粘土鉱物の種類の違いに着目した岩質材料の物性に関する一考察†

河野 勝宣* 竹原 裕太* 西村 強**

Effect of Structure of Clay Mineral on the Physical and Mechanical Properties of Rock Materials

by

Masanori KOHNO*, Yuta TAKEHARA* and Tsuyoshi NISHIMURA**

It is generally known that physical and mechanical properties of rock materials significantly change by clay mineral content. Therefore, it is considered that clay mineral content or type is one of the factors that greatly affect the rock strength. In order to clarify that effect of only clay mineral content, a series of experiments has been carried out on artificial rock by the use of gypsum specimen mixed with clay minerals. The value of P-wave velocity, uniaxial compressive strength and degree of strength reduction differ with the clay mineral content and type. Comparative tests revealed that the difference of clay mineral content or type in the clay mineral-bearing rock material specimens influences the physical and mechanical properties of rock materials. Furthermore, the results suggested that uniaxial compressive strength of clay mineral-bearing rock materials under dry condition can be evaluated on the basis of interlayer bonding force (i.e. chemical bonds type) in the clay minerals. Our results can be useful and contribution as basis data when evaluating physical and mechanical properties of clay mineral-bearing rock materials.

Key words:

Clay mineral, Uniaxial compressive strength, Gypsum specimen, Interlayer bonding force

1 緒 言

新生代に形成された堆積岩類や様々な変質作用を受けた諸岩類は、粘土鉱物を含むことが多く、これらの岩類は、岩石自体の強度が低だけでなく、含有粘土鉱物の影響による岩石組織の物理的または化学的な劣化度合いが大きい。また、含有粘土鉱物は、地すべりなどの斜面災害、建設工事における盤ぶくれや崩壊等の要因の一つとして挙げられる。そのため、粘土鉱物を含む地盤材料や岩質材料の物性について検討した研究は各分野において多くなされている。

Kahraman et al.¹⁾は、膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトを様々な割合で含有する岩石を用いて一軸圧縮試験を行った結果、スメクタイト含有量の増加に伴い、一軸圧縮強度が低下することを報告している。河野・前田²⁾は、大規模古期地すべり地内に掘削されたボーリングコア試料を用いて各種試験・分析を実施した結果、岩石中に含まれるスメクタイトは、岩石の物性を大きく変化させるとともに、岩石の強度低下に関与し、地すべりの発生と密接な関係があることを報告している。石田・堤³⁾は、スメクタイトを含む8種類の軟岩を用いて一軸圧縮試験を実施した結果、スメクタイト含有量が多い試料ほど乾湿の強度比が大きく、劣化しやすい岩石であると報告している。中村ほか⁴⁾は、乾燥状態および湿潤状態における凝灰岩類の一軸圧縮試験および圧裂引張試験を行った結果、

粘土鉱物含有量の指標として用いた比表面積が大きくなるにしたがって、湿潤状態における凝灰岩の強度低下の程度が大きくなることを報告している。これらの報告より、粘土鉱物が岩石の強度低下に何らかの影響を及ぼすことは明らかである。

日本列島の地質は、地質時代を通じて、マグマ活動や地殻変動、風化作用の産物が多く、熱水変質帯や破碎帯、風化帯が広範囲に分布しており、多種多様な粘土鉱物が普遍的に存在している。粘土鉱物はその構造や化学組成の違いから、粘土鉱物を含む地盤材料や岩質材料は、粘土鉱物の種類や含有量によって、物性が大きく変化することが想像される。したがって、地盤材料や岩質材料の物性を評価するうえで、粘土鉱物の種類や含有量に注目することは非常に重要である。前述のように、粘土鉱物を含む岩質材料の物性について検討した研究例はあるものの、粘土鉱物の種類についての研究例はほとんどない。Kohno & Maeda⁵⁾は、熱水変質軟岩の力学特性評価を行い、乾燥状態に対する湿潤状態の岩石の強度低下率が、含まれる粘土鉱物の種類によって異なることを明らかにしている。しかし、どの程度の粘土鉱物含有量で岩石の物性が変化するのかについては不明であり、また、粘土鉱物の種類の影響についての検討も十分になされていない。

本研究では、粘土鉱物のみの影響を評価できるように、石膏と粘土鉱物を様々な割合で混合した人工軟岩供試体

† 原稿受理 平成29年8月10日 Received Aug. 10, 2017 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 鳥取大学大学院工学研究科 〒680-8552 鳥取市湖山町南
Graduate School of Eng., Tottori Univ., Koyama-Minami, Tottori 680-8552.

