

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4）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再検討——

昭和58年3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。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現在までの強震観測の結果から明らかにされており、前報告(土研資料第1864号)ではこのような点を考慮した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予測式を提案した。本報告はこれを、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条件依存性、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、水平成分の最大加速度、最大速度、最大変位および加速度応答スペクトルに対する実用的な予測式を再提案するものである。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 3 月

建設省土木研究所地震防災部振動研究室

主任研究員 川 島 一 彦
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. 解析記録	3
2-2. 加速度の計器補正および変位, 速度の計算法	3
2-3. 遮断振動数 f_{ut} および f_{lw} の決定	14
2-4. 水平2成分の合成	18
2-5. 減衰定数による応答スペクトルの補正	19
2-6. 地盤条件の種別	20
3. 最大地震動の距離減衰式	44
3-1. 距離減衰式の形式の検討(同一地盤種別内)	44
3-2. 距離減衰式の地盤種別依存性の検討	49
3-3. $\tilde{a}_{\max}$, $\tilde{v}_{\max}$, $\tilde{d}_{\max}$ の距離減衰式の提案	52
4. 加速度応答スペクトルの距離減衰式	76
4-1. 距離減衰式の形式(同一地盤種別, 固有周期)	76
4-2. 距離減衰式の地盤種別依存性の検討	79
4-3. 距離減衰式の固有周期依存性の検討	81
4-4. $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の提案	84
5. 既往の研究成果との比較	116
5-1 加速度応答スペクトルの予測式	116
5-2 最大加速度の予測式	120
5-3 最大速度の予測式	123
5-4 最大変位の予測式	123
6. 結 論	141
参 考 文 献	144
付属資料-1. $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰および $\log U_{SA} \sim M \sim \Delta$ の関係	149
付属資料-2. 速度応答スペクトル $\tilde{S}_V$ および変位応答スペクトル $\tilde{S}_D$ の推定式	163
付属資料-3. $\tilde{\beta}$ スペクトルの推定式	175
付属資料-4. 総当り法による変数選択および層別因子を含む回帰分析	183

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。

Step1: 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。

Step2: 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。

Step3: 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。

Step4: 2@197成分の水平方向加速度記録をもとに、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の予測式を開発した。

本報告は、上記 Step4 の解析結果を以下の観点からさらに検討を加えたものである。

1) 最大地震動および加速度応答スペクトルの予測回帰式に、マグニチュード M 、震源深さ D_p 、震央距離 $\log(4+30)$ の2乗までの項およびこれら3者間の相互の積の項を加えた回帰式を用いることにより、予測精度がどの程度向上するかを検討し、現段階で最も実用的な回帰式の形式を求める。

2) 最大地震動および加速度応答スペクトルの予測回帰式の係数が地盤種別にどのように依存するかを検討し、最適な回帰式を求める。

3) 加速度応答スペクトルの予測回帰式の係数が固有周期 T にどのように依存するかを検討し、最適な回帰式を求める。

本解析に用いたのは、Step4と同じ建設省土木研究所および運輸省港湾技術研究所で数値化されたSMAC型強震計による2@197=394成分の水平方向加速度強震記録である。上記Step1で開発した手法によるSMAC型強震計記録の短・長周期特性の補正を加えるとともに、Step2による水平2成分の合成を考慮した最大地震動（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%）の統計解析を行い、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2@197成分の加速度強震記録の特性と、これが得られた地震の属性を示すとともに、速度および変位の計算法を示す。また、遮断振動数の設定とその考え方および地盤種別法につき示す。道路橋示方書・耐震設計編に示す分類に従い、本解析では地盤種別を1種(道示の1種地盤)，2種(同じく2種地盤および3種地盤)，3種(同じく4種地盤)の3種類に分けている。3章および4章では、それぞれ最大地震動および加速度応答スペクトルの推定式を求めている。3種類の地盤種別ごとに、これらの諸量が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推定式が示されている。5章では、本報告に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章および7章においては、本解析結果のまとめと今後研究を要する事項について示している。

2. 解析に用いた強震記録

2-1. 解析記録

解析対象としたのは表2-1に示すように我国の67観測地点(いずれも地盤上)において観測された2@197組の水平加速度強震記録(水平2成分)である。これらは表2-2に示すように、昭和38年3月27日の越前岬沖地震(M=6.9)から昭和55年6月29日の伊豆河奈崎沖地震(M=6.7)に至るまでの合計90回の浅発地震(震源深さ60km未満)に際し、SMAC型強震計(SMAC-B, B2, Q, D, E2)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数値化された記録である。2@197組の記録を、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A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は含まれていない。また、197記録中57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の地震により得られた記録は40である。また、解析に用いた記録のうち最も大規模な地震は、昭和43年5月16日の十勝沖地震(M=7.9)であり、昭和43年4月1日の日向灘沖地震(M=7.5)、昭和43年5月16日の十勝沖地震の余震(M=7.5)、昭和44年12月6日の北海道東部の地震(M=7.8)、昭和47年12月4日の八丈島東方沖の地震(M=7.2)、昭和48年6月17日の根室半島沖地震(M=7.4)、昭和53年6月12日の宮城県沖地震(M=7.4)等が、これに引続く規模の大きい地震である。

2-2. 加速度の計器補正および変位、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 $a_o(t)$ とすれば、このフーリエ変換 $F_o(f)$ は、

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

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。

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

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

表2-1(1) 解析に用いた強震記録

№	観測所名	記録名	地震№	地震名	地震発生年月日時分	M	深さ	震源距離
1	土研旧千葉支所 (1)	901-GRA-4	630804	千葉県東方沿岸	1963, 08. 04, 20:43	5.1	40	31.2
		901-GRA-33	68057	埼玉県中部	1968, 07. 01, 19:45	6.1	50	72.3
		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
		904-GR-4	71002	愛知県沿岸	1971, 01. 05, 06:09	6.1	40	67.7
3	落合橋 (1)	905-GRA-266	70011	松代近傍	1970, 04. 09, 01:44	5.0	0	24.3
4	開北橋	302-GR-1	66025	宮城県東方沖	1966, 06. 24, 06:52	5.1	60	61.9
		302-GR-3	67004	金華山沖	1967, 01. 17, 20:59	6.3	30	70.6
		302-GR-9	68050	岩手県沖	1968, 06. 12, 22:42	7.2	0	190.9
		302-GR-11	68062	宮城県東方沖	1968, 07. 05, 20:28	6.4	50	78.7
		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
5	有明海堤防	801-GR-1	66051	有明海	1966, 11. 12, 21:01	5.5	20	12.9
		801-GR-2	68026	日向灘	1968, 04. 01, 09:42	7.5	30	233.7
6	伊達橋	304-GR-6	67004	金華山沖	1967, 01. 17, 20:59	6.3	30	144.5
		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
7	新葛飾橋	101-GR-5	67057	茨城県沖	1967, 11. 19, 21:07	6.0	50	140.6
		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
		101-GR-24	74015	茨城県南西部	1974, 08. 04, 03:16	5.8	50	28.3
8	鹿島試験所	906-GR-12	71040	千葉県北部	1971, 10. 11, 19:16	5.2	40	9.5
		906-GR-13	72001	千葉県北部	1972, 01. 04, 09:20	5.0	40	11.3
		906-GR-17	73024	銚子近海	1973, 09. 30, 15:18	5.9	50	26.9
		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
9	石瀬戸橋	205-GR-2	68012	宮崎県南西部	1968, 02. 21, 10:45	6.1	0	40.6
		205-GR-6	68026	日向灘	1968, 04. 01, 09:42	7.5	30	136.0
		205-GR-8	70021	宮崎県沖	1970, 07. 26, 07:41	6.7	10	84.9
10	平大橋	907-GR-2	68015	福島県沖	1968, 02. 26, 05:00	5.4	50	84.5
		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

表2-1(2) 解析に用いた強震記録

№	観測所名	記録名	地震№	地震名	地震発生年月日時分	M	深さ	震火距離
10	平大橋	907-GR-39	70008	福島県沖	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
11	紀ノ川大橋	112-GR-8	68022	和歌山近海	1968.03.30, 04:04	5.0	0	5.4
		112-GR-25	73029	和歌山県中部	1973.11.25, 13:25	5.9	60	46.7
		112-GR-26	73030	"	1973.11.25, 18:19	5.8	60	42.0
12	妙見橋	306-GR-1	68026	日向灘	1968.04.01, 09:42	7.5	30	341.3
		306-GR-7	78008	島根県中部	1978.06.04, 05:04	6.1	0	29.8
13	板島橋	308-GR-2	68026	日向灘	1968.04.01, 09:42	7.5	30	103.3
		308-GR-3	68027	"	1968.04.01, 16:13	6.3	0	102.8
		308-GR-4	68066	愛媛県西部沿岸	1968.08.06, 01:17	6.6	40	10.0
14	幌満橋	1305-GR-1	68036	東北東方沖	1968.05.16, 09:49	7.9	0	155.1
		1305-GR-3	68038	青森県東方沖	1968.05.16, 19:39	7.5	40	74.0
15	新利根川橋	104-GR-9	68057	埼玉県中部	1968.07.01, 19:45	6.1	50	29.9
		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
16	草加高架橋	106-GR-9	68057	埼玉県中部	1968.07.01, 19:45	6.1	50	38.4
		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
17	平大橋	310-GR-15	68057	埼玉県中部	1968.07.01, 19:45	6.1	50	48.7
		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
18	四徳大橋	319-GR-3	68057	埼玉県中部	1968.07.01, 19:45	6.1	50	136.7
		319-GR-4	69032	岐阜県中部	1969.09.09, 14:15	6.6	0	85.5
		319-GR-5	71002	愛知県沿岸	1971.01.05, 06:09	6.1	40	150.5
19	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
		501-GR-74	72029	八丈島東方沖	1972.12.04, 19:16	7.2	50	262.0
		501-GR-81	74012	伊豆半島南部沿岸近海	1974.05.09, 08:33	6.9	10	123.2
20	西新井橋	902-GR-25	68057	埼玉県中部	1968.07.01, 19:45	6.1	50	41.6
		902-GR-38	74015	茨城県南西部	1974.08.04, 03:16	5.8	50	31.4
21	境川橋	1004-GR-1	68057	埼玉県中部	1968.07.01, 19:45	6.1	50	48.8
22	姥久保橋	1005-GR-1	68057	埼玉県中部	1968.07.01, 19:45	6.1	50	34.1
		1005-GR-2	76004	山梨県東部	1976.06.16, 07:36	5.5	20	40.5
23	羽田海底トンネル	1109-GR-3	68057	埼玉県中部	1968.07.01, 19:45	6.1	50	55.7
24	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
		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

表2-1(3) 解析に用いた強震記録

№	観測所名	記録名	地震№	地震名	地震発生年月日時分	M	深さ	震源距離
25	石 鎚 橋	313-GR-2	68070	愛媛県西部沿岸	1968, 08. 06, 13:21	5.3	40	82.4
26	新 八 幡 橋	204-GR-3	69032	岐阜県中部	1969, 09. 09, 14:15	6.6	0	89.1
		204-GR-28	75003	愛知・岐阜県境	1975, 03. 14, 22:56	5.3	50	33.8
27	豊 浜 大 橋	311-GR-5	69032	岐阜県中部	1969, 09. 09, 14:15	6.6	0	145.9
		311-GR-6	71002	愛知県沿岸	1971, 01. 05, 06:09	6.1	40	43.6
28	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
29	雄 平 橋	301-GR-7	70031	秋田県南東部	1970, 10. 16, 14:26	6.2	0	23.2
		301-GR-13	78012	宮城県沖	1978, 06. 12, 17:14	7.4	40	188.1
30	米 山 大 橋	102-GR-16	71012	新潟県南西部	1971, 02. 26, 04:27	5.5	0	26.2
31	魚 沼 橋	202-GR-15	71012	新潟県南西部	1971, 02. 26, 04:27	5.5	0	42.2
32	鶴 川 橋	1006-GR-3	71029	山梨県東部	1971, 07. 23, 07:07	5.3	10	15.0
		1006-GR-5	76004	"	1976, 06. 16, 07:36	5.5	20	16.9
33	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
		1401-GR-4	74006	千葉県東方沖	1974, 03. 03, 13:50	6.1	60	33.3
		1401-GR-5	74014	茨城県沖	1974, 07. 08, 14:45	6.3	40	79.0
		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
34	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
35	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
		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
36	土研千葉支所(2)	901-GRB-5	75002	千葉県北部	1975, 02. 08, 01:41	5.4	60	20.2
37	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
38	名 古 屋 港	404GR-1-1	630327	越前岬沖	1963, 03. 27, 06:34	6.9	0	127.0
		404GR-1-3	71002	愛知県沿岸	1971, 01. 05, 06:09	6.1	40	77.0
		404GR-1-4	75003	愛知・岐阜県境	1975, 03. 14, 22:56	5.3	50	24.3
39	釧 路 港	102GR-1-2	68036	東北東方沖	1968, 05. 16, 09:49	7.9	0	257.9
		102GR-1-4	680903	根室半島南東方沖	1968, 09. 03, 14:23	5.2	60	110.5
		102GR-1-6	69028	北海道東部	1969, 08. 12, 06:28	7.8	30	265.1
		102GR-1-7	70004	北海道南部地方	1970, 01. 21, 02:33	6.7	50	121.6
		102GR-1-8	71034	襟裳岬沖	1971, 08. 02, 16:25	7.0	60	201.7
		102GR-1-9	720511	釧路沖	1972, 05. 11, 09:45	5.8	60	61.2
		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
		102GR-1-12	740125	十勝沖	1974, 01. 25, 04:13	6.0	40	127.3
		102GR-1-13	740920	釧路沖	1974, 09. 20, 09:53	5.5	50	66.7
40	小 名 浜 港	208GR-1-1	66009	茨城県東方沖	1966, 04. 03, 13:43	5.8	20	92.5
		208GR-1-2	68057	埼玉県中部	1968, 07. 01, 19:45	6.1	50	170.4
		208GR-1-3	72029	八丈島東方沖	1972, 12. 04, 19:16	7.2	50	416.5

表2-1(4) 解析に用いた強震記録

№	観測所名	記録名	地震№	地震名	地震発生 年月日時分	M	深さ	震 源 距 離
40	小名浜港	208GR-1-5	73014	茨城県沖	1973, 07. 20, 17:13	5.9	40	59.7
41	大船渡港 (1)	206GR-1-1	67004	金華山沖	1967, 01. 17, 20:59	6.3	30	95.7
		206GR-1-3	68062	宮城県東方沖	1968, 07. 05, 20:28	6.4	50	81.9
42	東京港 (品川)	303GR-1-2	68057	埼玉県中部	1968, 07. 01, 19:45	6.1	50	51.0
		303GR-1-5	72027	茨城県南西部	1972, 11. 06, 20:39	5.1	40	56.0
		303GR-1-6	72029	八丈島東方沖	1972, 12. 04, 19:16	7.2	50	293.2
		303GR-1-8	74015	茨城県南西部	1974, 08. 04, 03:16	5.8	50	51.7
		303GR-1-9	75002	千葉県北部	1975, 02. 08, 01:41	5.4	60	44.9
43	鹿島港	301GR-1-2	68057	埼玉県中部	1968, 07. 01, 19:45	6.1	50	113.4
		301GR-1-3	69017	鹿島灘	1969, 05. 13, 23:19	5.2	50	60.6
		301GR-1-5	71025	茨城県沖	1971, 06. 13, 13:06	5.3	40	42.5
		301GR-1-6	71040	千葉県北部	1971, 10. 11, 19:16	5.2	40	13.0
44	高知港	602GR-1-1	68026	日向灘	1968, 04. 01, 09:42	7.5	30	167.4
		602GR-1-2	68066	愛媛県西部沿岸	1968, 08. 06, 01:17	6.6	40	112.5
		602GR-1-3	68107	高知県東部	1968, 12. 11, 20:45	5.6	50	49.2
45	細島港	702GR-1-1	68026	日向灘	1968, 04. 01, 09:42	7.5	30	82.2
		702GR-1-2	68066	愛媛県西部沿岸	1968, 08. 06, 01:17	6.6	40	118.2
		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
		702GR-1-5	70023	"	1970, 07. 26, 16:10	6.1	10	52.4
		702GR-1-6	720622	"	1972, 06. 22, 00:29	5.4	10	72.8
		702GR-1-7	740131	"	1974, 01. 31, 16:04	5.7	20	80.0
		702GR-1-8	740627	"	1974, 06. 27, 13:49	5.3	20	45.8
46	室蘭港	105GR-1-2	68038	青森県東方沖	1968, 05. 16, 19:39	7.5	40	184.0
		105GR-1-4	70004	北海道南部地方	1970, 01. 21, 02:33	6.7	50	177.2
		105GR-1-5	71034	襟裳岬沖	1971, 08. 02, 16:25	7.0	60	255.4
		105GR-1-7	73009	根室半島沖	1973, 06. 17, 12:55	7.4	40	412.8
		105GR-1-9	751030	浦河沖	1975, 10. 30, 10:41	6.0	60	154.1
47	青森港	201GR-1-2	68038	青森県東方沖	1968, 05. 16, 19:39	7.5	40	187.1
		201GR-1-3	68050	岩手県沖	1968, 06. 12, 22:42	7.2	0	254.0
48	八戸港	202GR-1-2	68050	"	"	7.2	0	182.7
		202GR-1-4	690621	青森県東方沖	1969, 06. 21, 00:38	5.6	40	73.1
		202GR-1-5	70004	北海道南部地方	1970, 01. 21, 02:33	6.7	50	246.1
		202GR-1-8	74016	岩手県北部沿岸	1974, 09. 04, 18:20	5.6	40	49.8
49	横浜港 (2)	305GR-2-1	68057	埼玉県中部	1968, 07. 01, 19:45	6.1	50	62.0
		305GR-2-5	71029	山梨県東部	1971, 07. 23, 07:07	5.3	10	63.7
		305GR-2-7	72029	八丈島東方沖	1972, 12. 04, 19:16	7.2	50	282.7
		305GR-2-9	74015	茨城県南西部	1974, 08. 04, 03:16	5.8	50	66.3
50	神戸港	504GR-1-2	69032	岐阜県中部	1969, 09. 09, 14:15	6.6	0	207.5
51	横浜港 (1)	305GR-1-3	71029	山梨県東部	1971, 07. 23, 07:07	5.3	10	61.0
		305GR-1-5	74012	伊豆半島 南部沿岸近海	1974, 05. 09, 08:33	6.9	10	124.9

表2-1(5) 解析に用いた強震記録

№	観測所名	記録名	地震№	地震名	地震発生 年月日時分	M	深さ	震源 距離
52	衣 浦 港	403GR-1-1	69032	岐阜県中部	1969.09.09,14:15	6.6	0	97.3
		403GR-1-2	71002	愛知県沿岸沖	1971.01.05,06:09	6.1	40	55.9
		403GR-1-4	75003	愛知・岐阜県境	1975.03.14,22:56	5.3	50	45.1
53	鹿 児 島 港	704GR-1-1	690918	屋久島近海	1969.09.18,03:41	5.9	0	129.4
		704GR-1-2	70021	宮崎県沖	1970.07.26,07:41	6.7	10	149.6
54	大 船 渡 港 (2)	206GR-2-1	70026	宮城県沖	1970.09.14,18:45	6.2	40	64.6
		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
55	酒 田 港	203GR-2-1	70031	秋田県南東部	1970.10.16,14:26	6.2	0	84.6
		203GR-2-2	72014	山形県中部	1972.08.20,19:09	5.3	20	39.9
56	四 日 市 港	405GR-2-1	71002	愛知県沿岸沖	1971.01.05,06:09	6.1	40	74.3
		405GR-2-2	75003	愛知・岐阜県境	1975.03.14,22:56	5.3	50	42.9
57	千 葉 港	302GR-1-2	73024	銚子近海	1973.09.30,15:18	5.9	50	51.8
		302GR-1-3	75002	千葉県北部	1975.02.08,01:41	5.4	60	23.3
58	田子の浦港	401GR-1-2	74012	伊豆半島 南部沿岸近海	1974.05.09,08:33	6.9	10	63.6
59	久里浜港	306GR-1-2	72029	八丈島東方沖	1972.12.04,19:16	7.2	50	257.6
60	塩 釜 港	207GR-2-1	72019	宮城県沖	1972.09.25,18:27	5.5	50	88.4
		207GR-2-3	73028	"	1973.11.19,22:02	6.4	50	113.7
		207GR-2-4	740505	福島県沖	1974.05.05,23:19	5.5	40	94.6
		207GR-2-5	75005	"	1975.04.08,15:27	5.9	30	102.9
61	苫小牧港	104GR-1-1	73009	根室半島沖	1973.06.17,12:55	7.4	40	357.3
62	鹿 島 港	301GR-2-1	73014	茨城県沖	1973.07.20,17:13	5.9	40	62.4
		301GR-2-2	73024	銚子近海	1973.09.30,15:18	5.9	50	30.8
		301GR-2-3	73025	"	1973.10.01,23:16	5.8	60	35.6
		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
63	大 分 港	701GR-1-1	75001	熊本県北東	1975.01.23,23:19	6.1	0	60.9
		701GR-1-2	75008	大分県中部	1975.04.21,02:35	6.4	0	37.8
64	沼津変電所	NUMAZU	78001	大島近海	1978.01.14,12:24	7.0	0	53.7
65	熱海変電所	ATAMI	78001	"	"	7.0	0	41.2
66	新岩田変電所	SHINIWATA	78001	"	"	7.0	0	108.5
67	白堀変電所	SHIROBORI	78001	"	"	7.0	0	44.7

表2-2(1) 解析に考慮した地震

№	地震№	地震名	年月日時分	M	深さ	震 距	震 離	記録名	観測所名
1	630327	越前岬沖	1963, 03. 27, 06:34	6.9	0	127.0		404GR-1-1	名古屋港
2	630804	千葉県東方沿岸	1963, 08. 04, 20:43	5.1	40	31.2		901-GRA-4	土研千葉支所(1)
3	650420	静岡近海	1965, 04. 20, 08:42	6.1	20	47.5		904-GR-1	新天竜川橋
4	66009	茨城県東方沖	1966, 04. 03, 13:43	5.8	20	92.5		208GR-1-1	小名浜港
5	66025	宮城県東方沖	1966, 06. 24, 06:52	5.1	60	61.9		302-GR-1	開北橋
6	66051	有明海	1966, 11. 12, 21:01	5.5	20	12.9		801-GR-1	有明海堤防
7	67004	金華山沖	1967, 01. 17, 20:59	6.3	30	70.6		302-GR-3	開北橋
						144.5		304-GR-6	伊達橋
						95.7		206GR-1-1	大船渡港(1)
	67057	茨城県沖	1967, 11. 19, 21:07	6.0	50	140.6		101-GR-5	新葛飾橋
8	68012	宮崎県南西部	1968, 02. 21, 10:45	6.1	0	40.6		205-GR-2	石瀬戸橋
9	68015	福島県沖	1968, 02. 26, 05:00	5.4	50	84.5		907-GR-2	平大橋
10	68018	千葉県中部	1968, 03. 07, 11:54	5.1	50	33.8		101-GR-7	新葛飾橋
11	68022	和歌山近海	1968, 03. 30, 04:04	5.0	0	5.4		112-GR-8	紀ノ川大橋
12	68026	日向灘	1968, 04. 01, 09:42	7.5	30	233.7		801-GR-2	有明海堤防
						136.0		205-GR-6	石瀬戸橋
						341.3		306-GR-1	妙見橋
						103.3		308-GR-2	板島橋
						167.4		602GR-1-1	高知港
						82.2		702GR-1-1	細島港
13	68027	"	1968, 04. 01, 16:13	6.3	0	102.8		308-GR-3	板島橋
14	68036	東北東方沖	1968, 05. 16, 09:49	7.9	0	155.1		1305-GR-1	幌満橋
						257.9		102GR-1-2	釧路港
15	68038	青森県東方沖	1968, 05. 16, 19:39	7.5	40	74.0		1305-GR-3	幌満橋
						184.0		105GR-1-2	室蘭港
						187.1		201GR-1-2	青森港
16	68050	岩手県沖	1968, 06. 12, 22:42	7.2	0	190.9		302-GR-9	開北橋
17	68057	埼玉県中部	1968, 07. 01, 19:45	6.1	50	227.0		304-GR-13	伊達橋
						47.7		101-GR-9	新葛飾橋
						29.9		104-GR-9	新利根川橋
						38.4		106-GR-9	草加高架橋
						48.7		310-GR-15	平大橋
						72.3		901-GRA-33	土研千葉支所(1)
						136.7		319-GR-3	四徳大橋
						82.3		501-GR-29	東京湾(富津岬)
						41.6		902-GR-25	西新井橋
						48.8		1004-GR-1	境川橋
						34.1		1005-GR-1	姥久保橋
						55.7		1109-GR-3	羽田海底トンネル
						170.4		208GR-1-2	小名浜港
						51.0		303GR-1-2	東京湾(品川)

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	震央距離	記録名	観測所名
17	68057	埼玉県中部	1968, 07. 01, 19:45	6.1	50	113.4	301GR-1-2	鹿島港
						62.0	305GR-2-1	横浜港 (2)
18	68050	岩手県沖	1968, 06. 12, 22:42	7.2	0	254.0	201GR-1-3	青森港
						182.7	202GR-1-2	八戸港
19	68062	宮城県東方沖	1968, 07. 05, 20:28	6.4	50	78.7	302-GR-11	開北橋
						162.6	304-GR-14	伊達橋
						81.9	206GR-1-3	大船渡港 (1)
20	68066	愛媛県西部沿岸	1968, 08. 06, 01:17	6.6	40	10.0	308-GR-4	板島港
						118.2	702GR-1-2	細島港
						112.5	602GR-1-2	高知港
21	68070	"	1968, 08. 06, 13:21	5.3	40	82.4	313-GR-2	石鎚橋
22	680903	根室半島南東方沖	1968, 09. 03, 14:23	5.2	60	110.5	102GR-1-4	釧路港
23	68107	高知県東部	1968, 12. 11, 20:45	5.6	50	49.2	602GR-1-3	高知港
24	69015	日向灘	1969, 04. 21, 16:19	6.5	10	51.4	702GR-1-3	細島港
25	69017	鹿島灘	1969, 05. 13, 23:19	5.2	50	60.6	301GR-1-3	鹿島港
26	690621	青森県東方沖	1969, 06. 21, 00:38	5.6	40	73.1	202GR-1-4	八戸港
27	69023	福島県沖	1969, 06. 23, 14:57	5.2	50	72.3	907-GR-31	平大橋
28	69024	"	1969, 07. 23, 22:14	5.5	40	76.9	907-GR-32	"
29	69028	北海道東部	1969, 08. 12, 06:28	7.8	30	265.1	102GR-1-6	釧路港
30	69032	岐阜県中部	1969, 09. 09, 14:15	6.6	0	85.5	319-GR-4	四徳大橋
						89.1	204-GR-3	新八幡橋
						145.9	311-GR-5	豊浜大橋
						188.7	1201-GR-6	西横堀高架橋
						207.5	504GR-1-2	神戸港
						97.3	403GR-1-1	衣浦港
31	690918	屋久島近海	1969, 09. 18, 03:41	5.9	0	129.4	704GR-1-1	鹿兒島港
32	70004	北海道南部地方	1970, 01. 21, 02:33	6.7	50	121.6	102GR-1-7	釧路港
						177.2	105GR-1-4	室蘭港
						246.1	202GR-1-5	八戸港
33	70008	福島県沖	1970, 02. 15, 13:01	5.1	50	99.1	304-GR-21	伊達橋
						59.2	907-GR-39	平大橋
34	70011	松代近傍	1970, 04. 09, 01:44	5.0	0	24.3	905-GRA-266	落合橋 (1)
35	70021	宮崎県沖	1970, 07. 26, 07:41	6.7	10	51.9	702GR-1-4	細島港
						84.9	205-GR-8	石瀬戸橋
						149.6	704GR-1-2	鹿兒島港
36	70023	"	1970, 07. 26, 16:10	6.1	10	52.4	702GR-1-5	細島港
37	70026	宮城県沖	1970, 09. 14, 18:45	6.2	40	92.6	302-GR-22	開北橋
						64.6	206GR-2-1	大船渡港 (2)
38	70031	秋田県南東部	1970, 10. 16, 14:26	6.2	0	153.3	304-GR-23	伊達橋
						23.7	301-GR-7	雄平橋
						84.6	203GR-1-1	酒田港

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	震 距 km	記録名	観測所名
39	71002	愛知県沿岸	1971, 01. 05, 06:09	6.1	40	67.7	904-GR-4	新天竜川橋
						150.5	319-GR-5	四徳大橋
						43.6	311-GR-6	豊浜大橋
						77.0	404GR-1-3	名古屋港
						55.9	403GR-1-2	衣浦港
						74.3	405GR-2-1	四日市港
40	71012	新潟県南西部	1971, 02. 26, 04:27	5.5	0	26.2	102-GR-16	米山大橋
						42.2	202-GR-15	魚沼橋
41	71018	福島県沖	1971, 03. 22, 19:40	5.4	10	147.9	304-GR-26	伊達橋
42	71021	宮城県沖	1971, 04. 05, 03:39	6.0	50	157.8	304-GR-28	〃
43	71025	茨城県沖	1971, 06. 13, 13:06	5.3	40	42.5	301GR-1-5	鹿島港
44	71029	山梨県東部	1971, 07. 23, 07:07	5.3	10	15.0	1006-GR-3	鶴川橋
						63.7	305GR-2-5	横浜港 (2)
						61.0	305GR-1-3	横浜港 (1)
45	71034	襟裳岬沖	1971, 08. 02, 16:25	7.0	60	201.7	102GR-1-8	釧路港
						255.4	105GR-1-5	室蘭港
46	71038	福島県沖	1971, 09. 08, 16:25	5.5	40	122.8	304-GR-30	伊達橋
						59.9	907-GR-60	平大橋
47	71040	千葉県北方	1971, 10. 11, 19:16	5.2	40	9.5	906-GR-12	鹿島試験所
						16.0	1401-GR-1	利根川河口堰
						13.0	301GR-1-6	鹿島港
48	72001	〃	1972, 01. 04, 09:20	5.0	40	11.3	906-GR-13	鹿島試験所
49	720511	釧路沖	1972, 05. 11, 09:45	5.8	60	61.2	102GR-1-9	釧路港
50	720622	宮崎県沖	1972, 06. 22, 00:59	5.4	10	72.8	702GR-1-6	細島港
51	72014	山形県中部	1972, 08. 20, 19:09	5.3	20	39.9	203GR-1-2	酒田港
52	72019	宮城県沖	1972, 09. 25, 18:27	5.5	50	147.0	304-GR-32	伊達橋
						88.4	207GR-2-1	塩釜港
53	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
						56.0	303GR-1-5	東京湾 (品川)
54	72029	八丈島東方沖	1972, 12. 04, 19:16	7.2	50	517.2	304-GR-33	伊達橋
						312.6	106-GR-21	草加高架橋
						301.0	310-GR-18	平大橋
						262.0	501-GR-74	東京湾 (富津岬)
						258.8	503-GR-17	東京湾 (観音崎)
						416.5	208GR-1-3	小名浜港
						293.2	303GR-1-6	東京湾 (品川)
						282.7	305GR-2-7	横浜港 (京浜)
						257.6	306GR-1-2	久里浜港
55	740505	福島県沖	1974, 05. 05, 23:19	5.5	40	94.6	207GR-2-4	塩釜港
56	73009	根室半島沖	1973, 06. 17, 12:55	7.4	40	412.8	105GR-1-7	室蘭港
						357.3	104GR-1-1	苫小牧港

表2-2(4) 解析に考慮した地震

№	地震 №	地震名	年月日時分	M	深さ	震央距離	記録名	観測所名
56	73009	根室半島沖	1973, 06. 17, 12:55	7.4	40	127.3	102GR-1-10	釧路港
57	73013	"	1973, 06. 24, 11:43	7.1	30	192.4	102GR-1-11	"
58	73014	茨城県沖	1973, 07. 20, 17:13	5.9	40	59.7	208GR-1-5	小名浜港
62	73014	茨城県沖	1973, 07. 20, 17:13	5.9	40	62.4	301GR-2-1	鹿島港
63	73024	釧子近海	1973, 09. 30, 15:18	5.9	50	26.9	906-GR-17	鹿島試験所
						51.8	302GR-1-2	千葉港
						30.8	301GR-2-2	鹿島港
64	73025	"	1973, 10. 01, 23:16	5.8	60	33.3	906-GR-18	鹿島試験所
						35.6	301GR-2-3	鹿島港
65	73028	宮城県沖	1973, 11. 19, 22:02	6.4	50	39.6	206GR-2-2	大船渡港(2)
						113.7	207GR-2-3	塩釜港
66	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
67	73030	"	1973, 11. 25, 18:19	5.8	60	42.0	112-GR-26	"
68	740125	十勝沖	1974, 01. 25, 04:13	6.0	40	127.3	102GR-1-12	釧路港
69	740131	宮城県沖	1974, 01. 31, 16:04	5.7	20	80.0	702GR-1-7	細島港
70	74006	千葉県東方沖	1974, 03. 03, 13:50	6.1	60	41.6	906-GR-19	鹿島試験所
						33.3	1401-GR-4	利根川河口堰
						41.3	206-GR-2	小見川大橋
						43.4	301GR-2-4	鹿島港
71	74012	伊豆半島 南部沿岸近海	1974, 05. 09, 08:33	6.9	10	23.2	501-GR-81	東京湾(富津岬)
						115.0	503-GR-19	東京湾(観音崎)
						124.9	305GR-1-5	横浜港(1)
						63.6	401GR-1-2	田子の浦港
72	740627	宮城県沖	1974, 06. 27, 13:49	5.3	20	45.8	702GR-1-8	細島港
73	74014	茨城県沖	1974, 07. 08, 14:45	6.3	40	79.0	1401-GR-5	利根川河口堰
						81.2	206-GR-3	小見川大橋
						70.9	301GR-2-5	鹿島港
74	74015	茨城県南西部	1974, 08. 04, 03:16	5.8	50	45.9	901-GRA-66	土研千葉支所(1)
						28.3	101-GR-24	新葛飾橋
						145.4	907-GR-83	平大橋
						23.6	104-GR-27	新利根川橋
						25.6	106-GR-27	草加高架橋
						34.0	310-GR-26	平大橋
						73.9	1401-GR-6	利根川河口堰
						64.5	206-GR-4	小見川大橋
						51.7	303GR-1-8	東京湾(品川)
						31.4	902-GR-38	西新井橋
75	74016	岩手県北部沿岸	1974, 09. 04, 18:20	5.6	40	66.3	305GR-2-9	横浜港(2)
						46.2	105-GR-8	真崎大橋
76	740920	釧路沖	1974, 09. 20, 09:53	5.5	50	49.8	202GR-1-8	八戸港
						66.7	102GR-1-13	釧路港

表2-2(5) 解析に考慮した地震

№	地震 №	地震名	年月日時分	M	深さ	震央距離	記録名	観測所名
77	74022	銚子沖	1974, 11. 16, 08:32	6.1	40	55.9	906-GR-22	鹿島試験所
						49.9	1401-GR-8	利根川河口堰
						59.2	206-GR-6	小見川大橋
						53.6	301GR-2-6	鹿島港
78	75001	熊本県北東	1975, 01. 23, 23:19	6.1	0	60.9	701GR-1-1	大分港
79	75002	千葉県北部	1975, 02. 08, 01:41	5.4	60	44.6	206-GR-8	小見川大橋
						20.2	901-GRB-5	土研千葉支所(2)
						44.9	303GR-1-9	東京港(品川)
						23.3	302GR-1-3	千葉港
80	75003	愛知・岐阜県境	1975, 03. 14, 22:56	5.3	50	33.8	204-GR-28	新八幡橋
						45.1	403GR-1-4	衣浦港
						42.9	405GR-2-2	四日市港
						24.3	404GR-1-4	名古屋港
81	75005	福島県沖	1975, 04. 08, 15:17	5.9	30	102.9	207GR-2-5	塩釜港
82	75008	大分県中部	1975, 04. 21, 02:35	6.4	0	37.8	701GR-1-2	大分港
83	75015	福島県沖	1975, 08. 15, 03:09	5.5	50	19.7	907-GR-94	平大橋
84	751030	浦河沖	1975, 10. 30, 10:41	6.0	60	154.1	105GR-1-9	室蘭港
85	76004	山梨県東部	1976, 06. 16, 07:36	5.5	20	40.5	1005-GR-2	姥久保橋
						16.9	1006-GR-5	鶴川橋
86	78001	大島近海	1978, 01. 14, 12:24	7.0	0	70.3	503-GR-21	東京湾(観音崎)
						53.7	NUMAZU	沼津変電所
						41.2	ATAMI	熱海変電所
						108.5	SHINIWATA	新岩田変電所
87	78002	宮城県沖	1978, 02. 20, 13:37	6.7	50	44.7	SHIROBORI	白堀変電所
						84.2	302-GR-34	開北橋
88	78008	島根県中部	1978, 06. 04, 05:04	6.1	0	219.9	907-GR-106	平大橋
						29.8	306-GR-7	妙見橋
89	78012	宮城県沖	1978, 06. 12, 17:14	7.4	40	81.4	302-GR-35	開北橋
						164.6	907-GR-108	平大橋
						312.2	104-GR-36	新利根川橋
						188.1	301-GR-13	雄平橋
90	80008	伊豆半島付近	1980, 06. 29, 16:20	6.7	10	104.5	206GR-2-3	大船渡港(2)
						61.3	1002-GR-5	東名・富士川橋

ここで,

$$F(f) = F_0(f) \cdot F_c(f) \quad (2-3)$$

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

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として次式とした¹¹⁾。

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

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

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2-3に示す定数である。

2-3. 遮断振動数 f_{ul} および f_{lu} の決定

補正加速度および変位の計算に際しては, それぞれ式(2-4)に示す遮断振動数 f_{ul} および f_{lu} が大きな影響を及ぼすため, これらを適当に定めなければならない。別途実施した検討によると, 本解析に用いたSMAC型強震計記録の精度は数値化の精度に大きく左右され, これが解析に用い得る f_{ul} および f_{lu} の決定に影響する。

表2-3 式(2-5)の定数 f_n , f_a (後藤による)

Type	f_n (Hz)	f_a (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			

したがって記録の利用上は対象としている地震動の振動数範囲を広くするために f_{ul} はできるだけ大きく, 反対に f_{lu} はできるだけ小さくとることが望ましいが, 実際の計算に際しては計算の安定上これがある有限な値で切らなければならない。すなわち, ある地震記録 $a_0(t)$ をマイラー紙上に書かせ, これを土木研究所の標準数値化システムでくり返し5回数値化し, これにより得られた波形を $a_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, 5$) とする。いま, $a_0(t)$ と $a_i(t)$ の比較をするために, 両者の加速度応答スペクトル(減衰定数は5%とする) $S_0(T)$ および $S_i(T)$ ($i=1, 2, \dots, 5$) を計算し, 次式で応答スペクトル比 R_i を定義する。

$$R_i = \frac{S_i(T)}{S_0(T)} \quad (i=1, 2, \dots, 5) \quad (2-6)$$

いま、式(2-6)の R_i の平均値を $\bar{R}$ 、標準偏差を σ_R 、変動係数を $\lambda_R = \sigma_R / \bar{R}$ とし、これを開北橋記録(1978年宮城県沖地震)、伊達橋記録(1978年宮城県沖地震)、および新石狩大橋記録(1968年十勝沖地震)に対して計算すると、図2-2, 2-3, 2-4のようになる。図中には最大加速度 $A_{\max}$ で除したフーリエ係数 $F(f)/A_{\max}$ も同時に示している。これによれば、変動係数 λ_R で表わした数値化精度とフーリエ係数の間にははっきりした相関があり、いま、両者をプロットすると図2-5のようになる。さらにこれを回帰式で近似すると図2-6のようになり開北橋、伊達橋、新石狩大橋をまとめた場合には次式となる¹²⁾。

$$\log(F/A_{\max}) = -0.61 \log \lambda_R - 1.84 \quad (2-7)$$

したがって、この関係を用いれば、所要の数値化精度(変動係数 λ_R)を決めることにより対応する $F/A_{\max}$ の値を知り、この値が満足される振動数範囲より、所期の数値化精度を満足する振動数範囲を定めることができる(図2-7参照)。1例として開北橋記録、伊達橋記録、新石狩大橋記録に対する遮断振動数を、 $\lambda_R=5\%$ 10%, 20%に対して求めると表2-4のようになる。

一方、SMAC-B2型強震計記録の振動実験をもとに、式(2-2)による短周期の補正効果および変位の計算精度の検討が行われており、以下のような結果が得られている¹³⁾。いま、表2-5に示す7種類の入力地震動を用いてSMAC-B2型強震計の振動実験を行い、強

表2-4 変動係数とこれに対応する読取り可能な周期範囲(秒)

読取り記録	$\lambda_R = 5\%$	$\lambda_R = 10\%$	$\lambda_R = 20\%$
開北橋記録	0.12~3.5	0.11~4.8	0.09~5
伊達橋記録	0.12~1.8	0.10~2.5	0.09~3
新石狩大橋記録	0.35~2.5	0.30~3.5	0.18~4

λ_R : 変動係数

震計の記録を、i) 強震計の通常の記録方式に従い、スタイラスペーパー上にアナログ波形で描き、これを土木研究所の標準数値化システムで数値化(以下、数値化記録と呼ぶ)、ii) 振子の運動を電氣的に計測し、こ

表2-5 加速度の再現性検討加振実験の一覧

実験番号	入力地震動記録						加振実験における最大加速度 ¹⁾ (gal)	卓越振動数 ²⁾	実験号
	発生年月日	地震名	M	震央距離(km)	記録地点	記録時最大加速度(gal)			
1	1973. 6. 17	根室半島沖地震	7.4	305	静内橋近傍地盤上NS成分	45	50	0.6, <u>1.4</u> , 2.9	E-1
2	1974. 5. 9	伊豆半島沖地震	6.9	140	川崎市浮島公園地盤上NS成分	12	50	<u>0.6</u> , 1.6, 2.6	E-2
3	1978. 1. 14	伊豆大島近海地震	7.0	90	千葉県富津岬地盤上NS成分	51	200	1.2, <u>1.8</u> , 2.1 2.4, 3.0, 4.5	E-3
4	1978. 1. 14	伊豆大島近海地震	7.0	230	名古屋港金城埠頭地盤上NS成分	22	100	<u>1.1</u>	E-4
5							150		E-5
6	1970. 9. 30	多摩川下流地震	4.5	8	川崎市浮島公園地盤上NS成分	22	200	<u>5.2</u>	E-6
7							300		E-7

注: 1) 最大加速度は実験時における目標値であり、実際に加振台に生じた加速度値ではない。

2) 加振台に生じた加速度応答のパワースペクトルから求めた卓越振動数であり、下横線のついた振動数は最も卓越した振動数を表わしている。

れをAD変換器により1/100秒間隔で数値化(以下、AD変換記録と呼ぶ)、の2種類の方法で数値化する。検定台の加速度は振動特性の良好なサーボ型加速度計によって正確に測定(以下、基準加速度と呼ぶ)してあるので、これと上記の2つの方法により強震計で記録・数値化した記録をもとに次式で応答スペクトル比を定義する。

$$R_{SA} = S_A^{B2} / S_A^* \quad (2-8)$$

ここで、

S_A^{B2} : 強震記録(AD変換記録もしくは数値化記録)から求めた加速度応答スペクトル(減衰定数は5%とする)

S_A^* : 基準加速度から求めた加速度応答スペクトル(減衰定数は5%とする)

7回の加振実験に対する式(2-8)の応答スペクトル比 R_{SA} の平均値および標準偏差を示すと図2-8(AD変換記録)および図2-9(数値化記録)のようになる。これより式(2-2)による短周期領域における加速度の補正効果を検討すると、AD変換記録の場合には高振動数側の遮断振動数 f_{ul} を30Hzと高くとることにより真の(振動台の)加速度(基準加速度)を0.05~3秒程度の周期範囲でよく再現することができる。これに対して、数値化記録の場合には、 f_{ul} を高くとっても数値化に伴う短周期の誤差が増幅され基準加速度の再現性は必ずしも向上しないこと、したがって、表2-5に示した記録に対しては、 $f_{ul} \approx 12$ Hzが実用上の限界と考えられることがわかる。

また、SMAC型強震計記録からこれを2回積分し変位を求める精度を検討するために、表2-6に示すように9種類のSMAC型強震計の加振実験が行われている。ここで、振動台への入力としては3種類の実測記録(富津岬記録、南港記録、扇島記録)が用いられているが、長周期側の特性を変化させる目的で低振動数側の遮断振動数 f_l^{IN} を $1/6$ Hz, $1/2$ Hz, 1 Hzと3種類に変化させたフィルターをかけ、合計 $3 \times 3 = 9$ 種類の模擬地震動(実験E-1~E-9、

表2-6参照)を作成し、これを検定台へのデジタル制御入力としている。加振実験の結果得られたSMAC-B2型強震計の加速度記録をもとに式(2-2)によって計算した変位を $d(t)$ 、直接測定した検定台の変位(以下、基準変位と呼ぶ)を $D(t)$ とし、計算変位の精度を次の3種のパラメータによって定義した。

表2-6 変位の再現性検討用加振実験の一覧

実験 番号	強震記録	バンドパス フィルター (秒)	加振実験時の最大応答値		
			基準 加速度 (gal)	基準変位 (cm)	強震計加 速度 (gal) ³⁾
E-1	富津岬記録	0.05~5	363.0	4.2	328.6
E-2		0.05~2	387.5	4.2	352.9
E-3		0.05~1	411.4	2.3	356.3
E-4	南港記録	0.05~5	275.6	6.5	273.7
E-5		0.05~2	304.3	6.1	244.4
E-6		0.05~1	360.5	5.8	348.9
E-7	扇島記録	0.05~5	375.3	4.4	292.8
E-8		0.05~2	406.8	3.4	313.9
E-9		0.05~1	398.5	1.9	337.0

注: 1) 以下の実験結果の表示には、この記号を用いる。

2) 強震記録に、このバンドパスフィルターをかけた記録を検定台への入力として、加振実験を行った。

3) スタイラスペーパー上の記録を数値化し、中心軸補正等を施した後の最大加速度。

$$\sigma = \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} |d(t)^2 - D(t)^2| dt \quad (2-9)$$

$$\mu = \frac{\int_0^{T_d} d(t)^2 dt}{\int_0^{T_d} D(t)^2 dt} \quad (2-10)$$

$$\xi = \frac{d_{\max}}{D_{\max}} \quad (2-11)$$

ここで、 $d_{\max}$ および $D_{\max}$ は、それぞれ $d(t)$ および $D(t)$ の最大値を表わしており、また、 T_d は $d(t)$, $D(t)$ の継続時間である。以上のようにして式(2-2)における低振動数側の遮断振動数 f_{lu} を種々変化した試算を行い、式(2-9)～(2-11)による精度を検討した結果が図2-10～2-12である。これによれば低振動数側の遮断振動数 f_{lu} を $1/3$ Hz 程度とした場合に計算変位 $d(t)$ は基準変位 $D(t)$ を全体としてよく再現し、 f_{lu} をこれ以下にとっても数値化に伴う長周期成分が数値積分の過程で増幅されるため、基準変位の再現性は必ずしも向上しないことがわかる。

上述した短周期領域における加速度の補正効果とも合わせると、遮断振動数は高振動数側では $f_{ul} \simeq 12$ Hz, 低振動数側では $f_{lu} \simeq 1/3$ Hz とすることが、最も実用的であると考えられるが、これらの遮断振動数は式(2-6)の数値化の変動係数 λ_R が $0.15 \sim 0.3$ 程度の範囲に相当する。以上に示した数値化の精度および加速度、速度、変位の計算法は上記の検討に用いた一般的な強震記録の場合であり、特に短周期や長周期に富む波形に対しては式(2-7)に示した数値化精度から図2-7に従って遮断振動数 f_{ul} および f_{lu} を決める必要がある。しかし、このようにすると1個1個の強震記録ごとに遮断振動数が異なることとなり、同一の振動数帯域を対象とした記録の統計解析には都合が悪い。このため、ここでは強震記録ごとの遮断振動数の設定は行わず、上記の検討結果を参考に $f_{ul} = 12$ Hz, $f_{lu} = 1/3$ Hz と同一の値を用いて全記録の補正を行うこととした。また、 f_{uu} および f_{ll} はそれぞれ 13 Hz, $1/4$ Hz とした。このようにして式(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2-13のようになる。したがって、本解析で扱うのは $1/3$ Hz $\sim$ 12 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。また、加速度応答スペクトルを求める場合には、当該振動数の周辺の地震動もスペクトル値に寄与するため、適用可能な振動数範囲は上記よりももう少し狭くなる。いま調和振動入力に対する定常振動解をもとにこれを検討してみよう。固有周期 T [秒] の1自由度系に周期 T_0 [秒] の調和振動が作用した場合の加速度応答倍率を $R(T)$ とすれば、 $R(T)$ は次式で与えられる。

$$R(T) = \sqrt{\frac{1 + 4k^2U^2}{(1 - U^2)^2 + 4k^2U^2}} \quad (2-12)$$

ここで、

$$U = \frac{T}{T_0}$$

系の固有周期 T が T_0 と一致した場合には、式(2-12)で $T = T_0$ とおき、

$$R(T_0) = \sqrt{\frac{1+4h^2}{4h^2}} \quad (2-13)$$

となる。いま、 $R(T_0)$ で無次元化して $R(T)$ を示す($R(T)/R(T_0)$)と図2-14のようになる。図中には $T_0=1/f_{u1}=1/12$ 秒とした場合、および $T_0=1/f_{u2}=3$ 秒とした場合の $R(T)/R(T_0)$ が示されている。これによれば $T_0=3$ 秒の場合には、固有周期 T が2秒における $R(T)/R(T_0)$ の値は0.1程度であり、周期(T_0)3秒の正弦波が作用した場合の固有周期(T)2秒の1自由度系の応答加速度は共振時の10%程度に下がることがわかる。したがって、いま、長周期側の地震動を3秒から遮断し始めるとすれば、固有周期2秒以下のスペクトル値に対する影響はほとんどないと考えられる。同様に、 $T_0=1/12$ 秒の場合には、固有周期 T が0.1秒以上になると、応答に対する寄与率は0.3以下となる。地震動に含まれる極端に低い周期成分の振幅は小さいと考えられることから、短周期側の遮断周期を1/12秒とした場合には、1/10秒以上のスペクトル値に対する影響は小さいと考えられる。したがって、遮断振動数を1/3~12 Hzとした場合の加速度応答スペクトルの適用範囲は1/2~10 Hz程度と考えられる。

2-4. 水平2成分の合成

強震計では、図2-15に示すように、互いに直交する X および Y 軸に沿う水平2成分の加速度を測定するが、このようにして得られた水平2成分の加速度記録は、たまたま強震計がセットされた方向(例えば、橋の周辺地盤の場合には、橋軸方向および橋軸直角方向にセットされる場合が多い)の加速度を表わすに過ぎない。特定の地震により地盤上で観測された水平2成分の加速度記録を相互に比較すると、両者は同一地点で観測されたにもかかわらず非常に異なる場合が少なくない。我国では一般に、水平2方向の地震力を独立に構造物に作用させて耐震計算を行うため、動的解析等で加速度記録を構造物に作用させる際に、強震計の記録方向とは異なった方向の水平成分が構造物に大きな応答を与える可能性があるとするれば、その程度を把握しておくことが必要とされる。これについては、すでに報告した通りであり、最大加速度、最大速度および最大変位については、水平2成分を合成した場合には、水平2成分のいずれか一方の大きい値より平均して8%程度大きくなり、また、加速度応答スペクトルの場合には、25~30%程度大きくなることがわかっている¹⁶⁾。したがって、ここでは、水平2成分を時間領域で合成し、これにより得られる最大地震動および加速度応答スペクトルを解析することとした。

すなわち、いま X および Y 軸に沿う加速度をそれぞれ $a^X(t)$ 、 $a^Y(t)$ とし、これを図2-15に示すように左まわりに θ だけ回転させた座標軸 x 、 y に沿う加速度を $a^x(\theta, t)$ 、 $a^y(\theta, t)$ とする。

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

$$\begin{aligned} a^X(t) &= a^x(0, t) \\ a^Y(t) &= a^x(\pi/2, t) \end{aligned} \quad (2-14)$$

の関係があるから、 θ の範囲を $0 \sim 2\pi$ とすれば、 $a^x(\theta, t)$ のみで、座標変換後の加速度を表わすことができる。 $a^x(\theta, t)$ の時間軸における最大加速度を $\tilde{a}_{\max}^\theta$ (絶対値をとる)、これを種々の θ に対して計算した場合に最大となる加速度を $a_{\max}$ とする。すなわち、

$$\tilde{a}_{\max} = \max \{ \tilde{a}_{\max}^\theta(\theta) \} \text{ for } \theta \quad (2-15)$$

ここで,

$$\tilde{a}_{\max}^0(\theta) = \max \{ |a^*(\theta, t)| \} \text{ for } t \quad (2-16)$$

ここで, $\max \{ f(z_1, z_2) \}$ for z_1 は z_1 を変化させた場合の関数 $f(z_1, z_2)$ の最大値を示す。同様にして変位, 速度についても $\tilde{d}_{\max}$, $\tilde{v}_{\max}$ を求め, これを以後の解析対象とする。197 記録に対して $\tilde{a}_{\max}$, $\tilde{v}_{\max}$, $\tilde{d}_{\max}$ および $\tilde{S}_A(T)$ を計算すると, この頻度分布はそれぞれ図 2-16, 図 2-17 に示す通りである。これによれば最大加速度は大部分が 250gal 以下であり, これを超える記録は 5 例である。

また, 応答スペクトルについては, $a^*(\theta, t)$ から減衰定数 5% の加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A(\theta, T)$ を求め, これを種々の θ に対して各周期ごとに求めた最大値を $\tilde{S}_A(T)$ とした。すなわち,

$$\tilde{S}_A(T) = \max \{ \tilde{S}_A(\theta, T) \} \text{ for } \theta \quad (2-17)$$

2-5. 減衰定数による応答スペクトルの補正

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¹⁷⁾¹⁹⁾⁵²⁾。

$$\tilde{S}_A(T, h) = \xi_{SA}(T, h) \times \tilde{S}_A(T, 0.05) \quad (2-18)$$

ここで,

$\tilde{S}_A(T, h)$: 減衰定数 h の加速度応答スペクトル [gal]

$\tilde{S}_A(T, 0.05) = \tilde{S}_A(T)$: 減衰定数 $h = 0.05$ (5%) の加速度応答スペクトル [gal]

$$\xi_{SA}(T, h) = \left[\frac{1.5}{40h+1} + 0.5 \right] \times \beta \left[\frac{1}{300h+16} - 0.8h \right] \quad (2-19)$$

β : 加速度応答スペクトル倍率

なお, 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 (2-19) の右辺第 2 項の影響は小さい。この場合には, 式 (2-19) は次式で近似することができる。

$$\xi_{SA}(T, h) \div \xi_{SA}(h) = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 \quad (2-20)$$

図 2-18 は, 参考文献 17) に示されている ξ_{SA} と式 (2-20) を比較して示したものである。これによれば, ξ_{SA} は減衰定数が小さい場合 (特に $h < 5\%$) には 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。

2-6. 地盤条件の種別

(1) 地盤の分類とその基本的な考え方

強震記録の特性は地盤条件の影響を受けて変化するため、記録の解析に際しては地盤条件を正しく考慮することが必要とされる。地盤条件を解析に取り入れる方法としては、i) 地盤条件を適当な指標で定量化し、これにより連続的に表示する方法と、ii) i) の指標に応じて数個のグループに分類する方法がある。地盤条件を表わすためには、岩盤、新第三紀層、洪積層、沖積層等地層の地質年代による分類、平均N値等地盤の強度に着目した分類、平均せん断波速度等地盤の剛性に着目した分類、表層地盤の固有周期特性に着目した分類等種々の方法が考えられるが、問題はこれらの推定精度である。一般に強震計（地盤上）の設置点の地盤調査は行われている例が少なく、また、仮に実施されていたとした場合でも、土質柱状図やN値程度の簡単なものが多い。さらに構造物の設計に必要な資料を得ることを目的としているため、ボーリング深度も浅いものが多い。地震記録は地表から数10m程度の表層地盤の影響のみならず、さらに深層の堆積条件や地形条件の影響も受けると考えられているが、このような資料になると現状ではほとんど入手不可能である。したがって、地盤条件を表わす指標としてはある程度大雑把ではあっても、どこでもおおよその結果を得られるものでなければならない。

また、耐震設計上の観点からは、表2-7に示す道路橋耐震設計指針（日本道路協会、昭和41年）による地質年代に基づく4種類の地盤分類が土木の分野では、広く利用されており、またこれを地盤の固有周期により読み変えた現行の道路橋示方書・耐震設計編（表2-8参照）においても、道路橋耐震設計指針の分類が引き続き用いられている。したがって、実務設計に用いるためには、現行の道路橋の耐震設計に用いられている地盤種別に沿ったものである必要がある。

表2-7. 道路橋耐震設計指針による地盤種別

区 分	説 明
1 種	(1) 第三紀以前の地盤（以下岩盤と称する） (2) 岩盤までの洪積層 ¹⁾ の厚さが10m未満
2 種	(1) 岩盤までの洪積層の厚さが10m以上 (2) 岩盤までの沖積層 ²⁾ の厚さが10m未満
3 種	沖積層の厚さが25m未満でかつ軟弱層 ³⁾ の厚さが5m未満
4 種	上記以外の地盤

注) 1) 沖積層の締まった砂層、砂れき層、玉石層を含む。

2) がけ崩れなどによる新しい堆積層を含む。

3) 地盤面から深さ10mより浅いところにある飽和砂質土層で、標準貫入試験のN値が10以下、均等係数が6以下でかつ粒径加積曲線の D_{20} が0.04~0.5mmの区間にある土層、および現地盤面から深さ3m以内にある粘性土層およびシルト質土層で、一軸圧縮試験または原位置試験より推定される一軸圧縮強度が0.2kg/cm²以下のごく軟弱な土層とした。

一方、上記の4種類の地盤種別に従った既往の強震記録の解析結果によれば、1種地盤のスペクトル特性が他の2, 3, 4種地盤のスペクトル特性に比較して大きく異なっているのに対し、2, 3, 4種地盤のスペクトル特性は相互にあまり変化がないことが指摘されている⁵⁾⁶⁾。これは、地震時の地盤振動を分類するという観点からは、現行の2, 3, 4種地盤の分類はやや細か過ぎ、もっと大きく分類してもよいことを示している。

以上の点から本解析では、地盤条件は基本的には道路橋耐震設計指針によることとし、2種地盤および3種地盤はまとめて1つの地盤種別として取り扱うこととした。したがって、本解析における地盤種別は1, 2, 3種の3区分とした。

表 2-8 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。

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

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。

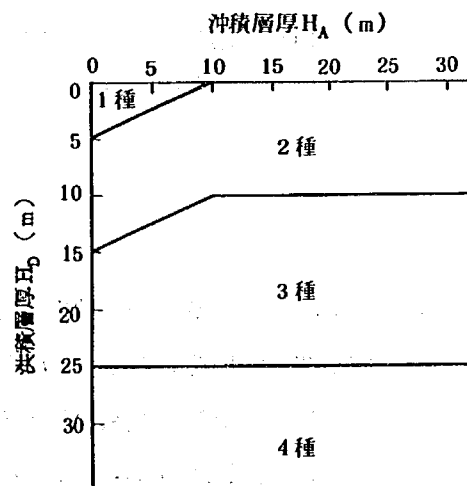
粘性土層の場合 $V_{si} = 100 N_i^{\frac{1}{3}} (1 \leq N_i \leq 25)$

砂質土層の場合 $V_{si} = 80 N_i^{\frac{1}{3}} (1 \leq N_i \leq 50)$

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) で求めたい場合 (相当深く標準貫入試験を行っても基盤面が現れない場合など) 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

(2) 地盤分類法

観測地点の地盤条件を分類するためには前節に示したように種々の方法が考えられるが、実用的なものとしては、i) 地質年代による分類、ii) 表層地盤の剛性もしくは固有周期による分類、iii) 当該観測地点の記録から求めた応答スペクトル等の周期特性に基づく分類がある。このうち、i) もしくは ii) の方法が地盤条件の分類としては本質的な方法と考えられるが、前述したように観測地点の地盤条件が詳細にわかっている例が非常に少ないため、実際にこれにより分類しようとする判断に苦しむ観測点が少くない。そこで、ここでは以下のようにiii)の方法により地盤分類を行った。

強震記録とは観測点の地盤振動に他ならない。したがって、地盤条件の違いを表層地盤内における地震動の増幅特性の違いと考えると、表層地盤の振動応答は次のように表わされる。

$$M(T) = E^*(T) \cdot G_0(T) \quad (2-21)$$

ここで、

$M(T)$: 地表面での地震動の性質

$E^*(T)$: 基盤での地震動の性質

$G_0(T)$: 表層地盤の増幅特性

T : 周期

同一箇所でも複数回 (N 回とする) の地震による記録が得られている場合には、 i 番目の地震による $E^*(T)$ を $E^*(T)_i$ 、 $M(T)$ を $M(T)_i$ とすると、 $G_0(T)$ は共通であるから、式 (2-21) は次のようになる。

$$M(T)_i = E^*(T)_i \cdot G_0(T) \quad (2-22)$$

したがって、式 (2-22) を N 回の地震に対して平均すると、

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(T)_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E^*(T)_i \right] \cdot G_0(T) \quad (2-23)$$

となる。いま、 N が十分大きく、かつ、 N 回の地震の特性が適当にばらついているとすれば、短周期が卓越した地震記録や長周期が卓越した地震記録が相互に適当にキャンセルし合って、 $1/N \cdot \sum_{i=1}^N E^*(T)_i$ は周期 T に対して比較的变化の少ない関数となることが期待される。したがって、この場合には式 (2-23) は、

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(T)_i \propto G_0(T) \quad (2-24)$$

となり、この条件が満足される場合には同一箇所における多数回の地震による地表面における地震動記録特性の平均値 $\bar{M}(T)_i$ は、表層地盤の増幅特性 $G_0(T)$ を近似することとなる。

応答スペクトルは地震時の表層地盤の振動特性を 1 自由度減衰系の最大応答で表わしたものであるから式 (2-21) に定義した $M(T)$ を加速度応答スペクトル倍率 $\beta(T)$ によって表わしても、式 (2-22) ~ 式 (2-24) の過程は変わらない。なお、ここで、加速度応答スペクトル $S_A(T)$ を用いずに、加速度応答スペクトル倍率 $\beta(T)$ を用いたのはスペクトルの周期特性(形状)に着目するためには、後者の方が式 (2-23) の

平均を行うために適当であると考えたためである。

以上の考え方にに基づき、各観測点ごとに観測記録の β スペクトル(β_i)およびこれを平均した値 $\bar{\beta}=1/N \sum_{i=1}^N \beta_i$ を求めた。ここで N はなるべく大きな数である必要があるが、記録数の関係で1~2回の記録しかなかったり、あるいはごく少数の観測点も多い。

これより平均応答スペクトル倍率 $\bar{\beta}$ の形状を検討すると、 $\bar{\beta}$ スペクトルは表2-9に示すように、タイプ-1からタイプ-3の3つに分類されることがわかった。各タイプの $\bar{\beta}$ スペクトルの特徴は表中に示す通りであり、周期領域でスペクトル倍率のはっきりしたピークを有するものから、はっきりせず全体として周期領域でなだらかに変化するものまで、細かく分類すると7種類となる。

これらの分類をもとに、 $\bar{\beta}$ スペクトルが最も卓越する周期(1次ピーク周期 T_1)、2番目に卓越する周期(2次ピーク周期 T_2)、 $\bar{\beta}$ スペクトルの肩に相当する周期(肩部周期 T_s)を各観測点ごとに求めた(表2-10参照)。ここで、肩部周期 T_s とは、タイプ3-2のようにはっきりしたピークを持たないスペクトルの周期特性を定義するために導入した周期であり、図2-19に示すように、 $\bar{\beta}$ スペクトルが周期領域において平坦部から急に右下がりに小さくなり始める周期である。ただし、タイプ-1のように T_1 以後単調に $\bar{\beta}$ が減少するものには肩部周期は定義できない。 T_1 、 T_2 、 T_s を各観測点ごとにプロットすると図2-20のようになる(図中には後述する方法により定めた地盤種別も示されている)。これを地盤調査等に基づき地盤種別がはっきりわかっている10地点*に対して検討すると、 T_1 、 T_2 、 T_s と地盤条件との間には明瞭な相関は存在しないことがわかった。この理由は表2-9に示したタイプ-1のようなスペクトルでは T_1 が一義的に決まるが、タイプ2-2、タイプ3-2、タイプ3-3、タイプ3-4等では、ピークが複数個あり、これらの値が互いに接近しているため、わずかな違いで T_1 、 T_2 が入れかわり、安定性に欠けるためと考えられた。また、 T_s も図2-19に示したように、タイプ3-2に対しては比較的定めやすいが、その他の場合には定めにくいという点によっている。なお、念のため、 T_1 、 T_2 、 T_s に相当するスペクトルレベル $\bar{\beta}(T_1)$ 、 $\bar{\beta}(T_2)$ 、 $\bar{\beta}(T_s)$ を図2-21に示すように各観測点ごとにプロットしてみたが、上述したように T_1 、 T_2 、 T_s 自身が地盤条件と明瞭な相関を持たないため、有意な結果は得られなかった。

そこで、周期領域における $\bar{\beta}$ スペクトルの卓越度の度合いではなく、特定の周期に対するスペクトル値を検討した一例が図2-22である。図中には、周期 $T=0.2$ 秒、0.7秒、2秒の場合が示されている。これを上記と同様、地盤調査等から地盤種別がはっきりわかっている10地点に対して検討すると、 $T=0.2$ 秒に対するスペクトル値 $\bar{\beta}(0.2)$ は各種の地盤種別の場合が入りみだれて、地盤種別の判定には適当ではないことがわかった。これは $T=0.2$ 秒付近では、短周期成分が卓越するタイプのスペクトルの場合でも、長周期成分が卓越するタイプのスペクトルの場合でも、ともに2~3程度の値を有しており、これによる地盤種別はできないことを示している。一方 $T=2$ 秒の場合には、1種地盤のスペクトル $\bar{\beta}(2.0)$ は0.2程度以下の値をとるのに対して、2種および3種地盤のスペクトル $\bar{\beta}(2.0)$ は0.2程度以上の値となりある程度地盤種別に応じてスペクトル値に違いがあることがわかる。しかし、この場合にも、2種地盤と3種地盤の

*地盤条件が完全に確認されているのは以下の通り

- ④開北橋、⑥伊達橋、⑦新葛飾橋、⑬板島橋、⑭梶満橋、⑯草加高架橋、⑰富津岬、⑱西新井橋、㉔観音崎
㉔真崎大橋

区別はそれ程はっきりしない。これに対して $T=0.7$ 秒の場合には、1種地盤のスペクトル $\bar{\beta}(0.7)$ は約0.7以下、2種地盤のスペクトルは約0.7～1.8、3種地盤のスペクトルは約1.8以上と非常に地盤条件との対応がよいことがわかる。これは表2-9に示した結果からわかるように、0.7秒付近が3種地盤のスペクトルが卓越する周期であり、一方、ここでは1種地盤および2種地盤のスペクトルは右下がりに減少しつつあるため、結果として1, 2, 3種地盤のスペクトル値には明瞭な差異が生じるためと考えられる。

したがって、ここでは地盤資料、周辺の地形地盤条件の概要調査とならんで $\bar{\beta}(0.7)$ の値も地盤種別を分類する資料に用いることとし、種々検討した結果、原則として $\bar{\beta}(0.7)$ の値が0.7以下となるものは1種地盤、0.7～1.8の範囲にあるものは2種地盤、1.8以上となるものは3種地盤とすることとした。なお、このようにして定めた地盤種別は表2-10に示した通りとなる。これによれば、地盤条件が1種、2種、3種となる観測点の数は、それぞれ19, 31, 17(合計67地点)となる。また、1種、2種、3種地盤ごとの強震記録数はそれぞれ46, 107, 44(合計197記録)となる。

表 2-9 平均加速度応答スペクトル倍率 $\bar{\beta}(T)$ の形状と特徴

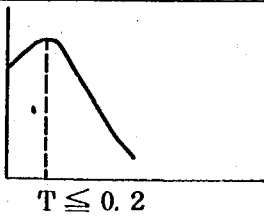
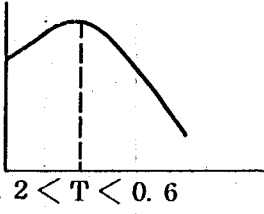
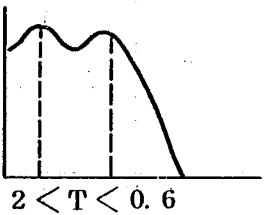
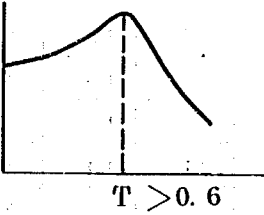
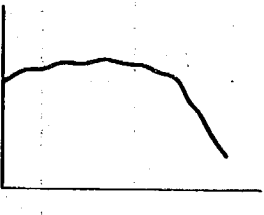
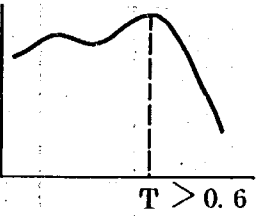
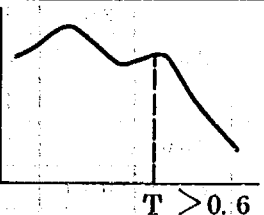
タイプ	$\bar{\beta}$ スペクトルの形状	特 徴
タイプ 1	 $T \leq 0.2$	◦ 単一の鋭いピークを有し、ピークの周期は 0.2 秒以下 ◦ 0.2 秒以下の$\bar{\beta}$ 値は周期Tの増加とともに急激に単調減少する。ただし、両対数グラフ上で、$\beta(T) \sim T$の関係が上向きにややふくらんだものもある。
タイプ 2-1	 $0.2 < T < 0.6$	◦ 単一のゆっくりしたピークを有し、ピークの周期は 0.2 ~ 0.6 秒。
タイプ 2-2	 $0.2 < T < 0.6$	◦ 2 つの明瞭なピークを有しており、短周期側のピークの特徴はタイプ 1 とよく似ている。長周期側のピークの周期は 0.2 ~ 0.6 秒。 ◦ 短周期側のピークが卓越するものと、長周期側のピークが卓越するものがある。
タイプ 3-1	 $T > 0.6$	◦ 単一のゆっくりしたピークを有し、ピークの周期は 0.6 秒以上。
タイプ 3-2		◦ 明瞭なピークが存在せず、周期 0.6 秒程度もしくはそれ以上までスペクトル値は比較的大きい値を保っている。
タイプ 3-3	 $T > 0.6$	◦ 2 つのピークを持っており、長周期側のピークは 0.6 秒以上。 ◦ この場合には、タイプ 2-2 と違って短周期側のピークはタイプ 1 のように鋭くない場合が多い。
タイプ 3-4	 $T > 0.6$	◦ 2 つのピークを持っており、長周期側のピークは 0.6 秒以上。 ◦ タイプ 2-1 と判断に迷う場合もあるが、タイプ 2-1 とするには長周期側のピーク（ふくらみ）が大きいもの。

表2-10(1) 観測地点ごとの $\bar{\beta}$ スペクトルの特徴と地盤種別

No	観測所No	観測所名	固有周期 [秒]			$\bar{\beta}$ スペクトル値			$\bar{\beta}$ スペクトル値			地盤種別
			1次ピーク	2次ピーク	肩部	1次ピーク	2次ピーク	肩部	T=0.2	T=0.7	T=2.0	
1	901-A	土研千葉支所	0.15			3.3			3.0	0.59	0.17	1
2	904	新天竜川橋	0.7			2.2			1.2	2.2	0.36	3
3	905-A	落合橋	0.15			2.6			2.0	0.34	0.09	1
4	302	開北橋	0.15			3.2			2.4	0.52	0.15	1
5	801	有明海	0.7			2.8			1.5	2.82	0.95	3
6	304	伊達橋	0.1			3.6			2.2	0.67	0.08	1
7	101	新葛飾橋	0.1		0.5	2.7		1.8	2.1	1.1	0.27	2
8	906	土研鹿島支所	0.3			2.6			2.4	1.2	0.16	2
9	205	石瀬戸橋	0.1	0.3	0.7	2.5	2.4	1.9	2.1	1.9	0.33	2
10	907	平大橋	0.3	1.0		2.8	1.3		2.3	1.1	0.20	2
11	112	紀ノ川大橋	0.1			2.7			2.0	0.71	0.09	2
12	306	妙見橋	1.0	0.5	1.5	2.7	2.7	2.3	1.6	2.5	0.85	3
13	308	板島橋	0.2			3.0			3.0	1.2	0.13	2
14	1305	幌満橋	0.15			3.1			2.8	0.59	0.20	1
15	104	新利根川橋	0.2	1.0		2.7	1.5		2.7	1.4	0.37	2
16	106	草加高架橋	0.5	0.15	0.7	2.6	2.2	2.5	2.2	2.5	0.33	3
17	310	平井大橋	0.3	0.7	1.0	3.0	1.7	1.5	2.4	1.7	0.42	2
18	319	四徳大橋	0.1		0.5	3.6		1.6	1.9	0.91	0.11	2
19	501	東京湾(富津岬)	0.15		0.7	2.9		1.4	2.7	1.4	0.45	2
20	902	西新井橋	0.2	0.5	1.0	2.4	2.1	1.4	2.4	2.0	0.30	3
21	1004	境川橋	0.2	1.5		3.0	0.18		3.0	0.43	0.12	1
22	1005	姥久保橋	0.15			2.8			2.4	0.82	0.18	1
23	1109	羽田海底トンネル	0.30	1.5		3.4	0.70		2.5	1.1	0.53	2
24	503	東京湾(観音崎)	0.15			3.3			3.2	0.67	0.17	1
25	313	石鏡橋	0.3	0.15		2.3	2.3		1.9	1.4	0.18	2
26	204	新八幡橋	0.1			3.0			2.0	0.51	0.11	1
27	311	豊浜大橋	0.15		0.5	2.7		2.3	2.5	1.2	0.22	2
28	1201	西横堀高架橋	1.0	0.15		2.5	2.3		2.3	1.5	0.92	2
29	301	雄平橋	0.15	0.5		3.0	2.3		3.0	1.6	0.41	2
30	102	米山大橋	0.15	0.5		3.2	1.4		2.5	0.70	0.09	1
31	202	魚沼橋	0.1	0.3		2.5	1.9		1.9	0.52	0.10	1
32	1006	鶴川橋	0.1	0.3		2.9	2.0		1.9	0.28	0.08	1
33	1401	利根川河口壊	0.3		0.7	2.4		2.0	1.8	2.0	0.39	3
34	105	真崎大橋	0.1	0.3		3.3	2.3		2.1	0.47	0.19	1
35	206	小見川大橋	0.5			3.3			1.8	1.7	0.32	3
36	901-B	土研旧千葉支所	0.2	0.7		3.9	0.56		3.9	0.56	0.11	1
37	1002	東名・富士川橋	0.3	0.1		3.0	2.6	0.89	2.4	1.3	0.70	2
38	404-1	名古屋港	0.1			3.0			2.1	0.71	0.24	2

表 2-10(2) 観測地点ごとの $\bar{\beta}$ スペクトルの特徴と地盤種別

No	観測所No	観 測 所 名	固有周期 [秒]			$\bar{\beta}$ スペクトル値			$\bar{\beta}$ スペクトル値			地盤種別
			1 次ピーク	2 次ピーク	肩 部	1 次ピーク	2 次ピーク	肩 部	T=0.2	T=0.7	T=2.0	
39	102-1	釧 路 港	0.3	1.0		2.9	1.4		2.9	1.2	0.33	2
40	208-1	小 名 浜 港	0.2	1.0		3.1	0.69		3.1	0.74	0.14	2
41	206-1	大 船 渡 港	1.0	0.2		3.3	2.3		2.3	1.7	0.27	3
42	303-1	東 京 港	0.1		0.5	2.6		2.3	2.4	1.2	0.18	2
43	301-1	鹿 島 港	0.15			2.6			2.3	0.39	0.07	1
44	602-1	高 知 港	0.3		1.5	2.5		1.3	2.0	2.2	0.38	3
45	702-1	細 島 港	0.2	1.0		3.6	1.1		3.6	1.1	0.15	2
46	105-1	室 蘭 港	0.2		0.5	3.2		1.8	3.2	0.81	1.26	2
47	201-1	青 森 港	0.2		1.5	2.9		1.5	2.9	1.8	0.2	3
48	202-1	八 戸 港	0.2		1.0	2.9		0.97	2.9	1.1	0.36	2
49	305-2	横 浜 港	0.3			3.0			3.0	0.72	0.16	2
50	504-1	神 戸 港	0.3			2.5			1.9	0.71	0.18	2
51	305-1	横 浜 港	0.2		0.7	2.7		2.1	2.7	2.1	0.32	3
52	403-1	衣 浦 港	0.15	0.5		2.8	1.9		2.2	1.4	0.12	3
53	704-1	鹿 児 島 港	0.5		2.0	2.7		1.9	1.8	2.2	1.9	3
54	206-2	大 船 渡 港	0.1			3.5			2.1	0.59	0.15	2
55	203-1	酒 田 港	0.3		0.7	2.4		1.7	2.3	1.7	0.43	2
56	405-2	四 日 市 港	0.15	0.3		2.8	2.4		2.2	1.3	0.10	2
57	302-1	千 葉 港	0.1	0.5		2.6	2.1		1.8	1.8	0.42	2
58	401-1	田 子 の 浦 港	0.5		1.0	2.2		1.8	2.1	1.9	0.53	3
59	306-1	久 理 浜 港	0.15		0.7	2.4		1.9	2.0	1.9	0.48	3
60	207-2	塩 釜 港	0.1	0.5		2.8	2.0		1.9	1.5	0.18	2
61	104-1	苫 小 牧	0.1		1.0	3.1		1.1	2.0	1.4	0.59	2
62	301-2	鹿 島 港	0.15		0.7	2.1		1.9	2.0	1.9	0.29	3
63	701-1	大 分 港	0.15			3.9			2.7	0.45	0.12	1
64	375	沼 津 変 電	0.3	0.1		3.0	2.5		2.4	0.54	0.28	1
65	376	熱 海 変 電	0.1			3.0			2.8	0.54	0.18	1
66	379	新 岩 田 変 電	0.7			2.9			1.2	2.9	0.90	3
67	380	城 堀 変 電	0.1		0.3	3.5		2.1	2.1	0.62	0.11	1

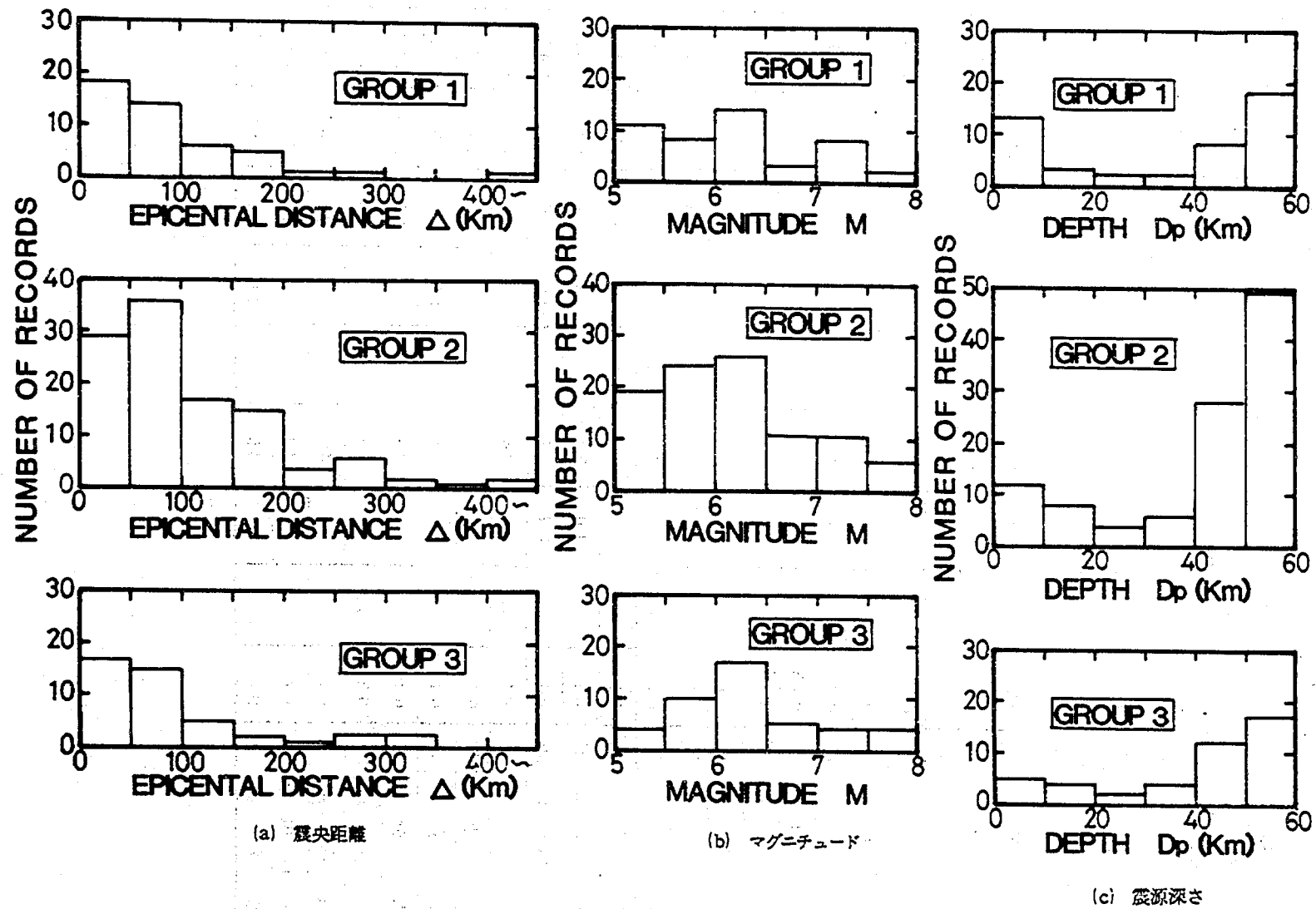


図 2 - 1 解析対象記録のマグニチュード、震央距離および震源深さ別の分類

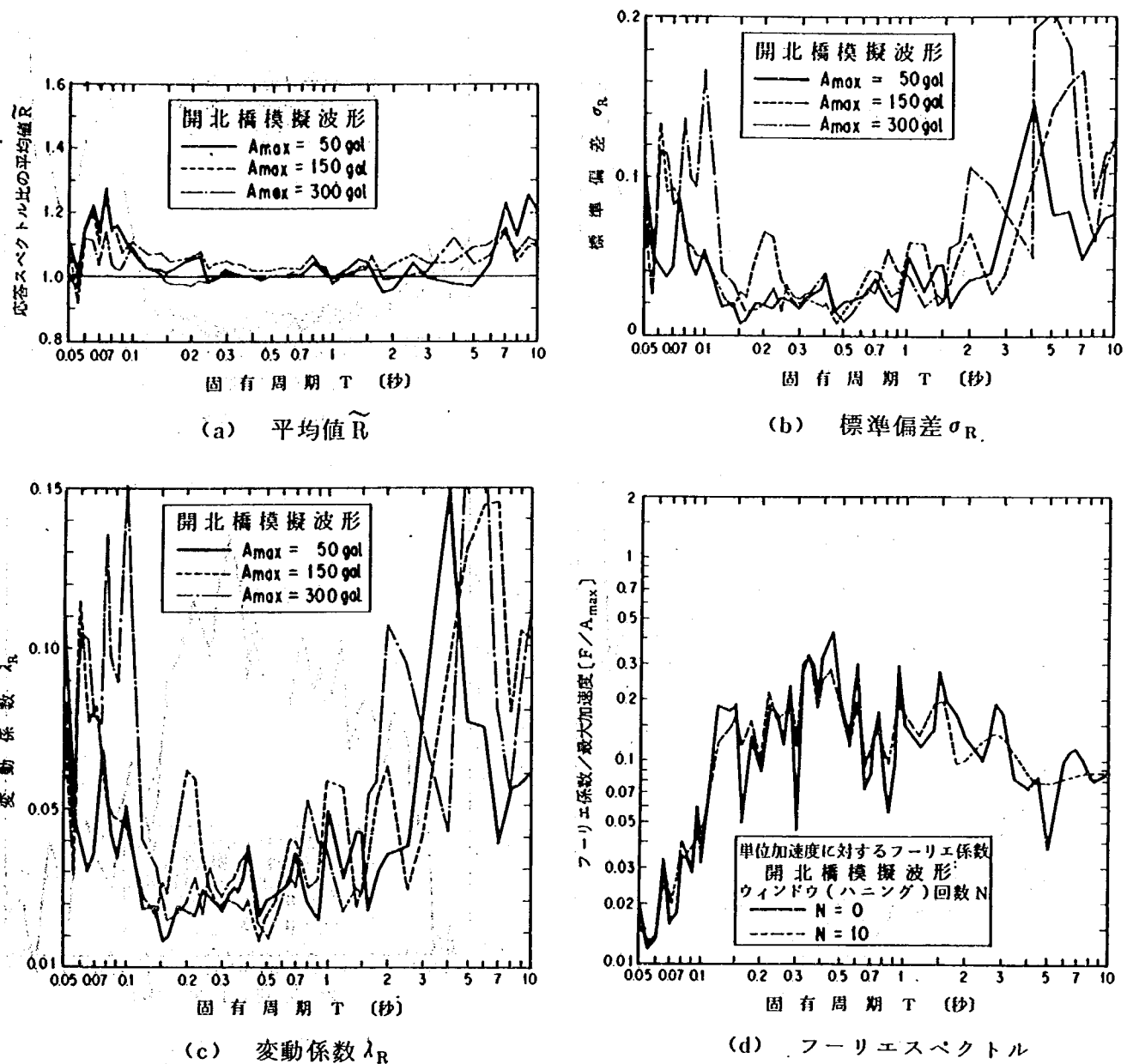
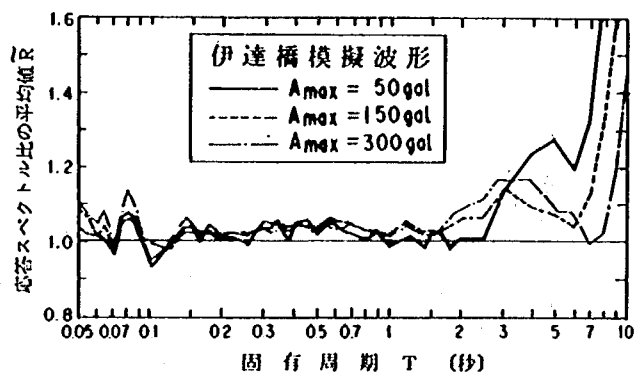
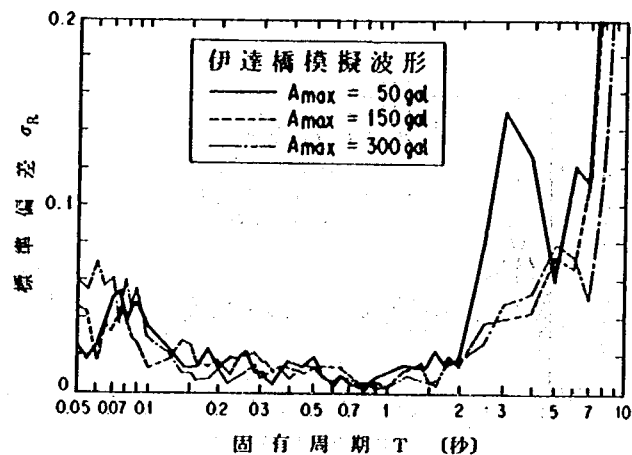


