

強震記録の重回帰分析に基づく加速度応答スペクトルの 距離減衰式

ATTENUATION OF EARTHQUAKE RESPONSE SPECTRA BASED ON MULTIPLE REGRESSION ANALYSIS OF JAPANESE STRONG MOTION DATA

川島一彦*・相沢 興**

By Kazuhiko KAWASHIMA and Koh AIZAWA

This paper presents the result of multiple regression analysis of absolute acceleration response spectra with damping ratio of 5% of critical. Analyzed were 394 horizontal strong motion acceleration records obtained at 67 free field sites in Japan from 88 earthquakes with focal depth less than 60 km. Because sensitivity of the Japanese SMAC accelerograph is appreciably low at the high frequency range, instrumental correction was performed on the original data. Each pair of two orthogonal horizontal components was combined in time domain to get the maximum value of absolute acceleration response spectra on the horizontal plane. The records were classified into three groups due to subsoil condition. Empirical formulae of attenuation of absolute acceleration response spectra with 5% damping ratio are proposed for three subsoil conditions.

1. ま え が き

公共土木施設の耐震設計の合理化を図るとともに、各種地震防災上の措置を講じるためには、地震動の特性を正しく知ることが重要である。地震動の特性を定義するためには種々のパラメーターが提案されているが、地震応答スペクトルは1自由度系の最大応答を示すだけの量ではあるが、構造物の基本的な応答特性を表わすとともに、地震動の強度、周期、継続時間の各特性を包含するものであることから、地震動特性を定義する最も基本的な量として、実務設計で多用されている。

本小文は、わが国の地盤上で得られた2@197成分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

本解析に用いた強震記録は、最大地震動の検討のために参考文献3)に示したものと同一であるので、ここで

は以下の説明に必要な事項のみを簡単に示すこととする。

解析対象としたのは、わが国の地盤上67地点において合計88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_{lu} , f_{ul} をそれぞれ1/3, 12Hzとする計器補正を加えている。ここで、対象を浅発地震に限定したのは、一般にわが国において被害地震の大部分はこのタイプのものであることを考慮したものである。また、わが国では一般に水平2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2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での絶対最大値をとると、強震計で観測された水平2成分の加速度応答スペクトルのうちのいずれか大きい方の値に比較し、平均17%程度大きくなる⁵⁾。

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。

* 正会員 工博 建設省土木研究所地震防災部振動研究室主任研究員(〒305 筑波郡豊里町大字旭1)

** 正会員 建設省土木研究所地震防災部振動研究室(同上)

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 S_A (減衰定数5%)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。

$$S_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $M, \Delta, GC_i (i=1, 2, 3)$ はそれぞれマグニチュード (気象庁マグニチュード)、震央距離 [km]、地盤種別であり、また、 $a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(T_k, GC_i)$ は固有周期 $T_k (k=1, 2, \dots, 10)$ および地盤種別 $GC_i (i=1, 2, 3)$ ごとに定められる係数である。本解析では、対数グラフ上での間隔がおおむね均等となるよう T_k は 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.5, 2, 3秒の10個を用いることとした。

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4)に示したとおりである。これによれば係数 a, b, c は固有周期および地盤種別に応じて系統的に変化するものとそうでないものがある。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、固有周期依存性については次章に示すこととする。

地盤種別 GC_i は連続関数ではなく、表層地盤の固有周期に応じて便宜的に3種類に分類しただけのものであるため、式(1)に地盤種別 GC_i を変数として取り入れることはできない。そこで、ここでは、係数 a, b, c の地盤種別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 が違おうとし、これらをそれぞれ独立に定めた場合と、係数 a, b, c は地盤種別 GC_i によらないと仮定し、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。

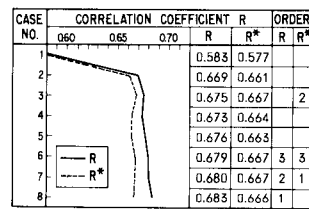
いま、式(1)の距離減衰式を用いることとすれば、地盤種別 GC_i に応じて \tilde{S}_A スペクトルを与えるためには、以下の8種類の推定式が与えられる。

$$\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = \begin{cases} a(T_k) \times 10^{b(T_k)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k)} & \dots \dots \dots \text{ケース 1} \\ a(T_k) \times 10^{b(T_k)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} & \dots \dots \dots \text{ケース 2} \\ a(T_k) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k)} & \dots \dots \dots \text{ケース 3} \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k)} & \dots \dots \dots \text{ケース 4} \\ a(T_k) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} & \dots \dots \dots \text{ケース 5} \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} & \dots \dots \dots \text{ケース 6} \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k)} & \dots \dots \dots \text{ケース 7} \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} & \dots \dots \dots \text{ケース 8} \end{cases} \dots \dots \dots (2)$$

