

土 木 研 究 所 資 料

最大地震動および地震応答スペクトルの推定法

——(その6)上下方向の最大地震動および加速度
応答スペクトルの距離減衰式——

昭和58年12月

建設省土木研究所
地震防災部振動研究室

Copyright © 1983 fiscal year by P.W.R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor transland into a machine language without the written permission of the Director of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。
したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ま え が き

公共土木施設を合理的に耐震設計するとともに各種地震防災上の措置を講じるためには、建設地点等の当該着目地点周辺で期待される地震動の強度および特性を正しく予測することが必要とされる。地震動の特性は、地震の規模、震源からの距離、当該着目地点周辺の地形・地盤条件等種々の要因によって複雑に変化することが現在までの強震観測の結果から明らかにされている。このような点を考慮し得る水平方向の最大地震動（最大加速度、最大速度、最大変位）および加速度応答スペクトルの距離減衰式に関しては、前報告（土研資料1993号）で実用的な予測式を提案した。本報告は、水平方向の最大地震動および加速度応答スペクトルに対する距離減衰を求めた手法と同様の手法を用いて、上下方向の最大地震動および加速度応答スペクトルに対する距離減衰式を求めた結果について報告するものである。これにより、地震動特性の把握が従来よりもさらに具体的に、また、精度よく行い得るようになると考えられる。

昭和 58 年 12 月

建設省土木研究所地震防災部振動研究室

室 長 荒 川 直 士

主任研究員 川 島 一 彦

研 究 員 田 村 敬 一

相 沢 興

高 橋 和 之

目 次

まえがき

1. 概 説	1
2. 解析に用いた強震記録	3
2-1. 解析に用いた強震記録	3
2-2. 加速度の計器補正法および速度, 変位の計算法	3
2-3. 減衰定数による応答スペクトルの補正法	5
3. 最大地震動の距離減衰式	18
3-1. 上下方向最大地震動の距離減衰式	18
3-2. 水平方向最大地震動と上下方向最大地震動の距離減衰特性の比較	22
4. 加速度応答スペクトルの距離減衰式	42
4-1. 上下方向加速度応答スペクトルの距離減衰式	42
4-2. 水平方向と上下方向の加速度応答スペクトルの距離減衰特性の比較 ...	46
5. 既往の研究成果との比較	75
6. 結 論	87
参考文献	82
付属資料-1. 解析に用いた $a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ および $S_A^V(T)$	85

1. 概 説

公共土木施設を合理的に耐震設計するとともに各種の地震防災上の措置を講じるためには、建設地点等当該着目地点周辺で期待される地震動の強度および特性を正しく予測することが必要とされる。我国では、昭和39年の新潟地震を契機として本格的な強震観測が行われるようになっており、土木研究所において直接・間接に記録の収集にあたる強震計(SMAC型強震計)の台数は、昭和58年3月末現在で約150箇所、300台となっている。これらの強震計により得られた記録のうち、現在までに約800成分の記録が土木研究所において数値化¹⁾され、地震応答解析における入力地震動として用いられるとともに、地震動の特性そのものに対しても、各種の解析が行われている。この結果、地震動の特性は、地震の規模、震源からの距離、建設地点周辺の地盤条件等種々の要因により複雑に変化することが知られるようになっている。したがって、これらの特性を適正に考慮した地震動の予測式を求めることが必要とされている。地震動の特性を表わすためには、最大加速度、実効加速度、継続時間、応答スペクトル等種々の指標が提案されている。このうち、応答スペクトルは1自由度系(1質点系)の応答ではあっても基本的には地震動が作用した場合の構造物の応答を表わすものであり、地震動の周期特性、継続時間等の情報が取り入れられたものである。また、最大加速度は、これだけを取り出すと、地震動の強度を表わすためには不十分な指標であるが、従来、耐震計算によく用いられてきている。さらに、近年では、走行車輛の安定性や落橋防止装置の地震力を検討するために、地震動の速度や変位に関する研究も必要とされつつある。このような観点から土木研究所地震防災部振動研究室では地震動の加速度応答スペクトル、最大加速度、最大速度、および最大変位の実用的な推定式を開発することを目標とし、現在までに以下の検討を行ってきた。

Step 1 : 我国の主要な強震記録を提供しているSMAC-B2型強震計の加振振動実験を実施し、その特性を検討するとともにディジタイザーによる数値化精度を検討した。これらを総合して、数値フィルターを用いた数値化精度を考慮した短・長周期成分の補正方法を開発し、その効果を上記加振実験結果をもとに確認した。^{2) 3) 4)}

Step 2 : 2@103成分の水平方向加速度記録をもとに水平2成分を合成した場合の影響を検討し、水平2成分のうちいずれか一方の最大値に比較し、2成分を合成した場合の最大値の割増率を求めた。^{5) 10)}

Step 3 : 2@103成分の水平方向加速度記録をもとに加速度応答スペクトルに及ぼす減衰定数の影響を検討し、減衰定数5%の加速度応答スペクトルを基本に任意の減衰定数(ただし、2%未満の場合もしくは固有周期が2秒以上の場合を除く)の加速度応答スペクトルを求める換算式を開発した。^{6) 11)}

Step 4 : 2@197成分の水平方向加速度記録をもとに、水平方向の最大地震動(最大加速度、最大速度、最大変位)および減衰定数5%の加速度応答スペクトルの予測式を開発した。^{7) 12) 13)}

Step 5 : 上記 Step 4の解析結果を i) 予測回帰式に考慮する説明変数の数、ii) 予測回帰式の係数の地盤種別依存性、および iii) 予測回帰式の係数の固有周期依存性(加速度応答スペクトルの場合)の3点から見直しを図り、水平方向の最大地震動(最大加速度、最大速度、最大変位)および減

減衰定数5%の加速度応答スペクトルに対する実用的な予測式を開発した⁸⁾

Step 6 : 上記 Step 3 の解析結果をさらに一般化し、減衰定数5%の加速度応答スペクトルから任意の減衰定数に対する加速度応答スペクトルを求める換算式を開発した⁹⁾

本報告では、上記 Step 4 および Step 5 の水平方向に対する解析結果を参考にして、上下方向の最大地震動（最大加速度、最大速度、最大変位）および加速度応答スペクトル（減衰定数5%）の重回帰分析を行い、これらの諸量を、対象地点の地盤種別、地震のマグニチュードおよび震央距離を任意に与えることにより求め得る実用的な予測式を提案するものである。

以下、2章においては本解析に用いた119成分の加速度強震記録の特性と、これらが得られた地震の属性および地盤種別を示す。3章および4章では、それぞれ上下方向の最大地震動および加速度応答スペクトルの予測回帰式を検討し、これらの諸量を地盤種別ごとに地震のマグニチュードおよび震央距離の関数として求め得る予測式を求めた結果について示す。また、上記 Step 5 で提案した水平方向の地震動に対する予測式と本報告に提案した上下方向の地震動に対する予測式との比較を示している。5章では、本報告で提案した推定式と既往の国内外の研究成果との比較を示している。さらに、6章においては、本解析結果のまとめを示している。

2. 解析に用いた強震記録

2-1. 解析に用いた強震記録

解析対象としたのは表2-1に示すように、我国の53観測地点(いずれも地盤上)において観測された119成分の上下方向加速度強震記録である。これらの記録は水平方向の最大地震動および加速度応答スペクトルの解析に用いた2@197組の水平加速度強震記録(水平2成分)のうち、上下方向強震記録が得られているものを抽出したものである。また、これらの記録は表2-2に示すように我国周辺に発生した昭和40年4月20日の静岡近海の地震($M=6.1$)から昭和55年6月29日の伊豆半島東方沖地震($M=6.7$)までの合計57回のマグニチュード5以上の浅発地震(震源深さ60km以浅)により、SMAC-B, B_2 , Q, D, E_2 により得られたものであり、建設省土木研究所および運輸省港湾技術研究所により記録・数値化された記録である。119成分の記録をこれらが得られた地震のマグニチュード M および震央距離 Δ 別に分類すると図2-1のようになる。これによれば、いわゆる大規模地震による近距離の記録が含まれていない。また、119記録の中で43記録はマグニチュード6.0~6.5の地震により得られたものであり、7.0以上のマグニチュードにより得られた記録は24記録である。解析に用いた記録のうち最も大規模な地震は、昭和43年4月1日の日向灘沖地震($M=7.5$)、および昭和43年5月16日の十勝沖地震の余震($M=7.5$)であり、昭和53年6月12日の宮城県沖地震($M=7.4$)、昭和48年6月17日の根室半島沖地震($M=7.4$)、昭和47年12月4日の八丈島東方沖地震($M=7.2$)等が、これに続く規模の大きい地震である。

各観測地点の地盤種別は表2-1に示すとおりである。これらは表2-3に示す道路橋示方書耐震設計編に従って分類したものである。ただし、道路橋示方書では地盤種別を表2-3のように4区分としているが、ここでは、道路橋示方書による2種および3種地盤を1つにまとめ、1種(表2-3の1種)、2種(同、2種+3種)および3種(同、4種)の3区分としている。この理由については参考文献7)を参照されたい。また、表2-2および表2-3にはそれぞれ土研資料1993号に示した水平方向に対応する観測所および地震の番号を参考のため示している。

2-2. 加速度の計器補正法および変位、速度の計算法

解析記録は数値化精度を考慮して、次式によりSMAC型強震計の短周期計器補正を加えるとともに、速度および変位を計算した。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 $F_0(f)$ は、

$$F_0(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a_0(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (2-1)$$

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。

$$\begin{aligned}
a(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{2\pi i f t} df \\
v(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(f)}{2\pi i f} e^{2\pi i f t} df \\
d(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(f)}{-4\pi^2 f^2} e^{2\pi i f t} df
\end{aligned} \tag{2-2}$$

ここで,

$$F(f) = F_0(f) \cdot F_c(f) \tag{2-3}$$

$$F_c(f) = \begin{cases} 0 & \dots\dots\dots 0 \leq f < f_{ll} \\ \frac{f-f_{ll}}{f_{lu}-f_{ll}} \cdot \frac{\exp(i\phi(f))}{R(f)} & \dots\dots\dots f_{ll} \leq f \leq f_{lu} \\ \frac{\exp(i\phi(f))}{R(f)} & \dots\dots\dots f_{lu} \leq f \leq f_{ul} \\ \frac{f_{uu}-f}{f_{uu}-f_{ul}} \cdot \frac{\exp(i\phi(f))}{R(f)} & \dots\dots\dots f_{ul} \leq f \leq f_{uu} \\ 0 & \dots\dots\dots f > f_{uu} \end{cases} \tag{2-4}$$

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て次式とした。¹⁵⁾

$$R(f) = \frac{1 + (U/N)^2}{\sqrt{(1-U^2)^2 + \{(1-U^2)U/N + 2hU\}^2}} \tag{2-5}$$

$$\phi(f) = \tan^{-1} \left[\frac{2hU}{(1-U^2)\{1 + (U/N)^2\} + 2hU \cdot U/N} \right]$$

ここで、 $U = f/f_n$ 、 $N = f_a/f_n$ であり、 f_n は振子の固有振動数、 f_a は表 2-4 に示す定数である。

以上の手法により補正した加速度、速度および変位を計算するに際しては、式(2-4)で定義した遮断振動数 f_{ul} および f_{lu} を正しく定めなければならない。本解析では、別途実施した検討結果をもとに $f_{ul} = 12\text{Hz}$ 、 $f_{lu} = 1/3\text{Hz}$ として補正を行うこととした。また、 f_{uu} および f_{ll} はそれぞれ 13Hz 、 $1/4\text{Hz}$ とした。このようにし

表 2-4. 式(2-5)の定数 f_n 、 f_a (後藤による)

Type	$f_n(\text{Hz})$	$f_a(\text{Hz})$	h
SMAC-A, B, C	10.00	5.66	1.0
SMAC-A ₂ , B ₂ , C ₂	7.14	10.80	1.0
SMAC-D, E ₂	20.00	4.00	0.6
SMAC-E, Q			

て式(2-5)の振幅および位相の補正係数 $R(f)$ および $\phi(f)$ を求めると図 2-2 のようになる。したがって、本解析で扱うのは $1/3\text{Hz} \sim 12\text{Hz}$ の範囲の地震動であり、これ以外の振動数範囲の地震動は対象として

いない。

以上のようにして計器補正を施した最大加速度 $a_{\max}^v$ 、最大速度 $v_{\max}^v$ 、最大変位 $d_{\max}^v$ および加速度応答スペクトル $S_A^v(T)$ を求めこれを地盤種別ごとに分類すると図 2-3、2-4 に示すようになる。また、119 成分の記録を地盤種別ごとに得られた地震のマグニチュード M 、震源深さ D_p および震央距離 L により分類すると図 2-5 のようになる。

2-3. 減衰定数による応答スペクトルの補正法

本解析では、減衰定数 5% の加速度応答スペクトルを対象としたが、これは、この程度の減衰が橋等一般の土木構造物の耐震設計を考える際に基本となると考えたためである。なお、減衰定数 5% の応答スペクトルが求められれば、次式により任意の減衰定数に対する応答スペクトルを推定することができる。⁹⁾¹¹⁾

$$S_A(T, h) = \xi_{SA}(T, h) \times S_A(T, 0.05) \quad (2-6)$$

ここで、

$S_A(T, h)$: 減衰定数 h の加速度応答スペクトル [gal]

$S_A(T, 0.05) = S_A(T)$: 減衰定数 $h = 0.05$ (5%) の加速度応答スペクトル [gal]

$$\xi_{SA}(T, h) = \left[\frac{1.5}{40h+1} + 0.5 \right] \times \beta(T)^{\left[\frac{1}{300h+6} - 0.8h \right]} \quad (2-7)$$

$\beta(T)$: 固有周期 T [秒] の加速度応答スペクトル倍率, $\beta(T) = S_A(T) / a_{\max}$

なお、上式は本来水平方向の地震応答加速度スペクトルに対して求められたものであるが、減衰定数により応答スペクトルが変化する状況は水平方向の地震応答スペクトルと上下方向の地震応答スペクトルで基本的な違いはないと考えられるため、上式を準用することとしたものである。また、減衰定数が非常に小さい場合 ($h < 0.01$) もしくは固有周期が長い場合 (おおむね $T > 2$ 秒の場合) を除けば、式 (2-7) の右辺第 2 項の影響は小さい。この場合には、式 (2-7) は次式で近似することができる。

$$\xi_{SA}(T, h) \doteq \xi_{SA}(h) = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 \quad (2-8)$$

図 2-6 は、参考文献 6) に示されている ξ_{SA} と式 (2-8) を比較して示したものである。これによれば、減衰定数が小さい場合 (特に $h < 5\%$) には ξ_{SA} は h により敏感に変化するが、 $h > 0.2$ となると、 h によってほとんど変化しないことがわかる。

表 2-1(1) 解析に用いた強震記録

No	観測所名	記録名	地震No	地震名	地震発生年月日	M	深さ (km)	震央 距離 (km)	地盤 種別	水平 成分 参照 No
1	土研田千葉支所 (1)	901-GRA-33	68057	埼玉県中部	1968. 07. 01, 19:45	6.1	50	72.3	1	1
		901-GRA-66	74015	茨城県南西部	1974. 08. 04, 03:16	5.8	50	45.9		
2	新天竜川橋	904-GR-1	650420	静岡近海	1965. 04. 20, 08:42	6.1	20	47.5	3	2
		904-GR-4	71002	愛知県沿岸	1971. 01. 05, 06:09	6.1	40	67.7		
3	開北橋	302-GR-11	68062	宮城県東方沖	1968. 07. 05, 20:28	6.4	50	78.7	1	4
		302-GR-22	70026	宮城県沖	1970. 09. 14, 18:45	6.2	40	92.6		
		302-GR-34	78002	"	1978. 02. 20, 13:37	6.7	50	84.2		
		302-GR-35	78012	"	1978. 06. 12, 17:14	7.4	40	81.4		
4	有明海堤防	801-GR-1	66051	有明海	1966. 11. 12, 21:01	5.5	20	12.9	3	5
5	伊達橋	304-GR-6	67004	金華山沖	1967. 01. 17, 20:59	6.3	30	144.5	1	6
		304-GR-13	68057	埼玉県中部	1968. 07. 01, 19:45	6.1	50	227.0		
		304-GR-14	68062	宮城県東方沖	1968. 07. 05, 20:28	6.4	50	162.6		
		304-GR-21	70008	福島県沖	1970. 02. 15, 13:01	5.1	50	99.1		
		304-GR-23	70031	秋田県南東部	1970. 10. 16, 14:26	6.2	0	153.3		
		304-GR-26	71018	福島県沖	1971. 03. 22, 19:40	5.4	10	147.9		
		304-GR-28	71021	宮城県沖	1971. 04. 05, 03:39	6.0	50	157.8		
		304-GR-30	71038	福島県沖	1971. 09. 08, 16:25	5.5	40	122.9		
		304-GR-32	72019	宮城県沖	1972. 09. 25, 18:27	5.5	50	147.0		
		304-GR-33	72029	八丈島東方沖	1972. 12. 04, 19:16	7.2	50	517.2		
6	新葛飾橋	101-GR-5	67057	茨城県沖	1967. 11. 19, 21:07	6.0	50	140.6	2	7
		101-GR-7	68018	千葉県中部	1968. 03. 07, 11:54	5.1	50	33.8		
		101-GR-9	68057	埼玉県中部	1968. 07. 01, 19:45	6.1	50	47.7		
7	鹿島試験所	906-GR-17	73024	銚子近海	1973. 09. 30, 15:18	5.9	50	26.9	2	8
		906-GR-18	73025	"	1973. 10. 01, 23:16	5.8	60	33.3		
		906-GR-19	74006	千葉県東方沖	1974. 03. 03, 13:50	6.1	60	41.6		
		906-GR-22	74022	銚子沖	1974. 11. 16, 08:32	6.1	40	55.9		
8	石瀬戸橋	205-GR-2	68012	宮城県南西部	1968. 02. 21, 10:45	6.1	0	40.6	2	9
		205-GR-6	68026	日向灘	1968. 04. 01, 09:42	7.5	30	136.0		
		205-GR-8	70021	宮城県沖	1970. 07. 26, 07:41	6.7	10	84.9		
9	平大橋	907-GR-2	68015	福島県沖	1968. 02. 26, 05:00	5.4	50	84.5	2	10
		907-GR-31	69023	"	1969. 06. 23, 14:57	5.2	50	72.3		
		907-GR-32	69024	"	1969. 07. 23, 22:14	5.5	40	76.9		
		907-GR-39	70008	"	1970. 02. 15, 13:01	5.1	50	59.2		
		907-GR-60	71038	"	1971. 09. 08, 16:25	5.5	40	59.9		
		907-GR-83	74015	茨城県南西部	1974. 08. 04, 03:16	5.8	50	145.4		
		907-GR-94	75015	福島県沖	1975. 08. 15, 03:09	5.5	50	19.7		
		907-GR-106	78002	宮城県沖	1978. 02. 20, 13:37	6.7	50	219.9		
		907-GR-108	78012	"	1978. 06. 12, 17:14	7.4	40	164.6		
10	紀ノ川大橋	112-GR-8	68022	和歌山近海	1968. 03. 30, 04:04	5.0	0	5.4	2	11
		112-GR-25	73029	和歌山県中部	1973. 11. 25, 13:25	5.9	60	46.7		

表 2 - 1 (2) 解析に用いた強震記録

No	観測所名	記録名	地震No	地震名	地震発生年月日	M	深さ (km)	震央 距離 (km)	地盤 種別	水平 参照 No
10	紀ノ川大橋	112-GR-26	73030	和歌山県中部	1973. 11. 25, 18:19	5.8	60	42.0	2	11
11	妙見橋	306-GR-1	68026	日向灘	1968. 04. 01, 09:42	7.5	30	341.3	3	12
		306-GR-7	78008	鳥根県中部	1978. 06. 04, 05:04	6.1	0	29.8		
12	板島橋	308-GR-2	68026	日向灘	1968. 04. 01, 09:42	7.5	30	103.3	2	13
		308-GR-3	68027	"	1968. 04. 01, 16:13	6.3	0	102.8		
13	幌満橋	1305-GR-3	68038	青森県東方沖	1968. 05. 16, 19:39	7.5	40	74.0	1	14
14	新利根川橋	104-GR-9	68057	埼玉県中部	1968. 07. 01, 19:45	6.1	50	29.9	2	15
		104-GR-23	72027	茨城県南西部	1972. 11. 06, 20:39	5.1	40	18.1		
		104-GR-27	74015	"	1974. 08. 04, 03:16	5.8	50	23.6		
		104-GR-36	78012	宮城県沖	1978. 06. 12, 17:14	7.4	40	312.2		
15	草加高架橋	106-GR-9	68057	埼玉県中部	1968. 07. 01, 19:45	6.1	50	38.4	3	16
		106-GR-21	72029	八丈島東方沖	1972. 12. 04, 19:16	7.2	50	312.6		
		106-GR-27	74015	茨城県南西部	1974. 08. 04, 03:16	5.8	50	25.6		
16	平井大橋	310-GR-15	68057	埼玉県中部	1968. 07. 01, 19:45	6.1	50	48.7	2	17
		310-GR-18	72029	八丈島東方沖	1972. 12. 04, 19:16	7.2	50	301.0		
		310-GR-26	74015	茨城県南西部	1974. 08. 04, 03:16	5.8	50	34.0		
17	四徳大橋	319-GR-3	68057	埼玉県中部	1968. 07. 01, 19:45	6.1	50	136.7	2	18
		319-GR-4	69032	岐阜県中部	1969. 09. 09, 14:15	6.6	0	85.5		
18	東京湾(富津岬)	501-GR-29	68057	埼玉県中部	1968. 07. 01, 19:45	6.1	50	82.3	2	19
		501-GR-74	72029	八丈島東方沖	1972. 12. 04, 19:16	7.2	50	262.0		
19	西新井橋	902-GR-25	68057	埼玉県中部	1968. 07. 01, 19:45	6.1	50	41.6	3	20
		902-GR-38	74015	茨城県南西部	1974. 08. 04, 03:16	5.8	50	31.4		
20	境川橋	1004-GR-1	68057	埼玉県中部	1968. 07. 01, 19:45	6.1	50	48.8	1	21
21	姥久保橋	1005-GR-1	68057	埼玉県中部	1968. 07. 01, 19:45	6.1	50	34.1	1	22
		1005-GR-2	76004	山梨県東部	1976. 06. 16, 07:36	5.5	20	40.5		
22	東京湾(観音崎)	503-GR-17	72029	八丈島東方沖	1972. 12. 04, 19:16	7.2	50	258.8	1	24
		503-GR-19	74012	伊豆半島南部沿岸近海	1974. 05. 09, 08:33	6.9	10	115.0		
		503-GR-21	78001	大島近海	1978. 01. 14, 12:24	7.0	0	70.3		
23	石鎚橋	313-GR-2	68070	愛媛県西部沿岸	1968. 08. 06, 13:21	5.3	40	82.4	2	25
24	新八幡橋	204-GR-3	69032	岐阜県中部	1969. 09. 09, 14:15	6.6	0	89.1	1	26
		204-GR-28	75003	愛知・岐阜県境	1975. 03. 14, 22:56	5.3	50	33.8		
25	豊浜大橋	311-GR-6	71002	愛知県沿岸	1971. 01. 05, 06:09	6.1	40	43.6	2	27
26	西横堀高架橋	1201-GR-6	69032	岐阜県中部	1969. 09. 09, 14:15	6.6	0	188.7	2	28
27	雄平橋	301-GR-7	70031	秋田県南東部	1970. 10. 16, 14:26	6.2	0	23.2	2	29
		301-GR-13	78012	宮城県沖	1978. 06. 12, 17:14	7.4	40	188.1		
28	米山大橋	102-GR-16	71012	新潟県南西部	1971. 02. 26, 04:27	5.5	0	26.2	1	30
29	魚沼橋	202-GR-15	71012	新潟県南西部	1971. 02. 26, 04:27	5.5	0	42.2	1	31
30	鶴川橋	1006-GR-3	71029	山梨県東部	1971. 07. 23, 07:07	5.3	10	15.0	1	32
		1006-GR-5	76004	"	1976. 06. 16, 07:36	5.5	20	16.9		
31	利根川河口堰	1401-GR-1	71040	千葉県北部	1971. 10. 11, 19:16	5.2	40	16.0	3	33

表 2 - 1(3) 解析に用いた強震記録

No	観測所名	記録名	地震No	地震名	地震発生年月日	M	深さ (km)	震央 距離 (km)	地盤 種別	水平 成分 参照 No
31	利根川河口堰	1401-GR-5	74014	茨城県沖	1974. 07. 08, 14:45	6.3	40	79.0	3	33
		1401-GR-6	74015	茨城県南西部	1974. 08. 04, 03:16	5.8	50	73.9		
		1401-GR-8	74022	銚子沖	1974. 11. 16, 08:32	6.1	40	49.9		
32	真崎大橋	105-GR-8	74016	岩手県北部沿岸	1974. 09. 04, 18:20	5.6	40	46.2	1	34
33	小見川大橋	206-GR-2	74006	千葉県東方沖	1974. 03. 03, 13:50	6.1	60	41.3	3	35
		206-GR-3	74014	茨城県沖	1974. 07. 08, 14:45	6.3	40	81.2		
		206-GR-4	74015	茨城県南西部	1974. 08. 04, 03:16	5.8	50	64.5		
		206-GR-6	74022	銚子沖	1974. 11. 16, 08:32	6.1	40	59.2		
		206-GR-8	75002	千葉県北部	1975. 02. 08, 01:41	5.4	60	44.6		
34	土研千葉支所(2)	901-GRB-5	75002	"	1975. 02. 08, 01:41	5.4	60	20.2	1	36
35	東名・富士川橋	1002-GR-5	80008	伊豆半島付近	1980. 06. 29, 16:20	6.7	10	61.3	2	37
36	名古屋港	404GR-1-3	71002	愛知県沿岸	1971. 01. 05, 06:09	6.1	40	77.0	2	38
37	釧路港	102GR-1-9	720511	釧路沖	1972. 05. 11, 09:45	5.8	60	61.2	2	39
		102GR-1-10	73009	根室半島沖	1973. 06. 17, 12:55	7.4	40	127.3		
		102GR-1-11	73013	"	1973. 06. 24, 11:43	7.1	30	192.4		
38	東京港(品川)	303GR-1-2	68057	埼玉県中部	1968. 07. 01, 19:45	6.1	50	51.0	2	42
39	鹿島港	301GR-1-5	71025	茨城県沖	1971. 06. 13, 13:06	5.3	40	42.5	1	43
		301GR-1-6	71040	千葉県北部	1971. 10. 11, 19:16	5.2	40	13.0		
40	高知港	602GR-1-1	68026	日向灘	1968. 04. 01, 09:42	7.5	30	167.4	3	44
41	細島港	702GR-1-2	68066	愛媛県西部沿岸	1968. 08. 06, 01:17	6.6	40	118.2	2	45
		702GR-1-3	69015	日向灘	1969. 04. 21, 16:19	6.5	10	51.4		
		702GR-1-4	70021	宮崎県沖	1970. 07. 26, 07:41	6.7	10	51.9		
42	室蘭港	105GR-1-2	68038	青森県東方沖	1968. 05. 16, 19:39	7.5	40	184.0	2	46
43	青森港	201GR-1-2	68038	青森県東方沖	1968. 05. 16, 19:39	7.5	40	187.1	3	47
44	八戸港	202GR-1-8	74016	岩手県北部沿岸	1974. 09. 04, 18:20	5.6	40	49.8	2	48
45	衣浦港	403GR-1-2	71002	愛知県沿岸沖	1971. 01. 05, 06:09	6.1	40	55.9	3	52
46	大船渡港(2)	206GR-2-1	70026	宮城県沖	1970. 09. 14, 18:45	6.2	40	64.6	2	54
		206GR-2-2	73028	"	1973. 11. 19, 22:02	6.4	50	39.6		
		206GR-2-3	78012	"	1978. 06. 12, 17:14	7.4	40	104.5		
47	四日市港	405GR-2-1	71002	愛知県沿岸沖	1971. 01. 05, 06:09	6.1	40	74.3	2	56
48	塩釜港	207GR-2-3	73028	"	1973. 11. 19, 22:02	6.4	50	113.7	2	60
49	鹿島港	301GR-2-2	73024	銚子近海	1973. 09. 30, 15:18	5.9	50	30.8	3	62
		301GR-2-4	74006	千葉県東方沖	1974. 03. 03, 13:50	6.1	60	43.4		
		301GR-2-5	74014	茨城県沖	1974. 07. 08, 14:45	6.3	40	70.9		
		301GR-2-6	74022	銚子沖	1974. 11. 16, 08:32	6.1	40	53.6		
50	大分港	701GR-1-2	75008	大分県中部	1975. 04. 21, 02:35	6.4	0	37.8	1	63
51	熱海変電所	ATAMI	78001	大島近海	1978. 01. 14, 12:24	7.0	0	41.2	1	65
52	新岩田変電所	SHINIWATA	78001	"	"	7.0	0	108.5	3	66
53	白堀変電所	SHIROBORI	78001	"	"	7.0	0	44.7	1	67

表 2 - 2(1) 解析に考慮した地震

No	地震No	地 震 名	年 月 日 時 分	M	深さ [km]	震央 距離 [km]	記 録 名	観 測 所 名	水成分 参照 No
1	650420	静岡近海	1965. 04. 20, 08:42	6.1	20	47.5	904-GR-1	新天竜川橋	3
2	66051	有明海	1966. 11. 12, 21:01	5.5	20	12.9	801-GR-1	有明海堤防	6
3	67004	金華山沖	1967. 01. 17, 20:59	6.3	30	144.5	304-GR-6	伊達橋	7
4	67057	茨城県沖	1967. 11. 19, 21:07	6.0	50	140.6	101-GR-5	新葛飾橋	7'
5	68012	宮崎県南西部	1968. 02. 21, 10:45	6.1	0	40.6	205-GR-2	石瀬戸橋	8
6	68015	福島県沖	1968. 02. 26, 05:00	5.4	50	84.5	907-GR-2	平大橋	9
7	68018	千葉県中部	1968. 03. 07, 11:54	5.1	50	33.8	101-GR-7	新葛飾橋	10
8	68022	和歌山近海	1968. 03. 30, 04:04	5.0	0	5.4	112-GR-8	紀ノ川大橋	11
9	68026	日向灘	1968. 04. 01, 09:42	7.5	30	136.0 341.3 103.3 167.4 82.2	205-GR-6 306-GR-1 308-GR-2 602GR-1-1 702GR-1-1	石瀬戸橋 妙見橋 板島橋 高知橋 細島港	12
10	68027	日向灘	1968. 04. 01, 16:13	6.3	0	102.8	308-GR-3	板島橋	13
11	68038	青森県東方沖	1968. 05. 16, 19:39	7.5	40	74.0 184.0 187.1	1305GR-3 105GR-1-2 201GR-1-2	幌満橋 室蘭港 青森港	15
12	68057	埼玉県中部	1968. 07. 01, 19:45	6.1	50	227.0 47.7 29.9 38.4 48.7 72.3 136.7 82.3 41.6 48.8 34.1 51.0	304-GR-13 101-GR-9 104-GR-9 106-GR-9 310-GR-15 901-GRA-33 319-GR-3 501-GR-29 902-GR-25 1004-GR-1 1005-GR-1 303GR-1-2	伊達橋 新葛飾橋 新利根川橋 草加高架橋 平井大橋 土研千葉支所(1) 四徳大橋 東京湾(富津岬) 西新井橋 境川橋 姥久保橋 東京湾(品川)	17
13	68062	宮城県東方沖	1968. 07. 05, 20:28	6.4	50	78.7 162.6	302-GR-11 304-GR-14	開北橋 伊達橋	19
14	68070	愛媛県西部沿岸	1968. 08. 06, 13:21	5.3	40	82.4	313-GR-2	石鎚橋	21
15	69015	日向灘	1969. 04. 21, 16:19	6.5	10	51.4	702GR-1-3	細島港	24
16	69023	福島県沖	1969. 06. 23, 14:57	5.2	50	72.3	907-GR-31	平大橋	27
17	69024	"	1969. 07. 23, 22:14	5.5	40	76.9	907-GR-32	"	28
18	69032	岐阜県中部	1969. 09. 09, 14:15	6.6	0	85.5 89.1 188.7	319-GR-4 204-GR-3 1201-GR-6	四徳大橋 新八幡橋 西横堀高架橋	30
19	70008	福島県沖	1970. 02. 15, 13:01	5.1	50	99.1 59.2	304-GR-21 907-GR-39	伊達橋 平大橋	33

表 2-2(2) 解析に考慮した地震

No	地震No	地 震 名	年 月 日 時 分	M	深さ (km)	震央 距離 (km)	記 録 名	観 測 所 名	水平 成分 参照 No
20	70021	宮 崎 県 沖	1970. 07. 26, 07:41	6.7	10	51.9 84.9	702GR-1-4 205-GR-8	細 島 港 石 瀬 戸 橋	35
21	70026	宮 城 県 沖	1970. 09. 14, 18:45	6.2	40	92.6 64.6	302-GR-22 206GR-2-1	開 北 橋 大 船 渡 港 (2)	37
22	70031	秋田県南東部	1970. 10. 16, 14:26	6.2	0	153.3 23.7	304-GR-23 301-GR-7	伊 達 橋 雄 平 橋	38
23	71002	愛知県沿岸	1971. 01. 05, 06:09	6.1	40	67.7 43.6 77.0 55.9 74.3	904-GR-4 311-GR-6 404GR-1-3 403GR-1-2 405GR-2-1	新 天 竜 川 橋 豊 浜 大 橋 名 古 屋 港 衣 浦 港 四 日 市 港	39
24	71012	新潟県南西部	1971. 02. 26, 04:27	5.5	0	26.2 42.2	102-GR-16 202-GR-15	米 山 大 橋 魚 沼 橋	40
25	71018	福 島 県 沖	1971. 03. 22, 19:40	5.4	10	147.9	304-GR-26	伊 達 橋	41
26	71021	宮 城 県 沖	1971. 04. 05, 03:39	6.0	50	157.8	304-GR-28	〃	42
27	71025	茨 城 県 沖	1971. 06. 13, 13:06	5.3	40	42.5	301GR-1-5	鹿 島 港	43
28	71029	山梨県東部	1971. 07. 23, 07:07	5.3	10	15.0	1006-GR-3	鶴 川 橋	44
29	71038	福 島 県 沖	1971. 09. 08, 16:25	5.5	40	122.8 59.9	304-GR-30 907-GR-60	伊 達 橋 平 大 橋	46
30	71040	千葉県北方	1971. 10. 11, 19:16	5.2	40	16.0 13.0	1401-GR-1 301GR-1-6	利根川河口堰 鹿 島 港	47
31	720511	釧 路 沖	1972. 05. 11, 09:45	5.8	60	61.2	102GR-1-9	釧 路 港	49
32	72019	宮 城 県 沖	1972. 09. 25, 18:27	5.5	50	147.0	304-GR-32	伊 達 橋	52
33	72027	茨城県南西部	1972. 11. 06, 20:39	5.1	40	18.1	104-GR-23	新 利 根 川 橋	53
34	72029	八丈島東方沖	1972. 12. 04, 19:16	7.2	50	517.2 312.6 301.0 262.0 258.8	304-GR-33 106-GR-21 310-GR-18 501-GR-74 503-GR-17	伊 達 橋 草 加 高 架 橋 平 井 大 橋 東京湾(富津岬) 東京湾(観音崎)	54
35	73009	根室半島沖	1973. 06. 17, 12:55	7.4	40	127.3	102GR-1-10	釧 路 港	56
36	73013	〃	1973. 06. 24, 11:43	7.1	30	192.4	102GR-1-11	〃	57
37	73024	銚子近海	1973. 09. 30, 15:18	5.9	50	26.9 30.8	906-GR-17 301GR-2-2	鹿 島 試 験 所 鹿 島 港	63
38	73025	〃	1973. 10. 01, 23:16	5.8	60	33.3	906-GR-18	鹿 島 試 験 所	64
39	73028	宮 崎 県 沖	1973. 11. 19, 22:02	6.4	50	39.6 113.7	206GR-2-2 207GR-2-3	大 船 渡 港 (2) 塩 釜 港	65
40	73029	和歌山県中部	1973. 11. 25, 13:25	5.9	60	46.7	112-GR-25	紀ノ川大橋	66
41	73030	〃	1973. 11. 25, 18:19	5.8	60	42.0	112-GR-26	〃	69
42	74006	千葉県東方沖	1974. 03. 03, 13:50	6.1	60	41.6 41.3	906-GR-19 206-GR-2	鹿 島 試 験 所 小 見 川 大 橋	70

表 2-2(3) 解析に考慮した地震

No	地震No	地 震 名	年 月 日 時 分	M	深さ [km]	震央 距離 [km]	記 録 名	観 測 所 名	水平 成分 参照 No
42	74006	千葉県東方沖	1974. 03. 03, 13:50	6.1	60	43.4	301GR-2-4	鹿 島 港	70
43	74012	伊豆半島南部沿岸近海	1974. 05. 09, 08:33	6.9	10	115.0	503-GR-19	東京湾(観音崎)	71
44	74014	茨城県沖	1974. 07. 08, 14:45	6.3	40	79.0 81.2 70.9	1401-GR-5 206-GR-3 301GR-2-5	利根川河口堰 小見川大橋 鹿 島 港	73
45	74015	茨城県南西部	1974. 08. 04, 03:16	5.8	50	45.9 145.4 23.6 25.6 34.0 73.9 64.5 31.4	901-GRA-66 907-GR-83 104-GR-27 106-GR-27 310-GR-26 1401-GR-6 206-GR-4 902-GR-38	土研千葉支所(1) 平 大 橋 新利根川橋 草加高架橋 平井大橋 利根川河口堰 小見川大橋 西新井橋	74
46	74016	岩手県北部沿岸	1974. 09. 04, 18:20	5.6	40	46.2 49.8	105-GR-8 202GR-1-8	真崎大橋 八 戸 港	75
47	74022	銚子沖	1974. 11. 16, 08:32	6.1	40	55.9 49.9 59.2 53.6	906-GR-22 1401-GR-8 206-GR-6 301GR-2-6	鹿島試験所 利根川河口堰 小見川大橋 鹿 島 港	77
48	75002	千葉県北部	1975. 02. 08, 01:41	5.4	60	44.6 20.2	206-GR-8 901-GRB-5	小見川大橋 土研千葉支所(2)	79
49	75003	愛知・岐阜県境	1975. 03. 14, 22:56	5.3	50	33.8	204-GR-28	新八幡橋	80
50	75008	大分県中部	1975. 04. 21, 02:35	6.4	0	37.8	701GR-1-2	大 分 港	82
51	75015	福島県沖	1975. 08. 15, 03:09	5.5	50	19.7	907-GR-94	平 大 橋	83
52	76004	山梨県東部	1976. 06. 16, 07:36	5.5	20	40.5 16.9	1005-GR-2 1006-GR-5	姥久保橋 鶴 川 橋	85
53	78001	大島近海	1978. 01. 14, 12:24	7.0	0	70.3 41.2 108.5 44.7	503-GR-21 ATAMI SHINIWATA SHIROBORI	東京湾(観音崎) 熱海変電所 新岩田変電所 白堀変電所	86
54	78002	宮城県沖	1978. 02. 20, 13:37	6.7	50	84.2 219.9	302-GR-34 907-GR-106	開北橋 平 大 橋	87
55	78008	島根県中部	1978. 06. 04, 05:04	6.1	0	29.8	306-GR-7	妙見橋	88
56	78012	宮城県沖	1978. 06. 12, 17:14	7.4	40	81.4 164.6 312.2 188.1 104.5	302-GR-35 907-GR-108 104-GR-36 301-GR-13 206GR-2-3	開北橋 平 大 橋 新利根川橋 雄 平 橋 大船渡港(2)	89
57	80008	伊豆半島付近	1980. 06. 29, 16:20	6.7	10	61.3	1002-GR-5	東名・富士川橋	90

表 2 - 3. 道路橋示方書・耐震設計橋による地盤種別

耐震設計上の地盤種別は、原則として地盤の特性値 T_g により区別し、表 3.6.1 によるものとする。

表 3.6.1 耐震設計上の地盤種別

地盤種別	地盤の特性値 T_g (秒)
1 種	$T_g < 0.2$
2 種	$0.2 \leq T_g < 0.4$
3 種	$0.4 \leq T_g < 0.6$
4 種	$0.6 \leq T_g$

地盤の特性値 T_g は、式 (3.6.1) によって算出するものとする。

$$T_g = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad \dots\dots\dots (3.6.1)$$

ここに、

T_g : 地盤の特性値 (s)

H_i : i 番目の地層の厚さ (m)

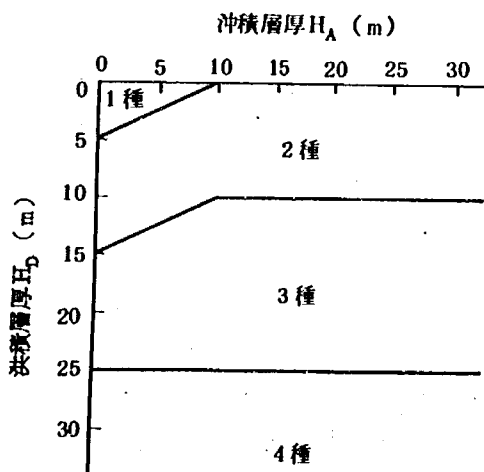
V_{si} : i 番目の地層の平均せん断弾性波速度 (m/s)、値は式 (3.6.2) によるものとする。

$$\begin{aligned} \text{粘性土層の場合} \quad V_{si} &= 100 N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 25) \\ \text{砂質土層の場合} \quad V_{si} &= 80 N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 50) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3.6.2)$$

