

塩ノ平断層破砕帯と車断層破砕帯の 物性試験結果

西脇 隆文^{1*}・小川 浩司¹・青木 和弘²・吉田 拓海²

¹応用地質株式会社 エネルギー事業部（〒336-0015 埼玉県さいたま市南区太田窪二丁目10-9）

²国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 建設部（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2-4）

*E-mail: nishiwaki-takafu@oyonet.oyo.co.jp

断層破砕部のボーリングコア採取自体およびそれを用いた室内試験の難しさから、断層破砕部の室内試験での物性データは報告例が少ない。筆者らは2011年4月11日に発生した福島県浜通り地震の際に活動した塩ノ平断層（塩ノ平地点）とその南方に位置し活動しなかった車断層（水上北地点）で断層を貫いたボーリングコア（掘進長約30m）を用いて各種室内試験を行った。その結果、断層破砕部の試料は母岩である結晶片岩に比べて低い強度定数、弾性定数を示した。また、断層面を構成する断層ガウジと、その周辺のカタクレサイトでは物性が異なること、断層ガウジの物性は断層面に働く応力状態が重要であることなどが分かった。断層破砕帯物性の理解のためには、今後さらなるデータの蓄積が必要である。

Key Words : laboratory experiment, fault damage zone, borehole core, Shionohira fault, Kuruma fault

1. はじめに

内陸活断層に沿って繰り返し生じる地震活動を、広域応力場の下での断層破砕帯のせん断破壊ととらえた場合、断層破砕帯の持つ物性値についての理解は断層活動性評価を考える上で重要である。岩石の物性値を調べる手段の一つとして、ボーリングコア（以下コアと略記）を用いた室内試験が挙げられるが、断層破砕部のコア採取自体およびそれを用いた室内試験の難しさから、断層破砕部の室内試験での物性データは世界的にも報告例が少ない。筆者らは2011年4月11日に発生した福島県浜通り地震の際に活動した塩ノ平断層（塩ノ平地点）とその南方に位置し活動しなかった車断層（水上北地点）で断層を貫く浅層ボーリング（掘進長約30m）を行い、ほぼ100%の採取率でコアを得ることができた¹⁾。これらのコアを用いて各種物理試験、透水試験、超音波速度測定、三軸圧縮試験、一面せん断試験を行い、両地点での断層破砕部の物性を測定したのでその結果を報告する。

2. 試料採取

室内試験に使用したコアは、塩ノ平地点で掘削したSFS-1孔及びSFS-2孔の2孔、水上北地点ではMFS-1孔、

MFS-2孔及びKMK-2孔の3孔で採取されたものである¹⁾。いずれの孔も断層破砕部を挟んで上盤側が堆積岩、下盤側は結晶片岩からなる。堆積岩は粗粒・細粒砂岩を主とし、一部で閃緑岩、結晶片岩の礫からなる礫岩が認められる。断層破砕部はカタクレサイト、断層角礫、断層ガウジからなり、断層破砕部の母岩は結晶片岩である（図-1）。結晶片岩は緑色～暗灰色を呈し、片理が発達する。これらのコアは、掘削から数年が経過したもので乾燥しており、乾燥クラックやスレーキングが生じている。試料採取は、地質ごとにコア上で特異な性状を示す箇所や劣化している箇所を避け、試験種別ごとに同様の性状を示す試料を採取するように確認しながら行った。

3. 試験方法

実施した室内試験とその数量を表-1に示す。供試体はコア性状から、砂岩からなる供試体のみ直径50mmに整形し、断層破砕部、結晶片岩からなるコアはコア径（直径60～70mm）のまま試験に供した。透水試験および三軸圧縮試験は飽和させた供試体で行い、その他の試験は湿潤させた供試体で行った。各試験は透水試験と一面せん断試験以外は、表-1に示す基準に沿って実施した。

