

土木研究所資料

リダクションファクターによる
非線形系の地震応答に関する研究

平成10年3月

建設省土木研究所
耐震技術研究センター振動研究室

Copyright © 1998 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、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

リダクションファクターによる 非線形系の地震応答に関する研究

振動研究室 室 長 田村 敬一
研 究 員 本田 利器*
研 究 員 中尾 吉宏
交流研究員 山本 浩一**

要 旨

兵庫県南部地震以降、構造物の非線形挙動を適正に評価することの重要性が、従来にもまして認識されるようになり、例えば、道路橋示方書にも動的解析による設計が示されている。しかし、非線形系の応答に影響を及ぼす地震動特性については明確になっていないのが現状である。

このような点に鑑み、本資料は、リダクションファクタースペクトルにより、地震動特性が非線形系の応答に与える影響について検討を行った結果をとりまとめたものである。

キーワード：非線形応答、地震動特性、リダクションファクター、靱性率、兵庫県南部地震

*現 京都大学 防災研究所 助手（平成9年10月より）

**交流研究員在職期間（平成8年4月から平成10年3月まで）

まえがき

現在の土木構造物の耐震設計では、例えば、道路橋のように弾性設計と非線形応答を考慮した保有水平耐力設計の2段階設計が導入されているが、非線形性を考慮した設計は歴史も浅く、地震動と構造物の非線形挙動との関係については解明されていない事項も多い。特に兵庫県南部地震では、非常に強い地震動により多くの土木構造物が甚大な被害を受けており、そのような地震動に対する構造物の非線形挙動を適正に評価することは、極めて重要である。今後、構造物の非線形挙動を考慮した合理的な設計地震動を設定するためには、地震動のどのような特性が構造物の非線形挙動に大きな影響を与えるのか、また、構造物の非線形性を考慮した設計をする際には、どのような地震動特性が必要なのか等を明確にしていく必要がある。

以上のような観点から、本研究では1質点系弾塑性型せん断バネモデルを用いた非線形動的解析を行い、構造物の非線形応答の特徴について検討した。解析対象記録は、兵庫県南部地震による強震記録を含む既往の代表的な強震記録である。これらの強震記録に対し、リダクションファクタースペクトルを算出し、それぞれの強震記録が構造物の非線形挙動にどのような影響を与えているかを検討し、そのメカニズムについて考察した。また、過去に提案されているリダクションファクターの評価式の適合性について検討した。さらに、強震記録が目標とする線形加速度応答スペクトルに合致するよう振幅調整を行った場合のリダクションファクターペクトルの特徴についても検討を行った。

目 次

まえがき

1. リダクションファクタースペクトル	1
1. 1 リダクションファクタースペクトルの定義	1
1. 2 解析条件	1
1. 3 解析対象	2
1. 4 リダクションファクタースペクトルの意味	4
2. 非線形履歴モデル	6
2. 1 バイリニアモデル	6
2. 2 デイグレイディングバイリニアモデル	7
2. 3 武田モデル	8
3. 履歴モデルが R_μ スペクトルに及ぼす影響	9
4. 地震動特性が R_μ スペクトルに及ぼす影響	17
5. R_μ スペクトルの評価式との比較	26
6. 振幅調整波形の R_μ スペクトル	32
7. まとめ	38
謝 辞	40
参考文献	41
付属資料 1	43
付属資料 2	55

1. リダクションファクタースペクトル

1.1 リダクションファクタースペクトルの定義

構造物の線形応答と非線形応答の関係については、従来より研究が行われており、リダクションファクター¹⁾もその一つである。リダクションファクター R_μ は、図-1.1に示すように、系が弾性領域内で耐えるために必要な降伏耐力 F_{ye} と、弾塑性応答が目標とする靱性率 μ になるために必要な降伏耐力 F_y との比として次式により定義される。

$$R_\mu = \frac{F_{ye}}{F_y} \quad (1.1)$$

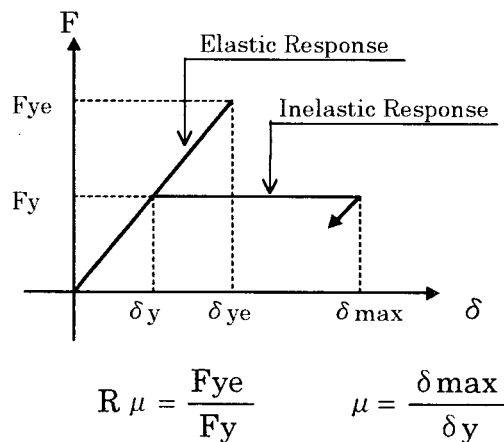


図-1.1 リダクションファクタースペクトルの定義

種々の固有周期に対して R_μ を求めることにより、リダクションファクタースペクトル（ R_μ スペクトル）が算出される。

1.2 解析条件

本研究では、図-1.2に示す一質点系弾塑性型せん断バネモデルを対象として、系の初期剛性から算出される固有周期を0.1secから5.0secまで変化させ、 R_μ スペクトルを求めた。解析には、靱性率 μ が目標値となるために必要な降伏耐力 F_y が必要となるが、 μ は応答計算の結果として得られるものであるため、繰り返し計算により F_y を変化させ、目標の μ に収束させることとした。本研究では、収束誤差を1%以下として計算を行った。また、解析に用いた内部減衰は、線形系及び非線形系のいずれについても、 $h=0.05$ とした。

F_y を定めるための収束計算においては、目標とする μ に対する F_y が複数存在する可能性がある。

今回の解析でも、 $\mu=2$ のケースでこのことが確認された。既往の研究結果³⁾からも解が複数存在することは知られており、これに対する対応は今後の課題といえるが、解が複数存在するのは μ が小さい場合に多く、 μ が大きい場合には解が複数存在するケースは少ないことが確認されている。したがって、本研究では、 $\mu=4,6,8$ について解析の対象とすることとした。

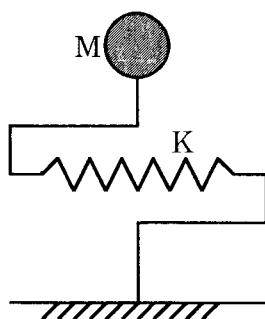


図-1.2 構造モデル

表-1.1 解析対象固有周期及び靱性率

固有周期 T(sec)	0.1	0.13	0.15	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0	1.2	1.3	1.5	2.0	2.5	3.0
	4.0	5.0															
靱性率 μ	線形 4 6 8																

1.3 解析対象

本研究で解析対象とした強震記録は、表-1.2 に示す 19 記録 34 成分の加速度波形と、道路橋示方書耐震設計編³⁾に規定されるタイプ I 及び II の標準加速度応答スペクトルに適合するような振幅調整した加速度波形⁴⁾である。

番号 1 ～ 10 は過去に日本で観測された強震記録の中から、最大加速度、継続時間、加速度応答スペクトル特性等を勘案し、地盤種別ごとに代表的な記録を抽出したものである。

番号 11 ～ 16 の 12 成分は、兵庫県南部地震で記録された代表的な強震記録から地盤種別ごとに 4 波形ずつを選んだものである。また、番号 17 ～ 19 は、ノースリッジ地震で観測された強震記録である。

解析対象記録の加速度波形を付属資料 1 に示す。

表-1.2 解析対象記録

番号	記録名	観測地点名	地震名	成分	発生日時	M	最大加速度 (gal)	地盤種別
1	102-GR-16	米山大橋	新潟県南西部	HB	1971.02.26,04:27	5.5	179	I
2	206-GR-2	小見川大橋	千葉県東方沖	HA,HB	1974.03.03,13:50	6.1	106 , 137	III
3	206-GR-2-3	大船渡港(2)	宮城県沖	E41S	1978.06.12,17:14	7.4	226	II
4	206-GR-6	小見川大橋	銚子沖	HB	1974.11.16,08:32	6.1	111	III
5	302-GR-34	開北橋	宮城県沖	LG,TR	1978.02.20,13:37	6.7	108 , 161	I
6	302-GR-35	開北橋	宮城県沖	LG,TR	1978.06.12,17:14	7.4	364 , 413	I
7	308-GR-2	板島橋	日向灘	LG,TR	1968.04.01,09:42	7.5	196 , 216	II
8	308-GR-4	板島橋	愛媛県西部沿岸	LG,TR	1968.08.06,01:17	6.6	594 , 615	II
9	316-GR-1	津軽大橋	日本海中部	LG	1983.05.26,12:00	7.7	278	III
10	1401-GR-8	利根川河口堰	銚子沖	LG,TR	1974.11.16,08:32	6.1	164 , 127	III
11	JMA KOBE	神戸海洋気象台	兵庫県南部	NS,EW	1995.01.17,05:46	7.2	818 , 617	I
12	INAGAWA	猪名川	兵庫県南部	NS,EW	1995.01.17,05:46	7.2	422 , 417	I
13	FUKIAI	葺合	兵庫県南部	Y,X	1995.01.17,05:46	7.2	802 , 687	II
14	TAKATORI	JR鷹取駅 ⁵⁾	兵庫県南部	NS,EW	1995.01.17,05:46	7.2	642 , 666	II
15	PORT ISLAND	ポートアイランド	兵庫県南部	NS,EW	1995.01.17,05:46	7.2	341 , 284	III
16	HIGASI KOGE BRG	東神戸大橋	兵庫県南部	N12W,N78E	1995.01.17,05:46	7.2	327 , 281	III
17	SYLMAR	シルマー	ノースリッジ	CH1,3	1994.01.17,04:31	6.7	592 , 827	———
18	ARLETA	アーリータ	ノースリッジ	CH1,3	1994.01.17,04:31	6.7	337 , 302	———
19	TARZANA	ターザナ	ノースリッジ	CH1,3	1994.01.17,04:31	6.7	1744 , 970	———

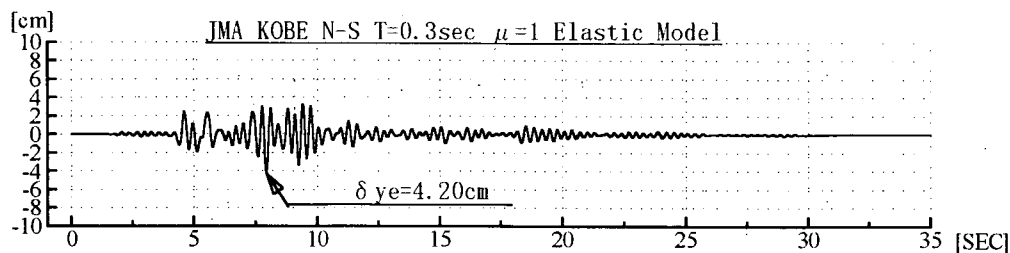
※ LG 及び TR は、それぞれ、橋軸方向及び橋軸直角方法を示す。

HA 及び HB は、それぞれ、水平方向の A 成分及び B 成分を示す。

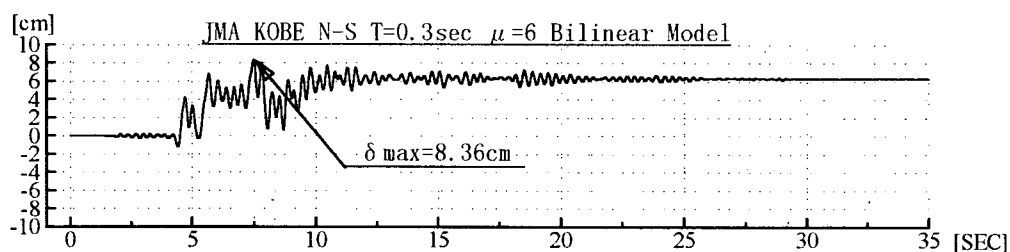
X 及び Y は、それぞれ、水平方向の X 成分及び Y 成分を示す。

1.4 リダクションファクタースペクトルの意味

まず、兵庫県南部地震による神戸海洋気象台記録 NS 成分を例として、 $R\mu$ スペクトルの算出過程を以下に示す。



(a) 線形応答変位波形



(b) 非線形応答変位波形

図-1.3 神戸海洋気象台記録 NS 成分の線形・非線形の時刻歴応答変位波形

図-1.3 に、線形の固有周期が $T=0.3\text{sec}$ である系の時刻歴応答変位波形を示す。図-1.3(a)は線形の応答変位波形であり、(b)はバイリニア履歴モデルによる非線形の応答変位波形 ($\mu=6$) である。線形の最大応答変位は $\delta ye=4.20\text{cm}$ である。非線形の最大応答変位及び降伏変位は、それぞれ、 $\delta max=8.36\text{cm}$ 及び $\delta y=1.40\text{cm}$ である。ここで、 δy は、系が目標の靱性率を有するように収束計算を行い、求めたものである。この場合の $R\mu$ は次のように求められる。

$$R\mu = \frac{F_{ye}}{F_y} = \frac{\delta ye}{\delta y} = \frac{4.20}{1.40} = 3.00 \quad (1.2)$$

$R\mu$ の逆数は、線形系と非線形系にそれぞれ必要とされる降伏耐力の低減率に相当する。すなわち、固有周期 $T=0.3\text{sec}$ 、靱性率 $\mu=6$ を有する構造物では、神戸海洋気象台記録NS成分が作用した場合、弾性応答加速度の $1/R\mu \approx 1/3$ の応答加速度に対して降伏しなければ、当該地震動に抵抗できることになる。このように、 $R\mu$ は構造物にある程度の損傷（塑性変形）を許容することによる設計地震力の低減率を与えるものであり、道路橋示方書³⁾の保有水平耐力法で採用されている、エネルギー一定則における $\sqrt{2\mu-1}$ と同様

の意味を有するものである。ただし、エネルギー一定則では、低減率は固有周期に関わらず一定値であるが、 R_μ スペクトルでは固有周期により変化する点が異なる。

図-1.4は神戸海洋気象台記録NS成分から求めた R_μ スペクトルである。図中Aの領域とBの領域を比較すると、Bの領域では R_μ の値自体が大きいとともに、 μ の増加に伴う R_μ の増加が大きいことがわかる。すなわち、線形の固有周期がBの領域にある構造物は、Aの領域の構造物に比較して、靱性を向上させることにより、設計地震力を大きく低減できることになる。このように、 R_μ スペクトルは構造物の非線形応答解析において重要な地震動特性を表すものである。

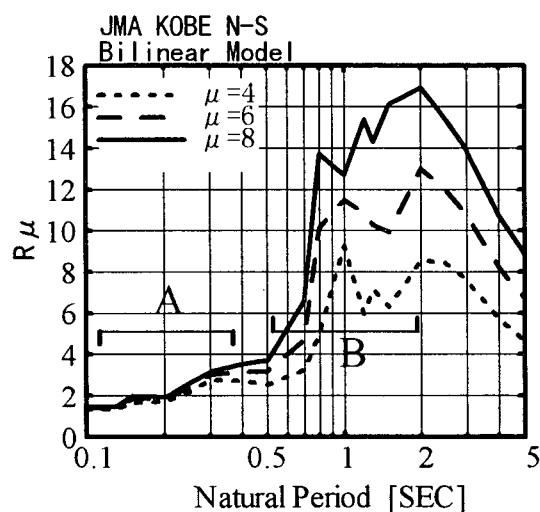


図-1.4 神戸海洋気象台記録 NS 成分の R_μ スペクトル

2. 非線形履歴モデル

構造物の非線形特性を表す履歴モデルは種々提案されているが、本研究では参考文献 6)を参考にして、次の3種類の履歴モデルを採用した。

2.1 バイリニアモデル

図-2.1 に示すように、降伏後の除荷時及び再載荷時の剛性も初期剛性と同じ値を用いるモデルである。本モデルは、部材の損傷に関わらず除荷時、再載荷時の剛性が変化しないという点では、実際の構造物の挙動を厳密には再現していないが、構造物の非線形履歴の特徴を最も単純に表すことができるため、解析に多く採用されている。

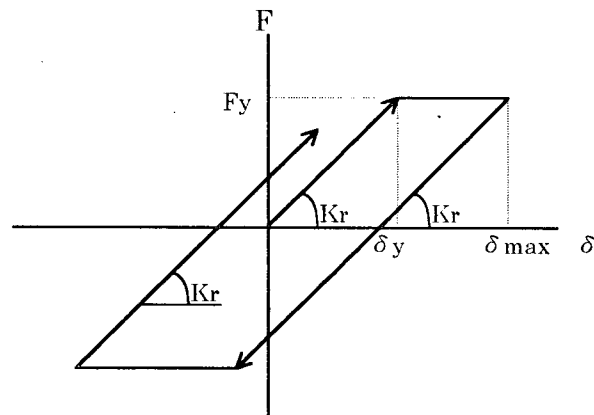


図-2.1 バイリニアモデルの履歴特性

2.2 ディグレイディングバイリニアモデル

バイリニアモデルでは、降伏後の剛性低下を考慮できないという欠点があるため、降伏後の載荷及び除荷時の剛性を低下させるモデルとして提案されたものである。剛性の変化は最大変位の関数として式(2.1)の β によって剛性低下の度合いが規定される。

$$K_{r'} = K_r \times \left(\frac{\delta_{\max}}{\delta_y} \right)^{-\beta} \quad (2.1)$$

ここで、 β は剛性低下指数であり、一般には0.4程度の値が採用されることが多い⁶⁾。

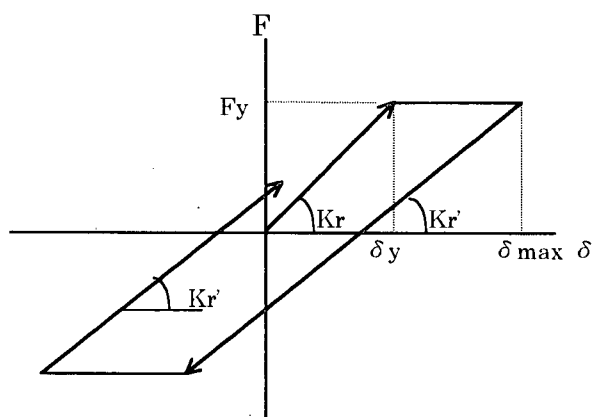


図-2.2 ディグレイディングバイリニアモデルの履歴特性

2.3 武田モデル

鉄筋コンクリートの部材実験から得られた復元力特性を詳細にモデル化したものである。本モデルの特徴は、降伏後の載荷時には外側の履歴ループの最大点を指向し、除荷時はディグレイディングバイリニアモデルと同様に最大変位の関数として剛性を低下させる点にある。武田モデルは、本来はトリリニア型の履歴モデルであるが、本研究では他のモデルとの整合を図るために、第一降伏点と第二降伏点を接近させバイリニア型とした。図-2.3 にバイリニア型とした場合の武田モデルの履歴特性を示す。

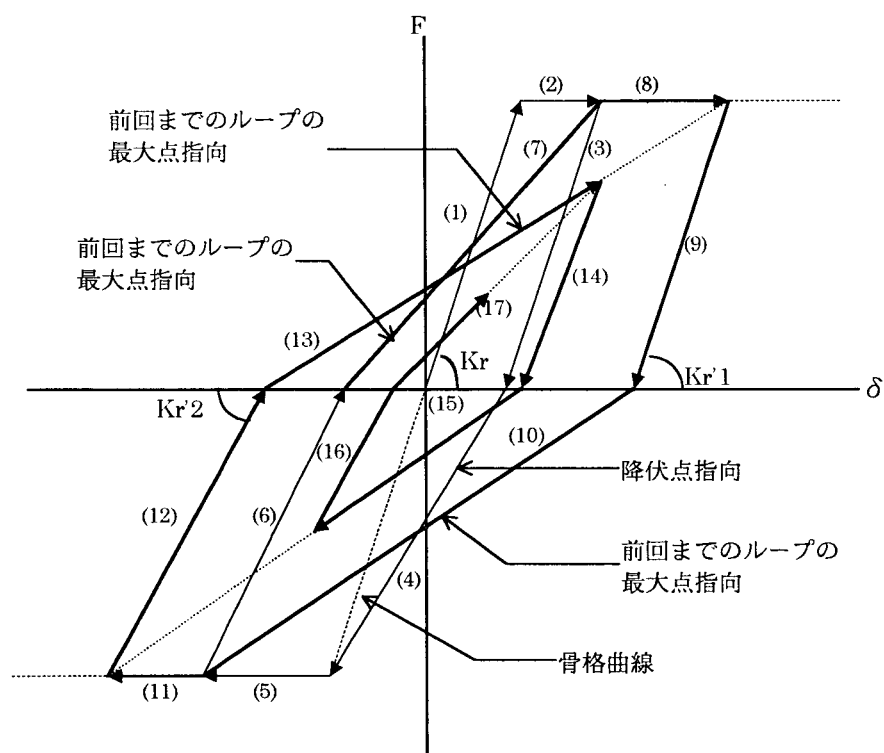


図-2.3 武田モデルの履歴特性

3 履歴モデルが $R\mu$ スペクトルに及ぼす影響

ここでは、2章に示した3種類の非線形履歴モデルについて、履歴モデルが $R\mu$ スペクトルに及ぼす影響について検討する。解析に用いた強震記録は、神戸海洋気象台記録 NS 成分、ポートアイランド記録 N S 成分、開北橋記録 TR 成分及び津軽大橋記録 LG 成分の4成分である。

まず、二次剛性は全ての履歴モデルで $K_1=0$ とし、剛性低下指数は $\beta=0.4$ とすることとした。また、各履歴モデルの特徴を評価するため、図-3.1 に示すように、最初に降伏に達して除荷される直前までは、全ての履歴モデルで同じ経路をたどるようにした。

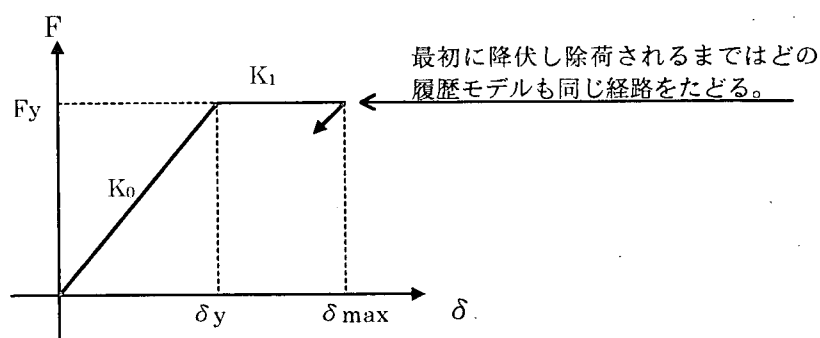
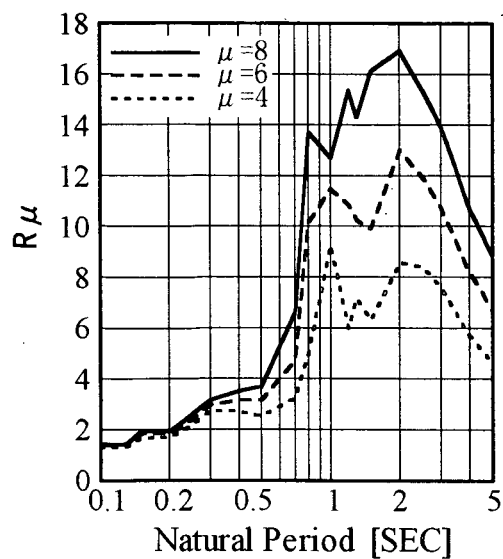
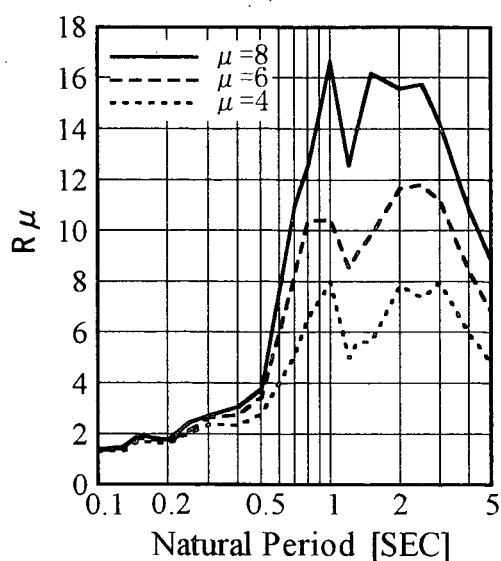


