

原位置岩盤三軸試験によって評価された 大谷石のせん断強さの位置付け[†]

谷 和 夫^{*}

Shear Strength of Ohya Stone Evaluated by In-situ Rock Mass Triaxial Test

by

Kazuo TANI^{*}

An in-situ triaxial test method was invented for accurate evaluation of stress and strain relationships of rock masses in the field. A series of proof tests were conducted at an abandoned quarry of Ohya stone. Comparison was made between the strength characteristics of Ohya stone evaluated by the in-situ triaxial tests conducted in the field and those by laboratory triaxial tests on core samples retrieved by rotary drilling from the same site. The results show that the in-situ triaxial test method on a large specimen is most reasonable and appropriate to evaluate mechanical characteristics of rock masses. The influence of heterogeneity was found significant for small specimens, while the influences of drainage condition and scale effect seem to be rather small.

Key words : Shear strength, Triaxial test, In-situ, Rock, Scale effect

1 緒 言

岩盤の力学特性の評価は、不均質性や不連続性に起因する寸法効果や採取した試料の品質が問題となるので、現場の露頭ないし調査坑で行う大規模な載荷試験、例えば平板載荷試験や岩盤せん断試験、あるいはボーリング孔で行うプレッシャーメータ試験によるのが一般的である。¹⁾しかし、これらの原位置岩盤試験には、① 応力とひずみの関係が直接に計測できない、② 載荷・応力経路の条件に制約がある、③ 試験面のゆるみやベディング・エラーがある、④ 深部地盤の強度特性が評価できない、⑤ ボーリング孔で行う試験は状況観察が困難、⑥ 変形特性と強度特性を別々の試験法により求める必要がある、など問題点が多い。

これらの問題点を解決する新しい試験方法として、深部岩盤の力学特性を精度良く評価することが可能な原位置岩盤三軸試験を考案した。²⁾そして、浅部地盤に適用する試験装置を製作し、大谷石の採掘跡地において初めてその実証試験に成功した。³⁾

しかし、この原位置岩盤三軸試験によって評価された大谷石の力学特性の位置付けがどのようなものであるかは厳密に議論されてこなかった。そこで、供試体の不均質の程度や大きさ、軸圧縮時の排水条件を変化させて室内三軸試験を系統的に行い、不均質性と寸法効果の影響や、せん断時の排水条件の影響を検討した。なお、本論文では強度特性についてのみ検討し、変形特性については別途報告する。

2 大 谷 石

原位置岩盤三軸試験を実施し試料を採取したサイトは、大谷石の露天の採石場跡地(宇都宮市大谷町)である。⁴⁾この大谷石は、新第三紀中新世の流紋岩質溶結凝灰

岩で、割れ目には乏しく連続・塊状である。

しかし、Fig. 1 に示すように、通称「みそ」と呼ばれる暗灰色または淡青色の礫を含み、不均質な岩盤である。これらの礫は沸石やモンモリロナイトを含み、基質部分より含水比が高く軟質である。⁵⁾よって、礫率や礫径を求めるのに粒度試験を行うことができない。そこで、供試体ないし試験体の表面で礫の輪郭をトレースしたものを画像処理して表面積礫率と表面換算径を求めた。⁶⁾この展開図法により求めた平均礫率は27%、平均礫径は9.7mmで、大谷石の石材分類としては荒目に属する。なお、暗灰色の礫と淡青色の礫は、直径 $d \times$ 高さ h が 100mm $\times$ 200mm の供試体 11 本で計測した平均礫径の平均値は各 9.3mm と 10.2mm で、最大礫径の平均値が各 53mm と 34mm で、粒度が少し異なる。また、平均礫率も各 15% と 12% で、若干の差がある。しかし、針貫入試験による貫入抵抗の降伏値の平均値には各 0.53kPa と 0.52kPa と有意な差が認められないので、力学的に両者を区別することはできない。



Fig. 1 Specimens of Ohya stone, $d = 50\text{mm}$, 65mm and 100mm .

