

k-2モデルによる東海地震を想定した 入力地震動の策定例

久田 嘉章¹

¹ 工学院大学教授 工学部建築学科 (〒163-8677 新宿区西新宿 1-2 4-2)
E-mail: hisada@cc.kogakuin.ac.jp

静岡県長泉町に建設された免震建築である静岡県立静岡がんセンターの耐震設計に用いるため、東海地震を想定した入力地震動の策定を行った。建設地における地震基盤までの地盤構造モデルは微動アレイによる地盤構造探査で行い、地震動の策定手法は経験的手法（小林・翠川法）、半経験的手法（入倉法）、および理論的手法（ハイブリッド手法）を用い、最悪条件や結果のばらつきを考慮して行った。特に理論的手法では震源近傍の強震動特性を考慮し、既存の巨大地震の震源パラメータを用いて周期1秒までの地震動計算を行うため、k-2モデル（k-squared model^{1) 2)}を使用した。計算の結果、断層破壊が当該地近くことで生成するdirectivity pulse波が、免震構造に最も大きく影響することを確認した。

Key Words : The Tokai earthquake, K-squared source model, input ground motion, aseismic design

1. はじめに

長周期構造物の耐震設計で考慮すべき長周期地震動には大きく分けて、堆積盆地で励起する表面波などサイト特性に起因するものと、directivity pulse波（指向性パルス波）やfling stepなど震源特性に起因するものがある。前者の例として2003年十勝沖地震による勇払平野で励起した長周期地震動があり、苫小牧市の石油タンクの火災事故を契機に、関東平野や大阪盆地などの堆積盆地の長周期地震動と、それによる長周期構造物（石油タンク、超高層建築、免震建築など）への影響が懸念されている。しかしながら表面波の加速度は小さく、また卓越周期は地盤構造で決まるため、減衰を付与したり、地盤との共振を避けるなどで比較的対処は容易であると思われる。

一方、震源近傍の地震動特性であるdirectivity pulse波やfling stepは、これまで長周期構造物の被害例が無いこともあり、耐震設計上、考慮されることは殆ど無いのが現状である³⁾。directivity pulse波は1995年兵庫県南部地震の際、神戸市の大被害をもたらした大きな要因の一つとして注目され、近年では強震動予測地図など震源近傍の地震動評価では広く採り入れられている。一方、fling stepは地表断層のごく近傍での断層すべりに起因する永久変位を伴うステップ関数上の長周期が卓越する変位波であり、1999年台湾・集集地震などで大きく注目をされるようになった。directivity pulse波やfling stepは、理論・観測面から

その成因が解明されており、現在では耐震設計の入力地震動として取り入れることが可能となっている⁴⁾。

本報告では震源近傍の強震動特性を考慮した入力地震動の策定例として、平成14年9月に開院した静岡県立静岡がんセンター・病院本棟における入力地震動策定を紹介する（平成11年日本建築センター評定）。サイトでの深層地盤は微動のアレイ観測で調査し、その結果をもとに強震動評価を行い、手法は経験的手法（小林・翠川法）、経験的グリーン関数法（半経験的手法）、理論的手法（ハイブリッド手法）を全て使用している。本報告では著者の担当したk-2モデル（k-squared model）による理論的手法を中心に紹介する（詳細は文献⁵⁾）。

2. 想定する地震と構造計画概要

静岡がんセンターは、図1、2に示すように富士山麓の愛鷹火山南東部に位置し、静岡県の地震地域係数は1.1以上のB地域に相当する。当サイトで考慮すべき震源モデルとして、図2に示すように仮想東海地震、仮想神奈川県西部地震、さらに富士川河口断層帯、及び神縄・国府津一松田断層帯による地震などが考えられる。この中で建設サイトに最も大きな影響を及ぼす地震として、仮想東海地震（M8）を対象とした入力地震動策定が行われた。仮想東海地震は、平成13年に中央防災会議から新しい想定震源域が公表されているが、ここでは建

建設サイトに近く、より影響のより大きいと考えられる石橋モデル（1976）を用いている。表1に使用した震源パラメータを示す。

当センターの病院本棟は、地震時の災害拠点として病院機能を維持させるため免震構造として計画されている。病院本棟は鉄骨鉄筋コンクリート・一部鉄骨造で、地下1階、地上11階、軒高53.45m、建築面積・延べ床面積はそれぞれ約14,763 m²、64,155 m²である。架構はブレース付きラーメン構造（一部耐震壁）、基礎は杭基礎である。免震部材は1階床下及び地下1階床下に設置し、一部は1階と地下1階の中間に設置した。免震部材は積層ゴムとすべり支承を併用し、減衰機構は鋼棒ダンパーと鉛プラグを用いている。基礎固定での設計用1次固有周期は短辺で0.91秒、長辺で0.86秒であり、免震層を含めた等価線形モデルによる1次固有周期は、免震層変位

の1 cmレベルで1.42秒、10 cmレベル（レベル1）で2.42秒、20 cmレベル（レベル2）で2.90秒、40 cmレベル（余裕度検討レベル）で3.33秒である。

