

# 断層破砕帯の形成とその特徴

藍檀オメル<sup>1\*</sup>・神立晋弥<sup>2</sup>・太田良巳<sup>3</sup>・坂本泉<sup>4</sup>

<sup>1</sup>琉球大学 工学部 (〒903-0213 沖縄県西原町千原 1)

<sup>2</sup>中電技術コンサルタント (〒735-8510 広島市南区出汐2-3-30)

<sup>3</sup>原子力規制庁 技術基盤グループ (〒106-8450 東京都港区六本木1-9-9)

<sup>4</sup>東海大学 海洋学部 (〒424-8610 静岡市清水区折戸3-20-1)

\*E-mail: aydan@tec.u-ryukyu.ac.jp

地殻を構成する岩盤は変動時に塑性化し、それに伴ってひずみの局所化が発生し、局所化したものが断層破砕帯と呼ばれている。したがって、岩盤には断層破砕帯が多数存在し、断層破砕帯を含まないものはほとんど存在しないであろう。完全に形成された断層破砕帯に亀裂状態が異なる六つの領域が存在する。破砕帯の中心部に粘土コア、その両側に亀裂状況が異なる領域が存在する。それらの亀裂は一般的に、雁行（引張）亀裂（T亀裂）、リーデル（Riedel）亀裂（R-R亀裂）、スケンプトン亀裂（P亀裂）、Y亀裂あるいはD亀裂およびせん断（S）亀裂と分類されている。本論文で断層破砕帯の形成に関連して室内試験と自然界における断層破砕帯の形成とその特徴についてまとめ、幾何学的モデル化に対する基本的な考え方を紹介する。

**Key Words** : fracture zone, shear zone, fault, formation, characteristics

## 1. 序論

岩盤内の断層破砕帯の形成は一般に地殻の構造的な運動に関係している。地殻を構成する岩盤は断層運動時に塑性化し、それに伴ってひずみの局所化が生じている。局所化したものが断層破砕帯と呼ばれ、岩盤中に断層破砕帯が多数存在する。したがって、自然界に断層破砕帯を含まない岩盤はほぼ存在しないであろう。

断層破砕帯の変形・強度特性といった力学特性はそれを囲む周辺岩盤のものに比べ小さく、その評価はかなり困難である。破砕帯を跨ぐような場所で建設される構造物の施工の際に様々な問題が生じていることが報告されている。例えば、トンネルの大変形現象は破砕帯中に施工する際に見られることが多い。また、そのような場所では大量な湧水とそれに伴う崩壊が見られる。大規模な地下空洞の場合にも同様なことも報告されている。

本論文で断層破砕帯の形成に関連して、著者らが実施した室内試験と自然界における断層破砕帯の形成とその特徴について現場調査や既存の情報などをまとめ、幾何学および力学的モデル化に対する基本的な考え方を紹介する。また、岩盤力学および岩盤工学の立場から断層破砕帯の評価の可能性を検討する。

## 2. 断層破砕帯の形成要因と自然界における事例

岩盤内の破砕帯の形成は一般に地殻の運動に関係し、大きな変形を起こした平面的ないしは曲面的な領域として定義される。一般的に、幅に対して比較的長く（長と幅の比が5：1以上）、かつ小さな有限変形状態を示す岩盤によって囲まれている<sup>1)</sup>。断層破砕帯が形成される過程で三つの異なった形成モードが考えられる（図-1）：正断層モード、衝上断層モード、走向移動断層モード。この節で、各形成モードに関して事例も紹介する。事例は近年地震で発生した断層破砕帯も含んでいる。

**正断層モード**は地殻下のマンテルの対流あるいはマグマの上昇による地殻の押し上げのために、地殻が横方向に伸ばされるときに生じる。鉛直応力は一般に最大圧縮応力であり、横方向応力は引張か、低い圧縮応力である。断層破砕帯の下盤におけるものに比べて大きな破砕が上盤に生じる（写真-1）。断層破砕帯破砕の幅が比較的広いにもかかわらず、断層粘土（Gouge: ガウジ）は比較的薄い。

