

横ずれ断層の断層変位による 地表面変形の食い違い弾性理論を用いた検討

大草 陽太郎^{1*}・谷 和夫²

¹横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム専攻 (〒240-00 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

²横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-00 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

*E-mail: d09gc103@ynu.ac.jp

断層変位による地表面変形を、精度良く予測することは容易ではない。先に、逆断層について、断層変位による地表面変形を検討した。ここでは、横ずれ断層の断層変位を与える範囲とその分布形状を考慮した場合の地表面変形を定量的に示すことを目的とした。計算方法として、食い違い弾性理論を用いた。その結果、得られた変位分布とせん断ひずみ分布から、各断層変位を与える範囲及びその分布形状で生じる水平面内の最大せん断と断層直上からの距離との関係を得た。

Key Words : elasticity theory of dislocation, strike-slip fault, displacement, surface

1. 背景・目的

原子力発電所などの重要構造物の設計の際には、地震時の断層変位による地表面変形を考慮しなければならず活断層の断層変位による地表面変形を評価している^{1,2)}。しかし、断層や地盤の条件によって、断層変位による地表面変形が、どのように分布するかと言った一般的な検討は十分になされていない。そこで、地表面変形に影響を与える因子の一つとして断層破砕帯の上端深さと食い違い量の分布形状を指摘した³⁾。また、逆断層の断層変位を与える範囲とその分布形状を考慮した場合の地表面変形を定量的に示した⁴⁾。ここでは、横ずれ断層の断層変位を与える範囲とその分布形状を考慮した場合の地表面変形を定量的に示すことを目的とした。

2. 計算方法と条件

(1) 食い違い弾性理論

Volterra(1907)は弾性体内に食い違いを生じた場合の任意の点における変位を算定する式を導いており、Steketee(1958)は地球物理学への応用を目的として、この“Volterra dislocation”に基づく断層の力学モデルを提唱した⁵⁾。そして、食い違いの弾性理論 (elasticity theory of dislocation) では、地殻を均質な半無限弾性体と仮定している。また、「力-食い違いの等価性」(force-dislocation equivalence)の定理が成り立つものとしている⁷⁾。詳しくは、Mansinha & Smylie(1971), Okada (1985,1995)を参照され

たい^{7,8,9)}。

(2) 計算条件

図-1 に地盤と断層の条件を示した。地盤を 3 つに分類した。地震発生層上の基盤 (上端深さ $-z_{st} < 3(\text{km})$) と地震発生層 ($-z_{st} = 3(\text{km})$, 下端深さ $-z_{sb} = 20(\text{km})$)、地震発生層下の基盤 ($-z_{sb} > 20(\text{km})$) である。地震発生層内にある震源断層の上端から、地震発生層より上の基盤に断層破砕帯が地表面に向かい延びた場合、地表面変形にどのような影響があるか検討した。また、地震発生層より上の基盤にある断層破砕帯が地表面に向かい延びる場合、震源断層で生じる食い違い量よりも断層破砕帯の食い違い量が小さくなる。そのため、地震発生層より上の基盤にある断層破砕帯内の食い違い量が地表面に近づくにつれ線形に減少する場合についても検討した。震源断層の走向をy軸方向とし、断層の中心を $y=0(\text{km})$ 、走向

表-1 計算ケース

case	z_{ft} km	z_{ft}/z_{st} -	U_s m	U_f m	δ_s °	λ_s °
1	3.0E+00	1.0E+00	1.0	1.0	90	0
2	2.0E+00	6.7E-01				
3	1.0E+00	3.3E-01				
4	1.0E-01	3.3E-02				
5	1.0E-02	3.3E-03				
6	1.0E-03	3.3E-04				
7	1.0E-04	3.3E-05				
8	2.0E+00	6.7E-01				
9	1.0E+00	3.3E-01				
10	1.0E-01	3.3E-02				
11	1.0E-02	3.3E-03				
12	1.0E-03	3.3E-04				
13	1.0E-04	3.3E-05				

