

最大地震動および応答スペクトルの推定式に及ぼす 強震記録の水平 2 成分合成の影響

EFFECTS OF COMPOSITION OF TWO HORIZONTAL COMPONENTS ON
ATTENUATION OF MAXIMUM EARTHQUAKE GROUND MOTIONS
AND RESPONSE SPECTRA

川 島 一 彦*・相 沢 興**・高 橋 和 之***

By Kazuhiko KAWASHIMA, Koh AIZAWA and Kazuyuki TAKAHASHI

1. ま え が き

強震観測では、一般に 1 地点につき水平 2 成分、上下 1 成分、計 3 成分の加速度を測定する。ここで、水平 2 成分の向きは、構造物の動的挙動観測に重点を置く場合には、構造物の主軸方向とこれに直角方向にとる場合が多い。このようにして特定の地震により地盤上で観測された水平 2 成分の加速度記録を相互に比較すると、両者は同一地点で観測されたにもかかわらず非常に異なる場合が少なくない。わが国では一般に、水平 2 方向の地震力を独立に構造物に作用させて耐震計算を行っているため、強震計の記録方向とは異なった方向の水平成分が構造物に大きな応答を与える可能性があるとするれば、その程度を把握しておくことが必要とされる。

1 地点における地震動の方向性に関しては、Penzien, 渡部, Kubo^{7),8)}, 星谷ら⁹⁾, 北川¹⁰⁾らの研究がある。これらは地震動を主軸に対するベクトルととらえ主軸に沿った地震動は統計的に独立であるとして、主軸方向の 3 方向入力を独立に与えようとするものである。しかし、地震動の特性は、震源域における地震動の特性、震源から観測地点に至る伝播特性、観測地点周辺の局所的な地形・地盤条件等に支配されるとされ²⁾、これらの因子を定量的に分析できる手法は現在まだ開発途上にある。

これに対して、1 地点の水平加速度の応答スペクトルが方向別にどのように異なるかを扱ったものに片山の研究¹¹⁾がある。片山は 1968 年十勝沖地震の本震と余震による各 3 か所、合計 6 個の強震記録を用いて方向別の応答レベルの検討をし、方向による応答値の最大・最小は平均値を基準として ±20% 程度ばらつくことを指摘し

ている。また、土岐¹²⁾はカリフォルニアで観測された最大加速度が 60~70 gal 以上の強震記録をもとに、水平 1 成分の最大加速度 X とその値を示す時刻における直交成分の加速度振幅 Y から、両成分の合成を近似的に $\sqrt{X^2+Y^2}$ で与えた場合に、合成の影響を $\sqrt{X^2+Y^2}/X$ により検討している。この結果、 $\sqrt{X^2+Y^2}/X$ は 1.0~ $\sqrt{2}$ の範囲に収まり、平均値は 1.06 であると報告している。これらの研究は、方向別の最大加速度および応答スペクトルを知るうえで貴重なものであるが、比較的少数の観測点で少数の地震により得られた記録に基づいているため、一般的な指標とみなし得るかどうかに関しては検討の余地を残している。

本小文は、以上の観点から、強震計で観測された水平 2 成分の加速度記録を水平面内で合成した場合に、加速度およびこれから求めた速度、変位、さらに加速度応答スペクトルが方向別にどの程度のばらつきで変化するかをわが国の地盤上で得られた多数の強震記録をもとに検討したものである。検討の主眼は、水平 2 成分の合成による最大加速度、最大速度、最大変位の増加率および加速度応答スペクトルの増加率とした。

2. 水平 2 成分の合成と合成の影響度の定義

強震計の感振方向に相当する水平 2 成分の直交座標軸を X, Y とし、これを水平面内で図-1 のように任意の角度 θ だけ回転した座標軸を x, y とすれば、両者の関係は次式で与えられる。

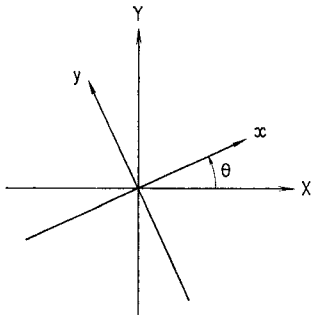
$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

いま、 X および Y 軸に沿う加速度をそれぞれ $a^X(t)$, $a^Y(t)$ とし、 $a^X(t)$, $a^Y(t)$ の最大値をそれぞれ a^X_{\max} , a^Y_{\max} とする。 $a^X(t)$, $a^Y(t)$ を式 (1) により座標変換し、合成すると、 x および y 軸に沿う加速度 $a^x(\theta, t)$,

* 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

** 正会員 建設省土木研究所地震防災部振動研究室

*** 正会員 建設省土木研究所地震防災部振動研究室



X, Y ----- AXES OF OBSERVATION
 x, y ----- TRANSFORMED AXES
 θ ----- ANGLE OF ROTATION

図-1 水平面内における座標軸の回転

$a^y(\theta, t)$ が得られる。

ここで、 $a^x(\theta, t)$ と $a^x(t)$, $a^y(t)$ の間には、

$$\left. \begin{aligned} a^x(t) &= a^x(0, t) \\ a^y(t) &= a^x\left(\frac{\pi}{2}, t\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

の関係があるから、 θ の範囲を $0 \sim 2\pi$ とすれば $a^x(\theta, t)$ のみで座標変換後の加速度を表わすことができる。

$a^x(\theta, t)$ の時間軸における最大加速度を

\bar{a}^0_{\max} (絶対値をとる)、これを種々の θ に対して計算した場合に最大となる加速度を \bar{a}_{\max} とする。すなわち

$$\bar{a}_{\max} = \max\{\bar{a}^0_{\max}(\theta)\} \text{ for } \theta \dots\dots\dots (3)$$

