

原位置三軸圧縮試験の 礫岩地盤への適用性の検討

岡田 哲実¹・谷 和夫²・大津 仁史³・小早川 博亮¹・金谷 守¹・伊藤 洋¹

¹ 正会員 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

E-mail: t-okada@criepi.denken.or.jp

² 横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

³ 正会員 東京電力(株) 原子力技術・品質安全部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3)

岩盤物性評価手法の高度化を目指して、礫岩地盤を対象として原位置三軸圧縮試験を実施した。試験は試掘坑内にて計三本、全て多段階载荷で実施した。軸ひずみと周ひずみの計測は、中空円筒供試体の中央小孔と外周の二箇所それぞれ計測した。試験の結果から、軸ひずみ、周ひずみともに、二箇所の計測結果はほぼ同等であり、信頼できる計測結果であることがわかった。また、原位置三軸圧縮、室内三軸圧縮試験、岩盤せん断試験のせん断強度を比較したところ、概ね同等の結果であった。

Key Words : rock mass, in-situ test, triaxial test, strength, deformation

1. はじめに

従来、岩盤の強度特性は岩盤せん断試験により、変形特性は平板载荷試験により評価されてきた。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試験結果の解釈は必ずしも容易ではない。
- ③ 試験面の整形によるゆるみの影響を受けやすい。
- ④ 試験体周辺の岩盤の影響を受けるため、広範囲な試験エリアを必要とする。

1997年に上記の問題を全て解決することができる新しい試験法(以降、原位置三軸試験法と呼ぶ)が考案され、翌年には直径40cm、高さ100cmの試験体を用いる試験装置が作製された¹⁾。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^{2,3)}。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。

本研究は岩盤の力学物性評価手法の高度化と信頼性の向上を目指して、不均質な岩盤である礫岩を対象として原位置三軸試験法の適用性を検討した。

2. 試験概要

(1) 試験位置

新第三系の礫岩を対象として地下9m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10cm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(q_p 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50cm掘り下げた後に試験候補地を選定した。

(2) 室内三軸試験

同試掘坑内底盤より、 $\phi 50\text{mm}$ のボーリングコアを採取した。コアはカッターにより切断後、平面研削盤を用いて端面を整形し、高さ約100mmの円柱状の供試体を作製した。また供試体側面にOHPシートを巻いて、礫の輪郭をトレースし、パソコンを用いてその画像処理を行い、礫の面積含有率を求めた^{4,5)}。原位置三軸試験の結果と比較するために、圧密排水および圧密非排水三軸試験を各3本実施した。室内試験では、原位置試験と比較して供試体の寸法が小さいため、相対的に礫の寸法が大きくなってしまう。礫の寸法について、三軸圧縮試験方法の基準(JGS2532-2002)には、「礫混じりの軟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。」という記載がある。しかし、今回の試験では、これを満足することが困難なため、5倍

以下の供試体についても排除せずに実験を行った。

(3) 原位置三軸試験

1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計3本の三軸圧縮試験を実施した。試験条件を表-1に示す。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。C-2、C-3については、最大の拘束圧で残留強度を確認した後、拘束圧を下げながら残留強度を確認した。載荷速度、除荷速度は、0.1MPa/min、0.5MPa/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⁹⁾。これにより、内セル（中央小孔）の磁力センサーを用いた円孔変位計測システム（ICD：Instrumentation for Cavity Deformation）¹⁾のスキャン時間（サンプリング間隔）を大幅に短縮し、精度を向上させた。また、外セル（外周）の計測方法は大幅に変更し、軸ひずみを差動トランス式変位計（LVDT）に、周ひずみを渦電流式非接触型変位計（PT：Proximity transducer）に変更した。この改良により、軸ひずみと周ひずみの計測は、中央小孔と外周の二箇所それぞれ計測することが可能となった（図-1）。