表1 仮想東海地震の震源パラメータ（石橋モデル）

緒元	設定値
地震規模	M8
断層北東端位置 (°)	(35.14 N, 138.73 E)
断層の最浅端深さ (km)	2
走行 (°)	N198E
傾斜角 (°)	34
長さ (km)	115
幅 (km)	70
平均すべり量 (m)	4
平均すべり角 (°)	71



図1 静岡県立静岡がんセンターの遠景（左）とサイト位置（右）

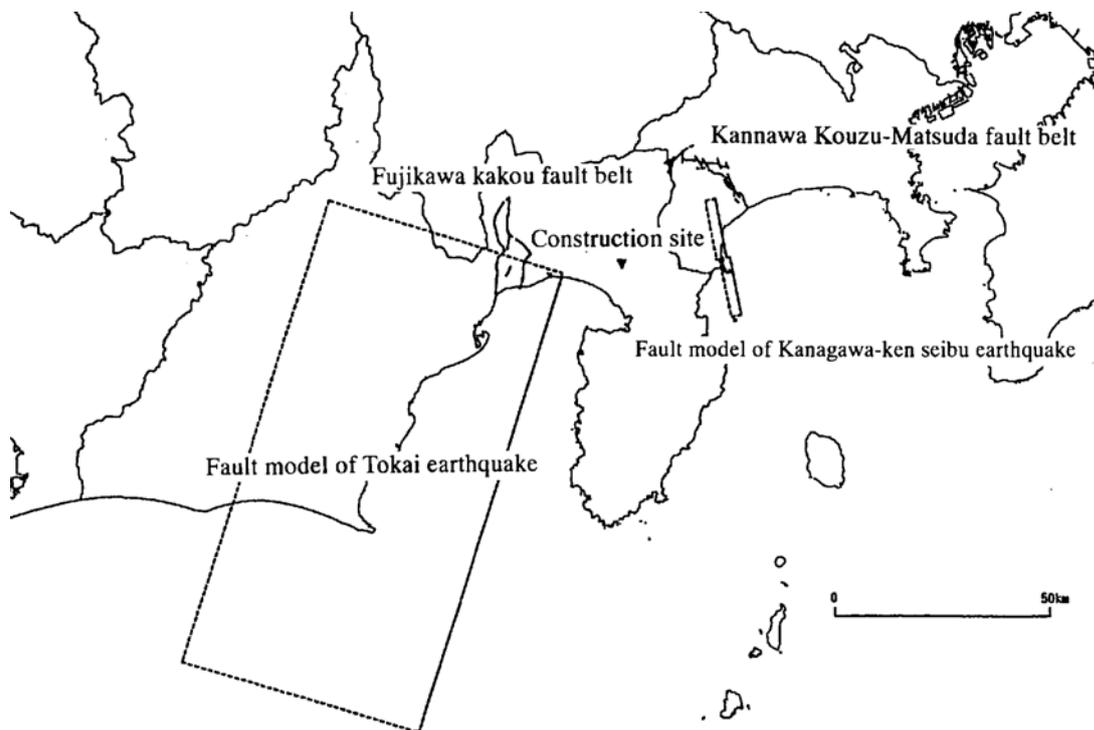


図2 建設サイト、及び入力地震動策定の祭に参考にした想定震源

表2 使用した地盤モデル

層	密度 (g/cm ³)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	層厚 (km)	Qp	Qs
1	2.0	1.7	0.6	0.043	100	50
2	2.1	2.3	0.91	0.17	160	80
3	2.2	2.9	1.55	1.14	300	150
4	2.4	5.5	3.0	2.00	400	200
5	2.8	6.5	3.8	-	400	200

本サイトでの地盤情報は以下の通りである。当該地では多くのボーリング調査や深さ60mまでのP S検層などが行われており、それらによると当地では愛鷹火山の噴出によるローム層が地表より約20mまで堆積し、以深は凝灰角礫岩層で構成されている。一方、長周期強震動の特性を調べる上で重要な工学的基盤から地震基盤までの地盤構造は殆ど知られていない。このため微動のアレイ観測を実施し、S波速度3 km/s程度の地震基盤までのS波速度構造を推定した(表2)。

3. k-2 model を利用した理論的手法と統計的グリーン関数法による入力地震動策定

入力地震動の策定法は経験的手法(小林・翠川法)と経験的グリーン関数法(半経験的手法)に加え、directivity pulse 波や fling step など様々な震源近傍の強震動特性を考慮するため、理論的手法(ハイブリッド手法)も用いている。理論的手法では、長周期強震動(周期約1秒以上)の作成にk-2モデルによる理論的手法を、短周期強震動(周期約1秒以下)には統計的グリーン関数法を用いたハイブリッド手法を使用した。M8クラスの海洋型地震を対象とした場合、震源逆解析による使用できるの震源パラメータは長周期の記録(通常、周期3~4秒以上)であるため、工学的に必要な短周期ではそのままでは適用はできない。そこで、震源近傍で強震記録が得られ、東海地震と同じM8クラスの海洋型逆断層タイプの地震である1985年メキシコ地震と1985年チリ地震を用い、k-2モデルによって短周期まで適用可能な震源パラメータを構築し、仮想東海地震に適用した。

k-2モデル(k-square model)^{1),2)}は、断層面にでのすべり分布などが短波長で空間波数(k)の2乗に逆比例すると仮定することで、短周期の地震動が経験的震源モデルである ω^2 モデル(omega-squared model)に整合するように構築する震源モデルである。オリジナルのk-2モデル³⁾では断層面のすべり分布のみにk-2分布を仮定していたが、著者はすべり分布に加え、破壊開始時間の分布にもk-2を導入し、破壊伝播のフロントで揺ら

