

(9) 加速度応答スペクトルの予測式

○ 建設省土木研究所 正員 川島一彦
 “ “ 相沢 興
 “ “ 高橋和之

1 まえがき

本小文は、我国の地盤上で得られた多数の加速度強震記録を重回帰分析し、減衰定数5%の加速度応答スペクトルの実用的な距離減衰式を提案するものである。検討の重点は、距離減衰式の地盤種別および固有周期依存性とした。

2 解析に用いた強震記録

解析対象としたのは、我国の地盤上67地点において合計90回の浅発地震(震源深さ60km未満)によりSMAC型強震計により得られた2@197成分の加速度強震記録であり、低振動数側および高振動数側の遮断振動数 f_{LH} , f_{UH} をそれぞれ、 $1/3$, $12H$ とすると計器補正を加えている。また、我国では一般に水平成分の地震力を独立に構造物に作用させることを考慮し、水平成分を時間領域で合成し、固有周期ごとに水平面内で最大となる加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A(T)$ (減衰定数5%)を解析対象とした。なお、このように水平面内の絶対最大値をとると、強震計と観測された水平成分の加速度応答スペクトルのうちのいずれの大きい方の値に比較し、平均17%程度大きくなる。

地盤条件は、道路橋示方書耐震設計編に従い、1種(道路橋示方書の1種)、2種(同、2種+3種)、3種(同、4種)の3種類に区分した。図1は、解析に用いた強震記録をマグニチュードおよび震央距離別に分類した結果を示すものである。

3 距離減衰式の地盤種別依存性の検討

加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A(T)$ の距離減衰特性に関しては現在までに各種の検討が行われているが、距離減衰式としては次式を仮定しているものが多い。

$$\tilde{S}_A(T_k, G_i) = a(T_k, G_i) \times 10^{b(T_k, G_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, G_i)} \quad (1)$$

ここで、 M , Δ , $G_i(i=1,2,3)$ はそれぞれ、マグニチュード、震央距離[km]、地盤種別であり、 $a(T_k, G_i)$, $b(T_k, G_i)$, $c(T_k, G_i)$ は固有周期 T_k ($k=1,2,\dots,10$)および地盤種別 $G_i(i=1,2,3)$ ごとに定められる係数である。本解析では、 T_k は0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.5, 2, 3秒の10個を用いる。

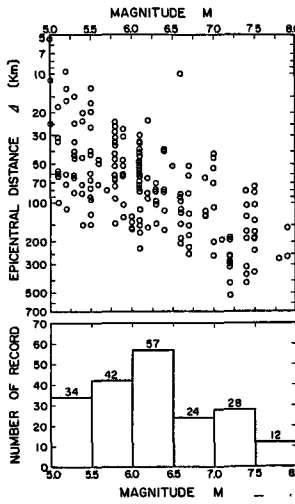
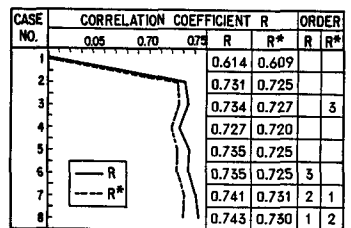
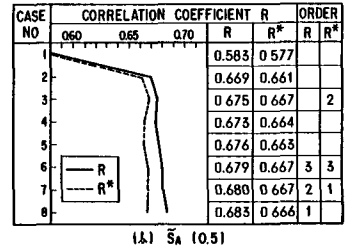
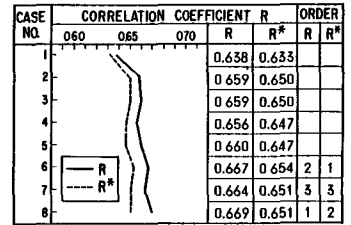


図1 解析に用いた強震記録のマグニチュードおよび震央距離別分類



LEGEND

CASE No.	COEFFICIENT a, b and c
1	a(GC1), b(GC1), c(GC1)
2	a(GC1), b(GC1), c(Tk, GC1)
3	a(GC1), b(Tk, GC1), c(GC1)
4	a(Tk, GC1), b(GC1), c(GC1)
5	a(GC1), b(Tk, GC1), c(Tk, GC1)
6	a(Tk, GC1), b(GC1), c(Tk, GC1)
7	a(Tk, GC1), b(Tk, GC1), c(GC1)
8	a(Tk, GC1), b(Tk, GC1), c(Tk, GC1)