N_i : 標準貫入試験による i 番目の地層の平均 N 値

i : 当該地盤が地表面から基盤面まで n 層に区分されるとき、地表面から i 番目の地層の番号

ここでの基盤面とは、粘性土層の場合は N 値が 25 以上、砂質土層の場合は N 値が 50 以上の地層の上面、もしくはせん断弾性波速度が 300 m/s 程度以上の地層の上面をいう。なお、地表面が基盤面と一致する場合は 1 種地盤とする。また、 T_g を式 (3.6.1) で求めがたい場合 (相当深く標準貫入試験を行っても基盤面が現われない場合など) には、図解 3.6.1 により地盤種別分類を行ってもよい。



図解 3.6.1 沖積層厚 H_A と
洪積層厚 H_B による地盤種別

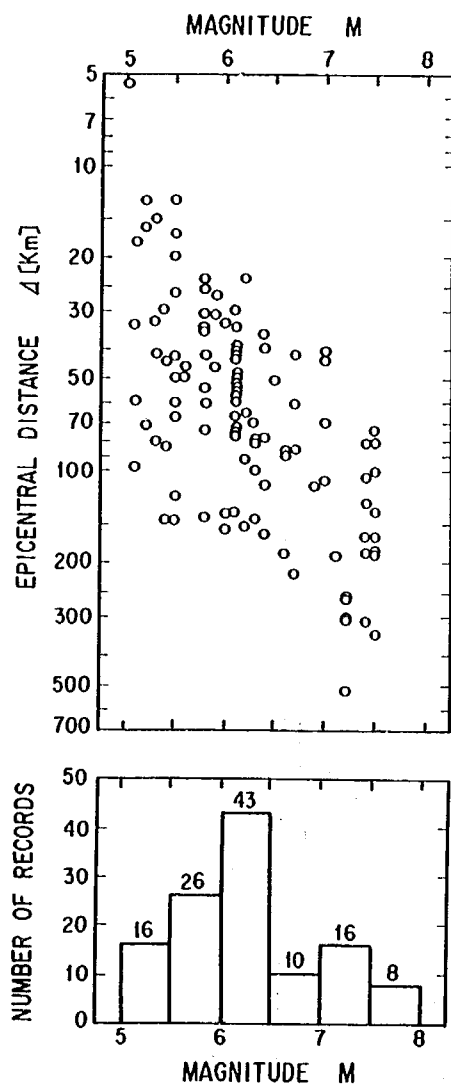


図2-1 解析対象記録の震央距離とマグニチュードの関係とマグニチュードの頻度分布

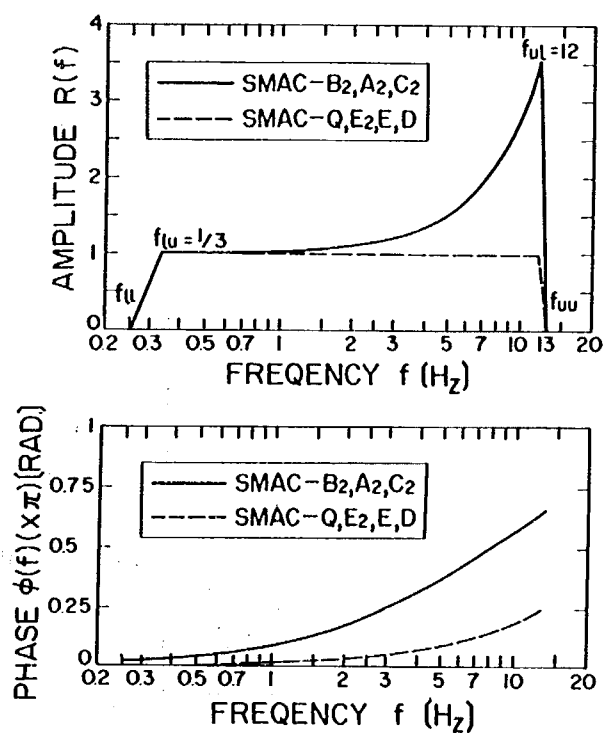


図2-2. 振幅および位相の補正係数
($f_{ul} = 12\text{Hz}$, $f_{ul} = 1/3\text{Hz}$)

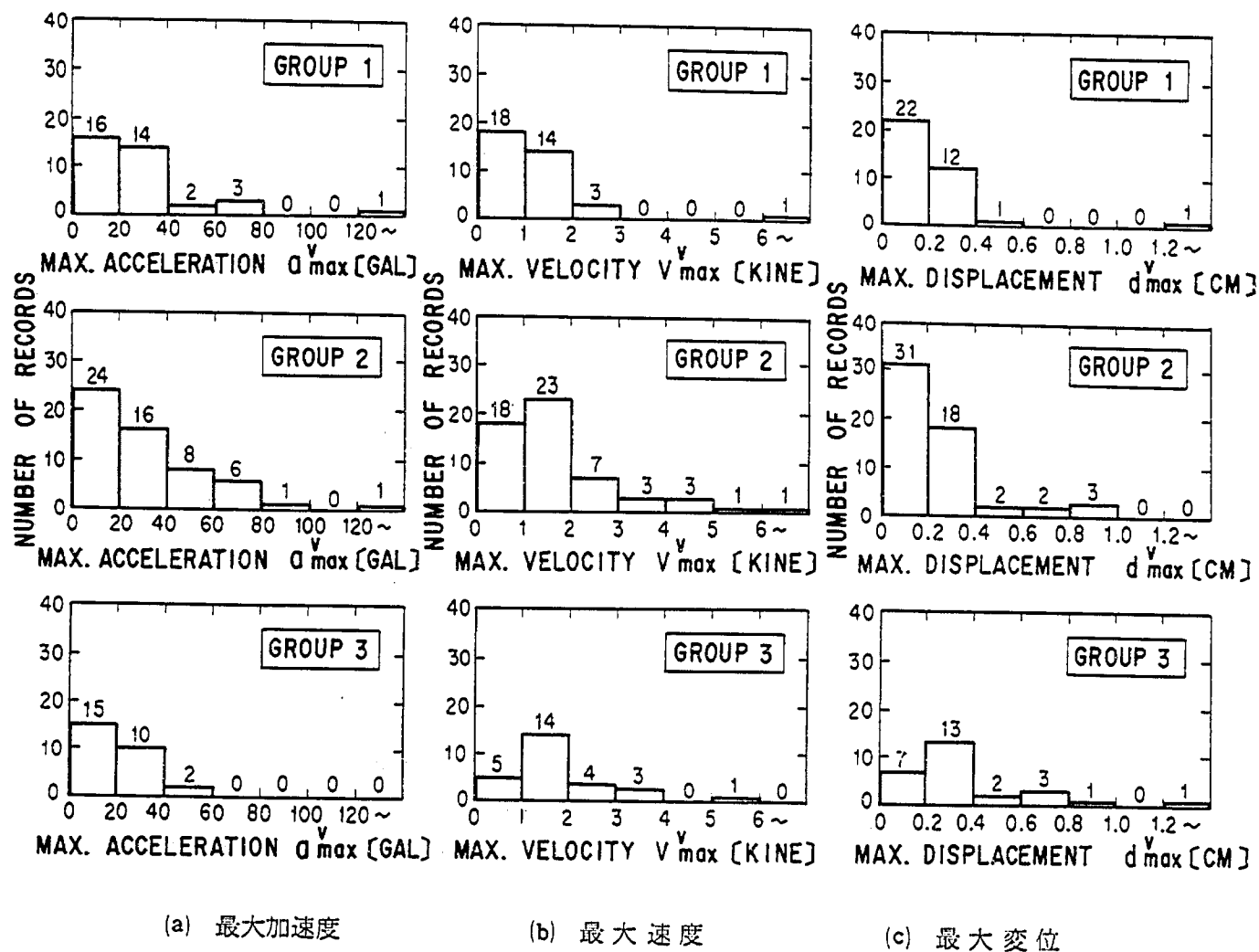


図 2 - 3. 解析対象記録の最大地震動の頻度分布

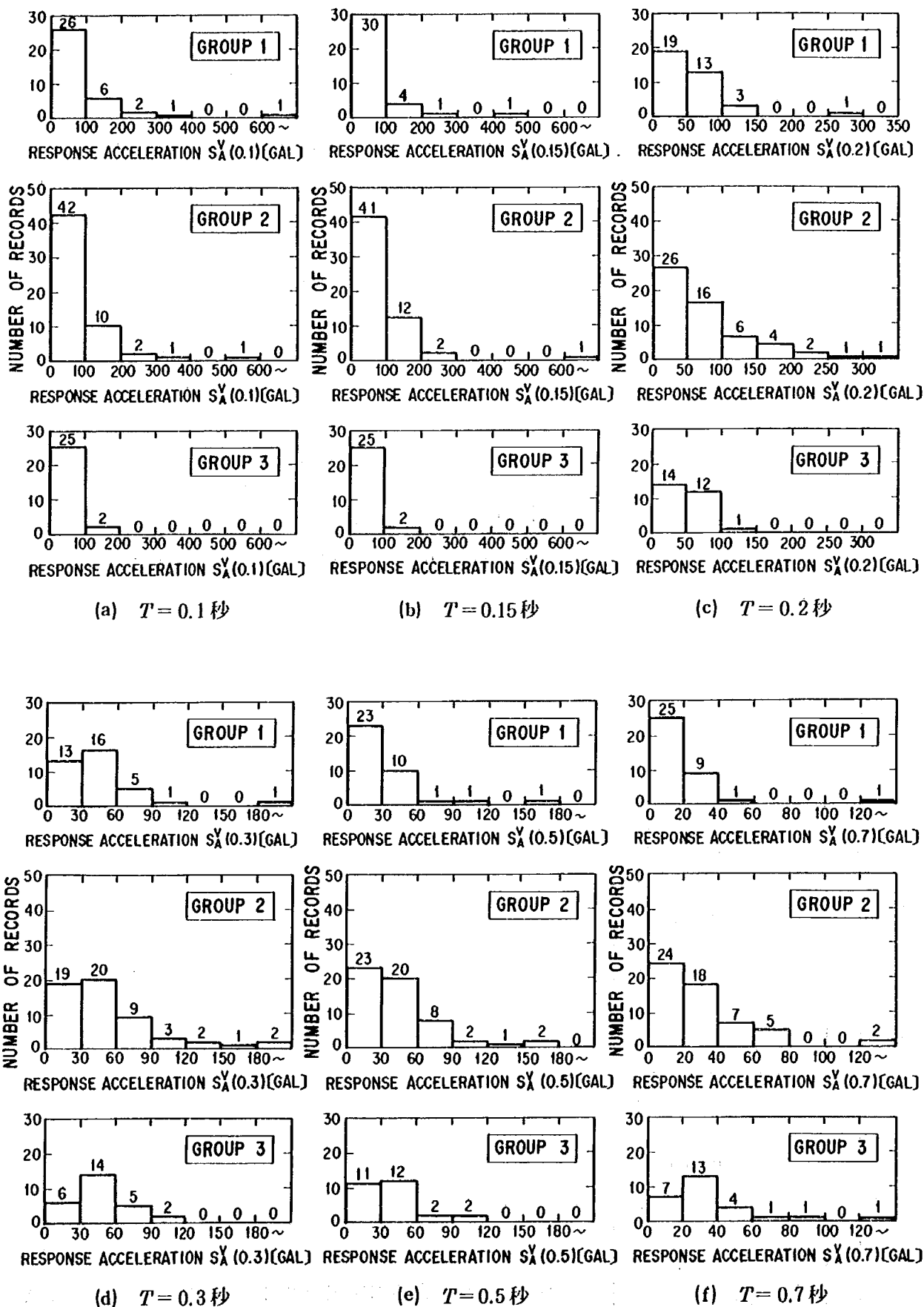
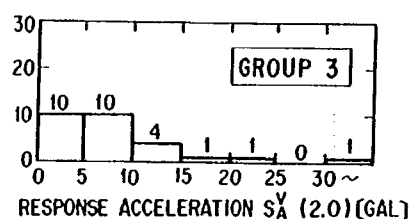
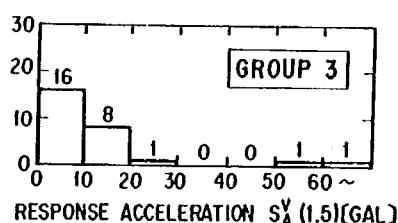
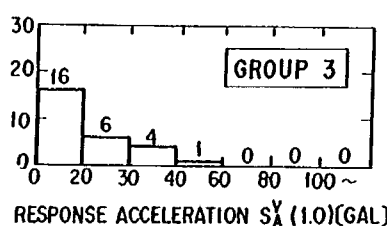
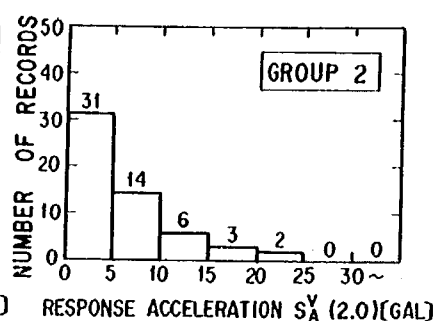
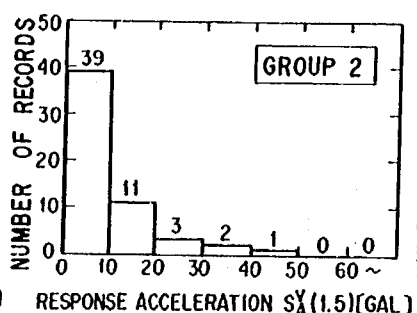
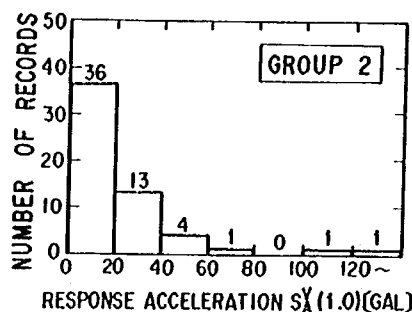
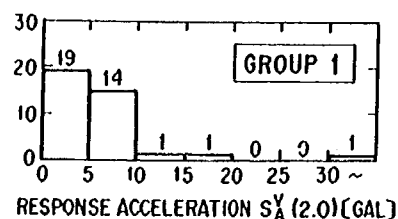
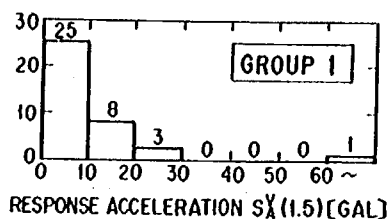
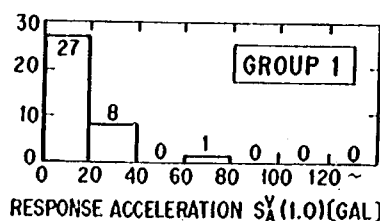


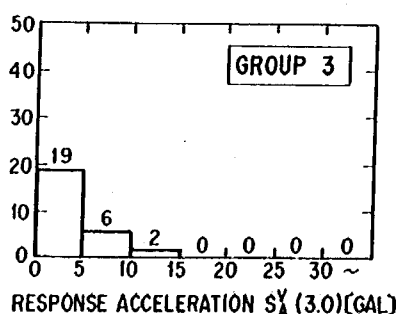
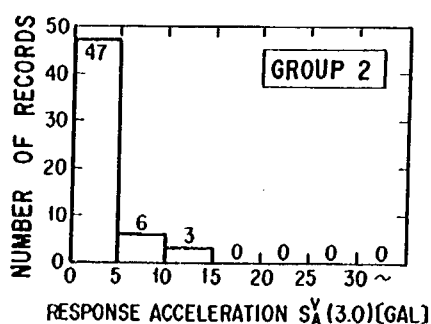
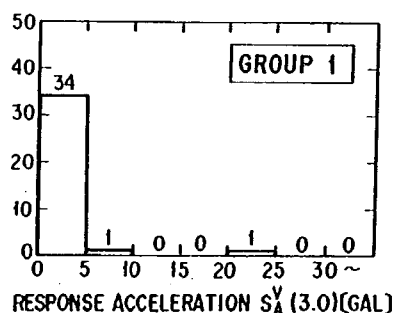
図 2 - 4 (1) 解析対象記録の加速度応答スペクトルの頻度分布



(g) $T = 1.0$ 秒

(h) $T = 1.5$ 秒

(i) $T = 2.0$ 秒



(j) $T = 3.0$ 秒

図2-4(2) 解析対象記録の加速度応答スペクトルの頻度分布

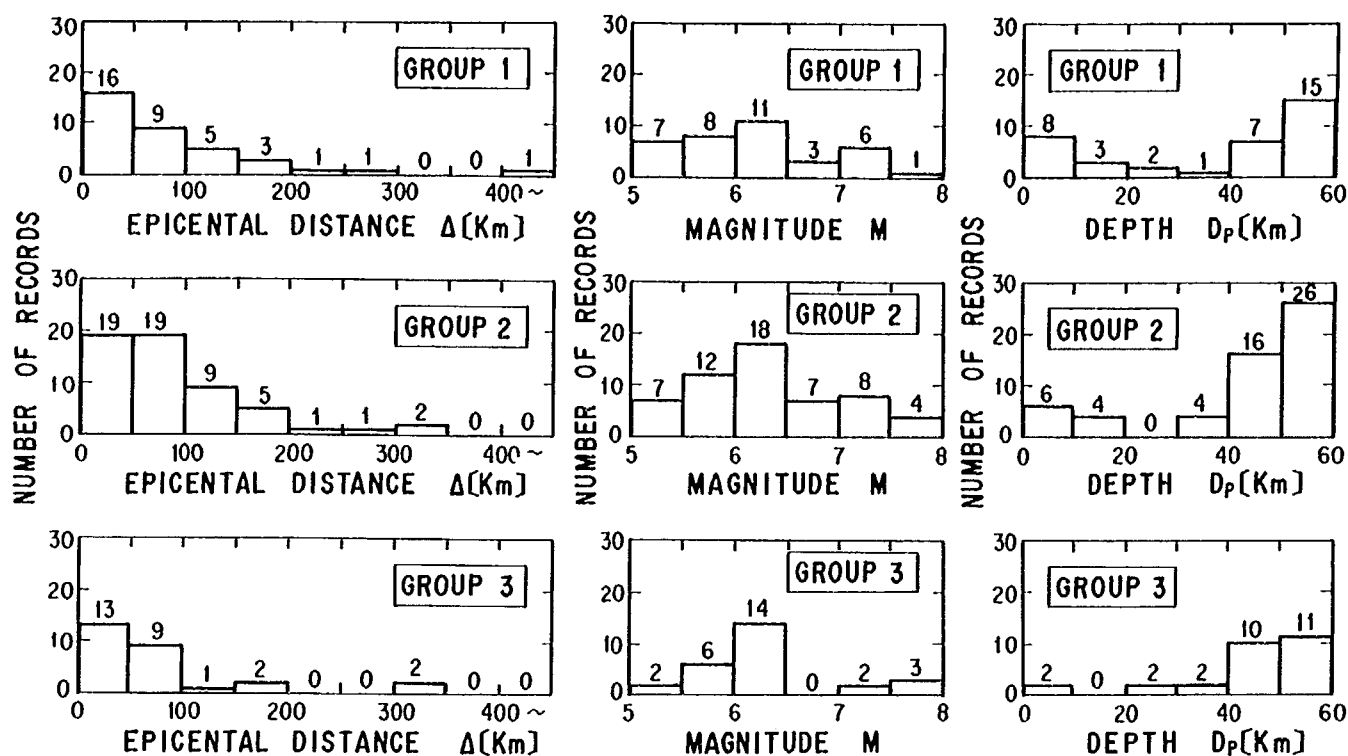


図2-5. 解析対象記録の震央距離，マグニチュードおよび震源深さごとの分類

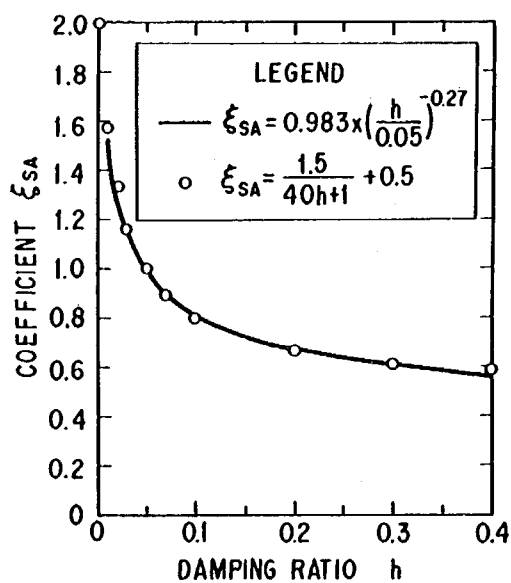


図2-6. 減衰定数 h による加速度応答スペクトル S_A の補正 (式(2-8))

3. 最大地震動の距離減衰式

3-1. 上下方向最大地震動の距離減衰式

最大地震動の距離減衰式に関しては現在までに各種の検討が行われているが、その大部分は水平方向地震動に対するものであり、上下方向地震動に対する検討は比較的少ない。ここでは、水平方向地震動の距離減衰特性に対する検討結果（土研資料1993号）に基づき、上下方向地震動の距離減衰式として次式を用いることとした。

$$X(M, \Delta, GC_i) = a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(GC_i)} \quad (3-1)$$

$$X(M, \Delta, GC_i) = a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^c \quad (3-2)$$

ここで、

X : 最大地震動（最大加速度 $a_{\max}^V$ [gal], 最大速度 $v_{\max}^V$ [cm/sec], 最大変位 $d_{\max}^V$ [cm]

M : 気象庁によるマグニチュード

Δ : 震央距離 [km]

Δ_0 : Δ が小さい範囲の X を調整する距離の指標、ここでは土研資料1993号に従い、 $\Delta_0 = 30$ km とする。

GC_i : 地盤種別 ($i = 1, 2, 3$)

$a(GC_i)$, $b(GC_i)$, $c(GC_i)$: 地盤種別ごとに重回帰分析により定められる係数

c : 地盤種別によらないとした場合の係数

ここで、式(3-1)と式(3-2)の違いは距離($\Delta + 30$)にかかる係数 c が地盤種別 GC_i ($i = 1, 2, 3$) によって変化すると仮定するかしないかである。これは、水平方向の最大地震動の距離減衰式の検討において、係数 a , b , c それぞれの地盤種別依存性を検討した結果、係数 a および b の両者はともに地盤種別によって変化しないと予測回帰式の精度が著しく低下するが、係数 c については、地盤種別によって変化する場合と変化しない場合とでは、自由度調整済みの重相関係数で表わした回帰式の精度に著しい違いがなく（ただし、やや後者の方が精度がよい）、また、結果的には式(3-1)および式(3-2)の距離減衰式の精度が他の形式の距離減衰式に比較して相対的に高いことによったものである。

式(3-1)および(3-2)を用いて前章に示した119成分の強震記録をもとに重回帰分析により係数 a , b , c を定めるとそれぞれ表3-1、表3-2のようになる。これより最大加速度 $a_{\max}^V$, 最大速度 $v_{\max}^V$, 最大変位 $d_{\max}^V$ は次式のようになる。

式(3-1)を用いた場合

$$a_{\max}^V = \begin{cases} 145.8 \times 10^{0.281M} \times (\Delta + 30)^{-1.277} & (1 \text{ 種地盤}) \\ 73.2 \times 10^{0.273M} \times (\Delta + 30)^{-1.078} & (2 \text{ 種地盤}) \\ 13.3 \times 10^{0.419M} \times (\Delta + 30)^{-1.240} & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases} \quad (3-3)$$

$$v_{\max}^v = \begin{cases} 1.77 \times 10^{0.313M} \times (\Delta + 30)^{-1.183} & (1 \text{ 種地盤}) \\ 0.370 \times 10^{0.323M} \times (\Delta + 30)^{-0.720} & (2 \text{ 種地盤}) \\ 0.0847 \times 10^{0.499M} \times (\Delta + 30)^{-0.931} & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases} \quad (3-4)$$

$$d_{\max}^v = \begin{cases} 0.0182 \times 10^{0.509M} \times (\Delta + 30)^{-1.112} & (1 \text{ 種地盤}) \\ 0.0185 \times 10^{0.361M} \times (\Delta + 30)^{-0.611} & (2 \text{ 種地盤}) \\ 0.00367 \times 10^{0.569M} \times (\Delta + 30)^{-0.819} & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases} \quad (3-5)$$

式(3-2)を用いた場合

$$a_{\max}^v = \begin{cases} 117.0 \times 10^{0.238M} \\ 88.2 \times 10^{0.297M} \\ 13.5 \times 10^{0.402M} \end{cases} \times (\Delta + 30)^{-1.190} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \quad (3-6)$$

$$v_{\max}^v = \begin{cases} 1.02 \times 10^{0.311M} \\ 0.558 \times 10^{0.374M} \\ 0.0837 \times 10^{0.511M} \end{cases} \times (\Delta + 30)^{-0.968} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \quad (3-7)$$

$$d_{\max}^v = \begin{cases} 0.0100 \times 10^{0.474M} \\ 0.0289 \times 10^{0.417M} \\ 0.00363 \times 10^{0.579M} \end{cases} \times (\Delta + 30)^{-0.879} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \quad (3-8)$$

表3-1. 式(3-1)を用いた場合の $a_{\max}^v$, $v_{\max}^v$, $d_{\max}^v$ に対する距離減衰式の係数 a, b, c

最大地震動	地盤種別	a	b	c	R (σ)
$a_{\max}^v$	1種	145.8	0.281	-1.277	0.984 (0.254)
	2種	73.22	0.273	-1.078	
	3種	13.26	0.419	-1.240	
$v_{\max}^v$	1種	1.766	0.343	-1.183	0.757 (0.221)
	2種	0.370	0.323	-0.720	
	3種	0.0847	0.499	-0.931	
$d_{\max}^v$	1種	0.0182	0.509	-1.112	0.965 (0.217)
	2種	0.0185	0.361	-0.611	
	3種	0.00367	0.569	-0.849	

表3-2. 式(3-2)を用いた場合の $a_{\max}^v$, $v_{\max}^v$, $d_{\max}^v$ に対する距離減衰の係数 a, b, c

最大地震動	地盤種別	a	b	c	R (σ)
$a_{\max}^v$	1種	117.0	0.268	-1.190	0.984 (0.253)
	2種	88.19	0.297		
	3種	13.49	0.402		
$v_{\max}^v$	1種	1.024	0.311	-0.968	0.748 (0.223)
	2種	0.558	0.374		
	3種	0.0837	0.511		
$d_{\max}^v$	1種	0.0100	0.474	-0.879	0.964 (0.222)
	2種	0.0289	0.417		
	3種	0.00363	0.579		

また、これらの距離減衰式の係数 a, b, c を式(3-3)～式(3-5)および式(3-6)～式(3-8)の場合について示すとそれぞれ図3-1および図3-2のようになる。これより、距離減衰式の係数に関して以下の事項が指摘される。

(1) 係数 a はいずれの地盤種別の場合にも、 $a_{\max}^v$, $v_{\max}^v$, $d_{\max}^v$ の順で小さくなる。また、式(3-2)の距離減衰式を用いた $d_{\max}^v$ の場合を除くと、係数 a はいずれの場合も、1種地盤の場合が一番大きく、以下、2種地盤、3種地盤の順となっている。このような傾向は式(3-1)の距離減衰式を用いた場合でも式(3

－ 2) の距離減衰式を用いた場合でもほとんど同じである。

(2) 係数 b はいずれの地盤種別の場合にも $a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ の順で大きくなる。また、これを地盤種別ごとに比較すると式 (3-1) の距離減衰式を用いた $d_{\max}^V$ を除くと $a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ いずれの場合も、一般に 3 種地盤の係数 b が一番大きく、また、1 種地盤の係数 b および 2 種地盤の係数 b は相互にあまり変わらない。係数 b はマグニチュード M が 1.0 大きくなった場合に最大地震動が何倍になるかを表わすものであり、 $a_{\max}^V$ の場合には地盤種別で異なるが、0.27～0.42 程度であるのに対し、 $d_{\max}^V$ の場合には、0.36～0.58 程度となっており、明らかに $a_{\max}^V \rightarrow v_{\max}^V \rightarrow d_{\max}^V$ となるに従い、マグニチュード依存性が強くなることを示している。

(3) 係数 c はいずれの地盤種別の場合にも全体として $a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ の順に絶対値が小さくなる。ただし、式 (3-1) の距離減衰式を用いた場合を検討すると $a_{\max}^V$ の場合には、係数 c は地盤種別にあまりよらず -1.1～-1.3 程度の範囲におさまっているのに対し、 $d_{\max}^V$ の場合には係数 c は地盤種別によって -0.85～-1.1 と比較的大きく変化する。したがって $d_{\max}^V$ のように係数 c が地盤種別によって大きく変化する場合には式 (3-2) の距離減衰式を用いることには、本質的に無理があるかもしれない。これについては今後記録の蓄積を待ち、検討を加えることが必要とされる。

以上のように、最大変位 $d_{\max}^V$ を除くと式 (3-1) と式 (3-2) の 2 種類の距離減衰式を用いた場合の係数 a , b , c はともに比較的良く似た特性を示している。そこで、式 (3-3)～式 (3-8) に従い、両ケースの距離減衰特性を $M=6$ および $M=8$ の場合について比較した結果が図 3-3 である。これによれば、最大加速度 $a_{\max}^V$ の場合には式 (3-1) および式 (3-2) の違いはごくわずかであり、実用上はほとんど差がないといってもよい。これに対して、最大変位 $d_{\max}^V$ の場合には、マグニチュード M が大きくなるにつれて式 (3-1) と式 (3-2) の違いは顕著となり、たとえば、 $M=8$ の場合には、震央距離 $d=30$ km の場合を例にとると、式 (3-1) による 1 種地盤、2 種地盤、3 種地盤の $d_{\max}^V$ がそれぞれ約 2.3 cm, 1.1 cm, 4 cm であるのに対し、式 (3-2) による $d_{\max}^V$ はそれぞれ約 1.7 cm, 1.7 cm, 4.2 cm となり、1 種地盤および 2 種地盤の場合に違いが大きいことがわかる。同様な傾向は、最大速度 $v_{\max}^V$ の場合にも多少認められ、 $d_{\max}^V$ の場合と同様マグニチュード M が大きくなると式 (3-1) と式 (3-2) の距離減衰式間に多少差が生じてくる。ただし、従来の震災経験等から判断すると $d_{\max}^V$, $v_{\max}^V$ いずれの場合にも、地盤種別が、1 種、2 種、3 種の順に同一のマグニチュードおよび震央距離に対する最大地震動は大きくなるはずだという観点から試算結果をみると、式 (3-2) を用いた場合には、ほぼ期待通りの距離減衰特性を示すのに対して、式 (3-1) を用いた場合には、マグニチュードの大きい場合に必ずしもこのようにはならない。上記の (3) の理由により $d_{\max}^V$ (一部には、 $v_{\max}^V$ も含む) に対しては式 (3-2) の距離減衰式を適用することには将来検討の余地があると考えられるが $d_{\max}^V$ の地盤種別による変化の状況等を総合的に考慮し、一応ここでは、式 (3-2) の距離減衰式を仮定した式 (3-6)～式 (3-8) を採用することとする。

式 (3-6)～式 (3-8) による $a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ を予測式のもととなった実測値(ただし、 $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ は加速度記録から計算で求めた速度および変位の最大値)とともに示すと、それぞれ図 3-4, 3-5, 3-6 となる。また、 $a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ の距離減衰式をマグニチュード $M=6$ および 8 に対して示すと、図 3-7

のようになる。これによれば同一のマグニチュードおよび震央距離に対する最大加速度 $a_{\max}^V$ は、地盤種別によってあまり大きく変化しないのに対して、最大加速度 $v_{\max}^V$ の場合には、一般に、1種地盤→2種地盤→3種地盤となるにつれ、 $v_{\max}^V$ が大きくなることがわかる。ただし、最大変位 $d_{\max}^V$ ではマグニチュード $M=8$ の場合には1種地盤と2種地盤がほとんど同程度の距離減衰を与えるのに対して3種地盤の距離減衰はこれらよりもかなり大きな値を与えており、必ずしも地盤種別による区分がなめらかではない。こうした点については、解析に用いた記録数が少ないことが原因の1つと考えられ、今後記録の蓄積を図り、再検討することが必要と考えられる。

次に、式(3-6)～式(3-8)による最大地震動の推定値のばらつきを示すため、実測値とこれが得られた地震のマグニチュード M および震央距離 Δ から式(3-6)～式(3-8)により求めた推定値の比を次式により定義した。

$$\begin{aligned} U_a &= a_{\max}^{VOB} / a_{\max}^{VP} \\ U_v &= v_{\max}^{VOB} / v_{\max}^{VP} \\ U_d &= d_{\max}^{VOB} / d_{\max}^{VP} \end{aligned} \quad (3-9)$$

ここで、

U_a, U_v, U_d : それぞれ最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$, 最大速度 $\tilde{v}_{\max}$, 最大変位 $\tilde{d}_{\max}$ のばらつきの度合いを表わす指標

$a_{\max}^{VOB}, v_{\max}^{VOB}, d_{\max}^{VOB}$: 重回帰分析のもととなった実測の最大加速度 [gal], および実測加速度から求めた最大速度 [cm/sec], 最大変位 [cm]

$a_{\max}^{VP}, v_{\max}^{VP}, d_{\max}^{VP}$: 式(3-6)～式(3-8)から求められる最大加速度 [gal], 最大速度 [cm/sec], 最大変位 [cm] の期待値

したがって、実際の最大地震動 $a_{\max}^{VOB}, v_{\max}^{VOB}, d_{\max}^{VOB}$ は式(3-9)から次式で与えられることになる。

$$\left. \begin{aligned} a_{\max}^{VOB} &= U_a \times a_{\max}^{VP} = U_a \\ v_{\max}^{VOB} &= U_v \times v_{\max}^{VP} = U_v \\ d_{\max}^{VOB} &= U_d \times d_{\max}^{VP} = U_d \end{aligned} \right\} \times [a \times 10^{bM} \times (\Delta + 30)^c] \quad (3-10)$$

式(3-9)より、 U_a, U_v, U_d を求め、これと M および Δ の関係を示すと、それぞれ図3-8, 3-9, 3-10のようになる。これによれば、 U_a, U_v, U_d は M および Δ により顕著に変化しない。次に各地盤種別ごとに $\log U_a, \log U_v, \log U_d$ の頻度分布を求めると表3-3および図3-11のようになる。データ数の少ない1種地盤および3種地盤の1部では、ややばらつきがあるが、 $\log U_a, \log U_v, \log U_d$ の頻度分布は正規分布により近似できることがわかる。

いま、 $\log U_k (k=a, v, d)$ が正規分布に従うと仮定すると、 $x = \log U_k$ が $a \sim b$ の範囲にある確率 $P(a < x < b)$ は次式で与えられる。

$$P(a < x \leq b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] dx \quad (3-11)$$

ここで,

$$x = \log U_k (k=a, v, d)$$

$\mu = x$ の平均値

$\sigma = x$ の標準偏差

$x = \log U_k$ の平均値 μ および標準偏差 σ を計算すると, μ は常に 0 であり, また σ は表 3-3 に示した通りとなる。ここで, $s = x / \sigma$ とおけば x は標準正規分布に従うこととなり, 次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P(a < x \leq b) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{a}{\sigma}}^{\frac{b}{\sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2} s^2\right] ds \\ &= \Phi\left(\frac{b}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right) \end{aligned} \quad (3-14)$$

ここで, Φ は標準正規分布関数である。いま, $x = \log U_k$ が b を超えない確率 (非超過確率) を改めて p とおけば,

$$p = 1 - P\{-\infty < x \leq b\} = 1 - \Phi\left(\frac{b}{\sigma}\right) \quad (3-13)$$

となる。 U_a, U_v, U_d の標準偏差 σ は表 3-3 に示したように地盤種別および $a_{\max}^v, v_{\max}^v, d_{\max}^v$ ごとに大きく変化しないため, いま, これらの平均を求めると $\sigma = 0.221$ となる。したがって, 式 (3-13) により, 非超過確率に対応する係数 U_a, U_v, U_d を求めると図 3-12 のようになる。式 (3-9) による期待値のばらつきを考慮する場合には, 非超過確率 p に応じて図 3-12 の係数 U_a, U_v, U_d を乗じて式 (3-10) により予測値を求めることができる。

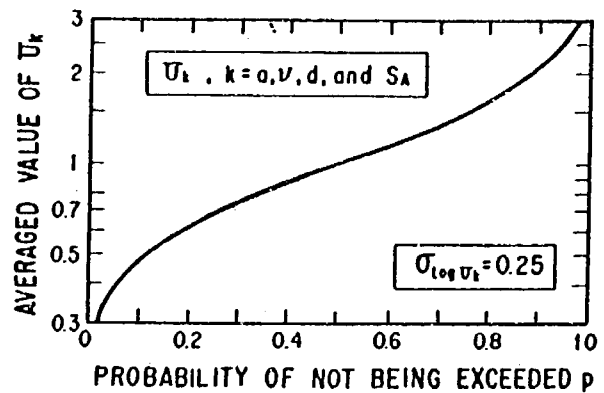


図 3-12 $U_k (k=a, v, d, S_A) \sim p$ の関係
($\sigma = 0.25$ とした場合)

3-2. 水平方向最大地震動と上下方向最大地震動の距離減衰特性の比較

前節に示した上下方向最大地震動の距離減衰式に用いた 119 成分の上下方向強震記録と同時に得られた 2@119 成分の水平方向強震記録を含む 2@197 成分の水平方向強震記録を用いて重回帰分析により求めた水平方向最大地震動の距離減衰式によれば, 最大加速度 $\tilde{a}_{\max}^H$, 最大速度 $\tilde{v}_{\max}^H$, 最大変位 $\tilde{d}_{\max}^H$ は次式で与えられる。

$$\tilde{a}_{\max}^H = \begin{cases} 987.4 \times 10^{0.216M} \\ 232.5 \times 10^{0.313M} \\ 403.8 \times 10^{0.265M} \end{cases} \times (L+30)^{-1.218} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \quad (3-14)$$

$$\tilde{v}_{\max}^H = \begin{cases} 20.82 \times 10^{0.263M} \\ 2.805 \times 10^{0.430M} \\ 5.105 \times 10^{0.404M} \end{cases} \times (\Delta + 30)^{-1.222} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \quad (3-15)$$

$$\tilde{d}_{\max}^H = \begin{cases} 0.626 \times 10^{0.372M} \\ 0.062 \times 10^{0.567M} \\ 0.070 \times 10^{0.584M} \end{cases} \times (\Delta + 30)^{-1.254} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \quad (3-16)$$

したがって、以下では、式(3-14)～式(3-16)と式(3-6)～式(3-8)を比較することにより、上下方向地震動と水平方向地震動の違いを検討することとする。まず、マグニチュード $M=6, 7, 8$ に対する最大加速度($\tilde{a}_{\max}^H, a_{\max}^V$)、最大速度($\tilde{v}_{\max}^H, v_{\max}^V$)、最大変位($\tilde{d}_{\max}^H, d_{\max}^V$)を水平方向と上下方向で比較した結果が図3-13, 3-14, 3-15である。これによれば $a_{\max}, v_{\max}, d_{\max}$ を問わず、一般に上下方向地震動は水平方向地震動よりも小さく、また、両者の距離の増加に伴う最大地震動の減衰特性は、比較的良好一致している。そこで、いま、次式により、水平方向最大地震動に対する上下方向最大地震動の比 R_a, R_v, R_d を定義する。

$$\begin{aligned} R_a &= a_{\max}^V / \tilde{a}_{\max}^H \\ R_v &= v_{\max}^V / \tilde{v}_{\max}^H \\ R_d &= d_{\max}^V / \tilde{d}_{\max}^H \end{aligned} \quad (3-17)$$

式(3-17)に式(3-6)～式(3-8)および式(3-14)～式(3-16)を代入して整理すると R_a, R_v, R_d は次のようになる。

$$R_a = \begin{cases} 0.118 \times 10^{0.0523M} \\ 0.379 \times 10^{-0.0161M} \\ 0.0334 \times 10^{0.136M} \end{cases} \times (\Delta + 30)^{0.0282} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \quad (3-18)$$

$$R_v = \begin{cases} 0.0492 \times 10^{0.0475M} \\ 0.199 \times 10^{-0.0562M} \\ 0.0164 \times 10^{0.108M} \end{cases} \times (\Delta + 30)^{0.254} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \quad (3-19)$$

$$R_d = \begin{cases} 0.0161 \times 10^{0.102M} \\ 0.468 \times 10^{-0.150M} \\ 0.0517 \times 10^{-0.00470M} \end{cases} \times (\Delta + 30)^{0.374} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \quad (3-20)$$

式(3-18)～式(3-20)による R_a, R_v, R_d をマグニチュード $M=6, 7, 8$ に対して計算した結果が図3-16, 3-17, 3-18である。これによれば、 R_a, R_v, R_d に関して以下の事項が指摘される。

1) 水平方向と上下方向の最大加速度の比 R_a は、震央距離 Δ 、マグニチュード M 、地盤種別 GC_i によって大きく変化せず全体として0.3～0.4程度の値をとる。ただし、マグニチュードが大きく8程度となると