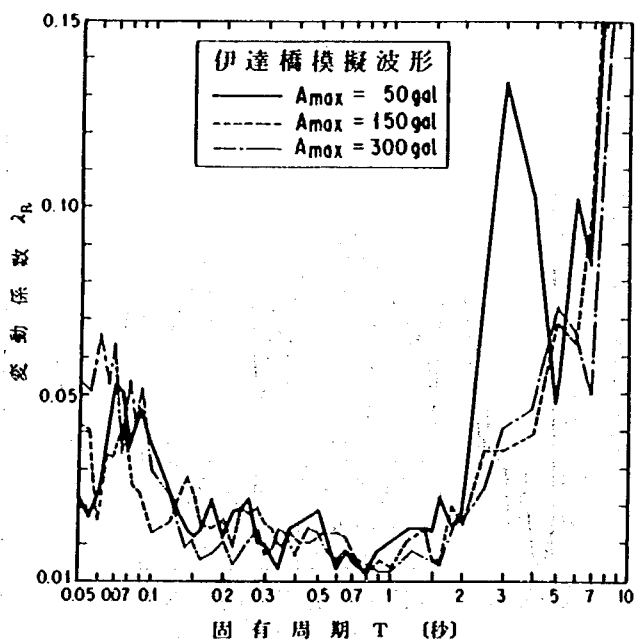
図 2-2 応答スペクトル比による読取り記録の精度 (開北橋記録)



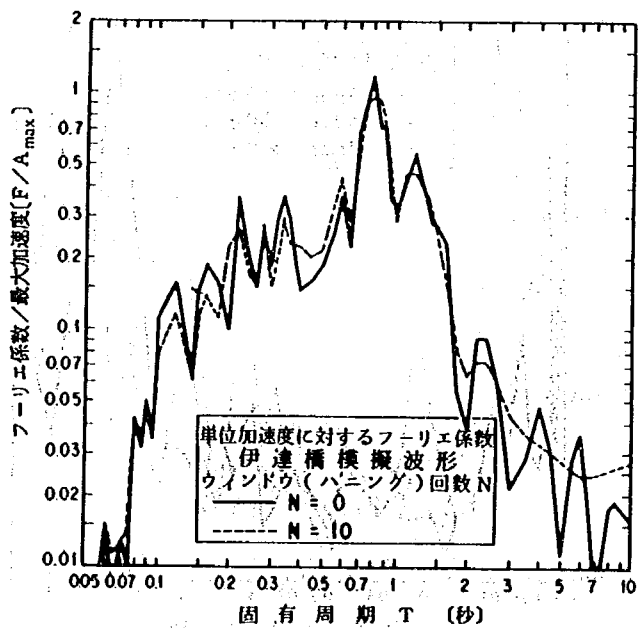
(a) 平均値 $\tilde{R}$



(b) 標準偏差 σ_R



(c) 変動係数 λ_R



(d) フーリエスペクトル

図 2-3 応答スペクトル比による読取り記録の精度 (伊達橋記録)

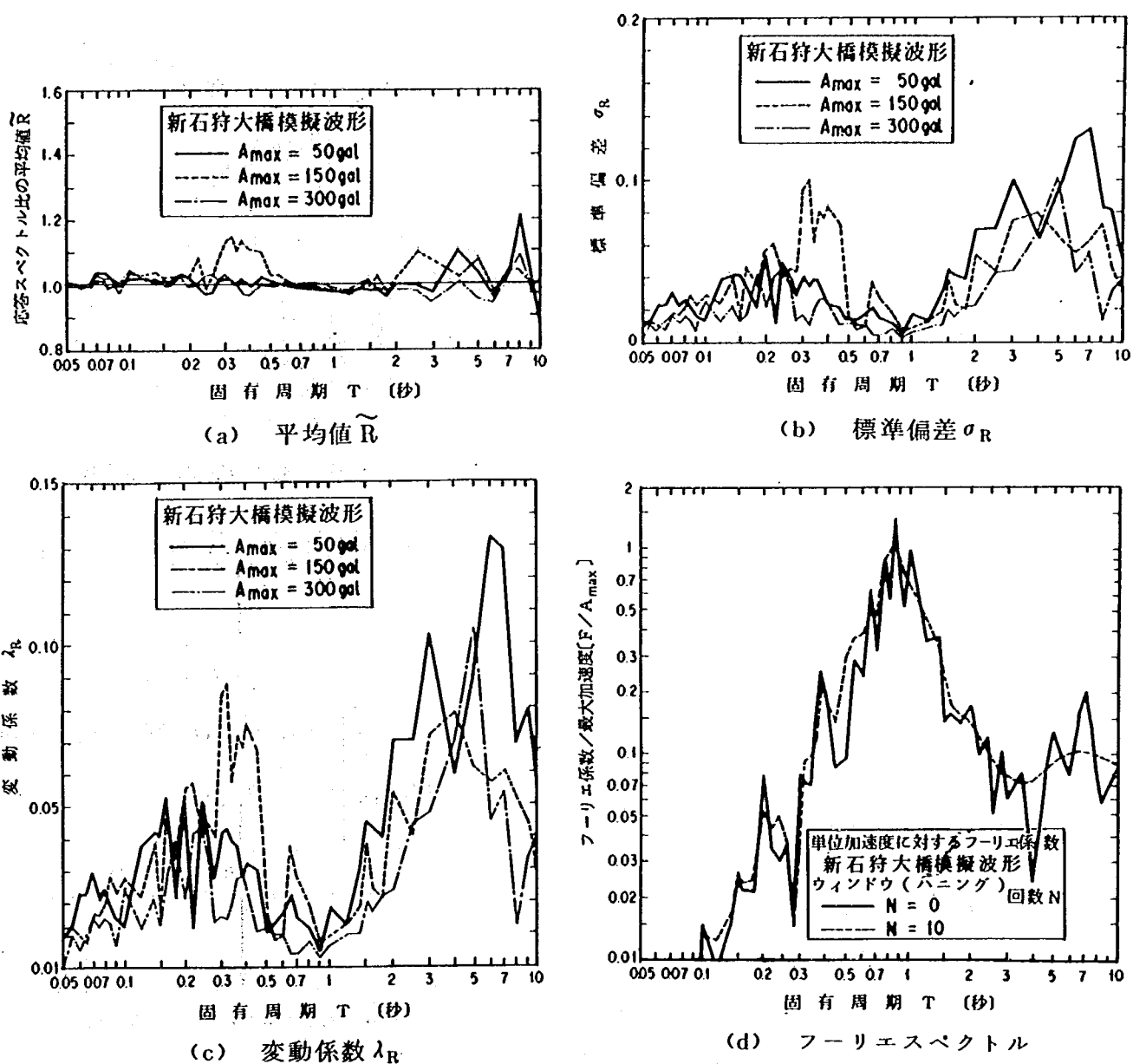
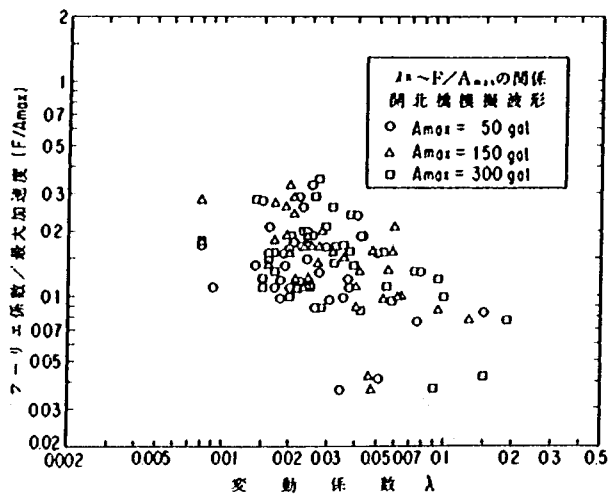
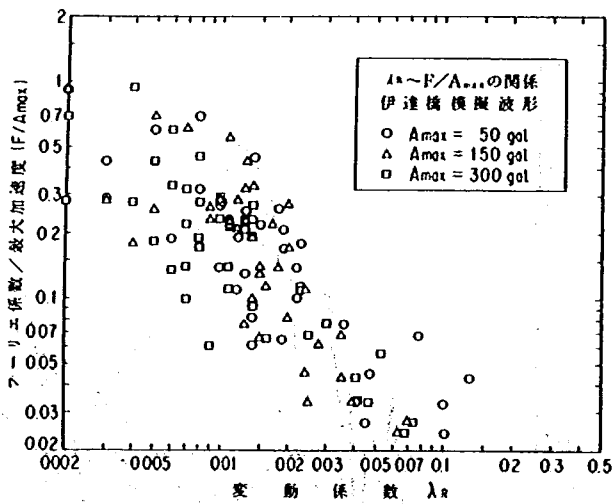


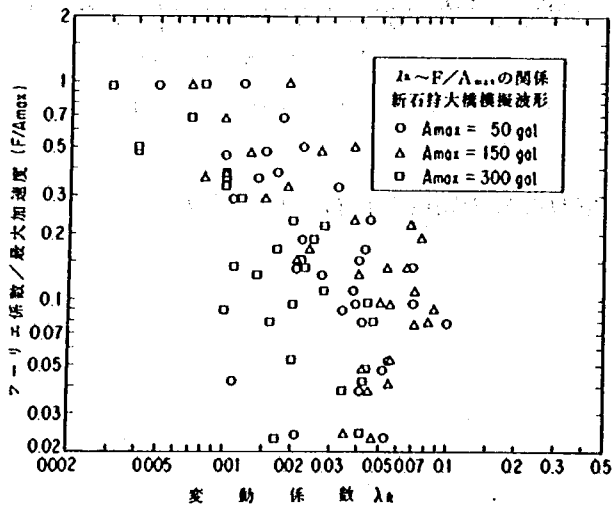
図 2-4 応答スペクトル比による読取り記録の精度 (新石狩大橋記録)



(a) 開北橋記録の場合



(b) 伊達橋記録の場合



(c) 新石狩大橋記録の場合

図 2-5 応答スペクトル比の変動係数 λ_R と
フーリエ係数 F/A_{max} の関係

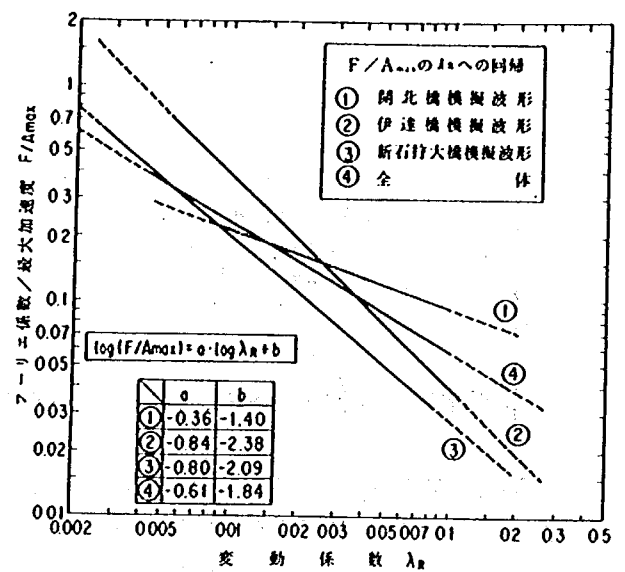
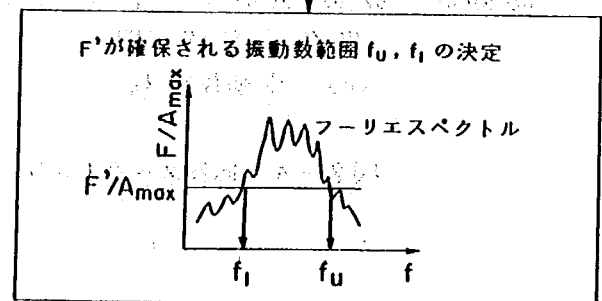
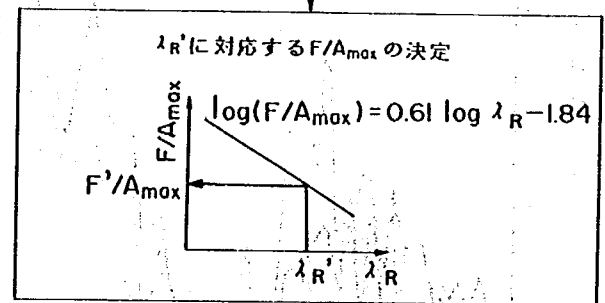


図 2-6 $\lambda_R \sim F/A_{max}$ の関係

要求される数値化精度 (変動係数 λ_R') の決定

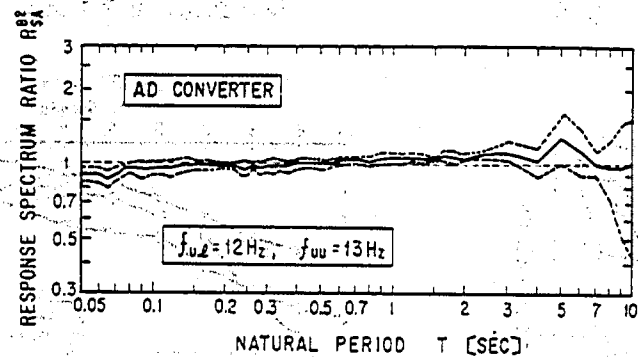


遮断振動数の決定

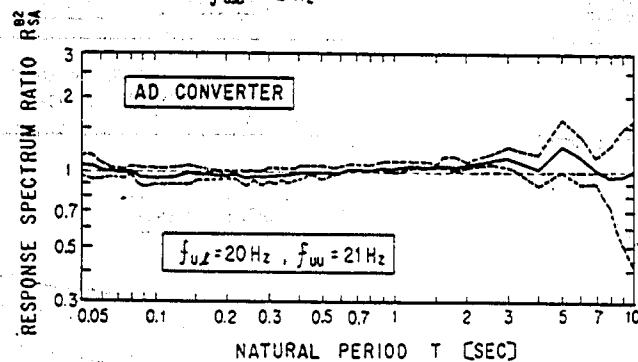
$$f_{ul} = f_u$$

$$f_{lu} = f_l$$

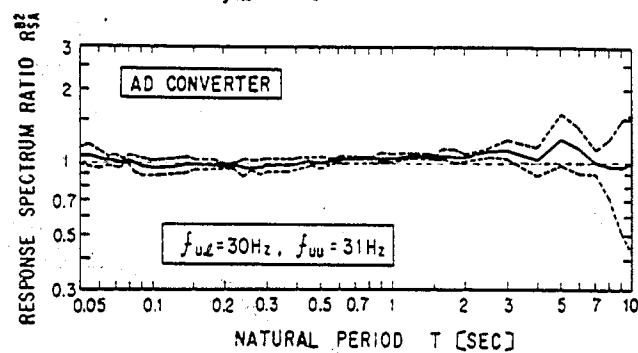
図 2-7 要求される数値化の精度に応じた
遮断振動数の決定法



(a) $f_{uL}=12\text{ Hz}$

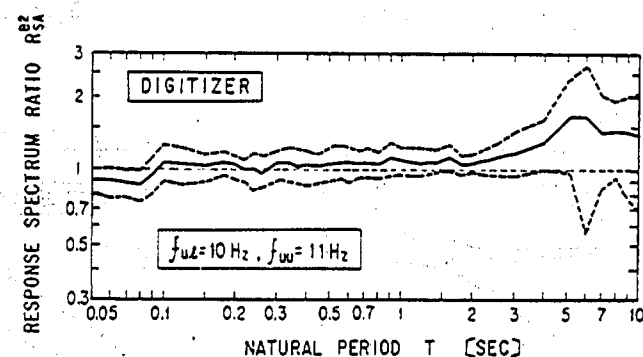


(b) $f_{uL}=20\text{ Hz}$

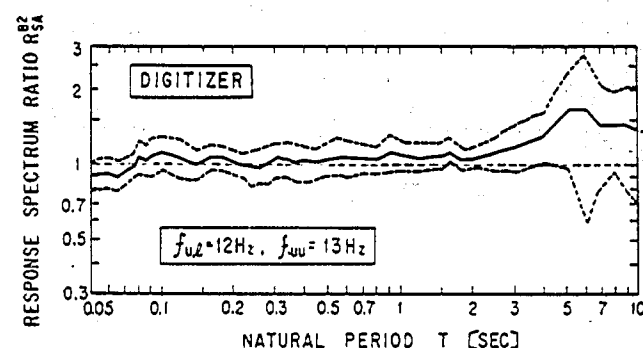


(c) $f_{uL}=30\text{ Hz}$

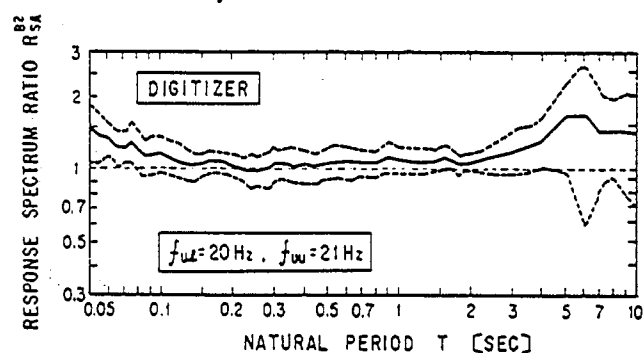
図 2-8 $R_{SA}^{B_2}$ の平均および標準偏差 (AD 変換記録)



(a) $f_{uL}=10\text{ Hz}$



(b) $f_{uL}=12\text{ Hz}$



(c) $f_{uL}=20\text{ Hz}$

図 2-9 $R_{SA}^{B_2}$ の平均および標準偏差 (数値化記録)

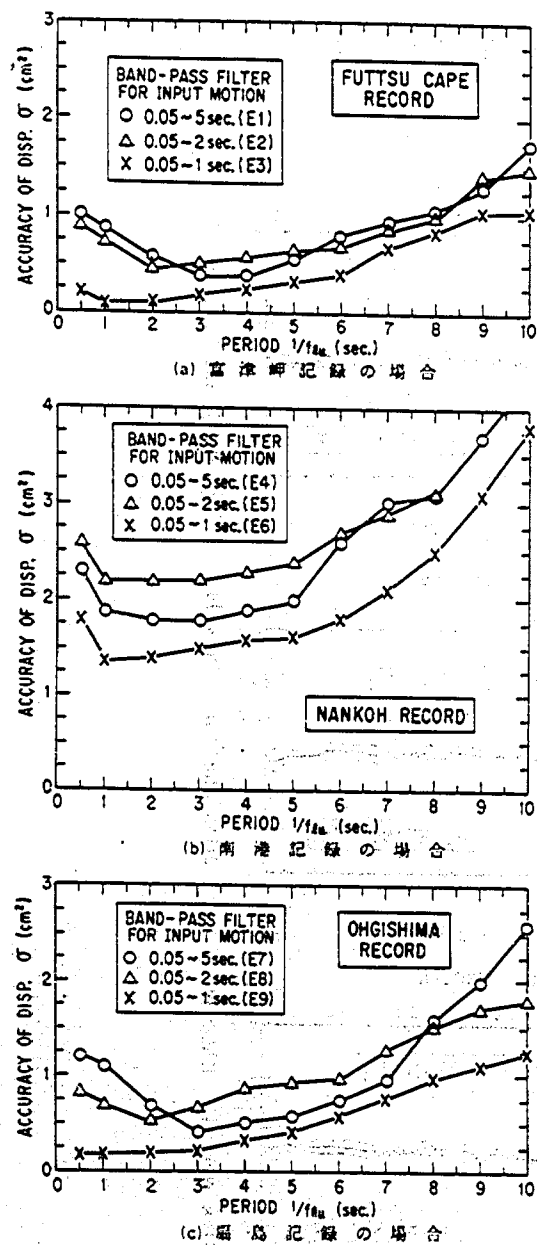


図2-10 σ による変位精度の検討

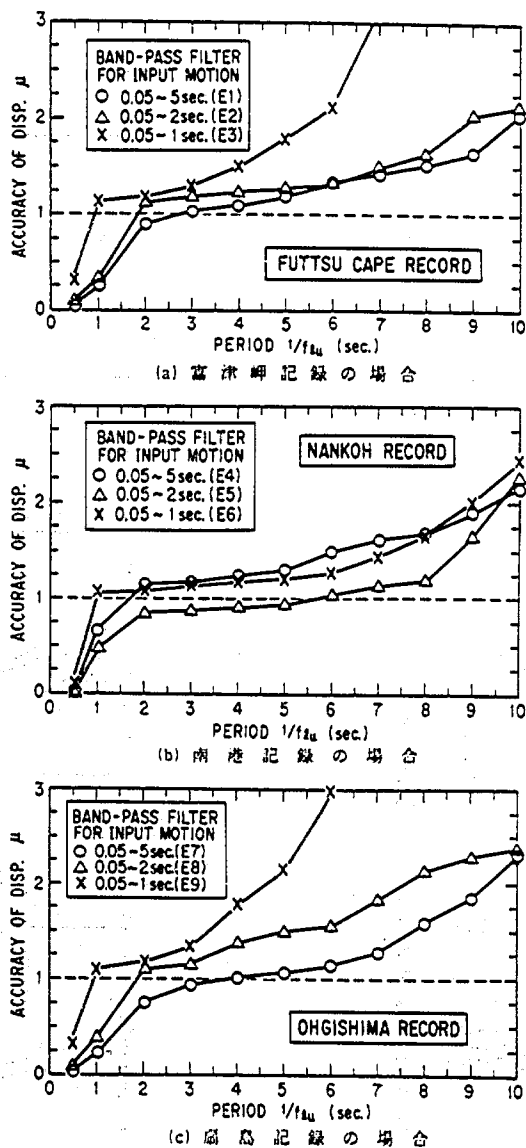


図2-11 μ による変位精度の検討

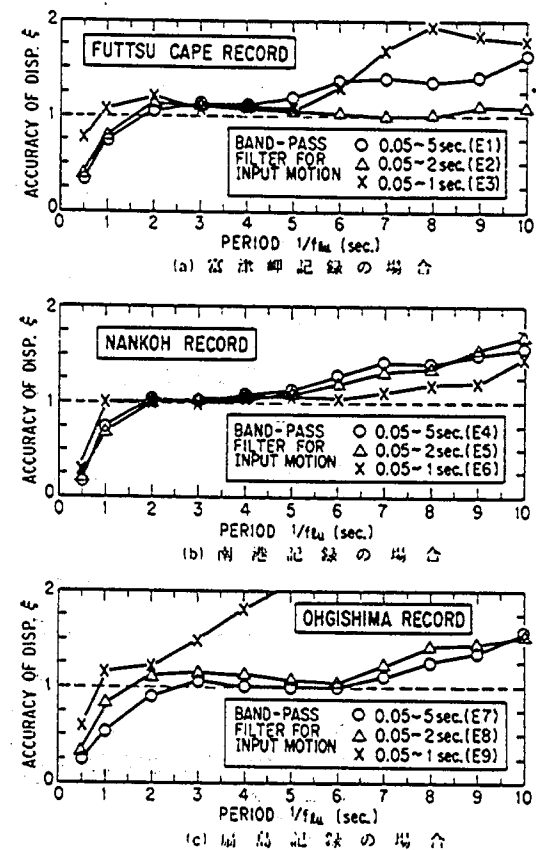


図2-12 ϵ による変位精度の検討

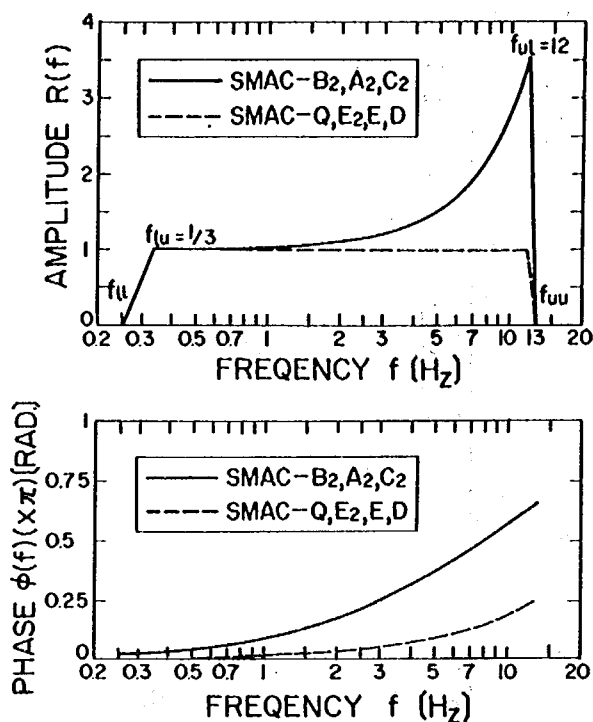


図 2-13 振幅および位相の補正関数
($f_{ul} = 12 \text{ Hz}$, $f_{ul} = 1/3 \text{ Hz}$)

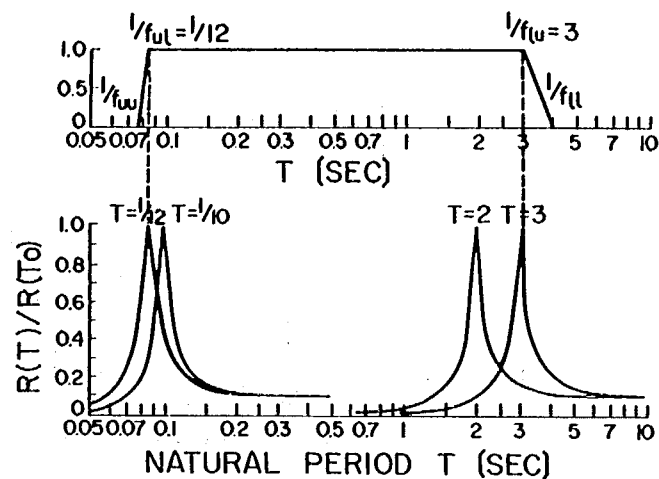
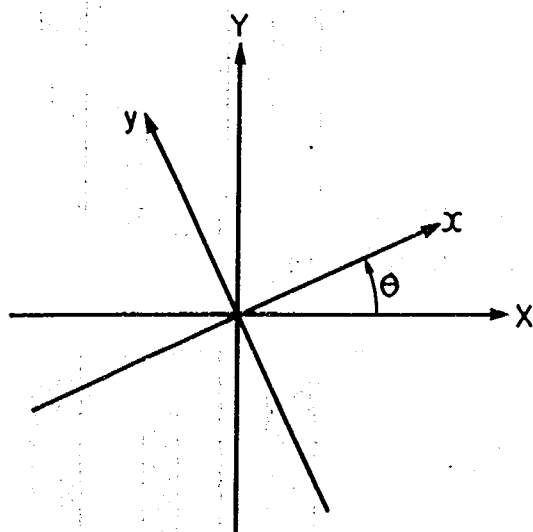


図 2-14 遮断振動数が応答スペクトルの適用範囲に及ぼす影響



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

図 2-15 水平面内における座標軸の回転

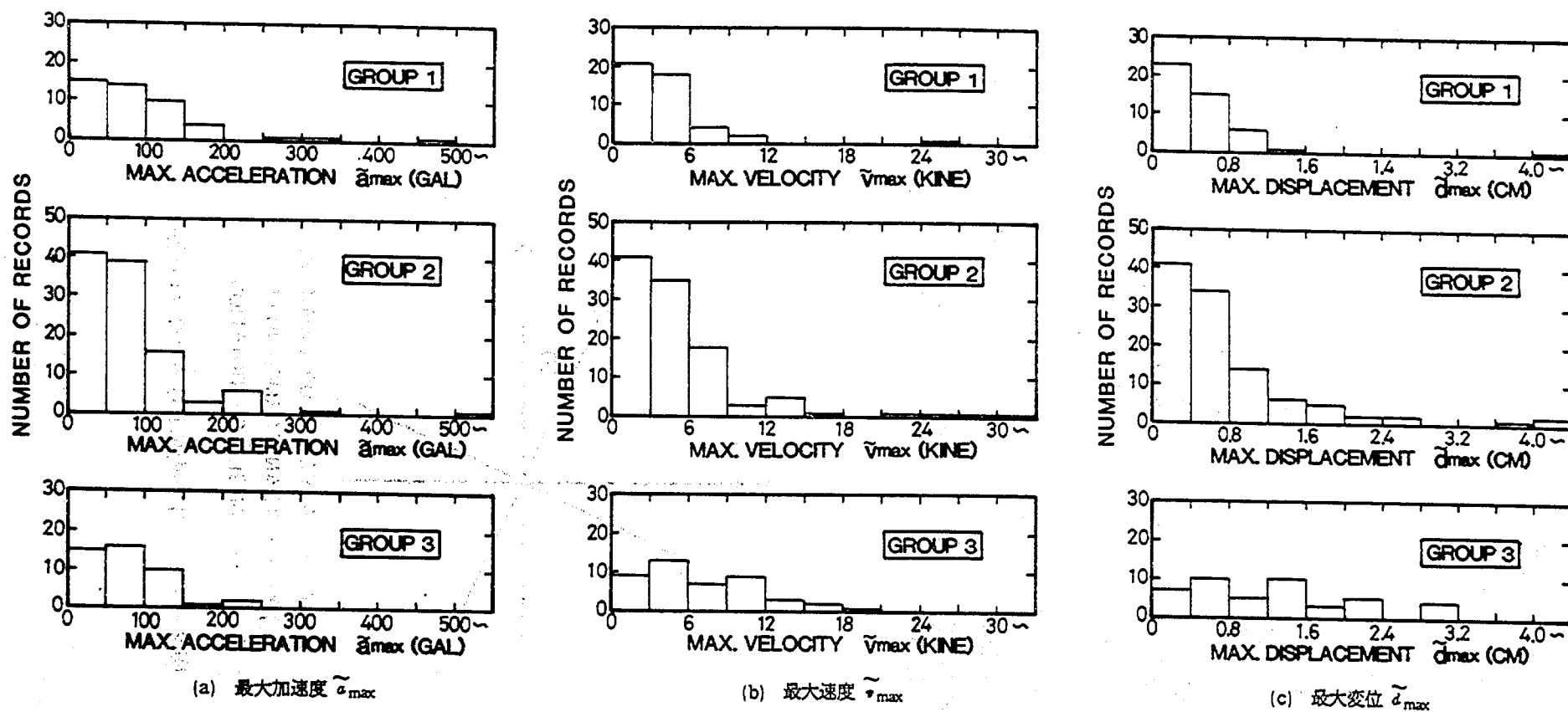


図2-16 最大地震動の頻度分布

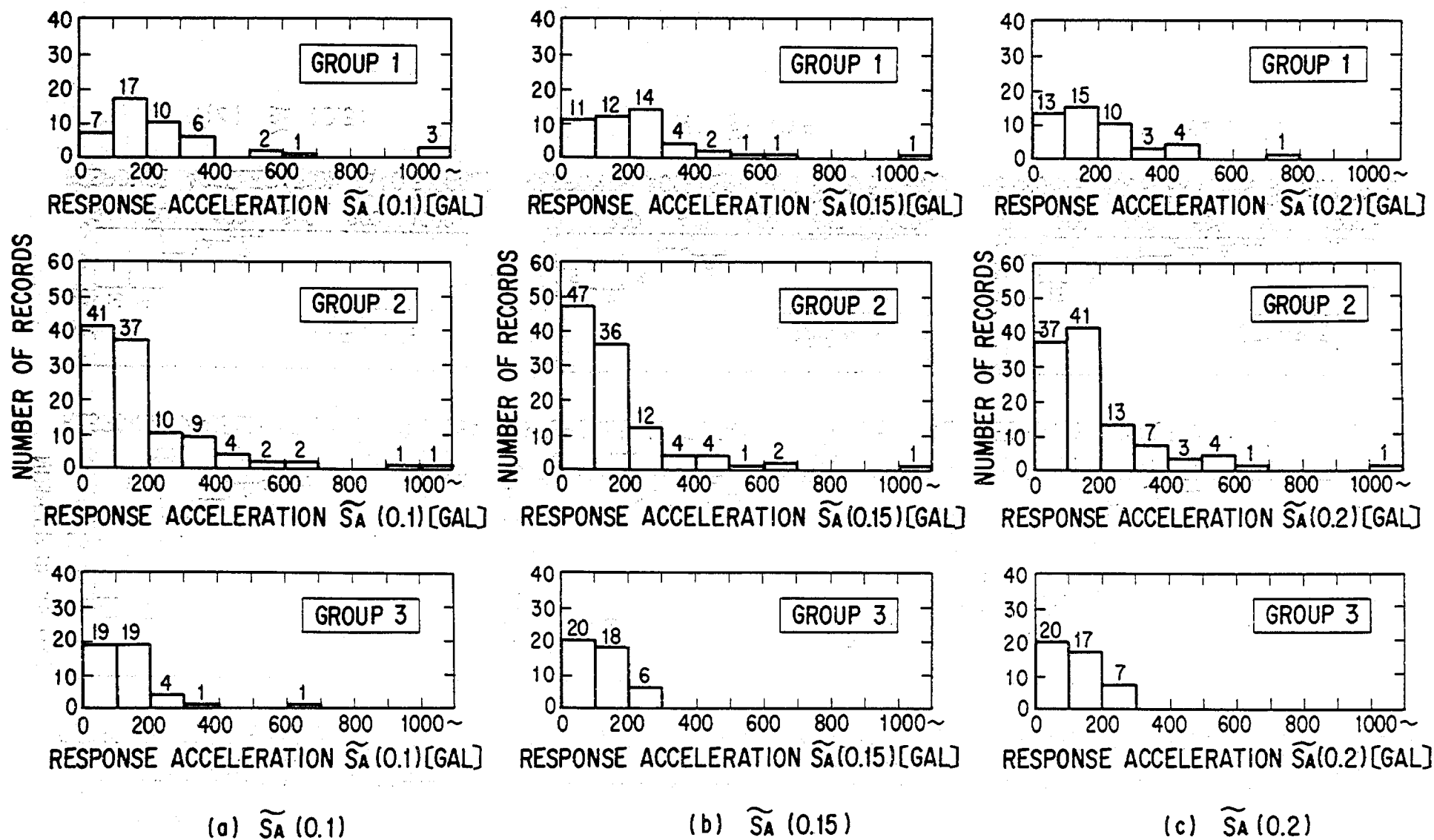
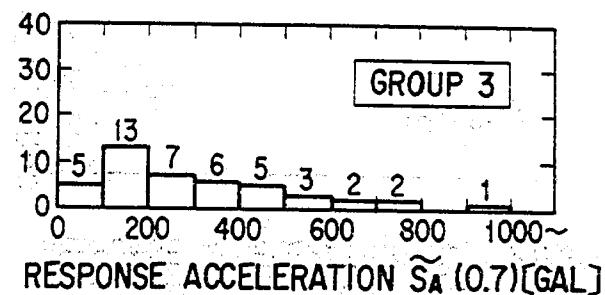
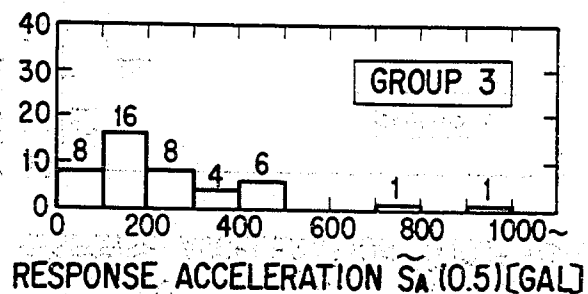
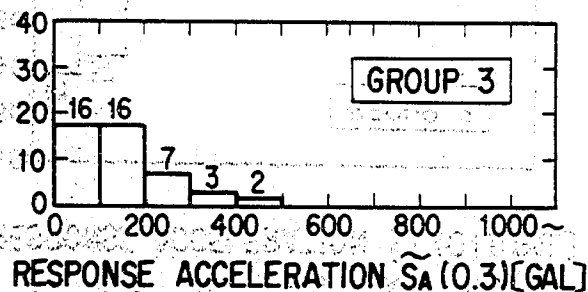
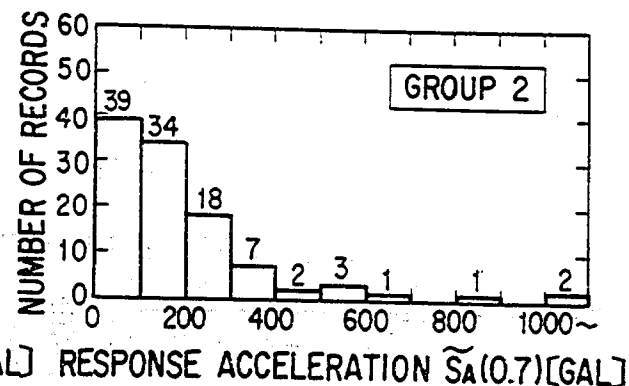
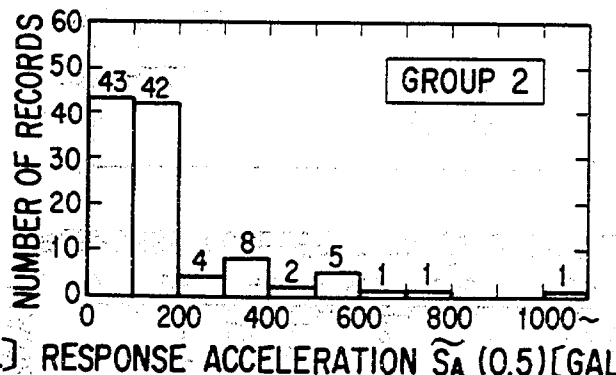
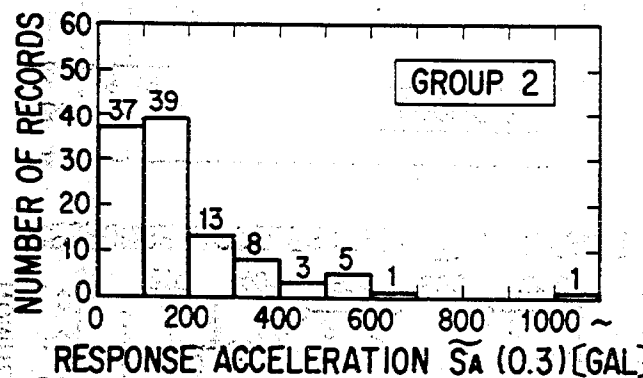
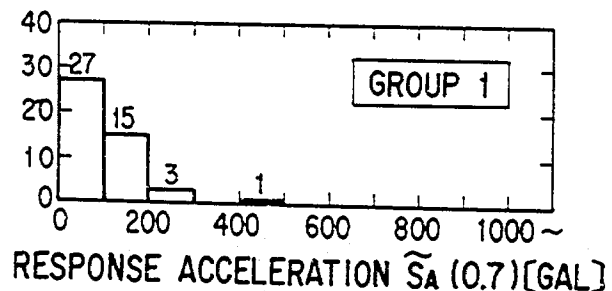
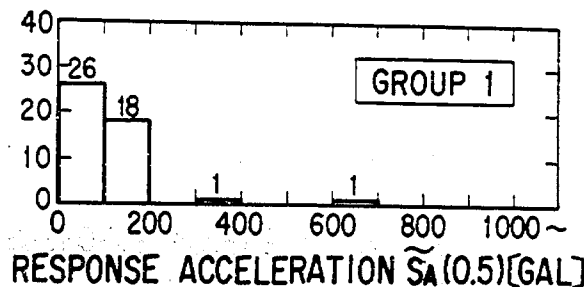
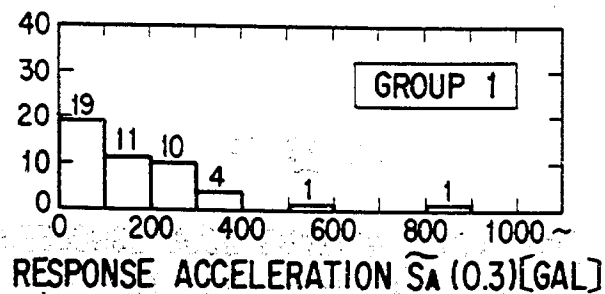


図 2-17(1) $\tilde{S}_A(T)$ スペクトルの頻度分布

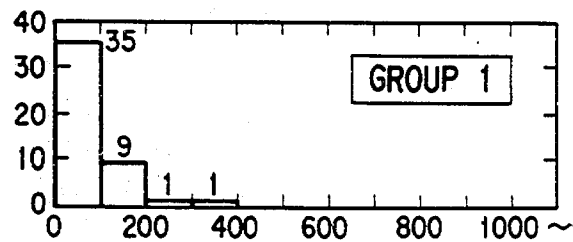


(d) $\tilde{S}_A(0.3)$

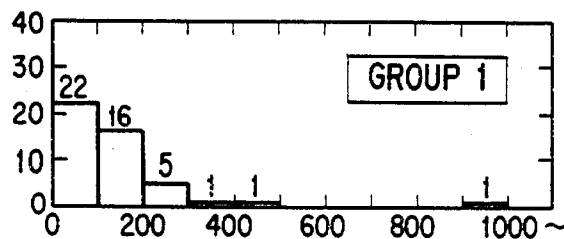
(e) $\tilde{S}_A(0.5)$

(f) $\tilde{S}_A(0.7)$

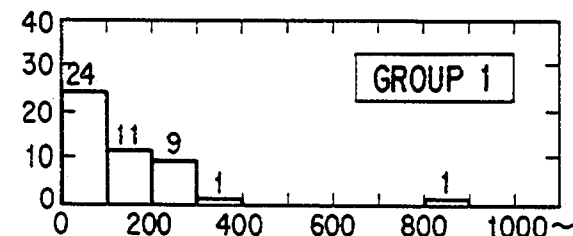
図 2-17(2) $\tilde{S}_A(T)$ スペクトルの頻度分布



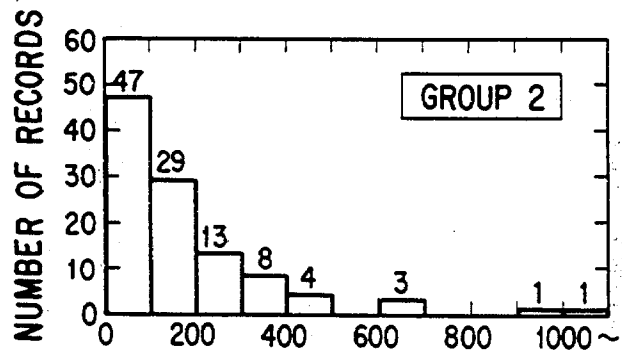
RESPONSE ACCELERATION $\tilde{S}_A(1.0)$ [GAL]



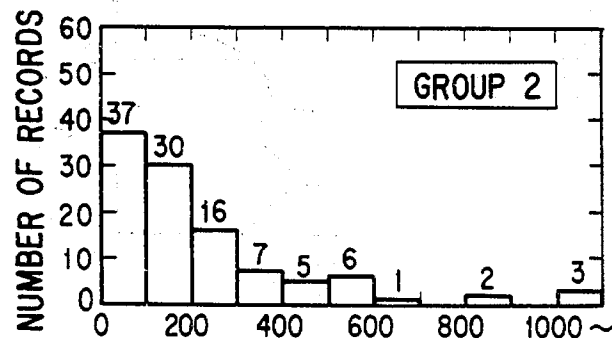
RESPONSE ACCELERATION $\tilde{S}_A(1.5)$ [GAL]



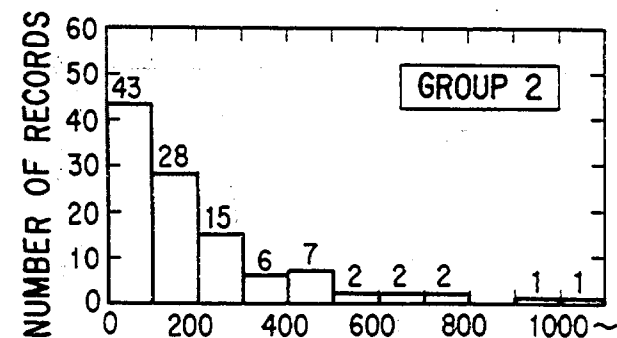
RESPONSE ACCELERATION $\tilde{S}_A(2.0)$ [GAL]



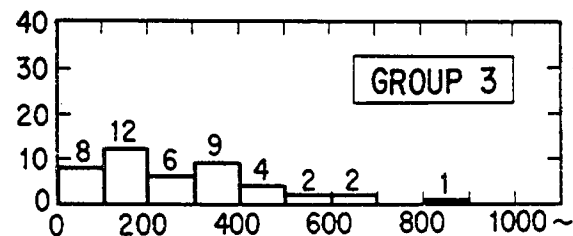
RESPONSE ACCELERATION $\tilde{S}_A(1.0)$ [GAL]



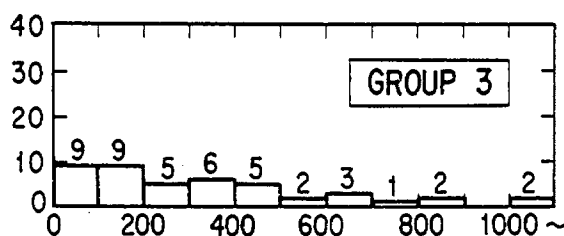
RESPONSE ACCELERATION $\tilde{S}_A(1.5)$ [GAL]



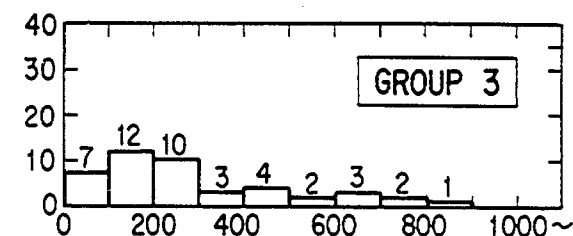
RESPONSE ACCELERATION $\tilde{S}_A(2.0)$ [GAL]



RESPONSE ACCELERATION $\tilde{S}_A(1.0)$ [GAL]



RESPONSE ACCELERATION $\tilde{S}_A(1.5)$ [GAL]



RESPONSE ACCELERATION $\tilde{S}_A(2.0)$ [GAL]

(g) $\tilde{S}_A(1.0)$

(h) $\tilde{S}_A(1.5)$

(i) $\tilde{S}_A(2.0)$

図 2-17(3) $\tilde{S}_A(T)$ スペクトルの頻度分布

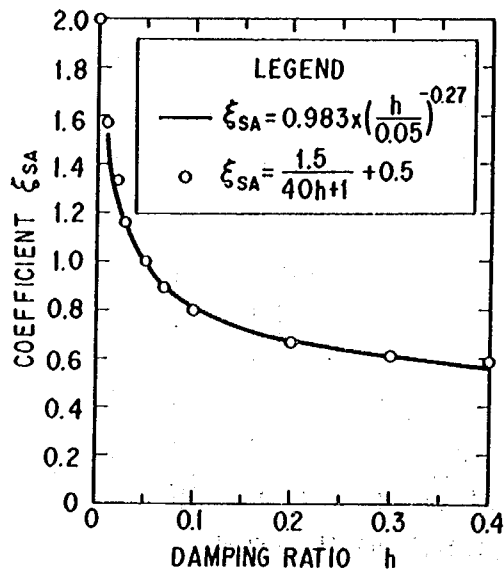


図 2-18 減衰定数 h による加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A$ の補正 (式 (2-20))

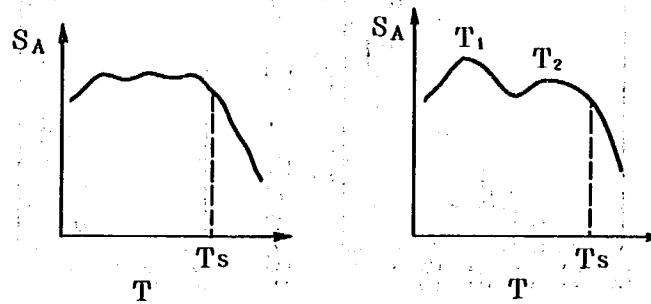
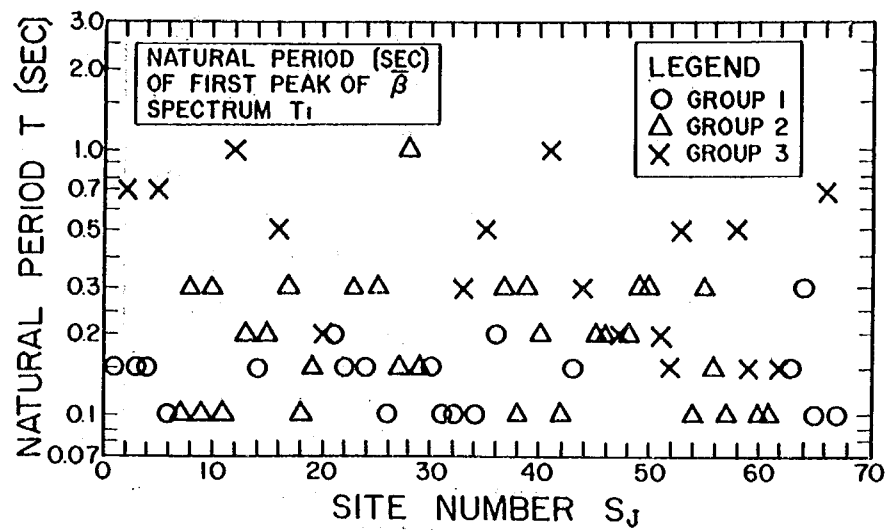
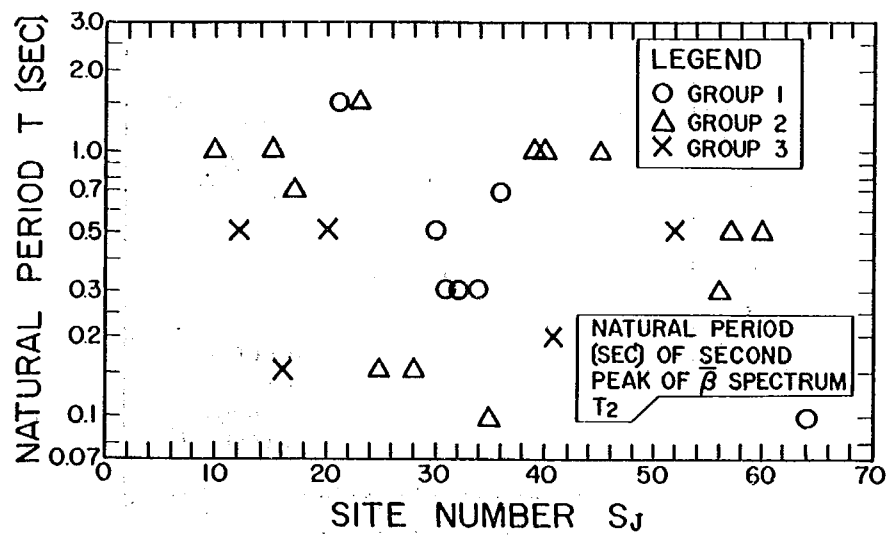


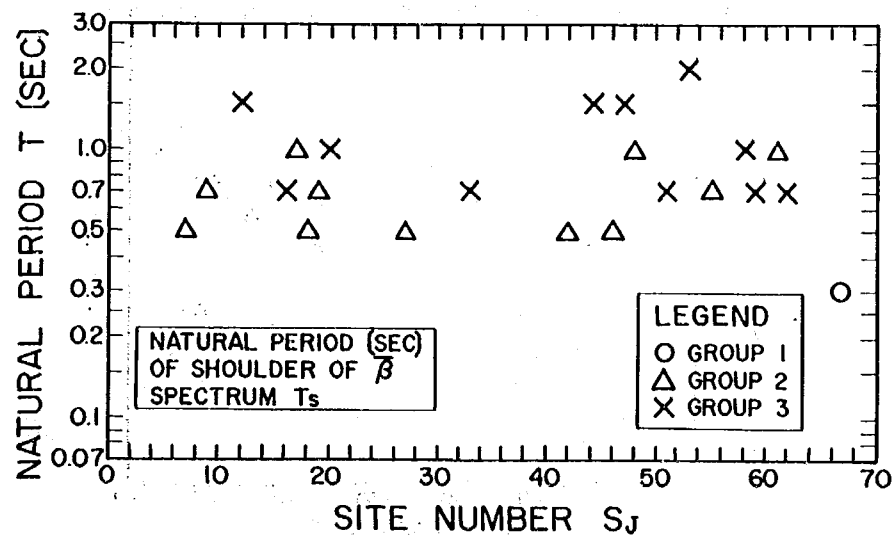
図 2-19 肩部周期 T_s の定義



(a) 1次ピーク周期 T_1

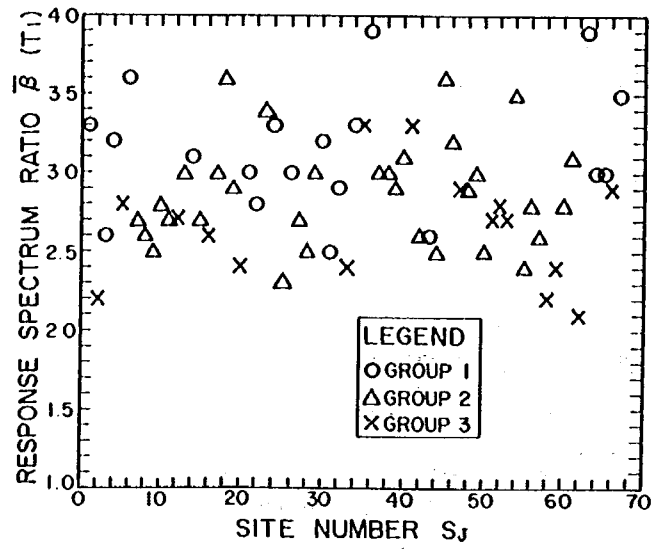


(b) 2次ピーク周期 T_2

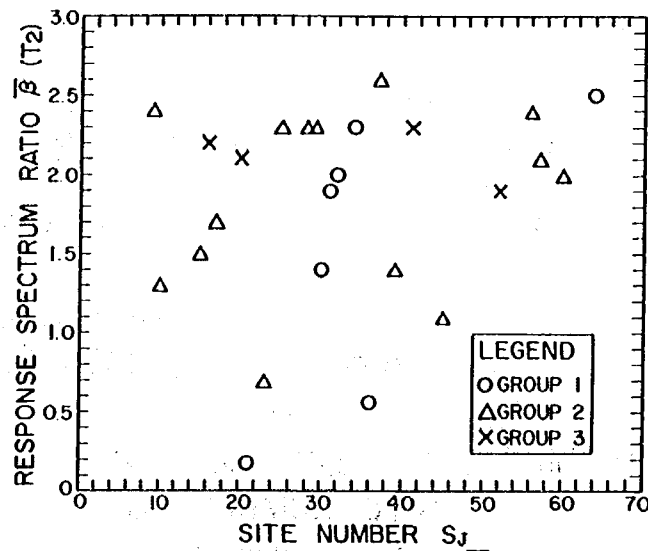


(c) 肩部周期 T_s

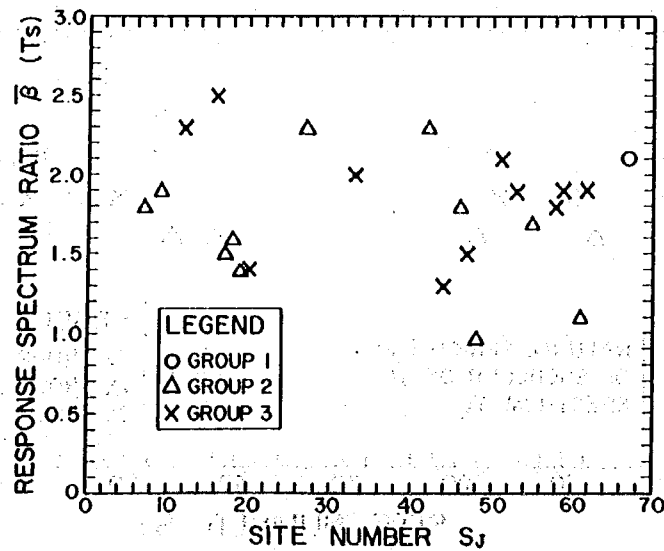
図2-20. 観測地点ごとの1次ピーク周期, 2次ピーク周期, 肩部周期
(Site Noは表2-10のNoを表わす)



(a) 1次ピーク周期に対応する $\bar{\beta}$ スペクトル



(b) 2次ピーク周期に対応する $\bar{\beta}$ スペクトル



(c) 肩部周期に対応する $\bar{\beta}$ スペクトル

図2-21 1次ピーク周期 T_1 、2次ピーク周期 T_2 および肩部周期 T_s に対応する $\bar{\beta}$ スペクトル
 ($\bar{\beta}(T_1)$, $\bar{\beta}(T_2)$, $\bar{\beta}(T_s)$)

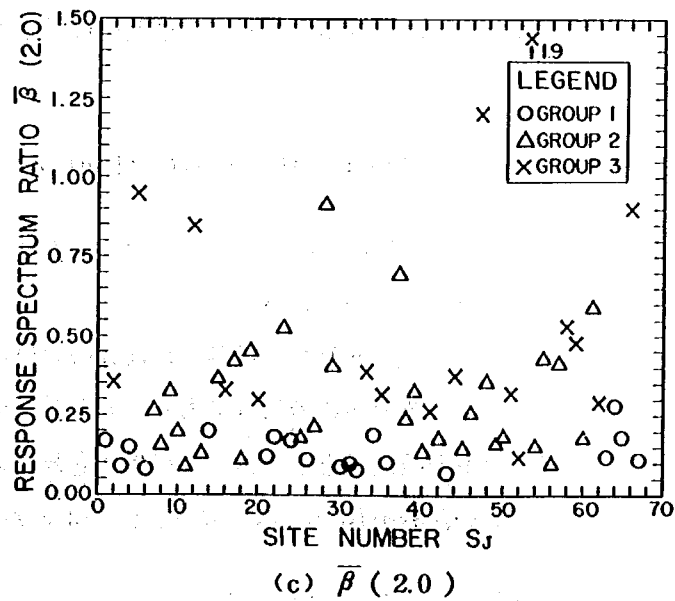
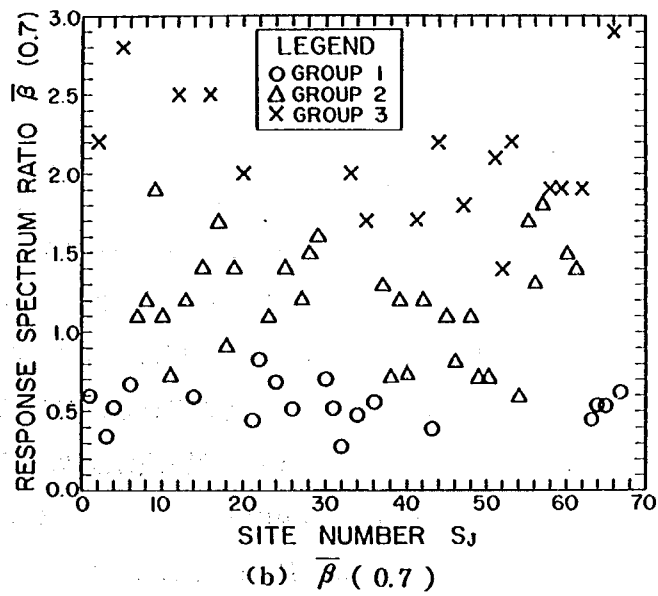
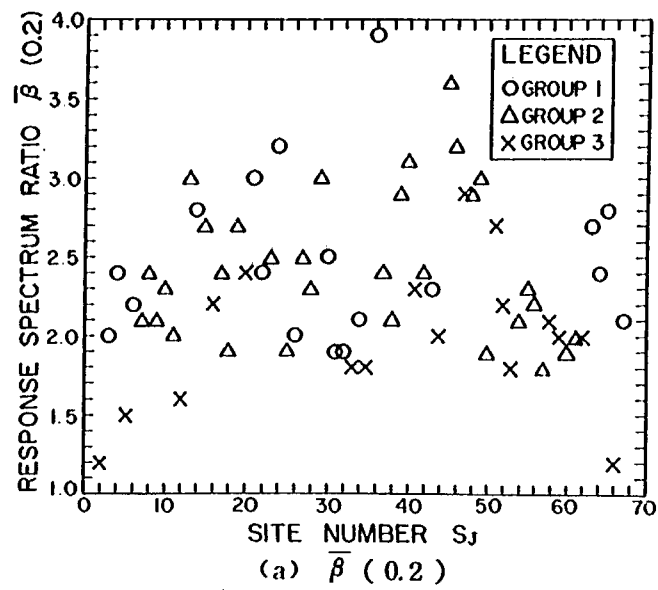


図 2-22 周期 $T = 0.2$ 秒, 0.7 秒, 2 秒に対する $\bar{\beta}$ スペクトル

3. 最大地震動の距離減衰式

3-1. 距離減衰式の形式の検討

最大地震動の距離減衰特性に関しては現在までに各種の検討が行われているが、距離減衰式としては次式を仮定しているものが多い。

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

ここで、

X : 最大地震動

M : マグニチュード

Δ : 距離の指標 (震央距離等)

Δ_0 : Δ が小さい範囲の X を調整する定数

GC_i : 地盤条件 ($i=1, 2, 3$)

$a(GC_i)$, $b(GC_i)$, $c(GC_i)$: 地盤条件ごとに定める係数

ここで、 M は我国では気象庁によるマグニチュードが用いられる場合が多い。また、 Δ としては震央距離、震源距離、断層の中心からの距離、エネルギーの最大放出点からの距離、断層までの最短距離等いろいろな考え方をすることができるが、現状では震央距離を用いる場合が多い。これは震央距離がどの地震に対しても一定の方式で求められているためである。また、地盤条件 GC_i は地盤の地質年代、軟質度、固有周期等に応じて一般に、2~4種類に分類される場合が多い。最大地震動に影響を与えるものとしては、この他にも各種の要因 (たとえば、伝播経路の特性、震源のメカニズム等) があると考えられるが、現状では工学的に統一された資料が得られるのは、上記 M , Δ , GC_i である。したがって、ここではこれらの条件を対象とし、その組み合わせの方法による最大地震動の予測式の精度を検討する。

いま、式 (3-1) の対数をとると、

$$\log X(M, \Delta, GC_i) = \log a(GC_i) + b(GC_i)M + c(GC_i) \log(\Delta + \Delta_0) \quad (3-2)$$

となり、 $\log X$ を M および $\log(\Delta + \Delta_0)$ の線形回帰式で表わすことができる。係数 $a(GC_i)$, $b(GC_i)$, $c(GC_i)$ は式 (3-2) を用いた重回帰分析から定めることができる。

式 (3-2) は、最大地震動 X を、マグニチュード M および震央距離 Δ の簡単な関数として与えたものであり、現在までに提案された距離減衰式は大部分がこの形式である。しかし、マグニチュード M および震央距離 Δ の2つを説明変数とした場合の距離減衰式としては、この他にも種々の形を考えることができる。たとえば、岡本は、鬼怒川発電所壱坑の記録をもとに、次式による最大加速度の予測式を提案している²¹⁾。

$$\log \frac{a_{\max}}{640} = \frac{\Delta + 40}{100} (-7.604 + 1.7244M - 0.1036M^2) \quad (3-3)$$

式 (3-3) では M の2乗の項が考慮されている所に特徴がある。また、Donovan らは、米国西海岸での強震

記録に基づき、次式による最大加速度推定式を提案している。¹³⁾

$$a_{\max} = a \times e^{bM} \times (\Delta + 25)^c \quad (3-4)$$

ここで、 a , b , c はいずれも震央距離の関数として次式で与えている。

$$\begin{aligned} a &= 2154000 \times \Delta^{-2.10} \\ b &= 0.046 \times 0.445 \log \Delta \\ c &= 2.515 - 0.486 \log \Delta \end{aligned} \quad (3-5)$$

式(3-4)の特徴は、係数 a , b , c を定数とせず、震央距離の関数とした点にある。

ここでは、距離減衰式の形が最大地震動の距離減衰特性を近似する上でどのような影響があるかを検討するために、式(3-1)の距離減衰式に震源深さ D_p の項を追加し、地盤種別 GC_i ごとの最大地震動 X を次式で与えることとした。

$$\begin{aligned} \log X(M, \Delta, D_p, GC_i) &= \log a(M, \Delta, D_p, GC_i) + b(M, \Delta, D_p, GC_i) M + c(M, \Delta, D_p, GC_i) \\ &\quad \log(\Delta + \Delta_0) + d(M, \Delta, D_p, GC_i) D_p \end{aligned} \quad (3-6)$$

ここで、係数 $b(M, \Delta, D_p, GC_i)$, $c(M, \Delta, D_p, GC_i)$, $d(M, \Delta, D_p, GC_i)$ は Donovan らの研究をさらに一般化して、それぞれ、 M , $\log(\Delta + \Delta_0)$, D_p の線形一次式で与えることとした。すなわち、

$$\begin{aligned} b(M, \Delta, D_p, GC_i) &= a_1 + a_2 M + a_3 \log(\Delta + \Delta_0) + a_4 D_p \\ c(M, \Delta, D_p, GC_i) &= a_5 + a_6 M + a_7 \log(\Delta + \Delta_0) + a_8 D_p \\ d(M, \Delta, D_p, GC_i) &= a_9 + a_{10} M + a_{11} \log(\Delta + \Delta_0) + a_{12} D_p \end{aligned} \quad (3-7)$$

ここで、 a_j ($j=1 \sim 12$) は地盤種別 GC_i ($i=1, 2, 3$) ごとに定められる係数である。式(3-7)を式(3-6)に代入して整理すると、次式となる。

$$\begin{aligned} \log X(M, \Delta, D_p, GC_i) &= f_1 + f_2 M + f_3 \log(\Delta + \Delta_0) + f_4 D_p + f_5 M \log(\Delta + \Delta_0) \\ &\quad + f_6 M D_p + f_7 D_p \log(\Delta + \Delta_0) + f_8 M^2 + f_9 \{\log(\Delta + \Delta_0)\}^2 + f_{10} D_p^2 \end{aligned} \quad (3-8)$$

ここで、

$$\begin{aligned} f_1 &= \log a, & f_2 &= a_1, & f_3 &= a_5 \\ f_4 &= a_9, & f_5 &= a_3 + a_6, & f_6 &= a_4 + a_{10} \\ f_7 &= a_8 + a_{11}, & f_8 &= a_2, & f_9 &= a_7 \\ f_{10} &= a_{12} \end{aligned} \quad (3-9)$$

f_j ($j=1 \sim 10$) は地盤種別 GC_i ごとに与えられる係数である。式(3-8)を式(3-2)と比較すると、 D_p , $M \log(\Delta + \Delta_0)$, $M D_p$, $D_p \log(\Delta + \Delta_0)$, M^2 , $\{\log(\Delta + \Delta_0)\}^2$, D_p^2 の7項が新たに加わり、定数項 f_1 を別にして全部で9項で $\log X(M, \Delta, D_p, GC_i)$ を表わしていることになる。ただし、基本的な説明変数はあく

までも、 M 、 Δ 、 D_p の3つであることに注意しなければならない。

そこで、式(3-8)の距離減衰式の中から定数項 f_1 の他に j 個($j=1, 2, \dots, 9$)の項を取り出し、重回帰分析により、重相関係数 R が最大となる項の組み合わせを総当り法により各地盤条件 GC_i ごとに求めた。たとえば、 $j=2$ の場合には、各地盤種別ごとに ${}^9C_2 = \frac{9!}{2!(9-2)!} = 36$ 個の組み合わせがあるが、これらに対する重回帰分析をことごとく行い、この中で重相関係数 R が最大となる項の組み合わせを求め、これを $j=2$ に対する結果とする訳である。

解析対象としたのは前章に示した197組の水平成分の最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$ 、最大速度 $\tilde{v}_{\max}$ 、最大変位 $\tilde{d}_{\max}$ である。 Δ_0 は土研資料1864号に従い30kmとした。

考慮する項の数 j ごとに、最も重相関係数が大きくなる項の組み合わせを求めると図3-1に示す通りとなる。これより、考慮する項数 j と重相関係数 R の関係に関しては、以下の事項が指摘される。

1) $\tilde{a}_{\max}$ 、 $\tilde{v}_{\max}$ 、 $\tilde{d}_{\max}$ のいずれの場合にも、考慮する項の数 j の増加に伴う重相関係数 R の増加の様子は全体として地盤種別によらずおおむね同じ傾向を示している。

2) 考慮する項の数 j を1~9に変化させた場合には、当然 $j=9$ の場合に R は最大となる。ただし、 $j \geq 2$ では j の増加によって R はほとんど変化しない。このことは現在一般に用いられている $j=2$ の場合の推定式にこれ以上 M 、 Δ 、 D_p の組み合わせから構成される項を加えても重相関係数 R は著しく大きくならないことを示している。

3) 考慮する項数 j を同じとした場合に推定式に選択される項の組み合わせは、 $\tilde{a}_{\max}$ 、 $\tilde{v}_{\max}$ 、 $\tilde{d}_{\max}$ ごとに同一ではない。また、地盤種別によってもかわっている。しかしながら、 $j=2$ の場合については、 $\tilde{a}_{\max}$ の3種地盤、 $\tilde{v}_{\max}$ の1種地盤および $\tilde{d}_{\max}$ の1種地盤を除けば、他のケースではすべて M および $\log(\Delta+30)$ の線形の組み合わせの場合に重相関係数 R は最大となる。ただし、 M および $\log(\Delta+30)$ の線形の組み合わせに対する $\tilde{a}_{\max}$ の3種地盤、 $\tilde{v}_{\max}$ の1種地盤および $\tilde{d}_{\max}$ の1種地盤の場合の重相関係数はそれぞれ、0.641、0.753、0.775であり、これらは図3-1に示した対応する組み合わせの重相関係数の最大値0.680、0.757、0.789とほとんど変わらない。

4) 震源深さ D_p の項を導入しても、重相関係数がほとんど変わらないのは、解析対象とした地震記録がもとと震源深さ D_p が60km未満の地震により得られたものであり、 D_p が限定されていることも一つの原因と考えられる。

以上は、重相関係数 R だけに着目した検討結果であるが、式(3-6)の距離減衰式の計算例として、 $j=2, 3$ および9の場合の結果を以下に示す。ここで、 $j=2$ は、式(3-1)に相当し、現在一般に使用されている距離減衰式を表わしている。また、 $j=3$ は式(3-1)にさらにもう1項加えた場合の距離減衰式を、また、 $j=9$ は式(3-8)の全ての項を考慮した場合の距離減衰式をそれぞれ表わしている。考慮する項数 $j=2, 3$ および9の距離減衰式としては、図3-1の検討結果に基づき次式を選んだ。

$j=2$ の場合

$$\log X(M, \Delta, GC_i) = f_1 + f_2 M + f_3 \log(\Delta + 30) \quad (3-10)$$

$j=3$ の場合

$$\log X(M, \Delta, GC_i) = f_1 + f_2 M + f_3 \log(\Delta + 30) + f_5 M \log(\Delta + 30) \quad (3-11)$$

$j=9$ の場合

$$\begin{aligned} \log X(M, \Delta, D_P, GC_i) = & f_1 + f_2 M + f_3 \log(\Delta + 30) + f_4 D_P + f_5 M \log(\Delta + 30) \\ & + f_6 M D_P + f_7 D_P \log(\Delta + 30) + f_8 M^2 + f_9 \{\log(\Delta + 30)\}^2 + f_{10} D_P^2 \end{aligned} \quad (3-12)$$

ここで、式(3-10)～式(3-12)の係数は、地盤種別 GC_i に応じて表3-1に示す通りである。

表3-1 最大地震動の距離減衰式の項数 $j=2, 3, 9$ の場合の係数

回帰式 の項数 j	地震動	地盤 種別	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}
2	$\tilde{a}_{\max}$	1種	3.031	0.221	-1.251							
		2種	2.357	0.308	-1.201							
		3種	2.605	0.262	-1.208							
	$\tilde{v}_{\max}$	1種	1.378	0.271	-1.275							
		2種	0.426	0.421	-1.183							
		3種	0.711	0.415	-1.257							
	$\tilde{d}_{\max}$	1種	-0.052	0.393	-1.390							
		2種	-1.252	0.549	-1.179							
		3種	-1.155	0.575	-1.224							
3	$\tilde{a}_{\max}$	1種	8.489	-0.662	-3.962		0.435					
		2種	2.026	0.361	-1.042		-0.025					
		3種	9.884	-0.851	-4.776		0.540					
	$\tilde{v}_{\max}$	1種	7.789	-0.766	-4.459		0.511					
		2種	0.984	0.333	-1.451		0.042					
		3種	8.409	-0.763	-5.031		0.571					
	$\tilde{d}_{\max}$	1種	9.247	-1.111	-6.009		0.742					
		2種	-0.556	0.439	-1.514		0.052					
		3種	3.902	-0.198	-3.703		0.375					
9	$\tilde{a}_{\max}$	1種	9.429	-1.388	-2.446	-0.017	0.493	1.1×10^{-3}	7.9×10^{-3}	0.048	-0.525	-7.3×10^{-5}
		2種	4.010	-0.454	-0.203	-0.019	-0.722	3.3×10^{-3}	2.9×10^{-3}	0.172	0.814	-7.7×10^{-5}
		3種	12.258	-2.521	-1.617	-0.021	2.127	7.6×10^{-3}	-0.014	-0.141	-3.137	2.6×10^{-4}
	$\tilde{v}_{\max}$	1種	8.179	-1.634	-1.947	-0.023	0.683	3.4×10^{-3}	3.6×10^{-3}	0.037	-0.908	-5.7×10^{-5}
		2種	2.545	-0.611	-0.084	-6.4×10^{-3}	-0.679	4.5×10^{-3}	-7.3×10^{-3}	0.183	0.819	-6.0×10^{-5}
		3種	10.408	-1.735	-3.927	2.9×10^{-3}	1.448	9.1×10^{-3}	-0.030	-0.085	-1.424	-1.6×10^{-5}
	$\tilde{d}_{\max}$	1種	9.164	-1.496	-4.655	-0.013	0.807	3.1×10^{-3}	-2.1×10^{-3}	0.016	-0.428	6.3×10^{-6}
		2種	0.246	-0.176	-0.441	-4.5×10^{-3}	-0.516	7.0×10^{-3}	-0.017	0.124	0.754	-2.8×10^{-5}
		3種	4.940	-0.242	-4.787	0.020	-0.276	9.4×10^{-3}	-0.039	0.089	1.527	-4.4×10^{-5}

これより、 $j=2, 3, 9$ に対する距離減衰を $M=5, 6, 7, 8$ に対して試算すると、それぞれ、図3-2, 3-3, 3-4に示す通りとなる。これより、 $j=9$ の場合には、震央距離の増加に伴ない、最大地震動 X が一度大きくなった後、再び小さくなる等複雑に変化し、地震動の距離減衰に関する従来の経験的事実とは明らかに一致しない場合がある。これは、恐らくばらつきも大きく、また、観測記録数が必ずしも十分ではないデータをより忠実に説明しようとした結果、かえって、本来の地震動の距離減衰特性を見失っていることを示している。また、 $j=3$ の場合についても同様であり、1種地盤および3種地盤については $M=8$ の場合に最大地震動の距離減衰率が非常に小さくなり、既往の経験的事実とは一致しない。これに

対して、 $j=2$ の場合には、いずれの条件下でも予測される距離減衰は、マグニチュード、震央距離および地盤種別の変化に伴ない相互に比較的調和がとれた変化を示し、おおむね妥当なものと考えることができる。なお、ここでは $j=3$ および9の場合に対する試算結果のみを示したが、 $j \geq 3$ の場合には、いずれの場合にもここに示したと同様な傾向を示す。

以上をまとめると以下ようになる。すなわち、最大地震動の距離減衰特性を推定するために現状において工学的に利用可能な情報は地震の規模（マグニチュード M ）および、距離の指標（震央距離 d 、震源深さ D_p ）の3者と考えられる。これらを説明変数として用いた最大地震動の距離減衰式では、式(3-2)のように地盤種別ごとの最大地震動 X の常用対数、すなわち $\log X$ を M および $\log(d+30)$ の線形回帰式で近似した場合の重相関係数は、これにそれぞれ M 、 D_p 、 $\log(d+30)$ の2乗までの項およびこれら3者間の相互の積の項を加えた回帰式を用いた場合とほとんど変わらない。しかしながら、これらによる距離減衰を実際に計算すると、 M および $\log(d+30)$ の項に他の項を加えた距離減衰式は地震ごとの地震動特性の変化や記録数が必ずしも十分ではないことを敏感に反映する結果、かえって地震動の距離減衰に対する既往の経験的事実と反する結果を与える。したがって、今回の検討結果の範囲では、式(3-2)のように $\log X$ を M および $\log(d+30)$ の線形回帰式で近似した場合が最も妥当な距離減衰を与えるといえることができる。

なお、マグニチュード M 、震央距離 d 、震源深さ D_p の3者を説明変数として地盤種別 GC_i ごとに求めた最大地震動の距離減衰特性の予測式が実測値を予測する上でなお大きなばらつきを有している理由としては、以下の点が考えられる。

1) マグニチュード M （気象庁マグニチュード）はもともと周期5秒程度の地震動変位の最大値から各気象台ごとに坪井公式により求められた値を平均して求められたものである。平均の過程に伴うばらつきを別にすると、 M は周期5秒という非常に長周期地震動の変位の関数として与えられたものであり、工学的に必要とされる短周期成分（一般に周期1～2秒以下）の地震動を推定するための変数として用いるにはもともと限界があると考えられる。

2) 距離の指標として震央距離 d を用いている。これは、我国では震央が気象庁により統一的に求められており、どの地震に対しても一律に震央距離を計算できることによっている。しかしながら、震央は断層上で最初に破壊が生じた点（震源）を地表面に投影した点であり、工学的に必要とされる短周期（一般に周期1～2秒以下）地震動を生ぜしめた地震エネルギーの放出された領域（複数個の場合もある）とは必ずしも一致していないと考えられる⁴⁸⁾。また、このような傾向は、大規模地震ほど著しい可能性があることを考えると、距離の指標として震央距離を用いること自身に基本的な限界があると考えられる。

3) 地震動の特性に影響を与える要因としては、地震の規模および震源以外にも各種のものが考えられる。これらは、いずれも現状では解明されていないものばかりであり、当面、地震動の距離減衰式に反映することはできないが、主要なものについて示すと、以下ようになる。

a) 伝播経路の特性 — 震源域から観測点までの伝播経路の特性は地域ごとに同一ではない。

b) 震源の機構 — 地震にはプレート境界の反発で生じる海洋性の地震と陸地のプレート内のひずみエネルギーの放出に伴なって内陸で生じる地震がある。また、断層の形式も逆断層、正断層、

横ずれ断層等各種のものがある。したがって、こうした地震の特性により、たとえ同一のマグニチュードを与える地震（＝震央距離100kmにおける周期5秒の地震動の最大変位が同一であることを保証するのみ）であっても、短周期地震動に対する影響度は異なると考えられる。

- c) 深層の地盤条件 — 今回の解析で用いている地盤種別は、地表面下せいぜい50m程度の表層の地盤条件に基づくものである。したがって、基礎岩盤から地表面下50m程度に至るまでの増幅特性、さらには基礎岩盤自身の中での増幅等、深層の地盤条件の影響が大きいと考えられる。
- d) 地形条件の影響 — 観測点の中には、斜面等地形条件の変化部も含まれている。地震動は地盤条件だけでなく、地形条件の影響も受けると考えられるが、現状では、これに対する十分な実測資料が蓄積されていない。

以上のように、最大地震動の距離減衰式に考慮すべき説明変数の種類とその特性に関してはまだ多くの不確定さが含まれており、これらは主として地震学および地震工学の面における今後の研究を待たなければならない。こうした点から現状では、地震の規模および距離の指標をそれぞれマグニチュードおよび震央距離で代表し、距離減衰式を式(3-2)のように与えた予測式が工学的には最も実用的であると考えられる。地震の規模および距離の指標以外の各種の要因が地震動の特性に寄与する影響が考慮されていないため、式(3-2)の予測精度は必ずしも十分ではないが、これに対しては後述するように予測式まわりの実測値のばらつきの度合いを考慮し、これに対して工学的な配慮を加えることで対処していくことが現実的と考えられる。

3-2. 距離減衰式の地盤種別依存性の検討

前節の検討では地盤種別ごとに距離減衰式の検討を行ったが、これは式(3-1)において、係数 $a(GC_i)$, $b(GC_i)$, $c(GC_i)$ は地盤種別ごとに独立であると仮定したことに他ならない。これらの係数は本来地盤種別によって変化する可能性があるが、現在用いている地盤種別は連続関数ではなく、表層地盤の固有周期に応じて便宜的に3種類に分類しただけのものであるため、式(3-1)に地盤種別 GC_i ($i=1, 2, 3$)を連続変数として取り入れることはできない。そこで、ここでは係数 a , b , c の地盤種別依存性を調べることとし、地盤種別 GC_i ごとに係数 a , b , c が違おうとし、これらをそれぞれ独立に定めた場合と、地盤種別 GC_i によらず係数 a , b , c は一定であると仮定し、全地盤種別に対して係数 a , b , c が一定となるように定めた場合のいずれが、より近似度の高い最大地震動の距離減衰式となるかを検討することとした。

