

最大地動の距離減衰式に基づく 工学的基盤地震動のシミュレーション手法

澤田 勉¹・平尾 潔²・辻原 治³・三神 厚⁴

¹正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

²フェロー会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

³正会員 博(工) 和歌山工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒644-0023 御坊市名田町野島 77)

⁴正会員 博(工) 徳島大学助手 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

本研究は、工学的基盤での最大地動(最大加速度, 最大速度および最大変位)の距離減衰に適合するような模擬地震動の作成法を提案したものである。具体的には、フーリエ振幅スペクトルと波形包絡線を与えて作成した工学的基盤での加速度波と、それを積分して得られる速度波および変位波の最大値が、距離減衰式より求められる最大加速度, 最大速度および最大変位と整合するように、フーリエ振幅スペクトルを修正する一手法を提案し、数値計算よりその妥当性を検証したものである。本手法を用いると、種々のマグニチュード, 断層距離および震源深さに対する工学的基盤での模擬地震動を比較的簡便に作成できる。

Key Words : simulation, earthquake ground motion, engineering bedrock, PGA, PGV, PGD, attenuation, Fourier amplitude spectrum

1. はじめに

構造物の耐震設計や動的応答解析では、入力地震動を適切に設定することが重要である。応答解析用の入力地震動としては、実地震記録(たとえば1995年兵庫県南部地震の記録)が多用されているが、計算機内で人工的に作成した模擬地震動を用いることも多い^{1),2)}。模擬地震動作成法は現在までに多数提案されており、それらを大別すると、断層モデルによる理論的方法³⁾⁻⁵⁾、小地震の記録を経験的グリーン関数として大地震の記録を合成する半経験的手法⁶⁾⁻¹¹⁾、および距離減衰式等の経験式に立脚した経験的手法^{1),2),12)-16)}になる。また、理論的手法と半経験的手法を組み合わせたハイブリット法¹⁷⁾や半経験的手法と経験的手法を併用した統計的波形合成法^{14),18),19)}も提案されている。これらのうち、経験的手法は実地震動の平均的な特性を直接反映できるという長所をもっており、実用的な方法となっている。本研究で提案する方法も経験的手法に属するものである。

地震動特性は、強度特性、周波数特性および非定常特

性に大別され、強度特性は最大地動(最大加速度, 最大速度および最大変位)、加速度のrms振幅値, 全パワー等で、周波数特性はフーリエスペクトルや応答スペクトルで、また非定常特性は波形包絡線や位相差分²⁰⁾で表現される。これら諸特性については、従来より多くの経験式(距離減衰式)が提案されており^{1),2),21)-30)}、それらのいくつかは耐震設計などで実際に用いられている。とくに、地震動強度特性を表す最大地動(最大加速度, 最大速度および最大変位)は、耐震設計用入力地震動設定の基本であり、これまでに多くの研究がなされてきた。最近では、工学的に有用な震源近傍まで適用可能な最大地動の距離減衰式が、安中ら^{25),26)}、福島ら^{27),28)}、山崎ら^{29),30)}、Ohno, et al.³¹⁾により提案されている。

経験的手法は、以上のような距離減衰式に基づいて模擬地震動を作成する方法であり、パワースペクトル(またはフーリエスペクトル)に基づく方法¹²⁾、非定常スペクトルに基づく方法^{13),14)}、応答スペクトルに基づく方法^{1),2)}等が提案されている。一般に、周波数特性(たとえばフーリエスペクトル)と非定常特性(たとえば波形包

絡線)を与えると模擬地震動を作成することはできるが、そのようにして作成した波形は必ずしも地震動強度特性を満足するものではない。たとえば、地震動強度特性として最大地動(最大加速度 A_{max} 、最大速度 V_{max} および最大変位 D_{max})が与えられたとき、上のようにして作成した加速度波およびそれを積分して得られる速度波、変位波の最大値は、必ずしも A_{max} 、 V_{max} および D_{max} を満足するものとはならない。

本研究の目的は、周波数特性と非定常特性を与えて作成した工学的基盤での模擬地震動が地震動強度特性をも満足するように、フーリエスペクトルを規定するパラメータを調整する一手法を提案することである。具体的には、フーリエ振幅スペクトルと波形包絡線を与えて作成した工学的基盤での加速度波と、それを積分して得られる速度波および変位波の最大値 (a_{max} , v_{max} および d_{max}) が、距離減衰式より求められる最大加速度、最大速度および最大変位と整合するように、フーリエ振幅スペクトルを規定する14個のパラメータ(後述)を修正する一手法を提案する。模擬地震動作成の基礎となる最大地動の距離減衰式としては、安中らによる推定式²⁶⁾を用いる。本研究で提案する模擬地震動作成法はスペクトルを規定するパラメータの決定過程がやや複雑であるが、一旦パラメータが決定されると、広い範囲のマグニチュード ($M=6\sim 8$)、断層距離 ($R=0\sim 200\text{km}$) および震源深さ ($H=0\sim 80\text{km}$) に対する模擬地震動を比較的簡単に作成できるといった特徴がある。また、最大地動(最大加速度、最大速度および最大変位)を忠実に反映できるため、実用的な方法であると考えられる。

2. 地震動特性の表現

前述のように、地震動特性は強度特性、周波数特性および非定常特性に大別される。模擬地震動の作成においては、これらの特性が的確に反映できるモデルを用いなければならない。本研究の模擬地震動作成法では、工学的基盤での加速度波を対象とし、以下のようなモデルを用いて地震動特性を表現する。

(1) 地震動強度特性

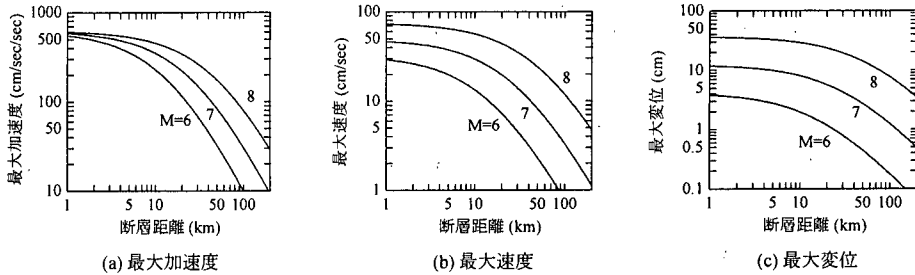
最大地動で代表される地震動強度特性は、耐震設計における基本パラメータであり、これを精度よく推定することは重要である。最大地動(最大加速度、最大速度および最大変位)を予測するため、現在までに多数の経験式(距離減衰式)が提案され、そのうちのいくつかは耐震設計等で実際に用いられている。これらのうち、文献25)-32)の距離減衰式は、地震マグニチュードと震源距離に相関がある場合や工学的に重要な震源近傍にも適用可能であるという特徴があり、最近注目されている。本研

究では、最大地動の距離減衰式として、安中らによる距離減衰式²⁶⁾を採用する。その理由は、この推定式が工学的に有用な震源近傍まで適用可能なこと、S波速度が数100m/sec程度の工学的基盤での最大地動を対象としていること、最大加速度、最大速度および最大変位が同一形式で記述されていること、震源からの距離の定義が簡単であること(断層距離すなわち断層面からの最短距離を用いている)等である。

