

強震動予測における理論的手法によるベンチマークテストに関する研究

D1-10265 本橋 佑真

1. 研究の目的と背景

建築の世界では、様々な経験式・実験結果により、「正解とする結果」が豊富にあり、解析結果との比較・検討がなされている。よって、様々な条件下での適応範囲を検討するのに、地震動の分野より信頼性が高く、比較的容易であるといえる。

しかし、地震動の分野では「正解とする結果」は「観測記録」に他ならず、強震動予測手法に関するベンチマークテストにおいて、その「正解とする結果」はその意味では存在しない。従って、様々な条件・手法の下でベンチマークテストを行い、その適応範囲やバラツキを検討することにより、あるモデルにおいてその計算手法が適しているか否かを明確化する。

その強震動予測手法は、近年、強震動地震学が急速に発展し「レシピ」や「強震波形の作成法」として体系化されつつある。

一方、工学分野においてもその成果を応用し、多くの強震動シミュレーションが行われ、入力地震動の策定などに応用されている。しかしながら同じ地震・観測点を対象としていながら、用いた手法や計算コードにより得られた結果には大きな差異が生じる場合があることが報告されている。

2011年度までに行なったベンチマークテストにより用いた手法や計算コードによる結果への影響、特性などの検討解析を行ってきた。

今後は過去に用いた手法や計算コードの違いによる結果の差異などを踏まえた上で、大都市圏で観測された広周期帯強震動を再現し、既往の震源・地盤モデルを改良した上で、想定地震による強震動予測を行う。

2. 研究概要

2.1 本ベンチマークテスト概要

本ベンチマークテストは先行研究である REER/SCEC プロジェクト・Day 他(2000, 2003)による数値解析手法の Code Test(以下、SCEC)を踏襲し行われる。

そして、工学院大学の計算結果と、本ベンチマークテスト HP やメールで参加を募った、強振動地震学分野の研究者・実務者の皆様(以下、本ベンチマークテスト参加者)の参加により、同じ条件のモデル(震源・伝播・地盤)の下で様々な手法・計算による結果の相互比較を行い、その適用範囲(計算可能な振動数、震源距離、盆地や地形

効果の影響など)やバラツキを検討する。

本ベンチマークテストで検討される様々な手法とは、理論的手法、統計的グリーン関数法、数値解析法(「差分法」「有限要素法」)の強振動予測手法で代表的な3手法のことである。

本研究では理論的手法を用いて行う。

理論的手法について、本研究における理論的手法とは波数積分法を用いたものであり、特徴として、対象地盤が平行成層地盤に限定されるものの、近距離から遠距離までの広帯域な強震動を高精度かつ簡易に計算できる利点がある。

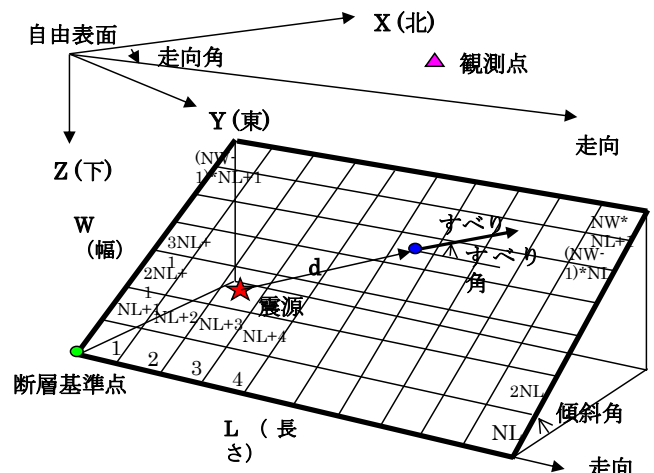


図1 断層震源モデル

2.2 研究の流れ

本研究で扱われる内容は以下に示す通りである。

- 私が理論的手法(波数積分法)で計算した結果を工学院大学の結果として、2011年度までに本ベンチマークテスト参加者から提出された計算結果と比較する。
- 2013年度モデル T71 について本ベンチマークテスト参加者の皆様から同手法計算により提出いただいた結果を、工学院大学の結果と比較する。
- 「ii」の結果を踏まえ、比較・検討した結果から T72 モデルの作成および検討を行う。
- T72 について本ベンチマークテスト参加者の皆様から同手法計算により提出いただいた結果を、工学院大学の結果と比較する。

