

最大地動の距離減衰に適合する 工学的基盤での加速度波形作成法の提案

渡辺泰友¹・岩本烈¹・澤田勉²・辻原治³

¹学生員 徳島大学大学院学生 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

²正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (同上)

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

本研究は、最大地動（最大加速度、速度および変位）の距離減衰に適合する基盤加速度波の一作成法を提案したものである。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る。強度特性は最大加速度、速度等で表わされ、周波数特性はフーリエ振幅スペクトル、応答スペクトル等で、また、非定常特性は波形包絡線等で表現される。地震動のシミュレーションでは、これら3つの特性をなるべく忠実に反映した波形を作成しなければならない。本研究では、周波数特性と非定常特性を与えて作成した基盤加速度波が最大地動（最大加速度、速度および変位）の距離減衰に適合するように周波数特性を規定するパラメータを調整する一手法を提案する。

Key Words : Peak Ground Motion, Attenuation, Simulation

1. はじめに

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。このうち強度特性は最大加速度や速度で、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等で表わされる。地震動のシミュレーションでは、これら3つの特性をなるべく忠実に反映した波形を作成しなければならない。本研究では、周波数特性と非定常特性を与えて作成した基盤加速度波が、最大地動（最大加速度、速度及び変位）の距離減衰に適合するように、周波数特性を規定するパラメータを調整する一手法を提案する。

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面での加速度波形と、それを積分して得られる速度波形及び変位波形の最大値 (a_{max} , v_{max} , d_{max}) が、距離減衰式より求められる最大加速度 (A_{max})、最大速度 (V_{max}) 及び最大変位 (D_{max}) に適合するように、フーリエ振幅スペクトルを規定する11個のパラメータを修正する一手法を提案する。

特に、フーリエスペクトルのモデルとして物理的意味が明確なモデルを用いたことが本研究の特徴である。

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、周波数特性及び非定常特性に分類できる。地震動のシミュレーションでは、これらの特性を的確に反映するモデルを用いなければならない。本研究の工学的基盤面での加速度波のシミュレーションでは、以下のようなモデルを用いて強度特性、周波数特性及び非定常特性を表現する。

(1) 強度特性

最大加速度で代表される強度特性は、地震動特性を表す基礎的パラメータであり、これを精度よく推定することは耐震工学上重要である。しかし、地震動は非常に複雑な現象であり、これを理論的に精度よく予測することは困難であるため、経験的な予測式により評価することが多い。この予測式は一般に距離減衰式と呼ばれ、現在までに多くの研究者により種々の回帰式が提案されてきた。これらのうち、福島ら¹⁾及び安中ら²⁾による距離減衰式は、地震マグニチュード(M)と断層距離（当該地点から断層面までの最短距離(R))の間に相関がある場合や、断層距離の小さい震源域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、このう

ち安中らによる距離減衰式²⁾を用いて、工学的基盤面での地震動強度を表す。

安中らは、種々のマグニチュード(M)及び断層距離(R)に対する工学的基盤面での最大地動(最大加速度、最大速度及び最大変位)を次のような距離減衰式を用いて表した。

$$\log A_{\max} = 0.606M + 0.00459H - 2.136 \log \{R + 0.334e^{0.653M}\} + 1.730 \quad (1)$$

$$\log V_{\max} = 0.725M + 0.00318H - 1.918 \log \{R + 0.334e^{0.653M}\} - 0.519 \quad (2)$$

$$\log D_{\max} = 0.935M + 0.00091H - 1.635 \log \{R + 0.334e^{0.653M}\} - 2.992 \quad (3)$$

ここで、 $A_{\max}$ =最大加速度(cm/sec²)、 $V_{\max}$ =最大速度(cm/sec)、 $D_{\max}$ =最大変位(cm)、 M =マグニチュード、 H =震源深さ(km)、 R =断層距離(km)である。ただし、上式はS波速度が300~600m/sec程度の工学的基盤面における最大地動の距離減衰式であり、地点補正項と誤差項は省略されている。式(1)~(3)より求められる任意のM及びRに対する最大地動は、基盤加速度波をシミュレートする際の目標値となる。

(2) 周波数特性

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ているかを表すものであり、フーリエスペクトル等で表現される。ここでは、工学的基盤面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 $S(f)$ により表す^{3),4)}。

$$S(f) = C \cdot M(f) \cdot P(f) \cdot T(f) \cdot Z(f) \quad (4)$$

ここで、 C =定数、 $M(f)$ =震源関数、 $P(f)$ =高周波数遮断フィルタ、 $T(f)$ =距離減衰を表す関数、 $Z(f)$ =地震基盤から工学的基盤までの増幅率である。各項は、それぞれ次のように表される。

