

地震動加速度応答スペクトルの統計解析

STATISTICAL ANALYSIS OF EARTHQUAKE ACCELERATION
RESPONSE SPECTRA

片山 恒雄*・岩崎 敏男**・佐伯 光昭***

By Tsuneo KATAYAMA, Toshio IWASAKI and Mitsuaki SAEKI

1. ま え が き

構造物の動的耐震解析を簡略化するための手法として地震動の応答スペクトルの考え方が定着してからすでに約 20 年になり、耐震設計用の強震動応答スペクトルとして提案されたものも国内外ではかなりの数にのぼる。

多数の地震記録から計算された個々の応答スペクトルから設計用スペクトルを作成する場合には、通常なんらかの“正規化”と“平均化”が行われる。個々の応答スペクトルは地震動の振動数特性と強度（激しさ）の両者の情報を含んでおり、スペクトル曲線の形状が地震動の振動数特性を表わし、スペクトルの数値的大きさ（スペクトル図の縦距）が地震動の強度を表わす。したがって、強度（たとえば最大加速度）の異なる多くの地震記録から得られた応答スペクトルをそのまま平均化しても設計に役立つ資料は得られない。地震記録の強度の違いによるスペクトル縦距の差を除去するために“平均化”の前に“正規化”が行われる。“正規化”の目的はスペクトル縦距を規準化して形状に関する特性だけを抽出し、強度の異なる地震記録の応答スペクトルを同じ尺度で比較できるようにすることにある。

何がもっとも適当な正規化パラメーターかに関しては種々の議論があるが^{1),2)}、わが国では地震記録の最大加速度が用いられることが多い。加速度応答スペクトルの縦距を地震動の最大加速度で割った値は加速度応答倍率または加速度比とよばれる。この種のスペクトルの代表例として、建設省土木研究所³⁾および運輸省港湾技術研究所⁴⁾の加速度応答倍率スペクトルがある。

加速度応答倍率スペクトルを用いる設計法は、従来の震度法による設計法に容易にすりつけられるという利点をもつ。主として過去の地震発生データから地域別に設

定される標準の設計震度に、構造物の振動特性に依存する加速度応答倍率をかけることにより、構造物の動特性を勘案しつつ従来の震度法の簡便さを生かした“修正震度法”が実用的な耐震設計の手法として導入される。「道路橋耐震設計指針」⁵⁾や「本州四国連絡橋耐震設計指針」⁶⁾の考え方をこの代表例としてあげることができる。

“正規化”によって得られた加速度応答倍率スペクトルは、わが国では従来記録地点の地盤条件別に平均化されている^{3),4)}。正規化により地震動強度の影響は一応除去できたとしても、スペクトル曲線の形状は記録地点の地盤条件によって異なるであろうことを考慮したものである。地盤別に平均化された加速度応答倍率スペクトルは、理論的・経験的に予測されるような相違を示すことが多く、地盤条件を考慮することの必要性を示唆している。

上述の過程を経て作成された設計用スペクトルが工学的にきわめて有用であることは議論の余地がないが、“正規化”と“平均化”によって本来個々の応答スペクトルが含んでいたその他の多くの情報が利用されなくなっていることも事実である。マグニチュードや震央距離の大小が地震動の振動数特性に影響を及ぼすことは広く認められているが、従来の設計用スペクトルの大部分はこれらの影響を積極的に取り入れたものとはなっていない。

最近の原子力発電所や大規模建設工事計画などの耐震設計では、建設地点を含む周辺地域の平均的な地震危険度を考えるだけでなく、その地点の周辺に発生の可能性がある特定の地震を想定した解析が行われることが少なくない。この傾向は地震の発生を特定の活断層と直接結びつけて考える米国では特に著しい。特定地域に発生する特定の大きさの想定地震に対して設計用地震動の特性を推定するためには、地震動の強度のみならずその振動数特性も各種の地震動パラメーターと関連づけておく必要があり、従来の地盤別平均の加速度応答倍率スペクトルのみでは不十分である。

* 正会員 Ph. D. 東京大学助教授 生産技術研究所

** 正会員 建設省土木研究所地震防災部振動研究室長

*** 正会員 日本技術開発(株)土木本部

このような観点から、応答スペクトルの縦距に直接注目して各種パラメーターによる回帰分析を行った例としては McGuire および Trifunac による研究がある。McGuire⁷⁾ は米国で得られた 68 成分の加速度記録を用い、速度応答スペクトル (Pseudo-velocity Spectrum) 縦距 v がマグニチュード M と震源距離 R (km) により、

$$\log v = a + bM - c \log(R + 25)$$

の形に表わされると仮定した回帰分析を行った。地震記録の選択にあたっては、地表層による増幅の影響が著しいものは意識的に除外している。日本では地表層構造がより広い範囲で変化しており、地盤種別を考慮した解析が重要と思われる。最近、Trifunac⁸⁾ は絶対加速度応答スペクトル縦距に関して類似の回帰分析を実施している。この研究はまだ予備的な段階にあるものと思われる。変数として地震マグニチュード、震源距離、信頼水準、地盤種別、加速度記録の方向 (水平か鉛直か) を考慮しているが、回帰式の形の仮定には十分理解できない部分が多い。

筆者らもかねてから応答スペクトルの統計的解析の問題に興味をもち、これに関連したいくつかの問題を研究してきた^{9), 9)~11)}。また、過去数年間にわたり、地震パラメーターおよび地盤種別から絶対加速度応答スペクトルを合理的に予測することを目的として、日本で得られた 277 成分の地震動記録を用いた絶対加速度応答スペクトル縦距の統計解析を実施してきた。研究の中間結果の一部はすでに発表してきたが^{12)~18)}、これまでの研究に一応のまとまりがついたので、ここにその結果を発表し、広く識者のご批判をおおぎたい。

2. 統計的解析の手法

本研究で用いた統計解析手法「数量化 I」理論のうち、次節以降で必要となる最小の情報をまとめて示す^{17), 18)}。

いま、 N 個の観測値 (外的基準の値という) があり、 i 番目の観測値を A_i とする。 A_i の実現に影響したと思われる R 個の項目 (アイテム) を選び出す。本研究の解析では、たとえば地震記録が得られた地点の地盤条件が項目の 1 つである。それぞれの項目を数個の範ちゅう (カテゴリー) に分ける。たとえば地盤条件の項目は「岩盤」、「洪積地盤」、「沖積地盤」などの範ちゅうに分けることができよう。 j 番目の項目の範ちゅうの数を K_j で表わす。このようにして、観測値 A_i のそれぞれは各項目内のいずれか 1 つの範ちゅうに対応した特性を有するものとなる。

観測値の番号を i 、項目の番号を j 、各項目内の範ちゅうの番号を k (厳密には k_j とすべきであるが簡単な

ため添字をはぶく) とし、変数 x_{ijk} を考える。変数 x_{ijk} の値は観測値 A_i の特性が項目 j の範ちゅう k に対応するときは 1 とし、それ以外の場合は 0 とする。ここで、項目 j 内の範ちゅう k の重み係数 (カテゴリー値) を w_{jk} とし、

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{K_j} x_{ijk} w_{jk} \dots \dots \dots (1)$$

なる量を考える。「数量化 I」理論では、 N 個の観測値 A_i が N 個の予測値 α_i とともによく一致するように重み係数 w_{jk} を定める。このような w_{jk} を定めるために、観測値と予測値の差の二乗和

$$\sum_{i=1}^N (A_i - \alpha_i)^2$$

が最小となるという条件を用いる。最適な重み係数 w_{jk} が定められれば、観測値と予測値の相関係数

$$\rho = \frac{(1/N) \sum A_i \alpha_i - \bar{A} \bar{\alpha}}{\sigma_A \sigma_\alpha} \dots \dots \dots (2)$$

