# 3次元有限要素法による動的破壊 シミュレーションに基づく断層パラメータの 違いによる断層周辺の応力変化

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

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

断層破壊に伴う断層周辺地盤や隣接する断層の応力変化を評価できるようになると、周辺断層の連動性 および活動性評価が可能になり、地震規模や発生確率の予測精度の向上が見込まれる.一般的な地震前後 の応力変化は、食い違い弾性論による静的なクーロン応力変化(静的ΔCFF)により評価されることが多 く、動力学的破壊プロセスを考慮して評価された事例はほとんどない.本研究では3次元FEM解析に基づ く動的断層破壊シミュレーションを用いて、単純な断層を仮定し、断層タイプ、初期応力分布や断層パラ メータの違いが、応力変化にどのような影響を与えるのかを静的ΔCFFにより検討するとともに、食い違 い弾性論による評価結果とも比較を行った.

Key Words : dynamic FEM analysis, fault rupture, stress change,  $\Delta CFF$ 

## 1. はじめに

断層破壊に伴う断層周辺地盤や隣接する断層の応力変 化を評価できるようになると、周辺断層の連動性および 活動性評価が可能になり、地震規模や発生確率の予測精 度の向上が見込まれる.一般的には、地震前後の応力変 化は、静的なクーロン応力変化(Static Coulomb Failure Function, 静的 $\Delta$ CFF) により評価されることが多い<sup>1),2,3)</sup>. △CFF は、断層面上のすべり破壊の起こりやすさを示す 指標であり、地震などに伴う地殻の応力変化量をもとに、 断層のずれの方向に動かそうとする力と、摩擦力として 断層の動きを止めようとする力から求められる.静的Δ CFF が 0.01~0.1MPa 程度のわずかな変化でもその後の地 震活動に影響を与えることが報告されている<sup>2)</sup>. また最 近では、動的 Δ CFF による検討も行われており、静的 Δ CFF よりも動的 △ CFF のほうが 余震活動の対比が良いと の報告もある<sup>4,5</sup>.しかし、これらの検討は、予め断層 のすべり量を仮定し、静的もしくは動的に断層に作用さ せたときの断層周辺の応力変化をもとにΔCFF を算定し たものであり、断層の動力学的破壊プロセスを考慮して 評価された事例はほとんどない.

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(以降, 3D-FEM と記載)によるシミュレーションを行ってきた<sup>9</sup>. 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<sup>7)</sup>. 岩田ら<sup>8</sup>は、この 手法を用いて 2014 年神代断層地震を対象にシミュレー ション解析を行い、断層面のすべり量およびすべり分布 は、初期応力分布や断層の剛性等により大きく異なるこ とを示した.また、算定されたすべり分布は、一般に静 的 $\Delta$ CFF を算定する際に用いられているレシピ<sup>9</sup>等に基 づく矩形とも大きく異なっている.

そこで本研究では、単純な断層モデルを用いて、一般 的に検討されている半無限均質地盤を仮定して食い違い 弾性論<sup>10</sup>に基づき $\Delta$ CFF を算定する方法<sup>10</sup>と、動力学的 破壊プロセスを考慮した 3D-FEM による静的 $\Delta$ CFF と比 較して、解析手法およびモデル化の違いが、応力変化に どのような影響を与えるのかを比較した.なお、動的 $\Delta$ CFF も周辺断層への影響を評価するうえで重要であるが、

## 2. 解析方法

#### (1) 食い違い弾性論による応力算定

地盤を均質な半無限弾性体とし, 断層面を表す矩形全 体が均一に滑ると仮定して食い違い理論に基づいて弾性 体内の任意の点の応力を算定する. ここで、断層タイプ による違いは、変位の入力方向を変えることで算定する. 計算に当たっては、プログラムCoulomb<sup>11)</sup>を用いた.

#### (2) 3次元動的FEM解析による応力算定

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. 3D-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 $\tau_n$   $\tau_u$ 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 τ がピーク強度 τ 、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  $\tau$ 、から残留強度  $\tau$ 、に低 下することにより応力降下量Δ τ<sub>s</sub>(=τ<sub>y</sub>-τ<sub>r</sub>)が周辺 要素に配分されることで破壊が伝播する.

