

大谷石の強度特性に関する寸法効果と実験的検討とそのモデル化

Scale effect on strength properties of Oya stone in triaxial compression tests

来村俊郎*・谷和夫**・岡田哲実***

Toshio KURUMURA, Kazuo TANI, Tetsuji OKADA

Scale effect on strength properties of a soft conglomerate rock, Oya stone, is evaluated based on the result of triaxial compression tests, paying attention to its heterogeneous nature. Typical characteristics of Oya stone is that the strength of groundmass is greater than that of gravels. Attention is paid to, ① shear strength of groundmass, gravel and their boundary, ② average diameter of gravels, ③ gravel content. Based on the experimental results, a simple model is proposed to evaluate scale effect on strength properties of Oya stone.

Key Words: scale effect, softrock, Oya stone, triaxial compression test, modeling

1. まえがき

礫岩の強度特性を三軸圧縮試験の結果を元に評価する際には、その不均質性に起因する寸法効果が問題となる。この問題では、礫岩を構成する各部の強度特性、礫の粒度、礫の割合など多くのパラメータを考慮する必要があるだけでなく、実験に用いる試料のばらつきが検討を困難にしている。そこで、①基質、礫、その境界部のせん断強度、②平均礫径、③礫率に着目し、礫が基質より柔らかい礫岩に対して三軸圧縮試験を実施して、礫が基質より柔らかい礫岩の強度特性に関する寸法効果を検討した。この検討においては、礫率の分布を考慮することにより、供試体のばらつきを表現した。

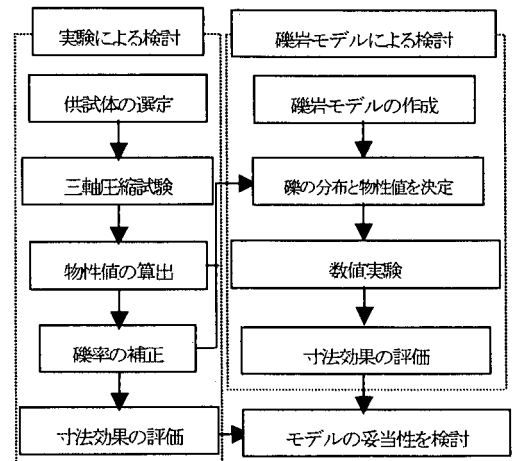


図-1 研究のフロー

2. 研究のフロー (図-1 参照)

礫のせん断強度(q_{lg})が基質のせん断強度(q_{lm})よりも強度が低い($q_{lm} \geq q_{lg}$)性質の礫岩を対象とした。このような礫岩の典型例として、わが国に広く分布しているグリーンタフの一種である大谷石を用いた。そして、三軸圧縮試験(CU)を行い、礫率の補正によって供試体のばらつきの影響を排除して、せん断強度に関する寸法効果を評価した。さらに礫岩モデルを提案することによって、数値実験からも寸法効果を検討した。実験の結果から得られるせん断強度と礫岩モデルを用いた数値実験から得られるせん断強度を比較することにより、礫岩モデルの妥当性を検討する。

*学生会員 学士(工学) 横浜国立大学院 工学府 社会空間システム学専攻

** Ph.D 横浜国立大学院 工学研究院

***正会員 工学修士 (財)電力中央研究所 地圏環境部

3. 実験による検討

表-1 供試体の寸法と実験を行なった有効拘束圧一覧

$\sigma'_c(\text{MPa})$		0.1	0.2	0.3	0.4	0.8	1.0	1.6	2.0	3.2	3.5
d	20	-	○	-	○	○	-	○	-	○	-
	50	○	○	-	○	○	-	○	-	○	-
	66	-	○	○	○	-	○	-	○	-	-
	100	○	○	-	○	○	○	-	○	-	-
	400	-	-	-	○	-	○	-	○	-	○

(1) 礫岩の三軸圧縮試験

試料は粗目の大谷石を使用した。理由として、①供試体の寸法が幅広く実験されていること(中島, 2000)、②礫のせん断強さが基質のせん断強さより小さいことが挙げられる。供試体の直径、 $d=20\text{mm}$ 、 50mm 、 66mm 、 100mm については室内で三軸圧縮試験(CU)を行い、 $d=400\text{mm}$ については原位置で岩盤三軸圧縮試験を行った。原位置の岩盤三軸圧縮試験の排水条件については、中島(2000)によって当該試料のCU試験とCD試験のせん断強さに差がないということが確認されているので、すべてCU試験として検討した。有効拘束圧は表-1に示すように0.1~3.5MPaの範囲で行った。また、直径 $d=20\text{mm}$ の実験では、基質として代表できる供試体(m)と $P_g=30\%$ と代表できる供試体(c)と礫として代表できる供試体(g)の3種類のグループに分けて実験を行なった。

