

# 強震動予測手法に関するベンチマークテスト：統計的グリーン関数法の場合（その2）

# BENCHMARK TESTS FOR STRONG GROUND MOTION PREDICTION METHODS: CASE FOR STOCHASTIC GREEN'S FUNCTION METHOD (PART2)

加藤研一 — \*1    久田嘉章 — \*2    大野 晋 — \*3  
 野畑有秀 — \*4    森川 淳 — \*5    山本 優 — \*6

Arihide NOBATA    Atsushi MORIKAWA    Yu YAMAMOTO

キーワード：  
 強震動予測手法、ベンチマークテスト、統計的グリーン関数法、乱数、点震源、断層モデル

We performed a benchmark tests for the strong motion simulation methods using stochastic Green's function method. In addition to the previous paper (Part 1), frequency dependent radiation coefficient of the source and oblique incidences of both SH and SV waves are newly considered. All the results calculated by four teams generally show good agreement to each other. Since random numbers are used in generating time histories, synthesized amplitude shows variation in particular frequencies. When applying the stochastic Green's function method, this variation should be in mind.

Keywords:  
 Strong motion prediction methods, Benchmark tests, Stochastic Green's function method, Random numbers, Point source, Fault model

Kenichi KATO    Yoshiaki HISADA    Susumu OHNO

## 1. はじめに

統計的グリーン関数法は高振動数帯域までの強震動波形を簡易に計算できることから、強震動の面的評価などに広く用いられている。しかしながら、乱数位相を用いた小地震動の作成法などに関して多様な手法があり<sup>1)</sup>、それら手法間の相違が計算結果に及ぼす影響を把握する必要がある。以上の背景のもと、統計的グリーン関数法のベンチマークテストを企画し、2010年にステップ1(点震源)と2(面震源)を実施した<sup>2)</sup>。その際、地盤は半無限および2層の平行成層地盤を設定し、震源の放射係数はSH波のみを対象として振動数一定とした。2層地盤はSH波の鉛直平面波入射を仮定し、増幅特性を評価した。以上のように、既報<sup>2)</sup>は単純な解析条件を設定していた。

本報は表1と表4に示すより複雑な解析条件を設定し、共著者らの参加のもと、ステップ3(点震源)とステップ4(面震源)のベンチマークテストを実施した。ステップ1、2との相違はSH波に加えてSV波も考慮し、振動数依存の震源の放射係数と基盤からの斜め入射による地盤増幅率を考慮した点である。その結果、上下動も励起されることになり、3成分の地震動波形の提出を条件とした。本ベンチマークテストには4チーム(大野・野畑・森川・山本)が独自の計算コードを用いて参加した。久田は平行成層地盤の厳密なグリーン関数<sup>3)</sup>を用いて参加したため、統計的グリーン関数法的前提条件とは異なるが、理論値との比較の位置づけとして記載した。なお、新たに解析コードを作成する人が計算結果を十分に追従できるように、計算条件を詳細に記述すると共に、各ステップごとに可能な限り多くの計算結果を掲載した。

## 2. ステップ3(点震源)のベンチマークテスト

### 2.1 計算手法と計算条件

ステップ3は表1に示すS31~S34の4通りのテストを実施した。点震源を図1に示す(x, y, z)=(0, 0, 2000) (単位 m)に置き、走向・傾

斜角・すべり角をそれぞれ(0°, 90°, 0°)とした。計算点は図1に示す自由表面上のベクトル(x, y, z)=(6, 8, 0)に沿う+000, +002, +006, +010(km)の4点とした。地盤モデルは表2に示す2層の平行成層地盤を基本としたが、モデルS31では基盤層(表2の2層目)のみの半無限一様地盤とした。S34では表3に示す4層地盤を用いた。

表1 ベンチマークテスト・ステップ3の検討ケース

モデル名	ステップ3 (点震源)			
	S31	S32	S33	S34
地盤	一様地盤	2層地盤		4層地盤
入射角	鉛直	斜め入射		
0値	なし	あり		
震源	点震源			
ラディエーション (SH & SV)	振動数(f)一定		振動数(f)依存	
破壊開始時間	—			
有効振動数	0~20 Hz			
出力点	000, +002, +006, +010 (計4点)			
出力成分	水平2成分	水平・上下3成分		
乱数の設定	各自の乱数3パターン			

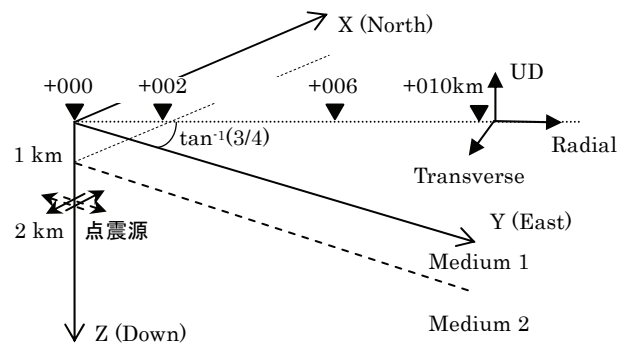


図1 ステップ3の点震源モデルと計算対象の観測点

\*1 小堀鐸二研究所 統括部長 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)  
 \*2 工学院大学建築学部まちづくり学科 教授  
 \*3 東北大学 准教授  
 \*4 大林組技術研究所 主任技師  
 \*5 小堀鐸二研究所 課長  
 \*6 大成建設技術センター