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, [Calは粘性境界マトリックス, {ü} }は加速度, {*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.



図-1 3次元ジョイント要素の概要図

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[CB]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の処理は荷 重伝達法<sup>10</sup>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 カー相対変位の関係を満足するまで収束計算を行う.

## (3) 静的△CFF

ΔCFF は、断層面のすべりやすさ、すべりにくさの変 化を定量的に表たものであり式(3)で算定される.

$$\Delta CFF = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma \tag{3}$$

ここで、 $\Delta \tau$ はすべり方向のせん断応力の変化量、 $\Delta \sigma$ は垂直応力の変化量であり、伸張を正、圧縮を負とする. この応力の変化量は、想定する活断層の走向、傾斜角、 すべり方向を踏まえて、断層がすべる方向に作用する力 として算定する. μ'は見掛けの摩擦係数であり,一般 的に0.4が用いられている<sup>1), 3)</sup>. ΔCFFが正の場合,断層が すべりやすくする方向に応力が変化したと考え、負の場 合にはすべりに抵抗する方向に応力が変化したと考える. なお、Toda et al.<sup>2</sup>の研究では、0.01~0.1MPa程度の僅かな △CFFの増加・減少でもその後の地震活動の活発化・静 穏化がみられることが報告されている.

3D-FEMにおける静的△CFFは、断層運動終了時の地 盤の応力変化量をもとに算定する.

## 3. 解析条件

#### (1) 断層パラメーター

地盤はP波速度6.1km/s,S波速度3.5km/sの均一な弾性地 盤とし、断層面は長さ15km、地表面から深さ10kmまで

★-1 横りれ町層のハフメータ	
断層寸法 長さL×幅W	15km×10km
アスペリティ寸法 長さ $L_{a}  imes  ext{if } W_{a}$	1.8km×1.8km
地震モーメント $M_0$	$1.74 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$
傾斜角δ	90°
断層全体の平均応力降下量 Δ σ	2.3MPa
アスペリティの応力降下量 Δ σ <sub>a</sub>	15.6MPa
アスペリティのすべり量 <i>D</i>	70.3cm
背景領域のすべり量 Da	29.0cm

広がる横ずれ断層と逆断層を仮定し、震源は断層面の中 央(深さ5km)とした.横ずれ断層モデルは傾斜角  $\delta$ =90°,すべり角 $\lambda$ =180°(右横ずれ断層)とし、逆断層モ デルは $\delta$ =50°, $\lambda$ =90°(逆断層),120°(右横ずれ成分 を含む逆断層)の2ケースについて検討を行う.断層パラ メータは、横ずれ断層の面積(15km×10km)をもとに レシピに基づき表-1のように設定した.なお、逆断層で は断層面が傾斜するため断層面積が異なるが、比較のた めに横ずれ断層と同一のパラメータを用いた.

# (2) 断層面の条件

3D-FEMでは断層すべり量を入力条件としないため、 断層面の強度、初期応力分布を設定する必要がある.初 期応力分布の違いによる影響を比較するために、図-2に 示すアスペリティモデルと山型モデルを設定した.アスペリティモデルでは、残留強度を応力降下量よりも十分 に大きい10.0MPaとし、これに表-1に示すアスペリティ の応力降下量を加えたものがピーク強度となる.山型モ デルは、強度超過量 $\Delta \tau_e$ が応力降下量 $\Delta \tau_e$ の1.6倍<sup>13)</sup>で あるとして、山型頂部の応力降下量 $\Delta \tau_e$ 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.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.



図-2 断層面の初期応力分布の概念図



3D-FEMでは、ジョイント要素のせん断バネ定数ksの 違いにより応答が大きく異なることが分かっている<sup>0</sup>. このため、 $ks=1.0\times10^4$ 、 $1.0\times10^6$ kN/m<sup>3</sup>とした2つのケース についても比較を行った.

