

## 礫岩への点載荷試験の適用可能性についての実験的検討

鳥取大学 正会員 ○河野 勝宣  
 鳥取大学 柏原 和歩  
 鳥取大学 正会員 小野 祐輔

## 1. はじめに

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多い。点載荷試験に基づく一軸圧縮強さの推定に関する研究例は、1960年代から近年までに非常に多く報告されている。代表的な点載荷強さと一軸圧縮強さの関係式については、Kahraman et al.<sup>1)</sup>や Kohno and Maeda<sup>2)</sup>においてまとめられている。これらの研究例では、非常に多くの岩種について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、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こと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い。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有意義であると考えられる。



図-1 点載荷試験（応用地質(株)製 Model-4326）

本研究では、礫岩を模擬した供試体を用いて点載荷試験を実施した。礫岩の点載荷強さの大きさやばらつきに対して、礫分含有率や載荷点位置における礫の有無がどの程度影響するのかについて調べることにより、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。

本研究では、礫岩を模擬した供試体を用いて点載荷試験を実施した。礫岩の点載荷強さの大きさやばらつきに対して、礫分含有率や載荷点位置における礫の有無がどの程度影響するのかについて調べることにより、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（那智石：9～12 mm，粒子密度 2.77 g/cm<sup>3</sup>）と基質部に相当する固化材（石膏またはセメントの2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。点載荷試験供試体は直径 50 mm，高さ 20 mm の円柱形，一軸圧縮試験供試体は直径 50 mm，高さ 100 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。点載荷試験供試体の基本物性（乾燥密度 $\rho_d$ ，飽和密度 $\rho_{sat}$ ，吸水率 $Q$ および有効間隙率 $n_e$ ）を図-2に示す。いずれの供試体も $C_g$ の増加に伴い、物性変化が見られる。石膏供試体とセメント供試体では同じ $C_g$ における $n_e$ の値に違いが見られるものの、その他の物性値については大きな違いは見られない。なお、これらの値は、天然の岩石の物性値の範疇にある。

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）

点荷試験は、球面状の突起（荷コーン）の2点間で供試体を挟み、荷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°Cで24時間乾燥した供試体(含水率0%)を用いて行い、荷方式は、供試体端面に垂直な方向(軸方向点荷: 図-3)とした。供試体は1つ条件につき15個以上の計375個用意した。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 Commission<sup>3)</sup>に基づいて、次式によって算出した。

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

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

一軸圧縮試験は、(株)誠研舎製の圧縮試験機DTC-127Bを用いて実施した。供試体の含水条件は点荷試験時と同じである。供試体は1つ条件につき3本以上の計76本用意した。軸ひずみ速度は0.1%/minとした。

### 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平均値も示している。

石膏供試体およびセメント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。

$C_g$ の増加に伴う $I_{s(50)}$ の低下傾向は、礫岩の強度特性評価に関する既往の研究<sup>4)</sup>とも調和的である。また、礫混じり軟岩の強度特性に関する研究<sup>5)</sup>では、 $C_g$ の増加に伴い、破壊ひずみも減少する傾向があることが報告されており、これについては、礫の混入により供試体内部のひずみが不均質になるとともに、脆性的な破壊を生じる環境のもとでは全体の強度や破壊ひずみが減少すると説明している。次に、荷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