の大小が統計モデルの妥当性を示す目安となる。 \bar{A} および $\bar{\alpha}$ はそれぞれ観測値、予測値の平均値であり、 σ_A および σ_α はそれぞれの標準偏差である。

式 (1) では重み係数の和で予測値が求められると仮定したが、観測値の性質によっては重み係数の積が予測値を与えると仮定した方が適切な場合がある。このときの予測値は、

$$\alpha_i = \prod_{j=1}^R \prod_{k=1}^{K_j} w_{jk}^{x_{ijk}} \dots \dots \dots (3)$$

の形で与えられる。両辺の常用対数をとれば上式は、

$$\log \alpha_i = \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{K_j} x_{ijk} (\log w_{jk}) \dots \dots \dots (4)$$

となり、形式的には式 (1) と同じになる。統計モデルの妥当性を示す量はやはり式 (2) の相関係数で与えられるが、この場合には \bar{A} 、 σ_A および $\bar{\alpha}$ 、 σ_α はそれぞれ $\log A_i$ および $\log \alpha_i$ の平均値と標準偏差である。式 (4) からわかるように、この場合の重み係数 w_{jk} は常に正の値となる。

3. 用いた資料と解析の具体的方法

(1) 地震記録と加速度応答スペクトル

1956 年から 1974 年の 19 年間に日本およびその周辺に発生した 67 個の地震によって日本各地で得られた 277 成分の地震動水平加速度記録を基本データとした。Fig. 1 は 67 個の地震をマグニチュードの範囲別に整理して示したものである。後述 (3. (2) 参照) の理由により、マグニチュード 4.4 以下および震源の深さ 61 km 以上の地震は除外した。67 個の地震の約 3/4 はマグニチュード 5 以上 7 未満の中規模地震である。マグニチュ

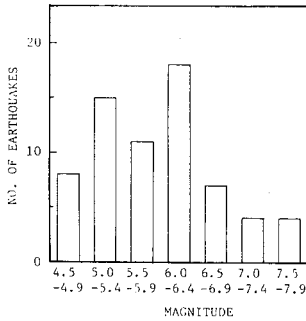


Fig. 1 Histogram of Magnitudes of 67 Earthquakes Used for Analysis

ードが 7.5 以上の地震は、1964 年新潟地震 ($M=7.5$)、1968 年日向灘地震 ($M=7.5$)、1968 年十勝沖地震 ($M=7.9$) と同日の余震 ($M=7.5$) の 4 つだけである。大部分の記録は建設省土木研究所および運輸省港湾技術研究所管理の地盤上に設置された強震計 (大部分は SMAC-B 2 型)

により得られたものである。

解析に使用した水平 277 成分の地震記録を最大加速度の範囲別に整理した結果を Fig. 2 に示す。最大加速度 100 ガル未満の記録が全体の 80% 強を占めている。強震計は通常ある程度以上の加速度に対して始動するようにセットされていること、および最大加速度の小さな記録は読取り精度の問題もあって数値化されていないことの 2 つの理由により、本解析で取扱う最大加速度 20 ガル未満の記録の数は少ない。特に、震央距離が小さく、最大加速度の大きい地震記録はなるべく網羅するように努力したが、それでも総数に対する割合は比較的小さくならざるを得なかった。もっとも多く記録成分が使用された地震は 1968 年十勝沖地震の本震であり、14 成分の記録がこの 1 つの地震に対応する。1968 年十勝沖地震では同日に発生した余震を含めると全部で 24 成分の加速度記録が解析に使用されている。

上述の地震記録の大部分については、土木研究所または港湾技術研究所によりすでに加速度応答スペクトルの縦距値が求められていたが、今回の解析のために新たに 124 成分の地震記録について応答スペクトルを計算し

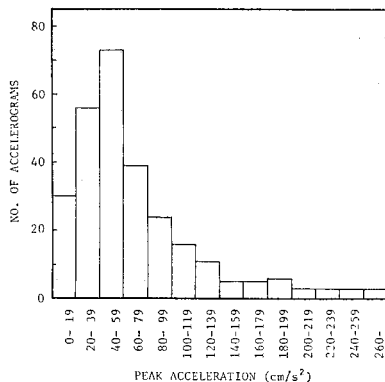


Fig. 2 Histogram of Peak Accelerations of 277 Accelerograms Used for Analysis

た。応答スペクトルの計算に用いた 1 自由度系の減衰定数は 5% とした。これは、5% 減衰のスペクトルが与えられていれば、すでに得られている多数のスペクトル曲線を検討することにより、1~10% 程度の減衰定数に対応するスペクトル値の工学的推定は可能であると判断したからである。加速度応答スペクトルを求める固有周期は 0.1~4.0 秒の範囲とし、18 個の非減衰固有周期におけるスペクトル縦距値でスペクトル曲線を表わした。これらの固有周期の値は、

$$T=0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, \\ 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, \\ 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 \text{ (Seconds)} \dots (5)$$

である。すでに計算されているスペクトル曲線において、これらの固有周期にちょうど対応する値がない場合には、内挿によって解析に使用する縦距値を求めたものもあるが、その数はきわめて少ない。

(2) 範ちゆう (カテゴリー) の設定

ある与えられた固有周期をもつ 1 自由度系の最大加速度応答値に影響を及ぼす主要な項目 (アイテム) として、本研究では、① 地震のマグニチュード、② 記録地点の震央距離および ③ 記録地点の地盤条件の 3 つを考慮した。地震および地震動の特性を表わすパラメーターの数は多いが、たとえば記録の最大加速度や主要動の継続時間はなんらかの形で上述の 3 つの項目に依存していると考えられる。また、個々の地震の発生機構、たとえば断層の長さ、傾き、断層面の方向と記録地点の幾何学的関係などが地震動に影響を及ぼすことは容易に想像できるが、これらのパラメーターが推定されている地震の数は限られている。今回の解析の目的は、なるべく多数の資料を有効に使用して現時点で工学的に有用な情報を得ることにあり、主要な影響を及ぼす因子としては前述の 3 つのみに着目し、その他の要因による影響はばらつきに関する検討結果として間接的にとらえることにした。

上述の 3 つの項目のうちマグニチュードと震央距離は連続量であり、これらの変数と加速度応答スペクトル縦距との関数関係を仮定すれば、地盤条件を層別因子とする通常の回帰分析が可能である。しかし、マグニチュードと震央距離の影響を関数関係で仮定することなしに、それらがスペクトル値に及ぼす非線形な影響をデータに則して把握するため、範ちゆうを設定して「数量化 I」による解析を実施した。

記録地点と地震発生領域との間の距離を定義するには、震央距離以外にもいくつかの量を考えることができる。大きな地震では震源領域も数十 km 以上にわたる広さをもつから、破壊の発生点である震源と注目地点の距離は必ずしも有効なパラメーターとはなり得ない。まし

て震央距離は震源深さに関する情報を含んでいない。しかし、たとえば震源域の中心からの距離を用いるには、おのおの地震に対して適切な震源域を仮定する必要がある。この段階で結局かなりのあいまいさを導入してしまうことになる。そこで今回の解析では、震央距離が最適な量ではないことを承知のうえで、工学的応用の便利さを考えあえて震央距離を項目として用いることにした。ただし、震源の深さが 61 km 以上の地震は、深さの影響が大きくなる可能性があるためデータから除外した。

