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

岩田 直樹1*・清田 亮二1・藍檀 オメル2・伊藤 高敏3・三浦 房紀4

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沖縄県中頭群西原町千原1)
³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)
⁴山口大学(〒755-8611山口県宇部市常盤台2-16-1)
*E-mail: n.iwata@ccenet.co.jp

筆者らは、これまで2014年長野県神城断層地震を事例として、3次元有限要素法を用いて加速度応答と 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、モデル化について検討を行ってきた.この結果、 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を適切に設定することで加速度応答と地表面 変位の最大値を概ね再現できることが分かってきたが、応答波形の形状や継続時間は再現できていない. これは、断層を平面、地盤を均質とした単純なモデルを用いていることも原因の一つと考えられる.そこ で本研究では、調査結果に基づき、表層付近で屈曲している断層面の形状や、地盤の弾性波速度が深さ方 向に変化する影響等について検討し、解析精度を向上するために必要なモデル化について評価を行った.

Key Words : dynamic FEM analysis, surface rupture, earthquake motion, nonplanar fault

1. はじめに

断層運動によるシミュレーションは、これまで強震動 を再現・予測することを目的に検討が進められてきたが、 1999年の台湾・集集地震やトルコ・コジャエリ地震で 地表面に生じた断層変形によって多くの被害が発生した ことを契機として、地表面断層変位の評価が求められる ようになってきた.これまで様々な強震動や地表面断層 変位の予測手法が提案されているが、強震動と地表面断 層変位を同時に評価できる手法はほとんどない.また、 これらの手法は、断層の規模や破壊過程(震源位置、方 向など)、断層面のすべり量を経験的に予め設定したう えでシミュレーションがなされおり、断層の動力学的破 壊プロセスを考慮できていない.このためこれまで経験 の少ないマグニチュード9クラスの地震や、断層タイプ やすべり方向に伴う指向性のある断層近傍での挙動は評 価することが難しい.

そこで筆者らは、断層運動に伴う強震動と地表面変位 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. Toki and Miura¹⁾、 水本ら²により提案されたこの手法は、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.岩田ら³は、この手法を用いて2014年神代断層地 震を対象に、断層面を一様勾配、地盤を均一と仮定した 単純なモデルにより、断層面のメッシュ寸法や断層破壊 の構成則を適切に設定すれば、強震動と地表面変位を同 時に評価できる可能性を示した.しかしながら、実際の 断層面は表層付近で屈曲しており、地盤も表層に近づく につれて弾性波速度が低下しているが、これらの影響に ついては検討されていない.

そこで本検討では、この断層面の傾斜角や屈曲、表層 付近の速度層区分の影響を検討するとともに、これまで 影響検討を行ってこなかった断層面内の初期応力分布に ついても併せて検討を行った。

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kt, kuおよ び垂直方向kv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_n τ_u 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_v を超えた場合にせん断破壊が生じる.

$$\tau = \sqrt{\tau_t^2 + \tau_u^2} \tag{1}$$

せん断応力がピーク強度に達してせん断破壊が発生す ると、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 $\Delta \tau_s (= \tau_y - \tau_r)$ が周辺 要素に配分されることで破壊が伝播する.

(2) 運動方程式

本解析における運動方程式を式(2)に示す.

$$[M]{\ddot{u}} + ([C] + [C_B]){\dot{u}} + [K]{u} = {F}$$
(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 β =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⁴により計算を行う.ここで、外力ベ クトルは、せん断応力ー相対変位の関係を満足しない不 釣り合い量として、この不釣り合い量がゼロ、すなわち、 せん断応力ー相対変位の関係を満足するまで収束計算を 行う.



図-1 3次元ジョイント要素の概要図

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 型である。断層の大きさや地震の規模については様々な 機関からの報告があるが、F-Netのメカニズム解⁹による と、マグニチュードMw=6.3、地震モーメントM₀=2.76× 10¹⁸N·m、断層の傾斜角50°、すべり角65°、震源深さ 5kmとなっている。一方で、余震の震源分布をもとに震 源断層の形状を検討した結果⁹では、断層面の形状は表 層付近で屈曲し、深さ約4km以深では傾斜角60°程度、 深さ4km以浅では40°程度であることも分かっている。

強震記録は、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、図-2に示す加速度応答が観測され ている.最大加速度は南北(N-S)方向で570Gal、東西(E-W)方向で219Gal,鉛直(U-D)方向で278Galである.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-2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.