図-3.1 最初に降伏に達し除荷されるまでの履歴モデルの経路

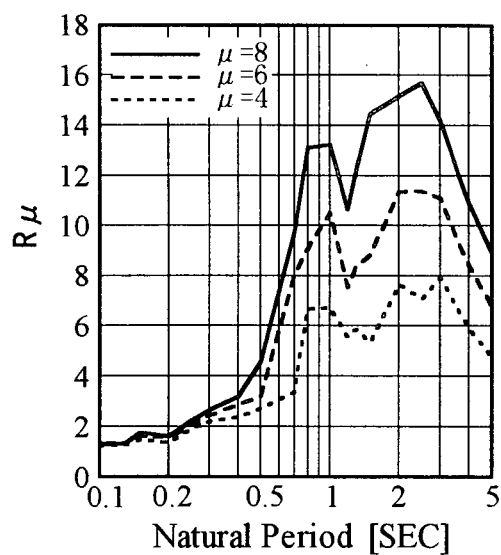
図-3.2～3.5 に、バイリニアモデル、ディグレイディングバイリニアモデル（剛性低下型）及び武田モデル（剛性低下型+最大点指向型）の各履歴モデルによる $R\mu$ スペクトルを示す。これによると、履歴モデルの違いによる $R\mu$ スペクトルの差異は比較的小さい。特に、神戸海洋気象台記録 NS 成分の $R\mu$ スペクトルの場合は、数値的に若干の違いはあるものの、履歴モデルによらず類似している。また、ポートアイランド記録 NS 成分及び開北橋記録 TR 成分の $R\mu$ スペクトルについても、履歴モデルの違いによる差異は小さい。ただし、津軽大橋記録 LG 成分の場合は、固有周期 2.5sec 付近のピークの特徴が履歴モデルにより異なっているが、これは、線形の加速度応答スペクトルで固有周期 2.5sec 付近に小さなピークがあり、その影響が強調されていることが考えられる。



(a) バイリニアモデル

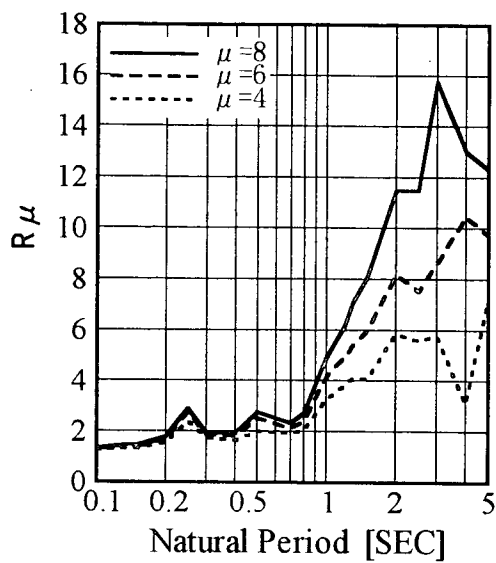


(b) ディグレイディングバイリニアモデル

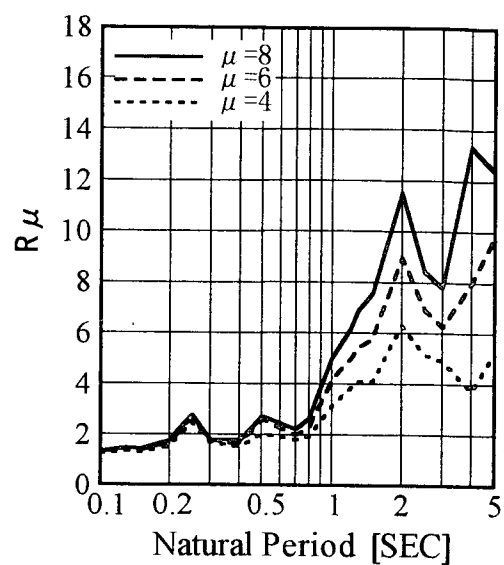


(c) 武田モデル

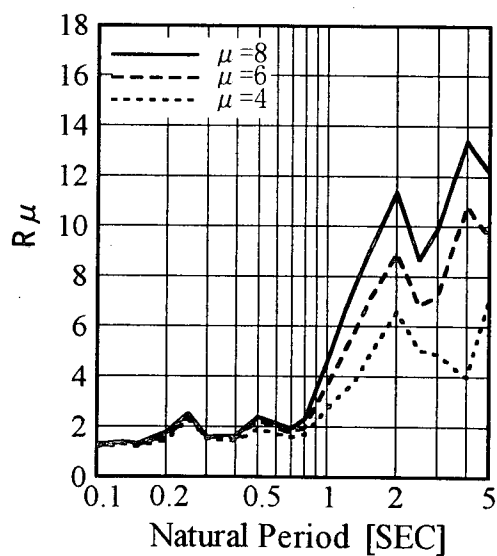
図-3.2 履歴モデルの違いによる R_μ スペクトルの差異
(神戸海洋気象台記録NS成分)



(a) バイリニアモデル

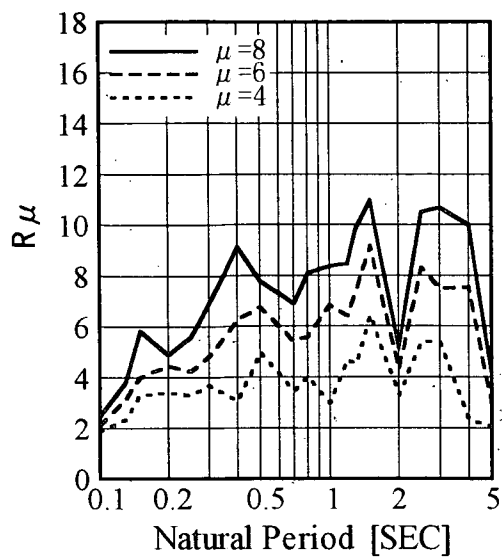


(b) ディグレイディングバイリニアモデル

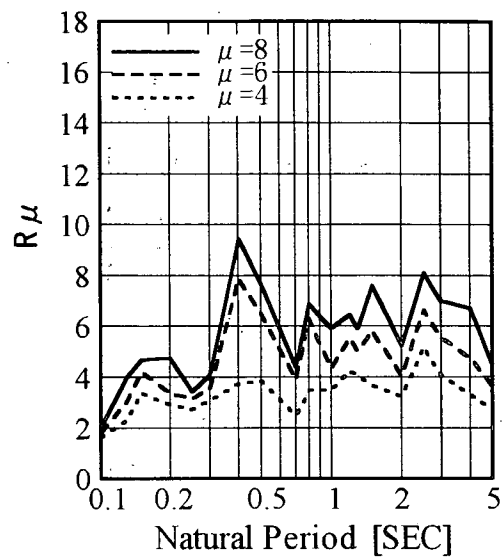


(c) 武田モデル

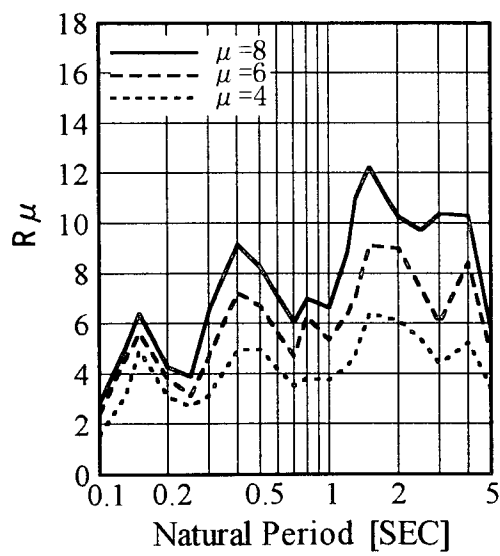
図-3.3 履歴モデルの違いによる R_μ スペクトルの差異
(ポートアイランド記録NS成分)



(a) バイリニアモデル

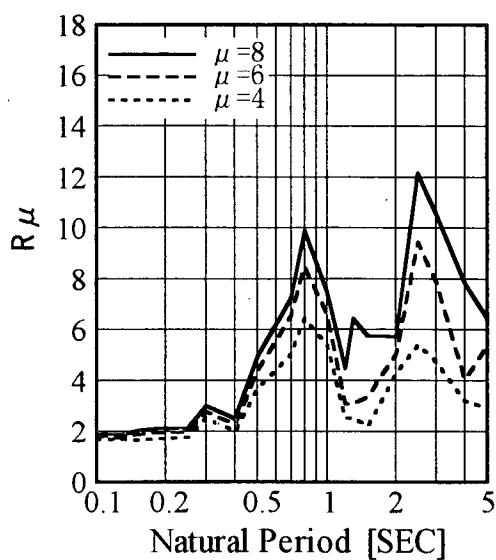


(b) デイグレイディングバイリニアモデル

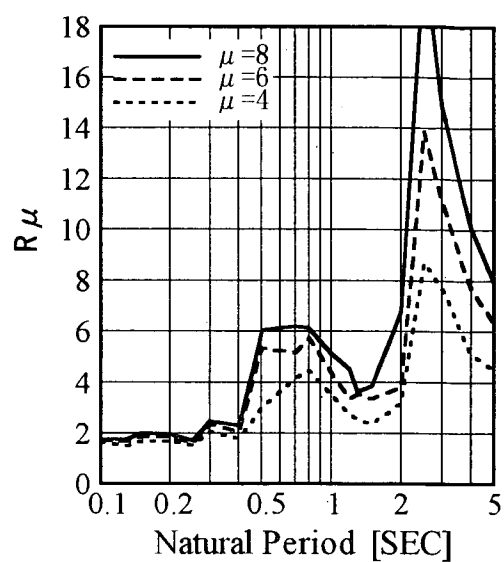


(c) 武田モデル

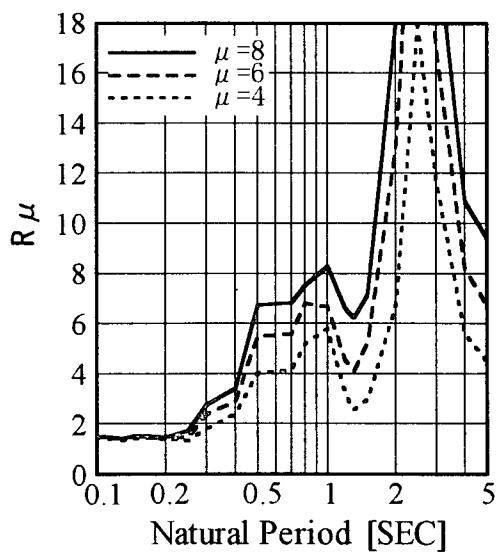
図-3.4 履歴モデルの違いによる R_μ スペクトルの差異
(開北橋記録TR成分)



(a) バイリニアモデル



(b) ディグレイディングバイリニアモデル



(c) 武田モデル

図-3.5 履歴モデルの違いによる R_μ スペクトルの差異
(津軽大橋記録LG成分)

以上の検討では、いずれの履歴モデルについても、二次剛性を $K_1=0$ 、剛性低下指数を $\beta=0.4$ としているため、二次剛性や β が $R\mu$ スペクトルに及ぼす影響については明らかになっていない。そこで、バイリニアモデルの二次剛性及びディグレイディングバイリニアの剛性低下指数を変化させ、 $R\mu$ スペクトルに及ぼす影響について検討した。

まず、二次剛性 K_1 については、図-3.6 のように初期剛性 K_0 に係数 r を乗じるものとし、ここで、 $r=0, 0.1, 0.2$ と変化させた。図-3.7 に、バイリニアモデルで二次剛性を変化させた場合の $R\mu$ スペクトルを示す。開北橋記録 TR 成分の場合の一部の固有周期及び津軽大橋記録 LG 成分について、一部 r の違いにより $R\mu$ スペクトルに差異が認められる場合があるが、全般的には r が $R\mu$ スペクトルに及ぼす影響は小さい。

次に、ディグレイディングバイリニアモデルにおいて、二次剛性を 0 ($r=0$) として、剛性低下指数を $\beta=0, 0.4, 0.6$ と変化させた。図-3.8 に、 β を変化させた場合の $R\mu$ スペクトルを示す。いずれの強震記録についても $\beta=0.4, 0.6$ の場合は、 $R\mu$ スペクトルはほとんど重なっており、 $\beta=0$ とした場合にも、 $\beta=0.4$ または 0.6 の場合と顕著な差異は認められない。

以上のことから、 $R\mu$ スペクトルを求める際には、履歴モデルや二次剛性及び剛性低下指数の違いによる影響は、比較的小さいとみなせる。本研究では、地震動特性の違いによる $R\mu$ スペクトルの変化について検討することが主な目的であるため、できるだけ単純な履歴モデルを採用することとし、完全バイリニアモデル ($r=0, \beta=0$) により計算を行うこととする。ただし、 $R\mu$ スペクトルは、ある靱性率に対する降伏耐力と応答の最大値にのみ着目しているものであり、履歴モデルにより時刻歴応答には差異がみられることに注意する必要がある。付属資料 2 に時刻歴応答変位波形の一例を示す。

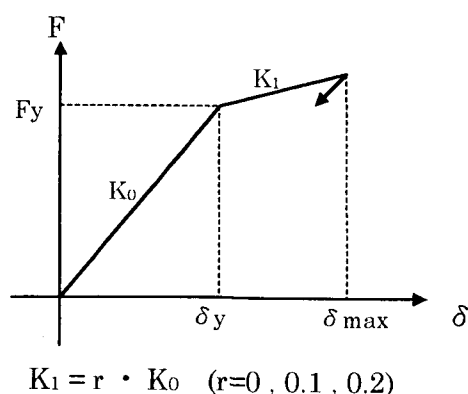
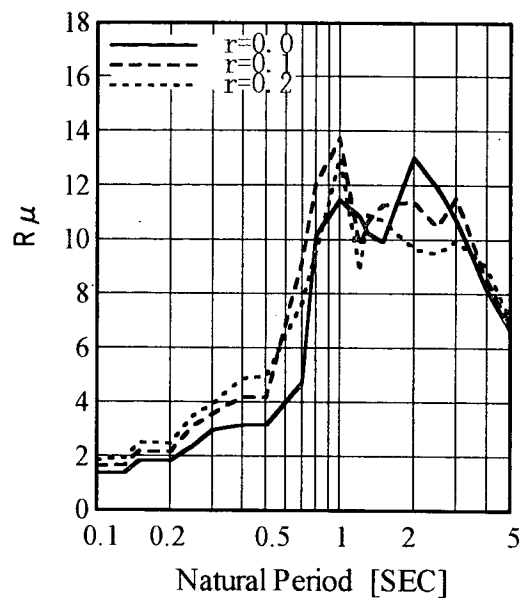
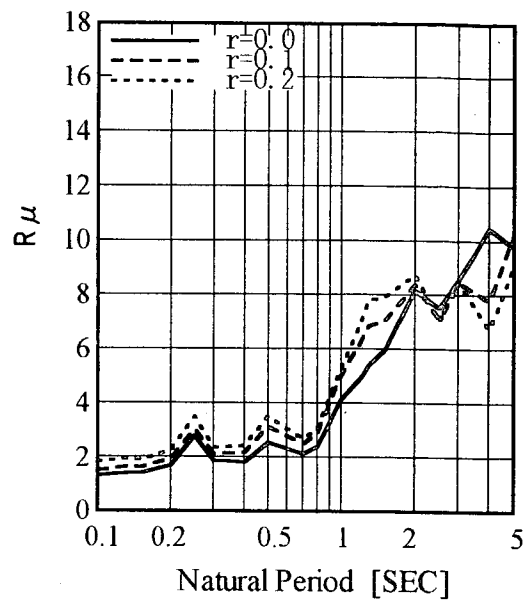


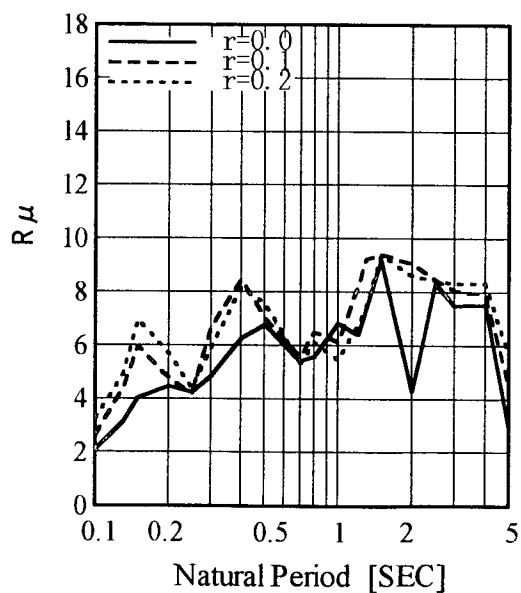
図-3.6 履歴モデルにおける二次剛性の影響



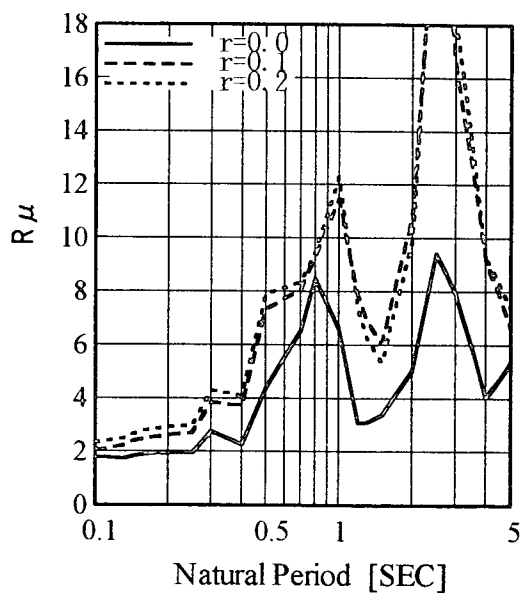
(a) 神戸海洋気象台記録NS成分



(b) ポートアイランド記録NS成分

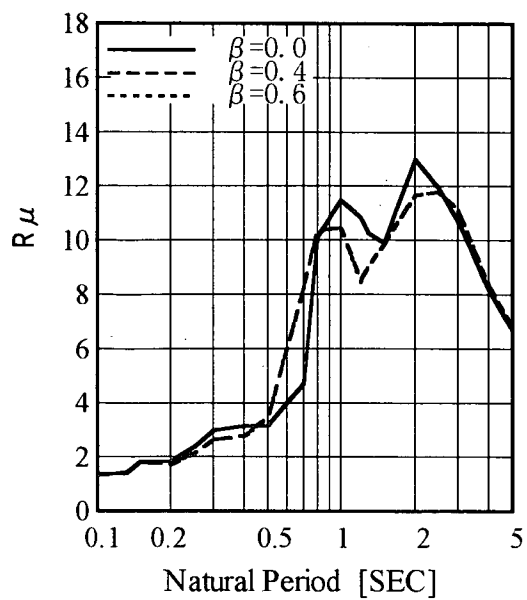


(c) 開北橋記録TR成分

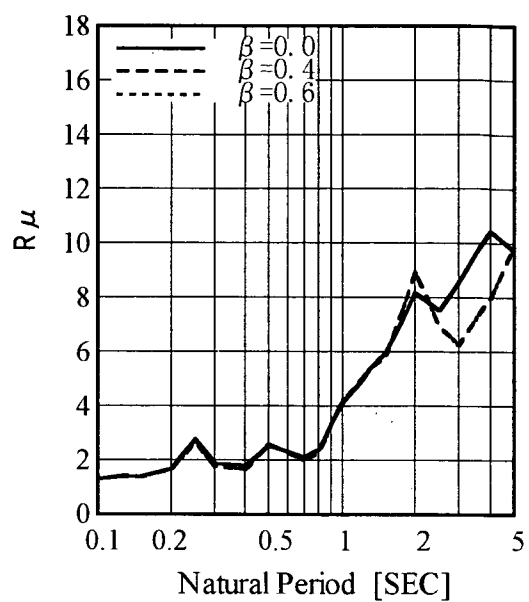


(c) 津軽大橋記録LG成分

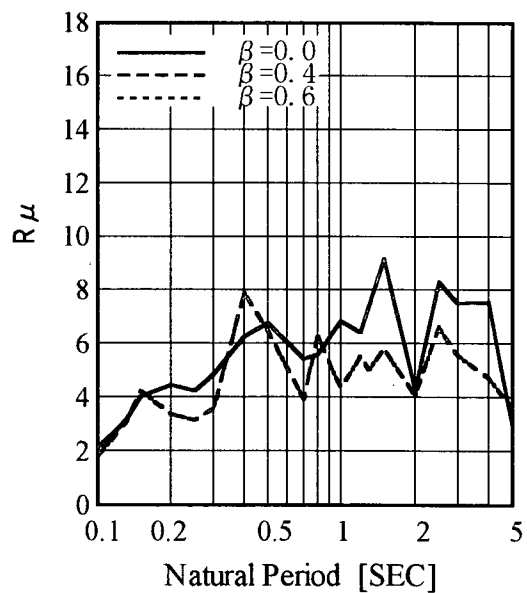
図-3.7 バイリニアモデルの二次剛性の影響 ($\mu=6$)



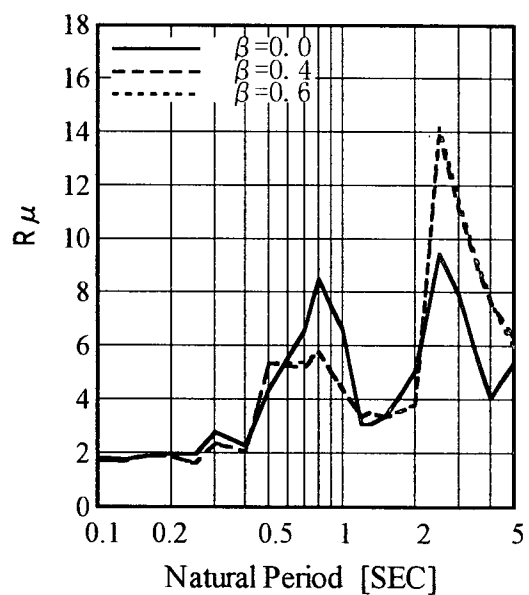
(a) 神戸海洋気象台NS成分



(b) ポートアイランド記録NS成分



(c) 開北橋記録TR成分



(d) 津軽大橋記録LG成分

図-3.8 ディグレイディングバイリニアモデルの
剛性低下係数の影響 ($\mu=6$)

