

定常確率過程に基づく初通過理論に地震動の非定常性を考慮した

応答スペクトル適合地震動の作成

Generation of response-spectrum-compatible ground motions based on first-passage theory
considering non-stationary effect

島田智之*, 三神厚**, 牧浩行***, 成行義文****

Tomoyuki Shimada, Atsushi Mikami, Hiroyuki Maki, Yoshifumi Nariyuki

* 徳島大学大学院博士後期課程, 先端技術科学教育部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

** 工 (博), 徳島大学大学院准教授, ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

*** 徳島大学大学院博士前期課程, 先端技術科学教育部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

**** 工 (博), 徳島大学大学院教授, ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

This study proposes a method of generating synthetic ground motions that fit the attenuation relationship of acceleration response spectrum, taking into account non-stationary effect. The authors previously proposed a method of generating ground motions based on stationary random process. This study develops our previous method so as to take into account non-stationary effect of ground motions incorporating a correction function that modify the calculated response spectrum for different types of earthquakes. The results shows that calculated response spectrum fits very well with the target response spectrum for various earthquakes of different magnitudes, focal depths and hypocentral distances.

Key Words: synthetic ground motion, first-passage theory, non-stationary, correction function

キーワード: 模擬地震動, 初通過理論, 非定常性, 補正関数

1. はじめに

設計用応答スペクトルに適合する地震動 (以下, 応答スペクトル適合地震動と呼ぶ) は, 原子力施設の耐震設計用入力地震動として考案されたものであるが¹⁾, 現在, 道路橋や一般建築物の耐震設計にも用いられている^{2), 3)}. この方法では, 時刻歴波形のフーリエ位相を予め設定した後, 目標とする設計用応答スペクトルに適合するようにフーリエ振幅を修正して加速度時刻歴を作成するものである. このようにして作成された加速度時刻歴は, 目標応答スペクトルの特性を満足する 1 つのサンプル波である. しかし, 地震動の予測には大きな不確実性が存在することが知られており, 上記の方法から得られたサンプル波は, 不確実性の影響が十分に考慮されているとは言えない. その不確実性が構造物の応答結果に及ぼす影響を検討した研究もいくつかなされており^{4)~6)}, 実際, 道路橋示方書・V耐震設計編では, 上記の方法で作成されたサンプル波を少なくとも 3 波用いた動的解析結

果で耐震性能を評価することとしている²⁾.

地震動の不確実性を考慮する一つの方法として, 確率論的な方法がある⁷⁾. 既往の応答スペクトル適合地震動の作成方法にこの考え方を適用しようとする, 1 回の収束計算過程において, 数多くのサンプル波一つ一つに対して応答スペクトルを求め, その平均応答スペクトルを求めるなどの統計処理をするといったやや煩雑な手続きが必要となる. これに対し, 地震動のパワースペクトル密度関数 (以下, パワースペクトルと略す) など確率論的なモデルで地震動モデルが与えられた場合には, ランダム応答理論により理論的に比較的簡単に平均応答スペクトルが求められる. この利点を利用して尾崎・高田⁸⁾, 島田ら⁹⁾は, 目標とする応答スペクトルの特性を平均的な意味で満足するような地震動のパワースペクトルを定常確率過程に基づいた初通過理論 (First passage theory)¹⁰⁾ を用いて求めている. これらの手法は, 地震動のパワースペクトルから求めたサンプル波の平均応答スペクトルを定常確率過程に基づいた初通過理論か

ら求めた平均応答スペクトルで十分表現できる場合において用いることができる手法である。しかし、地震動の継続時間が比較的小さい場合や構造物の固有周期が長い場合における最大応答は、地震動の非定常性の影響を強く受けるため、定常確率過程の初通過理論（以下、初通過理論と略す）に基づく方法だけでは表現できなくなる。地震動の非定常性の影響を考慮する方法として、非定常ランダム応答理論により得られる Evolutionary Spectrum を用いる方法¹¹⁾、または Complex Envelope の概念を用いる方法¹²⁾ などがある。

本研究では、初通過理論に基づく方法に補正を加える形で、既往の研究より簡易に地震動の非定常効果の取り込みを図る。具体的には、初通過理論により得られる応答スペクトルに、波形包絡線により表現される地震動の非定常性を考慮したものが、目標とする応答スペクトルに適合するよう、初通過理論による応答スペクトルに補正を加える。なお、本研究において目標とする応答スペクトルは、安中ら¹³⁾ による応答スペクトルの距離減衰式とした。この距離減衰式の応答スペクトルは、地震タイプ（内陸型、海溝型）ごとに与えられているため、応答スペクトルの補正は、地震動のタイプごとに行うこととした。本研究の提案する手法を用いると、様々なマグニチュードや震源距離の目標応答スペクトルを期待値とするような地震動（サンプル波）が、従来の方法に比べて精度よく作成することができる。

2. 地震動のモデルについて

地震動特性は、強度特性、周波数特性および非定常特性に分離される。本研究では、文献(9)と同様に地震動の非定常特性を波形包絡線で、強度特性と周波数特性をパワースペクトルでモデル化する。