ぎを導入することで、加速度波形でのランダムさが表現でき、さらに、すべり関数にsource-controlled fmaxを持つKostrov型のすべり速度関数を用いる。その結果、短周期で ω^2 モデルと整合する震源スペクトルとなる。長周期(長波長)では既存の結果のすべり分布を用い、小断層サイズ以下の短波長でk-2モデルを導入すれば長周期でのdirectivity pulse 波や fling step などの震源近傍の強震動特性と、短周期でのランダムな地震動特性とを同時に評価することが可能となる^{1),2)}。但し、ここで用いた震源モデルでは、すべり分布には震源インバージョンによるすべり分布をそのまま使用し、さらにすべり速度関数として単純な継続時間が1秒の三角形関数で代用している。

一方、周期1秒以下の短周期成分には統計的グリーン関数法を用いる⁷⁾。これはBooreの点震源モデルを断層面の小断層に分布させ⁸⁾、Irikura(1986)の方法で重ね合わせる手法である⁹⁾。

上記の手法を1985年メキシコ地震と1985年チリ地震に適用し、震源近傍で観測された強震記録を再現する震源パラメータを構築した。図3は1985年メキシコ地震の断層モデルと強震観測点(4地点)とすべり分布モデルである。断層モデルはSomerville他¹⁰⁾、及びMendoza and Hartzell¹¹⁾を参考に構築し、理論的手法のための破壊開始時間の分布には、図4に示すようなk2分布を用いた。k2分布は、断層面を8.3 km x 6.7 kmの小断層に分割し、各小断層で平均破壊伝播速度に1 σ が1 km/sの正規分布を持つランダムな破壊伝播速度を与えることで生成した。一方、図4には参考のため一定の破壊伝播速度(Vr = 3 km/s)による破壊開始時間の分布も示している。地盤モデルはSomerville他¹⁰⁾による構造を用い、グリーン関数は、観測点が断層直上にあることから最下層の構造による全無限体のグリーン関数を計算し、重複反射理論による増幅率を乗じて地表での波形を合成した。理論的手法は周期1秒以上、統計的グリーン関数法には周期2秒以下で計算し、周期1~2秒で交差するフィルターをかけて両者を加え合わせた。図5に一例として観測点CALにおける理論速度波形と観測波形、および加速度フーリエスペクトルの比較を示す。理論波形には図4で示した2つの破壊開始時間のモデルによる計算結果を示している。滑らかな破壊開始時間分布を用いると周期1秒以上の長周期強震動の励起が不足するが、k2分布モデルではメキシコ地震で顕著に見られた周期2秒前後で卓越する長周期強震動が再現されている。

全く同様に図6は1985年チリ地震の断層モデルと観測点位置(4地点)とすべり分布モデル、図7は破壊開始時間の分布である。この場合、断層面を1.4 km x 1.2 kmの小断層に分割し、各小断層で平均破壊伝播速度に1

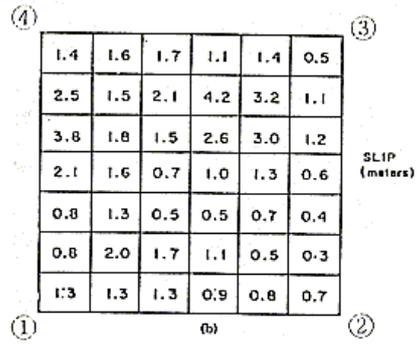
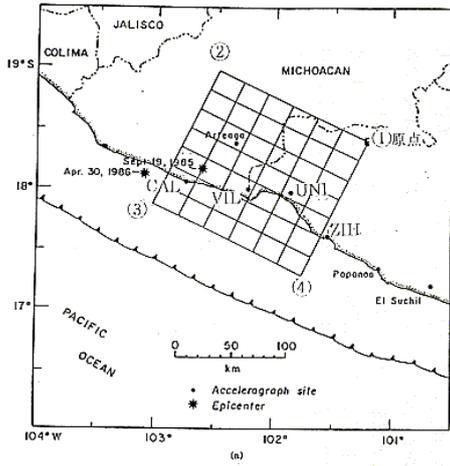


図3 1985年メキシコ地震の断層モデルと強震観測点(左)とすべり分布モデル(上)

