

# 原位置繰返し三軸試験装置の開発と 風化砂岩を対象とした試験法の実証

岡田 哲実<sup>1\*</sup>・納谷 朋広<sup>2</sup>・中村 大史<sup>3</sup>

<sup>1</sup>電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

<sup>2</sup>株式会社ダイヤコンサルタント 地質解析事業部 (〒331-0811 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3)

<sup>3</sup>関西電力株式会社 土木建築室技術グループ (〒530-8270 大阪市北区中之島3丁目6番16号)

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

東北地方太平洋沖地震を契機として、原子力施設の設計用地震動が大きくなっている。これに伴い、原子力施設を構築する基礎岩盤や周辺斜面の地震時の安定性評価において、動的解析の信頼性向上が必要となっている。しかし、不連続性岩盤を対象とした動的物性（繰返し変形特性）の試験方法は確立されていないのが現状である。そこで本研究では、原位置で岩盤の繰返し三軸試験が可能な試験装置を開発した。また、開発した装置を用いて割れ目を有する風化砂岩を対象に2本の繰返し三軸試験を実施した。試験の結果、現地で岩盤のヤング率と減衰率のひずみレベル依存性を取得することができた。

**Key Words :** cyclic deformation properties, in situ test, cyclic triaxial test, discontinuous rock mass

## 1. はじめに

東北地方太平洋沖地震を契機として、原子力施設の設計用地震動が大きくなっており、原子力施設を構築する基礎岩盤やその周辺の斜面の地震時の安定性評価において、動的解析の重要性が増している。解析結果の信頼性を向上させるためには、動的解析に用いる岩盤の動的（繰返し）変形特性を適切に評価することが必要である。堆積軟岩では、不連続面の影響は小さく、著しい寸法効果がない場合が多い<sup>1)</sup>。このため、土質地盤と同様に原位置の弾性波速度とサンプリングしたコアによる繰返し三軸試験等により、動的解析（通常は等価線形解析）に用いる動的変形特性、すなわち初期ヤング率 $E_0$ およびヤング率 $E$ や履歴減衰率 $h$ のひずみレベル依存性が求められている。

一方、割れ目を含む岩盤では、通常、割れ目を含んだマス（Rock mass）として大型試験体を用いた原位置岩盤試験（平板載荷試験や岩盤せん断試験）により力学物性が評価されている。過去には原位置岩盤試験に繰返し荷重を与えることにより、繰返し変形・強度特性を評価する試みが見られた<sup>2,3)</sup>。しかし、岩盤試験は要素試験ではないため、試験結果の解釈が困難であり、試験法として実用化に至らず、近年では実施されていない。

そこで著者らは、合理的な岩盤の動的物性評価を目指し、岩盤試験と同等レベルの寸法の試験体を用いる原

位置岩盤三軸試験<sup>4)</sup>に対して、繰返し載荷が可能なように試験装置を改造した。また、その装置を用いて割れ目を有する風化砂岩を対象に原位置繰返し三軸試験の実証試験を実施した。

## 2. 原位置岩盤三軸試験

電力中央研究所では、原位置で大型試験体（直径約40cm、高さ約100cm）の三軸試験が可能な原位置岩盤三軸試験装置を開発し、軟岩（凝灰岩）、不均質岩（礫岩）および不連続性岩盤（砂岩）を対象に実証試験を行ってきた<sup>5,6)</sup>。基本的な特徴として、スリット状に掘削した岩盤の中に円筒状の側圧セルを挿入し、側圧セルのゴム膜を介して拘束圧を作用させ、試験体上面に設置した載荷装置により軸応力を作用させるものである。また試験体のひずみについては、ベディングエラーや地山と連続する下端部の影響を防ぐため、試験体の側面で計測している。これまで様々な岩盤へ試験方法を適用する中で、試験方法、変位の計測方法、試験体の作製方法等に改良を加えてきた。特に、割れ目を有する岩盤に対しては、特別な掘削装置の開発を行い<sup>7)</sup>、これにより岩盤を選ばず試験体の作製が可能となった（図-1）。ただし、載荷については静的試験用であり、繰返し載荷試験を行うとしても載荷周波数は0.01Hz程度が限界であった。ま