\*1 General Manager, Kobori Research Complex, Inc.  
 \*2 Prof., Kogakuin University, School of Arch., Dep. of Urban Design and Planning  
 \*3 Assoc. Prof., Tohoku University  
 \*4 Chief Engineer, Obayashi Corporation Technical Research Institute  
 \*5 Manager, Kobori Research Complex, Inc.  
 \*6 Technology Center, Taisei Corporation

表 2 地盤の物性値(モデル S32, S33, S41~S44)

	層厚 D (m)	P波速度 Vp (m/s)	S波速度 Vs (m/s)	質量密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Q値	
					Qp	Qs
1層目	1000	4000	2000	2600	40f <sup>1.0</sup>	40f <sup>1.0</sup>
2層目(半無限)	$\infty$	6000	3464	2700	70f <sup>1.0</sup>	70f <sup>1.0</sup>

表 3 地盤の物性値(モデル S34)

	層厚 D (m)	P波速度 Vp (m/s)	S波速度 Vs (m/s)	質量密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Q値	
					Qp	Qs
1層目	200	1600	400	2000	20f <sup>1.0</sup>	20f <sup>1.0</sup>
2層目	400	2600	1000	2400	30f <sup>1.0</sup>	30f <sup>1.0</sup>
3層目	1000	4000	2000	2600	40f <sup>1.0</sup>	40f <sup>1.0</sup>
4層目(半無限)	$\infty$	6000	3464	2700	70f <sup>1.0</sup>	70f <sup>1.0</sup>

計算点の加速度フーリエスペクトル  $A(\omega)$  は、既報<sup>2)</sup>のステップ 1, 2 と同様に Boore(1983)<sup>4)</sup>に従い下式で評価した。

$$A(\omega) = S(\omega) \cdot Z(\omega) \quad (1)$$

$$S(\omega) = \frac{F_s \cdot R_k^s \cdot P_{RTTN}}{4\pi\rho V_s^3} \{\omega^2 \dot{M}(\omega)\} \quad (2)$$

$$Z(\omega) = \frac{1}{r} \exp\left(-\frac{\omega \cdot r}{2V_s Q_s}\right) \quad (3)$$

$S(\omega)$  は震源項、 $Z(\omega)$  は伝播経路による減衰項である。また  $\omega$  は円振動数、 $r$  は震源距離、 $\rho$  は密度、 $Q_s$  は伝播経路の S 波の Q 値である。 $F_s$  は観測点の地盤増幅係数、 $P_{RTTN}$  は波動エネルギーを水平 2 成分に分割するための係数、 $R_k^s$  は S 波の放射特性係数である。モデル S31 と S32 は振動数一定の  $R_k^s = 0.63$ <sup>4)</sup>を SH 波と SV 波に共通に与えた。S33 と S34 は Pitarka *et al.*(2000)<sup>5)</sup>による振動数依存の  $R_k^s$  を用いた。具体的には震源から計算点直下の地震基盤を結ぶ波線方向に対し、0~1Hz は SH 波と SV 波の理論値の  $R_k^s$  を、3Hz 以上は射出角方向に  $\pm 30$  度、方位角方向に  $\pm 60$  度の範囲の  $R_k^s$  を平滑化した値を、1~3Hz は理論値の  $R_k^s$  から平滑化した  $R_k^s$  への遷移帯域とした。

$\dot{M}(\omega)$  は Moment Rate 関数で、振幅スペクトルは下式で表示される ( $f$  は振動数、 $\omega = 2\pi f$ )。

$$|\omega^2 \dot{M}(f)| = \frac{\omega^2 M_0}{1 + (f/f_c)^2} P(f, f_{\max}) \quad (4)$$

(4)式の地震モーメント  $M_0$  とコーナー振動数  $f_c$  は、実際の地震の平均的な値を与えることとした。ステップ 3 はステップ 1 と同一の  $M_0 = 10^{18}$  Nm を与え、 $M_0$  と断層面積  $S$  の関係式(Somerville *et al.*, 1999<sup>6)</sup>、 $M_0 < 7.5 \times 10^{18}$  Nm の場合)から  $S$  を求め、 $S$  に対する等価半径  $R$  と  $M_0$  から Eshelby (1957)<sup>7)</sup> の式を用いて応力降下量  $\Delta\sigma$ 、更には Brune(1970)<sup>8)</sup>の式から  $M_0$  と震源層のせん断波速度  $V_s$  を用いてコーナー振動数  $f_c$  を与えた。以上の式から、 $S \approx 107.5$  km<sup>2</sup>、 $R \approx 5.74$  km<sup>2</sup>、 $\Delta\sigma \approx 2.31$  MPa、 $V_s = 3.464$  km/s より、 $f_c \approx 0.224$  Hz を得る。但し、ここでは  $f_c = 0.2$  Hz として以後の計算に用いた。なお、断層パラメータの設定に用いた式は既報<sup>2)</sup>に詳述されている。(4)式の  $P(f, f_{\max})$  は  $f_{\max}$  によって高振動数成分の振幅を減少させるためのフィルター関数であり、下式が与えられている。ここで、 $f_{\max} = 6$ Hz、 $n$  は Boore(1983)<sup>4)</sup>に従い 4 とした。

$$P(f, f_{\max}) = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_{\max})^{2n}}} \quad (5)$$

時刻歴波形の経時特性関数は Boore(1983)<sup>4)</sup>の  $w(t)$  を基本とし、(6)

