

# 3次元有限要素法による 2014年神城断層地震の地震動再現解析

岩田 直樹<sup>1\*</sup>・清田 亮二<sup>1</sup>・足立 光<sup>1</sup>・藍檀 オメル<sup>2</sup>・伊藤 高敏<sup>3</sup>  
三浦 房紀<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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)  
<sup>2</sup>琉球大学教授 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)  
<sup>3</sup>東北大学教授 流体科学研究所 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1)  
<sup>4</sup>山口大学教授 工学部理工学研究科 (〒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・集集地震等の地表面断層による被害事例を契機として、断層近傍の強震動だけでなく、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。そこで著者らは、過去の研究で、3次元有限要素法を用いて2014年長野県神城断層地震を事例として観測記録の再現を行ったが、地表面変位は概ね再現できたが加速度応答は再現できなかった。そこで本研究では、断層のばね定数、メッシュ分割寸法および断層破壊の構成則についてパラメータスタディを実施し、加速度応答と地表面変位を同時に評価できるパラメータの設定方法や、解析手法の適用性を検討した。この結果、適切なパラメータを設定し、メッシュ分割寸法を十分に小さくすることで加速度応答と地表面変位を同時に再現できることが分かった。

**Key Words :** *dynamic FEM analysis, surface rupture, fault rupture process, surface ground motion*

## 1. はじめに

断層運動によるシミュレーションは、これまで地震動を再現・予測することを目的に検討が進められてきた。シミュレーション手法としては、統計的グリーン関数による方法や差分法など様々な方法があるが、いずれの手法も、地震動の発生や伝播を対象としたものであり、断層面が地表に現れるような地表断層の変形量は評価できない。また、これらの手法は、過去の地震動の大きさや観測記録をもとに経験的に設定されたものであり、観測記録の少ない大規模地震や、上盤効果などの指向性のある地表面断層近傍での地震動への適用には課題が多い。

一方、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ダムや橋梁に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。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<sup>1)</sup>。

そこで筆者らは、断層運動に伴う強震動や地表面変位を同時に評価できる手法の確立を目指して、Toki and Miura<sup>2)</sup>、水本ら<sup>3)</sup>により提案されているFEMによる断層破壊プロセスを考慮した動力的解析手法によるシミュレーションを行ってきた。この手法は、断層面を岩盤の不連続面と同様と考え、ジョイント要素でモデル化し、震源の応力降下量によるせん断応力が周辺に配分され破壊が伝播することにより断層運動をモデル化したものである。岩田ほか<sup>4)</sup>は、この手法を用いて3次元有限要素法(3D-FEM)により2014年長野県神城断層地震のシミュレーションを行ったが、地表面変位応答は概ね再現できたものの、加速度応答は全く再現できなかった。この原因としては、断層面のメッシュ分割寸法や断層面の破壊構成則などの影響が考えられた。

そこで本研究では、各種パラメータの影響について、同様の手法を用い2014年長野県神城断層地震のシミュレーションを行い、断層運動に伴う強震動や地表面変位を

同時に評価するためのパラメータの設定方法や、本解析手法の適用性と妥当性について検討を行った。

## 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 $kr$ 、 $ks$ および垂直方向 $kt$ 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 $\tau_r$ 、 $\tau_s$ と垂直応力 $\sigma_n$ が発生するが、式(1)で算定される合成せん断応力 $\tau$ がピーク強度 $\tau_y$ 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-2は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 $\tau_y$ から残留強度 $\tau_r$ 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 $\tau_i$ からピーク強度 $\tau_p$ に達するまでの構成関係は線形

