

動力的断層破壊シミュレーションによるモデル断層近傍における地震動の比較

～地表断層の有無～

(株) ニュージェック 山田 雅行

論文要旨

摩擦係数を含む物性や摩擦構成則によって初期破壊領域と破壊停止領域をアприオリに与えない動力的断層破壊シミュレーションによりモデル断層近傍における地震動を予測し、地表に断層が現れる場合と現れない場合の比較を試みた。

その結果、 x 方向(断層並行方向)、 z 方向(上下方向)では、地表に断層が現れる場合には地震動の振幅が大きくなる傾向が見られるが、断層からごく近い領域に限定されることがわかった。 y 方向(断層直交方向)については、地表に断層が現れる場合と現れない場合の地表面での地震動の差異が小さいことがわかった。

キーワード：動力的断層破壊シミュレーション、地表断層、地震動

まえがき

動力的断層破壊シミュレーションは、近年、断層の物理現象の解明や運動学的地震動シミュレーションに用いるパラメータ設定方法の検証など、幅広く活用されつつある。しかしながら、動力的断層破壊シミュレーションによって断層近傍における地震動を直接推定した例は多くない。例えば、関口ら¹⁾や入倉ら²⁾のように、動力的断層破壊シミュレーションを用いて断層面の不均質性を求め、この不均質性に従って特性化震源モデルなどの破壊シナリオを決め、統計的グリーン関数法やハイブリッド法などにより運動学的に地震動を推定する場合が多い。もちろん、詳細な地盤構造を考慮できる点では、この方法は有利といえる。

著者らは、摩擦係数を含む物性や摩擦構成則によって初期破壊領域と破壊停止領域をアприオリに与えない動力的断層破壊シミュレーションを提案している³⁾。この動力的断層破壊シミュレーションによりモデル断層近傍における地震動を予測し、地表に断層が現れる場合と現れない場合の比較を試みた。

1. 動力的断層破壊シミュレーション手法および計算条件

動力的断層破壊シミュレーションは、3次元有限差分法^{例えば、4)}を用いた。

解析領域は、断層面の方向を x 方向として、 x 方向60km、 y 方向20km、 z 方向8kmとした。モデル上端($z=0$ km)は応力フリー境界とし、モデル下端($z=8$ km)および $x=\pm 30$ kmは粘性境界とした。上から2kmずつの水平成層の4層構造と

し、第1層は表層(断層上端より上の層)、第2層は断層面、第3層は下層(地震発生層の下)、第4層は粘性境界との遷移層(破壊しない層)とした。 x 方向には、 ± 0.5 kmの領域A、領域Aの外側の ± 5.0 kmまでの領域B、 $\pm 5.0\sim 25.0$ kmの領域Cと破壊を許さない $\pm 25.0\sim 30.0$ kmの領域Dを設定した。解析モデル断面図(xz 面)を図-1に示す。差分格子は、1辺が0.1kmの立方体格子、計算時間ピッチは0.001秒とした。

このモデルの第2層～第4層に対して、表-1の物性を与えた。第2層はB2に標準的な地震発生層の V_p 、 V_s を与え、内側のA2は2割増、外側のC2は2割減の値を設定した。摩擦構成則はすべり弱化解^{例えば、5)}を用いた。臨界すべり量 D_c は、A2に十分小さい値として0.1mを与え、剛性が小さければその分変形が大きくなることを考慮し、他の領域はせん断剛性に反比例する値を与えた。静摩擦係数 μ_s は、第2層が0.0364、第3層が0.2というように層ごとに一定値とし、動摩擦係数 μ_d はすべて0とした。第1層(表層)には、比較的軟らかい層として $V_s=0.7$ km/s(表-2)の物性を与えた。比較的軟らかい第1層の静摩擦係数 μ_s は、表層が破壊しない(地表に断層が現れない場合)と表層が破壊する場合(地表に断層が現れる場合)で、それぞれ0.02、0.002に設定した。