2.1 波形包絡線¹⁴⁾

地震動の振幅の非定常性は、次式の波形包絡線 $E(t)$ を用いて表される。図-1にその概形を示す。

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

ここで、係数 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。

$$\left. \begin{aligned} T_b &= (0.40 - 0.04M) T_d \\ T_c &= (0.78 - 0.04M) T_d \\ a &= -\ln 0.1 / (T_b - T_c) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

上式中の T_d は地震動の振幅が最大値の1/10になるまでの時間であり、次式で与えられる。

$$T_d = 10^{0.31M - 0.774} \quad (3)$$

また、図-1中の T_e は強震部継続時間であり、振動系の初通過確率を求める際に用いる定常応答の継続時間として用いられる（後述）。

$$T_e = T_c - T_b \quad (4)$$

2.2 地震動のパワースペクトル

地震動の強度特性と周波数特性は、次式のパワースペクトルで表現される。

$$S(\omega) = \frac{S_0 \cdot \omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4h_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \cdot \exp(-b\omega) \quad (5)$$

ここで、 ω は円振動数であり、 S_0 、 ω_g 、 h_g および b はパワースペクトルの強度、中心振動数、拡がり、および高振動数でのパワーの低減を表すパラメータである。式(5)は、線形1自由度振動系のホワイトノイズ外乱 S_0 に対する相対速度応答のパワースペクトル⁷⁾ に高振動数カットフィルター $e^{-b\omega}$ を乗じたものであり、4つのパラメータで表せる簡易なモデルである。図-2は、式(5)のパワースペクトルの1例を示したものである。

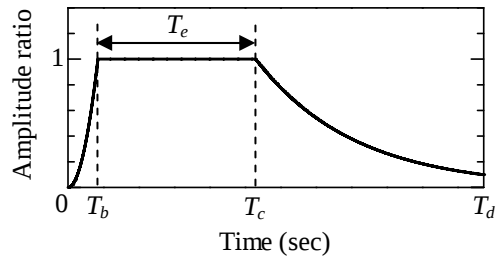


図-1 波形包絡線の概形

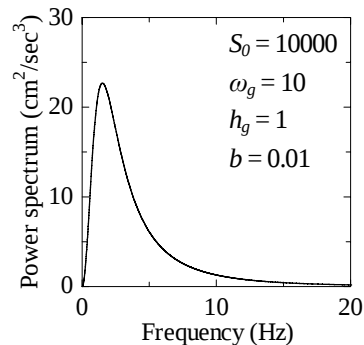


図-2 パワースペクトル

3. 初通過理論に基づく加速度応答スペクトルの算出法

方法の詳細は文献(9)に記載されており、本論文では簡単な説明と計算に必要な計算式を示す。固有円振動数 ω_0 、減衰定数 h を有する線形1自由度系の絶対加速度応答が、時間 $[0, T_e]$ で閾値 ξ を越えない確率、すなわち絶対加速度応答の最大値の確率分布関数 $P(\xi)$ は、初通過理論を用いて求められる。本研究で用いる確率分布関数は、応答が平均値0の定常確率ガウス過程と仮定してVanmarcke¹⁰⁾により提案された次式である。

$$P(\xi) = \exp \left[-\frac{\omega_2}{\pi} T_e \cdot \frac{1 - \exp \left\{ -\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot q \frac{\ddot{\xi}}{\sigma_z} \right\}}{\exp \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\ddot{\xi}}{\sigma_z} \right)^2 \right\} - 1} \right] \quad (6)$$

ここで、 ω_2 は応答のパワースペクトルの中心振動数、 T_e は定常応答の継続時間、 σ_z は応答の標準偏差および q は応答のパワースペクトルの形状係数である。応答の継続時間 T_e としては、式(4)に示した入力地震動の強震部継続時間を用いる。また、式(6)中のその他の値は次式を用いて求める。

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_0}} \quad (7)$$

$$\alpha_i = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}{\left\{ 1 - (\omega/\omega_0)^2 \right\}^2 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2} \cdot S(\omega) \cdot \omega^i d\omega \quad (8)$$

$$\sigma_z^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}{\left\{ 1 - (\omega/\omega_0)^2 \right\}^2 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2} \cdot S(\omega) d\omega \quad (9)$$

$$q = \sqrt{1 - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_0 \alpha_2}} \quad (0 \leq q \leq 1) \quad (10)$$

固有円振動数、減衰定数を有する線形1自由度系の加速度応答の最大値の期待値 $E[\xi]$ は次のように求められる。

$$E[\xi] = \int_0^{\infty} \xi \cdot \frac{dP(\xi)}{d\xi} d\xi \quad (11)$$

以上の式における積分は、シンプソン公式により計算した。加速度応答スペクトルは、固有周期の異なる振動系の最大応答値を求め、それらを連ねることにより得られる。式(11)から算出される最大加速度応答の期待値は平均加速度応答スペクトルに対応する。

