

動力的破壊進展解析による 地表断層変位予測手法の提案

澤田 昌孝^{1*}

¹電力中央研究所 地球工学研究所（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

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

近年、地表地震断層の変位によるインフラ施設の被害が懸念されるようになった。断層変位に対する施設の安全・性能を評価するためには施設近傍に分布する地表断層の地震時の変位量を推定・評価することが必要である。変位の推定手法の一つとして数値解析による推定が考えられる。

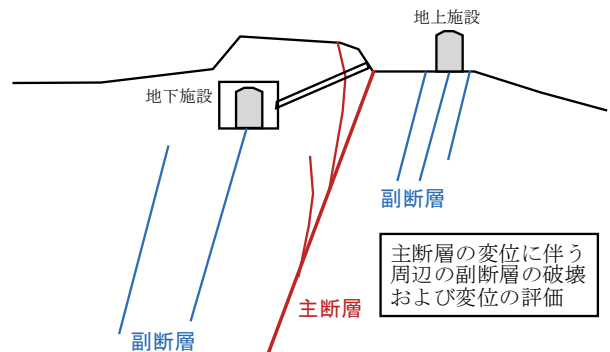
不連続面を陽にモデル化することに優れる三次元ブロック体個別要素法解析コードに断層の動力的破壊進展解析を実施するためのすべり弱化則を導入した。これを用いて、地震を発生させる断層（主断層）の周辺に副次的な断層（副断層）が分布する状況を想定し、主断層で地震が発生した際の副断層の変位を評価する解析について解析例を示した。

Key Words : *dynamic rupture simulation, fault displacement, distinct element method, benchmark*

1. はじめに

1999年に相次いで発生したトルコのコジャエリ地震と台湾の集集地震を契機として地表地震断層の変位によるインフラ設備の被害が懸念されるようになった。2011年の東日本大震災後に施行された原子力発電所の新規制基準¹⁾でも、重要施設の基礎地盤について、震源として考慮する活断層に加えて、敷地に分布する小規模な断層や地すべり面についても将来の変位の有無を検討することが求められている。

断層変位に対する構造物の設計を行う場合、構造物近傍の断層の変位を定量的に評価し、それが施設の安全機能・性能に重大な影響を与えるかどうかを検討する必要がある。図-1に地表部の断層と構造物の位置関係の模式図を示す。ここで主断層は地震を発生させると考えられる断層が地表まで到達したものである。例えば原子炉建屋がこの主断層上に建設されることはない。また、主断層と地質構造上の関連性は認められないが、主断層の活動に伴って形成された二次的な断層で、今後も主断層の活動とともに変位する可能性が否定できないものをここでは副断層と称す²⁾。断層変位に対する施設設計を行うためには、主断層が動いた際の施設近傍の副断層における変位量を推定することが必要となり、本論文ではそのための数値解析による予測手法について検討する。



主断層：地震を発生させると考えられる断層が地表まで到達したもの。
副断層：主断層と地質構造の関連性は認められないが、主断層の活動に伴って形成された二次的な断層で今後も主断層の活動により変位する可能性が否定できないもの。

図-1 地表部の断層と構造物

2. 数値解析による断層変位の推定

(1) 静的解析を用いた地震時の周辺地盤の変形評価

発電用原子炉施設の耐震安全性に関する審査やバックチェックの評価においても断層変位による支持地盤の変形・傾斜について、数値解析による評価・検討を行っていた。数値解析手法としては、食い違い理論による弾性理論解、境界に強制変位（あるいは地殻応力）を与える静力学的な有限要素法解析による検討²⁾が主として行われていた。断層に静的な強制変位を与えることによりその周辺・上部の地盤変形を数値解析で評価する試みは数

多くなされている³⁾。静力学的な解析を用いる場合の課題として、断層の破壊進展過程での周辺への影響の評価が難しいことが挙げられる。

(2) 断層の動力的破壊進展解析

前節に述べた課題を解決するために、本研究では動力的な断層の破壊過程を解析するアプローチをとる。断層の破壊規準や応力条件のもとに、き裂の発生、進展、停止の過程（破壊過程）を解く方法であり、物理的な意味が明確である。主に強震動の予測・評価などの地震動シミュレーション手法として開発・発展してきた方法であり、近接する断層間での破壊の乗り移りの検討にも用いられている⁴⁾。