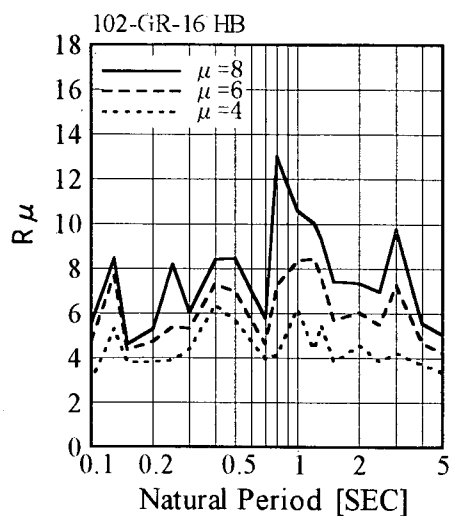
4 地震動特性が $R\mu$ スペクトルに及ぼす影響

ここでは、表-1.2 に示した 19 記録 34 成分の強震記録について $R\mu$ スペクトルを算出し、地震動特性が $R\mu$ スペクトルに及ぼす影響について検討する。ここで、兵庫県南部地震及びノースリッジ地震による 9 記録 18 成分は直下型地震による強震記録である。また、非線形履歴モデルとしては、完全バイリニアモデルを採用した。図-4.1～4.7 に計算結果を示す。

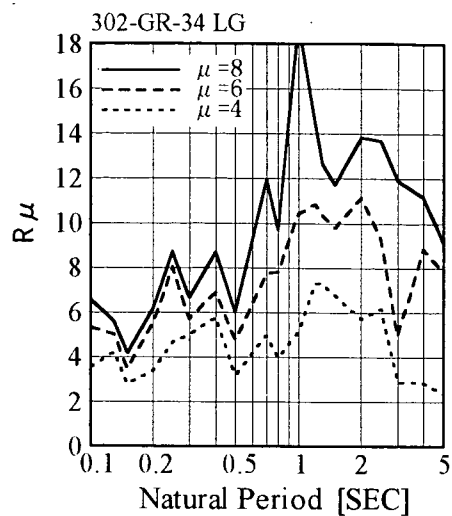
図-4.1～4.3 に示した兵庫県南部地震及びノースリッジ地震以外の強震記録の $R\mu$ スペクトルによれば、一般に、いずれの固有周期でも $R\mu$ の値が比較的大きいとともに、凹凸の多い形状を呈する。また、Ⅱ種及びⅢ種地盤では、0.3sec 以下程度の短周期領域において $R\mu$ スペクトルの靱性率依存性が小さいとともに、 $R\mu$ の値自体が小さくなっている。この傾向は、特にⅢ種地盤で顕著である。

兵庫県南部地震の強震記録による $R\mu$ スペクトルでは、固有周期 1～3sec 付近にピークを有する特徴を示すものが多い。また、 $R\mu$ スペクトルのピークが単一の場合が多く、一般に、Ⅰ種地盤からⅡ種、Ⅲ種地盤と地盤が軟質になるにしたがい、ピークが出現する固有周期が長周期に移行する傾向が認められる。さらに、短周期領域では、広い範囲において靱性率によらず $R\mu$ が小さな値を示すことが特徴的である。このような $R\mu$ スペクトルの特徴は、兵庫県南部地震が従来強震記録が得られた地震に比較して、構造物の非線形挙動に対して特徴的な影響を及ぼしたことを示唆するものである。ただし、葺合記録の X 成分と Y 成分のように、同じ観測点でもその方向によりかなり違ったスペクトル形状を示すものもあり、このような点については今後の検討が必要である。

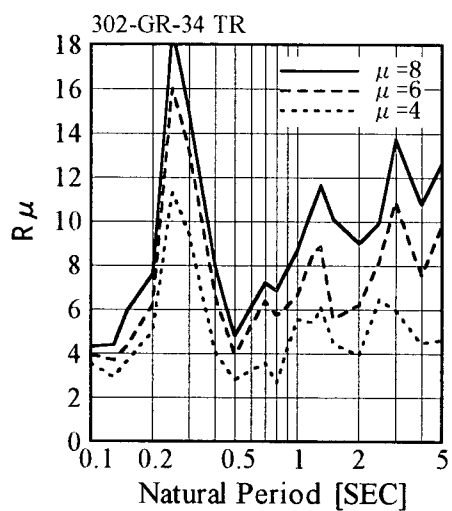
ノースリッジ地震の強震記録による $R\mu$ スペクトルについても、兵庫県南部地震の強震記録ほど明確ではないが、短周期領域においては靱性率によらず $R\mu$ の値が小さく、固有周期 1～3sec 付近にピークを有するという特徴がある。図-4.8 は神戸海洋気象台記録とシルマー記録の加速度波形を比較したものであるが、急激に主要動が立ち上がり、主要動の継続時間が短いこと、また、主要動の部分においては地震波の周期が比較的長いこと等が共通的である。すなわち、このような衝撃的な波形が $R\mu$ スペクトルに影響しているものと考えられる。



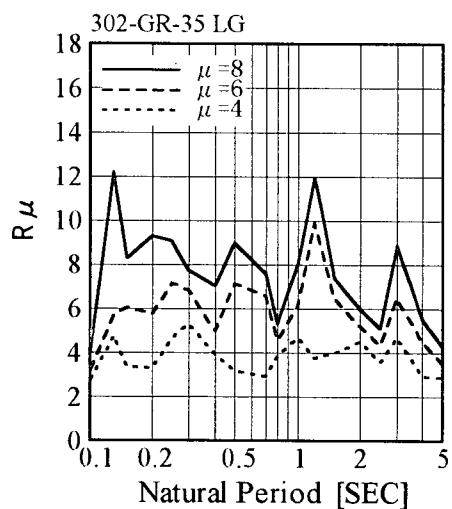
(a) 米山大橋記録HB成分



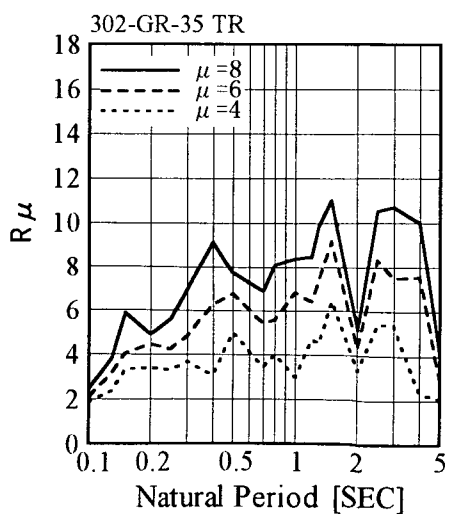
(b) 開北橋記録TR成分(78.2.20)



(c) 開北橋記録TR成分(78.2.20)

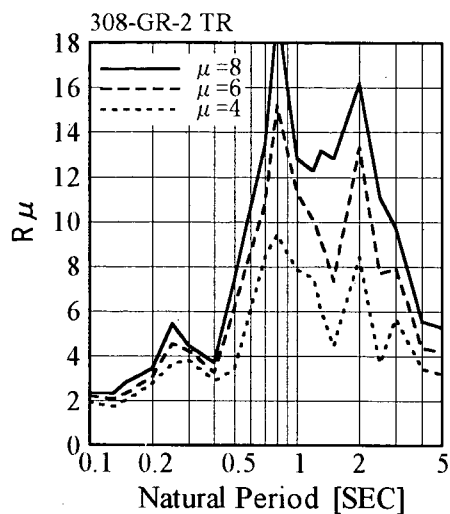


(d) 開北橋記録LG成分(78.6.12)

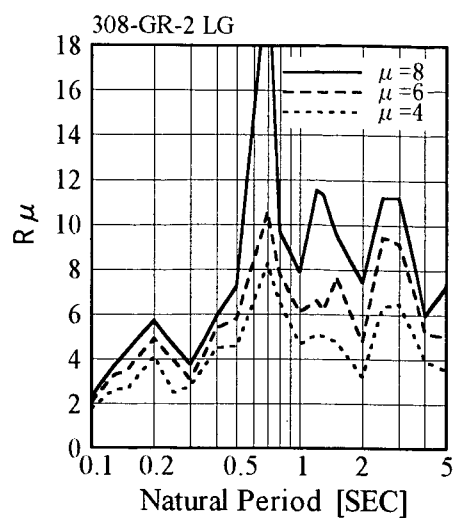


(e) 開北橋記録TR成分(78.6.12)

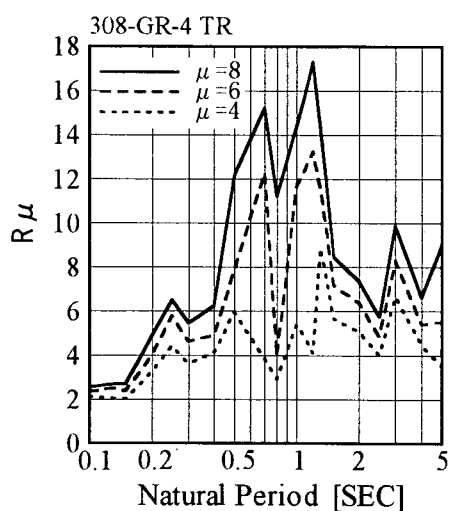
図-4.1 $R\mu$ スペクトル (I種地盤)



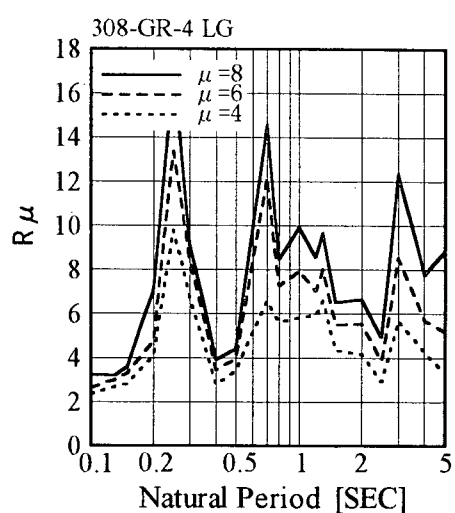
(a) 板島橋記録TR成分 (68. 4. 1)



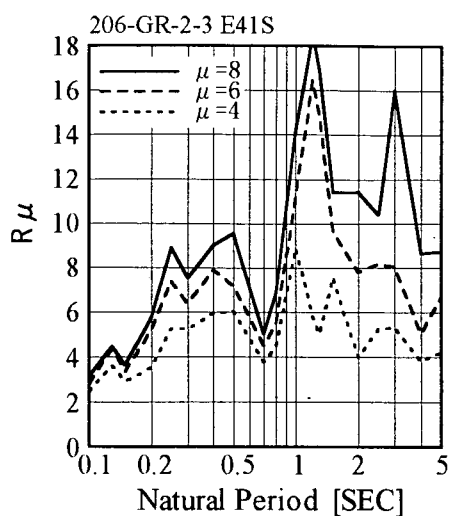
(b) 板島橋記録LG成分 (68. 4. 1)



(c) 板島橋記録TR成分 (68. 8. 6)

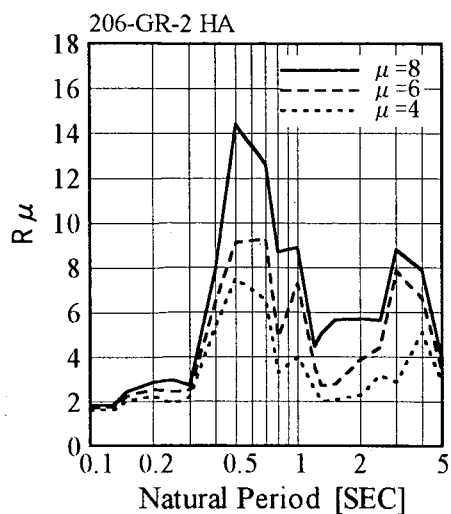


(d) 板島橋記録LG成分 (68. 8. 6)

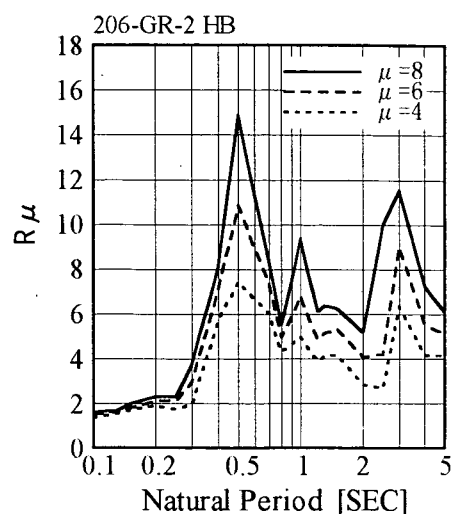


(e) 大船渡港記録E41S成分

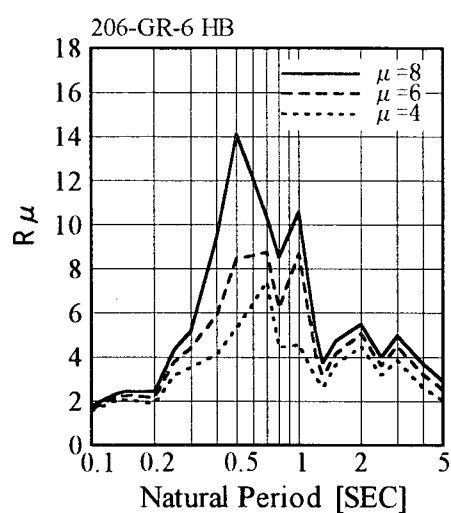
図-4.2 $R\mu$ スペクトル (Ⅱ種地盤)



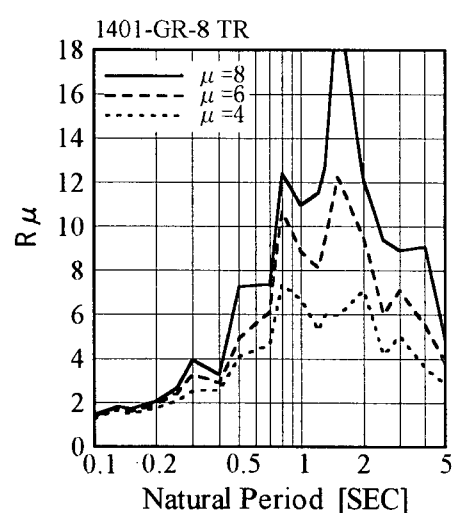
(a) 小見川大橋記録HA成分(74. 3. 3)



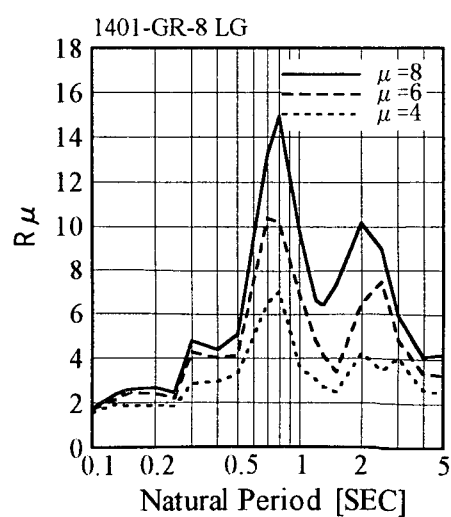
(b) 小見川大橋記録HB成分(74. 3. 3)



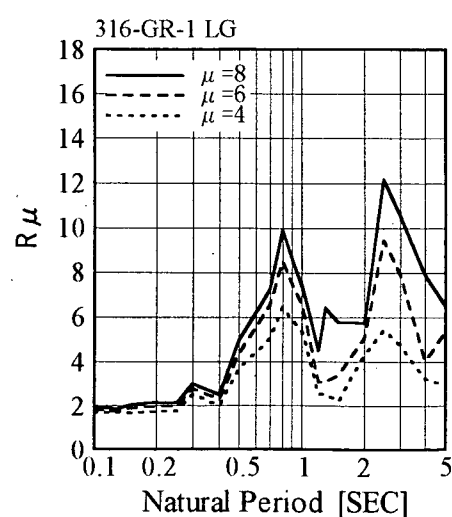
(c) 小見川大橋記録HB成分(74. 11. 16)



(d) 利根川河口堰記録TR成分

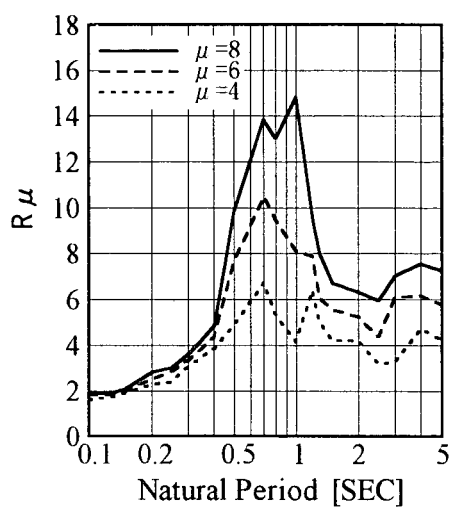


(e) 利根川河口堰記録LG成分

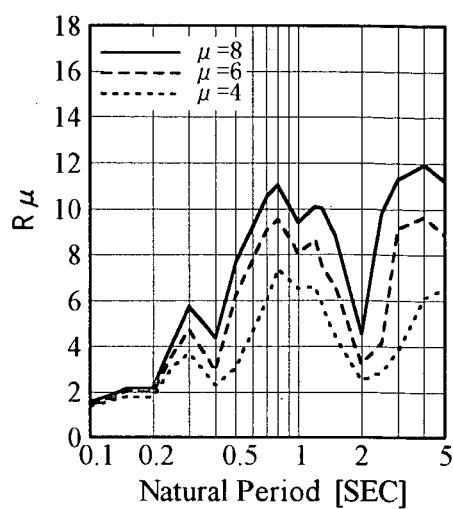


(f) 津軽大橋記録LG成分

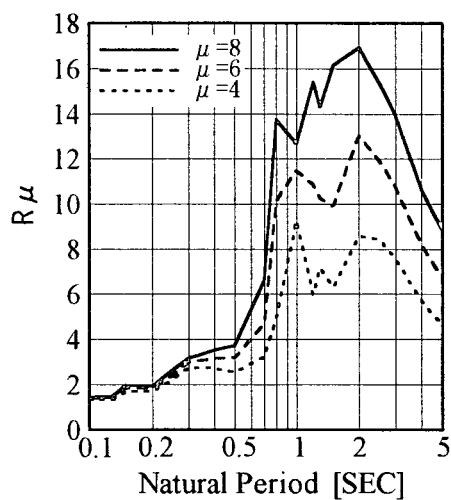
図-4.3 $R\mu$ スペクトル (Ⅲ種地盤)



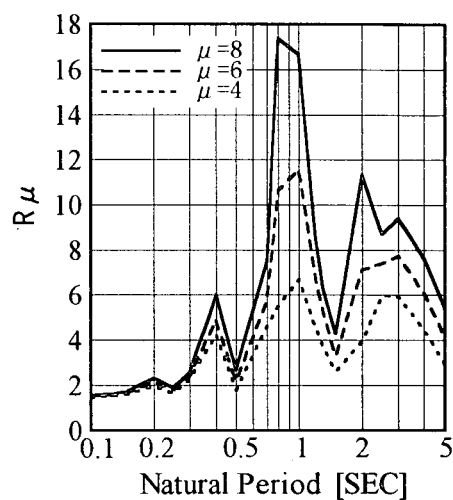
(a) 猪名川記録NS成分



(b) 猪名川記録EW成分

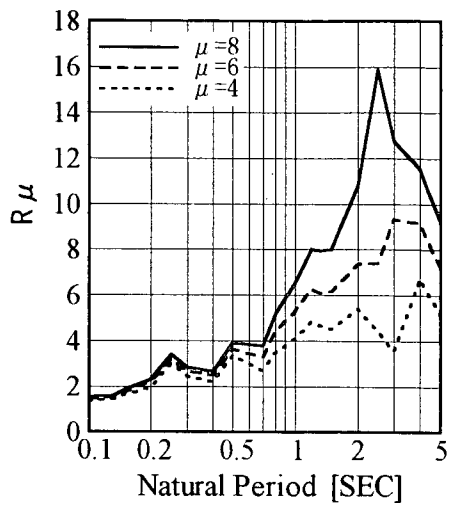


(c) 神戸海洋気象台記録NS成分

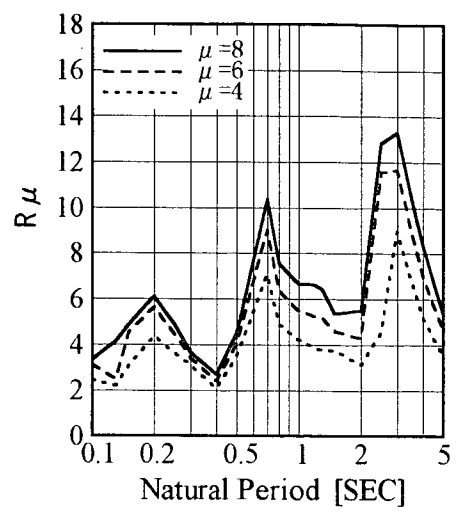


(d) 神戸海洋気象台記録EW成分

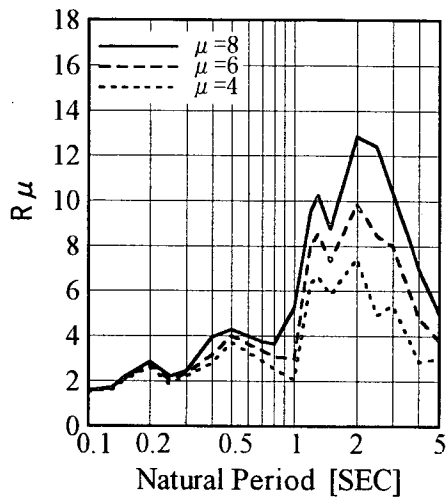
図-4.4 兵庫県南部地震記録の R_μ スペクトル (I 種地盤)



