

I-12 強震記録の統計解析から推定される震源スペクトル特性

東北工業大学 正員 ○神山 真
 " " 松川忠司

1. はじめに 強震動は大別すると震源特性、伝播経路、観測点近傍の局所的な地盤条件の影響を受ける。従って、強震動の予測モデルを構築するには各要因の影響度を定量的に把握する必要がある。これら三要因うち、震源特性の影響は震源そのものが直接観測の困難な位置にあることから、現在のところ断層モデルによる理論的推定に大きく依存しているのが実情である。一方、震源理論においても、工学で問題となる加速度地震動に限定すると種々論争の行なわれているところであり、結局のところ加速度地震動の震源特性は推定の域を出ない状況にある。このようなことから、実地震記録に即して加速度地震動の震源特性を明らかにすることは強震動予測モデル確立のために緊要となっている。本研究は強震記録の統計解析から伝播経路、観測点近傍の局所的な地盤条件を除去して震源スペクトルを求める方法を述べるとともに、このように求められた統計的震源スペクトルと断層モデルによる理論震源スペクトルとの関係について考察したものである。

2. ダミー変数を用いた強震動スペクトルの重回帰モデル

著者らは地表で観測された地震動スペクトルから上記三要因による影響を分離独立させる統計的モデルを提案している¹⁾。著者らのモデルは上記三要因の影響を地震マグニチュード、震源距離、観測点条件を数値化するダミー変数で代表させ、これらを説明変数として構成した重回帰モデルである。この統計的モデルは非常に簡単であるが、上記三要因を効果的に分離独立させることができる。ただし、このモデルは簡易化を優先させたもので、上記三要因のうち震源特性、伝播経路の影響を線形的に処理している。一方、震源断層の複雑な挙動、波動伝播に伴う種々の減衰、増幅、波動種別の差異などを考えると、地震動特性は震源、伝播経路パラメータに非線形に依存するとするのが自然である。とりわけ、ここで考察対象としている震源スペクトルをこのような統計的モデルで推定するには、地震動スペクトルが震源パラメータ、伝播経路パラメータとともにどのように非線形に変化するかを明らかにすることが重要である。そこで、このような非線形変動を求める重回帰モデルを誘導した。ここでは、紙面の関係から概念を中心に述べる。詳細は著者らの文献²⁾を参照されたい。

いま、地震動スペクトル $V(T)$ が地震マグニチュード M とともに図1のモデルのように変動するとする。 $V(T)$ は明らかに M とともに非線形に変動するが、このような非線形変動を回帰式でモデル化するには種々の方法が考えられる。ここではダミー変数の概念を用いて線形変動の組合せとして表現する。図1に示される任意の設定値 M_c を用いて説明変数 M を二つの領域に分割して次の回帰式を立てる。

$$\log_{10} V(T) = a_1(T)M_1 + a_2(T)M_2 + a_3(T)M_3 + a_4(T) \quad \text{---- (1)}$$

ここに、説明変数 M_1, M_2, M_3 は次のように与えられる。

$$M_1 = \begin{cases} M & (M \leq M_c) \\ M_c & (M > M_c) \end{cases}, \quad M_2 = \begin{cases} 0 & (M \leq M_c) \\ M - M_c & (M > M_c) \end{cases}, \quad M_3 = \begin{cases} 0 & (M \leq M_c) \\ 1 & (M > M_c) \end{cases}$$

式(1)に最小自乗法を適用すると、回帰係数 $a_1(T) \sim a_4(T)$ を求めることができ、さらに二つの線形式の境界値 M_0 は次式より求まる。

$$M_0 = M_c + a_3(T)/(a_1(T) - a_2(T)) \quad \text{---- (2)}$$

これらの回帰係数と二つの線形式の関係は図1に示されている。次に、以上のように求まる M_0 を新しい M_c として式(1)を適用する。このような繰返しを行い、回帰係数が収束したときの値を採用すれば最も妥当な二つの線形式による回帰モデルが求まることになる。

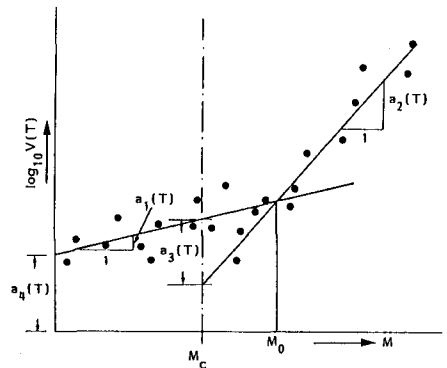


図1 ダミー変数による重回帰モデル

以上に説明したのが本研究の回帰モデルの概念であるが、図1のような2分割は多分割の場合に容易に拡張できるし、説明変数の数も多変数に適用可能である。ここで最終的に設定したモデルは地震マグニチュードM、震源距離rの常用対数 $\log_{10}r$ 及び各観測点の地盤条件を識別する S_j -変数を説明変数とした次の重回帰式である。

$$\log_{10}V(T) = \sum_{i=1}^5 a_i(T)M_i + \sum_{i=1}^5 b_i(T)R_i + c(T) + \sum_{j=1}^{N-1} A_j(T)S_j \quad \text{----- (3)}$$

