スメクタイトを含む岩石の 円柱(縦)点載荷強さ試験方法

河野 勝宣¹・前田 寛之²・鹿毛 一平³・小竹 純平⁴・仁井 太陽⁵

¹学生会員 北見工業大学 大学院工学研究科 寒冷地・環境・エネルギー工学専攻
(〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail : kohno-m@k-hokkai.co.jp

²正会員 北見工業大学教授 工学部 社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

E-mail : maedahr@mail.kitami-it.ac.jp

³久留米広域消防本部 (〒830-0003 福岡県久留米市東櫛原町999番地1)

⁴株式会社開発調査研究所 (〒062-0054 北海道札幌市豊平区月寒東4条10丁目7番1号)

⁵パナソニック電工テクノストラクチャー株式会社 (〒571-8686 大阪府門真市大字門真1048番地)

本論文は、スメクタイト含有量の異なる三種類の凝灰岩類を用いた、強制乾燥状態 ($105 \pm 3^\circ\text{C}$, $80 \pm 3^\circ\text{C}$, $60 \pm 3^\circ\text{C}$ および $40 \pm 3^\circ\text{C}$ で強制乾燥した状態) および強制湿潤状態における円柱(縦)点載荷強さ試験結果に基づいて、スメクタイトを含む岩石の乾燥方法および飽和方法と、円柱(縦)点載荷強さ試験方法を明らかにした。岩石の点載荷強さに関わる研究の場合、スメクタイトを含む岩石の強制乾燥状態における点載荷強さを正確に求めるためには、供試体を 60°C 以下で4日以上一定質量になるまで乾燥することが望ましく、また、それらの強制湿潤状態における点載荷強さを正確に求めるためには、供試体を水に15日以上一定質量になるまで浸すことが望ましいと考えられる。

Key Words : axial point load strength test, smectite-bearing rock, swelling clay mineral, forced dry-state, forced wet-state

1. 緒 言

ダム基礎岩盤については、一軸圧縮強さが 80 MPa 以上を硬岩、 $80\sim 20\text{ MPa}$ のものを中硬岩、 20 MPa 以下を軟岩と分類される¹⁾。一方、地質学の分野では、硬岩は主に火成岩、変成岩および先新生代の堆積岩であるのに対して、軟岩や中硬岩は新生代の堆積岩と、硬岩が熱水変質作用や風化作用を受けて熱水変質岩や風化岩となったものである²⁾。

軟岩および中硬岩地盤は、硬岩地盤に比べて力学的にも物理的および化学的にも相対的に弱いため、工学的な様々な問題を生じ³⁾、地すべりなどの災害の場になることも少なくない。そのため、軟岩および中硬岩の強さは、岩盤内構造物の安定評価、建設工事の安全確保、熱水変質岩地すべり²⁾や風化岩地すべりメカニズムの解明上、最も基礎的なデータとして、極めて重要である。

新鮮な岩石(変質作用を受けていない岩石)や熱水変質岩、風化岩などの変質岩の強さは、一般に、一軸圧縮試験などの室内試験によって評価される。最近では、

ポータブル点載荷強さ試験機を用いたフィールドでの不定形試料における点載荷強さから一軸圧縮強さを推定しようとする試みも多く見られる。また、1970~80年代における研究では、一軸圧縮強さは円柱供試体における点載荷強さの12.3~15.0倍⁴⁾、20~25倍⁵⁾および24倍^{7,8)}であることが報告されている。しかし、いずれの事例も硬岩には成立するが、軟岩や中硬岩では成立しない恐れがあり、また、載荷方向、供試体の形状や寸法、点載荷強さの計算方法などが統一されていない。また、各機関で用いられる点載荷強さから一軸圧縮強さへの換算係数は、岩種や岩石の変質の度合いの影響を大きく受けるため、実用的には、同種の岩石供試体に対して一軸圧縮試験をおこなって決定することが望ましいとされる⁹⁾。点載荷強さを岩石の一軸圧縮強さと直接的に関係づけるには未だ不明確の要素が多く¹⁰⁾、岩石の強さ評価は、前述のように、一軸圧縮試験などの室内試験に求める場合が多い。しかし、フィールドにおける岩体には断層や節理やクラックなどがあるため、露頭から一軸圧縮試験片を作製できる大きさの試料を得られないこともある。また、スメ

クタイトや混合層粘土鉱物などの膨潤性粘土鉱物を含む岩石では、成形中に試料が破壊し、供試体を作製できないこともある。このようなときでも、点載荷強さ試験は、一軸圧縮試験に比べて小さな試料で、岩石の強さを簡便かつ迅速に評価できるので、特に膨潤性粘土鉱物を含む岩石においても非常に有効な試験法である。

