

礫と基質の付着強度に着目した礫岩の強度評価式の提案

STRENGTH OF GRAVELLY ROCK BASED ON STRENGTH OF BOUNDARY OF GRAVEL AND MATRIX

岡田哲実*・中村敏明**・野崎隆司*・伊藤 洋*

Tetsuji OKADA, Toshiaki NAKAMURA, Takashi NOZAKI and Hiroshi ITO

The purpose of this research is to investigate the evaluation method of strength characteristics of gravelly rock by laboratory test. Unconfined compression tests were conducted on three types of artificial gravelly rocks and box shear tests were conducted on boundary of the gravel and the matrix materials. And triaxial compression tests were carried out on the matrix materials. This study proposed equations for evaluating strength of gravelly rock based on the results of these tests. The calculated results from the equations compared with the unconfined compression test results of artificial gravelly rocks.

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)}。礫部の強度が基質部より高く、礫同士で骨格を形成するほど礫率が高ければ、礫岩（礫部と基質部の混合体）の強度は、基質部のみの強度よりも増加することが推測される。骨格を形成しない程度の礫率においても、礫率の増加に伴い強度が増加するならば、基質部の強度で礫岩の強度を代表させることにより、安全側の評価が可能となる。しかし、逆の場合は、その強度評価が困難になる。

既往の研究のうち、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（図-1）。図の縦軸は、一軸圧縮強度（ q_u ）を基質（礫率0%）の一軸圧縮強度（ $q_{u(0)}$ ）で正規化している。

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、人工の礫岩を用いた検討を試みた^{5),6)}。その結果、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ことが明らかになった。本論文では、これまでの実験に、礫

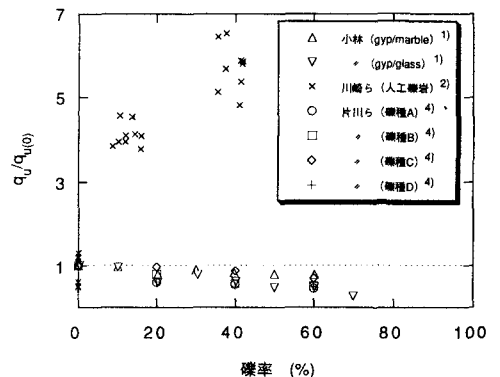


図-1 既往研究の礫率と一軸圧縮強度の関係^{1),2),4)}

* 正会員 (財)電力中央研究所 地盤耐震部

** 非会員 (株)ダイヤコンサルタント 技術研究所

材料と基質材料の境界面での定圧一面せん断試験および基質材料の三軸試験を追加し、その結果を基にして、礫と基質の付着強度に着目した礫岩の強度評価式を提案した。

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、これまで一軸試験と超音波伝播速度測定を実施した⁵⁾。さらに、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じ材質のガラス板（直径60mm、厚さ10mm）と基質材料を合わせた供試体を作製し、ガラスと基質材料の境界面でせん断するように定体積一面せん断試験を実施した⁶⁾。

今回は、一面せん断試験結果の精度を高めるため、ガラスと基質材料の境界面での定圧一面せん断試験を追加した。供試体の大きさは、定体積一面せん断試験と同様である。また、以降で提案する強度評価式では、クーロンの破壊基準を基本とするため、基質材料のみ（礫率0%）のUU三軸試験を行った。供試体の大きさは、一軸試験と同様に直径50mm、高さ100mmとした。一面せん断、三軸試験ともに、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

実施した基質材料の一軸試験および超音波伝播速度測定の結果⁵⁾を表-2に示す。表-2より、基質のみの試験結果（礫率0%）から、K-1とK-2は石膏を主とする材料であるが、強度（剛性）は、およそ1オーダー異なる。一方、K-2とS-1は、材料は異なるが、強度（剛性）はほぼ等しい。礫率の増加に伴う一軸強度の変化を図-2に示す。礫率の増加に伴って、S-1では若干の強度増加が見られるが、K-1とK-2では強度低下の傾向が見られる。ただし、K-1とK-2の低下傾向は異なり、K-2の方が低下の程度が大きい。このように、3種類がかなり異なった傾向を示す結果となった。前述したように、K-1とK-2の違いは、主に強度の違いであり、K-2とS-1の違いは、主に材料の違いである。K-2とS-1の強度変化の傾向の違いが大きいことから、基質の強度（すなわち、礫と基質の強度比）よりも基質材料の違いが、強度-礫率関係に大きな影響を与えていることがわかる。

