

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)—

BENCHMARK TESTS FOR STRONG GROUND MOTION PREDICTION METHODS

— Case for stochastic Green's function method (Part 1) —

加藤研一 — *1 久田嘉章 — *2
 川辺秀憲 — *3 大野 晋 — *4
 野津 厚 — *5 野畑有秀 — *6
 森川 淳 — *7 山本 優 — *8

Kenichi KATO — *1 Yoshiaki HISADA — *2
 Hidenori KAWABE — *3 Susumu OHNO — *4
 Atsushi NOZU — *5 Arihide NOBATA — *6
 Atsushi MORIKAWA — *7 Yu YAMAMOTO — *8

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 test for the strong motion simulation methods using stochastic Green's function method. All the results calculated by six teams from different institutions generally show good agreement to each other. Since random numbers are used in generating time histories and so on, 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

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ため、現在、国や自治体による強震動の面的評価や建設地点のサイト波の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や、重ね合わせ法などに関して多様な手法が提案されている^{例え}。そこで本ベンチマークテストでは、計6名の参加者が各々保有する計算コードを用い、同一条件の震源・伝播・地盤モデルに基づいて強震動計算を行った。それらの結果を相互比較し、統計的グリーン関数法を適用する際の留意点を、乱数位相の使用に起因する計算結果の差の観点から整理した。

2. ベンチマークテストの概要

表1に示すステップ1(点震源)とステップ2(面震源)の2段階のベンチマークテストを実施した。震源・地盤モデルは理論的手法、数値解析手法^{2,3)}と同一であり、地盤モデルを表2に示す。地盤モデルは2層の半無限成層地盤を基本としたが、ステップ1のモデルS10、S11では基盤層(表2の2層目)のみの半無限一様地盤とした。地盤減衰は考慮しない場合を基本としたが、ステップ1のモデルS13のみ表2に示す振動数依存のQ値を考慮した。

ここで用いる小地震動の作成法はBoore(1983)⁴⁾の点震源モデルを、小地震動の重ね合わせ法はIrikura(1986)⁵⁾、入倉(1994)⁶⁾を、地盤モデルはPEER/SCECプロジェクトのDay他(2000, 2003)^{7,8)}を踏襲し、SH波の遠地項を検討対象とした。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、計算条件は可能な限り詳細に記述した。

表1 ベンチマークテストの検討ケース

ステップ1 (点震源)				
モデル名	S10	S11	S12	S13
地盤	半無限地盤		2層地盤	
Q値	なし		あり	
震源	点震源			
破壊開始時間	—			
有効振動数	1~20 Hz			
出力点	000, +002, +006, +010 (計4点)			
乱数の設定	指定	各自の乱数3パターン		
ステップ2 (面震源)				
モデル名	S21	S22	S23	
地盤	2層地盤			
Q値	なし			
震源	横ずれ断層	逆断層	横ずれ断層	
破壊開始時間	一定		ランダム	
有効振動数	1~20 Hz			
出力点	000, ±002, ±006, ±010 (計7点)			
乱数の設定	各自の乱数3パターン			

表2 地盤の物性値

	層厚 D (m)	P波速度 Vp (m/s)	S波速度 Vs (m/s)	質量密度 ρ (kg/m ³)	Q値	
					Qp	Qs
1層目	1000	4000	2000	2600	40f ^{1.0}	40f ^{1.0}
2層目(半無限)	∞	6000	3464	2700	70f ^{1.0}	70f ^{1.0}

*1Hzで40と70

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⁾ 工学院大学建築学科 教授
³⁾ 京都大学原子炉実験所 助教

⁴⁾ 東北大学 准教授

⁵⁾ 港湾空港技術研究所 地震動研究チームリーダー

⁶⁾ 大林組技術研究所 主任技師

⁷⁾ 小堀鐸二研究所 課長

⁸⁾ 大成建設技術センター

¹⁾ General Manager, Kobori Research Complex, Inc.

²⁾ Prof., Dept. of Architecture, Kogakuin Univ.

³⁾ Assist. Prof., Kyoto Univ. Reactor Research Institute

⁴⁾ Assoc. Prof., Tohoku Univ.

⁵⁾ Head of Engineering Seismology Division, Port and Airport Research Institute

⁶⁾ Chief Engineer, Obayashi Corporation. Technical Research Institute

⁷⁾ Manager, Kobori Research Complex, Inc.

⁸⁾ Technology Center, Taisei Corporation, Ltd.

