

熱水変質軟岩および中硬岩の 円柱(縦)点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係

Relationship between cylinder (longitudinal) point load strength and uniaxial compression strength
of hydrothermally altered soft and semi-hard rocks

北見工業大学大学院工学研究科 ○学生員 河野勝宣 (Masanori Kohno)
北見工業大学工学部社会環境工学科 正 員 前田寛之 (Hiroyuki Maeda)

1. 緒 言

新鮮岩や変質岩の強さは、一般に、一軸圧縮強さによって評価される。しかし、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採集できないこともある¹⁾。また、一軸圧縮試験は、供試体の成形の良し悪しや載荷形式が大きく影響する試験であるため、必要な量の供試体を用意できたとしても、精密な試験をおこなえないこともあり、一軸圧縮試験を正しくおこなうのは容易ではない。このようなときでも、点載荷試験は、比較的小さな岩石試料で、非成形で、フィールドでも試験をおこなえ、強さを迅速に評価できるので、非常に有効である^{2), 3)}。それで、点載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。

ここで、点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係は、一軸圧縮強さが点載荷強さの12.3~15.0倍³⁾、20~25倍⁴⁾および24倍^{5), 6)}であることが過去の研究で報告されている。しかし、いずれの事例も花崗岩や玄武岩などの硬岩には成立するが、軟岩や中硬岩では全く成立せず、また、載荷方向の違いや供試体の形状、寸法、さらには計算方法などが統一されておらず、一般的な岩石の評価方法として確立されていない。

この研究発表では、代表的な軟岩および中硬岩である熱水変質岩の円柱(縦)点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係を明らかにすることを目的としておこなった試験結果について報告する。

2. 研究試料および研究方法

2.1 研究試料

研究試料である熱水変質岩は、北海道網走支庁遠軽町生田原南地すべり防止区域(以下、「生田原南地すべり地域」と記す。)および北海道釧路支庁弟子屈町奥春別地すべり地域南部(以下、「奥春別地すべり地域」と記す。)(図-1)の露頭や転石からハンマーを使って採集した。熱水変質帯は、主に地表踏査および粉末X線回折試験によって検討し、Utada (1980)⁷⁾に基づいて分類した(図-2)。

(1) 生田原南地すべり地域：試料は上部中新統生田原層に発達する熱水変質帯のクリノタイロライト帯細粒凝灰岩の岩片およびこの地域に掘削された垂直ボーリング孔のコア試料から採集した熱水変質帯のハロイサイト帯軽石凝灰岩および凝灰質礫岩である(表-1)。

(2) 奥春別地すべり地域：試料は鮮新統志計礼辺山溶岩に発達する熱水変質帯のアルナイト-石英帯デイサイトと、中新統シケレベ層およびハナクシベ層に発達する熱水変質帯のクローライト/スメクタイト混合層鉱物帯

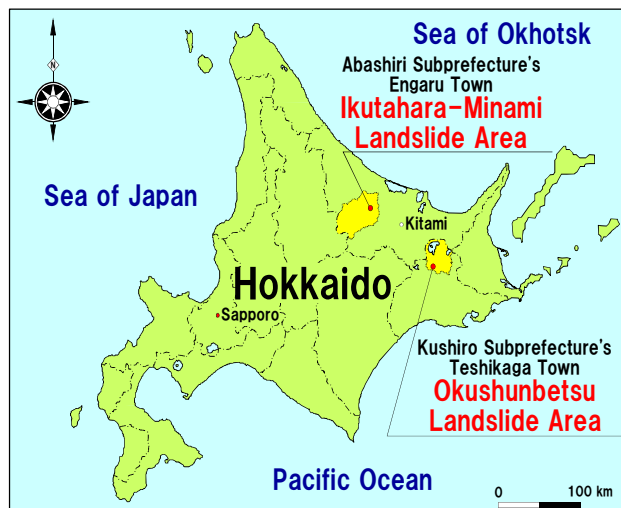


図-1 北海道遠軽町生田原南地すべり防止区域および弟子屈町奥春別地すべり地域南部の位置図

Acid alteration zone group	Sulfate series	Alunite - opal zone		Alunite - quartz zone		
	Silicate series	Halloysite zone	Kaolinite zone	Dickite zone	Pyrophyllite zone	
Neutral alteration zone group	K series	Smeectite zone		Int. Ill/Smc zone	Illite zone	K-feldspar zone
	Ca-Mg series			Int. Chl/Smc	Propylitic zone	
Alkaline alteration zone group	Ca series	Stilbite zone	Heulandite zone	Laumontite zone	Wairakite zone	
	Na series	Clinoptilolite zone	Mordenite zone	Analcite zone	Albite zone	

