

南海トラフ巨大地震を対象にした 経験的な強震動予測手法の検証

仲野健一*・境 茂樹*

南海トラフ巨大地震で生成される可能性が指摘されている長周期・長時間地震動によって、主に三大都市圏の超高層建物や免震建物が大きな被害を受けることが危惧されている。通常、M8クラスを超える巨大地震による地震動を計算する場合、強震動予測レシピで提案されているような手順に基づいたSMGAモデルによる強震動計算や、有限差分法などに基づく大規模計算が必要となる。しかしながら、公的な研究機関や少数の民間研究者を除いて、それらの検討をすることは難しく、一般の設計者にとってみれば、より簡便な経験的手法の活用が望まれる。国土交通省（2015）では南海トラフ巨大地震に対応するため、比較的簡便な経験的手法に分類される距離減衰式に基づく長周期・長時間地震動作成手法を開発し、超高層建物や免震建物の構造設計評定において活用することを提案している。本稿では、上記の計算手法に基づいて、南海トラフ巨大地震の強震動シミュレーションを実施するとともに、構造設計業務で利用する際の留意点を整理した。

キーワード：設計用入力地震動、南海トラフ巨大地震、強震動シミュレーション

1. はじめに

2015年12月17日、内閣府の中央防災会議は、「南海トラフ沿いの巨大地震による長周期・長時間地震動に関する報告」¹⁾において、南海トラフ巨大地震の地震像と被害想定を公表し、同月、国土交通省はパブリックコメント「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期・長時間地震動への対策」(以下、パブコメ)²⁾を公表した。内閣府は、歴史資料によって南海トラフ沿いの巨大地震として最大クラスとされている1703年宝永地震を想定し、東海・東南海・南海の3連動に加えて日向灘も震源域とする断層モデルを示している。一方、国土交通省はパブコメの中で、日本全国の公的な地震観測地点を対象にした簡便な長周期・長時間地震動予測手法(以下、パブコメ手法)を提案し、内閣府が想定する南海トラフ巨大地震の断層モデルを参考にして、同手法で長周期・長時間地震動を予測している。また、その長周期・長時間地震動によって過大な地震応答が予測される超高層建築物等(免震建物を含む)を特定の領域に建設する場合、その構造設計において同手法による検討を評定時に求めていくとしている。また、同パブコメには、既存の超高層建築物等に対しても、建設時に想定された設計用の速度応答スペクトルが、パブコメで示されている予測速度応答スペクトル(解放工学的基盤)を下回っている場合、改めて構造安全性を確認し、必要に応じて耐震性の向上を行うことが望ましい旨が記載されている。

近年、南海トラフ巨大地震の地震動予測は、上記を除

いて、多くの研究者によって実施されている。例えば、野津・若井(2013)³⁾によるSPGAモデルを用いたもの、田中・野畑(2014)⁴⁾による有限差分法を用いたもの、石井ほか(2013)⁵⁾によるアスペリティモデルを用いたもの、新たな試みでは動力的なアプローチとして廣野ほか(2016)⁶⁾などがある。これらで提案されている断層モデルや予測地震動は、明快な(もしくは厳密な)数理的解釈の上に成り立っており、緻密な検証を通して提案されたものであり、将来起こり得る予測事例として非常に重要である。特に最大級に対する備えが求められる防災目的での地震動評価としては、多種多様な検討を行う必要がある。

しかしながら、内閣府や研究者によって提案された断層モデルやそれを用いた地震動シミュレーション(有限要素法や動力的シミュレーションなど)の多くは、その明快な数理的解釈の厳密さや高い事象再現性の反面、それらを専門とする公的機関や一部の民間企業の研究者のみによって実施されているのが現状である。構造設計者は与えられた制約(時間や人的資源)の中で外力としての地震動に対して構造安全性を確保しなければならず、一部の構造設計者を除いて、地震動について上記を考慮して能動的に検討することは難しい。