## (3) 解析モデル

図-3に3D-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は、加速度応答を算定す る場合には、求めたい加速度応答の周期に応じてメッシ ュ分割を変更する必要があるが、変位応答や応力はメッ シュ分割に依存しない<sup>14</sup>.ただし、すべりや応力の解析 結果を図化する場合には、あまり大きなメッシュ分割は 好ましくない.このことから本解析では、断層近傍のメ ッシュ厚は250mとした.なお、図-3に示す横ずれ断層 モデルの節点数は75,840、要素数は69,654である.

#### 4. 食い違い弾性論による解析結果

図-4 は横ずれ断層モデルの震源深さ(GL-5km)における ΔCFF の平面分布を示す. 断層面は白矢印で示した方向 にすべり, 断層延長方向へ断層端部から外側に向かって プラスの領域が放射上に広がる. 断層端部より内側では 断層のすべりにより周辺地盤に逆向きのせん断応力が生 じるためマイナスの領域が生じるが, アスペリティの端 部では, アスペリティと背景領域ですべり量が大きく異 なることから, プラスの領域が広がる.

図-5 は逆断層モデルの震源深さ(GL-5km)における Δ CFF の平面分布を示す. 断層面を平面的に見ると図中の 緑の枠のようになるが, ΔCFF 分布は緑の実線で示した 標高のものを示す. 白矢印で示したすべり前面方向と断 層端部にプラス領域が広がるが,活動が活発になるとい う 0.1MPaの領域は横ずれ断層モデルよりも狭い.



図-4 横ずれ断層モデルの△CFFの平面分布 (GL-5km)



## 5. 3次元動的FEMIによる解析結果

#### (1) 初期応力分布の違いによる影響

横ずれ断層を対象として、初期応力分布の違いによる 比較を行った.ここで、ジョイント要素のせん断バネ定 数は ks=1.0×10<sup>6</sup>kN/m<sup>3</sup>とした.図-6 に断層面のすべり分 布、図-7 に GL-5km における Δ CFF の平面分布を示す. 山型モデルの最大すべり量は 1.26m で、すべり面は地表 面まで達するが、アスペリティモデルでは、最大すべり 量は 2.08m と大きいもののすべり面は地表面まで達して いない. Δ CFF 分布の断層延長方向の外側に伸びるオレ ンジ色や黄色で示したプラス領域は、山型モデルでは断 層端部から広がるが、アスペリティモデルではすべり面 が断層の途中で終わっているため、そのすべり端部から 広がる.また、このオレンジ色の領域は、山型モデルの 方が外側に伸びる結果となっている.一方、断層面両側 の分布は、震源付近のすべり量が大きいアスペリティモ デルの方がプラスの領域が大きく、Δ CFF の値も大きい.

#### (2) ジョイントのせん断バネの影響

横ずれ断層を対象として、せん断バネ定数の違いによる比較を行った.ここで、初期応力分布は山型とした. 図-8 および図-9 に ks=1.0×10<sup>4</sup> kN/m<sup>3</sup> とした場合の断層面のすべり分布および GL-5km における ΔCFF の平面分布示す.最大すべり量は 0.52m で、すべり面は地表面まで達しない.これは、断層が破壊した場合に、破壊したジョイント要素から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、このときバネ定数が小さいとジョイント要素の負担する応力が小さくなるためである.せん断バネ定数を小さくすると、すべりによる断層周辺の地盤の変形量も小さくなるためΔ









図-8 ks=1.0×10<sup>4</sup> kN/m<sup>3</sup>とした場合の断層面のすべり分布



図-9 ks=1.0×10<sup>4</sup> kN/m<sup>3</sup> とした場合の ΔCFF の平面分布(GL-5km)

#### (3) 断層タイプの違いによる影響

図-10 に逆断層モデルですべり角 λ=90° とした場合 の断層面のすべり分布を示す.すべり面はすべり角方向 に伸びて地表面まで達しており,最大すべり量は 1.74m となっている. 図示していないが, λ=120° とするとす べり面は斜め上方に広がるようになり,最大すべり量は λ=90° より若干低下して 1.65m となる.