図2 係数a, b, cの地盤種別依存性の検討

式(1)を固有周期および地盤種別ごとに解析した結果は参考文献(3)に示した通りである。これによれば、係数 a , b , c は固有周期および地盤種別に依りて系統的に変化するものとそうでないものがある(図4参照)。ここでは、まず、係数 a , b , c の地盤種別依存性を検討することとし、地盤種別ごとに係数 a , b , c が違うとし、これらとそれぞれ独立に定められた場合と、係数 a , b , c は地盤種別 GC_i によらぬと仮定し、全地盤種別に対して係数 a , b , c が一定となるように定められた場合のいずれが、より近似度の高い推定式となるかを検討することとした。

いま、式(1)の距離減衰式を用いることとすれば、地盤種別 GC_i に応じて \tilde{S}_A スペクトルを与えるためには、以下の8種類の推定式が与えられる。

$$\tilde{S}_A(T_E, M, \Delta, GC_i) = \begin{cases} a(T_E) \times 10^{b(T_E)M} \times (\Delta+30)^{c(T_E)} & (\gamma-ス1) \\ a(T_E) \times 10^{b(T_E)M} \times (\Delta+30)^{c(T_E, GC_i)} & (\gamma-ス2) \\ a(T_E) \times 10^{b(T_E, GC_i)M} \times (\Delta+30)^{c(T_E)} & (\gamma-ス3) \\ a(T_E, GC_i) \times 10^{b(T_E)M} \times (\Delta+30)^{c(T_E)} & (\gamma-ス4) \\ a(T_E) \times 10^{b(T_E, GC_i)M} \times (\Delta+30)^{c(T_E, GC_i)} & (\gamma-ス5) \\ a(T_E, GC_i) \times 10^{b(T_E)M} \times (\Delta+30)^{c(T_E, GC_i)} & (\gamma-ス6) \\ a(T_E, GC_i) \times 10^{b(T_E, GC_i)M} \times (\Delta+30)^{c(T_E)} & (\gamma-ス7) \\ a(T_E, GC_i) \times 10^{b(T_E, GC_i)M} \times (\Delta+30)^{c(T_E, GC_i)} & (\gamma-ス8) \end{cases} \quad (2)$$

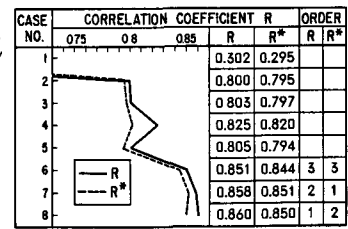
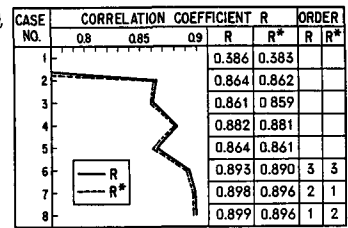
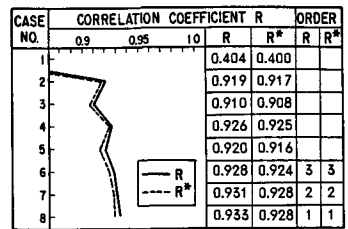
ここで、 $a(T_E, GC_i)$, $b(T_E, GC_i)$, $c(T_E, GC_i)$ は固有周期 T_E 秒ごとに定める係数 a , b , c が地盤種別 GC_i によって変化することを、また、 $a(T_E)$, $b(T_E)$, $c(T_E)$ は固有周期 T_E ごとに定める係数 a , b , c が地盤種別ごとに変化せず、一定値をとることとそれぞれ表わしている。

このようにして、197組の \tilde{S}_A スペクトルを用いてケース1~8の重相関係数 R および自由度調整済重相関係数 R^* を求めた一例が図5である。これによれば、ケース1では R は著しく小さいが、これを除けばケース2~6ではおおむね同程度の R を与え、また、ケース7, 8はこれらよりもやや大きな R を与えることがわかる。また、 R^* と比較しても同様の傾向が認められるが、 R^* は全体としてケース7の場合に最大となる。