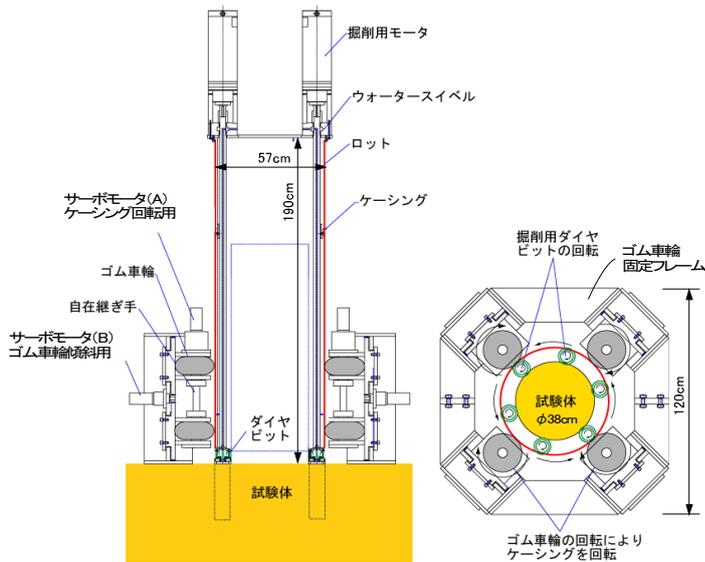


図-1 試験体掘削装置

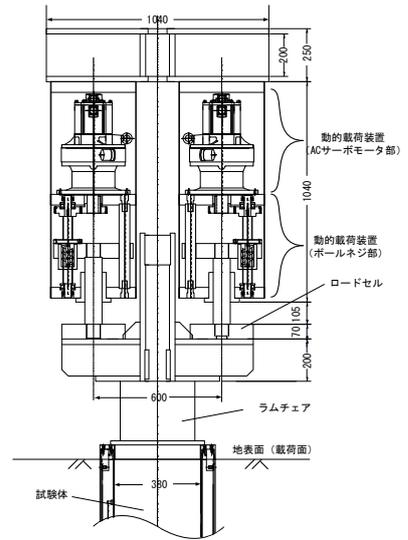


図-2 動的荷重装置

た、繰返し変形試験を行うためには微小ひずみの計測精度を向上させる必要があった。

### 3. 試験装置の改造

繰返し荷重試験に対応するため、軸応力を作用させる試験体上面の荷重装置（ジャッキ）を従来の静的なものから動的なものに変えた（図-2）。荷重装置はACサーボモータとボールねじから構成され、ジャッキ下端にロードセルを設置した。ジャッキ1台の最大荷重は250kN、最大変位は15cmであり、4台を並列に連結することで最大1000kNまでの荷重が可能となる。ACサーボモータ内部にはエンコーダを有し、外部のシーケンサーから変位制御と4台のジャッキの同期を行う。ロードセルからフィードバックを行うことにより、応力制御も可能である。繰返し荷重が可能な最小変位振幅は0.01mmであり、変位振幅5mmまでは1Hzで、変位振幅60mmまでは0.1Hzで荷重が可能である。波形は正弦波や三角波のほか外部（信号）入力も可能である。

ひずみ計測については、従来と同様に軸方向ひずみについては差動トランス式変位計を、周方向ひずみについては渦電流式非接触型変位計をゴムスリーブ上に変位計のターゲットとともに固定した（図-3、表-1）。ただし、微小ひずみから破壊ひずみまで計測するため、軸方向、周方向ともにストロークの異なる2種類の変位計を対面位置に2個2組、計8個を設置した。また、試験中に弾性波速度を計測する目的で、試験体の側面に加速度計を3箇所設置した。

