

# 横ずれ断層変位に伴う断層上部岩盤の破壊形態に関する岩石模型実験

澤田 昌孝<sup>1\*</sup>・上田 圭一<sup>1</sup>・小早川 博亮<sup>1</sup>・金谷 守<sup>1</sup>

<sup>1</sup>財団法人電力中央研究所 地球工学研究所（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）  
\*E-mail: sawada@criepi.denken.or.jp

エネルギー貯蔵施設、放射性廃棄物地層処分など重要地下構造物を岩盤内に建設する場合は、貯蔵物の漏洩を防ぐために基盤の断層変位に起因する高透水性の変形帯を回避する必要がある。

岩盤内での横ずれ断層系の3次元発達過程および変形帯の形成過程およびその分布状況に関する知見を得るために岩石を用いた断層模型試験を行った。試験は、真鍮のブロックの境界面を基盤断層に見立て、その境界面にずれ変位を与え、ブロックに接着された岩石板にクラックを発生させるものである。顕微鏡およびマイクロフォーカス X 線 CT スキャンを用いた観察により、リーデル線などのクラックの発生を確認し、基盤変位とその開口幅の関係をまとめた。

**Key Words :** strike-slip fault, model test, crack propagation, underground, microscopic observation

## 1. はじめに

国土が狭く、エネルギー資源に乏しい我が国においては、圧縮空気貯蔵やエネルギー地下貯蔵など、地下空間を有効に利用したエネルギー資源の貯蔵システムの構築が必要不可欠である。また、近年は、高レベル放射性廃棄物の地層処分が国家的プロジェクトとして検討されてきている。これらの重要構造物を地下の岩盤内に建設する際には、貯蔵物質の漏洩が懸念される高透水性変形帯を回避した建設地点の選定が重要となる(図-1)。建設地点選定においては活断層を回避することはもとより、古い年代に活動した断層においても、その周辺には断層変位時に形成された副次的な断層(小断層)や節理面が分布しているのが一般的である。それらが分布するゾーン(変形帯)は、全体として高透水性を示すことが多く、これら高透水性変形帯を可能な限り回避することが望ましい。主要な断層周辺の高透水性変形帯の分布特性に関する知見が予め準備されていることは、調査計画立案等に有効な情報を提供する。

一方、近年、国内外の巨大地震において、地表地震断層変位により多くのインフラ設備が被害を受けた。そのため、地下の基盤断層変位に伴う表層地盤の変形予測と被害軽減対策に関する課題が注目され、国内外を問わず様々な研究<sup>1)2)</sup>が行われつつある。しかしながら、地下での変形帯の分布に関する具体的かつ系統的な研究はま

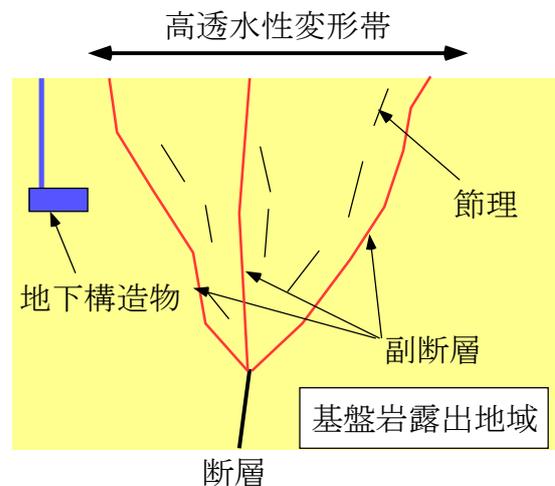


図-1 基盤断層と高透水性変形帯の模式図

だ少ない。特に横ずれ断層に関しては、縦ずれ断層に比べ断層形態が複雑で変形機構も3次元的事から、その実態が十分解明されているとはいえない。

以上の観点より、著者らは、横ずれ断層変位に伴って周辺岩盤に形成される変形帯と断層の位置関係、岩盤内の変形、破壊の発達過程や変形帯の幅に関して、現地調査と断層模型試験による検討を実施している。

横ずれ断層による地下岩盤中の破壊の発達過程・形状・分布を調べるため、拘束圧下において実際の岩石にずれ変位を与える断層模型試験を実施した。本報はその内容を報告するものである。

