

2次元および3次元有限要素法による2014年 神城断層地震の断層運動シミュレーション

岩田 直樹^{1*}・足立光¹・高橋裕徳¹・藍檀オメル²・三浦房紀³

¹中電技術コンサルタント(株) 原子力プロジェクト室 (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

²琉球大学工学部 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1)

³山口大学 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

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

1999年の台湾・集集地震やトルコ・コジャエリ地震の地表面変形による被害事例を契機として、断層運動によって生じる揺れだけでなく、地表面に生じる永久変位をいかに評価するかが課題となっている。これを解決するために、有限要素法などによる数値解析手法を用いた動力学的方法による検討がなされているが、断層のモデル化や初期条件などにより応答が異なることから実用化まで至っていない。本研究では、地表面変位が観測された逆断層型地震である2014年長野県神城断層地震を事例として、2次元および3次元有限要素法を用いて断層のモデル化の違いについて比較を行い、適用性を検討した。この結果、3次元モデルを用いて初期応力を適切に設定することで地表面変位を概ね再現できることが分かった。

Key Words : dynamic FEM analysis, surface rupture, fault displacement, fault rupture process

1. はじめに

1999年の台湾・集集地震やトルコ・コジャエリ地震では、地表面で生じた断層変形によって多くの被害が発生した。これまで耐震設計は地震の揺れに対してのみなされてきたが、これ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。また原子力施設では、重要施設を断層変位が生じる恐れのない地盤に設置することを原則としており、断層上に施設を建設することはない。しかしながら、敷地内およびその周辺にある断層が活動した場合に2次的に発生する断層の有無や活動性、断層運動によって生じる地表面変位の構造物への影響が心配されることから、これらを定量的に評価する試みがなされているが、実務に適用できるレベルまで至っていない¹⁾。

断層変位を定量的に評価する方法として様々な数値解析手法とモデルが提案されており、これには静的な手法と動的な手法がある¹⁾。静的な手法は、地盤を弾性体でモデル化し、断層変位を入力条件として断層周辺地盤の変位や応力変化を求める手法であり、複雑な地質構造や地形、地盤の非線形性や断層破壊のプロセスは考慮できない。一方、動的な手法は、差分法(FDM)、有限要素法(FEM)、境界要素法(BEM)等により断層の動力学破壊進展解析により隣接する断層の運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もある。

本研究では、Toki and Miura²⁾、水本ら³⁾により検討されている2次元および3次元FEMによる断層破壊プロセスを考慮した動力学解析手法を用いて、2014年11月に長野県で発生した神城断層地震を対象としてシミュレーションを行い、K-NET 白馬における観測値との比較により解析手法の適用性や解析条件の違いによる影響について検討を行った。

2. 解析方法

解析に当たっては、地盤はソリッド要素でモデル化し、断層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ことで断層の滑り挙動を再現する。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。

ピーク強度 τ_y は一般的に粘着力 c と内部摩擦角 φ を用いて算定 ($\tau_y = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi$) されるが、断層に作用する垂直応力 σ_n が不明であることから粘着力 c のみを考慮する。すなわち、粘着力 $c =$ ピーク強度 τ_y とする。断層にせん断破壊が生じると強度がピーク強度 τ_y から残留強度 τ_r に低下して応力降下が生じ、応力降下量 ($\tau_y - \tau_r$) が周辺要素に配分されることで破壊が伝播する。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、ここでは図-2に示すように破壊に達した瞬間に残留強度まで降下すると仮定した。なお、ジョイント要素の剥離については、垂直応力に引張応力が発生しないように十分な値としている。

3. 長野県神城断層地震の観測記録

長野県神城断層地震は、2014年11月22日22時8分頃、長野県北部の北安曇郡白馬村を震源として発生した地震であり、約9kmに亘って断続的に地表地震断層が確認されている。断層のタイプは、左横ずれ成分を含む逆断層型であり、断層の大きさや地震の規模については様々な

