動力学的破壊進展解析による 地表断層変位予測に関する基礎検討

澤田昌孝1*

1一般財団法人電力中央研究所 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.

著者らは三次元ブロック体個別要素法解析コードを用いた断層の動力学的破壊進展解析により、断層変 位を推定する手法の開発を進めている. 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での変位を評価する解析を実施し、主 断層, 副断層の走向傾斜が副断層のすべりに与える影響を調べた.

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

1. はじめに

大規模な内陸地震が発生すると、地震動だけでなく、 地表に生じる断層変位によっても土木構造物が被害を受 ける場合がある. 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においても、地表に生じ る断層変位により多くのインフラが被害を受けた¹⁾. 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2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 で副断層と称す. 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である.発電用原子炉施設の



図-1 地表部の断層と構造物

耐震安全性に関する審査やバックチェックの評価では、 断層変位による支持地盤の変位・傾斜について数値解析 による評価・検討を行っていた³⁾.数値解析手法として は、食い違いの弾性論による弾性理論解と境界に強制変 位を与える静力学的な有限要素法解析による検討が主と して行われていた. 著者4は、横ずれ断層周辺に分布す る副断層における変位量を三次元ブロック体個別要素法 を用いた動力学的破壊進展解析により推定する計算例を 示した, 地殻変動と地震動の重畳の影響および断層の破 壊過程での周辺への影響の評価が可能であることが動的 解析の利点である.本論文では、主断層および副断層の 走向傾斜が副断層での変位の発生に与える影響について 数値解析により検討した結果を報告する.

ブロック体個別要素法による断層の動力学的破壊進展解析

(1) 解析手法の特徴

用いた解析手法はCundallら^{3,0}によって開発された三次 元ブロック体個別要素法である.本手法では,一つの要 素は任意の多面体ブロックであり,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.

静的解析,動的解析ともにブロックの挙動に関する方 程式は運動方程式であり,これを陽解法によって解く.

(2) 動力学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.

$$\tau = c + \sigma_n \mu \tag{1}$$

ここで、 τ 、 σ 、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。動力学的破壊進展解析 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⁷.

$$\mu = \begin{cases} \mu_{s} - (\mu_{s} - \mu_{d}) \frac{d}{d_{0}}, & d \le d_{0} \\ \mu_{d}, & d > d_{0} \end{cases}$$
(2)

ここで、 μ_s は静止摩擦係数(=tan ϕ , ϕ は摩擦角), μ_d は動摩擦係数, d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_n で定義 される弾性挙動をとる.解析プログラムの機能拡張言語 を用いてこの構成式を導入した.

なお、以後の解析で減衰は考慮していない.



3. 主断層の周辺に分布する副断層の変位評価

(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 破壊・変位を評価することが課題である.本章では,主 断層活動時の周辺の副断層の変位を評価する解析を行っ た結果を示す.

主断層として,横ずれ断層と逆断層の2種類を考える. ともに長さ30km,幅15kmであり,傾斜は横ずれ断層の 場合に90°,逆断層の場合に45°とする.解析領域は 外側境界を主断層端部から30km離して設定することと し,図-3のようになる.また,震源の中心を断層走向 方向の中央部,傾斜方向に地表から12kmの位置に設定 した.

岩盤および主断層の材料パラメータ値を表-1 に示す. 限界せん断変位 do以外は壇ほか⁸を参考に設定した. do 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⁹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).

$$\sigma_{\max} = -42Z - 6$$

$$\sigma_{\min} = -20Z - 2$$
(3)

ここで、 σ_{max} 、 σ_{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 る破壊が発生してしまうので、 $\sigma_{max} = -42Z - 2$ [MPa]として 用いた. σ_{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 $\alpha = -31Z$ -2[MPa]とした.