岩石の点載荷強さ試験方法は、ISRM Commission (1985)¹¹⁾やASTM Standards (2001)¹²⁾をはじめとする多くの指針^{3), 9), 13)}などで基準・規格化されている。点載荷強さ試験は、一般に、自然含水状態でおこなうことが望ましいが、点載荷強さに関わる研究の場合には、乾燥状態および飽和状態の含水状態でおこなう方が再現性もあり、有効な場合もある。ISRM 指針(岩の力学連合会, 1982)¹⁴⁾では、試料の乾燥方法について、試料を $105 \pm 3^\circ\text{C}$ で24時間以上炉乾燥としている。しかし、熱水変質作用や風化作用を受けた岩石(主に軟岩や中硬岩)のうち、変質鉱物としてスメクタイトや混合層粘土鉱物などの膨潤性粘土鉱物を含む岩石をこの乾燥温度で乾燥すると、膨潤性粘土鉱物の結晶水が脱水するため、その結晶水が脱水しない状態における岩石本来の正確な点載荷強さが得られない可能性がある。土木工学分野では、その研究過程の中で、例えば、一軸圧縮試験などによって岩石の強さを評価する際、岩石中に膨潤性粘土鉱物を含んでいる可能性があるにも関わらず、供試体を前述の $105 \pm 3^\circ\text{C}$ で乾燥し、試験をおこなっている場合も少なくない。膨潤性粘土鉱物の結晶水が岩石の強さを決定しているわけではないが、試験結果が膨潤性粘土鉱物の結晶水を考慮した岩石本来の強さを得ているかは明らかではない。一方、試料の飽和方法については、試料を真空中で少なくとも1時間浸水としているが、これは装置の違いによって、試料が必ずしも飽和状態にならないことや、数多くの試料を一度に飽和状態にできないことなどの難点がある。さらに、軟岩を真空中で浸水すると、極めて軟質な岩石では、劣化の原因になる可能性がある。前述の指針^{3), 9), 11), 12), 13)}などでは、膨潤性粘土鉱物を含む岩石に対する特別な乾燥方法および飽和方法についての規定はない。それゆえ、膨潤性粘土鉱物を含む岩石の乾燥方法および飽和方法が点載荷強さの測定結果に与える影響を明らかにし、膨潤性粘土鉱物を含む岩石の乾燥方法および飽和方法を新たに決定する必要がある。

本論文では、スメクタイト含有量が異なる三種類の凝灰岩類を用いて、強制乾燥状態($105 \pm 3^\circ\text{C}$, $80 \pm 3^\circ\text{C}$, $60 \pm 3^\circ\text{C}$ および $40 \pm 3^\circ\text{C}$ で強制乾燥した状態)および強制湿潤状態における円柱(縦)点載荷強さ試験結果を比較検討し、スメクタイトを含む岩石の乾燥方法および飽和方法と、円柱(縦)点載荷強さ試験方法を提案する。

図-1 凝灰岩類の不定方位(一部定方位)粉末X線回折パターン。A: スメクタイトを少量含む軽石凝灰岩(試料番号 080608), B: スメクタイトを極微量含む細粒凝灰岩(試料番号 070521), C: スメクタイトを含まない細粒凝灰岩(試料番号 080615)。鉱物名略号 Chl: クローライト, Cpt: クリノタイロライト, Fld: 長石, Ill: イライト, Mor: モルデナイト, Qtz: 石英, Smc: スメクタイト。

2. 試料

試料は、北海道釧路総合振興局弟子屈町奥春別地域南部のシケレベンベツ川流域における上部中新統シケレペ層に広く発達する熱水変質帯のうち、モルデナイト帯軽石凝灰岩および細粒凝灰岩であり、ハンマーを使って採集した。これらの試料は粉末X線回折データによると、スメクタイトを少量含むもの、スメクタイトを極微量含むものおよびスメクタイトを含まないものに三分される(図-1)。河野、前田¹⁵⁾を参考にすると、スメクタイトを少量含む試料およびスメクタイトを極微量含む試料のスメクタイト含有量はそれぞれ5~10 wt%および1 wt%未満であると推定される。

スメクタイトを少量含む試料（試料番号 080608）は、肉眼的にクリーム色を呈し、多量のモルデナイトおよび少量の石英、長石、スメクタイト、クリノタイロライトなどからなる軽石凝灰岩である（図-1A）。スメクタイトを極微量含む試料（試料番号 070521）は、肉眼的に淡緑灰色を呈し、多量のモルデナイトおよび少量の石英、長石、スメクタイト、クローライト（緑泥石）、イライトなどからなる細粒凝灰岩である（図-1B）。スメクタイトを含まない試料（試料番号 080615）は、肉眼的にクリーム色を呈し、多量のモルデナイトおよび少量の石英、長石などからなる細粒凝灰岩である（図-1C）。ここで、スメクタイトを極微量含む試料およびスメクタイトを含まない試料とは、不定方位粉末X線回折データにおいて、スメクタイトの 1.46 nm の回折線が確認できない（図-1B, C）が、定方位データでは、それぞれ、それが確認できるものおよび確認できないもののことである（図-1B, C）。

これらの試料の密度、吸水率および有効間隙率を表-1 に示す。本研究では、吸水率および有効間隙率は、それぞれ、供試体の湿潤質量と乾燥質量との差の乾燥質量に対する割合および試料外部と通じている測定可能な供試体の全体積に対する空隙の比と定義¹⁶⁾し、次式によって算出した。

$$Q = \frac{M_{sat} - M_d}{M_d} \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$n = \frac{M_{sat} - M_d}{M_{sat} - M_w} \times 100 (\%) \quad (2)$$