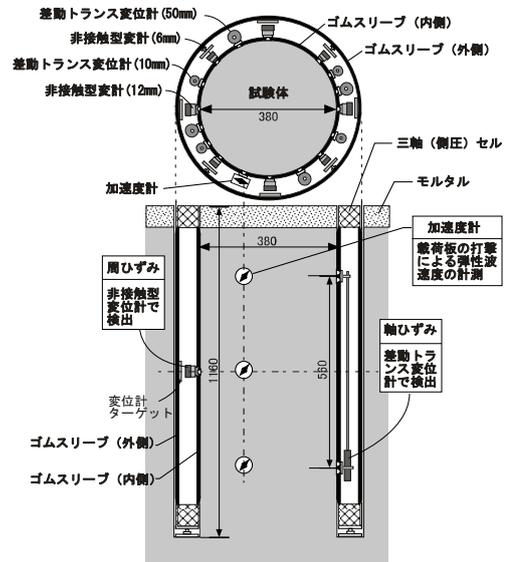


図-3 三軸セルとセル内の変位計等の配置

表-1 計測センサー一覧

計測器	論文中の名称	使用箇所	容量	方式	最小分解能
変位計①	LVDT50	セル内軸ひずみ	50mm	差動トランス式	5 μm
変位計②	LVDT10	セル内軸ひずみ	10mm	差動トランス式	1 μm
変位計③	GAP12	セル内周ひずみ	12mm	渦電流式非接触型	2 μm
変位計④	GAP6	セル内周ひずみ	6mm	渦電流式非接触型	1 μm
変位計⑤	GAP4	セル内周ひずみ	4mm	渦電流式非接触型	0.8 μm
変位計⑥	GAP2	セル外載荷板変位	2mm	渦電流式非接触型	0.6 μm
変位計⑦	CDP10	セル外載荷装置変位	10mm	ひずみゲージ式	0.8 μm
変位計⑧	CDP25	セル外載荷装置変位	25mm	ひずみゲージ式	2 μm
変位計⑨	CDP100	セル外載荷装置変位	100mm	ひずみゲージ式	10 μm
荷重計	L300	載荷装置付属	300kN	ひずみゲージ式	75N
加速度計	T601	セル内	~20kHz	圧電素子	fc~30kHz

なお、今回改良した荷重装置や変位計および加速度計が正常に機能することは、ナイロンダミー供試体を用いた室内試験により事前に確認した<sup>9)</sup>。

## 4. 実証試験

### (1) 対象岩盤

試験を実施した岩盤は風化した砂岩である。割れ目の間隔は3cm程度である。ハンマーの軽打で容易に岩片状となり、低い濁った音を発する。試験に先立ち5m×5mのエリアをバックフォアで地表から約1m掘り下げ、さらにそこから20cm程度手作業で盤下げおよび整形を行った。整形後の地質観察から、試験エリアは固結破砕部を境に、割れ目の多い岩盤と、より風化を受けて割れ目が鮮明でない岩盤に2分されていることがわかった。本研究では割れ目の多い岩盤を対象岩盤とした。目で確認できる地表の割れ目を全て記録し、その結果をシュミットネットに記載した(図-4)。これより、高角度のNE60°～90°に割れ目の方向が集中していることが分かる。岩盤の表面の打撃により計測された弾性波速度 $V_p=848\text{m/s}$ 、 $V_s=562\text{m/s}$ であり、これらの値より算出されるヤング率 $E_f=1500\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu_f=0.1$ であった。

