オン・サイトの自然含水状態における不定形供試体の 点载荷強さ試験に基づく軟岩および中硬岩の一軸圧縮強さの推定* －上部中新統火砕岩および碎屑岩の熱水変質岩の例を中心に－

河野 勝宣¹ 前田 寛之²

Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Soft and Semi-Hard Rocks Based on Irregular Lump Point Load Strength Test Results in an On-Site Natural-Moist State － Example of Hydrothermally Altered Rocks of the Upper Miocene Volcaniclastic and Clastic Rocks －

by Masanori KOHNO^a and Hiroyuki MAEDA^b

- a. Graduate Student, Cold Regions, Environmental and Energy Engineering Course, Graduate School of Engineering, National University Corporation Kitami Institute of Technology, 165, Koen-cho, Kitami 090-8507, Japan (Corresponding author, E-mail: kohno-m@k-hokkai.co.jp)
b. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, National University Corporation Kitami Institute of Technology

The purpose of this study was to clarify the relationship between irregular lump point load strength (PLS) and uniaxial compressive strength (UCS) in hydrothermally altered and least altered rocks, which are typical of the soft and semi-hard rocks found in northeastern Hokkaido, Japan. The numbers of specimens tested were 2,710 rock specimens for the irregular lump PLS test, whereas 312 rock specimens for the UCS test. These came primarily from the earth's surface in ancient hydrothermal fields. The rock specimens underwent irregular lump PLS and UCS tests using a laboratory testing machine with specimens.

The correlations between the irregular lump PLS, which was calculated by the formula of Hiramatsu et al. (1965), and the UCS were linear. The relationships between irregular lump PLS ($I_{s(i)}$) and UCS (q_u) were $q_u = 5.3-5.4 I_{s(i)}$, in the soft and semi-hard rocks with an irregular lump PLS below 8 MPa. These relationships applied to on-site tests of rocks with natural-moist state. The number of tested specimens satisfied accuracy requirements, based on the coefficient of variation. The irregular lump PLS was strongly correlated with the UCS. Therefore, the relationships between irregular lump PLS and UCS established in this study were highly precise. We could calculate the UCS from irregular lump PLS tests in the soft and semi-hard rocks only when their irregular lump PLS below 8 MPa.

KEY WORDS: Natural-Moist State, Irregular Lump Point Load Strength, Uniaxial Compressive Strength, Soft Rock, Semi-Hard Rock, On-Site Test

1. 緒 言

岩石の強さは、トンネルやフィルダム基礎などの設計・施工をおこなう際の安定評価、建設工事の安全確保、さらに、熱水変質岩地すべり¹⁾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のの一つとして、極めて重要である。岩石の強さを評価するうえで、よく用いられる方法の一つに一軸圧縮試験が挙げられる。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、

点载荷強さ試験は、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。それゆえ、点载荷強さから一軸圧縮強さを算出できれば、非常に便利であるとともに、コスト削減にもなる。

1970～80年代における研究では、点载荷強さ I_s と一軸圧縮強さ q_u との関係は、例えば、 $q_u = 24 I_s^{(2)}$ 、 $q_u = 23 I_s^{(3,4)}$ 、 $q_u = 12.5 I_s^{(5,6)}$ 、 $q_u = 20 \sim 25 I_s^{(7,8)}$ 、 $q_u = 12.3 \sim 15.0 I_s^{(9)}$ などであることが報告されている。しかし、いずれの事例も q_u - I_s グラフで示される一軸圧縮強さの最大値が200～350 MPaであり、疋田・菊地(1988)⁹⁾の関係式を除くと、主に硬岩を対象とした関係式であり、軟岩や中硬岩を考慮に入れた関係を明らかにした事例は非常に少ない。また、これらの研究事例では、载荷方向、供試体の形状や寸法、点载荷強さの計算方法などが統一されていない。そこで、筆者らは、これまで、北海道北東部地域を例に、点载荷強さ試験に基づく熱水変質岩の力学特性¹⁰⁾、さらに、熱水変質岩における円柱(縦)点载荷強さ I_s と一軸圧縮強さ q_u との関係が $q_u = 12.9 I_s^{(11)}$ であることを明らかにしてきた。しかし、これらの点

*2011年4月25日受付 2011年10月14日受理

1. 学生会員 修士(工学) 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 大学院生

2. 正会員 博士(工学) 北見工業大学 工学部 社会環境工学科 教授
[著者連絡先] FAX: 0157-23-9408

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

キーワード: 自然含水状態, 不定形点载荷強さ, 一軸圧縮強さ, 軟岩, 中硬岩, オン・サイト試験

Fig.1 Location of the sampling sites in northeastern Hokkaido, Japan.