## 2. 岩石断層模型試験

### (1) 試験模型の作成・载荷

岩石を用いた横ずれ断層の模型試験として、Bartlettらの研究<sup>3)</sup>がある。Bartlettらは、図-2のように24mm x 34mm x 94mmのBerea sandstoneの直方体ブロックに45°の角度断面を入れ、基盤断層と見立てた。それを厚さ1~6mmのIndiana limestoneの岩石板で挟み、三軸圧縮試験装置内で拘束圧下で载荷すると、角度断面に沿ったずれ変位が発生する。このずれ変位により岩石板に現われた破壊ゾーンを観察する実験である。この試験方法では、端部付近を排除すると断層線が短くなり観察できる部分が少ない、断層線が45°に傾斜しているために、供試体に意図せぬモーメントが作用する、という欠点が考えられる<sup>4)</sup>。

著者らもBartlettらに倣い、三軸圧縮試験装置内で岩石を用いた断層模型試験を実施することを考えた。上記のようなBartlettの試験の問題点を解決するため、载荷ブロック3枚(真鍮製、24mm x 80mm、厚さ10mm : 2枚、厚さ13.5mm : 1枚)を図-3のように5mmずらした状態で重ね合わせることで、基盤の断層を模擬した。この载荷ブロックを2枚の岩石板(河津凝灰岩、33.5mm x 80mm x 5mm)で挟み、その接触面はエポキシ系接着剤で接着し、ずれることがないようにした。三軸圧縮試験装置内において拘束圧下で载荷することで载荷用ブロック接触面にずれ変位を発生させ、岩石板に合計4箇所の破壊ゾーンを形成する。载荷は変位制御で行い、変位速度はBartlettらの試験を参考に0.002mm/sとした。

基盤の変位量(最大軸方向変位) $h$ 、拘束圧 $\sigma_c$ の条件を変化させることにより、それらの条件が破壊ゾーンの発達過程に及ぼす影響を調べた。試験ケースを表-1に示す。また、図-4にこれらの試験ケースにおける軸差荷重と軸変位の関係曲線を示す。No.1およびNo.3は、軸荷重のピークを確認後、速やかに载荷を終了したケースであり、その他のケースではピーク確認後もある程度、载荷を継続した。

### (2) 破壊ゾーンの観察

供試体に発生したクラックは、反射型実体顕微鏡を用いて観察した。実体顕微鏡において岩石板表面に発生したクラックの拡大写真を撮影し、そのデジタル画像をPC上で繋ぎ合わせた。このようにして作成した岩石板表面の観察用図面の例を図-5に示す。底盤の断層の直上付近にリーデルせん断に相当する雁行状の開口を伴うクラック(以後、リーデルクラックと呼ぶ)が形成されている。また、底盤の断層の直上付近にリーデルクラックの先端を繋ぐようにクラックが発生する。このクラックは、底盤の断層の走向との斜交角度がリーデルクラックと反対であり、より低角度であることから、Pせん断<sup>5)</sup>に相