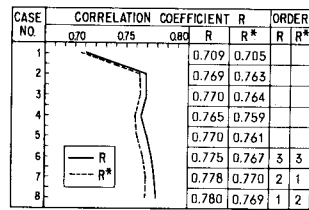
ここで、 $a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(T_k, GC_i)$ は固有周期 T_k 秒ごとに定める係数 a, b, c が地盤種別 GC_i

($i=1, 2, 3$) によって変化することを、また、 $a(T_k), b(T_k), c(T_k)$ は固有周期 T_k 秒ごとに定める係数 a, b, c が地盤種別ごとに定まることをそれぞれ表わしている。なお、ケース1は、係数 a, b, c がともに地盤種別によらないとしているため、地盤種別ごとのスペクトル値を与えることはできないが、他のケースとの比較のために解析したものである。また、ケース8は係数 a, b, c がすべて地盤種別によらないとしたもので、この場合には、1種~3種のそれぞれの地盤種別ごとに独立に解析した場合と結果的には同一の係数が得られることになる。

このようにして2.に示した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み重相関係数 R^{*2} を求めた一例 ($T_k=0.5$ および 1.5秒の場合) が図-1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、自由度調整済み重相関係数 R^{*2} で比較しても上記と同様の傾向が認められる。しかしながら、固有周期によって異なるが、 R^{*2} は全体としてケース7の場合に最大となり、この場合に \tilde{S}_A スペクトルの距離減衰特性に対する近似度がよいことを示している。なお、ここには



(a) $T=0.5$ 秒



(b) $T=1.5$ 秒

LEGEND

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

図-1 \tilde{S}_A スペクトルの距離減衰式の係数の地盤種別依存性 ($T=0.5$ 秒および 1.5 秒の場合)

示さないが、上記の傾向は他の固有周期の場合にも同様である。

4. 距離減衰式の固有周期依存性の検討

前章では、固有周期 $T_k (k=1, 2, \dots, 10)$ ごとに係数 $a (T_k, GC_i)$, $b (T_k, GC_i)$, $c (T_k, GC_i)$ の地盤種別 $GC_i (i=1, 2, 3)$ 依存性を検討した。ここでは前章とは反対に、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 $a (T_k, GC_i)$, $b (T_k, GC_i)$, $c (T_k, GC_i)$ が固有周期 T_k によらず一定であるとし、全固有周期に対して同一の値となるように定めた場合と、係数 $a (T_k, GC_i)$, $b (T_k, GC_i)$, $c (T_k, GC_i)$ が固有周期 T_k によって変化するとし、これらをそれぞれ T_k ごとに独立に定めた場合のいずれが、近似度の高い推定式となるかを検討することとする。

地盤種別 $GC_i (i=1, 2, 3)$ ごとに、固有周期 T_k 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考えることができる。

$$\tilde{S}_a(T_k, M, \Delta, GC_i) = \begin{cases} a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} \dots\dots\dots (\text{ケース1}) \\ a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} \dots\dots\dots (\text{ケース2}) \\ a(GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} \dots\dots\dots (\text{ケース3}) \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} \dots\dots\dots (\text{ケース4}) \\ a(GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} \dots\dots\dots (\text{ケース5}) \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} \dots\dots\dots (\text{ケース6}) \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} \dots\dots\dots (\text{ケース7}) \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} \dots\dots\dots (\text{ケース8}) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(T_k, GC_i)$ は地盤種別 GC_i ごとに定められる係数 a , b , c が固有周期 T_k によって変化することを、また、 $a(GC_i)$, $b(GC_i)$, $c(GC_i)$ は地盤種別 GC_i ごとに定められる係数 a , b , c が固有周期 T_k によって変化せず、一定値をとることをそれぞれ表わしている。ケース1は、係数 a , b , c がともに固有周期 T_k によらないため、全周期に対して \tilde{S}_a スペクトル値は同一となる。これは応答スペクトルとしては意味をなさないが、他のケースとの比較のために解析したものである。一方、ケース8は、係数 a , b , c がすべて地盤種別 GC_i および固有周期 T_k によって変化すると仮定した場合であり、式(2)のケース8と同じである。

