

1 まえがき

各種構造物の耐震設計を合理的に行うためには、建設地周辺で期待される地震動の特性を把握しておくことが必要とされる。地震動の特性あるいは強度に関しては、地震の規模、震源からの距離、当該建設地周辺の地盤条件等種々の要因により複雑に変化可能なことが現在までの解析^{1),2)}により知られている。地震応答スペクトル曲線は、地震動が構造物に与える動的な影響を測る一つの指標として地震応答解析の地震入力に広く用いられている。わが国における地震応答スペクトル曲線の解析については、高橋(1955)、高田ら(1965)、片山(1969)、林ら(1970)、栗林ら(1971)などが研究を行っている。

最近、建設省総合技術開発プロジェクトの一環として実施された耐震技術に関する研究開発の場においては、わが国において収集された強震記録の各成分をもとに、数量化理論を用いて応答スペクトル値に及ぼす地震の規模、震央距離、地盤条件の影響が検討されている。^{1),2),3)} そこで取扱われているのは応答スペクトル倍率 β とこれを計算するのに用いた入力地震動の最大加速度 $A_{max}[\text{gal}]$ と乗じた値(応答スペクトル $SA[\text{gal}]$ と呼ぶ)、亦即ち、ある入力地震動を自由床系に作用させた場合に系に生じる最大加速度値そのものである。応答スペクトル SA は上記の定義から明らかのように、地震動の振動数特性に関する情報と強度に関する情報の両者を含んでいる。したがって応答スペクトル SA を用いれば地震動の振動数特性および強度の両者を一度に定めることのできる反面、両者を単独に切り離して定めることはできない。地震動の強度に関しては、これに及ぼす地震のマグニチュード、震央距離の影響等に関する種々の提案がなされているが、それぞれの提案式ごとに大きな差があるのが実情であり、また距離の表わし方としても、起震点震央にとるが、あるいは断層の中心にとるが、今後の研究に待たなければならぬ問題も多い。したがって、地震応答スペクトル曲線を実務の耐震設計に取入れるためには地震動の振動数特性と強度とそれぞれ別々に評価して求める方がよりない適用性を有しているとも考えられる。本小文は、このような観点から建設省総合技術開発プロジェクトの場で蓄積されたこれらと同じ手法により、上記の各成分の強震記録を用いて、加速度応答スペクトル倍率 β に着目し、数量化理論を用いて統計解析を行った結果について報告するものである。

2. 対象とした地震動記録および範ちゅうの設定

解析の対象とした地震動記録は、1956年から1974年までの19年間にわが国およびその周辺に発生したマグニチュードが4.5以上、震源の深さが60km未満の68回の地震により地盤上で観測された各成分の地震動水平加速度記録である。このうち、大部分の記録は建設省土木研究所や工圏輸送省港湾技術研究所が所有する記録であり、S-M-A-C-B型強震計により採取されたものが多い。68回の地震とマグニチュードおよび震央距離により分類すると図1のようになり、全体の約3/4がマグニチュード未満の小規模地震である。マグニチュードが4.5以上の地震は、新潟地震(1964年M=7.7)、日向嶽地震(1968年M=7.5)、十勝沖地震および余震(1968年M=7.9、8.2)

表-1 解析に用いた地震動資料

(成分数)

マグニチュード M	地震 条件 O	震 央 距 離 Δ (km)					合 計
		$\Delta < 20$	$20 \leq \Delta < 60$	$60 \leq \Delta < 120$	$120 \leq \Delta < 200$	$200 \leq \Delta$	
4.5 ≤ M < 5.4 (60ヶ)	1種	6	4				10
	2種	4	10				14
	3種	12	8	8	2		30
	4種	6					6
5.4 ≤ M < 6.1 (48ヶ)	1種		4	2			6
	2種	4	4	4			12
	3種	2	12	6			20
	4種	4	2	4			10
6.1 ≤ M < 6.8 (102ヶ)	1種		4	6			10
	2種		4	4	2		10
	3種	4	32	22	8	2	68
	4種		4	4	2	2	14
6.8 ≤ M < 7.5 (29ヶ)	1種			4	3	2	9
	2種			2	4	2	8
	3種				4	4	8
	4種					4	4
7.5 ≤ M < 7.9 (38ヶ)	1種				2	2	4
	2種				6	2	8
	3種		2	6	4	2	14
	4種				2	10	12
合 計		42	92	72	39	32	277

