断層運動に伴う表層岩盤の 破壊形態に関する模型実験による検討

佐藤 あすみ1*・谷 和夫2・澤田 昌孝3

1横浜国立大学 工学部 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5土木工学棟)

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

³正会員 電力中央研究所 地球工学研究所 地圈科学領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646) *E-mail:b0343013@ynu.ac.jp

石油や液化ガス等の地下貯蔵や高レベル放射性廃棄物の地層処分施設などを岩盤内に立地する際には、貯蔵物の 漏洩や放射能による地盤汚染を防ぐために透水性の高い破砕帯を避けなくてはならない.一般的に、そのような破 砕帯は断層変位にともなって発達するため、断層近い岩盤の破壊形態を解明する必要がある.

そこで、本研究では岩盤の変形・破壊メカニズムに関する知見を得るために、横ずれ断層を模擬した二面せん断型の装置でモルタルで作った模擬岩石の破壊実験を行った.それにより、模型地盤底面での破壊などの既存の装置 が抱えていた問題を解決すると共に、クラックの新しい発達モデルを考え、力学的な考察を行った.

Key Words : model test, fault, rock, shear band, strike-slip

1. はじめに

国土が狭く,エネルギー資源が乏しい我が国では,石 油や液化天然ガスの地下備蓄や,地下空間を有効利用し たエネルギー貯蔵システムの必要性が高い.また,原子 力発電により発生する高レベル放射性廃棄物の地層処分 場も,大深度のに広大な地下空間への建設が考えられて いる.これらの重要な地下構造物を岩盤内に立地する際 には,貯蔵物の漏洩や地盤の放射能汚染を防ぐため,断 層変位に伴って発達する,透水性が高い破砕帯を回避す る必要がある.

一方,伏見ら¹⁾²⁾は,岩盤に発達する断層破砕帯を調べるため図-1に示す二面せん断型の装置を開発した.しかし,装置の細部や試験体の打設方法などに問題があった.そこで本研究ではその装置の問題点を解決するために試験装置と試験方法を改良し,模型地盤としてモルタルを用いて岩石破壊試験を実施した.それにより,新たな工学的知見を得るべく,模型地盤に発達するクラックを観察した.

そして,既存の研究³⁾⁻⁶⁾と比較することによって,表 層岩盤に発達するクラックの分類方法を検討した.

2. 模擬岩石破壊試験の概要

(1)試験装置及び試験体の作成

図-1に二面せん断型の試験装置の概要を、図-2に土槽と 試験体の概要を示す.また、改良前の試験体を写真-1に示 す.

せん断力を試験体に伝達するせん断キー(幅12mm, 高さ10mm,間隔30mm)を底盤及び側面に,断層を模擬 したスリット(幅1mm,高さ10mm)を底盤にそれぞれ設 置することにより,試験体(幅W=132mm,長さL=638mm, 最大高さ80mm)を模型地盤(最大高さ H_{2max} =70mm)と載荷 基盤(高さ H_{I} =10mm)に分け,載荷基盤を通じて模型地盤 に断層変位(最大100mm)を確実に与える構造である.

試験体の作製は、モルタル(早強ポルトランドセメントと豊浦砂と水)を混合した後に専用の型枠に打込み、 1日後に脱型して6日間養生する方法による.脱型した 試験体を装置の土槽内部に設置する際には、土槽やせん 断キーと試験体との隙間を水セメント比50%のセメントペーストで充填する.



図-1 試験装置全体の概要¹⁾²⁾



(2)既存の試験装置の問題点

上記の実験装置および試験体を用いて実施された試験結果から,以下の問題が考えられる.

スリットの上方にせん断破壊が発生せずに, せん断キ ーの上面に沿って破壊が生じる.

② 左右の試験体で異なる破壊形態

二面のスリット上の破壊が同一でなく,左右の対称性 が保たれていない.

③ 試験後に試験体をの回収できないこと

試験後の供試体を分解しないように装置から取り出す ことが困難で,試験体内部に発達する破砕帯が観察でき ない.

(3) 解決策

改良後の試験装置の概要を**写真-2**に示す. ①模型地盤と載荷基盤の境界での破壊.

せん断キー(幅12mm,高さ10mm,間隔30mm)を、幅 や高さはそのままにし,間隔70mmにした.弱面となるせ ん断キーの上面を減らすためである.

②左右の試験体で異なる破壊形態.

型枠で打設して作製した試験体をセメントペーストで 固定する方法から,直接打設する方法に変更した.左右 の試験体の品質や寸法,固定度を同一にするためであ る.

③試験後に試験体の回収ができないこと.