安中らは、1988年から1996年までに得られた気象庁87型強震計記録を用いて断層面の大きさを考慮した最大地動および加速度応答スペクトルの回帰分析を行った。ただし、加速度記録を積分して速度と変位を求める際には、0.1Hz以下の低周波数成分を除去して回帰データを作成した。マグニチュードの大きい地震については、断層面からの最短距離(以下では断層距離と呼ぶ)を用い、マグニチュードが5以上、断層距離が500km以下の地震記録(2085成分)に対して2段階回帰分析を行って、最大加速度(A_{max})、最大速度(V_{max})および最大変位(D_{max})の距離減衰式を次のように決定した²⁶⁾。

$$\begin{aligned} \log A_{max} &= 0.606M + 0.00459H \\ &\quad - 2.136 \log\{R + 0.334e^{0.653M}\} + 1.730 \\ \log V_{max} &= 0.725M + 0.00318H \\ &\quad - 1.918 \log\{R + 0.334e^{0.653M}\} - 0.519 \\ \log D_{max} &= 0.935M + 0.00091H \\ &\quad - 1.635 \log\{R + 0.334e^{0.653M}\} - 2.992 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 M =気象庁マグニチュード(以後、マグニチュードと略す)、 H =震源深さ(断層面の破壊開始点の深さ、km)、 R =断層距離(km)である。ただし、上式はS波速度が300~600m/sec程度の工学的基盤での最大地動の距離減衰式であり、地点補正項は省略されている。上式右辺の第1項は M に依存する項、第2項は H に依存する項、第3項は距離減衰項、第4項は定数項である。2段階回帰分析は、第1段階で地震ごとの距離減衰特性(第3項)を回帰した後、第2段階で地震に関する項(第1項、第2項および第4項)を決定する方法である。ここで注目すべきは、距離減衰項(第3項)がすべて同形であり、 A_{max} 、 V_{max} および D_{max} が同一形式で表現されていること、また、第3項(・)内の第2項によって震源の大きさが考慮されている点である。 A_{max} 、 V_{max} および D_{max} が高周波数、中周波数および低周波数を代表する強度パラメータであり、スペクトル特性と密接な関係をもつこと^{39), 40)}を考えると、これらを満足するように作成した模擬地震動は間接的に周波数特性をも反映したものとなる。図-1には、マグニチュード $M=6\sim 8$ に対する A_{max} 、 V_{max} および D_{max} の距離減衰特性を示す。図の横軸は断層距離(km)、縦軸は最大地動(A_{max} 、 V_{max} 、 D_{max})である。震源深さは、 $H=10\text{km}$ とした。



図一 最大地動の距離減衰特性²⁶⁾

(2) 周波数特性^{15), 34)}

周波数特性は、地震動がどのような周波数成分より構成されるかを表すものであり、フーリエスペクトルや応答スペクトルにより表現される。ここでは、工学的基盤での加速度波の周波数特性を、次のようなフーリエ振幅スペクトル $F(f)$ で表す。

$$F(f) = C \cdot S(f) \cdot U(f) \cdot Z(f) \quad (2)$$

ここで、 C =定数、 $S(f)$ =震源特性を表す関数、 $U(f)$ =伝播経路における減衰を表す関数、 $Z(f)$ =地震基盤から工学的基盤までの増幅率である。地震基盤はS波速度が3.5km/sec程度の硬い岩盤、工学的基盤はS波速度が数100m/sec程度の洪積層上面として定義される。なお、従来の研究^{15), 34)}では、地震動のフーリエスペクトルモデルとして、上式に高周波遮断フィルタを付加した式を用いる場合が多い。しかし、本研究では、後述の関数 $U(f)$ が高周波遮断フィルタの特性をも併せもつため、独立した高周波遮断フィルタは設けていない。

以下、上式の右辺各項について説明する。

定数 C は次式で表される^{15), 34)}。

$$C = \frac{R_{\theta\theta} F_S P_{RTTN}}{4\pi \rho V_S^3} \quad (3)$$

ここで、 $R_{\theta\theta}$ = 地震動のラディエーションパターン係数、 F_S = 自由表面の効果を表す係数、 P_{RTTN} = 水平2成分のエネルギー配分を表す係数、 ρ = 媒質の密度、 V_S = 媒質のS波速度である。これらの係数は次のように与えられる³⁴⁾。

$$R_{\theta\theta} = 0.63, F_S = 2.0, P_{RTTN} = 1/\sqrt{2}$$

$$\rho = 3.0 \text{ g/cm}^3, V_S = 3.5 \text{ km/sec}$$

このとき、 $C = 5.51 \times 10^{19}$ (CGS単位) となる。

震源特性を表す関数 $S(f)$ は ω^2 モデルに従うものとし、次式で表す。

$$S(f) = \frac{M_0 \cdot (2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad (4)$$

ここで、 M_0 および f_c は、それぞれ $S(f)$ の振幅および周

波数特性を規定する関数であり、地震モーメントおよびコーナー周波数と呼ばれる。地震学における通常の地震動フーリエスペクトルでは、観測波形等から決められた地震モーメント M_0 やコーナー周波数 f_c 等の特性を仮定する。しかし、本研究では後述するように、一般的な伝播経路特性を表す関数(式(5))とは異なるモデル(式(6))を用い、式(1)で与えられる最大加速度、最大速度および最大変位を満たすように M_0 や f_c を決定する。したがって、本研究における M_0 や f_c は地震学におけるそれらと必ずしも対応するものではない。

つぎに、スペクトル振幅の伝播経路における減衰を表す関数 $U(f)$ について考える。地震学では、この $U(f)$ を次式で表す。

$$U(f) = \exp(-\pi f X / Q V_S) / X \quad (5)$$

ここで、 f = 周波数、 X = 震源距離、 Q = 伝播経路の減衰を表す Q 値、 V_S = S波速度である。本研究では、式(1)の距離減衰式を基準として、震源域を含む広い範囲を対象とした模擬地震動の作成を目的とするため、式(5)は採用せず、式(1)と同形の次式を用いて $U(f)$ を表す。

$$U(f) = \{R + 0.334 \cdot e^{0.653M}\}^{-(c+d \log(f/f_c))} \quad (6)$$

ここで、 c および d はフーリエ振幅の距離減衰を規定するパラメータである。とくに、係数 d は高周波数になるほど距離減衰が大きくなることを考慮して導入した係数である。関数 $U(f)$ の周波数依存性を考慮する際に、指数項の第2項をコーナー周波数 f_c で基準化した。これは、コーナー周波数 f_c が、低周波数および中周波数を代表する地震動強度パラメータの最大変位および最大速度に大きく関与することを考慮したためである。すなわち、最大変位および最大速度の距離減衰特性は、 f_c を中心とするある範囲の周波数成分の距離減衰に支配されると考え、このような基準化を行った。上式は断層距離 (R) が一定であれば、高周波数成分を遮断する役目ももつ。

最後に、地震基盤から工学的基盤までの増幅率を表す関数 $Z(f)$ について述べる。この関数については、低周波数域で1に、また高周波数域で1以上の一定値に漸近することが示されている³⁴⁾。本研究では、なるべく少ない

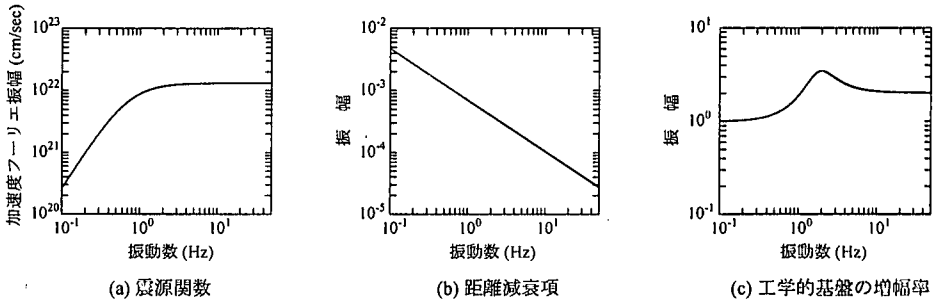


図-2 フーリエスペクトルを規定する関数 ($M=7, H=10\text{km}$)

