

面震源を用いた地震動解析 と岩盤応力に基づく副断層発生領域の推定

羽場一基¹・澤田昌孝²・渡辺和明³・堀宗朗⁴

¹正会員 博(理) 大成建設株式会社 原子力本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

E-mail: hb-kzm00@pub.taisei.co.jp

²正会員 博(工) 一般財団法人電力中央研究所 原子力リスク研究センター (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

E-mail: sawada@criepi.denken.or.jp

³正会員 大成建設株式会社 原子力本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

E-mail: kwatanab@ce.taisei.co.jp

⁴フェロー会員 Ph.D. 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25)

E-mail: horimune@jamstec.go.jp

原子力発電所等の重要構造物に対しては、副断層も考慮した断層変位評価が重要である。断層変位と地震動の重畳を考慮した評価では、フリングステップを考慮した広域の地震動解析と断層面を含む浅部地盤の断層変位解析を段階的に実施することが有効であると考えられる。しかし、断層変位解析において、詳細な地質調査を実施せずに、副断層の位置や形状を設定することは容易ではない。また、地震動解析では、断層近傍を含む広域の地震動を評価する必要があるため、震源断層を点震源の集合としてモデル化することは必ずしも適切でない。そこで、本論文では、まず、震源断層の滑りを点震源の集合ではなく面震源として定義し、有限要素法の入力荷重として設定する方法を提案した。これにより、使用する震源モデルに対して、解析モデルに常に最適な荷重を定義することが可能になる。さらに、2014年長野県北部の地震を対象とした地震動解析を実施し、その適用性を確認するとともに、岩盤の応力と強度に着目して地表断層の発生位置に関する分析を行った。その結果、各要素の破壊に対する余裕度を表す局所安全係数を用いると、その値が小さい領域と地表断層変位が観測された領域はよく一致することが分かった。この結果から、局所安全係数を用いることで、各震源モデルに対して、副断層が発生する可能性がある領域を事前に推定することができると考えられる。

Key Words: *fault displacement, ground motion, fling step, secondary fault, high performance computing, finite element method*

1. はじめに

大規模な内陸地震が発生すると地表に断層変位が出現し、近傍の構造物に大きな影響を与える可能性がある。1999年に発生したトルコのコジャエリ地震や台湾の集集地震においては、地表に生じた断層変位により多くのインフラが被害を受けた¹⁾。また、日本においても、2014年長野県北部の地震²⁾や2016年熊本地震³⁾のように、地表断層変位を伴う地震が発生している。そんな中、原子力発電所の重要構造物に対しても断層変位対策の必要性が指摘されている^{4),5),6)}。

日本の原子力施設に対する現行の規制基準では、耐震重要構造物は将来活動する可能性のある断層等の露頭が無いことを確認した地盤に設置することが求められている⁷⁾。一方、原子力サイト周辺の地盤は詳細な地質調査が実施され、地震を発生させる主断層が施設直下に存在する可能性は極めて低い。そのため、原子力施設に対する断層変位評価の目的は、主断層の活動に伴って副次的に形成される副断層を評価することである。

筆者らは、地表断層変位評価のための高性能計算を

用いた並列有限要素法(HPC-FEM)を開発^{8)~11)}し、実地震を対象とした解析^{12)~15)}によりその適用性を示した。これらの解析では、主断層による広域の地盤変形を食い違い弾性論¹⁶⁾により評価し、その結果を断層面を既知の弱面とした地震発生層以浅(深さ1km程度)の解析モデルの境界に準静的に入力することで、浅部にある副断層の活動性を評価している。

一方、主断層の発生位置周辺では、同時に強い地震動を受けると考えられるため、断層変位と地震動との重畳に関する検討が必要である。また、強い地震動は、副断層の発生に対して影響を与える可能性があるため、副断層の活動性の評価においても、地震動の影響を明確化することが重要である。

副断層は主断層に比べ規模が小さいため、以下のような2段階の解析が有効であると考えられる。:(1)主断層の滑りに対する広域の地震動を算出する、(2)(1)で求めた解を境界条件として副断層を含む岩盤・地盤の連続体モデルに入力する。(1)の地震動解析では、断層近傍を含めた全域に対してフリングステップ(永久変位)を含む地震動を評価する必要がある。一般的に、FEM

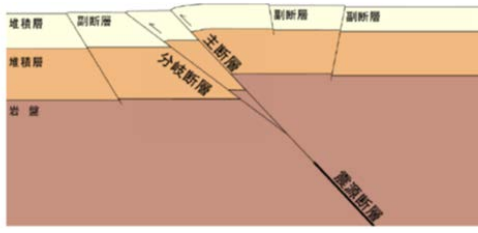


図-1 主な断層変位の分類⁶⁾

を用いた地震動評価では、震源断層を点震源の集合として近似するが、断層面に近い観測点では点震源の密度が結果に大きく影響するため、その近似は必ずしも適切でないと考えられる。また、(2)の地表断層変位解析においては、副断層を含む断層面を既知のものとして設定する必要がある。主断層については過去の地震からその発生位置を概ね推定することができる。一方、副断層については、発生事例が少なく、地表断層変位の規模が小さいため、原子力サイトのような詳細な地質調査を行わない限り、その位置を推定することが難しい。副断層は、震源断層と地質構造の関連性は認められないが、震源断層の活動に伴って形成された二次的な断層であり、図-1のように、比較的浅部に発生する根なし断層とされる。HPC-FEMを用いた地震動評価では、震源断層のすべりによる岩盤の応力を評価するため、浅部の岩盤の応力とその破壊強度の関係から、地表断層変位の発生位置の推定できる可能性がある。