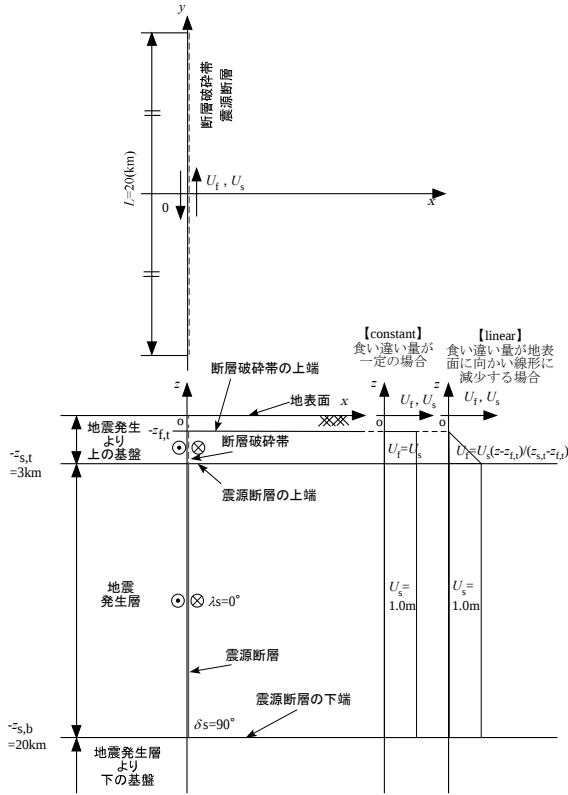


図-1 地盤と断層の条件(上：平面図，下：断面図)

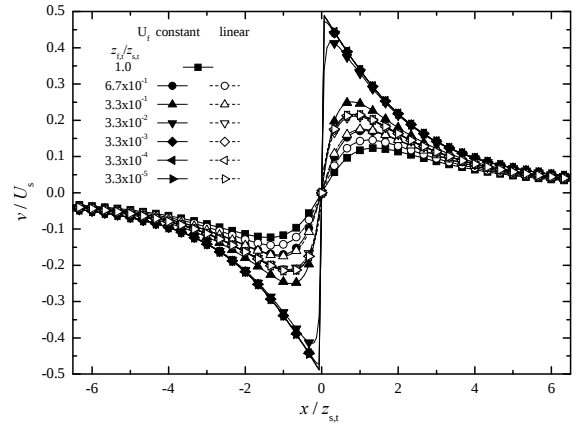
と直角の方向を x 軸方向，鉛直方向を z 軸方向として，震源断層の延長と地表面($z=0(\text{km})$)が交わる位置を $x=0(\text{km})$ とした．地盤は，等方均質な半無限弾性体と仮定し，ポアソン比 $\nu=0.250$ ，ヤング率 $E=8.0 \times 10^7 (\text{kN/m}^2)$ とした．地震発生層内の震源断層およびその上方に延長する断層破砕帯の傾斜角 $\delta_s=90^\circ$ ，すべり角 $\lambda_s=0^\circ$ ，長さ $L=20(\text{km})$ の左横ずれとした． δ_s ， λ_s については横ずれ断層を想定し， L については，レベル2地震動程度 $M_j=7.0$ を想定し，松田 (1972) 式を用い設定した¹⁰⁾．

表-1 に計算ケースを示した． z_{st} で正規化し，断層破砕帯の上端深さ z_t を $z_t/z_{st}=1.0 \sim 3.3 \times 10^{-5}$ とした．また，震源断層内，断層破砕帯内の食い違い量を U_s ， U_t とし， $U_s=1.0(\text{m})$ の様な場合(以下，constant と呼ぶ．)と， $U_t=U_s(z-z_t)/(z_{st}-z_t)$ として先端に向かって線形に減少する分布の非一様な場合(以下，linear と呼ぶ．)の2種類とした．

