要素内の破壊伝播による指向性を考慮した統計的グリーン関数法

INCORPORATING RUPTURE DIRECTIVITY EFFECTS INSIDE SUBFAULTS
IN STOCHASTIC GREEN'S FUNCTION METHOD早川 崇^{*1}, 小穴 温子^{*2}

Takashi HAYAKAWA and Atsuko OANA

The rupture directivity effects inside subfaults on ground motions are not usually considered in the stochastic Green's function method. In this study, we proposed a method which incorporates rupture directivity effects inside subfaults into the stochastic Green's function method. Our method has the advantages in that the decreasing of rupture directivity effects with frequency can be controlled and the arbitrary rupture patterns can be applied. We simulated the strong ground motions at TTRH02 and SMNH01 during the 2000 Tottori -ken Seibu Earthquake by the stochastic Green's functions method with/without our method. Reproduction of the observed records at TTRH02 were improved by our method.

Keywords : rupture directivity effect, stochastic Green's function method, subfault, the 2000 Tottori earthquake

破壊伝播効果, 統計的グリーン関数法, 要素断層, 2000年鳥取県西部地震

1. はじめに

統計的グリーン関数法は要素断層内の破壊伝播による指向性（以後、破壊伝播効果）を表現できない。そのため要素断層間の破壊時間の間隔より短周期では、破壊伝播効果が合成波から抜け落ちてしまう。大地震の要素断層サイズは数 km である場合が多い。例えば要素断層間隔が 3 km、破壊伝播速度を 2.5 km/s とすると、周期 $3/2.5=1.2$ 秒程度以下、言い換えれば 0.8 Hz 強以上で破壊伝播効果が抜け落ちる。一方、震源近傍の観測記録には数 Hz 以下の低振動数において、破壊伝播効果が認められている¹⁾。つまり 1 Hz～数 Hz 程度において、要素断層内の破壊伝播効果が考慮されないために、地震動評価が過大ないしは過小する場合は統計的グリーン関数法には存在する。1 Hz 程度の地震動は建築物の耐震性に強く影響するため²⁾、要素断層内の破壊伝播効果の考慮は工学的に非常に重要である。

上記の最も簡単な解決方法は要素断層を小さくすることである。統計的グリーン関数法で用いる波形合成法には、大地震のコーナー振動数から小地震のコーナー振動数にかけて ω^{-3} の過減衰となる問題がある^{3), 4)}。要素断層を小さくすると小地震のコーナー振動数は高くなり、文献 4 の Fig. 2、Fig. 3 に図示されているように、この過減衰により広い振動数帯域で大地震のスペクトルが過小評価となる。従って、要素断層を小さくすることには限界がある。

要素断層を小さくすることなく、統計的グリーン関数法に要素断層内の破壊伝播効果を導入する手法は既に提案されている^{5), 6)}。いずれも破壊伝播様式はユニラテラルで、一般的な同心円状の破壊様式に対応できない。また、断層破壊や地下構造の不均質性が原因で、破壊伝播効果は高振動数で徐々に減少すると考えられる。既往の手法は高振動数で徐々に破壊伝播効果が弱まる効果を表現することが困難であると考えられる。

本研究ではこれらの課題を解決する、統計的グリーン関数法に要素断層内の破壊伝播効果を反映する手法を提案した。最後に 2000 年鳥取県西部地震の地震動シミュレーションで本手法の有効性を検討する。

2. 手法概要

2. 1 理論

均質な無限体中において、要素断層中の微小要素 dS からの遠地 S 波による地表変位は式(1)、(2)、(3)で表される（文献 7 の式 4.87）。右辺の 2 は自由表面の効果である。

$$\underline{u}_k(x, t) = \frac{2F_k^s}{4\pi\rho\beta^3r} \underline{\dot{d}}(t-t_r-t_b)dS \quad (1)$$

^{*1} 清水建設(株)技術研究所 主任研究員・博士(工学)

^{*2} 清水建設(株)技術研究所 研究員・博士(工学)

Chief Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr.Eng.
Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr.Eng.

$$t_b = r/\beta, \quad t_r = h/V_r \quad (2)$$

$\mathbf{x}$ は評価地点の座標、 t は時間、 F^s はダブルカップル震源による S 波の放射係数、 ρ 、 β 、 μ は各々震源付近の密度、S 波速度、せん断剛性、 $\dot{d}$ はすべり速度関数、 r は微小要素と評価地点間の距離、 h は震源から微小要素間の距離、 V_r は破壊伝播速度である。右下の添え字 k は x, y, z 方向の何れかを表す。Fig. 1 に r と h を示す。

Fig.1 Distance h and r from infinitesimal area(dS) in a subfault whose size is L by W

式(1)のフーリエ変換は式(3)である。

$$u_k(\mathbf{x}, f) = \frac{2F_k^s}{4\pi\rho\beta^3 r} \mu \dot{d}(f) \exp(-i(2\pi f)(t_r + t_b)) dS \quad (3)$$

i は虚数単位で、 f は振動数である。式(3)において、 $u_k(\mathbf{x}, f)$ と $\dot{d}(f)$ はそれぞれ $u_k(\mathbf{x}, t)$ と $\dot{d}(t)$ の t に関するフーリエ変換を表す。式(3)を要素断層で面積分して、式(4)の要素断層のフーリエスペクトルを得る。面積分において要素断層内では震源距離、すべり速度関数、放射係数はそれぞれ一定とみなす。

$$U_k(\mathbf{x}, f) = \frac{2F_k^s}{4\pi\rho\beta^3 r} \mu \dot{d}(f) \int_S \exp(-i(2\pi f)(t_r + t_b)) dS \quad (4)$$

