものである。養生 3 日目ではフロー値が高くなるほどその強度が低くなっており，初期の q_u の大小はフロー値が影響を与えることが考えられる。しかし，養生 28 日目になると笠岡粘土 50%～70% とした原料土で作製した SGM 試料で q_u が高い値を示したことから，養生日数が進むと q_u は一概にフロー値で推定することは困難であると思われる。

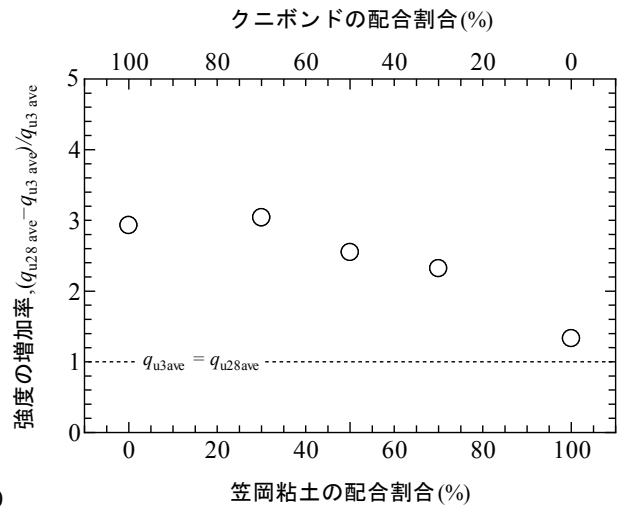


図6 q_u の強度増加率（養生 3～28 日目）

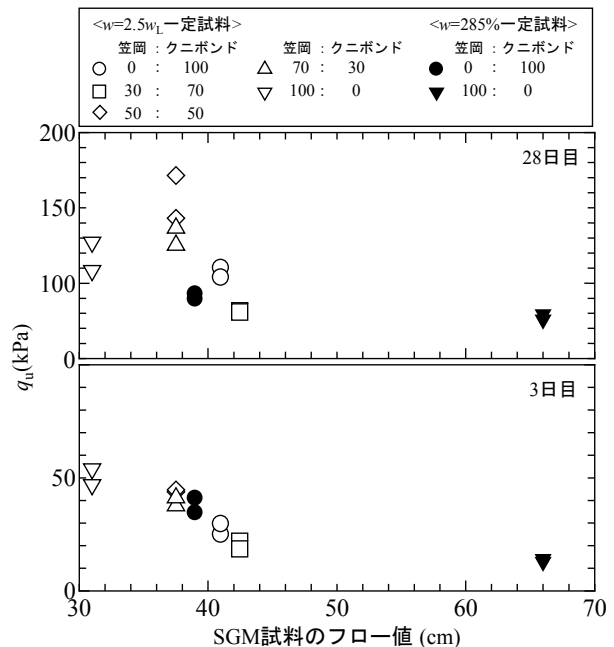


図7 SGM 試料のフロー値と各養生日数における q_u の関係

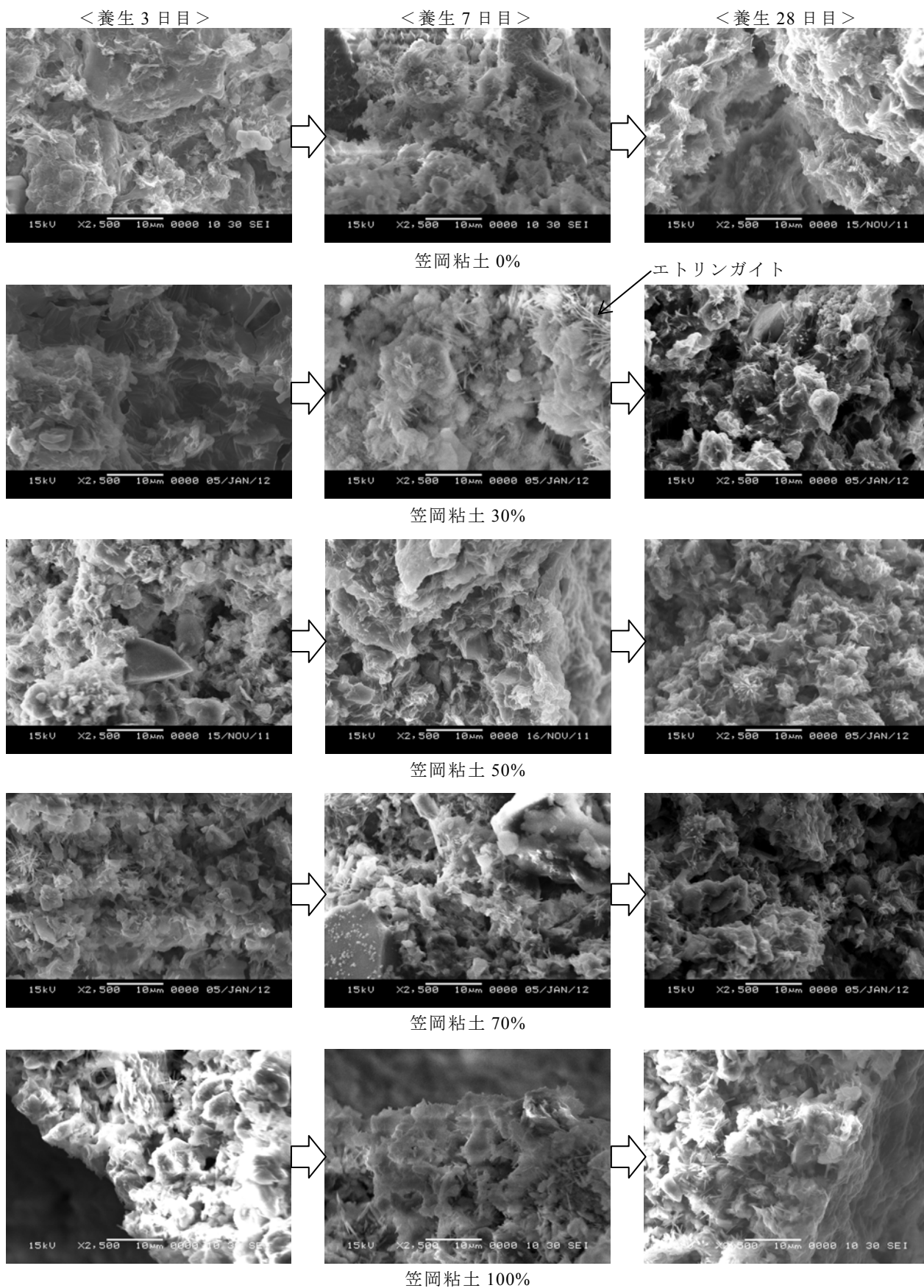


写真 1 SEM による養生日数に伴う内部構造の変化（画像内→で示す針状のものがエトリンガイト）

鉱物組成の種類や含有量が q_u の大小に与える影響を，SEM による内部の微視的構造の観察からも検討した．得られた画像を写真 1 に示す．なお，観察した SGM 試料は所定の養生日数において SEM 観察のためだ

けに用意した 1 本の供試体の一部分を取り出したもの（残りは次回の観察のために養生を継続）である。

まず養生 3 日目の SGM 試料をみると、笠岡粘土 0%、30%の SEM 画像ではセメントの水和反応によって生成されるエトリンガイトがほとんど見られていないが、笠岡粘土の割合が 50%を超えると養生 3 日目でも部分的にエトリンガイトの存在が確認できることから、原料土中の粘土鉱物の占める割合が多くなるとエトリンガイトの生成量も増加していることが考えられる。ここで、エトリンガイトの生成と粘土鉱物との関連性を見るために、写真 2 は砂とクニボンドを 1:1 の割合で配合した原料土にて作製した SGM 試料の内部構造を見たものである。