そこで本論文では、震源断層を点震源の集合ではなく、面震源として評価し、断層面の滑りからFEMの入力荷重を設定する方法を提案する。この方法を用いることで、使用する震源モデルに対して、解析モデルに対して最適な荷重を定義することが可能になる。さらに、実地震を対象とした面震源を用いた地震動解析を実施し、その適用性を確認するとともに、浅部の岩盤の応力と副断層の発生位置の関係を分析する。

本論文の構成は以下の通りである。2章で、FEMにおける地震動解析手法を整理し、FEMにおける面震源の設定方法を提案する。次に、3章で、実地震を対象とした地震動解析を実施し、観測結果と比較する。4章で、岩盤の応力を用いた地表断層変位の発生位置の推定を行い、観測結果との比較によりその適用性を確認する。最後に、5章にまとめを示す。

2. 面震源を用いた地震動解析手法

(1) 点震源を用いた地震動解析とその課題

地震動解析では、断層面の滑りをダブルカップル力として表現し、それによる地震動の伝播を評価する。この時、断層面は震源モデルに応じた点震源の集合とし

て近似することが一般的である。波数積分法¹⁸⁾では点震源を厳密な点として設定するが、有限要素法を用いる場合には、点震源が位置する有限要素の物体力として定義し、節点外力として与える。この時、位置 \mathbf{x}_0 の点震源における物体力は以下で与えられる¹⁹⁾。

$$\bar{p}_i(\mathbf{x}, t) = -M_{ij}(t) \frac{\partial \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)}{\partial x_j} \quad (1)$$

ここで、 i は座標方向の添え字、 M_{ij} は点震源が負担する小断層の地震モーメントテンソル、 $\delta(x)$ はディラックのデルタ関数である。FEMの定式化に基づき、物体力によるラグランジアンを弱形式化することで、節点 k に対する等価節点力は以下で与えられる。

$$P_i^k(\mathbf{x}, t) = M_{ij}(t) \frac{\partial N^k(\mathbf{x}_0)}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで、 $N^k(x)$ は節点 k の形状関数である。

断層面を点震源の集合として近似する場合、断層面に近い評価点では点震源の密度が結果に大きく影響する。特に、地震動解析の結果を地表断層変位解析の入力に使用する場合、断層近傍の結果が重要であるが、点震源が含まれる要素近傍で強い節点力が発生するため、地表断層変位の評価結果に大きな影響を与える。

(2) 面震源の定式化

そこで、断層面を点震源で近似せず、面震源として考慮し、有限要素の等価節点力を設定する方法を整理する。断層面上の点 x に対する物体力密度は次で与えられる。

$$p_i(\mathbf{x}, t) = -\frac{\partial m_{ij}(\mathbf{x}, t)}{\partial x_j} \quad (3)$$

ここで、 m_{ij} は地震モーメントテンソル密度であり、単位面積当たりの地震モーメントに対応し、以下で与えられる。

$$\begin{aligned} m_{xx} &= m_0 (\cos \lambda \sin 2\theta \sin \delta - \sin \lambda \cos^2 \theta \sin 2\delta) \\ m_{yy} &= -m_0 (\cos \lambda \sin 2\theta \sin \delta + \sin \lambda \sin^2 \theta \sin 2\delta) \\ m_{zz} &= m_0 (\sin \lambda \sin 2\delta) \\ m_{xy} &= m_0 \left(\cos \lambda \cos 2\theta \sin \delta + \frac{1}{2} \sin \lambda \sin 2\theta \sin 2\delta \right) \\ m_{yz} &= m_0 (\cos \lambda \cos \theta \cos \delta + \sin \lambda \sin \theta \cos 2\delta) \\ m_{zx} &= m_0 (\cos \lambda \sin \theta \cos \delta - \sin \lambda \cos \theta \cos 2\delta) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 θ 、 δ 及び λ は走向角、傾斜角及びすべり角である。また、 m_0 は単位面積当たりの地震モーメントであり、断層面上の食い違い量 D_0 とせん断弾性係数 G を用いて、 $m_0 = GD_0$ で与えられる。ここで、地震モーメントテンソル密度は断層面上で定義されることに注意する。

