

## 地震加速度波の統計的予測方法

STATISTICAL PREDICTION OF EARTHQUAKE  
ACCELERATION WAVE

片田 敏行\*・星谷 勝\*\*

By Toshiyuki KATADA and Masaru HOSHIYA

## 1. ま え が き

構造物の動的な耐震設計法には、Housnerにより提案された平均応答スペクトルを用いる方法あるいは地表加速度記録等を入力とした直接動的応答解析によって算出された応答に対して耐震設計を行う方法などがある。どちらの方法にしても、設計に用いる応答スペクトルや加速度記録によって構造物の耐震性と建設コストは大きく左右される。それゆえ、構造物の建設地点付近におけるサイスミンティ（Seismicity）を考慮した応答スペクトルの作成、あるいは応答解析入力加速度波の選択や作成が必要となってくる。

物理的に最も納得できる方法は断層モデルを設定して、解析的に建設地点における地表の変位、速度あるいは加速度などを求める方法であろう。しかし、現在のところ地震工学において必要とされる周波数領域（1～10 Hz）における理論地震波を算出できる断層モデルは完成していない。

それゆえ、震央距離、震源深さやマグニチュードなどの地震特性から建設地点における地震動の性状を統計的に推定する方法が有効となってくる。片山・岩崎<sup>1)</sup>はマグニチュード、震央距離および建設地点の地盤条件から加速度応答スペクトルの形状を表すパラメーター（18個の固有周期における縦距値）を算出する予測式を統計的に導いている。しかし、応答スペクトルはその定義上、構造物の最大応答値しか示さない。したがって、地震動に対する構造物の動的応答特性を検討して、その耐震性を高める方法として、構造物の応答の経時的变化を検討する点で不十分といえよう。

しかも、近年にみられる超高層ビルや長大橋梁などの柔構造物や原子力発電所などの社会的に十分な耐震性が

要求される重要構造物などに対して、地震加速度波を入力とする動的応答解析が必要といえよう。しかし、その応答解析には地震特性や地盤条件の違いを考慮せずに、過去の「著名」地震において得られた地震加速度波が使用されているのが現状である。

そこで、構造物の建設地点に影響を及ぼすと思われる地震特性（たとえば、マグニチュード、震央距離、震源深さなど）から、建設地点における地震動の性状が予想できれば、耐震設計する際に1つの指標となり得るであろう。また、ある地震特性に対して、ある地域内の任意の各地点における地震動の性状を予想できるようになれば、大きな面的な広がりをもつライフ・ライン施設の耐震性もより正確に検討できるであろう。

さて、地震特性から任意地点における地震動の個々の特性の予測に関して、過去に次のような研究が行われている。たとえば、任意地点に予想される最高震度については河角の研究<sup>2)~4)</sup>がある。最大加速度についてはSeedとSchnabel<sup>5)</sup>あるいは土田<sup>6)</sup>の研究がある。また、予想継続時間についてはHouser<sup>7)</sup>、Bolt<sup>8)</sup>あるいはTrifunacら<sup>9)</sup>の研究がある。しかし、以上の研究は多くの地震動の性状を表す特性値のいくつかを予想しているにすぎず、構造物の耐震性を検討するには予想される特性が少なすぎると思われる。そこで、本研究は構造物の建設予定地点の表層地盤状況を考慮しながら、地震特性から地震加速度波の多面的な波形特性を同時に明らかにできるような予測方法について検討するものである。すなわち、地震特性から地震加速度波そのものを予測する方法について検討する。もし、地震加速度波が予測できれば、これより応答スペクトルを算出することが可能である。したがって、現行の応答スペクトルを用いる耐震設計に対しても、建設地点で想定される地震特性を考慮した応答スペクトルを提供できる。

なお、地震特性から地震加速度波の波形特性を推定する統計的手法として、重回帰分析法を用いる。また、地

\* 学生会員 工修 東京大学大学院博士課程

\*\* 正会員 工博 武蔵工業大学教授 土木工学科

震加速度波は多面的な波形特性を有するので、主成分分析法を用いて、この多面的な特性を 1~2 の総合特性値に要約化して、これを回帰分析の目的変数とする。

2. 地震加速度波の波形特性の要約<sup>13),14)</sup>

地震加速度波は多面的な特性を有し、1~2 の特性だけでその多面的な特性をすべて表現するのは不可能といわざるを得ない。この多面的な波形特性をできる限り反映するような 1~2 の総合的な特性が得られれば便利であろう。そこで波形の多面的な特性をできる限り網羅するように波形特性をいくつか選び、これを 1~2 の総合特性に要約化することを試みる。なお、後に地震特性から波形特性を回帰推定する際に、この総合特性を目的変数として用いる。