式(4) 右辺に存在する式(5)の項は t_r と t_b の和により破壊伝播が表現された、見かけの震源スペクトルである。

$$\dot{M}_0(\mathbf{x}, f) = \mu \dot{d}(f) \int_S \exp(-i(2\pi f)(t_r + t_b)) dS \quad (5)$$

震源スペクトルは t_b を含まない式(6)である。

$$\dot{M}'_0(f) = \mu \dot{d}(f) \int_S \exp(-i(2\pi f)t_r) dS \quad (6)$$

統計的グリーン関数で要素内の破壊伝播効果を導入するには、要素断層の震源スペクトルを、見かけの震源スペクトルに置換すればよい。すなわち、式(5)の見かけの震源スペクトルを式(6)の震源スペクトルで除したスペクトル比を、統計的グリーン関数と合積すればよい。

式(5)と式(6)を実際に算定すると、要素断層の矩形形状が原因で人工的な鋭いスペクトルの落ち込みが積分項に発生する。この人工的な鋭い落ち込みにより、式(5)と式(6)のスペクトル比には鋭くて

大きい凹凸が発生する。このため、 ω -inverse-squared model⁸⁾ と同様な、最終すべり量と破壊時間にランダムな揺らぎを式(5)と式(6)に付与して人工的な凹凸を低減する。揺らぎを付与した式(5)、式(6)の積分項を式(7)、式(8)に示す。

$$\Omega(\mathbf{x}, f) = \int_S \Delta u \cdot \exp(-i(2\pi f)(t_r + \Delta t_r + t_b)) dS \quad (7)$$

$$\Omega'(f) = \int_S \Delta u \cdot \exp(-i(2\pi f)(t_r + \Delta t_r)) dS \quad (8)$$

Δu は平均最終すべり量に対する揺らぎを付与した最終すべり量の比である。 Δt_r は破壊時間の揺らぎである。補正関数を式(9)で定義する。

$$H(\mathbf{x}, f) = \Omega(\mathbf{x}, f) / \Omega'(f) \quad (9)$$

式(2)の t_r を任意の破壊様式で算定すれば、補正関数は任意の破壊様式で算定可能である。式(7)、式(8)を解析的に求めることは困難であるため、式(10)、式(11)により数値的に積分する。

$$\begin{aligned} \Omega(\mathbf{x}, f) &= LW \cdot \\ &\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \Delta u(\xi_{nm}) \exp(-i(2\pi f)(tr(\xi_{nm}) + \Delta t_r(\xi_{nm}) + t_b(\xi_{nm}))) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\xi_{nm} = (\xi_n, \xi_m) = \left((n-0.5) \cdot \frac{W}{N}, (m-0.5) \cdot \frac{L}{M} \right) \quad (11)$$

L, W は要素断層の長さ、 N, M は長さ方向と幅方向の積分区間数である。 n, m は積分区間の走向と傾斜方向の順番号である。積分精度が確保できるように、積分間隔 $L/N, W/M$ は対象とする最大振動数における波長の $1/6$ より小さく設定した。

2. 2 統計的グリーン関数法との対応

統計的グリーン関数法と式(6)の震源スペクトルの対応を考察する。統計的グリーン関数⁹⁾には具体的なすべり関数のイメージが無いため、すべり速度関数は δ 関数 ($\dot{d}(f)=1$) としてコーナー振動数の対応を考える。

統計的グリーン関数の震源スペクトルは式(12)である。

$$\dot{M}_0^{SGF}(\omega) = \mu \cdot \frac{\dot{d}(f=0)}{\sqrt{1+(f/f_m)^{2s}}} \cdot \frac{S}{1+(f/f_c^{SGF})^2} \quad (12)$$

f_c^{SGF} と f_m はそれぞれコーナー振動数と高周波遮断振動数、 s は遮断特性をコントロールする係数、 S は要素断層の面積である。式(6)と揃えるため、振動数 0 におけるすべり速度関数のスペクトルが最終すべり量と等しい関係を用いた。 f_m はすべり速度関数のコーナー振動数に対応し⁸⁾、さらに δ 関数の場合は f_m が ∞ であるため式(12)の右辺第 2 項は式(6)のすべり速度関数のフーリエスペクトル $\dot{d}(f)$ となる。従って式(12)の右辺第 3 項は (6) 式の右辺の積分項にあたる。 f_c^{SGF} は式(13)で与えられる¹⁰⁾。

$$f_c^{SGF} = 0.373\beta/R \quad (13)$$

R は円形クラックの半径である。文献 10 では具体的な V_r が示さ

れていないが、多くの断層動力学解析結果によると V_r は β の 0.8 ～0.9 倍程度¹¹⁾である。 $V_r=0.85\beta$ とすると式(13)から式(14)が得られる。式(14)から統計的グリーン関数のコーナー振動数は破壊時間 R/V_r の逆数に対応すると考えられる。

$$f_c^{SGF} = \frac{1}{3.15 R/V_r} \quad (14)$$

次に式(6)の震源スペクトルのコーナー振動数を考察する。簡単のため Fig. 2 に示す $-L/2$ から $L/2$ まで破壊するユニラテラルな破壊を用いる。式(15)はユニラテラルな破壊の震源スペクトルである。震源スペクトルは低振動数ではフラット、高振動数では f^{-1} で減衰するスペクトル特性である。およそそのコーナー振動数は $\lambda = \pi/2$ となる振動数で、破壊時間の 2 倍の逆数 $1/(2L/V_r)$ である。破壊様式が異なっても式(6)の積分区間長は破壊時間長さとなるため、式(6)の震源スペクトルのコーナー振動数は破壊時間の逆数に近い値と考えられる。

Fig.2 Uni-lateral rupture

$$\begin{aligned} \dot{M}'_0(f) &= \mu W \int_{-L/2}^{L/2} \exp(-i(2\pi f)(\xi/V_r)) d\xi \\ &= \mu W L \sin(\lambda)/\lambda \\ \lambda &= \frac{(2\pi f)L}{2V_r} \end{aligned} \quad (15)$$