載荷強さと一軸圧縮強さとの関係^{2-9,11)}の多くは、ボーリングコア試料の使用を想定した成形供試体や非成形コア⁹⁾における点載荷強さ試験によるものであり、不定形供試体における点載荷強さ(以下、「不定形点載荷強さ」と記す。)と一軸圧縮強さとの関係を明らかにした事例はない。それゆえ、これまでの研究事例は、オンーサイトにおいて、岩石の強さを迅速に評価できるとは言えない。

本論文は、主に、新第三系上部中新統火砕岩および砕屑岩と鮮新統デイサイト(石英安山岩)溶岩の熱水変質岩(主に軟岩や中硬岩)の試料を用いて、不定形点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係を明らかにした。ここで、岩石の力学的分類には様々な定義があるが、本研究では、一軸圧縮強さが20 MPa以下を軟質岩、20～80 MPaの範囲にあるものを中硬質岩、80 MPa以上を硬質岩とする定義^{12,13)}にしたがって、20 MPa未満を軟岩、20 MPa以上80 MPa未満を中硬岩、80 MPa以上を硬岩とした。本研究から得られた結果は、今後、岩盤分類¹⁴⁾におけるパラメータの一つである岩石の強さへの適用、土木構造物の設計・施工の際の岩石の強さ評価の迅速化、さらに、地すべり(狭義)または崩壊などのハザードマッピングをおこなう際にも岩石の強さの面からその精度の向上をはかるうえで、貴重な知見になると考えられる。

2. 岩石試料

本研究で使用した岩石試料は、北海道オホーツク総合振興局紋別郡遠軽町生田原地域および北見市留辺蘂町旭西地域と、釧路総合振興局川上郡弟子屈町奥春別地域(Fig. 1)における古熱水地域の地表からハンマーなどを使って採集した細粒凝灰岩、中粒凝灰

岩、軽石凝灰岩、火山礫凝灰岩、凝灰質泥岩、凝灰質砂岩、凝灰質礫岩およびデイサイトの8種の熱水変質岩35試料と、熱水変質作用を受けていない溶結凝灰岩3試料である。岩石試料は、風化の影響やハンマーによる打撃の影響の少ない露頭を中心付近から、不定形点載荷強さ試験用の供試体および一軸圧縮試験用の供試体を作製できる大塊を採集した。試料採集地域の地質は、主に、生田原地域における新第三系上部中新統生田原層、旭西地域における新第三系上部中新統小松沢層および第四系完新統火砕流堆積物(溶結凝灰岩)と、奥春別地域における新第三系上部中新統オデシカウシナイ層、ハナクシベ層およびシケレペ層と鮮新統志計礼辺山溶岩(デイサイト)からなる。

岩石試料の乾燥密度、飽和密度、吸水率および有効間隙率の平均値は、それぞれ、1.067～1.979 g/cm³、1.552～2.218 g/cm³、11.72～51.14%および22.94～56.15%の範囲にあり、いずれの物性値との間にも非常に高い相関が見られる(Fig. 2)。

