乾燥温度の違いがスメクタイトを含む 岩石の円柱(縦)点載荷強さに与える影響

河野 勝宣^{1*} · 前田 寛之²

¹国立大学法人北見工業大学 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) ²国立大学法人北見工業大学 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: kohno-m@k-hokkai.co.jp

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て、強制乾燥状態(105±3 ℃, 80±3 ℃, 60±3 ℃および40±3 ℃で強制乾燥した状態)における円柱(縦)点載荷強さ試験結果を比較検討し、乾燥温 度の違いがスメクタイトを含む岩石の円柱(縦)点載荷強さに与える影響を明らかにした.試験結果から、 スメクタイトを含む岩石では、乾燥温度が80 ℃以上では岩石中のスメクタイトの結晶水が脱水されるが、 60 ℃以下ではその結晶水が脱水されないこと、また、乾燥温度の違いが円柱(縦)点載荷強さとそのばらつ きに影響を与える要因の一つであることが判明した.それゆえ、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 ℃以下で乾燥することが望ましいと考えられる.

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

1. 緒 言

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¹⁾、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.しかし、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³⁾.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⁴⁾、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)⁵やASTM Standards (2001)⁶をはじめとする多くの指 針^{1),3),7)}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われるが、点載荷強 さに関わる研究の場合には、例えば、乾燥状態でおこな 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)⁸では、岩石の密度、吸水率、 空隙率などの測定において、試料の乾燥方法は105±3℃ で24時間以上炉乾燥するとしている.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.しかし、前述の指針^{1),3),5),0,7} などでは、膨潤性粘土鉱物を含む岩石に対する特別な乾 燥温度条件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温度の違い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 岩石の最適乾燥温度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±3℃、80±3℃、 60±3℃および40±3℃で強制乾燥した状態)における円 柱(縦)点載荷強さ試験結果を比較検討し、乾燥温度の違 いがスメクタイトを含む岩石の円柱(縦)点載荷強さに与 える影響を明らかにすることを目的としている.

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(2010)⁹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-2B,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 (I) −2B, 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.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¹⁰ (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.



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).

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

3. 研究方法

採集した岩石を点載荷強さ試験における供試体形状に 成形し,強制乾燥状態(105±3 ℃,80±3 ℃,60±3 ℃お よび40±3 ℃で強制乾燥した状態)4ケースにおける円 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^{3,5}. 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50mm程度、高さ20mm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^{3,5}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、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-2)

(2) 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^{1,3,5,6}.

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \tag{1}$$

ここで、*I*。は点載荷強さ、*P*は破壊荷重、*D*。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^{1),3,5,0}.

$$D_e^2 = \frac{4WD}{\pi} \tag{2}$$

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³.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.

$$D' = D - x \tag{3}$$

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.

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



図-2 円柱(縦)点載荷強さ試験の供試体形状

表-2 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	
	State of moisture content		ls (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°C)	30	0.71-1.59 (Avg. 1.35)	15.4
	Forced dry-state (40±3°C)	30	0.49-1.54 (Avg. 1.34)	16.1
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. <mark>1.96</mark>)	9.9
	Forced dry-state (60±3°C)	10	1.07-1.73 (Avg. 1.43)	14.1
	Forced dry-state (40±3°C)	10	1.07-1.80 (Avg. 1.41)	14.0
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°C)	30	2.25-3.62 (Avg. 2.83)	13.8

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



図-3 点載荷強さ試験機

量を測定するためのダイヤルゲージから構成される点載 荷強さ試験機を使用し(図-3),載荷荷重の測定には, 油圧式万能試験機を使用した.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)⁵⁰で規定されて いるものと同一の形状である.点載荷強さ試験における 載荷速度は、10~60秒間で破壊に至る程度³とされるが、 点載荷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.

4. 試験結果および考察

(1) 円柱(縦) 点載荷強さ

強制乾燥状態4ケース,供試体を105±3 ℃,80±3 ℃, 60±3 ℃および40±3 ℃で乾燥した状態(以下,それぞれ 「105 ℃,80 ℃,60 ℃および40 ℃乾燥状態」と記す.) における円柱(縦)点載荷強さを表-2および図-4に示す.

スメクタイトを少量含む試料の 105 ℃, 80 ℃, 60 ℃ および 40 ℃乾燥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 であり, 105 ℃乾燥状態で最も大きく, 次いで 80 ℃乾燥状態が大きく,60 ℃および 40 ℃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℃,80℃,60℃ および40℃乾燥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 ℃, 80 ℃, 60 ℃ および 40 ℃ 乾燥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 であり,いずれの乾燥温度においても有 意な差が見られない.