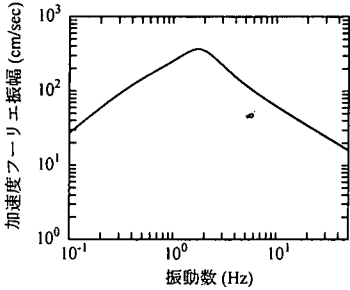


図-3 工学的基盤の加速度フーリエ振幅スペクトル ($M=7, H=10\text{km}$)

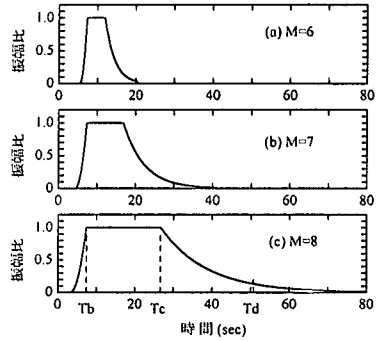


図-4 包絡線関数の形状

パラメータでこの関数を表現するため、次式により $Z(f)$ を表すこととした。

$$Z(f) = \frac{1 + \alpha \cdot (f/f_0)^2}{\{[1 - (f/f_0)^2]^2 + 4h^2(f/f_0)^2\}^{1/2}} \quad (7)$$

ここで、 f_0 は卓越周波数、 $h = Z(f)$ の形状係数、 α は高周波数における振幅を規定する係数である。上式は、地震基盤から工学的基盤までの増幅率を 1 自由度の変位および加速度の伝達関数を利用して表したものであり、低周波数域および高周波数域での振幅が、それぞれ 1 および α に漸近するモデルとなっている。式(3)、(4)、(6)および(7)を式(2)に代入すると、工学的基盤での加速度波のフーリエ振幅スペクトルが次式のように表される。

$$F(f) = C \cdot \frac{M_0 \cdot (2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \cdot \{R + 0.334 \cdot e^{0.653M}\}^{-[c + d \log(f/f_c)]} \cdot \frac{1 + \alpha \cdot (f/f_0)^2}{\{[1 - (f/f_0)^2]^2 + 4h^2(f/f_0)^2\}^{1/2}} \quad (8)$$

上式において、定数以外の係数、すなわち、 M_0 、 f_c 、 c 、 d 、 f_0 、 h および α の 7 個の係数が与えられると、フーリエ振幅スペクトルを決定することができる。これら係数の決定方法については次節で述べる。

図-2 および図-3 には、上述のパラメータを同定した後で得られた関数 $X(f)$ 、 $U(f)$ 、 $Z(f)$ およびフーリエ振幅スペクトル $F(f)$ の概形を示す。

(3) 非定常特性¹⁾

地震動の非定常特性は、波形包絡線、位相差分、非定常スペクトル等により表される。本研究では、大崎らによる以下のような波形包絡線 $E(t)$ を用いて基盤加速度波の非定常特性を表現する¹⁾。

$$\begin{cases} E(t) = (t/T_b)^2 & ; 0 \leq t \leq T_b \\ E(t) = 1 & ; T_b \leq t \leq T_c \\ E(t) = e^{-a(t-T_c)} & ; T_c \leq t \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 T_b 、 T_c および a はマグニチュード M の関数として次式で与えられる。

$$\begin{cases} T_b = (0.40 - 0.04M)T_d \\ T_c = (0.78 - 0.04M)T_d \\ a = -\ln 0.1/(T_d - T_c) \end{cases} \quad (10)$$

上式中の T_d は継続時間であり、次式より求められる。

$$T_d = 10^{0.31M - 0.774} \quad (11)$$

図-4 には、上述の波形包絡線を $M=6, 7, 8$ について示す。ただし、強震部の開始時刻 T_b が全ての M について同一となるようにして図示した。

3. 模擬地震動作成法と最大値の求め方

前述の地震動特性のうち、周波数特性（フーリエ振幅スペクトル）と非定常特性（波形包絡線）が与えられると、模擬地震動を作成することができる。以下、その手順について簡単に述べる。

① 式(8)に含まれる7個のパラメータ ($M_0, f_c, c, d, f_0, h, \alpha$) に適当な値を与え、式(8)を用いてフーリエ振幅スペクトル、 $F_k = F(f_k)$, $k=0, \dots, N_f$ を計算する。ここで、 $f_k = k \Delta f = k$ 次の離散周波数点、 $\Delta f = 1/T$, T =加速度波の全継続時間、 N_f =離散周波数点の数である。ただし、継続時間 T は、一般には式(11)の T_d とは異なるものであり、 T_d の後に後続の0を付加して、時間点の数を2の累乗にしたものである¹⁾。

② $0 \sim 2\pi$ の一様乱数を用いて、 k 次周波数に対するフーリエ位相角、 ϕ_k , $k=0, 1, \dots, N_f$ を求める。

③ 複素フーリエ係数 C_k を次式より求める。

$$C_k = F_k \cdot e^{i\phi_k} / T, \quad k=0, 1, \dots, N_f \quad (12)$$

ここで、 T =加速度波の全継続時間である。

④ 式(12)をフーリエ逆変換して、定常な加速度時刻歴 $a_s(t)$ を求める。

⑤ 上の $a_s(t)$ に式(9)の包絡線 $E(t)$ を乗じて、非定常な加速度時刻歴 $a(t)$ を求める。

$$a(t) = E(t) \cdot a_s(t) \quad (13)$$

⑥ ②の乱数の初期値を変えて②～⑤を N 回繰り返すことにより、 N 個のサンプル波（加速度波） $a_j(t)$, $j=1 \sim N$ を作成する。解析では、 $N=10$ とした。

以上のようにして得られた加速度時刻歴 $a_j(t)$ の最大値 $a_{j\max}$ はサンプルごとに異なるから、模擬地震動の最大値はそれらの平均として求められる。

$$a_{\max} = \sum_{j=1}^N a_{j\max} / N \quad (14)$$

速度および変位の最大値 v_{\max} および d_{\max} は、加速度時刻歴の積分より求めたそれぞれのサンプル波から同様な方法により計算する。なお、加速度時刻歴 $a_j(t)$ を積分する際には、0.1Hz 以下の低周波数成分は除去した。これは、安中らの距離減衰式が、そのような処理をしたデータを用いているためである。

4. フーリエ振幅スペクトルを規定するパラメータの決定

ここでは、周波数特性と非定常特性を与えて作成した模擬地震動が、地震動強度特性をも満足するように、周波数特性（フーリエ振幅スペクトル）を規定するパラメ

表-1 対象とした地震動

マグニチュード, M	6, 7, 8
断層距離, R (km)	0, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200
震源深さ, H (km)	0, 10, 20, 40, 80

