

大孔径の断層試料の採取と 三軸試験による力学特性評価

岡田 哲実^{1*}・中村 良太²・小川 浩司³・納谷 朋広⁴

¹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)

²株式会社セレス 我孫子事業所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646電力中央研究所内)

³応用地質株式会社 エネルギー事業部 (〒336-0015 さいたま市南区太田窪2-10-9)

⁴株式会社ダイヤコンサルタント 地質解析事業部 (〒331-0811さいたま市北区吉野町2-272-3)

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

断層の力学特性の合理的評価を目指し、電力中央研究所が開発した大孔径(直径20cm)の断層サンプリング装置を天然の断層試料の採取に初めて適用した。採取した試料を保護管から取り出す前にX線CTにより性状を観察した後、三軸圧縮試験を実施した。その結果、掘削パラメータを得ながら、断層試料の採取に成功した。得られたせん断強度は、既往の小孔径(直径5cm)の三軸試験結果と比較して、同等かやや小さめの強度を示し、サンプリングおよび試験方法のいくつかの課題が明確になった。

Key Words : fault, mechanical property, triaxial test, sampling, X-ray computed tomography

1. はじめに

原子力施設の基礎岩盤や周辺の岩盤斜面の安定性評価では、等価線形化法による動的有限要素解析(以下、等価線形解析と記載)によって得られた応力状態を用いたすべり安全率に基づく評価が行われている¹⁾。東北地方太平洋沖地震を契機に、等価線形解析に用いる設計用地震動が大幅に大きくなる傾向にある。このため、従来の評価方法では、現実的かつ合理的な評価が困難になってきており、斜面内部ですべりが生じる過程を表現できる時刻歴非線形解析の開発と実用化が進められている²⁾。

一方、解析手法の高度化のみならず、保守的に評価されてきた岩盤の力学特性評価の見直しも必要である。特に、断層を含む弱層の力学特性は、安定性評価に与える影響が一般に大きい。しかし、ボーリングによる断層試料のサンプリングは通常不可能と考えられており、地表付近の比較的断層が厚い部分(通常は粘土部)から直径5cm程度の供試体を手作業で採取して試験が行われている。よって、粘土部分の力学特性が断層の力学特性の代表値となっており、保守的な評価となっている可能性が高い。

第1著者らは、断層の力学特性の合理的な調査・評価方法を確立することを目的にして、断層試料のサンプリング装置および三軸試験装置を開発し、人工の断層試料を

用いた装置の室内実験による確認を行った³⁾。しかしながら、天然の断層に対する現場への適用性については未検証であった。

そこで、本研究では、開発した装置を用いて、天然の断層のサンプリングを行い、三軸圧縮試験を実施し、その力学特性を求め、既往の試験結果と比較した。

2. 開発したサンプリング装置の概要

開発したサンプリング装置を図-1に示す。保護管(コアチューブ)の直径は約200mm、長さは約500mmである。掘削後、装置先端に格納されている根切りビットでコアの下端部を切断できる機構を有している⁴⁾。また、コアチューブの回転・振動を抑制するため、ピストンに連結された六角シャフトを地上で固定できる構造になっており、回転動力の掘削用モーターがコアチューブの直上に設置されている⁵⁾。さらに、掘削して採取したコアは保護管の内側に設置したゴムスリーブの中に収納され、その状態で保護管ごとサンプリング装置から取り外して、運搬される。保護管は、アルミ製で2つ割の構造になっており、三軸試験機にセットした後、負圧を作用させ、拘束圧を与えた状態で保護管を取り外せるようになっている。