以上のことから、本研究では、パブコメ手法による計算環境を整備し、南海トラフ巨大地震を対象にした強震動シミュレーションを実施して、建築研究所で公開されている波形と比較することでその妥当性を確認する。また、同手法を構造設計業務で利用する上での留意点などを整理・検証する。

*1 建築研究第一部

2. 計算手法

パブコメ手法は主に佐藤ほか (2014)⁷⁾ に基づいており、強震動シミュレーションの実施にあたって通常必要なパラメータの多くを統計解析によって構築した回帰モデルに置き換えた手法である。そのため、パブコメ手法は一般的には経験的手法に分類される。同手法には対象に応じて複数の計算式が提案されているが、以下では「特定の地点での地震動を推定する改良経験式」について概説する。詳細については国土交通省 (2015)²⁾ もしくは建築研究所 (2013)⁸⁾ を参照されたい。

パブコメ手法の計算フローを図-1に示す。

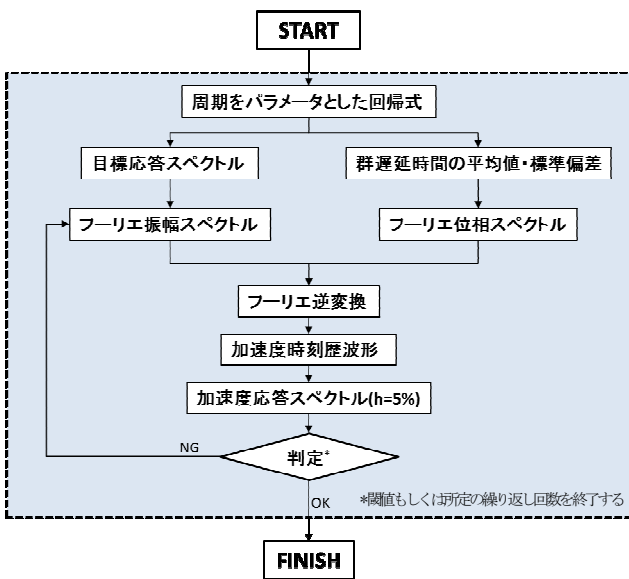


図-1 計算フロー

国土交通省 (2015)²⁾ で提案されているパブコメ手法のうち、特定の地点における地震動を推定する経験式では、以下の式 (1) に基づき、地震動の振幅情報として加速度応答スペクトル (h=5%) を推定する。

$$\log_{10} Y(T) = a_1(T)M_w + a_2(T)M_w^2 + be(T)R + bw(T)R - \log_{10}(R^{p(T)} + d(T)10^{0.5M_w}) + c_0(T) + c_j(T) + c_{wj}(T) \quad (1)$$

ここで、Y(T) は加速度応答スペクトル (h=5%)、 $a_1(T)$ 、 $a_2(T)$ は震源特性を表現する回帰係数、 $be(T)$ 、 $bw(T)$ は伝播経路特性についての係数で太平洋プレートかフィリピン海プレートのどちらで発生する地震かで選択される。 $p(T)$ 、 $d(T)$ も伝播経路特性に関する係数であり、 $c_0(T)$ 、 $c_j(T)$ 、 $c_{wj}(T)$ は地盤増幅についての係数である。 $c_j(T)$ 、 $c_{wj}(T)$ は先と同様にプレートによって異なるものを選択される。なお、プレートの違いによって片方の係数を使う場合、もう片方の係数は0となる。また、これらの係数は堆積層伝播時間 T_z (地震基盤上面から工学的基盤上面までのS波

鉛直伝播時間) によっても選択条件は異なるが、詳細は国土交通省 (2015)²⁾ を参照されたい。Rは断層最短距離 (km)、Tは応答スペクトルの周期を示している。なお、これらの係数については、パブコメが公表された後、建築研究所 HP⁹⁾ において公開された係数を使用している。

時刻歴波形は、逆フーリエ変換を用いた表現として一般に以下の式 (2) で表現される。

$$a(t) = \sum_{k=0}^{N_f} A_k \cdot \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (2)$$