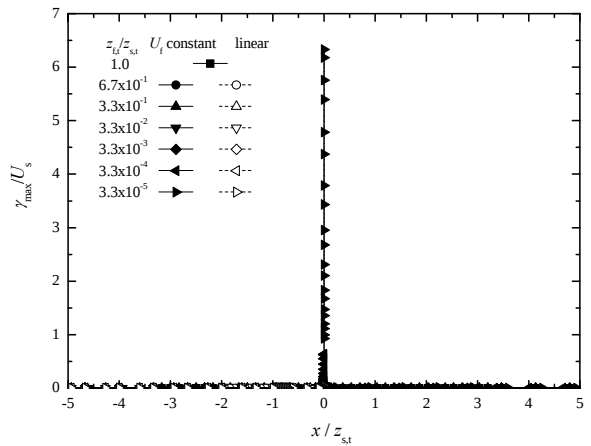
3. 計算結果と考察

(1) 計算結果

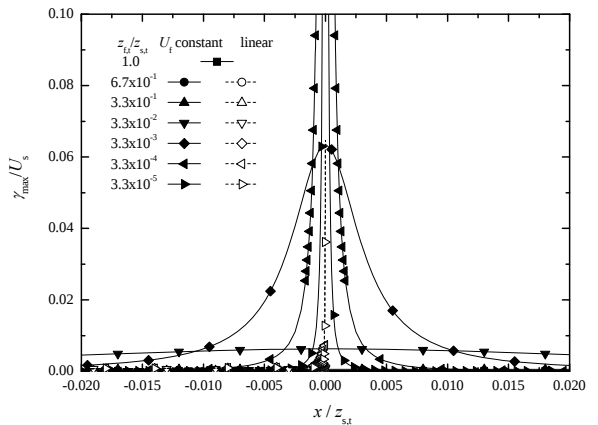
図-2(1)に $v/U_s \sim x/z_{st}$ 関係を示した．縦軸に震源断層および断層破砕帯の中央($y=0(\text{km})$)かつ地表面での水平変位量 v を U_s で正規化した v/U_s をとり，横軸に， x 軸方向の距離を z_{st} で正規化した x/z_{st} をとった． x/z_{st} が大きくなるほど断層破砕帯上端の延長が地表面と交わる位置($x/z_{st}=0$)から遠くなる．いずれのケースも， $x/z_{st}=0$ で $v/U_s=0$ とな



(1) $v/U_s \sim x/z_{st}$ 関係



(2) $\gamma_{\max}/U_s \sim x/z_{st}$ 関係



(2) $\gamma_{\max}/U_s \sim x/z_{st}$ 関係 (拡大)

図-2 計算結果

り，また， $x/z_{st}=0$ で v/U_s の正負が反転し対象となっている．そのため，以下では， x/z_{st} が正の範囲についてのみ論じる．おおよそ $0 < x/z_{st} < 1.0$ の間で最大の水平変位量が生じ， x/z_{st} が大きくなるほど v/U_s が小さくなっている． z_t/z_{st} が小さいほど v/U_s が大きくなる．constant に比

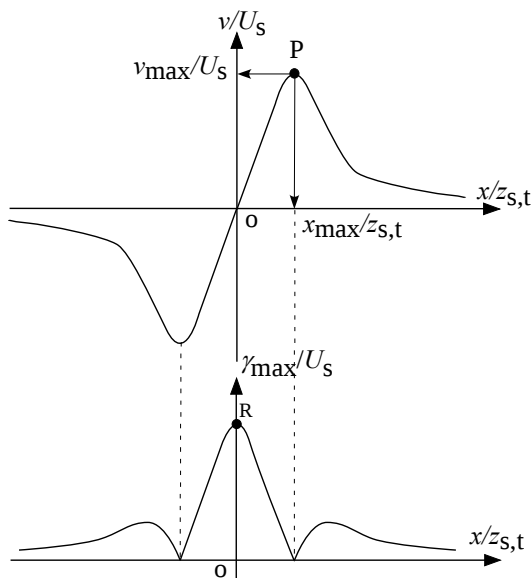


図-3 $v/U_s \sim x/z_{st}$, $\gamma_{\max}/U_s \sim x/z_{st}$ 関係のモデル

べ linear の v/U_s が小さくなる。図-2(2), (3)に, $\gamma_{\max}/U_s \sim x/z_{st}$ 関係を示した。水平面内の最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ の定義を式(1)に示す。

$$\gamma_{\max} = \sqrt{\gamma_{xy}^2 + (\varepsilon_x^2 - \varepsilon_y^2)} \quad \text{式-(1)}$$