地盤条件の分類もいろいろ考えられるが、現時点での応用を考えて「道路橋耐震設計指針」による分類を採用した。筆者らもこの分類が必ずしも最良とは考えていないが、細かい分類をするだけの情報がすべての記録地点に対して得られていないこと、およびこの分類が「石油パイプライン基準¹⁹⁾」や「沈埋トンネル耐震設計指針(案)²⁰⁾」などで踏襲されていて少なくとも土木構造物の耐震設計における 1 つの典型的な地盤分類と考えられることの 2 つの理由により採用することにした。実際の運用にあたり、このような概略の分類によっても、いずれの範ちゅうに入れるべきか迷うことがあったが、最終的には筆者らの主観的な判断に従った。地盤条件の範ちゅう分けは将来さらに検討を加える必要があると考えている。特に沖積層を主体とする地盤では、陸成のものとは水成のもの、粘性土系のものと砂質土系のものではかなり異なった特性を示し、これらの要素を考慮した分類が望

Table 1 Items and Categories Used for Quantification Analysis

Item	Category	Mean for the Data in Each Category
Earthquake Magnitude (<i>M</i>)	<i>M</i> =4.5~5.3	4.96
	<i>M</i> =5.4~6.0	5.75
	<i>M</i> =6.1~6.7	6.30
	<i>M</i> =6.8~7.4	7.06
	<i>M</i> =7.5~7.9	7.65
Epicentral Distance (<i>d</i> : km)	<i>d</i> =6~19	11.7
	<i>d</i> =20~59	38.2
	<i>d</i> =60~119	82.9
	<i>d</i> =120~199	158.7
	<i>d</i> =200~405	271.3
Ground Condition at Recording Site	Type I : Tertiary or Older Rock (Defined as Bedrock), or Diluvium with <i>H</i> * < 10 m	
	Type II : Diluvium with <i>H</i> ≥ 10 m or Alluvium with <i>H</i> < 10 m	
	Type III : Alluvium with <i>H</i> < 25 m Including Soft Layer** with Thickness Less than 5 m	
	Type IV : Other than the Above, Usually Soft Alluvium or Reclaimed Land	

* Depth to Bedrock.

** Sand Layer Vulnerable to Liquefaction or Extremely Soft Cohesive Soil Layer.

Table 2 Distribution of Data Set

Magnitude <i>M</i>	Ground Condition	Epicentral Distance <i>d</i> (km)					Total
		6 } 19	20 } 59	60 } 119	120 } 199	200 } 405	
4.5~5.3	Type I	6	4				10
	Type II	4	10				14
	Type III	12	8	8	2		30
	Type IV	6					6
5.4~6.0	Type I		4	2			6
	Type II	4	4	4			12
	Type III	2	12	6			20
	Type IV	4	2	4			10
6.1~6.7	Type I		4	6			10
	Type II		4	4	2		10
	Type III	4	32	22	8	2	68
	Type IV		6	4	2	2	14
6.8~7.4	Type I			4	3	2	9
	Type II			2	4	2	8
	Type III				4	4	8
	Type IV					4	4
7.5~7.9	Type I				2	2	4
	Type II				6	2	8
	Type III		2	6	4	2	14
	Type IV				2	10	12
Total		42	92	72	39	32	277

ましい。

各種の予備的な検討の結果、最終的に解析に使用した範ちゅうを **Table 1** に示す。マグニチュード 4.4 以下の地震は工学的にあまり意味がないのでデータから除外した。また、**Table 1** にはマグニチュードおよび震央距離の各範ちゅうに含まれる記録の平均マグニチュードと平均震央距離も示してある。範ちゅうの設定にあたっては、データ数の分布がある特定の範ちゅう内にかたよらないことと工学的な応用の便利さの両者を勘案した。震央距離の範ちゅうでは、震央距離が大きくなるほど範ちゅうの幅が等差級数的に大きくなるようにしてある。**Table 2** は、範ちゅうの組合せによる分類に含まれる地震記録の個数を示したものである。小マグニチュード・遠距離の記録および大マグニチュード・近距離の記録が欠如しており、データの分布はかたよっている。特に後者の記録がないことは予測式の精度に大きな影響を及ぼす可能性がある。また、前述のように、*M*=7.5~7.9 の地震記録 38 成分のうち 24 成分は 1968 年十勝沖地震の本・余震であり、大マグニチュード範ちゅうに対する予測式の性質が、この特定の地震の性質に支配されることが考えられる。いずれにせよ、地震動記録の不足による上述のデータのかたよりは現時点では改善できないわけであり、今後の記録の蓄積を待つほかはない。

(3) 推定式の形

「数量化 I」理論の適用にあたり、予測値は式(3)で示さ

れるように重み係数の積の形で与えられるものとした。

本論文の対象とする解析に先立ち、重み係数の和で予測値を求める同様の解析を 153 成分の地震記録を用いて実施した^{12),13)}。解析結果は一般に興味深い傾向を示したが、同時に和の形の推定式を使用したことによる欠点も明らかとなった。すなわち、範ちゅうの組合せによっては、予測される加速度応答スペクトル縦距が負の値を示した。このような場合には、加速度応答値がきわめて小さくなるものと理解すればよいが、負の値が得られることは実用上不便である。

また、地震動の最大加速度を与える従来の各種経験式は、マグニチュードの関数と震央距離の関数の積の形をとっている。これは、マグニチュードと震央距離が互いに独立な量であることを考えれば当然である。震源域から注目地点の地下基盤まで伝播してきた地震波が最終的にその地点の地表層構造の影響を受けるものとすれば、地盤条件の効果もまた積の形で現われるものと考えられる。すなわち、現象の物理的構造から、マグニチュード、震央距離、地盤条件の 3 つの因子が相乗的に影響して加速度応答スペクトル縦距が得られると考えた方が合理的である。

したがって、本研究の解析では、絶対加速度応答スペクトルの縦距値 \overline{SA} (ガル) を重み係数の積の形で次のように予測することにした。

$$\overline{SA}(T, h) = f_M(T, h) * f_d(T, h) * f_{GC}(T, h) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $T = 1$ 自由度系の非減衰固有周期 (秒, 式 (5) 参照)

$h = 1$ 自由度系の減衰定数 = 0.05 (3. (1)

参照)

$f_M(T, h) =$ マグニチュードの各範ちゅう (Table 1) に対する重み係数

$f_d(T, h) =$ 震央距離の各範ちゅう (Table 1) に対する重み係数

$f_{GC}(T, h) =$ 地盤条件の各範ちゅう (Table 1) に対する重み係数

である。前述のように、この場合の重み係数は常に正となるから、式 (6) による予測値は常に正の加速度応答スペクトル縦距を与える。

4. 数量化解析の結果

(1) 概要

数量化解析から得られた重み係数を一覧表の形で Table 3 に示す。問題の定式化に起因する数学的な制限から、一般に 1 つの項目を除いて他の項目では、いずれか 1 つの範ちゅうの重み係数の値を固定しなければならない。本解析ではマグニチュードおよび震央距離の項目のそれぞれ 1 つの範ちゅうの重み係数値を 1.00 としている。このような操作によって解の一般性が失われないことは保証されている。Table 3 を用いれば、たとえば $M=6.1\sim 6.7$, $d=20\sim 59$ km の地震により、3 種地盤上の固有周期 0.5 秒、減衰定数 0.05 の振動系に生ずる最大絶対加速度応答値は式 (6) から、

$$\overline{SA}(0.5, 0.05) = 0.309 \times 2.91 \times 140 = 126 \text{ ガル} \dots\dots\dots (7)$$