断層の動力的破壊進展解析に適用されてきた数値解析手法は、差分法（FDM）、境界要素法（BEM）が主であり、有限要素法（FEM）も一部用いられている。南カリフォルニア地震センター（SCEC）と米国地質調査所（USGS）は断層の動力的破壊進展解析手法の検証のためのベンチマーク問題をホームページ上に公開しており⁵⁾、これに参加した多くの解析手法が紹介されている。

Fälth et al.⁶⁾は動力的破壊進展解析ではないが、震源から等速度で破壊フロントが断層面上を進行するという仮定のもと、断層周辺の地下に分布する破碎帯の変位量予測を行っている。使用した解析手法はCundallら^{7,8)}が提案したブロック体の三次元個別要素法（DEM）である。ブロックについては剛体だけでなく内部を格子分割してFDMで解くこともできるため、DEMとFDMのハイブリッド法ともいえる。

実際のサイトを想定して数値解析により断層変位を評価する場合、その対象は主断層よりも、構造物に影響を与える位置に存在する副断層である。主断層・副断層は異なる走向・傾斜を持っていて、地盤は工学的物性の異なる複数の岩種・岩盤で構成される場合が多い。このようなサイトの地盤をモデル化するには、FEMや上記のブロック体DEMが適している。さらに、主断層が複数のセグメントに及ぶ数10kmの長さになる場合もあり、計算が大規模になることから、現段階において通常の計算機環境では、ブロック体DEMが適していると評価し、これを以降用いる。

3. ブロック体個別要素法の概要

(1) 解析手法の特徴

Cundallら^{7,8)}によって開発された三次元ブロック体個別要素法は、3DEC⁹⁾という解析プログラムとなっている。3DECでは、一つの要素は任意の多面体ブロックであり、

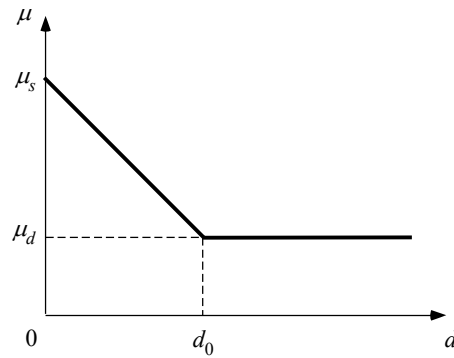


図-2 すべり弱化モデル

ブロック同士の接触、衝突、すべりには緻密な接触判定を必要とする。ブロック境界は平面、あるいは平面の集合体でモデル化することになり、本研究で対象とする断層や破碎帯などのモデル化に適している。

ブロックは剛体のみならず、ブロック内部を四面体差分格子で離散化することによりブロックの変形を考慮することもできる。

ブロック間の力学的相互作用は接触点で評価する。面で接触している場合、その接触面に含まれるブロック隅角点や差分格子点が接触点となる。接触面上の力学挙動は与えた構成モデルに従う。FISHというプログラム独自の言語⁹⁾を用いて断層や破碎帯などの不連続面（接触面）に対し任意の構成式を与えるなど、解析コードとしての機能を拡張することができる。

ブロックの重心座標や隅角点座標を時々刻々と更新し、断層のすべり破壊によるブロック間の接触面における相対変位についても、新規の接触点を自動的に探索し、離反した接触点は自動的に消去することができる。これにより、大変位解析が可能となる。

静的解析、動的解析ともにブロックの挙動に関する支配方程式は運動方程式であり、これを陽解法によって解く。時間刻みは解析精度を確保するようにプログラム内で自動的に決定される。

解析手法の詳細については文献^{7,8,9)}を参照されたい。

(2) 動力的破壊進展解析への適用

断層上の破壊判定は以下のクーロンの摩擦則により行う。

$$\tau = c + \sigma_n \mu \quad (1)$$

ここで、 τ 、 σ_n は断層面上のせん断応力、垂直応力、 c は粘着力、 μ は摩擦係数である。動力的破壊進展解析では、断層面上において図-2のような摩擦係数 μ とせん断（すべり）変位 d の関係式を定義するすべり弱化則が最も良く用いられる。