点震源の場合と同様に、物体力によるラグランジアンを弱形式化することで、等価節点力の各有限要素が



図-2 2014年長野県北部の地震における地表断層変位分布²⁾

らの寄与は以下で与えられる。

$$P_i^k(x, t) = \int \frac{\partial N^k}{\partial x_i} p_i(x, t) dV_e \quad (5)$$

ここで、 dV_e は対象とする有限要素内の微小体積である。

以下では、式(5)の積分を実行するために、岩盤のソリッド要素を四面体(2次)要素でモデル化することを考え、対象とする小断層は四角平面で定義される場合を想定する。四面体を平面で切断する時の切断面は、三角形または四角形となる。小断層は有限な四角平面であるため、その辺や角が要素内に存在する場合がある。妥当な過程として、小断層のサイズが有限要素サイズよりも十分大きいとすると、四面体の内部には、小断層の4辺の内、3辺以上は存在しない。したがって、四面体の内部に含まれる小断層領域は、四面体の平面による切断面を最大2本の直線で切断した多角形として定義される。そのため、要素内に含まれる一つの小断層領域の形状は、三角形、四角形、五角形及び六角形となる。ここでは、 N 角形を $N-2$ 個の3角形の和として定義し、式(5)の積分を以下のように実行する。

$$P_i^k(x, t) = \sum_n \int_0^1 d\xi_n \int_0^{1-\xi_n} \frac{\partial N^k}{\partial x_i} m(x(\xi_n, \eta_n), t) j(\xi_n, \eta_n) d\eta_n \quad (6)$$

ここで、 ξ_n 及び η_n は要素内の小断層の三角形 n の内部座標であり、 $0 \sim 1$ で定義する。また、 $j(\xi_n, \eta_n)$ はヤコビアンであり、三角形の場合、その面積の2倍に対応する。式(6)の数値積分は3点のガウス積分により実行する。さらに、複数の小断層が要素内に存在する場合には、各小断層からの寄与を合計する。

3. 実地震を対象とした地震動解析

(1) 評価対象：2014年長野県北部の地震

本論文では、2014年長野県北部の地震²⁾を想定した解析を実施する。本地震は2014年11月22日に発生し、マグニチュードは6.7(気象庁)、最大震度6弱で、西北西-東南東に圧縮軸をつ東側隆起の逆断層型の地震であった。主断層の破壊長さは約20km、破壊深さは約12kmで、震源域南側9kmに地表断層変位が発生した。

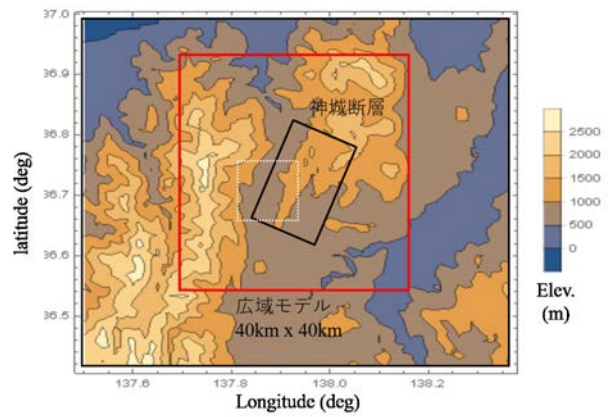


図-3 解析対象領域

表-1 速度構造

No	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Density (kg/m ³)	Q Value	Ref.
1	2500	1000	2100	150	J-SHIS
2	3800	2000	2400	200	
3	4000	2100	2400	300	
4	5000	2700	2500	200	
5	5500	3100	2600	300	Headquarters for Earthquake Research Promotion
6	5800	3400	2700	680,400	
7	6400	3800	2800	680,400	

特に、地表断層の北端では、図-2に示すように、主断層に加えて副断層に地表ずれ変位が観測された²⁾。ここで、主断層と平行に現れた副断層(図-2におけるb2及びb3)は、主断層と異なる西上がりのずれ変位であり、バックスラストであると考えられる。

(2) 解析モデルの作成

計算対象領域は、神城断層全域を含む40km × 40km × 深さ約20kmとし、図-3に示す通りである。地層構造は、基本的にJ-SHIS深部地盤データ²¹⁾に基づき設定し、 $V_s \geq 3.4$ km/s以上の地層は全国1次地下構造モデル(暫定版)(2012)²²⁾を用いて設定した。計算対象領域に含まれる地層は表-1の通りである。解析モデルは、オクトツリー法により四面体1次要素でメッシュ分割し、その後、四面体2次要素に修正して作成した。基本的に、オクトツリー法では地表及び地層境界が階段状に表現されるが、特に地表の階段形状は地表付近の応力に大きく影響する可能性がある。そこで本検討では、メッシュ分割に使用する地盤全体のジオメトリを直方体に変換した上でメッシュ分割を行い、その後逆変換を行うことで、地表面を滑らかな面として表現した。図-4に解析モデルを示す。ここで、+y軸方向が北方向に対応する。また、参考のため、図には震源断層の想定位置を白点線で示している。本検討では対象周波数を2.5Hzとし、最小節点間距離を31.25mとし