と推定される。

Table 3 Weighting Coefficients Obtained from Quantification Analysis

T*	ρ**	$f_M(T, 0.05)$					$f_d(T, 0.05)$					$f_{GC}(T, 0.05)$			
		Magnitude (M)					Epicentral Distance (d: km)					Ground Condition (GC)			
		4.5~5.3	5.4~6.0	6.1~6.7	6.8~7.4	7.5~7.9	6~19	20~59	60~119	120~199	200~405	Type I	Type II	Type III	Type IV
0.10	0.56	0.218	0.278	0.296	0.399	1.00	5.10	2.67	2.05	0.994	1.00	126	107	120	106
0.15	0.53	0.225	0.274	0.297	0.448	1.00	4.85	3.01	2.15	1.00	1.00	155	130	141	125
0.20	0.54	0.185	0.280	0.288	0.499	1.00	5.48	3.24	2.07	1.05	1.00	169	149	161	129
0.25	0.55	0.171	0.254	0.283	0.534	1.00	6.86	3.65	2.33	1.21	1.00	135	129	143	129
0.30	0.56	0.164	0.269	0.280	0.548	1.00	6.59	3.51	2.25	1.27	1.00	109	130	147	131
0.35	0.55	0.161	0.274	0.302	0.588	1.00	5.74	3.05	2.13	1.24	1.00	92.8	126	149	142
0.40	0.57	0.152	0.268	0.311	0.557	1.00	5.45	3.01	1.92	1.33	1.00	83.0	122	145	144
0.50	0.63	0.108	0.237	0.309	0.593	1.00	6.35	2.91	1.60	1.36	1.00	76.6	113	140	156
0.60	0.67	0.0889	0.246	0.321	0.618	1.00	5.88	2.79	1.46	1.32	1.00	62.1	101	134	159
0.70	0.70	0.0730	0.222	0.315	0.644	1.00	6.77	2.96	1.56	1.37	1.00	50.0	88.8	118	148
0.80	0.68	0.0683	0.214	0.294	0.595	1.00	5.89	2.73	1.54	1.28	1.00	47.9	91.0	115	145
0.90	0.67	0.0672	0.214	0.285	0.581	1.00	5.13	2.38	1.48	1.20	1.00	46.4	90.5	113	136
1.00	0.67	0.0653	0.204	0.284	0.636	1.00	4.62	2.15	1.40	1.16	1.00	43.3	89.3	107	125
1.50	0.72	0.0503	0.138	0.204	0.534	1.00	4.40	2.20	1.44	1.00	1.00	33.0	56.5	68.5	84.6
2.00	0.71	0.0605	0.148	0.215	0.585	1.00	3.66	1.99	1.29	0.924	1.00	24.7	36.8	44.1	46.2
2.50	0.70	0.0587	0.136	0.183	0.405	1.00	3.50	1.95	1.34	0.947	1.00	21.9	32.7	35.8	33.0
3.00	0.69	0.0660	0.138	0.194	0.391	1.00	3.26	1.79	1.35	0.867	1.00	18.8	26.6	28.5	26.6
4.00	0.68	0.0704	0.144	0.187	0.395	1.00	2.81	1.61	1.27	0.788	1.00	15.7	20.3	24.1	19.1

*T=Period (Seconds), **ρ=Correlation Coefficient

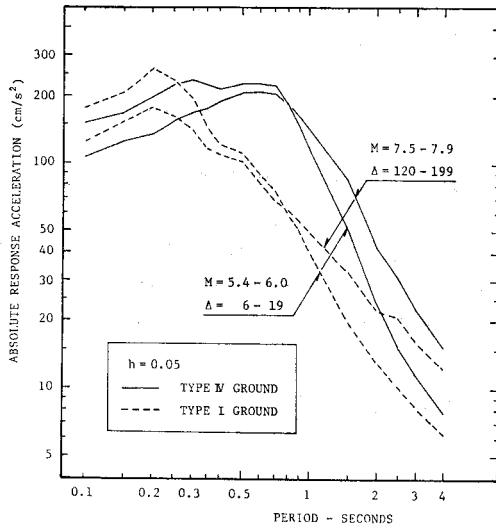


Fig. 3 Examples of Predicted Acceleration Spectra

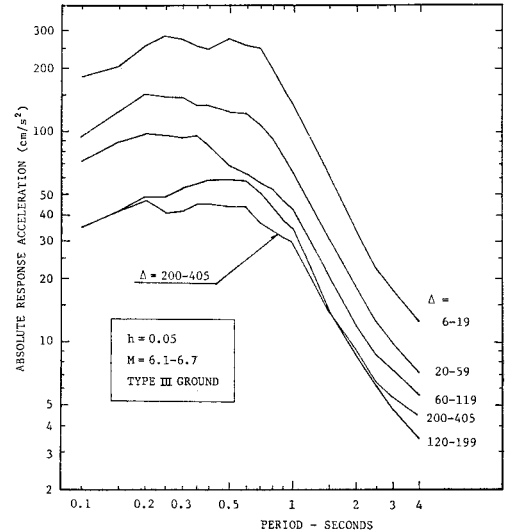


Fig. 5 Predicted Acceleration Spectra for Various Epicentral Distances

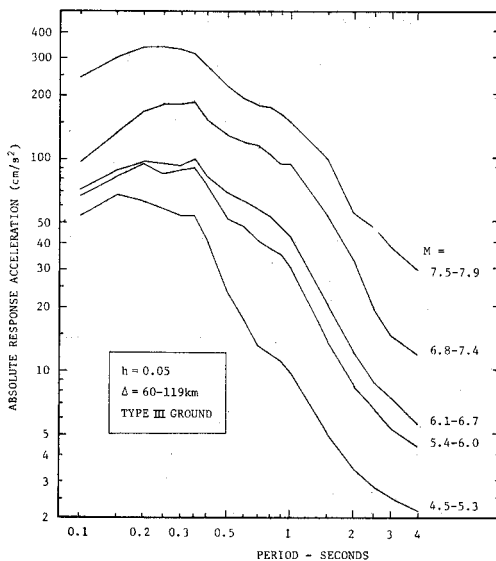


Fig. 4 Predicted Acceleration Spectra for Earthquakes with Various Magnitudes

Fig. 3 は2つの異なる地震 ($M=5.4\sim 6.0$, $\Delta=6\sim 19$ km および $M=7.5\sim 7.9$, $\Delta=120\sim 199$ km) で得られる1種および4種地盤上の記録の加速度応答スペクトルを Table 3 の重み係数を用いて求めたものである。岩盤上(1種地盤)と軟弱地盤上(4種地盤)の地震記録の振動数特性の相違がいずれの地震に対しても明瞭に現われている。さらに2つの地震では、同一種類の地盤上でも振動数特性が明らかに異なることが認められ、般にマグニチュードの大きな地震の地震動には比較的長周期の成分波が多く含まれていることが推測される。

同一の震央距離の範ちゅう ($\Delta=60\sim 119$ km) に発生

したマグニチュードの異なる地震により3種地盤上で得られる地震動の加速度応答スペクトルを Fig. 4 に示す。マグニチュードの変化による応答加速度の変化は、短周期の振動系に比べて長周期の振動系でより顕著に現われていることがわかる。

また、Fig. 5 は同一のマグニチュード範ちゅう ($M=6.1\sim 6.7$) の地震が異なる震央距離に発生した場合に3種地盤上の地震動から得られる加速度応答スペクトルを示したものである。震央距離の変化による加速度応答値の変化はスペクトルの短周期領域でより顕著に現われている。

