（第24回地震工学研究発表会講演論文集（1997年７月））

ハイブリッドグリーン関数法を用いた兵庫県南部地震の強震動シミュレーション －大阪府域の地震観測点における適用－

鶴来雅人[1]・宮腰　研[2]・入倉孝次郎[3]

1　正会員　工修　財団法人大阪土質試験所（〒550　大阪市西区立売堀4-3-2）
2　理博　財団法人大阪土質試験所（〒550　大阪市西区立売堀4-3-2）
3　理博　京都大学教授　防災研究所（〒611　京都府宇治市五ヶ庄）

経験的グリーン関数重ね合わせ法の問題点を解決するため，小地震記録を人工的に作成する試みが行なわれつつある。本検討では，小地震の短周期成分と長周期成分を異なった方法で作成し，これらを時間領域で足しあわせた地震動を重ね合わせのグリーン関数とする方法いわゆる「ハイブリッドグリーン関数重ね合わせ法」の工学的適用性を検討した。その結果，最大加速度，最大速度，最大変位，応答スペクトルに関しては概ね観測記録と整合性あるシミュレーション結果が得られることが明らかとなった。しかし，地震動の継続時間，位相については観測記録と整合する結果が得られず，今後検討が必要である。

Key Words : Empirical Green's function method , Hybrid Green's function , Hyogo-ken Nanbu earthquake , Strong ground motion , Simulation

1　はじめに

経験的グリーン関数重ね合わせ法[1),2)]は小地震記録を用いて大地震時の地震動を合成する方法であり，複雑な波動伝播過程やサイト特性を直接見積る必要がないという点で非常に有効な方法である。この方法を用いた実地震動の再現もこれまでにいくつかの地震で試みられ，その有効性が示されている[3)]。しかし，この手法を適用するには想定震源域で想定地震と同じ破壊メカニズムを有した中小地震記録が対象地点で観測されている必要がある。こういった理想的条件が整うのは非常に稀であり，これが同手法の工学的適用すなわち構造物耐震設計用入力地震動作成や強震動予測に用いるに際し，問題となる点の一つである。

この問題点を解消するため，中小地震観測記録の代わりに確率論的（Stochastic）手法により小地震波形を人工的に作成する試みが行なわれている[4)]。また，３次元地下構造を設定することにより長周期表面波をシミュレートし，これと先の確率論的手法による短周期地震動を足し合わすことによって小地震記録を人工的に作成する方法いわゆる「ハイブリッド法」の試みもなされるようになってきた[5),6)]。

本検討ではハイブリッドグリーン関数重ね合わせ法の適用性を検討するため，兵庫県南部地震の大阪府域における観測点を対象として強震動シミュレーションを行なった。

2　解析概要

2．1　解析手法

解析は，次の手順で行なう。

①対象地点における小地震の短周期地震動と長周期地震動をそれぞれ作成する。

②これらをバンドパスフィルターの処理を行なった後，時間領域で足し合わせる。

③②で得られた波形をグリーン関数として修正入倉手法[2)]を適用し，大地震の地震動をシミュレートする。

小地震の短周期地震動，長周期地震動およびサイト増幅特性は以下のように求める。

2．1．1　小地震短周期地震動の作成

小地震の短周期地震動は統計的シミュレーション法[7)]により作成する。これは，ある帯域でランダムなGaussian White Noiseにウィンドウをかけ，その振

幅スペクトルが次式に示されるω^{-2}モデルのスペクトル特性$A(f)$に平均的に一致するようにした後，位相ランダムを仮定して時間領域に逆変換するというものである。

$$A(f)=CM_0S(f)P(f)X^{-1}\exp[-\pi fX/\{Q(f)\beta\}] \quad \cdots \quad (1)$$

ここで，

$A(f)$：地震モーメントM_0(dyn・cm)の地震の震源から距離X(cm)離れた岩盤点で得られる加速度スペクトル（cm/s/s・s）

M_0：地震モーメント(dyn・cm)

$S(f)$：ω^{-2}則に従う震源特性

$P(f)$：高域遮断フィルター

X：震源距離(cm)

$Q(f)$：みかけ減衰を示すQ値

β：媒質のせん断波速度(=360,000cm/s)

C：その他の係数

である。震源特性$S(f)$はコーナー周波数をf_cとして，

$$S(f)=(2\pi f)^2/\{1+(f/f_c)^2\} \quad \cdots \quad (2)$$

と表せる。高域遮断フィルター$P(f)$は高域遮断周波数をf_{max}として，

$$P(f)=1/\{1+(f/f_{max})^n\} \quad \cdots \quad (3)$$

と表せる。ここでnはFaccioli[8]に従い１とする。その他の係数Cは，

$$C=R_{\phi\theta}F_SP_R/(4\pi\rho\beta^3) \quad \cdots \quad (4)$$

と表せる。ここで，

$R_{\phi\theta}$：ラディエーションパターンの係数(=0.63[9])