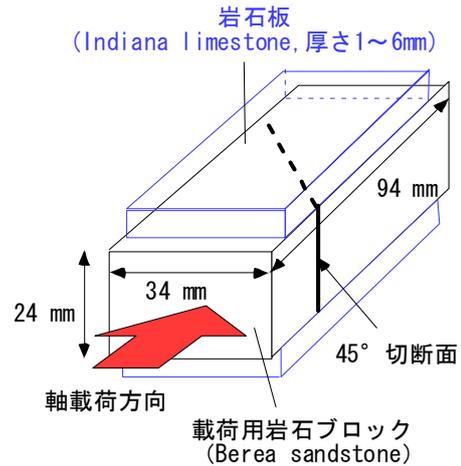
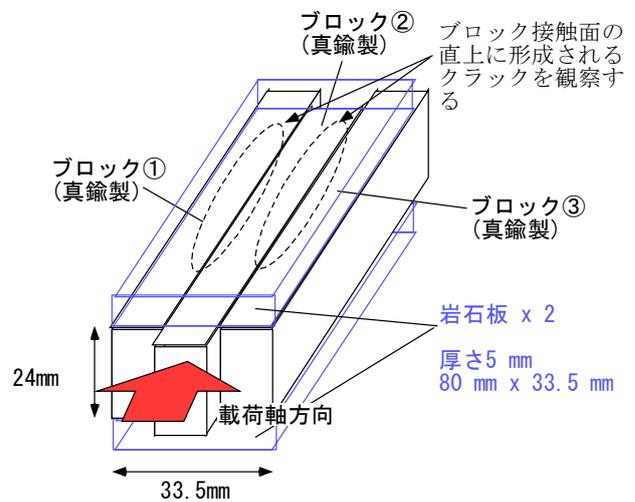
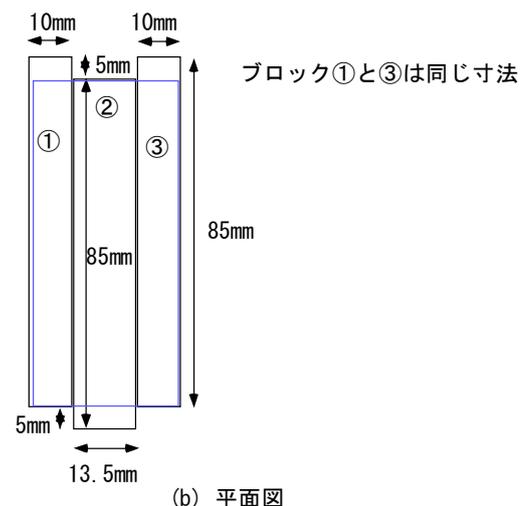


図-2 Bartlettらの断層模型試験(文献<sup>3)</sup>に基づき作成)



(a) 鳥瞰図



(b) 平面図

図-3 本研究で作成した断層模型

当すると考えられる。また、このクラックはリーデルクラックと比較して開口量が少なく不鮮明な場合が多い。このクラックの周辺は顕微鏡で観察すると白く変色して

表-1 試験ケースと条件

No.	拘束圧 $P_c$ (MPa)	最終変位量 $h$ (mm)	最大軸差荷重 $L_{max}$ (kN)	ピーク時の変位 $h_{peak}$ (mm)	ピーク後の変位 $h-h_{peak}$ (mm)
1	20	0.262	42.15	0.232	0.031
2		0.560	43.60	0.240	0.311
3	40	0.364	43.48	0.229	0.135
4		0.598	39.51	0.331	0.267
5		1.167	42.17	0.439	0.728

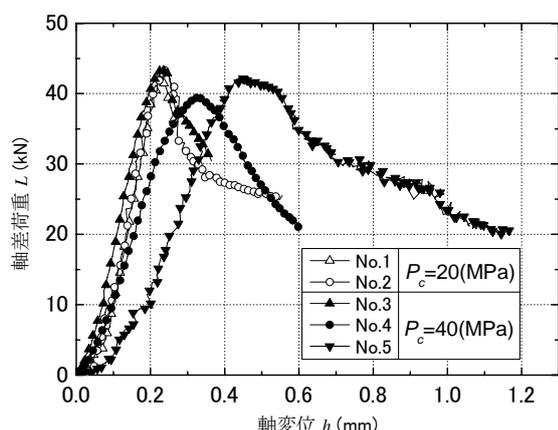


図-4 軸差荷重と軸変位の関係

いる。また、後述するマイクロフォーカスX線CTスキャンにおいても複数の細かいクラックが観察されるため、破壊していると考えられる。実際の横ずれ断層上部の岩盤においても、雁行状に発生したリーデルせん断の間の地盤が圧縮破壊して隆起している地形が見られる<sup>9)</sup>。この白色領域は、その圧縮破壊領域に相当すると考えられる。そこで、Pせん断に相当するクラックを含む白色の破砕領域を圧縮破壊領域と呼ぶ。

### (3) 供試体内部の観察

供試体内部を観察するためにマイクロフォーカスX線CTスキャン(X-TEK社 HMX225 X線透視装置にBIR社 ACTIS+3 CT装置を搭載したシステム、最小焦点寸法5 $\mu$ m)による観察を実施した。1mm毎にスライス幅50 $\mu$ mで断面CT撮影を行った。No.1, No.2, No.4, No.5の4試験ケースから対象とする破壊ゾーンをそれぞれ1箇所(約2cmの区間)ずつ選択して撮影を行った。図-6にその例を示す。