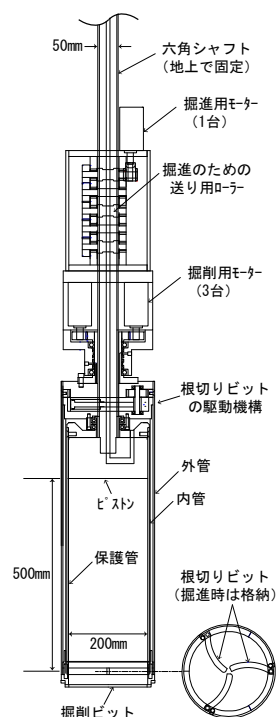


図-1 断層サンプリング装置

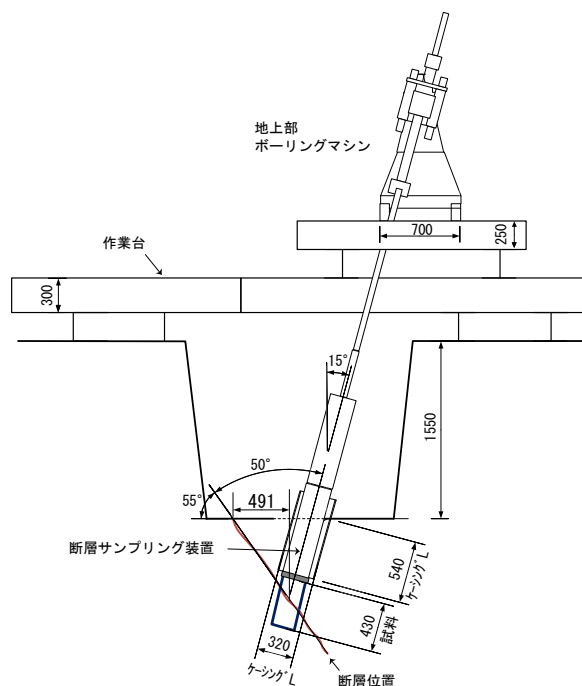


図-2 断層サンプリング装置

3. 現場サンプリングの概要

(1) 対象断層と採取手順

対象の岩盤は堆積岩で、試料を採取する断層は、地表付近で約55～70°の傾斜角を有する正断層である。

サンプリングに先立ち、表面の岩盤を約1.5mほど掘削

した。その後、作業台を設置し、断層の正確な位置を特定するため、パイロットボーリング（掘削孔径86mm，コア径68mm，掘進長1.5m）を行った。その結果を踏まえ、断層サンプリング装置を挿入するためのガイド孔（ノンコア，孔径250mm，掘進長約500mm）を掘削し，ケーシング（外径318mm，内径302mm）を挿入した。ケーシングの孔底を平滑に研磨した。断層サンプリング装置をケーシング内に挿入し，430～450mm程度の断層試料採取を行った。その状況の一例を図-2に示す。断層がコアの側面を高角度で貫通し，そのまま三軸試験に供することが特徴である。

また，掘進中には，断層サンプリング装置に付属するセンサー（掘進長計，トルク計，荷重計，加速度計，油圧圧力計，流量計等）を用いて，掘削パラメータを全区間にわたり取得した。

(2) サンプリング数量

サンプリングを同系統で異なる2つの断層（AシリーズとBシリーズ）で実施した（表-1）。Aシリーズでは，計7個サンプリングし，全て採取に成功した。そのうち6個（A-1～A-6）については試料を欠損なく採取できた。しかし，A-7については，断層付近が一部（数cm程度）欠損したが，三軸試験は可能と判断した。Bシリーズでは，計8個サンプリングし，5個（B-2，B-3，B-4，B-7，B-8）については試料を欠損なく採取できた。ただし，そのうちB-2については，上端面に断層が出現したため，つまり断層が供試体の側面を横切らなかったため，三軸試験は困難と判断した。B-3とB-4については，断層部以外の上端部もしくは下端部にやや岩盤の分離が見られた

表-1 サンプリング一覧

断層	No.	採取	状態	三軸試験
A	A-1	成功	良好	実施
	A-2	成功	良好	未実施
	A-3	成功	良好	未実施
	A-4	成功	ほぼ良好 (断層部微小欠け)	実施
	A-5	成功	ほぼ良好 (断層部微小欠け)	実施
	A-6	成功	良好	未実施
	A-7	ほぼ成功	断層付近 若干欠損	未実施
B	B-1	失敗	流失	未実施
	B-2	ほぼ成功	断層が若干 上端面に出現	未実施
	B-3	成功	ほぼ良好 (下端やや分離)	実施
	B-4	成功	ほぼ良好 (上端やや分離)	実施
	B-5	失敗	流失	未実施
	B-6	失敗	流失	未実施
	B-7	成功	良好	実施
	B-8	成功	ほぼ良好 (隙間あり)	実施

