

地表地震断層の特性及び出現条件の整理と課題

朝比奈 大輔^{1*}・清木 隆文²・清田 亮二³・董 勤喜⁴・オノ木 敦士⁵・吉田 淳⁶

¹産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門（〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1）

²宇都宮大学大学院 地域創生科学研究科（〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2）

³中電技術コンサルタント株式会社（〒734-8510 広島県広島市南区出汐2-3-30）

⁴株式会社エデュサイエンス総合研究所（〒214-0033 神奈川県川崎市多摩区東三田3-10-1-524）

⁵熊本大学 先端科学研究部（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2-39-1）

⁶サンコーコンサルタント株式会社（〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9）

*E-mail: d-asahina@aist.go.jp

地表に変位を生じる地表地震断層は、土木建築構造物に甚大な被害をもたらすため、その出現要因を理解することが重要である。地表地震断層については、これまでに様々な検討がされており、特に地震の規模を示すマグニチュードと地震断層の出現率について多くの研究事例がある。地表地震断層に影響を与える要因は、地震の規模以外にも考えられるが、それらについて整理した研究は少ない。

本研究では、地表地震断層の出現条件について、既往研究を基に整理し、課題を明確にすることを目的とする。地表地震断層の素因として、特に、地震の規模、表層地盤の厚さ、断層の傾斜、断層帯の幅、断層タイプ、断層に作用する力について整理した。

Key Words : *surface rupture, geohazard, earthquake, fault*

1. はじめに

地震は、地下の岩盤のずれによる破壊が生じることにより起こる現象である。特に、岩盤のずれによる食い違いが地表に現れた場合、これを地表地震断層と呼ぶ。地表地震断層は、地震動だけでなく表層地盤に変位を生じさせるため、地表の土木建築構造物に甚大な被害をもたらす。地表地震断層の形態は、断層の規模や、地形・地質条件の違いなど様々な要因によって決まる。したがって、地表地震断層の特性を把握しその出現要因を理解することは、地表地震断層による災害を軽減する上で重要である。

Avar and Hudyma(2019)は、地表地震断層による被害を低減するために、(i)断層の変位が地表に到達する可能性、(ii)地盤変位の推定、そして(iii)断層－表層地盤－構造物の相互作用を、地表地震断層の特性として理解することの重要性を示した¹⁾。地表地震断層に関するこれらの検討は、地下の断層から地上にある構造物までの広い領域に及ぶため、地震学、構造地質学、地盤工学、建築土木工学が取り組むべき学際的な試みである。また、地表地震断層による被害は、地震災害である地震動、液状化、地すべりと同様に、確率論的な地震ハザードとして取り扱う必要性が提唱され、多くの研究が行われている^{2),3),4)}。

5) このように、地表地震断層については、これまでに様々な検討がされており、特に、地震の規模を表すマグニチュードと地震断層の出現の関係性について多くの研究事例がある。しかし、地表地震断層の出現に影響を与える要因は、地震の規模以外にも考えられるが、それらについて整理した研究は少ない。

自然災害に対する考え方の一つに、災害を引き起こす原因を「素因」と「誘因」に整理して、適切な対策を講じる試みがされている⁶⁾。「素因」は、自然災害が生じた場所の特徴であり、自然的な素因（地形・地質・植生・気候など）や人工・社会的な素因（土地開発・土木構造物・防災対策・人口密度）等に分けられる。「誘因」は、直接的な被害を引き起こす原因とされており、地震動や、降雨、台風、火山等が考えられる。例えば、地すべり災害については、素因と誘因が明確に整理され、地すべり災害に対する考え方の整理の一助となっている⁷⁾。しかし、地震災害の中でも地すべりや液状化に比べて、地表地震断層については、これらの要因について活発に議論はされていない。