すなわち、前節の検討結果に基づき、 M および Δ の2変数を選び、式(3-2)の距離減衰式を用いることとすれば、地盤種別 GC_i ($i=1, 2, 3$)に応じて最大地震動 $X(M, \Delta, GC_i)$ を与えるためには以下の8種類の推定式が考えられる。

$$X(M, \Delta, GC_i) = \begin{cases} a \times 10^{bM} \times (\Delta + \Delta_0)^c & \text{(ケース1)} \\ a \times 10^{bM} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(GC_i)} & \text{(ケース2)} \\ a \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^c & \text{(ケース3)} \\ a(GC_i) \times 10^{bM} \times (\Delta + \Delta_0)^c & \text{(ケース4)} \\ a \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(GC_i)} & \text{(ケース5)} \end{cases} \quad (3-13)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(GC_i)} & (\text{ケース6}) \\ a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^c & (\text{ケース7}) \\ a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(GC_i)} & (\text{ケース8}) \end{array} \right.$$

ここで、 $a(GC_i)$ 、 $b(GC_i)$ 、 $c(GC_i)$ は係数 a 、 b 、 c がそれぞれ地盤種別 GC_i ($i=1, 2, 3$)ごとに变化することを、また、 a 、 b 、 c は係数が地盤種別 GC_i ごとに变化せず一定値をとることを表わしている。式(3-13)でケース1は、係数 a 、 b 、 c が全て地盤種別によらないとしているため、最大地震動 X を地盤種別ごとには与えられないが、参考のために解析したものである。一方、ケース8は係数 a 、 b 、 c が全て地盤種別によったもので、1種～3種のそれぞれの地盤種別ごとに独立に解析した場合と結果的には同一の係数が得られることとなる。

ここで、係数を地盤種別によらず一定として解析するためには、ダミー変数を用いる。たとえば、式(3-13)のケース7の場合を例にとると、次のような回帰式を仮定する。

$$\log X(M, \Delta, GC_i) = \log a(GC_i) + a_2 \log a(GC_2) + a_3 \log a(GC_3) + \{b(GC_i) + a_2 b(GC_2) + a_3 b(GC_3)\} M + c \log(\Delta + \Delta_0) \quad (3-14)$$

ここで、

$X(M, \Delta, GC_i)$: 地盤種別 GC_i ($i=1, 2, 3$)に属するマグニチュード M 、震央距離 Δ の最大地震動

$$a_2 = \begin{cases} 0 & \dots\dots\dots GC_i = 1, 3 \text{ の場合} \\ 1 & \dots\dots\dots GC_i = 2 \text{ の場合} \end{cases}$$

$$a_3 = \begin{cases} 0 & \dots\dots\dots GC_i = 1, 2 \text{ の場合} \\ 1 & \dots\dots\dots GC_i = 3 \text{ の場合} \end{cases}$$

$a(GC_1)$ 、 $a(GC_2)$ 、 $a(GC_3)$ 、 $b(GC_1)$ 、 $b(GC_2)$ 、 $b(GC_3)$ 、 c : 重回帰分析により定める係数

式(3-14)は c の項が地盤種別 GC_i ごとに变化していないが、これは式(3-14)を次の形に書き改めるとよくわかる。

$$\begin{aligned} \log X(M, \Delta, GC_1) &= \log a(GC_1) + b(GC_1)M + c \log(\Delta + \Delta_0) \\ \log X(M, \Delta, GC_2) &= \{ \log a(GC_1) + \log a(GC_2) \} \\ &\quad + \{ b(GC_1) + b(GC_2) \} M + c \log(\Delta + \Delta_0) \\ \log X(M, \Delta, GC_3) &= \{ \log a(GC_1) + \log a(GC_3) \} \\ &\quad + \{ b(GC_1) + b(GC_3) \} M + c \log(\Delta + \Delta_0) \end{aligned} \quad (3-15)$$

このようにして、前章に示した197組の水平成分の最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$ 、最大速度 $\tilde{v}_{\max}$ 、および最大変位 $\tilde{d}_{\max}$ を用いてケース1～ケース8の係数を定めると表3-2のようになる。また、ケース1～ケース8に対する重相関係数 R および自由度調整済み重相関係数 R^* を図示すると図3-5のようになる。これより、以下の項が指摘される。

表 3-2 式(3-13)の係数 a, b, c (a) 最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$

ケース	種 別	地盤種別	係数 a	係数 b	係数 c	重相関数 R	標準偏差 σ
1	a, b, c	1 種	365.3	0.268	-1.182	0.693	0.220
		2 種					
		3 種					
2	$a, b, c(GC_i)$	1 種	358.6	0.275	-1.182	0.699	0.219
		2 種			-1.196		
		3 種			-1.223		
3	$a, b(GC_i), c$	1 種	361.1	0.278	-1.194	0.699	0.220
		2 種		0.274			
		3 種		0.265			
4	$a(GC_i), b, c$	1 種	389.2	0.274	-1.196	0.700	0.219
		2 種	361.0				
		3 種	319.3				
5	$a, b(GC_i), c(GC_i)$	1 種	356.7	0.254	-1.118	0.700	0.220
		2 種		0.292	-1.246		
		3 種		0.270	-1.206		
6	$a(GC_i), b, c(GC_i)$	1 種	764.4	0.272	-1.332	0.703	0.220
		2 種	265.8		-1.122		
		3 種	389.8		-1.229		
7	$a(GC_i), b(GC_i), c$	1 種	987.4	0.216	-1.218	0.706	0.218
		2 種	232.5	0.313			
		3 種	403.8	0.265			
8	$a(GC_i), b(GC_i), c(GC_i)$	1 種	1073.0	0.221	-1.251	0.706	0.220
		2 種	227.3	0.308	-1.201		
		3 種	403.1	0.262	-1.208		

(b) 最大速度 $\tilde{v}_{\max}$

ケース	種 別	地盤種別	係数 a	係数 b	係数 c	重相関数 R	標準偏差 σ
1	a, b, c	1 種	4.516	0.385	-1.192	0.661	0.260
		2 種					
		3 種					
2	$a, b, c(GC_i)$	1 種	5.069	0.369	-1.239	0.710	0.245
		2 種			-1.159		
		3 種			-1.112		
3	$a, b(GC_i), c$	1 種	5.005	0.351	-1.185	0.712	0.244
		2 種		0.378			
		3 種		0.393			
4	$a(GC_i), b, c$	1 種	3.610	0.371	-1.170	0.708	0.246
		2 種	5.162				
		3 種	6.468				
5	$a, b(GC_i), c(GC_i)$	1 種	4.890	0.319	-1.083	0.713	0.245
		2 種		0.399	-1.244		
		3 種		0.418	-1.257		
6	$a(GC_i), b, c(GC_i)$	1 種	12.80	0.364	-1.422	0.715	0.245
		2 種	3.390		-1.062		
		3 種	6.193		-1.140		
7	$a(GC_i), b(GC_i), c$	1 種	20.82	0.263	-1.222	0.723	0.242
		2 種	2.805	0.430			
		3 種	5.105	0.404			
8	$a(GC_i), b(GC_i), c(GC_i)$	1 種	23.86	0.271	-1.275	0.723	0.243
		2 種	2.666	0.421	-1.183		
		3 種	5.136	0.415	-1.257		

(c) 最大変位 $\tilde{d}_{\max}$

ケース	種 別	地盤種別	係数 a	係数 b	係数 c	重相関数 R	標準偏差 λ
1	a, b, c	1 種	0.096	0.525	-1.225	0.695	0.294
		2 種					
		3 種					
2	$a, b, c(GC_i)$	1 種	0.111	0.500	-1.271	0.760	0.267
		2 種			-1.173		
		3 種			-1.089		
3	$a, b(GC_i), c$	1 種	0.108	0.478	-1.201	0.761	0.266
		2 種		0.511			
		3 種		0.538			
4	$a(GC_i), b, c$	1 種	0.071	0.503	-1.183	0.756	0.268
		2 種	0.110				
		3 種	0.163				
5	$a, b(GC_i), c(GC_i)$	1 種	0.107	0.456	-1.133	0.762	0.267
		2 種		0.526	-1.244		
		3 種		0.549	-1.233		
6	$a(GC_i), b, c(GC_i)$	1 種	0.454	0.492	-1.548	0.766	0.265
		2 種	0.071		-1.059		
		3 種	0.095		-1.034		
7	$a(GC_i), b(GC_i), c$	1 種	0.626	0.372	-1.254	0.771	0.262
		2 種	0.062	0.567			
		3 種	0.070	0.584			
8	$a(GC_i), b(GC_i), c(GC_i)$	1 種	0.886	0.393	-1.390	0.773	0.263
		2 種	0.056	0.549	-1.179		
		3 種	0.070	0.575	-1.224		

1) 係数 a, b, c をすべて地盤種別ごとに一定としたケース1では、重相関係数 R は他のケースに比較して著しく小さい。しかしながら、この他のケース、すなわち、ケース2～ケース8の間では、説明変数の数が一番多いケース8の場合が当然重相関係数 R が一番大きく、ケース2～ケース6はおおむね同程度の重相関係数 R を与えている。また、ケース7およびケース8はこれらよりもやや大きな重相関係数 R を与える。

2) 自由度調整済み重相関係数 R^* でケース1～ケース8を比較しても上記1)と同様の傾向が認められる。しかしながら、わずかではあるが、 $\tilde{a}_{\max}, \tilde{v}_{\max}, \tilde{d}_{\max}$ のいずれに対してもケース7の場合に R^* は最大となり、この場合に最大地震動の距離減衰特性に対する近似度が最もよいことを示している。

3-3. $\tilde{a}_{\max}, \tilde{v}_{\max}, \tilde{d}_{\max}$ の距離減衰式の提案

前節までの検討結果を総合すると、最大地震動の距離減衰式としては M および Δ の2つを説明変数とした式(3-13)の線形回帰式を用いたケース7およびケース8の両者が他のケースに比較して相対的に高い精度を有していると考えられる。したがって、ここでは両ケースにつき、その特徴および差異を検討することとする。なお、3-2に示したようにケース8は、係数 a, b, c をともに地盤種別 GC_i ($i=1, 2, 3$) ごとに定めた場合であり、また、ケース7は係数 a, b は地盤種別 GC_i ごとに、また係数 c は地盤種別とは独立にそれぞれ定めた場合の距離減衰式である。ここで、それぞれのケースの距離減衰式を再記すると次のようになる。

ケース 7

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{\max} &= \left\{ \begin{array}{l} 987.4 \times 10^{0.216M} \\ 232.5 \times 10^{0.313M} \\ 403.8 \times 10^{0.265M} \end{array} \right\} \times (\Delta + 30)^{-1.218} & \begin{array}{l} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{array} & (3-16) \\ \tilde{v}_{\max} &= \left\{ \begin{array}{l} 20.82 \times 10^{0.263M} \\ 2.805 \times 10^{0.430M} \\ 5.105 \times 10^{0.404M} \end{array} \right\} \times (\Delta + 30)^{-1.222} & \begin{array}{l} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{array} & (3-17) \\ \tilde{d}_{\max} &= \left\{ \begin{array}{l} 0.626 \times 10^{0.372M} \\ 0.062 \times 10^{0.567M} \\ 0.070 \times 10^{0.584M} \end{array} \right\} \times (\Delta + 30)^{-1.254} & \begin{array}{l} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{array} & (3-18) \end{aligned}$$

ケース 8

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{\max} &= \left\{ \begin{array}{l} 1,073 \times 10^{0.221M} \times (\Delta + 30)^{-1.251} \\ 227.3 \times 10^{0.308M} \times (\Delta + 30)^{-1.201} \\ 403.1 \times 10^{0.262M} \times (\Delta + 30)^{-1.208} \end{array} \right\} & \begin{array}{l} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{array} & (3-19) \\ \tilde{v}_{\max} &= \left\{ \begin{array}{l} 23.86 \times 10^{0.271M} \times (\Delta + 30)^{-1.275} \\ 2.666 \times 10^{0.421M} \times (\Delta + 30)^{-1.183} \\ 5.136 \times 10^{0.415M} \times (\Delta + 30)^{-1.257} \end{array} \right\} & \begin{array}{l} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{array} & (3-20) \\ \tilde{d}_{\max} &= \left\{ \begin{array}{l} 0.886 \times 10^{0.393M} \times (\Delta + 30)^{-1.390} \\ 0.056 \times 10^{0.549M} \times (\Delta + 30)^{-1.179} \\ 0.070 \times 10^{0.575M} \times (\Delta + 30)^{-1.224} \end{array} \right\} & \begin{array}{l} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{array} & (3-21) \end{aligned}$$

また、 $\tilde{a}_{\max}$ 、 $\tilde{v}_{\max}$ 、 $\tilde{d}_{\max}$ に対する係数 a 、 b 、 c をケース 7 および ケース 8 に対して示すとそれぞれ図 3-6 および 3-7 のようになる。これより、距離減衰式の係数 a 、 b 、 c に関して以下の事項が指摘される。

(1) 係数 $a(GC_i)$ はいずれの地盤種別の場合にも、 $\tilde{a}_{\max}$ 、 $\tilde{v}_{\max}$ 、 $\tilde{d}_{\max}$ の順で小さくなる。また、 $\tilde{a}_{\max}$ 、 $\tilde{v}_{\max}$ 、 $\tilde{d}_{\max}$ いずれの場合にも、 $a(GC_i)$ は 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。このような傾向はケース 7、ケース 8 とともにほとんど同じである。

(2) 係数 $b(GC_i)$ はいずれの地盤種別の場合にも $\tilde{a}_{\max}$ 、 $\tilde{v}_{\max}$ 、 $\tilde{d}_{\max}$ 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、 $\tilde{a}_{\max}$ 、 $\tilde{v}_{\max}$ 、 $\tilde{d}_{\max}$ いずれの場合にも 1 種地盤の係数 b は 2 種地盤および 3 種地盤の係数 b よりも全体として小さい。このような傾向はケース 7、ケース 8 とともにほとんど同じである。係数 b は、 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、 $\tilde{a}_{\max}$ の場合には地盤種別で異なるが、2.1~3.1 程度であるのに対し、 $\tilde{d}_{\max}$ の場合は 3.7~5.8 程度となっており、明らかに $\tilde{a}_{\max} \rightarrow \tilde{v}_{\max} \rightarrow \tilde{d}_{\max}$ 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 はケース 8 の場合には $\tilde{a}_{\max}$ 、 $\tilde{v}_{\max}$ 、 $\tilde{d}_{\max}$ いずれの場合にもおおむね -1.2~-1.4 の範囲にあり、地盤種別による差は大きくない。一方、ケース 7 では、係数 c は地盤種別ごとに同一の値となるように解析しているため、同じである。また、 $\tilde{a}_{\max}$ 、 $\tilde{v}_{\max}$ 、 $\tilde{d}_{\max}$ いずれの場合にも c はほとんど同じであり、

-1.2程度となる。

以上のように、ケース7およびケース8の係数 a, b, c を比較すると両者の間には著しい違いは認められない。そこで、式(3-16)～式(3-21)に従い両者の距離減衰を $M=6$ および8の2ケースについて比較した結果が図3-8である。これによるとケース7およびケース8の距離減衰の違いはごくわずかであり、実用上はほとんど差が無いといってもよい。したがって、基本的にはいずれのケースを使用してもよいと考えられるが、ここではケース7の方がケース8よりも係数 c の項がより簡単になっていることを考慮し、一応ケース7を採用することとする。なお、ケース8の距離減衰式の特性は土研資料第1864号に詳しい。

式(3-19)～式(3-21)による $\tilde{a}_{\max}, \tilde{v}_{\max}, \tilde{d}_{\max}$ を予測式のもととなった実測値(ただし、最大速度および最大変位は加速度記録から計算した値)とともに示すと、それぞれ図3-9, 3-10, 3-11となる。また、 $\tilde{a}_{\max}, \tilde{v}_{\max}, \tilde{d}_{\max}$ の予測式をマグニチュード $M=6$ および8に対して示すと図3-12のようになる。これによれば、 $\tilde{v}_{\max}$ および $\tilde{d}_{\max}$ はともに地盤種別が1種, 2種, 3種と軟質になるに従って同一マグニチュードおよび震央距離 Δ に対する予測値は大きくなるが、 $\tilde{a}_{\max}$ は2種地盤の場合が1種および3種地盤の場合よりもやや大きいものの、全体として地盤種別により大きな変化を示さないことがわかる。

次に、式(3-19)～式(3-21)による最大地震動の期待値のばらつきを示すために、実測値と、これが得られた地震の M および Δ から式(3-19)～式(3-21)により求めた期待値の比を次式により定義した。

$$\begin{aligned} U_a &= \tilde{a}_{\max}^{OB} / \tilde{a}_{\max}^P \\ U_v &= \tilde{v}_{\max}^{OB} / \tilde{v}_{\max}^P \\ U_d &= \tilde{d}_{\max}^{OB} / \tilde{d}_{\max}^P \end{aligned} \quad (3-22)$$

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

$\tilde{a}_{\max}^{OB}, \tilde{v}_{\max}^{OB}, \tilde{d}_{\max}^{OB}$: 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)

$\tilde{a}_{\max}^P, \tilde{v}_{\max}^P, \tilde{d}_{\max}^P$: 式(3-19)～式(3-21)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 $\tilde{a}_{\max}^{OB}, \tilde{v}_{\max}^{OB}, \tilde{d}_{\max}^{OB}$ は式(3-22)から次式で与えられることになる。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{a}_{\max}^{OB} &= U_a \times \tilde{a}_{\max}^P = U_a \\ \tilde{v}_{\max}^{OB} &= U_v \times \tilde{v}_{\max}^P = U_v \\ \tilde{d}_{\max}^{OB} &= U_d \times \tilde{d}_{\max}^P = U_d \end{aligned} \right\} \times \{ a \times 10^{6M} \times (\Delta + 30)^c \} \quad (3-23)$$

式(3-22)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3-13, 3-14, 3-15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3-16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

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		
	$\tilde{a}_{\max}$	$\tilde{v}_{\max}$	$\tilde{d}_{\max}$	$\tilde{a}_{\max}$	$\tilde{v}_{\max}$	$\tilde{d}_{\max}$	$\tilde{a}_{\max}$	$\tilde{v}_{\max}$	$\tilde{d}_{\max}$
$-1.0 \leq \log U < -0.9$	0 (0.0006)	0 (0.003)	0 (0.010)	0 (0.003)	0 (0.007)	0 (0.02)	0 (0.00009)	0 (0.004)	0 (0.01)
$-0.9 \leq \log U < -0.8$	0 (0.004)	0 (0.02)	0 (0.04)	0 (0.02)	0 (0.04)	0 (0.08)	0 (0.0009)	0 (0.02)	0 (0.04)
$-0.8 \leq \log U < -0.7$	0 (0.02)	0 (0.05)	0 (0.12)	0 (0.07)	0 (0.14)	0 (0.24)	0 (0.007)	0 (0.07)	0 (0.12)
$-0.7 \leq \log U < -0.6$	0 (0.10)	0 (0.18)	0 (0.33)	0 (0.28)	1 (0.45)	2 (0.69)	0 (0.04)	0 (0.21)	0 (0.31)
$-0.6 \leq \log U < -0.5$	0 (0.33)	0 (0.52)	0 (0.78)	1 (0.93)	3 (1.27)	2 (1.70)	0 (0.19)	0 (0.56)	0 (0.75)
$-0.5 \leq \log U < -0.4$	0 (0.97)	1 (1.27)	1 (1.61)	5 (2.53)	3 (3.05)	2 (3.61)	0 (0.66)	2 (1.31)	2 (1.54)
$-0.4 \leq \log U < -0.3$	5 (2.28)	1 (2.60)	3 (2.88)	5 (5.62)	5 (6.12)	6 (6.59)	2 (1.85)	4 (2.57)	5 (2.75)
$-0.3 \leq \log U < -0.2$	7 (4.35)	8 (4.44)	8 (4.45)	7 (10.3)	9 (10.4)	11 (10.4)	7 (3.99)	6 (4.26)	4 (4.25)
$-0.2 \leq \log U < -0.1$	5 (6.69)	9 (6.36)	8 (5.95)	13 (15.3)	13 (14.7)	10 (14.0)	4 (6.67)	4 (5.97)	7 (5.69)
$-0.1 \leq \log U < 0$	9 (8.29)	8 (7.61)	5 (6.88)	24 (18.7)	19 (17.5)	17 (16.3)	8 (8.63)	4 (7.07)	3 (6.58)
$0 \leq \log U < 0.1$	8 (8.29)	4 (7.61)	6 (6.88)	15 (18.7)	16 (17.5)	21 (16.3)	12 (8.63)	7 (7.07)	6 (6.58)
$0.1 \leq \log U < 0.2$	7 (6.69)	4 (6.36)	4 (5.95)	15 (15.3)	19 (14.7)	14 (14.0)	4 (6.67)	8 (5.97)	6 (5.69)
$0.2 \leq \log U < 0.3$	2 (4.35)	6 (4.44)	5 (4.45)	12 (10.3)	10 (10.4)	14 (10.4)	4 (3.99)	4 (4.26)	5 (4.25)
$0.3 \leq \log U < 0.4$	1 (2.28)	2 (2.60)	3 (2.88)	8 (5.62)	5 (6.12)	3 (6.59)	2 (1.85)	3 (2.57)	4 (2.75)
$0.4 \leq \log U < 0.5$	1 (0.97)	1 (1.27)	0 (1.61)	2 (2.53)	2 (3.05)	2 (3.61)	1 (0.66)	2 (1.31)	1 (1.54)
$0.5 \leq \log U < 0.6$	1 (0.33)	1 (0.52)	2 (0.78)	0 (0.93)	1 (1.27)	1 (1.70)	0 (0.19)	0 (0.56)	0 (0.75)
$0.6 \leq \log U < 0.7$	0 (0.10)	1 (0.18)	1 (0.33)	0 (0.28)	1 (0.45)	2 (0.69)	0 (0.04)	0 (0.21)	1 (0.31)
$0.7 \leq \log U < 0.8$	0 (0.02)	0 (0.05)	0 (0.12)	0 (0.07)	0 (0.14)	0 (0.24)	0 (0.007)	0 (0.07)	0 (0.12)
$0.8 \leq \log U < 0.9$	0 (0.004)	0 (0.02)	0 (0.04)	0 (0.02)	0 (0.04)	0 (0.08)	0 (0.0009)	0 (0.02)	0 (0.04)
$0.9 \leq \log U < 1.0$	0 (0.0006)	0 (0.003)	0 (0.010)	0 (0.003)	0 (0.007)	0 (0.02)	0 (0.00009)	0 (0.004)	0 (0.01)
標準偏差 σ	0.2155	0.2361	0.2622	0.2237	0.2392	0.2576	0.1971	0.2431	0.2622

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, $x \equiv \log U_k$ 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。

$$P(a < x \leq b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] dx \quad (3-24)$$

ここで,

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

$\mu = x$ 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 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。

$$\begin{aligned} P(a < x \leq b) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{a}{\sigma}}^{\frac{b}{\sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2} s^2\right] ds \\ &= \Phi\left(\frac{b}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right) \end{aligned} \quad (3-25)$$

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,

$$p = 1 - P(-\infty < x \leq b) = 1 - \Phi\left(\frac{b}{\sigma}\right) \quad (3-26)$$

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 $\tilde{a}_{\max}, \tilde{v}_{\max}, \tilde{d}_{\max}$ 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 $\sigma = 0.237$ となる。したがって, 式 (3-24) により, 非超過確率に対応する係数 $U_{a, v, d}$ を求めると図 3-17 のようになる。式 (3-20) 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 3-17 の係数 $U_{a, v, d}$ を乗じて式 (3-23) により予測値を求めることができる。

図 3-18 は $M = 8$ の場合の $\tilde{a}_{\max}, \tilde{v}_{\max}, \tilde{d}_{\max}$ の距離減衰を各種の p に対して示した結果である。

NUMBER OF TERMS	MULT. CORR. COEF. R						TERMS						MULT. CORR. COEF. R			ADJUSTED MULT. CORR. COEF. R*		
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	M	Δ	D	M ²	Δ^2	D ²	M Δ	MD	ΔD	GROUP 1	GROUP 2	GROUP 3
1								○								0.631	0.444	0.542
2							○	○						○		0.769	0.686	0.680
3							○	○			○	○				0.805	0.722	0.719
4							○	○			○	○	○	○	○	0.813	0.735	0.728
5							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.820	0.741	0.735
6							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.821	0.748	0.742
7							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.823	0.754	0.750
8							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.825	0.756	0.750
9							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.825	0.757	0.751

(a) MAXIMUM ACCELERATION $\tilde{a}_{max}$

NUMBER OF TERMS	MULT. CORR. COEF. R						TERMS						MULT. CORR. COEF. R			ADJUSTED MULT. CORR. COEF. R*		
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	M	Δ	D	M ²	Δ^2	D ²	M Δ	MD	ΔD	GROUP 1	GROUP 2	GROUP 3
1							○	○								0.556	0.307	0.240
2							○	○			○	○				0.757	0.694	0.539
3							○	○			○	○	○	○		0.797	0.730	0.605
4							○	○			○	○	○	○	○	0.816	0.733	0.643
5							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.824	0.737	0.665
6							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.831	0.745	0.672
7							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.833	0.748	0.677
8							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.834	0.751	0.678
9							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.834	0.753	0.679

(b) MAXIMUM VELOCITY $\tilde{v}_{max}$

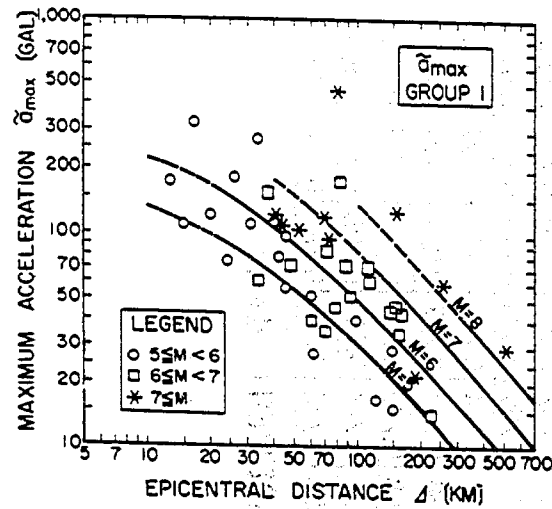
NUMBER OF TERMS	MULT. CORR. COEF. R						TERMS						MULT. CORR. COEF. R			ADJUSTED MULT. CORR. COEF. R*		
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	M	Δ	D	M ²	Δ^2	D ²	M Δ	MD	ΔD	GROUP 1	GROUP 2	GROUP 3
1							○	○								0.450	0.514	0.377
2							○	○			○	○				0.789	0.743	0.596
3							○	○			○	○	○	○	○	0.841	0.757	0.655
4							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.851	0.759	0.698
5							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.856	0.764	0.723
6							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.858	0.767	0.727
7							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.858	0.770	0.729
8							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.858	0.773	0.730
9							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.858	0.773	0.730

LEGEND

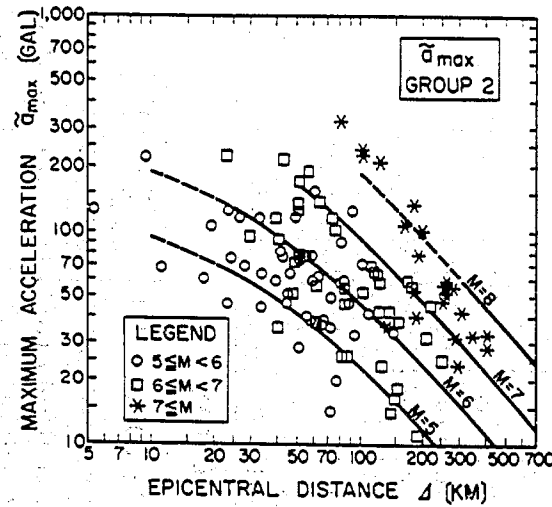
- GROUND GROUP 1
- GROUND GROUP 2
- / GROUND GROUP 3

(c) MAXIMUM DISPLACEMENT $\tilde{d}_{max}$

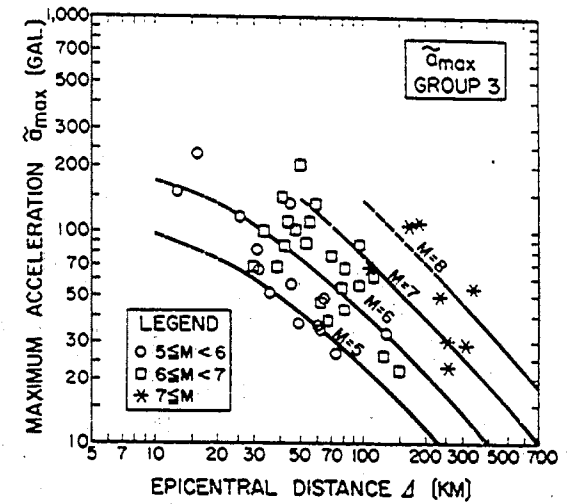
図3-1 最大地震動の距離減衰式に含まれる説明変数の数が予測精度に及ぼす影響



(a) 1種地盤

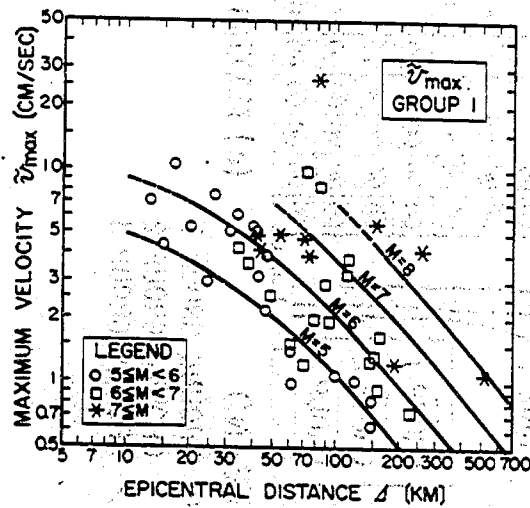


(b) 2種地盤

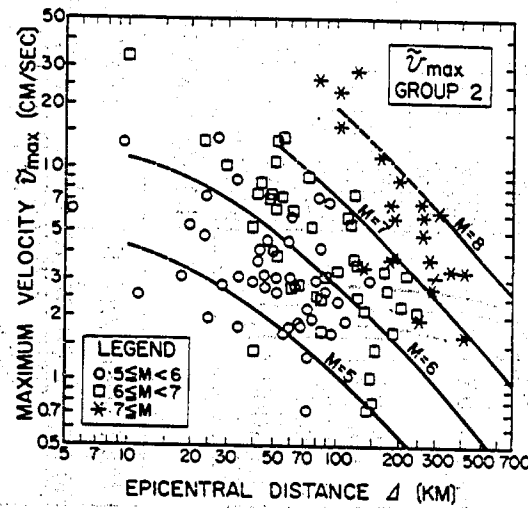


(c) 3種地盤

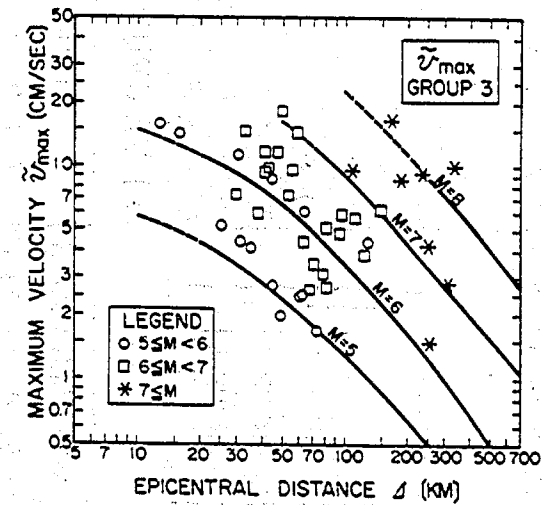
図3-2(1) 式(3-2)による最大加速度 $\tilde{a}_{max}$ の距離減衰式($j=2$ の場合)



(a) 1種地盤

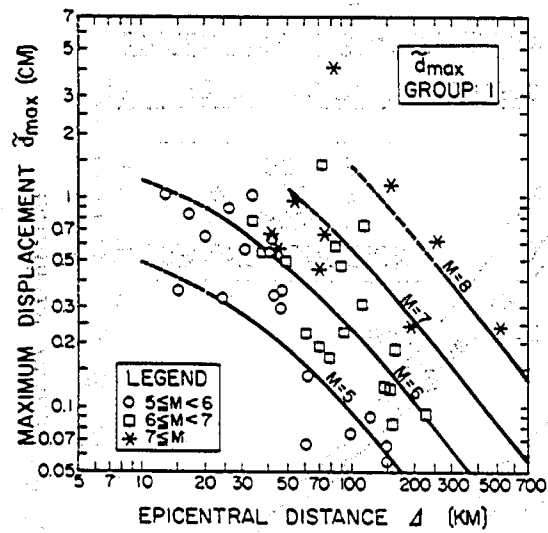


(b) 2種地盤

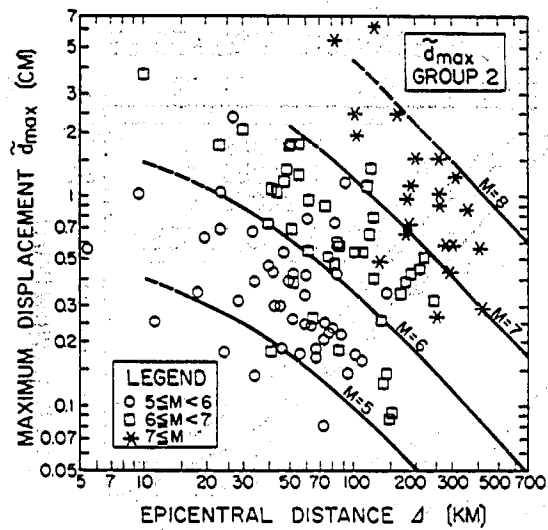


(c) 3種地盤

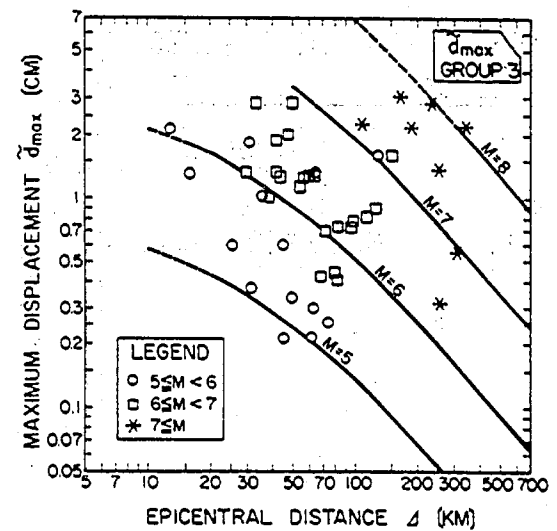
図3-2(2) 式(3-2)による最大速度 $\tilde{v}_{max}$ の距離減衰式($j=2$ の場合)



(a) 1種地盤



(b) 2種地盤



(c) 3種地盤

図3-2(3) 式(3-2)による最大変位 $\tilde{d}_{\max}$ の距離減衰式($j=2$ の場合)

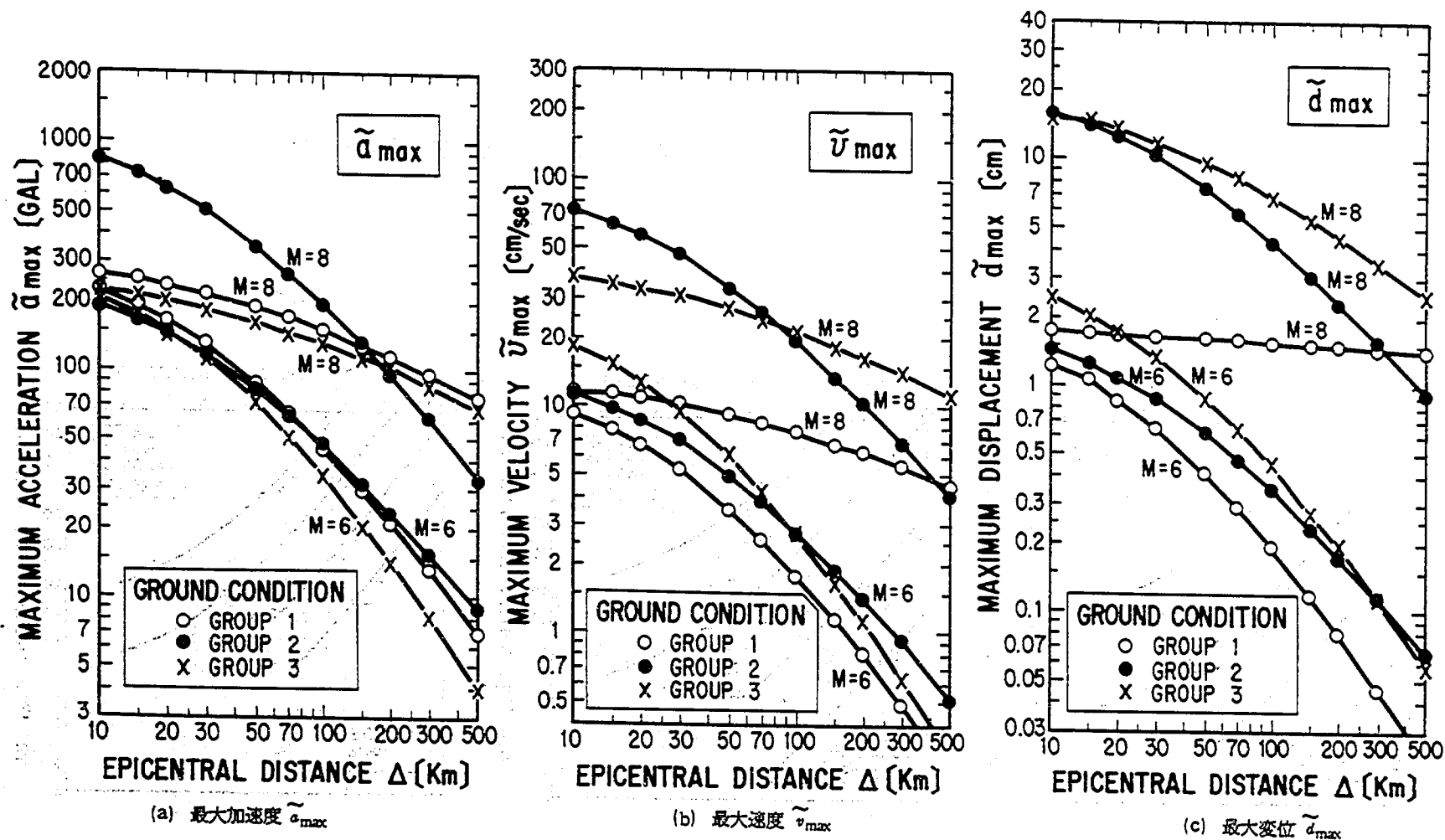
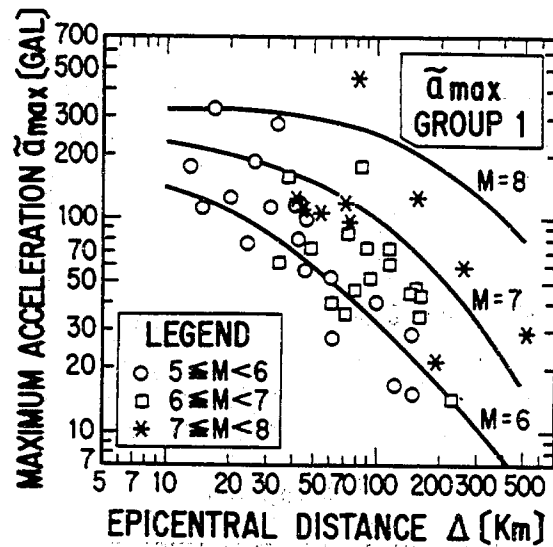
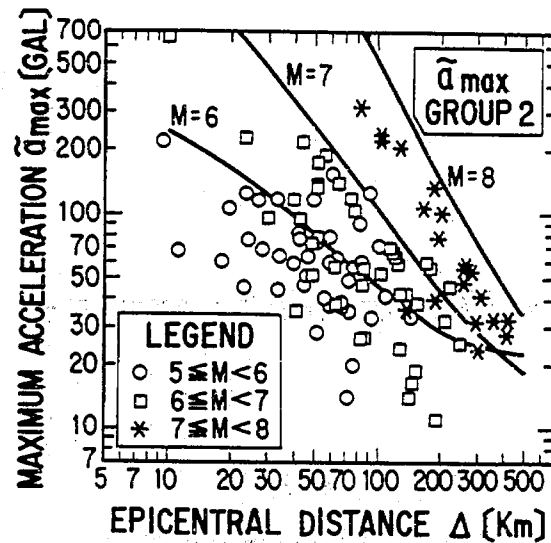


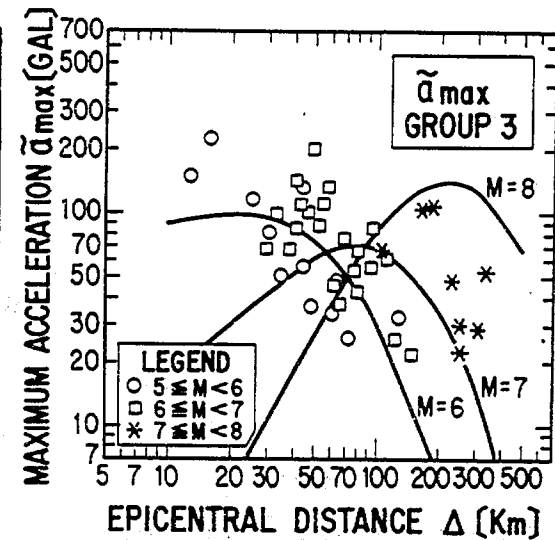
図3-3 式(3-11)による $\tilde{a}_{max}$, $\tilde{v}_{max}$, $\tilde{d}_{max}$ の距離減衰 ($j=3$ の場合)



(a) 1種地盤

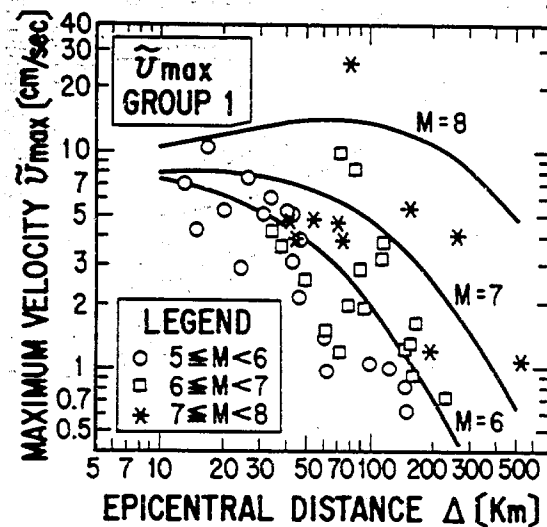


(b) 2種地盤

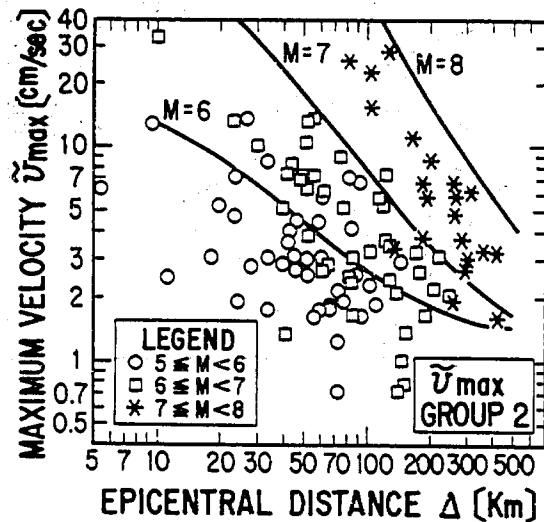


(c) 3種地盤

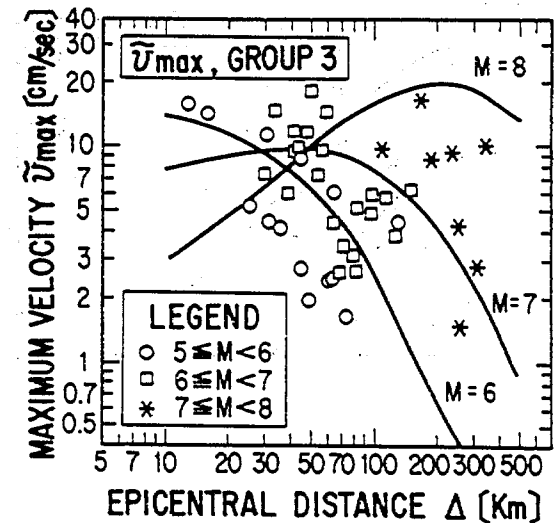
図3-4(1) 式(3-12)による $\tilde{a}_{max}$ の距離減衰式($j=9$ の場合)



(a) 1種地盤



(b) 2種地盤



(c) 3種地盤

図3-4(2) 式(3-12)による $\tilde{v}_{max}$ の距離減衰式($j=9$ の場合)

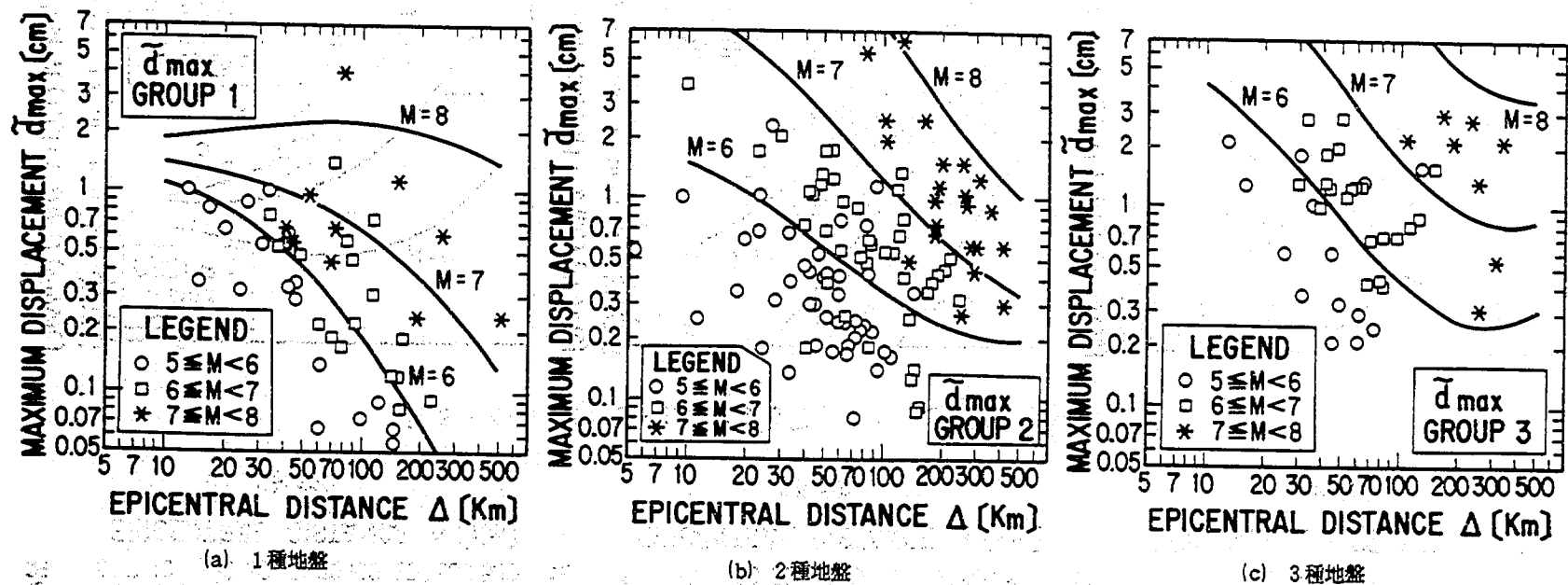
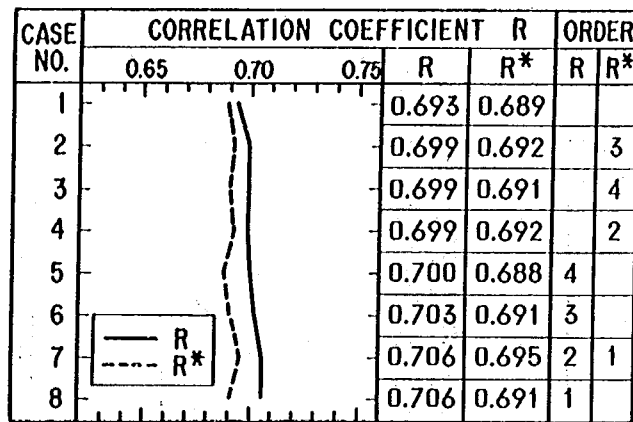
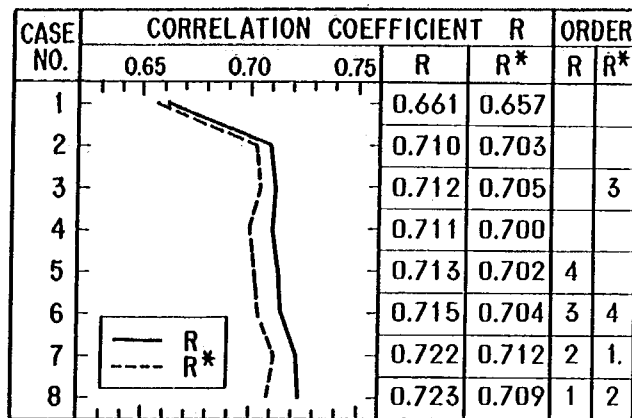


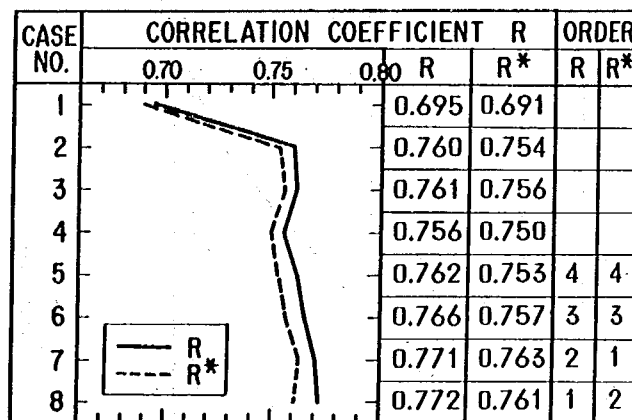
図 3-4(3) 式 (3-12) による $\bar{d}_{max}$ の距離減衰式 ($j=9$ の場合)



(a) MAXIMUM ACCELERATION $\tilde{a}_{max}$



(b) MAXIMUM VELOCITY $\tilde{v}_{max}$



(c) MAXIMUM DISPLACEMENT $\tilde{d}_{max}$

LEGEND

CASE No.	COEFFICIENT a, b and c	CASE No.	COEFFICIENT a, b and c
1	a, b, c	5	a, b (GC ₁), c (GC ₁)
2	a, b, c (GC ₁)	6	a (GC ₁), b, c (GC ₁)
3	a, b (GC ₁), c	7	a (GC ₁), b (GC ₁), c
4	a (GC ₁), b, c	8	a (GC ₁), b (GC ₁), c (GC ₁)

図 3-5 最大地震動の距離減衰式の係数 a, b, c の地盤種別依存性の検討結果

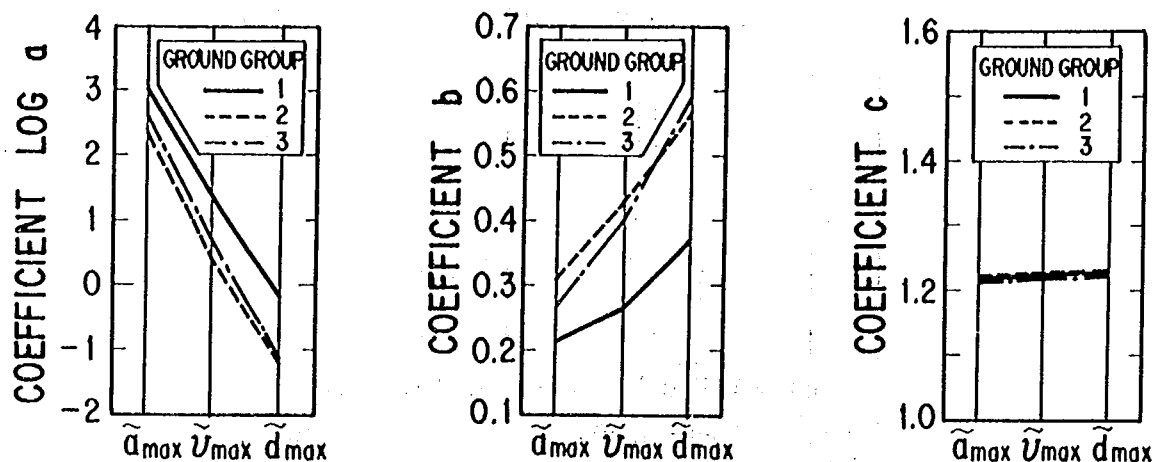


図3-6 最大加速度，速度，変位の距離減衰式（式（3-13））のケース7の係数
 $a(GC_i)$, $b(GC_i)$, c

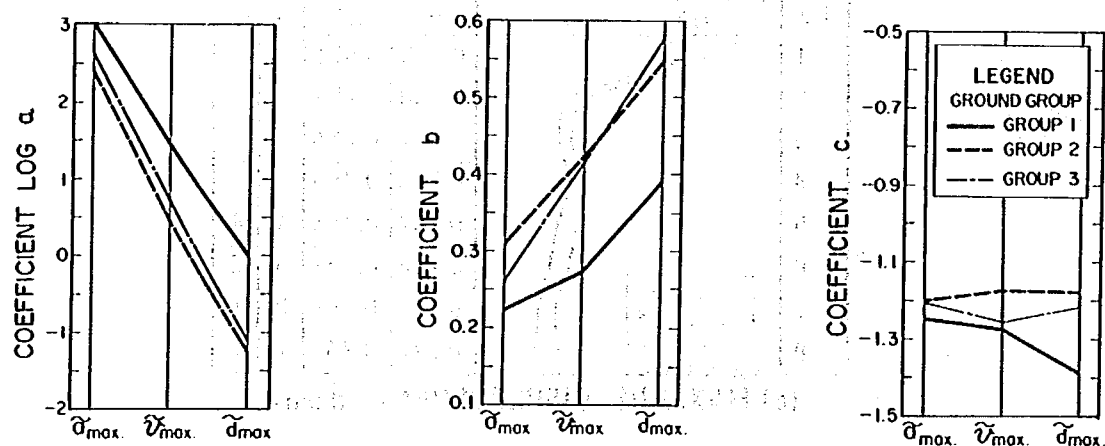


図3-7 最大加速度，速度，変位の距離減衰式（式（3-13））のケース8の係数
 $a(GC_i)$, $b(GC_i)$, $c(GC_i)$

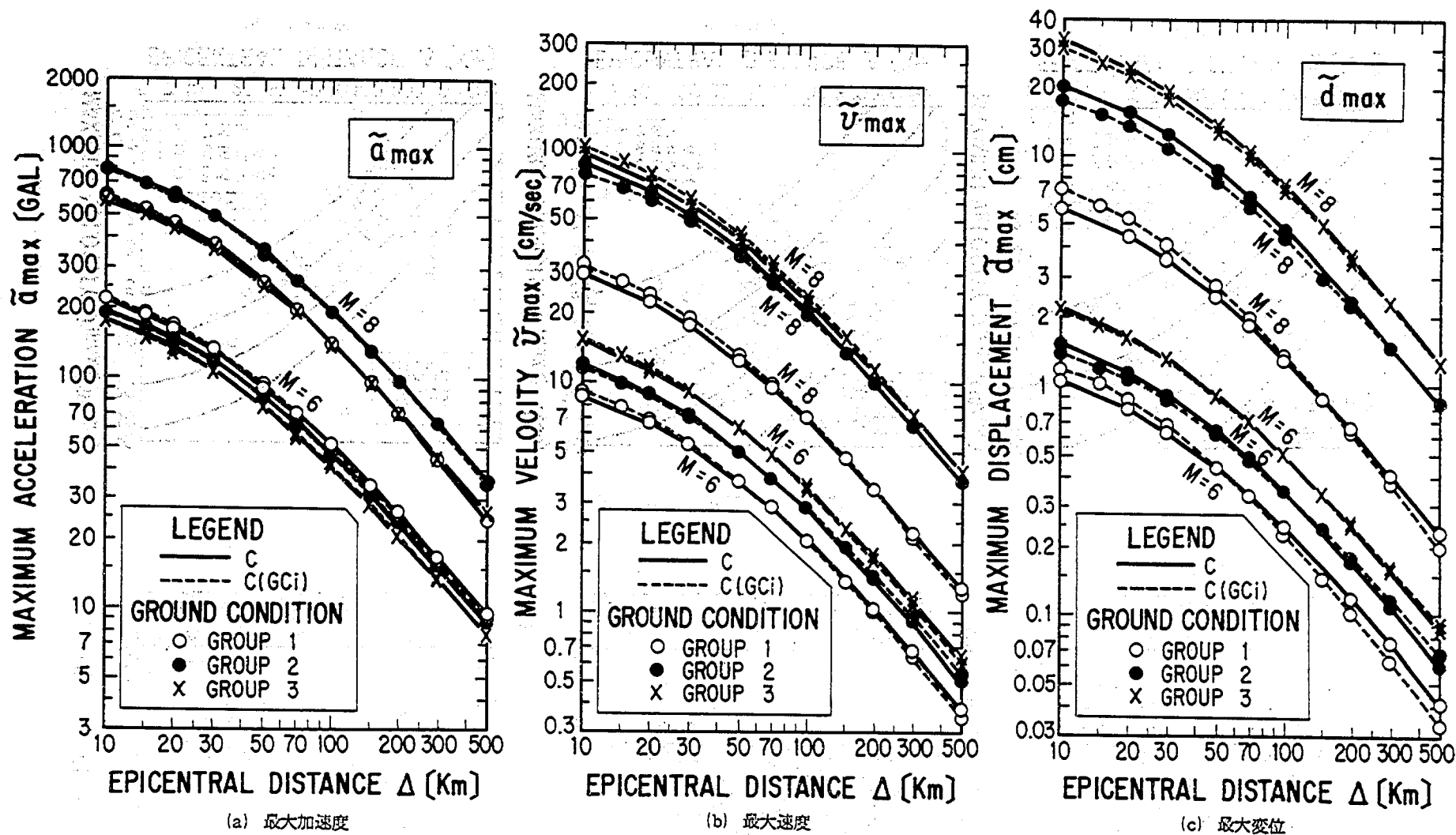
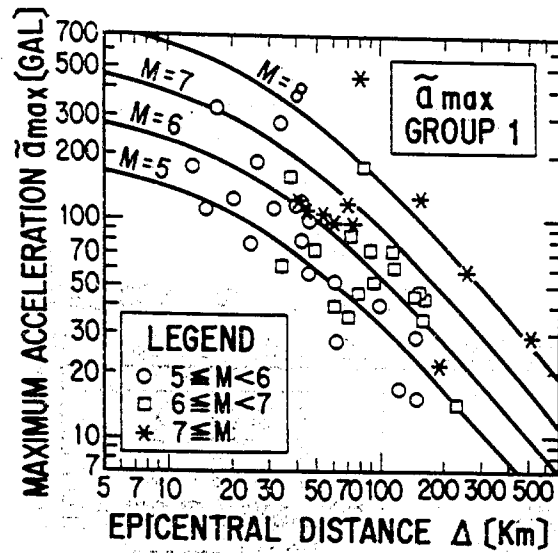
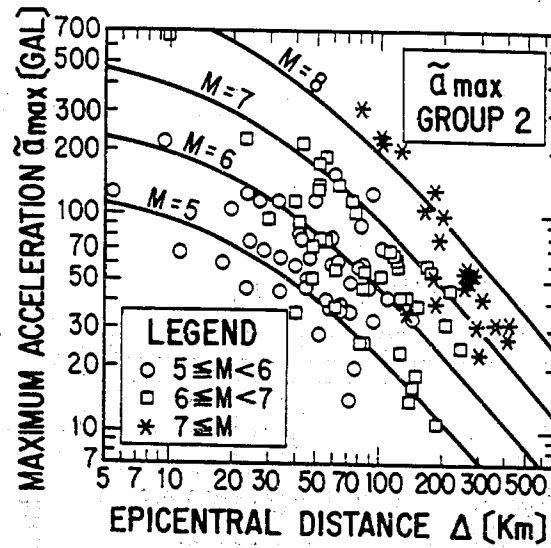


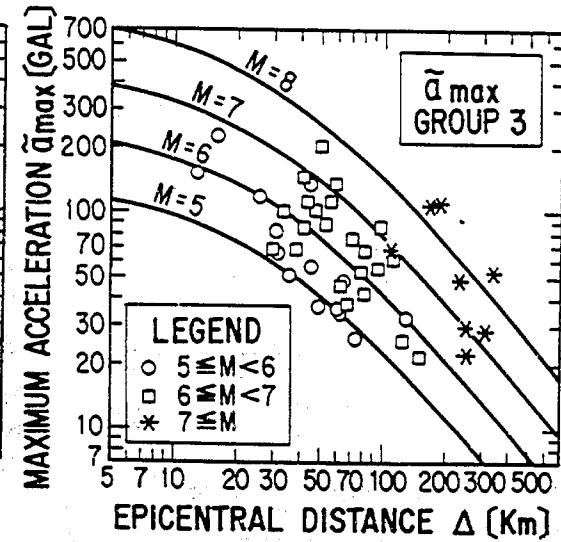
図 3-8 式 (3-16) ~ (3-18) の距離減衰式と式 (3-19) ~ (3-21) の距離減垂式の比較



(a) 1種地盤

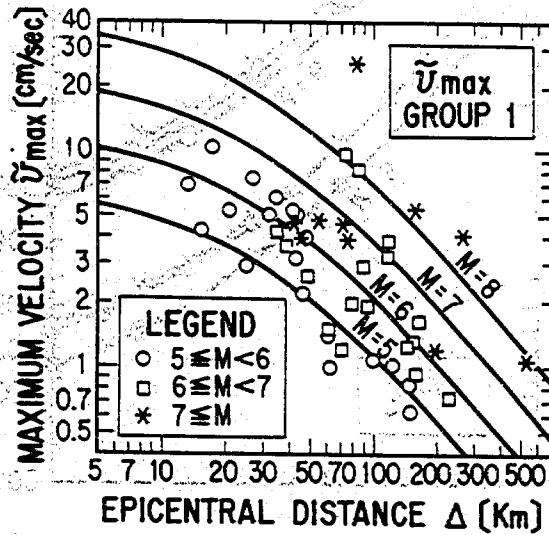


(b) 2種地盤

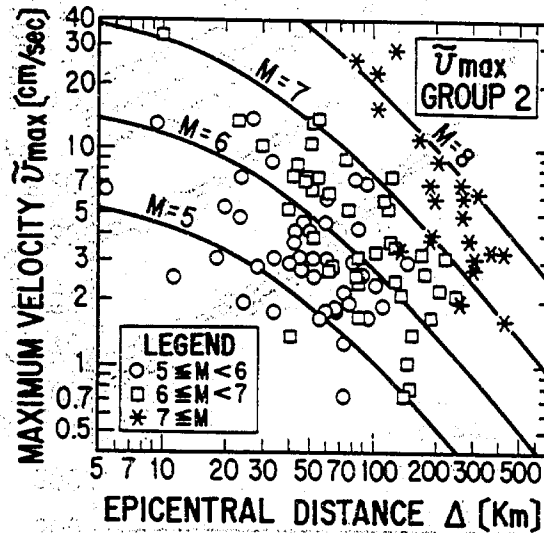


(c) 3種地盤

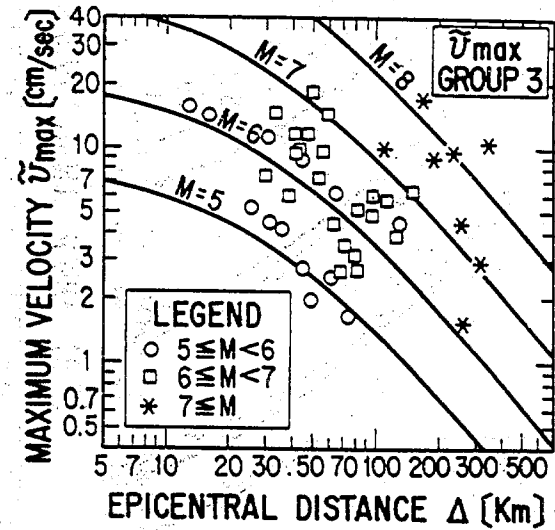
図 3-9 $\tilde{a}_{max}$ の距離減衰式



(a) 1種地盤



(b) 2種地盤



(c) 3種地盤

図 3-10 $\tilde{v}_{max}$ の距離減衰式

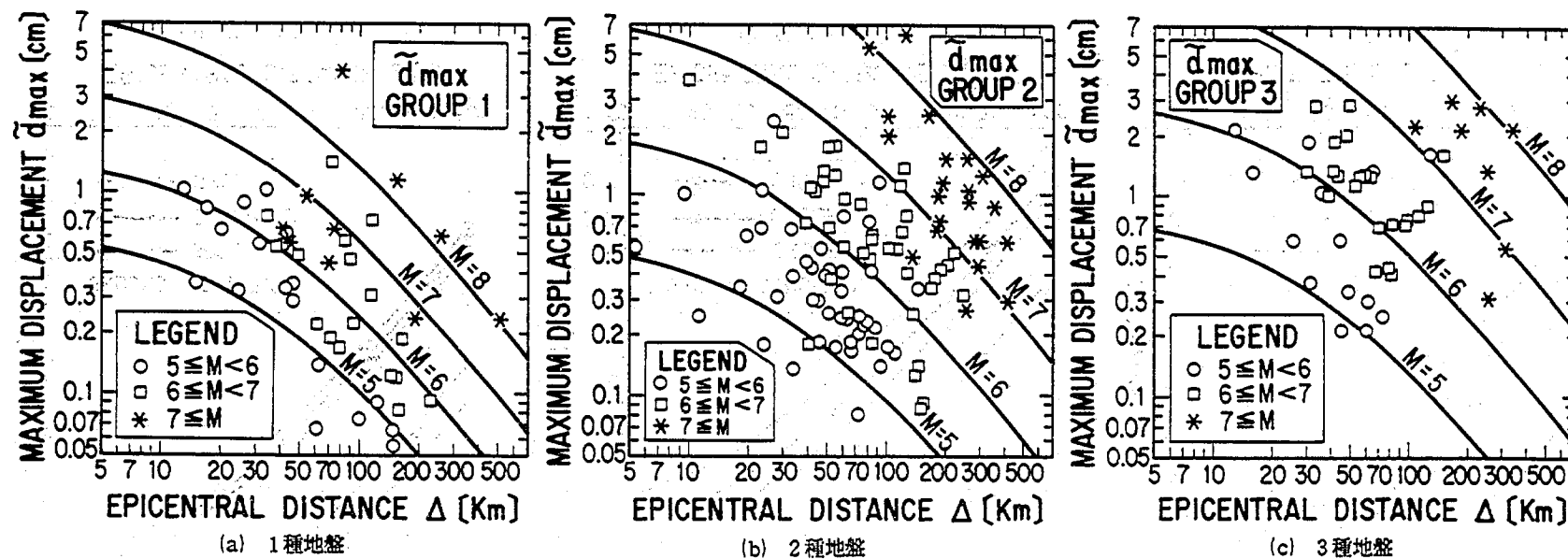
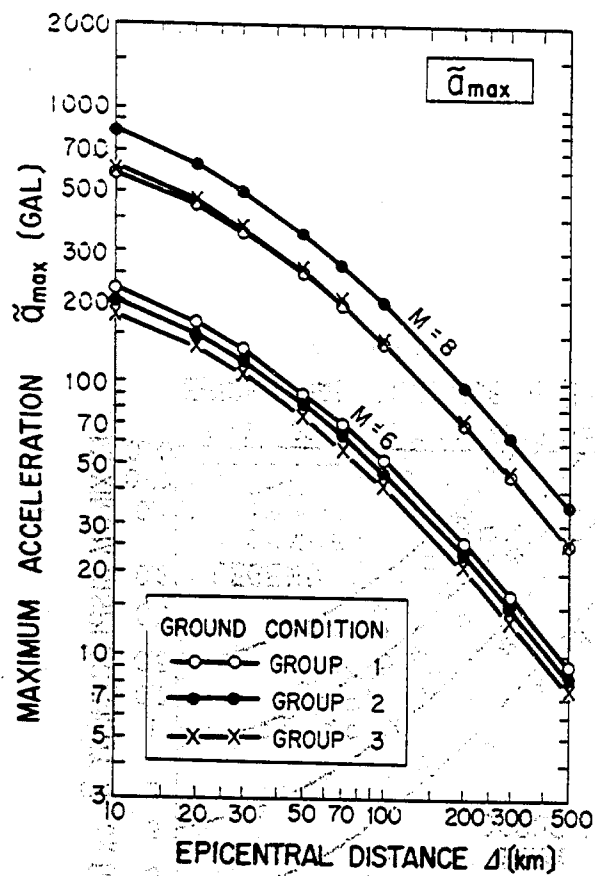
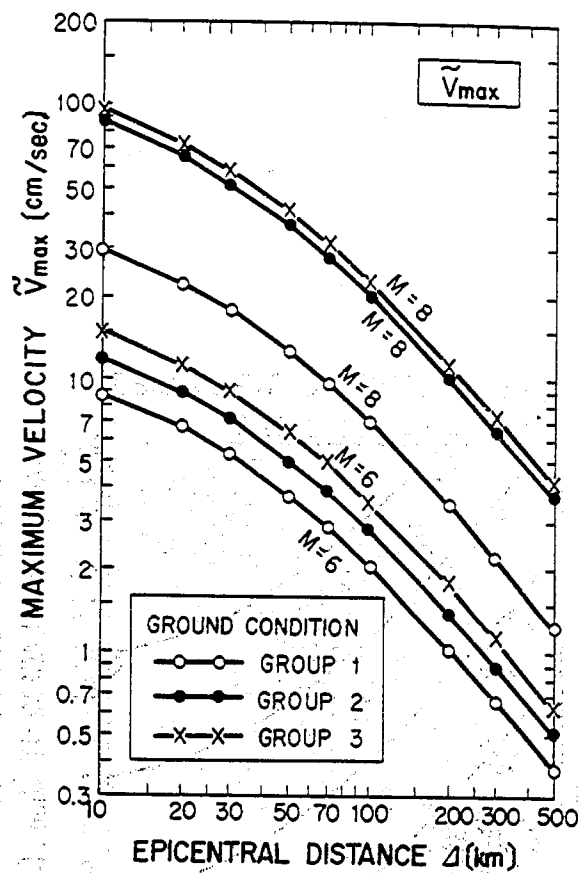


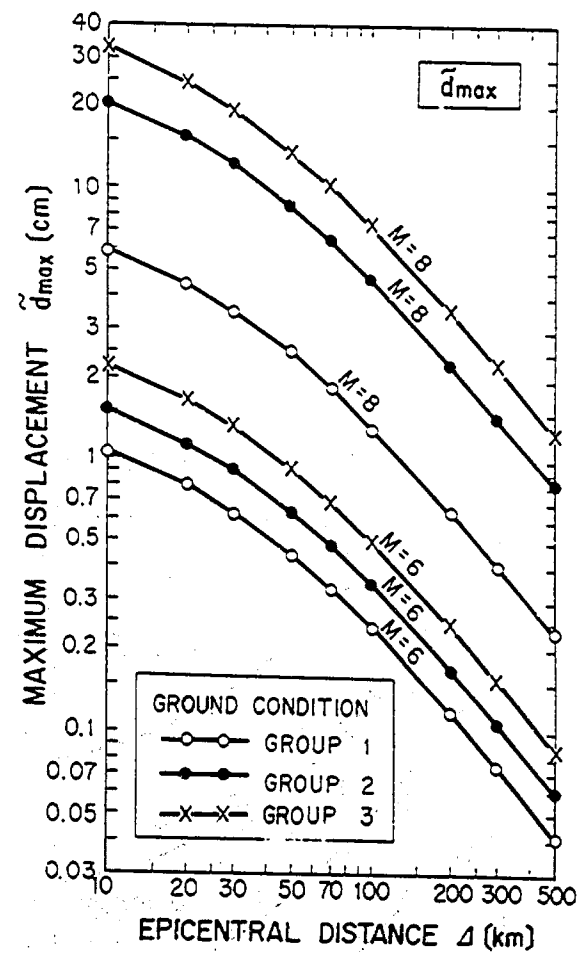
図 3-11 $\tilde{d}_{\max}$ の距離減衰式



(a) 最大加速度 $\tilde{a}_{max}$

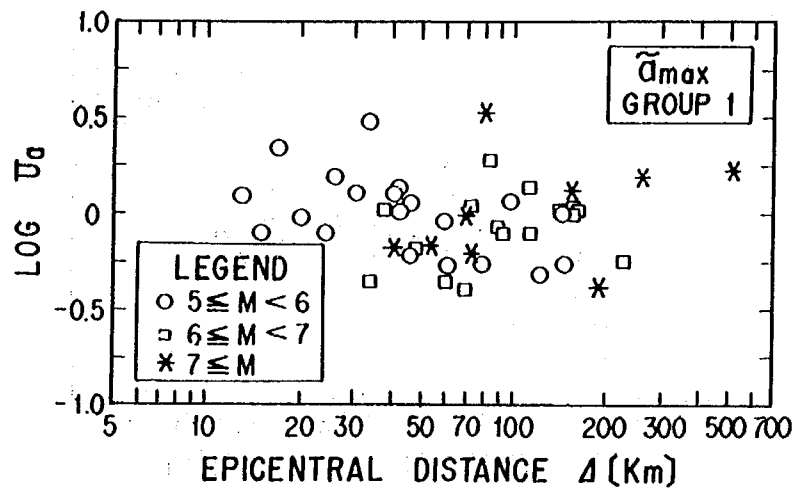


(b) 最大速度 $\tilde{v}_{max}$

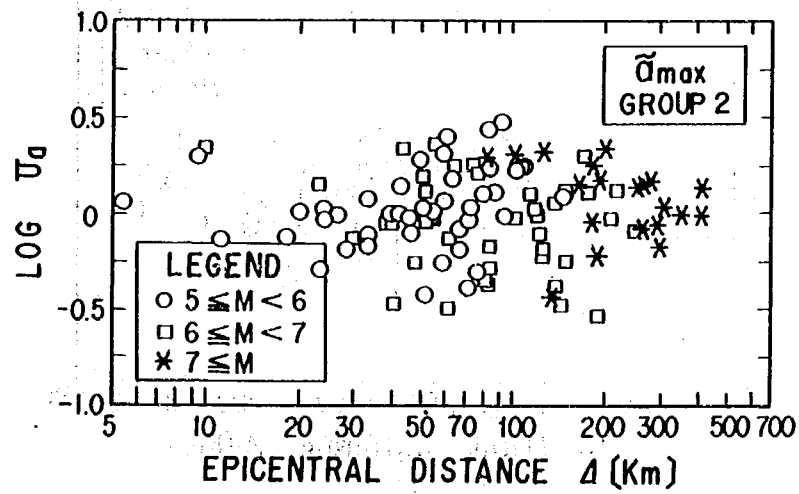


(c) 最大変位 $\tilde{d}_{max}$

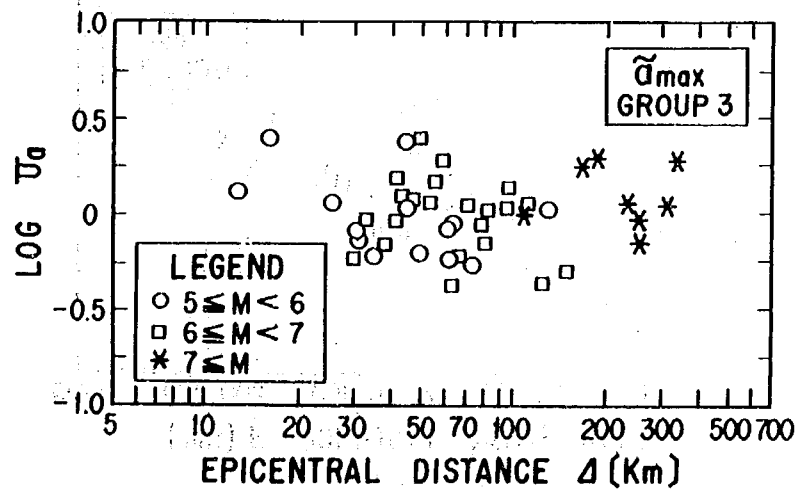
図 3-12 最大加速度 $\tilde{a}_{max}$, 最大速度 $\tilde{v}_{max}$, 最大変位 $\tilde{d}_{max}$ の距離減衰式 ($M=6$ および 8 の場合)



(a) 1種地盤

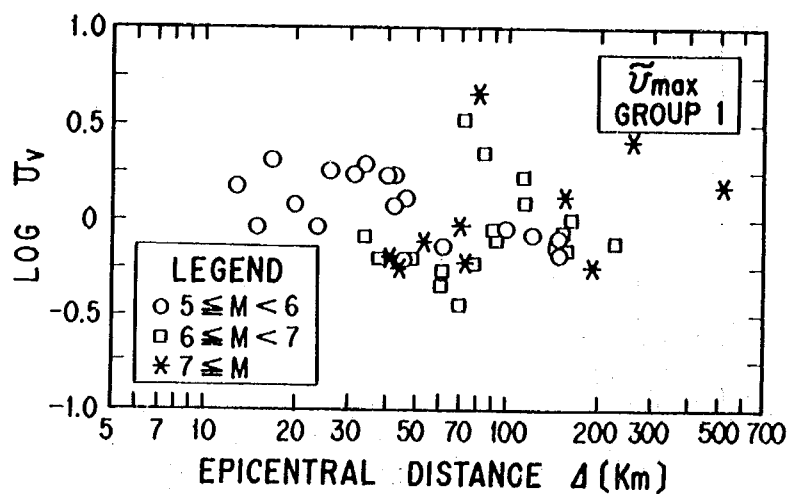


(b) 2種地盤

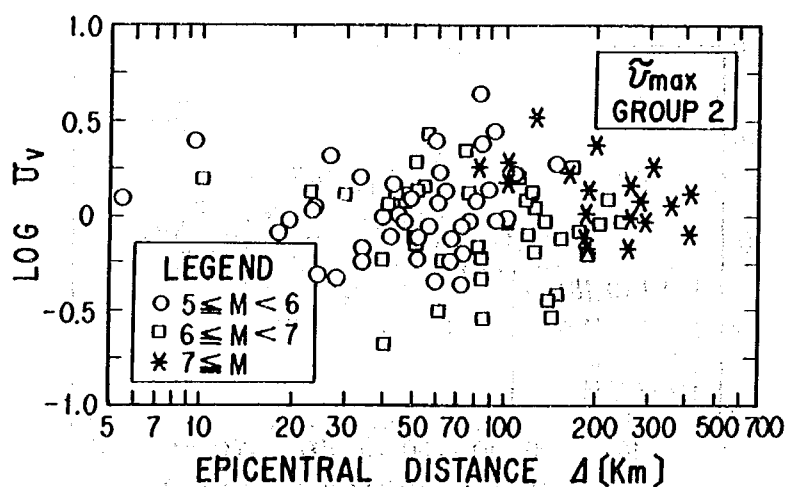


(c) 3種地盤

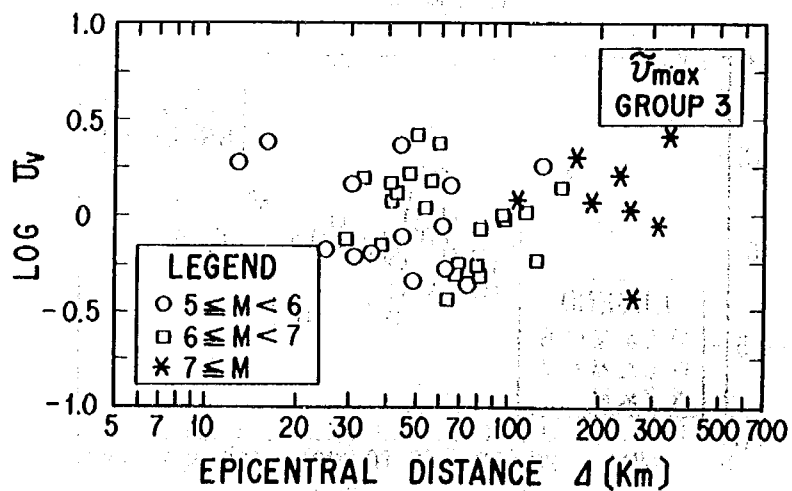
図3-13 $\text{Log } U_a \sim \Delta \sim M$ の関係



