統計的グリーン関数法による強震動予測法の検証と
仮想福岡地震への適用CALIBRATION OF STRONG MOTION PREDICTION METHOD USING
STATISTICAL GREEN'S FUNCTION AND ITS APPLICATION
TO HYPOTHESIZED FUKUOKA EARTHQUAKE

伊藤 茂郎*, 川瀬 博**

Shigeo ITOH and Hiroshi KAWASE

In our previous work we extracted statistical characteristics of seismic ground motions from K-net records of 25 earthquakes observed at 142 stations in the Kyushu region in order to establish the synthesis method of statistical Green's functions. In this paper we study the strong motion prediction method using these statistical Green's functions. First, we apply this method to the Kagoshima-ken Hokuseibu earthquake of March 26, 1997 and compare the synthetics with the observed. Second, we simulate strong motions at the bedrock level during the Hyogo-ken Nanbu earthquake of 1995. Synthetic waveforms based on this method match quite well with the observed. Thus it is proved that we can predict the bedrock motions using our statistical Green's function if we properly express the source model. Finally we applied this method to predict strong motions in Fukuoka City for a hypothesized Fukuoka earthquake. First strong motions at the bedrock level are predicted and then the strong motions at the ground surface are obtained by the 1-D wave propagation theory. The peak ground velocity thus estimated reaches 100 cm/s, which is less than Kobe.

Keywords: strong motion prediction, Green's function, statistical characteristics of ground motion, bedrock, surface geology
強震動予測, グリーン関数, 統計的地震動特性, 基盤, 表層地盤

1. はじめに

現在では構造物の耐震設計を行う際に地震応答解析を行う機会が多いが、建設サイトの地震動特性を十分考慮した入力地震動が用いられているとは言い難く、いまだ特定の強震記録を補正した波形や回帰分析に基づく応答スペクトルから得られる模擬地震動を使用している状況にある。しかし、兵庫県南部地震において注目された、いわゆる「震災の帯」は、断層の破壊伝播によるディレクティブイ効果や大阪盆地の深い地盤構造による増幅効果で生じたものであり¹⁾、震源およびサイトの特性を十分考慮した入力地震動を用いることの重要性が浮き彫りになった。近年、地震のスケールリング則に基づいて中小地震の観測記録を多数重ね合わせる経験的グリーン関数法が、強震動予測手法として注目されその有効性が検証されている^{例えば 2)}。この手法は、従来の経験的手法では考慮できない震源過程を表現でき、また理論的手法において問題となる短周期領域まで地盤構造を直接知ることなく、強震動を予測することができる。しかし、中小地震記録を用いる場合、記録がないと波形合成できないことから、それにかえて多数の中小地震記録を統計解析し、その平均的特性を有する中小地震相当の波形を用いる統計的グリーン関数法が最近提案され予測に用いられるようになってきている。このうち、釜江ら³⁾は震源スペクトルを ω^{-2} モデル⁴⁾としたBooreのモデル⁵⁾を用いて作成される統計的地震動をグリーン関数として、地域的

特性を反映した強震動予測手法を提案した。同様な手法は壇ら⁶⁾も関東地震の評価に用いている。ただBooreのグリーン関数は観測記録の統計値というよりも理念的なものである。これに対し佐藤ら⁷⁾は、ボアホール観測記録を用いて推定された工学的基盤波から、地震動の経時特性⁸⁾と ω^{-2} モデルによるスペクトル特性⁹⁾をそれぞれ別個に評価し、作成された統計的グリーン関数を波形合成して1978年宮城県沖地震による仙台での地震動を推定した。さらに表層地盤の非線形性を考慮して地表地震動を評価し、その妥当性を検証した。

最近筆者ら^{10) 11)}は科学技術庁防災科研の強震観測網K-netの九州地方142地点、25地震の観測記録(1,278×2波)から二段階回帰分析手法を用いて中小地震の統計的経時特性とスペクトル特性を抽出した。ここで重要なことは、経時特性とスペクトル特性が同じデータから同じマグニチュードMと震源距離Xの関数として統一的にモデル化されていることである。また、九州地方のK-net観測点ほとんど全てについて統計的特性が得られているので、マグニチュードと震源距離さえ指定すれば、任意のK-netサイトで統計的グリーン関数を作成できるのみならず、S波速度約1km/secの露頭岩盤と見なせる基準観測点の統計的性質を用いて九州地方の任意地点で基盤面上のグリーン関数の作成が可能となっている。

そこで本論文では、この統計的グリーン関数法の有用性を示し、それを仮想福岡地震に適用して予測結果を求め考察する。まず1997

* 清水建設 工修
(元九州大学 大学院生)

** 九州大学大学院人間環境学研究院 教授・工博

Shimizu Corporation, M. Eng.