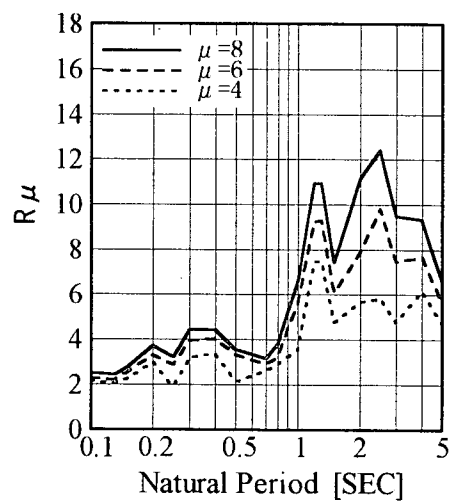
(a) 葦合記録Y成分



(b) 葦合記録X成分

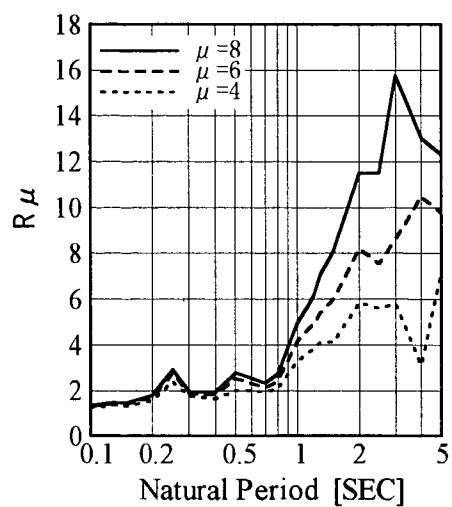


(c) J R 鷹取駅記録NS成分

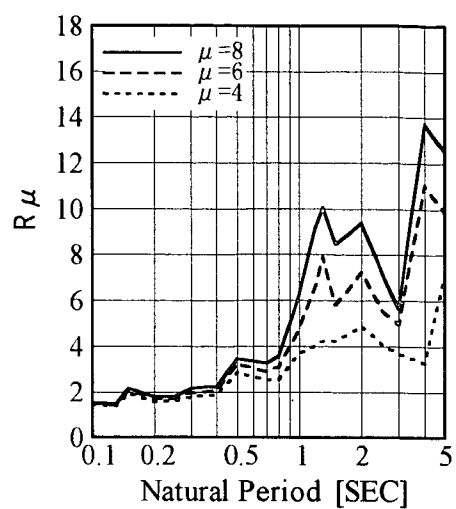


(d) J R 鷹取駅記録EW成分

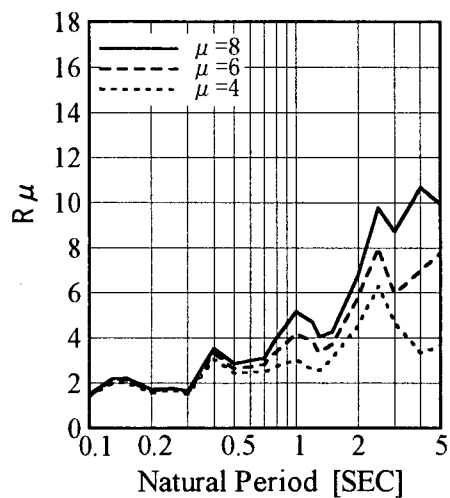
図-4.5 兵庫県南部地震記録の R_μ スペクトル (Ⅱ種地盤)



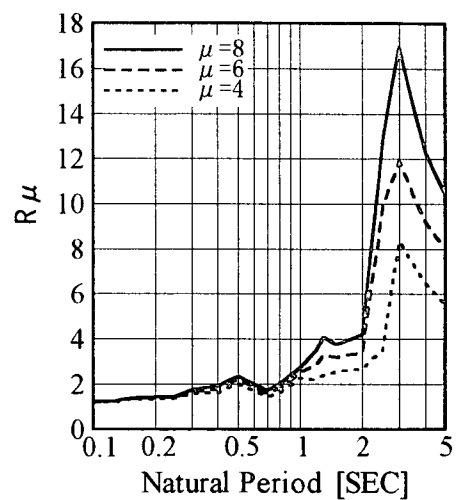
(a) ポートアイランド記録NS成分



(b) ポートアイランド記録EW成分

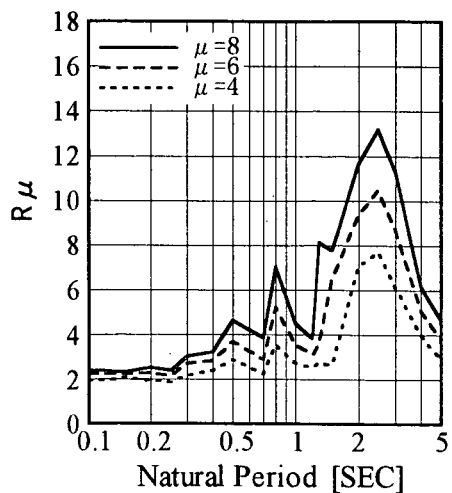


(c) 東神戸大橋記録N12W成分

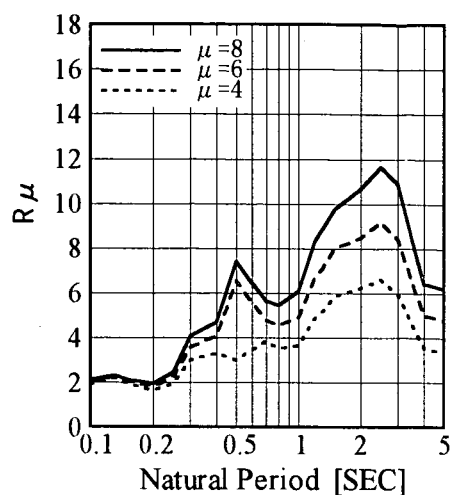


(d) 東神戸大橋記録N78W成分

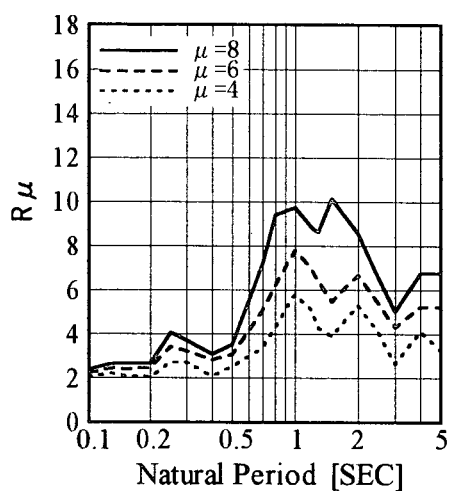
図-4.6 兵庫県南部地震記録の R_μ スペクトル (Ⅲ種地盤)



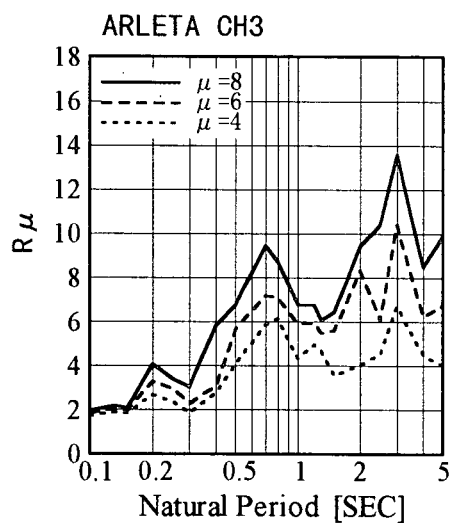
(a) シルマー記録CH1成分



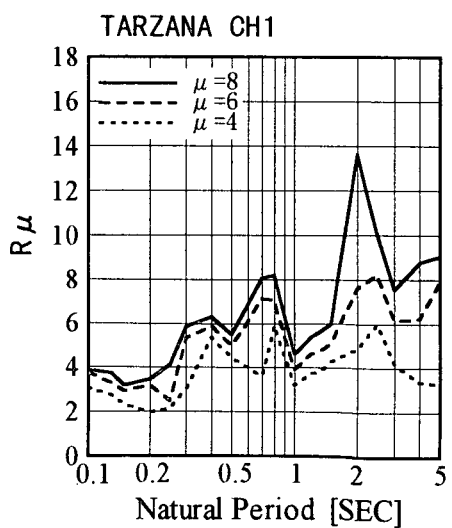
(b) シルマー記録CH3成分



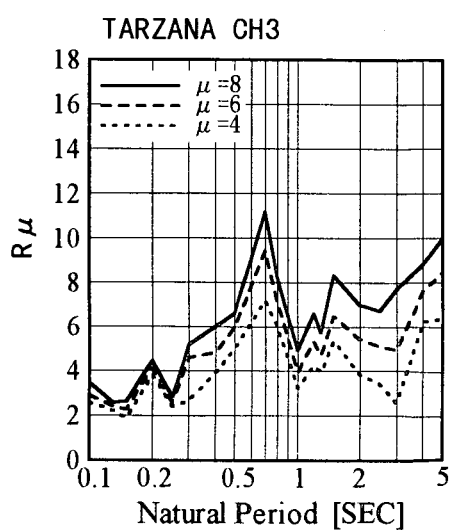
(c) アーリータ記録CH1成分



(d) アーリータ記録CH3成分



(e) ターザナ記録CH1成分



(f) ターザナ記録CH3成分

図-4.7 ノースリッジ地震記録の R_μ スペクトル

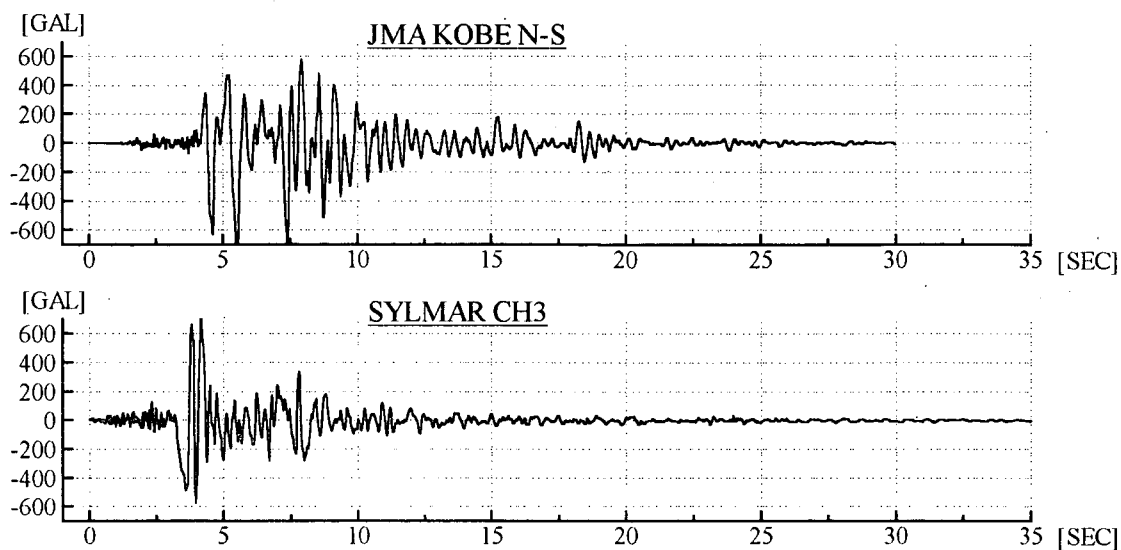


図-4.8 神戸海洋気象台記録 NS 成分とシルマー記録 CH3 成分の加速度波形

兵庫県南部地震やノースリッジ地震による衝撃的な地震波形による $R\mu$ スペクトルの特性について検討するために、正弦波 1 周期のみからなる波形について $R\mu$ スペクトルを求めた。ここで、正弦波の周期は $T=1.0\text{sec}$ とし、 $R\mu$ スペクトルの計算結果を図-4.9 に示す。本スペクトルは、固有周期が 0.5sec 程度以下の領域では靱性率によらず小さく、固有周期 $0.5\sim 1\text{sec}$ にかけて急激に立ち上がり、 1sec を越えた付近でピークを有している。この $R\mu$ スペクトルの特徴は、兵庫県南部地震による多くの強震記録やノースリッジ地震のシルマー記録の $R\mu$ スペクトルの特徴と同様である。すなわち、兵庫県南部地震やノースリッジ地震の強震記録に見られる $R\mu$ スペクトルの特徴的な形状の一因として、そのパルス的な地震波形の影響が考えられる。

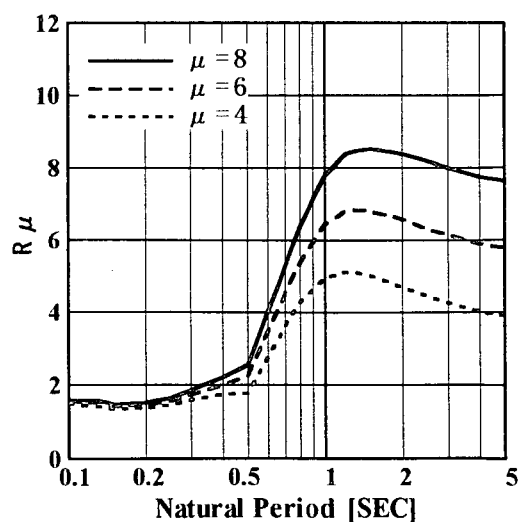


図-4.9 正弦波($T=1.0\text{sec}$) 1 周期のみの $R\mu$ スペクトル

5 R μ スペクトルの評価式との比較

R μ スペクトルについてはいくつかの評価式が提案されているが、ここでは、兵庫県南部地震記録を含む強震記録に対する R μ スペクトルの評価式の適用性について検討する。

検討対象とした R μ スペクトルの評価式は次のとおりである¹⁾。ここで、T 及び μ は、それぞれ、初期剛性から計算される固有周期及び靱性率である。

i) Arias and Hidalgo による評価式

$$R\mu = 1 + \frac{T}{kT_0 + \frac{T}{\mu - 1}} \quad (5.1)$$

k 及び T_0 については、Miranda の計算例¹⁾に準じ、それぞれ、 $k=0.1$ 及び $T_0=0.2$ とした。

ii) Nassar and Krawinkler による評価式

$$R\mu = [c(\mu - 1) + 1]^{1/c} \quad (5.2)$$

$$c(T, \alpha) = \frac{T^a}{1 + T^a} + \frac{b}{T} \quad (5.3)$$

a 及び b については α の値によって以下のように提案されている。 α は初期剛性に対する二次剛性の比率である。ここでは、 $\alpha=0.0$ を採用し、 $a=1.0$ $b=0.42$ とした。

α	a	b
0	1.0	0.42
0.02	1.0	0.37
0.1	0.8	0.29

iii) Vidic, Fajfar and Fischinger による評価式

$$R\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_0} + 1.0 \quad \text{for } T \leq T_0 \quad (5.4)$$

$$R\mu = \mu \quad \text{for } T > T_0 \quad (5.5)$$

ここに、

$$T_0 = 0.65\mu^{0.3}T_1 \quad (5.6)$$

$$T_1 = 2\pi \frac{\phi_{ev} V}{\phi_{ea} A} \quad (5.7)$$

V : 地盤上での最大速度

A : 地盤上での最大加速度

ϕ_{ev} : 速度応答スペクトル倍率

ϕ_{ea} : 加速度応答スペクトル倍率

$\phi_{ev}V$ 及び $\phi_{ea}A$ は、それぞれ、最大加速度応答及び最大速度応答に相当するため、本解析では、計算に用いた強震記録の加速度応答スペクトル及び速度応答スペクトルを算出し、それぞれの平均値を $\phi_{ev}V$ 及び $\phi_{ea}A$ とした。

iv) Miranda による評価式

$$R\mu = \frac{\mu-1}{\Phi} + 1 \quad (5.8)$$

$$\Phi = 1 + \frac{1}{10T - \mu T} - \frac{1}{2T} \exp \left[-\frac{3}{2} \left(\ln T - \frac{3}{5} \right)^2 \right] \quad \text{for rock sites} \quad (5.9)$$

$$\Phi = 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T} \exp \left[-2 \left(\ln T - \frac{1}{5} \right)^2 \right] \quad \text{for alluvium sites} \quad (5.10)$$

$$\Phi = 1 + \frac{T_g}{3T} - \frac{3T_g}{4T} \exp \left[-3 \left(\ln \frac{T}{T_g} - \frac{1}{4} \right)^2 \right] \quad \text{for soft soil sites} \quad (5.11)$$

本解析では兵庫県南部地震及びノースリッジ地震以外の強震記録、並びに兵庫県南部地震による強震記録のそれぞれについて卓越周期の平均値を算出し、それぞれ、 $T_g=0.6\text{sec}$ 及び 2.3sec とすることとした。

地盤条件を明確に考慮しているのは Miranda の式のみであるが、Vidic らの式は ($\phi_{ev}V/\phi_{ea}A$) により地盤条件を区分できるため、Miranda 及び Vidic らの式による評価では地盤種別を考慮することとした。Nassar らの式及び Arias らの式では地盤条件を考慮していないため、地盤種別による区分は行わないこととした。なお、Vidic らの式については、地盤種別を考慮しない場合にも検討対象とした。

表-1.2 に示した兵庫県南部地震及びノースリッジ地震以外の地震による 16 成分の強震記録の $R\mu$ スペクトル及びそれらの平均値並びに、Nassar ら、Vidic ら及び Arias らによる $R\mu$ スペクトルの評価式による値を図-5.1 に示す。同様に、兵庫県南部地震の強震記録に対する解析結果を図-5.2 に示す。

図-5.1 によれば、各強震記録で $R\mu$ スペクトルのばらつきが大きい、平均値と比較すると Arias ら、Nassar ら及び Vidic らの評価式は、いずれも同程度または若干低めの結果を与えている。特に固有周期 $0.5 \sim 1.5\text{sec}$ 付近においては、いずれの評価式も平均値に比較して小さくなっている。図-5.2 の兵庫県南部地震による強震記録の $R\mu$ スペクトルの平均値と各評価式を比較すると、 1sec 程度以下の固有周期領域については、Arias ら及び Nassar らの式は平均値を上回るのに対して、Vidic らの式は概ね平均値と適合する。 1sec 程度以上の固有周期領域においては、いずれの評価式も概ね同程度の値を示すが、固有周期 3sec 付近において $R\mu$ スペクトルの平均値は評価式を上回る点が特徴的である。

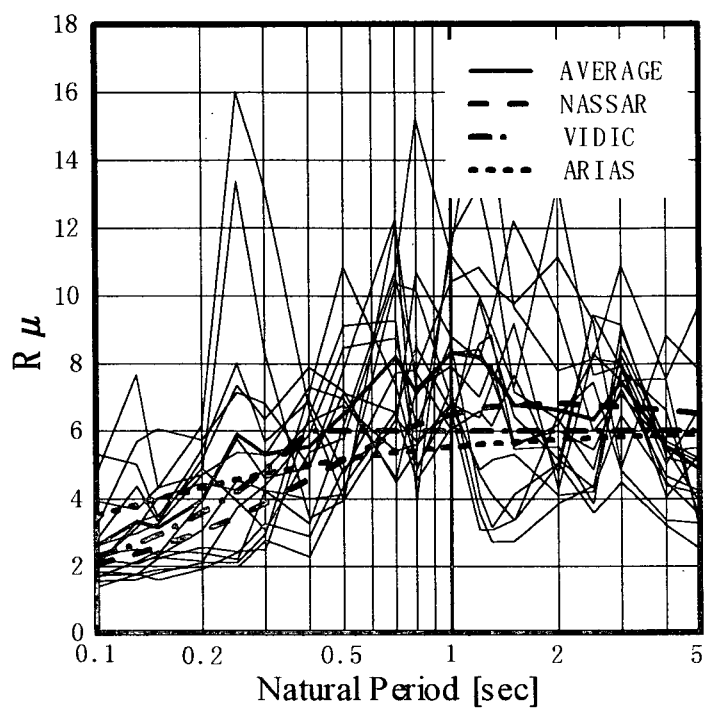


図-5.1 R_μ スペクトルと評価式の比較 ($\mu=6$)

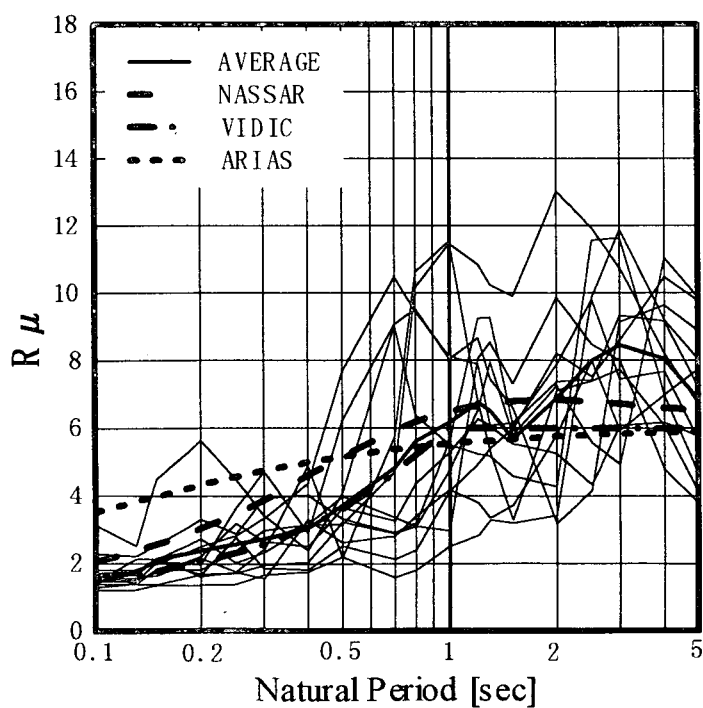


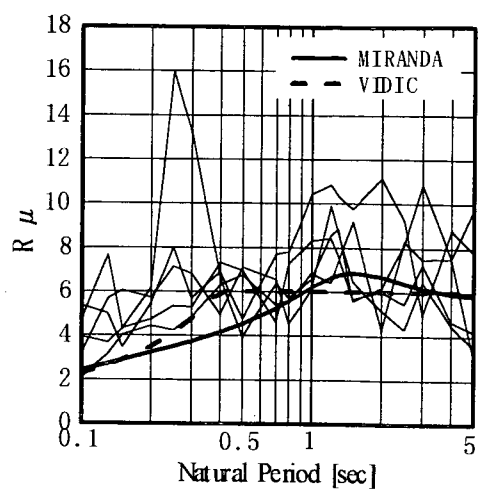
図-5.2 兵庫県南部地震記録の R_μ スペクトルと評価式の比較 ($\mu=6$)

次に、Miranda 及び Vidic らの式と地盤種別ごとに強震記録から算出した R_μ スペクトルとの比較を図-5.3 及び図-5.4 に示す。図-5.3 及び図-5.4 は、それぞれ、兵庫県南部地震及びノースリッジ地震以外の地震の強震記録並びに兵庫県南部地震による強震記録に対する解析結果を示したものである。地盤種別については、Miranda の式を用いる場合には、rock、alluvium 及び soft soil を、それぞれ、道路橋示方書³⁾のⅠ種、Ⅱ種及びⅢ種地盤と見なすことにした。また、Vidic らの式を用いる場合には、各地盤種別の強震記録から $\phi_{ev}V/\phi_{ea}A$ を求め、その平均値を用いた。

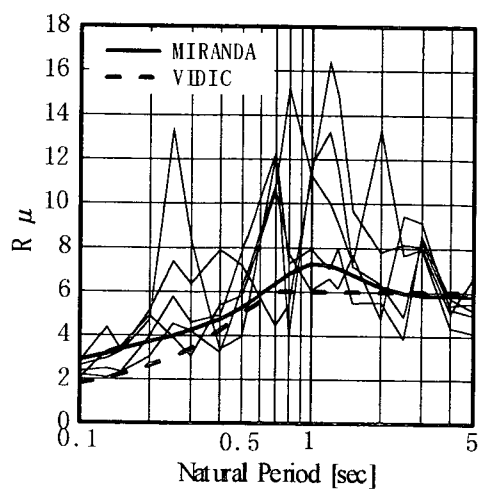
Miranda の式は、兵庫県南部地震及びノースリッジ地震以外の地震の強震記録の場合、Ⅰ種地盤の固有周期 1 sec 程度以下の領域で強震記録から求めた R_μ スペクトルよりも小さい値を示し、一方、Ⅲ種地盤の固有周期 0.3 sec 程度以下の領域では大きな値を示す以外は、全般に強震記録から求めた R_μ スペクトルと整合している。特に、Ⅲ種地盤の 1 sec 程度以下の固有周期領域においては Miranda の式は Vidic らの式よりも大きな値を与え、その結果、固有周期 0.3~1 sec 付近の帯域においては Vidic らの式よりも強震記録によく適合している。また、Miranda の式を兵庫県南部地震の強震記録から求めた R_μ スペクトルと比較すると、全般的には R_μ スペクトルの傾向を比較的よく捕らえているが、Ⅰ種及びⅡ種地盤では、兵庫県南部地震の強震記録に特徴的な長周期領域における R_μ スペクトルのピークは必ずしも十分に再現していない。しかし、Ⅲ種地盤については長周期領域における R_μ スペクトルのピークを含め広い周期帯で再現性がよいことがわかる。