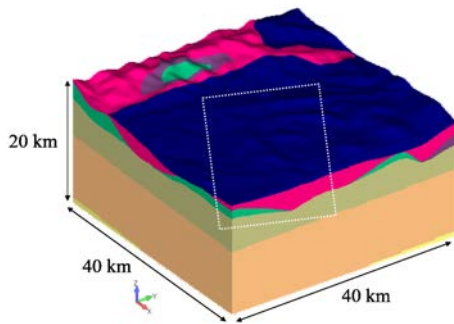


図-4 解析モデル

て解析モデルを作成した。解析モデルは7層の地層により構成され、総自由度数が228,465,240である。地表面の大部分は $V_s = 1.0$ km/s の地層（青色部分）で覆われるが、山間部では $V_s \geq 2.0$ km/s の地層が表れる。

(3) 震源モデル

断層面の滑り分布及び滑りの速度依存性は引問らの逆解析結果²⁰⁾を用いて設定した。最終滑り量分布及び滑り速度時間関数のノルムを図-5に示す。走行25 deg、傾斜角50 degであり、1.5 km × 1.5 kmの小断層毎に滑り変位及び滑り速度ベクトルが定義されている。また、滑り速度時間関数は各滑り方向に対して個別に定義されている。滑り速度時間関数は、深部では立ち上がり鋭く最大速度が大きい、浅部は相対的に最大速度が小さく幅広である傾向が見られる。また、破壊伝播速度は地震発生層以浅で2.0 km/sであり、発生層内で2.8 km/sとされ、岩盤のせん断弾性係数を 3.0×10^7 kPaと設定されている。

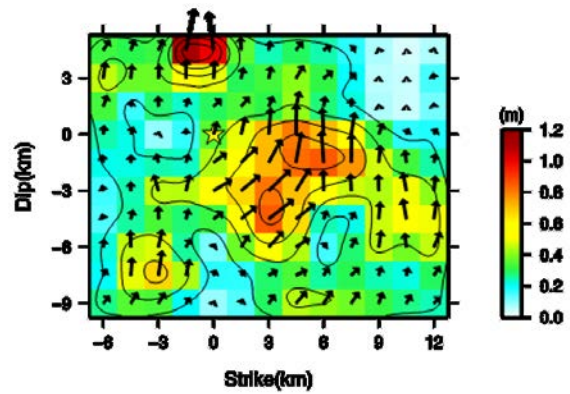
本検討では、この震源モデルを2章で定式化した面震源を用いて、断層の滑りに応じたダブルカップル力を設定する。この時、地震モーメントを決定する際の岩盤のせん断弾性係数は、表-1の弾性波速度を考慮して、深部の3層は逆解析と同じ 3.0×10^7 kPaとし、浅部の4層については1/2倍した。ただし、破壊開始時刻は各メッシュを10分割して設定した。

(4) その他の解析条件

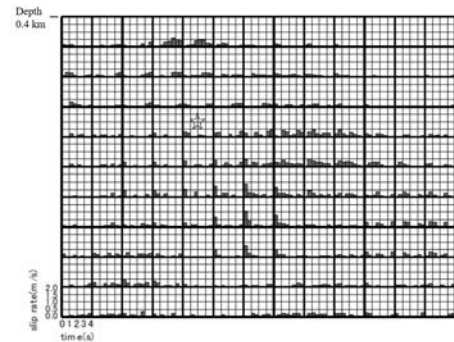
解析モデルの側方及び底面境界には粘性境界を設定し、モデル境界に向かってくる外向波を吸収して反射波を生じないようにした。減衰定数は、表-1の各層のQ値から設定した減衰比を、0.1 Hz及び4.0 Hzで満たすようにレイリー減衰で設定した。解析は0.01秒刻みで20秒まで実施した。

(5) 観測点における解析結果

図-6に地表断層変位が観測された10 km × 10 kmの領域（図-3の点線）の地表面の変位分布を示す。変位



A) 滑り分布



B) 滑り速度時間関数のノルム

図-5 2014年長野県北部の地震の逆解析結果²⁰⁾

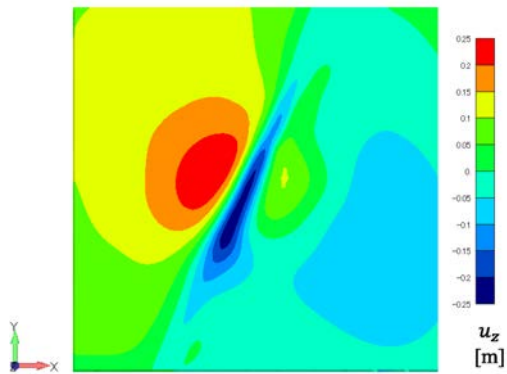
はモデル中央を境に、左右で異なる変位方向を示しており、主断層の地表断層変位の出現位置を確認できる。z方向変位より上盤側が持ち上がる逆断層型の結果になっている。また、変位の水平成分は上盤側で複雑な変位分布となっている。図-7に、フリグステップを観測したNGNH36観測点における変位の時刻歴を示す。このように、観測記録を概ね再現していることがわかる。ここで、本解析では標高及び地層構造を考慮した解析モデルを使用する等、引問らの逆解析結果²⁰⁾と条件が異なるため、引問らの結果とは完全に一致しないことに注意する。