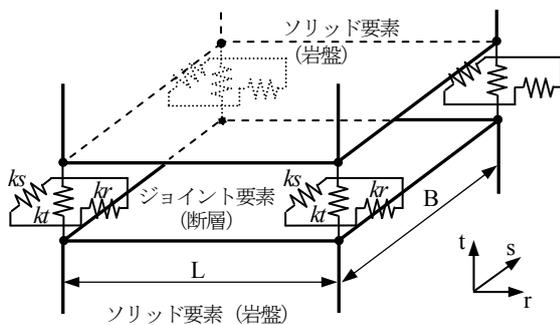


図-1 3次元ジョイント要素の概要図

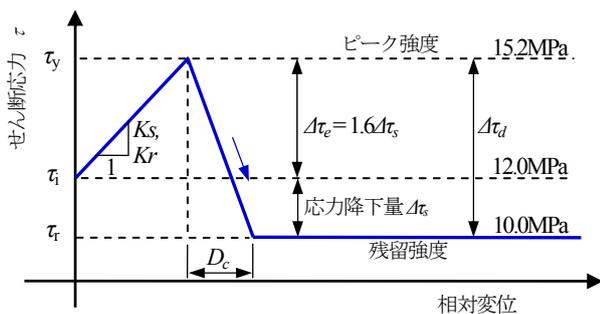


図-2 ジョイント要素のせん断方向の構成則

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<sup>9)</sup>が、本検討では応力降下時の変位-応力関係を線形形で単純化した。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。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大きな値としている。

### (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  $\beta$  法で  $\beta=0.25$  として解き、ジョイント要素の非線形処理は荷重伝達法<sup>9)</sup>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。

## 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機関からの報告<sup>例として7), 8)</sup>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図-3のように設定した。ここで、震源位置は断層中央に設定した。

地表面断層から西側に約0.5km離れたK-NET白馬の観測点で観測された加速度応答と加速度応答スペクトルを図-4および図-5に示す。最大加速度は、N-S(南北)方向で570Gal、E-W(東西)方向で219Gal、U-D(鉛直)方向で278Galである。加速度応答スペクトルは、断層面方向のN-S方

向が断層直交方向のE-W方向より大きく、卓越周期はN-S方向が0.2秒付近、E-W方向が0.1~0.2秒付近となっている。U-D方向の卓越周期は水平方向より小さく、0.1秒以下となっている。また、加速度波形をもとにEPS法<sup>9)</sup>により変位波形を算定した結果を図-4に併記する。K-NET白馬の観測点は断層の下盤側に位置することから、最終的な変位は、東方向に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。