□ : hydrothermal alteration zones examined in this study.
Int. Ill/Smc: interstratified illite/smectite minerals zone.
Int. Chl/Smc: interstratified chlorite/smectite minerals zone.

図-2 熱水変質帯の分類 (Utada, 1980⁷⁾, 一部修正・加筆)

細粒凝灰岩、ヒューランダイト帯火山礫凝灰岩、モルデナイト帯細粒凝灰岩および軽石凝灰岩、クリノタイロライト帯細粒凝灰岩およびスメクタイト帯細粒凝灰岩の岩片である(表-1)。

これらの岩石試料には、波状葉理や平行葉理が見られるものや、たまねぎ状風化が見られるものがある。

2.2 供試体の準備

点載荷試験は、本来、非成形でおこなわれるが、非成形では点載荷強さのばらつきが大きい⁸⁾ので、強さのばらつきを小さくするため、しかも、最も容易に成形できることとボーリングコアを活用できることから、供試体は直径50 mm程度、高さ20 mm程度の円柱に成形した(図-3A)。この寸法は図-3A中の $0.3W < D < W$ の条件⁹⁾を満足する。

一軸圧縮試験における供試体形状は、円柱および正四

表－1 供試体の鉱物組合せおよび熱水変質帯と試験結果

Forced dry-state														
Sample No.	Sampling site	Stratigraphy	Rock facies	Mineral composition	Hydrothermal alteration zone	Loading direction	Point load test			Uniaxial compression test			qu/Is	
							Number of specimen	Is (MPa)	Cv (%)	Number of specimen	qu (MPa)	Cv (%)		
08101101	Teshikaga	Shikerepeyama Lava	Dac	Qtz (+++) - Alu (+++)	Alu-Qtz zone	-	14	1.79	10.4	5	23.66	8.7	13.22	
08100501			f Tf	Qtz (++++) - Chl/Smc (+)	Chl/Smc zone		18	2.01	19.5	2	15.19	9.1	7.56	
08092802			lap Tf	Qtz (+++) - Pl (+) - Cal (+) - Hul (+) - Chl (+) - Smc (+)	Hul zone		28	3.14	4.9	5	36.69	1.8	11.68	
08060801			pm Tf	Qtz (+) - Lmt (-) - Mor (+) - Smc (+)	Mor zone		5	1.20	7.4	1	15.24	0.0	12.70	
08060802				Qtz (+) - Lmt +) - Mor (+) - Smc (+)			9	1.33	9.3	1	14.00	0.0	10.53	
08060803				Qtz (+) - Lmt (-) - Mor (+) - Smc (+)			19	1.57	10.7	5	16.26	7.3	10.36	
08060804				Qtz (+) - Pl (-) - Lmt (-) - Mor (+) - Smc (+)			22	1.66	6.0	13	17.63	8.0	10.62	
08061501				f Tf			Qtz (+) - Fld (+) - Mor (+) - Cpt (+)	7	3.42	14.3	5	31.14	15.0	9.11
08061502			Qtz (+) - Fld (+) - Mor (+) - Cpt (-)				11	2.77	8.9	10	26.03	7.2	9.40	
08061503			Qtz (+) - Fld (+) - Mor (+) - Cpt (+)				19	2.77	8.5	3	29.78	0.9	10.75	
08061504			Qtz (+) - Pl (+) - Mor (+)				12	1.67	17.1	4	41.56	7.0	24.89	
08061505			Qtz (+) - Pl (+) - Mor (+)				14	1.43	15.8	3	23.32	2.2	16.31	
08061506			pm Tf				Qtz (+++) - Pl (+) - Mor (+)	7	1.51	8.3	6	18.49	2.9	12.25
08061507							Qtz (+++) - Pl (+) - Lmt (-) - Mor (+)	8	0.86	23.2	2	8.93	18.9	10.38
08102602							Qtz (+) - Mor (+) - Smc (+)	65	1.94	28.0	4	26.44	5.3	13.63
07070901	Ikutahara	Ikutawara Formation	f Tf	Qtz (+) - Fld (+) - Cpt (+) - Smc (+)	Cpt zone	⊥	11	0.92	19.1	3	19.86	2.4	21.59	
				Qtz (+) - Fld (+) - Cpt (+) - Smc (-)			15	1.20	12.1	1	21.47	0.0	17.89	
				Qtz (+) - Fld (+) - Cpt (+) - Smc (+)			14	0.79	26.4	1	17.35	0.0	21.96	