ここで、 Q は供試体の吸水率、 n は供試体の有効間隙率、 M_{sat} は供試体の湿潤質量、 M_d は供試体の乾燥質量、 M_w は供試体の水中質量である。

代表的な軟岩である大谷石の乾燥密度、吸水率および有効間隙率は、それぞれ、1.350 g/cm³、29.20 % および 39.80 % であり¹⁷⁾（表-1），いずれの試料も大谷石と比較すると、乾燥密度が小さく、吸水率および有効間隙率が大きい。

3. 研究方法

採集した岩石を点載荷強さ試験供試体形状に成形し、乾燥質量および湿潤質量変化の測定と、円柱(縦)点載荷強さ試験をおこなった。なお、試験は全て実験室内でお

表-1 試料の物性値

Sample No.	Dry density (g/cm ³)	Saturated density (g/cm ³)	Water absorption (%)	Effective porosity (%)
080608	1.043	1.605	54.52	54.93
070521	1.172	1.690	43.70	50.69
080615	1.217	1.739	40.15	48.57
Oya stone	1.350	-	29.20	39.80

図-2 円柱(縦)点載荷強さ試験の供試体形状

こない、試験期間中の室内温度および相対湿度はそれぞれ約 20℃ および約 40% である。

(1) 供試体の作製方法

点載荷強さ試験における供試体形状は、円柱(横)、円柱(縦)、直方体、不規則塊状体および球状体がある^{9) 11)}。ここで、円柱(縦)および円柱(横)供試体とは、試験時において、それぞれ、端面に垂直および平行な方向に載荷する供試体形状のことである。本研究で点載荷強さ試験に用いた試料は、直径 50 mm 程度、高さ 20 mm 程度の円柱形に成形し、供試体とした（図-2）。この形状は、成形が容易で、ボーリングコアを活用できる利点がある。この寸法は図-2中の 0.3 $W < D < W$ の条件^{9) 11)}を満足する。

成形には、室内用ボーリングマシーンおよびダイヤモンドカッターを使用した。成形した供試体は、各試験の測定結果に大きな影響を与えるようなクラックを含まないもの、肉眼的に風化の程度が同じ試料を選び、各試験に必要な数量を用意した（表-2および表-3）。

(2) 供試体の乾燥質量および湿潤質量の測定

ここでは、供試体の乾燥温度および乾燥時間と、水に浸す時間を決めるため、供試体を 105±3℃、80±3℃、60±3℃ および 40±3℃ で乾燥したときの乾燥質量と、水に浸したときの湿潤質量を測定し、それぞれの質量変

表-2 乾燥質量および湿潤質量測定の供試体個数

Purpose of each examination	Number of specimen		
	080608	070521	080615
Max Temp.			
To reveal the relationship between drying time and change in dry mass of a specimen dried in an electric oven	105±3℃	5	5
	80±3℃	5	5
	60±3℃	5	5
	40±3℃	5	5
To reveal the relationship between immersion time and change in wet mass of a specimen saturated with water	5	5	5

表-3 供試体個数および円柱(縦)点載荷強さとその変動係数

Sample No.	State of moisture content	Number of specimen	Axial point load strength test	
			Is (MPa)	Cv (%)
080608	Forced dry-state (105±3℃)	30	1.44-1.88 (Avg. 1.70)	6.1
	Forced dry-state (80±3℃)	30	1.34-1.76 (Avg. 1.57)	6.1
	Forced dry-state (60±3℃)	30	0.71-1.59 (Avg. 1.35)	15.4
	Forced dry-state (40±3℃)	30	0.49-1.54 (Avg. 1.34)	16.1
	Forced wet-state	30	0.30-0.62 (Avg. 0.46)	18.4
070521	Forced dry-state (105±3℃)	10	2.06-2.66 (Avg. 2.36)	7.3
	Forced dry-state (80±3℃)	10	1.71-2.35 (Avg. 1.96)	9.9
	Forced dry-state (60±3℃)	10	1.07-1.73 (Avg. 1.43)	14.1
	Forced dry-state (40±3℃)	10	1.07-1.80 (Avg. 1.41)	14.0
	Forced wet-state	10	1.06-1.65 (Avg. 1.32)	14.1
080615	Forced dry-state (105±3℃)	30	2.26-3.92 (Avg. 2.84)	14.3
	Forced dry-state (80±3℃)	30	2.25-3.75 (Avg. 2.82)	14.0
	Forced dry-state (60±3℃)	30	2.26-3.64 (Avg. 2.82)	13.7
	Forced dry-state (40±3℃)	30	2.25-3.62 (Avg. 2.83)	13.8
	Forced wet-state	30	0.61-1.11 (Avg. 0.85)	17.2

Is : axial point load strength, Cv : coefficient of variation of axial point load strength, Avg. : average.