1本のリーデルクラックにおいても、図-6の18と14のようにその断面位置によって、基盤の断層からの傾斜角度が異なっており、リーデルクラックは岩石内部で対数らせん曲面<sup>9)</sup>を形成していることが分かる。図-6の12のようにリーデルクラックとPせん断に相当するクラックによってフラワー構造が形成されている。これは、横ずれ断層上部地盤に特徴的に現われる構造である。また地

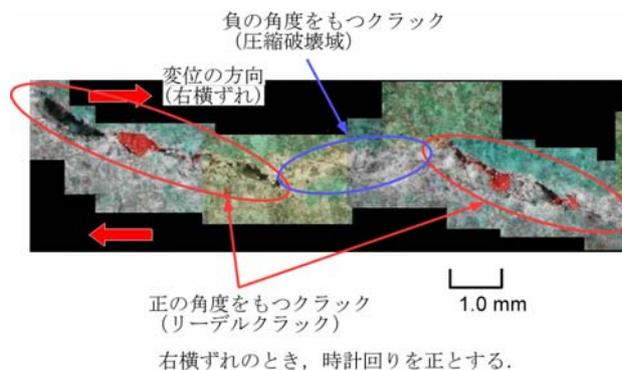


図-5 岩石の表面に現われた破壊ゾーンの様子(試験 No.5)

表近くにおいてリーデルせん断に囲まれる領域は圧縮破壊され隆起することが、実際の断層や砂箱で実施された断層模型試験で確認されている。しかし、今回のX線断面図ではそのような隆起は確認されなかった。これは、20MPaあるいは40MPaの拘束圧の効果と考えられる。

## 3. 破壊ゾーンの幾何特性の分析・測定

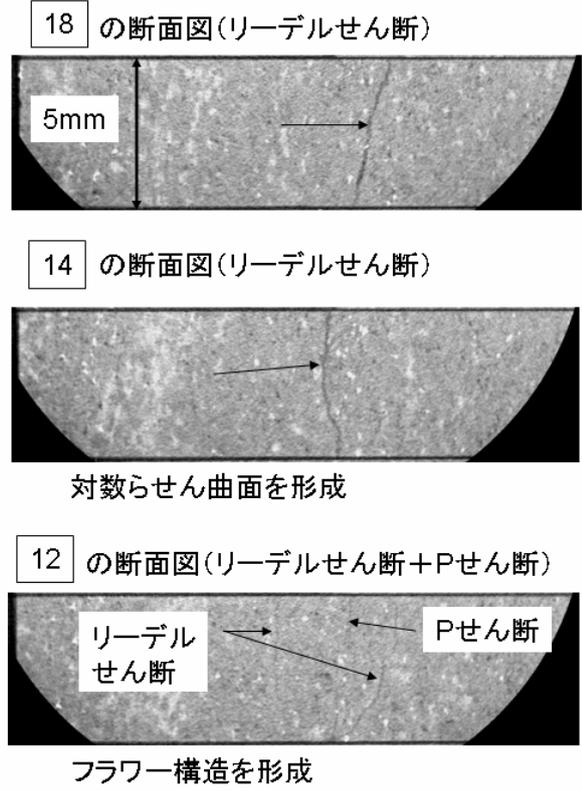
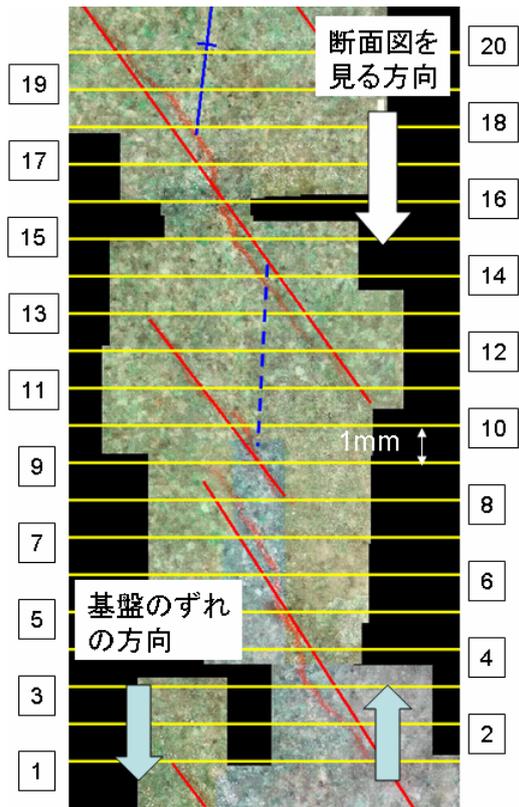
### (1) 分析の方針と測定項目

