

三軸圧縮試験で見られた不均質な岩石の変形特性に係る寸法効果に関する一考察

谷 和夫^{1*}

¹東京海洋大学 大学改革準備室 (〒108-8477 東京都港区港南4-5-7)

*E-mail: ktani00@kaiyodai.ac.jp

三軸試験は要素試験であり、寸法に依存しない試験結果が得られることが理想である。しかしながら、不均質あるいは潜在的な不連続面を含む岩では、試験結果が供試体の大きさに依存する寸法効果が認められる場合があり、岩盤の力学特性を評価する際には留意する必要がある。そこで、不連続面をほとんど含まない凝灰質の礫岩について、直径が20mmから100mmの供試体に対しては室内で岩石三軸試験を、直径が400mmの試験体に対しては原位置で岩盤三軸試験を行って検討した。強度特性については既に報告したので¹⁾、破壊に至るまでの変形特性について検討した結果を以下に報告する。

Key Words : *stiffness, triaxial test, rock, scale effect, heterogeneity*

1. はじめに

地盤材料の力学特性を調べるために行われる三軸試験は一般には要素試験と解されており、寸法や形状に依存しない試験結果が得られることが理想である。しかしながら、不均質あるいは潜在的な不連続面を含む岩では、試験結果が供試体の大きさに依存する寸法効果が認められる場合があり、このような岩の力学特性を評価する際には、寸法効果の程度を考慮して試験の規模や結果の評価方法を適切に判断する必要がある。

寸法効果の影響を検討するのに際して、潜在的な不連続面に起因するものについては、不明瞭な不連続面を特定して適切に評価することが難しいため、研究対象としては合理的ではない。そこで、不連続面をほとんど含まない凝灰質の礫岩について、不均質性に起因する寸法効果について検討することとした。

本研究では、三軸試験に供する供試体の直径が20mmから400mmという非常に広い寸法の幅で検討したことが特長である。直径が100mm以下の供試体に対しては室内で一般に行われる岩石三軸試験を、直径が400mmの試験体に対しては原位置で岩盤三軸試験を行った。

強度特性については既に報告したので¹⁾、以下には、破壊に至るまでの変形特性について検討した結果を報告する。

2. 大谷石

原位置で岩盤三軸試験を実施し、さらに室内で行う岩石三軸試験用の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²⁾。この大谷石は、新第三紀中新世の流紋岩質溶結凝灰岩で、割れ目に乏しく連続・塊状である。

しかし、写真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。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において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³⁾。



写真1：供試体の性状
(左から $d=50\text{mm}$, 65mm , 100mm)

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 ×高さ h が100mm×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。

原位置で行う岩盤三軸試験の試験体は深度 $z=0\sim2$ mの範囲に作製し、室内での岩石三軸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。

孔内起振受振方式による弾性波速度検層（地盤工学会基準 JGS1122-2012）で得られた弾性波速度は、P波速度 $V_p=2733\pm129$ m/s（平均値±標準偏差）、S波速度 $V_s=1191\pm136$ m/sである。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。一軸圧縮強さ $q_c=4\sim7$ MPa、圧裂引張り強さ $\sigma_c=0.8\sim1.2$ MPaである。

3. 三軸試験の方法

(1) 室内での岩石三軸試験の方法

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 ×高さ h が100mm×200mm、65mm×130mm、50mm×100mm、20mm×40mmの4種類の供試体を作製した。各寸法の供試体が不均質性の観点でほぼ同様であることが重要であるため、後に記す「礫試料」と「基質試料」を除いて、礫率が20～34%の供試体（以後「礫岩（conglomerate）試料」）を室内での岩石三軸試験に用いた。

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_d は0.1～3.2MPaの範囲とし、軸圧縮時のひずみ速度は0.01～0.02%/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 ×高さ h が100mm×200mmと50mm×100mm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）も行った。

さらに、不均質性の影響を検討するため、直径 d ×高さ h が20mm×40mmの最小寸法において、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（gravel）試料の礫率は54～88%で、基質（matrix）試料の礫率は4～13%である。