透水試験はJIS A 1218 2009「土の透水試験方法」を参

考に、三軸圧縮試験機を用いて、フローポンプ法または変水位法で実施した。一面せん断試験は、JGS 2541-2008「岩盤不連続面の一面せん断試験方法」を参考に、多段階一面せん断試験を実施した。試験ははじめに垂直ばね係数を求めるために繰り返し載荷試験を実施し、その後、

せん断試験を実施した。供試体の数が限られるため、複数の垂直応力下でせん断試験を実施し、さらに同一の供試体を用いてもう一度同じ条件で試験を実施した。

4. 試験結果

(1) 物理試験

密度試験、吸水及び有効間隙率試験、土粒子の密度試験で得られた物性値を表-2に示す。このうち、吸水及び有効間隙率試験では、水浸させた多くの試料が泥状化したため、参考値としている。

密度は堆積岩で $2.0\sim 2.1\text{g/cm}^3$ 、結晶片岩で $2.6\sim 2.7\text{g/cm}^3$ 、断層破碎部で $2.5\sim 2.6\text{g/cm}^3$ を示し、堆積岩でやや低い値をとる。間隙率は、堆積岩で $26\sim 27\%$ 、結晶片岩で $5\sim 7\%$ 、断層破碎部で $10\sim 11\%$ 程度である。

(2) 超音波速度測定

超音波速度測定により得られた動せん断弾性係数 G_d 、動弾性係数 E_d 、動ポアソン比 ν_d の平均値を表-3に示す。塩ノ平地点、水上北地点のどちらにおいても、断層破碎部の動せん断弾性係数 G_d 、動弾性係数 E_d は母岩である結晶片岩より小さい値を示す。動ポアソン比 ν_d は、断層破

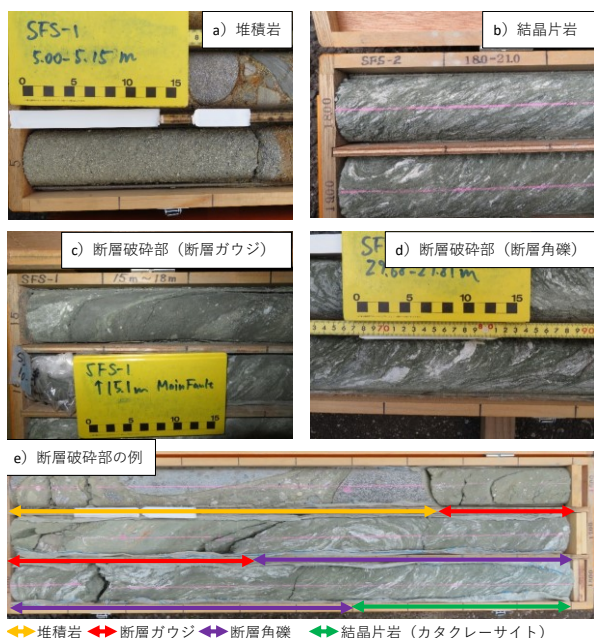


図-1 採取試料の接写写真

表-1 実施試験数量一覧

試験方法	準拠した試験基準	物性項目	試験数量（供試体）						合計数量
			塩ノ平地点			水上北地点			
			堆積岩	断層破碎部	結晶片岩	堆積岩	断層破碎部	結晶片岩	
密度試験	JGS 2132-2009	単位体積重量 （密度） ρ_t	6	9	6	6	9	6	42
吸水及び有効間隙率試験	KDK S-0501	間隙率 n	3	3	3	3	3	3	18
含水比試験	JGS 2134-2009		6	9	6	6	9	6	42
土粒子の密度試験	JIS A 1202-2009		1	1	1	1	1	1	6
超音波速度測定	JGS2110-2009	動せん断弾性係数 G_d	6	6	6	6	6	6	36
		動弾性係数 E_d							
		動ポアソン比 ν_d							
透水試験	JIS A 1218-2009※	透水係数 k	2	2	2	2	2	2	12
三軸圧縮試験（CU条件）及びポアソン比測定	JGS 2533-2009	剛性率 G	4	4	4	4	4	4	24
		変形係数 E_{50}							
		ポアソン比 ν							
		せん断強度 c							
		内部摩擦角 ϕ							
一面せん断試験	JGS2541-2008※	ダイレーション角 d_n	-	2	-	-	1	-	3
		せん断バネ係数 k_s							
		垂直バネ係数 k_n							
		せん断強度 c							
		内部摩擦角 ϕ							