ここで、 $a(t)$ は加速度時刻歴、 A_k は振動数 f_k における加速度フーリエ振幅、 f_k は k 番目の成分の振動数 ($f_k = k/T_d$)、 T_d は時刻歴波形の継続時間、 ϕ_k は k 番目の成分の位相角である。

位相特性の推定には群遅延時間の考え方が用いられており、以下の式 (3)、(4) で計算される。なお群遅延時間は、時刻歴波形における特定の振動数成分の重心位置を意味する¹⁰⁾。

$$\mu_{igr}(f) = A_{igr1}(f)M_0^{1/3} + B_{e1}(f)X + B_{w1}(f)X + c_{1j}(f) + c_{w1j}(f) \quad \dots(3)$$

$$\sigma_{igr}(f) = \sqrt{A_{igr2}(f)M_0^{1/3} + B_{e2}(f)X + B_{w2}(f)X + c_{2j}(f) + c_{w2j}(f)} \quad \dots(4)$$

ここで、 μ_{igr} は群遅延時間の平均値、 σ_{igr} は群遅延時間の分散、 M_0 は地震モーメント、 X は震源距離、 A_{igr} は震源に関する回帰係数、 B_e と B_w は震源距離に関する回帰係数、 C_j と C_{wj} は j 番目のサイト係数に関する回帰係数である。上記の式 (3)、(4) で推定される平均値と分散を用いて、式 (5) によって位相差分が計算される。

$$\Delta\phi(f) = -(\mu_{igr}(f) + \sigma_{igr}(f) \cdot s) \cdot df \cdot 2\pi \quad (5)$$

ここで、 $\Delta\phi(f)$ は位相差分、 s は平均0で分散1の標準分布、 df は振動数刻みである。さらに、この位相差分から式 (7)、(8) によって位相角 ϕ_k が推定できる。ここで、 ϕ_{k+1} は $k+1$ 番目の位相角、 ϕ_1 は1番目の位相角である ($\phi_1 = 0$)。

$$\begin{aligned} \phi_{k+1} &= \phi_k + \Delta\phi_k \\ \phi_1 &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

加速度フーリエ振幅 A_k は、式 (1) で推定された加速度応答スペクトル (h=5%) の擬似速度応答スペクトルを目標スペクトルとし、それと等価なものとして扱われる。加速度フーリエ振幅と式 (3)、(4) で定義された位相角をフーリエ係数の実部と虚部としてフーリエスペクトルを構成し、このフーリエスペクトルを逆フーリエ変換することで加速度時刻歴波形を得る。そして、この加速度時刻歴波形から加速度応答スペクトル (h=5%) を改めて計算し、目

標スペクトルを満足するか判定する。満足しない場合は計算された応答スペクトルに対する目標スペクトルの比を加速度フーリエ振幅 A_k に掛け（フーリエ位相スペクトルは残し）、再度フーリエスペクトルを作成し、繰り返して計算・判定を逐次行う（図-1参照）。

3. 断層モデルの設定と計算結果

南海トラフ巨大地震の断層モデルとして、本研究では建築研究所（2013）⁸⁾を参考にして、図-1および表-1に示すような矩形断層モデルを設定した。図中の黒星印は第1破壊開始点を、黄色の星印は第2～5破壊開始点を示す。また、図中の白抜ききの四角印は内閣府（2013）¹¹⁾で公開された断層モデルの要素断層位置を、赤色の矩形は本研究で設定した矩形断層モデルを示す。

図-1に示したように、断層モデルは日向灘域（Area1）、南海トラフ域（Area2とArea3）、東海域（Area4、Area5）、相模域（Area6）の6つのセグメントで構成されており、Area3とArea4で共通の第1破壊開始点とそれぞれのセグメントで破壊開始点を設定した。なお破壊開始時間は第1破壊開始点から各破壊開始点までの直線距離と破壊伝播速度から設定した。本研究では、せん断波速度は $V_s=4,000\text{m/s}$ とし、Geller（1976）¹²⁾にしたがって破壊伝播速度は $V_r=0.72*V_s$ と仮定した。なお、上記の時間差を考慮した上で、各セグメントから計算される地震動の総和をとったものを、南海トラフ巨大地震での計算対象地点における設計用入力地震動として採用した。