Vidic らの式は、兵庫県南部地震及びノースリッジ地震以外の地震による強震記録については、Ⅰ種地盤の 0.4~1 sec 付近の固有周期領域では Miranda の式よりも適合性が良い一方、Ⅲ種地盤の 1 sec 程度以下の固有周期領域では強震記録から算出した R_μ スペクトルを下回っている。また、Vidic らの式は長周期領域において $R_\mu = \mu$ としているが、これは変位一定則⁷⁾を仮定していることに相当し、図-5.4 に示した兵庫県南部地震の強震記録に見られる長周期領域における R_μ スペクトルのピークを再現することはできない。一方、1 sec 程度以下の固有周期領域では、Vidic らの式は強震記録から求めた R_μ スペクトルと概ね整合している。

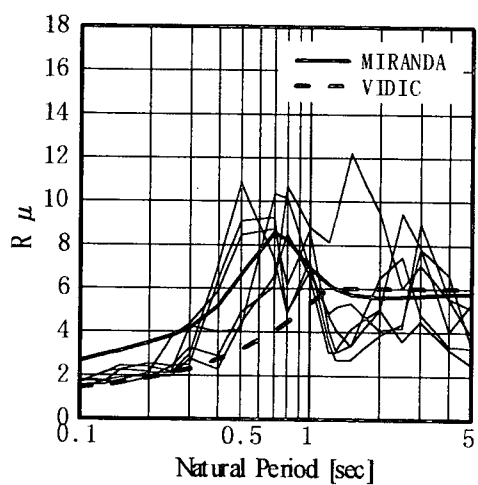
R_μ スペクトルは一般に、強震記録ごとの変動が大きく、それを単純な式で精度良く表すことは困難であるが、 R_μ スペクトルの既往の評価式の中では、Miranda の式及び Vidic らの式が強震記録から算出した R_μ スペクトルと比較的よく適合しており、特に、軟質なⅢ種地盤については再現性がよい。



(a) I 種地盤

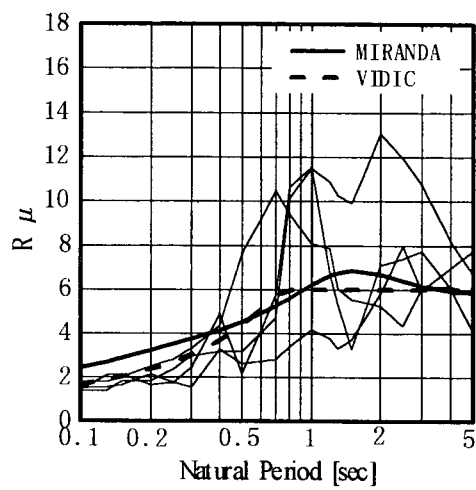


(b) II 種地盤

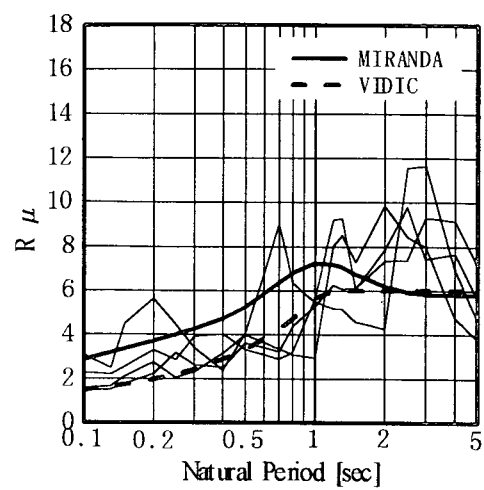


(c) III 種地盤

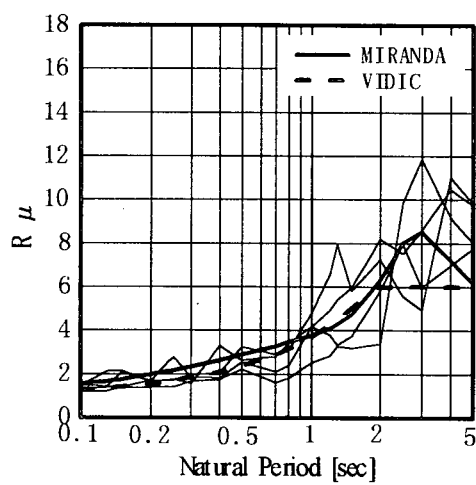
図-5.3 R_μ スペクトルと評価式の比較 ($\mu=6$)



(a) I種地盤



(b) II種地盤



(c) III種地盤

図-5.4 兵庫県南部地震記録の R_μ スペクトルと評価式の比較 ($\mu=6$)

6 振幅調整波形の $R\mu$ スペクトル

解析に用いた振幅調整波形は「道路橋の耐震設計に関する資料」⁴⁾に示されているタイプⅠ及びタイプⅡ地震動の各9成分の時刻歴波形であり、振幅調整に用いられた強震記録を表-6.1に示す。

タイプⅠ及びタイプⅡ地震動の $R\mu$ スペクトルを、それぞれ、図-6.1～6.3及び図-6.4～6.6に示す。

例えば、開北橋記録について、図-4.1に示した元波形の $R\mu$ スペクトルと振幅調整波形の $R\mu$ スペクトルを比較すると、振幅調整波形では元波形に比べて、 $R\mu$ の値が小さいとともに、スペクトルの形状が滑らかになっている。また、板島橋記録についても同様の傾向が認められる。すなわち、タイプⅠ地震動では、振幅調整の影響により $R\mu$ スペクトルの特性が大きく変化している。一方、タイプⅡ地震動の神戸海洋気象台記録について、図-4.4に示した元波形の $R\mu$ スペクトルと振幅調整波形の $R\mu$ スペクトルを比べた場合には、両者の特徴は概ね類似している。すなわち、タイプⅡ地震動では振幅調整により $R\mu$ スペクトルの特性が大きく変化することはない。

このような、タイプⅠ地震動とタイプⅡ地震動の特徴の差異について検討するために、タイプⅠ地震動としては開北橋記録 LG 成分及び板島橋記録 TR 成分、タイプⅡ地震動としては神戸海洋気象台記録 NS 成分及び JR 鷹取駅記録 NS 成分について元波形及び振幅調整波形の必要強度スペクトル（目標とする靱性率を確保するために必要な降伏耐力）を図-6.7～6.10に示す。ここで、 $\mu=1$ の場合が線形の加速度応答スペクトルに相当するものである。加速度応答スペクトルに対する振幅調整の影響について検討するただけであれば、 $\mu=1$ の場合についてのみ着目すればよいが、必要強度スペクトルは線形加速度応答スペクトルに $1/R\mu$ を乗ずることにより求められるため、参考までに他の靱性率に対する結果も示している。図-6.7及び6.8のタイプⅠ地震動の場合には振幅調整の度合いが大きく、特に元波形の長周期成分を大きくしていることがわかる。それに対して、図-6.9及び6.10のタイプⅡ地震動の場合には、振幅調整の度合いは軽微である。以上のような振幅調整の度合いの違いにより、元波形と振幅調整波形の $R\mu$ スペクトルの変化の程度が異なるものと考えられる。

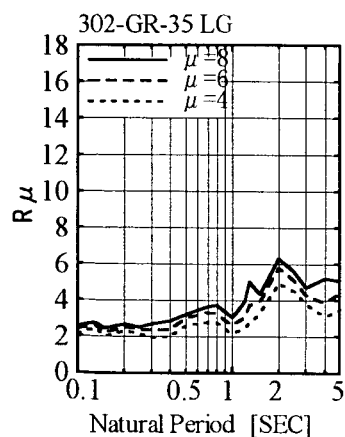
表-6.1 振幅調整に用いた強震記録

(a) タイプⅠ

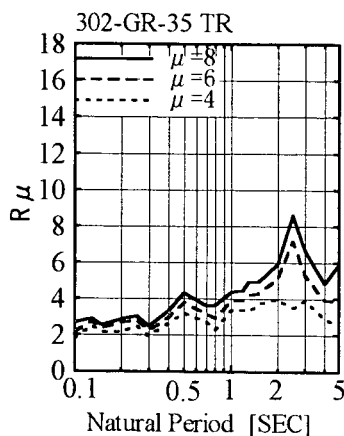
地盤種別	地震名	マグニチュード M	記録場所	成分
Ⅰ種地盤	1978年宮城県沖地震	7.4	開北橋周辺地盤上	LG, TR
	1993年北海道南西沖地震	7.8	七峰橋周辺地盤上	LG
Ⅱ種地盤	1968年日向灘沖地震	7.5	板島橋周辺地盤上	LG, TR
	1994年北海道東方沖	8.1	温根沼大橋周辺地盤上	TR
Ⅲ種地盤	1983年日本海中部地震	7.7	津軽大橋周辺地盤上	LG, TR
	1994年北海道東方沖地震	8.1	釧路川堤防周辺地盤上	LG

(b) タイプⅡ

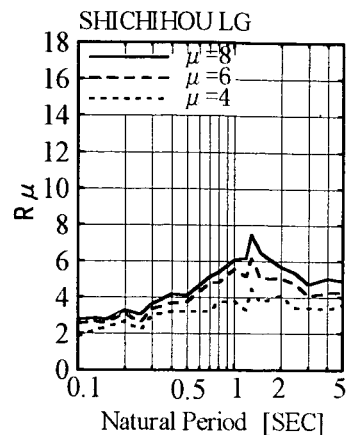
地盤種別	地震名	マグニチュード M	記録場所	成分
Ⅰ種地盤	1995年兵庫県南部地震	7.2	神戸海洋気象台地盤上	NS, EW
			猪名川高架予定地点周辺地盤上	NS
Ⅱ種地盤			JR 西日本鷹取駅構内地盤上	NS, EW
			大阪ガス葺合供給所構内地盤上	Y
Ⅲ種地盤			東神戸大橋周辺地盤上	N12W
			ポートアイランド内地盤上	NS, EW



(a) 開北橋記録LG成分

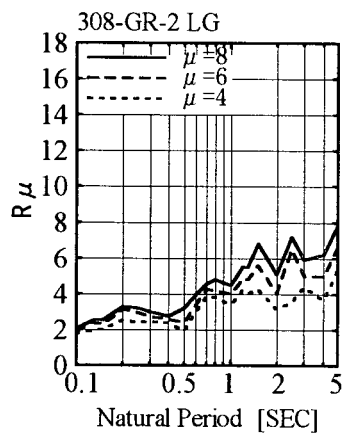


(b) 開北橋記録TR成分

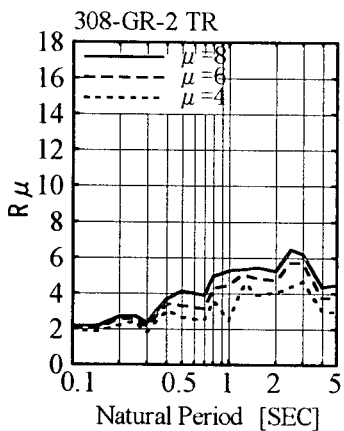


(c) 七峰橋記録LG成分

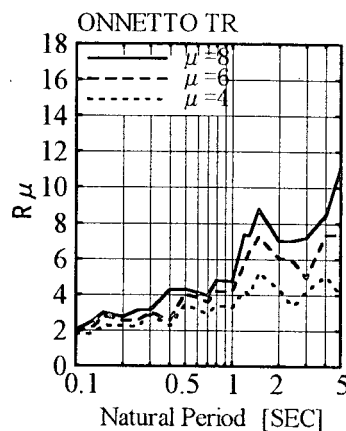
図-6.1 タイプ I 地震動の振幅調整波形の R_μ スペクトル (I 種地盤)



(a) 板島橋記録LG成分

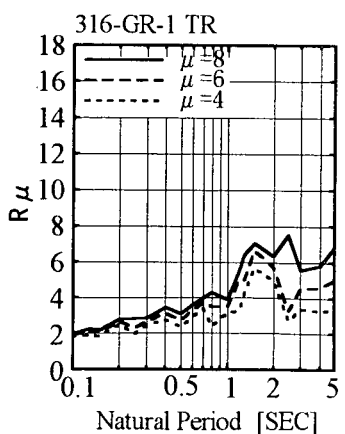


(b) 板島橋記録TR成分

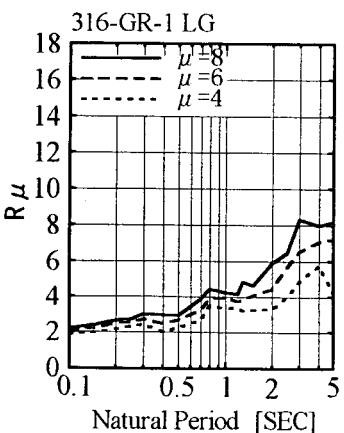


(c) 温根沼大橋記録TR成分

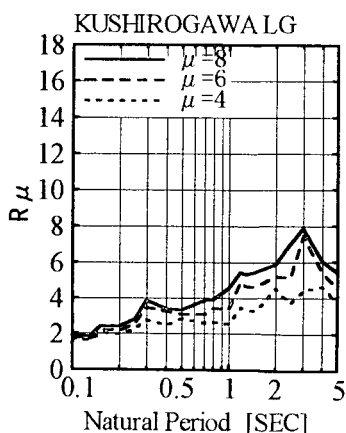
図-6.2 タイプ I 地震動の振幅調整波形の R_μ スペクトル (II 種地盤)



(a) 津軽大橋記録TR成分

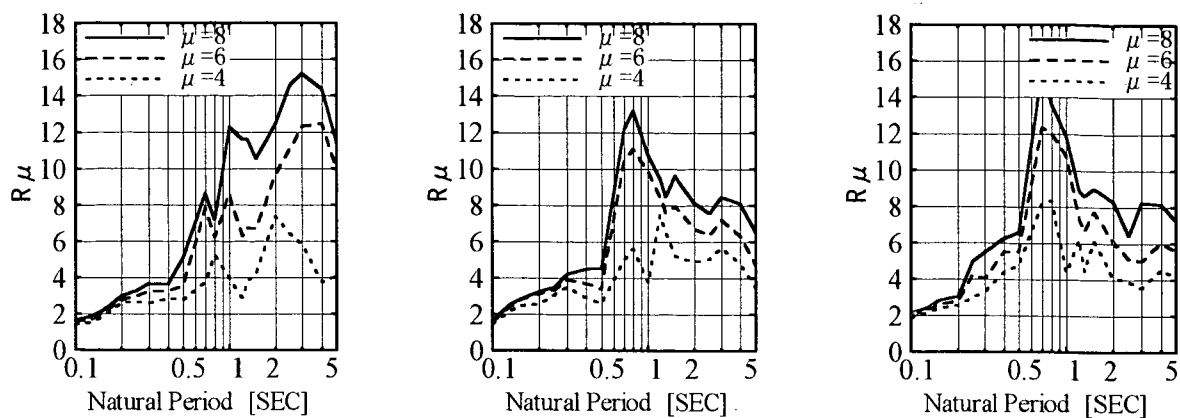


(b) 津軽大橋記録LG成分



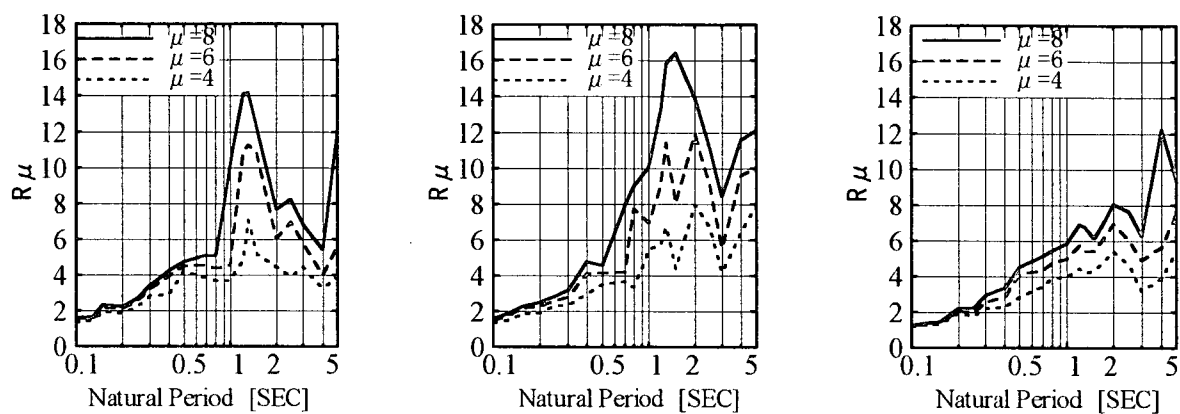
(c) 釧路川堤防記録LG成分

図-6.3 タイプ I 地震動の振幅調整波形の R_μ スペクトル (III 種地盤)



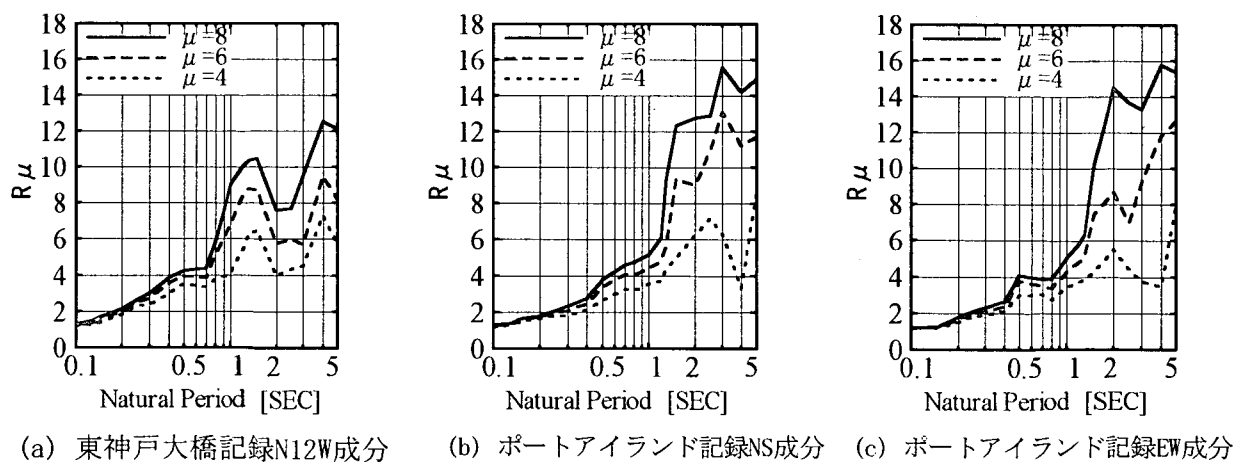
(a) 神戸海洋気象台記録NS成分 (b) 神戸海洋気象台記録EW成分 (c) 猪名川記録NS成分

図-6.4 タイプⅡ地震動の振幅調整波形の R_μ スペクトル (Ⅰ種地盤)



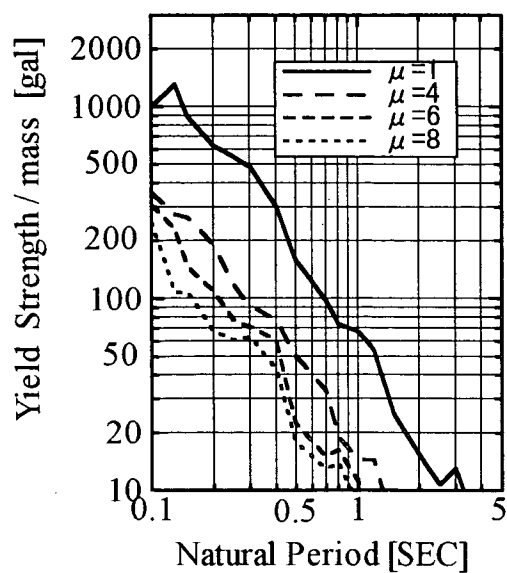
(a) JR 鷹取駅記録NS成分 (b) JR 鷹取駅記録EW成分 (c) 葺合記録Y成分

図-6.5 タイプⅡ地震動の振幅調整波形の R_μ スペクトル (Ⅱ種地盤)

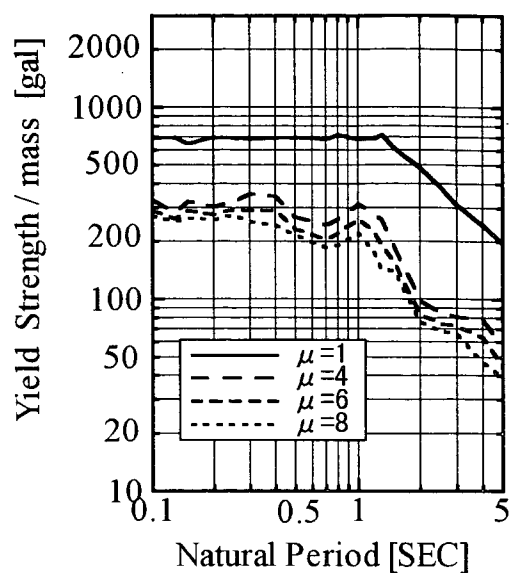


(a) 東神戸大橋記録N12W成分 (b) ポートアイランド記録NS成分 (c) ポートアイランド記録EW成分

図-6.6 タイプⅡ地震動の振幅調整波形の R_μ スペクトル (Ⅲ種地盤)