※基準を参考に試験方法を変更

表-2 各種物理試験結果

試験方法	物性項目	試験対象					
		塩ノ平地点			水上北地点		
		堆積岩	結晶片岩	断層破砕部	堆積岩	結晶片岩	断層破砕部
密度試験	密度 ρ_t (g/cm ³)	2.046	2.624	2.548	2.088	2.689	2.530
吸水率及び有効間隙率試験	有効間隙率 n_e (%)	参考値 46.9	4.1	参考値 30.2	参考値 40.4	5.3	6.9
土粒子の密度試験等	間隙率 n (%)	26.4	7.4	10.6	26.6	4.6	10.9

表-3 超音波速度試験結果

物性項目	試験対象					
	塩ノ平地点			水上北地点		
	堆積岩	結晶片岩	断層破砕部	堆積岩	結晶片岩	断層破砕部
動せん断弾性係数 G_d (MPa)	234	6520	2830	783	10500	5180
動弾性係数 E_d (MPa)	560	16700	7280	1960	26900	13300
動ポアソン比 ν_d	0.195	0.283	0.285	0.254	0.284	0.297

砕部と結晶片岩は同程度であった。断層破砕部と結晶片岩はばらつきが大きく、割れ目などの影響を受けていると考えられる。

(3) 透水試験

透水試験により得られた各箇所の透水係数 k の平均値を表-4に示す。また、密度と透水係数の関係で全結果を比較した図を図-2に示す。塩ノ平地点の試料では、堆積岩の透水係数が大きく、結晶片岩と断層破砕部は同程度であった。水上北地点の試料では、堆積岩の透水係数が大きく、結晶片岩と断層破砕部は同程度で、やや断層破砕部の方が大きかった。同じ岩では塩ノ平地点に比べ水上北地点の方が透水係数は小さく、全般に密度が大きいほど透水係数は小さくなっている。

(4) 三軸圧縮試験(CU条件)

三軸圧縮試験より得られた各種物性値を表-5に、圧密応力と変形特性の関係を図-3に示す。三軸圧縮試験の $c \cdot \phi$ を除く物性値については、試料ごとの物性値を比較するために、それぞれの試験結果から算出した回帰式をもとに、圧密応力0.30MPa相当の値を算出し掲載した。剛性率を算出する際の変形係数については、応力ひずみ曲線の傾向からピーク強度を確認することができるものが多いため、 E_{50} を採用し、ポアソン比 ν を用いて剛性率 G を算出した。

塩ノ平地点では、強度定数の一つであるせん断強度 c が堆積岩で最大であり、続いて結晶片岩、断層破砕部という順であった。剛性率 G 、変形係数 E_{50} は結晶片岩が大きく、堆積岩、断層破砕部の順に小さくなった。非排水条件におけるポアソン比 ν は、断層破砕部、堆積岩、

表-4 透水試験結果

物性項目	試験対象					
	塩ノ平地点			水上北地点		
	堆積岩	結晶片岩	断層破砕部	堆積岩	結晶片岩	断層破砕部
透水係数 (m/s)	4.58×10^{-8}	1.26×10^{-9}	1.12×10^{-9}	6.33×10^{-9}	2.50×10^{-10}	3.20×10^{-10}