久田ほか（2016）¹³⁾では、パブコメ手法は、震源近傍において、応答スペクトルの震源距離依存の傾向から、予測値が過大になることが指摘されている。そこで、本研究

では、断層最短距離の計算方法に着目して、表-1に示す矩形断層モデルから計算対象地点までの断層最短距離を計算した場合（CASE1）と内閣府（2013）¹¹⁾で公開された要素断層をもつ断層モデル（基本ケース）から計算した場合（CASE2）の2ケースを検討した。

図-3にパブコメ手法で計算した最大加速度（PGA）分布を、図-4に最大速度（PGV）分布を示す。また、図-5に藤本・翠川（2010）¹⁴⁾に従って推定した計測震度分布を示す。凡例は図中に示したとおりである。これらの図をみれば、断層近傍である高知、名古屋等の複数の計算対象地点において、PGAで1G程度、PGVで100kine程度の振幅が広く分布していることがわかる。また、推定計測震度で6.0前後（震度6弱～6強相当）が太平洋岸から中央構造線にかけての領域で幅広く分布していることがわかる。なお図-3～5に示した計算結果はCASE2の断層最短距離を使った場合である。

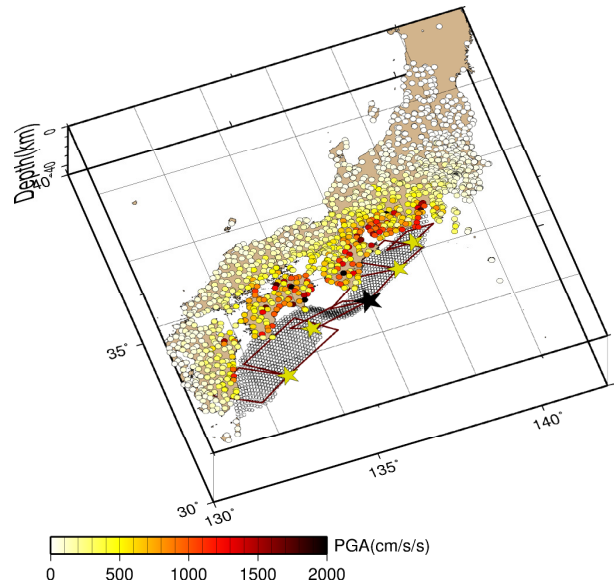


図-3 PGA分布

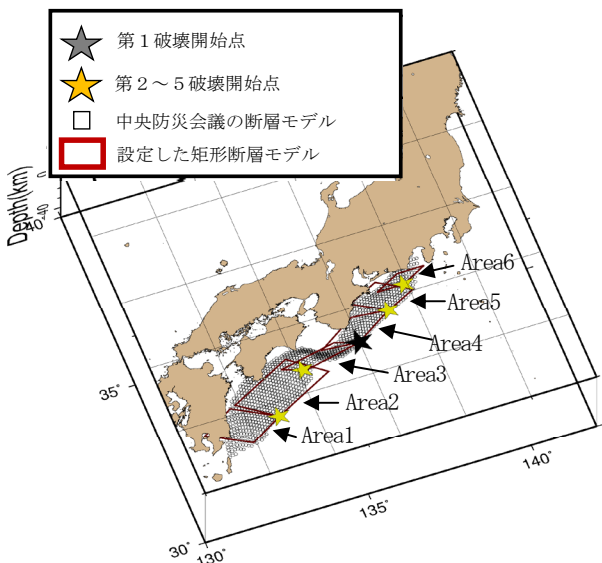


図-2 パブコメ手法で設定した断層モデル

表-1 断層パラメータ

Seg.	Location of Hypocenter			M_w	Location of 4corners of the seismic fault			
	Lat.	Lon.	Dep. (km)		Corner	Lat.	Lon.	Dep. (km)
Area1	31.872	133.064	10.6	8.4	1	33.173	132.111	35.300
					2	32.613	131.097	35.300
					3	31.332	132.050	10.600
					4	31.872	133.064	10.600
Area2	33.154	134.337	17.3	8.4	1	33.988	134.161	32.100
					2	33.144	132.258	32.100
					3	31.872	133.064	10.600
