

断層モデルを用いた海洋プレート型地震動の —予測手法とその結果について

大塚 久哲¹・P. G. SOMERVILLE²・佐藤 俊明³

¹フェロー 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

² Ph.D Woodward-Clyde Consultants, Senior Associate (566 El Dorado St., Suite 100, Pasadena, CA 91101, USA)

³工博 大崎総合研究所(株) 主席研究員 (〒100 東京都千代田区内幸町2-2-2)

短周期帯域と長周期帯域とで異なった手法を用いて地震動を作成した後、それらを合成して広帯域地震動を求める手法を用いて、滑り量の分布を考慮した断層モデルから広帯域地震動の推定を行った。将来発生する地震動の震源パラメータの不確定性を考慮して、960 波の時刻歴波形を発生させ、それらを統計的に処理して、平滑化応答スペクトルを標準偏差とともに提示した。さらにこの平滑化スペクトルを代表する10 ケースの時刻歴波形を提示した。

Key Words: Strong ground motion time history, Variable-Slip model, Broadband simulation hybrid method, Sagami trough, Response spectrum, Median and standard deviation

1. 序論

土木の大規模プロジェクトにおいて構造物、例えば吊橋のような長大橋梁の耐震設計を行う場合、当該地点の地震動を的確に評価することが重要である。

現在、断層モデルによって当該地点の地震動を予測する手法が開発されつつあるが、このようにして得られた地震動は、一つの震源パラメータを仮定した上での地震動の評価であって、将来発生するであろう大地震の震源パラメータを確定論的に予測することは現段階では不可能である。したがって、想定される震源パラメータの範囲を地震学的に考慮して種々のパラメータを組み合わせることで多数の地震動を発生させ、それらを統計的に処理して、将来発生する地震動の大きさの平均値や標準偏差を提示していくことが、必要であると考えられる。

本研究では、震源パラメータを種々変化させたときの地震動を数多く発生させ、予想される地震動がどの程度の平均値とばらつきを有し、このような考え方が工学的に有用であるか否かを、1923 年関東大地震の断層モデルを用いて検証した。

2. 広帯域地震動の推定手法

広帯域の時刻歴波形をシミュレーションするため

にハイブリッド法を用いた。この方法は、地震動を長周期帯域と短周期帯域に分けて計算した後にその両者を合成し時刻歴波形を求める方法である (Somerville 他、1996)。本研究で用いた長周期及び短周期帯域それぞれの地震動作成の方法は以下のとおりである。

長周期帯域においては地震波振幅の方位特性、断層の破壊伝播効果および媒質の波動伝播効果を理論的に計算する理論的グリーン関数を用いた標準的な波形計算方法 (Hartzell and Heaton, 1983) を用いる。この方法は近年起こった多くの地震による長周期強震動の波形のモデル化を行う際に広く用いられ、強震記録からインバージョンによって震源過程を求める際の典型的な方法の一つとなっている。

短周期帯域においては、既往の大地震の震源近傍で起こった中小地震の強震観測記録から求めた経験的震源時間関数と、Helmberger (1978) の一般化波線理論において、地震波振幅の方位特性を無視して計算されたグリーン関数 (Somerville et al (1991)) を用いて、半経験的に地震動を作成する。経験的震源時間関数としては、関東大地震と同様にプレート境界で起こった 1985 年ミチヨアカン地震 (Mw8.0) の際の余震 (Mw6.8) により Caleta de Campos (震央距離 32km) で得られた加速度波形を用いた (Somerville et al., 1991)。

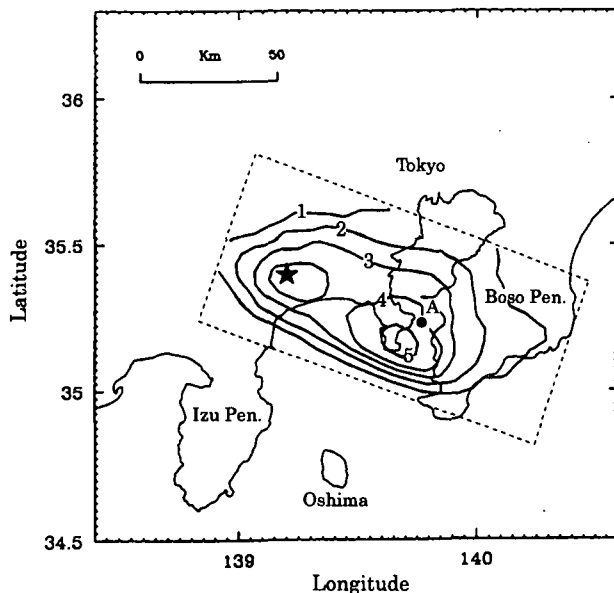


図1 1923年関東地震の断層、およびサイトAの位置
(最終滑り量分布(単位 m))