Prof., Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu Univ., Dr. Eng.

年3月26日に発生した鹿児島県北西部地震の再現を行い、提案手法の有用性を確認する。ここでは本震直後に発生した余震と同じ規模の統計的グリーン関数を作成し、断層モデルを用いて波形合成する。比較のため、余震記録を用いた経験的グリーン関数法や従来型の経験的手法によるシミュレーションも行う。次に、基盤における統計的グリーン関数を用いて1995年の兵庫県南部地震の強震動シミュレーションを行う。ここでは破壊開始点を変化させたパラメトリックスタディを行い、基盤面最大速度分布がどのように変化するかについて考察するとともに、露頭岩盤と見なせる神戸大学(KBU)や本山第一小学校(MOT)の観測記録と本震と同じ破壊開始点を用いた再現波を比較する。これにより基盤上の地震波の再現性を検証する。そして最後に、福岡市直下の警固断層に兵庫県南部地震の断層モデルを適用し、仮想福岡地震の強震動予測を行う。本研究では福岡市の町丁目ごとの強震動予測を行うために、まず基盤面における強震動を求め、次に各町丁目ごとの地盤特性を考慮して地表面の強震動を予測するという二段階の手法を用いている。本論文の強震動予測プロセスを用いることにより中小地震の観測記録が得られていない地点でも予測が可能となる。なお本研究で対象とする周波数は、統計的データ解析の際の有効周波数0.1~10Hzから、小地震の長周期域のノイズに配慮してさらに限定し、0.2~10Hzとする。

2. 統計的グリーン関数の作成

統計的グリーン関数は、筆者らが提案している統計的経時特性¹⁰⁾と統計的スペクトル特性¹¹⁾を用いて作成する。これら2つの地震動特性は、九州地方のK-net観測点142地点で観測された25地震の加速度波形のS波主要動部から抽出した。用いたデータは気象庁マグニチュードMjが4.5~6.6、震源距離Xが約15~300kmのもので、1,278×2成分(NS,EW)である。図1に用いた地震の震源と観測点を示す。データは、まず日本付近の平均的なS波の走時を用いてS波初動以降60秒間を切り出し、前後に2秒のコサインテーパをつけ64秒間のデータにした。S波初動以降がうまく切り出されていない場合は目視による切り出しを行っている。スペクトルの分離を行う際に必要な基準観測点MYZ005についてはあらかじめ、K-netの地盤情報から次元重複反射理論を用いて表層(4m)の影響をはぎ取り、その基盤波を推定した。このような処理を行うことにより当該地点はS波速度1km/secの露頭岩盤上の観測点と見なすことができる。

統計的経時特性は、Boore⁹⁾の包絡線関数 $W(t)$ でモデル化した。Booreのモデルは、継続時間 T_d 、振幅が最大となる時刻 T_r の T_d に対する比 ε 、時刻 T_d における振幅の最大振幅に対する比 η で規定される。(1)式の $H(t)$ は単位ステップ関数を表し、(2)式の a は関数 $W(t)$ の最大値が1になるように表現されている。

$$W(t) = a \cdot t^b \cdot \exp(-ct) \cdot H(t) \quad \dots(1)$$

$$a = \left(\frac{2.7182}{\varepsilon \cdot T_d} \right)^b \quad \dots(2)$$

$$b = \frac{-\varepsilon \cdot \ln \eta}{[1 + \varepsilon \cdot (\ln \varepsilon - 1)]} \quad \dots(3)$$

$$c = \frac{b}{\varepsilon \cdot T_d} \quad \dots(4)$$

$\eta=0.1$ で固定した包絡線関数 $W(t)$ を観測記録にフィッティングさ

図1 解析に用いた地震の震源と観測点の位置

図2 基盤スペクトルと基盤経時特性から得られる統計的グリーン関数(Mj=5.1, X=84km)と観測記録(1996.10.19 23:01 日向灘沖)の比較
セモデルパラメーター $T_r (= \varepsilon \times T_d)$ と T_d を同定し、得られた T_r と T_d をマグニチュード M と震源距離 X で回帰する。ここではマグニチュードと震源距離に正の相関があることを防ぐため二段階回帰分析を行っている。最終的に得られた回帰式は次式のように表される。

$$\log T_r = 0.0956 \cdot M + 0.3911 \cdot \log X - 0.6620 \quad \dots(5)$$

$$\log T_d = 0.0925 \cdot M + 0.4367 \cdot \log X - 0.2890 \quad \dots(6)$$

(5), (6)式は、基準観測点(露頭岩盤上)としたMYZ005(日向)のものである。右辺第三項が経時特性のサイト係数を表し、これを各観測点のサイト係数に置き換えれば、 T_r , T_d が各観測点ごとに得られる。