3種地盤の R_d はやや大きくなる0.5程度となる場合がある。

2) 水平成分と上下成分の最大速度の比 R_v は、震央距離 Δ によって変化し、一般に震央距離 Δ が大きくなるにつれて R_v は大きくなる傾向にある。ただし、地震のマグニチュード M および地盤種別 GC_i の影響は比較的小さい。震央距離 $\Delta=100\text{km}$ での R_v を求めると、0.2~0.4程度となる。

3) 水平成分と上下成分の最大変位の比 R_d は、震央距離 Δ および地盤種別 GC_i によって大きく変化し、震央距離 Δ が大きくなるとともに、また、1種地盤の場合に R_d は大きくなる傾向にある。ただし、単純に式(3-20)で R_d を求めると震央距離が大きくなると R_d が1.0を超える場合も出てくるが、このような現象は既往の観測からは認められておらず、 $d_{\max}^v$ および $\tilde{d}_{\max}^u$ の予測式の精度ともあわせて式(3-20)は、今後再検討が必要である。

表 3-3 $\log U_a, \log U_v, \log U_d$ の頻度分布

	1 種 地 盤			2 種 地 盤			3 種 地 盤		
	$a_{\max}^v$	$v_{\max}^v$	$d_{\max}^v$	$a_{\max}^v$	$v_{\max}^v$	$d_{\max}^v$	$a_{\max}^v$	$v_{\max}^v$	$d_{\max}^v$
$-1.0 \leq \log U < -0.9$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.9 \leq \log U < -0.8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.8 \leq \log U < -0.7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.7 \leq \log U < -0.6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.6 \leq \log U < -0.5$	0	0	0	0	0	2	0	0	0
$-0.5 \leq \log U < -0.4$	0	0	0	5	2	1	0	0	0
$-0.4 \leq \log U < -0.3$	4	1	2	3	5	2	1	0	2
$-0.3 \leq \log U < -0.2$	5	3	4	10	5	1	3	3	1
$-0.2 \leq \log U < -0.1$	5	9	7	6	8	7	5	6	7
$-0.1 \leq \log U < 0$	4	11	6	3	6	16	6	5	5
$0 \leq \log U < 0.1$	4	3	7	4	9	14	4	4	4
$0.1 \leq \log U < 0.2$	7	3	4	10	10	5	3	6	3
$0.2 \leq \log U < 0.3$	5	1	1	7	6	4	4	1	1
$0.3 \leq \log U < 0.4$	0	3	3	6	1	3	1	2	3
$0.4 \leq \log U < 0.5$	1	1	1	0	3	0	0	0	1
$0.5 \leq \log U < 0.6$	0	1	1	1	1	0	0	0	0
$0.6 \leq \log U < 0.7$	1	0	0	1	0	0	0	0	0
$0.7 \leq \log U < 0.8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$0.8 \leq \log U < 0.9$	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$0.9 \leq \log U < 1.0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
標準偏差 σ	0.2447	0.2075	0.2163	0.2756	0.2411	0.2169	0.1831	0.1803	0.2221

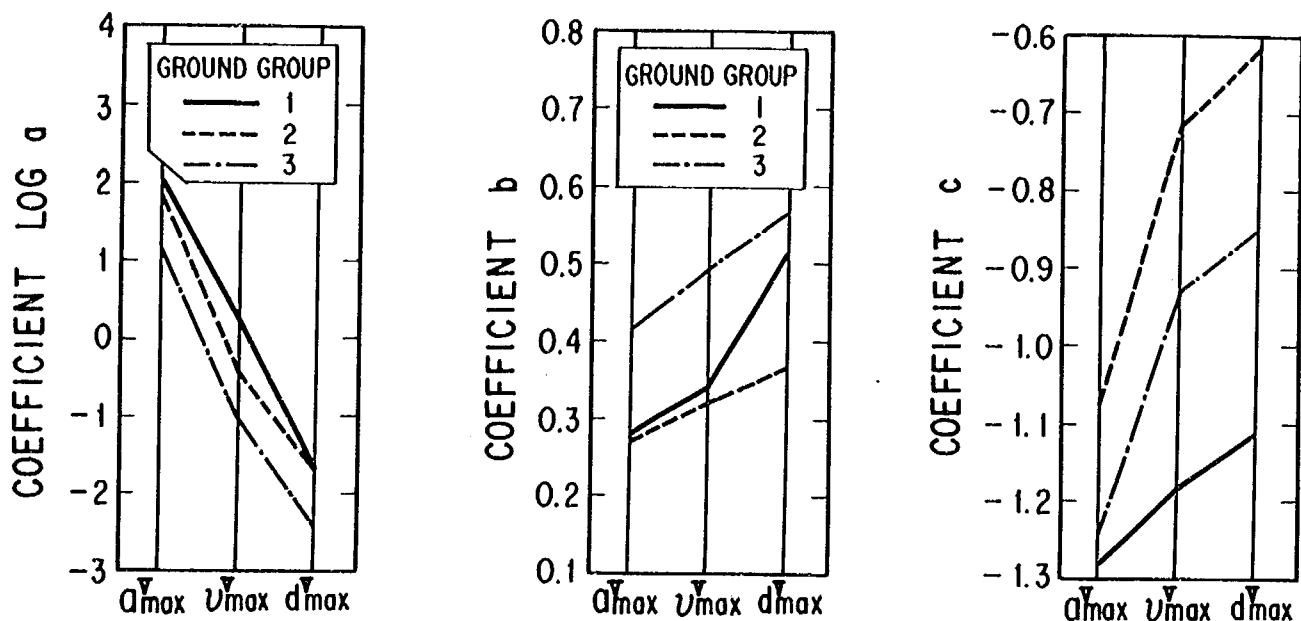


図3-1 $a_{\max}^v$, $v_{\max}^v$, $d_{\max}^v$ の距離減衰式 (式(3-1)) の係数

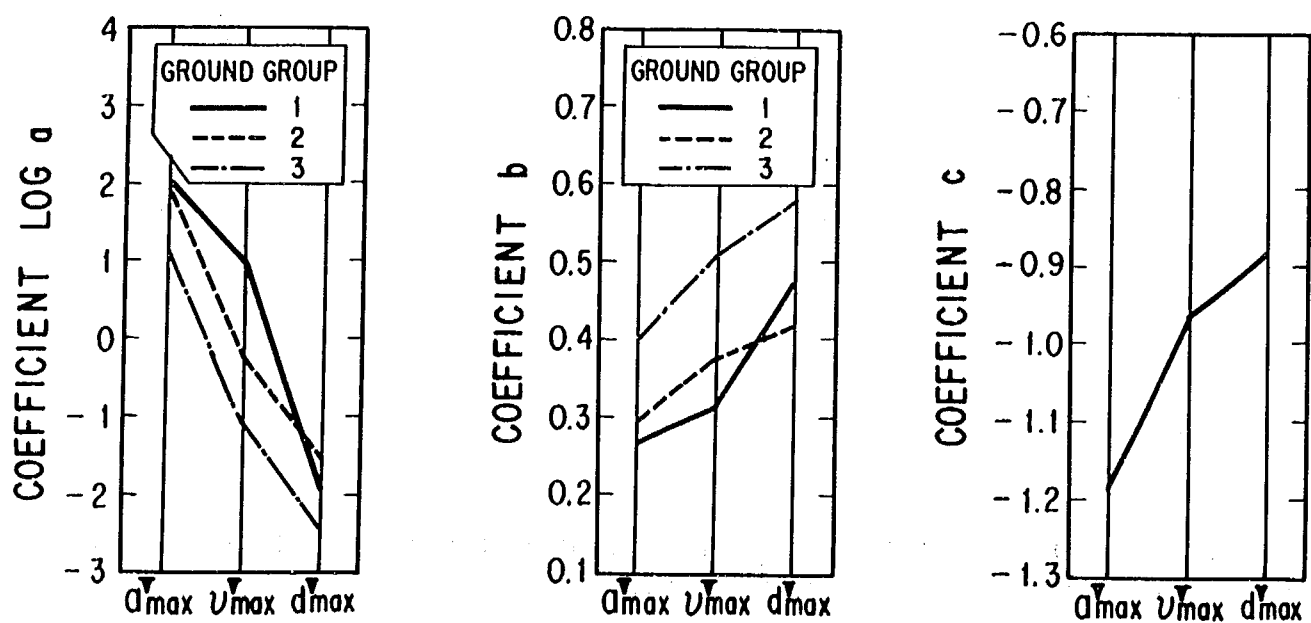
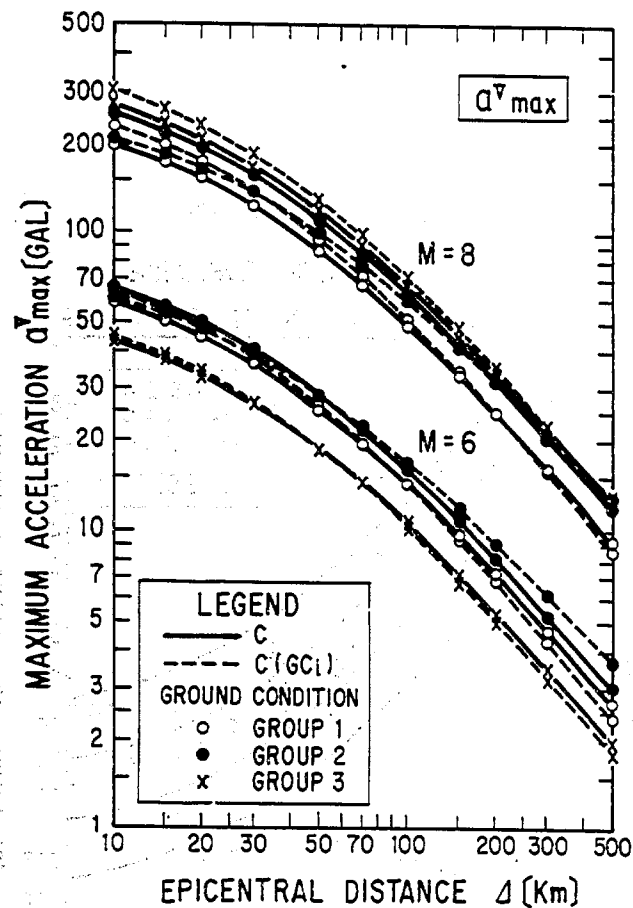
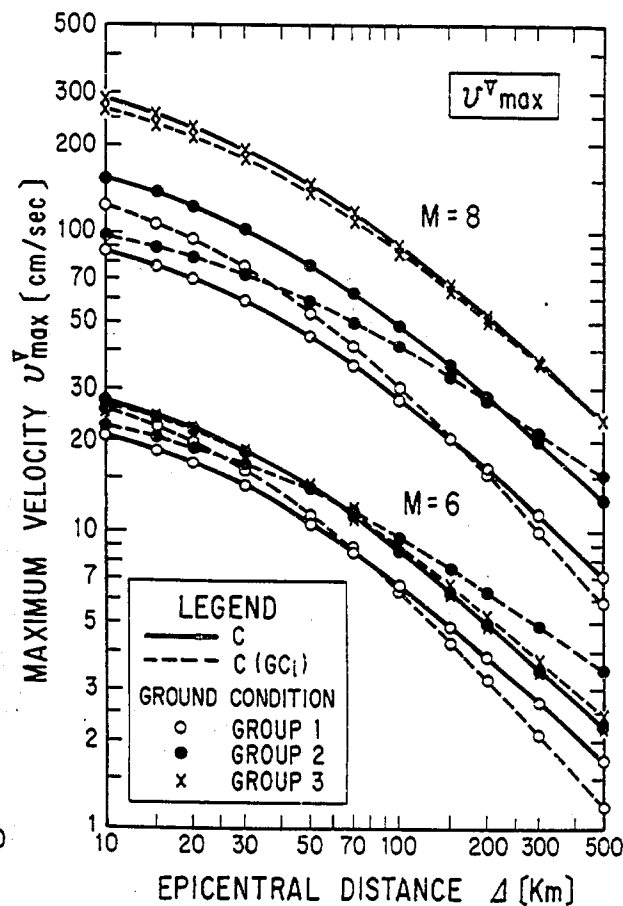


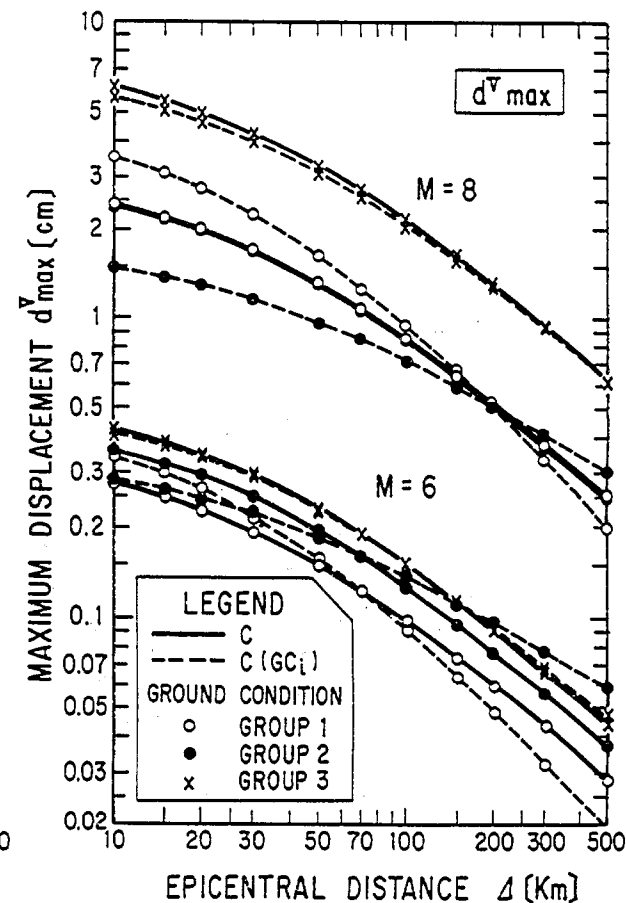
図3-2 $a_{\max}^v$, $v_{\max}^v$, $d_{\max}^v$ の距離減衰式 (式(3-2)) の係数



(a) 最大加速度 $a_v^{\max}$

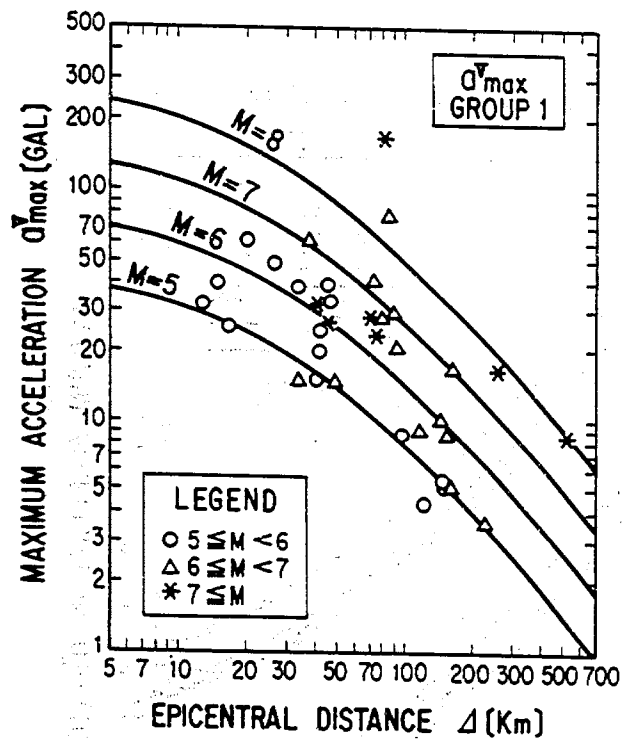


(b) 最大速度 $v_v^{\max}$

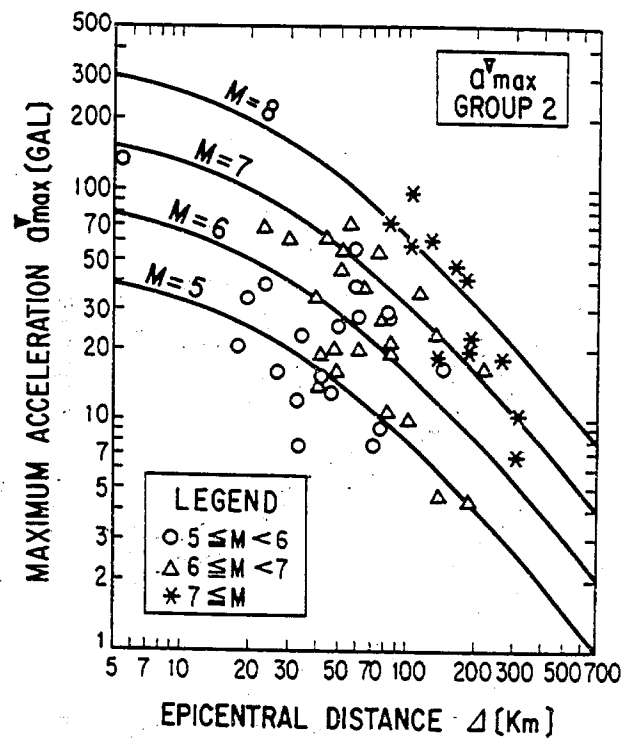


(c) 最大変位 $d_v^{\max}$

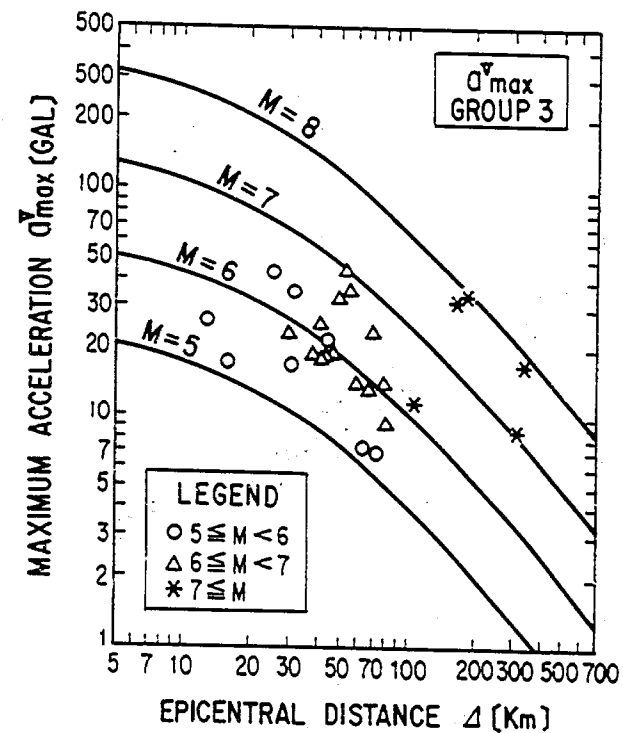
図 3-3 式(3-1)と式(3-2)の距離減衰式の比較



(a) 1 種 地 盤

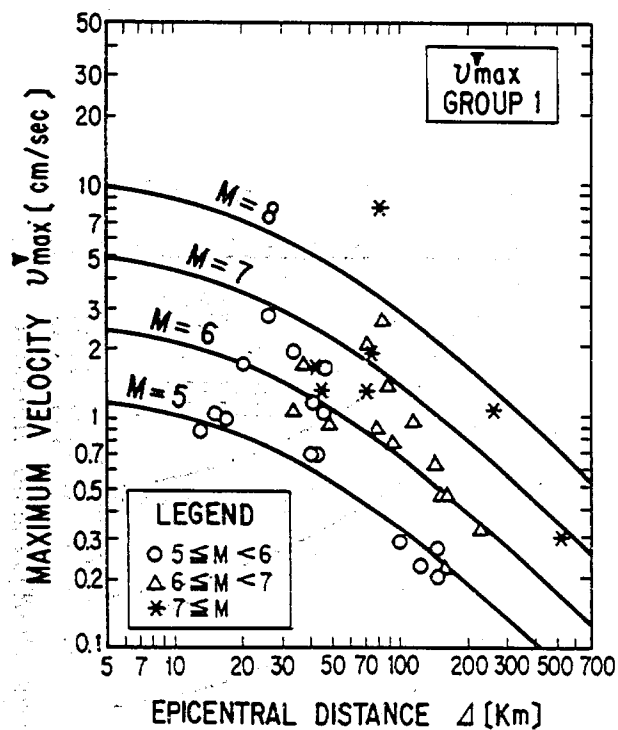


(b) 2 種 地 盤

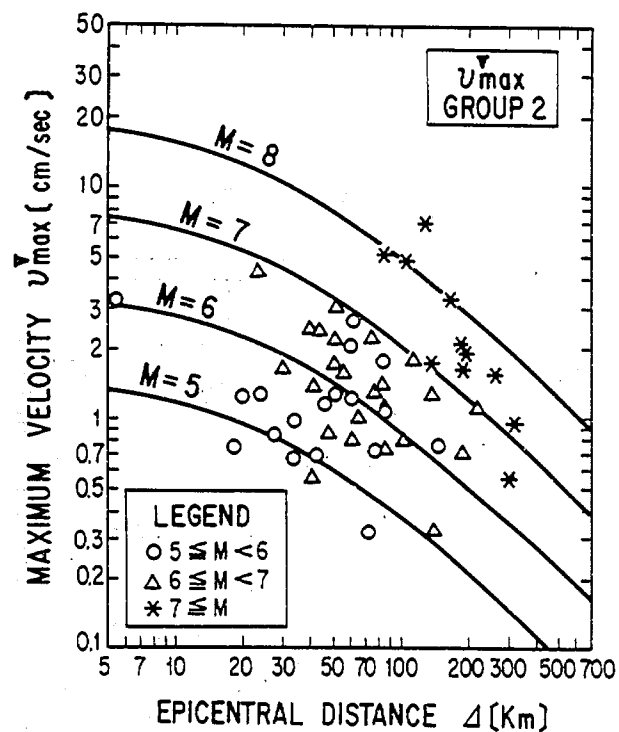


(c) 3 種 地 盤

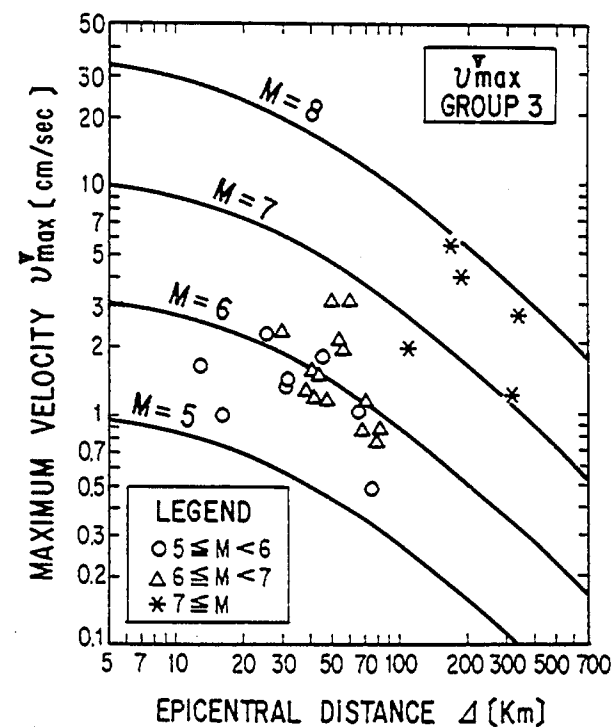
図 3 - 4 $a_{\max}^v$ の距離減衰



(a) 1 種 地 盤

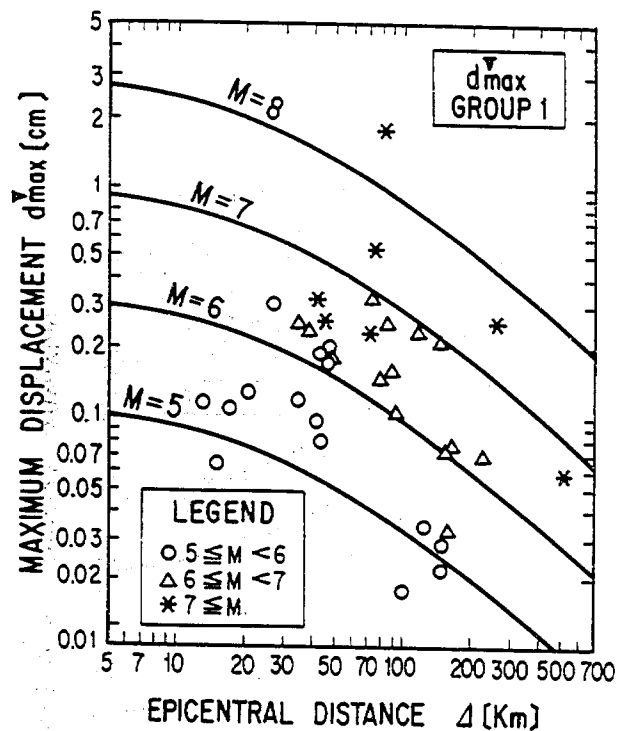


(b) 2 種 地 盤

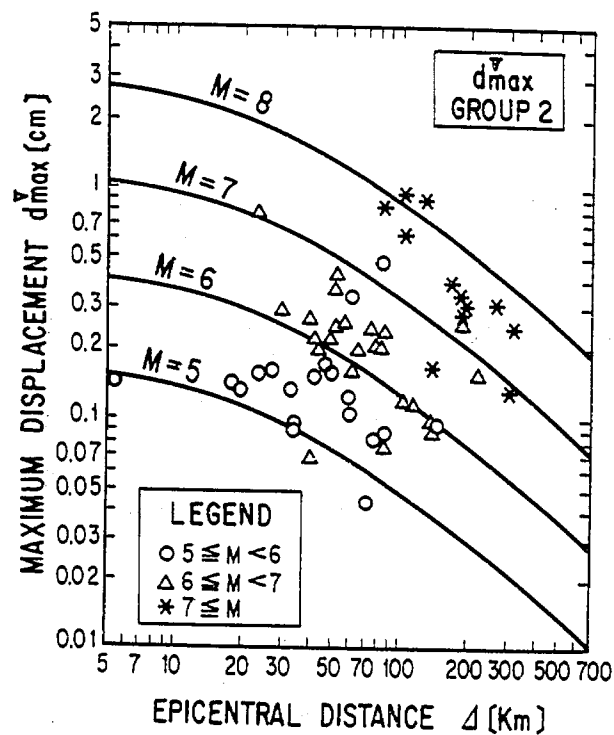


(c) 3 種 地 盤

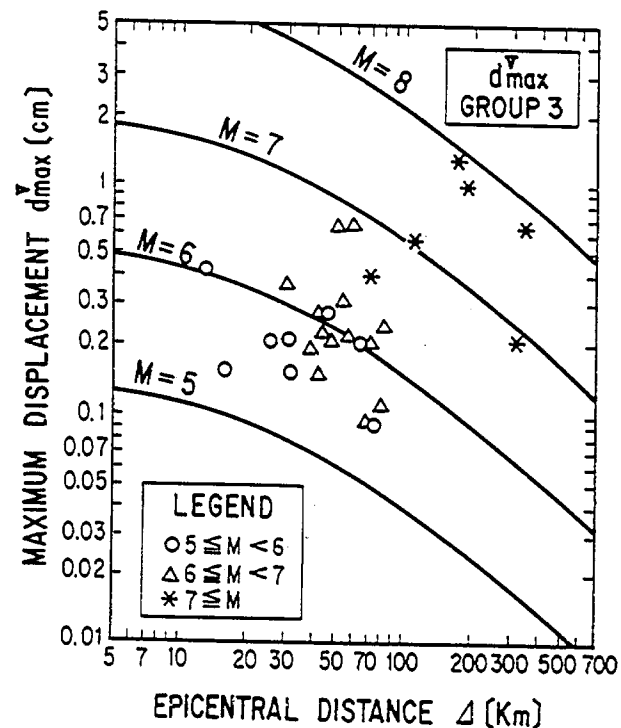
図 3 - 5 $v_{\max}$ の距離減衰



(a) 1 種 地 盤



(b) 2 種 地 盤



(c) 3 種 地 盤

図 3 - 6 $d_{\max}^v$ 距離減衰

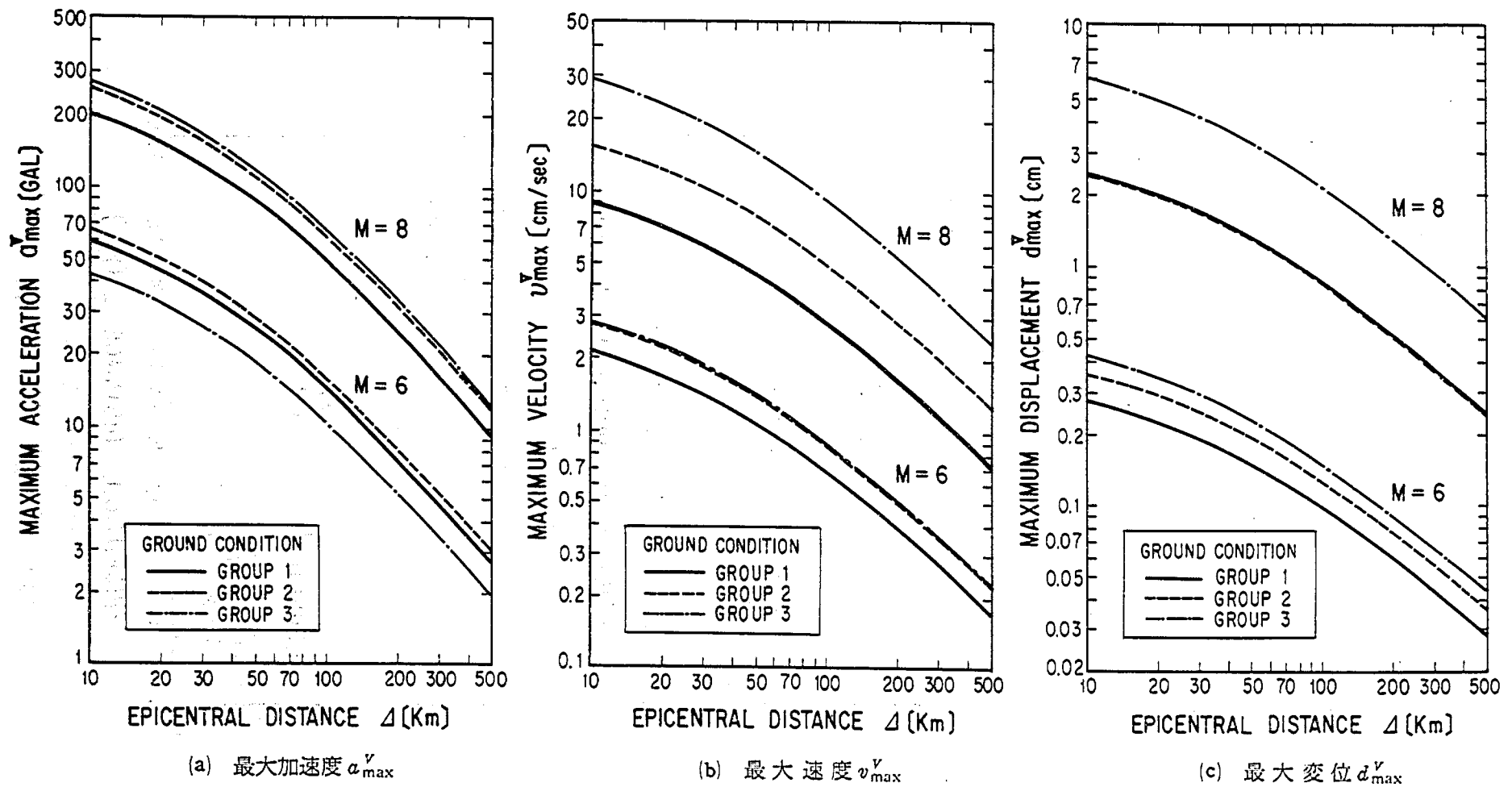
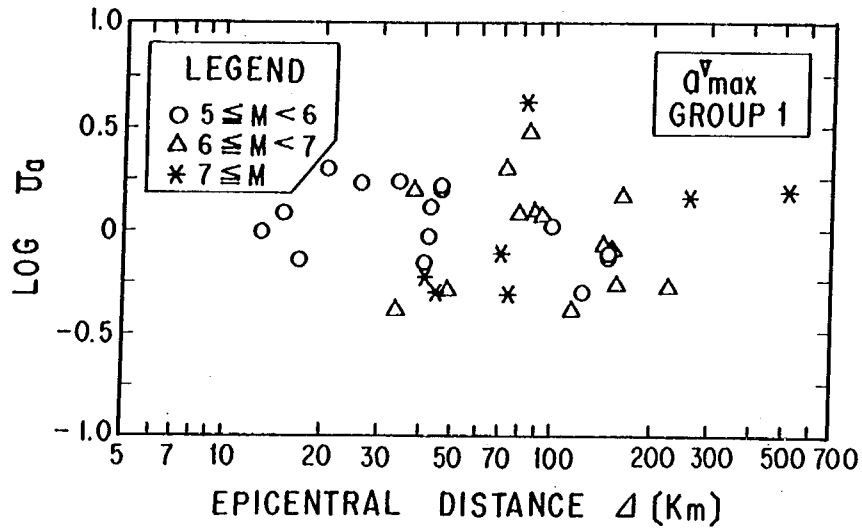
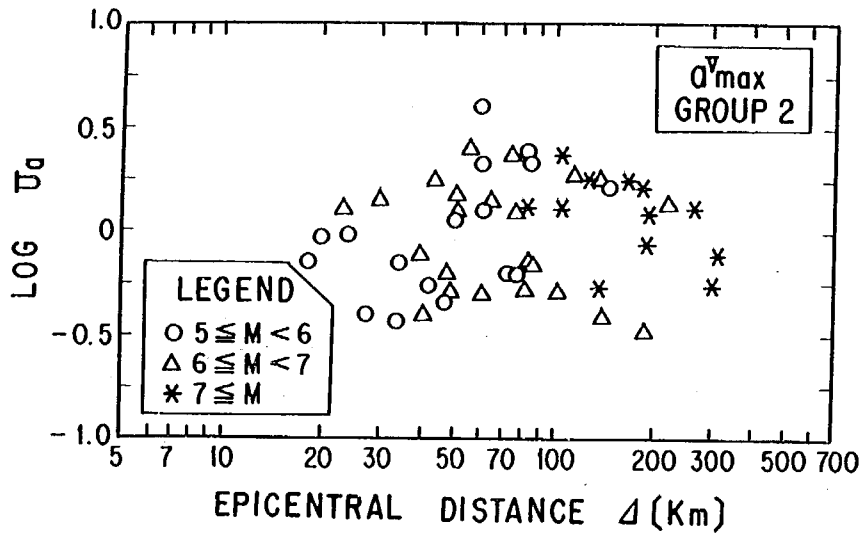


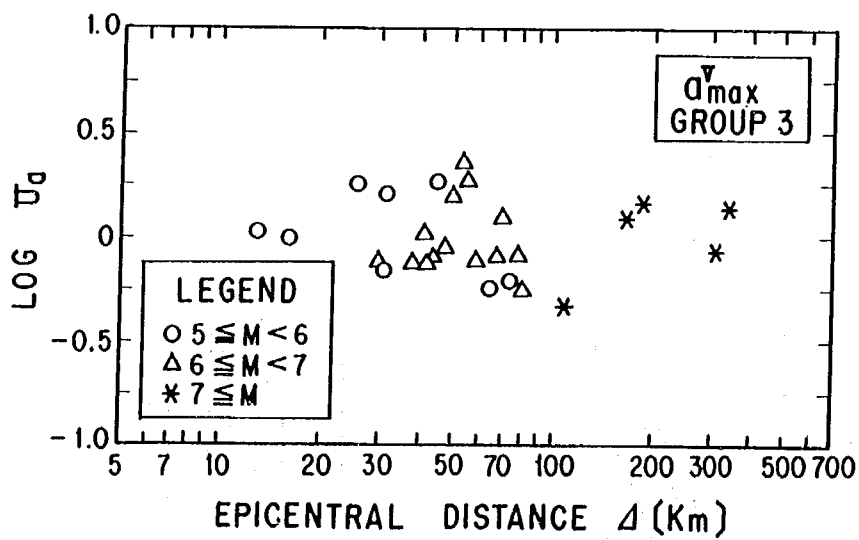
図 3 - 7 式 (3-6) ~ 式 (3-8) による $a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ の距離減衰式 ($M=6, 8$ の場合)