				Qtz (+) - Fld (+) - Cpt (+) - Smc (-)			15	1.00	9.7	5	22.10	4.1	22.10	
				Qtz (+) - Fld (+) - Cpt (+) - Smc (+)			14	2.24	28.6	3	18.09	22.7	8.08	
08092803	Teshikaga	Shikerepe Formation	f Tf	Qtz (+) - Pl (+) - OpA (+) - Smc (+)	Smc zone	⊥	15	0.90	40.8	1	10.67	0.0	11.86	
08102601														
Forced wet-state														
Sample No.	Sampling site	Stratigraphy	Rock facies	Mineral composition	Hydrothermal alteration zone	Loading direction	Point load test			Uniaxial compression test			qu/Is	
							Number of specimen	Is (MPa)	Cv (%)	Number of specimen	qu (MPa)	Cv (%)		
08101101	Teshikaga	Shikerepeyama Lava	Dac	Qtz (+++) - Alu (+++)	Alu-Qtz zone	-	15	1.51	15.5	5	15.64	21.0	10.36	
08100501			f Tf	Qtz (+++) - Chl/Smc (+)	Chl/Smc zone		19	0.09	45.6	4	1.21	15.0	13.44	
08092802			lap Tf	Qtz (+++) - Pl (+) - Cal (+) - Hul (+) - Chl (+) - Smc (+)	Hul zone		27	0.88	15.0	4	11.47	3.2	13.03	
08060805			pm Tf	Qtz (+) - Lmt (-) - Mor (+) - Smc (+)	Mor zone		44	0.46	17.8	17	4.73	12.5	10.28	
08061508			f Tf	Qtz (+) - Pl (+) - Mor (+)			18	0.94	11.4	10	16.65	19.8	17.71	
08061509				Qtz (+) - Pl (+) - Mor (+)			13	0.69	11.8	5	8.08	9.5	11.71	
08061510				Qtz (+) - Pl (+) - Mor (+)			7	0.48	23.0	5	5.81	14.3	12.10	
08061511				Qtz (+) - Pl (+) - Mor (+)			1	0.51	0.0	1	6.23	0.0	12.22	
08061512				Qtz (+) - Pl (+) - Mor (+)			4	0.53	14.3	1	6.44	0.0	12.15	
08061513				Qtz (+) - Pl (+) - Mor (+)			4	0.33	22.8	4	4.47	10.8	13.55	
08061514				Qtz (+) - Pl (+) - Lmt (-) - Mor (+) - Smc (+)			12	0.15	23.2	3	2.52	12.6	16.80	
08102602				Qtz (+) - Mor (+) - Smc (+)			66	0.50	32.3	3	7.70	29.1	15.40	
07070901	Ikutahara	Ikutawara Formation	f Tf	Qtz (+) - Fld (+) - Cpt (+) - Smc (+)	Cpt zone	⊥	12	0.39	33.4	4	4.08	11.7	10.46	
				Qtz (+) - Fld (+) - Cpt (+) - Smc (-)			35	0.52	17.6	2	5.20	1.4	10.00	
				Qtz (+) - Fld (+) - Cpt (+) - Smc (+)			16	0.35	28.4	4	4.36	3.5	12.46	
				Qtz (+) - Fld (+) - Cpt (+) - Smc (-)			32	0.46	20.9	3	5.36	3.5	11.65	
				Qtz (+) - Pl (+) - Cpt (-) - Smc (+)			17	0.44	24.8	1	4.60	0.0	10.45	
08092803	Teshikaga	Shikerepe Formation	f Tf	Qtz (+) - Pl (+) - Cpt (-) - Smc (+)	Smc zone	⊥	8	0.73	28.8	1	6.08	0.0	8.33	
08062801				Hanakushibe Formation										
Boring core	Ikutahara	Ikutawara Formation	tf Cg	Qtz (-) - Pl (-) - OpCT (-) - 10 Å Ha (-)	Ha zone	-	2	0.11	4.8	1	1.08	0.0	9.82	
			pm Tf	Qtz (-) - Pl (-) - OpCT (-) - 10 Å Ha (-)			1	0.37	0.0	1	4.22	0.0	11.41	

