

## 動力的破壊シミュレーションを用いた地震動と断層変位の重畳に関する基礎的検討

大林組 正会員 永井 秀樹 正会員 堤内 隆広 正会員 米田 昂司  
 構造計画研究所 正会員 〇三橋 祐太 正会員 庄司 正弘  
 電力中央研究所 正会員 山口 和英

### 1. 目的

近年地震時の地震動に加えて、断層変位が構造物に与える影響が問題になっており、特に確率論的リスク評価や BDBE（設計基準外事象）の観点から、原子力発電所近傍で破砕帯などの副断層や弱層に変位が励起された際の構造物等への影響評価が求められている。また、従来行われてきた耐震性評価に加え、断層変位を受ける構造物への影響評価を行う際には両者の重畳の考慮も問題となる。このような問題に対して主断層の活動に伴う副断層や弱層の挙動に関する様々な解析手法が提案・実施されてきている。有限差分法や有限要素法による動力的破壊シミュレーションは、断層の自発的破壊を考慮して動的な検討が可能であるという点に優位性があり、主断層の破壊による地震動と断層変位が重畳する際の時間差なども評価可能と考えられる。そこで、本検討では主断層の破壊に起因する副断層の破壊過程をシミュレーションし、地震動と断層変位の重畳に対して検討を行った。

### 2. 解析モデル

検討は 2 次元の有限要素法により実施した。解析コードは大規模並列解析可能な有限要素解析コード FrontISTR<sup>1)</sup> をカスタマイズしたものをを用いた。解析モデルを図 1 に示す。地盤は平面ひずみ要素、主および副断層をジョイント要素、地盤の周囲に半無限地盤をモデル化した粘性境界を付与する。モデルの表層 1km 部分を表層岩盤 ( $V_s=2.25$  (km/s),  $\nu=0.35$ ,  $\gamma=25.0$  (kN/m<sup>3</sup>)), それ以外を深部岩盤 ( $V_s=3.46$  (km/s),  $\nu=0.25$ ,  $\gamma=25.0$  (kN/m<sup>3</sup>)) とした。主断層は 2 次元でモデル化する都合上純粋な逆断層としてモデル化した。主断層には図 2 に示すすべり弱モデルを設定し、副断層には文献<sup>2)</sup>を参考にバイリニアモデルを用いた。主断層と副断層に設定した物性値を表 1 に示す。主断層を副断層との交差位置で屈曲させたのは、副断層にすべりを生じるせん断力を生じやすくするためである。また本検討では条件を単純化し、主断層、副断層内では一様な物性値を用いた。ただし表層部と深部における主断層の応力降下量等のパラメータは、周辺岩盤の剛性に比例させて変更した。表層部分のメッシュサイズは 100m 程度であり、透過振動数は 1~2Hz 程度となる。動力的破壊シミュレーションにおいては、破壊開始点の初期応力として強度を上回る値を与え、解析開始と同時に破壊開始点の要素が破壊し、応力の解放と周辺への再配分が発生することにより断層の自発的破壊が生じる。

### 3. 解析結果

時刻 20.0 秒の断層のすべり量分布を図 3 に示す。最終的な主断層のずれ量は屈曲部より上で 1.7m 程度、下で 1.0m 程度、副断層で 0.7m 程度となった。屈曲部より上で主断層の変位が大きく評価されるのは、主断層と副断層に囲まれる三角形の領域が上に平行移動するような変形モードとなるためである。図 3 に丸で囲った主断層および副断層の地表面トレース位置における水平方向加速度時刻歴及び断層すべり量時刻歴を図 4 に示す。加速度時刻歴に関しては、主断層近傍の最大応答加速度が 150gal 程度であるのに対して、副断層近傍では 100gal 程度となっている。ただし、本検討のモデルでは  $V_s=2000$  (m/s<sup>2</sup>) 程度の硬岩までしかモデル化しておらず、表層付近の増幅や高振動数成分は十分考慮されていない。主断層側では変位の発生と共に加速度応答が発生する結果となっているが、ずれ変位量が最大となる 10 秒前後では加速度応答のピークは過ぎた後となる。副断層側では、加速度応答のピークを過ぎた後にずれ変位が発生し始める結果となっている。ずれ変位時刻歴から求まるすべり速度は主断層で最大 1.0m/s、副断層で最大 0.25m/s 程度となった。時刻 6.0 秒の最大せん

キーワード 動力的破壊シミュレーション, 断層変位, 副断層, 並列有限要素解析, FrontISTR

連絡先 〒164-0011 東京都中野区中央 4 丁目 5 番 3 号 構造計画研究所 防災・環境部 TEL 03-5342-1137

断ひずみコンター図を図5に示す。

本検討は2次元解析であり断層長さ方向に一様の構造を仮定しているため地震モーメント等を直接求めることは出来ない。そこで断層長さと断層幅は同程度であるという既往の知見を基に、モーメント・マグニチュード  $M_w$  を概算した。その際、断層の平均すべり量として周辺岩盤の剛性が高い比較的深い部分に着目し1.0mを用いた。概算値は  $M_w=6.6$  となり、一般的な内陸地震から大きく外れるものではない。ただし、断層長さ方向に同じすべり量を仮定しているため、断層面内の平均すべり量としては過大に評価された値となる。