γ_{xy} は、水平面内の工学せん断ひずみで、 ε_x , ε_y は、それぞれ x 軸方向の軸ひずみと y 軸方向の軸ひずみである。 $\gamma_{\max}$ を U_s で正規化した $\gamma_{\max}/U_s$ を縦軸にとり、横軸には同じく x/z_{st} をとった。図-2 (3)は図-2 (2)を拡大したものである。 $z_{ft}/z_{st}=1.0 \sim 3.3 \times 10^5$ で、いずれも断層直上 $x/z_{st}=0$ で $\gamma_{\max}/U_s$ が最大値となった。断層破砕帯の上端が深くなると $\gamma_{\max}/U_s$ は減少した。断層破砕帯の上端が地表面に近いほど $\gamma_{\max}/U_s$ の最大値は大きく、 $\gamma_{\max}$ の最小値が生じる位置は $x/z_{st}=0$ に近くなる。linear の場合は、constant に比べ、 $\gamma_{\max}/U_s$ の最大値は小さく、 $\gamma_{\max}/U_s$ の最小値が生じる位置は $x/z_{st}=0$ から遠くなる。

(2) 考察

図-3に, $v/U_s \sim x/z_{st}$, $\gamma_{\max}/U_s \sim x/z_{st}$ 関係のモデルを示し、評価パラメータを決めた。まず、 $v/U_s \sim x/z_{st}$ 関係について、極大点Pでの v/U_s を $v_{\max}/U_s$ とし、その位置を $x_{\max}/z_{st}$ とした。次に、 $\gamma_{\max}/U_s \sim x/z_{st}$ 関係について、断層破砕帯の上端深さに z_{ft}/z_{st} によらず、極大点Rは、 $x/z_{st}=0$ となる。以下の考察では、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}/U_s$ について述べる。

図-4に, z_{ft}/z_{st} の異なる $\gamma_{\max}/U_s \sim x/z_{st}$ 関係を4本示した。断層破砕帯が地表面まで達した場合($z_{ft}/z_{st}=0$)が1本、断層破砕帯が地震発生層の上の基盤の中央まで達した場合($z_{ft}/z_{st}=0 \sim 1.0$)が2本、断層破砕帯が無い場合($z_{ft}/z_{st}=1.0$)が1本である。 $\gamma_{\max}/U_s \sim x/z_{st}$ 関係を示したときに、 $\gamma_{\max}/U_s$ に

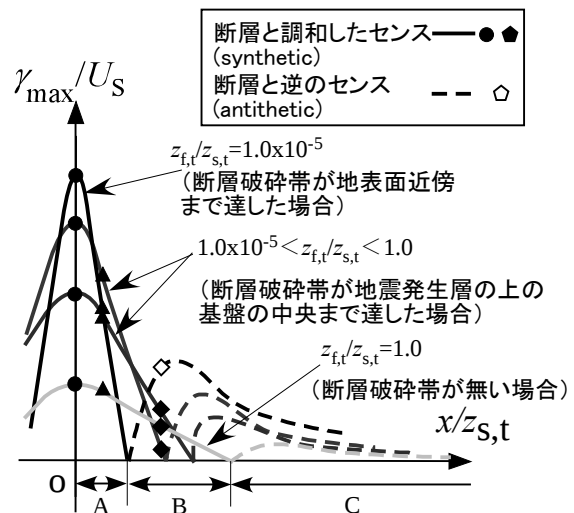
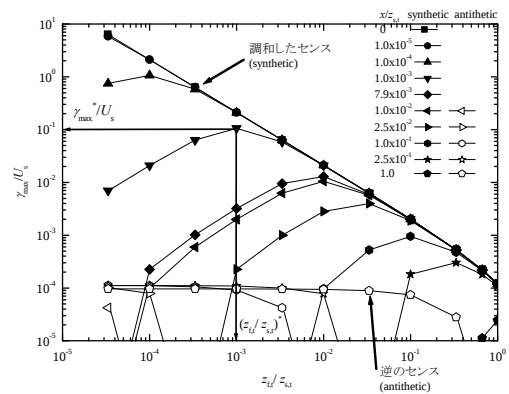


図-4 z_{ft}/z_{st} の異なる $\gamma_{\max}/U_s \sim x/z_{st}$ 関係



図

-5 $\gamma_{\max}/U_s \sim z_{ft}/z_{st}$ 関係(constant)