3. ステップ1(点震源)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1は表1に示す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・すべり角はそれぞれ(0°, 90°, 0°)とする。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。

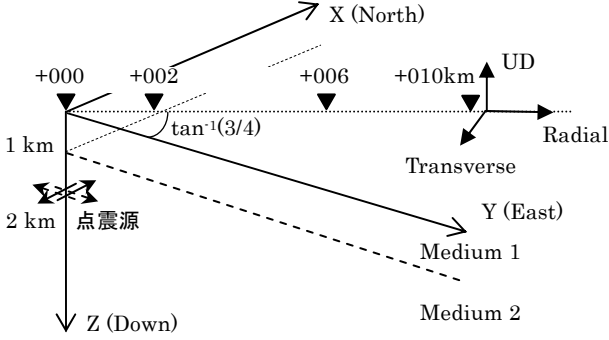


図1 ステップ1の点震源モデルと計算対象の観測点

計算点の加速度フーリエスペクトル $A(\omega)$ は、Boore(1983)⁴⁾に従い下式で評価した。

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

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

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

$S(\omega)$ は震源項、 $Z(\omega)$ は伝播経路による減衰項である。また ω は円振動数、 r は震源距離、 ρ は密度、 Q_s は伝播経路の S 波の Q 値である。 F_s は観測点の条件で決まる係数で、自由表面上にあれば 2.0 となる。 P_{RMTN} は波動エネルギーを水平 2 成分に分割するための係数であり、ステップ1では $1/\sqrt{2}$ を用いた。 R_k^s は S 波の放射特性であり、ここでは単純に S 波の等方な放射係数 $R_k^s = 0.63^4)$ を用いた。また $\dot{M}(\omega)$ 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、 $\omega = 2\pi f$)。

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

高振動数を対象とする場合、位相スペクトルは通常、ランダム値が用いられる。

(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1は $M_0 = 10^{18}$ Nm (= 10^{25} dyne-cm) と設定し、(5)式に示す M_0 (単位: Nm) と断層面積 S (単位: km^2) の関係式 (Somerville *et al.*, 1999¹¹⁾、 $M_0 < 7.5 \times 10^{18}$ Nm の場合) から S を求め、 S に対する等価半径 R (単位: km) と M_0 (単位: Nm) から Eshelby (1957)¹⁰⁾ による(6)式を用いて応力降下量 $\Delta\sigma$ (単位: bar)、更には Brune(1970)⁹⁾ による(7)式から M_0 (単位: dyne-cm) と震源層のせん断波速度 V_s (単位: km/s) を用いてコーナー振動数 f_c を与えた。

$$S = 2.23 \times (M_0 \times 10^7)^{2/3} \times 10^{-15} \quad (5)$$

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{R^3} \times 10^{-14} \quad (6)$$

$$f_c = 4.9 \cdot 10^6 V_s \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3} \quad (7)$$

(7)式の $\Delta\sigma$ の単位は bar である。以上の式から、 $S \approx 107.5 \text{ km}^2$ 、 $R \approx 5.74 \text{ km}$ 、 $\Delta\sigma \approx 2.31 \text{ MPa} = 23.1 \text{ bar}$ 、 $V_s = 3.464 \text{ km/s}$ より、 $f_c \approx 0.224 \text{ Hz}$ を得る。但し、ここでは $f_c = 0.2 \text{ Hz}$ として以後の計算に用いた。

(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、 $f_{\max} = 6 \text{ Hz}$ 、 n は Boore(1983)⁴⁾に従い 4 とした。

$$P(f, f_{\max}) = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_{\max})^{2n}}} \quad (8)$$

時刻歴波形の経時特性関数は Boore(1983)⁴⁾の $w(t)$ を基本とし、(9)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(10)~(12)式で表わされる。

$$w(t) = at^b e^{-ct} H(t) \quad (9)$$

$$a = \left(\frac{5e}{T_w} \right)^b \quad (10)$$

$$b = \frac{-\varepsilon \ln \eta}{1 + \varepsilon (\ln \varepsilon - 1)} \approx 1.25315 \quad (11)$$

$$c = \frac{b}{\varepsilon T_w} \approx \frac{6.2657}{T_w} \quad (12)$$

(10)式の 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 $f_c = 0.2 \text{ Hz}$ より、 $T_w = 10 \text{ s}$ を用いる。また Boore(1983)⁴⁾に従い、(11)式と(12)式の右辺の数字は $\varepsilon = 0.2$ 、 $\eta = 0.05$ の場合の値である。乱数位相の設定は、(9)式の経時特性を満足し、有効周波数の帯域で(2)式の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。有効振動数は 1~20 Hz の帯域とした。以上の条件のもと、時間刻み 0.01 秒の水平 1 成分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

