

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 —

岩田 直樹^{1*}・大塚 康範²・藍檀 オメル³・伊藤 高敏⁴・オノ木 敦士⁵・池田 隆明⁶

¹中電技術コンサルタント(株) 原子力本部 (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

²一般社団法人日本応用地質学会 (〒187-0034 東京都小平市栄町3-13-9)

³琉球大学 工学部工学科社会基盤デザインコース (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1)

⁴東北大学 流体科学研究所 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1)

⁵熊本大学 工学部 (〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2-39-1)

⁶長岡技術科学大学 大学院工学研究科環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1)

*E-mail: n.iwata@cecnet.co.jp

大規模な内陸地震により地表に断層(地表地震断層)が出現すると、重要構造物に大きな被害を与える。地表地震断層の発生の有無や規模については、過去の観測記録や地質調査結果をもとに経験的に評価されることが一般的である。一方で、震源モデルを用いて地表地震断層のシミュレーション解析も行われているが、大半は地盤を均質としており、速度層構造や断層周辺に存在するダメージゾーンなどを考慮した事例は少ない。そこで本研究では、2016年熊本地震の前震が発生した日奈久断層を対象として、ダメージゾーンの有無などの地盤条件の違いが、地表地震断層の発生の有無や地表面の強震動にどのような影響を与えるかを、3次元有限要素法による動的破壊シミュレーションにより検討を行った。

Key Words : dynamic FEM analysis, fault rupture, damage zone, surface rupture, strong motion

1. はじめに

これまでの耐震設計は地震の揺れに対して検討されてきたが、1999年の台湾・集集地震やトルコ・コジャエリ地震で地表に生じた断層変形によりダムや橋梁に多くの被害が発生したことを契機として、断層変位に対する対応が課題となっている。日本でも2011年福島県浜通り地震、2014年長野県神城断層地震、2016年熊本地震のように、地表地震断層を伴う地震が発生している。

地表地震断層の変位量は、断層規模、長さや相関があり、M6.5以上となる発生し始める¹⁾など過去の観測結果をもとにした経験的な評価や、断層面とすべり量を仮定した食い違い弾性論²⁾による静的な解析が一般的である。一方、動的な数値シミュレーションによる地表地震断層の評価も行われており、表層をモデル化したものと、断層全体をモデル化したもの2つに大きく区分される。前者は、FEMや粒子法等により地表に発生する断層の分布形状や、周辺に発生する副断層を評価している場合が

多く、モデル底面の断層変位を入力条件としている。一方で後者は、断層面の力の釣り合いに基づき、断層の破壊進展を動力的に評価する手法であり、差分法(FDM)、有限要素法(FEM)、境界要素法(BEM)等による様々な手法が提案されている。これらの手法は、断層の動学的破壊進展解析により隣接する断層の連動性や地表面の変位や加速度の動的な応答を再現できるといった特長はあるが、断層のモデル化、初期条件や境界条件等による影響が大きいといった課題があるが、検討事例が少なく、実務に適用できるレベルまで至っていない^{3,4)}。

地表地震断層周辺には、断層運動で形成された割れ目帯(ダメージゾーン、以降DZと記載)が存在しており、地震規模に応じてその幅や割れ目性状が異なる。オノ木ら⁵⁾は、断層周辺のDZに着目し、地殻応力により断層面に発生する応力が、DZを考慮することでアスペリティへの応力集中を考慮できることや、このアスペリティの破壊による地震モーメントは、DZを考慮しないものよりかなり小さくなることを数値解析により評価してい

る。一方、金折ら⁹⁾は、断層をジョイント要素でモデル化した平面2次元動的FEMを用いて、2つの横ずれ断層地震において、断層周辺のDZを考慮することで面的な強震動分布を良く再現できることを示している。

一方、筆者らは、これまで断層運動に伴う地表地震断層の発生だけでなく、断層近傍の強震動を同時に評価できる手法の確立を目指して、断層の動力学的破壊プロセスを考慮した3次元動的FEM解析手法によるシミュレーションを行ってきた。この手法を用いた2014年長野県神城断層地震のシミュレーション⁷⁾では、地震規模に応じた初期応力分布を設定しても、断層のすべり量が想定以上に大きく、地震モーメントもかなり大きくなることや、地殻の速度層分布を考慮すると地表面で大きな断層変位が生じるといった課題を示している。