以上のようにして、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^* を求めた一例(2種地盤の場合)が図-2である。これによれば、固有周期に伴うスペクトル値の

CASE NO.	CORRELATION COEFFICIENT			ORDER R	ORDER R*		
	08	085	09				
1				0.566	0.583		
2				0.864	0.862		
3				0.861	0.859		
4				0.882	0.881		
5				0.864	0.861		
6				0.893	0.890	3	3
7				0.898	0.896	2	1
8				0.899	0.896	1	2

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	$a(T_k, GC_i), b(GC_i), c(T_k, GC_i)$
2	$a(GC_i), b(GC_i), c(T_k, GC_i)$	6	$a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(T_k, GC_i)$
3	$a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(GC_i)$	7	$a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(GC_i)$
4	$a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(T_k, GC_i)$	8	$a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(T_k, GC_i)$

図-2 \tilde{S}_a スペクトルの距離減衰式の係数の固有周期依存性 (2種地盤の場合)

変化を考慮できないケース1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2~6はおおむね同程度の 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い R を与えている。一方、自由度調整済み重相関係数 R^* によってケース1~8を比較しても上記と同様の傾向が認められる。しかしながら、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^* は最大となっており、また、1種地盤の場合にも、ケース7とケース8の R^* はほとんど変わらない。

5. 提案する加速度応答スペクトルの距離減衰式

前章までの検討結果を総合すると、 \tilde{S}_a スペクトルの距離減衰式としてはマグニチュード M および震央距離 Δ の2つを説明変数にもち、係数 a , b , c は固有周期 T_k および地盤種別 GC_i に応じて次のように定め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と考えられる。

Ⓐ 式(2)もしくは式(3)のケース8

$$\tilde{S}_a(T_k, M, \Delta, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} \dots\dots\dots (4)$$

Ⓑ 式(2)のケース7

$$\tilde{S}_a(T_k, M, \Delta, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k)} \dots\dots\dots (5)$$

Ⓒ 式(3)のケース7

$$\tilde{S}_a(T_k, M, \Delta, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} \dots\dots\dots (6)$$

Ⓓ 式(2)のケース7と式(3)のケース7の合成

$$\tilde{S}_a(T_k, M, \Delta, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^c \dots\dots\dots (7)$$

したがって、以下では上記4ケースにつき、それぞれの特徴および差異を検討することとするが、検討の重点は

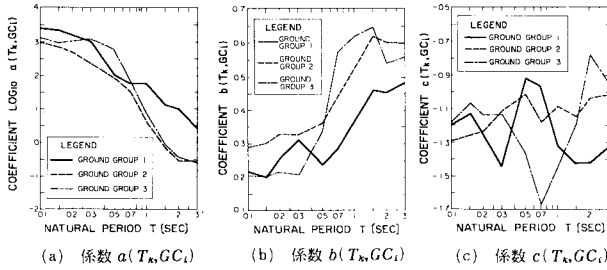


図-3 式(4)の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(T_k, GC_i)$

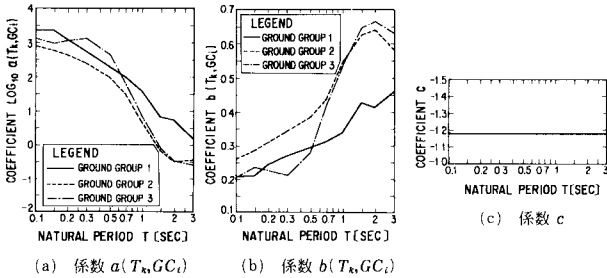


図-4 式(7)の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, c

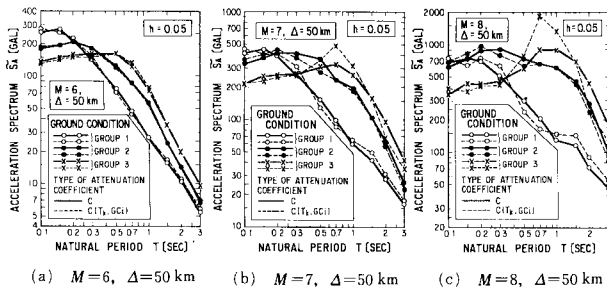


図-5 式(4)および式(7)の距離減衰式の比較例

表-1 式(7)の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, c

固有周期 (秒)	1種地盤		2種地盤		3種地盤	
	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$
0.1	2420	0.211	848.0	0.262	1307	0.208
0.15	2407	0.216	629.1	0.288	948.2	0.238
0.2	1269	0.247	466.0	0.315	1128	0.228
0.3	574.8	0.273	266.8	0.345	1263	0.224
0.5	211.8	0.299	102.2	0.388	580.6	0.281
0.7	102.5	0.317	34.34	0.440	65.67	0.421
1.0	40.10	0.344	5.04	0.548	7.41	0.541
1.5	7.12	0.432	0.719	0.630	0.803	0.647
2.0	5.78	0.417	0.347	0.644	0.351	0.666
3.0	1.67	0.462	0.361	0.586	0.262	0.635