ここで

$$\bar{a}^0_{\max}(\theta) = \max\{|a^x(\theta, t)|\} \text{ for } t \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\max\{f(z_1, z_2)\}$ for z_1 は z_1 を変化させた場合の関数 $f(z_1, z_2)$ の最大値を示す。また、強震計により記録された水平2成分の最大加速度(絶対値) a^X_{\max} , a^Y_{\max} のうち、いずれか大きい方を a_{\max} とし、次式により座標変換に伴う最大加速度の増加率 r_a を定義する。

$$r_a \equiv \bar{a}_{\max}/a_{\max} \dots\dots\dots (5)$$

速度および変位についても同様に、最大速度、最大変位の増加率 r_v , r_d を定義することができる。

$$r_v \equiv \bar{v}_{\max}/v_{\max} \dots\dots\dots (6)$$

$$r_d \equiv \bar{d}_{\max}/d_{\max} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 \bar{v}_{\max} , \bar{d}_{\max} はそれぞれ速度 $v^x(\theta, t)$ および変位 $d^x(\theta, t)$ において θ および t を種々変化させた場合の最大値(絶対値)であり、 v_{\max} , d_{\max} は X, Y 水平2成分に沿う速度および変位の最大値(絶対値)のうち、いずれか大きい方である。

また、応答スペクトルレベルの変化を検討するために、 $a^x(\theta, t)$ に対する減衰定数 5% の加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A(\theta, T)$ および加速度応答スペクトル倍率 $\tilde{\beta}(\theta, T)$ を求めた。ここで、 T は固有周期であり、 $\tilde{S}_A(\theta, T)$ と $\tilde{\beta}(\theta, T)$ の間には次の関係がある。

$$\tilde{S}_A(\theta, T) = \tilde{\beta}(\theta, T) \times \bar{a}^0_{\max}(\theta) \dots\dots\dots (8)$$

いま、 $\tilde{S}_A(\theta, T)$ および $\tilde{\beta}(\theta, T)$ を種々の θ に対して計算し、各固有周期ごとに求めた最大値をそれぞれ $\tilde{S}_A(T)$, $\tilde{\beta}(T)$ 、最小値をそれぞれ $\tilde{S}_{A\min}(T)$, $\tilde{\beta}_{\min}(T)$ とする。一方、強震計により観測した $a^x(t)$ および

$a^y(t)$ の加速度応答スペクトルをそれぞれ $S_A^X(T)$, $S_A^Y(T)$ 、また、加速度応答スペクトル倍率をそれぞれ $\beta^X(T)$, $\beta^Y(T)$ とし、次式により加速度応答スペクトルおよび加速度応答スペクトル倍率の増加率 $r_{SA}(T)$ および $r_{\beta}(T)$ を定義する。

$$r_{SA}(T) \equiv \tilde{S}_A(T)/S_A(T) \dots\dots\dots (9)$$

$$r_{\beta}(T) \equiv \tilde{\beta}(T)/\beta(T) \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

$$S_A(T) : \int_{0.1}^3 S_A^X(T) dT \text{ および } \int_{0.1}^3 S_A^Y(T) dT$$

のうち、いずれか大きい方の成分の加速度応答スペクトル

$$\beta(T) : \int_{0.1}^3 \beta^X(T) dT \text{ および } \int_{0.1}^3 \beta^Y(T) dT$$

のうち、いずれか大きい方の成分の加速度応答スペクトル倍率

ここで、スペクトル強度の大きい成分のスペクトルを用いて応答スペクトルの増加率を求めたのは、一般に地震応答解析等では水平2成分のうちスペクトル強度の大きい成分が入力地震動として利用される場合が多いことを考慮したためである。また、固有周期の範囲を 0.1~3 秒としたのは大部分の構造物の固有周期がこの範囲に入ることを考慮したものである。

3. 解析に用いた強震記録

解析対象としたのは表-1 に示す 43 地点(地盤上)において建設省土木研究所により観測、数値化された 103 記録(2@103 成分)である¹⁾。これらは合計 49 回の地震により SMAC 型強震計(SMAC-B2, Q, D, E2)により得られたものであり、数値化精度¹³⁾を考慮して次式により短周期の計器補正を加えるとともに、速度および変位を計算した¹⁴⁾。すなわち、いま、強震計による加速度記録を $a_0(t)$ とすれば、このフーリエ変換

表-1 解析に用いた地震記録の観測地点

No.	観測点	No.	観測点	No.	観測点
1	新葛飾橋	16	妙見橋	31	浜名大橋
2	米山大橋	17	板橋	32	境川橋
3	新利根川橋	18	平井大橋	33	苑久保橋
4	真崎大橋	19	豊浜大橋	34	中央鶴川橋
5	草加高架橋	20	四徳大橋	35	東名酒匂川橋
6	大平大橋	21	富津岬	36	一の橋高架橋
7	紀ノ川大橋	22	鶴音崎	37	羽田海底トンネル
8	魚沼橋	23	裾花ダム	38	千代田大橋
9	横倉沢橋	24	三保ダム	39	新石狩大橋
10	新八幡橋	25	旧土研千葉支所	40	大湊毛橋
11	石瀬戸橋	26	西新井橋	41	俣尾橋
12	小見川橋	27	新天竜川	42	利根川河口堰
13	雄平橋	28	落合橋(橋脚近傍)	43	落合橋(出張所)
14	開北橋	29	旧土研鹿島試験所		
15	伊達橋	30	平大橋		

$F_0(f)$ は

$$F_0(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a_0(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad \dots\dots\dots(11)$$

