

土 木 研 究 所 報 告

第 166 号

最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式……………川島一彦
相沢 興
高橋和之

昭 和 60 年 9 月

建 設 省 土 木 研 究 所

Copyright © 1985年 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General 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。

最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式

川島 一彦* 相沢 興** 高橋 和之**

Attenuation of Peak Ground Motions and Absolute Acceleration Response Spectra

by Dr. Kazuhiko Kawashima, Koh Aizawa
and
Kazuyuki Takahashi

要 旨：

公共土木施設を合理的に耐震設計すると共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特性を正しく予測することが必要とされる。本報告は最大地震動及び減衰定数5%の加速度応答スペクトルを対象とし、我が国で得られた394成分の水平成分強震記録及び119成分の上下成分強震記録を重回帰分析した結果を取りまとめたものである。観測に用いられたSMAC型強震計は短周期成分の感度が低下しているため、これに対する計器補正を加えると共に、水平成分の記録については、水平2成分の合成を施し、水平面内で最大となる最大地震動及び加速度応答スペクトルを解析対象とした。重回帰分析により、最大地震動及び加速度応答スペクトルが地震のマグニチュード及び震央距離によってどのように変化するかを3種類の地盤種別ごとに求め、これを距離減衰式として提案した。

キーワード：耐震設計，入力地震動，最大加速度，最大速度，最大変位，応答スペクトル

Synopsis：

For determining appropriate seismic effects to be considered in design of civil engineering structures, it is essential to assess intensities and frequency characteristics of severe ground motions. This report presents the result of multiple regression analysis of both 394 horizontal and 119 vertical strong motion acceleration records. Because sensitivity of the Japanese SMAC accelerograph is appreciably low at the high frequency range, instrument correction was performed on the original data. Each pair of two orthogonal horizontal components was combined in time domain to get the maximum peak ground motions in the horizontal plane. The same composition was considered to get the maximum value of absolute acceleration response spectra with damping of 5% of critical on the horizontal plane. With use of multiple regression analysis, empirical formulae of attenuation of the maximum peak ground motions (acceleration, velocity and displacement) and absolute acceleration response spectra with 5% damping ratio were proposed in terms of earthquake magnitude and epicentral distance for three subsoil conditions.

Key Words： Earthquake Resistant Design, Input Ground Motion, Peak Acceleration, Peak Velocity, Peak Displacement, Earthquake Response Spectra

*建設省土木研究所地震防災部耐震研究室室長

**建設省土木研究所地震防災部振動研究室

目 次

1. 概説	(3)
2. 解析に用いた強震記録	(3)
2.1 解析記録	(3)
2.2 加速度記録の計器補正及び変位, 速度の計算法	(14)
2.3 水平 2 成分の合成	(17)
2.4 減衰定数による応答スペクトルの補正	(18)
3. 地盤条件の種別	(18)
3.1 地盤の分類とその基本的な考え方	(18)
3.2 地盤分類法	(19)
4. 水平成分最大地震動の距離減衰式	(26)
4.1 距離減衰式の形式の検討	(26)
4.2 距離減衰式の地盤種別依存性の検討	(35)
4.3 $\tilde{a}_{\max}$, $\tilde{v}_{\max}$, $\tilde{d}_{\max}$ の距離減衰式の提案	(36)
4.4 提案する距離減衰式の特性及び推定式まわりのばらつき	(40)
5. 上下成分最大地震動の距離減衰式	(46)
5.1 上下成分最大地震動の距離減衰式	(46)
5.2 提案する距離減衰式の特性及び推定式まわりのばらつき	(49)
5.3 水平成分最大地震動と上下成分最大地震動の距離減衰特性の比較	(51)
6. 水平成分加速度応答スペクトルの距離減衰式	(56)
6.1 距離減衰式の形式の検討	(56)
6.2 距離減衰式の地盤種別依存性の検討	(61)
6.3 距離減衰式の固有周期依存性の検討	(63)
6.4 $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の提案	(64)
6.5 提案する距離減衰式の特性及び推定式まわりのばらつき	(68)
7. 上下成分加速度応答スペクトルの距離減衰式	(74)
7.1 上下成分加速度応答スペクトルの距離減衰式	(74)
7.2 提案する距離減衰式の特性及び推定式まわりのばらつき	(78)
7.3 水平成分と上下成分の加速度応答スペクトルの距離減衰特性の比較	(78)
8. 既往の研究成果との比較	(85)
8.1 水平成分最大地震動及び加速度応答スペクトル	(85)
8.1.1 水平成分最大加速度の予測式	(85)
8.1.2 水平成分最大速度の予測式	(89)
8.1.3 水平成分最大変位の予測式	(89)
8.1.4 水平成分加速度応答スペクトルの予測式	(89)
8.2 上下成分最大地震動及び加速度応答スペクトル	(96)
9. 結語	(100)
9.1 本報告の結論	(100)
9.2 将来への展望	(103)
謝辞	(104)
参考文献	(104)

1. 概 説

公共土木施設を合理的に耐震設計すると共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を正しく予測することが基本条件として必要とされる。地震動とは、地殻の破壊によって発生した振動が地盤を伝播することにより、地盤に生じる振動である。地殻の破壊に伴う振動（震源域における振動）は、極めて複雑なメカニズムによって引き起こされる現象であり、これに震源域から当該着目地点までの伝播経路の特性、着目地点周辺の地形地盤条件等が複雑に影響し合うため、現状では、地震動の特性を解析的に求めることは極めて困難である。このため、従来地震動に関する研究は、実地震による地震動の記録を集積し、これを解析することにより行われてきた。

我が国では、昭和39年の新潟地震を契機として本格的な地震動の観測（強震観測）が実施されており、土木研究所において直接、間接に記録の集積にあたる強震計の台数は、昭和59年3月末現在で約150箇所、300台となっている。強震観測により得られた記録のうち、土木研究所において現在までに約800成分の記録が数値化され、各種土木構造物の地震応答解析における入力地震動として使用されると共に、地震動の特性に対する解析が行われてきた¹⁾。この結果、地震動の特性は、地震の規模、震源からの距離、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おり、これらの特性を適切に組み入れた地震動の実用的な予測式を求めることが必要とされている。

本研究は、上記の目的のために実施したものであり、地震動の特性として最も基本的な最大地震動（最大加速度、最大速度、最大変位）及び加速度応答スペクトル（絶対加速度応答スペクトル、減衰定数5%）を取り上げ、これらに対する実用的な推定式を既往の強震記録を重回帰分析することにより求めようとするものである。ここで、最大地震動とは、時系列な地震動の波形のうち、最大値のみに着目したものであり、地震動の強度を表すためには、単独では必ずしも十分な指標ではないが、従来、耐震設計において地震動の強度を表す最も基本的な指標として、広く用いられているものである。また、加速度応答スペクトルは、1自由度の振動系に地震動を作用させた場合に系に生じる最大応答加速度として定義されたものである²⁾。1自由度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すものであり、同時に周期特性、継

続時間を含んだ地震動の強度を表す重要な指標である。

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に示すように我が国の地盤上で観測された2@197成分の水平成分加速度強震記録及び119成分の上下成分加速度強震記録である。これらは、いずれもSMAC型強震計(SMAC-B, B₂, Q, D, E₂)を用いて、建設省土木研究所及び運輸省港湾研究所において観測・数値化された記録である³⁾。水平成分記録の場合には、後述(2.3参照)するように水平2成分の合成を施すために、水平2成分のうち、いずれか一方しか記録されていないものは除外し、水平2成分が完全に得られている記録だけを対象としている。また、水平成分の記録と上下成分の記録は、同一観測地点で同一地震により得られたものを使用しているが、一般に上下成分記録の加速度振幅は、水平成分記録の加速度振幅に比較して小さいため、数値化可能な程度に加速度振幅が大きい(一般には、20~30 gal以上)記録数は、上下成分の方が水平成分よりも少ない。解析に用いた上下成分の記録数が水平成分の記録数よりも少ないのはこのためである。なお、表-2・1中には記録名及び地震Noが示されているが、これらは土木研究所強震記録総合検索システムにおいて、記録の登録(記録地点及び当該地点における何番目の記録であるか等の情報を与える)及びこれらが得られた地震に関する情報(発生年月日時分、マグニチュード、震央位置等)を与えるために独自に定めたものである¹⁾。

記録が得られた地震は、表-2・2に示すとおりであり、昭和38年3月27日から昭和55年6月29日の間に生じたマグニチュード5以上の浅発地震(震源深さ60 km以浅)である。水平成分記録は合計88回の地震により、また、上下成分記録は合計57回の地震により、それぞれ、得られたものである。ここで、解析対象記録として浅発地震による記録を選んだのは、このタイプの地震が一番多いことと、過去の土木構造物の地震被害はすべて浅発地震によっていることを考慮したためである。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48年6月17日の根室半島沖地震($M=$

土 木 研 究 所 報 告

表-2・1(1) 解析に用いた強震記録

No	観 測 所 名	記 録 名	水平成分記録	上下成分記録	地震No	地 震 名	地 震 発 生 年 月 日 時 分	M	深さ (km)	震央 距離 (km)
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	1973.19.30.15:18	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
		907-GR-39	○	○	70008	〃	1970.02.15.13:01	5.1	50	59.2
		907-GR-60	○	○	71038	〃	1971.09.08.16:25	5.5	40	59.9
		907-GR-83	○	○	74015	茨城県南西部	1974.08.04.03:16	5.8	50	145.4
		907-GR-94	○	○	75015	福島県沖	1975.08.15.03:09	5.5	50	19.7

最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式

表-2・1(2) 解析に用いた強震記録

No	観測所名	記録名	水平成分記録	上下成分記録	地震No	地震名	地震発生年月日時分	M	深さ(km)	震央距離(km)
10	平大橋	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
		306-GR-1	○	○	68026	日向灘	1968.04.01.09:42	7.5	30	341.3
12	妙見橋	306-GR-7	○	○	78008	島根県中部	1978.06.04.05:04	6.1	0	29.8
		308-GR-2	○	○	68026	日向灘	1968.04.01.09:42	7.5	30	103.3
13	板島橋	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
		1305-GR-1	○	—	68036	東北東方沖	1968.05.16.09:49	7.9	0	155.1
14	幌満橋	1305-GR-3	○	○	68038	青森県東方沖	1968.05.16.19:39	7.5	40	74.0
		104-GR-9	○	○	68057	埼玉県中部	1968.07.01.19:45	6.1	50	29.9
15	新利根川橋	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
		106-GR-9	○	○	68057	埼玉県中部	1968.07.01.19:45	6.1	50	38.4
16	草加高架橋	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
		310-GR-15	○	○	68057	埼玉県中部	1968.07.01.19:45	6.1	50	48.7
17	平大橋	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
		319-GR-3	○	○	68057	埼玉県中部	1968.07.01.19:45	6.1	50	136.7
18	四徳大橋	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
		501-GR-29	○	○	68057	埼玉県中部	1968.07.01.19:45	6.1	50	82.3
19	東京湾(富津岬)	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
		902-GR-25	○	○	68057	埼玉県中部	1968.07.01.19:45	6.1	50	41.6
20	西新井橋	902-GR-38	○	○	74015	茨城県南西部	1974.08.04.03:16	5.8	50	31.4
		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	〃	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
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

土 木 研 究 所 報 告

表-2・1(3) 解析に用いた強震記録

№	観 測 所 名	記 録 名	水平成分記録	上下成分記録	地震№	地 震 名	地 震 発 生 年 月 日 時 分	M	深さ (km)	震央 距離 (km)
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	404-GR-1-1	○	—	630027	越前岬沖	1963.03.27.06:34	6.9	0	127.0
		404-GR-1-3	○	○	71002	愛知県沿岸	1971.01.05.06:09	6.1	40	77.0
		404-GR-1-4	○	—	75003	愛知・岐阜県境	1975.03.14.22:56	5.3	50	24.3
39	釧路港	102-GR-1-2	○	—	68036	東北東方沖	1968.05.16.09:49	7.9	0	257.9
		102-GR-1-4	○	—	680003	根室半島南東方沖	1968.09.03.14:23	5.2	60	110.5
		102-GR-1-6	○	—	69028	北海道東部	1969.08.12.06:28	7.8	30	265.1
		102-GR-1-7	○	—	7004	北海道南部地方	1970.01.21.02:33	6.7	50	121.6
		102-GR-1-8	○	—	71034	襟裳岬沖	1971.08.02.16:25	7.0	60	201.7
		102-GR-1-9	○	○	720511	釧路沖	1972.05.11.09:45	5.8	60	61.2
		102-GR-1-10	○	○	73009	根室半島沖	1973.06.17.12:55	7.4	40	127.3
		102-GR-1-11	○	○	73013	〃	1973.06.24.11:43	7.1	30	192.4
		102-GR-1-12	○	—	740125	十勝沖	1974.01.25.04:13	6.0	40	127.3
		102-GR-1-13	○	—	740920	釧路沖	1974.09.20.09:53	5.5	50	66.7
40	小名浜港	208-GR-1-1	○	—	66009	茨城県東方沖	1966.04.03.13:43	5.8	20	92.5
		208-GR-1-2	○	—	68057	埼玉県中部	1968.07.01.19:45	6.1	50	170.4
		208-GR-1-3	○	—	72029	八丈島東方沖	1972.12.04.19:16	7.2	50	416.5
		208-GR-1-5	○	—	73014	茨城県沖	1973.07.20.17:13	5.9	40	59.7
41	大橋渡港(1)	206-GR-1-1	○	—	67004	金華山沖	1967.01.17.20:59	6.3	30	95.7
		206-GR-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)	303-GR-1-2	○	○	68057	埼玉県中部	1968.07.01.19:45	6.1	50	51.0
		303-GR-1-5	○	—	72027	茨城県南西部	1972.11.06.20:39	5.1	40	56.0
		303-GR-1-6	○	—	72029	八丈島東方沖	1972.12.04.19:16	7.2	50	293.2
		303-GR-1-8	○	—	74015	茨城県南西部	1974.08.04.03:16	5.8	50	51.7
		303-GR-1-9	○	—	75002	千葉県北部	1975.02.08.01:41	5.4	60	44.9
43	鹿島港(1)	301-GR-1-2	○	—	68057	埼玉県中部	1968.07.01.19:45	6.1	50	113.4
		301-GR-1-3	○	—	69017	鹿島灘	1969.05.13.23:19	5.2	50	60.6
		301-GR-1-5	○	○	71025	茨城県沖	1971.06.13.13:06	5.3	40	42.5
		301-GR-1-6	○	○	71040	千葉県北部	1971.10.11.19:16	5.2	40	13.0
44	高知港	602-GR-1-1	○	○	68026	日向灘	1968.04.01.09:42	7.5	30	167.4
		602-GR-1-2	○	—	68066	愛媛県西部沿岸	1968.08.06.01:17	6.6	40	112.5
		602-GR-1-3	○	—	68107	高知県東部	1968.12.11.20:45	5.6	50	49.2

表-2・1(4) 解析に用いた強震記録

No	観測所名	記録名	水平成分記録	上下成分記録	地震No	地震名	地震発生年月日時分	M	深さ(km)	震央距離(km)
45	細島港	702-GR-1-1	○	—	68026	日向灘	1968.04.01.09:42	7.5	30	82.2
		702-GR-1-2	○	○	68066	愛媛県西部沿岸	1968.08.06.01:17	6.6	40	118.2
		702-GR-1-3	○	○	69015	日向堤	1969.04.21.16:19	6.5	10	51.4
		702-GR-1-4	○	○	70021	宮城県沖	1970.07.26.07:41	6.7	10	51.9
		702-GR-1-5	○	—	70023	〃	1970.07.26.16:10	6.1	10	52.4
		702-GR-1-6	○	—	720622	〃	1972.06.22.00:29	5.4	10	72.8
		702-GR-1-7	○	—	740131	〃	1974.01.31.16:04	5.7	20	80.0
		702-GR-1-8	○	—	740627	〃	1974.06.27.13:49	5.3	20	45.8
46	室蘭港	105-GR-1-2	○	○	68038	青森県東方沖	1968.05.16.19:39	7.5	40	184.0
		105-GR-1-4	○	—	70004	北海道南部地方	1970.01.21.02:33	6.7	50	177.2
		105-GR-1-5	○	—	71034	襟裳岬沖	1971.08.02.16:25	7.0	60	255.4
		105-GR-1-7	○	—	73009	根室半島	1973.06.17.12:55	7.4	40	412.8
		105-GR-1-9	○	—	751030	浦河沖	1975.10.30.10:41	6.0	60	154.1
47	青森港	201-GR-1-2	○	○	68038	青森県東方沖	1968.05.16.19:39	7.5	40	187.1
		201-GR-1-3	○	—	68050	岩手県沖	1968.06.12.22:42	7.2	0	254.0
48	八戸港	202-GR-1-2	○	—	68050	〃	〃	7.2	0	182.7
		202-GR-1-4	○	—	690621	青森県東方沖	1969.06.21.00:38	5.6	40	73.1
		202-GR-1-5	○	—	7004	北海道南部地方	1970.01.21.02:33	6.7	50	246.1
		202-GR-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)	305-GR-2-1	○	—	68057	埼玉県中部	1968.07.01.19:45	6.1	50	62.0
		305-GR-2-5	○	—	71029	山梨県東部	1971.07.23.07:07	5.3	10	63.7
		305-GR-2-7	○	—	72029	八丈島東方沖	1972.12.04.19:16	7.2	50	282.7
		305-GR-2-9	○	—	74015	茨城県南西部	1974.08.04.03:16	5.8	50	66.3
50	神戸港	504-GR-1-2	○	—	69032	岐阜県中部	1969.09.09.14:15	6.6	0	207.5
51	横浜港(1)	305-GR-1-3	○	—	71029	山梨県東部	1971.07.23.07:07	5.3	10	61.0
		305-GR-1-5	○	—	74012	伊豆半島南部沿岸近海	1974.05.09.08:33	6.9	10	124.9
52	衣浦港	403-GR-1-1	○	—	69032	岐阜県中部	1969.09.09.14:15	6.6	0	97.3
		403-GR-1-2	○	○	71002	愛知県沿岸沖	1971.01.05.06:09	6.1	40	55.9
		403-GR-1-4	○	—	75003	愛知・岐阜県境	1975.03.14.22:56	5.3	50	45.1
53	鹿兒島港	704-GR-1-1	○	—	690918	屋久島近海	1969.09.18.03:41	5.9	0	129.4
		704-GR-1-2	○	—	70021	宮崎県沖	1970.07.26.07:41	6.7	10	149.6
54	大船渡港(2)	206-GR-2-1	○	○	70026	宮城県沖	1970.09.14.18:45	6.2	40	64.6
		206-GR-2-2	○	○	73028	〃	1973.11.19.22:02	6.4	50	39.6
		206-GR-2-3	○	○	78012	〃	1978.06.12.17:14	7.4	40	104.5
55	酒田港	203-GR-2-1	○	—	70031	秋田県南東部	1970.10.16.14:26	6.2	0	84.6
		203-GR-2-2	○	—	72014	山形県中部	1972.08.20.19:09	5.3	20	39.9
56	四日市港	405-GR-2-1	○	○	71002	愛知県沿岸沖	1971.01.05.06:09	6.1	40	74.3
		405-GR-2-2	○	—	75003	愛知・岐阜県境	1975.03.14.22:56	5.3	50	42.9
57	千葉港	302-GR-1-2	○	—	73024	銚子近海	1973.09.30.15:18	5.9	50	51.8
		302-GR-1-3	○	—	75002	千葉県北部	1975.02.08.01:41	5.4	60	23.3
58	田子の浦港	401-GR-1-2	○	—	74012	伊豆半島南部沿岸近海	1974.05.09.08:33	6.9	10	63.9
59	久里浜港	306-GR-1-2	○	—	72029	八丈島東方沖	1972.12.04.19:16	7.2	50	257.6
60	塩釜港	207-GR-2-1	○	—	72019	宮城県沖	1972.09.25.18:27	5.5	50	88.4
		207-GR-2-3	○	○	73028	〃	1973.11.19.22:02	6.4	50	113.7
		207-GR-2-4	○	—	740505	福島県沖	1974.05.05.23:19	5.5	40	94.6
		207-GR-2-5	○	—	75005	〃	1975.04.08.15:27	5.9	30	102.9

表-2・1(5) 解析に用いた強震記録

No	観測所名	記録名	水平成分記録	上下成分記録	地震No	地震名	地震発生年月日時分	M	深さ(km)	震央距離(km)
61	苫小牧港	104-GR-1-1	○	—	73009	根室半島沖	1973.06.17.12:55	7.4	40	357.3
62	鹿島港(2)	301-GR-2-1	○	—	73014	茨城県沖	1973.07.20.17:13	5.9	40	62.4
		301-GR-2-2	○	○	73024	銚子近海	1973.09.30.15:18	5.9	50	30.8
		301-GR-2-3	○	—	73025	〃	1973.10.01.23:16	5.8	60	35.6
		301-GR-2-4	○	○	74006	千葉県東方沖	1974.03.03.13:50	6.1	60	43.4
		301-GR-2-5	○	○	74014	茨城県沖	1974.07.08.14:45	6.3	40	70.9
		301-GR-2-6	○	○	74022	銚子沖	1974.11.16.08:32	6.1	40	53.6
63	大分港	701-GR-1-1	○	—	75001	熊本県北東	1975.01.23.23:19	6.1	0	60.9
		701-GR-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	1978.01.04.12:24	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
合計			197 記録	119 記録						

表-2・2(1) 解析に考慮した地震

No	地震No	地震名	年月日時分	M	深さ(km)	震央距離(km)	記録名	観測所名	水平成分記録	上下成分記録
1	630327	越前岬沖	1963.03.27.06:34	6.9	0	127.0	404-GR-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	208-GR-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	1967.07.17.20:59	6.3	30	70.6	302-GR-3	開北橋	○	—
						144.5	304-GR-6	伊達橋	○	○
						95.7	206-GR-1-1	大船渡港(1)	○	—
8	67057	茨城県沖	1967.11.19.21:07	6.0	50	140.6	101-GR-5	新葛飾橋	○	○
9	68012	宮崎県南西部	1968.02.21.10:45	6.1	0	40.6	205-GR-2	石瀬戸橋	○	○
10	68015	福島県沖	1968.02.26.05:00	5.4	50	84.5	907-GR-2	平大橋	○	○
11	68018	千葉県中部	1968.03.07.11:54	5.1	50	33.8	101-GR-7	新葛飾橋	○	○
12	68022	和歌山近海	1968.03.30.04:04	5.0	0	5.4	112-GR-8	紀ノ川大橋	○	○
13	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	602-GR-1-1	高知港	○	○
14	68027	〃	1968.04.01.16:13	6.3	0	82.2	702-GR-1-1	細島港	○	○
						102.8	308-GR-3	板島橋	○	○
15	68036	東北東方沖	1968.05.16.09:49	7.9	0	155.1	1305-GR-1	幌満橋	○	—
						257.9	102-GR-1-2	釧路港	○	—
16	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	105-GR-1-2	室蘭港	○	○
						187.1	201-GR-1-2	青森港	○	○
17	68050	岩手県沖	1968.06.12.22:42	7.2	0	190.9	302-GR-9	開北橋	○	—

表-2・2(2) 解析に考慮した地震

No	地震No	地 震 名	年 月 日 時 分	M	深さ (km)	震央 距離 (km)	記 録 名	観 測 所 名	水平成 分記録	上下成 分記録
18	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 井 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	208-GR-1-2	小 名 浜 港	○	—
						51.0	303-GR-1-2	東 京 湾 (品 川)	○	○
						113.4	301-GR-1-2	鹿 島 港 (1)	○	—
19	68050	岩手県沖	1968.06.12.22:42	7.2	0	62.0	305-GR-2-1	横 浜 港 (2)	○	—
						254.0	201-GR-1-3	青 森 港	○	—
20	68062	宮城県東方沖	1968.07.05.20:28	6.4	50	182.7	202-GR-1-2	八 戸 港	○	—
						78.7	302-GR-11	開 北 橋	○	○
						162.6	304-GR-14	伊 達 橋	○	○
21	68066	愛媛県西部沿岸	1968.08.06.01:17	6.6	40	81.9	206-GR-1-3	大 船 渡 港 (1)	○	—
						10.0	308-GR-4	板 島 港	○	—
						118.2	702-GR-1-2	細 島 港	○	—
22	68070	〃	1968.08.06.13:21	5.3	40	112.5	602-GR-1-2	高 知 港	○	—
23	680903	根室半島南東方沖	1968.09.03.14:23	5.2	60	82.4	313-GR-2	石 榎 橋	○	○
24	68107	高知県東部	1968.12.11.20:45	5.6	50	110.5	102-GR-1-4	釧 路 港	○	—
25	69015	日向灘	1969.04.21.16:19	6.5	10	49.2	602-GR-1-3	高 知 港	○	—
26	69017	鹿 島 灘	1969.05.13.23:19	5.2	50	51.4	702-GR-1-3	細 島 港	○	○
27	690621	青森県東方沖	1969.06.21.00:38	5.6	40	60.6	301-GR-1-3	鹿 島 港 (1)	○	—
28	69023	福島県沖	1969.06.23.14:57	5.2	50	73.1	202-GR-1-4	八 戸 港	○	—
29	69024	〃	1969.07.23.22:14	5.5	40	72.3	907-GR-31	平 大 橋	○	○
30	69028	北海道東部	1969.08.12.06:28	7.8	30	76.9	907-GR-32	〃	○	○
31	69032	岐阜県中部	1969.09.09.14:15	6.6	0	265.1	102-GR-1-6	釧 路 港	○	—
						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	○	○
32	690918	屋久島近海	1969.09.18.03:41	5.9	0	207.5	504-GR-1-2	神 戸 港	○	—
						97.3	403-GR-1-1	衣 浦 港	○	—
						129.4	704-GR-1-1	鹿 児 島 港	○	—
33	70004	北海道南部地方	1970.01.21.02:33	6.7	50	121.6	102-GR-1-7	釧 路 港	○	—
						177.2	105-GR-1-4	室 蘭 港	○	—
						246.1	202-GR-1-5	八 戸 港	○	—
34	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	○	○
35	70011	松代近傍	1970.04.09.01:44	5.0	0	24.3	905-GRA-266	落 合 橋 (1)	○	—

表-2・2(3) 解析に考慮した地震

No	地震No	地震名	年月日時分	M	深さ (km)	震央 距離 (km)	記録名	観測所名	水平成分記録	上下成分記録
36	70021	宮崎県沖	1970.07.26.07:41	6.7	10	51.9	702-GR-1-4	細島港	○	○
						84.9	205-GR-8	石瀬戸橋	○	○
						149.6	704-GR-1-2	鹿児島港	○	—
37	70023	〃	1970.07.26.16:10	6.1	10	52.4	702-GR-1-5	細島港	○	—
38	70026	宮城県沖	1970.09.14.18:45	6.2	40	92.6	302-GR-22	開北橋	○	○
						64.6	206-GR-2-1	大船渡港(2)	○	○
39	70031	秋田県南東部	1970.10.16.14:26	6.2	0	153.3	304-GR-33	伊達橋	○	○
						23.7	301-GR-7	雄平橋	○	○
						84.6	203-GR-1-1	酒田港	○	—
40	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	404-GR-1-3	名古屋港	○	○
						55.9	403-GR-1-2	衣浦港	○	○
						74.3	405-GR-2-1	四日市港	○	○
41	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	200-GR-15	魚沼橋	○	○
42	71018	福島県沖	1971.03.22.19:40	5.4	10	147.9	304-GR-26	伊達橋	○	○
43	71021	宮城県沖	1971.04.05.03:39	6.0	50	157.8	304-GR-28	〃	○	○
44	71025	茨城県沖	1971.06.13.13:06	5.3	40	42.5	301-GR-1-5	鹿島港(1)	○	○
45	71029	山梨県東部	1971.07.23.07:07	5.3	10	15.0	1006-GR-3	鶴川橋	○	○
						63.7	305-GR-2-5	横浜港(2)	○	—
						61.0	305-GR-1-3	横浜港(1)	○	—
46	71034	襟裳岬沖	1971.08.02.16:25	7.0	60	201.7	102-GR-1-8	釧路港	○	—
						255.4	105-GR-1-5	室蘭港	○	—
47	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	○	○
48	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	301-GR-1-6	鹿島港(1)	○	○
49	72001	〃	1972.01.04.09:20	5.0	40	11.3	906-GR-13	鹿島試験所	○	—
50	720511	釧路沖	1972.05.11.09:45	5.8	60	61.2	102-GR-1-9	釧路港	○	○
51	720622	宮崎県沖	1972.06.22.00:59	5.4	10	72.8	702-GR-1-6	細島港	○	—
52	72014	山形県中部	1972.08.20.19:09	5.3	20	39.9	203-GR-1-2	酒田港	○	—
53	72019	宮城県沖	1972.09.25.18:27	5.5	50	147.0	304-GR-32	伊達橋	○	○
						88.4	207-GR-2-1	塩釜港	○	—
54	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	303-GR-1-5	東京湾(品川)	○	—
55	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	平井大橋	○	○
						262.0	501-GR-74	東京湾(富津岬)	○	○
						258.8	503-GR-17	東京湾(観音崎)	○	○
						416.5	208-GR-1-3	小名浜港	○	—
						293.2	303-GR-1-6	東京港(品川)	○	—
						282.7	305-GR-2-7	横浜港(京浜)	○	—

表-2・2(4) 解析に考慮した地震

No	地震No	地震名	年月日時分	M	深さ (km)	震央 距離 (km)	記録名	観測所名	水平成 分記録	上下成 分記録
55	72029	八丈島東方沖	1972.12.04.19:16	7.2	50	257.6	306-GR-1-2	久里浜港	○	—
56	740505	福島県沖	1974.05.05.23:19	5.5	40	94.6	207-GR-2-4	塩釜港	○	—
57	73009	根室半島沖	1973.06.17.12:55	7.4	40	412.8	105-GR-1-7	室蘭港	○	—
						357.3	104-GR-1-1	苫小牧港	○	—
						127.3	102-GR-1-10	釧路港	○	○
58	73013	〃	1973.06.24.11:43	7.1	30	192.4	102-GR-1-11	〃	○	○
59	73014	茨城県沖	1973.07.20.17:13	5.9	40	59.7	208-GR-1-5	小名浜港	○	—
60	73014	〃	1973.07.20.17:13	5.9	40	62.4	301-GR-2-1	鹿島港(2)	○	—
61	73024	銚子近海	1973.09.30.15:18	5.9	50	26.9	906-GR-17	鹿島試験所	○	○
						51.8	302-GR-1-2	千葉港	○	—
						30.8	301-GR-2-2	鹿島港(2)	○	○
62	73025	〃	1973.10.01.23:16	5.8	60	33.3	906-GR-18	鹿島試験所	○	○
						35.6	301-GR-2-3	鹿島港(2)	○	—
63	73028	宮城県沖	1973.11.19.22:02	6.4	50	39.6	206-GR-2-2	大船渡港(2)	○	○
						113.7	207-GR-2-3	塩釜港	○	○
64	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	○	○
65	73030	和歌山県中部	1973.11.25.18:19	5.8	60	42.0	112-GR-26	紀ノ川大橋	○	○
66	740125	十勝沖	1974.01.25.04:13	6.0	40	127.3	102-GR-1-12	釧路港	○	—
67	740131	宮城県沖	1974.01.31.16:04	5.7	20	80.0	702-GR-1-7	細島港	○	—
68	74006	千葉費東方沖	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	301-GR-2-4	鹿島港(2)	○	○
69	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	305-GR-1-5	横浜港(1)	○	—
						63.6	401-GR-1-2	田子の浦港	○	—
70	740627	宮城県沖	1974.06.27.13:49	5.3	20	45.8	702-GR-1-8	細島港	○	—
71	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	301-GR-2-5	鹿島港(2)	○	○
72	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(2)	○	○
						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	平井大橋	○	○
						73.9	1401-GR-6	利根川河口堰	○	○
						64.5	206-GR-4	小見川大橋	○	○
						51.7	303-GR-1-8	東京湾(品川)	○	—
						31.4	902-GR-38	西新井橋	○	○
73	74016	岩手県北部沿岸	1974.09.04.18:20	5.6	40	66.3	305-GR-2-9	横浜港(2)	○	—
						46.2	105-GR-8	真崎大橋	○	○
74	740920	釧路沖	1974.09.20.09:53	5.5	50	49.8	202-GR-1-8	八戸港	○	○
						66.7	102-GR-1-13	釧路港	○	—

表-2・2(5) 解析に考慮した地震

No	地震No	地震名	年月日時分	M	深さ (km)	震央 距離 (km)	記録名	観測所名	水平成分記録	上下成分記録
75	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	301-GR-2-6	鹿島港(2)	○	○
76	75001	熊本県北東	1975.01.23.23:19	6.1	0	60.9	701-GR-1-1	大分港	○	—
						44.6	206-GR-8	小見川大橋	○	○
77	75002	千葉北部	1975.02.08.01:41	5.4	60	20.2	901-GRB-5	土研千葉支所(2)	○	○
						44.9	303-GR-1-9	東京港(品川)	○	—
						23.3	302-GR-1-3	千葉港	○	—
						33.8	204-GR-28	新八幡橋	○	○
78	75003	愛知・岐阜県境	1975.03.14.22:56	5.3	50	45.1	403-GR-1-4	衣浦港	○	—
						42.9	405-GR-2-2	四日市港	○	—
						24.3	404-GR-1-4	名古屋港	○	—
						102.9	202-GR-2-5	塩釜港	○	—
79	75005	福島県沖	1975.04.08.15:17	5.9	30	37.8	701-GR-1-2	大分港	○	○
80	75008	大分県中部	1975.04.21.02:35	6.4	0	19.7	907-GR-94	平大橋	○	○
81	75015	福島県沖	1975.08.15.03:09	5.5	50	154.1	105-GR-1-9	室蘭港	○	—
82	751030	浦河沖	1975.10.30.10:41	6.0	60	40.5	1005-GR-2	姥久保橋	○	○
83	76004	山梨県東部	1976.06.16.07:36	5.5	20	16.9	1006-GR-5	鶴川橋	○	○
						70.3	503-GR-21	東京湾(観音崎)	○	○
84	78001	大島近海	1978.01.14.12:24	7.0	0	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	○	○
						44.7	SHIROBORI	白堀変電所	○	○
						84.2	302-GR-34	開北橋	○	○
85	78002	宮城県沖	1978.02.20.13:37	6.7	50	219.9	907-GR-106	平大橋	○	○
86	78008	島根県中部	1978.06.04.05:04	6.1	0	29.8	306-GR-7	妙見橋	○	○
87	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	○	○
						104.5	206-GR-3	大船渡港(2)	○	○
88	80008	伊豆半島付近	1980.06.29.16:20	6.7	10	61.3	1002-GR-5	東名・富士川橋	○	○

7.4), 昭和44年8月12日の北海道東部の地震($M=7.8$), 昭和47年12月4日の八丈島東方沖地震($M=7.2$), 昭和53年6月12日の宮城県沖地震($M=7.4$)等が, これに続く規模の大きい地震である。

記録が得られた地震のマグニチュード M 及び震央距離 Δ の関係を示すと図-2・1 のようになる。これによれば, 全体としてマグニチュード M の大きい地震による記録は震央距離 Δ も長くなっており, 耐震設計上重要ないわゆる大規模地震による近距離の記録は, 今回解析した中にはそれ程多く含まれていない。これは, このような条件下での記録が前述したような短期

間の強震観測により得られなかったためである。

図-2・2 は, 対象記録をマグニチュード, 震央距離, 震源深さ別に分類したものである。水平成分の場合を例にとれば, 197 記録中 57 記録(全体の 29%) 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 (全体の 20%) である。

各観測地点の地盤種別は, 道路橋示方書耐震設計編の地盤種別によって 3 種類に分類した⁵⁾。ただし, 道路橋示方書耐震設計編では地盤種別を 4 区分としているが, ここでは, 道路橋示方書耐震設計編による 2 種地

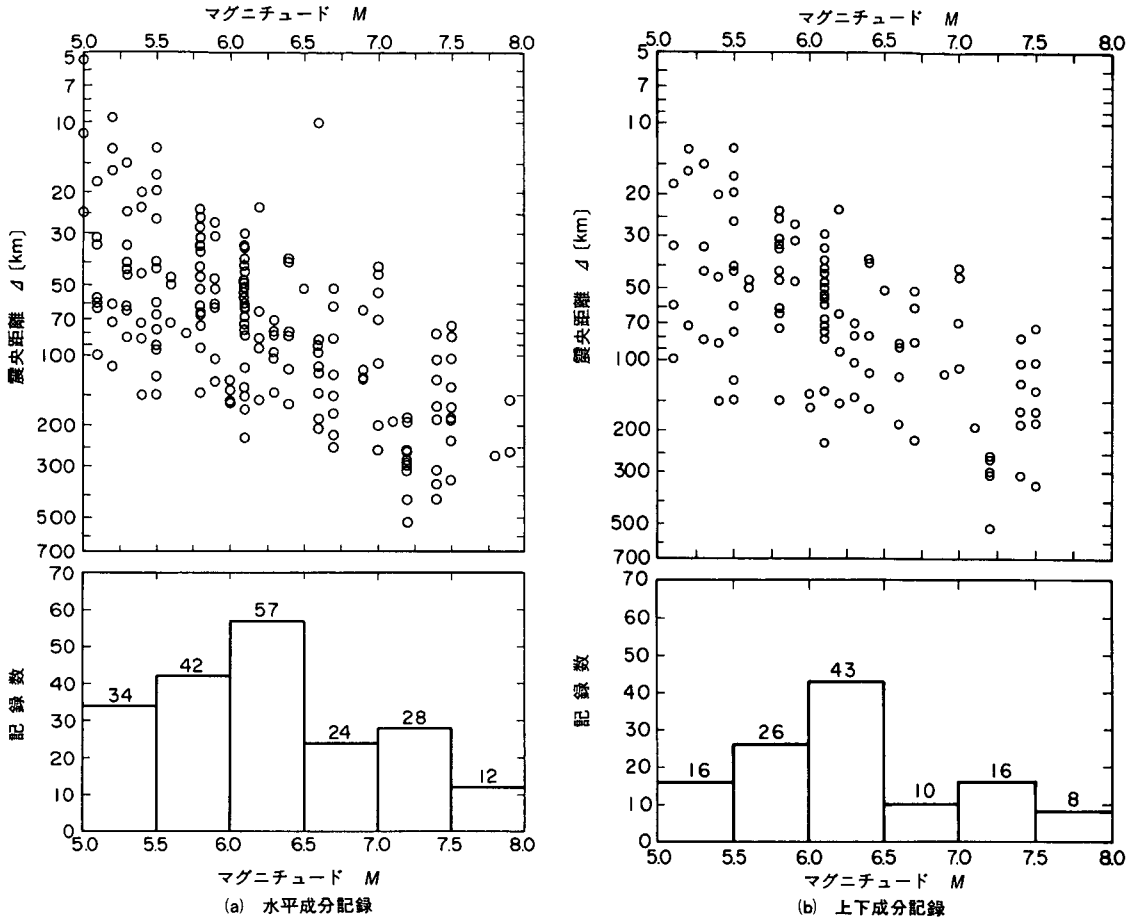


図-2.1 解析対象記録のマグニチュード及び震央距離別分類

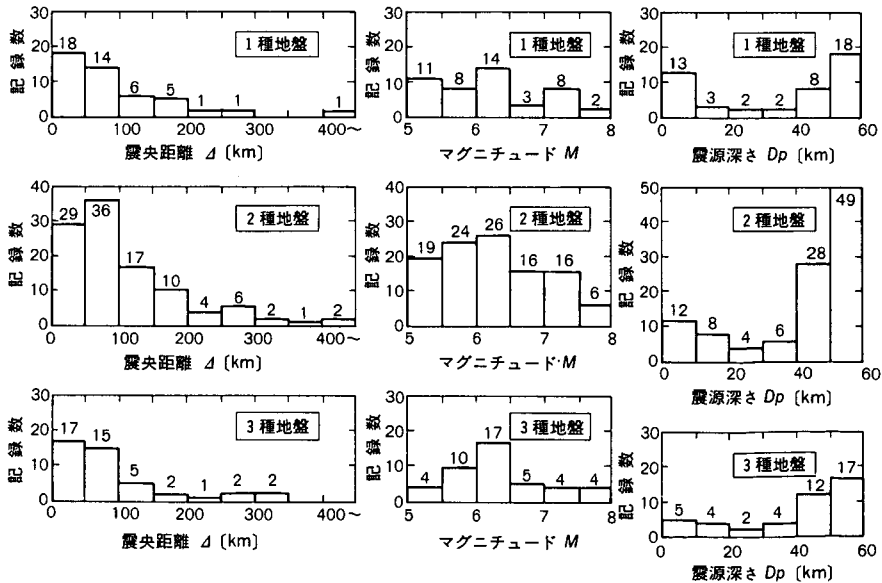


図-2.2(1) 解析対象記録のマグニチュード、震央距離及び震源深さ別の分類 (水平成分)

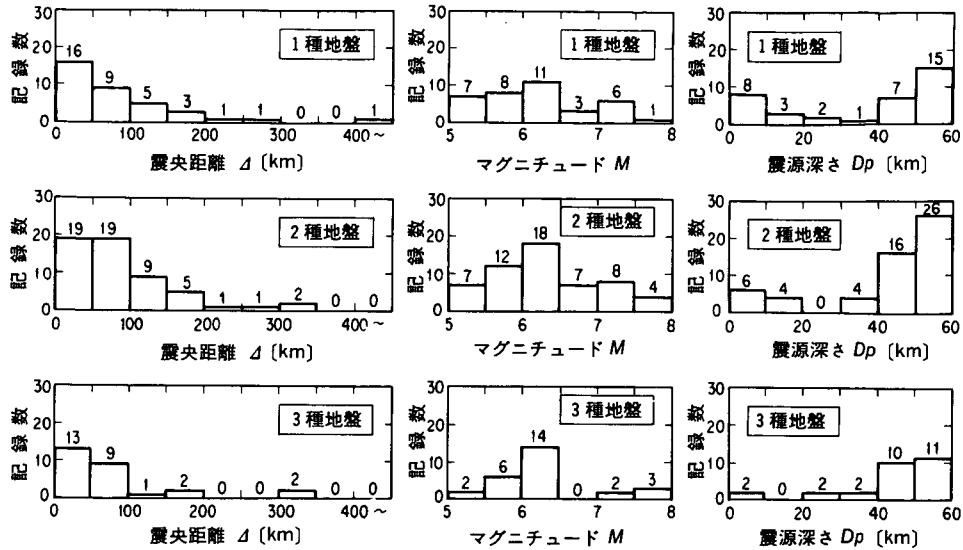


図-2.2(2) 解析対象記録のマグニチュード、震央距離及び震源深さ別の分類 (上下成分)

盤及び3種地盤を1つにまとめ、1種地盤(道路橋示方書耐震設計編による1種地盤)、2種地盤(同、2種地盤+3種地盤)、3種地盤(同、4種地盤)の3区分としている。このようにした理由及び地盤種別法については3章に示す。なお、このように地盤種別を3種に区分すると、水平成分記録の場合には地盤種別が1種、2種、3種となる観測点数は、それぞれ、19, 31, 17地点(合計67地点)となり、1種地盤、2種地盤、3種地盤ごとの記録数は、それぞれ、46, 107, 44記録(合計197記録)となる。同様に、上下成分記録の場合には、地盤種別が1種、2種、3種となる観測点の数は、それぞれ、17, 24, 12地点(合計53地点)となり、また、1種地盤、2種地盤、3種地盤ごとの記録数は、それぞれ、36, 56, 27記録(合計119記録)となる。

最大地震動(最大加速度、最大速度、最大変位)及び代表的な固有周期($T=0.2$ 秒、 0.5 秒、 2 秒)に対する加速度応答スペクトル値の頻度分布を示すと、それぞれ図-2.3、図-2.4のようになる。ここで、水平成分に対しては、後述(2.3節参照)するように、水平2成分の合成を加えた値を示している。これによれば、水平成分の最大加速度の場合を例にとれば、最大加速度が100 gal以上の記録数は57であり、全体(197記録)の29%である。さらに、最大加速度が200 gal以上となると記録数は13となり、全体の7%となっている。

2.2 加速度記録の計器補正及び変位、速度の計算法

解析記録は数値化精度を考慮して、以下の方法によ

りSMAC型強震計の短周期計器補正を加えると共に、速度及び変位を計算した⁶⁾。すなわち、いま強震計による加速度記録を $a_0(t)$ とすれば、このフーリエ変換 $F_0(f)$ は次式により求められる^{7,8)}。

$$F_0(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a_0(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

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。

$$\left. \begin{aligned} a(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{2\pi i f t} df \\ v(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(f)}{2\pi i f} e^{2\pi i f t} df \\ d(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(f)}{-4\pi^2 f^2} e^{2\pi i f t} df \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで

$$F(f) = F_0(f) \cdot F_c(f) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$F_c(f) = \begin{cases} 0 & \dots\dots\dots 0 \leq f < f_{lu} \\ \frac{f - f_{lu}}{f_{lu} - f_{ul}} \cdot \frac{\exp(i\phi(f))}{R(f)} & \dots\dots\dots f_{lu} \leq f \leq f_{ul} \\ \frac{\exp(i\phi(f))}{R(f)} & \dots\dots\dots f_{lu} \leq f \leq f_{ul} \\ \frac{f_{uu} - f}{f_{uu} - f_{ul}} \cdot \frac{\exp(i\phi(f))}{R(f)} & \dots\dots\dots f_{ul} \leq f \leq f_{uu} \\ 0 & \dots\dots\dots f > f_{uu} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、 f_{lu} 及び f_{ul} は、それぞれ低振動数側及び高

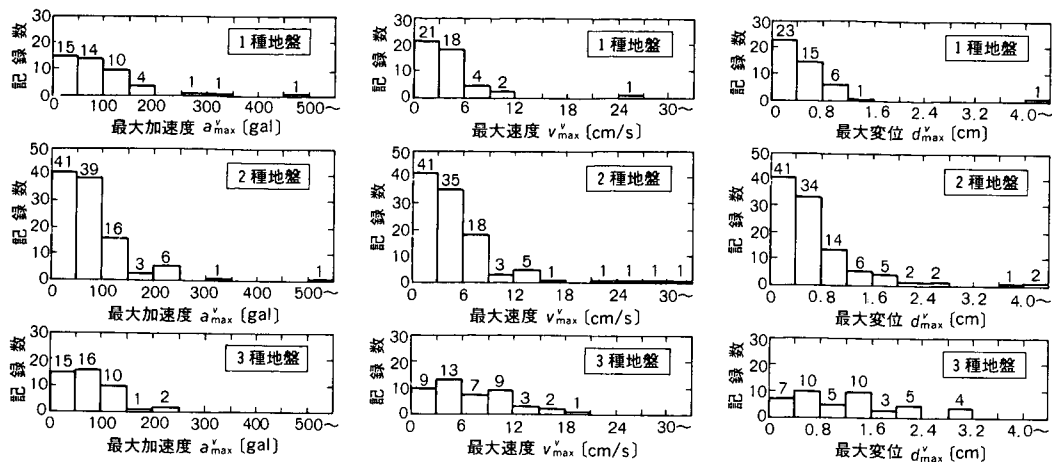


図-2・3(1) 解析対象記録(水平成分記録)の最大地震動の頻度分布

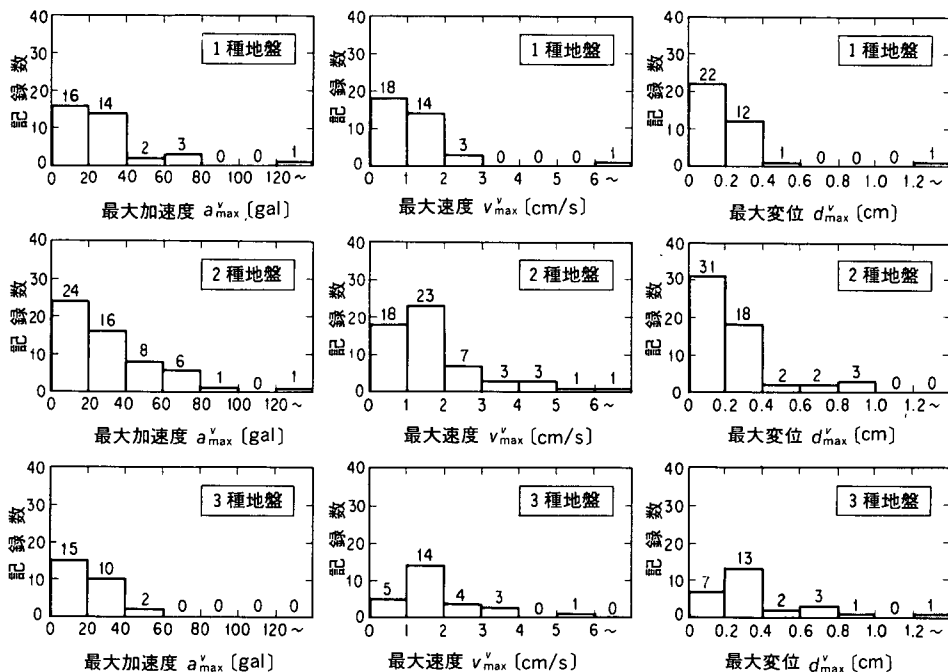


図-2・3(2) 解析対象記録(上下成分記録)の最大地震動の頻度分布

振動数側の遮断振動数であり、 f_u 及び f_{uu} は、それぞれ f_{iu} 及び f_{ui} に対応する補正フィルタ倍率が 0 となる振動数である⁹⁾。また、振幅及び位相の補正関数 $R(f)$ 及び $\phi(f)$ は、SMAC 型強震計に用いられている空気減衰器の空気が、ばねとして作用する効果を考慮して次式とした^{10),11)}。

$$\left. \begin{aligned} R(f) &= \frac{1 + (U/N)^2}{\sqrt{(1 - U^2)^2 + \{(1 - U^2)U/N + 2hU\}^2}} \\ \phi(f) &= \tan^{-1} \left[\frac{2hU}{(1 - U^2)\{1 + (U/N)^2\} - 2hU \cdot U/N} \right] \end{aligned} \right\}$$

..... (2・5)

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。

補正加速度及び変位の計算に際しては、遮断振動数 f_{ui} 及び f_{iu} 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。記録の利用上は対象としている地震動の振動範囲を広くするためには、 f_{ui} はできるだけ大きく、反対に f_{iu} はできるだけ小さくすることが望ましいが、実際の計算に際しては計算の安定