化を検討した。本研究では、湿潤質量に用いた水は蒸留水である。なお、乾燥質量および湿潤質量の測定は、0.01 g の分解能を持つ電子天秤を用いておこなった。

a) 乾燥質量の測定

乾燥質量を測定する際、供試体の初期含水量が異なるため、乾燥時間も変わるため、乾燥前の含水状態が飽和状態の供試体で検討した。まず、飽和状態の供試体の初期質量を測定し、その後、供試体を 105±3℃ に設定した乾燥炉に入れ、3 時間、6 時間、12 時間、24 時間、以後 1 日ごとの乾燥質量を記録した。乾燥質量に変化がなくなった段階で試験を終了した。一般に、岩石の乾燥質量の測定は、乾燥した試料が空気中の水分を吸水しないようにするためにデシケータなどで試料を室温まで冷ましてからおこなわれるが¹⁸⁾、本研究では、乾燥炉から出した直後に乾燥質量の測定をおこなった。乾燥温度 80±3℃、60±3℃ および 40±3℃ のケースも同様に乾燥質量の測定をおこなった。供試体は、各乾燥温度において、各試料 5 個ずつの合計 60 個用意した (表-2)。

b) 湿潤質量の測定

供試体を強制湿潤状態にするため、水に浸す方法を採用した。この方法は、真空中で浸水することによって、浸水崩壊の恐れがあるスメクタイトを含む岩石試料の場合に有効であると考えられる。まず、水に浸す前の供試体の初期質量を測定し、その後、供試体を水に浸し、3 時間、6 時間、12 時間、24 時間、以後 1 日ごとの湿潤質量を記録した。湿潤質量に変化がなくなった段階で試験を終了した。湿潤質量は、少し湿ったタオルで供試体表面の水分を拭き取って測定した。なお、本研究における水の水温は 20℃ である。供試体は、各試料 5 個ずつの合計 15 個用意した (表-2)。

(3) 円柱(縦)点載荷強さ試験

a) 点載荷強さの算出方法

点載荷強さ試験は、球面状の突起 (載荷コーン) の 2 点間で供試体を挟み、載荷することによって供試体を破壊させる試験であり、点載荷強さは次式によって算出される^{3), 9), 11), 12)}。

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (3)$$

ここで、 I_s は点載荷強さ、 P は破壊荷重、 D_e は等価コア径である。等価コア径とは、二つの載荷点を通る供試体の最小断面積と等しい断面積を持つコアの直径であり (図-2)、次式によって算出される^{3), 9), 11), 12)}。

$$D_e^2 = \frac{4WD}{\pi} \quad (4)$$

ここで、 D_e は等価コア径、 W は供試体直径、 D は載荷点間隔である。軟岩や中硬岩供試体において載荷コーンの貫入により載荷点間隔 D が小さくなった場合には、点載荷強さの算出において破壊時の載荷点間隔 D' を用いる⁹⁾。それゆえ、本研究では、破壊時の載荷点間隔 D' を次式によって算出した。

$$D' = D - x \quad (5)$$

ここで、 D' は破壊時の載荷点間隔、 D は載荷点間隔、 x は供試体における載荷コーンの貫入量である。載荷点間隔 D はノギスを用いて測定し、載荷コーンの貫入量 x はダイヤルゲージを用いて測定した。

図-3 点荷重強さ試験機および油圧式万能試験機

b) 試験装置

試験装置は、供試体を挟む載荷コーン、載荷コーンを保持するための載荷フレームおよび供試体における貫入量を測定するためのダイヤルゲージから構成される点荷重強さ試験機と、載荷荷重を測定するための油圧式万能試験機を使用した（図-3）。載荷コーンの材質はダイス鋼（SKD）であり、十分な剛性を持つものである。また、試験における載荷コーンの形状は、頂角 60° 、先端半径 5 mm であり、ISRM Commission (1985)¹¹⁾で規定されているものと同一の形状である。点荷重強さ試験における載荷速度は、 $10\sim 60$ 秒間で破壊に至る程度⁹⁾とされるが、点荷重強さに大きな影響を与えないように、一定速度 (100 N/sec) で載荷した。

c) 供試体

供試体は、強制乾燥状態 4 ケースおよび強制湿潤状態において、スメクタイトを少量含む試料およびスメクタイトを含まない試料で各 30 個ずつと、スメクタイトを極微量含む試料で各 10 個ずつの合計 350 個用意した（表-3）。

4. 試験結果および考察

(1) 乾燥質量の変化

各試料の乾燥温度 $105\pm 3^\circ\text{C}$ 、 $80\pm 3^\circ\text{C}$ 、 $60\pm 3^\circ\text{C}$ および $40\pm 3^\circ\text{C}$ における乾燥質量の測定結果を図-4に示す。

いずれの試料も乾燥温度 $105\pm 3^\circ\text{C}$ では乾燥日数 1 日後と 2 日後、 $80\pm 3^\circ\text{C}$ では乾燥日数 2 日後と 3 日後、 $60\pm 3^\circ\text{C}$ では乾燥日数 3 日後と 4 日後、 $40\pm 3^\circ\text{C}$ では乾燥日数 4 日後と 5 日後の乾燥質量の変化がそれぞれ見られず、乾燥温度の違いによって乾燥日数が異なっている（図-4）。