震源関数 $M(f)$ は次式で表される。

$$M(f) = M_0 \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad (5)$$

ここで、 M_0 および f_c は、それぞれ地震モーメントおよびコーナー振動数であり、次式のようにマグニチュード(M)および震源深さ(H)の関数として表す。

$$\log M_0 = a_1 + a_2 M + a_3 H \quad (6)$$

$$\log f_c = b_1 - b_2 M \quad (7)$$

高周波数遮断フィルタ $P(f)$ は次式で与えられる。

$$P(f) = \left\{ 1 + \left(\frac{f}{f_{\max}} \right)^m \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

ここで、 $f_{\max}$ =遮断振動数、 m =定数である。本研究では、これらを次のように固定した。

$$f_{\max} = 15 \text{ Hz}, m = 4$$

距離減衰を表わす関数 $T(f)$ は次式で表す。

$$T(f) = (R + 0.334 e^{0.653 M})^{-(c + d \log(f/f_c))} \quad (9)$$

ここで、 c および d は係数であり、それぞれ次式のようなマグニチュードの関数で表す。

$$c = c_1 - c_2 M \quad (10)$$

$$d = d_1 - d_2 M \quad (11)$$

最後に、地震基盤から工学的基盤までの増幅率 $Z(f)$ は次式で表す。

$$Z(f) = \frac{1 + (f/f_0)^2}{\left[\left\{ 1 - (f/f_0)^2 \right\}^2 + 4h^2 (f/f_0)^2 \right]^{1/2}} \quad (12)$$

ここで、 f_0 =卓越周波数、 h =形状係数である。

以上の式において、パラメータ($a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, f_0, h$)が与えられるとフーリエ振幅スペクトルを規定することができる。

(3) 非定常特性

地震動の非定常特性は、波形包絡線や非定常スペクトル⁵⁾等により表される。ここでは、大崎らによる⁶⁾以下のような波形包絡線を用いて基盤加速度波の非定常特性を表現する。

まず、地震動継続時間を、次式のようなマグニチュードMの関数として求める。

$$T_d = 10^{0.31M - 0.774} \quad (13)$$

このとき、波形包絡線 $e(t)$ は、時刻 t の関数として以下のようにならえられる。

$$\begin{aligned} e(t) &= (t/T_b)^2 & 0 \leq t \leq T_b \\ e(t) &= 1 & T_b \leq t \leq T_c \\ e(t) &= e^{-a(t-T_c)} & T_c \leq t \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、 T_b 、 T_c および a は包絡線の形状を規定する係数であり、マグニチュードの関数として、次式より求められる。

$$\begin{aligned} T_b &= \{0.12 - 0.04(M-7)\} T_d \\ T_c &= \{0.50 - 0.04(M-7)\} T_d \\ a &= -\ln 0.1 / (T_d - T_c) \end{aligned} \quad (15)$$

3. シミュレーションモデルの決定法

地震動のシミュレーションでは、一般に周波数特性と非定常特性を与えて波形を作成する。しかし、このようにして作成された模擬地震動は必ずしも強度特性を満足するも

のではない。ここでは、本研究で用いたシミュレーション手法の概要と、それを用いて得られる基盤加速度波を、最大地動の距離減衰に適合するように修正する方法について述べる。

(1) シミュレーション手法の概要

加速度波形は、式(4)のフーリエ振幅スペクトルと式(14)の波形包絡線を用いて、以下の手順で作成される。

- ① フーリエ振幅スペクトルを規定する 11 個のパラメータ ($a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, f_0, h$) を適切に設定して、任意のマグニチュード (M) 及び断層距離 (R) に対するフーリエ振幅スペクトル $S_k = S(f_k)$, $k=0, 1, \dots, N_f$ を計算する。ここで、 $f_k = k$ 次の振動数、 N_f = 振動数点の数である。
- ② $0 \sim 2\pi$ の一様乱数を作成し、 k 次振動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。

$$C_k = S_k \cdot e^{i\phi_k} / T, \quad k=0, 1, \dots, N_f \quad (16)$$

ここで、 T = 地震動継続時間である。この T は、一般には式(13)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。