(a) 1種地盤

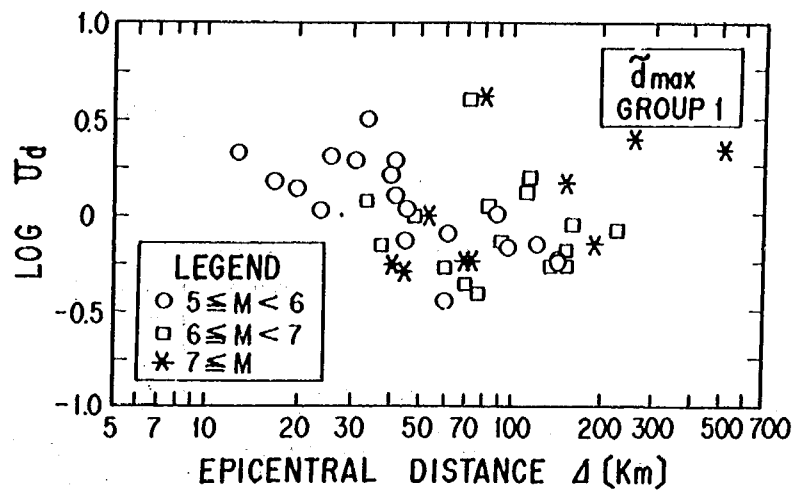


(b) 2種地盤

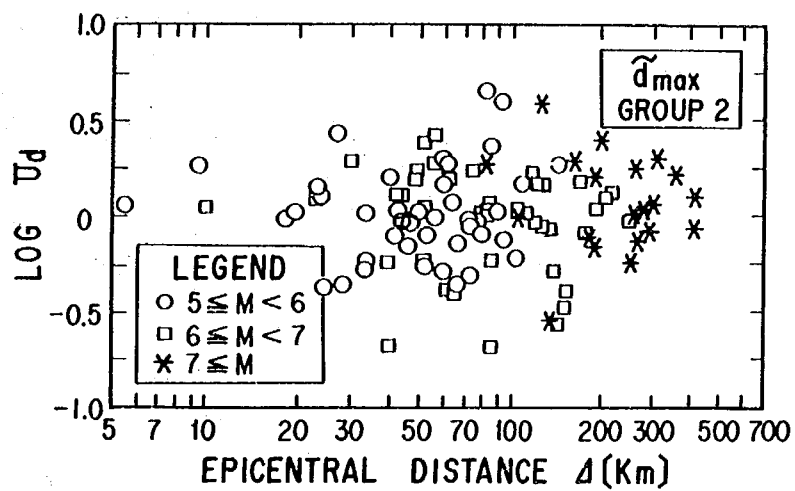


(c) 3種地盤

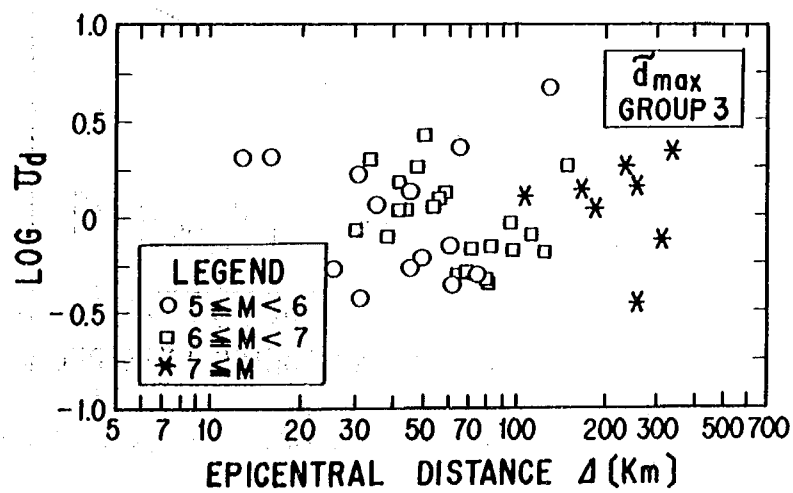
図3-14 $\log U_v \sim \Delta \sim M$ の関係



(a) 1種地盤



(b) 2種地盤



(c) 3種地盤

図3-15 $\log U_d \sim \Delta \sim M$ の関係

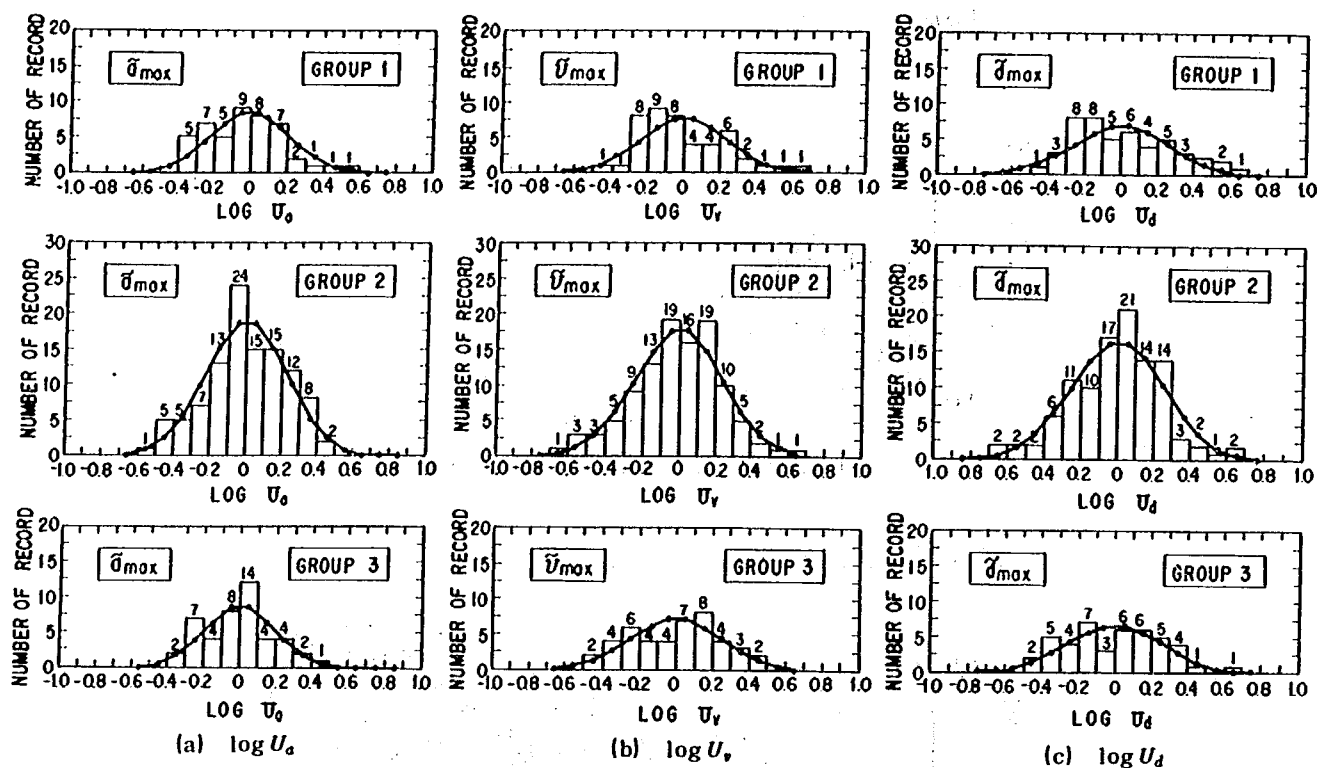


図 3-16 $\log U_a$, $\log U_v$, $\log U_d$ の頻度分布

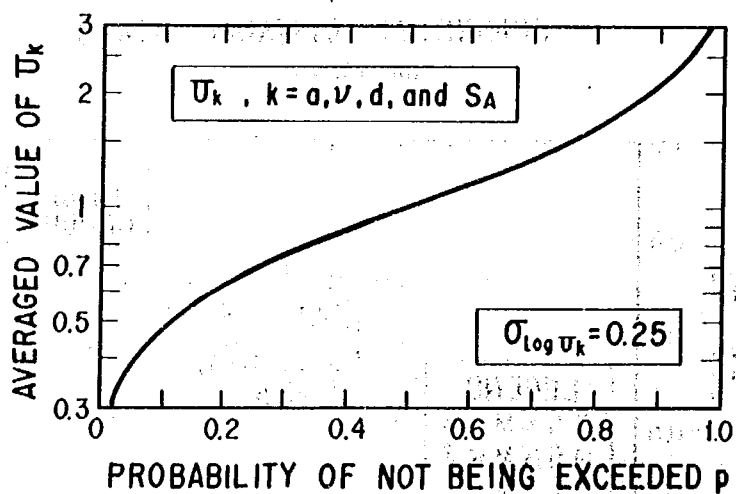


図 3-17 U_k ($k = a, v, d, S_A$) $\sim p$ の関係 ($\sigma = 0.25$ とした場合)

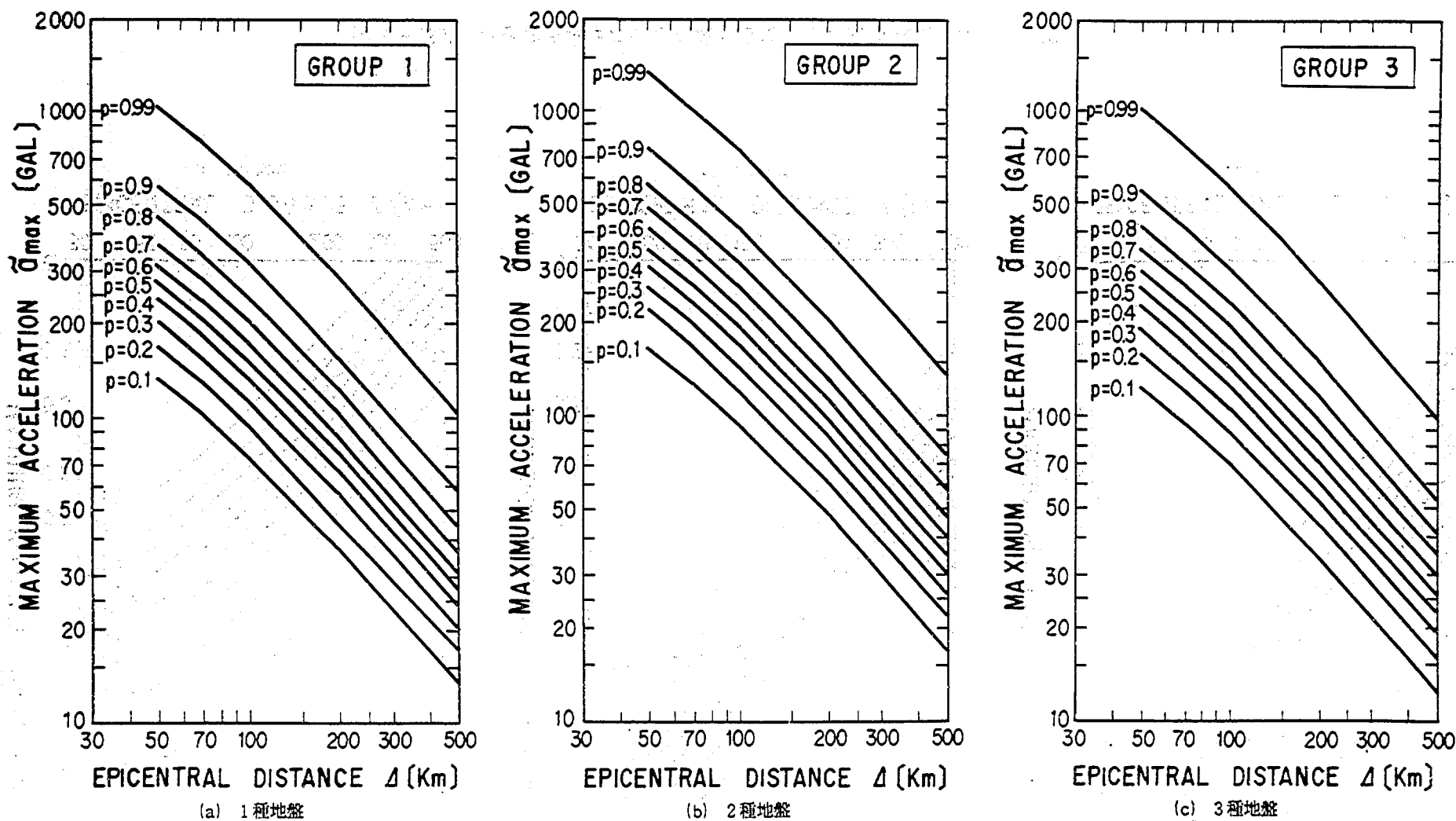
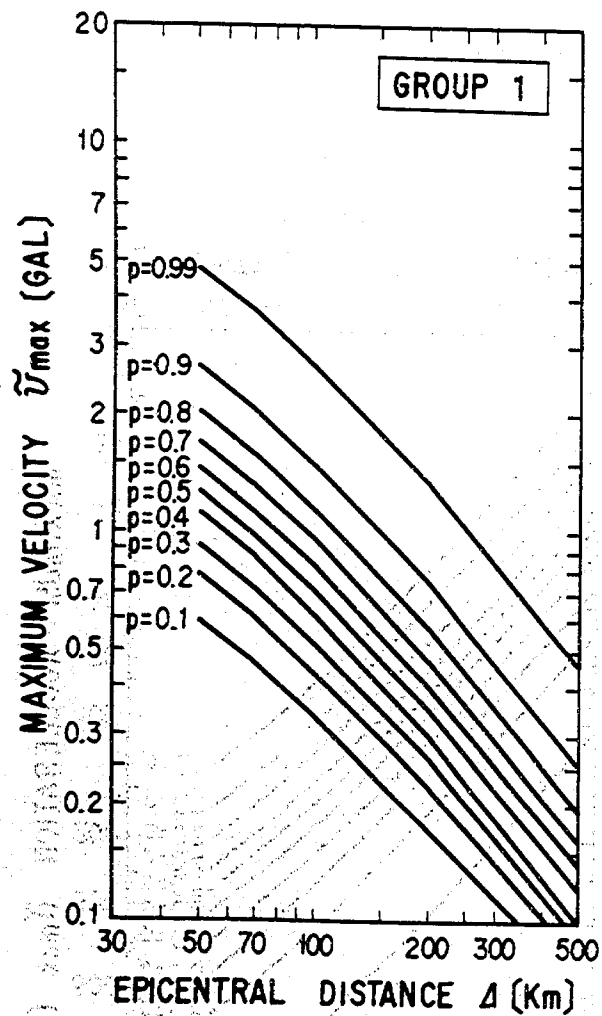
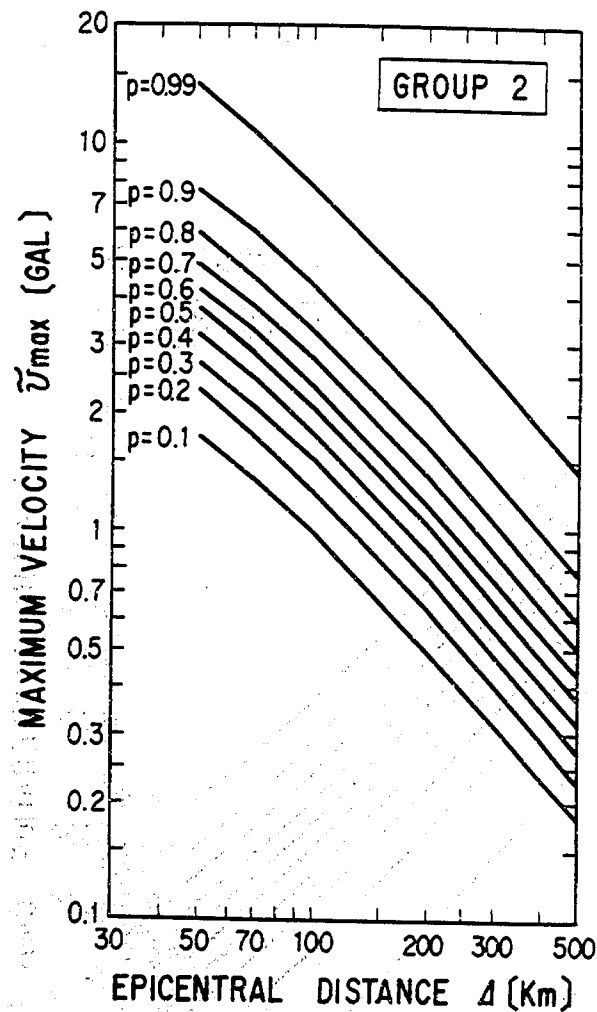


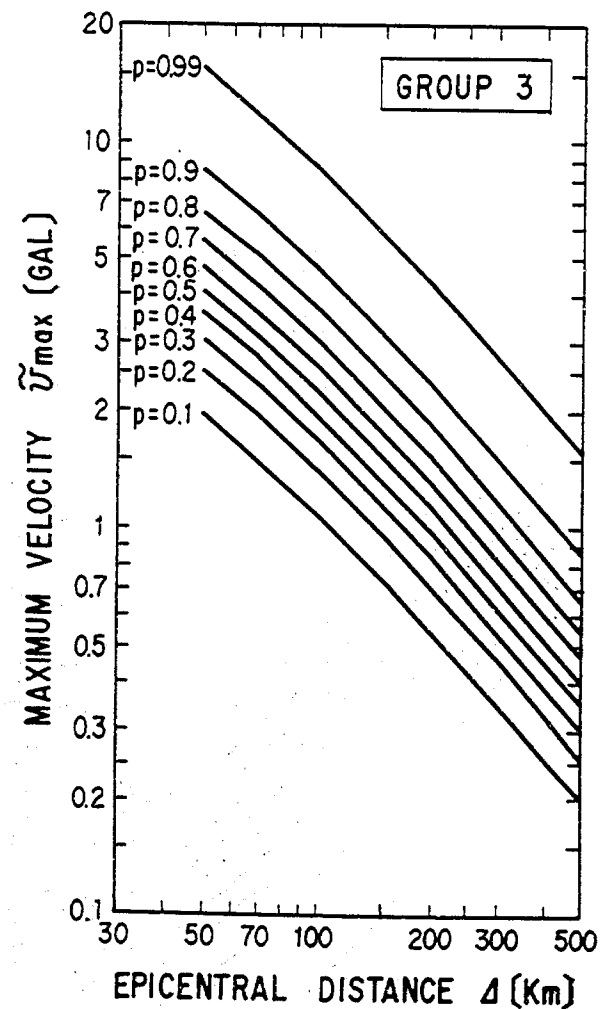
図3-18(1) 非超過確率 p に応じた最大加速度 $\tilde{a}_{max}$ の距離減衰 ($M=8$ の場合)



(a) 1種地盤

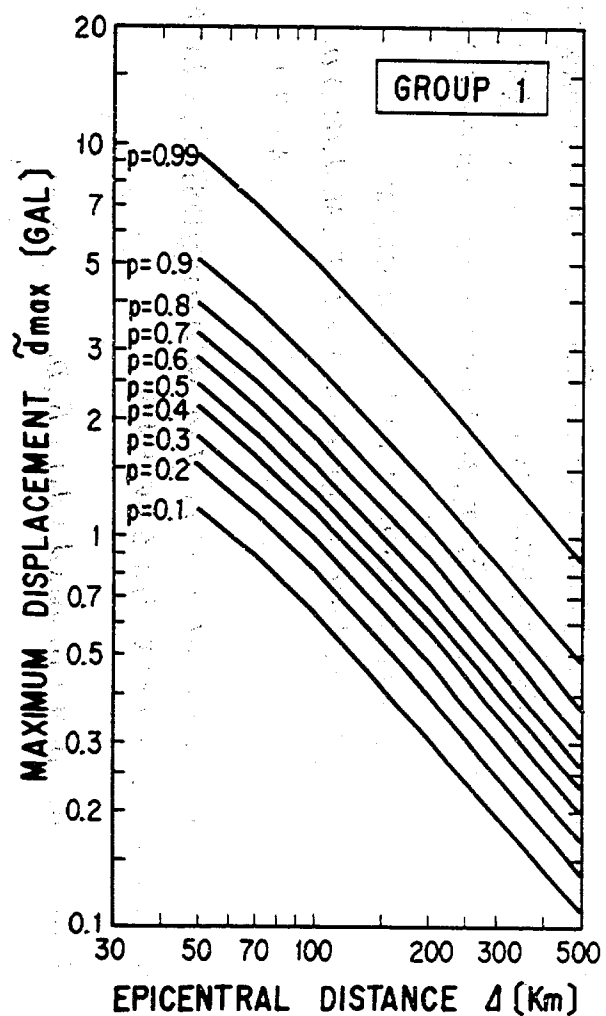


(b) 2種地盤

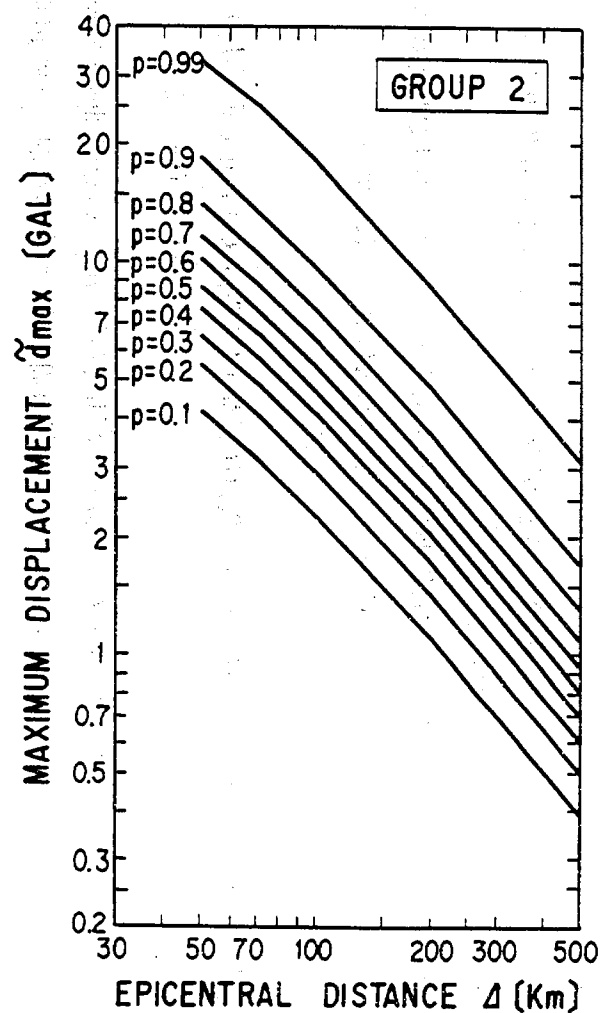


(c) 3種地盤

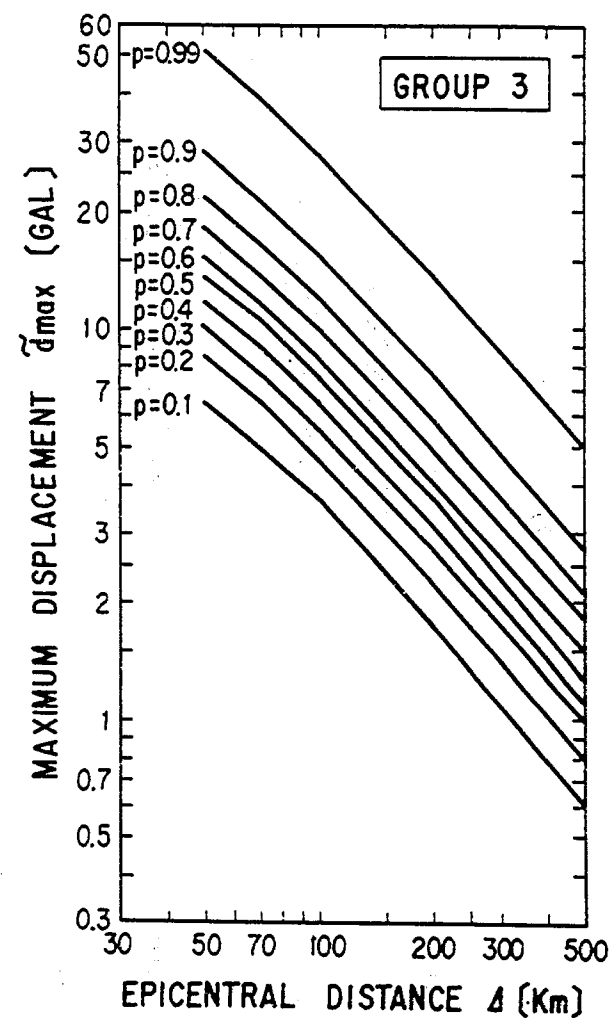
図3-18(2) 非超過確率 p に応じた最大速度 $\tilde{v}_{\max}$ の距離減衰 ($M=8$ の場合)



(a) 1種地盤



(b) 2種地盤



(c) 3種地盤

図 3-18(3) 非超過確率 p に応じた最大変位 $\tilde{d}_{max}$ の距離減衰 ($M=8$ の場合)

4. 加速度応答スペクトルの距離減衰式

4-1 距離減衰式の形式の検討

加速度応答スペクトル(減衰定数5%) $\widetilde{S}_A$ の距離減衰式としては、次式を仮定しているものが多い。

$$\widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(T_k, GC_i)} \quad (4-1)$$

ここで

$\widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$: 水平2成分の合成を考慮した減衰定数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

Δ : 震央距離[km]

Δ_0 : Δ が小さい範囲の $\widetilde{S}_A$ を調整する定数[km]

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, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0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

式(4-1)の対数をとると

$$\log \widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = \log a(T_k, GC_i) + b(T_k, GC_i)M + c(T_k, GC_i) \log(\Delta + \Delta_0) \quad (4-2)$$

となり、式(3-2)と同様に、 $\log \widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$ を M および $\log(\Delta + \Delta_0)$ の線形回帰式で表わすことができる。係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(T_k, GC_i)$ は固有周期および地盤種別ごとに重回帰分析から定めることができる。

ここで、3-1と同様に、距離減衰式の形式が加速度応答スペクトル $\widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$ の距離減衰特性を近似する上でどのような影響があるかを検討するために、式(3-6)にならって、式(4-2)に震源深さ D_p の項を追加して、加速度応答スペクトル $\widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$ を次式で与えることとした。

$$\begin{aligned} \log \widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = & \log a(T_k, M, \Delta, GC_i) + b(T_k, M, \Delta, GC_i)M \\ & + c(T_k, M, \Delta, GC_i) \log(\Delta + \Delta_0) + d(T_k, M, \Delta, GC_i) D_p \end{aligned} \quad (4-3)$$

ここで、係数 $b(T_k, M, \Delta, GC_i)$, $c(T_k, M, \Delta, GC_i)$, $d(T_k, M, \Delta, GC_i)$ は地盤種別 GC_i ごとにそれぞれ M , $\log(\Delta + \Delta_0)$, D_p の線形1次式として次式で与えるものとする。

$$b(T_k, M, \Delta, GC_i) = \beta_1 + \beta_2 M + \beta_3 \log(\Delta + \Delta_0) + \beta_4 D_p \quad (4-4)$$

$$c(T_k, M, \Delta, GC_i) = \beta_5 + \beta_6 M + \beta_7 \log(\Delta + \Delta_0) + \beta_8 D_p$$

$$d(T_k, M, \Delta, GC_i) = \beta_9 + \beta_{10} M + \beta_{11} \log(\Delta + \Delta_0) + \beta_{12} D_p \quad (4-4)$$

ここで、 $\beta_j (j = 1 \sim 12)$ は固有周期 $T_k (k = 1, 2, \dots, 10)$ および地盤種別 $GC_i (i = 1, 2, 3)$ ごとに定められる係数である。式(4-4)を式(4-3)に代入して整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \log \widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = & g_1 + g_2 M + g_3 \log(\Delta + \Delta_0) + g_4 D_p + g_5 M \log(\Delta + \Delta_0) \\ & + g_6 M D_p + g_7 D_p \log(\Delta + \Delta_0) + g_8 M^2 + g_9 \{ \log(\Delta + \Delta_0) \}^2 \\ & + g_{10} D_p^2 \end{aligned} \quad (4-5)$$

ここで、

$$\begin{aligned} g_1 = \log a(T_k, GC_i), \quad g_2 = \beta_1, \quad g_3 = \beta_5, \quad g_4 = \beta_9 \\ g_5 = \beta_3 + \beta_6, \quad g_6 = \beta_4 + \beta_{10}, \quad g_7 = \beta_8 + \beta_{11}, \quad g_8 = \beta_2 \\ g_9 = \beta_7, \quad g_{10} = \beta_{12} \end{aligned} \quad (4-6)$$

$g_j (j = 1 \sim 12)$ は固有周期 $T_k (k = 1, 2, 3, \dots, 10)$ および地盤種別 $GC_i (i = 1, 2, 3)$ ごとに与えられる係数である。式(4-5)は最大地震動の場合の式(3-8)に対応するものであり、式(4-2)と比較すると、 D_p , $M \log(\Delta + \Delta_0)$, $M D_p$, $D_p \log(\Delta + \Delta_0)$, M^2 , $\{ \log(\Delta + \Delta_0) \}^2$, D_p^2 の7項が新しく加わり、定数項 g_1 を別にして全部で9項で $\log \widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$ を表わしていることになる。

そこで、3-1と同じ手法を用いて、式(4-5)の距離減衰式の中から定数項 g_1 の他に j 個 ($j = 1, 2, \dots, 9$) の項を取り出し、重回帰分析により重相関係数 R が最も大きくなる項の組み合わせを、総当り法により、各固有周期 T_k および地盤種別 $GC_i (i = 1, 2, 3)$ ごとに求めた。たとえば、 $j = 2$ の場合には、各固有周期 T_k および地盤種別 $GC_i (i = 1, 2, 3)$ ごとに ${}_9C_2 = \frac{9!}{2!(9-2)!} = 36$ 個の項の組み合わせがあるが、これらに対する重回帰分析をことごとく行い、その中で重相関係数 R が最大となる項の組み合わせを求め、これを $j = 2$ に対する結果とする訳である。

解析対象としたのは2章に示した197組の $\widetilde{S}_A$ スペクトル(減衰定数5%)である。地盤種別は3章と同様に1種(道路橋示方書耐震設計編による1種地盤)、2種(同、2種地盤+3種地盤)、3種(同、4種地盤)の3つに区分した。また、 Δ_0 は30kmとした。考慮する項数 j ごとに、最も重相関係数が大きくなる項の組み合わせを固有周期 $T_k = 0.2$ 秒、0.5秒、0.7秒および2秒の場合に対して求めると図4-1に示す通りとなる。これより、考慮する項数 j と重相関係数 R の関係に関しては以下の事項が指摘される。

- 1) 固有周期 $T_k = 0.2$ 秒、0.5秒、0.7秒、2秒のいずれの場合にも、考慮する項の数 j の増加に伴

なう重相関係数 R の変化の様子は、全体として地盤種別によらずおおむね同じである。

2) 考慮する項数を $j = 1 \sim 9$ と変化させた場合には、当然ながら項数の最も多い $j = 9$ の場合に R は最大となる。しかしながら、 $j \geq 2$ では、 j の増加によって R はほとんど変化しない。このことは、現在一般に用いられている $j = 2$ の場合の推定式にこれ以上 $M, D_p, \log(D + D_0)$ に係わる項を加えても重相関係数 R はあまり増えないことを示している。

3) 変数の数 j を同じとした場合に、推定式に選択される項の組み合わせは、固有周期ごと、および、地盤種別ごとに同一ではない。しかしながら、 $j = 2$ の場合についてみると、 $T_k = 0.2$ 秒の場合の1種および3種地盤の例を除けば、他のケースでは、すべて、 M および $\log(D + D_0)$ の組み合わせの場合に重相関係数 R は最大値をとる。また、 $T_k = 0.2$ 秒の場合の1種および3種地盤の例では変数を M および $\log(D + D_0)$ とした場合の重相関係数は、それぞれ 0.763, 0.615 であり、これらは図 4-1 に示した対応する組み合わせの重相関係数 R の最大値 0.765, 0.622 とほとんど変わらない。

以上は重相関係数 R だけに着目した検討結果であるが、式 (4-5) による距離減衰式の試算例として、 $j = 2, 3$ および 9 の場合の結果を以下に示す。ここで、 $j = 2$ は式 (4-1) に相当し、現在一般に使用されている距離減衰式を表わしている。また、 $j = 3$ は式 (4-1) にさらにもう1項加えた場合の距離減衰式を、また、 $j = 9$ は式 (4-5) の全ての項を考慮した場合の距離減衰式をそれぞれ表わしている。考慮する項数 $j = 2, 3$ および 9 の距離減衰式としては、図 4-1 の検討結果に基づき次式を選んだ。

$j = 2$ の場合

$$\log \widetilde{S}_A(T_k, M, D, GC_i) = g_1 + g_2 M + g_3 \log(D + 30) \quad (4-7)$$

$j = 3$ の場合

$$\log \widetilde{S}_A(T_k, M, D, GC_i) = g_1 + g_2 M + g_3 \log(D + 30) + g_5 M \log(D + D_0) \quad (4-8)$$

$j = 9$ の場合

$$\begin{aligned} \log \widetilde{S}_A(T_k, M, D, D_p, GC_i) = & g_1 + g_2 M + g_3 \log(D + D_0) + g_4 D_p + g_5 M \log(D + D_0) \\ & + g_6 M D_p + g_7 D_p \log(D + D_0) + g_8 M^2 \\ & + g_9 \{ \log(D + D_0) \}^2 + g_{10} D_p^2 \end{aligned} \quad (4-9)$$

ここで、式 (4-7) ~ 式 (4-9) の係数 (固有周期 0.5 秒の場合) は、地盤種別 GC_i に応じて表 4-1 に示す通りである。これより $j = 2, 3, 9$ に対する距離減衰 (固有周期 $T_k = 0.5$ 秒の場合) を $M = 5, 6, 7, 8$ に対して試算すると、それぞれ図 4-2, 図 4-3, 4-4 に示す通りである。これより $j = 9$ の場合には式 (3-12) の場合と同様に震央距離の増加に伴ない $\widetilde{S}_A$ スペクトルが一度大きくなった後、再び小さくなる等複雑に変化し、地震動の距離減衰に関する従来経験的事実とは明らかに一致しない。これは、恐らくばらつきも大きく、また観測記録数が必ずしも十分ではないデータをより忠実に説明しようと

表 4-1 加速度応答スペクトル (固有周期 0.5 秒) の距離減衰式の
項数 $j = 2, 3, 9$ の場合の係数

変数の 数	固有 周期	地盤 種別	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
$j=2$	$T=0.5$	1 種	2.016	0.261	-0.924							
		2 種	1.937	0.358	-1.052							
		3 種	2.777	0.338	-1.360							
$j=3$	$T=0.5$	1 種	7.961	-0.696	-3.862		0.472					
		2 種	0.860	0.528	-0.533		-0.081					
		3 種	7.016	-0.310	-3.438		0.315					
$j=9$	$T=0.5$	1 種	7.680	-0.559	-3.717	-0.013	0.424	3.2×10^{-3}	2.3×10^{-3}	-8.3×10^{-3}	4.9×10^{-3}	-2.1×10^{-4}
		2 種	3.034	-0.822	1.584	-0.013	-0.792	3.7×10^{-3}	-1.9×10^{-3}	0.216	0.570	-4.3×10^{-5}
		3 種	10.434	-2.013	-0.834	-0.049	1.629	0.012	-0.017	-0.103	-2.576	1.5×10^{-4}

した結果、かえって、本来の地震動の距離減衰特性を見失ってしまっていることを示している。また、 $j=3$ の場合についても同様であり、1 種地盤および 3 種地盤については $M=8$ の場合に既往の経験的事実とは一致しない距離減衰を与える。これに対して $j=2$ の場合には、いずれの条件下でも予測される距離減衰は、マグニチュード、震央距離および地盤種別の変化に伴ない相互に比較的調和がとれた変化を示し、おおむね妥当なものと考えることができる。なお、ここでは、 $j=3$ および 9 の場合に対する試算の結果のみを示したが、 $j \geq 3$ の場合には、いずれの場合にもここに示した場合と同様な傾向を示す。

以上をまとめると、 $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の形に関しては次のようにまとめることができる。すなわち、 $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰特性を推定するために、現状において工学的に利用可能な情報は地震の規模 (マグニチュード M) および距離の指標 (震央距離 D , 震源深さ D_p) の 3 者と考えられる。これらを説明変数として、式 (4-2) のように地盤種別ごとの $\tilde{S}_A$ スペクトルの常用対数、すなわち、 $\log \tilde{S}_A$ を M および $\log (D + D_0)$ の線形回帰式で近似した場合の重相関係数 R は、これにそれぞれ M , D_p , $\log (D + D_0)$ の 2 乗までの項およびこれら 3 者間の相互の積の項を加えた回帰式を用いた場合とほとんど変わらない。しかしながら、これらによる距離減衰を実際に計算すると、 M および $\log (D + D_0)$ の項に他の項を加えた距離減衰式は地震記録ごとのスペクトルの変化や記録数が必ずしも十分でないことを敏感に反映する結果、かえって既往の距離減衰に対する経験的事実と反する結果を与える。したがって、今回の検討結果の範囲では、式 (3-2) のように $\log \tilde{S}_A$ を M および $\log (D + 30)$ の線形回帰式で近似した場合が最も妥当な距離減衰を与えるということができる。

なお、マグニチュード M , 震央距離 D , 震源深さ D_p の 3 者を説明変数として地盤種別 GC_i ごとに求めた $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰特性の予測式が実測値を予測するうえでなお大きなバラツキを有している理由としては 3-1 で最大地震動の項で示したと同じ理由が挙げられる。

4-2 距離減衰式の地盤種別依存性の検討

式 (4-1) による解析では、係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(T_k, GC_i)$ がいずれも固有周

期 T_k の他に、地盤種別 GC_i ($i = 1, 2, 3$) によって変化すると仮定した。ここでは、3つの係数の地盤種別依存性を検討するために、3-2と同様の手法により、地盤種別 GC_i ごとに係数 a , b , c が違うとし、これらをそれぞれ独立に定めた場合と、係数 a , b , c は地盤種別 GC_i によらないと仮定し、全地盤種別に対し係数 a , b , c が一定となるように定めた場合のいずれが、より $\widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$ スペクトルに対する近似度の高い推定式となるかを検討することとした。

前節の検討結果に基づき、 M および Δ の2変数を選び、式(4-1)の距離減衰式を用いることとすれば、地盤種別 GC_i ($i = 1, 2, 3$) に応じて、 $\widetilde{S}_A$ スペクトルを与えるために、以下の8種類の推定式が考えられる。

$$\widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = \begin{cases} a(T_k) \times 10^{b(T_k)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(T_k)} & (\text{ケース1}) \\ a(T_k) \times 10^{b(T_k)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(T_k, GC_i)} & (\text{ケース2}) \\ a(T_k) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(T_k)} & (\text{ケース3}) \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(T_k)} & (\text{ケース4}) \\ a(T_k) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(T_k, GC_i)} & (\text{ケース5}) \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(T_k, GC_i)} & (\text{ケース6}) \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(T_k)} & (\text{ケース7}) \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(T_k, GC_i)} & (\text{ケース8}) \end{cases} \quad (4-10)$$

ここで、 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(T_k, GC_i)$ は、固有周期 T_k 秒に対する係数 a , b , c が、地盤種別 GC_i ($i = 1, 2, 3$) ごとに変化することを、また、 $a(T_k)$, $b(T_k)$, $c(T_k)$ は、固有周期 T_k 秒に対する係数 a , b , c が地盤種別 GC_i ごとに変化せず一定値をとることを表わしている。式(4-10)でケース1は、係数 a , b , c がともに地盤種別 GC_i によらないため、地盤種別別の $\widetilde{S}_A$ スペクトルを与えることはできないが、他のケースとの比較のために解析したものである。一方、ケース8は係数 a , b , c が全て地盤種別によるとしたもので、この場合には1種~3種のそれぞれの地盤種別ごとに独立に解析した場合(詳細は、土研資料第1864号参照)と、結果的には同一の係数が得られることとなる。

ここで、係数を地盤種別によらず一定として解析するためには、ダミー変数を用いる。たとえば、式(4-10)のケース7の場合を例にとると、次のような回帰式を仮定する。

$$\begin{aligned} \log \widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = & \log a(T_k, GC_i) + a_2 \log a(T_k, GC_2) + a_3 \log a(T_k, GC_3) \\ & + \{ b(T_k, GC_i) + a_2 b(T_k, GC_2) + a_3 b(T_k, GC_3) \} M \\ & + c(T_k) \log(\Delta + \Delta_0) \end{aligned} \quad (4-11)$$

ここで、

$\widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$: 地盤種別 GC_i ($i = 1, 2, 3$) に属するマグニチュード M , 震央距離 Δ , 固有周期 T_k (秒) の $\widetilde{S}_A$ スペクトル (gal)

$$a_2 = \begin{cases} 0 & \dots\dots\dots GC_i = 1, 3 \text{ の場合} \\ 1 & \dots\dots\dots GC_i = 2 \text{ の場合} \end{cases}$$

$$a_3 = \begin{cases} 0 & \dots\dots\dots GC_i = 1, 2 \text{ の場合} \\ 1 & \dots\dots\dots GC_i = 3 \text{ の場合} \end{cases}$$

$$a(T_k, GC_1), a(T_k, GC_2), a(T_k, GC_3), b(T_k, GC_1), b(T_k, GC_2),$$

$b(T_k, GC_3), c(T_k)$: 固有周期 $T_k (k = 1, 2, \dots\dots\dots 10)$ ごとに重回帰分析により定める定数。

式(4-11)は、 c の項が地盤種別 GC_i ごとに变化していないが、これは式(4-11)を次の形に書き改めるとよくわかる。

$$\log \widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_1) = \log a(T_k, GC_1) + b(T_k, GC_1)M + c(T_k) \log(\Delta + \Delta_0)$$

$$\begin{aligned} \log \widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_2) = & \{ \log a(T_k, GC_1) + \log a(T_k, GC_2) \} \\ & + \{ b(T_k, GC_1) + b(T_k, GC_2) \} M + c(T_k) \log(\Delta + \Delta_0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \log \widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_3) = & \{ \log a(T_k, GC_1) + \log a(T_k, GC_3) \} \\ & + \{ b(T_k, GC_1) + b(T_k, GC_3) \} M + c(T_k) \log(\Delta + \Delta_0) \end{aligned} \quad (4-12)$$

このようにして、2章に示した197組の $\widetilde{S}_A$ スペクトルを用いて、ケース1～ケース8の係数を定め、それぞれのケースにおける重相関係数 R および、自由度調整済み重相関係数 R^* を求めると、図4-5のようになる。これより、以下の事項が指摘される。

1) 係数 a, b, c を全て地盤種別 GC_i ごとに同一としたケース1では、重相関係数 R は、他のケースと比較して著しく小さい。しかしながら、ケース1を除く他のケースでは、考慮する項数が一番多いケース8の場合に当然ながら重相関係数 R は、最も大きくなる。ただし、ケース2～ケース6は、おおむね同程度の重相関係数 R となっており、また、ケース7およびケース8では、これらよりもやや大きくなっている。このような傾向は、固有周期 T によって、変わらない。

2) 自由度調整済み重相関係数 R^* によって、ケース1～ケース8を比較しても、上記1)と同様の傾向が認められる。しかしながら、固有周期 T_k によって異なるが、ケース7の場合に R^* が最大となる場合が多い。以上より、自由度調整済み重相関係数 R^* をもととすれば、ケース8との差はほとんどないが、ケース7の場合が全体としてやや近似度が高いと考えられる。ケース7およびケース8の距離減衰特性の比較等に関しては4-4に示す。

4-3 距離減衰式の固有周期依存性の検討

式(4-1)の解析では、係数 $a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(T_k, GC_i)$ がいずれも地盤種別 GC_i ($i = 1, 2, 3$)ごとに、固有周期 $T_k (k = 1, 2, \dots\dots\dots 10)$ によって変わると仮定した。ここでは、4-

2とは反対に、3つの係数の固有周期依存性を検討するために、係数 a, b, c が固有周期の関数であるとし、これらをそれぞれの固有周期 T_k ごとに独立に定めた場合と固有周期 T によらず一定であると仮定し、全固有周期に対して係数 a, b, c が同一の値となるように定めた場合のいずれが、より近似度の高い推定式となるかを検討することとする。

4-1の検討結果に基づき、説明変数としては M および Δ の2つを選び、式(4-1)の距離減衰式を用いることとする。地盤種別 GC_i ($i = 1, 2, 3$)ごとに固有周期 T_k に応じて、 $\widetilde{S}_A$ スペクトルを表わすためには、以下の8種類の推定式が考えられる。

$$\widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = \begin{cases} a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(GC_i)} & (\text{ケース1}) \\ a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(T_k, GC_i)} & (\text{ケース2}) \\ a(GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(GC_i)} & (\text{ケース3}) \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(GC_i)} & (\text{ケース4}) \\ a(GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(T_k, GC_i)} & (\text{ケース5}) \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(T_k, GC_i)} & (\text{ケース6}) \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(GC_i)} & (\text{ケース7}) \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(T_k, GC_i)} & (\text{ケース8}) \end{cases} \quad (4-13)$$

ここで、 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(T_k, GC_i)$ は、地盤種別 GC_i ($i = 1, 2, 3$)ごとに定められる係数 a, b, c が、固有周期 T_k によって変化することを、また、 $a(GC_i)$, $b(GC_i)$, $c(GC_i)$ は、地盤種別 GC_i ($i = 1, 2, 3$)ごとに定められる係数 a, b, c が固有周期 T_k によって変化せず、一定値をとることを表わしている。式(4-13)でケース1は、係数 a, b, c がともに固有周期 T によらないため、全周期に対してスペクトル値は同一となる。これは、明らかに応答スペクトルとしては意味がないが、他ケースとの比較のため解析したものである。一方、ケース8は、係数 a, b, c が全て地盤種別 GC_i および固有周期 T_k によって変化すると仮定した場合である。この場合には、各固有周期および地盤種別ごとに、独立に解析した場合(土研資料第1864号の結果を参照)と結果的には同一の係数が得られることとなる。

ここで、係数を固有周期 T_k によらず一定として解析するためには、前節と同じようにダミー変数を用いる。たとえば、式(4-13)のケース7の場合を例にとると、次式の回帰式を仮定する。

$$\begin{aligned} \log \widetilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = & \log a(T_1, GC_i) + \beta_2 \log a(T_2, GC_i) + \dots \\ & + \beta_m \log a(T_m, GC_i) + \dots \\ & + \beta_{10} \log a(T_{10}, GC_i) \end{aligned}$$

$$+ \{ b(T_1, GC_i) + \beta_2 b(T_2, GC_i) + \dots \dots \dots$$

$$+ \beta_m b(T_m, GC_i) + \dots \dots \dots$$

$$+ \beta_{10} b(T_{10}, GC_i) \} M$$

$$+ c(GC_i) \log(D + D_0)$$

(4-14)

ここで、

$\widetilde{S}_A(T_k, M, D, GC_i)$: 地盤種別 GC_i ($i = 1, 2, 3$) に属するマグニチュード M , 震央距離 D , 固有周期 T_k (秒) の $\widetilde{S}_A$ スペクトル (gal)

$$\beta_m = \begin{cases} 0 & \dots \dots \dots k \neq m \text{ の場合} \\ 1 & \dots \dots \dots k = m \text{ の場合} \end{cases}$$

$$k = 1, 2, \dots \dots \dots, 10$$

$T_1, T_2, \dots \dots \dots, T_{10}$: 解析に用いる固有周期で、本解析では、0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1., 1.5, 2., 3 秒とした。

$a(T_m, GC_i), b(T_m, GC_i) \dots \dots \dots (m = 1, 2, 3, \dots \dots 10), c(GC_i)$: 地盤種別 GC_i ($i = 1, 2, 3$) ごとに重回帰分析により定める係数。

式(4-14)では、 c の項が固有周期 T_k ごとに変化していないが、これは式(4-14)を次の形に書き改めるとよくわかる。

$$\log \widetilde{S}_A(T_1, M, D, GC_i) = \log a(T_1, GC_i) + b(T_1, GC_i)M + c(GC_i) \log(D + D_0)$$

$$\log \widetilde{S}_A(T_2, M, D, GC_i) = \{ \log a(T_1, GC_i) + \log a(T_2, GC_i) \}$$

$$+ \{ b(T_1, GC_i) + b(T_2, GC_i) \} M + c(GC_i) \log(D + D_0)$$

⋮

$$\log \widetilde{S}_A(T_m, M, D, GC_i) = \{ \log a(T_1, GC_i) + \log a(T_m, GC_i) \}$$

$$+ \{ b(T_1, GC_i) + b(T_m, GC_i) \} M + c(GC_i) \log(D + D_0)$$

⋮

$$\log \widetilde{S}_A(T_{10}, M, D, GC_i) = \{ \log a(T_1, GC_i) + \log a(T_{10}, GC_i) \}$$

$$+ \{ b(T_1, GC_i) + b(T_{10}, GC_i) \} M + c(GC_i) \log(D + D_0)$$

(4-15)

このようにして、2章に示した197組の $\widetilde{S}_A$ スペクトルを用いて、ケース1～ケース8の係数を、重回帰分析により求め、それぞれのケースにおける重相関係数 R および自由度調整済み重相関係数 R^* を求めると、図4-6のようになる。

これより、以下の事項が指摘される。

1) 係数 a, b, c を全ての固有値に対して同一としたケース 1 では、重相関係数 R は、他のケースに比較して極端に小さい。これは、固有周期に伴うスペクトル値の変化を考慮できない回帰式を用いているため、当然の結果である。ケース 1 を除く他のケースでは、考慮する項数が多くなるほど、当然、重相関係数 R は大きくなるが、地盤種別にかかわらず、ケース 2～ケース 6 は、おおむね同程度の重相関係数 R を与え、また、ケース 7 およびケース 8 では、これらよりも一段高い重相関係数 R を与えている。

2) 自由度調整済み重相関係数 R^* によって、ケース 1～ケース 8 を比較しても、上記 1) と同様の傾向が認められる。しかしながら、1 種地盤を除く 2 種および 3 種地盤の場合には、ケース 7 で R^* は最大となっている。また、1 種地盤の場合にも、ケース 7 の R^* はケース 8 の R^* とほとんど変わらない。

4-4 $\widetilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の提案

前節までの検討結果を総合すると、 $\widetilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式としてはマグニチュード M および震央距離 D の 2 つを説明変数として持ち、係数 a, b, c は固有周期 T_k ($k = 1, 2, \dots, 10$) および地盤種別 GC_i ($i = 1, 2, 3$) に応じて以下のように定めた場合が他のケースに比較して相対的に高い精度を有していると考えられる。

- ㉑ $a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(T_k, GC_i) \dots\dots\dots$ 4-2 のケース 8 もしくは 4-3 のケース 8

$$\widetilde{S}_A(T_k, M, D, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (D+30)^{c(T_k, GC_i)} \quad (4-16)$$

- ㉒ $a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(T_k) \dots\dots\dots$ 4-2 のケース 7

$$\widetilde{S}_A(T_k, M, D, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (D+30)^{c(T_k)} \quad (4-17)$$

- ㉓ $a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(GC_i) \dots\dots\dots$ 4-3 のケース 7

$$\widetilde{S}_A(T_k, M, D, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (D+30)^{c(GC_i)} \quad (4-18)$$

- ㉔ $a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c \dots\dots\dots$ 4-2 のケース 7 と 4-3 のケース 7 を合成した場合

$$\widetilde{S}_A(T_k, M, D, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (D+30)^c \quad (4-19)$$

したがって、以下では上記 4 ケースにつき、それぞれの特徴および差異を検討することとする。

上記 4 ケースに対する係数 a, b, c をそれぞれ表 4-2～4-5 に示す。また、これを固有周期 T_k に対してプロットするとそれぞれ図 4-7～4-10 のようになる。これより、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 および b は上記の式 (4-16)～式 (4-19) のいずれの回帰式を用いても同じような値をとり、顕著な違いは認められない。

表 4-2 $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(T_k, GC_i)$
および重相関係数 $R(T_k, GC_i)$ (式(4-16))

固有周期 T (秒)	1 種 地 盤				2 種 地 盤				3 種 地 盤			
	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(T_k, GC_i)$	$R(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(T_k, GC_i)$	$R(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(T_k, GC_i)$	$R(T_k, GC_i)$
0.1	2090	0.2024	-1.120	0.66	982.0	0.2892	-1.289	0.66	1306	0.2074	-1.176	0.62
0.15	2543	0.2189	-1.199	0.74	696.1	0.3067	-1.255	0.67	930.3	0.2024	-1.064	0.58
0.2	1558	0.2595	-1.258	0.76	504.5	0.3294	-1.238	0.62	1121	0.2164	-1.140	0.62
0.3	1140	0.3134	-1.447	0.79	242.7	0.3282	-1.106	0.59	1254	0.2098	-1.133	0.61
0.5	111.0	0.2611	-0.9239	0.61	86.50	0.3581	-1.052	0.63	598.7	0.3380	-1.360	0.59
0.7	60.24	0.2857	-0.9687	0.69	34.42	0.4407	-1.180	0.70	71.33	0.5737	-1.669	0.66
1.0	57.69	0.3657	-1.321	0.74	4.448	0.5256	-1.084	0.67	7.684	0.6202	-1.433	0.56
1.5	13.47	0.4691	-1.428	0.82	0.6847	0.6209	-1.140	0.75	0.8030	0.6477	-1.180	0.60
2.0	10.77	0.4537	-1.422	0.80	0.2851	0.6078	-1.028	0.78	0.3284	0.5414	-0.7751	0.62
3.0	2.466	0.4849	-1.331	0.82	0.2890	0.5462	-1.010	0.76	0.2515	0.5618	-0.9433	0.62

表 4-3 $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(T_k)$ (式(4-17))

固有周期 T (sec)	1 種 地 盤		2 種 地 盤		3 種 地 盤		$c(T_k)$	備 考
	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$		
0.1	2700	0.217	897.4	0.273	1317	0.221	-1.221	$R = 0.6851$ $\sigma = 0.2523$
0.15	2646	0.221	660.7	0.297	954.1	0.249	-1.215	$R = 0.6990$ $\sigma = 0.2377$
0.2	1463	0.256	501.7	0.328	1139	0.246	-1.234	$R = 0.6684$ $\sigma = 0.2525$
0.3	642.2	0.280	282.6	0.356	1273	0.237	-1.221	$R = 0.6642$ $\sigma = 0.2550$
0.5	150.7	0.279	85.6	0.356	567.7	0.240	-1.044	$R = 0.6800$ $\sigma = 0.2558$
0.7	99.24	0.315	33.76	0.437	65.52	0.417	-1.165	$R = 0.7612$ $\sigma = 0.2457$
1.0	42.52	0.348	5.193	0.554	7.440	0.548	-1.201	$R = 0.7408$ $\sigma = 0.3013$
1.5	8.335	0.441	0.781	0.645	0.811	0.666	-1.240	$R = 0.7781$ $\sigma = 0.2874$
2.0	5.116	0.410	0.326	0.632	0.349	0.651	-1.130	$R = 0.7836$ $\sigma = 0.2700$
3.0	1.401	0.462	0.329	0.570	0.259	0.613	-1.108	$R = 0.7799$ $\sigma = 0.2536$

注) $R(T)$: 重相関係数
 $\sigma(T)$: 標準偏差

表 4-4 $\widetilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(GC_i)$ (式(4-18))

固有周期 〔秒〕	1 種 地 盤		2 種 地 盤		3 種 地 盤		備考
	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	
0.1	2849	0.221	804.6	0.253	1309	0.211	重相関 係数 R 1種: 0.93 2種: 0.90 3種: 0.86 $\log U_{SA}$ の標準 偏差 σ 1種: 0.255 2種: 0.266 3種: 0.256
0.15	2834	0.225	597.0	0.279	949.7	0.241	
0.2	1495	0.257	442.3	0.305	1130	0.231	
0.3	676.7	0.283	253.2	0.336	1266	0.227	
0.5	249.4	0.309	96.96	0.379	581.6	0.284	
0.7	120.7	0.327	32.58	0.431	65.78	0.424	
1.0	47.21	0.354	4.780	0.539	7.423	0.544	
1.5	8.38	0.441	0.683	0.620	0.804	0.650	
2.0	6.809	0.427	0.330	0.634	0.352	0.669	
3.0	1.969	0.472	0.342	0.577	0.262	0.638	

$$c(GC_i) = \begin{cases} -1.242 & (1 \text{ 種地盤}) \\ -1.138 & (2 \text{ 種地盤}) \\ -1.187 & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases}$$

表 4-5 $\widetilde{S}_A$ 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 (式(4-19))

固有周期 〔秒〕	1 種 地 盤		2 種 地 盤		3 種 地 盤		備考
	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	
0.1	2420	0.211	848.0	0.262	1307	0.208	重相関 係数 $R =$ 0.90 $\log U_{SA}$ の標準 偏差 $\sigma =$ 0.261
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	

$$c = -1.178$$

なお、係数 a および b の値に関しては以下のような特徴がある。

i) 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。ただし、3種地盤の場合には固有周期が0.3秒付近で小さなピークを有している。

ii) 係数 b は地盤種別によって大きく異なり、一般に1種地盤の係数 b が2種および3種地盤の b よりも小さい。また、この傾向は固有周期が約0.5秒以上の長周期領域において著しい。一方、2種および3種地盤の場合についていえば、係数 b は固有周期が約0.3秒以下においては0.2～0.35程度であるのに対し、固有周期が約1秒以上では0.50～0.65程度と大きくなる。係数 b はマグニチュード M が1.0大きくなった場合に $\widetilde{S}_A$ スペクトルが何倍になるかを表わす指標である。上記より、2種および3種地盤の場合には M が1.0大きくなると、固有周期が約0.3秒以下の領域において $\widetilde{S}_A$ スペクトルは1.6～2.2倍となるのに対し、固有周期が約1秒以上の領域においては $\widetilde{S}_A$ スペクトルは3.5～4.5倍になることを示している。また、1種地盤の場合には、これほど大きく固有周期によって係数 b は変化しないが、固有周期が約0.3秒以下では0.2～0.3程度（単位の M の増加に伴ない $\widetilde{S}_A$ スペクトルは、1.6～2.0倍増加）であるのに対し、固有周期が約1.0秒以上では0.35～0.45程度（同、2.2～2.8倍増加）となっている。

2) 係数 c は式(4-16)～(4-19)の回帰式に応じて変化するが、以下の特徴がある。

i) 固有周期 T_k および地盤種別 GC_i ごとに独立に求めた場合(図4-7)によれば、係数 c は T_k および GC_i によって系統的な変わり方をしていない。

ii) 係数 c を固有周期 T_k ごとに求めた結果(図4-8)によれば、係数 c は固有周期0.5秒付近でやや小さくなる傾向があるものの、いずれの周期に対しても-1.05～-1.25の範囲におさまっており、固有周期により大きく変化しない。したがって、基本的には係数 c を固有周期に応じて変化させる必要はないように考えられる。

iii) 係数 c を地盤種別 GC_i ごとに求めた結果(図4-9)によれば、1種地盤、2種地盤、3種地盤に対する係数 c はそれぞれ-1.24, -1.14, -1.19となる。地盤種別による係数 c の上限と下限の差は0.1程度しかなく、基本的には係数 c を地盤種別ごとに変化させる必要はないように考えられる。

次に、上記回帰式により代表的な M および Δ に対して $\widetilde{S}_A$ スペクトルを試算した一例が図4-11である。ここでは、いずれの回帰式を用いても大きな違いはないことから、上記4種類の回帰式中最も多くの項数を含む式(4-16)と最も簡単な式(4-19)の比較を示している。これによれば、 M が大きく、 Δ が小さい範囲(たとえば、 $M=8$, $\Delta=50$ kmの場合)において3種地盤の $\widetilde{S}_A$ スペクトルの固有周期0.7秒付近では両者の違いがはっきりと表われるが、この他には、両ケースの違いはわずかであり、実用上はほとんど差が無いといってもよいことがわかる。ここで、 $M=8$, $\Delta=50$ kmといった大規模地震による近距離で得られた記録は今回の解析対象記録には全く含まれておらず、いずれが正しいとは現段階では判断できない。今後の記録の蓄積を待って検討していくことが必要である。したがって、基本的には式(4-16)～式(4-19)のいずれのケースを使用してもよいと考えられるが、ここでは係数 c の項が最も簡単になっていることを考慮し、式(4-19)を採用することとする。

式(4-19)による $\widetilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰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、もととなった実測の $\widetilde{S}_A$ 値とともに予測式を示すと図 4-12 のようになる。また、式 (4-19) による $\widetilde{S}_A$ スペクトルの期待値を主要な震央距離 ($\Delta = 50 \text{ km}, 100 \text{ km}, 200 \text{ km}$) およびマグニチュード ($M = 5, 6, 7, 8$) の組合せに対して示すと図 4-13 のようになる。これらの $\widetilde{S}_A$ スペクトルと既往の研究成果の比較については 5 章に示すこととする。

次に、式 (4-19) による $\widetilde{S}_A$ スペクトルの期待値のばらつきを示すために、実測のスペクトル $\widetilde{S}_A^{OB}$ と、これが得られた地盤の M , Δ および地盤種別 GC_i ($i = 1, 2, 3$) から式 (4-19) により求めた期待値 $\widetilde{S}_A^P$ の比 $U_{SA}(T)$ を次式により定義した。

$$U_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i) = \frac{\widetilde{S}_A^{OB}(T_k, M, \Delta, GC_i)}{\widetilde{S}_A^P(T_k, M, \Delta, GC_i)} \quad (4-20)$$

ここで、

$U_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i)$: $\widetilde{S}_A(T_k)$ スペクトルのばらつきの度合いを表わす指標

$\widetilde{S}_A^{OB}(T_k, M, \Delta, GC_i)$: 重回帰分析のもととなった $\widetilde{S}_A$ スペクトルの実測値

$\widetilde{S}_A^P(T_k, M, \Delta, GC_i)$: 式 (4-19) から求められる $\widetilde{S}_A$ スペクトルの期待値

したがって、実際のスペクトル値 $\widetilde{S}_A^{OB}(T_k, M, \Delta, GC_i)$ は、式 (4-20) から、次式で与えられることになる。

$$\begin{aligned} \widetilde{S}_A^{OB}(T_k, M, \Delta, GC_i) &= U_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i) \cdot \widetilde{S}_A^P(T_k, M, \Delta, GC_i) \\ &= U_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i) \left[a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^c \right] \end{aligned} \quad (4-21)$$

式 (4-20) による $U_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i)$ を主要な固有周期 ($T = 0.2 \text{ 秒}, 0.5 \text{ 秒}, 2 \text{ 秒}$) に対して求め、これと M および Δ の関係を示すと図 4-14 のようになる。これによれば、 U_{SA} は M および Δ 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 4-6 のようになる。また、これを各周期に対して示すと図 4-15 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、 $x \equiv \log U_{SA}$ 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。

$$P(a < x \leq b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] dx \quad (4-22)$$

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 4-6 に示した通りとなる。ここで、 $s = x / \sigma$ とおけば s は標準正規分布に従うこととなり、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 P(a < x < b) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{a}{\sigma}}^{\frac{b}{\sigma}} \exp \left[-\frac{1}{2} s^2 \right] ds \\
 &= \phi \left(\frac{b}{\sigma} \right) - \phi \left(\frac{a}{\sigma} \right)
 \end{aligned}
 \tag{4-23}$$

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、

$$\begin{aligned}
 p &= 1 - P \left[-\infty < x \leq b \right] \\
 &= 1 - \phi \left(\frac{b}{\sigma} \right)
 \end{aligned}
 \tag{4-24}$$

となる。なお、表4-6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0.255となる。また、これにより式(4-24)による $p \sim U_{SA}(T_k)$ の関係を求めると図3-17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(4-20)の係数 $U_{SA}(T_k)$ を乗じて式(4-21)により応答スペクトル値を推定することができる。一例として $p=0.1 \sim 0.9$ と変化させた場合の $\widetilde{S}_A$ スペクトルの1例($M=6$ および8、 $d=100\text{km}$ の場合)を図4-16に示す。

表 4 - 6 (1) $\log U_{SA}$ の頻度分布 (1 種地盤)

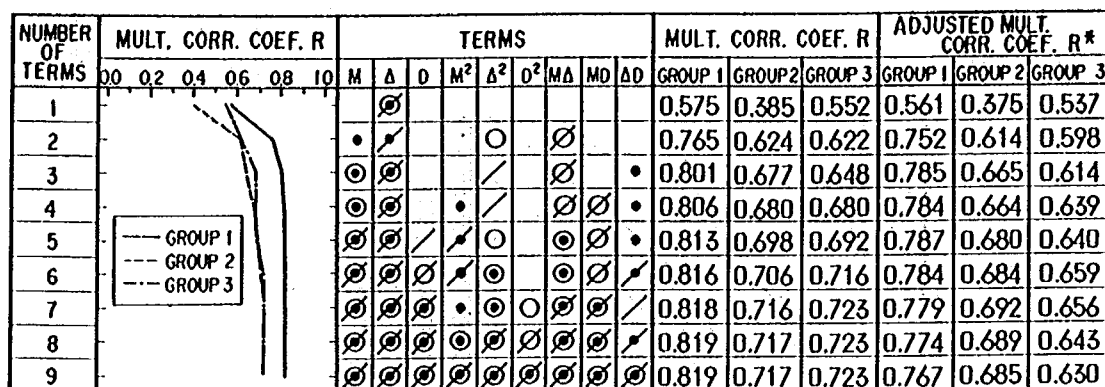
$\log U_{SA}$	固 有 周 期 T (秒)									
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	3
$-1 \leq \log U < -0.9$	0 (0.01)	0 (0.001)	0 (0.002)	0 (0.004)	0 (0.02)	0 (0.003)	0 (0.02)	0 (0.007)	0 (0.02)	0 (0.005)
$-0.9 \leq \log U < -0.8$	0 (0.04)	0 (0.008)	0 (0.007)	0 (0.02)	0 (0.07)	0 (0.02)	0 (0.05)	0 (0.03)	0 (0.04)	0 (0.02)
$-0.8 \leq \log U < -0.7$	0 (0.12)	0 (0.04)	0 (0.03)	0 (0.06)	0 (0.18)	0 (0.05)	0 (0.16)	0 (0.09)	0 (0.13)	0 (0.08)
$-0.7 \leq \log U < -0.6$	0 (0.33)	0 (0.15)	0 (0.13)	0 (0.21)	0 (0.43)	0 (0.19)	1 (0.40)	0 (0.28)	0 (0.36)	0 (0.25)
$-0.6 \leq \log U < -0.5$	0 (0.78)	0 (0.45)	0 (0.42)	0 (0.57)	1 (0.94)	0 (0.55)	0 (0.89)	0 (0.70)	0 (0.83)	0 (0.64)
$-0.5 \leq \log U < -0.4$	3 (1.61)	0 (1.17)	2 (1.12)	1 (1.34)	4 (1.78)	4 (1.31)	1 (1.73)	2 (1.51)	1 (1.66)	2 (1.44)
$-0.4 \leq \log U < -0.3$	4 (2.87)	5 (2.50)	2 (2.45)	4 (2.66)	3 (2.99)	2 (2.64)	3 (2.96)	3 (2.80)	6 (2.91)	2 (2.74)
$-0.3 \leq \log U < -0.2$	3 (4.44)	6 (4.42)	6 (4.40)	6 (4.45)	4 (4.41)	4 (4.45)	8 (4.43)	5 (4.46)	6 (4.44)	7 (4.46)
$-0.2 \leq \log U < -0.1$	6 (5.94)	4 (6.46)	5 (6.52)	8 (6.27)	7 (5.71)	5 (6.30)	5 (5.79)	6 (6.08)	4 (5.88)	6 (6.16)
$-0.1 \leq \log U < 0$	6 (6.87)	9 (7.83)	8 (7.94)	5 (7.45)	3 (6.50)	10 (7.51)	4 (6.62)	6 (7.09)	4 (6.76)	8 (7.24)
$0 \leq \log U < 0.1$	9 (6.87)	10 (7.83)	9 (7.94)	3 (7.45)	6 (6.50)	5 (7.51)	8 (6.62)	10 (7.09)	10 (6.76)	5 (7.24)
$0.1 \leq \log U < 0.2$	5 (5.94)	3 (6.46)	4 (6.52)	8 (6.27)	7 (5.71)	6 (6.30)	6 (5.79)	6 (6.08)	6 (5.88)	8 (6.16)
$0.2 \leq \log U < 0.3$	5 (4.44)	6 (4.42)	7 (4.40)	9 (4.45)	4 (4.41)	4 (4.45)	4 (4.43)	3 (4.46)	4 (4.44)	4 (4.46)
$0.3 \leq \log U < 0.4$	2 (2.87)	0 (2.50)	0 (2.45)	0 (2.66)	4 (2.99)	4 (2.64)	2 (2.96)	2 (2.80)	1 (2.91)	0 (2.74)
$0.4 \leq \log U < 0.5$	2 (1.61)	1 (1.17)	3 (1.12)	0 (1.34)	1 (1.78)	2 (1.31)	3 (1.73)	1 (1.51)	1 (1.66)	3 (1.44)
$0.5 \leq \log U < 0.6$	0 (0.78)	1 (0.45)	0 (0.42)	2 (0.57)	2 (0.94)	0 (0.55)	0 (0.89)	1 (0.70)	2 (0.83)	0 (0.64)
$0.6 \leq \log U < 0.7$	0 (0.33)	1 (0.15)	0 (0.13)	0 (0.21)	0 (0.43)	0 (0.19)	0 (0.40)	1 (0.28)	1 (0.36)	1 (0.25)
$0.7 \leq \log U < 0.8$	1 (0.12)	0 (0.04)	0 (0.03)	0 (0.06)	0 (0.18)	0 (0.05)	1 (0.16)	0 (0.09)	0 (0.13)	0 (0.08)
$0.8 \leq \log U < 0.9$	0 (0.04)	0 (0.008)	0 (0.007)	0 (0.02)	0 (0.07)	0 (0.02)	0 (0.05)	0 (0.03)	0 (0.04)	0 (0.02)
$0.9 \leq \log U < 1.0$	0 (0.01)	0 (0.001)	0 (0.002)	0 (0.004)	0 (0.02)	0 (0.003)	0 (0.02)	0 (0.007)	0 (0.02)	0 (0.005)
標 準 偏 差 σ	0.262	0.229	0.226	0.241	0.278	0.239	0.273	0.254	0.267	0.249

表 4-6 (2) $\log U_{SA}$ の頻度分布 (2 種地盤)

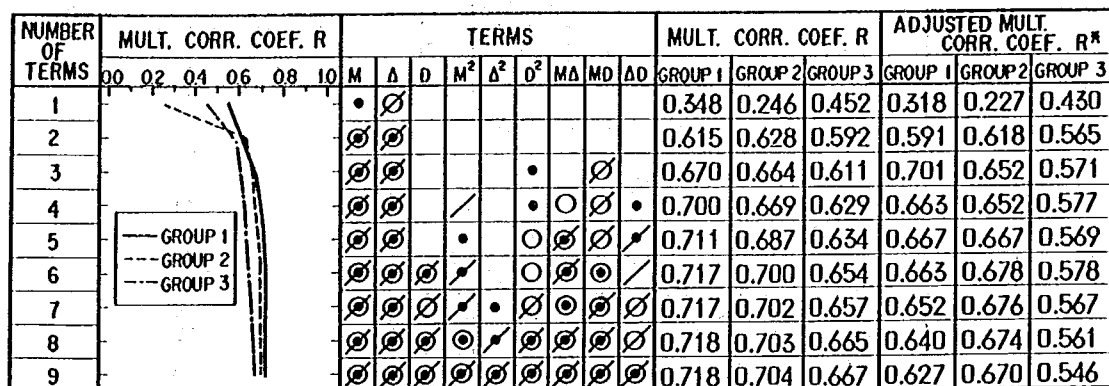
$\log U_{SA}$	固 有 周 期 T (秒)									
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	3
$-1 \leq \log U < -0.9$	0 (0.02)	0 (0.009)	0 (0.04)	0 (0.04)	0 (0.02)	0 (0.009)	0 (0.11)	0 (0.07)	0 (0.03)	0 (0.02)
$-0.9 \leq \log U < -0.8$	0 (0.07)	0 (0.05)	0 (0.13)	0 (0.12)	0 (0.05)	0 (0.05)	1 (0.29)	0 (0.20)	0 (0.09)	0 (0.05)
$-0.8 \leq \log U < -0.7$	0 (0.23)	0 (0.16)	0 (0.37)	0 (0.34)	0 (0.19)	0 (0.16)	1 (0.68)	1 (0.51)	0 (0.29)	0 (0.18)
$-0.7 \leq \log U < -0.6$	0 (0.67)	0 (0.51)	1 (0.93)	0 (0.88)	1 (0.58)	1 (0.52)	1 (1.45)	1 (1.17)	1 (0.79)	1 (0.56)
$-0.6 \leq \log U < -0.5$	1 (1.66)	3 (1.39)	5 (2.07)	3 (1.99)	1 (1.51)	1 (1.40)	3 (2.76)	3 (2.40)	3 (1.85)	4 (1.47)
$-0.5 \leq \log U < -0.4$	5 (3.56)	3 (3.21)	4 (4.03)	6 (3.95)	3 (3.36)	6 (3.22)	5 (4.72)	3 (4.38)	3 (3.79)	1 (3.32)
$-0.4 \leq \log U < -0.3$	6 (6.55)	5 (6.27)	6 (6.89)	8 (6.83)	8 (6.40)	5 (6.28)	3 (7.25)	6 (7.09)	10 (6.72)	7 (6.36)
$-0.3 \leq \log U < -0.2$	11 (10.4)	12 (10.4)	10 (10.3)	9 (10.3)	9 (10.4)	6 (10.4)	10 (10.1)	16 (10.2)	8 (10.4)	7 (10.4)
$-0.2 \leq \log U < -0.1$	15 (14.1)	16 (14.5)	10 (13.5)	11 (13.6)	13 (14.3)	10 (14.5)	17 (12.5)	7 (13.0)	12 (13.8)	16 (14.4)
$-0.1 \leq \log U < -0$	9 (16.4)	11 (17.2)	16 (15.4)	17 (15.6)	17 (16.8)	19 (17.1)	14 (13.9)	17 (14.6)	13 (15.9)	18 (16.9)
$0 \leq \log U < 0.1$	21 (16.4)	16 (17.2)	14 (15.4)	17 (15.6)	20 (16.8)	22 (17.1)	16 (13.9)	13 (14.6)	18 (15.9)	11 (16.9)
$0.1 \leq \log U < 0.2$	13 (14.1)	19 (14.5)	13 (13.5)	8 (13.6)	11 (14.3)	18 (14.5)	9 (12.5)	12 (13.0)	15 (13.8)	20 (14.4)
$0.2 \leq \log U < 0.3$	12 (10.4)	9 (10.4)	15 (10.3)	13 (10.3)	13 (10.4)	13 (10.4)	8 (10.1)	13 (10.2)	12 (10.4)	12 (10.4)
$0.3 \leq \log U < 0.4$	6 (6.55)	9 (6.27)	8 (6.89)	7 (6.83)	5 (6.40)	1 (6.28)	8 (7.25)	8 (7.09)	6 (6.72)	6 (6.36)
$0.4 \leq \log U < 0.5$	5 (3.56)	2 (3.21)	3 (4.03)	5 (3.95)	4 (3.36)	1 (3.22)	8 (4.72)	4 (4.38)	4 (3.79)	3 (3.32)
$0.5 \leq \log U < 0.6$	2 (1.66)	2 (1.39)	1 (2.07)	3 (1.99)	1 (1.51)	3 (1.40)	1 (2.76)	0 (2.40)	1 (1.85)	0 (1.47)
$0.6 \leq \log U < 0.7$	0 (0.67)	0 (0.51)	1 (0.93)	0 (0.88)	0 (0.58)	0 (0.52)	0 (1.45)	2 (1.17)	0 (0.79)	0 (0.56)
$0.7 \leq \log U < 0.8$	0 (0.23)	0 (0.16)	0 (0.37)	0 (0.34)	1 (0.19)	0 (0.16)	2 (0.68)	1 (0.51)	0 (0.29)	1 (0.18)
$0.8 \leq \log U < 0.9$	0 (0.07)	0 (0.05)	0 (0.13)	0 (0.12)	0 (0.05)	1 (0.05)	0 (0.29)	0 (0.20)	1 (0.09)	0 (0.05)
$0.9 \leq \log U < 1.0$	0 (0.02)	0 (0.009)	0 (0.04)	0 (0.04)	0 (0.02)	0 (0.009)	0 (0.11)	0 (0.07)	0 (0.03)	0 (0.02)
標 準 偏 差 σ	0.256	0.244	0.273	0.270	0.249	0.245	0.305	0.288	0.264	0.248

表 4 - 6 (3) $\log U_{SA}$ の頻度分布 (3 種地盤)

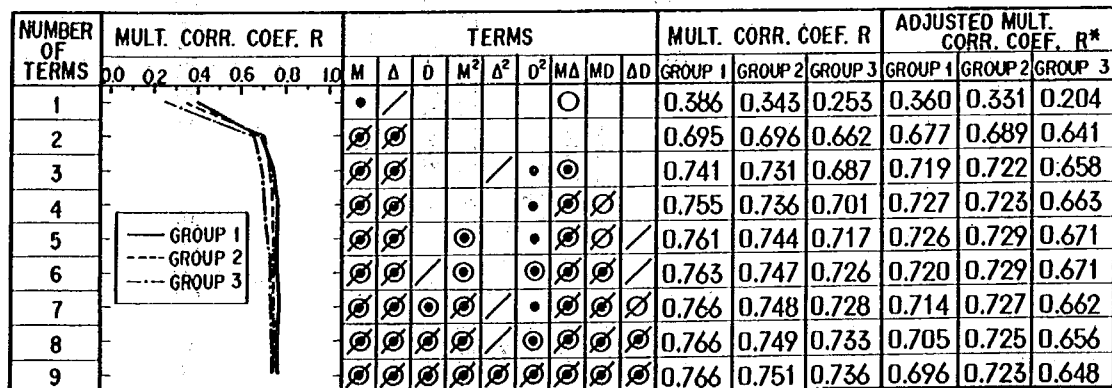
$\log U_{SA}$	固 有 周 期 T (秒)									
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	3
$-1 \leq \log U < -0.9$	0 (0.0006)	0 (0.0007)	0 (0.0003)	0 (0.0006)	0 (0.003)	0 (0.004)	0 (0.05)	0 (0.05)	0 (0.02)	0 (0.010)
$-0.9 \leq \log U < -0.8$	0 (0.004)	0 (0.004)	0 (0.003)	0 (0.004)	0 (0.02)	0 (0.02)	0 (0.13)	0 (0.12)	0 (0.06)	0 (0.04)
$-0.8 \leq \log U < -0.7$	0 (0.03)	0 (0.03)	0 (0.02)	0 (0.02)	0 (0.06)	0 (0.07)	0 (0.29)	0 (0.28)	0 (0.16)	0 (0.12)
$-0.7 \leq \log U < -0.6$	0 (0.09)	0 (0.09)	0 (0.08)	0 (0.09)	0 (0.19)	0 (0.21)	0 (0.61)	0 (0.60)	0 (0.40)	0 (0.32)
$-0.6 \leq \log U < -0.5$	0 (0.35)	0 (0.34)	1 (0.28)	1 (0.33)	0 (0.54)	0 (0.56)	1 (1.15)	1 (1.14)	0 (0.87)	0 (0.75)
$-0.5 \leq \log U < -0.4$	2 (0.98)	2 (0.97)	1 (0.86)	0 (0.94)	0 (1.27)	2 (1.31)	2 (1.96)	5 (1.94)	0 (1.69)	0 (1.54)
$-0.4 \leq \log U < -0.3$	2 (2.24)	3 (2.23)	2 (2.11)	1 (2.20)	5 (2.53)	3 (2.57)	3 (2.99)	3 (2.98)	6 (2.85)	7 (2.75)
$-0.3 \leq \log U < -0.2$	3 (4.18)	2 (4.18)	4 (4.13)	5 (4.17)	5 (4.26)	7 (4.26)	4 (4.11)	5 (4.12)	7 (4.23)	3 (4.25)
$-0.2 \leq \log U < -0.1$	8 (6.34)	5 (6.36)	5 (6.47)	7 (6.38)	6 (6.02)	6 (5.97)	3 (5.08)	2 (5.10)	4 (5.50)	9 (5.68)
$-0.1 \leq \log U < 0$	6 (7.80)	9 (7.84)	7 (8.09)	8 (7.89)	7 (7.16)	2 (7.07)	4 (5.65)	5 (5.68)	6 (6.27)	8 (6.57)
$0 \leq \log U < 0.1$	10 (7.80)	8 (7.84)	8 (8.09)	13 (7.89)	6 (7.16)	6 (7.07)	4 (5.65)	6 (5.68)	4 (6.27)	1 (5.68)
$0.1 \leq \log U < 0.2$	6 (6.34)	6 (6.36)	10 (6.47)	3 (6.38)	7 (6.02)	8 (5.97)	10 (5.08)	8 (5.10)	7 (5.50)	7 (5.68)
$0.2 \leq \log U < 0.3$	4 (4.18)	6 (4.18)	3 (4.13)	0 (4.17)	3 (4.26)	6 (4.26)	4 (4.11)	2 (4.12)	5 (4.23)	5 (4.25)
$0.3 \leq \log U < 0.4$	1 (2.24)	2 (2.23)	2 (2.11)	4 (2.20)	2 (2.53)	2 (2.57)	2 (2.99)	3 (2.98)	2 (2.85)	1 (2.75)
$0.4 \leq \log U < 0.5$	1 (0.98)	0 (0.97)	0 (0.86)	1 (0.94)	2 (1.27)	1 (1.31)	0 (1.96)	0 (1.94)	1 (0.87)	1 (0.75)
$0.5 \leq \log U < 0.6$	1 (0.35)	0 (0.34)	0 (0.28)	1 (0.33)	2 (0.54)	1 (0.56)	0 (1.15)	0 (1.14)	1 (0.87)	1 (0.75)
$0.6 \leq \log U < 0.7$	0 (0.09)	0 (0.09)	0 (0.08)	0 (0.09)	0 (0.19)	0 (0.21)	1 (0.61)	1 (0.60)	0 (0.40)	0 (0.32)
$0.7 \leq \log U < 0.8$	0 (0.03)	0 (0.03)	0 (0.02)	0 (0.02)	0 (0.06)	0 (0.07)	0 (0.29)	1 (0.28)	0 (0.16)	1 (0.12)
$0.8 \leq \log U < 0.9$	0 (0.004)	0 (0.004)	0 (0.003)	0 (0.004)	0 (0.02)	0 (0.02)	0 (0.13)	0 (0.12)	1 (0.06)	0 (0.04)
$0.9 \leq \log U < 1.0$	0 (0.0006)	0 (0.0007)	0 (0.0003)	0 (0.0006)	0 (0.003)	0 (0.004)	0 (0.05)	0 (0.05)	0 (0.02)	0 (0.010)
標準偏差 σ	0.219	0.218	0.211	0.217	0.240	0.243	0.307	0.305	0.276	0.263



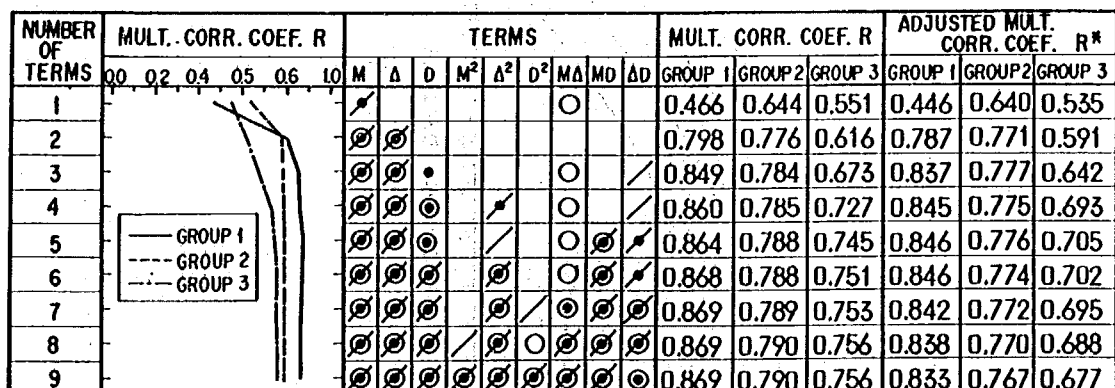
(a) $S_A(0.2)$



(b) $S_A(0.5)$



(c) $S_A(0.7)$

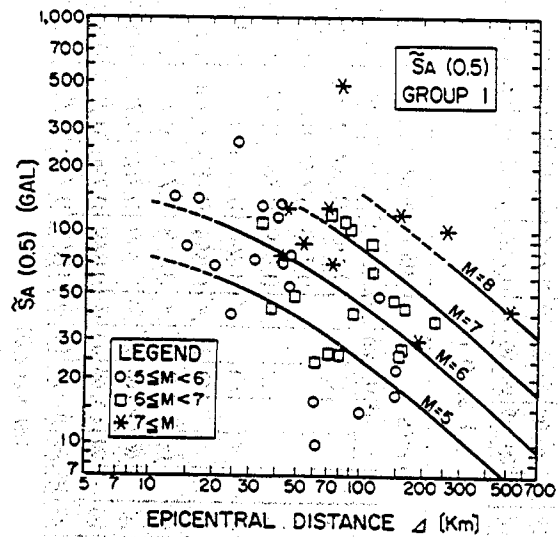


LEGEND

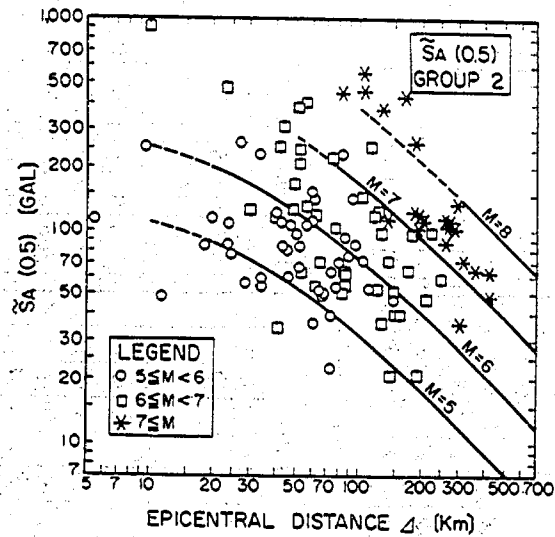
- GROUND GROUP 1
- GROUND GROUP 2
- / GROUND GROUP 3

(d) $S_A(2.0)$

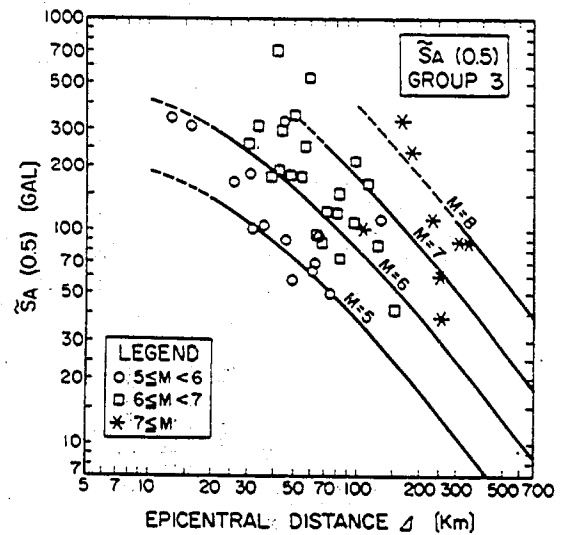
図4-1 加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A(T)$ の距離減衰式に含まれる説明変数の数が予測精度に及ぼす影響