**衝上断層モード**は、大陸縁辺の近くでのプレートの衝突あるいはマグマの上昇による横方向への押し上げの結果として横方向に圧縮されるときに、生じる。横方向応力が一般に卓越した圧縮応力であり、鉛直応力は最小応力である。断層破砕帯の両側に比較的狭い破

砕帯が生じている（写真-2）．それにも拘らず，ガウジの厚みは正断層モードの場合より厚い．

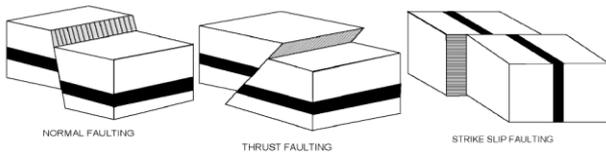


図-1 地殻の運動に伴う断層破碎帯の分類<sup>2)</sup>



写真-1 正断層運動に伴う断層破碎帯の例



写真-2 逆断層運動に伴う断層破碎帯の例

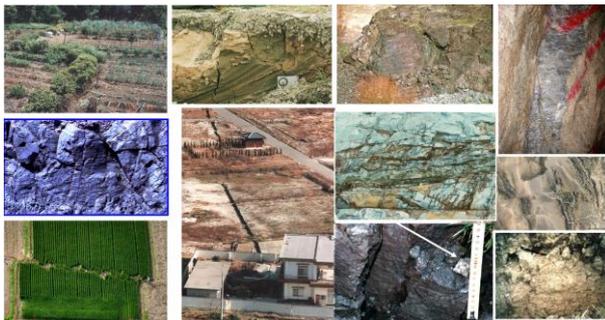
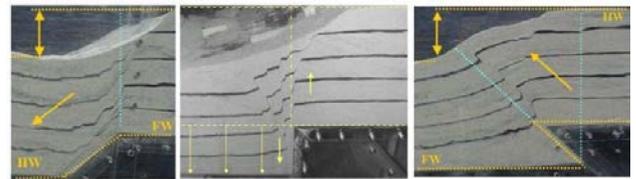


写真-3 横連断層運動に伴う断層破碎帯の例

走向移動断層モードは，地殻の中の横方向応力の一方が最大で，他のものが最小であるときに生じる．そしてこれらは大きな相対水平変位に調和するようにプレートの境界に沿って発展する．断層破碎帯の幅やガウジの存在は深さによって異なる（写真-3）．断層破碎帯は地表面近くで大きく，深度が増すにつれて狭くなる（図-2）．一方，ガウジの厚みは深度に応じて増加する．

### 3. 室内断層試験における断層破碎帯の形成

断層破碎帯の形成を実験的に検討するため，重力場（一定加速度環境）のもとで長さ 780mm、高さ 300mm、奥行き 350mm である観測水槽を製作した<sup>3)</sup>．この水槽の底盤は 2 つのブロックよりなっている．片方のブロックの下に底盤を支える棒があり，この棒はピンによりとめられている．このピンを引き抜くことにより一定の角度で底盤が落下することによって断層運動を再現できる．本実験装置は断層傾斜角・断層変位量を変化させることが可能である（写真-4）．実験装置の落下する底盤の断層変位量は 3.5～100mm の間で変化させて実験をできる．



(a) 45° (b) 90° (c) 135°

写真-4 室内断層試験における断層破碎帯の形成

図-3 は断層変位量を 25～100mm の間で変化させて角度 90°で実施した実験で観察された断層破碎帯の様子を示す．断層変位量 25, 50 の場合では断層真上の斜面は砂の安息角より小さい，断層変位量 100mm の場合には断層真上の斜面が砂の安息角と一致する．各断層変位量に対する断層亀裂の伝達の様子を図-3 に示す．この図より断層亀裂の伝達の様子が明確に見られる．伝達の様子は，4cm 間隔で作成した水平層のずれから見て取ることができる．