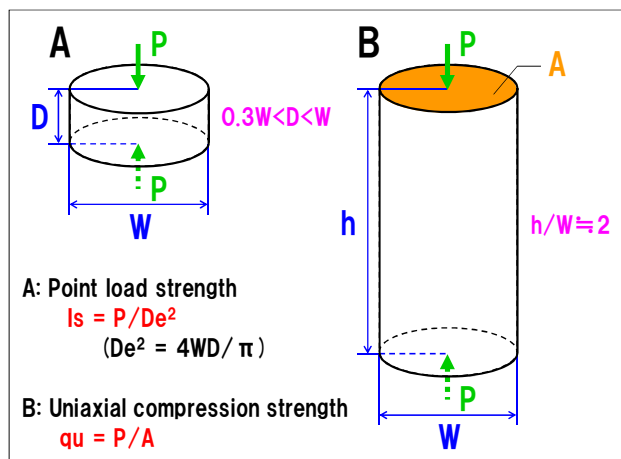
Abbreviation of rocks: Dac=dacite, f Tf=fine tuff, lap Tf=lapilli tuff, pm Tf=pumice tuff, tf Cg=tuffaceous conglomerate.

Abbreviation of minerals: Alu=alunite, Cal=calcite, Chl=chlorite, Chl/Smc=interstratified chlorite/smectite minerals, Cpt=clinoptilolite, Fld=feldspar, Ha=halloysite, Hul=heulandite, Lmt=laumontite, Mor=mordenite, OpA=opal-A, OpCT=opal-CT, Pl=plagioclase, Qtz=quartz, Smc=smectite.

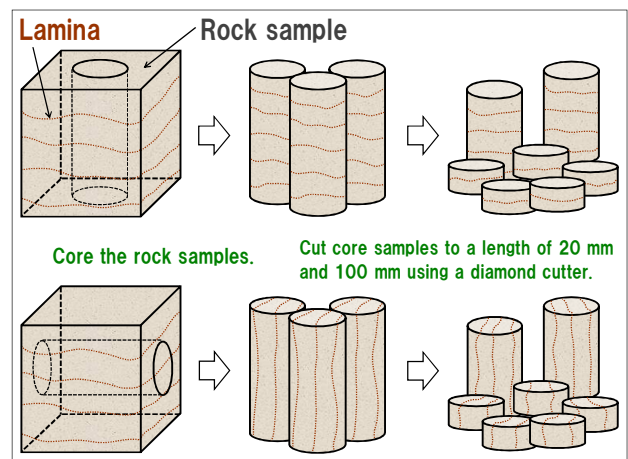
Relative abundance: (+++) > (++) > (+) > (-).

Loading direction: ⊥=perpendicular of the lamina plane, ||=parallel of the lamina plane.

Point load test and uniaxial compression test: Is=point load strength, qu=uniaxial compression strength, Cv=coefficient of variation.