ータを調整する方法について述べる。一般に、地震動強度特性としての最大地動 (A_{\max} , V_{\max} および D_{\max}) は、それぞれ高・中・低周波数成分を代表するパラメータであり、スペクトル形状と密接な関係をもつ。したがって、 A_{\max} , V_{\max} , D_{\max} を目標値として作成した模擬地震動は、周波数特性をも反映したものとなる。本手法の基本は、距離減衰式より求めた最大地動 (A_{\max} , V_{\max} , D_{\max}) を目標値として、フーリエ振幅スペクトルを規定するモデルパラメータを同定することである。

(1) 対象とした地震動

本研究では、震源域を含む広い範囲の工学的基盤での強地震動の作成を目的として、表-1に示すようなマグニチュード (M)、断層距離 (R) および震源深さ (H) の地震動を対象として解析を行った。以下では、これらの地震動を適宜選択して解析に用いるが、最終的には、表-1に示す地震動（マグニチュード3通り、断層距離13通り、震源深さ5通り）の合計195通りを解析の対象とした。

(2) 予備解析

第2章で述べたように、決定すべきパラメータは、フーリエ振幅スペクトルを規定する7個のパラメータ ($M_0, f_c, c, d, f_0, h, \alpha$) である。これらのパラメータは2つのグループに分類できる。その1つは、工学的基盤の増幅率に關係する f_0, h および α であり、これらは地震マグニチュードや震源深さには依存しない。他方、 M_0, f_c, c および d はマグニチュードや震源深さに依存して変化するパラメータである。そこで、解析においては、工学的基盤の増幅率に關係するパラメータとそれ以外のパラメータを別個に同定することにした。

まず、工学的基盤の増幅率を規定するパラメータ (f_0, h, α) を推定するために、特定のマグニチュード ($M=7$) および震源深さ ($H=10$ km) の地震に対して、次の評価関数が最小となるように上述の7個のパラメータを決定した。

$$S_c = \sum_R \{r_a^2(\beta; R) + r_v^2(\beta; R) + r_d^2(\beta; R)\} \rightarrow \min \quad (15)$$

ここで、 R =断層距離、 $\beta = \{M_0, f_c, c, d, f_0, h, \alpha\}^T$ であり、 r_a, r_v および r_d はそれぞれ次のように表される。

$$\begin{cases} r_a(\beta; R) = \log\{a_{\max}(\beta; R) / A_{\max}(R)\} \\ r_v(\beta; R) = \log\{v_{\max}(\beta; R) / V_{\max}(R)\} \\ r_d(\beta; R) = \log\{d_{\max}(\beta; R) / D_{\max}(R)\} \end{cases} \quad (16)$$

ここで、 $a_{\max}(\beta; R)$, $v_{\max}(\beta; R)$ および $d_{\max}(\beta; R)$ はパラメ

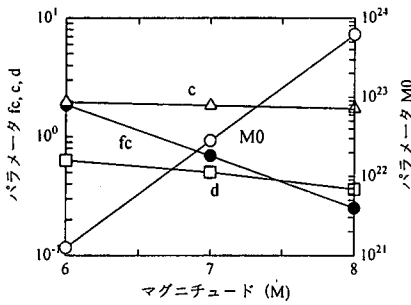


図-5 パラメータとマグニチュードの関係 ($H=10$ km)

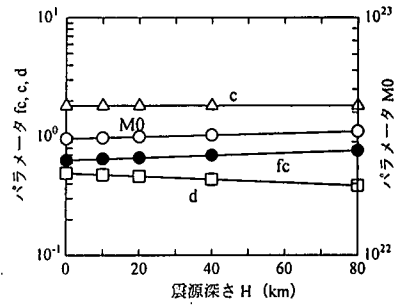


図-6 パラメータと震源深さの関係 ($M=7$)

表-2 予備解析におけるパラメータの初期値と収束値
(マグニチュード $M=7$, 震源深さ $H=10$ km)

パラメータ	初期値の範囲	収束値
M_0	$10^{22} \sim 10^{23}$	2.904×10^{22}
f_c	0.4~1.2	0.667
c	1.6~2.0	1.823
d	0.3~0.7	0.485
f_0	1~5	1.8226
h	0.1~0.7	0.4459
α	1~3	2.1140

ータ β に任意の値を与えて作成した模擬地震動の最大値、 $A_{\max}(R)$ 、 $V_{\max}(R)$ および $D_{\max}(R)$ は式(1)より求められる最大地動である。式(15)は、模擬地震動の最大値と距離減衰式によるそれらの対数の残差平方和が最小になるように、パラメータ β を逐次修正するための評価基準である。式(15)の最小化問題はパラメータ β に関する非線形問題となるので、適切な非線形計画法を用いて解かなければならない。本研究では、この問題を MSLP 法 (修正反復線形計画法)⁴²⁾を用いて解いた。なお、解析の過程で必要となる式(16)の偏微分係数は数値微分より求めた。

β の決定過程では、まず初期値として $\beta^{(0)}$ を与えた後、これを式(15)に基づいて順次修正し、最終的に収束解を求めるという過程がとられる。ところが、非線形関数の最小化問題では、いくつかの局所解が存在するため、異なる初期値に対して異なる収束解が得られることが多い。そこで、種々の初期値を与えて求めた解のうち、評価関数(残差平方和)が最小となる解(全域解)を求めることが必要である。本研究では、距離減衰式(式(1))や地震の相似則^{34,41)}を参考にして、表-2に示すような広い範囲の初期値を設定して、式(15)の評価関数を最小とするような収束解を求めた。以上のようにして得られた収束解を表-2の右欄に示す。ここで求めた f_0 、 h および α の値(表-2中の太字)は以下の解析で固定される。このときの評価関数(式(15))の値は、 $S_e=0.0026$ になった。

つぎに、 f_0 、 h および α 以外のパラメータ、すなわち、 M_0 、 f_c 、 c および d について考える。これらのパラメータは、式(1)の最大地動の距離減衰特性を反映して、マグニチュ

ード (M) および震源深さ (H) によって変化することが予想される。そこで、 M や H に依存しないパラメータ f_0 、 h および α を表-2の収束値、すなわち、 $f_0=1.8226$ 、 $h=0.4459$ 、 $\alpha=2.1140$ に固定し、表-1の M および H のそれぞれについて、式(15)の評価関数を最小とするようなパラメータ M_0 、 f_c 、 c および d を同定し、これらパラメータの M および H に対する依存性を検討した。図-5 および図-6には、これらパラメータとマグニチュード (M) および震源深さ (H) との関係を示す。図において、横軸はマグニチュード (M) または震源深さ (H)、縦軸はそれぞれのパラメータ値である。これらの図表より、以下のことがわかる。

- (a) M_0 は、 M および H が增大するにつれて、片対数紙上でほぼ直線的に増加する。
- (b) f_c は、 M の増大とともに減少し、 H の増大とともに増加する。両者の関係は片対数上でほぼ線形である。
- (c) 係数 c は、 M の増大とともに片対数上で直線的に減少するが、 H に対してはほぼ一定である。
- (d) 係数 d は、 M および H の増大とともに、片対数上でほぼ線形的に減少する。

以上の結果より、これらパラメータとマグニチュード (M) および震源深さ (H) の関係を次のように設定した。ただし、モデルの簡単化のため M と H の連成項は考慮しないこととした。

$$\begin{cases} \log M_0 = a_0 + a_1 M + a_2 H \\ \log f_c = b_0 - b_1 M + b_2 H \\ \log c = c_0 - c_1 M \\ \log d = d_0 - d_1 M - d_2 H \end{cases} \quad (17)$$