3. 研究方法

本研究では、強制乾燥状態および強制湿潤状態における不定形点載荷強さ試験と一軸圧縮試験、さらに、オンーサイトの自然含水状態における不定形点載荷強さ試験をおこなった。一軸圧縮試験用の供試体作製時には、岩粉発生の抑制やダイヤモンドカッターの冷却などのために水を使用するが、これにより、供試体のオンーサイトの自然含水状態を維持することが困難になるため、一軸圧縮試験については自然含水状態ではおこなっていない。なお、本研究では、河野ほか(2010)¹⁵⁾に基づいて、強制乾燥状態は、膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトや混合層粘土鉱物などの結晶水が脱水されないと考えられる60±3℃の乾燥炉で供試体を一定質量になるまで乾燥させた状態であり、強制湿潤状態は、供試体を水(本研究では蒸留水を使用した。)に一定質量になるまで浸した状態である。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。供試体の質量が一定になるのを確認した後も試験をおこなう直前までの間、強制乾燥状態における供試体は60±3℃の乾燥炉で保管し、強制湿潤状態における供試体は蒸留水に浸し続けた。強制湿潤状態における供試体は、少し湿ったタオルで供試体表面の水分を拭き取って試験をおこなった。なお、本研究における蒸留水の水温は約20℃である。自然含水状態における点載荷強さ試験用の供試体は、11月上旬～中旬にかけて採集し、いずれの地域でも天候は晴れ、日平均気温は約4.4℃¹⁶⁾であった。また、オンーサイトの自然含水状態を維持するため、試料採集時から試験をおこなうまでの間、密封して保管した。点載荷強さ試験および一軸圧縮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

Fig.2 Relationships between the average physical properties of hydrothermally altered rocks.

Fig.3 Shapes of rock specimen. A: irregular lump point load strength test, B: uniaxial compressive strength test.

Table 1 Numbers of specimens and sampling sites.

Rock facies	Forced-dry state			Forced-wet state			Natural-moist state	
	PLS test	UCS test	Sampling site	PLS test	UCS test	Sampling site	PLS test	Sampling site
Fine tuff	478	70	19	441	66	19	403	10
Medium tuff	25	1	1	22	1	1	-	-
Pumice tuff	195	34	6	129	32	6	81	2
Lapilli tuff	114	10	3	102	10	3	68	2
Tuffaceous mudstone	23	4	1	15	3	1	46	1
Tuffaceous sandstone	117	19	3	96	17	3	100	2
Tuffaceous conglomerate	10	2	1	5	1	1	-	-
Dacite	23	5	1	25	5	1	-	-
Welded tuff	76	16	3	66	16	3	50	1

PLS test: Irregular lump point load strength test, UCS test: Uniaxial compressive strength test.

20℃および約 40% である。

3・1 供試体

不定形点載荷強さ試験における供試体は、ISRM Commission (1985)⁸⁾や地盤工学会基準¹⁷⁾による不規則塊状体 (Irregular lump) に相当する。不定形供試体は、点載荷強さ試験機に設置した時の載荷点間隔 D を直径とする球が試料の中に入るような大きさとし、Fig. 3A に示すような形状とした。また、供試体の平均的な幅 W は 50 mm 程度、載荷点間隔 D は 30 mm 程度とした。この寸法は、ISRM Commission (1985)⁸⁾や地盤工学会基準¹⁷⁾の形状における $0.3 W < D < W$ の条件を満足する。

一軸圧縮試験における供試体は、室内用ボーリングマシンおよびダイヤモンドカッターを使用して、直径 50 mm 程度、高さ 100 mm 程度に成形し、円柱供試体とした (Fig. 3B)。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 Fig. 3B 中の $h/W \approx 2$ の条件^{18,19)}を満足する。なお、供試体作製時には、岩質に影響を及ぼすような熱や衝撃を与えないように配慮した。

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、強制乾燥状態および強制潤潤状態における不定形点載荷強さ試験および一軸圧縮試験で、それぞれ 1,962 個および 312 個、自然含水状態における不定形点載荷強さ試験で 748 個の合計 3,022 個用意した (Table 1)。同じ岩種でも試料採集箇所が異なるものがあるため、それらの試料については別々の試料として扱い、Table 1 には試料採集箇所数を示した。

3・2 不定形点載荷強さ試験

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¹⁷⁾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/s) で載荷した。