$c = -1.178$

係数の最も多いケース③と最も少ないケース④に置く。

図-3, 4はそれぞれケース③, ④の係数 a, b, c を示したものである(表-1にケース④の係数の値を示す)。これによれば、係数 a, b はケース③, ④とも同じような値をとり、顕著な違いは認められない。また、ここには示さないが、このような傾向はケース②, ⑤についても同じである。係数 c は、ケース③では固有周期によって $-0.8 \sim -1.7$ の範囲で変化しているが、地盤種別および固有周期による系統的な変化はみられない。また、ここには示さないが、ケース⑤では、1種, 2種, 3種地盤に対する係数 c は、それぞれ $-1.24, -1.14, -1.19$ となる。地盤種別による係数 c の上限と下限の差は 0.1 しかなく、基本的には係数 c を地盤種別ごとに変化させる必要はないと考えられる。

次に式(4)および(7)の距離減衰式を用いて代表的な M, Δ の組合せに対して \bar{S}_a スペクトルを計算した一例が図-5である。これによれば、 M が大きく、 Δ が小さい範囲(たとえば、 $M=8, \Delta=50$ kmの3種地盤の場合)において両者の違いがはっきり現われるが、このほかでは両ケー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。ここで、 $M=8, \Delta=50$ kmといった大規模近距離地震による記録は、今回の解析対象記録には全く含まれておらず、本解析結果の適用範囲外であるためいずれがより正しい結果を与えるとは現段階では判断できない。今後の記録の蓄積を待つて検討していくことが必要とされる。

以上より、基本的には式(4)~(7)のいずれを使用しても実用上は大差がないが、係数 c の項が最も簡単になっていることを考慮し、ここでは式(7)を \bar{S}_a スペクトルの距離減衰式として提案することとする。ただし、上述したように、大規模近距離地震に対しては、式(7)の予測精度は明らかではないので、適用に際しては注意が必要である。

次に、図-4をもとに式(7)の特徴を検討してみよう。まず、係数 a は短周期領域で大きく、長周期になるにつれてほぼ単調

に減少する。係数 b は地盤種別によって大きく異なり、一般に1種地盤では2, 3種地盤よりも係数 b は小さい。また、この傾向は固有周期が約0.5秒以上の長周期領域において著しい。一方、2, 3種地盤の場合には、係数 b は固有周期が約0.3秒以下においては0.2~0.35程度であるのに対し、固有周期が約1秒以上では0.50~0.65程度と大きくなる。係数 b はマグニチュードが1.0大きくなった場合に \tilde{S}_A スペクトルが何倍になるかを表わす指標である。上記より、2, 3種地盤の場合には、 M が1.0大きくなると固有周期が約0.3秒以下の領域では、 \tilde{S}_A スペクトルは1.6~2.2倍となるのに対し、固有周期が約1秒以上の領域では \tilde{S}_A スペクトルは3.5~4.5倍になることを示している。1種地盤の場合には、これほど大きく固有周期によって係数 b は変化しないが、固有周期が約0.3秒以下では0.2~0.3程度(単位の M の増加に伴い \tilde{S}_A スペクトルは1.6~2.0倍増加)であるのに対し、固有周期が約1秒以上では0.35~0.45程度(同、2.2~2.8倍に増加)となっている。

式(7)の実測値まわりのばらつきを示すために、実測の \tilde{S}_A^{pb} スペクトルとこれが得られた地震の M, Δ から式(7)により求めた推定値 \tilde{S}_A^p の比を次式により定義した。

$$U_{SA} = \tilde{S}_A^{pb} / \tilde{S}_A^p \dots \dots \dots (8)$$

U_{SA} の一例として固有周期0.5秒, 2種地盤の U_{SA} を示すと図-6のようになり、 U_{SA} は M, Δ により系統的に変化しない。そこで、地盤種別ごとに $\log U_{SA}$ の頻度分