3. ベンチマークテスト検討モデル

本ベンチマークでは千葉北西部地震を用いる。千葉北西部地震は近年発生した首都直下地震であり、多くの良好な強振動記録が得られている。また、表層地盤に良否に対応した明確な震度分布の違いを見ることができる。

表 1 本ベンチマークテスト検討モデル

ステップ	
モデル名	T71(必須) T72(任意)
対象地震	2005年千葉県北西部地震(Mj6.0)
震源(文献)	点震源(瀬瀬・三宅, 2005) 但し、震源時間関数は継続時間1秒の三角形関数
減衰	あり
有効振動数	0~1Hz(1秒以上)、但し計算は1.5Hz以上まで (数値解析手法の場合は、1Hzより低振動数でも可能)
地盤	関東平野の3次元深部地盤モデル(長周期地震動予測モデル、2009試作版)による観測点直下の平行成層地盤を使用(表層地盤の改善等)
出力点	26地点(k-net・kik-net・UR都市機構・建築研究所・戸田建設株式会社・株式会社鴻池組による観測記録)。但し、必須12地点、任意14地点とする

震源モデルについては2005年7月23日の千葉県北西部の地震(千葉県北西部地震)(Mj6.0)の震源モデルとして、表6に示す瀬瀬・三宅(2005)の点震源モデルを用いる。震源時間関数(モーメントレート関数)は、瀬瀬・三宅のオリジナルモデルは継続時間2.2秒のベル型関数であるが、ここではより短周期地震動を生成させるため、継続時間1秒の2等辺三角形とする。

表 2 震源モデル

北緯(°)	35.582
東経(°)	140.138
X(km)	153.333
Y(km)	135.005
深さ(km)	70
Strike(°)	25.5
Dip(°)	63.1
Rake(°)	67.8
地震モーメント(Nm)	5.8×10^{17}

計算結果は比較の際の有効振動数を統一するためにフィルター処理を行う。(0~1.5Hzを対象とする)

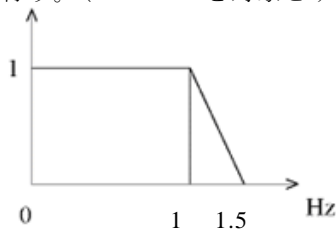


図 3 ローパスフィルター

表層地盤増幅

深部で増幅した地震波は表層でさらに増幅をする。今回は表層の影響も対象とするため本解析では各観測点で得られているボーリングデータより表層地盤をモデル化する。深部地盤データにより解放工学的基盤($V_s=500$ m/s)までの入射波を3次元波動場で計算し、表層地盤による鉛直入射仮定による1次元増幅率を乗じて自由表面における地震動を計算する。

今回本ベンチマークテストで使用する観測点は図4に示す東京湾岸地域を中心とする震央距100km圏内の地盤情報を有するK-net, Kik-net, UR, 建研の観測点を対象とした。

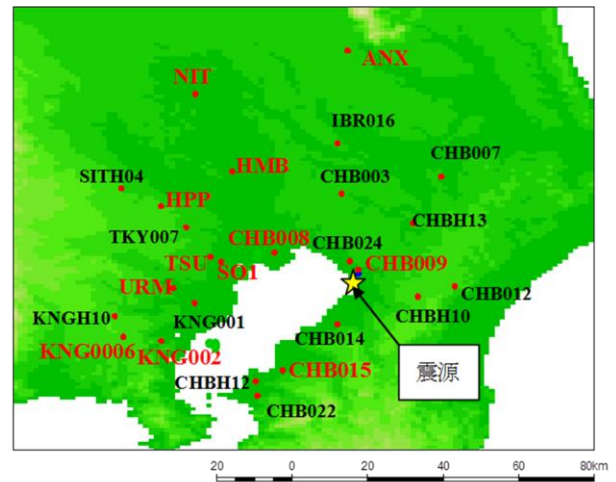


図 4 観測点・震源位置

地盤モデルについて工学的基盤より深い地盤モデルは、地震調査研究推進本部による長周期地震動予測地図において、想定東海地震の計算用いられた関東平野を対象とした地盤モデル(LPGM2009_tokai_tonankai.st、以下、推本地盤モデル(2009)、と略記)を用いる。