(a) 1 種地盤



(b) 2 種地盤



(c) 3 種地盤

図 4-2 $\tilde{S}_A(0.5)$ スペクトルの距離減衰特性 ($j=2$ の場合)

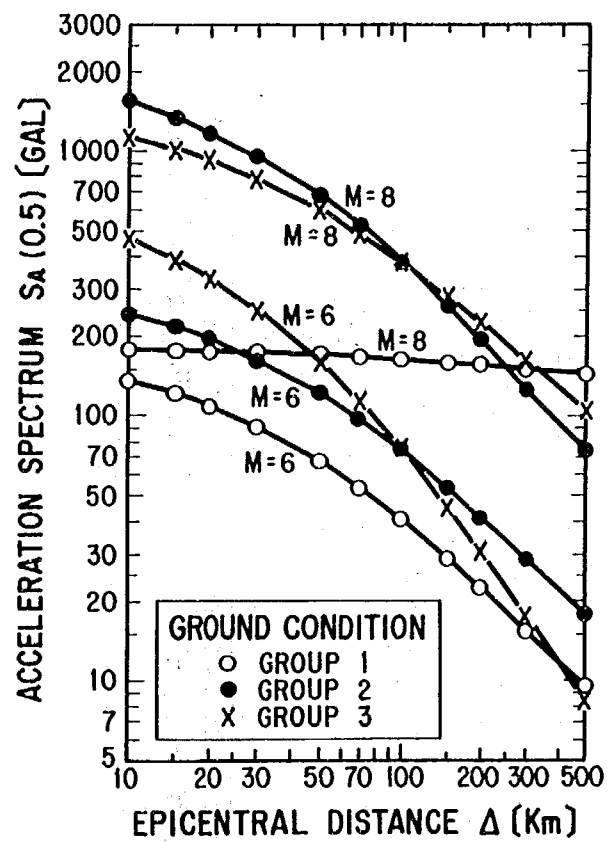


図4-3 $\tilde{S}_A(0.5)$ スペクトルの距離減衰特性 ($j=3$ の場合)

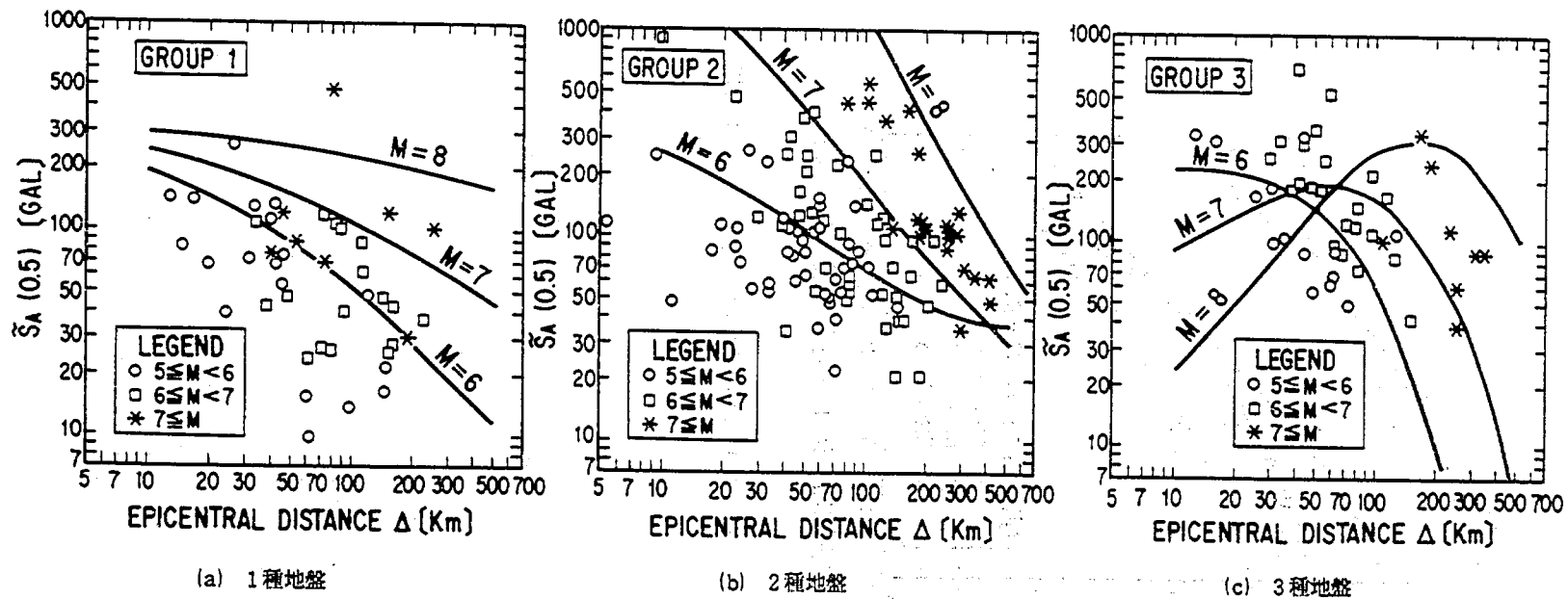
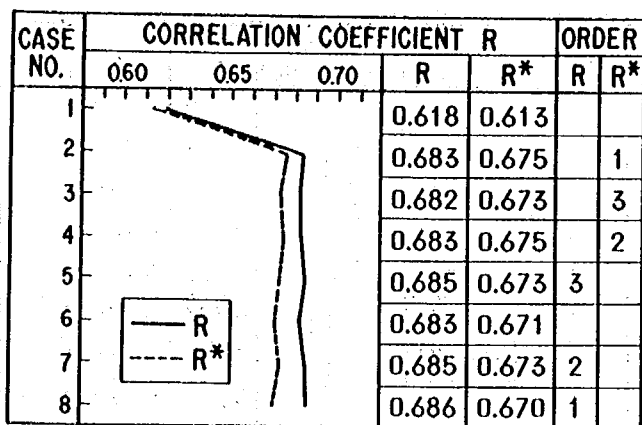
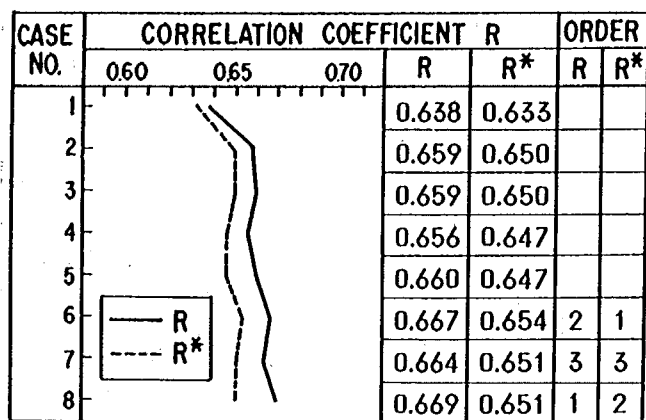


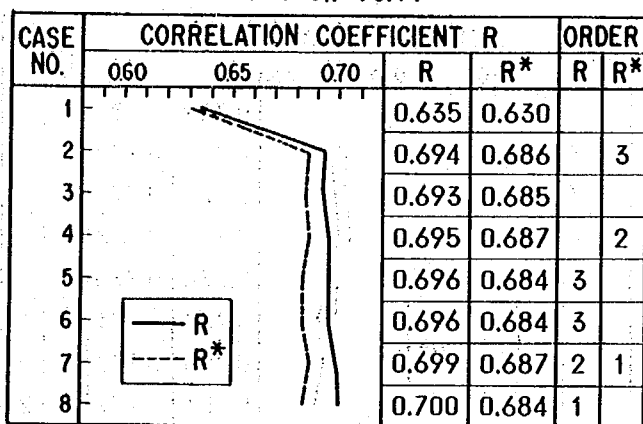
図 4-4 $\tilde{S}_A(0.5)$ スペクトルの距離減衰特性 ($j=9$ の場合)



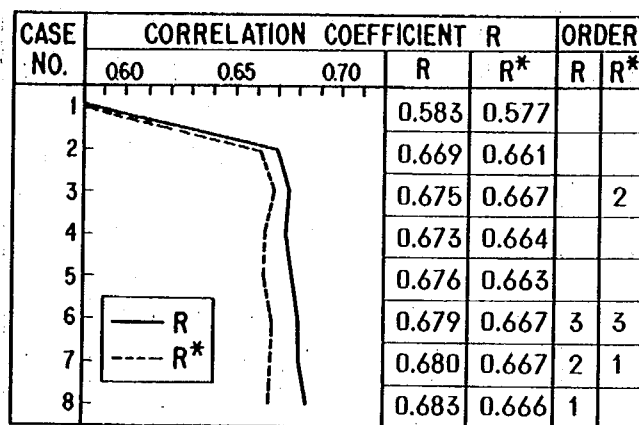
(a) $\tilde{S}_A(0.1)$



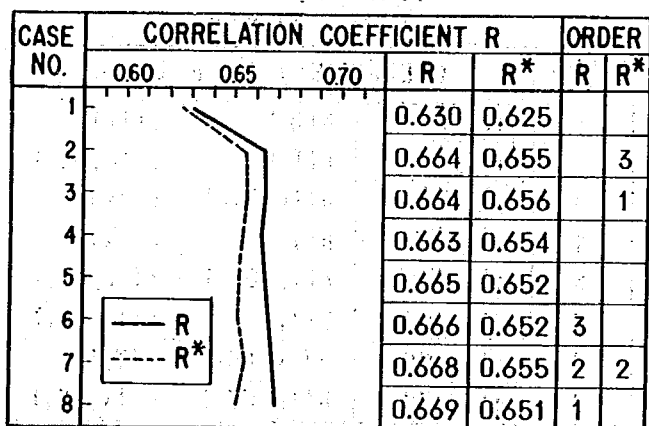
(d) $\tilde{S}_A(0.3)$



(b) $\tilde{S}_A(0.15)$



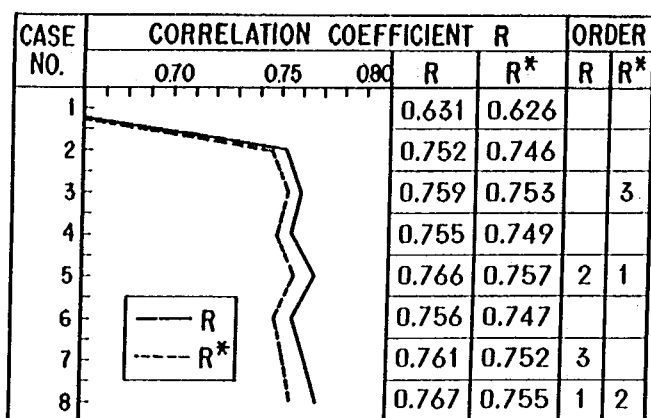
(e) $\tilde{S}_A(0.5)$



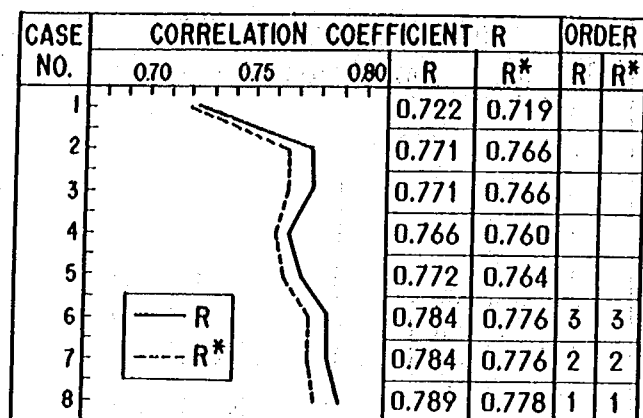
(c) $\tilde{S}_A(0.2)$

L E G E N D			
CASE No.	COEFFICIENT a, b and c		
1	$a(T_k)$	$b(T_k)$	$c(T_k)$
2	$a(T_k)$	$b(T_k)$	$c(T_k, GC_i)$
3	$a(T_k)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(T_k)$
4	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k)$	$c(T_k)$
5	$a(T_k)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(T_k, GC_i)$
6	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k)$	$c(T_k, GC_i)$
7	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(T_k)$
8	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(T_k, GC_i)$

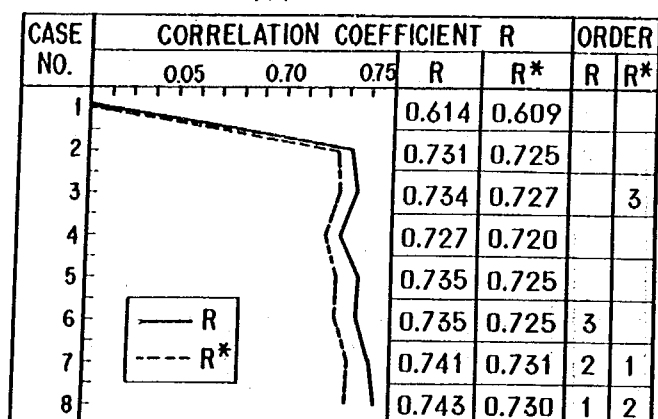
図4-5(1) $\tilde{S}_A(T)$ スペクトルの距離減衰式の係数の地盤種別依存性の検討結果



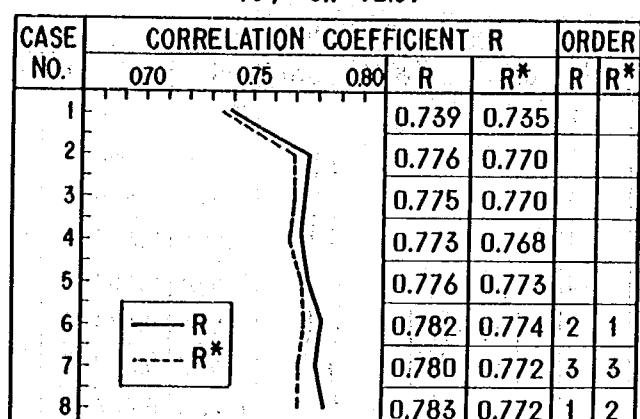
(f) $\tilde{S}_A(0.7)$



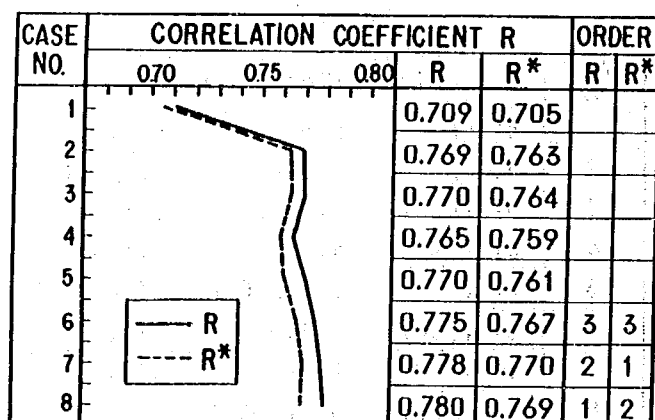
(l) $\tilde{S}_A(2.0)$



(g) $\tilde{S}_A(1.0)$



(j) $\tilde{S}_A(3.0)$

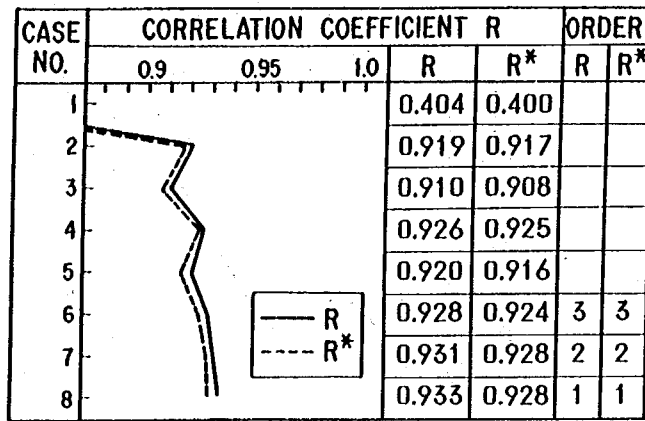


(h) $\tilde{S}_A(1.5)$

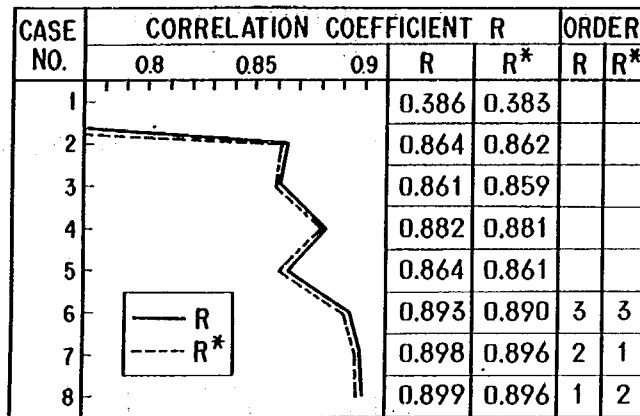
CASE No.	COEFFICIENT a, b and c		
	a(T _k)	b(T _k)	c(T _k)
1	a(T _k)	b(T _k)	c(T _k , GC ₁)
2	a(T _k)	b(T _k , GC ₁)	c(T _k)
3	a(T _k , GC ₁)	b(T _k)	c(T _k)
4	a(T _k)	b(T _k , GC ₁)	c(T _k , GC ₁)
5	a(T _k , GC ₁)	b(T _k)	c(T _k , GC ₁)
6	a(T _k)	b(T _k , GC ₁)	c(T _k)
7	a(T _k , GC ₁)	b(T _k)	c(T _k , GC ₁)
8	a(T _k , GC ₁)	b(T _k , GC ₁)	c(T _k , GC ₁)

LEGEND

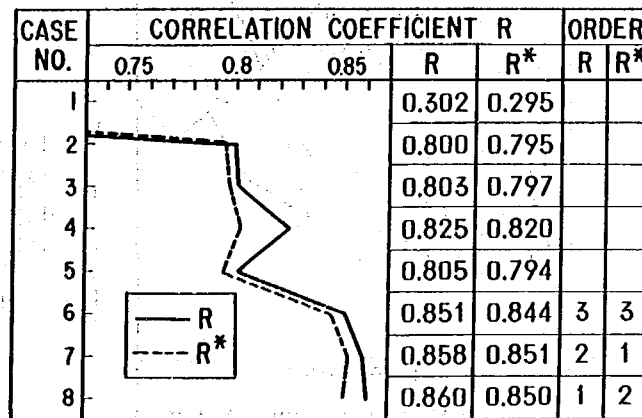
図4-5(2) $\tilde{S}_A(T)$ スペクトルの距離減衰式の係数の地盤種別依存性の検討結果



(a) GROUND GROUP 1



(b) GROUND GROUP 2



(c) GROUND GROUP 3

LEGEND

CASE No.	COEFFICIENT a, b and c	CASE No.	COEFFICIENT a, b and c
1	a (GC ₁), b (GC ₁), c (GC ₁)	5	a (GC ₁), b (T _k , GC ₁), c (T _k , GC ₁)
2	a (GC ₁), b (GC ₁), c (T _k , GC ₁)	6	a (T _k , GC ₁), b (GC ₁), c (T _k , GC ₁)
3	a (GC ₁), b (T _k , GC ₁), c (GC ₁)	7	a (T _k , GC ₁), b (T _k , GC ₁), c (GC ₁)
4	a (T _k , GC ₁), b (GC ₁), c (GC ₁)	8	a (T _k , GC ₁), b (T _k , GC ₁), c (T _k , GC ₁)

図4-6 $\tilde{S}_A(T)$ スペクトルの距離減衰式の係数の固有周期依存性の検討結果

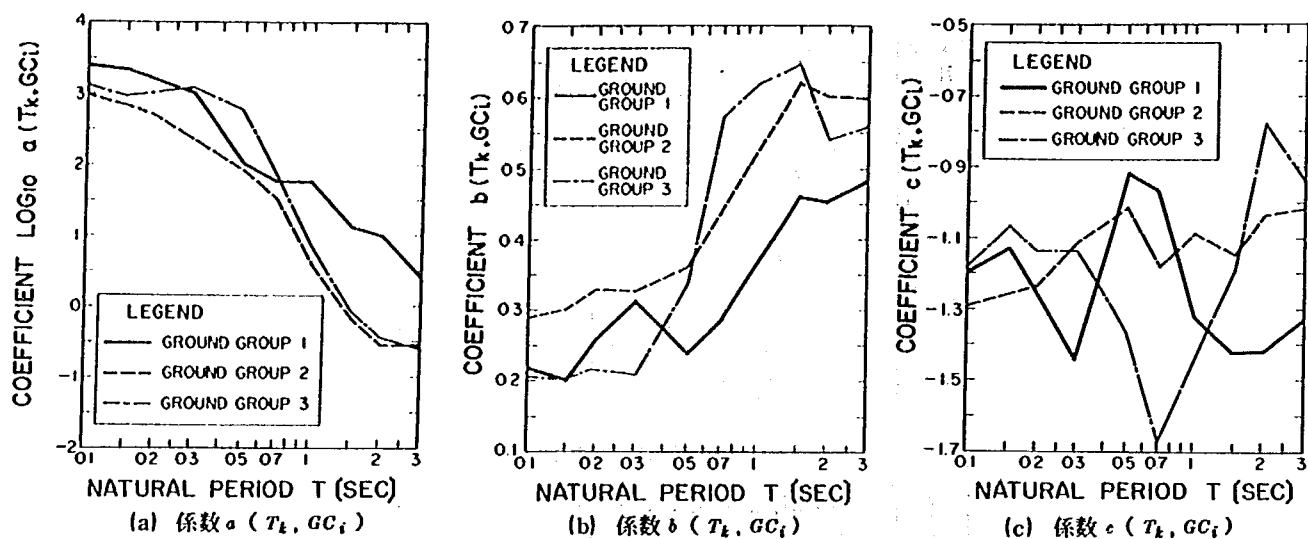


図4-7 S_A スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$ および $c(T_k, GC_i)$

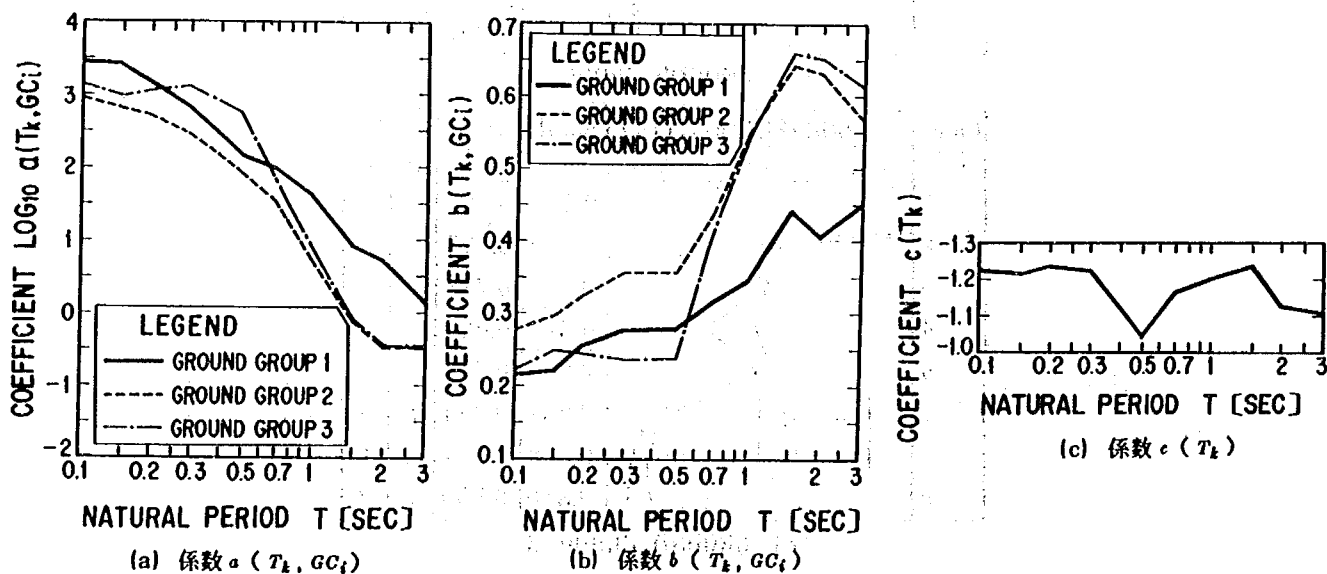


図4-8 S_A スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$ および $c(T)$

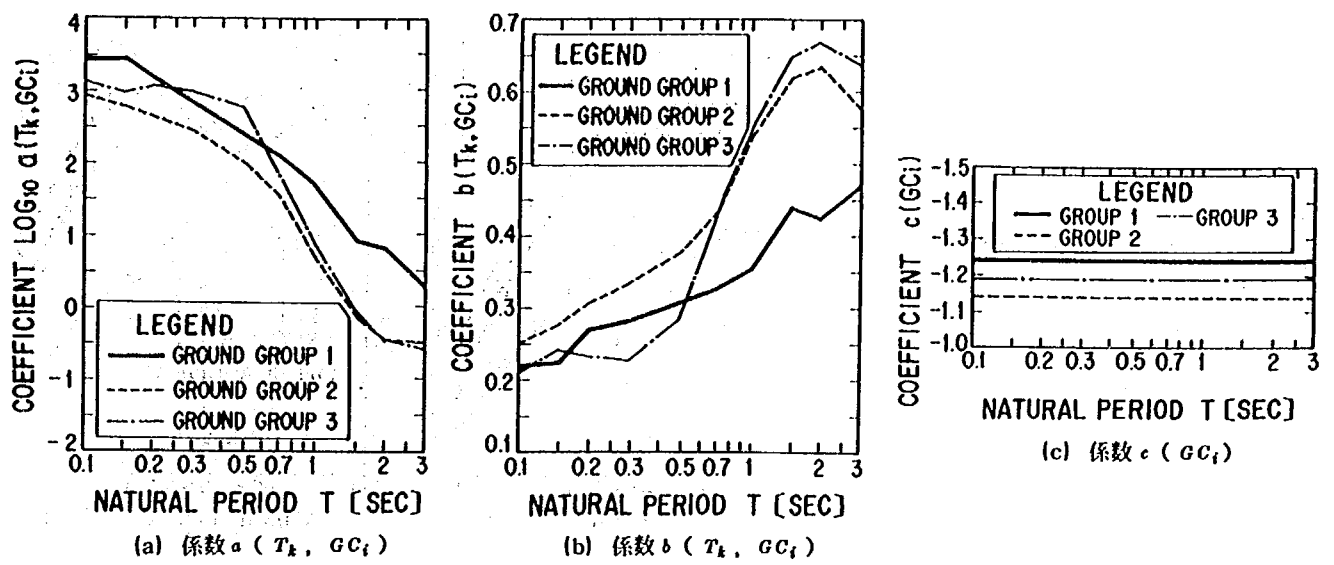


図4-9 S_A スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$ および $c(GC_i)$

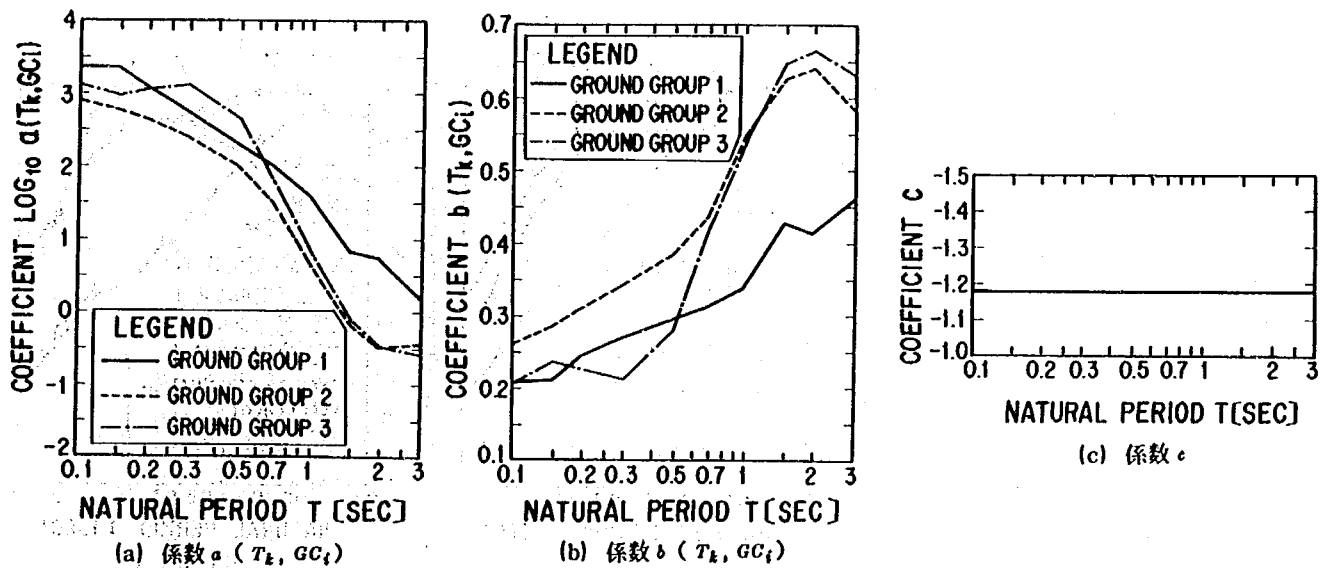


図4-10 S_A スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$ および c

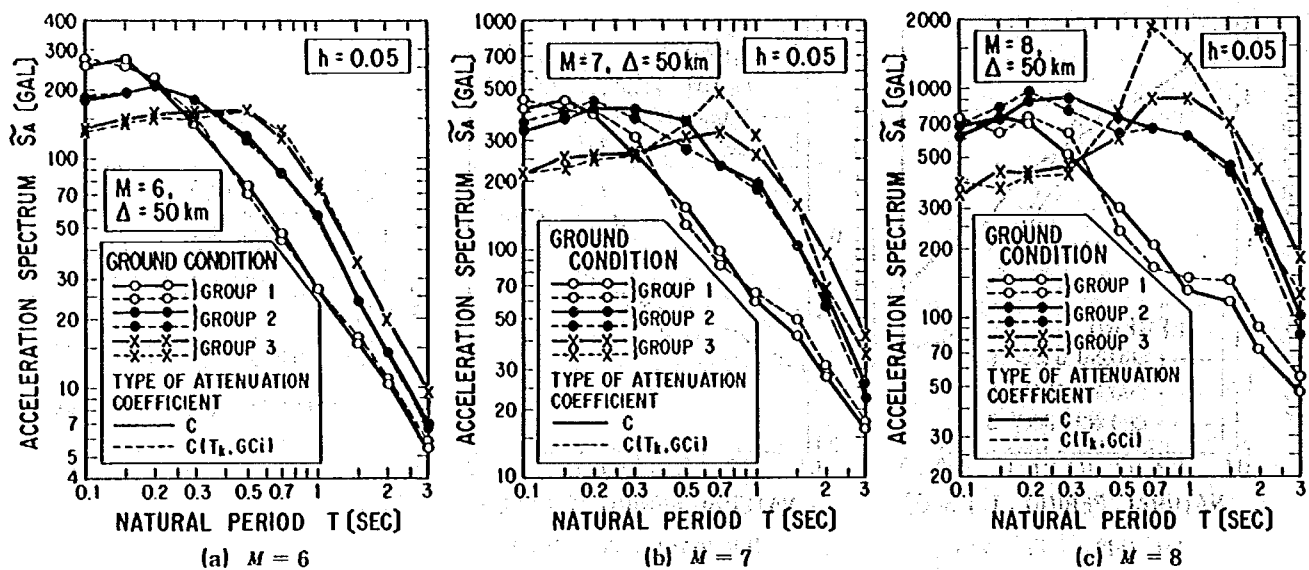


図4-11(1) 式(4-16)と式(4-19)の回帰式の比較($\Delta = 50$ kmの場合)

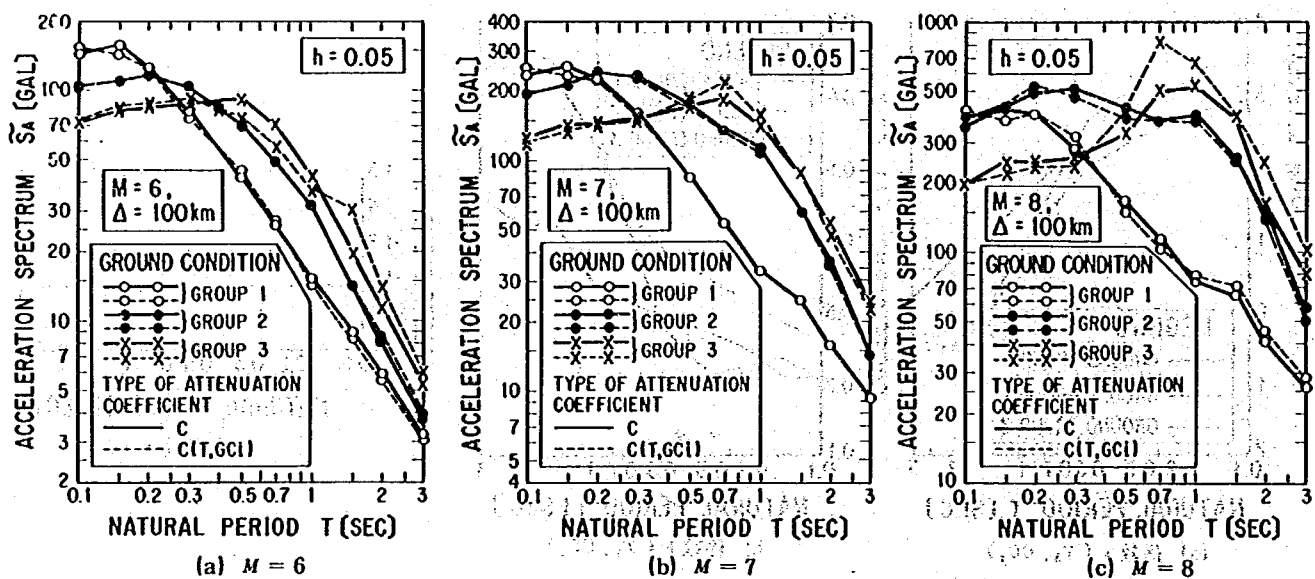


図4-11(2) 式(4-16)と式(4-19)の回帰式の比較($\Delta = 100$ kmの場合)

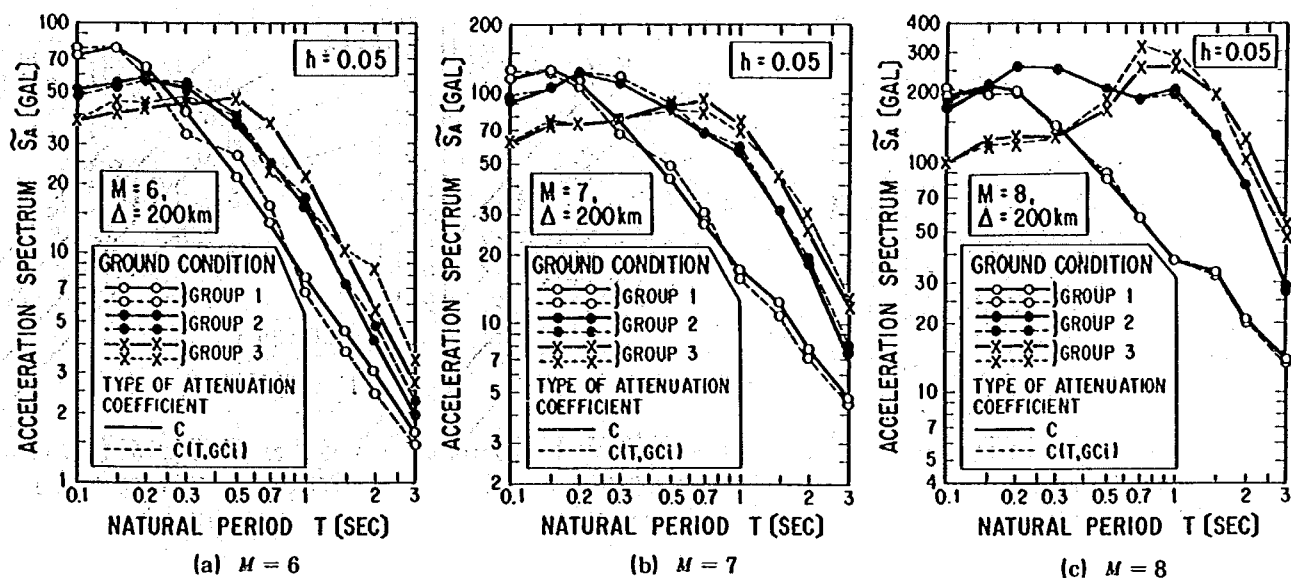


図4-11(3) 式(4-16)と式(4-19)の回帰式の比較 ($\Delta=200$ kmの場合)

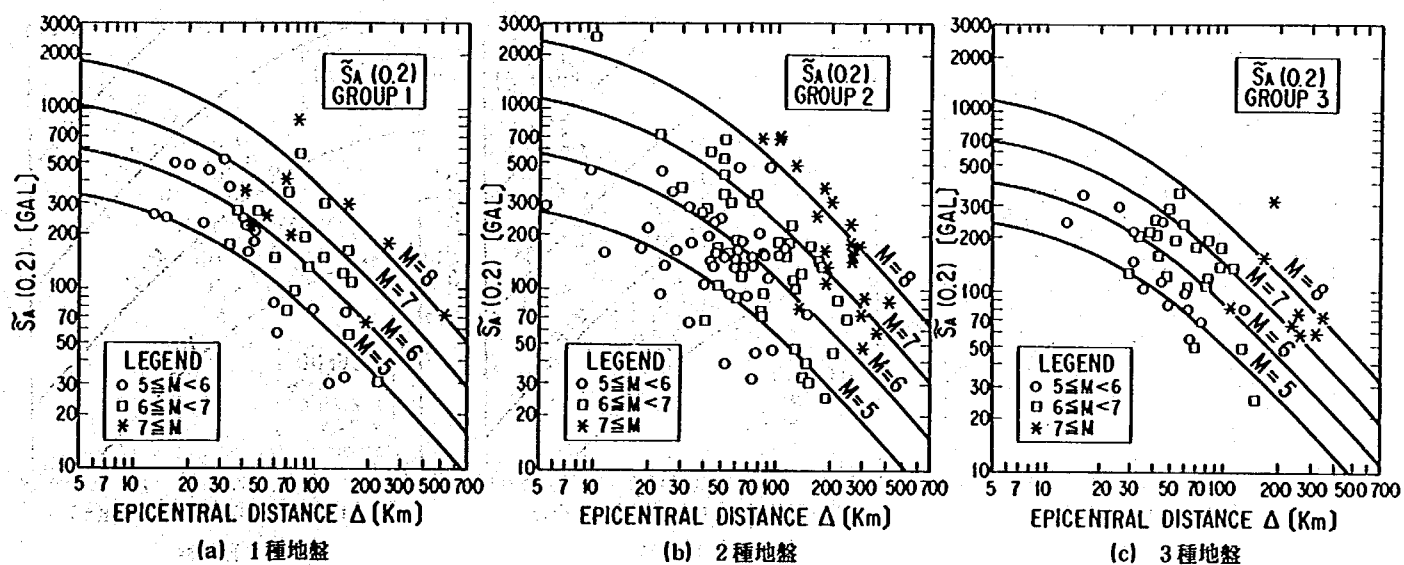


図4-12(1) $\tilde{S}_a(0.2)$ の距離減衰特性

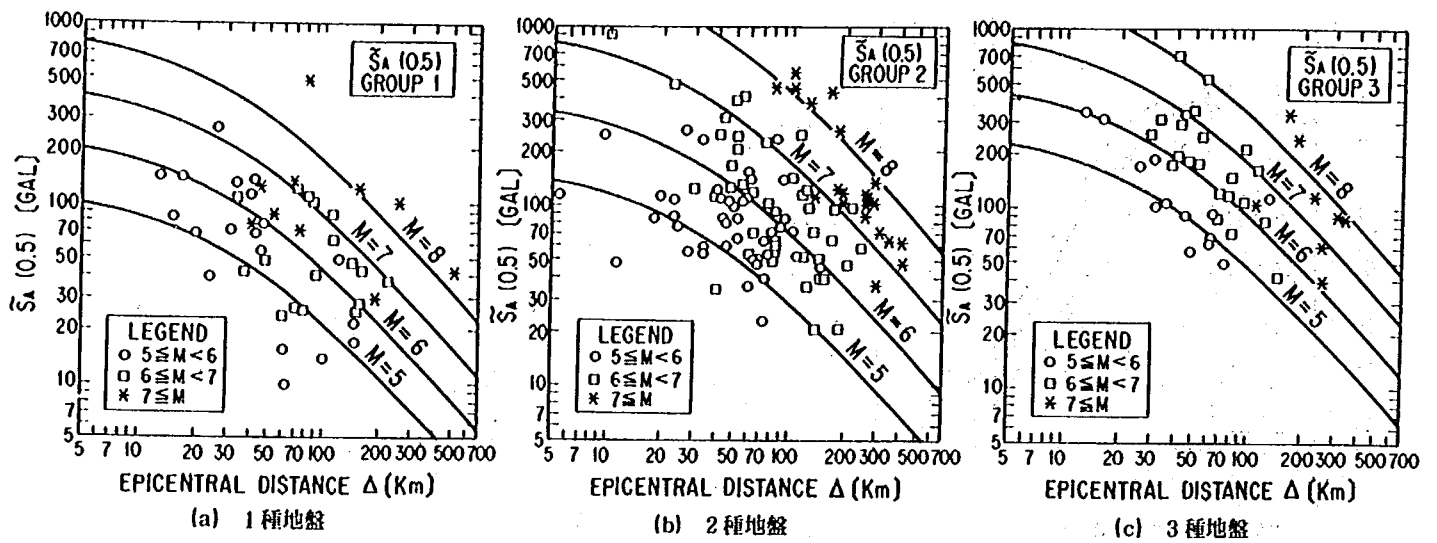


図4-12(2) $\tilde{S}_A(0.5)$ の距離減衰特性

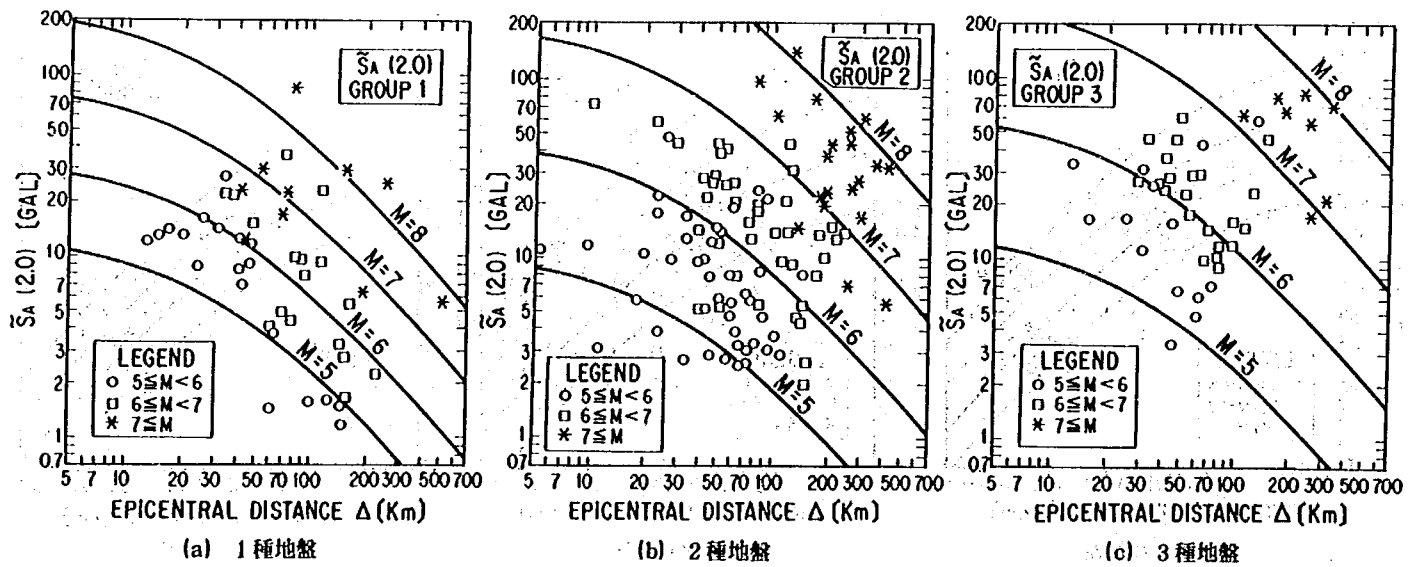
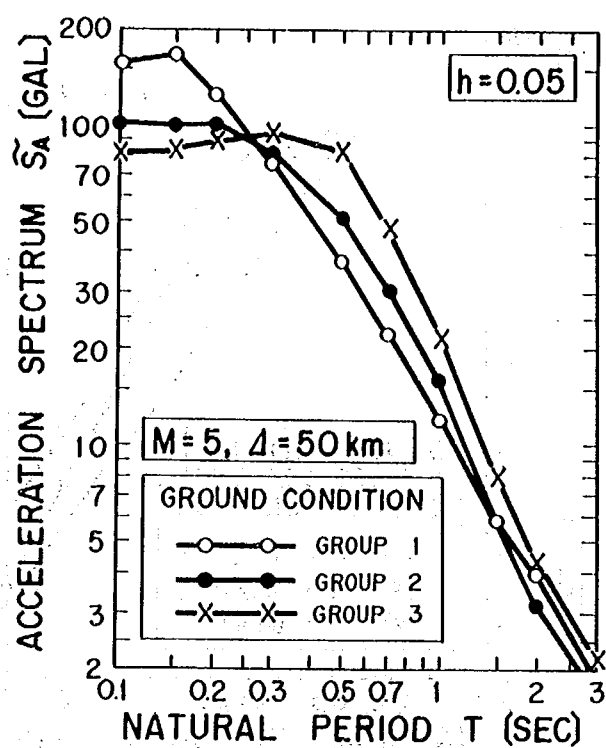
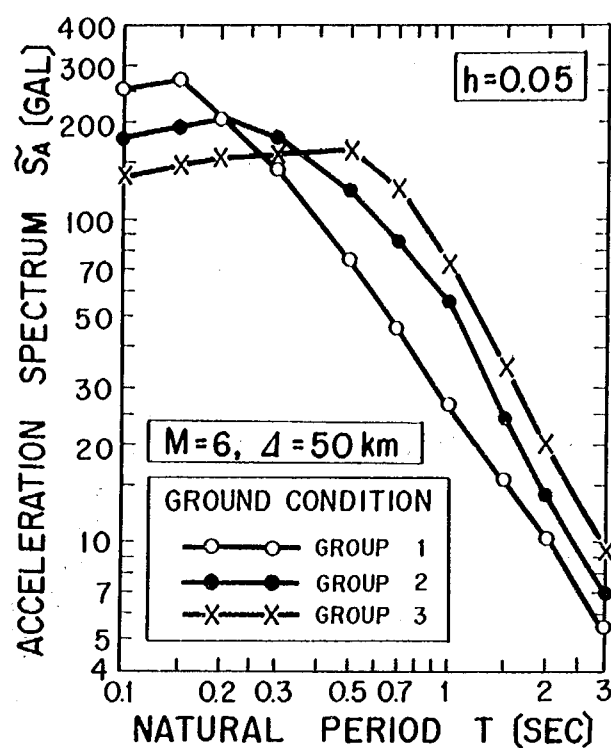


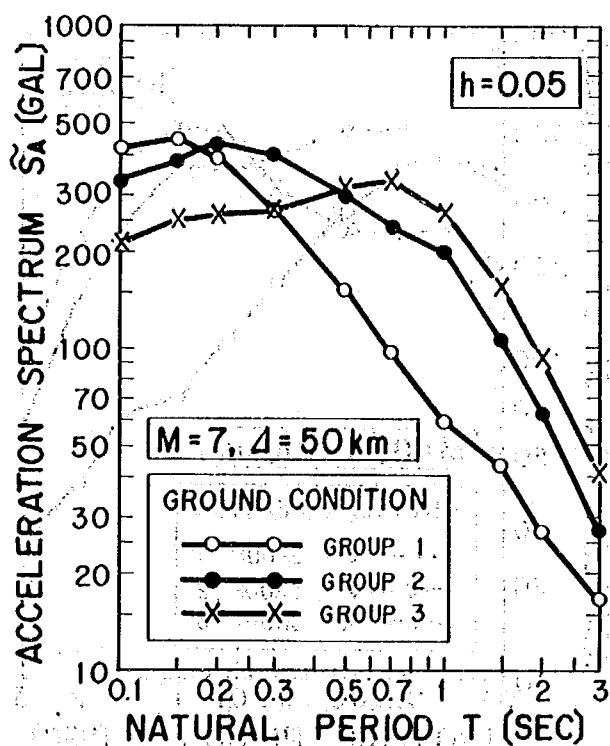
図4-12(3) $\tilde{S}_A(2.0)$ の距離減衰特性



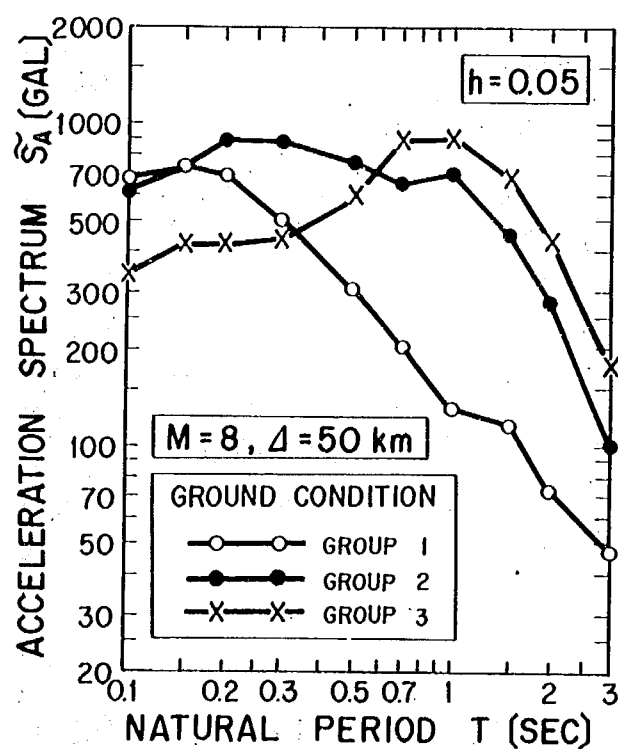
(a) $M=5$



(b) $M=6$

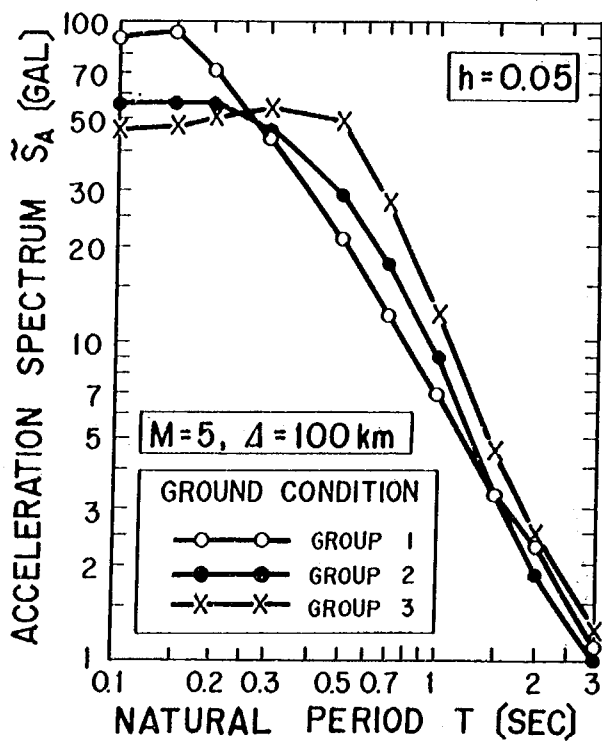


(c) $M=7$

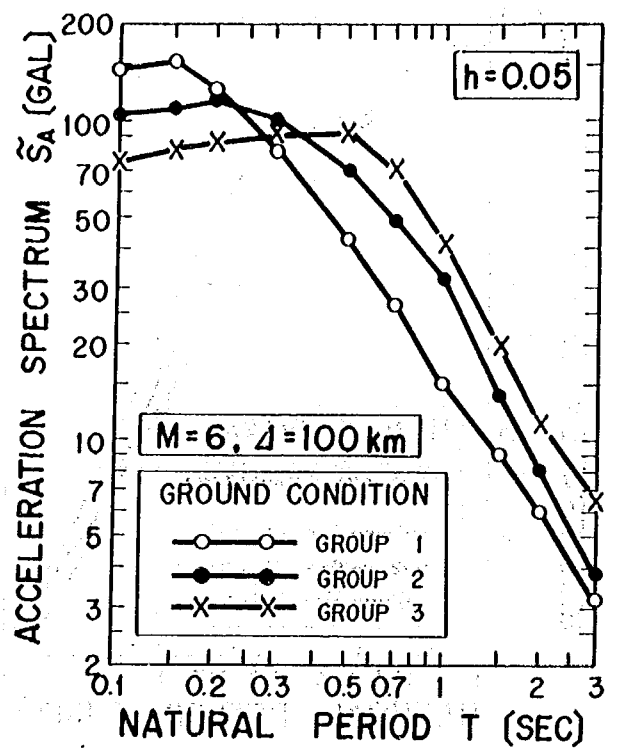


(d) $M=8$

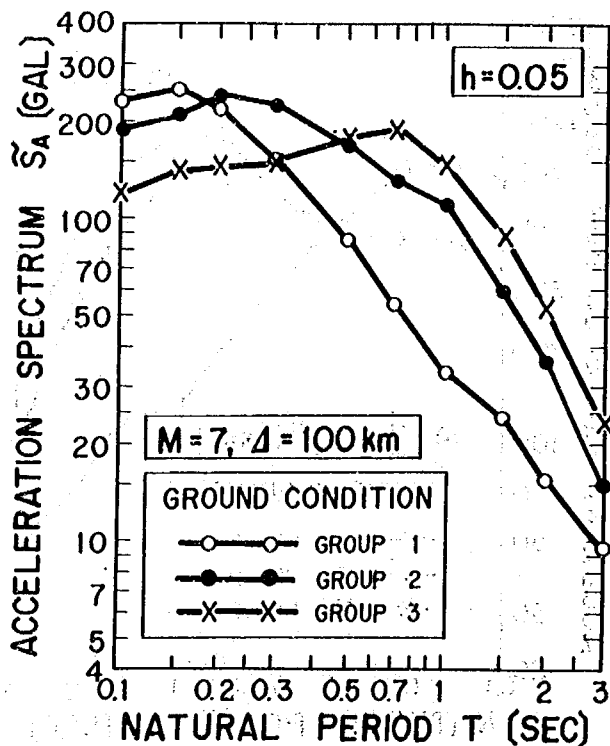
図4-13(1) $\tilde{S}_a$ スペクトル ($\Delta=50$ kmの場合)



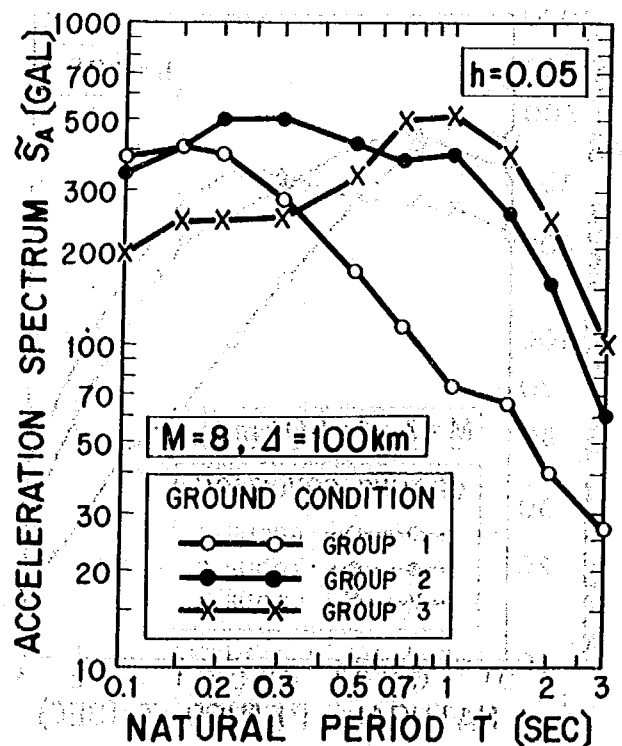
(a) $M=5$



(b) $M=6$

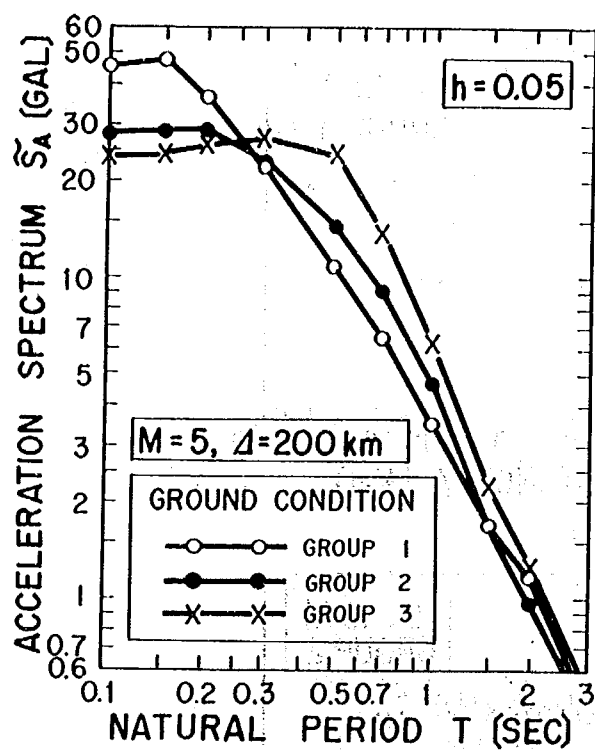


(c) $M=7$

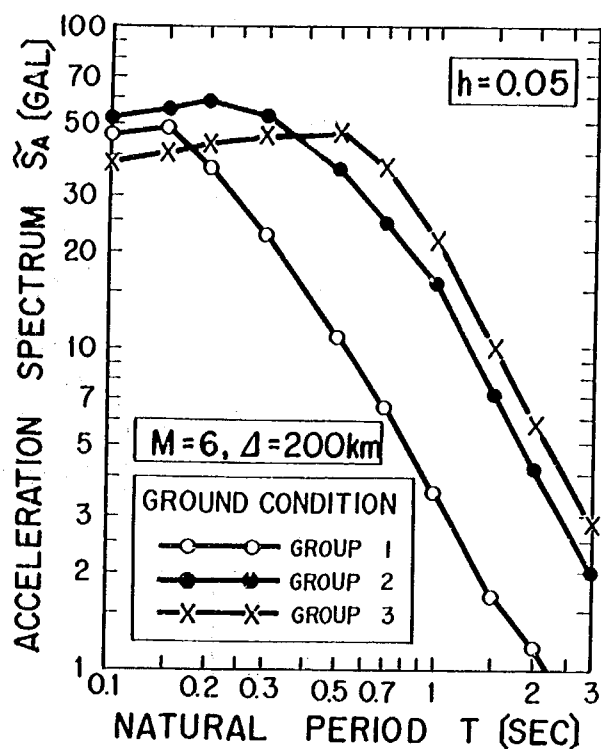


(d) $M=8$

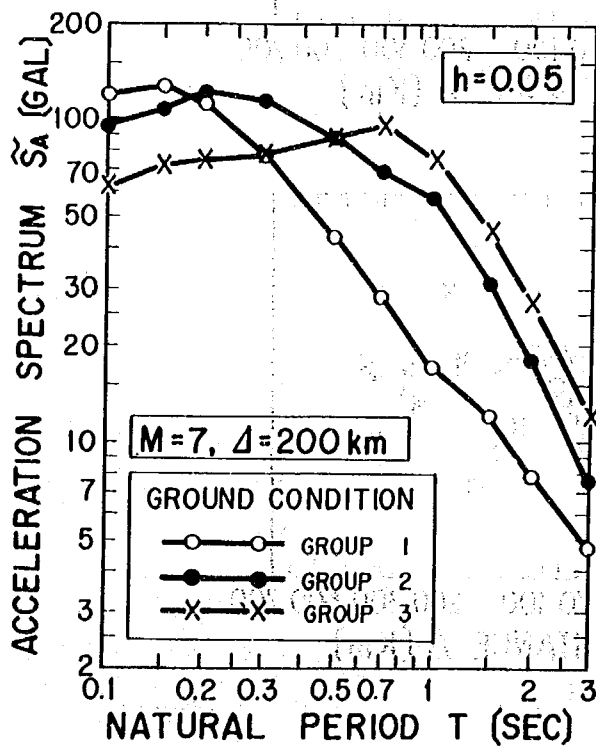
図4-13(2) $\tilde{S}_A$ スペクトル ($\Delta=100$ kmの場合)



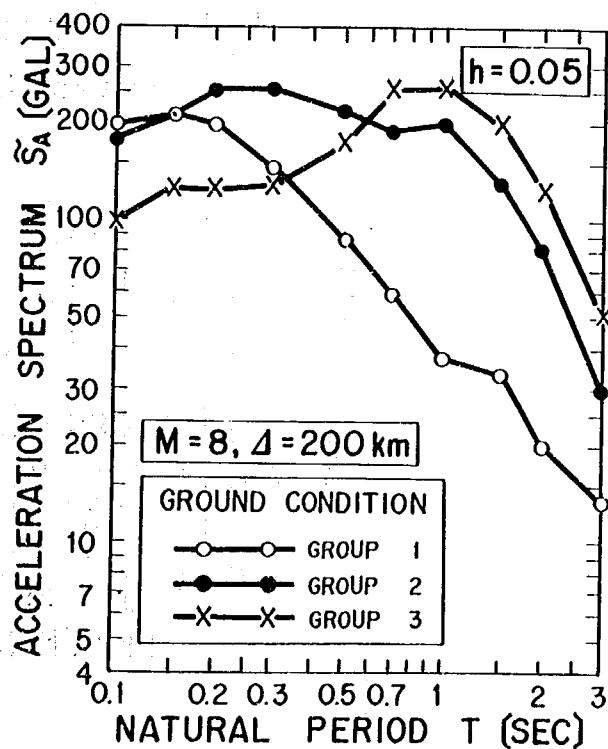
(a) $M=5$



(b) $M=6$

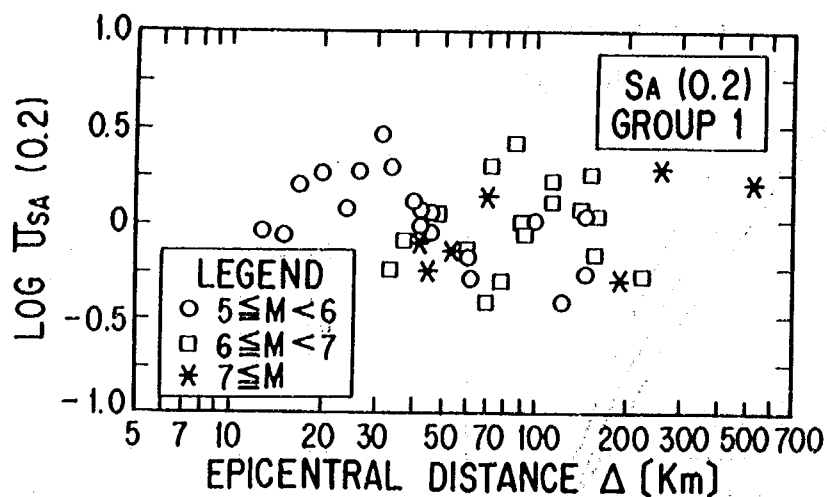


(c) $M=7$

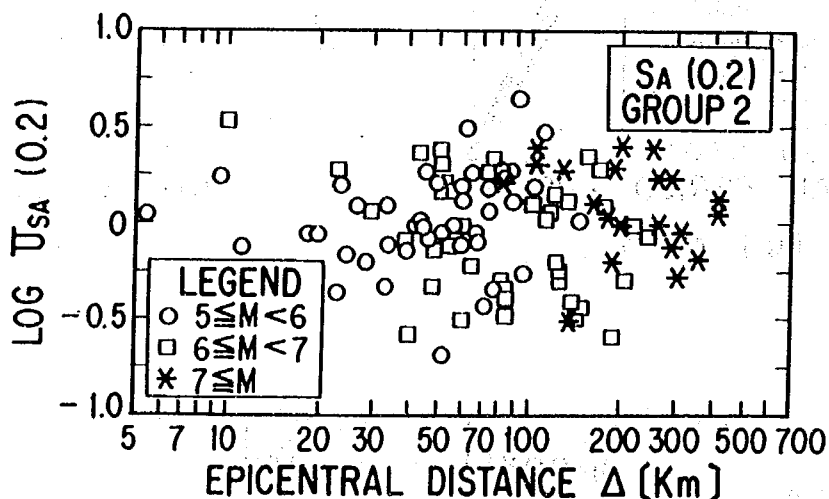


(d) $M=8$

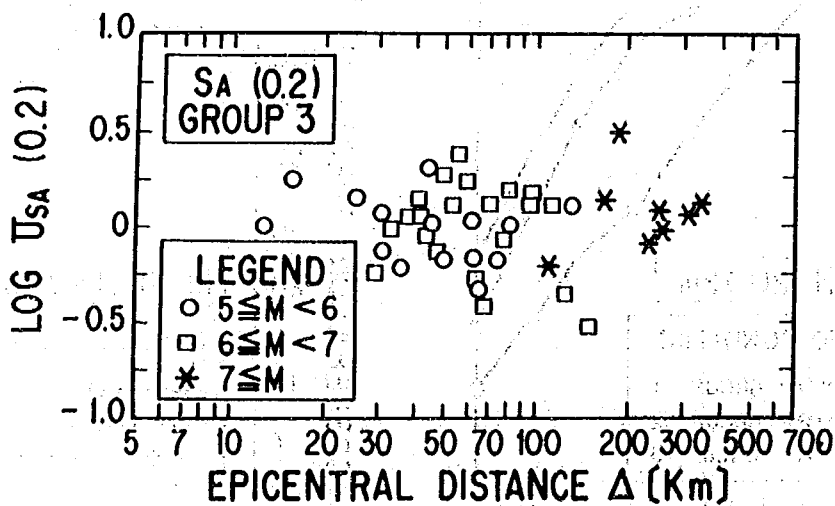
図4-13(3) $\tilde{S}_a$ スペクトル ($\Delta=200$ kmの場合)



(a) 1種地盤

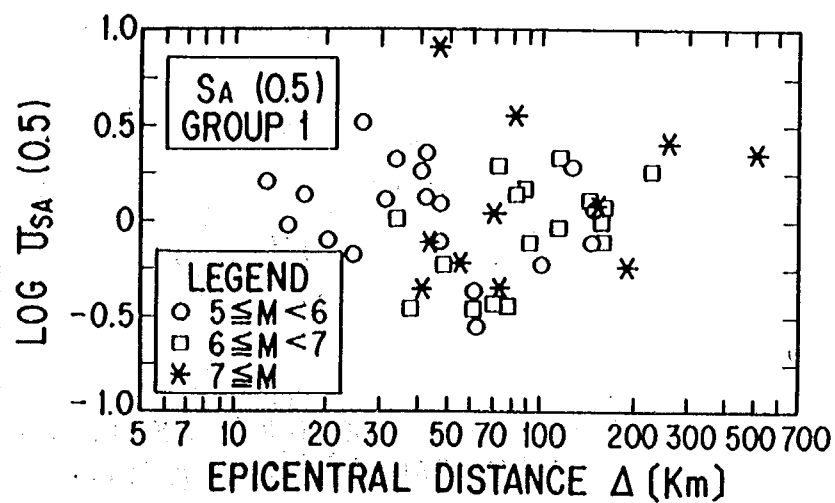


(b) 2種地盤

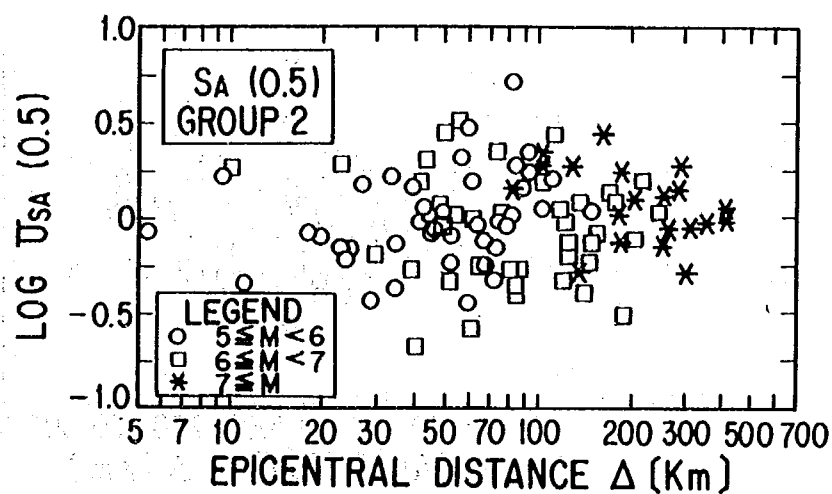


(c) 3種地盤

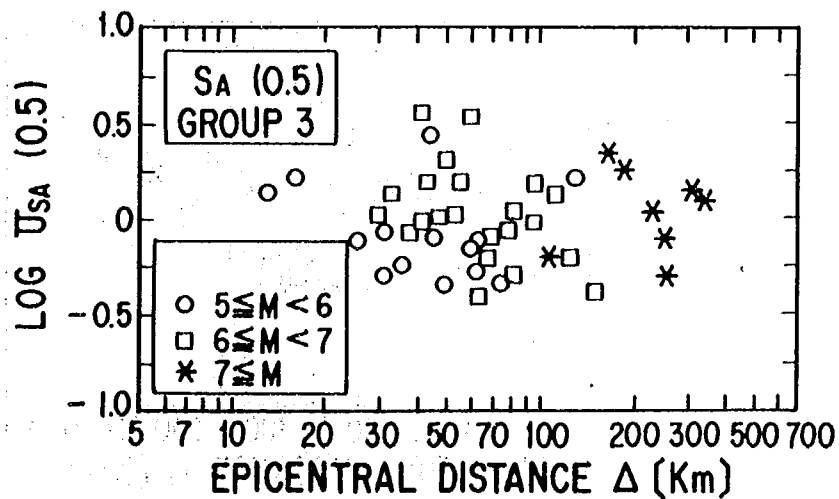
図4-14(1) $\text{Log } U_{SA} \sim M \sim \Delta$ の関係 ($T = 0.2$ 秒の場合)



(a) 1種地盤

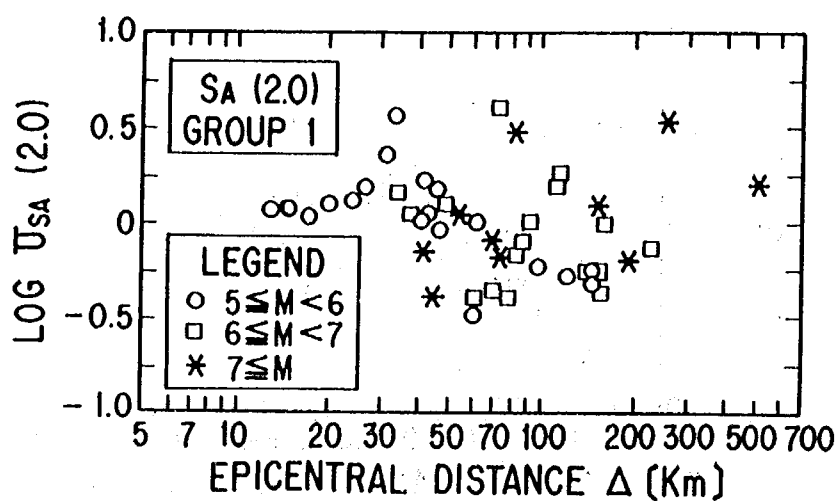


(b) 2種地盤

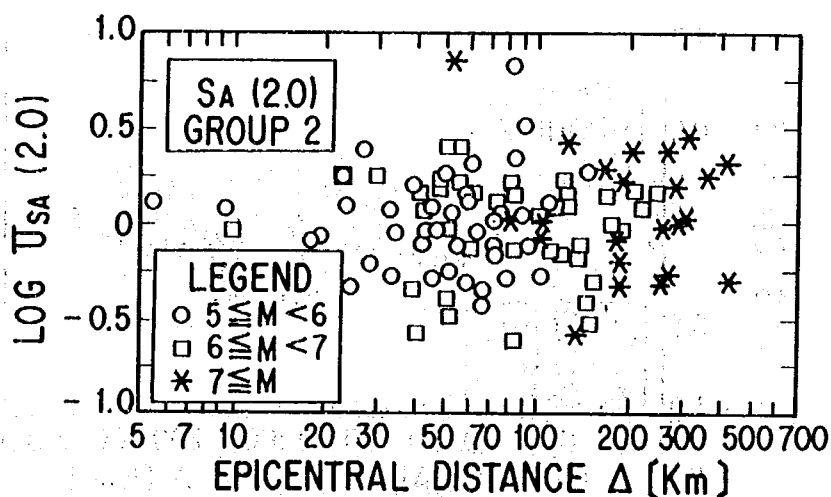


(c) 3種地盤

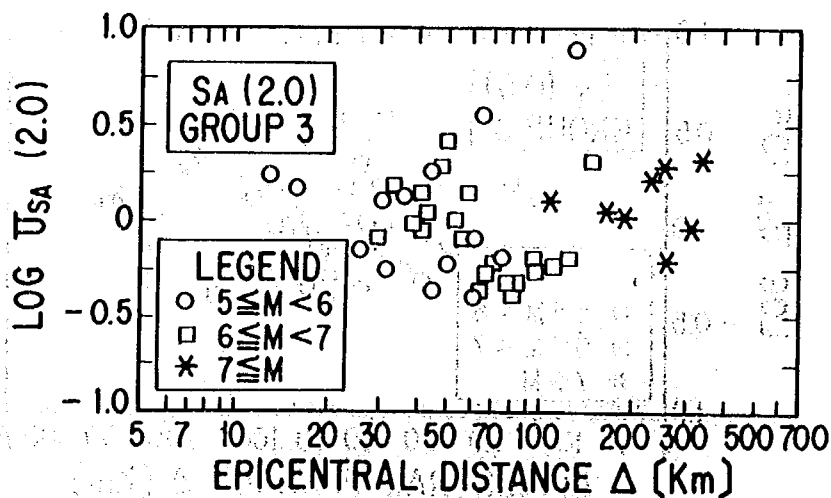
図4-14(2) $\text{Log } U_{SA} \sim \Delta \sim M$ の関係 ($T = 0.5$ 秒の場合)



(a) 1種地盤



(b) 2種地盤



(c) 3種地盤

図4-14(3) $\text{Log } U_{SA} \sim M \sim \Delta$ の関係 (固有周期 2.0 秒の場合)

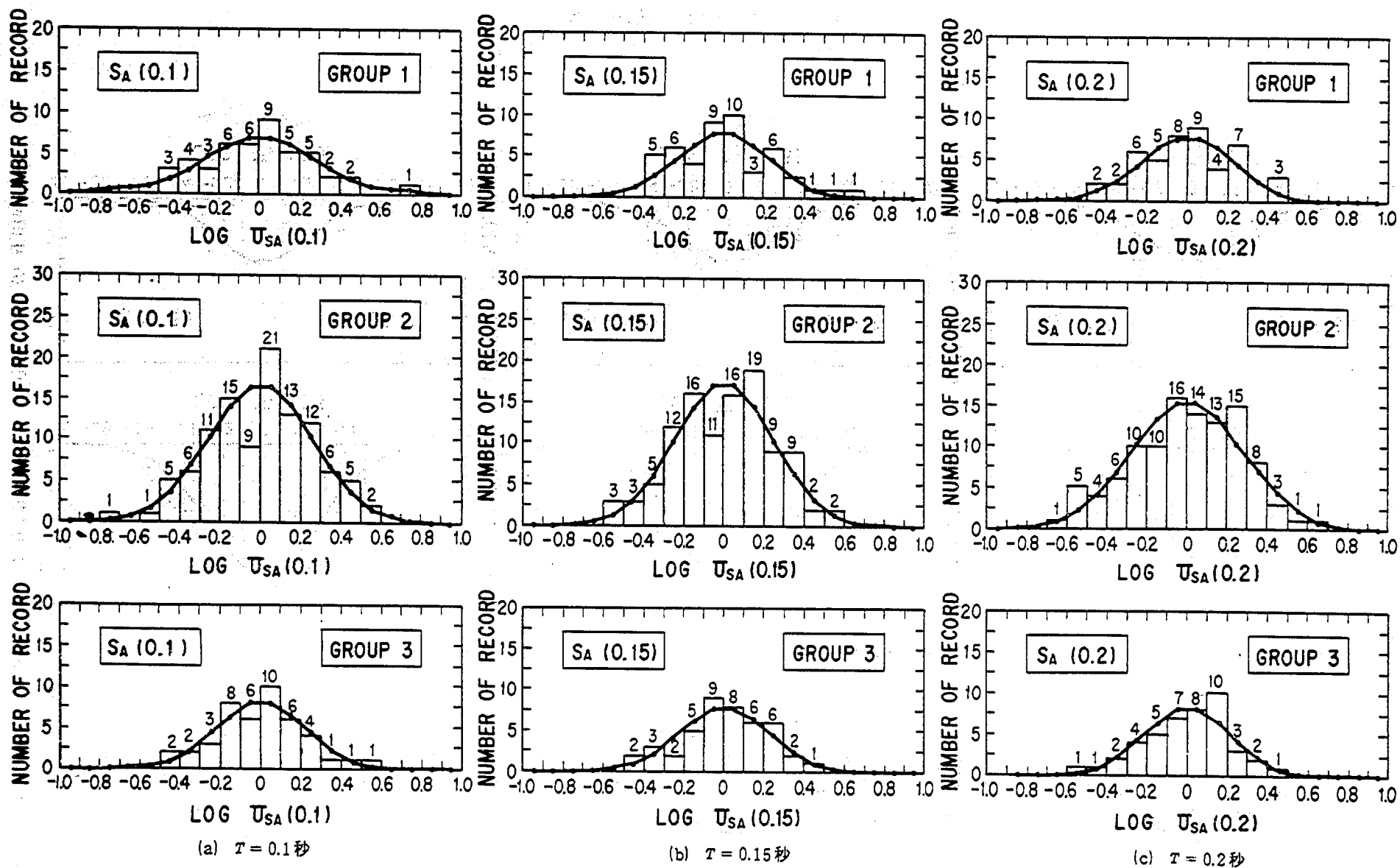


図 4-15(1) $\text{Log } U_{SA}(T)$ の頻度分布

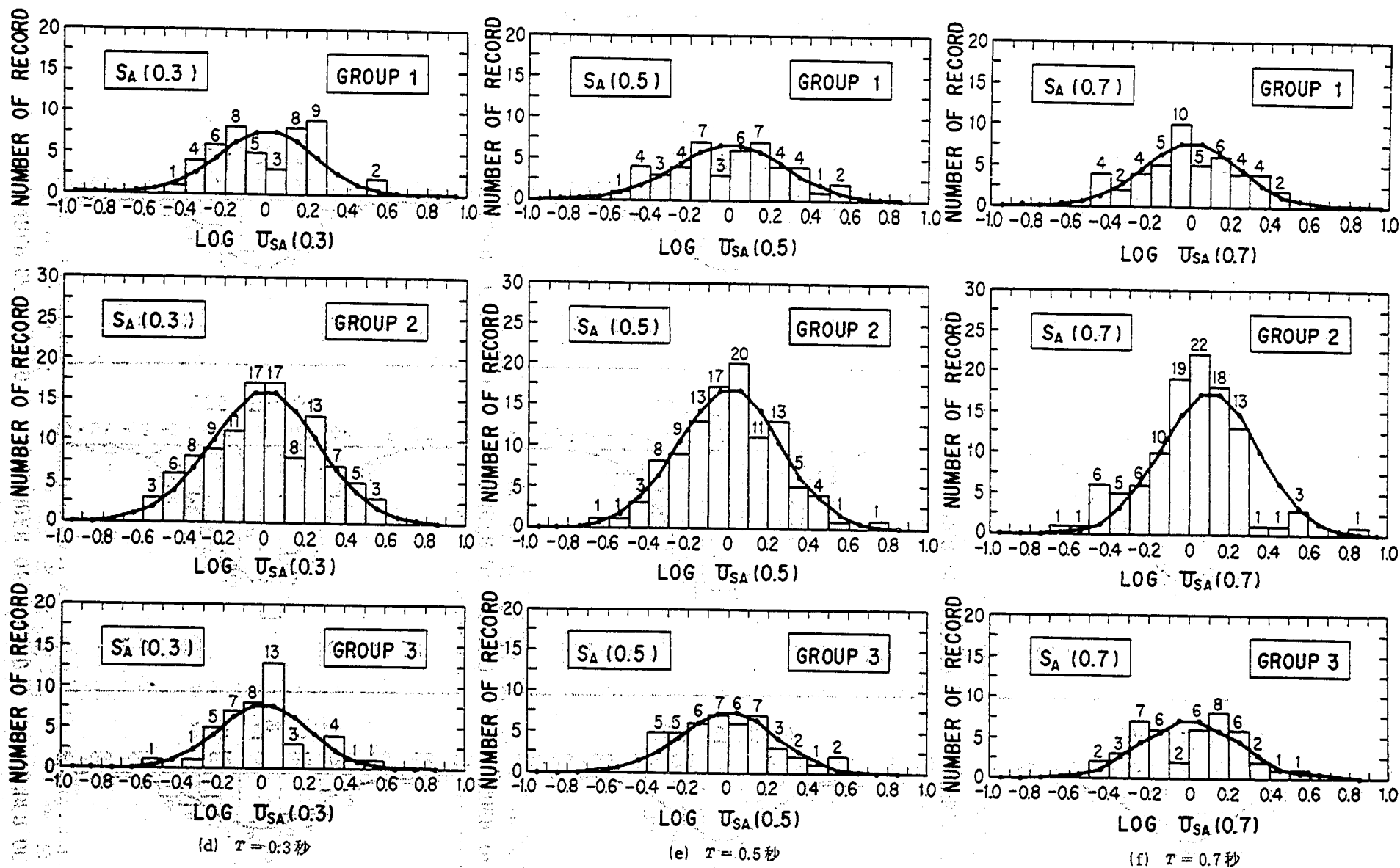


図 4-15(2) $\text{Log } U_{SA}(T)$ の頻度分布

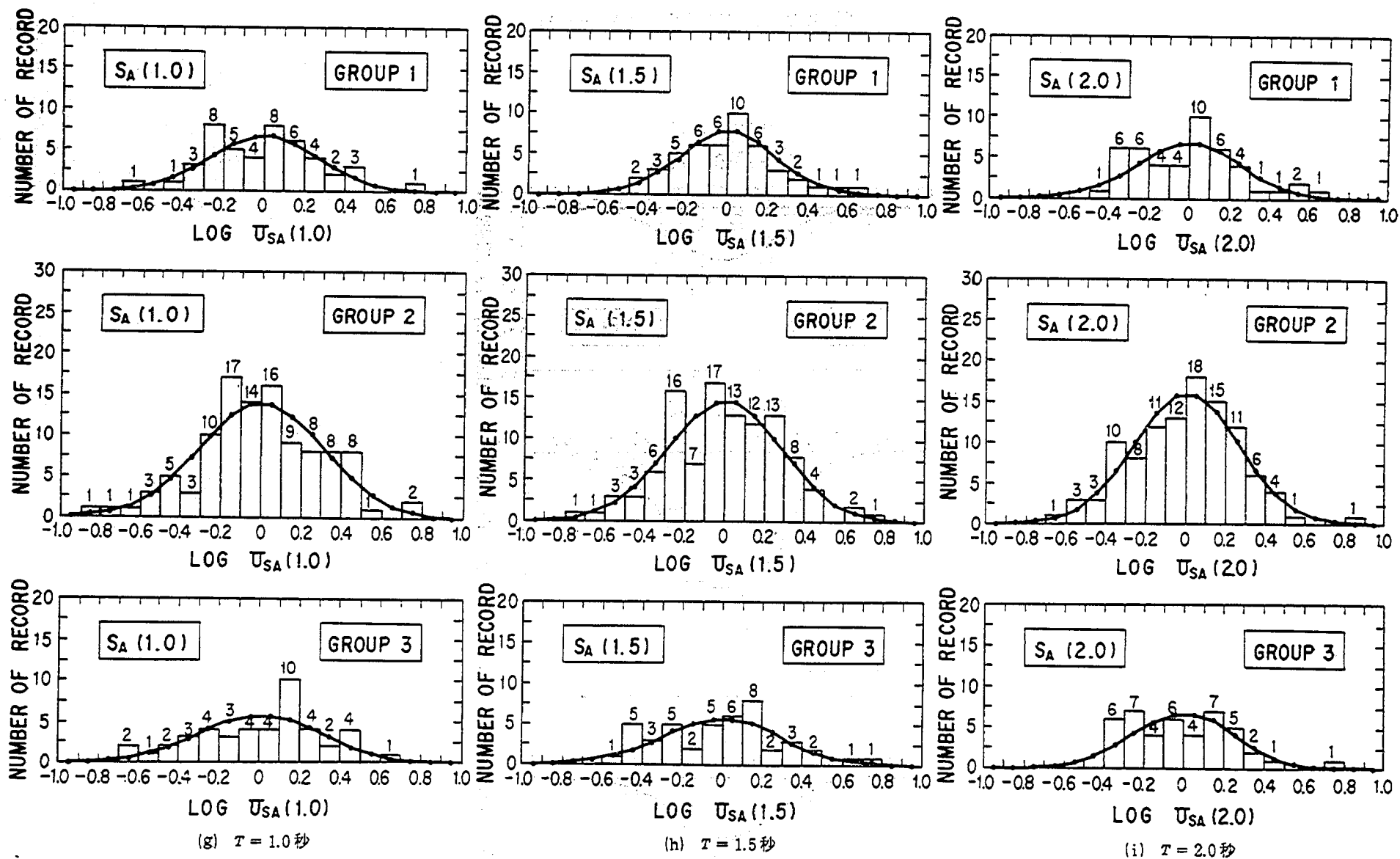
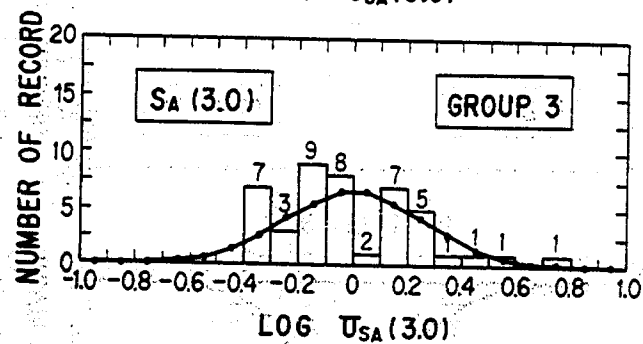
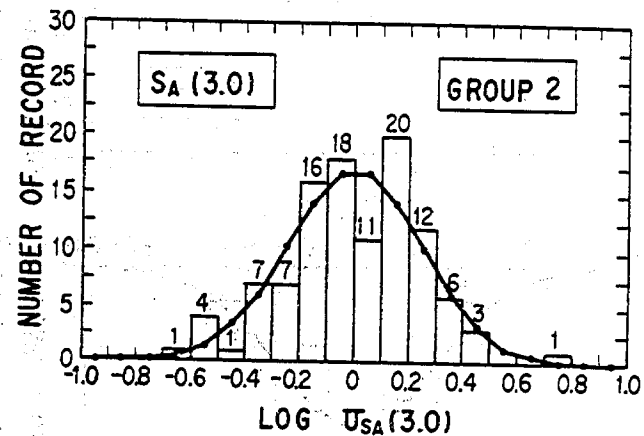
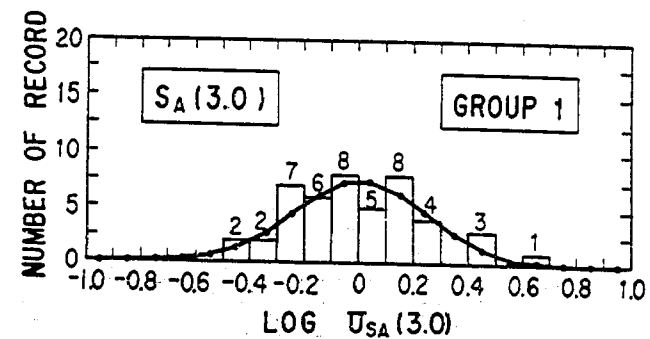
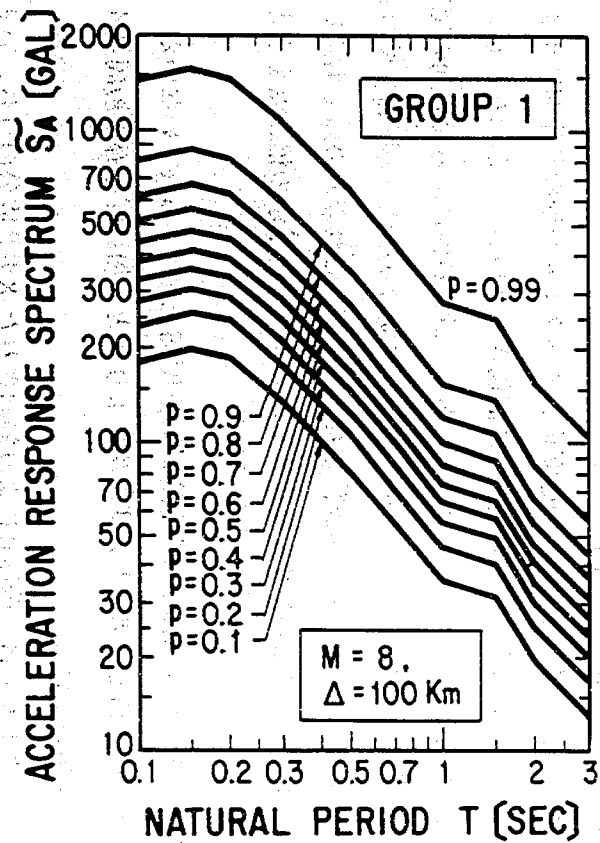