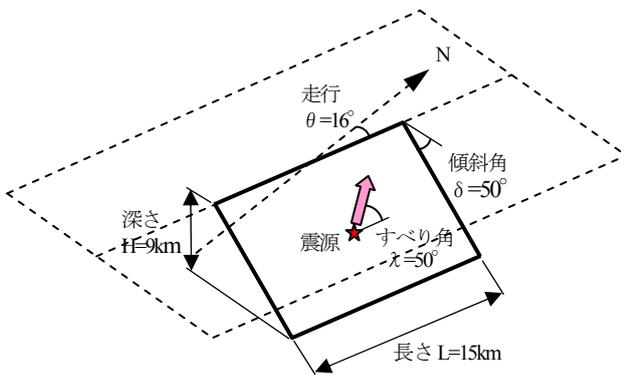


図-3 長野県神城断層地震の断層モデル

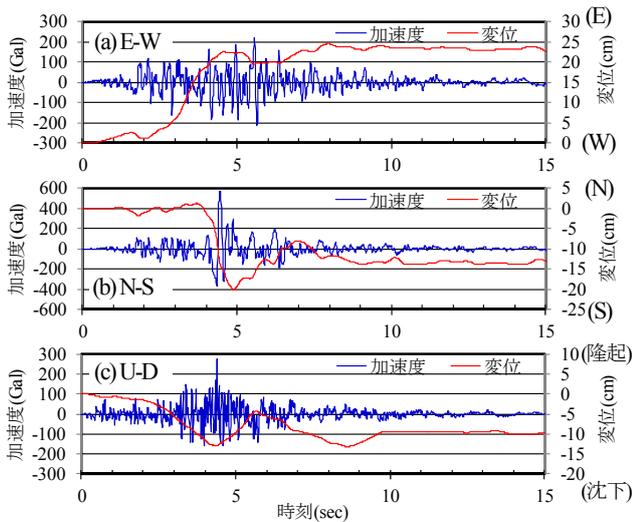


図-4 K-NET白馬観測点の加速度観測記録と変位応答

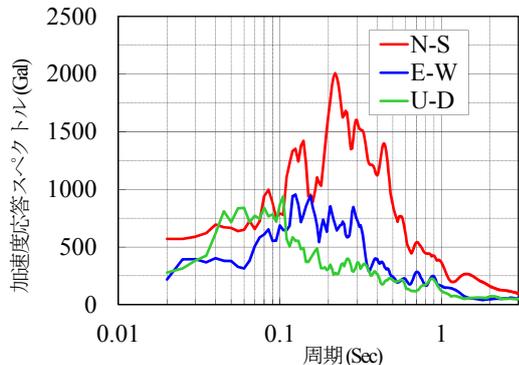


図-5 観測記録の加速度応答スペクトル

#### 4. 解析条件

##### (1) 解析条件

本検討では、①断層のバネ定数、②断層面のメッシュ分割寸法、③断層破壊時の限界すべり量の各パラメータの違いによる加速度応答への影響について比較検討を行った。ジョイント要素のせん断バネ定数は、 $k_s=10.0, 1.0, 0.1, 0.01 \text{ kN/m}^3$ の4ケースに変化させて影響を検討した。ここで、垂直バネ定数は、一般的な岩盤不連続面ではせん断バネ定数の数倍程度の値を設定することが多いことから、せん断バネ定数の3倍とした。また、断層面のメッシュ分割寸法は、500, 300, 200, 150mの正方形で分割した4ケース、限界すべり量は0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2cmとした5ケースについてそれぞれの影響を検討した。

その他のパラメータとして、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、P波速度6.1km/s、S波速度3.5km/sとした。断層面内の平均応力降下量 $\Delta \tau_s$ は、断層寸法とすべり量等をもとにレシビ<sup>10)</sup>に基づき2.0MPaとした。ピーク強度はAndrew<sup>11)</sup>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 $\Delta \tau_s$ の1.6倍であるとの知見をもとにピーク強度 $\Delta \tau_d$ を5.2 MPaに設定した。なお、本解析では応力降下量が重要であり、残留強度 $\tau_r$ 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。

動的解析に当たっては、時間刻み0.01秒、継続時間10秒とした。また、各パラメータの違いによる応答を比較するため、K-NET白馬の観測点位置に相当する地表面断層中央から西側0.5kmの位置をモニタリング点として、加速度および変位応答を抽出する。

##### (2) 解析モデル

図-6に断層面を500mで分割した場合の3次元FEMモデルを示す。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

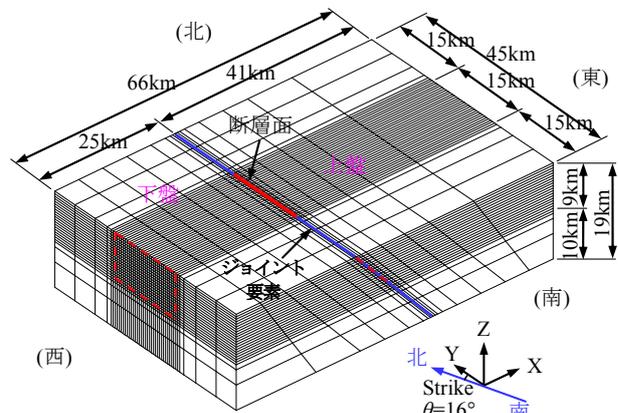


図-6 長野県神城断層地震の3次元FEMモデル

よび底面には粘性境界を設定した。断層面の分割寸法を小さくする場合には、断層および断層近傍のメッシュ分割を小さくするが、境界付近のメッシュ分割寸法はいずれのケースもほぼ同様とした。なお、最も細かく断層面を150mで分割した場合、節点数は175,032、要素数は163,212である。

### (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（破壊開始点）のせん断応力をピーク強度よりも若干大きく設定する。震源は断層面中央に設定し、震源の大きさは1km×1kmとした。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した。断層のすべり角は50°で、左横ずれ成分を含む逆断層型であることから、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左横ずれ成分を含む逆断層の挙動が再現できる。