と求められる。これに強震計の特性によるフィルター $F_c(f)$ を見込み、補正した加速度 $a(t)$ 、速度 $v(t)$ 、変位 $d(t)$ を次式で求める¹⁸⁾。

$$a(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{2\pi i f t} df \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$v(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(f)}{2\pi i f} e^{2\pi i f t} df \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$d(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(f)}{-4\pi^2 f^2} e^{2\pi i f t} df \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここで、

$$F(f) = F_0(f) \cdot F_c(f) \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$F_c(f) = \begin{cases} 0 & \dots\dots\dots 0 \leq f < f_{lu} \\ \frac{f-f_{lu}}{f_{lu}-f_{ll}} \cdot \frac{e^{i\phi(f)}}{R(f)} & \dots\dots\dots f_{ll} \leq f \leq f_{lu} \\ \frac{e^{i\phi(f)}}{R(f)} & \dots\dots\dots f_{lu} \leq f \leq f_{ul} \\ \frac{f_{uu}-f}{f_{uu}-f_{ul}} \cdot \frac{e^{i\phi(f)}}{R(f)} & \dots\dots\dots f_{ul} \leq f \leq f_{uu} \\ 0 & \dots\dots\dots f > f_{uu} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(16)$$

ここで、 f_{lu} および f_{ul} はそれぞれ低振動数側および高振動数側の遮断振動数であり、 f_{ll} および f_{uu} はそれぞれ f_{lu} および f_{ul} に対応する補正フィルター倍率が0となる振動数である。また、振幅および位相の補正係数 $R(f)$ および $\phi(f)$ は SMAC 型強震計に用いられている空気減衰器の空気がばねとして作用する効果を考慮した^{14), 16), 17)}。 f_{lu} および f_{ul} は数値化の精度を考慮してそれぞれ 1/3 Hz, 12 Hz とした。

以上のようにして求めた 103 記録の \bar{a}_{max} , \bar{v}_{max} , \bar{d}_{max} の頻度を示すと図-2 のようになり、 \bar{a}_{max} , \bar{v}_{max} , \bar{d}_{max} は、それぞれ、150 gal 以下、12 cm/s 以下、1.5 cm 以下の記録数が多い。地震のマグニチュードを震央距離および対象記録の数量別に分類すると図-3 のとおりである。これによれば、マグニチュード 5~6.5 程度の地震による記録が多いが、一部には 7~8 の記録も含まれている。ただし、大規模な地震による近距離の記録は含まれていない。

4. 板島橋記録に対する試算例

上述した水平2成分の合成効果を具体的に検討するた

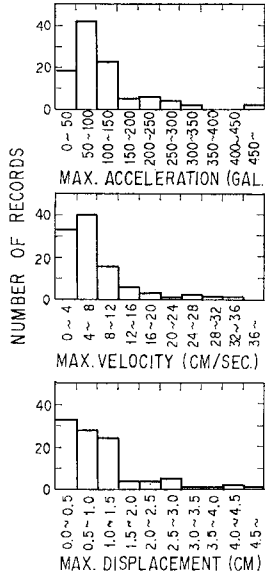


図-2 最大加速度、最大速度、最大変位の分布

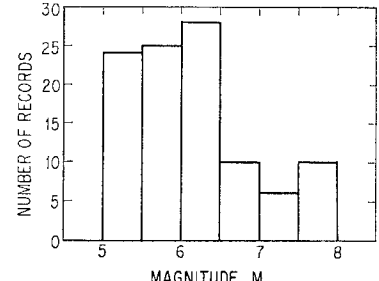
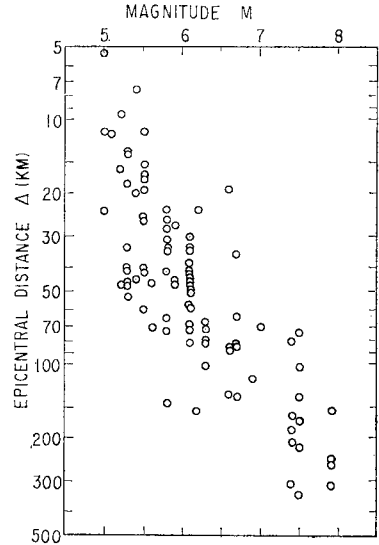


図-3 解析対象記録のマグニチュードおよび震央距離別分類

め、103 記録のうちから任意に1記録を選び、 $r_a, r_v, r_d, r_{SA}, r_\beta$ 等を計算した。対象としたのは、1968年4月1日の日向灘沖地震 ($M=7.5$) により愛媛県宇和島市の板島橋近傍地盤上で観測された記録である¹⁹⁾。この場合には本橋までの震央距離は約 100 km であった。

図-4 は式 (1) による x 軸に沿う加速度 $a^x(\theta, t)$ を $\theta=0, \pi/6, \pi/3, \pi/2$ に対して示したものである。ここで式 (2) に示したように、 $a(0, t)$ および $a(\pi/2, t)$ が実際に強震計で観測されたそれぞれ、橋軸方向および橋軸直角方向成分である。

$a^x(\theta, t)$ および $d^x(\theta, t)$ を $\theta=0 \sim 2\pi$ の範囲で5度間隔に計算し、これらの方向別の最大値を示すと図-5 のようになる。これより、式 (5) および (7) で定義した r_a, r_d を求めるとそれぞれ 1.09, 1.10 となる。ここでは $v^x(\theta, t)$ は示していないが、同様にして、 r_v は 1.19 と求められる。

次に、 $a^x(\theta, t)$ に対する加速度応答スペクトルおよび加速度応答スペクトル倍率を求めた。図-6 は $\tilde{S}_A(T), \tilde{S}_{Amin}, \tilde{\beta}(T), \tilde{\beta}_{min}(T)$ と $S_A^X(T), S_A^Y(T), \beta^X(T), \beta^Y(T)$ の関係を示したものである。板島橋記録の場合には式 (9), (10) で定義した $S_A(T)$ および $\beta(T)$ は