M=7.5)の4つである。277成分の地震動記録を最大加速度により分類すると図-1のようになる。最大加速度が60~60 galの記録が最も多く、また最大加速度が1,000gal未満の記録が全体の80%を占めている。次に、数量化理論を用いて応答スペクトルを統計解析するに際して、応答スペクトルに影響を及ぼす項目(ヤム)として、(1)地震のマグニチュード、(2)観測地点の震央距離、および(3)地盤条件の3つを考慮した。

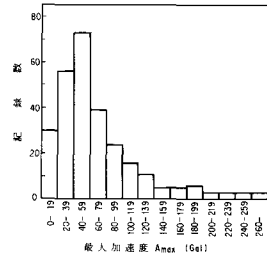
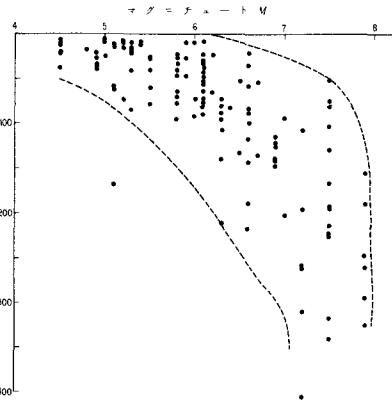


図-2 最大加速度による分類

図-1 解析に用いる地震動記録のM、Δによる分類
 1では、(1)地震のマグニチュード、(2)観測地点の震央距離、および(3)地盤条件の3つを考慮した。

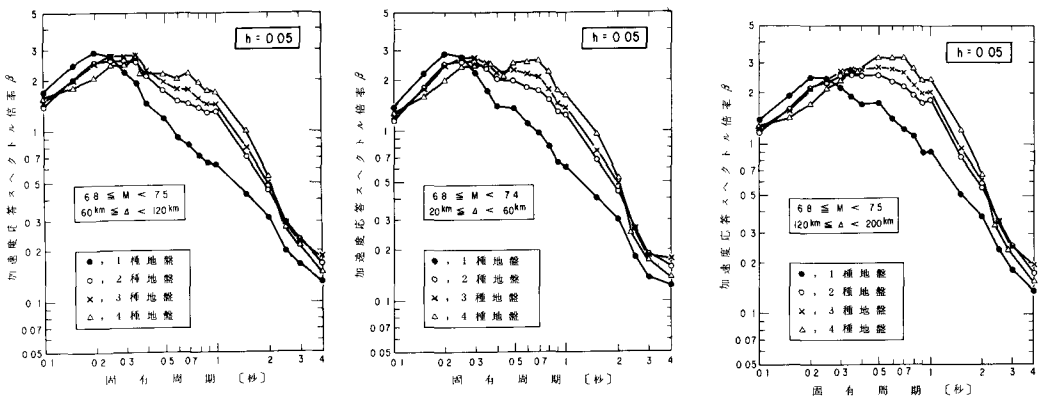
地盤条件については道路橋耐震設計指針(日本道路協会, 1977年)に従い、1種、2種、3種、4種の4カテゴリに分類した。このように項目および範囲に依って277成分の記録を分類すると表1のようになる。また数量化理論の適用にあたり、固有周期T_i秒、減衰定数5%の1自由度系の加速度応答スペクトル倍率β(T_i)の予測値とし、(4)式を次のように表わした。

$$\hat{\beta}(T_i) = C(M)_i \times C(\Delta)_i \times C(G.C.)_i$$

ここで $\hat{\beta}(T_i)$ = 加速度応答スペクトル倍率(固有周期T_i秒) $C(\Delta)_i$ = 震央距離Δの重み係数
 $C(M)_i$ = マグニチュードMの重み係数 $C(G.C.)_i$ = 地盤条件G.C.の重み係数

3 解析結果

数量化解析から定められた応答スペクトル倍率β(T_i)に対するマグニチュード、震央距離、地盤条件の重み係数を求めた。一例として、図3および図4に、それぞれ、マグニチュードM=6.8~7.4および7.5~7.9の加速度応答スペクトル倍率を震央距離Δ=20~60km, 60~120km, 120~200km、地盤種別GC=1種、2種、3種、4種に對し示す。これらの結果からは、同一のマグニチュードおよび震央距離に属するグループの中で、地盤種別の変化に対するベクトルの変化を知ることでできる。同様計算結果の一例として、加速度応答ベクトルに及ぼすマグニチュード