F_S：自由地表面の影響による増幅(=2.0)

P_R：エネルギー分配の係数(=0.71)

ρ：密度(=2.7g/cm^3)

である。この方法で基盤岩における小地震の短周期地震動が得られる。

２．１．２　小地震長周期地震動の作成

小地震の長周期地震動は３次元地下構造に対してStaggerd-Gridを用いた差分法により作成する。この方法はノースリッジ地震などに適用され，堆積盆地上の観測点のおける長周期地震動の再現が行なわれている[10]。なお，大阪平野の堆積盆地構造は宮腰らによるモデル[11]を用いた。

２．１．３　サイト増幅特性

対象地点のサイト増幅特性は，観測記録から独立に推定される震源特性，伝播経路特性を取り除くことによって評価する方法[12]を用いて算出した。この方法は，観測記録から得られるスペクトルを解析対象地点直下の岩盤で得られる理論スペクトル（(1)式により算出される）で除することによって求めるものである。

短周期地震動については，ここで得られたサイト増幅特性を直接(1)式に乗じることにより，サイト増幅特性が考慮される。長周期地震動については３次元構造で計算された増幅特性と比較して不足分をかさ上げすることにより，サイト増幅特性が考慮される。

２．２　解析対象地点

解析対象地点は関西地震観測研究協議会による弥栄，忠岡の観測点である。弥栄は厚い沖積層上の，忠岡は薄い沖積層上の観測点である。

２．３　解析対象地震

解析対象大地震は兵庫県南部地震である。その震源過程については，菊地による遠地実体波を用いた波形インバージョンによる検討[13]，Sekiguchi *et al.* による震源近傍の観測記録を用いた波形インバージョンによる検討[14]，釜江らによる経験的グリーン関数法を用いたフォーワードモデリングによる検討[15]などが行なわれている。本検討では，表１に示す釜江らによる断層モデルを用いることとした。

表１　兵庫県南部地震の断層モデル

	ｱｽﾍﾟﾘﾃｨ1	ｱｽﾍﾟﾘﾃｨ2	ｱｽﾍﾟﾘﾃｨ3
基準点緯度(°)	34.600	34.649	34.732
基準点経度(°)	135.029	135.100	135.232
基準点深度(km)	0.0	8.0	4.8
走　行(°)	233.0	233.0	233.0
傾斜角(°)	96.0	90.0	85.0
すべり角(°)	180.0	180.0	180.0
断層長さ(km)	11.0	8.0	8.0
断層幅(km)	16.0	8.0	8.0
地震ﾓｰﾒﾝﾄ (×10E25 dyn cm)	10.0	3.4	1.8
ﾗｲｽﾞﾀｲﾑ(sec)	0.6	0.6	0.6
応力降下量(bar)	86.0	163.0	86.0

３　解析結果

図１にハイブリッドグリーン関数の一例を示す。同図上から短周期地震動，長周期地震動，ハイブリッドグリーン関数である。

弥栄，忠岡のサイト増幅特性を図２に示す。図中太線はサイト増幅特性の平均値，細線は平均値±標準偏差である。

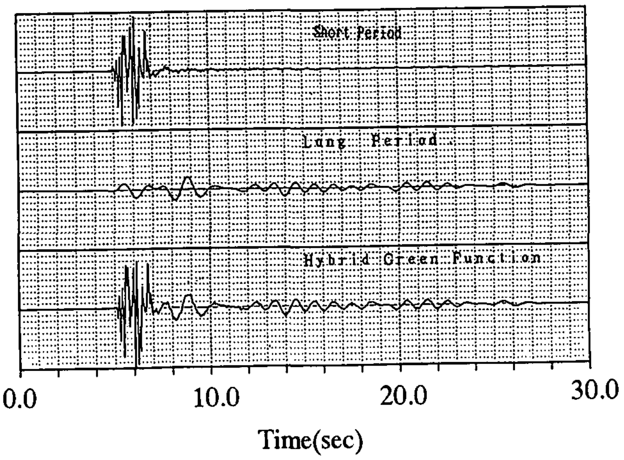
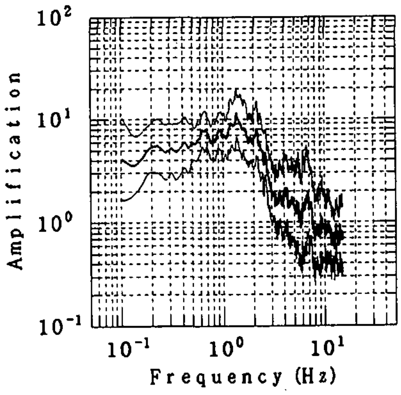
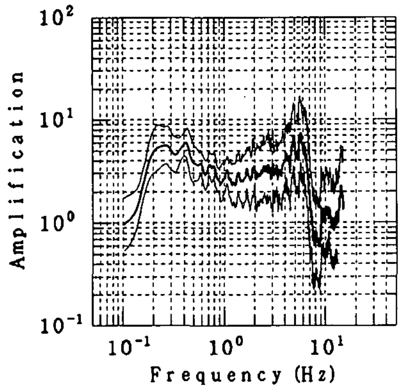