統計的スペクトル特性 $F(f)$ は、マグニチュード M と震源距離 X を用いて簡単に表現できる壇ら¹²⁾の二段階回帰分析手法を適用した。まず一段階目では、観測スペクトル $F_{ij}(f)$ を

$$\log F_{ij}(f) = S_i(f) - \log X_{ij} + b(f) \cdot X_{ij} + C_j(f) \quad \dots(7)$$

でモデル化する。 i は地震番号、 j は観測点番号を表し、 $S_i(f)$ は震源特性、 $b(f)$ は距離係数、 $C_j(f)$ は j 観測点のサイト係数である。 $S_i(f)$ と $C_j(f)$ を分離するために基準観測点 ($j=1$) のサイト係数について自由地表面の拘束条件 $10^{C_1(f)}=2.0$ を与えた。よって一段階目で得られた $C_j(f)$ は基準観測点に対する比として決まるので、基準観測点はサイト増幅のない露頭岩盤であることが望ましい。次に二段階目では(8)式のように震源特性を M の1次式でモデル化し、一段階目で得られた距離係数 $b(f)$ を用いて $a(f)$ および $C_j(f)$ を求める。

$$\log F_{ij}(f) = a(f) \cdot M_i - \log X_{ij} + b(f) \cdot X_{ij} + C_j(f) \quad \cdots (8)$$

以上により得られた経時特性とスペクトル特性を用いて統計的グリーン関数を作成する。まず、マグニチュード M 、震源距離 X および観測地点を設定し、経時特性については回帰式(5)、(6)から得られる Tr と Td を用いて Boore の包絡線関数 $W(t)$ を計算する。スペクトル特性については回帰式(8)から目標フーリエスペクトル $F(f)$ を計算する。次にランダム位相と目標スペクトル $F(f)$ を用いて定常波を作成し、包絡線関数 $W(t)$ を掛ける。この時点で、 $W(t)$ を掛けて得られた波形 $g(t)$ のフーリエスペクトルは目標スペクトル $F(f)$ より減少しているので、 $g(t)$ をフーリエ変換し位相スペクトルは保存して、スペクトル特性を目標フーリエスペクトル $F(f)$ で置き換え、フーリエ逆変換することにより統計的グリーン関数 $f(t)$ を作成する。得られた統計的グリーン関数はスペクトル補正のため立ち上がり広がり、一部が波形の後半にずれ込むので、時間軸を5秒間シフトさせ、5秒以降にコサインテーパを付けたウィンドウを施した。以上により、マグニチュードと震源距離を与えれば任意のサイトで個別の統計的グリーン関数を作成でき、また基準観測点の統計的性質は基盤における地震動特性と見なせるので、基盤における波形合成用グリーン関数の作成が可能である。図2に基準観測点の基盤スペクトルと基盤経時特性を用いて作成した統計的グリーン関数 ($M_j=5.1$, $X=84\text{km}$) と観測記録(1996.10.19 23:01 日向灘沖)を比較して示す。最上段に示す統計的グリーン関数(SGF)と二段目、三段目の観測記録(OBS. NS, OBS. EW)は包絡形・最大値とも良く一致している。但し、速度波形については特に後半部において加速度波形ほど一致度は良くない。これは加速度波形が包絡線の形状で拘束が効いているのに対し、速度波形については直接的に拘束が効いていないことによるもので、加速度包絡形とランダム位相を与える生成法を用いる限り避けられないものと思われる。基盤スペクトルは観測スペクトルの NS, EW 成分の平均的な値となっている。

3. 鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーション

3.1 解析地点と断層パラメータ

次に統計的グリーン関数法を用いて1997年3月26日に発生した鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションを行う。比較のため、本震直後に発生した余震(1997.03.26 17:39 $M_j=4.7$)記録を用いた経験的グリーン関数法や従来型の経験的手法を用いたシミュレーションも同時に行う。解析地点は震源断層を取り囲む KGS002(出水)、KGS004(阿久根)、KGS005(宮之城)、KGS007(川内)の4地点である。図3に震源断層と解析地点を示す。

従来型の経験的手法を用いたシミュレーションは本震と同じマグニチュード M と震源距離 X を用いて前節で説明した統計的経時特性モデルとスペクトルモデルから作成される。半経験的波形合成法に

