

(27) 強震記録の統計処理による地盤の増幅スペクトル及び

基礎入射波スペクトルのアテニュエーション特性

東北工業大学 工学部 ○神山 眞
東北工業大学 工学部 松川 忠司

1. まえがき

強震時における地盤の振動特性は震源過程、伝播経路、観測点近傍の地盤構造など種々の要素の影響を受ける。このうち、地盤構造の影響は各地点固有で、しかも他要素の影響に比し定常的であることが知られている。従って、既往の地震記録に対して適当な統計処理を施せば、観測地点固有の性質とそれ以外の性質を分離することにより、各地点固有の地盤構造による増幅特性と全観測点に共通地震毎に変動するアテニュエーション特性を得ることができると考えられる。この考えに従い、長橋、小林¹⁾は日本の代表的強震記録に対して巧みな統計解析を施し、各観測点の増幅スペクトルを求めるとともに、基礎の地震動スペクトルの統計式を与えている。長橋、小林は彼らの方法を既成の統計理論に沿った形で述べてないが、一種の非線形重回帰式をiterationで解いたものと考えることができる。但し、非線形重回帰式としての考察がなされていないので物理的にみた基礎の概念が不明瞭であり、しかもiterationが収束しないことがあると指摘されている。²⁾

本報告は長橋らの考えに従いながらも、統計的手法を既成の理論に求め、各観測点の増幅スペクトルと基礎入射波スペクトルの統計式を試算したものである。この手法は重回帰式が本質的線形である点、基礎の概念を物理的にとらえることのできる点などの利点を有している。

2. ダミー変数を導入した応答スペクトルの重回帰分析

いま、周期をT、応答スペクトルをV(T)として、マグニチュード、震央距離(km)、震源深さ(km)を各々M、Δ、Dとすると、既往の重回帰モデルを参照して次のように定める。

$$\log_{10} V(T) = a(T)M - b(T) \log_{10} \Delta - d(T)D - C(T) \quad \text{---- (1)}$$

ここに、a(T)、b(T)、C(T)、d(T)は回帰係数。

式(1)は全観測点に共通に適用される重回帰モデルであるが、応答スペクトルが全部でN個の異なる観測点により得られたものであるとすると、次のようにダミー変数³⁾を導入してブロック分けされた重回帰モデルを設定できる。

$$\log_{10} V(T) = a(T)M - b(T) \log_{10} \Delta - d(T)D - C(T) + \log_{10} H(T) + A_1(T) \cdot S_1 + A_2(T) \cdot S_2 + \dots + A_{N-1}(T) \cdot S_{N-1} \quad \text{---- (2)}$$

ここに、S₁、S₂、...、S_{N-1}がダミー変数であり、N観測点のうち代表的観測点(基準点とよぶ)を除く、N-1個の観測点に対して、該当観測点であれば1、そうでなければ0かとられる。また、基準点であればS₁=S₂=...=S_{N-1}=0ととられる。さらに、H(T)は基準点における理論周波数応答関数とする。

式(2)において、右辺第1項から第4項までが全観測点に共通する項であり、他の項は共通項からの各観測点毎のバラツキを表す。共通項からのバラツキという統計的指標はここで考えている地盤の地震時応答という観点から考えれば、各観測点の増幅及び減衰特性と考えることができる。同様に、共通項は全観測点に共通する地盤すなわち、地震工学で言う基礎の入力特性と理解することができる。

以上から、式(2)に対して最小自乗法を適用して求められる回帰係数a(T)、b(T)、...、A₁(T)、...、A_{N-1}(T)を用いれば、任意の観測点λ(λ=1~N-1)の増幅スペクトルAMP_λ(T)及び、基準点の基礎に対応する基礎入射

図-1. 観測地点



波スペクトル $S\Delta_0(\tau)$ は次のように与えられる。

$$AMP_{\lambda}(\tau) = H(\tau) \cdot 10^{A_{\lambda}(\tau)} \quad \dots (3)$$

$$S\Delta_0(\tau) = 10^{a(\tau) \cdot M} \cdot \Delta^{-b(\tau)} \cdot 10^{-d(\tau) \cdot D} \cdot 10^{-c(\tau)} \quad \dots (4)$$

3. 解析に用いたデータセット

今回の解析に用いたデータセットは運輸省の港湾地域強震観測網⁽⁴⁾により得られた強震記録のうち最大加速度約50ガル以上の水平動記録より求められた速度応答スペクトル(減衰定数 $\zeta=0.05$)とした。これらのデータは図-1に示す22の観測点より得られたものであり、一観測点につき6成分以上の水平動速度応答スペクトルを有する。但し、同一地震で得られた異なる成分の水平動記録の速度応答スペクトルもデータ不足を補う便宜上、ここでは別個のデータとして扱っている。従って、データセットのデータ総数は186である。