式で与える。ここで  $t$  は時間、 $H(t)$  は unit-step 関数 (Heaviside-step 関数) を、 $a, b, c$  はそれぞれ(7)式のとおりである。

$$w(t) = at^b e^{-ct} H(t) \quad (6)$$

$$a = \left(\frac{5e}{T_w}\right)^b, \quad b = \frac{-\varepsilon \ln \eta}{1 + \varepsilon(\ln \varepsilon - 1)} \approx 1.25315, \quad c = \frac{b}{\varepsilon T_w} \approx \frac{6.2657}{T_w} \quad (7)$$

$e$  は自然対数の底(2.718...),  $T_w$  は震源継続時間  $T_d$  ( $T_d = 1/f_c$ ) を用いて  $T_w = 2 T_d$  と表わされる。本モデルでは  $f_c = 0.2$  Hz より、 $T_w = 10$  s を用いる。また Boore(1983)<sup>4)</sup>に従い、(7)式右辺の数字は  $\varepsilon = 0.2$ ,  $\eta = 0.05$  の場合の値である。乱数位相の設定は(6)式の経時特性を満足し、有効周波数の帯域で(2)式の震源スペクトル振幅に最もよくフィットするものから 3 ケース選択する条件とした。SH 波と SV 波は異なる乱数位相を用いた。有効振動数は 0~20Hz の帯域とした。以上の条件のもと、時刻刻み 0.01 秒の水平、上下成分の加速度時刻歴波形を 20.48 秒計算した。

## 2.2 計算結果の相互比較

モデル S31 は既報<sup>2)</sup>のモデル S11 と解析条件がほぼ同一であるため掲載を割愛した。モデル S32 の点震源直上の点+000 について、各参加者による 3 つの異なる乱数位相を用いた結果の擬似速度応答スペクトルを図 2 に示す。モデル S32 は振動数一定の  $R_k^s (=0.63)$ を SH 波と SV 波に共通に用いている。しかも点+000 は点震源直上のため、地盤増幅率は SH 波と SV 波で同一である。従って図 2 に見られるスペクトル振幅の差異は、乱数位相による影響と考えられる。既報<sup>2)</sup>でも指摘したが、統計的グリーン関数法をサイト波評価に適用するには、複数の乱数位相に基づいて地震動を評価し、平均的な応答スペクトル振幅を与える乱数を選択するなどの検討が望まれる。

モデル S33 の点+000 の擬似速度応答スペクトルを図 3 に示す。S32 との相違は振動数依存の震源の放射係数  $R_k^s$  を考慮する条件が加わったことである。横ずれ断層を設定しているため、点震源直上の点+000 の振幅は理論上ゼロとなる。図 2(b)と比べて周期約 0.3 秒以降のスペクトル振幅が小さくなるのは、振動数依存の  $R_k^s$  の影響である。0.3 秒以下のスペクトル振幅も小さくなるのは、平滑化した  $R_k^s$  の値が約 0.3 となり、S32 で用いた 0.63 より小さいためである。

以上は点震源と計算点の幾何学的関係から鉛直入射となる点+000 の結果を示した。本ベンチマークテストでは、既報<sup>2)</sup>に比べて新たに SH 波と SV 波の基盤からの斜め入射を考慮した場合を設定した。モデル S33 では振動数依存の  $R_k^s$  に加え、斜め入射による地盤増幅も計算条件となる。そこで各条件の事前確認が必要と考え、最終結果の比較に先立って、震源の放射係数  $R_k^s$  と地盤増幅率を出力した。最も入射角が大きくなる点+010(震央距離 10km)を例にとり、各参加者による SH 波と SV 波の  $R_k^s$  を図 4(a)に示す。0~1Hz は  $R_k^s$  の理論値、1~3Hz は遷移帯域、3Hz 以上は平滑化後の帯域である。3Hz 以上で SH 波の  $R_k^s$  が卓越するなど、振動数依存性も含めて参加者間の結果は良く一致している。基盤からの SH 波および SV 波の水平・上下動の地盤増幅率を図 4(b)に示す。点+010 は S 波の入射角が 84° となり、SV 波の臨界角(35°)を超える複雑な計算となるが、参加者間の結果は一致している。3 つの異なる乱数位相を用いた場合について、各参加者による EW 方向と UD 方向の加速度波形を図 5 に示す。図の

零秒は発震時に対応しており、(2)式の震源項のスペクトルに最も良くフィットする波形から順番に番号(1~3)をつけている。S波の立ち上がり時間や、加速度振幅の包絡形など、各参加者の加速度波形は概ね一致している。擬似速度応答スペクトルを図6に示す。応答ス