モデル S10 は指定した乱数位相を共通に用いているため、参加者間の計算結果は一致していた。それ以外の検討ケースは乱数位相を各参加者が独立に与えるため、計算結果が完全に一致することはない。ここではモデル S11(半無限地盤、減衰なし)の震央距離 $\Delta = 10 \text{ km}$ を例にとり、各参加者による計算結果の加速度波形を3つの乱数位相について発震時を零秒にとり図2に示す。(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、加速度振幅が大きい時間帯など、各参加者の加速度波形は概ね一致している。Nozu の結果は経時特性関数を表現するために与えた位相情報の制約(野津・他, 2009)¹²⁾により、 S 波立ち上がり以前にも震動が見られる。これらの波形のフーリエスペクトルを図3に示す。図3(a)は振幅スペクトルを振動数ごとに収束計算しているため(Hisada, 2008)¹³⁾、計算結果のフーリエスペクトルは、異なる乱数位相を用いてもターゲットとほぼ一致している。そこで図3(a)を基準と見なし、図3(b)~(f)に重ね書いて示す。図3(b)、(c)も同様の振幅補正を行っており、計算結果はターゲットと概ね一致している。図3(d)~(f)は Boore(1983)⁴⁾の原論文に従い、振幅補正を行っていない。乱数位相ごとにフーリエスペクトルが変動してい

るが、元々の問題設定とした比較対象の帯域(1~20Hz)では、ターゲットを概ね再現している。振幅補正の有無として図 3(a)と(f)を例にとり、振幅補正の影響を擬似速度応答スペクトルの観点から比較した結果を図 4(a), (b)に示す。図 3(a)のように振幅補正によりフーリエスペクトルをターゲットに一致させたとしても、乱数位相を用いる限り応答スペクトルは同一とはならず、周期が長くなるにつれてスペクトル振幅の差が生じることに注意が必要である。サイト波評価への適用に際しては、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 S12, S13 は 2 層地盤による検討である。ステップ 2 でも 2 層地盤を対象としているため、ここでは掲載を割愛する。

4. ステップ 2 (面震源) のベンチマークテスト

4.1 計算手法と計算条件

ステップ 2 は表 1 に示す 3 通りのテストを実施した。モデル S21

は図 5 に示した鉛直右横ずれ断層に対応し、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°) に設定されている。破壊は(0, 1000, 4000)から一定の速度($V_f=3000$ 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 1×1 km² とした。計算点は図 5 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 7 点とした。ステップ 2 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(6)式より $\Delta\sigma=13.95$ MPa、(7)式より $f_c=0.404$ Hz とする。ライズタイム τ は Boore(1983)⁴⁾の震源継続時間 T_w を用い、 $\tau = 2/f_c \approx 5.0$ s とした。地盤条件は表 2 に示す 2 層地盤とし、S 波の鉛直平面波入射を仮定して地盤増幅特性を評価した。

波形合成は Irikura(1986)⁵⁾、および、それを修正した横井・入倉(1991)¹⁴⁾に基づいて行う。横井・入倉(1991)¹⁴⁾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。