$$\mu = \begin{cases} \mu_s - (\mu_s - \mu_d) \frac{d}{d_0}, & d \leq d_0 \\ \mu_d, & d > d_0 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 μ_s は静止摩擦係数（ $=\tan \phi$ 、 ϕ は摩擦角）、 μ_d は動摩擦係数、 d_0 は限界せん断変位を表す。断層での垂直応力に変化がないとき、図-2の縦軸はせん断応力と読み替えることもできる。すなわち、断層のある位置で破壊が起きた後、せん断変位の進行とともに応力が降下して限界せん断変位 d_0 において残留状態に至ることを表している。この時、負担できなくなった応力は周辺に分配され、式(1)の破壊規準を満たすとさらに進展していく。破壊前の断層は垂直剛性 k_n 、せん断剛性 k_s で定義される弾性挙動をとる。せん断変位ベクトルは破壊の過程で方向が変化する場合もある。SCEC と USGS⁹⁾は、 d をせん断変位ベクトルのノルムではなく経路に沿った絶対値の和としており（例えば+方向に 3m 変位した後、-方向に 1m 変位した場合、 $d=2m$ ではなく $d=4m$ とする）、本研究でもその定義を用いる。3DEC の機能拡張言語 FISH を用いてこの構成式を導入した。

なお、動力学破壊進展解析では数値的な振動が発生することがあるが、特にそれに対する対策は施していない。また、以降の解析では減衰は考慮していない。

4. ベンチマーク解析

(1) 問題設定

第2章で述べたように、数多くの解析手法により断層の動力学破壊進展解析は実施される。SCECとUSGSが公開しているベンチマーク問題に第3章に述べた解析手法を適用し、既往の解析結果との比較により信頼性を確認している。ここでは、その一例を示す。対象問題は、一連のベンチマーク問題のCase15にあたる左横ずれ断層での分岐問題（二次元）とする。

図-3のように長さ28km、幅15kmの断層（主断層）から長さ12km、幅15kmの断層（分岐断層）が分岐している。分岐位置は主断層の両端からそれぞれ16km、12kmの位置であり、分岐角度は30°である。震源は図-3上で主断層上の断層分岐位置より左側領域の中心位置にあり、3km×3kmの正方形形状である。ここで実施する二次元解析では、深さ7.5kmの位置を抽出して解析を実施する。

解析領域は90km×60kmとし、主断層から30km以上離して外側境界を設定した。厚さを1kmとし上下面の鉛直方向変位を固定する、疑似的な平面ひずみ状態とした。断層面上の格子サイズは0.1kmとするように指示されているので、ブロック内部を四面体格子で自動分割する際に格子サイズ0.1kmを指定した。また、解析時間の短縮

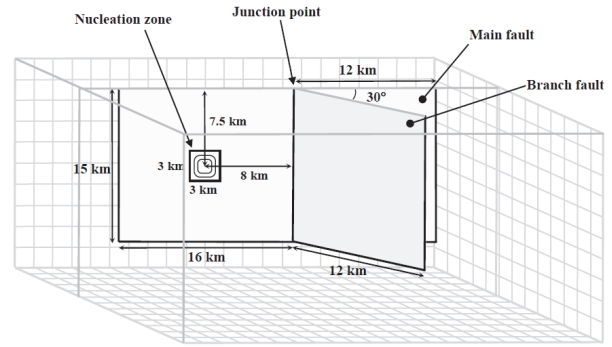


図-3 分岐断層の問題⁹⁾

表-1 材料パラメータ値（分岐問題）

	パラメータ	単位	値
岩盤	P波速度 V_p	m/s	6000
	S波速度 V_s	m/s	3464
	密度 ρ	kg/m ³	2670
断層	粘着力 c	MPa	0.0
	静止摩擦係数 μ_s	-	0.677
	動摩擦係数 μ_d	-	0.525
	限界せん断変位 d_0	m	0.40
	垂直剛性 k_n	MPa/m	1.0×10^4
	せん断剛性 k_s	MPa/m	1.0×10^4

のため、断層から離れるしたがって格子サイズを大きくした（最大0.5km）。

断層では引張り破壊が発生しないと仮定しており、分岐点では主断層に沿うすべりは発生するが、分岐断層に沿うすべりは発生しない。分岐断層上では0.1km離れた最近接の格子点からすべりが許容される。

解析に用いた材料パラメータを表-1に示す。これらの値は基本的にベンチマーク問題の仕様により指定されたものがある。ただし、断層は剛塑性的に挙動するものとしており、垂直・せん断剛性については指定されていない。これらについて解析時間を極端に長くしない範囲で大きい値を設定し、弾性的な変位を十分小さくした。

