

有限要素法によるノースリッジ地震記録のシミュレーション

三浦房紀¹・坪井利弘²・水元学千³

¹正会員 工博 山口大学大学院 環境共生工学専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

²正会員 工修 株式会社永楽開発 設計部 (〒461-0027 名古屋市東区芳野 1-13-19)

³山口大学大学院学生 環境共生工学専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

本研究は筆者らがこれまで開発・改良を進めてきた非線形有限要素法を用いて、ノースリッジ地震の断層を対象に、そのモデル化、破壊過程のシミュレーションを行い、破壊過程の検討を行うとともに地震記録とシミュレーション波形の比較検討を行ったものである。その結果、加速度振幅は水平成分はほぼ同じレベルになるが、鉛直成分はシミュレーション波形の方が大きくなること、また継続時間はシミュレーション波形の方が長くなることなどが分かった。

Key Words: Fault rupture mechanism, FEM, Northridge earthquake, numerical simulation

1. まえがき

筆者らは、岩石の固着滑り破壊実験から求めた破壊面（滑り面）のせん断応力-滑り量関係をジョイント要素の構成関係に導入して、非線形有限要素法による地震断層の破壊過程、およびそれに伴う地震波の生成シミュレーション手法を提案し、その妥当性を示している¹⁾。本研究はこの手法を用いて、1994年のノースリッジ地震で観測された波形を再現することを試みたものである。ノースリッジ地震を対象としたのは、この地震が逆断層の成分が卓越した地震であるので、筆者らの提案する2次元解析で比較的近似がしやすいためである。

2. 断層モデルと解析ケース

(1) 断層モデル

ノースリッジ地震の断層パラメータは $M_s=6.8$ 、震源深さ 18km、幅 20km、傾斜角 45° 、応力降下量 $\Delta\tau=74\text{bar}$ とされている²⁾。本研究で扱う断層モデルは上述のように2次元モデルであるので、断層の長さは紙面奥行き方向に無限大ということになる。図-1は解析に用いた断層と周辺地殻の有限要素網である。このモデルは文献(3)を基に作成したものであり、水平方向 45km、鉛直方向 25km の範囲を、節点数 6790 (自由度数 13580) でモデル化したものである。正方形要素の一边は最大 500m、最

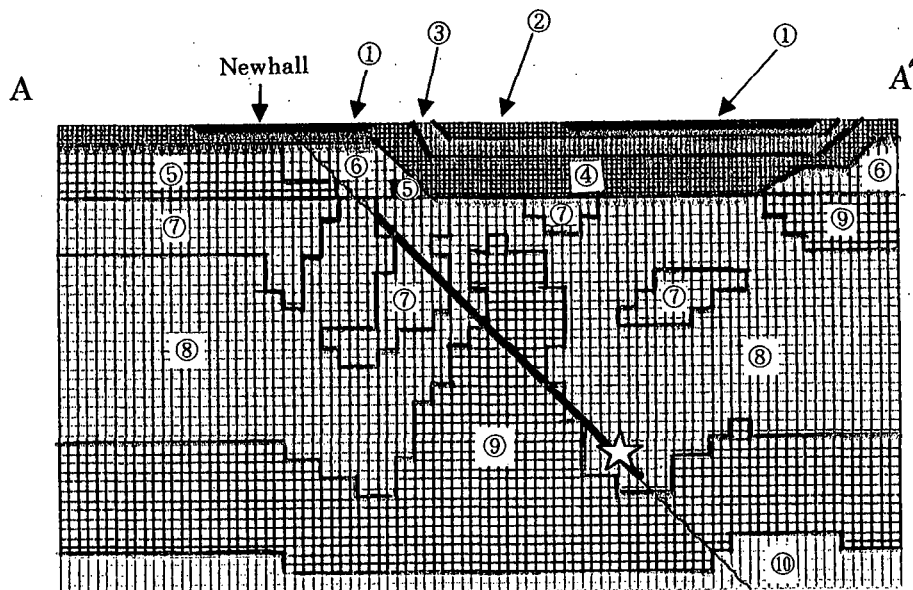


図-1 解析モデルの有限要素網

表一 地殻の物理定数

層	単位体積重量 (tonf/m ³)	P波速度 (km/sec)	S波速度 (km/sec)
①	1.7	1.4	0.6
②	1.8	2.0	1.1
③	1.9	2.5	1.4
④	2.1	3.1	1.8
⑤	2.3	4.3	2.5
⑥	2.4	5.5	3.2
⑦	2.4	5.9	3.4
⑧	2.5	6.3	3.7
⑨	2.5	6.5	3.8
⑩	2.5	6.7	3.9