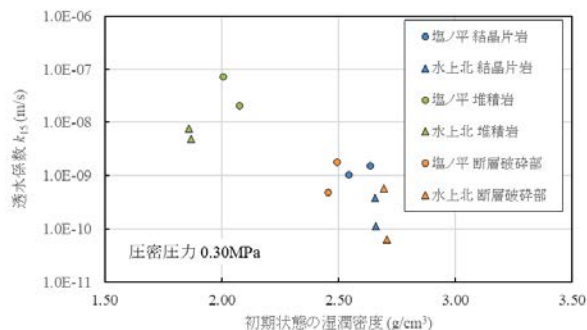


図-2 透水試験結果の比較

表-5 三軸圧縮試験結果一覧

物性項目	塩ノ平地点			水上北地点		
	堆積岩	結晶片岩	断層破砕部	堆積岩	結晶片岩	断層破砕部
剛性率 G (MPa)	31.3	63.0	17.0	30.3	614	32.0
変形係数 E_{50} (MPa)	91.5	183	49.7	87.7	1790	93.3
ポアソン比 ν	0.47	0.47	0.48	0.47	0.47	0.47
せん断強度 c (MPa)	0.302	0.174	0.000	0.010	0.855	0.000
内部摩擦角 ϕ (°)	47.4	40.0	41.3	42.3	58.9	46.1

※三軸圧縮試験の $c \cdot \phi$ を除く値は、試料それぞれの4供試体の回帰式から、圧密応力0.30MPa相当の値を算出し掲載

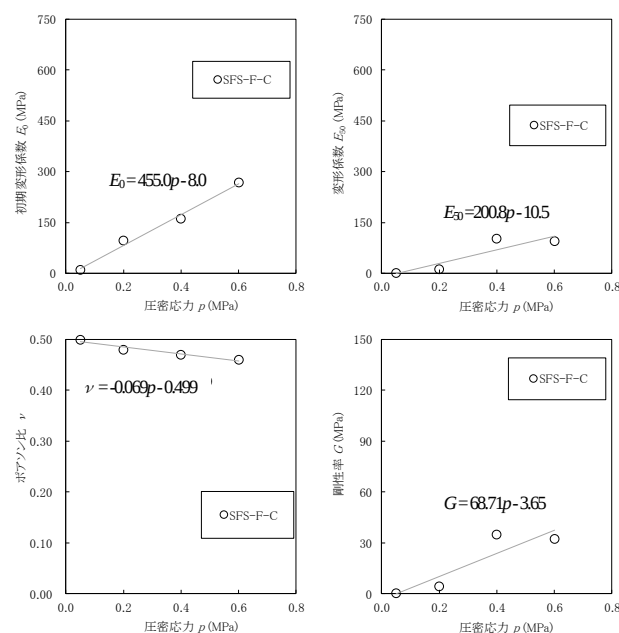


図-3 塩ノ平断層断層破砕部試料の圧密応力と変形特性の関係

結晶片岩のいずれも同程度であった。

水上北地点では、せん断強度 c は結晶片岩で最も大きかった。剛性率 G 、変形係数 E_{50} も結晶片岩が大きく、堆積岩と断層破碎部の剛性には大差なかった。ポアソン比 ν は、断層破碎部、堆積岩、結晶片岩のいずれも同程度であった。断層破碎部において、せん断強度 c は 0 だった。

(5) 一面せん断試験

一面せん断試験より得られた各種物性値を表-6 に示す。試料はせん断面が容易に判別できる、破碎岩片と細粒物質からなる断層ガウジ試料である。試験の際には、せん断面沿いに分離させた状態で試験機にセットした。試料選定の結果、塩ノ平地点で 2 試料、水上北地点で 1 試料を採取し供試体加工した。そのうえで一度の試験に複数の垂直荷重条件でせん断させ、せん断特性の変化を確認する、多段階一面せん断試験を行った。試験後、供試体の変形状況に応じて二回目の多段階一面せん断試験を行った。垂直応力の条件は、供試体の性状によって設定した。