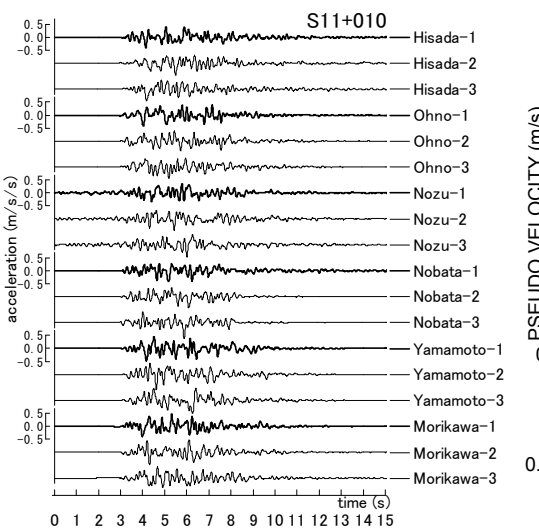


図 2 ステップ 1・モデル S11 の加速度波形の比較
震央距離 $\Delta=10$ km 地点

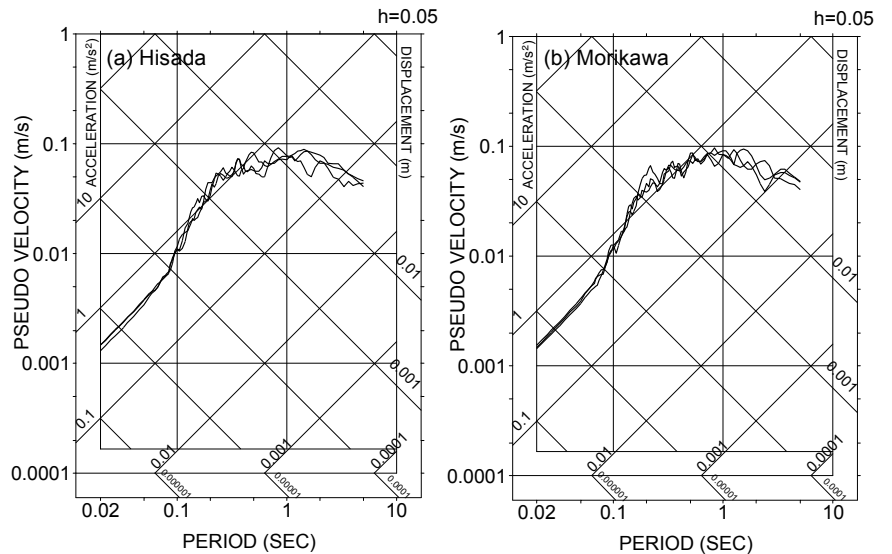


図 4 ステップ 1・モデル S11 の擬似速度応答スペクトルの比較
震央距離 $\Delta=10$ km 地点

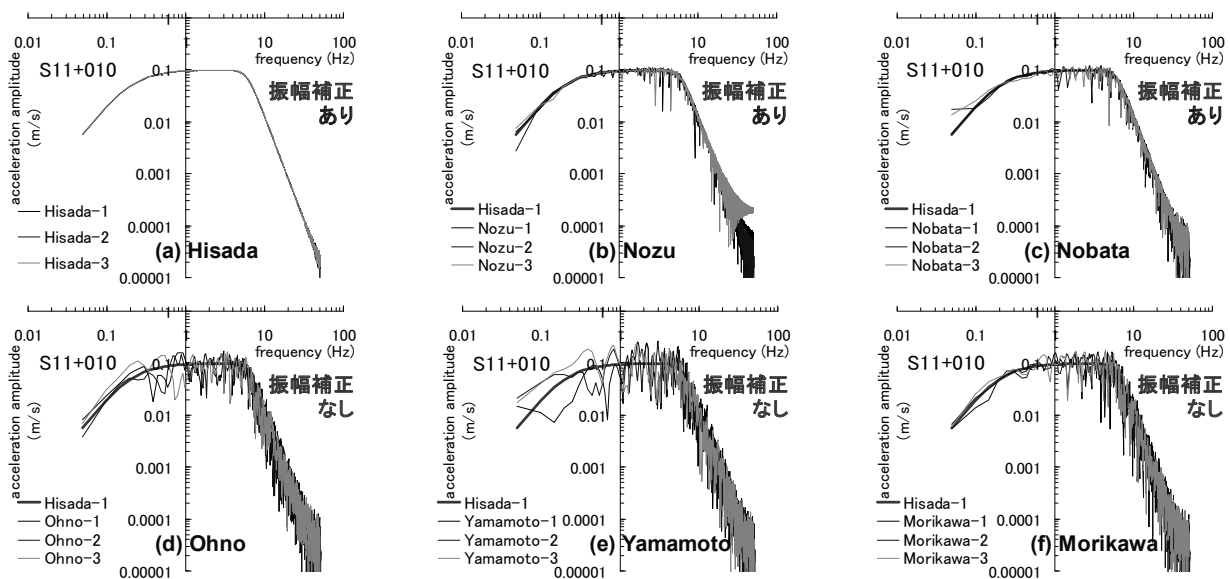


図 3 ステップ 1・モデル S11 の震央距離 $\Delta=10$ km 地点の加速度フーリエスペクトル

$$U(t) = \sum_i \sum_j^{N_L N_W} u_{ij}(t-t_{ij}) + \sum_i \sum_j^{N_L N_W} \sum_k^{(N_D-1)n'} \frac{1}{n'} u_{ij}(t-t_{ij} - \frac{(k-1)\tau}{(N_D-1)n'}) \quad (13)$$

$$t_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_S} + \frac{\eta_{ij}}{V_r} \quad (14)$$

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、 τ 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、 η_{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。また n' は再分割数であり、この n' により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合成が可能となる。入倉(1994)⁶⁾では、 n' は次式の関係式を満足するように設定されている。ここで f_H は有効周波数の上限である。

$$\frac{n'N_D}{\tau} > 2f_H \quad (15)$$

小断層の地震モーメント M_0 は $5.40 \times 10^{15} \text{ Nm}$ であり、応力降下量は大地震と同じ値 ($\Delta\sigma = 13.95 \text{ MPa}$) とする。この場合、小断層の断層すべり量は約 0.167 m 、かつ(7)式より $f_c \approx 2.33 \text{ Hz}$ となる。従って、(9)式に用いる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 ($1 \text{ m} / 0.167 \text{ m}$) から $N_D = 6$ を用いる。小断層のサイズ ($1 \times 1 \text{ km}^2$) より、 $N_L = 8$ 、 $N_W = 4$ とした。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。計算条件を単純化するために、各小地震から $P_{RMTN} = 1$ として SH 波のみを生成させ、それを X(NS)、Y(EW)の水平 2 成分に分解した結果を提出波形とした。その際、(2)式の放射係数 R_i^2 は 0.63 とし、小地震ごとに SH 波を transverse 成分として、X,Y 軸上に sin, cos 成分として分解した。