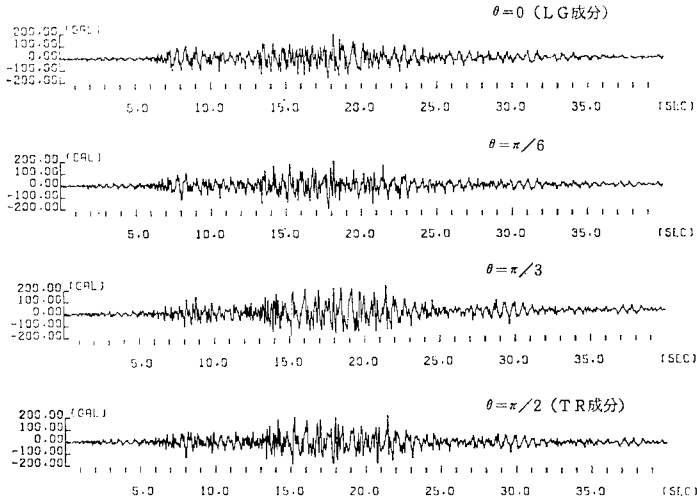


図-4 板島橋近傍地盤上の加速度強震記録 (1968年4月1日の日向灘沖地震による) をもとにした $a^x(\theta, t)$ の試算例

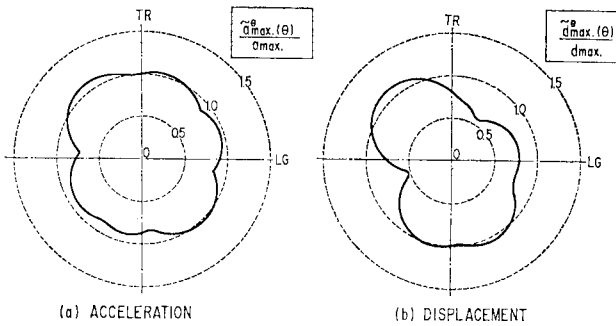


図-5 板島橋近傍地盤上の強震記録 (1968年4月1日の日向灘沖地震による) をもとにした方向別の加速度および変位の試算例

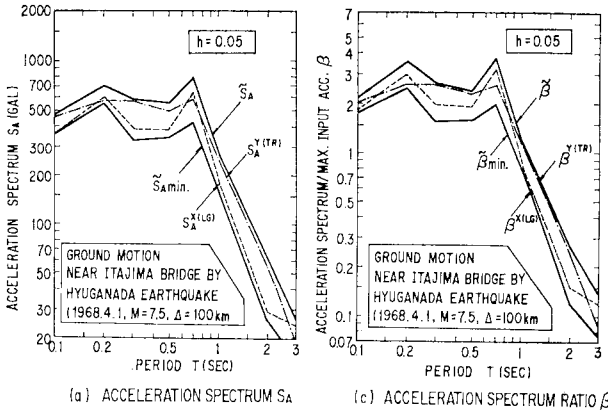


図-6 板島橋近傍地盤上の強震記録 (1968年4月1日の日向灘沖地震による) をもとにした S_A スペクトルおよび β スペクトルの試算例

それぞれ $S_A^Y(T)$ および $\beta^Y(T)$ (ともに、橋軸直角方向成分) となり、これをもとに $r_{SA}(T)$ および $r_\beta(T)$ を求めると図-7 のようになる。これによれば、 $r_{SA}(T)$

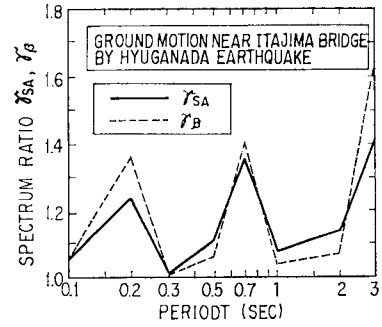


図-7 板島橋近傍地盤上の強震記録 (1968年4月1日の日向灘沖地震による) をもとにした r_{SA} および r_β の試算

と $r_\beta(T)$ は全体として似かよっており、両者は固有周期が 0.2 秒、0.7 秒、3 秒付近で大きく、最大 1.2~1.4 程度の値となっている。

5. 最大地震動に対する水平 2 成分合成の影響

前章に示した板島橋記録に対する試算例と同じ手法により 103 記録に対する r_a, r_v, r_d を求め、その頻度分布を示すと 図-8 のようになる。X 軸と Y 軸の地震動が同じ時刻に同一値で最大となれば、それらのベクトル和はその最大値の $\sqrt{2}$ となるため、 r_a, r_v, r_d の最大値は当然ながらいずれも $\sqrt{2}$ である。図-8 によれば、 r_a, r_v, r_d はともに 1.0 に近いものが一番多く、これらの値が大きくなるに従って頻度は急激に減少する。

表-2 加速度、速度および変位の増加率 r_a, r_v, r_d の平均と標準偏差

	平均値	標準偏差
r_a	1.086	0.079
r_v	1.083	0.089
r_d	1.077	0.075

r_d の平均値および標準偏差は表-2 に示すとおりであり、3 者とも平均値は 1.08、標準偏差は 0.08 程度である。

図-9 は r_a, r_v, r_d と震央距離の関係を地震のマグニチュード別に示したものである。これによれば、 r_a, r_v, r_d とマグニチュードおよび震央距離の間には、今回解析に用いたデータの範囲では特に明瞭な相関関係は認められない。

次に、式 (5)~(7) の $a_{max}, v_{max}, d_{max}$ および $\bar{a}_{max}, \bar{v}_{max}, \bar{d}_{max}$ の距離減衰を地震のマグニチュード M 別に示すとそれぞれ、図-10, 11 となる。ここで、図中の実線は後述する重回帰分析による理論距