[†] 原稿受理 平成 17 年 8 月 17 日 Received Aug. 17, 2005

^{*} 正 会 員 横浜国立大学大学院工学研究院 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台, Dept. of Civil Eng., Yokohama National Univ., Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501

サスペンション PS 検層により計測した弾性波速度を Fig. 2 に示す。P 波速度 $V_p = 2733 \pm 129 \text{ m/s}$ (平均値 $\pm$ 標準偏差), S 波速度 $V_s = 1191 \pm 136 \text{ m/s}$ で、深度によらず一様である。原位置岩盤三軸試験の試験体は深度 $z=0 \sim 2 \text{ m}$ の範囲に作製し、室内試験用のコア試料もロータリー・ドリリング (呼び径 100mm, 66mm) により同深度から採取した。地下水位は地表面と一致していたので、いずれも飽和状態にある。

採取したコア試料 (直径 $d = 65 \text{ mm}$) を用いて行った超音波速度測定 (地盤工学会基準 JGS 2110-1998), 圧裂引張り試験 (地盤工学会基準 JGS 2551-2002), 一軸圧縮試験 (地盤工学会基準 JGS 2521-2000) の結果を Table 1 に示す。供試体で計測された超音波速度の値がサスペンション PS 検層による弾性波速度の現場計測値 (Fig. 2) と一致していることから、サンプリングによる乱れの影響がないことが確認できる。不均質な礫岩なので一軸圧縮試験や圧裂試験の結果は変動係数が 0.2 $\sim$ 0.3 とややばらついているが、一軸圧縮強さ $q_u = 4 \sim 7 \text{ MPa}$, 圧裂引張り強さ $\sigma_t = 0.8 \sim 1.2 \text{ MPa}$ である。

3 三軸試験の方法

3・1 室内三軸試験の方法

現地よりロータリー・ドリリング (地盤工学会基準 JGS 1224-2003) で採取したコア試料より、直径 $d \times$ 高

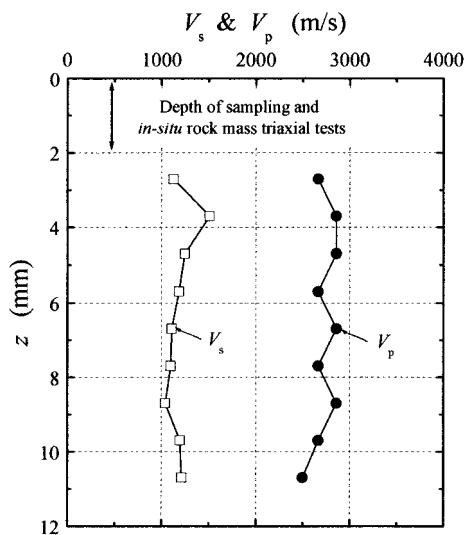


Fig. 2 Result of suspension type PS logging.

さ h が $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, $65 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$, $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, $20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ の 4 種類の供試体を作製した。不均質性の影響を排除するため、後に記す「礫試料」と「基質試料」を除いて、礫率が 20 $\sim$ 34% の供試体 (以後「礫岩 (conglomerate) 試料」) を室内三軸試験に用いた。そして、寸法効果の影響を検討するため、全ての寸法において圧密非排水 (CU) 試験 (地盤工学会基準 JGS 2553-2002) を行った。有効拘束圧 σ'_c は 0.1 $\sim$ 3.2 MPa の範囲とし、軸圧縮のひずみ速度は 0.01 $\sim$ 0.02%/min とした。また、軸圧縮時の排水条件の影響を検討するため、直径 $d \times$ 高さ h が $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ と $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ の供試体において、圧密排水 (CD) 試験 (地盤工学会基準 JGS 2534-2002) を行った。

さらに、不均質性の影響を検討するため、直径 $d \times$ 高さ h が $20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ の寸法において、礫 (みそ) の部分が支配的な供試体 (以後「礫 (gravel) 試料」) と基質 (マトリックス) の部分が支配的な供試体 (以後「基質 (matrix) 試料」) を選択的に作製して圧密非排水 (CU) 試験を行った。礫試料の礫率は 54 $\sim$ 88% で、基質試料の礫率は 4 $\sim$ 13% である。