試験後にリフト等で鉛直方向に試験体を一体として吊 り上げることができるように, せん断キー付きの側壁の 下部にL型のにつめを設置した.

(4)試験方法

H_{2max}=20mm, 早強ポルトラルドセメント・砂・水=1:5:1 の配合のモルタルを打設し, 6日間養生した後, 0.0167mm/sの変位制御を用いて試験を行った.



写真-1 改良前の試験装置



写真-2 改良後の試験装置

3. 試験結果

試験後の供試体の観察を行った.また,伏見ら¹⁾のデ ータと比較することにより,改良後の試験の妥当性を確 認した.

(1)試験装置改良の効果

①観察

底面での破壊は発生せず,試験体で観察された破壊形 態は左右ほぼ対称となった.また,スリット直上に見ら れた,隆起したブロックの形態の完全な維持は難しいが, 試験体を崩さずに取り上げることが出来た.

②平均せん断応力と変位の関係

ロードセルで計測した荷重Pをせん断面積で除した平 均せん断応力と外部の変位計で計測した見かけの断層変 位の関係を図-3に示す.本実験は、応力-変位関係が明 確なピークを有する脆性的な破壊である.また、ピーク 時の平均せん断応力及び見かけの断層変位は改良前(伏 見2006)では0.95MPa(h=1.7mm),本研究では0.68MPa

(h=2.1mm) である. これらの差は打設方法の違いによ るものだと考えられる.



図-3 平均せん断応力-変位関係

(2) クラックの観察

断層変位が増加すると、模型地盤には異なるモードの クラックが順に発生する(写真3-6).図-4にクラック の発達モデルを模式的に示す.尚、分類及び名称は砂地 盤の実験等による分類方法5⁻⁷⁾に従って行った(図-5).

まず、1次モードとして、**写真-3、4**のように断層の直 上にほぼ等間隔に雁行配列のクラックが出現する.これ がリーデルせん断である.リーデルせん断が断層となす 角度₉ない断層の横ずれによる回転方向を正とすると、 22.2~33.0°であった.

次に2次モードとして、**写真-5**のようにリーデルせん 断の先端に近い部分から断層の横ずれによる回転とは反 対方向に₀=-14.9~36.9°のクラックが発生する.これ をP₁せん断とおく.その後、P₁せん断は断層変位の増大 にともなって徐々に開口していき、ほぼ平行にもう一本 Pせん断が発生する.ここでは後から発生するものをP₂ せん断とする. 谷ら(1997)⁷⁾によると、リーデルせん断に伴うずれ変 位により、最大主応力方向が-(θ_R-θ_P)傾く. その結果リ ーデルせん断発生前の主応力方向が変化し、Pせん断が 発生する.

P₂せん断発生後,リーデルせん断,P₁せん断とP₂せん 断によって形成された平行四辺形のブロックが隆起する. また,模型地盤から分離したブロックの外側には破壊は 及んでいない.従って,2次モードまでの段階ではリー デルせん断の出現状態とP₁およびP₂せん断の出現状態 を検討すれば,破壊領域が特定できることが分かった.



写真-3 破壊の様子(F=1.75mm)



写真-4 破壊の様子 (h=2.8mm)



写真-5 破壊の様子(/=5.4mm)



写真-6 大変位後の破壊の様子(左18.0㎜)



図-4 クラックの発達モデル

4. クラックの発達モードに関する分類

(1) 幾何学的分類の提案

リーデルせん断発生後に発生する2種類のPせん断 (P₁P₂)について幾何学的特徴について分類することとし た.本報では、3本の連続するリーデルせん断に挟まれ た2本のP₁せん断が断層を横断するかしないか、で分類 することとした.

分類の方法を図-6に説明する.これは、P₁せん断が2 本とも断層を横断している例であり、これを①とする. リーデルせん断とP₁せん断の変位の、断層に平行な成分 が図の四角く区切った部分では反対向きになっている. ここを不適合ゾーンとする.



図-6 P₁せん断の分類①

同様に、出現する可能性のある2本のP₁せん断の位置関係を図-7に示す.尚,凡例は図-6と同様とする.

①はどちらのP₁せん断も断層を横断しており,先に述 べた,不適合ゾーンが両端に発生している.②は一方の P₁せん断は断層を横断し、もう一方は横断しないタイプ で,③はどちらのP₁せん断も断層を横断しないタイプ のものである.

また、②③それぞれのAは下のP₁せん断に対して上の P₁せん断が断層をはさんで逆側にあるタイプ、Bは同じ 側ではあるが、下のP₁せん断に対して上のP₁せん断が 断層に近いタイプ、Cは下のP₁せん断より上のP₁せん断 が外側にあるタイプである.③-ABCはそれぞれABCを 180°回転させたものである.