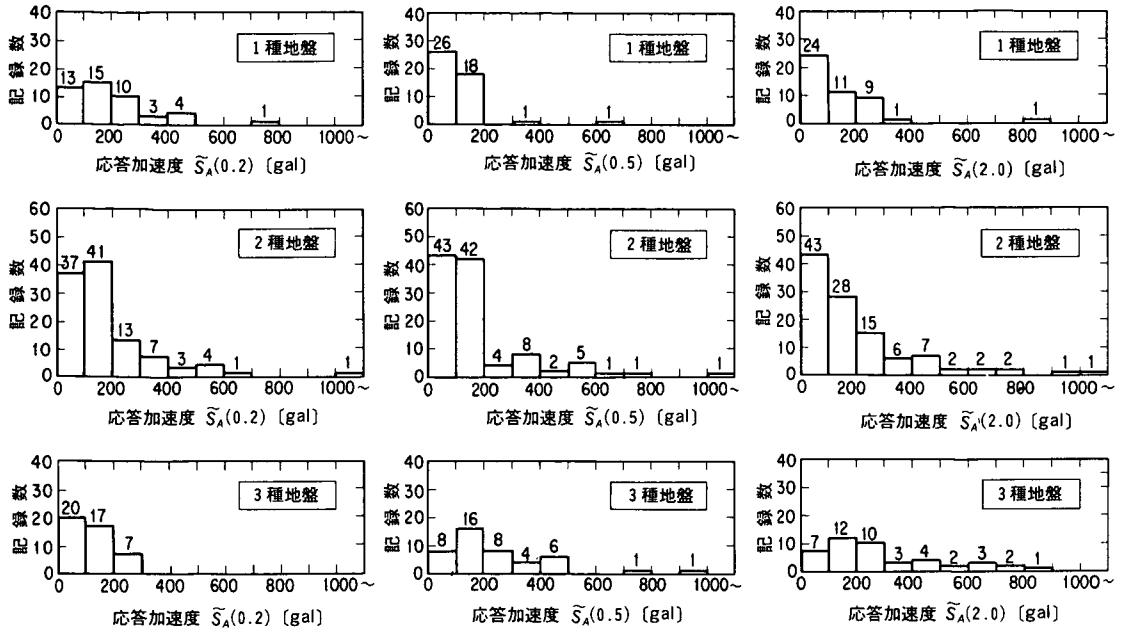


図-2・4(1) 水平成分加速度応答スペクトルの頻度分布

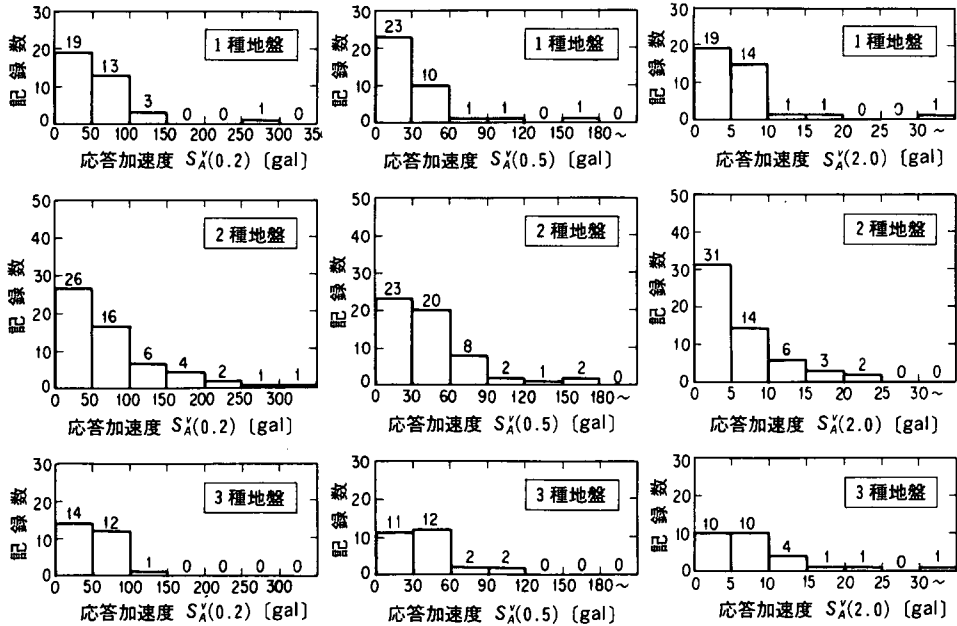


図-2・4(2) 上下成分加速度応答スペクトルの頻度分布

上これがある有限な値で切らなければならない。別途実施した検討結果によると、数値化された強震記録の精度は大部分数値化の精度に支配され、また、数値化の精度は記録に含まれる振動数成分によって変化する^{12),13)}。従って、記録の精度を一定にするとすれば個々の

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、ここでは平均的な強震記録に対する精度の検討結果を参考に、 $f_{ul}=12\text{ Hz}$ 、 $f_{lu}=1/3\text{ Hz}$ とすることにした。従って、本解析で扱うのは $1/3\sim 12$

表-2.3 式(2.5)の定数 f_n 及び f_a

種 別	f_n [Hz]	f_a [Hz]	減衰定数 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			

Hz の範囲の地震動である。

以上のようにして、式(2.4)による振幅及び位相の補正関数を機種ごとに求めると図-2.5 のようになる。

2.3 水平 2 成分の合成

強震計では、図-2.6 に示すように、互いに直交する X 及び Y 軸に沿う水平 2 成分の加速度記録が得られるが、これら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、橋軸方向及び橋軸直角方向にセットされる場合が多い¹⁾) の加速度を表すに過ぎない。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。我が国では一般に、水平 2 方向の地震力を独立に構造物に作用させて耐震計算を行うため、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とすれば、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、既に報告したとおり^{14),15)}、最大加速度、最大速度及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分かっている。従って、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及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 及び 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-2.6 に示すように左回りに 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、

$$\begin{aligned} a^x(t) &= a^x(0, t) \\ a^y(t) &= a^x(\pi/2, t) \end{aligned} \quad (2.6)$$

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すことができる。

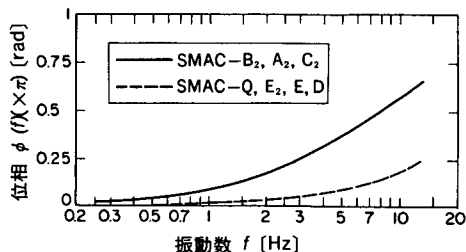
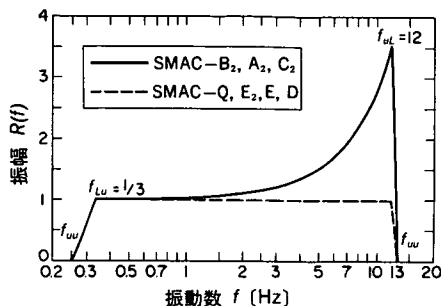


図-2.5 振幅及び位相の補正関数

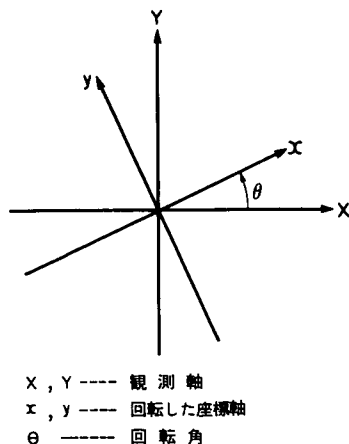


図-2.6 水平面内における座標軸の回転

$a^x(\theta, t)$ の時間軸における最大加速度を $\tilde{a}_{\max}^0$ (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 $\tilde{a}_{\max}$ とする。すなわち、

$$\tilde{a}_{\max} = \max\{\tilde{a}_{\max}^0(\theta)\}_{\text{for } \theta} \quad (2.7)$$

ここで、

$$\tilde{a}_{\max}^0(\theta) = \max\{|a^x(\theta, t)|\}_{\text{for } t} \quad (2.8)$$

ここで、 $\max\{f(z_1, z_2)\}_{\text{for } z_1}$ 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。

また、応答スペクトルについては、 $a^x(\theta, t)$ 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、

$$\tilde{S}_A(T) = \max\{\tilde{S}_A(\theta, T)\}_{\text{for } \theta} \quad \cdots \cdots (2 \cdot 9)$$

2.4 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するが、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^{16), 17), 18), 19)}。

$$S_A(T, h) = \xi_{SA}(T, h) \times S_A(T, 0.05) \quad \cdots \cdots (2 \cdot 10)$$

ここで

$S_A(T, h)$: 減衰定数 h の加速度応答スペクトル [gal]

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

$$\xi_{SA}(T, h) = \left[\frac{1.5}{40h+1} + 0.5 \right] \times \beta^{\left(\frac{1}{300h+6} - 0.8h \right)} \quad (2 \cdot 11)$$

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 ($h < 0.01$) で $\beta \gg 1$ となる場合もしくは $\beta \ll 1$ となる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・11) の $\beta^{\left(\frac{1}{300h+6} - 0.8h \right)}$ 項の影響は小さい。この場合には、式 (2・11) は次式で近似することができる。

$$\xi_{SA}(T, h) \doteq \xi_{SA}(h) = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 \quad \cdots \cdots (2 \cdot 12)$$

図-2・7 は、式 (2・12) による $\xi_{SA}(h)$ を示したものである。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分かる。

3. 地盤条件の種別

3.1 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

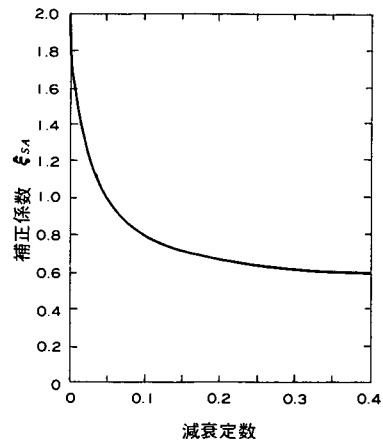


図-2・7 減衰定数 h ~ 補正係数 ξ_{SA} の関係

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 10 m 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。従って、地盤条件を表す指標としてはある程度大雑把ではあっても、どこでもおよそその結果を得られ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-3・1 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、現在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替えた現行の道路橋示方書・耐震設計編 (表-3・2 参照) においても、道路橋耐震設計指針の分類が引続き用いられている。従って、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-3.1 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 未満かつ軟弱層 ³⁾ の厚さが5 m 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_{50} が0.04~0.5mm の区間にある土層、および現地盤面から深さ3 m 以内にある粘性土層及びシルト質土層で、一軸圧縮試験又は原位置試験より推定される一軸圧縮強度が 0.2kg/cm^2 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水平成分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て、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^{20), 21), 22), 23)}。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種地盤及び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。従って、本解析における地盤種別は1, 2, 3種の3区分とした。

3.2 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分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なくない。そこで、ここでは以下に示すようにiii) の方法も併用して総合的に地盤分類を行った。

強震記録とは観測地点の地盤振動に他ならない。従って、地盤条件の違いを表層地盤内における地震動の増幅等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される^{24), 25)}。

$$M(T) = E^*(T) \cdot G_0(T) \quad \cdots \cdots (3.1)$$

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(3.1)は次のようになる。

$$M(T)_i = E^*(T)_i \cdot G_0(T) \quad \cdots \cdots (3.2)$$

従って、式(3.2)を N 回の地震に対して平均すると、

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(T)_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E^*(T)_i \right] \cdot G_0(T) \quad \cdots \cdots (3.3)$$

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²⁶⁾。従って、この場合には式(3.3)は、

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(T)_i \propto G_0(T) \quad \cdots \cdots (3.4)$$

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 $\overline{M}(T)$ 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したものであるから式(3.1)で定義した $M(T)$ を加速度応答スペクトル倍率 $\beta(T)$ によって表しても、式(3.2)~式(3.4)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(3.3)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2章に示した水平成分強震記録の β スペクトル (β_i) 及びこれを平均した値 $\bar{\beta} = 1/N \cdot \sum_{i=1}^N \beta_i$ 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

表-3.2 道路橋示方書・耐震設計編による地盤種別

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)

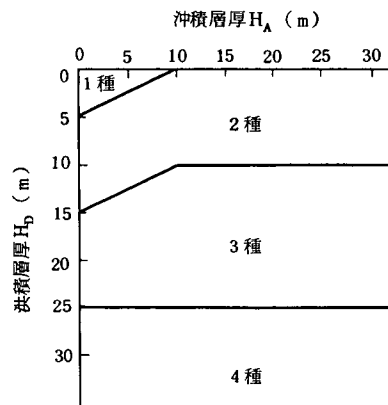
V_{si} : i 番目の地層の平均せん断弾性波速度 (m/s), 値は式 (3.6.2) によるものとする。

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

N_i : 標準貫入試験による i 番目の地層の平均 N 値

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

ここでの基盤面とは、粘性土層の場合は N 値が 25 以上、砂質土層の場合は N 値が 50 以上の地層の上面、もしくはせん断弾性波速度が 300m/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われない場合など) には、図解 3.6.1 により地盤種別分類を行ってもよい。



図解 3.6.1 沖積層厚 H_A と洪積層厚 H_D による地盤種別

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少なくない。

これにより水平成分記録の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-3・3に示すように、タイプ1からタイプ3の3つに分類することができる。各タイプの $\bar{\beta}$ スペクトルの特徴は表中に示すとおりであり、周期領域でスペクトル倍率のはっきり

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。

これらの分類を基に、 $\bar{\beta}$ 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-3・4参

表-3・3 平均加速度応答スペクトル倍率 $\bar{\beta}(T)$ の形状とその特徴

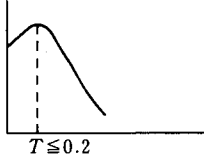
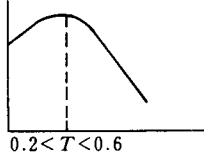
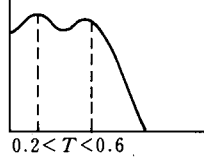
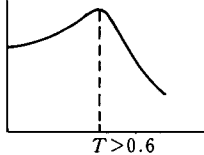
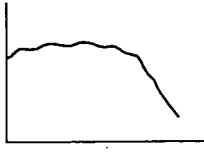
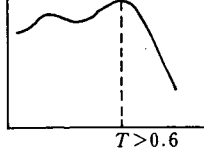
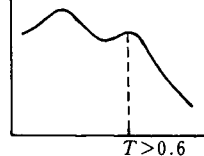
タイプ	$\bar{\beta}$ スペクトルの形状	特 徴
タイプ1		○単一の鋭いピークを有し、ピークの周期は0.2秒以下 ○0.2秒以下の$\bar{\beta}$値は周期Tの増加と共に急激に単調減少する。ただし、両対数グラフ上で、$\bar{\beta}(T) \sim T$の関係が上向きにややふくらんだものである。
タイプ2-1		○単一のゆっくりしたピークを有し、ピークの周期は0.2～0.6秒。
タイプ2-2		○2つの明瞭なピークを有しており、短周期側のピークの特徴はタイプ1とよく似ている。長周期側のピークの周期は0.2～0.6秒。 ○短周期側のピークが卓越するものと、長周期側のピークが卓越するものがある。
タイプ3-1		○単一のゆっくりとしたピークを有し、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		○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		○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-3・4 観測地点ごとの β 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)			β スペクトル値			β 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 鎚 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 堰	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-3・4 観測地点ごとの $\bar{\beta}$ スペクトルの特徴と地盤種別(つづき)

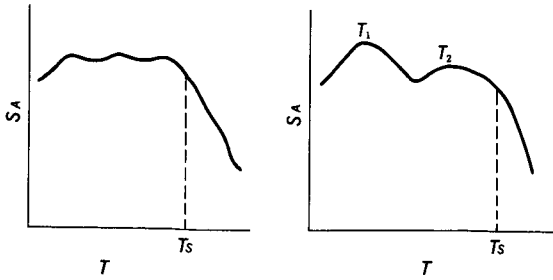
No	観測所No	観 測 所 名	固有周期〔秒〕			$\bar{\beta}$ スペクトル値			$\bar{\beta}$ スペクトル値			地盤種別
			1 次ピーク	2 次ピーク	肩 部	1・次ピーク	2 次ピーク	肩 部	$T=0.2$	$T=0.7$	$T=2.0$	
39	102-1	釧 路 港	0.3	1.0		2.9	1.4		2.9	1.2	0.33	2
40	208-1	小 名 浜 港	0.2	1.0		3.1	0.69		3.1	0.74	0.14	2
41	206-1	大 船 渡 港 (1)	1.0	0.2		3.3	2.3		2.3	1.7	0.27	3
42	303-1	東 京 港	0.1		0.5	2.6		2.3	2.4	1.2	0.18	2
43	301-1	鹿 島 港 (1)	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 (2)	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 (1)	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 (2)	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 里 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 (2)	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

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-3・1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-3・2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分かっている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分かった。この理由は表-3・3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

*地盤条件が完全に確認されているのは以下のとおり

④開北橋、⑥伊達橋 ⑦新葛飾橋 ⑬板島橋 ⑭幌満橋 ⑮草加高架橋 ⑲富津岬 ⑳西新井橋 ㉔観音崎 ㉕真崎大橋


図-3-1 肩部周期 T_s の定義

2-2, タイプ3-2, タイプ3-3, タイプ3-4等では, ピークが複数個であり, 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 が入れ替わり, 安定性に欠けるためと考えられる。また, T_s も図-3-1 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も原因と考えられる。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-3-3 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-3-4 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分かっている 10 地点に対して検討すると, 以下ようになる。すなわち $T=0.2$ 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乱れて, 地盤種別の判定には適当ではないことが分かった。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, 共に 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 種及び 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分かる。しかし, この場合にも, 2 種地盤と 3 種地盤の区別はそれ程ははっきりしない。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分かる。これは表-3-3 に示した結果から分かるように, 0.7 秒付近で 3 種地盤のスペクトルが卓

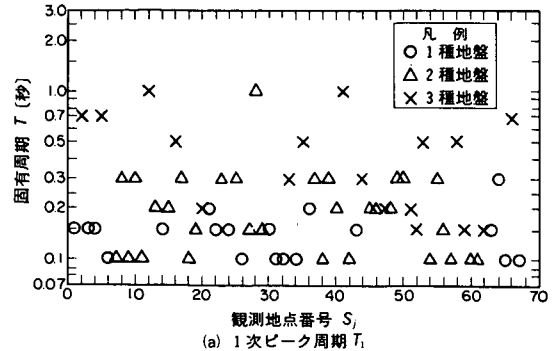
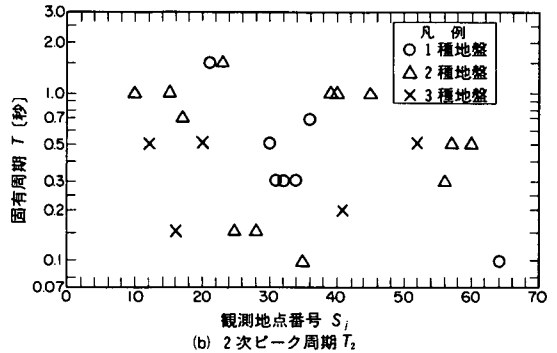
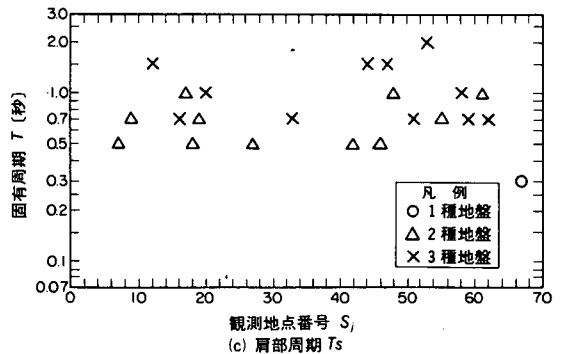
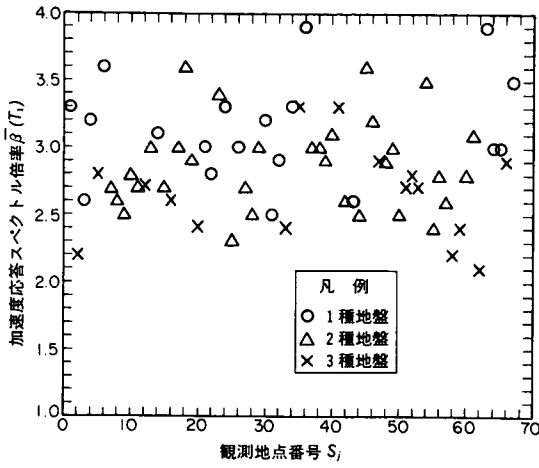

(a) 1 次ピーク周期 T_1

(b) 2 次ピーク周期 T_2

(c) 肩部周期 T_s

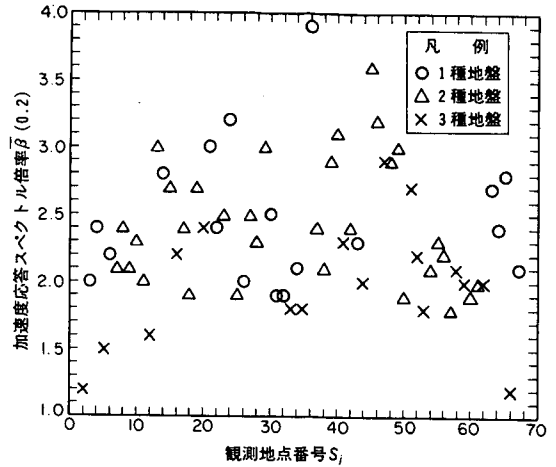
図-3-2 観測地点ごとの 1 次ピーク周期, 2 次ピーク周期, 肩部周期 (観測地点番号は表-3-4 の No. を表す)

越する周期であり, 一方, ここでは 1 種地盤及び 2 種地盤のスペクトルは右下がり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。

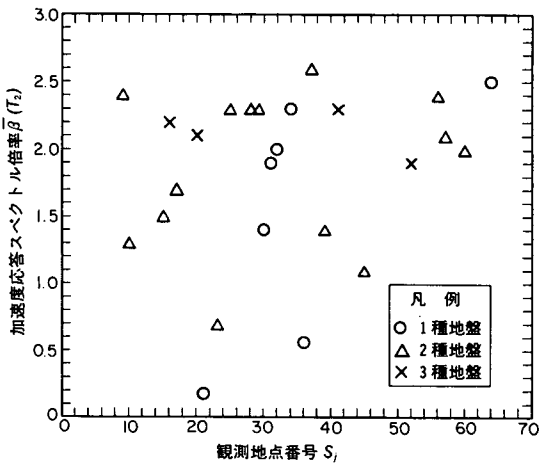
従って, ここでは, 周辺の概略の地形地盤条件及び地盤資料と共に $\bar{\beta}$ の値も地盤種別の参考とすることとし, 原則として $\bar{\beta}(0.7)$ の値が 0.7 以下となるものは 1 種地盤, 0.7~1.8 の範囲にあるものは 2 種地盤, 1.8 以上となるものは 3 種地盤と判定することとした。このように総合判断により定めた地盤種別を表-3-4 に



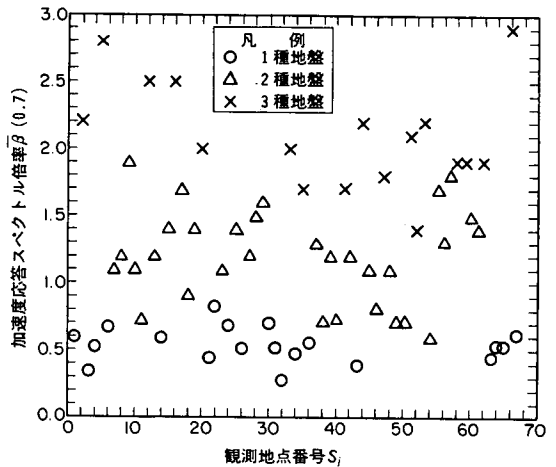
(a) 1次ピーク周期に対応する $\bar{\beta}$ スペクトル



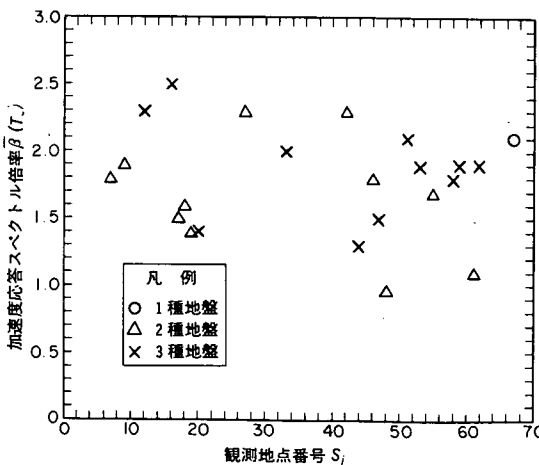
(a) $\bar{\beta}(0.2)$



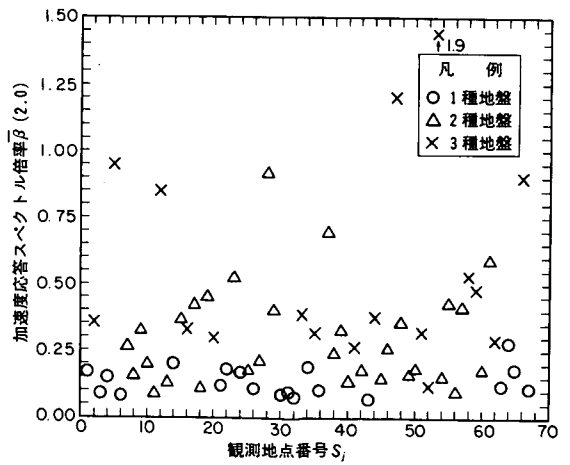
(b) 2次ピーク周期に対応する $\bar{\beta}$ スペクトル



(b) $\bar{\beta}(0.7)$



(c) 肩部周期に対応する $\bar{\beta}$ スペクトル



(c) $\bar{\beta}(2.0)$

図-3.3 1次ピーク T_1 , 2次ピーク T_2 及び肩部周期 T_s に対応する $\bar{\beta}$ スペクトル

図-3.4 固有周期 $T = 0.2$ 秒, 0.7 秒及び 2 秒に対する $\bar{\beta}$ スペクトル

示す。

4. 水平成分最大地震動の距離減衰式

4.1 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も各種の検討が行われており、これらの結果によれば、距離減衰式としては次式が実測値との対応が良いとされている^{20), 27)}。

$$X(M, \Delta, GC_i) = a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(GC_i)} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、

X : 最大地震動(最大加速度 $\bar{a}_{\max}$, 最大速度 $\bar{v}_{\max}$, 最大変位 $\bar{d}_{\max}$)

M : マグニチュード

Δ : 距離の指標

Δ_0 : Δ が小さい範囲の X を調整する定数

GC_i : 地盤種別 ($i=1, 2, 3$)

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

ここで、 Δ としては震央距離、震源距離、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、ここでは震央距離を用いる。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得る唯一の距離の指標であるためである。なお、震央距離の代わりに震源距離を用いることも考えられるが、震源距離は震央距離と震源深さの両者を与えなければならないため、実用に際して使いづらいという点を考慮し、ここでは震央距離を採用したものである。なお、震源深さの影響については後述する。また、 Δ_0 は震央距離 Δ が 0 の場合に X が無限大とならないようにするために導入した定数である。 $M=8$ 程度の大規模地震の場合には断層の大きさは 50~100 km 程度になると言われている。地震動の強度は一般に断層に近くなる程大きくなるが、断層の直上ではある一定の値に近づくとされている²⁸⁾。このような点から、ここでは、震源域における地震動が一定値に漸近するよう、断層の大きさの 1/2 程度を考え、 $\Delta_0=30$ km とすることとした。なお、断層の大きさは、地震の規模によって変化するが、上記のように、マグニチュード 8 クラスの地震に対する断層の大きさを基に Δ_0 を定めたのは、耐震設計で目標とする地震は一般にこの程度の大規模地震であることを考慮したものである。

地盤種別 $GC_i (i=1, 2, 3)$ は前章に示したように 1 種地盤 (道路橋示方書耐震設計編の 1 種地盤)、2 種地盤 (同、2 種+3 種地盤)、3 種地盤 (同 4 種地盤) の 3 種類とした。

最大地震動に影響を与えるものとしては、地震のマグニチュード M 、震央距離 Δ 、地盤種別 GC_i の他にも各種の要因 (例えば、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。従って、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(4.1)の対数をとると、

$$\log X(M, \Delta, GC_i) = \log a(GC_i) + b(GC_i)M + c(GC_i) \log(\Delta + 30) \dots\dots\dots (4.2)$$

となり、 $\log X$ を M 及び $\log(\Delta + 30)$ の線形回帰式で表すことができる。係数 $a(GC_i), b(GC_i), c(GC_i)$ は式(4.2)を用いた重回帰分析から定めることができる。

式(4.2)は、最大地震動 X を、マグニチュード M 及び震央距離 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 及び震央距離 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。例えば、岡本は、鬼怒川発電所堅坑の記録を基に、次式による最大加速度の予測式を提案している²⁹⁾。

$$\log \frac{\bar{a}_{\max}}{640} = \frac{\Delta + 40}{100} (-7.604 + 1.7244M - 0.1036M^2) \dots\dots\dots (4.3)$$

式(4.3)では M の 2 乗の項が考慮されているところに特徴がある。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³⁰⁾。

$$\bar{a}_{\max} = a \times e^{bM} \times (\Delta + 25)^c \dots\dots\dots (4.4)$$

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。

$$\begin{aligned} a &= 2,154,000 \times \Delta^{-2.10} \\ b &= 0.046 \times 0.445 \log \Delta \dots\dots\dots (4.5) \\ c &= 2.515 - 0.486 \log \Delta \end{aligned}$$

式(4.4)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以下のよう検討することとした。すなわち、地震動の特性は震源深さにも依存するという研究成果²⁷⁾を考慮し、式(4.1)の距離減衰式に震源深さ D_p の項を追加して、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。

$$\begin{aligned} \log X(M, \Delta, D_p, GC_i) = & \log a(GC_i) \\ & + b(M, \Delta, D_p, GC_i)M \\ & + c(M, \Delta, D_p, GC_i)\log(\Delta+30) \\ & + d(M, \Delta, D_p, GC_i)D_p \dots\dots\dots (4.6) \end{aligned}$$

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 , $\log(\Delta+30)$, D_p の線形一次式で与えることとした。すなわち、

$$\begin{aligned} b(M, \Delta, D_p, GC_i) = & \alpha_1 + \alpha_2 M + \alpha_3 \log(\Delta+30) \\ & + \alpha_4 D_p \\ c(M, \Delta, D_p, GC_i) = & \alpha_5 + \alpha_6 M + \alpha_7 \log(\Delta+30) \\ & + \alpha_8 D_p \\ d(M, \Delta, D_p, GC_i) = & \alpha_9 + \alpha_{10} M + \alpha_{11} \log(\Delta+30) \\ & + \alpha_{12} D_p \dots\dots\dots (4.7) \end{aligned}$$

ここで、 $\alpha_j (j=1\sim 12)$ 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(4.7)を式(4.6)に代入して整理すると、次式となる。

$$\begin{aligned} \log X(M, \Delta, D_p, GC_i) = & f_1 + f_2 M + f_3 \log(\Delta+30) \\ & + f_4 D_p + f_5 M \log(\Delta+30) \\ & + f_6 M D_p + f_7 D_p \log(\Delta+30) + f_8 M^2 \\ & + f_9 \{\log(\Delta+30)\}^2 + f_{10} D_p^2 \dots\dots\dots (4.8) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} f_1 = & \log a, \quad f_2 = \alpha_1, \quad f_3 = \alpha_5, \quad f_4 = \alpha_9, \\ f_5 = & \alpha_3 + \alpha_6, \quad f_6 = \alpha_4 + \alpha_{10}, \quad f_7 = \alpha_8 + \alpha_{11}, \quad \dots\dots (4.9) \\ f_8 = & \alpha_2, \quad f_9 = \alpha_7, \quad f_{10} = \alpha_{12} \end{aligned}$$

$f_j (j=1\sim 10)$ は地盤種別 GC_i ごとに与えられる係数である。式(4.8)を式(4.2)と比較すると、 D_p , $M \log(\Delta+30)$, $M D_p$, $D_p \log(\Delta+30)$, M^2 , $\{\log(\Delta+30)\}^2$, D_p^2 の7項が新たに加わり、定数値 f_i を別にして全部で9項で $\log X(M, \Delta, D_p, GC_i)$ を表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(4.8)の距離減衰式の中から定数項 f_i 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 及び自由度調整済み重相関係数 R^* が最大となる項の組み合わせを総当たり法³¹⁾によ

り各地盤条件 GC_i ごとに求めた。例えば、 $j=2$ の場合には、各地盤種別ごとに ${}_9C_2=9!/2!(9-2)!=36$ 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 及び自由度調整済み重相関係数 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わけである。

ここで、距離減衰式の精度を表すために重相関係数 R の他に自由度調整済み重相関係数 R^* を用いたのは、以下の理由による。すなわち、重相関係数 R は説明変数の数(考慮する項数 j)を増せば増す程単調に増大するため、最終的には利用可能な説明変数をすべて使用した場合が実測値との対応が最も良いとの答えが得られる。しかしながら、このようにして得られた距離減衰式は、与えられた197組の最大地震動 ($\bar{a}_{\max}$, $\bar{v}_{\max}$, $\bar{d}_{\max}$) に対する適合度は最適と言えるが、工学的な意味において予測精度が最適という保証はない。距離減衰式としては、なるべく貢献度の低い説明変数を含まず、簡単なものが望ましい。自由度調整済み重相関係数 R^* は式(4.10)のように与えられ、重相関係数 R と異なり説明変数の数 j によって単調増加しない。従って、ここでは R と並んで R^* が最大となる条件から、適切な距離減衰式を推定することとしたものである。

$$R^* = \sqrt{1 - \frac{n-1}{n-j-1}(1-R^2)} \dots\dots\dots (4.10)$$

ここで、

R^* : 自由度調整済み重相関係数

R : 重相関係数

n : データ数

j : 説明変数の数(考慮する項数, $j=2, 3, \dots, 9$)

解析対象としたのは2章に示した197組の水平成分の最大加速度 $\bar{a}_{\max}$, 最大速度 $\bar{v}_{\max}$, 最大変位 $\bar{d}_{\max}$ である。

考慮する項の数ごとに、最も重相関係数及び自由度調整済み重相関係数 R^* が大きくなる項の組み合わせを求めると図-4.1に示すとおりとなる。これによれば、考慮する項数 j と重相関係数 R 及び自由度調整済み重相関係数 R^* の関係に関しては、以下の事項が指摘される。

1) $\bar{a}_{\max}$, $\bar{v}_{\max}$, $\bar{d}_{\max}$ のいずれの場合にも、考慮する項の数(説明変数 j)の増加に伴う重相関係数 R 及び自由度調整済み重相関係数 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。

考慮する 説明変数 の数	重相関係数 R						説明変数の組み合わせ								重相関係数 R^*			自由度調整済み重相 関係数 R^*			
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	M	Δ	D	M^2	Δ^2	D^2	$M\Delta$	$M D$	ΔD	1種地盤	2種地盤	3種地盤	1種地盤	2種地盤	3種地盤
1																0.631	0.444	0.542	0.621	0.436	0.526
2																0.769	0.686	0.680	0.757	0.678	0.660
3																0.805	0.722	0.719	0.789	0.713	0.694
4																0.813	0.735	0.728	0.794	0.722	0.695
5																0.820	0.741	0.735	0.794	0.725	0.692
6																0.821	0.748	0.742	0.790	0.730	0.691
7																0.823	0.754	0.750	0.786	0.733	0.691
8																0.825	0.756	0.750	0.782	0.733	0.681
9																0.825	0.757	0.751	0.776	0.730	0.669

(a) 最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$

考慮する 説明変数 の数	重相関係数 R						説明変数の組み合わせ								重相関係数 R^*			自由度調整済み重相 関係数 R^*			
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	M	Δ	D	M^2	Δ^2	D^2	$M\Delta$	MD	ΔD	1種地盤	2種地盤	3種地盤	1種地盤	2種地盤	3種地盤
1							●	○								0.556	0.307	0.240	0.429	0.507	0.349
2							○	○			○					0.757	0.694	0.539	0.778	0.738	0.569
3							○	○				●	○			0.797	0.730	0.605	0.829	0.749	0.621
4							○	○				○	○	○	○	0.816	0.733	0.643	0.835	0.748	0.659
5							○	○	●	●		○	○	○	○	0.824	0.737	0.665	0.836	0.751	0.678
6							○	○	○	●	○		○	○	○	0.831	0.745	0.672	0.834	0.751	0.672
7							○	○	○	○	○		○	○	○	0.833	0.748	0.677	0.829	0.751	0.664
8							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.834	0.751	0.678	0.824	0.751	0.652
9							○	○	○	○	○	○	○	○	○	0.834	0.753	0.679	0.819	0.749	0.639

(b) 最大速度 $\tilde{v}_{\max}$

考慮する 説明変数 の数	重相関係数 R						説明変数の組み合わせ								重相関係数 R^*			自由度調整済み重相 関係数 R^*			
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	M	Δ	D	M^2	Δ^2	D^2	$M\Delta$	MD	ΔD	1種地盤	2種地盤	3種地盤	1種地盤	2種地盤	3種地盤
1							○									0.450	0.514	0.377	0.542	0.292	0.188
2							○	○								0.789	0.743	0.596	0.744	0.687	0.506
3							○	○				●			○	0.841	0.757	0.655	0.780	0.720	0.564
4							○	○				●	○		○	0.851	0.759	0.698	0.795	0.721	0.594
5							○	○				●	○	○	○	0.856	0.764	0.723	0.799	0.722	0.608
6							○	○				●	○	○	○	0.858	0.767	0.727	0.802	0.727	0.603
7							○	○				●	○	○	○	0.858	0.770	0.729	0.798	0.727	0.594
8							○	○				●	○	○	○	0.858	0.773	0.730	0.793	0.727	0.580
9							○	○				●	○	○	○	0.858	0.773	0.730	0.787	0.726	0.563

(c) 最大変位 $\tilde{d}_{\max}$

凡 例
○ 1種地盤
● 2種地盤
／ 3種地盤

図-4-1 水平成分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

2) 考慮する項の数 j を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。 R^* についても同様で、 $j \geq 2$ では j の増加による R^* の変化は小さい。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 の組み合わせから構成される項を加えても距離減衰式の精度は著しく増大し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変わっている。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種地盤及び $\tilde{d}_{\max}$ の1種地盤を除けば、他のケースではすべて M 及び $\log(\Delta+30)$ 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 及び $\log(\Delta+30)$ の線形の組み合わせに対す

る $\bar{a}_{\max}$ の 3 種地盤, $\bar{v}_{\max}$ の 1 種地盤及び $\bar{d}_{\max}$ の 1 種地盤の場合の重相関係数 R は, それぞれ, 0.641, 0.753, 0.775 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 0.680, 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 R はほとんど変わらない。この理由は, 解析対象とした地震記録がもともと震源深さ D_p が 60 km 以浅の地震により得られたものであり, D_p が限定されているためと考えられる。

以上は, 重相関係数 R 及び自由度調整済み重相関係数 R^* に基づく距離減衰特性の検討結果であるが, 式(4・8)の距離減衰式の計算例として $j=2, 3$ 及び 9 の場合を検討した結果を以下に示す。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している。また, $j=3$ は, 式(4・1)にさらにもう一項加えた場合の距離減衰式を, また, $j=9$ は式(4・8)のすべての項を考慮した場合の距離減衰式をそれぞれ表している。考慮する項数 $j=2, 3$ 及び 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

$$\log X(M, \Delta, GC_i) = f_1 + f_2 M + f_3 \log(\Delta + 30) \dots\dots\dots (4 \cdot 11)$$

$j=3$ の場合

$$\log X(M, \Delta, GC_i) = f_1 + f_2 M + f_3 \log(\Delta + 30) + f_5 M \log(\Delta + 30) \dots\dots\dots (4 \cdot 12)$$

$j=9$ の場合

$$\begin{aligned} \log X(M, \Delta, D_p, GC_i) = & f_1 + f_2 M + f_3 \log(\Delta + 30) \\ & + f_4 D_p + f_5 M \log(\Delta + 30) + f_6 M D_p \\ & + f_7 D_p \log(\Delta + 30) + f_8 M^2 + f_9 \{\log(\Delta + 30)\}^2 \\ & + f_{10} D_p^2 \dots\dots\dots (4 \cdot 13) \end{aligned}$$

ここで, 式(4・11)～式(4・13)の係数は, 地盤種別 GC_i に応じて表-4・1 に示すとおりである。

これより, $j=2, 3, 9$ に対する距離減衰を $M=6, 7, 8$ に対して試算すると, それぞれ, 図-4・2, 図-4・3, 図-4・4 に示すとおりとなる。これより, $j=9$ の場合には, 震央距離の増加に伴い, 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とが分かる。これは, ばらつきが大きく, 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する結果, かえって, 本来の地震動の基本的な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 種地盤及び 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 M , 震央距離 Δ 及び地盤種別 GC_i の変化に伴い相互に比較的調和のとれた変化を示し, 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 $j=3$ 及び 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もの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), 地盤条件, 及び, 距離の指標 (震央距離 Δ , 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(4・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 及び $\log(\Delta + 30)$ の線形回帰式で近似した場合の重相関係数 R 及び自由度調整済み重相関係数 R^* は, これにそれぞれ $M, D_p, \log(\Delta + 30)$ の 2 乗までの項及びこれら 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 及び $\log(\Delta + 30)$ 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。従って, 今回の検討結果の範囲では, 式(4・2)のように $\log X$ を M 及び $\log(\Delta + 30)$ 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。

マグニチュード M , 震央距離 Δ , 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³²⁾。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の地震動変位の最大振幅の関数として与えられたもので

表-4.1 水平成分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}

あり³³⁾、工学的に必要とされる短周期成分(一般に周期0.1~3秒の範囲)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 L を用いている。これは、我が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³⁴⁾。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、地震の規模及び震央距離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、以下のようになる。

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——地震による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って内陸で生じる地震がある^{35),36)}。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。従って、こうした地震の特性により、例えば同一のマグニチュードを与える地震(=震央距離100 km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50 m程度の表層の地盤条件に基づくものである。実際には、基礎岩盤から

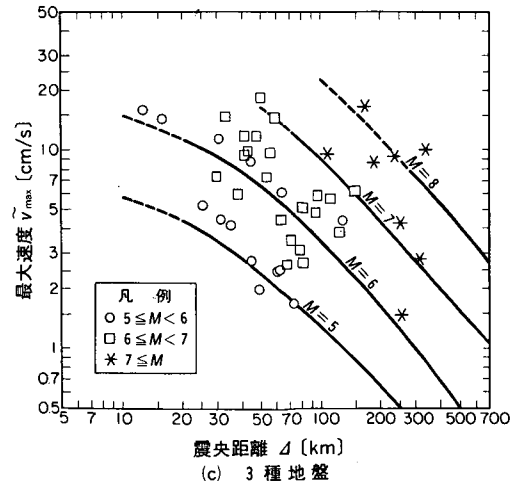
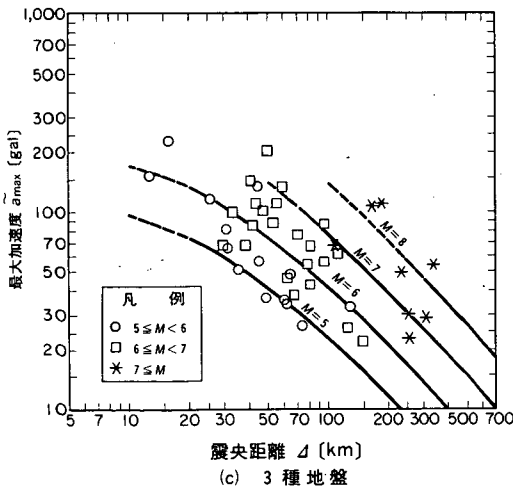
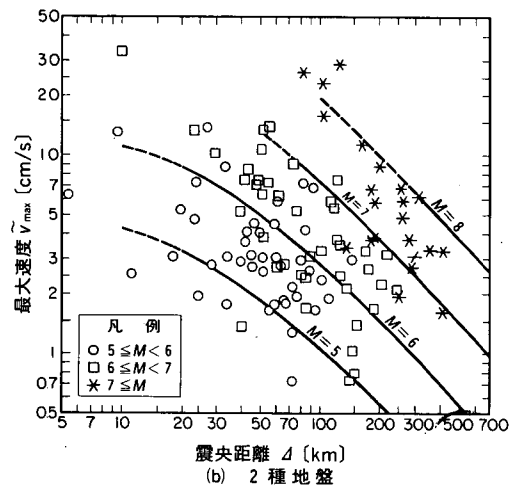
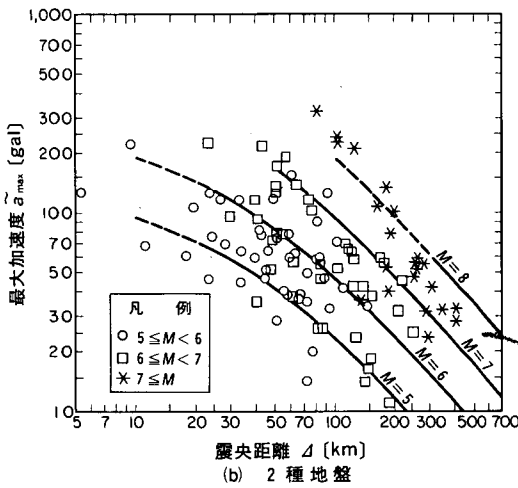
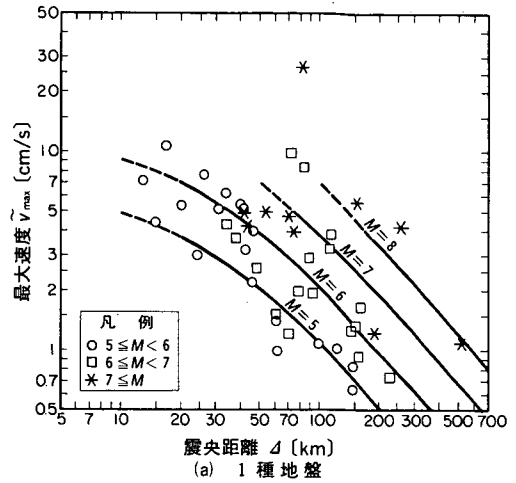
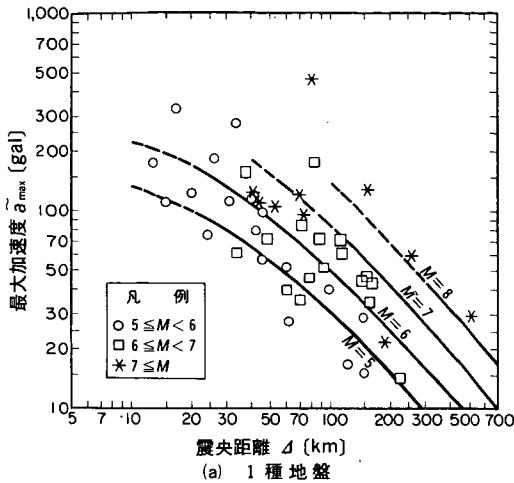


図-4.2 (1) 式(4.11)による水平成分最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$ の距離減衰式 ($j=2$ の場合)

図-4.2 (2) 式(4.11)による水平成分最大速度 $\tilde{v}_{\max}$ の距離減衰式 ($j=2$ の場合)

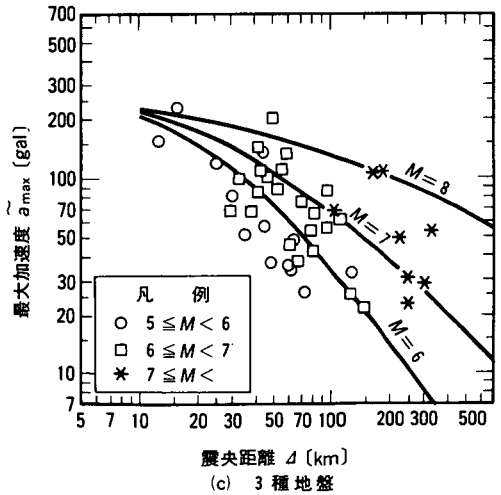
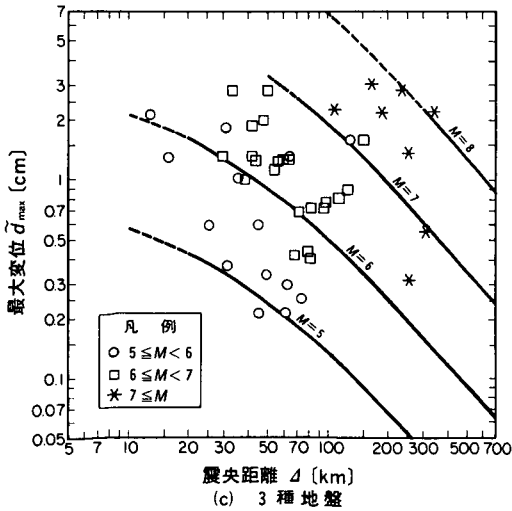
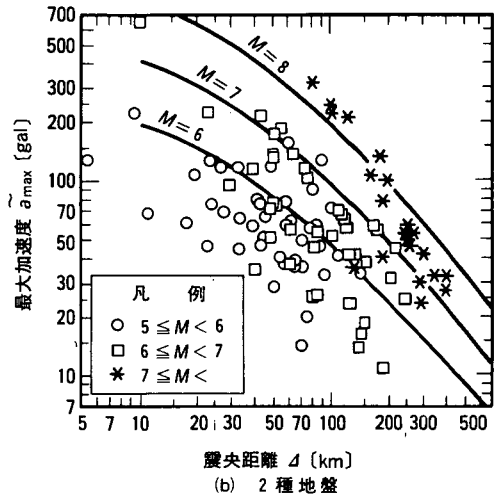
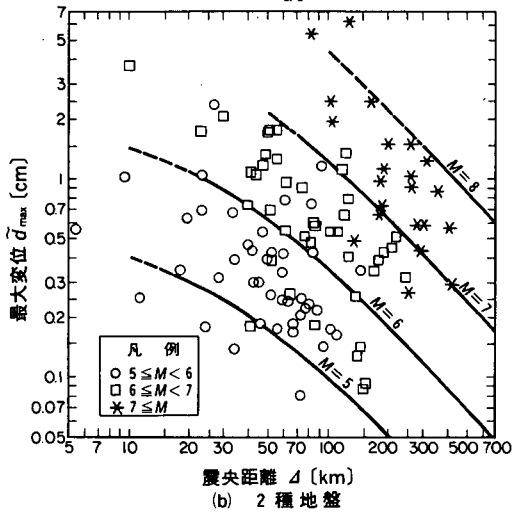
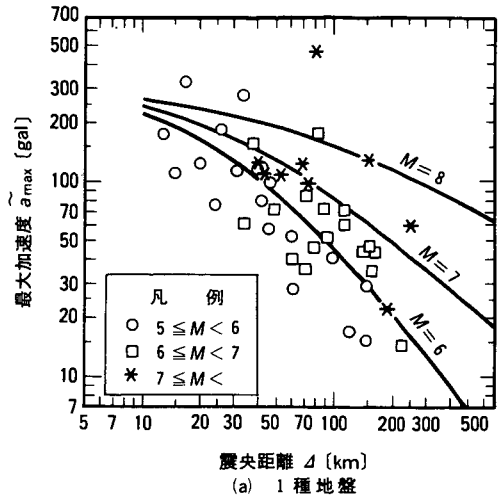
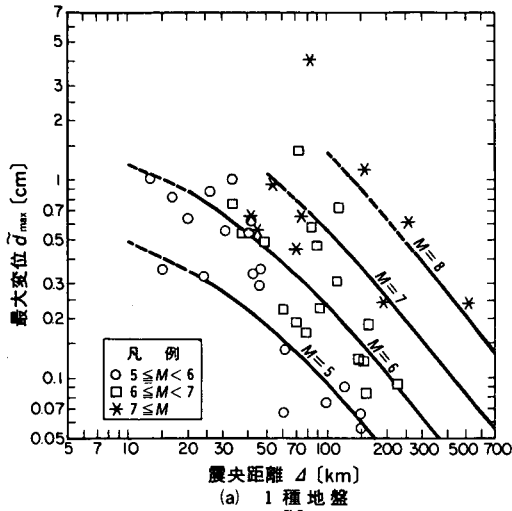


図-4・2(3) 式(4・11)による水平成分最大度位 $\tilde{d}_{\max}$ の距離減衰式 ($j=2$ の場合)

図-4・3(1) 式(4・12)による水平成分最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$ の距離減衰式 ($j=3$ の場合)