主断層が逆断層の場合の主応力は、y方向を最大主応力、x方向を中間主応力、z方向を最小主応力とする。断層上に作用する垂直応力およびせん断応力を横ずれの場合と揃えるために、以下のように設定した。



	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	3500
	密度 ρ	kg/m ³	2700
断層	粘着力 c	МРа	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	M Pa/m	$1.0 \ge 10^4$
_	せん断剛性 k_s	M Pa/m	$1.0 \ge 10^4$

$$\sigma_x = -31\sqrt{2Z} - 2$$

$$\sigma_y = -42\sqrt{2Z} - 2$$

$$\sigma_z = -20\sqrt{2Z} - 2$$
(4)

レシーバーとなる副断層については、図-4に示すよう に地表の断層の中央部と両端部に5km×7kmの領域A,B, Cを設定して配置した.副断層は一辺0.5kmの正方形とし た.領域A~Cでの副断層は図-5に示す2通りとする.

パターン1では、副断層の走向を主断層と一致させ、 傾斜は90°、±45°とした(+)個への傾斜を正とする). 主断層から地表において離隔0.5、1.0、1.5、2.0kmの位置 に配置した. パターン2では、副断層の走向を主断層の 走向に対して±45°、90°とした(主断層の走向から反 時計回りを正として角度を定義する). 傾斜は90°とし た. 主断層との離隔は地表において0.5、1.0、1.5、2.0km





としたが、走向が主断層と 90°異なる副断層はお互いに接触しないように中心間が 1.0km 離れるように配置した.

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-2 のように設定した. 破壊後は 粘着力がゼロになるとした.

格子サイズは副断層の分布する領域 A~C 内では 0.125km, 主断層を挟む領域では 0.25km とし, 主断層か ら離れるにしたがい, 大きくなるものとした(最大で 1.0km).格子サイズは数値解析による波動伝播の表現 に大きな影響を与える.波長を精度良く表現するために は格子サイズを波長の 1/8 以下にする必要がある.本ケ ースの場合, 主断層・副断層周辺の対象最大周波数は約 1.8Hz となる.

解析手順は、まず静的解析により所定の初期応力を作用させる.地表を除く外側境界を粘性境界に変更した後、 (=0[s]において震源部のせん断応力をせん断強さの1.005

表-2 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
ダイレイタンシー角 ψ	deg.	0.0
引張り強さ σ_t	MPa	0.0
垂直剛性 k_n	M Pa/m	$6.0 ext{ x } 10^3$
せん断剛性 k_s	M Pa/m	1.5×10^3

倍にすることで破壊の進展を開始させる(動的解析).

(2) 解析結果

a) 主断層が横ずれ断層の場合

図-6は主断層における最大せん断変位分布図である. 副断層の配置パターン1のときのものであるが,パター ン2でもほとんど違いは認められなかった.断層中央下 部に位置する震源から破壊が広がる様子が見て取れる. 主断層上のせん断変位の平均値は *t* = 11 [s] 以降ほぼ収束 しており,093mであった.また,最大せん断変位は約 2.1m(震源近傍)であった.地表で計算された加速度は 最大550galを超えており、計算を終了した ⊨12 [s] でもま だ継続していた.

図-7は副断層の配置パターン1において、3つの領域で の副断層の破壊発生位置、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 (=12 [s]). また,図-8はパターン2において3つ の領域での副断層の破壊発生位置である. 各領域を鳥瞰 図で示しているが、図の上側が+v側である. 黒丸の位置 で破壊が発生しており、副断層上の黒丸の個数が多いほ ど破壊領域が大きいことになる. 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よりも多くの破壊 が見られることはパターン1,2に共通である.これは横 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. 図-7で は、傾斜が90°の副断層で破壊が多く見られる.多くの 副断層では破壊は地表部に限定されるが、傾斜90°の主 断層に近い副断層では、約250mの深さまで破壊が及ん でいる場合がある. そのような副断層では10mmを超え る変位となっている. 全く破壊していない場合 (弾性挙



図-7 副断層における破壊・変位の分布(横ずれ断層パターン1, =12[s])



図-8 副断層における破壊の分布(横ずれ断層パターン2, ⊨12[s])



図-10 副断層における破壊の分布(逆断層パターン1, 2, ⊨11[s])