3・2 原位置岩盤三軸試験の方法

提案する原位置岩盤三軸試験は、Fig. 3 に示すように、ボーリング孔底に中空円筒形状の試験体を掘削・成形し、その中央の小孔と外周溝 (スリット) にゴム膜を介して側圧 (内圧 p_{in} と外圧 p_{out}) を作用させると共に、上面に載せたキャップに軸荷重 Q_a を載荷した時の試験体の軸方向と半径方向の変位挙動を計測するものである。²⁾ 試験体の掘削・成形はロータリー・ドリリングによるため、試験体に対する乱れを最低限に抑えることができる。また、試験体中央部の軸ひずみは中央の小孔で相対軸変位を計測して求めるため、上面のベッディング・エラー、下端部の拘束や深部地盤の圧縮の影響を受けずに厳密に評価することができる。結果的に、ボーリング孔底に大型の試験体を掘削することができれば、深部岩盤の平均的な応力 $\sim$ ひずみ関係 (要素としての強度・変形特性) を調べることが可能である。

地下深部に試験体を精度良く掘削する技術に不安があったので、最初のステップとして露頭あるいは調査坑底面で実施することができる装置 (調査深度 0 $\sim$ 2m) を製作した。⁷⁾ 試験体の寸法は外径 400mm, 内径 86mm,

Table 1 Results of measurement of ultrasonic wave velocity, splitting tensile strength test and unconfined compression test.

Item of measurement	No. of data	Average $\pm$ Standard deviation	Coefficient of variation
Wet density ρ_t	80	1.911 $\pm$ 0.031 (g/m ³)	0.016
Water content w	40	23.49 $\pm$ 1.16 (%)	0.056
P wave velocity V_p	64	2732 $\pm$ 143 (m/s)	0.052
S wave velocity V_s	43	1135 $\pm$ 74 (m/s)	0.065
Tensile strength σ_t	16	1.014 $\pm$ 0.200 (MPa)	0.197
Uniaxial compressive strength q_u	8	5.739 $\pm$ 1.552 (MPa)	0.270
Initial Young's modulus E_i		2762 $\pm$ 863 (MPa)	0.313
Secant Young's modulus at $q=0.5q_u$ E_{50}		1570 $\pm$ 497 (MPa)	0.316
Axial strain at failure ϵ_{af}		0.364 $\pm$ 0.033 (%)	0.091

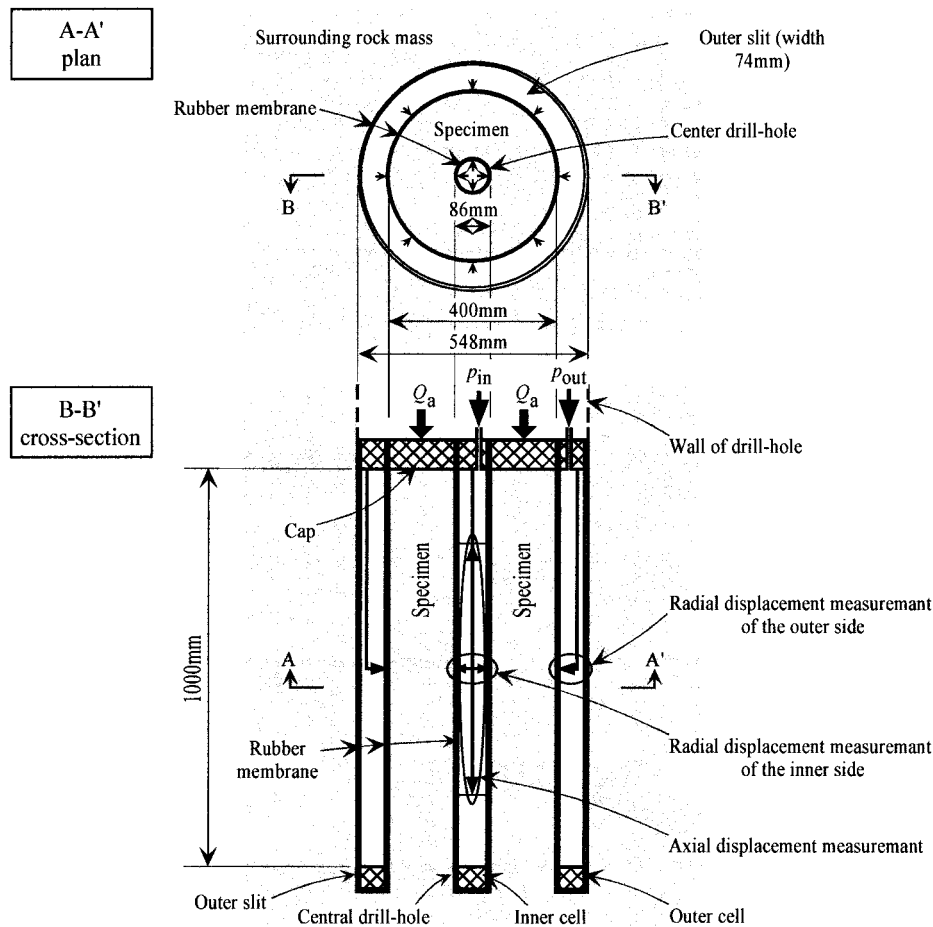


Fig. 3 In-situ rock mass triaxial test method.