乾燥質量の測定をおこなった供試体個数は各 5 個ずつであるが（表-2），一般に、点荷重強さ試験は 10 個以上の供試体個数でおこなわれることが多く^{3), 9), 11), 13)}，乾燥時間は、複数の供試体を同時に乾燥すれば、乾燥炉の容量や性能によって異なり、また、乾燥前の供試体の含水状態が飽和状態であれば、最も長くなり、乾燥時間を厳密に決定することは難しい。したがって、同時乾燥供試体個数や乾燥炉の違いによっても乾燥時間が異なることから、ここでは、供試体を $105\pm 3^\circ\text{C}$ で 1 日以上、 $80\pm 3^\circ\text{C}$ で 2 日以上、 $60\pm 3^\circ\text{C}$ で 3 日以上および $40\pm 3^\circ\text{C}$ で 4 日以上一定質量になるまで乾燥した状態をスメクタイトを含む試料の強制乾燥状態と呼ぶことにする。

(2) 湿潤質量の変化

各試料の湿潤質量の測定結果を図-4に示す。

スメクタイトを少量含む試料では湿潤日数 12 日後と 13 日後、スメクタイトを極微量含む試料およびスメクタイトを含まない試料では湿潤日数 14 日後と 15 日後の湿潤質量の変化がそれぞれ見られず、試料の種類によって湿潤時間が異なっている（図-4）。このことから、モルデナイト帯軽石凝灰岩および細粒凝灰岩以外の熱水変質岩についても、湿潤質量の測定をおこなった（図-5）。ここで使用した試料は、アルーナイトー石英帯デイサイト、ハロイサイト帯軽石凝灰岩および凝灰質礫岩、プロピライト帯中粒凝灰岩、クローライト／スメクタイト混合層鉱物帯細粒凝灰岩、スメクタイト帯細粒凝灰岩、ローモンタイト帯中粒凝灰岩、ヒューランダイト帯火山礫凝灰岩およびクリノタイロライト帯細粒凝灰岩である。なお、これらの試料は、アルーナイトー石英帯デイサイトを除いて、膨潤性粘土鉱物を含み、弟子屈町奥春別地域南部から採集した。

図-4 供試体の乾燥質量および湿潤質量の変化

図-5 様々な熱水変質岩供試体の湿潤質量の変化

ローモンタイト帯中粒凝灰岩では湿潤日数 9 日後と 10 日後、スメクタイト帯細粒凝灰岩とハロイサイト帯軽石凝灰岩および凝灰質礫岩では湿潤日数 10 日後と 11 日後、クローライト／スメクタイト混合層鉱物帯細粒凝灰岩では湿潤日数 13 日後と 14 日後、それ以外の試料では湿潤日数 15 日後と 16 日後の湿潤質量の変化が見られなかった。浸水直後の湿潤質量の変化は、岩種の違

いによる差は見られず、また、岩種の違いや熱水変質帯と湿潤日数との関係についての差は特に見られないが、湿潤日数は、試料の種類によって異なる。したがって、最も湿潤日数の長い試料を基準として、供試体を水に 15 日以上一定質量になるまで浸した状態をスメクタイトを含む試料の強制湿潤状態と呼ぶことにする。

(3) 円柱(縦)点載荷強さ

強制乾燥状態 4 ケース、供試体を $105 \pm 3^\circ\text{C}$ で 1 日以上、 $80 \pm 3^\circ\text{C}$ で 2 日以上、 $60 \pm 3^\circ\text{C}$ で 3 日以上および $40 \pm 3^\circ\text{C}$ で 4 日以上一定質量になるまで乾燥した状態（以下、それぞれ「 105°C 、 80°C 、 60°C および 40°C 乾燥状態」と記す。）と、強制湿潤状態（供試体を水に 15 日以上一定質量になるまで浸した状態）における円柱(縦)点載荷強さを図-6および表-3に示す。

スメクタイトを少量含む試料の 105°C 、 80°C 、 60°C および 40°C 乾燥状態と、強制湿潤状態における供試体個数 30 個の点載荷強さの平均値は、それぞれ 1.70 MPa, 1.57 MPa, 1.35 MPa および 1.34 MPa と、0.46 MPa であり、各乾燥温度における強制乾燥状態の方が強制湿潤状態よりも明らかに大きい。また、各乾燥温度における強制乾燥状態の供試体の点載荷強さは、 105°C 乾燥状態で最も大きく、次いで 80°C 乾燥状態が大きく、 60°C および 40°C 乾燥状態ではほぼ同じである。

スメクタイトを極微量含む試料の 105°C 、 80°C 、

図-6 強制乾燥状態および強制湿潤状態における円柱(縦)点載荷強さ

図-7 強制乾燥状態および強制湿潤状態における円柱(縦)点載荷強さの変動係数

60 °C および 40 °C 乾燥状態と、強制湿潤状態における供試体個数 10 個の点載荷強さの平均値は、それぞれ 2.36 MPa, 1.96 MPa, 1.43 MPa および 1.41 MPa と、1.32 MPa であり、スメクタイトを少量含む試料と同様の傾向が見られる。

スメクタイトを含まない試料の 105 °C, 80 °C, 60 °C および 40 °C 乾燥状態と、強制湿潤状態における供試体個数 30 個の点載荷強さの平均値は、それぞれ 2.84 MPa, 2.82 MPa, 2.82 MPa および 2.83 MPa と、0.85 MPa であり、各乾燥温度における強制乾燥状態の方が強制湿潤状態よりも明らかに大きい。各乾燥温度における強制乾燥状態の供試体の点載荷強さはいずれの乾燥温度においても有意な差は見られない。