この3次元深層地盤構造モデルのうち、観測点直下の地盤構造から平行成層地盤を仮定して使用する。その際、各層の物性値は表1により与えられている。一方、本ベンチマークテストでは、結果への影響の小さいと考えられる地盤層である、非常に薄く、かつ隣り合う物性値が近い層は統合し、簡略化した地盤モデルとする。

表 3 地盤モデル(2009)の物性値

層番号	P波速度 V_p (km/s)	S波速度 V_s (km/s)	密度 (g/cm ³)	Q値
1	1.7	0.35	1.8	70f/fref
2	1.8	0.5	1.95	100 f/fref
3	2	0.6	2	120 f/fref
4	2.1	0.7	2.05	140 f/fref
5	2.2	0.8	2.07	160 f/fref
6	2.3	0.9	2.1	180 f/fref
7	2.4	1	2.15	200 f/fref
8	2.7	1.3	2.2	260 f/fref
9	3	1.5	2.25	300 f/fref
10	3.2	1.7	2.3	340 f/fref
11	3.5	2	2.35	400 f/fref
12	4.2	2.4	2.45	400 f/fref
13	5	2.9	2.6	400 f/fref
14	5.5	3.2	2.65	400 f/fref
15	6	3.53	2.7	400 f/fref
16	6.7	3.94	2.8	400 f/fref
17	7.8	4.6	3.2	500 f/fref
18	5	2.9	2.4	200 f/fref
19	6.8	4	2.9	300 f/fref
20	8	4.7	3.2	500f/fref

4. 計算結果波形比較

今回のベンチマークテストには3つの参加チームと工学（自分の結果を工学院の結果とする）の結果、観測波形の5つの波形がある
参加者それぞれ理論的手法を用いているが手法に違いがあり、以下の表に示す。