乱数位相の設定はステップ 1 と同様であり、小地震の震源スペクトルに最もよくフィットするものから 3 ケースを選択し、各々の乱数位相を断層面全体について共通に用いる条件とした。有効振動数は $1 \sim 20 \text{ Hz}$ の帯域とした。以上の条件のもと、時間刻み 0.01 秒 の NS、EW 方向の加速度時刻歴波形を 20.48 秒 計算した。

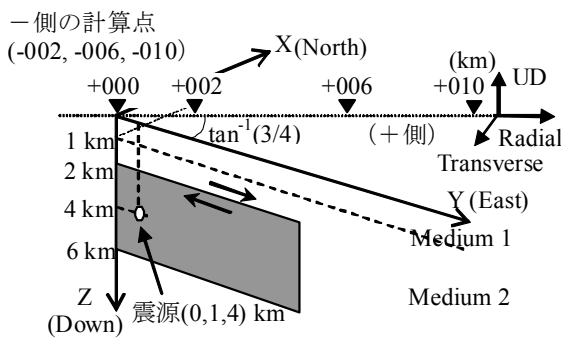


図 5 ステップ 2 の鉛直横ずれ断層面と計算対象の観測点 (モデル S21、S23)

4.2 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 S21 モデルについて、断層破壊が遠ざかる方向の -10km 地点、断層面直上に位置する 0km 地点、破壊伝播方向の +10km を例に取り、NS 方向の加速度波形を震源時を零秒として図 6 に、擬似速度応答スペクトルを図 7 に示す。スペクトルの比較において、計算結果が他と著しく異なる場合はその結

果に凡例を付した。-10km 地点(図 6(a))では継続時間の長い波形となっている。そのスペクトル(図 7(a))を見ると、周期約 0.6 秒の卓越が共通して認められる。これは断層面を長さ方向に離散化したことにより生じた人工的な卓越周期と思われる。この卓越周期は、断層面と観測点の幾何学的な位置関係により、小地震からの波動が規則的な時間差を伴って到達することに起因し、破壊伝播と逆方向にある -10km 地点で最も顕著となっていた。

図 6(b)、図 7(b)に示す 0km 地点では加速度振幅が大きくなると共に、-10km 地点に比べて波形の継続時間が短くなっている。Nozu による結果は小さいが、他の計算結果はほぼ一致している。これは幾何減衰の考え方の相違にあり、Nozu は地表まで、他は地震基盤まで幾何減衰を考慮したことに起因している。

+10km 地点は破壊伝播方向に位置するため、他の 2 地点に比べて継続時間が短い波形となっている。また、周期 1 秒以上のスペクトル振幅はややばらついている。本報は 1 秒以下の短周期帯を対象としており、厳密な検討は今後の課題であるが、破壊伝播方向(+10km)では逆方向(-10km)に比べ、乱数位相の影響が長周期側で顕著になると予想される。なお +10km および -10km は断層面から離れた地点に位置するため、幾何減衰の考え方の違いによる振幅の差は小さくなり、参加者間の計算結果は周期 1 秒以下ではほぼ一致している。

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 S23 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。ここでは入倉(1994)⁶⁾を基本とし、小地震間隔と破壊伝播速度により生じる周期性を防ぐためのランダム数 ε_{ij} を(14)式に導入した下式を用いた。その他の条件はモデル S21 と同一である。

$$t_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_S} + \frac{\eta_{ij}}{V_r} + \varepsilon_{ij} \quad (16)$$

$$pw/V_r > \varepsilon_{ij} > -pw/V_r, \quad 1/2 > p > 0, \quad (w \text{ は断層幅})$$

-10km 地点を例に取り、小地震の破壊開始時間にゆらぎを与えた S23 モデルの加速度波形と擬似速度応答スペクトルを図 8 に示す。破壊開始時間にゆらぎを与えることにより、図 6(a)の加速度波形に見られたほぼ等時間間隔の波群や、図 7(a)の周期約 0.6 秒のスペクトル振幅の卓越は解消されている。ただし、破壊開始時間のゆらぎは 0.6 秒以下の短周期側の振幅にも影響を与え、図 7(a)に比べて計算結果の差が大きくなる周期帯もある。実現象として破壊伝播速度が一定とは考えにくい。破壊開始時間にゆらぎを与えることは、断層の不均質な破壊過程をモデル化したとも言える。従って、図 8(b)の計算結果の差は破壊開始時間のゆらぎによるものであり、参加者間の計算コードの差でないことを付け加えておく。