供試体の表面で観察された破壊ゾーンの分布を定量的に分析するにあたり、図-7に示すような方針を採った。すなわち、境界の影響を考慮し、断層長手方向の両端部に最も近い部分に出現するクラックの1本目は分析の対象外とした。また、供試体の端部まで進展しているクラックも境界の影響を受けていると考えられるので、分析の対象からはずした。

観察された破壊ゾーンを、载荷ブロックの接触面(基盤の断層位置)と斜交する角度の正負(右ずれの場合、時計回りを正)によって、2種類に分けて分析した。角度が正のものはリーデルクラック(suffix R)であり、負のものは周辺の白色化した破壊領域も含めて圧縮破壊領域(suffix C)とした。分析の際にはそれぞれの破壊ゾーンを単純に直線としてモデル化し、分析・計測した。

計測する項目は以下のものであり、それぞれ図-8のように定義した。

- 基盤の断層と斜交する角度  $\theta_c, \theta_r$



左図の赤十字はリーデルクラック、青十字は圧縮破壊領域に対応している。  
黄線は撮影をした断面を表し、代表的な3断面の映像を右側に示す

図-6 マイクロフォーカスX線 CTスキャンによる破壊ゾーンの観察(試験 No.4)

- 破壊ゾーンの長さ  $L_R, L_C$
  - リーデルクラックの開口幅  $W_R$
  - 圧縮破壊領域の変状幅  $W_C$
- また、基盤の断層に沿う方向及び直交方向の破壊ゾーンの大きさについては、上記の測定値を用いて下記の式により算出した。
- 破壊ゾーンの大きさ(幅)  $D_R=L_R \times \sin\theta_R, D_C=L_C \times \sin\theta_C$

- 破壊ゾーンの大きさ(長さ)  $D_R=L_R \times \cos\theta_R, D_C=L_C \times \cos\theta_C$

PCの描画ソフトにおいて、岩石板表面の亀裂のデジタル画像上に図-8のように直線(十字)を上書きし、その直線の長さをPC上で測った。実体顕微鏡において同じ倍率で撮影した1mm方眼紙の画像を用いて実際の1mmのPC上での長さを求め、その換算比率から破壊ゾーンの各サイズを算出した。