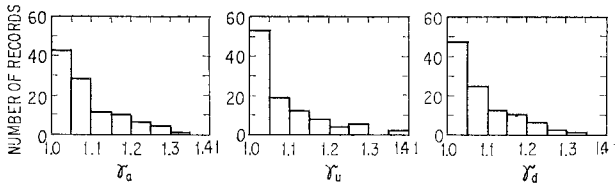


図-8 加速度，速度および変位の増加率 ($\gamma_a, \gamma_v, \gamma_d$) の頻度分布

表-3 最大地震動の重回帰推定式

	水平2成分のいずれか大きい方		水平面内で合成した最大成分	
	推定式	重回帰係数	推定式	重回帰係数
加速度	$a_{max} = 24.3 \times 10^{0.268M} \times \Delta^{-0.659}$	0.52	$\tilde{a}_{max} = 27.7 \times 10^{0.267M} \times \Delta^{-0.669}$	0.53
速度	$v_{max} = 0.49 \times 10^{0.327M} \times \Delta^{-0.576}$	0.48	$\tilde{v}_{max} = 0.54 \times 10^{0.322M} \times \Delta^{-0.564}$	0.47
変位	$d_{max} = 0.022 \times 10^{0.369M} \times \Delta^{-0.512}$	0.52	$\tilde{d}_{max} = 0.022 \times 10^{0.364M} \times \Delta^{-0.513}$	0.53

離減衰曲線である。これによれば，最大地震動はおおむね距離の増加とともに減少し，また， M が大きくなるにつれて大きくなる傾向がある。そこでいま，図-10 および 図-11 の距離減衰を地震の M および震央距離 Δ を変数とした重回帰分析により求めることとし，距離減衰を次式により仮定した^{5), 6)}。

$$GM = a \times 10^{bM} \times \Delta^c \dots \dots \dots (17)$$

ここで， GM は $a_{max}, v_{max}, d_{max}, \tilde{a}_{max}, \tilde{v}_{max}, \tilde{d}_{max}$ を表わしている。

この結果求められた距離減衰式は表-3 に示すようになる。これにより， $M=5, 6, 7, 8$ に対する最大加速度，速度，変位の距離減衰を示すと 図-10 および 図-11 の実線のようになる。

加速度の距離減衰式を例にとり水平2成分合成の影響を検討すると次のようになる。すなわち，表-3 から， \tilde{a}_{max} と a_{max} の比は

$$\frac{\tilde{a}_{max}}{a_{max}} = \frac{27.67 \times 10^{0.267M} \times \Delta^{-0.669}}{24.27 \times 10^{0.268M} \times \Delta^{-0.659}} = 1.14 \times 10^{-0.001M} \times \Delta^{-0.01} \dots \dots \dots (18)$$