(a) 1 種 地 盤

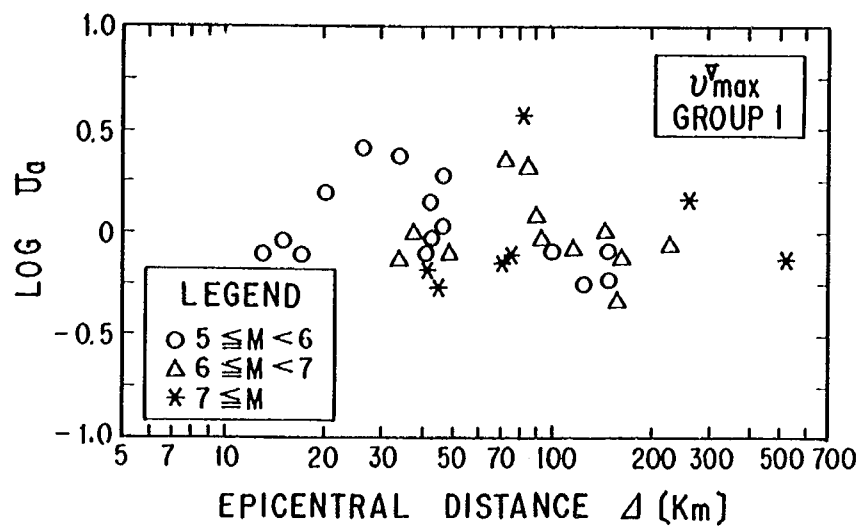


(b) 2 種 地 盤

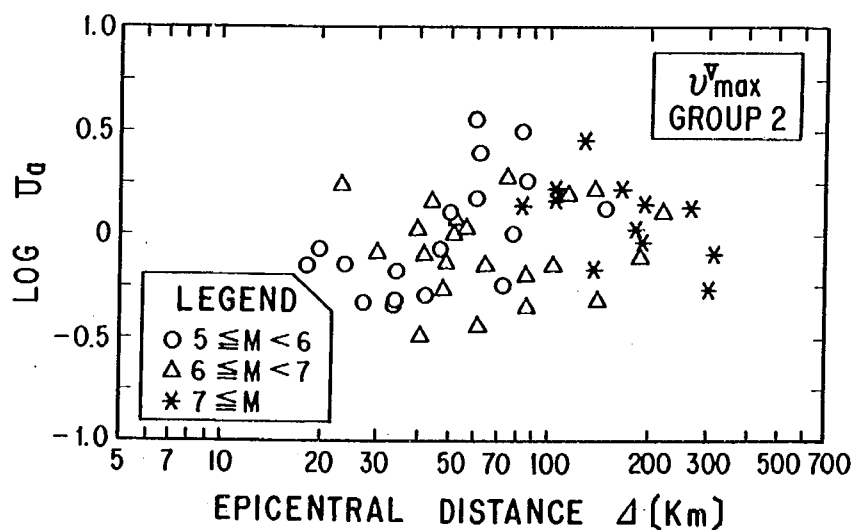


(c) 3 種 地 盤

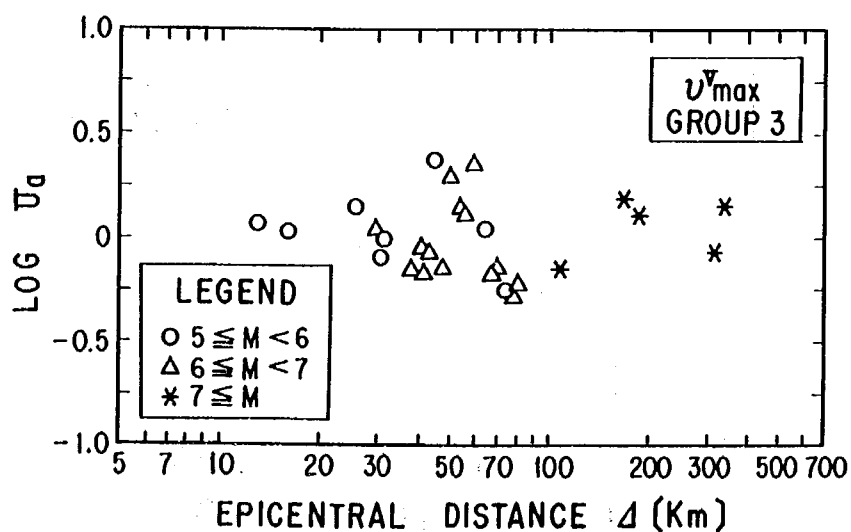
図3-8 $\log U_a \sim \Delta \sim M$ の関係



(a) 1 種 地 盤

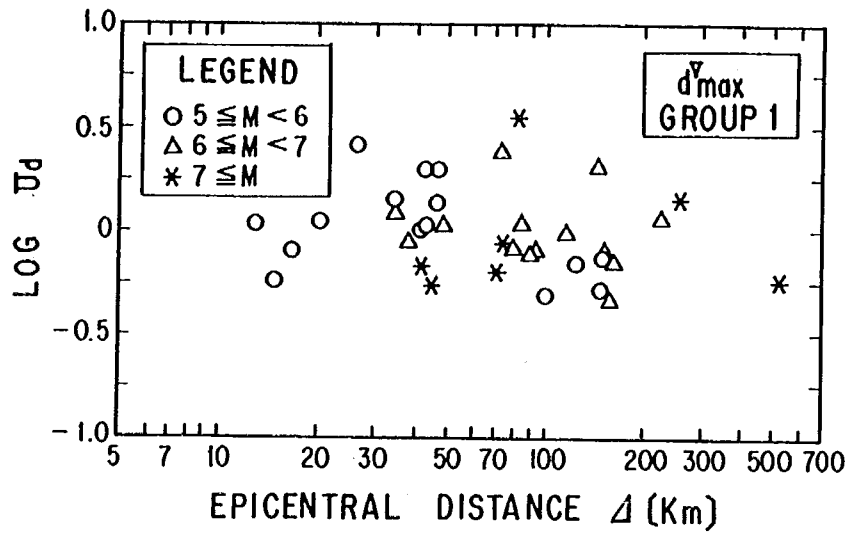


(b) 2 種 地 盤

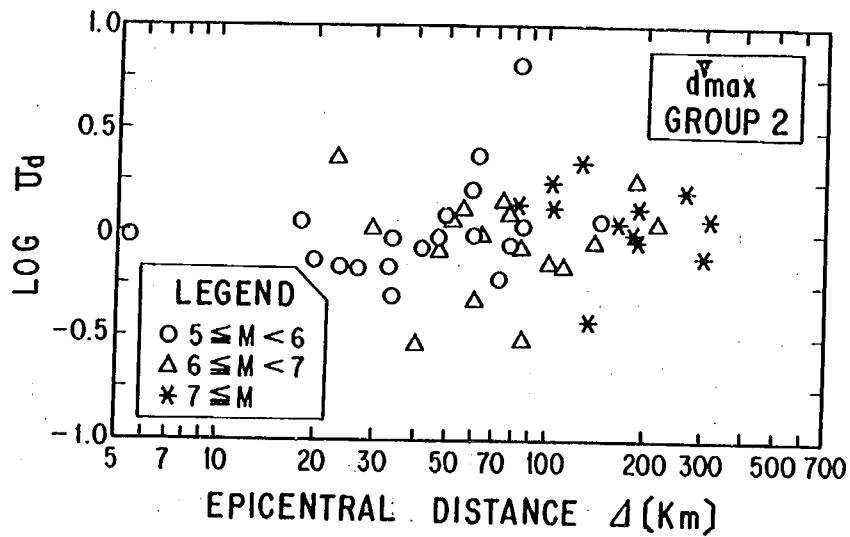


(c) 3 種 地 盤

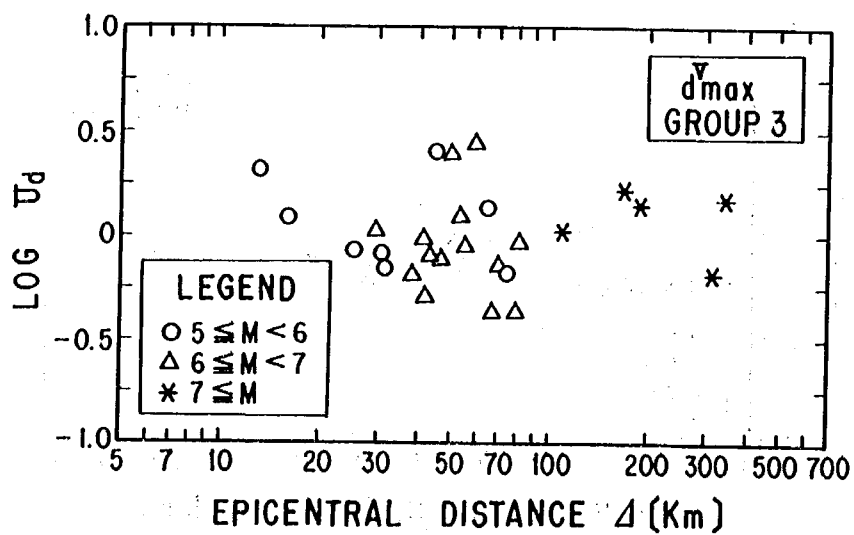
図 3-9 $\log U_v \sim \Delta \sim M$ の関係



(a) 1 種 地 盤



(b) 2 種 地 盤



(c) 3 種 地 盤

図3-10 $\log U_d \sim \Delta \sim M$ の関係

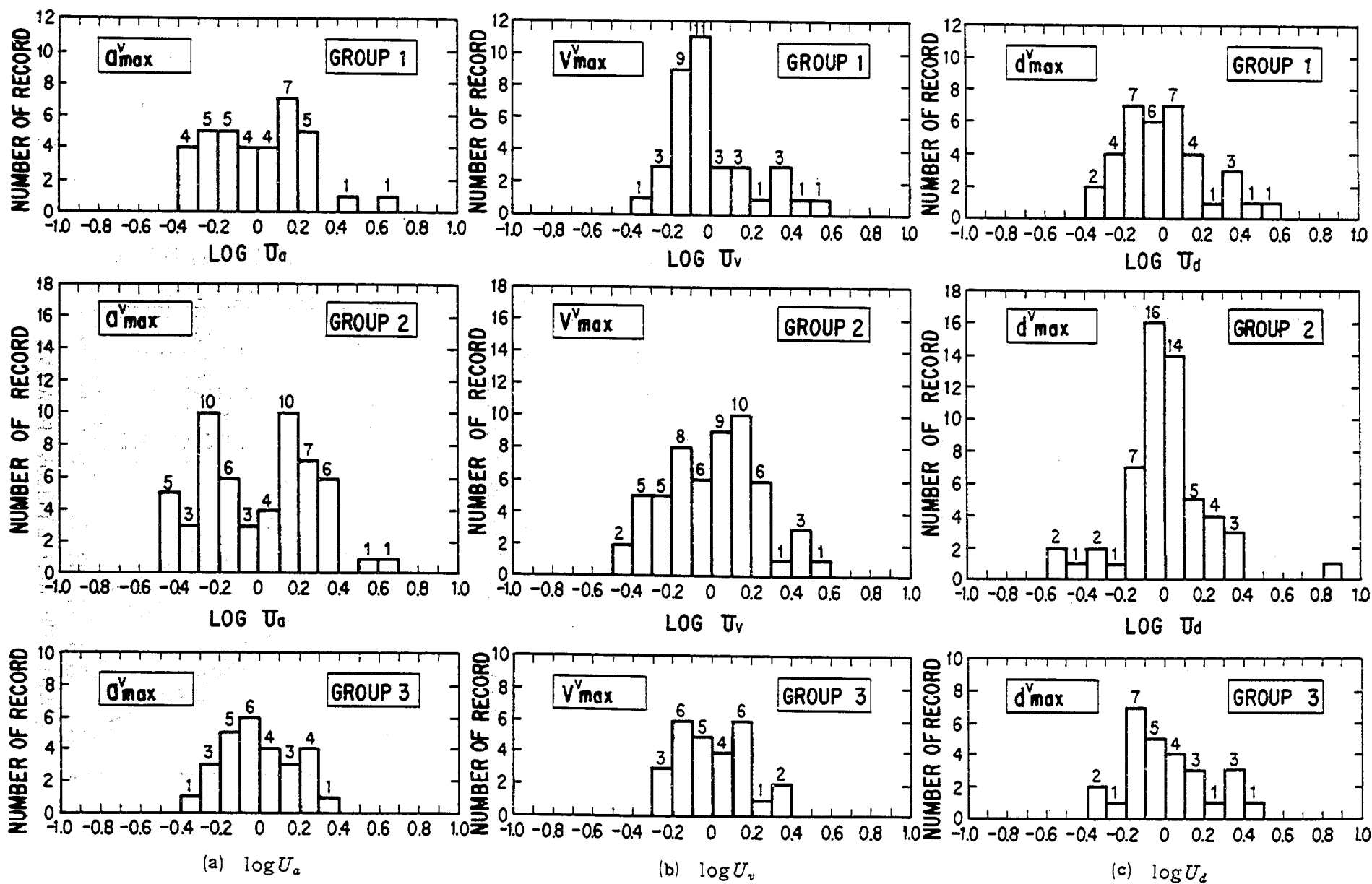
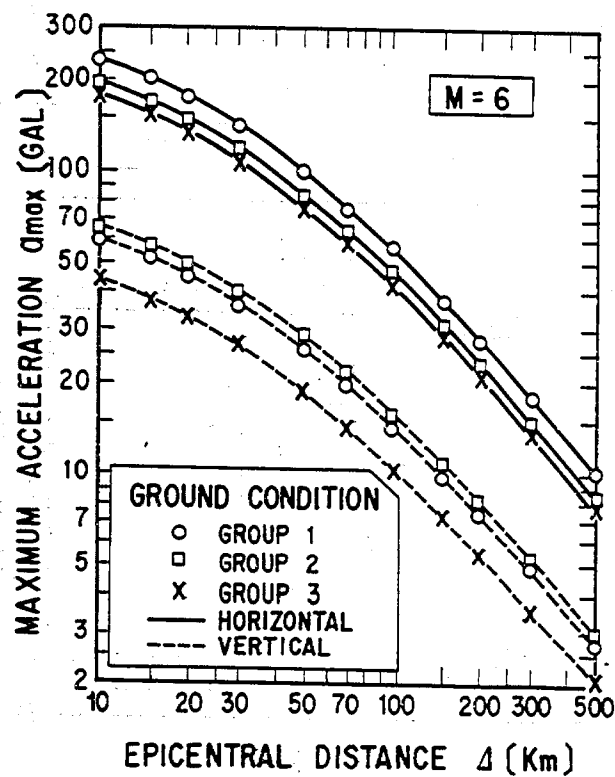
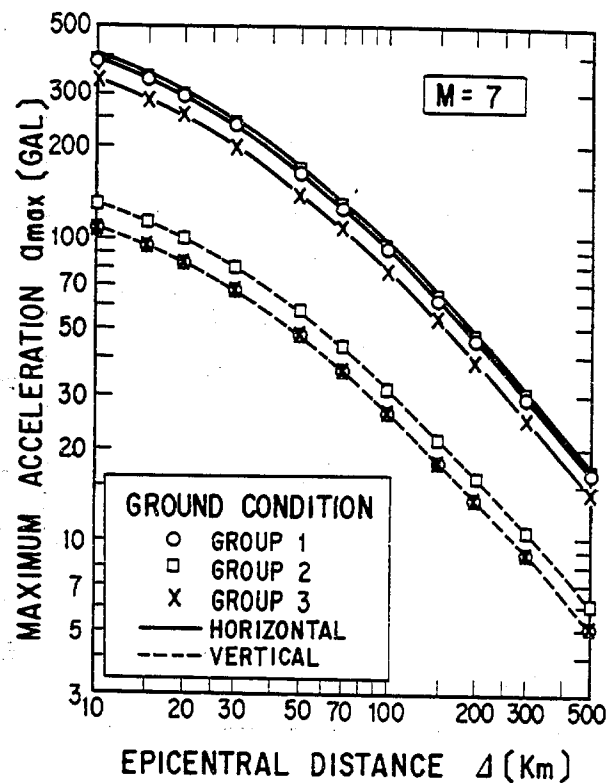


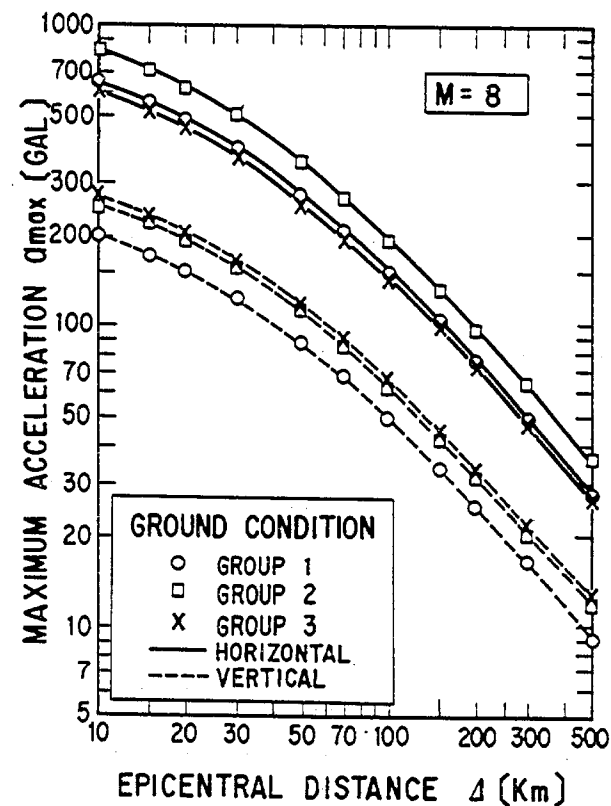
図 3-11 $\log U_a$, $\log U_v$, $\log U_d$ の頻度分布



(a) $M = 6$ の場合



(b) $M = 7$ の場合



(c) $M = 8$ の場合

図 3-13 $a_{\max}^H$ と $a_{\max}^V$ の距離減衰の比較

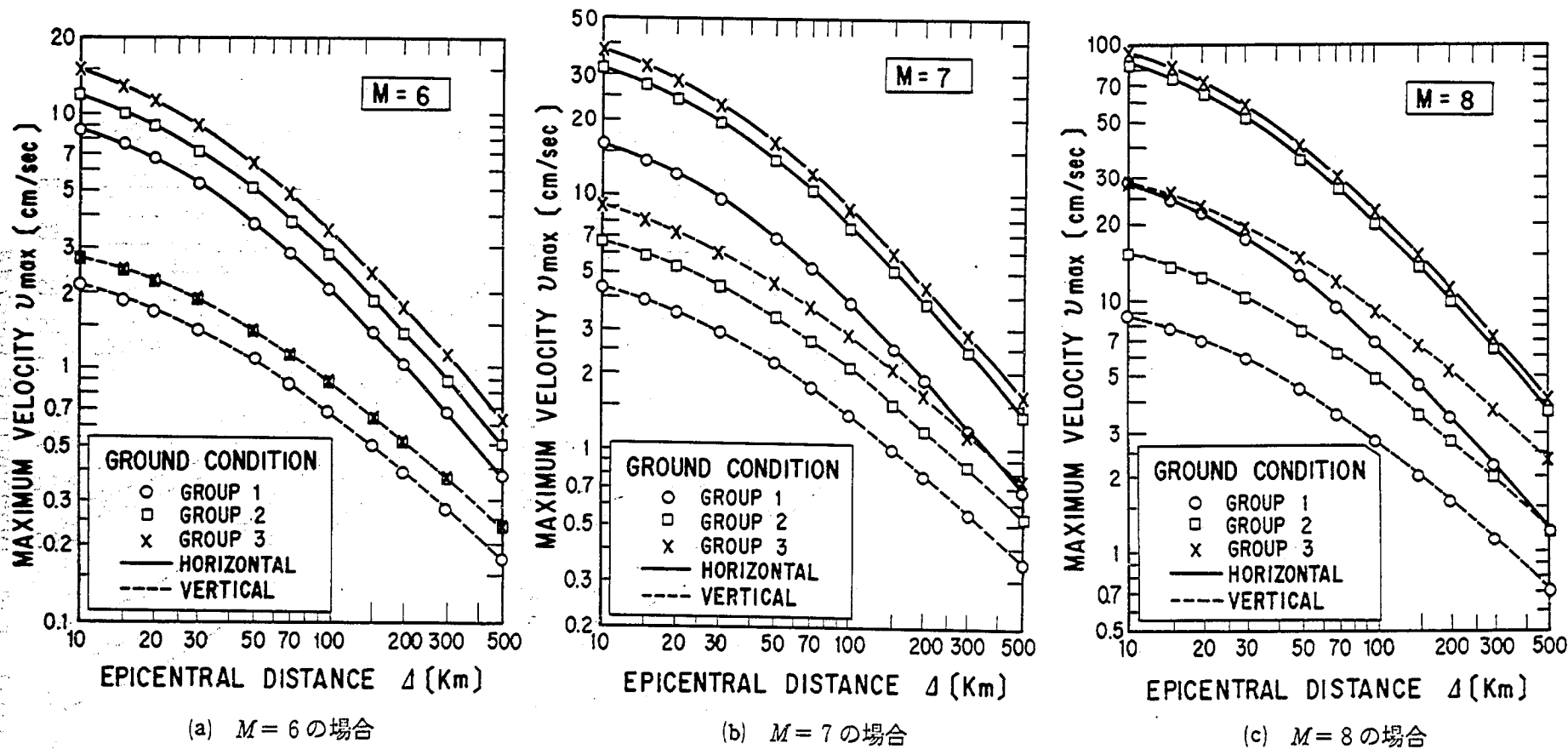
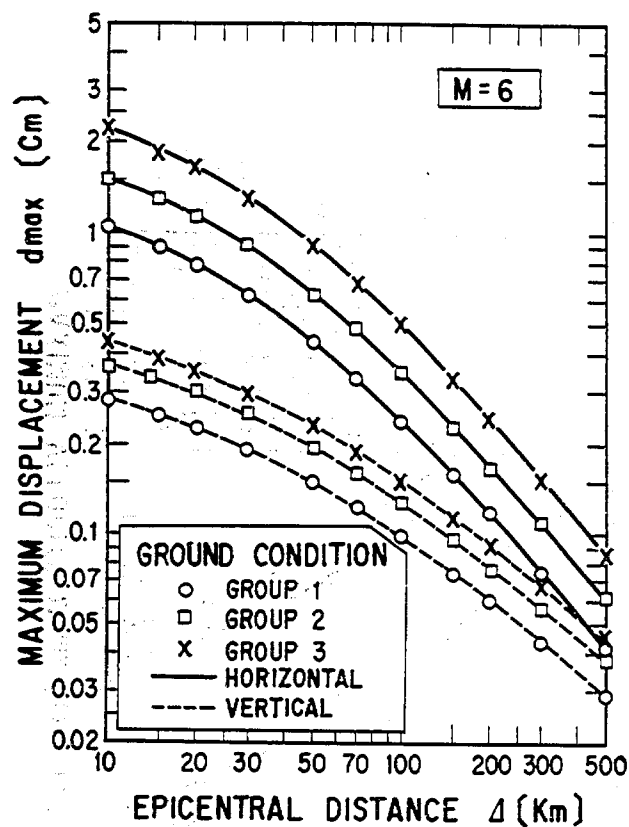
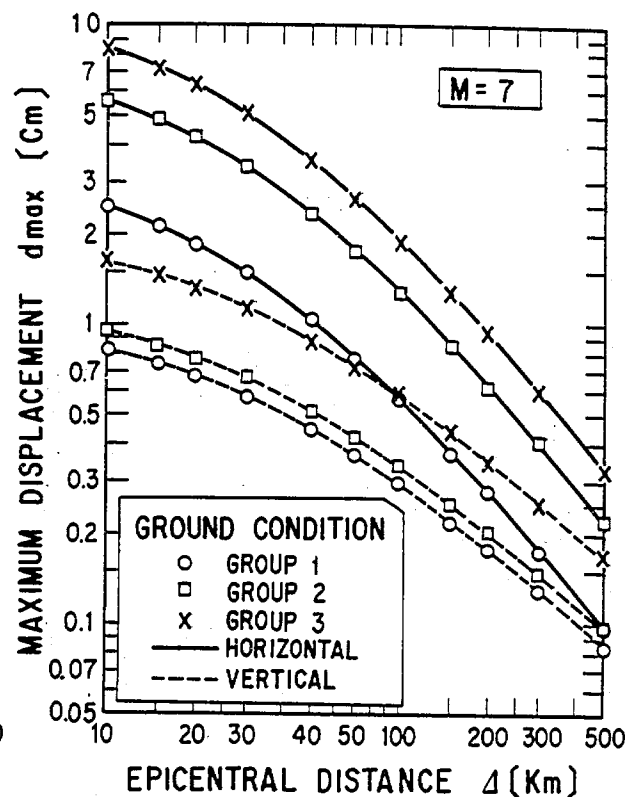


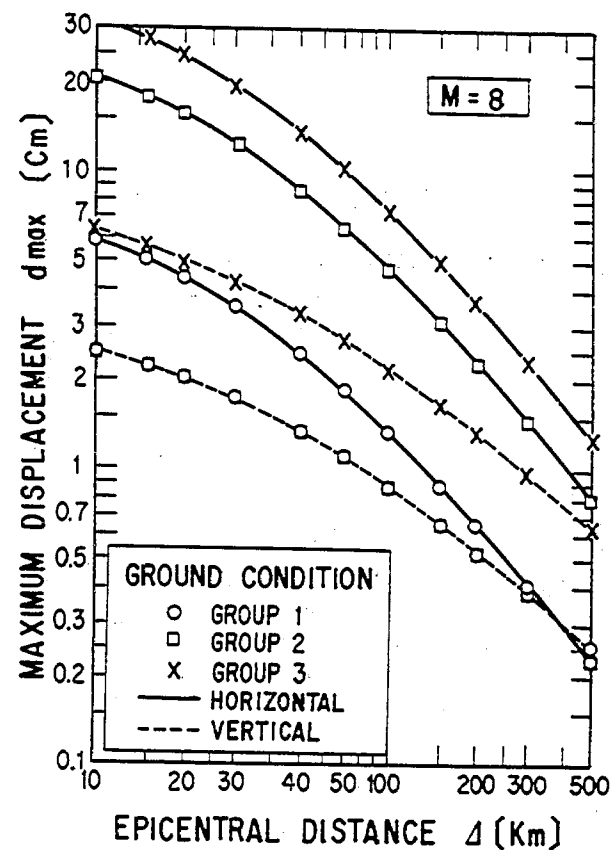
図 3-14 $\tilde{v}_{\max}^H$ と $v_{\max}^V$ の距離減衰の比較



(a) $M=6$ の場合

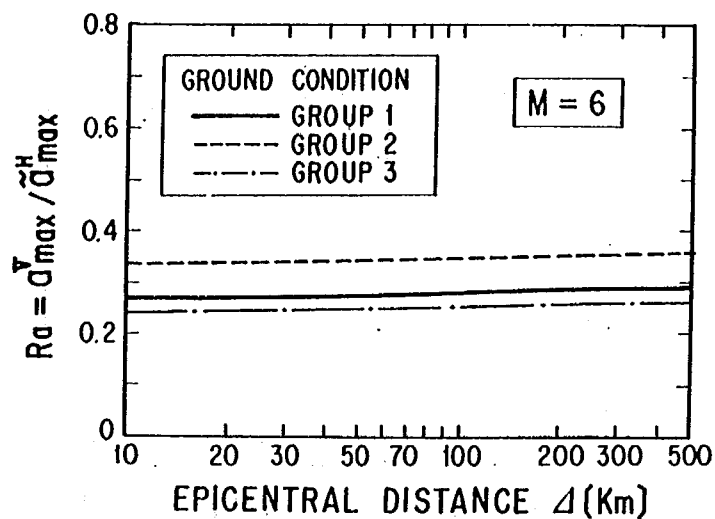


(b) $M=7$ の場合

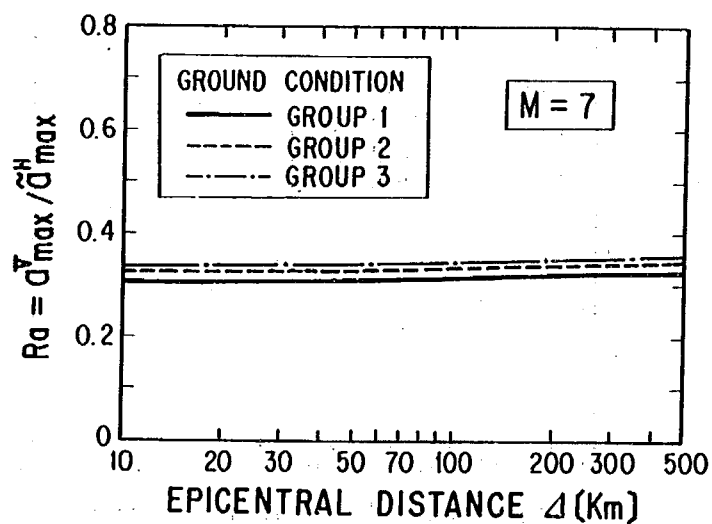


(c) $M=8$ の場合

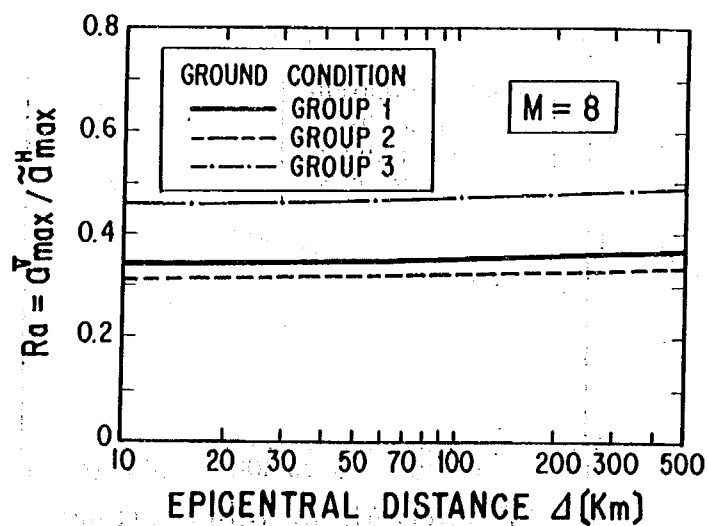
図 3-15 $\tilde{d}_{\max}^H$ と $d_{\max}^V$ の距離減衰の比較



(a) $M = 6$ の場合

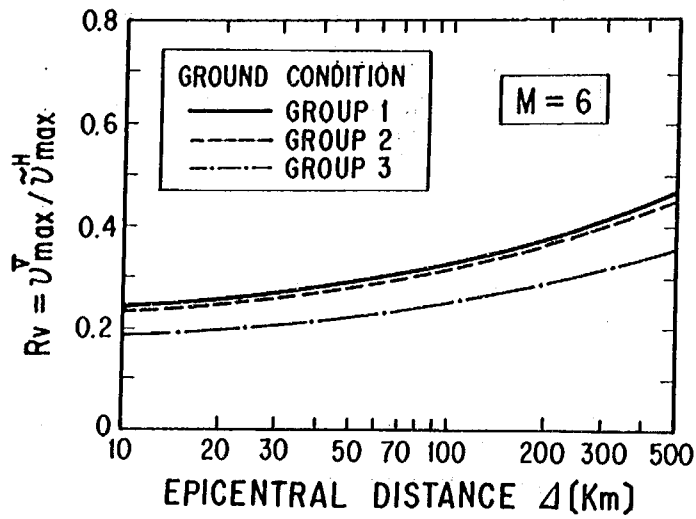


(b) $M = 7$ の場合

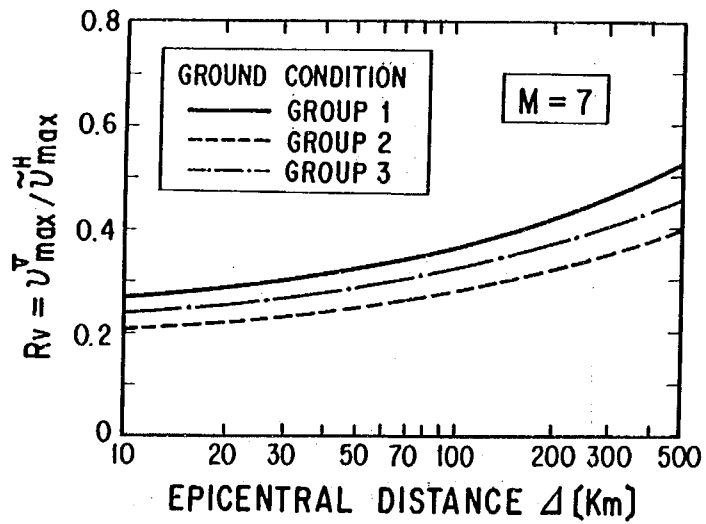


(c) $M = 8$ の場合

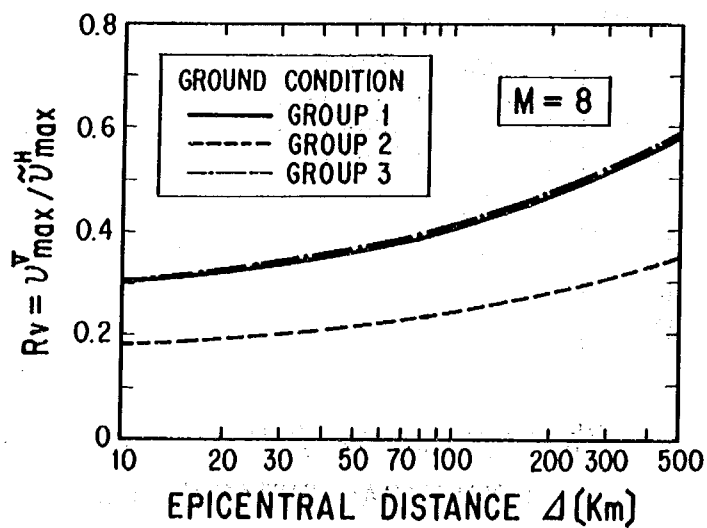
図 3-16 $R_a = a_{\max}^v / \tilde{a}_{\max}^H$ の試算例



(a) $M = 6$ の場合

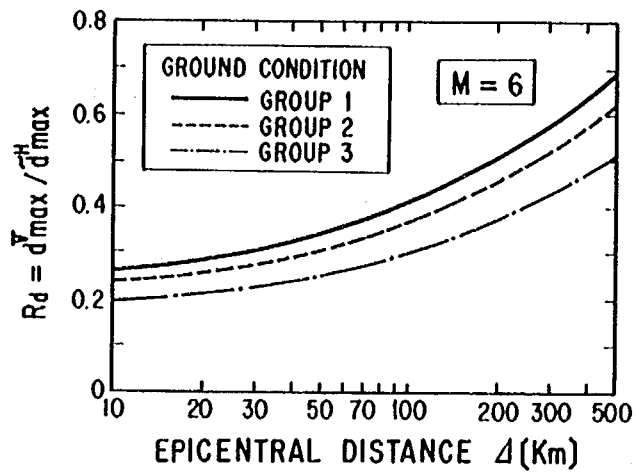


(b) $M = 7$ の場合

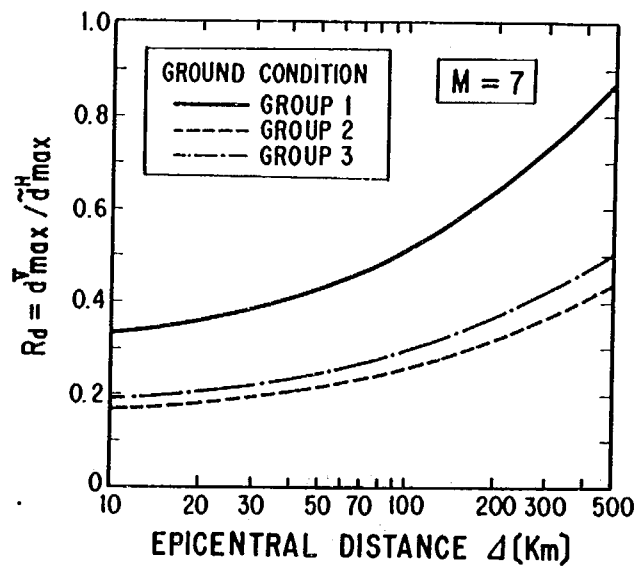


(c) $M = 8$ の場合

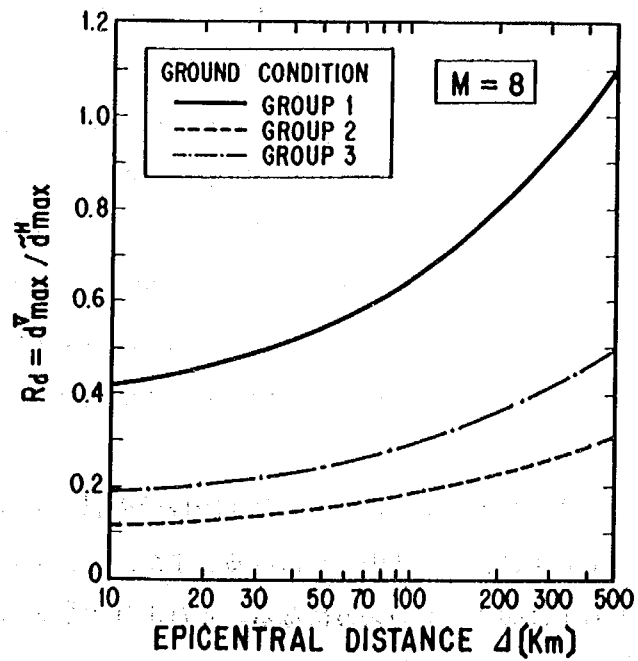
図 3-17 $R_v = v_{\max}^v / v_{\max}^H$ の試算例



(a) $M = 6$ の場合



(b) $M = 7$ の場合



(c) $M = 8$ の場合

図 3-18 $R_d = d_{\max}^v / d_{\max}^H$ の試算例

4. 加速度応答スペクトルの距離減衰式

4-1. 上下方向加速度応答スペクトルの距離減衰式

水平方向加速度応答スペクトルの距離減衰式の検討結果に基づき、上下方向加速度応答スペクトルの距離減衰を以下の2種類の回帰式で表わす。

$$S_A^V(T_k, M, d, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (d + d_0)^{c(T_k, GC_i)} \quad (4-1)$$

$$S_A^V(T_k, M, d, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (d + d_0)^c \quad (4-2)$$

ここで、

$S_A^V(T_k, M, d, GC_i)$: 上下方向地震動から計算した減衰定数5%の加速度応答スペクトル
〔gal〕

M : 気象庁によるマグニチュード

d : 震央距離

d_0 : d が小さい範囲の S_A^V を調整する距離の指標であり、ここでは $d_0 = 30\text{km}$ とする。

GC_i : 地盤種別 ($i = 1, 2, 3$)

T_k : 固有周期〔秒〕 ($k = 1, 2, 3, \dots, 10$)、今回の解析では、0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.5, 2, 3 秒としている。

$a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(T_k, GC_i)$: 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

c : 固有周期 T_k および地盤種別 GC_i によらないとした場合の係数

ここで、式(4-1)と式(4-2)の違いは、距離($d + 30$)にかかる係数 c が固有周期 T_k および地盤種別 GC_i の両者によって変化すると仮定するかしないかである。これは、水平方向の加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A^H$ の距離減衰式の検討において、係数 a , b , c それぞれの固有周期 T_k および地盤種別 GC_i 依存性を検討した結果、係数 a および b はともに固有周期 T_k および地盤種別 GC_i の両者によって変化するとしないと回帰式の精度が著しく低下するのに対し、係数 c については固有周期 T_k および地盤種別 GC_i によって変化するとした場合と変化しないとした場合の2種類の距離減衰式間で、自由度調整済み重相関係数 R^* で表わした回帰の精度は大差がなく(ただし、やや後者の方が精度がよい)、また、結果的に式(4-1)および式(4-2)の距離減衰式の精度が他の形式の距離減衰式に比較して相対的に高いことによったものである。

式(4-1)および式(4-2)を用いて2章に示した119成分の記録をもとに重回帰分析により係数 a , b , c を定めると表4-1および表4-2のようになる。また、これをもとに係数 a , b , c の周期領域の変化を示すと図4-1および図4-2のようになる。これより S_A^V スペクトルの距離減衰式の係数 a , b , c に関しては、以下の事項が指摘される。

- 1) 係数 a は上記式(4-1)および式(4-2)のいずれの距離減衰式を用いた場合にもおおむね同じ値をとる。また、係数 a は短周期領域で大きく、周期が長くなるにつれてほぼ単調に減少する。
- 2) 係数 b の値は、式(4-1)の距離減衰式を用いた場合と式(4-2)の回帰式を用いた場合でやや異なる。ただし、全体としてはいずれの場合も短周期領域で小さく、長周期領域で大きくなっており、このような傾向は2種類の距離減衰式間で変わらない。また、係数 b は地盤種別によって変化し、固有周期によって多少変化するが、一般に1種地盤、2種地盤、3種地盤の順に大きくなる。係数 b はマグニチュード M が1.0大きくなった場合に S_A^V スペクトルが何倍になるかを表わす指標である。式(4-2)の場合を例にとれば、地盤種別によって多少異なるが固有周期が約0.3秒以下においては、係数 b は0.225～0.35程度(S_A^V は1.68～2.24倍となる)であるのに対し、固有周期が約1秒以上では0.5～0.7程度(S_A^V は3.16～5.01倍となる)と大きくなる。
- 3) 固有周期 T_k および地盤種別 GC_i ごとに係数 c を定めた式(4-1)の場合には、係数 c は T_k および GC_i に応じ-0.4～-1.7の範囲で変化する。しかしながら T_k および GC_i による係数 c の変化の様子には一定の規則性は認められない。これに対して、係数 c を固有周期 T_k および地盤種別 GC_i によらず一定であるとした式(4-2)の場合には、係数 c は-1.015となる。

次に、上記2種類の距離減衰式により、代表的な M および d の組み合わせに対して S_A^V スペクトルを試算した一例が図4-3である。これによれば、 M が大きく、 d が小さい範囲(たとえば、 $M=8$ 、 $d=50$ kmおよび100 kmの場合)において式(4-1)と式(4-2)の距離減衰式間の違いがはっきり表われる。このような傾向は、3種地盤の場合の固有周期0.5～1秒付近で著しい。ただし、この場合を除くと、2種類の距離減衰式間の違いは顕著ではない。 $M=8$ 、 $d=50$ kmといった大規模地震による近距離の記録は今回の解析対象記録には全く含まれておらず、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。記録の蓄積を待って今後検討していくことが必要とされよう。しかしながら、式(4-1)の距離減衰式を用いた回帰では、地盤種別ごとに独立して解析するため、記録数が少ない場合には解析結果が一部の特殊な記録の影響を受けやすい。これに対して、式(4-2)の距離減衰式を用いた回帰では、全地盤種別の記録を同時に解析しているため、一部の特殊な記録の影響を受ける度合いは式(4-1)の場合に比較して相対的に少ないと考えられる。ただし、式(4-2)では係数 c が固有周期および地盤種別によらないと仮定しており、このような仮定の妥当性は記録の蓄積を待って今後検討していくことが必要とされよう。以上のような点を考慮し、ここでは、一応、式(4-2)の距離減衰式を採用することとする。

式(4-2)による S_A^V スペクトルの距離減衰式の一例として、固有周期 $T=0.2$ 秒、0.5秒、2秒の場合に対して、もととなった S_A^V 値とともに予測値を示すと図4-4のようになる。また、式(4-2)による S_A^V スペクトルの予測値を主要なマグニチュード($M=5, 6, 7, 8$)および震央距離($d=50$ km, 100 km, 200 km)の組み合わせに対して示すと図4-5のようになる。

次に、式(4-2)による S_A^V スペクトルの推定値のばらつきを示すために、実測のスペクトル S_A^{VOB} と、これが得られた地盤の M 、 d および地盤種別 GC_i ($i=1, 2, 3$)から式(4-2)により求めた推定値 S_A^{VP} の比 $U_{SA}(T)$ を次式により定義した。

表4-1 式(4-1)による S_A^V スペクトルの距離減衰式の係数

$a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(T_k, GC_i)$

固有周期	1 種 地 盤			2 種 地 盤			3 種 地 盤			備 考
T (秒)	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(T_k, GC_i)$	
0.1	559.5	0.279	-1.339	553.9	0.341	-1.537	103.8	0.349	-1.301	重相関係数 (標準偏差) 0.903 (0.257)
0.15	508.3	0.288	-1.369	195.5	0.273	-1.105	90.74	0.429	-1.517	
0.2	140.0	0.270	-1.062	108.0	0.291	-1.029	136.5	0.363	-1.399	
0.3	60.34	0.239	-0.832	18.57	0.283	-0.688	152.1	0.346	-1.358	
0.5	35.68	0.310	-1.059	6.245	0.346	-0.705	10.83	0.630	-1.727	
0.7	9.991	0.420	-1.225	2.279	0.379	-0.670	1.606	0.695	-1.563	
1.0	5.642	0.485	-1.389	0.591	0.389	-0.501	0.340	0.629	-1.114	
1.5	1.395	0.575	-1.469	0.388	0.402	-0.610	0.0350	0.692	-0.959	
2.0	0.282	0.561	-1.144	0.252	0.345	-0.425	0.116	0.514	-0.733	
3.0	0.186	0.494	-0.994	0.163	0.353	-0.490	0.113	0.340	-0.300	

表4-2 式(4-2)による S_A^V スペクトルの距離減衰式の係数

$a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, c

固有周期	1 種 地 盤		2 種 地 盤		3 種 地 盤		備 考
T (秒)	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	
0.1	246.4	0.230	224.8	0.232	114.5	0.251	重相関係数 (標準偏差) 0.897 (0.261)
0.15	207.2	0.235	168.4	0.255	107.8	0.258	
0.2	124.1	0.263	105.5	0.288	155.7	0.232	
0.3	95.72	0.267	31.92	0.351	171.1	0.228	
0.5	31.86	0.304	10.44	0.410	13.82	0.388	
0.7	5.869	0.388	4.039	0.451	1.939	0.509	
1.0	2.185	0.428	1.386	0.495	0.352	0.596	
1.5	0.441	0.506	0.758	0.486	0.0343	0.711	
2.0	0.203	0.541	0.670	0.468	0.105	0.610	
3.0	0.196	0.497	0.389	0.462	0.0886	0.584	