4 距離減衰式の固有周期依存性

次に、3つの係数の固有周期依存性を検討するために、地盤種別 GC_i ごとに、係数 a , b , c が固有周期 T_E によらず一定であると、全固有周期に対して同一の値となるように定められた場合と、係数 a , b , c が固有周期 T_E によって変化するとし、これらとそれぞれ T_E ごとに独立に定められた場合のいずれが、近似度の高い推定式となるかを検討した。地盤種別 GC_i ($i=1, 2, 3$)ごとに、固有周期 T_E に応じて \tilde{S}_A スペクトルを表わすためには、式(2)と同様の考え方により、次の8種類の距離減衰式を与えることができる。

$$\tilde{S}_A(T_E, M, \Delta, GC_i) = \begin{cases} a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta+30)^{c(GC_i)} \\ a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta+30)^{c(T_E, GC_i)} \\ a(GC_i) \times 10^{b(T_E, GC_i)M} \times (\Delta+30)^{c(GC_i)} \\ a(T_E, GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta+30)^{c(GC_i)} \\ a(GC_i) \times 10^{b(T_E, GC_i)M} \times (\Delta+30)^{c(T_E, GC_i)} \end{cases} \quad (3)$$



LEGEND

CASE No	COEFFICIENT a, b and c	CASE No	COEFFICIENT a, b and c
1	$a(GC_i), b(GC_i), c(GC_i)$	5	$a(GC_i), b(T_E, GC_i), c(T_E, GC_i)$
2	$a(GC_i), b(GC_i), c(T_E, GC_i)$	6	$a(T_E, GC_i), b(GC_i), c(T_E, GC_i)$
3	$a(GC_i), b(T_E, GC_i), c(GC_i)$	7	$a(T_E, GC_i), b(T_E, GC_i), c(GC_i)$
4	$a(T_E, GC_i), b(GC_i), c(GC_i)$	8	$a(T_E, GC_i), b(T_E, GC_i), c(T_E, GC_i)$

図3 係数 a , b , c の固有周期依存性の検討

$$\begin{cases} a(T_R, G_C i) \times 10^{b(T_R, G_C i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_R, G_C i)} \\ a(T_R, G_C i) \times 10^{b(T_R, G_C i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_R, G_C i)} \\ a(T_R, G_C i) \times 10^{b(T_R, G_C i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_R, G_C i)} \end{cases} \quad (3)$$

前章と同様、197組の \tilde{S}_A スペクトルをもとに、ケース1~8の重相関係数Rおよび自由度調整済み重相関係数

R^* を求めた結果が図3である。これによれば、固有周期に伴うスペクトル値の変化を考慮できないケース上のRが非常に小さいことは当然として、その他のケースでは地盤種別にかかわらずケース6はほぼ同程度のRを与えるのに対し、ケース7, 8ではこれらよりも一段大きなRを与えている。一方、 R^* の場合にもRと同様であるが、1種地盤を除く2種および3種地盤の場合には、ケース7で R^* は最大となる。