以上から、補正関数に用いる式(6)の震源スペクトルは統計的グリーン関数の震源スペクトルと同様に、要素断層の破壊継続時間に対応したコーナー振動数を有する同様なスペクトル特性と考えられる。

2. 3 最終すべり量と破壊開始時刻の不均質性

ω -inverse-squared model と同じ方法で Δu と Δt_r を算定した。式(16)、式(17)、式(18)に Δu と Δt_r の算定式を示す。

$$\Delta u'(\xi_{nm}) = \sum_{n=1}^{N/2-1} \sum_{m=1}^{M/2-1} \frac{1}{\sqrt{1+(n^2+m^2)^2}} \quad (16)$$

$$\cos\left(2\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_n}{L} + \theta_n\right) \cos\left(2\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_m}{W} + \theta_m\right) \quad (17)$$

$$\Delta u(\xi_{nm}) = 1 + c \cdot \Delta u'(\xi_{nm}) \quad (17)$$

$$\Delta t_r(\xi_{nm}) = \Delta t / \Delta u(\xi_{nm}) \quad (18)$$

θ は各波数に付与されるランダム位相である。ナイキスト波数は

$N/(2L)$ 、 $M/(2W)$ である。 c は揺らぎ量を調整する係数である。揺らぎ量を大きくすると Ω や Ω' の人工的な山谷を低減できるが、破壊伝播効果による指向性が薄まってしまう。兵庫県南部地震で用いられた $c=1$ 、 $\Delta t=1.0s$ ¹²⁾ を基本とし、全要素断層において揺らぎがない ($c=0$) の震源スペクトル形状を維持しつつ震源スペクトルの落ち込みがほぼ解消すること、後述する地震動シミュレーションにおいて再現性が増すように c と Δt を微調整した。その結果、 $c=1.31$ 、 $\Delta t=0.75$ 秒とした。

Δu や Δt_r により、要素断層の四角形形状に起因する Ω や Ω' のスペクトルの人工的な凹が低減されるが、そのランダム位相によっても人工的な凹凸が発生する。この凹凸を低減するため、 Ω および Ω' は複数のランダム位相に対する結果の平均をとった。以下補正関数の算定手順を示す。

- 1) 揺らぎのランダム位相を変えて、式(7)と式(8)から Ω と Ω' のスペクトルを各々21作成
- 2) 位相はそのままに、それぞれ 21 個の Ω と Ω' の振幅をバンド幅 1.2Hz の Parzen ウィンドウで平滑化
- 3) 2) で平滑化したそれぞれ 21 個の Ω と Ω' のスペクトル振幅の平均を算定し、平均との残差が最も小さい Ω および Ω' の位相をそれぞれの平均振幅に付与して Ω_a と Ω'_a を算定
- 4) 3) の Ω_a と Ω'_a を用いて式(9)により補正関数を算定

2. 4 振動数に比例した補正関数の低減

複数の大地震記録から、破壊伝播効果による地震動振幅の増幅率と、水平 2 成分の平均に対する断層直交方向の振幅比が、周期の関数としてモデル化されている¹⁾。同研究によると破壊伝播効果は長周期から短周期にかけて小さくなり、周期 0.6 秒 (1.7Hz) で消失 (率=1) する。また断層直交方向の振幅比は長周期では理論に基づく値となるが、短周期側にかけて変化し、周期 0.5 秒 (2Hz) で等方化 (比=1) する。この消失と等方化はほぼ同じ周期で、共に震源と伝播の不均質性が原因と考えられている。

2000 年鳥取県西部地震において、Radial 成分/Transverse 成分比が数 Hz 程度の間に理論から 1 となる¹³⁾。上記のように破壊伝播効果の消失と等方化の振動数がほぼ等しいとすると、2000 年鳥取県西部地震の破壊伝播効果は数 Hz 程度の間に消失したと考えられる。そこで破壊伝播効果を徐々に消失させるため、式(19)により補正関数を 2Hz から 4Hz にかけて 1 に収束させた。

$$\log(H') = \log(H) \cdot \exp\left(0.5 + 0.5 \cos\left[\pi(f-f_1)/(f_2-f_1)\right]\right) \quad (19)$$

H と H' は収束前後の補正関数、 f_1 と f_2 は収束開始 (2Hz) と収束終了 (4Hz) の振動数である。最終的には H' を用いた。

3. 2000 年鳥取県西部地震の地震動シミュレーション

3. 1 概要

統計的グリーン関数法に本手法を適用しない場合 (以後、従来法) と、適用する場合 (本手法) で地震動シミュレーションを行って、本手法の有効性を確認する。

震源断層が詳細に推定されていること、震源近傍の観測点で非線形効果を反映した一次元速度構造が推定されていること等から、KiK-net の TTRH02 日野と SMNH01 伯太における 2000 年鳥取県

西部地震 (Mj7.3) の記録を対象とした。本手法の効果を見やすくするため、観測記録から地震基盤上面の入射波を推定して計算波と比較した。Fig.3 に TTRH02、SMNH01、断層の地表投影と震央を示す。

3. 2 観測基盤波の推定

線形時と、非線形を反映した本震時の TTRH02 と SMNH01 の地下構造モデルが作成されている¹⁴⁾。これらの地下構造モデルに地殻構造として S 波速度が 3000 m/s、3500 m/s の層¹⁵⁾を最下層に追加した。3000m/s の層の上面は、J-SHIS¹⁶⁾の S 波速度が 3100m/s の層の上面深さ、3500m/s は文献 17 の深さとした。ただし TTRH02 では S 波速度が 2487 m/s の層が指摘¹⁸⁾されているため、文献 13 の最下層に同層を 1 層追加してから、地殻構造を追加した。Table1 と Table2 に TTRH02 と SMNH01 の地下構造モデルを示す。表の () 内は本震時の非線形を考慮した等価な S 波速度及び Q 値である。