今回の解析では、マグニチュードや震央距離が加速度応答値に及ぼす影響に特定の関数関係を仮定せず、データの性質に則した重み係数を求めている。したがって、データの不完全さ(データ個数およびデータ分布のかたより)もあって、得られたスペクトル曲線はかなり不規則であり、たとえば Fig. 5 では長周期領域で $\Delta=200\sim 405$ km の範ちゅうのスペクトル値の方が $\Delta=120\sim 199$ km の範ちゅうのスペクトル値よりも大きくなっている。Fig. 3~5 に示されるように、応答スペクトルの形状そのものが地盤のみならず、マグニチュードや震央距離の影響を受けることはすでに定性的に認められている事実であり、これらの傾向が定量化された点に今回の解析の重要な意味がある。

Table 3 の第2列には277個の実測スペクトル縦距と重み係数から計算された277個の予測値の相関係数の値が示されている。特に短周期領域の相関係数は必ずしも高いとはいえず、式(6)から得られる予測値 \bar{SA} の値のみならず、予測値を中心にした実測値の分布を十

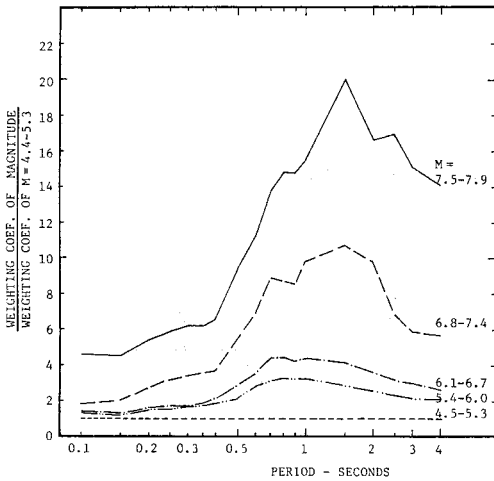


Fig. 6 Effect of Magnitude on Acceleration Spectra

分に検討しておくことの重要性を示唆している。この点に関しては後に 4.(3) で検討する。

(2) 予測値 \overline{SA} の特性

解析で考慮した各種要因が加速度応答スペクトル縦距 \overline{SA} に与える影響をより詳細に検討する。

Fig. 6 は、震央距離と地盤種別の範ちゅうが同一のときに、マグニチュードの変化によって加速度応答スペクトル縦距がどのような影響を受けるかを表わしたものである。マグニチュードの影響度はスペクトル図の短周期領域と長周期領域で大きく異なっている。固有周期が 0.4 秒程度以下の領域では、マグニチュードが 4.5~5.3

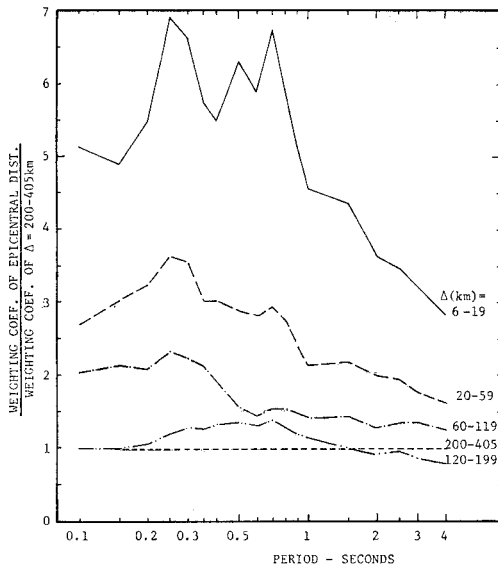


Fig. 7 Effect of Epicentral Distance on Acceleration Spectra

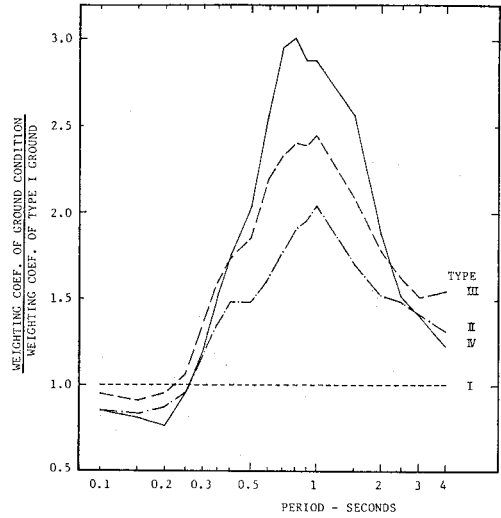


Fig. 8 Effect of Ground Condition on Acceleration Spectra

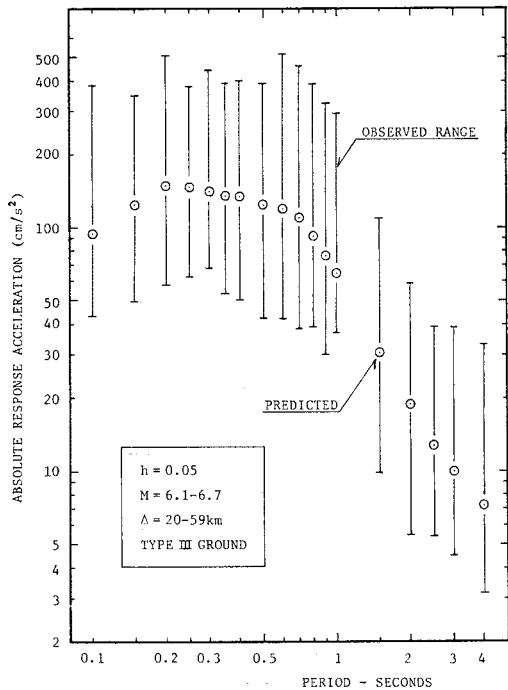


Fig. 9 An Example of Observed Range and Predicted Value of Acceleration Spectral Amplitude

から 7.5~7.9 に増加すると、加速度応答スペクトル縦距は 5~6 倍になるが、固有周期が 0.7 秒程度以上の領域ではこの倍率が 14~20 と大きな値を示す。すなわち、長周期構造物では地震マグニチュードの変化によって、最大応答加速度の値が短周期構造物よりも大きな影響を受けることは明らかであり、このような傾向は応答