図 4-15(3) $\text{Log } U_{SA}(T)$ の頻度分布

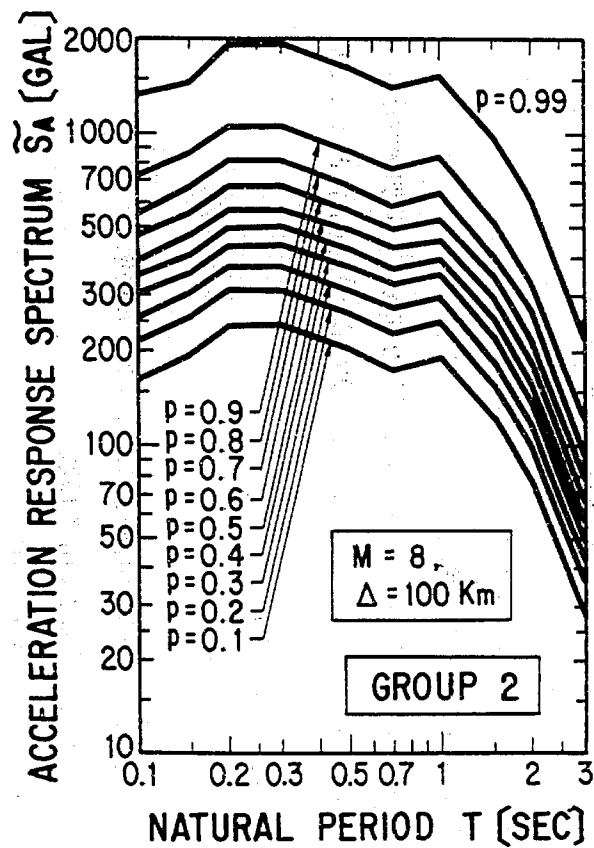


(j) $T = 3.0$ 秒

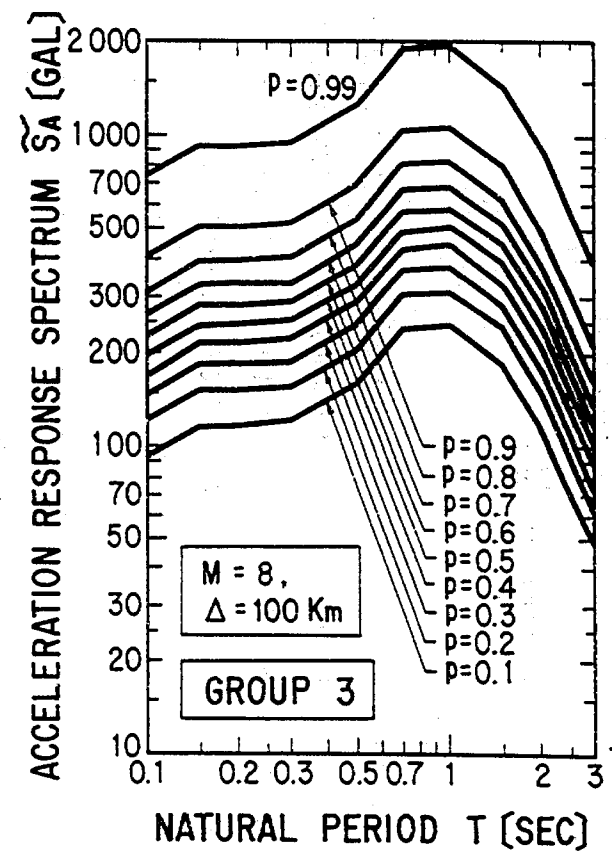
図 4-15(4) $\text{Log } U_{SA}(T)$ の頻度分布



(a) 1種地盤



(b) 2種地盤



(c) 3種地盤

図4-16 主要な非超過確率に対する $\tilde{S}_A$ スペクトル ($M=8.0, \Delta=100 \text{ km}$ の場合)

5. 既往の研究成果との比較

5-1 加速度応答スペクトルの予測式

現在までに我国で提案されている主要な応答スペクトルの距離減衰式は表5-1(a)に示す通りである。代表的なものとしては、建設省総合プロジェクト新耐震設計法の開発の一環として開発された予測式があり、これは我国の地盤上で得られた277成分の強震記録から減衰定数5%の加速度応答スペクトル $S_A(T)$ を求め、これを数量化理論により解析したもので、次の推定式が求められている⁵⁾。

$$S_A(T) = f_M(T) \times f_d(T) \times f_{GC}(T) \quad (5-1)$$

ここで、

$S_A(T)$: 固有周期 T [秒], 減衰定数5%の加速度応答スペクトル

$f_M(T)$: マグニチュードの範ちゅうごとの重み係数

$f_d(T)$: 震央距離の範ちゅうごとの重み係数

$f_{GC}(T)$: 地盤条件の範ちゅうごとの重み係数

また、道路橋示方書耐震設計編では、上記と同じ記録および解析方法を用いて加速度応答スペクトル倍率 $\beta(T)$ を解析した結果を付属資料に示している。この場合には、次のような推定式となっている⁶⁾。

$$\beta(T) = f_M'(T) \times f_d'(T) \times f_{GC}'(T) \quad (5-2)$$

ここで、

$\beta(T)$: 固有周期 T [秒], 減衰定数5%の加速度応答スペクトル倍率

$f_M'(T)$: マグニチュードの範ちゅうごとの重み係数

$f_d'(T)$: 震央距離の範ちゅうごとの重み係数

$f_{GC}'(T)$: 地盤条件の範ちゅうごとの重み係数

これらの解析結果は、我国で得られた記録をもとに加速度応答スペクトルを地盤条件別にマグニチュードおよび震央距離の関数として推定し得る道を開いた点で高く評価されている。しかしながら、これらの解析に用いられた記録はSMAC型強震計により得られたものであり、計器特性による短周期の感度が低下している。従って、式(5-1)、(5-2)による解析結果は短周期の感度低下の影響を受けたものと考えることができる。今回の解析では、これらの点が改善されているが、これ以外の点でも違いがあるので、今回の解析結果と式(5-1)による解析結果を比較する前に、両解析手法の相違点をまとめると以下になる。

a) 新耐震設計法によるスペクトルは、SMAC型強震計の感度補正が加えられていないが、今回の解析ではディジタル化による数値化精度を考慮した補正法によりもとの加速度記録の短周期を補正し、これから計算したスペクトルを用いている。

b) 新耐震設計法によるスペクトルでは、強震計により観測された水平2成分のうち、いずれか一方

表 5-1 既往の地盤応答スペクトルの予測式

(a) 我国の研究成果

出典	解析データ	地盤種別	推定式
建設省新耐震設計法 (案) (片山恒雄) (岩崎敏男) (佐伯光昭)	我国の地盤上で得られた 277 成分	道路橋耐震設計指針 の地盤種別による 1, 2, 3, 4 種	$S_A(T) = f_M(T) \times f_J(T) \times f_{GC}(T)$ ここで, $f_M(T)$, $f_J(T)$, $f_{GC}(T)$ はそれぞれ 数量化解析から求められるマグニチュード, 震央距離および地盤種別の範ちゅうに対する 重み係数
道路橋示方書耐震設計編 付属資料 (岩崎敏男) (川島一彦) (高木義和)	同上	同上	$\beta(T) = f'_M(T) \times f'_J(T) \times f'_{GC}(T)$ ここで, $f'_M(T)$, $f'_J(T)$, $f'_{GC}(T)$ はそれぞれ 数量化解析から求められるマグニチュード, 震央距離および地盤種別の範ちゅうに対する 重み係数
建設省土木研究所 (土研資料第1864号) (1982)	我国の地盤上で得られた 2 @ 197 成分	道路橋示方書耐震設計編の地盤種別による 1 種, 2+3 種, 4 種の 3 区分	$S_A(T, M, \Delta, GC_i) = a(T, GC_i) \times 10^{b(T, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T, GC_i)}$ ここで, 係数 a, b, c は固有周期および地盤条件 $GC_i (i=1, 2, 3)$ ごとに定められる係数

(b) 海外における研究成果

出典	解析データ	地盤種別	推定式
McGuire (1974)	米国で得られた 68 成分の記録	地表層による増幅の著しいものは除いている。	$S_V(T) = a(T) \times 10^{b(T)M} \times (R+25)^{-c(T)}$ $a(T)$, $b(T)$, $c(T)$ は各周期ごとに与えられている。
Faccioli	環太平洋地震地帯の記録 (日本の記録含む)	Soft Soil Sites	$S_V(T) = a(T) \times 10^{b(T)M} \times (R+25)^{-c(T)}$ ($T=0.1 \sim 4.0$) 係数 $a(T)$, $b(T)$, $c(T)$ は固有周期ごとに与えられる。
Trifunac	米国西海岸で得られた 182 成分	1) 沖積地盤 2) 軟かい岩 3) 基盤 } 3 種	$\log S_A(T)_p = M + \log A_0(R) - a(T)_p - b(T)M - c(T) - d(T)s - e(T)v - f(T)M^2 - g(T)R$ ここで, $S_A(T)_p$: 信頼性のレベル p の加速度応答スペクトル $s=0$ 沖積層, $=1$ 軟かい岩, $=2$ 基盤 $v=0$ 水平成分, $=1$ 上下成分 $\log A_0(T)$: 振幅の減少に関する経験的補正関数 p =信頼性のレベル ($\div$ 非超過確率) $a(T)$, $b(T)$, $c(T)$, $d(T)$, $f(T)$, $g(T)$: 固有周期ごとに与えられる係数

注) Δ = 震央距離 [km] R = 震源距離 [km]

もしくは両方の記録を集めて277成分とし、この記録のスペクトルを解析している。これに対して今回の解析では、強震計により観測された水平2成分を時間領域で合成し、スペクトル値が最大となる方向のスペクトルを解析している。

c) 新耐震設計法では、277成分の記録を用いているが、今回の解析では、これに昭和53年1月の伊豆大島近海地震、昭和53年6月の宮城県沖地震等の最近の地震記録を加え2@197=394成分の記録を解析に用いた。なお、2-4に示したように、このように水平2成分を合成してスペクトルを求めると水平2成分のスペクトルのうち、いずれか大きい方のスペクトルに比較し、各周期で平均して25~30%程度大きめの結果を与えることがわかっている。¹⁶⁾

d) 新耐震設計法では、道路橋耐震設計指針の地盤種別に基づき、4種類の地盤種別を考慮している。今回の解析では2種、3種、4種地盤のスペクトル値に違いが少ないことから、道路橋示方書に基づく1種、2種+3種、4種の3分類としている。

e) 新耐震設計法では、数量化理論を用いるため、マグニチュード、震央距離が範ちゅうごとに与えられる(例えば、マグニチュードのカテゴリーは5.4~6.1, 6.1~6.8, 6.8~7.5, 7.5~7.9と4区分、震央距離のカテゴリーは20km以下, 20~60km, 60~120km, 120~200kmと4区分に分けられている)が、今回の解析では、重回帰分析を用いているため、マグニチュードおよび震央距離に対して連続的に応答スペクトルを求めることができる。

以上のような相違点を考慮した上で新耐震設計法のスペクトルと今回の解析結果を比較した一例が図5-1である。ここで上記e)に示したように、新耐震設計法のスペクトルは、マグニチュードおよび震央距離のそれぞれのカテゴリーに対して与えられているため、これをカテゴリー内に属する記録のマグニチュードおよび震央距離の平均値で代表されるそれぞれマグニチュードおよび震央距離に相当するスペクトルと考えた。このようにすると震央距離 d の場合には、 $20 \leq d < 60\text{km}$, $60 \leq d < 120\text{km}$, $120 \leq d < 200\text{km}$ のカテゴリーに対して、それぞれ震央距離の平均値 $\bar{d}$ は38.2km, 82.9km, 158.7kmとなり、また、マグニチュード M の場合には $6.8 \leq M < 7.5$, $7.5 \leq M \leq 7.9$ のカテゴリーに対して、マグニチュードの平均値 $\bar{M}$ はそれぞれ7.06, 7.65となる。したがって図5-1はこれらの代表値の $\bar{M}$, $\bar{d}$ に対して、今回開発したスペクトルを計算し、これらに対応するカテゴリーの新耐震設計法のスペクトルと比較したものである。これより両者の比較に関し、以下の事項が指摘される。

i) 固有周期0.3秒程度以下の短周期領域では、今回のスペクトルの方が新耐震設計法のスペクトルよりもかなり大きくなっている。これは今回のスペクトルにはSMAC型強震計の計器特性が加えられているためと考えられる。

ii) 固有周期0.3秒以上の領域でも、今回の解析結果の方が全体として新耐震設計法のスペクトルよりも大きくなっている。ただし、震央距離が150km程度以上になると、この関係が逆転する傾向が一部に認められる。

ただし、以上のような違いはあるが、短周期の計器補正の有無、水平2成分の合成効果の有無を考慮すれば、両者の結果は全体としてよく一致しているといえることができる。

次に、海外において現在までに提案された主要な応答スペクトルの距離減衰式を表5-1(b)に示す。こ

のうち、McGuire により提案された速度応答スペクトルは、地表層による増幅の著しい記録は除いており地盤種別は特に考慮されていない。また、Faccioli は我国の強震記録を含む環太平洋地震地帯の記録を用いて速度応答スペクトルを次式のように求めている。ただし地盤条件については“soft soil site”とあるだけで、定量的な地盤条件の評価とこれによるスペクトルの区分は行われていない。

$$S_v(T) = a(T) \times 10^{b(T)M} \times (R+25)^{-c(T)} \quad (5-3)$$

ここで、

$S_v(T)$: 固有周期 T (秒), 減衰定数 h の速度応答スペクトル

M : マグニチュード

R : 震源距離 (km)

$a(T), b(T), c(T)$: 重回帰分析により固有周期 T ごとに定められる係数

Faccioli は減衰定数 5% に対して式 (5-3) の係数 $a(T), b(T), c(T)$ を与えている。速度応答スペクトル S_v を次式で加速度応答スペクトル S_A に変換し、

$$S_A(T) \simeq \frac{2\pi}{T} S_v(T) \quad (5-4)$$

これを図 4-13 と比較できるように $M = 6, 7, 8$, 震源距離 $R = 50, 100, 200$ km に対して計算すると図 5-2 のようになる。ただし、今回の解析では震央距離 Δ を用いているのに対し、式 (5-3) では震源距離 R を用いていることに注意しなければならない。図 5-2 によれば、Faccioli のスペクトルは全体として今回の解析結果の第 3 種地盤のスペクトルに近い結果を与えていることがわかる。ただし、距離減衰は今回の解析よりやや小さく、震源距離が大きくなっても、スペクトル値がなかなか減少しないという特徴がある。

これに対して、Trifunac らは最近米国で得られた 182 成分の記録をもとに、加速度応答スペクトルを次式のように与えている。

$$\log S_A(T)_p = M + \log A_0(R) - a(T)p - b(T)M - c(T) \\ - d(T)s - e(T)v - f(T)M^2 - g(T)R \quad (5-5)$$

ここで、

$S_A(T)_p$: 固有周期 T (秒), 減衰定数 h , 信頼性のレベル p の加速度応答スペクトル

M : マグニチュード (ローカルマグニチュード M_L)

s : 地盤条件 ($s = 0$: 沖積層, $s = 1$: 軟かい岩, $s = 2$: 基盤)

v : 水平, 上下の指標 ($v = 0$: 水平成分, $v = 1$: 上下成分)

$\log A_0(T)$: 震央からの距離に伴う振幅の減少率に関する経験的な補正関数 (Richter による)

p : 信頼性のレベルで、確率とは異なるが 0.1~0.9 の範囲では非超過確率を近似する。

$a(T), b(T), c(T), d(T), e(T), f(T), g(T)$: 重回帰分析により定める未定定数

Trifunac のスペクトルをマグニチュード $M = 6, 7, 8$, 震央距離 $\Delta = 50$ km, 100 km, 200 km に対して式

(5-5)から計算した結果が図5-3である。これを図4-13に示した本解析によるスペクトルと比較すると、Trifunacらのスペクトルは震央距離が50km程度以上となると、極めて小さなスペクトル値を与えることがわかる。例えば、マグニチュード $M=8$ で震央距離 $\Delta=100$ kmの場合には、スペクトル値が最も大きい3種地盤の固有周期0.55秒付近のスペクトル値でさえ150gal以下となっており、我国の同種の解析結果からは信じられない程度の小さい値となっている。ただし、震央距離が50km程度未満になると傾向は反対になり、震央距離が短いほどスペクトル値は非常に大きな値を与える。Trifunacらが用いた記録はその半分以上が1971年のSan Fernando地震($M=6.9$)により得られたものであり、我国のように規模の大きい地震による記録は少ないことから、解析に用いた地震データの特徴を踏まえて我国のスペクトルとTrifunacらによる米国のスペクトルの相違について検討していくことが必要とされる。

5-2 最大加速度の予測式

現在までに我国で提案されている主要な最大加速度の距離減衰式は表5-2(a)に示す通りである。代表的なものとしては、建設省総合プロジェクト新耐震設計法の開発の一環として開発された予測式がある。これは我国の地盤上で得られた301成分の強震記録から、強震計で得られた水平2成分のうち最大加速度の大きいいずれか一方の成分を重回帰分析したもので、次式が得られている。

$$a_{max} = \begin{cases} 46.0 \times 10^{0.208M} \times (\Delta + 10)^{-0.686} & (1 \text{ 種 地 盤 }) (R = 0.48) \\ 24.5 \times 10^{0.333M} \times (\Delta + 10)^{-0.924} & (2 \text{ 種 地 盤 }) (R = 0.59) \\ 59.0 \times 10^{0.261M} \times (\Delta + 10)^{-0.886} & (3 \text{ 種 地 盤 }) (R = 0.62) \\ 12.8 \times 10^{0.432M} \times (\Delta + 10)^{-1.112} & (4 \text{ 種 地 盤 }) (R = 0.72) \\ 34.1 \times 10^{0.308M} \times (\Delta + 10)^{-0.925} & (\text{全記録から求めた場合}) (R = 0.62) \end{cases} \quad (5-6)$$

ここで、 R は重相関係数を表わしている。上式は道路橋示方書耐震設計編の付属資料にも取り入れられている。この推定式と今回の推定式の違いは、前節で示した新耐震設計法の応答スペクトルの場合と同様であり、a)計器補正の有無(新耐震設計法の推定式は未補正記録をもとにしている)、b)水平2成分の合成の有無(今回の解析では、2成分の合成をしている)、c)記録数の違い(今回の解析では新耐震設計法以後に発生した伊豆大島近海地震、宮城県沖地震等による記録を補充している)の3点である。

図5-4は新耐震設計法による推定式と今回の推定式を $M=6, 7, 8$ に対して比較したものである。これによれば上記計器補正の効果と水平2成分合成の効果により、今回の予測式(特に1種地盤)は、新耐震設計法の予測式よりも、かなり大きな結果を与えるのがわかる。ただし、新耐震設計法の予測式では、1種地盤の場合には $M=8$ 、震央距離 $\Delta=50$ kmの条件でも最大加速度は130galにしかならず、もともと非常に小さい値しか与えないことに注意しなければならない。

一方、図5-5は、表5-2に示した既往の我国の主要な最大加速度の予測式を $M=6, 8$ に対して示したものであり、図5-6は篠、大角、片山により最近提案された最大加速度の予測式である²⁴⁾図5-6は723成分の記録を用いて道路橋示方書の地盤種別法に従い、1~4種に分類した最大加速度の距離減衰であるが、最大加速度は地盤種別によらず、ほぼ同程度となっていることが注目される。これは、今回の解析結果(図3-12(a)参照)でも同様の結果となっている。また、図5-7は既往の海外における主要な

表5-2 既往の最大加速度の予測式

(a) 我国の研究成果

出典	解析データ	地盤種別	推定式	備考
建設省新耐震設計法(案)	我国の地盤上の301成分	道路橋耐震設計指針の地盤種別による(4種類)	$a_{\max} = \begin{cases} 46.0 \times 10^{0.208M} \times (d+10)^{-0.666} & (1\text{種地盤}) \\ 24.5 \times 10^{0.333M} \times (d+10)^{-0.921} & (2\text{種地盤}) \\ 59.0 \times 10^{0.251M} \times (d+10)^{-0.886} & (3\text{種地盤}) \\ 12.8 \times 10^{0.432M} \times (d+10)^{-0.112} & (4\text{種地盤}) \end{cases}$	計器補正はしていない。
片山恒雄 (1974)	1963~1970年間にわが国で得られた46地震による330記録		$a_{\max} = 9.59 \times 10^{0.466M} \times d^{-1.290}$ $a_{\max} = 203 \times 10^{0.411M} \times (d+30)^{-1.637}$	$\sigma(U) = 0.877$ $\sigma(U) = 0.942$
後藤尚男 亀田弘行 今西直人 橋本修身 (1978)	我国の地盤上の45成分(最大加速度50 gal以上)	道路橋耐震設計指針による3種地盤	$a_{\max} = 407.4 \times 10^{0.160M} \times (d+30)^{-0.752}$	計器補正済 $\sigma(\ln U) = 0.495$
後藤尚男 亀田弘行 杉戸真太 (1982)	我国の地盤上の28地震による84成分	一般の沖積および洪積地盤(道路橋耐震設計指針の第2,3種に相当)	$a_{\max} = 202 \times 10^{0.178M} \times (d+30)^{-0.666}$	$\sigma(U) = 0.578$
岡本舜三	鬼怒川発電所立て坑(地下672m)の記録	粗粒凝灰岩	$\log \frac{a_{\max}}{640} = \frac{d+40}{100} (-7.604 + 1.7244M - 0.1036M^2)$	
篠、泉 大角恒雄 片山恒雄 (1982)	我国の地盤上で得られた723成分	道路橋示方書による1,2,3,4種地盤	地盤別の場合 $a_{\max} = 6.85 \times 10^{0.372M} \times d^{-0.866} \quad (1\text{種})$ $a_{\max} = 6.75 \times 10^{0.351M} \times d^{-0.793} \quad (2\text{種})$ $a_{\max} = 14.8 \times 10^{0.318M} \times d^{-0.829} \quad (3\text{種})$ $a_{\max} = 4.45 \times 10^{0.420M} \times d^{-0.922} \quad (4\text{種})$ 層別因子の場合 $a_{\max} = \begin{cases} 8.04 \\ 8.09 \\ 9.18 \\ 8.04 \end{cases} \times 10^{0.353M} \times d^{-0.837} \quad \begin{matrix} (1\text{種}) \\ (2\text{種}) \\ (3\text{種}) \\ (4\text{種}) \end{matrix}$	
大崎順彦 渡部丹 藤堂正喜	岩盤上で得られた75組の強震記録	岩盤上	$a_{\max} = 10^{0.440M - 1.38 \log R + 1.01}$	
建設省土木研究所(土研資料第1864号) (1982)	我国の地盤上で得られた2@197成分	道路橋示方書耐震設計編の地盤種別による1種, 2+3種, 4種の3区分	$\tilde{a}_{\max} = 1,073 \times 10^{0.221M} \times (d+30)^{-1.251} \quad (1\text{種})$ $\tilde{a}_{\max} = 227.3 \times 10^{0.308M} \times (d+30)^{-1.201} \quad (2,3\text{種})$ $\tilde{a}_{\max} = 403.1 \times 10^{0.262M} \times (d+30)^{-1.208} \quad (4\text{種})$	$\sigma(\log U) = 0.217$ $\sigma(\log U) = 0.221$ $\sigma(\log U) = 0.191$

(b) 海外における研究成果

出典	解析データ	地盤種別	推定式	ばらつき
Donovan (1973)	世界各地の記録		$a_{\max} = 1,320 e^{0.59M} \times (\Delta + 25)^{-1.52}$	$\sigma(\ln U) = 0.84$
Esteve (1970)			$a_{\max} = 1,230 \times e^{0.8M} \times (\Delta + 25)^{-2}$	$\sigma(\ln U) = 1.2$
Esteve and Villaverde (1974)	Western U. S.		$a_{\max} = 5,600 \times e^{0.8M} \times (\Delta + 40)^{-2}$	$\sigma(\ln U) = 0.64$
McGuire (1974)	West Coast of U. S.		$a_{\max} = 472 \times 10^{0.278M} \times (\Delta + 25)^{-1.301}$	$\sigma(\log U) = 0.222$
Orphal and Lahoud (1974)	California	考慮されてい ない。	$a_{\max} = 6.6 \times 10^{-2} \times 10^{0.40M} \times \Delta^{-1.39}$	$\sigma(U) = 1.99$
Eguchi (1981)	Western United States の669成 分	"	$a_{\max} = 67.6 \times 10^{0.37M} \times \Delta^{-1.44}$	$\sigma(\log U) = 0.28$
Seed, Idriss			図示されている	報告されていない
Donovan and Bornstein (1978)	Western U. S. の 59記録, このう ちの37記録はSan Fernando 地震 による。また, 最 大地震はM=7.7	Rock and Hard Soil Site	$a_{\max} = b_1 \times e^{b_2 M} \times (\Delta + 25)^{b_3}$ ここで, $b_1 = 2,154,000 \times \Delta^{-2.10}$ $b_2 = 0.046 \times 0.445 \log \Delta$ $b_3 = 2.515 - 0.486 \log \Delta$	"
Faccioli	環太平洋地震地 帯の記録(日本の 記録も含む)	Soft Soil Sites	$a_{\max} = 108 \times 10^{0.265M} \times (R + 25)^{-0.808}$ (47成分から定めた場合) $a_{\max} = 65.6 \times 10^{0.263M} \times (R + 25)^{-0.678}$ (28成分から定めた場合)	$\sigma(\log U) = 0.236$ $\sigma(\log U) = 0.275$

注) $a_{\max}$: 最大加速度 (gal) M : マグニチュード Δ : 震央距離 (km) R : 震源距離 (km)

最大加速度の予測式を $M = 6, 8$ に対して示したものである。米国における解析は、大部分がカリフォルニア州の強震記録（この中でも 1971 年 San Fernando 地震による記録の比率が非常に高い）を用いており、地盤条件は一般に良好なものが多いと考えられる。ここで、上述したように、最大加速度は地盤条件にはあまりよらないことを考慮し、今回の解析結果を既往の我国および海外における主要研究結果と比較すると次のようになる。すなわち、いま今回の解析結果から $M = 6$ の場合の $\Delta = 30 \text{ km}$ および $\Delta = 100 \text{ km}$ の最大加速度を求めると、おおよそ 130 gal, 45 gal 程度となる。また、 $M = 8$ の場合の $\Delta = 30 \text{ km}$ および $\Delta = 100 \text{ km}$ の最大加速度はそれぞれ 400~500 gal, 140~200 gal 程度となる。一方、これらを既往の研究結果について調べてみると、研究者により相当のばらつきがあるものの、大勢としては今回の解析結果に近いものが多い。したがって、このような点から、今回求めた最大加速度の推定式は従来の研究

成果とも、おおむね矛盾はないものといえることができる。

5-3 最大速度の予測式

既往の主要な最大速度の距離減衰式をまとめると表5-3に示す通りである。このうち、後藤、亀田、杉戸の推定式²³⁾は道路橋耐震設計指針でいう2種および3種相当の地盤上の強震記録から求めたものであり、大崎、渡部³⁶⁾および林³⁷⁾の推定式は、いずれも岩盤上の強震記録から求めたものである。McGuire 米国系の研究成果は、いずれも米国西海岸での比較的良好な地盤上で得られた強震加速度記録をもとに求められたものである。また、Faccioli の解析には、我国を含む環太平洋地震地帯の記録が使われている。図5-8および5-9はそれぞれ我国および海外において提案された距離減衰式を $M=6$ および 8 に対して示したものである。これに対する本解析結果は図3-12(b)に示した通りである。

震央距離 $\Delta=100\text{km}$ での最大速度を基準として、今回の解析結果と図5-8および5-9の結果を比較すると以下ようになる。すなわち、今回の解析結果によれば、地盤種別によって異なるが、 $M=6$ の場合は 2 cm/sec (1種地盤) $\sim 3.5\text{ cm/sec}$ (3種地盤)、 $M=8$ の場合には 7 cm/sec (1種地盤) $\sim 25\text{ cm/sec}$ (3種地盤)となる。これに対して、後藤らの結果では $M=6$ に対して 6.5 cm/sec $M=8$ に対して 18 cm/sec 、また、大崎、渡辺らおよび金井による結果では、 $M=6$ に対して $0.15\sim 0.7\text{ cm/sec}$ $M=8$ に対して $3\sim 10\text{ cm/sec}$ となる。後藤らの結果では距離のべき条項が -0.3 と小さいことから距離減衰が小さい。一方、海外の研究成果によれば、Faccioli の結果が近距離では小さな最大速度を与えている他は、比較的相互によく似た結果を与えており、上記 $\Delta=100\text{km}$ の最大速度を求めると $M=6$ に対して $2\sim 5\text{ cm/sec}$ 、 $M=8$ に対して $13\sim 28\text{ cm/sec}$ となる。今回の解析結果はこれらの結果に比較的近い値を与えている。なお、加速度から速度に変換するに際して用いるフィルター(振動数帯域)が、個々の研究者ごとに同一ではないので、これらを考慮しないと厳密な意味では相互比較はできない。

5-4 最大変位の予測式

既往の主要な最大変位の距離減衰式は表5-4に示す通りである。このうち、後藤、亀田、杉戸の推定式²³⁾は前節と同様に道路橋耐震設計指針でいう2種および3種相当の地盤に対するものである。また、坪井の式は強震加速度の2回積分から求めた変位ではなく、長周期地震計(変位計)により観測された変位をもとにしたものであり、本解析で対象としている振動数範囲よりも相当低い振動数の波を含んだものと考えられる。図5-10および図5-11はそれぞれ我国および海外において提案された距離減衰式を $M=6$ および 8 に対して示したものである。

坪井の式を除く国内外の推定式を総合して、震央距離 $\Delta=100\text{km}$ における最大変位を求めると $M=6$ に対して $0.5\sim 3\text{ cm}$ 、 $M=8$ に対して $7\sim 25\text{ cm}$ となる。これに対して、今回の解析結果では $M=6$ に対して 0.25 cm (1種地盤) $\sim 0.5\text{ cm}$ (3種地盤)、 $M=8$ に対して 1.5 cm (1種地盤) $\sim 7\text{ cm}$ (3種地盤)となり、上記よりもやや小さい結果となっている。ただし、前節に示したように変位を算出する際に用いられたフィルターが個々の研究者ごとに同じではないので、厳密な比較はできない。

表 5-3 既往の最大速度の予測式

(a) 我国の研究成果

出典	解析データ	地盤種別	推定式	
金井 清			$v_{\max} = 10^A$ $A = 0.61M - (1.66 + 3.60/D) \log D$ $- 0.631 + 1.83/D$	
後藤 尚男 亀田 弘行 杉戸 真太	我国の地盤上で得られた28地震による84成分	一般の沖積および洪積地盤（道路橋耐震設計指針の第2,3種地盤相当）	$v_{\max} = 1.17 \times 10^{0.232M} \times (D+30)^{-0.300}$	$\sigma(U) = 0.655$
大崎 順彦 渡部 丹 藤堂 正喜	75組の強震記録	岩 盤	$v_{\max} = 10^{0.607M - 1.19 \log R - 1.40}$	
林 大村 熊谷	硬質岩盤上の60成分の加速度記録および軟岩上の35成分の加速度記録	硬岩および軟岩	<u>硬 岩</u> $v_{\max} = 10^{0.65M - 1.36 \log R - 2.00}$ <u>軟 岩</u> $v_{\max} = 10^{0.54M - 1.31 \log R - 0.95}$	
建設省土木研究所（土研資料第1864号） 〔1982〕	我国の地盤上で得られた2@197成分	道路橋示方書耐震設計編の地盤種別による1種, 2+3種, 4種の3区分	$\bar{v}_{\max} = 23.86 \times 10^{0.271M} \times (D+30)^{-1.275}$ (1種) $\bar{v}_{\max} = 2.666 \times 10^{0.421M} \times (D+30)^{-1.183}$ (2,3種) $\bar{v}_{\max} = 5.136 \times 10^{0.415M} \times (D+30)^{-1.257}$ (3種)	$\sigma(\log U) = 0.239$ $\sigma(\log U) = 0.243$ $\sigma(\log U) = 0.243$

(b) 海外における研究成果

出典	解析データ	地盤種別	推定式	備考
Orphal and Lahoud (1974)	California	考慮されていない	$v_{\max} = 0.726 \times 10^{0.52M} \times D^{-1.34}$	$\sigma(U) = 1.89$
Eguchi (1981)	Western United Statesの669成分	"	$v_{\max} = 1.132 \times 10^{0.45M} \times D^{-1.19}$	$\sigma(\log U) = 0.24$
Esteve (1970)		"	$v_{\max} = 15 \times e^M \times (D + 0.17 e^{0.59M})^{-1.7}$	$\sigma(\ln U) = 0.84$
Esteve and Villaverde (1974)	Western U. S.	"	$v_{\max} = 32 \times e^M \times (D + 25)^{-1.7}$	$\sigma(\ln U) = 0.74$
McGuire (1974)	West Coast of U. S.	"	$v_{\max} = 5.64 \times 10^{0.401M} \times (D + 25)^{-1.202}$	$\sigma(\log U) = 0.273$
Faccioli	環太平洋地震地帯の記録（日本の記録も含む）	Soft Soil Sites	$v_{\max} = 1.48 \times 10^{0.282M} \times (R + 25)^{-0.425}$ （37成分から定めた場合） $v_{\max} = 0.93 \times 10^{0.369M} \times (R + 25)^{-0.600}$ （26成分から定めた場合）	$\sigma(\log U) = 0.253$ $\sigma(\log U) = 0.243$

注) $v_{\max}$: 最大速度 (cm/sec) D : 震央距離 (km)
 M : マグニチュード R : 震源距離 (km)

表 5 - 4 既往の最大変位の予測式

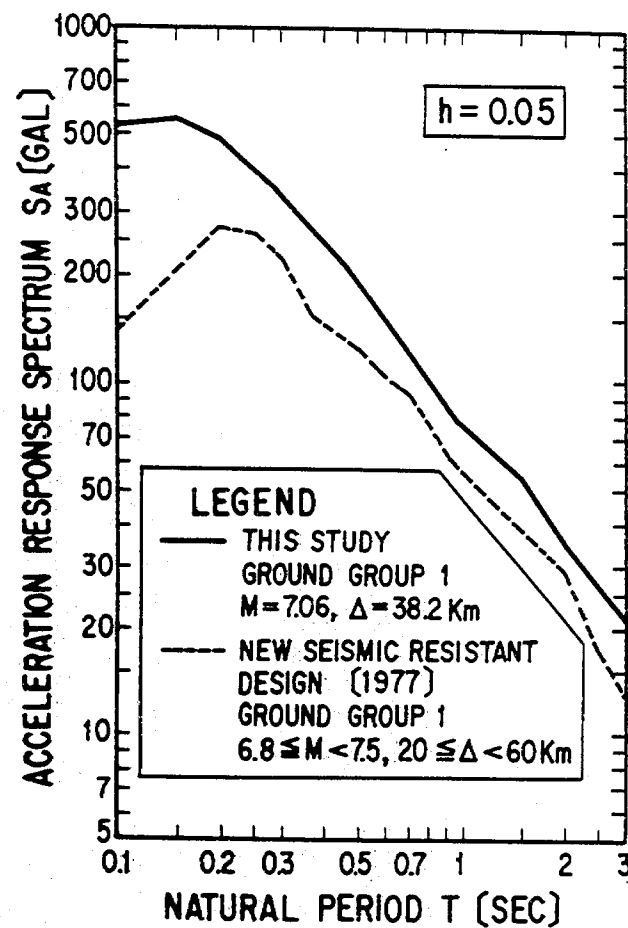
(a) 我国の研究成果

出典	解析データ	地盤種別	推定式	備考
後藤 尚男 亀田 弘行 杉戸 真太	我国の地盤上の 28地震による84 成分	一般の沖積およ び洪積地盤（道 路橋耐震設計指 針の第2,3種相 当）	$d_{\max} = 0.0288 \times 10^{0.356M} \times (D+30)^{-0.219}$	$\sigma(U) = 0.685$
坪井 忠二	震源深さ60km以 内の地震		$d_{\max} = 0.676 \times 10^M \times D^{-1.73} \quad (D < 500\text{km})$	
建設省土木研究 所（土研資料 第1864号） 〔1983〕	我国の地盤上で 得られた2 @ 197成分	道路橋示方書耐 震設計編の地盤 種別による1種、 2+3種、4種の 3区分	$\tilde{d}_{\max} = 0.886 \times 10^{0.393M} \times (D+30)^{-1.390}$ (1種) $\tilde{d}_{\max} = 0.056 \times 10^{0.519M} \times (D+30)^{-1.179}$ (2,3種) $\tilde{d}_{\max} = 0.070 \times 10^{0.575M} \times (D+30)^{-1.221}$ (4種)	

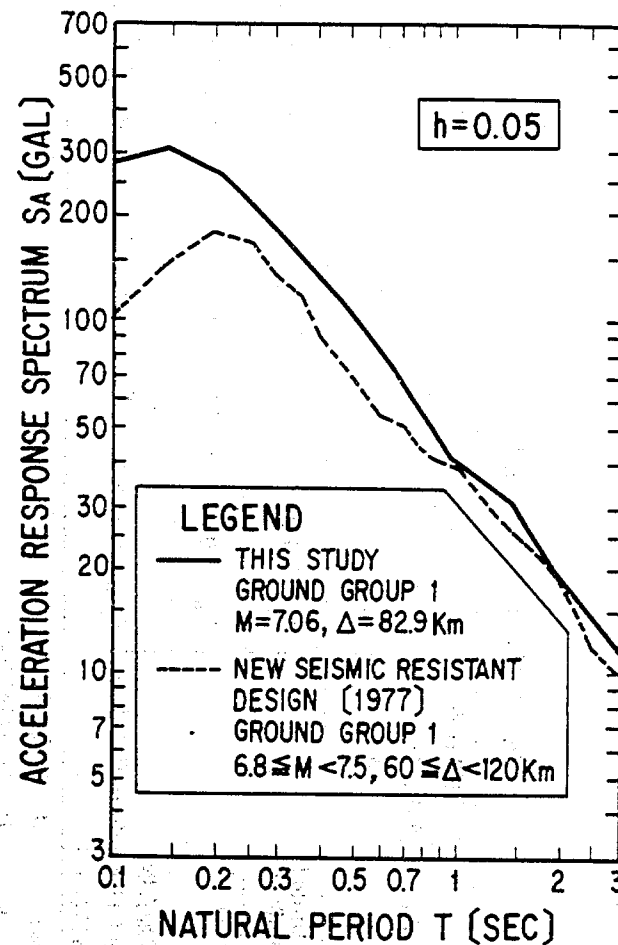
(b) 海外における研究成果

出典	解析データ	地盤種別	推定式	備考
Orphal and Lahoud (1974)	California	考慮されて いない	$d_{\max} = 4.71 \times 10^{-2} \times 10^{0.57M} \times D^{-1.18}$	$\sigma(U) = 2.19$
Eguchi (1981)	Western United Statesの669成分	"	$d_{\max} = 7.08 \times 10^{-2} \times 10^{0.51M} \times D^{-0.97}$	$\sigma(\log U) = 0.33$
McGuire (1974)	West Coast of U. S.	"	$d_{\max} = 0.393 \times 10^{0.431M} \times (D+25)^{-0.885}$	$\sigma(\log U) = 0.330$
Faccioli	環太平洋地震地 帯の記録（日本 の記録も含む）	Soft Soil Sites	$d_{\max} = 0.10 \times 10^{0.497M} \times (R+25)^{-0.691}$	$\sigma(\log U) = 0.254$

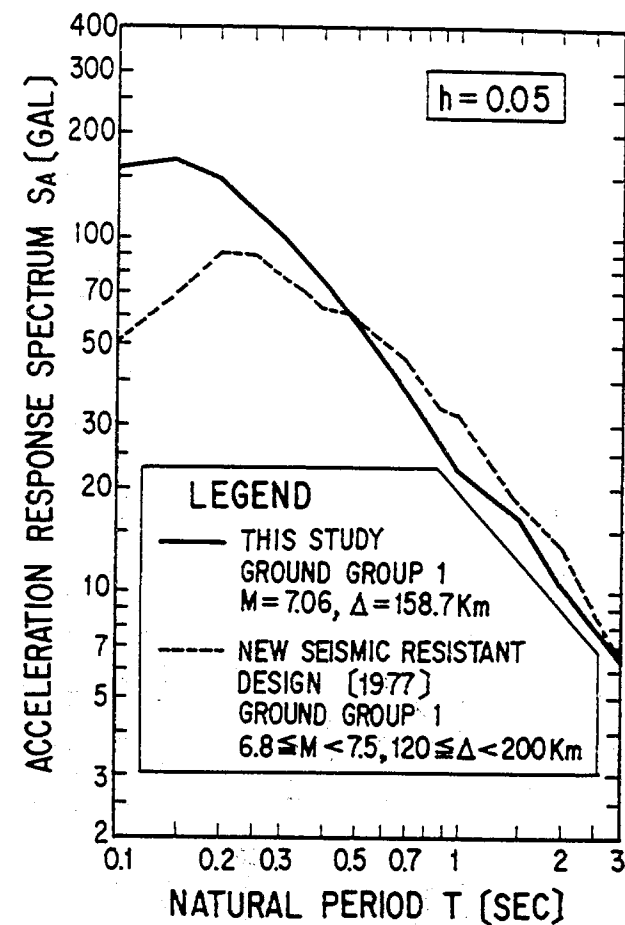
注) $d_{\max}$: 最大変位 (cm) D : 震央距離 (km)
 M : マグニチュード R : 震源距離 (km)



(a) $20 \leq \Delta < 60 \text{ km}$ の場合 ($\Delta = 38.2 \text{ km}$)



(b) $60 \leq \Delta < 120 \text{ km}$ の場合 ($\Delta = 82.9 \text{ km}$)



(c) $120 \leq \Delta < 200 \text{ km}$ の場合 ($\Delta = 158.7 \text{ km}$)

図 5-1(1) 新耐震設計法(案)のスペクトルとの比較(第1種地盤, $6.8 \leq M < 7.5$ の場合)

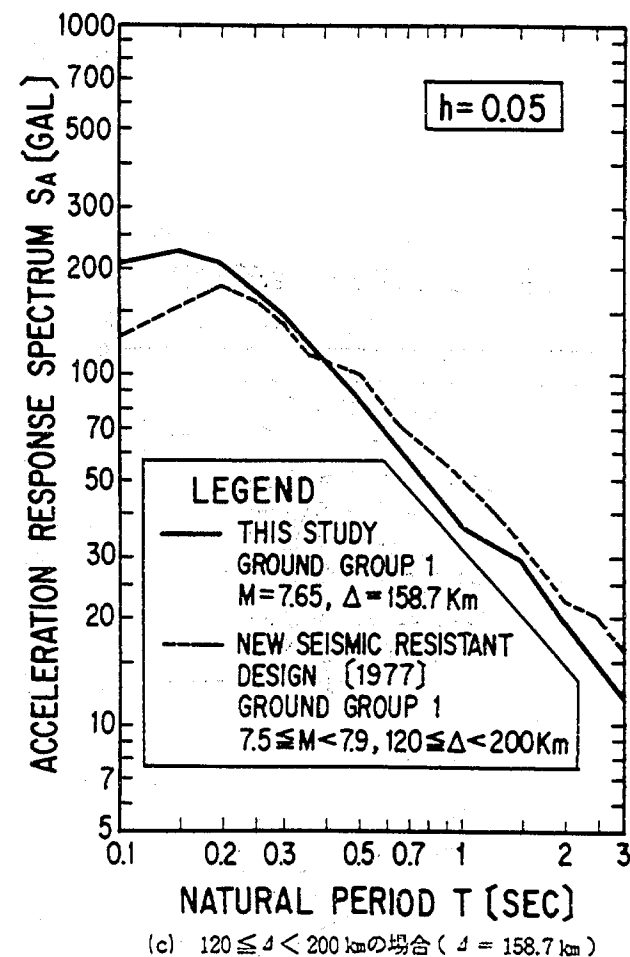
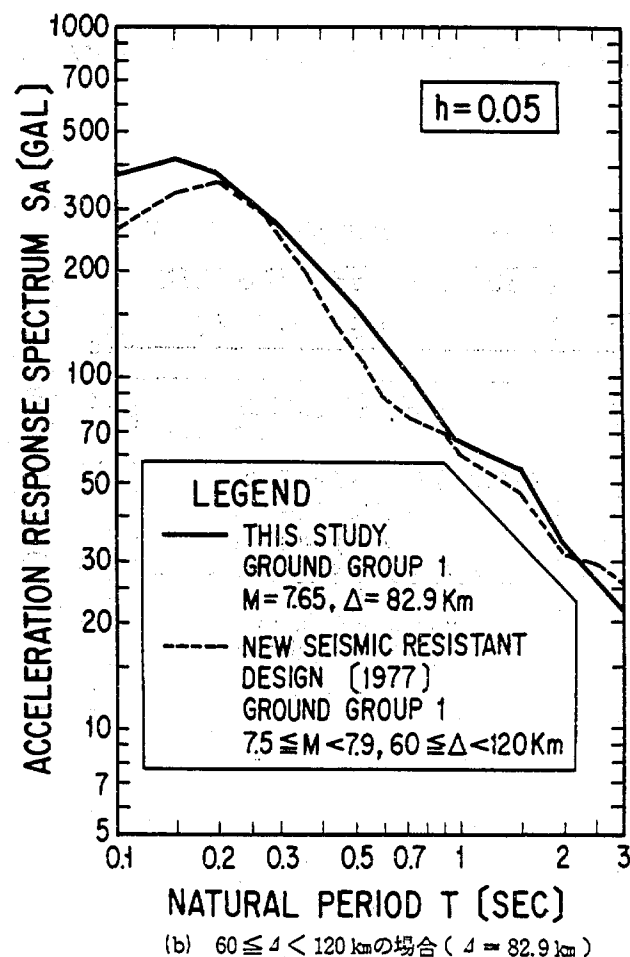
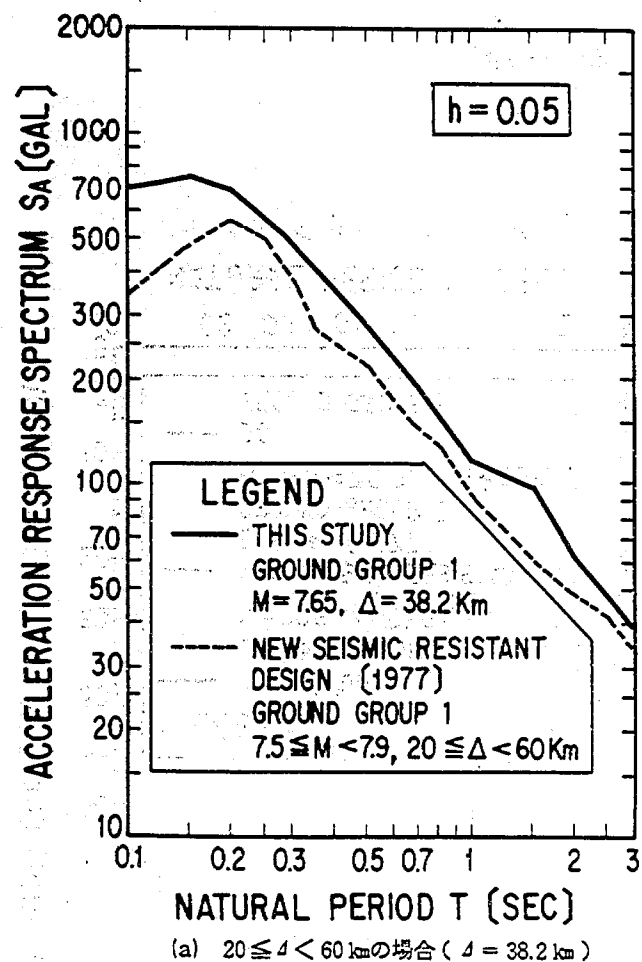
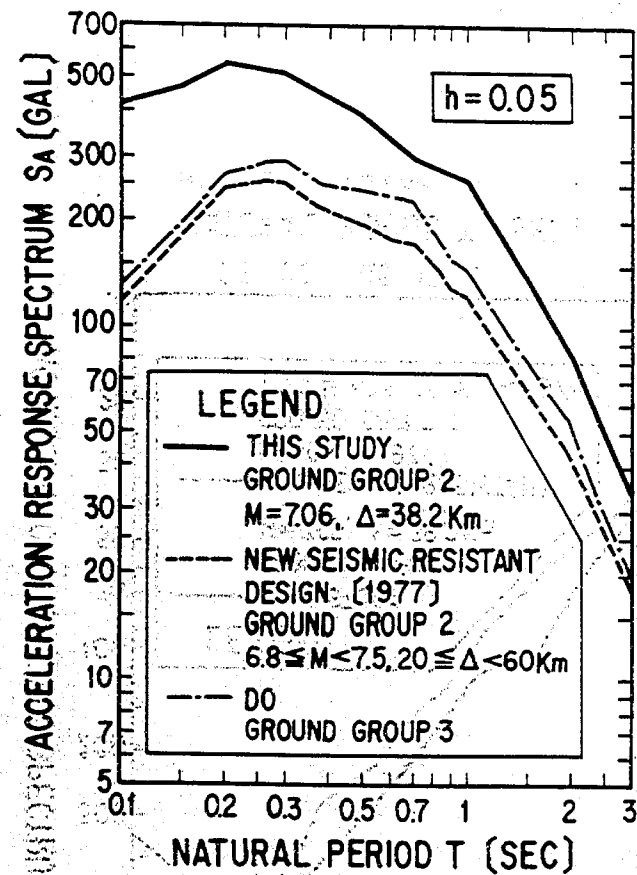
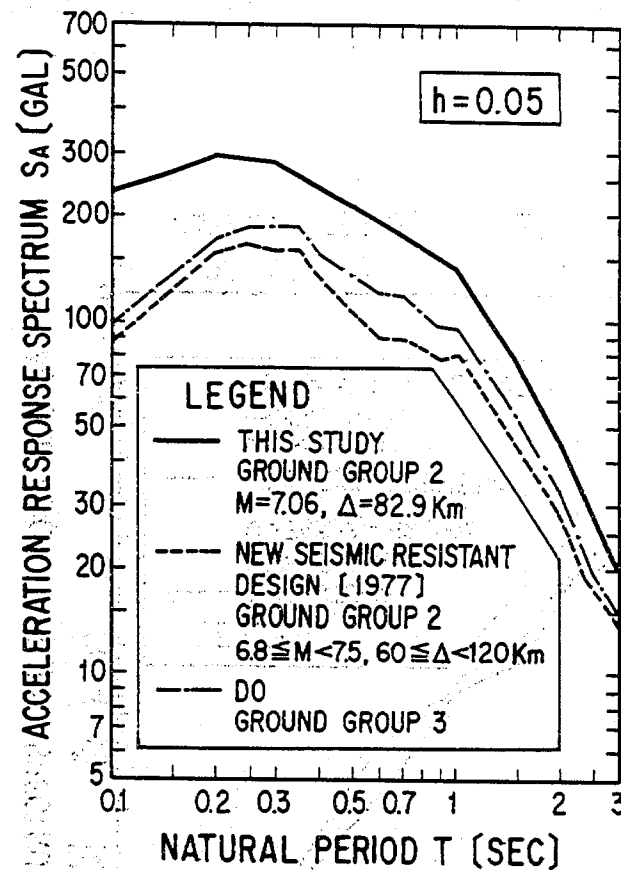


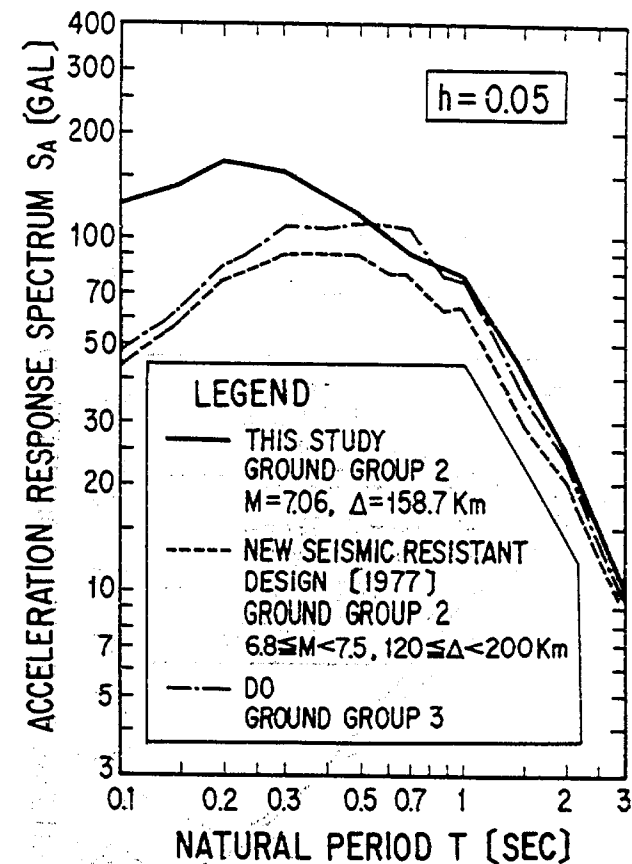
図 5-1(2) 新耐震設計法(案)のスペクトルとの比較(第1種地盤, $7.5 \leq M \leq 7.9$ の場合)



(a) $20 \leq \Delta < 60 \text{ km}$ の場合 ($\Delta = 38.2 \text{ km}$)

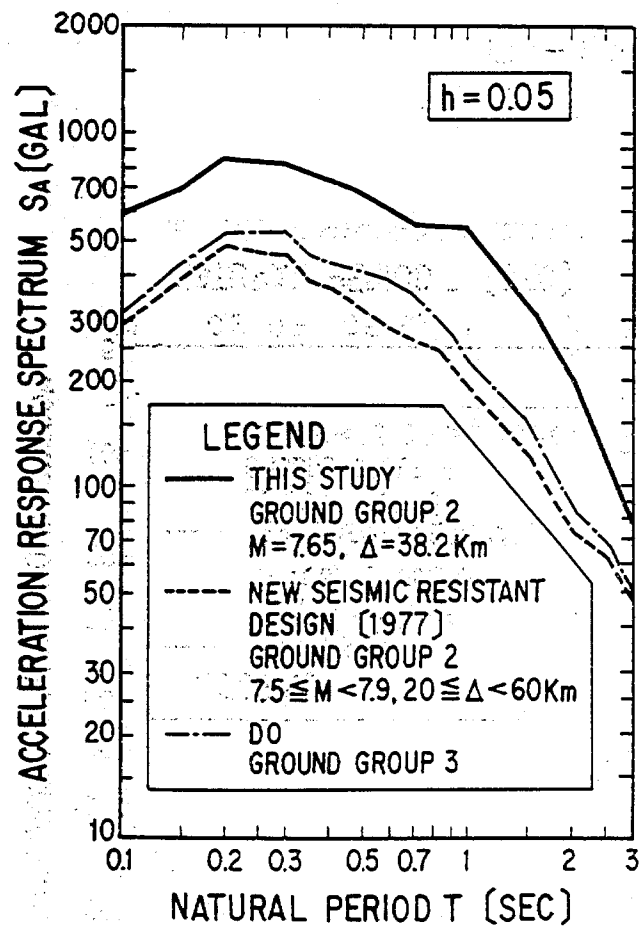


(b) $60 \leq \Delta < 120 \text{ km}$ の場合 ($\Delta = 82.9 \text{ km}$)

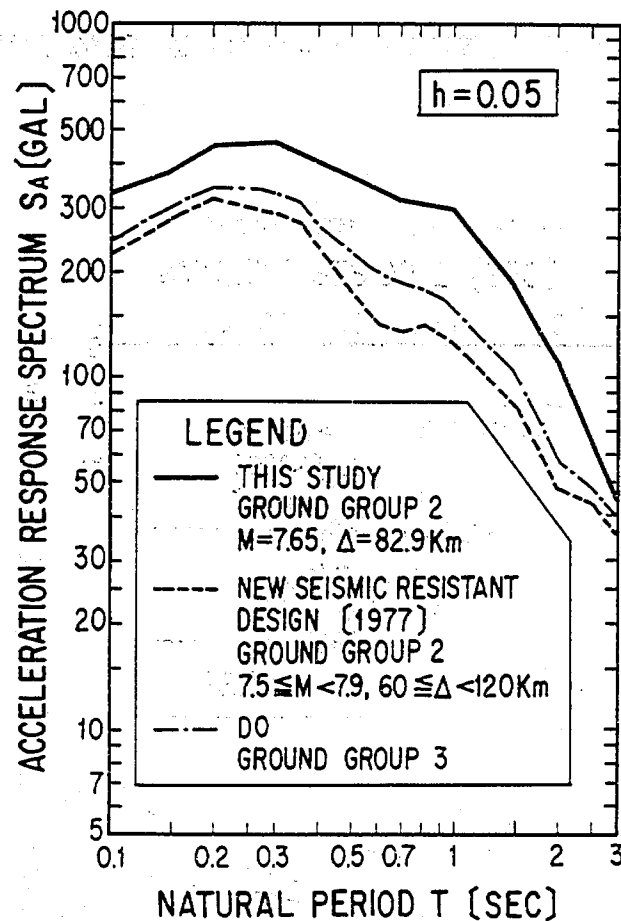


(c) $120 \leq \Delta < 200 \text{ km}$ の場合 ($\Delta = 158.7 \text{ km}$)

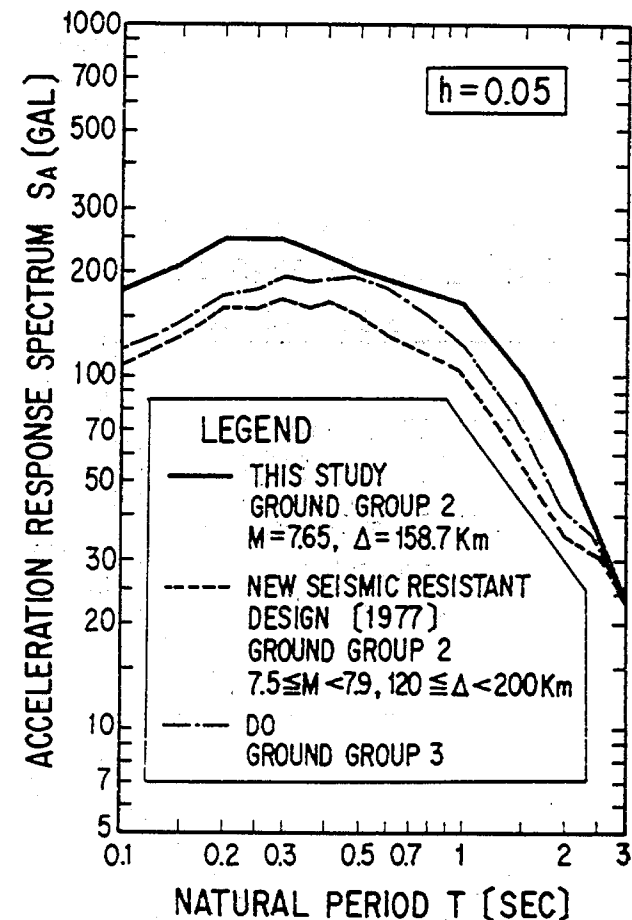
図 5-1(3) 新耐震設計法(案)のスペクトルとの比較(第2種地盤, $6.8 \leq M < 7.5$ の場合)



(a) $20 \leq \Delta < 60 \text{ km}$ の場合 ($\Delta = 38.2 \text{ km}$)



(b) $60 \leq \Delta < 120 \text{ km}$ の場合 ($\Delta = 82.9 \text{ km}$)



(c) $120 \leq \Delta < 200 \text{ km}$ の場合 ($\Delta = 158.7 \text{ km}$)

図 5-1(4) 新耐震設計法(案)のスペクトルとの比較(第2種地盤, $7.5 \leq M \leq 7.9$ の場合)

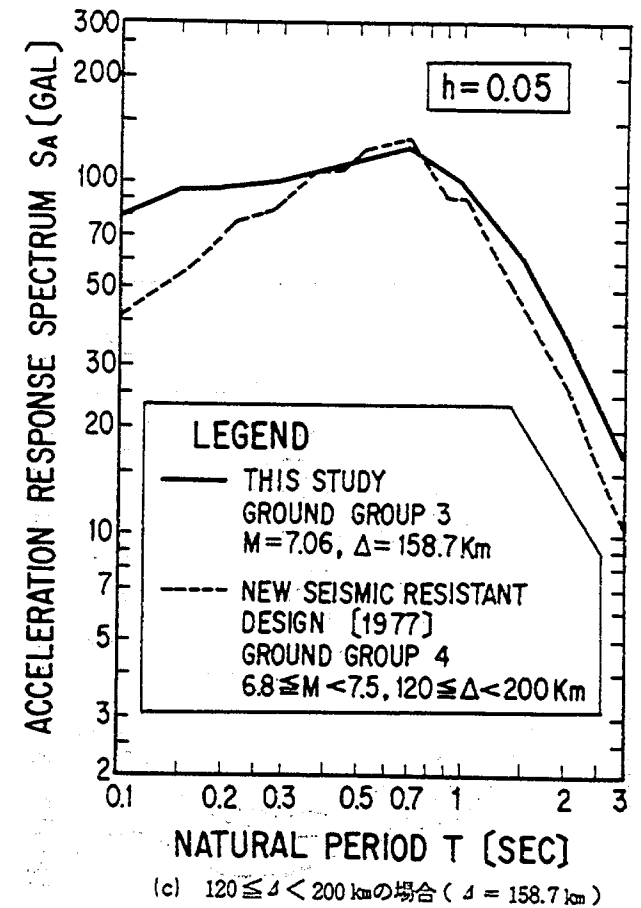
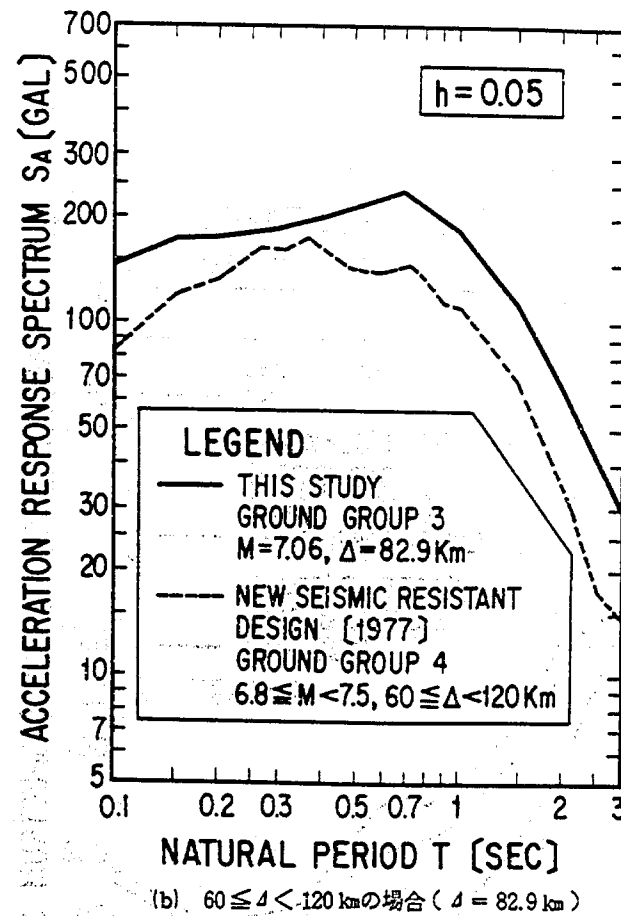
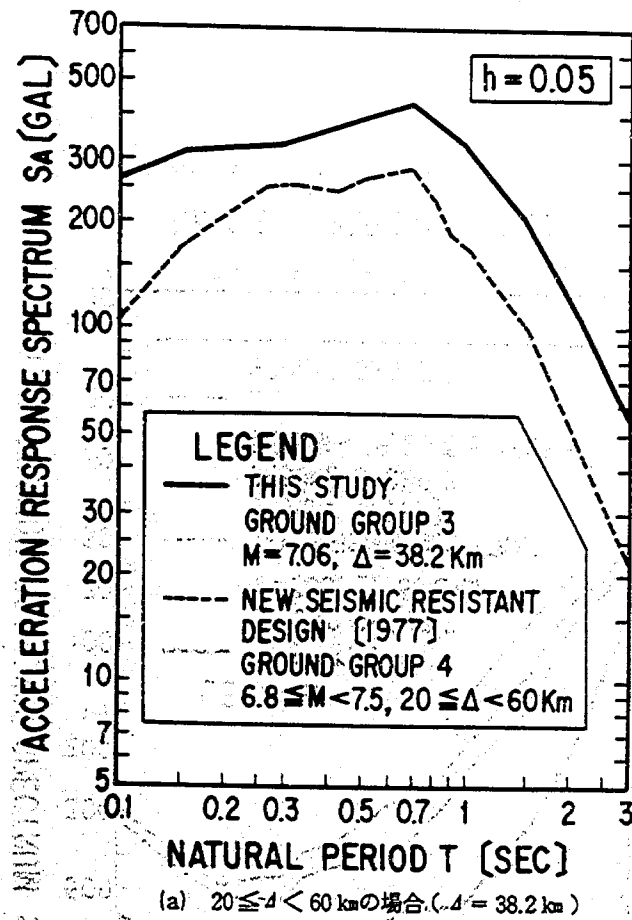
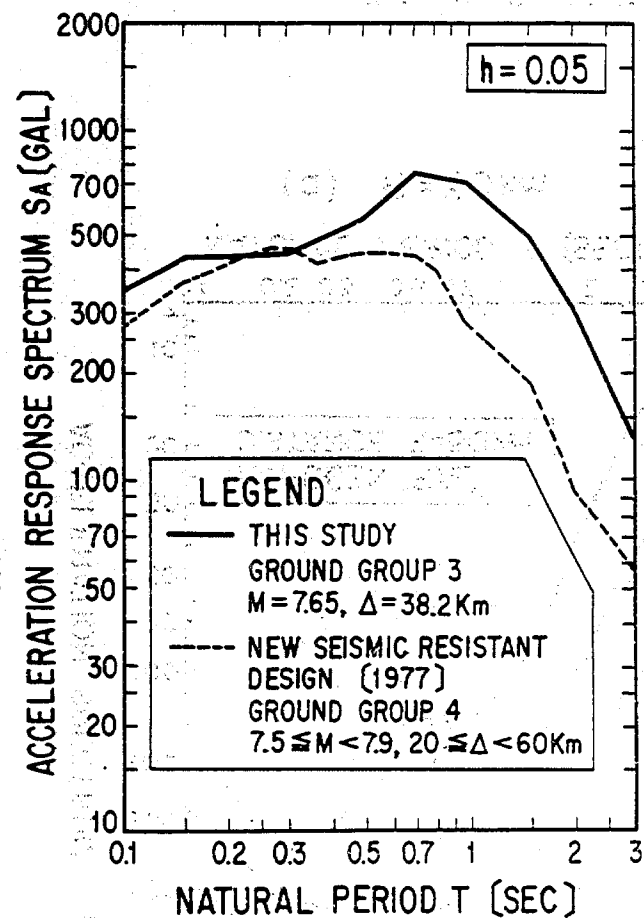
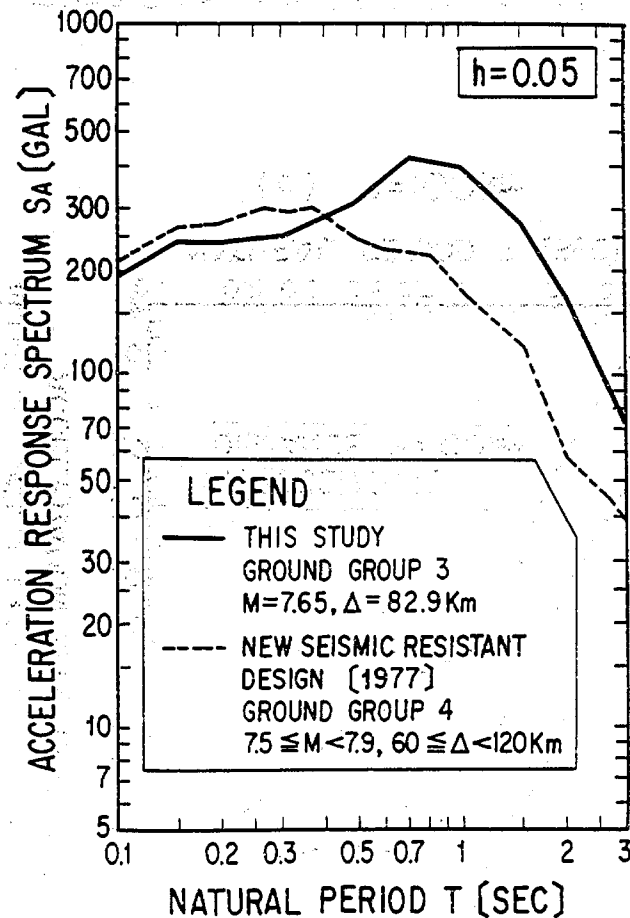


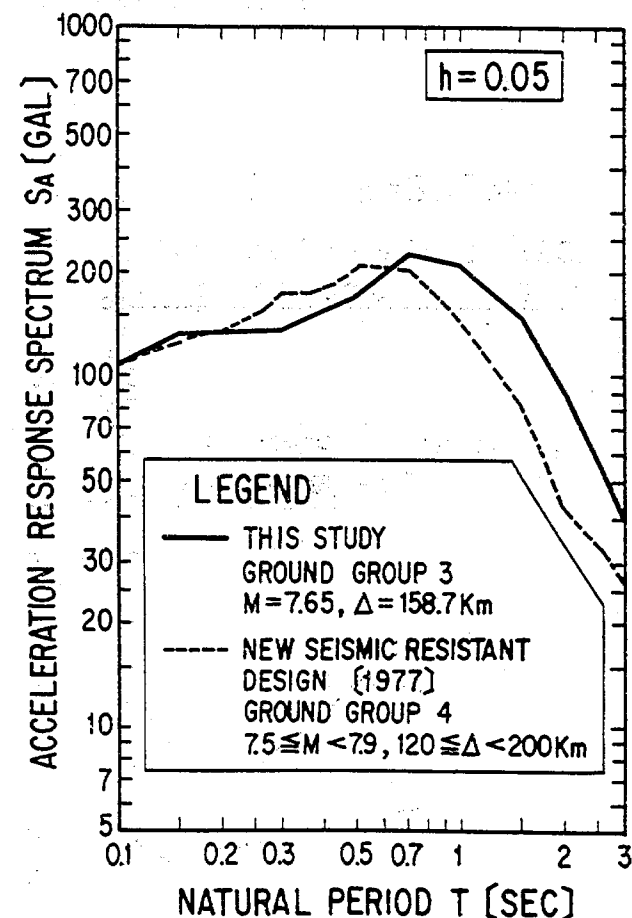
図 5-1(5) 新耐震設計法(案)のスペクトルとの比較 (第3種地盤, $6.8 \leq M < 7.5$ の場合)



(a) $20 \leq \Delta < 60\text{ km}$ の場合 ($\Delta = 38.2\text{ km}$)



(b) $60 \leq \Delta < 120\text{ km}$ の場合 ($\Delta = 82.9\text{ km}$)



(c) $120 \leq \Delta < 200\text{ km}$ の場合 ($\Delta = 158.7\text{ km}$)

図 5 - 1 (6) 新耐震設計法 (案) のスペクトルとの比較 (第 3 種地盤, $7.5 \leq M \leq 7.9$ の場合)

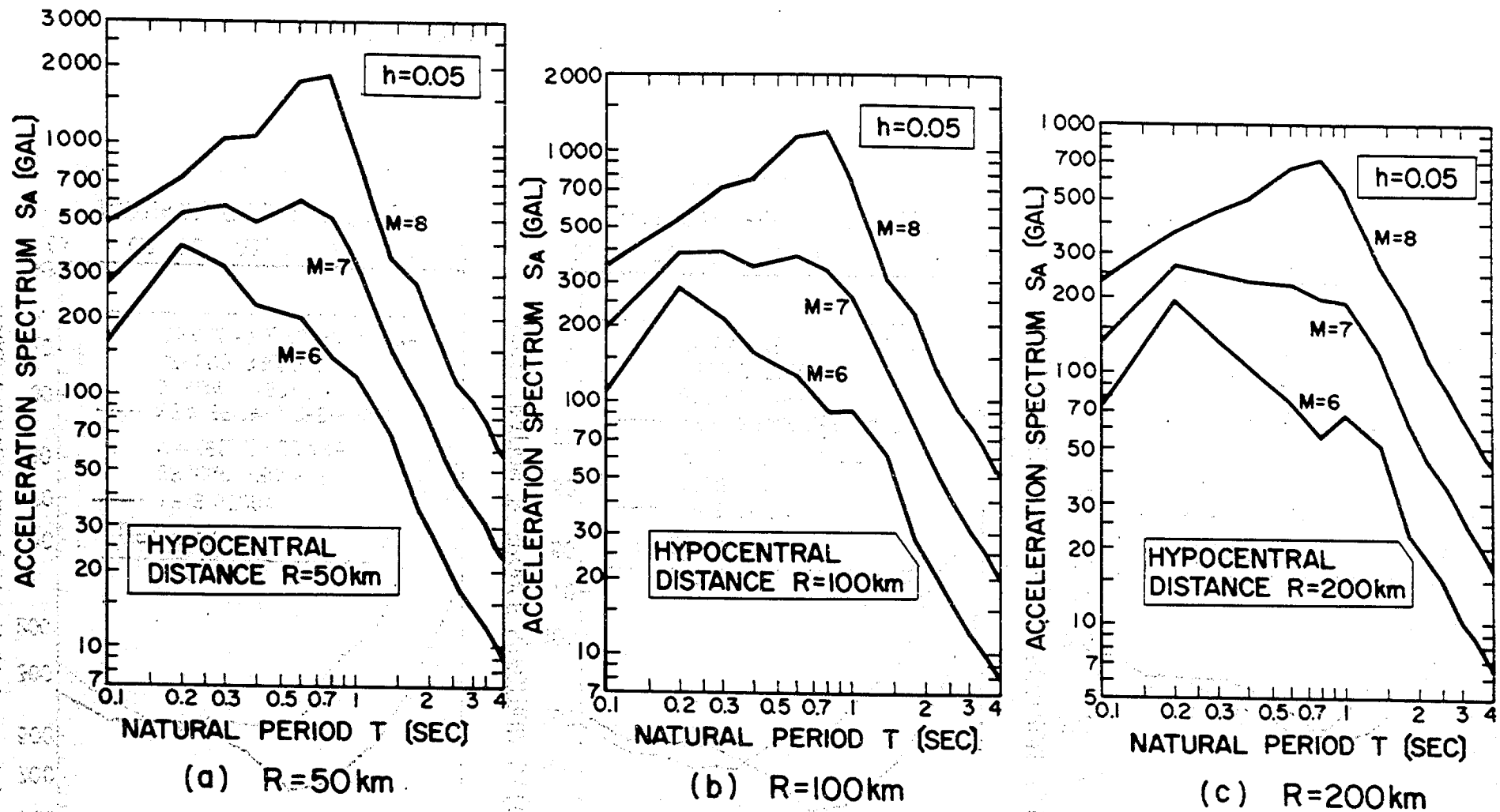


図 5-2 Faccioli による加速度応答スペクトル (速度応答スペクトルから加速度応答スペクトルに変換)

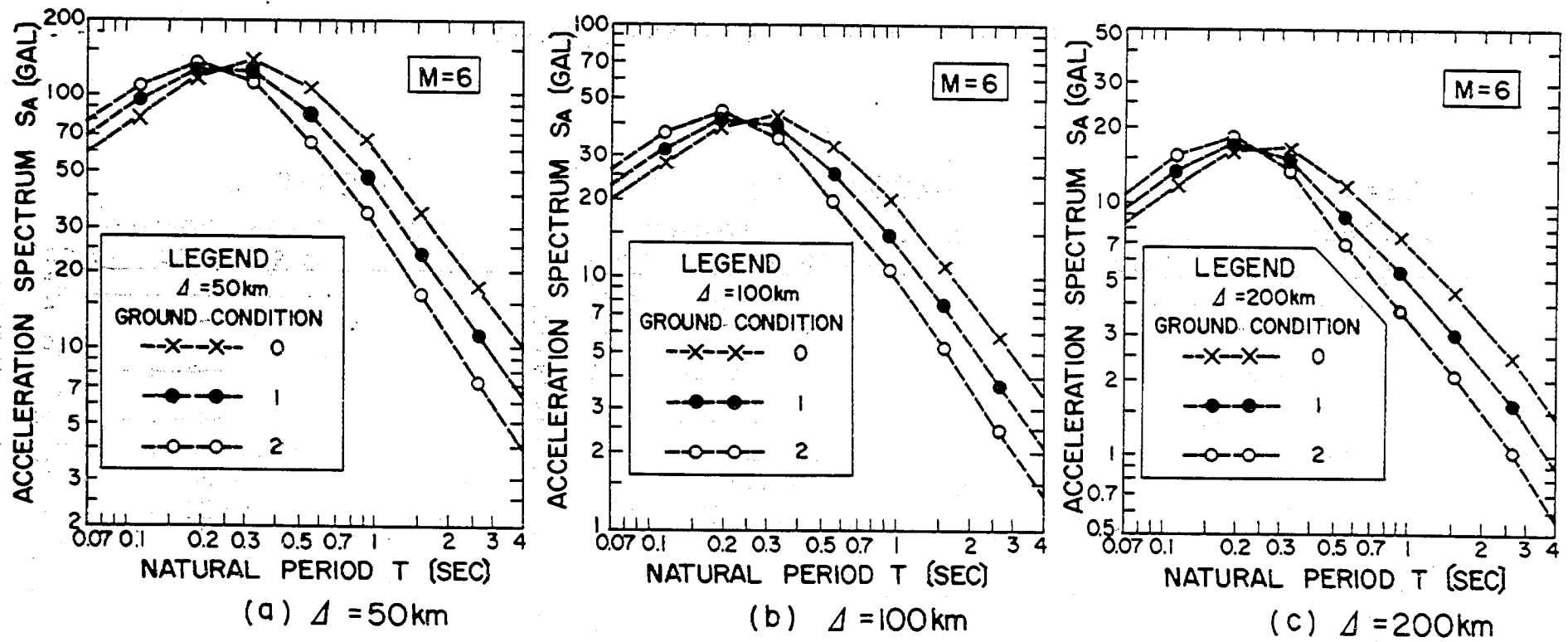


図5-3(1) Trifunac らの応答スペクトル ($M=6$ の場合)