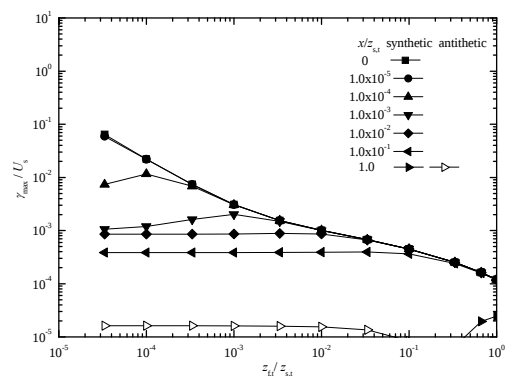


図-6 $\gamma_{\max}/U_s \sim z_{ft}/z_{st}$ 関係(linear)

は2種類のずれのセンスが存在する。1つは、実線で示した断層と調和したセンス(synthetic)と、もう一つは、点線で示した断層と逆のセンス(antithetic)である。syntheticは、断層直上 $x/z_{st}=0$ で $\gamma_{\max}/U_s$ の最大値をとる、antitheticは、syntheticの外側で生じる。

図-5に $\gamma_{\max}/U_s \sim z_{ft}/z_{st}$ 関係(constant の場合)を示した。縦

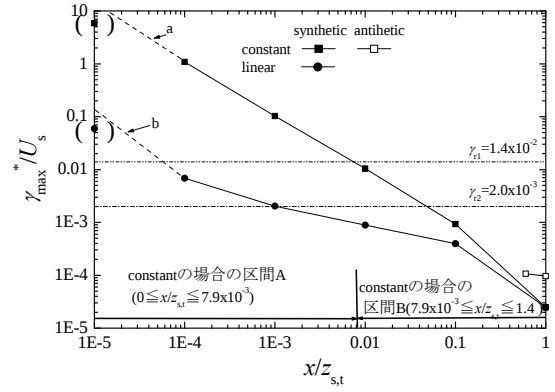
軸に、単位食い違い量当たりの地表面での最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}/U_s$ を示し、横軸に断層破碎帯の上端深さ z_{ft} を震源断層の上端深さ z_{st} で正規化した z_{ft}/z_{st} を示し、断層からの距離 x/z_{st} の異なる値をプロットした。

constant な場合の $\gamma_{\max}/U_s \sim z_{ft}/z_{st}$ 関係は、地表面で生じる最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}/U_s$ のセンスに着目すると、3 つに分けられる。1 つ目は、黒印で示した断層と調和したセンス(synthetic)のみの $\gamma_{\max}/U_s$ が生じる場合である。これは、図-4 に示す区間 A ($0 \leq x/z_{st} \leq 7.9 \times 10^{-3}$) に相当する。2 つ目は、黒印で示した断層と調和したセンス(synthetic)と白抜き印で示した断層と逆のセンス(antithetic)の $\gamma_{\max}/U_s$ が生じる場合である。これは、図-4 に示す区間 B ($7.9 \times 10^{-3} \leq x/z_{st} \leq 1.4$) に相当する。3 つ目は、白抜き印で示した断層と逆のセンス(antithetic) のみの $\gamma_{\max}/U_s$ が生じる場合である。これは、図-4 に示す区間 C ($1.4 \leq x/z_{st}$) に相当する。図-5 には $0 \leq x/z_{st} \leq 1.0$ の範囲を示している。

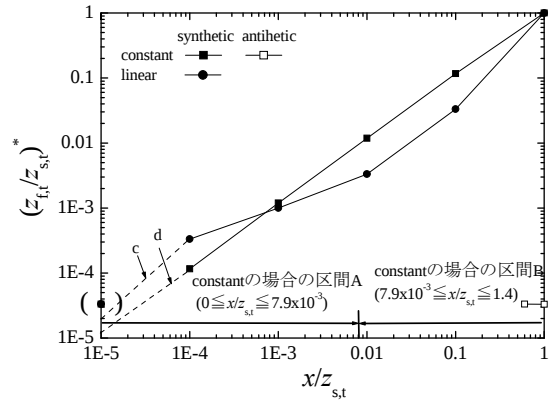
synthetic なセンスのみの $\gamma_{\max}/U_s$ が生じる場合において、 $x/z_{st}=0$ の時、 z_{ft}/z_{st} が小さくなるほど、 $\gamma_{\max}/U_s$ が大きくなる。また、 $0 < x/z_{st} \leq 7.9 \times 10^{-3}$ の時、 z_{ft}/z_{st} が小さくなるほど、 $\gamma_{\max}/U_s$ が大きくなり、ある z_{ft}/z_{st} で $\gamma_{\max}/U_s$ が、極大値を生じる。これらは、図-4 に示した丸印、三角印からも分かる。synthetic なセンスと antithetic なセンスの $\gamma_{\max}/U_s$ が生じる場合においては、 z_{ft}/z_{st} が小さくなるほど、synthetic なセンスの $\gamma_{\max}/U_s$ が大きくなり、ある z_{ft}/z_{st} で極大値を生じ、synthetic なセンスの $\gamma_{\max}/U_s$ が小さくなる。その後、 $\gamma_{\max}/U_s=0$ となり、antithetic なセンスの $\gamma_{\max}/U_s$ が大きくなる。これは、図-4 に示した四角印からも分かる。