3・2・1 点載荷強さ試験機 本研究で使用した点載荷強さ試験機を Fig. 4A に示す。点載荷強さ試験機は、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、載荷荷重を測定するロードセルおよび荷重測定装置と、載荷コーンの貫入量を測定するダイヤルゲージから構成される (Fig. 4A)。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。ロードセルおよび荷重測定装置はそれぞれ株式会社共和電業製 LU-500KE および同 WGA-670B を用い、ロードセルは最大 5,000 N までの荷重が測定可能である。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)⁸⁾で規定されているものと同一の形状である。

3・2・2 不定形点載荷強さの算出方法 不定形点載荷強さの算出方法は、ISRM Commission (1985)⁸⁾や地盤工学会基準¹⁷⁾でも定められているが、不定形供試体の場合は、載荷点を含む最小断面積の断面が円形や長方形ではなく、不規則であるため、等価コア径の算出が困難である。それゆえ、本研究では、不定形点載荷強さを平松ほか (1965)²⁰⁾に基づいて、次式によって算出した。

$$I_s(i) = k P / D^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $I_s(i)$ は不定形点載荷強さ、 k は定数、 P は破壊荷重、 D は載荷点間隔である。平松ほか (1965)²⁰⁾は、不定形供試体について、 k の値として形状に関係なく、0.9 を用いている。それゆえ、本研究においても k の値として 0.9 を用いた。

(1) 式は、形状効果および寸法効果を見逃しており、載荷点間隔 D が等しければ、円柱、直方体、立方体など、いずれの形状でもすべて同様に扱われることになり、現在では推奨されていない。本研究における不定形供試体は、できるだけ形状の揃ったものを

Fig.4 Testing machine. A: point load strength test, B: uniaxial compressive strength test.

Fig.5 Relationships between irregular lump point load strength (PLS) and uniaxial compressive strength (UCS) in the forced-dry and forced-wet states.

使用し、全ての供試体の最小断面積がほぼ同じ大きさになり、結果的に、ISRM Commission (1985)⁸⁾や地盤工学会基準¹⁷⁾で定められている方法で評価していることと原理的に等価と判断できる。したがって、不定形供試体であっても、その形状および寸法をできるだけ同じようにすれば、平松ほか(1965)²⁰⁾の式は十分に使用できると考えられる。

また、軟岩や中硬岩供試体において载荷コーンの貫入により载荷点間隔 D が小さくなった場合には、点载荷強さの算出において破壊時の载荷点間隔 D' を用いる¹⁷⁾。それゆえ、本研究では、破壊時の载荷点間隔 D' を次式によって算出した。

$$D' = D - \alpha \quad (2)$$

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

3・3 一軸圧縮試験

本研究では、一軸圧縮試験は油圧式万能試験機(株式会社島津製作所)を用いておこなった(Fig. 4B)。なお、試験時には球座を使用した。一軸圧縮試験における载荷速度は0.1 ~ 1.0 MPa/sである。一軸圧縮強さは次式によって算出した^{18,19)}。

$$q_u = P/A \quad (3)$$

ここで、 q_u は一軸圧縮強さ、 P は破壊荷重、 A は供試体断面積である。

4. 結果および考察

4・1 不定形点载荷強さと一軸圧縮強さとの関係

強制乾燥状態および強制湿潤状態における熱水変質岩 35 試料と溶結凝灰岩 3 試料の不定形点载荷強さと一軸圧縮強さとの関係を Fig. 5 に示す。不定形点载荷強さ $I_{s(i)}$ と一軸圧縮強さ q_u との関係は、線形であり、強制乾燥状態および強制湿潤状態におけるこれらの関係式は、それぞれ、 $q_{u-dry} = 5.2 I_{s(i)-dry}$ および $q_{u-wet} = 5.9 I_{s(i)-wet}$ である(Fig. 5A,B)。また、強制乾燥状態および強制湿潤状態におけるこれらの相関係数 R はそれぞれ 0.85 および 0.92 であり、いずれの状態においても非常に高い相関が見られる(Fig. 5A,B)。

強制乾燥状態および強制湿潤状態における不定形点载荷強さと一軸圧縮強さとの関係がほぼ同一であることから、両含水状態における試料を一括して扱った場合の関係式は $q_u = 5.3 I_{s(i)}$ であり、また、これらの相関係数 R は 0.90 であるので、非常に高い相関が見られる(Fig. 5C)。