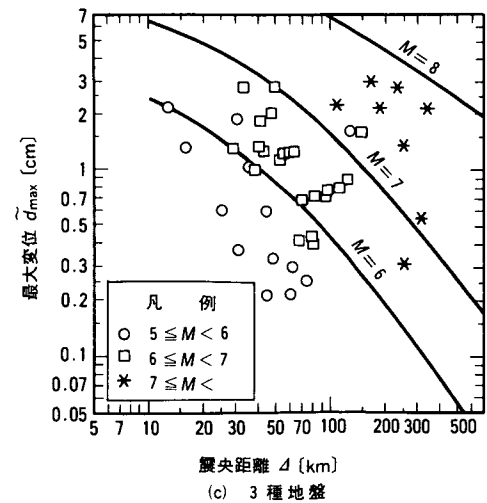
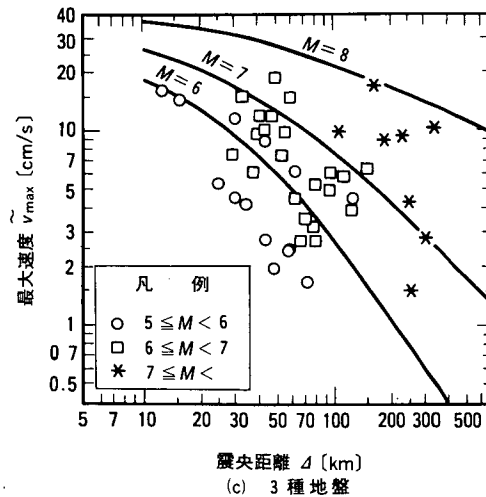
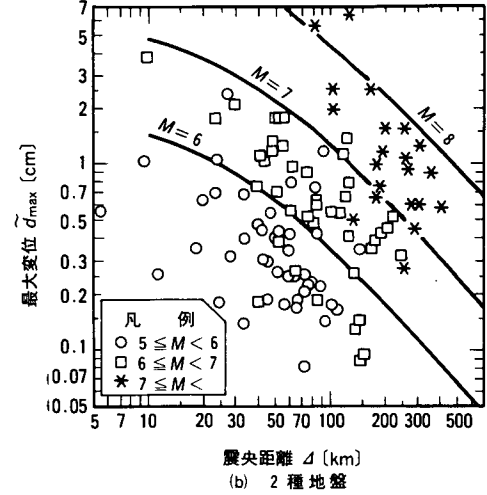
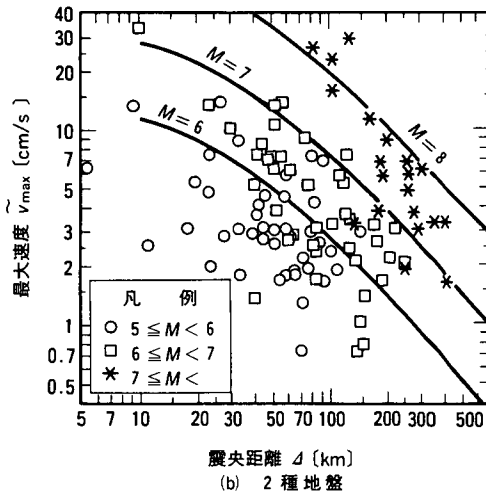
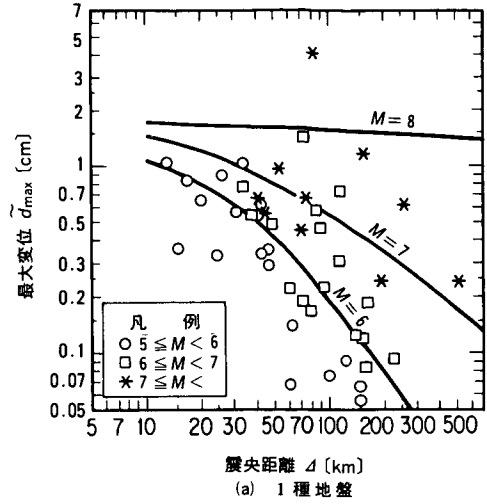
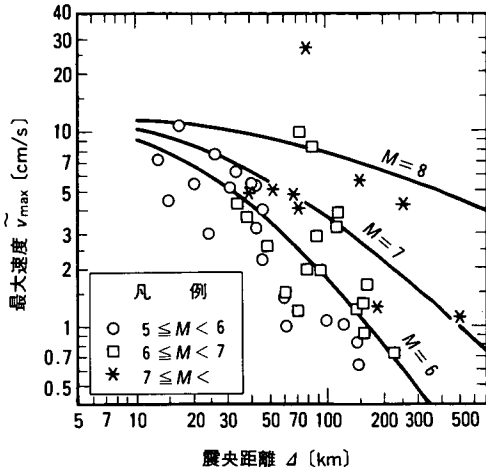
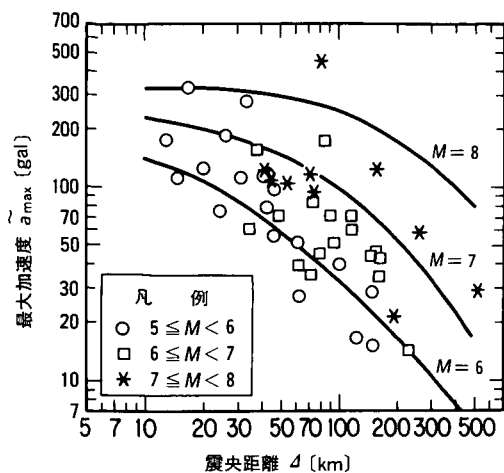
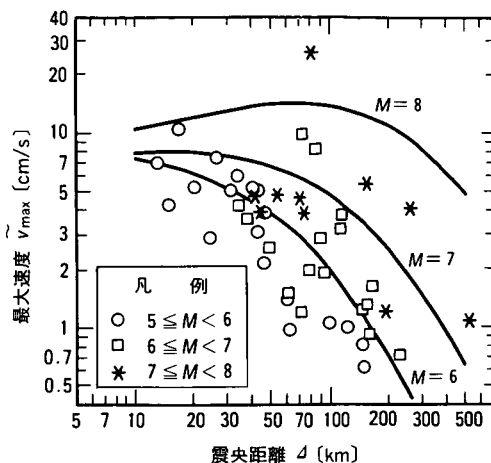


図-4.3(2) 式(4.12)による水平成分最大速度 $\tilde{v}_{max}$ の距離減衰式 ($j=3$ の場合)

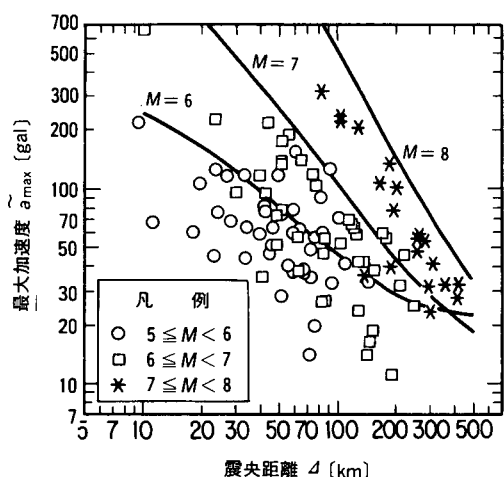
図-4.3(3) 式(4.12)による水平成分最大変位 $\tilde{d}_{max}$ の距離減衰式 ($j=3$ の場合)



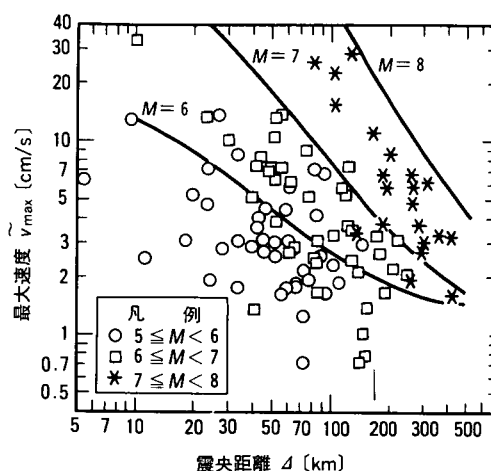
(a) 1 種地盤



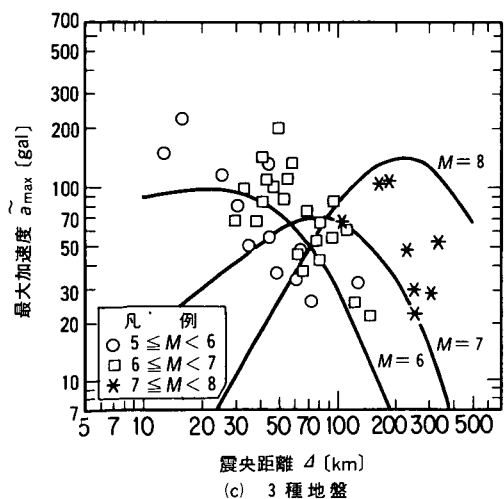
(a) 1 種地盤



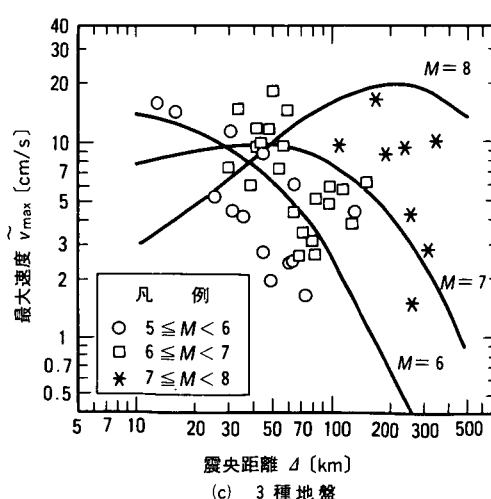
(b) 2 種地盤



(b) 2 種地盤



(c) 3 種地盤



(c) 3 種地盤

図-4.4(1) 式(4.13)による水平成分最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$ の距離減衰式 ($j=9$ の場合)

図-4.4(2) 式(4.13)による水平成分最大速度 $\tilde{v}_{\max}$ の距離減衰式 ($j=9$ の場合)

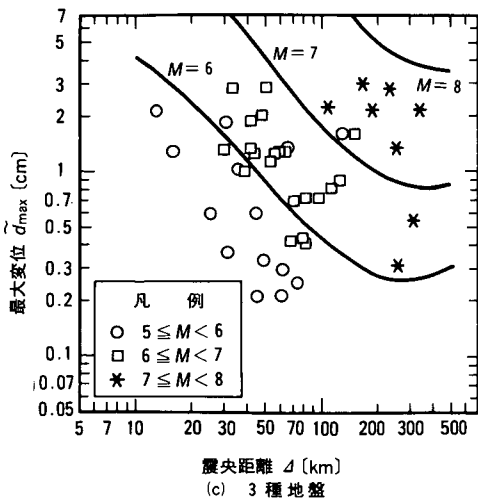
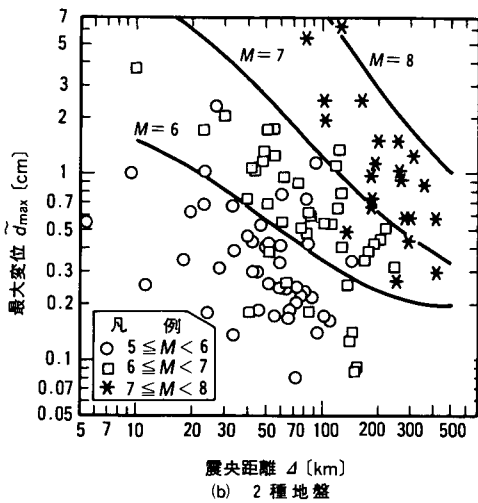
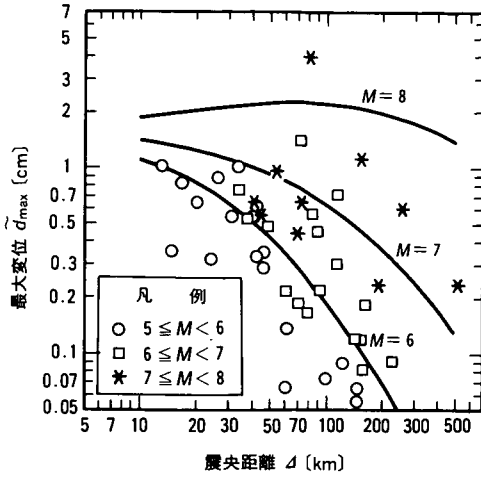


図-4.4 (3) 式(4.13)による水平成分最大変位 $\tilde{d}_{\max}$ の距離減衰式 ($j=9$ の場合)

地表面下 50 m 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³⁷⁾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及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及び距離の指標をそれぞれマグニチュード及び震央距離で代表し，距離減衰式を式(4.2)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。地震の規模及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(4.2)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必要と考えられる。

4.2 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(4.1)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3種類に分類したものであるため，式(4.1)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にし，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，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 及び Δ の2変数を選び，式(4.2)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。

$$X(M, \Delta, GC_i) = \begin{cases} a \times 10^{bM} \times (\Delta + 30)^c & (\text{ケース 1}) \\ a \times 10^{bM} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} & (\text{ケース 2}) \\ a \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^c & (\text{ケース 3}) \\ a(GC_i) \times 10^{bM} \times (\Delta + 30)^c & (\text{ケース 4}) \\ a \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} & (\text{ケース 5}) \\ a(GC_i) \times 10^{bM} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} & (\text{ケース 6}) \\ a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^c & (\text{ケース 7}) \\ a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} & (\text{ケース 8}) \end{cases} \dots\dots\dots (4 \cdot 14)$$

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している。式(4・14)で、ケース 1 は係数 a 、 b 、 c がすべ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 がすべて地盤種別によるとしたもので、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³⁸⁾。

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³¹⁾。例えば、式(4・14)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。

$$\log X(M, \Delta, GC_i) = \log a(GC_i) + \alpha_1 \log a(GC_2) + \alpha_3 \log a(GC_3) + \{b(GC_i) + \alpha_2 b(GC_2) + \alpha_3 b(GC_3)\}M + c \log(\Delta + 30) \dots\dots\dots (4 \cdot 15)$$

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

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0 \dots\dots GC_i = 1, 3 \text{ の場合} \\ 1 \dots\dots GC_i = 2 \text{ の場合} \end{cases}$$

$$\alpha_3 = \begin{cases} 0 \dots\dots GC_i = 1, 2 \text{ の場合} \\ 1 \dots\dots GC_i = 3 \text{ の場合} \end{cases}$$

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

式(4・15)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・15)を次の形に書き改めるとよく分かる。

$$\begin{aligned} \log X(M, \Delta, GC_1) &= \log a(GC_1) + b(GC_1)M \\ &\quad + c \log(\Delta + 30) \\ \log X(M, \Delta, GC_2) &= \{\log a(GC_1) + \log a(GC_2)\} \\ &\quad + \{b(GC_1) + b(GC_2)\}M + c \log(\Delta + 30) \\ \log X(M, \Delta, GC_3) &= \{\log a(GC_1) + \log a(GC_3)\} \\ &\quad + \{b(GC_1) + b(GC_3)\}M + c \log(\Delta + 30) \\ &\dots\dots\dots (4 \cdot 16) \end{aligned}$$

このようにして、2 章に示した 197 組の水平成分の最大加速度 $\bar{a}_{\max}$ 、最大速度 $\bar{v}_{\max}$ 及び最大変位 $\bar{d}_{\max}$ を用いてケース 1～ケース 8 の係数を定めると表-4・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 及び自由度調整済み重相関係数 R^* を図示すると図-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 をすべて地盤種別ごとに一定としたケース 1 の重相関係数 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 及びケース 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、 $\bar{a}_{\max}$ 、 $\bar{v}_{\max}$ 、 $\bar{d}_{\max}$ 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良いことを示している。

4.3 $\bar{a}_{\max}$ 、 $\bar{v}_{\max}$ 、 $\bar{d}_{\max}$ 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 及び Δ の 2 つを説明変数とした式(4・14)の線形回帰式を用いたケース 7 及びケース 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。従って、ここでは両ケースにつき、その特徴及び差異を検討することとする。なお、4・2 節に示したように、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。

表-4・2 式(4・14)の係数 a, b, c

	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
(a) 最大加速度 $\ddot{a}_{\max}$	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 $\dot{v}_{\max}$	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		

表-4.2 式(4.14)の係数 a, b, c (つづき)

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
(c) 最大変位 $\tilde{d}_{\max}$	1	1 種	0.096	0.525	-1.225	0.695	0.294
		2 種					
		3 種					
	2	1 種	0.111	0.500	-1.271	0.760	0.267
		2 種			-1.173		
		3 種			-1.089		
	3	1 種	0.108	0.478	-1.201	0.761	0.266
		2 種		0.511			
		3 種		0.538			
	4	1 種	0.071	0.503	-1.183	0.756	0.268
		2 種	0.110				
		3 種	0.163				
	5	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	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	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	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		

ケース 7

$$\tilde{d}_{\max} = \begin{cases} 987.4 \times 10^{0.216M} & (1 \text{ 種地盤}) \\ 232.5 \times 10^{0.313M} & (2 \text{ 種地盤}) \\ 403.8 \times 10^{0.265M} & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases} \times (\Delta + 30)^{-1.218} \quad \dots\dots\dots (4.17)$$

$$\tilde{v}_{\max} = \begin{cases} 20.82 \times 10^{0.263M} & (1 \text{ 種地盤}) \\ 2.805 \times 10^{0.430M} & (2 \text{ 種地盤}) \\ 5.105 \times 10^{0.404M} & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases} \times (\Delta + 30)^{-1.222} \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

$$\tilde{d}_{\max} = \begin{cases} 0.626 \times 10^{0.372M} & (1 \text{ 種地盤}) \\ 0.062 \times 10^{0.567M} & (2 \text{ 種地盤}) \\ 0.070 \times 10^{0.584M} & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases} \times (\Delta + 30)^{-1.254} \quad \dots\dots\dots (4.19)$$

ケース 8

$$\tilde{d}_{\max} = \begin{cases} 1073 \times 10^{0.221M} \times (\Delta + 30)^{-1.251} & (1 \text{ 種地盤}) \\ 227.3 \times 10^{0.308M} \times (\Delta + 30)^{-1.201} & (2 \text{ 種地盤}) \\ 403.1 \times 10^{0.262M} \times (\Delta + 30)^{-1.208} & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

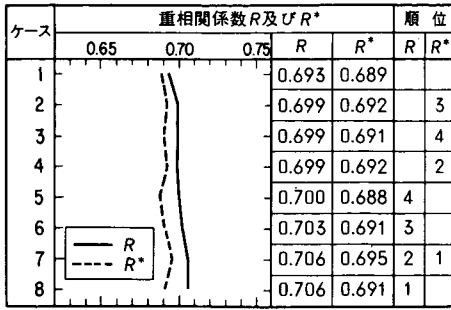
$$\tilde{v}_{\max} = \begin{cases} 23.86 \times 10^{0.271M} \times (\Delta + 30)^{-1.275} & (1 \text{ 種地盤}) \\ 2.666 \times 10^{0.421M} \times (\Delta + 30)^{-1.183} & (2 \text{ 種地盤}) \\ 5.136 \times 10^{0.415M} \times (\Delta + 30)^{-1.257} & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.21)$$

$$\tilde{d}_{\max} = \begin{cases} 0.886 \times 10^{0.393M} \times (\Delta + 30)^{-1.390} & (1 \text{ 種地盤}) \\ 0.056 \times 10^{0.549M} \times (\Delta + 30)^{-1.179} & (2 \text{ 種地盤}) \\ 0.070 \times 10^{0.575M} \times (\Delta + 30)^{-1.224} & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.22)$$

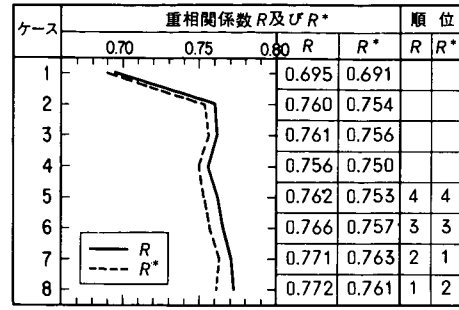
また、 $\tilde{a}_{\max}$, $\tilde{v}_{\max}$, $\tilde{d}_{\max}$ に対する係数 a, b, c をケース 7 及びケース 8 に対して示すとそれぞれ図-4.6 及び図-4.7 のようになる。これより、距離減衰式の係数 a, b, c に関して以下の事項が指摘される。

(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 とほぼ同じである。

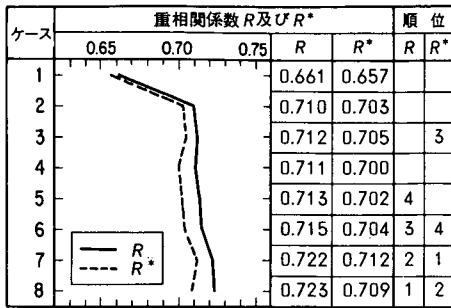
(2) 係数 $b(GC_i)$ はいずれの地盤種別の場合にも



(a) 最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$



(c) 最大変位 $\tilde{d}_{\max}$



(b) 最大速度 $\tilde{v}_{\max}$

凡 例

ケース	係数 a, b, c	ケース	係数 a, b, c
1	a, b, c	5	a, b (GC), c (GC)
2	a, b, c (GC)	6	a (GC), b, c (GC)
3	a, b (GC), c	7	a (GC), b (GC), c
4	a (GC), b, c	8	a (GC), b (GC), c (GC)

図-4.5 水平成分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

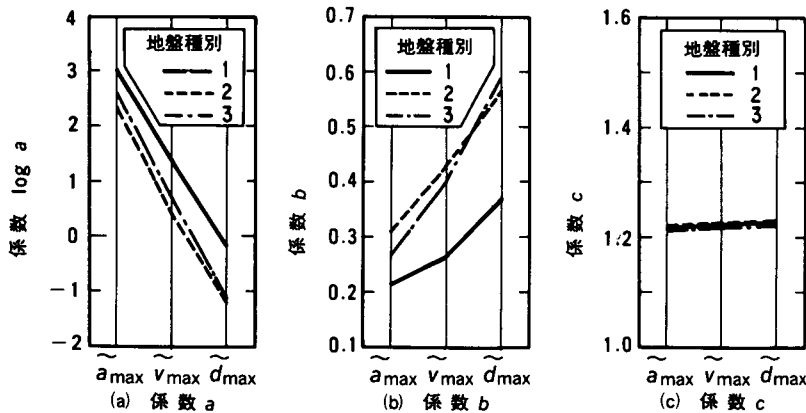


図-4.6 水平成分最大地震動の距離減衰式 (式(4.14)) の係数 a, b, c (ケース 7 の場合)

$\tilde{a}_{\max}$, $\tilde{v}_{\max}$, $\tilde{d}_{\max}$ 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 種地盤及び 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す (10^b 倍となる) ものであり、 $\tilde{a}_{\max}$ の場合には地盤種別で異なるが、0.21~0.31 程度であるのに対し、 $\tilde{d}_{\max}$ の場合は 0.37~0.58 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小さい。

以上のように、ケース 7 及びケース 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(4.17)~式(4.22)に従い両者の距離減衰を $M=6$ 及び $M=8$ の 2 ケースについて比較した結果が図-4.8 である。これによるとケース 7 及びケース 8 の距離減衰の違いはごくわずかであり、実用上は

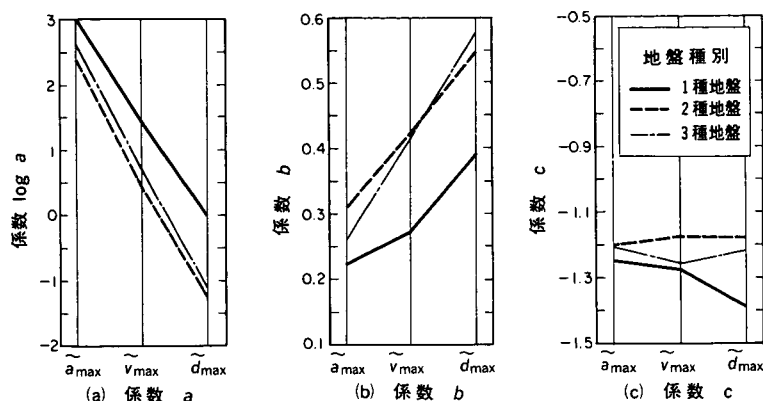


図-4.7 水平成分最大地震動の距離減衰式 (式(4.14)) の係数 a, b, c (ケース 8 の場合)

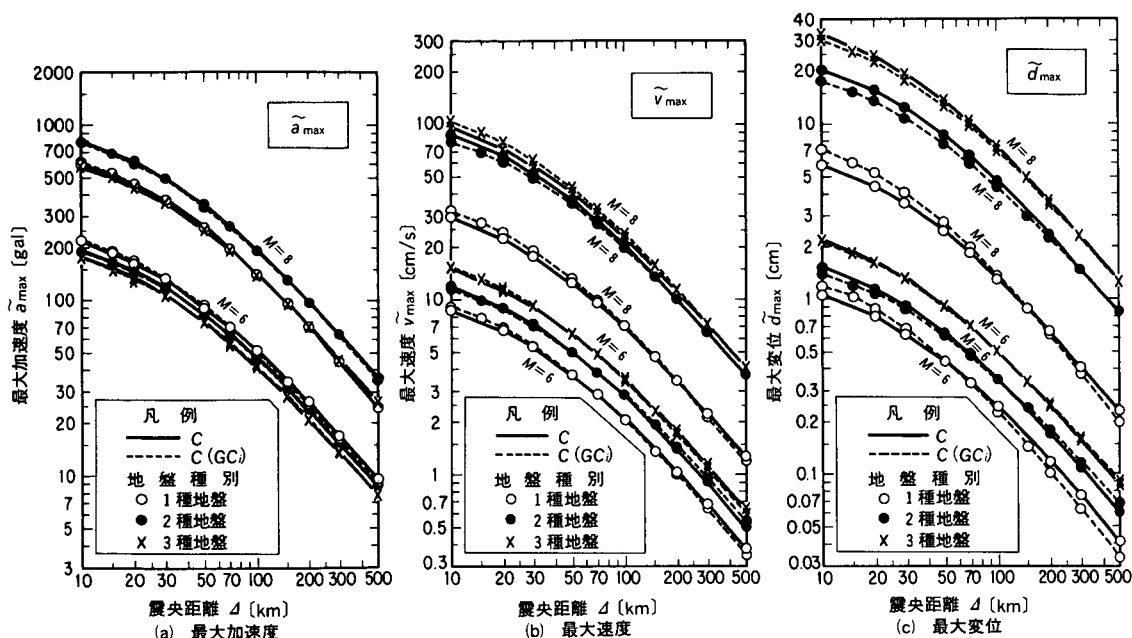


図-4.8 式(4.17)～(4.19)の距離減衰式と式(4.20)～(4.22)の距離減衰式の比較

ほとんど差が無いといってよい。従って、基本的にはいずれのケースを使用しても良いと考えられるが、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、ケース 7 を採用することとした。

4.4 提案する距離減衰式の特性及び推定式まわりのばらつき

式(4.17)～式(4.19)による $\tilde{a}_{\max}$, $\tilde{v}_{\max}$, $\tilde{d}_{\max}$ を予測式の基となった実測値 (ただし、最大速度及び最大変位は加速度記録から計算した値) と共に示すと、それ

ぞれ図-4.9, 図-4.10, 図-4.11 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 $M=6$ 及び 8 に対して示すと図-4.12 のようになる。これによれば、 $\tilde{v}_{\max}$ 及び $\tilde{d}_{\max}$ は共に地盤種別が 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 M 及び震央距離 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 種及び 3 種地盤の場合よりもやや大きいものの、全体としては地盤種別により大きな変化を示さないことが特徴として指摘される。

次に、式(4.17)～式(4.19)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

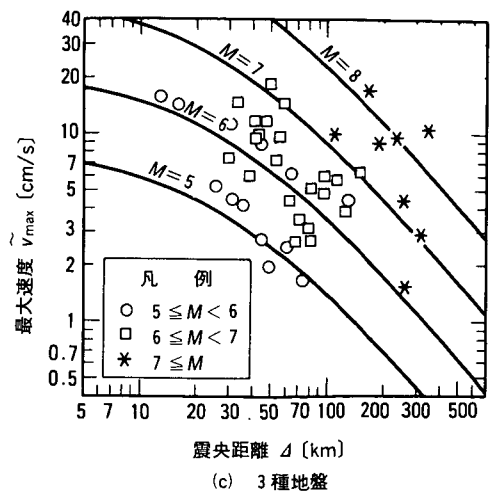
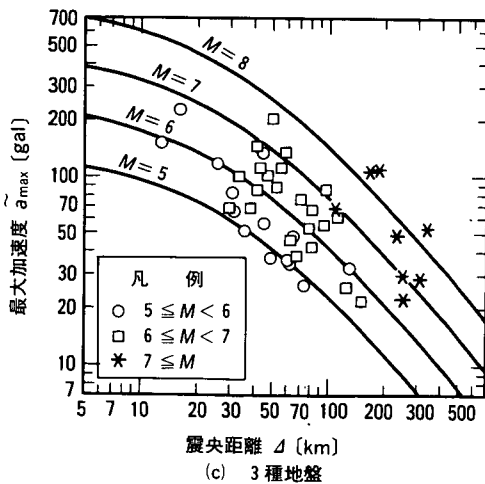
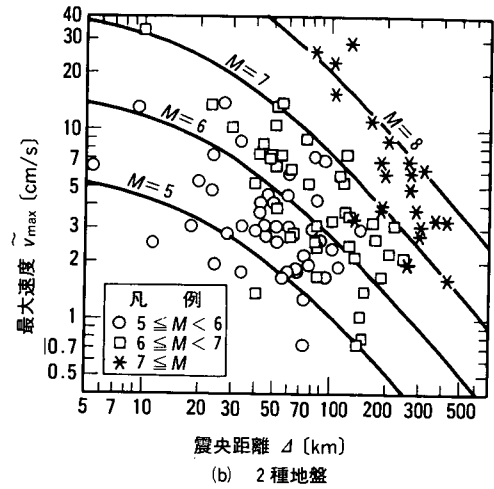
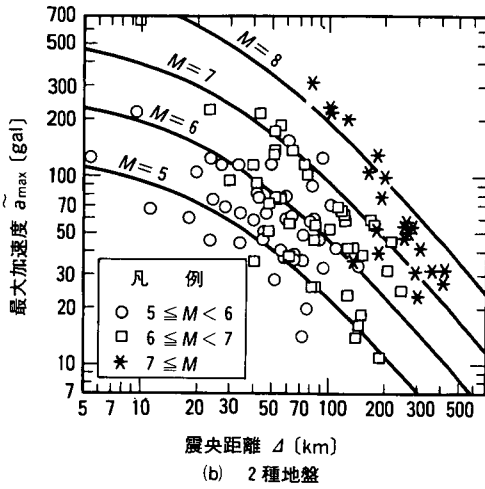
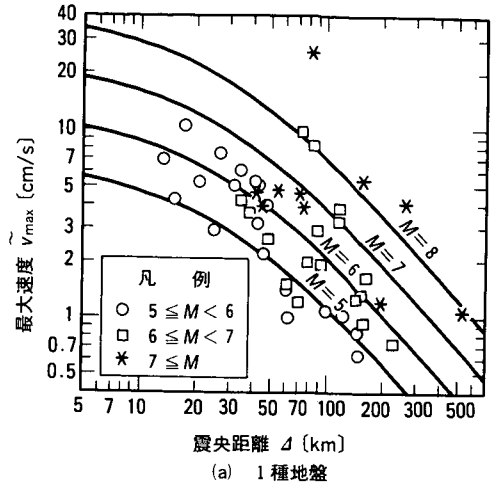
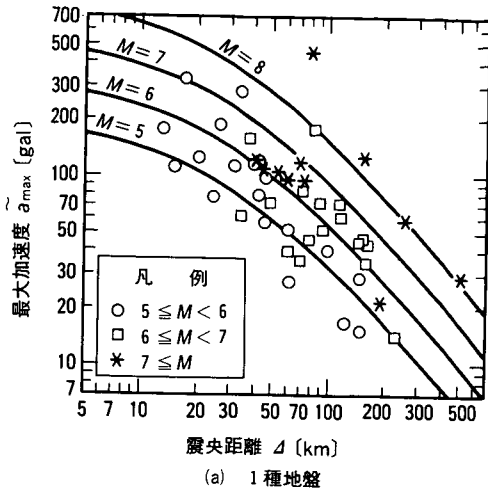


図-4-9 $\tilde{a}_{max}$ の距離減衰

図-4-10 $\tilde{v}_{max}$ の距離減衰

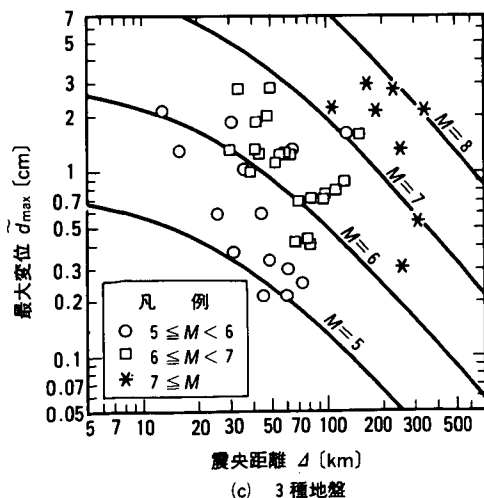
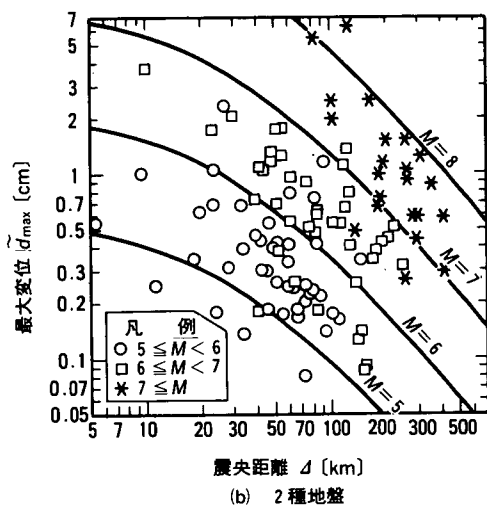
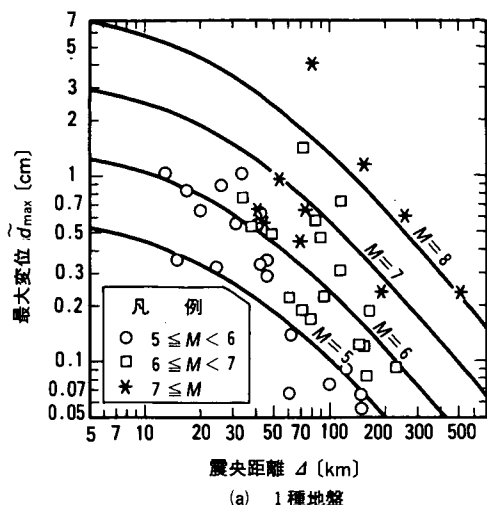


図-4.11 $\tilde{d}_{\max}$ の距離減衰

た地震の M 及び Δ から式(4.17)～式(4.19)により求めた期待値の比を次式により、定義した。

$$\begin{aligned} U_a &= \tilde{a}_{\max}^{OB} / \tilde{a}_{\max}^P \\ U_v &= \tilde{v}_{\max}^{OB} / \tilde{v}_{\max}^P \dots\dots\dots (4.23) \\ U_d &= \tilde{d}_{\max}^{OB} / \tilde{d}_{\max}^P \end{aligned}$$

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す指標

$\tilde{a}_{\max}^{OB}, \tilde{v}_{\max}^{OB}, \tilde{d}_{\max}^{OB}$: 重回帰分析の基となった実測の最大加速度 [gal] 及び実測加速度から求めた最大速度 [cm/s], 最大変位 [cm]

$\tilde{a}_{\max}^P, \tilde{v}_{\max}^P, \tilde{d}_{\max}^P$: 式(4.17)～式(4.19)から求められる最大加速度 [gal], 最大速度 [cm/s], 最大変位 [cm] の期待値

従って、実際の最大地震動 $\tilde{a}_{\max}^{OB}, \tilde{v}_{\max}^{OB}, \tilde{d}_{\max}^{OB}$ は式(4.23)から次式で与えられることになる。

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{\max}^{OB} &= U_a \times \tilde{a}_{\max}^P = U_a \times \left[a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \right. \\ \tilde{v}_{\max}^{OB} &= U_v \times \tilde{v}_{\max}^P = U_v \times \left. \times (\Delta + 30)^c \right] \\ \tilde{d}_{\max}^{OB} &= U_d \times \tilde{d}_{\max}^P = U_d \times \left. \right] \end{aligned} \dots\dots\dots (4.24)$$

式(4.23)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-4.13, 図-4.14, 図-4.15 のようになる。これによれば、 U_a, U_v, U_d は M 及び 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図-4.16 のようになる。データ数の少ない1種地盤及び3種地盤の1部では、ややばらつきがあるが、 $\log U_a, \log U_v, \log U_d$ の頻度分布は正規分布により近似できることが分かる。

いま、 $\log U_k (k=a, v, d)$ が正規分布に従うと仮定すると、 $x = \log U_k$ が $a \sim b$ の範囲にある確率 $P(a < x \leq b)$ は次式で与えられる³⁹⁾。

$$P(a < x \leq b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \dots\dots\dots (4.25)$$

ここで、

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

μ : x の平均値

σ : x の標準偏差

$x = \log U_k$ の平均値 μ 及び標準偏差 σ を各固有周期ごとに計算すると、 μ は0であり、また σ は表-4.3の

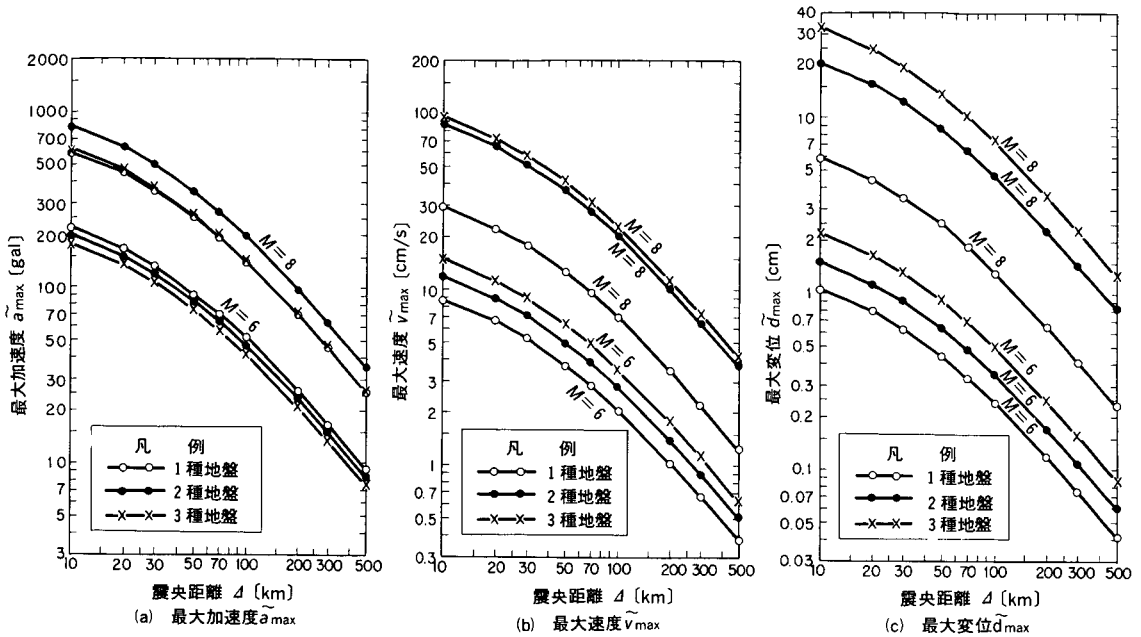


図-4.12 水平成分最大加速度 $\tilde{a}_{max}$, 最大速度 $\tilde{v}_{max}$, 最大変位 $\tilde{d}_{max}$ の距離減衰式 ($M=6$ 及び 8 の場合)

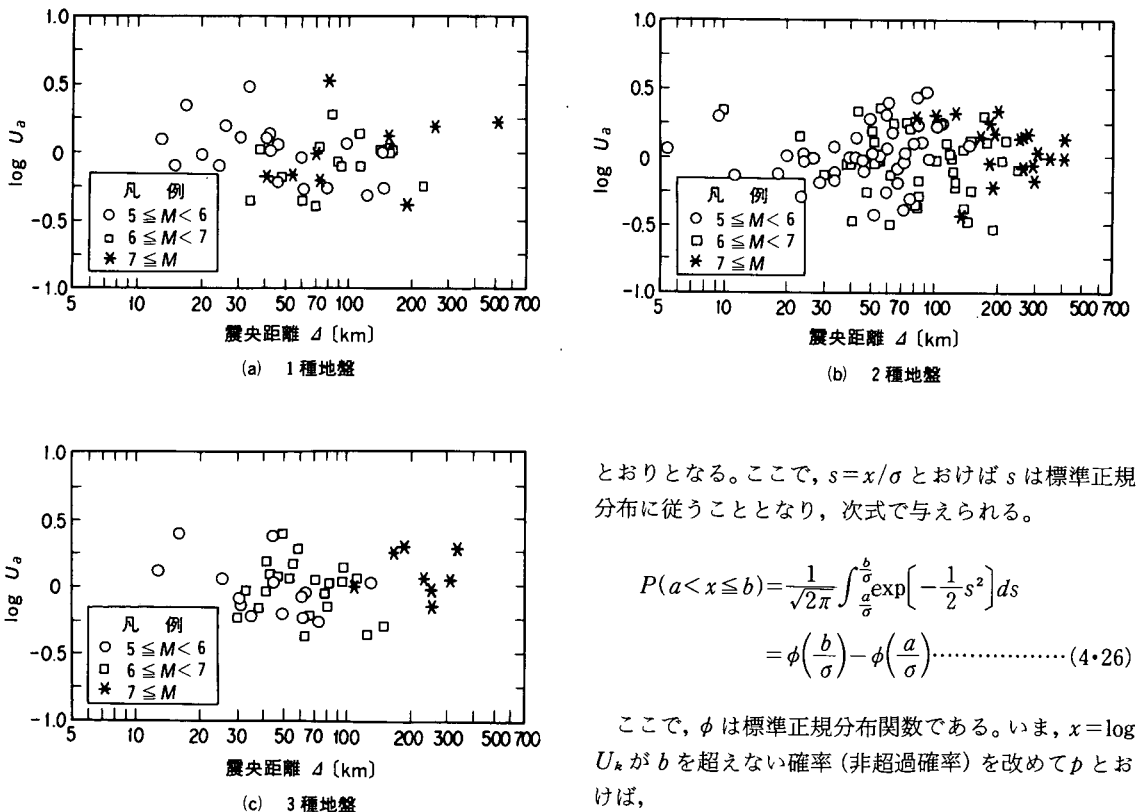


図-4.13 $\log U_a \sim \Delta \sim M$ の関係

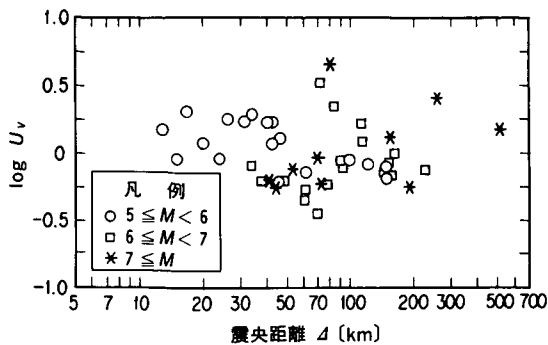
とおりとなる。ここで、 $s=x/\sigma$ とおけば s は標準正規分布に従うこととなり、次式で与えられる。

$$P(a < x \leq b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{a}{\sigma}}^{\frac{b}{\sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2}s^2\right] ds$$

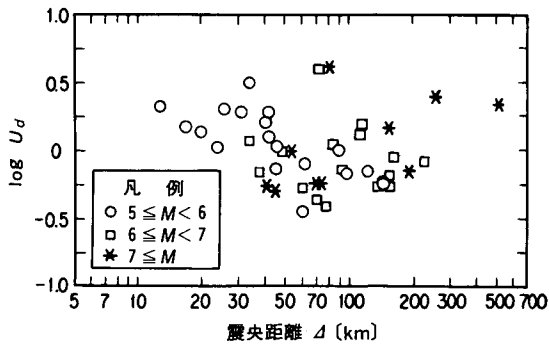
$$= \phi\left(\frac{b}{\sigma}\right) - \phi\left(\frac{a}{\sigma}\right) \dots \dots \dots (4.26)$$

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、

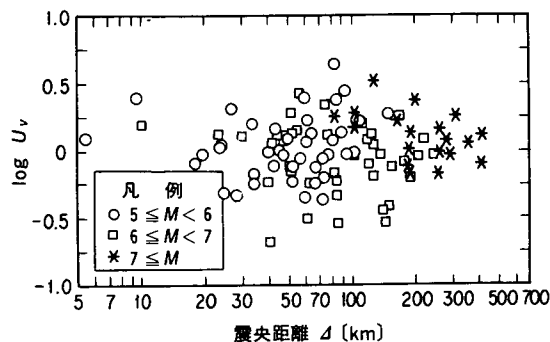
$$p = 1 - P(-\infty < x \leq b) = 1 - \phi\left(\frac{b}{\sigma}\right) \dots \dots \dots (4.27)$$



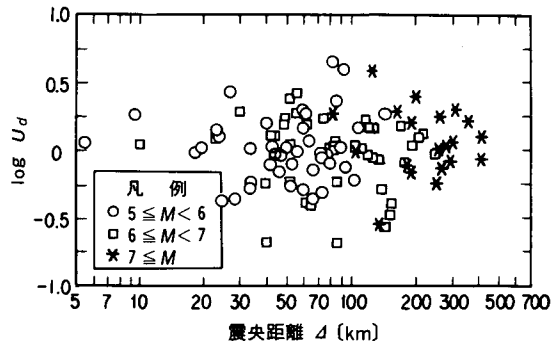
(a) 1種地盤



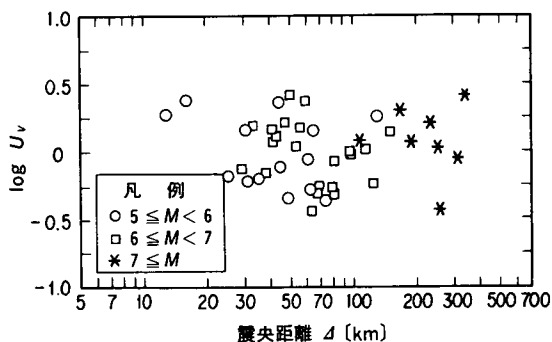
(a) 1種地盤



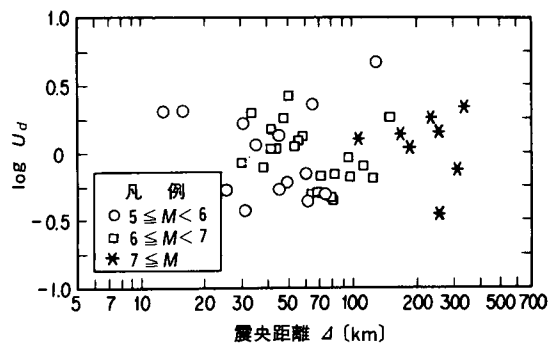
(b) 2種地盤



(b) 2種地盤



(c) 3種地盤



(c) 3種地盤

図-4.14 $\log U_v \sim \Delta \sim M$ の関係

図-4.15 $\log U_a \sim \Delta \sim M$ の関係

となる。 $\log U_a$, $\log U_v$, $\log U_d$ の標準偏差 σ は地盤種別及び $\bar{a}_{\max}$, $\bar{v}_{\max}$, $\bar{d}_{\max}$ 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 $\sigma=0.24$ となる。従って、式(4.25)により、非超過確率に対応する係数 U_a , v_a を求めると図-4.17のようになる。式(4.23)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-4.17の係数 U_a , v_a を乗じて式(4.24)により予測を求めることができる。

表-4.3 $\log U_a$, $\log U_v$, $\log U_d$ の標準偏差

最大地震動	地 盤 種 別		
	1種地盤	2種地盤	3種地盤
最大加速度 $\bar{a}_{\max}$	0.216	0.224	0.197
最大速度 $\bar{v}_{\max}$	0.236	0.239	0.243
最大変位 $\bar{d}_{\max}$	0.262	0.258	0.262

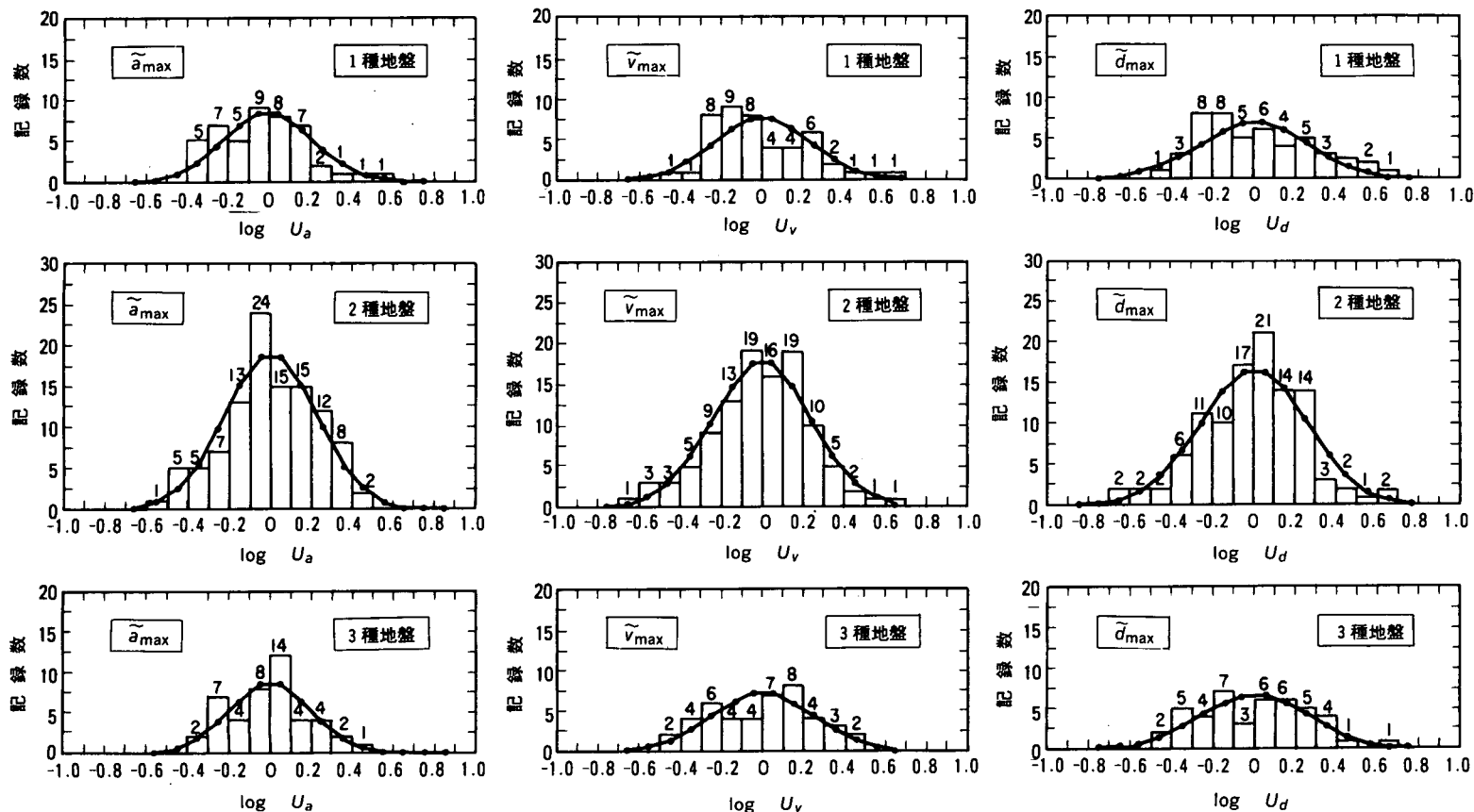
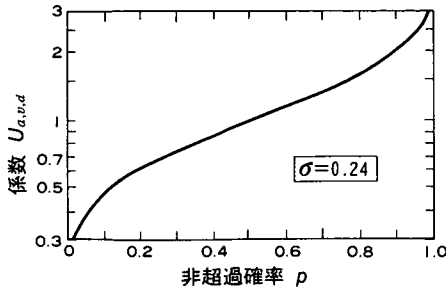