これより、エトリンガイトの生成起点が砂側からではなくクニボンド側であることが伺える。さらに、写真 3 は笠岡粘土 50%で作製した SGM 試料の内部構造をより高倍率で観察したものであるが、エトリンガイトはスメクタイトであろうと思われる層構造をもつ鉱物の層間を起点に生成、成長している様子が伺える。これらの結果から、スメクタイトはイライト、カオリナイトなどに比べて比表面積が大きいため、粘土鉱物の表面に付着したセメントが粘土周囲の水と水和反応することによってエトリンガイトが生成されたことが推測される。

養生 7 日目、28 日目を見ると、まず笠岡粘土 0%の SGM 試料では、養生 7 日目でエトリンガイトの存在が確認できるが、エトリンガイト同士がリンクするまでは至っていないように思われる。一方、笠岡粘土 30%、50%、70%では、養生 7 日目から 28 日目になるにつれて、生成したエトリンガイト同士がリンクして徐々に画像全体に広がってきている様子が伺える。ここで、笠岡粘土 100%の SGM 試料においては、養生 7 日目でエトリンガイトの生成、成長が他に比べて多く見られるものの、養生 28 日目と比較するとその差はあまりない。従って、養生日数が進むとエトリンガイトの成長が抑制されて、SGM 強度の増加に至っていない可能性が推測される。SGM 試料内部のエトリンガイトの成長をスメクタイト含有量との関係で見てみると、スメクタイトは比表面積の大きいため、この表面からセメントの水和反応を促進することが示唆されたが、一方で原料土内に占めるスメクタイト鉱物の割合が多くなりすぎても強度の増加には繋がらなく、本研究の配合条件で考えると笠岡粘土 50%のときが養生 28 日目において最も強度増加が見込める割合となっていることがわかった。