## 5. 解析結果

### (1) 断層のバネ定数の影響

図-7は、K-NET 白馬の観測点に相当するモニタリング点における断層のせん断バネ定数  $k_s$  の違いによる N-S 方向（断層面方向）および U-D 方向（鉛直方向）の加速度応答の比較を示す。ここで、断層面の分割寸法は500m、限界すべり量  $D_c$  は0cmに固定している。断層面の  $k_s$  が小さくなると N-S 方向では加速度振幅が小さくなるが、U-D 方向では大きくなる。破壊したジョイント要素からの解放されるせん断応力は、周辺のジョイント要素とソリッド要素に配分されるが、 $k_s$  が小さくなるとジョイント要素の負担する応力が小さくなる。このため断層面のせん断方向にあたる N-S 方向では振幅が小さくなるが、地盤の震動が支配的と考えられる U-D 方向の

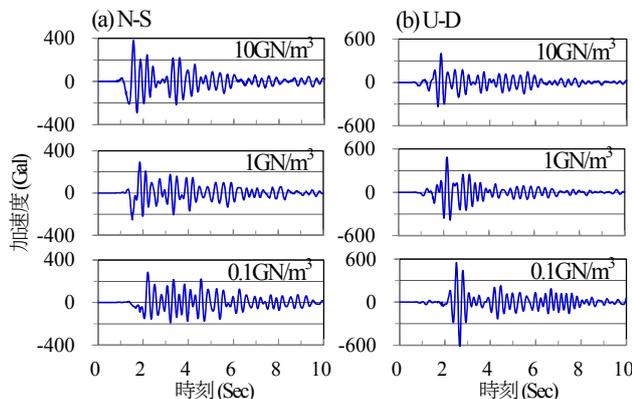


図-7 断層のバネ定数  $k_s$  の違いによる加速度応答の比較

振幅は大きくなる。また紙面の都合で図示できていないが、断層面に直交する E-W 方向も U-D 方向と同様に振幅が大きくなる。なお、 $k_s=0.01GN/m^3$  としたケースでは、破壊が伝播せず、震源近傍で破壊が止まる結果となる。震動開始時刻や主要動のピーク発生時刻は、バネ定数が小さくなると遅くなる。

図-8は、 $k_s=1GN/m^3$  としたケースの断層面の破壊開始時刻の分布と、断層面内の要素 F-1、F-2 のせん断応力の経時変化を示す。破壊面はすべり方向に長い楕円状に広がり、断層中央の地表面へは1.48秒で到達し、側方端へは2.3~3.2秒で到達する。震源から地表面への破壊伝播速度は約3.5km/sで、地盤のS波速度と同程度となっている。一般的な破壊伝播速度はS波速度の0.8倍程度<sup>12)</sup>であることから、この結果はやや早い。せん断応力の経時変化は、図-8(b)の見えるように、震源では瞬時に残留強度に低下し、周辺要素に応力が配分され、破壊後も震動を繰り返しながら破壊が進展していく。

### (2) 断層面のメッシュ分割寸法の影響

図-9は、K-NET 白馬の観測点に相当するモニタリング点における断層のメッシュ分割寸法の違いによる N-S および U-D 方向の加速度応答の比較を示す。ここで、断層のバネ定数  $k_s$  は  $1GN/m^3$ 、限界すべり量  $D_c$  は0cmに固定している。メッシュサイズが小さくなると、高振動数成分が増加し、主要動に続く後続の波形が小さくなる。破壊伝播速度が同じと仮定すると、メッシュ単位で応力配分が行われるため、メッシュサイズが小さいと、一度に配分される力が小さく、回数も多くなることから、短周期成分が卓越し、応答も小さくなるもの考えられる。