(1) 地震加速度波に関する特性値

地震加速度波に関する特性値は多面的な特性をできるだけ網羅するように選択される必要がある。本研究において、以下の特性値を用いることにする。

- a. 継続時間  $T_d$  (sec)
- b. 絶対最大加速度  $|\ddot{y}|_{max}$  (cm/sec<sup>2</sup>)
- c. 絶対平均加速度  $|\ddot{y}|_{ave}$  (cm/sec<sup>2</sup>)
- d. ゼロ・クロッシング数  $N$  (個)
- e. 全パワーの平方根値  $P$  (cm/sec<sup>3/2</sup>)
- f. 平均パワーの平方根値  $P_{ave}$  (cm/sec<sup>2</sup>)

次に、おのおのの特性値について説明する。

a. の特性値は原波形記録から求められたデジタル数値の継続時間を示したものである。現在のところ、動的応答解析に用いる地震加速度波の継続時間に関して、多くの研究がなされているが<sup>7),9),20)</sup>、どのような定義を用いるかについてはまだ統一的な合意ができていない。また、本研究で用いた地震加速度波のデジタル数値は同一資料<sup>13)</sup>による。そこで、今回の解析では地震記録の資料に記載されている継続時間の数値をそのまま用いることにした。

b. の特性値は振幅レベルの最大値である。地震動の継続時間、周波数特性および振幅レベルの時間的な変化の情報を含んでいない。

c. の特性値は振幅レベルの平均値を示す。定義を次式に与える。

$$|\ddot{y}|_{ave} = \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} |\ddot{y}(t)| dt \dots\dots\dots (1)$$

d. の特性値は周波数特性を示す。すなわち、ゼロ・クロッシング数によって、その地震加速度波がもつ卓越周期を推定できる。

e. の特性値は次式で定義される。

$$P = \sqrt{\int_0^{T_d} \{\ddot{y}(t)\}^2 dt} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\ddot{y}(t)$  は地震加速度である。

山原<sup>10)</sup>によれば、全パワーは構造物の破壊に対するエネルギーの供給源としての地震動強さの評価方法の1つとなり得る。

f. の特性値は次式で定義される。

$$P_{ave} = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} \{\ddot{y}(t)\}^2 dt} \dots\dots\dots (3)$$

この特性値は地震動のもつ単位時間当りの平均エネルギーを表す<sup>10)</sup>。

(2) 使用地震記録とその統計的特性

本研究で用いた地震加速度記録は土木研究所でデジタル化されて公開された資料<sup>13)</sup>を武蔵工大土木工学科応用力学研究室でカード化されたものである。解析に使用した記録の総数は 69 成分である。