NAGANO	薄層法
NAKAGAWA	薄層法
7社GW	波数積分法
MOTOHASHI	波数積分法

ここからその差異が波形にどのような影響を与えているのか比較を行っていく。

4.1 提出波形との比較

chb009(千葉)、kng006(二俣川)は波形の合いがよい波形である。到達時間についてグラフよりNAGANOを除いた波形はほぼ一致していることがわかる。

位相、振幅においてNSを除いたEW、UD成分の波形の合いが非常によくほぼ一致していることがわかる。

全てではないがNAGANOの結果は到達時間が早く波形の位相振幅が大きくなる傾向にある。

7社GWとMOTOHASHIは同じプログラムを使用しているためkng006のようにほぼ同一な波形が出るはずなのだがchb009ではノイズが出てしまっている。

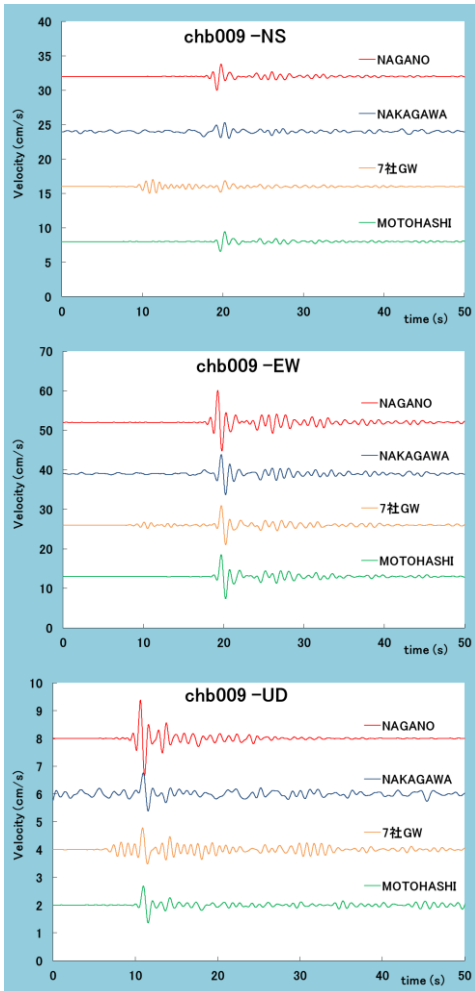


図 5 chb009 速度波形

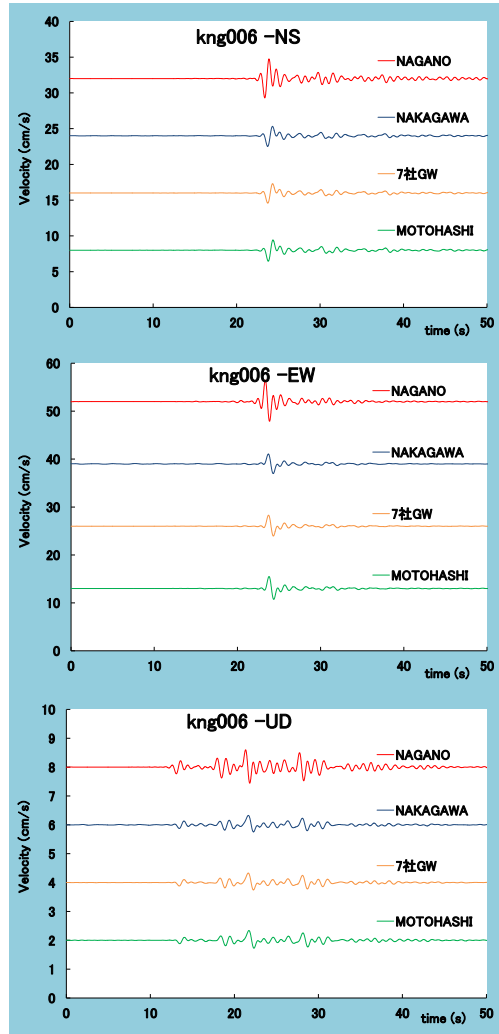


図 6 kng006 速度波形

4.2 観測波形との比較

それぞれの観測機関により観測された2005年千葉北西部地震との記録と計算結果との比較を行う。計算結果と同様に振動数を統一するため、0~1.5Hzのフィルター処理を行った記録波形を利用し比較を行う。観測波形との合いは観測点ごとに違っていたため今回は波形の合いが良好であったtky007(新宿)、波形の合いが良好ではなかったkng002(横浜)について考察をする。

振幅位相の違いを出すために観測波形の到達時間をずらしているが全波形において観測波形よりも早い傾向にあることがわかった。

観測点ごとの結果を見ると、神奈川県や東京西部のほうの波形は比較的観測波形と近い結果が出ていることがわかった。一方、東京湾岸沿いの波形はそれぞれの成分において観測波形が大きく出てしまっている。これは表層地盤の良否が原因だと思われる。

今回のベンチマークから表層での波を増幅させる結果を用いているのだが堅い地盤は比較的観測点との合いがよく柔らかい観測点は悪くなっている。

このことから次回のベンチマークから地盤の良否によって表層の増幅を異なるものにするにより改善できるものだと考えられる。

5. まとめ

今回のベンチマークテスト T71 で得られた結果から今後行う予定である T72 に向けていくつかの改善点が見つかっている。

今後は、その改善点をもとに T72 で使用する震源モデル及び地盤データの再提案を行っていく。

さらに、理論的手法、統計的グリーン関数法、数値解析手法の3手法の理解を深めることで、それぞれの結果に生じた差異の原因の特定の確に検討することが出来る。また、本テストで使用したプログラムや、波形データ、入力パラメータ、マニュアル等を公開し多くの実務者に信頼性の高い強震動予測手法を使用可能とすることを目指す。