3. 原位置三軸試験の試験手順

試験面（底盤）の成形から試験後の埋め戻しまでの手順を図-2に示す。また、これらの概要を以下に示す。

(1) 掘削準備

試験位置を選定するため底盤を整形し（図-2①）、試験体に載荷する軸力の反力をとるため、天盤反力体の作製を行った。その後、底盤に約5cmの厚さのモルタルを敷設した（図-2②）。これは試験面を保護する目的の他に、機材の運搬や設置を効率よく行うためである。最終的にモルタルは除去せず、試験体（上部）に含まれるが、原位置岩盤三軸試験は供試体の側面でひずみを計測することから、モルタルが試験結果に影響を与えることはない。

表-1 試験一覧

試験体名	段階数，拘束圧 (MPa)
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 ⑦0.2
C-3	破壊強度 ①0.3 ②0.6 ③2.4 ④1.7
	残留強度 ⑤0.8 ⑥0.4 ⑦0.1

(2) 試験体の掘削

試験体の掘削は、従来の方法^{2,3)}と同様に以下の手順で行った。

(a)中央小孔をφ86のビットで掘削，コア採取（図-2③）

(b)外周溝内側をφ400のビットで掘削（図-2④）

(c)外周溝外側をφ560のビットで掘削（図-2⑤）

(d)外周溝の回収（図-2⑥）

(e)試験体の完成

全ての掘削は、H鋼からなる専用架台に設置した油圧駆動型の簡易ボーリング機械（ダイヤモンドコアカッター）を用いた。掘削では、特に試験体の品質確保のために、回転に伴うビットのぶれや中心軸のずれに気を使いながら掘削を進めた。φ400とφ560の掘削により形成される外周溝（リングコア）は、φ560側からパールや鋼製棒等のテコ棒を差し込み、リングコア先端部（底部）に応力を集中させて切断した。切断後の外周溝底部の凹凸はなるべくパール等により手作業により除去した後、最後は砂を敷いて平坦にした。以上で試験体が完成する。

(3) 試験装置の設置と試験

試験装置の設置は以下の手順で行った。

(a)外周溝外側と岩盤との隙間に鋼管を設置

(b)外周溝に外セルを設置（図-2⑦）

(c)中央小孔に内セルを設置（図-2⑧）

(d)試験体上面にロードセルなどを設置（図-2⑨）

これらの完了後、試験を実施する。なお、①の手順は必ずしも必要ではないが、今回対象の岩盤が比較的軟質であることから、周辺岩盤のみで高拘束圧を負担させることが困難であるために実施した。また、変位計測の結果を検証する目的で、①の作業前に、ひずみゲージ（ゲージ長90mm）を試験体の上部から約10cmのところに軸方向、周方向それぞれ対角位置に1枚ずつ計4枚貼り付けた。