断層からの距離(x/z_{st})における、synthetic なセンスと antithetic なセンスの最大の最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}/U_s$ を、 $\gamma_{\max}^*/U_s$ とし、その時の z_{ft}/z_{st} を $(z_{ft}/z_{st})^*$ とした。

図-6 に、linear な場合の $\gamma_{\max}/U_s \sim z_{ft}/z_{st}$ 関係を示した。linear な場合は、constant の場合と同様に、地表面で生じる最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}/U_s$ のセンスに着目すると、3 つに分けられる。区間 C ($1.4 \leq x/z_{st}$) は、断層破碎帯の無い場合($z_{ft}/z_{st}=1.0$)の antithetic なセンスの最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}/U_s$ が生じる範囲なので、断層破碎帯の食い違い量分布によらず同じ範囲を示す。図-7(1), (2)に $\gamma_{\max}^*/U_s \sim x/z_{st}$ 関係、 $(z_{ft}/z_{st})^* \sim x/z_{st}$ 関係を、それぞれ $1.0 \times 10^{-5} \leq x/z_{st} \leq 1.0$ の範囲で示した。これは、図-5, 6 の $\gamma_{\max}/U_s \sim z_{ft}/z_{st}$ 関係の断層からの距離(x/z_{st})での $\gamma_{\max}/U_s$ の最大値を意味する。図中に、constant, linear な場合の synthetic, antithetic なセンスの $\gamma_{\max}^*/U_s$ を示した。図中の括弧内のシンボルは、断層破碎帯の上端が、最も地表面に近い場合($z_{ft}/z_{st}=3.3 \times 10^{-5}$)での値である。図-5, 6 に示したように、 $z_{ft}/z_{st}=3.3 \times 10^{-5}$ の時に、断層破碎帯の上端が、地表面まで達した場合($z_{ft}/z_{st}=0$)には、計算した範囲内では、最大の最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}^*/U_s$ が生じていない。そのため $x/z_{st}=1.0 \times 10^{-5}$ での



(1) $\gamma_{\max}^*/U_s \sim x/z_{st}$ 関係



(2) $(z_{ft}/z_{st})^* \sim x/z_{st}$ 関係

図-7 $\gamma_{\max}^*/U_s \sim x/z_{st}$ および $(z_{ft}/z_{st})^* \sim x/z_{st}$ 関係

$\gamma_{\max}^*/U_s$ は、括弧内に示すシンボルよりも大きな $\gamma_{\max}^*/U_s$ を示すと予想される。破線 a~d は、その場合に予想される線である。また、図中に示したように、antithetic なセンスの $\gamma_{\max}^*/U_s$ は、区間 A では、生じない。synthetic なセンスの $\gamma_{\max}^*/U_s$ は、constant, linear な場合も断層直上に近くなるほど $\gamma_{\max}^*/U_s$ は大きくなる。

synthetic なセンスの $\gamma_{\max}^*/U_s$ において、constant な場合と linear な場合を比較すると、constant な場合の方が、linear な場合よりも、 $\gamma_{\max}^*/U_s$ の値が最大で 2 桁程度大きい。