4. 応答スペクトル適合地震動の作成

4.1 目標とする応答スペクトル

本研究では、安中ら¹³⁾によって提案されている加速度応答スペクトルの距離減衰式をターゲットとする。これは、異なる地震動のタイプについて提案されており、減衰定数が $h = 0.05$ に対応している。本研究では、工学的基盤を対象とし、等価震源距離に対応する次の距離減衰式（本研究における対象周期帯は0.1～10sec）を用いた。

$$\begin{aligned} \log R_A(T_0) &= C_m(T_0)M + C_h(T_0)H + S_c(T_0, Eqtype) \\ &\quad - \log X - (C_{d0}(T_0) + C_{dh}(T_0)H)X \\ &\quad + C_0(T_0) + G_c(T_0, Site) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $R_A(T_0)$ は固有周期 T_0 を有する線形1自由度系の最大加速度応答、 M はマグニチュード、 H は震源深さ(km)、 X は等価震源距離(km)である。 $C_m(T_0)$ 、 $C_h(T_0)$ 、 $C_{d0}(T_0)$ 、 $C_{dh}(T_0)$ は各パラメータ(M , H , X)の影響を表す係数、 $C_0(T_0)$ は標準的な地点特性を表す定数項、および $G_c(T_0, Site)$ 、 $S_c(T_0, Eqtype)$ は、それぞれ地震タイプごとに与えられる地点補正係数、震源補正係数である。上式に含まれる各回帰係数は文献(13)に譲る。目標応答スペクトルは、式(12)に任意の M , H , X を代入して得られる加速度応答スペクトルとする。なお、 $S_c(T_0, Eqtype)$ は4つの地震タイプごと(A1, A2, BおよびC)に与えられているが、ここでは、内陸活断層型地震Cと深さ60km未満のプレート境界型地震A1の2つの地震タイプを対象として応答スペクトル適合地震動の数値計算を行う。

4.2 地震動モデルの同定

地震動モデルとして式(1)の波形包絡線と式(5)のパワースペクトルを用いている。本研究では、波形包絡線を表すマグニチュード M は既知パラメータとし、パワースペクトルを表すパラメータ S_0 、 ω_g 、 h_g および b を未知パラメータとし、これらを同定する。パワースペクトルのパラメータは、式(11)より算出される加速度応答スペクトルと式(12)に任意の M , H , X を与えることにより求める加速度応答スペクトルの残差平方和を最小とする評価基準を用いて同定する。

$$S_e = \sum_{i=1}^{N_T} \{R_v(T_{0i}; \alpha) - R_A(T_{0i})\}^2 \rightarrow \min \quad (13)$$

ここで、 N_T は固有周期の数であり、本研究では100とした。また、 $R_v(T_{0i}; \alpha)$ は式(11)より算出される平均加速度応答スペクトル、 $R_A(T_{0i})$ は式(12)の距離減衰式から算出した加速度応答スペクトル、 T_{0i} は i 番目の固有周期である。また、 $\alpha = \{S_0, \omega_g, h_g, b\}^T$ はパワースペクトルを規定

表－1 応答スペクトル適合地震動の数値解析で用いた
マグニチュード (M)、震源深さ (H)、および等価
震源距離 (X)

Case	Earthquake type	M	H (km)	X (km)
1	Inland-crustal earthquake	5	2	10
2		5	2	100
3		7	10	20
4	Inter-plate earthquake	6	4	25
5		6	4	100
6		8	24	50

する未知パラメータである。固有周期 $T_{0i}; i = 1 \sim N_T$ は、本研究における距離減衰式の対象周期帯 (0.1～10sec) の間を対数軸で 100 等分した点での値とした。

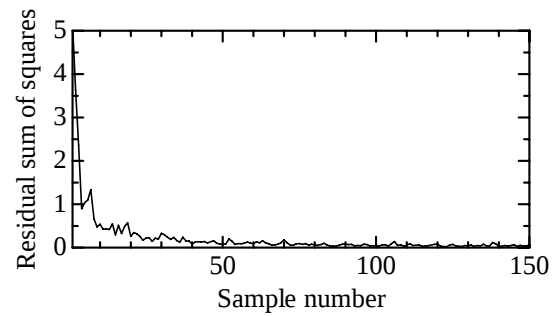
4.3 初通過理論に基づく応答スペクトル適合地震動の数値計算とその問題点

特定のマグニチュード M 、震源深さ H および等価震源距離 X を与えることでパワースペクトルのパラメータ α が求まる。ここでは、同定したパワースペクトルより算出した式(11)の平均加速度応答スペクトルと式(12)の加速度応答スペクトル推定式を比較することにより適合性を検討する。さらに、同定したパワースペクトルとランダム位相および式(1)の波形包絡線より100波のサンプル波形を作成し、それらを入力とする応答解析を行い、平均応答スペクトルを求め¹⁵⁾ (以下、シミュレーションと呼ぶ)、上述のそれらと比較する。応答スペクトル適合地震動の数値計算例は表－1に示す6ケースとし、 H はマグニチュード M の関数として式(14)より求めたものを丸めたものとした¹⁴⁾。