図-5 および図-6 より、以上のパラメータを規定する係数 ($a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, d_0, d_1, d_2$) の概略値を求めると、次のようになった。

$$\begin{cases} \log M_0 = 13.3 + 1.3M + 0.0004H \\ \log f_c = 2.6 - 0.4M + 0.001H \\ \log c = 0.42 - 0.023M \\ \log d = 0.4 - 0.1M - 0.001H \end{cases} \quad (18)$$

(3) 本解析

予備解析の結果を用い、表-1に示す M , R および H の全てを同時に考慮して、模擬地震動のフーリエスペクトルを規定するパラメータを決定する。前述のように、これらパラメータは次の14個の係数で表される。

地震モーメント(M_0) : a_0, a_1, a_2

コーナー周波数(f_c) : b_0, b_1, b_2

距離減衰パラメータ : c_0, c_1, d_0, d_1, d_2

工学的基盤の増幅率 : f_0, h, α

これらのうち、工学的基盤の増幅率に関するパラメータ(f_0, h, α)は、 M や H に依存しないので、予備解析で求めた値($f_0=1.8226, h=0.4459, \alpha=2.1140$)に固定し、それ以外のパラメータを規定する係数を、次の評価関数が最小となるように同定した。

$$S_e = \sum_M \sum_R \sum_H \{r_a^2(\beta; M, R, H) + r_v^2(\beta; M, R, H) + r_d^2(\beta; M, R, H)\} \rightarrow \min \quad (19)$$

ここで、 M =マグニチュード、 R =断層距離、 H =震源深さ、 $\beta=(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, d_0, d_1, d_2)$ =パラメータを規定する係数であり、 r_a, r_v および r_d はそれぞれ次のように表される。

$$\begin{cases} r_a(\beta; M, R, H) = \log\left\{\frac{a_{\max}(\beta; M, R, H)}{A_{\max}(M, R, H)}\right\} \\ r_v(\beta; M, R, H) = \log\left\{\frac{v_{\max}(\beta; M, R, H)}{V_{\max}(M, R, H)}\right\} \\ r_d(\beta; M, R, H) = \log\left\{\frac{d_{\max}(\beta; M, R, H)}{D_{\max}(M, R, H)}\right\} \end{cases} \quad (20)$$

パラメータを規定する係数の初期値は、予備解析の結果より得られた概略値(式(18))を用いた。これらの初期値と式(19)の評価関数を用いて解析を行った結果、各係数の収束値として表-3の右欄に示す値が得られた。

以上のようにして得られたパラメータのうち、地震モーメント M_0 およびコーナー周波数 f_c は、第2章で述べたように、地震学におけるそれらと直接対応するものではない。ここでは、本研究で求めた M_0 および f_c と地震学におけるそれらの間にどのような差があるかについて若干の検討を加えておく。地震学では、 M_0 および f_c とマグニチュード M の関係(相似則)がいくつか提案されている。ここでは、これらの相似則として次式を参考にする⁴⁾。

$$\begin{cases} \log M_0 = 16.1 + 1.5M \\ \log f_c = 2.3 - 0.5M \end{cases} \quad (21)$$

他方、本研究では式(17)と表-3より次式が得られる。ただし、震源深さ H に対する依存項は省略している。

$$\begin{cases} \log M_0 = 13.3 + 1.3M \\ \log f_c = 2.6 - 0.4M \end{cases} \quad (22)$$

表-3 パラメータの初期値と収束値

区分	パラメータ	初期値	収束値
$\log M_0$	a_0	13.3	13.243
	a_1	1.3	1.3124
	a_2	0.0004	0.000234
$\log f_c$	b_0	2.6	2.6410
	b_1	0.4	0.4013
	b_2	0.001	0.001213
$\log c$	c_0	0.42	0.4219
	c_1	0.023	0.02258
$\log d$	d_0	0.4	0.3718
	d_1	0.1	0.09697
	d_2	0.001	0.000957
S_e	—	0.53	0.16

$$f_0=1.8226, h=0.4459, \alpha=2.1140$$

両式の比較より、以下のことがわかる。

- (1) M_0 については、距離減衰項が異なるため(前述の式(5)と式(6))直接の対比はできないが、 M に対する依存性を表す係数は、本研究の方が小さい。これは、本研究の同定で目標とした最大地動のうち、マグニチュードに対する依存性が比較的小さい最大加速度や最大速度の影響が現れたためであると考えられる。
- (2) 本研究のコーナー周波数 f_c は、定数項が大きく、 M に対する依存性の項は小さい。したがって、本研究より求めた f_c の値は地震学におけるそれよりかなり大きくなる。これは、最大加速度や最大速度を考慮したことにより、地震動のフーリエスペクトルの下限周波数が大きくなったためであると考えられる。

以上のように、本研究で同定したフーリエスペクトルは、地震学におけるそれよりもマグニチュードに対する依存性が小さく、高周波数成分を多く含むモデルとなっている。

以上のようにして求めた係数を用い、式(17)を式(8)に代入すると、工学的基盤での加速度波のフーリエスペクトルが得られるので、第3章で述べた方法により模擬地震動を作成できる。

5. 模擬地震動の妥当性の検討

本研究の模擬地震動作成法の妥当性を、最大地動、加速度応答スペクトルの距離減衰特性および実地震動の応答スペクトルとの比較から検討する。

まず、提案手法を用いて作成した基盤加速度波およびそれを積分して得られる速度波と変位波の最大値が、安中らによる距離減衰式(図-1)とどの程度適合するかを示す。図-7は、模擬地震動の最大値と、距離減衰式によるそれらを $M=6, 7, 8$ の各場合について比較したものである。ただし、模擬地震動の最大値は10個のサンプル波の平均である。図より、模擬地震動の最大値は距離減衰式によるそれらとほぼ一致することがわかる。

つぎに、本手法より作成した模擬地震動の加速度応答

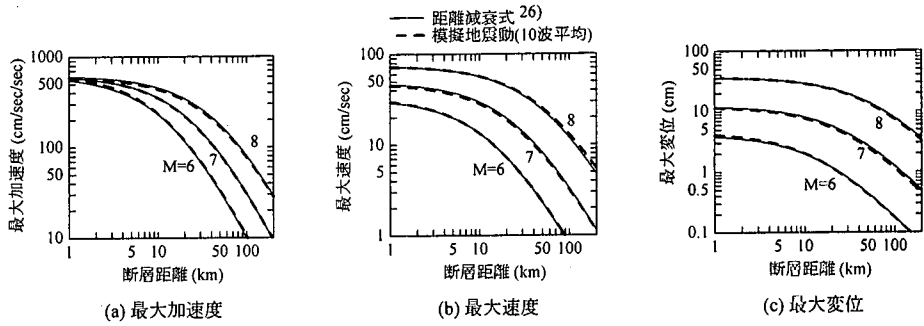


図-7 模擬地震動の最大値と距離減衰式の比較 ($H=10\text{km}$)

