横ずれ断層変位に伴って表層岩盤に 発達する亀裂の実験的検討

佐藤 あすみ¹・谷 和夫²*・澤田 昌孝³

¹横浜国立大学大学院 工学府(〒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電力中央研究所 地球工学研究所(〒270-1194我孫子市我孫子1646)
*tani@cvg.ynu.ac.jp

放射性廃棄物の地層処分場の立地などに際して,実施される断層調査は,効率的かつ高精度であることが望まれる.そのためには断層変位量の増加とそれに伴う岩盤の変形・破壊との関係を解明しておく必要がある.

そこで,横ずれ断層変位に伴う岩盤の変形・破壊メカニズムに関する知見を得るために,二面せん断型の試験装置により凝灰岩及びモルタルで作製した人工岩の破壊試験を行い,岩盤の表面に規則性を持った 亀裂が発達する状況を観察した.観察結果に基づき,横ずれ断層変位に伴って表層岩盤に発達する亀裂を 分類して,その種類・寸法・配置に関する知見を得た.

Key Words : strile slip fault, rock mass, cracks, model test

1. はじめに

国土が狭く,エネルギー資源に乏しい我が国では, 石油や液化ガスの地下貯蔵システムの必要性が高い. また,原子力発電によって発生する高レベル放射性廃 棄物の地層処分が検討されている.これら重要構造物 の立地に際しては,内容物や放射能の漏洩を防ぐため に,断層はもとより断層変位によって生じる変形帯を 回避する必要があり,断層やその周囲の変形帯につい て調査が行われる.その調査を効率的かつ精度の高い ものにするためには,断層変位に伴う断層上部岩盤の 変形・破壊形態を解明しておく必要がある.

そこで,横ずれ断層変位に伴う表層岩盤の変形・破 壊メカニズムに関する知見を得るために,既存の二面 せん断型の試験装置によりモルタルで作製した人工岩 の破壊試験を行ってきた¹⁾.それにより,人工岩は横ず れ断層変位量hの増加に伴って,初めにリーデルせん断 が,続いてP1せん断,P2せん断が発達し,その後3種類 のせん断に囲まれた平行四辺形部が隆起することが分 かっている.しかし,自然岩については分かっていな い.そこで,凝灰岩の二面せん断試験の結果について 報告する.また,観察結果に基づき,横ずれ断層変位 に伴って表層岩盤に発達する亀裂の種類・寸法・配置 に関する知見を得た.

2.岩の破壊試験

(1)人工岩の二面せん断試験¹⁾

岩盤を模擬した人工岩に断層変位を与える,二面せん断型の実験装置の概要を図-1に示す(伏見ら 2006).



基盤に相当する土槽の底盤が長手方向に 3 つのブロッ クに分かれており,中央のブロックを分割面に沿って スライドさせることにより横ずれ断層変位を与える. 模型地盤はセメント,珪砂7号,水を重量比1:5:1で 混合したモルタルを土槽に層厚 $H_2=20$ mm 及び 30mm で 打設し湿潤環境で 7 日間養生して作製した.試験は横 ずれ断層変位量 $h \in 0.0167$ mm/s の変位制御試験で増加 させ,任意の段階で模型地盤の表面を写真撮影し,ス ケッチした.

H₂=20mmのケースで観察されたクラックのスケッチ を図-2に示す.hの増加に伴い,リーデルせん断,P₁せ ん断,P₂せん断と亀裂が増えていることが分かる.

(2) 凝灰岩の二面せん断試験の概要

凝灰岩の二面せん断試験装置が,澤田ら(2007)³によって報告されている.この試験装置は,横ずれ方向のみならず,縦ずれも発生している可能性があった.そこで,レールを付けることで,横ずれ方向のみの変位を与えられるように改良した.改良前後の試験装置を図-3に示す.また,試験は,装置の表面・裏面に凝灰岩を接着剤(エコセパラ)で貼り付け,岩石とシリコンを塗布・密閉し,その状態で拘束圧 σ(=10-40MPa)をかけながら,図-3中の矢印の方向に断層変位を与えた.詳細については,参考文献³を参照されたい.

試験に用いた凝灰岩の平均一軸圧縮強さqult63.1MPa であった.

試験ケースは,拘束圧 σ_c =10,20,40MPa時にそれぞれ, 最大変位量 h_{max} から,最大荷重時変位量 h_p を引いた h_{max} - h_p =(0.2),0.3,0.6,2.0mmを目指して載荷した10ケースについ て行った.スペースの都合上,結果はケース1~3について報告する.