(2) 原位置での岩盤三軸試験の方法

原位置で行う岩盤三軸試験は、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（内圧と外圧）を作用させると共に、上面に載せたキャップに軸荷重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⁾。なお、試験体の底部は岩盤に連続しているので、せん断中の排水条件を制御することはできない。

試験体の寸法は外径400mm、内径86mm、高さ1,000～1,050mmである。拘束圧 α 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。

4. 供試体及び試験体で測定された超音波速度

寸法効果の影響の検討では異なる寸法の供試体及び試験体を用いるが、これらの準備における乱れの影響が無いことを確認する必要がある。そこで、室内での岩石三軸試験に用いる供試体については、試験前に両端面を発振子と受振子で挟んでパルス透過法（地盤工学会基準 JGS1220-2009）により超音波速度を測定した。一方、原位置での岩盤三軸試験に用いる試験体については、試験前に中央の小孔を利用して小区間（離間が0.9m）の超音波速度検層を行った。

図1に超音波速度 V_p & V_s と供試体ないし試験体の直径 d の関係を示す。礫岩（conglomerate）試料（○印と●印）については、直径 d に依存せず $V_{pc}=2500\sim3200$ m/s及び $V_{sc}=900\sim1500$ m/sの範囲にあり、2章に示す現地で測定した弾性波速度と調和的である。よって、サンプリング及び試料運搬・保管や供試体ないし試験体の作製・整形に伴う乱れが弾性的な性質（弾性剛性）に及ぼす影響はほと

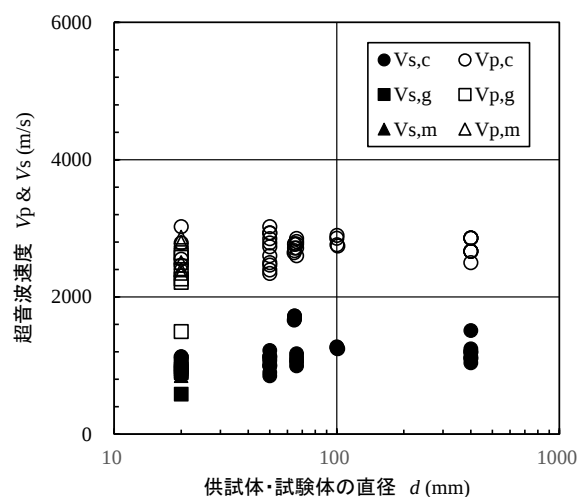


図1：超音波速度と直径の関係

んどないと結論できる。直径 $d=20\text{nm}$ の基質 (matrix) 試料 ($\triangle$ 印と $\blacktriangle$ 印) についても、礫岩 (conglomerate) 試料と同じ値 ($V_{pm} \doteq V_{pc}$, $V_{sm} \doteq V_{sc}$) が得られている。しかし、直径 $d=20\text{nm}$ の礫 (gravel) 試料 ($\square$ 印と $\blacksquare$ 印) については、数十パーセント低い値 ($V_{pg} < V_{pc}$, $V_{sg} < V_{sc}$) が得られている。礫の部分は基質の部分よりも軟質であるために、乱れの影響が顕在化したか、あるいは元始的に礫 (gravel) 試料の弾性剛性が低い可能性がある。よって、以下の寸法効果の検討では、直径 $d=20\text{nm}$ の礫 (gravel) 試料の結果を除いて考察する必要があると判断した。