(2) 礫率の計算

礫率を算出するため、供試体に OHP シートを巻きつけて目視で礫の位置を記録した。その OHP シートをスキャナで読み取り、面積計算ソフト(IPLAB)を利用して各供試体の礫率と各礫の径を算出した。計算された礫率(P_g)の度数分布を図-2に示す。礫率の平均値は、29.7%であるため、代表的な礫率(代表礫率 P_g^*)を30%と決定した。平均礫径(D_g)は15mmである。なお、直径 $d=400\text{mm}$ の試験では礫率を調べなかったため、礫の大きさに対して供試体の寸法が非常に大きいことを考慮して、 $P_g=30\%$ とした。

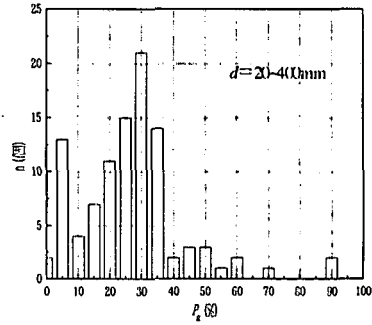


図-2 $n \sim P_g$ 分布

(3) 礫率の補正

図-3に示すように寸法効果を評価する際に、礫率の異なる供試体の実験データを比較することは、ばらつきが大きいいため非常に難しい。そこで、異なる礫率(P_g)に対して得られたせん断強さ q_t を代表礫率(P_g^*)の時のせん断強さに補正して寸法効果を検討した。まず三グループに分けることによって幅広い礫率についてデータを得られている $d=20\text{mm}$ について、各有効拘束圧ごとに直線に近似し、代表礫率(P_g^*)時の q_t (以下 q_t^* とする)を決定した。そして、 q_t を q_t^* で無次元化することによって、有効拘束圧によらない q_t/q_t^* と P_g^* の関係を図-4に示すように求めた。この補正関係が直径 $d=20\text{mm}$ 以外の直径($d=50, 66, 100, 400\text{mm}$)についても成り立つと仮定して、代表礫率($P_g^*=30\%$)に対するせん断強さ q_t^* に補正した。この補正により、代表礫率($P_g^*=30\%$)に対するせん断強さ q_t^* と σ'_c の関係が図-5のように得られ、寸法効果を評価する上で礫率が異なる供試体によるデータのばらつきを排除することができる。また、間隙氷圧 u_f についても同様に礫率に対する補正を行なった。

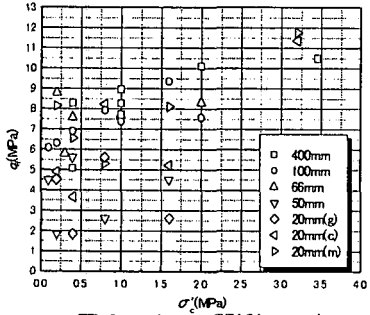


図-3 q_t と P_g の関係(all data)

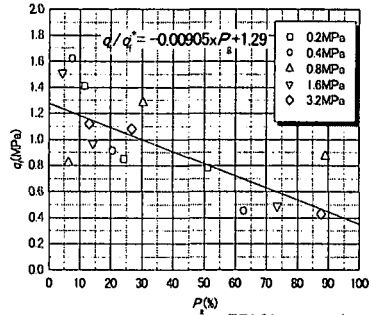


図-4 q_t/q_t^* と P_g^* の関係($d=20\text{mm}$)

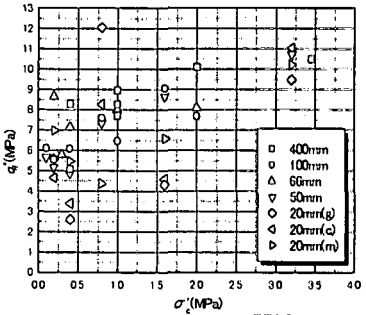


図-5 q_t^* と σ'_c の関係

(4) 寸法効果の評価

供試体サイズが 10 倍になる時のせん断強度の変化率を計算して寸法効果を検討する方法を使用した。(池見他, 1998; 谷・池見, 2002)