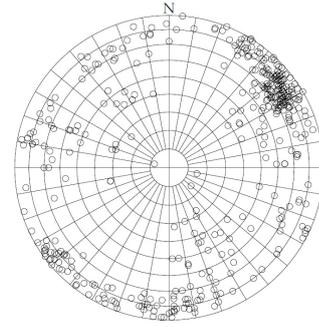


図-4 岩盤表面のシュミット投影測定データ

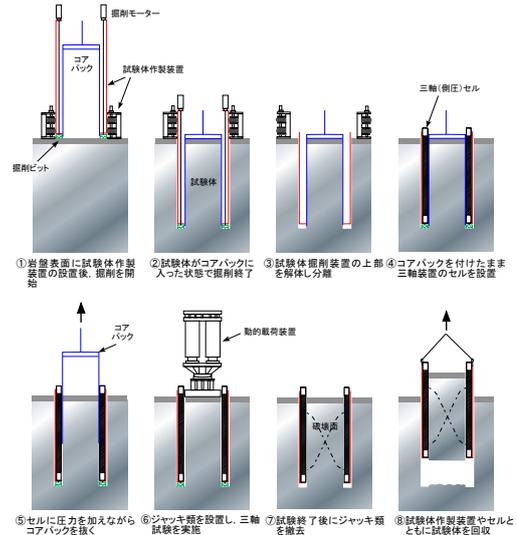


図-5 試験体作製と試験の手順

### (2) 試験体の作製、試験の手順

試験体の作製から試験に至る手順は不連続性岩盤を対象とした過去の試験<sup>8)</sup>と概ね同様である(図-5)。試験体作製装置のケーシングは掘削後抜かず地上に出ている上半分を分離し、掘削モーター、ロッド、ビット、ゴム車輪を設置した架台を取り除くことによって、そのまま三軸セルを挿入する。試験体から岩片が分離しないように、三軸セルを挿入し、セル圧を若干加え、ゴム膜を試験体に密着させながら、アクリル製のコアパックを抜く。その後、荷重反力に予め取り付けられた動的荷重装置を試験体の上面に設置する。荷重反力はH鋼で組み上げたもので、地盤とはアンカーで固定した。

以上で試験準備が完了し、等方拘束圧を荷重した後、繰返し三軸試験を実施する(写真-1)。試験終了後、荷重反力や動的荷重装置等を撤去し、破壊した試験体を回収するため、セル圧を加えた状態で試験体を拘束し、ケーシングごと回収した。



写真-1 試験の様子(左:反力設置, 右:試験直前)

表-2 原位置試験の荷重パターン

供試体 No.	拘束圧 (MPa)	荷重 Step No.	荷重変位 mm	周波数 Hz	供試体 No.	拘束圧 (MPa)	荷重 Step No.	荷重変位 mm	周波数 Hz
T-1	0.2	1	+ 0.01	1	T-2	0.2	1	+ 0.01	0.1
		2	+ 0.01	2			2	+ 0.01	1
		3	+ 0.02	1			3	+ 0.01	10
		4	+ 0.02	1			4	+ 0.02	10
		5	+ 0.02	1			5	+ 0.02	1
		6	+ 0.02	0.1			6	+ 0.02	0.1
		7	+ 0.02	0.01			7	+ 0.01	0.1
		8	+ 0.02	5			8	+ 0.01	1
		9	+ 0.04	1			9	+ 0.01	10
		10	+ 0.06	1			10	+ 0.02	10
	11	+ 0.08	1	11	+ 0.02	1			
	12	+ 0.1	1	12	+ 0.02	0.1			
	13	+ 0.2	1	13	+ 0.02	0.1			
	14	+ 0.4	1	14	+ 0.01	0.1			
	15	+ 0.8	1	15	+ 0.01	1			
	16	+ 1.6	1	16	+ 0.01	10			
	17	+ 4.8	0.1	17	+ 0.02	10			
	18	+ 4.8	0.1	18	+ 0.02	1			
	19	+ 14.4	0.1	19	+ 0.02	0.1			
	20	+ 43.2	0.1	20	+ 0.04	1			
					0.76	21	+ 0.07	1	
				22		+ 0.1	1		
				23		+ 0.2	1		
				24		+ 0.4	1		
				25		+ 0.7	1		
				26		+ 1	1		
				27		+ 5	0.1		

### (3) 原位置繰返し三軸試験の試験条件

原位置繰返し三軸試験は2本実施した。荷重パターンを表-2に示す。試験体の1本目(T-1)では、拘束圧を0.2MPaとして、せん断応力振幅を11波ずつ段階的に上げていく荷重条件とした。また、荷重装置の変位が1.6mmまでは両振り(軸方向応力 $\sigma_a$ 、周方向応力 $\sigma_r$ の時、 $\sigma_a < \sigma_r$ を許容するが、引張状態にはならない条件 $\sigma_a > 0$ )で荷重した。試験体の2本目(T-2)では、0.2MPa、0.4MPaで微小繰返し荷重のみ実施し、0.76MPaでせん断応力振幅を11波ずつ段階的に上げていく荷重条件とした。基本的に片振り条件で荷重した。