そこで本研究では、DZの有無、DZ幅や弾性波速度の違いによる地表地震断層の発生の有無や、断層面のすべり量、地震動の規模等について、地震発生リスクが非常に高い日奈久断層を対象に検討を行うとともに、2016年熊本地震で観測された地表面変位や強震動のシミュレーションによりモデル化や解析手法の妥当性を検討した。

2. 解析方法

(1) 断層面のモデル化

本研究では、地盤は8節点アイソパラメトリック要素、断層面はジョイント要素でモデル化する。ジョイント要素は、図-1に示すようにジョイント要素を挟む岩盤要素（ソリッド要素）の節点間をせん断方向バネ k_r 、 k_s および垂直方向 k_t のバネで接続する。3次元FEMで四角形のジョイント要素を設置した場合、四角形の四隅にバネを設定し、それぞれについて応力を算定し、モール・クーロン破壊規準に基づき破壊判定を行う。ジョイント要素には面内のせん断応力 τ_r 、 τ_s と垂直応力 σ_n が発生するが、式(1)で算定される合成せん断応力 τ がピーク強度 τ_y を超えた場合にせん断破壊が生じる。

$$\tau = \sqrt{\tau_r^2 + \tau_s^2} \quad (1)$$

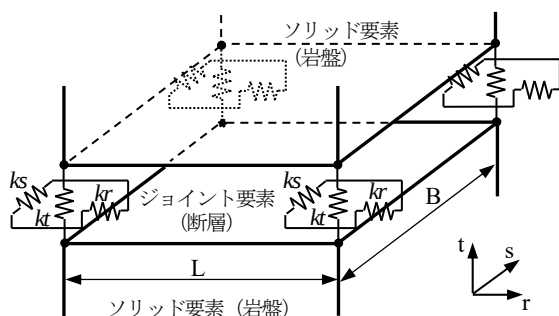


図-1 3次元ジョイント要素の概要図

図-2はジョイント要素のせん断方向の構成則を示す。せん断応力がピーク強度に達すると応力降下が生じ、せん断応力がピーク強度 τ_y から残留強度 τ_r に低下することにより応力降下量 $(\tau_y - \tau_r)$ が周辺要素に配分される。これにより周辺要素のせん断応力が増加し、ピーク強度に達してせん断破壊が生じることで破壊が伝播する。ここで、初期応力 τ_i からピーク強度 τ_y に達するまでの構成関係は線形と仮定し、バネ定数は一定とした。応力降下時の構成関係は、一般的に、応力降下は相対変位に対して指数関数的に降下することが知られているが、本検討では応力降下時の変位-応力関係を線形として単純化した。ここで、限界すべり量 D_c は地震動の規模により異なり、一般的な地震動では数10cm～数m程度であることが知られている。また、ジョイント要素の垂直応力は、剥離（引張応力）が生じないよう十分に大きな値を設定した。

(2) 運動方程式

本解析における運動方程式を式(2)に示す。

$$[M]\{\ddot{u}\} + ([C] + [C_B])\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (2)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ は系全体の質量、減衰、剛性マトリックス、 $[C_B]$ は粘性境界マトリックス、 $\{\ddot{u}\}$ は加速度、 $\{\dot{u}\}$ は速度、 $\{u\}$ は変位である。また、外力ベクトル $\{F\}$ はジョイント要素の破壊に伴う応力降下量であり、ジョイント要素の相対変位に応じた応力降下量となる。系全体の減衰マトリックス $[C]$ は、質量マトリックス $[M]$ と剛性マトリックス $[K]$ の線形結合で表されるRayleigh減衰を設定する。粘性境界の減衰マトリックス $[C_B]$ は、モデルの側方および底面境界での反射波の影響を取り除くため設定したダッシュポットに相当する。

断層の破壊プロセスや地盤の変位および加速度などの動的な挙動については、式(2)の運動方程式をNewmarkの β 法で $\beta=0.25$ として解き、ジョイント要素の非線形の処理は荷重伝達法により計算を行う。ここで、外力ベクトルは、応力降下時のせん断応力-相対変位の関係に基づく相対変位に応じた応力降下量となるため、せん断応力-相対変位の関係を満足するまで荷重伝達法により収束計算を行う。