各試験で得られたピーク強度時の垂直応力、せん断応力をプロットすると図-4 のようになる。各試験結果から得られたせん断強度 c と内部摩擦角 ϕ は表-6 に示した。試料ごとにまとめて線形近似することで、試料ごとのせん断強度と内部摩擦角を計算すると図-4 中の近似式になり、せん断強度は 0.05MPa 以下、内部摩擦角は 10~30° の値を示した。

各試験で得られた垂直ばね係数・せん断ばね係数の比較を図-5 に示す。各ばね係数の算出は、せん断箱の間隔を変形層厚と仮定し、試験で得られた垂直剛性、せん断剛性に変形層厚を乗ずることで単位断層幅、単位面積当たりの値 (MPa) を求めた。垂直ばね係数の垂直応力

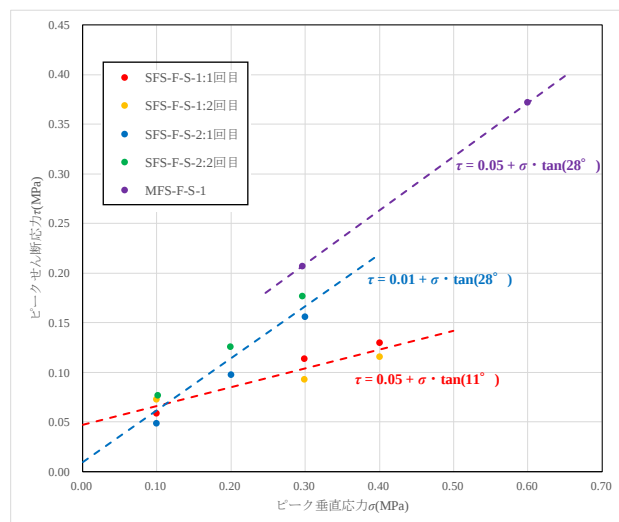


図-4 せん断試験におけるピークせん断応力と垂直応力の関係

依存性は、試料によって程度が異なるが、垂直応力が高いほど垂直ばね係数は大きくなっており、圧力が高いほど試料が圧密を受け、剛性が高くなっていることを示す。各試験では試料の変形度合いによって垂直応力を変えているが、すべての試料で、繰り返し垂直ばね係数が初期垂直ばね係数より大きい値を示す。これは、1 回目の载荷によって試料が圧密を受けたことを示唆する。

せん断ばね係数は塩ノ平地点の試料は各垂直応力に対して 2 回試験を行って求めている。せん断ばね係数は試料によって垂直応力依存性の強いものと弱いものがあるが、垂直応力が大きくなるとせん断ばね係数は大きくなっている。

次に、各試験で得られたダイレーション角の比較を図-6 に示す。ダイレーション角は、試験初期の垂直変位量の増加をせん断変位量で除して求めた。ダイレーシ

表-6 一面せん断試験結果

地点名	供試体番号	試験回数 (回目)	ピーク時				初期 垂直 ばね 係数 k_{n1} MPa	繰り返し 垂直 ばね 係数 k_{n2} MPa	せん断 ばね 係数 k_s MPa	ダイレー ション角 d_n °
			垂直 応力 σ_n MPa	せん断強さ τ_f MPa	せん断強 度 c MPa	内部 摩擦角 ϕ °				
塩ノ平	SFS-F-S-1	1	0.100	0.059	0.036	13.7	0.73	3.97	2.30	14.5
	SFS-F-S-1		0.299	0.114			1.01	6.48	1.01	4.22
	SFS-F-S-1		0.400	0.130			4.89	10.35	5.05	3.06
	SFS-F-S-1	2	0.100	0.073	0.058	7.77	-	-	0.44	11.5
	SFS-F-S-1		0.299	0.093			-	-	2.76	3.35
	SFS-F-S-1		0.400	0.116			-	-	4.56	2.27
	SFS-F-S-2	1	0.100	0.049	0.000	27.0	1.05	1.79	0.29	12.0
	SFS-F-S-2		0.200	0.098			1.29	2.15	0.91	3.07
	SFS-F-S-2		0.300	0.156			1.63	2.36	0.90	2.32
	SFS-F-S-2	2	0.101	0.077	0.025	27.1	-	-	0.73	12.6
	SFS-F-S-2		0.199	0.126			-	-	1.25	8.66
	SFS-F-S-2		0.296	0.177			-	-	1.21	5.36
水上北	MFS-F-S-1	1	0.296	0.207	0.046	28.6	1.02	4.87	1.02	7.40
	MFS-F-S-1		0.600	0.372			1.03	4.87	1.51	-