2. 動力的断層破壊シミュレーション結果

(1) 断層面における破壊の進展状況

断層面における破壊の進展状況を見るために、図-2に断層面における破壊時刻の分布を示した。なお、図は破壊停止時の破壊時刻を示している。

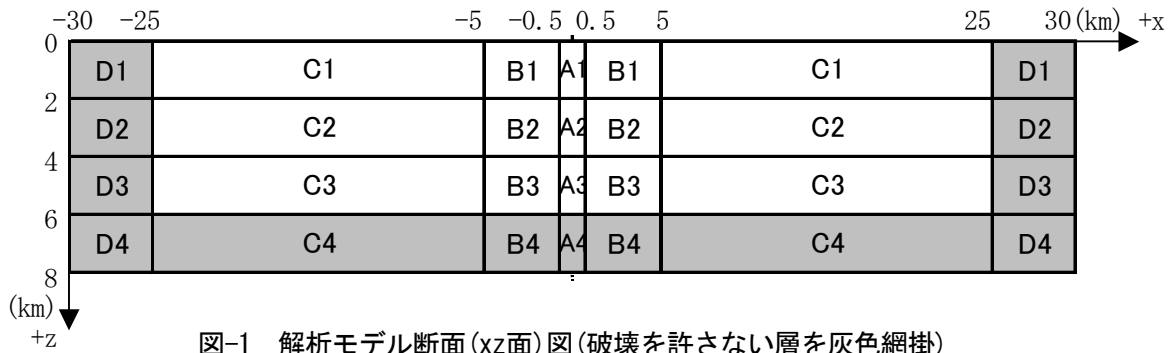


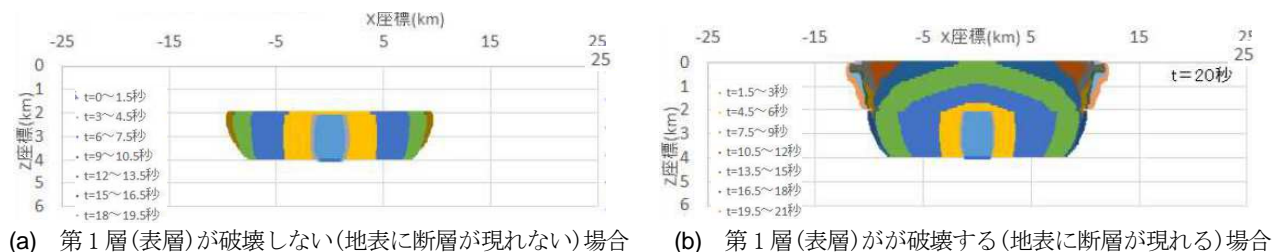
図-1 解析モデル断面(xz面)図(破壊を許さない層を灰色網掛)

表-1 物性一覧(第2層~第4層, 破壊を許さない層を灰色網掛)

層	領域	V_p (km/s)	V_s (km/s)	ρ (t/m^3)	μ_s	μ_d	D_c (m)	破壊可否
第2層 断層面	A2	7.200	4.157	2.67	0.0364	0.0	0.10	可
	B2	6.000	3.464	2.67	0.0364	0.0	0.14	
	C2	4.800	2.771	2.67	0.0364	0.0	0.22	否
	D2	4.800	2.771	2.67	1	0.0	0.22	
第3層 下層	A3	7.000	4.000	2.90	0.2	0.0	0.10	可
	B3	7.000	4.000	2.90	0.2	0.0	0.10	
	C3	7.000	4.000	2.90	0.2	0.0	0.10	否
	D3	7.000	4.000	2.90	1	0.0	0.10	
第4層 遷移層	A4	7.000	4.000	2.90	1	0.0	0.10	否
	B4	7.000	4.000	2.90	1	0.0	0.10	
	C4	7.000	4.000	2.90	1	0.0	0.10	
	D4	7.000	4.000	2.90	1	0.0	0.10	

表-2 第1層物性一覧(破壊を許さない層を灰色網掛)

層	領域	V_p (km/s)	V_s (km/s)	ρ (t/m^3)	μ_s		μ_d	D_c (m)	破壊可否
					破壊しない	破壊する			
第1層 表層	A1	2.100	0.700	2.00	0.02	0.002	0.0	4.58	可
	B1	2.100	0.700	2.00	0.02	0.02	0.0	4.58	
	C1	2.100	0.700	2.00	0.02	0.02	0.0	4.58	
	D1	2.100	0.700	2.00	1	1	0.0	4.58	否