図-10は、FEMメッシュサイズの違いによる N-S およ

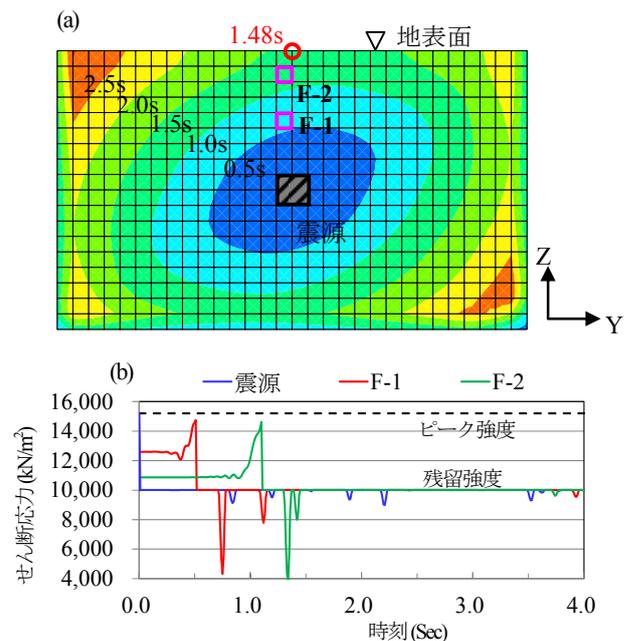


図-8 断層面の破壊開始時刻の分布とせん断応力の経時変化

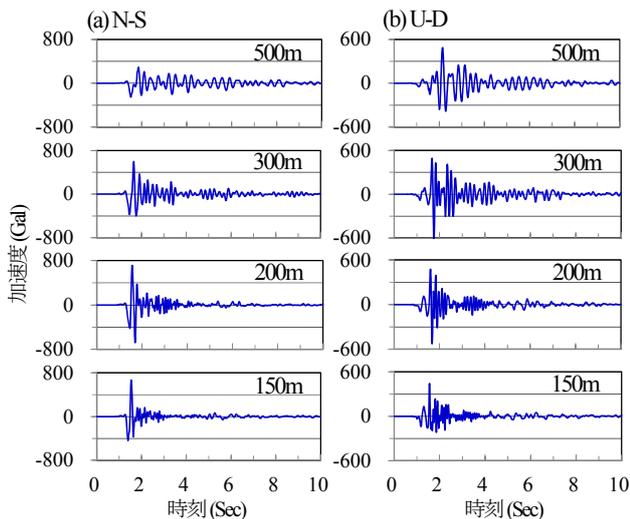


図-9 メッシュ分割寸法の違いによる加速度応答の比較

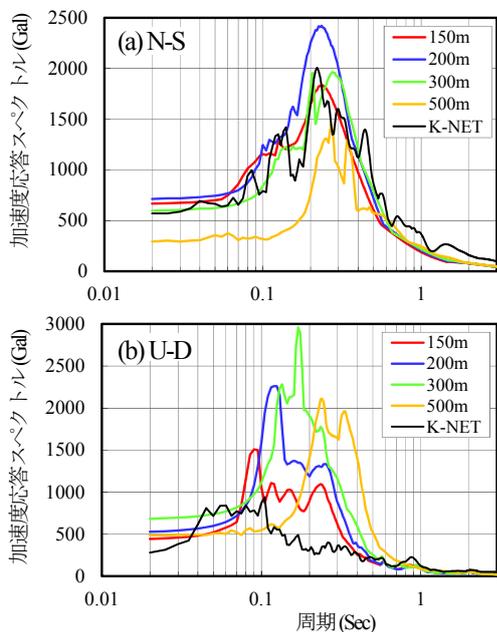


図-10 断層のバネ定数の違いによる加速度応答の比較

び U-D 方向の加速度応答スペクトルの比較を示す。いずれも、メッシュサイズが小さくなるのに伴ってスペクトルのピークの位置が短周期側に移動し、観測値に近づいて行く傾向がみられる。この傾向は、E-W 方向についても同様である。この結果から、N-S および E-W 方向では、メッシュサイズ 150m 程度とすることで、スペクトル形状やピークの値が観測値に近づくことが分かった。しかしながら U-D 方向では、ピークの位置が観測記録よりもやや長周期側にあり、ピーク値も大きくなっていることから、更にメッシュ分割寸法を小さくすることで、観測値に近い応答が得られることが考えられる。