次に、ガラスと基質の境界面の一面せん断試験の結果を図-3に示す。S-1を除き、定体積と定圧条件による大きな差

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	カオリン	水遣水	
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 (%)	単位体積重量 (kN/m ³)	動弾性係数 E _d (MPa)	一軸圧縮強度 q _u (MPa)	静弾性係数 E _{so} (MPa)
K-1	0	18.0	12700	17.0	3860
K-2	0	13.2	2450	1.27	409
S-1	0	14.5	1680	1.21	693
K-1	20	19.4	11800	15.1	3600
		15.7	1990	0.622	184
		16.6	2450	1.26	773
K-1	40	20.5	15000	13.4	3540
		17.6	3530	0.598	308
		18.4	4080	1.26	1360
K-1	60	21.8	16300	7.99	4620
		19.6	4810	0.436	418
		20.4	7380	1.33	2670
ガラスビーズ	100 (ガラスのみ)	21.7	37600	636	57600

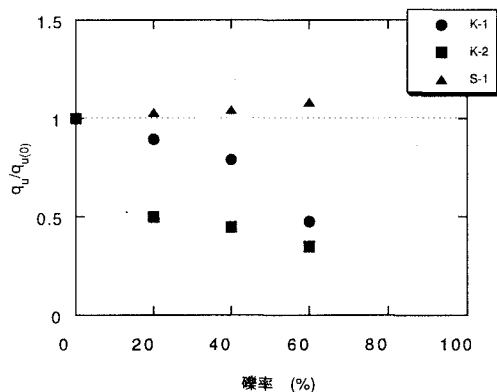


図-2 礫率と一軸圧縮強度の関係

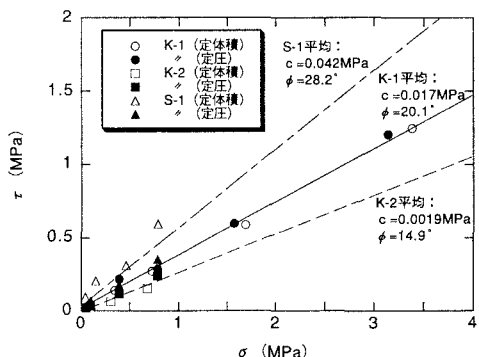


図-3 礫と基質の境界面の付着強度

は見られない。S-1の試験条件による強度差の原因は不明であるが、境界面の付着強度として、定体積と定圧の両方の試験結果を用いて付着強度の平均値を求めた(図-3)。図-2と図-3より、礫率の増加に伴って若干の強度増加を示したS-1は、他の材料と比較し付着強度が大きいことがわかる。また、K-1とK-2を比較すると、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付着強度が礫率-強度関係に大きな影響を与えているものと考えられる。

表-3 基質材料の三軸試験結果

種類	UU三軸試験結果	
	c (MPa)	ϕ (°)
K-1	5.52	20.4
K-2	0.738	1.82
S-1	0.521	11.5

表-3に基質材料のみのUU三軸試験の結果を示す。特徴としては、K-2とS-1は、ほぼ同一軸圧縮強度であったが、K-2の方が、かなりcに依存した材料であることがわかる。

以上の試験結果を基に、以下では、礫と基質の付着強度に着目して礫岩の強度評価のためのモデルを作成し、強度の評価式の提案を試みる。

4. 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-4:①)。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-4:②)。せん断面で発揮されるせん断力 T_i (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(図-4:③)。

$$T_i = \tau_i \cdot S = (c_m + \sigma_i \cdot \tan \phi_m) \cdot S = T_m + T_b = S_m \cdot \tau_m + S_b \cdot \tau_b = S_m \cdot (c_m + \sigma_m \cdot \tan \phi_m) + S_b \cdot (c_b + \sigma_b \cdot \tan \phi_b) \quad (1)$$