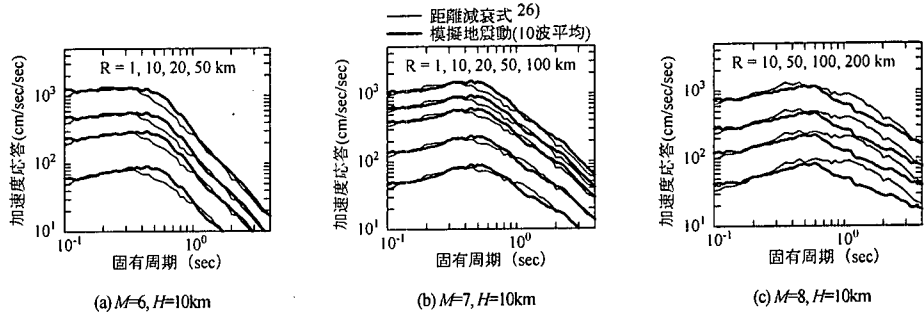


図-8 模擬地震動と距離減衰式による加速度応答スペクトルの比較

スペクトルの妥当性について検討する。安中ら(文献26)において、最大地動とは別に、加速度応答スペクトルの距離減衰式も導いている。この距離減衰式は、最大地動と同様に式(1)の形式で表現されており、係数は固有周期の関数として与えられている。この係数を距離減衰式に代入すると、任意の M , R および H に対する工学的基盤の加速度応答スペクトルを求めることができる。以下では、このようにして得られた加速度応答スペクトルと、模擬地震動のそれとを比較することにより、提案手法の妥当性を検証する。図-8は、両者の加速度応答スペクトルを、 $M=6, 7, 8$ の各場合について比較したものである。ここで、震源深さは $H=10\text{km}$ とした。図より、本手法による模擬地震動の加速度応答スペクトルが、距離減衰式より求めたそれらと全体的にほぼ整合することがわかる。ただし、マグニチュードが大きい場合($M=8$)には、模擬地震動の応答スペクトルは 1sec 以上の固有周期でやや過小評価となり、この傾向は断層距離 R が大きくなるほど顕著になる。これは、本研究で用いた非定常性を表すモデル(式(9))が周波数に依存する継続時間を考慮できないためであると考えられる。一般に、大地震による遠方場の地震記録には表面波等の長周期成分が混在し、周期の長い成分波の継続時間は長くなる。このため、実地震動の加速度応答スペクトルは長周期領域で大きくなるが、本研究での模擬地震動作成法ではこれを考慮できない。

最後に、模擬地震動の応答スペクトルと実地震動のそれとを比較することにより、両者がどの程度整合するか

表-4 解析に用いた実地震動記録⁽⁴³⁾

記録名 (記号)	マグニ チュード	断層距離 (km)	震源深さ (km)	工学的基盤 深さ(m)
SKN018 ¹⁾	6.1	83	78	GL-5
SKN021 ¹⁾	6.1	133	44	GL-5
SKN022 ¹⁾	6.5	128	73	GL-5
SKN026 ¹⁾	6.7 ⁶⁾	40	58	GL-5
SKN036 ¹⁾	6.0	78	56	GL-5
SKN038 ¹⁾	6.0	105	96	GL-5
KND201 ²⁾	7.2 ⁹⁾	29	18	GL-25
KND701 ³⁾	7.2 ⁹⁾	51	18	GL-25
NSM101 ⁴⁾	6.7 ⁶⁾	88	58	GL-25
OAR004 ⁵⁾	6.7 ⁶⁾	89	58	GL-18
SMZ006 ⁶⁾	6.7 ⁶⁾	63	58	GL-40
PI001 ⁷⁾	7.2 ⁹⁾	3.5	18	GL-83

- 1) 東京大学生産技術研究所千葉実験所 2) 関西電力高砂地点
 3) 関西電力海南海港地点 4) 西松建設技術研究所
 5) 電力中央研究所大洗地点 6) 清水建設技術研究所
 7) 神戸市ポートアイランド 8) 1987年千葉県東方沖地震
 9) 1995年兵庫県南部地震

を調べた。比較の対象とした実地震動は、文献43)に収録されている鉛直アレー観測記録のうち、次の条件を満たす12個の記録である。

- (1) マグニチュードが6以上
- (2) 断層距離が200km以下
- (3) S波速度が300m/sec以上の基盤で得られた記録

表-4に、これら12個の地震記録の記録名(本研究で設定した記号)、地震マグニチュード、断層距離(km)、震源深

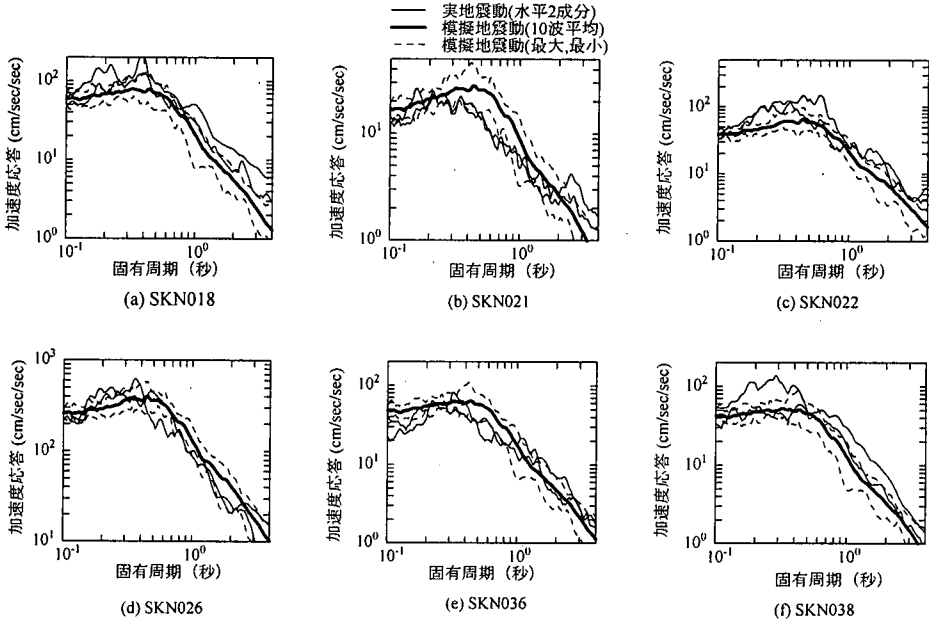


図-9 実地震動と模擬地震動の応答スペクトルの比較 (東京大学生産技術研究所⁴³⁾)

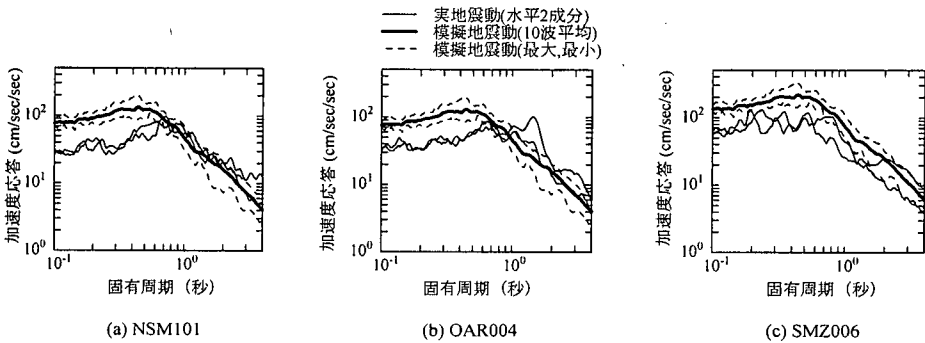


図-10 実地震動と模擬地震動の応答スペクトルの比較 (1987年千葉県東方沖地震⁴³⁾)

さ(km), および地震計の設置深さ(m)を示す⁴³⁾。断層距離は、1987年千葉県東方沖地震と1995年兵庫県南部地震については、文献44)および45)より断層からの最短距離を求めたが、それ以外の地震については文献43)に基づく震源距離を用いた。