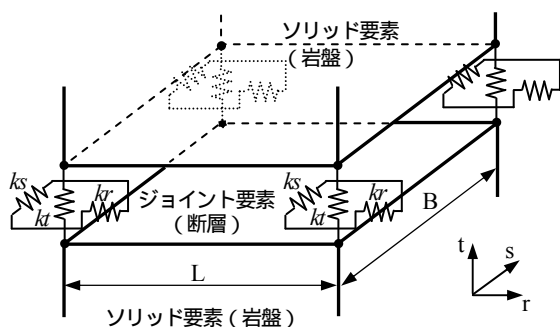


図-1 3次元ジョイント要素の概要図

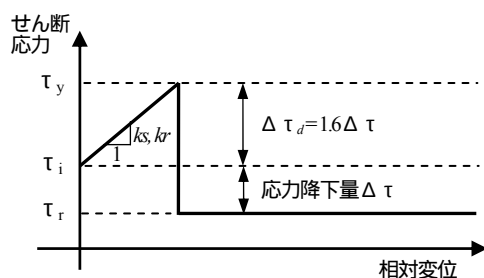


図-2 ジョイント要素の構成則

機関からの報告^{例えば4), 5)}があるが, 本検討ではこれらを集計して平均的なパラメータを表-1および図-3のように設定した. ここで, 断層の平均すべり量は, 「震源断層を特定した地震動の強震予測手法」⁶⁾(以降, レシピと呼ぶ)により算定したものである.

また、地表地震断層から西側に約1km離れたK-NET白馬の観測点で加速度応答が観測されており、最大加速度は南北方向で570Gal、東西方向で219Gal、鉛直方向で278Galであった。この加速度波形をもとにEPS法⁷⁾により変位波形を算定した結果を図-4に示す。K-NET白馬の観測点は断層の下盤側に位置し、最終的な変位は、東方向

表-1 長野県神城断層地震の断層パラメータ

モーメントマグニチュード Mw	6.3
断層寸法 幅 W × 長さ L	15km × 15km
地表から断層下端までの深さ H	9km
走行 θ	16° (N16E)
傾斜 δ	50° (50E)
すべり角 λ	50°
震源 (破壊開始点)	断層中央
断層平均すべり量	80cm