4.2 セン断弾性係数と一軸圧縮強度との関係

図 8 は、 G_{vh} と q_u との関係を示したものである。図より G_{vh} と q_u には強い相関があり、原料土内部の構成鉱物の割合に関係なく各々が比例関係となっていることがわかる。なお、SGM 試料に関する G_{vh} と q_u の関係は、著者らのこれまでの研究⁵⁾から得られた結果とも一致しており、セメント添加量や目標とする湿潤密度が一定である気泡混合処理土においては、 G_{vh} と q_u の関係から得られる傾きは供試体の w には関係せず、ほぼ等しくなるといえる。

4.3 セン断弾性係数の伝播・振動方向の違いによる影響

図 9 は BE 試験より算出した G_{vh} と G_{hh} の関係を示したものである。図から G_{vh} と G_{hh} から得られる傾きは 1:1 に近くなっていることが確認できる。剛性の面では自然堆積粘性土から得られる G_{vh} と G_{hh} の傾き¹⁰⁾と

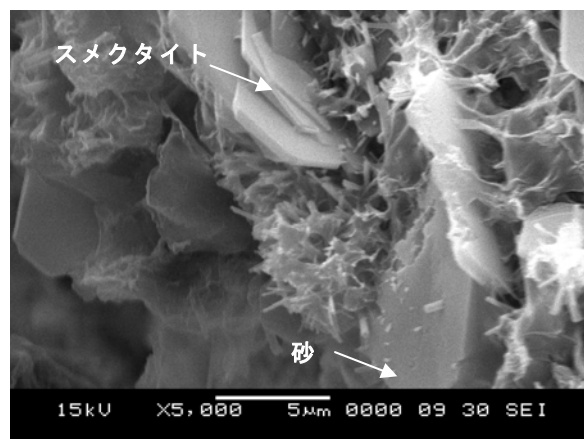


写真 2 砂：クニボンド=1：1 の割合で混合した原料土にて作製した SGM 試料の内部構造（養生 7 日目）

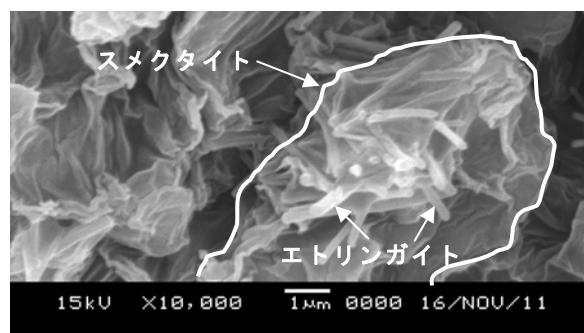


写真 3 エトリンガイトの生成の様子（笠岡粘土 50%、養生 7 日目）

比較してかなり等方的な材料であるといえ、SGM 試料は球形に近い気泡が比較的均等に混入、保持されていることが考えられる²⁾⁴⁾⁵⁾。

5. まとめ

本研究では、笠岡粘土とクニボンドの配合割合を変えた数種類の原料土を用いて作製した SGM 供試体に対して一軸圧縮試験と BE 試験を実施し、原料土内部の粘土鉱物の構成やその割合の違いが強度や剛性に与える影響について検討した。以下に、得られた知見をまとめる。

- どの SGM 試料においても、一軸圧縮強さやせん断弾性係数は養生日数に伴って増加することがわかったが、その強度増加の割合は、原料土の構成鉱物やその含有割合が大きく影響していることがわかった。
- 原料土内部のス멕タイト含有割合が、SGM 試料のエトリンガイトの生成や成長に影響を与えている可能性が示唆された。また、SGM 試料の強度増加を見込める適切なス멕タイトの含有割合が存在することも明らかとなった。
- 一軸圧縮強さとせん断弾性係数との関係には強い相関があり、セメント添加量や目標とする湿潤密度が一定である SGM 試料においては、一軸圧縮強さとせん断弾性係数から得られる傾きは供試体の含水比には関係せずにはほぼ等しくなることがわかった。また、縦横方向におけるせん断弾性係数の関係は 1:1 に近く、SGM 試料は自然堆積粘性土と比較してかなり等方的な材料であることがいえる。

