

礫岩の点載荷強さに及ぼす影響因子に関する実験的検討

鳥取大学 ○松本 直希
鳥取大学 正会員 河野 勝宣

1. はじめに

岩盤斜面の安定性評価やトンネル掘削時の切羽の岩質判定などでは、岩の強度特性は最も基礎的な評価項目であるとともに、取得必須の情報である。一軸圧縮強さは岩石の代表的な力学特性の一つとして挙げられる。しかし、岩石中の割れ目の存在により、所定の供試体寸法を満足できない場合もある。また、スメクタイト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。そのため、点載荷試験、シュミットハンマー試験、超音波速度試験、針貫入試験などから間接的に一軸圧縮強さを推定しようとする研究例が数多く存在する。このうち、点載荷試験(図-1)は、小さな試料で、非整形で、しかも野外でも短時間で簡単に実施することができるので、国内外を問わず実用例も非常に多い¹⁾³⁾。点載荷試験による岩塊の強度評価はこれまで、非常に多くの岩種についてほぼ網羅的に検討されているものの、礫岩を対象としたものは著者らの知る限り存在しない。礫岩の場合、図-2に示すように、礫と基質部の硬軟の差、礫の分布状態、さらに、載荷点位置の礫の有無によっては、点載荷強さのばらつきが大きくなるのが容易に想像できる。そのため、そもそも礫岩に対して点載荷試験を実施すること自体ナンセンスであるというのが共通認識である。礫岩自体は決して珍しい岩種ではなく、角礫岩や火山砕屑性の凝灰角礫岩等も含めると、その分布域は非常に広く、これら岩種を主とする地質条件下で発生した岩盤崩落や落石災害も多く報告されている。したがって、礫岩の強度評価に対しても点載荷試験を適用することができれば岩塊の強度評価の迅速化やコスト縮減につながり、非常に有意義であると考えられる。

本研究では、人工礫岩供試体を用いて礫含有率や載荷点位置における礫の有無が点載荷強さの大きさやばらつきにどの程度影響するのかについて実験により調べ、礫岩への点載荷試験の適用可能性について検討した。さらに、得られた結果から、人工礫岩の点載荷強さと一軸圧縮強さの関係の特徴についてまとめた。

2. 研究方法

人工礫岩供試体は、礫(9~12 mm, 3~6 mm, 2.5~5 mm)と基質部に相当する固化材(石膏またはセメント(I),(II)の3種類)に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、固化させて作成した。表-1に示すように、人工礫岩は下記の比較を目的に、基質部の固化材と礫サイズに応じて5種類作成した。すなわち、供試体Aと供試体Bでは基質部の材料の違い(強度は同程度)の比較、供試体Aと供試体Cでは基質部の強度の違い(材料は同じ)の比較、供試体A、供試体Dおよび供試体Eでは礫サイズの違いの比較である。

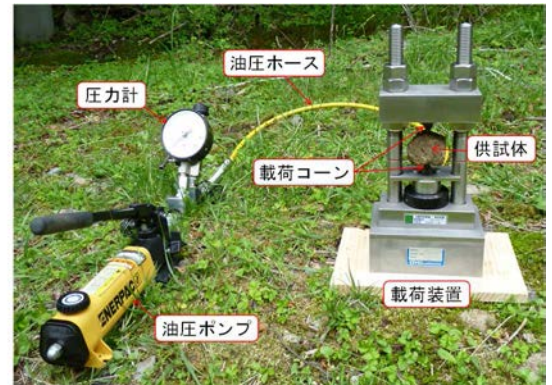


図-1 点載荷試験 (応用地質(株)製 Model-4326)

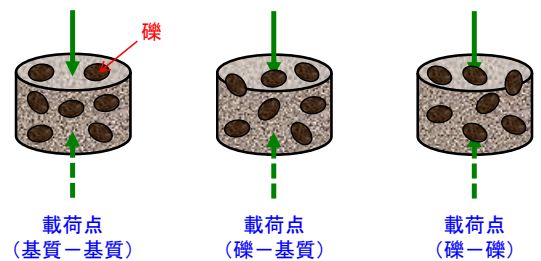


図-2 礫岩に対する点載荷試験の問題点

キーワード 点載荷試験, 礫岩, 一軸圧縮強さ

連絡先 〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101 鳥取大学工学部 地盤工学研究室 TEL0857-31-5755 (河野)