5. 三軸試験の結果

他の文献^{1,2,4}に応力～ひずみ関係や強度特性に関する記載は譲り、以下には破壊に至るまでの変形特性に関する結果のみを記す。

破壊に至るまでの変形特性として軸方向のヤング率と破壊時の軸ひずみに注目して検討した。いずれも軸変位の計測結果に基づいて計算されるが、室内での岩石三軸

試験の場合には供試体の両端面におけるベッディング・エラーを、原位置での岩盤三軸試験の場合には上端面におけるベッディング・エラーと底部が岩盤に連続していることの影響を排除した計測とする必要がある。そこで以下の検討では、これら影響を受けてしまう外部変位計測の結果ではなく、室内での岩石三軸試験では供試体の側面の対角位置で、原位置での岩盤三軸試験では中央小孔の内壁で計測した局所変位計測の結果を用いる。さらに、局所変位計測における対角位置で計測したペアのデータは、载荷の初期には概ね同様の挙動を示すが、载荷を続ける（破壊に近づく）と変形の局所化が進行して非一様な変形が顕著となり徐々に相互に乖離した挙動を呈するのが一般的である。変形の一様性が過度に損なわれると変位計を設置した位置の影響が顕在化し、計測された結果が供試体ないし試験体の平均的な変形を代表していないことが懸念される。そこで以下の検討では、ペアの偏差が平均の30%を超えたデータは排除した。

(1) ヤング率に関する結果

図2にヤング率 E_I 及び E_{50} と拘束圧 α の関係を示す。初期ヤング率 E_I は $q/q_f < 0.1$ (q : 軸差応力, q_f : 破壊時の軸差応力) の範囲で見られるほぼ線形な軸差応力と軸ひずみの関係の接線剛性を、 $q/q_f = 0.5$ のヤング率 E_{50} は $q/q_f = 0.5$ の時の割線剛性を示す。

各寸法毎のデータはかなりばらついているので傾向を読み取ることが容易ではないが、直線回帰分析による傾きの値 ($\Delta E_I / \Delta \alpha$) 及び ($\Delta E_{50} / \Delta \alpha$) の各平均が約480及び約220と正なので、全体として拘束圧の増加に伴って剛性が増加する傾向、いわゆる剛性の拘束圧依存性が確認できる。そして、礫 (gravel) 試料 (*印) を除いて、礫岩 (conglomerate) 試料と基質 (matrix) 試料のデータを見る限りでは、直径 d によって系統的な傾向（寸法効果）は認められない。

なお、礫 (gravel) 試料 (*印) の E_I 及び E_{50} の値は、礫岩 (conglomerate) 試料や基質 (matrix) 試料より明らかに低く、超音波速度の結果（弾性剛性）と調和的な関係である。また、初期ヤング率 E_I は $q/q_f = 0.5$ のヤング率 E_{50} よりもやや大きい程度であり（数%程度しか大きくない）、载荷の前半 ($q/q_f < 0.5$) における応力～ひずみ関係はかなり線形であることが分かる。

(2) 破壊時の軸ひずみに関する結果

図3に破壊時 ($q/q_f = 1.0$) の軸ひずみ α_f と拘束圧 α の関係を示す。

各寸法毎のデータは図2と同様にかなりばらついているので傾向を読み取ることが容易ではないが、直線回帰分析による傾きの値 ($\Delta \alpha_f / \Delta \alpha$) の平均が約0.039%/MPaと正なので、全体として拘束圧の増加に伴って破壊時の軸

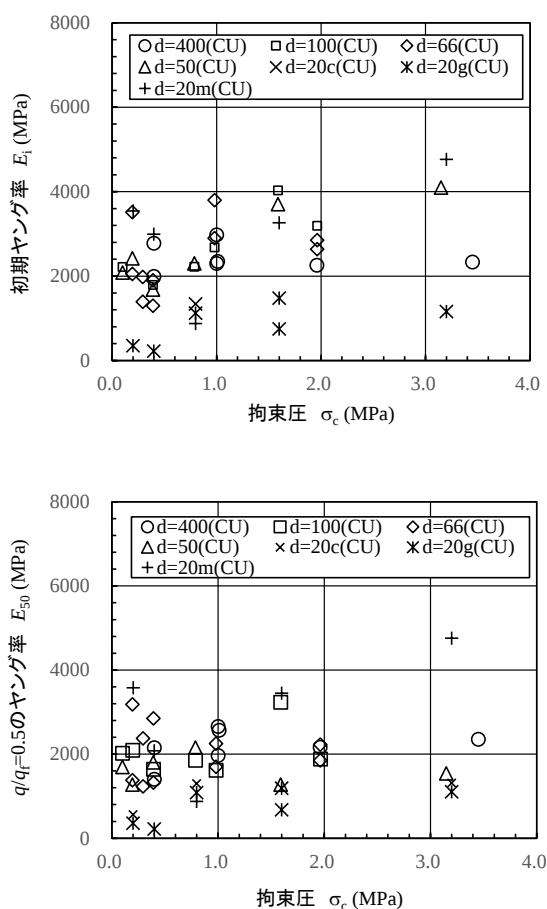


図2：ヤング率と拘束圧の関係
(上： E_I 下： E_{50})