解析は初期応力解析と動的解析の2段階で実施した。垂直応力は主断層、分岐断層ともに120MPaであるが、せん断応力は主断層で70MPa、分岐断層で78MPaを左横ずれになるように作用させる。また、震源部では81.6MPaのせん断応力となるように内側からせん断応力を作用させる（初期応力解析で破壊しないように震源部の静止摩擦係数を表-1よりも大きくした）。動的解析では、外側境界を粘性境界に変更する。 $t=0s$ において震源部の静止摩擦係数を周辺と同じ値にすることにより、震源部で破壊が発生し、周辺に伝播する。なお、動的解析における時間刻みは $\Delta t=1.2019 \times 10^{-4}s$ であった。

(2) 解析結果

図-4は解析を終了した $t=12s$ において断層上に破壊が発

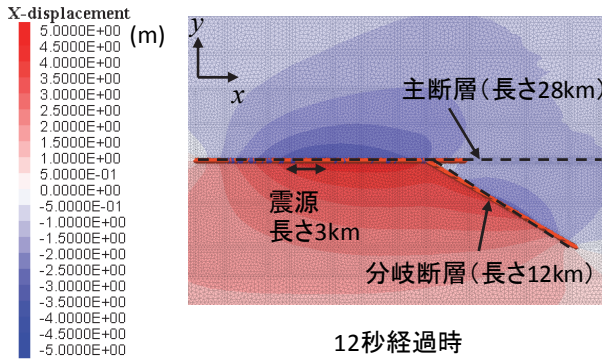


図-4 x方向変位のコンターと断層上の破壊箇所

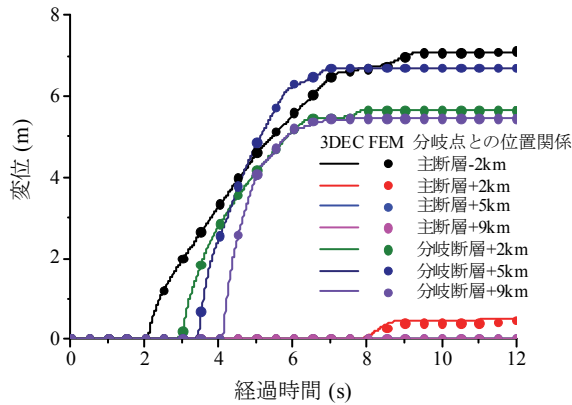


図-5 断層上でのすべり変位の経時変化

生した箇所をプロットしたものである。コンター図はx方向の変位を表している。このケースの特徴としては、震源から破壊が進展し分岐点を超えた後、分岐断層上を破壊が進展するのに対して、主断層上では破壊の進展が極めて遅くなることである。これは分岐断層上での左横ずれ変位が主断層の分岐点より+x側の垂直応力を高める変形となるためである。

SCECとUSGS⁹⁾はホームページ上に既に解析を実施したチームの結果の一部を公開している。断層上のせん断変位の経時変化についてBarallがFEM¹⁰⁾により実施した解析結果⁹⁾と今回実施した解析結果を比較したものが図-5である。両者の解析結果はたいへん良く一致している。

以上のように、導入した解析手法による断層上のせん断変位の計算について信頼性を確認している。

5. 主断層の周辺に分布する副断層の変位評価の解析例

(1) 問題設定

重要構造物が主断層の直上に位置するケースは少なく、多くの場合、主断層の活動に伴う構造物近傍の副断層の変位を評価することになる。ここでは、提案した解析手

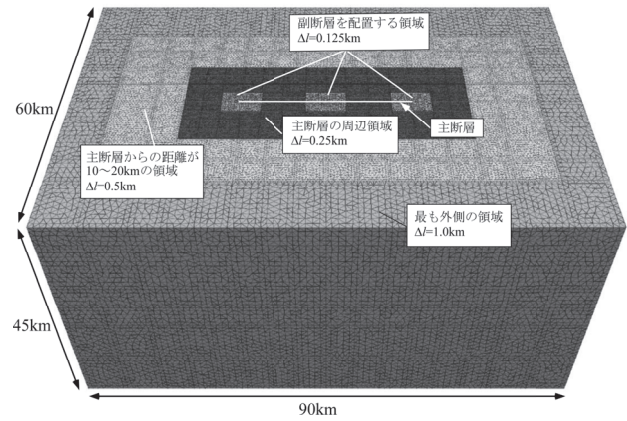


図-7 解析領域

表-2 材料パラメータ値 (岩盤, 主断層)