図3 鹿児島県北西部地震の震源断層と解析地点の位置

図4 三宅ら(1999)による鹿児島県北西部地震の断層モデル

表1 解析に用いたパラメータ

パラメータ	Asperity No. 1	Asperity No. 2
長さ $L \times$ 幅 W	7[km] $\times$ 6[km]	2.8[km] $\times$ 3.6[km]
走向 θ , 傾斜角 δ	98°, 90°	98°, 90°
S波速度 V_s	3.1[km/s]	3.1[km/s]
破壊伝播速度 V_r	2.5[km/s]	2.5[km/s]
立ち上がり時間 τ	0.5[sec]	0.5[sec]
破壊伝播様式	Radial	Radial
重ね合わせ数 $N \times N \times N$	5 $\times$ 5 $\times$ 5	2 $\times$ 3 $\times$ 5
応力降下量の比 C	1.06	0.70

は Irikura²⁾を改良した入倉ら¹³⁾の手法を用いる。解析に用いた断層モデルを図4に示す。このモデルは、震源の西側の大きなアスペリティ(No. 1)と東側の小さなアスペリティ(No. 2)から成っており、経験的グリーン関数法を用いたシミュレーションから三宅ら¹⁴⁾が推定したものである。断層パラメータを表1に示す。三宅ら¹⁴⁾によると、小地震の重ね合わせは西側のアスペリティで $5 \times 5 \times 5$ 、東側で $3 \times 2 \times 5$ であり、応力降下量の比 C をそれぞれ 1.06, 0.70 としている。2. で示した統計的グリーン関数法を用いる場合、重ね合わせ数を表す相似比 N はマグニチュードと地震モーメントの関係から計算できるが、応力降下量はパラメータではないので C を厳密に設定するのは難しい。ここでは、三宅ら¹⁴⁾の評価に合わせ、まずマグニチュード $M=4.7$ として余震と同じ規模の統計的グリーン関数を作成し、三宅ら¹⁴⁾が推定した C をそのまま大地震動の合成に用いることにした。統計的グリーン関数は各アスペリティごとにアスペリティの中心と観測点間の距離を回帰式の震源距離として作成する。

図5 従来の経験的手法(最上段)、経験的グリーン関数法(二段目と三段目)、統計的グリーン関数法(四段目)と観測記録(五段目と最下段)の比較

3.2 解析結果

図5に解析結果を示す。最上段が回帰式をそのまま用いた経験的手法(EM)、二段目および三段目が経験的グリーン関数法(EGFM NS, EGFM EW)、四段目が統計的グリーン関数法(SGFM)、五段目と最下段が観測記録(OBS. NS, OBS. EW)で左列に加速度波形、右列にそれを積分した速度波形を示している。特に注目すべきはKGS004(阿久根)の解析結果である。阿久根では周期1秒程度のやや短周期パルス波が明瞭に観測されているが、従来の経験的手法(EM)ではこのパルス波を再現できていない。図6の上に阿久根の観測スペクトル、下に各シミュレーション波のスペクトルを示すが、経験的手法(EM)が1.5~2Hz付近にピークがあるのに対し、観測スペクトルでは0.5~1Hz付近にピークが見られる。一方、統計的グリーン関数法(SGFM)や経験的グリーン関数法(EGFM)では観測記録に見られるやや短周期パルス波をうまくシミュレートできている。図6のスペクトルでも観測と同じ0.5~1Hz付近にピークが見られる。このやや短周期パルス波については液状化の影響と推定している報告¹⁵⁾もある。しかし、地盤の線形性を仮定する波形合成法を用いてこのパルス波が再現できていること、また阿久根が西側の大きなアスベリティの破壊進行方向に位置していることを考えると、これは液状化の影響というよりもむしろ破壊伝播によるディレクティブティの影響が表れているものと思われる。ただし、6Hzに見られるピークは観測にはほとんど見られず、最表層(厚さ5m, $V_s=120\text{m/s}$)は非線形化していた可能性が高い。これに対しKGS002(出水), KGS005(宮之城), KGS007(川内)については各手法とも観測記録と比べて、加速度レベルは過大評価気味だが、全体的に概ね調和的な結果が得られている。これらの結果は、破壊伝播によるディレクティブティの影響が大きい阿久根の

図6 KGS004(阿久根)の観測スペクトル(上)と各シミュレーション波のスペクトル(下)

ような場所では、点震源を仮定した従来型の経験的方法では限界があり、断層モデルに基づいた統計的グリーン関数法や経験的グリーン関数法が必要であることを示している。

次に、統計的グリーン関数を作成する際に与えるランダム位相の影響を調べるために、異なる20個のランダム位相を用いて統計的グリーン関数法によるシミュレーションを行い、最大値の平均 m と標準偏差 σ を求めた。表2に結果を示す。これを見て分かるように与えるランダム位相による影響はそれ程大きくなく、その標準偏差は平均値の15%前後にとどまっている。