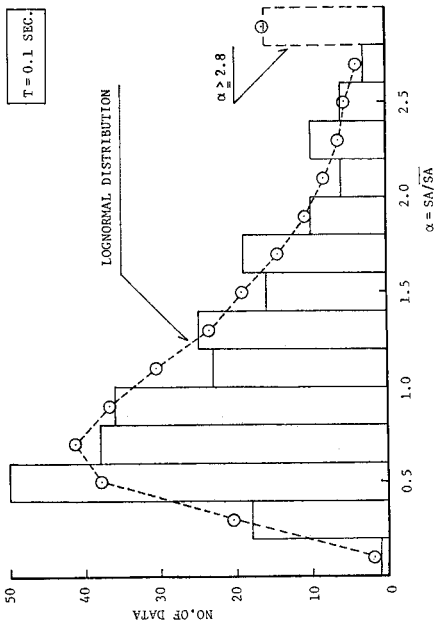


Fig. 10 Histogram of $\alpha = SA/\bar{SA}$ for $T=0.1$ sec

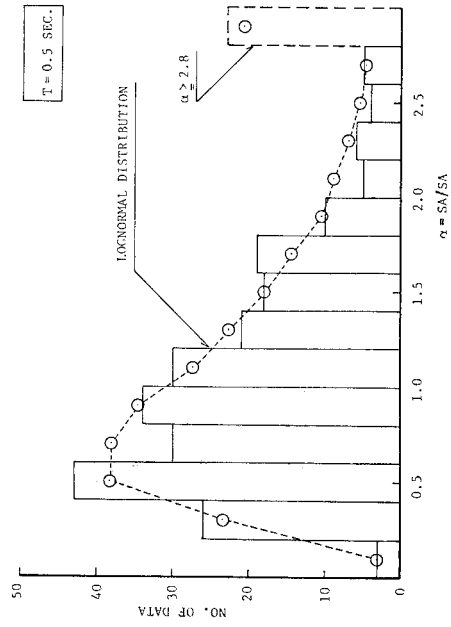


Fig. 11 Histogram of $\alpha = SA/\bar{SA}$ for $T=0.5$ sec

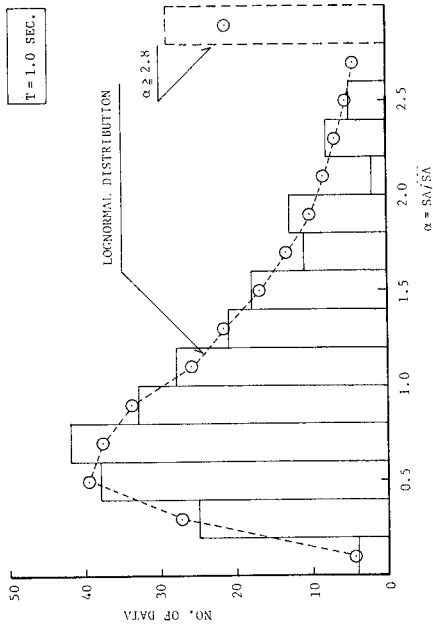


Fig. 12 Histogram of $\alpha = SA/\bar{SA}$ for $T=1.0$ sec

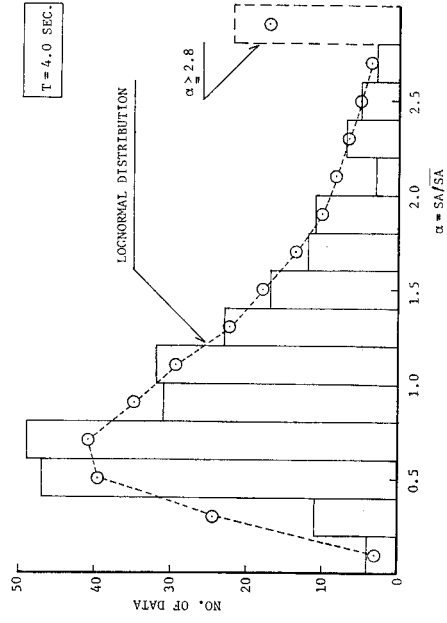


Fig. 13 Histogram of $\alpha = SA/\bar{SA}$ for $T=4.0$ sec

スペクトルの形の変化として、前掲の Fig. 3 や Fig. 4 に現われている。

地震のマグニチュードと地盤条件の範ちゅうを固定して考えたときに、震央距離の変化が加速度応答スペクトル縦距に与える影響を Fig. 7 に示す。今回の解析で用いた記録の最大震央距離は 405 km であり、Fig. 7 には震央距離が減少するにつれて加速度応答スペクトル縦距がどのように増大するかを各固有周期に対して示してある。震央距離の影響は加速度応答スペクトルの短周期領域で顕著に現われている。この傾向は前掲の Fig. 5 を詳しく見ても明らかであり、近距離地震には単周期成分が相対的に強く含まれていることに起因する。

記録地点の地盤条件が加速度応答スペクトルに及ぼす影響は Fig. 8 に示されている。Fig. 8 は、地震のマグニチュードと震央距離の条件が同じときに、各種地盤上の記録の加速度応答スペクトル縦距が 1 種地盤上の値に対して何倍になるかを示している。この図によると、地盤の影響は固有周期が 0.5~2.0 秒程度の領域で顕著に現われ、この領域では地盤の軟弱度が増すほど加速度応答スペクトル縦距値は大きくなる。また、約 0.3 秒以下の短周期領域では、地盤種別の相違によって加速度応答スペクトル縦距はあまり影響を受けないが、どちらかといえば硬地盤上の記録の方がやや大きな加速度応答値を示している。

(3) 実測値のばらつき

Table 3 の相関係数が示すように、予測値 \overline{SA} と実測値の相関は必ずしも高いとはいえない。式 (6) はマグニチュード、震央距離、地盤種別のある 1 つの組合せに対して 1 つの予測値 \overline{SA} を与えるが、この組合せに属する実測値は大きなばらつきを示している。Fig. 9 は、 $M=6.1\sim 6.7$ 、 $L=20\sim 59$ km、3 種地盤の条件を満たす 32 個のデータ (Table 2 参照) のばらつきの範囲と式 (6) による予測値を示したものである。この図からも明らかなように、Table 3 の重み係数により式 (6) で予測値 \overline{SA} を求めても、将来実際に観測される地震記録の加速度応答スペクトル縦距の中には、この予測値を大幅に上まわるものや下まわるものが現われる。Fig. 9 に示されるばらつきのおもな原因は、解析に用いた範ちゅうの幅がかなり大きいこと、および実際の加速度応答スペクトル縦距はマグニチュード、震央距離、地盤種別以外の要因の影響も受けることの 2 つにある。

Table 4 Value of $\alpha=SA/\overline{SA}$ for Specified Probabilities of Being Exceeded

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)					
				Value of α Corresponding to p					
				$p=0.05$	$p=0.1$	$p=0.2$	$p=0.3$	$p=0.4$	$p=0.5$
T	m_α	σ_α	χ^2						
0.1	1.24	0.910	11.78	2.94	2.32	1.75	1.41	1.18	1.00
0.15	1.25	0.882	31.66	2.90	2.31	1.74	1.42	1.20	1.02
0.2	1.27	0.914	26.34	2.98	2.36	1.77	1.44	1.21	1.03
0.25	1.26	0.968	19.78	3.06	2.39	1.77	1.43	1.19	1.00
0.3	1.26	0.948	10.19	3.04	2.38	1.78	1.43	1.20	1.01
0.35	1.29	1.10	9.01	3.31	2.53	1.83	1.45	1.18	0.98
0.4	1.26	0.999	11.50	3.12	2.42	1.78	1.42	1.18	0.99
0.5	1.30	1.05	6.93	3.24	2.51	1.84	1.46	1.21	1.01
0.6	1.29	1.11	10.40	3.33	2.54	1.83	1.44	1.18	0.98
0.7	1.34	1.32	16.80	3.70	2.74	1.91	1.47	1.18	0.96
0.8*	1.27	1.02	9.56	3.16	2.45	1.79	1.43	1.18	0.99
0.9*	1.29	1.08	12.55	3.28	2.52	1.83	1.45	1.19	0.99
1.0*	1.28	1.09	14.47	3.28	2.51	1.81	1.43	1.17	0.97
1.5*	1.23	1.00	17.01	3.08	2.38	1.74	1.39	1.14	0.95
2.0*	1.23	0.956	7.37	3.01	2.35	1.73	1.39	1.16	0.97
2.5*	1.27	1.14	14.97	3.34	2.53	1.80	1.41	1.15	0.95
3.0*	1.24	1.01	19.45	3.11	2.40	1.75	1.40	1.15	0.96
4.0*	1.23	0.953	16.49	3.00	2.34	1.73	1.39	1.16	0.97
Average				3.16	2.44	1.79	1.43	1.18	0.99