試験ケース及び, 各計測値を表-1に示す. Q_pは最大 荷重を表している.

せん断力 τ を一軸圧縮強度 q_u で除し,無次元化したものと,断層変位量hを層厚 H_2 で除し,無次元化したものとの関係を図-4に示す. τ/q_u にばらつきが見られるが,これは密度のばらつきが理由であると考える.

また,試験後のケース1の観察スケッチを代表として 図-5に示す.これにより,大別して2種類の亀裂が発達 していることが分かる.一つは線状の亀裂で,人工岩 を用いた試験のリーデルせん断と同じ種類の亀裂であ ると判断した.もう一つは,隣接するリーデルせん断 間に見られる.この脇にリーデルせん断とは逆の角度 を持ったせん断が見えることもある.

表-1 試験ケースと結果

case	拘束王co(MPa)	QP(KN)	hpeak(nm)	hmax(nm)	hpp(mm)
	10	20.83	0.25	0.69	0.43
2	2 10	21.96	0.44	1.08	0.65
3	3 10	32.86	0.34	240	206



 \boxtimes -4 $\tau/q_{\rm u}$ - h/H_2





左:人工岩の破壊試験

右:凝灰岩の破壊試験





図-8 L_P/H₂-θ_P(参考文献 2)より抜粋)

3.試験結果

(1)表層岩盤に発達する亀裂の種類¹²⁾

人工岩の二面せん断試験,凝灰岩の二面せん断試験 とも,断層変位量hの増加に伴って亀裂が発達する.得 られた結果を以下にまとめる.

人工岩の二面せん断試験では,断層線に対して右横 ずれ断層では時計回りに,左横ずれ断層では反時計回 りに,亀裂が発達する.これをリーデルせん断とする. 続いて,リーデルせん断とは逆の角度を持つ亀裂が発 達してくる.先行して出現するものをP₁せん断,それ とほぼ平行な位置に後れて出現するものをP₂せん断と する.その後,3種類の間に囲まれた平行四辺形の部分 が隆起する.

一方,凝灰岩の二面せん断試験では載荷中に供試体の様子を直接観察することは不可能なので*h*_{max}-*h*_pを変えた実験を行い,破壊の進行を推測した.

これらをまとめ、て図-6に示す.

(2)表層岩盤に発達する亀裂の配置・寸法2)

人工岩の二面せん断試験で得られた,リーデルせん 断の長さL_R及びリーデルせん断の間隔D_Rをそれぞれ層 厚H₂で除し無次元化した値とリーデルせん断が断層線 となす角度_&,同様にP₁せん断の長さL_PをH₂で除し無次 元化した値とP₁せん断が断層線となす角度_&との関係に ついて図-7,8に示す.

 $H_2=20\text{mm}\,\mathfrak{C}|\sharp L_{\mathrm{R}}/H_2=5.98\pm0.96\ ,\ D_{\mathrm{R}}/H_2=7.43\pm0.69\ ,\ \theta_{\mathrm{R}}=13.1\pm4.4\ ^\circ\ ,\ H_2=30\text{mm}\,\mathfrak{C}|\sharp\ ,\ L_{\mathrm{R}}/H_2=6.03\pm1.29\ ,\ D_{\mathrm{R}}/H_2=6.03\pm1.29\ ,\ D_{\mathrm{$

7.60 ±2.5 , $\theta_{\rm R}$ =29.3 ± 2.0 °となっている.これにより , H_2 =20-30mmでは $L_{\rm R}/H_2$, $D_{\rm R}/H_2$ には差がないことが分かった .

また,同試験で得られた D_R/L_R は, H_2 =20mmでは D_R/L_R =1.3±0.18, H_2 =30mmでは D_R/L_R =1.3±0.69,となっ ており,こちらも差が見られていない.

4.表層岩盤に発達する亀裂の配置

(1) リーデルせん断, P₁ せん断発達時の配置¹⁾

リーデルせん断及び P_1 せん断が発達している時点 での配置で,考えられるタイプを図-9 に示す.図中 の太矢印は,基盤断層の動きを,それぞれの亀裂脇の 矢印は亀裂発達後の岩盤脇の動きを,一点破線は基盤 断層の線を,実線はリーデルせん断を,点線は P_1 せ ん断をそれぞれ示したものである.また上の P_1 せん 断を P_1 -a,下の P1 せん断を P_1 -b とする.この配置は,3 本のリーデルせん断にはさまれた P_1 -a, P_1 -b が断層線を横 断するかしないかで分類した.