#### 4. まとめ

本研究では主断層の活動に起因する副断層の破壊挙動の動的な評価を目的とし、その基礎的検討として、主断層および副断層をモデル化した動学的破壊シミュレーションを2次元FEM解析により実施し、副断層の破壊を動的に評価した。主断層に屈曲を設けたモデルによって、主断層の活動により副断層が副次的に破壊する結果が得られた。さらに、副断層の破壊は主断層に遅延する傾向が見られた。今後は構造物への影響評価も含めた検討などを実施する予定である。

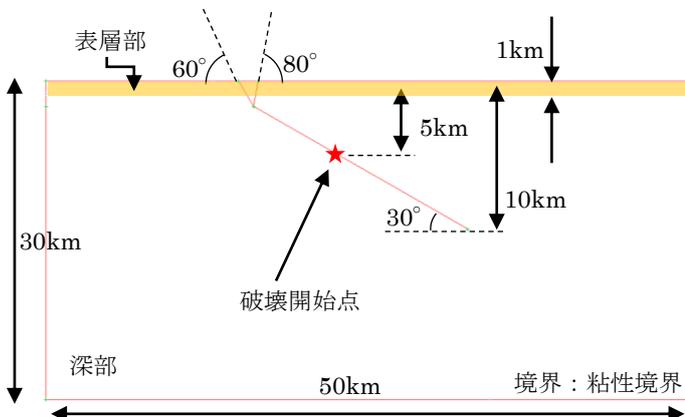


図1 解析モデル

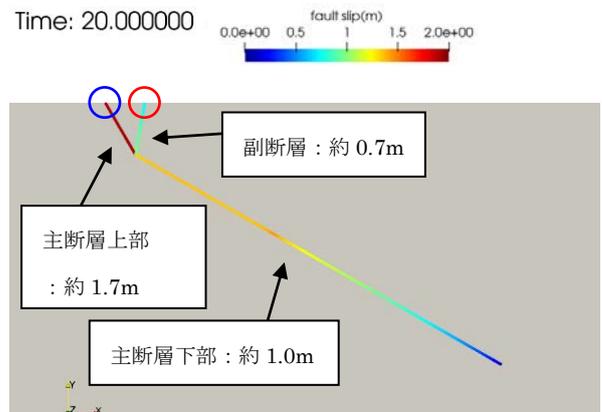


図3 断層ずれ量コンター図(時刻20.0s)

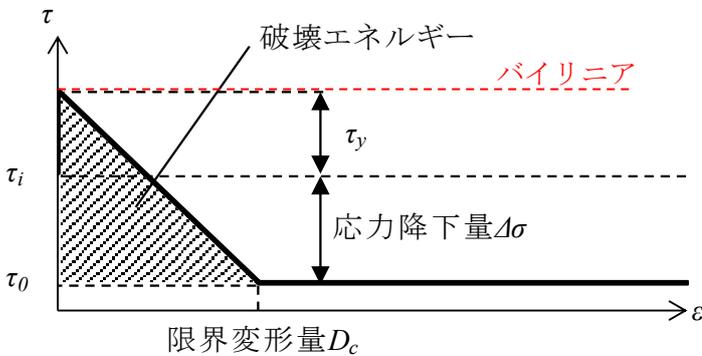


図2 主断層の変位応力関係

表1 主/副断層の物性値

		主断層		副断層
		深部	表層	
初期剛性 (MN/m <sup>2</sup> /m)	法線	1.00E+03	1.00E+03	1.00E+03
	せん断	1.00E+02	1.00E+02	8.81E+02
せん断強度 $\tau_y$	MN/m <sup>2</sup>	1.6	0.24	0.6
限界変形量 $D_c$	mm	56	8.4	バイリニアを設定
応力降下量 $\Delta\sigma$	MN/m <sup>2</sup>	1.0	0.15	

#### 参考文献

- 1) FrontISTR 研究会 HP: <https://www.frontistr.com/>
- 2) 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<技術資料>, 土木学会, 2009年2月.

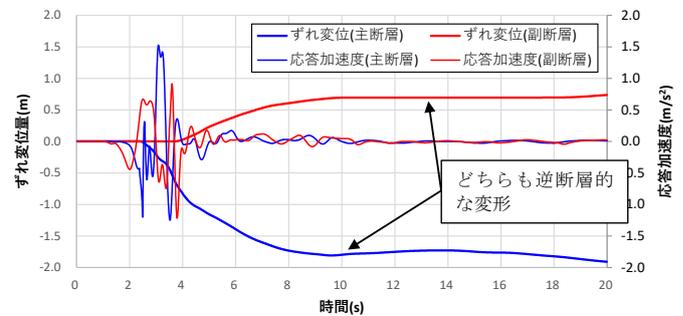


図4 断層ずれ量および応答加速度時刻歴

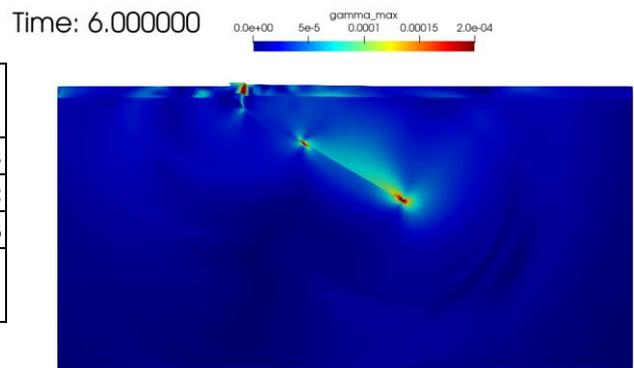


図5 最大せん断ひずみコンター図(時刻6.0秒)