が、三軸試験は可能と判断した。B-8については、X線CT画像（後述、図-5）から断層付近および岩盤部に縦方向に空隙がみられる。一方、Bシリーズの3個（B-1、B-5、B-6）については、試料の一部が流失し、掘削長に対して供試体の高さが短くなっており採取失敗と判断した。

(3) 掘削パラメータの例

試料採取が困難であったBシリーズのうち、採取に失敗したB-1と成功したB-7の掘削パラメータの一例を図-3、図-4に示す。まず、横軸（時間）が両ケースで大きく異なることに着目してほしい。最上段の図の掘進長と時間の関係を見ると、B-1が掘削終了に約7000秒を要しているのに対して、B-7は約2000秒で終了している。つまり3倍以上の掘進速度差がある。また、図に示すようにB-7については、掘削中にあえて掘進速度15.0mm/min～

27.6mm/minまで増加させた。なお、両ケースともに掘進が止まった後の時間は、コア下端の切断（根切り）を行っている。

回転数については、両ケースともに80rpmを基本として制御した。掘削に成功したB-7はトルク上昇で途中で一回停止している。荷重は上部荷重と下部荷重、および初期値をゼロとした時の両者の差分が図示してある。上部荷重は六角シャフトの上部で計測した荷重、下部荷重はピストンで計測した供試体上端に作用する荷重である。両者の差分が、ビット荷重とサンプラーの摩擦荷重の合計を示す。B-1とB-7に目立った傾向の違いは見られない。送水量については、B-1の8～9L/minに対して、B-7は2～4L/minである。B-7の方が掘進速度が3倍以上速いが、掘進長当たりの水量はより少ない。掘削中の油圧トルクは、B-1はほとんど上昇していないのに対して、B-7は掘削中は最大100Nm当たりまで増加している。ピストンで計測し

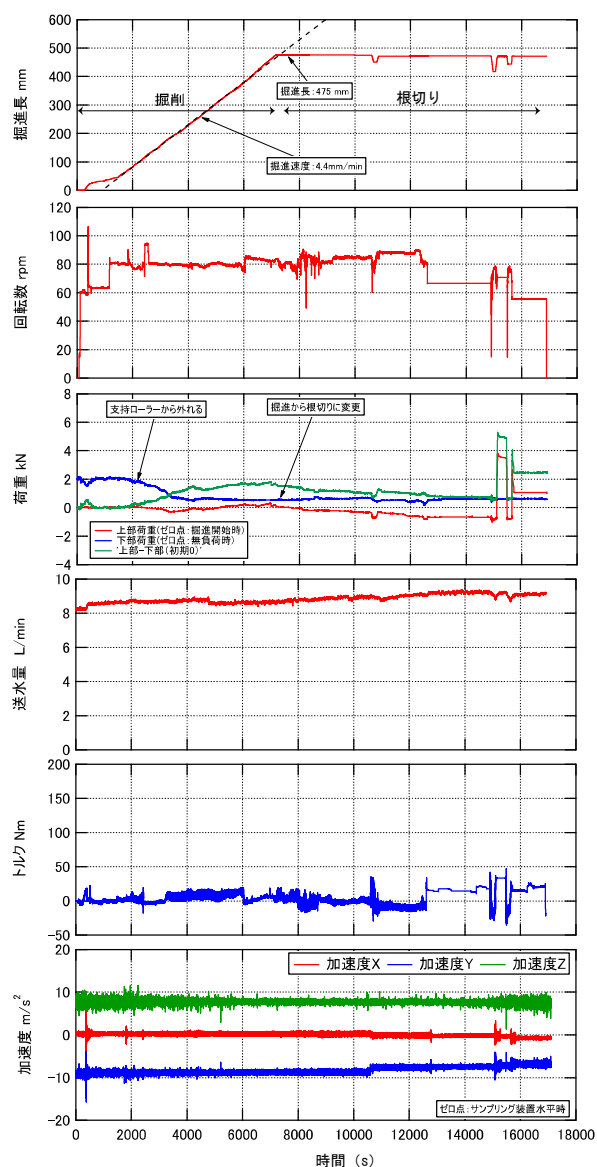


図-3 掘削パラメータ (B-1)