粘着力(c_m, c')と供試体の寸法(d)の関係を図-6 に示す。供試体の寸法が増加すると粘着力は増加する傾向にある。一方、内部摩擦角(ϕ_m, ϕ')と供試体の寸法(d)の関係は図-7 に示すように、供試体の寸法が増加すると内部摩擦角は減少する傾向にある。粘着力(c_m, c')と供試体の寸法(d)の関係、内部摩擦角(ϕ_m, ϕ')と供試体の寸法(d)の関係から $\Delta q_f / \Delta (\log d) / q_f$ と σ'_e の関係を計算した(図-10)。有効拘束圧(σ'_e)が低い場合は、供試体の寸法が 10 倍になると 10% 程度の強度増加が見られるが、有効拘束圧(σ'_e)が高くなるほど割合は 0 に近づく。したがって、大谷石の当該試料に関しては、寸法効果はほとんど無いものと判断される。

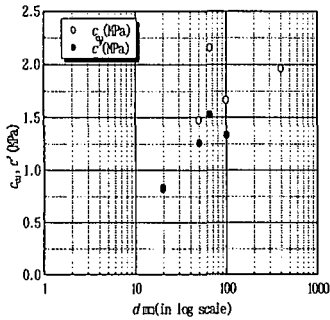


図-6 c_m, c' と $\log d$ の関係

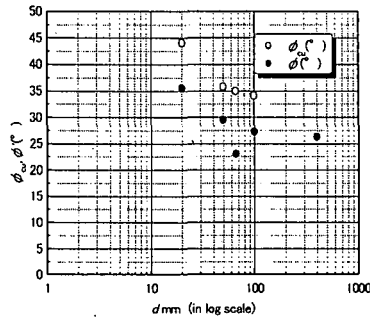


図-7 ϕ_m, ϕ' と $\log d$ の関係

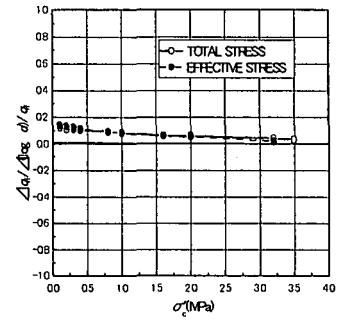


図-8 寸法効果の評価

4. 礫岩モデルによる検討

同一礫径の丸い礫が均一に分布すると仮定して 2 次元の礫岩モデルを作成した。礫部のせん断強度が基質部のせん断強度より低いので、せん断強度が発揮される時に形成されるせん断帯は、せん断強度が小さい礫を選択的に通過すると仮定した。その結果、せん断強度は、供試体と礫の相対的な配置、基質部と礫部のせん断強度を用いて計算することが可能である。

(1) 代表礫率(P_g^*), 平均礫径(D_{50}), 基質と礫のせん断強度(q_m と q_g) の決定

丸い礫の径と礫率はそれぞれ平均礫径($D_{50}=15\text{mm}$)と代表礫率($P_g^*=30\%$)で代表させた。

基質部のせん断強度(q_m)と礫部のせん断強度(q_g)の決定では、直径 $d=20\text{mm}$ の三種(m, c, g)の実験データを利用した。 q_f と P_g 関係において、各拘束圧ごとに $P_g=P_g^*=30\%$, $q_f=q_f^*$ の点を通り、かつ各有効拘束圧ごとの q_f と P_g の関係の近似直線の傾き ($\Delta q_f / \Delta P_g$) の平均を傾きとする直線を $q_f \sim P_g$ 上に引く。それぞれの直線が、 $P_g=0\%$ と 100% を通る時の q_f を基質部のせん断強度(q_m)と礫部のせん断強度(q_g)とする。この基質部のせん断強度(q_m)と礫部のせん断強度(q_g)から、基質部の強度定数 ($c_{am}=2.27\text{MPa}$, $\phi_{am}=26.3^\circ$, $c'_m=1.82\text{MPa}$, $\phi'_m=35.3^\circ$) と礫部の強度定数 ($c_{ag}=0.22\text{MPa}$, $\phi_{ag}=26.3^\circ$, $c'_g=0.14\text{MPa}$, $\phi'_g=35.3^\circ$) を算出した。