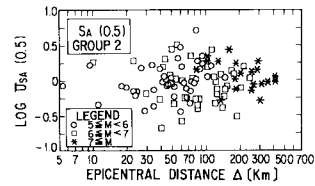


図-6 $\log U_{SA} \sim M \sim \Delta$ の関係 (固有周期 $T=0.5$ 秒, 2種地盤の場合)

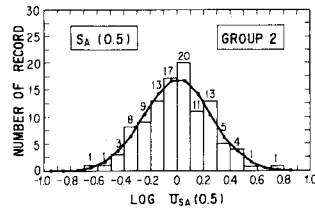


図-7 $\log U_{SA}$ の頻度分布 (固有周期 $T=0.5$ 秒, 2種地盤の場合)

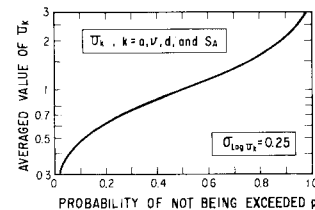


図-8 $U_{SA} \sim$ 非超過確率 p の関係

表-2 $\log U_{SA}$ の標準偏差

	$T=0.1$ s	$T=0.15$ s	$T=0.2$ s	$T=0.3$ s	$T=0.5$ s	$T=0.7$ s	$T=1$ s	$T=1.5$ s	$T=2$ s	$T=3$ s
1種地盤	0.262	0.229	0.226	0.241	0.278	0.239	0.273	0.254	0.267	0.249
2種地盤	0.256	0.244	0.273	0.270	0.249	0.245	0.305	0.288	0.264	0.248
3種地盤	0.219	0.218	0.211	0.217	0.240	0.243	0.307	0.305	0.276	0.263

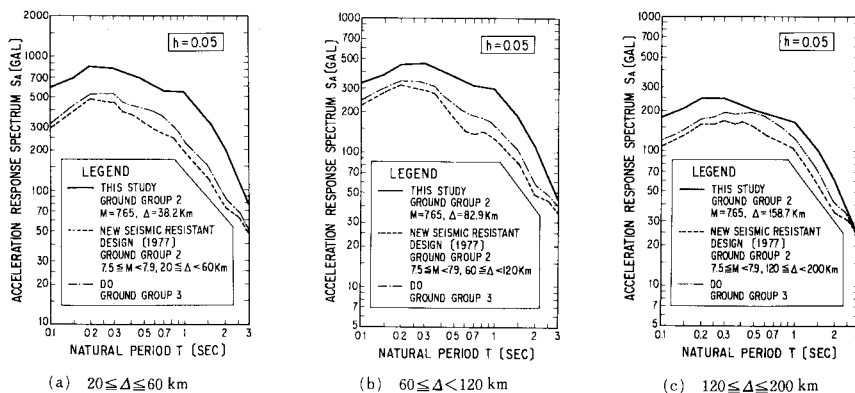


図-9 新耐震設計法に示されたスペクトル ([6]) との比較例 (2種地盤, $7.5 \leq M \leq 7.9$ の場合)

布を求めた一例(2種地盤, $T=0.5$ 秒)が図-7であり, $\log U_{sA}$ の頻度分布は全体として正規分布により近似されることがわかる. $\log U_{sA}$ の標準偏差 σ を求めると, 表-2のようになり地盤種別および固有周期によって大きく変化せず, 平均は0.25程度である. いま, $\log U_{sA}$ の頻度分布が正規分布に従うと仮定し, $\sigma=0.25$ とすると, $\log U_{sA}$ がある値を超えない確率 p (非超過確率) を求めることができる. 図-8はこのようにして求めた非超過確率 p に対する係数 U_{sA} であり, 式(7)にこの係数を乗じることによって, 所要の非超過確率に対する推定値を求めることができる.