** 正 会 員 鳥取大学大学院工学研究科 〒680-8552 鳥取市湖山町南
Graduate School of Eng., Tottori Univ., Koyama-Minami, Tottori 680-8552.

を作製し、粘土鉱物の種類・含有量の違いによって、供試体の最も基礎的な物性値と一軸圧縮強度がどのように変化するのかについて実験的に検討した。特に、一軸圧縮強度の差を粘土鉱物の構造の違いに基づいて考察した。

2 供試体の作製方法および実験方法

人工軟岩供試体は、Table 1 に示すような配合で、半水石膏粉末 ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$, 吉野石膏(株)製 ハイストーン N 型)、石英粉末 (SiO_2 , 土粒子密度 $\rho_s = 2.662 \text{ g/cm}^3$) および粘土鉱物粉末を混合し、これらの粉末に対して 5 割の蒸留水を加えてスラリー状にした後、塩化ビニル樹脂製の型枠に流し込み、固化 (二水石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + 石英 SiO_2 + 粘土鉱物) して作製した (Fig. 1)。石英粉末と粘土鉱物粉末の割合 (質量比) を種々変化させることにより、固化材である石膏の割合を一定にし、かつ、粘土鉱物含有量の異なる供試体を作製した。粘土鉱物混合率 C_c は 0%, 10%, 20%, 30% とした。なお、供試体は、直径 30 mm、高さ 60 mm の円柱形とした (Fig. 1)。

ここで、代表的な層状珪酸塩鉱物 (粘土鉱物) の構造模式図を Fig. 2 に示す。粘土鉱物の大部分は、Si-O など四面体シートと Al-O などの八面体シートの組合せからなる層状の結晶構造をもった層状珪酸塩鉱物からなる。これらの 2 つのシートの組合せ (1:1 層または 2:1 層) が連続して積み重なることにより、粘土鉱物は主に 1:1 型構造または 1:2 型構造に分類される。さらに、陽イオン同型置換によって生じる組成等の違いによって細かく分類される。本研究で用いた粘土鉱物は、Fig. 2 に示す各構造を網羅できるように、カオリナイト (カオリン鉱物の一種、 $\rho_s = 2.577 \text{ g/cm}^3$)、蛇紋石 ($\rho_s = 2.518 \text{ g/cm}^3$)、1.0 nm ハロイサイト ($\rho_s = 2.736 \text{ g/cm}^3$)、タルク ($\rho_s = 2.786 \text{ g/cm}^3$)、雲母粘土鉱物 ($\rho_s = 2.904 \text{ g/cm}^3$)、緑泥石 ($\rho_s = 2.841 \text{ g/cm}^3$) およびスメクタイト ($\rho_s = 2.549 \text{ g/cm}^3$) の計 7 種類である。また、岩石中によく含まれる鉱物 (非粘土鉱物) として長石 ($\rho_s = 2.613 \text{ g/cm}^3$) および方解石 ($\rho_s = 2.713 \text{ g/cm}^3$) についても検討した。混合粉末試料はいずれも 75 μm 以下の通過した試料であり、これらの粉末試料は、(株)リガク製 Ultima IV を用いて不定方位 X 線回折パターンにより同定した (Fig. 3)。なお、石膏-粘土鉱物混合供試体について、X 線回折パターンおよび 2 次電子画像を確認したところ、粘土鉱物 (または非粘土鉱物) と石膏の混合による新たな反応生成物は見られていない。

一軸圧縮試験は、(株)誠研舎製の圧縮試験機 DTC-127B を用いて行った。圧縮荷重の測定および記録には、(株)東京測器研究所製の圧縮荷重計 CLP-20B および超小型動ひずみレコーダ DC-204R を用いた。試験時の軸ひずみ速度は 0.1%/min とした。供試体の含水状態による強度の違いを把握するため、一軸圧縮試験は、乾燥状態 (供試体を 70°C で 24 時間乾燥させた状態) および飽和状態 (デシケータ内で供試体を浸水させ、24 時間真空脱気した後、大気圧下において 24 時間浸水させた状態) の供試体について行い、1 種の供試体につき 4 本以上の計 268 本につい

Table 1 Mix proportion of gypsum specimens.