$$H = 10^{0.353M - 1.435} \quad (14)$$

なお、本検討のシミュレーションのサンプル数については、サンプル数を増やしても得られる平均加速度応答スペクトルの形状がほとんど変化しない数とした。具体的には、図－3に示すように、サンプル波を n 個から $n+1$ 個に増やした時の平均加速度応答スペクトルの差について、離散周波数点ごとに差の二乗和 (対数) がほぼ一定となる値とした。ここで用いた地震動モデルは、マグニチュード $M = 8$ 、震源深さ $H = 35(\text{km})$ および等価震源距離 $X = 65(\text{km})$ のプレート境界型地震の距離減衰式をターゲットに同定したパワースペクトルである。その結果、おおよそ、70～80波でその値が一定になることから、100波用いることとした。

図－4、5は、目標応答スペクトルである距離減衰式の加速度応答スペクトル (実線、黒色)、初通過理論より作

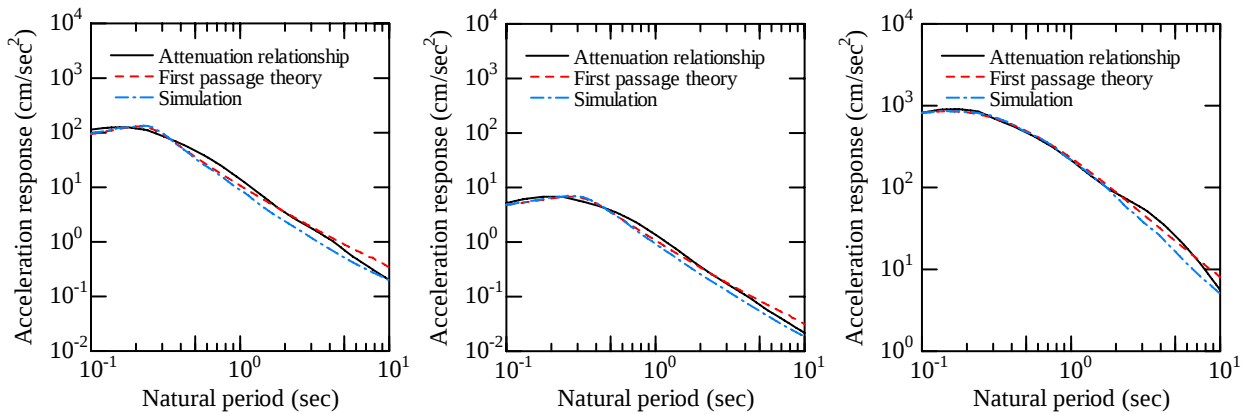


図－3 シミュレーションのサンプル数とその平均加速度応答スペクトルの残差平方和の関係

成した平均加速度応答スペクトル (破線、赤色) およびシミュレーションによる100波の平均加速度応答スペクトル (一点鎖線、青色) を示す。図の横軸は固有周期(sec)、縦軸は最大加速度応答(cm/sec^2)であり、いずれも対数軸で示してある。これらの図より、以下のことがわかる。

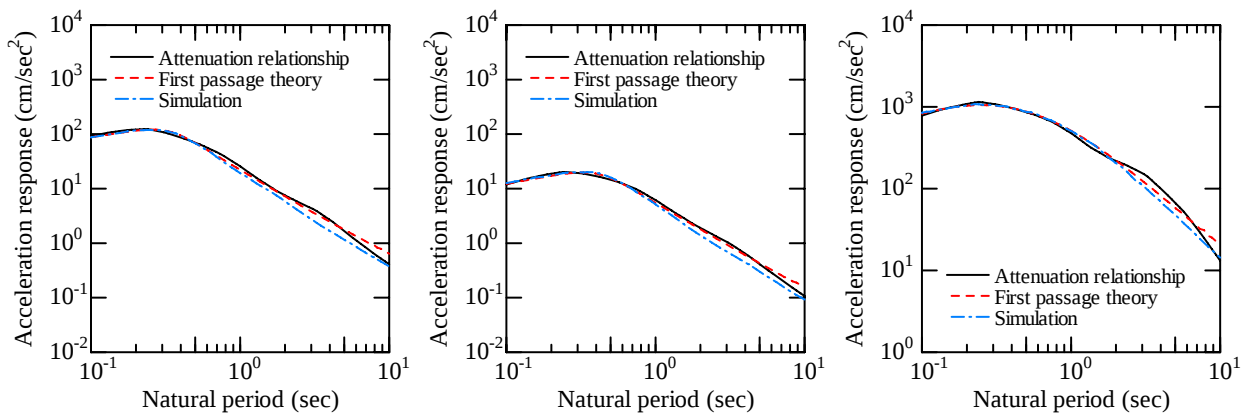
- (1) 初通過理論による平均応答スペクトルと目標応答スペクトルは、マグニチュード M が5の場合において適合性が悪い。
- (2) 初通過理論による応答スペクトルとシミュレーションのそれは、どのケースにおいても構造物の固有周期が1～2(sec)より長い領域において適合性が悪くなっている。初通過理論とシミュレーションとの差は、マグニチュード M が小さくなる程顕著になり、その理由は、式(4)の継続時間 T_e が短くなると、系の応答が十分成長せず非定常性の影響を強く受けるためであり、定常応答の仮定が満たされず過大評価となる。例えば、固有周期が $T_0 = 10 \text{ sec}$ の場合、初通過理論とシミュレーション結果の応答スペクトル比は、 $M = 5, 6$ で約1.5～2.0程度となる。
- (3) (1)と(2)より、初通過理論を用いた応答スペクトル適合地震動のサンプル波は、マグニチュード M が小さい場合、または、固有周期が長い領域では目標応答スペクトルとの適合性が悪い。