モデル S22 は逆断層を対象としたが、参加者間の結果の差はモデル S21 と同等であったため、S21 で代表させて報告した。

5. ライズタイムの考察と次のステップにむけて

(13)式のライズタイム τ はすべり関数の継続時間であり、破壊フロントが断層面を移動することによる震源過程の継続時間とは異なる。地震規模が大きくなると、一般にすべり関数の継続時間より震源過程の継続時間の方が長くなる。コーナー振動数 f_c は震源過程の継続時間で決まるため、Boore(1983)⁴⁾の方法により求めたステップ 2 の $\tau = 5 \text{ s}$ はかなり大きな値となっている。今回のベンチマークテスト

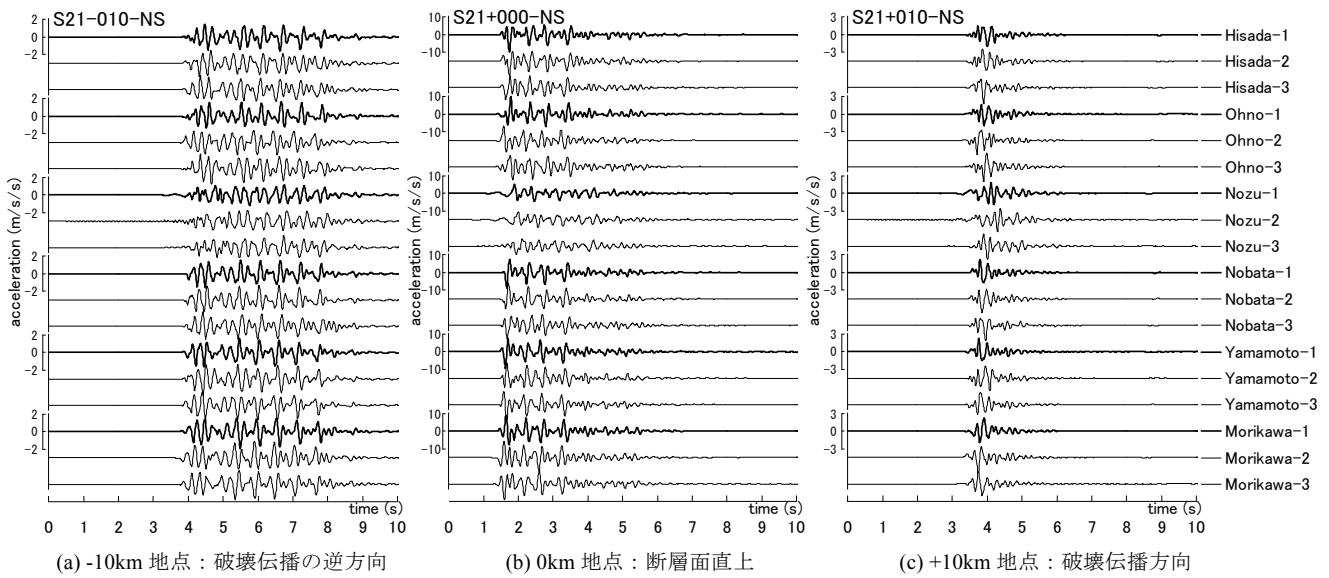


図6 ステップ2・モデル S21 (鉛直横ずれ断層)の加速度波形：NS 方向

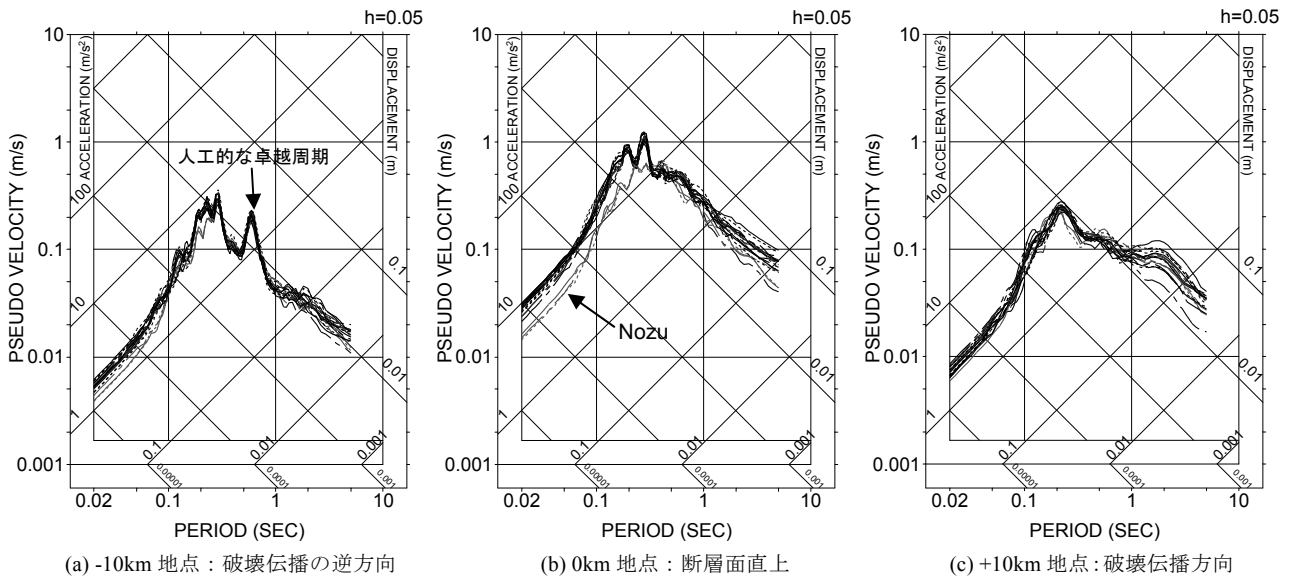


図7 ステップ2・モデル S21 (鉛直横ずれ断層)の擬似速度応答スペクトル(h=5%)：NS 方向

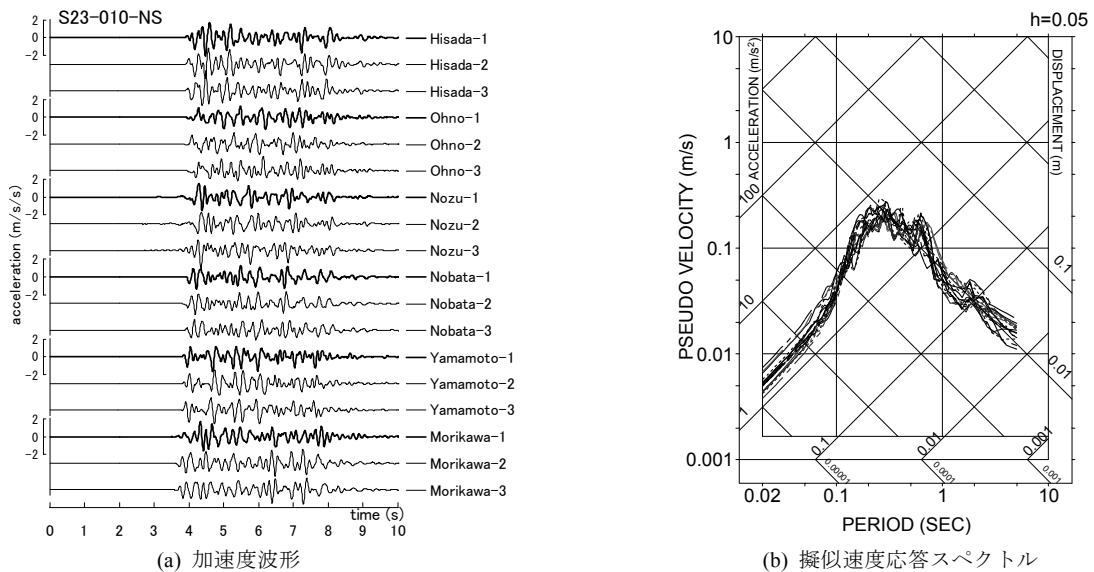


図8 ステップ2・モデル S23 (鉛直横ずれ断層)の加速度波形と擬似速度応答スペクトル(h=5%)：NS 方向の-10km 地点

では小地震の震源継続時間 T_w の評価法と整合させるため、大地震の τ として 5s を用いることとした。鉛直横ずれ断層(モデル S21)の Morikawa の結果を例に取り、震源直上の観測点(0km)の加速度フーリエスペクトルを図 9 に示す。

強震動予測レシピ(地震調査研究推進本部、2008)¹⁵⁾では、アスペリティ(または断層)の幅を破壊伝播速度で除した値の半分 ($W/2V_r$) を τ の値として推奨している。参考までに、 $\tau = W/2V_r = 0.67s$ とした場合のスペクトル振幅も図 9 に示した。 τ を短くしたことにより、1.5Hz($1/\tau$ に対応)以下のスペクトル振幅が大きくなり、 τ はこの周期帯に影響を与える重要なパラメータであることを示している。一方、1.5Hz 以上の高振動数帯域は τ を含まない(13)式の第 1 項が支配的となるため、 τ によらずにほぼ同一の振幅を示している。