参考文献¹⁾において,ベクトルの不適合ゾーン(運動 学的に不適合な状態であるゾーン)の位置により出現し うるタイプ(-A, -B, -A, -B)とそうでないタイプ があることが分かっている.本報では,P₁せん断発達 以降の分類にも役立つ情報を得るべく,さらなる検討 を加えた.

出現しうるタイプの例として -A,出現しないタイ プの例として -Cを挙げる.図-10のように,P₁-bの領 域で,リーデルせん断が断層線と直交する線をaとし, リーデルせん断とP₁せん断が交わる位置をb,リーデル せん断の終点を通る線をc,P₁せん断の中心を通る線をd …とし,各線上におけるリーデルせん断,P₁せん断の 変位量を計算する.変位量計算に使用した条件を以下 に示す.

・ $\theta_{\rm R}\!\!=\!\!25.0\,^\circ$, $\theta_{\rm Pl}\!\!=\!\!-5.00\,^\circ$, $D_{\rm R}\!/\!L_{\rm R}\!\!=\!\!1.3$ とする .

・図-9中で丸がついた部分で,それを拡大した図-10を この計算の範囲とする.x-y軸は図-10に従う.

・各線a,b,c・・・線上では/=1.00が与えられおり,適合条件 が成り立つとする.

・リーデルせん断の開口は終点では終了していることと する.

・リーデルせん断の変位量をdR, P_1 せん断の変位量をd P_1 とする.

-Aにおける各点での変位の適合式を以下に示す.

- a リーデルせん断のy方向成分がh=1動いている. y: dRcos &=1 より, dR=1.10
- b x: $dRsin\theta_R = dP_1sin\theta_{P_1}$



 $y:dRcos\theta_R+dP_1cos\theta_{P1}=1$

より,dR=0.174,dP1=0.845で,dR:dP1=1:4.86

- c リーデルせん断の終点なので変位せず,dR=0.00 y:dP₁cos₆₁=1より,dP₁=1.00
- d y: $dP_1 cos \theta_{P1} = 1 より, dP_1 = 1.00$
- e リーデルせん断の終点なので変位せず,dR=0.00 y:dP₁cos_{θ1}=1より,dP₁=1.00
- f $x:dRsin\theta_R = dP_1sin\theta_{P1}$ -(2) $y:dRcos\theta_R + dP_1cos\theta_{P1} = 1$ -(3)
- より, dR=0.174, dP₁=0.845

これにより,リーデルせん断またはP₁せん断が単独 で出現している点では,それぞれが亀裂に沿って1.00変 位する.一方,両せん断が現われている場所では,P₁ せん断がリーデルせん断の4.86倍変位する.すなわち, 両せん断が発達していると,hの増加量はP₁せん断に大 きく影響するということが推測できる.

同様に, -Cについて以下に示す.こちらは, P₁-aせん 断の変位量をdP₁-a, P₁-bせん断の変位量をdP₁-bとした.

- a $x:dRsin \theta_R = [dP_1-b]sin \theta_{P_1}$ $y:dRcos \theta_R + [dP_1-b]cos \theta_{P_1} = 1$
- より, dR=0.174, [dP₁-b]=0.845で, dR: [dP₁-b]=1:4.86
- b x: $dRsin\theta_R = [dP_1 a]sin\theta_{P1} + [dP_1 b]sin\theta_{P1}$ y: $dRcos\theta_R + [dP_1 . a]cos\theta_{P1} + [dP_1 . b]cos\theta_{P1} == 1$
- より,dRが存在しない結果となる.(計算略)
- c リーデルせん断の終点なので変位せずdR=0.00 y: [dP₁-b]cos_P=1より, [dP₁-b]= 1.00

- d y: $[dP_1-b]\cos\theta_{P_1}=1$ \sharp \mathcal{I} , $[dP_1-b]=1.00$
- e リーデルせん断の終点なのでdR=0.00 y: [dP₁-b]cos ₀₁=1より, [dP₁-b]=1.00
- f x: $dRsin\theta_R = [dP_1 b]sin\theta_{P_1}$ y: $dRcos\theta_R + [dP_1 - b]cos\theta_{P_1} = 1$
- より, dR=0.174, [dP₁-b]=0.845

これらの変位量の計算から,各線上(a,b,c...)での dR,dP₁が計算できるタイプとそうでないタイプがあるこ とが分かった.