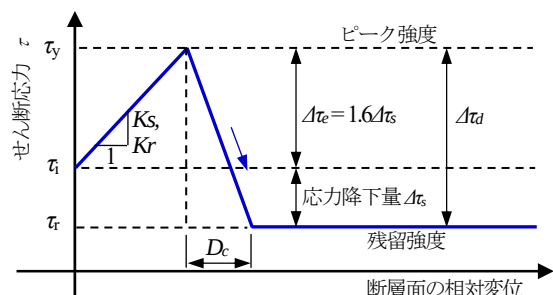


図-2 ジョイント要素のせん断方向の構成則

3. 検討断層地震の概要

熊本県で2016年4月14日21:26にM6.5の前震が発生し、2日後の4月16日1:25にM7.3の本震が発生した。一連の地震は、布田川断層帯と日奈久断層帯の一部がずれて発生したもので、M6.5の前震は日奈久断層帯の高野―白旗区間の活動によると考えられている。2016年の熊本地震では日奈断層帯の北側の一部しか動いておらず、エネルギーを溜めていると考えられており、地震調査研究推進地本部（以降、推本と呼ぶ）が示す地震発生確率では非常に高いと評価している。

本研究では、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」⁸⁾により日奈久断層帯の高野―白旗区間を対象として、推本が設定している特性化震源モデル（以降、推本モデルと呼ぶ）を用いてDZの有無、DZ幅や弾性波速度の違いによる地表地震断層の発生の有無や、断層面のすべり量、地震動の規模等について検討を行った。その結果をもとに、日奈久断層帯の高野―白旗区間で発生した2016年熊本地震前震のシミュレーションを行い、地表面変位分布と加速度応答を観測結果と比較して、DZの影響について評価を行った。

推本モデル⁹⁾の断層モデルを図-3、断層パラメータを表-1に示す。断層長さ20km、幅14km、傾斜角90°で断層タイプは正断層成分を含む右横ずれ型である。地震規模はM6.8、地震モーメント $M_0=5.28 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$ であり、アスペリティは正方形を仮定し、破壊開始点（震源）をアスペリティ下端の北側に設定した。なお、武村¹⁾によるとM6.8以上で地表地震断層の出現率が非常に高いことから、当地震も地表断層が生じる可能性が高い。

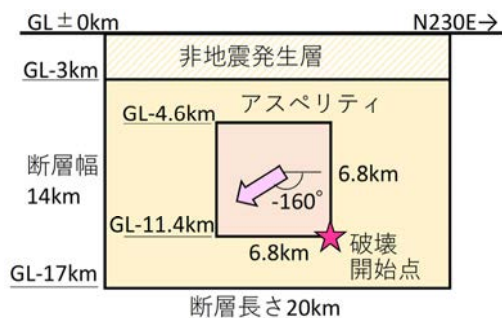


図-3 推本モデルの断層モデル

表-1 日奈久断層地震の断層パラメータ

	推本	前震1	前震2
マグニチュードM	6.8	6.5	6.4
地震モーメント $M_0(\text{N} \cdot \text{m})$	5.28×10^{18}	1.74×10^{18}	1.06×10^{18}
走行 θ	N203°E	N212°E	N211°E
傾斜 δ	90°	89°W	86°W
すべり角 λ	-160°	-164°	-152°
アスペリティ(km)	6.8×6.8	5.5×5.5	5.1×5.1
震源深さ(km)	-11.4	-11.4	-6.7
応力降下量(MPa)	16.5	17.4	17.5

熊本地震前震と呼ばれるM6.5の地震（以降、前震1と呼ぶ）が2016年4月14日21:26に発生し、その直後から地震活動が活発化し、2時間半後の4月15日00:03にM6.4の地震（以降、前震2と呼ぶ）が発生している。F-Netのメカニズム解¹⁰⁾による前震の震源情報を図-4および表-1に示す。各断層パラメータは、地震モーメントをからレシピに基づき設定した。