以上により、実際の中小地震観測記録を合成する経験的グリーン関数法のみならず、経験的手法から得られる中小地震相当の模擬地震動を合成する統計的グリーン関数法でも観測記録を再現することに成功した。

4. 兵庫県南部地震の強震動シミュレーション

4.1 断層モデルとパラメター

ここでは統計的グリーン関数法を用いて1995年兵庫県南部地震($M_j=7.2$)の強震動シミュレーションを行う。兵庫県南部地震で注目された、いわゆる「震災の帯」は、断層の破壊伝播によるディレクティビティ効果と大阪盆地の深い盆地構造がもたらした「エッジ効果」によるものと考えられている。ここでは、エッジ効果を含むサイトの影響は別途考慮できるものとして第2節の基準観測点(S波速度1km/sec相当)の基盤スペクトルと基盤経時特性を用いて統計的グリーン関数を作成し、基盤レベルの強震動シミュレーションを行う。まず、破壊開始点を動かしながらパラメトリックスタディを行い、基盤面最大速度分布がどのように変化するかを検討する。次に露頭岩盤上と見なせる地点の観測記録とシミュレーション波を比較し、統計的グリーン関数法の有用性を検証する。第2節の統計的性質を抽出する際に我々が用いたデータは九州地方のものであるため、これが関西地方の統計的性質と類似しているかどうかについて別途検証する必要があるが、ここでは第一次近似としてそれが類似しているものと仮定する。

断層モデルは、兵庫県南部地震($M_j=7.2$)の神戸側セグメントをモデル化した松島・川瀬¹⁾に従った。松島・川瀬¹⁾は波数積分法により計算された理論波形を用いて、観測波に見られる顕著な速度パルスが再現できるように、複数のアスペリティから成る断層モデルをフォワードインバージョンにより求めている。さらに、神戸市地域の三次元盆地構造をモデル化し、三次元有限差分法を用いて強震動シミュレーションを行った。推定された断層モデルは4つのアスペリティから成り、経験的グリーン関数法を用いて兵庫県南部地震の断層モデルを推定した釜江・入倉モデル¹⁶⁾の改良版と言える。松島・川瀬モデルの諸元を表3に、断層モデルを図7に示す。

波形合成に用いるパラメターは以下の手順で推定する。すでに述べたように応力降下量の比 C は直接決定することはできないが、断層全体の平均に対する各アスペリティごとの比として設定することとした。つまり、用いた統計的グリーン関数はそもそも応力降下量をパラメターとしていないので平均的には同じと見なしていることになるが、その平均からの相対的なずれをアスペリティごとに補正したわけである。表3の各アスペリティのすべり量 $D_1 \sim D_4$ と断層幅 $W_1 \sim W_4$ を佐藤¹⁷⁾の応力降下量評価式、すなわち

$$\Delta\sigma = a \cdot \frac{\mu D}{W} \quad \dots(9)$$

に代入し、応力降下量 $\Delta\sigma_1 \sim \Delta\sigma_4$ と平均的な応力降下量 $\Delta\sigma_E (= \Sigma$

表2 統計的グリーン関数法による最大値のばらつき

	地点	KGS002	KGS004	KGS005	KGS007
加速度 (gal)	平均値 m	672.3	339.0	805.4	510.9
	標準偏差 σ	96.0	60.0	99.3	76.6
速度 (kine)	平均値 m	20.5	46.4	37.2	36.2
	標準偏差 σ	3.0	6.7	3.8	5.8

$\sigma_1/4$ を求め、その比を各アスペリティの応力降下量の比 $C_1 \sim C_4$ とする。ここで μ は断層を形成する媒質のせん断剛性率、 a は断層面の幾何学的形状や境界条件によって決まる定数である。次に佐藤¹⁷⁾のモーメント評価式(10)式を用いて統計的グリーン関数用地震のマグニチュードを $M=5$ と仮定しその地震モーメント M_0 を算定する。

$$\log M_0 (\text{dyne} \cdot \text{cm}) = 1.5M + 16.2 \quad \dots(10)$$

最後に、表3に示す地震モーメント $M_0 \sim M_4$ と応力降下量の比 $C_1 \sim C_4$ を用いて、横井・入倉¹⁸⁾の(11)式から相似比 $N_1 \sim N_4$ を求める。

$$N = \left(\frac{M_0}{C \cdot M_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \dots(11)$$

これから要素サイズも決まる。立ち上がり時間は釜江・入倉¹⁶⁾に従い全アスペリティ0.6secとし、S波速度は3.5km/sec、破壊伝播速度は3.0km/secと仮定した。表4に解析に用いたパラメターを示す。