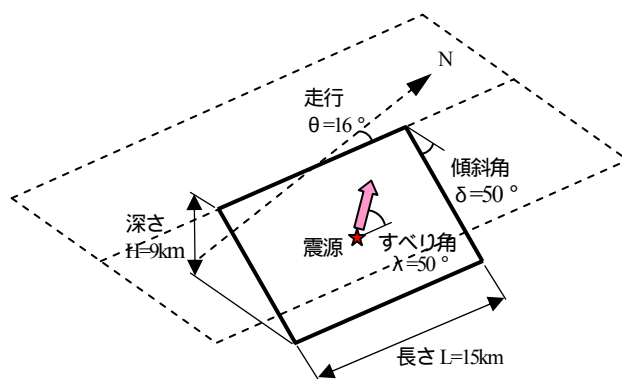


図-3 長野県神城断層地震の断層モデル

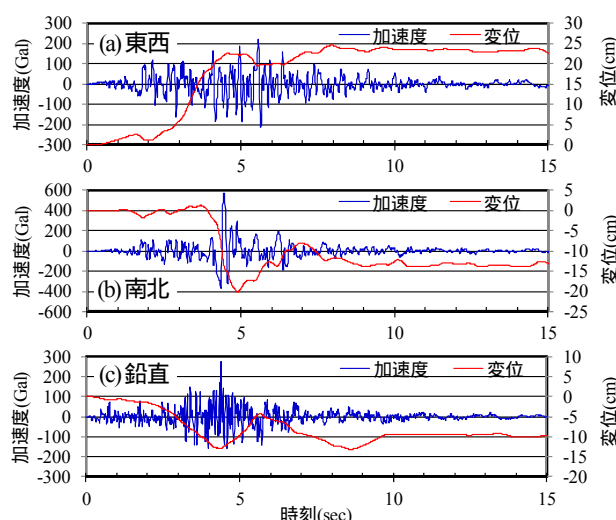


図-4 K-NET白馬観測点の加速度観測記録と変位応答

に24cm程度，南方向に14cm程度，鉛直方向には10cm程度の沈下が生じたものと推定された．

4. 解析条件

(1) 解析モデル

2次元および3次元FEMモデルを図-5に示す．いずれのFEMモデルも，断層端部から境界までの距離を断層長さ15km以上を確保できるように解析領域を確保し，側面および底面には粘性境界を設定した．メッシュ分割に当たっては，算定したい地震動の最大振動数 f_{max} に応じて，式(2)により地盤のせん断波速度 V_s を用いて算定したメッシュ厚よりも小さくする必要がある⁸⁾．

$$f_{max} = \frac{V_s}{4 \sim 5 \times H} \quad (2)$$

このため2次元FEMモデルでは，観測記録の加速度応答スペクトルの主要成分である0.2～0.3秒程度の地震動を再現できるように断層部周辺を200m程度でメッシュ分割した．一方，3次元FEMモデルでは，メッシュ分割を細かくすると高振動数の応答まで再現できるが，メッシュ数が多くなり，計算時間が非常に長くなることから断層面を1km×1kmメッシュに分割した．

(2) 解析用物性値

解析用物性値を表-2に示す．岩盤の弾性波速度は，断層周辺の地震観測点の断層からの距離と伝播時間より算定した．断層のパネ定数は，設定の違いによって応答が異なることから，せん断パネ定数を $k_s=1.0 \times 10^4$ ， 1.0×10^5 ， 1.0×10^6 ， 1.0×10^7 kN/m³の4ケースに変化させてパネ定数の違いによる影響を検討する．垂直パネ定数は，一般的な岩盤不連続面ではせん断パネ定数の数倍程度の値を設定することが多いことから，せん断パネ定数の3倍とした．断層の強度については，断層面内の平均応力降下量 $\Delta \tau$ はレシビに基づき算定し，ピーク強度についてはAndrew⁹⁾により破壊が安定的に進展する条件として，図

-2に示す強度超過量 $\Delta \tau_d$ が応力降下量 $\Delta \tau$ の1.6倍であるとの知見をもとに，ピーク強度 τ_y を設定した．なお，本解析では応力降下量が重要であり，残留強度 τ_r は意味を持たない．このため，応力降下量よりも十分に大きい10.0MPaを設定した．

(3) 断層の応力分布

断層に破壊が生じるように，断層面内のせん断応力分布は，震源のせん断応力をピーク強度よりも若干大きく設定する．震源周辺のせん断応力分布は，断層面内の平均的な応力降下量が2.0MPaとなるように，断層端部の応力降下量を0として震源に近づくに従って大きくなる山型の分布を設定する．なお，3次元モデルでは，すべり角方向に初期せん断力を与えることにより，逆断層方向と横ずれ方向に分力が作用することから横ずれ成分を含む逆断層の挙動が再現できる．

5. 2次元FEMによる解析結果

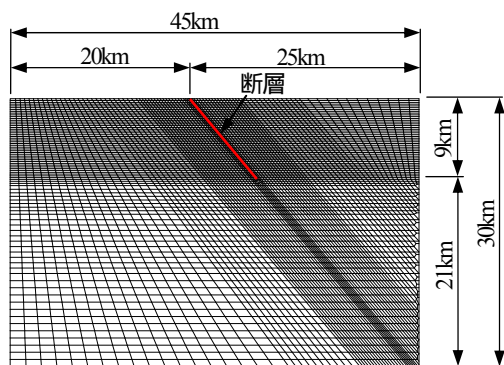
(1) 断層の破壊進展に伴う挙動

本節では，断層の破壊進展に伴う断層面内の応力分布や破壊の進展，地表面の挙動について，断層のせん断パネ定数を $k_s=1.0 \times 10^5$ kN/m³としたケースを例に検討する．