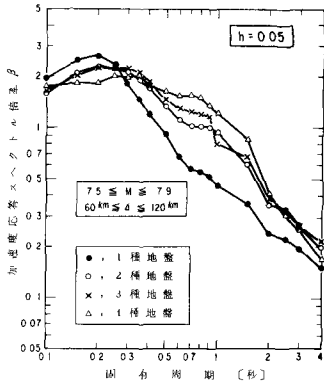


(a) 20 ≤ Δ < 60 km の場合

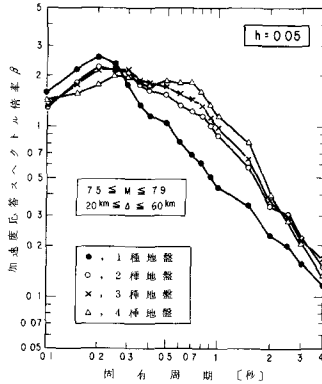
(b) 60 ≤ Δ < 120 km の場合

(c) 120 ≤ Δ < 200 km の場合

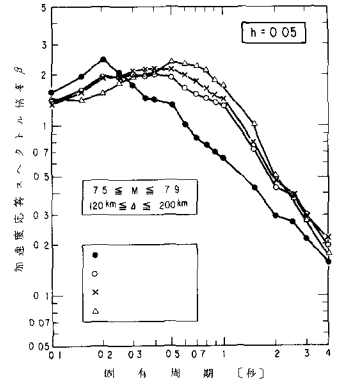
図3 M=6.8~7.4に対する加速度応答スペクトル倍率β曲線



(a) $20 \leq \Delta < 60$ kmの場合



(b) $60 \leq \Delta < 120$ kmの場合



(c) $120 \leq \Delta < 200$ kmの場合

図4 $M=7.5 \sim 7.9$ に対する加速度応答倍率 β 曲線

の影響を調べるために、震央距離 $\Delta = 60 \sim 120$ km で第4種地盤に属する加速度応答スペクトル倍率を図5に、また、震央距離の影響を調べるためにマグニチュード $M = 6.8 \sim 7.5$ で第4種地盤に属する加速度応答スペクトル倍率を図6にそれぞれ示す。

次に、加速度応答スペクトル倍率に及ぼすマグニチュード、震央距離、地盤条件相互間の影響を調べたのが図7~9である。さらに各リテラブルとの重み係数の最大値と最小値の差(レンジ)と定義できる)を示したのが図10である。

4 考察

上述の解析結果をとりまとめると以下のようになる。

- (1) 固有周期が0.4秒程度以上の領域では、 β に及ぼす影響は、一般にマグニチュード($4.5 \leq M \leq 7.9$)が最も支配的であり、地盤条件($1 \leq C_s \leq 4$)がこれに次ぎ、震央距離($0 \leq \Delta \leq 405$ km)の影響は最も小さい。また固有周期が0.4秒程度以下の領域では、 β に及ぼすマグニチュード、震央距離、地盤条件の影響はおおむね同程度である。
- (2) 加速度応答スペクトル倍率に及ぼすマグニチュードの影響は固有周期約0.4秒以上(とくに、固有周期0.5秒付近)で大きいに対して、固有周期0.4秒以下ではそれほど著しくない。また、長周期の構造物に付する程、加速度応答スペクトル倍率は大マグニチュード地震の場合の方が小マグニチュード地震より大きくする傾向がある。
- (3) 加速度応答スペクトル倍率に及ぼす地盤条件の影響は固有周期が0.4~2秒程度の領域で大きく、この領域では、地盤が軟弱な程、加速度応答スペクトル倍率が大きいに対して、固有周期0.3秒程度以下および2.5秒程度以上の領域では地盤条件の影響はそれほど著しくない。また、一般に長周期(1.5倍、2.5秒程度以下)の構造物に付する程、加速度応答スペクトル倍率は地盤が軟弱な場合の方が硬質の場合より大きくする傾向が認められる。
- (4) 加速度応答スペクトル倍率に及ぼす震央距離の影響は、固有周期約0.5秒以上の領域を除けばそれほど著しいものではない。しかしながら、詳細にみるとやはり、長周期の構造物に付する程、加速度応答スペクトル