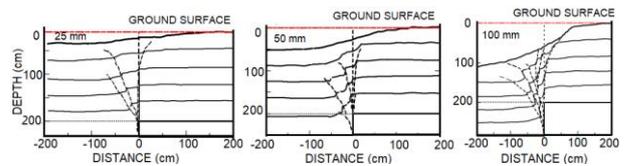
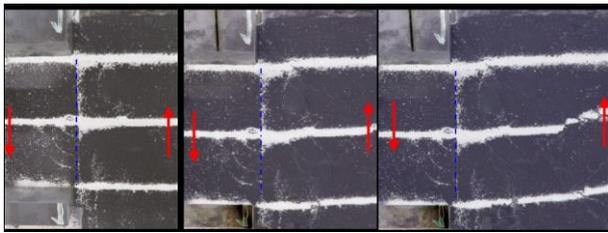
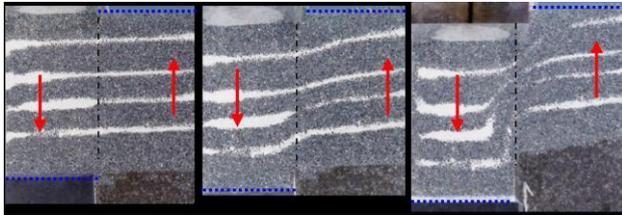


図-2 正断層運動に伴う相対変位の違いによる断層破碎帯<sup>3)</sup>

断層亀裂は複数の線になって左右両方の地盤に発生していることがわかる．伝達した断層亀裂によって水平層が階段状の変形形態を示している．断層発生後は地表に緩やかな坂が形成されている．その傾斜は最大安息角に等しい．また，運動する側の地盤(上盤)に発生している亀裂の様子は逆断層運動に近いが動かない側の地盤(下盤)内に発生する亀裂の様子は正断層に類似している．さらに，運動する側の地盤が動かない側の地盤に対して破断・変形した領域が大きいことを判断できる．



(a)粘着性のせん断試験



(b)粒状体のせん断試験

写真-5 横連運動による室内試験における断層破碎帯の形成

一定速度環境で底面摩擦実験を用いて粘着性と粒状体の材料に対する横ずれ断層運動による断層破碎帯の形成例を示す。運動する片側の供試体はほぼ剛体運動するように実験を実施した。粘着性の材料の場合複数亀裂が形成されているが粒状体の材料の場合、明確の亀裂があらわれていない。しかし、相対変形量の約0.7倍まで変形帯が形成されている。

#### 4. 室内圧縮・せん断試験による断層破碎帯の形成

##### (1) 室内圧縮試験

室内圧縮試験に関して実験は、国内の名古屋大学 (NU)、東海大学(TU)、豊田工業高等専門学校(TNCT)、および琉球大学(RU)の4研究機関とトルコの Middle East Technical University (METU)と Hacettepe University (HU) の計6研究機関の岩盤工学研究室で行った<sup>4)</sup>。NU, TU, TNCT および RU の圧縮試験機は最大2,000kNの積載能力がある試験機である。一方、METUの圧縮試験機は最大積載荷重2,000kNのサーボ操縦装置の高剛性の試験機である。琉球大学でさらに衝撃試



写真-6 室内圧縮試験における断層破碎帯の形成

験装置を所有している。

実験に用いた岩石材料は、琉球石灰岩(Ryukyu limestone)、凝灰岩(tuff)、花崗岩(granite)、閃緑花崗岩、斑岩(porphryte)、安山岩(andesite)、砂岩(sandstone)などである。写真-6に一軸圧縮実験に観察された破碎帯の様子を示す。