次に、使用地震記録の統計的な特性を明らかにするために、マグニチュード、震央距離および震源深さの分布状況を 図-1~3 に示す。図-1~3 によりマグニチュード

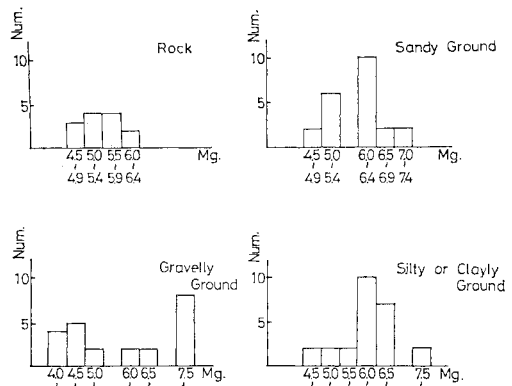


図-1 マグニチュードの分布状況

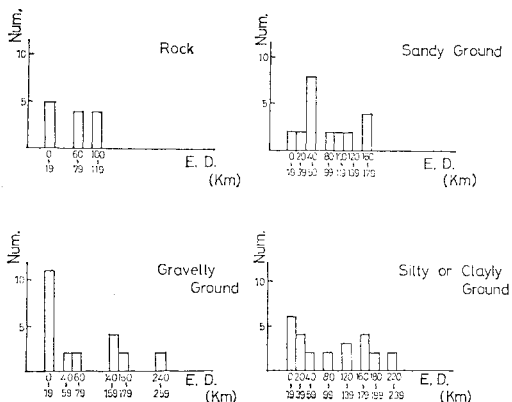


図-2 震央距離の分布状況

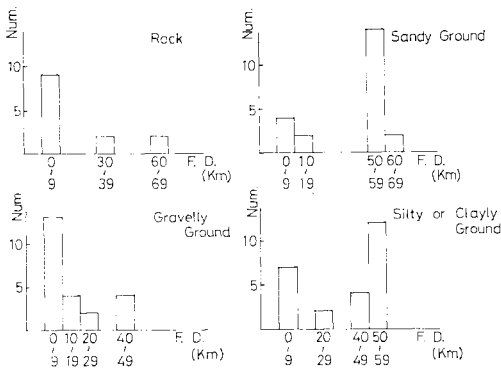


図-3 震源深さの分布状況

下、震央距離および震源深さに関して、使用地震記録数がそれほど偏っていないことがわかる。また、解析結果は地震の特性値の分布している範囲内においてのみ保障される。たとえば、図-1 にみられるように砂質地盤においてマグニチュードが7.5以上のデータを含んでいない。したがって、砂質地盤において、マグニチュードが7.5以上の地震に対して、本研究の解析結果を適用することはできないであろう。しかし、さらに広範囲の地震特性値を有する地震記録を収集することによって、この限界は解消できる。

(3) 主成分分析法

いくつかの特性値を要約化するための統計的手法として、主成分分析法がある。主成分分析法とは互いに相関を有する多数の特性値を互いに無相関な総合特性値に要約化する統計手法である。本研究では地震加速度波の特性値である継続時間、絶対最大加速度、あるいは全パワーなどを1~2の総合特性値に要約化して、地震加速度波の波形特性を検討しようとするわけである。このとき、各地震加速度波の波形特性が総合特性値によって、定量的に表現されている。

数学的には、拘束条件(A)のもとで、次の線形モデル式の係数を決定することを意味している<sup>12)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= l_{11}x_1 + \dots + l_{1p}x_p \\ &\vdots \\ z_m &= l_{m1}x_1 + \dots + l_{mp}x_p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$\sum_{i=1}^p l_{ki}^2 = 1, m \leq p (k=1, \dots, m) \dots\dots\dots (5)$$

$p$ : 特性値の数,  $m$ : 主成分の数

条件(A)

- ① 第1主成分  $z_1$  の係数  $\{l_{1i}\}$  ( $i=1, \dots, p$ ) は  $z_1$  の分散が最大となるように定める。
- ② 第2主成分  $z_2$  の係数  $\{l_{2i}\}$  ( $i=1, \dots, p$ ) は  $z_2$  が  $z_1$  と無相関となるという条件のもとで、 $z_2$  の分

散が最大となるように定める。

- ③ 以下同様にして、第  $k$  主成分の係数  $\{l_{ki}\}$  ( $i=1, \dots, p$ ) は  $z_k$  が  $z_1, \dots, z_{k-1}$  と無相関となるという条件のもとで、 $z_k$  の分散が最大となるように定める。

以上の係数の決定は特性値  $x_i$  に関する相関行列の固有値問題となる。なお、主成分分析法に関する詳細な説明はたとえば参考文献(12)を参照されたい。

(4) 解析結果

参考文献(13), (14)によれば、地震加速度波に関する各主成分のうち、第1および第2主成分についてのみ物理的意味をもつとされている。すなわち、第1, 第2主成分の物理的意味は次のように示されている。

第1主成分

第1主成分は、波形の総合的な大きさである「規模(Size)」を表している。第1主成分の値が大きいほど波形は大きいとされている。

第2主成分

第2主成分は、地震動の卓越周期などを含む振幅の経時的な変化、すなわち波形の「形(Shape)」を表している。具体的には、第2主成分の値が小さいほど衝撃的な波形である。また、その値が大きいほど一定の振幅レベルの加速度が持続する波形である。