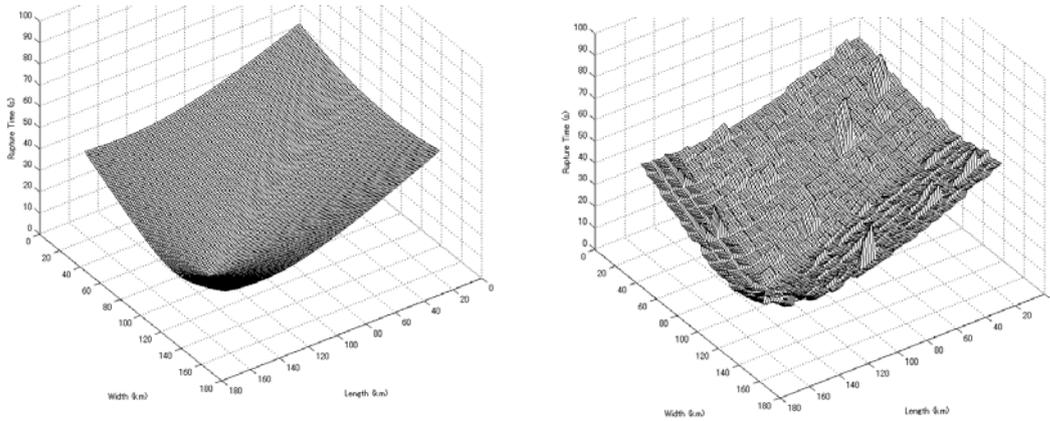


図4 1985年メキシコ地震の破壊開始時間分布(左:破壊伝播速度が一定の場合、右:k分布の場合)

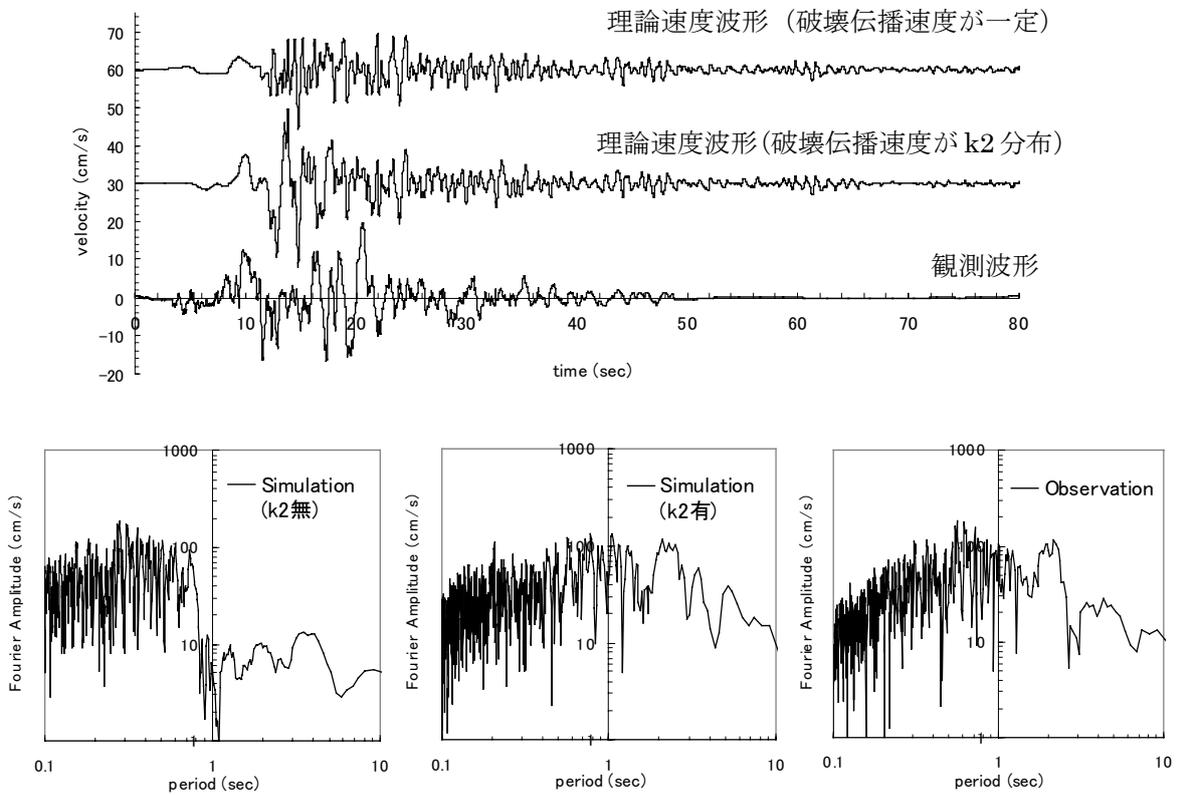


図5 CALにおける理論・観測速度波形(上、NS成分)とそのフーリエ振幅スペクトル(下)