これらの地震による地殻変動は、陸域観測技術衛星「だいち2号」(ALOS-2)によるSAR干渉解析によって捉えられているが、個々の地震の地殻変動を算定できないことから、合計の地殻変動量が求まっている¹¹⁾。なお、SAR干渉解析は、衛星から地表の同一地点に対して異なる2時期にレーダーを照射し、得られる反射波の2時期の位相差を計算することによって、衛星から地表を見たときの視線方向の地表変位（LOS変位）を面的に捉える技術である。図-5は、2014年11月14日と2016年4月15日12:53のペアによるLOS変位（西側から入射角32.4°）と、GEONETによる水平変位を合わせて示したものである。干渉SAR解析によると、前震2の震源の西側では最大+12cm程度の衛星から遠ざかる方向の地盤変位（沈下傾向）が発生し、前震1の震源の北西部では最大10cm程度の衛星に近づく方向の地盤変位（隆起傾向）が見られる。これらの地殻変動の特徴は、今回の地震が右横ずれ断層運動であることと調和的である。なお、

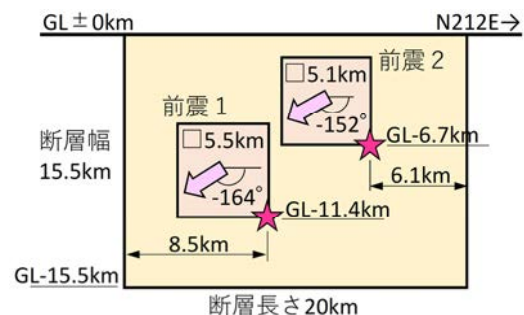


図-4 前震1, 2の断層モデル

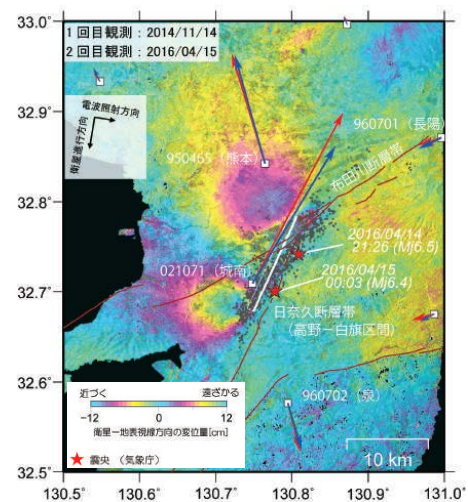


図-5 SARによる地殻変動の観測記録¹¹⁾

前震 1, 2 によって明瞭な地表地震断層は発生していない。このことは、武村¹⁾が示した M6.5 以下では地表地震断層の出現率が非常に小さいことと整合している。

4. 地表地震断層へのダメージゾーンの影響

(1) 解析モデル

本検討では、推本モデルを用いて DZ の影響による地表地震断層の発生の有無や断層面のすべり量を比較する。図-6 に対象とした推本モデルの FEM 分割図を示す。断層端部から側方および底面境界までの距離は、それぞれ断層長さおよび断層深さ程度とし、側面および底面には粘性境界を設定した。地盤のせん断弾性波速度 V_s ¹²⁾¹³⁾は、地表面～GL-0.3km で 2.1km/s, GL-0.3～-2.0km で 3.1km/s, GL-2.0～-3.0km で 3.2km/s, GL-3.0～-17.0km で 3.5km/s, GL-17.0km 以深で 3.8km/s となる水平成層地盤を仮定した。断層はジョイント要素、岩盤はソリッド要素でモデル化した。ジョイント要素は Y 軸方向の側方境界まで設定しており、断層部分のみ破壊が伝播するようにモール・クーロン破壊規準に基づく強度を設定するが、断層面より外側は破壊しないように非常に大きな強度を設定した。なお今回は、表層付近の非地震発生層を通り抜けて断層が地表面に達することができるように、断層部上部の非地震発生層には、断層と同様の強度を設定した。