### (3) 断層破壊時の限界すべり量の影響

図-11 は、K-NET 白馬の観測点に相当するモニタリン

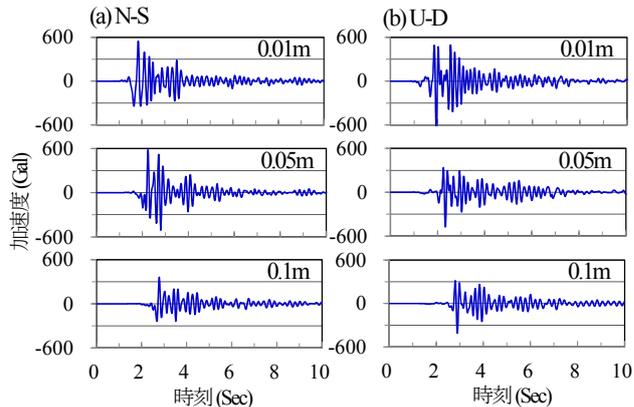


図-11 限界すべり量  $D_c$  の違いによる加速度応答の比較

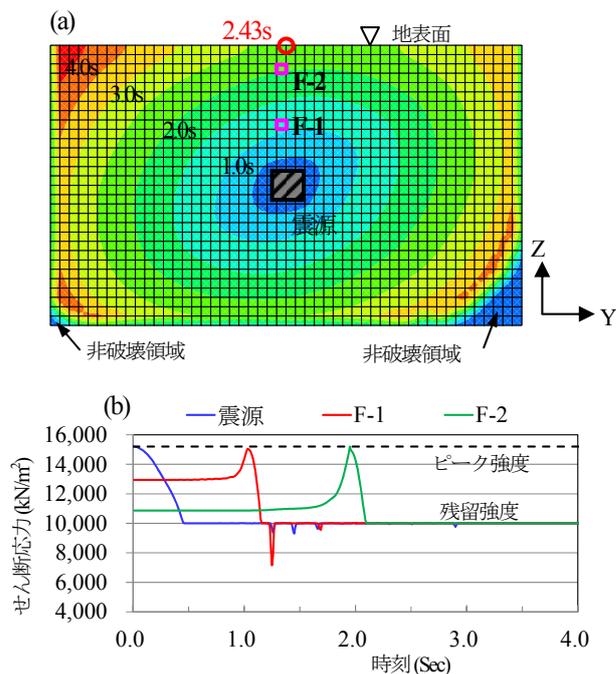


図-12 断層面の破壊開始時刻の分布とせん断応力の経時変化

グ点における断層破壊時の限界すべり量  $D_c$  の違いによる N-S および U-D 方向の加速度応答の比較を示す。ここで、断層面の分割寸法は 150m が望ましいが、計算に非常に長い時間を要することから 300m とし、断層のバネ定数  $k_s$  を  $1\text{GN/m}^3$  に固定して影響検討を行った。この結果、 $D_c=0.2\text{m}$  としたケースでは破壊が伝播せず、震源近傍で破壊が止まるが、この他のケースでは、 $D_c$  が大きくなると主要動の発生時刻が遅くなり、振幅も小さくなる傾向が見られる。これは、 $D_c$  が大きくなると、すべり量に応じた応力しか配分されないため応力降下が緩やかになることが原因である。 $D_c=0.1\text{m}$  としたケースの最大加速度発生時刻は 2.8 秒付近となるが、観測値の 4.4 秒と比べるとまだ早い。

図-12 は、 $D_c=0.1\text{m}$  としたケースの断層面の破壊開始時刻の分布と、断層面内の F-1, F2 要素のせん断応力の経時変化を示す。破壊面は、断層中央の地表面へは 2.43