図-2~図-4に対象としたデータのM、 Δ 、Dに対するヒン度分布を示す。Mのヒン度分布から対象としたデータはM=6.0からM=7.5に集中していることがわかる。

4. 各観測点の増幅スペクトル

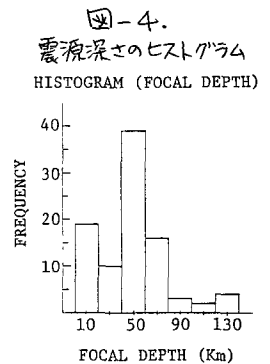
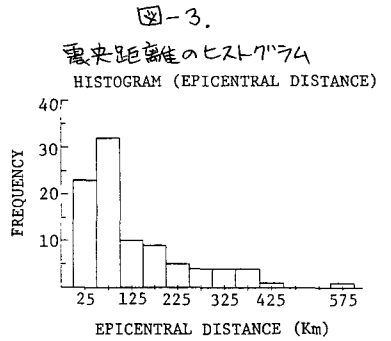
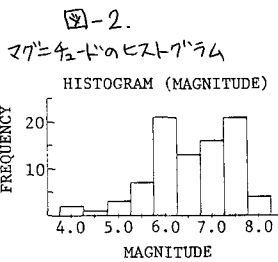
式(2)において基準点をどこに設定するかは結果に重要な影響を及ぼすと考えられる。しかも、この基準点の選択が直接、基盤の設定を支配することになる。

ここでは図-1の観測点のうち、最も堅固な岩盤が露出している大船渡(OFUNATO)を基準点として設定した。更らに、同点では基盤が露出していると仮定して、 $H(\tau)=2$ とした。従って、以下でいう基盤とは、大船渡に露出している岩盤(S波速度が1km/sec前後と推定される)に対応する層を意味する。

上述のように基準点ならびに基盤を設定されたときに各観測点で求められた増幅スペクトルを代表地点について示したのが図-5である。図-5をみると、各観測点毎に増幅度、卓越周期が異なっており、各観測点特有の増幅スペクトルが得られているのがわかる。これらの増幅スペクトルは統計的に得られたものであり、種々の要因の影響を反映したものである。例えば、これらの要因として地震波の波動特性(実体波、表面波)、土の応力-ひずみ関係の非線形化起因する地盤の強震時における物性変化などが考えられる。このように種々の影響を総合的に反映させたものが図-5の増幅スペクトルと考えられるが、ここでは、図-5のスペクトルの妥当性を考える一つの試みとして、粘性を考慮したS波重複反射の理論増幅スペクトルを求め、図-5の増幅スペクトルと比較してみた。

図-5の増幅スペクトルから得られている各観測点の地盤構造は深部については必ずしも明確ではないが、既往の研究を参照して一定の推定が可能である。表-1は、このようにして推定された各観測点の地盤構造モデルである。ここで、Q値はHachinoheを除き、仮定された値である。図-6は表-1の地盤構造を用いて求められた各観測点のS波重複反射理論による増幅スペクトルである。

図-5と図-6を比較してみると、図-6の理論増幅スペクトルは弾性理論に基づいたものであるが短周期帯域の振幅が全般に優勢であるが、増幅度の大きさ、卓越周期などの点から統計的スペクトルは理論スペクトルに比較的調和していることがわかる。このように種々の影響を反映しているものと考えられる統計的スペクトルはS波重複反射理論という単一の理論に調和していることは注目すべきことと思われる。



5. 基盤入射波スペクトル

基盤入射波のアテニュエーション特性をみるため式(2)における係数 $a(\tau)$ 、 $b(\tau)$ 、 $c(\tau)$ 、 $d(\tau)$ の周期毎の変化を示したのが図-7、図-8である。

マグニチュード M の係数 $a(\tau)$ は長周期になるに連れ、値が大きくなる傾向がみられる。すなわち、長周期ほど地震のマグニチュードの影響をより強く受けることがわかる。逆に、震央距離 Δ の係数 $b(\tau)$ は周期とともに漸減する。つまり、長周期ほど距離減衰が小さい。

これらの結果は、既往の研究結果に合致するし、物理的説明とも矛盾しない。一方、震源深さ D の係数 $d(\tau)$ をみると周期の0.5秒付近を境として絶対値が大幅に変化していることが読みとれる。すなわち、短周期成分ほど震源深さの影響を強く受けることがわかる。これまで、震源深さは重回帰モデルのパラメータとして採用される例は少ないが、この結果をみると影響の大小は別にしても、震源深さは基盤入射波スペクトルの周期特性に微妙な影響を及ぼすものと推定される。