標本数が61成分の地震加速度波のなかで、第1および第2主成分得点が最大あるいは最小の波形が参考文献(13), (14)に示されている。

また、本研究で用いた69成分に関して主成分分析を行って得られた、主成分得点の算出式(4)の係数は表-1に示されている。

表-1 式(4)の係数の算出結果

		Td	V max	Zc	V ave.	P <sup>2</sup>	P <sup>ave</sup>
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>
Rock	Z <sub>1</sub>	0.190	0.505	0.082	0.453	0.505	0.490
	Z <sub>2</sub>	0.627	-0.008	0.669	-0.290	0.142	-0.234
Gravelly Ground	Z <sub>1</sub>	0.397	0.281	0.308	0.483	0.493	0.438
	Z <sub>2</sub>	0.457	-0.578	0.511	-0.160	0.145	-0.388
Sandy Ground	Z <sub>1</sub>	0.202	0.483	0.095	0.488	0.490	0.490
	Z <sub>2</sub>	0.669	-0.099	0.729	-0.039	0.072	-0.069
Silty or Clayey G.	Z <sub>1</sub>	0.378	0.386	0.288	0.455	0.475	0.439
	Z <sub>2</sub>	0.505	-0.404	0.668	-0.216	0.225	-0.297

3. 地震加速度波の分類

波形特性に関する主成分分析によって、地震加速度波の波形特性は「規模(Size)」と「形(Shape)」という2つの総合的な特性で代表されることがわかった。この2つの総合特性を示す主成分得点を用いれば、各地震加速度波の波形の相対的な相違を定量的に識別することが

できる。

さて、主成分の物理的な意味により、地震加速度波は次に示すような4種類のタイプに分類されよう。

- ㊸ タイプⅠ 大規模・衝撃型
- ㊹ タイプⅡ 大規模・持続型
- ㊺ タイプⅢ 小規模・衝撃型
- ㊻ タイプⅣ 小規模・持続型

ただし、上記の分類は統計解析に用いた地震加速度記録の標本集団内における相対的なものである。タイプⅠは相対的に波形規模が大きく、衝撃的な波形といえよう。また、タイプⅡは波形規模が大きく、一定の加速度レベルが持続するような波形といえよう。タイプⅢは波形規模が小さく、衝撃的な波形といえよう。タイプⅣは波形規模が小さく、一定の加速度レベルが持続するような波形といえるであろう。

この結果、各地震加速度波は各主成分得点によって、地震動の性状別に、上記の4種のタイプに分類できる。地震動の性状別が上記の4種のタイプに分けられるということは、これまで定性的に認識されていたことであろう。しかし、主成分得点を用いれば、上記の4タイプの分類が定量的に可能である。したがって、地震加速度波の標本集団の中から、任意のタイプの地震加速度波を定量的に選ぶことも可能となる。

#### 4. 地震特性の波形特性に対する回帰分析

前節の解析によって、6個の特性値で表現された波形特性が2個の総合特性値（すなわち、主成分得点）に要約された。そこで、この主成分得点を目的変数とし、地震特性を説明変数として回帰分析を行うことにする。解析の結果、波形特性の回帰推定式が得られれば、サイヌミンチーに基づいて地震特性が想定されると、建設予定地点における地震動の性状が推定できることになる。

##### (1) 地震特性の分類

本研究では、地震の震源に関する特性として、次の3種の特性を用いた。

- a. マグニチュード
- b. 震央距離
- c. 震源深さ

地震特性として、上記に示されたもの以外にも、いくつかの特性が考えられよう。上記の3種の特性を選択して解析に用いた理由には2つある。第1の理由は各地震加速度記録について、上記の3種の地震特性しか得られなかったことにある。他の理由は統計解析に用いる地震特性として、これら3つの特性で十分であると考えられたからである。実際、解析結果もある程度満足すべきも

のであると思われた。

波形特性値の場合と同様に、各地震特性値は文献 11)に記載されているものをそのまま用いて統計解析を行った。

##### (2) 観測地点の表層地盤の分類<sup>13),14)</sup>

一般に、最大加速度あるいは震害は表層地盤の状況によって大きく影響されるといわれている。それゆえ、地震記録を統計解析する際には、その観測地点の地盤状況を考慮する必要がある。しかも、なるべく客観的かつ定量的な指標、たとえば地盤の1次固有振動数などを用いて、表層地盤を分類すれば、解析の精度もよくなるであろう。しかし、限られた地震加速度記録の数、あるいは地盤の情報などを考えると、地盤状況を厳密に分類することは解析自体を不可能にしてしまう恐れがある。