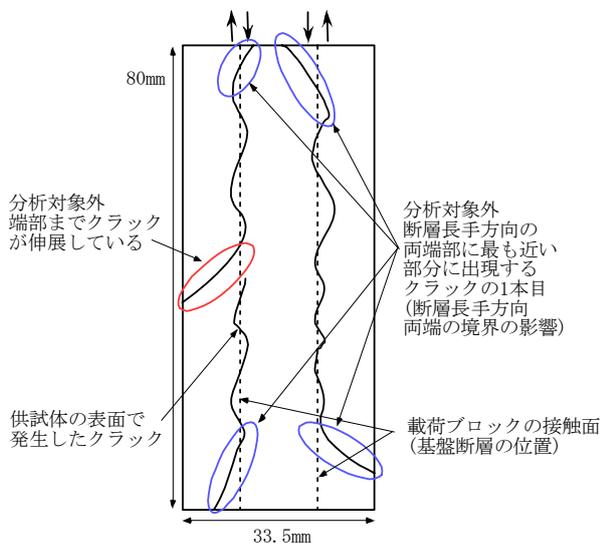


図-7 顕微鏡観察による分析の方針

## (2) 測定結果と考察

岩石板表面に現われた破壊ゾーンは以下のような分布特性となった。

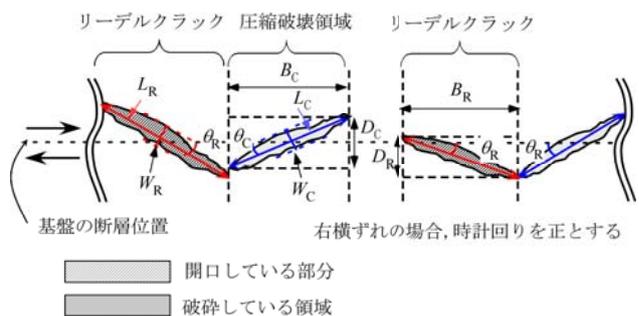


図-8 顕微鏡観察による測定項目

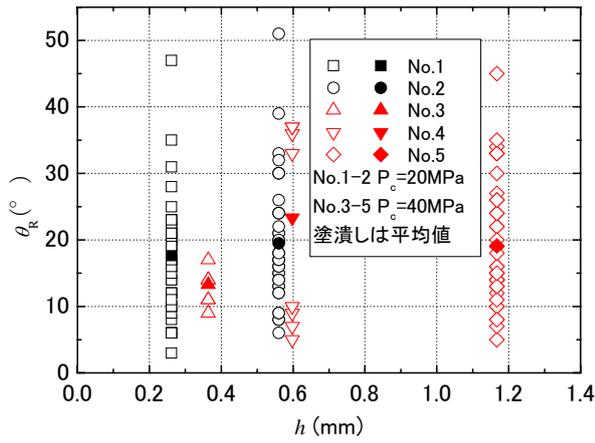


図-9 基盤断層とリーデルクラックのなす角度

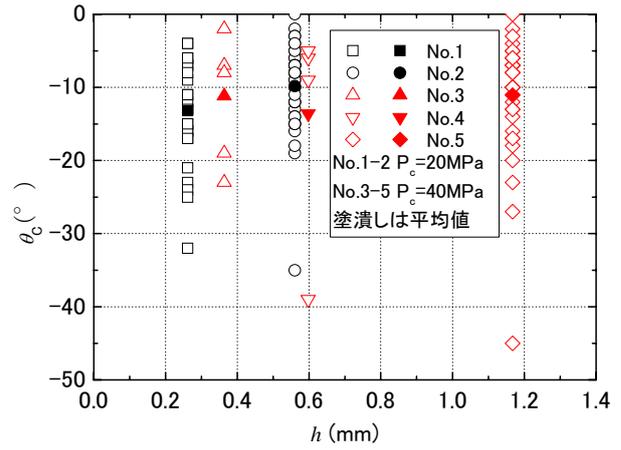


図-10 基盤断層と圧縮破壊領域のなす角度

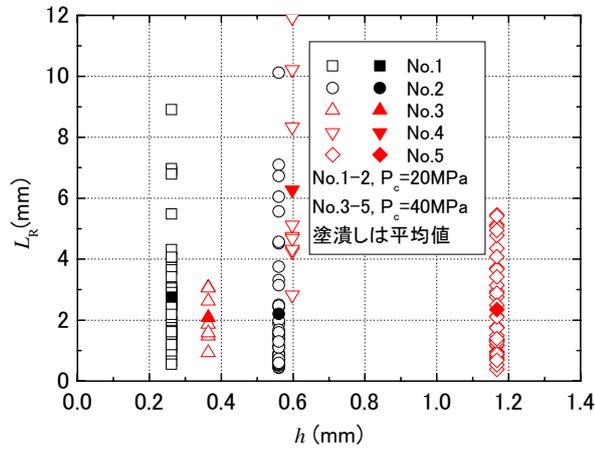


図-11 リーデルクラックの長さ

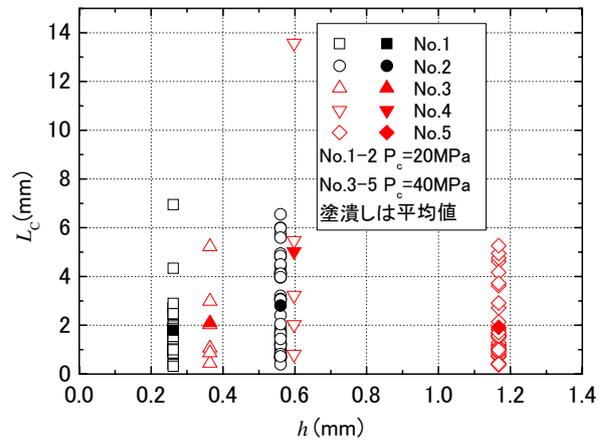


図-12 圧縮破壊領域の長さ

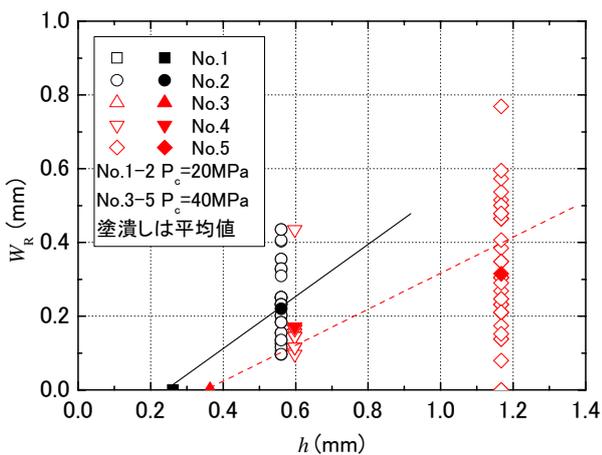


図-13 リーデルクラックの開口幅

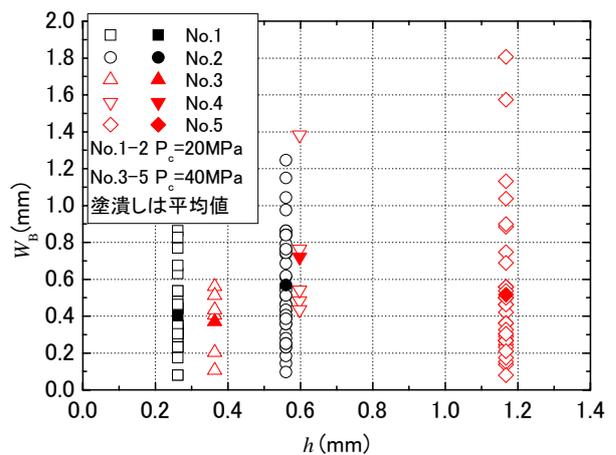


図-14 圧縮破壊領域の変状域の幅

a) 破壊ゾーンと断層走向のなす角度

載荷ブロックの接触面(基盤の断層)と斜交する角度 $\theta_R$ ,  $\theta_c$ と, 変位量 $h$ との関係を図-9および図-10に示す.  $\theta_R$ も

$\theta_c$ の値も, それぞれ $3^\circ \sim 50^\circ$ ,  $-45^\circ \sim 0^\circ$ の範囲に分布し, 大きくばらついている. これらのデータを平均すると,  $P_c=20\text{MPa}$ のとき,  $\theta_R=18.5^\circ$ ,  $\theta_c=11.5^\circ$ ,  $P_c=40\text{MPa}$

のとき $\theta_R=18.6^\circ$  ,  $\theta_C=11.9^\circ$  であり, 拘束圧に依存する傾向は認められない. クラックの角度は, 表面における主応力 $\sigma_1$ の方向に依存するが, 本試験の拘束圧は供試体に対して等方に作用し, 主応力 $\sigma_1$ の方向が拘束圧の大きさに対して変化しないため, クラックの角度に拘束圧依存性は見られなかったと考えられる.

#### b) リーデルクラック, 圧縮破壊領域の長さ

リーデルクラックおよび圧縮破壊領域の長さ $L_R$ ,  $L_C$ と変位量 $h$ の関係をそれぞれ図-11, 図-12に示す. 試験ケースNo.4において, 規模の大きい破壊ゾーンが現われているが, 基盤の断層変位 $h$ や拘束圧の影響については不明確である.