図-5 砂地盤を用いた実験で見られるせん断帯の分類5)6)



図-7 P₁せん断の分類

不適合ゾーンの大きな違いは位置と延長である. 真ん 中のリーデルせん断をはさんで上下の不適合ゾーンが, 真ん中のリーデルせん断の両端に位置するタイプと2本 のP₁せん断の間で重なっているタイプがある. 延長と しては, リーデルせん断上の広範囲にわたるタイプと, そうでないタイプに分かれている. また, 真ん中のリ ーデルをはさんで上下にあるために, 広くなっている タイプもある.

(2)結果との比較

伏見ら¹⁾²⁾の実験の2試験体と、試験装置改良後の実験で発生したP₁せん断の種類と数を比較する.

伏見ら 1/2の実験(石膏:砂:水=1:4:1.5, 1:3:1)で明 確に見られた 4 組の P_1 せん断の全てが③-B であり、今 年度の実験で明確に見られた 2 組はどちらも②-A であ った.

実験で確認された②-A, ③-Bの共通点は, 不適合ゾ ーンが両端にあるということである. 確認されてはい ないが①②-B③-A③-Cも同様の特徴を持つ.

一方、不適合ゾーンが真ん中のリーデルせん断の上下に重なって位置する.このように位置する場合,2本のP₁せん断はつながった後開口し,P₂せん断は出現しない可能性が高い.

現段階では、不適合ゾーンが両端にあるパターンし か確認されていないことから、幾何学上では図-6、7の ように10種類のP₁せん断の出現の仕方があるが、実際 には不適合ゾーンが両端に位置するものは出現しやす く,重なって位置するものは出現しにくいということ が推測出来る.

5. まとめ

本報での検討内容をまとめると以下のようになる. ・横ずれ断層による表層岩盤の破壊形態を観察する試 験装置を改良し,実際に模型地盤で実験を行った.そ の結果,改良前の問題点を解決できたことが分かった. ・発生するクラックについて,1次モード,2次モード (1),2次モード(2)であるという発達モデルを考え,分 類および名称付けを行った.また,特にP₁せん断に注 目し,発達様式について結果と比較し考察した.その 結果,幾何学的には出現の可能性があっても,実験で 確認できたのは,リーデルせん断とP₁せん断の変位の, 断層に平行な成分が反対になっている部分が両端に位 置するパターンのみであった.

今後は、データの補充をはかると共に、岩の強度が 破壊形態に及ぼす影響を観察するために、固結度(一 軸圧縮強さ)の違う模型地盤による実験を行う予定で ある.また、模型地盤の層厚の違いが破壊形態に及ぼ す影響についても検討していく予定である. 謝辞:前田記念工学振興財団による平成17年度研究助 成により試験装置の開発を行った.この場を借りて, 感謝致します.

参考文献

- 伏見隆之,谷和夫,澤田昌孝:横ずれ断層運動に伴う周辺岩盤の破壊構造解明のための模擬岩石破壊試験,第35回岩盤力学に関するシンポジウム,pp323-328,2006.
- 2) 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, pp.219-224,2005.
- Naylor, M.A., Mandl, G. and Sijpesteijn, C.H.K. : Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress state, *Journal of structural Geology*, Vol.8, No.7, pp.737-752, 1986.

- Bartlett, W.L., Friedman, M. and Logan, J.M. : Experimental folding and faulting of rocks under confining pressure, *Tectonophysics*, 79, pp.255-277, 1981.
- 5) 小山良浩・谷和夫:横ずれ断層の模型実験で観察 された砂地盤の表面に発達するせん断帯の構造分 析,土木学会論文集, No.750/III-65, pp.171-181, 2003.
- 谷和夫,小山良浩:横ずれ断層の模型実験で観察 された砂地盤の内部に発達するせん断帯の構造分 析,土木学会論文集,No.757/III-66, pp.235-246, 2004.
- 谷和夫,上田圭一,阿部信太郎,仲田洋文,林康 之: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.

MODEL TEST FOR INVESTIGATION OF FAULT RUPTURE IN SURFACE ROCK

Asumi SATO, Kazuo TANI and Masataka SAWADA

Fault rupture zone should be examined in order to prevent any possible leakage from the facilities as underground energy storage and for high-level radioactive waste disposal. In this study, some improvements are made in the existing equipment for fault model tests, which was developed in order to investigate the rupture mechanism in surface rock mass by strike-slip faulting. Some model tests are conducted using artificial rock made of mortar, and a new crack propagation model is presented.