そこで、本研究では資料 11)に記載されている情報をもとにして、単に地盤の硬軟等によって、表層地盤を以下の4種に分類することにする。

- a. 岩および岩質地盤
- b. 砂礫混り地盤
- c. 砂および砂質地盤
- d. シルトおよび粘土質地盤

##### (3) 途中伝播経路に関する考察

一般に、地震波は震源から観測地点までの伝播途中の地質状態によって影響を受ける。すなわち、地震波は伝播途中において、その振幅と位相が変化する。

地質状態を正確に把握するためには、実地踏査、地表面から伝播経路に至るボーリング調査、あるいは弾性波探査などを行う必要がある。しかし、現実には途中伝播経路の地質状態が明らかな地震加速度記録は数少ない。それゆえ、途中伝播経路が波形特性に及ぼす影響は、地震特性から波形特性を回帰分析する際の誤差項に含むことにする。

##### (4) 解析手法および解析結果

本研究では、地震特性から波形特性を回帰分析する手法として重回帰分析法<sup>15)</sup>を用いている。重回帰分析法について、その詳細はたとえば文献 12)を参照されたい。

具体的には、マグニチュード、震央距離および震源深さという3種類の地震特性値を説明変数として、地震加速度波の波形特性の総合特性値である第1および第2主成分得点を目的変数として回帰分析を行う。

解析の結果、各表層地盤別に求められた回帰推定式の偏回帰係数を表-2に示す。また、表-3は各表層地盤における第1および第2主成分得点の重相関係数である。表-3をみると、岩盤と砂質地盤における重相関係

表-2 偏回帰係数

		Mg	E. D.	F. D.	(Const.)
		$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_0$
Rock	Z <sub>1</sub>	-0.831	-0.077	0.007	5.791
	Z <sub>2</sub>	1.638	0.003	-0.041	-6.722
Gravelly Ground	Z <sub>1</sub>	0.169	0.004	-0.013	-2.017
	Z <sub>2</sub>	0.783	0.003	-0.005	-4.368
Sandy Ground	Z <sub>1</sub>	1.263	0.020	-0.010	-7.632
	Z <sub>2</sub>	-1.005	-0.001	-0.003	-6.480
Silty or Clayly G.	Z <sub>1</sub>	0.038	0.023	-0.017	0.380
	Z <sub>2</sub>	1.020	-0.013	0.0003	-5.716

Mg.: マグニチュード E.D.: 震央距離 F.D.: 震源深さ

表-3 重回帰係数

	Rock	Gravelly Ground	Sandy Ground	Silty or Clayly G.
Z <sub>1</sub>	0.908	0.658	0.966	0.751
Z <sub>2</sub>	0.888	0.646	0.924	0.554

数は高いが、礫質地盤とシルト質地盤では重回帰係数は若干低く、重回帰分析の精度は少し落ちる。

### 5. 地震加速度波の統計的予測

#### (1) 予測の方法と手順

本節では、各地震加速度波のもつ主成分得点を仲立ちとして地震特性より地震加速度波を推定する方法について検討する。

前節の重回帰分析の結果、想定される地震に関する地震特性から建設予定地点での主成分得点が回帰推定できる。すなわち、各主成分の物理的意味より、想定される地震に対して建設予定地点での地震加速度波の「規模(Size)」と「形(Shape)」とが主成分得点によって定量的に予測できる。そこで、次に示されるような手順によって地震特性より地震加速度波を回帰推定することにする。

##### 手順-1 地震の想定

建設予定地点に影響が予想される地震の規模と位置を地震学的見地から想定する。この結果、地震特性(マグニチュード、震央距離および震源深さ)が想定される。

##### 手順-2 表層地盤の分類

建設予定地点における表層地盤が前節において分類した4種の地盤種別のどれに該当するかを検討し、決定する。

##### 手順-3 主成分得点の予測

地震特性を説明変数とする主成分得点の各表層地盤別回帰推定式の偏回帰係数は表-2に示されている。そこで、決定された表層地盤における重回帰推定式を用いて、想定された地震特性から建設予定地点の第1、第2主成分得点を予測する。主成分の物理的意味から、建設予定地点で予想される地震加速度波の「規模」と「形」