Clay mineral content	Bassanite	Quartz	Clay mineral
$C_c = 0\%$	70%	30%	0%
$C_c = 10\%$	70%	20%	10%
$C_c = 20\%$	70%	10%	20%
$C_c = 30\%$	70%	0%	30%

Fig. 1 Gypsum specimen.

Fig. 2 Schematic crystal structure of layer silicate (based on Shirozu⁶⁾).

て行った。また、乾燥密度、飽和密度、有効間隙率、吸水率および P 波速度を求めた。なお、本研究では、石膏の水和水を脱水させないために、一軸圧縮試験および物理試験における供試体乾燥時の温度を 70°C とした。

3 実験結果および考察

3.1 石膏-粘土混合供試体の基本物性

石膏-粘土鉱物混合供試体の乾燥密度、飽和密度、有効間隙率、吸水率および P 波速度を Fig. 4 に示す。粘土鉱物混合率 $C_c = 0\%$ の石膏供試体の乾燥密度は 1.20 g/cm^3 、飽和密度は 1.65 g/cm^3 、有効間隙率は 45.0%、吸水率は 37.5% であり、乾燥状態および飽和状態における P 波速度はそれぞれ 2.48 km/s および 2.25 km/s である。これらの値は、泥岩や凝灰岩などの軟岩の物性値の範疇にある。

石膏-粘土鉱物混合供試体の乾燥密度および飽和密度のいずれも粘土鉱物 (または非粘土鉱物) 混合率 C_c の違いによる大きな差はみられず、また、石膏供試体 ($C_c = 0\%$) の密度のおよそ $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ の範囲にある (Fig. 4A)。有効

Fig. 3 Unoriented X-ray powder diffraction (XRD) patterns of bassanite (A), quartz (B), kaolinite (C), serpentine (D), 1.0 nm halloysite (E), talc (F), mica (G), chlorite (H), smectite (I), feldspar (J) and calcite (K) powders.

間隙率も C_c の違いによる大きな差はみられず、40~50% の範囲にある (Fig. 4B)。吸水率は、30~45% の範囲にあり、混合する粘土鉱物の種類により、違いはみられるが、同種の供試体に着目すると、 C_c の違いによる大きな差はみられない (Fig. 4C)。乾燥状態および飽和状態における供試体の P 波速度は、それぞれ、2.2~2.7 km/s および 1.6~2.5 km/s の範囲にある。また、P 波速度は、飽和状態よりも乾燥状態における供試体のほうが大きく、乾燥状態における石膏-雲母粘土鉱物混合供試体と、飽和状態における石膏-蛇紋石混合供試体および石膏-緑泥石混合供試体を除くと、いずれも、 C_c の増加に伴い、低下する傾向が見られる (Fig. 4D)。ただし、石膏-非粘土鉱物混合供試体では、 C_c の違いによる大きな差は見られない。

3・2 応力-ひずみ曲線と接線弾性係数

乾燥状態および飽和状態における石膏-粘土鉱物混合

供試体の一軸圧縮試験時の応力-ひずみ線図を Fig. 5A に示す。同図には、石膏供試体 ($C_c = 0\%$)、石膏-スメクタイト混合供試体 ($C_c = 30\%$) および石膏-長石混合供試体 ($C_c = 30\%$) の代表的な試験結果のみを示している。