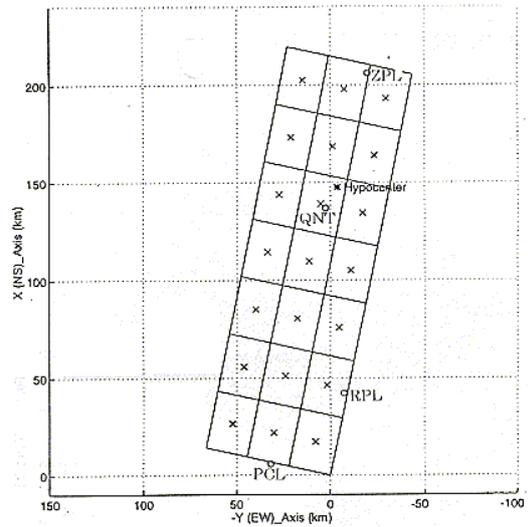
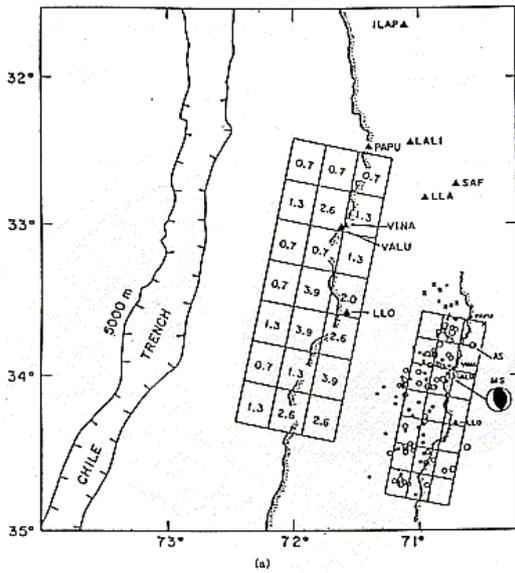


図6 1985年チリ地震の断層モデルとすべり分布モデル強震観測点の位置

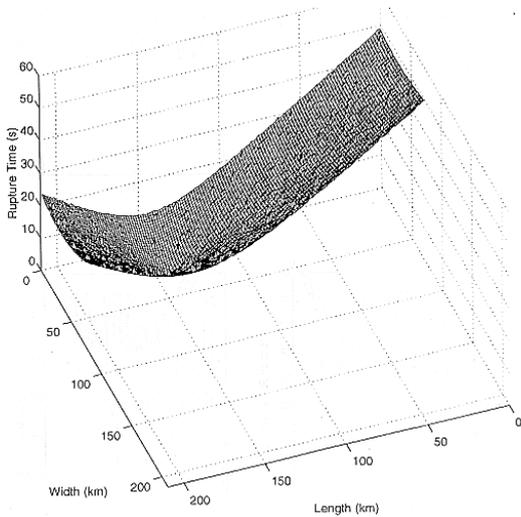


図7 1985年チリ地震で用いた破壊開始時間分布

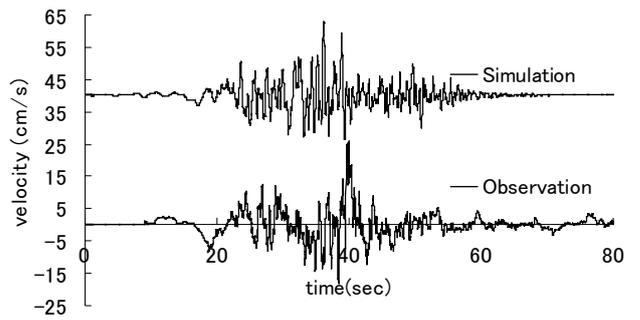


図8 RPLにおける理論速度波形（上）と観測波形（下、NS成分）

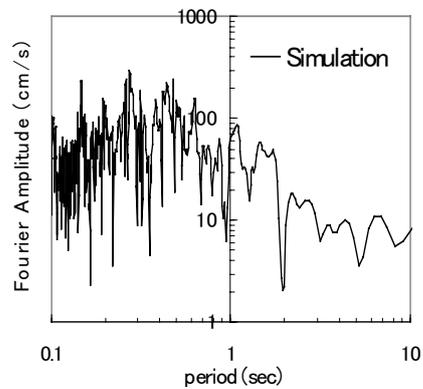
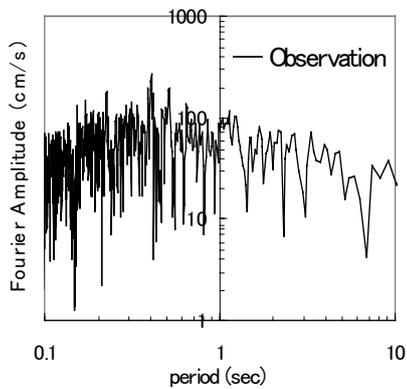