					4	32.716	134.939	10.600
Area3	33.315	136.139	12.3	8.4	1	34.583	135.242	43.759
					2	33.975	134.030	42.059
					3	32.974	134.389	11.800
					4	33.315	136.139	12.300
Area4	33.315	136.139	12.3	8.3	1	34.870	136.568	42.214
					2	34.329	135.434	46.514
					3	33.315	136.139	12.300
					4	33.850	137.263	8.000
Area5	33.850	137.263	8.0	8.4	1	35.339	137.506	30.529
					2	34.897	136.549	28.729
					3	33.850	137.263	8.000
					4	34.287	138.210	9.800
Area6	34.513	138.026	10.4	8.0	1	35.598	138.298	38.261
					2	35.258	137.534	38.261
					3	34.513	138.026	10.352
					4	34.856	138.793	10.352

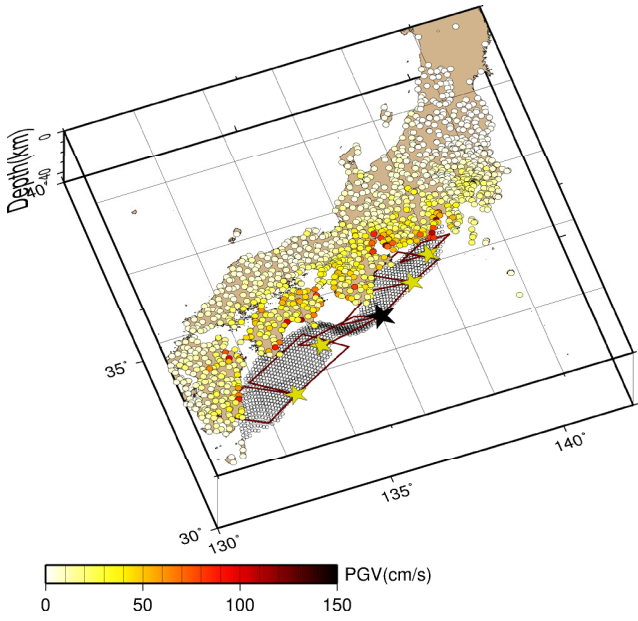


図-4 PGV 分布

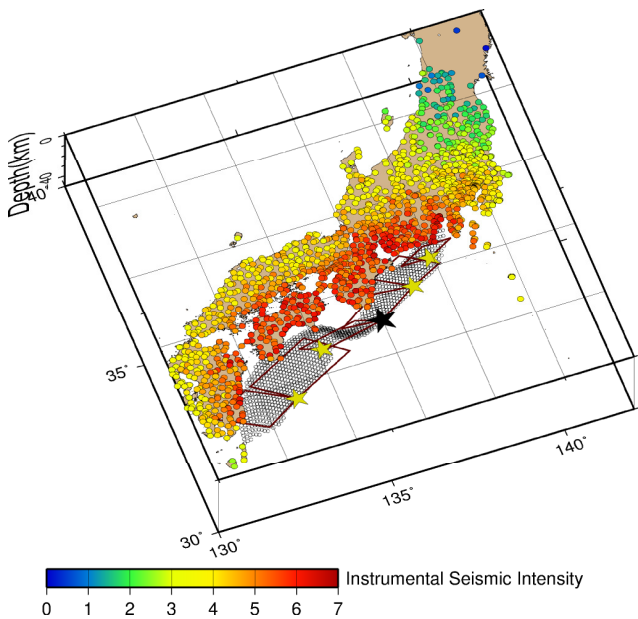


図-5 推定計測震度分布

図-6~9に、OSKH02 (此花), AIC003 (津島), AIC004 (名古屋), KGIN (工学院大学) において計算された加速度時刻歴波形とフーリエスペクトルおよび pSv ($h=5\%$) をそれぞれ示す。なお、建築研究所 (2013)³⁾ で公開されている波形を黒線で、CASE1 を赤線で、CASE2 を青線で表している。これらの結果をみれば、赤線と青線は、波形およびスペクトルの形状や継続時間など概ね整合していることがわかる。一方で、波群の重なり具合など、整合していない部分も見受けられるが、それらは断層モデルの分割方法や破壊開始点などの設定パラメータの差異に主に依っていると考えられる。