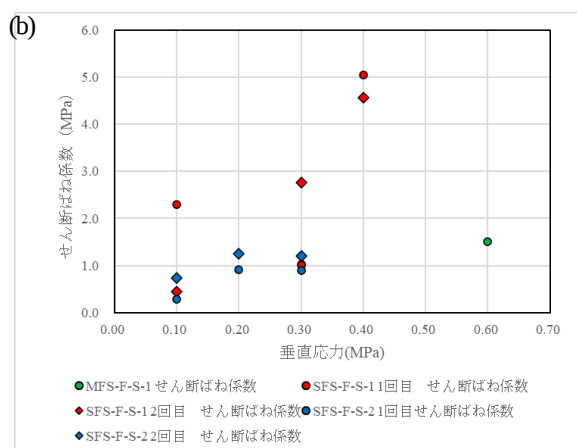
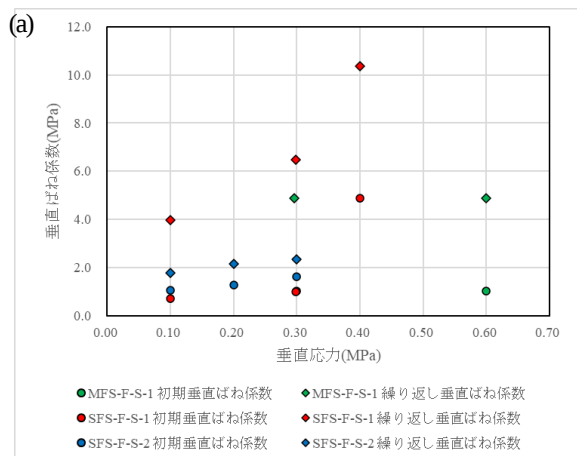


図-5 各ばね係数の比較：

(a) 垂直ばね係数, (b) せん断ばね係数

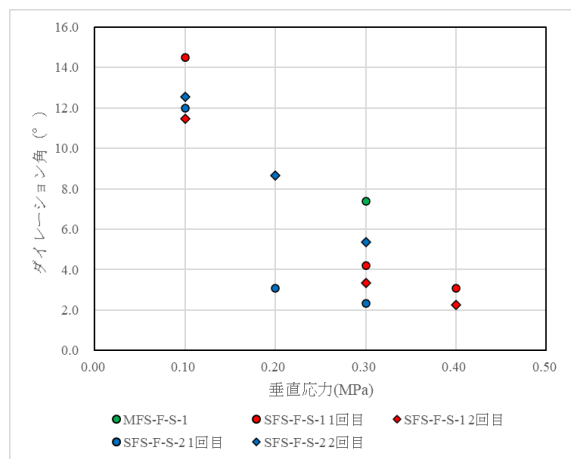


図-6 一面せん断試験におけるダイレーション角

ン角は、垂直応力が増加するにしたがって減少し、垂直応力0.10MPaの時に10～14°，0.40MPaで2～3°を示す。これは、大きな垂直応力が断層面に働くことで試料全体がつぶれるように変形し、せん断による断層面の乗りあがりや抑えられていることを示している。

