

3次元免震における適切な上下免震特性の検討

(研究報告)

2000年5月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

3次元免震における適切な上下免震特性の検討 (研究報告書)

北村 誠司* 森下 正樹*

要 旨

共通床（コモンデッキ）に原子炉容器、一次系機器を搭載し、これを大型の皿ばねを用いた免震要素で上下方向に支持する3次元免震構造概念（コモンデッキ方式）を対象に、適切な上下免震特性に関する検討を行った。

検討用の入力地震動としては、4種類の自然地震波と3種類の人工地震波を地震入力を用いた。地盤条件や免震建屋の特性を考慮し、水平免震建屋の地震応答解析を行い、上下免震要素の支持レベルにおける床応答と加速度時刻歴を整理した。

上記で得た免震支持レベルでの応答加速度を入力として、1自由度上下免震構造モデルを用いて地震応答解析を行った。解析は、線形解析、非線形解析（復元力特性が弾性である皿ばねと弾完全塑性の減衰要素を想定）の2種類について実施した。線形解析で検討する範囲は、免震振動数0.8～2.5Hz、減衰比2～60%を組み合わせた領域とした。非線形解析では、皿ばねの剛性のみで決まる免震振動数0.5～5Hz、剛性比1～20、及び降伏震度0.01～0.2の範囲で検討した。上下免震システムの免震特性として、最大相対変位、最大加速度、及び5～12Hz間における床応答加速度の最大値の3つの応答量に対する判断基準を設定し、これらを満足するパラメタの組み合わせ領域について調べた。

判断基準として最大相対変位50mm、規格化加速度0.75、規格化床応答0.33を用いた場合、線形解析の結果から、免震振動数は0.8、1.0、1.2Hz、減衰比はそれぞれ30、20、15%以上の組み合わせが適切であることがわかった。また非線形解析の結果、免震振動数0.8～1.0Hzの皿ばねと、剛性比4～6、降伏震度0.05～0.06の減衰要素を組み合わせて用いることで、適切な免震特性が得られることがわかった。非線形解析の結果は、等価減衰比が20%以上の減衰要素を用いることで、系としての卓越振動数が1.0～2.0Hzの範囲において適切な免震効果が得られることに相当する。

*大洗工学センター システム技術開発部 構造・材料技術開発グループ

Study on Optimal Vertical Isolation Characteristics

Seiji KITAMURA*

Masaki MORISHITA*

ABSTRACT

Optimal vertical isolation characteristics were studied for the structural concept of vertical seismic isolation system, which uses a common deck and a set of large coned dish springs.

Four kinds of earthquake wave and three kinds of artificial seismic wave were used. The earthquake response analysis of a base isolated building was carried out considering some ground conditions and some vertical vibration characteristics of the building isolator. Floor response and acceleration time history at the vertical isolation level were arranged.

Using the acceleration time history as a seismic input, the earthquake response analysis of the vertical isolation system according to single degree of freedom model was carried out. Linear analysis and non-linear analysis were made. In the linear analysis, vertical isolation frequency was examined within 0.8 to 2.5 Hz, and damping ratio was examined within 2 to 60%. In the non-linear analysis, it was examined within vertical isolation frequency 0.5 to 5Hz, which depended only on the rigidity of the coned disk spring, rigidity ratio of the damping devise 1 to 20 and yield seismic intensity of the damping devise 0.01 to 0.2. As the optimal vertical isolation characteristics of the system, the criterion of largest relative displacement, maximum acceleration and maximum value of the floor response acceleration between 5 to 12Hz was set, the combination region of the appropriate parameter were examined.

In case of largest relative displacement 50 mm, acceleration response magnification of 0.75, floor response magnification of 0.33 were used as a criterion, from the result of the linear analysis, vertical frequency was set at 0.8 to 1.2 Hz, and by combining the damping ratio over 20 %, it was proven that appropriate vertical isolation characteristics were obtained. The result of the non-linear analysis showed that the combination of the coned disk spring of vertical frequency 0.8 to 1.0 Hz and the damping element of rigidity ratio 4 to 6, yield seismic intensity 0.05 to 0.06 was optimum.

*Structure and material research section, O-arai Engineering Center

目 次

1. はじめに	1
2. 水平免震建屋の上下動地震応答解析	2
2.1 上下地震動データセット	2
2.2 水平免震建屋の上下動応答解析	4
2.2.1 解析条件	4
2.2.2 固有値解析結果	5
2.2.3 地震応答解析結果	8
3. 上下免震特性に関するパラメタサーバイ	45
3.1 線形解析	45
3.1.1 解析条件	45
3.1.2 線形解析の結果	45
3.1.3 線形解析に基づく適切な免震特性の検討	47
3.2 鉛ダンバの使用を想定した非線形解析	53
3.2.1 非線形解析の方法と条件	53
3.2.2 非線形解析の結果	55
3.2.3 非線形解析に基づく適切な免震特性の検討	57
3.3 上下免震特性に関するパラメタサーバイのまとめ	60
4. まとめ	145
参考文献	146
APPENDIX A 上下動スペクトルの作成方法	147
APPENDIX B 免震建屋の上下動簡易解析	150
APPENDIX C 入力地震波の加速度・速度・変位時刻歴	156
APPENDIX D 二直線モデルによる等価剛性と等価減衰	166

表 リスト

Table 2.1	評価に用いた上下地震動データセット	11
Table 2.2	解析モデルの諸元	12
Table 2.3	解析モデルの材料物性値	13
Table 2.4	地盤ばねの定数	13
Table 2.5	積層ゴムの剛性	13
Table 2.6	解析ケース一覧	14
Table 2.7	地盤-免震層-建屋系の固有値解析結果	15
Table 2.8	簡易法による固有値解析結果	15
Table 2.9	建屋最大加速度と床応答加速度	16
Table 3.1	入力用上下地震動の最大値一覧	61
Table 3.2	入力地震動の倍率と最大値	62
Table 3.3	線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域	63
Table 3.4	線形解析に基づく適正領域	66
Table 3.5	線形解析における不適正要因の分析	67
Table 3.6	非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域	69
Table 3.7	非線形解析に基づく免震特性の適正領域	87

図 リスト

Fig. 2.1	入力地震動の応答スペクトルと加速度時刻歴	17
Fig. 2.2	人工地震波の目標応答スペクトル	26
Fig. 2.3	全地震動の加速度応答スペクトル	27
Fig. 2.4	全地震動の規格化加速度応答スペクトル	28
Fig. 2.5	振動モードに占める地盤ばね、免震層、建屋の寄与	29
Fig. 2.6	積層ゴムと地盤条件による固有振動数の変化（簡易解析）	30
Fig. 2.7	振動モードに占める地盤ばね、免震層、建屋の寄与 (1次モード、簡易解析)	31
Fig. 2.8	簡易解析による2次モード	32
Fig. 2.9	デッキレベルの床応答スペクトル	33
Fig. 2.10	原子炉建屋デッキ据付けレベルの最大加速度の比較	42
Fig. 2.11	原子炉建屋デッキ据付けレベルの床応答ピーク(10Hz)の比較	43
Fig. 2.12	原子炉建屋デッキ据付けレベルの床応答ピーク(1.5Hz)の比較	44
Fig. 3.1	免震振動数と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$	90
Fig. 3.2	減衰と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$	97
Fig. 3.3.1	入力条件による相対変位の比較	104
Fig. 3.3.2	入力条件による規格化応答加速度の比較	105
Fig. 3.3.3	入力条件による規格化床応答の比較	106
Fig. 3.4	不適正となる要因の概略図	107
Fig. 3.5	塑性率と等価振動数及び等価減衰比の関係	108
Fig. 3.6	免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz} \alpha=5$	109
Fig. 3.7	免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz} \beta=0.05$	123
Fig. 3.8	非線形解析の適正領域における等価減衰比と卓越振動数	137
Fig. 3.9	適正領域に対応する減衰要素パラメタ	139

1. はじめに

高速炉プラントにおいては、設計条件としての地震荷重の大小が原子炉構造等の主要機器の設計成立性を左右する場合が多い。従って、免震構造の適用によって機器への地震入力を低減することができれば、機器の構造設計における成立範囲が拡大されるばかりでなく、プラントの安全性向上と経済性向上の両面で大きな効果が期待できる。

水平動に対しては、原子炉建物のレベルで免震する方式の研究が進み、実用化できる段階まで到達している。次の段階として、上下動を含めた3次元免震構造の開発が期待されている。3次元免震の方法としては、建物全体を3次元免震する方法、建物の水平免震を前提として機器を上下方向に免震する方法の2通りが考えられる。基本的にロッキングを回避することができ、振動特性が簡明になることから、後者の方が実現性が高いと考えられる^[1-1]。そこで、共通床(コモンデッキ)に原子炉容器、一次系機器を搭載し、これを大型の皿ばねを用いた免震要素で上下方向に支持する構造概念(コモンデッキ方式)^[1-2]を創出し、概念の成立性に関する検討を進めてきた。本検討では、コモンデッキ方式の機器上下免震構造を対象に、適切な免震効果の設定に関する検討を行う。

機器上下免震構造の振動特性を設定する上で、対象とする系への入力地震動特性の想定が非常に重要なポイントのひとつとなる。本検討では、4種類の自然地震波と3種類の人工地震波を地震入力として用い、地盤条件(せん断波速度)や免震建物の特性(上下方向免震振動数)と関連付けたうえで、免震建屋の地震応答解析を行い、免震支持レベルでの床応答と加速度時刻歴を整理する(2章)。

上記で得た応答加速度を入力として、上下免震構造の1自由度モデルによる免震構造の地震応答解析を、線形解析、非線形解析の2種類について実施する。最大相対変位、最大加速度、及び床応答の3つの応答量から、上下免震システムの免震特性として適切なパラメタの組み合わせについて明らかにする。(3章)

2. 水平免震建屋の上下動地震応答解析

機器上下免震構造の振動特性を設定する上で、対象とする系への入力地震動特性の想定が非常に重要なポイントのひとつとなる。本検討では、4種類の自然地震波と3種類の人工地震波を地震入力として用い、地盤条件(せん断波速度)や免震建屋の特性(積層ゴムの軸剛性)と関連付けたうえで、免震建屋の地震応答解析を行い、免震支持レベルでの床応答と加速度時刻歴を整理する。

2.1. 上下地震動データセット

解析の入力とする上下地震動として、Table 2.1 に示す実地震記録4波、人工地震波5波の計9波を選定し、これらのデータセットを整備した。なお、人工地震波はすべて S2 相当とした。各地震動の減衰 5% の応答スペクトルと加速度時刻歴を Fig. 2. 1 (1) ~ (9) に示す。

各地震動の特徴は次のとおりである。

【実地震記録】

(1) El Centro 地震

出典はカリフォルニア工科大学 Report No.76-02 である。周期 0.1 s にスペクトルのピークがある。最大加速度は約 3.2 m/s, 繼続時間は 53.76 s であるが、主要動は最初の 20 s 程度である。

(2) La Union 地震(メキシコ)

長周期成分が卓越した地震の代表例として選定した。データは震災予防協会より入手したもので、原番号と名称は、それぞれ「f12」、「UNIO」である。スペクトルはブロードで明確なピークはなく、逆に、相対的には周期 1 s を超える領域も有意である。最大加速度は約 1.2 m/s と、比較的小さい。

(3) 神戸地震

神戸地震については、神戸大学の記録を採用した。計測波は速度の時刻歴として得られたものである。周期約 0.15 s にスペクトルのピークがあり、かつ周期約 1 s の近傍にも卓越領域が見られる。実質的な継続時間は数秒と、非常に短い点が特徴的である。最大加速度は 4.5 m/s² で、使用した地震波の中で最大である。

(4) 十勝沖地震

これも、長周期成分が卓越した地震の代表例として選定した。スペクトルのピークは周期約 0.26 s あたりにあるがそれほど大きくはなく、周期 1 s を超える領域まで卓越域が広がっている。最大加速度は約 1.1 m/s² で、解析に使用した地震波の中では最も小さい。

【人工地震波】

(5) 人工地震波 m

もんじゅの設計用 S1 地震(水平動)をもとに、長周期成分を人為的に卓越させた上でスペクトル比と中心周期比を用いた補正によって上下動の目標応答スペクトルを作成した。S2 地震相当とするために全体を 1.5 倍し、人工地震波を作成した。目標応答スペクトルの補正方法は Appendix A に示しておく。

(6) 人工地震波 x

長周期成分の大きい S2 地震波として設定した。

(7) 人工地震波 y2

M = 7.0 の直下型地震に対応する目標応答スペクトルを下記の3種類の地盤条件 ($V_s=2000, 1000$, 及び 700 m/sec) に対して設定し、これに基づいて人工地震波を作成した。

y2-0020:	$V_s = 2000 \text{ m/s}$,	$V_p = 3970 \text{ m/s}$
y2-0010:	$V_s = 1000 \text{ m/s}$,	$V_p = 2450 \text{ m/s}$
y2-0007:	$V_s = 700 \text{ m/s}$,	$V_p = 1790 \text{ m/s}$

これらの人工地震の目標応答スペクトル（減衰 5%）を Fig. 2. 2 に示す。人工地震波 y2 シリーズは周期 1 秒を超えた領域で速度一定であり、免震にとって厳しい特性の波であることがわかる。

解析に使用した全地震動の 5% 減衰の加速度応答スペクトルを Fig. 2. 3 に示す。Fig. 2. 4 は、これらを周期 0.033 秒における応答加速度（Z.P.A., Zero Period Acceleration に該当）で規格化したものである。これらの図からは、十勝沖地震が絶対値としては小さいが、短周期領域と長周期領域における相対的な応答加速度の点で、免震構造にとって厳しい波であることがわかる。

2.2. 水平免震建屋の上下動応答解析

積層ゴムで水平免震された原子炉建屋を対象として、地盤条件と積層ゴムの軸剛性をパラメタとして上下地震動入力に対する地盤－免震層－建屋相互作用解析を行い、機器免震構造が据付けられる位置における建屋の加速度応答時刻歴を求める。この加速度時刻歴を用いて、床応答スペクトルを算出する。

2.2.1 解析条件

(1) 地盤条件

地盤条件としては、超硬質岩盤立地、岩盤立地として最も柔らかい条件、並びにその中間的条件を設定した。具体的には、地盤のせん断波速度として、 $V_s = 2000$, 1000, 及び 700 m/s の 3 種類を想定した。

(2) 水平免震要素

水平免震要素として用いられる積層ゴムの軸剛性として、免震層による上下動応答の増幅を極力抑制する観点から十分に硬い条件と、比較的柔らかい条件の 2 種類を想定した。具体的には、積層ゴムの軸剛性と上部構造の質量から決まる 1 自由度系の振動数として、20 Hz と 10 Hz を想定した。

(3) 原子炉建屋

原子炉建屋の解析モデルは過去の大型高速炉設計研究例に基づく免震建屋の応答解析例^[2-1]を参照して定めた。

(4) 解析モデル

解析モデルは、各階の質量と建屋壁の軸剛性で構成される集中質量系モデルである。Table 2.2 に解析モデルの諸元を、Table 2.3 に原子炉建屋(コンクリート)と鋼製格納容器の材料定数を示す。Table 2.4 及び Table 2.5 には、それぞれ地盤ばね定数と積層ゴム定数を示す。なお、解析モデルの詳細については文献[2-1]に詳述してあるので、ここでは省略する。

(5) 解析ケース

解析ケースの一覧 Table 2.6 に示す。解析ケースの総数は42である。この中で、人工地震波 y2 シリーズは地震波自体が地盤条件に対応しているため、積層ゴム軸剛性のみを変えることとした。なお、後述のように実際の地盤－免震層－建屋連成系の固有振動数は連成の影響を強く受けて変化している点に注意を要する。

2.2.2 固有値解析結果

地盤－免震層－建屋連成系の固有値解析結果を Table 2.7 に示す。表には、参考のために地盤との連成を無視した場合、並びに積層ゴム軸剛性が 15 Hz の場合も示してある。また、原子炉建屋自体の固有振動数(基礎固定、免震なし)は約 15 Hz である。

いずれのケースも、最低次の固有振動数は地盤条件に強く依存し、約 4 Hz から約 10 Hz まで変化する。積層ゴムの軸剛性の影響は地盤条件の影響に比べてやや小さい。また、基礎固定の場合から明らかに、最低次の固有振動数は上部構造の質量と積層ゴムの軸剛性で決まる1自由度系の振動数とは異なっており、この差は積層ゴムの剛性が高いほど顕著である。これは、建屋自体の振動と免震層の連成に起因するものと考えられる。高次のモードは、建屋自体の弾性変形が主体のモードであるため、地盤や積層ゴム剛性の影響はほとんど受けず、各ケースともに約 20 Hz 内外にある。Fig. 2. 5 は各ケースの振動モードにおける、地盤ばねの変形、免震層(積層

ゴム)の変形、および建屋構造自体の弾性変形の寄与分の割合を示したものであるが、軟質地盤の場合($V_s=700 \text{ m/s}$)の場合には、地盤ばねのみが変形して構造自体はほとんど剛体的に振動しており、免震層の変形も小さい。逆に、硬質地盤($V_s=2000 \text{ m/s}$)の場合には免震層と構造の振動(変形)が卓越してくることがわかる。硬質地盤と軸剛性の低い免震層を組合せた場合($V_s=2000 \text{ m/s} + f_v=10 \text{ Hz}$)には、免震層の変形が大部分を占める、という結果になる。

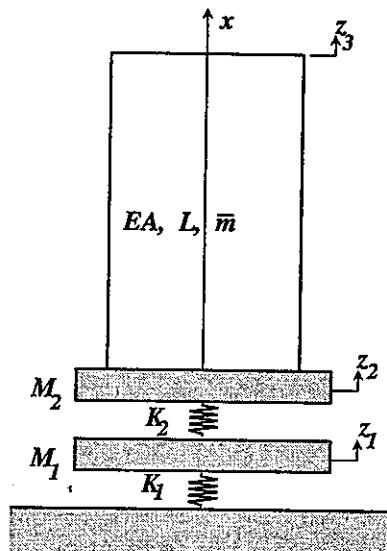
以上のような地盤ー免震層ー建屋系の連成振動挙動を理解するために、3自由度の振動系モデルによる簡易解析を行った。次頁の図のように、地盤ー免震層ー建屋連成系を地盤ばね(K_1)、積層ゴム剛性(K_2)、及び下部基礎版(M_1)、上部基礎版(M_2)、並びに上部構造でモデル化する。上部構造は軸振動する一様な矩体とする。

ここで、記号の意味は、

- EA: 棒の軸剛性
- K_1 : 地盤ばね剛性
- K_2 : 積層ゴム軸剛性
- L : 棒の長さ
- M_1 : 下部基礎版質量
- M_2 : 上部基礎版質量
- \bar{m} : 棒の単位長さ当たり質量
- x : 棒の下端を原点とする座標

z_1, z_2, z_3 : 上下部基礎版及び棒頂部の絶対変位

である。



棒の変位関数として、一端固定、他端自由の真直棒の軸振動に関する理論モードを採用する。

$$z = (z_3 - z_2) \sin \frac{\pi x}{2L} \quad (2.1)$$

系の運動方程式は；

$$\begin{aligned} & \mathbf{M} \ddot{\mathbf{Z}} + \mathbf{K} \mathbf{Z} = \mathbf{0} \\ & \mathbf{Z} = [z_1 \ z_2 \ z_3] \\ & \mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 + \mu_1 M & \mu_2 M \\ 0 & \mu_2 M & \mu_3 M \end{bmatrix} \\ & \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 & 0 \\ -K_2 & K_2 + K & -K \\ 0 & -K & K \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad (2.2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} & M = \bar{m}L \\ & \mu_1 = 0.22676 \\ & \mu_2 = 0.13662 \\ & \mu_3 = 0.5 \\ & K = 1.2337 \frac{EA}{L} \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad (2.3)$$

