

論文

原位置岩盤三軸試験法の開発と不均質岩盤への適用性の検証

Development of In-situ Triaxial Test for Inhomogeneous Rock Mass

岡田 哲実 (おかだ てつじ)

財電力中央研究所 主任研究員

谷 和夫 (たに かずお)

横浜国立大学 教授

金谷 守 (かなたに まもる)

財電力中央研究所 上席研究員

大津 仁史 (おおつ ひとし)

東京電力㈱ 主任

1. はじめに

ダムや原子力発電所などの大型土木構造物を岩盤上に建設する際、岩盤の強度特性は岩盤せん断試験により、変形特性は平板載荷試験により評価されてきた^{1),2)}。しかしながら、これらの試験方法には次の問題が存在する。

- ① 強度特性と変形特性を別々の試験法により評価しなければならない。
- ② 基本的に要素試験ではないために、応力とひずみの関係を直接求められない。また、試験結果の解釈は必ずしも容易ではない^{3)~5)}。
- ③ 試験面の整形によるゆるみの影響を受けやすい。また、その影響の評価が困難である。

1997年に上記の問題を解決することができる新しい試験法（以降、原位置岩盤三軸試験法と呼ぶ）が考案され、翌年には直径40 cm、高さ100 cmの試験体を用いる試験装置が作製された⁶⁾。1999年に均質な軟岩（大谷石）を対象とした実証試験によって、この試験法の適用性が確認され、本試験法が従来の岩盤試験に代わる試験法となり得ることが示された^{7),8)}。ただし、原位置での実証は、唯一この均質な軟岩のみであり、本試験法の実用化には、不均質な岩盤や不連続性岩盤への適用性の確認が残されていた。

そこで本研究では不均質な岩盤である礫岩を対象として原位置岩盤三軸試験法の適用性を検討した。

2. 原位置岩盤三軸試験法^{6)~8)}

原位置岩盤三軸試験法は、ボーリング孔底に中空円筒形状の試験体を掘削し、中央の小孔と外周溝にゴム膜を介して側圧を作用させると共に、上面を軸方向に載荷した時の試験体の軸方向と円周方向の変位挙動を計測するものである。試験体の掘削・成形は、ロータリー・ドリリングによるため、振動による試験体への乱れを最低限に抑えることができる（図-1）。また、試験体中央高さの軸ひずみは中央の小孔で相対軸変位を計測して求め、試験体上下端の乱れに伴う計測の誤差や下端部の拘束の影響を受けずに厳密に計測することができる。試験終了後には試験体を回収し、その破壊状況を観察することができる（図-1）。

3. 不均質な岩盤への適用性の検証

3.1 試験位置

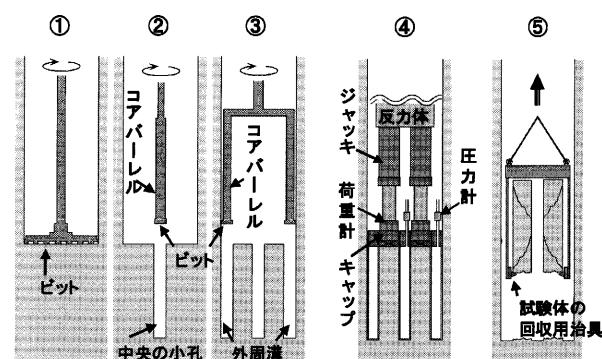
新第三系の礫岩を対象として地下-9 mの試掘坑内で試験を実施した。対象とする礫岩層は、数mmから数十cm以上の安山岩礫を含む。基質の強度は軟岩程度であり、礫は基質と比較して硬質（一軸圧縮強さで20倍程度）である。掘削によるゆるみの影響を考慮し、底盤を約50 cm掘り下げた後に試験候補地を選定した。

3.2 試験内容

原位置岩盤三軸試験法を用いて、三軸圧縮試験を3本、三軸引張り試験を2本実施した（表-1）。三軸圧縮試験は均質な軟岩を対象として試験を行った実績があるが^{7),8)}、三軸引張り試験については初めての試みである。引張り強さと低拘束圧のせん断強さを評価することが狙いである。