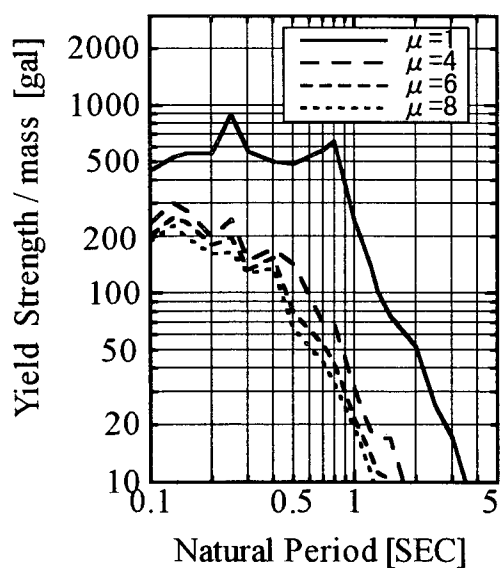


(a) 元波形

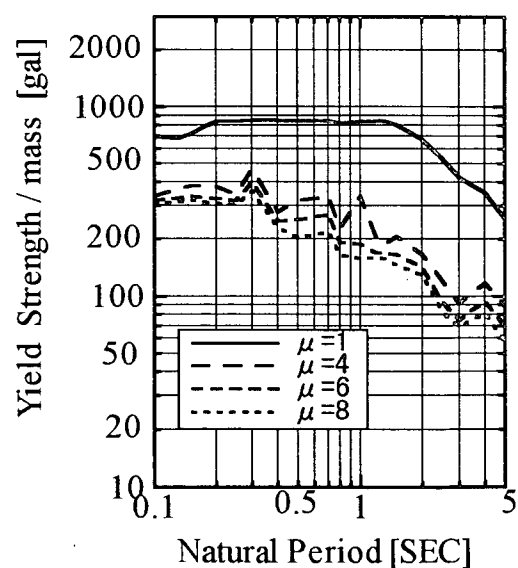


(b) 振幅調整波形

図-6.7 開北橋記録の必要強度スペクトル

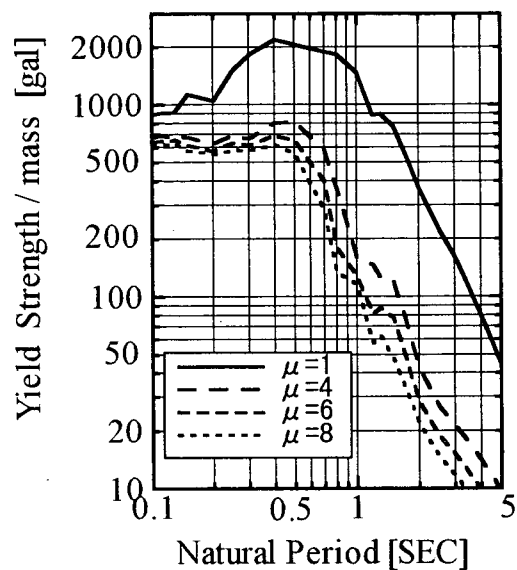


(a) 元波形

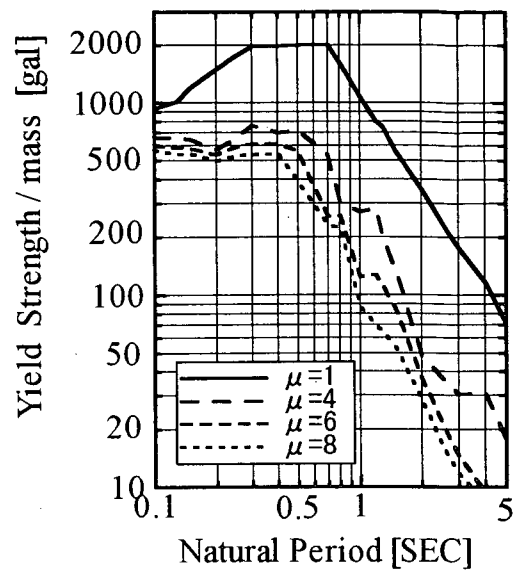


(b) 振幅調整波形

図-6.8 板島橋記録の必要強度スペクトル

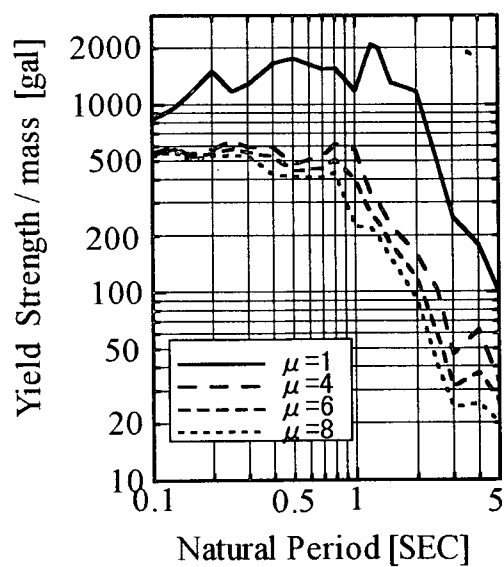


(a) 元波形

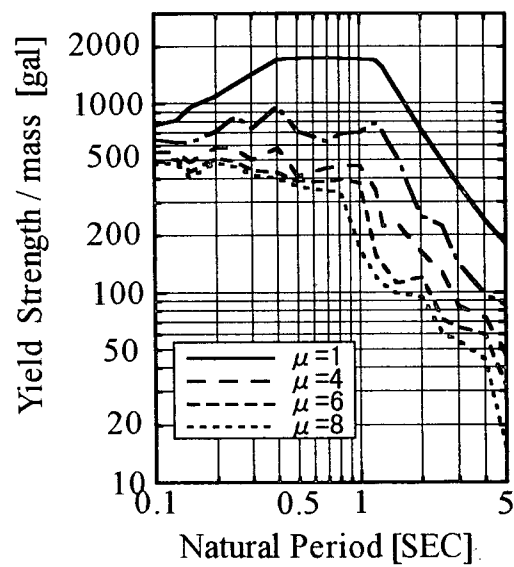


(b) 振幅調整波形

図-6.9 神戸海洋気象台記録の必要強度スペクトル



(a) 元波形



(b) 振幅調整波形

図-6.10 J R 鷹取記録の必要強度スペクトル

7. まとめ

本研究では、構造物の非線形応答を表す指標として $R\mu$ スペクトルを用い、 $R\mu$ スペクトル算出に及ぼす非線形履歴モデルの影響、地震動特性の違いによる $R\mu$ スペクトルの特徴等について検討した。以下に、本研究の結果をまとめる。

① 非線形履歴モデルが $R\mu$ スペクトルに及ぼす影響

3種類の非線形履歴モデルを用いて、二次剛性や剛性低下指数を変化させ非線形動的解析を行った。その結果、履歴モデルの違いが $R\mu$ スペクトルに及ぼす影響は大きくないことがわかった。

② 地震動特性が $R\mu$ スペクトルに及ぼす影響

兵庫県南部地震による強震記録の $R\mu$ スペクトルは、短周期領域で小さな値をとり、固有周期1～3sec付近に大きなピークを有するという、従前の強震記録とは異なる特徴を示すものが多い。このような特徴はノースリッジ地震によるシルマーの記録などにも認められ、衝撃的なパルス状の波形の影響であると考えられる。

③ $R\mu$ スペクトルの評価式との比較

$R\mu$ スペクトルは、一般に、強震記録ごとの変動が大きく、それを単純な式で精度良く表すことは困難であるが、既往の $R\mu$ スペクトルの評価式の中では Miranda の式及び Vidic らの式が比較的適合性がよいことがわかった。

④ 振幅調整波形の $R\mu$ スペクトル

道路橋示方書のタイプⅠ及びタイプⅡ地震動に適合する振幅調整波形について $R\mu$ スペクトルを算出した結果、タイプⅡ地震動の場合には、振幅調整波形の $R\mu$ スペクトルは元波形の $R\mu$ スペクトルと概ね類似しているが、タイプⅠ地震動の場合には両者が異なっている。これは、タイプⅠ及びタイプⅡ地震動に対する振動数領域での振幅調整の度合いの影響によるものであると考えられる。

⑤ 今後の課題

地震動の特性により、 $R\mu$ スペクトルに特徴的な変化が見られることがわかったが、そのメカニズムは十分には解明されていない。例えば、時刻歴波形としては類似している1強震記録の2成分でも異なる $R\mu$ スペクトルを呈する場合があります。地震動のどのような特性が $R\mu$ スペクトルに影響を及ぼしているのか解明する必要がある。さらに、強震記録の振幅調整の影響が $R\mu$ スペクトルに及ぼす定量的な影響の評価も必要である。 $R\mu$ スペクトルの評価式については、現状では十分な精度が得られている段階には達しておらず、今後の検討が必要である。

また、本研究では、一質点系のモデルにより解析を行ったが、非線形系の挙動を考える場合には、

多質点系の影響も考慮する必要があると考えられる。

以上のような検討により、構造物の非線形応答特性に影響を及ぼす地震動特性を解明し、それをもとに設計用入力地震動を設定していく必要がある。

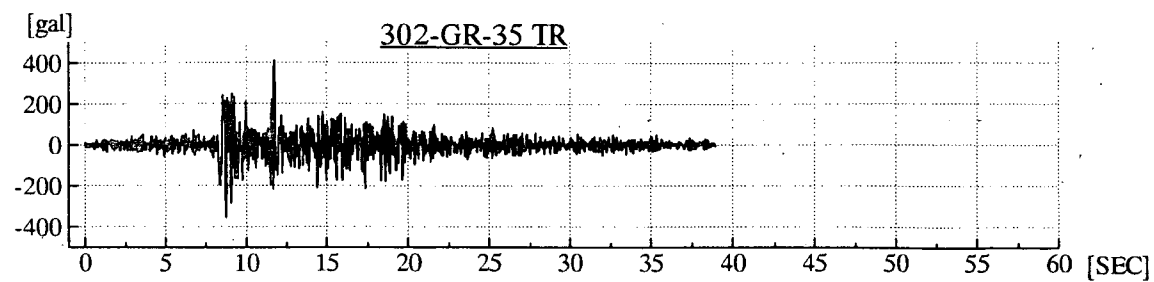
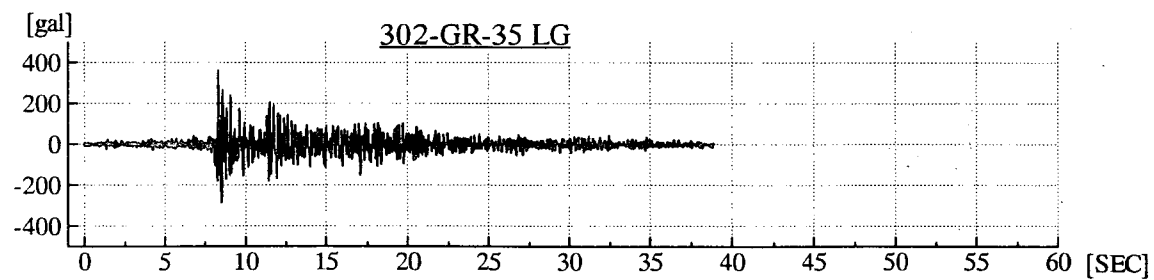
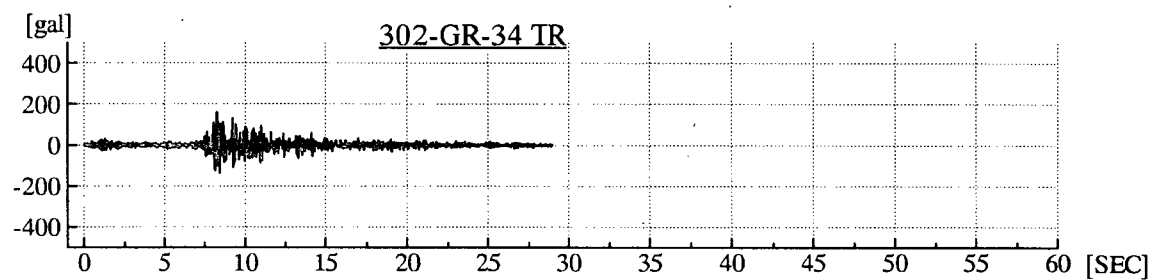
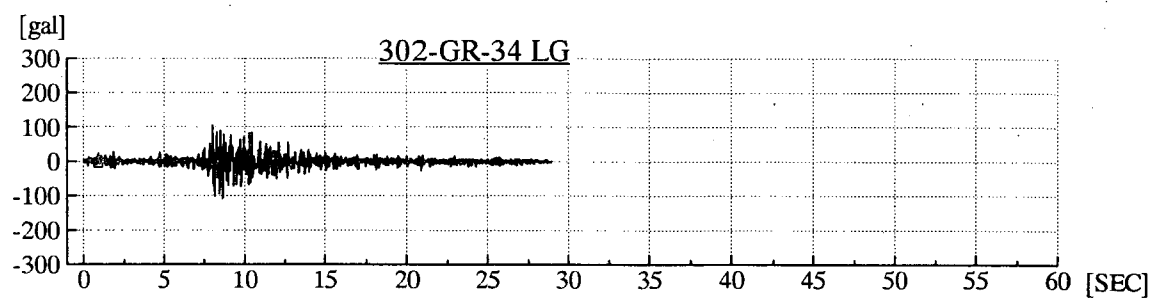
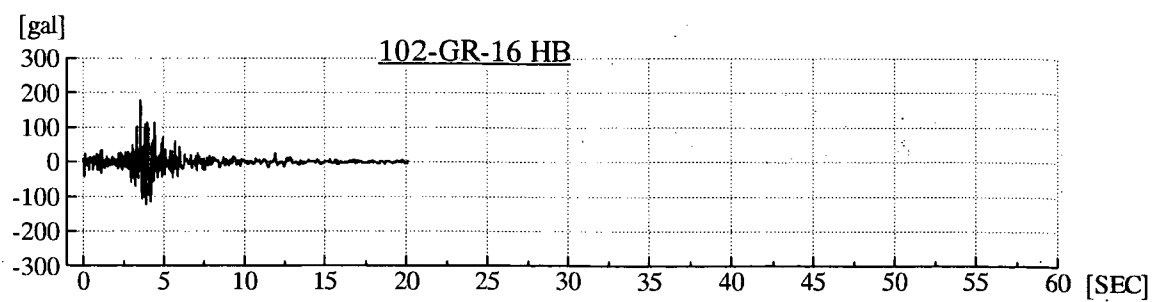
謝 辞

本研究で使用了強震記録は、多くの機関によって実施されている強震観測により得られたものである。
御関係の方々の御尽力に対して心より御礼申し上げる次第である。

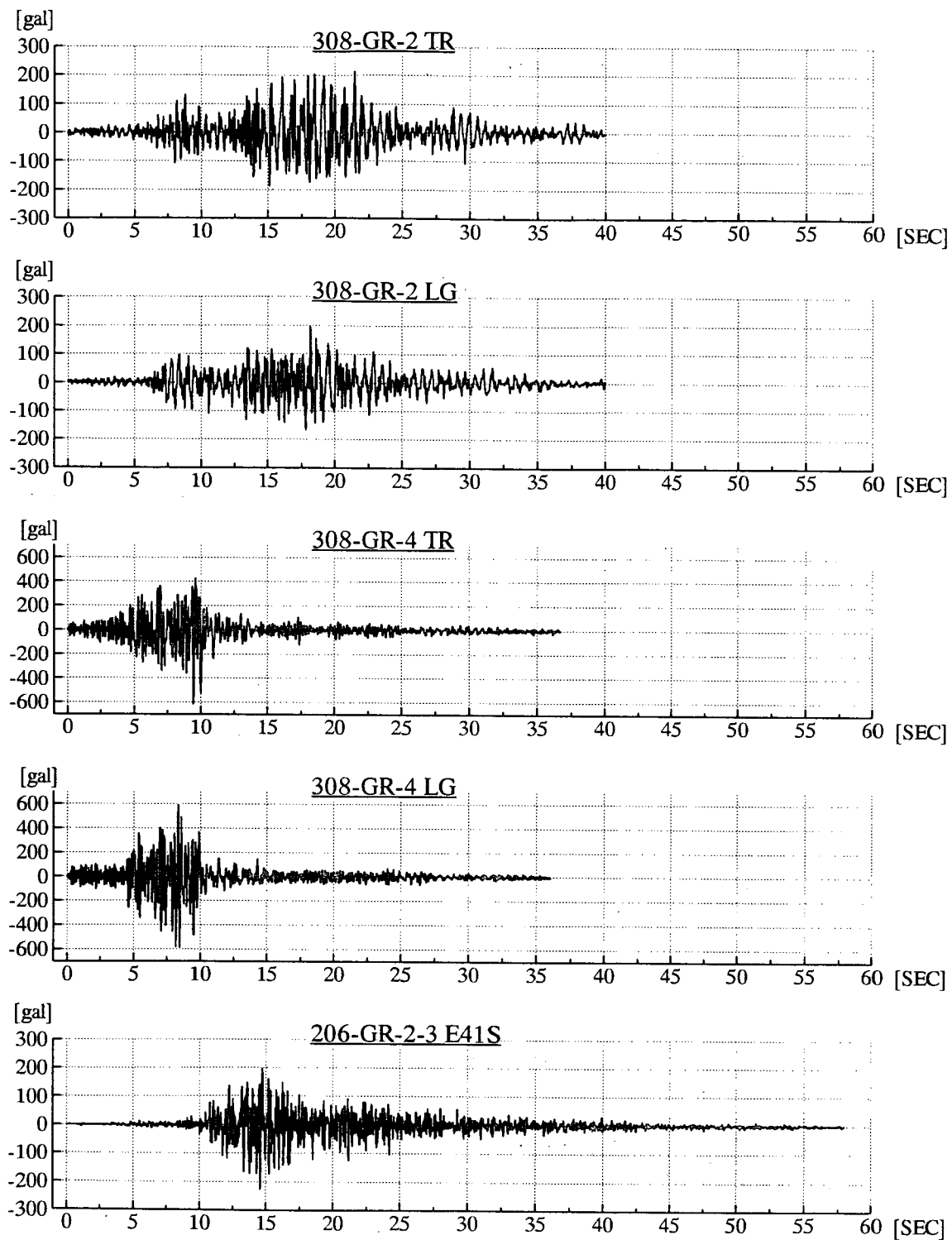
参考文献

- 1) Miranda, E. and Bertero, V. V. : "Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake-Resistant Design", Earthquake Spectra, Vol.10, No.2, 1994
- 2) 伊藤彰浩、家村浩和、五十嵐晃：必要強度スペクトルに基づく弾塑性耐震設計法について，土木学会第51回年次学術講演会，I-B257，平成8年9月
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，平成8年12月
- 4) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，平成9年3月
- 5) Y.Nakamura : Waveform and its analysis of the 1995 Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake, JR Earthquake Information No.23c, Railway Technical Research Institute, March, 1995.
- 6) 梅村 魁：鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法・続（中層編）技報堂出版，昭和57年
- 7) 土岐憲三：構造物の耐震設計 新体系土木工学 11, 技報堂出版，昭和56年4月
- 8) 建設省土木研究所：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，昭和60年9月
- 9) 建設省土木研究所：動的解析用入力地震動の設定法，土木研究所資料，第2120号，昭和59年3月