図-11 に GL-5km における  $\Delta$  CFF の平面分布示す.  $\lambda$  =90° とした場合,  $\Delta$  CFF が 0.2MPa 以上のオレンジ色で示した領域は断層面の両側で放射状に分布し,横ずれ断層で見られたようなすべり方向前後のプラス領域は発生しない. これはすべり方向前後のプラス領域は発生しない. これはすべり方向前後のプラス領域は発生しない. これはすべり方向前後のプラス領域は予約本の指数になったかと考えられる. 一方,  $\lambda$ =120° とした場合,断層面両側のオレンジ色の領域はすべり方向に伸びる形状となるが,領域は  $\lambda$ =90° よりも狭くなる. 同様に,すべり方向の断層面近傍のマイナスの領域もすべり方向に伸びる形状となるが,領域は  $\lambda$ =90° よりも狭い.



図-10 逆断層モデル(λ=90°)の断層面のすべり分布



図-11 逆断層モデルの△CFFの平面分布(GL-5km)

#### 6. 食い違い弾性論と3次元動的FEM解析との比較

本検討では、レシピに基づき、断層寸法より地震モー メント、すべり量および応力降下量を算定したが、3D-FEMのすべり量はレシピよりも大きくなった.このため、 断層延長方向の外側に伸びるプラス領域は似た形状とな るが、3D-FEMによる Δ CFFの値は食い違い弾性論より もかなり大きくなった.

3D-FEMの断層面のすべり面分布は、解析条件の違い で震源付近にのみすべりが生じる場合や、地表面まです べりが到達する場合などはあるが、いずれのケースもす べり量は滑らかに変化するため、食い違い弾性論で入力 したようなアスペリティ部分のみですべり量が大きい状 態とは異なる.このため食い違い弾性論の $\Delta$ CFF分布は、 すべり差の大きいアスペリティ外周付近に応力集中が生 じ、 $\Delta$ CFFが大きいプラスの領域が生じるが、3D-FEM でそのような挙動は見られない.このため断層面両側の  $\Delta$ CFFの分布形状が3D-FEMと食い違い弾性論では異な る結果となっている.

今回の検討では、初期応力分布を山型モデルとし、ジ ョイント要素のせん断バネ定数を1.0×10<sup>%</sup>kN/m<sup>3</sup>とすると すべり面が地表面まで達し、最大すべり量は12m以上と なった.このため断層面のすべり分布より算定される地 震モーメントも3.0×10<sup>18</sup>N·m以上とレシピよりもかなり 大きくなった. また, 初期応力分布をアスペリティモデ ルとした場合、最大すべり量は2.08mと非常に大きくな るが、すべり領域が小さいため地震モーメントは2.0× 10<sup>18</sup>N・mとなった. 一方, ジョイント要素のせん断バネ 定数を1.0×104kN/m3とし、初期応力分布を山型モデルと すると、最大すべり量は0.52m、地震モーメントは1.43× 10<sup>18</sup>N·mとなり、レシピよりも若干小さくなる. これら の結果から、初期応力分布をアスペリティモデルとし、 バネ定数を1.0×10<sup>4</sup>kN/m<sup>3</sup>程度に設定することでレシピに 近い数値が得られる可能性があることが分かった.しか しながら、2014年神城断層地震を対象とした既往の検討 では、バネ定数を1.0×10<sup>4</sup>kN/m<sup>3</sup>とすると断層面の破壊が 進展しなくなることからバネ定数を1.0×10<sup>6</sup>kN/m<sup>3</sup>として 検討を行っていた<sup>9</sup>. また初期応力分布も, アスペリテ ィモデルを用いると、地表面変位が非常に大きくなるた め山型モデルを採用していた<sup>8</sup>ことなどから、どういっ た解析パラメータの組み合わせが良いかを検討すること は今後の大きな課題である.