である。なお、定式化の詳細と簡易モデルの妥当性の検討については Appendix B に示してある。

Table 2. 8 に簡易解析の結果得られた固有振動数の一覧を示す。1次の固有振動数は、各ケースともに詳細解析の結果とよく一致している。一致の程度は地盤が柔らかいほど良く硬質地盤で免震層が固い場合が最も悪いが、これは、後者では(簡易法では一様な棒の振動モードを仮定した)上部構造の振動モードの寄与が前者に比べて卓越してくるためである。

Fig. 2. 7 は1次振動モードにおける地盤ばね、免震層、及び建屋構造の寄与の割合を示したものである。ここでも、硬質地盤においては建屋構造の変形の寄与が顕著

であることがわかる。一方、軟質地盤の場合には地盤ばねの変形が支配的である。免震層の寄与は硬質地盤ほど顕著になるが、免震層の剛性が約 10 Hz 以上であれば建屋の寄与を上回ることはない。通常の水平免震の設計では免震層の剛性は 20 Hz 程度を目安とすることを考えると、水平免震建屋の上下動の応答増幅は免震層での単純な増幅ではなく、むしろ免震層と建屋構造の動的相互作用の結果であるといえる。Fig. 2. 8 は2次の振動モードであるが、地盤ばねと建屋の振動が逆相となっている点が特徴的である。免震相は、硬質地盤の場合には地盤ばねと同位相であるが、軟質地盤の場合には逆相になる。2次モードでは、概して建屋構造自体の振動が支配的である。免震層の寄与の程度は、硬質地盤においては免震層剛性に強く影響を受けるが、軟質地盤においてはほとんど無視できる程度に小さい。

2.2.3 地震応答解析結果

地盤－免震層－原子炉建屋連成系の地震応答解析結果から作成したコモンデッキ据付け位置における床応答スペクトルを Fig. 2. 9 (1)～(9) に示す。各図で、上段は床応答スペクトル、下段は建屋応答の応答スペクトルと入力地震動の応答スペクトルの比をとったもので、地盤－免震層－建屋連成系による応答の増幅を示している。解析に用いた各地震動の結果を概観すると、

(1) El Centro 地震

硬質地盤における1次モード（約 9 ～10 Hz）に顕著な卓越領域があり、免震層が柔らかいほどピークは高い。建屋の2次モードに対応する約 20 Hz にも卓越域がある。こちらは、免震層が固いほどピークが高く、1次モードのピークを上回る。応答の増幅率の点では、全ての条件で2次モードが大きい。

(2) La Union 地震

硬質地盤と柔らかい免震層を組合せた場合に、1次モード（約 9 ～10 Hz）のピークが卓越する。2次モードのピークは1次より高く、全てのケースで顕著である。

(3) 神戸地震

硬質地盤と柔らかい免震層の組合せにおける1次モードの卓越が顕著である。他

の条件では、1次モードにおける増幅は小さい。2次モードは、増幅率は大きいが応答加速度の絶対値は小さい。

(4) 十勝沖地震

他の地震と異なり、軟質地盤条件における1次モード(約 4 Hz 近傍)に卓越領域が現れるが、絶対値は小さい。応答倍率からわかるように、このピークは地盤－免震層－建屋連成系による応答の増幅ではなく、入力地震動自体のスペクトルのピークがほぼそのまま現れているものである。2次モードのピークは小さい。

(5) 人工地震波 m

硬質地盤と柔らかい免震層を組合せた場合に、1次モード(約 9 ~ 10 Hz)のピークが卓越する。2次モードのピークは全てのケースで顕著である。

(6) 人工地震波 x

硬質地盤と柔らかい免震層を組合せた場合に1次モードのピークが卓越する点は人工地震波 x と同様であるが、その幅が広く、約 5~10 Hz の範囲にわたる。2次モードのピークは全てのケースで現れている。

(7) 人工地震波 y2

硬質地盤 ($V_s=2000 \text{ m/s}$) では、他の人工地震波と同様に柔らかい免震層の場合に1次モードのピークが顕著に卓越する。2次モードのピークも大きい。軟質地盤 ($V_s=1000, 700 \text{ m/s}$) では、1次のひろいピークがあるが、これは地震動のピークである。他の人工地震波と異なり、軟質地盤でも2次の鋭いピークが卓越する。

各地震動に対する応答結果を比較するために、デッキレベルにおける最大応答加速度、デッキの固有振動数 1.5 Hz 近傍 (1.4~1.6 Hz) における床応答スペクトル(減衰 1% における加速度)の最大値、及び主要機器の固有振動数 10 Hz 近傍 (8.0~12.5 Hz) の床応答スペクトル(減衰 1% における加速度)の最大値を Table 2. 9 に示す。これらを棒グラフにしたもののが Fig. 2. 10 ~ Fig. 2. 12 である。これらより次のことが分る。

- 1) 建屋の最大応答加速度は、十勝沖地震とLa Union 地震を除いて入力地震波より増幅される。増幅は硬質地盤で特に顕著である。建屋の最大応答加速度の絶対値は神戸地震, 人工地震波 m, 人工地震波 y2, El Centro 地震, 人工地震波 x の順に大きい。
- 2) 10Hz における応答加速度は硬質地盤では入力波の応答加速度より相当に増幅する。増幅の程度は硬質地盤と柔らかい免震層を組合せたケースが顕著であり, 神戸地震, 人工地震波 m, 及び人工地震波 y2 が際立っている。La Union と十勝沖地震は概して低い。
- 3) 1.5Hz における応答加速度は入力波からの増幅はほとんど無く, 入力地震動の特性によって決まる。地盤条件や免震層の剛性の影響をほとんど受けない点も特徴的である。レベルとしては人工地震波 y2 が最も高く, とくに軟質地盤で際立って大きい(人工地震波 y2 は地盤条件によって入力そのものが変る)。次いで, 神戸, 人工地震波 x, 人工地震波 m, La Union, 十勝沖地震の順であり, El Centro が最も低い。

Table 2.1 評価に用いた上下地震動データセット

記号	地 震 名	最大加速度(G)	備考
ec-0000	El Centro 地震	0.211	
ku-0000	神戸地震	0.462	(神戸大学)
lu-0000	La Union 地震	0.126	(メキシコ)
tt-0000	十勝沖地震	0.117	(八戸記録)
m2-0000	人工地震波 m	0.238	
x2-0000	人工地震波 x	0.210	
y2-0020	人工地震波 y2-1	0.340	(M7.0, Vs=2000)
y2-0010	人工地震波 y2-2	0.367	(M7.0, Vs=1000)
y2-0007	人工地震波 y2-3	0.450	(M7.0, Vs=700)

Table 2.2 解析モデルの諸元

Reactor Building (RC)					Containment Vessel (Steel)				
Elev.	Node	Weight	Elm	Cross Sec.	Elev.	Node	Weight	Elm	Cross Sec.
EL(m)	#	(ton)	#	Area (m ²)	EL(m)	#	(ton)	#	Area (m ²)
46.0	12	3050		11	46.0	21	400	20	3.4
31.7	11	4850		10	25.2	20	1000	19	4.5
25.2	10	2550		9	21.2	19	200	18	4.5
21.2	9	10350		8	14.2	18	250	17	4.5
14.2	8	22200		7	7.2	17	250	16	4.5
7.2	7	27350		6	0.2	16	5650	15	156.2
0.2	6	34300		5	-8.3	15	5550	14	281.7
-8.3	5	34250		4	-13.8	14	4600	13	281.7
-13.8	4	28150		3	-19.8	13	13250	12	(Rigid)
-19.8	3	45950		2	(Rigid)				
-26.8	2	64500		1	(Rigid)				
-30.3	1	26400		101	Parameter				
-33.3	101	26400			Elm #1~11, 12~15 : Concrete				
					Elm #16~20 : Steel				

Table 2.3 解析モデルの材料物性値

材料物性値		原子炉建屋	原子炉格納容器
縦弾性係数	E ($E+06 \text{ kgf/cm}^2$)	0.27	2.10
せん断弾性係数	G ($E+05 \text{ kgf/cm}^2$)	1.16	8.08
ポアソン比	ν	0.167	0.30
減衰定数	h	0.05	0.02

Table 2.4 地盤ばねの定数

V_s m/s	V_p m/s	K_v $E+11 \text{ kgf/m}$	C_v $E+09 \text{ kgf}^*s/m$
700	1790	0.28	1.6
1000	2450	0.62	2.4
2000	3970	3.0	5.7

Table 2.5 積層ゴムの剛性

f_v Hz	h %	K_v $E+11 \text{ kgf/m}$	C_v $E+08 \text{ kgf}^*s/m$
10	2.0	1.35	0.86
20	2.0	5.40	1.72

Table 2.6 解析ケース一覧

地震波記号	地 震	地盤 Vs (m/s)	建屋周期 (Hz)
ec-2020	El Centro 地震	2000	20
ec-1020		2000	10
ec-2010		1000	20
ec-1010		1000	10
ec-2007		700	20
ec-1007		700	10
ku-2020	神戸地震(神戸大学)	2000	20
ku-1020		2000	10
ku-2010		1000	20
ku-1010		1000	10
ku-2007		700	20
ku-1007		700	10
lu-2020	Mexico La Union 地震	2000	20
lu-1020		2000	10
lu-2010		1000	20
lu-1010		1000	10
lu-2007		700	20
lu-1007		700	10
tt-2020	十勝沖地震	2000	20
tt-1020		2000	10
tt-2010		1000	20
tt-1010		1000	10
tt-2007		700	20
tt-1007		700	10
m2-2020	人工地震 m	2000	20
m2-1020		2000	10
m2-2010		1000	20
m2-1010		1000	10
m2-2007		700	20
m2-1007		700	10
x2-2020	人工地震 x	2000	20
x2-1020		2000	10
x2-2010		1000	20
x2-1010		1000	10
x2-2007		700	20
x2-1007		700	10
y2-2020	人工地震 y2 (Vs2000)	2000	20
y2-1020		2000	10
y2-2010	人工地震 y2 (Vs1000)	1000	20
y2-1010		1000	10
y2-2007	人工地震 y2 (Vs700)	700	20
y2-1007		700	10

Table 2.7 地盤-免震層-建屋系の固有値解析結果

		Unit: Hz			
		$V_s = 2000 \text{ m/s}$	$V_s = 1000 \text{ m/s}$	$V_s = 700 \text{ m/s}$	<i>Fixed Base</i>
$f_v = 10 \text{ Hz}$	1st mode	7.7	5.3	4.0	9.0
	2nd mode	19.1	18.6	18.4	19.4
	3rd mode	21.7	21.3	21.2	22.0
$f_v = 15 \text{ Hz}$	1st mode	9.3	5.8	4.2	11.7
	2nd mode	19.4	18.6	18.4	20.0
	3rd mode	22.1	21.3	21.2	23.9
$f_v = 20 \text{ Hz}$	1st mode	10.2	6.0	4.2	13.0
	2nd mode	19.6	18.6	18.4	20.3
	3rd mode	22.4	21.3	21.2	26.5

【注】基礎固定、免震無しの建屋の固有振動数: 14.9, 20.5, 30.4 Hz

Table 2.8 簡易法による固有値解析結果

		$V_s = 2000 \text{ m/s}$	$V_s = 1000 \text{ m/s}$	$V_s = 700 \text{ m/s}$
$f_v = 10 \text{ Hz}$	1st mode	7.3	5.2	3.9
	2nd mode	22.5	20.4	19.6
$f_v = 15 \text{ Hz}$	1st mode	8.6	5.6	4.1
	2nd mode	23.9	20.4	19.6
$f_v = 20 \text{ Hz}$	1st mode	9.2	5.8	4.2
	2nd mode	24.8	20.4	19.6

Table 2.9 建屋最大加速度と床応答加速度

	地震波名	最大加速度 m/s ²	10HzFR*	1.5HzFR** m/s ²	備考
El Centro	ec-0000	2.063	17.103	2.683	観測地震波
	ec-2020	4.972	37.267	2.771	
	ec-1020	4.241	65.410	2.834	
	ec-2010	3.220	19.814	2.874	
	ec-1010	2.654	20.436	2.932	
	ec-2007	2.212	12.877	3.004	
	ec-1007	2.024	13.032	3.070	
神戸地震	ku-0000	4.524	26.185	7.333	入力地震波
	ku-2020	6.126	44.365	7.464	
	ku-1020	8.623	125.291	7.565	
	ku-2010	5.446	34.730	7.721	
	ku-1010	5.425	41.643	7.845	
	ku-2007	4.594	23.486	8.061	
	ku-1007	4.584	25.143	8.201	
La Union	lu-0000	1.238	6.756	3.864	入力地震波
	lu-2020	1.807	15.723	3.944	
	lu-1020	2.132	24.764	4.012	
	lu-2010	1.541	6.994	4.096	
	lu-1010	1.701	8.397	4.180	
	lu-2007	1.426	4.889	4.274	
	lu-1007	1.381	5.308	4.360	
十勝沖地震	tt-0000	1.143	2.804	2.718	入力地震波
	tt-2020	1.277	6.204	2.780	
	tt-1020	1.414	9.091	2.831	
	tt-2010	1.358	3.057	2.898	
	tt-1010	1.515	3.513	2.960	
	tt-2007	1.323	2.282	3.045	
	tt-1007	1.433	2.520	3.115	
人工地震m	m2-0000	2.338	20.843	4.901	入力地震波
	m2-2020	6.531	34.845	5.006	
	m2-1020	5.592	102.423	5.046	
	m2-2010	4.186	27.655	5.236	
	m2-1010	3.851	33.111	5.344	
	m2-2007	3.603	18.846	5.550	
	m2-1007	3.264	20.274	5.691	
人工地震x	x2-0000	2.053	10.593	5.616	入力地震波
	x2-2020	3.418	18.972	5.747	
	x2-1020	4.412	45.882	5.862	
	x2-2010	2.678	14.218	5.981	
	x2-1010	3.284	17.484	6.091	
	x2-2007	2.516	9.858	6.287	
	x2-1007	2.802	10.780	6.421	
人工地震y2 (Vs2000)	y2-0020	3.214	19.505	7.741	入力地震波
	y2-2020	6.363	44.392	7.906	
	y2-1020	5.885	88.518	8.052	
人工地震y2 (Vs1000)	y2-0010	3.924	22.213	11.904	入力地震波
	y2-2010	4.360	28.369	12.659	
	y2-1010	4.656	32.077	12.922	
人工地震y2 (Vs700)	y2-0007	4.499	24.389	15.744	入力地震波
	y2-2007	4.645	21.047	17.568	
	y2-1007	5.096	22.007	17.942	

* 8Hz～12.5Hz間の床応答スペクトル(1%減衰)の最大値

** 1.4Hz～1.6Hz間の床応答スペクトル(1%減衰)の最大値

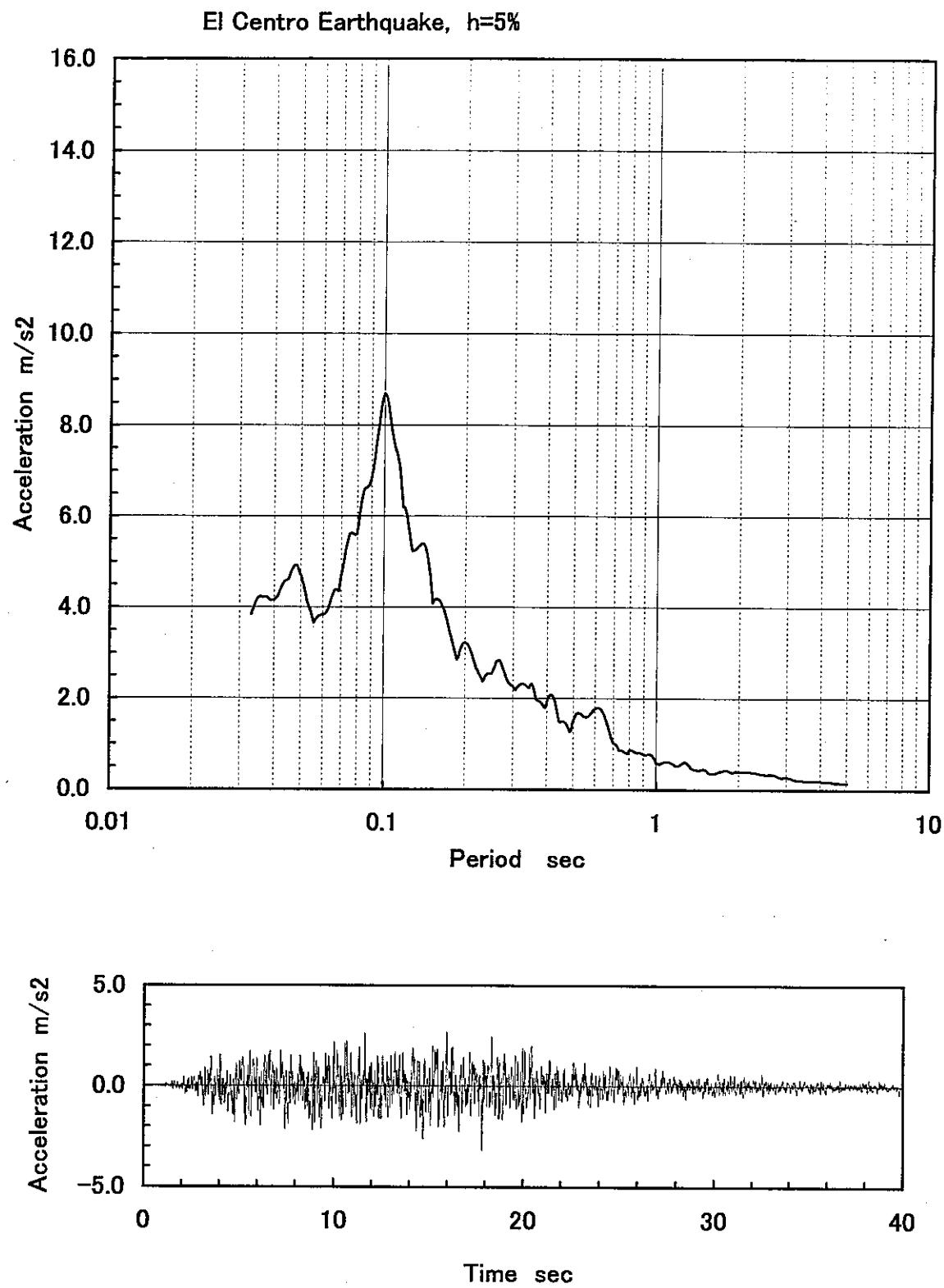


Fig. 2. 1 (1) 入力地震動の応答スペクトルと加速度時刻歴 (El Centro 地震)