4. 岩盤応力に基づく副断層発生領域の推定

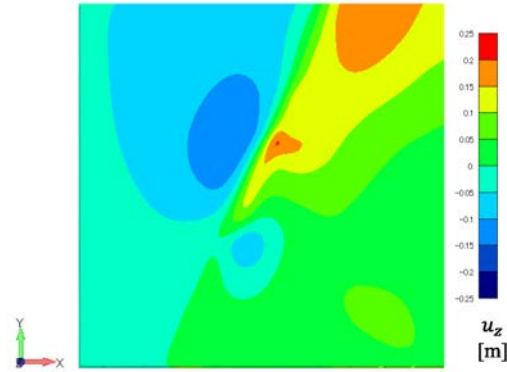
(1) 応力の定義及び分析領域

ここでは、地震動解析における岩盤の応力を整理する。分析に使用する応力は地震動解析における応力に自重解析での応力を足し合わせたものである。ここで、自重解析では図-4の側方及び底面境界を法線方向固定とし、重力加速度を設定した。ただし、自重解析では地層構造における地圧の異方性が出ないように、浅部の4層を同一物性値とし、4層目の物性値とした。また、ポアソン比は全領域で0.49として計算した。

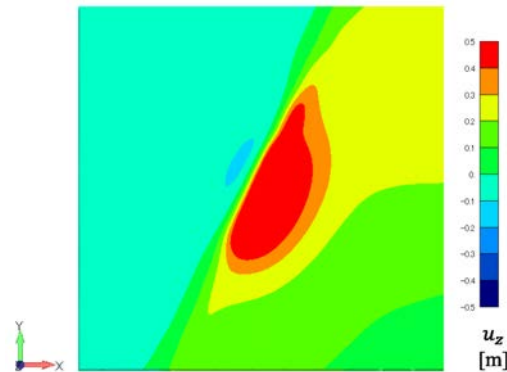
分析領域としては、地表断層変位が観測された10 km



A) 東西方向 (x 方向)



B) 南北方向 (y 方向)



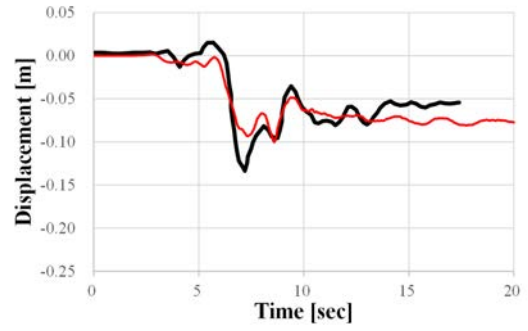
C) 上下方向 (z 方向)

図-6 地表面の変位コンター図

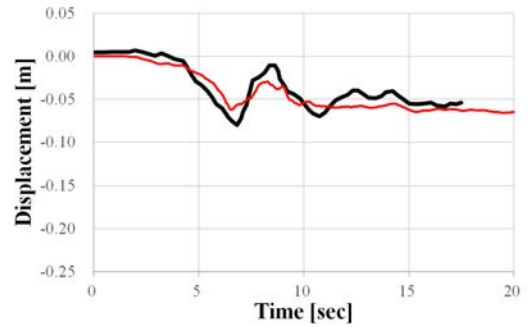
x 10km の領域 (図-3 の点線) で深さ 3km 程度までとする。また、地震による応力増分としては、最終的な永久変位における応力増分を考慮する。

(2) 最大主せん断応力

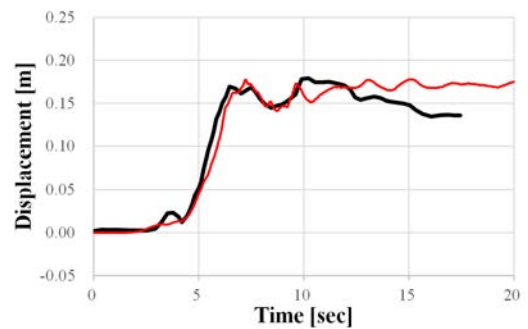
図-8 に最大主せん断応力のコンター図を示す。図-8 A) は地表面の結果であり、図-8 B) は A) の点線位置での x 軸に平行な鉛直断面での結果である。図-8 A) から、地表面には最大主せん断応力が大きい 2 本の帯が確認できる、図-6 との比較により、+x 側の帯は変位の符号が変化する部分に対応しており、主断層に相当すると考えられる。一方、+x 側の帯は、正の z 変位が発生する領域に対応している。さらに、図-8 B)



A) 東西方向 (x 方向)



B) 南北方向 (y 方向)