以下、解析結果を示す。図-9～図-11は、表-4に示す実地震記録の加速度応答スペクトル(減衰定数0.05)と模擬地震動のそれを比較したものであり、横軸は固有周期(sec)、縦軸は加速度応答である。図中の太線および細かい点線は模擬地震動の10波平均とその最大値および最小値を連ねた線に、細線は実地震動(水平2成分)に対応する。これらの図より、個々の実地震動と模擬地震動の応答スペクトルは細部では異なる場合もあるが、全体的な傾向は比較的良好に整合していることがわかる。ただし、

図-10および図-11において、模擬地震動の加速度応答スペクトルのいくつかは短周期領域で実地震動のそれよりかなり大きくなっている。これは、地中やや深い位置で観測された実地震動が開放基盤面でのそれと比べて短周期側で小さくなる傾向にあるのに対し、模擬地震動ではそれが考慮できなかったためである。

図-12は、模擬地震動と実地震動(SKN026, EW成分)の加速度、速度および変位波形を比較したものである。図より、模擬地震動と実地震動は細部では若干異なるものの、それらの最大値や非定常特性などの全体的な傾向はほぼ対応することがわかる。

以上のように、本研究で提案した模擬地震動は個々の地震動特性を忠実に再現するものではないが、最大地動や工学的に重要な応答スペクトル等の平均的な特性をよ

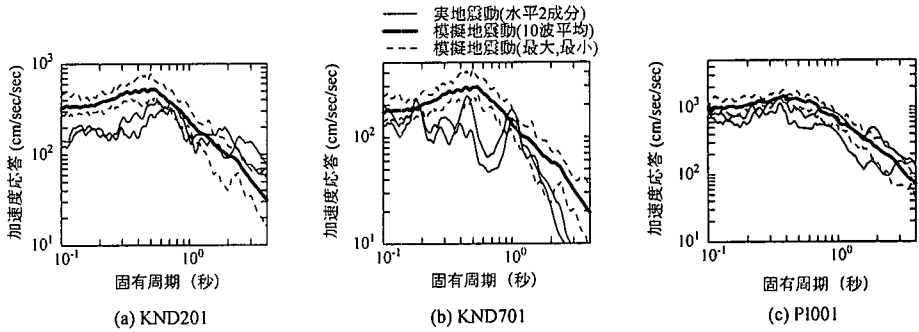


図-11 実地震動と模擬地震動の応答スペクトルの比較 (1995年兵庫県南部地震⁴³⁾)

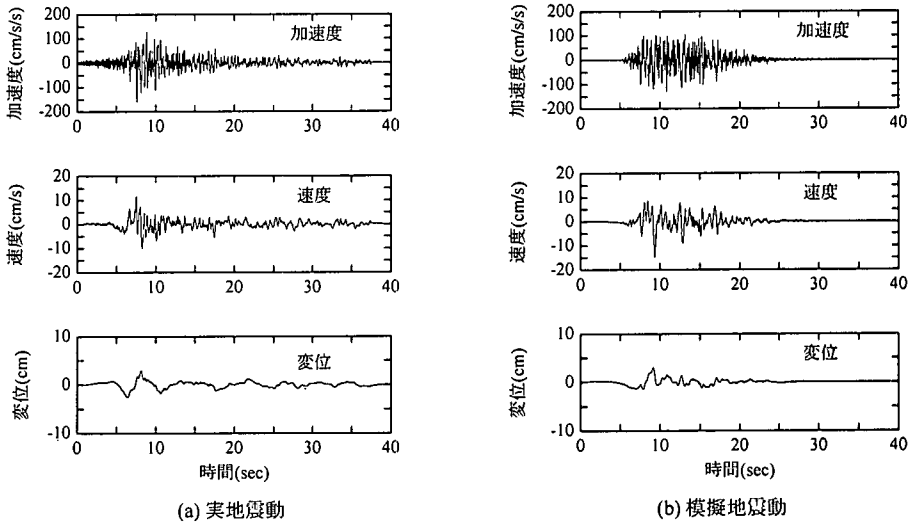


図-12 実地震動と模擬地震動の波形の比較 (SKN26, EW成分⁴³⁾)

く反映する。本手法は、スペクトル振幅を規定する14個のパラメータを与えるだけで、任意のマグニチュード(M)、断層距離(R)および震源深さ(H)に対する基盤加速度波を簡便に作成できるため、実用的な方法となっている。従来の研究では、特定の応答スペクトルを目標値として模擬地震動を作成する方法が提案され、設計などで実際に用いられている^{1), 2)}。しかし、この方法を用いて任意の M および R に対する模擬地震動を作成するためには、その都度応答スペクトルを設定し、収束計算を行うことが必要となる。それに比べ、本手法はフーリエ振幅スペクトルを規定するパラメータが決定されると、広い範囲のマグニチュード、断層距離および震源深さに対する模擬地震動を比較的簡便に作成できるという特徴がある。また、本手法を用いると、最大地動を介して地震動の周波数特性を平均的に捉えられるという利点もある。

6. おわりに

本研究は、工学的基盤での加速度波を対象として、最大地動(最大加速度、最大速度および最大変位)の距離減衰特性と整合するような模擬地震動の一作成法を提案し、その妥当性を数値解析より検証したものである。本研究の内容を要約すると以下ようになる。

- (1) フーリエ振幅スペクトルと波形包絡線を与えて作成した基盤加速度波と、それを積分して得られる速度波および変位波の最大値が、距離減衰式より得られる最大加速度、最大速度および最大変位と整合するように、フーリエ振幅スペクトルを規定するパラメータを修正する一手法を提案した。
- (2) フーリエ振幅スペクトルとして、従来のモデル、すなわち、震源関数、伝播経路特性および工学的基盤の増幅特性の積で表現したモデルを用いるとともに、距離減衰式との対応から、モデルパラメータの具体的な形を規定し、14個のパラメータによりフーリエ振幅スペ

クトルを表した。

- (3) 提案手法の妥当性を、最大地動と加速度応答スペクトルの距離減衰特性より検討し、本手法による模擬地震動がこれらとほぼ整合することを示した。
- (4) 模擬地震動の妥当性を、12個の実地震記録の応答スペクトルとの比較より検討した。その結果、個々の実地震動と模擬地震動の応答スペクトルは細部では異なる場合もあるが、全体的には比較的よく整合することがわかった。

本研究で提案した手法を用いると、 $M=6\sim 8$ の任意のマグニチュードに対し、震源域を含む広い範囲の模擬地震動を比較的簡便に作成できる。このようにして作成した模擬地震動は、耐震設計の基本となる最大地動や応答スペクトルとほぼ整合することから、応答解析用の入力地震動として有用であると考えている。ただし、マグニチュードが8クラスの地震では、1sec以上の周期において、模擬地震動の応答スペクトルが距離減衰式のそれより若干小さくなるという問題点がある。これについては、今後検討することが必要である。

謝辞：本研究では、模擬地震動の妥当性検討の際に、震災予防協会発行の鉛直アレー観測記録⁴³⁾を使用した。関係各位に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，pp.199-214, 1994.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，日本道路協会，pp.146-161, 1991.
- 3) Haskell, N.A. : Elastic displacement in the near-field of a propagating fault, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 59, pp.865-908, 1969.
- 4) Hartzell, S.H. and Heaton, T.H. : Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture of the 1979 Imperial Valley, California earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 83, pp.780-810, 1983.
- 5) Papageorgiou, A.S. and Aki, K. : A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion, Part I and Part II, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 73, pp.693-722, pp.953-978, 1983.
- 6) 佐藤忠信, 北勝利, 前田知就：兵庫県南部地震における強震域での加速度応答スペクトルの推定, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp.149-159, 1997.
- 7) Hartzell, S.H. : Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophys. Res. Letters* 5, pp.1-4, 1978.
- 8) 松村郁栄, 入倉孝次郎：大地震の強震動を予測する方法について, 自然災害科学, 1-1, pp.29-43, 1982.
- 9) Inikura, K. : Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proc. of 7th Japan Earthq. Eng. Symp.*, pp. 151-

156, 1986.