本研究では、地表地震断層の素因について、既往研究を基に整理し、課題を明確にすることを目的とする。地表地震断層の原因として、地殻応力や地形地質条件等の素因と、表層地盤に変位を生じる引き金となる誘因に分

けることができる。断層の規模、地殻応力、地形・地質的条件等から、地震断層が地表に出現する際の素因について整理し、今後検討すべき課題の抽出を行う。

2. 地表地震断層の出現要因

地表地震断層の出現要因について検討しているこれまでの研究例を以下に挙げる。山崎（1981）は、断層の出現形態の多様性の要因として、断層沿いの(i)未固結被覆層の厚さの地域差、(ii)地震断層の変位量の地域差、(iii)断層面の傾斜の地域差を挙げており、断層の出現形態が地域によって大きく異なることに言及している⁸⁾。また、地表地震断層の特徴を左右する要因として、断層の規模の他に、断層運動のタイプ（逆断層・正断層・横ずれ断層）、断層面の傾斜、断層帯の幅、断層の成熟度、断層の変位量、表層地盤の厚さ及び物性が挙げられている⁹⁾。さらに遠田(2013)は、震源の深さ、応力、断層構造の不均質性、地震断層発見に関する地理的条件を挙げている⁹⁾。本研究では、これらの既往研究を参考に地表地震断層の出現要因としての素因を整理した。なお、これらの素因が地表地震断層の出現に与える影響の大小に関する議論は本論文では対象としない。また、本論文で取り扱う地表に変動を生じる断層は造構運動を対象とし、重力による地盤のずれは対象外とする。また、地震活動が活発な地域の地形・地質的特徴は、長期にわたる断層

活動の累積結果として考えられる。繰り返し引き起こされる断層のすべりによって、地形の食い違いや段差が拡大し、侵食や堆積作用を受けながら、横ずれ谷や断層崖などの特徴的な断層地形が作られる⁸⁾。このような地域では、以下に述べる素因が複合的に影響していることが考えられる。

地表地震断層の素因を表-1に示す。素因は、深度に着目し、地表・表層地盤と基礎基盤（地震発生層）の二つに区分した。また、広域的な素因と断層周辺の局所的な素因についても分けて整理した。本稿では、これらの素因の中で、地震の規模、表層地盤の厚さ、断層の傾斜、断層帯の幅、断層タイプ、断層に作用する力に焦点をあて、研究例を紹介する。

(1) 地震の規模

図-1に、表層地盤（＜深度3km）、基礎基盤（深度約3km～20km）、断層の規模、及び地表地震断層との関係を示す¹⁰⁾。ここでは日本の内陸部の地震を想定し、一つの目安として、S波速度3km/s程度を示す層の上面を境に、上部を表層地盤、下部を基礎基盤とする。一般的に、地震の規模を表すマグニチュードは断層の規模と共に増加し、M6.8程度になると断層が地表に到達し、ずれが出現する傾向がある（以下、Mは気象庁マグニチュード、M_wはモーメントマグニチュードとする）¹¹⁾。地表地震断層に影響を与える第一の要因は断層の規模とされており、

表-1 地表地震断層の素因

深度	影響範囲	素因
表層地盤 (＜3km)	広域	地形の起伏（重力の影響）
		表層地盤の厚さ
		地質特性（粗・細粒土の密度、加圧密度）、風化
	局所的 (断層周辺)	断層タイプ（正断層・逆断層・横ずれ断層）
		断層のクラス（主断層・副断層・分岐断層）
		断層の傾斜
		断層面の位置（先端部、中央部、連結部）
		断層の変位量
		断層帯の幅（活動回数、成熟度、ダメージゾーン）
		地熱・火山の存在
基礎基盤 (地震発生層, 3～20km)	広域	断層・岩盤に作用する力
		地下水の存在
		断層の規模
	局所的 (断層周辺)	断層の深さ
		断層のアスぺリティ分布・深さすべり速度