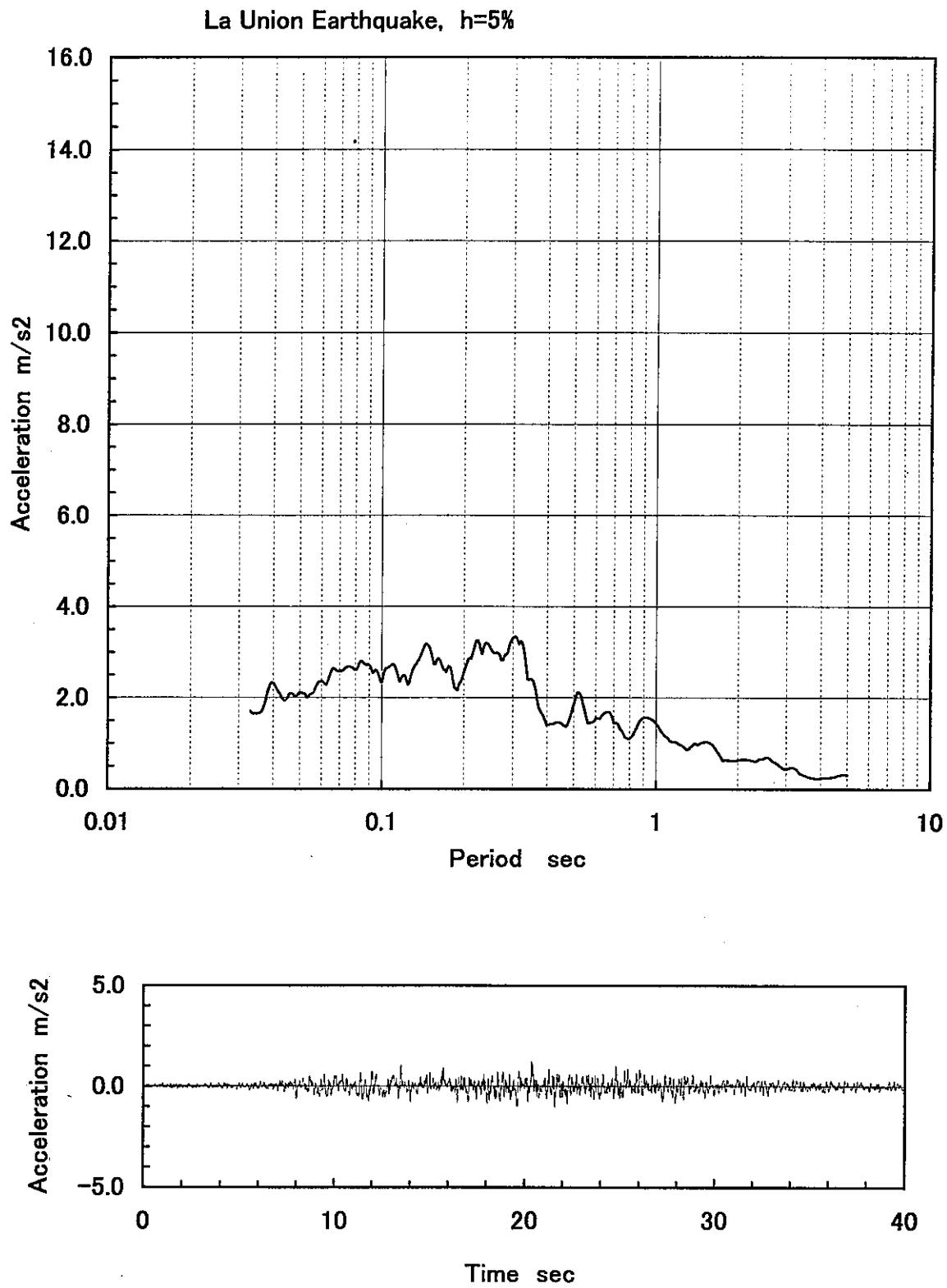


Fig. 2. 1 (2) 入力地震動の応答スペクトルと加速度時刻歴 (La Union)

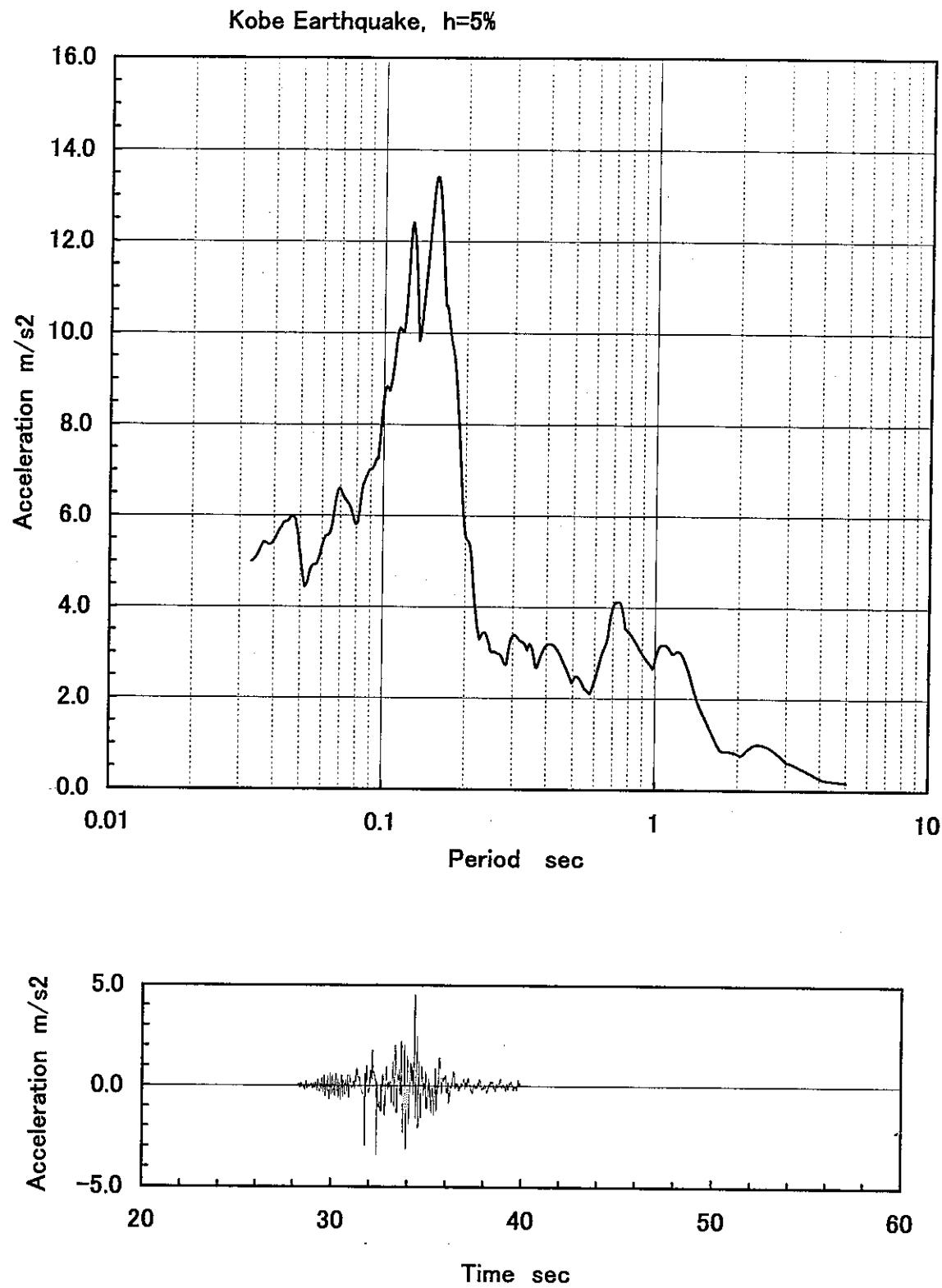


Fig. 2.1 (3) 入力地震動の応答スペクトルと加速度時刻歴 (神戸地震)