メッシュ分割は、断層面および断層近傍では 100m とし、DZ は断層面の両側にあるソリッド要素の剛性を低下させることでモデル化している。

(2) 検討ケースとダメージゾーンの物性

推本モデルを用いて①DZ の有無、②DZ 幅、③DZ の剛性（周辺岩盤とのせん断弾性波速度比 V_{sd}/V_s ）、④臨界すべり量 D_c の影響について比較検討を行った。ここで、 V_{sd} は DZ の V_s であり、 V_{sd}/V_s は周辺の健全な岩盤に対する DZ の V_s の低下度合いを示す。なお、DZ の剛性低下率は V_{sd}/V_s の二乗に比例する。

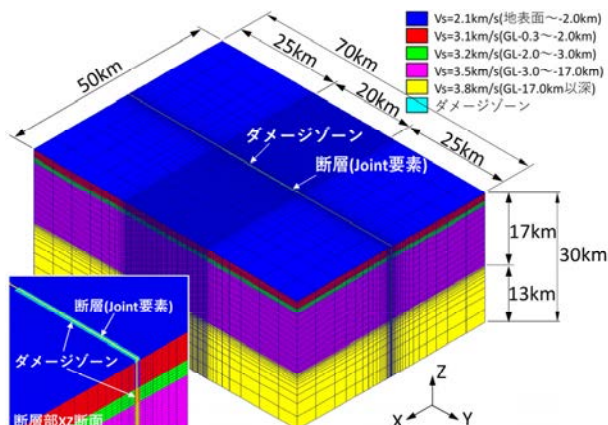


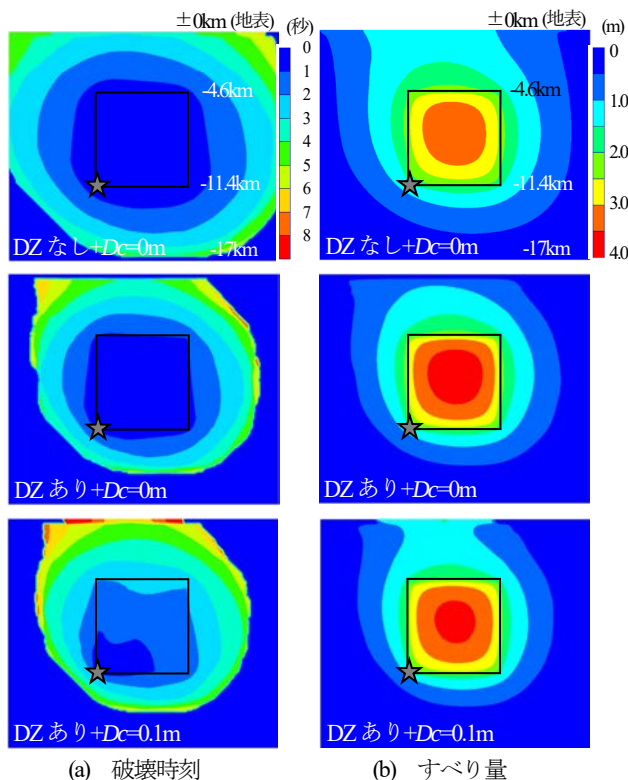
図-6 推本モデルのFEM要素分割図

DZ 幅および V_{sd}/V_s については、Huang & Ampuero¹⁴⁾は、多くの断層でダメージゾーンの幅が 100～400m であり、 V_{sd}/V_s は 20～60% であるとしている。Vernil & Scholz¹⁵⁾は、露頭の観測記録から断層長(L)と DZ 幅(W)には $W/L \approx 10^{-2}$ の関係があることを示している。一方、野島断層の大深度ボーリング調査では、断層周辺の低速度帯の幅が約 20～50m で、その V_{sd}/V_s が 40～66% であることが分かっている¹⁶⁾。これらを踏まえて、DZ 幅は断層片側に 200m, 100m, 50m とし、 V_{sd}/V_s は 70, 60, 50, 40% としてパラメトリックスタディを行った。

D_c は断層面の広がりや破壊伝播速度などに影響を与える重要なパラメータであり、地震規模に依存する。Ohnaka の提案式¹⁷⁾によると、当該断層規模に対しては $D_c=0.8m$ 程度となるが、 $D_c=0.8m$ とすると断層面の破壊が伝播しないことから、破壊が伝播する最も大きな $D_c=0.1m$ を用いて検討を行った。