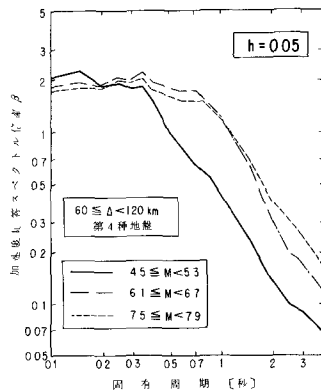


図5 β 曲線に対するMの影響

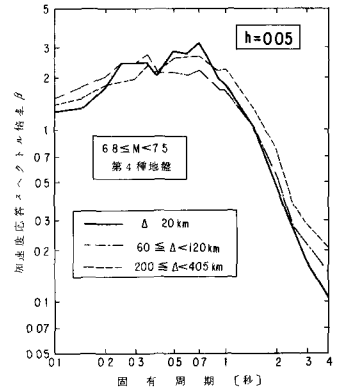


図6 β 曲線に対する Δ の影響

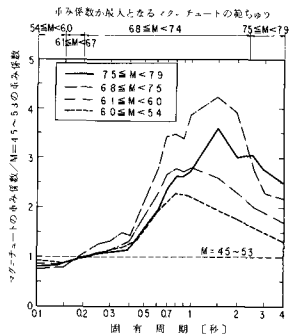


図7 平均係数により表わしたMの影響

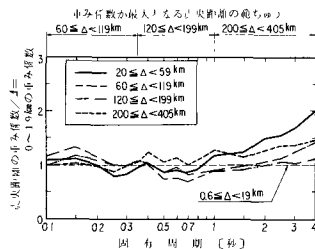


図8 平均係数により表わしたΔの影響

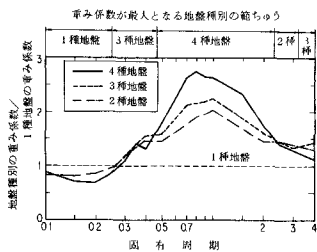


図9 平均係数により表わされた地盤条件の影響

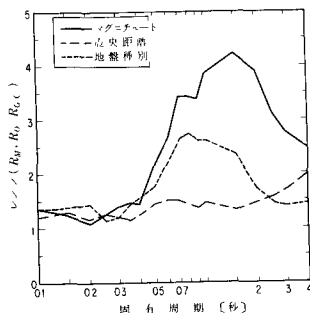


図10 曲線に対するM, Δ, 地盤条件のレスポンス比

倍率は遠距離の地震の場合の方が近距離の地震より大きくなる傾向にある。

(5) ここに示した加速度応答スペクトル倍率に対する統計解析結果と加速度応答スペクトルSA (= $\rho \times A_{max}$)に対する統計解析結果と比較すると、加速度応答スペクトルの形状、すなわち、Δ値に関する限りは、結果として両者はおおむね同じ値と与える。

(6) 本解析に用いた地震動記録には、大規模地震による震源近くの記録がほとんど含まれていない。したがって、実際に際しては、この範ちゅうに属する加速度応答スペクトル倍率の推定値には今後検討の余地を残していると考えられる。また、平均係数には、地震動の特性に関する現在までの知見に照らし合わせれば、多少の誤差は避けられないものもあり、これらについては今後の強震記録データの収集と持ち、さらに検討を加えていくことが必要とされる。

謝辞：本小文に用いた応答スペクトルの統計解析手法は、建設省土木研究所の委託により(財)国土開発技術研究センター内に設立された耐震技術開発研究委員会(委員長：岡本舜三埼玉大学学長)の地震力地盤部会(部長：久保慶三郎東京大学教授)で審議開発された手法と適用したものである。地震力地盤部会の活動に際しては、特に片山恒雄東京大学助教授より直接的指導を得た。また、解析の基礎資料とした地震動加速度応答スペクトル値の一部は運輸省港湾技術研究所の報告書から引用させて頂いた。さらに今回の解析の実施にあたっては、日本技術開発(株)佐伯昭昭氏の協力を得た。ともに、末尾に於て謝意を述べ、厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 建設省：新耐震設計法(案)，土木研究所資料第1185号，1977
- 2) 建設省土木研究所：耐震技術に関する研究開発総合報告書，土木研究所資料第1250号，1977
- 3) 片山、岩崎、佐伯：地震動加速度スペクトルの統計解析，土木学会論文報告集，第275号，1978-7