(a) 第1層(表層)が破壊しない(地表に断層が現れない)場合

(b) 第1層(表層)がが破壊する(地表に断層が現れる)場合

図-2 断層面における破壊時刻の分布

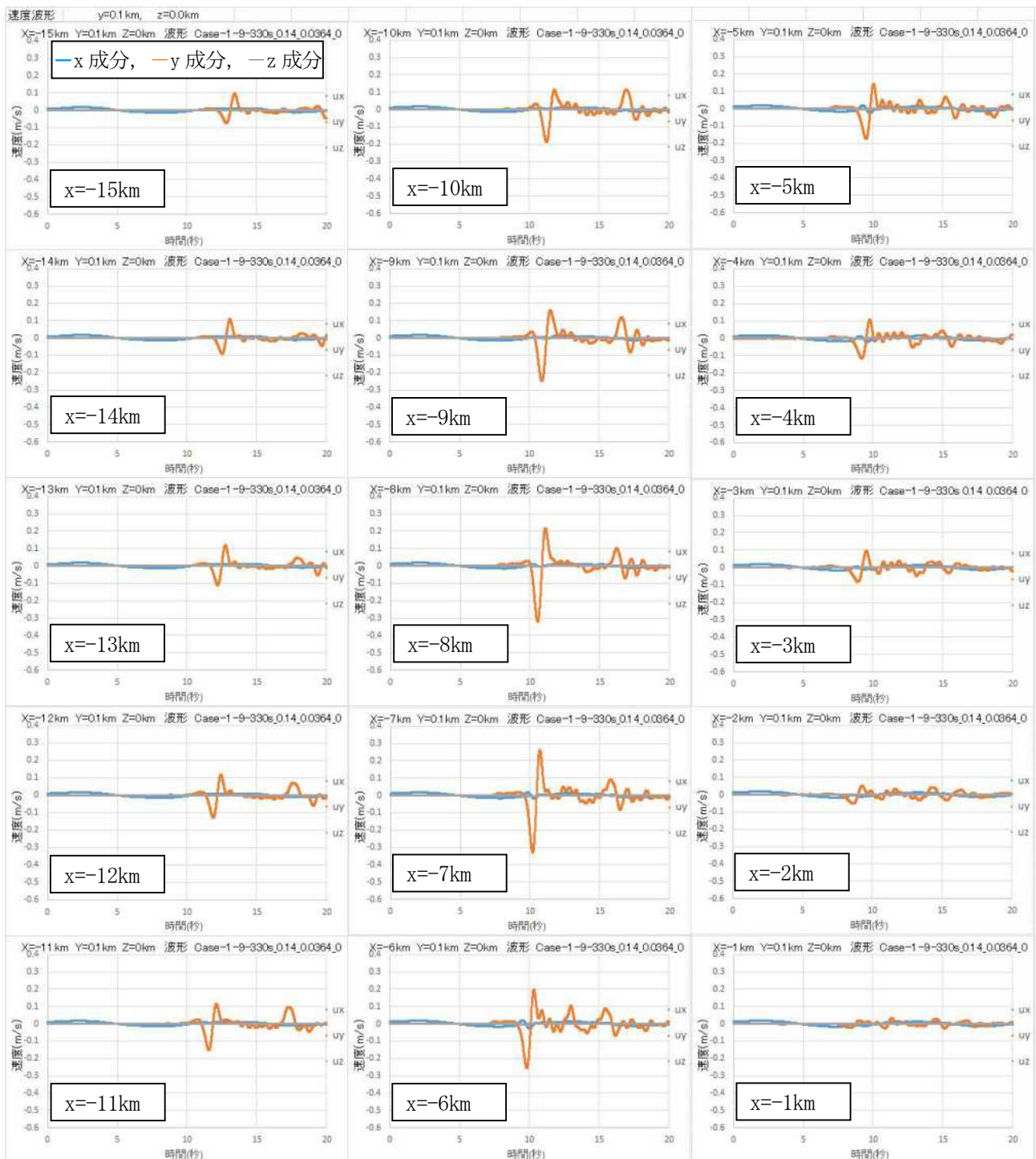


図-3 第1層(表層)が比較的軟らかい層($V_s=0.7\text{km/s}$), 表層が破壊しない(地表に断層が現れない)場合の地表面($y=0.1\text{km}$)速度波形

第1層(表層)を比較的軟らかい層($V_s=0.7\text{km/s}$)としたケースにおいて、表層が破壊しない(地表に断層が現れない)場合は、第2層のみ $x=\pm 10\text{km}$ 付近まで破壊が進展していることがわかる。表層が破壊する場合(地表に断層が現れる場合)も、第2層は同様に $x=\pm 10\text{km}$ 付近まで破壊が進展し、表層が破壊しない(地表に断層が現れない)場合とほぼ同様の破壊となっていることがわかる。第1層(表層)は $x=\pm 12\text{km}$ 付近まで破壊に至っていることがわかる。