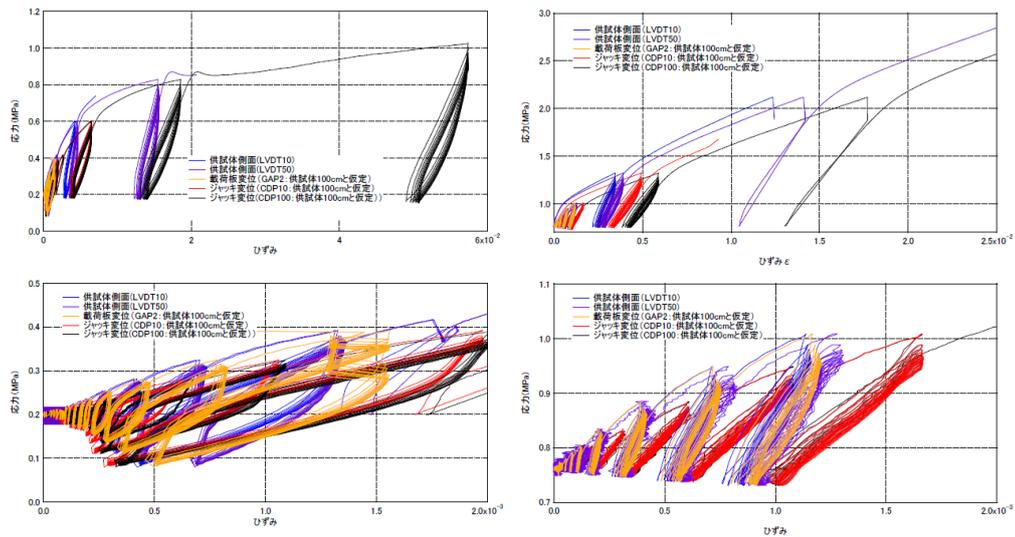


図-6 応力とひずみの関係 (左: T-1, 右: T-2)

T-1, T-2ともに波形は全て三角波で、荷重前の初期せん断応力が0MPaとなるよう調整した。また微小荷重の段階では繰り返し変形特性の周波数依存性を確認するため、周波数を0.01~10Hzと変えて試験を実施した。ただし、結果的には最大周波数は5Hzが限界であった。最終的には応力が増加しなくなるまで、すなわちピーク強度が得られるまで、荷重振幅を増加させる予定であった。しかし、三軸セルの制約である最大変位60mmを超えた段階でも応力は増加し続けたため、ピーク強度を得られずに試験を終了せざるを得なかった。

#### (4) コア試料の室内三軸試験

割れ目を含まない岩石の力学特性を得る目的で原位置三軸試験位置の近傍より、φ5cmのコア試料を採取し、静的三軸試験および繰り返し三軸試験を実施した。試験方法はともにJGS基準に従った。静的三軸試験の排水条件については原位置三軸試験と同様に不飽和の排水(CD)条件で実施したが、繰り返し三軸試験については、飽和の非排水(CU)条件でも実施した。静的三軸試験の拘束圧は0.2, 0.4, 0.8MPaとした。繰り返し三軸試験の拘束圧は0.2MPaのみとした。

### 5. 試験結果および考察

#### (1) 試験結果の評価

2本の原位置繰り返し三軸試験の応力-ひずみ関係を図-6に示す。図には前述(表-1)の2種類の局所軸ひずみ(LVDT10およびLVDT50)と荷重板変位(GAP2)は概ね整合する結果が得られた。ジャッキの変位(CDP10およびCDP100)については、試験体の変位だけでなく、

荷重枠の変形も含むため、やや剛性を過少評価する傾向が見られた。なお、荷重板変位とジャッキの変位のひずみについては試験体の高さを100cmと仮定している。LVDT10およびGAP2の計測では、微小ひずみ(10<sup>6</sup>レベル)からの変形特性を計測することができ、両者の結果はよく一致している。以上のことから、変形計測の信頼性は高いと判断される。

試験後に試験体を回収し、試験体の側面のスケッチを実施した(図-7)。目視で観察できる全ての不連続面をスケッチした。観察結果から主たるせん断面と思われる不連続面については図中に太線で記載した。なお、T-1については、試験体の中央付近の約20cm程度が回収時