4・2 オン・サイトの自然含水状態における不定形点载荷強さによる一軸圧縮強さの推定

前節の関係式 $q_u = 5.3 I_{s(i)}$ は、強制乾燥状態および強制湿潤状態における関係を一括して扱ったものであるから、それらの中間の自然含水状態においてもこの関係式は適用できるのではないかと考えられる。そこで、熱水変質岩 17 試料と溶結凝灰岩 1 試料を用いて、オン・サイトの自然含水状態における不定形点载荷強さ試験をおこない、強制乾燥状態および強制湿潤状態における一軸

Fig.6 Relationship between irregular lump point load strength (PLS) in the natural-moist state and uniaxial compressive strength (UCS) in the forced-dry and forced-wet states.

Fig.7 Relationship between irregular lump point load strength (PLS) in the natural-moist state and estimated uniaxial compressive strength (UCS) from moisture content of rock samples.

圧縮強さとの相関関係について検討した (Fig. 6)。自然含水状態における不定形点載荷強さ $I_{s(i)}$ と強制乾燥状態における一軸圧縮強さ q_{u-dry} および強制湿潤状態における一軸圧縮強さ q_{u-wet} との関係式は、それぞれ、 $q_{u-dry} = 17.1 I_{s(i)}$ および $q_{u-wet} = 4.7 I_{s(i)}$ である (Fig. 6)。また、これらの相関係数 R はそれぞれ 0.87 および 0.76 であり、いずれの状態においても高い相関が見られる (Fig. 6)。

一般に、岩石の強さと含水比には高い相関関係があると言われている²¹⁾。そこで、本研究において、オン・サイトの自然含水状態における一軸圧縮強さは得られていないが、強制湿潤状態および自然含水状態における供試体の含水比から、一軸圧縮強さを推定し、自然含水状態における不定形点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係について検討した。熱水変質岩 17 試料と溶結凝灰岩 1 試料の強制湿潤状態および自然含水状態における含水比と、強制乾燥状態、強制湿潤状態および試料の含水比により推定された自然含水状態における一軸圧縮強さを Fig. 7A に示す。この図から、ほとんどの試料において、強制湿潤状態と自然含水状態における含水比には大きな差がないため、試料の含水比により推定された自然含水状態における一軸圧縮強さも強制湿潤状態におけるそれと大きな差はないと考えられる。さらに、自然含水状態における不定形点載荷強さと試料の含水比により推定された一軸圧縮強さとの関係をプロットしたものが Fig. 7B である。自然含水状態における不定形点載荷強さ $I_{s(i)}$ と一軸圧縮強さ q_u との関係は $q_u = 5.4 I_{s(i)}$ 、また、相関係数 R は 0.78 である。この関係式は Fig. 5C の関係式と類似しており、これは、強制乾燥状態および強制湿潤状態における関係を一括して扱った関係式を支持する結果であると考えられる。

以上のことから、不定形点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係式を次式によって定める。

$$q_u = 5.3 \sim 5.4 I_{s(i)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 q_u は一軸圧縮強さ、 $I_{s(i)}$ は平松ほか (1965)²⁰⁾ の式によって算出した不定形点載荷強さである。強制乾燥状態、強制湿潤状態および自然含水状態のいずれの含水状態においても、本研究によって得られた関係式 (4) を用いれば、不定形点載荷強さから一軸圧縮強さを算出することが可能であることが明らかとなった。なお、(4) 式の適用範囲は、不定形点載荷強さが 8 MPa 以下 (一軸圧縮強さが 40 MPa 以下の中硬岩の中間領域以下) の範囲とする。