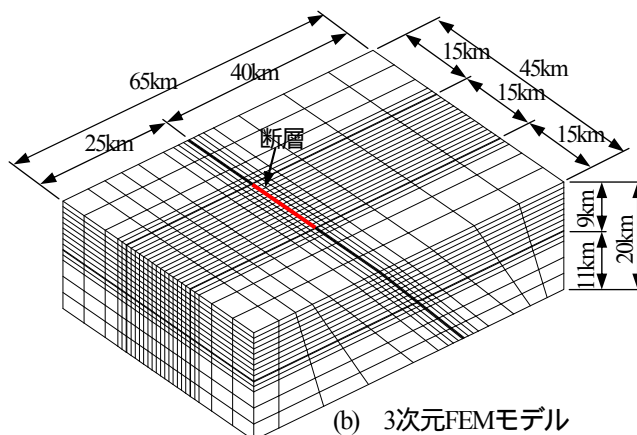
図-6に断層面内のせん断応力とすべり量の経時変化を

表-2 FEMによる断層シミュレーションの解析用物性値

岩盤	S波速度 V_s (km/s)	3.5
	P波速度 V_p (km/s)	6.1
	ポアソン比 ν	0.25
断層	せん断パネ定数 k_s (kN/m ³)	1.0×10^4 , 1.0×10^5 , 1.0×10^6 , 1.0×10^7
	垂直パネ定数 k_n (kN/m ³)	$3 \times k_s$
	応力降下量 $\Delta \tau$ (MPa)	2.0
	ピーク強度 τ_y (MPa)	15.2
	残留強度 τ_r (MPa)	10.0



(a) 2次元FEMモデル



(b) 3次元FEMモデル

図-5 神城断層地震のFEMモデル

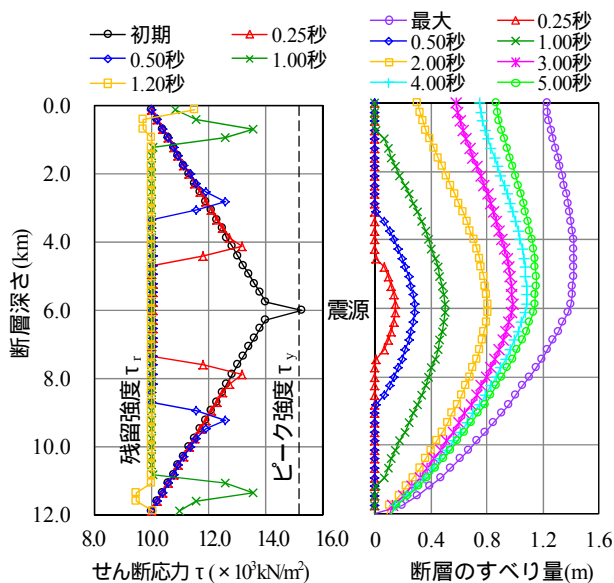
示す．初期応力分布は，図-6(a)に見られるように断層中央の震源位置でピーク強度を僅かに超える応力を設定し，断層上下端の応力降下量=0（残留強度）として，断層面内の平均応力降下量が2.0MPaとなるように中央部で14.0 MPaの初期せん断応力を設定した．図-6(a)に示すせん断応力分布の経時変化を見ると，震源からの破壊進展に伴って初期応力が残留強度に相当する応力まで低下し，破壊開始から約1.2秒で破壊領域が地表面に達する．断層のすべりは，図-6(b)に見られように震源から広がり，断層破壊が地表面に達した後すべり続け，最終的には地表面で1.2m程度のすべり量が生じる．