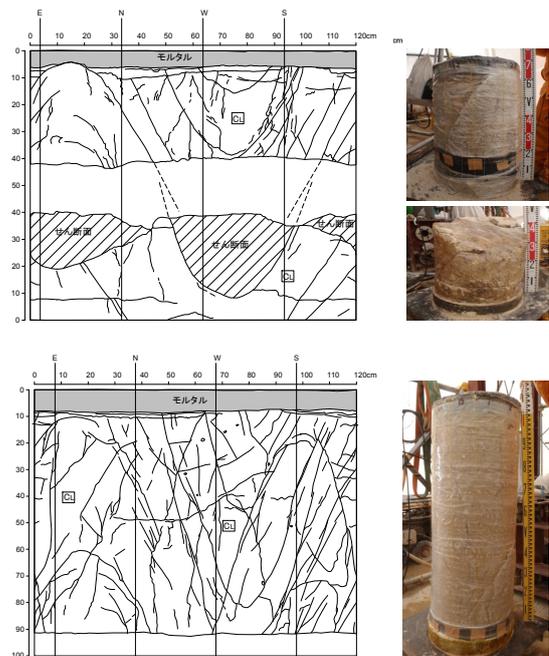


図-7 供試体側面のスケッチと試験体 (上: T-1, 下: T-2)

に破壊してしまったため、スケッチを取ることができなかった。T-1では、高角と低角の2つのせん断面が観察された。高角のせん断面については、試験体を横切るような断面が観察された。T-2では、試験体の上端部から発生する破壊面と試験体の下端部から発生する破壊面が観察された。観察した限りでは、下端部から発生した破壊面の方が変位が大きかった。

試験体の回収が可能であれば、不連続面を介して発生するせん断破壊の状況を観察することができるため、試験結果の解釈に有効である。

## (2) 原位置岩盤の繰返し変形特性

試験体の側面で計測した変位（以降、内部変位）と載荷板の変位（以降、外部変位）から求められる等価ヤング率 $E_{eq}$ 、履歴減衰率 $h$ と等価軸ひずみ $(\epsilon_a)_{SA}$ との関係を求めた（図-8）。なお、外部変位から求める軸ひずみについては試験体の高さを100cmと仮定した。この結果、T-1、T-2ともに、外部変位と内部変位の差が小さく、 $E_{eq}$ 、 $h$ ともに顕著なひずみレベル依存性を示すことがわかった。T-1とT-2は拘束圧が0.2MPa、0.76MPaと異なるものの、概ね傾向は類似している。ひずみレベルが $10^{-6}$ の $E_{eq}$ は4000~5000MPa程度であり、 $h$ は約3%程度である。ひずみレベルが $10^{-5}$ では $E_{eq}$ は約半分の2000MPa程度まで低下し、 $h$ は約15~20%まで増加した。

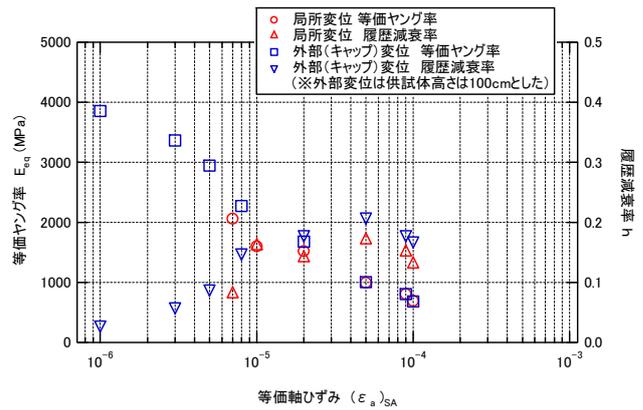
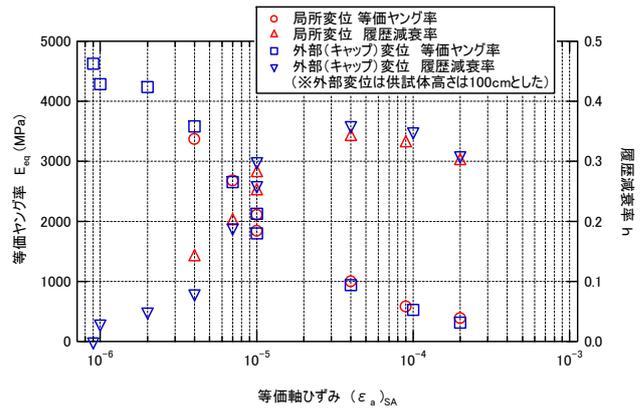