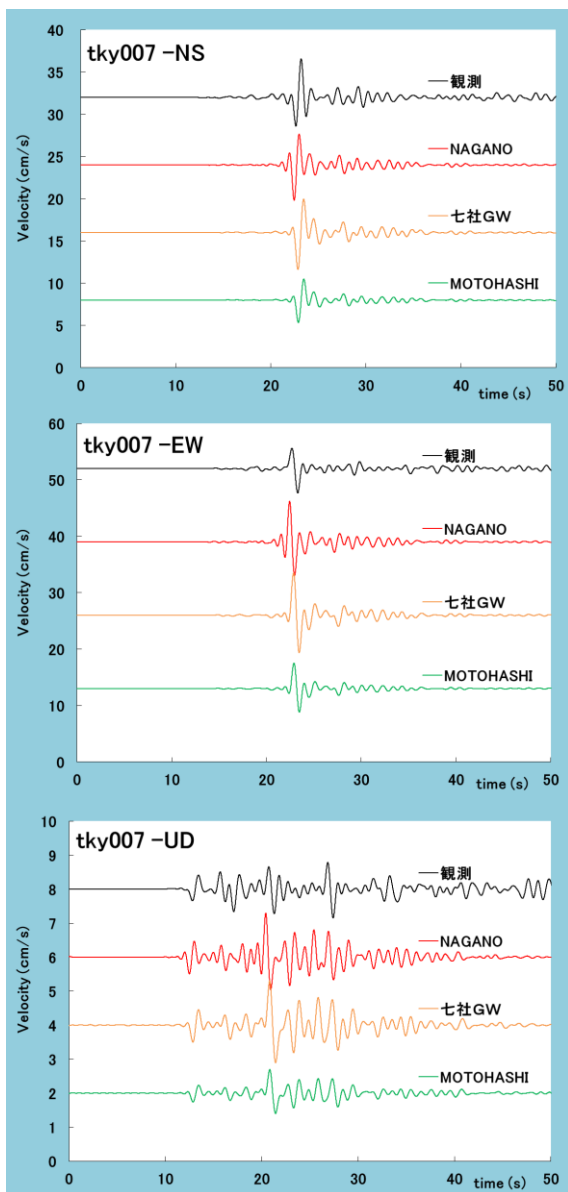


図 7 tky007 速度波形

6. 参考文献

1) 本ベンチマークテスト HP :

<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/benchmark/index.htm>

1) 山中浩明 他, 『地震の揺れを科学する みえてきた強震動の姿』, 東京大学出版会, 2006

2) 日本建築学会, 『最新の地盤震動研究を活かした強震動波形の作成法』, 2009年3月

3) 工学院大学久田研究室 HP より、理論的地震動計算法について.doc

4) 久田嘉章 建築の震動 応用編 第6章 朝倉書店

5) <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/gk/publication/>

6) GMS (<http://www.gms.bosai.go.jp/GMS/>)

7) 青井真 他, 『不連続格子を用いた4次精度差分法による波形合成』, 第10回日本地震工学シンポジウム, 1998

8) 地震ハザードステーション (J-SHIS) HP より詳細法計算手法のページ

http://www.j-shis.bosai.go.jp/j-map/result/tn_256/html/html/B-1.html

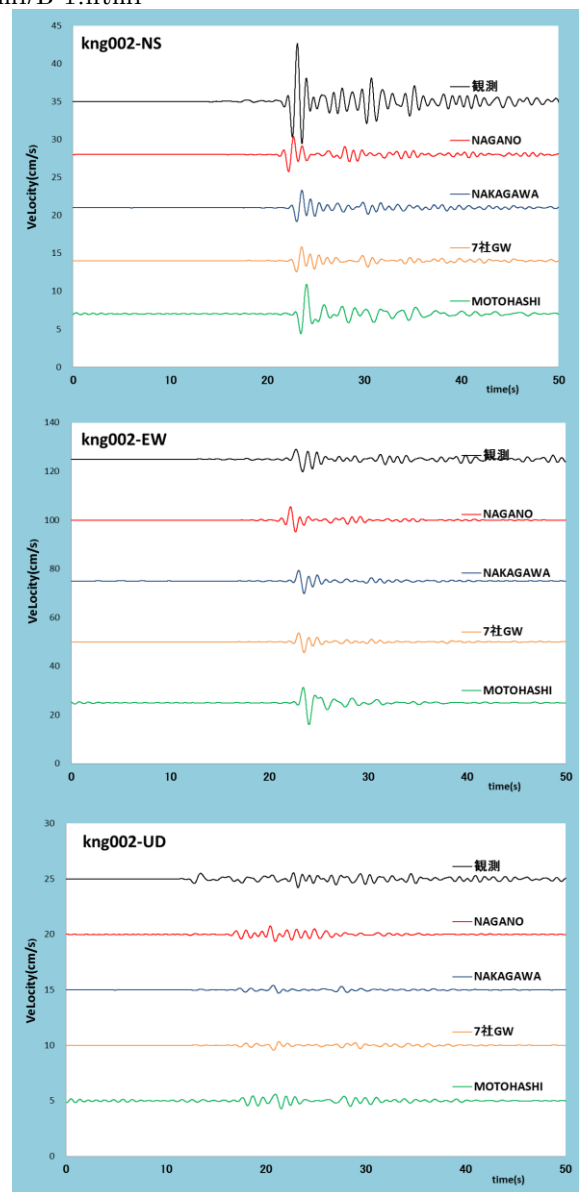


図 8 kng002 速度波形