	パラメータ	単位	値
岩盤	P波速度 V_p	m/s	6000
	S波速度 V_s	m/s	3464
	密度 ρ	kg/m ³	2670
断層	粘着力 c	MPa	0.0
	静止摩擦係数 μ_s	-	0.384
	動摩擦係数 μ_d	-	0.34
	限界せん断変位 d_0	m	0.14
	垂直剛性 k_n	MPa/m	1.0×10^4
	せん断剛性 k_s	MPa/m	1.0×10^4

法により主断層活動時の周辺の副断層の変位評価に関する試解析を示す。

主断層として、長さ30km、幅15km、傾斜90°の左横ずれ断層を考える。図-7に示すように解析領域は長さ90km、幅60km、深さ45kmとし、主断層の端から30km離して外側境界を設定した。また、震源の中心を断層走向方向の中央部、深度12kmに配置した。格子サイズ Δl は後述する副断層配置領域で0.125km、主断層周辺で0.25kmとし、外側ほど大きくした(最大1.0km)。解析モデルのブロック数は2,318、格子点数は3,310,635、格子数は15,023,939、接触点数は1,783,708となった。

岩盤および主断層の材料パラメータを表-2に示す。限界せん断変位 d_0 以外は壇ほか¹¹⁾を参考に設定した。 d_0 は破壊が停止せず継続するように震源のサイズ(一辺5.4km)および断層周辺の格子サイズと合わせて検討して設定した。

加瀬⁴⁾は鉛直横ずれ断層の動力学的破壊進展解析の広域応力として以下の式を用いた(引張りを正とする)。

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= -42Z - 6 \\ \sigma_{\min} &= -20Z - 2\end{aligned}\quad (3)$$

ここで、 $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ は水平面内における最大、最小主応力[MPa]、 Z は深さ[km]である。本式をそのまま初期応力として用いると、 $t=0$ sにおいて地表部に初期せん断による

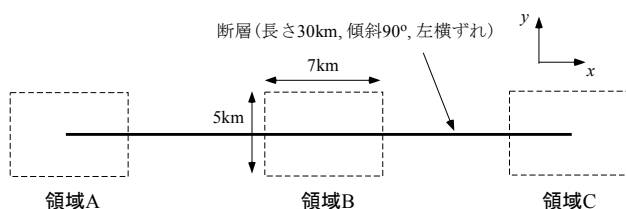


図-8 副断層を配置する領域

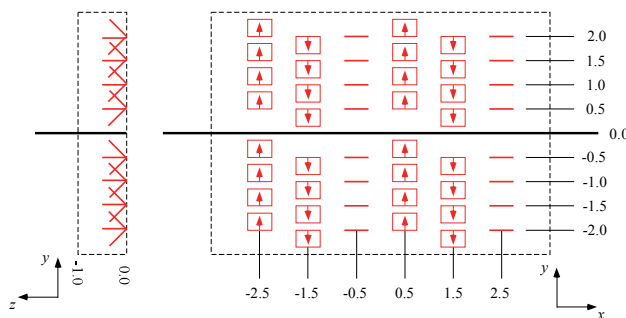


図-9 副断層の配置

破壊が発生してしまうので、 $\sigma_{\max} = -42Z - 2$ [MPa]として用いた。 $\sigma_{\max}$ の方向は主断層が左横ずれに変位するように主断層の走向から 45° とした。 z 方向の応力は $\sigma_z = -31Z - 2$ [MPa]とした。

レシーバーとなる副断層については、図-8に示すように断層の中央部と両端部に $5\text{km} \times 7\text{km}$ の領域A、B、Cを配置し、その領域内に一辺 0.5km の正方形の副断層を配置した。副断層の走向は主断層と一致させ、傾斜は 90° 、 $\pm 45^\circ$ とした。主断層から地表において離隔 $0.5, 1.0, 1.5, 2.0\text{km}$ の位置に配置した(図-9)。副断層についてはクーロンのすべりモデルに基づく材料パラメータ値を表-3のように設定した。破壊後に粘着力はゼロとなる。

表-3 材料パラメータ値 (副断層)