##### (2) 室内せん断試験

###### a) 一面せん断試験

Aydanら(1994)<sup>5)</sup>が開発したせん断試験機を動的せん断試験もできるように改善した<sup>6)</sup>。鉛直荷重およびせん断荷重の最大値は、200 kNであり、供試体のサイズは2種類で、100×100×100mmあるいは150×75×75mmである。写真-7はそれぞれのサイズの供試体を用いて凝灰岩に発生する破碎帯の形成例を示す。



(a) 船生石

(b) 大谷石

写真-7 一面せん断試験における破碎帯の形成の様子

###### b) 二面せん断試験

写真-8に示すように、二面せん断試験用の専用治具を作成した<sup>7)</sup>。この試験で使用する供試体寸法は30×30×100mmである。二面せん断試験用治具は供試体中央部40mm範囲を治具重錘で押し抜いてせん断する仕組みになっており、載荷前に破断部の両境界を固定し治具重錘を載せた上で試験を行う。また、供試体両側面より拘束圧を10kNまで作用させた状態でせん断試験することが可能である。この治具を利用して静的および衝撃荷重による二面せん断試験した。衝撃試験に新たに開発した落下衝撃試験機(新型:OA-STD500X)

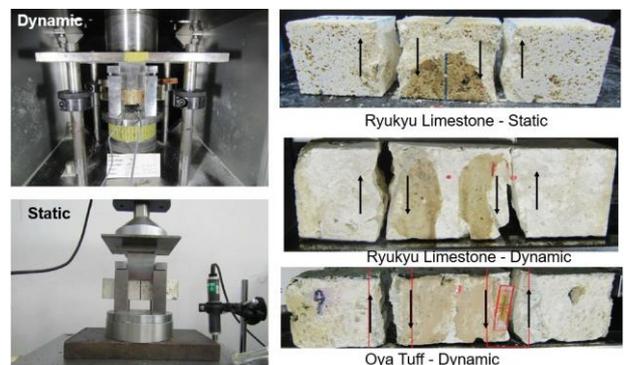


写真-8 静的および衝撃荷重下で淡石(琉球石灰岩)の二面せん断試験における破碎帯の形成の様子

を用いた。木町砂岩、大谷石および琉球石灰岩(サンゴ質・淡石質)を用いて二面せん断試験を衝撃および静的荷重環境で行った。写真-8に琉球石灰岩(サンゴ質・淡石質)を用いて行った二面せん断試験による破砕帯の形成状況を示す。

### 5. 断層破砕帯内の亀裂パターン

図-3に断層破砕帯に可能な破壊とそれらの方向を示す。これらの亀裂は次のように名付けられている<sup>129)</sup>：

- 雁行(引張)亀裂(T亀裂)：これらは純粋に伸張タイプのひずみによるものであり、最大主応力の平行に発展する。
- リーデル亀裂(R-R'亀裂)：これらの亀裂は共役セットとして生じ、最大主応力に対して $45-\phi/2$ の角度を持つ。
- スケンプトン亀裂(P亀裂)：Skempton<sup>10)</sup>が、R亀裂と共役な亀裂もまた生じるとして、この亀裂を衝上せん断破壊と呼んでいる。
- Y亀裂あるいはD亀裂：これらの亀裂は大きい相対変位を起こすようなせん断方向に平行に生じる。
- 劈開(SあるいはX)：劈開あるいは片理のような亀裂は最大主応力に垂直に生じる。

上記の全ての亀裂の発生がどの断層破砕帯においても観察されるというものではない。図-4および図-5に示すようにそれらは相対変位量や母岩の力学的および物理的特性に関してお互いに共役的である場合がしばしばある。