三軸圧縮試験については、一つの試験体で複数の拘束圧の試験が可能な多段階載荷方式で行った。多段階載荷は、ピーク荷重に達した後、側圧まで除荷し、また次の拘束圧へ移る方法を用いた。三軸引張り試験は、試験体とキャップを接着剤とアンカーで固定し、目的の拘束圧まで等方圧密した後、破壊に至るまで軸荷重を減少させた。せん断速度はともに0.1 MPa/minである。

なお、本試験の実施にあたり、変位計測システムの改良を行った（図-2）。改良の内容は、外周溝（外セル）



- ①底面を平滑に仕上げる（モルタルを打設し平滑にすることも可能）。
- ②中央の小孔を掘削する。採取したコアを観察する。
- ③外周溝（スリット）を掘削する。この状態で試験体の成形が終了する。
- ④内セル、外セル、および載荷システムを設置する。<試験を実施>
- ⑤試験終了後に試験体を回収し、その破壊状況を観察する。

図-1 原位置岩盤三軸試験法の手順

表一 原位置岩盤三軸試験一覧

試験	試験体名	段階数, 拘束圧(MPa)
三軸圧縮試験	C-1	破壊強度 ①1.0 ②1.5
	C-2	破壊強度 ①0.2 ②0.4 ③0.8 ④1.6 残留強度 ⑤0.8 ⑥0.4 ⑦0.1
	C-3	破壊強度 ①0.3 ②0.6 ③2.4 残留強度 ④2.4 ⑤0.6 ⑥0.3
三軸引張り試験	P-1	2.0
	P-2	4.5

の軸ひずみの計測を差動トランスマ式変位計（以降 LVDT）に、周ひずみの計測を非接触型変位計（以降 PT）に変更した⁹⁾。中央の小孔（内セル）は従来と同様の磁力センサーによる円孔変位計測システム（以降 ICD）を改良して用いた。これにより、軸ひずみと周ひずみは外セルと内セルの2箇所でそれぞれ計測することが可能となった。さらに比較のため、供試体上部にはゲージ長60 mmのひずみゲージ（以降 Gage）も貼付した。

また、原位置岩盤三軸試験の結果と比較するために、同試掘坑内底盤より採取したφ50 mmおよびφ55 mmのボーリングコアを用いて室内三軸圧縮試験および三軸引張り試験を実施した。ともに圧密排水、圧密非排水の二つの条件で試験を行った。

4. 試験結果

4.1 主応力差-ひずみ関係

三軸圧縮試験（試験体 C-2）の主応力差と軸、周ひずみの関係を図-3に示す。軸ひずみに関して、LVDT、ICD、Gage はほぼ一致した。キャップに取り付けた変位計（以降 CAP）については、ベッディングエラーや試験体直下の地盤の沈下等を含んでおり、局所ひずみよりもかなり大きな値となった。周ひずみに関しては、ICD と PT がほぼ一致した。周方向の Gage については他の二つと異なる傾向を示しているが、ゲージ長が短く、礫の上にゲージが貼られた可能性もあり信頼性は低い。他の試験体 C-1, C-3 についてもおおむね同様の傾向を示した。

三軸引張り試験（試験体 P-1）の主応力差と軸、周ひずみの関係を図-4に示す。軸ひずみについては三軸圧縮試験と同様の傾向を示した。周ひずみについて、PT と Gage はほぼ一致した。しかし、ICD については明らかに不自然な挙動を示している。周ひずみを計測している ICD のステンレスバンド（図-2）が、膨張する方向（引張り側）には追従しにくい構造になっているためと考えられる。もう一つの試験体 P-2 についてもおおむね同様の傾向を示した。

以上より、三軸引張り試験の ICD については改善の必要があるが、その他の変位計測システムについては、複数の計測方法で一致した結果が得られていることから、ベッディングエラーの影響を受けずに、良好な軸、周ひずみを計測できた。