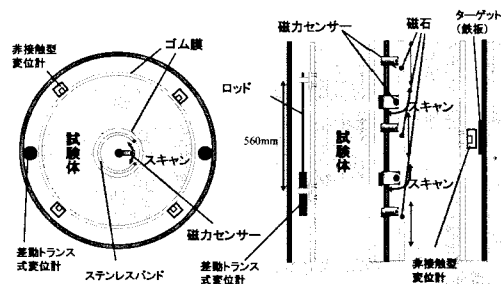


図-1 原位置三軸試験の変位計測システム

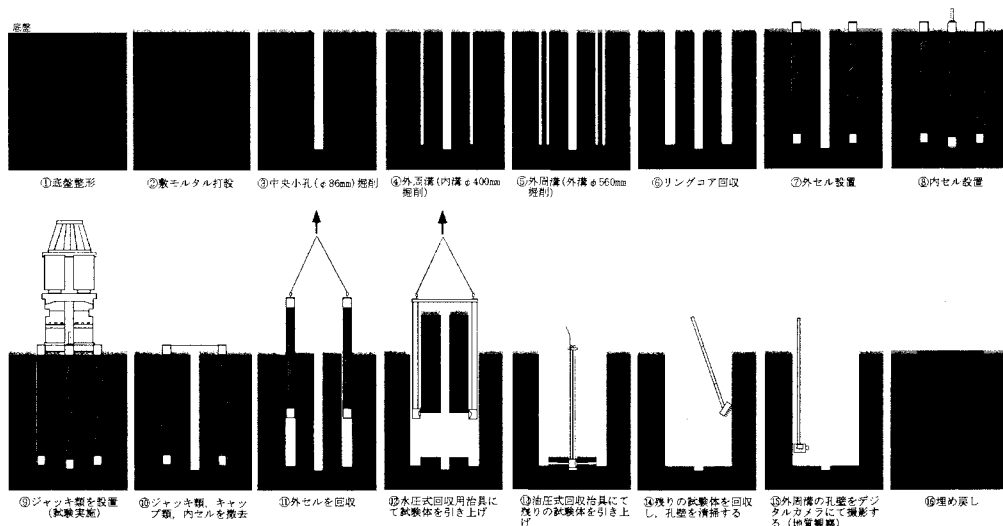


図-2 原位置三軸試験の作業手順

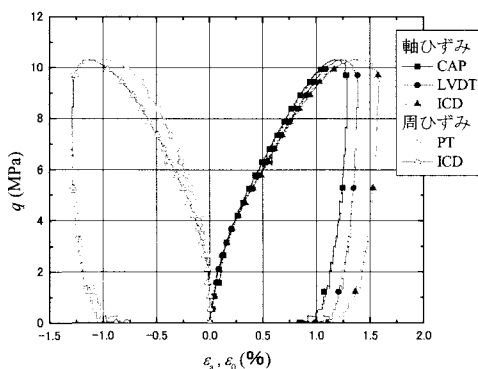


図-3 軸差応力-ひずみ関係 (C-1)

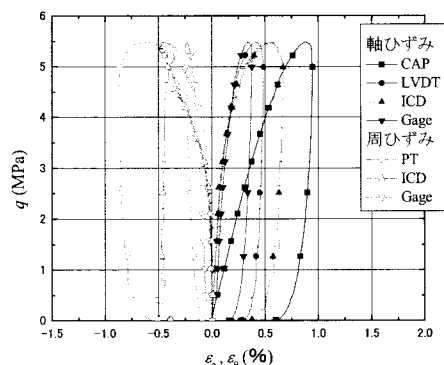


図-4 軸差応力-ひずみ関係 (C-2)

(4) 試験体の回収

試験の終了後、以下の手順で試験体の回収を行った。

(a) ジャッキ、キャップの回収 (図-2⑩)

(b) 外セル、内セル、鋼管の回収 (図-2⑪)

(c) 試験体回収用治具を用いた試験体の回収 (図-2⑫)

試験体回収用治具とは、試験体の底部を切断する道具である。外周に挿入し、4点の鋼製くさび（平たがね状のくさび）をジャッキで水平に突起させるものと、中央小孔に挿入し、1点で鋼製くさびを用いるものの2種類を使用した。なお、試験体の回収後は、試験結果の数値解析を行う目的で、孔壁を清掃して孔壁の画像をデジタルカメラにて撮影した⁷⁾。その後、最終的に掘削孔は、試験後の観察を終えた試験体などで埋め戻し、一連の作業を完了する。

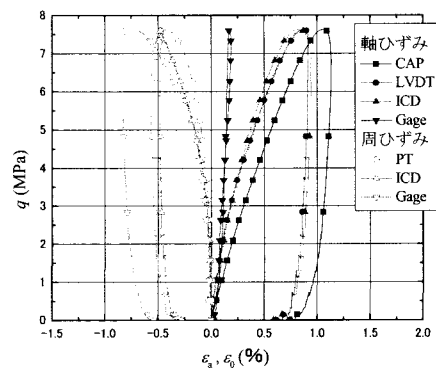


図-5 軸差応力-ひずみ関係 (C-3)

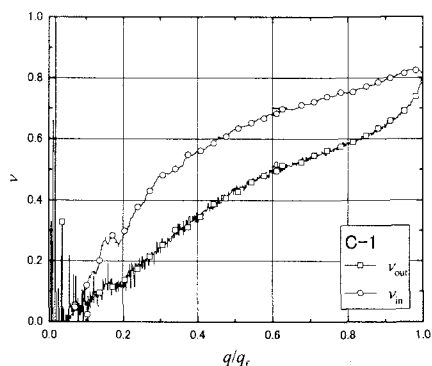


図-6 ポアソン比 (C-1)