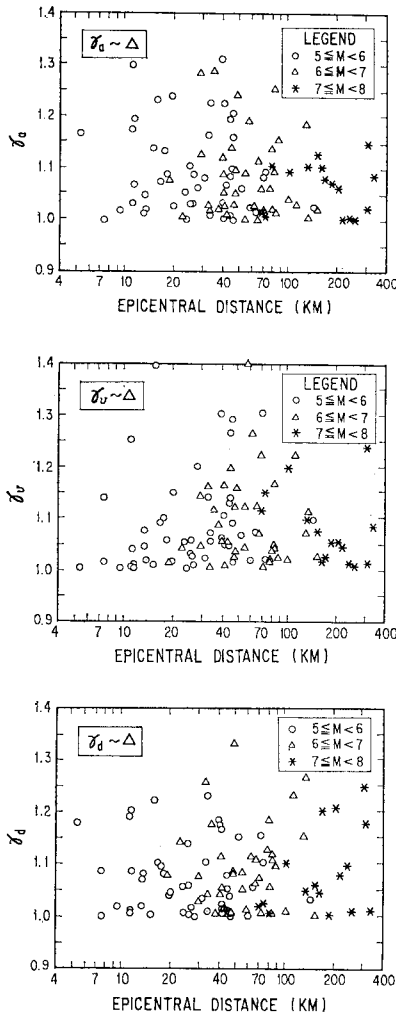


図-9 加速度，速度および変位の増加率 $\gamma_a, \gamma_v, \gamma_d$ と震央距離およびマグニチュードの関係

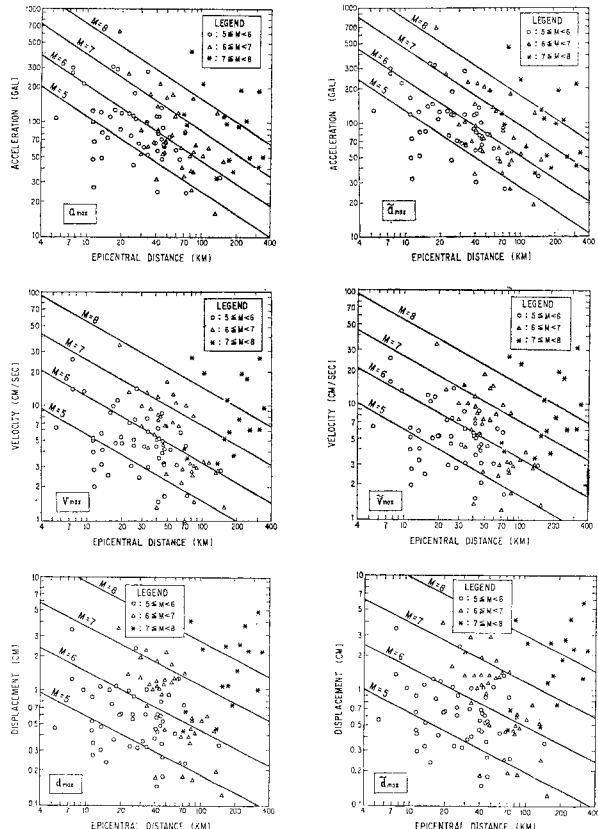


図-10 $a_{max}, v_{max}, d_{max}$ の距離減衰

図-11 $\tilde{a}_{max}, \tilde{v}_{max}, \tilde{d}_{max}$ の距離減衰

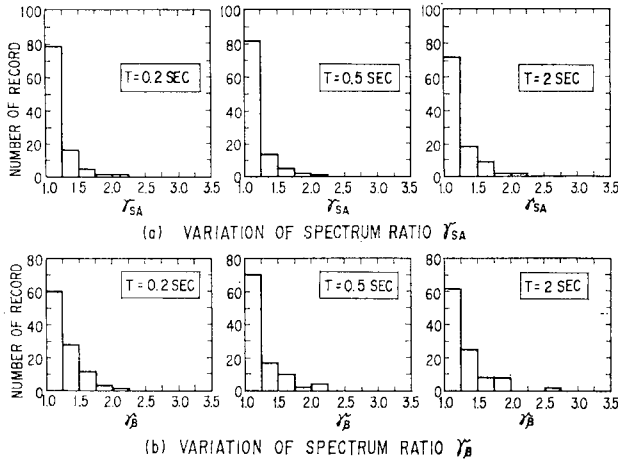


図-12 S_A スペクトルおよび β スペクトルの増加率 γ_{SA} , γ_{β} の頻度分布

となり、 \bar{a}_{max}/a_{max} は M にはほとんど影響されず、わずかに Δ に逆比例する。表-2 に示したように実測加速度の増加率 $\tau_a = \bar{a}_{max}/a_{max}$ (式 (5)) は平均 1.08 であり、式 (18) の定数項 1.14 よりも小さい。これは、 Δ の項の影響であり、たとえば式 (18) で $\Delta=100$ km および 300 km とした場合の \bar{a}_{max}/a_{max} を求めるとそれぞれ 1.09 および 1.08 となり表-2 の τ_a と矛盾しない。

6. 加速度応答スペクトルに対する水平 2 成分合成の影響

103 記録に対する γ_{SA} , γ_{β} の頻度分布を主要な固有周期 T に対して求めると 図-12 のようになる。 τ_a , τ_v , τ_d の場合には前述したように、水平 2 成分のベクトル和を求めているため上限値が $\sqrt{2}$ であったが、 γ_{SA} , γ_{β} の場合にはこのほかに地震動の周期成分の違いが反映されるため、理論上上限はない。ただし、図-12 の結果では、 γ_{SA} , γ_{β} の最大値はそれぞれ 2.25, 2.75 となっている。また、固有周期別に γ_{SA} および γ_{β} の平均値と標準偏差を求めると 図-13 のようになる。固有周期により値は多少異なるが、固有周期が 0.1~3 秒の間を平均すると γ_{SA} については平均値 1.17, 標準偏差 0.22 程度、 γ_{β} については平均値 1.27, 標準偏差 0.27 程度となる。

また、 γ_{SA} , γ_{β} に対する震央距離およびマグニチュードの影響を主要な固有周期に対して示すと 図-14 のようになり、図-9 に示した τ_a , τ_v , τ_d の場合と同様、 M および Δ の間に特に明瞭な関係は認められない。

次に、式 (9), (10) の $\hat{S}_A(T)$ および $\hat{\beta}(T)$ の距離減衰を主要な固有周期に対して地震のマグニチュード M 別に示すとそれぞれ 図-15, 16 のようになる。こ

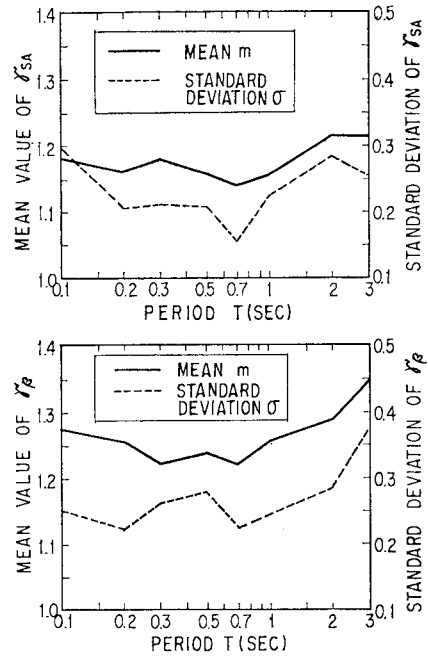


図-13 固有周期別の S_A スペクトルおよび β スペクトルの増加率 γ_{SA} , γ_{β} の平均値と標準偏差

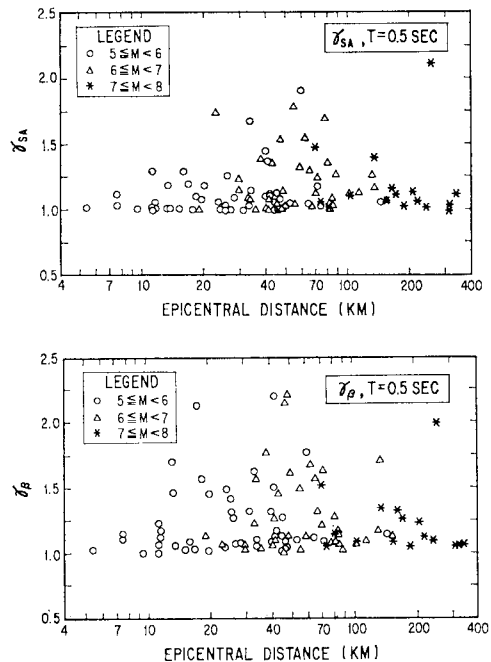


図-14 S_A スペクトルおよび β スペクトルの増加率 γ_{SA} , γ_{β} と震央距離およびマグニチュードの関係

こで、図-15 中の実線は後述する重回帰式による理論距離減衰曲線である。これによれば、 $\hat{S}_A(T)$ はいずれの固有周期の場合にも全体として距離の増加とともに減