図－3 点载荷試験および一軸圧縮試験の供試体形状



図－4 供試体の準備方法

角柱がある⁹⁾が、供試体は直径 50 mm 程度、高さ 100 mm 程度の円柱に成形した(図－3 B)。この寸法は図－3 B 中の $h/W \approx 2$ の条件⁹⁾を満足する。

成形には、オートコピック(株式会社マルトー)およびダイヤモンドカッター(有限会社岩本鉱産物商会)を使用した(図－4)。ここで、異方性を持つ岩石において試験をおこなう場合、層理面に対して垂直および平行に

载荷し、それらのデータを区別して扱う必要がある¹⁰⁾ため、葉理面が確認される試料に関しては、葉理面に対して垂直および平行にそれぞれ分けて成形した(図－4)。成形した供試体(点载荷試験用 695 個、一軸圧縮試験用 162 個)は、試験のばらつきを小さくするため、強さに大きな影響を与えるようなクラックを含まないものを選び、各試験に必要な分だけ用意した(表－1)。なお、ここで

の強制乾燥状態は膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトやハロイサイト(10Å)などの結晶構造が破壊されないと考えられる。60±3℃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蒸留水に一定質量になるまで浸した状態である。

2.3 点載荷試験および一軸圧縮試験

試験装置は、点載荷試験装置(株式会社本間電気製作所札幌)および万能試験機(株式会社東京衡機製作所)を使用した(図-5)。また、点載荷試験における載荷コーン形状は、様々なものがあるが、この研究では ISRM の指針で規定されているものと同一である⁹⁾。一軸圧縮試験時には球座を使用し、応力が均一に加わるように配慮した。

3. 結果および考察

3.1 円柱(縦)点載荷強さおよび一軸圧縮強さ

円柱(縦)点載荷試験と一軸圧縮試験における強制乾燥および強制湿潤状態の点載荷強さと一軸圧縮強さを表-1に示す。

これらのデータから、強制乾燥状態における点載荷強さはモルデナイト帯細粒凝灰岩(試料番号: 08061501)が 3.42 MPa で最も大きく、クリノタイロライト帯細粒凝灰岩(試料番号: 07070901)が 0.79 MPa で最も小さい。一軸圧縮強さはモルデナイト帯細粒凝灰岩(試料番号: 08061504)が 41.56 MPa で最も大きく、モルデナイト帯軽石凝灰岩(試料番号: 08061507)が 8.93 MPa で最も小さい。また、強制湿潤状態における点載荷強さはアルーナイト-石英帯デイサイト(試料番号: 08101101)が 1.51 MPa で最も大きく、クローライト/スメクタイト混合層鉱物帯細粒凝灰岩(試料番号: 08100501)が 0.09 MPa で最も小さい。一軸圧縮強さはモルデナイト帯細粒凝灰岩(試料番号: 08061508)が 16.65 MPa で最も大きく、ハロイサイト帯凝灰質礫岩(ボーリングコア)が 1.08 MPa で最も小さい。それで、強制湿潤状態において、スメクタイトやハロイサイト(10Å)などの膨潤性粘土鉱物を含む試料の強さが小さいのは、これらの膨潤性粘土鉱物が強制湿潤状態によって膨張したことが強さ低下に影響を与えたと考えられる。

強制乾燥および強制湿潤状態における点載荷強さと一軸圧縮強さの変動係数(表-1)は、前者の方が大きい傾向があり、ばらつきが大きい。ここで、供試体個数 n は、点載荷強さの変動係数の大きさに強く影響され、変動係数が 10%前後の場合、3, 4 個、20%前後で 10 個程度、30%前後で 20 個程度が要求される³⁾。それで、点載荷強さの変動係数と供試体個数(表-1)から、変動係数が大きい値を示しているのにもかかわらず、供試体個数が少ない試料もあるが、ほとんどの試料については変動係数による供試体個数を満足しているため、この研究における点載荷試験結果は高い精度を持つと考えられる。供試体個数が少ない試料に関しては、今後、供試体個数を増やすことで改善されることが考えられる。

3.2 円柱(縦)点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係

円柱(縦)点載荷試験結果および一軸圧縮試験結果から、これらの相関関係を図-6に示す。

強制乾燥および強制湿潤状態における円柱(縦)点載荷

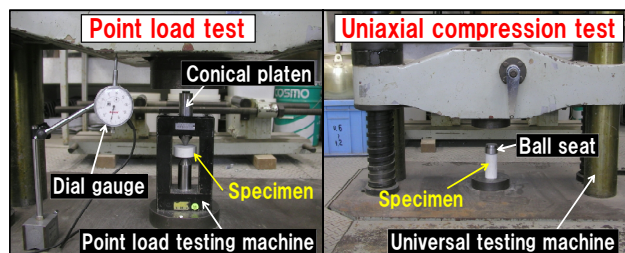


図-5 点載荷試験装置および万能試験機

強さ I_s と一軸圧縮強さ q_u との関係式は、回帰直線の傾きからそれぞれ $q_u = 6.8 I_s + 10.0$ および $q_u = 11.7 I_s + 0.2$ であり、また、強制乾燥および強制湿潤状態における相関係数は、それぞれ 0.63 および 0.92 であり、強制湿潤状態において非常に高い相関が見られる。