図9 RPLにおける理論的手法による加速度フーリエスペクトル（左：破壊伝播速度が一定の場合、中：k2分布の場合）と観測波形のフーリエスペクトル（右）

σ が 1 km/s の正規分布を持つランダムな破壊伝播速震源度を与え、k2 分布の破壊開始時間を生成した。地盤モデルは Somerville 他¹⁰⁾ による構造を用い、生成した理論速度波形と観測波形の比較を図 8 に、スペクトルの比較を図 9 に示す。観測波形は広い周期帯域で良く再現されている。パラメータを長泉町の静岡がんセンターにおける理論地震動に適用した。図 10 と表 3 に使用した 2 種の断層モデルとすべり分布を示す。破壊開始点は断層面の下端部とし、破壊が観測点に近づく場合（破壊開始点 1）と離れる場合（破壊開始点 2）の 2 ケースを考慮した。地盤構造は微動観測をもとにした表 2 の成層地盤を用い、半無限成層地盤モデルのグリーン関数を使用した¹²⁾。

図 11 に計算した速度波形（NS 成分）を示す。Forward と backward の directivity 効果により、理論波形の性状は大きく異なっている。すなわち破壊フロントが観測点に近づく場合（破壊開始点 1）、継続時間が短いものの、大きな振幅となっているのに対し、破壊フロントが離れ

る場合（破壊開始点 2）、継続時間は長いものの、短周期の卓越する小さな振幅の波形となる。

3 手法、すなわち経験的手法（小林-翠川手法）、半経験的手法、理論的手法（理論手法と統計的グリーン関数法）で得られた地震動を比較検討する。図 12 に 3 手法による速度応答スペクトル ($\eta=5\%$) を示す。理論的手法による結果は震源のパラメータの値で大きく変動するが、経験的手法と半経験的手法の結果は比較的安定し、理論的手法によるばらつきに対して中間程度の値を示している。特に免震構造の応答に影響する長周期成分に着目すると、最も大きな値は、理論的手法を用い forward directivity 効果が現れているメキシコ型地震によるものであり（MEX1）、逆に最も小さな値は backward directivity 効果によるメキシコ型地震によるものであった（MEX2）。従って、経験的手法や半経験的手法により経験的な地震動特性を把握し、理論的手法により最悪条件や結果のばらつきを評価できたことは有効であった。

表 3 使用した仮想東海の震源パラメータ

断層モデル	石橋モデル	メキシコ型モデル	チリ型モデル
断層長さ (km)	115	125	120
断層幅 (km)	70	80	75
走向角 (°)	N198E	N198E	N198E
傾斜角 (°)	34	34	34
断層すべり (m)	4.0	0.7~4.2	0.7~4.2
断層面下端深さ (km)	41	45	45
断層面上端深さ (km)	1.9	0.3	3.1
すべり角 (°)	71	70	70
破壊開始点深さ (km)	41	45	45
破壊伝播速度 (km/s)	3.0 (一定)	3.0 (ばらつき考慮)	3.0 (ばらつき考慮)
k2 分布を生じさせる小断層サイズ	-	8.3 x 6.7 km ²	1.4 x 1.2 km ²

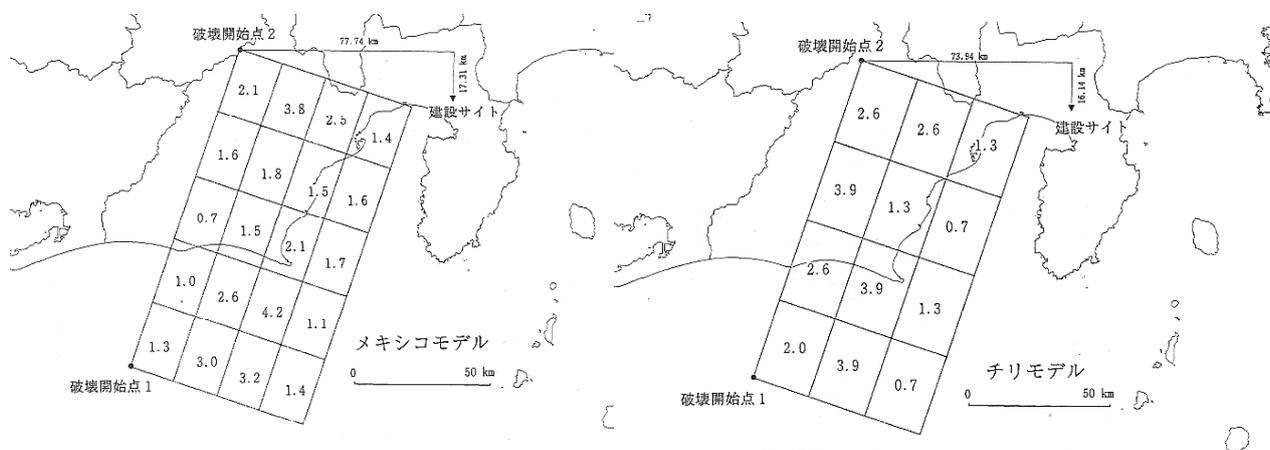


図 10 仮想東海地震に適用したメキシコ地震モデル (左) とチリ地震モデル (右)