式(3)の説明変数 M_i 、 R_i はそれぞれ地震マグニチュード、震源距離の常用対数を式(1)の考え方で3分割したときに設定される変数である。また、 S_j は S_j -変数であり、Nは全観測点数である。式(3)が誘導された背景は文献2に詳しいが、式(3)により観測点の局所的な地盤条件による増幅率が求まるとともに、地震規模、伝播距離に応じた地震動スペクトルの非線形変動が明らかにできる。

3. 震源スペクトルの統計的推定

式(3)の重回帰モデルを我国の強震記録228成分(26観測点)¹⁾に適用した。その解析結果には地震動スペクトルの変動に関する興味深い現象が得られているが、紙面の関係からここでは震源スペクトルの推定についてのみ述べる。

式(3)の最後の項を除くことにより観測点の地盤条件によらない基盤の地震動スペクトルの変動が求まる。図2はこのように求まる基盤スペクトルを強震記録データの平均震源距離 $r=80\text{km}$ で地震マグニチュードMによりスケリングした例である。地震規模とともに基盤スペクトルは複雑に変動することがわかる。いま、このような基盤スペクトルを与える基盤が震源を含む一様な半無限空間に相当すると仮定すると、震源におけるスペクトル(震源スペクトル)が波動のgeometrical spreadingなどを考慮して求まる。一方、震源スペクトルのスケリングに関して断層モデルを適用したHanks and McGuire(HMモデル)³⁾及びPapageorgiou and Aki(PAモデル)⁴⁾の二つの理論が提案されている。そして、この二つの理論間にその是非をめぐって激しい論争がなされている。この点、本研究で求まる震源スペクトルは強震記録から経験的に知られたものであり、二つの理論の論争に一定の判断を与えるものと考えられる。図3、4は本研究による統計的震源スペクトルを上記の二つの理論震源スペクトルと比較したものである。図3、4では地震マグニチュードMに代り地震モーメント M_0 で震源スペクトルがスケリングされている。両図の比較から、HMモデルよりPAモデルの方が工学で問題となる大地震及び周期帯域で妥当であることが指摘される。

(参考文献) 1)Kamiyama and Yanagisawa:Siols and Foundations, Vol.26, No.2, pp.16-32, 2)Kamiyama and Matsukawa:Structural Eng./Eathq. Eng. (in print), 3)Hanks and McGuire:BSSA, Vol.71, 4)Papageorgiou and Aki:BSSA, Vol.78

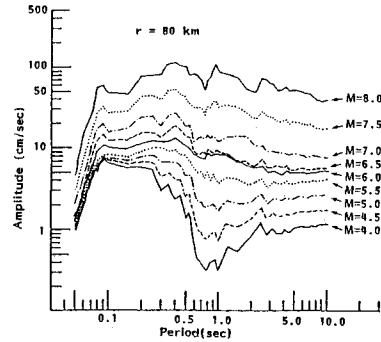


図2 統計解析による基盤スペクトル

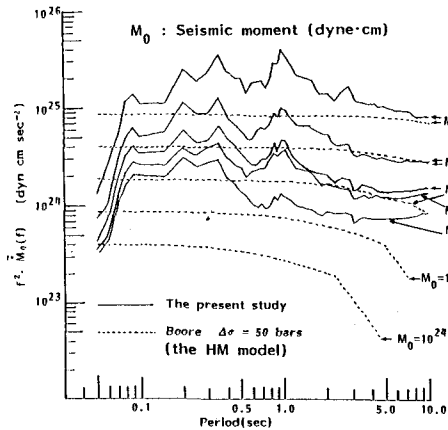


図3 統計的震源スペクトルと理論震源スペクトル(HMモデル)の比較

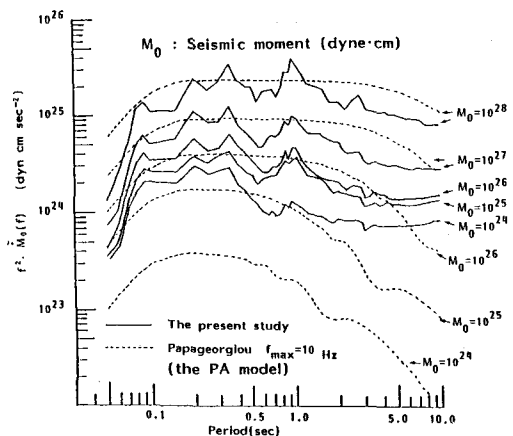


図4 統計的震源スペクトルと理論震源スペクトル(PAモデル)の比較