図-7および図-8は地表面断層から東西にそれぞれ1km，2kmの地点の加速度と変位の時刻歴応答を示す．図-7に示す加速応答について見ると，加速度応答の正のピークは震源に近い東側から西側に向けて順次生じており，最大加速度は地表面断層に近い1km地点が2km地点より大きくなっている．また，東西の最大加速度を1km地点と比較すると，東側は水平84Gal，鉛直68Gal，西側は水平57Gal，鉛直46Galであり，断層の上盤（東側）の応答が下盤（西側）より大きくなるという上盤効果が見られる．

図-8に示す変位応答について見ると，下盤側の断層西側では潜り込むような変形を示し，水平変位は東側(+)に，鉛直変位は沈下(-)となり，上盤側の断層東側は下盤とは逆の挙動を示す．地表面断層の東西1km地点の残留変形量は，東側地点では西側に24cm移動して65cm隆起し，西側地点では東側に49cm移動して23cm沈下する．

(2) 断層のバネ定数の違いによる影響

断層のせん断バネ定数を $k_s=1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^7 \text{ kN/m}^3$ で変化させて応答を比較した．せん断バネ定数を $k_s=1.0 \times$



(a) せん断応力分布 (b) すべり量の分布

図-6 断層面内のせん断応力とすべり量の経時変化

10^4 kN/m^3 としたケースでは破壊進展せず，震源付近のみが破壊した．図-9は断層破壊が地表面まで進展したせん断バネ定数を $k_s=1.0 \times 10^5, 1.0 \times 10^6, 1.0 \times 10^7 \text{ kN/m}^3$ とした場合の地表面断層の西側1km地点の水平加速度と水平変位の時刻歴応答を示す．図-9(a)に見られるように，最大加速度の発生時刻はせん断バネ定数が大きいほど早い．これは，せん断バネ定数が大きいほど応力降下により周辺に配分された応力の断層負担が大きくなることが原因であり， $k_s=1.0 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ としたケースでは応力負担が小さいために破壊が生じなかったものと考えられる．

一方，変位応答については，図-9(b)に見られるように変位発生時刻は断層の剛性が大きいほど早くなる傾向は見られるが，最終的な変位量はいずれのケースもほぼ同様である．これは，いずれのケースも断層全面が破壊して剛性がゼロとなり，最終の釣り合い状態に差がほとんどないためである．なお，これらの水平加速度および水平変位の傾向は，鉛直方向についても同様である．

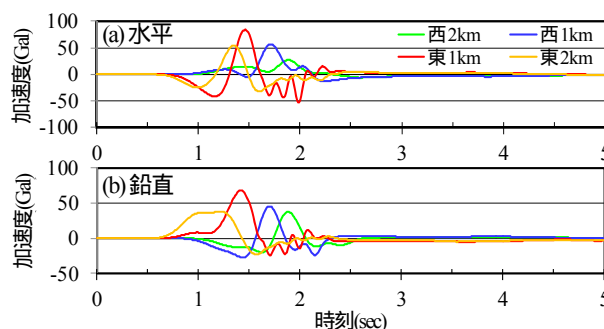


図-7 地表面の加速度応答(2DFEM, $k_s=1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$)

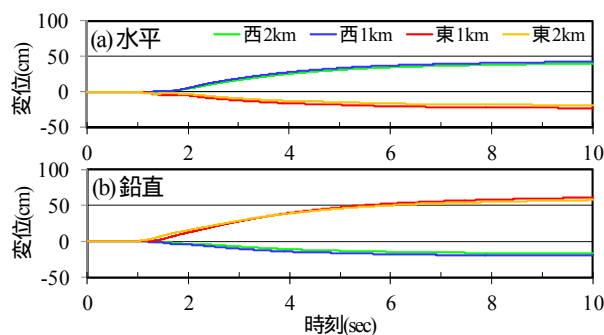


図-8 地表面の変位応答(2DFEM, $k_s=1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$)