表-1 人工礫岩供試体の基本物性

供試体 No.	基質	礫サイズ	乾燥密度 [g/cm ³]	飽和密度 [g/cm ³]	吸水率 [%]	有効間隙率 [%]
A	セメント(I)	9-12 mm	2.17	2.31	13.35	6.25
B	石膏	9-12 mm	1.87	2.09	22.36	12.36
C	セメント(II)	9-12 mm	2.33	2.40	7.67	3.32
D	セメント(I)	3-6 mm	2.19	2.29	10.13	4.67
E	セメント(I)	2.5-5 mm	2.19	2.31	11.92	5.49

点荷試験供試体は直径 50 mm、高さ 20 mm の円柱形とした。供試体の礫分含有率（礫分の体積比率） C_g は 0～60%（10%間隔）である。供試体の基本物性を表-1 に示す。石膏供試体とセメント供試体では物性値に違いが見られるものの、これらの値は、天然の岩石の物性値の範疇にある。

点荷試験は、球面状の突起（荷重コーン）の2点間で供試体を挟み、荷重することによって供試体を破壊させる試験である。本研究における点荷試験は、応用地質(株)製 Model-4326 の点荷試験機（図-1）を用いて実験室内で実施した。試験は、試験直前に 60℃ で 24 時間乾燥した供試体（含水率 0%）を用いて行い、荷重方式は、供試体端面に垂直な方向（軸方向点荷：図-3）とした。本研究では合計 1217 個の供試体について点荷試験を実施した。供試体破壊前後の観察から、上下ともに礫部による点荷、礫部と基質部による点荷、上下ともに基質部による点荷の3つに分類して結果を整理した。点荷強さ $I_{s(50)}$ は ISRM Commission⁴⁾ に基づいて、式(1)によって算出した。

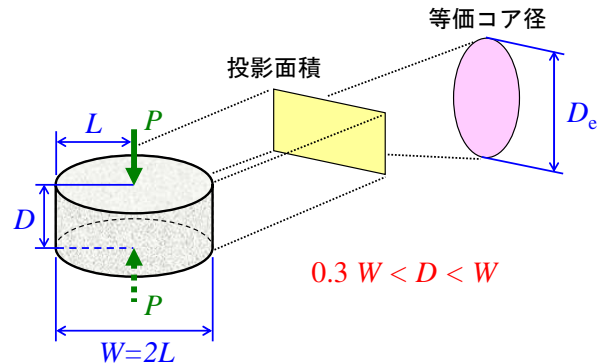


図-3 点荷試験の供試体形状（軸方向点荷）

$$I_{s(50)} = F \frac{P}{D_e^2} \quad F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0.45} \quad D_e^2 = \frac{4WD}{\pi} \quad (1)$$

ここで、 F は寸法補正係数、 P は破壊荷重、 D_e は等価コア径（2つの荷重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（円）の直径である：図-3）、 W は供試体幅、 D は荷重点間隔である。

3. 結果および考察

各礫分含有率における点荷試験結果を図-4 に示す。図中の G-G は上下ともに礫部による点荷、G-M は礫部と基質部による点荷、M-M は上下ともに基質部による点荷の結果とそれらの平均値を示している。また、上記3つの結果をすべて合わせた全平均値も示している。なお、図-4A, B は河野ら⁵⁾の結果である。