- (1) T =Period (Seconds)
- (2) m_α =Mean of α
- (3) σ_α =Standard Deviation of α
- (4) $\chi^2 = \sum_{i=1}^{15} \frac{(F_i - f_i)^2}{F_i}$ $\chi^2_{0.95,12} = 21.03$
 F_i =Expected No. of Occurrences
 f_i =Observed No. of Occurrences
- (5) p =Probability of Being Exceeded
 *Two Data Omitted for Calculation of m_α, σ_α

本節では、今回の解析に用いた 277 成分の記録に基づいて、実測値が予測値 \overline{SA} のまわりにどのように分布しているかを検討する。

いま、測定値 SA と予測値 \overline{SA} の比を α とする：

$$\alpha = \frac{SA}{\overline{SA}} \dots \dots \dots (8)$$

解析に用いた記録の数は 277 成分であるから、各固有周期に対して 277 個の α の値がある。Fig. 10~13 は α の分布を $T=0.1, 0.5, 1.0$ および 4.0 秒の 4 つの固有周期についてヒストグラムの形で示したものである。いずれの分布も α の大きな値の側に長い裾野を持ち、一見して対数正規分布に類似した形状を示している。Table 4 の (2),(3) 欄には 277 個のデータから求めた α の平均値と標準偏差を各固有周期に対して示した。 $T=0.8\sim 4.0$ 秒においては、2 つの異常に大きな α の値が標準偏差の妥当な推定を乱していることが明らかとなったため、これら 2 つのデータを除外して m_α, σ_α を計算している。各固有周期におけるデータを Fig. 10~13 のように 15 個の区分に分割し、各区分に含まれる実測値の個数と対数正規分布を仮定して得られる推定個数との適合度に関して χ^2 -検定を行った。Fig. 10~13 には対数正規分布を当てはめた場合の α の推定

分布が示してあり、Table 4 の (4) 欄には各固有周期に対する χ^2 の値がまとめられている。データを 15 区間に分割した場合の有意水準 0.05 に対する χ^2 の値は 21.03 である。 $T=0.15$ および 0.20 秒での χ^2 の値がこれをやや上まわっているが、全体的に見れば対数正規分布は有意水準 0.05 で妥当であるといえる。

α の分布が固有周期にかかわらずほぼ対数正規分布とみなされることを仮定すれば、任意の超過確率 p を与える α の値が求められる。Table 4 の (5) 欄には、対数正規分布を仮定して求めた超過確率 $p=0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ に対する α の値を示した。同じ超過確率に対する α の値は固有周期に無関係にほぼ一定値となっており、概略の値は Table 4 の最下行に示した平均値で代表させることができる。式 (6) で計算して得られる予測値 \overline{SA} は超過確率約 50% の加速度応答スペクトル図を与え、これを約 3 倍にしたものが超過確率 5% のスペクトルを与えることがわかる。Table 4 に示した α の値と式 (6) による \overline{SA} の値を併用すれば、建造物の重要度にあつた超過確率に対する加速度応答スペクトル縦距が求められる。このような考え方は、近い将来、耐震設計における重要な課題となる。

5. 地震工学における応用の可能性

前章で述べた数量化解析の結果 (Table 3) とばらつきに関する検討結果 (Table 4) は耐震設計における地震荷重の決定に対して広い応用性を有しているものと考えられる。

地震のマグニチュード、震央距離と想定地点の地盤条件が与えられれば、式 (6) と Table 3 の重み係数によって、平均的な設計用加速度応答スペクトルが予測できる。また、この結果を Table 4 に与えられた α の値で修正することにより、建造物の重要度を考慮し、超過確率を指定した絶対加速度応答スペクトルが得られる。たとえば、固有周期 0.5 秒、減衰定数 0.05 の建造物が 3 種地盤上にあるとき、 $M=6.1\sim 6.7$ 、 $d=20\sim 59$ km の地震による最大加速度応答値は式 (7) により 126 ガルと予測されるが、超過確率を 0.10 以下にしたい場合には、Table 4 最下行の $p=0.10$ に対応する平均値を使用すれば、

$$126 \times 2.44 = 307 \text{ ガル}$$

なる値が得られる。減衰定数が 0.05 以外の値をとるときには、従来の経験に則して、式 (6) と Table 3 による推定値を適当に増減すればよい。このような補正係数の 1 例は参考文献 (14), (15) に見られる。

各範ちゅうの組合せに対して式 (6) と Table 3 から得られる平均の加速度応答スペクトルを用いて、特定

の地震条件を仮定した場合の地震応答解析に際して用いるべき入力地震動の合理的な選択が可能となる。従来の地震応答解析では、いくつかの有名な地震動記録の最大加速度を適当に増減した波形を用いたり、注目地点と同様の地盤条件で得られた記録を用いることが多かった。しかし、地震動記録の最大加速度は地震動の強さを表わす指標として適切とはいえず、また、加速度応答スペクトルの形状そのものも地盤条件のみならず、想定地震のマグニチュードと震央距離に関係する。したがって、与えられた条件に対して予測される加速度応答スペクトルと類似のスペクトルを有する地震動記録を入力地震動として選択することが望ましい。このような考え方からすれば、最近の地震応答解析にしばしば用いられる模擬地震動を作成するための資料としても、前章の解析結果を有効に利用することが可能である。このためには、たとえば本解析の結果から非減衰の加速度応答スペクトルを推定^{(14), (15)}、さらに、これを近似的な速度応答スペクトルに変換したのち、非減衰速度応答スペクトルがフリー・スペクトルに近似的に等しいことを利用するのもひとつの方法であろう。

今回の解析結果を採用すれば、従来よりもきめの細かい地震危険度の解析が可能である。河角の最高震度期待値の地図に代表される従来の地震危険度解析では、地震発生に関する過去の資料から、与えられた将来の期間に各地に発生する地震動の最大加速度の期待値を推定している。河角マップでは、過去の地震のマグニチュードと発生位置から注目地点の地震動の強さを見積るために、東京の本郷台で得られた気象庁震度階と地震動最大加速度の経験式が用いられている。したがって、注目地点の地盤条件が本郷台の地盤と大きく異なる場合への適用に問題が残るうえ、前述のように地震動が建造物に及ぼす影響は最大加速度のみでは判断できない。この点を考え、小林・鏡見⁽²¹⁾は基盤に入射する地震動による地表層の応答を計算し、対象建造物の特性を考慮したマイクロ・ゾーニングの手法を提案した。しかし、この方法においても、基盤に入射する地震動の特性そのものが地震のマグニチュードや震央距離の影響を受けることは考慮されていない。本論文で述べた解析の結果を用いれば、これらの要素を勘案した応答加速度値の概略の推定が可能であり、地震活動度の資料との適切な組合せにより、きめ細かい地震危険度解析を行うことができよう。このような地震危険度解析では、発生地震のマグニチュードと震央距離の違いによる地震動の振動数特性の相違が考慮され、注目地点の地盤条件および対象建造物の周期特性を勘案した応答加速度の期待値を求めることとなる。さらに、Table 4 に示された超過確率の検討結果を組込んだ危険度解析も可能と思われる。

6. む す び

1956年から1974年の19年間に日本各地の地盤上に設置された強震計によって得られた277成分の地震動加速度記録から計算した加速度応答スペクトルの18個の固有周期における縦距値(減衰定数0.05)に対し、地震マグニチュード、震央距離、記録地点の地盤条件の3つを項目として「数量化Ⅰ」理論による統計解析を実施し、以下の結果を得た。