$c = -1.015$

$$U_{SA}(T_k, M, A, GC_i) = \frac{S_A^{VOB}(T_k, M, A, GC_i)}{S_A^{VP}(T_k, M, A, GC_i)} \quad (4-3)$$

ここで,

$U_{SA}(T_k, M, A, GC_i)$: $S_A^V(T_k)$ スペクトルのばらつきの度合いを表わす指標

$S_A^{VOB}(T_k, M, A, GC_i)$: 重回帰分析のもととなった S_A^V スペクトルの実測値

$S_A^{VP}(T_k, M, A, GC_i)$: 式(4-2)から求められる S_A^V スペクトルの期待値

したがって、実際のスペクトル値 $S_A^{VOB}(T_k, M, A, GC_i)$ は、式(4-3)から、次式で与えられることになる。

$$\begin{aligned} S_A^{VOB}(T_k, M, A, GC_i) &= U_{SA}(T_k, M, A, GC_i) \cdot S_A^{VP}(T_k, M, A, GC_i) \\ &= U_{SA}(T_k, M, A, GC_i) \cdot \{a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (A+30)^c\} \end{aligned} \quad (4-4)$$

式(4-3)による $U_{SA}(T_k, M, A, GC_i)$ を主要な固有周期 ($T = 0.2$ 秒, 0.5 秒, 2 秒) に対して求め、これと M および A の関係を示すと図4-6のようになる。これによれば、 U_{SA} は M および A により顕著に変化しないことがわかる。次に各地盤種別ごとに $\log U_{SA}$ の頻度分布を求めると表4-3のようになる。また、これを各周期に対して示すと図4-7のようになる。これによればデータ数の少ない1種地盤および3種地盤の1部ではややばらつきがあるが、 $\log U_{SA}$ の頻度分布は全体として正規分布により近似できる。いま、 $\log U_{SA}$ が正規分布に従うと仮定すると、 $x = \log U_{SA}$ が $a \sim b$ の範囲にある確率 $P(a < x \leq b)$ は式(3-24)と同様、次式で与えられる。

$$P(a < x \leq b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] dx \quad (4-5)$$

ここで,

$x = \log U_{SA}$

$\mu = x$ の平均値

$\sigma = x$ の標準偏差

$x = \log U_{SA}$ の平均値 μ および標準偏差 σ を各固有周期ごとに計算すると、 μ は常に0であり、また σ は表4-3に示した通りとなる。ここで、 $s = x / \sigma$ とおけば x は標準正規分布に従うこととなり、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P(a < x < b) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{a}{\sigma}}^{\frac{b}{\sigma}} \exp \left[-\frac{1}{2} s^2 \right] ds \\ &= \Phi \left(\frac{b}{\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{a}{\sigma} \right) \end{aligned} \quad (4-6)$$

ここで、 Φ は標準正規分布関数である。いま、 $x = \log U_{SA}$ が b を超えない確率（非超過確率）を改めて p とおけば、

$$\begin{aligned} p &= 1 - P \left[-\infty < x \leq b \right] \\ &= 1 - \Phi \left(\frac{b}{\sigma} \right) \end{aligned} \quad (4-7)$$

となる。なお、表4-3によれば、 $\log U_{SA}(T_k)$ の標準偏差 σ の値は固有周期および地盤種別によってそれ程変化しない。したがって、 σ を各固有周期および地盤種別ごとに平均すると0.248となる。また、これにより式(4-7)による $p \sim U_{SA}(T_k)$ の関係を求めると図3-12に示した通りとなる。したがって、ここで示した解析式による期待値のばらつきを考慮する場合には、非超過確率 p の値に応じて式(4-3)の係数 $U_{SA}(T_k)$ を乗じて式(4-4)により応答スペクトル値を推定することができる。

4-2. 水平方向と上下方向の加速度応答スペクトルの距離減衰特性の比較

197組（2@197成分）の強震記録を重回帰分析した結果によれば、水平方向の加速度応答スペクトル（減衰定数5%） $\widetilde{S}_A^H(T_k, M, \Delta, GC_i)$ の距離減衰式は次式で与えられる。

$$\widetilde{S}_A^H(T_k, M, \Delta, GC_i) = a^H(T_k, GC_i) \times 10^{b^H(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{-1.178} \quad (4-8)$$

ここで、係数 $a^H(T_k, GC_i)$ および $b^H(T_k, GC_i)$ は表4-4に示す通りである。

ここでは、式(4-2)による上下方向の S_A^V スペクトルと式(4-8)による水平方向の $\widetilde{S}_A^H$ スペクトルを比較することにより、上下方向地震動と水平方向地震動の違いを検討することとする。まず、代表的なマグニチュード（ $M=6, 7, 8$ ）および震央距離（ $\Delta=50\text{km}, 100\text{km}, 200\text{km}$ ）の組み合わせに対して S_A^H スペクトルと S_A^V スペクトルの比較をした結果が図4-8である。また、 $\widetilde{S}_A^H$ スペクトルを基準にして $\widetilde{S}_A^V$ スペクトルの比 R_{SA} を次式で定義する。

$$R_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i) = \frac{S_A^V(T_k, M, \Delta, GC_i)}{\widetilde{S}_A^H(T_k, M, \Delta, GC_i)} \quad (4-9)$$

式(4-9)に式(4-2)および式(4-8)を代入して整理すると R_{SA} は次のようになる。

$$R_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i) = a'(T_k, GC_i) \times 10^{b'(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{0.163} \quad (4-10)$$

ここで、係数 $a'(T_k, GC_i)$ および $b'(T_k, GC_i)$ は表4-5に示す通りである。これより、マグニチュード $M=6, 7, 8$ および震央距離 $\Delta=50\text{km}, 100\text{km}, 200\text{km}$ の組み合わせに対して R_{SA} を計算した結果が図4-9である。これより、 $\widetilde{S}_A^H$ スペクトルと S_A^V スペクトルの比 R_{SA} はマグニチュード、震央距離、地盤種別、固有周期に大きく影響されず0.2～0.4程度の値をとることがわかる。ただし、マグニチュードが大きい場合には、1種地盤の固有周期1～2秒付近で部分的に R_{SA} がこれよりも大きくなる傾向が認められる。

表4-3 (1) $\log U_{SA}$ の頻度分布 (1種地盤)

$\log U_{SA}$	固有周期 T (秒)									
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	3
$-1.0 \leq \log U < -0.9$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.9 \leq \log U < -0.8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.8 \leq \log U < -0.7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.7 \leq \log U < -0.6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.6 \leq \log U < -0.5$	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.5 \leq \log U < -0.4$	1	2	0	0	0	2	0	1	1	0
$-0.4 \leq \log U < -0.3$	3	2	1	1	2	2	4	1	2	2
$-0.3 \leq \log U < -0.2$	5	3	7	6	5	3	2	7	5	2
$-0.2 \leq \log U < -0.1$	3	4	4	6	7	7	7	4	2	9
$-0.1 \leq \log U < 0$	2	5	7	6	7	7	8	9	11	8
$0 \leq \log U < 0.1$	5	7	6	6	5	5	6	2	3	4
$0.1 \leq \log U < 0.2$	5	7	5	3	2	3	1	6	5	5
$0.2 \leq \log U < 0.3$	2	1	3	5	4	1	3	1	3	3
$0.3 \leq \log U < 0.4$	5	1	2	2	1	3	2	2	2	1
$0.4 \leq \log U < 0.5$	0	2	0	0	1	1	2	0	1	2
$0.5 \leq \log U < 0.6$	0	0	1	1	1	2	0	2	1	0
$0.6 \leq \log U < 0.7$	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
$0.7 \leq \log U < 0.8$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$0.8 \leq \log U < 0.9$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$0.9 \leq \log U < 1.0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
標準偏差 σ	0.3409	0.2647	0.2019	0.2068	0.2488	0.2587	0.2465	0.2580	0.2355	0.1999

表4-3 (2) $\text{Log } U_{SA}$ の頻度分布 (2種地盤)

$\log U_{SA}$	固有周期 T (秒)									
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	3
$-1.0 \leq \log U < -0.9$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.9 \leq \log U < -0.8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.8 \leq \log U < -0.7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.7 \leq \log U < -0.6$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
$-0.6 \leq \log U < -0.5$	2	1	1	1	2	1	0	0	2	1
$-0.5 \leq \log U < -0.4$	4	4	3	2	1	1	3	2	1	1
$-0.4 \leq \log U < -0.3$	4	8	7	3	3	4	3	4	3	3
$-0.3 \leq \log U < -0.2$	7	4	5	10	9	7	8	3	5	2
$-0.2 \leq \log U < -0.1$	5	4	8	10	8	8	11	10	8	11
$-0.1 \leq \log U < 0$	7	6	5	1	2	7	5	12	9	7
$0 \leq \log U < 0.1$	3	4	4	7	9	6	7	5	8	9
$0.1 \leq \log U < 0.2$	5	5	9	8	10	11	9	10	13	12
$0.2 \leq \log U < 0.3$	7	9	5	6	6	5	4	4	4	7
$0.3 \leq \log U < 0.4$	5	6	3	4	3	3	2	5	1	0
$0.4 \leq \log U < 0.5$	5	2	4	2	1	2	0	0	1	1
$0.5 \leq \log U < 0.6$	0	1	2	2	2	1	2	0	0	0
$0.6 \leq \log U < 0.7$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$0.7 \leq \log U < 0.8$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$0.8 \leq \log U < 0.9$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$0.9 \leq \log U < 1.0$	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
$1.0 \leq \log U$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
標準偏差 σ	0.3227	0.3288	0.2892	0.2749	0.2568	0.2519	0.2770	0.2424	0.2602	0.2430

表 4 - 3 (3) $\text{Log } U_{SA}$ の頻度分布 (3 種地盤)

$\log U_{SA}$	固 有 周 期 T (秒)									
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	3
$-1.0 \leq \log U < -0.9$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.9 \leq \log U < -0.8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.8 \leq \log U < -0.7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.7 \leq \log U < -0.6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$-0.6 \leq \log U < -0.5$	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$-0.5 \leq \log U < -0.4$	1	1	0	0	0	1	2	2	1	1
$-0.4 \leq \log U < -0.3$	1	1	1	0	2	1	3	0	1	1
$-0.3 \leq \log U < -0.2$	4	1	3	4	2	2	1	6	1	3
$-0.2 \leq \log U < -0.1$	2	7	5	3	1	5	4	3	8	5
$-0.1 \leq \log U < 0$	6	6	6	5	8	3	2	3	5	5
$0 \leq \log U < 0.1$	2	3	6	8	8	4	5	4	2	3
$0.1 \leq \log U < 0.2$	3	1	0	4	2	5	1	1	3	3
$0.2 \leq \log U < 0.3$	4	4	3	3	2	2	6	4	3	3
$0.3 \leq \log U < 0.4$	2	2	3	0	1	3	2	4	1	1
$0.4 \leq \log U < 0.5$	1	0	0	0	1	0	1	0	2	1
$0.5 \leq \log U < 0.6$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
$0.6 \leq \log U < 0.7$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$0.7 \leq \log U < 0.8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$0.8 \leq \log U < 0.9$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$0.9 \leq \log U < 1.0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
標 準 偏 差 σ	0.2493	0.2288	0.1985	0.1609	0.1893	0.2354	0.2578	0.2431	0.2242	0.2389

表 4-4 $\tilde{S}_A''$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a''(T_k, GC_i)$, および $b''(T_k, GC_i)$ (式 (4-8))

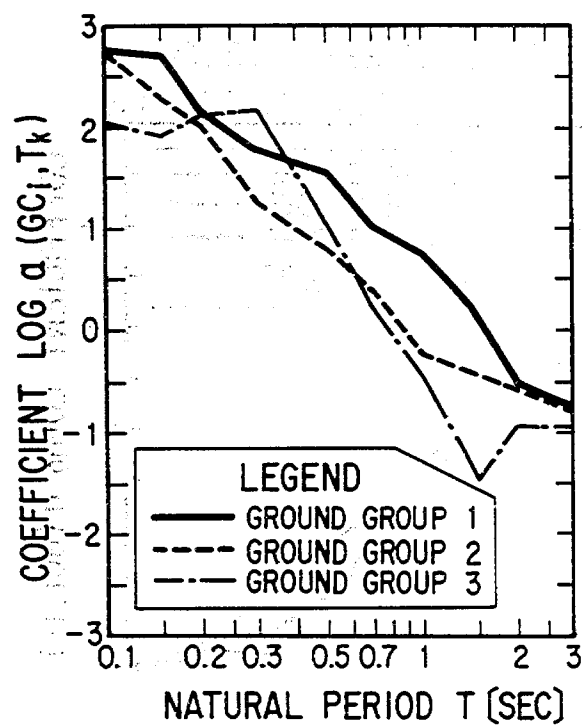
固有周期 (秒)	1 種 地 盤		2 種 地 盤		3 種 地 盤	
	$a''(T_k, GC_i)$	$b''(T_k, GC_i)$	$a''(T_k, GC_i)$	$b''(T_k, GC_i)$	$a''(T_k, GC_i)$	$b''(T_k, GC_i)$
0.1	2420	0.211	848.0	0.262	1307	0.208
0.15	2407	0.216	629.1	0.288	948.2	0.238
0.2	1269	0.247	466.0	0.315	1128	0.228
0.3	574.8	0.273	266.8	0.345	1263	0.224
0.5	211.8	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

$$c = -1.178$$

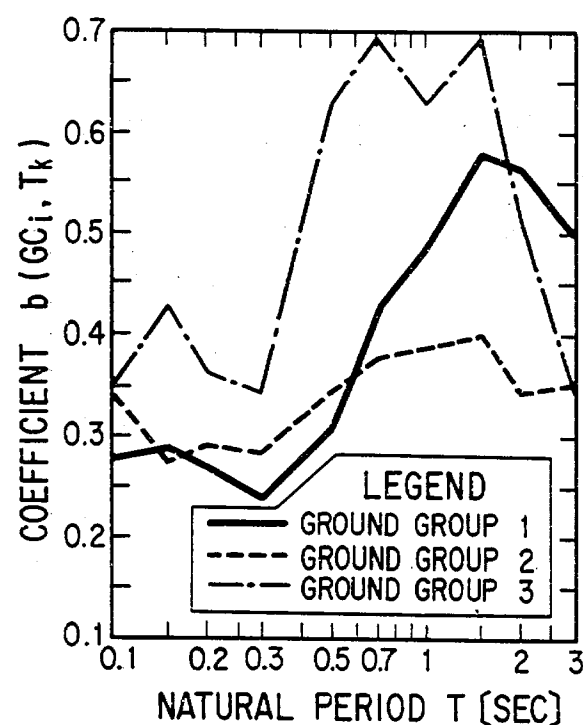
表 4-5 水平成分を基準とした上下成分の推定式の係数 $a'(T_k, GC_i)$ および $b'(T_k, GC_i)$

固有周期 T (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	0.102	0.0188	0.265	-0.0302	0.0876	0.0433
0.15	0.0861	0.0189	0.268	-0.0337	0.114	0.0198
0.2	0.0978	0.0157	0.226	-0.0268	0.138	0.00370
0.3	0.167	-0.00640	0.120	0.00500	0.135	0.00470
0.5	0.150	0.00460	0.102	0.0216	0.0238	0.106
0.7	0.0572	0.0714	0.118	0.0106	0.0295	0.0872
1.0	0.0545	0.0838	0.275	-0.0535	0.0475	0.0545
1.5	0.0620	0.0746	1.054	-0.144	0.0427	0.0644
2.0	0.0351	0.124	1.928	-0.176	0.300	0.0565
3.0	0.117	0.0352	1.078	-0.124	0.339	0.0507

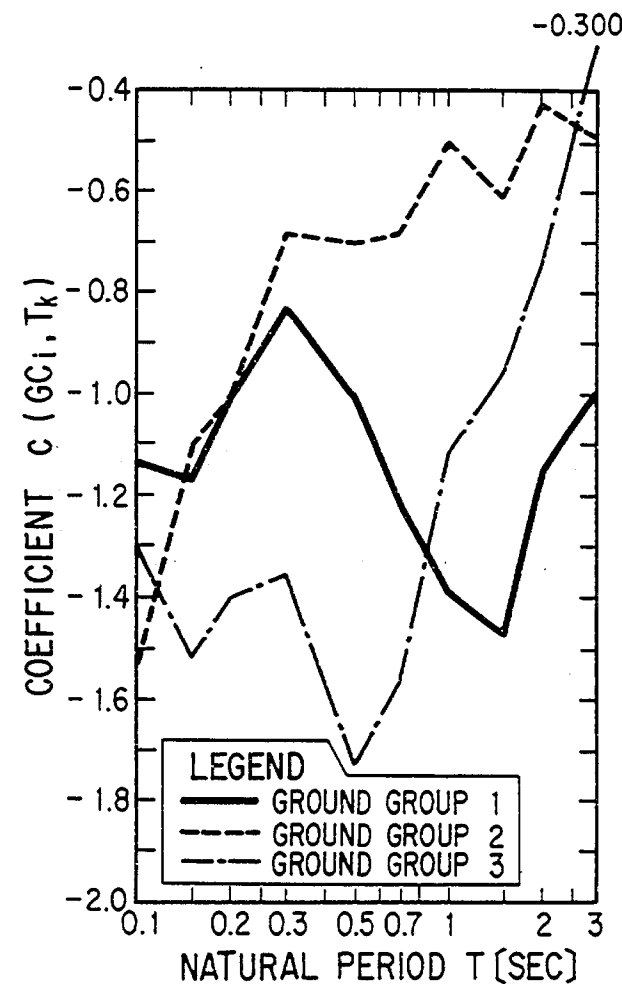
$$c = 0.163$$



(a) 係数 $a (T_k, GC_i)$

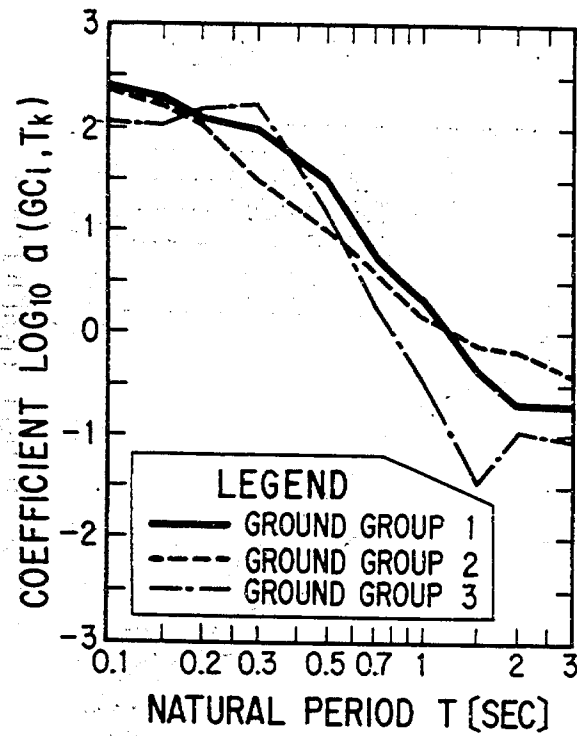


(b) 係数 $b (T_k, GC_i)$

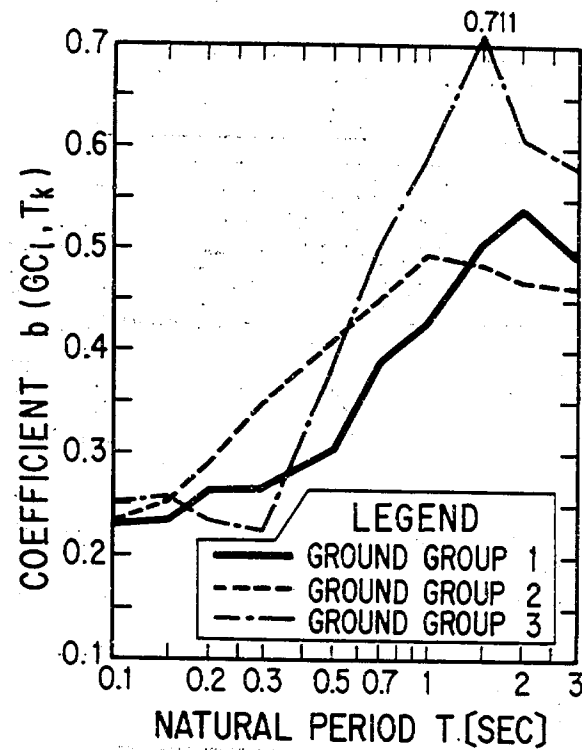


(c) 係数 $c (T_k, GC_i)$

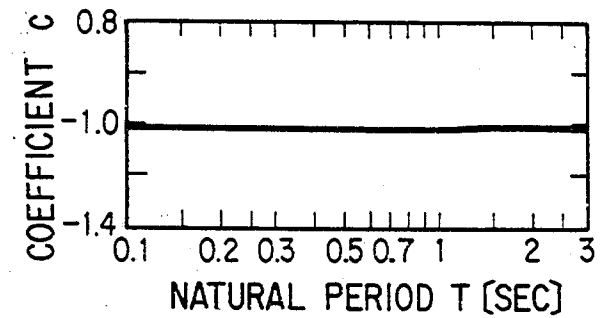
図 4-1 S_A^V スペクトルの距離減衰式の係数 $a (T_k, GC_i)$, $b (T_k, GC_i)$ および $c (T_k, GC_i)$



(a) 係数 $a(T_k, GC_i)$

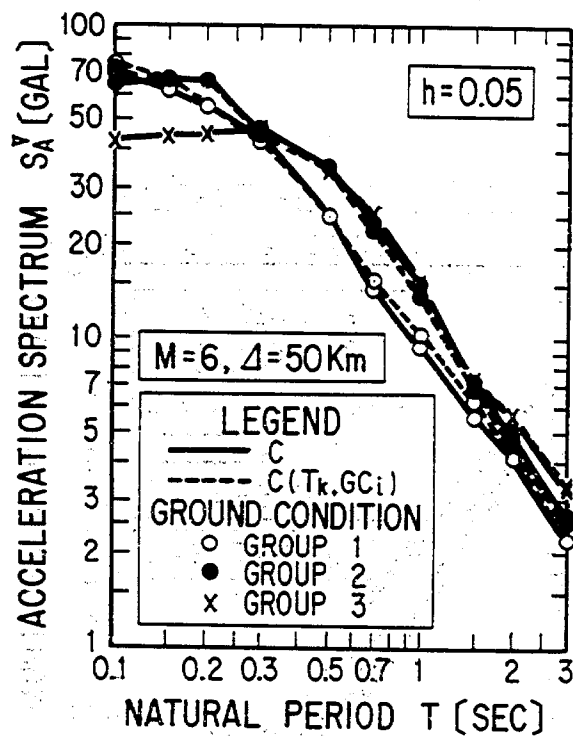


(b) 係数 $b(T_k, GC_i)$

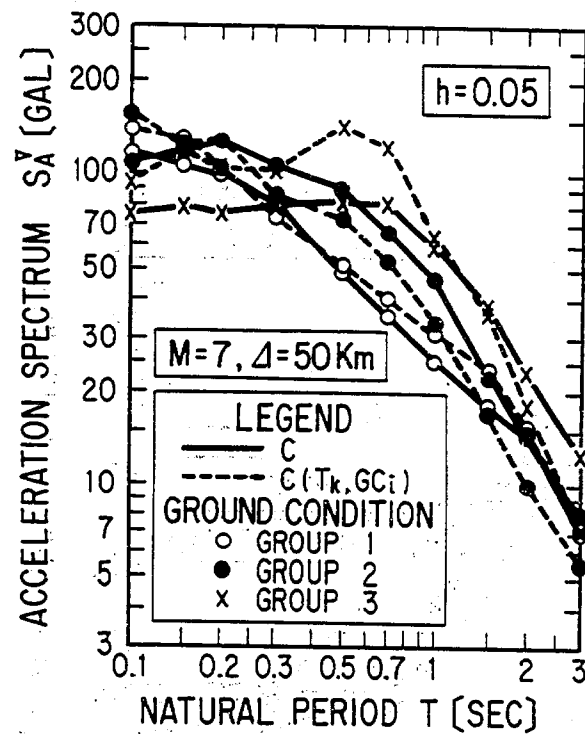


(c) 係数 c

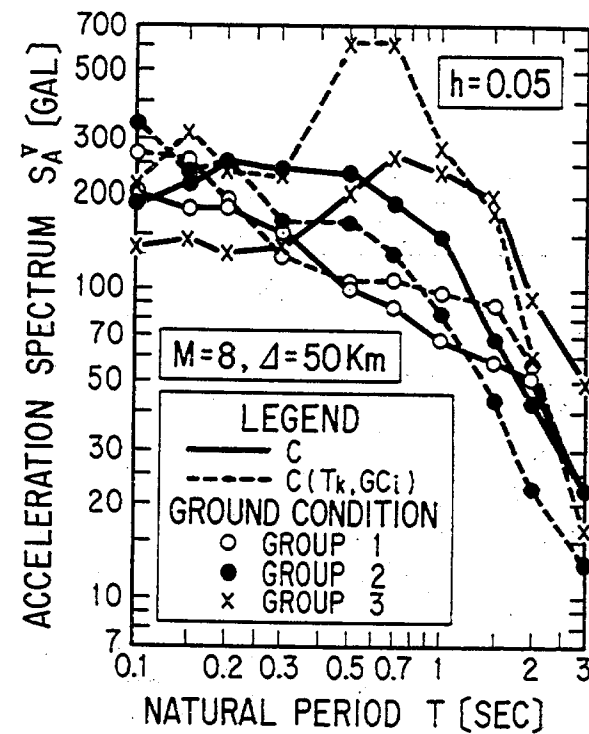
図 4-2 S_A^V スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$ および c



(a) $M=6$

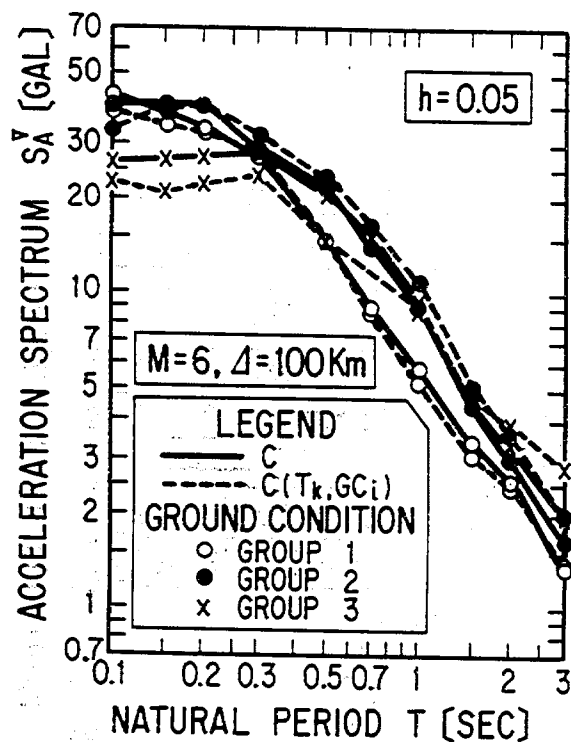


(b) $M=7$

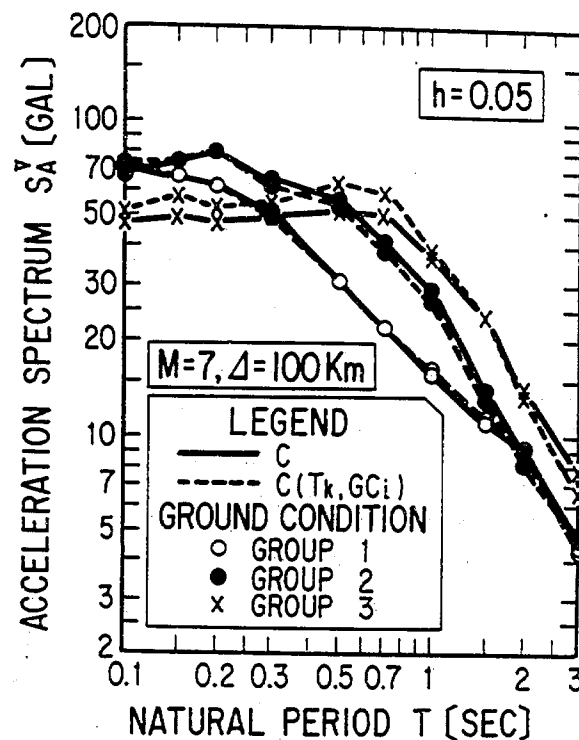


(c) $M=8$

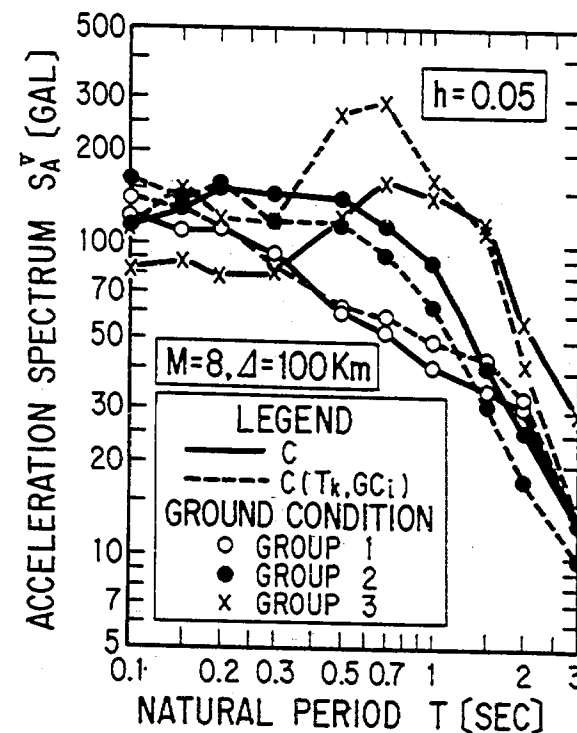
図 4-3(1) 式(4-1)と式(4-2)の S_A^V スペクトルの予測式の比較 ($\Delta=50\text{km}$ の場合)



(a) $M=6$

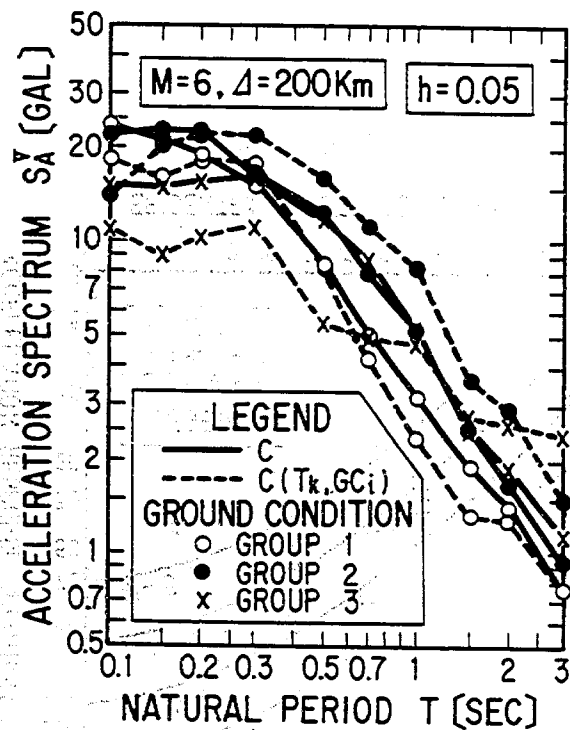


(b) $M=7$

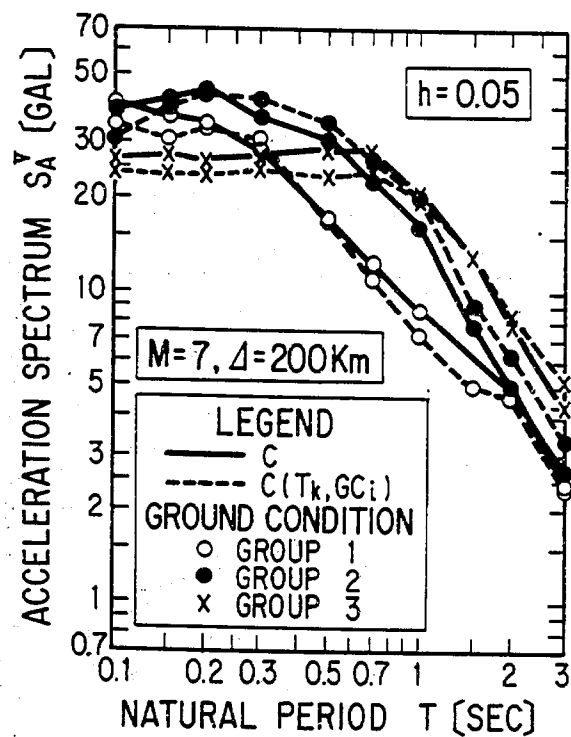


(c) $M=8$

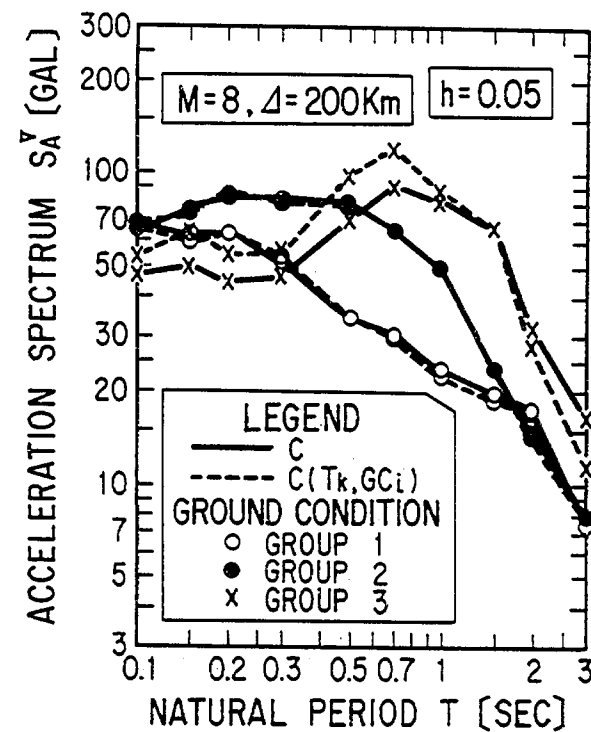
図4-3(2) 式(4-1)と式(4-2)の S_A^v スペクトルの予測式の比較 ($\Delta=100\text{km}$ の場合)



(a) $M=6$

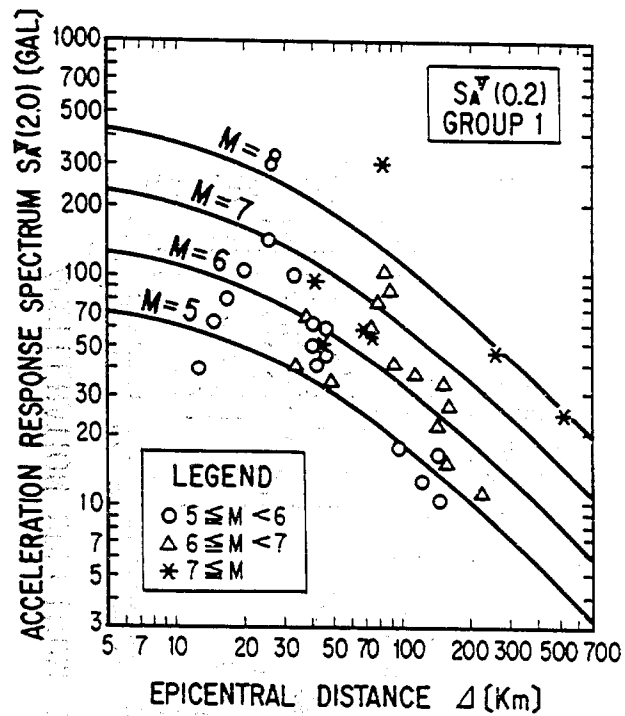


(b) $M=7$

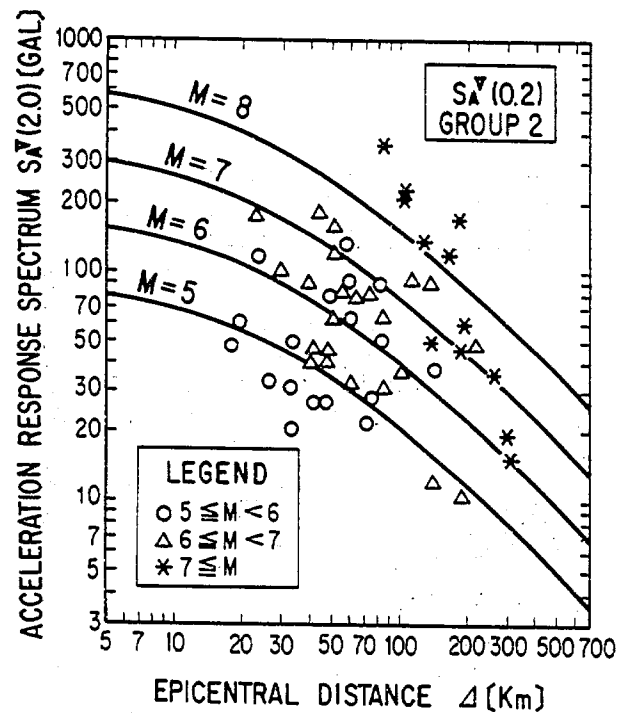


(c) $M=8$

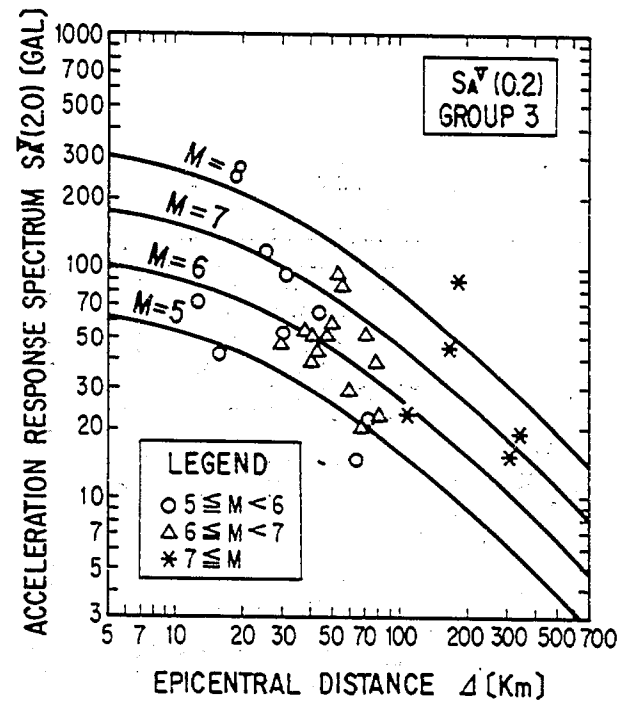
図 4-3(3) 式(4-1)と式(4-2)の S_A^v スペクトルの予測式の比較 ($\Delta=200\text{ km}$ の場合)