図-7(1)に計算結果に加え、参考となるせん断ひずみの値として、 $\gamma_{r1}=1.4 \times 10^{-2}$ と $\gamma_{r2}=2.0 \times 10^{-3}$ を示した。 γ_{r1} は、鉄筋コンクリート構造計算規準の壁面のせん断ひずみの値を参考とした¹¹⁾。 γ_{r2} は、原子力発電所耐震設計技術規程に関する壁面のせん断ひずみの値を参考とした¹²⁾。 γ_{r1} , γ_{r2} と計算結果を比較すると、antithetic なセンスの $\gamma_{\max}^*/U_s$ は、 γ_{r1} , γ_{r2} よりも小さな値であることがわかる。

図-7(1) と (2) をセットで見ることで、断層からの距離(x/z_{st})において生じうる最大の最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}^*/U_s$

とそれを生じさせる断層破砕帯の上端深さ $((z_{ft} / z_{st})^*)$ を読み取ることができる。例えば、これらの図を用いると constant な場合で、synthetic なセンスの γ_{max}^* / U_s が、 $\gamma_{ft}=1.4 \times 10^{-2}$ となる断層からの距離は、およそ $x / z_{st} = 7.0 \times 10^{-3}$ ($x=2.1 \times 10^2$ (km)) となり、その時の断層破砕帯の上端深さは、およそ $z_{ft} / z_{st} = 8.0 \times 10^{-3}$ ($z_{ft} = 2.4 \times 10^2$ (km)) であることが分かる。

4. まとめ

横ずれ断層の断層変位を与える範囲とその分布形状を考慮して、地表面変形を定量的に示すことを目的とした。計算方法として、食いだい弾性理論を用いた。震源断層の震度を固定し、震源断層の上端より延びる断層破砕帯の上端深さは変化させた。また、断層破砕帯内の食いだい量の分布形状は、一様な形状と地表に近づくにつれて線形的に減らす形状とした。

さらに、鉄筋コンクリート構造計算規準の壁面のせん断ひずみの値と、原子力発電所耐震設計技術規程に関する壁面のせん断ひずみの値を参考とし、計算した地表面の最大せん断ひずみの値を比較した。横ずれ断層について、その結果、得られた変位分布と最大せん断ひずみ分布から、各断層変位を与える範囲及びその分布形状で生じる水平面内の最大せん断ひずみと断層直上からの距離との関係を得た。

参考文献

1)原子力安全・保安院：柏崎刈羽原子力発電所の建屋の上下変動・基礎地盤について、中越沖地震における柏崎

刈羽原子力発電所に関する調査・検討状況の住民説明会配布資料，2009.

2)佐藤良輔：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版会，pp.114-381，1989.

3)大草陽太郎，谷和夫：食いだい弾性理論による地震時の地殻変動予測の問題抽出に関する文献調査，第39回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.32-37，2010.

4)大草陽太郎，谷和夫：食いだい弾性理論による震源断層上端から発達する断層破砕帯を考慮した地殻変動予測，第45回地盤工学研究発表会，pp.1567-1568，2010.

5)大塚康範：地震断層のずれにともなう地盤・岩盤の変形解析（その1），応用地質，19巻，3号，pp.9-18，1978.

6)Stekette, J.A. : On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium, *Can. J. Phys. Earth*, 22, pp.213-221, 1958.

7)Mansinha, L. and Smylie, D.E. : The displacement fields of inclined faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 61, pp.1433-1440, 1971.

8)Okada, Y. : Surface deformation due to inclined shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, pp.1135-1154, 1985.

9)Okada, Y. : Internal deformation due to inclined shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, pp.1018-1140, 1995.

10)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2，28，pp.269-283，1975.

11)日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法—，日本建築学会，pp.222-228，1999.

12)原子力規格委員会：原子力発電所耐震設計技術規程，日本電気協会，pp.112-134，2009.

STUDY ON SURFACE DEFORMATION BY STRIKE-SLIP FAULT DISPLACEMENT USING BY ELASTICITY THEORY OF DISLOCATION

Yotaro OKUSA and Kazuo TANI

A series of computation were conducted using fault dislocation theory to investigate the surface deformation due to strike-slip fault displacements. Focus was placed on the propagation of fault dislocation from the source fault to the fault rupture in the surface layer. Based on the computed results, the relationship between the maximum shear strain on the ground surface and the distance for the fault location was presented.