(3) ダメージゾーンと臨界すべり量の影響

図-7にDZの有無および D_c を設定した場合の断層面の破壊時刻と断層面のすべり量を示す。ここで、DZ幅は200m、 V_{sd}/V_s は60%としている。DZなしで $D_c=0m$ とした場合、破壊領域が断層面全体に広がり、破壊面は地表面や側方境界に達している。アスペリティ付近では3.4m～2m程度のすべりが生じ、地表面での断層の最大ずれは断層方向に1.19m、鉛直方向に0.57mとなった。レシピで設定したアスペリティの平均すべり量1.2mと比較すると非常に大きなすべりが生じている。このため地震モーメ



(a) 破壊時刻 (b) すべり量

図-7 断層面の破壊分布（断層面を西側から望む）

ントは $1.54 \times 10^{19} \text{N} \cdot \text{m}$ となり、想定値の約3倍となった。

一方、DZを考慮して $D_c=0\text{m}$ とした場合、アスペリティ付近では $3.8\text{m} \sim 2.5\text{m}$ 程度のすべりが生じ、DZを考慮しない場合より大きなすべりとなるが、表層の低速度帯に向かって破壊領域の広がりが抑制されており、GL-0.3km以浅の $V_s=2.1\text{km/s}$ 層下端で破壊面が停止した。この原因を確認するために、表層を $V_s=2.6\text{km/s}$ としたり、層厚を100mに薄くした解析を行うと、破壊面が地表に到達する結果となった。このことから、層境界を挟んで V_s が大きく異なることと、表層厚さがある程度ある場合には、地表地震断層の発生を抑制する効果があることが分かった。このようにDZを考慮すると破壊領域が小さくなることから、地震モーメントは $4.78 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$ となり、想定値程度となった。しかし、アスペリティのすべり量が多いことや、アスペリティ全体が一気に破壊すること、更には地表面に断層のずれが生じないことなど想定と大きく異なる点も多い。

DZと D_c を考慮すると、破壊領域は D_c を考慮しない場合よりも若干小さくなるとともに、GL-0.3km以浅の $V_s=2.1\text{km/s}$ 層にも破壊が伝播するようになった。しかし、破壊時間の分布は、 $V_s=2.1\text{km/s}$ 層下端で不連続となっていることから、一旦は層境界で破壊は止まるが、その後の下層での破壊の進展に伴い、破壊エネルギーを貯め込んで破壊するといった現象が生じているものと考えられる。こういったメカニズムで地表面に破壊が伝播するかは今後の検討課題であるが、今回の検討では、表層付近の断層面の強度（応力降下量）をアスペリティ周辺と同様に設定していることも一因と考えられる。この結果、アスペリティ付近のすべり量は、 D_c を考慮することで小さくなり、地震モーメントも $4.38 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$ となった。また、すべり面はGL-0.3km以浅で広がり、地表面で断層方向に1.31m、鉛直方向に0.70mのずれが生じた。

(4) ダメージゾーンの幅と剛性の影響

$V_{sd}/V_s=60\%$ 、 $D_c=0.1\text{m}$ として、DZ幅を200, 100, 50mに変えると、地表面での断層のずれは、断層方向に1.31, 0.06, 0.07mとなり、DZ幅が100m以下では地表に破壊面が到達せず、断層面の弾性的な変形のみが生じる結果となった。ただし、地震モーメントは 4.38×10^{18} , 4.08×10^{18} , $4.03 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$ となり、DZ幅が小さくなると僅かに小さくなる程度であった。

DZ幅を50m、 $D_c=0.1\text{m}$ として、 V_{sd}/V_s を70, 60, 50, 40%に変えると、地表面での断層方向の断層のずれは、1.24, 0.07, 0.09, 0.03mとなり、地震モーメントは 5.93×10^{18} , 4.03×10^{18} , 2.65×10^{18} , $1.48 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$ となった。これは、 V_{sd}/V_s が小さくなるとDZが大きく変形するため断層のすべり量が非常に小さくなり、破壊領域も小さくなったことが原因である。