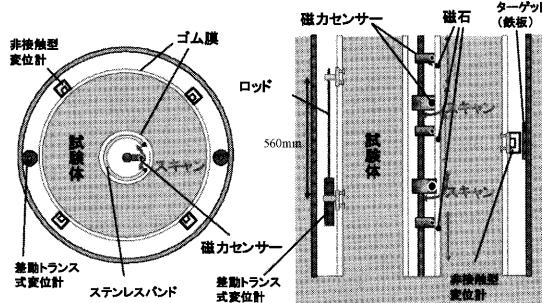


図-2 変位計測システムの概念

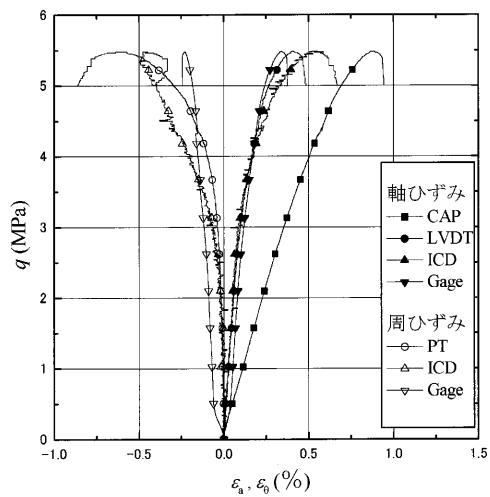


図-3 三軸圧縮試験の応力ひずみ関係 (C-2)

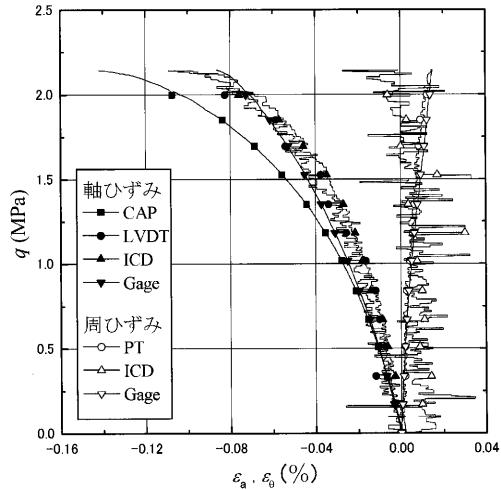


図-4 三軸引張り試験の応力ひずみ関係 (P-1)

4.2 原位置岩盤三軸と室内三軸の強度比較

室内三軸試験の $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ と $(\sigma_1' - \sigma_3')/2$ の関係を図-5示す。図より、三軸圧縮試験、三軸引張り試験ともに有効応力で整理すると、強度は排水条件に依存しないことがわかる。原位置岩盤三軸試験から得られたボアソン比は、破壊時の主応力差の半分 ($q_f/2$) において、0.1~0.35程度であり、原位置試験は排水 (CD) 試験に近い傾向を示していると考えられる。よって、図-5中に原位置岩盤三軸試験の結果（三軸圧縮試験については1段階目）もプロットした。結果として、原位置岩盤三軸試験は室内三軸試験とおおむね同等の強度が得られたことがわかる。原位置と室内では、礫率や相対的な礫の

論 文

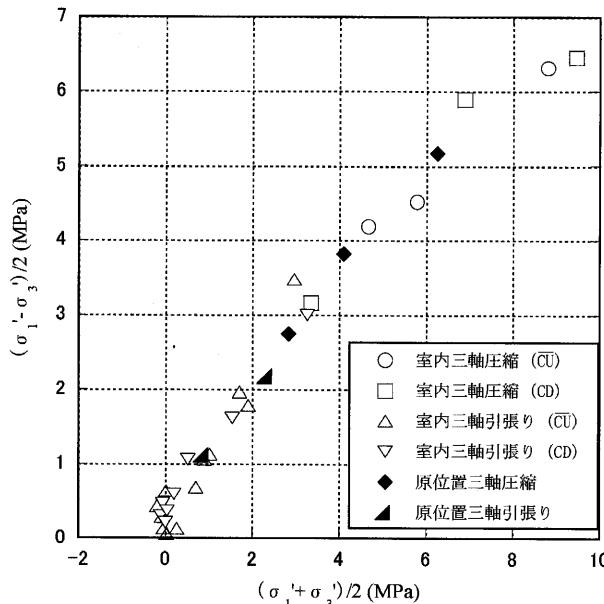


図-5 室内と原位置の強度比較

寸法も異なり、また不連続面の影響や乱れの影響も異なることから、厳密な解釈は難しい。しかしながら、今回対象とした礫岩は軟岩であることから、既往の研究結果¹⁰⁾でも報告されているとおり寸法効果の影響は小さいものと推察される。