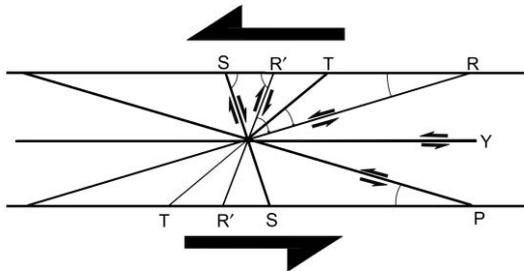


図-3 断層破砕帯にみられる亀裂の分類<sup>1,2,9)</sup>

表-1 断層破砕帯にみられる亀裂の方向

T亀裂	R亀裂	R'亀裂	P亀裂	Y(D)亀裂
45	10-30	60-75	160-170	175-180

### 6. 断層破砕帯の厚み

断層破砕帯の厚みは破壊形成の結果としてのエネルギー消散量と破砕帯内の相対変位に関する。Aydm<sup>11)</sup>

および Aydm & Johnson<sup>12)</sup>は、砂岩の破砕帯の厚みと相対変位との関係についていくつかの現場観測と計測を行っており、図-6に観測結果を示す。その後、断層破砕帯の厚みと相対変位の関係について新しいデータが集められ、多くの研究者によって纏められている<sup>13,14,15)</sup>。今までの観察結果と著者らが収集した結果を図-7および図-8に示す。推測されるように、断層破砕帯の厚みは相対変位の増加につれて増える。データは一つの帯の中で分布している。この帯の幅は恐らく岩種に関係しているものと思われる。また、断層破砕帯コアと呼ばれる粘土を含む部分と断層破砕帯の厚みの関係を図-8に示す