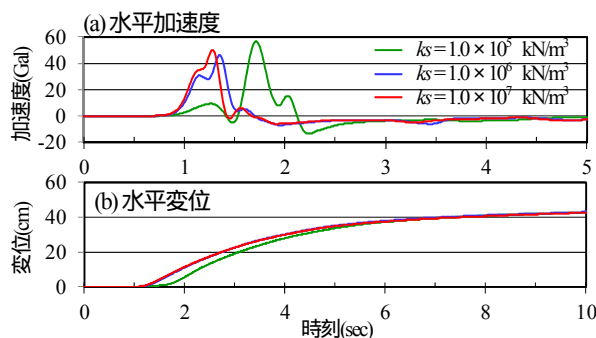


図-9 地表面の変位応答(2DFEM, 西側1km地点)

(3) K-NET白馬の観測記録との比較

K-NET白馬の観測点は、解析モデルの地表面断層の西側1km地点に概ね相当する．図-7および図-8に示した西側1km地点の水平加速度および水平変位応答を、図-4の東西方向の観測記録と比較すると、解析結果の最大加速度は、水平方向57Gal、鉛直方向46Galとなっており、観測値の東西方向219Gal、鉛直方向278Galに比べると1/4～1/5程度となっている．この原因としては、2次元モデルでは断層の長さ方向（2次元断面の奥行方向）への破壊進展を考慮できていないためと考えられる．

一方、最大変位は、観測では水平（東）方向に24cm移動し、10cm沈下したのに対して、解析結果では水平方向に47cm移動し、22cm沈下しており、観測値に比べて2倍程度大きくなっている．この原因としては、本来、神城断層は左横ずれ成分を含む逆断層であるが、2次元解析であるため逆断層としてモデル化しており、応力降下量が大きく設定されているためと考えられる．

6. 3次元FEMによる解析結果

(1) 断層の破壊進展に伴う挙動

図-10は、断層のせん断バネ定数を $k_s=1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$ としたケースの断層面のせん断破壊発生時刻の分布を示し、図-11および図-12は断層中央の地表面断層から東西にそれぞれ1km、2kmの地点の加速度と変位の時刻歴応答を示す．3次元モデルでは、破壊がすべり角方向に進行するため断層中央の地表面への破壊到達時刻は2.52秒となり、2次元モデルの1.2秒と比べると遅くなる．その後、断層破壊が端部まで進展し、断層端部には破壊開始から4～5秒程度で達する．2次元モデルに比べて断層破壊の時間が長いことから、図-11に示す加速度応答は、2次元モデルでは2秒程度で終わっていたものが7～8秒程度継続するが、最大加速度は2次元と同程度となる．南北および鉛直の加速度応答では、2次元モデルと同様に、西側の応答に比べて東側の応答が大きくなる上盤効果が確認できる．

図-12に示す変位についてみると、下盤側の地表面断層西側では潜り込むとともに南側に变形するため、東西方向は東側(+)、南北方向は南側(-)、鉛直変位は沈下(-)となり、上盤側の地表面断層東側はその逆となっている．地表面の変位は、断層破壊が地表面に達する以前の鉛直方向では1秒付近、水平方向は1.5秒付近から生じ始め、断層破壊が終了する5秒付近まで増加し、破壊終了とともに残留変位の発生も終了する．この傾向は、断層破壊終了後も残留変形が発生する2次元モデルと異なり、一般的に考えられる断層の挙動と整合した結果となっている．

次に、断層のせん断バネ定数を変えて $k_s=1.0 \times 10^4$ 、 1.0×10^5 、 1.0×10^6 、 $1.0 \times 10^7 \text{ kN/m}^3$ とした4ケースについて検討を行った結果、3次元モデルにおいても2次元モデルと同様に、せん断バネ定数を $k_s=1.0 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ としたケースでは破壊進展せず、破壊は震源付近の数要素に留まった．また、最大加速度や変位の発生時刻も2次元モデルと同様に、せん断バネ定数が高いほど早くなるが、最終的な変位量はいずれのケースもほぼ同様であった．