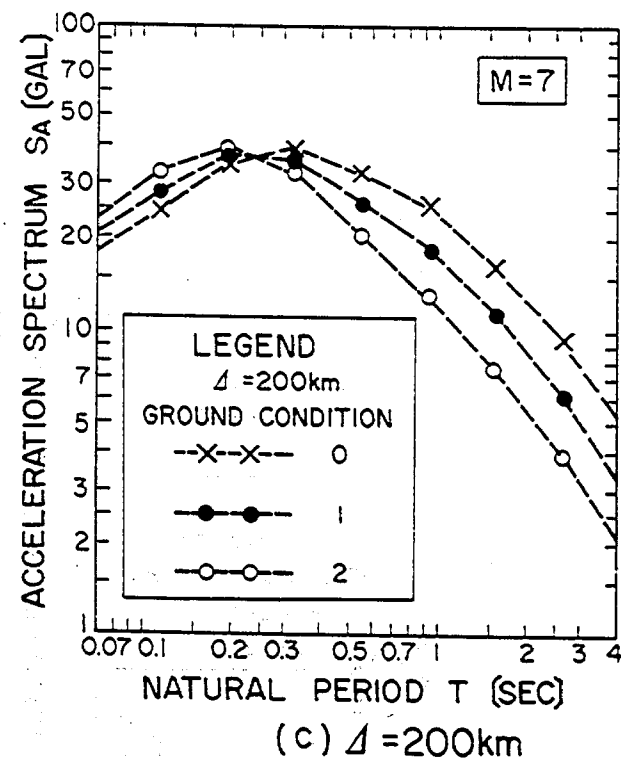
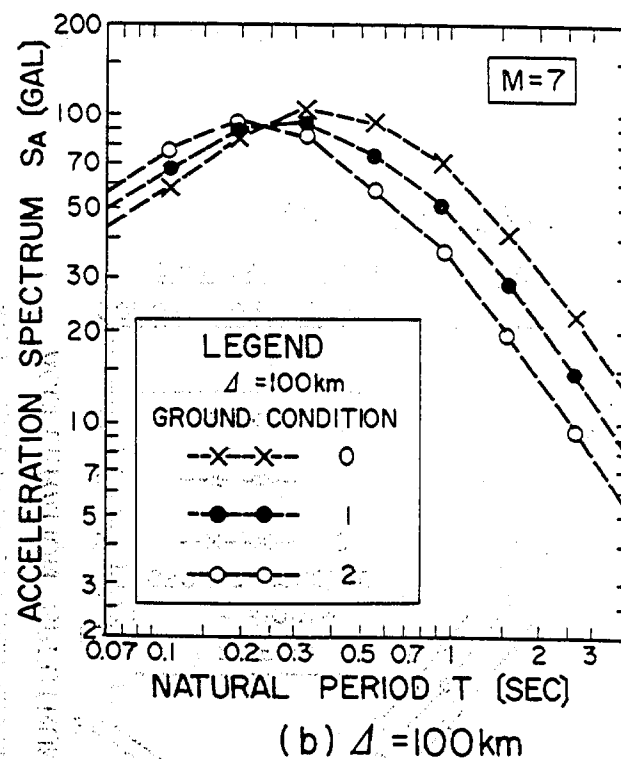
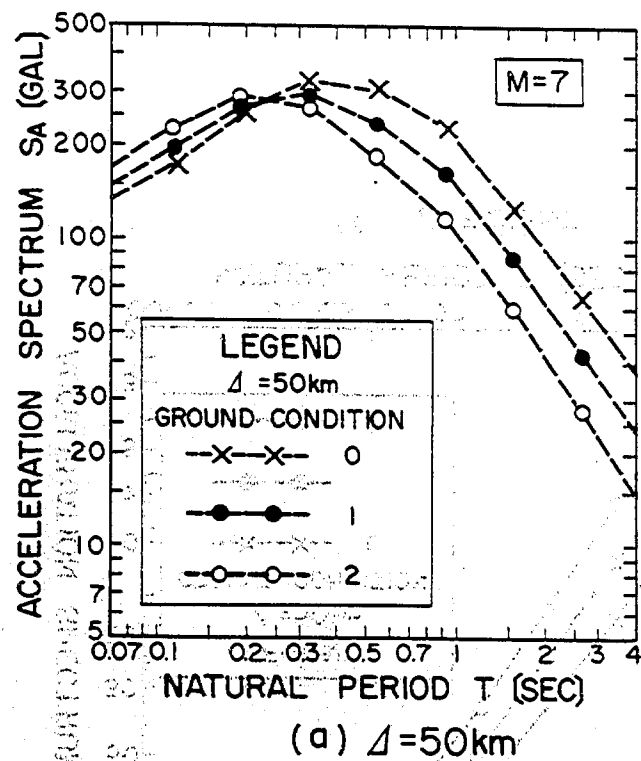


図 5 - 3(2) Trifunac らの応答スペクトル ($M=7$ の場合)

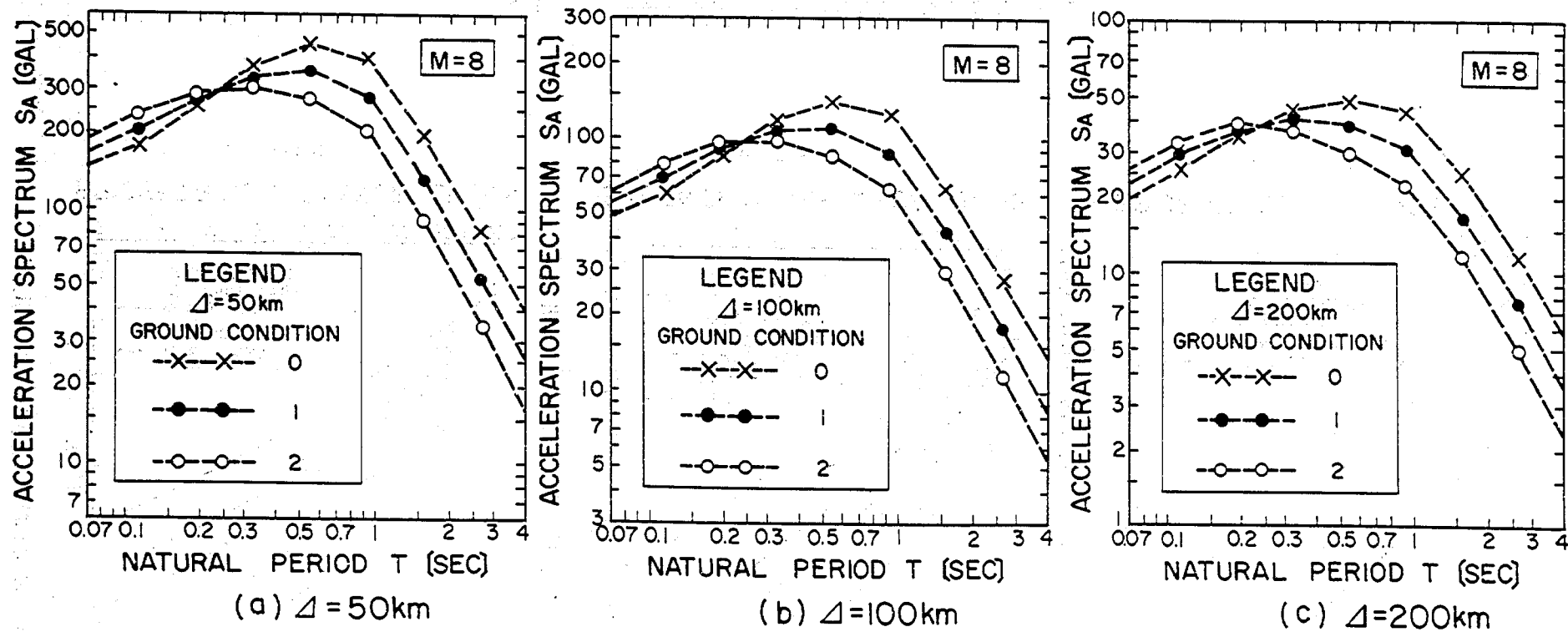


図 5-3(3) Trifunac らの応答スペクトル ($M=8$ の場合)

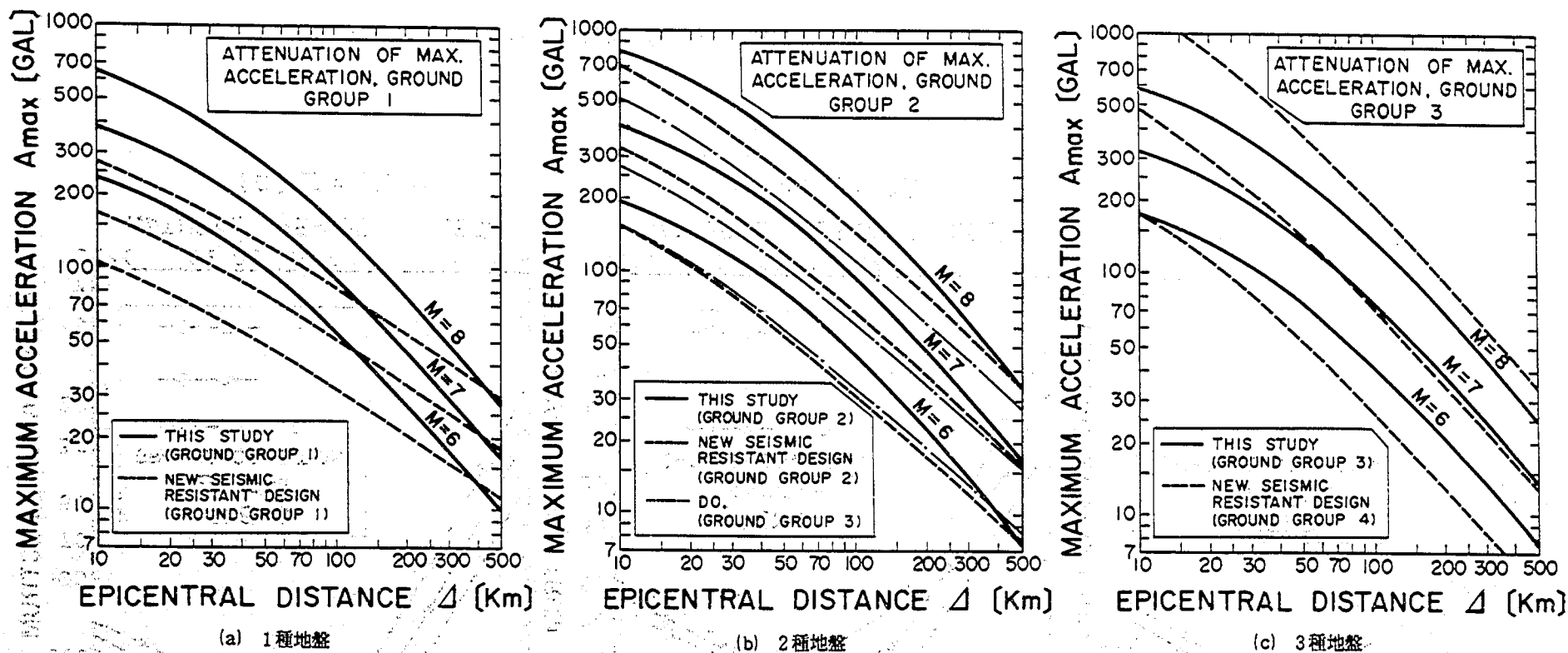
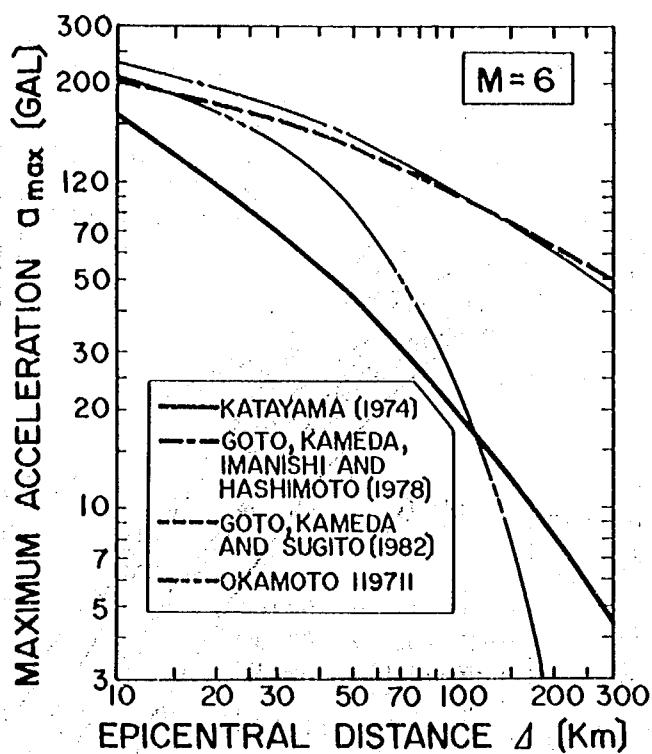
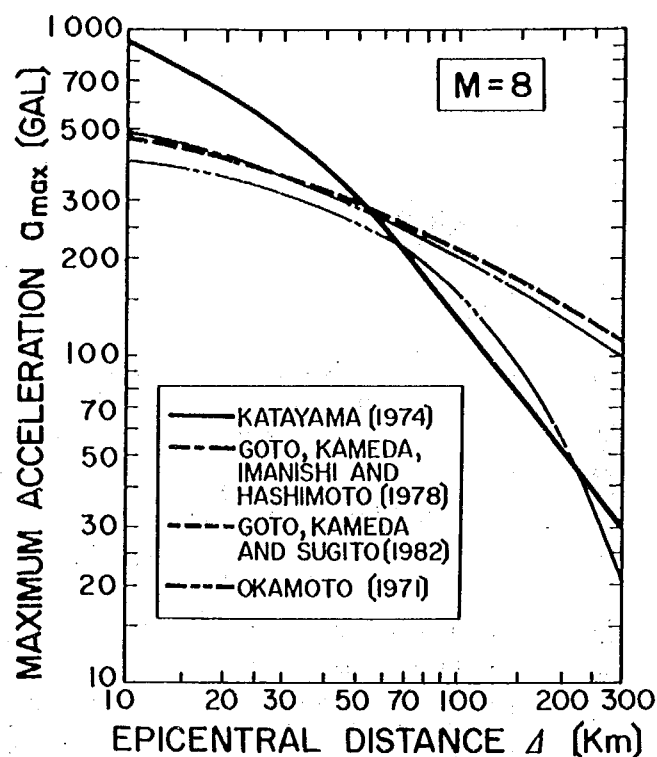


図 5 - 4 新耐震設計法 (案) の最大加速度推定式との比較

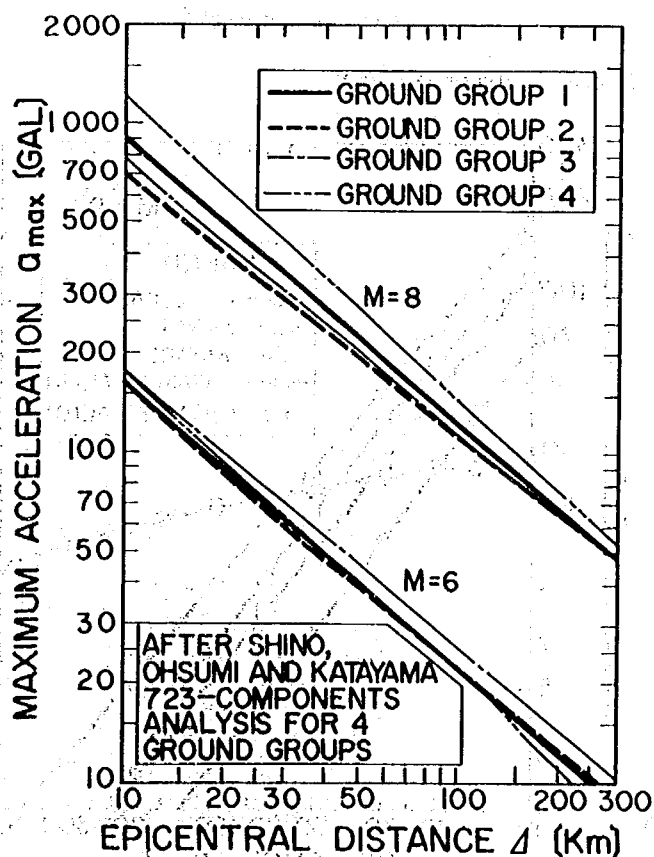


(a) M=6 の場合

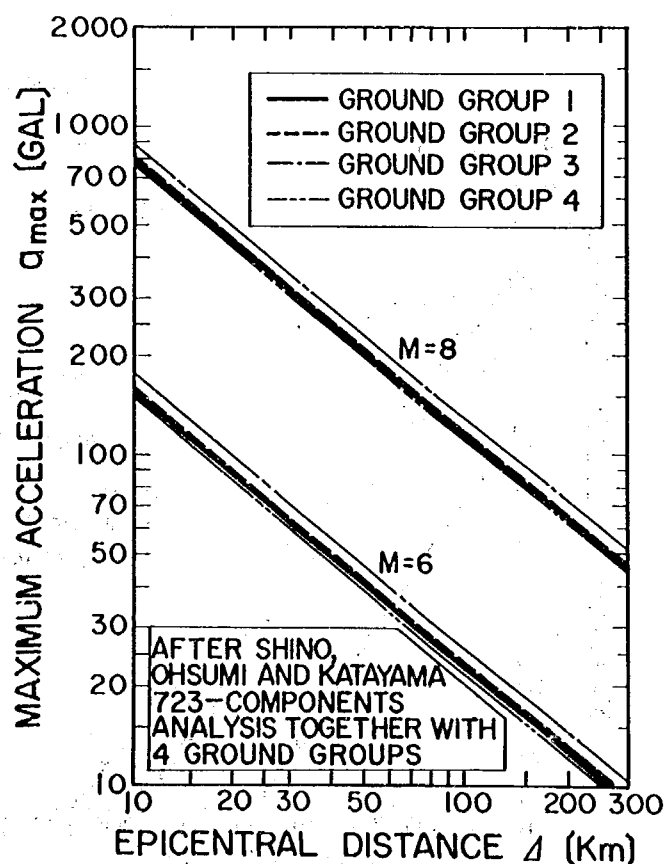


(b) M=8 の場合

図 5-5 既往の我国における最大加速度の予測式

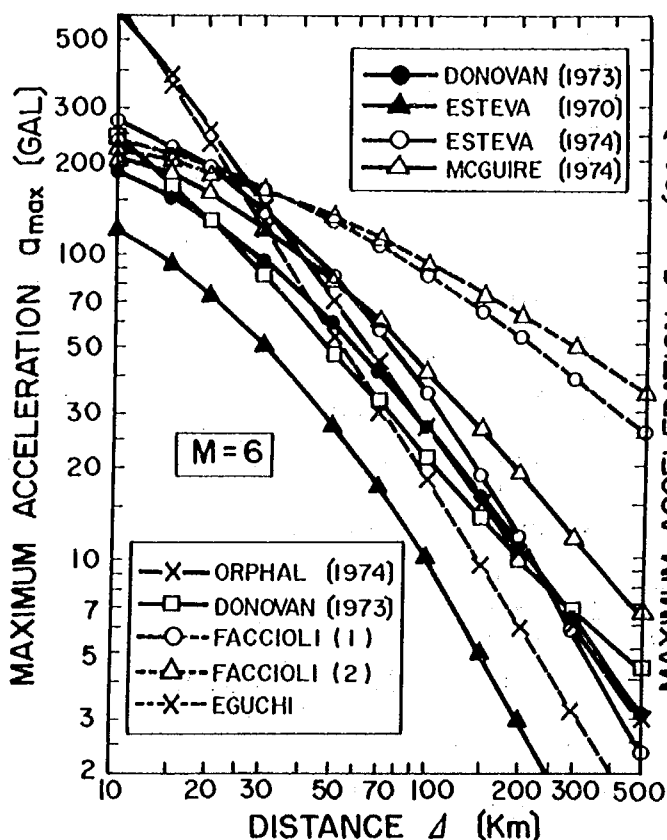


(a) 地盤別に解析した場合

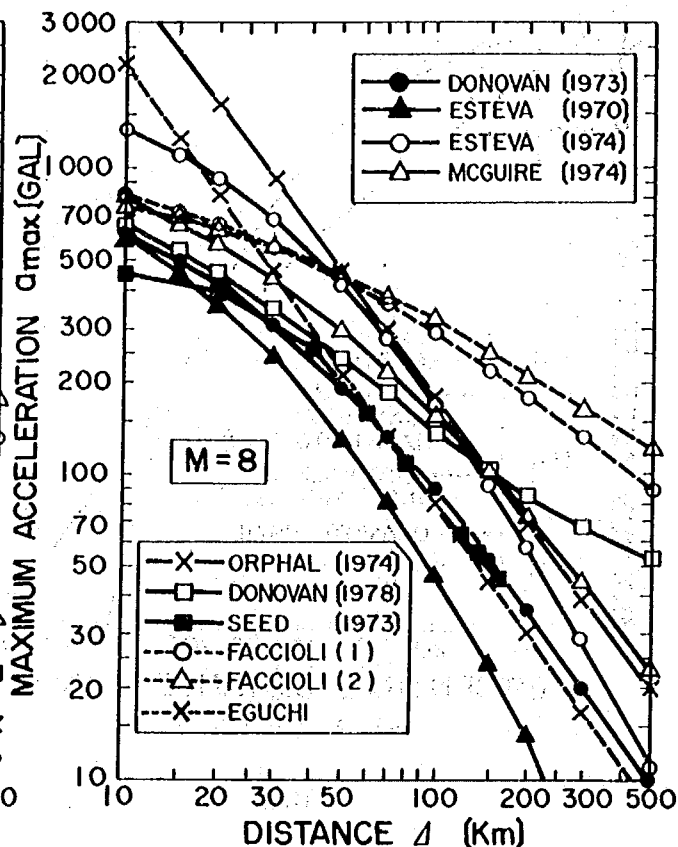


(b) 地盤条件を層別因子とした場合

図 5-6 篠, 大角, 片山による最大加速度の距離減衰

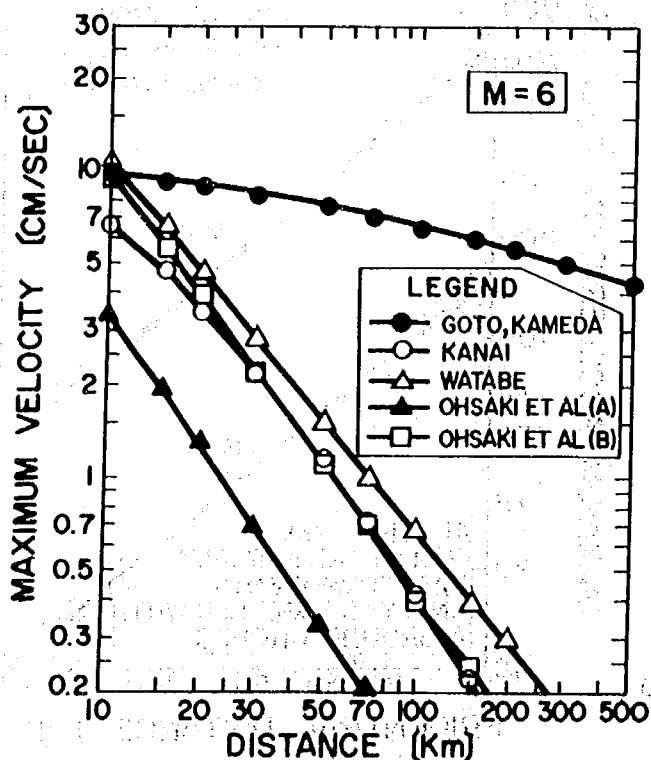


(a) $M=6$ の場合

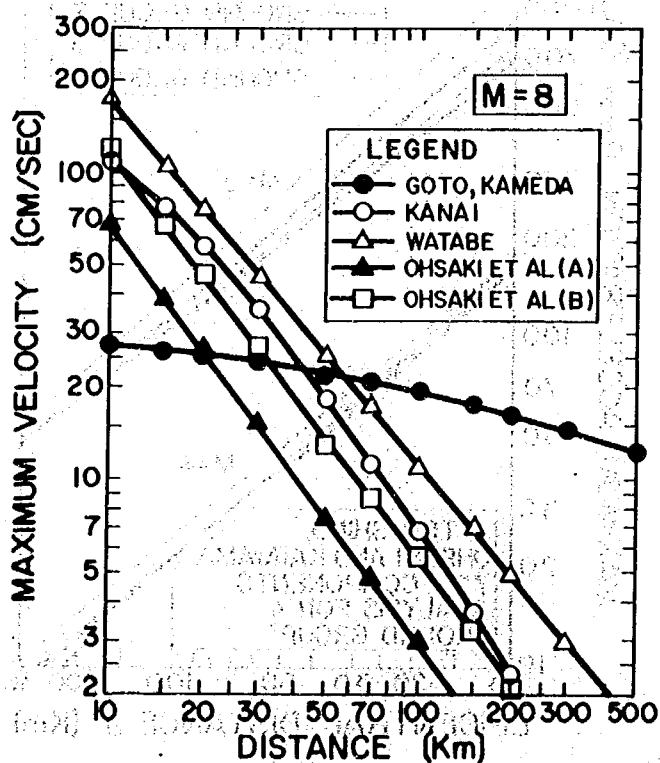


(b) $M=8$ の場合

図 5-7 既往の海外における最大加速度の推定式

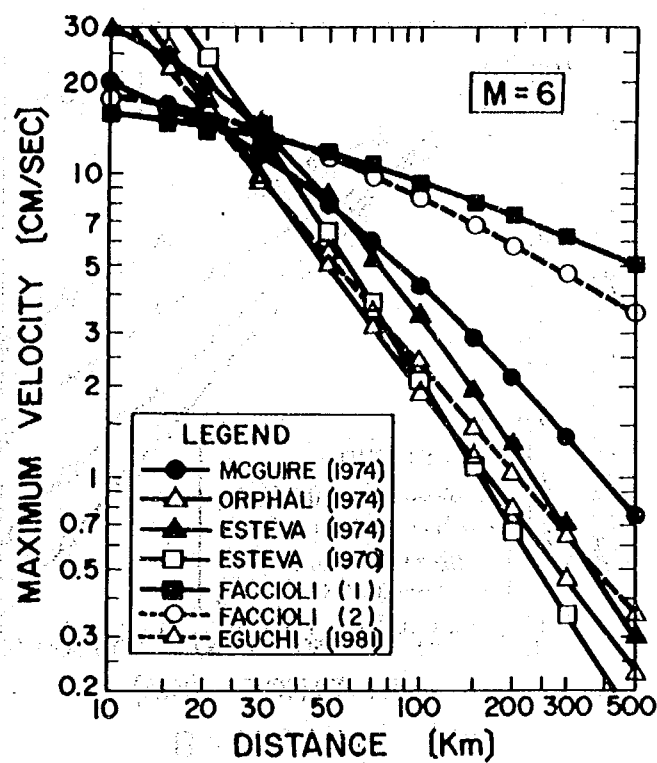


(a) $M=6$

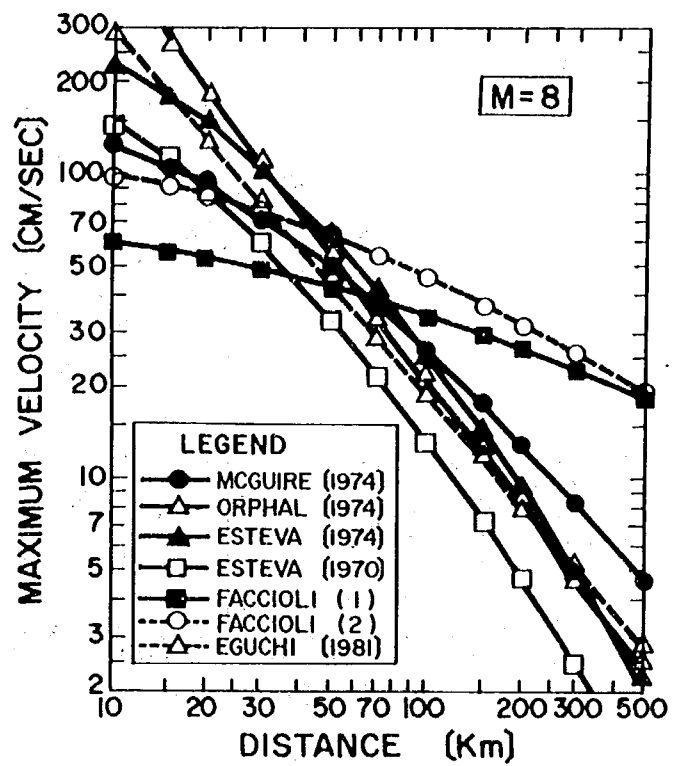


(b) $M=8$

図 5-8 既往の我国における最大速度の推定式

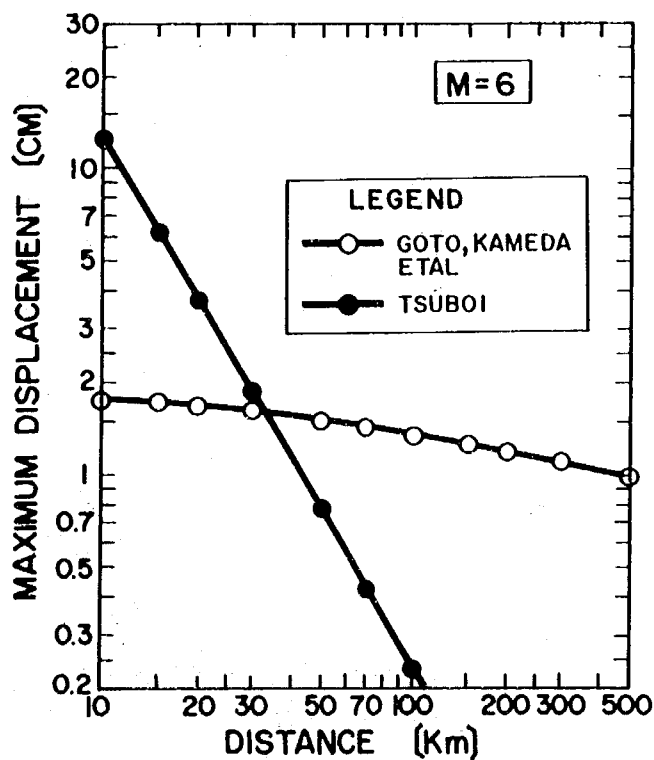


(a) M = 6

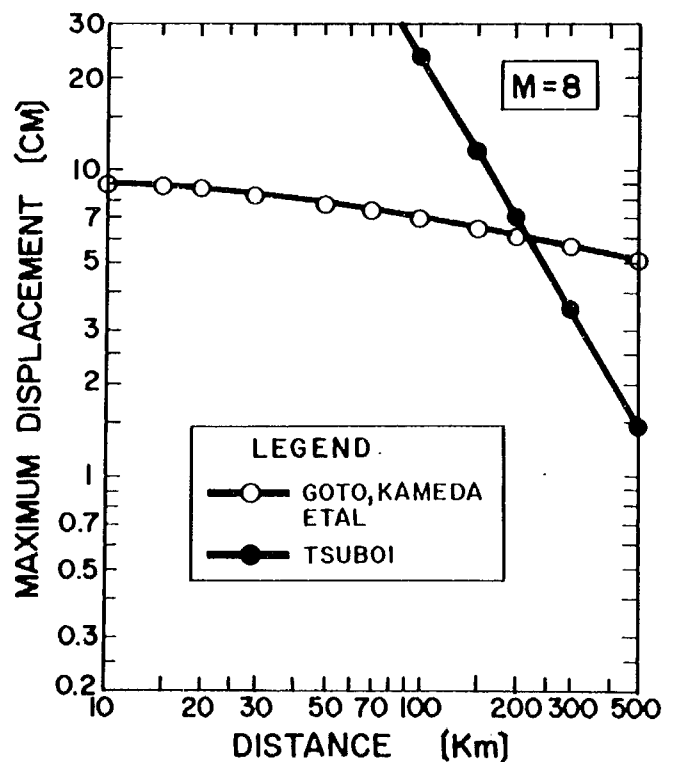


(b) M = 8

図5-9 既往の海外における最大速度の推定式

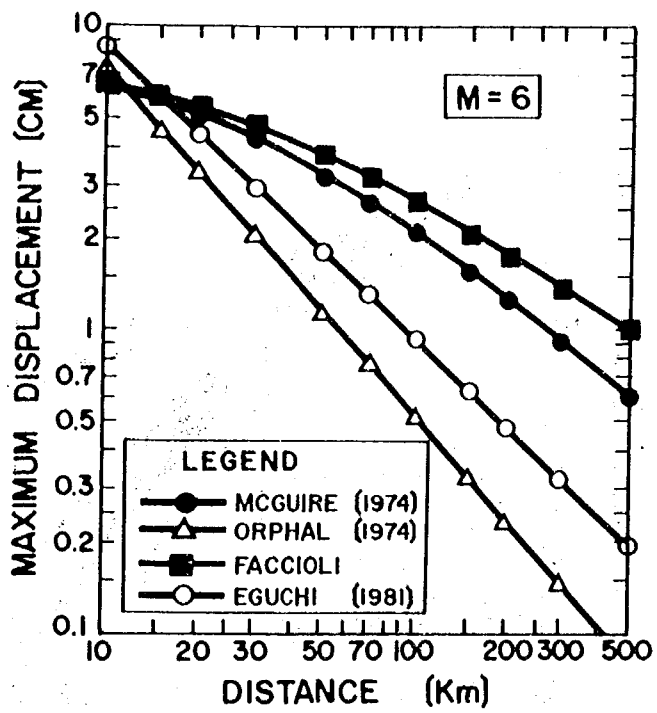


(a) M = 6

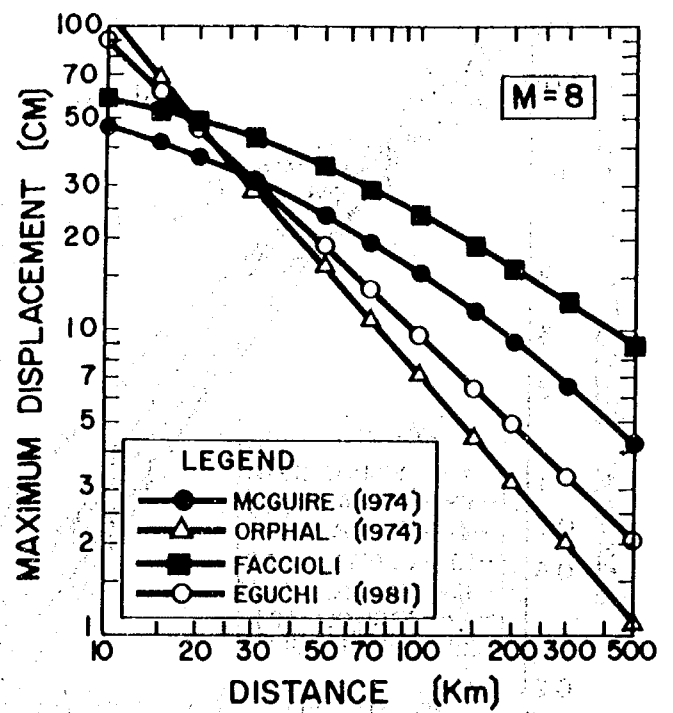


(b) M = 8

図5-10 既往の我国における最大変位の推定式



(a) $M=6$



(b) $M=8$

図5-11 既往の海外における最大変位の推定式

6. 結 論

我国の地盤上67地点において90回の浅発地震(震源深さ60km未満)によりSMAC型強震計により観測された2@197組の水平成分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) 最大地震動(最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$, 最大速度 $\tilde{v}_{\max}$, 最大変位 $\tilde{d}_{\max}$)の距離減衰式としては、マグニチュード M および震央距離 Δ の2つを説明変数とした式(3-16)~式(3-18)が現段階では実用的と考えられる。この理由は以下の通りである。

a) 最大地震動 X ($X=\tilde{a}_{\max}, \tilde{v}_{\max}, \tilde{d}_{\max}$)の常用対数 $\log X$ をマグニチュード M および震央距離 $\log(\Delta+30)$ の線形回帰式で表わした距離減衰式とこれにさらに M , 震源深さ D_p , $\log(\Delta+30)$ の2乗までの項およびこれら3者間の相互の積の項を加えた距離減衰式を重相関係数の大小で比較すると、後者の重相関係数は前者の重相関係数に比較し、ほとんど大きくなる。さらに、後者の場合には地震ごとの地震動特性の変化や解析に利用できる記録数が現状では必ずしも十分でないことを敏感に反映する結果、かえって既往の地震動の距離減衰に対する経験的事実と反する結果を与える場合がある。これに対して、前者の場合には予測される距離減衰は、 M , Δ および地盤種別の変化に伴ない相互に比較的調和がとれた変化を示す。このような点から、距離減衰式の形式としては現状では $\log X$ を M および $\log(\Delta+30)$ で線形回帰した場合が最も妥当な結果を与えると考えられる。

b) $\log X$ を M および $\log(\Delta+30)$ の2変数で線形回帰する場合の係数(定数項の係数 a , M の項の係数 b , $\log(\Delta+30)$ の項の係数 c)の地盤種別依存性を検討した結果、各種の組み合わせの中で a, b, c がともに地盤種別に依存するとした場合と、係数 a, b は地盤種別に依存するが、係数 c は地盤種別には依存しないとした場合の2種類の距離減衰式が他に比較して相対的に重相関係数が大きいことがわかった。また、両式による距離減衰を比較すると、両者の違いはごくわずかであり、実用上はほとんど差が無いといってもよい。したがって、基本的にはいずれの距離減衰式を使用してもよいが、後者の距離減衰式の方が係数 c の項がより簡単になっていることを考慮し、本報告では後者を採用することとした。

2) 加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A$ (減衰定数5%)の距離減衰式としては、マグニチュード M および震央距離 Δ の2つを説明変数とした式(4-19)が現段階では実用的と考えられる。この理由は以下の通りである。

a) $\tilde{S}_A$ スペクトルの常用対数 $\log \tilde{S}_A$ をマグニチュード M および震央距離 $\log(\Delta+30)$ の線形回帰式で表わした距離減衰式と、これにさらに M , 震源深さ D_p , $\log(\Delta+30)$ の2乗までの項およびこれら3者間の相互の積の項を加えた距離減衰式を重相関係数の大小で比較すると、後者の重相関係数は前者の重相関係数に比較し、ほとんど大きくなる。さらに、後者の場合には地震ごとの地震特性の変化や解析に利用できる記録数が現状では必ずしも十分でないことを敏感に反映する結果、かえって既往の地震動の距離減衰に対する経験的事実と反する結果を与える場合がある。これに対して前者の場合には予測される距離減衰は、 M , Δ , および地盤種別の変化に伴ない相互に比較的調和がとれた変化を示す。このような点から、距離減衰式

の形式としては現状では $\log \tilde{S}_A$ を M および $\log(d+30)$ で線形回帰した場合が最も妥当な結果を与えると考えられる。

b) $\log \tilde{S}_A$ を M および $\log(d+30)$ の2変数で線形回帰する場合の係数(定数項の係数 a , M の項の係数 b , $\log(d+30)$ の項の係数 c) の地盤種別依存性を固有周期ごとに重相関係数の大小で検討した結果、各種の組み合わせの中で係数 a , b , c がともに地盤種別に依存するとした場合と、係数 a , b は地盤種別に依存するが、係数 c は地盤種別に依存しないとした場合の2種類の距離減衰式が他に比較して相対的に大きな重相関係数を有する。

c) 上記 $\log \tilde{S}_A$ の線形回帰式で、係数 a , b , c の固有周期依存性を地盤種別ごとに重相関係数の大小で検討した結果、各種の組み合わせの中で係数 a , b , c がともに固有周期に依存するとした場合と、係数 a , b は固有周期に依存するが、係数 c は固有周期に依存しないとした場合の2種類の距離減衰式が他に比較して、相対的に大きな重相関係数を有する。

d) 上記 b) および c) を総合すると、係数 a および b はそれぞれ固有周期および地盤種別に依存し、係数 c は、i) 固有周期と地盤種別の両者に依存する、ii) 固有周期のみに依存する、iii) 地盤種別のみに依存する、iv) 固有周期および地盤種別のいずれにも依存しない、の4種類の場合が相対的に重相関係数の大きい距離減衰式として抽出される。これらの距離減衰式を実際に計算してみると、 $M \geq 8$, $d \leq 50\text{km}$ といった大規模近距離地震における一部の $\tilde{S}_A$ スペクトルに差が生じる他は、4種類の距離減衰式間の違いはわずかであり、実用上はほとんど差がないことがわかった。したがって、後述する M および d の適用範囲内では基本的には4種類のいずれの推定式を用いてもよいと考えられるが、ここでは係数 c の項が最も簡単になっているiv)が現段階では実用的であると判断した。

3) 上記最大地震動 ($\tilde{a}_{\max}$, $\tilde{v}_{\max}$, $\tilde{d}_{\max}$) および加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A$ の距離減衰式において、予測値と実測値の比の常用対数を式(3-22)および式(4-20)で定義し、この頻度分布を求めるとおおよそ平均 $m=0$, 標準偏差 $\sigma=0.25$ の正規分布に従う。したがって、いま、実測値に対する予測値のばらつきが平均 $m \pm 1\sigma$ の範囲に収まる場合を考えると、予測値は実測値の $1/1.8 \sim 1.8$ 倍 ($10^{0.25} \approx 1.8$) の範囲でばらつくことになる。このようなばらつきは、最大地震動および加速度応答スペクトルを工学的に予測する上で必ずしも小さなものではないが、上記1)および2)の検討から明らかなように、回帰式の形式、項数および係数の地盤種別依存性、固有周期依存性等を適当に設定することにより、このようなばらつきを小さくすることは現状では困難と考えられる。この理由は地震動の特性が現在の解析に説明変数として考慮しているマグニチュード、震央距離の他に地震の発震機構、伝播経路の特性、深層の地盤条件、地形条件等の他の特性にも依存している部分が少なくないためと考えられるためである。しかしながら、これらの特性を分類定義するためには地震学および地震工学の面における今後の研究に待つ所が多く、現状では最大地震動および加速度応答スペクトルの予測式に取り入れることはできない。本研究による距離減衰式の予測精度は必ずしも十分ではないが、予測式まわりの実測値のばらつきを考慮し、これに対する配慮をすることで工学的に対処していくことが、現段階では現実的な方法と考えられる。このために本報告では予測式まわりの実測値のばらつきを考慮し、非超過確率 p に応じた倍率 $U_{\tilde{a}_{\max}}$, $U_{\tilde{v}_{\max}}$, $U_{\tilde{d}_{\max}}$ を式(3-26), 式(4-24)により与えた。

4) 最大地震動 ($\tilde{a}_{\max}$, $\tilde{v}_{\max}$, $\tilde{d}_{\max}$) の距離減衰特性に関しては、以下の事項が指摘される。

a) 同一のマグニチュードおよび震央距離に対する地震動の最大変位 $\tilde{d}_{\max}$ および最大速度 $\tilde{v}_{\max}$ に対する地盤種別の影響は大きく、地盤種別が1種、2種、3種となるに従って $\tilde{d}_{\max}$ および $\tilde{v}_{\max}$ は顕著に大きくなる。これに対して最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$ の場合には、地盤種別の影響は小さく、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 $\tilde{a}_{\max}$ は2種地盤の場合が1種地盤および3種地盤の場合よりもやや大きいものの、その差は小さい。

b) 距離減衰式の係数 b は、マグニチュード M が1.0が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る。 $\tilde{a}_{\max}$ の場合には地盤種別で異なるが、0.16~0.21程度の範囲であるのに対し、 $\tilde{v}_{\max}$ は0.26~0.4、 $\tilde{d}_{\max}$ は0.37~0.58程度となる。したがって、 M が1.0増えた場合には $\tilde{a}_{\max}$ は、約1.4~1.6倍、 $\tilde{v}_{\max}$ は1.8~2.5倍、 $\tilde{d}_{\max}$ は2.3~3.8倍となることになり、明らかに $\tilde{a}_{\max}$ 、 $\tilde{v}_{\max}$ 、 $\tilde{d}_{\max}$ の順にマグニチュード依存性が大きくなることを示している。また、このようなマグニチュード依存性は、1種地盤の場合には比較的小さく、2種地盤および3種地盤の場合に大きい。

5) 加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A$ の距離減衰特性に関しては、以下の事項が指摘される。

a) 距離減衰式の係数 b は地盤種別および固有周期によって変化する。同一の固有周期に対する係数 b は1種地盤の場合が2種地盤および3種地盤の場合より著しく小さい。また、同一の地盤種別に対する係数 b は短周期領域において小さく、長周期になるに従い、おおむね単調に大きくなる。

b) 同一のマグニチュードおよび震央距離に対する $\tilde{S}_A$ スペクトルは地盤種別により大きく異なる。一般に1種では0.1~0.2秒付近でスペクトル値は最大となるのに対し、2種地盤および3種地盤では、それぞれ0.2~0.3秒、0.5~0.8秒程度でスペクトル値は最大となる。

6) 本報告で提案する推定式の適用に際しては、以下の点に注意しなければならない。

a) 強震記録の数値化精度を考慮して、 $\frac{1}{3}$ Hz および12 Hz をそれぞれ低振動数側および高振動数側の遮断振動数とするSMAC型強震計の計器補正を加えた。したがって、本解析に用いた地震動は $\frac{1}{3}$ Hz~12 Hzの振動数帯域に限定された地震動であり、最大地震動を推定する際に、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のある場合には、本解析結果を適用することはできない。また、加速度応答スペクトルを求める際には、当該周期の周辺の地震動もスペクトル値に寄与するため、適用可能な振動数範囲は上記よりももう少し狭くなり、 $\frac{1}{2}$ Hz~10 Hzが適用範囲と考えられる。

b) 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、さらに規模の大きい地震による断層直近の記録は含まれていない。したがって、本解析結果を外挿して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。

参 考 文 献

- 1) Housner, G.W.: Behavior of Structures During Earthquakes, Proc., ASCE, Vol. 85, No.EM4, 1959.
- 2) 高田孝信, 大久保忠良, 栗林栄一: 橋梁の耐震設計に関する研究(I), 土木研究所報告128号, 1965.
- 3) 土田 肇, 倉田栄一, 石坂徳三, 林 聡: 各種地盤における平均応答スペクトル, 港湾技術研究所報告, 12-4, 1973.
- 4) 栗林栄一, 岩崎敏男, 辻 勝成: 地震応答スペクトルに及ぼす諸因子, 土木学会第11回地震工学研究発表会, 1971.
- 5) 片山恒雄, 岩崎敏男, 佐伯光昭: 地震動加速度応答スペクトルの統計解析, 土木学会論文報告集, 第275号, 1978.
- 6) 岩崎敏男, 川島一彦, 高木義和: 地震応答スペクトルの統計解析, 土木技術資料, Vol. 21-8, 1979.
- 7) 建設省土木研究所: 土木構造物における加速度強震記録, 土木研究所彙報第1~第7, Vol. 32~38.
- 8) 土田 肇, 倉田栄一ほか: 港湾地域強震観測年報, 1963年以後~.
- 9) 後藤尚男, 亀田弘行, 杉戸真太, 今西直人: デジタルフィルタによるSMAC-B₂型加速度記録の補正について, 土木学会論文報告集, 第277号, 1982.
- 10) 萩原尊礼: 振動測定, 宝文館, 昭和20年12月.
- 11) 後藤健一: SMAC型強震計の短周期特性, 地震学会講演集, 1979.
- 12) 川島一彦, 高木義和, 相沢 興: デジタイザーによるSMAC型強震計記録の数値化精度, 土木学会論文報告集, 第324号, 1982.
- 13) 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, 第325号, 1982.
- 14) 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.
- 15) 建設省土木研究所: 昭和51年度総合技術開発プロジェクト・耐震技術に関する研究開発報告書, 土木研究所資料, 第1250号, 1977.
- 16) 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, 1983.
- 17) 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, 1983.
- 18) 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.

- 19) 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。
- 20) 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。
- 21) 岡本舜三：耐震工学，オーム社，昭和46年9月。
- 22) 後藤尚男，亀田弘行，今西直人，橋本修身：強震記録の補正効果を考慮した地震動パラメータの統計的性質，第5回日本地震工学シンポジウム，昭和53年。
- 23) 後藤尚男，亀田弘行，杉戸直太：地震動の最大地動予測におけるN値を用いた地盤条件の評価法について，土木学会論文報告集，第317号，昭和57年1月。
- 24) 篠 泉，大角恒雄，片山恒雄：強震データの統計解析における問題点，第37回土木学会年次学術講演会概要集，第1部会，昭和57年10月。
- 25) 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.
- 26) McGuire, R.K.: Seismic Design Spectra and Mapping Procedures Using Hazard Analysis Based Directly on Oscillator Response, International Journal for Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 5, pp. 211-234, 1977.
- 27) McGuire, R.K.: FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis, Open-File Report 76-67, U.S. Geological Survey, 1976.
- 28) Trifunac, M.D. and Anderson, J.G.: Preliminary Empirical Models for Scaling Absolute Acceleration Spectra, Report No. 77-03, University of Southern California, 1977.
- 29) Trifunac, M.D.: Effects of Site Geology on Amplitude of Strong Motion, 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1980.
- 30) Eguchi, R.T.: An Alternative Approach to Modelling Earthquake Ground Motion Attenuation in the Western United States, 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1980.
- 31) Seed, H.B. and Idriss, I.M.: Rock Motion Accelerations for High Magnitude Earthquakes, Report No. EERC 69-7, University of California, Berkeley, 1969.
- 32) Lysmer, J. Seed, H.B. and Schnabel, P.B.: Influence of Base Rock Characteristics on Ground Response, Report No. EERC 70-7, University of California, Berkeley, 1970.
- 33) Joyner, W.B., Boore, D.M. and Porcella, R.L.: Peak Horizontal Accelerations and Velocity from Strong-Motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, Open-File Report 81-365, U.S. Geological Survey, 1981.

- 34) 片田敏行, 伯野元彦: 1968 年十勝沖地震による青森地震記録の土質動力学考察, 土木学会論文報告集, 第 318 号, 昭和 57 年 2 月.
- 35) 渡部丹, 藤堂正喜: 設計用模擬地震動に関する研究 — その 2, 模擬地震動の作成に必要な地震動特性についての解析 —, 日本建築学会論文報告集, 第 312 号, 昭和 57 年 2 月.
- 36) Ohsaki, Y., Watabe, M. and Tohdo, M.: Analyses on Seismic Ground Motion Parameters Including Vertical Components, Proc. 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1980.
- 37) Hayashi, K., Ohmura, B. and Kumagai, C.: Spectral Characteristics of Hard Rock Motions, Proc. 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1980.
- 38) Boore, D.M.: On the Attenuation of Peak Velocity, Proc. 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1980.
- 39) Crouse, C.B. and Turner, B.E.: Processing and Analysis of Japanese Accelerograms and Comparisons with U.S. Strong Motion Data, Proc. 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1980.
- 40) Donovan, N.C.: A Statistical Evaluation of Strong Motion Data including the February 9, 1971 San Fernando Earthquake, Proc. 5th WCEE, Rome, Vol. I, pp. 1252–1261, 1973.
- 41) Esteva, L. and Villaverde, R.: Seismic Risk, Design Spectra, and Structural Reliability, Proc. 5th WCEE, Rome, Vol. 2, pp. 2586–2597, 1973.
- 42) Orphal, D.L. and Lahoud, J.A.: Prediction of Peak Ground Motion from Earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 64, pp. 1563–1574, No. 5, October, 1974.
- 43) Donovan, N.C., and Bornstein, A.E.: Uncertainties in Seismic Risk Procedure, Proc. ASCE, No. GT7, 1978.
- 44) Hudson, D.E.: A Comparison of Strong Motion Earthquake Data Banks for Japan and the Western United States, Proc. 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1980.
- 45) Boore, D.M., Joyner, W.B., Oliver, A.A. and Page, R.A.: Estimation of Ground Motion Parameters, Geological Survey Circular, 795.
- 46) Katayama, T.: An Engineering Prediction Model of Acceleration Response Spectra and Its Application to Seismic Hazard Mapping, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, 1982.
- 47) Faccioli, E.: Response Spectra for Soft Soil Sites, Proc. Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE, Vol. 1, pp. 441–456, 1978.

- 48) 藤野陽三, 浜崎義弘, 井上涼介: Identification of Multiple Rupture Process of 1979 Imperial Valley Earthquake by Near-field Accelerograms, 第6回日本地震工学シンポジウム, 昭和57年12月。
- 49) 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。
- 50) 川島一彦, 相沢 興, 高橋和之: 加速度応答スペクトルの予測式, 第17回土木学会地震工学 研究発表会, 昭和58年7月。
- 51) 川島一彦, 相沢 興, 高橋和之: 最大地震動の予測式, 第17回土木学会地震工学研究発表会, 昭和58年7月。
- 52) 相沢 興, 川島一彦, 高橋和之: 応答スペクトルに対する減衰定数の補正法, 第38回 土木学会 年次学術講演会, 昭和58年9月。
- 53) 川島一彦, 相沢 興, 高橋和之: 最大地震動の距離減衰式に関する一考察, 第10回 土木学会関東支部年次研究発表会, 昭和58年1月。
- 54) 川島一彦, 相沢 興, 高橋和之: 地震応答スペクトル倍率による地盤種別法, 第10回 土木学会関東支部年次研究発表会, 昭和58年1月。

付 属 資 料 - 1

$\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰および $\log U_{SA} \sim M \sim \Delta$ の関係

(図 4 - 12 および図 4 - 14 に示した以外の固有周期に対する結果)

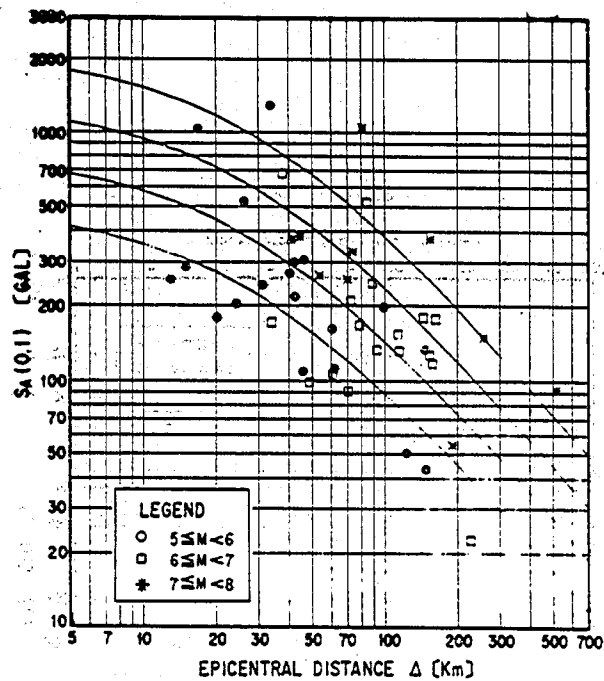
10-10-11

10-10-11 10-10-11 10-10-11

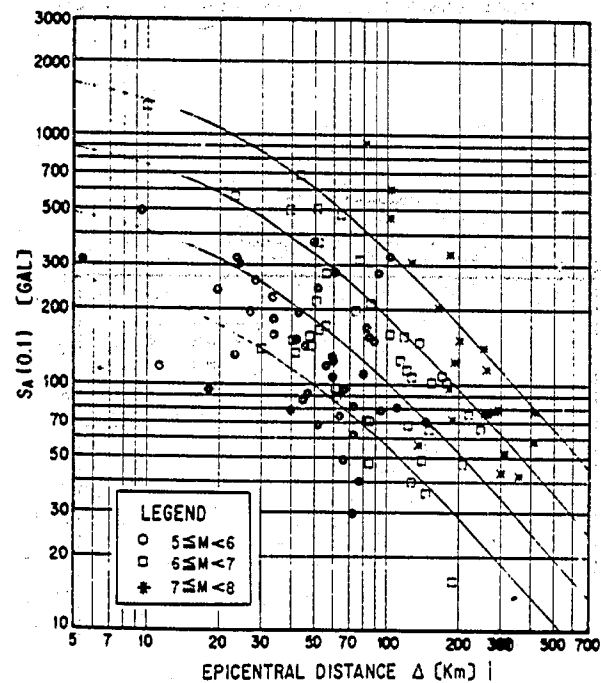
10-10-11 10-10-11 10-10-11 10-10-11

11

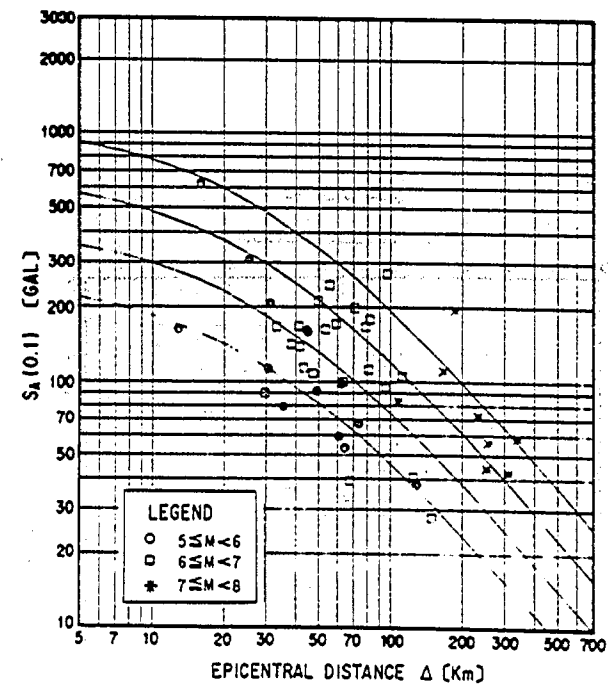
11



(a) 1種地盤

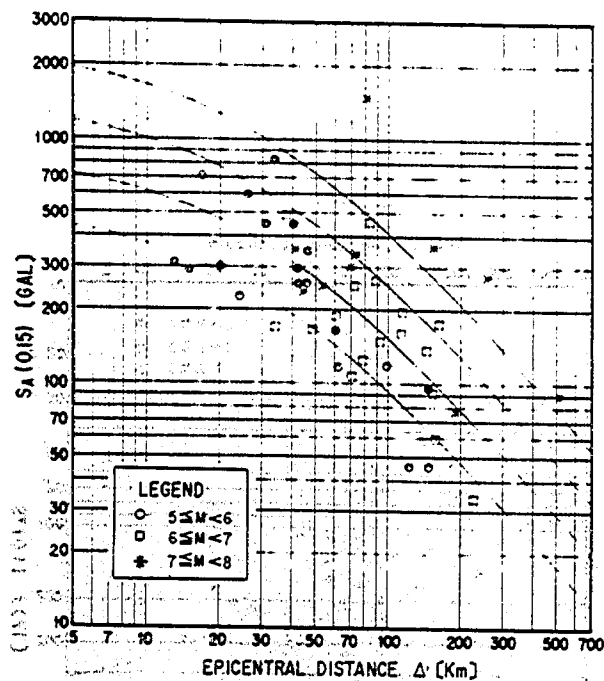


(b) 2種地盤

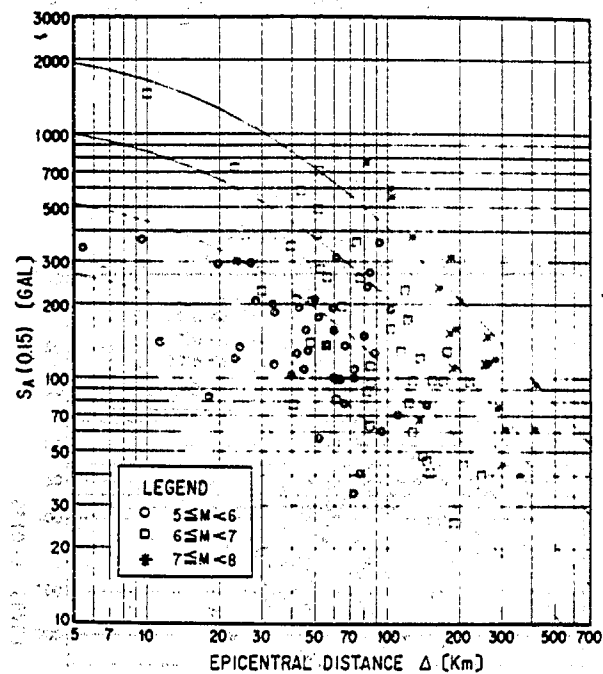


(c) 3種地盤

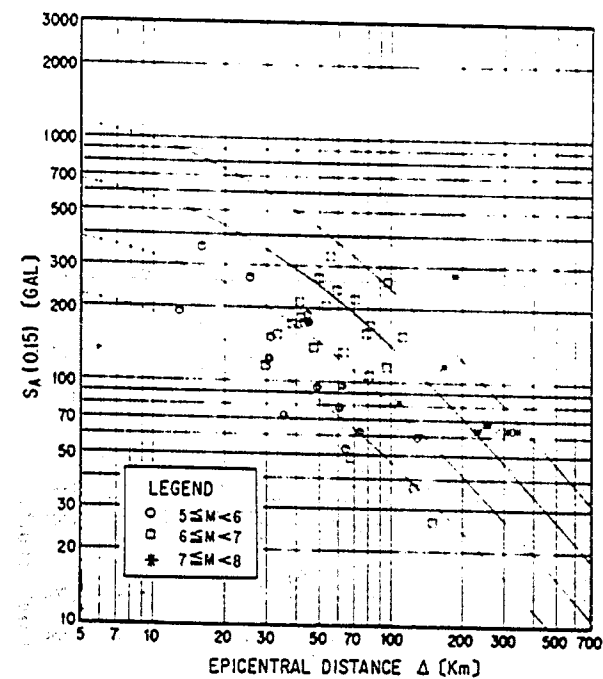
付図1-1 $\tilde{S}_A(0.1)$ の距離減衰特性



(a) 1種地盤

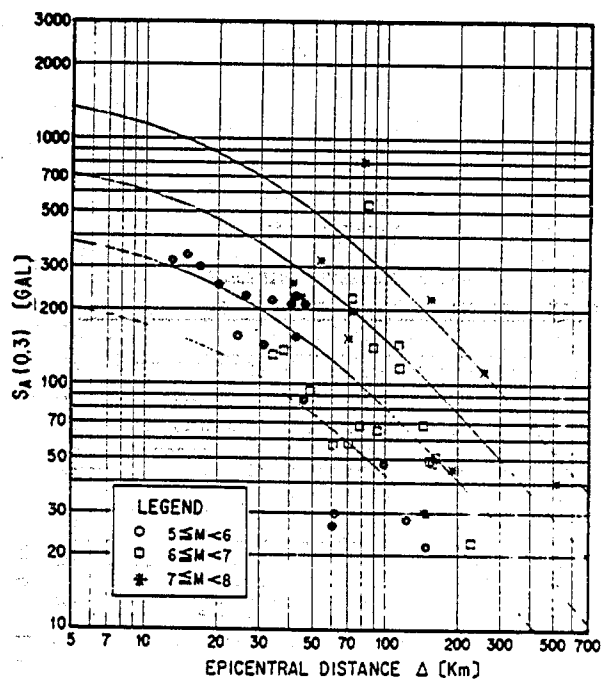


(b) 2種地盤

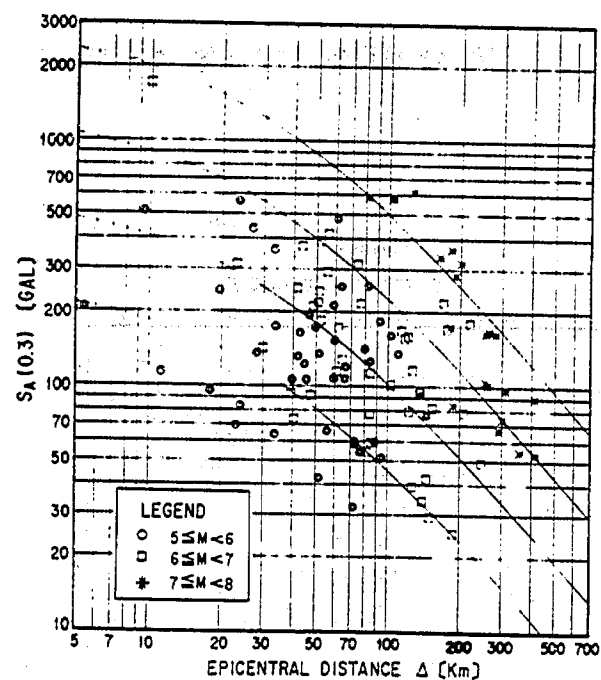


(c) 3種地盤

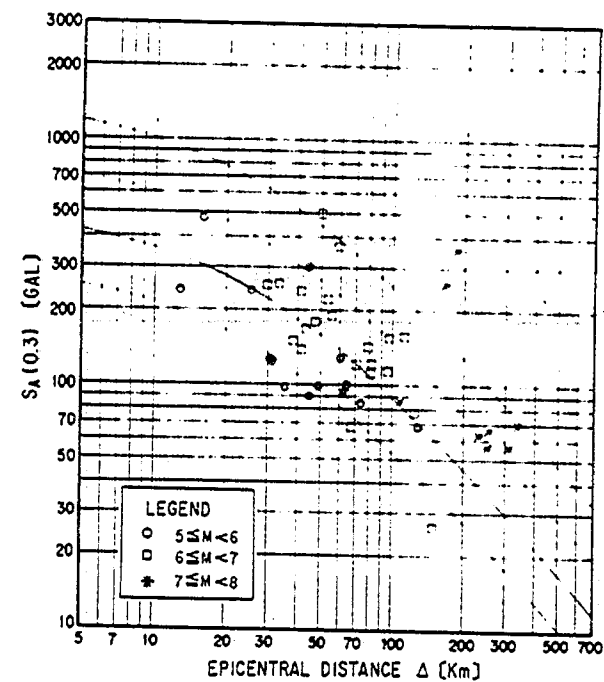
付図1-2 $\tilde{S}_A(0.15)$ の距離減衰特性



(a) 1種地盤

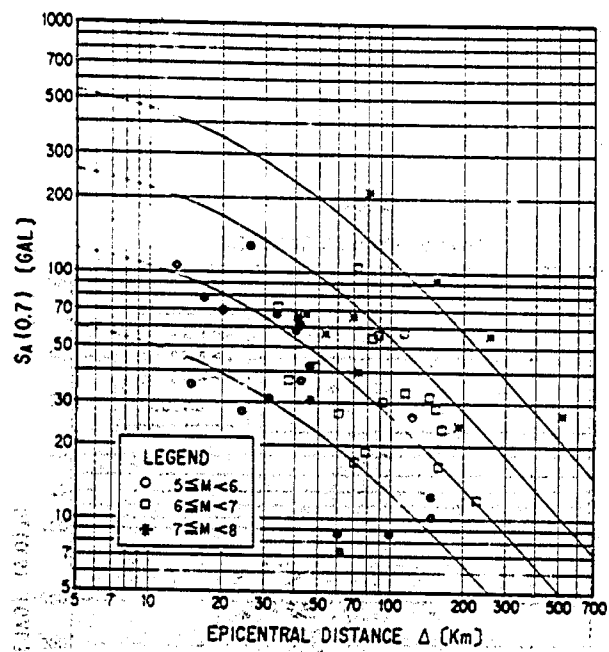


(b) 2種地盤

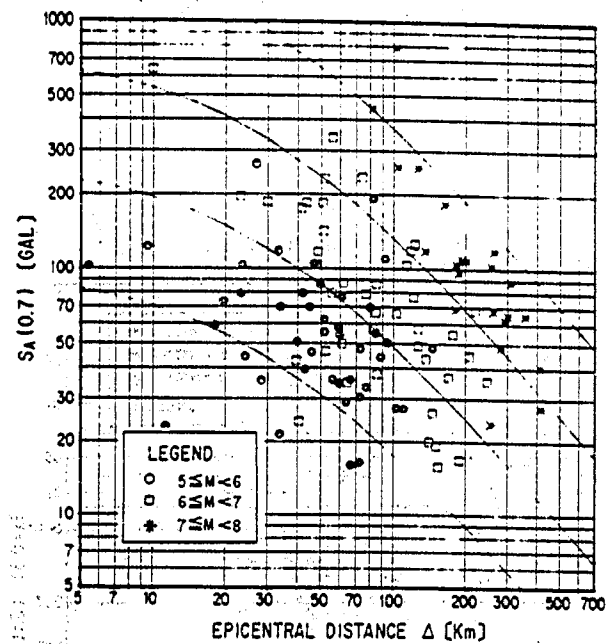


(c) 3種地盤

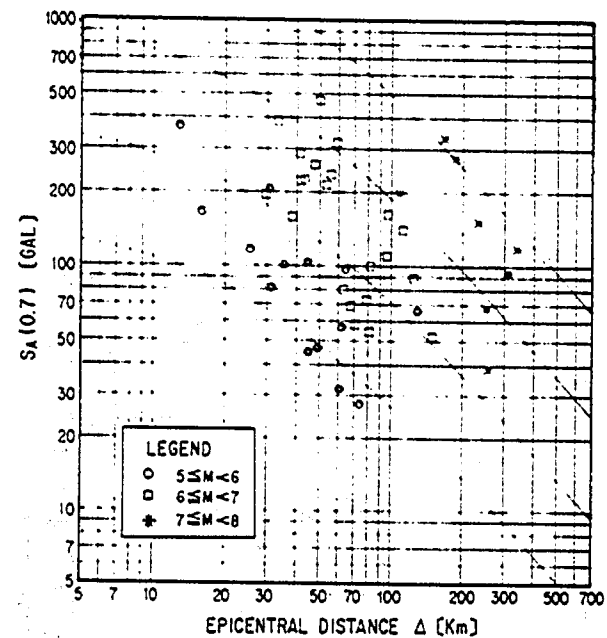
付図1-3 $\tilde{S}_A(0.3)$ の距離減衰特性



(a) 1種地盤

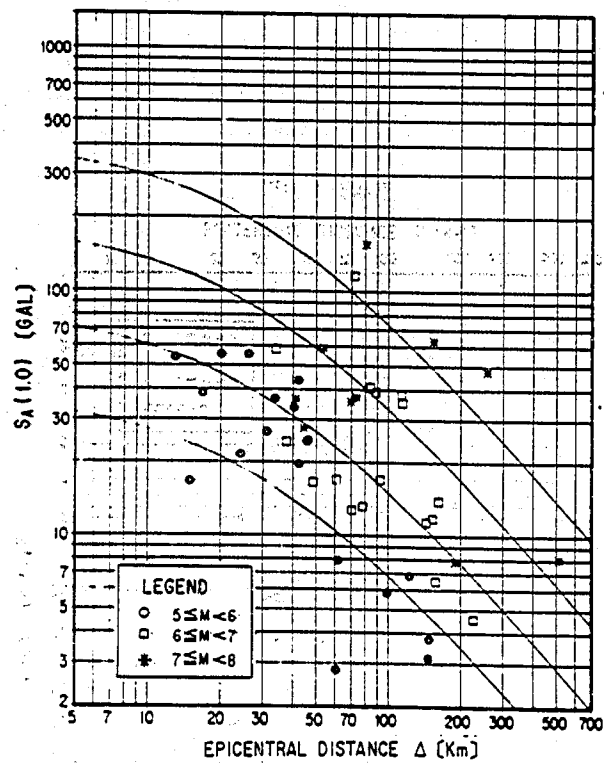


(b) 2種地盤

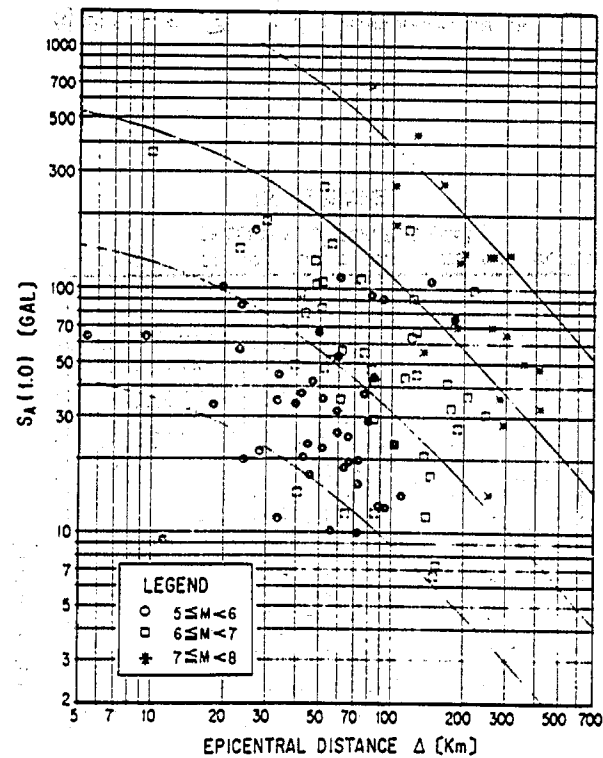


(c) 3種地盤

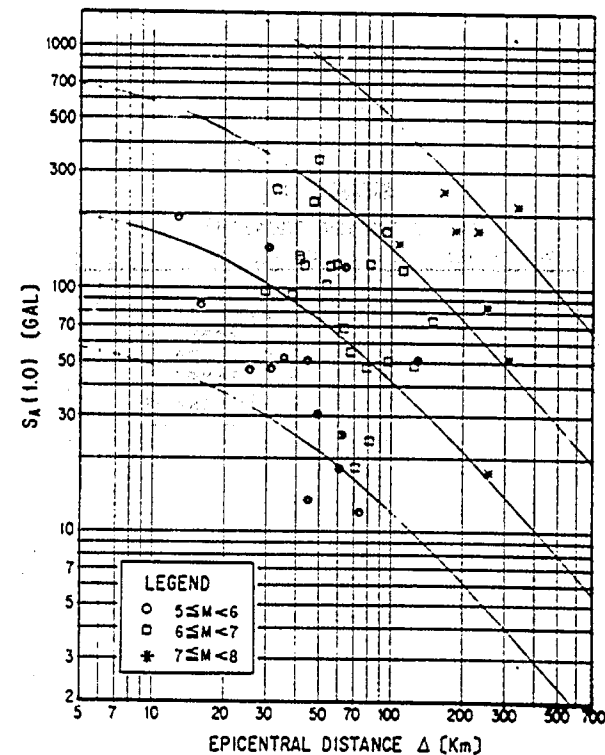
付図1-4 $\tilde{S}_A(0.7)$ の距離減衰特性



(a) 1種地盤

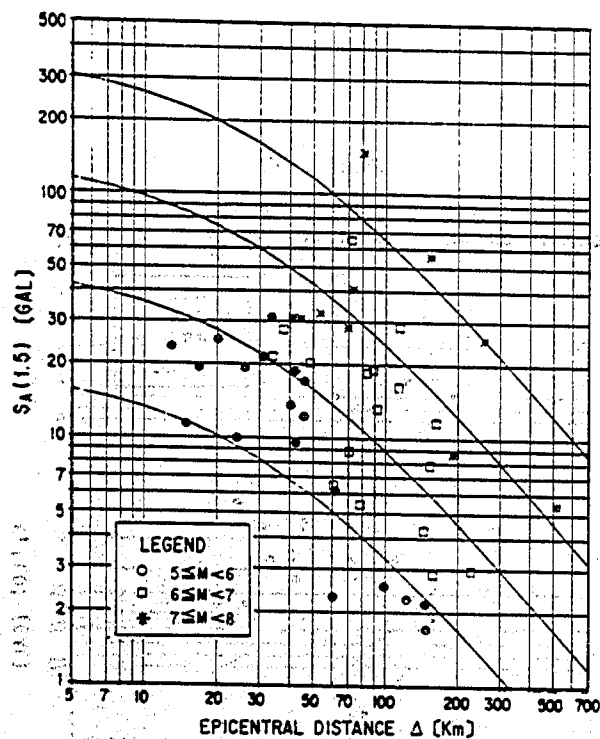


(b) 2種地盤

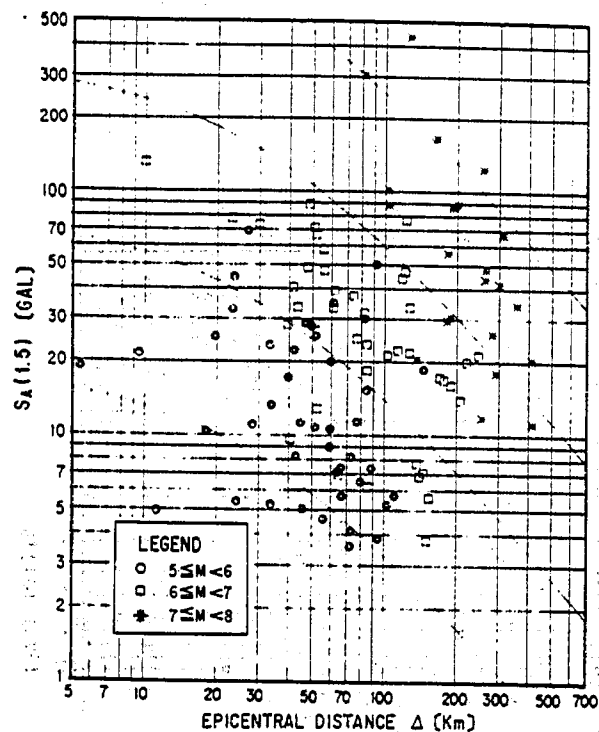


(c) 3種地盤

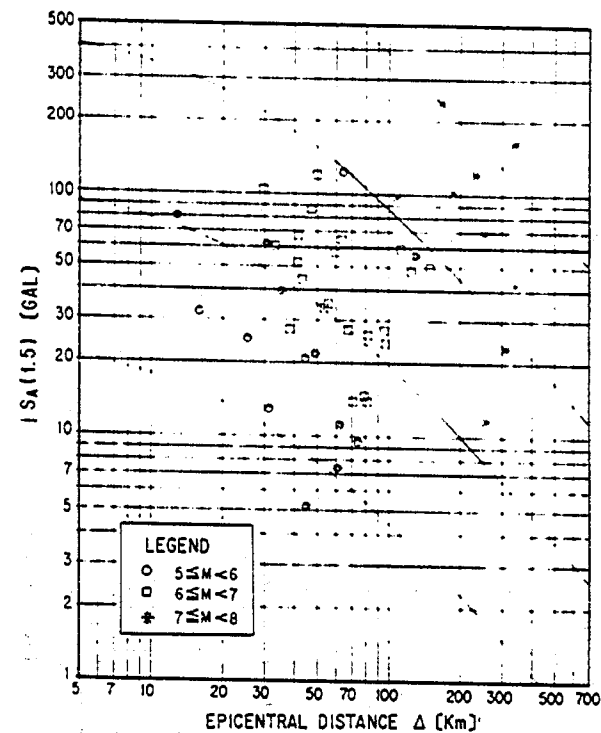
付図1-5 $\tilde{S}_A(1.0)$ の距離減衰特性



(a) 1種地盤

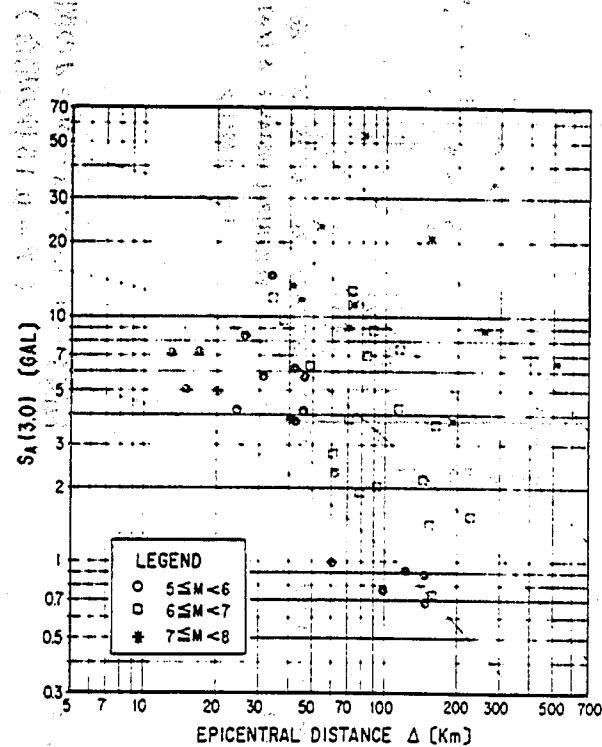


(b) 2種地盤

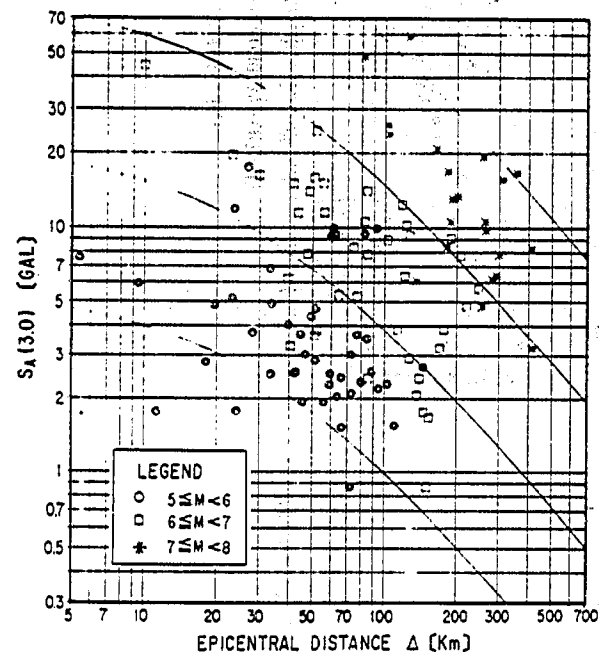


(c) 3種地盤

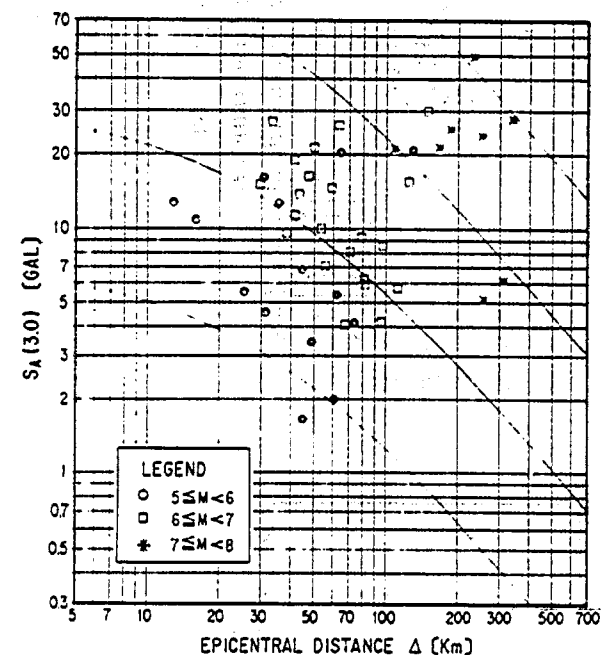
付図1-6 $\tilde{S}_A(1.5)$ の距離減衰特性



(a) 1種地盤

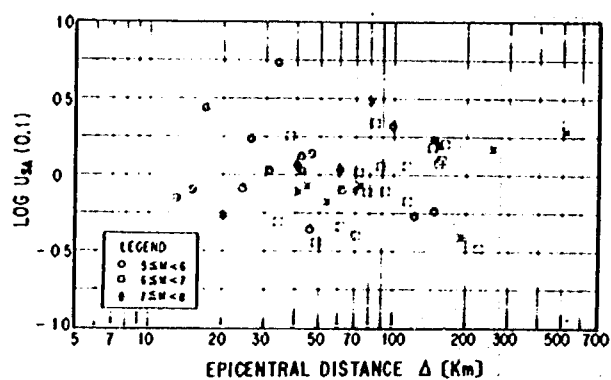


(b) 2種地盤

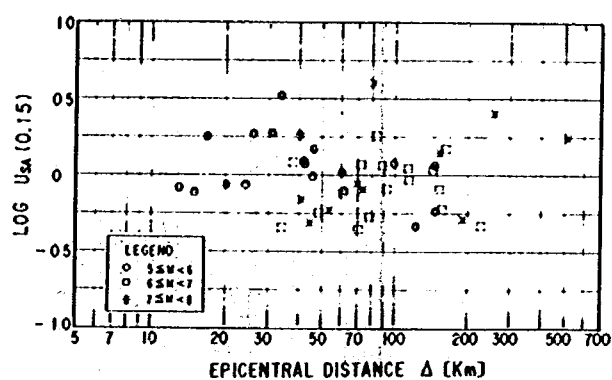


(c) 3種地盤

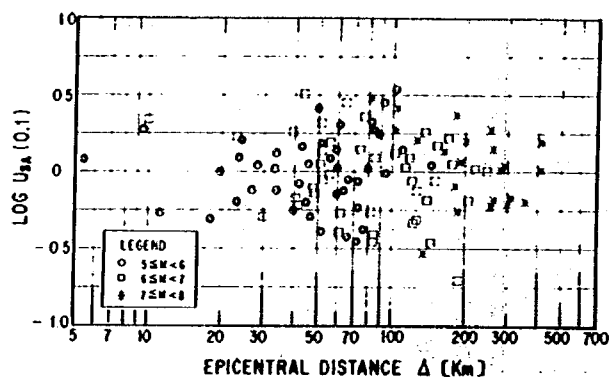
付図1-7 $\tilde{S}_A(3.0)$ の距離減衰特性



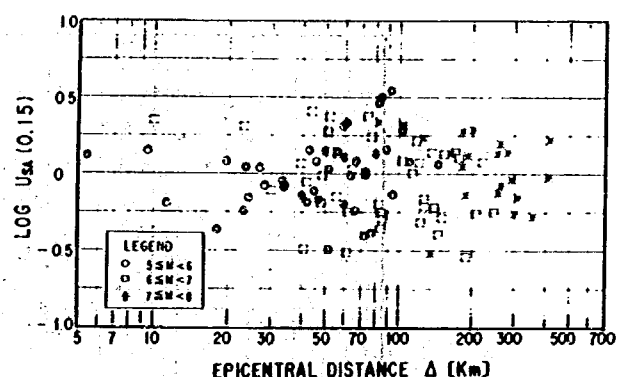
(a) 1種地盤



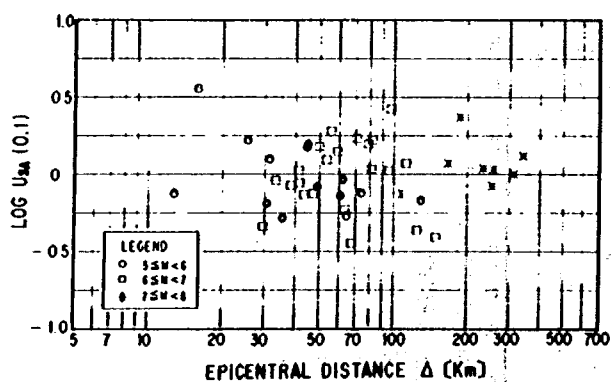
(a) 1種地盤



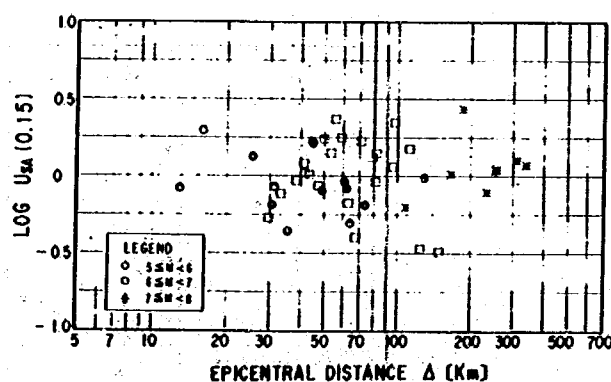
(b) 2種地盤



(b) 2種地盤



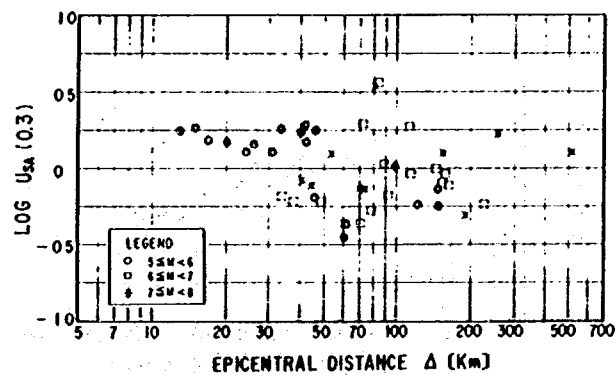
(c) 3種地盤



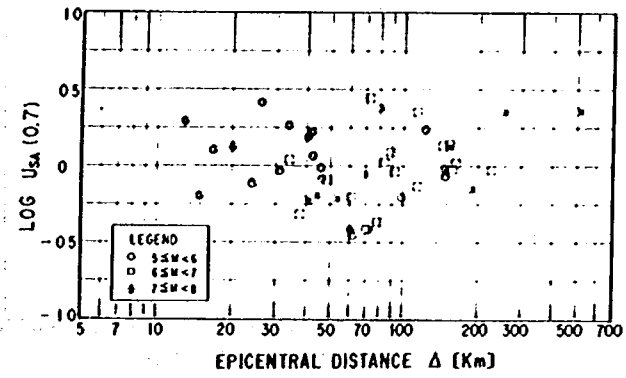
(c) 3種地盤

付図1-8 $\text{Log } U_{SA} \sim M \sim \Delta$ の関係
($T = 0.1$ 秒の場合)