高さ1000～1050mmで、側圧は最大5.0MPa、軸荷重は最大8000kN（最大軸応力65.5MPa）である。軸方向の変位は中央の小孔で3深度、円周方向の変位は試験体の内側面と外側面においてそれぞれ2深度で計測する。これらの変位計測には、試験体に圧着されたゴム膜に小型の磁石をセットし、その移動量を磁力センサーで感知する方式を採用した。

試験手順は、最初に風化した表層部分を削剥して新鮮岩を露出させた後に、円盤状のビットの底面にインプリグネーティッド・ダイヤモンド・チップをセットしたディスク・カッターで上面を水平に成形する。そして、深さ約105cmの中央の小孔と外周溝（スリット）をロータリー・ドリリングにより掘削する。この時、基本的な掘削変数を連続的に計測し、試験体に大きな荷重が負荷されないことを確認した。⁴⁾成形された試験体に外セル、キャップ、内セルを設置して、載荷枠を組み立てる。

合計7本の試験体（No. 1～7）に対して、単調載荷試験を6本、多段階載荷試験（No. 5）を1本実施した。拘束圧は0.1～3.5MPaの範囲とし、軸圧縮の載荷速度は0.05～0.10MPa/minとした。多段階載荷試験（No. 5）における各載荷段階のピーク強さの判定は、軸荷重の計測値が増加から減少に転じたことを確認する方法によった。よって、第1載荷段階の強度は正しく評価されているが、第2載荷段階以降の強度は損傷の蓄積により過小評価されている可能性がある。なお7本の内、最初に実

施した試験（No. 1）は装置の不具合により試験体の底部に拘束圧が作用せず失敗したが、他の6本は全て適切にせん断破壊した。

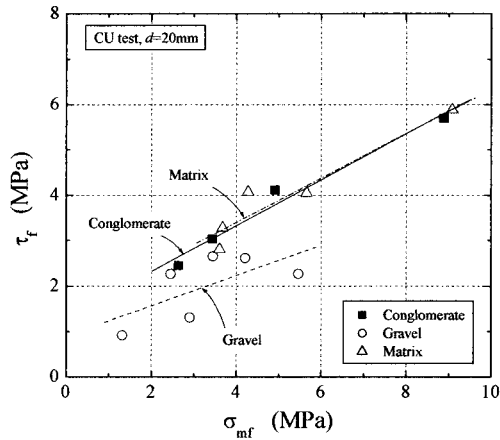
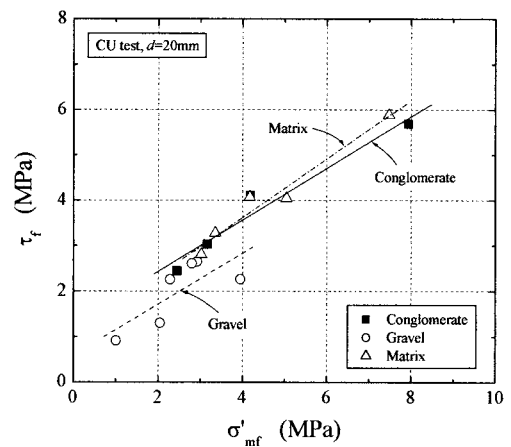
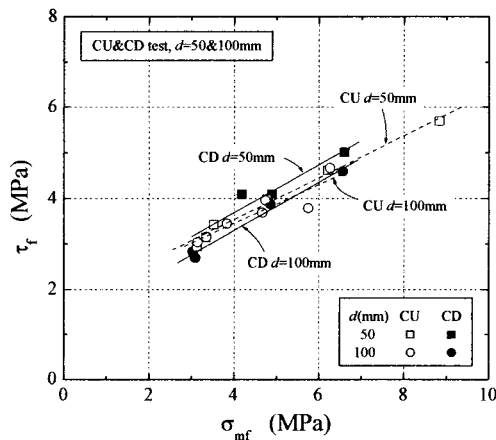
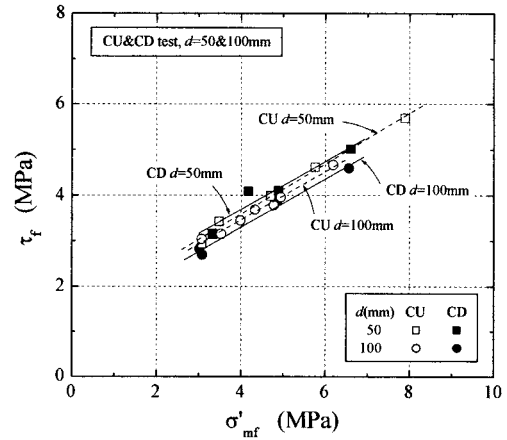
4 三軸試験の結果