(3) K-NET白馬の観測記録との比較

図-11に示す3Dモデルによる加速度応答を図-4に示す観測値と比較すると、高振動数成分を再現できておらず、

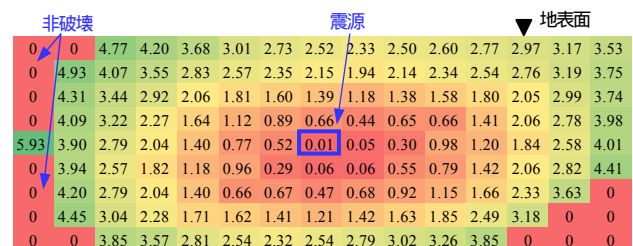


図-10 断層面のせん断破壊発生時刻の分布

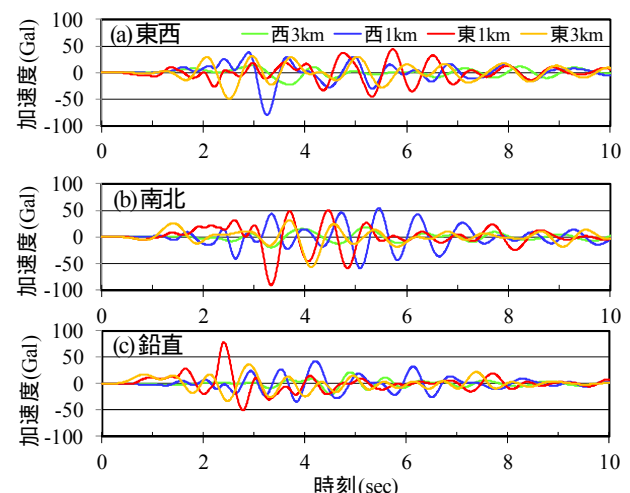


図-11 地表面の加速度応答(3DFEM, $k_s=1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$)

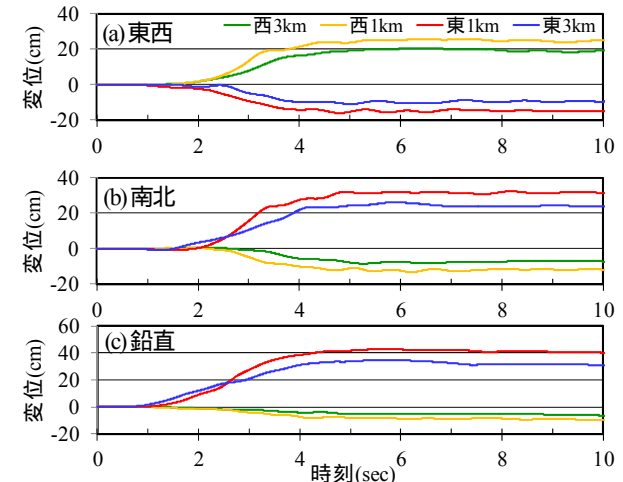


図-12 地表面の変位応答(3DFEM, $k_s=1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$)