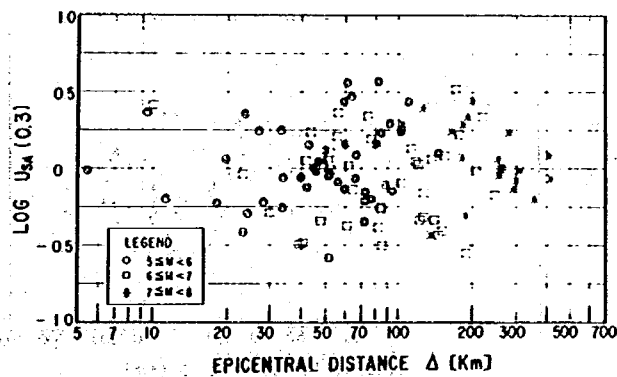
付図1-9 $\text{Log } U_{SA} \sim M \sim \Delta$ の関係
($T = 0.15$ 秒の場合)



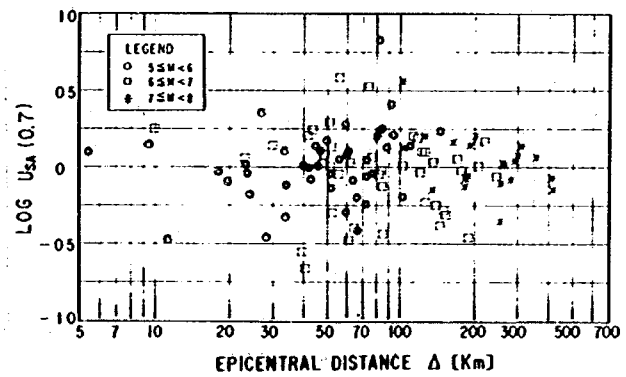
(a) 1種地盤



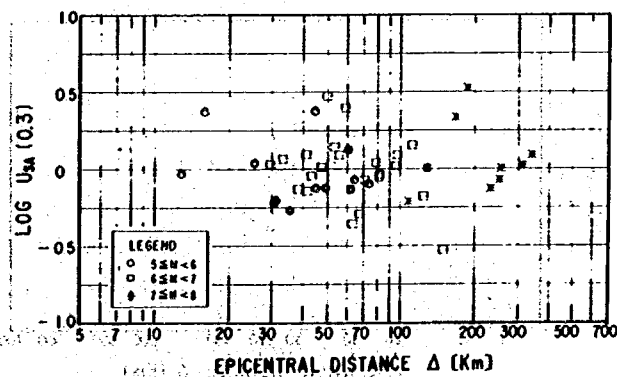
(a) 1種地盤



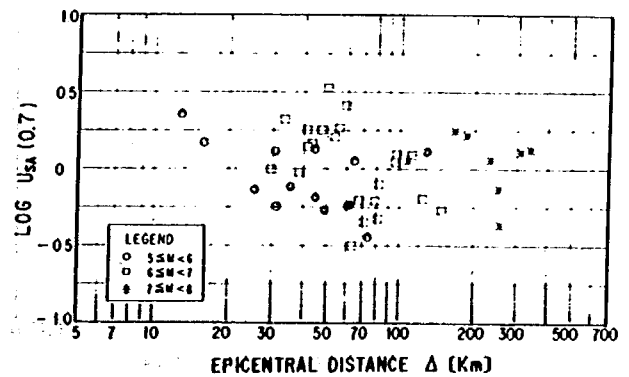
(b) 2種地盤



(b) 2種地盤



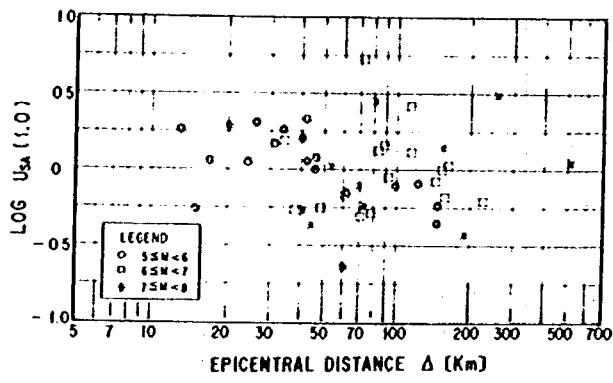
(c) 3種地盤



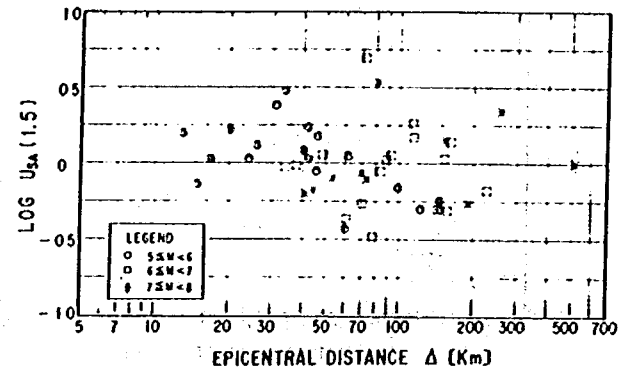
(c) 3種地盤

付図1-10 $\log U_{SA} \sim M \sim \Delta$ の関係
(合震 ($T=0.3$ 秒の場合))

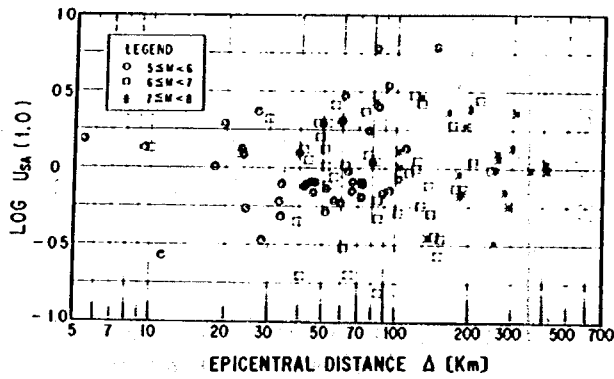
付図1-11 $\log U_{SA} \sim M \sim \Delta$ の関係
($T=0.7$ 秒の場合)



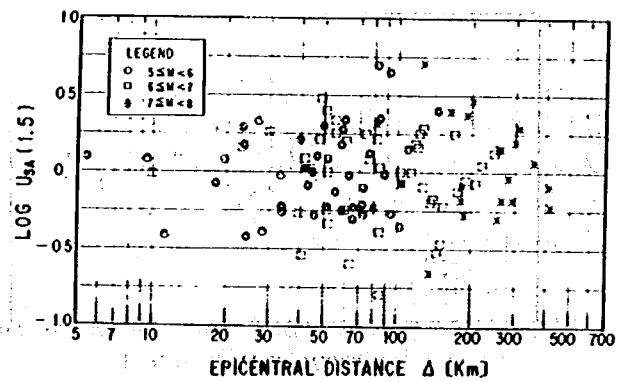
(a) 1種地盤



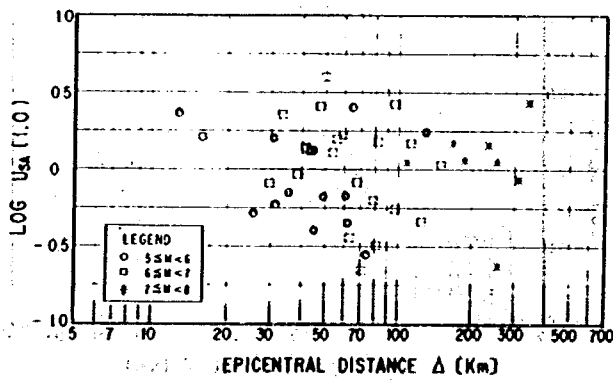
(a) 1種地盤



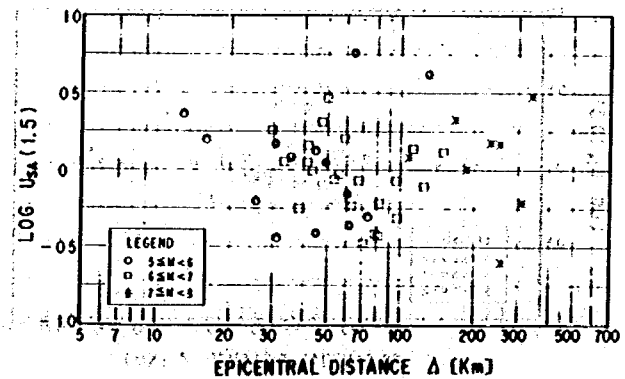
(b) 2種地盤



(b) 2種地盤



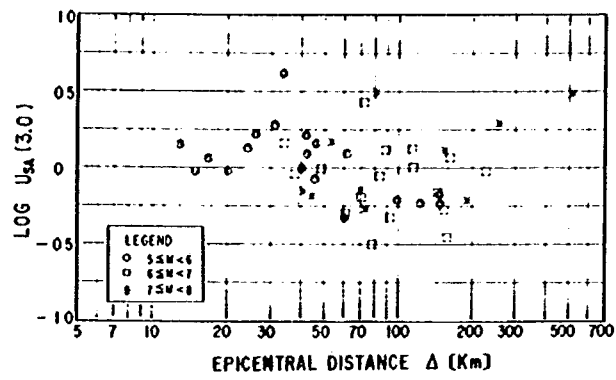
(c) 3種地盤



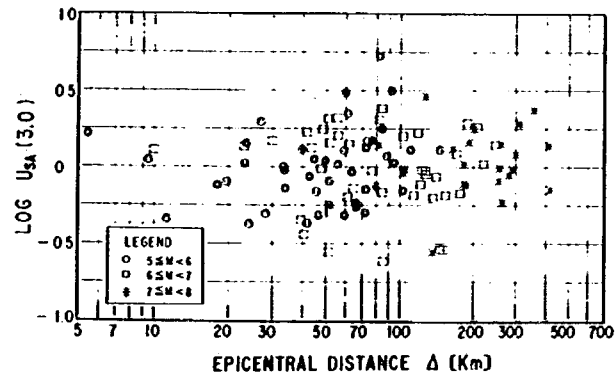
(c) 3種地盤

付図1-12 $\text{Log } U_{SA} \sim M \sim \Delta$ の関係
($T=1.0$ 秒の場合)

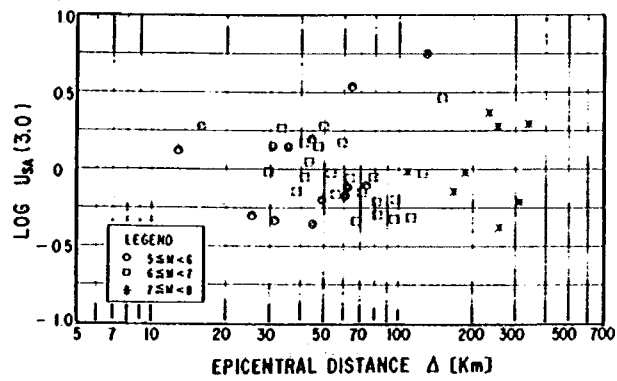
付図1-13 $\text{Log } U_{SA} \sim M \sim \Delta$ の関係
($T=1.5$ 秒の場合)



(a) 1種地盤



(b) 2種地盤



(c) 3種地盤

付図1-14 $\text{Log } U_{SA} \sim M \sim \Delta$ の関係 ($T = 3.0$ 秒の場合)

付 属 資 料 - 2

速度応答スペクトル $\widetilde{S}_v$ および変位応答スペクトル $\widetilde{S}_d$ の推定式

付属資料-2 速度応答スペクトル S_v および変位応答スペクトル S_D

速度応答スペクトル S_v および変位応答スペクトル S_D は、加速度応答スペクトル S_A と近似的に次の関係がある。

$$S_v \simeq \frac{T}{2\pi} S_A \quad (\text{付2-1})$$

$$S_D \simeq \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 S_A \quad (\text{付2-2})$$

上記の関係が、水平2成分の合成をしたスペクトル $\tilde{S}_A$ 、 $\tilde{S}_v$ 、 $\tilde{S}_D$ に対しても成立すると仮定し、 $\tilde{S}_A$ スペクトルを式(4-19)で与える。すなわち、

$$\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^c \quad (\text{付2-3})$$

ここで、係数 $a(T_k, GC_i)$ 、 $b(T_k, GC_i)$ および c は表4-5に示す通りである。式(付2-3)をそれぞれ式(付2-1)、式(付2-2)に代入すると、次式となる。

$$\tilde{S}_v \simeq a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^c \quad (\text{付2-4})$$

$$\tilde{S}_D \simeq a''(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^c \quad (\text{付2-5})$$

ここで、

$$a'(T_k, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times \frac{T}{2\pi} \quad (\text{付2-6})$$

$$a''(T_k, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \quad (\text{付2-7})$$

係数 $b(T_k, GC_i)$ および c については変化しないが、これらを含めて、それぞれ式(付2-4)、式(付2-5)による速度応答スペクトル $\tilde{S}_v$ および変位応答スペクトル $\tilde{S}_D$ の推定式の係数を示すと付表2-1、2-2のようになる。また、付図2-1および2-2はそれぞれ $\tilde{S}_v$ および $\tilde{S}_D$ に対する係数を固有周期に対して図示した結果を示したものである。

また、代表的な M および Δ の組み合わせに対して、式(付2-4)および式(付2-5)による $\tilde{S}_v$ スペクトルおよび $\tilde{S}_D$ スペクトルを計算すると、それぞれ図付2-3および図付2-4のようになる。

付表 2 - 1 $\widetilde{S}_V$ 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

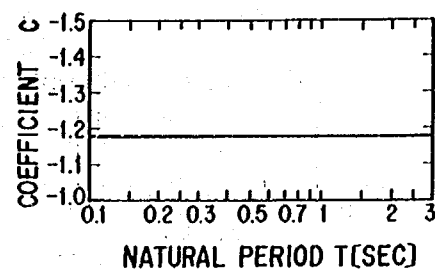
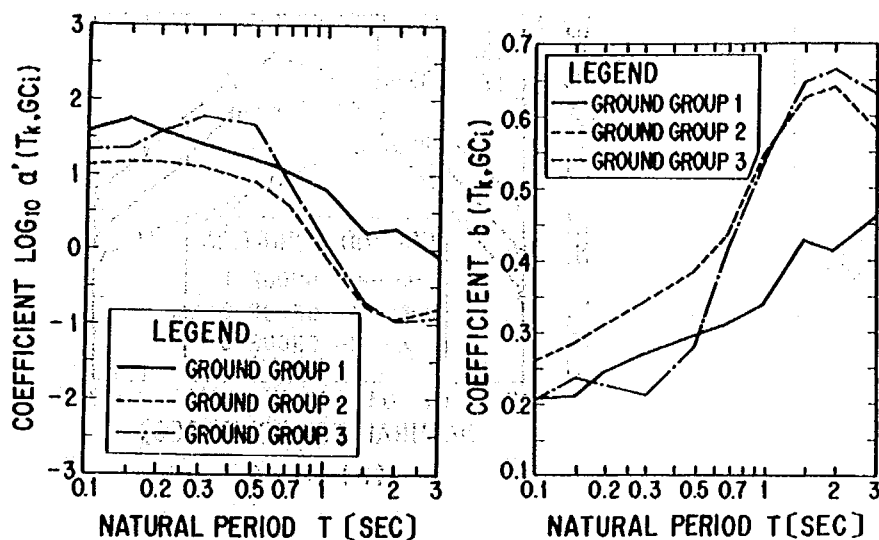
固有周期 〔秒〕	1 種 地 盤		2 種 地 盤		3 種 地 盤	
	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$
0.1	38.51	0.211	13.59	0.262	20.80	0.208
0.15	57.47	0.216	15.02	0.288	22.64	0.238
0.2	40.41	0.247	14.83	0.315	35.92	0.228
0.3	27.44	0.273	12.74	0.345	60.32	0.224
0.5	16.86	0.299	8.132	0.388	46.21	0.281
0.7	11.42	0.317	3.826	0.440	7.317	0.421
1	6.381	0.344	0.802	0.548	1.180	0.541
1.5	1.700	0.432	0.172	0.630	0.192	0.647
2	1.841	0.417	0.111	0.644	0.112	0.666
3	0.798	0.462	0.172	0.586	0.125	0.635

$c = -1.178$

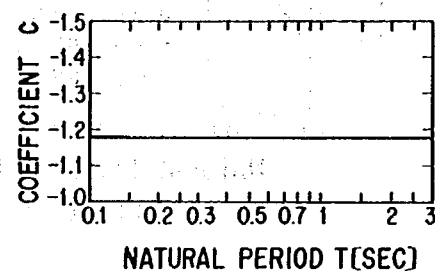
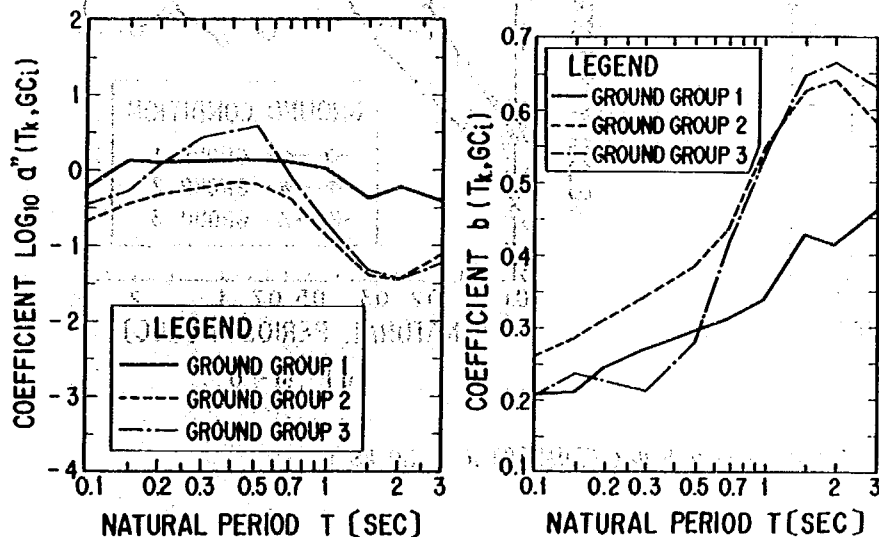
付表 2 - 2 $\widetilde{S}_D$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, c

固有周期 〔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	0.613	0.211	0.215	0.262	0.331	0.208
0.15	1.372	0.216	0.359	0.288	0.540	0.238
0.2	1.286	0.247	0.472	0.315	1.143	0.228
0.3	1.310	0.273	0.608	0.345	2.880	0.224
0.5	1.341	0.299	0.647	0.388	3.677	0.281
0.7	1.273	0.317	0.426	0.440	0.815	0.421
1	1.016	0.344	0.128	0.548	0.188	0.541
1.5	0.406	0.432	0.0410	0.630	0.0457	0.647
2	0.586	0.417	0.0352	0.644	0.0356	0.666
3	0.381	0.462	0.0822	0.586	0.0597	0.635

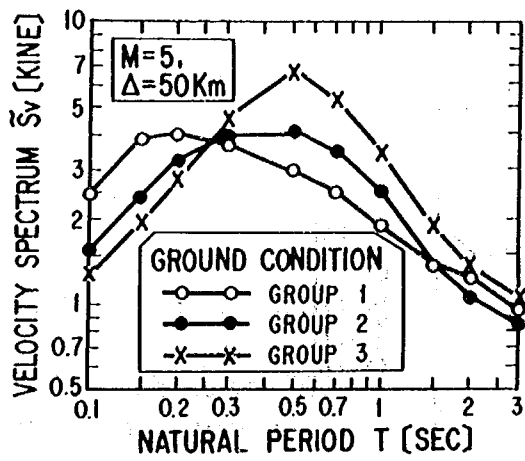
$c = -1.178$



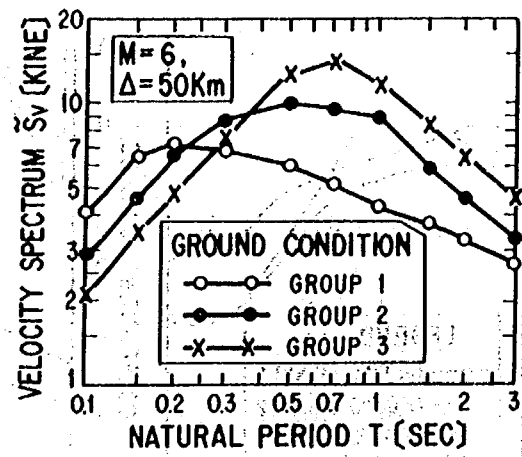
付図 2-1 $\tilde{S}_V$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$ および c



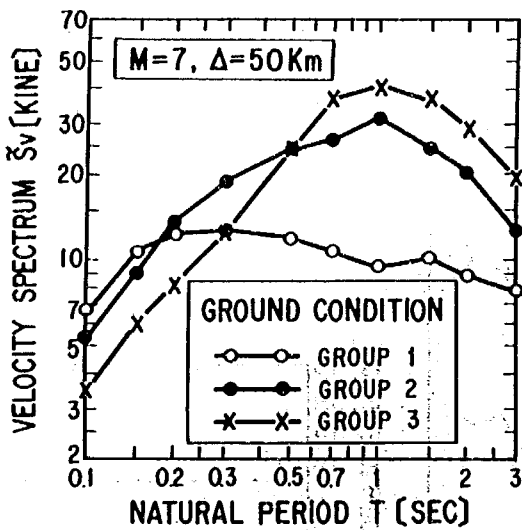
付図 2-2 $\tilde{S}_D$ スペクトルとの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$ および c



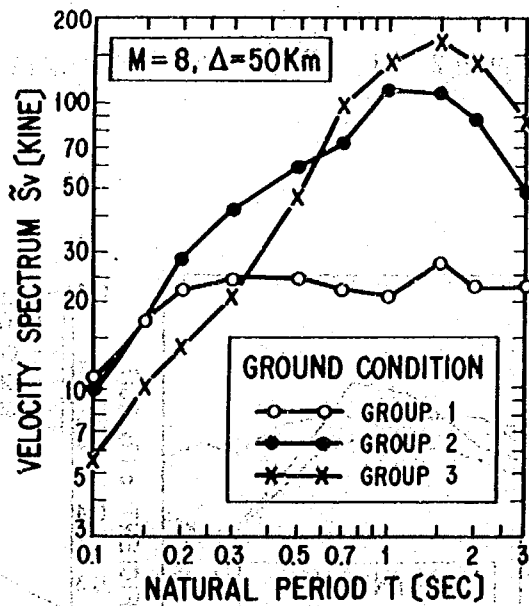
(a) $M=5$



(b) $M=6$

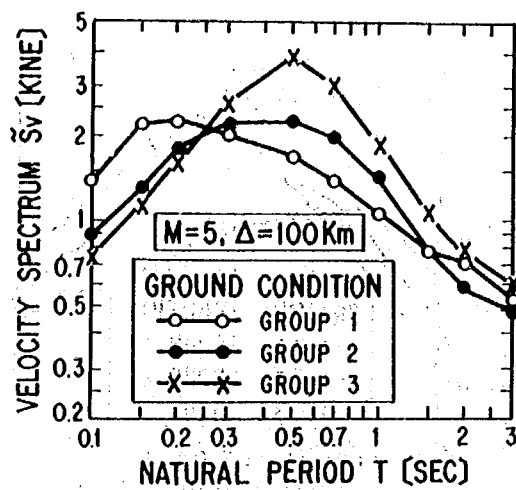


(c) $M=7$

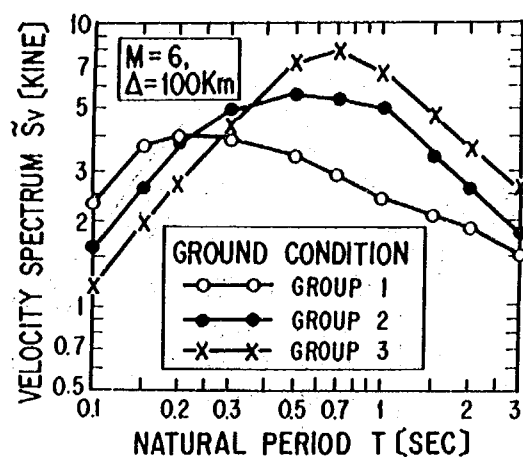


(d) $M=8$

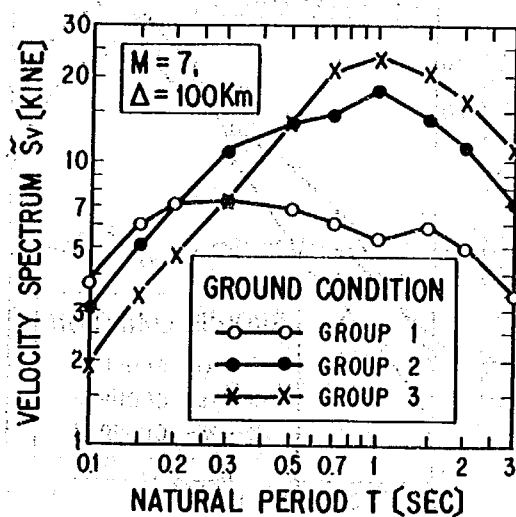
付図2-3(1) $\tilde{S}_v(T)$ スペクトル (震央距離 $\Delta=50\text{ km}$)



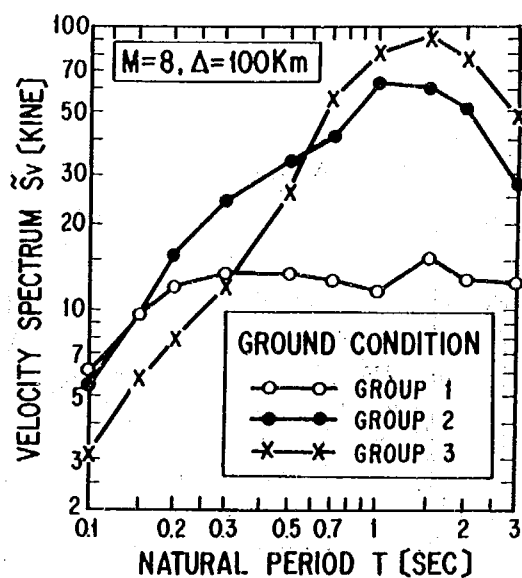
(a) $M=5$



(b) $M=6$

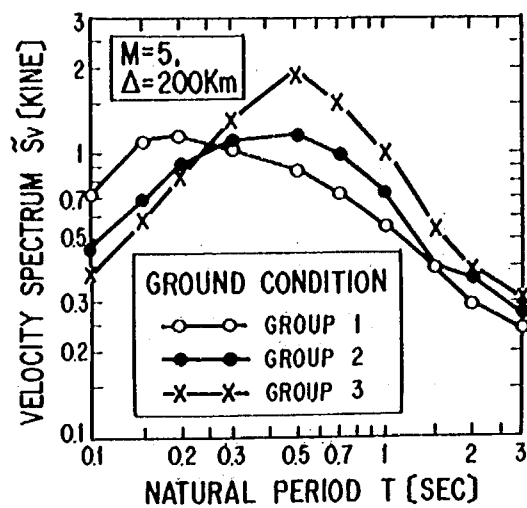


(c) $M=7$

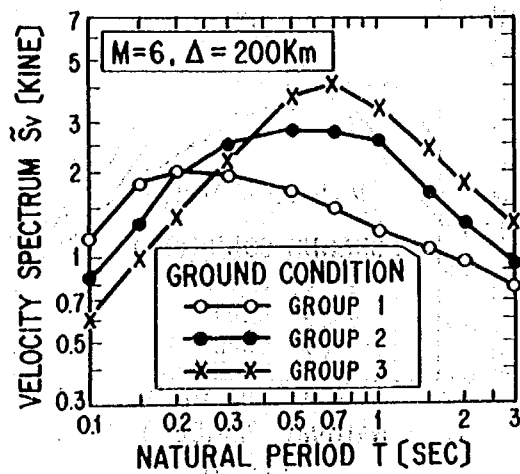


(d) $M=8$

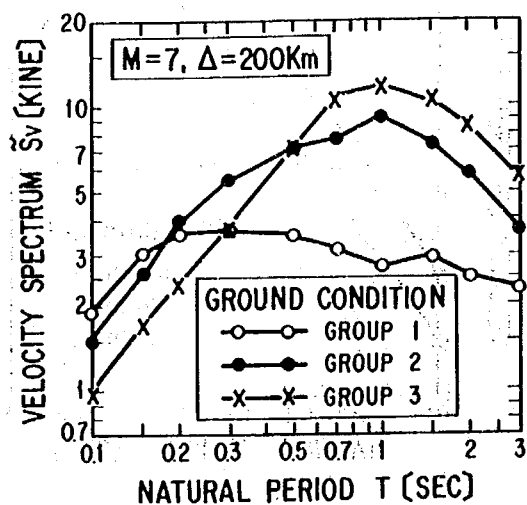
付図 2-3(2) $\tilde{S}_v(T)$ スペクトル (震央距離 $\Delta = 100\text{ km}$)



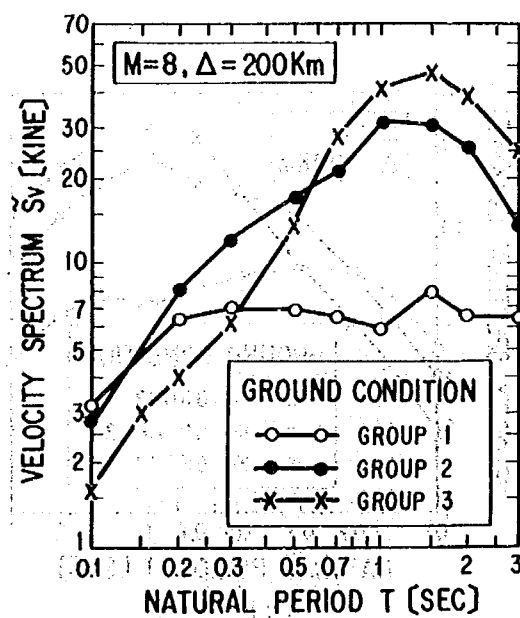
(a) $M=5$



(b) $M=6$

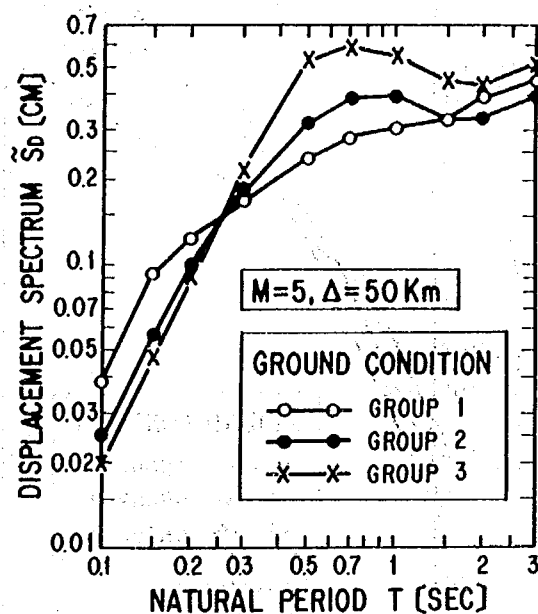


(c) $M=7$

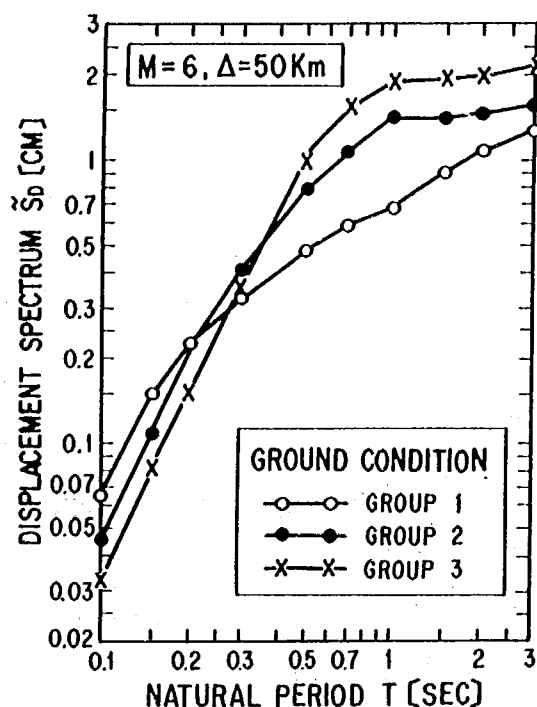


(d) $M=8$

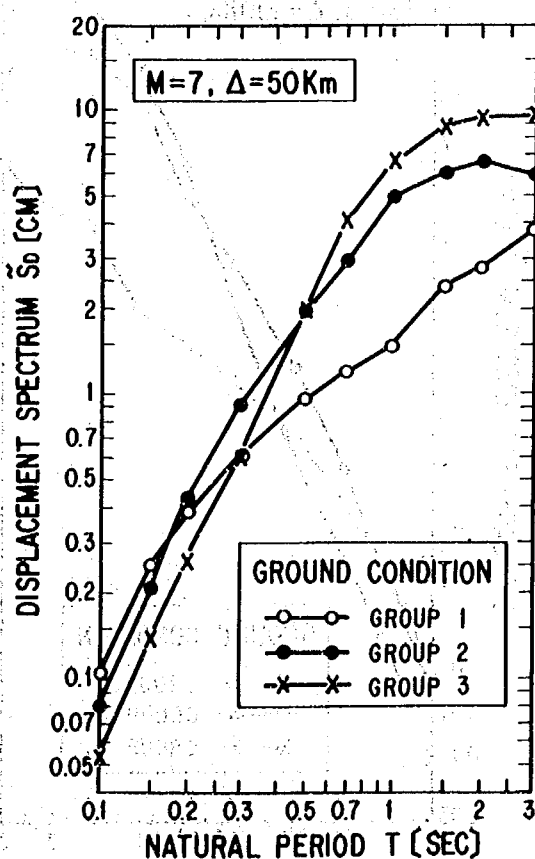
付図 2-3(3) $\tilde{S}_v(T)$ スペクトル (震央距離 $\Delta = 200 \text{ km}$)



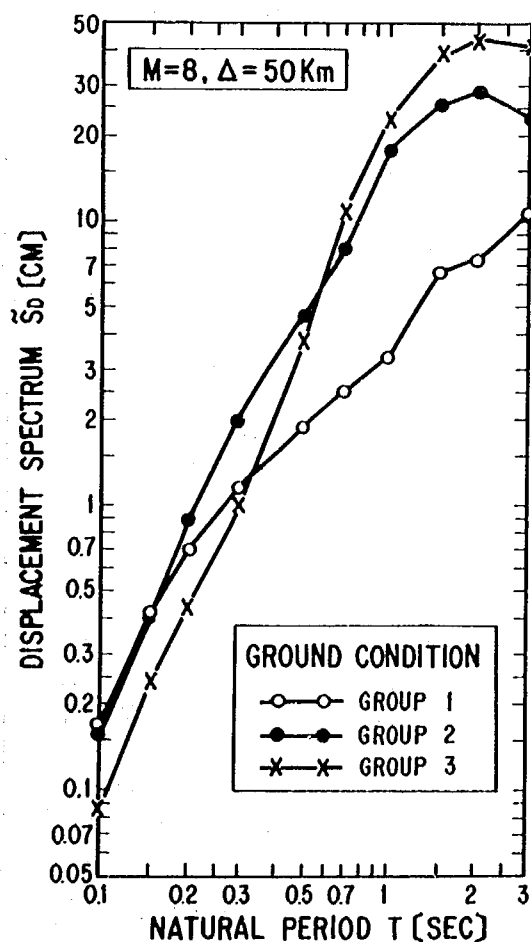
(a) $M=5$



(b) $M=6$

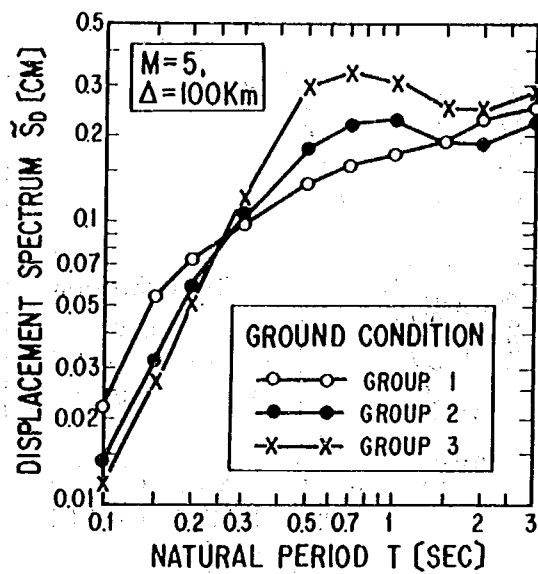


(c) $M=7$

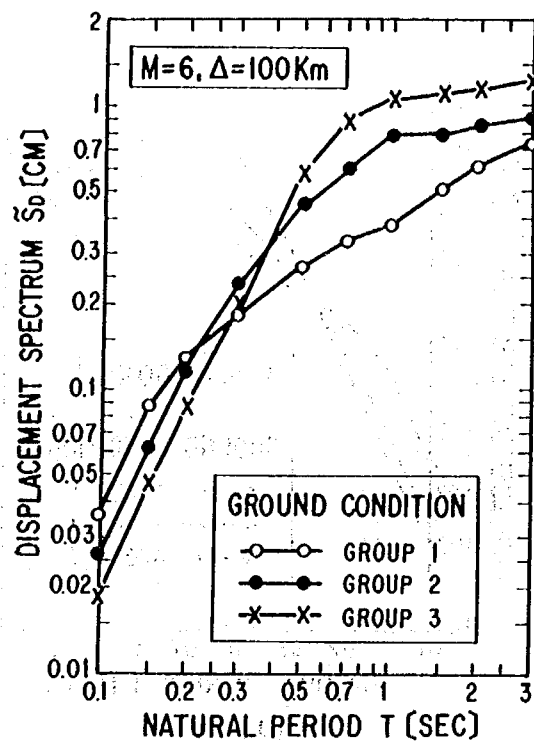


(d) $M=8$

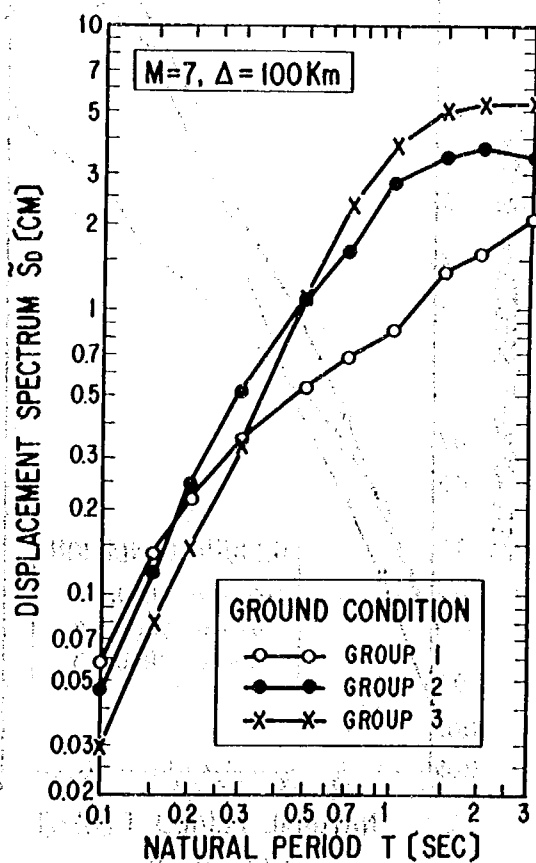
付図2-4(1) $\tilde{S}_d(T)$ スペクトル (震央距離 $\Delta = 50 \text{ km}$)



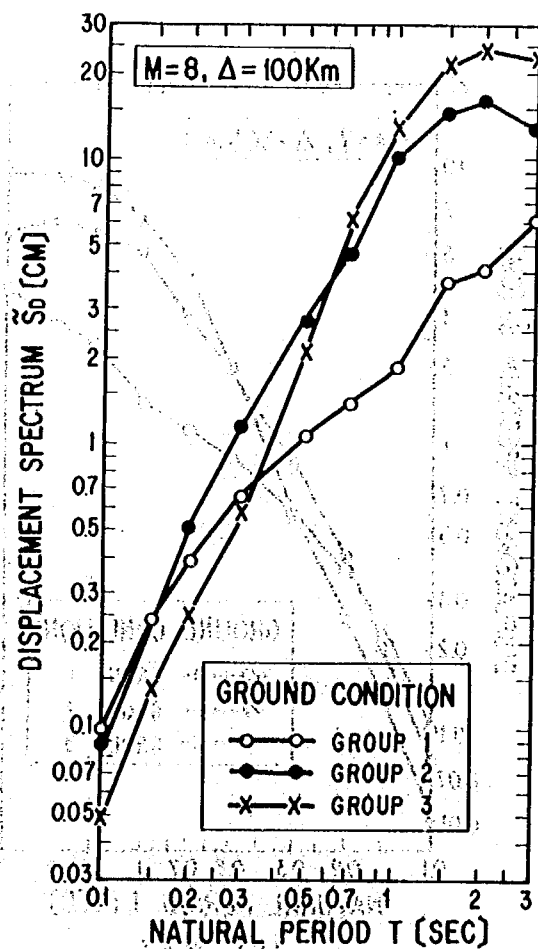
(a) $M=5$



(b) $M=6$

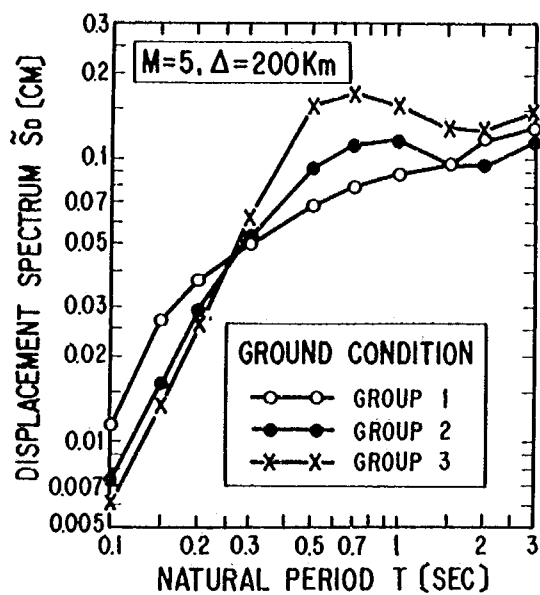


(c) $M=7$

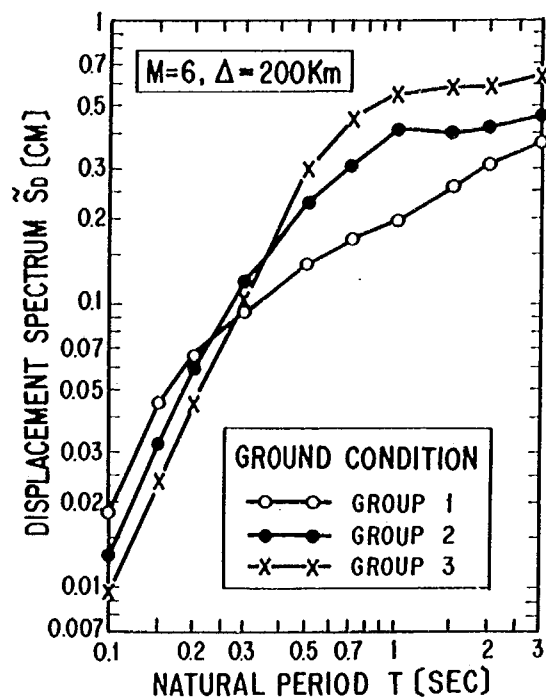


(d) $M=8$

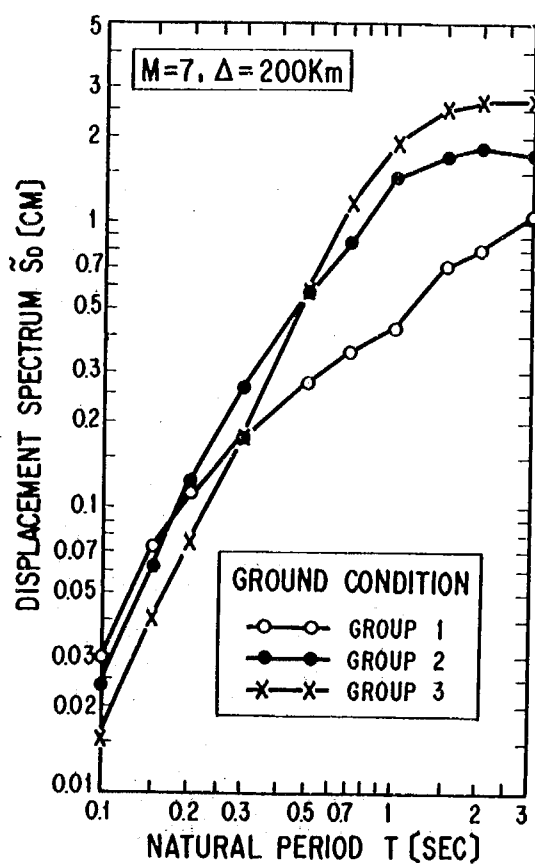
付図 2-4(2) $\tilde{S}_d(T)$ スペクトル (震央距離 $\Delta = 100\text{ km}$)



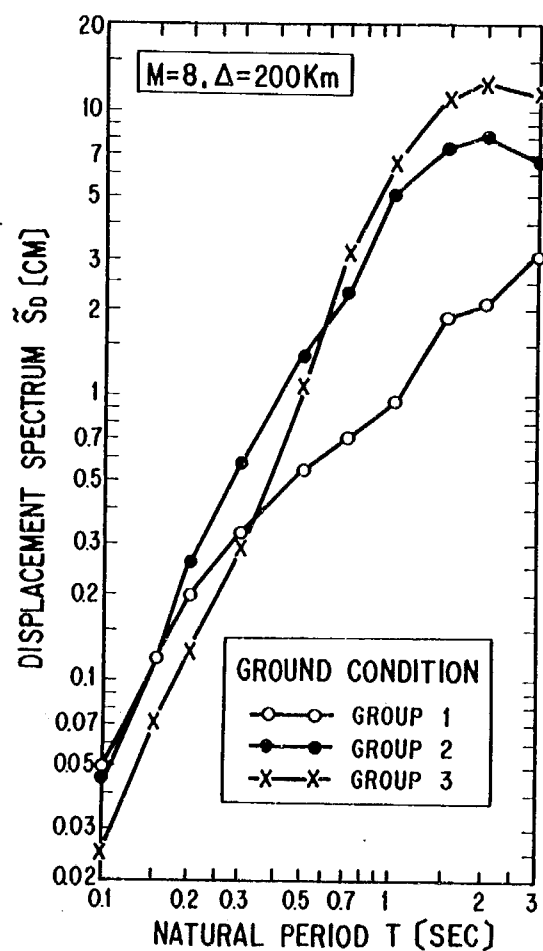
(a) $M=5$



(b) $M=6$



(c) $M=7$



(d) $M=8$

付図 2-4(3) $\tilde{S}_d(T)$ スペクトル (震央距離 $\Delta = 200\text{ km}$)

付 属 資 料 - 3

$\tilde{\beta}$ スペクトルの推定式

付属資料-3 $\tilde{\beta}$ スペクトルの推定式

3章および4章では、それぞれ、最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$ および加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A$ の推定式を示した。それぞれの推定式は、式(3-16)および式(4-19)に示した通りであり、次式で与えられる。

$$\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^c \quad (\text{付3-1})$$

$$\tilde{a}_{\max} = a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c_0} \quad (\text{付3-2})$$

係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, c および a , b , c_0 ($\tilde{S}_A$ に対する係数 c と区別するために、ここでは c_0 と表わす)は、重回帰分析よりそれぞれ表3-2および表4-5のように与えられている。いま、式(付3-1)および式(付3-2)より、加速度応答スペクトル倍率 $\tilde{\beta}$ を次式で求める。

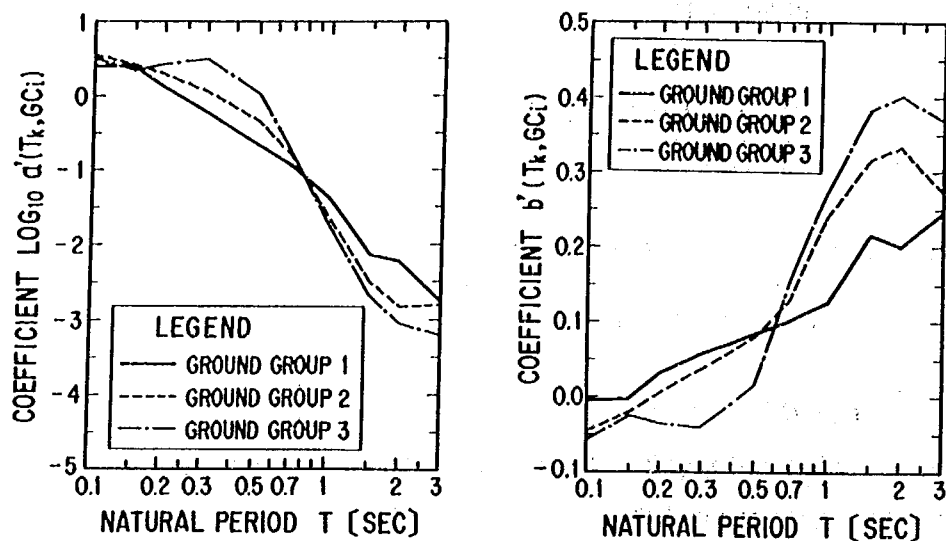
$$\begin{aligned} \tilde{\beta}(T_k, M, \Delta, GC_i) &= \frac{\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)}{\tilde{a}_{\max}(M, \Delta, GC_i)} = \frac{a(T_k, GC_i)}{a(GC_i)} \times \frac{10^{b(T_k, GC_i)M}}{10^{b(GC_i)M}} \times \frac{(\Delta + 30)^c}{(\Delta + 30)^{c_0}} \\ &= a'(T, GC_i) \times 10^{b'(T, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c'} \quad (\text{付3-3}) \end{aligned}$$

上式による $\tilde{\beta}$ スペクトルは、 $\tilde{S}_A$ および $\tilde{a}_{\max}$ を水平面内でそれぞれ単独に求めた結果から計算した値であり、厳密には $\tilde{\beta}$ とはならないが、一般に水平2成分の合成による $\tilde{a}_{\max}$ の増加率が8%程度と小さいことから、 $\tilde{\beta}$ を近似すると考えられる。このようにして式(付3-3)の係数 $a'(T_k, GC_i)$, $b'(T_k, GC_i)$, c' を定めると付表3-1のようになる。また、付図3-1は $a'(T, GC_i)$, $b'(T, GC_i) \sim T$ の関係を示したものである。

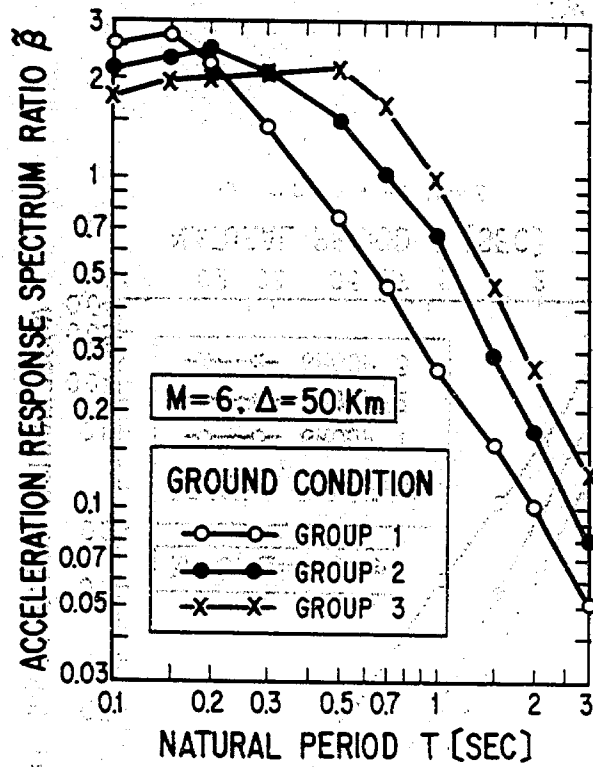
代表的な M および Δ の組み合わせに対して、式(付3-3)による $\tilde{\beta}$ スペクトルを計算すると付図3-2のようになる。

付表3-1 $\tilde{\beta}(T)$ スペクトルの係数 $a'(T_k, GC_i)$, $b'(T_k, GC_i)$ および c'

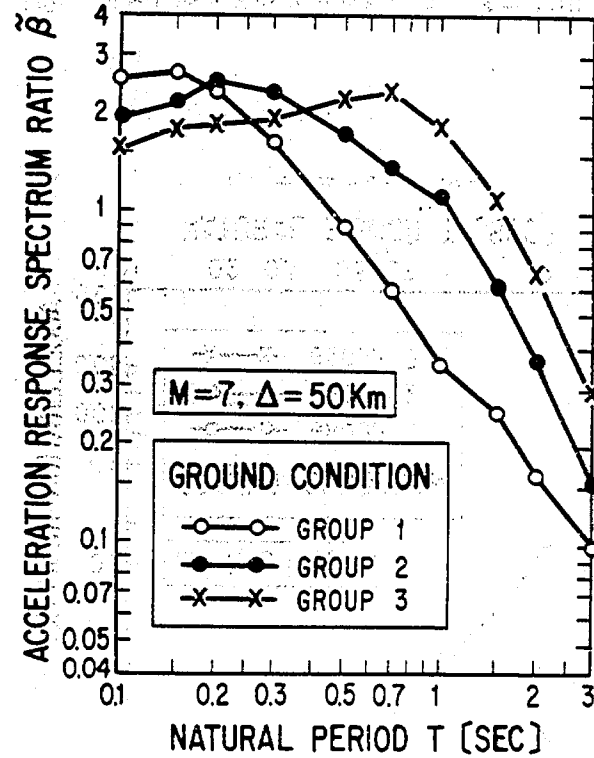
固有周期 $T(\text{sec})$	1 種 地 盤		2 種 地 盤		3 種 地 盤		c'
	$a'(T_k, GC_1)$	$b'(T_k, GC_1)$	$a'(T_k, GC_2)$	$b'(T_k, GC_2)$	$a'(T_k, GC_3)$	$b'(T_k, GC_3)$	
0.1	2.45	-0.00963	3.65	-0.0501	3.24	-0.0575	0.0406
0.15	2.44	-0.00498	2.71	-0.0243	2.35	-0.0277	
0.2	1.29	0.0268	2.00	0.00231	2.79	-0.0371	
0.3	0.582	0.0525	1.15	0.0329	3.13	-0.0417	
0.5	0.215	0.0784	0.439	0.0758	1.44	0.0160	
0.7	0.104	0.0963	0.148	0.128	0.163	0.156	
1.0	0.0406	0.124	0.0217	0.236	0.0184	0.276	
1.5	0.00721	0.211	0.00309	0.317	0.00199	0.382	
2.0	0.00586	0.197	0.00149	0.331	0.00087	0.401	
3.0	0.00169	0.241	0.00155	0.274	0.00065	0.369	



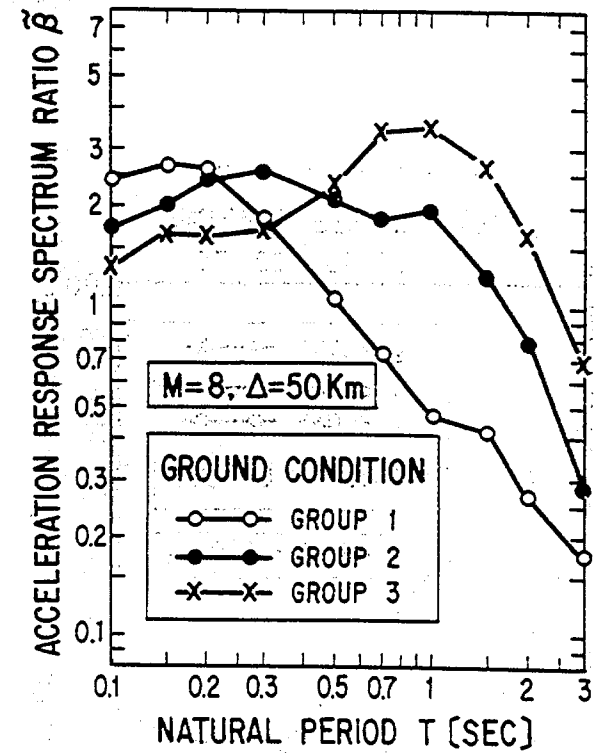
付図 3-1 $\tilde{\beta}$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$ および $b(T_k, GC_i)$



(a) マグニチュード $M=6$

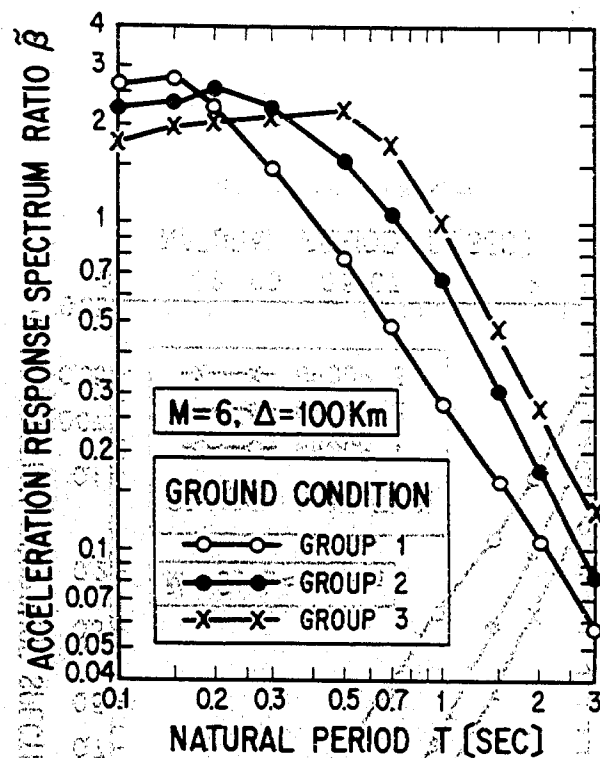


(b) マグニチュード $M=7$

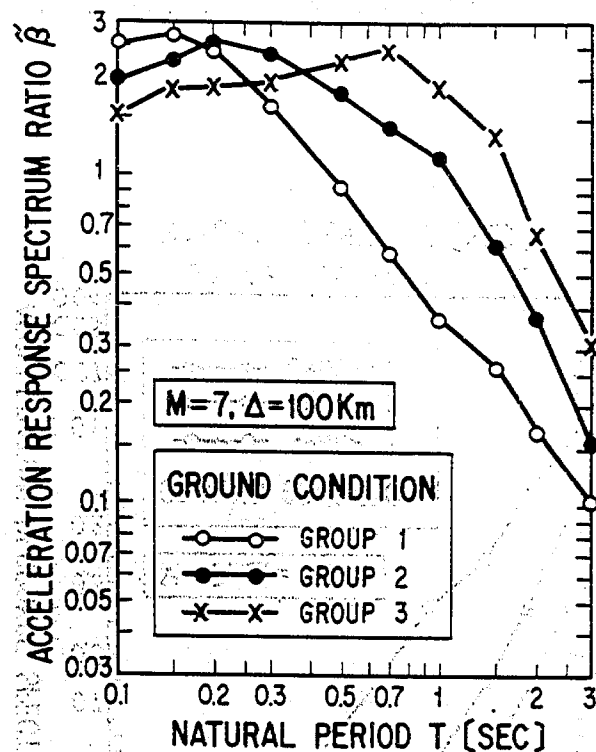


(c) マグニチュード $M=8$

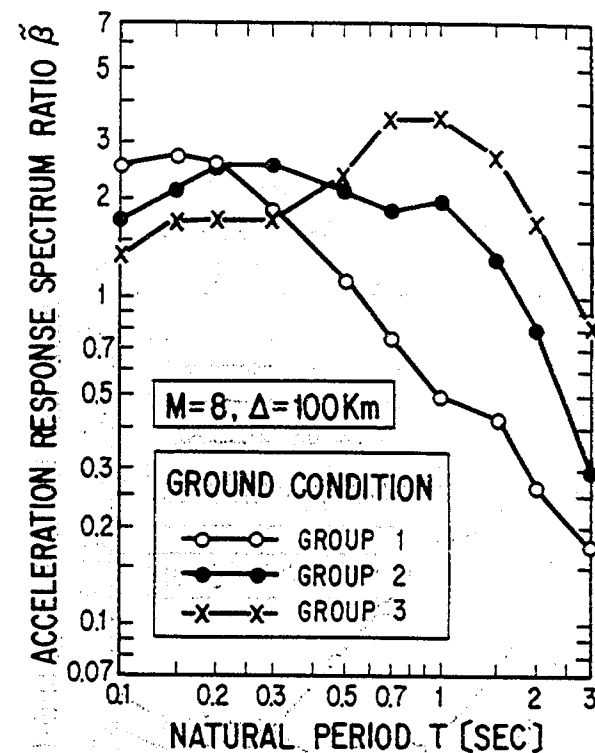
付図 3-2(1) 加速度応答スペクトル倍率 $\tilde{\beta}$ ($\Delta=50 \text{ km}$ の場合)



(a) マグニチュード M=6

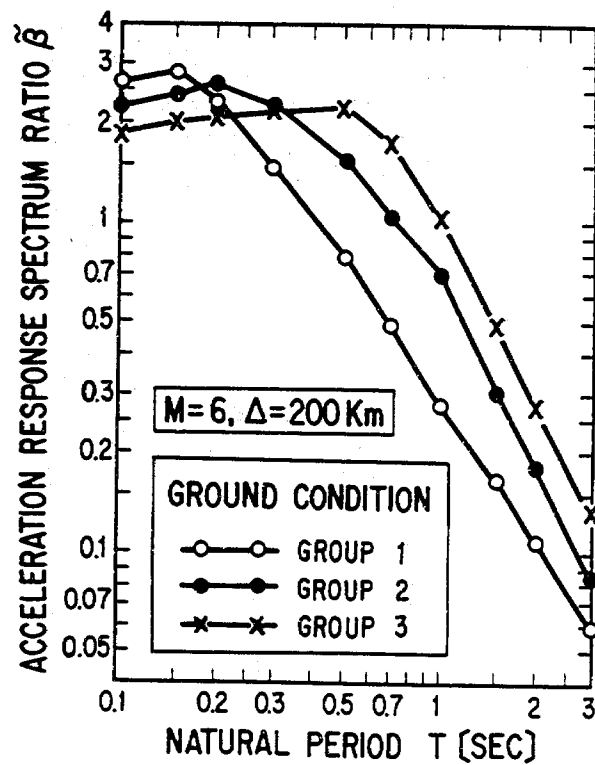


(b) マグニチュード M=7

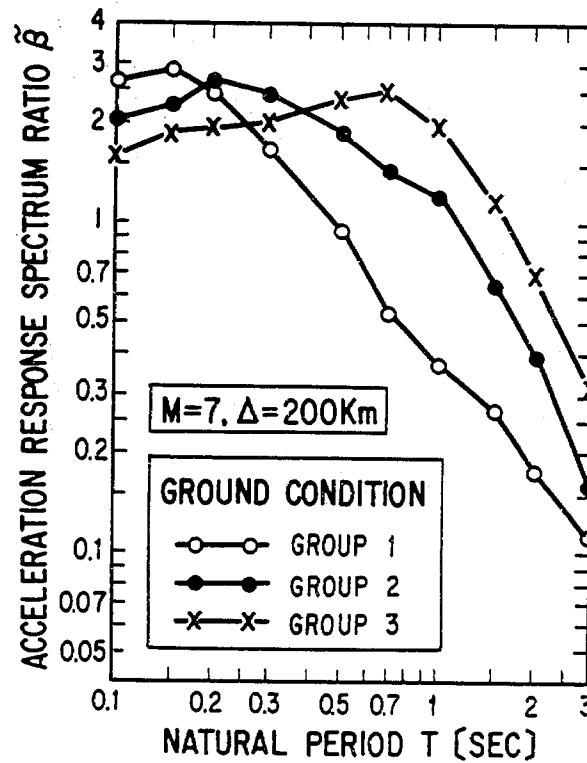


(c) マグニチュード M=8

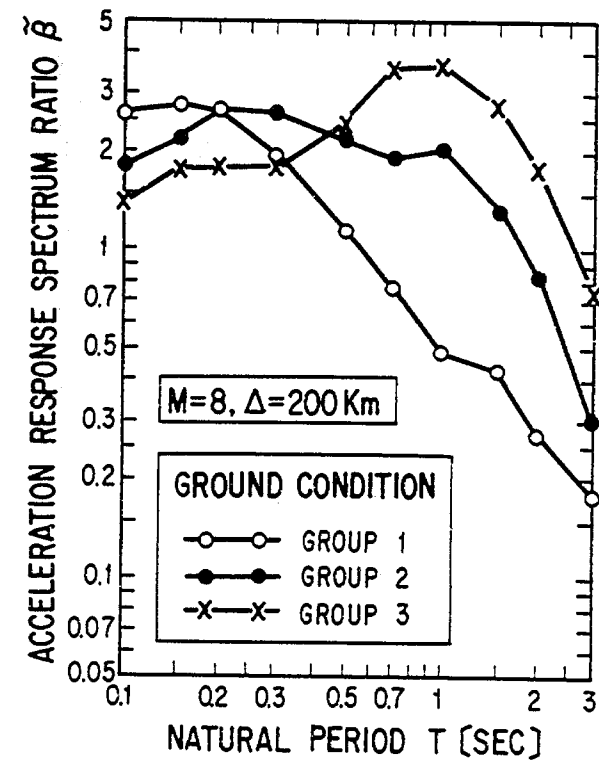
付図3-2(2) 加速度応答スペクトル倍率 $\tilde{\beta}$ ($\Delta=100\text{km}$ の場合)



(a) マグニチュード $M=6$

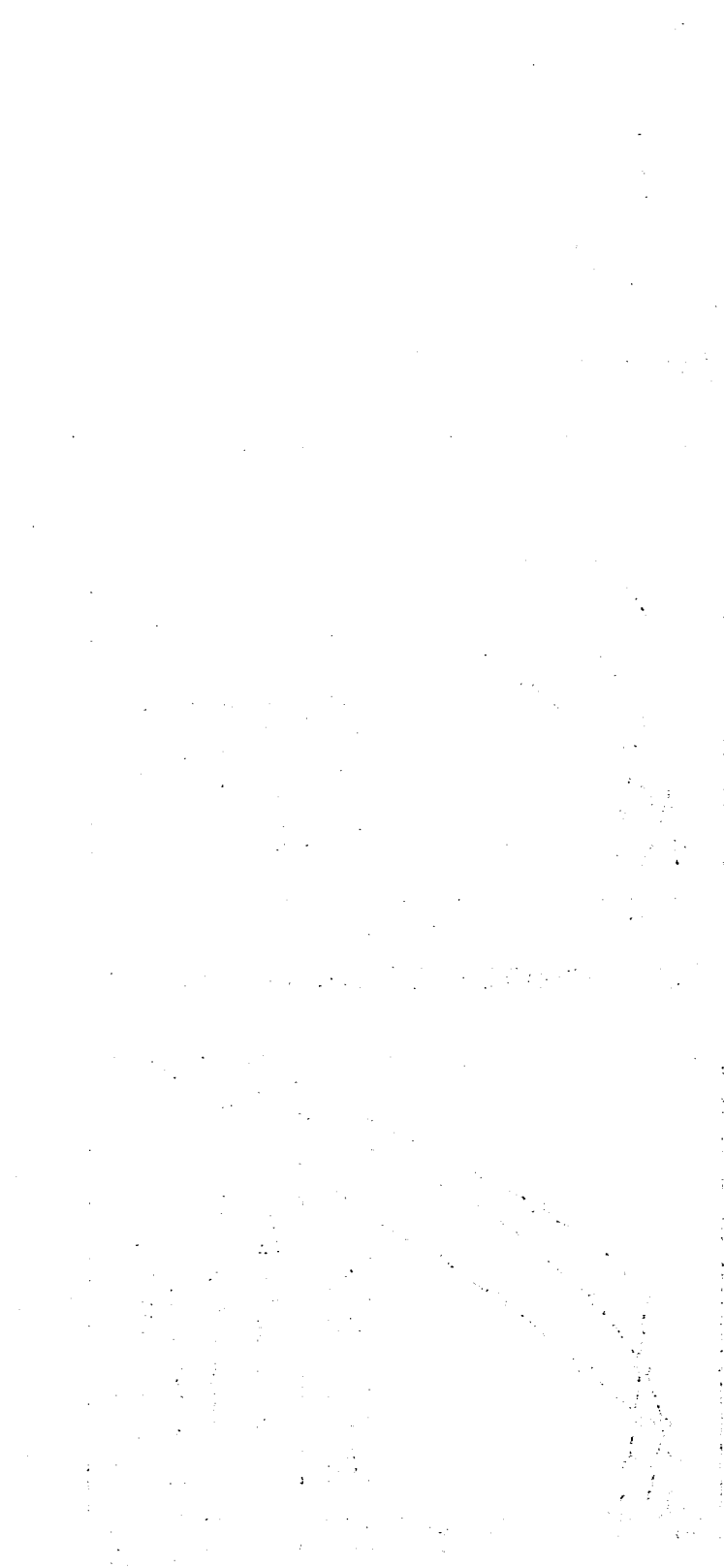


(b) マグニチュード $M=7$



(c) マグニチュード $M=8$

付図 3-2(3) 加速度応答スペクトル倍率 $\tilde{\beta}$ ($\Delta=200 \text{ km}$ の場合)



© 1999 by John Wiley & Sons, Inc.

付 属 資 料－４

総当り法による変数選択および層別因子を含む回帰分析

1. 総当り法による変数選択

いま、目的特性 y を説明するのに役だつと考えられる変数を $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ とする。 p の数が大きい場合には、 $x_1, x_2, \dots, x_p$ 全部を用いた回帰式を求めるよりも、これらのうちの寄与度の高い変数だけを用いた回帰式の方が実用的な場合がある。これは、変数の数が少ない方が、回帰式が簡単になり、問題をより直観的にとらえることができると同時に、間違いも少なくなるためである。変数のうちのどのような変数を取捨抽出するのがよいかを考えてみる。変数選択の手法としては種々提案されているが、ここでは、すべての部分集合について実際に回帰式を求める方法（総当り法）について示す。

(1) 総当り法

総当り法とは、 p 個の説明変数の中から任意の r 個 ($r=1, 2, 3, \dots, p$) を選びこれらの全ての組み合わせについて、回帰式を計算するものである。この場合には回帰式の計算対象とする組み合わせの全数は次のようになる。

$${}_p C_1 + {}_p C_2 + {}_p C_3 + \dots + {}_p C_p = (1+1)^p - {}_p C_0 = 2^p - 1 \quad (\text{付4-1})$$

たとえば、 $p=10$ とすると、 $2^{10} - 1 = 1,023$ 組みである。

この $(2^p - 1)$ 組の重回帰式の中から、ある判定基準によって最良となる変数の組を選択する方法である。

(2) 回帰式の良さの評価

変数選択で選ばれた変数の組（重回帰モデル）の良否を決める基準としては、一般に、残差平方和（RSS, Residual Sum of Squares；観測値と予測値との差の2乗和）が用いられる。重回帰式に含まれる変数の数 r を固定して、その中で順位をつけるとすれば、RSS が小さい組み合わせが良いと考えることができる。また、RSS が接近した組み合わせが複数個存在する場合には、選ばれた変数の組み合わせや、偏回帰係数の符号、大きさ等を総合的に評価する必要がある。

(3) 自由度調整済重相関係数

一般の重相関係数 R の2乗（寄与率と呼ばれる） R^2 は、次式で定義される。

$$R^2 = 1 - \text{RSS} / \text{SYY} \quad (\text{付4-2})$$

ここで、

SYY: y の平方和

RSS: 残差平方和

これに対して、RSS, SYY の代りに、これらをそれぞれの自由度で割った分散を用いて自由度調整済寄与率 R^{*2} は次式で定義される。

$$R^{*2} = 1 - \frac{\text{RSS} / (n-p-1)}{\text{SYY} / (n-1)} = 1 - \frac{n-1}{n-p-1} (1 - R^2) \quad (\text{付4-3})$$

ここで、第2項の分子・分母の期待値は、帰無仮説のもとで σ^2 になる。

さらに、第2項の分子・分母の期待値が、MSEP (Mean Square Error of Prediction ; 適当に与えた予測点における予測誤差) になるようにして得られる

$$R^{**2} = 1 - \frac{(n+p+1)RSS/(n-p-1)}{(n+1)SYY/(n-1)} = - \frac{(n-1)(n+p+1)}{(n+1)(n-p+1)} (1-R^2) \quad (\text{付4-4})$$

は自由度2重調整済寄与率と呼ばれる。

説明変数の数 r を増せば、 RSS は単調に減少するため、 RSS だけを基準にすると、利用可能な変数を全部使った場合が最適であるという答が得られる。このようにして得られた回帰式は与えられた n 組のデータに対する当てはまりは最良といえるが、工学的な意味において予測精度が最良という保証がない。予測式としては、役に立たない変数を含まず、できるだけ簡単なものが望ましい。その一つの方法としては一般に用いられる重相関係数 R の代わりに自由度調整済重相関係数 R^* で回帰式の適合度を判断する方法がある。 R^* は R と異なり説明変数の数 r に対して単調増加しないで、 R^* が最大となる条件から、適当な回帰式を選ぶことができる。

2. 層別因子を含む回帰分析

分類尺度の変数を説明変数として取り入れるときには、 n 個のデータは、分類項目 (水準) によっていくつかの層に分けられるので、これを層別因子を含む回帰分析という。説明変数がすべて分類尺度の場合は数量化理論I類と呼ばれる質的データの分析方法と一致する。

(1) 層別因子の導入

層別因子は、質的な差 (または量的な差) を表わすもので、層別因子の水準を重回帰式の中に取り込むためには、定義変数 (ダミー変数, Dummy Variable) を用いる。これは、分類尺度の数量的表現に用いられる方法である。たとえば、地盤条件 x が3分割 (1種, 2種, 3種) されている場合、変数 x に次のような2つ (自由度 $3-1=2$) の定義変数 D_1, D_2 を導入する。

水 準	D_1	D_2
GROUP 1	0	0
GROUP 2	1	0
GROUP 3	0	1

このとき、 D_1, D_2 に対する偏回帰係数 b_1, b_2 は、それぞれ他の説明変数の条件を一定としたときの1種地盤と2種地盤の差、1種地盤と3種地盤の差の推定値となる。また、偏回帰係数 b_0 は、1種地盤の母平均の推定値となる。一般に層別因子が l 水準をもつときは、 $l-1$ 個の定義変数が必要である。

(2) 層別因子を含む重回帰分析

説明変数として x_1, x_2 の2つがあり、かつ3水準の層別因子を含む場合の重回帰分析を考えよう。この場合の各水準ごとの重回帰式は、

$$y^{(k)} = b_0^{(k)} + b_1^{(k)}x + b_2^{(k)}x_2 \quad (k=1, 2, 3) \quad (\text{付4-5})$$

と書くことができる。(2-1)式に定義変数 D_1, D_2 を導入すると,

$$y = b_{00} + b_{01}D_1 + b_{02}D_2 + b_{10}x_1 + b_{11}D_1x_1 + b_{12}D_2x_1 + b_{20}x_2 + b_{21}D_1x_2 + b_{22}D_2x_2 \quad (\text{付4-6})$$

ここで, D_1, D_2 はそれぞれ以下の通りである。

水 準	D_0	D_1	D_2
1	1	0	0
2	1	1	0
3	1	0	1

さらに, (2-2)式に D_0 を導入すれば,

$$\begin{aligned}
 y &= b_{00}D_0 + b_{01}D_1 + b_{02}D_2 + (b_{10}D_0 + b_{11}D_1 + b_{12}D_2)x_1 + (b_{20}D_0 + b_{21}D_1 + b_{22}D_2)x_2 \\
 &= (b_{00} + b_{10}x_1 + b_{20}x_2) \cdot D_0 \quad \leftarrow \text{水準1の項} \\
 &\quad + (b_{01} + b_{11}x_1 + b_{21}x_2) \cdot D_1 \quad \leftarrow \text{水準2と水準1の差の項} \\
 &\quad + (b_{02} + b_{12}x_1 + b_{22}x_2) \cdot D_2 \quad \leftarrow \text{水準3と水準1の差の項} \\
 &= b_{00}D_0 + b_{10}D_0x_1 + b_{20}D_0x_2 \\
 &\quad + \underbrace{(b_{01}D_1 + b_{02}D_2)}_{b_0 \text{ の層別項}} + \underbrace{(b_{11}D_1x_1 + b_{12}D_2x_1)}_{b_1 \text{ の層別項}} + \underbrace{(b_{21}D_1x_2 + b_{22}D_2x_2)}_{b_2 \text{ の層別項}} \quad (\text{付4-7})
 \end{aligned}$$

となる。この(2-3)式の中の変数 $\{D_0, D_1, D_2, D_0x_1, D_1x_1, D_2x_1, D_0x_2, D_1x_2, D_2x_2\}$ について変数の選択を行い, 最良の回帰式を求めれば層別因子を考慮した重回帰式を求めることができる。ここで, 変数 $\{D_1, D_2\}, \{D_1x_1, D_2x_1\}, \{D_1x_2, D_2x_2\}$ に対する偏回帰係数 $\{b_{01}, b_{02}\}, \{b_{11}, b_{12}\}, \{b_{21}, b_{22}\}$ はそれぞれ水準1と他の水準の差の推定値であるので, 単独に選択することには注意が必要である。

また, 各水準ごとに求めた偏回帰係数と(2-3)式から求めた偏回帰係数との関係は,

$$\begin{aligned}
 b^{(1)} &= b_{00}, & b_0^{(2)} &= b_{00} + b_{01}, & b_0^{(3)} &= b_{00} + b_{02} \\
 b_1^{(1)} &= b_{10}, & b_1^{(2)} &= b_{10} + b_{11}, & b_1^{(3)} &= b_{11} + b_{12} \\
 b_2^{(1)} &= b_{20}, & b_2^{(2)} &= b_{20} + b_{21}, & b_2^{(3)} &= b_{20} + b_{22}
 \end{aligned} \quad (\text{付4-8})$$

となる。

層別因子を含む重回帰分析での変数選択は, 通常の重回帰分析における変数選択と同様に行う。

最大地震動および地震応答スペクトルの推定法

一 (その4) 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再検討 一
キーワード 耐震設計, 設計地震力

ISSN 0386-5878

土研資料第1993号

昭和58年3月

川島一彦,

相沢 興,

高橋和之

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の予測式を, 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条件依存性, 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点から検討し, 水平成分の最大加速度, 最大速度, 最大変位および加速度応答スペクトルに対する実用的な予測式を提案するものである。

郵便はがき

40円切手
をはいて
下を

305-□□

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所

地震防災部振動研究室 御中

No. 175

No. 175

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第 1993 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印