(a) 1種地盤

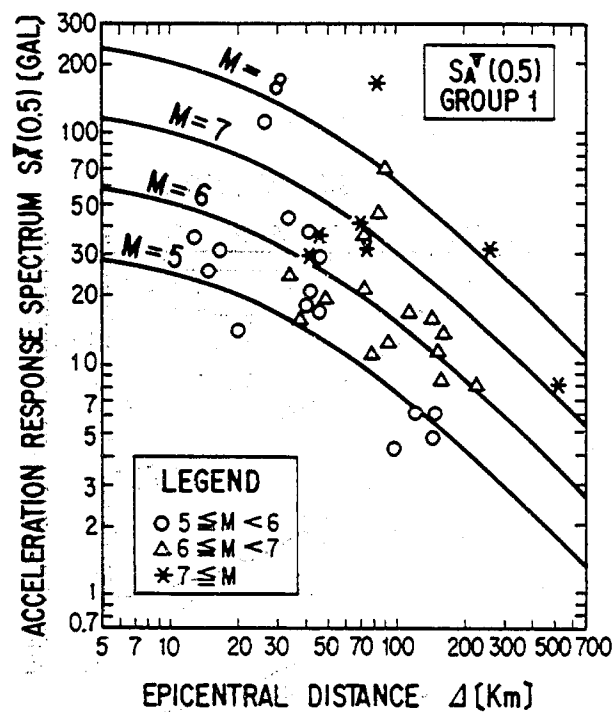


(b) 2種地盤

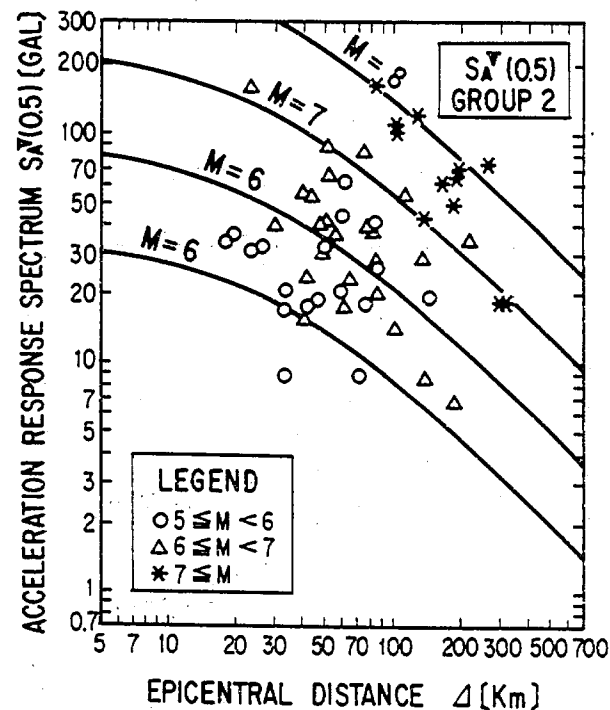


(c) 3種地盤

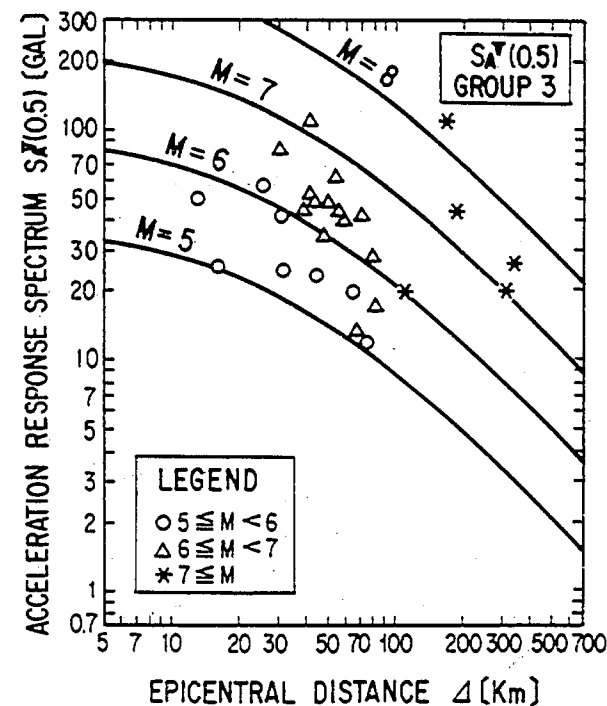
図4-4(1) $S_A^V(0.2)$ の距離減衰



(a) 1種地盤

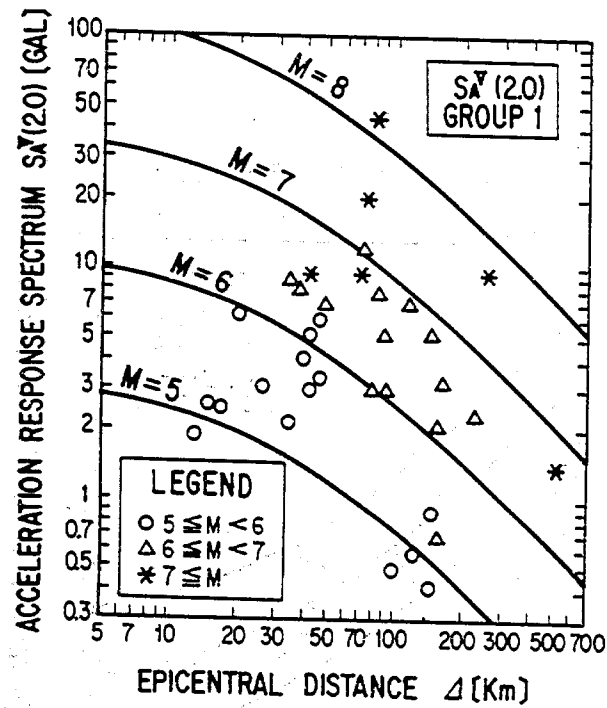


(b) 2種地盤

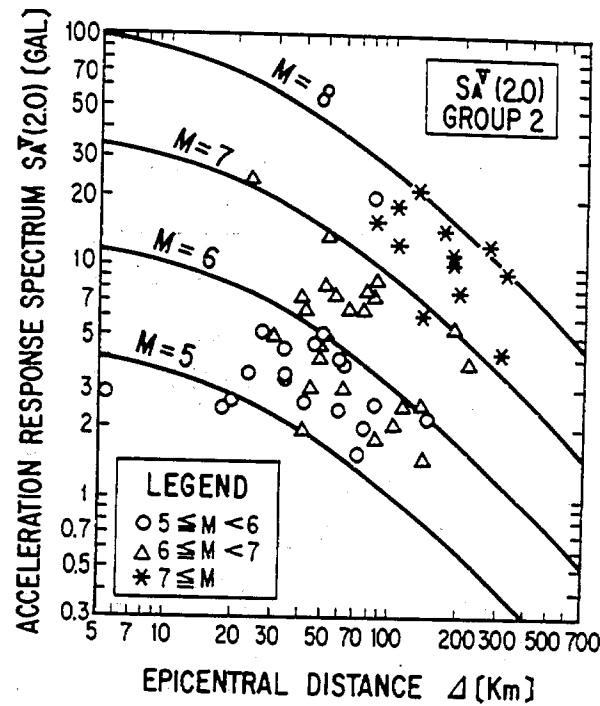


(c) 3種地盤

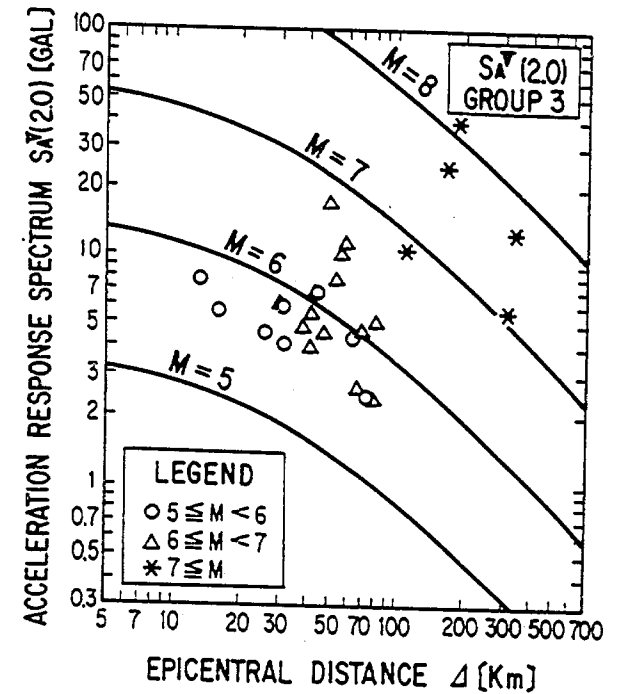
図 4-4(2) $S_A^V(0.5)$ の距離減衰



(a) 1種地盤

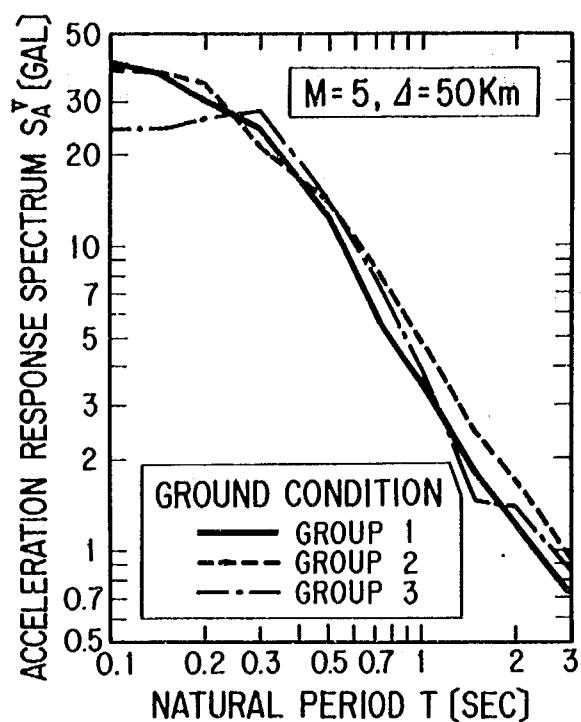


(b) 2種地盤

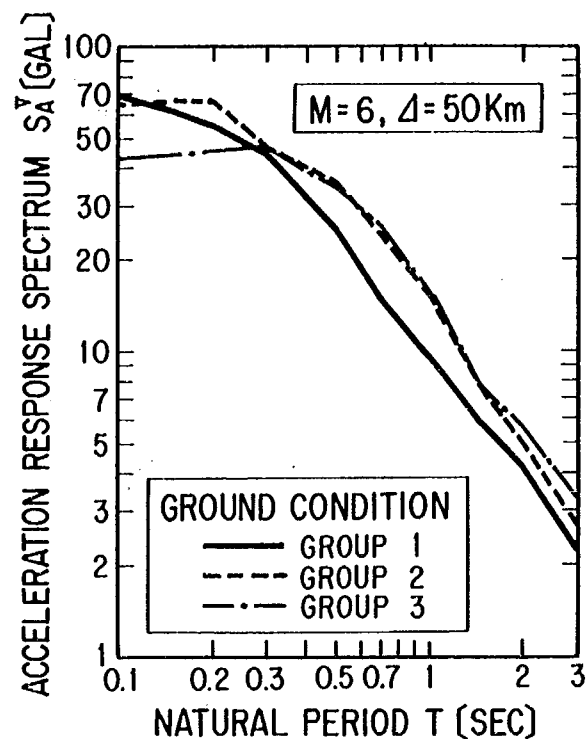


(c) 3種地盤

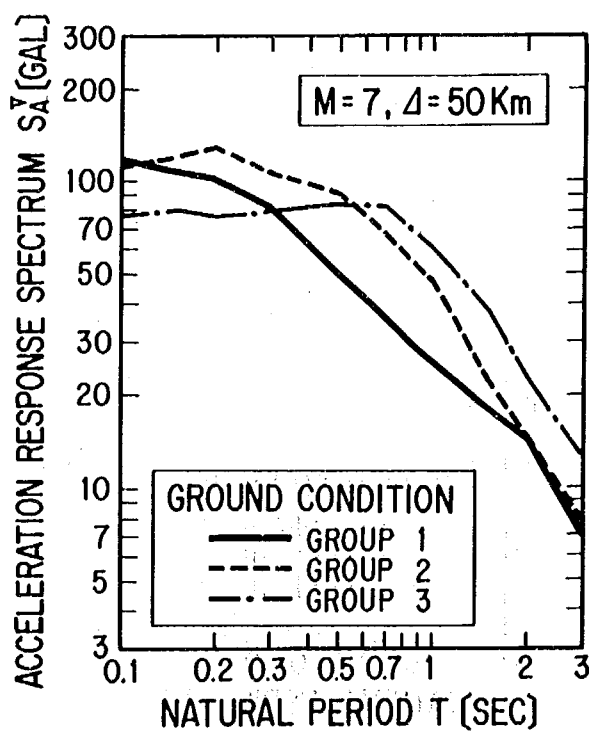
図 4-4(3) $S_A^V(2.0)$ の距離減衰



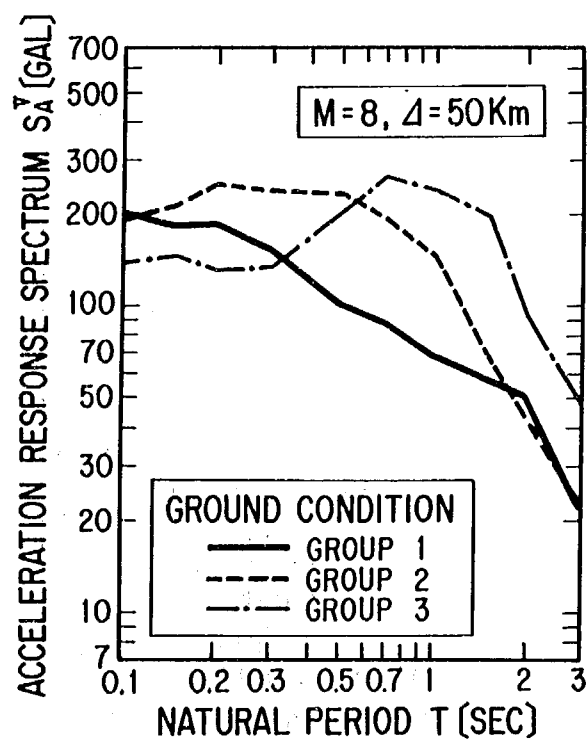
(a) $M=5$



(b) $M=6$

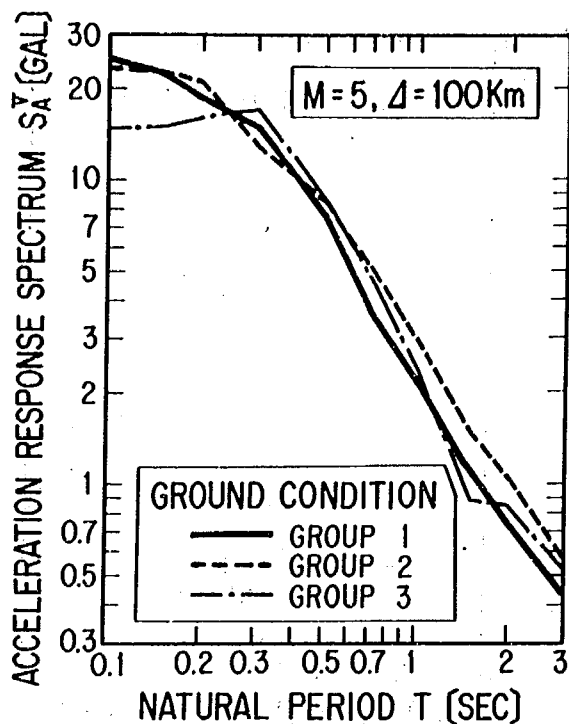


(c) $M=7$

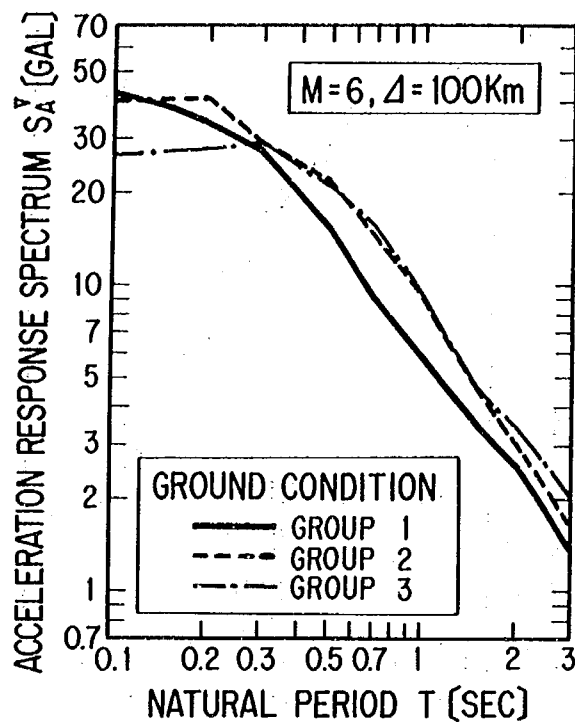


(d) $M=8$

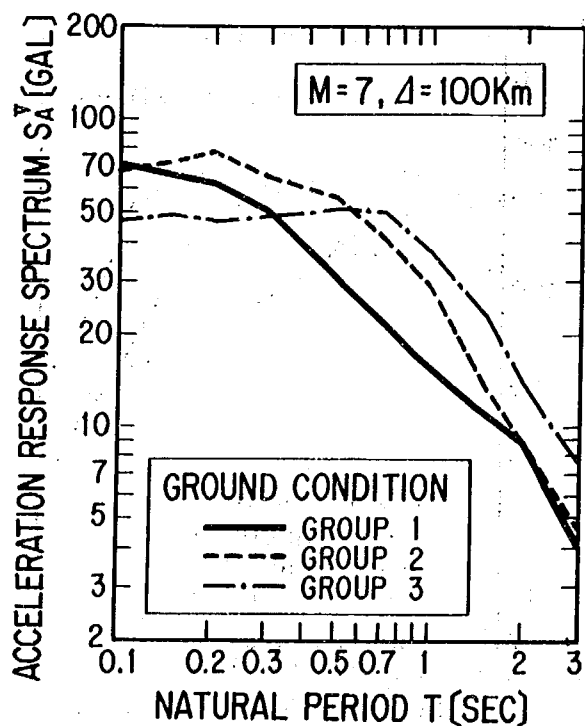
図4-5(1) S_A^v スペクトル ($\Delta=50\text{km}$ の場合)



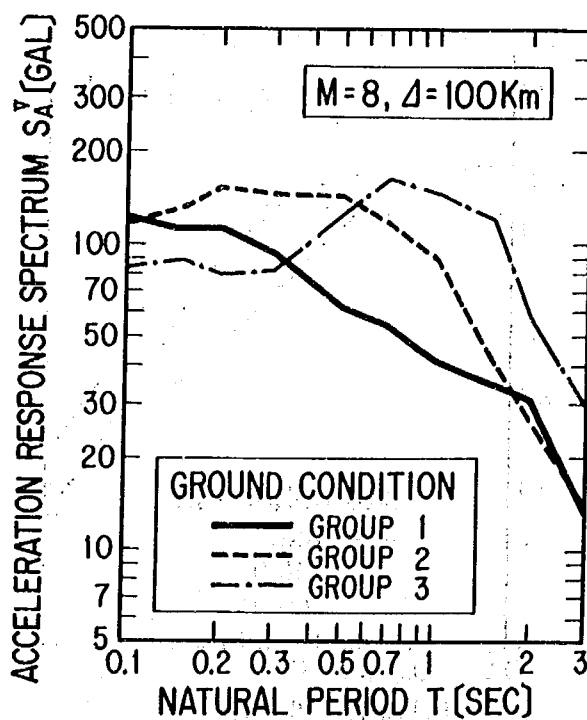
(a) $M=5$



(b) $M=6$

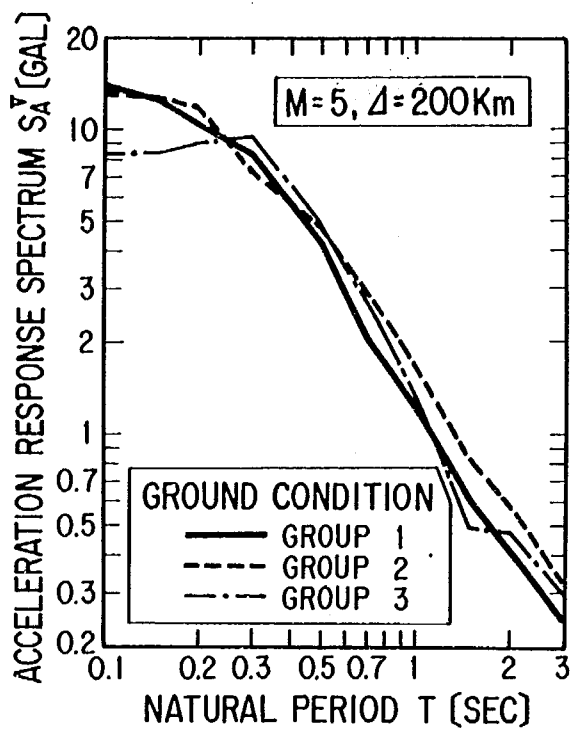


(c) $M=7$

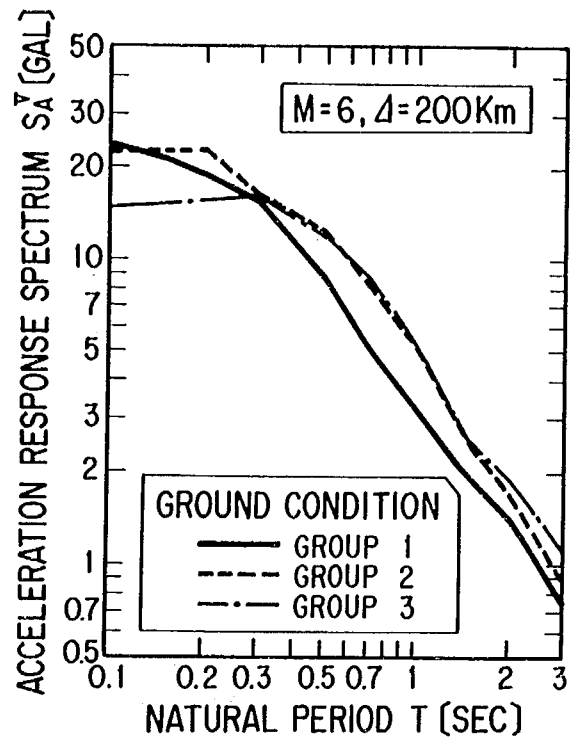


(d) $M=8$

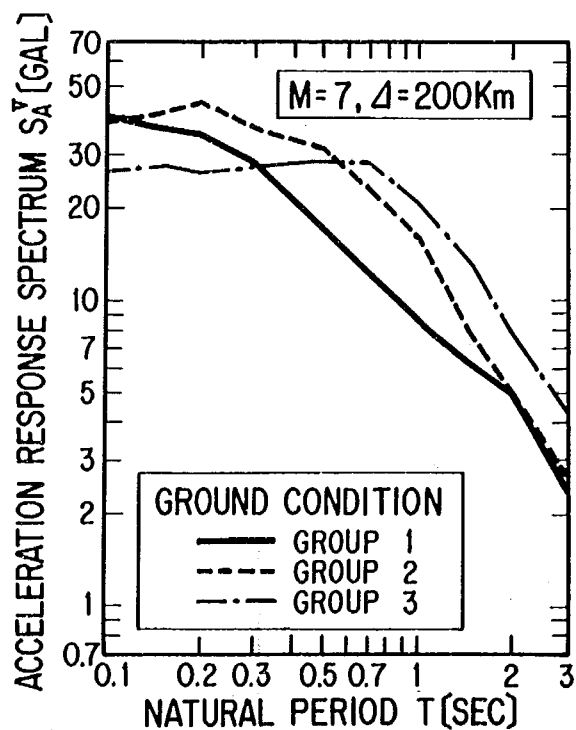
図 4-5(2) S_A^v スペクトル ($\Delta=100\text{km}$ の場合)



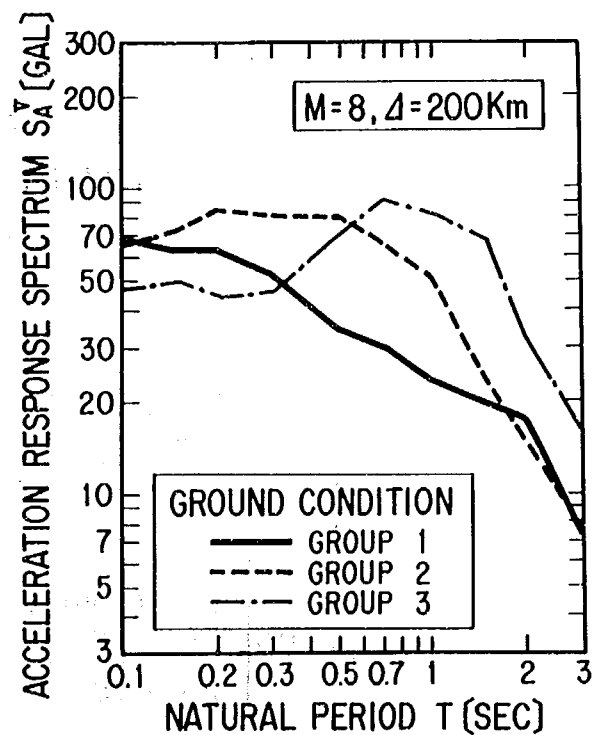
(a) $M=5$



(b) $M=6$

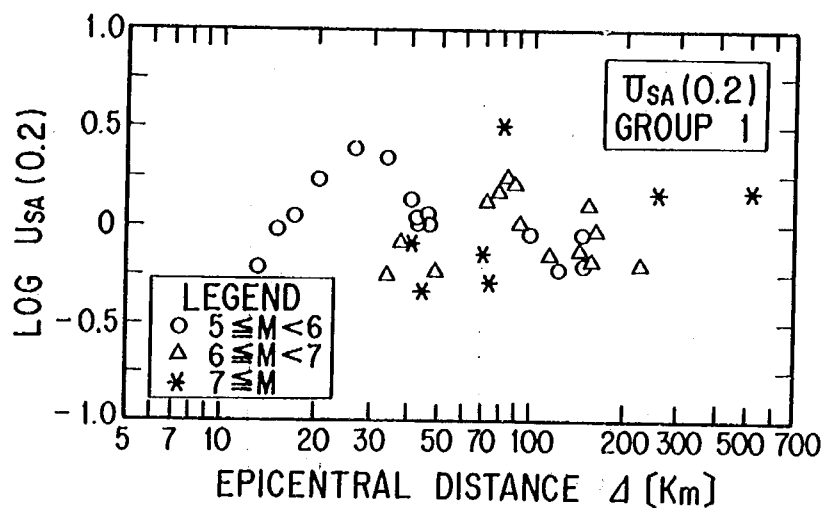


(c) $M=7$

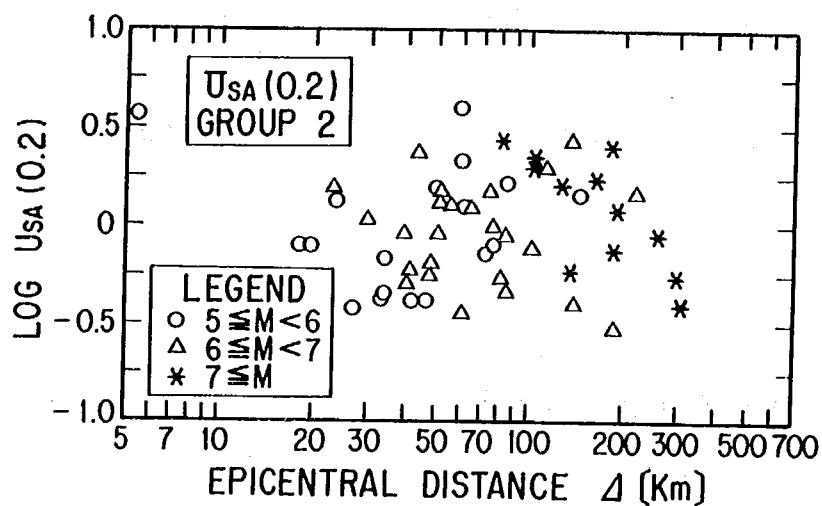


(b) $M=8$

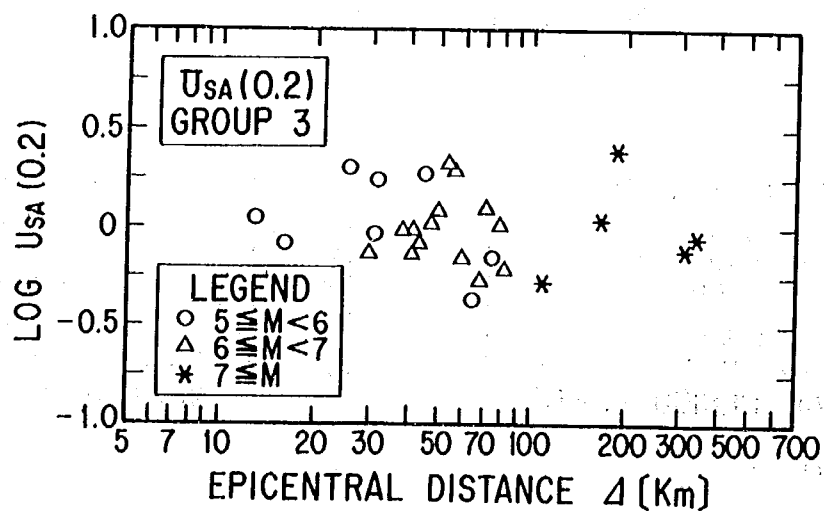
図4-5(3) S_A^v スペクトル ($\Delta=200\text{km}$ の場合)



(a) 1 種地盤

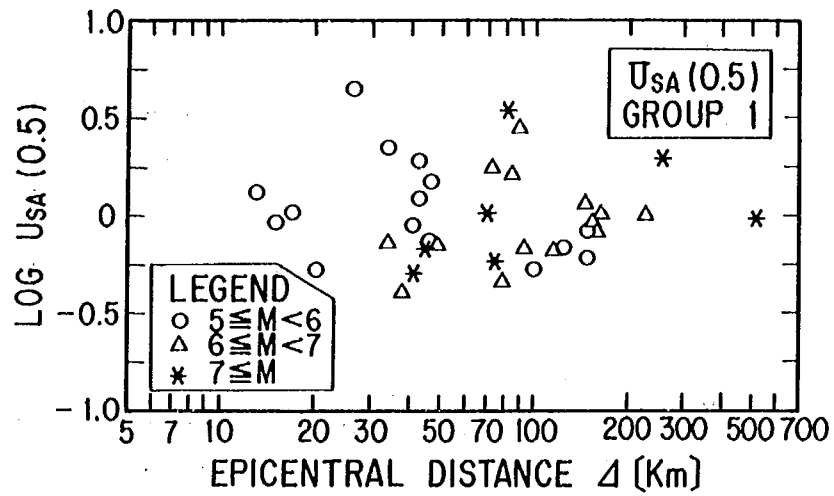


(b) 2 種地盤

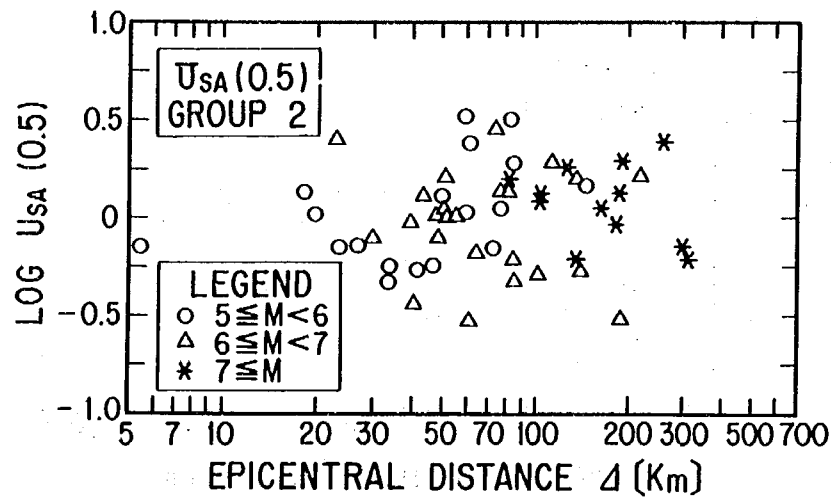


(c) 3 種地盤

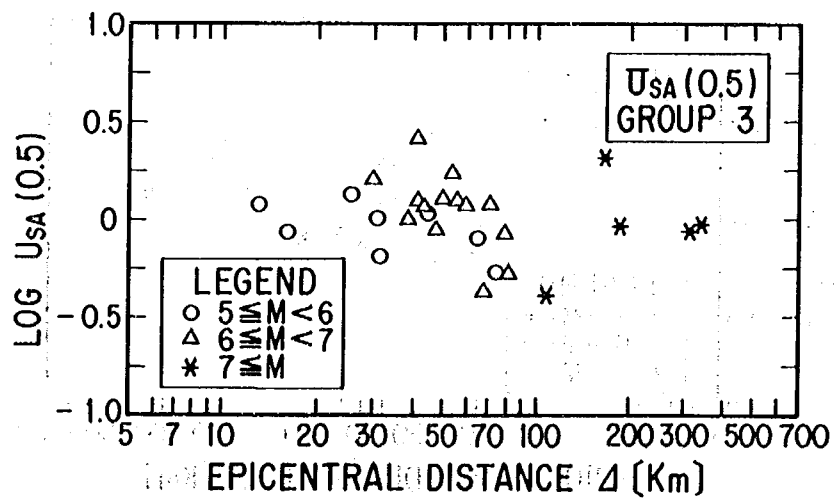
図 4 - 6 (1) $\text{Log } U_{SA} (0.2) \sim \Delta \sim M$ の関係



(a) 1種地盤

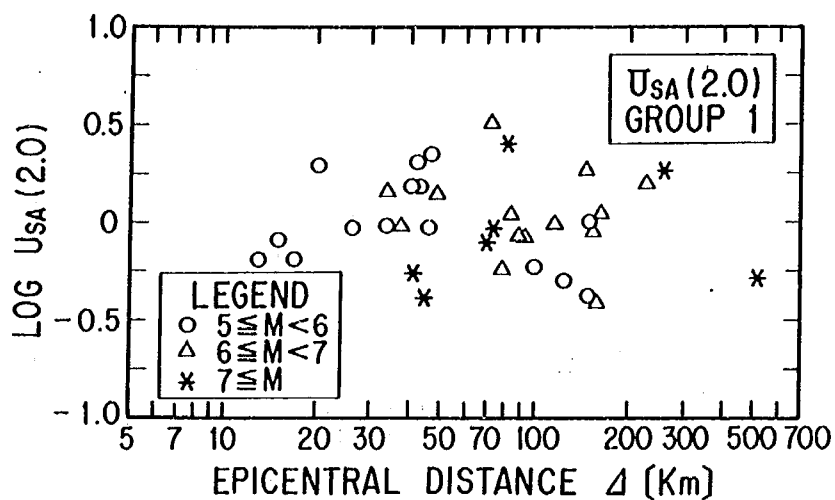


(b) 2種地盤

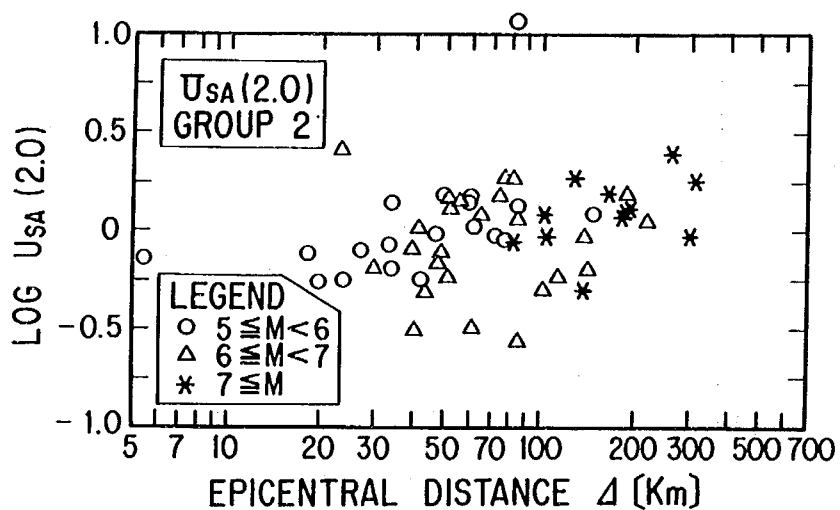


(c) 3種地盤

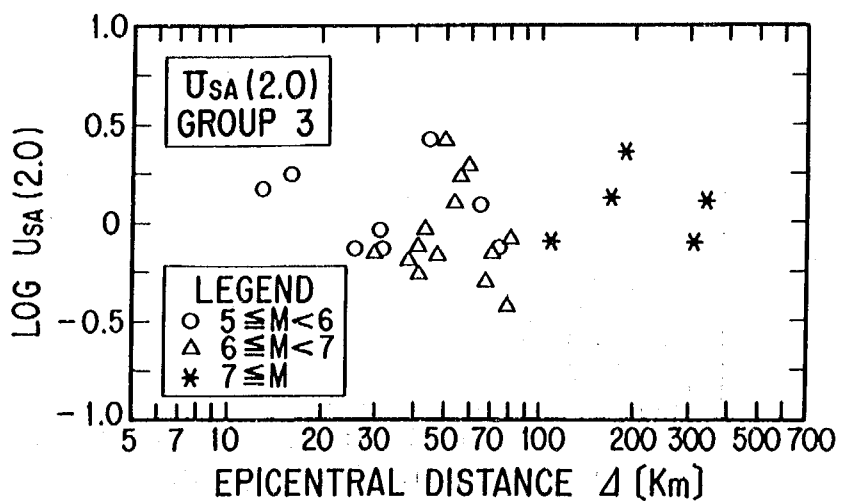
図4-6(2) $\text{Log } U_{SA}(0.5) \sim \Delta \sim M$ の関係