とが主成分得点によって定量的に予測されることになる。

##### 手順-4 地震加速度波の選択

第2主成分の物理的意味より、同じ第2主成分得点を有する2つの地震加速度波は互いにその「形」が類似していると考えられる。しかし、第1主成分得点がいれば、地震加速度波の「形」は類似していても、その「規模」は異なっていると考えられる。

さて、地震加速度波の主成分分析の結果、解析に用いられた各地震加速度波の主成分得点が求められている。そこで、第2主成分得点の予測値と同じ第2主成分得点を有する地震加速度波を選択する。

##### 手順-5 選択された地震加速度波の「規模」の調整

第2主成分得点に基づいて選択された地震加速度波のもつ第1主成分得点の予測値と異なっていれば、地震加速度波を「規模」に関して調整する必要が出てくる。

ここで、第1主成分得点の予測値による地震加速度波の調整方法が問題となる。本研究では次のような調整方法を用いることにする。

さて、地震特性値より求められた主成分得点の予測値は各波形特性値へ回帰することができる。すなわち、式(4)をマトリックスで表示すれば、

$$\tilde{Z} = \tilde{L} \cdot \tilde{X} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、

- $\tilde{Z}$ : 主成分マトリックス
- $\tilde{L}$ : 係数マトリックス
- $\tilde{X}$ : 波形特性マトリックス

したがって、式(6)より、

$$\tilde{X} = \tilde{L}^{-1} \cdot \tilde{Z} \dots \dots \dots (7)$$

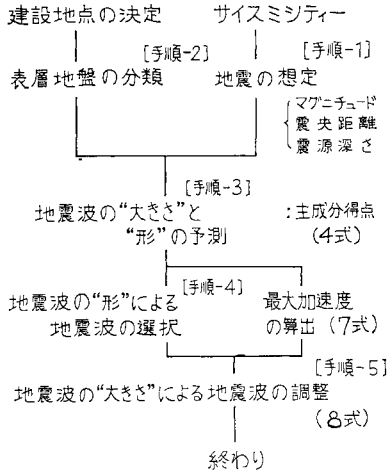
となり、第1主成分得点の予測値より波形特性値の予測値を求めることができる。そこで、式(7)を用いて絶対最大加速度と継続時間の予測値を求め、この2つの予測値で地震加速度波を調整することにする。具体的には、予測された絶対最大加速度をもつように振幅を増減させる。式で示せば、次式のようになる。

$$\ddot{y}'(t) = \frac{|\ddot{y}(t)|'_{\max}}{|\ddot{y}(t)|_{\max}} \times \ddot{y}(t) \dots \dots \dots (8)$$

ここで、

- $\ddot{y}'(t)$ : 調整された地震加速度
- $\ddot{y}(t)$ : 調整前の地震加速度
- $|\ddot{y}(t)|'_{\max}$ : 予測された絶対最大加速度
- $|\ddot{y}(t)|_{\max}$ : 調整前の地震加速度波の絶対最大値

この方法によれば、地震加速度の調整が簡単に行える。さらに、ゼロ・クロッシング数を除いた他の波形特性値(絶対平均加速度、全パワーおよび平均パワー)は地震加速度と継続時間の関数である。それゆえ、絶対最大加速度と継続時間で調整すれば、他の波形特性につい



図—4 予測の手順

でも、ある程度考慮したことになるであろう。すなわち、式 (8) を用いれば、第 1 主成分である波形の「規模」を調整できることを意味していよう。

さて、ゼロ・クロッシング数はその地震加速度波のもつ卓越振動数と関係づけられる。式 (8) を用いた調整方法ではゼロ・クロッシング数は変化しない。それゆえ、式 (8) を用いて波形を調整しても、地震加速度波の周波数特性をある程度まで表す第 2 主成分にそれほど影響を与えないであろう。以上に述べた予測方法の手順をフローチャートの形で 図—4 に示す。

(2) 数値計算例

前節に述べた予測方法を用いて、地震特性から地震加速度波を推定することを試みる。すなわち、東京に被害を及ぼすと思われる想定地震に対して、都内数箇所の建設地点を想定して、この地点における地震加速度波を推定してみるわけである。

a) 想定震源モデル

東京都防災会議の報告<sup>17)</sup>によれば、地震活動状況、空白域、活断層、活褶曲、活傾動の分布と規模などから、いわゆる「東京直下型地震」の震源として、9 地域が想定されている。本研究では、これら 9 地域のうちから、「東京・千葉県境地域 (震源深さ 40 km,  $M_g=6^{3/4}\sim 7$ )」を震源として選択して、建設地点における地震加速度を予測してみることにする。