4. 結 言

生田原南地すべり地域における上部中新統生田原層と奥春別地すべり地域における鮮新統志計礼辺山溶岩、上部中新統シケレペ層およびハナクシベ層に産する熱水変質軟岩および中硬岩の円柱(縦)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) 強制乾燥状態における円柱(縦)点載荷強さ I_s と一軸圧縮強さ q_u との関係式は $q_u = 6.8 I_s + 10.0$ であり、前者と後者との相関係数が 0.63 であることから、高い相関が見られる。
- (2) 強制湿潤状態における円柱(縦)点載荷強さ I_s と一軸圧縮強さ q_u との関係式は $q_u = 11.7 I_s + 0.2$ であり、前者と後者との相関係数が 0.92 であることから、非常に高い相関が見られる。
- (3) フィールドにおける岩石の含水状態はそのほとんどの場合、雨水や融雪水、地下水の影響により湿潤状態であることと、強制湿潤状態において円柱(縦)点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係に非常に高い相関があることから、円柱(縦)点載荷強さから一軸圧縮強さを算出する際には供試体の含水状態は強制湿潤状態の方がより有効であると考えられる。
- (4) 点載荷試験は、フィールドにおいて岩石強さを迅速に評価することができるため、試料採集後の時間短縮を可能にし、室内試験によるスレーキングなどの影響を少なくすることも可能であることから、非常に有効な試験である。

5. 今後の課題

様々な種類の熱水変質岩についても同様の試験を実施し、より多くのデータを集積すれば、熱水変質岩における円柱(縦)点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係を明らかにすることができると考えられる。また、熱水変質岩以外の様々な軟岩および中硬岩、さらには硬岩における関係についても明らかにすれば、点載荷試験のみで岩盤評価を可能にすることができ、地すべり(狭義)や崩壊などのハザードマップを作成する際にも、岩石強さの面からその精度をより高くすることができると考えられる。なお、最終的には室内試験でおこなう成形試料ではなく、フィールドにおける非成形試料についての点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係を明らかにすることが課題である。