図1　ハイブリッドグリーン関数の一例



弥栄



忠岡

図2　サイト増幅特性

弥栄における観測速度波形とシミュレーションによる速度波形の比較を図3に示す。図中，上が観測速度波形，下がシミュレーションによる速度波形である。疑似速度応答スペクトルの比較を図4に示す。図中，太線が観測記録の応答スペクトル，細線がシミュレーション波形のそれである。

さらに，忠岡における観測速度波形とシミュレーションによる速度波形の比較を図5に，疑似速度応答スペクトルの比較を図6に示す。

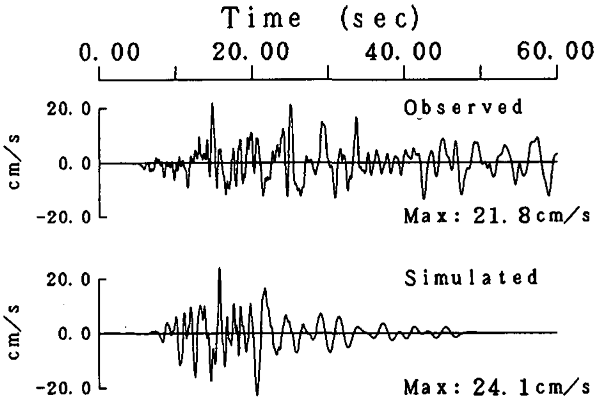


図3　観測波形とシミュレーション波形の比較（弥栄）

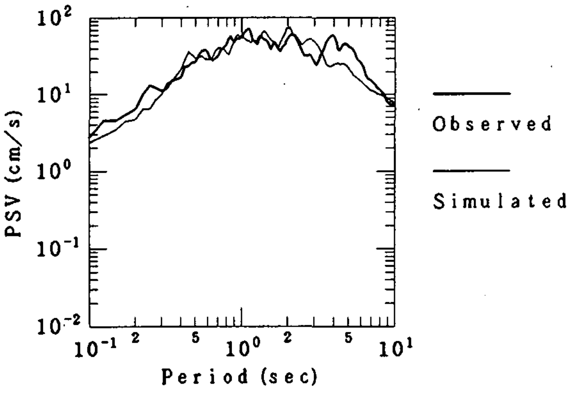


図4　疑似速度応答スペクトルの比較（弥栄）

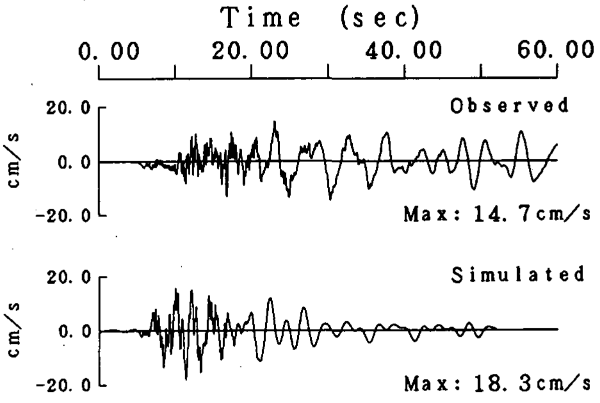


図5　観測波形とシミュレーション波形の比較（忠岡）

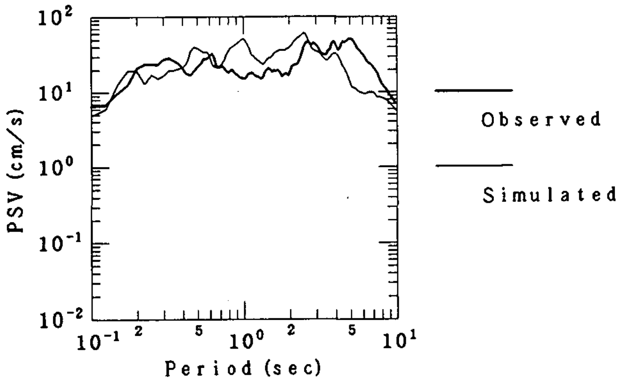


図6　疑似速度応答スペクトルの比較（忠岡）

2地点における最大加速度，最大速度，最大変位の観測値とシミュレーションによる値の比較を表2に示す。以上の結果から，次のことが言える。

①最大加速度・最大速度・最大変位の観測値と解析値の差は10%～20%程度であり，最大値については概ね良好な結果が得られた。

②応答スペクトルについては，忠岡の1sec以上の周期帯域でやや観測と解析とで差がみられるが，それ以外では概ね観測波の応答スペクトルと整合性あるスペクトルが得られた。

③地震動の継続時間は観測に比べ短い。これは，サイト特性の評価が振幅のみを対象としており，位相を評価していないことによるものと考えられる。今後，位相特性を考慮したサイト特性を評価する必要がある。

表2　最大加速度（Amax），最大速度（Vmax），最大変位（Dmax）の比較

地点	Amax(cm/s/s)		Vmax(cm/s)		Dmax(cm)	
	観測	解析	観測	解析	観測	解析
弥栄	146.2	124.8	21.8	24.1	8.6	9.4
忠岡	187.3	200.3	14.7	18.3	7.8	6.3

4　おわりに

本検討では，1995年兵庫県南部地震による大阪府内の観測点における強震動をシミュレーションすることによって，ハイブリッドグリーン関数重ね合わせ法の工学的適用性の検討を行った。その結果，次の成果が得られた。

①最大加速度，最大速度，最大変位，応答スペクトルに関しては，概ね観測記録と整合性のあるシミュレーション結果が得られた。

②地震動の継続時間については観測記録と比較してやや短く評価された。地震動の継続時間は地震規模，震源距離，対象地点の地盤状況などと大きな関わりがあり，今後検討する必要がある。また，サイト固有の位相特性についての検討も必要である。

謝辞：小地震長周期地震動の作成にはArben Pitarka氏作成のプログラムを使用した。また，本検討に用いた兵庫県南部地震本震観測記録は関西地震観測研究協議会（座長：土岐憲三京都大学教授）より提供されたものです。記して感謝いたします。

参考文献

1）Hartzell,S.H.：Earthquake aftershocks as Green's functions，Geophys. Res. Lett.，5，pp.1-4，1978.

2）Irikura,K.：Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, Proc. of the 7th Japan Earthq. Eng. Symp.，pp.151-156，1986.