ひずみ ϵ_{af} が増加する傾向、いわゆる破壊が脆性的なものから延性的なものに変化していく傾向が確認できる。そして、礫（gravel）試料（*印）を除いて、礫岩（conglomerate）試料と基質（matrix）試料のデータを見る限りでは、直径 d によって系統的な傾向（寸法効果）は認められない。また、CD試験とCU試験の結果についても、有意な差は認められない。

なお、礫（gravel）試料（*印）の ϵ_{af} は、礫岩（conglomerate）試料や基質（matrix）試料と余り差は無いようである。強度の相違と剛性の相違が同程度だった可能性がある。

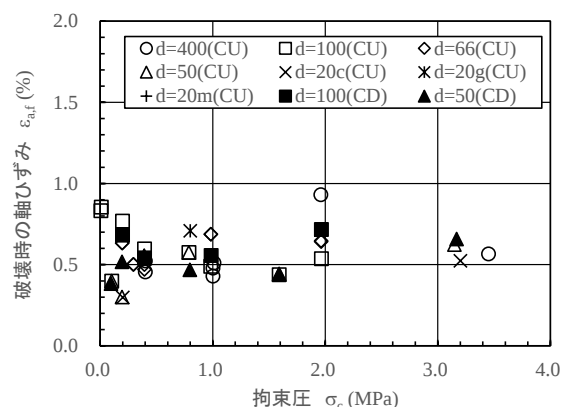


図3：破壊時の軸ひずみと拘束圧の関係

6. 結論

不均質な礫岩である大谷石を対象として、室内での岩石三軸試験と原位置での岩盤三軸試験の結果を比較し、供試体ないし試験体の直径が20mmから400mmという非常に広い範囲において破壊に至るまでの変形特性に係る寸法効果を検討した。その結果、初期ヤング率 E_0 と $q/q_f=0.5$ のヤング率 E_{50} 、さらに破壊時（ $q/q_f=1.0$ ）の軸ひずみ ϵ_{af} に関して、寸法効果は認められなかった。

謝辞：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（株））と来村俊郎氏（東京ガス（株））が実施した。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷 和夫：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，材料，Vol.55，No.5，pp.483-488，2006.
- 2) 岡田哲実，野崎隆司，池見元宣，谷 和夫：電中研式原位置岩盤力学試験法の開発，電力中央研究所，研究報告，No.U02023，36p，2003.
- 3) 川崎 了，小泉和広：画像処理による礫岩の礫分含有率の計測方法に関する検討，応用地質，Vol.39，No.2，pp.202-207，1998.
- 4) Tani, K., Nozaki, T., Kaneko, S., Toyooka, Y. and Tachikawa, H.: Down-hole triaxial test to measure average stress-strain relationship of rock mass, *Soils and Foundations*, Vol.43, No.5, pp.53-62, 2003.

STUDY ON SCALE EFFECT ON DEFORMATION CHARACTERISTICS OF HETEROGENEOUS ROCK EVALUATED BY TRIAXIAL COMPRESSION TESTS

Kazuo TANI

Triaxial test is ideally regarded as so-called an element test. However, if the rock is heterogeneous or potentially discontinuous, the test results may depend on the size of the specimens. In this study, a series of two kinds of triaxial tests were conducted on a tuffaceous conglomerate of heterogeneous nature, Oya stone, for a wide range of specimen size to investigate the scale effect on deformation characteristics. Specimens of 20-100mm in diameter were used in the laboratory, while those of 400mm in diameter were used in the field. The test results demonstrated that no obvious scale effect were recognized on the Young's moduli nor the axial strains at failure.