本節の手法の大きな問題は、定常性を仮定した初通過理論と非定常性が反映された目標応答スペクトルを適合させているところにある。これが、この手法の適合性の良くない理由であり、本来は、非定常性を考慮した初通過理論と目標応答スペクトルとを適合させるべきである。



(a) Case 1 ($M=5, H=2\text{km}, X=10\text{km}$) (b) Case 2 ($M=5, H=2\text{km}, X=100\text{km}$) (c) Case 3 ($M=7, H=10\text{km}, X=20\text{km}$)

図－4 内陸活断層型地震の距離減衰式の加速度応答スペクトルとの比較



(a) Case 4 ($M=6, H=4\text{km}, X=25\text{km}$) (b) Case 5 ($M=6, H=4\text{km}, X=100\text{km}$) (c) Case 6 ($M=8, H=24\text{km}, X=50\text{km}$)

図－5 プレート境界型地震の距離減衰式の加速度応答スペクトルとの比較

4.4 初通過理論の改良とそれを用いた応答スペクトル適合地震動の数値計算

前節で述べた問題を解決するために、本研究では、定常性を仮定した状態で発生させた地震動に、波形包絡線をかけ非定常性を考慮したものが、応答スペクトルに適合するよう初通過理論の応答スペクトルの補正を行う。その手順とそれを用いた応答スペクトル適合地震動の作成手順を図－6 に示すとともに、以下に説明する。まず、初通過理論による応答スペクトルと目標応答スペクトルが適合するように地震動のパワースペクトルのパラメータを同定する（点線(A)）。次に、同定したパワースペクトルを用いて初通過理論により定常な平均加速度応答スペクトル $R_{\text{vanmarcke}}$ を求める（点線(B)）。一方、同じパワースペクトルを用いて100個の時刻歴波形を発生させ、それらに式(1)で示される波形包絡線をかけることで地震動の非定常性を考慮したものを考え、100波の平均加速度応答スペクトル $R_{\text{simulation}}$ を求める（点線

(C)）。このとき、定常的な加速度応答スペクトルと波形包絡線により非定常性を考慮した平均加速度応答スペクトルとの比 ($r = R_{\text{vanmarcke}} / R_{\text{simulation}}$) を補正関数とし（ここまですが図－6 左図の説明）、それで $R_{\text{vanmarcke}}$ を除いたものが応答スペクトルに適合するようパワースペクトルを決定する。結果として、初通過理論による応答スペクトルは、目標応答スペクトルからずれることになる。この補正関数を様々な地震動を対象として求め、そこから本研究で用いる補正関数を回帰分析により求める。なお、補正関数は平均応答スペクトルどうしの比から得られるものであるため、前節の検討から、ここでも100波あれば足りるものと判断した。また、補正関数を求めるために対象とした地震動は、表－2 に示すような内陸活断層型地震とプレート境界型地震の各128通り（マグニチュード4通り、震源深さ4通り、震源距離8通り）とした。ただし、内陸活断層型地震とプレート境界型地震のマグニチュードの対象範囲は、過去の地震記