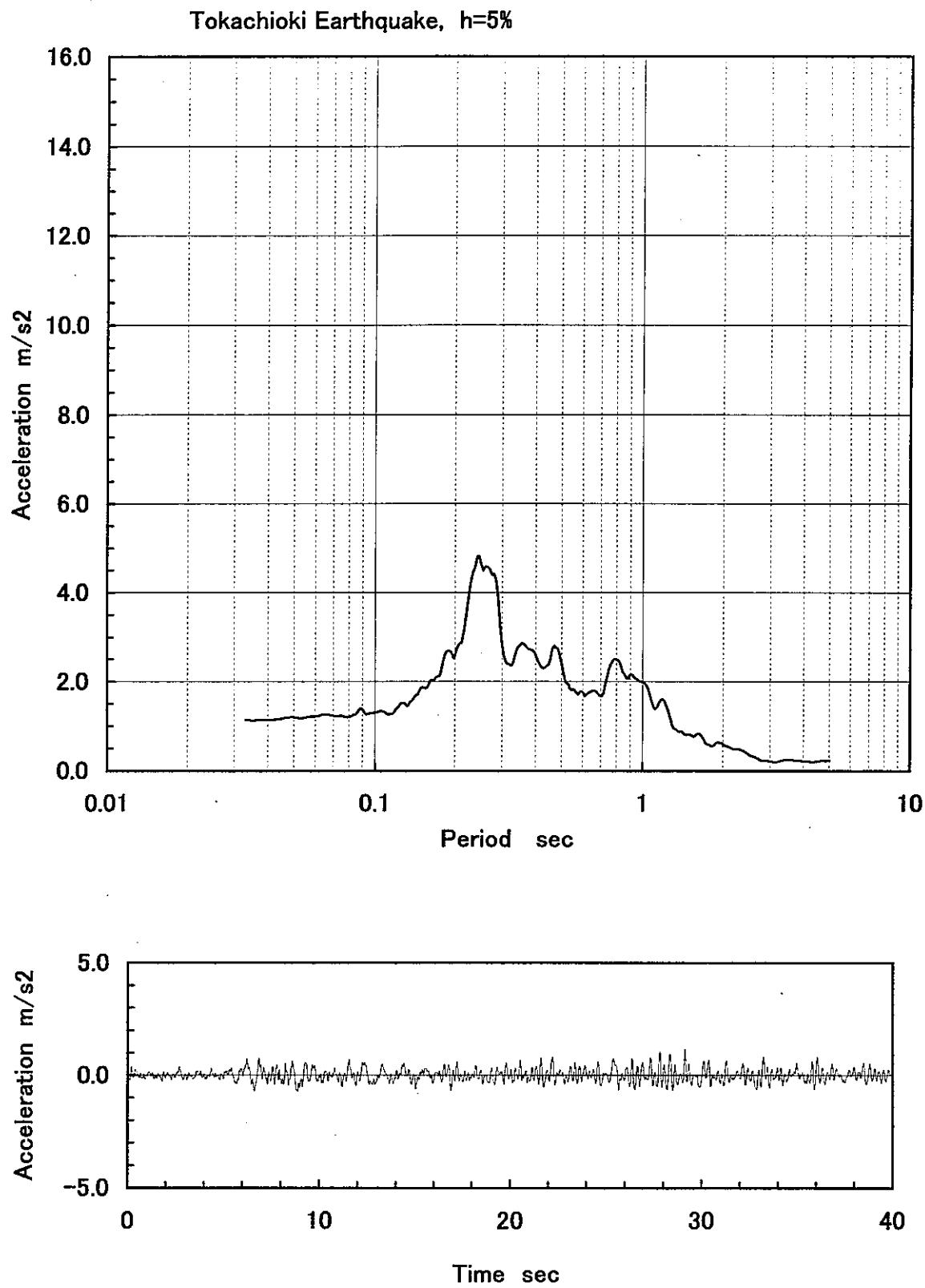


Fig. 2.1 (4) 入力地震動の応答スペクトルと加速度時刻歴（十勝沖地震）

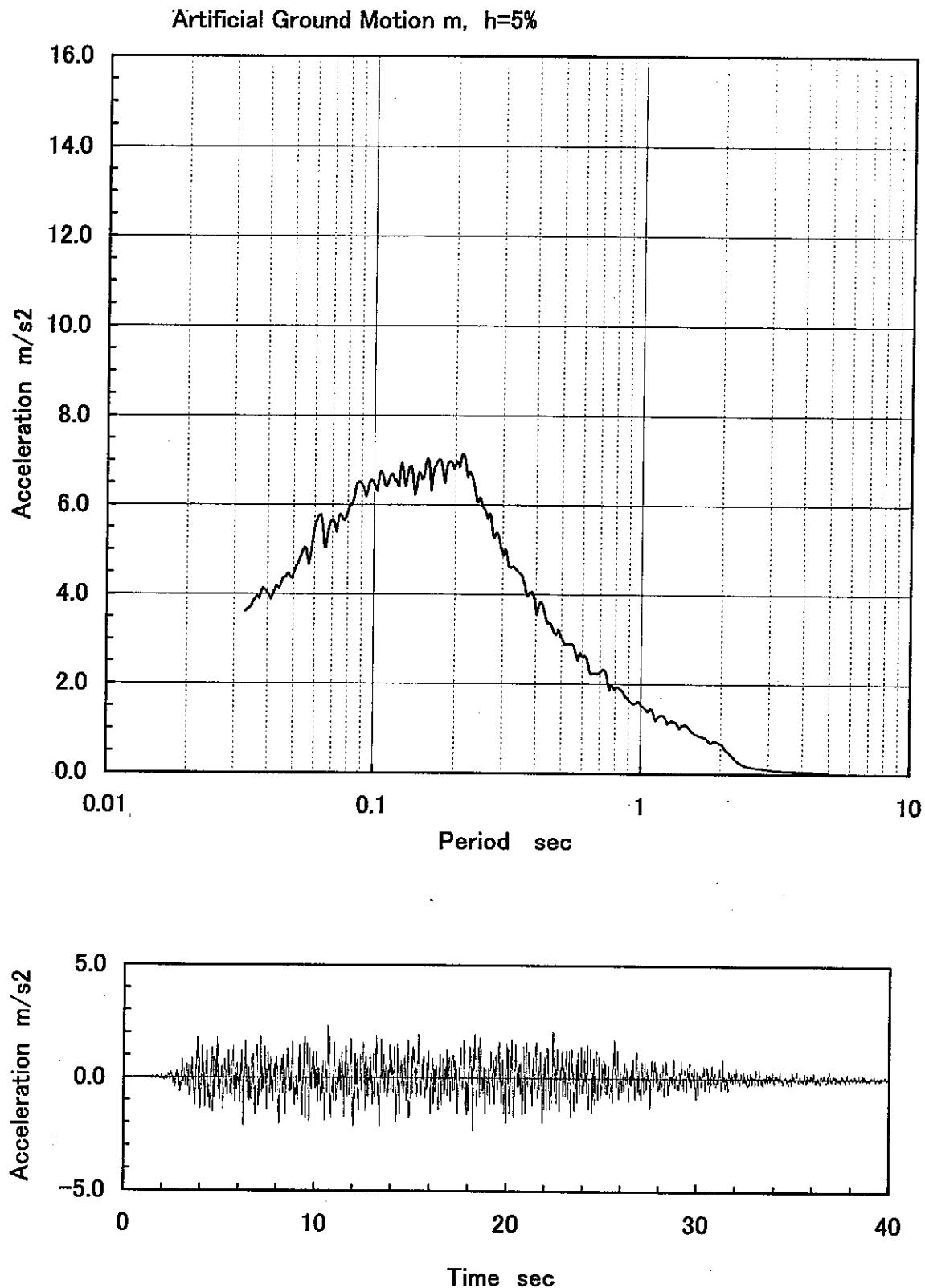


Fig. 2.1 (5) 入力地震動の応答スペクトルと加速度時刻歴（人工地震m）

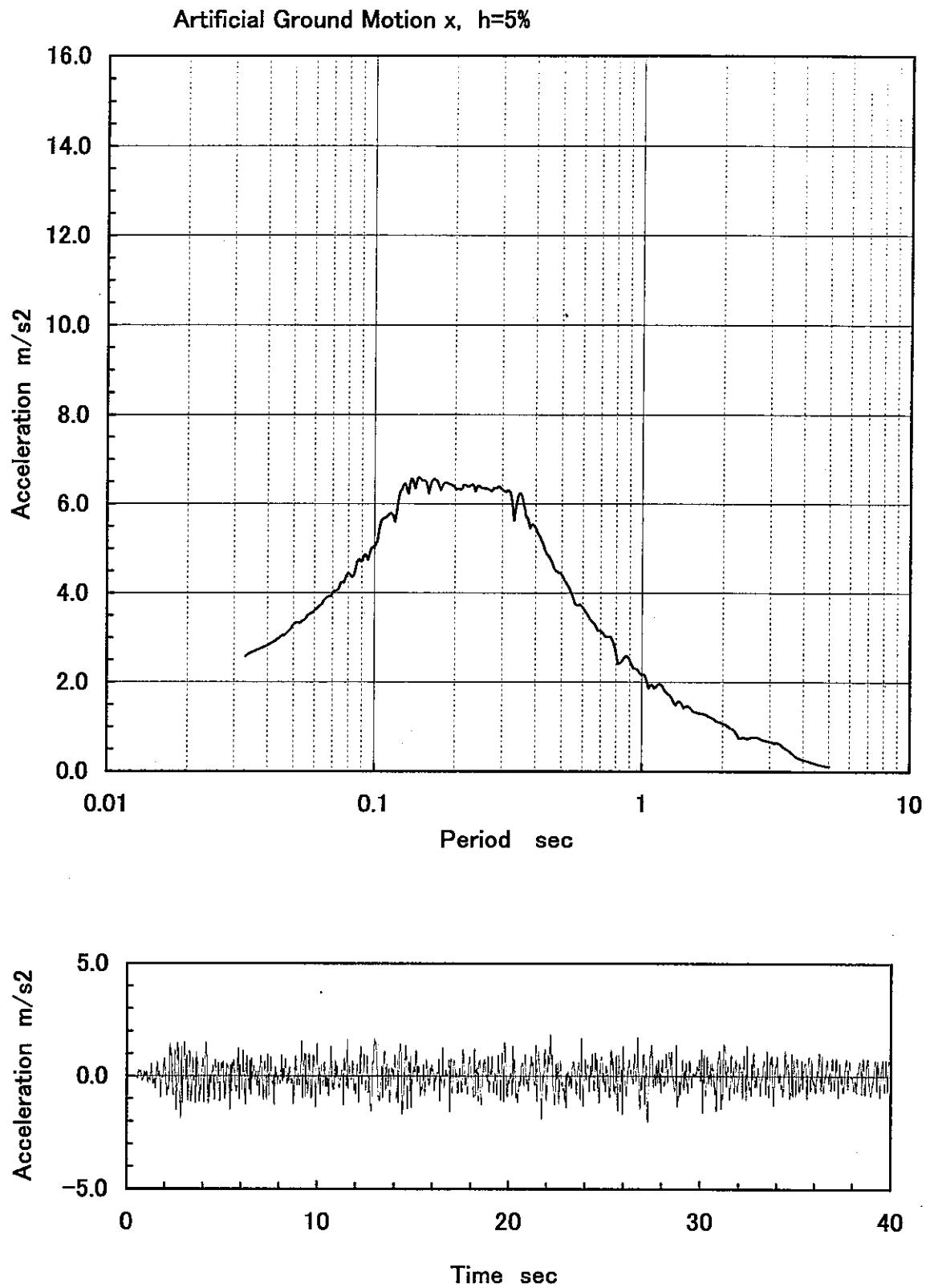


Fig. 2. 1 (6) 入力地震動の応答スペクトルと加速度時刻歴（人工地震x）

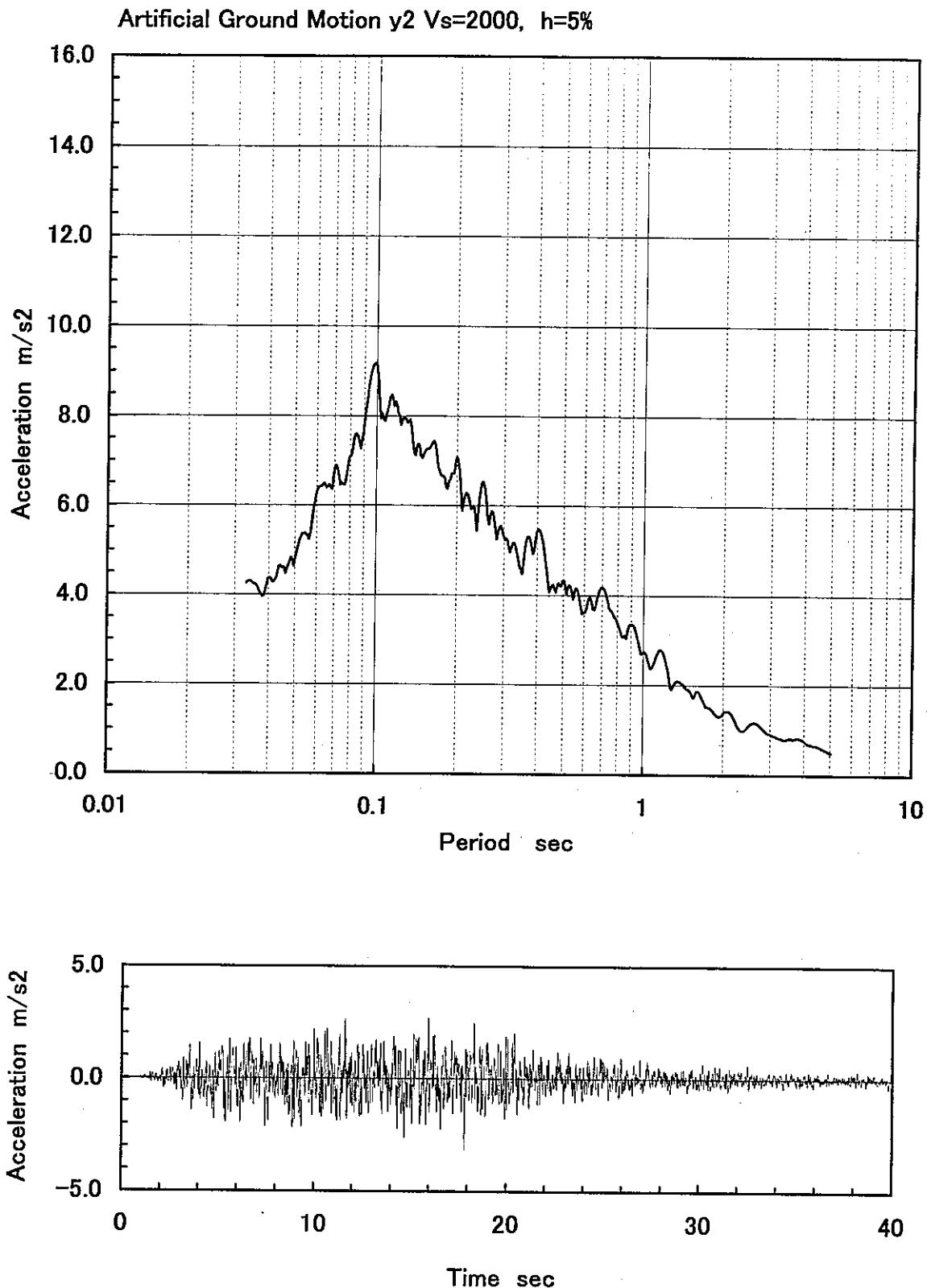


Fig. 2. 1 (7) 入力地震動の応答スペクトルと加速度時刻歴（人工地震y2Vs2000）

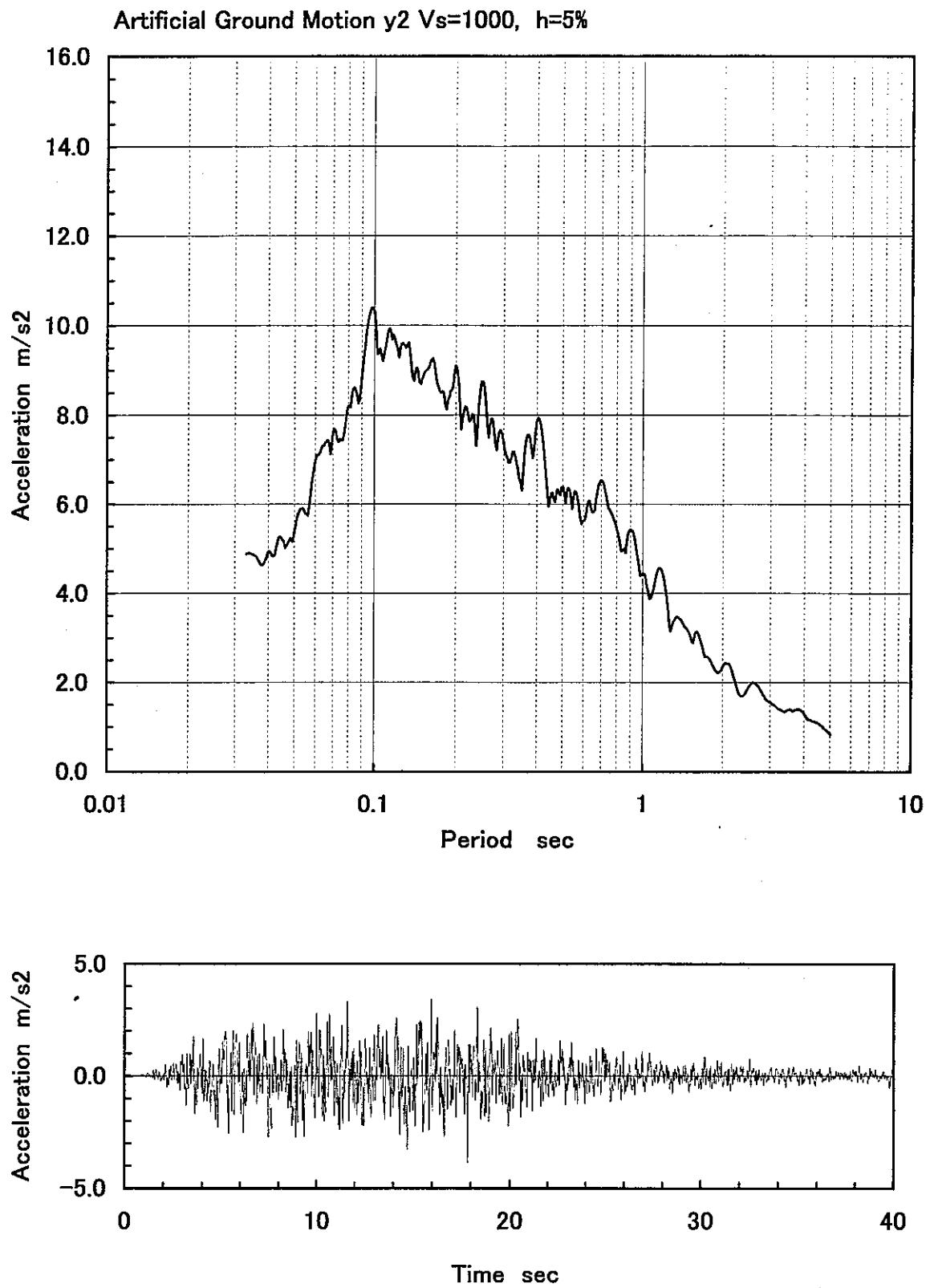


Fig. 2. 1 (8) 入力地震動の応答スペクトルと加速度時刻歴（人工地震y2Vs1000）

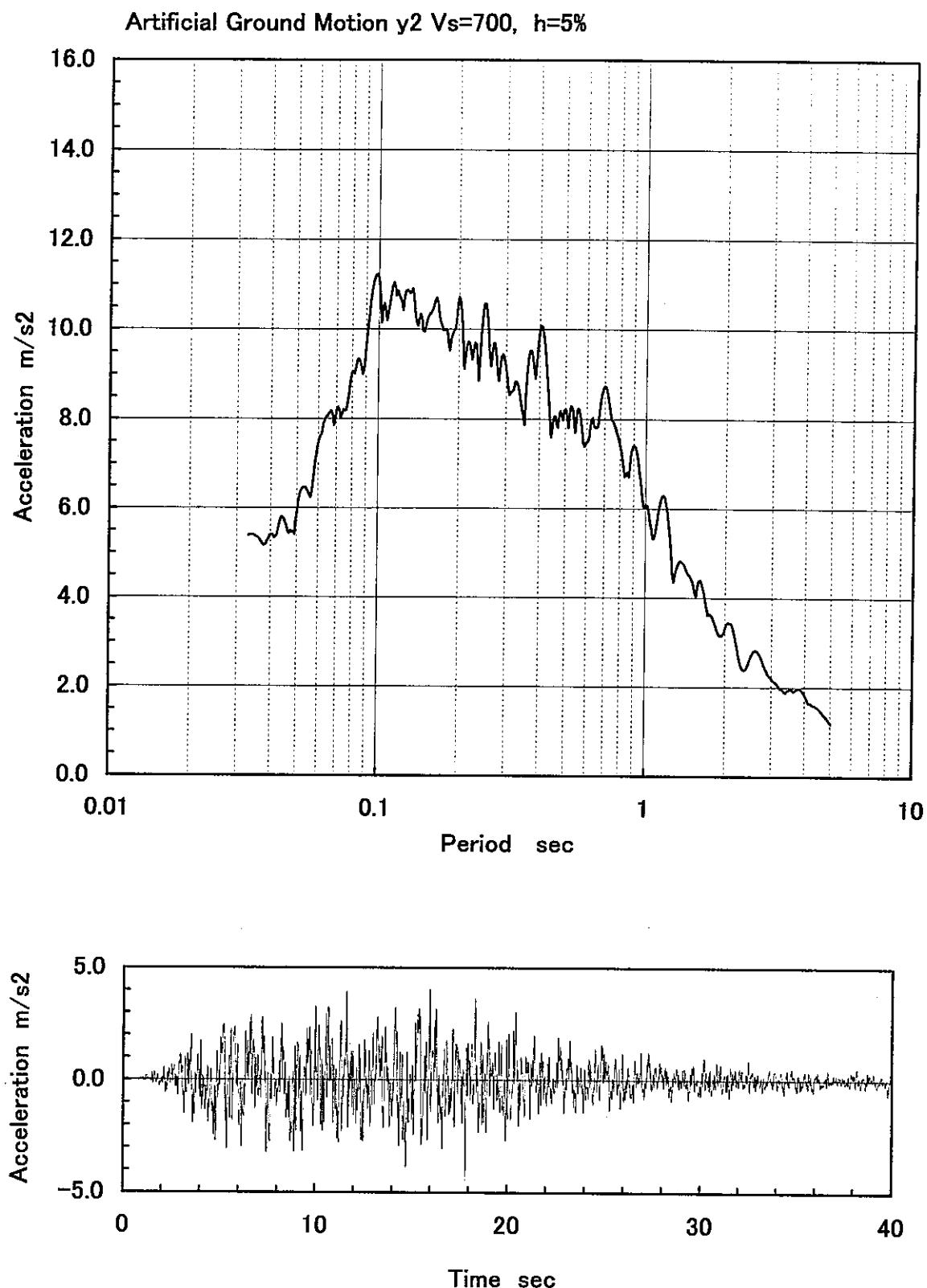


Fig. 2. 1 (9) 入力地震動の応答スペクトルと加速度時刻歴（人工地震 y_2 V_s 700）

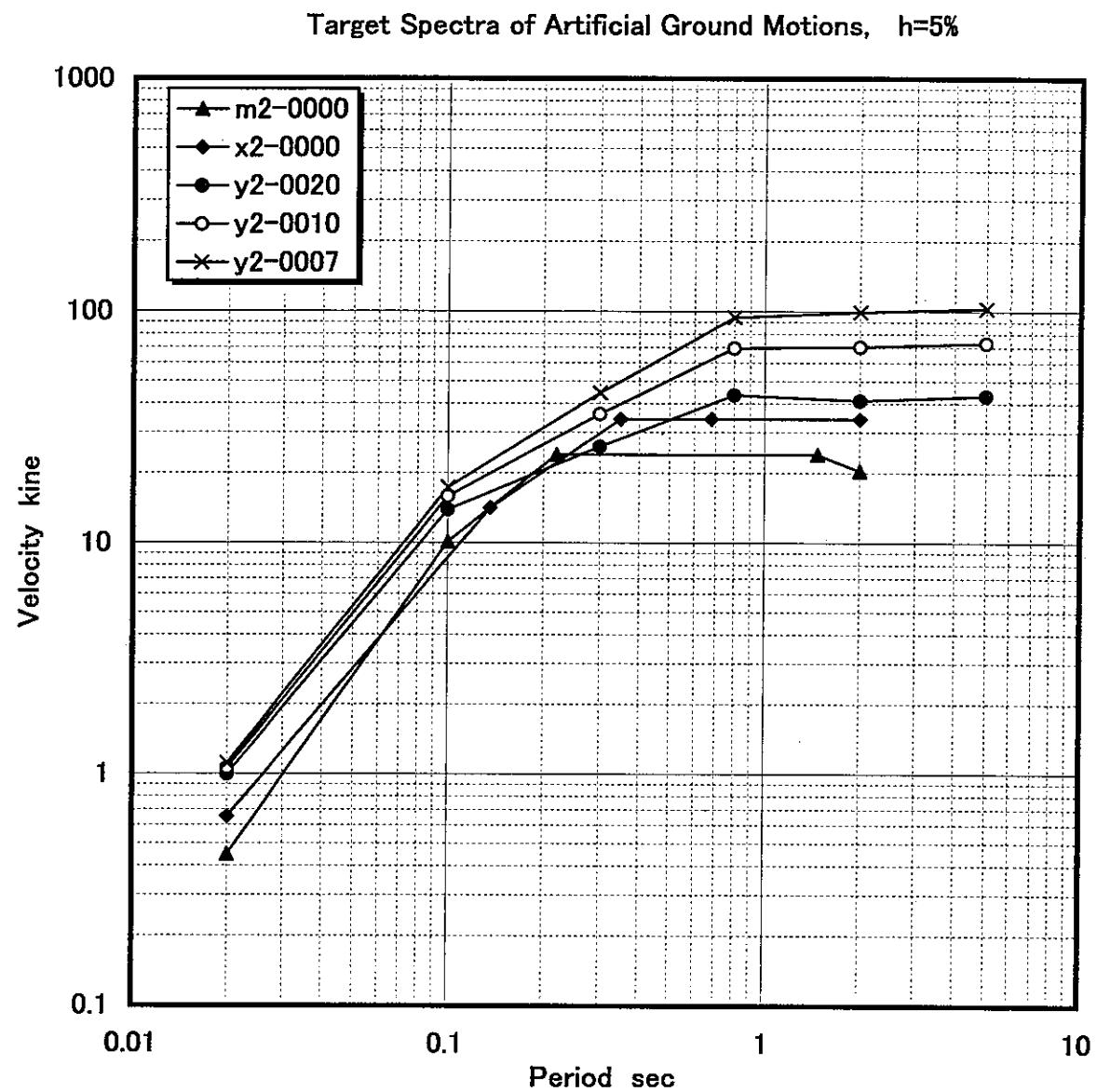