5. 熊本地震前震のシミュレーション

推本モデルを使った検討結果から、DZと D_c を考慮した結果が、変位、地震規模等について総合的にレシピーによる想定値と整合する結果となることが分かった。そこで、熊本地震の前震1, 2についてシミュレーションを行い、地表面変位分布をSARおよびGEOMETの観測結果¹¹⁾と比較するとともに、KiK-net益城観測点で記録されている加速度記録と解析による加速度応答を比較した。

SAR観測記録は、前震1, 2を分けることが困難であることから、前震1と前震2のシミュレーションによる地表変位を足し合わせて観測記録と比較を行った。SARとの比較に当たっては、解析より求まる断層方向、断層直交方向、鉛直方向の変位を衛星の視線方向に合成したLOS変位分布図と比較した。図-8は解析による前震1と前震2のLOS変位分布を示す。図-8(a)に示す表-1のパラメータによるLOS変位分布は、前震2の震源の西側ではマイナス（沈下傾向）、前震1の震源の北側でプラス（隆起傾向）といった傾向は再現できているが、LOS変位量はかなり小さい。前震2の震源西側にあるGEOMETの電子基準点「城南」では、断層方向の北側に約20cmの水平変位と、鉛直に1cmの沈下が観測されている。解析では水平に23cm、鉛直に21cmの沈下となっており、水平は概ね観測程度であるが、鉛直変位はかなり大きい。

そこで、矢来ら¹¹⁾がSAR観測より推定した断層傾斜角 75° を用いて再度計算を行った結果を図-8(b)に示す。この結果、プラス領域、マイナス領域ともにLOS変位は増加したが、観測値よりまだ小さい。また解析では、断層東側で大きな隆起傾向が算定されるが、実測では僅かであり、実測の再現性は低い。これらの原因として、今回のモデルは地殻のごく表層の低速度帯をモデル化していないことが一つとして考えられる。

KiK-net益城観測点位置において抽出した前震1の加速度応答を図-9に示す。最大加速度は、東西125Gal、南北283Gal、鉛直108Galとなっており、GL-252mの基盤にお

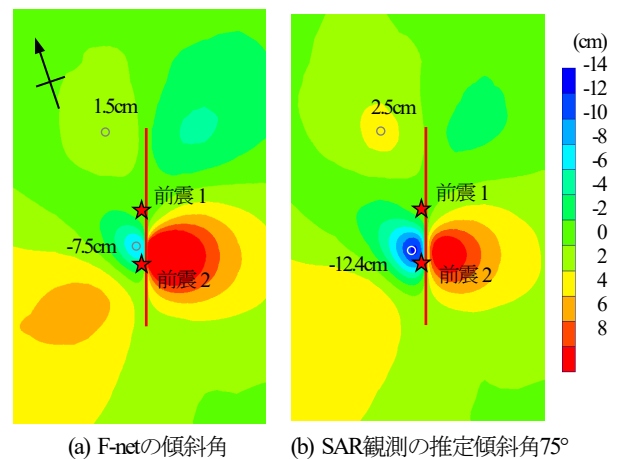


図-8 解析による前震1と前震2のLOS変位分布

ける観測記録である東西179Gal, 南北237Gal, 鉛直127Galと同程度となっている。

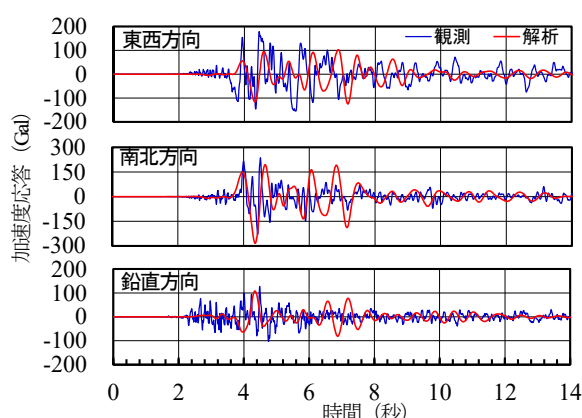


図-9 KiK-net益城観測点位置における加速度応答の比較

6. おわりに

日奈久断層を対象とした3次元動的FEM解析による断層シミュレーションにより、DZをモデル化した場合の影響検討を行った。その結果、DZ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で、レシピと同程度の規模の地震が再現となった。また、地殻のごく表層に低速度帯がある場合、表層への断層の破壊進展が抑制されることも分かった。これらの結果をもとに、2016年熊本地震前震のシミュレーションを行い、地表面変位分布や観測点の加速度応答を概ね再現可能であることも分かった。