図-4.16 $\log U_a$, $\log U_v$, $\log U_d$ の頻度分布


図-4-17 非超過確率 p ～係数 $U_{a,v,d}$ の関係

5. 上下成分最大地震動の距離減衰式

5.1 上下成分最大地震動の距離減衰式

前章に示した水平成分最大地震動の距離減衰特性に関する検討結果を基に、上下成分最大地震動の距離減衰特性を検討する。水平成分最大地震動と上下成分最大地震動の間では、距離減衰特性に基本的な違いは無いと考えられることから、距離減衰式としては前章に示した式(4-14)のケース7及びケース8を用いることとし、両者の比較から検討を進めることとした。すなわち、

$$X(M, \Delta, GC_i) = a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

$$X(M, \Delta, GC_i) = a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^c \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、

X : 上下成分最大地震動 (最大加速度 $a_{\max}^v$ [gal], 最大速度 $v_{\max}^v$ [cm/s], 最大変位 $d_{\max}^v$ [cm])

表-5-1 式(5.1)を用いた場合の $a_{\max}^v$, $v_{\max}^v$, $d_{\max}^v$ の距離減衰式の係数 a, b, c

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

M : 気象庁によるマグニチュード

Δ : 震央距離

GC_i : 地盤種別 ($i=1, 2, 3$)

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

c : 地盤種別によらないとした場合の係数

ここで、式(5.1)と式(5.2)の違いは、距離($\Delta+30$)にかかる係数 c が地盤種別 GC_i ($i=1, 2, 3$) によって変化すると仮定するかしないかである。

式(5.1)及び(5.2)を用いて2章に示した119成分の上下成分強震記録から求めた最大地震動 $a_{\max}^v$, $v_{\max}^v$, $d_{\max}^v$ を基に重回帰分析により係数 $a(GC_i)$, $b(GC_i)$, c , $c(GC_i)$ を定めるとそれぞれ表-5-1, 表-5-2 のようになる。これより最大加速度 $a_{\max}^v$, 最大速度 $v_{\max}^v$, 最大変位 $d_{\max}^v$ は次式のようにになる。

式(5.1)を用いた場合

$$a_{\max}^v = \begin{cases} 145.8 \times 10^{0.281M} \times (\Delta + 30)^{-1.277} & (1 \text{ 種地盤}) \\ 73.2 \times 10^{0.273M} \times (\Delta + 30)^{-1.078} & (2 \text{ 種地盤}) \\ 13.3 \times 10^{0.419M} \times (\Delta + 30)^{-1.240} & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

$$v_{\max}^v = \begin{cases} 1.77 \times 10^{0.343M} \times (\Delta + 30)^{-1.183} & (1 \text{ 種地盤}) \\ 0.370 \times 10^{0.323M} \times (\Delta + 30)^{-0.720} & (2 \text{ 種地盤}) \\ 0.0847 \times 10^{0.499M} \times (\Delta + 30)^{-0.931} & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

$$d_{\max}^v = \begin{cases} 0.0182 \times 10^{0.509M} \times (\Delta + 30)^{-1.112} & (1 \text{ 種地盤}) \\ 0.0185 \times 10^{0.361M} \times (\Delta + 30)^{-0.611} & (2 \text{ 種地盤}) \\ 0.00367 \times 10^{0.569M} \times (\Delta + 30)^{-0.849} & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

表-5-2 式(5.2)を用いた場合の $a_{\max}^v$, $v_{\max}^v$, $d_{\max}^v$ の距離減衰式の係数 a, b, c

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

式(5・2)を用いた場合

$$a_{\max}^V = \begin{cases} 117.0 \times 10^{0.268M} \\ 88.2 \times 10^{0.297M} \\ 13.5 \times 10^{0.402M} \end{cases} \times (\Delta + 30)^{-1.190} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \quad \dots\dots\dots (5 \cdot 6)$$

$$v_{\max}^V = \begin{cases} 1.02 \times 10^{0.311M} \\ 0.558 \times 10^{0.374M} \\ 0.0837 \times 10^{0.511M} \end{cases} \times (\Delta + 30)^{-0.968} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \quad \dots\dots\dots (5 \cdot 7)$$

$$d_{\max}^V = \begin{cases} 0.0100 \times 10^{0.474M} \\ 0.0289 \times 10^{0.417M} \\ 0.00363 \times 10^{0.579M} \end{cases} \times (\Delta + 30)^{-0.879} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \quad \dots\dots\dots (5 \cdot 8)$$

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

1) 係数 $a(GC_i)$ はいずれの地盤種別の場合にも、 $a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ の順で小さくなる。また、式(5・2)の距離減衰式を用いた $d_{\max}^V$ の場合を除くと、係数 $a(GC_i)$ はいずれの場合も、1種地盤の場合が一番大きく、以下、2種地盤、3種地盤の順となっている。このような傾向は式(5・1)の距離減衰式を用いた場合でも式(5・2)の距離減衰式を用いた場合でもほとんど同じである。

2) 係数 $b(GC_i)$ はいずれの地盤種別の場合にも

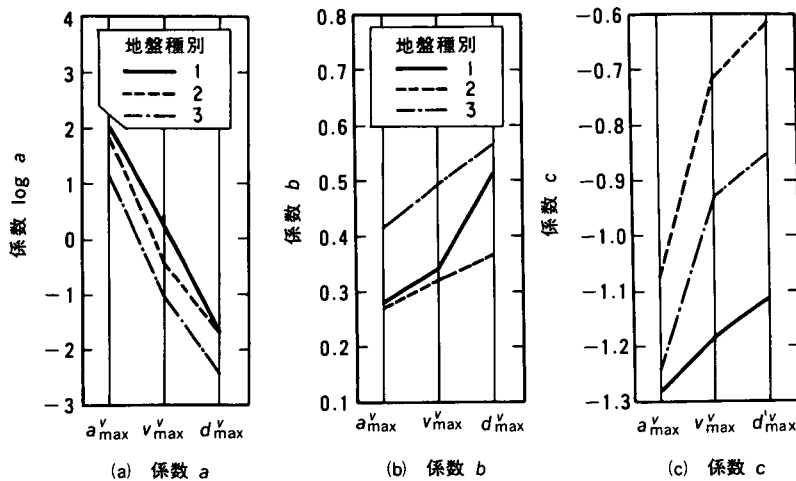


図-5・1 上下成分最大地震動の距離減衰式(式(5・1))の係数 a, b, c

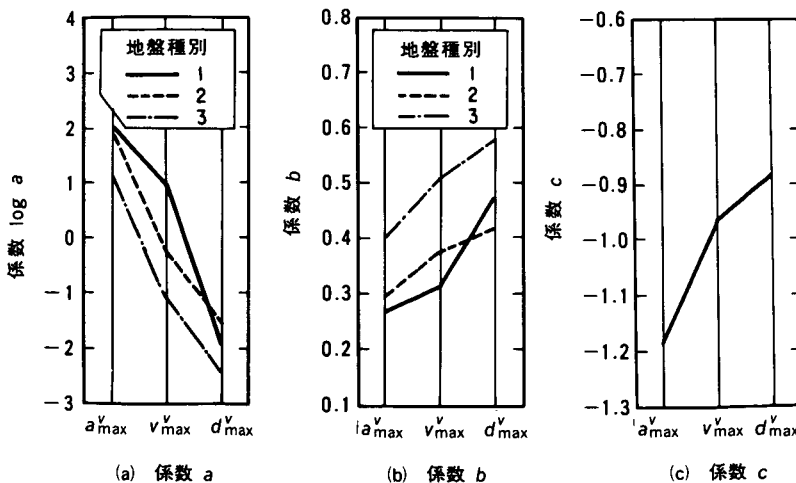


図-5・2 上下成分最大地震動の距離減衰式(式(5・2))の係数 a, b, c

$a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ の順で大きくなる。また、これを地盤種別ごとに比較すると式(5・1)の距離減衰式を用いた $d_{\max}^V$ を除くと $a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ いずれの場合も、一般に3種地盤の係数が一番大きく、また、1種地盤の係数 $b(GC_1)$ および2種地盤の係数 $b(GC_2)$ は相互にあまり変わらない。係数 $b(GC_1)$ は前章に示したようにマグニチュード M が1.0大きくなった場合に最大地震動が何倍になるかを表すものであり、 $a_{\max}^V$ の場合には地盤種別で異なるが、0.27~0.42程度であるのに対し、 $d_{\max}^V$ の場合には、0.36~0.58程度となっており、水平成分最大地震動の場合と同様に、明らかに $a_{\max}^V \rightarrow v_{\max}^V \rightarrow d_{\max}^V$ となるに従い、マグニチュード依存性が強くなることを示している。

3) 係数 $c(GC_i)$ はいずれの地盤種別の場合にも全体として $a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ の順に絶対値が小さくなる。ただし、式(5・1)の距離減衰式を用いた場合を検討すると、 $a_{\max}^V$ の場合には係数 $c(GC_i)$ は地盤種別にあまりよらず-1.1~-1.3程度の範囲に収まっているのに対し、 $d_{\max}^V$ の場合には係数 $c(GC_i)$ は地盤種別によって-0.85~-1.1と比較的大きく変化する。従って、 $d_{\max}^V$ のように係数 $c(GC_i)$ が地盤種別によって大きく変化する場合には式(5・2)の距離減衰式を用いることには、本質的に無理があるかもしれない。これについては今後記録の蓄積を待ち、検討を加えることが必要とされる。

以上のように、最大変位 $d_{\max}^V$ を除くと式(5・1)と式(5・2)の2種類の距離減衰式を用いた場合の係数

$a(GC_i)$, $b(GC_i)$, c , $c(GC_i)$ は共に比較的良く似た特性を示している。そこで式(5・3)~式(5・8)に従い、両ケースの距離減衰特性を $M=6$ 及び $M=8$ の場合について比較した結果が図-5・3である。これによれば、最大加速度 $a_{\max}^V$ の場合には式(5・1)及び式(5・2)の違いはごくわずかであり、実用上はほとんど差がないといってもよい。これに対して、最大変位 $d_{\max}^V$ の場合には、マグニチュード M が大きくなるにつれて式(5・1)と式(5・2)の違いは顕著となり、例えば、 $M=8$ の場合には、震央距離 $\Delta=30\text{km}$ の場合を例にとると、式(5・1)による1種地盤、2種地盤、3種地盤の $d_{\max}^V$ がそれぞれ約2.3cm, 1.1cm, 4cmであるのに対し、式(5・2)による $d_{\max}^V$ はそれぞれ約1.7cm, 1.7cm, 4.2cmとなり、1種地盤及び2種地盤の場合に違いが大きいが分かる。同様な傾向は、最大速度 $v_{\max}^V$ の場合にも多少認められ、 $d_{\max}^V$ の場合と同様マグニチュード M が大きくなると式(5・1)と式(5・2)の距離減衰式間に多少差が生じてくる。ただし、従来の震災経験等から判断すると $d_{\max}^V$, $v_{\max}^V$ いずれの場合にも、同一のマグニチュード及び震央距離に対する最大地震動は地盤種別が、1種、2種、3種の順に大きくなるはずだという観点から試算結果をみると、式(5・2)を用いた場合には、ほぼ期待どおりの距離減衰特性を示すのに対して、式(5・1)を用いた場合には、マグニチュードの大きい場合に必ずしもこのようにはならない。前述した3)の理由により $d_{\max}^V$ (一部には、 $v_{\max}^V$ も含む) に対しては式(5・2)の距離減衰式を適用することには将来検討の余地が

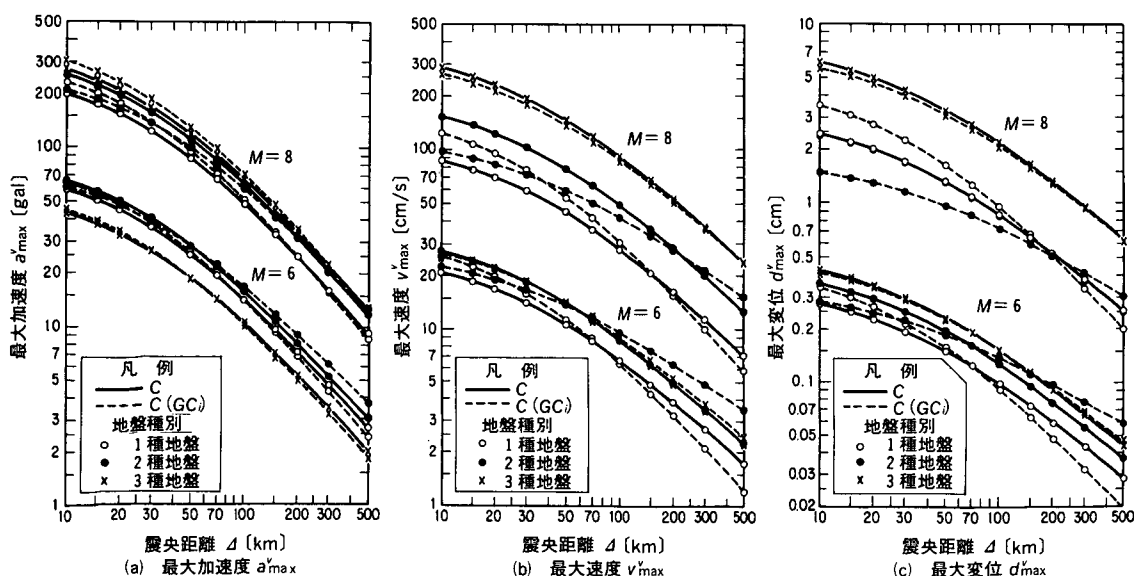


図-5・3 式(5・1)の距離減衰式と式(5・2)の距離減衰式の比較

あると考えられるが、 $d_{\max}^V$ の地盤種別による変化の状況等を総合的に考慮し、一応ここでは、式(5・2)の距離減衰式を仮定した式(5・6)～式(5・8)を採用することとする。

5.2 提案する距離減衰式の特性及び推定式まわりのばらつき

式(5・6)～式(5・8)による $a_{\max}^V$ 、 $v_{\max}^V$ 、 $d_{\max}^V$ を予測式の基となった実測値(ただし、 $v_{\max}^V$ 、 $d_{\max}^V$ は加速度記録から計算で求めた速度及び変位の最大値)と共に示すと、それぞれ図-5・4、図-5・5、図-5・6となる。また、 $a_{\max}^V$ 、 $v_{\max}^V$ 、 $d_{\max}^V$ の距離減衰式をマグニチュード $M=6$ 及び8に対して示すと、図-5・7のようになる。これによれば同一のマグニチュード M 及び震央距離 Δ に

対する最大加速度 $a_{\max}^V$ は、地盤種別によってあまり大きく変化しないのに対して、最大速度 $v_{\max}^V$ 、最大変位 $d_{\max}^V$ の場合には、一般に、1種地盤→2種地盤→3種地盤となるにつれ大きくなることが分かる。ただし、最大変位 $d_{\max}^V$ ではマグニチュード $M=8$ の場合には1種地盤と2種地盤がほとんど同程度の距離減衰を与えるのに対して、3種地盤の距離減衰はこれらよりかなり大きな値を与えており、必ずしも地盤種別による区分が滑らかでない。こうした点については、今後記録の蓄積を図り、再検討が必要と考えられる。

次に、式(5・6)～式(5・8)による最大地震動の推定値のばらつきを示すため、水平成分最大地震動の場合と同様(式(4・23)参照)に実測値とこれが得られた地震のマグニチュード M 及び震央距離 Δ から式(5・6)

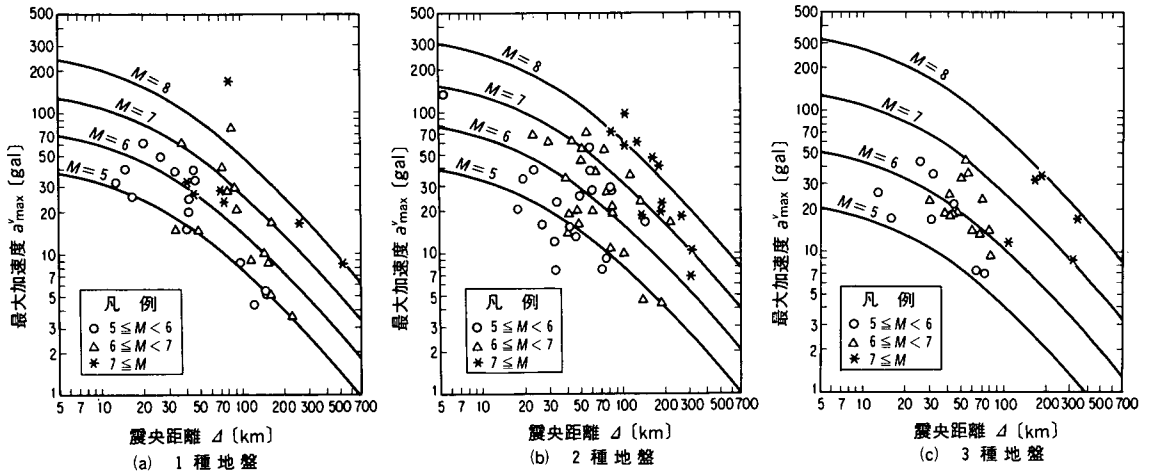


図-5・4 $a_{\max}^V$ の距離減衰式

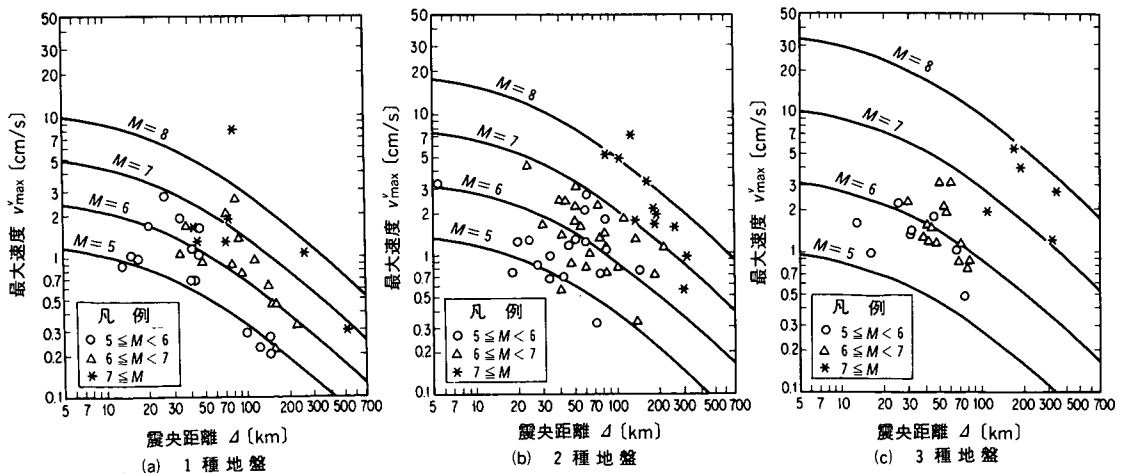


図-5・5 $v_{\max}^V$ の距離減衰式

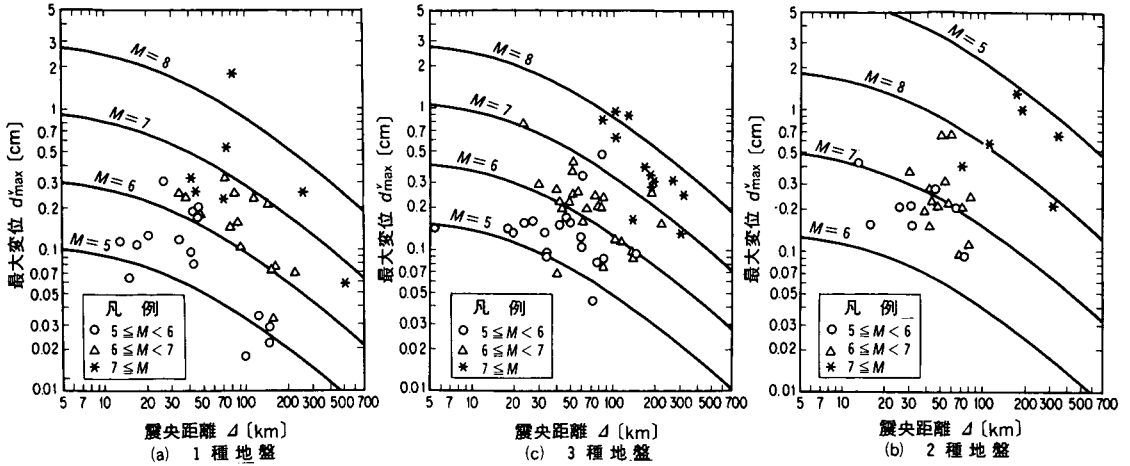


図-5.6 $d_{\max}^V$ の距離減衰式

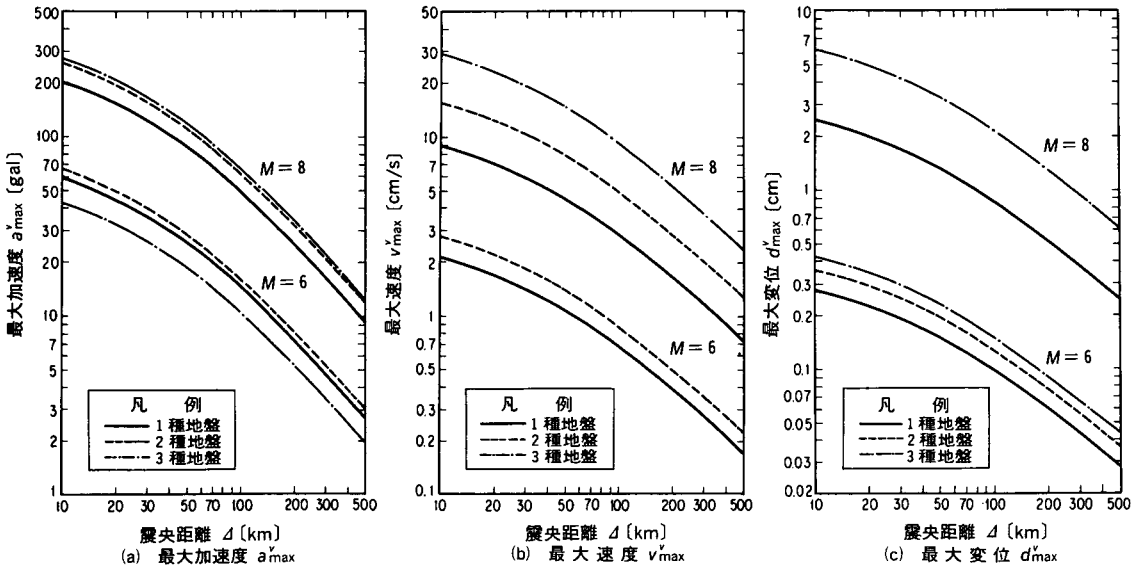


図-5.7 上下成分最大加速度 $a_{\max}^V$, 最大速度 $v_{\max}^V$, 最大変位 $d_{\max}^V$ の距離減衰式 ($M=6$ 及び 8 の場合)

～式(5.8)により求めた推定値の比を次式により定義した。

$$\begin{aligned} U_a^V &= a_{\max}^{VOB} / a_{\max}^{VP} \\ U_v^V &= v_{\max}^{VOB} / v_{\max}^{VP} \dots\dots\dots (5.9) \\ U_d^V &= d_{\max}^{VOB} / d_{\max}^{VP} \end{aligned}$$

ここで、

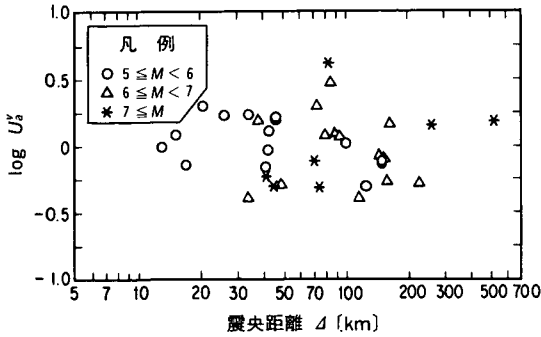
U_a^V, U_v^V, U_d^V : それぞれ最大加速度 $a_{\max}^V$, 最大速度 $v_{\max}^V$, 最大変位 $d_{\max}^V$ のばらつきの度合いを表す指標

$a_{\max}^{VOB}, v_{\max}^{VOB}, d_{\max}^{VOB}$: 重回帰分析の基となった実測の

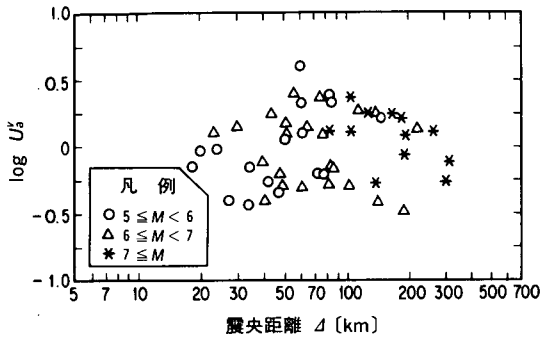
最大加速度[gal], 及び実測加速度から求めた最大速度[cm/s], 最大変位[cm]

$a_{\max}^{VP}, v_{\max}^{VP}, d_{\max}^{VP}$: 式(5.6)～式(5.8)から求められる最大加速度[gal], 最大速度[cm/s], 最大変位[cm]

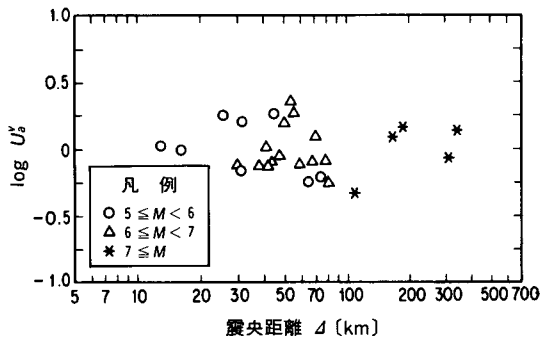
式(5.9)より、 U_a^V, U_v^V, U_d^V を求め、これと M 及び Δ の関係を示すと、それぞれ図-5.8, 図-5.9, 図-5.10 のようになる。これによれば、 U_a^V, U_v^V, U_d^V は M 及び Δ により顕著に変化しない。次に各地盤種別ごとに $\log U_a^V, \log U_v^V, \log U_d^V$ の頻度分布を求めると図-5.11 のようになる。データ数の少ない1種地盤及び3種地



(a) 1 種地盤



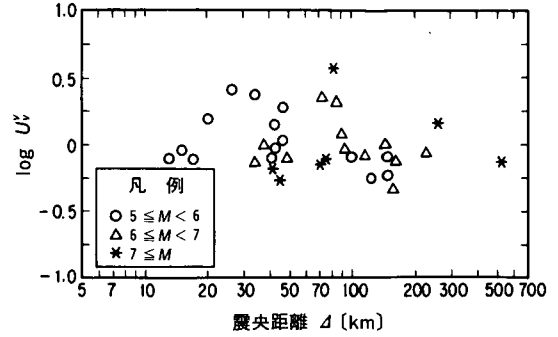
(b) 2 種地盤



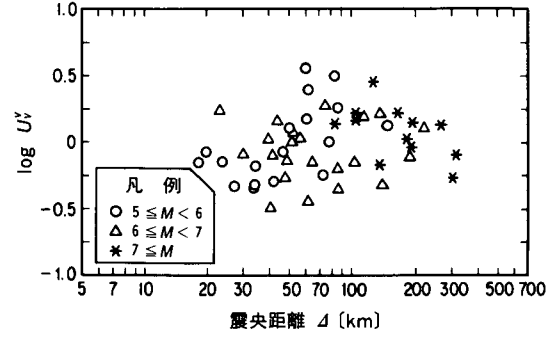
(c) 3 種地盤

図-5-8 $\log U_a^v \sim \Delta \sim M$ の関係

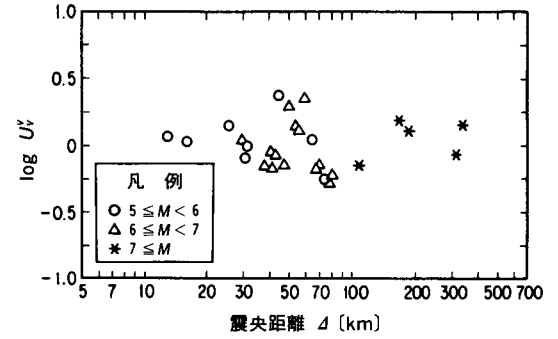
盤の一部では、ややばらつきがあるが、 $\log U_a^v$, $\log U_v^v$, $\log U_d^v$ の頻度分布は水平成分最大地震動の場合と同様に正規分布により近似できることが分かる。 $x = \log U_k^v (k=a, v, d)$ の標準偏差 σ を求めると表-5-3 に示すとおりであり、地盤種別及び $a_{\max}^v$, $v_{\max}^v$, $d_{\max}^v$ ごとに大きく変化しない。従って、これらの平均を求めると $\sigma = 0.22$ となる。これより、式(4-27)により、非超過確率 p に対応する係数 $U_{a,v,d}^v$ を求めると図-5-12 のようになる。式(5-9)による期待値のばらつきを考慮する場合には、非超過確率 p に応じて式(5-6)～式(5-8)による予測値に図-5-12 の係数 $U_{a,v,d}^v$ を乗じて最大



(a) 1 種地盤



(b) 2 種地盤



(c) 3 種地盤

図-5-9 $\log U_v^v \sim \Delta \sim M$ の関係

地震動を推定することができる。

5.3 水平成分最大地震動と上下成分最大地震動の距離減衰特性の比較

前節に示した上下成分最大地震動の距離減衰式の検討に用いた 119 成分の上下成分記録と同時に得られた水平成分記録を含む 2@197 成分の水平成分強震記録を用いた重回帰分析によれば、水平成分最大地震動の距離減衰式は式(4-17)～式(4-19)により与えられる。

従って、以下では、式(5-6)～式(5-8)と式(4-17)～式(4-19)を比較することにより、上下成分最大地震動と

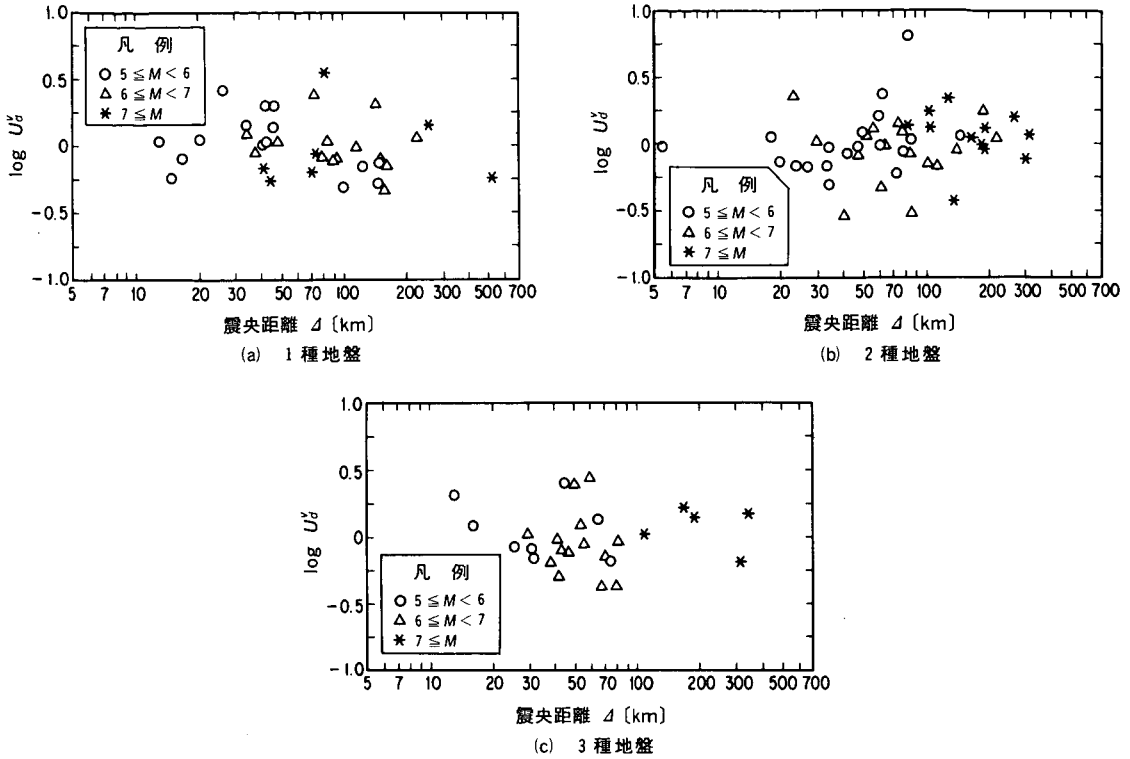


図-5・10 $\log U_d^v \sim \Delta \sim M$ の関係

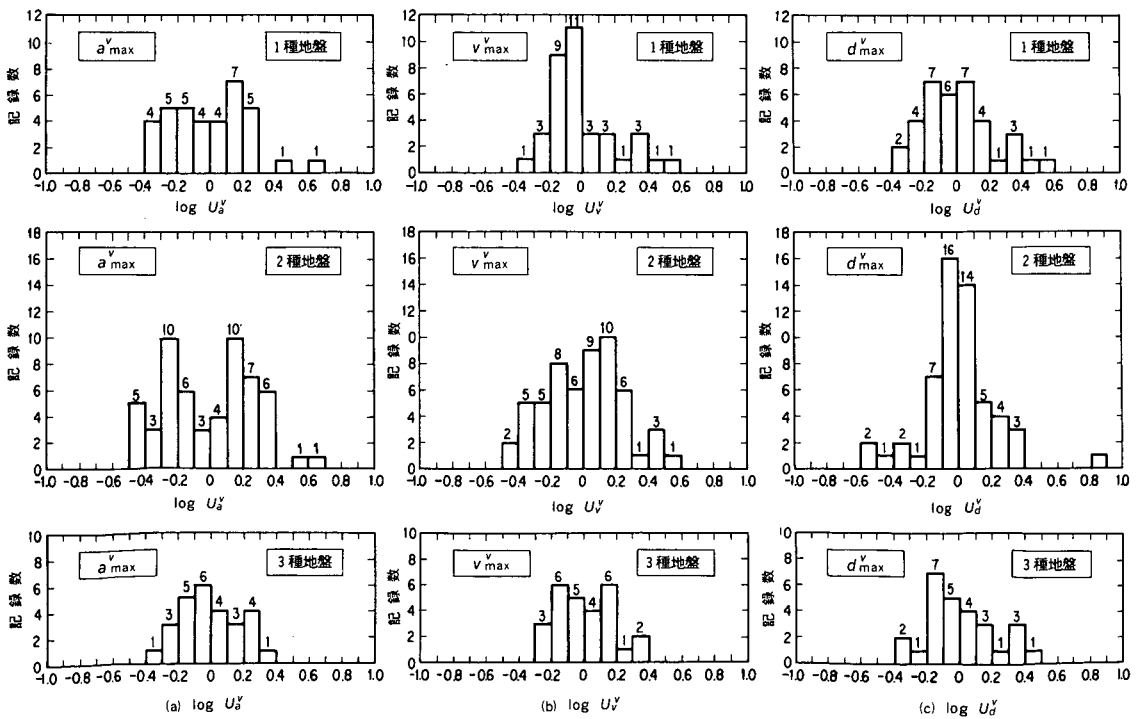


図-5・11 $\log U_a^v$, $\log U_v^v$, $\log U_d^v$ の頻度分布

水平成分最大地震動の違いを検討することとする。まず、マグニチュード $M=6, 7$ 及び 8 に対する最大加速度 ($\bar{a}_{\max}, a_{\max}^V$), 最大速度 ($\bar{v}_{\max}, v_{\max}^V$), 最大変位 ($\bar{d}_{\max}, d_{\max}^V$) を水平成分と上下成分で比較した結果が図-5-13~図-5-15である。これによれば最大加速度, 最大速度, 最大変位を問わず, 一般に上下成分地震動

は水平成分地震動よりも小さく, また, 両者の距離の増加に伴う最大地震動の減少の割合は, 比較的良好

表-5-3 $\log U_a^V, \log U_v^V, \log U_d^V$ の標準偏差

最大地震動	地 盤 種 別		
	1種地盤	2種地盤	3種地盤
最大加速度 $a_{\max}^V$	0.245	0.276	0.183
最大速度 $v_{\max}^V$	0.208	0.241	0.180
最大変位 $d_{\max}^V$	0.216	0.217	0.222

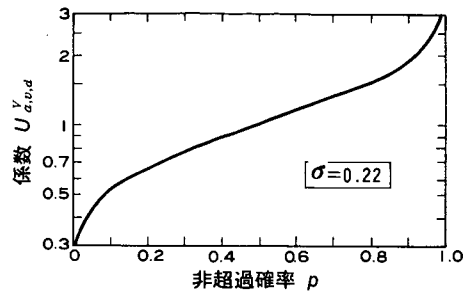


図-5-12 非超過確率 p ~ 係数 $U_{a,v,d}^V$ の関係

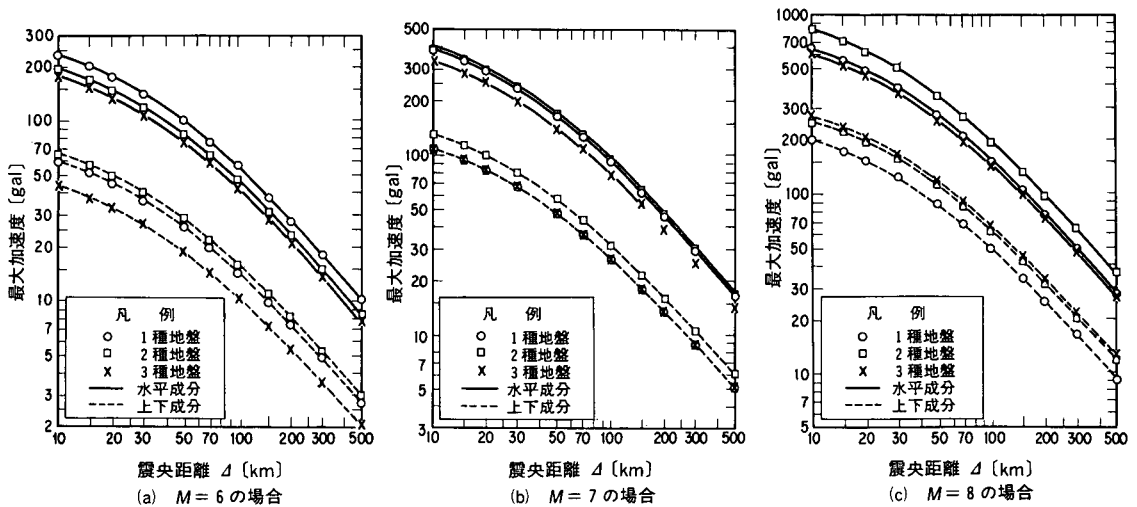


図-5-13 $\bar{a}_{\max}$ と $a_{\max}^V$ の距離減衰の比較

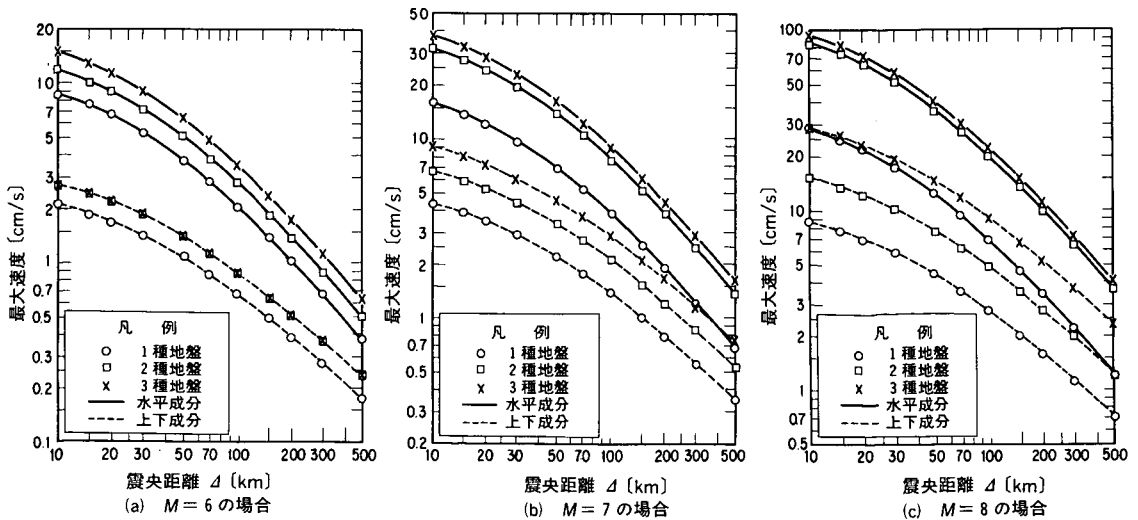


図-5-14 $\bar{v}_{\max}$ と $v_{\max}^V$ の距離減衰の比較

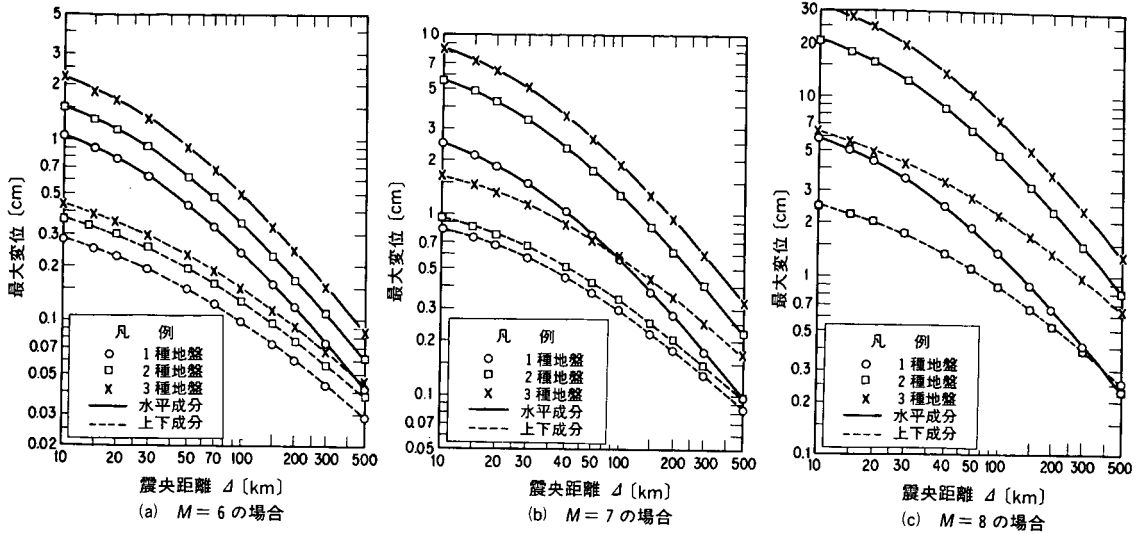


図-5.15 $\tilde{d}_{\max}$ と $d_{v\max}^V$ の距離減衰の比較

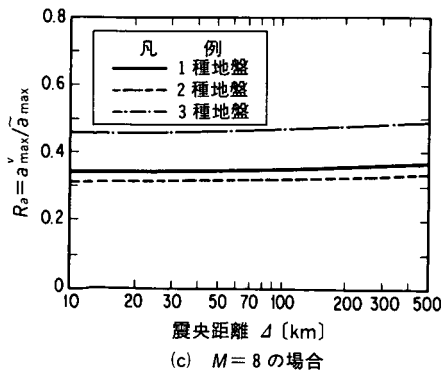
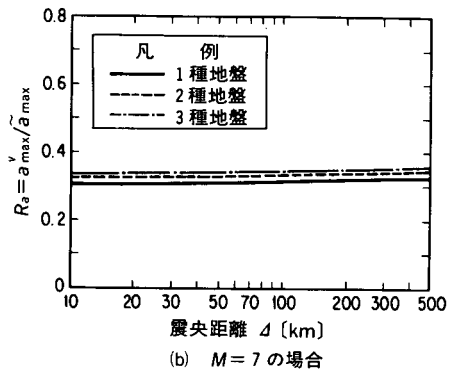
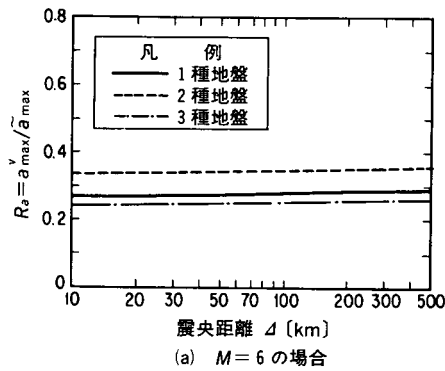


図-5.16 $R_a = a_{\max}^V / \tilde{a}_{\max}$ の試算例

一致している。そこで、いま、次式により水平成分最大地震動に対する上下成分最大地震動の比 R_a, R_v, R_d を定義する。

$$\begin{aligned} R_a &= a_{\max}^V / \tilde{a}_{\max} \\ R_v &= v_{\max}^V / \tilde{v}_{\max} \cdots \cdots (5.10) \\ R_d &= d_{\max}^V / \tilde{d}_{\max} \end{aligned}$$

式(5.10)に式(5.6)～式(5.8)及び式(4.17)～式(4.19)を代入して整理すると R_a, R_v, R_d は次のようになる。

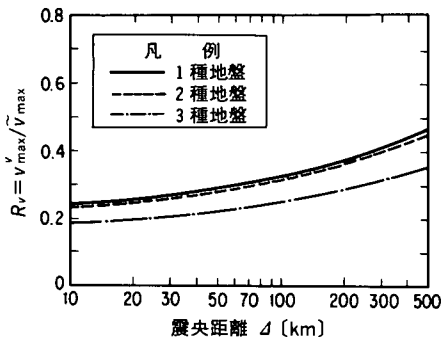
$$R_a = \begin{cases} 0.118 \times 10^{0.0523M} \\ 0.379 \times 10^{-0.0161M} \\ 0.0334 \times 10^{0.136M} \end{cases} \times (\Delta + 30)^{0.0282} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \cdots \cdots (5.11)$$

$$R_v = \begin{cases} 0.0492 \times 10^{0.0475M} \\ 0.199 \times 10^{-0.0562M} \\ 0.0164 \times 10^{0.108M} \end{cases} \times (\Delta + 30)^{0.254} \quad \begin{matrix} (1 \text{ 種地盤}) \\ (2 \text{ 種地盤}) \\ (3 \text{ 種地盤}) \end{matrix} \cdots \cdots (5.12)$$

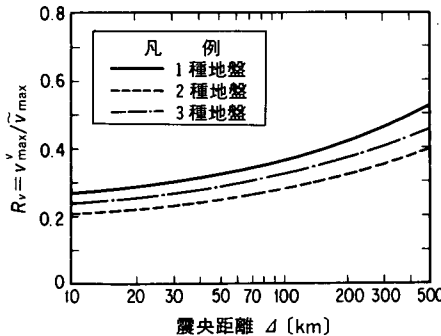
$$R_d = \begin{cases} 0.0161 \times 10^{0.102M} & (1 \text{ 種地盤}) \\ 0.468 \times 10^{-0.150M} & (2 \text{ 種地盤}) \\ 0.0517 \times 10^{-0.00470M} & (3 \text{ 種地盤}) \end{cases} \times (\Delta + 30)^{0.374} \quad \dots\dots\dots (5 \cdot 13)$$

式(5・11)～式(5・13)による R_a , R_v , R_d をマグニチュード $M=6, 7$ 及び 8 に対して計算した結果が図-5・16～図-5・18 である。これによれば, R_a , R_v , R_d に関して以下の事項が指摘される。

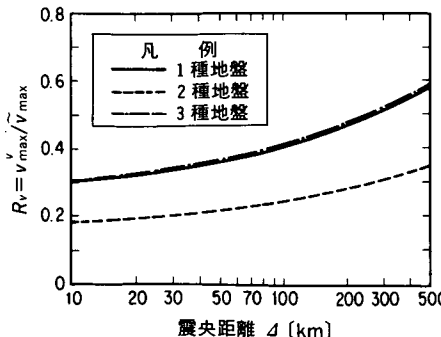
1) 水平成分と上下成分の最大加速度の比 R_a は, 震央距離 Δ , マグニチュード M , 地盤種別 GC_i によって



(a) $M=6$ の場合



(b) $M=7$ の場合

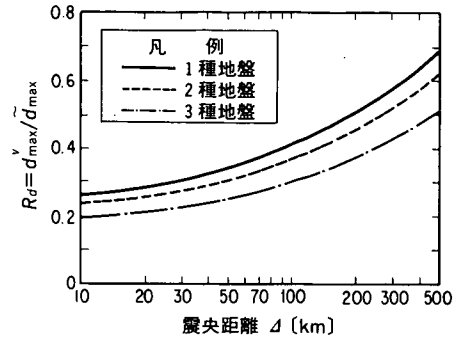


(c) $M=8$ の場合

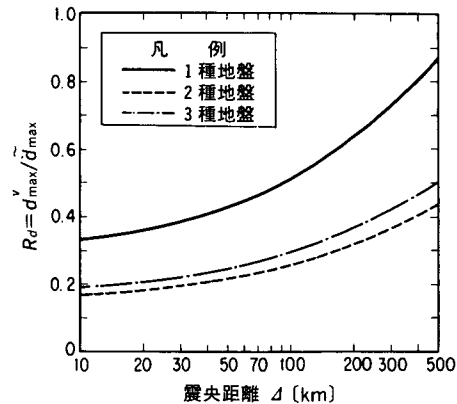
図-5・17 $R_v = v_{\max}^v / \bar{v}_{\max}$ の試算例

大きく変化せず全体として $0.3 \sim 0.4$ 程度の値をとる。ただし, マグニチュードが大きく 8 程度となると 3 種地盤の R_a はやや大きくなり 0.5 程度となる場合がある。

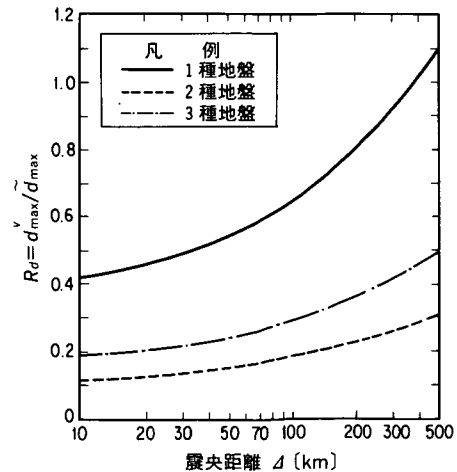
2) 水平成分と上下成分の最大速度の比 R_v は, 震央



(a) $M=6$ の場合



(b) $M=7$ の場合



(c) $M=8$ の場合

図-5・18 $R_d = d_{\max}^v / \bar{d}_{\max}$ の試算例

距離 Δ によって変化し、一般に震央距離 Δ が大きくなるにつれて R_0 は大きくなる傾向にある。ただし、地震のマグニチュード M 及び地盤種別 GC_i の影響は比較的小さい。震央距離 $\Delta=100\text{km}$ での R_0 を求めると、0.2~0.4 程度となる。