Fig. 2.2 人工地震波の目標応答スペクトル

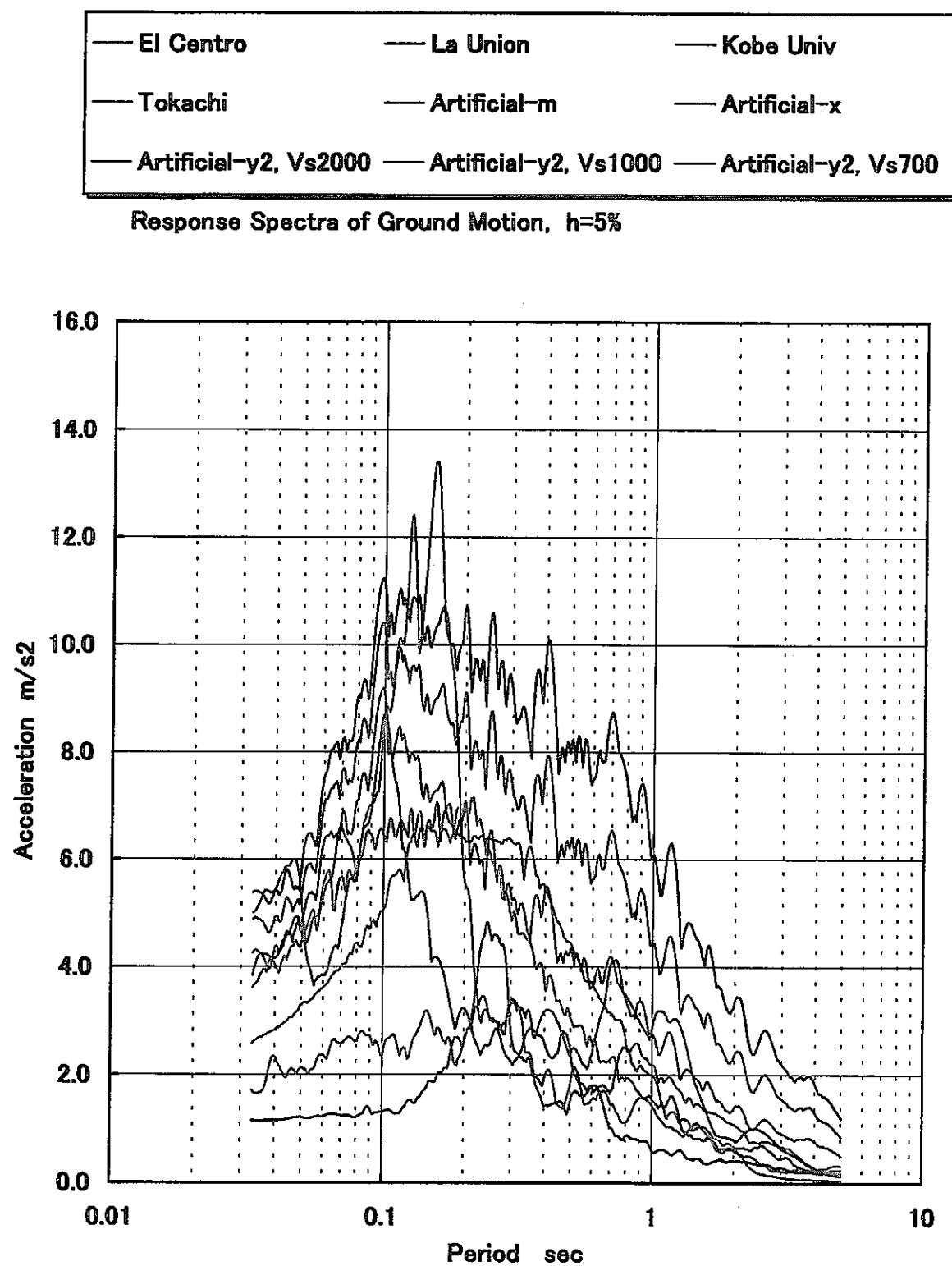


Fig. 2.3 全地震動の加速度応答スペクトル

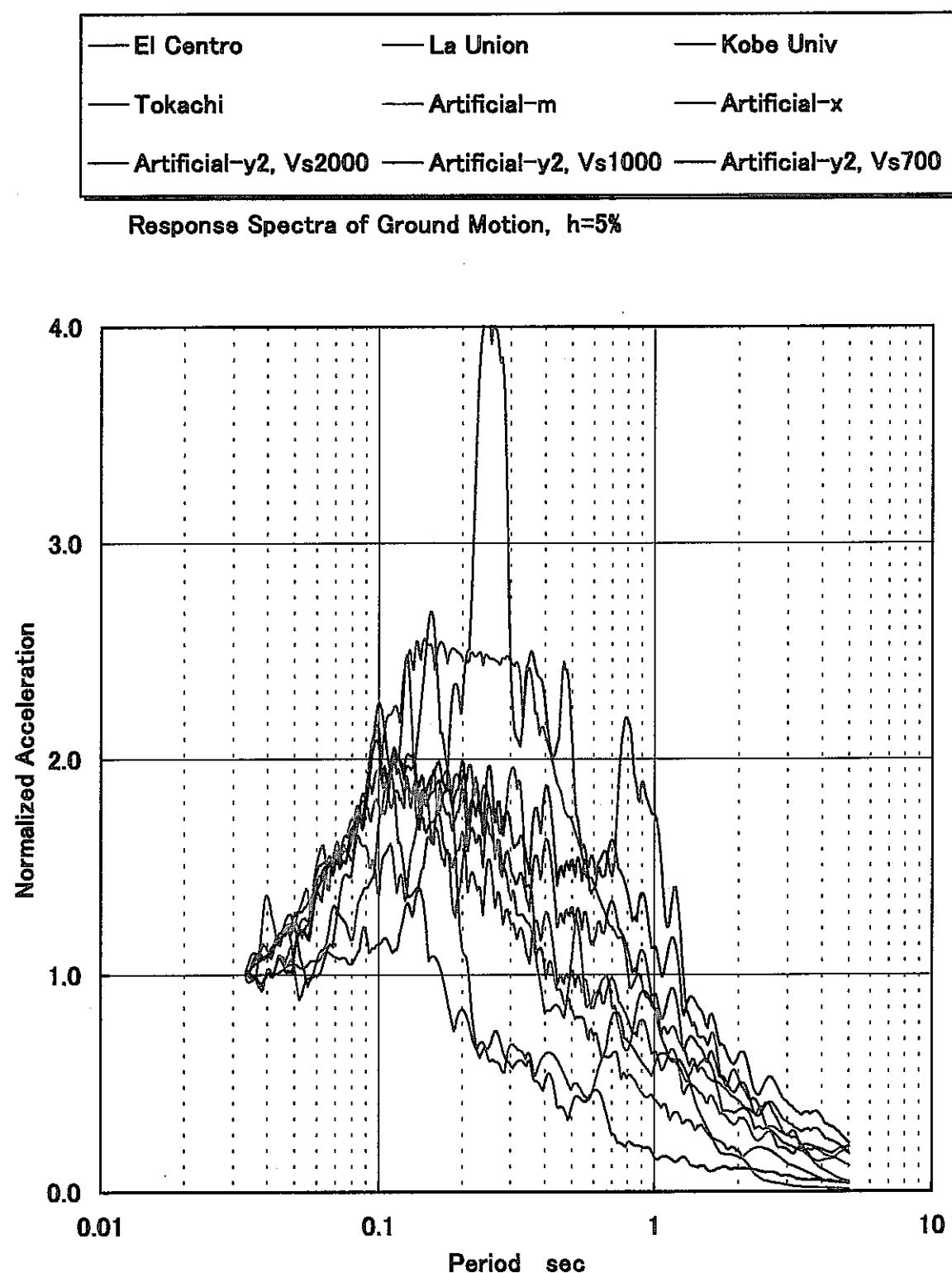


Fig. 2.4 全地震動の規格化加速度応答スペクトル

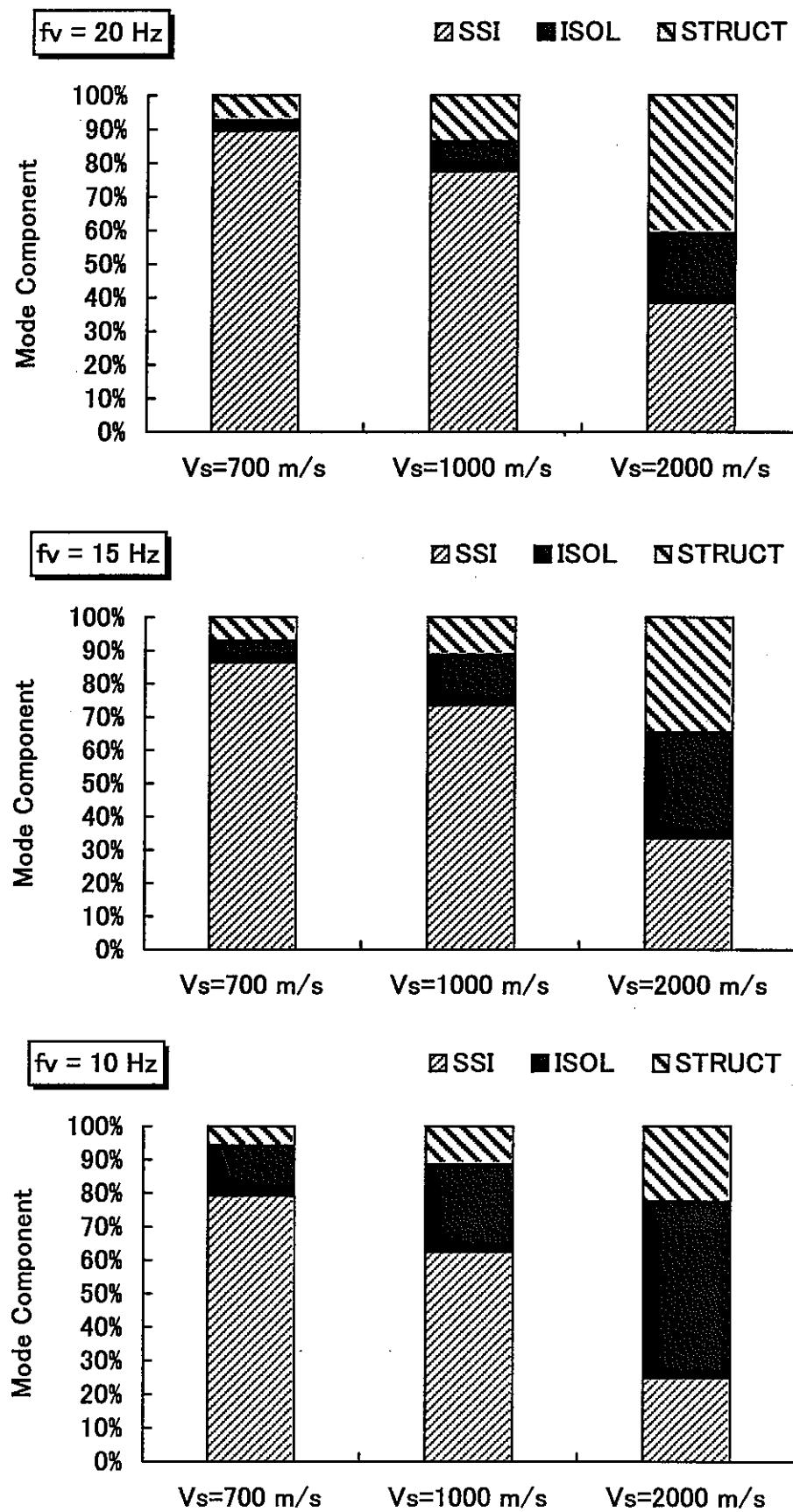


Fig. 2.5 振動モードに占める地盤ばね, 免震層, 建屋の寄与

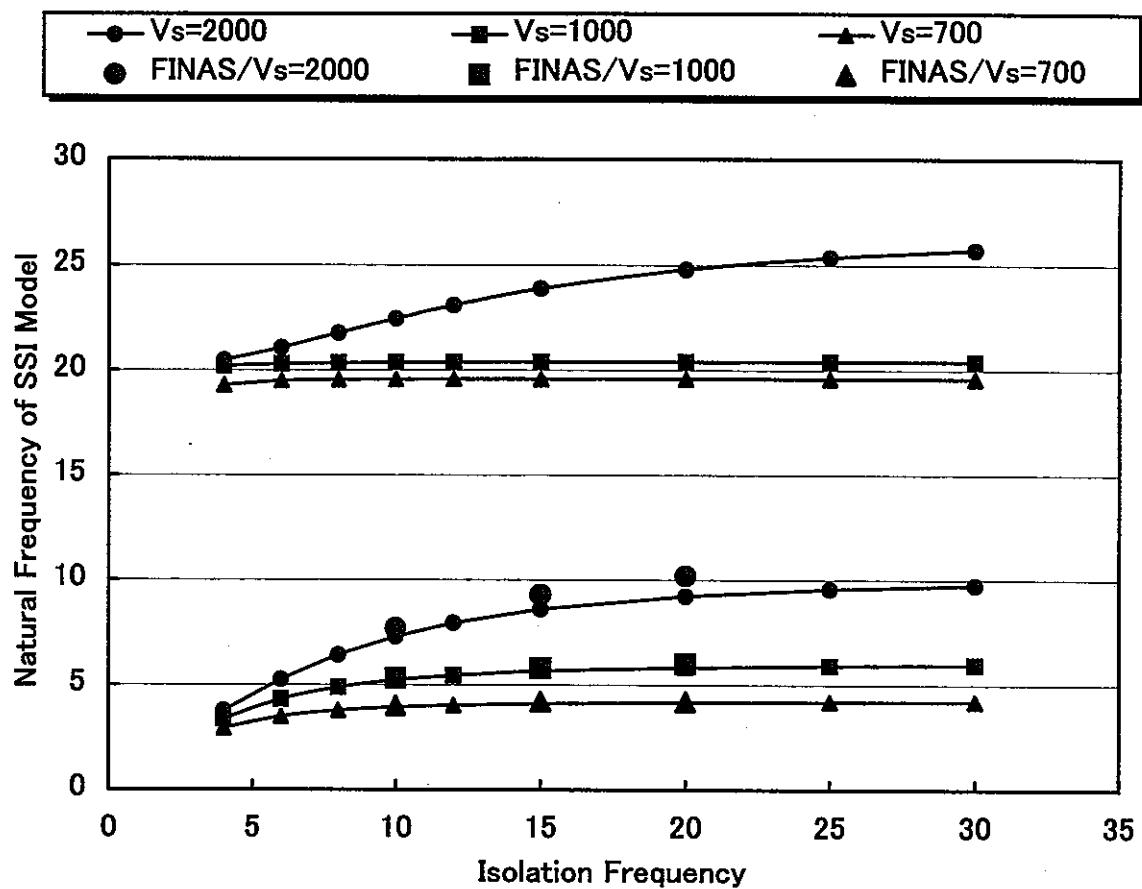


Fig. 2. 6 積層ゴムと地盤条件による固有振動数の変化(簡易解析)

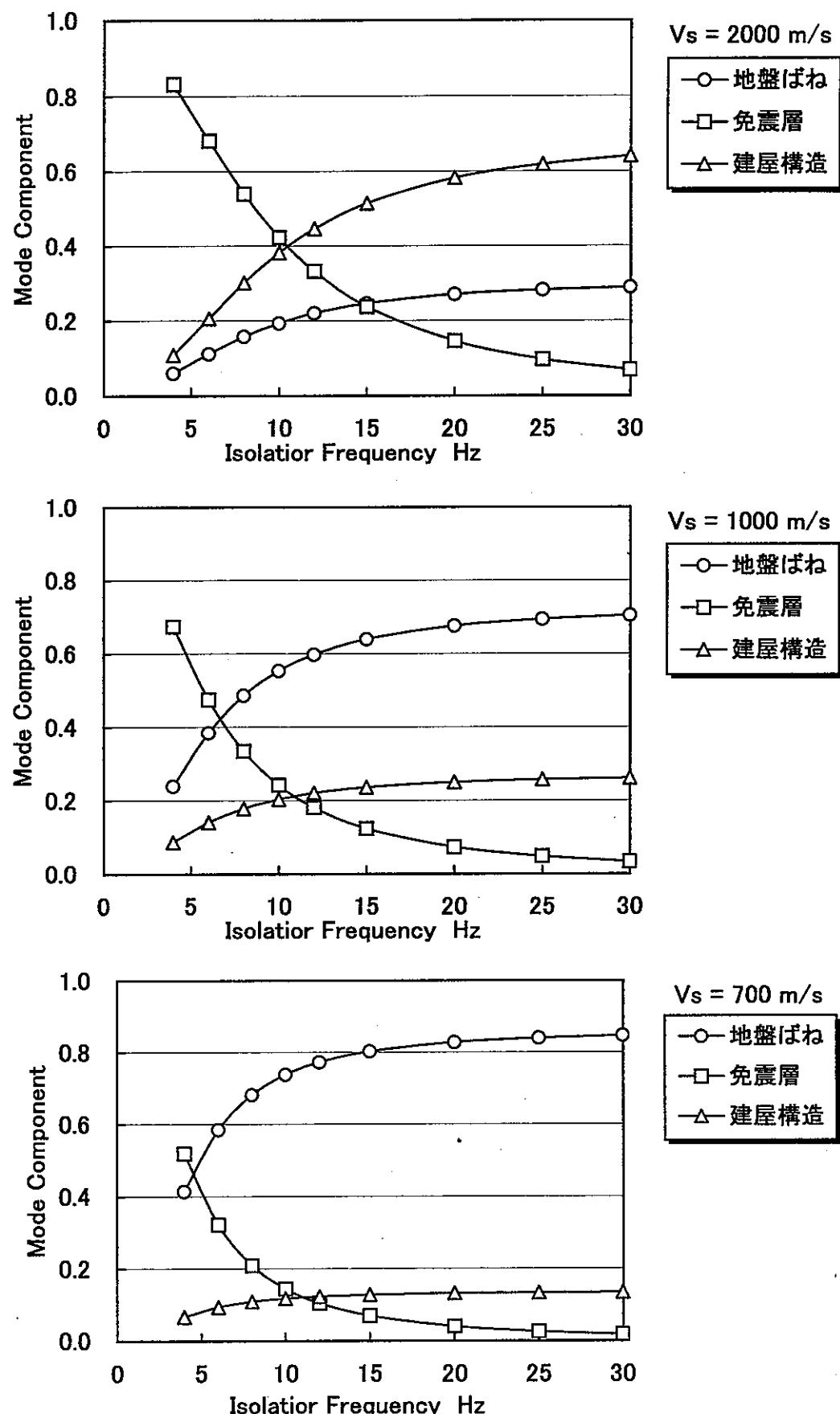


Fig. 2. 7 振動モードに占める地盤ばね、免震層、建屋の寄与(1次モード、簡易解析)

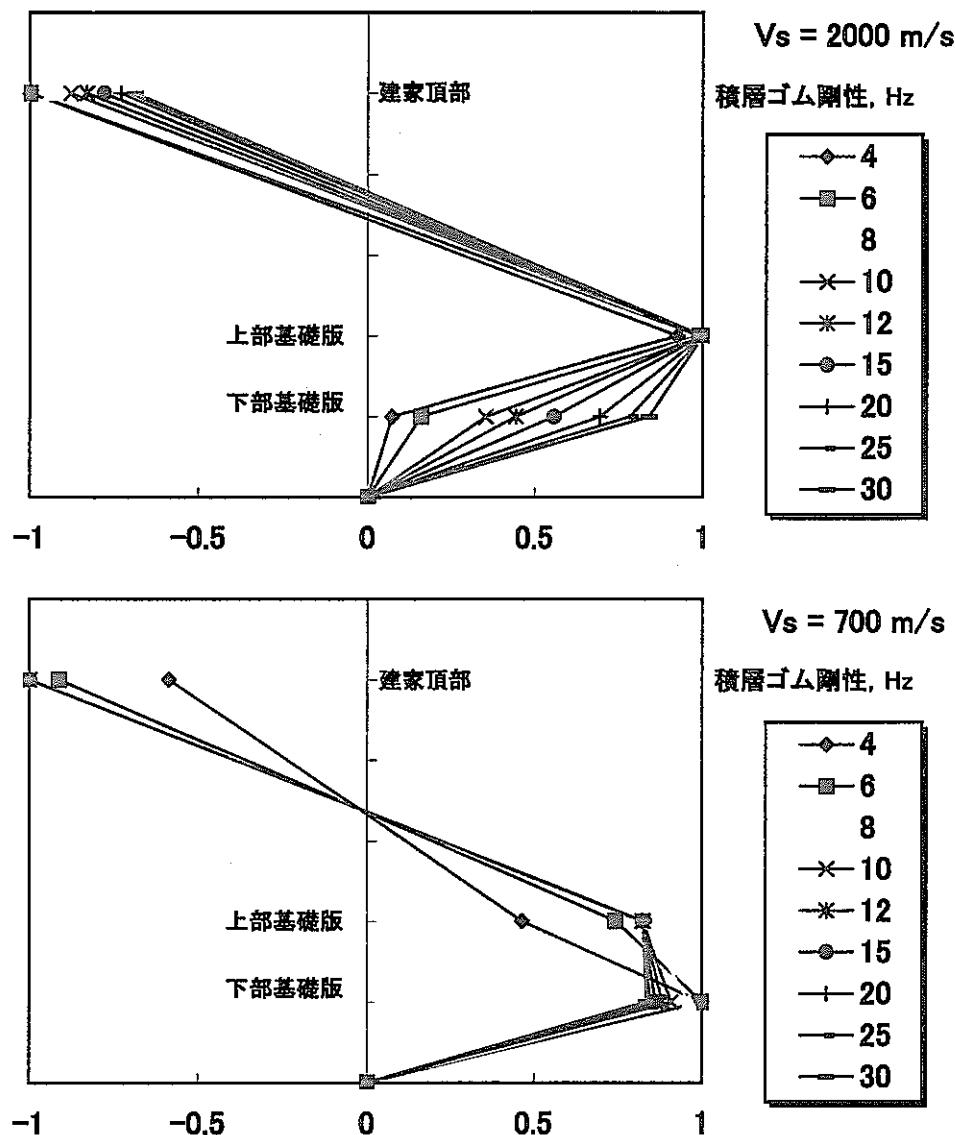


Fig. 2.8 簡易解析による2次モード

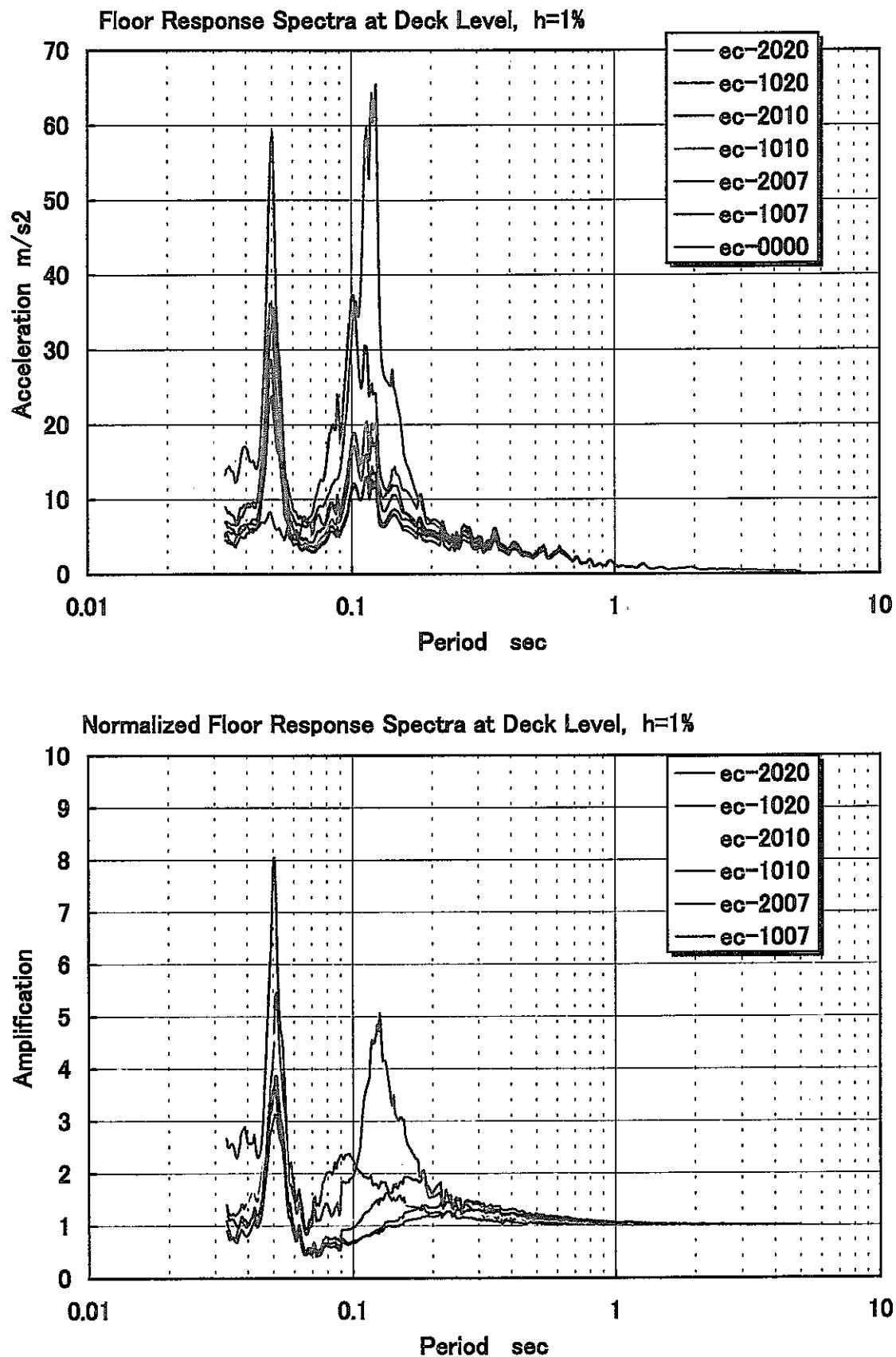


Fig. 2.9 (1) デッキレベルの床応答スペクトル (El Centro 地震)