スメクタイトを少量および極微量含む試料の 105 °C, 80 °C と、60 °C および 40 °C 乾燥状態のそれぞれにおいて強さの違いが見られたのは、試料に含まれるスメクタイトの結晶水が 105 ± 3 °C および 80 ± 3 °C では脱水されるが、60 ± 3 °C および 40 ± 3 °C では脱水されないため、点載荷強さは、より高温の乾燥状態では大きく、より低温の乾燥状態では小さくなったと考えられる。また、スメクタイトを少量および極微量含む試料の点載荷強さは、80 °C 乾燥状態よりも 105 °C 乾燥状態の方が大きい。これは、80 °C 乾燥状態では 105 °C 乾燥状態に比べてスメクタイトの結晶水が脱水されず、105 °C 乾燥状態よりも結晶水が残存しているためと考えられる。一方、60 °C および 40 °C 乾燥状態における点載荷強さに有意な差が見られないのは、試料を低温で乾燥したことにより、スメクタイトの結晶水が脱水されなかったためと考えられる。したがって、60 °C および 40 °C 乾燥状態における点載荷強さがスメクタイトを含む試料本来の測定結果であ

ると考えられる。

したがって、スメクタイトを含む岩石は 60 °C 以下で乾燥することが望ましいと考えられる。

(4) 円柱(縦)点載荷強さの測定結果のばらつき

一般に、データのばらつき度を判断するには標準偏差や変動係数が用いられる。標準偏差が大きいほど測定結果の変動度合いが大きいとされるが、標準偏差の大きさは原変量の大きさによって左右される。すなわち、一軸圧縮試験のように点載荷強さ試験よりも大きい値が得られる場合、これら試験の強さの標準偏差を比較しただけでは、どちらの試験結果がより変動が大きいかの判断はつかない。そのため、本研究では、変動係数を用いて点載荷強さの測定結果のばらつきを検討した。

供試体の強制乾燥状態 4 ケース (105 °C, 80 °C, 60 °C および 40 °C 乾燥状態) および強制湿潤状態における円柱(縦)点載荷強さの変動係数を図-7および表-3に示す。

点載荷強さのばらつきは、変動係数から、いずれの試料も各乾燥温度における強制乾燥状態よりも強制湿潤状態の方が大きい傾向がある。これは、膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトが強制湿潤状態によって吸水膨潤した影響と考えられる。

スメクタイトを少量および極微量含む試料の 105 °C, 80 °C と、60 °C および 40 °C 乾燥状態のそれぞれにおいて点載荷強さの変動係数に違いが見られたのは、点載荷強さの測定結果と同様のことが言えると考えられる。すなわち、試料を 105 ± 3 °C および 80 ± 3 °C で乾燥した場合には、スメクタイトの結晶水の脱水により、スメクタイト本来の膨潤する性質が失われ、点載荷強さの変動係数が小さくなり、強さのばらつきがあまり見られなかつ

たと考えられる。一方、試料を $60 \pm 3^\circ\text{C}$ および $40 \pm 3^\circ\text{C}$ で乾燥した場合には、スメクタイトの結晶水が脱水されず、スメクタイトを含む試料本来のばらつきが大きく見られる結果となったと考えられる。 60°C および 40°C 乾燥状態における点載荷強さの変動係数に有意な差が見られないのも、両乾燥温度において点載荷強さに有意な差が見られないことと同様に、変動係数にも差が見られなかったと考えられる。したがって、点載荷強さのばらつきは 60°C および 40°C 乾燥状態よりも 105°C および 80°C 乾燥状態の方が小さいが、スメクタイトを含む試料本来の測定結果を得ていることから、前者の乾燥温度が望ましいと考えられる。

スメクタイトを含まない試料は、いずれの乾燥温度においてもスメクタイトの膨潤の影響を受けないため、点載荷強さの変動係数に有意な差が見られなかったと考えられる。

このように、スメクタイトなどの膨潤性粘土鉱物を含む試料における乾燥温度の違いは、点載荷強さのばらつきに影響を与える要因の一つである。

(5) 円柱(縦)点載荷強さの統計的性質と供試体個数

点載荷強さ試験における供試体個数は点載荷強さの変動係数の大きさに強く影響される。強さの分布が正規分布で近似できるとすれば(図-8)、信頼度 95 % での片側信頼区間が平均値の 15 % 以内にするために必要な供試体個数 n は、統計的推定の問題として t 分布を用いて求められる。変動係数が 10 % 前後の場合、 $n=3, 4$ 個であるが、20 % 前後になると $n=10$ 個程度、さらに 30 % 前後になると $n=20$ 個程度が要求される⁴⁾。点載荷強さの変動係数と供試体個数(表-3)から、いずれの試験結果も変動係数に見合った供試体個数を用意しているため、平均値の信頼区間が狭く、試料における岩石の強さの特徴を正確に捉えている。