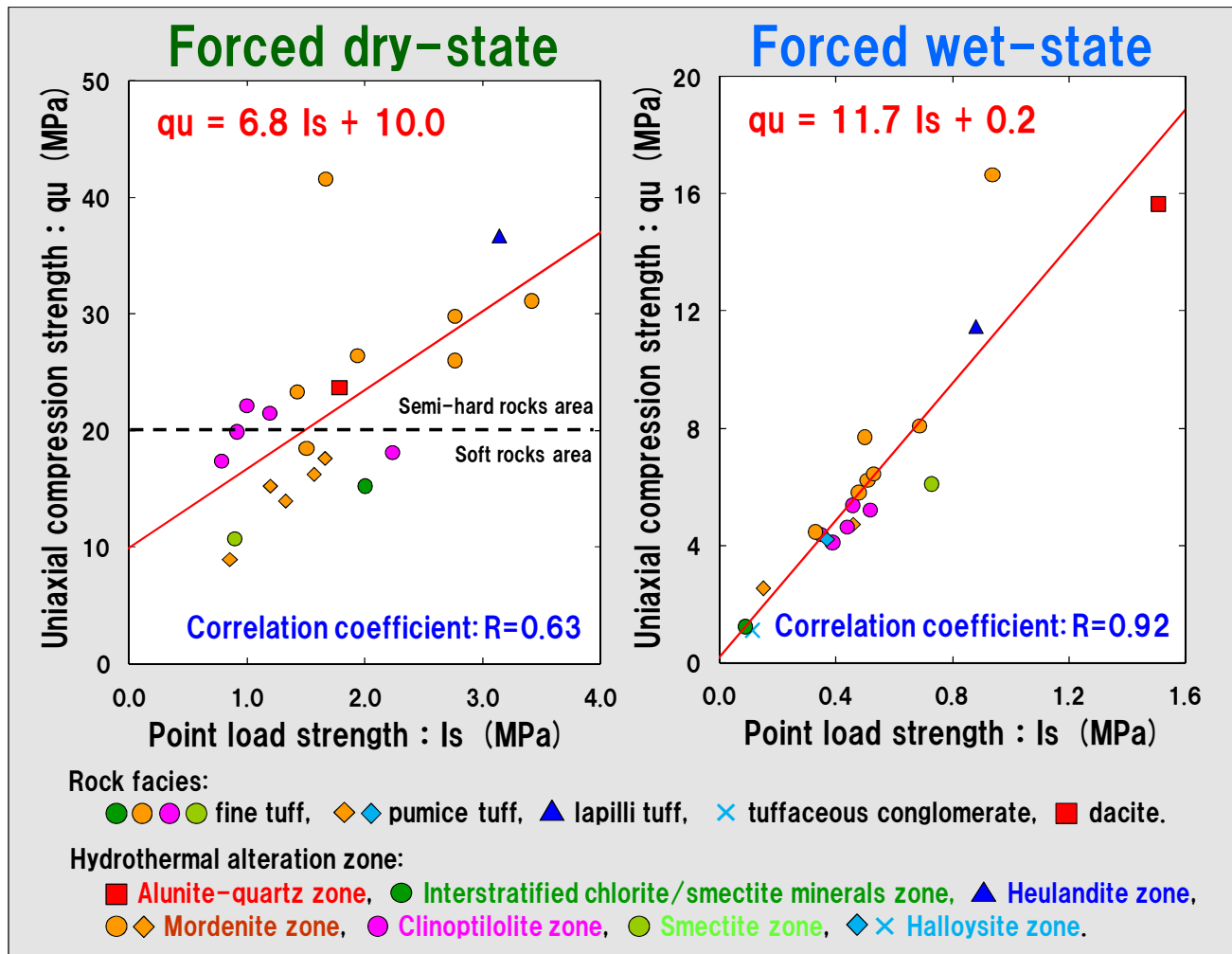


図-6 熱水変質岩における円柱(縦)点載荷強さと一軸圧縮強さとの関係

謝辞：国立大学法人北見工業大学工学部社会環境工学科後藤隆司准教授，中村 大助教，平松雅宏技術員および岡田包儀技術員にはオートコアピッカー，ダイヤモンドカッター，万能試験機，点載荷試験装置およびダイヤルゲージの使用を快諾していただいた。同土木開発工学科鹿毛一平氏，久保仁美氏，小竹純平氏，中 優里江氏および仁井太陽氏には試料採集と室内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。

引用文献

- 河野勝宣・前田寛之・中村政文・辻 健史・榊原直人：軟岩一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，日本応用地質学会平成20年度研究発表会講演論文集，pp.193-194, 2008.
- 平松良雄・岡 行俊・木村英郎：非整形試験片による岩石の引張強さ迅速試験，日本鉱業会誌，Vol.81, No.932, pp.1024-1030, 1965.
- 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.
- 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.
- 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.
- BIENIAWSKI, Z.T.: Estimating the strength of rock materials, *J. S. Afr. Inst. Min. and Met.*, Vol.74, No.8, pp.313-320, 1974.
- Utada, M.: Hydrothermal alterations related to igneous activity in Cretaceous and Neogene formations of Japan. In *granitic magmatism and related mineralization* (S. Ishihara and S. Takenouchi, ed.), *Mining Geol. Spe. Issue*, No.8, pp. 67-83, 1980.
- 前田寛之：熱水変質帯地すべりと熱水変質岩の点載荷強度との関係ー東部北海道弟子屈町奥春別地すべり地域および遠軽町生田原南地すべり地域の例ー，平成18年度(社)日本地すべり学会シンポジウム講演集，pp.39-46, 2006.
- 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.
- 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・解説書ー平成18年度版ー，社団法人地盤工学会，256p, 2006.