秒で到達し、側方端へは 3.5~4.5 秒で到達する。震源から地表面への破壊伝播速度は約 2.1km/s であり、地盤の S 波速度の 0.6 倍程度であり、一般的な破壊伝播速度 (S 波速度の 0.8 倍程度) よりもやや遅い。なお、図-2 に示した降下応力とすべり量との関係は線形を仮定しているが、応力降下時のせん断応力の経時変化は凸形状となっている。このことは、応力降下による断層のすべりが、最初は緩やかであるが、加速度的に増加することを示しており、これにより破壊伝播速度が遅くなっているものと考えられる。Dc を設定しない場合、図-8(a)に見られたように破壊が断層面全体に広がり、破壊しない領域はほとんど存在しなかった。これは、破壊伝播を止めるために、予め設定した断層面の外側のジョイント要素の強度を大きく設定し、破壊が設定した領域よりも外側に広がらないようにしていたためである。しかし、Dc を設定することで、図-12(a)に見られたように、左右の下端に破壊しない領域が存在するようになった。このことは、応力降下量と Dc を適切に設定することで、予め破壊領域を設定しなくても、破壊の伝播を止めることができることを示唆していると考えられる。

## 6. おわりに

3次元FEMによる2014年長野県神城断層地震の強震動シミュレーションを行い、観測された加速度記録との比較により各種パラメータ設定方法について検討を行った。この結果、以下の知見が得られた。

- (1) 水平加速応答は、断層面のメッシュ分割寸法を 150m程度とすることで観測値を概ね再現できる。
- (2) 鉛直加速応答は、断層面のメッシュ分割寸法を 150mよりも更に小さくすることで、観測値を再現できる可能性がある。
- (3) 加速度応答の震動開始時刻や主要動のピーク発生時刻は、断層面のせん断バネ定数ksを小さくした場合

や、限界すべり量Dcを大きくすることで遅くなる。  
 (4) バネ定数ksを0.01GN/m<sup>2</sup>以下、もしくは限界すべり量 Dcを0.2cm以上とすると断層面の破壊が伝播しない。  
 以上のことから、適切にパラメータを設定し、断層面のメッシュ分割寸法を十分に小さくすることで、加速度および変位応答を 3 次元 FEM により同時に再現できることが分かった。

## 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/I-70, pp.27-40, 2005.
- 4) 岩田直樹, 足立光, 高橋裕徳, 藍檀オメル, 三浦房紀: 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, 第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.50-55, 2016.
- 5) Ohnaka, M. and Kuwahara, Y.: Characteristic features of local breakdown near a crack-tip in the transition zone from nucleation to unstable rupture during stick-slip shear failure, *Tectonophysics*, 75, pp. 197-220, 1990.
- 6) 坪井利弘, 三浦房紀: 断層運動を模擬する岩石すべり破壊実験の有限要素解析, 土木学会論文集, No. 537/I-35, pp. 61-76, 1996.
- 7) 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.
- 8) 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>
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Andrew, D. J.: Rupture velocity of plane strain shear cracks, *J. Geophysical Research*, Vol.81, pp.5679-5687, 1976.
- 12) 片岡正次郎, 日下部毅明, 村越潤, 田村敬一: 想定地震に基づくレベル2地震動の設定手法に関する研究, 国土技術政策総合研究所研究報告, 15, 2003.

## GROUND MOTION SIMULATION OF THE 2014 KAMISHIRO FAULT EARTHQUAKE USING 3D-FEM

Naoki IWATA, Ryouji KIYOTA, Koh ADACHI, Ömer AYDAN, Takatoshi ITO and Fusanori MIURA

In the past study, the authors conducted fault rupture simulation using 3D-FEM for the 2014 Kamishiro Fault Earthquake. While the surface displacement response was in good agreement with the actual displacement, the acceleration response was not well simulated. In this study, the authors revised simulation conditions such as spring stiffness of joint elements, FEM mesh size of a fault plane and the constitutive relation during stress drop to evaluate the acceleration response together. The computational results confirmed that the displacement and strong motion can be evaluated simultaneously using appropriate constitutive parameters and fine FEM mesh with a size less than 150m.