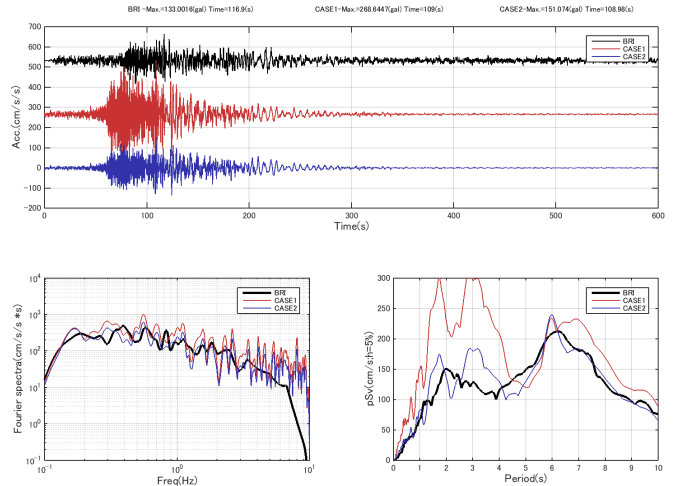


図-6 OSKH02 (此花)

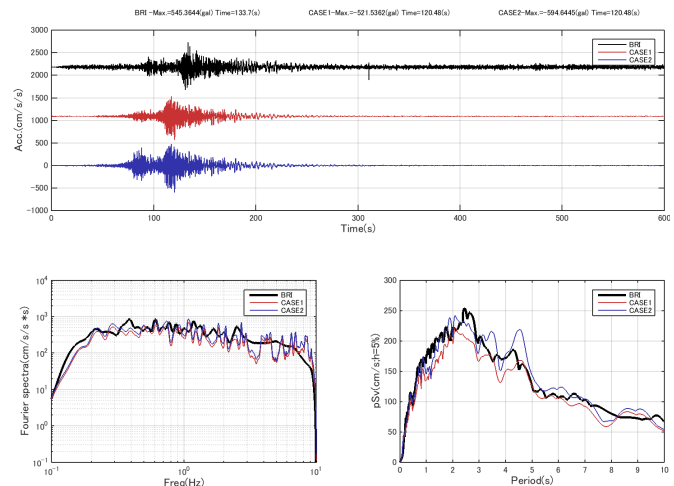


図-7 AIC003 (津島)

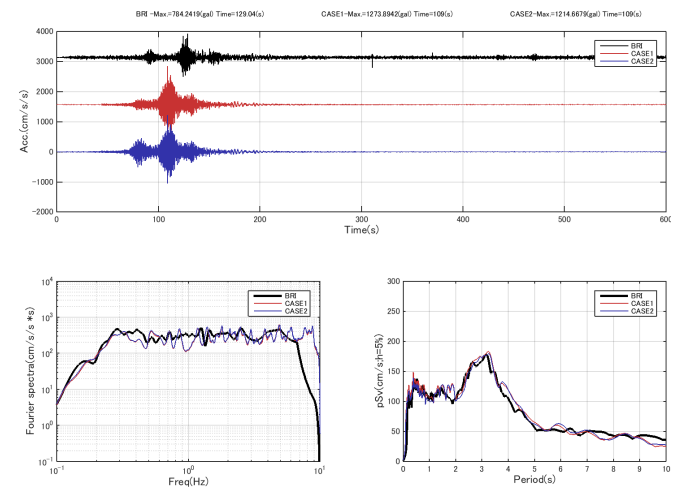


図-8 AIC004 (名古屋)