他の文献^{4), 8)}に応力～ひずみ関係や変形特性に関する記載は譲り、以下には強度特性に関する結果のみを記す。

4・1 室内三軸試験の結果

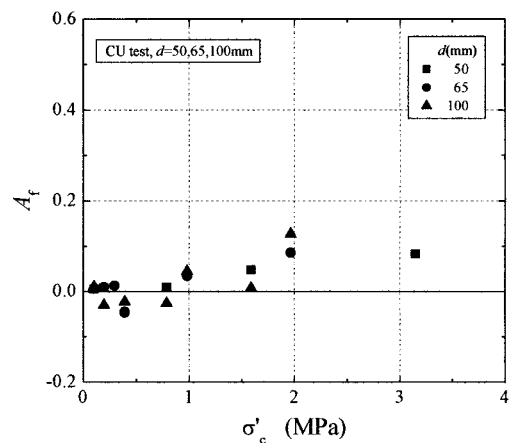
4・1・1 不均質性の検討 Fig. 4に直径 d ×高さ h が20mm×40mmの供試体を用いて行った圧密非排水（CU）試験で得られた最大軸差応力時の平均主応力と最大せん断応力の関係を示す。代表的な礫岩（conglomerate）試料（■印）と比較して、基質（マトリックス）の部分が支配的な基質（matrix）試料（△印）のせん断強さは数%大きい程度だが、軟弱な礫（みそ）の部分が支配的な礫（gravel）試料（○印）のせん断強さは1～5割も低く、またデータのばらつきも非常に大きい。大谷石の場合、礫率が低く基質が骨格構造を形成しているので、基質の部分が礫の部分よりも礫岩としての強度特性により強く関与していると思われる。さらに、直径が平均礫径の2倍程度の供試体は、不均質性の影響が強く出るので、礫岩としての強度特性を評価するには小さ過ぎることが分かる。

4・1・2 排水条件の検討 Fig. 5に直径 d ×高さ h が100mm×200mmと50mm×100mmの供試体を用いて行った圧密非排水（CU）試験と圧密排水（CD）試験で

(a) Relationship of τ_f and σ_{mf} (b) Relationship of τ_f and σ'_{mf} Fig. 4 Result of CU test, $d = 20\text{mm}$.(a) Relationship of τ_f and σ_{mf} (b) Relationship of τ_f and σ'_{mf} Fig. 5 Result of CU & CD tests, $d = 50 \text{ \& } 100\text{mm}$.

得られた最大軸差応力時の平均主応力と最大せん断応力の関係を示す。全応力表示の場合は、応力レベルが低いケース ($\sigma_{mf} < 5\text{MPa}$) では排水条件の影響は見られないが、高いケース ($\sigma_{mf} > 5\text{MPa}$) ではCU試験によるせん断強さがCD試験によるせん断強さよりもやや低くなる傾向が見られる。これはFig. 6示すように、有効拘束圧 σ'_c が1.6MPa以下では破壊時の間隙水圧係数 A_f がほぼゼロ（過剰間隙水圧がゼロ）であるのに対して、 σ'_c が1.6MPaを超えると $A_f > 0.08$ となり正の過剰間隙水圧が発生するためである。また、有効応力表示の場合は、排水条件の影響は全く認められず、大谷石でも有効応力原理が成り立つことが確認できる。

足立・小川⁹⁾は同じ大谷石を用いてCD試験およびCU試験を行い、本研究と同様の結果を得ている。すなわち、有効拘束圧 σ'_c が5MPa以上の場合にはせん断強さは排水条件に依存するが、5MPaより低い σ'_c では両試験によるせん断強さに差がないことを示している。よって、大谷石の場合、一軸圧縮強さ程度 ($q_u = 4 \sim 7\text{MPa}$) を超えない有効拘束圧においては、破壊時の過剰間隙水圧は相対的に小さく、排水条件が強度特性に及ぼす影響は小さいと言えよう。

Fig. 6 Relationship of A_f and σ'_c .