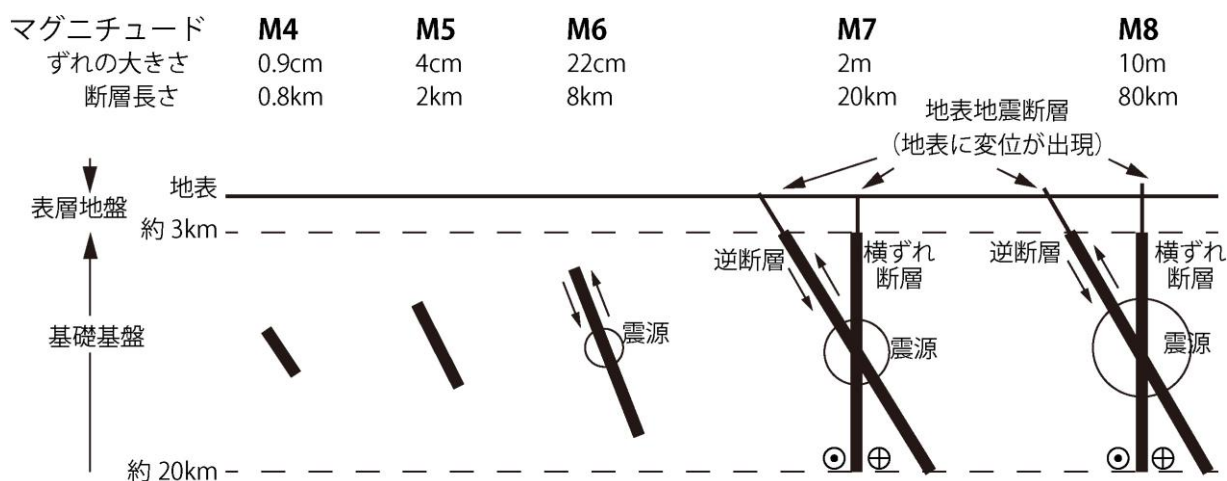


図-1 地震発生層と震源断層、地表地震断層の関係。山崎(2013)¹⁰⁾を参考に作成。

マグニチュードと地表地震断層の関係については多くの研究が行われている^{12), 13), 14)}。Lettis et al. (1997) は、地表地震断層が出現する確率について276の地震を整理し、 $M_w 5.9$ で約 40%、 $M_w 7.2$ で約 90%の数値を示している¹⁵⁾。遠田(2013)は、断層の出現率は、 $M 6.5$ 以上で20%、 $M 7.0$ 以上で44%と整理している⁹⁾。これらの数値は、地震の規模と断層の出現率の関係性であり、 $M 7.0$ 以上の規模の大きい地震に対しても、地表に出現していない断層が存在することを示している。このことは、地表地震断層の出現を決める主要因は地震の規模であるものの、それ以外の要因も影響していることを示唆している。なお、これらの出現率は、地表地震断層が露頭で認識されることで数値化されるため、発見を左右する地理的条件及び侵食速度などの地質地形学的条件が数値に大きく影響する⁹⁾。地表地震断層は、地震規模が大きいほど明瞭に地表に現れる傾向にあるため、断層の出現率はMが高いほど確度が高く、逆にMが低いとその確度は低くなるといえる。そのため、規模の小さい地震による地表地震断層の出現率は、過少見積もりや見落としが生じやすいため注意が必要である。

(2) 表層地盤の厚さ

図-1に示すように、表層地盤の厚さは地下3km程度以下であり、比較的岩石の強度が低く、地震を引き起こすほどのひずみを蓄えることができないと考えられている。震源付近から伝播される断層の変位が表層地盤に到達すると、相対的に弱層である表層地盤が変形し、緩衝材となって断層のひずみを吸収する。このため、表層地盤が厚いほど地表地震断層は出現しにくい傾向がある。山崎(1981)は、国内の5つの地表地震断層について、その変位量と表層地盤の層の厚さが一定の関係にあることを示した⁸⁾。表層地盤の厚さの影響については、砂箱実験を使用した検討もされており、小山&谷 (2003) は、砂試料