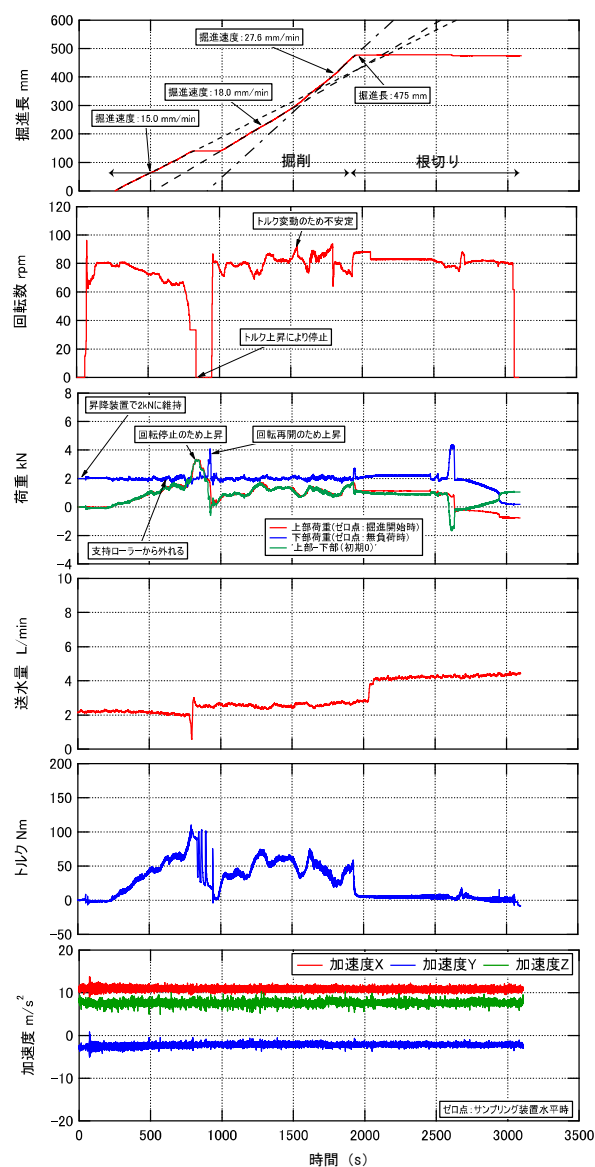


図-4 掘削パラメータ (B-7)

た掘削中の加速度（振動）については、掘削初期、根切りの後半で、若干B-1の方が大きい傾向がみられる。

以上より、成否の差は掘進速度と水量であると推察している。採取失敗したB-1は、トルクや荷重の変動が小さいが、掘削の前半と後半に加速度がわずかに大きい傾向を示した。なお、このような掘削パラメータを今後、蓄積し、分析していくことで、断層採取の要点が明確になっていくことを期待している。

4. 断層試料の三軸試験

(1) 試験供試体のX線CT撮影

前述の表-1に記載のとおり、断層試料の採取に成功した11本のうち、供試体としてAシリーズ：3本、Bシリーズ：4本を用いて三軸試験を行った。試験に先立ち、サンプリング時のアルミ製の保護管を付けたままヘリカルX線CTにより、各供試体の撮影を行った（図-5）。

撮影結果より、断層の状態をかなり鮮明に観察することができた。Aシリーズの断層は比較的シャープに見えるが、Bのシリーズは断層中に粘土あるいは礫を挟んでおり、断層周辺の岩盤部も破碎しているように見える。同図上には想定断層位置を矢印で記載した。A-1については、断層位置が2カ所想定されたため、そのまま記載している。ここに示した全供試体が供試体の側面を断層が高角に横切るように採取できていることがわかる。前述のとおり、B-3やB-4では供試体の下端あるいは上端で岩盤部が破碎しているが、断層部のサンプリングと試験は問題ないと判断した。なお、全供試体について、試験時には上端と下端の両端にキャッピングを行う事により、問題なく試験を実施できた。