表1 破壊モデルパラメータ

断層パラメータ	走向 N70° W 傾斜角 25° NE
	長さ 130km 幅 70km
	深さ 2.0-31.6km
	地震モーメント 7.8×10^{27} dyne-cm

3. 震源特性、伝播特性およびサイト特性

本手法の適用事例として 1923 年関東大地震を取り上げ、同地震による東京湾湾口部のサイトA(図1)の地震動を推定する。断層モデルとしては、測地データと遠地実体波を用いたインバージョンによって求められた Wald and Somerville(1995)のモデルを用いる。表1に断層モデルのパラメータを示す。図1は断層面の地表面への投影面を示しており、地震動を求めるサイトAとともに、1923年関東大地震時の最終滑り量のコンター図と震央の位置を併せて示している。

地下構造モデルとしては、表2に示す水平成層構造を用いる。この地下構造のモデル化に際しては、S波速度 500m/sec の層が露頭しているとして、-215mまでは検層結果を参考にして、それより深いところでは既往の研究をもとに定数を設定した。計算点はこの地下構造モデルの地表面である。なお、深い部分の地下構造モデルの妥当性は、1990年小田原地震(M5.1)の館山の地震観測波形のシミュレーションにより確認されている。

表2 計算に用いた速度構造

深度 (km)	厚さ (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	密度 (g/cm ³)	Qp	Qs
0.00	0.035	1.84	0.50	2.2	100	50
0.035	0.120	1.90	0.65	2.2	100	50
0.155	0.06	2.02	0.77	2.2	100	50
0.215	0.585	2.10	0.80	2.2	100	50
0.80	2.20	3.60	1.80	2.3	200	100
3.00	5.00	4.70	2.60	2.5	300	150
8.00	5.00	5.70	3.30	2.6	300	150
13.00	7.00	6.60	3.70	2.8	500	250
20.00	5.00	6.90	3.90	2.9	500	250
25.00	7.00	7.00	4.00	3.0	500	250
32.00		7.90	4.40	3.2	1000	500

4. 相模トラフの将来の地震動の推定

(1) 断層震源モデルのモデル化

(a) 断層面の幾何学的形状

断層面の幾何学的形状のモデルは、前述のものをを用いた。これは地震動を求めようとする地点の位置が、1923年関東大地震の断層面の幾何学的な形状に対してあまり鋭敏ではないと考えられるからである。

(b) 破壊伝播速度の設定

これまでの多くの地震の解析例から、破壊伝播速度の平均的な値は経験的に s 波速度の 0.8 倍であることが知られている。1923年関東大地震の断層面の存在する深さ 2km から 32km の位置における s 波速度の平均値は 3.7km/s であることから、本検討ではその 0.8 倍である 3km/s を破壊伝播速度の中央値として採用した。その他に、破壊伝播速度の(中央値-標準偏差)、(中央値+標準偏差)の値である 2.5km/s、3.5km/s をパラメーターとした。中央値の重みを 0.45、(中央値±標準偏差)の重みを 0.275 とした。

(c) 立ち上がり時間の設定

立ち上がり時間は断層面上のある位置における滑りの継続時間を表す。ここでは、Somerville 他(1993年)が地殻内地震について求めた地震モーメントと立ち上がり時間の経験的関係を参考にして、沈み込み境界(サブダクションゾーン沿い)の地震における同様な関係を推定したところ、1923年関東大地震について、立ち上がり時間6秒が得られた。立ち上がり時間の(中央値-標準偏差)および(中央値+標準偏差)は、それぞれ、4秒、8秒とした。

短周期の地震動シミュレーションにおいてサブイ

表3 仮定された立ち上がり時間の分布

主要動の 立ち上がり時間	サブイベントの 立ち上がり時間	重み
4.0	1.5	.1375
(中央値-標準偏差)	(中央値)	
6.0	1.0	.1375
(中央値)	(中央値-標準偏差)	
6.0	1.5	.45
(中央値)	(中央値)	
6.0	2.0	.1375
(中央値)	(中央値+標準偏差)	
8.0	1.5	.1375
(中央値+標準偏差)	(中央値)	

ベントの経験的震源時間関数として用いる 1985 年ミチョアカン地震の余震の立ち上がり時間は、余震の地震モーメントから平均値を 1.5 秒、(中央値-標準偏差) および (中央値+標準偏差) を、それぞれ 1.0 秒、2.0 秒とした。立ち上がり時間の組み合わせと重みを表 3 に示す。