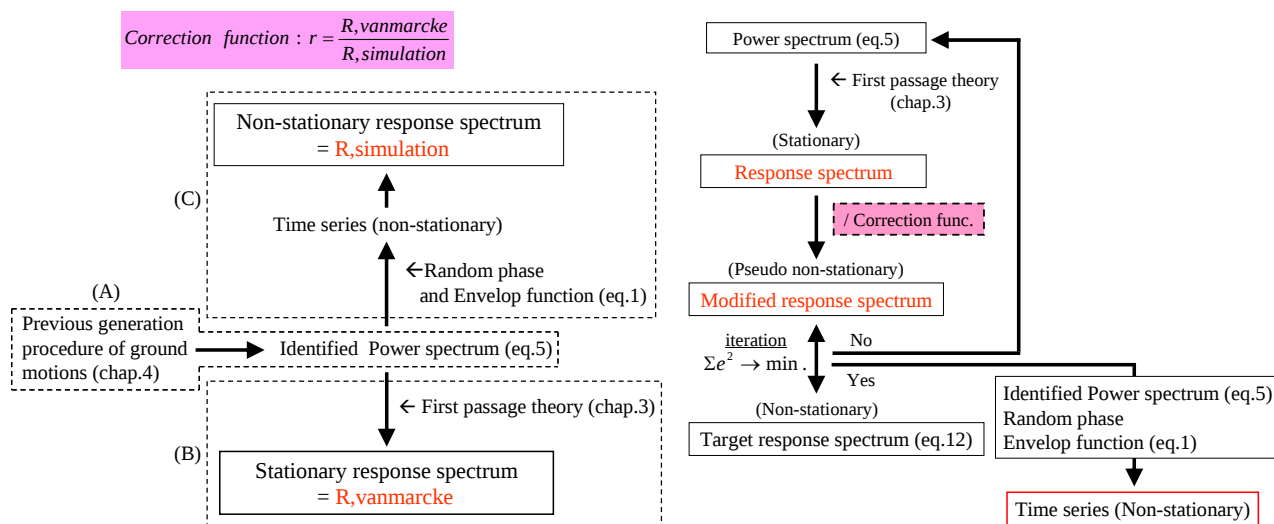


図-6 補正関数を求める手順（左図）とそれを用いた応答スペクトル適合地震動作成手順（右図）

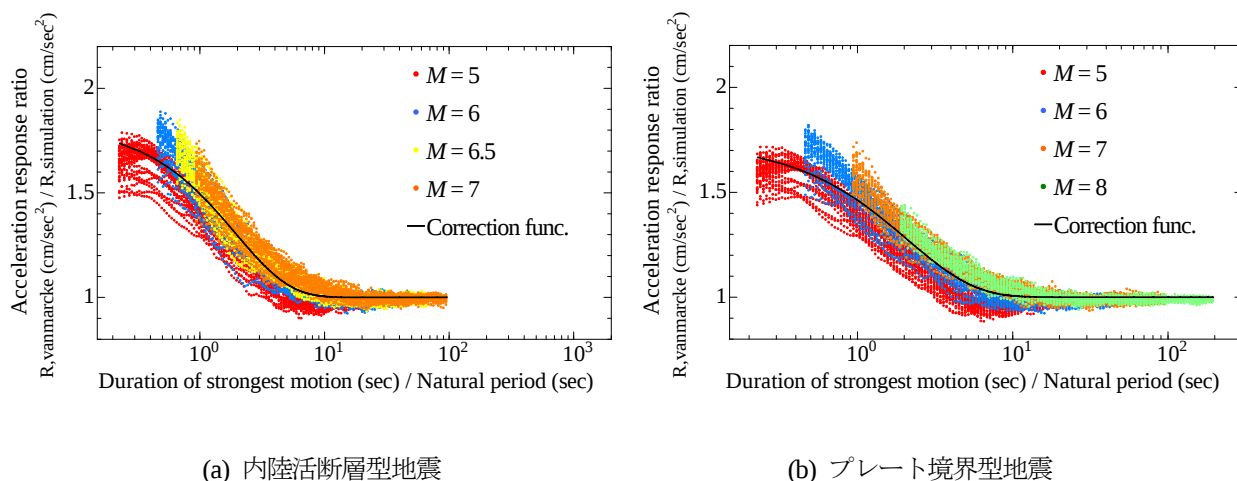


図-7 地震タイプごとの加速度応答スペクトル比（点）と補正関数（実線）

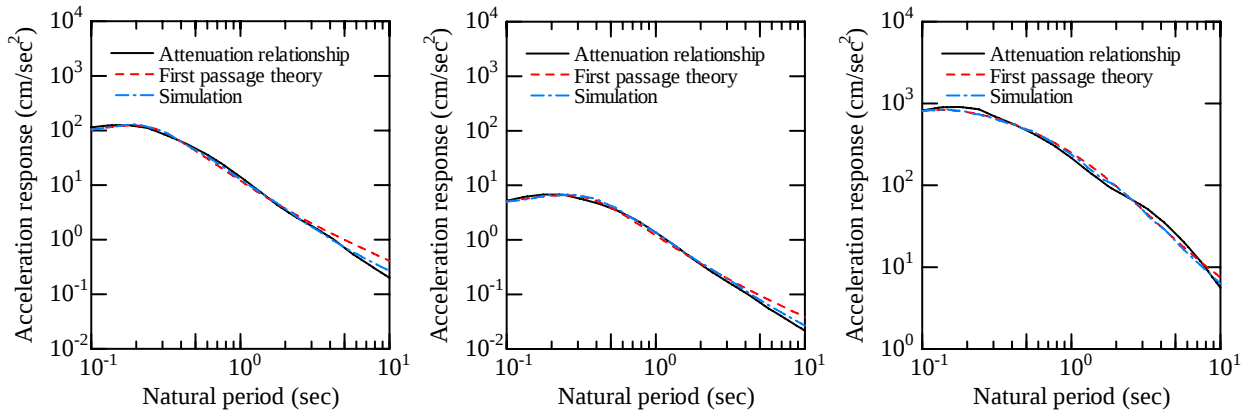
表-2 補正関数を求めるために対象とした地震動

Earthquake type	Inland-crustal earthquake	Inter-plate earthquake
M	5, 6, 6.5, 7	5, 6, 7, 8
H (km)	10, 20, 40, 50	10, 20, 40, 50
X (km)	10, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200	10, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200