今回の観察結果からも明らかのように、断層の形態や状態は様々である。開発したサンプリング装置により、採取した試料を応力解放することなく、X線CT撮影を行えば、客観的な代表性の検討や、断層の形態や状態と力学特性を関連付けることが可能である。

(2) 試験条件

選定した7本の供試体に対して、地盤工学会基準の軟岩の圧密非排水（CU）三軸圧縮試験方法（JGS2533-2009）に準拠して三軸試験を実施した。用いた三軸セルについては、既往の文献³⁾に示すものと同様である。B値については90%以上とした。

X線CTの画像から判断した断層の最大傾斜角度 α と有効拘束圧 σ_c を、試験結果のうち、最大軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 、過剰間隙水圧 u_f とあわせ表-2に示す。 α は36～55°であり、 σ_c は0.25MPa～2.0MPaとした。

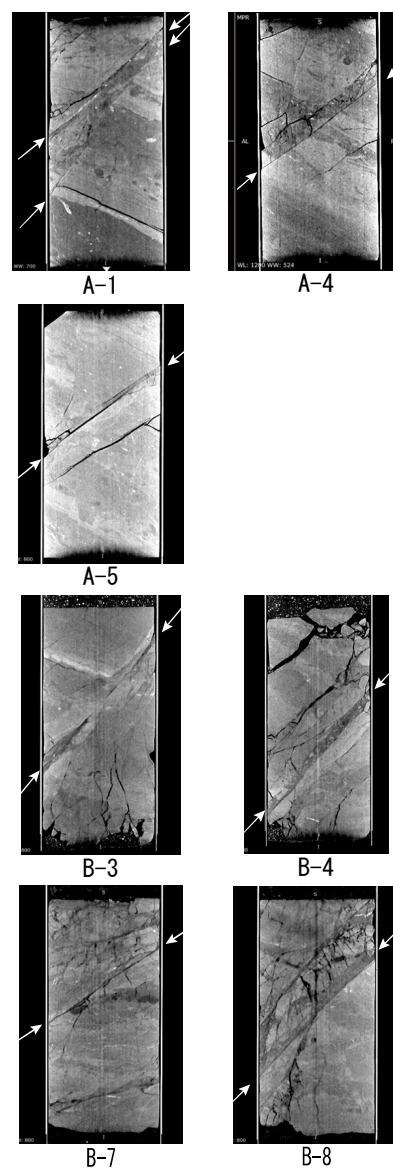


図-5 試験供試体のX線CT

表-2 三軸試験一覧

供試体 No.	α (°)	σ_c (MPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (MPa)	u_f (MPa)
A-1	41/55	0.5	0.77	0.037
A-4	36	2.0	1.81	0.468
A-5	46	0.25	1.02	-0.110
B-3	51	1.2	1.52	0.233
B-4	47	1.6	1.73	0.742
B-7	37	0.8	3.63	-0.024
B-8	45	0.8	0.90	0.193

(3) 試験結果（応力-ひずみ関係）

軸差応力と外部変位計の計測値を単純に供試体の高さで割った軸ひずみの関係、過剰間隙水圧と軸ひずみの関係を図-6（最大軸ひずみ1%）、図-7（最大軸ひずみ10%）に示す。図-6より、様々な断層の形態や状態を反映して、一般的な傾向を読みとりにくい。Aシリーズは初期の剛性が高く、Bシリーズは初期の剛性が小さいが、载荷に伴い一旦剛性が増加する傾向を示す。過剰間