3) 水平成分と上下成分の最大変位の比 R_d は、震央距離 Δ 及び地盤種別によって大きく変化し、震央距離 Δ が大きくなると共に、また、1 種地盤の場合に R_d は大きくなる傾向にある。ただし、単純に式(5・13)で R_d を求めると震央距離の大きい範囲で R_d が 1.0 を超える場合も出てくるが、このような現象は既往の観測からは認められない。 $d_{\max}^V$ 及び $\tilde{d}_{\max}$ の予測式の精度とも併せて式(5・13)は、今後再検討が必要である。

6. 水平成分加速度応答スペクトルの距離減衰式

6.1 距離減衰式の形式の検討

加速度応答スペクトルの距離減衰式に関しては、従来、前章に示した最大地震動の距離減衰式ほどの検討が加えられていない。このため、加速度応答スペクトルの距離減衰式としてどのような形が実測値との適合性がよいかをまず検討しなければならない。加速度応答スペクトルは、地震動による線形一自由度系の絶対最大応答加速度を固有周期 T 及び減衰定数 h の関数として表したものであるが、地震動の強度を周期成分ごとに応答加速度によって表した量であると考えられることもできる。このため、基本的には、4 章及び 5 章に示した最大地震動に対する距離減衰特性と同様の特徴を有していると考えられることができる。

このような点から、本章では、水平成分加速度応答スペクトルの距離減衰式として式(6・1)を仮定し、4 章と同様に距離減衰式に含まれる説明変数の数の影響から検討することとした。

$$\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} \quad \dots (6 \cdot 1)$$

ここで、

$\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$: 水平 2 成分の合成を考慮した減衰定数 5% の水平成分絶対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)

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 秒の 10 個としている。

$a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(T_k, GC_i)$: 固有周期 $T_k (k=1, 2, 3, \dots, 10)$ 及び地盤種別 $GC_i (i=1, 2, 3)$ ごとに定められる係数

式(6・1)の対数をとると

$$\log \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = \log a(T_k, GC_i) + b(T_k, GC_i)M + c(T_k, GC_i) \log(\Delta + 30) \quad \dots (6 \cdot 2)$$

となり、式(4・2)と同様に、 $\log \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$ を M 及び $\log(\Delta + 30)$ の線形回帰式で表すことができる。係数 $a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(T_k, GC_i)$ は固有周期及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、4・1 節と同様に、距離減衰式の形式が加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$ の距離減衰特性にどのような影響があるかを検討するために、式(4・6)にならって、式(6・2)に震源深さ D_F の項を追加して、加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$ を次式で与えることとした。

$$\log \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = \log a(T_k, GC_i) + b(T_k, M, \Delta, GC_i)M + c(T_k, M, \Delta, GC_i) \log(\Delta + 30) + d(T_k, M, \Delta, GC_i)D_F \quad \dots (6 \cdot 3)$$

ここで、係数 $b(T_k, M, \Delta, GC_i), c(T_k, M, \Delta, GC_i), d(T_k, M, \Delta, GC_i)$ は固有周期 T_k 、地盤種別 GC_i ごとにそれぞれ、 $M, \log(\Delta + 30), D_F$ の線形 1 次式として次式で与えるものとする。

$$\begin{aligned} b(T_k, M, \Delta, GC_i) &= \beta_1 + \beta_2 M + \beta_3 \log(\Delta + 30) + \beta_4 D_F \\ c(T_k, M, \Delta, GC_i) &= \beta_5 + \beta_6 M + \beta_7 \log(\Delta + 30) + \beta_8 D_F \\ d(T_k, M, \Delta, GC_i) &= \beta_9 + \beta_{10} M + \beta_{11} \log(\Delta + 30) + \beta_{12} D_F \quad \dots (6 \cdot 4) \end{aligned}$$

ここで、 $\beta_j (j=1 \sim 12)$ は固有周期 $T_k (k=1, 2, \dots, 10)$ 及び地盤種別 $GC_i (i=1, 2, 3)$ ごとに定められる係数である。式(6・4)を式(6・3)に代入して整理すると次のようになる。

$$\log \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = g_1 + g_2 M + g_3 \log(\Delta + 30)$$

$$+g_4 D_P + g_5 M \log(\Delta + 30) + g_6 M D_P \\ + g_7 D_P \log(\Delta + 30) + g_8 M^2 + g_9 \{\log(\Delta + 30)\}^2 \\ + g_{10} D_P^2 \dots\dots\dots (6.5)$$

ここで、

$$g_1 = \log(T_k, GC_i), g_2 = \beta_1, g_3 = \beta_5, \\ g_4 = \beta_9, g_5 = \beta_3 + \beta_6, g_6 = \beta_4 + \beta_{10}, \\ g_7 = \beta_8 + \beta_{11}, g_8 = \beta_2, g_9 = \beta_7, \\ g_{10} = \beta_{12} \dots\dots\dots (6.6)$$

$g_j (j=1\sim 10)$ は固有周期 $T_k (k=1, 2, 3, \dots, 10)$ 及び地盤種別 $GC_i (i=1, 2, 3)$ ごとに与えられる係数である。式(6.5)は最大地震動の場合の式(4.8)に対応するものであり、式(6.2)と比較すると、 $D_P, M \log(\Delta + 30), MD_P, D_P \log(\Delta + 30), M^2, \{\log(\Delta + 30)\}^2, D_P^2$ 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 $\log \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$ を表していることになる。

そこで、4.1節と同じ手法を用いて、式(6.5)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、総当たり法により、各固有周期 T_k 及び地盤種別 $GC_i (i=1, 2, 3)$ ごとに求めた。例えば、 $j=2$ の場合には、各固有周期 T_k 及び地盤種別 $GC_i (i=1, 2, 3)$ ごとに、 ${}_9C_2=9!/2!(9-2)!=36$ 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組の水平成分の $\tilde{S}_A$ スペクトル(減衰定数5%)である。地盤種別は4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。

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 秒及び2秒の場合に対して求めると図-6.1に示すとおりとなる。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、4章に示した水平成分最大地震動の場合と同様に $j=2$ の場合の距離減衰式にこれ以上 $M, D_P, \log(\Delta + 30)$ に係わる項を加えても重相関係数 R はあまり大きくなら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、距離減衰式に選択される項の組み合わせは、固有周期ごと及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種及び3種地盤の例を除けば、他のケースでは、すべて、 M 及び $\log(\Delta + 30)$ の組み合わせの場合に重相関係数 R は最大値をとる。 $T_k=0.2$ 秒の場合の1種及び3種地盤の例では変数を M 及び $\log(\Delta + 30)$ 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-6.1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。

4) 自由度調整済み重相関係数 R^* についても、上記1)~3)と基本的に変わらない。

以上は重相関係数 R だけに着目した検討結果であるが、実際に式(6.5)の距離減衰式により加速度応答スペクトルを試算した例として、 $j=2, 3$ 及び9の場合の結果を以下に示す。ここで、 $j=2$ は式(6.1)に相当し、 $j=3$ は式(6.1)にさらにもう1項加えた場合の距離減衰式をそれぞれ表している。考慮する項数 $j=2, 3$ 及び9の距離減衰式としては、図-6.1の検討結果に基づき次式を選んだ。

$j=2$ の場合

$$\log \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) \\ = g_1 + g_2 M + g_3 \log(\Delta + 30) \dots\dots\dots (6.7)$$

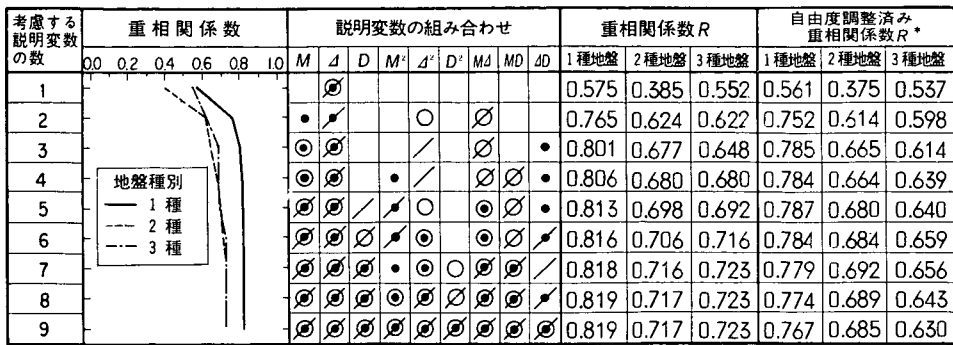
$j=3$ の場合

$$\log \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = g_1 + g_2 M \\ + g_3 \log(\Delta + 30) + g_5 M \log(\Delta + 30) \dots\dots (6.8)$$

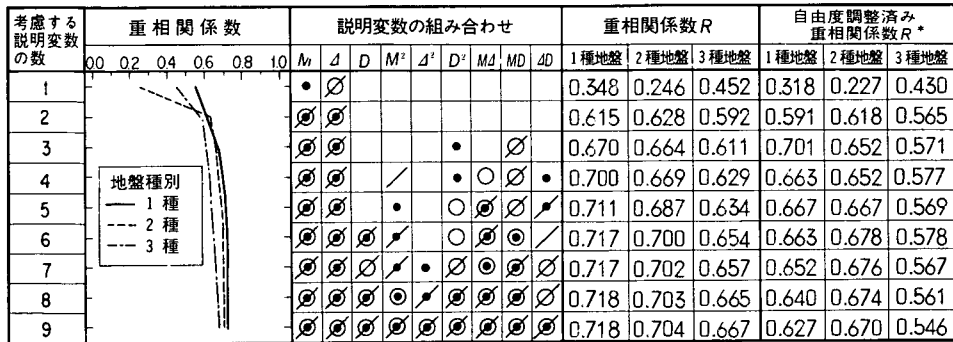
$j=9$ の場合

$$\log \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, D_P, GC_i) = g_1 + g_2 M \\ + g_3 \log(\Delta + 30) + g_4 D_P + g_5 M \log(\Delta + 30) \\ + g_6 M D_P + g_7 D_P \log(\Delta + 30) + g_8 M^2 \\ + g_9 \{\log(\Delta + 30)\}^2 + g_{10} D_P^2 \dots\dots\dots (6.9)$$

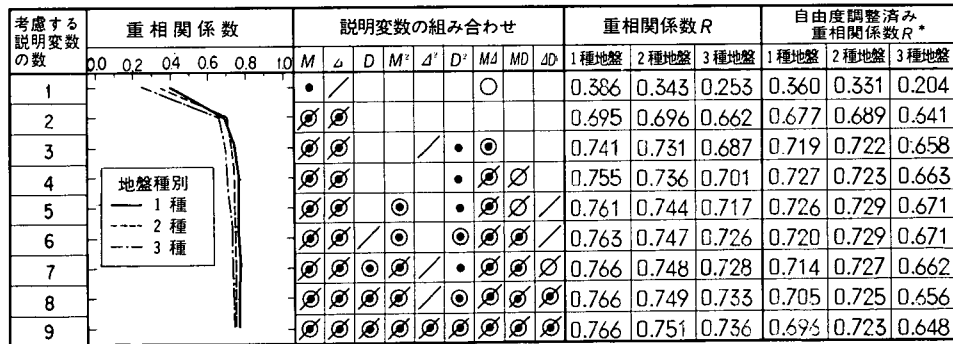
ここで、式(6.7)~式(6.9)の係数の例として固有周期0.5秒の場合を示すと、地盤種別 GC_i に応じて表-6.1に示すとおりとなる。これより $j=2, 3, 9$ に対する距離減衰(固有周期 $T_k=0.5$ 秒の場合)を $M=5, 6, 7, 8$ に対して試算すると、それぞれ図-6.2, 図-6.3, 図-6.



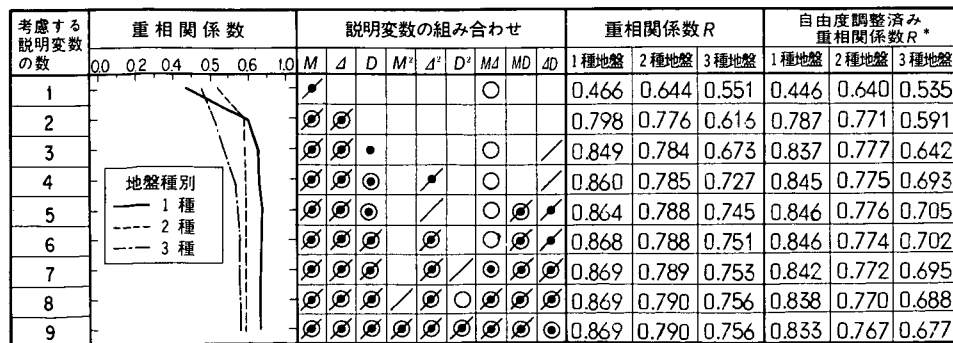
(a) SA(0.2)



(b) SA(0.5)



(c) SA(0.7)



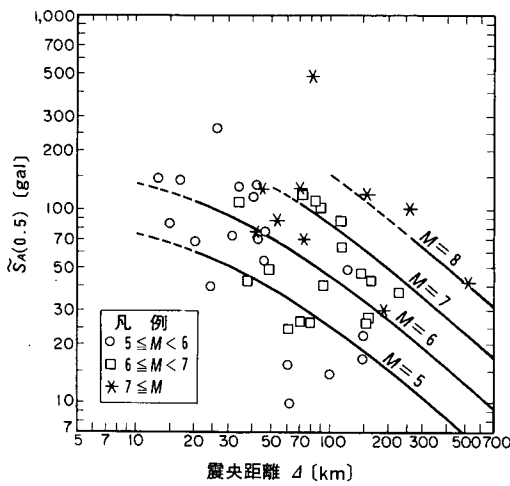
(d) SA(2.0)

凡 例
○ 1種地盤
● 2種地盤
／ 3種地盤

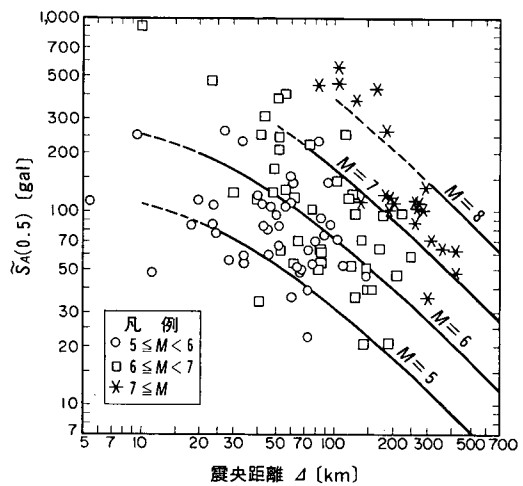
図-6.1 水平成分加速度応答スペクトルの距離減衰式に含まれる説明変数の数が予測精度に及ぼす影響

表-6・1 水平成分加速度応答スペクトルの距離減衰式の項数 $j=2, 3, 9$ の場合の係数

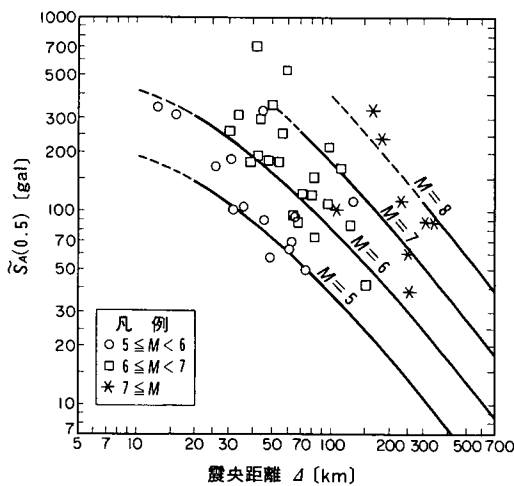
変数の数	固有周期	地盤種別	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
$j=2$	$T=0.5$	1種	2.046	0.261	-0.924							
		2種	1.937	0.358	-1.052							
		3種	2.777	0.338	-1.360							
$j=3$	$T=0.5$	1種	7.961	-0.696	-3.862		0.472					
		2種	0.860	0.528	-0.533		-0.081					
		3種	7.016	-0.310	-3.438		0.315					
$j=9$	$T=0.5$	1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}



(a) 1種地盤



(b) 2種地盤

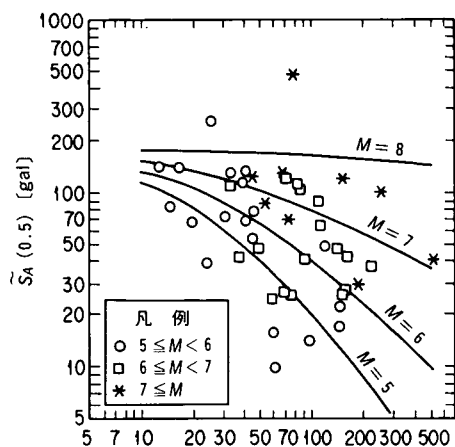


(c) 3種地盤

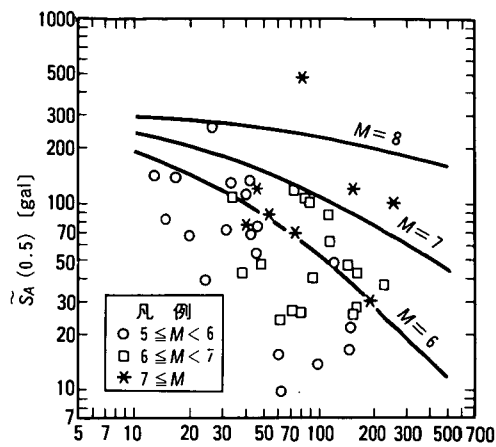
図-6・2 $\tilde{S}_A(0.5)$ スペクトルの距離減衰特性 ($j=2$ の場合)

4に示すとおりである。これによると、 $j=9$ の場合には4章に示した最大地震動の場合と同様に震央距離の増加に伴い $\tilde{S}_A$ 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の経験的事実とは明らかに一致しない。また、 $j=3$ の場合についても同様であり、1種地盤の場合には $M=8$ の場合に距離による減衰がほとんど無く、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、震央距離及び地盤種別の変化に伴い相互に比較的調和のとれた変化を示し、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、 $j=3$ 及び 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。

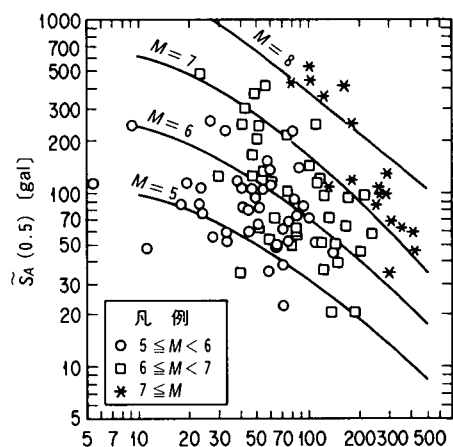
以上をまとめると、 $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の形に関しては次のようにまとめることができる。すなわち、 $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰特性を検討するために、



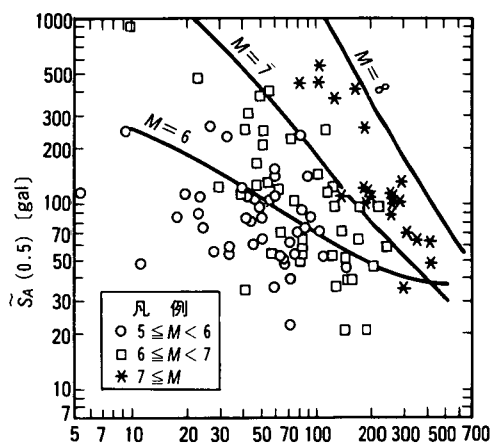
震央距離 Δ [km]
(a) 1 種地盤



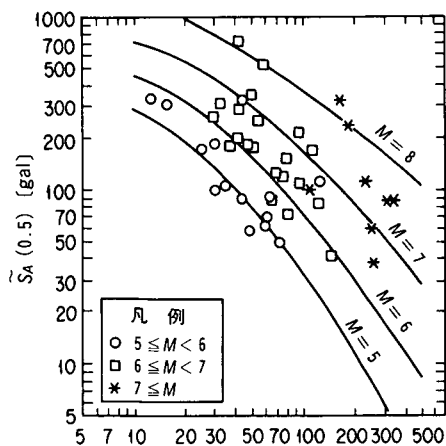
震央距離 Δ [km]
(a) 1 種地盤



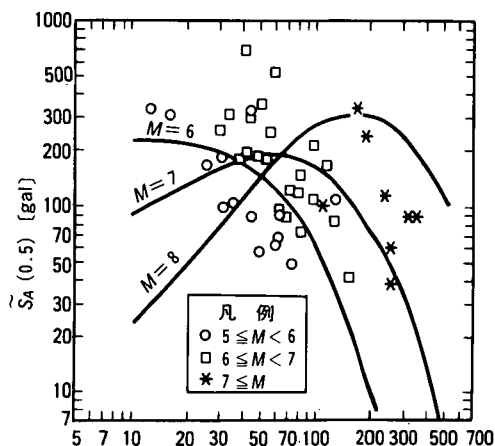
震央距離 Δ [km]
(b) 2 種地盤



震央距離 Δ [km]
(b) 2 種地盤



震央距離 Δ [km]
(c) 3 種地盤



震央距離 Δ [km]
(c) 3 種地盤

図-6-3 $\tilde{S}_A(0.5)$ スペクトルの距離減衰特性
($j=3$ の場合)

図-6-4 $\tilde{S}_A(0.5)$ スペクトルの距離減衰特性
($j=9$ の場合)

現状において工学的に利用可能な情報は、最大地震動の場合と同様に、地震の規模（マグニチュード M ）及び距離の指標（震央距離 Δ 、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(6・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 及び $\log(\Delta+30)$ 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 、 $\log(\Delta+30)$ の2乗までの項及びこれら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 及び $\log(\Delta+30)$ 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。従って、今回の検討結果の範囲では、式(6・2)のように $\log \tilde{S}_A$ を M 及び $\log(\Delta+30)$ 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 Δ 、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、大きなばらつきを有している理由としては4・1節の最大地震動の項で示したと同じ理由が挙げられる。

6.2 距離減衰式の地盤種別依存性の検討

式(6・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、4・2節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 $\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$ 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 及び Δ の2変数を選び、式(6・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、 $\tilde{S}_A$ スペクトルを与えるためには、以下の8種類の推定式が考えられる。

$$\begin{aligned} \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) \\ \left\{ \begin{aligned} &a(T_k) \times 10^{b(T_k)M} \times (\Delta+30)^{c(T_k)} \end{aligned} \right. \quad (\text{ケース 1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &a(T_k) \times 10^{b(T_k)M} \times (\Delta+30)^{c(T_k, GC_i)} \quad (\text{ケース 2}) \\ &a(T_k) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta+30)^{c(T_k)} \quad (\text{ケース 3}) \\ &a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k)M} \times (\Delta+30)^{c(T_k)} \quad (\text{ケース 4}) \\ = &a(T_k) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta+30)^{c(T_k, GC_i)} \quad (\text{ケース 5}) \\ &a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k)M} \times (\Delta+30)^{c(T_k, GC_i)} \quad (\text{ケース 6}) \\ &a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta+30)^{c(T_k)} \quad (\text{ケース 7}) \\ &a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta+30)^{c(T_k, GC_i)} \quad (\text{ケース 8}) \\ &\dots\dots\dots (6 \cdot 10) \end{aligned}$$

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している。式(6・10)のケース1では、係数 a 、 b 、 c が共に地盤種別 GC_i によらないため、地盤種別ごとの $\tilde{S}_A$ 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 がすべて地盤種別によるとしたもので、この場合には1〜3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、4・2節と同様にダミー変数を用いる。例えば、式(6・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。

$$\begin{aligned} \log \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = &\log a(T_k, GC_i) \\ &+ \alpha_2 \log a(T_k, GC_2) + \alpha_3 \log a(T_k, GC_3) \\ &+ \{b(T_k, GC_i) + \alpha_2 b(T_k, GC_2) \\ &+ \alpha_3 b(T_k, GC_3)\} M + c(T_k) \log(\Delta+30) \quad (6 \cdot 11) \end{aligned}$$

ここで、

$\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$: 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 $\tilde{S}_A$ スペクトル [gal]

$$\begin{aligned} \alpha_2 = &\begin{cases} 0 & \dots\dots\dots GC_i=1, 3 \text{ の場合} \\ 1 & \dots\dots\dots GC_i=2 \text{ の場合} \end{cases} \\ \alpha_3 = &\begin{cases} 0 & \dots\dots\dots GC_i=1, 2 \text{ の場合} \\ 1 & \dots\dots\dots GC_i=3 \text{ の場合} \end{cases} \end{aligned}$$

$a(T_k, GC_1)$, $a(T_k, GC_2)$, $a(T_k, GC_3)$,
 $b(T_k, GC_1)$, $b(T_k, GC_2)$, $b(T_k, GC_3)$,
 $c(T_k)$: 固有周期 $T_k(k=1, 2, \dots, 10)$ ごとに
 重回帰分析により定める定数。

式(6・11)は、 c の項が地盤種別 GC_i ごとに変化して
 いないが、これは式(6・11)を次の形に書き改めると
 よくわかる。

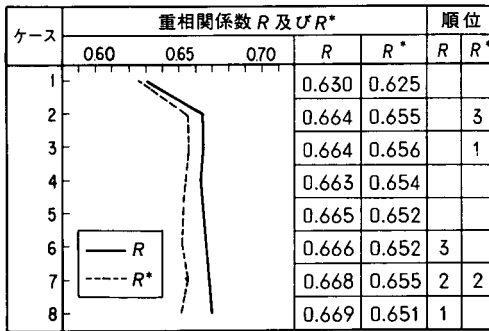
$$\begin{aligned}
 \log \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_1) &= \log a(T_k, GC_1) \\
 &+ b(T_k, GC_1)M + c(T_k) \log(\Delta + 30) \\
 \log \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_2) &= \{\log a(T_k, GC_1) \\
 &+ \log a(T_k, GC_2)\} + \{b(T_k, GC_1) \\
 &+ b(T_k, GC_2)\}M + c(T_k) \log(\Delta + 30) \\
 \log \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_3) &= \{\log a(T_k, GC_1) \\
 &+ \log a(T_k, GC_3)\} + \{b(T_k, GC_1) \\
 &+ b(T_k, GC_3)\}M + c(T_k) \log(\Delta + 30) \dots (6 \cdot 12)
 \end{aligned}$$

このようにして、2章に示した197組の水平成分 $\tilde{S}_A$

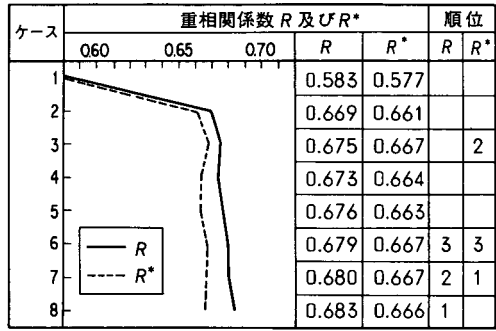
スペクトルを用いて、ケース1～ケース8の係数を定
 め、それぞれのケースにおける重相関係数 R 、及び自
 由度調整済み重相関係数 R^* を求めると、図-6・5(固有
 周期 $T_k=0.2, 0.5, 0.7, 2$ 秒の場合)のようになる。これ
 より、以下の事項が指摘される。

1) 係数 a, b, c をすべて地盤種別 GC_i ごとに同一
 としたケース1では、重相関係数 R は、他のケースに
 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及びケ
 ース8では、重相関係数 R は、これよりもやや大き
 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。

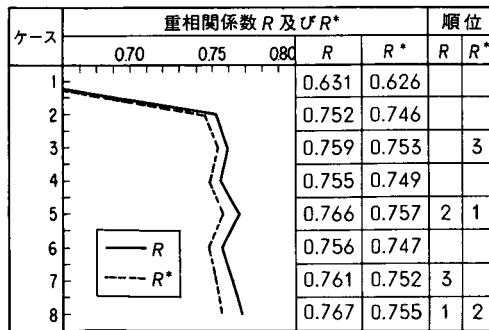
2) 自由度調整済み重相関係数 R^* によって、ケ
 ース1～ケース8を比較しても、上記1)と同様の傾向が認



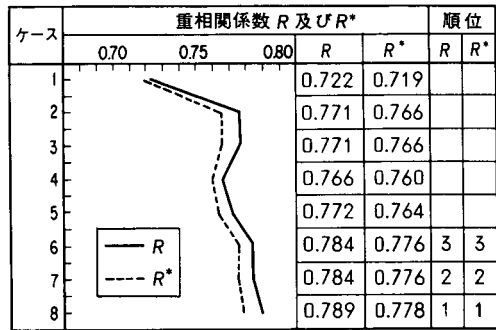
(a) $\tilde{S}_A(0.2)$



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



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



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

ケース	係数 a, b, c	ケース	係数 a, b, c
1	$a(T_k), b(T_k), c(T_k)$	5	$a(T_k), b(T_k, GC_i), c(T_k, GC_i)$
2	$a(T_k), b(T_k), c(T_k, GC_i)$	6	$a(T_k, GC_i), b(T_k), c(T_k, GC_i)$
3	$a(T_k), b(T_k, GC_i), c(T_k)$	7	$a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(T_k)$
4	$a(T_k, GC_i), b(T_k), c(T_k)$	8	$a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(T_k, GC_i)$

図-6・5 $\tilde{S}_A$ 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

められる。

ケース 7 及びケース 8 の距離減衰特性の比較等に関しては 6・4 節に示すこととする。

6.3 距離減衰式の固有周期依存性の検討

6.2 節の解析では、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 $T_k (k=1, 2, \dots, 10)$ によって変わると仮定した。ここでは、6.2 節とは反対に、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。

6.1 節の検討結果に基づき、説明変数としては M 及び Δ の 2 つを選び、式(6・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、 $\tilde{S}_A$ スペクトルを表すためには、以下の 8 種類の推定式が考えられる。

$$\begin{aligned} \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) &= \begin{cases} a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} & \text{(ケース 1)} \\ a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} & \text{(ケース 2)} \\ a(GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} & \text{(ケース 3)} \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} & \text{(ケース 4)} \\ a(GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} & \text{(ケース 5)} \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} & \text{(ケース 6)} \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} & \text{(ケース 7)} \\ a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} & \text{(ケース 8)} \end{cases} \\ &\dots\dots\dots(6 \cdot 13) \end{aligned}$$

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それぞれ表している。式(6・3)でケース 1 は、係数 a, b, c が共に固有周期 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 がすべて地盤種別 GC_i 及び固有周期 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、各固有周期及び地盤種別ごとに、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。例えば、式(6・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。

$$\begin{aligned} \log \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) &= \log a(T_1, GC_i) \\ &+ \beta_2 \log a(T_2, GC_i) + \dots + \beta_m \log a(T_k, GC_i) + \dots \\ &+ \beta_{10} \log a(T_{10}, GC_i) + \{b(T_1, GC_i) \\ &+ \beta_2 b(T_2, GC_i) + \dots + \beta_m b(T_k, GC_i) + \dots \\ &+ \beta_{10} b(T_{10}, GC_i)\} M + c(GC_i) \log(\Delta + 30) \\ &\dots\dots\dots(6 \cdot 14) \end{aligned}$$

ここで、

$\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$: 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 $\tilde{S}_A$ スペクトル [gal]

$\beta_m = \begin{cases} 0 & \dots\dots\dots k \neq m \text{ の場合} \\ 1 & \dots\dots\dots k = m \text{ の場合 } (m=2, 3, \dots, 10) \end{cases}$
 $k=1, 2, \dots, 10$

$T_1, T_2, \dots, T_{10}$: 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 秒である

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

式(6・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(6・14)を次の形に書に改めるとよく分かる。

$$\begin{aligned} \log \tilde{S}_A(T_1, M, \Delta, GC_i) &= \log a(T_1, GC_i) \\ &+ b(T_1, GC_i)M + c(GC_i) \log(\Delta + 30) \\ \log \tilde{S}_A(T_2, M, \Delta, GC_i) &= \{\log a(T_1, GC_i) \\ &+ \log a(T_2, GC_i)\} + \{b(T_1, GC_i) \\ &+ b(T_2, GC_i)\}M + c(GC_i) \log(\Delta + 30) \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \log \tilde{S}_A(T_m, M, \Delta, GC_i) &= \{\log a(T_i, GC_i) \\ &+ \log a(T_m, GC_i)\} + \{b(T_i, GC_i) \\ &+ b(T_m, GC_i)\} M + c(GC_i) \log(\Delta + 30) \\ &\vdots \\ \log \tilde{S}_A(T_{10}, M, \Delta, GC_i) &= \{\log a(T_i, GC_i) \\ &+ \log a(T_{10}, GC_i)\} + \{b(T_i, GC_i) \\ &+ b(T_{10}, GC_i)\} M + c(GC_i) \log(\Delta + 30) \\ &\dots\dots\dots (6 \cdot 15) \end{aligned}$$

このようにして、2章に示した197組の $\tilde{S}_A$ 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 及び自由度調整済み重相関係数 R^* を求めると、図-6・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 をすべての固有周期に対して同一としたケース1では、重相関係数 R は、他のケースと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及びケース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。

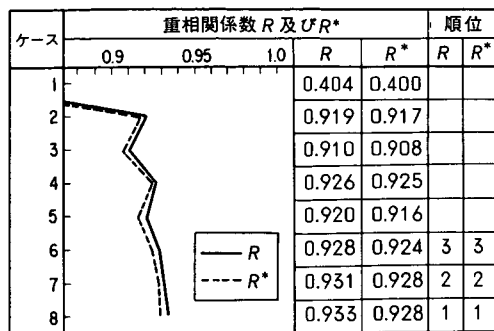
2) 自由度調整済み重相関係数 R^* によって、ケース1～ケース8を比較しても、上記1)と同様の傾向が認められる。しかしながら、1種地盤を除く2種及び3種地盤の場合には、ケース7で R^* は最大となっている。また、1種地盤の場合にも、ケース7の R^* はケース8の R^* とほとんど変わらない。

6.4 $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の提案

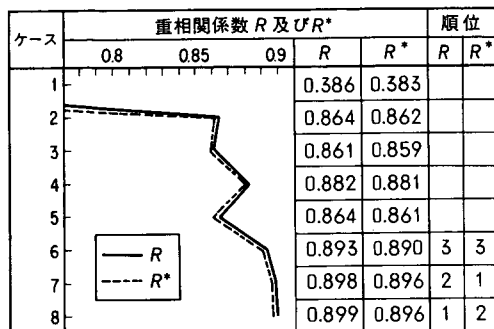
前節までの検討結果を総合すると、 $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式としてはマグニチュード M 及び震央距離 Δ の2つを説明変数として持ち、係数 a, b, c は固有周期 $T_k(k=1, 2, \dots, 10)$ 及び地盤種別 $GC_i(i=1, 2, 3)$ に応じて以下のように定めた場合が他のケースと比較して相対的に高い精度を有していると考えられる。

- ① $a(T_k, GC_i), b(T_k, GC_i), c(T_k, GC_i)$ ——6.2節のケース8もしくは6.3節のケース8

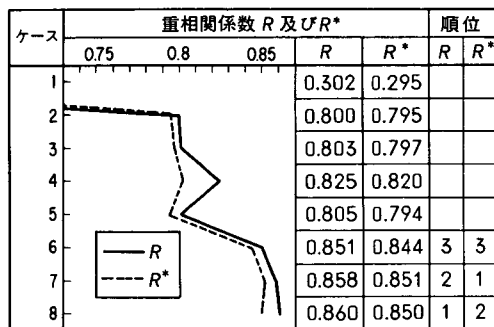
$$\begin{aligned} \tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) &= a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \\ &\times (\Delta + 30)^{c(T_k, GC_i)} \dots\dots\dots (6 \cdot 16) \end{aligned}$$



(a) 1種地盤



(b) 2種地盤



(c) 3種地盤

凡 例

ケース	係数 a, b, c		
1	$a(GC_i)$	$b(GC_i)$	$c(GC_i)$
2	$a(GC_i)$	$b(GC_i)$	$c(T_k, GC_i)$
3	$a(GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(GC_i)$
4	$a(T_k, GC_i)$	$b(GC_i)$	$c(GC_i)$
5	$a(GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(T_k, GC_i)$
6	$a(T_k, GC_i)$	$b(GC_i)$	$c(T_k, GC_i)$
7	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(GC_i)$
8	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$c(T_k, GC_i)$

図-6・6 $\tilde{S}_A$ 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

② $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(T_k)$ ——6.2 節の
ケース 7

$$\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(T_k)} \quad (6 \cdot 17)$$

③ $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(GC_i)$ ——6.3 節の
ケース 7

$$\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c(GC_i)} \quad (6 \cdot 18)$$

④ $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, c ——6.2 節のケース
7 と 6.3 節のケース 7 を合成した場合

$$\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i) = a(T_k, GC_i) \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^c \quad (6 \cdot 19)$$

従って、以下では上記 4 ケースにつき、それぞれの
特徴及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-6・
2～表-6・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-6・7～図-6・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 及び b は上記の式(6・16)～式(6・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

表-6・2 $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(T_k, GC_i)$ 及び重相関係数 $R(T_k, GC_i)$
(式(6・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	0.202	-1.120	0.66	982.0	0.289	-1.289	0.66	1306	0.207	-1.176	0.62
0.15	2543	0.219	-1.199	0.74	696.1	0.307	-1.255	0.67	930.3	0.202	-1.064	0.58
0.2	1558	0.260	-1.258	0.76	504.5	0.329	-1.238	0.62	1121	0.216	-1.140	0.62
0.3	1140	0.313	-1.447	0.79	242.7	0.328	-1.106	0.59	1254	0.210	-1.133	0.61
0.5	111.0	0.261	-0.9239	0.61	86.50	0.358	-1.052	0.63	598.7	0.338	-1.360	0.59
0.7	60.24	0.286	-0.9687	0.69	34.42	0.441	-1.180	0.70	71.33	0.574	-1.669	0.66
1.0	57.69	0.366	-1.321	0.74	4.448	0.526	-1.084	0.67	7.684	0.620	-1.433	0.56
1.5	13.47	0.469	-1.428	0.82	0.685	0.621	-1.140	0.75	0.803	0.648	-1.180	0.60
2.0	10.77	0.454	-1.422	0.80	0.285	0.608	-1.028	0.78	0.328	0.541	-0.775	0.62
3.0	2.466	0.485	-1.331	0.82	0.289	0.546	-1.010	0.76	0.252	0.562	-0.943	0.62

表-6・3 $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(T_k)$ 及び重相関係数 $R(T_k)$ (式(6・17))

固有周期 T [秒]	1 種 地 盤		2 種 地 盤		3 種 地 盤		$c(T_k)$	$R(T_k)$
	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$	$a(T_k, GC_i)$	$b(T_k, GC_i)$		
0.1	2700	0.217	897.4	0.273	1317	0.221	-1.221	0.69
0.15	2646	0.221	660.7	0.297	954.1	0.249	-1.215	0.70
0.2	1463	0.256	501.7	0.328	1139	0.246	-1.234	0.67
0.3	642.2	0.280	282.6	0.356	1273	0.237	-1.221	0.66
0.5	150.7	0.279	85.60	0.356	567.7	0.240	-1.044	0.68
0.7	99.24	0.315	33.76	0.437	65.52	0.417	-1.165	0.76
1.0	42.52	0.348	5.193	0.554	7.440	0.548	-1.201	0.74
1.5	8.335	0.441	0.781	0.645	0.811	0.666	-1.240	0.78
2.0	5.116	0.410	0.326	0.632	0.349	0.651	-1.130	0.78
3.0	1.401	0.452	0.329	0.570	0.259	0.613	-1.108	0.78

表-6・4 $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$, $c(GC_i)$ 及び重相関係数 $R(GC_i)$ (式(6・18))

固有周期 T [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
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	8.385	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-6・5 $\tilde{S}_A$ 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 及び重相関係数 R (式(6・19))

固有周期 T [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 $R=0.90$
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	5.036	0.548	7.411	0.541	
1.5	7.122	0.432	0.719	0.630	0.803	0.647	
2.0	5.784	0.417	0.347	0.644	0.351	0.666	
3.5	1.672	0.462	0.361	0.586	0.262	0.635	

$$c = -1.178$$

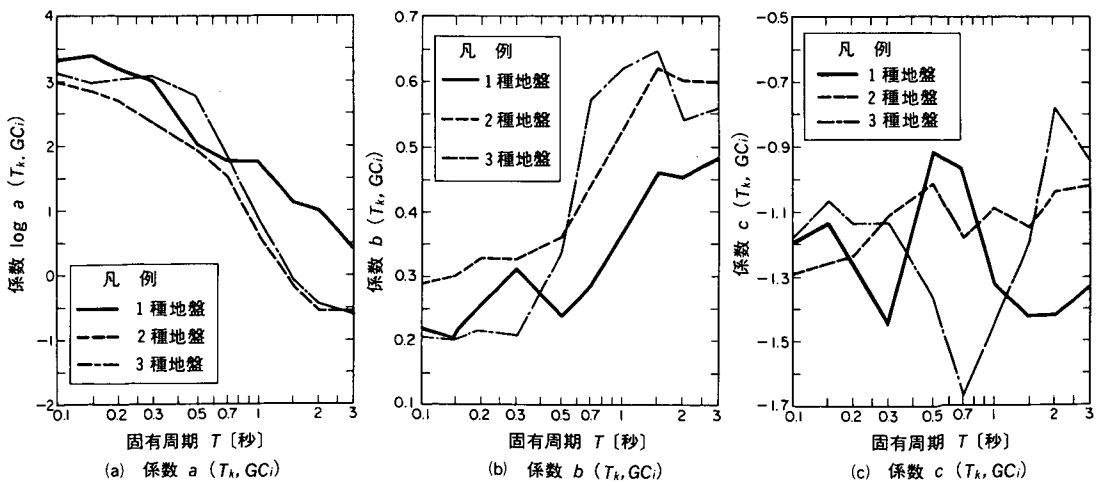


図-6・7 $\tilde{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$ 及び $c(T_k, GC_i)$ (式(6・16))

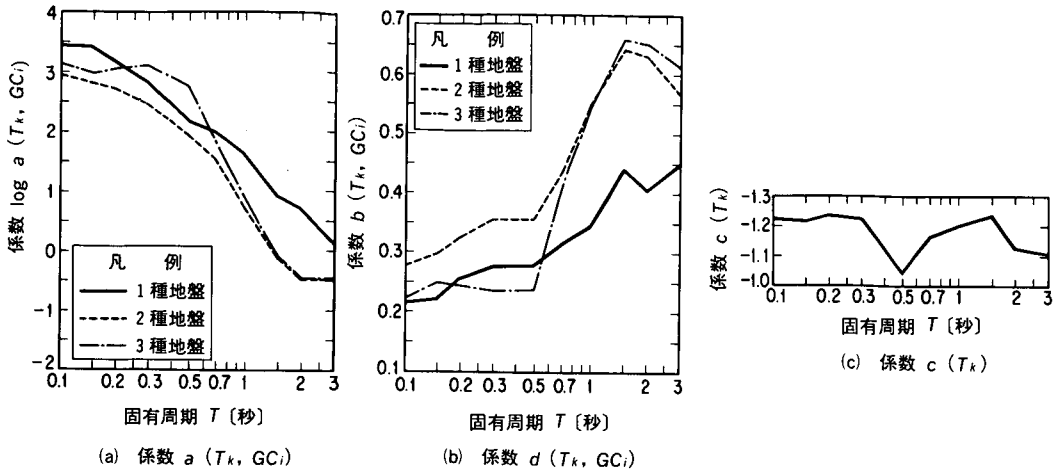


図-6-8 $\bar{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$ 及び $c(T_k)$ (式(6-17))

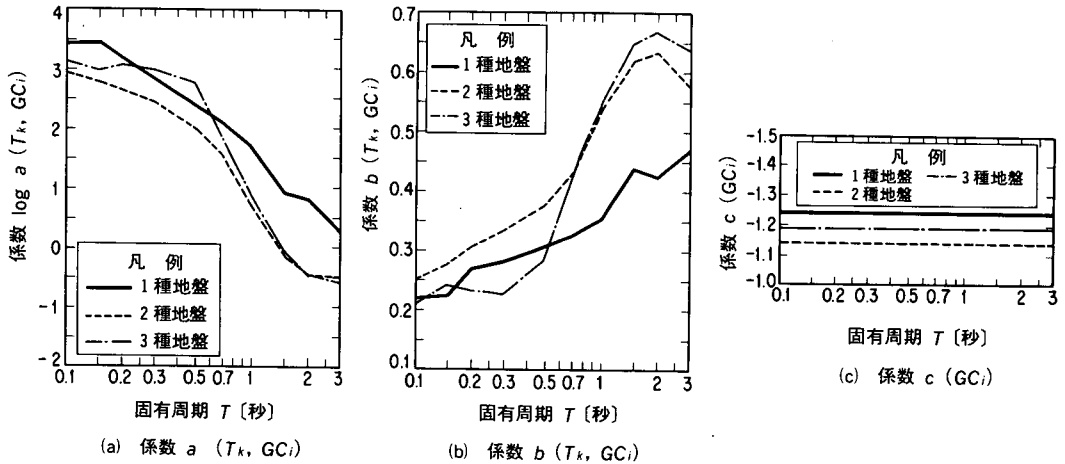


図-6-9 $\bar{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$ 及び $c(GC_i)$ (式(6-18))

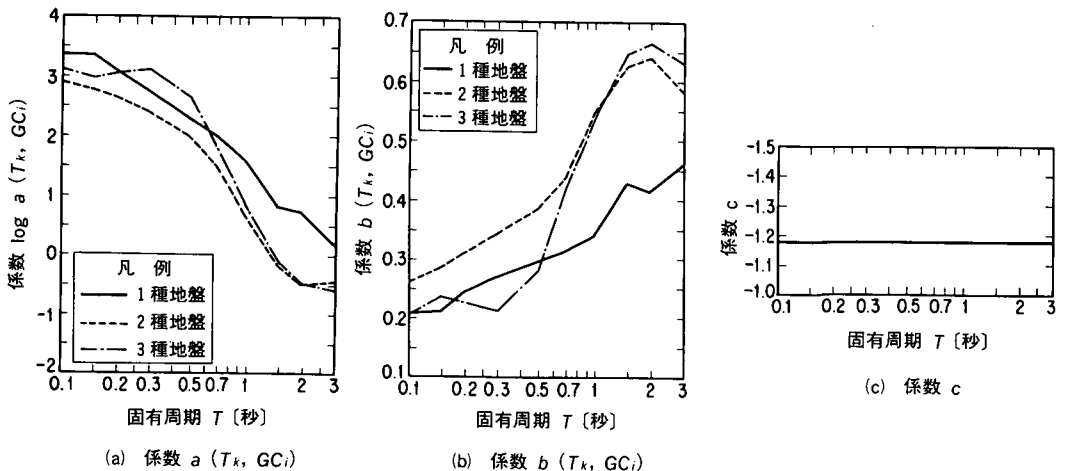


図-6-10 $\bar{S}_A$ スペクトルの距離減衰式の係数 $a(T_k, GC_i)$, $b(T_k, GC_i)$ 及び c (式(6-19))

違いは認められない。

なお、係数 a 及び 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種及び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秒以上の長期領域において著しい。一方、2種及び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 $\tilde{S}_A$ スペクトルが何倍になるかを表す指標である。上記より、2種及び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は $\tilde{S}_A$ 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 $\tilde{S}_A$ 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 の増加に伴い $\tilde{S}_A$ 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以上では0.35~0.45程度(同、2.2~2.8倍増加)となる。

2) 係数 c は式(6・6)~式(6・9)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 及び地盤種別 GC_i ごとに独立に求めた場合(図-6・7)によれば、係数 c は T_k 及び 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-6・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の範囲に収まっており、固有周期により大きく変化しない。従って、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と考えられる。

iii) 係数 c を地盤種別 GC_i ごとに求めた結果(図-6・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と考えられる。

次に、上記回帰式により代表的な M 及び Δ に対して $\tilde{S}_A$ スペクトルを試算した一例が図-6・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(6・16)と最も簡単な式(6・19)の両者を比較している。これによれば、 M が大きく、 Δ が小さい範囲(例えば、 $M=8$, $\Delta=50\text{km}$ の場合)において3種地盤の $\tilde{S}_A$ スペクトルの固有周期0.7秒付近では両者の違いははっきりと現れるが、これを除けば両ケースの違いはわずかであり、実用上はほとんど差がないといってもよいことが分かる。ここで、 $M=8$, $\Delta=50\text{km}$ 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つて検討していくことが必要である。従って、基本的には式(6・16)~式(6・19)のいずれのケースを利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(6・19)を提案することとする。

6.5 提案する距離減衰式の特性及び推定式まわりのばらつき

式(6・19)による $\tilde{S}_A$ 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 $\tilde{S}_A$ 値と共に予測値を示すと図-6・12のようになる。また、式(6・19)による $\tilde{S}_A$ スペクトルの期待値を主要な震央距離($\Delta=50\text{ km}$, 100 km, 200 km)及びマグニチュード($M=5, 6, 7, 8$)の組合せに対して示すと図-6・13のようになる。これによれば、固有周期0.2~0.5秒程度を境に、これよりも長周期側では、 $\tilde{S}_A$ 値は1種地盤、2種地盤、3種地盤となるにつれて大きくなるのに対し、これよりも短周期側では、一般に反対の傾向を有することが分かる。一般の土木構造物の基本固有周期は0.2~0.5秒程度以上である場合が多いことを考慮すると、固有周期が0.2~0.5秒程度よりも長周期側では、地盤が一般に軟弱になる程 $\tilde{S}_A$ 値が大きくなることは、既応の震害が軟弱地盤上により生じやすいことと調和している。また、マグニチュード M が大きくなると、2種及び3種地盤上の $\tilde{S}_A$ 値が1種地盤上の $\tilde{S}_A$ 値よりも非常に大きくなる点が興味深い。

なお、固有周期が0.2~0.5秒以下の短周期領域では、1種地盤上の $\tilde{S}_A$ 値は、2種及び3種地盤上の $\tilde{S}_A$ 値に比較して決して小さくないことに注意しなければならない。これは、このような短周期領域に固有周期を有する構造物は、2種及び3種地盤上よりもむしろ1種地盤上で大きな応答を生じることを意味している。

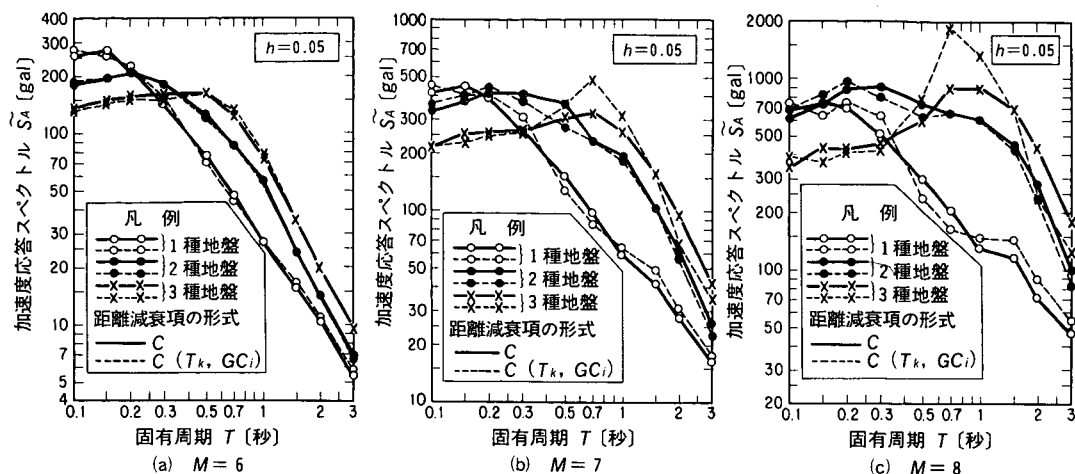


図-6-11 (1) 式(6-16)の距離減衰式と式(6-19)の距離減衰式の比較 ($\Delta=50$ km の場合)