(a) 1 種地盤



(b) 2 種地盤



(c) 3 種地盤

図 4 - 6(3) $\text{Log } U_{SA}(2.0) \sim \Delta \sim M$ の関係

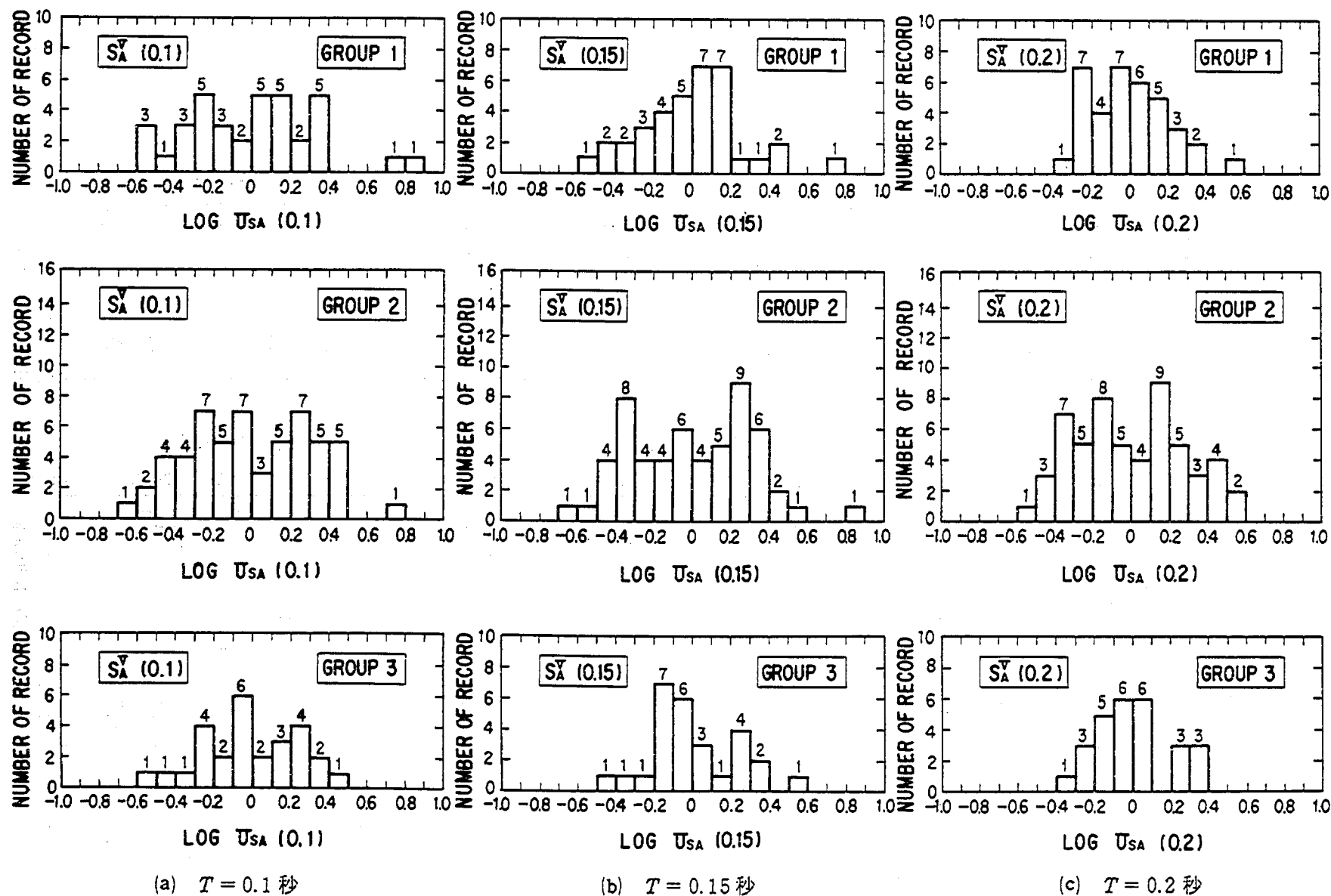


図 4-7(1) $\text{Log } U_{SA}$ の頻度分布

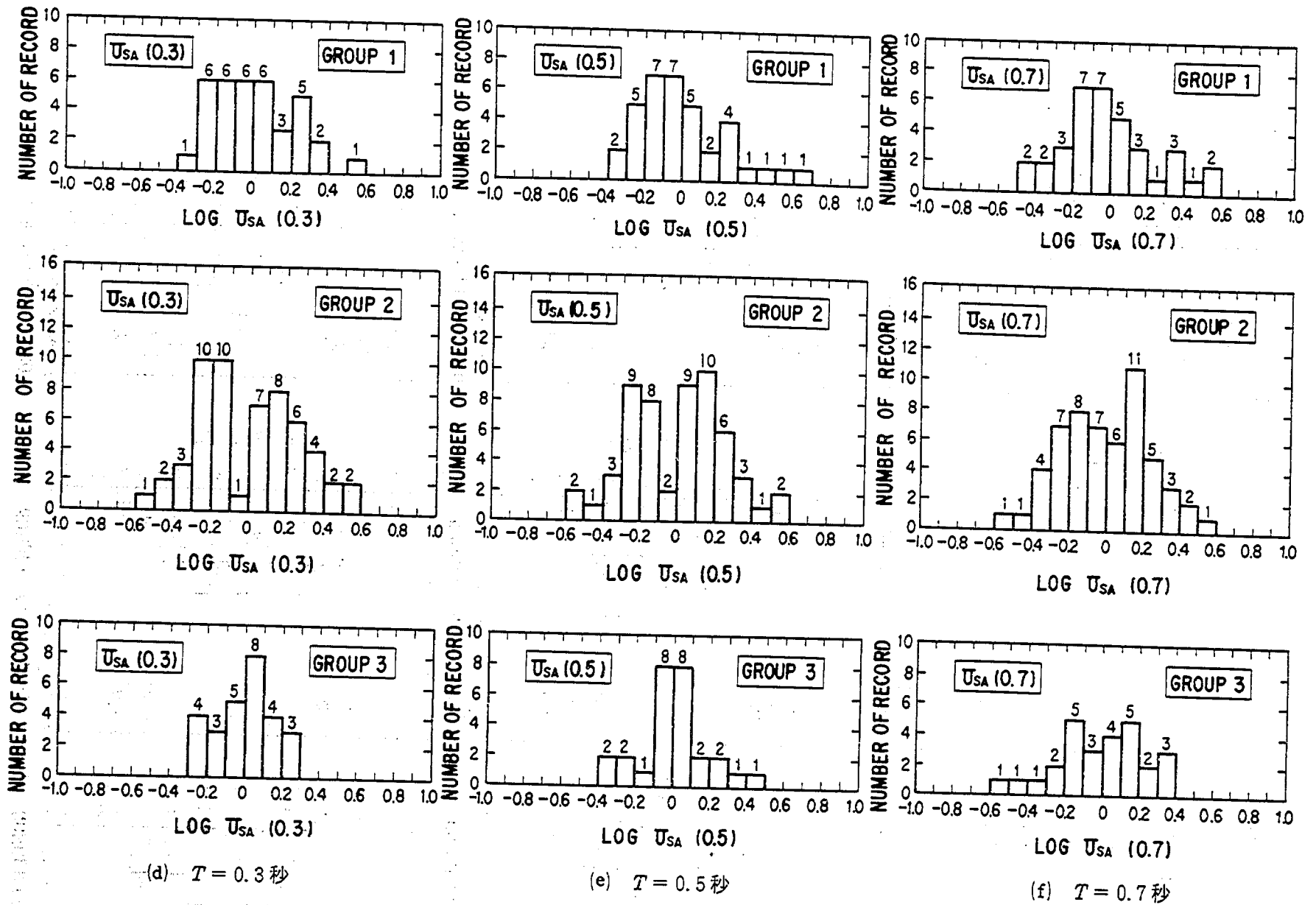


図 4-7(2) Log U_{SA} の頻度分布

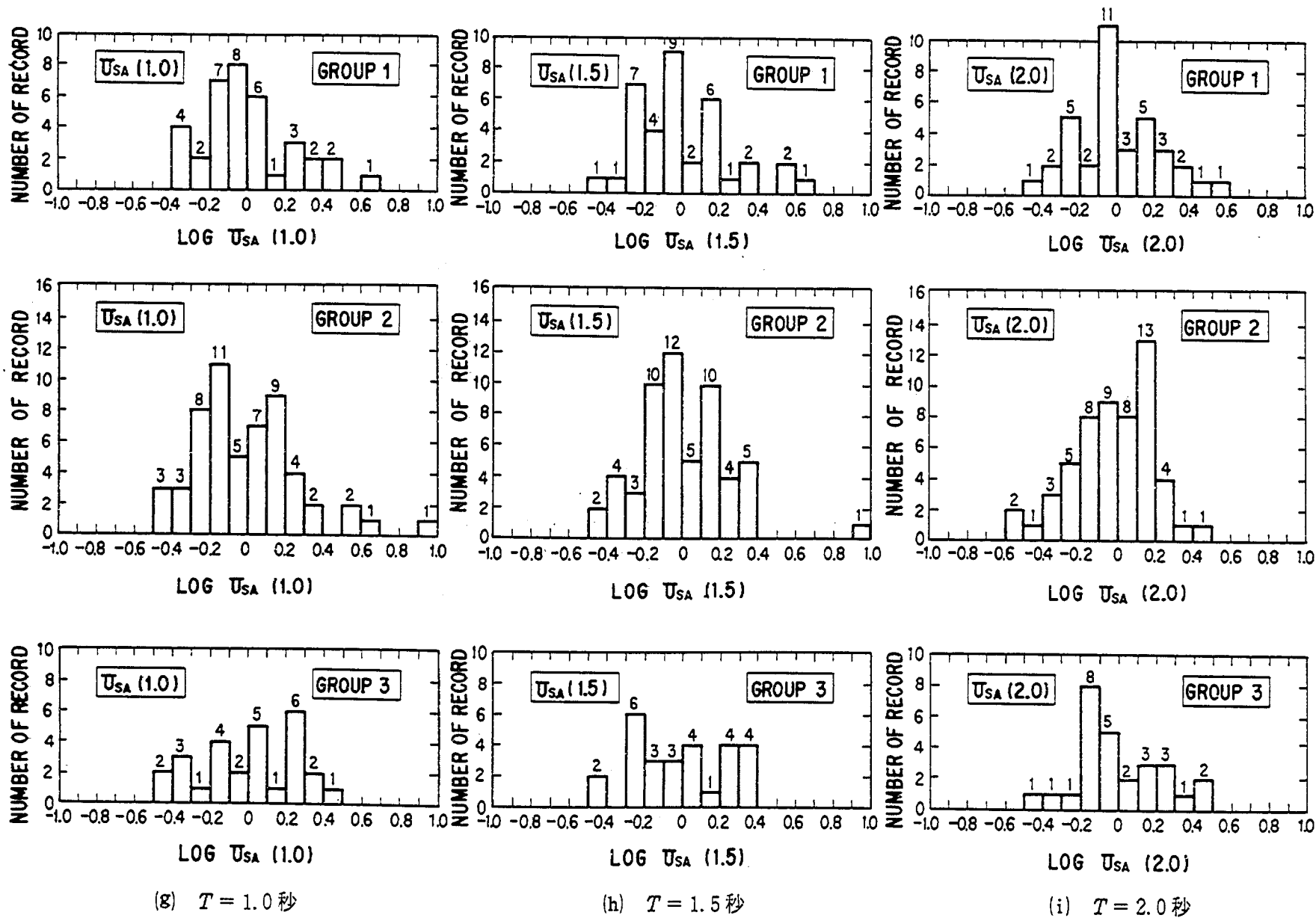
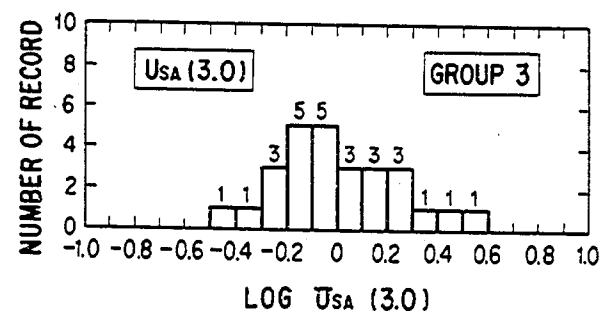
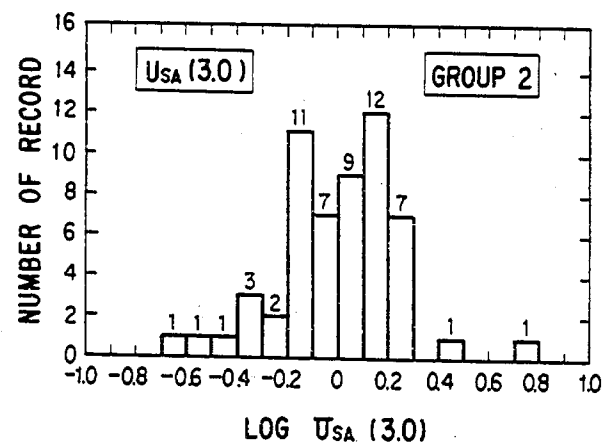
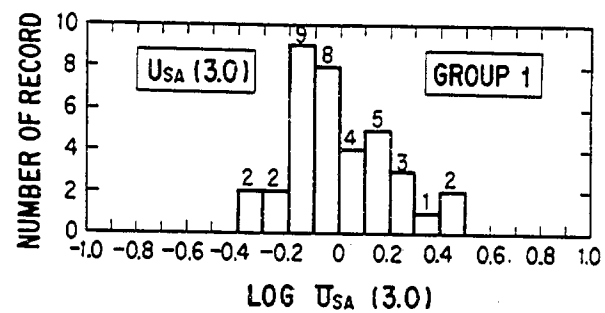
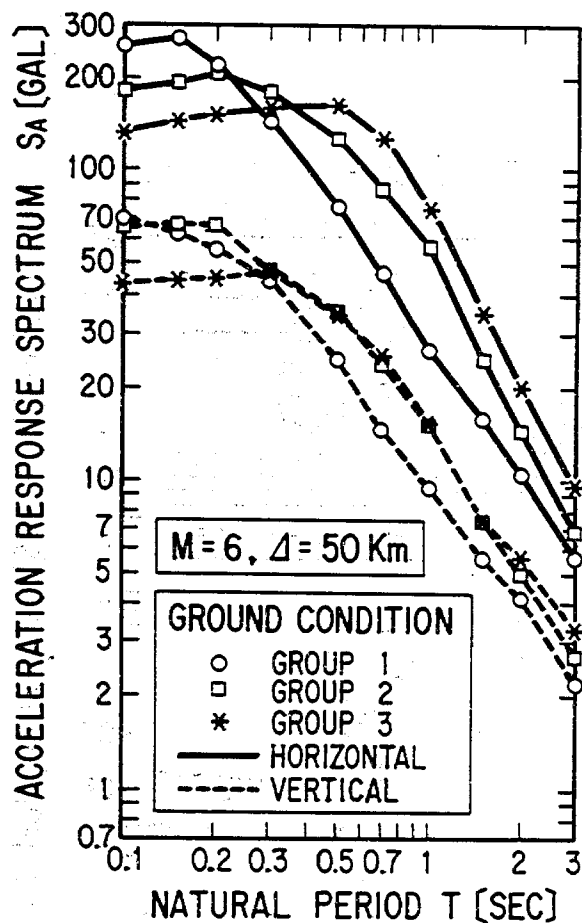


図 4 - 7 (3) $\text{Log } U_{SA}$ の頻度分布

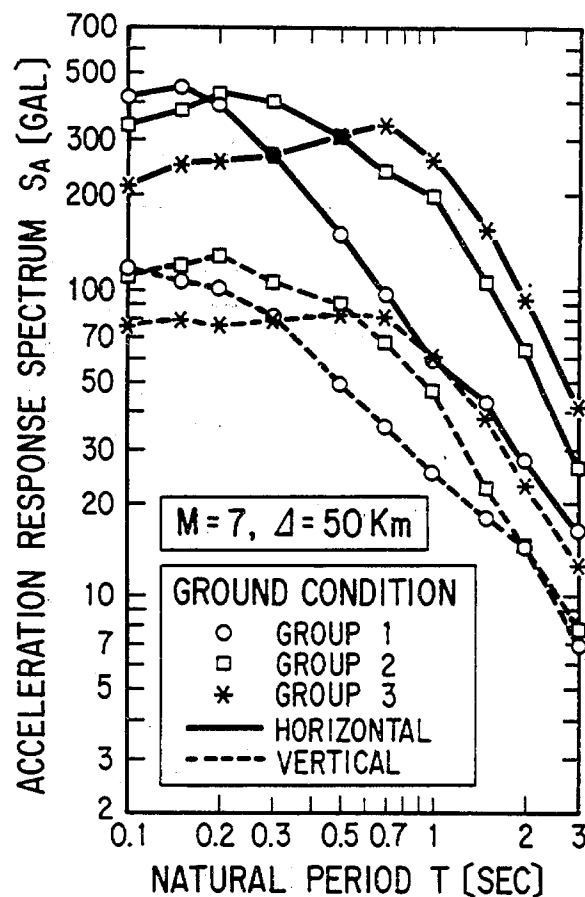


(j) $T = 3.0$ 秒

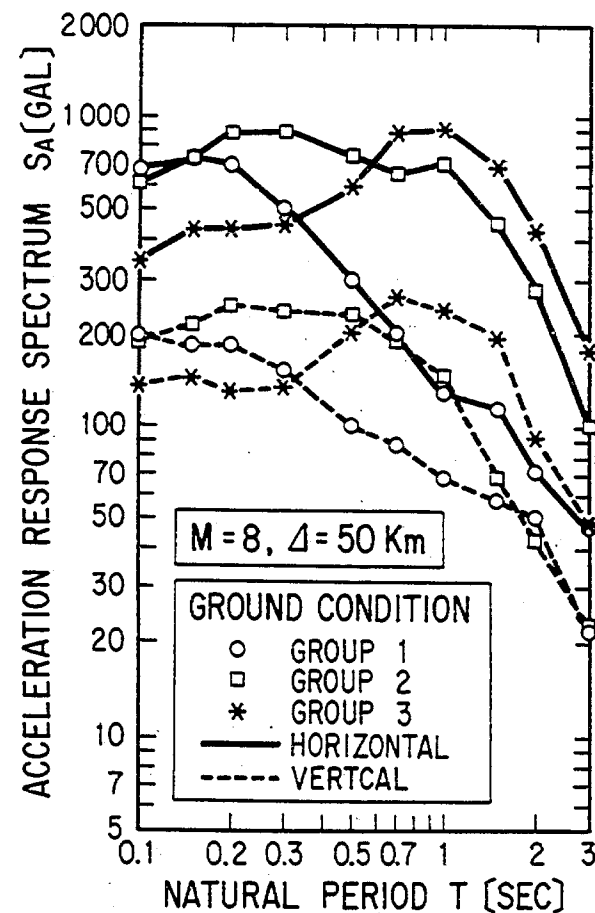
図 4-7(4) $\text{Log } U_{SA}$ の頻度分布



(a) $M=6$

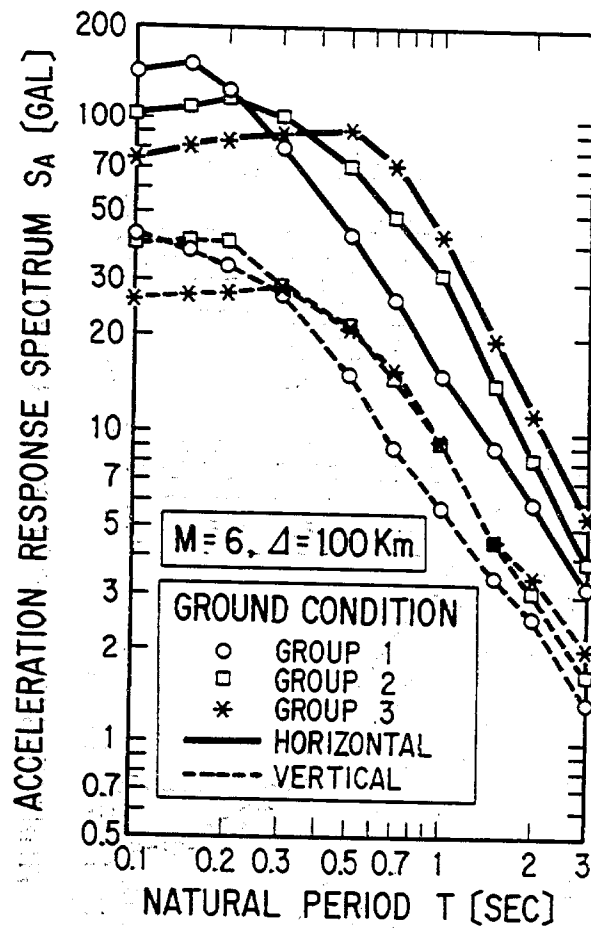


(b) $M=7$

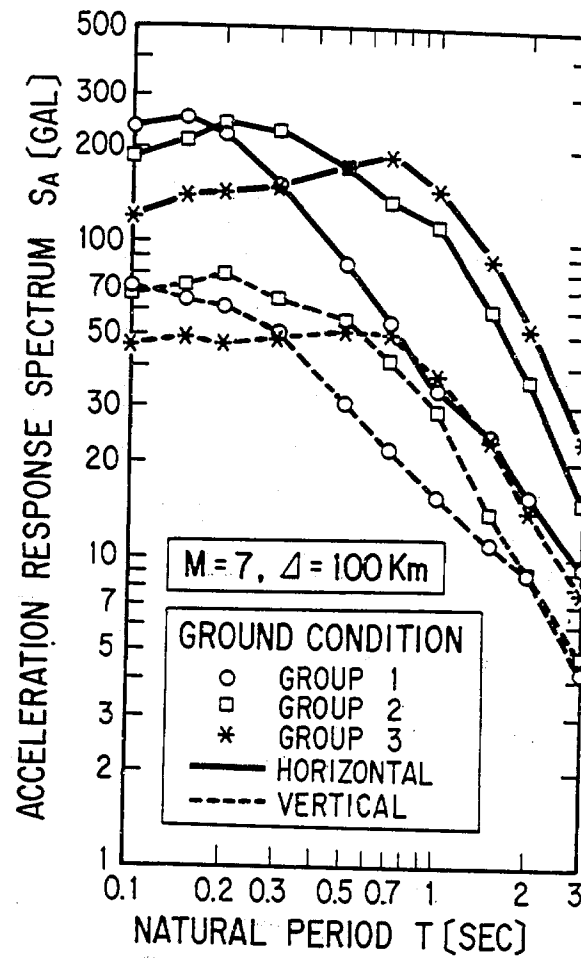


(c) $M=8$

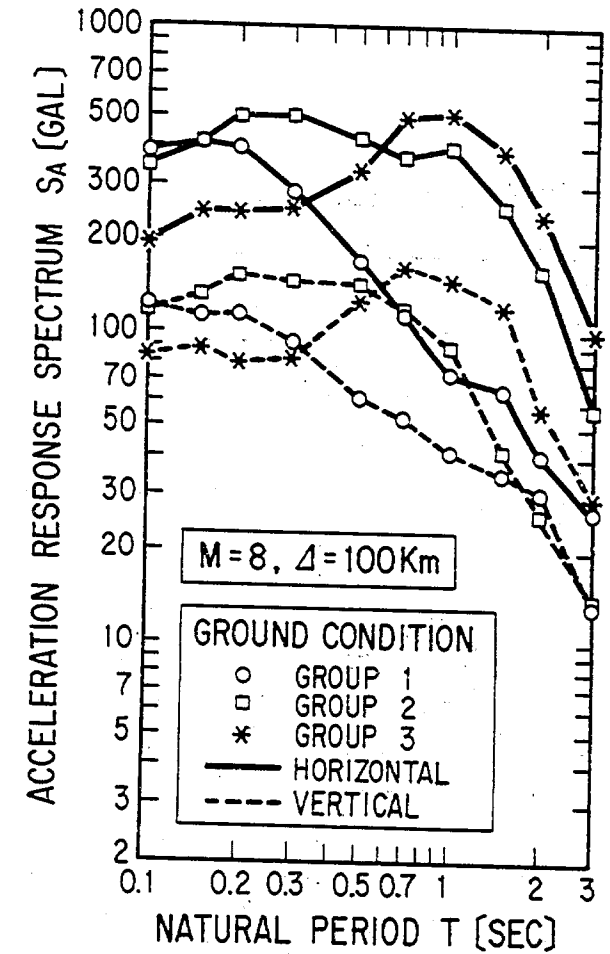
図 4-8(1) S_A^V と $\tilde{S}_A^H$ との比較 ($\Delta=50\text{km}$ の場合)



(a) $M=6$

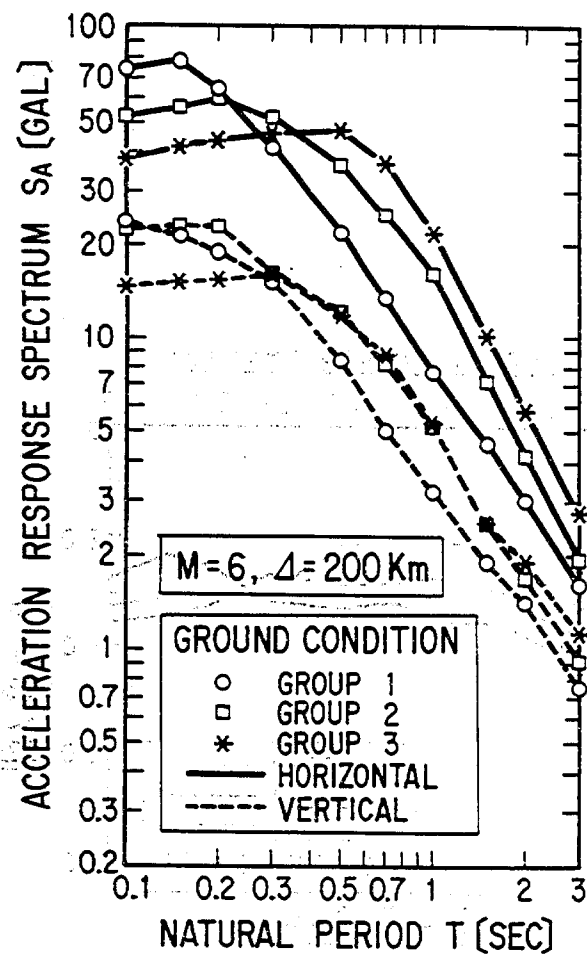


(b) $M=7$

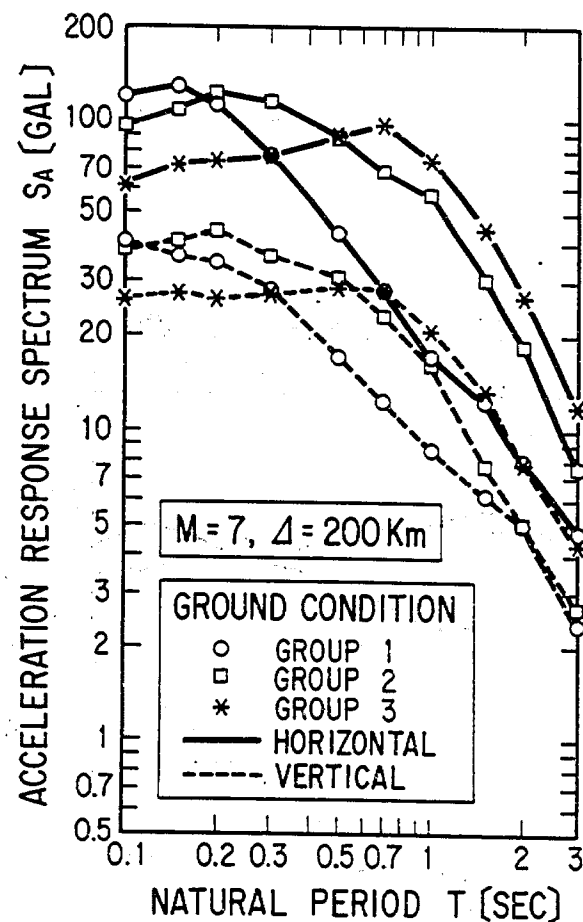


(c) $M=8$

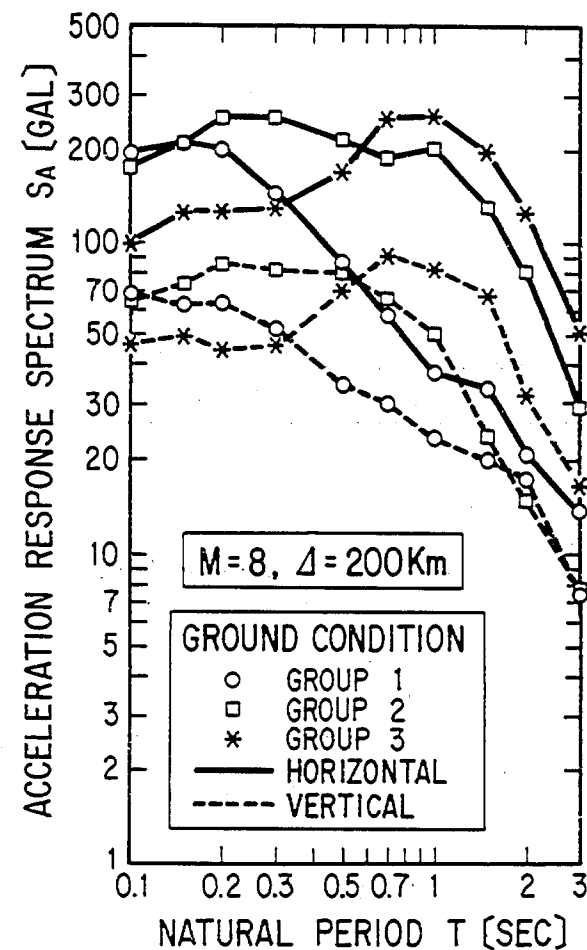
図4-8(2) S_A^V と $\tilde{S}_A^H$ との比較 ($\Delta=100 \text{ km}$ の場合)



(a) $M=6$

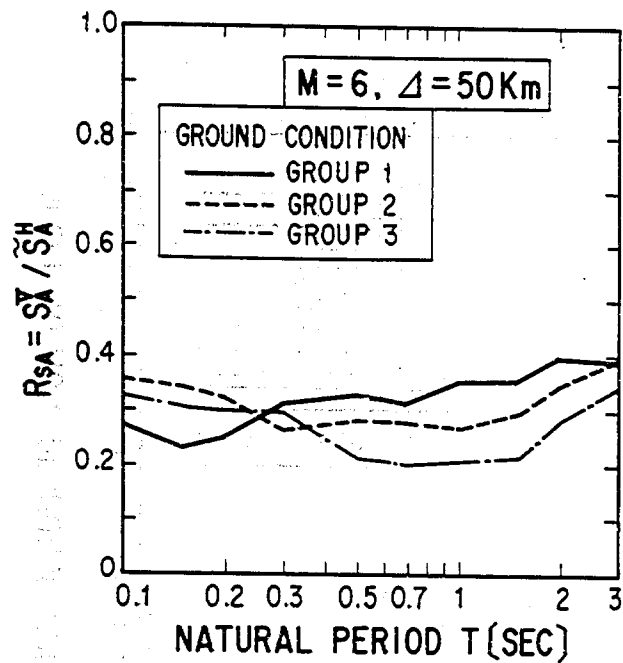


(b) $M=7$

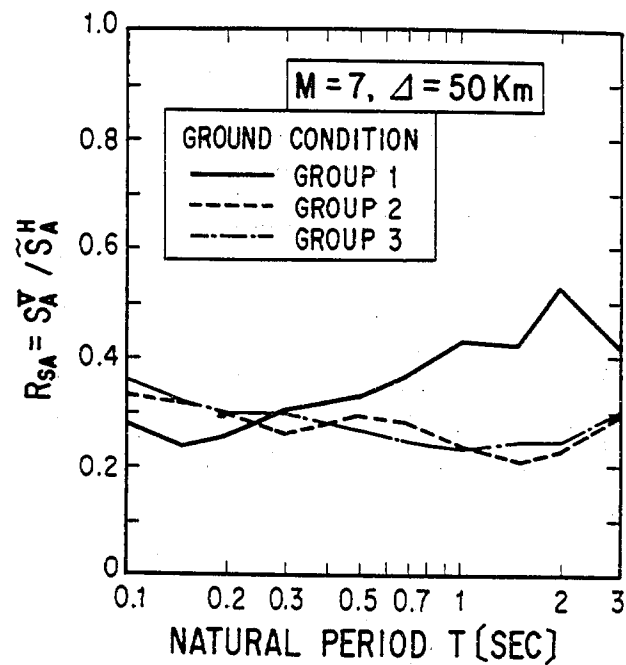


(c) $M=8$

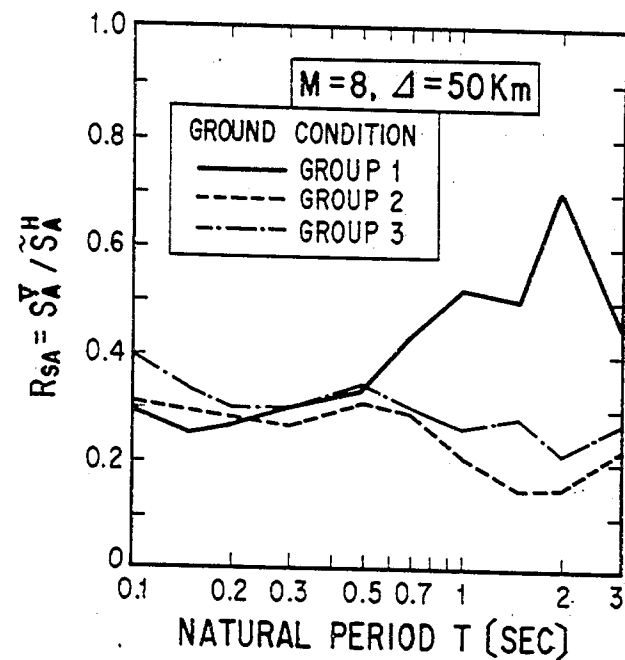
図 4-8(3) S_A^V と $\tilde{S}_A^H$ との比較 ($\Delta=200 \text{ km}$ の場合)



(a) $M=6$

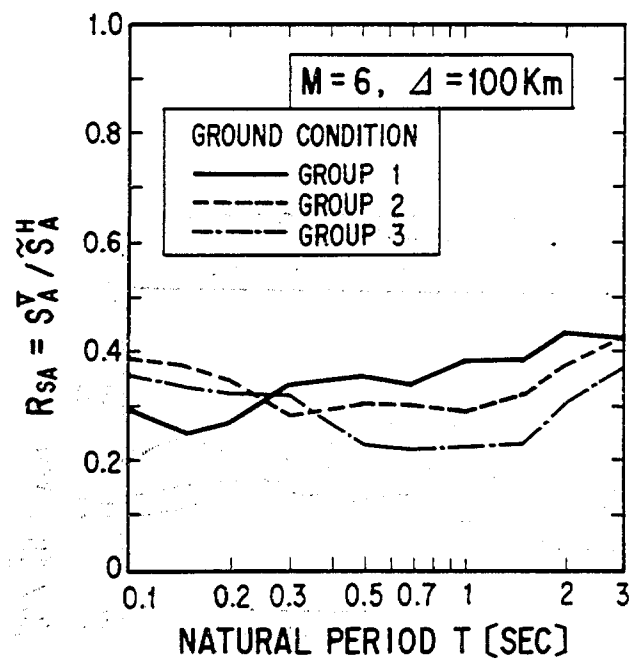


(b) $M=7$

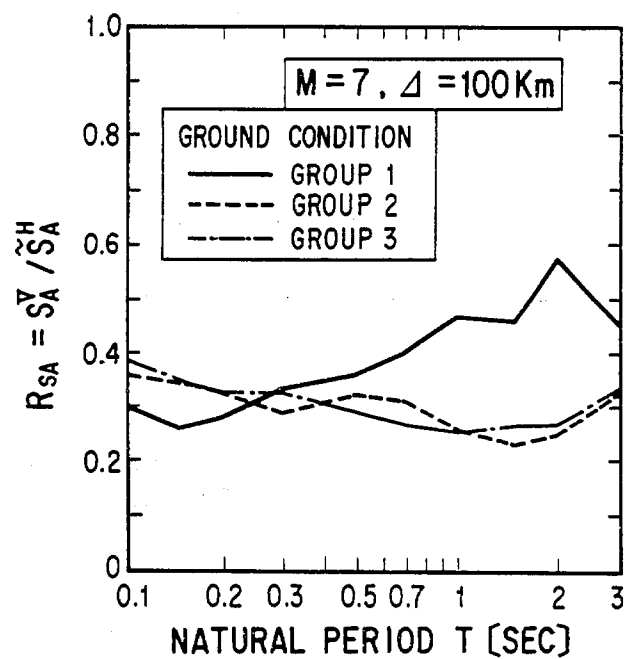


(c) $M=8$

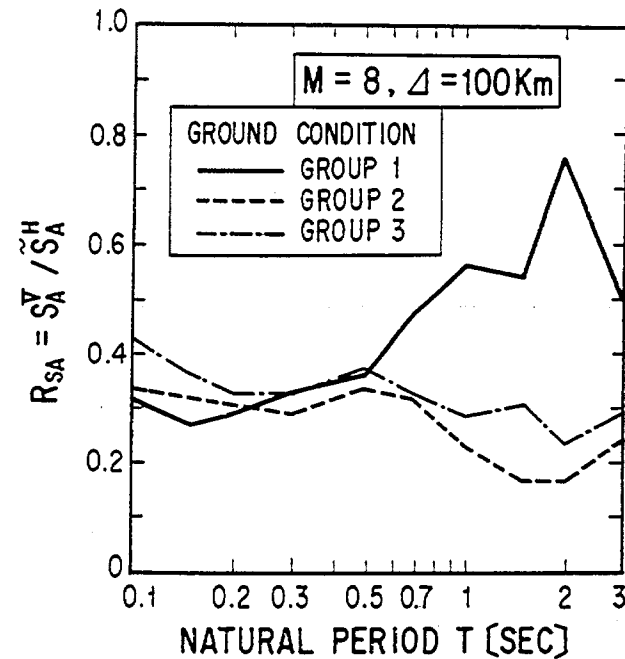
図 4-9(1) $\tilde{S}_A^V / \tilde{S}_A^H$ ($\Delta=50\text{km}$ の場合)



(a) $M=6$

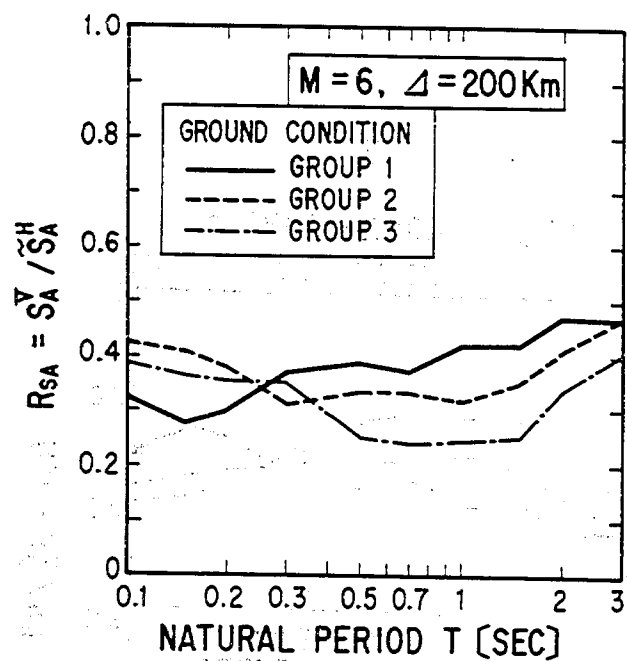


(b) $M=7$

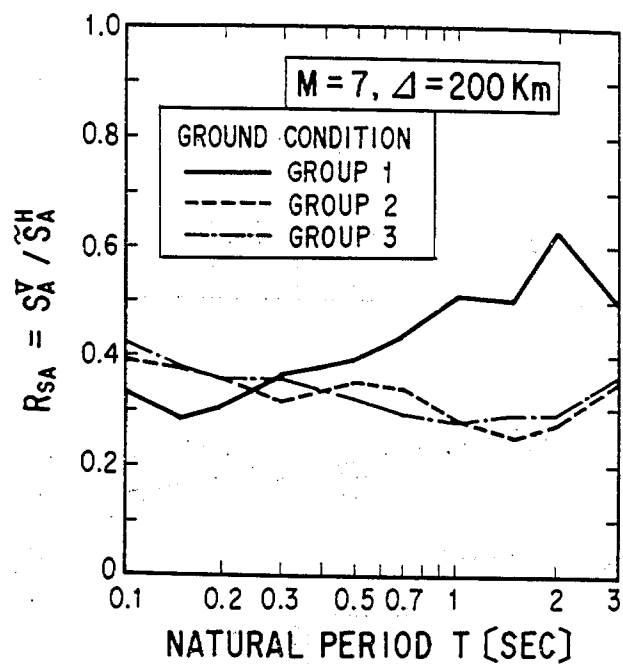


(c) $M=8$

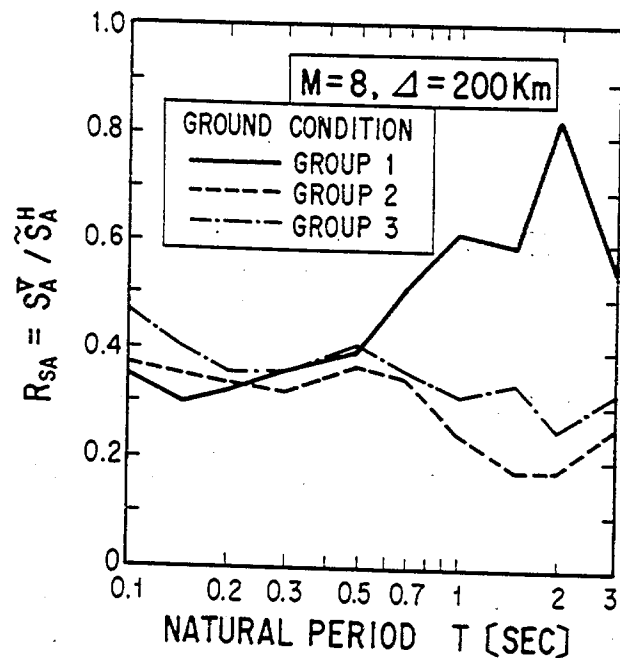
図 4-9(2) S_A^V / S_A^H ($\Delta=100\text{km}$ の場合)



(a) $M=6$



(b) $M=7$



(c) $M=8$

図 4-9(3) S_A^V / S_A^H ($\Delta=200$ kmの場合)

5. 既往の研究成果との比較

従来、水平方向の最大地震動および加速度応答スペクトル等に関しては各種の研究があるが、上下方向地震動の特性を検討した研究は比較的少ない。これは、上下方向の地震動は水平方向の地震動に比較して耐震設計上の重要性がやや低いという理由の他に上下方向の記録は水平成分の記録に比較して加速度振幅が小さいために記録数値化された記録数が水平成分に比較してかなり少ないことによると考えられる。現在までに提案されている主要な上下方向の最大加速度、最大速度および最大変位の距離減衰式をまとめるとそれぞれ表5-1、表5-2、表5-3のようになる。

このうち、Idriss らの研究〔1978〕およびSadigh らの研究〔1978〕の研究はともにマグニチュード6.5 程度の小規模地震に対してのみ適用可能なもので、任意のマグニチュードに対する距離減衰式を与えるものではない。また、Boore らの研究〔1978〕も3 種類のマグニチュードのレンジ（5～5.7, 6～6.4, 7.1～7.7）に対する距離減衰式を与えるものである。また、この場合には、解析に用いられた強震記録が地盤上で得られたものではなく、1～2階建の地階（Class 1 Structure と呼んでいる）およびそれ以上の高い建物の地階（Class 2 Structure と呼んでいる）でそれぞれ得られたものであることに注意しなければならない。大崎らの研究〔1980〕は岩盤上の強震記録だけをもとに距離減衰を求めたものであるが、解析に用いた記録数はそれ程多くないとされている。Trifunac ら〔1976〕の距離減衰式は水平成分と上下成分の記録をダミー変数を用いて同時に重回帰分析して求めたもので、既往の研究成果の中では最も記録数が多いと考えられる。しかしながら、181 記録中、マグニチュード M が7 以上の記録は7 成分に過ぎない。以上の点からわかるように、上下方向の最大地震動に関しては、まだ、十分な距離減衰式が求められていないのが実情といえよう。

表5-1～表5-3に示した既往の研究成果と式（3-6）～式（3-7）による距離減衰式をマグニチュード $M=6$ および8について比較した結果が図5-1である。ただし、これらの比較のうち最大速度 $v_{\max}^v$ および最大変位 $d_{\max}^v$ の比較の場合には、加速度記録を数値積分して速度および変位を求める際の低振動数側の遮断振動数が各研究者ごとに統一されていないため、考慮されている振動数帯域が相互に異なることに注意しなければならない。図5-1によれば、最大加速度については今回求めた式（3-6）は既往の研究に比較して震央距離が小さい領域では小さめの結果を、また、震央距離が大きい領域では大きめの結果をそれぞれ与えることがわかる。また、最大速度および最大変位についても同様な傾向が認められる。

上下方向加速度応答スペクトルについては現在までにほとんど研究が実施されていないようであるので今回の解析と既応の研究成果の比較はここでは行わない。

表 5 - 1 既往の上下方向最大加速度の予測式

出 典	解析データ	地 盤 種 別	推 定 式	備 考
Trifunac (1976)	57回の地震による 181 成分の記録	alluvium ($s' = 0$) intermediate ($s' = 1$) baserock ($s' = 2$) の 3 種類	$\log a_{\max}^v = M + \log A_0(d)$ $-\log \{y_0(M, p, s', v')\}$ ここで, $\log y_0 = -0.898p - 1.789M + 6.217$ $+ 0.060s' + 0.331v' + 0.186M^2$ ここで, s' = 地盤種別 $v' = 1$ (上下成分の場合) p = 非超過確率	水分成分と上下成分 加速度を同時に回帰 している。 水平成分の場合には $v' = 0$
Boore, Oliver, Page and Joyner (1978)	a) Class 1 Structure 158 記録 b) Class 2 Structure 108 記録	a) Class 1 Structure (1 ~ 2 階建の地下) rock soil b) Class 2 Structure (それ以上の階数の建物) rock soil	マグニチュードのレンジ (5 ~ 5.7, 6 ~ 6.4, 7.1 ~ 7.7) ごとに $\log a_{\max}^v = A + E \log R$ ここで, R : 断層線までの直近の距離 (km) A, E : 重回帰分析による係数	
Idriss and Ng (1978)	マグニチュード 5.6 ~ 6.4 の 4 回の地震による強 震記録を使用 rock site 数は 22, stiff site 数は 40	rock site stiff site	$\ln a_{\max}^v = \ln A + E \ln (D + 20)$ ここで, A, E : 重回帰分析による係数 D : Energy center からの 距離 (km)	ローカルマグニチュ ード $M_L \div 6.4 \sim 6.5$ の地震に対する推定 式
Sadigh, Power and Youngs (1978)	マグニチュード 6.3 ~ 6.5 の 11 地震による強震記 録を使用	deep soil site (岩盤上に 60m 以上土 が堆積した場合)	$\ln a_{\max}^v = \ln A + E \ln (D + 20)$ ここで, A, E : 重回帰分析による係数 D : Energy center からの 距離 (km)	マグニチュード 6.5 付 近の地震に対する推 定式
Ohsaki, Watabe and Tohdo (1980)	岩盤上の記録 (記録数は比較的少 ない)	岩 盤 上	$a_{\max}^v = 23.9 \times 10^{0.485M} \times d^{-1.85}$	75 記録を使った水平 成分最大加速度の解 析も同時に行われて いる。