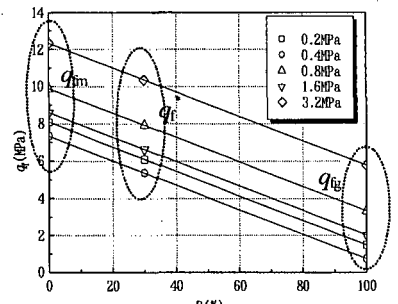


図-9 q_m と q_g の求め方

(2) 同一礫径 D_{50} 礫の配置の決定

図-10 に示すように正三角形格子(一辺の長さ X)の頂点に礫を配置(千鳥格子)した。このようなモデルを選択した理由は、実験終了後の供試体で観察されたせん断帯が供試体の底面ないし上面と約 60 度をなすので千鳥格子の辺と平行な関係にあることと、最も単純な配置であることの二点からである。千鳥格子の一辺の長さ X は、式 1 を用いて礫岩ごとに固有の値となり、幾何学的な条件より得られる。 P_g^* と D_{50} の値から $X=26.5\text{mm}$ と算出することができる。

$$X = \sqrt{\frac{(D_{50})^2 \times \delta}{P_g}} \quad \cdot \cdot \text{式 1}$$

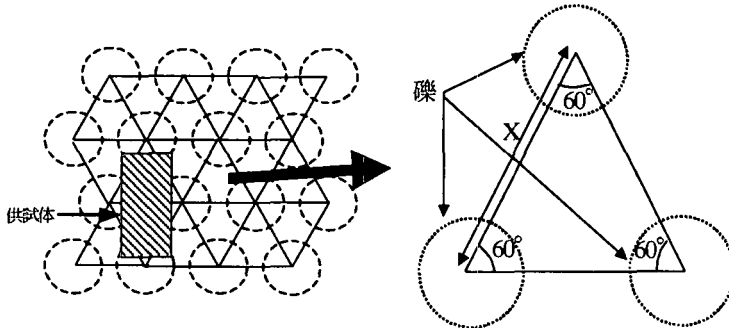


図-10 礫岩モデルの礫の配置

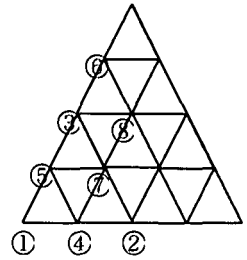


図-11 供試体の配置する位置

(3) 供試体の配置の決定によるせん断層が礫を通る割合(L_d/L)

供試体($d=20\text{mm}$, 50mm , 100mm , 400mm)を図-11の①～⑧の位置に供試体の重心を一致させて設置する。また、密度と配置位置の影響を検討するために三つの計算モード (Mode1～3)を設定した。Mode1は礫の中心より構成される三角形の頂点にのみ供試体の重心を一致させる場合(①のみに設置)、Mode2は三角形の各辺を二等分する位置にも供試体の重心を一致させる場合(①～③に設置)、Mode3は三角形の各辺を四等分する位置にも供試体の重心を一致させる場合(①～⑧に設置)である。そして、表-2のように各位置の異なる頻度に重みづけを行なった。例えば①は六つの三角形が共有しており、同種の点が礫の中心を頂点とする三角形に三点あるので $1/6 \times 3$ と求められる。また、⑧においては共有する三角形がなく、三角形内に同種の点がないので 1×1 と求められる。このようにして得られた重みを用いてせん断層が礫を通る割合(L_d/L)の平均をとると、表-3の結果が得られる。これにより、重みを考慮したせん断層が礫を通る割合の平均値が Mode2=Mode3となることから、設置位置については、Mode3の①～⑧に配置すれば十分であると判断した。①～⑧に重心を配置した供試体について、方眼紙を用いてせん断層が通る長さ(L)とせん断層が礫を通る長さ(L_d)をはかる。せん断層が供試体を通る位置については、①せん断層の入射角度を60度、②礫を最大限に通るように選択された直線、③上下面のせん断層は折り返すことの3つを考慮して決定した。方眼紙から L_d/L をよみとることによって、供試体内の礫のばらつきを数値実験によって図-12のように表現した。これにより、せん断層が礫を通る割合(L_d/L)、代表率率(P_g)と平均礫径(D_{50})の三つのパラメータにより供試体のばらつきを示すことができる。また、重みを考慮した平均値によって寸法効果の検討も可能になる。