- ④ 式(16)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(14)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。

$$a(t) = e(t) \cdot a_s(t) \quad (17)$$

- ⑥ $a(t)$ を積分することにより、速度時刻歴 $v(t)$ 及び変位時刻歴 $d(t)$ と、それらの絶対最大値 $a_{\max}$, $v_{\max}$, $d_{\max}$ を求める。

以上の手順より作成した地震波形の最大値 ($a_{\max}$, $v_{\max}$ 及び $d_{\max}$) は、一般に距離減衰式から得られる最大地動 ($A_{\max}$, $V_{\max}$ 及び $D_{\max}$) と整合しない。両者を整合させるためには、フーリエ振幅スペクトルを規定する 11 個のパラメータ ($a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, f_0, h$) を適切に設定しなければならない。

(2) フーリエ振幅スペクトルの決定法

ここでは、前項の手順より求めたシミュレーション波の最大値を、距離減衰式より得られるそれらと整合させる方法について述べる。シミュレーションでは、フーリエ振幅スペクトルと波形包絡線を用いるが、後者は任意の M が与えられると式(14)より一義的に決定される。残る問題は、フーリエスペクトルを規定する 11 個のパラメータ ($a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, f_0, h$) を、シミュレーション波の最大値と距離減衰

式より得られるそれらが整合するように修正することである。以下、これらパラメータの修正方法について述べる。記述を簡単にするために、11 個のパラメータを次のように置く。

$$\alpha = \{a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2, f_0, h\}^T \quad (18)$$

シミュレーション波の最大値は、 M , R 及び α の関数であるから、次のように表される。ただし、重複を避けるため、以下では主に $a_{\max}$ についてのみ記す。

$$a_{\max} = a_{\max}(M, R; \alpha) \quad (19)$$

一般に、シミュレーション波の最大値はサンプルごとに異なるから、いくつかのサンプル波の最大値の平均を求める。

$$\bar{a}_{\max}(M, R; \alpha) = \sum_{i=1}^N a_{\max, i}(M, R; \alpha) / N \quad (20)$$

ここで、 N = サンプル波の数であり、次章の数値解析では $N=5$ とした。以上のシミュレーション波の最大値と、距離減衰式によるそれらが整合するようにパラメータ α を修正する評価基準として、次式を設定する。

$$S_e(\alpha) = \sum_{MR} \{I_a^2(M, R; \alpha) + I_v^2(M, R; \alpha) + I_d^2(M, R; \alpha)\} \rightarrow \min \quad (21)$$

ここで、 r_a , r_v , r_d は次のようになる。

$$\begin{aligned} r_a(M, R; \alpha) &= \log\{\bar{a}_{\max}(M, R; \alpha) / A_{\max}(M, R)\} \\ r_v(M, R; \alpha) &= \log\{\bar{v}_{\max}(M, R; \alpha) / V_{\max}(M, R)\} \\ r_d(M, R; \alpha) &= \log\{\bar{d}_{\max}(M, R; \alpha) / D_{\max}(M, R)\} \end{aligned} \quad (22)$$

式(21)は、シミュレーション波と距離減衰による最大値の対数の残差平方和が最小になるように、パラメータ α を逐次修正するための評価基準である。本研究では、式(21)の最小化問題を MSLP 法（修正反復線形計画法）を用いて解いた。その際に必要となるパラメータ α に関する偏微分係数は、数値微分より求めた。

4. 数値解析および考察

数値解析では、式(21)の評価関数を最小とするように、フーリエ振幅スペクトルを規定する 11 個のパラメータを決定する。次式はこのようにして決定された各パラメータの値を示したものである。

$$\text{Log} M_0 = 13.3865 + 1.3403M + 0.000569H$$

$$\text{Log} f_c = 2.2958 + 0.3556M$$

$$c = 2.03930 - 0.0288M$$

$$d = 1.02102 - 0.08631M$$

$$f_0 = 4.22668$$

$$h = 0.2089$$

これらのパラメータを用いて基盤加速度、速度および変位波形を作成し、提案手法の妥当性を検討した。図-1～図-3は、本手法より作成した模擬地震動の最大加速度、最大速度および最大変位を、距離減衰式より得られるそれらと比較したものである。これらの図より、提案手法による模擬地震動の最大値は、距離減衰式によるそれらとほぼ適合することが分かる。

図-4は基盤加速度波の1例を示したものである($M=7.0, R=1\text{km}, H=10\text{km}$)。また、図-5は $M=7, H=10\text{km}$ に対する基盤加速度波の応答スペクトルを示したものである。