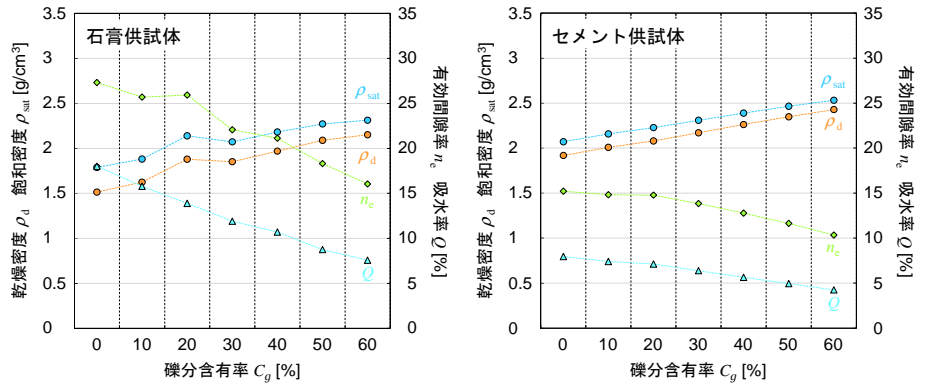


図-2 人工礫岩供試体の基本物性

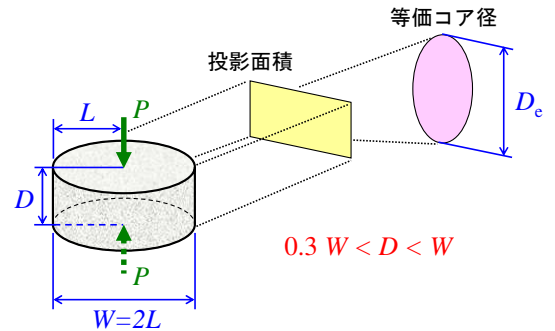


図-3 点荷試験の供試体形状(軸方向点荷)

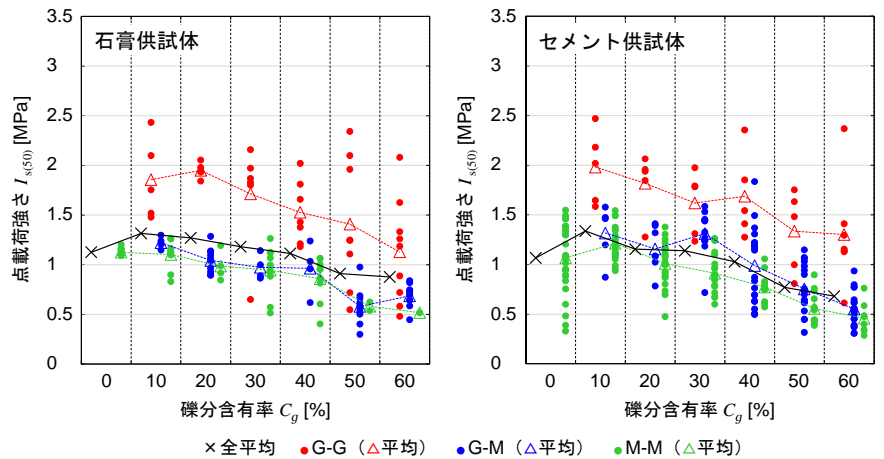


図-4 人工礫岩供試体の点荷強さ

験を実施する場合、荷点位置の礫の有無により  $I_{s(50)}$  が大きく異なる点に留意する必要がある。

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<sup>6)</sup>。

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  $\phi$  ( $\phi = 25\%$ ,  $\phi = 30\%$ ) 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。

各  $C_g$  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。なお、従来の一軸圧縮試験によれば、 $C_v$  が 15~20%である例が比較的多く、特に  $C_v$  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とされるが<sup>7),8)</sup>、本研究における  $q_u$  の  $C_v$  はすべて 20%以下である。 $C_g = 0\%$  供試体の  $q_u$  は 25 MPa 以上であるので硬岩に分類され、 $C_g = 10\sim60\%$  供試体（礫岩）の  $q_u$  は 25 MPa 以下であるので軟岩に分類される。図-6 におけるプロットをみると、 $C_g = 0\%$  と  $C_g = 10\sim60\%$  では、 $I_{s(50)}$  と  $q_u$  の傾きに違いが見られた。 $C_g = 0\%$  供試体は、礫を含んでおらず、細粒砂岩や泥質岩と捉えることもできる。 $C_g = 0\%$  供試体の関係式（黒実線）は  $q_u = 25.6 I_{s(50)}$  であり、硬岩を対象とした

代表的な関係式  $q_u = 24 I_{s(50)}$ <sup>9)-11)</sup> と近い傾きであることがわかる。一方、 $C_g = 10\sim60\%$  供試体の関係式（黒破線）は  $q_u = 13.9 I_{s(50)}$  であり、軟岩を対象とした代表的な関係式  $q_u = 16.4 I_{s(50)}$ <sup>2)</sup> に比べて若干傾きが小さいものとなった。関係式<sup>2)</sup> は主に塊状の均質な熱水変質軟岩を対象として得られたものであり、礫岩等の不均質な岩種は含まれていない。このことが同じ軟岩領域でありながら関係式に違いが見られたものと考えられる。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。一方で、礫を避けて点荷した場合（M-M）は、関係式<sup>2)</sup> の傾きと近くなるようにも見える。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。なお、図-6 に示されるいずれの関係式も相関係数は 0.97 以上であり、非常に強い相関がある。