以上のように求められた係数 $a(\tau)$ 、 $b(\tau)$ 、 $c(\tau)$ を長橋、小林の結果と比較すると、各係数の周期毎の変化はよく対応していることがわかる。但し、係数の絶対値についてはここの結果は全般に小さな値を与えている。特に、係数 $b(\tau)$ の値の違いは注目し得るものと思われる。長橋、小林の $b(\tau)$ はほぼ1.0を前後する値である。それに対して、この研究の $b(\tau)$ は0.5に漸近する形で周期とともに値が減っている。係数 $b(\tau)$ は距離減衰に逆係する係数であり、実際の距離減衰は $\Delta^{-b(\tau)}$ (Δ : 震央距離)で与えられる。周知のように、波動の幾何減衰は実体波であれば Δ^{-1} 、表面波であれば $\Delta^{-0.5}$ で与えられる。従って、この研究結果における $b(\tau)$ の値の変化は周期約0.5秒以上の長周期期では表面波のような距離減衰を示しているということになる。逆に、それより短周期期では、むしろ実体波に近い距離減衰が与えられていると理解される。このように、距離減衰にあたかも波動特性の違いを示唆するような周期毎の変化が見られることは、基盤入射波の波動伝播特性の影響を考える上でたいへん興味深いことである。

次に、基盤入射波スペクトルの例として震央距離 Δ によるスペクトルの変化を示したのが図-9、図-10である。図-9はマグニチュード $M=6.0$ 、震源深さ $D=40$ km、図-10はマグニチュード $M=7.5$ 、震源深さ $D=0$ kmに対するものである。

これらの図から、いかなる震央距離でもマグニチュードの大きい地震ほど長周期成分が優勢なスペクトルとなることがわかる。また、当然のことであるが、震央距離の短かいほど短周期成分が強く現われることもわかる。

図-5. 統計的処理により求められた代表的地点の増幅スペクトル

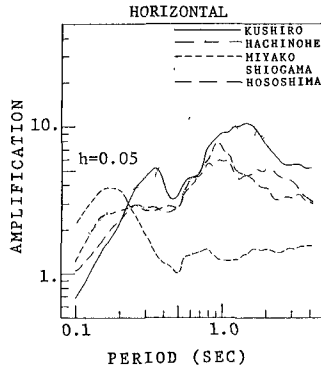


図-6. 各波の重複反折理論により求められた増幅スペクトル

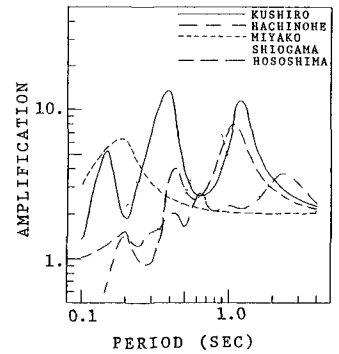


表-1. 各地点の地盤構造

KUSHIRO			
Thickness (m)	S-wave velocity (m/sec)	Density (g/cm ³)	Q
2.0	50.0	1.6	10.0
5.0	70.0	1.7	10.0
13.0	400.0	2.0	10.0
22.0	150.0	1.8	10.0
10.0	250.0	2.0	10.0
33.0	600.0	2.0	10.0
	1400.0	2.3	10.0

MIYAKO			
Thickness (m)	S-wave velocity (m/sec)	Density (g/cm ³)	Q
2.2	120.0	1.6	10.0
7.9	230.0	1.7	10.0
	800.0	2.0	10.0

SHIOGAMA			
Thickness (m)	S-wave velocity (m/sec)	Density (g/cm ³)	Q
3.45	95.0	1.55	10.0
7.20	60.0	1.35	10.0
3.10	145.0	1.70	10.0
	850.0	1.80	10.0

HACHINOHE			
Thickness (m)	S-wave velocity (m/sec)	Density (g/cm ³)	Q
2.0	100.0	1.8	14.19
2.0	160.0	1.8	13.23
3.0	195.0	1.9	11.80
3.0	195.0	2.0	11.60
2.0	380.0	2.0	12.33
1.0	200.0	2.0	12.33
1.0	375.0	2.0	12.33
3.0	375.0	1.6	9.26
1.0	200.0	1.6	9.26
10.0	430.0	1.6	6.97
8.0	270.0	1.7	7.42
144.0	370.0	1.9	7.16
180.0	690.0	2.0	10.00
	1100.0	2.1	10.00