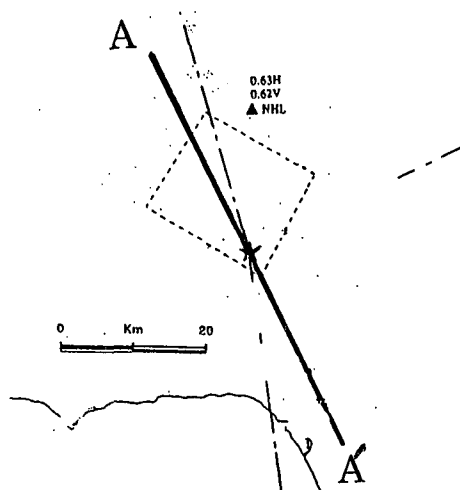
小 125m とし、地殻の弾性波速度に応じて、表現できる周波数の上限がほぼ同じ (約 2.2Hz) になるように分割してある。図中の太実線が断層を表し、この線に沿ってジョイント要素が配列してある。☆印が震源を表し、地表面下 18km にある。破壊はここから始まるようにジョイント要素のせん断強度、初期せん断応力を与えている。震源から伝播してきた破壊は地表面下 5km で止まるように、また最深部 6km は破壊しないようにこれらの領域に対応するジョイント要素のせん断強度は非常に大きくしてある。図中の丸数字は地殻の番号を表しており、その物理定数は表一に示すとおりである。これより断層のほとんどが第⑦、⑧、⑨層の中に存在しており、その平均せん断波速度、単位体積重量はそれぞれ 3640m/s、2.47tonf/m³である。

図一 2 はノースリッジ地震震央周辺の地図であり、図中の★印がノースリッジ地震本震の震央位置を示す。また太実線 A-A は図一 1 に示した有限要素モデルの位置である。さらに、▲印は本研究で地震波の比較検討を行う地震記録の取れた観測点 (New hall, NHL) の位置を示す。本研究で解析する断層モデルの位置は上述の地下構造が詳しく示してある文献(3)から引用したものであり、残念ながら断層モデルの面と地震観測点はこの様に同一面上には存在していない。

(2) 解析ケース

断層を表現するジョイント要素の構成関係を図一 3 に示す。断層面のせん断応力 τ がせん断強度 τ_p に達した後は指数関数的に応力降下が生じるというモデルであるが、このときの応力降下量 $\Delta \tau = (\tau_i - \tau_r)$ 、および破壊応力降下量 $\Delta \tau_b = (\tau_p - \tau_r)$ を変化させて破壊の様子、発生する加速度波形の比較を行う。ジョイントのせん断バネ定数 k_s は最大せん断強度 τ_p に達する変位量 ε を 1cm と仮定して、 $k_s = (\tau_p - \tau_i) / \varepsilon$ によって求めている。なお、詳しい解析手法の説明は文献(1)を参照されたい。

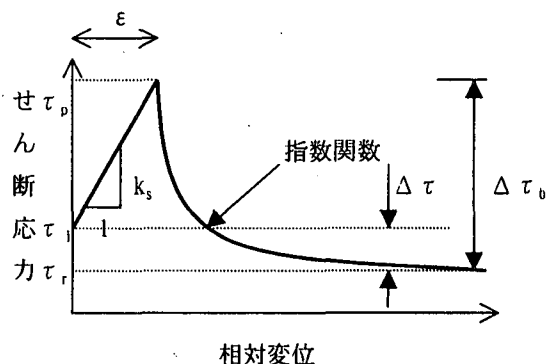
解析ケースを表一 2 に示すように 5 ケース考える。ケース 1、2、3 は $\Delta \tau = 74\text{bar}$ の一定とし、 $\Delta \tau_b$ を 117、160、246bar と変化させた場合である。こ