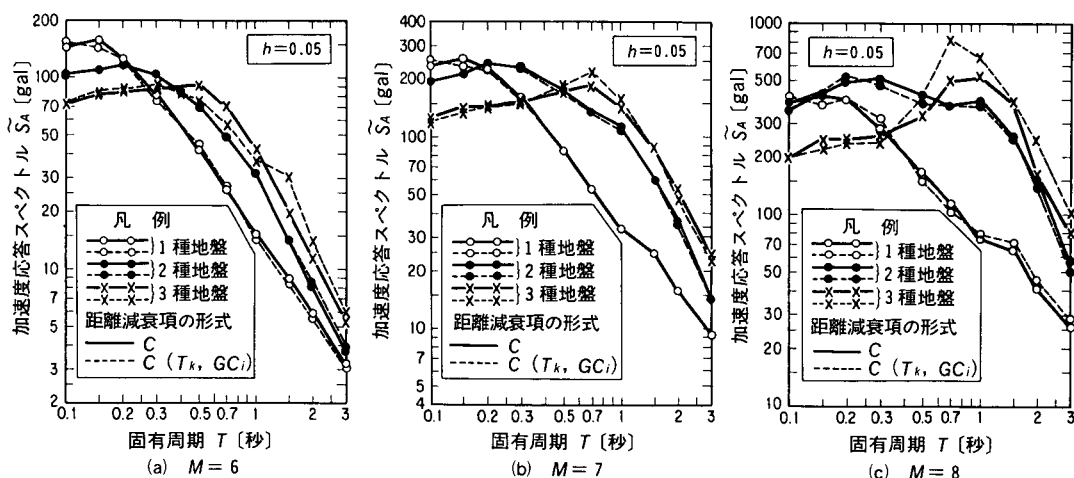


図-6-11 (2) 式(6-16)の距離減衰式と式(6-19)の距離減衰式の比較 ($\Delta=100$ km の場合)

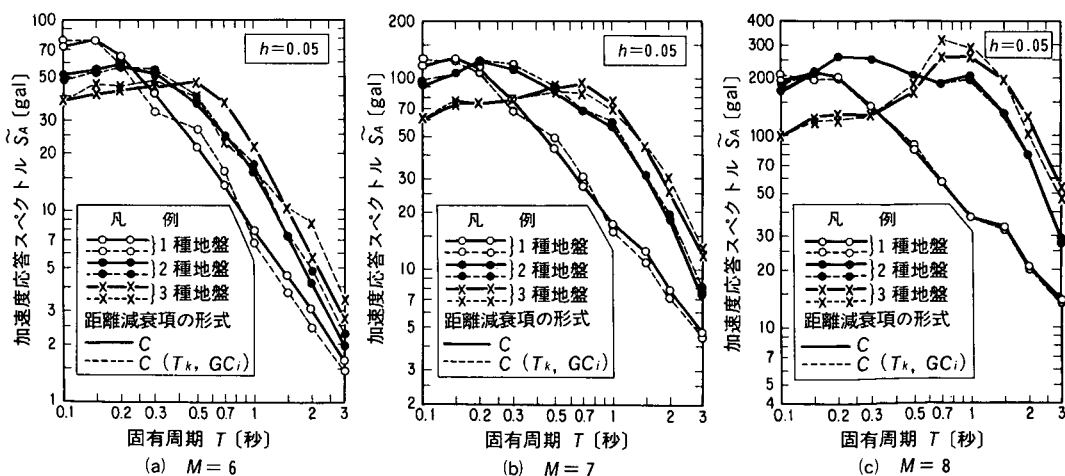


図-6-11 (3) 式(6-16)の距離減衰式と式(6-19)の距離減衰式の比較 ($\Delta=200$ km の場合)

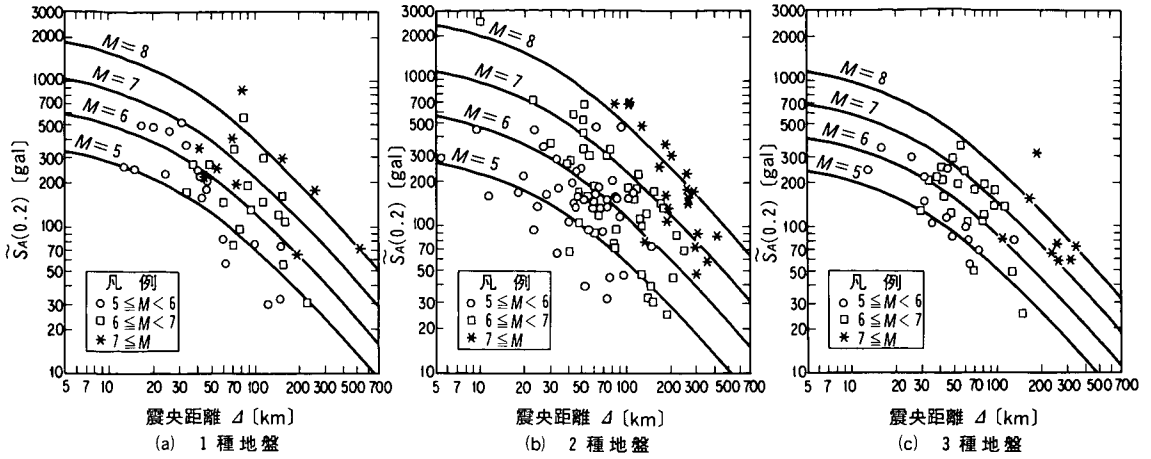


図-6・12 (1) $\tilde{S}_A(0.2)$ の距離減衰特性

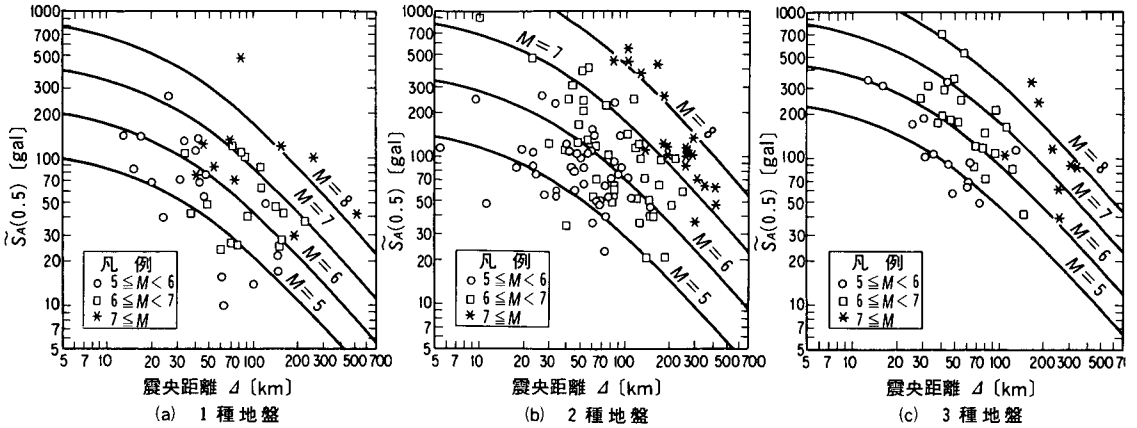


図-6・12 (2) $\tilde{S}_A(0.5)$ の距離減衰特性

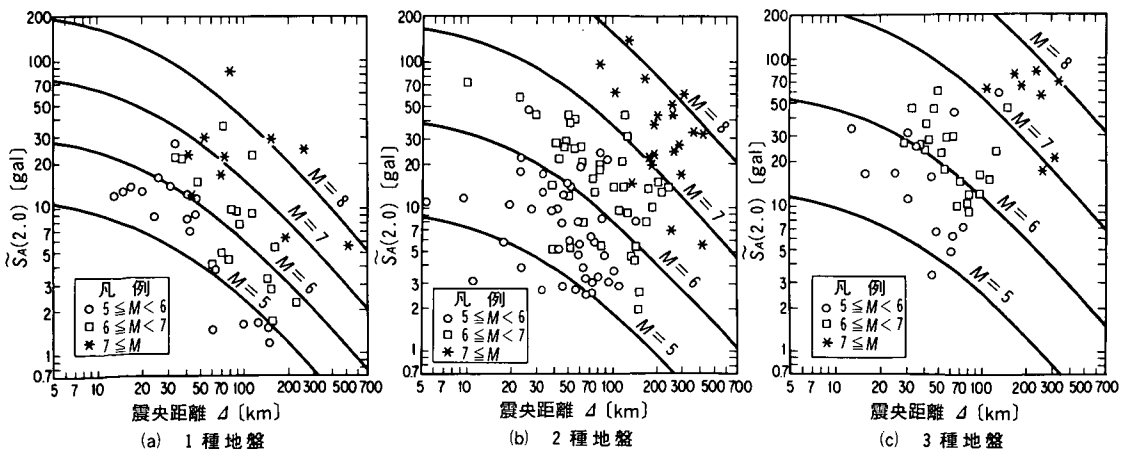
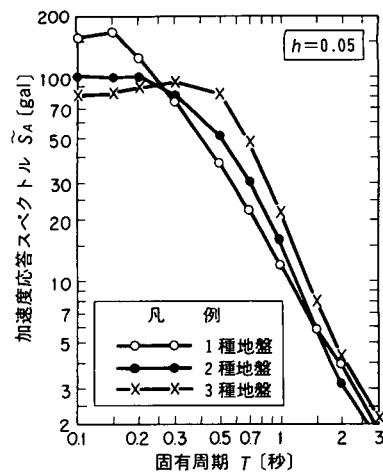
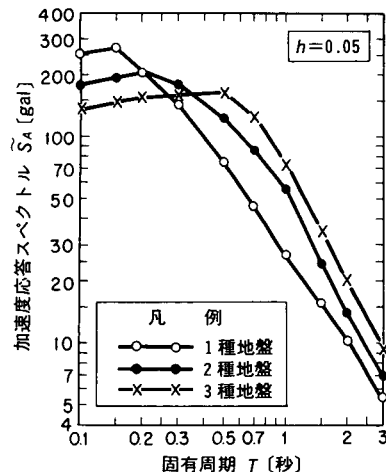
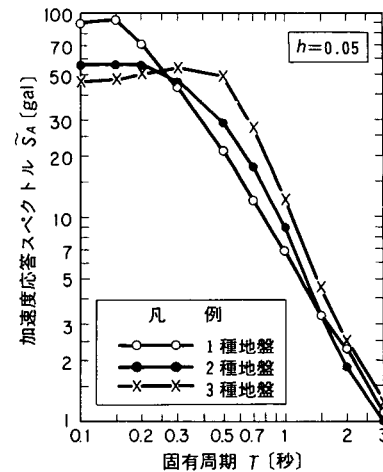
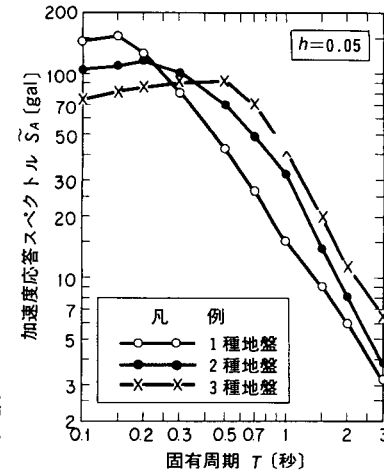
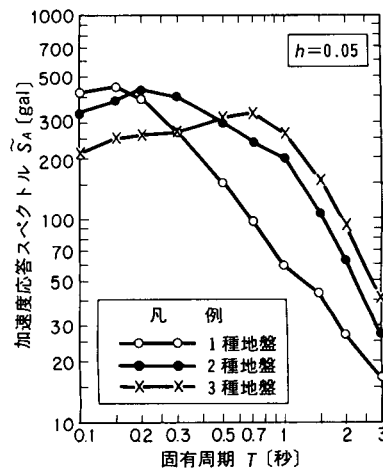
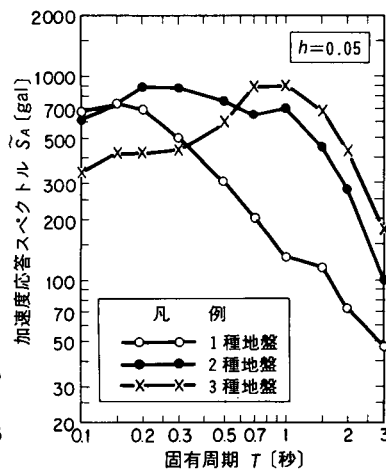
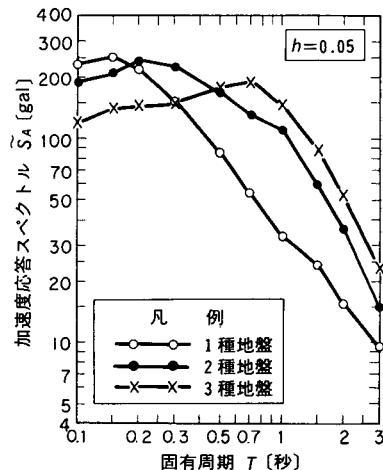
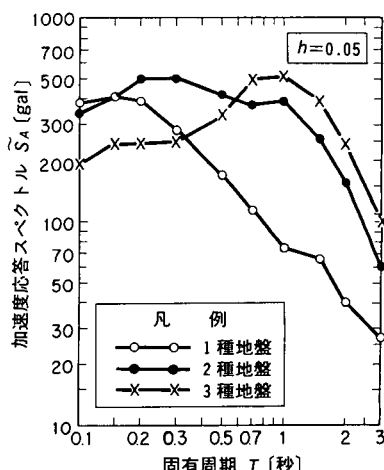


図-6・12 (3) $\tilde{S}_A(2.0)$ の距離減衰特性

(a) $M=5$ (b) $M=6$ (a) $M=5$ (b) $M=6$ (c) $M=7$ (d) $M=8$ 図-6.13(1) $\tilde{S}_A$ スペクトル ($L=50$ km の場合)(c) $M=7$ (d) $M=8$ 図-6.13(2) $\tilde{S}_A$ スペクトル ($L=100$ km の場合)

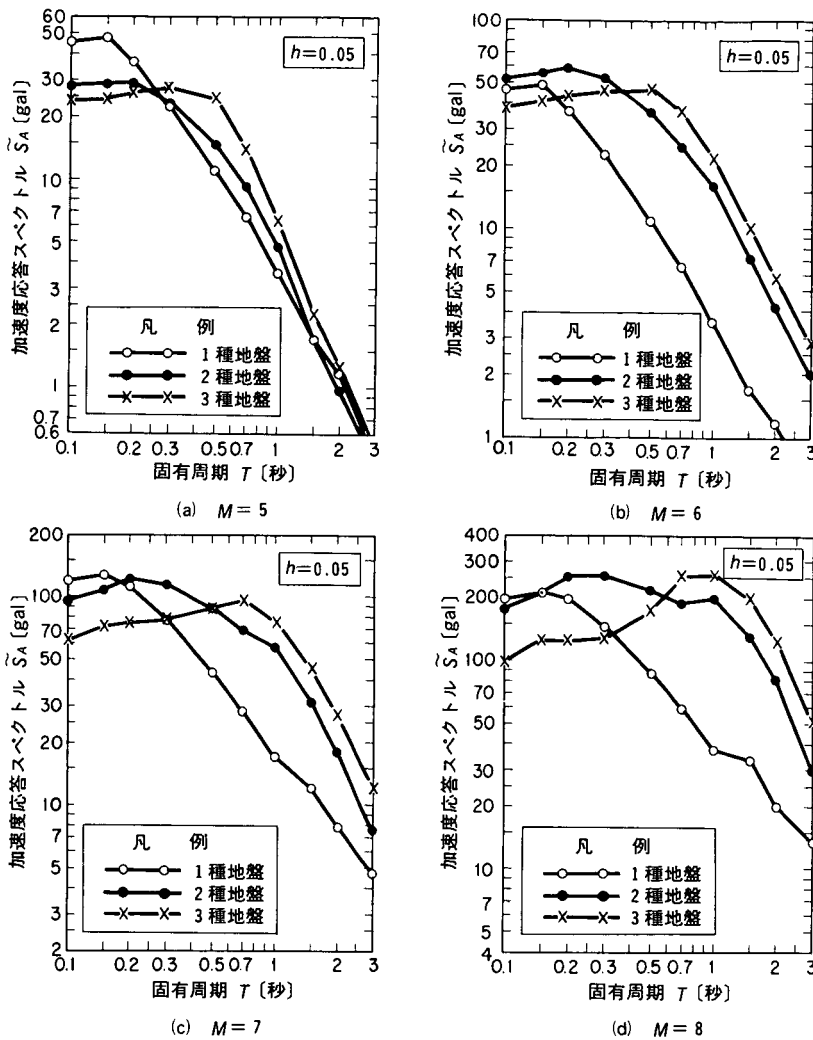


図-6・13(3) $\tilde{S}_A$ スペクトル ($\Delta=200$ km の場合)

次に、式(6・19)による $\tilde{S}_A$ スペクトルの予測値のばらつきを示すために、最大地震動の場合と同様に実測のスペクトル $\tilde{S}_A^{OB}$ と、これが得られた地盤の M 、 Δ 及び地盤種別 $GC_i (i=1, 2, 3)$ から式(6・19)により求めた予測値 $\tilde{S}_A^P$ の比 U_{SA} を次式により定義する。

$$U_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i) = \frac{\tilde{S}_A^{OB}(T_k, M, \Delta, GC_i)}{\tilde{S}_A^P(T_k, M, \Delta, GC_i)} \quad \dots\dots\dots (6 \cdot 20)$$

ここで、

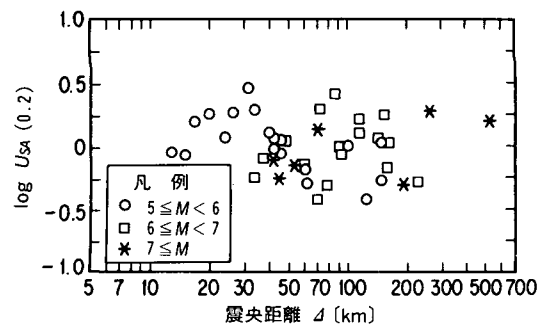
$U_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i)$: $\tilde{S}_A(T_k)$ スペクトルのばらつきの度合いを表す指標

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

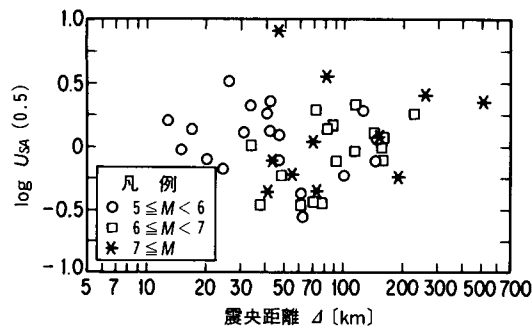
$\tilde{S}_A^P(T_k, M, \Delta, GC_i)$: 式(6・19)から求められる $\tilde{S}_A$ スペクトルの期待値
従って、実際のスペクトル値 $\tilde{S}_A^{OB}(T_k, M, \Delta, GC_i)$ は、次式で与えられることになる。

$$\begin{aligned} \tilde{S}_A^{OB}(T_k, M, \Delta, GC_i) &= U_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i) \cdot \tilde{S}_A^P(T_k, M, \Delta, GC_i) \\ &= U_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i) \times \{a(T_k, GC_i) \\ &\quad \times 10^{b(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^c\} \dots\dots\dots (6 \cdot 21) \end{aligned}$$

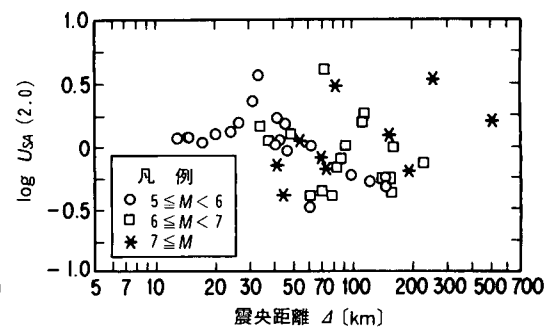
式(6・20)による $U_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i)$ を主要な固有周期 ($T=0.2$ 秒, 0.5 秒, 2 秒) に対して求め、これと M 及び Δ の関係を示すと、図-6・14 のようになる。これによれば、 U_{SA} は M 及び Δ により顕著に変化し



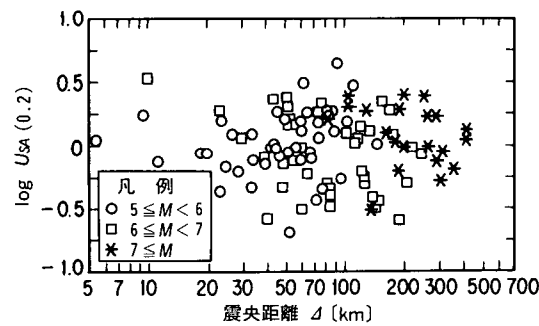
(a) 1 種地盤



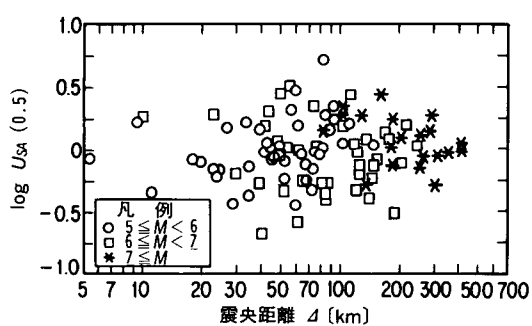
(a) 1 種地盤



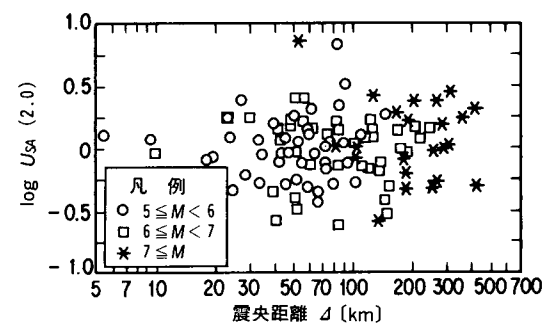
(a) 1 種地盤



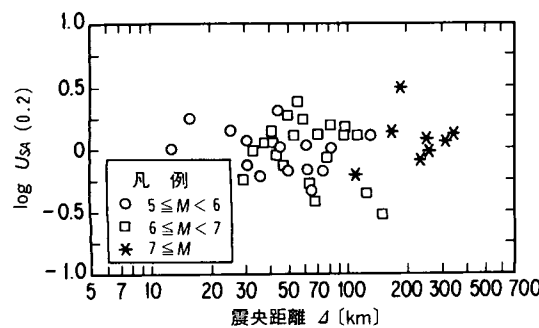
(b) 2 種地盤



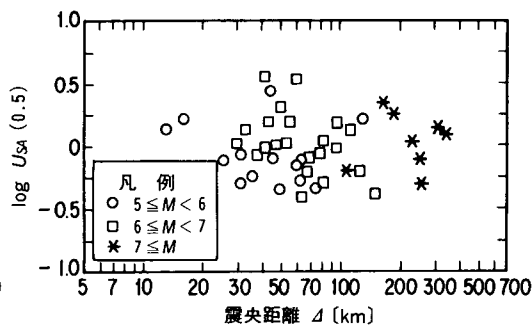
(b) 2 種地盤



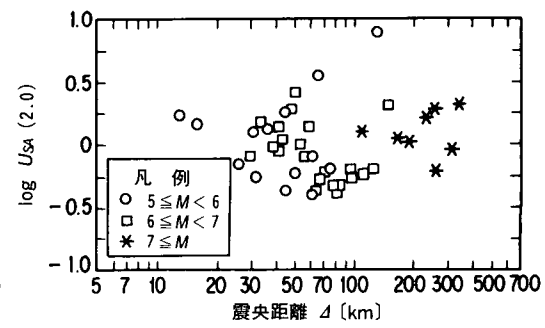
(b) 2 種地盤



(c) 3 種地盤



(c) 3 種地盤



(c) 3 種地盤

図-6・14(1) $\log U_{SA}(0.2) \sim \Delta \sim M$ の関係図-6・14(2) $\log U_{SA}(0.5) \sim \Delta \sim M$ の関係図-6・14(3) $\log U_{SA}(2.0) \sim \Delta \sim M$ の関係

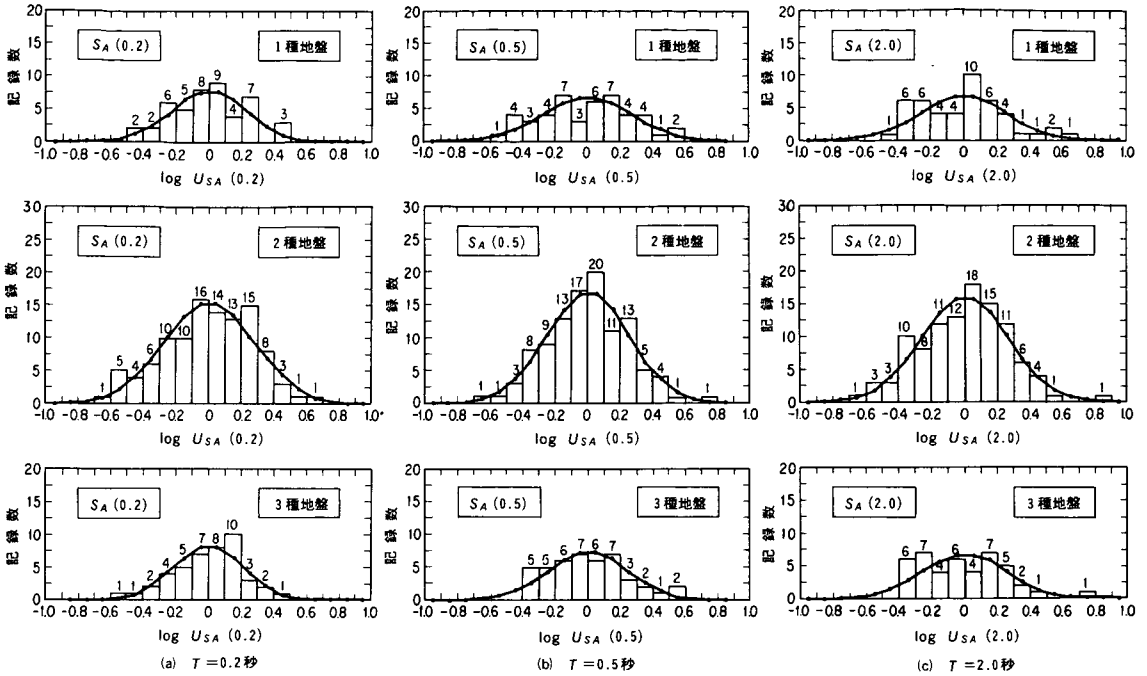


図-6-15 $\log U_{SA}$ の頻度分布 (固有周期 $T=0.2$ 秒, 0.5 秒, 2 秒の場合)

表-6-6 $\log U_{SA}(T)$ の標準偏差

地盤種別	固有周期 T (秒)									
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	3
1 種	0.262	0.229	0.226	0.241	0.278	0.239	0.273	0.254	0.267	0.249
2 種	0.256	0.244	0.273	0.270	0.249	0.245	0.305	0.288	0.264	0.248
3 種	0.219	0.218	0.211	0.217	0.240	0.243	0.307	0.305	0.276	0.263

ないことが分かる。次に各地盤種別ごとに $\log U_{SA}$ の頻度分布を求めると図-6-15 のようになる。これによればデータ数の少ない 1 種地盤及び 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。 $x = \log U_{SA}$ の標準偏差 σ を各固有周期ごとに計算すると、表-6-6 のようになり、標準偏差 σ の値は固有周期及び地盤種別によってそれ程変化しない。従って、 σ を各固有周期及び地盤種別ごとに平均すると 0.26 となり、これにより式(4-27)に準拠して非超過確率 $p \sim U_{SA}(T_k)$ の関係を求めると図-6-16 のようになる。

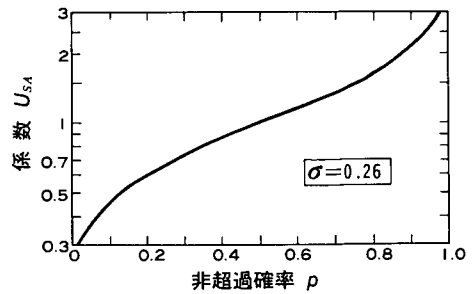


図-6-16 非超過確率 $p \sim$ 係数 U_{SA} の関係

7. 上下成分加速度応答スペクトルの距離減衰式

7.1 上下成分加速度応答スペクトルの距離減衰式

6 章に示した水平成分加速度応答スペクトルの距離

減衰式の検討結果に基づき、上下成分加速度応答スペクトルの距離減衰特性を検討する。最大地震動の場合と同様、水平成分加速度応答スペクトルと上下成分加速度応答スペクトルの間には、距離減衰特性に基本的な違いは無いと考えられる。このため、距離減衰式としては前章に示した式(6-16)及び式(6-19)を用いることとし、両者の比較から検討を進めることとする。す

なわち、

$$S_A^V(T_k, M, \Delta, GC_i) = a^V(T_k, GC_i) \times 10^{b^V(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c^V(T_k, GC_i)} \dots\dots\dots (7.1)$$

$$S_A^V(T_k, M, \Delta, GC_i) = a^V(T_k, GC_i) \times 10^{b^V(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{c^V} \dots\dots\dots (7.2)$$

ここで、

$S_A^V(T_k, M, \Delta, GC_i)$: 減衰定数 5% の上下成分絶対
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

GC_i : 地盤種別 ($i = 1, 2, 3$)

T_k : 固有周期 [秒] ($k = 1, 2, 3, \dots, 10$), 今回の
解析では, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7,
1, 1.5, 2, 3 秒の 10 個としている。

$a^V(T_k, GC_i), b^V(T_k, GC_i), c^V(T_k, GC_i)$: 固有周
期 T_k ($k = 1, 2, \dots, 10$) 及び地盤種別 GC_i
($i = 1, 2, 3$) ごとに定められる係数

c^V : 固有周期 T_k 及び地盤種別 GC_i によらない

とした場合の係数

ここで、式(7.1)と式(7.2)の違いは、距離の項にかかる係数が固有周期 T_k 及び地盤種別 GC_i の両者によって変化するかないかである。

式(7.1)及び式(7.2)を用いて 2 章に示した 119 成分の上下成分記録から求めた S_A^V スペクトルを基に重回帰分析により係数 a^V, b^V, c^V を定めると表-7.1 及び表-7.2 のようになる。また、これを基に係数 a^V, b^V, c^V の周期領域の変化を示すと図-7.1 及び図-7.2 のようになる。これより S_A^V スペクトルの距離減衰式の係数 a^V, b^V, c^V に関しては、以下の事項が指摘される。

1) 係数 a^V は上記式(7.1)及び式(7.2)のいずれの距離減衰式を用いた場合にもおおむね同じ値をとる。また、係数 a^V は短周期領域で大きく、周期が長くなるにつれてほぼ単調に減少する。

2) 係数 b^V の値は、式(7.1)の距離減衰式を用いた場合と式(7.2)の距離減衰式を用いた場合でやや異なる。ただし、全体としてはいずれの場合も短周期領域で小さく、長周期領域で大きくなっており、このような傾向は 2 種類の距離減衰式間で変わらない。また、

表-7.1 式(7.1)を用いた場合の S_A^V スペクトルの距離減衰式の係数 $a^V(T_k, GC_i), b^V(T_k, GC_i), c^V(T_k, GC_i)$

固有周期 T [秒]	1 種 地 盤			2 種 地 盤			3 種 地 盤			備 考
	$a^V(T_k, GC_i)$	$b^V(T_k, GC_i)$	$c^V(T_k, GC_i)$	$a^V(T_k, GC_i)$	$b^V(T_k, GC_i)$	$c^V(T_k, GC_i)$	$a^V(T_k, GC_i)$	$b^V(T_k, GC_i)$	$c^V(T_k, GC_i)$	
0.1	559.5	0.279	-1.339	553.9	0.341	-1.537	103.8	0.349	-1.301	重相関係数 0.903
0.15	508.3	0.288	-1.369	195.5	0.273	-1.105	90.74	0.429	-1.517	
0.2	140.0	0.270	-1.062	108.0	0.291	-1.029	136.5	0.363	-1.399	
0.3	60.34	0.239	-0.832	18.57	0.283	-0.688	152.1	0.346	-1.358	
0.5	35.68	0.310	-1.059	6.245	0.346	-0.705	10.83	0.630	-1.727	
0.7	9.991	0.420	-1.225	2.279	0.379	-0.670	1.606	0.695	-1.563	
1.0	5.642	0.485	-1.389	0.591	0.389	-0.501	0.340	0.629	-1.114	
1.5	1.395	0.575	-1.469	0.388	0.402	-0.610	0.035	0.692	-0.959	
2.0	0.282	0.561	-1.144	0.252	0.345	-0.425	0.116	0.514	-0.733	
3.0	0.186	0.494	-0.994	0.163	0.353	-0.490	0.113	0.340	-0.300	

表-7.2 式(7.2)を用いた場合の S_A^V スペクトルの距離減衰式の係数 $a^V(T_k, GC_i), b^V(T_k, GC_i), c^V$

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

$c^V = -1.015$

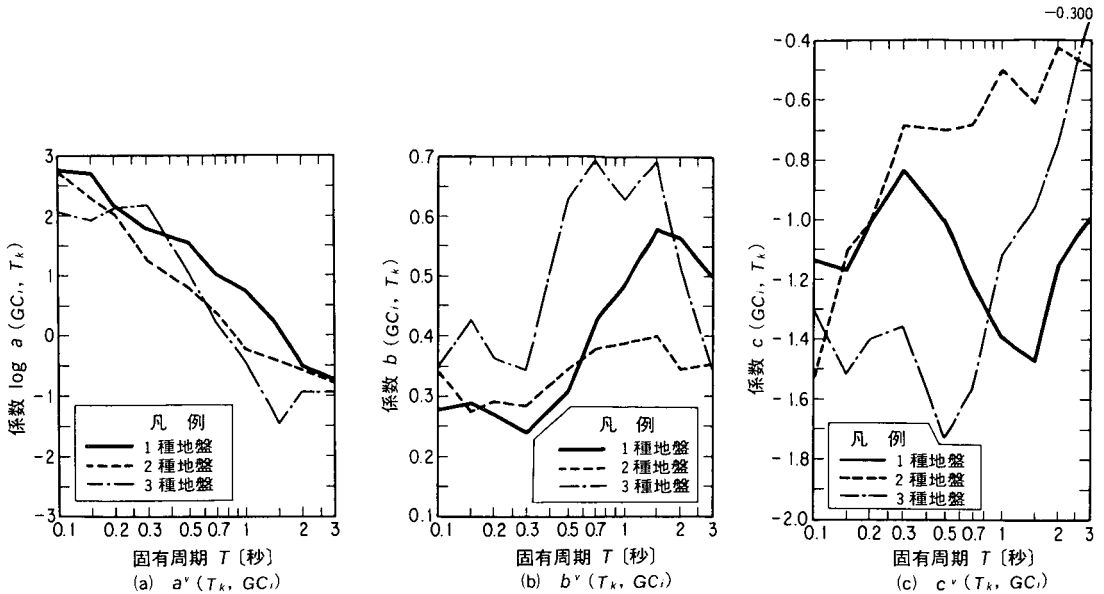


図-7・1 S_A^v スペクトルの距離減衰式の係数 $a^v(T_k, GC_i)$, $b^v(T_k, GC_i)$ 及び $c^v(T_k, GC_i)$ (式(7・1))

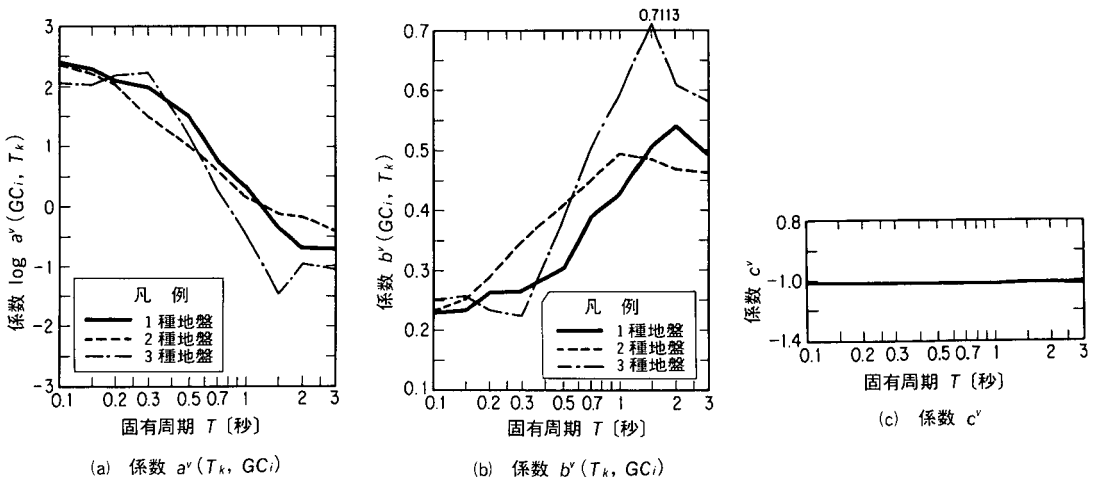
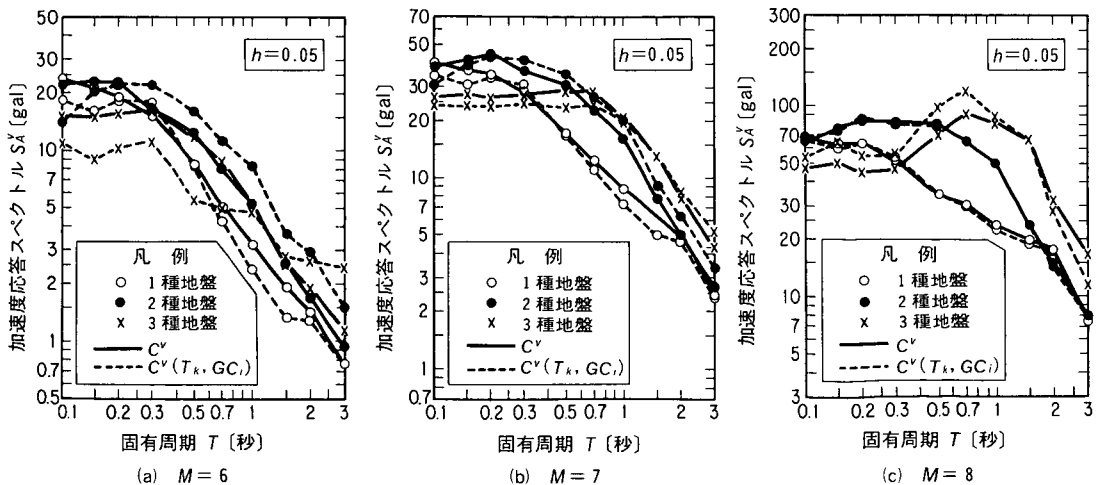
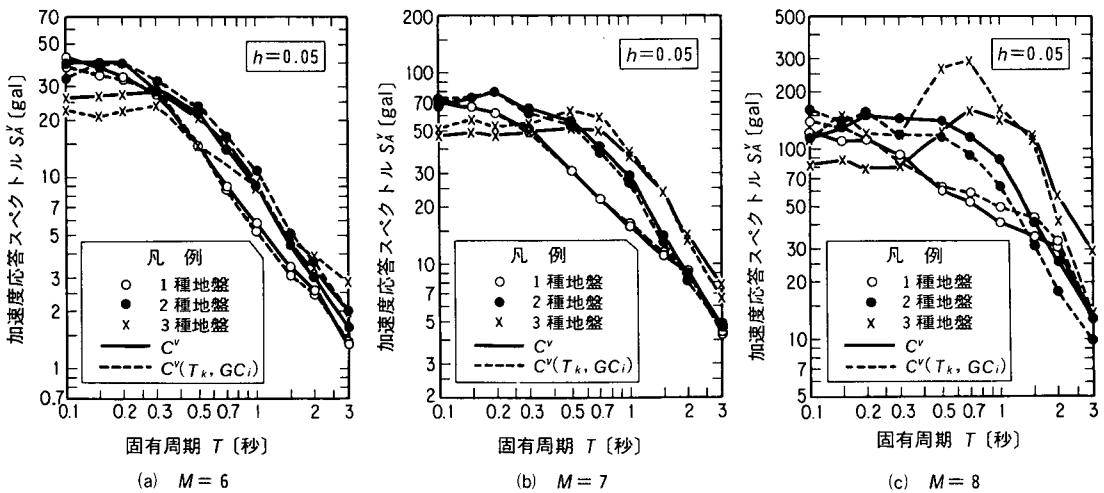
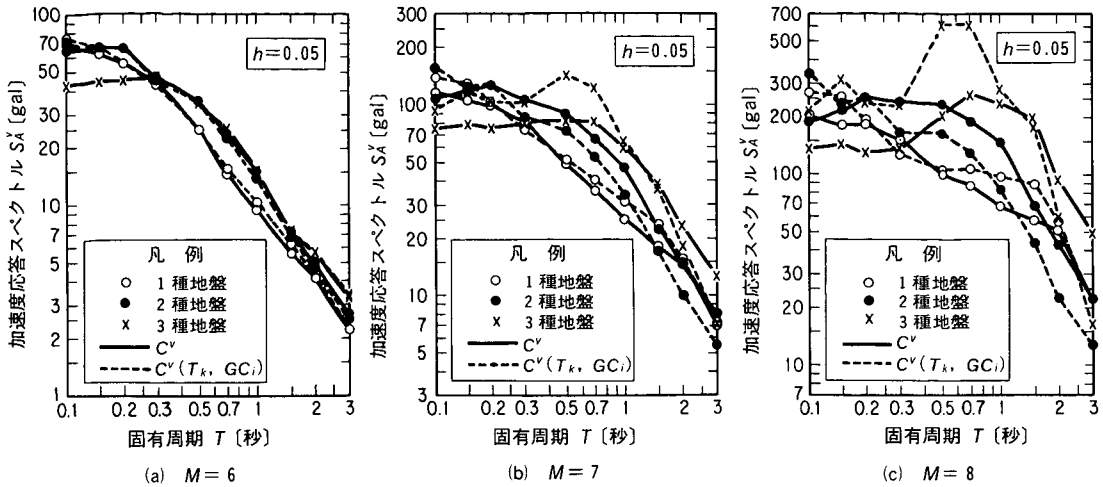


図-7・2 S_A^v スペクトルの距離減衰式の係数 $a^v(T_k, GC_i)$, $b^v(T_k, GC_i)$ 及び c^v (式(7・2))

係数 b^v は地盤種別によって変化し、固有周期によって多少変化するが、一般に1種地盤、2種地盤、3種地盤の順に大きくなる。係数 b^v はマグニチュード M が1.0が大きくなった場合に S_A^v スペクトルが何倍になるかを表す指標である。式(7・2)の場合を例にとれば、地盤種別によって多少異なるが、固有周期が約0.3秒以下においては係数 b は0.225~0.35程度 (S_A^v は1.68~2.24倍となる) であるのに対し、固有周期が約1秒以上では0.5~0.7程度 (S_A^v は3.16~5.01倍となる) と大きくなる。

3) 固有周期 T_k 及び地盤種別 GC_i ごとに係数 c^v を定めた式(7・1)の場合には、係数 c^v は T_k 及び GC_i に応じ-0.4~-1.7の範囲で変化する。しかしながら、 T_k 及び GC_i による係数 c^v の変化の様子には一定の規則性は認められない。これに対して、係数 c^v を固有周期 T_k 及び地盤種別 GC_i によらず一定であるとした式(7・2)の場合には、係数 c^v は-1.015となる。

次に上記2種類の距離減衰式により、代表的な M 及び Δ の組み合わせに対して S_A^v スペクトルを試算した一例が図-7・3である。これによれば、 M が大きく、



Δ が小さい範囲 (例えば, $M=8$, $\Delta=50\text{km}$ 及び 100km の場合) において式(7.1)と式(7.2)の距離減衰式間の違いははっきり現れる。このような傾向は, 3 種地盤の場合の固有周期 $0.5\sim 1$ 秒付近で著しい。ただし, この場合を除くと, 2 種類の距離減衰式間の違いはそれ程顕著ではない。 $M=8$, $\Delta=50\text{km}$ といった大規模地震による近距離の記録は今回の解析対象記録には全く含まれておらず, いずれがより正しい結果を与えるとは現段階では判断できない。記録の蓄積を待って今後検討していくことが必要とされよう。しかしながら, 式(7.1)の距離減衰式を用いた解析では, 地盤種別ごとに独立して解析するため, 記録数が少ない場合には解析結果が一部の特殊な記録の影響を受けやすい。これに対して, 式(7.2)の距離減衰式を用いた解析では, 全地盤種別の記録を同時に解析しているため, 一部の特殊な記録の影響を受ける割合は式(7.1)の場合に比較して相対的に少ないと考えられる。ただし, 式(7.2)では係数 c^V が固有周期及び地盤種別によらないと仮定しており, このような仮定の妥当性は記録の蓄積を待って今後検討していくことが必要とされよう。以上のような点を総合し, ここでは, 一応, 式(7.2)の距離減衰式を提案することとする。

7.2 提案する距離減衰式の特性及び推定式まわりのばらつき

式(7.2)による S_A^V スペクトルの距離減衰式の一例として, 固有周期 $T=0.2$ 秒, 0.5 秒, 2 秒の場合に対して, 基となった S_A^V スペクトル値と共に予測値を示すと図-7.4 のようになる。また, 式(7.2)による S_A^V スペクトルの予測値を主要なマグニチュード ($M=5, 6, 7, 8$) 及び震央距離 ($\Delta=50\text{km}, 100\text{km}, 200\text{km}$) の組み合わせに対して示すと図-7.5 のようになる。これによれば, S_A^V スペクトルの全体としての形状は, 6 章に示した水平成分加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A$ とよく似ているのが分かる。ただし, 振幅自身は水平成分の加速度応答スペクトルに比較し, かなり小さい。また, マグニチュード M が $5\sim 6$ と小さい場合には, 地盤種別による S_A^V スペクトルの違いは顕著ではないが, M が $7, 8$ と大きくなるにつれてははっきりした違いが現れてくる。例えば, $M=8$ の場合には震央距離 Δ によって多少変化するが, 一般に固有周期 0.3 秒以上では 1 種地盤の S_A^V スペクトルが最も小さく, 2 種地盤, 3 種地盤の順に大きくなる。ただし, 固有周期が 2 秒以上では, 1 種地盤の S_A^V スペクトルと 2 種地盤の S_A^V スペクトルの大小関係が逆転しているが, これは記録が少

ないことによる誤差と考えられる。

次に, 式(7.2)による S_A^V スペクトルの推定値のばらつきを示すために, 6 章と同様に実測のスペクトル S_A^{VOB} と, これが得られた地震の M , Δ 及び地盤種別 $GC_i (i=1, 2, 3)$ から式(7.2)により求めた推定値 S_A^{VP} の比 U_{SA}^V を次式により定義する。

$$U_{SA}^V(T_k, M, \Delta, GC_i) = \frac{S_A^{VOB}(T_k, M, \Delta, GC_i)}{S_A^{VP}(T_k, M, \Delta, GC_i)} \dots\dots\dots (7.3)$$

ここで,

- $U_{SA}^V(T_k, M, \Delta, GC_i)$: $S_A^V(T_k)$ スペクトルのばらつきの度合いを表す指標
- $S_A^{VOB}(T_k, M, \Delta, GC_i)$: 重回帰分析の基となった S_A^V スペクトルの実測値
- $S_A^{VP}(T_k, M, \Delta, GC_i)$: 式(7.2)から求められる S_A^V スペクトルの期待値

式(7.3)による $U_{SA}^V(T_k, M, \Delta, GC_i)$ を主要な固有周期 ($T=0.2$ 秒, 0.5 秒, 2 秒) に対して求め, これと M 及び Δ の関係を示した結果が図-7.6 である。これによれば, U_{SA}^V は M 及び Δ により顕著に変化しないことが分かる。次に各地盤種別ごとに $\log U_{SA}^V$ の頻度分布を求めると図-7.7 のようになる。これによればデータ数の少ない 1 種地盤及び 3 種地盤の 1 部ではややばらつきがあるが, $\log U_{SA}^V$ の頻度分布は全体として正規分布に近い。

$x = \log U_{SA}^V$ の標準偏差 σ を各固有周期ごとに計算すると, 表-7.3 のようになり, 固有周期及び地盤種別によってそれ程大きく変化しない。従って, σ を各固有周期及び地盤種別ごとに平均すると 0.25 となり, これより式(4.27)に準拠して非超過確率 $p \sim U_{SA}^V$ の関係を求めると図-7.8 のようになる。

7.3 水平成分と上下成分の加速度応答スペクトルの距離減衰特性の比較

水平成分の加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) $\tilde{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)$ の距離減衰特性は 6 章に示したとおりであり, 距離減衰式は式(6.19)及び表-6.5 により与えられる。ここでは, 式(7.2)による上下成分の S_A^V スペクトルと式(6.19)による水平方向の $\tilde{S}_A$ スペクトルを比較することにより, 上下成分地震動と水平成分地震動の違いを検討することとする。

まず, 代表的なマグニチュード ($M=6, 7, 8$) 及び震央距離 ($\Delta=50\text{km}, 100\text{km}, 200\text{km}$) の組み合わせに対して $\tilde{S}_A$ スペクトルと S_A^V スペクトルの比較を