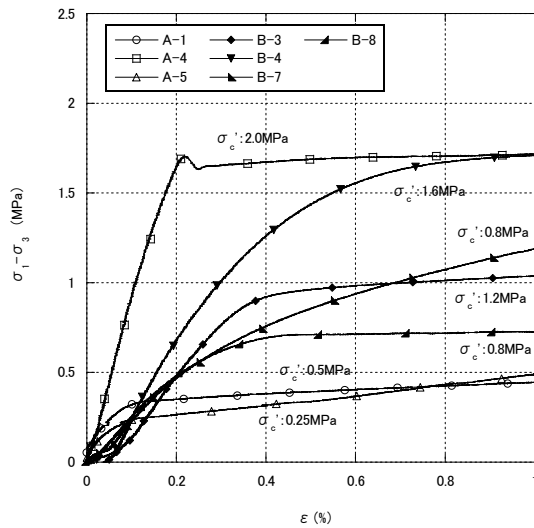


図-6 応力-ひずみ関係，間隙水圧-ひずみ関係（ $\varepsilon_a < 1\%$ ）

隙水圧については，剛性ほど明瞭な違いは示さず，両シリーズ共になだらかに増加していく傾向を示す。

大ひずみについては，図-7に示すが，A-1，A-4では途中でメンブレンが破損したため，10%まで载荷ができなかった。この点は今後の課題である。また，B-7については，他の試験と異なり，軸差応力が増加し続けたため，軸ひずみ8%のところで試験を中断した。試験後，セルを解体して確認したが，特に問題は見られなかったため，試験結果として除外しなかった。

応力-ひずみ関係については，B-7を除き，軸ひずみ0.1～1%以下の付近で勾配が大きく低下し，その後はほぼ応力が変動しないか，若干増加する傾向を示す。過剰間隙水圧については，1～2%程度でピークを示し，その後は低下する，すなわち体積変化は圧縮から膨張の傾向を示す。

いずれにしても，これらの結果には，断層周辺の岩盤部の変形も含まれる。今回，外部変位のみでなく，断層周辺の局所変位も計測しているため，今後断層部自体の

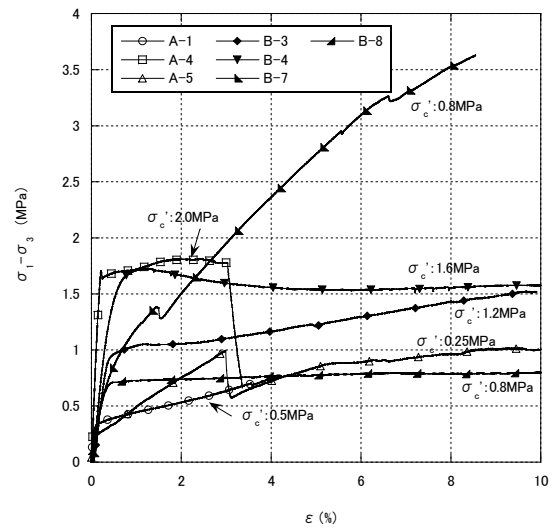


図-7 応力-ひずみ関係，間隙水圧-ひずみ関係（ $\varepsilon_a < 10\%$ ）

応力-ひずみ関係についても考察を深めていきたい。

(4) 強度特性

今回の三軸試験では，断層面の傾きが表-2に示すように計測されているため，この面上の応力状態を用いて試験結果を整理した。A-1については，断層角度が2種類想定されたため，両方の角度で計算した。有効応力で整理した σ' と τ の関係を図-8に示す。なお，図中には，今回試験をした断層とは異なるが，同系統の断層で別途実施した直径5cmの供試体の三軸試験結果を示す。

まず，AシリーズとBシリーズでは，A4を除いて，強度に大きな違いがないことがわかる。A4の強度が小さかった原因については，現時点では不明であるが，断層よりも上部にあるき裂が試験結果に影響を与えた可能性がある。図-7上図に示したように，B-7は大きな強度を示したものの有効応力で整理すると特に違和感はない。