供試体 A（セメント(I)）と供試体 B（石膏）を比較すると、両供試体ともに点荷強さ $I_{s(50)}$ の平均値は $C_g = 10\%$ において最も大きく、 C_g の増加に伴い、低下傾向が見られた。次に、荷重点位置の礫の有無による $I_{s(50)}$ の平均値に着目すると、いずれの C_g においても M-M、G-M、G-G の順に $I_{s(50)}$ が大きくなる傾向があり、荷重点位置に礫が存在すると $I_{s(50)}$ が大きくなる傾向がわかった。特に、G-G については M-M および G-M に比べて2倍程度も大きいことがわかった。したがって、礫岩を用いて点荷試験を実施する場合、荷重点位置の礫の有無により $I_{s(50)}$ が大きく異なる可能性がある点に留意する必要がある。

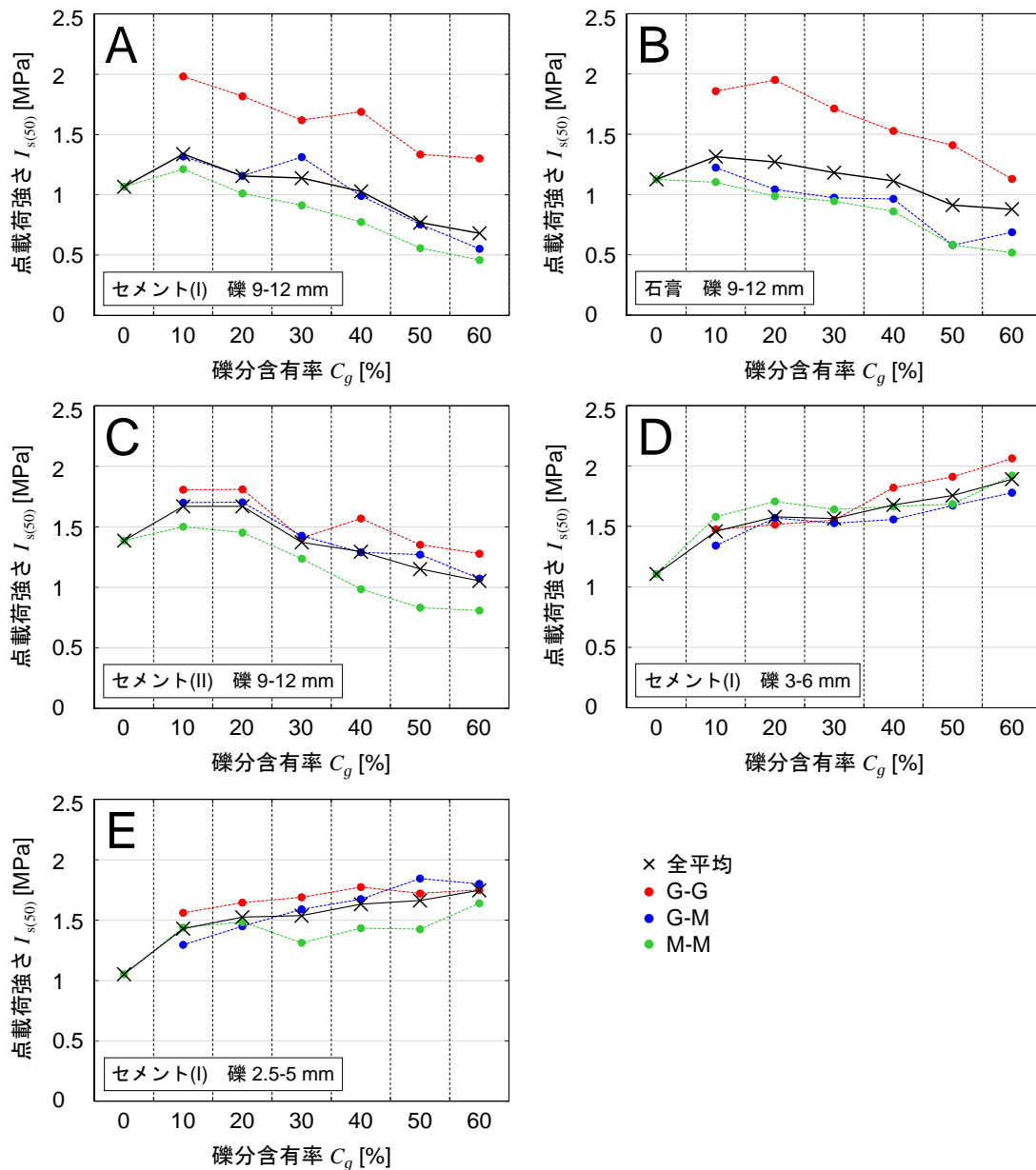


図-4 人工礫岩供試体の点載荷強さ (A~Eは表-1の供試体No.に対応)