図一 2 震源と断層モデル、観測点の位置

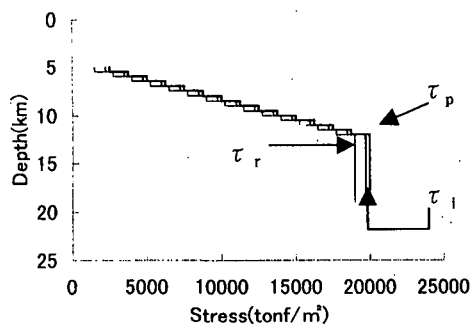
表一 2 解析ケースと断層面上の応力

	$\Delta \tau$	$\Delta \tau_b$
ケース 1	74 bar	117 bar
ケース 2	74 bar	160 bar
ケース 3	74 bar	246 bar
ケース 4	55.3 bar	141.3 bar
ケース 5	46.1 bar	132.1 bar

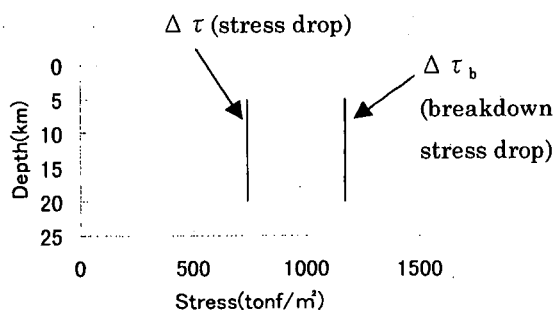


図一 3 用いたジョイント要素の構成関係

れによって $\Delta \tau_b$ の違いを検討することができる。ケース 4、ケース 5 は $\Delta \tau$ をそれぞれ 55.3bar、46.1bar と小さくした場合であるが、その理由は後述する。ケース 4、5 の $\Delta \tau_b$ はケース 2 と同様、 $\Delta \tau$ に 86bar を足した値としている。ケース 2 とケース 4、5 を比較することによって $\Delta \tau$ の差による影響を検討することができる。図一 4 (a) に τ_i 、 τ_p 、 τ_r の深さ方向の分布、(b) に $\Delta \tau$ 、 $\Delta \tau_b$ の分布を示す。 τ_i 、 τ_p 、 τ_r の深さ方向の分布は最近の地球物理学の分野で明らかにされた成果を近似したものであり⁴⁾、 $\Delta \tau$ 、 $\Delta \tau_b$ の分布は簡単のために深さ方向に一定と仮定している。