表面に断層帯を形成するために必要な断層変位量が、表層地盤の厚さと伴に増加することを示した¹⁶⁾。一方、規模の大きな断層、もしくは表層地盤がほとんど存在しない場合では、表層地盤が緩衝材として機能せず、断層が表層地盤を突き抜けた場合に、平均すべり量が増加する可能性が指摘されている¹¹⁾。

また、広域応力場が引張で正断層が生じる場合、表層地盤の厚さと地表に現れる断層の間隔には一定の関係が成り立つとされている¹⁷⁾。Maeda et al. (2019)は、沖縄県宮古島市の地表地震断層である正断層群とその間隔を調べ、地震波速度構造及びコアデータから、断層の規模について推定している¹⁸⁾。

(3) 断層の傾斜

断層の傾斜は、地表に出現する断層の形態に影響を与える¹⁹⁾。断層傾斜角が高角度の場合、地表地震断層は断層崖として現れることが多く、地表に現れる断層の幅は小さい。一方、断層傾斜角が低角度で軟質の堆積物が表層に存在する場合、バックスラストなどの形態が観測されている¹⁹⁾。基盤の逆断層の角度の違いが地表に与える影響については、砂箱実験においても再現されている。上田(2011)は、逆断層場において、断層傾斜角が低角度の場合、高角度の場合よりも地表に出現する断層帯の幅が広がる傾向があることを示した²⁰⁾。

地表で観察される断層の傾斜は、断層タイプに大きく影響されることも知られている。一般的に、正断層は逆断層よりも傾斜が大きい。逆断層は地表付近で徐々に傾斜が小さくなる傾向があるのに比べて、正断層は、表層地盤と基礎岩盤の境界面で角度が変わり、地表に近づく傾斜が大きくなる傾向がある。この角度の変化と正断層面の傾斜の変化により、地溝帯が発生することがある。

(4) 断層帯の幅

本稿では、破碎帯を、断層コア及び断層周辺に発達するダメージゾーンを含む領域と定義して、議論を行う。Scholz et al. (1993)は、地表地震断層の長さやダメージゾーンの幅に関係があることを指摘し、その経験式について様々な研究が行われてきた^{21, 22)}。また、地下の震源断層の断層帯の幅については、地震波速度構造、比抵抗構造、測地学的手法等で確認・推定されている。これらの手法で観測された断層帯の幅は、一般的に、表層で見られる断層帯の幅よりも大きく、例えば数100 m～数 kmに達する場合もある^{23, 24, 25, 26)}。この理由として、震源付近では岩石の破碎が主断層から離れた場所まで影響し、ダメージゾーンが発達するためだと考えられる。断層の変位は端部に向かうほど減少し、それと共にダメージゾーンの幅も減少する。拘束圧がダメージゾーンに与える影響については、室内岩石試験によっても再現することができる。拘束圧が低い（浅い）場合、岩石は局所的で脆性的に破壊するが、拘束圧が高い（深い）場合、岩石の破壊は広範囲に及び、ダメージゾーンの幅も広がることが知られている。

伏島(2001)は、2000年鳥取県西部地震の地震断層を調査し、1km以上の幅を持った断層帯について報告した²⁷⁾。2000年鳥取県西部地震の特徴として、地震時の変形が多く、多くの小断層として分散し、一つの断層に集中して大きな地表地震断層にならなかったことが挙げられている。その理由として、断層の成熟度についての指摘がされている。断層の成熟過程の解釈として、断層の初期段階では、広い範囲に小断層が現れ、成長して行くにつれて一つの長い断層に成長していく考えが示されている²⁸⁾。2000年鳥取県西部地震は、成熟度の低い断層によって地震が発生し、そのため、地表地震断層は小断層として分散した²⁹⁾。このように、地震時の変形が数本の断層に分散する場合、地表に明瞭な断層として現れるのはより難しくなり、広い断層帯を持つ地表地震断層となる傾向がある。