# 7. おわりに

本研究では、単純な断層モデルを用いて、食い違い弾 性論と3D-FEMよる静的ΔCFFの比較を行った.この結

- 果,以下の知見が得られた.
- レシピに基づき設定した断層パラメータを用いて 3D-FEMを行ったが、断層面のすべり量および地震 モーメントは、ジョイント要素のバネ定数を1.0× 10<sup>4</sup>kN/m<sup>3</sup>とした場合を除き、レシピで算定したもの よりかなり大きくなった.
- (2) 食い違い弾性論と3D-FEMの△CFFの正負領域の分 布形状は、断層延長方向の外側では似たものとなる が、断層面の両側のアスペリティ周辺では変位分布 の違いにより大きく異なる.
- (3) 3D-FEMで初期応力分布を変えると、すべり量やす べり分布範囲が異なることから、ΔCFFの分布も大 きく異なる.
- (4) 3D-FEMでジョイント要素のバネ定数を小さくすると、 ΔCFFの分布形状は同様であるが、すべり量が小さくなるためΔCFFの値は小さくなる.
- (5) 逆断層モデルでは、断層面側面にΔCFFのプラスの 領域が発生し、その形状はすべり角方向に伸びる傾 向がある.

3D-FEM では、同じ断層タイプでも解析条件の組み合わせにより $\Delta$ CFF の値と分布領域が大きく異なる. どのような解析条件の組み合わせを行えば、実際の活断層の連動性や活動性を評価でき、同時に発生する加速度応答や地表面変位を評価できるかは大きな課題である. このため今後は、加速度や変位、地中応力等の観測記録があり、断層運動の活動性や連動性を検証できる断層地震を対象として、3D-FEM の適用性と妥当性を検証していきたいと考えている.また、今回対象外とした動的 $\Delta$ CFF についても検討を行っていく予定である.

#### 参考文献

 Stein, R. S., A. A. Barka, and J. H. Dieterich : Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering, *Geophys. J. Int.*, 128, pp.594-604, 1997.

- 2) Toda, S., Stein, R.S., Reasenberg, P.A., Dieterich, J.H. and Yoshida, A.: Stress transferred by the 1995 Mw = 6.9 Kobe, Japan, shock : Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *J. Geophys. Res.*, 103, pp.24543-24565, 1998.
- 3) 橋本学:兵庫県南部地震に伴う応力変化:断層モデル によるクーロン破壊関数の変化の計算と地震活動の変 化との比較,地震第2輯,第48巻,pp.521-530,1995.
- Kilb, D., Gomberg, J. and Bodin, P.: Aftershock triggering by dynamic stresses, J. Geophys. Res., 107(B4), 2060, doi:10.1029/2001JB000202,2002
- 5) Gomberg, J., Bodin, P. and reasenberg, P. A.: Observing earthquakes triggering near-field by dynamic deformations, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 93, pp.118-138,2003.
- 6) 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.
- 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.
- 8) 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,2019(投稿中).
- 9) 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.
- Okada: Internal deformation due to shear and tensile fault in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 82, pp.1018-1040, 1992.
- 11) 遠田晋次, Stein, R. S., King, G. C. P.: ディスロケーションソ フトウェア「Coulomb」の紹介,活断層研究, 21, pp.25-32, 2002.
- 12) 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.
- Andrew, D. J.: Rupture velocity of plane strain shear cracks, J. Geophys. Res., Vol. 81, pp. 5679-5687, 1976.
- 14)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.

# COMPARISON OF CHANGE OF STRESS FIELD AROUND THE FAULT BY DYNAMIC FAULT RUPTURE SIMULATION USING 3D-FEM

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

When we become able to evaluate stress changes of ground around ruptured faults and adjacent faults, it is possible to improve the predicting accuracy of the magnitude and the probability of the next earthquake. Generally, interaction between active faults is represented by static stress changes in Coulomb Failure Function ( $\Delta$ CFF) induced by the fault rupturing, however, there are few studies that evaluated dynamic stress changes considering fault rupture process. In this study, we conducted fault rupture simulations using 3D-FEM for simple models with planar fault plane and homogeneous bedrock and examined influence of fault types, initial stress distributions and fault parameters in dynamic stress changes.