HOSOSHIMA			
Thickness (m)	S-wave velocity (m/sec)	Density (g/cm ³)	Q
12.0	200.0	1.7	10.0
7.0	127.0	1.4	10.0
3.0	275.0	1.6	10.0
6.0	164.0	1.5	10.0
10.0	260.0	1.8	10.0
10.0	164.0	1.6	10.0
	800.0	2.0	10.0

一方、基盤入射波スペクトルのマグニチュードMによる変化の一例を示したものが図-11である。図-11は震央距離 $\Delta=100\text{km}$ で、震源深さ $D=0\text{km}$ 、 $D=40\text{km}$ の場合を示されている。

図-11をみると、マグニチュードMの大きい地震ほど長周期成分が優勢となるという図-9、図-10にみられた傾向と同様に示されている。特に、マグニチュード7.5から8.0程度の地震になると、基盤入射波スペクトルは周期約0.5秒以上の周期帯域ではほぼフラットなスペクトルとなることわかる。

また、震源深さDの影響をみとみると、図-8に示した係数 $d(\tau)$ の値を反映して、周期0.5秒前後を境として $D=0\text{km}$ と $D=40\text{km}$ ではかなり異なることわかる。周期約0.5秒以下の短周期帯域では震源深さか深いほどスペクトル振幅が大きい。このことは、同周期以下の短周期成分が実体波と考えると一定の説明が可能である。すなわち、基盤入射波が実体波であれば、震源深さか深いほどより鉛直に近い方向からの入射が期待され、その結果振幅も大きくなるということになる。

以上のように、前述の距離減衰と同様に、基盤入射波スペクトルに対する震源深さの影響においても波動特性の違いが示唆されていることは注目に価するものと思われる。

6. おわりに

今回は港湾強震観測網の記録に基いて解析をすすめたものであり、いわば予備的考察である。現在、さらにデータセットを拡張した作業を行っており、これらの結果を含めて改めて総合的な考察を加えたいと考えている。
<参考文献>

- 1) 長橋、小林：第4回日本地震工学シンポジウム講演集
- 2) 渡部：建設省建築研究所、建築研究報告 No.92
- 3) 上田：統計処理プログラム、サイエンス社
- 4) 土田他：港湾技術資料 No.971也

図-7.
回帰係数 $a(\tau)$, $b(\tau)$, $c(\tau)$
の周期変化

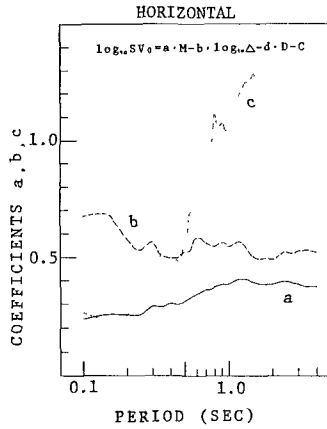


図-8.
回帰係数 $d(\tau)$
の周期変化

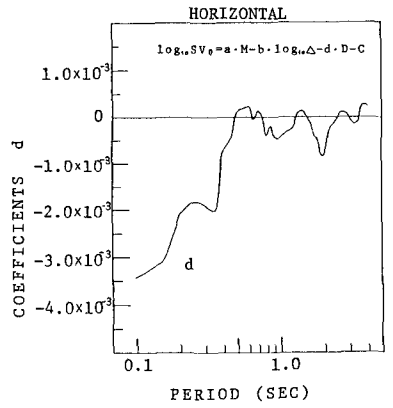


図-9.

震央距離による基盤入射波
スペクトルの変動

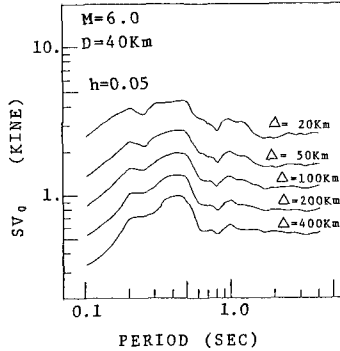


図-10.

震央距離による基盤入射波
スペクトルの変動

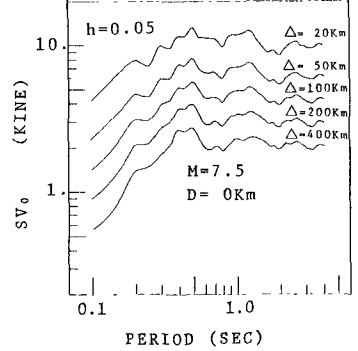


図-11.

マグニチュード、震源深さによる
基盤入射波スペクトルの変動