ペクトルの振幅にやや違いが見られるが、震源からの放射係数 $R_k^s$ と地盤増幅率が参加者間で一致することから、この振幅の相違は乱数位相の影響と思われる。

モデル S33 に対し、S34 では地盤モデルを2層から4層に変更し、

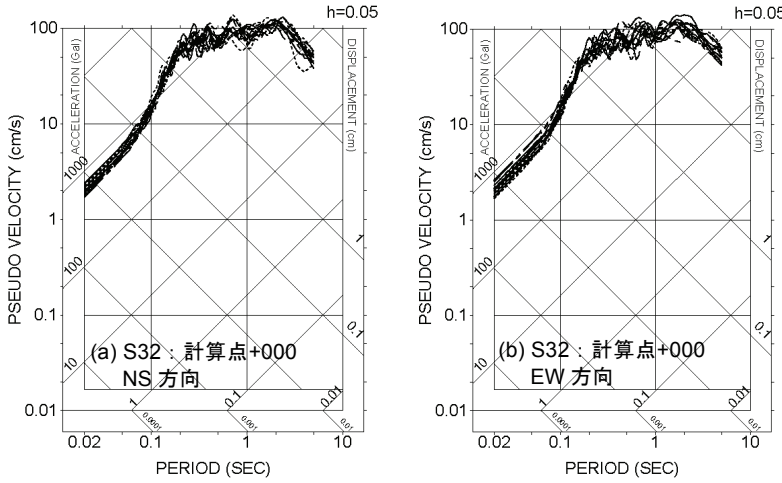


図2 ステップ3・モデル S32 の擬似速度応答スペクトル：計算点+000

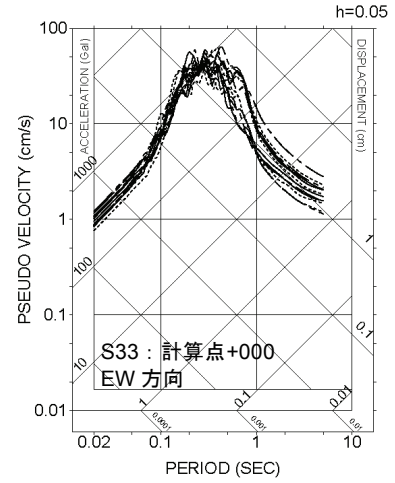


図3 モデル S33 の擬似速度応答スペクトル

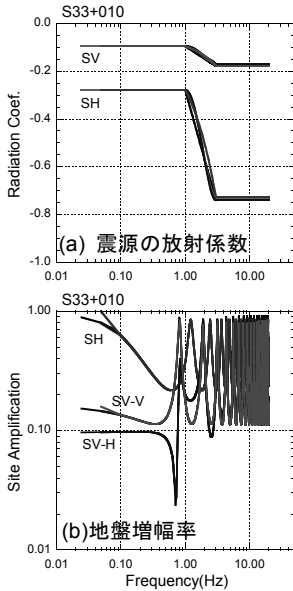


図4 放射係数、地盤増幅率の比較 (モデル S33 : 計算点+010)

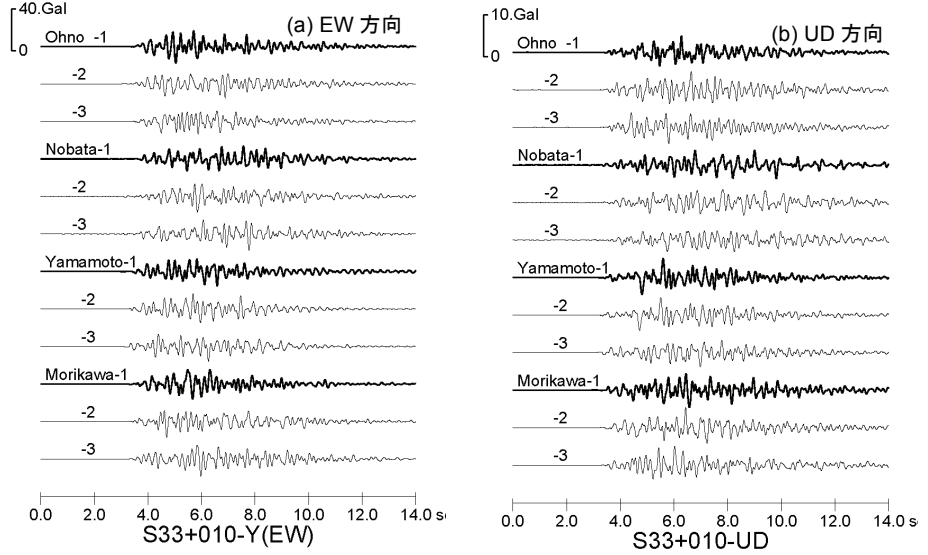


図5 ステップ3・モデル S33 の加速度波形の比較：計算点+010

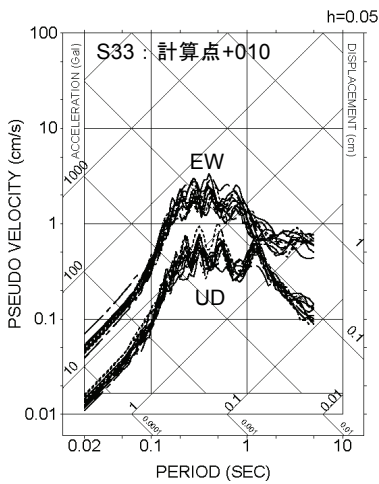


図6 モデル S33 の擬似速度応答スペクトル

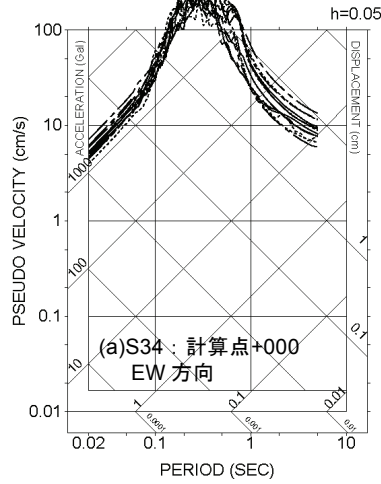
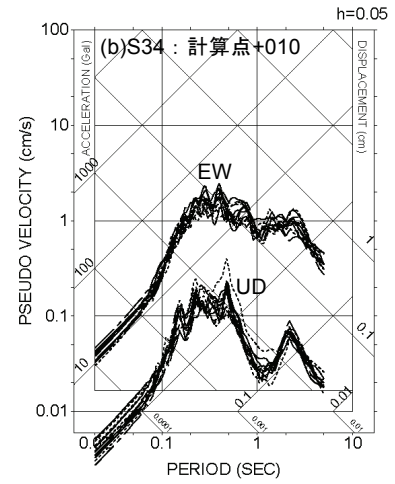