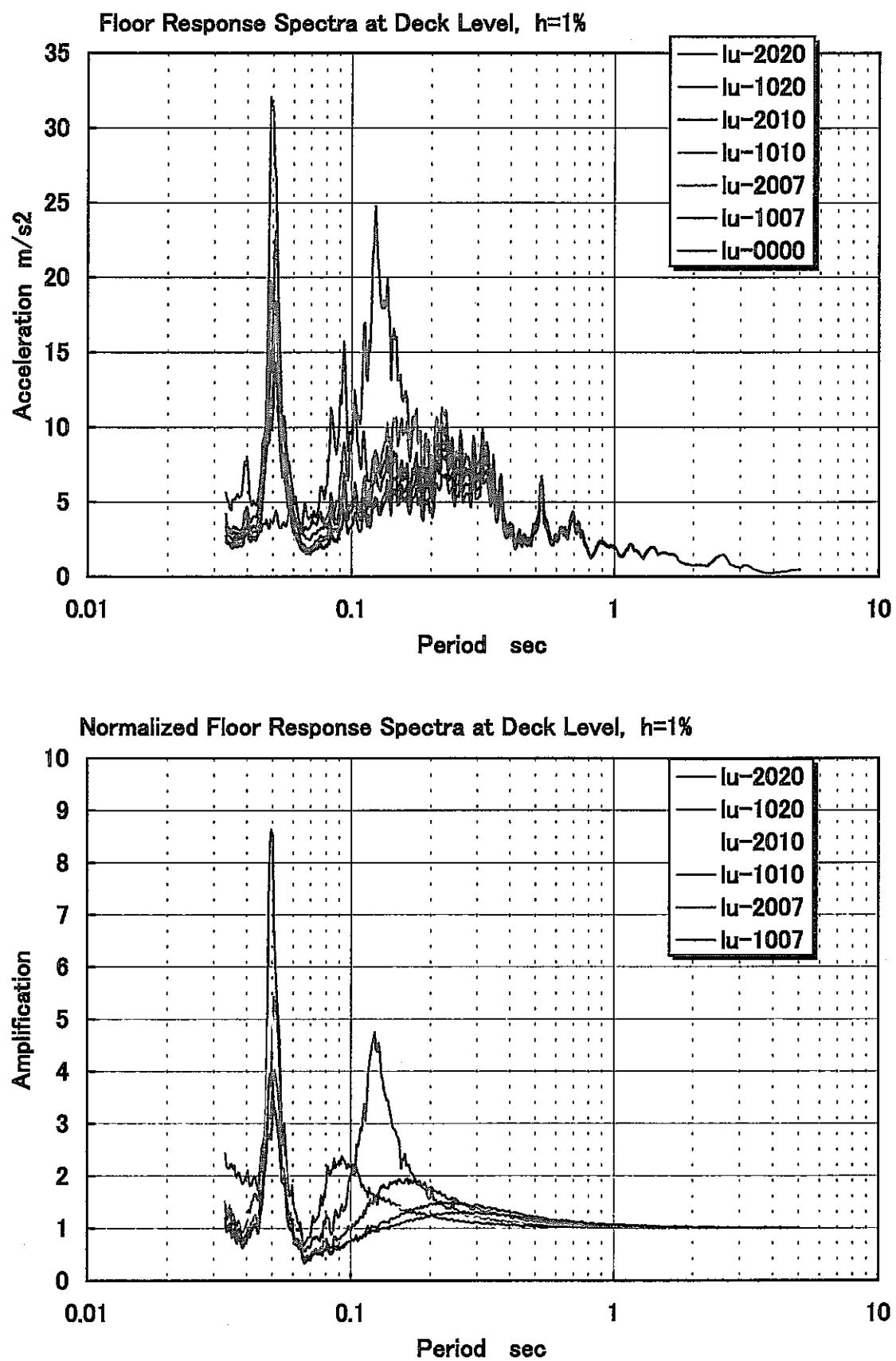


Fig. 2.9 (2) デッキレベルの床応答スペクトル (LaUnion 地震)

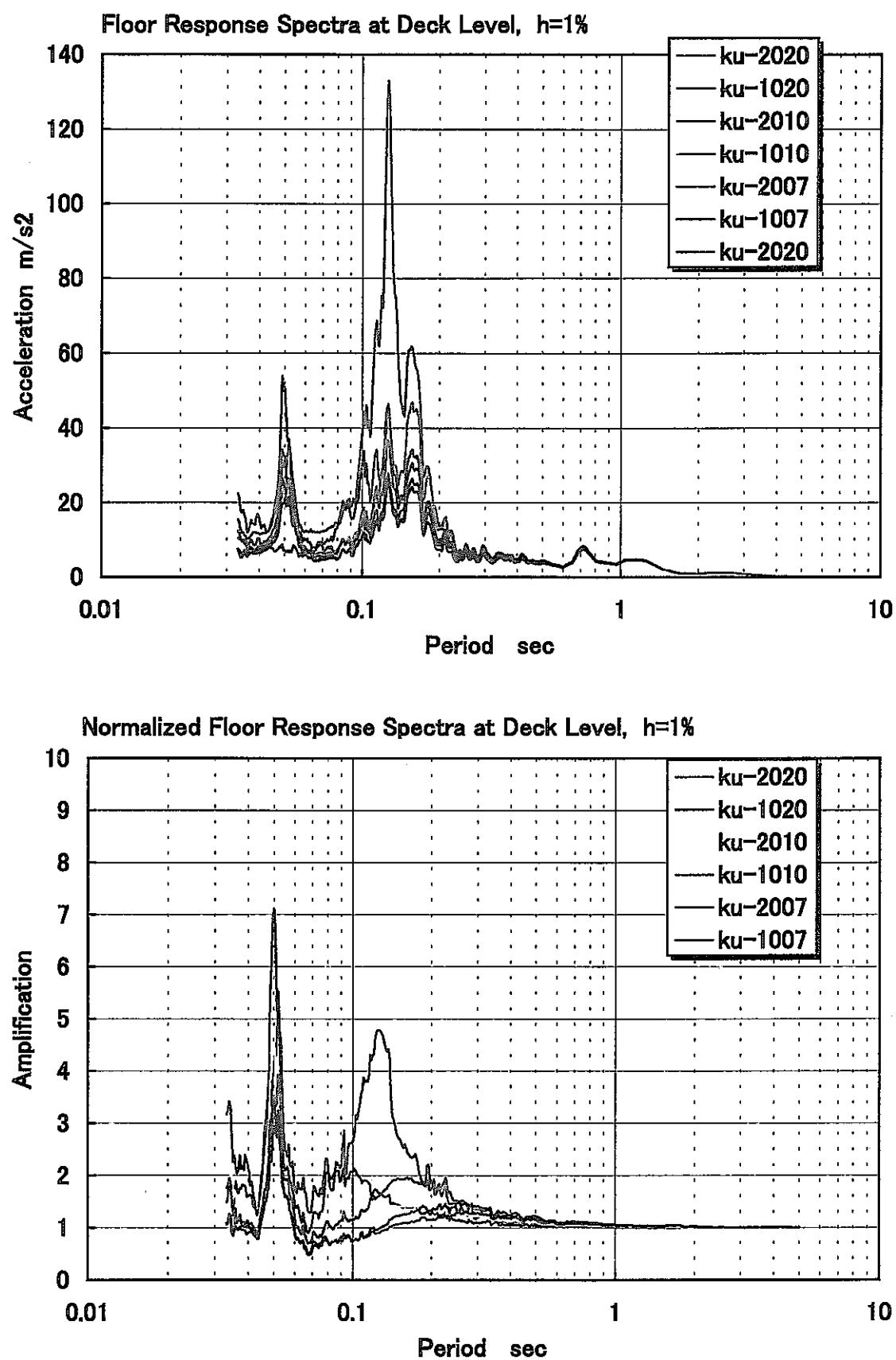


Fig. 2.9 (3) デッキレベルの床応答スペクトル（神戸地震）

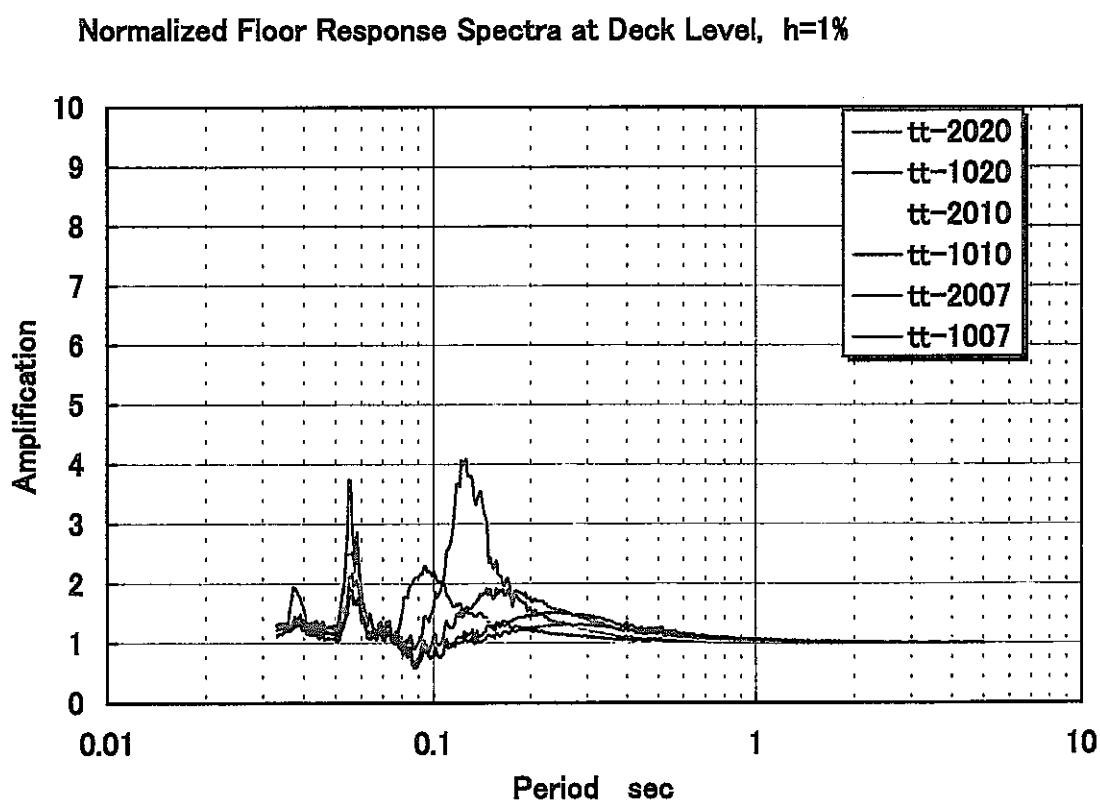
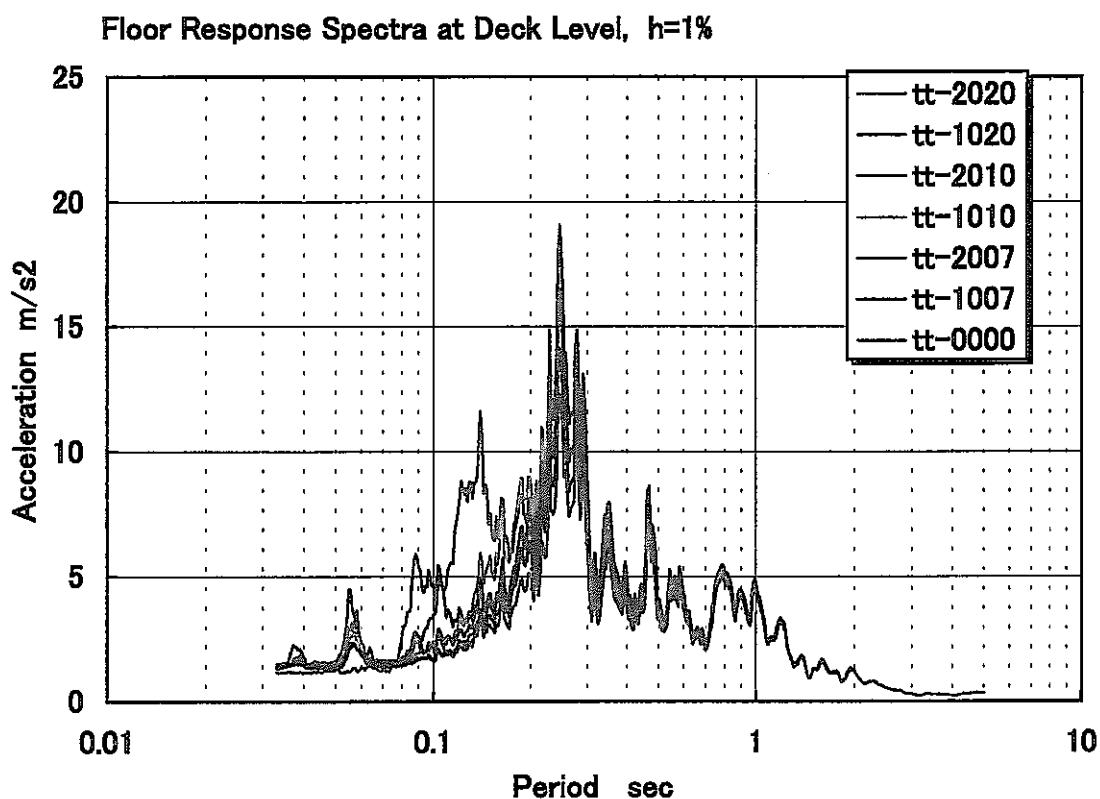