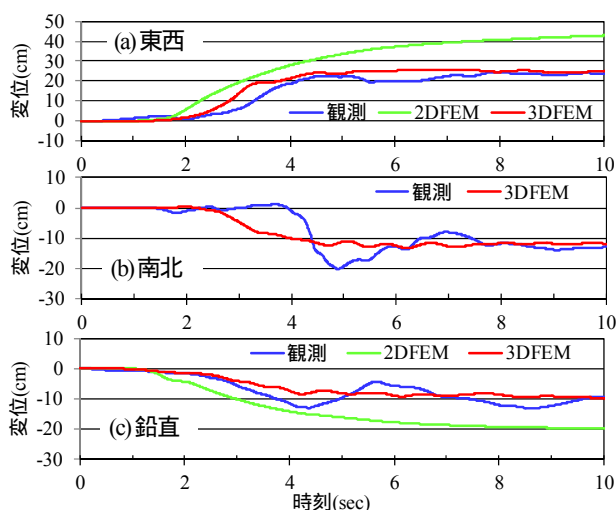


図-13 K-NET白马観測点の変位応答と解析結果の比較

最大加速度も小さく、ピークの発生時刻が観測値よりも早い。これは、メッシュサイズが大きいことや、図-2に示すように応力降下を瞬間的に行っていることなどが原因と考えられる。一方、応答変位は、横ずれ成分を考慮した3次元モデルにより解析を行うことで、図-13に示すように逆断層挙動のみをモデル化した2次元モデルよりも残留変位が小さくなり、いずれの方向も観測値とほぼ同様の残留変位量となった。

7. おわりに

2次元および3次元FEMを用いて断層をジョイント要素でモデル化し、長野県神城断層地震のシミュレーションを行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 本検討の範囲では、加速度応答を2次元および3次元モデルともに再現できなかった。
- (2) 加速度応答にはジョイント要素の剛性の影響が大きく、ピーク発生時刻は剛性を大きくすると早くなる。

(3) 逆断層において上盤側の加速度応答が大きくなるという上盤効果を、2次元および3次元FEMを用いて評価できることが分かった。

(4) 変位応答にはジョイント要素の剛性の影響はほとんどなく、最終的な残留変位量もほぼ同程度となる。

(5) 逆断層のみをモデル化した2次元モデルではK-NET白马観測点の変位記録を再現できなかったが、すべり角に応じた初期せん断力分布を考慮した3次元モデルを用いることで変位記録を概ね再現できた。

本検討では加速応答を再現できなかったが、メッシュサイズや応力降下を瞬間的に行っているなど課題も多く、更なる検討が望まれる。また今後、他の地震動についても検討を行い、初期応力分布を含めたモデル化や解析手法の妥当性及び適用性を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会，原子力土木委員会：断層変位評価小委員会 研究報告書，2015。
- 2) Toki, K. and Miura, F.: Simulation of a fault rupture mechanism by two-dimensional finite element method, *J. Phys. Earth*, 33, pp. 485-511, 1985.
- 3) 水本学千，坪井利弘，三浦房紀：3次元FEMによる断層モデルの解析に関する基本的検討，土木学会論文集，No. 780/ -70，pp. 27-40，2005。
- 4) 気象庁：気象庁報道資料 平成26年11月22日22時08分頃の長野県北部の地震について，2014。
- 5) 防災科学技術研究所：地震活動のトピック 2014年11月22日長野県北部の地震，<http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/n-nagano141122/?LANG=ja>
- 6) 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」），2009。
- 7) 太田良巳，アイダン・オメル：加速度記録から地盤の応答変位を求める手法について，地震工学論文集，Vol.29，pp. 1046-1051，2007。
- 8) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987，pp. 327-328，1987。
- 9) Andrew, D. J.: Rupture velocity of plane strain shear cracks, *J. Geophysical Research*, Vol. 81, pp. 5679-5687, 1976.

FAULT RUPTURE SIMULATION OF 2014 KAMISHIRO FAULT EARTHQUAKE USING 2D AND 3D-FEM

Naoki IWATA, Koh ADACHI, Yasunori TAKAHASHI, Ömer AYDAN and Fusanori MIURA

Since the 1999 Chi-chi earthquake and the 1999 Kocaeli earthquake damaged many important structures due to surface rupture, as well as a strong motion by the fault rupture, displacement and inclination in ground surface become the significant issues. In this study, we conducted fault rupture simulation using two and three dimensional finite element method for the 2014 Kamishiro Fault Nagano Prefecture Earthquake. The applicability of analytical method and conditions, such as initial stress distribution, modeling of the fault plane and constitutive law is confirmed by comparison with the observed ground motions and displacement.