(2) モデル断層近傍における地震動の比較

第1層(表層)が破壊しない(地表に断層が現れない)場合と表層が破壊する場合(地表に断層が現れる場合)について、断層からの距離 $y=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 2.0, 5.0\text{km}$ における $x=-1.0\sim -15.0\text{km}$ (1.0km 間隔)の時刻歴波形を計算した。

断層からの距離 $y=0.1\text{km}$ における第1層(表層)が破壊しない(地表に断層が現れない)場合と表層が破壊する場合(

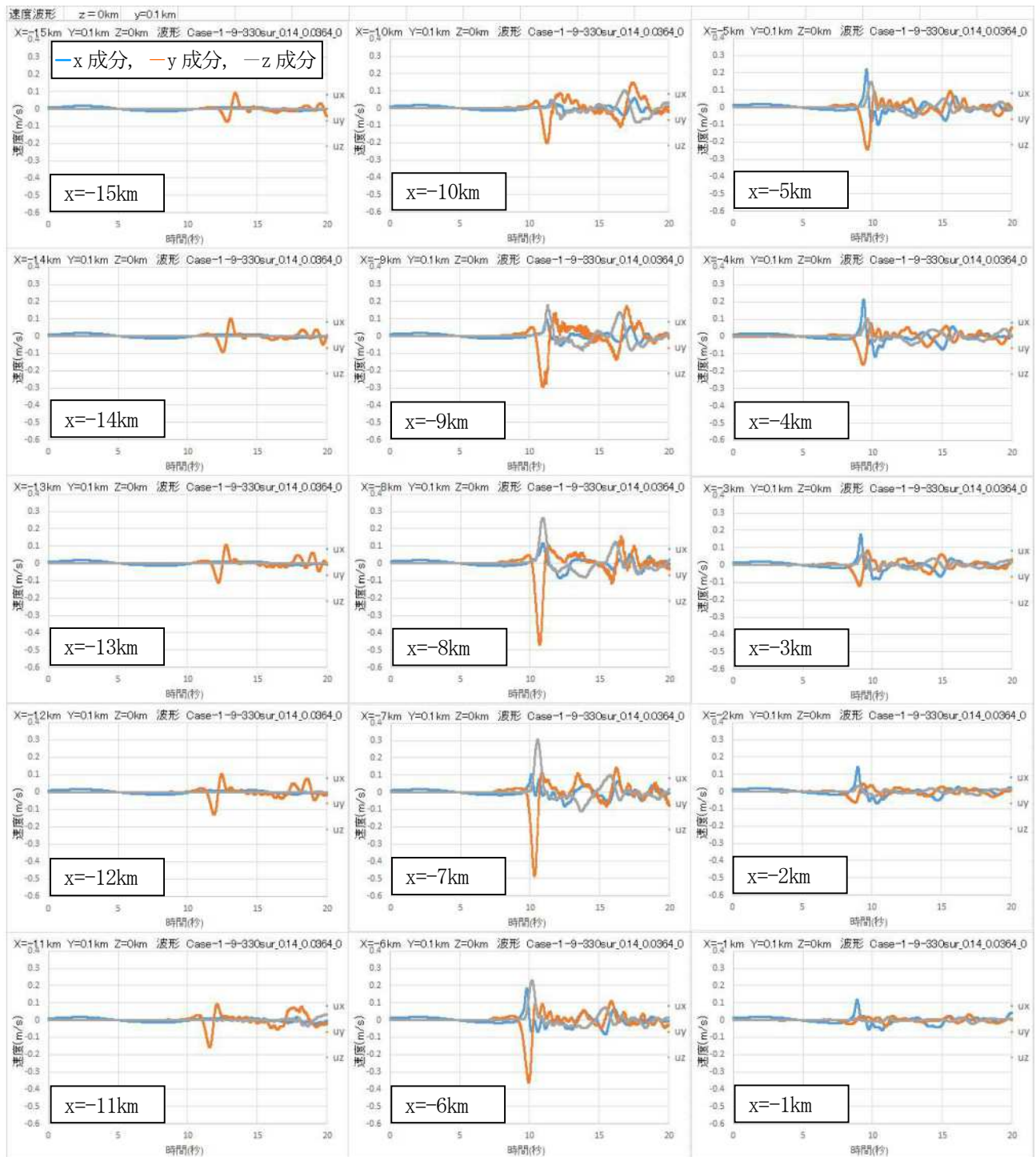
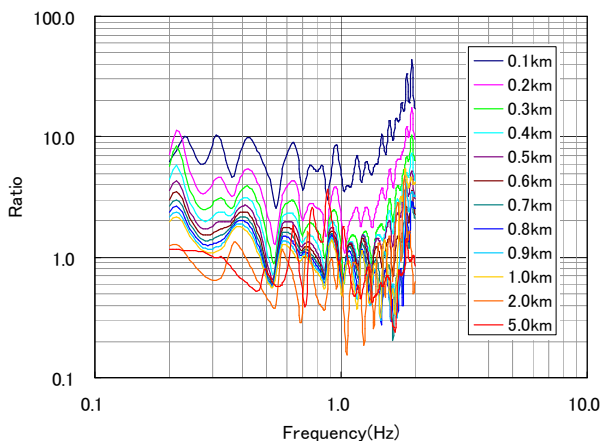