過去の震災からいえば、この地域は明治 27 年 6 月東京地震の震源にあたると思われる。この地震の震源位置は「東経 139°54′, 北緯 35°42′」とされている<sup>18)</sup>。

そこで、数値計算に用いる震源モデルの震源位置は上記の震源位置と同一として、震源モデルの諸元を次のように仮定した。

○震央位置：東経 139°54′, 北緯 35°42′

表—4 想定された建設地点

	Surface Cond.	Site	Epicentral Dis.
1	Rock	—	—
2	Gravelly Ground	Shiba-kohen Minato-ku	21 Km
3	Sandy Ground	9-Chome Minamisuna-machi Koh-to-ku	16 Km
4	Silty or Clayly G.	6 Chome Ohshima Koh-to-ku	13 Km

表—5 予測された主成分得点

	First PCA. Score	Second PCA. Score
Gravelly Ground	-0.575	0.685
Sandy Ground	0.698	0.097
Silty or Clayly G.	0.586	0.751

PCA.=Principal Component Analysis

○震源深さ：20 km

○地震規模：マグニチュード=6.5

b) 建設地点

互いに異なる表層地盤<sup>19)</sup>をもつ都内の 3 地点を建設地点として想定した。このとき震央距離が統計解析に用いた地震加速度記録の標本集団がもつ最大値を超えないように選択した。表—4 に想定建設地点の具体的な位置と震央距離を示す。なお、都内に岩および岩質地盤を有する適当な地点が見当たらないので、この表層地盤における予測を行わないことにした。

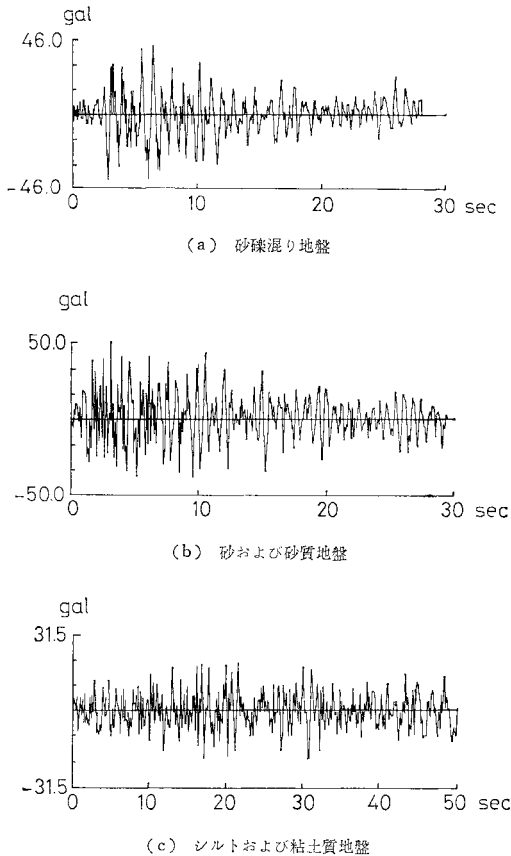
さて、想定された震源特性に対して、表—2 に与えられる係数をもつ算出式によって求められた第 1 および第 2 主成分得点の予測値を表—5 に示す。次に、第 2 主成分得点の予測値に応じて、標本集団より選択される。第 2 主成分得点の予測値と実測値はほぼ同じ大きさとなるように選択されているが、第 1 主成分得点の大きさは互いに異なる。したがって、式 (8) を用いて地震加速度を調整する必要がある。

まず、式 (7) を用いて、第 1 主成分得点より絶対最大加速度の予測値を求める。次に、第 2 主成分得点に応じて選択された地震加速度波が予測された絶対最大加速度をもつように、式 (8) を用いて調整する。