動)あるいは1つの格子点のみが破壊している場合でも、 変位が発生するが、1mm程度の値である.基本的には、 主断層からの離隔が大きくなるにつれ破壊は起こりにく く変位は小さいが、一部2km離れた副断層でも破壊が発 生している.図-8では、断層の走向で比較すると、破壊 領域の大きい順に+45°、45°、90°となる.走向が +45°の副断層は法線方向が最小圧縮主応力と近く、法 線方向が最大圧縮応力に近い45°の副断層よりもせん 断破壊しやすいことが理由と考えられる.また、領域A の-y/側や領域Cの+y/側などの引張り域では、その主断層 を挟んだ反対側である圧縮域よりも破壊範囲が大きい傾 向にある.図-7の配置と比較して、離れた断層でも破壊 範囲が大きめである.

b) 主断層が逆断層の場合

図-9は主断層における最大せん断変位図である. 副断層の配置がパターン1のときのものであるが,パターン2でも違いはほとんど認められなかった. 断層中央下部に位置する震源から破壊が広がる様子が見て取れる. 横ずれ断層の場合と比較して,最もせん断変位が発生している領域が震源よりも上部(断層の中心部)に位置することが特徴である. 主断層上のせん断変位の平均値はt=9[s]時にはほぼ収束しており,約1.3mである. 最大せん断変位は約2.5mである. いずれも横ずれ断層の場合よりも大きくなった. 横ずれ断層と異なり,すべりの方向の一

方が地表であり開放されているためと考えられる.地表 での最大加速度は断層から2km離れた上盤側で約400gal であり、11s経過時で揺れはまだ継続していた.

図-10は副断層の配置パターン1,2それぞれにおける, 3つの領域での副断層上の破壊位置である(=11[s]). 主断層端の外側である領域Aの-x側,領域Cの+x側では破 壊がほとんど発生していない. 断層の中央と両端(主断 層端の内側) での破壊の程度は類似している. この傾向 は先述した横ずれ断層の場合と大きく異なる. パターン 1を見ると、傾斜90°の副断層は、主断層との離隔によ らず地表部で破壊が見られる. 傾斜-45°の副断層は特 に上盤側(+v側)において地表部に破壊が見られる.パ ターン2を見ると走向90°の副断層は全く破壊していな い. 断層中央部の領域Bでは+45°の副断層も45°の副 断層も同様に地表部で破壊しているのに対して、両端の 領域A, Cでは上盤と下盤で破壊しやすい走向が異なっ ている. 法線が主断層の内側に向かっている副断層で破 壊しやすい傾向がある. この領域では、地盤が主断層内 側に向かって変位していると考えられ、断層の法線が地 盤の主ひずみ方向に近いことが原因と考えられる. 上盤 側がやや破壊のプロットが多い.

4. まとめ

主断層の周辺に副断層が分布する状況(2パターン) を設定し、主断層で地震が発生した際の副断層での変位 を計算する解析を実施した.主断層が横ずれ断層の場合、 端部周辺に分布する副断層のうち、主断層と同じ走向傾 斜のものや最大圧縮主応力方向に走向が近いもので破壊 しやすい傾向が得られた.また、主断層が逆断層の場合、 端部(断層より内側)に位置する副断層のうち、地盤の 変位方向に走向が直交する副断層で破壊が発生しやすい 傾向が得られた.

今後,副断層のサイズ,初期地圧の深度分布,表層地 盤の物性等の断層変位への影響について検討することを 考えている.また、本手法を地表地震断層変位が明らか な実地震に適用することにより、地表変位の再現性を確 認する.

参考文献

- 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.
- 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.
- 3) 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.
- 4) 澤田昌孝:動力学的破壊進展解析による地表断層変位 予測手法の提案,第43回岩盤力学に関するシンポジ ウム講演集, CD-ROM, 2015.
- 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 壇一男,武藤真奈美,鳥田晴彦,大橋泰裕,加瀬祐 子:動力学的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.
- 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.

BASIC STUDY ON A PREDICTION OF 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. The author is developing a numerical prediction method for surface fault displacement. A three-dimensional distinct element code was adopted in the method. In this paper, the numerical method was applied to simulations focusing on displacements of target surface faults locating in the vicinity of the primary fault, and the effect of strike and dip angle of faults on surface fault displacement was studied.