乾燥状態における石膏供試体 ($C_c = 0\%$) および石膏-長石混合供試体 ($C_c = 30\%$) の応力-ひずみ曲線は、軸ひずみの増加に伴い、弾性挙動を示したまま脆性破壊に至る傾向を示す。一方、乾燥状態における石膏-スメクタイト混合供試体と飽和状態におけるいずれの供試体も、最大応力に達した後、破壊に至るまでにひずみの増加が認められる。乾燥状態における一軸圧縮強度の 50% における接線弾性係数を求めると、石膏供試体 ($C_c = 0\%$) および石膏-長石混合供試体 ($C_c = 30\%$) の接線弾性係数は、乾燥状態では 3.8 GPa 前後、飽和状態では 1.4 GPa 前後であり、いずれの含水状態においても長石混合の有無による差は見られない。一方、スメクタイト混合供試体の接線弾性係数は、乾燥状態では 2.8 GPa 程度、飽和状態では 0.1 GPa 程度であり、スメクタイトの混合により、接線弾性係数が低下することがわかる。特に、飽和状態における石膏-スメクタイト混合供試体の接線弾性係数は、乾燥状態に比べて大きく低下することがわかる。いずれの供試体においても、一軸圧縮試験によって得られる応力-ひずみ曲線の傾向と接線弾性係数の値は軟岩と同様である。

乾燥状態および飽和状態における石膏-粘土鉱物混合供試体の C_c と接線弾性係数との関係を Fig. 5B に示す。乾燥状態における接線弾性係数は、石膏-緑泥石混合供試体 ($C_c = 10\%$) の 4.4 GPa が最も大きく、石膏-タルク混合供試体 ($C_c = 30\%$) の 2.0 GPa が最も小さい。一方、飽和状態における接線弾性係数は、石膏-長石混合供試体 ($C_c = 10\%$) の 1.9 GPa が最も大きく、石膏-スメクタイト混合供試体 ($C_c = 30\%$) の 0.1 GPa が最も小さい。飽和状態における接線弾性係数は、石膏-スメクタイト混合供試体のほかに、蛇紋石および緑泥石を除く石膏-粘土鉱物混合供試体において小さい傾向にある。乾燥状態および飽和状態における石膏-粘土鉱物混合供試体の接線弾性係数は、いずれの含水状態も、石膏供試体 ($C_c = 0\%$) よりも大きい値を示す供試体もあるが、 $C_c = 10\% \sim 30\%$ の範囲では、 C_c の増加に伴い、低下傾向がみられる。なお、非粘土鉱物では、飽和状態における石膏-長石混合供試体を除くと、 C_c の増加に伴い、接線弾性係数が一部増大する傾向もみられる。以上のことから、岩質材料に含有する粘土鉱物は、弾性係数の低下を引き起こすとともに、その程度は粘土鉱物の種類によって異なることが言える。

3・3 粘土鉱物混合率と一軸圧縮強度との関係

乾燥状態および飽和状態における石膏-粘土鉱物混合供試体の C_c と一軸圧縮強度との関係を Fig. 6A, B に示す。同図には、それぞれ、4 本以上の供試体の試験結果の平均値をプロットしている。これらの一軸圧縮強度の変動係数はすべて 15% 以下であり、そのうちの半数以上が 10% 以下である。

Fig. 4 Physical properties of gypsum specimen mixed with clay or non-clay mineral (A: density, B: effective porosity, C: water absorption, D: P-wave velocity).

Fig. A $\cdots$ Gypsum specimen ($C_c=0\%$), Mixed samples ($C_c=30\%$, — Smectite, — Feldspar)
 Fig. B $\leftarrow$ Gypsum specimen ($C_c=0\%$), Mixed samples (Δ Kaolinite, $\blacksquare$ Serpentine, $\circ$ 1.0 nm halloysite, $\square$ Talc, $\diamond$ Mica, $\blacktriangle$ Chlorite, $\bullet$ Smectite, $\times$ Feldspar, $+$ Calcite)

Fig. 5 One example of stress-strain curve on the uniaxial compressive strength test of gypsum specimen mixed with smectite 30% or feldspar 30% (A) and tangent modulus of elasticity (B). Solid and dashed lines in Fig. B are dry and saturated conditions, respectively.