断層のダメージゾーンが地表地震断層の発生に与える影響については、露頭観察や実験による検討は難しく、主に数値解析モデルで検討されている。近年の数値解析モデルによる検討例として、岩田ら(2021)は、日奈久断層を対象に3次元動的FEM解析を行い、ダメージゾーンを考慮すると、断層のすべり領域が抑制され地震モーメントが低下することを示した³⁰⁾。また、Kang and Duan (2015)は、横ずれ断層について断層の深さ、幅、形状が、断層表面の変位場に及ぼす影響を3次元弾塑性モデルを用いて検討している³¹⁾。

(5) 断層タイプ

断層のタイプは、断層の出現形態に影響を与える。片岡&日下部(2005)は、1885年から2003年に発生した地表地震断層を対象として、最大変位量、地震規模、及び断層

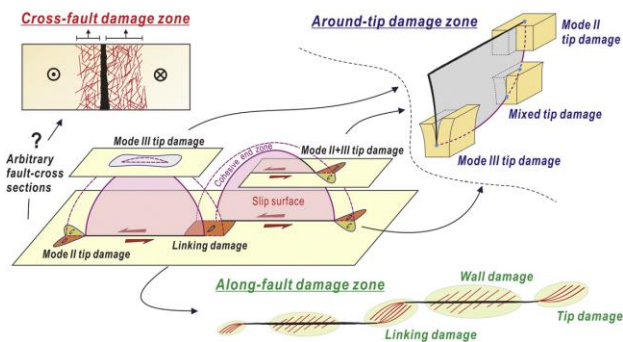


図-2 左横ずれ断層周辺のダメージゾーンの模式図³³⁾。

タイプの関係を示した³²⁾。その結果、横ずれ断層と逆断層を比較すると、同じ断層規模では逆断層の方が大きな最大変位量を示す傾向にあることを示した。その理由として、横ずれ断層と逆断層では、表層地盤に進入する断層のずれの伝播のしやすさが異なることを挙げている。この伝播特性の違いは、断層周辺の変位を空間的にとらえることによって理解できる(図-2)³³⁾。表層地盤の変形量は断層タイプ（もしくは断層端部の破壊モード）によって変化する。断層の運動方向に対する変位の位置によって、断層沿いの破壊モードはモードⅡもしくはモードⅢになる。これらの破壊モードは、表層地盤に進入する断層のずれと考えることができる。同じ断層規模で、横ずれ断層と逆断層の最大変位量が異なるのは、これらの破壊モードの差による変位量の大きさが関係していると考えられる。

また、断層のタイプによって、断層の変位が表層地盤で吸収される程度が異なるとともに、断層の出現形態も異なることが知られている。逆断層は地表付近で傾斜が小さくなる傾向があるが、正断層は表層地盤と基礎岩盤の接触部で屈折し、地表に近づくにつれて傾斜が大きくなる傾向がある。横ずれ断層は、基礎地盤の変位に対してほぼ鉛直方向に沿う傾向があるが、地表付近で複数の小断層に枝分かれするフラワー構造と呼ばれるすべり面が出現する場合もある^{13, 34)}。

(6) 断層に作用する力

遠心載荷試験装置は、地下の応力場を再現できるため、断層に作用する力が地表地震断層に与える影響について検討することが可能である³⁵⁾。Lee and Hamada (2005)は、重力場および遠心載荷場における模型実験を用いた検討を行い、高拘束圧条件下における断層の破壊伝播特性を示した³⁶⁾。また、拘束圧を加えることのできる遠心載荷装置による実験では、1gの模型実験よりも模型表面に現れる破壊が明瞭ではなく、体積変化に大きな違いがあることを示した。高拘束圧条件下では、重力場よりも地表地盤の厚さによる地表地震断層への影響が少ないと結論づけている。また、地表地震断層の鉛直方向の変位につ