線形時の地下構造モデルは非線形モデルのベースとなり重要であるため本研究でも検証した。スペクトルインバージョンにより SMNH01 のサイト特性が地震動記録から推定されている¹⁹⁾。サイト特性は増幅率の再現性が直接比較できるため、SMNH01 ではサイト特性と鉛直入射の S 波の理論増幅率を比較した。Fig. 4 にサイト特性と第 7 層上面への入射に対する第 1 層上面における増幅率の比較を示す。サイト特性をほぼ再現し、線形時のモデルは妥当と考えられる。

Fig.3 TTRH02, SMNH01, the fault of the Tottori-ken Seibu Earthquake(Mj7.3) and the epicenter

Table1 1D velocity structure at TTRH02						
No	Density	S-wave velocity	Q		Thick-ness	Depth
	ton/m ³	m/s	Q0	α	m	m
1	1.7	169 (61)	38 (3.0)	0	4	0
2	1.7	214 (67)	42 (3.1)	0	7	4
3	1.9	371 (291)	38 (13)	0	9	11
4	2.1	548	36	0	22	20
5	2.2	790	6	0	58	42
6	2.6	2487	86	0.82	50	100
7	2.6	3000	86	0.82	3450	150
8	2.7	3500	86	0.82		3600

Table2 1D velocity structure at SMNH01

No	Density	S-wave velocity	Q		Thick-ness	Depth
	ton/m ³	m/s	Q0	α	m	m
1	1.7	235 (229)	18 (2.5)	0	4	0
2	1.8	345 (153)	17 (2.5)	0	7	4
3	2.2	573	8	0	11	11
4	2.4	1243	6	0	20	22
5	2.6	2248	14	0	12	42
6	2.6	2800	26	0	47	54
7	2.6	3000	86	0.82	3399	101
8	2.7	3500	86	0.82		3500

Fig.4 The comparison of site response between empirical and theoretical S-wave amplification at SMNH01

Fig.5 The comparison of HVR between record and theory at TTRH02

TTRH02 のサイト特性は推定されていないため、中小地震の地表記録 S 波部の水平／上下スペクトル比と、拡散波動場理論²⁰⁾に基づく理論水平／上下スペクトル比を比較した。No. 1～5 層では文献 12、No. 7、8 層では文献 13 の P 波速度を用いた。No. 6 の層は鳥取周辺の Vp/Vs 比¹⁷⁾ (1.73) を用いた。Fig. 5 は TTRH02 における水平／上下スペクトル比の観測と理論の比較である。2Hz 弱の卓越を再現し、対象とする振動数帯のスペクトル特性を概ね説明できている。

線形時の S 波速度と Q 値を非線形時に置き換え、鉛直入射を仮定して、S 波速度が 3000m/s の地震基盤上面における入射波の 2 倍 (以後、基盤波) を地中記録から推定した (以後、観測基盤波)。

3. 3 断層モデル

統計的グリーン関数法を適用し易いように、断層モデルは特性化震源モデルとした。グリーン関数の評価に観測点毎にレシーバー関数でチューニングされた地下構造モデルを用いた、高精度な震源インバージョンが行われている²¹⁾。まずはこの震源インバージョン結果を出来る限り特性化震源モデルに反映した。具体的には、断層全体と各アスペリティの位置と面積と地震モーメント、破壊開始点、破壊伝播様式、破壊伝播速度を取り込んだ。断層全体と各アスペリティの面積及び地震モーメントから各アスペリティと背景領域のすべり量が求まる。すべり角は震源インバージョン結果の平均として断層面全体で0度とした。同震源インバージョンにおいて TTRH02 と SMNH01 でも地下構造モデルが推定されているが、チューニングの対象周期は 2H 以下で、今回対象としている 4Hz より低振動数であるため、本研究では用いていない。

Fig.6 The characterized source model of the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake

本震の応力降下量は推定されていないため、本研究で設定した。以下に手順を示す。

- 1) 断層全体の短周期レベル A は記録から推定された値¹⁹⁾とし、式(15)²²⁾から断層全体の平均応力降下量を算定する。

$$\sigma = (7/16) \cdot M_0 / R^3 \quad (15)$$
 σ は応力降下量、 M_0 は地震モーメント、 R は断層の等価半径である。
- 2) 断層全体の平均応力降下量に対するアスペリティの応力降下量比 γ_σ を、本震の強震動再現シミュレーションに関する既往研究^{15), 23)}における平均的な値をとって $\gamma_\sigma=3$ と設定する。
- 3) 断層全体の平均応力降下量 σ に応力降下量比 γ_σ を乗じて、アスペリティの応力降下量を算定し、さらに式(16)²⁴⁾からアスペリティの短周期レベル A_a を算定する。

$$A_a = A[(1-\gamma_s)\gamma_s\gamma_\sigma^2 / \{(1-\gamma_s)\gamma_s\gamma_\sigma^2 + (1-\gamma_s\gamma_\sigma)\}]^{0.5} \quad (16)$$
 γ_s は断層全体に対するアスペリティの面積比である。
- 4) 断層全体からアスペリティを差し引いて背景領域の短周期レベルを求め、式(13)で応力降下量を算定する。

巨視的断層パラメータを Table3、微視的断層パラメータを Table4 にそれぞれ示す。断層モデルを Fig. 6 に示す。

Table3 Macroscopic fault parameters of the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake

Upper depth (km)	0.1	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004) ²¹⁾
Strike direction θ	325	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
Dip angle δ	90	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
Rake angle λ	0	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
Seismic moment M_0 (Nm)	1.75E+19	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
Short-period spectral level A (Nm/s ²)	8.15E+18	Satoh(2010) ¹⁹⁾
Fault length L (km)	28.0	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
Fault width W (km)	17.6	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
Fault area S (km ²)	493	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
Average slip (m)	1.07	$D=M_0/(\mu S)$
Average stress drop $\Delta\sigma$ (MPa)	3.89	$\Delta\sigma=(7/16)M_0/(S/\pi)^{1.5}$
Rupture velocity(km/s)	1.50	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
Rupture mode	concentric	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
Medium		
Density ρ (g/cm ³)	2.7	HERP(2003) ¹⁵⁾
S-wave velocity β (km/s)	3.5	HERP(2003)
Rigidity μ (N/m ²)	3.31E+10	$\mu=\rho\beta^2$

Table4 Microscopic fault parameters of the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake

Asperity seismic moment	M_{0a1} (Nm)	2.57E+18	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
	M_{0a2} (Nm)	1.67E+18	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
	M_{0a3} (Nm)	1.43E+18	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
Asperity area	S_{a1} (km ²)	26.4	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
	S_{a2} (km ²)	26.4	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
	S_{a3} (km ²)	17.6	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
Asperity Slip	D_{a1} (m)	2.94	$D_{a1}=M_{0a1}/\mu/S_{a1}$
	D_{a2} (m)	1.92	$D_{a2}=M_{0a2}/\mu/S_{a2}$
	D_{a3} (m)	2.45	$D_{a3}=M_{0a3}/\mu/S_{a3}$
Asperity short-period spectral level	A_a (Nm/s ²)	7.16E+18	
Asperity Stress drop	$\Delta\sigma_a$ (MPa)	11.7	$\Delta\sigma_a=\gamma_\sigma\Delta\sigma$
Area ratio of asperity to entire fault	γ_s	0.14	$\gamma_s=S_a/S$
Stress drop ratio of asperity to entire fault	γ_σ	3	HERP(2003), Muto <i>et al.</i> (2009) ²³⁾
Background seismic moment	M_{0b} (Nm)	1.18E+19	Miyakoshi <i>et al.</i> (2004)
Background area	S_b (km ²)	422.4	$S_b=S-S_a$
Background short-period spectral level	A_b (Nm/s ²)	3.90E+18	$A_b=(A^2-A_a^2)^{0.5}$
Background slip	D_b (m)	0.85	$D_b=M_{0b}/(\mu S_b)$
Background effective stress σ_b (MPa)		2.18	$\sigma_b=(A_b/4\pi\beta^2)(\pi/S_b)^{0.5}$

3. 4 補正関数

Fig. 7、Fig. 8 に Δu と Δt_r を示す。これらは 2.3 項の 3) で最も平均的であった Ω に付与した揺らぎである。TTRH02 と SMNH01 で、同じ 21 通りの揺らぎのランダム位相を用いたため、Fig. 7、Fig. 8 は TTRH02 と SMNH01 で同じである。 Δt_r は 0.3~2.0 秒に収まるデータが全体の 97%以上で殆どを占める。2 秒程度の大きな Δt_r が存在し物理的な解釈が難しいが、目的である震源スペクトルの平滑化や ω^{-2} スペクトル特性の実現を優先させた。

Fig.7 Slip fluctuations Δu

Fig.8 Rupture time fluctuations Δt_r calculated from Δu in Fig.7

補正関数の評価において様々な破壊方向の要素断層で $\Omega' a$ や Ωa が正しく評価されていること、また全要素断層で安定して評価されていることが重要である。そのような観点から本節では $\Omega' a$ や Ωa を全要素断層について示す。Fig.9 に要素断層面積の半分で除して無次元化した $\Omega' a$ を示す。アスペリティの要素断層では図の枠を太線とした。揺らぎが共通であるため、Fig.9 は TTRH02 と SMNH01 で同じである。(8) 式で用いた長さで傾斜方向の積分点数はそれぞれ 50 と 55 である。 ω -inverse-squared モデルは、破壊様式がユニラテラルで、すべり速度関数が ω^{-1} でスペクトルが減衰する場合、震源スペクトルの減衰は ω^{-2} となる。本研究の Ωa と $\Omega' a$ はすべり速度関数のスペクトルが乗じられていないので、ほぼユニラテラルな破壊となる震源から走行方向と傾斜方向の要素断層における震源スペクトルの減衰は ω^{-1} となる。破壊が要素断層の対角線方向に進む場合は破壊の有限性が走向方向と傾斜方向の2方向に現れるため ω^{-2} で減衰する。Fig.7 に描いた ω^{-1} と ω^{-2} の傾斜と比較すると、 $\Omega' a$ は振動数に対して $\omega^{-1} \sim \omega^{-2}$ で減衰しており、 $\Omega' a$ はほぼ ω -inverse-squared モデルに従っていることが分かる。

Fig.10 に TTRH02 における $\Omega' a$ を Ωa と共に要素断層面積の半分で除して無次元化して示す。図中の★は破壊開始点で、■は

TTRH02 の断層面への投影点である。破壊が観測点に向かう Forward 側の要素断層では地震波がほぼ同時に重なり合うため、 Ωa が $\Omega' a$ に比べて大きくなる。Backward 側では逆に小さくなる。低振動数では要素断層に比べて波長が長くなり、破壊伝播効果が薄れるため、 $\Omega' a$ と Ωa は同じとなる。