図-8 原位置岩盤三軸試験の繰返し変形特性  
(上：T-1，下：T-2)

## (3) 室内岩石試験の結果

静的三軸試験（不飽和、CD条件）の結果得られた強度特性は粘着力 $c_d=0.18$  (MPa)、内部摩擦角 $\phi_d=46^\circ$ であった。なお、湿潤密度 $\rho_i=2.16\text{g/cm}^3$ 、ヤング率 $E_{50}=68\text{MPa}$ であった。同岩種を対象とした既往の三軸試験結果と比較して、 $\phi$ は同等、 $c$ は半分程度であった。このため、サンプリング箇所の風化の程度が大きいのか、あるいはサンプリングの乱れの影響があるものと推察される。

繰返し三軸試験の供試体の側面で計測した変位（以降、局所変位）から求められる等価ヤング率 $E_{eq}$ 、履歴減衰率 $h$ と等価軸ひずみ $(\epsilon_a)_{SA}$ との関係を求めた（図-9）。CD（不飽和）試験とCU（飽和）試験の結果を比較すると、概ね類似した傾向が得られた。ひずみレベルが $10^{-5}$ では $E_{eq}$ は300~400MPa程度であり、 $h$ は約1~2%程度であった。原位置岩盤三軸試験の結果と比較すると、明らかに $E_{eq}$ 、 $h$ ともに小さい結果である。

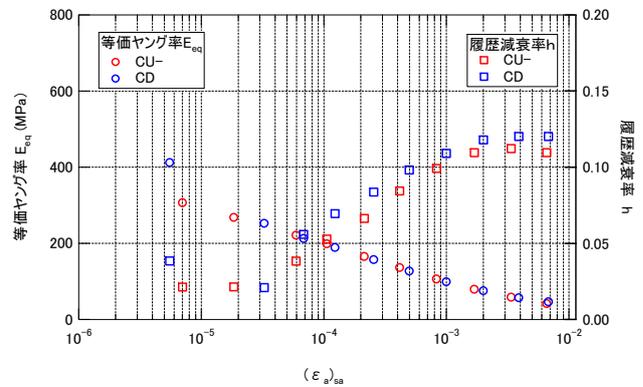


図-9 コアの繰返し変形特性

## (4) 微小ひずみレベルのヤング率

原位置岩盤三軸試験のT-2では、0.2、0.4、0.76MPaの拘束圧において微小ひずみ（ $10\mu$ ひずみ以下）の繰返し載荷を実施し、等価ヤング率を計測した。また、サンプリングした直径50mmのコアにおいても0.2、0.4、0.8MPaの拘束圧で実施した三軸試験において微小ひずみレベル

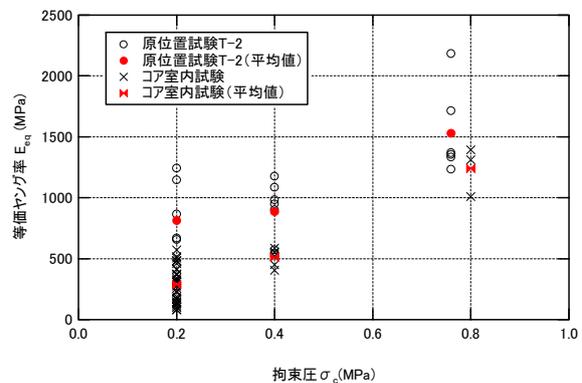


図-10 微小ひずみ時のヤング率

のヤング率を整理した。これら両者の微小ひずみレベルのヤング率を比較した(図-10)。これより、T-2の拘束圧0.2MPaの等価ヤング率の平均値は約800MPa程度であった。T-1試験体の微小ひずみ時のヤング率は、3000～4000MPa程度であり、4～5倍の大きな乖離が見られる。一方、コアの微小ひずみレベルのヤング率は、T-2の結果と比較すると、0.2MPaの拘束圧では、T-2の値の半分程度であるが、拘束圧が増加するにしたがい、その差が小さくなる傾向が見られる。