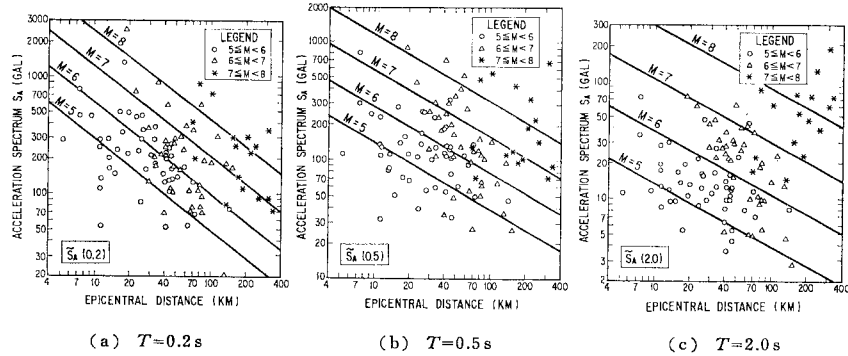


図-15 \tilde{S}_A の距離減衰

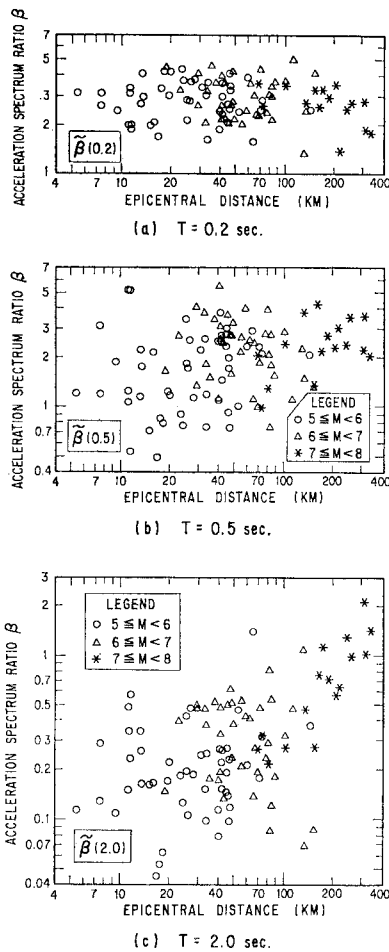


図-16 $\tilde{\beta}$ の距離減衰

少し、 M が大きくなるにつれて大きくなる傾向がある。これに対して、 $\tilde{\beta}(T)$ は固有周期が 0.2 秒の場合には、距離および M との間にはっきりした相関をもたないようにみえる。また、固有周期が 2 秒の場合には、一般に距離が大きくなるにつれて $\tilde{\beta}(T)$ も大きくなる傾向がある。ただし、図-3 に示したように、解析に用いた地震記録自体が遠距離のものは M の大きな地震による記

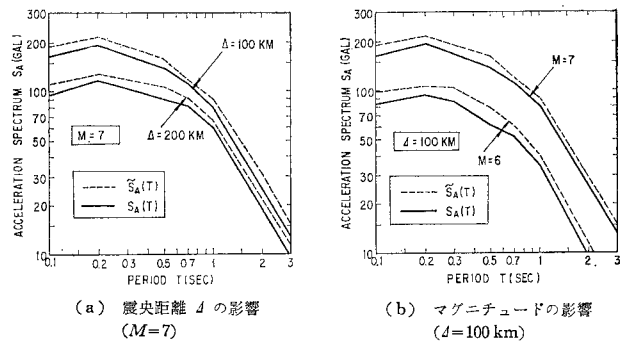


図-17 重回帰分析結果に基づく $\tilde{S}_A(T)$ と $S_A(T)$ の比較

表-4 加速度応答スペクトルの重回帰推定式

固有周期 T [秒]	\tilde{S}_A				S_A			
	a	b	c	重相関係数	a	b	c	重相関係数
0.1	69.3	0.284	-0.777	0.53	58.9	0.291	-0.796	0.53
0.2	46.7	0.318	-0.781	0.54	39.6	0.307	-0.732	0.49
0.3	57.2	0.264	-0.664	0.50	38.6	0.287	-0.687	0.49
0.5	16.3	0.308	-0.582	0.43	15.2	0.313	-0.615	0.44
0.7	5.55	0.334	-0.485	0.44	5.09	0.333	-0.491	0.44
1	2.18	0.358	-0.445	0.45	1.77	0.363	-0.441	0.45
2	0.26	0.450	-0.533	0.61	0.26	0.425	-0.490	0.56
3	0.11	0.461	-0.543	0.63	0.10	0.441	-0.489	0.60

(注) a, b, c は式 (17) の係数

録である点を考えると、これは M による影響とも考えられる。スペクトル特性そのものは今回の検討の主目的ではないので、このような点に関しては今後さらに詳細な検討を加えたい。

いま、図-15 に示した $\tilde{S}_A(T)$ とこのもととなった $S_A(T)$ の距離減衰を地震の M および震央距離 Δ を変数とした重回帰分析により求めることとし、回帰式として前述の式 (17) を仮定すると、表-4 のようになる。重回帰式による $M=5, 6, 7, 8$ に対する $\tilde{S}_A(T)$ の値は図-15 に実線で示したとおりである。また、主要な M および Δ に対して重回帰式に基づく $\tilde{S}_A(T)$ と $S_A(T)$ の比較の一例を図-17 に示す。全体としては $\tilde{S}_A(T)$ と $S_A(T)$ の間には図-13 に示した γ_{SA} の平均値程度の違いがあることがわかる。

7. 結 論

強震計で観測された水平2成分の加速度記録は、水平面内における互いに直交する任意の2方向の加速度を表わすにすぎない。したがって、このほかの方向においては当然地震動の特性は異なるという認識のもとに、式(5)~(7), (9), (10)により水平2成分を合成した最大加速度 \bar{a}_{\max} , 最大速度 \bar{v}_{\max} , 最大変位 \bar{d}_{\max} および減衰定数5%の加速度応答スペクトル $\bar{S}_A(T)$, 加速度応答スペクトル倍率 $\bar{\beta}(T)$ の増加率をわが国の地盤上で観測された103記録をもとに検討した。本検討により得られた結論は以下のとおりである。