C) 上下方向 (z 方向)

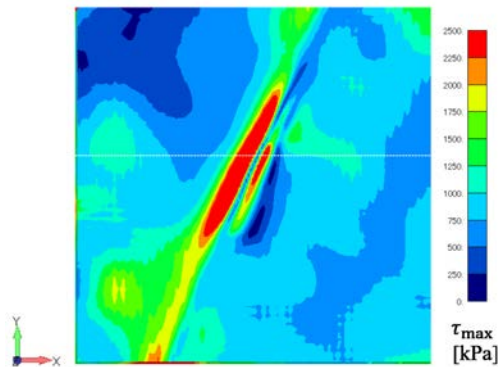
図-7 観測記録との比較 (NGNH36)

より、深部に設定した震源断層に対応した最大主せん断応力の帯が確認され、それが -x 側の帯に到達している。一方、+x 側の帯は、深部の断層面とは連続性がないことが分かる。

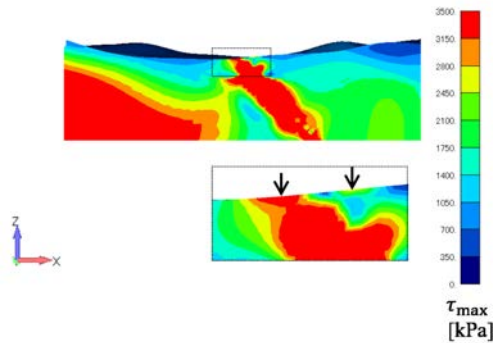
これらの結果より、-x 側の帯は主断層に対応し、+x 側の帯はバックスラスト的に発生した副断層に対応すると考えられる。

(3) 局所安全係数

岩盤の破壊強度は垂直抗力に依存し、地圧及び地震、特に永久変位による応力増分により変化するため、せん断応力が大きくても必ずしも破壊するわけではない。そのため、断層変位の発生を評価するためには、応力だけでなく、破壊強度も考慮した指標が適切であると考えられる。ここでは、岩盤の局所安全係数 (LSF) に着目す



A) 地表面



B) 断面（全体図及び拡大図）

図-8 最大主せん断応力コンター図。矢印部分が地表面における最大主せん断応力が大きい帯の位置に対応する。

る。LSFは斜面の安全率評価で用いられる指標で、(せん断)破壊に対する余裕度を表す指標であり、図-9で与えられる¹⁷⁾。ここで、本来のLSFは引張強度を設定し、引張破壊に対しても適用する指標であるが、ここでは断層のずれに対して適用するため、せん断破壊にのみ着目した。また、LSFは、原子力施設の基礎地盤・背後斜面の安全性評価に用いる想定すべり線の設定時に、重要な評価指標として使われている¹⁷⁾。地震動解析では岩盤の破壊を考慮した解析を行わないため、局所安全係数で評価できるのは、破壊の開始点のみである。それでも、図-1に示す通り、副断層は浅部で発生し、規模も小さいため、浅部の局所安全係数を評価することで、副断層の発生を評価できると考えられる。一方、深部からのずれ変位の伝播により地表に現れる主断層や分岐断層には、必ずしも適用できないことに注意が必要である。

図-10に地表面の局所安全係数のコンター図を示す。この時、粘着力は及び内部摩擦角はそれぞれ1.2 MPa及び30 degとした。これは第一層の岩盤の典型的な値として設定したものである。また、コンター図には、地表断層変位の観測結果²⁾を合わせて黒線で示している。この結果から、最大主せん断応力と同様に、LSFが小さい帯が2本確認できる。主断層の南側(-y側)でLSF

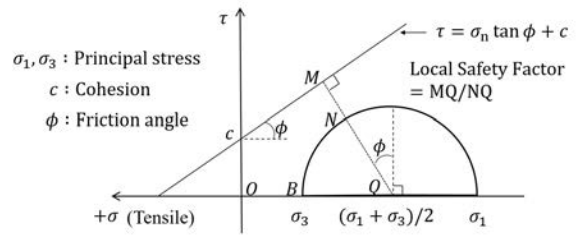


図-9 局所安全係数の概念図

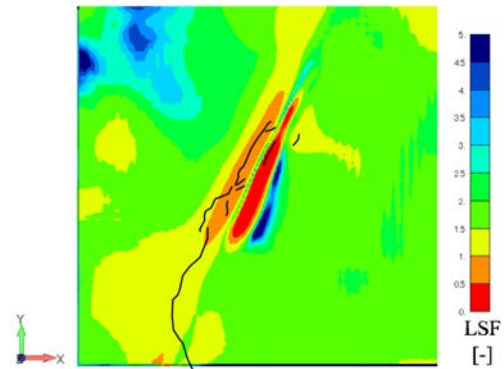


図-10 局所安全係数コンター図

が1を切る領域が広がっており、観測結果と一致する。また、主断層の地表断層線に平行に局所安全係数が小さい帯が確認でき、副断層b2と一致する。さらに、1km程度離れた部分では、1は切らないものの、LSFが相対的に小さい領域を確認することができ、副断層b3に想定する部分と対応している。