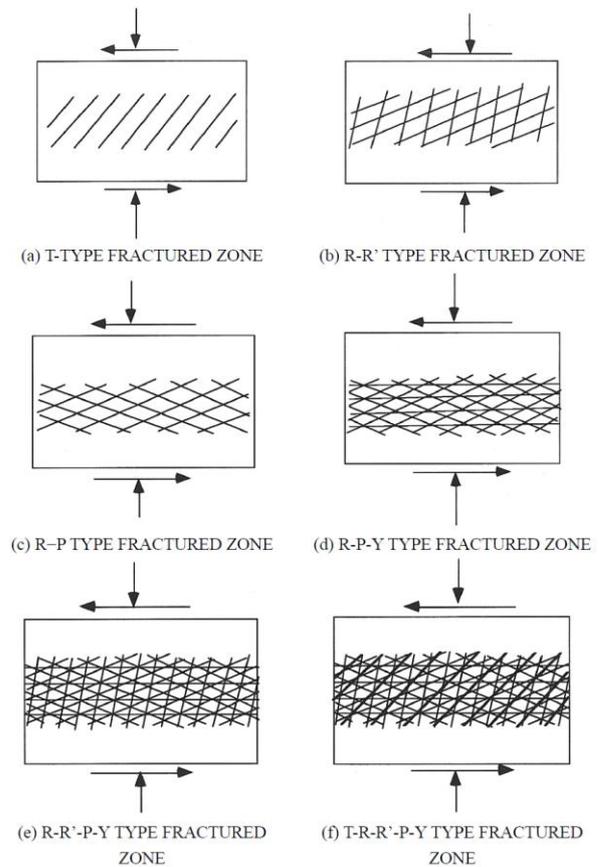


図-4 相対変位量や母岩の力学的および物理的特性に関して断層破砕帯の亀裂状況

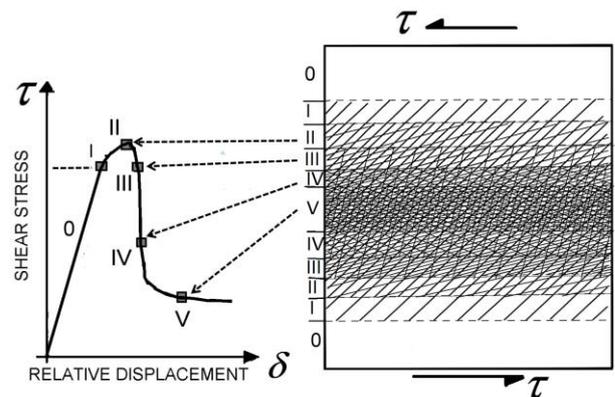


図-5 完全に完成した断層破砕帯にみられる亀裂状況

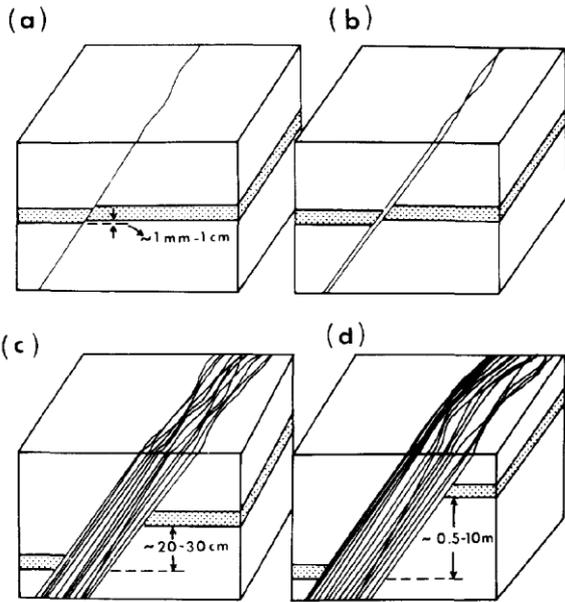


図-6 砂岩の破碎帯の厚みと相対変位との関係<sup>1)</sup>

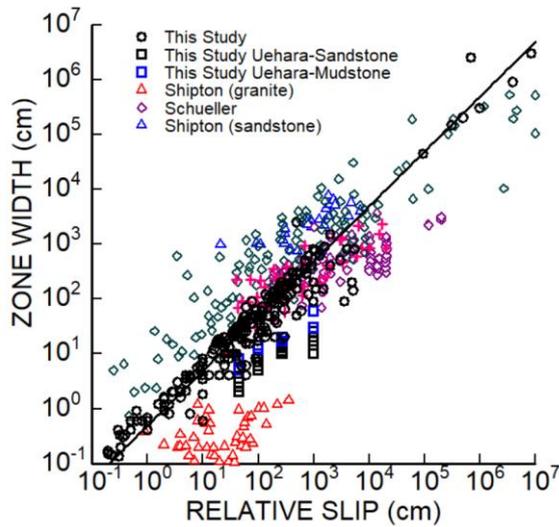


図-7 断層破碎帯の厚みと相対変位の関係

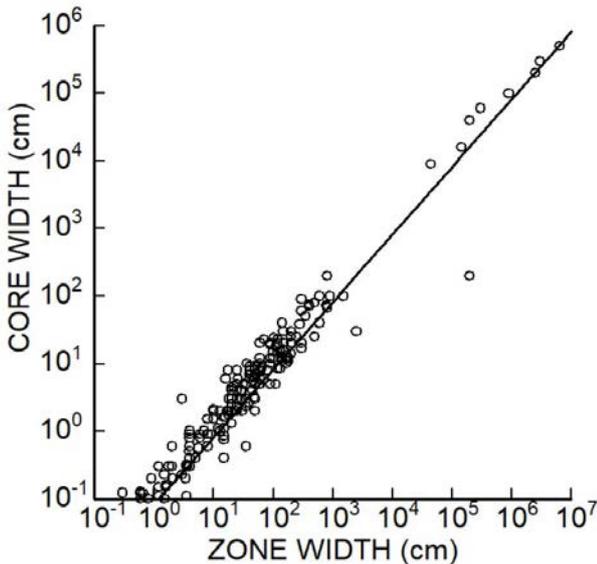


図-8 断層破碎帯の厚みと粘土コアの厚みの関係

## 7. 断層破碎帯表面形状

断層破碎帯の表面形状はその力学特性、透水性および熱特性などに大きな影響を与えている。図-3から図-8までに見られるようにその幾何学形状は相対変位とその性質によって異なっている。さらに、相対ずれに伴い発生する高温<sup>17,18)</sup>で断層破碎帯に再結晶化現象が現れ、その影響は深度によって大きいと思われる。