図-4 第1層(表層)が比較的軟らかい層($V_s=0.7\text{km/s}$), 表層が破壊する(地表に断層が現れる)場合の地表面($y=0.1\text{km}$)速度波形

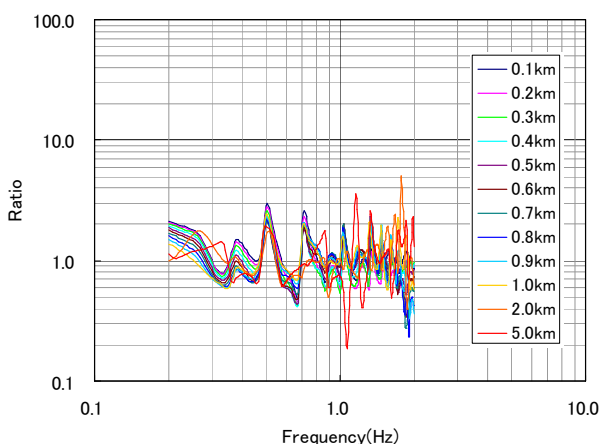
地表に断層が現れる場合の時刻歴波形(速度)をそれぞれ図-3, 図-4 に示す. 図はいずれも右下から左上に, $x=-1.0\text{km}$ から -15.0km の時刻歴波形を示し, 図中の青色線が x 成分, 橙色線が y 成分, 灰色線が z 成分を示す. なお, モデルおよび荷重が x 方向に対称であるため, x の正側と負側の変位や速度は対称となる.

図-3, 図-4 を比較すると, 第1層(表層)が破壊しない(地表に断層が現れない)場合(図-3)は $x=-1\sim-10\text{km}$ (右側2列)において x

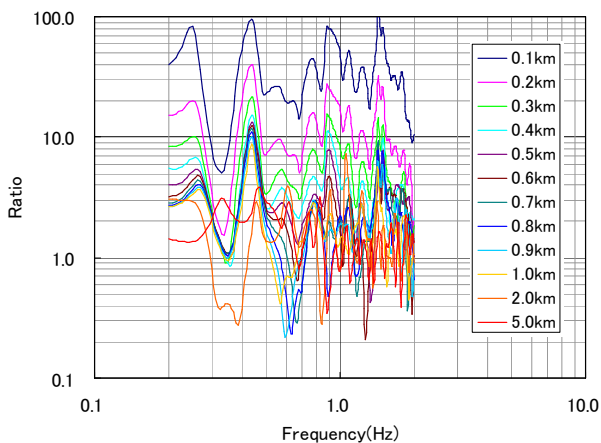
方向の揺れがほとんど見られないのに対して, 表層が破壊する(地表に断層が現れる)場合(図-4)は x 方向(断層並行方向)に 0.2m/s 程度のパルス的な波動が見られる(図中青色線). $x=-5\sim-9\text{km}$ 付近では上下方向のパルスも見られる(図中灰色線). y 方向(断層直交方向)に関しては, 位相の変化は見られるものの, 振幅に大きな違いは無いように見える. また, $x=-11\sim-15\text{km}$ の破壊が及ばない領域(左側1列)においては, いずれも y のみの揺れが卓越し, 図-3, 図-4 における違いは見られない.