#### c) リーデルクラックの開口幅, 圧縮破壊領域の変状域の幅

リーデルクラックの開口幅 $W_R$ , 圧縮破壊領域の変状域の幅 $W_C$ と変位量の関係をそれぞれ図-13, 図-14に示す. 平均値で比較して,  $W_R$ は, 変位量の増加に伴って, 大きくなっている. 一方,  $W_C$ は, 平均値では変位量の増加に伴う変化は明確ではないが, 幅の大きいゾーンが増加している. また, それぞれの拘束圧に着目すると,  $W_R$ に関しては拘束圧の低いケースの方が, 高い値を示す. このことは, 拘束圧がリーデルクラックの開口を抑制することを示唆している. 一方で,  $W_C$ に関しては拘束圧の影響は不明確である.

## 4. おわりに

岩石を用いた横ずれ断層の模型試験を実施したところ, 実際の断層上部岩盤で見られるリーデルせん断に相当するクラックや, Pせん断を伴う破壊領域を再現することができた. これらの破壊ゾーンの分布特性と基盤の断層変位や拘束圧の影響を調べたところ, 基盤の断層との交差角度や長さはどちらの影響も明確でないこと, リーデルクラックの開口幅は, 断層変位が大きい場合, 拘束圧

が小さい場合に増加する傾向があることが明らかになった. 破壊ゾーンの基盤断層との交差角度, 長さが基盤変位の増加に対して収束すれば, 破壊ゾーンの分布範囲を特定することができるが, 更に大きな基盤変位を与える試験を実施して確認する必要がある.

今後は別の岩種を用いた試験, 人工材料を用いた寸法の大きな模型試験を実施しデータの拡充を図る. さらに断層変形帯の現地調査家結果との比較・検討を実施する.

**謝辞:** 本研究は科学研究費補助金(基盤研究B, 課題番号16360241)の成果の一部である. 静岡ガス(株)の伏見隆之氏, (株)セレスの中小真一氏, 水野貴由氏には実験の実施にあたり, ご協力いただいた. また, 横浜国立大学の谷和夫教授には貴重なご助言をいただいた. ここに記して深く謝意を表します.

## 参考文献

- 1) 谷和夫, 上田圭一, 阿部信太郎, 仲田洋文, 林泰幸: 野島地震断層で観察された未固結な表層地盤の変形構造, 土木学会論文集, No.568/III-39, pp.21-39, 1997.
- 2) 上田圭一: 横ずれ断層系の発達過程ならびに変形地形の形成過程—断層模型試験による検討—, 電力中央研究所研究報告 U03021, 2003.
- 3) Bartlett, W. L., Friedman, M. and Logan, J. M.: Experimental Folding and Faulting of Rocks under Confining Pressure Part IX. Wrench Faults in Limestone Layers, *Tectonophysics*, **79**, pp.255-277, 1981.
- 4) 伏見隆之, 谷和夫, 澤田昌孝: 断層運動に伴う表層岩盤の破壊構造を解明するための岩石破壊試験の手法の検討, 第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 CD-ROM, 2005.
- 5) Nayler, M. A., Mandl, G. and Sijpersteijn, C. H. K.: Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states, *Journal of Structural Geology*, Vol. 8, No.7, pp.737-752, 1986.
- 6) Bergerat, F., Angelier, J., Gudmundsson, A. and Torfason, H.: Push-ups, fracture patterns, and palaeoseismology of the Leirubakki Fault, South Iceland, *Journal of Structural Geology*, 25, pp.591-609, 2003.

## MODEL TEST FOR INVESTIGATION OF FAULT RUPTURING IN ROCK MASS OVERLYING STRIKE-SLIP FAULT

Masataka SAWADA, Keiichi UETA, Hiroaki KOBAYAKAWA  
and Mamoru KANATANI

In order to make clear the deformation characteristics of the rock ground induced by the strike-slip fault displacement, fundamental study on the rupture phenomena of the rock material is conducted by the laboratory test.

Strike-slip fault zones are induced experimentally under confining pressures, in initially intact layers of Kawazu tuff subjected to strike-slip displacement along the contact boundaries in underlying brass forcing blocks. The fault zones consist of the Riedel shears, and the P-shears. Their orientations, lengths, and crack openings are investigated using the microscope and the micro focus X-ray CT scan.