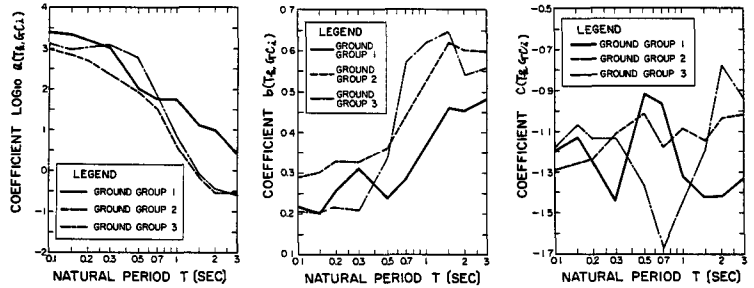


図4 式(4)の係数 $a(T_R, G_C i)$, $b(T_R, G_C i)$, $c(T_R, G_C i)$

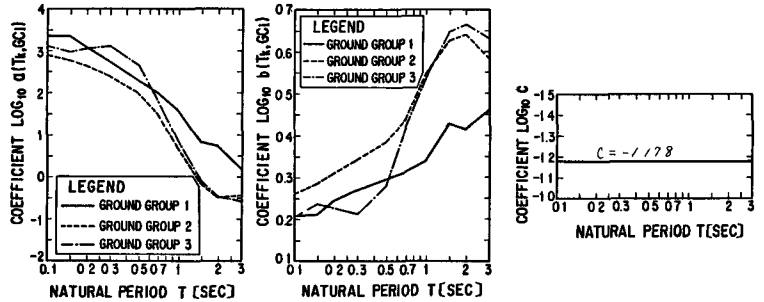


図5 式(7)の係数 $a(T_R, G_C i)$, $b(T_R, G_C i)$, c

5. 提案する加速度応答スペクトルの距離減衰式

以上の結果を総合すると、 \tilde{S}_A スペクトルの距離減衰式の係数 a ,

b , c は、固有周期 T_R および地盤種別 $G_C i$ に応じて次のように定められた場合が他のケースに比較して相対的に高い近似度を有している。

① 式(2)もしくは式(3)のケース8

$$\tilde{S}_A = a(T_R, G_C i) \times 10^{b(T_R, G_C i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_R, G_C i)} \quad (4)$$

② 式(2)のケース7

$$\tilde{S}_A = a(T_R, G_C i) \times 10^{b(T_R, G_C i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_R)} \quad (5)$$

③ 式(3)のケース7

$$\tilde{S}_A = a(T_R, G_C i) \times 10^{b(T_R, G_C i)M} \times (\Delta + 30)^{c(G_C i)} \quad (6)$$

④ 式(2)のケース7と式(3)のケース7の合成

$$\tilde{S}_A = a(T_R, G_C i) \times 10^{b(T_R, G_C i)M} \times (\Delta + 30)^c \quad (7)$$

したがって、以下では上記4ケースにつき、それぞれの特徴を検討することとするが、検討の重点は係数の最も多いケース①と最も少ないケース④に置く。

図4, 5はそれぞれケース②,

④の係数を示したものである(

表1にケース④の係数の値を示

表1 式(7)の係数 $a(T_R, G_C i)$ および $b(T_R, G_C i)$

固有周期 T(秒)	岩盤		沖積・洪積地盤		軟弱地盤	
	a(T)	b(T)	a(T)	b(T)	a(T)	b(T)
0.1	24.20	0.211	848.0	0.262	130.7	0.208
0.15	24.07	0.216	629.1	0.288	94.82	0.238
0.2	12.69	0.247	466.0	0.315	112.8	0.228
0.3	574.8	0.273	266.8	0.345	126.3	0.224
0.5	211.8	0.299	102.2	0.388	580.6	0.201
0.7	102.5	0.317	34.34	0.440	65.67	0.421
1	40.1	0.344	5.04	0.548	7.41	0.541
1.5	7.12	0.432	0.719	0.630	0.803	0.647
2	5.78	0.417	0.347	0.644	0.351	0.666
3	1.67	0.462	0.361	0.586	0.262	0.635

注) $c = -1.178$

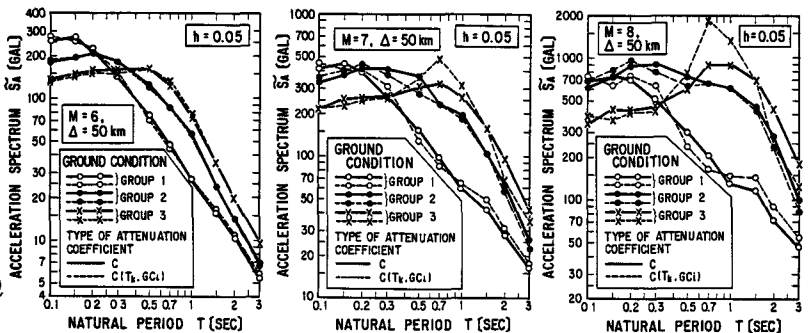


図6 式(4)と式(7)の比較 (M=6, 7, 8, $\Delta=50$ kmの場合)

す)。これによれば、係数 α 、 β は η -ス④、④とも同じような値をとり、このような傾向は η -ス④、④についても同じである。

次に、式(4)および(7)を用いて代表的な M 、 Δ の組み合わせに対して \hat{S}_a を計算した一例を図6である。これによれば、 M が大きく、 Δ が小さい範囲において両者の違いがはっきり表われるが、この他では両 η -スの違いはわずかであり、実用上はほとんど差がないといってもよい。

以上より、基本的には式(4)~(7)のいずれも使用しても実用上は大きな差がないが、係数 C の項が簡単になっていることを考慮し、ここでは式(7)を \hat{S}_a スペクトルの距離減衰式として提案する。