パラメータ	単位	値
粘着力 c	MPa	0.025
摩擦角 ϕ	deg	32.0
ダイレイタンスー角 ψ	deg	0.0
引張り強さ σ_t	MPa	0.0
垂直剛性 k_n	MPa/m	6.0×10^3
せん断剛性 k_s	MPa/m	1.5×10^3

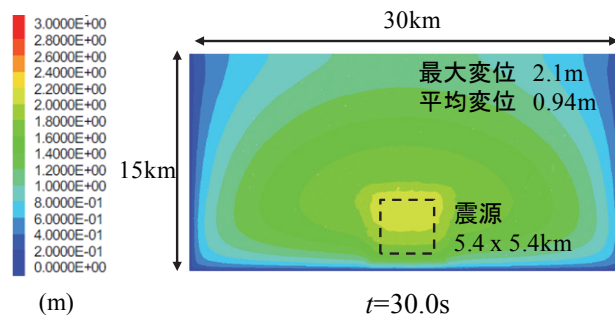


図-10 断層上のすべり分布

解析手順は、まず静的解析により所定の初期応力を作らせ、地表を除く外側境界を粘性境界に変更した後、動的解析開始時 ($t=0\text{s}$) において震源部のせん断応力をせん断強さの1.005倍にすることで破壊進展を開始させた。解析は30s間を対象に実施し、時間刻みは $1.8934 \times 10^{-4}\text{s}$ である。

(2) 解析結果

図-10に30秒経過時の断層上のすべり変位分布を示す。最大変位は震源付近で2.1m、平均変位は0.94mであり、

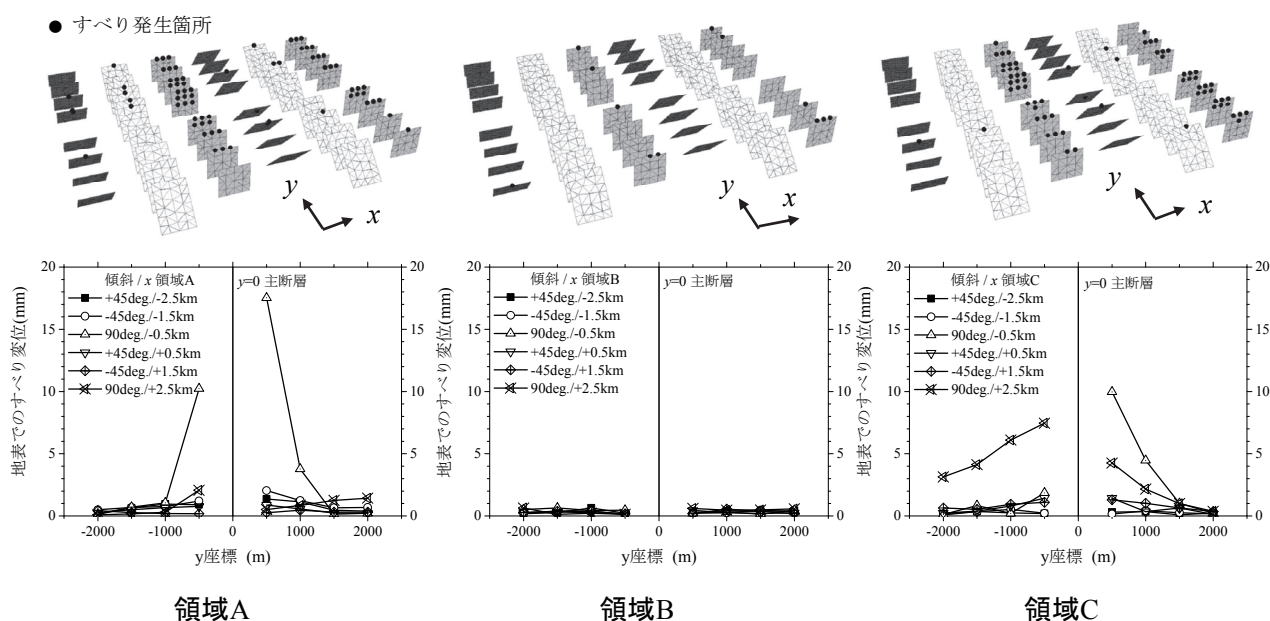


図-11 副断層における地表変位 ($t=30\text{s}$)

