

Ⅲ-A 333

礫岩の強度評価に関する一考察

(財) 電力中央研究所 正会員 岡田哲実
 (財) 電力中央研究所 正会員 伊藤 洋 野崎隆司
 (株) ダイヤコンサルタント 非会員 中村敏明

1. はじめに

近年、原子力発電所やダムの基礎岩盤として、礫岩を対象とするケースが増えている。礫岩は、礫部と基質部の物性が異なる不均質岩である。そのため、礫と基質の剛性比および強度比、礫の含有率、礫形状などの多数の要因が混在することから力学特性評価を困難にしている。そのような背景から、特に礫の含有率(以降、礫率と呼ぶ)と強度の関係に着目した研究が数例見られる^{1)~4)}。このうち、自然岩については、礫率と強度(一軸圧縮強度)の関係に明瞭な相関は見られない^{2),3)}。一方、人工の礫岩を用いた検討によると、礫率の増加に伴って、強度が低下する結果^{1),4)}と上昇する結果²⁾が見られる。本研究では、このように異なった結果が得られた理由を明らかにし、礫岩の力学特性の評価手法を確立することを目的としている。これまでに著者らは、3種類の基質材料を用いた人工の礫岩を用いた検討を試みた⁵⁾。その結果、基質材料の種類の違いにより、かなり異なった傾向が得られた(図-1: 図の縦軸は、一軸圧縮強度(q_b)を基質(礫率0%)の一軸圧縮強度(q_{b0})で正規化している)。そこで本報告では、礫と基質の付着強度に着目した評価を試みるため、礫材料と基質材料の境界面での一面せん断試験を実施し、その結果を基にして礫岩の強度評価式の提案を行った。

2. 実験概要

実験に用いる人工礫岩⁵⁾は、礫材料として直径5mmのガラスビーズを用いた。基質材料は石膏またはセメントを主とする材料であり、配合は表-1に示す3種類である。3種類の基質材料に対して、体積比で、0(基質のみ)、20、40、60%となる礫材料(ガラスビーズ)を混合し人工礫岩を作製した。この人工礫岩を用い、これまで一軸圧縮試験と超音波伝播速度測定を実施した⁵⁾が、今回はさらに圧裂引張試験を加えた。

礫材料と基質材料の付着強度を求める目的で、礫材料であるガラスビーズと同材料のガラス板(直径60mm、厚さ10mm)と3種類の基質材料を合わせて供試体を作製し、ガラスと基質材料の境界面でせん断するように一面せん断試験を実施した。K-1材料は0.39~3.14MPa、K-2とS-1材料は0.05~0.78MPaの4拘束圧(4供試体)で試験を行った。

3. 試験結果

実施した圧裂引張試験の結果と以前行った一軸圧縮試験および超音波伝播速度測定の結果⁵⁾を表-2に示す。また、ガラスと基質の境界面の一面せん断試験の結果を表-3に示す。一面せん断試験の結果(表-3)と図-1より、礫率の増加に伴って若干の強度増加を示したS-1材料は、他の材料と比較し c_b 、 ϕ_b ともに大きいことがわかる。また、K-1とK-2は共に $c_b \approx 0$ であるが、礫率の増加に伴い急な強度低下を示すK-2の方が ϕ が小さい。これらの結果から、礫と基質の境界面の強度(以降、付着強度と呼ぶ)が礫率-強度関係に大きな影響を与えているものと考えられる。そこで以降では、付着強度に着目した礫岩の強度評価式について考察する。

4. 考察(礫岩の強度評価式の提案)

礫岩供試体のせん断面で発揮されるせん断強度を考える(図-2:①)。礫(ガラス)の強度は基質強度に比べかなり大きいので、せん断面は基質及び基質と礫の境界を切る(図-2:②)。凹凸を無視し、せん断面は平面であると仮定する(図-2:③)。図-2:③より、せん断面で発揮されるせん断力 $T_f(N)$ を、クーロンの破壊基準を用いて、基質部(matrix)と基質と礫の境界部(boundary)に分離する。

$$T_f = \tau_f \cdot S = S \cdot (c_b + \sigma_f \cdot \tan \phi_b) = T_b + T_s = S_b \cdot \tau_b + S_s \cdot \tau_s = S_b \cdot (c_b + \sigma_b \cdot \tan \phi_b) + S_s \cdot (c_s + \sigma_s \cdot \tan \phi_s) \quad (1)$$

キーワード: 礫岩, 礫率, 人工岩, 付着強度, 評価式

〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646 TEL. 0471-82-1181 FAX. 0471-84-2941