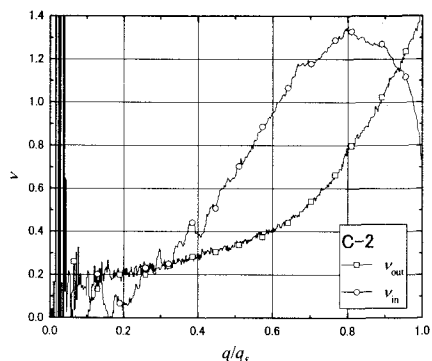


図-7 ポアソン比 (C-2)

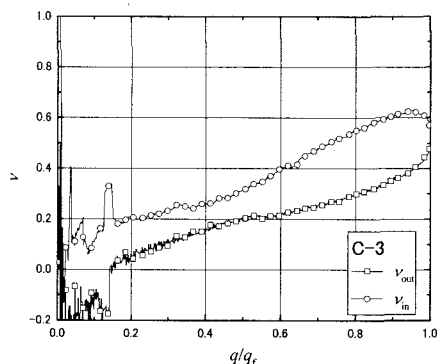


図-8 ポアソン比 (C-3)

4. 試験結果

(1) 軸差応力-ひずみ関係

各試験体、第1段階における軸差応力と軸ひずみおよび周ひずみの関係を図-3～図-5に示す。全試験体の軸ひずみに関して差動トランス式変位計 (LVDT) と円孔変位計測システム (ICD) はほぼ一致する結果となった。キャップに取り付けた変位計 (CAP) については、外部で計測しているためベッディングエラーを含んでおり、局所ひずみよりも若干大きい値となる⁸⁾。試験体C-2とC-

3についてはその傾向が見られるが、試験体C-1については、そのような傾向は表れなかった。C-1のリングコアと中央小孔のコアの観察から、試験体の上面から約80cmの位置に試験体を横切る不連続面 (割れ目) が見られた。この不連続面の変位が大きく、相対的にベッディングエラーの影響が小さかったのではないかと考えられる。C-2とC-3で計測した軸方向のひずみゲージ (Gage) の計測結果については、C-2ではLVDTやICDとほぼ一致する結果が得られた。C-3については、ひずみを過小に評価する結果となったが、この原因はひずみゲージが礫の上に貼られたためと考えられる。

周ひずみに関しても内セルのICDと外セルの渦電流式非接触型変位計 (PT) はほぼ一致している。ただし、ひずみが大きくなるにしたがい、若干PTのひずみが小さいように見えるが、これはひずみの局所的な差が現れたためと思われる。なぜなら多段階すべての結果をみると必ずしも同様の傾向があるわけではなく、ICDとPTがほぼ一致する結果や、PTのひずみが若干大きい結果なども見られるからである。C-2とC-3で計測した周方向のひずみゲージ (Gage) の計測結果については、ICDやPTとほぼ一致している。

以上より、軸ひずみ、周ひずみともに変位計測システムは、ベッディングエラーの影響を受けずに、良好なひずみを計測することが可能であることが明らかとなった。

(2) ポアソン比

各試験体に関する1段階目の軸ひずみと周ひずみから求めたポアソン比 (ν) とせん断レベル (q/q_t) の関係を図-6～図-8に示す。図には、内セルの計測結果から求められる ν_{in} と外セルの計測結果から求められる ν_{out} を別々に示した。ひずみゲージについては、うまく計測できていないため図示しなかった。全ての試験体に対してポアソン比がせん断応力の増加とともに、増加していく傾向がある。これは、せん断応力レベルが低い段階では、体積が収縮していたものが、膨張に転じ、破壊に至ったことを示す岩盤に特徴的なダイレタンシー特性が顕著に表れたものと考えられる。従来の岩盤試験法では原位置でポアソン比を直接求めることは困難だったが、本試験法を用いることにより、それが可能であることが明らかとなった。