図7 モデル S34 の擬似速度応答スペクトル



条件を更に複雑にした。計算点+000のEW成分を例にとり、擬似速度応答スペクトルを図7(a)に示す。図3に示したS33の点+000と比較すると、参加者間のスペクトル振幅が2倍以上大きくなっている。モデルS34は4層地盤としたため、幾何減衰を考慮する地震基盤までの距離が0.4kmとなり、モデルS33の距離(1.0km)と比べて1/2.5と短いことがスペクトル振幅の差異の要因である。点+010のEW、UD成分の結果を図7(b)に示す。図6に示したS33の計算点+010と比較すると、上下方向のスペクトル振幅が小さくなるなど、参加者間で共通の傾向が認められる。以上、ステップ3では様々な計算条件を設定したが、上下動も含めて参加者間の計算結果は概ね一致した。ただし、乱數位相の使用によるばらつきが常に存在している。

### 3. ステップ4(面震源)のベンチマークテスト

#### 3.1 計算手法と計算条件

ステップ4は表4に示す4通りのテストを実施した。S44は各自の独自手法による検討であり、久田が平行成層地盤の厳密なグリーン関数<sup>3)</sup>を用いて参加した。モデルS41, 42, 44の断層面と計算対象地点を図8に示す。断層面は鉛直右横ずれとし、基準点(0, 0, 2000)、断層長さ8000m、断層幅4000m、断層すべり量1m、走向・傾斜角・すべり角はそれぞれ(90°, 90°, 180°)に設定した。破壊は(0, 1000, 4000)から一定の速度( $V_r=3000$  m/s)で同心円状に伝播し、破壊開始位置は各小断層の中心に置く条件としている。小断層のサイズは $1 \times 1$  km<sup>2</sup>とした。計算点は自由表面上のベクトル(x, y, z)=(6, 8, 0)に沿う+000, ±002, ±006, ±010(km)の7点とした。

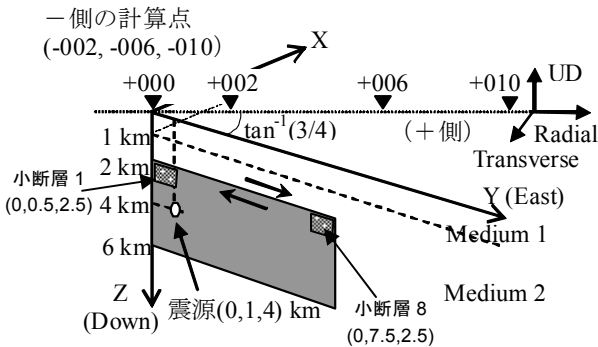


図8 ステップ4の鉛直横ずれ断層面と計算対象の観測点 (モデルS41, S42, S44)

ステップ4では $M_0=1.04 \times 10^{18}$  Nmと設定しており、断層の等価半径とEshelby(1957)<sup>7)</sup>の式より $\Delta\sigma=13.95$  MPaとなる。ライズタイム $\tau$ は強震動予測レシピ(地震調査研究推進本部、2009)<sup>9)</sup>を参考とし、断層幅 $W$ を破壊伝播速度 $V_r$ で除した値の半分( $\tau=W/2V_r=0.67$  s)とした。波形合成はIrikura(1986)<sup>10)</sup>、および、それを修正した横井・入倉(1991)<sup>11)</sup>に基づいて行う。横井・入倉(1991)<sup>11)</sup>による方法では、大地震と小地震の応力降下量の比が1の場合、断層全体の地震動 $U(t)$ は、小断層の地震動 $u_{ij}(t)$ を用いて次式で表される。

$$U(t) = \sum_i \sum_j^{N_L} u_{ij}(t-t_{ij}) + \sum_i \sum_j^{N_L} \sum_k^{(N_D-1)n'} \frac{1}{n'} u_{ij} \left\{ t-t_{ij} - \frac{(k-1)\tau}{(N_D-1)n'} \right\} \quad (8)$$

$$t_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_S} + \frac{\eta_{ij}}{V_r} \quad (9)$$

ここで、 $t$ は時間、 $t_{ij}$ は断層の破壊開始時刻から小断層の波が計算点に到達するまでの時間、 $\tau$ はライズタイム、 $N_L \cdot N_W \cdot N_D$ はそれぞ

れ断層の長さ方向・幅方向・すべり方向の分割数、 $r_{ij}$ は小断層から波形計算地点までの距離、 $\eta_{ij}$ は断層の破壊開始点から小断層までの距離、 $V_S$ はS波速度、 $V_r$ は断層の破壊伝播速度を表す。 $n'$ はすべり方向の重ね合わせの際に生じる人為的な周期性を、有効周波数外の高周波数側に移動させる再分割数である。

表4 ベンチマークテスト・ステップ4の検討ケース

モデル名	ステップ4(面震源)			
	S41	S42	S43	S44
地盤	2層地盤			
入射角	斜め入射			
Q値	あり			
震源	横ずれ断層	逆断層	横ずれ断層	
ラティーン( SH & SV )	振動数(f)依存			任意
破壊開始時間	一定	ランダム	一定	
有効振動数	0~20 Hz			
出力点	000, ±002, ±006, ±010 (計7点)			
出力成分	水平・上下3成分			
乱数の設定	各自の乱数3パターン			