4. 解析条件

(1) 解析条件

本検討では、①断層の初期応力分布、②断層面の傾斜 角、③表層付近の岩盤の弾性波速度が低下する影響につ いて比較検討を行った。断層面の初期応力分布は、これ までの検討³では図-3に示す震央付近のせん断応力が最 も大きく、断層端部に向かって応力が低下し、端部で0



図-2 K-NET白馬観測点の加速度観測記録と変位応答

となる山型を仮定していた.しかしながら、レシピ⁸等 ではアスペリティにのみにせん断応力が集中するモデル が用いられている.このことから、山型モデルとアスペ リティモデルの違いについて検討を行った. 断層の傾斜 角については、メカニズム解等^{5,9}による結果や、余震 分布から求めた結果を考慮して、50°もしくは60°の一 様勾配で分布するモデル(以降、それぞれ50°、60°モ デルと呼ぶ)と,深さ4kmで屈曲(4km以深:60°,4km 以浅:40°)したモデル(以降,40+60°モデルと呼 ぶ)について比較を行った.地盤の弾性波速度は、これ までの検討では、深部の弾性波速度が地表面まで一様に 分布するとして検討を行ってきた.しかしながら、J SHISによる表層付近の弾性波速度¹⁰は、地表面~GL-0.7kmで1.1km/s, GL-0.7~-2.6kmで2.1km/s, GL-2.6~-2.7km で2.7km/s, GL-2.7~-3.0kmで3.1km/s, GL-3.0~-8.0kmで 3.3km/s, GL-8.0km以深で3.5km/sとなっている. そこで本 検討では、表層付近の弾性波速度が低下する影響につい て検討を行った.

上記以外のパラメータとして、ジョイント要素のせん 断バネ定数は $k=1.0 \times 10^{6} kN/m^{3}$ 、減衰定数は3%とした.

動的解析に当たっては、時間刻み0.005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し、実測値と比較する.



(2) 解析モデル

図-4に断層面が屈曲した場合の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、側面および底 面には粘性境界を設定した.断層周辺の岩盤のメッシュ 高さHは、5Hz程度まで考慮できるように弾性波速度に 応じて分割した.なお、図-4に示す40+60°モデルの節 点数は184,184、要素数は171,990である.

(3) 断層の応力分布

断層面内の平均応力降下量Δ τ,は、断層寸法とすべ り量等をもとにレシピ⁸に基づき2.3MPaとした.初期応 力分布は、山型モデルでは、図-3に示すように、強度超 過量 $\Delta \tau_e$ が応力降下量 $\Delta \tau_s$ の1.6倍¹¹⁾であるとして、山 型頂部の応力降下量Δτ_aを6.0MPaに設定し、断層面全 体の応力降下量の平均が2.3 MPaとなるように震源付近 のピーク強度部分の面積(1.8km×1.8km)を設定した. -方、アスペリティモデルでは、レシピに基づきアスペリ ティの面積(29.1km²,断層面積の15%)を算定し、平均応 力降下量に断層面積とアスペリティ面積の比率を掛けて 応力降下量 $\Delta \tau_d \epsilon 15.6 MPa$ と算定した. なお、本解析で は応力降下量が重要であり,残留強度 τ,は意味を持た ないため、平均応力降下量よりも十分に大きい10.0MPa を設定し、これに応力降下量を加えたものをピーク強度 に設定した.なお、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.

断層のすべり角は気象庁の解析結果⁹等をもとに60° とし、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) 初期応力分布形状の影響

初期応力分布の影響を検討するために、山型モデルと アスペリティモデルの断層のすべり分布より求まる地震 モーメントと、K-NET 白馬観測所に相当する抽出点の 変位および加速度応答を観測値と比較した.ここで、断 層面の傾斜角は50°,地盤の速度層は一様とした.

図-5 は山型モデルの断層面のすべり分布を示す. 震源からすべり角方向にすべり面は広がり,地表面まで達している.最大すべり量は 1.69m で,すべり量より計算される地震モーメントは 5.93×10¹⁸N·m となり,観測値の地震モーメントの 2.1 倍となっている.一方,アスペリティモデルのすべり面分布形状は山型モデルと同様となるが,最大すべり量は 3.46m,地震モーメントは 9.32

×10¹⁸N·m であり, 地震モーメントは山型モデルの 1.6 倍となる. この結果, 図-6 に示す抽出点の変位応答に 見られるように, 山型モデルの抽出点の残留変位は観測 値の 1.3~2.0 倍となり, アスペリティモデルは観測値の 1.5~3.5 倍となる.