副断層位置に対応するLSFに比べ、主断層に対応するLSFは値が大きいことが分かる。これは断層変位の発生メカニズムの違いに関係すると考えられる。副断層、特にバックスラスト型の副断層は地表面から破壊が開始すると考えられる。一方、主断層は地下のずれが地表面に到達したものである。本論文の地震動解析は線形解析であり破壊の進展は考慮しないため、実際に破壊開始点に対応する地表面では副断層の局所安全係数が小さくなったと考えられる。また、図-11にモール門の中心から破壊基準面までの距離(図-9におけるMQ)を示す。この結果より、主断層に対応する箇所ではMQが大きく、副断層に対応する領域ではMQが小さい。これは、主断層の領域では強い圧縮になっているが、副断層の領域では引張に近づいているためである。このように、破壊強度は垂直応力の変化により大きく変化するため注意が必要である。

これらの結果から、副断層は観測された領域は、LSFが小さい領域に内包されていることが分かる。実際には、LSFが小さくても、断層変位が観測されていない領域も存在する。一方、LSFが大きい部分には地表断

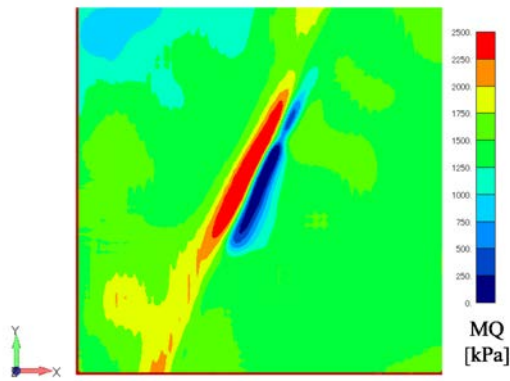


図-11 モール円の中心から破壊基準への距離 (MQ) のコンター図

層変位は観測されていない。地震動解析では線形弾性解析を実施しているため、破壊の進展は考慮されない、ある場所で破壊が開始すると周りの応力状態も変化するため、必ずしも LSF が小さい領域全てに断層変位が出るわけではないと考えられる。このように、精度の限界はあるものの、フリグステップを伴う地震動解析の応力結果から、副断層が発生する可能性が高い領域を推定することが可能であると考えられる。さらに、断層変位解析に用いる詳細モデルでは断層面を陽にモデル化する必要があるが、LSF や応力の結果は、断層変位解析において考慮すべき副断層の位置や形状を決定するための重要な情報を与えると考えられる。ただし、実際に地表断層編が発生しうるか、どこから破壊が開始するかについては、断層面の滑りを考慮した断層変位評価解析を実施する必要がある。

5. まとめ

本論文では、地震動と断層変位の重畳を考慮した断層変位評価を実現することを目的として、大規模 3 次元 FEM を用いた地震動解析手法を整理した。特に、断層変位評価を目的とする場合には、断層近傍の地震動の結果が重要となるため、地震動解析における震源断層のモデル化の方法に注意が必要である。本論文では、震源断層を面震源としてモデル化し、有限要素法の節点荷重とする方法と提案した。これにより、震源モデルを設定した時に、常に解析モデルに最適な荷重を定義することが可能になる。また、提案した面震源を用いて 2014 年長野県北部の地震を対象とした地震動解析を実施し、岩盤の応力を分析した。特に、岩盤の破壊に対する余裕度を表す指標である局所安全係数に着目し、岩盤の応力と破壊強度の観点から、副断層の発生との関係を整理した。その結果、地表面には局所安全係数が小さい領域が存在し、それらの領域と地表断層変位の観測結果は良く一致することが分かった。地震動解

析では線形弾性解析であり破壊の進展は考慮されないため、必ずしも LSF が小さい領域全てに断層変位が出るわけではないと考えられるが、局所安全係数が小さい領域のどこかで破壊が開始し、副断層として成長するものと考えられる。そのため、地震動解析における応力を整理することで、各震源モデルに対して、副断層が発生する可能性がある領域を事前に推定することができる考えられる。また、断層面を既知の弱面とする断層変位評価において、副断層の位置及び形状を決定するため、または複数の破碎帯の中からより危険な破碎帯を抽出するための有益な情報になると考えられる。

今後は、本解析で実施したフリグスリップを含む地震動解析結果を浅部の地盤モデルに入力し、地表断層、特に副断層の活動性評価を実施する予定である。

謝辞： 本解析の一部は、海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用して実施したものである。防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net の波形記録を使用させて頂きました。東京電力ホールディングス株式会社 引間博士から震源インバージョン結果をご提供いただきました。ここに御礼申し上げます。