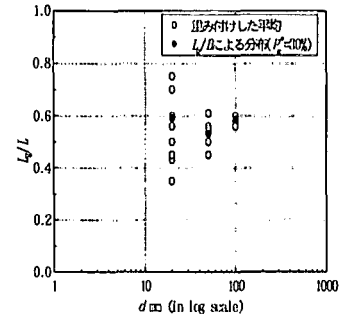


図-12 L_d/L 分布

表-2 パターンと重み

供試体の中心の配置	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
L_d/L	0.43	0.35	0.75	0.60	0.56	0.50	0.70	0.45
重み	$1/6 \times 3$	$1/2 \times 1$	$1/2 \times 2$	$1/2 \times 2$	$1/2 \times 2$	$1/2 \times 2$	1×2	1×1

表-3 各 Mode の重み付き平均

Mode	1	2	3
パターン	①	①～③	①～⑧
重みを表す係数	0.43	0.57	0.59

大谷石に関しては、表-4に示すようにばらつきを示す標準偏差は、供試体の寸法が大きくなると収束していることがわかる。また、重みを考慮した平均については、供試体の寸法に関係なく一定であることがわかる。よって大谷石には寸法効果はないと判断できる。

表-4 モデルによるばらつきの表現と重みを考慮した平均値

$d(\text{mm})$	20	50	100	400
標準偏差	0.40	0.14	0.05	0.00
重みを考慮した平均	0.43	0.57	0.59	0.6

(4) セン断強度評価モデル式の決定

図-11 に示す礫岩モデルにおいて、基質部のせん断強さが礫部のせん断強さよりも強い ($q_m \geq q_g$) 場合における礫岩のせん断強さをモデル化した(岡田他, 2000, 2001)。改良した部分は、基質と礫の分担率を表すパラメータとして稜率の代わりにせん断帯が基質を通る割合 ($1-L_g/L$) と礫を通る割合 (L_g/L) を用いたことである。図-13 に示すようにせん断帯は礫を乗り越えることなく選択的に強度の低い礫部を通ると仮定した。礫とせん断帯の配置より、対象としている全領域を構成するせん断帯の長さ (L) とせん断帯が礫を通る長さの和 ($L_g = L_{g1} + L_{g2} + L_{g3} + \dots$) を求めることができる。また、せん断帯全体にかかるせん断荷重 (T) が、基質部を通過するせん断帯にかかるせん断荷重 ($\sum T_m = T_{m1} + T_{m2} + T_{m3} + \dots$) と礫部を通過するせん断帯にかかるせん断荷重 ($\sum T_g = T_{g1} + T_{g2} + T_{g3} + \dots$) に分けることができる(式 2)。さらに、この礫岩の各構成部分のせん断破壊がモデルがモール・クーロンの破壊基準に従うと仮定する(式 3~5)。応力を表す変数の変換式(式 6)を用いて、どの部分においても拘束圧が一定にかかるものと仮定して、礫岩のせん断面で発揮されるせん断強さ (τ) を式 7 で表すことができる。

せん断強さ (τ): せん断面に作用する破壊面のせん断強さ、 τ_m : 基質部のせん断強さ、 τ_g : 礫部のせん断強さ、直応力 (σ): せん断面に作用する破壊面の直応力、 σ_m : 基質部の直応力、 σ_g : 礫部の直応力、粘着力 (c): せん断面に作用する破壊面の粘着力、 c_m : 基質の粘着力、 c_g : 礫の粘着力、内部摩擦角 (ϕ): せん断面に作用する破壊面の内部摩擦角、 ϕ_m : 基質の内部摩擦角、 ϕ_g : 礫の内部摩擦角を表している。

$$T_f = \sum T_m + \sum T_g \dots \text{式 2}$$

$$T_f = \hat{\sigma}_f \times L = (c + \hat{\sigma}_f \times \tan \phi) \times L \dots \text{式 3}$$

$$T_m = \sum (\hat{\sigma}_{fm} \times L_m) = \sum L_m \times (c_{fm} + \hat{\sigma}_{fm} \times \tan \phi_{fm}) \dots \text{式 4}$$

$$T_g = \sum (\hat{\sigma}_{fg} \times L_g) = \sum L_g \times (c_{fg} + \hat{\sigma}_{fg} \times \tan \phi_{fg}) \dots \text{式 5}$$