4・1・3 寸法効果の検討 Fig. 7に直径 $d \times$ 高さ h が100mm $\times$ 200mm, 65mm $\times$ 130mm, 50mm $\times$ 100mm, 20mm $\times$ 40mmの4種類の供試体を用いて行った圧密非排水 (CU) 試験で得られた最大軸差応力時の平均主応力と最大せん断応力の関係を示す。全応力表示の場合も有効応力表示の場合も、せん断強さが供試体の大きさに依存する一定の傾向は認められない。よって、恣意的に礫率を一定の幅に揃えた供試体を用いれば、供試体の直径

が平均礫径の2～10倍の範囲で、大谷石のせん断強さに関して寸法効果はないと言える。

4・2 原位置岩盤三軸試験の結果

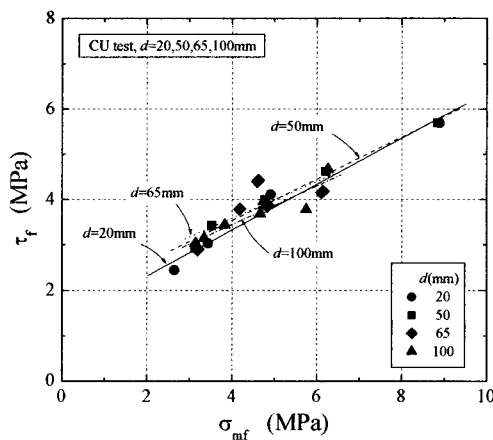
Fig. 8に成功した6本 (No. 2～7) の試験体に対して得られた最大軸差応力時の平均主応力と最大せん断応力の関係を、礫岩 (conglomerate) 試料を用いた室内三軸試験の結果と比較して示す。なお、多段階载荷試験を行なったNo. 5については、損傷が蓄積される影響が懸念されたので、せん断強さを過小評価することがない第1载荷段階の結果のみを載せている。

原位置岩盤三軸試験では排水条件を制御することができないが、試験体の底部が地山に連続しているため非排水条件を完全に保っているとは考えられない。実際に原位置岩盤三軸試験の結果とCD試験の結果を比べてみると、両者のせん断強さはほとんど一致しており、原位置岩盤三軸試験が排水条件に近い環境下で実施されたと推測される。また、4・1・2項に記したように、排水条件の影響が小さい範囲の拘束圧の下で試験を実施したので、CU試験の結果とも調和的であり、特に有効応力表示の場合の一致度が高い。

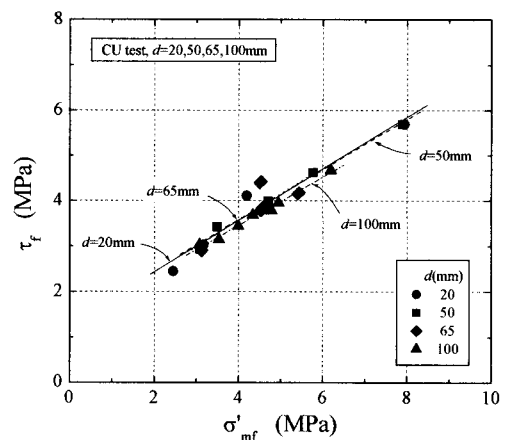
一軸試験や三軸試験に関する地盤工学会基準 (例えば、

JGS 2531-2000) においては、不均質な岩盤における寸法効果を考慮して「粗粒結晶を持つ岩石や礫岩を対象とする場合には、供試体の直径は、構成粒子の最大寸法の5倍以上が望ましい。」という規定を設けている。この条件を満足する三軸試験を室内で行うためには、大谷石の最大礫径が50～60mmであるので、直径が250～300mmを超える供試体が必要である。一方、原位置岩盤三軸試験は、試験体の寸法が十分に大きく (直径 $d = 400$ mm)、しかも乱れの影響も受けないことを考慮すると、礫岩のように不均質な岩盤の力学特性を評価するのに好適であると結論できる。