図-7 は抽出点の加速度応答を示す. アスペリティモ デルは、アスペリティ部分の応力降下量が大きく、一気 に破壊が進展することから、山型モデルに比べて最大加 速度応答が大きく, 主要動の継続時間もやや短くなる. アスペリティモデルの最大加速度を山型モデルのものと 比較すると、E-W方向では1.4倍であるが、N-S、U-D方 向では3倍程度と非常に大きな応答となっている.山型 モデルの最大加速度を観測記録と比較すると、E-W 方 向は観測値の 1.9 倍, N-S 方向は 0.7 倍, U-D 方向は 1.5 倍となっており、N-S方向に比べて E-W 方向はかなり大 きく評価されており、指向性に課題が残る. 今回、すべ り角を 60°としたが、様々な機関から出されているす べり角は 50~60°の範囲と様々であることから、今後 はすべり角を変えた影響検討も必要と考えられる.一方, U-D 方向の最大加速度は、メッシュ分割を小さくすると 低下し、鉛直動を適正に評価するためにはメッシュ分割 を 150m 以下にする必要があることから³⁾, メッシュ分 割を小さくすることで改善できると考えられる.

これらのことから、断層面の総応力降下量が同一であっても、初期応力分布の違いにより大きく地震規模が異なることが分かった.また、レシピにより設定した応力降下量を用いると、想定した地震規模よりかなり大きくなることも分かった.

(2) 断層面の傾斜角の影響

断層面の傾斜角の影響を比較するために,50°モデル を基本として,60°モデルおよび40+60°モデルの断層 のすべり分布より求まる地震モーメントと,K-NET 白 馬観測所に相当する抽出点の変位および加速度応答を観 測値と比較した.ここで,初期応力分布は山型,地盤の 速度層は一様とした.

60°モデルの断層のすべり分布は図-5 に示した 50° モデルとほぼ同様で、最大すべり量が 1.71m と若干大き くなり、これに伴って地震モーメントも6.15×10¹⁸N·m となる.一方、40+60° モデルの断層面のすべり分布は、 図-8 に示すように、GL-4km 付近で屈曲した影響により、 震源から地表面までのすべり面分布が不連続となる.震 源付近での最大すべり量は 1.13m、GL-4km 以浅の断層 面の最大すべり量は 1.17m で、震源付近よりも GL-4km 以浅の断層面のほうがすべり量は大きくなっている.屈 曲の影響により一様傾斜モデルよりもすべり量が小さく なることから、地震モーメントは 4.45×10¹⁸N·m となり、 50°モデルの 0.75 倍に低下する.



日1 初期応り方前の建いによる加速反応者の比較

図-9 に抽出点の応答変位を示す. 60°モデルでは 50°モデルより断層面が立った状態であることから,水 平方向は 50°ケースの 1.2 倍程度,鉛直方向は 1.6 倍程 度に増加する. 一方,40+60°モデルは,屈曲の影響に より水平,鉛直方向とも水平方向は 50°モデルの 0.7 倍 程度に減少する.

図-10 は抽出点の加速度応答を示す. 60° モデルの応 答波形は、図-7(a)に示した 50° モデルと似た形状とな るが、40+60° モデルはピークの位置が若干遅れ、ピー クがより立った形状となり、最大加速度も一様傾斜角モ デルよりも大きくなる. また、2.5 秒以降の主要動に続 く波形の振幅も大きくなる. 60° モデルの最大加速度は、 E-W、U-D 方向は 50° モデルと同程度であるが、N-S 方 向ほ 1.5 倍程度に大きくなっている. 一方、40+60° モデ ルの最大加速度は、E-W、U-D 方向は 50° モデルの 1.2 倍程度、N-S 方向は 2.0 倍程度に大きくなっている.



図-8 断層のすべり分布(40+60°モデル)





(3) 表層付近の弾性波速度低下の影響

表層付近の弾性波速度低下の影響を比較するために, 断層面が屈曲したモデルを用いて,表層速度を低下させ たときのすべり分布より求まる地震モーメントと,抽出 点の変位および加速度応答を観測値と比較した.ここで, 初期応力分布は山型モデルとした.

図-11に弾性波速度低下ケースの断層面のすべり分布 を示す.弾性波速度一様ケースと同様に,屈曲部ですべ り面が不連続となる.震源付近の最大すべり量は1.34m であるが,GL4km以浅では地表面に向かうほどすべり 量は大きくなり,最大すべり量は地表面で2.36mとなる. 弾性波速度一様ケースとすべり比べるとすべり量は大き くなるが,表層付近の剛性が低いため地震モーメントは











3.94×10¹⁸N·mとなり、一様ケースの0.9倍となる.