$$\hat{\sigma}_f = \frac{q_f}{2} \times \cos \phi = \hat{\sigma}_3 \dots \text{式 6}$$

$$\hat{\sigma}_f = \frac{\cos \phi_m}{1 - \sin \phi_m} \times (c_m \times \cos \phi_m + \hat{\sigma}_3 \times \sin \phi_m) \times \sum \left(1 - \frac{L_g}{L} \right) + \frac{\cos \phi_g}{1 - \sin \phi_g} \times (c_g \times \cos \phi_g + \hat{\sigma}_3 \times \sin \phi_g) \times \sum \left(\frac{L_g}{L} \right) \dots \text{式 7}$$

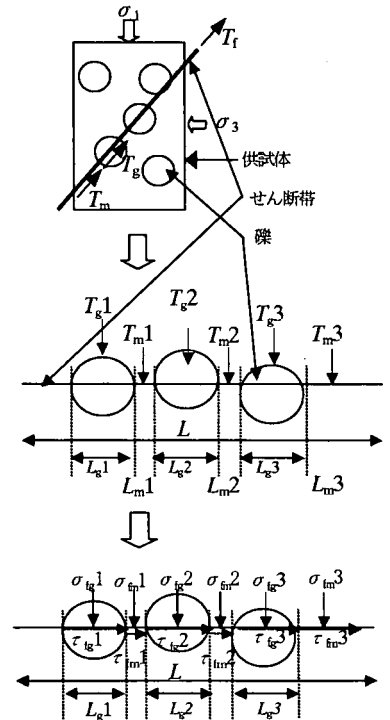


図-13 礫岩の強度特性のモデル化

5. 実験から得られるせん断強さとモデル式から得られたせん断強さの比較

各有効拘束圧ごとの代表稜率 (P_g) によって補正されたせん断強さ q_f^* から得られる τ_f と、礫岩モデルの数値実験から得られるせん断強さ (τ_f) の分布を、有効拘束圧 $\sigma'_3 = 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 \text{ MPa}$ において比較した(図-14~18)。この結果から以下のことがわかった。

① 有効拘束圧 (σ'_3) が小さい場合、室内実験 ≒ 数値実験となるが、有効拘束圧 (σ'_3) が大きい場合、室内実験 > 数値実験となる。② 室内実験におけるばらつきを数値実験において表現することが出来た。③ 室内実験での寸法効果(図-8)を数値実験から得られる重みを考慮した平均値により表現することが出来た。

① において室内実験と数値実験に差が生じた理由として、有効拘束圧 (σ'_3) が増加すると差が大きくなることから、数値実験において設定した基質の内部摩擦角 (ϕ_m) が低かったことが考えられる。今後 ϕ_m の設定方法を検討しなおすことで、室内実験から得られる値と数値実験から得られる値の整合性を示すことが出来れば、礫岩モデルから室内試験を表現することができる。また、この礫岩モデルによって原地盤の強度の評価も可能となる。

以上から、① 基質部のせん断強さ (q_m) と礫部のせん断強さ (q_g)、② 平均礫径 (D_{50})、③ 代表稜率 (P_g)、④ 基質を通る割合 ($1-L_g/L$) とせん断帯が礫を通る割合 (L_g/L) の四つのパラメータがわかれば、礫岩のばらつき、寸法効果とせん断強度を求めることが可能となる。

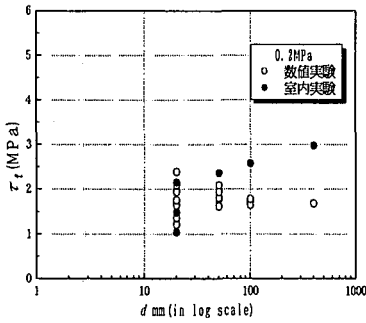


図-14 $\tau_f \log d$ (0.2MPa)

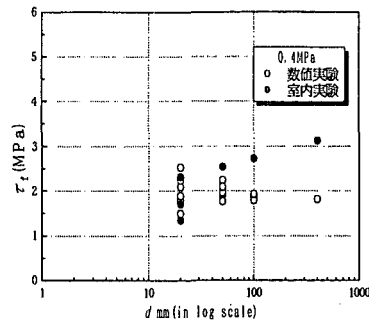


図-15 $\tau_f \log d$ (0.4MPa)