このように、点載荷強さ試験において、必要な供試体個数は、試験後の変動係数の値によって明らかになるため、試験をおこなう前に必要な供試体個数を決定することは難しい。そこで、点載荷強さ試験をおこなう前に、試験に必要とされる供試体個数の目安を決定するため、本研究で用いたモルデナイト帯軽石凝灰岩および細粒凝灰岩以外のスメクタイトを含む岩石について点載荷強さ試験(供試体個数: 合計 935 個)をおこない、その結果から得られた変動係数と供試体個数の関係を図-9に示す。この図は、信頼度 95 % での片側信頼区間の平均値に対する百分率 ϕ (ここでは、 $\phi = 15\%$) が、供試体個数 n によってどのように変化するかを示したものである。供試体個数 n が $10 \leq n < 20$ の範囲では、変動係数が 30 % を超える試料や $\phi = 15\%$ の境界付近に多数存在

図-8 60°C 乾燥状態および強制湿潤状態における円柱(縦)点載荷強さのヒストグラムと確率密度関数

図-9 スメクタイトを含む様々な岩石の点載荷強さの変動係数と供試体個数の関係

しているが、 $20 \leq n$ の範囲では、全ての試料において、変動係数に見合った供試体個数を用意している。

前述のように、一般に、点載荷強さ試験は 10 個以上の供試体個数でおこなわれることが多く^{3), 9), 11), 13)}、本研究においてもスメクタイトを極微量含む試料の供試体個数は 10 個であり、変動係数に見合った供試体個数を用意

しているが、今後、スメクタイトを含む岩石において点載荷強さ試験をおこなう場合、供試体個数は 20 個以上用意することが望ましいと考えられる。また、試験前に、用意した供試体個数から推定される変動係数よりも試験後得られた変動係数が大きい場合には、供試体個数を増やして、追加試験をおこなう必要がある。

(6) 円柱(縦)点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係

スメクタイトを少量含む試料およびスメクタイトを含まない試料の 60 °C 乾燥状態および強制湿潤状態における円柱(縦)点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係を表-4に示す。

スメクタイトを少量含む試料およびスメクタイトを含まない試料の強制乾燥状態における一軸圧縮強さの平均値は、それぞれ 17.63 MPa および 26.03 MPa であり、前者は軟岩、後者は中硬岩に分類される。一方、強制湿潤状態におけるこれら試料の一軸圧縮強さの平均値は、それぞれ 4.73 MPa および 5.96 MPa であり、両者にそれほど大きな差は見られない。

一軸圧縮強さの変動係数は、いずれの試料も強制湿潤状態の方が強制乾燥状態よりも大きく、点載荷強さ試験結果と同様の傾向が見られるが、点載荷強さの変動係数よりも小さく、ばらつきが小さい。また、一軸圧縮試験において、信頼度 95 % での片側信頼区間が平均値の 15 % 以内にするために必要な供試体個数は、変動係数が 15 % の場合、7 個程度必要であるとされる^{16), 18)}。いずれの試料も変動係数が 15 % 以下であり、供試体個数も 7 個以上であるため(表-4)、試料における岩石の強さの特徴を正確に捉えている。

したがって、これらのデータから、スメクタイトを少量含む試料およびスメクタイトを含まない試料の一軸圧縮強さは、それぞれ円柱(縦)点載荷強さの 10.3~13.1 倍、7.0~9.2 倍である(表-4)。

5. 結 言

スメクタイトを含む岩石の乾燥方法および飽和方法と、円柱(縦)点載荷強さ試験方法を検討した結果を要約すると次のとおりである。

- (1) スメクタイトを含む岩石の強制乾燥状態における点載荷強さを正確に求めるためには、供試体を 60 °C 以下で 4 日以上一定質量になるまで乾燥することが望ましいと考えられる。
- (2) スメクタイトを含む岩石の強制湿潤状態における点載荷強さを正確に求めるためには、浸水崩壊の恐れがある岩石試料の場合は、供試体を水に 15 日以上

表-4 円柱(縦)点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係

Sample No.	State of moisture content	Is (MPa)	Uniaxial compressive test			qu/Is
			N	qu (MPa)	Cv (%)	
080608	Forced dry-state (60±3°C)	Avg. 1.35	13	14.75~19.69 (Avg. 17.63)	8.0	13.1
	Forced wet-state	Avg. 0.46	17	3.40~ 5.51 (Avg. 4.73)	12.5	10.3
080615	Forced dry-state (60±3°C)	Avg. 2.82	10	21.78~28.51 (Avg. 26.03)	7.2	9.2
	Forced wet-state	Avg. 0.85	7	4.90~ 7.35 (Avg. 5.96)	12.5	7.0

Is : axial point load strength, N : number of specimens, qu : uniaxial compressive strength, Cv : coefficient of variation of uniaxial compressive strength, Avg. : average.