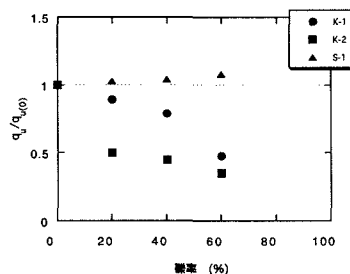
図-1 礫率と一軸圧縮強度の関係⁵⁾

表-1 基質材料の配合

種類	配合(重量比)				養生日数(日)
	石膏	早強セメント	ポスラン	水	
K-1	1.0	-	-	0.4	10
K-2	1.0	-	0.2	1.2	10
S-1	-	1.0	2.8	3.0	5

表-2 試験結果一覧

種類	礫率 (ガラスビーズ割合) (%)	弾性係数 E_b (MPa)	一軸圧縮強度 q_b (MPa)	圧裂引張強度 q_t (MPa)
K-1	0	12700	17.0	1.64
K-2	(基質のみ)	2450	1.27	0.233
S-1		1680	1.21	0.285
K-1	20	11800	15.1	1.07
K-2		1990	0.622	0.124
S-1		2450	1.26	0.196
K-1	40	15000	13.4	0.798
K-2		3530	0.598	0.0925
S-1		4080	1.26	0.128
K-1	60	16300	7.99	0.359
K-2		4810	0.436	0.0737
S-1		7380	1.33	0.220
ガラスビーズ	100 (ガラスのみ)	37600	636	-

表-3 礫と基質の付着強度

種類	ガラスとの付着強度	
	c_b (MPa)	ϕ_b (°)
K-1	0.00092	20.0
K-2	0.0042	12.1
S-1	0.075	32.1

ただし、 τ_f ：破壊時のせん断応力（N/m²）、 σ_f ：破壊時の直応力（N/m²）、 S ：せん断面の面積（m²）あり、 c_m ：礫岩の粘着力（N/m²）、 ϕ_m ：礫岩の内部摩擦角（rad）である。また、下付添字 m , b は、基質（matrix）と基質と礫の境界（boundary）の成分を表す。ここで、礫の体積含有率を P_g を用いて、図-2 に示す仮定より、 S_m , S_b は次式で表される。

$$S_b = P_g \cdot S, \quad S_m = S - S_b = (1 - P_g) \cdot S \quad (2)$$

式(2)を式(1)に代入すると次式に示す礫岩のせん断強度評価式が得られる。

$$\tau_f = (1 - P_g)(c_m + \sigma_m \cdot \tan \phi_m) + P_g(c_b + \sigma_b \cdot \tan \phi_b) = (1 - P_g) \cdot c_m + P_g \cdot c_b + (1 - P_g) \cdot \sigma_m \cdot \tan \phi_m + P_g \cdot \sigma_b \cdot \tan \phi_b \quad (3)$$

(i) $\sigma_m = \sigma_b$ の場合

ここで、境界部にも基質部にも、同じ直応力（ $\sigma_m = \sigma_b = \sigma_f$ ）が作用すると考えると、式(3)は次式のようにになる。

$$\tau_f = (1 - P_g) \cdot c_m + P_g \cdot c_b + \sigma_f \{ (1 - P_g) \cdot \tan \phi_m + P_g \cdot \tan \phi_b \} \quad (4)$$

よって、式(1)、式(4)から礫岩の粘着力 c_m 、内部摩擦角 ϕ_m は次式により得られる。

$$c_m = (1 - P_g) \cdot c_m + P_g \cdot c_b, \quad \tan \phi_m = (1 - P_g) \cdot \tan \phi_m + P_g \cdot \tan \phi_b \quad (5)$$

(ii) $\sigma_m \neq \sigma_b$ の場合

式(3)より、境界部と基質部に作用する直応力が異なると考える（ $\sigma_m \neq \sigma_b$ ）。それぞれの直応力には、式(2)より、次式の関係が成り立つ。

$$S \cdot \sigma_f = S_m \cdot \sigma_m + S_b \cdot \sigma_b = S \cdot \{ (1 - P_g) \cdot \sigma_m + P_g \cdot \sigma_b \} \quad (6)$$

ここで、せん断面近傍で、ひずみは一樣と仮定すると、 $\sigma_m : \sigma_b = E_m : E_b$ となることから（ただし、 E_m ：基質の剛性、 E_b ：礫の剛性）、次式が得られる。

$$\sigma_m = \sigma_b \cdot E_m / E_b \quad (7)$$

式(6)、式(7)より次式が得られる。

$$\sigma_m = \sigma_f \cdot E_m / \{ P_g \cdot E_b + (1 - P_g) \cdot E_m \}, \quad \sigma_b = \sigma_f \cdot E_b / \{ P_g \cdot E_b + (1 - P_g) \cdot E_m \} \quad (8)$$