乾燥状態および飽和状態における石膏供試体 ($C_c=0\%$) の一軸圧縮強度は、それぞれ、18.2 MPa および 7.7 MPa であり、飽和状態における供試体の方が小さい。石膏-粘土鉱物混合供試体の一軸圧縮強度は、いずれの含水状態においても $C_c=10\sim30\%$ の範囲では、 C_c の増加に伴い、低下傾向がみられ、その低下の様相に大きな差は見られない (Fig. 6A)。一方、石膏-非粘土鉱物混合供試体の一軸圧縮強度は、 C_c の増加に伴い、乾燥状態では増加傾向を示し、飽和状態では大きな違いは見られず、石膏-粘土鉱物混合供試体の試験結果とは異なる傾向がみられた (Fig. 6B)。このことから、粘土鉱物の含有が岩質材料の強度低下に関係することは明らかである。乾燥状態および飽和状態における一軸圧縮強度は、いずれの含水状態においても石膏-緑泥石混合供試体 ($C_c=10\%$) が最も大きく、それぞれ 21.0 MPa および 8.7 MPa であった。一方、乾燥状態および飽和状態の一軸圧縮強度の最小値

は、いずれも $C_c=30\%$ において見られ、それぞれ、石膏-タルク混合供試体の 8.8 MPa および石膏-スメクタイト混合供試体の 1.6 MPa であった。これらの供試体の一軸圧縮強度は、石膏供試体 ($C_c=0\%$) に比べて、乾燥状態ではおよそ 50% 低下しており、飽和状態ではおよそ 80% も低下することがわかった。 $C_c=10\sim30\%$ の範囲における石膏-粘土鉱物混合供試体における一軸圧縮強度の最大値と最小値の差は、いずれの C_c においても、乾燥状態では 9 MPa 程度、湿潤状態では 5 MPa 程度であり、粘土鉱物の種類の違いによって、一軸圧縮強度に差があることがわかる。ゆえに、含有する粘土鉱物の種類は岩質材料の強度低下に影響を及ぼす要因の一つであり、今後、粘土鉱物を含む地盤材料の力学特性評価をする際には、粘土鉱物の種類についても注意する必要があると言える。

なお、乾燥状態における $C_c=10\%, 20\%$ において、一部の供試体の一軸圧縮強度が石膏供試体 ($C_c=0\%$) の一軸

Fig. 6 Relationships between clay or non-clay mineral content and uniaxial compressive strength (A, B), and strength change ratio (C) of test of gypsum specimen mixed with clay or non-clay mineral. Solid and dashed lines in Figs. A and B are dry and saturated conditions, respectively.

圧縮強度よりも大きく、これについては、五味・岡本⁷⁾の実験においても同様の傾向を示している。このことについては、後述する粘土鉱物の層間の結合力が関係していると考えられるが、詳細については今後の課題である。

3・4 粘土鉱物の層間結合力和一軸圧縮強度との関係

乾燥状態における石膏-粘土鉱物混合供試体の一軸圧縮強度 (Fig. 6A) に注目すると、強度分布の特徴として、ある特定の強度値に分布し、それらは大きく 3 つに分布しているようである。すなわち、 $C_c = 10\%$ を例に挙げると、緑泥石、雲母粘土鉱物およびスメクタイトは、一軸圧縮強度が 20 MPa 程度、カオリナイト、蛇紋石および 1.0 nm ハロイサイトは一軸圧縮強度が 15 MPa 程度、タルクは一軸圧縮強度が 12 MPa 程度の強度値に特徴的に分布する。便宜上、強度値ごとに Group I~III の 3 つの分類する。Group I は緑泥石、雲母粘土鉱物およびスメクタイト、Group II はカオリナイト、蛇紋石および 1.0 nm ハロイサイト、Group III はタルクである。粘土鉱物混合率が変化してもこれらの Group 内の粘土鉱物の組合せに変化はない。各 Group 内の粘土鉱物の特徴について Fig. 2 に基づいて記述するとともに、一軸圧縮強度との関係について考察する。Group I における粘土鉱物は、単位層同士が主としてイオン結合により結びついており、層間には陽イオンまたは水酸化物シートを持つ 2:1 型構造の粘土鉱物である (Fig. 2)。層間に働く力 (結合力) は Fig. 2 に示すように、層電荷によって表すことができる。この層電荷の大きさは鉱物の物性に大きく関連する⁶⁾といわれている。Group I における粘土鉱物では、緑泥石、雲母粘土鉱物、スメクタイトの順に層電荷が大きいが、これらの粘土鉱物を含む供試体の一軸圧縮強度に大きな差はないことから、層電荷の大きさは一軸圧縮強度には大きな影響を与えるものではないようである。ただし、これらの試験結果は 1 回の乾燥によって得られたものであり、スメクタイトのように湿潤時に層間に水を取り込んで膨潤、乾燥時に脱水によって収縮し、材料自体を劣化させるような