注\*) S44はオプションケースで自由参加。

小断層の地震モーメント $M_0$ は $5.40 \times 10^{15}$  Nmであり、応力降下量は大地震と同じ値( $\Delta\sigma=13.95$  MPa)とする。この場合、小断層の断層すべり量は約0.167 m、 $f_c=2.33$  Hzから小断層の震源の継続時間 $T_w$ は0.86 sとなる。 $N_D$ はすべり量の比(1 m/0.167 m)から $N_D=6$ を用いる。小断層のサイズ( $1 \times 1$  km<sup>2</sup>)より、 $N_L=8$ 、 $N_W=4$ とした。以上の設定は既報<sup>2)</sup>と同一である。実際の計算に際しては、小断層を点震源と見なした小地震を設定した。各小地震から $P_{RTTN}=1$ としてSH波とSV波を生成させ、それをX(NS)、Y(EW)の水平2成分に方位変換した結果と、SV波の斜め入射から励起される上下動を提出波形とした。その際、(2)式の放射係数 $R_k^s$ は2節で述べた振動数依存とし、小地震ごとにSH波とSV波の $R_k^s$ を変化させた。地盤条件は表2に示す2層地盤を用い、SH波とSV波の斜め入射を考慮して各小断層からの地盤増幅率を評価した。

乱數位相の設定はステップ3と同様に、小地震の震源スペクトルに最もよくフィットする3ケースを選択し、各々の乱數位相を断層面全体について共通に用いた。SH波とSV波は異なる乱數位相を用いた。有効振動数は0~20Hzの帯域とした。以上の条件のもと、時間刻み0.01秒の3方向の加速度時刻歴波形を20.48秒計算した。

#### 3.2 計算結果の相互比較

小地震の破壊開始時間を一定としたS41モデルについて、破壊伝播方向の+010(震央距離10km)を例に取り結果を以下に示す。ここで設定したモデルは、小地震から計算点に到る波線に沿って入射角が変動するため、 $8 \times 4=32$ の小地震ごとにSH波とSV波の斜め入射を考慮した地盤増幅率の計算を行っている。また、小地震から計算点への射出角と方位角も変動するため、32の小地震ごとにSH波とSV波の震源からの放射係数も振動数に依存させて変えた計算を行っている。以上のように設定条件が複雑なため、各条件の事前確認が必要と考え、震源の放射係数と地盤増幅率を前もって出力して確認した。図8に示す断層左端最浅部の小断層1と断層右端最浅部の小断層8を例にとり、各参加者による放射係数、地盤増幅率を比較した

結果を図9～図10に示す。小断層1と8では点+010に対する放射係数が符号も含めて大きく異なるが、参加者間の結果は一致している。地盤増幅率の結果も参加者間で整合するのを確認できた。3つの異なる乱数位相を用いた場合について、各参加者によるEW方向とUD方向の加速度波形を図11に示す。計算点+010は破壊進行方向に位置するため、継続時間が2秒程度の短い波形となっており、S波の立ち上がり時間や包絡形は概ね一致している。擬似速度応答スペクトルを図12に示す。周期約2秒の卓越が共通に見られるなど、参加者間の計算結果は対応しているが、EW成分の0.5～1秒付近など、ばらつきが大きい周期帯もある。

小地震における破壊開始時間の周期性を避けるため、モデルS42では小地震の破壊開始時間にランダムな変化を導入した。破壊開始時間のゆらぎは人工的な卓越周期を回避することを確認したが、この結果は既報<sup>2)</sup>で議論しているため掲載を割愛する。

モデルS44は横ずれ断層を対象としたオプションケースであり、久田が参加した。震源スペクトルは(2)式のBoore(1983)<sup>4)</sup>を用いるが、グリーン関数は波数積分法を用いて理論的に計算するのが特徴であ

る<sup>3)</sup>。震源スペクトルのフーリエ位相は1Hz以下で零位相、1～3Hzは遷移帯域、3Hz以上はランダム位相を与えている。なお、3Hz以上の放射係数はSH波とSV波とも $R_x^2=0.63$ としており、短周期側の計算条件は異なっている。点+010のEW方向とUD方向の擬似速度応答スペクトルと加速度波形を図13に示す。1秒以上は図12のモデルS41と解析条件が同一である。その帯域でスペクトル振幅を比較すると、2秒周辺が卓越するなどの共通点が見られる。しかしながら、S44の3秒以上の上下動スペクトルはS41に比べて大きくなり、図13(c)の上下動波形の後半にも周期の長い波動が見られる。S44は厳密なグリーン関数を用いているため、長周期側の相違は浅い震源による表面波の影響と考えられ、震央距離が長くなると両者の差がより顕著になると考えられる。この点は浅い震源に統計的グリーン関数法を適用する場合の限界であり、理論的なグリーン関数を長周期側で用いるハイブリッド法の適用が望まれる<sup>1)</sup>。

S43は図14に示す逆断層を対象とした。この断層モデルはDay et al.(2003)<sup>12)</sup>を踏襲しており、断層面の4隅(①～④)を図14のように与えた。断層長さを6000m、断層幅を6000m、断層すべり量を1m