波形合成法では中間周期帯のスペクトル振幅が落ち込むことが古くから指摘されている⁹⁾。この原因は 2 つの効果の組み合わせ、①断層の長さ・幅・ τ の有限性に対応する 3 つのコーナー振動数により ω^3 の傾きで振幅が減少し、②さらにすべり方向の重ね合わせに用いる(13)式の第 2 項に起因する $1/\tau$ (Hz)の落ち込み(図中に矢印で示した振動数)と考えられており¹⁶⁾、①の現象は断層の分割数を小さくするほど顕著となる。大きめのアスペリティに対して破壊伝播逆方向で計算を行う場合は、①と②の条件が重なるため、中間周期帯の落ち込みが顕著になるとと思われる。

中間周期帯の落ち込みの解決方法として、入倉・釜江(1993)¹⁷⁾は自己相似な不均質断層モデルを、三宅・他(1999)¹⁸⁾は(13)式の第 2 項を改良した方法を、野津(2004)¹⁶⁾は円形クラックモデルに基づく波形合成法を、引田(2009)¹⁹⁾は矩形クラックモデルの動力学的すべり時間関数を導入することを提案している。

今後は①に関連した断層の分割数の問題や、②の $1/\tau$ の落ち込みの課題を整理することも含め、より複雑な震源や地盤モデルを対象にベンチマークテストを実施予定である。

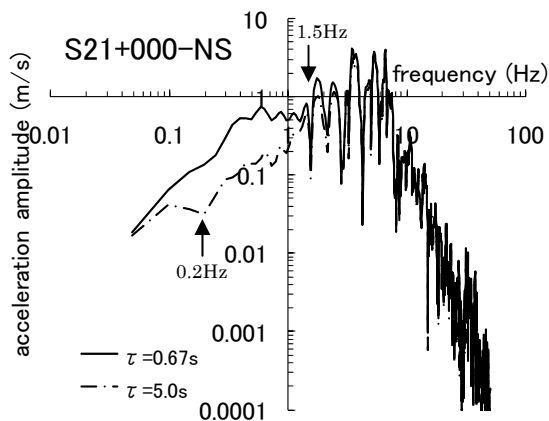


図 9 τ を変化させた場合のフーリエスペクトルの比較

6. まとめ

点震源および面震源を対象とし、計 6 名の参加者による統計的グリーン関数法のベンチマークテストを実施した。各参加者の計算結果は概ね一致したが、小地震動の生成に乱数位相を用いているため、計算結果に差が生じる周期帯もある。上記の手法としての制約も理解した上で、統計的グリーン関数法を適用す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。

<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(工学院大学)、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(主査: 加藤研一(小堀鐸二研究所))、および工学院大学・総合研究所・都市減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・早川崇氏に、計算に際して池田孝、引田智樹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) 久田嘉章・青井 真・加藤研一・川辺秀憲・釜江克宏・上林広敏・境 有紀・早川 崇・永野正行・吉村智昭: 強震動予測手法に関するベンチマークテスト (その 1), 日本地震学会秋季大会, A12-8, 2009.
- 3) 久田嘉章・青井 真・加藤研一・川辺秀憲・釜江克宏・早川 崇・永野正行・吉村智昭: 強震動予測手法に関するベンチマークテスト (その 2), 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 予稿集, Disc2, SCG081-13, 2010.
- 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*, Vol.73, 1865-1894, 1983.
- 5) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, 151-156, 1986.
- 6) 入倉孝次郎: 震源のモデル化と強震動予測, *地震*, 46, 495-512, 1994.
- 7) 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 1A01*, 1-24, 2000. http://www-rohan.sdsu.edu/~steveday/BASINS/Final_Report_1A01.pdf
- 8) 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
- 9) Brune, J.N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, *J. Geophys. Res.*, 75, 4997-5009, 1970.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 野津 厚・長尾 毅・山田 雅行: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—, *土木学会論文集 A*, Vol.65, No.3, 808-813, 2009.
- 13) Hisada, Y.: Broadband strong motion simulation in layered half-space using stochastic Green's function technique, *Journal of Seismology*, Vol.12, No.2, 265-279, 2008.
- 14) 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.
- 15) 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
- 16) 野津厚: 円形クラックモデルの経験的グリーン関数法への適用, *地震* 2, 56, 337-350, 2004.
- 17) 入倉孝次郎・釜江克宏: ω^2 モデルのための震源のモデル化と経験的グリーン関数法による強震動予測, *地震学会講演梗概集*, 2, 87, 1993.
- 18) 三宅弘恵・岩田知孝・入倉孝次郎: 経験的グリーン関数法を用いた 1997 年 3 月 26 日(MJMA6.5)及び 5 月 13 日(MJMA6.3)鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル, *地震* 2, 51, 431-442, 1999.
- 19) 引田智樹: 矩形クラックモデルの動力学的すべり時間関数を組み込んだ統計的グリーン関数法, *日本地震工学会・大会梗概集*, 224-225, 2009.

[2010 年 6 月 17 日原稿受理 2010 年 9 月 1 日採用決定]