(d) 滑り分布モデルの作成

本研究では将来の相模トラフ地震を想定して 8 つの滑り分布モデルを作成した。この滑り分布モデルの一部を滑りベクトルの形で図 2 に示す。各モデルに対して 1/8 の重みを用いることにした。

(e) 震源位置(破壊開始点)の選定

断層走行に沿って等間隔に 4 箇所の震源を仮定し、断層面の幅方向には中央部付近の上部側と下部側の 2 箇所を選んだ。

(f) シミュレーションで用いる変動パラメータのまとめとケース数

これまで 8 つの滑り分布モデルのセット、8 箇所の震源位置のセット、3 つの破壊伝播速度のセット、3 つの主イベントの立ち上がり時間のセット、3 つのサブイベントの立ち上がり時間のセット、およびこれらの各パラメータ値に割り当てた重みについて説明した。以下では、これらの断層パラメータの変動を組み合わせ、 $8 \times 8 \times 3 \times 5 = 960$ ケースについてシミュレーションを行い、時刻歴波形を生成した。

(2) 計算結果

(a) 各パラメータの変動を考慮した応答スペクトルの中央値および標準偏差

計算された時刻歴波形の NS 成分と EW 成分の応答スペクトル間で系統的な相違が小さいことがわかったので、水平 2 成分の応答スペクトルの平均をとった。前述の各パラメータ値に割り当てられた重みを用いて、全セットに対する応答スペクトルの中央値および標準偏差を計算して、その結果を図 3 に示した。

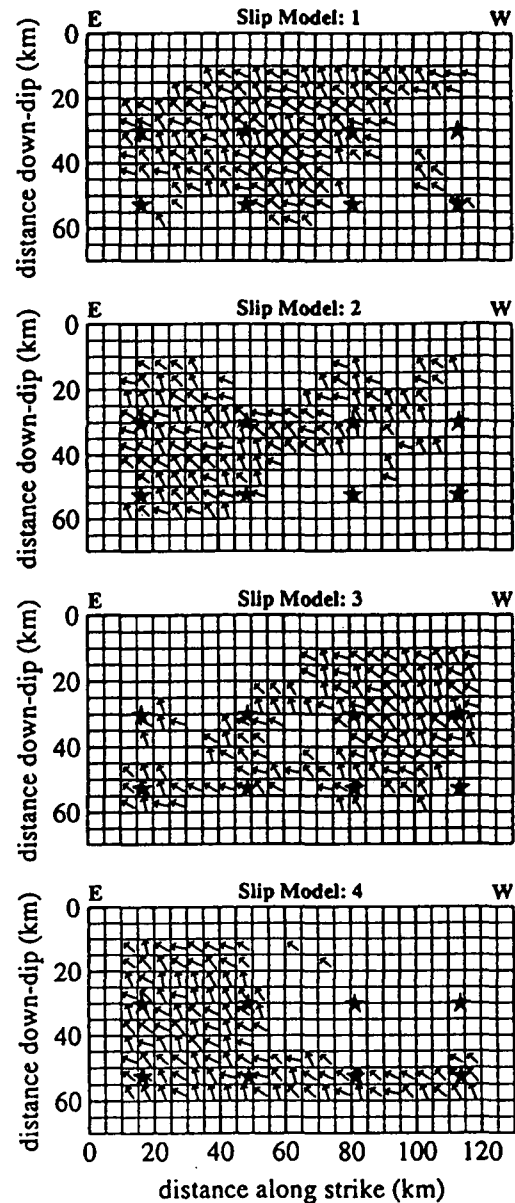


図2 相模トラフの地震の断層モデルにおいて想定した 8 通りの滑り分布の一部と 8 通りの震源位置 (星印) (大きく滑る部分の滑りの向きをベクトルで表示)