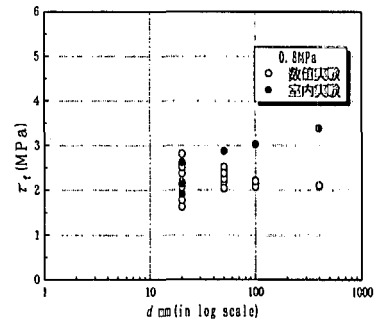


図-16 $\tau_f \log d$ (0.8MPa)

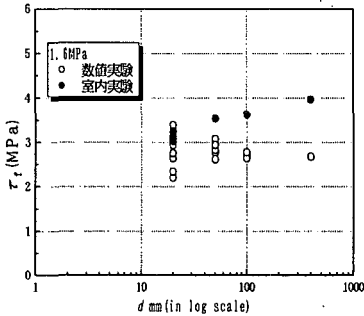


図-17 $\tau_f \log d$ (1.6MPa)

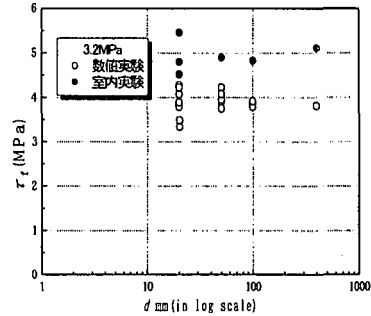


図-18 $\tau_f \log d$ (3.2MPa)

6. 結論

礫のせん断強さが基質のせん断強さよりも強度が弱い ($q_{tm} \geq q_{te}$) 大谷石を用いた三軸圧縮試験(CU)を行い、代表礫率(P_g^*)によってせん断強さを補正し、強度特性の寸法効果を実験的検討により検討した。これにより大谷石の寸法効果は、有効拘束圧(σ'_v)が低い場合は、供試体の寸法が10倍になると10%程度の強度増加が見られるが、有効拘束圧(σ'_v)が高くなるほど割合は0に近づく。したがって、大谷石の当該試料に関しては、寸法効果はほとんど無いものと判断される。

また、礫岩モデルによって寸法効果を数値実験によって検討した。平均礫径(D_g)と代表礫率(P_g^*)により、丸い礫が均一に三角形の頂点の上に配置されている(千鳥格子配置)モデルを作成した。そしてせん断面で発揮されるせん断強さは、①基質部のせん断強さ(q_{tm})と礫部のせん断強さ(q_{te})、②平均礫径(D_g)、③代表礫率(P_g^*)、④基質を通る割合($1-L_g/L$)とせん断帯が礫を通る割合(L_g/L)を考慮して、様々な寸法の供試体について求めることが可能となった。

今後の課題として、モデル式の適応性を高めるために、大谷石以外の「礫が基質よりも強度が弱い ($q_{tm} \geq q_{te}$)」による検討が必要であると考えられる。

7. 参考文献

- (1)池見元宣、谷 和夫、岡田哲実、田中幸久(1998)：直径35～500mmの軟岩供試体を用いた三軸圧縮試験、第10回岩の力学国内シンポ、P13-18。(2)岡田哲実、中村敏明、野崎隆司、伊藤 洋(2000)：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、第30回地盤力学に関するシンポ、P333-337。(3)岡田哲実、野崎隆司、伊藤 洋、中村敏明(2000)：自然礫岩を用いた礫と基質の付着強度の検討、第35回地盤工学発表会、P1023-1024。(4)中本 崇、西村 強、川崎 了、木山英郎(2000)：二種混合体の圧縮特性に関する解析的検討、第30回地盤力学に関するシンポ、P338-342。(5)I中島 徹(2000)：原位置岩盤三軸試験の排水条件に関する実験的研究、横浜国立大学卒業論文。(6)岡田 哲実、伊藤 洋、野崎隆司、中村敏明(2001)：人工岩を用いた礫岩の強度評価の検討、第36回地盤工学研究発表会、P593-594。(7)松枝 真吾、清水隆文(2002)：堆積軟岩(大谷石)の粘土鉱物の含有率と力学特性の関連性について、第11回岩の力学国内シンポ、E14。(8)谷 和夫、池見 元宣(2002)：三軸圧縮試験で見られた均質な軟岩のせん断挙動に関する寸法効果、第11回岩の力学国内シンポ、A14。