(4) 式における係数の値と主に軟岩や中硬岩を対象とした円柱

(縦) 供試体における点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係式 $q_u = 12.9 I_{s(i)}$ ¹¹⁾ における係数を比較すると、後者の方が約 2.4 倍大きい。このことは、点載荷強さの算出方法が ISRM Commission (1985)⁸⁾ や地盤工学会基準¹⁷⁾ の式によるのか、平松ほか (1965)²⁰⁾ の式によるのかの違いを反映している。また、著者らは、平松ほか (1965)²⁰⁾ によって算出した不定形点載荷強さは ISRM Commission (1985)⁸⁾ によって算出した円柱 (縦) 供試体における点載荷強さの 2.0 ～ 2.2 倍であり、両者には非常に高い相関 (相関係数 0.80 ～ 0.84) が見られることを明らかにしたが¹⁰⁾、これも、点載荷強さを算出した式の違いを反映していると考えられる。今後、点載荷強さから一軸圧縮強さを算出する際には、どの点載荷強さ算定式を使用するかによって、関係式を使い分ける必要があるが、いずれにおいても、同様な一軸圧縮強さが算出できると考えられる。

軟岩や中硬岩を主体とする地質環境下での各種の建設工事現場や地すべり地域における調査ボーリングコア試料においては、クラックやボーリングに伴う泥状化、新たな破断面の形成などにより、10 cm 以上の棒状コア採取率が低く、一軸圧縮試験をおこなうことが困難な場合が多い。本研究の成果は、このような場合においても非常に有効であると考えられる。

4・3 試験の妥当性の検証

本研究では、変動係数を用いて点載荷強さおよび一軸圧縮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、標準偏差を強さの平均値で除したもので、次式によって算出される。

$$C_v = s/x \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 C_v は変動係数、 s は標準偏差、 x は各試料における不定形点載荷強さまたは一軸圧縮強さの平均値である。

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、信頼度 95% での片側信頼区間が平均値の 25% 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⁹⁾。変動係数 C_v が 10% 前後の場合、 $N = 3$ 個であるが、20% 前後になると $N = 5$ 個程度、さらに 30% 前後になると $N = 10$ 個程度が要求される²²⁾。

強制乾燥状態、強制湿潤状態および自然含水状態における不定形点載荷強さ試験結果から得られた変動係数と供試体個数との関

Fig.8 Relationship between number of specimens and coefficient of variation.

係を Fig. 8 に示す。この図は、信頼度 95% の片側信頼区間が平均値の 25% 以内にするために必要な供試体個数 N によって変動係数 C_v がどのように変化するかを示したものである。この図から、自然含水状態における変動係数は強制乾燥状態および強制湿潤状態よりも大きい傾向にあるが、これは、自然含水状態では、必ずしも各供試体の含水比が一樣でないためであると考えられる。また、強制乾燥状態および強制湿潤状態における変動係数には、特に大きな違いは見られない。強制湿潤状態における一部の試料では、 $\phi = 25\%$ の境界付近に存在しているが、ほとんどの試料においては変動係数に見合った供試体個数を用意しているため、点載荷強さ試験結果の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おり、本研究における不定形点載荷強さ試験結果は妥当であることが実証された。

一方、従来の一軸圧縮試験結果によれば、変動係数が 15 ~ 20% である例が比較的多く、特に変動係数が 20% を超える場合には、供試体個数を増やすことが望ましい²³⁾とされるが、ほとんどの試料については変動係数が 20% 以下であったため、一軸圧縮試験においても試験結果は妥当であると考えられる。

5. 結 言

北海道北東部遠軽町生田原地域、北見市留辺蘂町旭西地域および弟子屈町奥春別地域に産する、主に、新第三系上部中新統火砕岩および砕屑岩と鮮新統デイサイト溶岩の熱水変質岩（一軸圧縮強さが 40 MPa 以下の軟岩および中硬岩）の平松ほか(1965)²⁰⁾の式によって算出した不定形点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係についてまとめると次のとおりである。

(1) 強制乾燥状態および強制湿潤状態における不定形点載荷強さ $I_{s(i)}$ と一軸圧縮強さ q_u との関係は、一括して扱った関係式が $q_u = 5.3 I_{s(i)}$ 、また、相関係数 R が 0.90 であるので、非常に高い相関が見られる。

(2) 自然含水状態における不定形点載荷強さ $I_{s(i)}$ と一軸圧縮強さ q_u とは、関係式および相関係数 R がそれぞれ $q_u = 5.4 I_{s(i)}$ およ