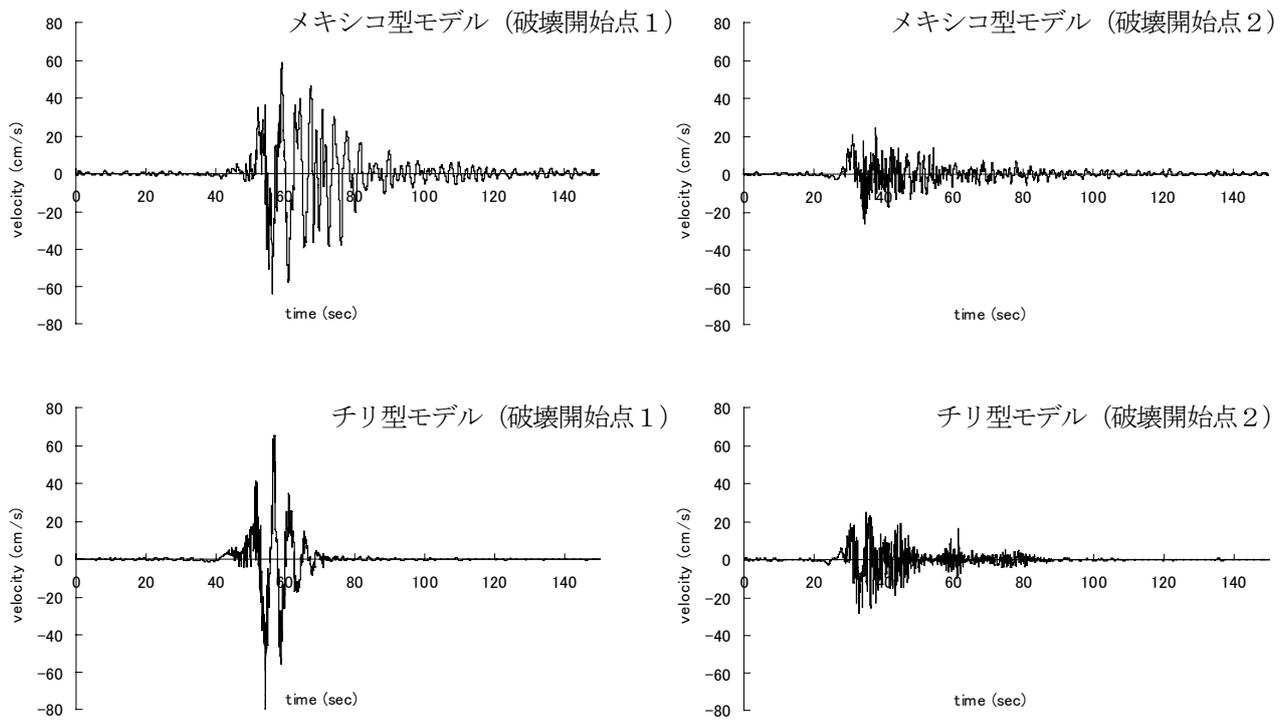


図 11 東海地震を想定したメキシコ型モデル (上) とチリ型モデルに (下) よる長泉町での速度波形 (NS成分、左：破壊開始点1、右：破壊開始点2)