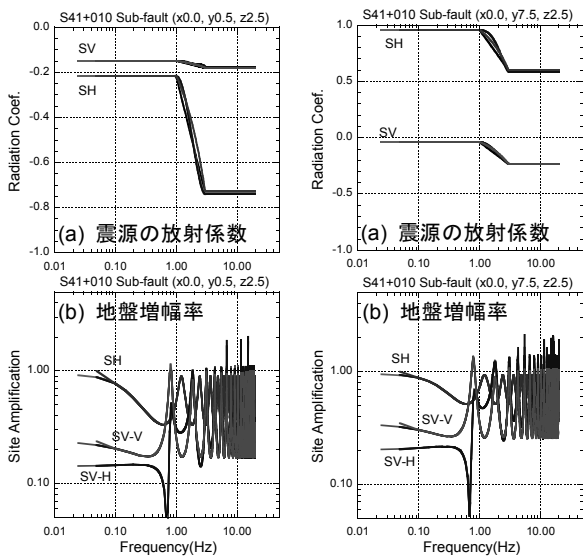


図9 小断層1からの値 (モデルS41: 計算点+010) 図10 小断層8からの値 (モデルS41: 計算点+010)

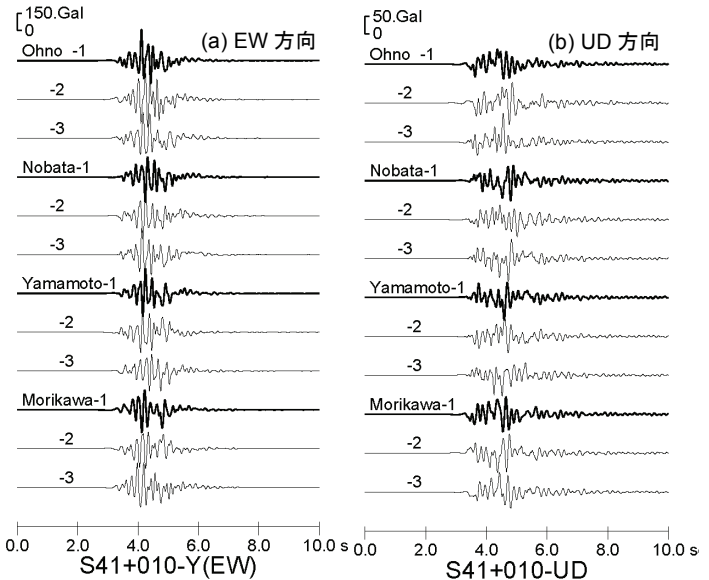


図11 ステップ4・モデルS41の加速度波形の比較: 計算点+010

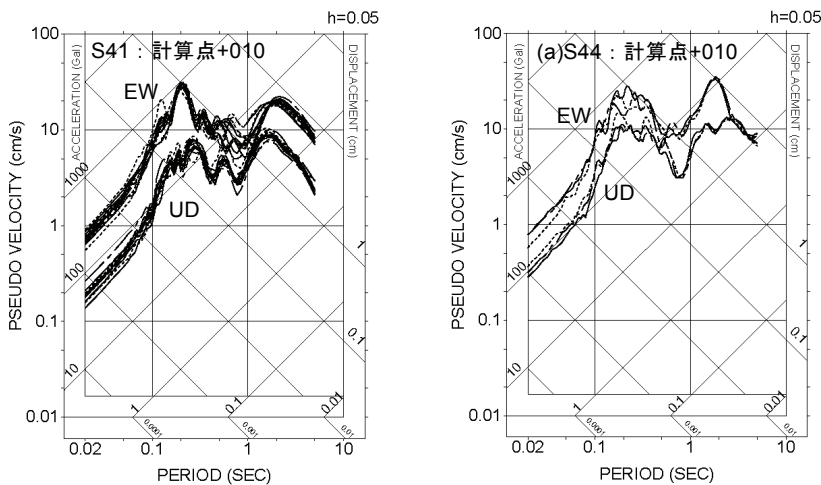


図12 モデルS41の擬似速度応答スペクトル

図13 モデルS44の擬似速度応答スペクトルと加速度波形

とし、走向・傾斜角・すべり角はそれぞれ(115°, 40°, 70°)に設定した。破壊は(0, 0, 6000)から一定の速度( $V_r=3000$  m/s)で同心円状に伝播し、破壊開始位置は各小断層の中心に置く条件とした。 $M_0 \approx 1.17 \times 10^{18}$  Nmと設定したため、 $\Delta\sigma \approx 13.15$  MPaとなる。小断層の地震モーメント  $M_0$  は  $5.40 \times 10^{15}$  Nm であり、応力降下量は大地震と同じ値( $\Delta\sigma=13.15$  MPa)とする。この場合、小断層の断層すべり量は約 0.167 m、 $f_c \approx 2.28$  Hz から小断層の震源の継続時間  $T_w$  は 0.88 s となる。 $N_D$  はすべり量の比 (1 m / 0.167 m) から  $N_D=6$  を用いる。小断層のサイズ(1×1 km<sup>2</sup>)より、 $N_L=6$ 、 $N_W=6$  とした。ライズタイム  $\tau$  は地震調査研究推進本部(2009)<sup>9)</sup>を参考とし、断層幅  $W$  を破壊伝播速度  $V_r$  で除した値の半分( $\tau = W/2V_r=1.0$  s)とした。

震源直上の計算点+000を例にとり、EW方向とUD方向の擬似速度応答スペクトルを図15に示す。参加者間の結果は上下動の対応は良いものの、水平動の長周期側においてばらつきがみられ、乱数位相の影響がより顕著になっている。SH波とSV波の放射係数の符号は理論的な値を用いて統一しているが、小地震の時刻歴波形の正負は乱数位相の影響により変化する。従ってSH波とSV波の時刻歴波形の符号により、方位変換後のNS方向とEW方向の振幅は異なり、長周期側のばらつきの原因となっている。なお、SH波とSV波の最大値の符号を強制的に統一させると、このばらつきは減少することを確認している。