(a) x成分



(b) y成分



(c) z成分

図-5 フーリエスペクトル比(表層破壊する／表層が破壊しない)

比較的振幅が大きい $x=5.0\text{km}$ (図-3, 4の右上図)に着目し, 表層が破壊した場合／表層が破壊しない場合のスペクトル比を $y=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 2.0, 5.0\text{km}$ について計算した. x 方向(断層並行方向), y 方

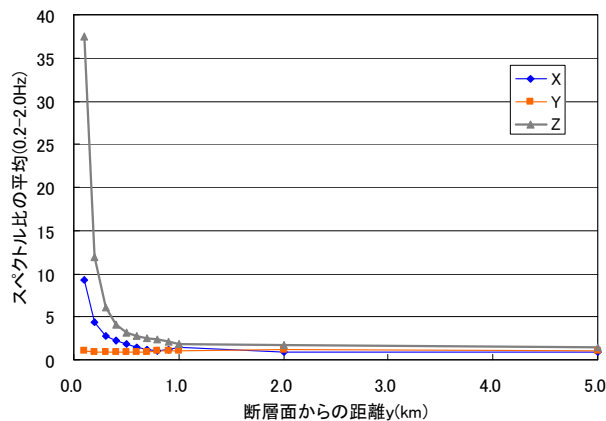


図-6 フーリエスペクトル比(表層破壊する／表層が破壊しない)の平均値と断層からの距離 y の関係

向(断層直交方向), z 方向(上下方向)のそれぞれについて, 図-5に示す. また, 表層が破壊した場合／表層が破壊しない場合のスペクトル比を $0.2\sim 2.0\text{Hz}$ の範囲で平均した値を断層からの距離 y に対してプロットしたのが図-6である.

図-5を見ると, x 方向, z 方向は断層近傍の $y=0.3\text{km}$ 程度以下の範囲で, スペクトル比が急激に大きくなっている. 言い換えると, このモデルケースでは, 断層から $y=0.3\text{km}$ 程度以上離れると, 表層が破壊しない場合と表層が破壊した場合の差は顕著とは言えない結果となった. 一方, y 方向(断層直交方向)のスペクトル比は x, z 方向とは異なり, ほとんど変化していない. 図-6からも, このモデルケースでは, 断層から $y=0.3\text{km}$ 程度以上離れると, 表層が破壊しない場合と表層が破壊した場合の差は小さい結果を示した.

3. まとめ

動力学的断層破壊シミュレーションによりモデル断層近傍における地震動を予測し, 地表に断層が現れる場合と現れない場合の比較を試みた. その結果, x 方向(断層並行方向), z 方向(上下方向)では, 地表に断層が現れる場合には地震動の振幅が大きくなる傾向が見られるが, 断層からごく近い領域の範囲に限定されることがわかった. y 方向(断層直交方向)については, 地表に断層が現れる場合と現れない場合の差異は小さいことがわかった.

今回の検討は, 1章に示したようにモデル断層であり, 幾何学的条件や物性値に関して現実的なモデルとは異なり, パラメータ設定の妥当性については今後の議論が必要である.

あとがき

本論文を(一社)建設コンサルタンツ協会近畿支部において発表することを快くお許しいただいた(国研)防災科学技術研究所 藤原広行博士, みずほ情報総研(株) 今井隆太博士および高椋恵氏に記して謝意を表す。

今後, 実際の断層を模擬するようなモデルについても検討を行っていく予定である。

参考文献(または引用文献)

- 1) 関口春子, 加瀬祐子, 堀川晴央, 佐竹健治, 杉山雄一, Arben Pitarka : 大阪平野における地震動予測の試みー動的な地震破壊シナリオと3次元地価構造モデルによる地震動計算ー, 活断層・古地震研究報告, No.2, pp.341-357, 2002.
- 2) 入倉孝次郎, 三宅弘恵, Luis A. Dalguer, 松島信一, 壇一男, 佐藤俊明, 香川敬生 : 動力的震源モデルに基づく強震動予測(2) 地表および地中断層地震の震源のモデル化と強震動評価, 地震学会秋季大会, 2005.
- 3) 山田雅行, 羽田浩二, 今井隆太, 高椋恵, 藤原広行 : 初期破壊領域と破壊停止領域をアプリオリに与えない動力的断層破壊シミュレーション, 日本地震工学会・大会ー2017, 2017(投稿中).
- 4) Kase, Y. : Slip-length scaling low for strike-slip multiple segment earthquakes based on dynamic rupture simulations, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.100, No.2, 2010, pp.473-481.
- 5) 大中康譽, 松浦充宏 : 地震発生の物理学, 東京大学出版会, 2002.