いて、断層のタイプ、傾斜角、及び表層地盤の相対密度との関係性についても言及している^{35,36)}。

Gudmundsson et al.(2010)は、断層帯の形成に関連して岩石中の亀裂伝播から議論し、亀裂が異なる応力場を持つゾーンに進行し始めると、新しいゾーンの局所的な応力が亀裂伝播に影響することを示唆した³⁷⁾。これは、岩石の特性の変化等により、断層に作用する局所的な応力が変化することに起因している。岩石の特性の変化や、断層面の不均質性によって、亀裂の進展方向が変化し、場合によっては亀裂の進展を阻害することがある。

近年、断層に作用する力を、広域応力場及び断層周辺のダメージゾーンの影響から数値モデルによって検討する試みが行われている。オノ木ら(2021)³⁸⁾は、クラックテンソル³⁹⁾によって破碎帯をモデル化し、断層面の局所的な応力集中を模擬することで、ダメージゾーン内の応力不均一性等が地震の規模に影響を与えることを数値解析によって評価している。

3. まとめ

本稿では、地表地震断層の素因について整理し、特に、地震の規模、表層地盤の厚さ、断層の傾斜、断層帯の幅、断層タイプ、断層に作用する力についてのこれまでの研究例を紹介した。主に、地表地盤の素因を取り上げたが、表-1に示すように、他にも地表地震断層に影響を与える素因がある。特に、基礎基盤の震源域周辺の断層に関する特性は、断層の規模ともかわりがあるため、非常に重要である⁴⁰⁾。また、地表地震断層による災害を低減するためには、地表地震断層の影響領域と土木建築物との関係性の理解が重要である。

断層－表層地盤－構造物の間の相互作用について、その関係性を適切に評価することが重要であるが、体系的な検討は十分ではない。例えば、基礎基盤から表層地盤への変遷域において、断層の破壊がどのように進行しているかについての検討は少ない。地表地震断層を対象とした砂箱実験では、岩盤の不均質性や地下水の存在などは考慮されず、地質特性を単純化している場合が多い。

これらの地表地震断層に関する問題点を解決するためには、断層－表層地盤－構造物の各レベルにおける基礎的な知識と相互作用の理解について、様々なアプローチ（露頭観察、室内実験、数値解析）を統合して検討すべきである。地表地震断層による災害を軽減するためには、他の地震災害と同様に、災害の要因を整理し理解した上で、適切な対策を行うことが重要である。

参考文献

1) Avar, B.B. and Hudyma N.W. : Earthquake surface rupture: a brief survey on interdisciplinary research and practice from

geology to geotechnical engineering, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, pp.5259-5281, 2019.

2) Youngs, R.R., Arabasz, W.J., Anderson, R.E., Ramelli, A. R., Ake, J.P., Slemmons, D.B., McCalpin, J.P., Doser, D.I., Fridrich, C.J., Swan Iii, F.H., Rogers, A.M., Yount, J.C., Anderson, L.W., Smith, K.D., Bruhn, R.L., Knuepfer, P.L.K., Smith, R.B., DePolo, C.M., O'Leary, D.W., Coppersmith, K.J., Pezzopane, S.K., Schwartz, D.P., Whitney, J.W., Olig, S.S. and Toro, G.R. : A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA): *Earthquake Spectra*, v. 19, no. 1, p. 191-219, 2003.

3) Bray J.D. : Designing buildings to accommodate earthquake surface rupture. In: Goodno B (ed) *Improving the seismic performance of existing and other structures*. ASCE, Reston, pp 1269-1280, 2009.

4) Petersen, M.D., Dawson, T.E., Chen, R., Cao, T., Wills, C.J., Schwartz, D.P. and Frankel, A.D. : Fault displacement hazard for strike-slip faults: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 101, no. 2, p. 805-825, 2011.