この結果、想定された震源モデルに対して、各建設地点で統計的に予測された地震加速度波が得られたことになる。各建設地点で予測される地震加速度波を図—5 に示す。

6. あとがき

本論文は想定される震源に対する、建設地点の地震動の性状を統計的に予想する方法について提案したもので



図一五 予測された地震加速度波形

ある。また、地震動の性状を定量的に評価する方法についても示している。

本論文の結論を要約すれば、以下のように示される。

(1) 地震動の性状を示す地震加速度波は、その波形特性の主成分分析によって、「規模 (Size)」と「形 (Shape)」という2つの総合的な特性値 (主成分) により定量的に表現される。

(2) この2つの総合特性値、(すなわち主成分得点) によって、各地震加速度波の相対的相違を定量的に評価することが可能となった。

(3) さらに、重回帰分析法を用いて、各地震加速度波のもつ主成分得点を仲立ちとして地震特性より地震加速度波を統計的に推定する方法を提案した。

(4) 数値計算例として、想定される震源に対して、表層地盤の異なる都内3か所における予想地震加速度波を推定した。

(5) なお、本研究で提案した統計的予測方法の精度は解析に用いる地震加速度波の標本集団の統計的特性に左右される。それゆえ、さらに種々のタイプの地震加速度波が収集されるならば、適用できる地震特性値の範囲と予測の精度はいっそう向上するであろう。

なお、本研究は第1著者である片田が武蔵工大在学中に、第2著者である星谷の指導のもとで行ったものである。

最後に、本研究の遂行にあたって、鹿島建設 草野直幹氏と清水建設 石井 清氏より数々の有益な助言をいただきました。ここに深謝する次第です。

#### 参考文献

- 1) 片山恒雄・岩崎敏雄・佐伯光昭：地震動加速度応答スペクトルの統計解析，土木学会論文報告集，No. 275，pp. 29~40，1978.7.
- 2) 河角 広：有史以来の地震活動より見たる我国各地の地震危険度及び最高震度の期待値 (英文)，Bulletin of the Earthquake Research Institute, Uni. of Tokyo, Vol. 29, pp. 469~482, 1951.
- 3) 河角 広：わが国における地震危険度の分布，建築雑誌，Vol. 66, No. 773, pp. 3~9, 1951.
- 4) 河角 広：わが国における地震危険度の分布，資源データ・ブック，第6号，1952.
- 5) Schnabel, P.B. and H.B. Seed: Accelerations in rock for earthquakes in the Western United States, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 63, pp. 501~506, 1973.
- 6) Tsuchida, H., T. Uwabe and S. Hayashi: Characteristics of base rock motions calculated from strong motion accelerograms, Proceeding of 5th W.C.E.E., Rome, pp. 716~726, 1973.
- 7) Housner, G.W.: Intensity of ground shaking near the causative fault, Proceeding of 3rd W.C.E.E., New Zealand, pp. 94~109, 1965.
- 8) Bolt, B.A.: Duration of a strong ground motion, Proceeding of 5th W.C.E.E., Rome, pp. 1304~1313, 1973.
- 9) Trifunac, M.D. and A.G. Brady: A study on the duration of strong earthquake ground motion, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 65, pp. 581~626, 1975.
- 10) 山原 浩：地震の振動特性を考慮した地震時の地動の推定 (その1)，建築学会論文報告集，No. 175, 1970.9.
- 11) 建設省土木研究所振動研究室：地震記録のデジタル数値その1~6，土木研究所資料.
- 12) 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正：多変量解析法，日科技連，1974.
- 13) 星谷 勝・片田敏行：地震加速度波形の特性に関する考察，第30回年次学術講演会概要集，I-154, 1975.10.
- 14) 星谷 勝・片田敏行：Quantitative classification of earthquake wave by principal component analysis, 第4回日本地震工学シンポジウム (1975), 1975.11.
- 15) 岡本舜三：耐震工学，オーム社，1971.
- 16) 土木学会編：地震応答解析と実例，1973.
- 17) 東京都防災会議：東京直下地震に関する調査研究 (その4) - 活断層および地震活動状況等に関する考察一，pp. 237, 1977.
- 18) 宇佐美龍夫：資料日本被害地震総覧，東大出版会，1975.3.
- 19) 建設省計画局・東京湾総合開発協議会：都市地盤調査報告書 (第17巻) - 東京湾周辺地帯の地盤 (資料編)，昭和44年3月31日.
- 20) 佐伯光昭・片山恒雄・岩崎敏男：わが国の地盤上で得られた加速度記録の特性，第32回年次学術講演会概要集，I-162, 1977.10.