スメクタイトを少量および極微量含む試料の105℃, 80℃と,60℃および40℃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℃および80±3℃では脱水されるが, 60±3℃および40±3℃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℃ 乾燥状態よりも105℃乾燥状態の方が大きい.これは,

80℃乾燥状態では105℃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℃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℃および 40℃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℃および40℃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.

スメクタイトを含まない試料において,各乾燥温度に おける強制乾燥状態の点載荷強さに有意な差が見られな



図-4 強制乾燥状態4ケースにおける円柱(縦)点載荷強さ



図-5 円柱(縦)点載荷強さの変動係数

いのは、この試料にはスメクタイトなどの膨潤性粘土鉱 物が含まれないため、前述のような乾燥温度の影響を受 けなかったためと考えられる.

したがって、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、点載荷強さに影響を与える要因の一つである。それゆえ、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 ℃以下で乾燥することが望ましいと考えられる。

(2) 円柱(縦)点載荷強さの測定結果のばらつき

本研究では、変動係数を用いて円柱(縦)点載荷強さの 測定結果のばらつきを検討した.変動係数とは、測定結 果のばらつきを相対的に表し、変動係数が大きいほど測 定結果のばらつきの度合いが大きいとされる.変動係数 は、標準偏差を点載荷強さの平均値で除したもので、



図-6 円柱(縦)点載荷強さのヒストグラムと確率密度関数

次式によって算出される.

$$C_v = \frac{s}{I_m} \times 100 \ (\%)$$
 (4)

ここで、C,は変動係数、sは標準偏差、I,は各試料における点載荷強さの平均値である.

強制乾燥状態4ケース(105 ℃, 80 ℃, 60 ℃および 40 ℃乾燥状態)における円柱(縦)点載荷強さの変動係 数を表-2および図-5に示す.

スメクタイトを少量および極微量含む試料の105 ℃, 80℃と、60℃および40℃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るが、これは、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℃および80±3℃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っ たと考えられる.一方, 試料を60±3℃および40±3℃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 ℃および40 ℃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 ℃および40 ℃乾燥状態よりも105 ℃および80 ℃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.

したがって、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.

(3) 円柱(縦)点載荷強さの統計的性質

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-6),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¹¹⁾.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.

5. 結 言

105 ℃, 80 ℃, 60 ℃および40 ℃乾燥状態における乾燥温度の違いがスメクタイトを含む岩石の円柱(縦)点載荷強さに与える影響を比較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点載荷強さは、105 ℃乾燥状態で最も大きく、次いで80 ℃乾燥状態で大きく、60 ℃および40 ℃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は、いずれの乾燥温度においても有意な差が見られない.
- (2) 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 ℃および80 ℃乾燥状態の方 が60 ℃および40 ℃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 きは、いずれの乾燥温度においても有意な差が見ら れない.
- (3) スメクタイトを含む岩石における乾燥温度の違いは、 点載荷強さとそのばらつきに影響を与える要因の一 つである.
- (4) 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℃以 下で乾燥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技術部平松雅宏技術員 と、同工学部土木開発工学科卒業生鹿毛一平氏、小竹純 平氏および仁井太陽氏には点載荷強さ試験にご協力いた 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) 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)土木学会, 1991.

- 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.
- 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)地盤 工学会,2006.
- Goodman, R. E.: Introduction to Rock Mechanics, Second edition, John Wiley & Sons, 562p., 1980.
- 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.
- 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 (1), 2001.
- 7) 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.
- 8) 岩の力学連合会: ISRM指針, Vol.1, 61p., 1982.
- 9) 河野勝宣,前田寛之:軟岩ー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.
- 10) 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.
- 11) 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.

EFFECT OF DIFFERENCE OF DRYING TEMPERATURE ON THE AXIAL POINT LOAD STRENGTH FOR SMECTITE-BEARING ROCKS

Masanori KOHNO and Hiroyuki MAEDA

This paper elucidates effect of difference of drying temperature on the axial point load strength for 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. The rocks are divided into three groups on the basis of their smectite content. Comparative tests revealed that the difference of drying temperature in the smectite-bearing rock specimens influences the point load strengths and their discrepancies on the basis of coefficient of variation. Therefore, it is to be desired that the axial point load strengths of smectite-bearing rocks are measured the specimens in the forced dry-state at a temperature below 60 °C.