Fig. 7 XRD patterns of 1.0 nm halloysite (A, identical to Fig. 3E) and 0.7 nm halloysite (B).

粘土鉱物は、おそらく、乾湿繰り返し後に試験を実施すると、同じ乾燥状態でも緑泥石や雲母粘土鉱物混合供試体に比べて強度は小さくなると考えられる。Group II における粘土鉱物は、層電荷が 0 であり、水素結合によって形成される 1:1 型構造の粘土鉱物である (Fig. 2)。このうち、1.0 nm ハロイサイトの層間には 1 枚の水分子層が挟まれ、層間に働く結合力は弱い⁶⁾。層間の水分子は 70°C で容易に脱水し、底面間隔も 1.0 nm から 0.7 nm になる (Fig. 7)。それゆえ、1.0 nm ハロイサイト混合供試体の一軸圧縮強度とカオリナイトや蛇紋石混合供試体との間に大きな差が見られなかったと考えられる。Group III における粘土鉱物は、層電荷が 0 であり、ファンデルワールス力によって形成される 2:1 型構造の粘土鉱物である (Fig. 2)。

以上のように、層間に働く化学結合の種類の違いによって、乾燥状態における一軸圧縮強度に差が見られた。一般に、層間に働く結合力は、イオン結合、水素結合、ファンデルワールス力の順に大きい。本実験で得られた一軸圧縮強度の違いも、これらの結合力の大きさを反映している。すなわち、Group I (主にイオン結合)、Group II (水素結合)、Group III (ファンデルワールス力) の順に一軸圧縮強度は大きい結果となった。パイロフィライトおよびパーミキュライトについては、本研究で検討していないが、同様の実験を行った場合、それぞれ、Group III および Group I と同様の強度を示すと考えられる。

なお、飽和状態については、乾燥状態と同様の傾向は

見られなかった。これは、含水による層間の結合力の低下に加えて、粘土鉱物は他の鉱物に比べて比表面積が大きいことや、陽イオン交換時の水和エネルギー、さらに、間隙水圧等の影響が複雑に関係するため、乾燥状態と同様な傾向が見られなかったと考えられる。

3・5 粘土鉱物混合率と強度変化率との関係

Fig. 6A, B に示されるように、供試体の含水状態により、一軸圧縮強度に差が見られた。そこで、飽和状態における一軸圧縮強度が乾燥状態の強度よりどれだけ変化しているかを示すため、強度変化率 SCR を式(1)によって算出した。

$$SCR = \frac{S_{csat} - S_{cdry}}{S_{cdry}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

ここで、添え字の dry および sat は乾燥状態および飽和状態における供試体の一軸圧縮強度 S_c を表す。 SCR が負の場合は、乾燥状態に比べて飽和状態における供試体の一軸圧縮強度 S_c が低下していることを意味する。

C_c と SCR との関係を図 6C に示す。石膏供試体 ($C_c = 0\%$) の SCR は -57.5% であり、石膏-長石混合供試体 ($C_c = 10\%$) の -45.6% が最も小さく、石膏-スメクタイト混合供試体 ($C_c = 30\%$) の -89.7% が最も大きい。 C_c の増加に伴い、 SCR が負の方向に大きくなる傾向が見られ、粘土鉱物の種類によって、 SCR の値は異なる。特に、非粘土鉱物である長石および方解石、蛇紋石や緑泥石混合供試体では、 SCR が石膏供試体 ($C_c = 0\%$) と同程度であるか、または、 C_c の増加による SCR に大きな変化は見られない。一方、カオリナイト、 1.0 nm ハロイサイト、雲母粘土鉱物、スメクタイト混合供試体では SCR が他の粘土鉱物混合供試体よりも大きい。これら粘土鉱物の種類による SCR の違いは、Kohno & Maeda⁵⁾の結果と整合的であり、カオリナイト、 1.0 nm ハロイサイト、雲母粘土鉱物、スメクタイト等を含有する岩質材料は、強度低下に及ぼす含水の影響が他の粘土鉱物に比べて大きいことがわかる。これは、粘土鉱物の比表面積の大きさが異なることや、層間への水の浸透量も少なからず影響しているものと推察されるが、前述のように、飽和状態での一軸圧縮強度においては、粘土鉱物の性質に加え、間隙水圧等の影響も含まれており、これについては、今後、総合的に検討し、詳細を明らかにする必要がある。