(3) 強度特性

多段階で実施した全試験体のモール円を図-9に示す。また、各試験体および全試験体から求められるピーク、残留の c 、 ϕ を表-2にまとめた。これらの図表より、C-1の ϕ が他と比較して小さくなったが、これは拘束圧1.0と1.5MPaの2つの拘束圧から算出した値であるので、

信頼性は低い。C-2とC-3を比較すると、 c 、 ϕ が若干異なるが、ほぼ同等の結果と言える。1段階目のみと多段階目全ての強度特性を比較すると、多段階の2段階目以降は一度低拘束圧について破壊した試験体で実施しているため、若干 ϕ が小さくなる傾向を示したが、その低下の割合は小さい。残留強度はピーク強度の c より小さく、ピーク強度の ϕ より大きい結果を示している。これは、高い拘束圧で行った試験では、ピーク強度と残留強度の差が小さくなるという一般的な特性から、見かけ上 ϕ が大きくなったためである。多段階全体でもピークおよび残留の c 、 ϕ の相関係数は $R^2=0.99$ 以上であり、ばらつきが少なく信頼性の高い結果であると考えられる。

(4) 原位置三軸と室内三軸の比較

室内三軸試験から得られた c 、 ϕ を表-2に示した。原位置三軸試験の1段階目の結果と比較すると原位置の方が若干 c が小さく、 ϕ が大きい結果となった。この理由として、まず礫率の違い考えられる。平均の礫率は原位置三軸の試験体が約30%であり、室内三軸の試験体が約20%であった。既往の研究から礫率が多いほど ϕ が大きくなる場合があることも示されている⁹⁾。また、前述したように、原位置の試験体には割れ目も若干見られ、含水条件も完全に飽和ではない等の要因も考えられる。

また、同試験坑内で実施した2個の岩盤せん断試験の結果との比較を図-10に示す。図中には室内のCD三軸試験の結果も合わせて示した。原位置三軸試験の結果は岩盤せん断試験の結果とほぼ同等の結果となった。

変形特性については、原位置三軸試験の載荷初期のポアソン比が0.2以下であることから、室内の圧密排水三軸試験の結果と比較した。室内のCD三軸試験と原位置三軸の弾性係数 E_{30} を図-11に示す。CD三軸試験は3本実施したものの、うち1本は局所変位をうまく測ることができなかったため、2本しか図示されていない。試験数は少ないものの概ね同等と言える。

(5) 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が、多段階載荷で繰返し荷重を加えているため、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°の破壊面が確認できた(写真-1)。

6. 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を

表-2 三軸試験の c 、 ϕ

試験	種類	c (MPa)	ϕ (°)	R^2
原位置三軸	C-1	2.47	28.7	1.000
	C-2	1.21	41.8	0.998
	C-3	1.57	39.3	1.000
	1段階目	1.12	43.8	0.993
	2段階目以降	1.41	40.0	0.998
	全体	1.35	40.7	0.996
	C-2 残留	0.42	46.2	0.999
	C-3 残留	1.02	43.1	0.997
	残留全体	0.57	46.0	0.993
室内三軸	CD c_d, ϕ_d	1.80	34.2	0.933
	CU c', ϕ'	1.16	38.3	0.993