約11秒経過時でほぼ収束する。

図-11は3つの領域における副断層でのすべり発生位置および副断層地表中央点におけるせん断変位（その位置でせん断変位が最大となる方向の値）を主断層との離隔との関係でプロットしたものである。黒丸の位置ですべりが発生している。断層の両端に位置する領域A、Cの方が中央に位置する領域Bよりも多くのすべりが見られる。横ずれ断層では、断層端部周辺にひずみが集中し、地表において鉛直方向の変位が見られることと対応する。約250mまですべりが発生している副断層では10mmを超えるせん断変位となる場合がある。また、全くすべりがなく、あるいは一つの格子点のみですべりが発生している場合は1mmを下回るせん断変位となっている。せん断変位は主断層から離れるにつれ、小さくなる傾向にある。

以上のように、主断層の活動に伴う周辺の副断層の変位を数値解析により算出することが可能である。動力学の破壊進展解析を適用することにより動的な影響についても考慮できる。主断層の破壊センス（横ずれ、正・逆断層）、マグニチュード、副断層のサイズ、走向・傾斜、離隔などを变化させた解析ケースを実施、結果整理することで地震時の断層変位の一般的傾向について考察できると考えている。

6. おわりに

地表での断層変位量が明らかな実地震に対して本手法を適用することにより、地表変位の再現性を確認する必要がある。

謝辞：解析の実施にあたっては、株式会社地層科学研究所の中川光雄氏にご協力いただいた。スウェーデンClay Technology社のBilly Fäth氏からご自身の研究についての丁寧な解説をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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、構造および設備の基準に関する規則，2013.
- 2) 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.
- 3) 例えば、谷和夫：ジョイント要素を用いた FEM による逆断層の模型実験のシミュレーション，地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム，土質工学会，pp.215-222，1994.
- 4) 例えば、加瀬祐子：断層間での破壊の乗り移り 応力が深さに依存する場合についての考察，地学雑誌，Vol.111，pp.287-297，2002.
- 5) Harris R. A., Barall, M., Archuleta, R., Dunham, E. Aagaard, B., Ampuero, J. P., Bhat, H., Cruz-Atienza, V., Dalguer, L., Dawson, P., Day, S., Duan, B., Ely, G., Kaneko, Y. Kase, Y., Lapusta, N. Liu, Y., Ma, S., Oglesby, D., Olsen, K., Pitarka, A., Song, S. and Templeton, E.: The SCEC/USGS dynamic earthquake rupture code verification exercise, *Seism. Resear. Let.*, Vol.80, pp.119-126, 2009.
- 6) Fäth, B., Hökmark, H. and Munier, R.: Slip on repository rock fractures induced by large earthquakes. Results from dynamic discrete fracture modeling, *4th U.S. Rock Mechanics – 2nd Canada Rock Mechanics Symposium*, 5p. 2008.
- 7) Cundall, P. A.: Formulation of a three-dimensional distinct element model – part I: a scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.25, pp.107-116, 1988.
- 8) Hart, R. D., Cundall, P. A. and Lemos, J.: Formulation of a three-dimensional distinct element model – part II: mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.25, pp.117-126, 1988.
- 9) Itasca Consulting Group Inc.: 3DEC 5.0 User's Guide, 2013.
- 10) Barall, M.: A grid-doubling finite-element technique for calculating dynamic three-dimensional spontaneous rupture on an earthquake fault, *Geophys. J. Int.*, Vol.178, pp.845-859, 2009.
- 11) 壇一男，武藤真奈美，鳥田晴彦，大橋泰裕，加瀬祐子：動力学のシミュレーションによる断層の連動破壊に関する基礎的研究，活断層・古地震研究報告，No.7，pp.259-271，2007.

PREDICTION METHOD FOR SURFACE FAULT DISPLACEMENT BY DYNAMIC RUPTURE SIMULATION

Masataka SAWADA

Since the outbreaks of huge earthquakes in Taiwan and Turkey in 1999, attention has been paid to surface fault rupturing causing damages to various civil engineering structures. In this paper, a numerical prediction method for surface fault displacement was proposed. A three-dimensional distinct element code was adopted as a basic code, and a slip-weakening model was installed for dynamic rupture simulation. The numerical method was applied to a benchmark problem and a test simulation focusing on displacements of target surface faults locating in the vicinity of the primary strike-slip fault.