Fig. 2.9 (4) デッキレベルの床応答スペクトル（十勝沖地震）

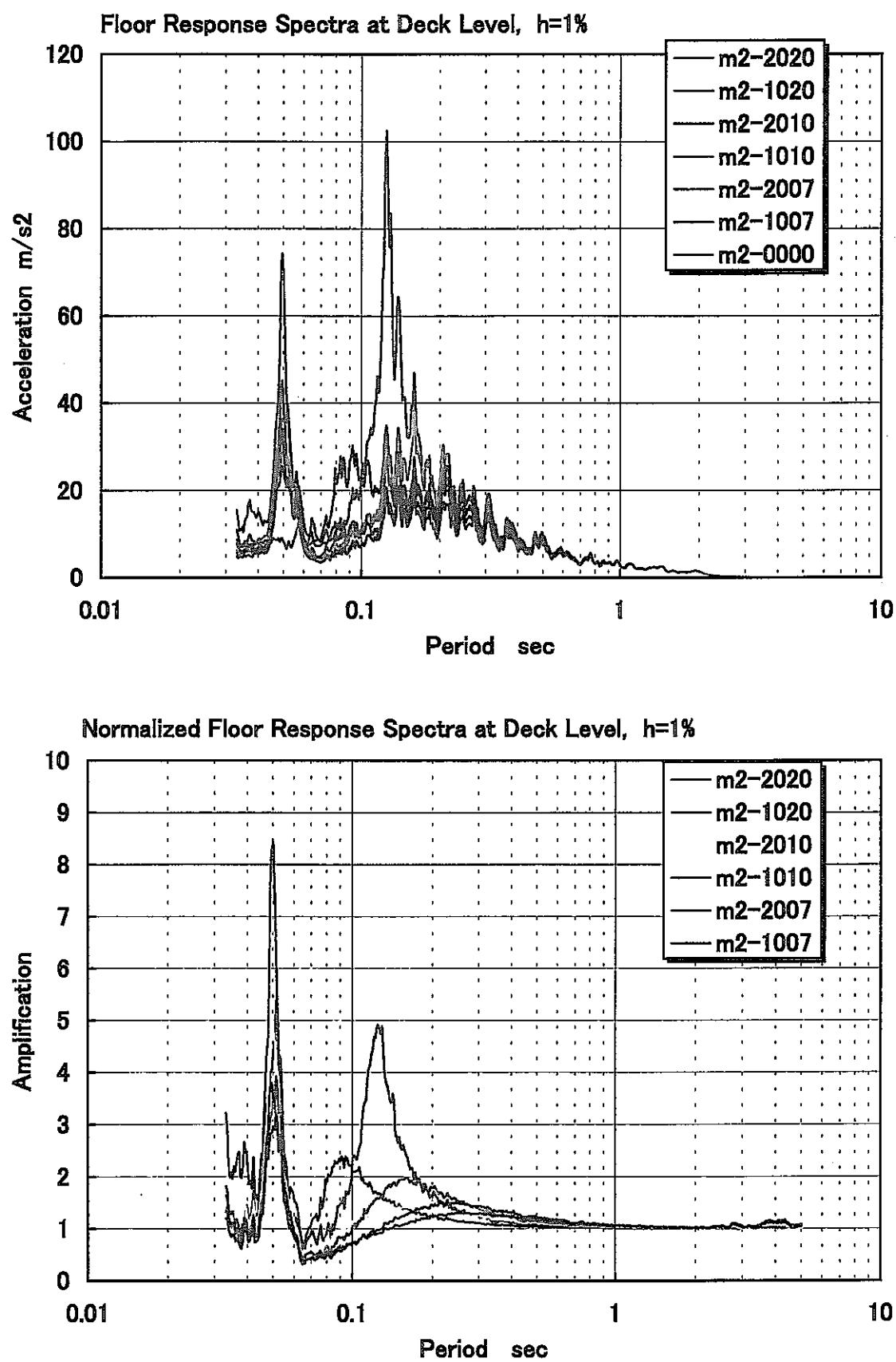


Fig. 2.9 (5) デッキレベルの床応答スペクトル（人工地震波m）

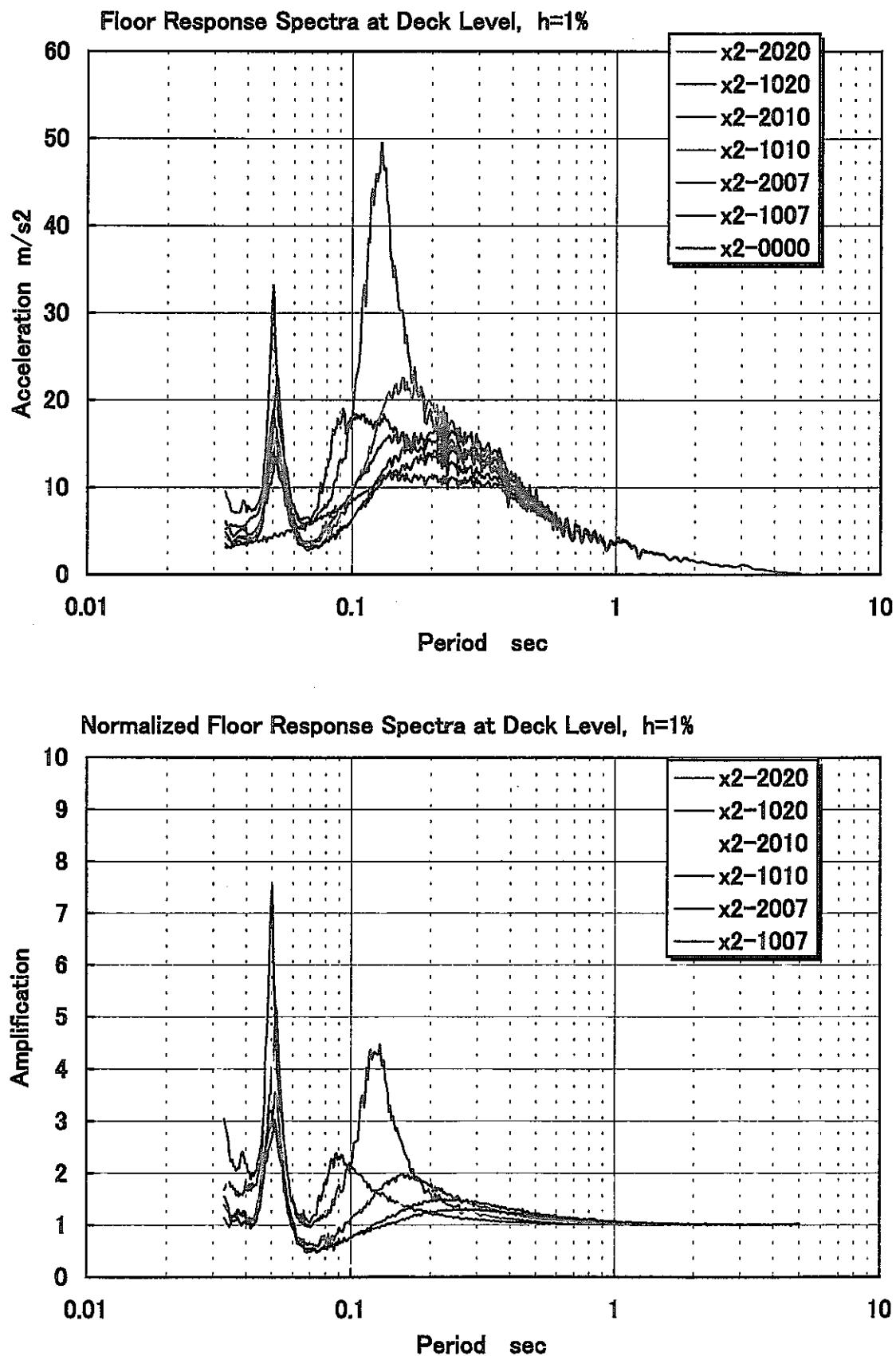


Fig. 2.9 (6) デッキレベルの床応答スペクトル（人工地震波x）

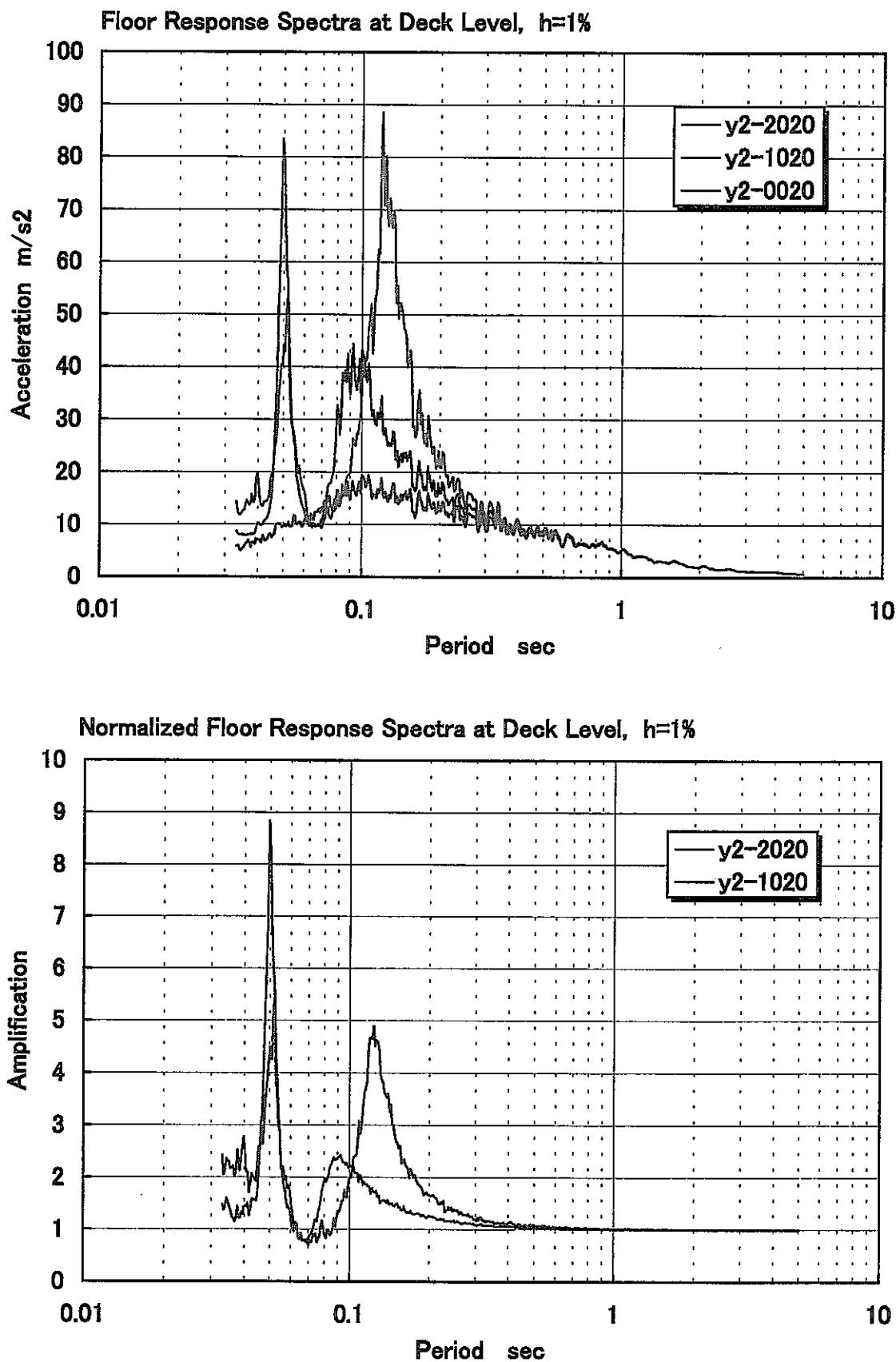


Fig. 2.9 (7) デッキレベルの床応答スペクトル（人工地震波y@2000）

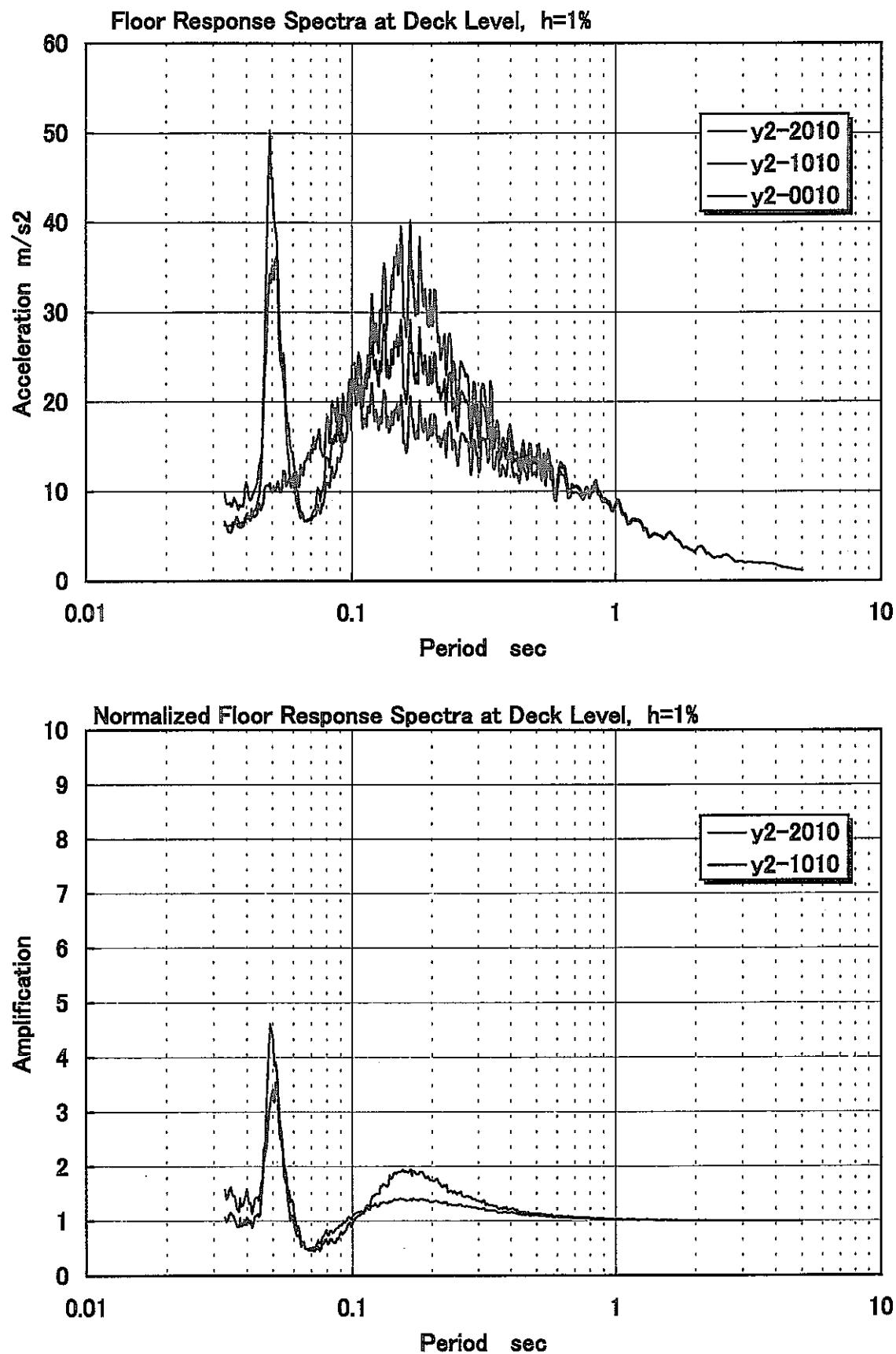


Fig. 2.9 (8) デッキレベルの床応答スペクトル（人工地震波y@1000）

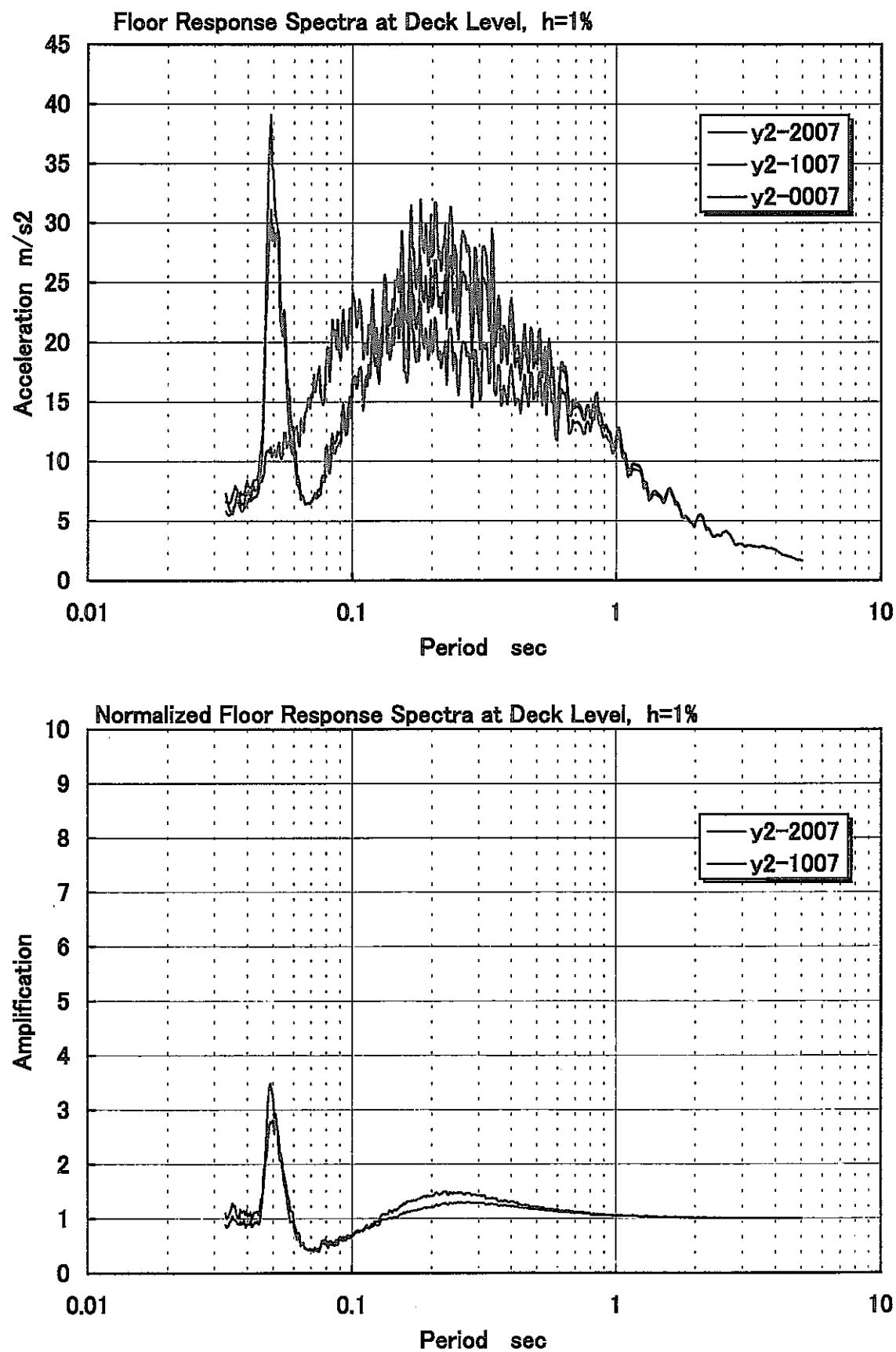


Fig. 2.9 (9) デッキレベルの床応答スペクトル（人工地震波y@700）

RESPONSE OF REACTOR BUILDING

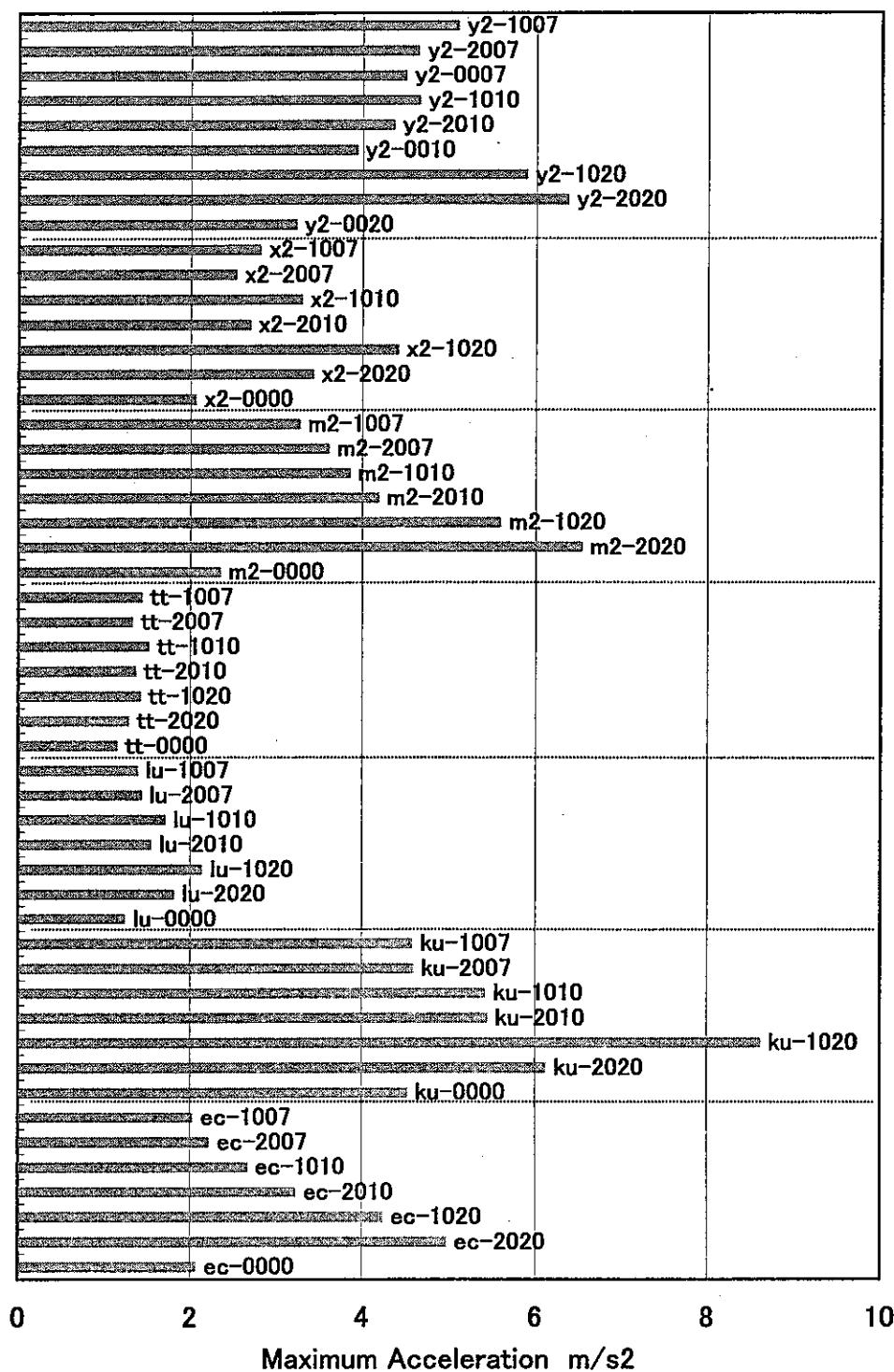


Fig. 2. 10 原子炉建屋デッキ据付けレベルの最大加速度の比較

SPECTRAL ACCELERATION at 10 Hz

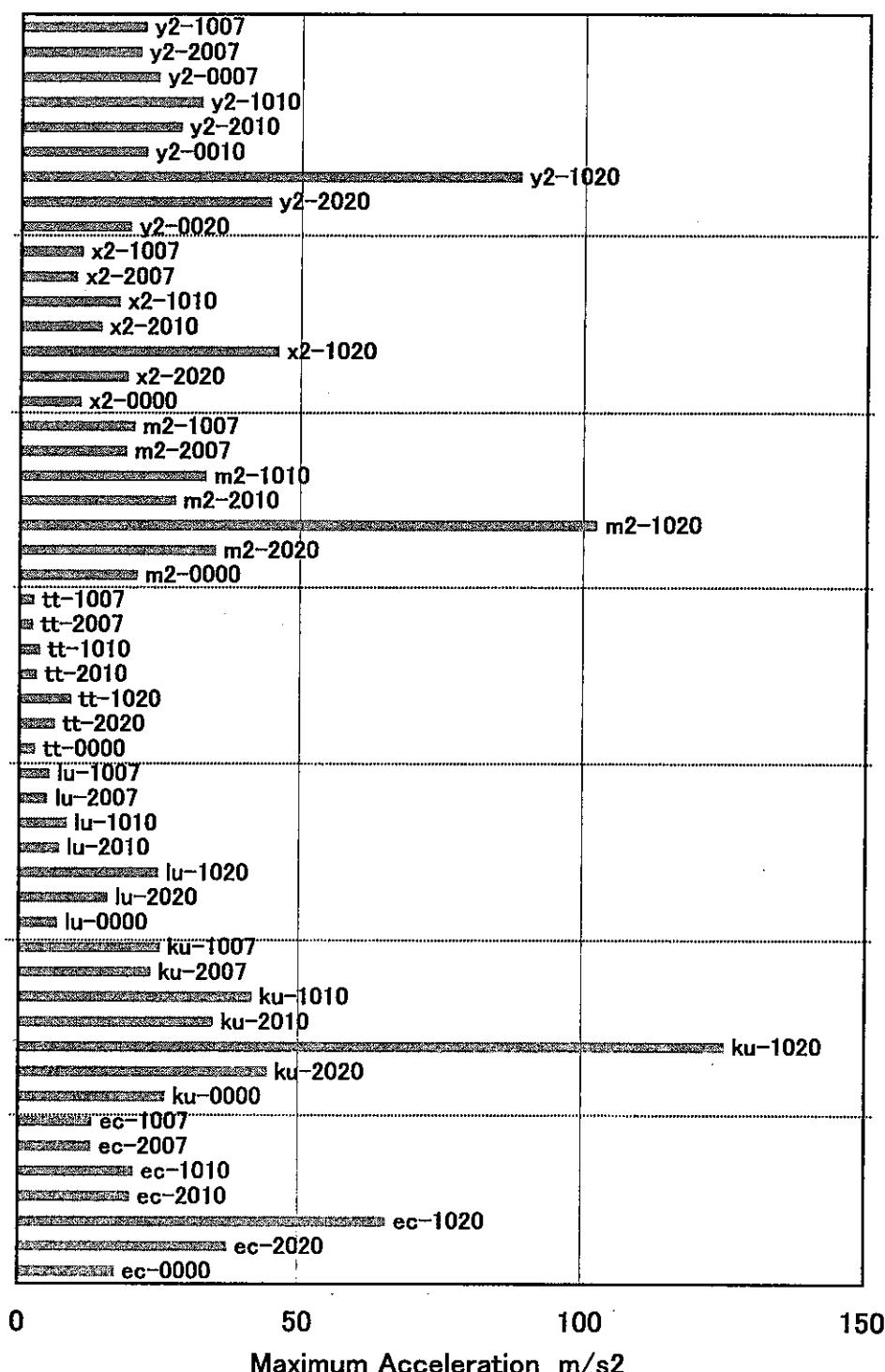


Fig. 2. 11 原子炉建屋デッキ据付けレベルの床応答ピーク(10Hz)の比較

SPECTRAL ACCELERATION at 1.5 Hz

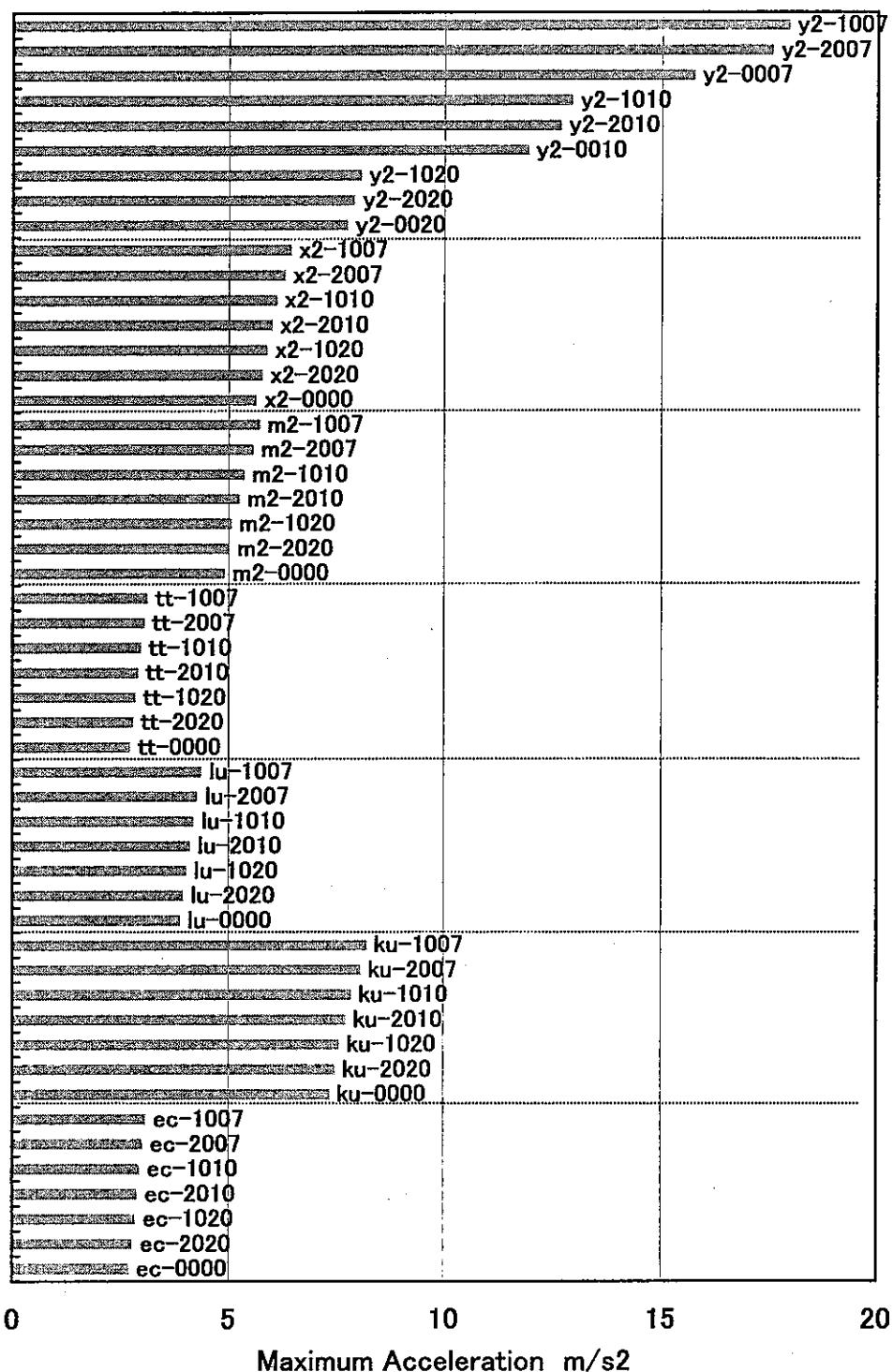


Fig. 2. 12 原子炉建屋デッキ据付けレベルの床応答ピーク(1.5Hz)の比較

3. 上下免震特性に関するパラメタサーベイ

上下免震に要求される適切な特性(免震振動数と減衰特性)の把握を目的として、前章の水平免震建屋の地震応答解析によって得られた原子炉容器据付けレベルでの建屋の応答加速度を入力として用い、上下免震構造の1自由度モデルによる免震構造の地震応答解析を行い、以下の値を算出した。

- 免震構造最大絶対加速度
 - 免震構造の最大相対変位
 - 免震構造の応答に基づく床応答加速度の 10 Hz 近傍での最大値
(デッキに支持される固有振動数 8.0～12.5Hz の機器の最大応答加速度に該当)
- 解析は、線形解析、及び鉛ダンパーの使用を想定した非線形解析の2種類を行った。

3.1 線形解析

3.1.1 解析条件

支持重量については、W=12,000 ton を想定した。

免震振動数と減衰を以下のようにとり、全ての組み合せ 40 ケースについて地震波応答解析を行った。

免震振動数: 0.8、1.0、1.2、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0 Hz (8種類)

減衰比: 2.0、5.0、10、15、20 % (5種類)

地震波(7種類)と地盤条件(3種類)、及び積層ゴム剛性の組み合せ(2種類)が 42 ケースあるので、全解析ケース数は 1680 ケースとなる。なお、減衰比については、必要に応じて 30、40、60 % の追加解析を実施した。

3.1.2 線形解析の結果

線形解析による、免震振動数と応答の関係について整理したものを、地震波毎に Fig.3.1-1～3.1-7 に示す。図で、最大応答加速度と 10 Hz 近傍(8.0～12.5 Hz)の床応答加速度の最大値については、それぞれ非免震の場合の値によって規格化してある。Fig.3.2-1～3.2-7 は、減衰比と応答の関係を示している。なお、これらは全解析結果のうち、積層ゴム剛性 20 Hz の結果である。

これらの結果を概観すると、以下のことがわかる。

【応答加速度】

- － 応答加速度は免震効果の直接的な目安になるものであるが、概して免震振動数の低下とともに低減する。ただし、詳細にみると応答加速度の免震振動数依存性は地震波毎に若干異なっている。例えば神戸地震では免震振動数 2 Hz のところに局所的な極小値が存在しており、また La Union の場合には、減衰比が小さいとき、免震振動数が 2.5 Hz を越えると加速度は急激に増加する。
- － 応答加速度の減衰依存性は、免震振動数が比較的高く、加速度が大きい領域で特に顕著である。すなわち、減衰は、免震振動数が高い場合には補助的な加速度低減効果を持つ。
- － Fig. 3.3-2 は、代表的免震特性(免震振動数 1、2、4 Hz、減衰比 10%)の場合について、入力条件による応答加速度を比較して示したものである。図から、免震振動数が比較的高い場合(4 Hz)には応答は増幅する場合が多く、全ての条件で免震効果(加速度応答の低減)を達成するためには、免震振動数を 1 Hz 程度まで下げてやる必要のあることがわかる。地震条件による相違はこの場合も大きく、十勝沖地震、人工地震波 x、人工地震波 y の場合に、相対的に応答加速度は大きい(免震効果が小さい)。また、相対変位と異なり、加速度応答は(同一の地震入力に対して)地盤条件に大きく影響され、軟質地盤ほど応答加速度の非免震に対する比は大きい。

【相対変位】

- － 相対変位は、概して免震振動数の低下とともに増大する。その傾向は、免震振動数が約 2 Hz を下回るあたりから、特に顕著になる場合が多い。

- － 相対変位の減衰依存性は、免震振動数が低く、変位が大きい領域で特に顕著である。逆に、免震振動数が高い領域では、減衰の影響は比較的小さい。すなわち、減衰による変位低減効果は免震振動数が低いほど、大きい。
- － Fig. 3.3-1 は、代表的免震特性(免震振動数 1、2、4 Hz、減衰比 10%)の場合について、入力条件による相対変位の比較を示したものであるが、これらから、相対変位は地震条件によって異なり、人工地震波 y と神戸地震の場合に比較的大きい。硬質地盤 ($V_s=2000\text{m/s}$) に限定すると、免震振動数を 1 Hz とした場合の最大相対変位は約 60 mm 程度である。一方、人工地震波 y (この地震波は地盤条件によって異なるスペクトルに基づき作成されている)を除き、同一地震入力の場合の地盤条件などにはあまり影響されない。

【床応答加速度】

- － 床応答加速度は、上下免震構造に支持される2次系の応答を表している、という意味において、例えば原子炉構造など、上下同入力の低減の対象とする機器の応答の観点からの免震効果の目安として捉えることができる。床応答加速度は免震振動数の低下とともに低減している。
- － 床応答加速度の減衰依存性は、免震構造の加速度応答の減衰依存性に比較すると、相対的にやや小さい。ただし、地震波によっては、特に免震振動数が高い領域で、やはり補助的な応答低減効果として働いている場合がある。
- － Fig. 3.3-3 は、代表的免震特性(免震振動数 1、2、4 Hz、減衰比 10%)の場合について、入力条件による応答加速度を比較して示したものである。免震構造の直接的な加速度応答と異なり、床応答で見ると、若干の例外(十勝沖地震)を除いて、免震の効果は免震振動数が比較的高い場合においても現れている。地盤条件の影響は、免震構造の加速度応答と比較すると、相対的に小さい。

3.1.3 線形解析に基づく適切な免震特性の検討

次に、線形解析によるパラメタサーベイの結果に基づいて、上下免震として適切な特性に関する検討を行う。検討の指標としては、

- － 免震構造最大応答加速度

－免震構造の最大相対変位

－免震構造の応答に基づく床応答加速度の 10 Hz 近傍での最大値

の3つの応答量を用いる。このうち、応答加速度と床応答については、免震効果の観点から入力波の値(非免震に相当)で規格化して比較する。

【入力地震波のレベルの調整】