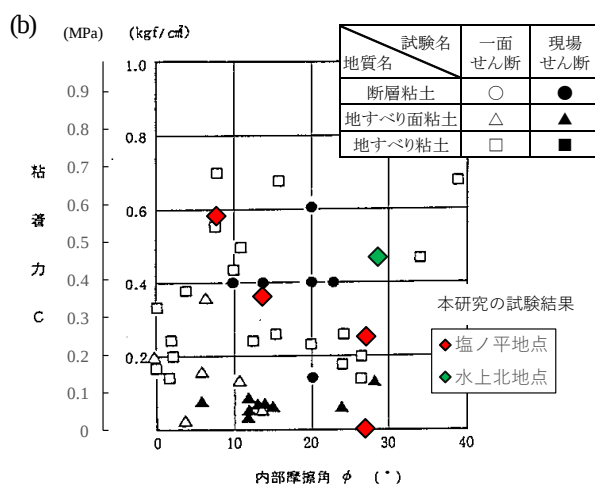
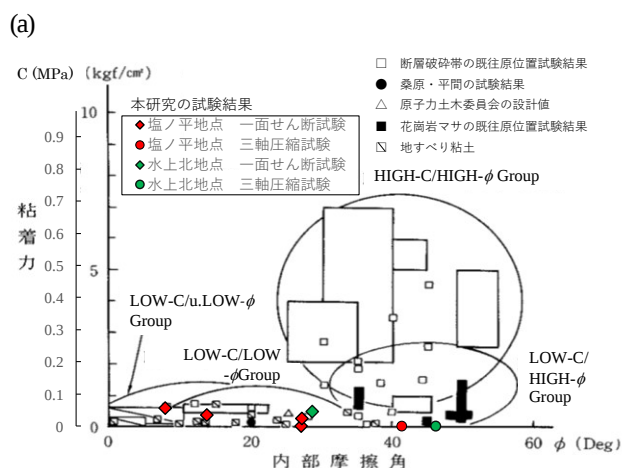


図-7 本研究で得られた断層破砕部の強度特性と既往研究結果の比較 (a) 桑原，平間²⁾, (b) 西，江刺⁹⁾に加筆

5. 既往研究との比較

コアを用いた室内試験による断層破砕部の物性値研究はあまり行われておらず、特に結晶片岩を母岩とする破砕帯研究は桑原・平間²⁾や天田ほか³⁾等ごくわずかである。今回室内試験によって得られた物性値を概観すると、断層破砕部は母岩の結晶片岩と比べて、変形係数や剛性率といった弾性係数やせん断強度、内部摩擦角といった強度定数が低い値を示した(表-5)。この物性の違いの理由は、断層運動によるせん断破壊、地下水の影響等が考えられる。一方、透水係数は断層破砕部と結晶片岩の間で大きな違いは認められず(図-2)、同様の透水特性を持つ。この結果は、佐藤工業⁴⁾における、断層破砕部は母岩よりも透水性が高いという結果とは異なっており、本研究で使ったコアでは、結晶片岩も断層運動の影響を受けて透水係数が大きくなっている、あるいは、断層破砕部が細粒化して透水係数が低下しているなどの影響が考えられる。

強度定数に関しては、桑原，平間²⁾が既往の断層破砕部のせん断強度 c 、内部摩擦角 ϕ の値をまとめている。

この結果に本研究の結果を落としたところ、図-7(a)のようになる。この結果と比較すると、本研究の三軸圧縮試験で得られた c は0、 ϕ は 40° であり、破碎帯の原位置試験で得られているLow c 、High ϕ グループに相当する。これは供試体が断層ガウジのみでなく、断層角礫およびカタクレサイトからなるため、これらの物性を複合した結果が得られたと考えられる。一方、断層ガウジ試料を用いた一面せん断試験で得られた c は0.05MPa以下、 ϕ は $10\sim 30^\circ$ であり、桑原、平間の結果や地すべり粘土で得られているLow c 、Low ϕ グループに相当する。これは断層ガウジ試料が地すべり粘土のような細粒物主体の試料と類似しているためと考えられる。以上から、断層破碎帯の物性を考える際にはこうしたLow c 、Low ϕ の強度特性を持つ断層ガウジが挟在する断層面とその周辺に分布するLow c 、High ϕ の強度特性をもつ断層角礫もしくはカタクレサイトからなるダメージゾーン両方の物性を考慮する必要があるといえる。