最後に, 図-9は式(7)と片山らにより提案された応答スペクトル⁶⁾の比較の一例 ($7.5 \leq M \leq 7.9$, $20 \leq \Delta \leq 60$ km の場合)を示したものである. ここで, 片山らの解析では, 短周期の計器補正を施さない277成分の強震記録を数量化理論を用いてマグニチュードと震央距離のカテゴリーごとにスペクトル値を求めているのに対して, 本解析では計器補正を施し, また, 水平2成分を合成した197組(2@197成分)のスペクトル値をもとに重回帰分析により距離減衰を求めている点と異なっている. なお, 水平2成分の合成を施すことにより, 水平2成分のいずれか大きい方のスペクトル値に比較し, 平均17%程度大きなスペクトル値が得られることは前述したとおりである. また, 片山らのスペクトルは, M および Δ のそれぞれのカテゴリーに対して与えられているため, これをカテゴリーに属する記録の M および Δ の平均値(図-9の例では $\bar{M}=7.65$, $\bar{\Delta}=38.2$ km)に相当するスペクトルと考えた. 図-9によれば, 両者は全体としてよく似た特性を示すが, 水平2成分の合成効果を考慮したとしても, なお式(7)の方が一般に震央距離の小さい領域で大きな値を与える. この理由をはっきりしないが, 片山らの解析において, あるカテゴリーに属するスペクトル値をその中の平均マグニチュード \bar{M} および平均震央距離 $\bar{\Delta}$ に相当するスペクトル値と考えたことが1つの理由として挙げられる. なお, 式(7)では, 短周期成分の補正を施した効果を認めることができる.

6. 結 論

わが国の地盤上67地点において88回の浅発地震によりSMAC型強震計で観測された2@197組の水平成分加速度強震記録をもとに, 周期1/12~3秒の範囲で計器補正を加えるとともに水平面内における水平2成分の合成効果を考慮した減衰定数5%の加速度応答スペクトル \tilde{S}_A の距離減衰式を検討した. 本解析結果は以下のようにまとめることができる.

(1) \tilde{S}_A スペクトルの常用対数 $\log \tilde{S}_A$ を M および

$\log(\Delta+30)$ の2変数で線形回帰する場合の係数 a , b , c (式(1)参照)の地盤種別依存性を固有周期ごとに重相関係数の大小で検討した結果, 各種の組合せの中で, 係数 a , b , c がともに地盤種別に依存するとした場合と, 係数 a , b は地盤種別に依存するが, 係数 c は地盤種別に依存しないとした場合の2種類の距離減衰式が他に比較して相対的に大きな重相関係数を有する.

(2) $\log \tilde{S}_A$ の線形回帰式で, 係数 a , b , c の固有周期依存性を地盤種別ごとに重相関係数の大小で検討した結果, 各種の組合せの中で, 係数 a , b , c がともに固有周期に依存するとした場合と, 係数 a , b は固有周期に依存するが係数 c は固有周期に依存しないとした場合の2種類の距離減衰式が他に比較して相対的に大きな重相関係数を有する.

(3) 上記(1)および(2)を総合すると, 係数 a , b はそれぞれ固有周期および地盤種別に依存し, 係数 c は, i) 固有周期と地盤種別の両者に依存する, ii) 固有周期のみに依存する, iii) 地盤種別のみに依存する, iv) 固有周期および地盤種別のいずれにも依存しない, の4種類の場合が相対的に重相関係数の大きい距離減衰式として抽出される. これらの距離減衰式を実際に計算してみると, $M \geq 8$, $\Delta \leq 50$ km といった大規模近距離地震における一部の \tilde{S}_A スペクトルに差が生じるほかは, 違いはわずかであり, 実用上はほとんど差がないといつてよい. したがって, 大規模近距離地震の場合を除けば, 基本的にはいずれの距離減衰式を用いてもよいと考えられるが, ここでは係数 c の項が最も簡単になっていることを考慮し, iv) の距離減衰式(式(7))を提案する.

謝 辞: 本解析には, 運輸省港湾技術研究所の記録を多数使用させていただいた. 末尾ながら厚くお礼申し上げます.

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所: 土木構造物における加速度強震記録, 土木研究所彙報, No. 1~8, Vol. 32~38, 40.
- 2) 上田 肇・倉田栄一ほか: 港湾地域強震観測年報.
- 3) 川島一彦・相沢 興・高橋和之: 強震記録の重回帰分析による最大地震動の距離減衰式, 土木学会論文報告集(投稿中)
- 4) 川島一彦・相沢 興・高橋和之: 最大地震動および地震応答スペクトルの統計解析, 第6回日本地震工学シンポジウム, 1982.
- 5) 川島一彦・相沢 興・高橋和之: 最大地震動および地震応答スペクトルの推定式に及ぼす強震記録の水平2成分合成の効果, 土木学会論文報告集, 第329号, 1983.
- 6) 片山恒雄・岩崎敏男・佐伯光昭: 地震加速度応答スペクトルの統計解析, 土木学会論文報告集, 第275号, 1978.
- 7) 奥野忠一ほか: 統・多変量解析法, 日科技連, 1976.

(1983. 8. 31・受付)