REFERENCE

- 1) 地盤工学会：地震時の断層変位に伴う地震災害に関する調査報告書，地盤工学会 2001 年度調査委員会報告書，2002。
- 2) 石村大輔，岡田真介，丹羽雄一，遠田晋次：2014 年 11 月 22 日長野県北部の地震 (Mw 6.2) によって出現した神城断層沿いの地表地震断層の分布と性状，活断層研究，Vol.43, pp.95-108, 2015。
- 3) 東北大学災害科学国際研究所：平成 28 年熊本地震に関する報告書，2017。
- 4) 原子力安全推進協会：原子力発電所敷地内断層の変位に対する評価手法に関する調査・検討報告書，2013。
- 5) 土木学会原子力土木委員会：断層変位小委員会報告書，2015。
- 6) 原子力学会：断層変位に対するリスク評価と工学的な対応策，「断層の活動性と工学的なリスク評価」調査専門委員会報告書，2017。
- 7) 原子力規制委員会：実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則，2013。
- 8) 澤田昌孝，羽場一基，堀宗朗：断層変位評価のための数値解析手法の提案と計算力学的検討，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.72, No.2, pp.L675-L685, 2016。
- 9) 澤田昌孝，羽場一基，堀宗朗：断層変位評価のための高性能数値解析手法の開発，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.73, No.2, pp.L699-L710, 2017。
- 10) Sawada, M., Haba, K. and Hori, M.: Estimation of surface fault displacement by high performance computing, *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol.12, No.4, 1841003, 2018。
- 11) Motoyama, H., Sawada, M., Hotta, W., Haba, K., Otsuka, Y., Akiba, H., Hori, M.: Development of a general-purpose parallel finite element for analyzing earthquake engineering problems. *Earthq. Engng. Struct. Dyn.* 50, 4180-4198, 2021。

- 12) 澤田昌孝, 羽場一基, 堀宗朗: 地表地震断層を伴う実地震を対象とした高性能計算による地表断層変位評価, 土木学会論文集 A2, Vol.74, No.2, pp.1.627-1.638, 2018.
- 13) 羽場一基, 澤田昌孝, 堀宗朗: 断層及び地盤物性の不確実性を考慮した確率論的断層変位評価への高性能計算の適用, 土木学会論文集 A2 (応用力学) 74.2, 1.683-1.692, 2018.
- 14) Haba, K.; Hata, A.; Sawada, M.; Hori, M. Estimation of the effect of material uncertainty on surface fault displacement using latin hypercube sampling. *J. Jpn. Assoc. Earthq. Eng.* 20, 1325, 2020.
- 15) Sawada, M., Haba, K. and Hori, M.: Predictive Simulation for Surface Fault Occurrence Using High-Performance Computing, *GeoHazards*, 3(1), 88-105, 2022
- 16) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.82, No.2, pp.1018-1040, 1992.
- 17) 土木学会原子力土木委員会: 原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術, 2008.
- 18) 久田嘉章: 成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法, 日本建築学会構造系論文集, 第501号, pp.48-57, 1997.
- 19) Aki, K. and Richards P. G.: *Quantitative Seismology Theory and Methods*, W. H. Freeman and Company, P.61, 1980.
- 20) 引間和人, 中村亮一, 植竹富一: 2014年長野県北部の地震(Mj6.7)の震源過程~震源近傍の広帯域地震波形を考慮した解析~, 日本地震学会講演予稿集2015年度秋季大会, S15-14, 2015.
- 21) 防災科学技術研究所: J-SHIS 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>, 2022年9月9日閲覧.
- 22) 地震調査研究推進本部: 全国1次地下構造モデル(暫定版), http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/choshuki2012_a2.pdf (2022年9月9日閲覧)

(Received)

(Accepted)

GROUND MOTION ANALYSIS USING PLANE SOURCE AND ESTIMATION OF OCCURENCE REGION OF SECONDARY FAULTS BASED ON STRESS OF ROCK MASS

Kazumoto HABA, Masataka SAWADA, Kazuaki WATANABE and Muneo HORI

Fault displacement evaluation including secondary faults is essential for the safety of important structures such as nuclear power plants. In the evaluation considering the superposition of fault displacement and ground motion, it is effective to conduct ground motion analysis for a wide area considering the fling step and fault displacement analysis for shallow ground including the fault planes in stages. However, it is not easy to set the location and shape of secondary faults without a detailed geological survey. In the ground motion analysis, it can not be appropriate to model the earthquake fault as a set of point sources because the ground motion of a wide area including the vicinity of the earthquake fault must be evaluated. In this paper, we proposed a method to set the input loads in FEM of the earthquake fault which is defined as a plane source rather than a set of point sources. That enables the optimal setting of the load in each analytical model for the earthquake source model used. Furthermore, we conducted a ground motion analysis for the 2014 Nagano-ken hokubu earthquake and analyzed the location of the surface fault focusing on the stress and strength of the rock mass. As a result, it was shown that the regions where the local safety factor, which expresses the margin for failure of rock mass, is small coincide well with the observed regions of surface fault displacement. This result suggests that the local safety factor can be used to estimate the occurrence of secondary faults for each earthquake source model.