Fig.11、Fig.12 に TTRH02、SMNH01 の補正関数 H' を示す。破壊が向かってくる forward 側の要素断層では、補正関数は約 0.5Hz から増大し 2Hz で最大となる。0.5Hz は要素断層のサイズ (2.0×2.2 km) を平均破壊伝播速度 (1.5km/s) で除した時間の逆数に相当する。2Hz で forward 側では最大、backward 側では最小となるのは、2.4 項で述べたテーパ処理の影響である。TTRH02、SMNH01 とともに補正関数は、純粋な forward 側から純粋な backward 側になるに従って徐々に小さくなっている。本手法により全要素断層において、合理的な補正関数が得られていることが確認できる。

3.5 地震動シミュレーション概要と結果

統計的グリーン関数の f_0 は 6Hz^{25} 、 Q 値は $86f^{0.82-26}$ とした。放射特性は 2~4Hz にかけて理論から等方放射に遷移させた。経時特性には散乱理論による包絡関数²⁷⁾を用いた。ランダム位相が異なる 10 の統計的グリーン関数を作成した。本手法では統計的グリーン関数に、Fig.11 と Fig.12 に示した要素断層毎の補正関数 H' を合積した。従来法と本手法の相違は補正関数の合積の有無のみである。従来法と本手法で基盤波を 10 波合成した (以後、合成基盤波)。

Fig.13 と Fig.14 に TTRH02 における従来法と本手法の合成基盤波の加速度波形とそのフーリエスペクトルを観測基盤波と比較して示す。フーリエスペクトルは合成した 10 波の平均である。波形は 10 波のうちフーリエスペクトルが最も平均的な基盤合成波で、補正関数が有意な 0.5~4Hz の帯域波である。TTRH02 の観測基盤波は NS、EW 成分ともに 2~3Hz で卓越する。従来法ではこの卓越が過小評価となっているが、本手法ではほぼ再現している。過小評価が改善された原因は、Fig.11 に示す TTRH02 に近いアスペリティ上部の要素断層の補正関数が forward 側の破壊伝播効果により大きいことであり、本手法が有効に機能した結果である。

TTRH02 と同様に、Fig.15 と Fig.16 に SMNH01 における合成基盤波と観測基盤波の加速度波形とそのフーリエスペクトルを示す。NS 成分のフーリエスペクトルを見ると、従来法はほぼ一致しているが、本手法は 0.7~1.5Hz で過大評価である。一方 EW 成分では 0.7~2Hz において従来法は過大評価であるが、本手法は過大評価が低減されている。本手法の優劣の判断が困難である。SMNH01 はアスペリティの上側 8 個の要素断層の補正関数はほぼ 1 である。残りのアスペリティの要素断層は backward 側ではあるが SMNH01 から遠距離で、近傍の forward 側の背景領域と補正効果が相殺される。これらの理由で補正関数の影響が小さく、明確な手法の有効性が表れ難かったと考えられる。また 0.7~1.5Hz で振幅変化の傾向が成分間で異なるのは、要素波の重ね合わせ効果に対する補正関数の位相の影響が成分で異なるためである。

Fig.9 Source spectra $\Omega'a$ (dash lines) and angles of ω^1 and ω^2 (dotted lines)

Fig.10 Source spectra $\Omega'a$ (dash lines) and apparent source spectra Ωa (solid lines) at TTRH02

Fig.11 Spectra of directivity correction functions H' at TTRH02

Fig.12 Spectra of directivity correction functions H' at SMNH01

Fig.13 Record and synthetic acceleration waveforms at TTRH02

Fig.15 Record and synthetic acceleration waveforms at SMNH01

Fig.14 The comparisons of record (dashed lines) and synthetic (solid lines) acceleration Fourier spectra at TTRH02

Fig.16 The comparisons of record (dashed lines) and synthetic (solid lines) acceleration Fourier spectra at SMNH01

4. 結論

本研究では従来の統計的グリーン関数法に対して要素断層内の破壊伝播効果を考慮する手法を提案した。本手法は要素断層の見かけの震源スペクトルを震源スペクトルで除して補正関数を作成し、統計的グリーン関数と補正関数を要素断層毎に合積することで破壊伝播効果を考慮する。要素断層のサイズを小さくする必要がないため、合成波のスペクトルの過小評価が発生しない。他の手法と比べて、様々な破壊様式に対応可能なこと、断層破壊の不均質性等を考慮して振動数で破壊伝播効果を調整可能なことの利点を有する。

2000年鳥取県西部地震のKiK-netのTTRH02日野とSMNH01伯太の観測基盤波をシミュレーションして本手法の有効性を確認した。2地点とも、純粋なforward側から純粋なbackward側になるに従って徐々に小さくなる合理的な補正関数が安定して得られた。

TTRH02の2~3Hzの観測基盤波の卓越が本手法でより再現できることから、本手法は有効と考えられた。SMNH01は補正関数の影響が小さく、本手法の有効性を確認するには至らなかった。今後他の大地震でも本手法の有効性を確認するとともに、震源スペクトルの平滑化に用いる最終すべり量と破壊開始時間の c や Δt_c を検討する必要がある。

謝辞

(財)地域地盤環境研究所の宮腰研博士より、鳥取県西部地震の震源インバージョンに関する情報を提供していただきました。清水建設の佐藤智美博士には既往研究に関して教示していただきました。観測記録には防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net強震記録を、一部の図の作成にはGMT²⁸⁾を使用させていただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., Abrahamson, N. A.: Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity, *Seismo. Res. Letters*, Vol. 68, No.1, pp. 199-222, 1997
- 2) Kawase, H.: Metamorphosis of Near-Field Strong Motions by Underground Structures and Their Destructiveness To Man-made Structures, -Learned from the Damage Belt Formation during the Hyogo-ken Nanbu Earthquake-, 10th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 29-34, 1998 (in Japanese)
川瀬博: 震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能力, -1995年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ-, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 29-34, 1998
- 3) Irikura, K.: Earthquake Source Modeling for Strong Motion Prediction, *ZISIN*, Vol.46, pp. 495-512, 1994 (in Japanese)
入倉孝次郎: 震源のモデル化と強震動予測, 地震第2輯, 第46巻, pp. 495-512, 1994
- 4) Nozu, A.: An Application of Circular Crack Model for Empirical Green's Function Method, *ZISIN*, Vol.56, pp. 337-350, 2004 (in Japanese)
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応用, 地震2輯, 第56巻, pp. 337-350, 2004
- 5) Yachi, K., Dan, K., Sato, T., Kitamura, H.: Generation of Stochastic Green's Function Including the Rupture Directivity Effects in the Element Fault, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, B-II, pp. 121-122, 2015. 7 (in Japanese)
谷内孝誠, 壇一男, 佐藤俊明, 北村春幸: 要素断層内の破壊伝播効果