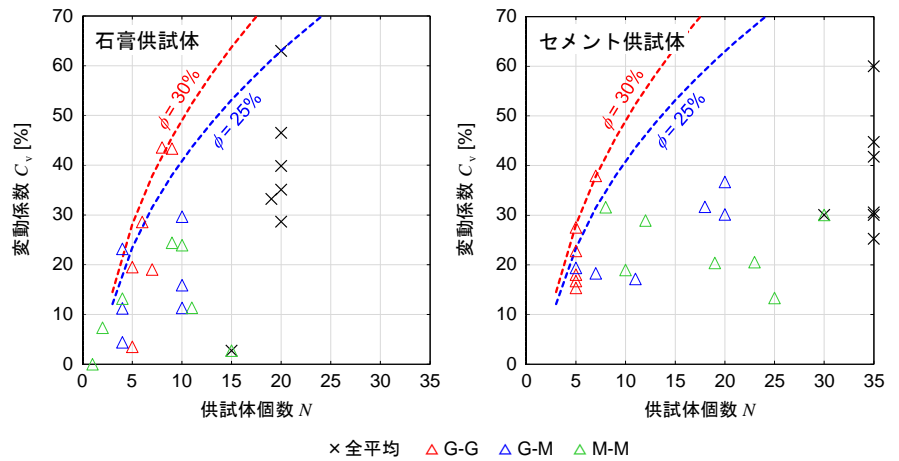


図-5 点荷試験における供試体個数と変動係数との関係

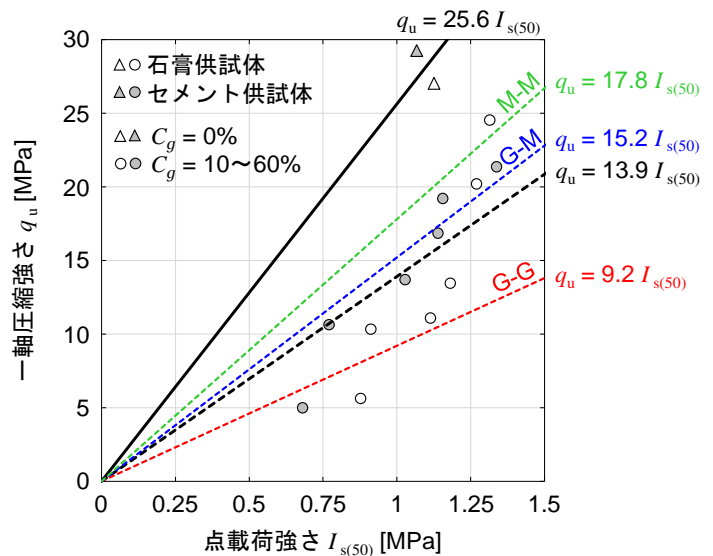


図-6 人工礫岩の点荷強さと一軸圧縮強さとの関係

#### 4. まとめと今後の課題

点載荷試験を用いて礫岩の強度特性を評価する際、載荷点位置の礫の有無により点載荷強さが大きく異なることが明らかとなった。今後、第一著者を中心に、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、点載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。さらに、最終著者を中心に、礫岩の不均質性によって生じる強度のばらつきの程度を有限要素法による数値解析を用いて解明する予定である。これらの検討結果を統合することにより、礫岩のような不均質性が卓越する岩石／岩質材料の強度特性評価に対する点載荷試験の適用可能性の詳細を明らかにする。

#### 参考文献

- 1) Kahraman, S., Gunaydin, O. and Fener, M.: The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **42** (4), 584–589, 2005.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 川崎 了・中川 加明一郎・江藤芳武・野崎明人・小泉和広：室内試験による大深度礫岩コアの品質評価，土木学会論文集，(617), III-46, 77–87, 1999.
- 5) 小林隆志・吉中 龍之進：礫混じり軟岩の強度・変形特性に関する研究，土木学会論文，(487), III-26, 31–40, 1994.
- 6) 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，(423), 30–41, 1988.
- 7) 佐々宏一・西松裕一・山崎豊彦：岩石の強さ試験結果の処理方法および供試体数の決定方法について，日本鉱業会誌，**84** (965), 1475–1478, 1968.
- 8) 日本鉱業会「岩石強度測定法特別委員会」編：岩石強度測定法実施基準案，日本鉱業会誌，**84** (965), 1479–1487, 1968.
- 9) Broch, E. and Franklin, J. A.: The point-load strength test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **9** (6), 669–697, 1972.
- 10) Bieniawski, Z. T.: Estimating the strength of rock materials, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, **74** (8), 312–320, 1974.
- 11) Bieniawski, Z. T.: Point load test in geotechnical practice, *Eng. Geol.*, **9** (1), 1–11, 1975.