供試体 A (セメント(I)) と供試体 C (セメント(II)) を比較する。供試体 C は、供試体 A および B と同様に、点載荷強さ $I_{s(50)}$ の平均値は $C_g = 10\%$ において最も大きく、 C_g の増加に伴い、低下傾向が見られた。載荷点位置の礫の有無による $I_{s(50)}$ の平均値については、いずれの C_g においても M-M、G-M、G-G の順に $I_{s(50)}$ が大きくなる傾向がみられるものの、供試体 A および B のような大きな差は見られない。基質部の強度が増したことで (セメント(I) < セメント(II))、礫の影響による強度差がそれほど現れなかったと考えられる。今後、礫自体の強度特性の把握と、礫と基質部の強度が同程度の供試体を用いて検討する必要がある。

供試体 A (礫 9~12 mm)、供試体 D (礫 3~6 mm) および供試体 E (礫 2.5~5 mm) を比較する。供試体 D および E の点載荷強さ $I_{s(50)}$ の平均値は $C_g = 60\%$ において最も大きく、 C_g の増加に伴い、増加傾向が見られた。載荷点位置の礫の有無による $I_{s(50)}$ の平均値については、いずれの C_g においても明瞭な傾向の違いは見られなかった。礫径が小さくなることで、基質部と礫部の一体性・均質性が増す方向になり、その結果、載荷点位置の礫の影響の低減、さらに、基質に比べて強度の大きい礫の増加に伴って点載荷強度が増加したと考えられる。したがって、礫径および礫分含有率は点載荷強さに影響を与える一つの要因になることがわかった。今後、種々の礫径における同様の検討をする必要がある。

点荷試験結果の妥当性について、供試体個数 N と変動係数 C_v の関係 (図-5) より考察する。点荷試験における供試体個数 N は $I_{s(50)}$ の変動係数 C_v の大きさに強く影響される。 $I_{s(50)}$ の分布が正規分布で近似できるとすれば、試験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⁶⁾。図-5 は、信頼度 90%での片側信頼区間の平均値に対する百分率 ϕ ($\phi=25\%$, $\phi=30\%$) が、 N によってどのように変化するかを示している。すなわち、赤破線よりもプロットが右側に存在すれば、信頼度 90%での片側信頼区間が平均値の 30%以内に、青破線よりもプロットが右側に存在すれば、平均値の 25%以内の試験結果であるということになる。当然、後者のほうが試験結果の精度 (妥当性) が高いという評価になる。図-5 より、荷点位置に礫が存在すると $I_{s(50)}$ のばらつきが大きくなる傾向がわかる。G-Gを除くと、いずれのケースも $\phi=25\%$ では、変動係数に見合った供試体個数を用意していることがわかる。

一軸圧縮強さが 30 MPa 以下の範囲における点荷強さ $I_{s(50)}$ と一軸圧縮強さ q_u との関係を図-6 に示す。 $q_u=25$ MPa が軟岩と硬岩の境界の一つの目安とされている。 q_u と $I_{s(50)}$ の関係式 (黒実線) は $q_u=15.3 I_{s(50)}$ (相関係数: $R=0.95$) であり、軟岩を対象とした代表的な関係式 $q_u=16.4 I_{s(50)}$ ⁷⁾ と近い傾きであることがわかる。荷点位置の礫の有無を考慮した $I_{s(50)}$ を用いて q_u との関係を示したものが図-6 中の色付き破線である。これらの傾きをみると、荷点位置の片側 (G-M) または両側 (G-G) に礫が存在する場合、M-Mにおける関係式に比べて傾きが小さくなることがわかった。以上のことから、点荷試験から礫岩の一軸圧縮強さを推定する場合、荷点位置の礫の有無により関係式の傾きが大きく異なる点に留意する必要がある。