(1) 水平2成分を合成することによる最大加速度, 最大速度, 最大変位の増加率 r_a, r_v, r_d の頻度は1.0に近いものが一番多く, これらの値が大きくなるに従い指数関数的に減少する(ただし, r_a, r_v, r_d の最大は $\sqrt{2}$ である)。 r_a, r_v, r_d の平均および標準偏差は表-2に示すとおりであり, 3者とも平均値は1.08, 標準偏差は0.08程度である。

(2) 今回解析対象とした103記録の範囲では, r_a, r_v, r_d は震央距離および地震のマグニチュードとはっきりした相関をもたない。

(3) $\bar{a}_{\max}, \bar{v}_{\max}, \bar{d}_{\max}$ の距離減衰式を地震のマグニチュード M および震央距離 Δ を変数とする重回帰分析により求めると表-3のようになる。これらを, それぞれ, $a_{\max}, v_{\max}, d_{\max}$ に対して重回帰分析より求めた距離減衰式と比較すると, いずれの場合にも全体として8%程度大きくなり, これは上記(1)と一致している。

(4) 水平2成分を合成することによる減衰定数5%の加速度応答スペクトル $S_A(T)$ および加速度応答スペクトル倍率 $\beta(T)$ の増加率 r_{SA}, r_β の頻度は上記(1)と同様に1.0に近いものが一番多く, r_{SA}, r_β が大きくなるにつれ指数関数的に減少する。ただし, r_a, r_v, r_d と違い, r_{SA}, r_β の最大値は $\sqrt{2}$ 以上となり, 今回対象とした記録の中では r_{SA}, r_β の最大値はそれぞれ2.25, 2.75であった。また, r_{SA}, r_β の平均および標準偏差は図-14のようになる。固有周期により多少異なるが, 固有周期0.1~3秒の間を平均すれば, 平均および標準偏差は r_{SA} についてはそれぞれ1.17, 0.22程度, r_β についてはそれぞれ1.27, 0.27程度となる。

(5) $\bar{S}_A(T)$ の距離減衰式を(3)と同様に地震のマグニチュード M および震央距離 Δ を変数とする重回帰分析により求めると表-4のようになる。これを $S_A(T)$ に対して重回帰分析より求めた距離減衰式と比較すると全体として12%程度大きくなる。

(6) 上記(3)および(5)の重回帰分析から求めた最大加速度, 速度, 変位および加速度応答スペクトルの距離減衰式の精度は, これらの相関係数が全体としてやや低いことから必ずしも十分ではない。今後, こうした点を検討し, 地盤条件の判別等も加えて実用的な距離減衰の推定式を開発していきたい。

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, 土木研究所叢報, No. 1~No. 7, Vol. 32~38.
- 2) Strong-Motion Earthquake Instrument Arrays, Proc. of the International Workshop on Strong-Motion Earthquake Instrument Arrays, May 1978, Honolulu, Hawaii.
- 3) 片山恒雄・岩崎敏男・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, 第275号, 1978.
- 4) 岩崎敏男・川島一彦・高木義和: 地震応答スペクトルの統計解析, 土木技術資料, Vol. 21-8, 1979.
- 5) 建設省土木研究所: 新耐震設計法(案), 総合技術開発プロジェクト新耐震設計法の開発研究報告書, 土木研究所資料, 第1185号, 1977.
- 6) 建設省土木研究所: 昭和51年度総合技術開発プロジェクト・耐震技術に関する研究開発報告書, 土木研究所資料, 第1250号, 1977.
- 7) Penzien, J. and M. Watabe: Characteristics of 3-Dimensional Earthquake Ground Motions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, 1975.
- 8) Kubo, T. and J. Penzien: Characteristics of 3-Dimensional Ground Motions Along Principal Axes, San Fernando Earthquake, 6th WCEE, New Delhi India, 1977.
- 9) 星谷 勝・磯山龍二: 多次元非定常確率過程による地震動のシミュレーション, 土木学会論文報告集, 第269号, 1978.
- 10) 北川良和: 地震動の方向性と地盤特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1978.
- 11) 片山恒雄: 応答スペクトルによる強震動の方向性の検討, 第11回土木学会地震工学研究発表会講演概要, 1971.
- 12) 土岐憲三: 構造物の耐震解析, 土木学会, p. 37, 1981.
- 13) 川島一彦・高木義和・相沢 興: デジタル化によるSMAC型強震計記録の数値化精度, 土木学会論文報告集, 第323号, 1982.
- 14) 川島一彦・高木義和・相沢 興: 数値化精度を考慮したSMAC-B2型強震計記録の計器補正法および変位計算法, 土木学会論文報告集, 第325号, 1982.
- 15) 岩崎敏男・川島一彦・若林 進・高木義和: 地震応答スペクトルに及ぼすSMAC型強震計特性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第309号, 1981.
- 16) 後藤健一: SMAC型強震計の短周期特性, 地震学会講演集, 1979.
- 17) 萩原尊礼: 振動測定, 宝文館, 1951.
- 18) 後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太・今西直人: デジタルフィルタによるSMAC-B2型加速度記録の補正について, 土木学会論文報告集, 第277号, 昭和53年.
- 19) 岩崎敏男・川島一彦・高木義和: 強震記録を用いた道路橋井筒ケーソン橋脚の地震応答解析, 土木学会論文報告集, 第293号, 1980.
- 20) 川島一彦・相沢 興・高橋和之: 地震動の最大水平地動に及ぼす方向性の検討, 第9回土木学会関東支部研究発表会概要集, 1982.

(1982.1.12・受付)