5) Baize, S., Cinti, F., Costa, C., Dawson, T., Elliott, A., Guerrieri, L., McCalpin, J., Okumura, K., Scotti, O., Takao, M., Villamor, P., and Walker, R. : Surface rupture database for seismic hazard assessment - 2015 *Report of the kick-off meeting of the SURE database working group*. Zenodo., 2016.

6) 鉄道総合技術研究所防災技術研究部・鉄道地震工学研究センター：鉄道と自然災害一列車を護る防災・減災対策，288 頁，2015.

7) 土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム：地すべり防止技術指針及び同解説(提案)，土木研究所資料，4077，2007.

8) 山崎晴雄：地震断層の出現形態とその形成条件，*地調月報*，32，pp.574-575，1981.

9) 遠田晋次：内陸地震の長期評価に関する課題と新たな視点，*地震学雑誌*，119,2,pp.105-123，2013.

10) 山崎晴雄：地震と断層，そして活断層とは何か。思いこみや風評を排して冷静な対応を，*日本原子力学会誌*，55,6，2013.

11) 武村雅之：日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響および地震被害との関係—，*地震*，51，pp.211-228，1998.

12) 大塚道男：地震のマグニチュードと地表にあらわれる断層について，*地震*，18,pp.1-8，1965.

13) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について，*地震*，28,pp.269-283，1975.

14) Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. : New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 84, no. 4, p. 974-1002, 1994.

15) Lettis W., Wells D.L., Baldwin J.N. : Empirical observations regarding reverse earthquakes, blind thrust faults, and quaternary deformation: are blind thrust faults truly blind? *Bulletin of the Seismological Society of America* 87:1171-1198, 1997.

16) 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*，750/III-65, pp.171-181, 2003.