この大寸法の原位置岩盤三軸試験の結果が、礫率を一定の幅に揃えた小寸法の礫岩 (conglomerate) 試料を供試体として用いた室内三軸試験の結果と調和的であることは興味深い。たとえ供試体の直径が最大礫径の5倍を超えていなくても、恣意的に礫率を一定の幅に揃えるという条件を付ければ、礫岩における寸法効果はそれほど著しくはないとも推測できるからである。ただし、この見解は大谷石について得られた個別的なものであり、他の特性を有する礫岩についても成り立つ一般的な傾向かどうかはさらに検討を要する。

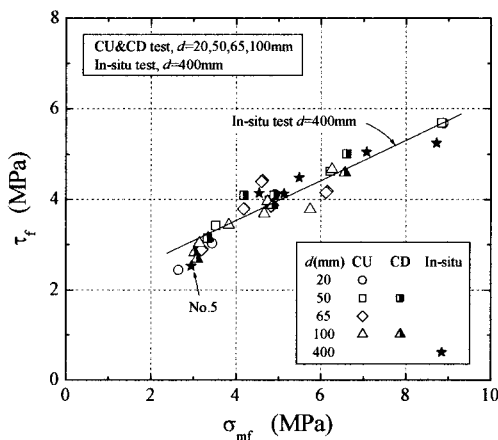


(a) Relationship of τ_f and σ'_{mf}

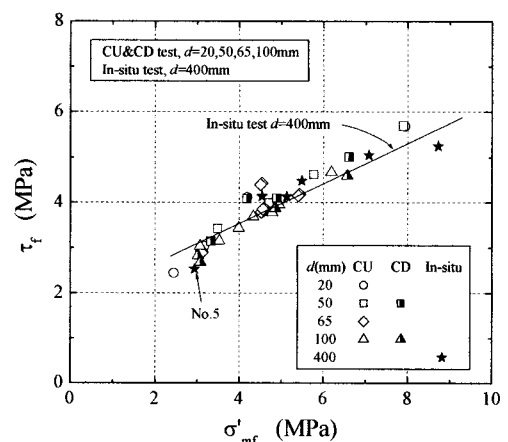


(b) Relationship of τ_f and σ'_{mf}

Fig. 7 Result of CU test, $d = 20, 50, 65, 100$ mm.



(a) Relationship of τ_f and σ'_{mf}



(b) Relationship of τ_f and σ'_{mf}

Fig. 8 Comparison of in-situ tests with CD & CU tests.

5 強度定数の比較

Fig. 9 にモール・クーロンの破壊規準に用いる強度定数（せん断抵抗角と粘着力）と供試体ないし試験体の直径 d の関係を示す。CU 試験の結果は有効応力表示は ϕ' と c' 、全応力表示は ϕ_{CU} と c_{CU} として表示し、CD 試験は全応力と有効応力が等しいので ϕ_d と c_d として表示した。一方、原位置岩盤三軸試験は排水条件が厳密には分からないので、それぞれ ϕ と c と表示した。

CU 試験の結果と CD 試験の結果が $\phi' = \phi_d$ かつ $c' = c_d$ であることより、有効応力原理に従っていることが確認できる。有効応力表示の室内三軸試験（CU 試験と CD 試験）の結果と比較すると、原位置岩盤三軸試験の結果はせん断抵抗角がやや小さい一方で粘着力がやや大きい。また、全応力表示では CU 試験の結果の方に近い値が得られているが、CD 試験の結果との差もそれほど大きくはない。原位置岩盤三軸試験は排水条件に近い環境で行なわれたと推測されるが、過剰間隙水圧が完全には消散せず、部分排水条件的な挙動の影響がある程度は反映したのかもしれない。ただしこの影響は小さく、また有効応力表示のせん断抵抗角と粘着力に見られる僅かの差も、その相違が相殺し合うために 4・2 節で検討したようにせん断強さは結果的に一致している。