一定質量になるまで浸すことが望ましいと考えられる。

- (3) スメクタイトを含む岩石の点載荷強さは、105 °C 乾燥状態で最も大きく、次いで 80 °C 乾燥状態で大きく、60 °C および 40 °C 乾燥状態ではほぼ同じである。また、スメクタイトを含まない岩石の点載荷強さに対しては、乾燥温度の有意な影響は見られなかった。
- (4) スメクタイトを含む岩石の点載荷強さのばらつきは、変動係数によると、105 °C および 80 °C 乾燥状態の方が 60 °C および 40 °C 乾燥状態よりも小さい。また、スメクタイトを含まない岩石の点載荷強さのばらつきに対しては、乾燥温度の有意な影響は見られなかった。
- (5) スメクタイトを含む岩石において点載荷強さ試験をおこなう場合、供試体個数は 20 個以上用意することが望ましいと考えられる。
- (6) スメクタイトを含む岩石の点載荷強さは、岩石の点載荷強さに関わる研究の場合、60 °C 以下の強制乾燥状態および強制湿潤状態の両含水状態で評価することが望ましいと考えられる。

謝辞：国立大学法人北見工業大学工学部社会環境工学科山下 聡教授および同技術部平田広昭技術員には乾燥炉を譲っていただいた。同技術部平松雅宏技術員には点載荷強さ試験にご協力いただいた。3 名の匿名査読者の方には数々の建設的なコメントをいただいた。記して、以上の方々に厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 菊池宏吉, 藤枝 誠, 岡 信彦, 小林隆志：ダム基礎岩盤の耐荷性に関する地質工学的総合評価, 応用地質特別号(岩盤分類), pp.107-117, 1983.
- 2) 前田寛之：地すべり学の発展のため、北海道において、今後、何をすべきか？, 北海道地すべり学会・(社)日本地すべり学会北海道支部 30 周年記念事業実行委員会編 CD：資料集「北海道の地すべり研究 30 年」, pp.1-10, 2008.
- 3) 岩盤力学委員会軟岩小委員会編：軟岩の調査・試験の指

- 針(案)－1991年版－, 124p., 社団法人土木学会, 1991.
- 4) 疋田貞良, 菊地昌博: 点載荷試験の実用性に関する一考察, 開発土木研究所月報, No.423, pp.30-41, 1988.
 - 5) Brook, N.: The use of irregular specimens for rock strength test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.14, pp.193-202, 1977.
 - 6) Brook, N.: The equivalent core diameter method of size and shape correction in point load testing, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.22, No.2, pp.61-70, 1985.
 - 7) Broch, E. and Franklin, J. A.: The point-load strength test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.9, No.6, pp.669-697, 1972.
 - 8) Bieniawski, Z. T.: Estimating the strength of rock materials, *J. S. Afr. Inst. Min. and Met.*, Vol.74, No.8, pp.313-320, 1974.
 - 9) 岩の試験・調査規格・基準検討委員会編: 岩の試験・調査方法の基準・解説書－平成 18 年度版－, 256p., 社団法人地盤工学会, 2006.
 - 10) Goodman, R. E.: *Introduction to Rock Mechanics*, Second edition, John Wiley & Sons, 562p., 1980.
 - 11) ISRM Commission on Testing Methods, Working Group on Revision of the Point Load Test Method: Suggested method for determining point load strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.22, No.2, pp.51-60, 1985.
 - 12) American Society for Testing and Materials: ASTM Designation: D:5731-05, Standard Test Method for Determination of Point Load Strength Index of Rock, *2001 Annual Book of ASTM Standards*, Vol.4.08 Soil and Rock (I), 2001.
 - 13) 日本道路公団: 点載荷試験機を用いた岩片の強度試験方法, 日本道路公団規格 JHS 715-1997, pp.35-37, 1997.
 - 14) 岩の力学連合会: ISRM 指針, Vol.1, 61p., 1982.
 - 15) 河野勝宣, 前田寛之: 軟岩－中硬岩境界領域におけるスメクタイトを含む細粒凝灰岩の円柱(縦)点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係－北海道生田原南地すべり移動体の上部中新統生田原層の例－, 日本地すべり学会誌, Vol.47, No.1, pp.17-25, 2010.
 - 16) 土木学会岩盤力学委員会「土木技術者のための岩盤力学」改訂小委員会編: 土木技術者のための岩盤力学－昭和 54 年版－, 673p., 社団法人土木学会, 1979.
 - 17) 中村 大, 後藤隆司, 森 訓保, 鈴木輝之, 平松雅宏: 岩石の凍上性に関する基礎的研究－岩石の物性値と破砕の影響－, 地盤工学ジャーナル, Vol.1, No.4, pp.131-142, 2006.
 - 18) Vutukuri, V. S., Lama, R. D. and Saluja, S. S. 著, 増田秀夫, 田中莊一 訳: 岩石・岩盤技術者のためのハンドブック, 岩の力学的性質 I－試験に関する技術と結果－, 266p., 古今書院, 1989.

(2010. 4. 20 受付)

METHOD OF AXIAL POINT LOAD STRENGTH TEST FOR SMECTITE-BEARING ROCKS

Masanori KOHNO, Hiroyuki MAEDA, Ippei KAGE,
Junpei KOTAKE and Motoharu NII

This paper elucidates drying, saturating, and axial point load strength test methods of smectite-bearing rocks on the basis of analyses of the axial point load strength tests in a forced dry-state at temperatures of 105 ± 3 °C, 80 ± 3 °C, 60 ± 3 °C, and 40 ± 3 °C, respectively and a forced wet-state. The rocks are divided into three groups on the basis of their smectite content. It is to be desired that the axial point load strengths of smectite-bearing rocks are measured the specimens in the forced dry-state, dried in an electric oven at a temperature below 60 ± 3 °C for 4 days or more to achieve a constant mass, and the specimens in the forced wet-state, saturated with water for 15 days or more to achieve constant mass.