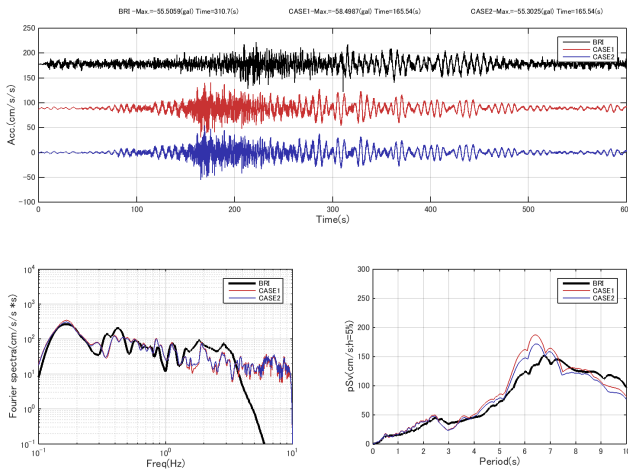


図-9 KGIN (工学院大学)

ここで重要なことは、図-6のOSKH02(此花)での比較において、CASE1に比べてCASE2の振幅が国土交通省(2015)²⁾とよく一致していることである。一方、他の図では顕著な差異はみられない。このことは、断層近傍が計算対象地点で、かつ、矩形断層モデルと沈み込み帯プレート等を詳細に検討して設定された断層モデルとの間で顕著な差異が生じる可能性がある場合、断層最短距離の取り方に留意しなければならないことを示唆している。

4. 構造設計業務に用いる際の留意点

本検討によって、パブコメ手法を構造設計業務に用いる際、特に以下の点に注意する必要があることがわかった。

- ① 海溝型の巨大地震を想定した断層モデルの設定において、複数のセグメントにおける断層パラメータの設定(セグメントの位置や破壊開始時刻等)
- ② 断層最短距離の設定(第4章参照)
- ③ 応答スペクトル振幅(水平方向)の回帰モデルは、地震観測記録の水平2方向の幾何平均値を用いて統計解析されたものであること
- ④ 3大都市圏(一部除く)では任意地点の地震動評価が可能とされているが、それは堆積層伝播時間 T_z (地震基盤から工学的基盤までのせん断波鉛直伝播に要する時間)を説明関数とした回帰モデルによって評価されること(従って T_z の深部地盤構造モデルの精度やメッシュに依存する)
- ⑤ 別手法(差分法等)で評価する場合、対象建物の弾性固有周期を含む特定の周期範囲(塑性化を適切に考慮して設定する)で区域波を下回らない必要があること

5. まとめ

本研究でのまとめは以下のとおりである。

- 国土交通省(2015)²⁾別紙3で示されたパブコメ手法を整備し、それを用いた南海トラフ巨大地震の強震動シミュレーションを実施し、建築研究所(2013)⁸⁾の計算結果と整合することを確認した。
- 上記シミュレーションの結果、断層最短距離の計算に用いる断層モデルの違いによって、震源近傍では顕著な差異が生じる可能性があることがわかった。
- 断層モデルの設定や各セグメントから放出される地震波形の重ね合わせ方等、適切な設定となるように配慮しなければならない。

謝辞: 防災科学技術研究所の地震観測網(K-NET, KiK-net)で観測された地震記録を使用させて頂きました。本研究の一部に、民間7社(㈱安藤・間、㈱熊谷組、佐藤工業㈱、戸田建設㈱、西松建設㈱、㈱フジタ、前田建設工業㈱)による平成26-27年度共同研究「南海トラフ・相模トラフの巨大地震による長周期・長時間地震動に関する研究」の成果を用いています。ここに記して感謝の意を表します。一部の図の作成にはGMT¹⁶⁾を用いています。