4 結 言

本研究では、石膏と粘土鉱物を様々な割合で混合した人工軟岩供試体を作製し、粘土鉱物の種類・含有量の違いによって、物性値と一軸圧縮強度がどのように変化するかについて検討した。その結果、石膏-粘土鉱物混合供試体の P 波速度、一軸圧縮強度および乾湿による強度変化率は、含有する粘土鉱物の種類・含有量によって異なることがわかった。特に、乾燥状態における石膏-粘土鉱物混合供試体の一軸圧縮強度は、最大値と最小値で 9 MPa 程度の差がみられ、粘土鉱物の種類の違いによ

って、一軸圧縮強度に大きな差がみられた。本研究では、この一軸圧縮強度の差を粘土鉱物の構造の違いに基づいて考察した。飽和状態における一軸圧縮強度に与える粘土鉱物の種類や含有量の影響については課題を残すが、乾燥状態における一軸圧縮強度は、含有粘土鉱物が緑泥石、雲母粘土鉱物およびスメクタイト（イオン結合）、カオリナイト、蛇紋石および 1.0 nm ハロイサイト（水素結合）、タルク（ファンデルワールス力）の順に大きい結果となった。これは、含有粘土鉱物の層間に働く化学結合の種類、すなわち、結合力の大小関係を反映するような結果であった。

以上の結果は、含有粘土鉱物の種類は岩質材料の強度低下に影響を及ぼす要因の一つであり、今後、粘土鉱物を含む地盤材料や岩質材料の力学特性評価をする上で、貴重な知見になると考えられる。

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費（課題番号：16K21174）の助成を受けて実施したものである。また、実験には、鳥取大学工学部土木工学科卒業生重松祐汰君の協力を得た。記して、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) S. Kahraman, A. S. Aloglu, B. Aydin and E. Saygin, "The effect of clay content on the strength of clay-bearing rocks", Proceedings of 9th Asian Rock Mechanics Symposium, RMC4-P174 (2016).
- 2) M. Kohno and H. Maeda, "Relationship between cylinder (longitudinal) point load strength and uniaxial compression strength for smectite-bearing fine tuffs in a soft and semi-hard rock boundary area: Example of the Upper Miocene Ikutawara Formation from the Ikutahara-Minami landslide area", Landslides - Journal of the Japan Landslide Society, Vol.47, No.1, pp.17-25 (2010).
- 3) R. Ishida and S. Tsutsumi, "Physical properties of smectite bearing soft rocks (Part 2) -Texture and swelling pressure-", Journal of the Clay Science Society of Japan, Vol.34, No.1, pp.22-34 (1994).
- 4) D. Nakamura, T. Goto, Y. Ito, S. Yamashita, T. Kawaguchi and S. Kataoka, "Study on the differences in strength of rocks under dry and wet conditions", Technical Report of the 52nd Annual Meeting of the Hokkaido Branch, Japanese Geotechnical Society, No.52, pp.157-164 (2012).
- 5) M. Kohno and H. Maeda, "Relationship between point load strength index and uniaxial compressive strength of hydrothermally altered rocks", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.50, pp.147-157 (2012).
- 6) H. Shirozu, "Clay Mineralogy: The basis of clay science (New edition)", pp.1-185 (2012) Asakura Publishing.
- 7) S. Gomi, and M. Okamoto, "Strength of artificial soft rocks using clays", Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.44, No.5, pp.21-23 (1996).