び 0.78 であるので、高い相関が見られる。

(3) 強制乾燥状態、強制湿潤状態および自然含水状態のいずれの含水状態においても、不定形点載荷強さが 8 MPa 以下の中硬岩の中間領域以下であれば、本研究によって得られた関係式 $q_u = 5.3 \sim 5.4 I_{s(i)}$ を用いて、不定形点載荷強さから一軸圧縮強さを算出することが可能である。

(4) 本研究では、変動係数を用いて点載荷強さおよび一軸圧縮強さの測定結果のばらつきを検討し、不定形点載荷強さ試験および一軸圧縮試験結果の妥当性を実証した。

(5) 本研究では、不定形点載荷強さ試験は実験室内にておこなわれたが、ポータブル点載荷強さ試験機を用いてオン・サイトで試験を実施すれば、不定形点載荷強さ試験は、より迅速に岩石の強さを評価でき、実用性がより高くなると考えられる。

謝辞 国立大学法人北見工業大学工学部猪狩平三郎研究推進員には万能試験機の使用を快諾していただくとともに、建設的なコメントをいただいた。同大学院工学研究科土木開発工学専攻修了生林 啓太氏と同工学部土木開発工学科卒業生鳥谷部勇弥氏、青木秀晃氏、小坂勇太氏、石黒敦久氏および安達寛将氏には試料採集と点載荷強さ試験および一軸圧縮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。

References

- 1) H. Maeda: 30-years-studies on landslides in Hokkaido, The Hokkaido Landslide Society and the Hokkaido Branch of the Japan Landslide Society (2008), pp.1-10 (in CD-ROM).
- 2) E. Broch and J. A. Franklin: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **9** (1972), 669-697.
- 3) Z. T. Bieniawski: J. S. Afr. Inst. Min. Metall., **74** (1974), 312-320.
- 4) Z. T. Bieniawski: Eng. Geol., **9** (1975), 1-11.
- 5) N. Brook: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **14** (1977), 193-202.
- 6) N. Brook: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **17** (1980), 231-235.
- 7) N. Brook: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **22** (1985), 61-70.
- 8) ISRM Commission on Testing Methods, Working Group on Revision of the Point Load Test Method: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **22** (1985), 51-60.
- 9) S. Hikita and M. Kikuchi: A monthly newsletter of Civil Engineering of Institute (1988), pp.30-41.
- 10) M. Kohno and H. Maeda: Journal of MMIJ, **127** (2011), 14-19.
- 11) M. Kohno and H. Maeda: International Journal of the JCRM, **7** (2011), 17-23.
- 12) H. Kikuchi, M. Fujieda, N. Oka and T. Kobayashi: Journal of the Japan Society of Engineering Geology, Special Issue (1984), pp.103-118.
- 13) Japan Society of Civil Engineers: Evaluation of soft rock -Application to investigation design and construction-, (Doboku Gakkai, Tokyo, 1992), 386p.
- 14) The Japanese Geotechnical Society: Method for engineering classification of rock mass, Designation: JGS 3811-2004.
- 15) M. Kohno, H. Maeda, I. Kage, J. Kotake and M. Nii: JSCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (Doboku Gakkai Ronbunshuu C), **66** (2010), 859-868.
- 16) Japan Meteorological Agency: URL (<http://www.jma.go.jp>).
- 17) The Japanese Geotechnical Society: Method for Point Load Test on Rocks, Designation: JGS 3421-2005.
- 18) ISRM Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **16** (1979), 135-140.
- 19) The Japanese Geotechnical Society: Method for Uniaxial Compression Test on Rocks, Designation: JGS 2521-2000.
- 20) Y. Hiramatsu, Y. Oka and H. Kiyama: Journal of MMIJ, **81** (1965), 1024-1030.
- 21) Japan Society of Civil Engineers: Doboku Gijutsusha no tamenno Ganban Rikigaku, (Doboku Gakkai, Tokyo, 1979), 673p.
- 22) K. Sassa, Y. Nishimatsu and T. Yamazaki: Journal of MMIJ, **84** (1968), 1475-1478.
- 23) Mining and Metallurgical Institute of Japan: Journal of MMIJ, **84** (1968), 1479-1487.