既往の実験結果と比較するとA4を除いて今回の強度は同等かやや小さい強度となった。既往のデータは同系

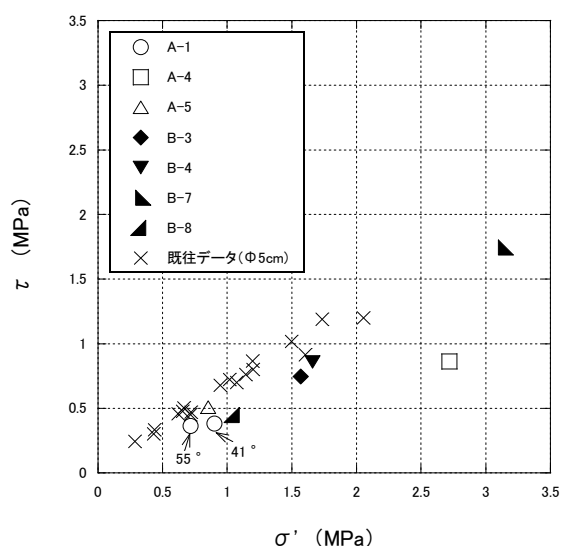


図-8 三軸試験から得られた強度特性

統ではあるが異なる断層であり、断層の厚み、採取深度、載荷速度なども異なる。そのため厳密な比較はできないが、今回のサンプリング中に試料を乱した可能性は否定できず、今回の試験の強度を過小評価する原因となっている可能性がある。また、間隙水圧の計測位置が断層から遠いため、計測結果の信頼性についても検討の余地がある。今後、実用的な手法となるように上記の課題の改善を行いたい。

5. まとめ

開発した断層サンプリング装置を現場に適用した。サンプリングを実施した15本のうち、3本の失敗はあったものの、直径約20cm、高さ約45cmの天然の断層試料を採取することに成功した。取得した掘削パラメータより、失敗したケースでは掘進スピードが遅く、水量が多すぎた可能性が高い。

採取した断層試料の7本を用いて、試験前に保護管に

入った状態で応力を解放せずにX線CTの撮影を行い、断層の性状や断層の角度等を観察することができた。その後、圧密非排水三軸試験を実施し、供試体の応力-ひずみ関係、間隙水圧-ひずみ関係を得ることができた。既往の同系統の断層の三軸試験結果と比較するとやや小さい強度を示し、いくつかの課題が明確になった。今後、課題を解決し、より客観的かつ合理的な断層の物性評価手法を確立したい。

謝辞：本研究を進めるに当たり、地盤安定性評価検討会の電力各社の委員により、検討内容を審議していただきました。現（公財）深田地質研究所の船戸明雄氏には、装置開発のアドバイスをいただきました。試験装置の設計・製作は立川機械製作所（株）の立川日出男氏、立川智勝氏が実施しました。また、（資）KAS計測の折田隆三氏、（株）セレスの谷口友規氏、元応用地質（株）の平山伸行氏には、開発当初より実験データの取得に協力していただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本電気協会原子力規格委員会：原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-2015），pp.217-263，2016。
- 2) 石丸真，岡田哲実，中村大史，河井正，風間基樹：軟岩のせん断破壊後の強度変形特性のモデル化と斜面の地震時すべり安定性評価への適用，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.73，No.1，pp.23-38，017。
- 3) 岡田哲実，谷口友規，平山伸行，折田隆三：断層試料を採取するためのサンプリング装置および三軸試験装置の開発，第14回岩の力学国内シンポジウム講演集，講演番号067，2017。
- 4) 岡田哲実，船戸明雄，立川日出男：コア下端切断機構を備えるボーリングコア採取装置，特願2012-062574，2012。
- 5) 岡田哲実，船戸明雄，立川日出男：コア回転防止機構を備える下端切断機構を備えるボーリングコア採取装置，特願2012-062575，2012。

SAMPLING OF FAULT SPECIMEN OF A LARGE-DIAMETRIC BORED HOLE AND EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTY USING TRIAXIAL TEST

Tetsuji OKADA, Ryota NAKAMURA, Kouji OGAWA and Tomohiro NAYA

Samplings of specimens were carried out on the natural fault for the first time using the large-diametric (D=20cm) sampling device developed at the Central Research Institute of Electric Power Industry in order to rationally evaluate mechanical properties of fault. After the fault specimen including the protecting aluminum tube was scanned in the x-ray CT, triaxial compression tests were conducted. As a result, the samplings were successfully performed while acquiring the drilling parameters. And the shear strength was equal to or less than the shear strength obtained by the previous triaxial test data using the small diametric (D=5cm) specimens. Some issues of the sampling and the test method are identified from the test data.