(1) 与えられた地震のマグニチュード、注目地点からの震央距離の範囲、および注目地点の地盤条件に対し、平均的な絶対加速度応答スペクトル縦距を重み係数の積の形で予測する経験式が求められた。

(2) マグニチュード、震央距離および地盤条件が絶対加速度応答スペクトル縦距に与える影響を定量的に検討して得られた傾向は、従来定性的に指摘されていた傾向とよく一致していた。

(3) マグニチュードの影響は固有周期約0.7秒以上の領域で特に明らかであり、この領域の絶対加速度応答スペクトル縦距はマグニチュードの増加に伴い著しく増大する。震央距離の減少による絶対加速度応答スペクトル縦距の増大は一般にスペクトル図で約0.8秒以下の短周期領域で顕著に現われる。また、地盤の影響は固有周期0.5~2.0秒程度の領域で顕著であり、この領域では地盤が軟弱になるに従い絶対加速度応答スペクトル縦距は増大する。

(4) 実測値と予測値の比が近似的に対数正規分布に従うことを利用し、任意に与えられた超過確率の値に対応した絶対加速度応答スペクトル縦距を予測する資料を提供した。

(5) 地震マグニチュード、震央距離、地盤条件を考慮して求めた絶対加速度応答スペクトル図を利用すれば、地震応答解析に用いる入力地震動が合理的に選択できること、および従来よりもきめの細かい地震危険度解析が可能となることについて論及した。

今回の解析結果を利用するに際しては、用いたデータおよび解析手法の性質から、以下の諸点に注意する必要がある。

(1) 解析に用いたデータはマグニチュードが大きく、震央距離が小さな地震によるものをほとんど含んでいない。したがって、これらの範ちゅうの組合せに対する予測値の精度は相対的に低い可能性がある。

(2) 強震計で得られた地震記録を使用しているため、非常に小さな加速度記録は含まれていない。したがって、予測値が10ガル程度以下となるような部分では一般に予測値は実際に得られるであろう値よりも大きめ

の推定をしている可能性がある。

(3) マグニチュードおよび震央距離の範ちゅうはかなり幅が広い。また、数量化解析の結果の一部には、重み係数の大小関係が逆転している部分が含まれている。実際の応用に際しては、十分な工学的判断を必要としよう。

謝 辞：本研究は、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(部会長・久保慶三郎 東京大学生産技術研究所教授)の研究活動の一環として実施されたものである。解析の基礎資料となっ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^{22)~24)}から引用し、港湾地域観測地点の地盤条件の判定には参考文献25)~27)を参照した。使用データの整備および統計処理は、常田賢一氏(建設省土木研究所地震防災部振動研究室)および島村 浩氏(当時 日本技術開発株式会社)に負うところが多い。

以上記して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Newmark, N.M., J.A. Blume, and K.K. Kapur: Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants, Proc. ASCE, Vol. 99, No. PO 2, 1973.
- 2) 星谷 勝・矢作 枢・柴田定昭・草野直幹: 平均応答スペクトル作成に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第232号, 1974.
- 3) Kuribayashi, E., T. Iwasaki, Y. Iida and K. Tsuji: Effects of Seismic and Subsoil Conditions on Earthquake Response Spectra, Proc. of Intern. Conf. on Microzonation for Safer Construction, Research and Application, Vol. II, 1972.
- 4) 土田 肇・倉田栄一・石坂徳三・林 聡: 各種地盤における平均応答スペクトル, 港湾技術研究所報告, 第12巻, 第4号, 1973.
- 5) 道路橋耐震設計指針・同解説, 日本道路協会, 1972.
- 6) 本州四国連絡橋耐震設計指針, 本州四国連絡橋公団, 1972.
- 7) McGuire, R.K.: Seismic Structural Response Risk Analysis, Incorporating Peak Regressions on Earthquake Magnitude and Distance, Structures Publication No. 399, R 74-51, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1974.
- 8) Trifunac, M.D.: Forecasting the Spectral Amplitudes of Strong Earthquake Ground Motion, Paper presented at panel discussion 4 "Earthquake Parameter for Design of Major Projects", Preprint of 6th World Conf. on Earthquake Engineering, India, 1977.
- 9) Katayama, T.: "A Note on the Acceleration Ratio Spectrum of Seventy Japanese Strong-Motion Earthquake Records, Bulletin of Faculty of Science and Engineering of Chuo University, Vol. 12, 1969.
- 10) Katayama, T.: Empirical Probability Distribution of Earthquake Acceleration Magnification Factor, 生産研究, 第24巻, 第10号, 1972.
- 11) 片山恒雄: 最大応答加速度値の分布に関する一考察, 土木学会第27回年次学術講演会講演概要集第I部, 1972.

- 12) 佐伯光昭・片山恒雄・岩崎敏男：我国の地盤上で得られた地震動の加速度波形記録および加速度応答スペクトルの特性について，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集第I部，1976.
- 13) Iwasaki, T., and T. Katayama: Statistical Analysis of Strong-Motion Earthquake Response Spectra, Proc. of U.S.-Japan Seminar on Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems, Tokyo, 1976.
- 14) 大橋昭光・岩崎敏男・若林進・常田賢一：加速度強震記録の統計解析，天然資源の開発利用に関する日米会議・耐風耐震構造専門部会，第9回合同部会，1977.
- 15) 耐震技術に関する研究開発総合報告書，(財) 国土開発技術研究センター，耐震技術開発研究委員会，1977.
- 16) 常田賢一・片山恒雄・佐伯光昭：加速度応答スペクトルの統計解析，土木学会第32回年次学術講演会講演概要集第I部，1977.
- 17) 林知己夫・樋口伊佐夫・駒沢勉：情報処理と統計数理，産業図書，1970.
- 18) FACOM 230-45 S, QUANTAS 解説書，富士通，1972.
- 19) 石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示，通商産業省，運輸省，建設省，自治省告示第1号，1973.
- 20) 沈埋トンネル耐震設計指針(案)，土木学会，1975.
- 21) Kobayashi, H., and H. Kagami: A Method for Local Seismic Intensity Zoning Maps on the Basis of Subsoil Conditions, Proc. of Intern. Conf. on Microzonation for Safer Construction, Research and Application, Vol. II, 1972.
- 22) 土田肇・山田通一郎・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報(1963, 1964)，港湾技研資料，No. 55, 1968. 同(1965, 1966)，同 No. 62, 1968.
- 23) 土田肇・倉田栄一・須藤克子：港湾地域強震観測年報(1967)，港湾技研資料，No. 64, 1969. 同(1968)，同 No. 98, 1970. 1968年十勝沖地震とその余震の港湾地域における強震記録，同 No. 80, 1969. 港湾地域強震観測年報(1969)，同 No. 100, 1970. 同(1970)，同 No. 116, 1971.
- 24) 倉田栄一・石坂徳三・土田肇：港湾地域強震観測年報(1971)，港湾技研資料，No. 136, 1972. 同(1972)，同 No. 160, 1973. 同(1973)，同 No. 181, 1974. 同(1974)，同 No. 202, 1975.
- 25) 土田肇・山田通一郎・倉田栄一：港湾地域強震観測地点資料(その1)，港湾技研資料，No. 34, 1967.
- 26) 倉田栄一・土田肇・須藤克子：港湾地域強震観測地点資料(その2)，港湾技研資料，No. 107, 1970.
- 27) 倉田栄一・石坂徳三：港湾地域強震観測地点資料(その3)，港湾技研資料，No. 156, 1973.

(1977.10.31・受付)