図-9に沖縄県で見られる正断層、逆断層および横ずれ断層における破碎帯の例を示す。図-9より断層破碎帯の破碎状況、ガウジの厚み、粘土の種類および周辺の岩盤の破片の含量など異なっていることが見受けられる。特に断層破碎帯の様々な特性を評価する際に、粘土分以外の部分の特性もしっかり考慮すべきことを示す。現段階で岩盤力学の分野で断層破碎帯の評価手法がまだ確立されていない。今後、相対変位量、周辺母岩の性質、断層発生機構を考慮して、断層破碎帯の表面形状の評価法の確立が不可欠である。

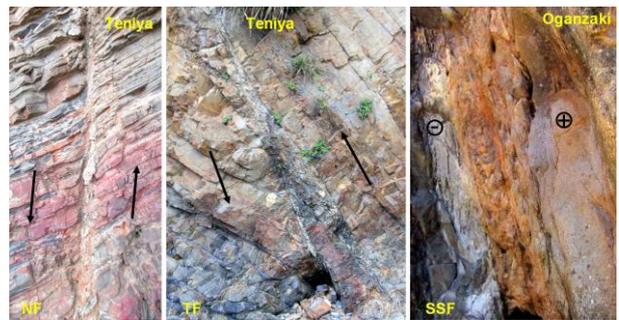


図-9 沖縄県における各種正断層の層断層破碎帯の例

## 8. 断層破碎帯の評価

Aydanら<sup>15)</sup>は断層破碎帯を含む岩盤の様々な状態を定量的に評価できる新し岩盤分類を提案した。この岩盤分類はRMQR (Rock Mass Quality Rating) と呼ばれている。この岩盤分類を図-4を考慮して図-5に示した6つの状況に適用した際のRMQRの値は表-2のようになる。また、Q値およびRMRの岩盤分類を適用した際の値も表-2に示した。岩盤等級Vは断層破碎帯の粘土コアと呼ばれている部分に該当すると解釈できる。

表-2: 各種岩盤分離による断層破碎帯の岩盤等級

岩盤分類	0	I	II	III	IV	V
Q-Value	533	79.2	8.33	1.03	0.11	0.0033
RMR	100	89	71	52	31	8
RMQR	100	82	64	43	21	0-5

## 9. 結論

本論文で断層破砕帯の形成に関連して、様々な室内試験と自然界における断層破砕帯の形成とその特徴についてまとめた。断層破砕帯に亀裂状態が異なる六つの領域が形成され、その中心部に粘土コアが存在する。それらの亀裂は一般的に、雁行（引張）亀裂（T亀裂）、リーデル（Riedel）亀裂（R-R亀裂）、スケンプトン亀裂（P亀裂）、Y亀裂あるいはD亀裂およびせん断（SあるいはX）亀裂と分類されている。断層破砕帯の相対変位量と破砕帯幅と断層破砕帯厚みと粘土コア厚みの間に線形的な関係が認められる。室内試験結果と自然界における観察結果は同様な傾向を示す。また、岩盤力学および岩盤工学の立場から断層破砕帯の評価の可能性を検討し、既存の岩盤分類法（例えばRMQR）を適用できることが明らかになった。