- を考慮した統計的グリーン関数の生成, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-II, pp. 121-122, 2015. 7
- 6) Hongwei Wang, Ruizhi Wen, and Yefei Ren: Simulating Ground-Motion Directivity Using Stochastic Empirical Green's Function Method, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 107, No. 1, pp. 359-371, 2017. 2
 - 7) Aki, K., and P. G. Richards: *Quantitative Seismology, Theory and Methods*, W. H. Freeman, New York, Vol. 1., 1980
 - 8) Hisada, Y.: A Theoretical Omega-Square Model Considering Spatial Variation in Slip and Rupture Velocity, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 90, No.2, pp. 387-400, 2000. 4
 - 9) Boore, D. M.: Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 160, pp. 635-676, 2003
 - 10) Brune, J. N.: Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes, *J. Geophysical Res.*, Vol. 75, No. 26, pp. 4997-5009, 1970. 9
 - 11) Schmedes, J., Archuleta, R. J., and Lavalée, D.: Correlation of earthquake source parameters inferred from dynamic rupture simulations, *J. Geophysical Res.*, Vol. 115, pp. 635-676, 2010
 - 12) Hisada, Y.: A Theoretical Omega-Square Model Considering Spatial Variation in Slip and Rupture Velocity. Part 2: Case for a Two-Dimensional Source Model, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 91, No.4, pp. 651-666, 2001. 8
 - 13) Satoh, T.: Radiation Pattern and Fmax of the Tottori-ken Seibu Earthquake and the Aftershocks Inferred from KiK-net Strong Ground Records, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, No.556, pp. 25-34, 2002. 6
佐藤智美: KiK-net 強震記録に基づく鳥取県西部地震とその余震のラディエーションパターン及びfmaxの評価, 日本建築学会構造系論文集, 第556号, pp. 25-34, 2002. 6
 - 14) Nagano, M., Kato, K. and Takemura, M.: Estimation of Bedrock Motions Near Seismic Fault During The 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake, -Comparison with the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake-, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, No.550 pp. 39-46, 2001. 12 (in Japanese)
永野正行, 加藤研一, 武村 雅之: 2000年鳥取県西部地震時の震源断層近傍における基盤地震動の推定, -1995年兵庫県南部地震との比較-, 日本建築学会構造系論文集, 第550号, pp. 39-46, 2001.12
 - 15) Headquarters for Earthquake Research Promotion: Validation for Strong Ground Motion Prediction Method Using Records During the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake, <http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/pdf/20021031tottori.pdf>, 2002, (accessed 2016. 7.21) (in Japanese)
地震調査研究推進本部: 鳥取県西部地震の観測記録を利用した強震動評価手法の検証について, <http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/pdf/20021031tottori.pdf>, 2002, (2016. 7.21参照)
 - 16) J-SHIS Hazard Station: <http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>, (accessed 2016. 3.22)
J-SHIS 地震ハザードステーション: <http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>, (2016. 3.22参照)
 - 17) Hashizume, M., Kishimoto, Y.: On the Method of Hypocenter Determination of MicroEarthquakes, *Disaster Prevention Research Institute Annuals*, Vol.10A, pp. 35-41, 1967.3 (in Japanese)
橋爪道郎, 岸本兆方: 微小地震の震源の求め方について, 京大防災研究所年報第10号A, pp. 35-41, 1967. 3
 - 18) Higashi, S., Abe, S.: Estimation of Bedrock Motions at KiK-net Hino Site During the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake Based on the Results of Seismic Reflection Survey, 11th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 461-464, 2002 (in Japanese)
東貞成, 阿部信太郎: 反射法探査結果に基づく2000年鳥取県西部地震時のKiK-net日野地点における基盤地震動の推定, 第11回日本地震工学シンポジウム梗概集, pp. 461-464, 2002
 - 19) Satoh, T.: Scaling Law of Short-period Source Spectra for Crustal Earthquakes in Japan Considering Style of Faulting of Dip-Slip and Strike-Slip, *Journal of Structural and Construction*