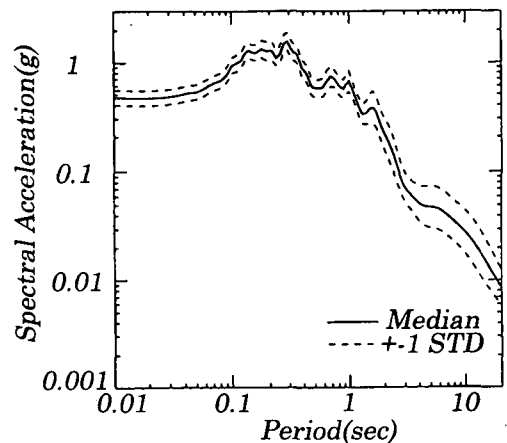


図3 全ての震源パラメータの変動を考慮した場合の応答スペクトルの中央値と標準偏差

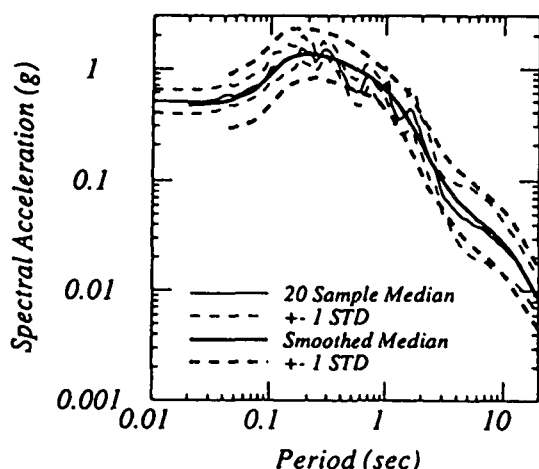


図4 平滑化された応答スペクトルと10ケース（20波形）の時刻歴波形の応答スペクトルの中央値と標準偏差の比較

(b) 平滑化スペクトルの作成

平滑化スペクトルは960ケースのシミュレーションから得られた応答スペクトルの平均値を滑らかなカーブで表現したものである。平滑化に関しては、当該サイトで実際に生じると予想される平均的な地震動特性を反映していないと考えられるスペクトルのピークおよび谷を除外した。その結果を図4に太線で示す。

(c) シミュレーション結果を代表する10ケースの時刻歴波形セットの選定

960ケースのシミュレーション波の中から、波形群として時刻歴波形の応答スペクトルの平均値とばらつきが平滑化応答スペクトルのそれらを近似的に満足するように10ケースの時刻歴波形のセット（1ケースでNS、EW成分があるので計20波）を選択した。これら10ケースの時刻歴波形（計20波）の応答スペクトルの中央値と標準偏差を平滑化応答スペクトルのそれらと比較したものを図4に示す。加速度の時刻歴波形の一部を図5に示す。

これらの10ケースの時刻歴波形は相模トラフで起こる大地震によるサイトAの地震動の平均的特性とそのばらつきを表すという観点で使用できる。

6. あとがき

本検討では短周期帯域と長周期帯域とで異なった手法で地震動を作成した後、それらを合成して広帯域地震動を求める手法を用いて、1923年関東大地震による断層モデルを用いて、任意に選んだサイトA

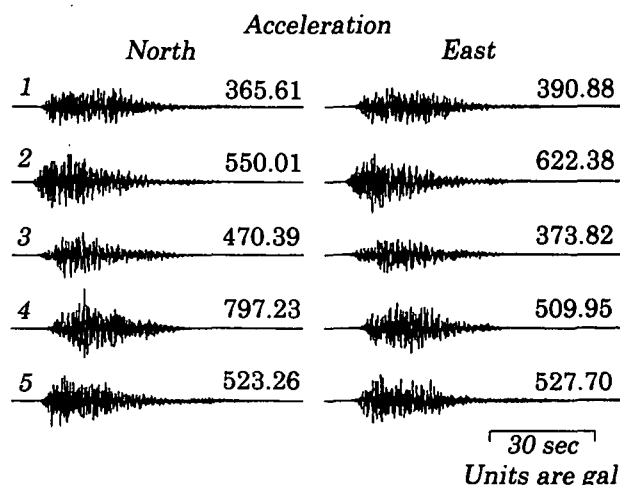


図5 平滑化応答スペクトルを代表する10ケースの時刻歴加速度波形のNSおよびEW成分の一部

の地震動を評価した。

プレート境界型の短周期帯域の地震動の推定に関し、同じプレート境界型の余震記録を用いたことが本手法の特徴の一つである。この手法によれば、地震動を推定したい断層上で発生した記録波形がない場合でも、短周期帯域の地震動の推定が可能である。

サイトAにおける地震動は、平滑化応答スペクトルの中央値とその標準偏差によって表した。また、960ケースの時刻歴波形の中から、平滑化応答スペクトルの中央値とその標準偏差を満足するような10ケースの時刻歴波形のセットを選択した。

謝辞：本研究に御協力いただいた大崎総合研究所（株）渡辺孝英氏に謝意を表する。

参考文献

- 1)Hartzell, S.H. and T.H. Heaton: Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture of the 1979 Imperial Valley, California earthquake, Bull. Seism. Soc. Am. 83, pp.780-810, 1983
- 2)Helmberger, D.V. and D.G. Harkrider: Modeling earthquakes with generalized ray theory, Proc. IUTAM Symp. Modern Problems in Elastic Wave Propagation, Wiley, New York, pp.499-518, 1978.
- 3)Wald, D.J. and P.G. Somerville: Variable slip rupture model of the great 1923 Kanto, Japan earthquake: geodetic and body-waveform analysis, Bull. Seism. Soc. Am., 85, pp.159-177, 1995