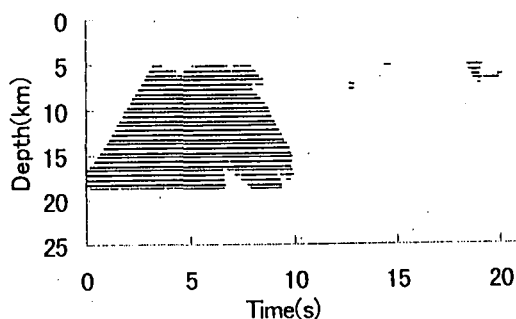


(a) τ_p , τ_l , τ_r の分布

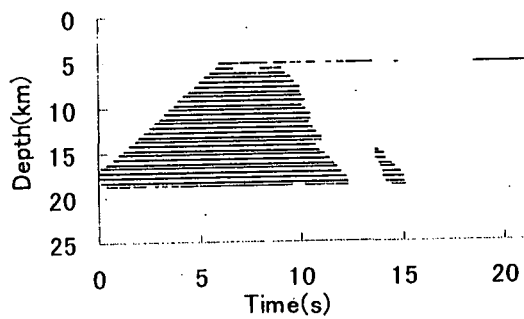


(b) $\Delta \tau$, $\Delta \tau_b$ の分布

図一4 断層面上の各種応力の分布



(a) ケース 1



(b) ケース 3

図一5 破壊要素の時間分布

3. 解析結果の検討

(1) 破壊の伝播の様子

図一5に断層の滑動の様子を示す。これは図の縦軸にジョイント要素を深さ方向に並べ、各々のジョイント要素が滑動している時間帯を横軸方向に実線で表したものである。この実線が途切れている場合はその時間帯にそのジョイント要素は滑動していないことを表わしている。図(a)はケース1、(b)はケース3の結果である。深さ16~18kmのジョイント要素は震源近傍であり、時刻0秒から破壊が生じている。ここより破壊は上方に伝わっていることがこれらの図より分かるが、ケース1の方がケース3に比べ、同じ深さのジョイント要素が早く破壊を開始している、すなわち破壊の伝播速度が早いことが分かる。図の実線の開始点を連ねた曲線の勾配が破壊の伝播速度を表すことになるが、その平均値、すなわち平均破壊伝播速度を各ケースについて求めた結果を表一3に示す。ケース1、2、3の破壊伝播速度を比較すると、この順に5.33km/s、3.10km/s、2.80km/sと小さくなっており、これより $\Delta \tau$ は同じであっても、 $\Delta \tau_b$ が大きいほど破壊伝播速度が小さくなることが分かる。なお一般には破壊伝播速度はせん断波速度の80~90%程度といわれているので、ここではそれに適合するケース2を標準ケースとする。

表一3には平均食い違い量もあわせて示してあるが、これらの値は僅かながらケース1、2、3の順で大きくなっている。一方、文献によるとノースリ

表一3 破壊伝播速度と食い違い量

	平均破壊伝播速度(km/s)	平均食い違い量(m)
ケース1	5.33	4.58
ケース2	3.10	4.65
ケース3	2.80	4.83
ケース4	2.97	3.55
ケース5	2.88	3.00

ッジ地震の平均食い違い量は3.52m²⁾となっており、ケース1、2、3の値はこれより大きくなっている。そこで、この3.52mとケース2の平均食い違い量4.65mとの比に比例して応力降下量を小さく、すなわち、 $74 \times 3.52 / 4.65 = 55.3 \text{ bar}$ に設定したのがケース4である。

さらに平均食い違い量として次式で与えられる弾性力学に基づく理論値⁴⁾から平均食い違い量Dを求める。

$$D = 3\pi \Delta \tau a / (8\mu)$$

これに $\Delta \tau = 74 \text{ bar}$ 、 $2a$ は断層幅=20km、 $\mu = \rho V_s^2$ 、 $\rho = 2.47 \text{ tf/m}^3$ 、 $V_s = 3642 \text{ m/s}$ を代入すると $D = 2.90 \text{ m}$ を得る。これとケース2の食い違い量の比に比例して応力降下量を求めると46.1barとなる($74 \times 2.90 / 4.65$)。この応力降下量を外力として解析を行ったのがケース5である。