- Engineering (Transactions of AIJ), Vol.75 No.651, pp. 923-932, 2010. 5 (in Japanese)
- 佐藤智美: 逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケーリング則, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 651 号, pp. 923-932, 2010. 5
- 20) Kawase, H., Sánchez-Sesma, F. J., and Matsushima, S.: The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity Inversions Based on Diffuse Field Theory for Plane Waves, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.101, No.5, pp. 2001-2014, 2011. 10
- 21) Miyakoshi, K., Cho, I., PETUKIN Anatoly: Slip Distribution Modeling of Spatio-Temporal Heterogeneous Source Process, Report for the study on master model for strong Ground motion prediction toward earthquake disaster mitigation, pp. 29-42, 2004. 3 (in Japanese)
- 宮腰研, 長郁夫, Petukhin Anatoly: すべりの時空間的不均質特性のモデル化, 地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究, 平成 15 年度研究成果報告書, pp. 29-42, 2004. 3
- 22) Eshelby, J. D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proceedings of the Royal Society, Vol. 241A, pp. 376-396, 1957
- 23) Muto, M. Shimazu, N., Dan, K., Abiru, T.: Asperity Models for the Crustal Earthquakes in Chugoku District based on Short-Period Level by Spectral Inversion. Part2: 2000 Tottori-Ken Seibu Earthquake, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-II, pp. 151-152, 2009. 7 (in Japanese)
- 武藤真菜美, 島津奈緒未, 壇一男, 阿比留哲生: スペクトルインバージョン結果に基づく中国地方の地殻内地震のアスペリティモデルの構築 (その 2) 2000 年鳥取県西部地震, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-II, pp. 151-152, 2009. 7
- 24) Dan, K., Miyakoshi, J. and Yashiro, K.: Simulation of Ground Motions at Sapporo and Akita During The 1993 Hokkaido-nansei-oki Earthquake by Empirical Green's Function method, -Verification of Characterizing Procedure of Earthquake Source Model for Strong Motion Prediction -, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.554, pp. 53-62, 2002. 4 (in Japanese)
- 壇一男, 宮腰淳一, 八代和彦: 経験的グリーン関数法による 1993 年北海道南西沖地震の札幌および秋田における地震記録の再現, -強震動予測のための震源モデルの特性化手法の検証-, 日本建築学会構造系論文集, 第 554 号, pp. 53-62, 2002. 4
- 25) Tsurugi, M., Kagawa, T., Okazaki, A., Hada, K., and Irikura, K.: Study on a high-cut filter for strong ground motion prediction, -Based on the observed records during the 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake-, Japan Association for Earthquake Engineering Papers, Vol.6, No.4 pp. 94-112, 2006 (in Japanese)
- 鶴来雅人, 香川敬生, 岡崎敦, 羽田浩二, 入倉孝次郎: 強震動予測のための高域遮断フィルターに関する研究, -1995 年兵庫県南部地震の観測記録に基づく検討-, 日本地震工学会論文集, 第 6 巻, 第 4 号, pp. 94-112, 2006
- 26) Petukhin, A., Irikura, K., Ohmi, S., and Kagawa, T.: Estimation of Q-values in the Seismogenic and Aseismic Layers in the Kinki Region, Japan, by Elimination of the Geometrical Spreading Effect Using Ray Approximation, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.93, No.4, pp. 1498-1515, 2003. 8
- 27) Satoh, T.: Study on Envelope Model of Ground Motions Based on Inversion of Group Delay Time and Scattering Theory, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.586, pp. 71-78, 2004. 12 (in Japanese)
- 佐藤智美: 群遅延時間のインバージョンと散乱理論に基づく地震動の経時特性モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 586 号, pp. 71-78, 2004. 12
- 28) Wessel, P. and Smith, W. H. F.: New, Improved Version of Generic Mapping Tools Released, EOS Trans. Amer. Geophys. U., vol.79, No.47, pp. 579, 1998. 12

INCORPORATING RUPTURE DIRECTIVITY EFFECTS INSIDE SUBFAULTS IN STOCHASTIC GREEN'S FUNCTION METHOD

Takashi HAYAKAWA^{*1} and *Atsuko OANA*^{*2}

^{*1} Chief Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr.Eng.

^{*2} Researcher, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr.Eng.

We have proposed a stochastic Green's function method with rupture directivity effects inside subfaults (hereafter we call SGF_{RD}) and its verification by simulations of observed strong ground motions has been presented. SGF_{RD} has advantages in that decreasing of rupture directivity effects with frequency due to heterogeneous rupture and underground structure is controllable and various kinds of rupture patterns are available.

In conventional stochastic Green's function methods (SGF), each subfault is represented by a point source. Source spectra of subfaults are assumed to be the omega squared model and rupture directivity effects inside subfaults are not considered. On the condition that Green's function and rigidity in a source layer are uniform in a subfault and slip time function is delta function, we accounted t_r which is S-wave travel time between rupture front and a station in a source spectrum of each subfault. We defined correction function as the ratio of a source spectrum with t_r to a source spectrum without t_r . In order to avoid artificial fluctuations due to rectangle shape of subfaults in source spectra, we introduced the spatial randomness for t_r and slip. The correction functions are complex spectra. By the convolution of a correction function with a source spectrum of each subfault, the rupture directivity effects inside subfaults have been incorporated.

In order to verify SGF_{RD}, we simulated the strong ground motions recorded at TTRH02 and SMNH01 stations during the 2000 Tottori-Ken Seibu earthquake (Mj7.3) by SGF and SGF_{RD}. The 1D velocity structures with decreasing S-wave velocities due to soil nonlinearity were constructed at the stations. Ground motions at depths corresponding to the seismic bedrock were estimated based on the records on ground surface using the 1D velocity structures and compared to synthetic ground motions by SGF and SGF_{RD}. We decreased rupture directivity effects from 2Hz and diminished at 4Hz with the constraint that the correction function was 1. In a low frequency range, the correction functions were almost 1. The correction functions were less/more than 1 in a frequency range of 1Hz or higher. The correction functions were getting larger as rupture directions in subfaults were from backward to forward. Improvement of reproducibility of the ground motion was not recognized at SMNH01 where the rupture directivity effects seemed to be small. On the other hand, the peak around 2-3 Hz of the observed record was successfully reproduced by SGF_{RD} at TTRH02. The rupture direction in the asperity was forward direction and the correction functions strongly effected on the synthetic ground motion. Improvement for reproducibility at TTRH02 meant its effectiveness of SGF_{RD}.

The simulations of other large earthquakes are necessary to verify SGF_{RD} for the future work.

(2019年3月20日原稿受理, 2020年5月18日採用決定)