3）例えば，　釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長：特定サイトにおける強震動予測，日本建築学会構造系論文報告集，No.409，pp.11-25，1990.

4）釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長：1991，地震のスケー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，No.430，pp.1-9，1991.

5）入倉孝次郎・釜江克宏・A. Pitarka：直下地震による強震動のハイブリッド・シミュレーション法，日本地震学会講演予稿集1994年度秋季大会，p.212，1994.

6）釜江克宏・A. Pitarka・入倉孝次郎：ハイブリッドグリーン関数を用いた強震動評価－1995年兵庫県南部地震への適用－，日本地震学会講演予稿集1996年度秋季大会，1996.

7）Boore,D.M.：Stochastic simulation of high - frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra，Bull. Seism. Soc. Am.，Vol.73，pp.1865-1894，1983

8）Faccioli,E.：A study of strong motions from Italy and Yugoslavia in terms of gross source properties，Geophys. Monograph，37，Maurice Ewing，AGU，6，pp.297-309，1986.

9）Boore,D.M.・J.Boatwright：Average body-wave radiation coeffecient，Bull. Seism. Soc. Am.，Vol.74，pp.1615-1621，1984

10）Pitarka,A.・K.Irikura：Basin structure effects on long-period strong motions in the San Fernando Valley and the Los Angels basin from the 1994 Northridge earthquake and an aftershock，Bull. Seism. Soc. Am.，Vol.86，pp.S126-S137，1996.

11）宮腰研・香川敬生・越後智雄：大阪平野における深部地下構造のモデル化，物理探査学会第96回学術講演会論文集，pp.186-189，1997.

12）鶴来雅人・田居優・入倉孝次郎・古和田明：経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討，「地震」投稿中

13）菊地正幸：遠地実体波による震源のメカニズム，月刊地球号外，No.13，pp.47-53，1995.

14）Sekiguchi H.・K.Irikura・T.Iwata・Y.Kakehi・M.Hoshiba：Minute locating of faulting beneath Kobe and the waveform inversion of the source process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake using strong ground motion，J. Phys. Earth，Vol.44，pp.473-487，1996.

15）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，「日本建築学会論文集」投稿中