- 17) Soliva, R., Benedicto, A. and Maerten, L. : Spacing and linkage of confined normal faults: Importance of mechanical thickness: *Journal of Geophysical Research*, 111, B01402, 2006.
- 18) Maeda, S., Otsubo, M., Asahina, D. and Furuno, Y. : Estimating the thickness of a faulted mechanical layer based on fault spacing: An example from Miyakojima Island, southern Ryukyu Arc, Japan: *Island Arc*, v. 29, no. 1, 2019.
- 19) Boncio, P., Liberi, F., Caldarella, M., and Nurminen, F.C. : Width of surface rupture zone for thrust earthquakes: implications for earthquake fault zoning, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 241–256, 2018.
- 20) 上田圭一：模型実験による逆断層・活褶曲帯の発達過程の検討，*電力中央研究所報告*, N10049, 2011.
- 21) Scholz, C.H., Dawers, N.H., Yu, J.Z., Anders, M.H. and Cowie, P.A. : Fault growth and fault scaling laws: Preliminary results: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 98, no. B12, p. 21951-21961, 1993.
- 22) Vermilye, J.M. and Scholz, C.H. : The process zone: A microstructural view of fault growth: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 103, no. B6, p. 12223-12237, 1998.
- 23) Cochran, E.S., Li, Y.G., Shearer, P.M., Barbot, S., Fialko, Y. and Vidale, J.E. : Seismic and geodetic evidence for extensive, long-lived fault damage zones: *Geology*, v. 37, no. 4, p. 315-318, 2009.
- 24) Powers, P.M. and Jordan, T.H. : Distribution of seismicity across strike-slip faults in California: *Journal of Geophysical Research*, v. 115, no. B5, 2010.
- 25) Valoroso, L., Chiaraluce, L. and Collettini, C. : Earthquakes and fault zone structure: *Geology*, v. 42, no. 4, p. 343-346, 2014.
- 26) 山口寛，大内悠平，小田佑介，三島稔明，村上英記，加藤茂弘：Audio-frequency Magnetotelluric 法による郷村断層周辺の地下比抵抗構造，*地質学雑誌*, 122(11), pp.573- 586, 2016.
- 27) 伏島祐一郎，吉岡敏和，水野清秀，宍倉正展，井村隆介，小松原琢，佐々木俊法：2000 年鳥取県西部地震の地震断層調査，*活断層・古地震研究報告*, 1, pp.1- 26, 2001.
- 28) Wesnousky, S.G. : Seismological and structural evolution of strike-slip faults, *Nature*, 335, 340-343, 1988.
- 29) 杉山雄一，宮下由香里，伏島祐一郎，小林健太，家村克敏，宮脇明子，新谷加代：鳥取県西部，日南湖リニアメント上でのトレンチ調査，*活断層・古地震研究報告*, 4, pp.193- 207, 2004.
- 30) 岩田直樹，大塚康範，藍壇オメル，伊藤高敏，オノ木敦士，池田隆明：地表地震断層の発生におけるダメージゾーンの影響に関する解析的検討―日奈久断層を事例として―，第 48 回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要，投稿中。
- 31) Kang, J. and Duan, B. : Elastic and inelastic responses of compliant fault zones to nearby earthquakes in three dimensions: a parameter-space study: *Geophysical Journal International*, v. 201, p. 1195-1214, 2015.
- 32) 片岡正次郎，日下部毅明：内陸地震の規模・タイプと地表地震断層の特性との関係，*土木学会論文集*, 81/I-73, pp.21- 32, 2005.
- 33) Choi, J.H., Edwards, P., Ko, K. and Kim, Y.S. : Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach: *Earth-Science Reviews*, v. 152, p. 70-87, 2016.
- 34) Fossen, H. : *Structural Geology*, Cambridge University Press, 2nd edition, 2016.
- 35) Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas, A., Nagaoka, S. : Centrifuge modelling of reverse fault–foundation interaction. *Bull Earthq Eng* 6:607–628, 2008.
- 36) Lee, J.W. and Hamada, M. : An experimental study on earthquake fault rupture propagation through a sandy soil deposit: *Structural engineering/Earthquake engineering*, 22, 1, p.1-13, 2005.
- 37) Gudmundsson, A., Simmenes, T.H., Larsen, B. and Philipp, S.L. : Effects of internal structure and local stresses on fracture propagation, deflection, and arrest in fault zones: *Journal of Structural Geology*, v. 32, no. 11, p. 1643-1655, 2010.
- 38) オノ木敦士，岩田直樹，朝比奈大輔，藍壇オメル：断層ダメージ領域内の応力不均一性が断層領域の力学的挙動に与える影響，第 48 回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要，投稿中。
- 39) 小田匡寛，鈴木健一郎，山崎雅直，斉藤禎二郎：岩石構造の数量化とその岩盤力学への応用，*テクニクスと変成作用（原郁夫先生退官記念論文集）*，創文，pp. 367-378, 1996.
- 40) Faulkner, D.R., Jackson, C.A. L., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A.J. and Withjack, M.O. : A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones: *Journal of Structural Geology*, v. 32, no. 11, p. 1557-1575, 2010.

CHARACTERISTICS OF EARTHQUAKE SURFACE RUPTURE AND CONDITION FOR ITS APPEARANCE

Daisuke ASAHINA, Takafumi SEIKI, Ryoji KIYOTA, Qinxin DONG, Atsushi
SAINOKI and Jun Yoshida

It is important to understand the conditions that cause the surface rupture, because surface ruptures associated with a large displacement during destructive earthquakes cause severe damage to civil engineering structure. There have been many studies on earthquake surface rupture, especially on the relationship between the magnitude of the earthquake and the appearance of ruptures. However, there are few studies of other factors that affect earthquake surface ruptures. In this study, we summarize the factors that affect the appearance of earthquake surface rupture, and clarify the issues.