参考文献

- 1) 内閣府:「南海トラフ沿いの巨大地震による長周期・長時間地震動に関する報告」について、http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_report.html(閲覧日:2015年10月14日)。
- 2) 国土交通省:「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期・長時間地震動への対策案について」に関するご意見募集について、http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000601.html(閲覧日:2015年10月14日)。
- 3) 野津厚, 若井淳:南海トラフの地震(Mw9.0)を対象とした強震動評価へのSPGAモデルの適用, 港湾空港技術研究所資料, No.1271, 2013年。
- 4) 田中清和, 野畑有秀:南海トラフ巨大地震による長周期・長時間地震動の評価, 大林組技術研究所報, No.78, 2014年。
- 5) 石井やよい, 壇一男, 宮腰淳一, 高橋広人, 護雅史, 福和伸夫:南海トラフの巨大地震の断層モデルの設定と経験的グリーン関数法による強震動予測, 清水建設研究報告, 第90号, 2013年。
- 6) Hiorono T., K. Tsuda, W. Tanikawa, J. Ampuero, B. Shibazaki, M. Kinoshita, and James J. Mori.: Near-trench slip potential of megaquakes evaluated from fault properties and conditions, SCIENTIFIC REPORT, Vo.6, 2016.
- 7) 佐藤智美, 大川出, 佐藤俊明, 藤堂正喜, 西川孝夫:サイト固有の特性を反映した経験式に基づく南海トラフ沿いの巨大地震に対する長周期・長時間地震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第695号, 2014, pp.37-46.

- 8) 大川出, 佐藤智美, 佐藤俊明, 藤堂正喜, 北村春幸, 鳥井信吾, 辻泰一, 北村佳久: 超高層建築物等への長周期・長時間地震動の影響に関する検討—南海トラフ4連動地震による超高層・免震建物の応答解析—, 建築研究資料, No.147号, 2013.
- 9) 建築研究所: 長周期・長時間地震動の予測手法, <http://smo.kenken.go.jp/long/> (閲覧日: 2016年10月14日).
- 10) 大崎順彦, 岩崎良二, 大川出, 政尾亨: 地震波の位相特性とその応答に関する研究, 第5回日本地震工学シンポジウム, 1978.
- 11) 内閣府: 南海トラフの巨大地震モデル検討会において検討された震度分布・浸水域等に係るデータ提供について, <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/index.html> (閲覧日: 2012年12月4日)
- 12) Geller, R.J. : Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66, 1976, pp. 1501-1523.
- 13) 久田嘉章, 山崎久雄, 境茂樹, 井川望: 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期・長時間地震動と免震構造への対策案に関する課題—その1: 設計用・検証用地震動の位置づけについて—, 日本建築学会大会 (九州), 2016年.
- 14) 藤本一雄, 翠川三郎: マグニチュードの影響を考慮した計測震度と地震動強さ指標の関係式, *日本地震工学会*, 第10巻, 第2号, 2010年, pp. 1-11.
- 15) 地震調査研究推進本部: 長周期・長時間地震動評価 2016年試作版—相模トラフ巨大地震の検討—, http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/16_choshuki/ (閲覧日: 2016年10月14日).
- 16) Wessel, P. and W. H. F. Smith. : New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, 79, 1998, p. 579.

Validations of the Empirical Prediction Method for Strong Ground Motion Simulations of Nankai Trough earthquakes

Kenichi NAKANO, Shigeki SAKAI

Researchers have pointed out that Nankai Trough earthquakes generates long-period motions that threaten high-rise and base-isolated buildings in Japan. They have predicted strong ground motion of Nankai Trough earthquakes, using the finite difference method as a rigorous approach. However, the finite difference method is extremely difficult for laypeople. MLIT (2015) provides a method that is more user-friendly than other methods for simulation of Nankai Trough earthquakes. Thereby, the method provided by MLIT (2015) might be suitable for the structural design of high-rise or base-isolated buildings in Japan. From the above, we report the simulation of the strong ground motion of Nankai Trough earthquakes using the empirical prediction method provided by MLIT (2015) in this article, and provide instructions for use of the method for the structural design of high-rise and base-isolated buildings in Japan.