## 参考文献

- 1) Ramsay, J.G. and Huber, M.I.: The Techniques of Modern Structural Geology. London, *Academic Press*, 1987.
- 2) Aydan, Ö.: Ground motions and deformations associated with earthquake faulting and their effects on the safety of engineering structures. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Springer, R. Meyers (Ed.), 3233-3253. 31, 2012.
- 3) 太田 良巳：地震断層近傍における地震動および地盤の変形挙動による土木構造物への影響に関する基礎的研究。東海大学大学院博士委論文, p.233, 2011.
- 4) Aydan, Ö., Ohta, Y., Daido, M., Kumsar, H. Genis, M., Tokashiki, N., Ito, T., Amini, M.: Chapter 15: Earthquakes as a rock dynamic problem and their effects on rock engineering structures. *Advances in Rock Dynamics and Applications*, Editors Y. Zhou and J. Zhao, CRC Press, Taylor and Francis Group, 341-422, 2011.
- 5) Aydan, Ö., T. Akagi, H. Okuda, T. Kawamoto. The cyclic shear behaviour of interfaces of rock anchors and its effect on the long term behaviour of rock anchors. *Int. Symp. on New Developments in Rock Mechanics and Rock Engineering*, Shenyang, 15-22, 1994.
- 6) Aydan, Ö., N. Tokashiki, J. Tomiyama, N. Iwata, K. Adachi, Y. Takahashi. The Development of A Servo-control Testing Machine for Dynamic Shear Testing of Rock Discontinuities and Soft Rocks, *EUROCK2016*, Ürgüp, 791-796, 2016.
- 7) Kodate, S.. A Fundamental Study on the Dynamic Deformation and Fracture Characteristics of Rocks under Shock Loads. *Master Thesis*, 140p, University of the Ryukyus, Okinawa, Japan, 2021.
- 8) Aydan, Ö., Kodate, S. and Iwata, N.. A New Double Shearing Testing Equipment for the Shear Behaviour of Rocks and Discontinuities under Static and Shock Loads. *European Rock Mechanics Symposium, EUROCK2021*, Torino, 8p, 2021.
- 9) Scholz, C.H., N.H. Dawers, J.Z. Yu, M.H. Anders. Fault growth and fault scaling laws: preliminary results *Journal of Geophysical Research*, AGU 98(B12), 21,951-21,961, 1993.
- 10) Skempton, A.W. Some observations on tectonic shear zones. *Proc. of International Congress on Rock Mechanics*, ISRM Lisbon, 1,329-335, 1966.
- 11) Aydın, A. Small Faults Formed as Deformation Bands in Sandstone. *Pure and Applied Geophysics*, 116, 913-930, 1978.
- 12) Aydın, A. and A. M. Johnson. Developments of faults as zones of deformation bands and as slip surfaces in sandstone. *Pure and Applied Geophysics*, 116, 931-942, 1978.
- 13) Haggert, K., S.J.D. Cox, M.W. Jessell Observation of fault gouge development in laboratory see-through experiments *Tectonophysics* 204,123-136, 1992.
- 14) Shipton Z. K. and P. A. Cowie. Damage zone and slip-surface evolution over  $\mu\text{m}$  to km scales in high-porosity Navajo sandstone, Utah, *J. Struct. Geol.*, 23, 1825-1844, 2001.
- 15) Schueller, S., Braathen, A., Fossen, H. and Tveranger, J. Spatial distribution of deformation bands in damage zones of extensional faults in porous sandstones: Statistical analysis of field data. *J. Structural Geology*, 52 148-162, 2013.
- 16) Aydan, Ö., Ulusay, R. & Tokashiki, N.. A new rock mass quality rating system: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses. *Rock Mech Rock Eng* 47: 1255-1276, 2014.
- 17) Aydan, Ö.. Time dependency in Rock Mechanics and Rock Engineering. *CRC Press*, 246p, 2017.
- 18) Aydan, Ö.. Continuum and Computational Mechanics for Geomechanical Engineers. *CRC Press*, 324p, 2021.

## FORMATION OF FAULT/SHEAR ZONES AND THEIR CHARACTERISTICS

Ömer AYDAN, Shinya KODATE, Yoshimi OHTA and Izumi SAKAMOTO

Fault/shear zones may cause very severe engineering problems such as heavy water in-flow, squeezing, instability and they may be pathways for leakage of radio-active wastes to the environment. In this study, the main causes of fault/shear formation and some actual examples are described. Then, the results of several experimental programs undertaken on the formation of fault/shear zones are presented. Finally, some proposals have been done how to characterize the geometry, fracturing, morphology and internal structure of fault/shear zones and some examples are given using some rock classifications.