4.2 解析結果

はじめに破壊開始点の与える影響を調べるためにパラメトリックスタディを行った。破壊開始点を变化させた場合の基盤面最大速度分布を図8に示す。松島・川瀬モデルでは、西側3つのアスペリティの傾斜角(dip)は 90° 、最も東側のアスペリティは傾斜角(dip)を 85° としているが、パラメトリックスタディでは4つのアスペリティは全て傾斜角 90° とした。また、各アスペリティの破壊は破壊

表3 松島・川瀬モデルの各アスペリティの諸元

Asperity No.	$M_0 \times 10^{18} [\text{Nm}]$	Size [km ²]	すべり量 D [m]
1	0.62	4.5×5	0.85
2	1.07	4.5×5	1.47
3	2.59	8×10	1.00
4	4.83	8×10	1.90

図7 解析に用いた断層モデル¹⁾

表4 解析に用いたパラメター

Asperity No.	応力降下量の比 C	$N \times N \times N$	立ち上がり時間 τ [sec]
1	0.90	2×2×2	0.6
2	1.56	2×2×2	0.6
3	0.53	5×5×5	0.6
4	1.01	5×5×5	0.6

開始点に対して最短距離にある最深部のコーナーからラディアルに進行していくものとした。即ち破壊開始点がA点の場合、各アスペリティの破壊は各々最西端深部から始まる。

A点から破壊が進行する場合、大きなアスペリティと破壊伝播によるディレクティビティの影響を強く受けるアスペリティ No. 4 の真上あるいは東側に速度の大きな領域が見られる。次にB,Cが破壊開始点の場合、アスペリティ No. 4 は最西端深部から破壊が進行するのでその影響はA点の場合と変わらないが、その他のアスペリティでは破壊が最東端深部から進行するために、西側に速度 10～30m/sec の領域が広がった。D点の場合、アスペリティ No. 4 の破壊も最東端深部から進行するので、速度の大きな領域がB,C点の場合よりさらに西側に広がるようになっている。このように破壊開始点は基盤面最大速度分布に大きな影響を与えることが分かる。

次に、松島・川瀬モデルと同じく破壊開始点をA点とした場合の基盤面速度波形を兵庫県南部地震の際に観測された露頭岩盤相当の観測記録と比較する。ここではアスペリティ No. 4 の傾斜角を 85° とし、観測記録は断層直交方向に相当する $N33^\circ W$ 成分で表すことにする。図9に解析地点を示す。解析地点は神戸大学(KBU)と本山第一小学校(MOT)である。両地点とも断層の破壊進行方向に位置しており、明瞭な速度パルスが観測されている。図10に解析結果を示す。上段が統計的グリーン関数法を用いた合成波、下段が観測波($N33^\circ W$ 成分の速度波形)である。これを見て分かるようにKBU, MOTとも観測記録に見られるパルス波が再現できている。このことは、震源モデルを的確に表現できれば、統計的グリーン関数法により強震動を予測することが可能であることを示している。なお、ここでは放射特性は考慮していないが、その周波数依存性が与えられれば考慮することは容易である。本手法を適用した場合、まず基盤面の合成波形を計算し、次に基盤面浅部の堆積層の影響について別途考慮することになるが、神戸の場合のように地震基盤から上の堆積層の影響が強い場合はその基盤の速度差を補正する必要がある。

5. 仮想福岡地震の強震動予測

5.1 予測プロセス

最後に福岡市直下の警固断層を対象に強震動予測を行う。統計的グリーン関数法の大きな利点は、破壊伝播によるディレクティビティ

図9 解析地点

図8 破壊開始点を変化させた場合の基盤面最大速度分布 (cm/sec)

図10 基盤面合成波と観測波との比較

図 11 福岡市の $V_s=600\text{m/s}$ 層の深さマップ (m)¹⁹⁾

ィ効果を表現できること、また地動最大値だけではなく建物の応答解析に必要な合成波形が得られることである。ここでは対象とする警固断層の地震像が明らかでないこと、また防災計画これまで我々が経験した最大級の内陸地震を想定すべきであることを考え、兵庫県南部地震 ($M_j=7.2$) の神戸側セグメントと同じ規模の地震が発生すると仮定する。警固断層は博多湾から福岡市の中心部を通り南西方向へ少なくとも約 20km 延びているが、本論では図 7 の断層モデルを警固断層に沿って D 点が博多湾側となるように配置した。なお、福岡市における町丁目ごとの表層地盤による影響を反映した強震動予測を行うため、まず地表面下に想定した基盤面 (S 波速度 1km/sec) における強震動を求め、次に各町丁目ごとの地盤特性を考慮して地表面の強震動を予測するという二段階の手法を用いている。