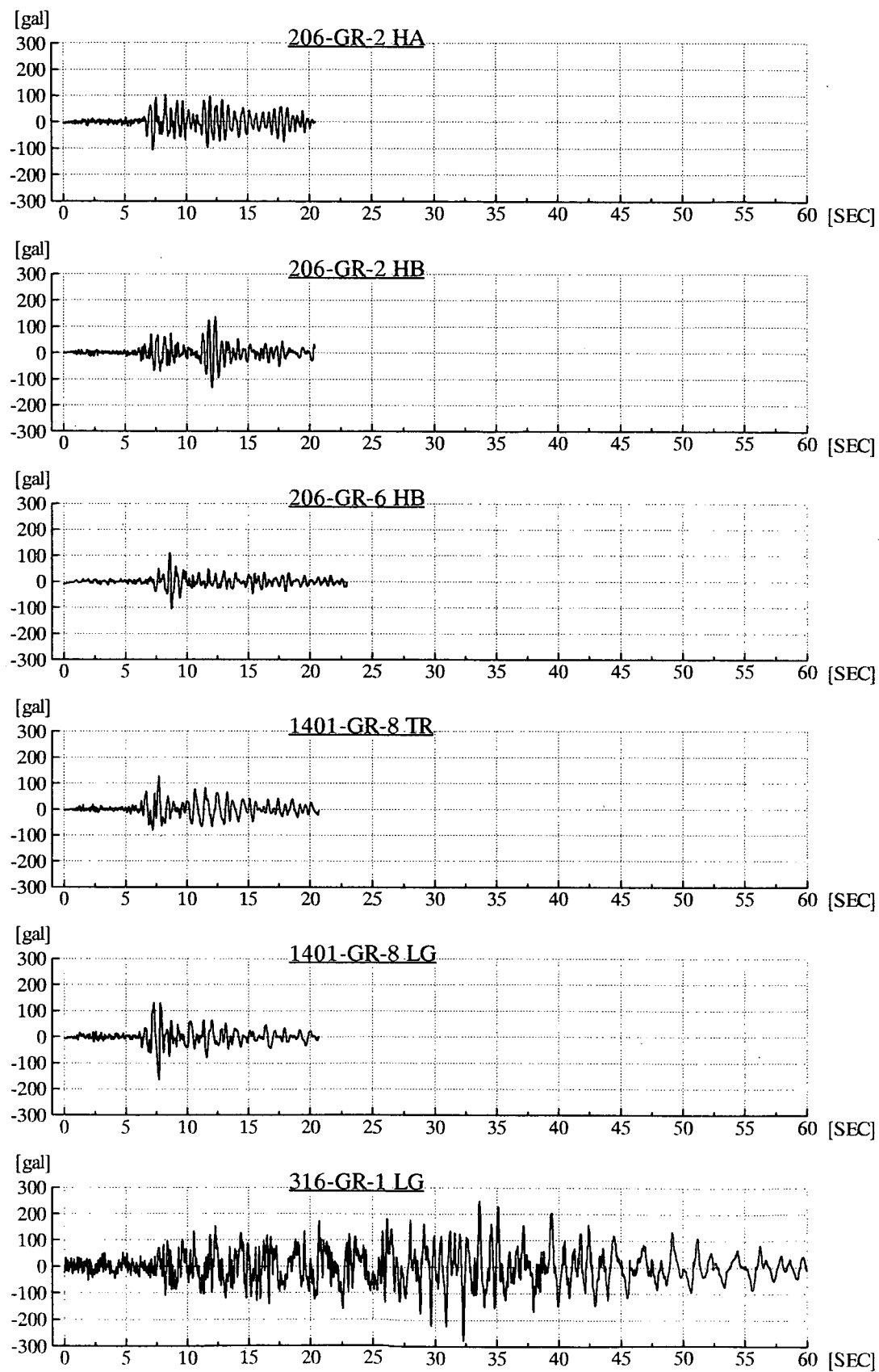
付属資料 1 加速度波形の一覧



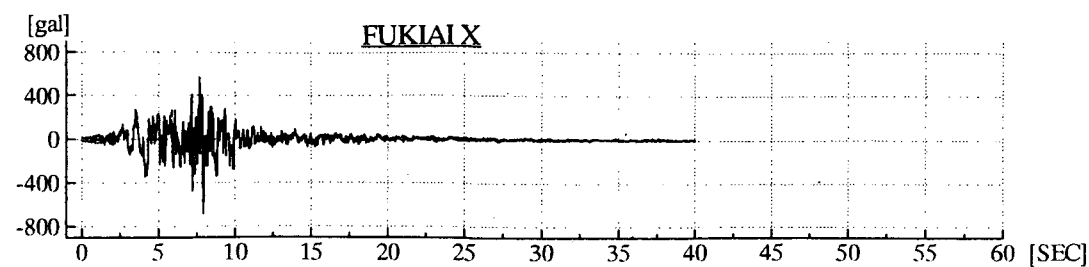
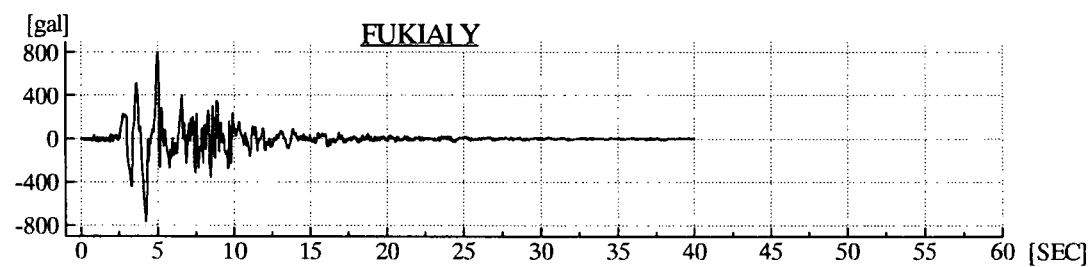
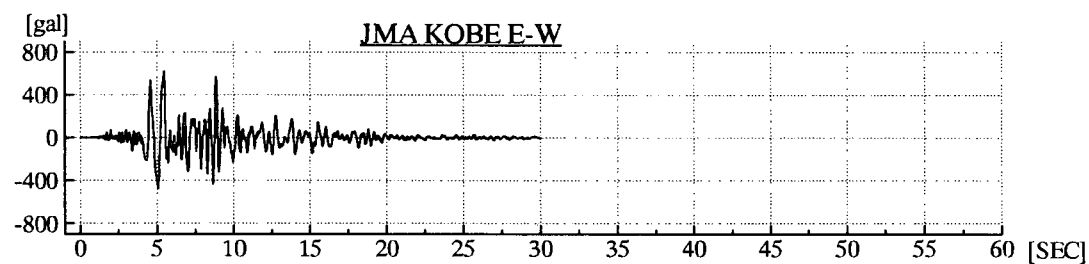
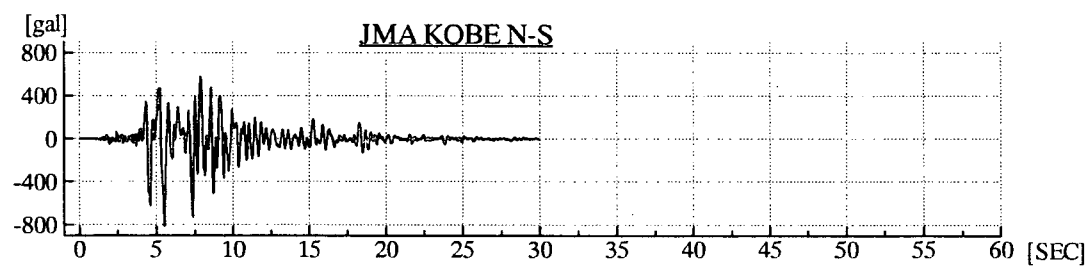
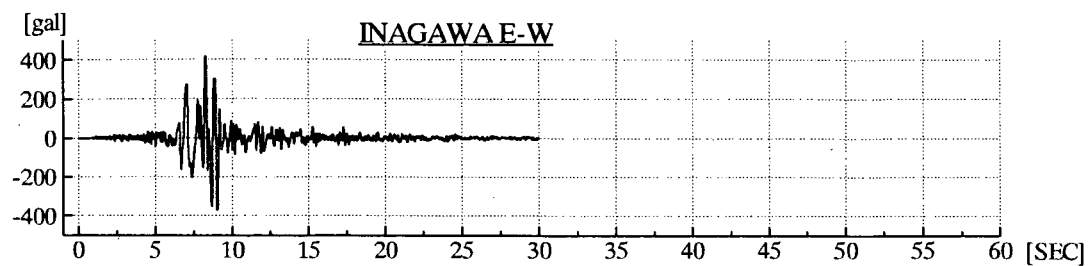
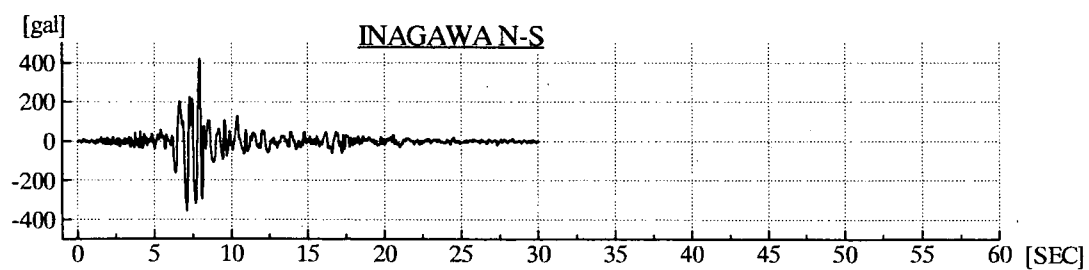
付図-1.1 I種地盤の加速度波形



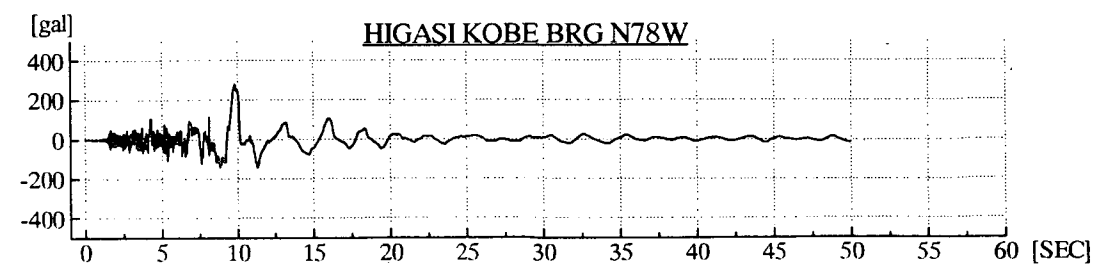
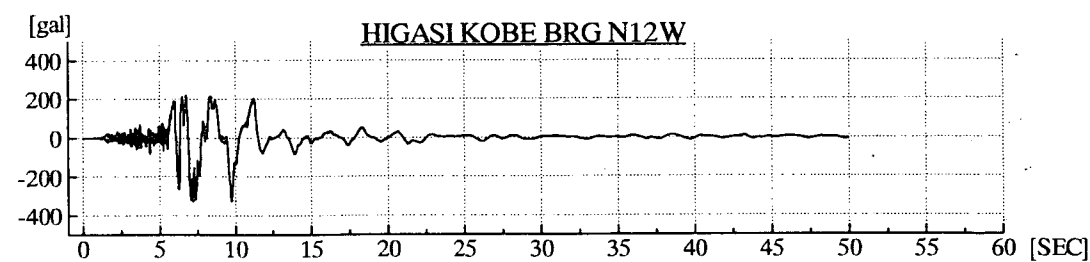
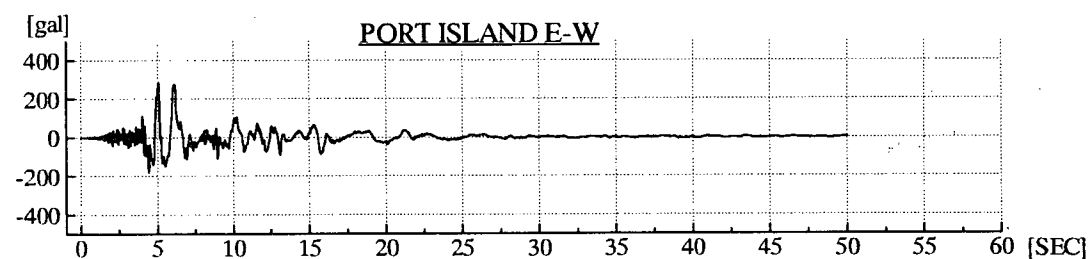
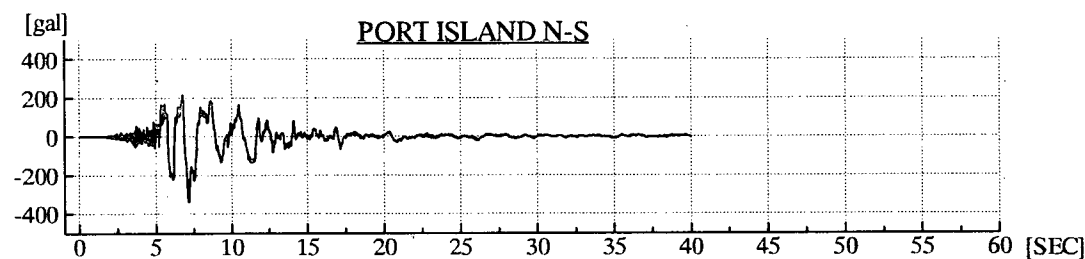
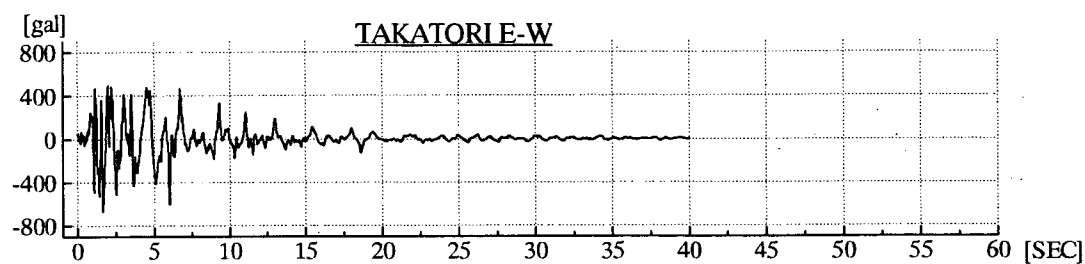
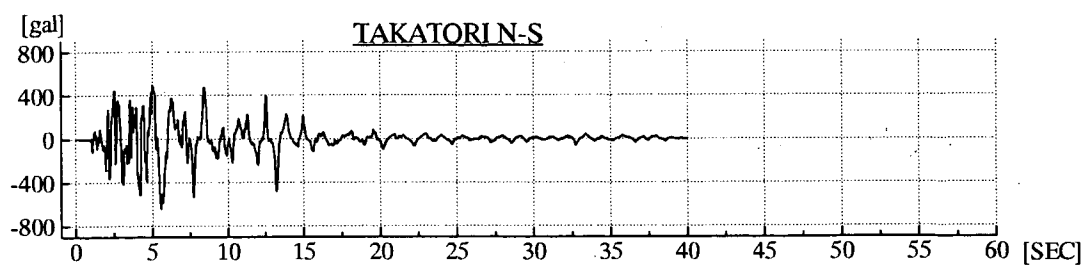
付図-1.2 II種地盤の加速度波形



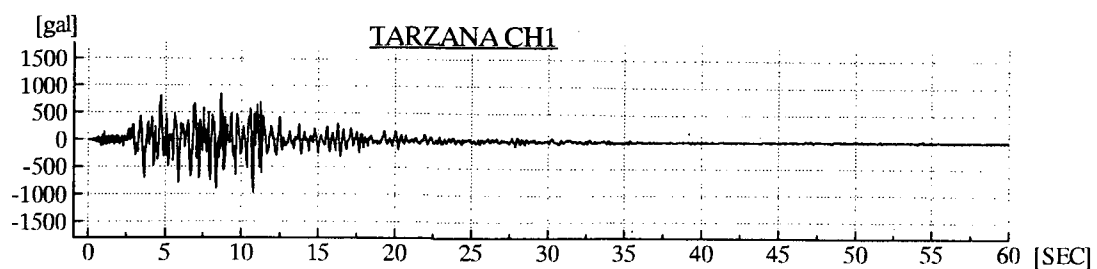
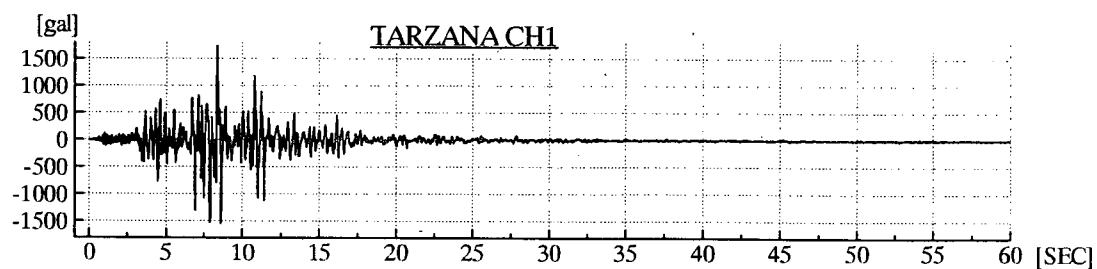
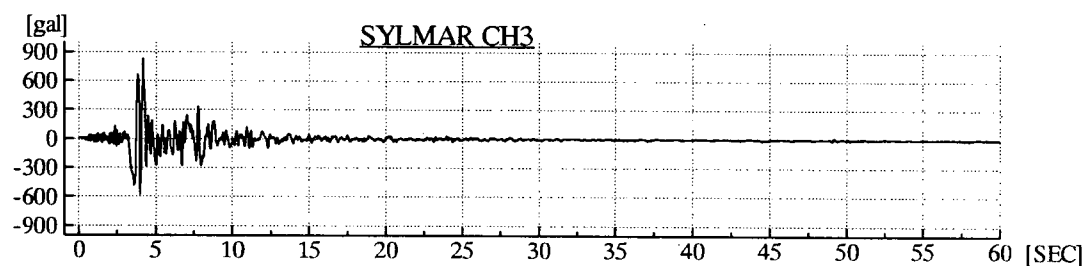
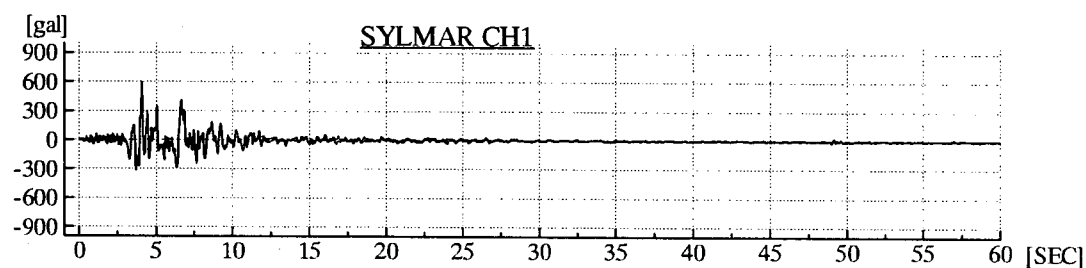
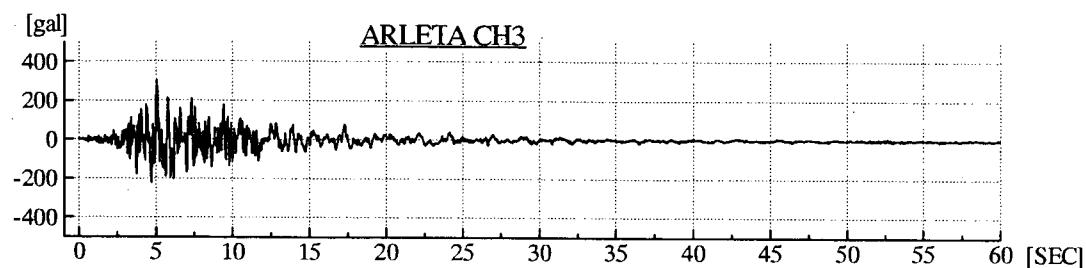
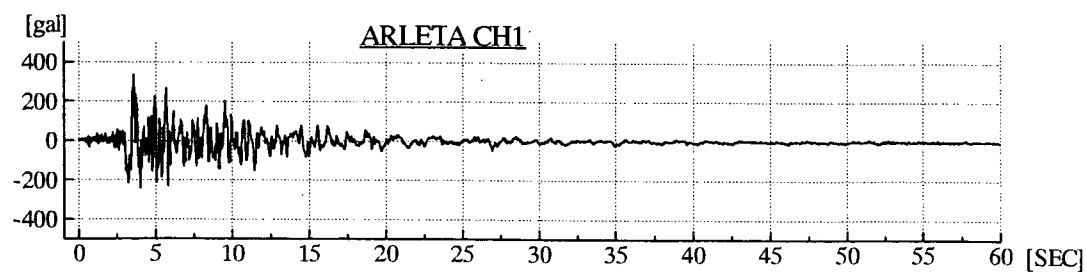
付図-1.3 Ⅲ種地盤の加速度波形



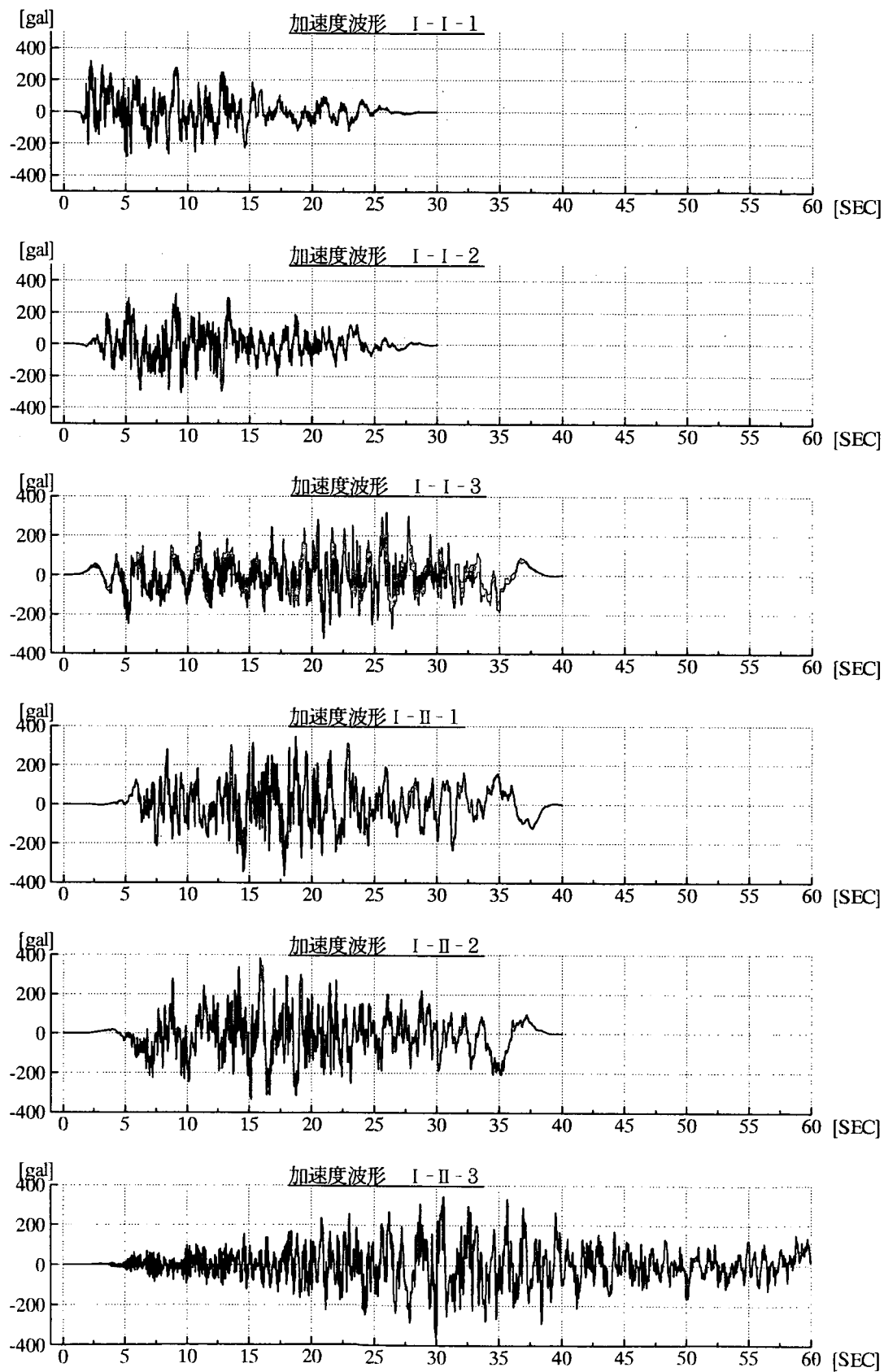
付図-1.4(1) 兵庫県南部地震による加速度波形



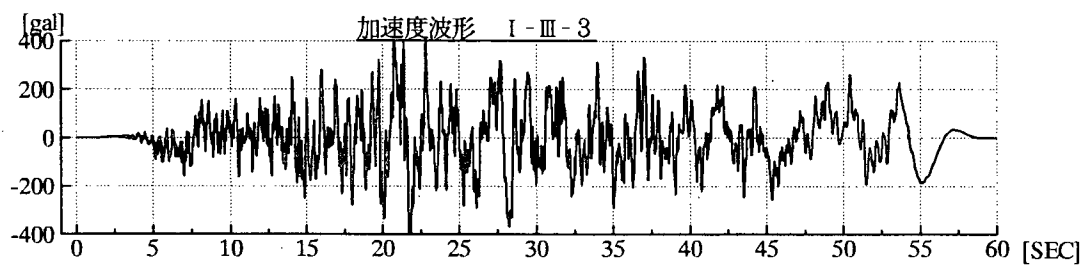
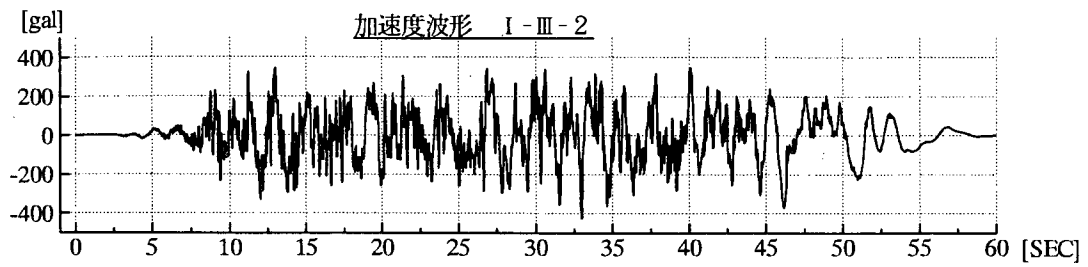
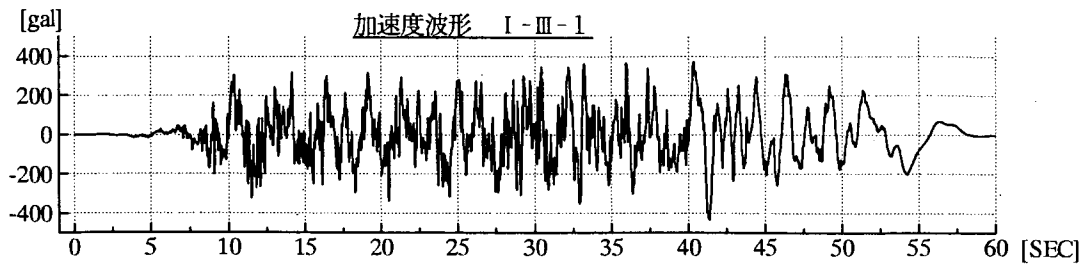
付図-1.4(2) 兵庫県南部地震による加速度波形