西・江刺⁹⁾の一面せん断試験および原位置せん断試験の結果と比較すると(図-7(b))、本研究の結果のうち塩ノ平地点の結果は西・江刺の結果のばらつきの中に含まれることがわかる。一方、水上北地点の結果は、西・江刺の結果と比べてやや内部摩擦角が大きい値を示している。

また、一面せん断試験から各種のばね係数を求めた結果では、断層面に働く応力状態が断層のばね係数に影響すること(図-5)が確認できた。ダイレーション角について、断層ガウジの測定結果はほとんど報告されていないが、硬質な岩盤の不連続面上でのせん断時に測定されるダイレーション角はBarton⁶⁾によるレビューにまとめられている。これによると岩盤では不連続面の状態によって乗りあがりに違いが出るが、不連続面の凹凸が大きい面では $20\sim 30^\circ$ の値を示す。今回の試験では試料が未固結の断層ガウジ試料であったため、試料全体が変形し、

14° 以下の小さな値を示したものと考えられる。

6. おわりに

本研究ではこれまでに報告が少ない断層破碎帯の物性値をコアを用いた室内試験によって求めた。断層破碎帯は、周囲の地質構造、広域応力場、形成過程、活動性などに応じて多様な性状・物性を示す。また、同一の断層においても、その構造や物性は空間的多様性を持ち一様ではない。したがって断層破碎帯の物性について理解するためには、対象断層のテクトニックセッティング、試料の代表性を考慮した上で、得られた物性値とそれらの条件との関係を整理しつつデータを蓄積していく必要があると考える。

参考文献

- 1) 青木和弘, 田中遊雲, 吉田拓海, 島田耕史, 酒井 亨, 亀高正男, 瀬下和芳: 2011 年福島県浜通りの地震で活動した塩ノ平断層と活動しなかった車断層の断層破碎帯の特徴, 応用地質, vol.62, no.2, pp.64-81, 2021.
- 2) 桑原 徹, 平間邦興: 断層破碎帯の工学的物性評価に関する研究, 破碎帯の工学的性質に関するシンポジウム, 発表論文集, pp.27-33, 1992.
- 3) 天田高白, 川上和彦, 渡辺文人: 破碎帯地域の岩石物性に関する考察, 新砂防, vol.44, no6, pp.21-28, 1992.
- 4) 佐藤工業: 断層活動が地下の水理に与える影響に関する調査, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告書, pp.245, 1999.
- 5) 西 好一, 江刺靖行: 断層破碎帯材料の力学的特性, 電力中央研究所報告, no.384033, 1985.
- 6) Barton, N.: Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, vol7, pp. 287-332, 1973.

PHYSICAL CHARACTERISTICS OF SHIONOHIRA FAULT DAMAGE ZONE AND KURUMA FAULT DAMAGE ZONE BASED ON LABORATORY TESTS

Takafumi NISHIWAKI, Koji OGAWA, Kazuhiro AOKI and Takumi YOSHIDA

Various physical and mechanical tests were performed on shallow borehole cores (~ 30 m) taken from the activated Shionohira and the non-activated Kuruma faults associated with the April 2011 Fukushima-ken Hamadori earthquake. The results showed 1) low strength constants and elastic constants for the fault damage zone samples compared to the host rocks; 2) different physical properties for fault gouge, fault breccia, and cataclasite of the fault damage zone; and 3) for fault gouge, the importance of considering the stress factor on the fault plane. Data accumulation from various fault damage zones is needed to gain better understanding of the physical properties of the fault damage zone.