6 結 語

不均質な礫岩である大谷石を対象として、原位置岩盤三軸試験と室内三軸試験の結果を比較し、強度特性の評価について以下の結論を得た。

(1) 試験体の寸法が直径 400mm と大きい原位置岩盤三軸試験は、最大礫径が数 cm の不均質な礫岩の強度特性を評価するのに好適な試験方法である。

(2) 直径が平均礫径の 2 倍程度の供試体は、不均質性の影響が強く出るため、礫岩の強度特性を評価するには小さ過ぎる。

(3) 礫率を一定の幅に揃えた供試体を用いれば、供試体の直径が平均礫径の 2 ～ 10 倍の範囲で、大谷石のせん断強さに関する寸法効果は小さい。

(4) 大谷石の場合、強度特性の観点から、有効応力原理が成り立っていることが確認された。また、一軸圧縮強さを超えない有効拘束圧においては、破壊時の過剰間隙水圧は相対的に小さく、排水条件が強度特性に及ぼ

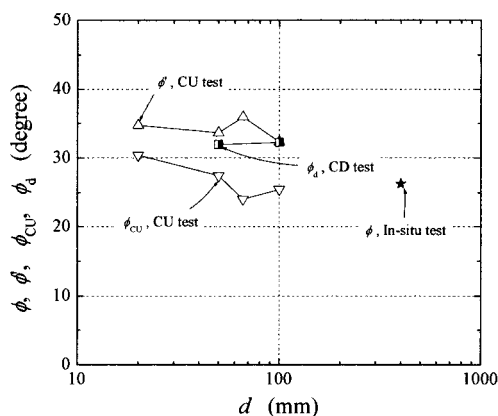
す影響は非常に小さい。

(5) 大谷石で実施した原位置岩盤三軸試験は、排水条件に近い環境の下でせん断されたと推測される。

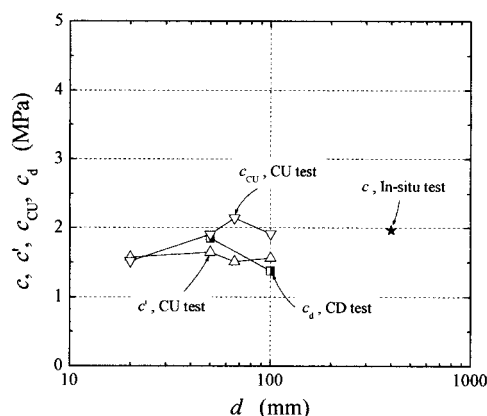
室内三軸試験は、(財)電力中央研究所の岡田哲実主任研究員の指導の下、中島徹氏（鹿島建設㈱）と来村俊郎氏（東京ガス㈱）が実施した。関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Committee of Rock Mechanics, "Suggested method for in-situ test", Jap. Soc. Civil Engineers, pp.1-249 (2000).
- 2) K. Tani, "Proposal of two kinds of new field tests to investigate strength and deformability of rock masses", Proc. 42nd Geotech. Eng. Symposium, JGS, pp.71-76 (1998).
- 3) K. Tani, "Prompt report of proof testing of CRIEPI in-situ triaxial test method on rock mass", Proc. 2nd Asian Rock Mechanics Symposium, pp.639-642 (2001).
- 4) T. Okada, T. Nozaki, M. Ikemi and K. Tani, "Development of In-situ tests for rock masses (CRIEPI method)", CRIEPI report, No.U02023 (2003).
- 5) T. Yoshikawa, "Geology and stratigraphy of Tertiary system in the Utsunomiya district, Tochigi Prefecture, central Japan", Jour. Geol. Soc. Japan, Vol.104, No.5, pp.346-356 (1998).
- 6) S. Kawasaki and K. Koizumi, "Measurement method for gravel fraction content of conglomerate by image data processing", Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.39, No.2, pp.202-207 (1998).
- 7) K. Tani, H. Tachikawa, S. Kaneko and Y. Toyooka, "Development of apparatus for new In-situ rock test using downhole hollow cylindrical specimen", Proc. 31st Rock Mechanics Symposium, JSCE, pp.82-86 (2001).
- 8) K. Tani, T. Nozaki, S. Kaneko, Y. Toyooka and H. Tachikawa, "Down-hole triaxial test to measure average stress-strain relationship of rock mass", Soils and Foundations, Vol.43, No.5, pp.53-62 (2003).
- 9) T. Adachi and T. Ogawa, "Mechanical properties and failure criterion of soft sedimentary rock", Jour. Jap. Soc. Civil Engineers, Vol.295, pp.51-63 (1980).



(a) Relationship of ϕ and d



(b) Relationship of c and d .

Fig. 9 Strength parameters, internal frictional angle and cohesion.