図-12 および図-13 は抽出点の変位および加速度応答 を示す. 表層の弾性波速度を低下させることで, 残留変 位が生じ始める時刻や, 加速度波形の主要動の発生時刻 が遅くなり観測値に近づくが, 残留変位や最大加速度は 弾性波速度一様ケースよりもかなり大きくなる. ただし, 変位応答の揺らぎの挙動や主要動の継続時間が長くなる など,より観測値に近い挙動が得られるようになる.

図-14は、断層中央部の E-W 方向(断層直交方向)の 地表面の鉛直変位分布を示す.断層部のずれは、弾性波 速度一様ケースでは 0.55m、弾性波速度低下ケースでは 1.3m となっている.断層東側の分布形状をみると、弾 性波速度一様ケースでは、断層から 1km 付近まではほ



ぼ等しく、それより東側で緩やかに低下し、その傾きは 断層西側と同程度である.一方、弾性波速度低下ケース では、断層から離れるに従って急激に隆起量が小さくな り、その傾きは断層西側よりも大きくなっている.SAR 干渉解析より得られた地殻変動データ¹⁰によると、地表 面断層近傍では西側よりも東側の干渉縞が密であること から、東側の傾斜が急であることが分かる.このことか ら、弾性波速度を低下させたほうがより現実に近い地表 面変位の分布形状を再現できるものと考えられる.

6. おわりに

2014年長野県神城断層地震を対象に,断層の初期応力 分布,傾斜角,表層付近の弾性波速度低下の影響につい て検討を行った.この結果,以下の知見が得られた.

- (1) レシピをもとに応力降下量を設定し、初期応力分布 を算定したが、いずれのモデルの地震モーメント、 加速度、残留変位とれ観測値を大きく上回る結果と なった.
- (2) アスペリティモデルの初期応力分布を用いると、応 力降下量が大きいため、山型モデルよりも大きな加 速度と変位が生じる.
- (3) 断層面が屈曲した場合、一様の場合と比べると断層 すべり量および変位応答は小さくなるが、加速応答 は大きくなる.
- (4) 表層の弾性波速度を低下させると、表層付近の断層

面のすべり量,変位・加速度応答とも大きくなるが, 地震モーメントは剛性低下の影響により小さくなる. 断層面の屈曲や地盤の弾性波速度分布を考慮すること で,観測値に近い挙動を得られることが分かってきたが, 最大加速度や残留変位は観測値よりも大きくなっている. このため,今後は実測値を再現するためのパラメータの 設定方法やモデル化について再検討する必要がある.

参考文献

- Toki, K. and Miura, F. : Simulation of a fault rupture mechanism by twodimensional finite element method, *J. Phys. Earth.* 33, pp. 485-511, 1985.
- 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.2740, 2005.
- 3) 岩田直樹,清田亮二,足立光,藍檀オメル,伊藤高敏, 三浦房紀: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,第45回岩盤力学に関するシン ポジウム講演集,pp.19-24,2018.
- (平井利弘,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.
- 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) Panayotopoulos, Y., Hirata, N., Hashima, A., Iwasaki, T., Sakai, S. and Sato, H.: Seismological evidence of an active footwall shortcut thrust in the Northern Itoigawa–Shizuoka Tectonic Line derived by the aftershock sequence of the 2014 M 6.7 Northern Nagano earthquake, *Tectonophysics*, 679, pp.15-28, 2016.
- 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) 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.
- 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.
- 防災科学技術研究所: J-SHIS 地震ハザードステーション, 2018 年度版深部地盤.
- Andrew, D. J : Rupture velocity of plane strain shear cracks, J. Geophysical Research, Vol. 81, pp. 5679-5687, 1976.
- 12) 国土地理院:長野県北部を震源とする地震に関する情報, http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h26-nagano-earthquake-index.html

EFFECTS OF FAULT GEOMETRY AND SUBSURFACE STRUCTURE MODEL IN STRONG MOTION AND SURFACE RUPTURE INDUCED BY THE 2014 KAMISHIRO FAULT NAGANO EARTHQUAKE

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

In the previous study, the authors conducted a parametric studies of fault rupture simulations for the 2014 Kamishiro Faulut Earthquake. The computational results confirmed that the maximum response of ground motions and displacement were able to be evaluated using appropriate constitutive parameters and fine FEM mesh with a size less than 150m. However, the duration of acceleration response and the shape of surface displacement response were not well simulated, partly because the fault plane was assumed to be straight planar feature and the bedrock was homogeneous. In this study, we examined the influence by the fault bend at shallow depth and S-wave velocity structure model based on geological survey.