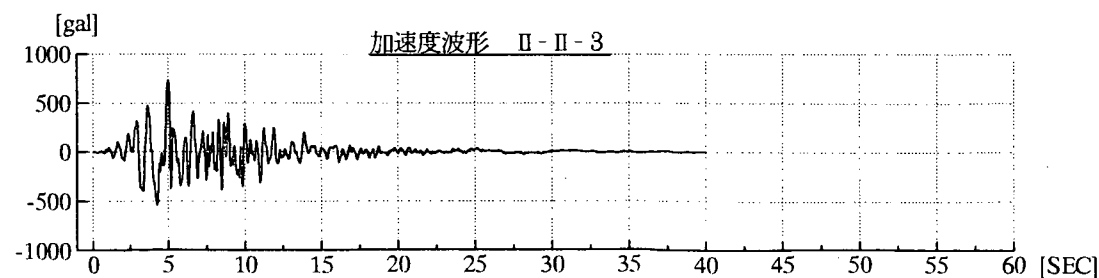
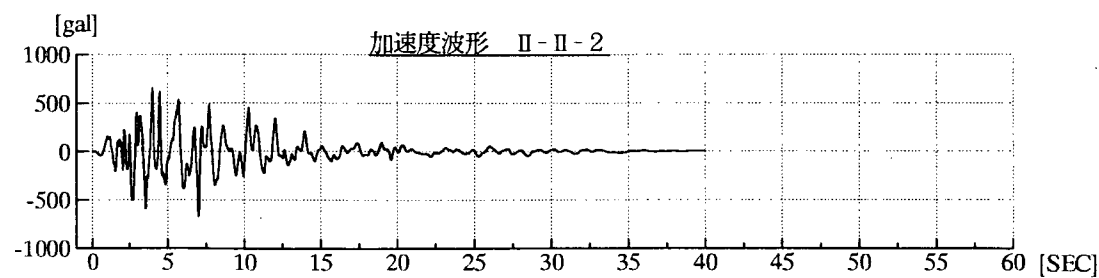
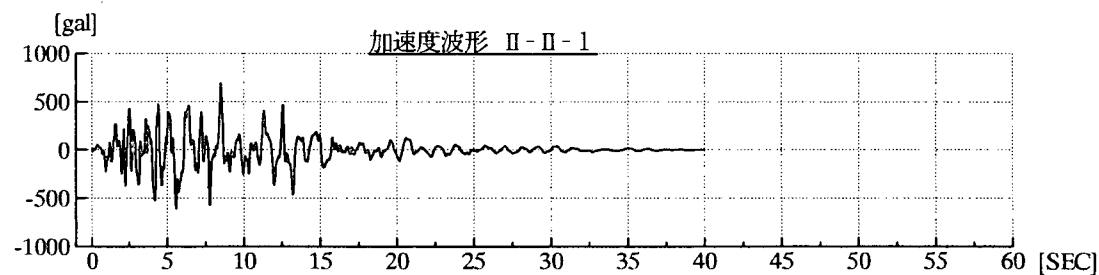
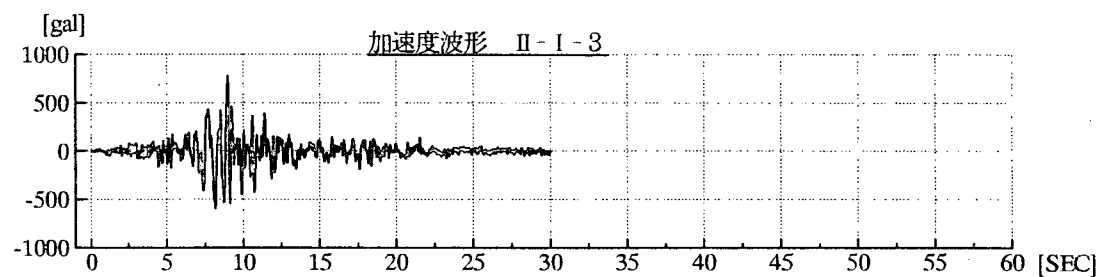
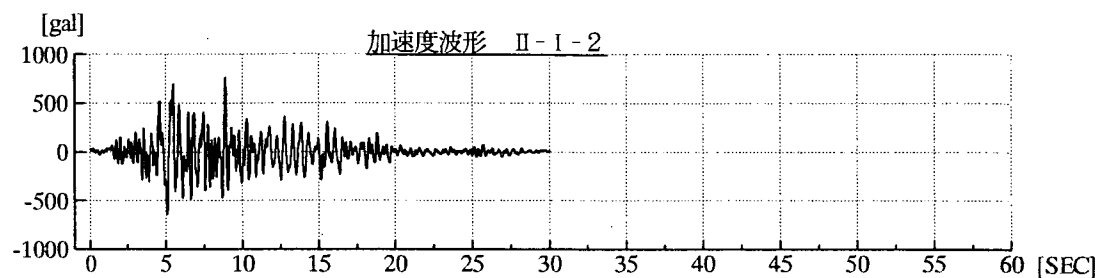
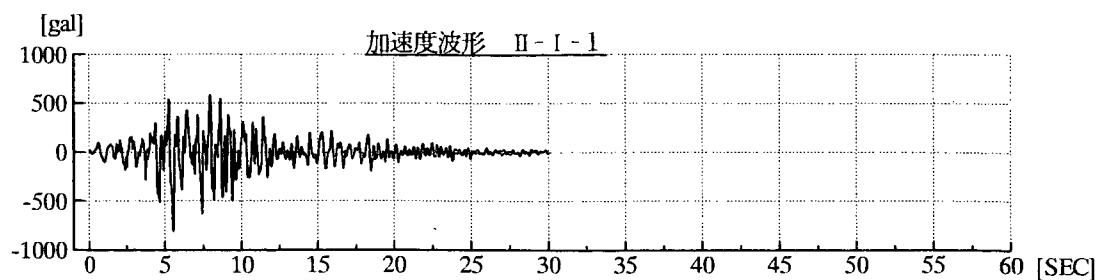
付図-1.5 ノースリッジ地震による加速度波形



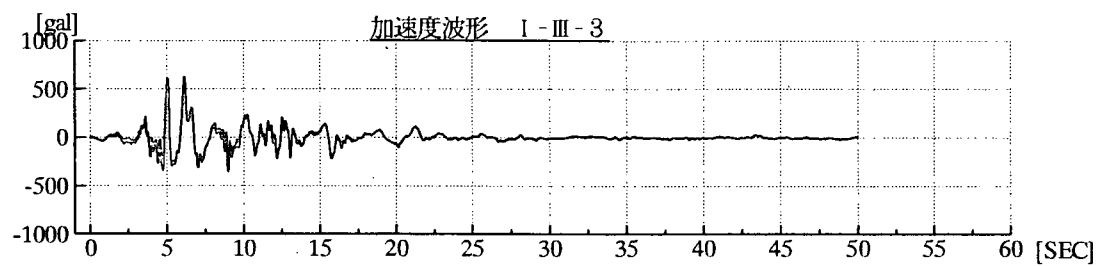
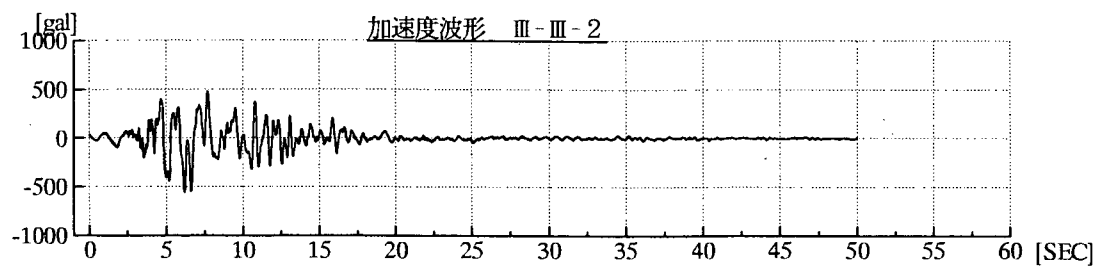
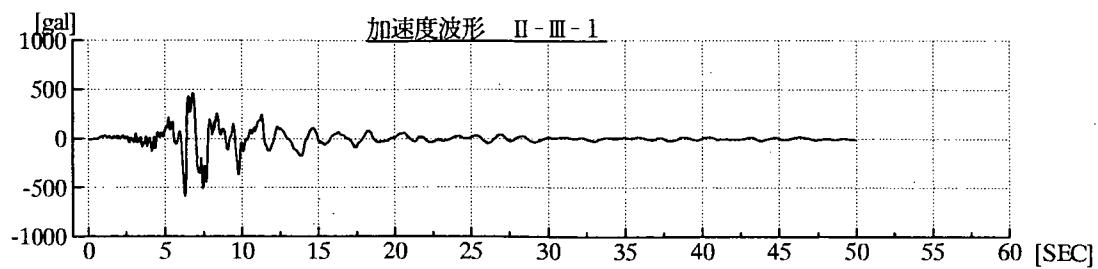
付図-1.6(1) タイプ I 地震動の標準加速度波形



付図-1.6(2) タイプⅠ地震動の標準加速度波形

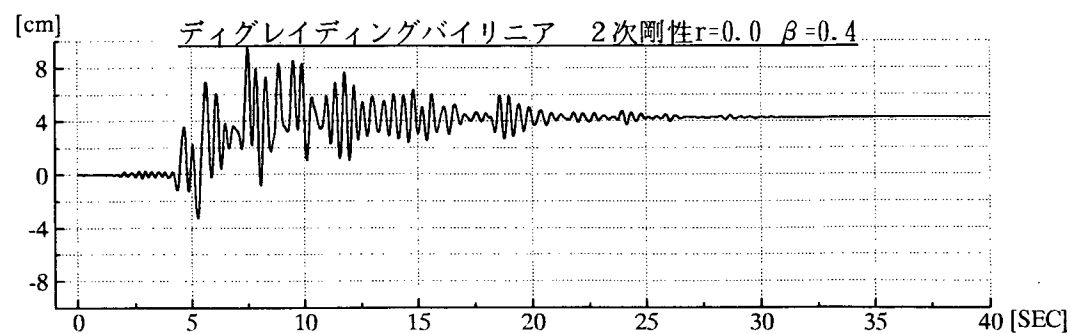
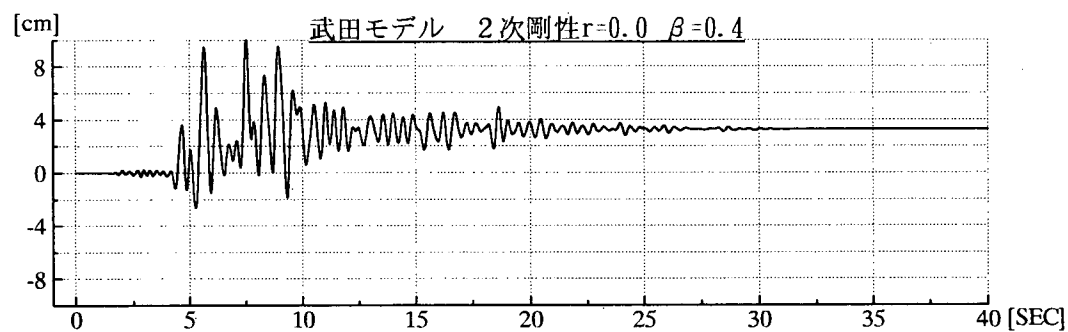
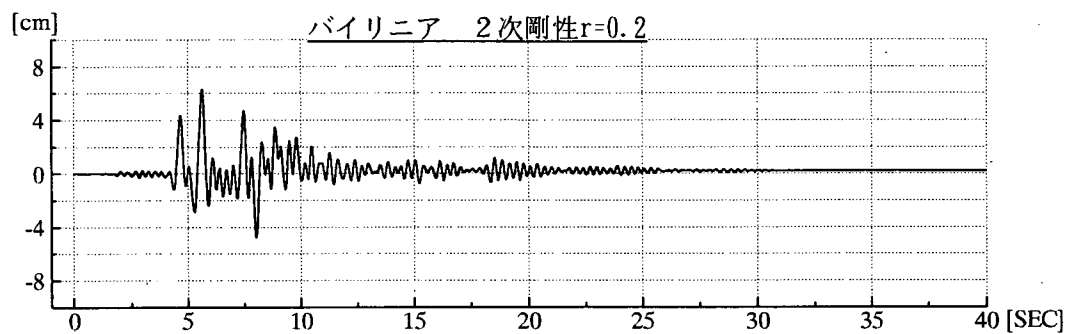
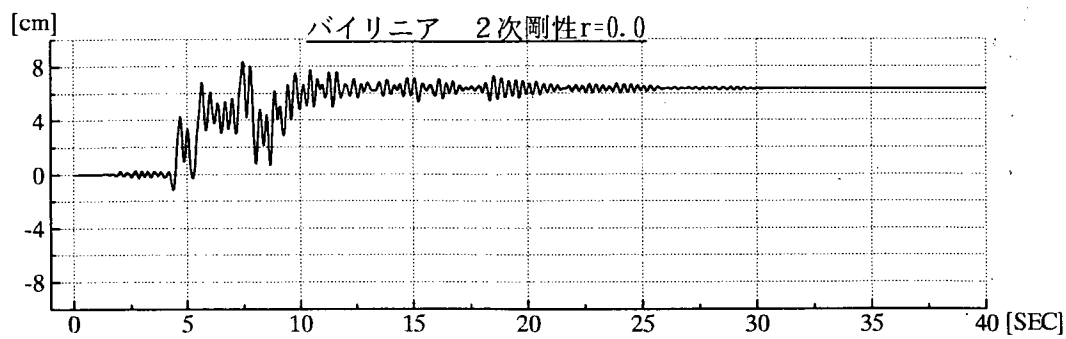


付図-1.7(1) タイプII地震動の標準加速度波形

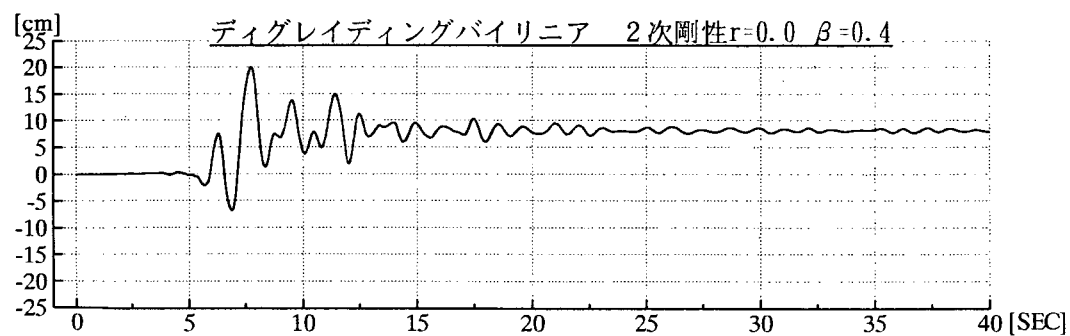
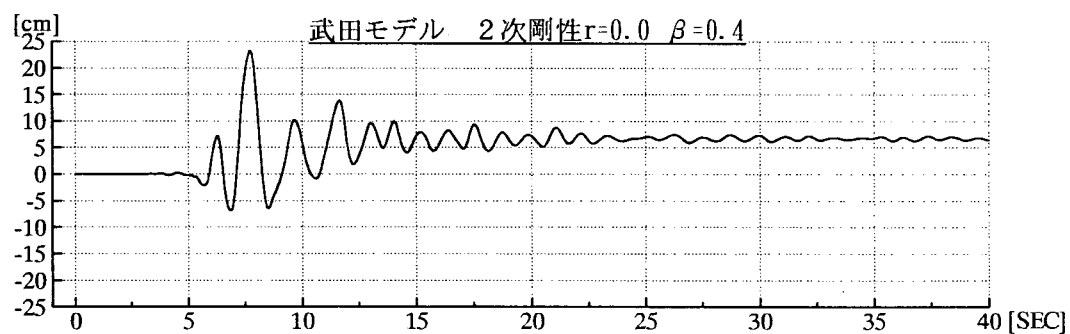
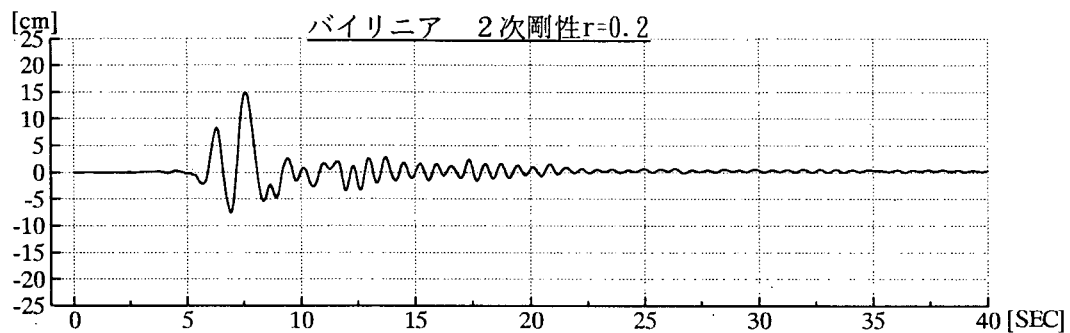
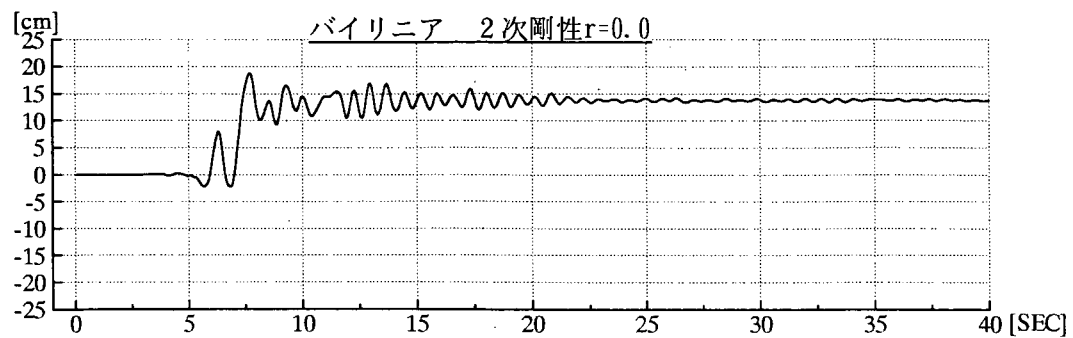


付図-1.7(2) タイプⅡ地震動の標準加速度波形

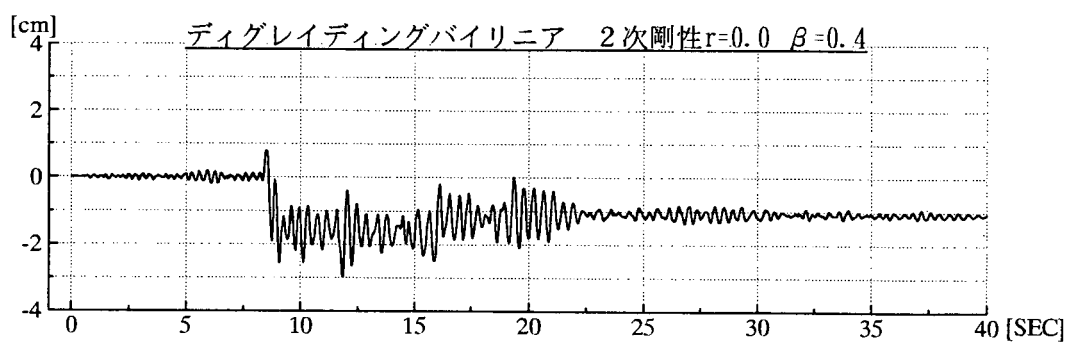
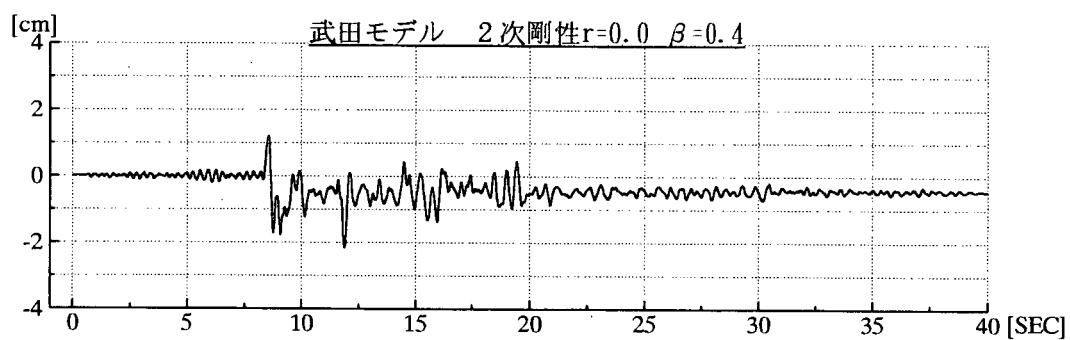
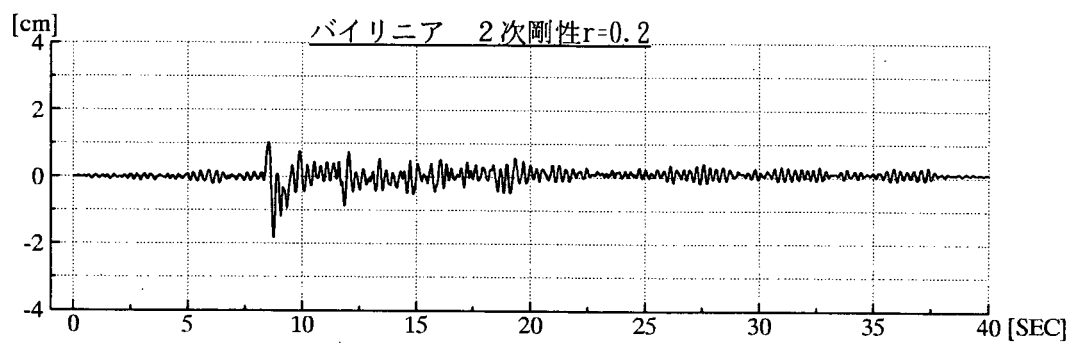
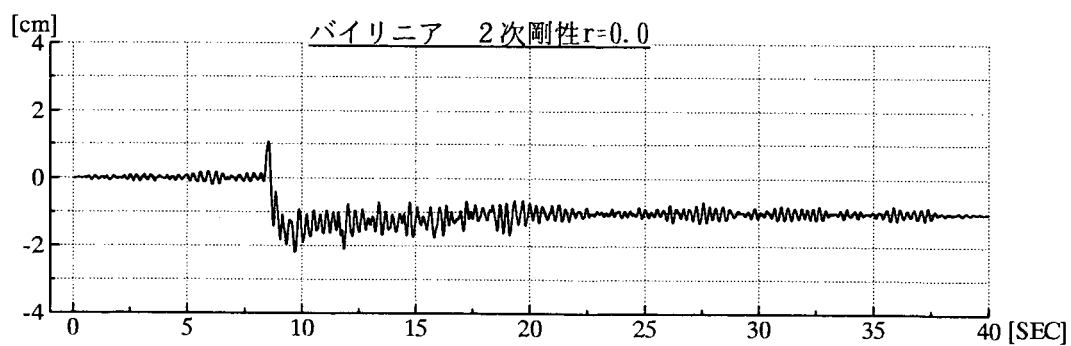
付属資料 2 時刻歴応答変位波形



付図-2.1 神戸海洋気象台記録NS成分による応答変位波形 ($T=0.3\text{sec}$ $\mu=6$)



付図-2.2 ポートアイランド記録NS成分による応答変位波形 ($T=0.7\text{sec}$ $\mu=6$)



付図-2.3 開北橋記録TR成分による応答変位波形 ($T=0.3s$ $\mu=6$)