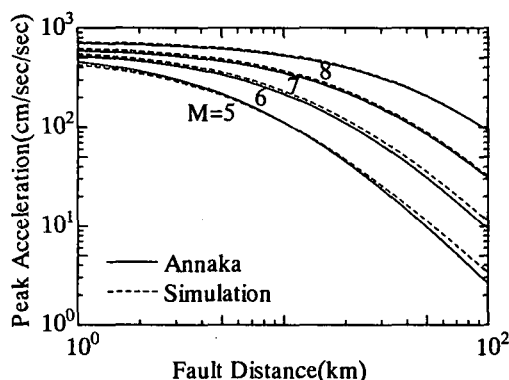


図-1 最大加速度の距離減衰の比較

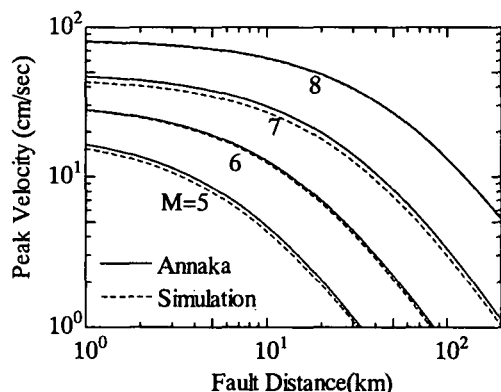


図-2 最大速度の距離減衰の比較

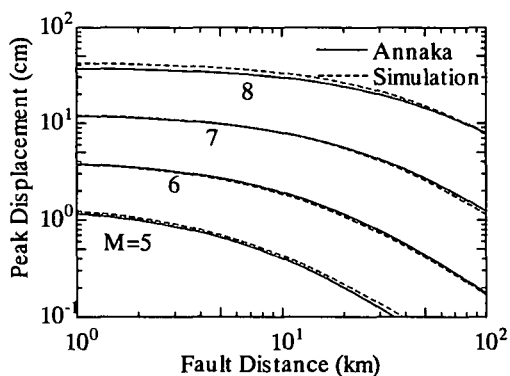


図-3 最大変位の距離減衰の比較

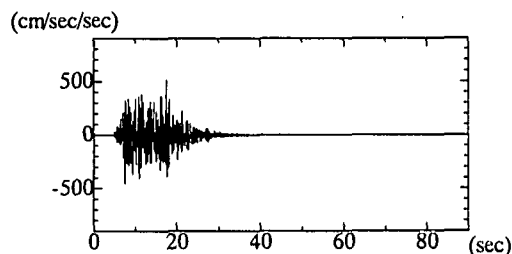


図-4 工学的基盤波の1例
($M=7, R=1\text{km}, H=10\text{km}$)

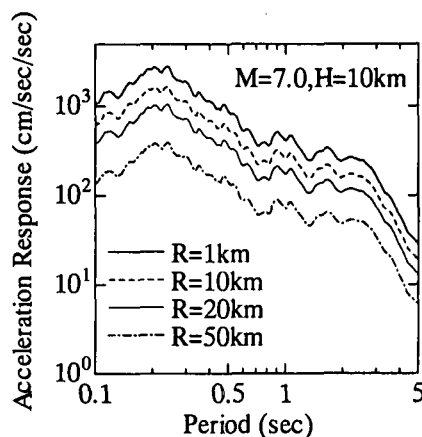


図-5 加速度応答スペクトル
($M=7.0, H=10\text{km}$)

4. おわりに

本研究では、周波数特性と非定常特性を与えて作成した工学的基盤面での地震動が、強度特性をも満足するようにパラメータを調整する一手法を提案した。そして、作成した工学的基盤面での加速度、速度および変位波形の最大値が、目標とした距離減衰によるそれらとほぼ適合することを確認した。

参考文献

- 1) 福島美光：地震波の発生・伝播の理論を背景とした入力地震動の経験的予測，東京工業大学学位論文，1995。
- 2) 安中正・山崎文雄・片平冬樹：気象庁87型強震計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。
- 3) Boor, 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
- 4) 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。
- 5) Sugito, M. and Kaneda, H.: Prediction of nonstationary earth quake motions on rock surface, Proc. of JSCE, Struct. Eng./Earthq. Eng., Vol. 2, No. 2, pp.149-158, 1985。
- 6) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1996。