ここで, dR,dP1が計算できた -Aについて, 各線上で 大きな変位量を示している所に丸をつけ, その丸を線 でつないだ.また, このdR,dP1はP1-a上でも同様である ため(計算略), P1-a領域内でも大きな変位量をつないだ. これらをまとめて図-11に示す.

この図-11右図の作成の一連の作業を考えられる全ての配置タイプ(図-9)に行う.すると,図-10右図の形になるのは -A, -B, -A, -Bであり,これは参考文献¹⁾において,出現しうるタイプとしたものと一致する.また,試験結果として見られたものは -A -B -Cである.

以上より,3本の間にはさまれた2本のP₁せん断P₁-a, P₁-bの配置を考えた時に,変位が大きい場所をつないだ 線が図-11右図のようになることがP₁せん断発達時の配 置の条件すなわち出現条件であることが分かった.以 降,これをP-R型とする.

(2)リーデルせん断, P₁せん断, P₂せん断発達時の配置 続いて, リーデルせん断, P₁せん断, P₂せん断の配置に



ついて考える.P₁せん断発達後,P₂せん断がどの位置に 発達するのかによって分類を行った.P₁せん断発達時 点で出現するタイプとして認定した, -AについてP₂ せん断を加えた分類を図-12に示す.

図中太矢印は基盤断層の動きを,それぞれの亀裂脇 の矢印は亀裂発達後の表層岩盤の動きを,破線は基盤 断層の線を,太実線はリーデルせん断を,細実線(赤)は P₁せん断を,そして点線(青)はP₂せん断を表している. また,領域aと領域bに分けた.

ここで,Pせん断に関して(1)から(8)においてP-R型が 含まれているか判断する.例えば,図-12(1)では,P₁せ ん断はP-R型,P₂せん断もP-R型である.しかし,領域a のP₂せん断と領域bのP₁せん断をつないだ線はP-R型では ない.同様に(1)から(8)まで考えると,P₁・P₂せん断の区 別なくP-R型のみ含まれる配置と((2)(3)(4)(7)(8))とそうで ない配置に分類される.

また,これらは領域Aの平行四辺形部と領域Bの平行 四辺形部が接していないという特徴を持つ.図-1の試 験結果と照合してみると,隣り合う平行四辺形部は接 していない.一例なので断定は出来ないが,隣り合う 平行四辺形部が接しない配置を取ることがP₂せん断発 達時の出現の条件であると推測出来る.

5.まとめ

横ずれ断層変位に伴う岩盤表面の変形・破壊形態に 関する知見を得るために,モルタルで作成した人工岩 と凝灰岩に対してそれぞれ二面せん断試験を行った. それぞれのまとめを以下に示す.

人工岩の二面せん断試験について

・断層変位量の増加に伴ってリーデルせん断, P₁せん断, P₂せん断が発達する.

・リーデルせん断の長さと間隔の比は層厚20-30mmでは 変化しない.

・リーデルせん断, P₁せん断の幾何学的な配置は出現す る配置と出現しない配置があり,出現する配置が持つ 特徴をP-R型とした.

・そのP-R型を用いてP2せん断発達時の配置に関しても分類を行った結果,隣り合う平行四辺形部が接しない配置をとることが推測された.

凝灰岩の二面せん断試験について

・断層変位量の増加に伴って,人工岩とは異なった破壊の様子を示す.今後さらなる検討が必要である.

参考文献

1)佐藤あすみ,谷和夫,澤田昌孝: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,第36回岩盤力 学に関するシンポジウム講演論文集,CD-ROM 2)佐藤あすみ,谷和夫,澤田昌孝:横ずれ断層運動に伴う岩 盤表面の破壊形態に関する模型実験と2005年パキスタ ン地震で出現した地表地震断層との比較,第42回地盤工 学会研究発表会平成19年度発表講演集,CD-ROM 3)澤田昌孝,上田圭一,小早川博亮,金谷守,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, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集,CD-ROM

Experimental study on cracks in rock mass overlying strike-slip fault

Asumi SATO, Kazuo TANI and Masataka SAWADA

Investigation into fault for construction of high-level radioactive waste disposal facilities is expected efficient and precision.

For this purpose, it's necessary to elucidate deformation and fracture in rock mass overlying strikeslip fault. In this study typical model tests were conducted using mortar and tuff. A systematic pattern of racks are observed so model of species, arrangement of different types of cracks in rock mass ovelying strike-slip fault are proposed.