一方、今回の試験で計測された弾性波速度から算出される動ヤング率 $E_d$ は約1500MPa程度であった。また、試験サイトのごく近傍(1～3m)程度離れた場所から別途サンプリングした供試体の $E_d$ は無拘束圧時で平均約1600MPa程度であった。試験サイトは地表面からの風化を受けており、場所により岩の硬さに違いが見られた。このため、コアは弱い部分を採取したか、あるいはサンプリングによる乱れを生じ、原位置岩盤三軸試験のヤング率と比較して、小さな結果となったと解釈することが自然であるが、詳細については今後の検討課題としたい。

## 6. まとめ

- (1) 原位置で大型供試体(直径約40cm, 高さ約100cm)の割れ目を含む岩盤の動的(繰返し)三軸試験が可能な試験装置を開発した。
- (2) 開発した装置を用いて割れ目を含む風化砂岩を対象に実証試験を実施し、割れ目を含む岩盤の動的変形特性を得ることができた。結果的に、動的変形特性には顕著なひずみレベル依存性が見られた。
- (3) 岩盤の動的変形特性は同地点で採取したコアの動的変形特性と大きく異なる結果となった。この原因としては、コアの乱れや風化岩特有の物性のばらつきの影響と考えられるものの詳細は不明であり、今後の検討課題である。

謝辞：本研究は、電力9社、日本原子力発電、電源開発、日本原燃による平成22年度～24年度電力共通研究の一部として実施しました。

## 参考文献

- 1) 池見元宣, 谷和夫, 岡田哲実, 田中幸久: 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ジウム講演論文集, 1998.
- 2) 土質工学会編: 岩の調査と試験 第 39 章 動的平板載荷試験, pp.347-354, 1989.
- 3) 藤原義一, 日比野敏, 金川忠, 駒田広也, 中川加明一郎, 石田毅, 野崎隆司: 動的繰返しせん断試験による岩盤の動的力学特性—凝灰角礫岩の場合—, 電力中央研究所研究報告, No.383067, 1984.
- 4) 岡田哲実: 技術手帳「原位置岩盤三軸試験」, 地盤工学会誌, Vol.58, No.5, pp.39-40.
- 5) Tani K, Nozaki T, Kaneko S, Toyo-oka Y, 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.
- 6) 岡田哲実, 金谷守, 小早川博亮, 伊藤洋, 大津仁史, 谷和夫: 原位置岩盤三軸試験法の開発(その2)—計測システムの改良と不均質岩盤への適用, 電力中央研究所研究報告 N05049, 2006.
- 7) 岡田哲実, 伊藤洋: 原位置岩盤三軸試験法の開発(その3)—大型円柱試験体作製装置の開発, 電力中央研究所研究報告 N06036, 2007.
- 8) 岡田哲実, 伊藤洋, 生貞幸治, 笹田俊治, 山上裕也, 今林達雄, 武井孝, 細野高康: 原位置岩盤三軸試験法の不連続性岩盤への適用性検証—割れ目の卓越した砂岩の場合, 電力中央研究所研究報告 N07513, 2008.
- 9) 岡田哲実, 納谷朋広: 岩盤を対象とした原位置繰返し三軸試験装置の開発, 第 49 回地盤工学研究発表会発表講演集, 2014.

## DEVELOPMENT OF IN SITU CYCLIC TRIAXIAL TEST METHOD AND ITS APPLICATION FOR WEATHERED ROCK OF SANDSTONE

Tetsuji OKADA, Tomohiro NAYA and Hiroshi NAKAMURA

The design earthquake motions for nuclear power plant increased than ever before since the Great East Japan Earthquake. Therefore, reliability improvement of dynamic analysis for the stability evaluation of the rock foundation and the surrounding rock slope at the plant is needed. However, testing methods to evaluate dynamic mechanical properties of discontinuous rock mass are not established. Therefore we improved the in-situ triaxial test method to make it possible to perform dynamic triaxial tests. After that, two in-situ dynamic (cyclic) triaxial tests were carried out on weathered rock of sandstone. From the result of in-situ tests, strain level dependency of Young's modulus and damping constant were evaluated.