録から考えて設定したため異なっている。また、安中らが解析に用いた地震記録は、最大加速度の絶対値がほぼ $0.1 \sim 1000 \text{ cm/sec}^2$ の範囲内にあることから、シミュレーションによる 100 波のサンプル波形の絶対最大加速度の平均値が、 $0.1 \sim 1000 \text{ cm/sec}^2$ 以外になる場合は除外した。

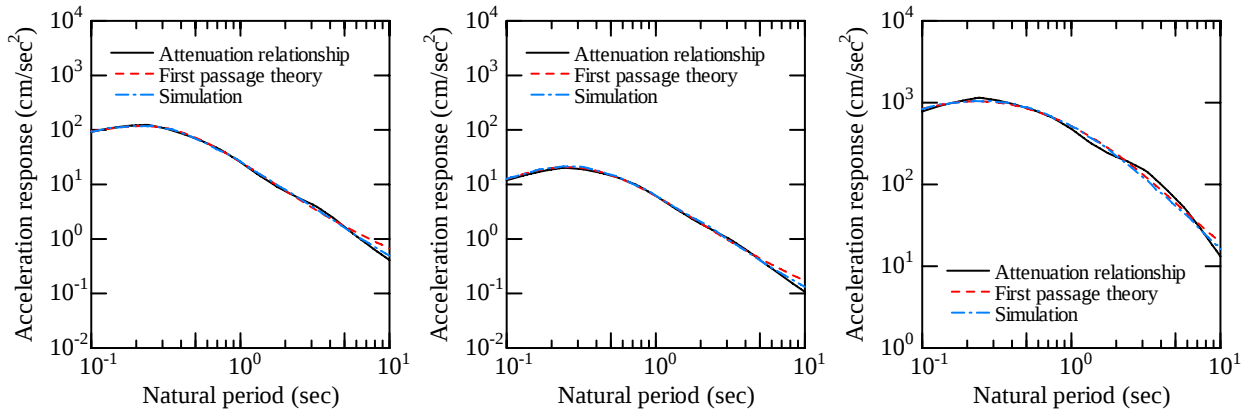
図-7 は、表-2 に示した様々な地震動に対する加速度応答スペクトル比を各固有周期 T_{0i} に対してマグニ

チュード M ごとに色の違う点で地震タイプごとに示したものである。地震動の非定常性の影響は、前節で説明したように地震動の継続時間が小さい、すなわちマグニチュードが小さいほど大きく受けることからマグニチュードに依存した形で与えられるべきである。したがって、地震動の強震部継続時間 T_e (式(4))を構造物の固有周期で除した値で横軸を表すこととした。図-7 より、ターゲットのマグニチュードが同じでも震源深さや震源距離が異なれば加速度応答スペクトル比は異なる。特に横軸の値が 10 より小さい領域ではそれが大きく、また、地震タイプによりばらつき量に違いが見られる。このことから、補正関数はマグニチュードの他に震源深さや震源距離、地震タイプに依存した形で表現する必要があるが、本研究では、できるだけ簡単な関数形で表現することとし、震源深さや震源距離に依存する項は考えず、地震タイプごとに次式の回帰式を設定した。



(a) Case 1 ($M=5, H=2\text{km}, X=10\text{km}$) (b) Case 2 ($M=5, H=2\text{km}, X=100\text{km}$) (c) Case 3 ($M=7, H=10\text{km}, X=20\text{km}$)

図-8 内陸活断層型地震の距離減衰式の加速度応答スペクトルとの比較



(a) Case 4 ($M=6, H=4\text{km}, X=25\text{km}$) (b) Case 5 ($M=6, H=4\text{km}, X=100\text{km}$) (c) Case 6 ($M=8, H=24\text{km}, X=50\text{km}$)

図-9 プレート境界型地震の距離減衰式の加速度応答スペクトルとの比較

$$r(x) = 1 + a_1 \cdot e^{-a_2 x} \quad (15)$$

ここで、 $r(x)$ は補正関数、 $x = T_e / T_0$ 、および a_1 、 a_2 は回帰パラメータである。地震タイプごとの補正関数は様々な地震動に対する加速度応答スペクトル比の残差平方和を最小とするように決定した。以下に、各地震タイプの補正関数の回帰パラメータ a_1 、 a_2 をそれぞれ示す。また、図-7 中の実線は地震タイプごとの補正関数をそれぞれ示してある。