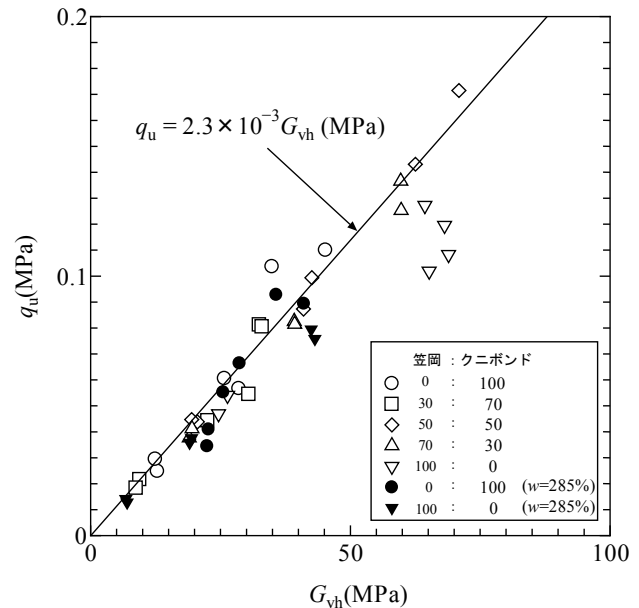


図 8 G_{vh} と q_u の関係

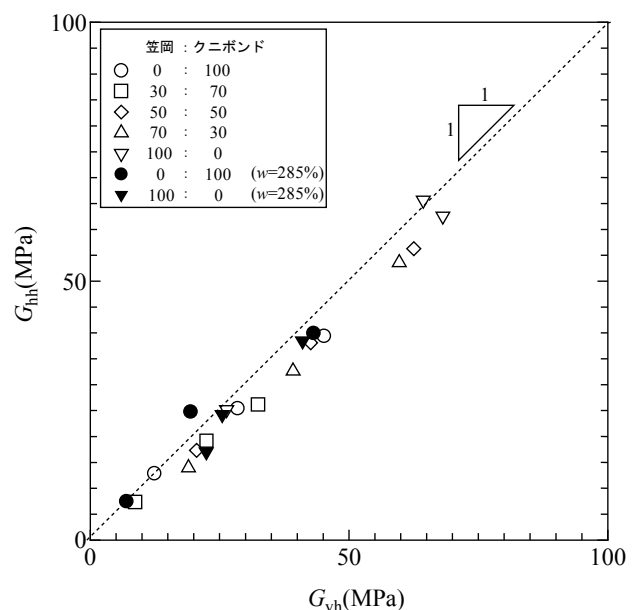


図 9 G_{vh} と G_{hh} の関係

<謝辞>

本研究を遂行するにあたり、函館工業高等専門学校 松浦翔悟君に実験に関するご協力をいただいた。記して敬意を表します。

<参考文献>

- 1) Tuchida, T. Tang, Y.X. and Watabe, Y.: Mechanical Properties of Lightweight Treated Soil Cured in Water Pressure, Soils and Foundations, Vol.47, No.4, pp.731-748, 2007.
- 2) Watabe, Y., Itou, Y., Kang, M.S. and Kikuchi, Y.: One-Dimensional Compression of Air-Form Treated Lightweight Geo-Material in Microscopic Point of View, Soils and Foundations, Vol.44, No.6, pp.53-67, 2004.
- 3) 沿岸技術研究センター：港湾・空港における軽量混合処理土工法技術マニュアル（改訂版），沿岸技術ライブラリー，No.31, p.371, 2008.

- 4) Kataoka, S., Kawaguchi, T., Horita, T., Tanaka, M., Sakaiya, T. and Shibuya, S.: Unconfined compression strength and elastic shear modulus of air-form treated lightweight soil, Proc. of International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, Seoul, 2011.
- 5) 堀田崇由, 片岡沙都紀, 川口貴之, 田中政典, 富田龍三, 中島美代子: 原料土の違いが気泡混合処理土の変形・強度特性に与える影響, 第46回地盤工学研究発表会, pp.671-672, 2011.
- 6) 地盤工学会: 粘土鉱物判定のための試料調整, 地盤材料試験の方法と解説―二分冊の1―, pp.355-360, 2009.
- 7) 和田光史: 粘土鉱物の同定および定量法, 日本土壤肥科学雑誌, Vol.37, No.1, pp.9-17, 1966.
- 8) 土質工学会: 粘土の不思議, pp.181, 1986.
- 9) Ohtsubo, M., Egashira, K., Koumoto, T. and Bergado, D.Y.: Mineralogy and Chemistry, and their Correlation with the Geotechnical Index Properties of Bangkok Clay: Comparison with Ariake Clay, Soils and Foundations, Vol.40, No.1, pp.11-21, 2000.
- 10) Kawaguchi, T., Yamashita, S., Kataoka, S., Shibuya, S. and Kawajiri, S.: Inherent and indecedanisotoropy of three natural sedimentary clays reflectiong on the elastic shear modulus, Proc. of the 4th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol.1, pp.575-579, 2008.