表 5 - 2 既往の上下方向最大速度の予測式

出 典	解析データ	地 盤 種 別	推 定 式	備 考
Trifunac (1976)	57回の地震による 181 成分の強震記録	alluvium ($s' = 0$) intermediate ($s' = 1$) baserock ($s' = 2$)	$\log v_{\max}^v = M + \log A_0 (J)$ $\quad - \log \{ y_0 (M, p, s', v') \}$ ここで, $\log y_0 = -1.087 p - 2.059 M + 8.357$ $\quad + 0.134 s' + 0.344 v' + 0.201 M^2$ s' : 地盤種別 $v' = 1$ (上下成分の場合) p : 非超過確率	水平成分と上下成分 の速度を同時に回帰 している。 水平成分の場合には $v' = 0$
Boore, Oliver, Page and Joyner (1978)	a) Class 1 Structure 158 記録 b) Class 2 Structure 108 記録	a) Class 1 Structure (1 ~ 2 階建の地下) rock soil b) Class 2 Structure (それ以上の階数の建物) rock soil	マグニチュードのレンジ (5 ~ 5.7, 6 ~ 6.4, 7.1 ~ 7.7) ごとに $\log v_{\max}^v = A + E \log R$ ここで, R : 断層線までの直近の距離 (km) A, E : 重回帰分析による係数	
Idriss and Ng (1978)	マグニチュード 5.6 ~ 6.4 の 4 回の地震による強 震記録を使用 rock site 数は 22, stiff site 数は 40	rock site stiff site	$\ln v_{\max}^v = \ln A + E \ln (D + 20)$ ここで, A, E : 重回帰分析による係数 D : Energy center からの 距離 (km)	ローカルマグニチュ ード $M_L \div 6.4 \sim 6.5$ の地震に対する推定 式
Sadigh, Power and Youngs (1978)	マグニチュード 6.3 ~ 6.5 の 11 地震により強震記 録を使用	deep soil site (岩盤上に 60m 以上土 が堆積した場合)	$\ln v_{\max}^v = \ln A + E \ln (D + 20)$ ここで, A, E : 重回帰分析による係数 D : Energy center からの 距離 (km)	マグニチュード 6.5 付 近の地震に対する推 定式
Ohsaki, Watabe and Tohdo (1980)	岩盤上の記録	岩盤上	$v_{\max}^v = 0.141 \times 10^{0.485 M} \times J^{-1.25}$	75 記録を使った水平 成分最大速度の解析 も同時に行われてい る。

表 5 - 3 既往の上下方向最大変位の予測式

出典	解析データ	地盤種別	推定式	備考
Trifunac (1976)	57回の地震による181成分の強震記録	alluvium ($s' = 0$) intermediate ($s' = 1$) baserock ($s' = 2$)	$\log d_{\max}^V = M + \log A_0 (d)$ $+ \log y_0 (M, p, s', v')$ ここで, $\log y_0 = -1.288 p - 2.366 M + 9.717$ $+ 0.205 s' + 0.240 v' + 0.226 M^2$ s' : 地盤種別 $v' = 1$ (上下成分の場合) p : 非超過確率	水平成分と上下成分の変位を同時に回帰している。 水平成分の場合には $v' = 0$
Boore, Oliver, Page and Joyner (1978)	(a) Class 1 Structure 158 記録 (b) Class 2 Structure 108 記録	(a) Class 1 Structure (1 ~ 2 階建の地下) rock soil (b) Class 2 Structure (それ以上の階数の建物) rock soil	マグニチュードのレンジ (5 ~ 5.7, 6 ~ 6.4, 7.1 ~ 7.7) ごとに $\log d_{\max}^V = A + E \log R$ ここで, R : 断層線までの直近の距離 (km) A, E : 重回帰分析による係数	
Idriss and Ng (1978)	マグニチュード 5.6 ~ 6.4 の 4 回の地震による強震記録を使用 rock site 数は 22, stiff site 数は 40	rock site stiff site	$\ln d_{\max}^V = \ln A + E \ln (D + 20)$ ここで, A, E : 重回帰分析による係数 D : Energy center からの距離 (km)	ローカルマグニチュード $M_L \div 6.4 \sim 6.5$ の地震に対する推定式
Sadigh, Power and Youngs (1978)	マグニチュード 6.3 ~ 6.5 の 11 地震による強震記録を使用	deep soil site (岩盤上に 60 m 以上土が堆積した場合)	$\ln d_{\max}^V = \ln A + E \ln (D + 20)$ ここで, A, E : 重回帰分析による係数 D : Energy center からの距離 (km)	マグニチュード 6.5 付近の地震に対する推定式

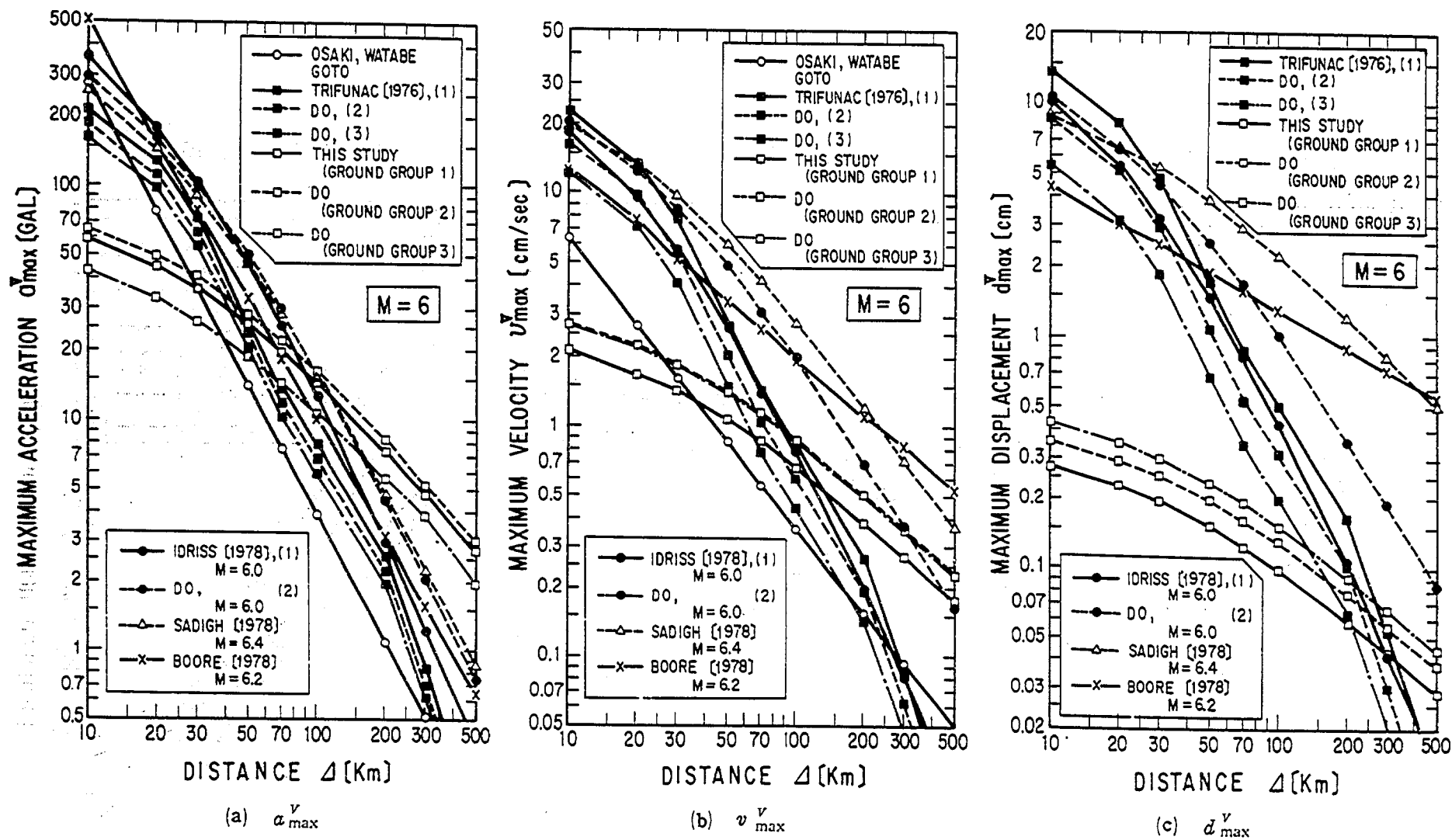


図 5 - 1 (1) 既往の研究成果との比較 ($M=6$ 相当の場合)

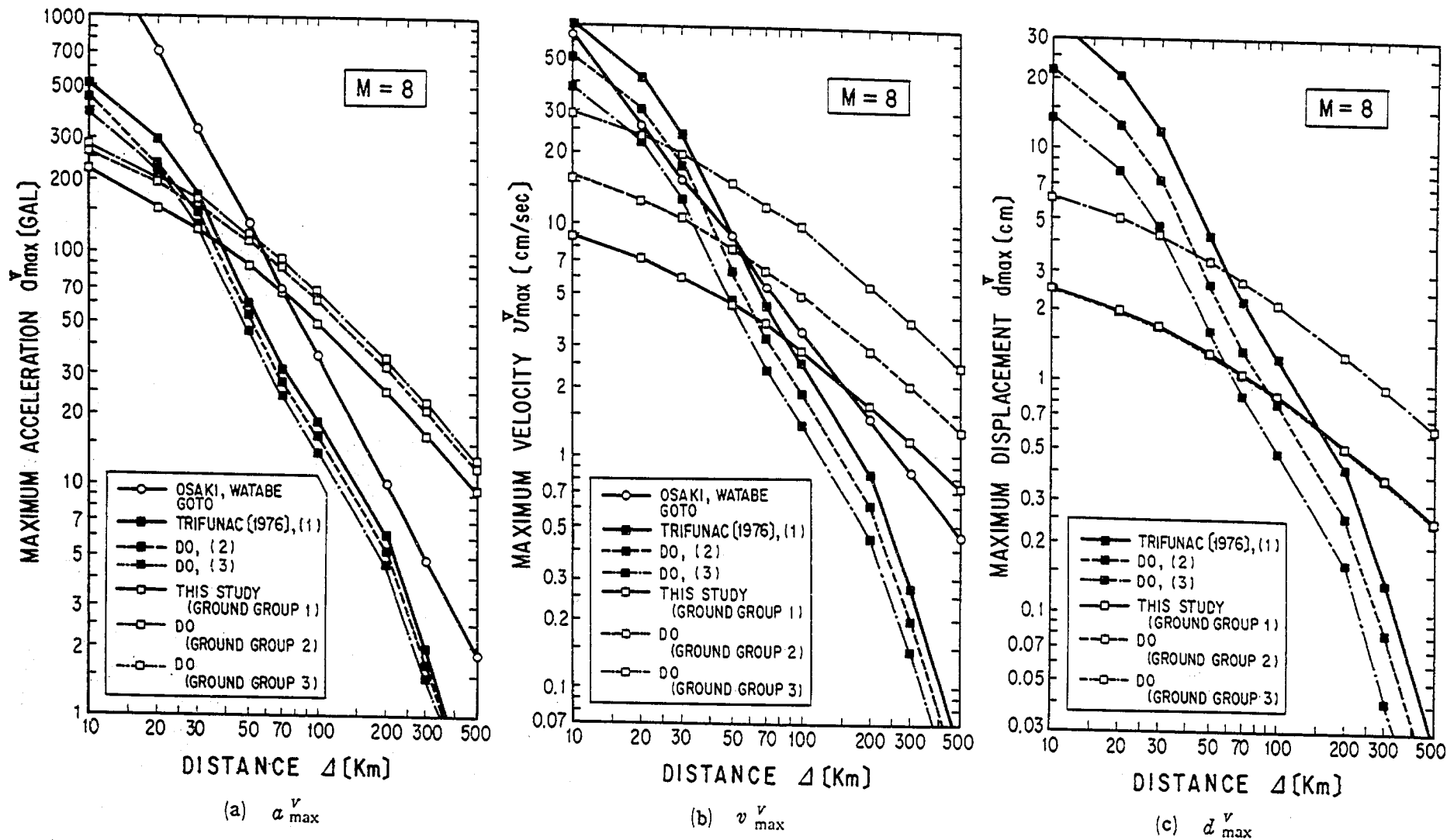


図 5 - 1 (2) 既往の研究成果との比較 ($M = 8$ の場合)

6. 結 論

我国の地盤上53地点において57回のマグニチュード5以上の浅発地震（震源深さ60km未満）によりSMAC型強震計により観測された119成分の上下方向加速度強震記録をもとに、最大地震動（最大加速度、最大速度、最大変位）および減衰定数5%の加速度応答スペクトルを道路橋示方書耐震設計編に基づく3種類（1種地盤、2種+3種地盤、4種地盤）の地盤種別ごとに求めた。本解析結果は以下のようにまとめられる。

1) 上下方向の最大加速度 $a_{\max}^V$ 、最大速度 $v_{\max}^V$ 、最大変位 $d_{\max}^V$ の距離減衰式としてそれぞれ式（3-6）、式（3-7）、式（3-8）を提案する。ここで、提案式の精度 U_a 、 U_v 、 U_d を式（3-9）で定義すると $\log U_a$ 、 $\log U_v$ 、 $\log U_d$ の標準偏差は0.22程度となり、予測値を上廻らない確率（非超過確率）に対応する推定値は式（3-6）～式（3-8）の予測値に図3-12の係数を乗じることにより求めることができる。

2) 水平成分と上下成分の最大加速度の比 R_a は震央距離 Δ 、マグニチュード M 、地盤種別 GC_i によって大きく変化せず全体として0.3～0.4程度の値をとる。これに対して水平成分と上下成分の最大速度および最大変位の比 R_v および R_d はともに震央距離 Δ 、地盤種別 GC_i によって変化する。ただし、今回の求めた最大変位の比 R_d については震央距離の大きな領域で、既往の観測事例と反する結果を与える場合があるため、今後記録の蓄積を待って再検討が必要である。

3) 上下方向の加速度応答スペクトル $S_A^V(T)$ （減衰定数5%）の距離減衰式として式（4-2）を提案する。ここで、提案式の精度 U_{SA} を式（4-3）で定義すると、 $\log U_{SA}$ の標準偏差 σ は固有周期 T_k および地盤種別 GC_i によらず0.25程度となり、予測値を上廻らない確率（非超過確率） p に対応する推定値は式（4-2）の予測値に図3-12の係数を乗じることにより求めることができる。

4) 水平成分と上下成分の加速度応答スペクトルの比 R_{SA} は、マグニチュード、震央距離、地盤種別、固有周期に大きく影響されず0.2～0.4程度の値をとる。

5) 本解析に用いた強震記録には数値化の精度を考慮して、1/3Hzおよび12Hzをそれぞれ低振動側および高振動数側の遮断振動数とする計器補正を加えてある。したがって、本解析に用いた地震動は1/3Hz～12Hzの振動数帯域に限定された地震動であり、最大地震動および加速度応答スペクトルを推定する際に、これよりも高振動数側もしくは低振動数側の地震動を考慮する必要がある場合には、本解析結果を適用することはできない。また、本解析のもととなった強震記録には規模の大きい地震による記録は少なく、さらに、記録数自身も必ずしも十分なものではない。したがって、本解析結果をもとに規模の大きい地震による震央直近の地震動を推定しようとする際には、推定式の精度が保証されていないことに注意しなければならない。こうした点については、記録の蓄積を待ち、今後さらに検討を加えていくことが必要とされる。

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～No 8，Vol 32～38，41.
- 2) 川島一彦，高木義和，相沢興：ディジタイザーによるSMAC型強震計記録の数値化精度，土木学会論文報告集，No 324，1982.
- 3) 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，土木学会論文報告書，No 325，1982.
- 4) 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.
- 5) 建設省土木研究所：最大地震動および地震応答スペクトルの推定法 —（その1）水平2成分合成の影響—，土木研究所資料，第1765号，昭和57年3月.
- 6) 建設省土木研究所：最大地震動および地震応答スペクトルの推定法 —（その2）地震応答加速度スペクトルに及ぼす減衰定数の影響—，土木研究所資料，第1841号，昭和57年7月.
- 7) 建設省土木研究所：最大地震動および地震応答スペクトルの推定法 —（その3）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開発—，土木研究所資料，第1864号，昭和57年11月.
- 8) 建設省土木研究所：最大地震動および地震応答スペクトルの推定法 —（その4）最大加速度，最大速度，最大変位および加速度応答スペクトルの距離減衰式の再検討—，土木研究所資料，第1993号，昭和58年3月.
- 9) 建設省土木研究所：最大地震動および地震応答スペクトルの推定法 —（その5）減衰定数による地震応答加速度スペクトルの補正式の開発—，土木研究所資料，第2001号，昭和58年7月.
- 10) 川島一彦，相沢興，高橋和之：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，土木学会論文報告集，第329号，昭和58年1月.
- 11) 川島一彦，相沢興，高橋和之：地震応答スペクトルに及ぼす減衰定数の影響，土木学会論文報告集，第335号，昭和58年7月.
- 12) 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，昭和57年12月.
- 13) 川島一彦，相沢興，高橋和之：強震記録の重回帰分析による地震動の最大加速度，最大速度および最大変位の推定式.
- 14) 川島一彦，相沢興：減衰定数に対する地震応答スペクトルの補正法，土木学会論文集，第344/I-1号，1984.4.
- 15) 後藤健一：SMAC型強震計の短周期特性，地震学会講演集，1979.
- 16) Idriss, I. M.: Characteristics of Earthquake Ground Motions, State of the Arts Report, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Proc. of the ASCE Geotechnical

Engineering Division Speciality Conference, 1978.

- 17) Trifunac, M. D. and Brady, A. G. : Correlation of Peak Acceleration, Velocity and Displacement with Earthquake Magnitude, Distance and Site Conditions, International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 4, No 5, 1976.
- 18) Sadigh, K., Power, M. S. and Youngs, R. : Peak Horizontal and Vertical Accelerations, Velocities and Displacements on Deep Soil Sites for Moderately Strong Earthquakes, Proc 2nd International Conference on Microzonations, San Francisco, CA. 1978.

付属資料- I

解析に用いた $a'_{\max}$, $v'_{\max}$, $d'_{\max}$ および $S'_\lambda(T)$

No.	RECORD NAME	$a_{\max}^y$ [gal]	$v_{\max}^y$ [cm/sec]	$d_{\max}^y$ [cm]	ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM RATIO $\beta = S_A^y(T)/a_{\max}^y$									
					T = 0.1	T = 0.15	T = 0.2	T = 0.3	T = 0.5	T = 0.7	T = 1.0	T = 1.5	T = 2.0	T = 3.0
1	901-GRA-33	40.251	2.041	0.329	3.4516	1.9410	1.4779	0.8654	0.6975	0.9021	0.8364	0.5130	0.2948	0.1078
2	901-GRA-66	38.950	1.058	0.174	3.7049	2.1439	1.5151	0.7527	0.4343	0.3623	0.2529	0.1175	0.0850	0.0833
3	904-GR-1	18.761	1.146	0.207	1.4262	1.8099	2.7414	2.5916	1.8235	1.2528	0.7701	0.3458	0.2415	0.1877
4	904-GR-4	13.109	0.851	0.094	1.7220	1.8647	1.5769	2.3935	0.9990	1.6073	1.2632	0.3144	0.2005	0.0777
5	302-GR-11	27.675	0.892	0.146	3.3978	2.3483	2.7343	1.0094	0.3944	0.4100	0.1635	0.1382	0.1043	0.0732
6	302-GR-22	20.363	0.770	0.106	3.8111	3.0515	2.0008	1.5481	0.6073	0.7286	0.4327	0.1390	0.1446	0.0895
7	302-GR-34	77.156	2.586	0.254	4.8029	2.2056	1.3236	1.0586	0.5903	0.3036	0.3028	0.1254	0.0990	0.0352
8	302-GR-35	168.800	7.899	1.802	4.1571	2.8608	1.7590	1.5516	0.9659	0.7382	0.3822	0.4515	0.2580	0.1385
9	801-GR-1	26.075	1.656	0.420	2.7258	2.7622	2.7665	3.6708	1.8935	1.3765	0.8993	0.3914	0.2986	0.2462
10	304-GR-6	10.004	0.635	0.215	2.1649	2.2401	2.1860	4.7247	1.5598	0.8333	0.4146	0.3093	0.5147	0.3909
11	304-GR-13	3.604	0.324	0.069	1.9437	1.6490	3.0855	2.4484	2.2267	1.1213	0.8826	0.5214	0.6337	0.3205
12	304-GR-14	16.741	0.457	0.076	2.9878	2.5188	1.5853	1.7829	0.8100	0.3184	0.2213	0.1412	0.1883	0.0626
13	304-GR-21	8.688	0.292	0.018	3.4412	2.0907	2.0398	3.1226	0.4933	0.1777	0.1133	0.0748	0.0578	0.0329
14	304-GR-23	8.650	0.453	0.073	2.2598	2.0813	3.8839	3.0186	1.3062	0.6271	0.5358	0.3355	0.2418	0.1807
15	304-GR-26	5.205	0.263	0.029	2.0463	2.6943	2.0411	2.2215	1.1499	0.5654	0.2941	0.1360	0.1718	0.0603
16	304-GR-28	5.045	0.217	0.033	3.1312	2.9437	2.9788	3.9639	1.6838	0.6718	0.3173	0.1794	0.1352	0.0813
17	304-GR-30	4.364	0.229	0.035	2.5222	2.0543	2.8717	2.2133	1.4157	0.8000	0.4462	0.2035	0.1343	0.1288
18	304-GR-32	5.315	0.207	0.023	2.8474	3.4643	3.0487	2.7705	0.8944	0.2999	0.2134	0.1336	0.0794	0.0679
19	304-GR-33	8.361	0.296	0.058	3.1357	2.4088	2.8890	2.1902	0.9541	0.7017	0.3221	0.1631	0.1654	0.1334
20	101-GR-5	4.594	0.327	0.089	2.1768	2.6084	2.6582	2.7103	1.8929	1.6787	1.1241	0.6689	0.3222	0.2984
21	101-GR-7	7.489	0.379	0.092	1.9983	2.1545	2.7309	1.7904	1.1792	0.8902	0.4616	0.4682	0.4441	0.2230
22	101-GR-9	19.904	0.858	0.180	1.8557	1.8502	2.0234	1.4308	2.0432	1.2880	0.6601	0.3606	0.1969	0.1398
23	906-GR-17	16.092	0.847	0.158	2.2686	1.7556	2.0406	1.5656	2.0169	1.2239	0.8226	0.4683	0.3136	0.0925
24	906-GR-18	12.062	0.674	0.133	3.8427	2.6195	2.5956	2.5316	1.4403	1.1475	0.7932	0.3919	0.3610	0.1687
25	906-GR-19	19.117	1.376	0.219	2.2140	2.1171	2.4017	1.4476	1.2446	1.0650	0.9397	0.4833	0.3335	0.2416
26	906-GR-22	71.114	1.558	0.256	2.2248	1.6194	1.1727	0.6200	0.5169	0.5381	0.3047	0.1997	0.1036	0.0311
27	205-GR-2	13.954	0.556	0.069	4.0751	1.7819	2.8771	1.4159	1.1352	0.5492	0.5195	0.2341	0.1399	0.0508
28	205-GR-6	17.951	1.711	0.164	1.3859	2.2599	2.7658	2.3717	2.3784	2.6304	0.9639	0.4575	0.3351	0.1521
29	205-GR-8	21.502	1.138	0.232	2.2540	2.8765	2.9723	2.8543	1.3329	0.6944	0.9081	0.2566	0.3931	0.2254
30	907-GR-2	27.250	1.078	0.087	2.0920	4.3385	1.8677	1.3856	0.9764	0.4599	0.3421	0.1295	0.0907	0.0468
31	907-GR-31	7.703	0.320	0.044	1.9992	2.9779	2.8090	1.8027	1.1723	0.6408	0.3513	0.1579	0.2015	0.0968
32	907-GR-32	9.028	0.723	0.082	2.4919	2.6574	3.0936	1.7969	2.0237	1.3538	0.6781	0.2979	0.2185	0.0917
33	907-GR-39	55.341	2.086	0.122	1.4835	1.7161	2.3227	1.3766	0.7992	0.2631	0.1493	0.0825	0.0434	0.0312
34	907-GR-60	38.363	1.220	0.105	1.8641	2.0269	2.3480	1.1812	0.5438	0.4611	0.1423	0.0899	0.1016	0.0587
35	907-GR-83	16.715	0.757	0.094	1.3829	2.6484	2.2554	2.3742	1.1636	0.8452	1.1307	0.2244	0.1340	0.0930
36	907-GR-94	33.815	1.232	0.134	1.4688	1.7762	1.7787	1.7706	1.0897	0.4363	0.2400	0.1005	0.0769	0.0505
37	907-GR-106	16.233	1.107	0.155	2.1944	2.5584	2.9697	2.8897	2.1665	1.5183	1.0146	0.3504	0.2302	0.1709
38	907-GR-108	45.667	3.323	0.377	2.2390	2.4700	2.5845	2.3441	1.3402	1.4479	1.0413	0.6602	0.3135	0.1044
39	112-GR-8	131.497	3.251	0.144	3.8191	4.7659	2.1835	0.5150	0.1697	0.0998	0.0662	0.0336	0.0215	0.0108
40	112-GR-25	13.007	1.140	0.175	1.5037	2.0572	2.0447	2.0668	1.4649	2.7128	1.1664	0.3820	0.3454	0.2381
41	112-GR-26	15.466	0.684	0.150	2.2909	1.7581	1.7168	1.4881	1.1408	1.8210	0.6335	0.3671	0.1634	0.1024
42	306-GR-1	16.990	2.658	0.660	1.1378	1.0446	1.1177	1.0869	1.5337	2.6670	3.0879	1.3392	0.7444	0.5107
43	306-GR-7	22.553	2.277	0.361	2.2033	1.7941	2.0762	1.5875	3.5740	3.6990	2.0873	0.5087	0.2699	0.1251
44	308-GR-2	56.597	4.700	0.926	2.7088	2.8179	3.7093	3.2112	1.9199	2.2254	1.8423	0.8833	0.3239	0.2277
45	308-GR-3	9.863	0.791	0.119	1.8589	2.8672	3.6958	1.9325	1.4508	1.5962	2.0360	0.3940	0.2100	0.1949
46	1305-GR-3	23.085	1.861	0.537	1.6940	2.1203	2.3425	2.1821	1.3633	1.1724	0.9650	1.0990	0.8518	0.2082
47	104-GR-9	60.734	1.642	0.289	4.3729	2.9561	1.6550	0.7302	0.6697	0.7218	0.3991	0.1582	0.0791	0.0743
48	104-GR-23	20.628	0.745	0.143	3.1433	1.5577	2.3298	1.3977	1.6598	0.6283	0.2516	0.1588	0.1174	0.1120
49	104-GR-27	38.725	1.260	0.157	2.8785	3.5157	2.9765	2.2252	0.7969	0.4389	0.2678	0.1684	0.0877	0.0628
50	104-GR-36	10.336	0.927	0.243	1.9003	2.3573	1.4844	2.2017	1.7826	1.5235	1.8990	1.1002	0.9109	0.4472

No	RECORD NAME	$a_{\max}^v$ [gal]	$v_{\max}^v$ [cm/sec]	$d_{\max}^v$ [cm]	ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM RATIO $\beta = S_A^v(T)/a_{\max}^v$									
					$T = 0.1$	$T = 0.15$	$T = 0.2$	$T = 0.3$	$T = 0.5$	$T = 0.7$	$T = 1.0$	$T = 1.5$	$T = 2.0$	$T = 3.0$
51	106-GR-9	18.566	1.278	0.193	2.3581	2.5982	2.8893	3.6719	2.3601	1.6020	0.6211	0.3355	0.2614	0.1061
52	106-GR-21	8.745	1.201	0.206	1.7540	1.7404	1.7306	2.5030	2.2810	2.0556	1.3431	0.9092	0.6385	0.3755
53	106-GR-27	42.792	2.209	0.206	2.3856	2.6616	2.7429	2.7361	1.3171	0.5347	0.2594	0.1097	0.1064	0.0557
54	310-GR-15	16.075	1.133	0.218	1.8564	2.2230	2.8435	2.4547	1.9204	1.4817	0.9462	0.6790	0.2733	0.2043
55	310-GR-18	6.699	0.550	0.132	1.4675	1.9548	2.8721	3.4124	2.7659	1.4195	1.3981	0.8456	0.6186	0.3481
56	310-GR-26	22.992	0.980	0.095	2.8396	3.3698	2.1454	3.0436	0.9017	0.4732	0.3220	0.1650	0.1407	0.0787
57	319-GR-3	23.263	1.261	0.097	1.9978	2.9308	3.8716	2.1627	1.2500	0.8757	0.4617	0.1862	0.1062	0.0368
58	319-GR-4	19.460	0.736	0.076	2.9721	1.6164	1.5928	1.9713	1.0370	0.8300	0.3674	0.2423	0.0923	0.0493
59	501-GR-29	10.658	1.402	0.199	1.5020	1.8359	2.5071	2.5312	3.5291	2.1709	1.5113	0.7770	0.6890	0.2658
60	501-GR-74	18.203	1.547	0.314	1.7962	2.2262	1.9537	2.2989	4.0152	1.9459	1.2593	0.5774	0.6708	0.1944
61	902-GR-25	17.502	1.190	0.148	1.7257	3.2155	2.9576	4.4545	2.9561	1.6336	0.7133	0.3376	0.2247	0.1380
62	902-GR-38	34.770	1.422	0.154	1.9190	2.2007	2.6407	2.5142	0.6970	0.3935	0.2067	0.1204	0.1183	0.0680
63	1004-GR-1	14.336	0.927	0.181	1.4525	2.0283	2.3603	1.9729	1.3189	0.9657	0.7947	0.7141	0.4730	0.1665
64	1005-GR-1	14.692	1.057	0.256	2.6284	3.2359	2.7459	2.2725	1.6316	1.2667	1.6572	0.7846	0.5866	0.2714
65	1005-GR-2	15.136	0.684	0.099	3.7565	3.6695	4.0883	3.3083	1.1748	0.8401	0.6805	0.3592	0.2622	0.0929
66	503-GR-17	16.458	1.060	0.257	2.3293	2.5777	2.7162	2.4752	1.8726	1.4705	0.8131	0.5193	0.5738	0.1895
67	503-GR-19	8.965	0.964	0.235	1.7548	2.4329	4.0511	3.0547	1.8618	1.8234	1.3186	1.4345	0.7675	0.4294
68	503-GR-21	28.076	1.282	0.235	2.1982	2.1544	2.0659	1.5398	1.4616	1.0369	0.7666	0.3432	0.3295	0.1317
69	313-GR-2	28.918	1.754	0.478	3.0601	2.7062	3.0525	1.9010	1.4177	0.8772	1.4756	0.7042	0.6720	0.1832
70	204-GR-3	29.401	1.347	0.158	2.3833	2.2021	2.8848	2.8648	2.3789	0.7814	0.3256	0.1700	0.1713	0.0806
71	204-GR-28	37.766	1.889	0.120	3.5454	2.7644	2.6317	1.9565	1.1266	0.6479	0.1876	0.0817	0.0561	0.0341
72	311-GR-6	60.795	2.383	0.197	2.3300	3.0163	2.9419	1.1296	0.8932	0.7458	0.2991	0.1419	0.0486	0.0266
73	1201-GR-6	4.433	0.705	0.253	1.7663	1.7525	2.3860	1.7735	1.5288	1.5091	1.3747	0.8236	1.1976	1.2912
74	301-GR-7	68.239	4.303	0.770	3.6279	2.3862	2.5747	1.7273	2.3672	0.9603	0.5888	0.3991	0.3528	0.1451
75	301-GR-13	19.672	1.630	0.284	1.9939	2.3475	2.2980	1.4079	3.2729	1.6243	1.3584	0.4986	0.5266	0.2467
76	102-GR-16	48.354	2.727	0.315	2.5097	4.3326	2.9373	1.9929	2.2992	1.0928	0.4320	0.2181	0.0628	0.0607
77	202-GR-15	19.836	1.168	0.190	2.3012	2.4293	2.4620	1.7081	1.8625	1.0299	0.9012	0.5606	0.2563	0.1275
78	1006-GR-3	39.995	1.037	0.066	2.4242	1.9762	1.5401	1.5924	0.6330	0.2446	0.2017	0.0913	0.0639	0.0347
79	1006-GR-5	25.596	0.991	0.110	2.1783	3.0110	3.0421	2.0929	1.2184	0.6481	0.3375	0.1709	0.0973	0.0706
80	1401-GR-1	17.141	0.996	0.157	2.0173	2.5276	2.4928	3.4716	1.4871	1.1332	0.6316	0.3036	0.3312	0.1363
81	1401-GR-5	14.018	0.757	0.111	5.1796	2.5062	2.7960	3.1947	1.9727	0.8948	0.3939	0.2436	0.1661	0.1984
82	1401-GR-6	7.047	0.480	0.093	3.8484	2.7507	3.0918	3.4249	1.6728	0.7415	0.5744	0.3712	0.3468	0.2577
83	1401-GR-8	32.462	3.109	0.645	2.2203	2.7254	1.7776	2.4744	1.4677	2.0969	0.9877	0.5532	0.5179	0.2112
84	105-GR-8	32.767	1.606	0.200	3.5016	1.7743	1.3672	1.1964	0.8946	0.8160	0.4711	0.2394	0.1834	0.0626
85	206-GR-2	24.775	1.590	0.275	2.6831	2.2279	1.5721	2.3326	4.3672	1.4214	0.9123	0.3860	0.2216	0.1333
86	206-GR-3	9.341	0.673	0.240	1.9225	2.2919	2.4648	2.1378	1.7945	0.8431	0.8523	0.8047	0.5366	0.4979
87	206-GR-4	7.309	1.043	0.206	1.3504	1.7011	2.0130	2.6540	2.6708	2.8940	2.2491	1.3143	0.6021	0.4891
88	206-GR-6	13.825	3.153	0.654	1.7994	2.1808	2.1375	2.6436	2.8614	2.8360	1.9601	0.9544	0.8090	0.6302
89	206-GR-8	21.534	1.740	0.276	2.5651	2.4831	3.0284	1.8578	1.0733	1.0198	0.7674	0.3149	0.3167	0.2832
90	901-GRB-5	61.343	1.700	0.129	3.2721	2.5072	1.7158	0.5054	0.2256	0.1439	0.1189	0.0726	0.1019	0.0256
91	1002-GR-5	19.845	0.817	0.159	3.0058	1.8741	1.6416	1.3265	0.8838	0.7166	0.5615	0.2365	0.1490	0.1388
92	404GR-1-3	27.136	1.290	0.203	1.4898	1.8053	1.9069	2.1131	1.4501	1.1988	0.5242	0.2182	0.2834	0.0762
93	102GR-1-9	27.603	2.642	0.335	1.9610	1.7568	2.2772	2.7921	2.2388	1.9041	1.6633	0.4094	0.1338	0.0942
94	102GR-1-10	60.448	6.886	0.899	1.4253	1.4642	2.2491	2.3012	2.0119	2.7502	2.4563	0.4809	0.3502	0.1661
95	102GR-1-11	21.969	1.903	0.299	1.6343	1.9248	2.6987	2.6355	3.1830	2.9894	1.4656	0.8107	0.3439	0.2056
96	303GR-1-2	45.293	1.696	0.248	4.3947	2.1049	1.3879	1.2851	0.9275	0.4538	0.2921	0.2259	0.1778	0.0497
97	301GR-1-5	24.441	0.679	0.081	3.2752	2.8868	1.6749	1.4112	0.8394	0.2938	0.1812	0.1582	0.1214	0.0533
98	301GR-1-6	32.098	0.876	0.117	2.6507	2.4711	1.2252	1.2998	1.1001	0.5946	0.2856	0.1207	0.0583	0.0408
99	602GR-1-1	32.054	5.309	1.279	1.2427	1.3347	1.3802	1.7555	3.3663	4.1165	1.5892	2.6094	0.7743	0.4208
100	702GR-1-1	71.067	5.066	0.834	4.2567	3.7680	4.9066	2.5128	2.2828	0.9057	0.8948	0.5281	0.2231	0.1941

No.	RECORD NAME	$a_{\max}^y$ [gal]	$v_{\max}^y$ [cm/sec]	$d_{\max}^y$ [cm]	ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM RATIO $\beta = S_A^y(T)/a_{\max}^y$									
					$T = 0.1$	$T = 0.15$	$T = 0.2$	$T = 0.3$	$T = 0.5$	$T = 0.7$	$T = 1.0$	$T = 1.5$	$T = 2.0$	$T = 3.0$
101	702GR-1-3	50.655	2.197	0.356	3.5204	3.0097	2.3300	0.9541	1.7545	0.9545	0.6893	0.1728	0.0960	0.0663
102	702GR-1-4	54.149	3.024	0.418	3.3725	3.3254	2.6542	1.5074	1.2345	0.9296	0.4362	0.1757	0.2467	0.1178
103	105GR-1-2	41.515	2.067	0.341	1.8519	3.5149	4.0854	2.1139	1.1972	0.6963	0.5047	0.4523	0.2609	0.1298
104	201GR-1-2	33.954	3.955	0.984	2.6312	3.9515	2.6298	1.8835	1.2927	1.1663	2.1052	1.7634	1.1491	0.2832
105	202GR-1-8	25.174	1.261	0.158	3.1929	2.8876	3.1579	1.4028	1.2438	1.4455	0.8256	0.3983	0.1984	0.0649
106	403GR-1-2	35.469	1.897	0.217	3.4310	2.5878	2.4108	1.6329	1.2244	1.2965	0.4810	0.2526	0.2889	0.0589
107	206GR-2-1	37.814	1.015	0.196	2.2744	1.8530	2.0693	0.6370	0.6217	0.4041	0.2005	0.1330	0.1672	0.0978
108	206GR-2-2	33.911	2.411	0.267	2.7044	2.4101	2.6243	1.2744	1.6378	0.7724	0.9356	0.4700	0.2095	0.0936
109	206GR-2-3	96.429	4.709	0.625	2.0728	2.2094	2.2946	1.9932	1.0690	0.6707	0.3135	0.1899	0.1287	0.0575
110	405GR-2-1	53.300	2.200	0.240	2.9179	3.1348	1.5055	2.6815	1.5817	0.8364	0.3853	0.1772	0.1200	0.0808
111	207GR-2-3	35.719	1.780	0.116	2.0095	2.5868	2.6059	3.1398	1.5263	0.7104	0.2267	0.1395	0.0694	0.0238
112	301GR-2-2	16.664	1.330	0.210	2.6791	3.0651	3.1546	2.6815	2.5304	2.8315	1.3568	0.6048	0.3572	0.1660
113	301GR-2-4	18.550	1.476	0.225	2.8813	2.3469	2.3074	2.5167	2.5561	1.7616	0.9796	0.6014	0.3527	0.1723
114	301GR-2-5	23.136	1.142	0.204	3.4569	3.0628	2.2506	1.6654	1.8085	0.7585	0.2570	0.1576	0.2028	0.1371
115	301GR-2-6	44.088	2.084	0.311	2.0846	1.9767	2.1487	1.2641	1.3901	0.9799	1.0251	0.3609	0.1754	0.0736
116	701GR-1-2	62.063	1.674	0.239	3.7365	2.2626	1.0826	0.5054	0.2504	0.2890	0.1448	0.2645	0.1260	0.0522
117	ATAMI	32.082	1.627	0.328	3.8331	3.1112	2.9136	1.8519	0.9034	0.6192	0.6905	0.3528	0.2836	0.1863
118	SHINIWATA	11.638	1.922	0.556	1.4792	1.6243	1.9976	2.0834	1.6879	3.0321	2.8048	1.0827	0.9099	0.9063
119	SHIROBORI	26.021	1.285	0.261	2.7470	3.7142	1.9484	2.3565	1.3775	0.6049	0.7849	0.5285	0.2481	0.1303

最大地震動および地震応答
スペクトルの推定法
一(その6)上下方向の最大地震動および
加速度応答スペクトルの距離減衰式一

ISSN 0386-5878
土研資料第 2038号
昭和 58年 12月

荒川直士, 川島一彦
田村敬一, 相沢 興
高橋和之

キーワード 耐震設計, 地震動, 応答スペクトル

要 旨

本報告は, 水平方向の最大地震動および加速度応答スペクトルに対する距離減衰を求めた手法と同様の手法を用いて, 上下方向の最大地震動および加速度応答スペクトルに対する距離減衰式を求めた結果について報告するものである。



郵便はがき

3 0 5 - □ □

40円切手
をはいて
下さい

建設省土木研究所

地震防災部振動研究室

御中

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

No.172

No.172

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第 2038 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

土木研究所資料第 2038 号
最大地震動および地震応答スペクトルの推定法 (その 6)