ただし、 τ_i :破壊時のせん断応力(N/m²)、 σ_i :破壊時の直応力(N/m²)、 S :せん断面の面積(m²)、 c_m :礫岩の粘着力(N/m²)、 ϕ_m :礫岩の内部摩擦角(rad)である。下付添字 m は基質(matrix)の成分を表し、下付添字 b は基質と礫の境界(boundary)の成分を表す。

次に、礫と基質の境界部の凹凸を規則的な凹凸(傾斜角)を有する不連続面と仮定する(図-4:④)。式(1)における c_b 、 ϕ_b は、凹凸を含んだ礫と基質の境界面の付着強度である。図-5のように、せん断応力の方向に対して角度 i だけ傾く面上の σ_i と τ_i は、力のつりあいから、次式のように表される⁷⁾。

$$\tau_i = \tau_b \cos^2 i - \sigma_b \cos i \cdot \sin i \quad (2)$$

$$\sigma_i = \sigma_b \cos^2 i + \tau_b \cos i \cdot \sin i \quad (3)$$

角度 i に傾斜した面上におけるせん断強度は、クーロンの破壊基準を用い次式で表されるとする。

$$\tau_i = c_{b0} + \sigma_i \tan \phi_{b0} \quad (4)$$

ただし、 c_{b0} 、 ϕ_{b0} は凹凸を含まない境界面の粘着力と内部摩擦角である。式(2)、(3)を(4)へ代入すると、次式が得られる。

$$\tau_b = c_{b0} / (\cos^2 i - \cos i \cdot \sin i \cdot \tan \phi_{b0}) + \sigma_b \tan(\phi_{b0} + i) \quad (5)$$

よって、凹凸を含んだ境界面の粘着力、内部摩擦角は、凹凸を含まない境界面の粘着力、内部摩擦角および傾斜角

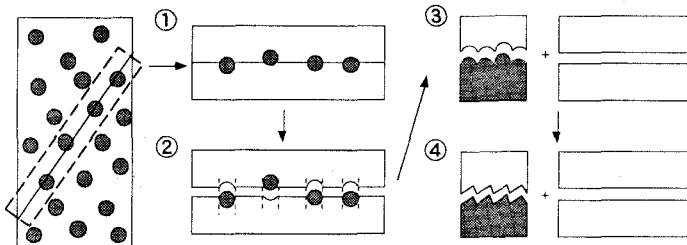


図-4 礫岩のせん断面のモデル化

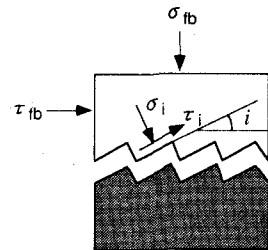


図-5 仮定した規則的な凹凸

を用いて次式で表される。

$$c_s = c_{s0} / (\cos^2 i - \cos i \cdot \sin i \cdot \tan \phi_{s0}) \quad , \quad \phi_s = \phi_{s0} + i \quad (6)$$

また、式(1)中の面積成分 S_m, S_s は、礫の体積含有率を P_g を用いて次式で表される。

$$S_s = P_g \cdot S \quad , \quad S_m = S - S_s = (1 - P_g) \cdot S \quad (7)$$

式(7)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。

$$\tau_f = (1 - P_g)(c_m + \sigma_{jm} \cdot \tan \phi_m) + P_g \cdot (c_s + \sigma_{js} \cdot \tan \phi_s) = (1 - P_g) \cdot c_m + P_g \cdot c_s + (1 - P_g) \cdot \sigma_{jm} \cdot \tan \phi_m + P_g \cdot \sigma_{js} \cdot \tan \phi_s \quad (8)$$

(a) $\sigma_{jm} = \sigma_{js}$ の場合 (応力集中を考慮しない場合)