参考文献

- 1) 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連—，地震第2報第51巻，pp.211-228，1998。
- 2) Okada: Internal deformation due to shear and tensile fault in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, pp.1018-1040, 1992.
- 3) 澤田昌孝：動力学破壊進展解析による地表断層変位予測手法の提案，電力中央研究所報告，N14007，2014。

- 4) 入江紀嘉，檀一男，生玉真也，入倉考次郎：地中震源断層と地表面断層の断層パラメータ間の動学的断層破壊モデルの構築，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第657号，pp.1965-1974，2010。
- 5) オノ木敦士，岩田直樹，朝比奈大輔，藍檀オメル：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。
- 6) Fukushima, K., Kanaori, Y. and Miura F.: Influence of fault process zone on ground shaking of inland earthquakes: Verification of Mj=7.3 Western Tottori Prefecture and Mj=7.0 West Off Fukuoka Prefecture earthquakes, southwest Japan, *Engineering Geology*, 116, pp.157-165, 2010.
- 7) 岩田直樹，清田亮二，藍檀オメル，伊藤高敏，三浦房紀：断層面の形状や地質構造の違いによる強震動と断層変位の比較：神城断層地震を事例として，第46回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.13-18，2019。
- 8) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」），2020。
- 9) 震源断層を特定した地震動予測地図（シナリオ地震動予測地図）九州・沖縄地域，全国地震動予測地図2020年版，地震調査研究推進本部。
https://www.jishin.go.jp/main/chousa/20_yosokuchizu/yosokuchizu2020_chizu_39.pdf
- 10) 防災科学技術研究所：広帯域地震観測網，F-net，<http://www.fnet.bosai.go.jp>（2021.9.7閲覧）
- 11) 矢来博司，小林知勝，森下遊，藤原智，檜山洋平，川元智司，上芝晴香，三浦優司，宮原伐折羅：熊本地震に伴う地殻変動から推定された震源断層モデル，国土地理院時報，No.128，pp.169-176，2016。
- 12) 布田川・日奈久断層帯の地震を想定した強震動評価，地震調査研究推進本部地震調査委員会，平成15年7月31日。
- 13) 防災科学技術研究所：J-SHIS 地震ハザードステーション，2020年度版深部地盤。
- 14) Huang, Y., Ampuero, J.-P. and Helmberger, D.V.: Earthquake ruptures modulated by waves in damaged fault zones, *J. Geophys. Res: Solid Earth*, 119, 3133–3154, doi:10.1002/2013JB010724, 2014.
- 15) Vernilye, J. M. and Schoiz, C. H.: The process zone: A microstructural view of fault growth, *J. Geophys. Res.*, 103(B5), pp.12,223-12,237, 1998.
- 16) Yamamoto, K., Sato, N. and Yabe, Y.: Elastic property of damaged zone inferred from in-situ stresses and its role on the shear strength of faults, *Earth Planets Space*, 54, pp.1181–1194, 2002.
- 17) Ohnaka, M.: A Physical scaling relation between the size of an earthquake and its nucleation zone size, *Pure Appl. Geophys.*, 157, pp.2259–2282, 2000.

ANALYTICAL STUDY ON THE EFFECT OF DAMAGE ZONE ON THE OCCURRENCE OF SURFACE RUPTURE AT HINAGU FAULT

Naoki IWATA, Yasunori OHTSUKA, Ömer AYDAN, Takatoshi ITO, Atsushi SAINOKI and Takaaki IKEDA

When a surface rupture occurs due to a large-scale inland earthquake, it causes great damage to important structures. The occurrence of surface ruptures is generally evaluated empirically based on past observation records and geological survey results. On the other hand, surface rupture simulations have also been performed using the fault model, but most of them have a homogeneous ground and without the damage zone around the fault. Therefore, in this study, regarding the Hinagu fault where the foreshock of the 2016 Kumamoto earthquake occurred, the effect of different ground conditions in the damage zone on the occurrence of surface ruptures and strong motions was examined using 3D fault rupture simulation.