4.3 試験体の回収

試験終了後に試験体の破壊面を観察するため、試験体の回収を試みた。三軸圧縮試験については、多段階載荷で荷重を繰返し加えているため、C-2, C-3の試験体は粉碎しており回収不能であった。2段階のみで終了した比較的損傷の少ないC-1の試験体について観察を行ったところ、礫をよけて基質部でせん断破壊している約60°のせん断破壊面が確認できた（口絵写真-20(1)）。

三軸引張り試験については、2本とも試験体の回収に成功した。最小主応力 σ_3 が負になったP-1では、上面から約40cmのところでほぼ水平の引張り破壊面が見られた（口絵写真-20(2)）。P-2は上面から約70~80cmのところで、約20°の角度で破壊した。静的圧縮試験（1段階のみ）による ϕ が43.8°であったことを考えると、 $\pi/4 - \phi/2 = 23.1^\circ$ より、伸張せん断破壊として妥当な結果である（口絵写真-20(3)）。

5. ま と め

不均質な礫岩地盤を対象として原位置岩盤三軸試験法の検証を行った。その結果、三軸引張り試験の周ひずみ計測の一部に課題が見つかったものの、軸ひずみと周ひずみは、中央の小孔と外周溝の両方でほぼ一致し、信頼性の高い応力-ひずみ関係を得ることができた。また、

原位置岩盤三軸試験と室内三軸試験のせん断強度を比較したところ、おおむね同等の結果が得られた。さらに、試験終了後の試験体の回収にも成功した。

以上より、不均質な岩盤を対象として、原位置岩盤三軸試験法が従来から行われてきた平板載荷試験、岩盤せん断試験等に代わる実用的で有力な岩盤調査法であることが示された。

6. 今後の課題

今回は試験では、1本の試験体作製に約2週間程度の時間を要してしまった。実用化に向けて、より効率的な掘削方法の検討が必要である。また、今後は不連続岩盤を対象とした適用性の検証を行う予定である。

謝 辞

本研究は、電力9社、日本原子力発電株、電源開発株による電力共通研究の一部として実施しました。また、原位置試験を実施するにあたって株ダイヤコンサルタントのご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説、第8編、pp. 520~541, 2004.
- 2) 土木学会：原位置岩盤試験法の指針、pp. 3~39, 2000.
- 3) 山本晴二・仲村治朗・宮池克人・水野直哉：互層堆積軟岩を対象としたブロックせん断試験等に関する2, 3の考察、電力土木、No. 214, pp. 75~85, 1988.
- 4) 酒井俊朗・佐藤正行・宇野晴彦・福井史朗：軟岩地盤の原位置岩盤せん断強度特性について、第25回土質工学研究発表会、pp. 1079~1082, 1990.
- 5) 谷 和夫：堆積軟岩を用いた室内岩盤せん断試験、第29回岩盤力学に関するシンポジウム、pp. 21~28, 1999.
- 6) 谷 和夫・立川日出男・金子 進・豊岡義則：孔底の中空円筒試験体を利用した新しい岩盤試験装置の開発、第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 82~86, 2001.
- 7) 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.
- 8) 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U02023, 2003.
- 9) 曽布川茂・岡田哲実・辻野敏文・立川日出男・谷 和夫：原位置三軸試験における変位計測システムの改良と適用性の検討、第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 201~206, 2005.
- 10) 吉中龍之進・長田昌彦・五月女敦・杉山弘泰・浜野久美：三軸圧縮試験による火山角礫岩の強度及び変形特性、土木学会論文集、No. 673/III-54, pp. 85~100, 2001.

（原稿受理 2005.12.13）