内陸活断層型地震： $a_1 = 0.8277$, $a_2 = 0.5143$

プレート境界型地震： $a_1 = 0.7430$, $a_2 = 0.4754$

このようにして求めた補正関数は、以下のように用いる(図-6 右図参照)。すなわち、初通過理論の応答スペ

クトルを目標応答スペクトルに応じた上式の補正関数で除することで擬似的に非定常性を考慮した平均加速度応答スペクトルを求め、それと目標応答スペクトルが適合するように 4.2 節のスペクトルフィッティングを行い、パワースペクトルのパラメータを同定する。図-8, 9 は、地震動の非定常性の影響を考慮した応答スペクトル適合地震動の数値解析を行い、距離減衰式の加速度応答スペクトルと同定したパワースペクトルのパラメータを用いた初通過理論の平均加速度応答スペクトルおよびシミュレーションによる 100 波の平均加速度応答スペクトルの比較を示す。なお、数値解析例は 4.3 節同様、表-1 に示した地震動を対象とし、また、図の凡例は、図-4, 5 と同じである。図-8, 9 から、初通過理論に非定常性の影響を取り込んだ応答スペクトルを用いて同定したパワースペクトルと波形包絡線を用いたシミュレーションの平均応答スペクトルと距離減衰式の応答スペクトルは、図-4, 5 に比べてマグニチュードの大

小によらず、また、周期が長い領域においても、良く一致する結果となった。

5. まとめ

本論文は、目標応答スペクトルを期待値とするような地震動を確率論的かつ効率的に精度良く作成する応答スペクトル適合地震動の作成方法について、初通過理論の実用的手法である Vanmarcke の手法を用いた既往の地震動作成方法に擬似的な手法によって地震動の非定常性の影響を考慮する一手法を示したものである。応答スペクトル適合地震動として、地震タイプ（内陸活断層型地震およびプレート境界型地震）を考慮した加速度応答スペクトルの距離減衰式をターゲットとして作成し、その適合性を検討した。本研究の内容を要約すると以下のようになる。

- (1) 既往の初通過理論に地震動の非定常の影響を考慮するため、定常確率過程に基づいた初通過理論による平均応答スペクトルとシミュレーションによる平均応答スペクトルとの比から補正する関数を求めた。
- (2) 本研究で求めた補正関数は、震源深さ、震源距離によらず、マグニチュードのみに依存した形で、地震タイプごとに求めた。
- (3) 地震タイプごとの補正関数を定常過程に基づく手法に導入して、応答スペクトル適合地震動を作成した。その結果、シミュレーションの平均応答スペクトルは地震マグニチュードの大小に関係なく目標応答スペクトルの対象周期帯（0.1～10sec）全域で良く適合した。

謝辞

本研究を進めるにあって、徳島大学学長裁量経費より経済的支援を受けました。徳島大学工学部 澤田勉名誉教授には、貴重なご意見、ご指導を頂きました。また、応答スペクトルの距離減衰式を求めるために必要な回帰係数データは、東電設計(株) 土木本部の安中正氏より提供して頂きました。関係各位に甚大なる謝意を表します。

参考文献

- 1) Scanlan, R. H. : Earthquake time histories and response spectra, J.of EM Div., ASCE, Vol.10, No.EM4, pp.635-654, 1974.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 丸善株式会社, pp.12-29, pp.304-310, 2002.
- 3) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2004), pp.491-503, 2004.
- 4) 中山隆弘, 藤原豪紀, 長谷川賢治, 児玉明日香, 竹本康弘：地震動および材料強度の不確実性を考慮した既設橋梁の耐震信頼性に関する一考察, JCOSSAR2000 論文集, pp.197-204, 2000.
- 5) 北原武嗣, 伊藤義人：地震波の位相特性が鋼製および RC 橋脚の最大応答変位に与える影響, JCOSSAR2003 論文集, pp.671-678, 2003.
- 6) 小林雅人, 森川英典：支承と入力地震動の不確実性を考慮した RC 橋脚を有する橋梁構造系の耐震信頼設計, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1369-1374, 2004.
- 7) 星谷勝：確率論手法による振動解析, 鹿島出版会, pp.95-111, pp.153-174, 1974.
- 8) 尾崎隆司, 高田毅士：初通過理論を用いたパワースペクトル密度関数と応答スペクトルの相互変換, 日本建築学会・荷重指針の地震荷重(案)に関して, 構造工学論文集, Vol.49B, pp.343-349, 2003.
- 9) 島田智之, 三神厚, 澤田勉：動的信頼性理論に基づく応答スペクトル適合地震動の一作成法, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.313-320, 2007.
- 10) Vanmarcke, E. H. : Properties of Spectral Moments with Applications to Random Vibration, Proc.of ASCE, EM2, pp.425-446, 1972.
- 11) 釜田正毅, 源栄正人, 柴田明德：ランダム応答理論に基づく短周期地震動の統計的評価法—震源断層のランダムな不均質性が地震動の共分散応答に及ぼす影響—, 日本建築学会構造系論文集, 第533号, pp.61-68, 2000.
- 12) 室野剛隆, 佐藤忠信：位相のバラツキを考慮した 1 自由度系のランダム応答の定式化, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.910-913, 2006.
- 13) 安中正, 森田大, 相京泰仁, 原田光男：地震タイプを考慮した加速度応答スペクトル推定式, 土木学会地震工学論文集, CD-ROM 版, No.101, 2005.
- 14) 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, 1996.
- 15) 澤田勉, 平尾潔, 辻原治, 三神厚：最大地震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, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.311-322, 2001.

(2008 年 9 月 18 日受付)