4. まとめと今後の課題

点荷試験を用いて礫岩の強度特性を評価する際、荷点位置の礫の有無、礫径、基質部の強度の違い、礫含有率により点荷強さが大きく異なることが明らかとなった。今後、礫の寸法や形状、寸法効果の影響についての追加実験、また、野外で天然の礫岩を採取し、点荷試験および一軸圧縮試験を実施することで、本研究結果との整合性について検討する予定である。

参考文献

- 1) Broch, E. and Franklin, J. A.: The point-load strength test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **9** (6), 669–697, 1972.
- 2) Bieniawski, Z. T.: Estimating the strength of rock materials, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, **74** (8), 312–320, 1974.
- 3) Bieniawski, Z. T.: Point load test in geotechnical practice, *Eng. Geol.*, **9** (1), 1–11, 1975.
- 4) ISRM Commission on Testing Methods, Working Group on Revision of the Point Load Test Method: Suggested method for determining point load strength (Coordinator Franklin, J. A.), *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **22** (2), 51–60, 1985.
- 5) 河野勝宣, 柏原和歩, 小野祐輔: 礫岩への点荷試験の適用可能性についての実験的検討, 第74回(令和4年度)公益社団法人土木学会中国支部研究発表会発表概要集, 230–233 (III-26), 2022.
- 6) 疋田貞良, 菊地昌博: 点荷試験の実用性に関する一考察, 開発土木研究所月報, (423), 30–41, 1988.
- 7) Kohno, M. and Maeda, H.: Relationship between point load strength index and uniaxial compressive strength of hydrothermally altered soft rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **50**, 147–157, 2012.

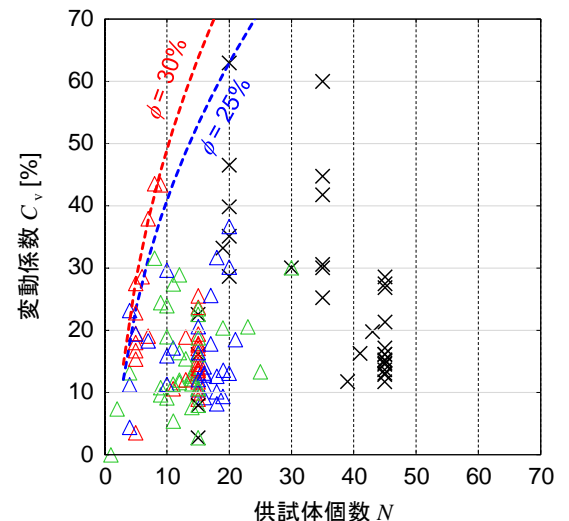


図-5 点荷試験の供試体個数と変動係数との関係

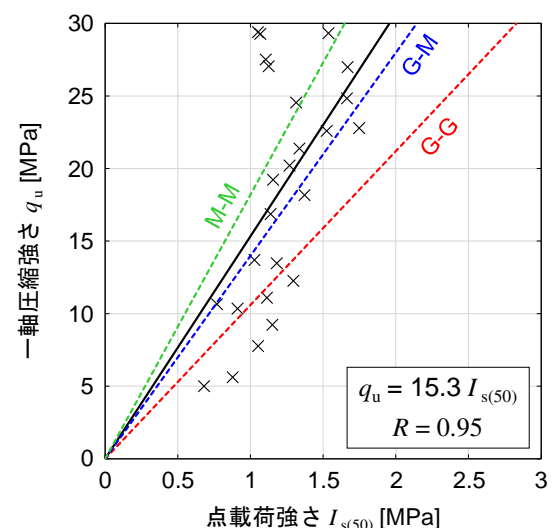


図-6 点荷強さと一軸圧縮強さとの関係