(2) 地震波の比較

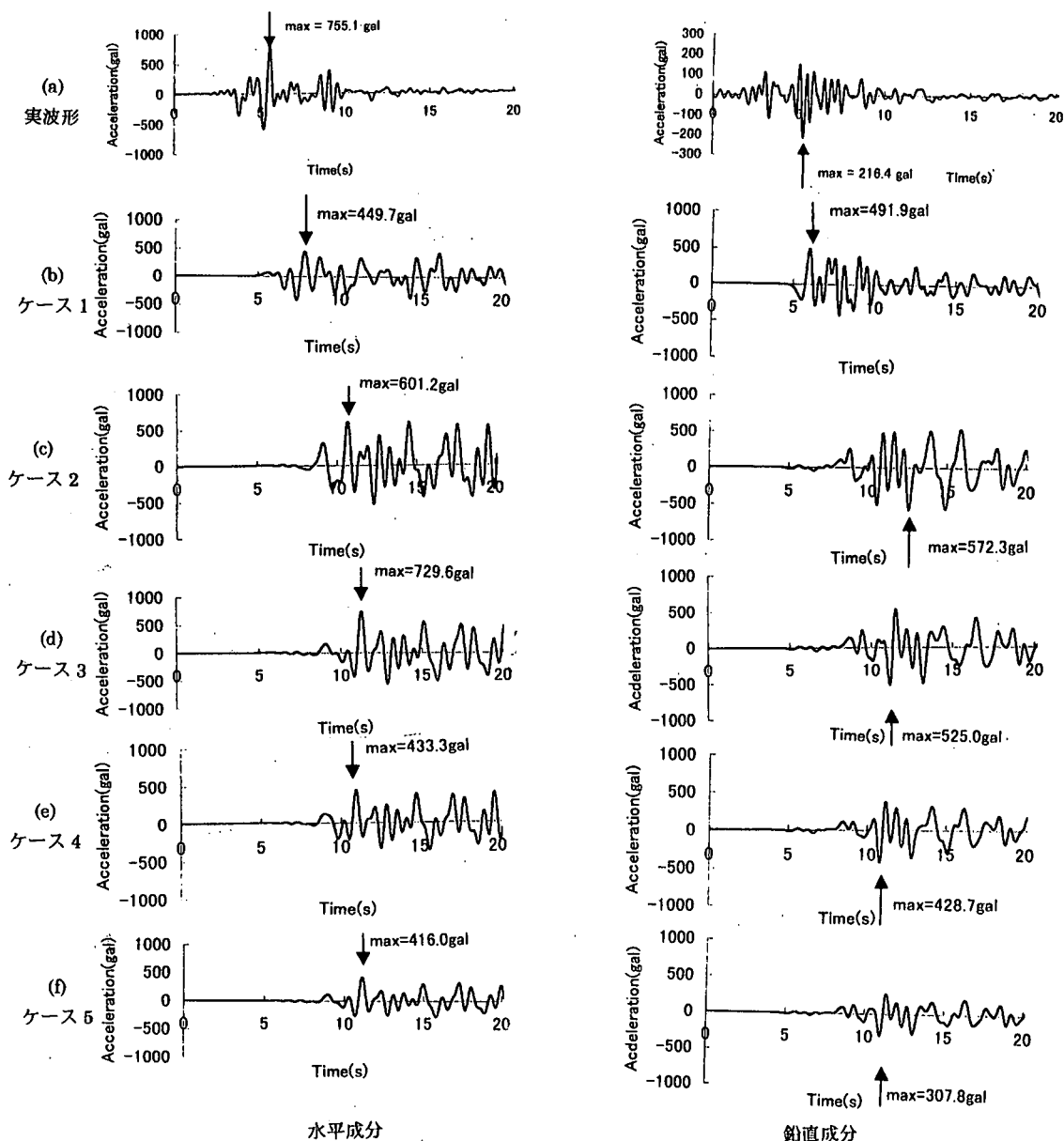
ノースリッジ地震ではたくさんの地震波が観測されているが、本報告では断層近傍で比較的本研究で用いた断層面モデルの面上に近い Newhall の地震観測記録とシミュレーション結果を比較する。比較を行うに当たっては、地震記録、シミュレーション波形の両方に 2.2Hz のハイカットフィルターをかけたものを用いる。その理由は、FEM メッシュの大きさからそれ以上高い周波数の地震波が生じないからである。

図一6に波形を示す。図(a)が観測波形であり、(b)以下順にケース1、2、3、4、5の波形である。それぞれ左が水平成分であり、右が上下成分である。なお、時間軸は観測波とシミュレーション波の間では合わせていない。シミュレーション波の時刻は破壊開始からの時間である。これよりシミュレーション波形の水平成分は観測波の最大加速度より小さめ

の値になっているが、鉛直成分は逆に大きめの値となっている。また継続時間はシミュレーション波形の方が長くなっている。この様に観測記録とほぼ同じ振幅レベルの加速度波形が得られることは確認できたが、異なるところも多くあり、今後さらに改良を続けて行く予定である。

参考文献

- 1)坪井、三浦：断層運動を模擬する岩石滑り破壊実験の有限要素法解析、土木学会論文集、No.537/I-35, pp. 61-76, 1996.
- 2)土木学会：1994年ノースリッジ地震侵害調査報告、1997.
- 3)A. Pitarka and K. Irikura : Basin structure effects on long-period strong motions in the San Fernando Valley and the Los Angeles basin from the 1994 Northridge earthquake and an aftershock, BSSA, Vol.86, No.1B, pp.126-137, 1996.
- 4)金森博雄：地震の物理、岩波書店、pp.74-76, 1982.



図一6 加速度波形の比較