5.2 サイト特性の評価

まず福岡地盤図¹⁹⁾に基づいて各町丁目ごとの基盤深さ (S 波速度約 600m/sec) を推定する。図 11 に福岡市の基盤深さマップを示す。警固断層付近に基盤の深い地域が見られることが分かる。次に我々が収集した福岡市内の 33 本の PS 検層データに基づき、平均的な 4 層モデル ($V_s=200, 400, 600, 1000\text{m/sec}$) を仮定する。各層の深さは $V_s=600\text{m/sec}$ の層深さに対する比として求められており、図 11 に示す基盤深さにこの層厚比を掛けあわせて町丁目ごとに地盤構造が推定される。そして得られた各町丁目の地盤構造から一次元重複反射理論を用いてサイト特性を評価することにした。

統計的スペクトル特性を求める際に分離された FKO006 (福岡市) のサイト特性 $10^{C_j(f)-C_l(f)}$ とこの観測点のある町丁目の基盤深さから推定された一次元重複反射理論による理論値の比較を図 12 に示す。図の右にはモデル化した地盤構造も示した。Q 値は一律 25 としている。分離により得られたサイト特性と理論値の一次ピークが良く対応していることが分かる。ただ低周波数領域では分離により得られたサイト特性が理論値よりも若干大きくなっている。これは分離された観測サイト特性には表面波の混入があるのに、理論値には含まれていないためと思われる。

表層地盤モデルに基づいた理論増幅特性による評価法の有効性を検証するために FKO006 について 1999 年 3 月 9 日に熊本県阿蘇地方で発生した地震 ($M_j=4.5$) を対象に統計的グリーン関数を作成した。まず基盤スペクトルと基盤経時特性を用いて統計的グリーン関数を

図 12 インバージョンにより得られたサイト特性と一次元重複反射理論による理論値の比較

図 13 基盤面の統計的グリーン関数 (最上段) および一次元波動論から得られた地表面の統計的グリーン関数 (二段目) と観測記録 (三段目) および分離されたサイト特性を用いた統計的グリーン関数 (最下段)

図 14 福岡市の基盤面最大速度マップ (cm/sec)

図 15 福岡市の地表面最大速度マップ (cm/sec)

作成し、図 12 に示した FK0006 の理論増幅特性を考慮して地表面における統計的グリーン関数を求めた。図 13 の最上段に FK0006 の基盤面における統計的グリーン関数 (SGF (Bedrock)) を、二段目および三段目に地表面の統計的グリーン関数 (SGF (1-D Theory)) と観測記録 (OBS. EW) を比較して示す。最上段に示す基盤波が一次元波動論を用いて理論的に計算されたサイト特性の影響で増幅され、観測記録に概ね一致した波形と最大値が得られていることが分かる。このことは K-net 観測点以外の地点においても、まず基盤スペクトルと基盤経時特性を用いて統計的グリーン関数を作成し、別途得られた理論増幅特性を用いて、地表面における統計的グリーン関数を作成することが可能であることを示している。ただし FKS006 ではこの観測点のサイト係数を用いた場合 (SGF) と比べると地盤モデルを用いた場合は過小評価気味で、図 12 のスペクトルの差を反映している。

5.3 強震動予測

図 14 に図 8(a) と同じく A 点を破壊開始点とし南から北に破壊させた場合の基盤面上の予測最大速度マップを示す。福岡市の中心部から破壊の進行方向に沿って、基盤面最大速度 50~60cm/sec の領域が分布しており、ディレクティブティ効果を反映した結果が得られている。次に各町丁目ごとに一次元重複反射理論を用いて地表面における強震動を計算する。図 15 に表層地盤の影響を考慮した地表面上の予測最大速度マップを示す。福岡市では最大で 100cm/sec 程度の最大速度が予測され、市中心部で大きな被害が予想される結果となった。ただ、これは兵庫県南部地震の「震災の帯」内の推定最大速度レベル¹⁾と比べると小さい。これは、ひとつにはやや短周期域のサイト特性を過小評価しているためである。また放射特性の評価が入っていないことの影響もあろう。なお、破壊開始点を変えた場合や破壊進行方向を変えたケースも検討しているがいずれの場合も福岡市内の最大速度は図 15 と同程度かそれ以下となった。