よって、式(8)を式(3)に代入し、次式が得られる。

$$\tau_f = (1 - P_g) \cdot c_m + P_g \cdot c_b + \sigma_f \{ (1 - P_g) \cdot E_m \cdot \tan \phi_m / \{ P_g \cdot E_b + (1 - P_g) \cdot E_m \} + P_g \cdot E_b \cdot \tan \phi_b / \{ P_g \cdot E_b + (1 - P_g) \cdot E_m \} \} \quad (9)$$

よって、式(1)、式(9)から礫岩の粘着力 c_m 、内部摩擦角 ϕ_m は次式により得られる。

$$c_m = (1 - P_g) \cdot c_m + P_g \cdot c_b, \quad \tan \phi_m = \{ (1 - P_g) \cdot E_m \cdot \tan \phi_m + P_g \cdot E_b \cdot \tan \phi_b \} / \{ P_g \cdot E_b + (1 - P_g) \cdot E_m \} \quad (10)$$

以上の式(5)と式(10)を用いて、礫率に伴う一軸圧縮強度の変化を計算すると図-3 のようになる。ただし、基質の三軸試験は行っていないため、基質の c_m , ϕ_m は、表-2 に示す一軸圧縮強度と圧裂引張強度から Horibe の式⁶⁾を用いて算定した。これより、K-2 については試験結果と計算結果は比較的整合している。K-1 と S-1 については、あまり整合していないものの、S-1 が K-1, 2 と異なる傾向を示すことが表現されている。計算の仮定 (i) と (ii) を比較すると、礫と基質の剛性比を考慮した (ii) により、S-1 の強度が上昇する傾向や K-2 の強度が礫率の小さい範囲において急に低下する傾向を示せる可能性が伺われる。

5. おわりに

今回提案した評価式には多くの仮定が施されているものの、礫岩の強度を、礫率、基質の強度、礫と基質の付着強度、および礫と基質の剛性比から評価できる可能性が示されたものとする。今後は、三軸試験を行い評価式の妥当性を検討していく。さらに、今回は簡略化した仮定もモデルの中に組み込んで行く予定である。

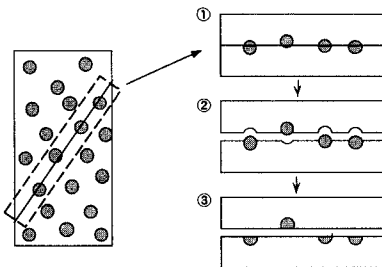


図-2 礫岩せん断面のモデル化

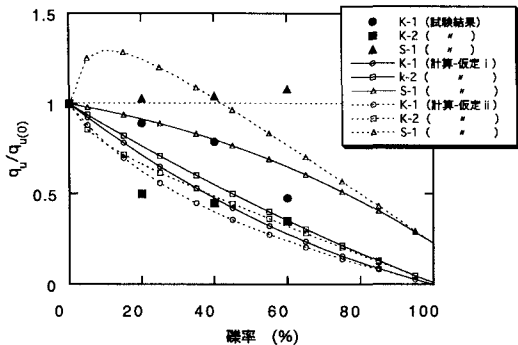


図-3 試験結果と計算結果の比較

参考文献

- 1) 小林隆志：礫混じり軟岩の力学的特性とその評価に関する研究，埼玉大学学位論文，1995。
- 2) 川崎 了・伊藤 洋・小泉和宏：礫岩コアの寸法効果とサンプリングによる乱れに関する評価，応用地質，第39巻，第4号，pp.391-400，1998。
- 3) 橋本 徹・片川秀基・村上弘行：岩石の力学特性に対する礫分の影響について，第53回土木学会年次学術講演会講演要集，pp.676-677，1998。
- 4) 片川秀基 他：人工礫混じり岩石の力学的性質に及ぼす礫分の影響について，土木学会論文集（投稿予定）。
- 5) 岡田哲夫・伊藤 洋・野崎隆司・中村敏明：人工礫岩の力学特性に関する一考察，第34回地盤工学研究発表会発表講演集，1999。
- 6) HORIBE, T.: The abstract of the report from "Committee concerning the method of the measurement of the strength of rock" in M.M.I.J., Rock mechanics in Japan, Vol.1, pp.29-31, 1970。