式(8)より、境界部にも基質部にも、同じ直応力 ($\sigma_{jm} = \sigma_{js} = \sigma_f$) が作用すると考える。これは、礫部の応力集中を考慮しない場合を想定している。この仮定により、式(8)は次式のようになる。

$$\tau_f = c_{cm} + \sigma_f \cdot \tan \phi_{cm} = (1 - P_g) \cdot c_m + P_g \cdot c_s + \sigma_f \{ (1 - P_g) \cdot \tan \phi_m + P_g \cdot \tan \phi_s \} \quad (9)$$

よって、式(6)、式(9)から礫岩の粘着力 c_{cm} 、内部摩擦角 ϕ_{cm} は次式により得られる。

$$c_{cm} = (1 - P_g) \cdot c_m + P_g \cdot c_{s0} / (\cos^2 i - \cos i \cdot \sin i \cdot \tan \phi_{s0}) \quad , \quad \tan \phi_{cm} = (1 - P_g) \cdot \tan \phi_m + P_g \cdot \tan(\phi_{s0} + i) \quad (10)$$

(b) $\sigma_{jm} \neq \sigma_{js}$ の場合 (応力集中を考慮する場合)

式(8)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 ($\sigma_{jm} \neq \sigma_{js}$)。すなわち、礫部に作用する応力の集中を考慮する。それぞれの直応力には、式(7)より、次式の関係が成り立つ。

$$S \cdot \sigma_f = S_m \cdot \sigma_{jm} + S_s \cdot \sigma_{js} = S \cdot \{ (1 - P_g) \cdot \sigma_{jm} + P_g \cdot \sigma_{js} \} \quad (11)$$

ここで、せん断面近傍で、ひずみは一樣と仮定すると、 $\sigma_{jm} : \sigma_{js} = E_m : E_s$ となり (ただし、 E_m : 基質の剛性、 E_s : 礫の剛性)、次式が得られる。

$$\sigma_{jm} = \sigma_{js} \cdot E_m / E_s \quad (12)$$

式(11)、式(12)より次式が得られる。

$$\sigma_{jm} = \sigma_f \cdot E_m / \{ P_g \cdot E_s + (1 - P_g) \cdot E_m \} \quad , \quad \sigma_{js} = \sigma_f \cdot E_s / \{ P_g \cdot E_s + (1 - P_g) \cdot E_m \} \quad (13)$$

式(13)を式(8)に代入し、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \tau_f &= c_{cm} + \sigma_f \cdot \tan \phi_{cm} \\ &= (1 - P_g) \cdot c_m + P_g \cdot c_s + \sigma_f \left[(1 - P_g) \cdot E_m \cdot \tan \phi_m / \{ P_g \cdot E_s + (1 - P_g) \cdot E_m \} + P_g \cdot E_s \cdot \tan \phi_s / \{ P_g \cdot E_s + (1 - P_g) \cdot E_m \} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

よって、式(6)、式(14)から礫岩の粘着力 c_{cm} 、内部摩擦角 ϕ_{cm} は次式により得られる。

$$\begin{aligned} c_{cm} &= (1 - P_g) \cdot c_m + P_g \cdot c_{s0} / (\cos^2 i - \cos i \cdot \sin i \cdot \tan \phi_{s0}) \\ \tan \phi_{cm} &= \{ (1 - P_g) \cdot E_m \cdot \tan \phi_m + P_g \cdot E_s \cdot \tan(\phi_{s0} + i) \} / \{ P_g \cdot E_s + (1 - P_g) \cdot E_m \} \end{aligned} \quad (15)$$

以上のように、式(10)と式(15)(もしくは、式(9)と式(14))を用いて礫岩の強度が、基質の強度 (c_m, ϕ_m)、礫と基質の付着強度 (c_s, ϕ_s or c_{s0}, ϕ_{s0})、 i 、礫率 (P_g)、礫と基質の剛性比 (E_m/E_s) から求められる。式(10)と式(15)を比較すると、 c 成分については両式は等しく、 ϕ の成分だけが異なることがわかる。ただし、礫と基質の付着強度を求める場合、凹凸の効果 (i の大きさ) をどう考えるべきかが、議論を残す点である。