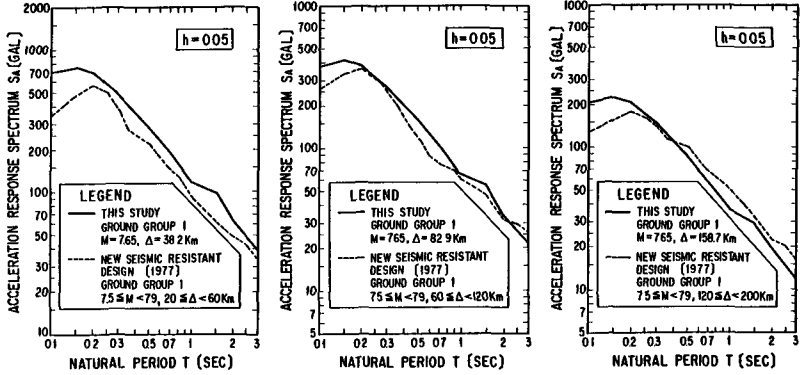
最後に、図7は式(7)と片山らにより提案された応答スペクトル S_a との比較を示したものである。両者は全体としてよく似た特性を示すが、近距離の場合には式(7)の方が一般に大きく、また、1種地盤の場合には短周期成分の補正を施した効果が認められる。

6. まとめ

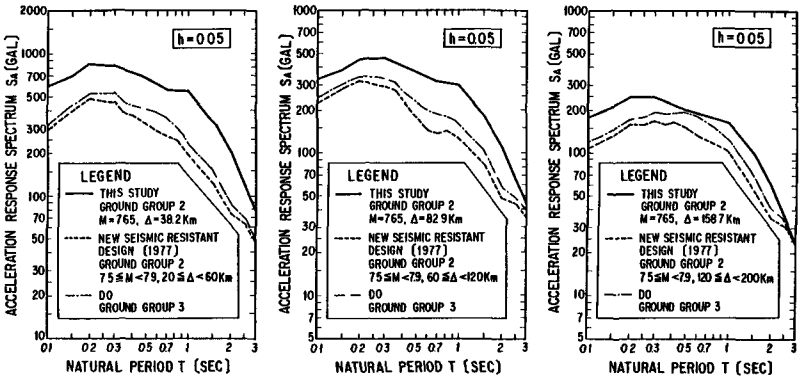
我々の地盤上で得られた197組の強震記録に基づき、減衰定数 α の加速度応答スペクトル $\hat{S}_a(T)$ の距離減衰式として、式(7)を提案した。ただし、解析のもととなった強震記録には大規模近距離地震による記録が少なかったため、このような地震に対する推定精度に関しては、今後の記録の蓄積を因り検討を加える必要がある。

参考文献

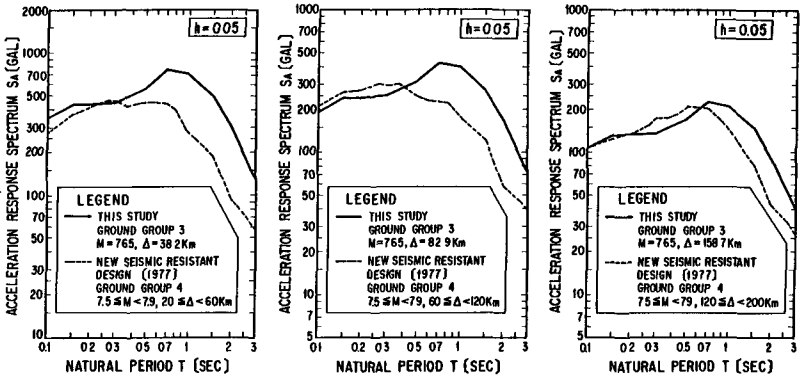
1)建設省土木研究所：土木構造物における…，土木研究所彙報，No.1~No.8，2)土田肇他：港湾地域強震観測年報，3)川島一彦他：最大地震動および地震応答…，第6回日本地震工学シンポ，1982，4)片山恒雄他：地震加速度応答スペクトルの…，土木学会論文報告集，Vol.275，1978。



(a) 1種地盤



(b) 2種地盤



(c) 3種地盤

図7 今回の解析と片山らによる解析結果の比較