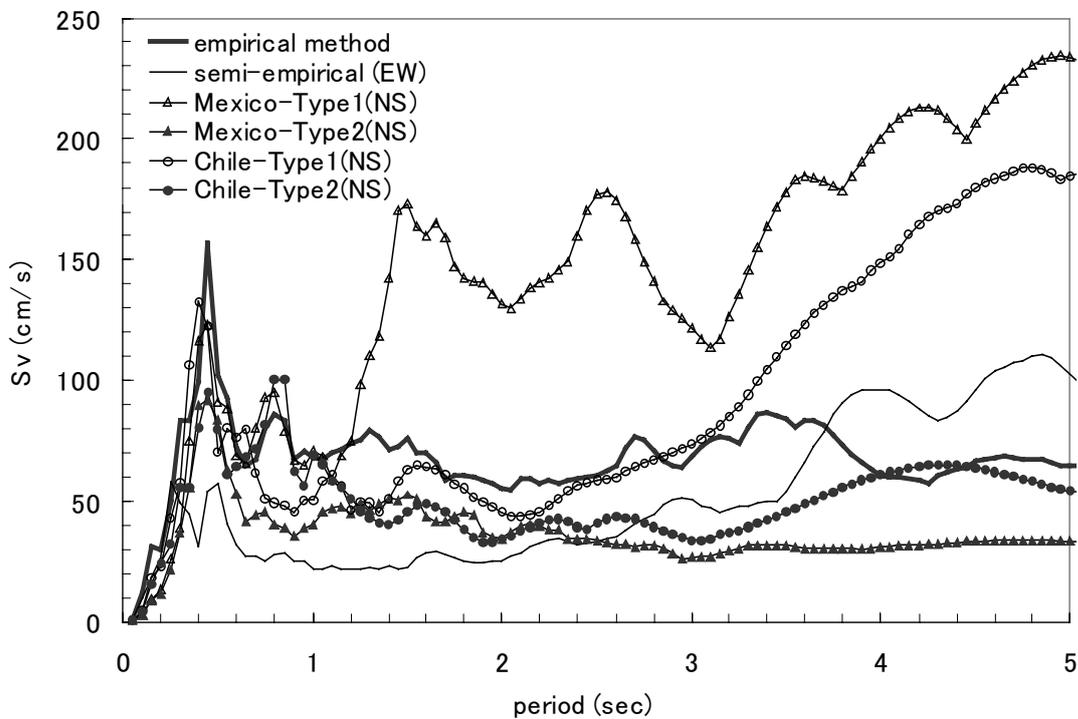


図 12 仮想東海地震による各種法 (半経験的手法、経験的手法、理論手法) による速度応答スペクトル (5%減衰) の比較

5. おわりに

静岡県長泉町に建設された静岡県立静岡がんセンターの設計にあたり、地域における地震動特性を評価するため東海地震を想定した地震動予測を行った。まず微動アレイによる地盤構造探査を行い、建設地における地震基盤までの地盤構造モデルを構築した。地震動策定は、経験的手法・半経験的手法・理論的手法を用い、最悪条件や結果のばらつきを考慮して行った。その結果、forward directivity 効果による長周期パルス波が当病院の免震構造に最も大きく影響することを確認した。最後に計算した全ての地震動を用い、静岡がんセンターの構造的・機能的安全性の確認を行った（詳細は文献⁵⁾を参照されたい）。

一方、2000年台湾集集地震の後、大規模な地表断層運動による大変位・大速度の波形が注目され、免震建築の安全性が危惧されている（例えば、文献³⁾）。当病院の場合、対象とした地震は伏在（地中）の逆断層地震の下盤側に位置し、さらに断層から10数km離れているため、断層運動による永久変位の影響は大きくはなかった。もし当病院が上盤側の地表断層の近傍で建設されていたら、想定される最悪の地震動（台湾地震の石岡TCU068など）では免震建築は成り立たなかった可能性が大きい。今後は巨大地震の震源近傍、特に地表断層が現れた場合の強震動特性の解明が急がれる。同時に、それに対応できる耐震（免震・制振）構造の開発も望まれる。

謝辞

本サイトの地震動策定に際して、微動による地盤探査には東京工業大学の山中浩明氏が、経験的・半経験的手法による地震動策定には東京工業大学の翠川三郎氏が、静岡癌センターの構造設計は株式会社 横河建築設計事務所が、それぞれ実施しました。その際、静岡県都市住宅部営繕課、静岡県健康福祉部県立病院課がんセンター準備室の皆様のご協力を頂きました。本研究は文部科学による大都市大震災軽減化特別プロジェクト、および学術フロンティア・工学院大学による助成を頂いています。

参考文献

- 1) Hisada Y.: A theoretical omega-square model considering the spatial variation in slip and rupture velocity, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.90, No.2, pp.387-400, 2001
- 2) 久田嘉章、k-2 モデルによる強震動評価、月間地球／号外、No.37, pp.179-186, 2002、pp99-110, 2002
- 3) 久田嘉章、震源近傍の強震動 — 改正基準法の設計用入力地震動は妥当か? —、第29回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、pp99-110, 2001

- 4) Hisada, Y, and J. Bielik, A Theoretical Method for Computing Near-Fault Strong Motions in Layered Half-Space Considering Static Offset due to Surface Faulting, with a Physical Interpretation of Fling Step and Rupture Directivity, Bull. of the Seism. Soc. of America., Vol.93, No.3, pp.1154-1168, June., 2003
- 5) 久田嘉章、翠川三郎、山中浩明、鱒沢 曜、免震病院を対象とした入力地震動の策定例 — 震源近傍の強震動、及び、深部地盤構造を考慮した入力地震動策定 —、第30回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、Sept., 2002
- 6) Herrero, A. and P. Bernard (1994). A kinematic self-similar rupture process for earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 84, 1216-1228.
- 7) Kamae, K., K. Irikura, and A. Pitarka (1998), "A Technique for Simulating Strong Ground Motion using Hybrid Green's Function", Bull. Seismo. Soc. Am., Vol.88, No.2, pp.357-367.
- 8) Boore, D.M., Stochastic simulation of High-frequency ground motions based on seismological models of radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 73, pp.1865-1894, 1983
- 9) Irikura, K., Prediction of Strong Acceleration Motion using Empirical Green's Function, Proc. 7th Japan Earthq. Engng. Sym., pp.151-156, 1986
- 10) Somerville, P.G., M. Sen, and B. Cohee, Simulation of Strong Ground Motions Recorded during the 1985 Michoacan, Mexico and Valparaiso, Chile Earthquakes, Bull. Seismo. Soc. Am., Vol.81, pp.1-27. 1991
- 11) Mendoza, C. and S. H. Hartzell (1989), "Slip Distribution of the 19 September 1985 Michoacan, Mexico, earthquake: Near-Source and Teleseismic Constraints", Bull. Seismo. Soc. Am., Vol.79, pp.655-669.
- 12) 久田嘉章、成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法、日本建築学会構造系論文集 第501号、pp.49-56、Nov.1997