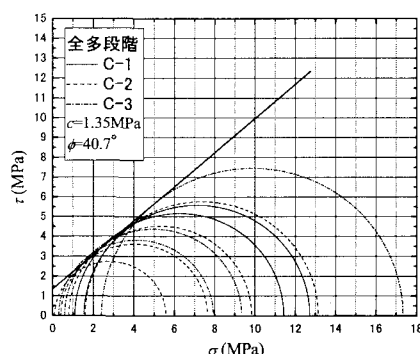


図-9 全試験のモール円

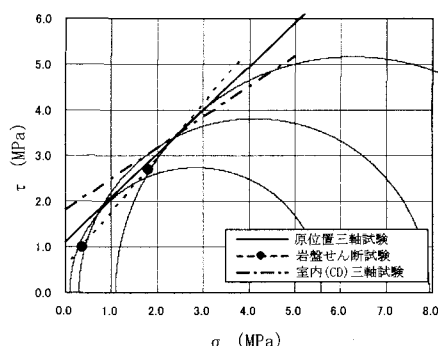


図-10 岩盤せん断と原位置三軸のせん断強度

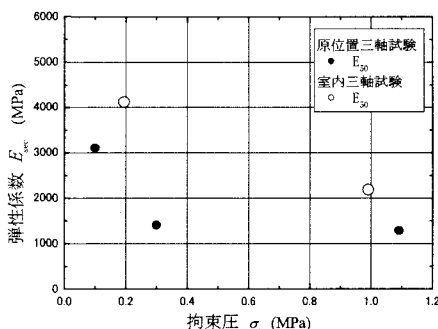


図-11 E_{30} と拘束圧の関係

試掘坑内にて実施した。試験結果から、軸ひずみ、周ひずみともに、内セルと外セルの計測結果はほぼ同等であり、信頼できる計測結果であることがわかった。また、室内三軸圧縮試験および岩盤せん断試験のせん断強度と比較した結果、概ね同等の結果であった。

以上より、不均質な岩盤を対象に原位置三軸試験の適用性が確認された。これにより、従来は取得することが困難であった岩盤の応力ひずみ関係やポアソン比などを原位置で高精度に求めることが可能となった。

7. 今後の課題

今回は試験では、試験体の掘削に予想以上の時間を要してしまった(2週間程度/本)。実用化に向けて、より効率的な掘削方法が必要である。今後は不連続岩盤における適用性の確認を行う予定である。

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) 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.
- 2) Kazuo TANI, Takashi NOZAKI, Susumu KANEKO, Yoshinori TOYOOKA, Hideo 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.
- 3) 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.
- 4) 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, 第39巻, 第2号, pp.202-207, 1998.

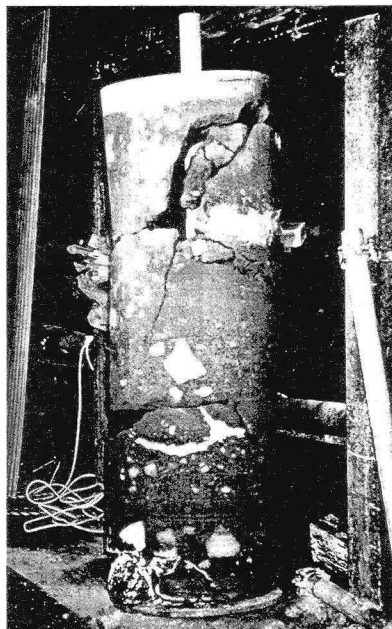


写真-1 試験後の試験体 (C-1)

- 5) 岡田哲実, 野崎隆司, 伊藤洋, 中村敏明: 礫岩の物性評価に関する研究(その2), 電力中央研究所研究報告 U02053, 2003.
- 6) 曾布川茂, 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.
- 7) 小早川 博亮, 京谷孝史, 大津仁史: 均質化法による不均質な岩盤の変形特性の評価, 第60回土木学会年次学術講演会公演概要集, 2005.
- 8) Fumio TATSUOKA, Satoru SHIBUYA: Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory test, *Proc. 9th ARC on SMFE*, Vol.2, 1992.

APPLICABILITY OF IN-SITU TRIAXIAL COMPRESSION TEST OF PSEPHITES

Tetsuji OKADA, Kazuo TANI, Hitoshi OOTSU, Hiroaki KOBAYAKAWA,
Mamoru Kanatani and Hiroshi ITO

Three in-situ (multiple-step) triaxial compression tests were carried out in a 9m-deep exploratory adit. The rock mass at the site is sedimentary soft rock of psephites of Neogene system. Axial and lateral strains are measured in the center hole and outer slit of hollow cylindrical specimens. From the result of in-situ triaxial compression test, axial and lateral strains measured in the center hole approximately agreed with the corresponding values measured in the outer slit. Consequently, the measurement systems are reliable. The shear strength evaluated by laboratory triaxial compression test and in-situ rock shear test were about equal to that by in-situ triaxial compression test.