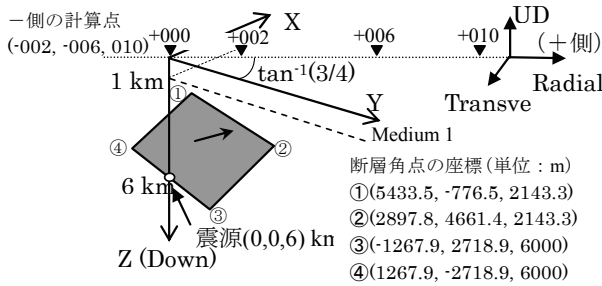


図14 ステップ4・S43の断層面と計算対象の観測点

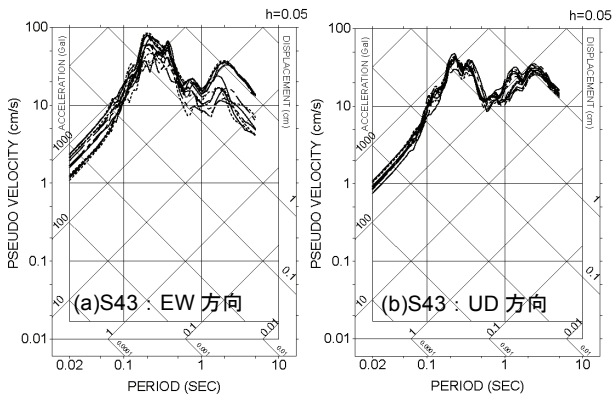


図15 S43の計算点+000の擬似速度応答スペクトル

#### 4. まとめ

点震源および面震源を対象とし、振動数依存の震源の放射係数や斜め入射による地盤増幅率の考慮など、既報<sup>2)</sup>に比べてより複雑な条件でベンチマークテストを実施した。各条件の事前確認が必要と考え、震源の放射係数と地盤増幅率を出力したところ、参加者間の結果は良く対応した。一方、応答スペクトルの計算結果は概ね一致したが、やや違いが見られる周期帯もあり、乱数位相の影響と思われる。

統計的グリーン関数法をサイト波評価に適用する際は、複数の乱数位相に基づいて地震動を評価し、平均的な応答スペクトル振幅を与える乱数を選択するなど、手法としての制約も理解した上で用いることが重要である。なお、本研究の全ての結果は下記ホームページに公開されている。ベンチマークテストは理論的手法と数値解析手法についても実施されている<sup>13,14)</sup>。

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

#### 謝辞

本プロジェクトは文部科学省・科学研究費・基盤研究(B)「設計用入力地震動作成のための強震動予測手法の適用と検証」(代表:久田嘉章、平成21-23年度)の研究助成で行われ、日本建築学会地盤震動小委員会(元主査:加藤研一、現主査:久田嘉章)、および工学院大学・総合研究所・都市防災研究センターとの連携のもとに行われました。課題の設定や結果のまとめ方に際して永野正行・吉村智昭・青井真・早川崇・川辺秀憲氏にご協力いただきました。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会: 最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法, 2009.
- 2) 加藤研一・久田嘉章・川辺秀憲・大野晋・野津厚・野畑有秀・森川淳・山本優: 強震動予測手法に関するベンチマークテスト: 統計的グリーン関数法の場合(その1)、日本建築学会技術報告集, 第17巻、第35号、49-54, 2011.
- 3) Hisada, Y.: Broadband strong motion simulation in layered half-space using stochastic Green's function technique, *Journal of Seismology*, **12**, No.2, 265-279, 2008.
- 4) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of Seismological Society of America*, **73**, 1865-1894, 1983.
- 5) Pitarka, A., P. Somerville, Y. Fukushima, T. Uetake and K. Irikura: Simulation of near-fault strong-ground motion using hybrid Green's functions, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **90**, 566-586, 2000.
- 6) Somerville, P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, **70**, 59-80, 1999.
- 7) Eshelby, J. D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proceedings of the Royal Society*, A241, 376-396, 1957.
- 8) Brune, J.N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, *J. Geophys. Res.*, **75**, 4997-5009, 1970.
- 9) 地震調査研究推進本部・地震調査委員会: 付録 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), 2008. [http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hyoka.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka.htm)
- 10) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, 151-156, 1986.
- 11) 横井俊明・入倉孝次郎: 震源スペクトルのScaling則と経験的グリーン関数, *地震*, **44**, 109-122, 1991.
- 12) Day, S. M., J. Bielak, D. Dreger, S. Larsen, R. Graves, A. Pitarka, K. B. Olsen: Tests of 3D Elastodynamic Codes, *Final Report to Pacific Earthquake Engineering Research Center, Lifelines Program TASK 1A02*, 1-32, 2003. [http://www-rohan.sdsu.edu/~steveday/BASINS/Final\\_Report\\_1A02.pdf](http://www-rohan.sdsu.edu/~steveday/BASINS/Final_Report_1A02.pdf)
- 13) 久田嘉章・永野正行・野津厚・宮腰研: 強震動予測に関するベンチマークテスト—理論的手法の場合(その1)、日本建築学会技術報告集、第17巻、第35号、43-48, 2011.
- 14) 吉村智昭・永野正行・久田嘉章・青井真・早川崇・Seckin Ozgur Citak・松島信一・大西良広: 強震動予測に関するベンチマークテスト—数値解析手法の場合(その1)、日本建築学会技術報告集、第17巻、第35号、67-72, 2011.

[2011年6月\*\*日原稿受理 2011年\*月\*日採用決定]