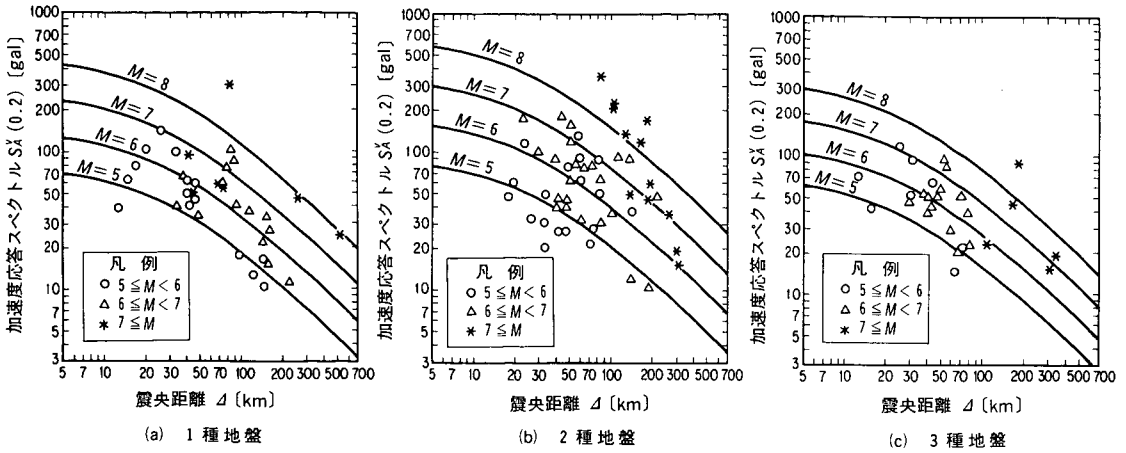


図-7.4 (1) $S_A(0.2)$ の距離減衰特性

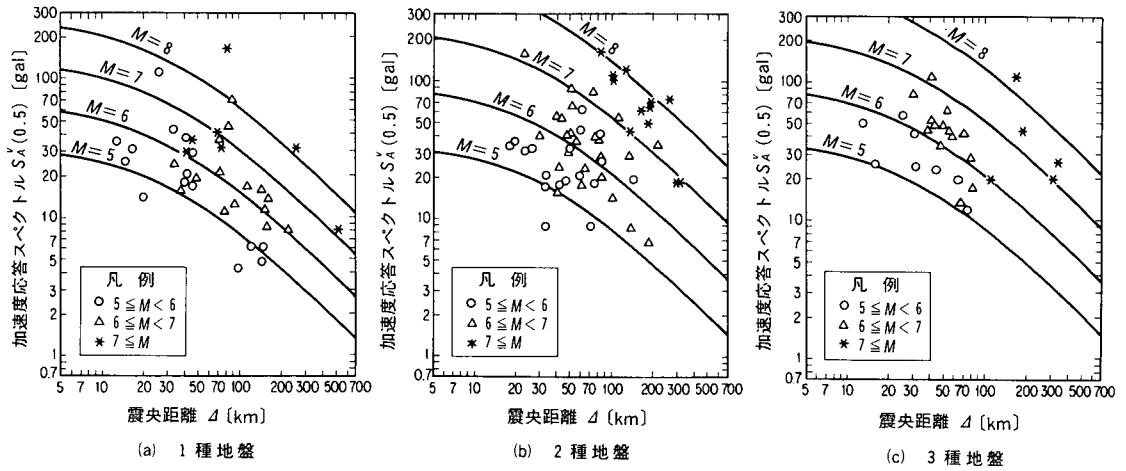


図-7.4 (2) $S_A(0.5)$ の距離減衰特性

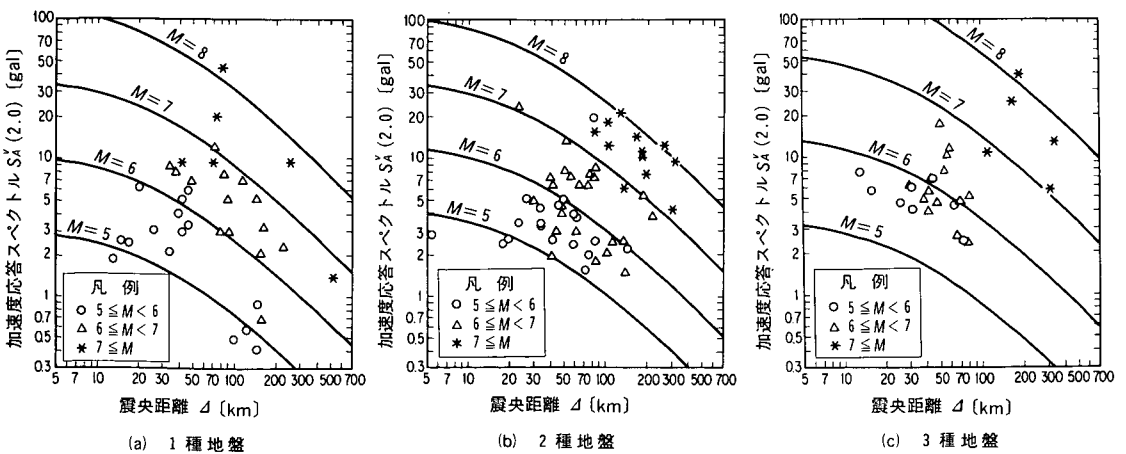


図-7.4 (3) $S_A(2.0)$ の距離減衰特性

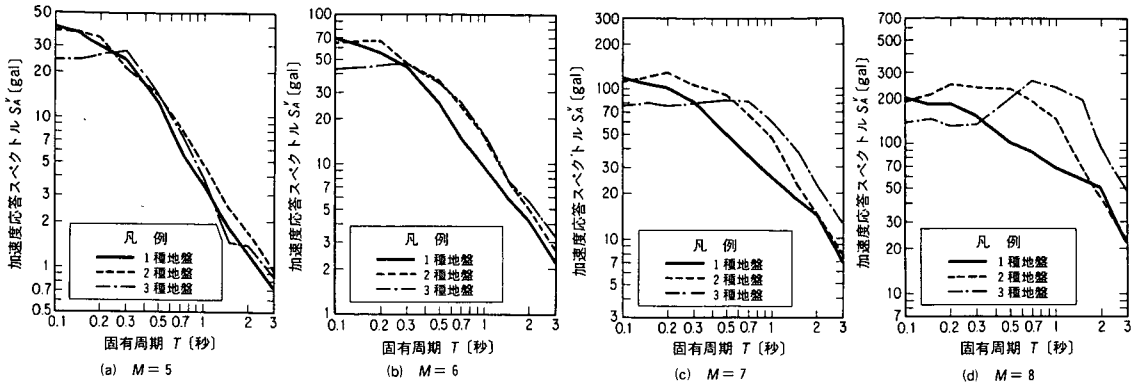


図-7.5(1) S_A^V スペクトル ($\Delta=50$ km の場合)

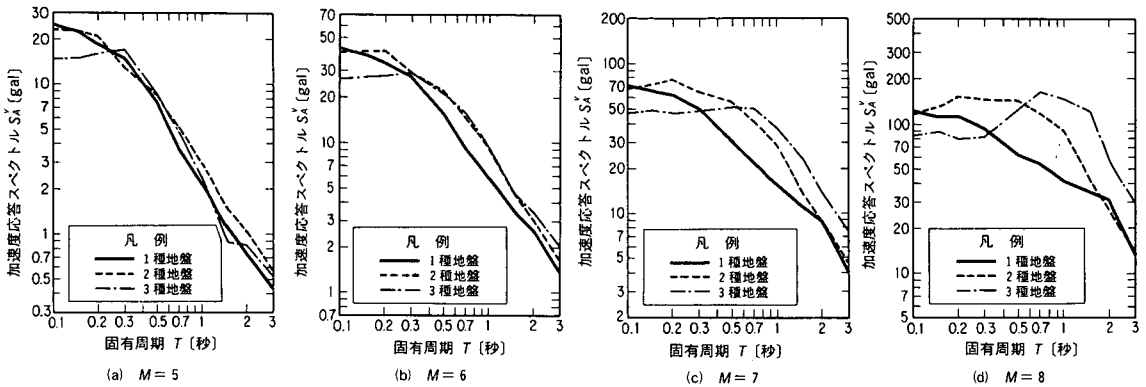


図-7.5(2) S_A^V スペクトル ($\Delta=100$ km の場合)

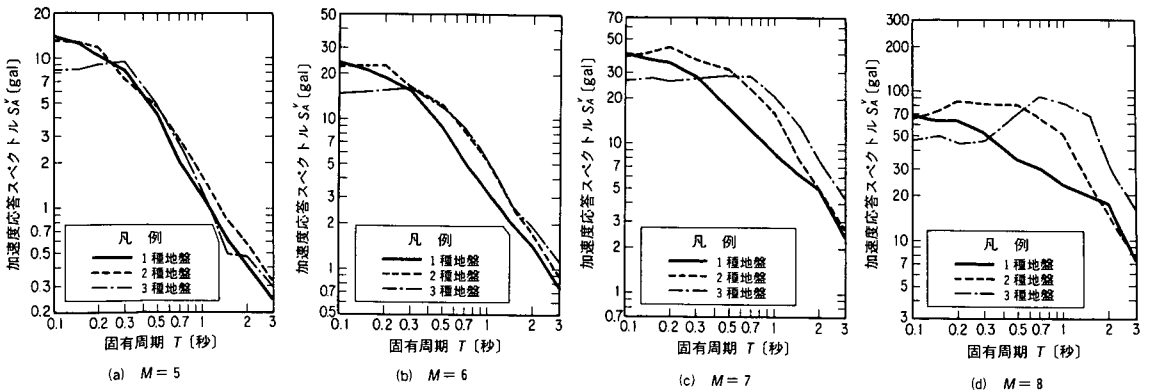
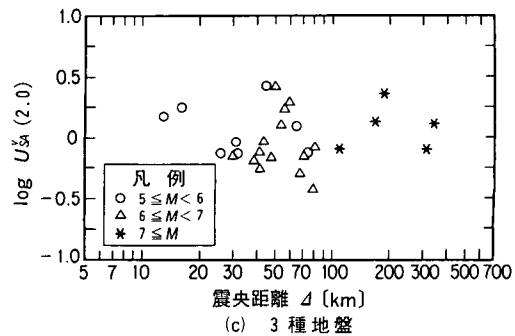
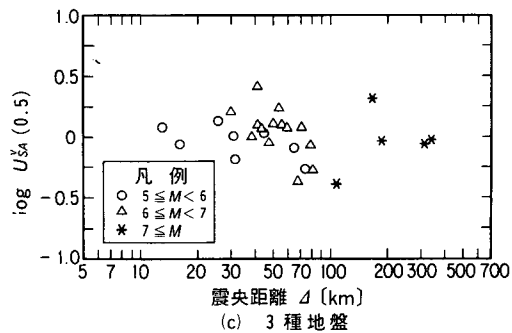
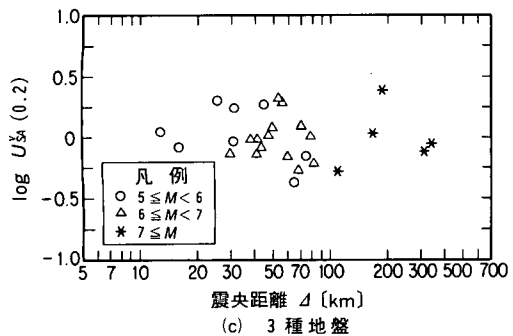
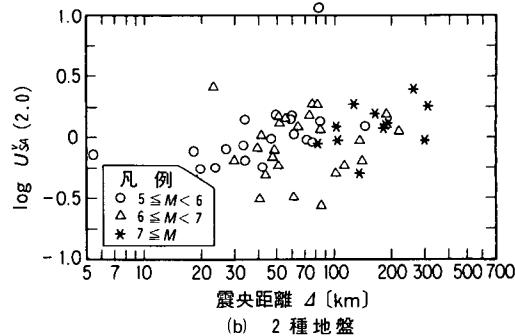
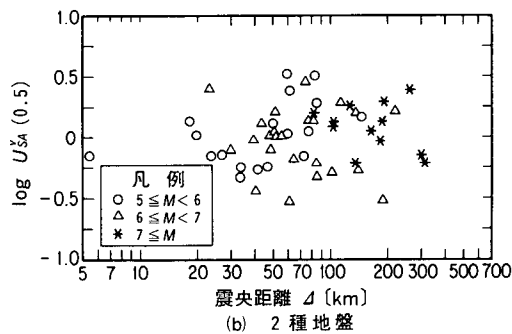
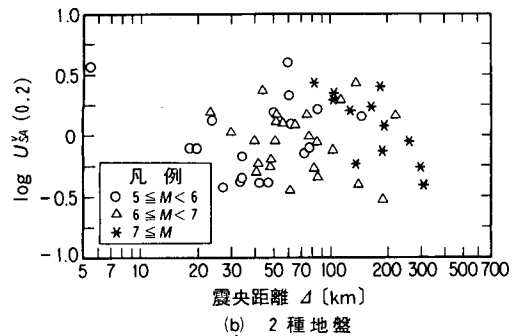
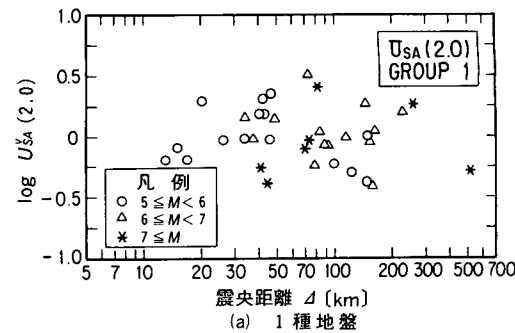
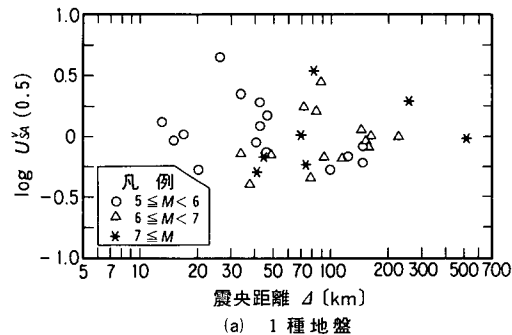
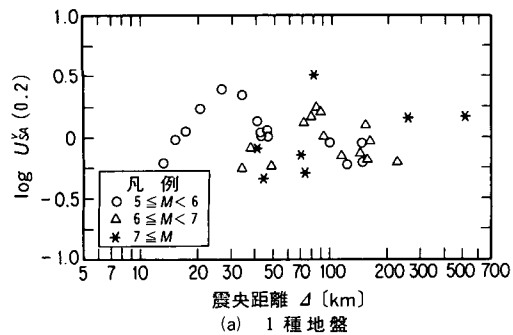


図-7.5(3) S_A^V スペクトル ($\Delta=200$ km の場合)

した結果が図-7.9である。これによれば、 S_A^V スペクトルは $\bar{S}_A$ スペクトルに比較して値自身は小さいが、固有周期 T_k 、地盤種別 GC_i 等による変化の様子は、よく似ている。そこで、 $\bar{S}_A$ スペクトルを基準にして S_A^V スペクトルの比 R_{SA} を次式で定義する。

$$R_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i) = \frac{S_A^V(T_k, M, \Delta, GC_i)}{\bar{S}_A(T_k, M, \Delta, GC_i)} \quad (7.4)$$

式(7.4)に式(7.2)及び式(6.19)を代入して整理すると R_{SA} は次のようになる。

図-7.6(1) $\log U_{SA}^{V}(0.2) \sim \Delta \sim M$ の関係図-7.6(2) $\log U_{SA}^{V}(0.5) \sim \Delta \sim M$ の関係図-7.6(3) $\log U_{SA}^{V}(2.0) \sim \Delta \sim M$ の関係

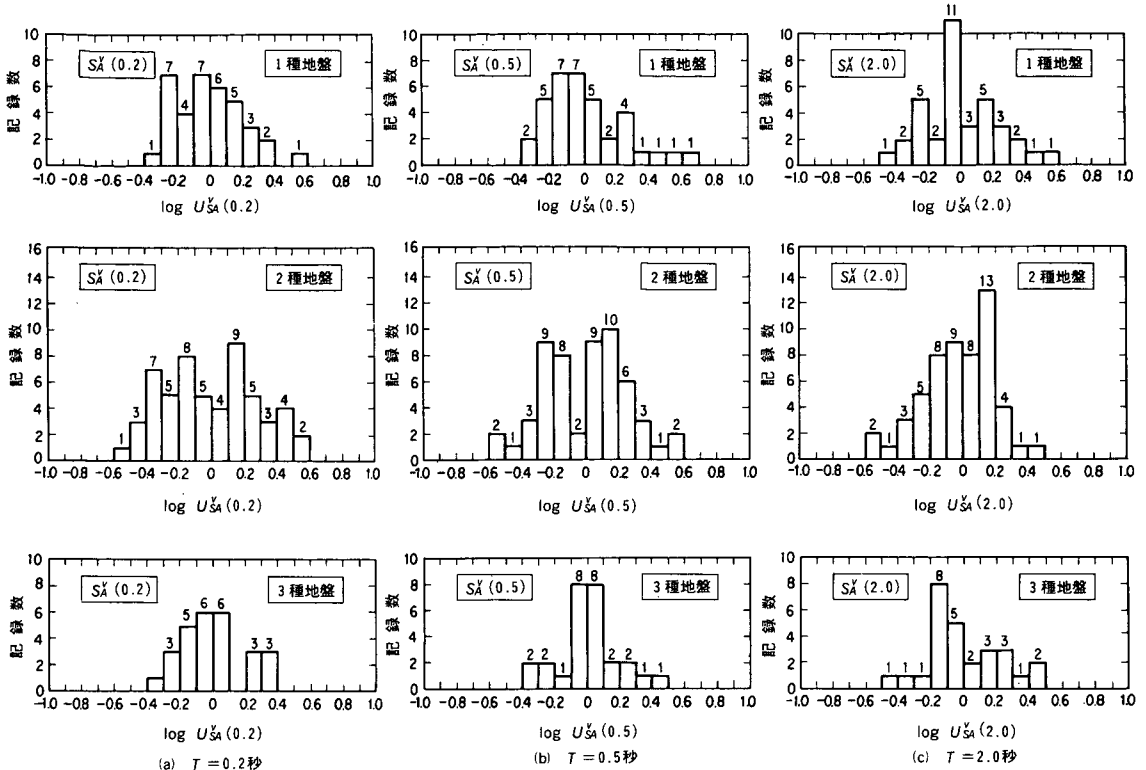


図-7.7 $\log U_{SA}^V$ の頻度分布 (固有周期 $T=0.2$ 秒, 0.5 秒, 2 秒の場合)

表-7.3 $\log U_{SA}^V(T)$ の標準偏差

地盤種別	固有周期 T [秒]									
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	3
1 種	0.341	0.265	0.202	0.207	0.249	0.259	0.247	0.258	0.236	0.200
2 種	0.323	0.329	0.289	0.275	0.257	0.252	0.277	0.242	0.260	0.243
3 種	0.249	0.229	0.199	0.161	0.189	0.235	0.258	0.243	0.224	0.239

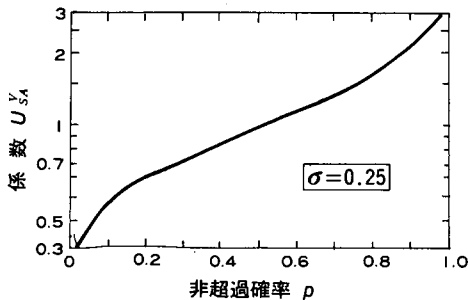


図-7.8 非超過確率 $p \sim$ 係数 U_{SA}^V の関係

$$R_{SA}(T_k, M, \Delta, GC_i) = a'(T_k, GC_i) \times 10^{b'(T_k, GC_i)M} \times (\Delta + 30)^{0.163} \dots (7.5)$$

ここで、係数 $a'(T_k, GC_i) = a(T_k, GC_i) - a^V(T_k, GC_i)$, $b'(T_k, GC_i) = b(T_k, GC_i) - b^V(T_k, GC_i)$ であり、 a' , b' は表-7.4 に示すとおりである。これより、マグニチュード $M=6, 7, 8$ 及び震央距離 $\Delta=50\text{km}$, 100 km , 200 km の組み合わせに対して R_{SA} を計算した結果が図-7.10 である。これによれば、 $\tilde{S}_A$ スペクトルと S_A^V スペクトルの比 R_{SA} はマグニチュード、震央距離、地盤種別、固有周期に大きく影響されず $0.2 \sim 0.4$ 程度の値をとることが分かる。ただし、マグニチュードが大きい場合には、1種地盤の固有周期 $1 \sim 2$ 秒付近で部分的に R_{SA} がこれよりも大きくなる傾向が認められる。

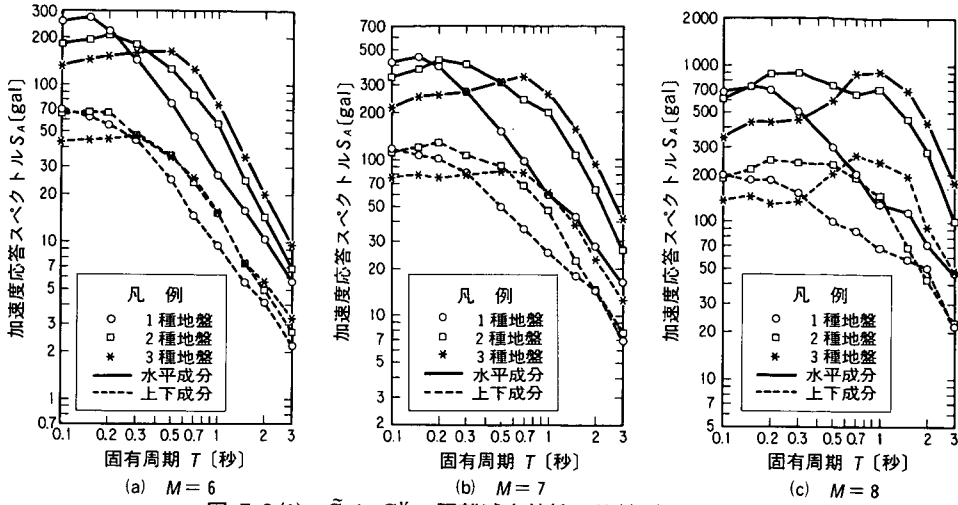


図-7.9(1) $\bar{S}_A$ と S_V の距離減衰特性の比較 ($\Delta=50$ km の場合)

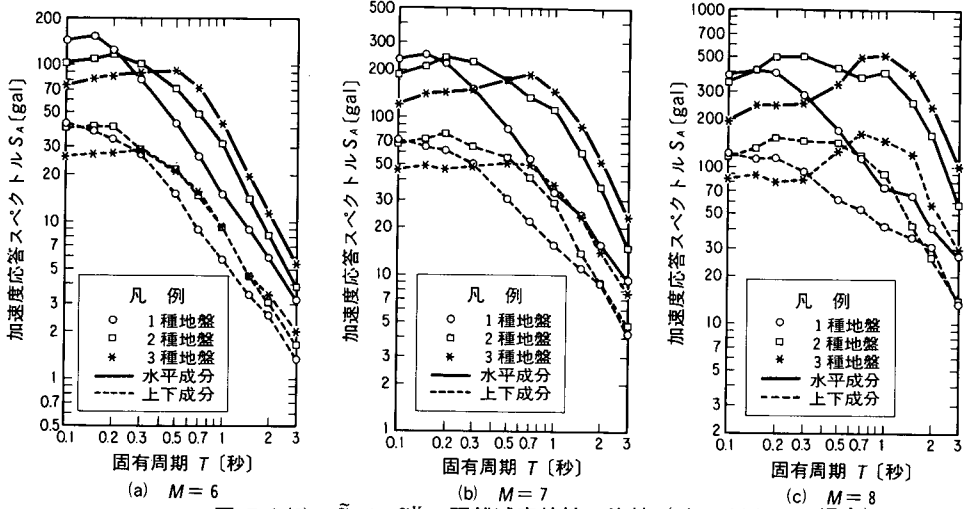


図-7.9(2) $\bar{S}_A$ と S_V の距離減衰特性の比較 ($\Delta=100$ km の場合)

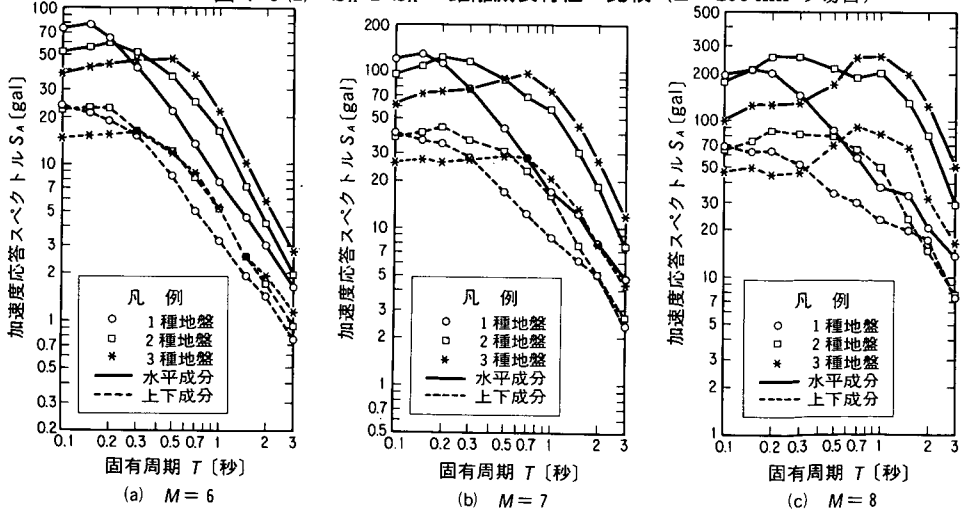


図-7.9(3) $\bar{S}_A$ と S_V の距離減衰特性の比較 ($\Delta=200$ km の場合)

表-7・4 水平成分を基準とした上下成分の推定式の係数 a' , b' , c'

固有周期 T [秒]	1 種 地 盤		2 種 地 盤		3 種 地 盤	
	$a'(T_k, GC_i)$	$b'(T_k, GC_i)$	$a'(T_k, GC_i)$	$b'(T_k, GC_i)$	$a'(T_k, GC_i)$	$b'(T_k, GC_i)$
0.1	0.102	0.0188	0.265	-0.0302	0.0876	0.0433
0.15	0.0861	0.0189	0.268	-0.0337	0.114	0.0198
0.2	0.0978	0.0157	0.226	-0.0268	0.138	0.00370
0.3	0.167	-0.00640	0.120	0.00500	0.135	0.00470
0.5	0.150	0.00460	0.102	0.0216	0.0238	0.106
0.7	0.0572	0.0714	0.118	0.0106	0.0295	0.0872
1.0	0.0545	0.0838	0.275	-0.0535	0.0475	0.0545
1.5	0.0620	0.0746	1.054	-0.144	0.0427	0.0644
2.0	0.0351	0.124	1.928	-0.176	0.300	0.0565
3.0	0.117	0.0352	1.078	-0.124	0.339	0.0507

$c' = 0.163$

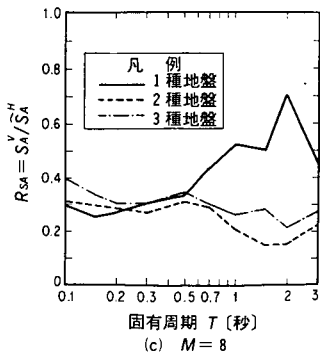
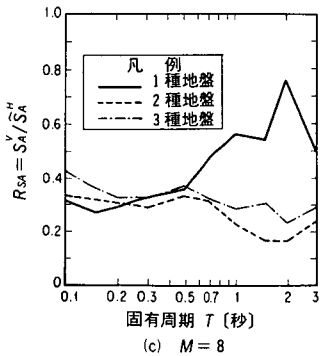
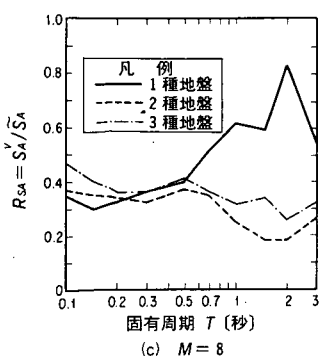
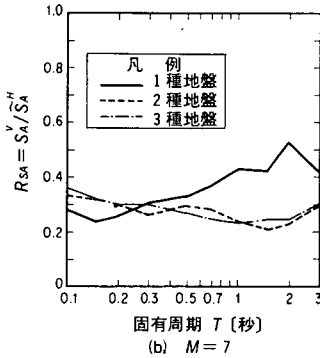
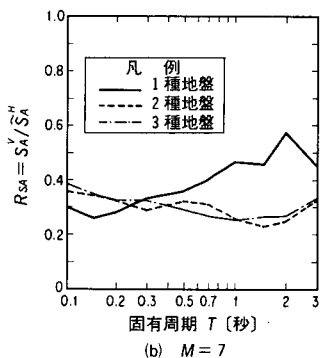
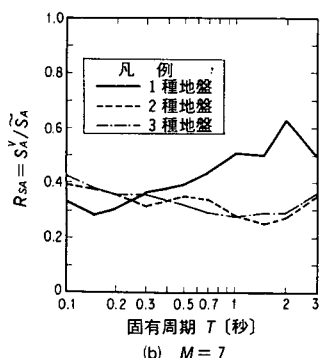
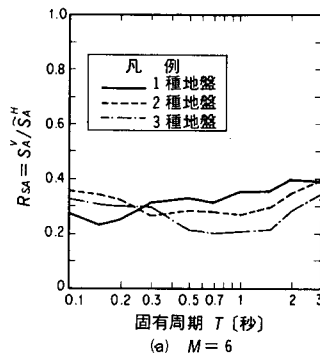
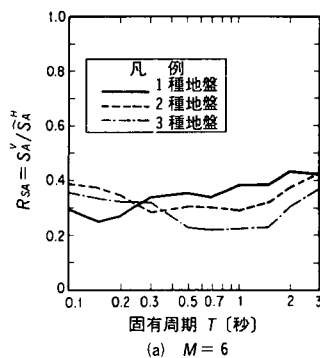
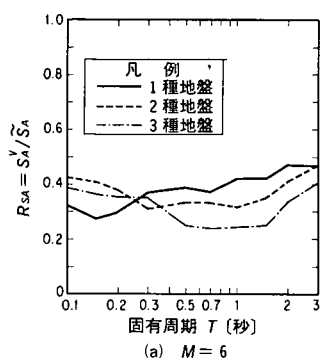


図-7・10 (1) $R_{SA} = S_A^V / \tilde{S}_A$ の試算例 ($\Delta = 50$ km の場合)

図-7・10 (2) $R_{SA} = S_A^V / \tilde{S}_A$ の試算例 ($\Delta = 100$ km の場合)

図-7・10 (3) $R_{SA} = S_A^V / \tilde{S}_A$ の試算例 ($\Delta = 200$ km の場合)

8. 既往の研究成果との比較

8.1 水平成分最大地震動及び加速度応答スペクトル

8.1.1 水平成分最大加速度の予測式

現在までに我が国で提案されている主要な水平成分最大加速度の距離減衰式は表-8・1(a)に示すとおりである^{20),29),40),41),42),43)}。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²⁰⁾。これは我が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。

$$a_{\max} = \begin{cases} 46.0 \times 10^{-0.208M} \times (\Delta + 10)^{-0.686} \\ (1 \text{ 種地盤}) (R=0.48) \\ 24.5 \times 10^{-0.333M} \times (\Delta + 10)^{-0.924} \\ (2 \text{ 種地盤}) (R=0.59) \\ 59.0 \times 10^{-0.261M} \times (\Delta + 10)^{-0.886} \\ (3 \text{ 種地盤}) (R=0.62) \quad \dots\dots (8 \cdot 1) \\ 12.8 \times 10^{-0.432M} \times (\Delta + 10)^{-1.112} \\ (4 \text{ 種地盤}) (R=0.72) \\ 34.1 \times 10^{-0.308M} \times (\Delta + 10)^{-0.925} \\ (\text{全記録から求めた場合}) (R=0.62) \end{cases}$$

ここで、 R は重相関係数を表している。式(8・1)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おり、我が国で得られた記録を基に最大加速度を地盤条件別にマグニチュード及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型強震計による未補正(短周期計器補正)記録であり、短周期の感度が低下したものである。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(8・1)による解析結果を比較する前に、両者の相違点をまとめると以下のようになる。

i) 新耐震設計法(案)による最大加速度の予測式は、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イザーによる数値化精度を考慮した補正法により基の加速記録の短周期を補正し、これから計算した最大加速度を用いている。

ii) 新耐震設計法(案)では、強震計により観測された水平2成分のうち、いずれか大きい一方の記録(301

成分)の最大加速度を解析している。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、最大加速度が水平面内で最大となる方向の最大加速度を解析している。なお、2・3節に示したように、このように水平2成分を合成して最大加速度を求めると水平2成分のうち、いずれか大きい方の最大加速度と比較して、平均して8%程度大きめの結果を与えることが分かっている。

iii) 新耐震設計法(案)では、301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成分の記録を用いている。

iv) 新耐震設計法(案)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種及び3種地盤のスペクトル値に違いが少なことから、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。

以上のような相違点を考慮した上で、新耐震設計法(案)による推定式と今回の推定式を $M=6, 7, 8$ に対して比較した結果が図-8・1である。これによれば上記の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(案)の予測式よりも、かなり大きな結果を与えるのが分かる。ただし、新耐震設計法(案)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130 gal程度にしかならず、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-8・2は表-8・1に示した既往の我が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-8・3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⁴²⁾。図-8・3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、ほぼ同程度となることが注目される。これは、今回の解析結果(図-4・12参照)でも同様の結果となっている。

また、図-8・4は既往の海外における主要な最大加速度の予測式(表8・1(b)参照)を $M=6, 8$ に対して示したものである^{27),44)~50)}。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

表-8・1(a) 既往の水平成分最大加速度の予測式（我が国の研究成果）

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）	我が国の地盤上の301成分	道路橋耐震設計指針の地盤種別による（4種類）	$a_{\max} = \begin{cases} 46.0 \times 10^{0.208M} \times (\Delta + 10)^{-0.686} & (1\text{種地盤}) \\ 24.5 \times 10^{0.333M} \times (\Delta + 10)^{-0.924} & (2\text{種地盤}) \\ 59.0 \times 10^{0.261M} \times (\Delta + 10)^{-0.886} & (3\text{種地盤}) \\ 12.8 \times 10^{0.432M} \times (\Delta + 10)^{-1.112} & (4\text{種地盤}) \end{cases}$	計器補正はしていない。
片山恒雄 〔1974〕	1963～1970年間に我が国で得られた46地震による330記録		$a_{\max} = 9.59 \times 10^{0.466M} \times \Delta^{-1.290}$ $a_{\max} = 203 \times 10^{0.411M} \times (\Delta + 30)^{-1.637}$	$\sigma(U) = 0.877$ $\sigma(U) = 0.942$
後藤尚男 亀田弘行 今西直人 橋本修身 〔1978〕	我が国の地盤上の45成分（最大加速度50gal以上）	道路橋耐震設計指針による3種地盤	$a_{\max} = 407.4 \times 10^{0.160M} \times (\Delta + 30)^{-0.752}$	計器補正済 $\sigma(\ln U) = 0.495$
後藤尚男 亀田弘行 杉戸真太 〔1982〕	我が国の地盤上の28地震による84成分	一般の沖積及び洪積地盤（道路橋耐震設計指針の第2、3種に相当）	$a_{\max} = 202 \times 10^{0.178M} \times (\Delta + 30)^{-0.666}$	$\sigma(U) = 0.578$
岡本舜三	鬼怒川発電所立坑（地下672m）の記録	粗粒凝灰岩	$\log \frac{a_{\max}}{640} = \frac{\Delta + 40}{100} (-7.604 + 1.7244M - 0.1036M^2)$	
篠大角恒雄 片山恒雄 〔1982〕	我が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	<u>地盤別の場合</u> $a_{\max} = 6.85 \times 10^{0.372M} \times \Delta^{-0.866} \quad (1\text{種})$ $a_{\max} = 6.75 \times 10^{0.351M} \times \Delta^{-0.793} \quad (2\text{種})$ $a_{\max} = 14.8 \times 10^{0.318M} \times \Delta^{-0.829} \quad (3\text{種})$ $a_{\max} = 4.45 \times 10^{0.420M} \times \Delta^{-0.922} \quad (4\text{種})$ <u>層別因子の場合</u> $a_{\max} = \begin{cases} 8.04 \\ 8.09 \\ 9.18 \\ 8.04 \end{cases} \times 10^{0.353M} \times \Delta^{-0.837} \quad \begin{matrix} (1\text{種}) \\ (2\text{種}) \\ (3\text{種}) \\ (4\text{種}) \end{matrix}$	
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	$a_{\max} = 10^{0.440M - 1.38 \log R + 1.04}$	
建設省土木研究所（土研資料第1864号） 〔1982〕	我が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	$\tilde{a}_{\max} = 1,073 \times 10^{0.221M} \times (\Delta + 30)^{-1.251} \quad (1\text{種})$ $\tilde{a}_{\max} = 227.3 \times 10^{0.308M} \times (\Delta + 30)^{-1.201} \quad (2, 3\text{種})$ $\tilde{a}_{\max} = 403.1 \times 10^{0.262M} \times (\Delta + 30)^{-1.208} \quad (4\text{種})$	$\sigma(\log U) = 0.217$ $\sigma(\log U) = 0.221$ $\sigma(\log U) = 0.191$

表-8・1 (b) 既往の水平成分最大加速度予測式 (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		$a_{\max} = 1,320 e^{0.58M} \times (\Delta + 25)^{-1.52}$	$\sigma(\ln U) = 0.84$
Esteva [1970]			$a_{\max} = 1,230 \times e^{0.8M} \times (\Delta + 25)^{-2}$	$\sigma(\ln U) = 1.2$
Esteva 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) $a_{\max} = 65.5 \times 10^{0.263M} \times (R + 25)^{-0.678}$ (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] Δ : 震央距離 [km]
 M : マグニチュード R : 震源距離 [km]

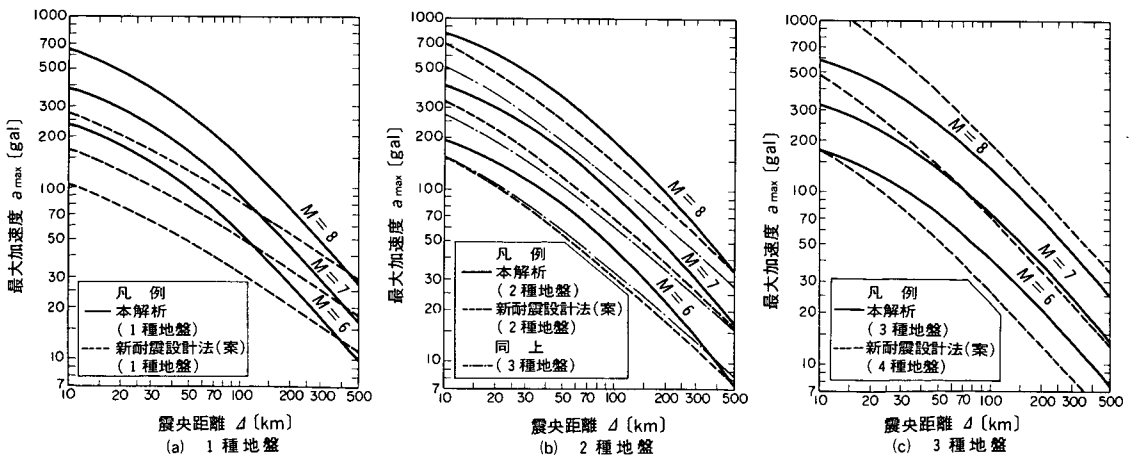


図-8・1 新耐震設計法 (案) の最大加速度推定式との比較

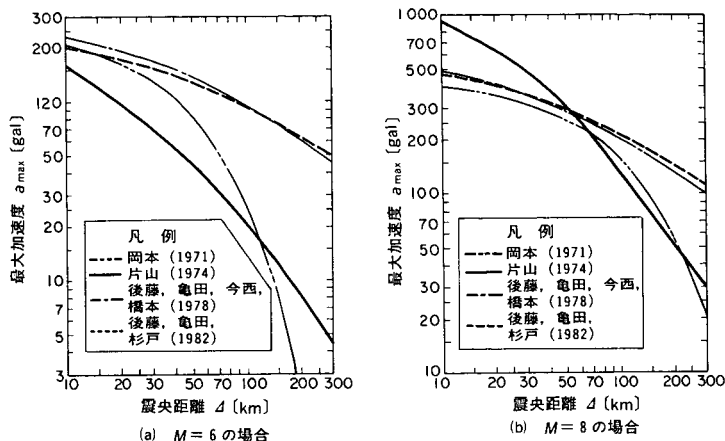


図-8-2 既往の我が国の水平最大加速度の予測式

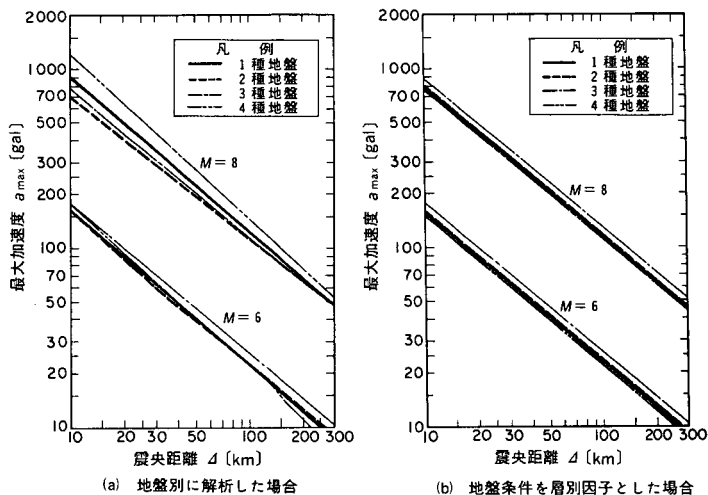


図-8-3 篠, 大角, 片山による水平成分最大加速度の推定式

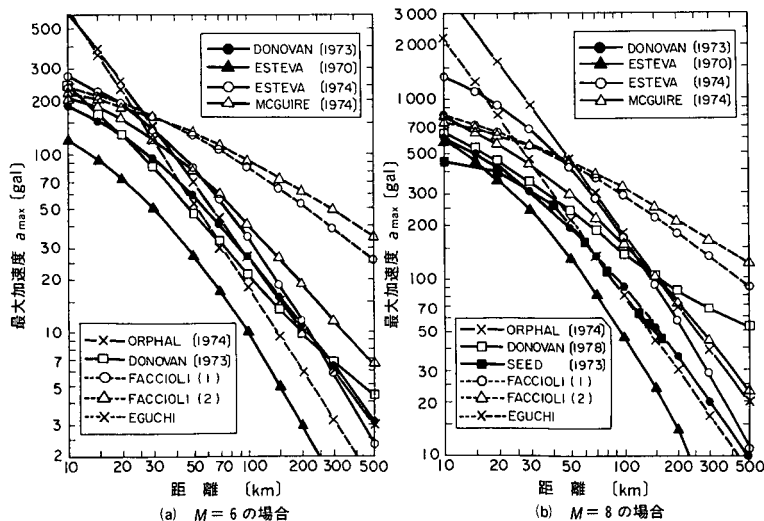


図-8-4 既往の海外における水平成分最大加速度の予測式

果を既往の我が国及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 $\Delta=30\text{ km}$ 及び $\Delta=100\text{ km}$ 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 $\Delta=30\text{ km}$ 及び $\Delta=100\text{ km}$ 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、大勢として今回の解析結果に近いものが多い。従って、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と言えることができる。

8.1.2 水平成分最大速度の予測式

既往の主要な水平成分最大速度の距離減衰式をまとめると表-8・2に示すとおりである^{20),41),43),45),47),48),50),51),52)}。このうち、後藤らの推定式は道路橋耐震設計指針という2種及び3種相当の地盤上の強震記録から求めたものであり、大崎ら及び林らの推定式は、いずれも岩盤上の強震記録から求めたものである。McGuire ら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基に求められたものである。また、Faccioli の解析には、我が国を含む環太平洋地震帯の記録が使われている。図-8・5及び図-8・6はそれぞれ我が国及び海外において提案された距離減衰式を $M=6$ 及び 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-4・12(b)に示したとおりである。

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-8・5及び図-8・6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/s (1種地盤) ~ 3.5 cm/s (3種地盤), $M=8$ の場合には 7 cm/s (1種地盤) ~ 25 cm/s (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/s , $M=8$ に対して 18 cm/s , また、大崎ら及び金井による結果では、 $M=6$ に対して $0.15\sim0.7\text{ cm/s}$, $M=8$ に対して $3\sim10\text{ cm/s}$ 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 $2\sim5\text{ cm/s}$, $M=8$ に対して $13\sim28\text{ cm/s}$ となる。今回の解析結果はこれらに比較して著しい違いはない。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ことに注意しなければならない。

8.1.3 水平成分最大変位の予測式

既往の主要な水平成分最大変位の距離減衰式を示すと表-8・3のとおりである^{20),41),47),48),50)}。このうち、後藤らの推定式は前節と同様に道路橋耐震設計指針という2種及び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基にしたものであり、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-8・7及び図-8・8はそれぞれ我が国及び海外において提案された距離減衰式を $M=6$ 及び 8 に対して示したものである。

長周期の変位を対象とした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 $0.5\text{ cm}\sim3\text{ cm}$, $M=8$ に対して $7\text{ cm}\sim25\text{ cm}$ 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) ~ 0.5 cm (3種地盤), $M=8$ に対して 1.5 cm (1種地盤) ~ 7 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。

8.1.4 水平成分加速度応答スペクトルの予測式

現在までに我が国で提案されている水平成分の加速度応答スペクトルの距離減衰式は表-8・4(a)に示すとおりである^{5),20),21),22)}。代表的なものとしては、新耐震設計法(案)の予測式がある。これは我が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。

$$S_A(T) = f_M(T) \times f_d(T) \times f_{cc}(T) \cdots \cdots (8\cdot2)$$

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 [gal]

$f_M(T)$: 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

$f_{cc}(T)$: 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、上記と同じ記録及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

表-8・2(a) 既往の水平成分最大速度の予測式（我が国の研究成果）

出典	解析データ	地盤種別	推定式	備考
金井 清			$v_{\max} = 10^A$ $A = 0.61M - (1.66 + 3.60/\Delta) \log \Delta - 0.631 + 1.83/\Delta$	
後藤 尚男 亀田 弘行 杉戸 真太	我が国の地盤上で得られた28地震による84成分	一般の沖積及び洪積地盤（道路橋耐震設計指針の第2, 3種地盤相当）	$v_{\max} = 1.17 \times 10^{0.232M} \times (\Delta + 30)^{-0.300}$	$\sigma(U) = 0.655$
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成分の加速度記録及び軟岩上の35成分の加速度記録	硬岩及び軟岩	<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〕	我が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	$\bar{v}_{\max} = 23.86 \times 10^{0.271M} \times (\Delta + 30)^{-1.275}$ (1種) $\bar{v}_{\max} = 2.666 \times 10^{0.421M} \times (\Delta + 30)^{-1.183}$ (2, 3種) $\bar{v}_{\max} = 5.136 \times 10^{0.415M} \times (\Delta + 30)^{-1.257}$ (3種)	$\sigma(\log U) = 0.239$ $\sigma(\log U) = 0.243$ $\sigma(\log U) = 0.243$

表-8・2(b) 既往の水平成分最大速度の予測式（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	$v_{\max} = 0.726 \times 10^{0.52M} \times \Delta^{-1.34}$	$\sigma(U) = 1.89$
Eguchi 〔1981〕	Western United States の669成分	〃	$v_{\max} = 1.132 \times 10^{0.45M} \times \Delta^{-1.19}$	$\sigma(\log U) = 0.24$
Esteva 〔1970〕		〃	$v_{\max} = 15 \times e^M \times (\Delta + 0.17 e^{0.59M})^{-1.7}$	$\sigma(\ln U) = 0.84$
Esteva and Villaverde 〔1974〕	Western U. S.	〃	$v_{\max} = 32 \times e^M \times (\Delta + 25)^{-1.7}$	$\sigma(\ln U) = 0.74$
McGuire 〔1974〕	West Coast of U. S.	〃	$v_{\max} = 5.64 \times 10^{0.461M} \times (\Delta + 25)^{-1.202}$	$\sigma(\log U) = 0.273$
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)	$\sigma(\log U) = 0.253$ $\sigma(\log U) = 0.243$

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

最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式

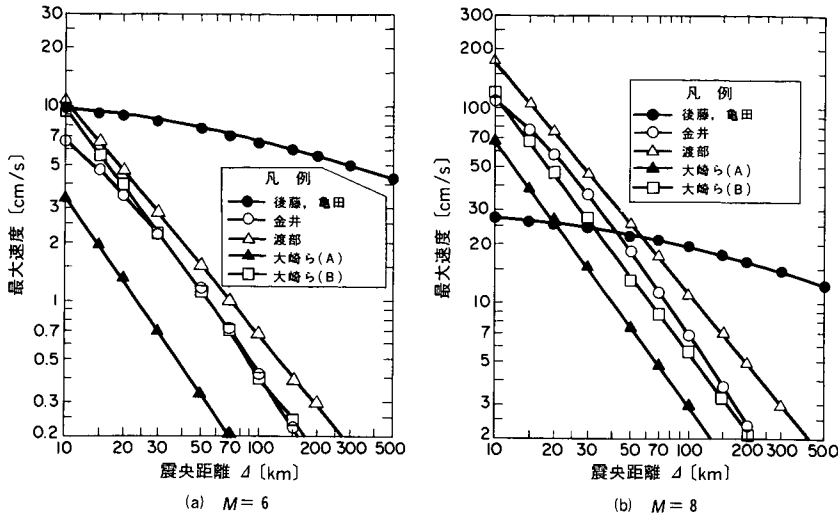


図-8・5 既往の我が国の水平成分最大速度の予測式

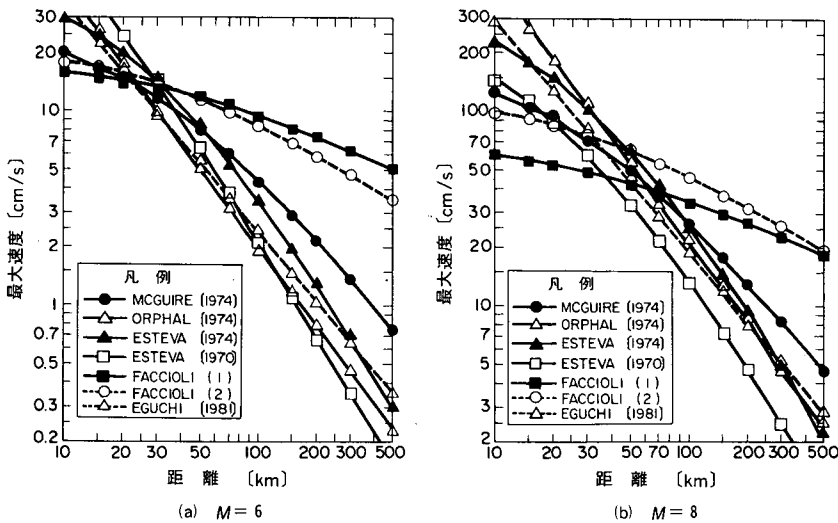


図-8・6 既往の海外における水平成分最大速度の予測式

表-8・3(a) 既往の水平成分最大変位の予測式 (我が国の研究成果)

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	我が国の地盤上の 28地震による84成分	一般の沖積及び洪 積地盤 (道路橋耐 震設計指針の第 2,3種相当)	$d_{\max} = 0.0288 \times 10^{0.356M} \times (\Delta + 30)^{-0.219}$	$\sigma(U) = 0.685$
坪井 忠二	震源深さ60km以 内の地震		$d_{\max} = 0.676 \times 10^M \times \Delta^{-1.73} \quad (\Delta < 500\text{km})$	
建設省土木研究所 (土研資料第1864 号) [1983]	我が国の地盤上で 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	$\bar{d}_{\max} = 0.886 \times 10^{0.399M} \times (\Delta + 30)^{-1.390}$ (1種) $\bar{d}_{\max} = 0.056 \times 10^{0.549M} \times (\Delta + 30)^{-1.179}$ (2,3種) $\bar{d}_{\max} = 0.070 \times 10^{0.575M} \times (\Delta + 30)^{-1.224}$ (4種)	

表-8・3(b) 既往の水平成分最大変位の予測式 (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	$d_{\max} = 4.71 \times 10^{-2} \times 10^{0.57M} \times \Delta^{-1.18}$	$\sigma(U) = 2.19$
Eguchi (1981)	Western United States の669成分	〃	$d_{\max} = 7.08 \times 10^{-2} \times 10^{0.51M} \times \Delta^{-0.97}$	$\sigma(\log U) = 0.33$
McGuire (1974)	West Coast of U. S.	〃	$d_{\max} = 0.393 \times 10^{0.434M} \times (\Delta + 25)^{-0.555}$	$\sigma(\log U) = 0.330$
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] Δ : 震央距離 [km]
 M : マグニチュード R : 震源距離 [km]