5. 試験結果と計算結果の比較

提案した強度評価式を用いて、人工礫岩の一軸強度を計算する。礫率 (P_g) をパラメータとし、基質の強度 (c_m, ϕ_m) は基質のUU三軸試験結果(表-3)を用いる。凹凸のない境界面の付着強度 (c_{s0}, ϕ_{s0}) は、一面せん断試験の結果(図-3)を用いる。礫と基質の剛性比 (E_m/E_s) は、超音波伝播速度測定の結果から求められる動弾性係数 E_d (表-2)を用いる。凹凸の効果を表す傾斜角の傾き (i) の値については、次のように考える。

あるせん断面を規定したとき、礫の位置により凹凸の程度は異なるが(図-4の②)、平均的には、せん断面が半球の中間の位置にあると仮定する(図-6)。この時、せん断面と球の境界部と球の頂点がなす角度を傾斜

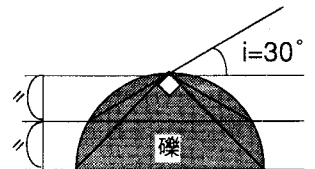


図-6 i の考え方

角の傾き $i (= 30^\circ)$ とした。

以上の値を式(10)と式(15)に代入し、計算した結果を試験結果とあわせて、図-7に示す。図より、K-1については、仮定 a (応力集中を考慮しない場合) と仮定 b (応力集中を考慮した場合) の計算結果はあまり差がなく、実験結果ともかなり整合している。しかし、K-2については計算結果と実験結果は異なった傾向を示している。実験結果が礫率の増加に伴って、強度が低下する傾向を示すのに対し、計算結果は、強度が上昇する傾向を示している。S-1については、仮定 a と仮定 b の計算結果に大きな差があり、仮定 a の方が、かなり実験結果と整合している。

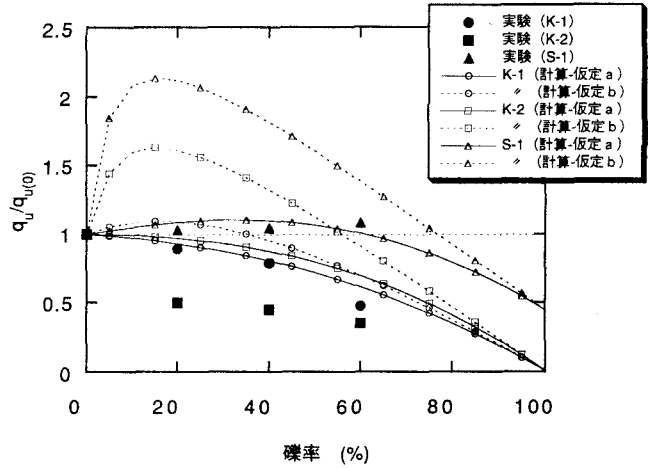


図-7 試験結果と計算結果の比較 ($i=30^\circ$)

以上のように、K-1、S-1の実験結果について

は、提案した仮定 a の評価式により強度を評価できる可能性が高いことが示された。しかし、K-2については、試験結果をうまく表現できなかった。K-2の特徴は、c の成分の卓越した基質材料であり、しかも礫と基質の付着強度の c がほとんど 0 であるため、一軸試験においてせん断破壊でなく、引張破壊が卓越した可能性が考えられる。

6. おわりに

人工礫岩を用いた試験結果をもとに、礫と基質の付着強度に着目した礫岩の強度評価式を提案した。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、1) 基質の強度、2) 礫と基質の付着強度、3) 礫率、4) 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、結果をうまく表現出来なかった K-2 の結果に関する検討、今回大胆な仮定をした礫の凹凸の効果 (傾斜角 i) に関する実験的な評価、および自然岩に関する評価式の適用性について検討する予定である。

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概要集，pp.676-677，1998。
- 4) 片川秀基・橋本 徹・平野秀次・村上弘行：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) 岡田哲実・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，pp.685-686，1999。
- 6) 岡田哲実・伊藤 洋・野崎隆司・中村敏明：礫岩の強度評価に関する一考察，第 54 回土木学会年次学術講演会，pp.666-667，1999。
- 7) E. フック・J. W. ブレイ：岩盤斜面工学，朝倉書店，pp.69，1979。