- 10) Kamiyama, M. : Synthesis of strong motion accelerograms from small earthquake records by use of a scaling law of spectra, *Structural Eng. / Earthq. Eng. (Proc. of Japan Soc. of Civil Eng.)*, Vol. 5, No. 1, pp.173-182, 1988.
- 11) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福地保長：地域的な震源スケールリングモデルを用いた大地震(M7級)のための設計用地震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第416号, pp.57-70, 1990.
- 12) 星谷勝：確率論的手法による振動解析, 鹿島出版会, pp.203-259, 1974.
- 13) Kameda, H., Sugito, M. and Asamura, T. : Simulated earthquake motions scaled for magnitude, distance and local soil conditions, *Proc. of 7th World Conf. on Earthq. Eng.*, pp.295-302, 1980.
- 14) Sugito, M. and Kameda, H. : Prediction of nonstationary earthquake motions on rock surface, *Structural Eng. and Earthq. Eng. (Proc. of Japan Soc. of Civil Eng.)*, Vol. 2, No. 2, pp.149-159, 1985.
- 15) Boore, D.M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 73, pp.1865-1894, 1983.
- 16) Scanlan, R.H. and Sachs, K. : Earthquake time histories and response spectra, *Journ. of Eng. Mech. Div., ASCE*, Vol. 100, No. EM4, pp.635-653, 1974.
- 17) 大塚久哲, Somerville, P.G., 佐藤俊明：断層パラメータの予測誤差を考慮した広帯域地震動の評価, 土木学会論文集, No. 584/I-42, pp.185-200, 1993.
- 18) 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特性と地盤の非線形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, pp.27-37, 1994.
- 19) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福地保長：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, 日本建築学会構造系論文報告集, 第430号, pp.1-9, 1991.
- 20) 大崎順彦, 岩崎良二, 大川出, 政尾亨：地震波の位相特性とその応用に関する研究, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.201-207, 1978.
- 21) Seed, H.B., Murarka, R., Lysmer, M. and Idriss, I.M. : Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from Source, and local site conditions for moderate strong earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 66, pp.1323-1342, 1976.
- 22) Trifunac, M.D. : Preliminary analysis of the peaks of strong earthquake motion—Dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance and recording site conditions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 66, pp.189-219, 1976.
- 23) 後藤尚男, 亀田弘行, 杉戸真太：地震動の最大地動予測におけるN値を用いた地盤条件の評価法について, 土木学会論文報告集, 第317号, pp.69-78, 1982.
- 24) Kawashima, K., Aizawa, K. and Takahashi, K. : Attenuation of peak ground acceleration, velocity and displacement based on

- multiple regression analysis of Japanese strong motion records, *Earthq. Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. 14, pp.199-215, 1986.
- 25) 安中正, 山谷敦, 桃林治彦, 野沢是幸: 関東および周辺地域の地震観測記録を用いた基盤における最大加速度推定式の検討, 第19回地震工学研究発表会講演概要, pp.129-132, 1987.
- 26) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁87型強震記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.161-164, 1997.
- 27) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A new attenuation relation of peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 80, pp.757-783, 1990.
- 28) 福島美光: 断層近傍まで適用可能な最大加速度の距離減衰式の導出と改訂, 清水建設研究報告, 第63号, pp.75-88, 1996.
- 29) Molas, G.L. and Yamazaki, F.: Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus events, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 85, pp.1343-1358, 1995.
- 30) 山崎文雄, 大西淳一, 田山聡, 高野辰雄: 高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3491-3496, 1998.
- 31) Ohno, S., Takemura, M., Niwa, M. and Takahashi, K.: Intensity of strong ground motion on prequaternary stratum and surface soil amplification during the 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake Japan, *J. Phys. Earth.*, No.44, pp.623-648, 1996.
- 32) 高坂政道, 小島清嗣, 大保直人: 都市ガス導管の地震被害推定システム, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3507-3512, 1998.
- 33) Kamiyama, M. and Yanagisawa, E.: A statistical model for estimating response spectra of strong earthquake ground motions with emphasis on local soil conditions, *Soils and Foundations*, Vol. 26, No. 2, pp.16-32, 1986.
- 34) 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, 日本建築学会構造系論文集, 第462号, pp.79-89, 1994.
- 35) 翠川三郎, 小林啓美: 地震動の地震基盤からの入射波スペクトルの性質, 日本建築学会論文報告集, 第273号, pp.43-53, 1978.
- 36) 神山眞: 地盤の影響を考慮した震動継続時間およびその関連パラメータの統計解析, 土木学会論文集, No.350/1-2, pp.271-280, 1984.
- 37) 沢田勉, 永江正広, 平尾潔: 位相差分による地震動継続時間間の定義とその統計解析, 土木学会論文集, No.368/1-5, pp.373-382, 1986.
- 38) 佐藤智美, 川瀬博, 佐藤俊明: ボ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およ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, pp.19-28, 1994.
- 39) Sawada, T., Hirao, K. and Yamamoto, H.: Relation between maximum amplitude ratios (a/v , ad/v^2) and spectral parameters of earthquake ground motions, *Proc. of 10th World Conf. on Earthq. Eng.*, Vol. 2, pp.617-622, 1992.
- 40) Kamiyama, M.: Spectral characteristics of strong ground motions in terms of peak values, *Structural Eng./Earthq. Eng.(Proc. of Japan Soc. of Civil Eng.)*, Vol. 12, No. 3・No. 4, pp.79-93, 1996.
- 41) 宇津徳治編: 地震の事典, 朝倉書店, pp.243-244, 1997.
- 42) 沢田勉, 辻原治, 平尾潔, 山本英史: 地盤のS波速度とQ値の同定問題におけるS-L-P法の改良とその適用, 土木学会論文集, No.446/1-19, pp.205-213, 1992.
- 43) 震災予防協会: 強震動アレー観測, No.1, No.2, No.3, 1993, 1995, 1998.
- 44) 佐藤良輔: 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, 1995.
- 45) 関西ライフライン研究会: 阪神・淡路大震災に学ぶ, pp.21-54, 1998.
- 46) 沢田勉, 岩本烈, 平尾潔, 辻原治: 最大地動の距離減衰に適合する基盤加速度波のシミュレーション, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.589-594, 1998.

(2000. 9. 29 受付)

A SIMULATION METHOD OF EARTHQUAKE GROUND MOTIONS ON ENGINEERING BEDROCK BASED ON ATTENUATION OF PEAK VALUES

Tsutomu SAWADA, Kiyoshi HIRAO, Osamu TSUJIHARA and Atsushi MIKAMI

A simulation method of earthquake ground motions on engineering bedrock is proposed. The essence of the method is identification of parameters prescribing Fourier spectrum, so that the peak values of the motions generated by proposed models of Fourier amplitude spectrum and envelope function, fit the peak acceleration, velocity and displacement obtained from attenuation equations. The method can be used to generate acceleration time series on engineering bedrock for various magnitudes of earthquakes, distances and focal depths.