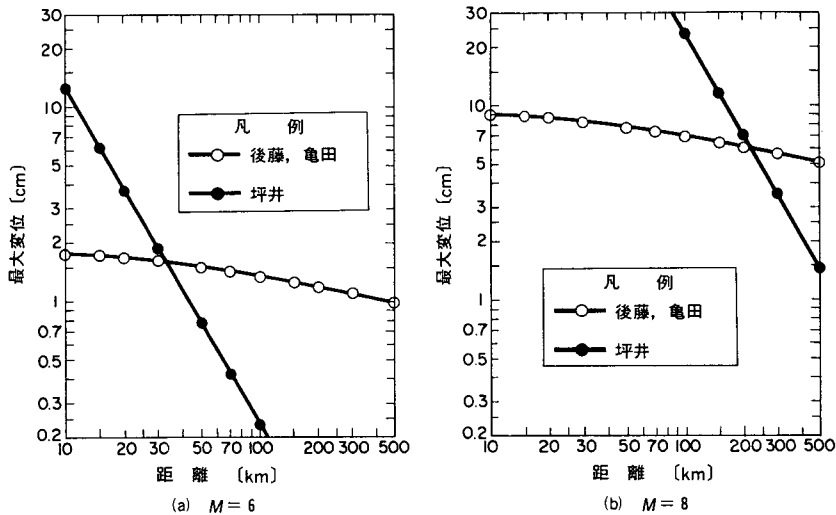


図-8・7 既往の我が国の水平成分最大変位の予測式

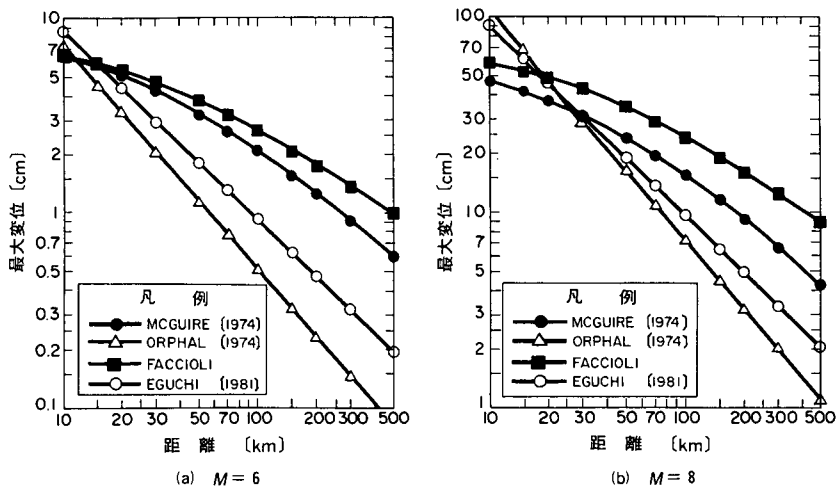


図-8・8 既往の海外における水平成分最大変位の予測式

表-8・4(a) 既往の水平成分加速度応答スペクトルの予測式（我が国の研究成果）

出典	解析データ	地盤種別	推定式
建設省新耐震設計法 (案)	我が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	$S_A(T) = f_M(T) \times f_d(T) \times f_{GC}(T)$ ここで、 $f_M(T)$, $f_d(T)$, $f_{GC}(T)$ はそれぞれ数量化解析から求められるマグニチュード、震央距離及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	同上	同上	$\beta(T) = f_M'(T) \times f_d'(T) \times f_{GC}'(T)$ ここで、 $f_M'(T)$, $f_d'(T)$, $f_{GC}'(T)$ はそれぞれ数量化解析から求められるマグニチュード、震央距離及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]	我が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 は固有周期及び地盤条件 GC_i ($i=1,2,3$)ごとに定められる係数

表-8・4(b) 既往の水平成分加速度応答スペクトルの予測式（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種 3) 基盤	$\log S_A(T, p) = M + \log A_0(R) - a(T)p - b(T)M - c(T) - d(T)s - e(T)v - f(T)M^2 - g(T)R$ 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, $s=1$: 軟かい岩, $s=2$: 基盤 $v=0$: 水平成分, $v=1$: 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 (≒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) S_A : 加速度応答スペクトル β : 加速度応答スペクトル倍率 $\beta = S_A/a_{max}$ Δ : 震央距離[km]
 S_v : 速度応答スペクトル M : マグニチュード R : 震源距離[km]

場合には、次のような推定式となっている。

$$\beta(T) = f_M(T) \times f_d(T) \times f_{GC}(T) \quad \cdots \cdots (8 \cdot 3)$$

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

これらの推定式と今回の解析の違いは、8.1 節で示

した水平成分最大加速度の場合と同様に、i) 計器補正の有無（新耐震設計法(案)の推定式は未補正記録を基にしている）、ii) 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）、iii) 記録数の違い（今回の解析では新耐震設計法(案)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）、iv) 地震種別数の違い（新耐震設計法(案)では 4 種類、今回の解析では 3 種類にそれぞれ分類している）の 4 点である。また、この他に、新耐震設計法(案)では、数量化理論を用いているため、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20 km 以下, 20~60 km, 60~120 km, 120~200 km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、マグニチュード及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点が異なっている。

以上のような相違点を考慮した上で新耐震設計法(案)のスペクトルと今回の解析結果を比較した一例が図-8・9である。ここで上述したように、新耐震設計法(案)のスペクトルは、マグニチュード及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及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及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 Δ の場合には、 $20 \leq \Delta < 60$ km, $60 \leq \Delta < 120$ km, $120 \leq \Delta < 200$ kmのカテゴリーに対して、それぞれ震央距離の平均値 $\bar{\Delta}$ は38.2 km, 82.9 km, 158.7 km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。従って図-8・9はこれらの代表値の $\bar{M}$, $\bar{\Delta}$ に対して、本報告で提案する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(案)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(案)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(案)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150 km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うことができる。

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-8・4(b)に示す^{27),50),53),54)}。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

我が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軟質な地盤とあるだけで、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。

$$S_v(T) = a(T) \times 10^{b(T)M} \times (R+25)^{-c(T)} \dots \dots (8 \cdot 4)$$

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(8・4)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 を次式により加速度応答スペクトル S_A に変換し、

$$S_A(T) \approx \frac{2\pi}{T} S_v(T) \dots \dots \dots (8 \cdot 5)$$

これを図-6・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-8・10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-8・10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分かる。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。

$$\begin{aligned} \log S_A(T), p = & M + \log A_0(R) - a(T)p - b(T)M \\ & - c(T) - d(T)s - e(T)v - f(T)M^2 \\ & - g(T)R \dots \dots \dots (8 \cdot 6) \end{aligned}$$

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,

最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式

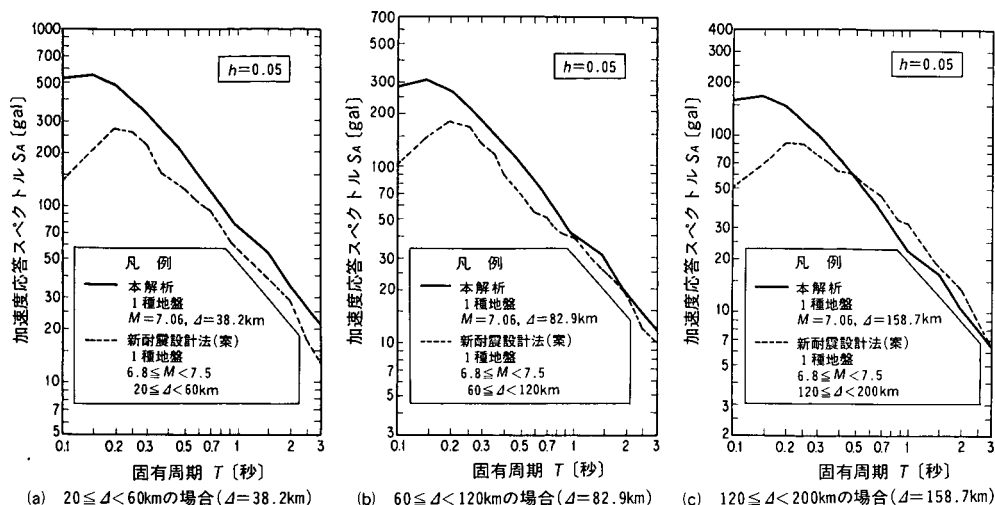


図-8・9 (1) 新耐震設計法(案)のスペクトルとの比較 (1種地盤, $6.8 \leq M < 7.5$ の場合)

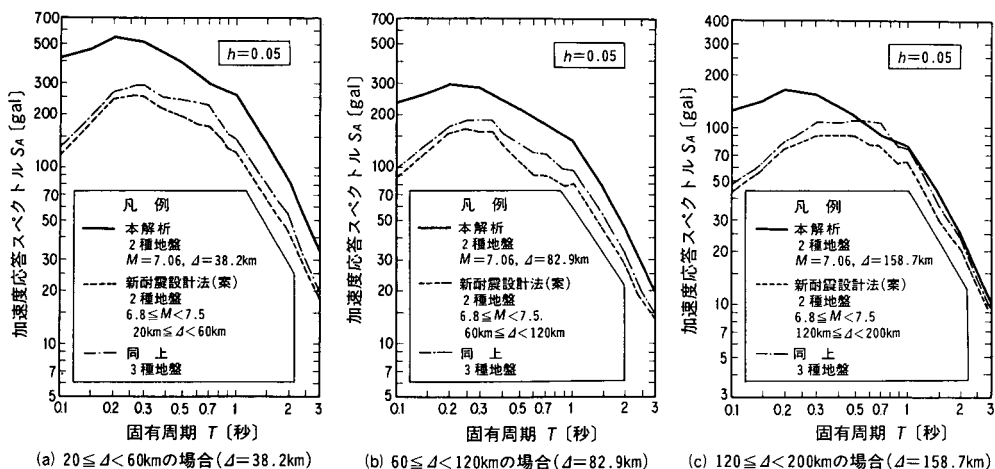


図-8・9 (2) 新耐震設計法(案)のスペクトルとの比較 (2種地盤, $6.8 \leq M < 7.5$ の場合)

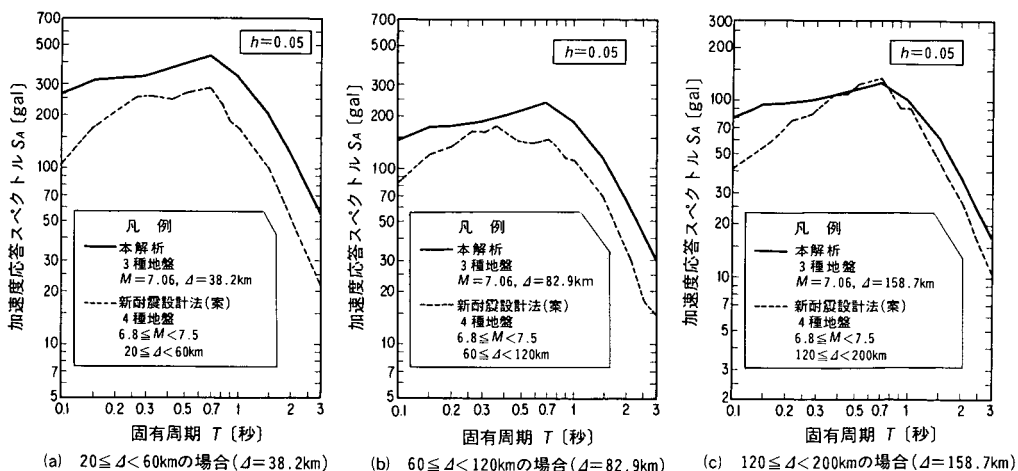


図-8・9 (3) 新耐震設計法(案)のスペクトルとの比較 (3種地盤, $6.8 \leq M < 7.5$ の場合)

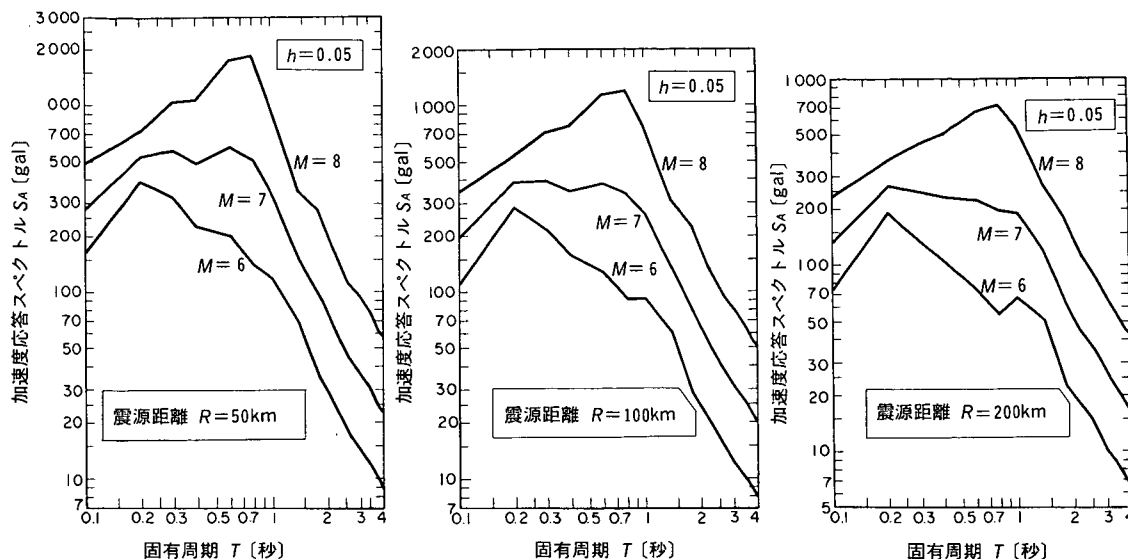


図-8-10 Faccioli による水平成分加速度応答スペクトル (速度応答スペクトルから加速度応答スペクトルに変換)

$v=1$: 成分)

$\log A_0(R)$: 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)

ρ : 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 $M=7, 8$, 震央距離 $\Delta=50\text{km}, 100\text{km}, 200\text{km}$ に対して式(8-6)から計算した結果が図-8-11 である。これを図-6-13 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 50 km 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分かる。例えば、マグニチュード $M=8$ で震央距離 $\Delta=100\text{km}$ 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 付近のスペクトル値でさえ 150 gal 以下となっており、我が国の同種の解析結果と比較して非常に小さい値となっている。ただし、震央距離が 50 km 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、我が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、我が国のスペクトルと 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^{(55), (56), (57)}。

8-2 上下成分最大地震動及び加速度応答スペクトル

従来、上下成分の地震動の特性を検討した研究は水平成分に比較して非常に少ない。これは、上下成分の記録が水平成分の記録に比較して加速度振幅が小さいために、記録数値化された記録数が水平成分に比較してかなり少ないことによるものである。現在までに提案されている主要な上下成分の最大加速度、最大速度及び最大変位の距離減衰式をまとめるとそれぞれ表-8-5、表-8-6、表-8-7 のようになる。

このうち、Idriss らの研究⁽²⁷⁾及び Sadigh らの研究⁽⁵⁸⁾は共にマグニチュード 6.5 程度の小規模地震に対してのみ適用可能なもので、任意のマグニチュードに対する距離減衰式を与えるものではない。また、Boore らの研究⁽⁵⁹⁾も 3 種類のマグニチュードのレンジ (5~5.7, 6~6.4, 7.1~7.7) に対する距離減衰式を与えるものである。また、この場合には、解析に用いられた強震記録が地盤上で得られたものではなく、1~2 階建の地階 (Class 1 Structure と呼んでいる) 及びそれ以上の高い建物の地階 (Class 2 Structure と呼んでいる) でそれぞれ得られたものであることに注意しなければならない。大崎らの研究は岩盤上の強震記録だけを基に距離減衰を求めたものであるが、解析に用いた記録数はそれ程多くないとされている。Trifunac らの

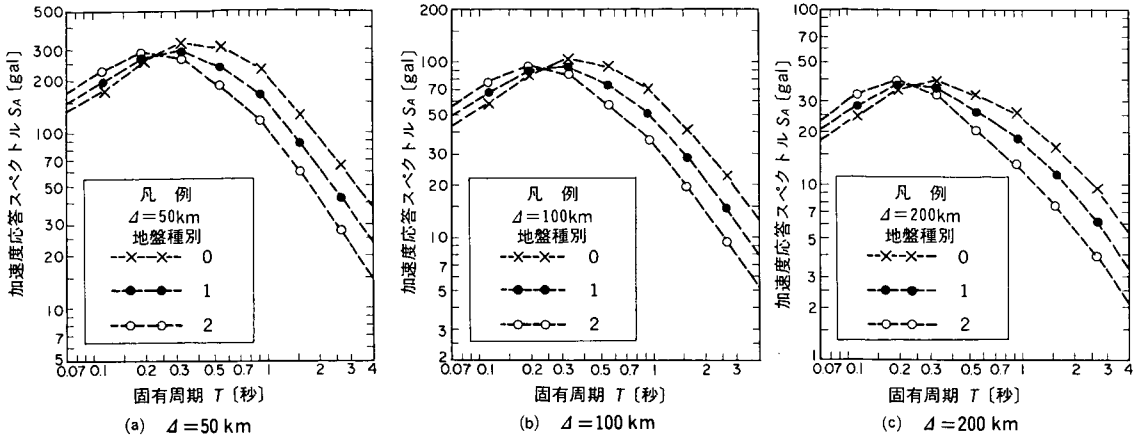


図-8-11 (1) Trifunac らの水平成分加速度応答スペクトル ($M=7$ の場合)

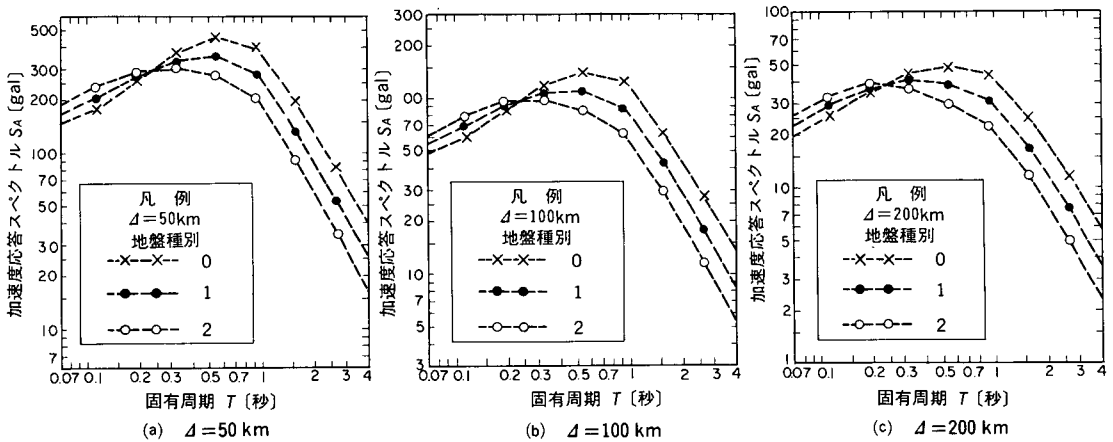


図-8-11 (2) Trifunac らの水平成分加速度応答スペクトル ($M=8$ の場合)

表-8-5 既往の上下成分最大変位の予測式

出典	解析データ	地盤種別	推定式	備考
Trifunac [1976]	57回の地震による181成分の強震記録	alluvium($s'=0$) intermediate($s'=1$) baserock($s'=2$) の3種類	$\log a_{\max}^v = M + \log A_0(\Delta) - \log \{y_0(M, p, s', v')\}$ ここで, $\log y_0 = -0.898p - 1.789M + 6.217 + 0.060s' + 0.331v' + 0.186M^2$ ここで, s' : 地盤種別 v' : 1(上下成分の場合) p : 非超過確率	水平成分と上下成分の変位を同時に回帰している。 水平成分の場合には $v'=0$
Boore, Oliver, Page and Joyner [1978]	a) Class 1 Structure 158 記録 b) Class 2 Structure 108 記録	a) Class 1 Structure (1~2階建の地下) rock soil b) Class 2 Structure (それ以上の階数の建物) rock soil	マグニチュードのレンジ(5~5.7, 6~6.4, 7.1~7.7)ごとに $\log a_{\max}^v = A + E \log R$ ここで, R : 断層線までの直近の距離(km) A, E : 重回帰分析による係数	

表-8・5 既往の上下成分最大加速度の予測式（つづき）

出典	解析データ	地盤種別	推定式	備考
Idriss and Ng 〔1978〕	マグニチュード5.6～6.4の4回の地震による強震記録を使用 rock site 数は22, stiff site 数は40	rock site stiff site	$\ln a_{\max}^v = \ln A + E \ln(D+20)$ ここで、 A, E ：重回帰分析による係数 D ：Energy center からの距離(km)	ローカルマグニチュード $M_L \approx 6.4 \sim 6.5$ の地震に対する推定
Sadigh, Power and Youngs 〔1978〕	マグニチュード6.3～6.5の11地震による強震記録を使用	deep soil site (岩盤上に60m以上土が堆積した場合)	$\ln a_{\max}^v = \ln A + E \ln(D+20)$ ここで、 A, E ：重回帰分析による係数 D ：Energy center からの距離(km)	マグニチュード6.5付近の地震に対する推定式
Ohsaki, Watabe and Tohdo 〔1980〕	岩盤上の記録 (記録数は比較的少ない)	岩盤上	$a_{\max}^v = 23.9 \times 10^{0.485M} \times \Delta^{-1.85}$	75記録を使った水平成分最大加速度の解析も同時に行われている。

表-8・6 既往の上下成分最大速度の予測式

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

表-8・7 既往の上下成分最大変位の予測式

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

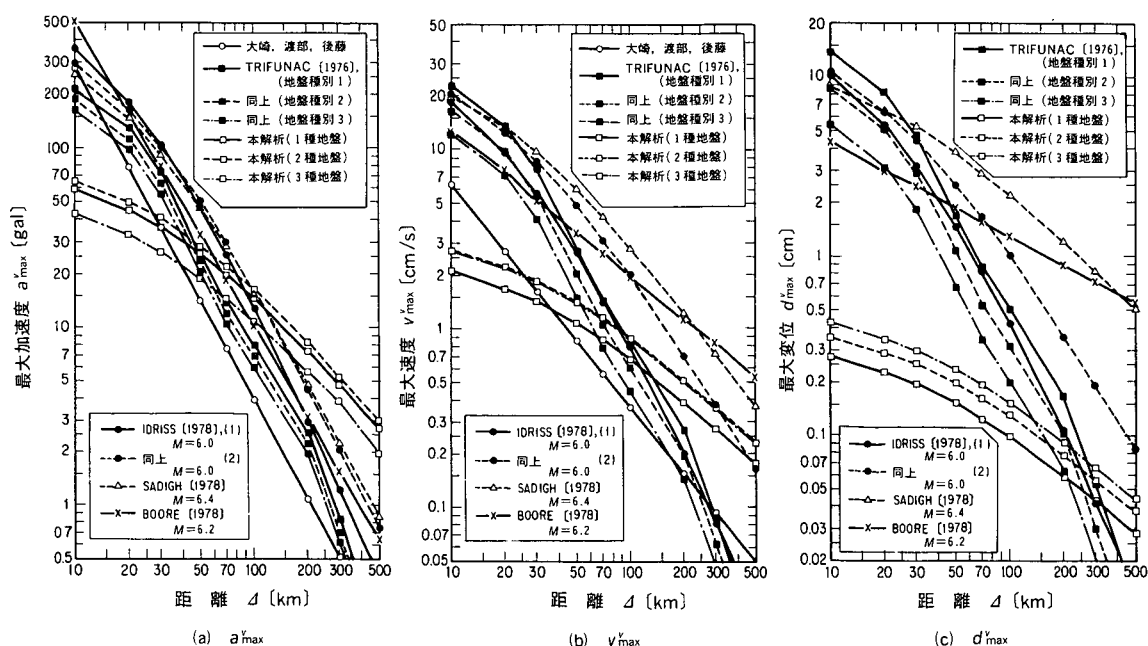


図-8・12(1) 既往の上下成分最大地震動の距離減衰 ($M=6$ 相当の場合)

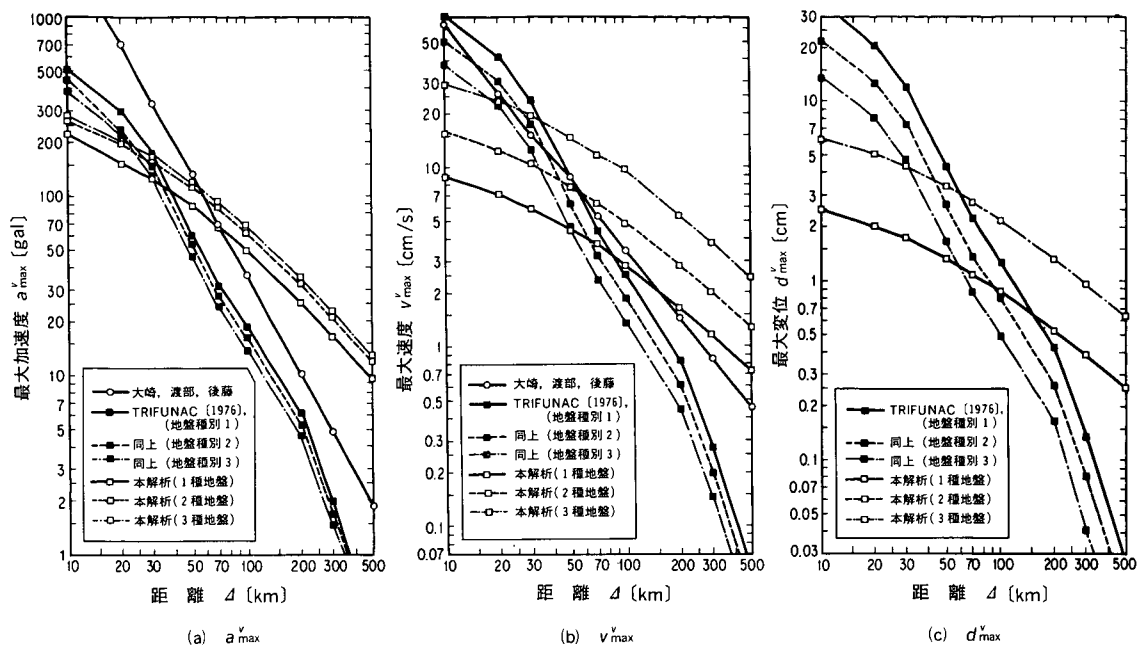


図-8・12 (2) 既往の上下成分最大地震動の距離減衰 ($M=8$ 相当の場合)

距離減衰式は水平成分と上下成分の記録をダミー変数を用いて同時に重回帰分析して求めたもので、既往の研究成果の中では最も記録数が多いと考えられる⁵⁹⁾。しかしながら、181 記録中、マグニチュード M が 7 以上の記録は 7 成分に過ぎない。以上の点から分かるように、上下成分の最大地震動に関しては、まだ、十分な距離減衰式が求められていないのが実情といえよう。

表-5・4～表-5・6 に示した既往の研究成果と式(5・6)～式(5・7)による距離減衰式をマグニチュード $M=6$ 及び 8 について比較した結果が図-8・12 である。ただし、これらの比較のうち最大速度 $v_{\max}$ 及び最大変位 $d_{\max}$ の比較の場合には、加速度記録を数値積分して速度及び変位を求める際の低振動数側の遮断振動数が各研究者ごとに統一されていないため、考慮されている振動数帯域が相互に異なることに注意しなければならない。図-8・1 によれば、最大加速度については今回求めた式(5・6)は既往の研究に比較して震央距離が小さい領域では小さめの結果を、また、震央距離が大きい領域では大きめの結果をそれぞれ与えることが分かる。また、最大速度及び最大変位についても同様な傾向が認められる。

上下成分加速度応答スペクトルについては、現在までにほとんど研究が実施されていないようであるので、今回の解析と既得の研究成果の比較はここでは行

わない。

9. 結 語

9.1 本報告の結論

我が国の地盤上 67 地点において 88 回の浅発地震(震源深さ 60 km 以浅)により SMAC 型強震計により観測された 2@197 成分の水平成分加速度強震記録、及びこれらと同時にこれらのうちの 53 地点において 57 回の浅発地震により観測された 119 成分の上下成分加速度強震記録を基に、水平成分及び上下成分の最大地震動(最大加速度、最大速度、最大変位)及び減衰定数 5% の絶対加速度応答スペクトル(以下、加速度応答スペクトルと呼ぶ)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とまとめられる。

1) 水平成分最大地震動(水平成分最大加速度 $\tilde{a}_{\max}$ 、水平成分最大速度 $\tilde{v}_{\max}$ 、水平成分最大変位 $\tilde{d}_{\max}$)の距離減衰式としては、マグニチュード M 及び震央距離 Δ の 2 つを説明変数とした式(4・17)～式(4・19)が現段階では最も実用的と考えられる。この理由は以下のとおりである。

a) 水平成分最大地震動 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 及び震央距離 $\log(\Delta+30)$ の線形回帰式で表した距離減衰式と、これにさらにマグニチュード M 、震源深さ $D_p, \log(\Delta+30)$ の 2 乗までの項及びこれら 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て、ほとんど大きくならない。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 及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 及び $\log(\Delta+30)$ で線形回帰した場合が最も妥当な結果を与えられと考えられる。

b) $\log X$ を M 及び $\log(\Delta+30)$ 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 が共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大きい。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ないと言ってもよい。従って、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、本報告では後者を提案することとした。

2) 水平成分最大地震動 ($\bar{a}_{\max}$, $\bar{v}_{\max}$, $\bar{d}_{\max}$) 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及び震央距離に対する水平成分最大変位 $\bar{d}_{\max}$ 及び水平成分最大速度 $\bar{v}_{\max}$ 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 $\bar{d}_{\max}$ 及び $\bar{v}_{\max}$ は顕著に大きくなる。これに対して水平成分最大加速度 $\bar{a}_{\max}$ 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及び震央距離に対する水平成分最大加速度 $\bar{a}_{\max}$ は 2 種地盤の場合が 1 種地盤及び 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 大きくなった場合に水平成分最大震動が何倍になるかを表すものである。 $\bar{a}_{\max}$ 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、 $\bar{v}_{\max}$ は 0.26~0.4、 $\bar{d}_{\max}$ は 0.37~0.58 程度となる。従って、

M が 1.0 増えた場合には $\bar{a}_{\max}$ は、約 1.4~1.6 倍、 $\bar{v}_{\max}$ は 1.8~2.5 倍、 $\bar{d}_{\max}$ は 2.3~3.8 倍となることになり、明らかに $\bar{a}_{\max}$ 、 $\bar{v}_{\max}$ 、 $\bar{d}_{\max}$ 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 種地盤及び 3 種地盤の場合に大きい。

3) 上下成分最大地震動 (上下成分最大加速度 $a_{\max}^V$ 、上下成分最大速度 $v_{\max}^V$ 、上下成分最大変位 $d_{\max}^V$) の距離減衰式としては、式(5.6)~式(5.8)が現段階では最も実用的と考えられる。この理由は、以下のとおりである。すなわち、上記 1) に示した水平成分最大地震動の距離減衰式を基本に上下成分最大地震動の距離減衰式を検討した結果によれば、震央距離 $(\Delta+30)$ にかかる係数 c^V を地盤種別に依存するとした場合としないとした場合の違いは、最大加速度 $a_{\max}^V$ 及び最大速度 $v_{\max}^V$ においてはごくわずかであり、実用上はほとんど差が無いと言ってもよい。これに対して、最大変位 $d_{\max}^V$ の場合には、マグニチュード M が 8 程度と非常に大きく、震央距離 Δ が小さい場合には、両者に多少差が現れてくるが、地盤種別による $d_{\max}^V$ の変化の状況は、後者の方がすぐれている。従って、ここでは、後者の距離減衰式を提案するとしたものである。

4) 上下成分最大地震動 ($a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$) の距離減衰特性に関しては、以下の事項が指摘される。

a) マグニチュード M 、震央距離 Δ 、地盤種別 GC_i による上下成分最大地震動 $a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ の変化の様子は全体として、水平成分最大地震動 $\bar{a}_{\max}$, $\bar{v}_{\max}$, $\bar{d}_{\max}$ とよく似ている。

b) 同一のマグニチュード M 、震央距離 Δ 、地盤種別 GC_i による上下成分最大地震動 $a_{\max}^V$, $v_{\max}^V$, $d_{\max}^V$ は水平成分最大地震動 $\bar{a}_{\max}$, $\bar{v}_{\max}$, $\bar{d}_{\max}$ よりも小さい。水平成分最大地震動に対する上下成分最大地震動の比 $R_a (\equiv a_{\max}^V / \bar{a}_{\max})$, $R_v (\equiv v_{\max}^V / \bar{v}_{\max})$, $R_d (\equiv d_{\max}^V / \bar{d}_{\max})$ を定義すると、最大加速度の比 R_a は、 M 、 Δ 、 GC_i によらず、0.3~0.4 程度の値をとるが、最大速度の比 R_v 及び最大変位の比 R_d は、震央距離及び地盤種別によって変化する。

5) 水平成分加速度応答スペクトル $\bar{S}_A$ (減衰定数 5%) の距離減衰式としては、マグニチュード M 及び震央距離 Δ の 2 つを説明変数とした式(6.19) (式中の係数は表-6.5 参照) が現段階では最も実用的と考えられる。この理由は以下のとおりである。

a) $\bar{S}_A$ スペクトルの常用対数 $\log \bar{S}_A$ をマグニチュード M 及び震央距離 $\log(\Delta+30)$ の線形回帰式で表した距離減衰式と、これらにさらに M 、震源深さ D_p , $\log$

($\Delta+30$)の2乗までの項及びこれら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 及び地盤種別の変化に伴い相互に比較的調和のとれた変化を示す。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 及び $\log(\Delta+30)$ で線形回帰した場合が最も妥当な結果を与えられと考える。

b) $\log \tilde{S}_A$ を M 及び $\log(\Delta+30)$ 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 が共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 が共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)及びc)を総合すると、係数 a 及び b はそれぞれ固有周期及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)固有周期及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、 $M \geq 8$ 、かつ、 $\Delta \leq 50$ 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。従って、後述する M 及び Δ 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式(6・19)が現段階では実用的であると判断した。

6) 水平成分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 は地盤種別及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種地盤及び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及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種地盤及び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。

7) 上下成分加速度応答スペクトル S_A^V の距離減衰式としては、式(7・2)(式中の係数は表・7・2参照)が現段階では最も実用的と考えられる。この理由は、以下のとおりである。すなわち、上記5)に示した水平成分加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A$ の距離減衰式を基本に、上下成分加速度応答スペクトルの距離減衰式を検討した結果によれば、震央距離($\Delta+30$)にかかる係数 c^V を地盤種別及び固有周期に依存するとした場合と、これらによらないとした場合の距離減衰式の違いは、マグニチュードが8程度と大きく、また、震央距離が非常に小さい場合を除けばそれ程顕著なものではない。従って、上記5)のd)と同様に、係数 c^V の項がより簡単になっている式(7・2)を提案することとしたものである。

8) 上下成分の加速度応答スペクトル S_A^V の距離減衰特性に関しては、以下の事項が指摘される。

a) マグニチュード M 、震央距離 Δ 、地盤種別 GC_i による上下成分加速度応答スペクトル S_A^V の変化の様子は、全体として水平成分加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A$ とよく似ている。

b) 同一マグニチュード M 、震央距離 Δ 、地盤種別 GC_i に対する上下成分加速度応答スペクトル S_A^V は水平成分加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A$ よりも小さい。水平成分加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A$ に対する上下成分加速度応答スペクトル S_A^V の比 $R_{SA} (= S_A^V / \tilde{S}_A)$ は、 M 、 Δ 、 GC_i 、固有周期に大きく影響されず、0.2~0.4程度の値をとる。

9) 上記最大地震動($\bar{a}_{max}$ 、 $\bar{a}_{max}^V$ 、 $\bar{v}_{max}$ 、 $\bar{v}_{max}^V$ 、 $\bar{d}_{max}$ 、 $\bar{d}_{max}^V$)及び加速度応答スペクトル($\tilde{S}_A$ 、 S_A^V)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(4・23)、(5・9)、(6・20)及び(7・3)で定義し、これらの頻度分布を求めるとおおよ標準偏差 $\sigma=0.25$ の正規分布に従う。従って、いま、実測値に対する予測値のばら

つきが平均値±標準偏差の1倍の範囲に収まる場合を考えると、予測値は実測値の1/1.8~1.8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、最大地震動及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), 3), 5), 7)の検討から明らかなように、回帰式の形式、項数及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及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。このために本研究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 に応じた倍率を図-4・17、図-5・12、図-6・16、図-7・8により与えた。

10) 本報告で提案する予測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、1/3Hz及び12Hzをそれぞれ低振動数側及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。従って、本解析に用いた地震動は1/3Hz~12Hzの振動数帯域に限定された地震動であり、最大地震動を推定する際に、これよりも高振動数側もしくは低振動数側の地震動を考慮する必要がある場合には、本解析結果を適用することはできない。また、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、1/2.5Hz~10Hzが適用範囲と考えられる。

b) 本解析の基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。従って、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、推定式の精度が十分保証されていないことに注意しなければならない。

9.2 将来への展望

本研究では十分取扱うことができなかったが、地震動の特性を研究する上で、今後重要と考えられる事項を挙げると以下ようになる。

1) 地震動の特性を定量的に表すためには、何が構造物の動的応答及び終極的な破壊に最も寄与するかを知らなければならない。このうち、構造物の動的応答に関しては、近年、実測や地震応答解析の事例がある程度蓄積されるようになった結果、地震動の周期特性、継続時間等の要因と構造物の基本固有振動数、減衰定数等の動的特性の両者により決まることが明らかになりつつある。また、これらの特性を簡単に表示するために、本解析に示したように構造物を1自由度の振動系で置き換えた応答スペクトルが提案されており、これに対する実用的な推定も本研究成果の利用等により可能になりつつある。これに対して構造物の終局的な破壊に対して、地震動特性の何が最も寄与するかは、構造部材の動的耐力に関する研究がまだ十分進んでいないため、現状では、はっきりしていない。今後、こうした点を見極め、適切な地震動特性を定義すると共に、これに対する研究が必要とされる。

2) 従来、マグニチュード6クラスの小規模な地震により、公共土木施設が被害を受けた例はきわめて稀であり、従って本来耐震設計に考慮する必要があるのはマグニチュード8クラスの大規模地震である。また、中程度の規模($M=7$)の地震であっても、その断層直近では被害を生じる可能性がある。しかしながら、強震観測を開始してからまだ日が浅いため、我が国のみならず、諸外国においても、このような地震動を直接観測した事例はほとんどないことから、本来の意味の“強震”地震動の特性は分かっていない。従って今後、観測網の一層の充実を図り、本研究に示した地震動の推定手法の高精度化を図る必要がある。

3) 本研究による加速度応答スペクトルの解析結果によれば、固有周期0.4秒以上の領域では、2種地盤及び3種地盤の S_a スペクトル値に比較して、1種地盤の S_a スペクトル値が非常に小さい。これは、第三紀以前の地盤(岩盤)もしくはそこまでの洪積層の厚さが約10m未満の場合と、洪積層、沖積層等の堆積層が約10m以上の場合では、地震動の特性が大きく異なることを示している。また、岩盤の地震動についても、軟岩と硬岩とでどの程度地震動の特性が異なるかは明らかではない。今後、硬岩→軟岩→密な地盤となるにつれ、地震動の特性がどのように変化するかを明らかにする

ことが必要とされる。また、こうした点に基づき、耐震設計上の地盤種別を正しく設定することが必要とされる。

4) 本研究では、SMAC 型強震計記録を用いたが、このため、強震計の記録、数値化の精度の関係から信頼できる周期範囲は $1/12 \sim 3$ 秒である。従って 3 秒以上の長周期地震動に対しては本研究成果は適用できないが、吊橋、斜張橋等の長大構造物では、基本固有周期が $5 \sim 10$ 秒になるものがある。従って、長大構造物の耐震設計を合理化するためには、長周期地震動を精度よく観測できる強震計を配置し、記録の集積を図ることが必要とされる。

5) 本研究に示したのは、地盤上のある 1 地点における地震動の最大値を推定する手法であるが、公共土木施設は一般に平面的に細長いものが多く、構造物の軸線に沿って地形・地盤条件も一様ではない。従来、構造物周辺の 1 点（地盤上）において、観測された記録を、その付近全体の地震動を代表する値と考えて構造物に作用させているが、上記の点から、このような解析手法は公共土木施設の耐震設計には十分ではない。このためには、特定地域に多数の強震計を配置し、当該地区内の地震動に及ぼす地形・地盤条件の影響を体系的に観測し得る観測網の設置と、こうした記録に基づく平面的な地震動の実証的な予測手法の開発が必要とされる。

謝 辞

本研究の実施に際しては、各方面からの御支援と御指導を賜った。特に、地震防災部振動研究室荒川直士室長（現 日本道路公団東京第一建設局調査役）には、本研究の遂行中終始御支援を賜った。また、関東地建高木義和技官（元 振動研究室技官）には、記録の収集、数値化精度の検討に御尽力いただいた。

なお、本研究に用いた強震記録は、昭和 39 年以後、建設省、北海道開発局、日本道路公団、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、都道府県等により実施されてきた強震観測により得られたものである。観測に携われた方々の御努力に対して、心からお礼申し上げる次第である。また、本解析には、上記以外に運輸省港湾技術研究所により観測・数値化された記録も多数使用させていただいた。記録の利用を快くお許しいただいた御担当の方々に厚くお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所「土木構造物に対する強震観測」土木研究所資料、第 1734 号、昭和 57 年 6 月。
- 2) Housner, G.W.: Behavior of Structures During Earthquakes, Proc., ASCE, Vol. 85, No. EM4, 1959.
- 3) 建設省土木研究所「土木構造物における加速度強震記録」土木研究所集報 No. 1~No. 7, Vol. 32~38.
- 4) 土田肇、倉田栄一ほか「港湾地域強震観測年報」1963 年以後。
- 5) 日本道路協会「道路橋示方書・同解説」昭和 55 年。
- 6) 川島一彦、高木義和、相沢興「数値化精度を考慮した SMAC-B₂ 型強震計記録の計器補正法および変位計算法」土木学会論文報告書、No. 325, 1982.
- 7) 大崎順彦「地震動のスペクトル解析入力」鹿島出版会、昭和 58 年。
- 8) 堀川明「ランダム変動の解析」共立出版、昭和 47 年。
- 9) 後藤尚男、亀田弘行、杉戸真太、今西直人「ディ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) 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.
- 13) 川島一彦、高木義和、相沢興「ディジタイザーによる SMAC 型強震計記録の数値化精度」土木学会論文報告集、No. 324, 1982.
- 14) 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一（その 1）水平 2 成分合成の影響一」土木研究所資料、第 1765 号、昭和 57 年 3 月。
- 15) 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地震記録の水平 2 成分合成の影響」土木学会論文報告集、第 329 号、1983.
- 16) 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一（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一」土木研究所資

- 料, 第 1841 号, 昭和 57 年 7 月。
- 17) 建設省土木研究所「最大地震動および地震応答スペクトルの推定法—(その 4) 最大加速度, 最大速度, 最大変位および加速度応答スペクトルの距離減衰式の再検討—」土木研究所資料, 第 1993 号, 昭和 58 年 3 月。
- 18) 川島一彦, 相沢興, 高橋和之「地震応答スペクトルに及ぼす減衰定数の影響」土木学会論文報告集, 第 335 号, 昭和 58 年 7 月。
- 19) 川島一彦, 相沢興「減衰定数に対する地震応答スペクトルの補正法」土木学会論文集, 第 344/1-1 号, 昭和 59 年 4 月。
- 20) 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, 昭和 52 年 3 月。
- 21) 片山恒雄, 岩崎敏男, 佐伯光照「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, 昭和 53 年。
- 22) 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, 昭和 54 年 8 月。
- 23) 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。
- 24) Kanai, K. "Relation between The Nature of Surface Layer and Amplitude of Earthquake Motions" (I) BERI, 30(1952), pp.31-37, (II) BERI, 31(1953), pp. 219-226, (III) BERI, 31(1953), pp. 275-279, (IV) BERI, 34(1956), pp. 167-184.
- 25) Kanai, K. et al. "Comparative Studies of Earthquake Motions on the Ground and Under-ground" (I) BERI, Vol. 37(1959), pp. 53-87, (II) BERI, Vol. 44(1966), pp. 609-643.
- 26) 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。
- 27) 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.
- 28) Boore, D.M. Joyner, W.B., Oliver, A.A. and Page, R.A. "Estimation of Ground Motion Parameters" Geological Survey Circular, 1975.
- 29) 岡本舜三「耐震工学」オーム社, 昭和 46 年 9 月。
- 30) Donovan, N.C., and Bornstein, A.E. "Uncertainties in Seismic Risk Procedure" Proc. ASCE, No. GT7, 1978.
- 31) 奥野忠一他「統多変量解析法」日科技速, 昭和 51 年 3 月。
- 32) 坪井忠二「地震のマグニチュードについて」地震, 第 2 輯, 第 10 巻, 等 1 号, 1957。
- 33) 宇津徳二「1885 年～1925 年の日本の地震活動」震研彙報, Vol. 54, 1979。
- 34) 藤野陽三, 浜崎義弘, 井上涼介 "Identification of Multiple 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。
- 35) 杉村新「七島—東北日本—千島活動帯」地球科学, 第 37 号, 1958。
- 36) 勝又護「日本列島およびその周辺におけるサイスミシティとそれに関連する諸問題」地震時報, 第 35 巻, 第 3, 4 号, 昭和 45 年。
- 37) Chang, F.K. "An Empirical Interpretation of the Effects of Topography on Ground Motion of the San Fernando California, Earthquake 9 February 1971", Miscellaneous Paper 5-76-1, Waterways Experimental Station, 1976.
- 38) 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。
- 39) Ang, A.H-S and Tang, Wilson (伊藤学, 亀田弘行訳)「土木・建築のための確率統計の基礎」丸善, 昭和 50 年。
- 40) 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。
- 41) 後藤尚男, 亀田弘行, 杉戸直太「地震動の最大地震予測における 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。
- 42) 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。
- 43) 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 12 月。
- 44) 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.
 - 45) Esteva, L. and Villaverde, R. "Seismic Risk, Design Spectra, and Structural Reliability" Proc. 5th WCEE, Rome, Vol. 2, pp. 2586-2597, 1973.
 - 46) McGuire, R.K. "FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis" Open-File Report 76-67, U.S. Geological Survey, 1976.
 - 47) 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.
 - 48) Eguchi, R.T. "An Alternative Approach to Modelling Earthquake Ground Motion Attenuation in the Western United States" 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1980.
 - 49) Seed, H.B. and Idriss, I.M. "Rock Motion Accelerations for High Magnitude Earthquakes" Report No. EERC 69-7, University of California, Berkeley, 1969.
 - 50) Faccioli, E. "Response Spectra for Soft Soil Sites" Proc. Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE, Vol. 1, pp. 441-456, 1978.
 - 51) 大築志夫, 金井清「耐震設計」コロナ社, 昭和 47 年。
 - 52) Hayashi, K., Ohmura, B. and Kumagai, C. "Spectral Characteristics of Hard Rock Motions" Proc. 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1980.
 - 53) Trifunac, M.D. "Effects of Site Geology on Amplitude of Strong Motion" 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1980.
 - 54) McGuire, R.K. "Seismic Structure Response Rick Analysis Incorporating Peak Response Regressions on Earthquake Magnitude and Distance" Report No. R74-51, School of Engineering, MIT, Cambridge, Mass. 1974.
 - 55) Hudson, D.E. "A Comparison of Strong Motion Earthquake Data Banks for Japan and the Western United States" Proc. 7th WCEE, Istanbul, Turkey, 1980.
 - 56) Crose, 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.
 - 57) Shino, I. and Katayama, T. "A Comparative study of Japanese and U.S Strong Motion Properties by Response Spectra" 第 6 回日本地震工学シンポジウム, 昭和 57 年 12 月。
 - 58) Sadigh, K., Power, M. S. and Youngs, R. "Peak Horizontal and Vertical Accelerations, Velocities and Displacements on Deep Soil Sites for Moderately Strong Earthquakes" Proc 2nd International Conference on Microzonations, San Francisco, CA. 1978.
 - 59) Boore, D.M., Oliver, A.A., Page R.A. and Joyner, W.B. "Estimation of Ground Motion Parameters" Open-file Report No. 78-509, United States Department of the Interior, Geological Survey, 1978.
 - 60) 川島一彦, 相沢興「強震記録の重回帰分析に基づく加速度応答スペクトルの距離減衰式」土木学会論文集, 第 350 号 I-2, 昭和 59 年 10 月。
 - 61) 川島一彦, 相沢興, 高橋和之「強震記録の重回帰分析による地震動の最大加速度, 最大速度および最大変位の推定式」土木技術資料, Vol. 26-2, 昭和 59 年。
 - 62) 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式-(その 6) 上下方向の最大地震動および加速度応答スペクトルの距離減衰式-」土木研究所資料, 第 2038 号, 昭和 58 年。

昭和 59 年 8 月 28 日原稿受理

最大地震動及び地震応答スペクトルの 距離減衰式

土 木 研 究 所 報 告
第166号 1985年 9 月

川島一彦 相沢 興
高橋和之

要 旨：

公共土木施設を合理的に耐震設計すると共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特性を正しく予測することが必要とされる。本報告は最大地震動及び減衰定数5%の加速度応答スペクトルを対象とし、我が国で得られた394成分の水平成分強震記録及び119成分の上下成分強震記録を重回帰分析した結果を取りまとめたものである。観測に用いられたSMAC型強震計は短周期成分の感度が低下しているため、これに対する計器補正を加えると共に、水平成分の記録については、水平2成分の合成を施し、水平面内で最大となる最大地震動及び加速度応答スペクトルを解析対象とした。重回帰分析により、最大地震動及び加速度応答スペクトルが地震のマグニチュード及び震央距離によってどのように変化するかを3種類の地震種別ごとに求め、これを距離減衰式として提案した。

キーワード：耐震設計，入力地震動，最大加速度，最大速度，最大変位，
応答スペクトル

**Attenuation of Peak Ground Motions and
Absolute Acceleration Response Spectra**

Report of PWRI
Vol. 166 Sept. 1985

by **Dr. Kazuhiko Kawashima, Koh Aizawa
and Kazuyuki Takahashi**

Synopsis :

For determining appropriate seismic effects to be considered in design of civil engineering structures, it is essential to assess intensities and frequency characteristics of severe ground motions. This report presents the result of multiple regression analysis of both 394 horizontal and 119 vertical strong motion acceleration records. Because sensitivity of the Japanese SMAC accelerograph is appreciably low at the high frequency range, instrument correction was performed on the original data. Each pair of two orthogonal horizontal components was combined in time domain to get the maximum peak ground motions in the horizontal plane. The same composition was considered to get the maximum value of absolute acceleration response spectra with damping of 5 % of critical on the horizontal plane. With use of multiple regression analysis, empirical formulae of attenuation of the maximum peak ground motions (acceleration, velocity and displacement) and absolute acceleration response spectra with 5 % damping ratio were proposed in terms of earthquake magnitude and epicentral distance for three subsoil conditions.

Key Words : Earthquake Resistant Design, Input Ground Motion, Peak Acceleration, Peak Velocity, Peak Displacement, Earthquake Response Spectra

土木研究所報告第166号

昭和60年9月1日発行

発行 建設省土木研究所
〒305 茨城県筑波郡豊里町大字旭1番地
電話 0298 (64) 2211

印刷 前田印刷株式会社
金沢市金市町ホ34番地1
電話 (0762) 57-3391

本研究報告より転載又は複製する場合は、前もって
建設省土木研究所情報資料課に連絡のうえ、許可を
得てください。

Report
of
The Public Works Research Institute
Ministry of Construction

Vol. 166 Sept. 1985

CONTENTS

Attenuation of Peak Ground Motions and Absolute Acceleration Response Spectra	Kazuhiko Kawashima, Koh Aizawa and Kazuyuki Takahashi
--	---