6. まとめ

本研究では、九州地方の K-net 観測記録から抽出した地震動の統計的性質を用いて、統計的グリーン関数法による強震動予測法の検証を行い、本手法を福岡市直下の警固断層に適用した。まず 1997 年の鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションを行い、従来型の経験的な強震動予測手法と比較して統計的グリーン関数法の有用性を確認した。特に、破壊伝播によるディレクティブティ効果が大きい地点では断層モデルを考慮した強震動予測が必要であることが示された。次に基盤における統計的グリーン関数を用いて 1995 年の兵庫県南部地震の強震動シミュレーションを行った。破壊開始点を変化させたパラメトリックスタディを行い、基盤面最大速度分布がどのように変化するかについて考察するとともに、露頭岩盤と見なせる神戸大学 (KBU) や本山第一小学校 (MOT) の観測記録と本震と同じ破壊開始点を用いた合成波を比較した。合成波は観測波のパルスをうまく再現しており、断層モデルさえ適切に表現すれば基盤上の強震動予測が可能であることが分かった。そして最後に、警固断層で兵庫県南部地震の神戸側セグメントと同じ規模の地震が発生した際の強震動予測を行った。ここではまず基盤面における強震動を求め、さらに実際の基盤深さに基づいた地盤増幅特性を考慮して地表面の強震動を予測した。福岡市では最大で 100cm/sec 程度の最大速度が予測されたが、兵庫県南部地震の推定最大速度レベルに比べると小

さいものであった。その原因については今後定量化したい。

本研究の強震動予測プロセスを用いれば日本全国で震源とサイトの影響を考慮した定量的強震動予測が可能となるが、地盤の非線型化の影響などについては別途考慮する必要がある。また防災計画を考える上では、実在する建物群と強震動レベルから地震被害予測を行うことも重要となる。これらについては今後の検討課題である。

謝辞

本研究には科学技術庁防災科研の強震観測網 K-net のデータを利用させて頂きました。また九州大学大学院修士課程久原寛之君には図面の作成などに協力頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 松島信一・川瀬博, 1995 年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第 534 号, 33-40, 2000. 8.
- 2) Irikura, K., Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., 151-156, 1986.
- 3) 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長, 地震のスケールリング則に基づいた大地震時の強震動予測: 統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 430 号, 1-9, 1991. 2.
- 4) Aki, K., Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res., Vol. 72, No. 4, 1217-1231, 1967.
- 5) Boore, D. M., Stochastic simulation of high frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 73, No. 6, 1865-1894, 1983.
- 6) 壇一男・渡辺史・佐藤俊明・宮腰淳一・佐藤智美, 統計的グリーン関数による 1923 年関東地震 (Mjma7.9) の広域強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 530 号, 53-62, 2000. 4.
- 7) 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明, 観測記録から同定した地震動の統計的性質と地盤の非線型性を考慮した強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 463 号, 27-37, 1994. 9.
- 8) 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明, ポアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 461 号, 19-28, 1994. 7.
- 9) 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明, 表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性: 仙台地域のポアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 462 号, 79-89, 1994. 8.
- 10) 伊藤茂郎・久原寛之・川瀬博, K-NET 強震観測記録を用いた九州地方の統計的地震動特性: その 1. 地震動の統計的経時特性, 日本建築学会九州支部研究報告, 269-272, 2000. 3.
- 11) 久原寛之・伊藤茂郎・川瀬博, K-NET 強震観測記録を用いた九州地方の統計的地震動特性: その 2. 地震動の統計的スペクトル特性, 日本建築学会九州支部研究報告, 273-276, 2000. 3.
- 12) 壇一男・宮腰淳一・八代和彦, 中規模地震の観測記録から得られる地盤増幅特性に基づく大規模地震の応答スペクトルの簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第 480 号, 35-46, 1996. 2.
- 13) 入倉孝次郎・香川敏生・関口春子, 経験的グリーン関数法を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, No. 2, B25, 1997. 10.
- 14) 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 ($M_{\text{JMA}}6.5$) 及び 5 月 13 日 ($M_{\text{JMA}}6.3$) 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, 地震第 2 輯, 第 51 巻, 第 4 号, 431-442, 1999.
- 15) 松村和雄, 1997 年鹿児島県北西部地震の地震動の特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 512 号, 75-82, 1998. 10.
- 16) 釜江克宏・入倉孝次郎, 1995 年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第 500 号, 29-36, 1997. 10.
- 17) 佐藤良輔 編著, 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会, 1989.
- 18) 横井俊明・入倉孝次郎, 震源スペクトルの Scaling 則と経験的 Green 関数法, 地震第 2 輯, 第 44 巻, 第 2 号, 109-122, 1991.
- 19) 九州地質調査業協会, 福岡地盤図, 1981.

(2000 年 5 月 10 日原稿受理, 2000 年 10 月 11 日採用決定)