相対変位については、例えば配管の強制変位に対する健全性の観点から、その絶対値が問題になるので応答値そのものを比較する。その際、解析に用いた各種の入力地震波のレベルが統一されていないので、相対変位の比較に際しては、以下の方法によって、各入力地震に対する応答に係数を乗じたものを比較の対象とする。

- － 入力地震動の加速度時刻歴を積分して速度及び変位の時刻歴を求める。
Table 3.1 に各地震波の加速度、速度、及び変位の最大値を示す。また、Appendix C に各入力地震波の加速度、速度、変位の時刻歴を示してある。
- － 次に、硬質地盤 ($V_s = 2000 \text{ m/s}$) における人工地震波 y を基準として、各地震波の最大速度をこれにあわせるような係数を求める。その結果を Table 3.2 に示す。El Centro や十勝沖などの記録地震は、約 2 倍する結果となっている。
- － 各地震波によるパラメタサーベイの結果のうち、相対変位についてこの係数を乗じたものを対象として比較する。

【免震特性の判断】

免震特性を判断するのに当たって、十勝沖地震については、対象外とした。これは、十勝沖地震波は、非常に強い長周期成分を有しており、このような波を $V_s = 700 \text{ m/s}$ 以上の比較的硬い地盤と組み合わせるのは、比現実的であり、判断結果が過度に保守的になるからである。同様に人工地震波 y と $V_s = 700 \text{ m/s}$ の組み合わせについても検討対象外とした。以下、本検討において特に断りがない場合、全地震波とは、これらを除く、17 ケースの地震動（積層ゴムの上下方向の固有振動数は $H_v = 20 \text{ Hz}$ ）をさすこととする。

上下免震特性としての適切さの判断は、次の3通りの条件で判断した。

条件	最大 相対変位 mm	規格化 加速度	床応答	
			規格化 床応答	最大値 G
1	50	0.75	0.33 または 1	
2	75	0.75	0.33 または 1	
3	100	1.00	0.50 または 1	

このうち、相対変位の上限値 50 mm については、免震構造と非免震構造を結ぶ配管に対する地震時の相対変位について、熱膨張変位と同程度の値まで許容する、との考えに基づいて設定した。条件 2、3 では、設計対応により、この設定値を緩和できるという前提で設定した。

原子炉容器軸長の半分程度の長さの直管を考える。 $L = 5000 \text{ mm}$

熱膨張率 $a = 2E-5 \text{ mm/mm}/^{\circ}\text{C}$

温度差 $\Delta T = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\Delta L = L * a * \Delta T = 5000 * 2E-5 * 500 = 50 \text{ mm}$$

加速度については入力地震波の 0.75 倍とした。機器の入力となる床応答については 0.33 倍に低減することを目安とした。さらに、10Hz 近傍の床応答が1G を下回る場合についても適切であると判断した。条件 3 では、規格化加速度、規格化床応答の目安を若干緩和した。

【上下免震に適切な振動特性の領域】

Table 3.3(1/3)～(3/3) に、免震特性の判断の目安に基づく、地震波毎の免震特性が適正と判断できる領域を示す。各表においては、横軸は減衰比、縦軸は免震振動数(Hz)で整理した。適正領域は○印で示した。Table 3.4 に、十勝沖を除く6種類の地震波（原則3種類の地盤条件を考慮、積層ゴムの上下方向の固有振動数は $H_v = 20 \text{ Hz}$ とした）について、適否を判断した結果を示す。

個々の地震条件等に若干の例外があるが、まず、全体的に共通な傾向について述べる。地震波毎に比べると、観測地震波に比べ m を除く人工地震波の場合、適正領域が狭い。地盤条件で比べると、せん断波速度が大きい(硬い)地盤ほど、適正領域が広い。免震振動数を小さく設定するとともに、減衰比を大きくすることで適正な領域が広がる(表中では右下がりの直線の上側に適正領域がある)。これとは逆に、免震振動数が小さくなり過ぎると大きな減衰が必要になる(表中では右上がりの直線の下側に適正領域がある)。この結果、免震振動数 1.0~2.0 Hz 付近で、適正領域が広くなる(小さい減衰でも成立するので、最適な振動数を考えることができる)。

しかし、最適免震振動数は、入力地震波毎に異なる。条件 1 の免震特性の判断の目安に基づく評価の場合、最適免震振動数は、人工地震波 m 及び y では 1.5 Hz、La Union や人工地震波 x では 1.0 ~ 1.2 Hz となる。この結果、全ての地震条件で同時に適正となる領域は、免震振動数 1.2 Hz で減衰比 15 % 以上の時、及び 1.0 Hz で 20 % 以上の時、及び 0.8Hz で 30%以上の時に限られる。

条件 2 に基づく評価の場合、免震振動数 1.2 Hz 以下で、減衰比 15 % 以上の領域に適正な領域が拡大する。条件 3 まで緩和すると、適正領域は若干広がり、免震振動数 1.2 Hz 以下で減衰比 10 % 以上の領域で判断条件を満たす。1.5Hz の場合でも、30%以上の減衰で成立する。

【免震特性が不適となる要因の分析】

これまでに、線形解析結果に基づき、免震システムの設計が成立する領域を明らかにした。この検討結果を踏まえて、設計が成立しない(適正でない)領域の主たる要因について分析する。

そこで、まず、設定した判断条件が、適正領域の判断にどのような影響を及ぼすかについて調べる。ここでは、理解を容易にするため典型的な例として、人工地震波 m 、 $V_s = 700 \text{ m/s}$ 、条件 1 の場合を取り上げ、相対変位、規格化加速度、規格化床応答の3つの制限を緩くした場合、厳しくした場合の6ケースについて調べた。結果を Table 3.5.1 に示す。

相対変位の条件を操作すると、低振動数、低減衰の方向に拡縮することがわかる。表中においては、右上がりの線で領域の適否が区分されることになり、適正領域はその線の下側(高振動数側)に存在する。一方、規格化加速度の条件を操作すると、高振動数、低減衰の方向、すなわち表中では右下がりの線で領域が区分されており、適

正領域は線の上側(低振動数側)にある。規格化床応答の条件を操作する場合、表中でほぼ水平な線によって、適否が区分される。適正な領域は、上側(低振動数側)となる。この結果を、Fig.3.4 に模式的に示す。適正な領域は、3本の線に囲まれた領域となる。この図では、それぞれを直線で表したが、実際には、地震応答解析で得られる応答値で評価しているので、複雑な(局所的な凹凸を多分に含む)曲線となる(必ずしも線で表せる保証はないが、ここでは定性的に説明するため線で表している)。

この検討で、注目すべき点は、大きな減衰を与えた場合、高い振動数方向にも、低い振動数方向にも、適正な領域が広がる可能性がある点にある。本検討においては、当初減衰比 20%までの条件でサーベイすることとしていたが、上記の検討結果から、60%まで広げてサーベイすることとした。その結果、上述したように、条件1では 0.8Hz が、条件3では 1.5Hz において適切な領域があることがわかった。

次に、前述の条件2を参照解として、地震、地盤、判断等の条件をひとつづつ外して、成立(適正)範囲がどのように広がるかを調べた。地震波等の条件毎に適正範囲の広がり具合は異なるが、結果を包括的に把握するため、前述の Table 3.4 と同様に全ての条件(6種類の地震波、3種類の地盤条件)を考慮して判断したものと比較する。結果を Table 3.5.2 に示す。

- ① 積層ゴムの上下方向の固有振動数が 10 Hz の場合の適正範囲は、同 20 Hz の場合と結果的には同じになった。積層ゴムの上下方向剛性は、適正範囲にあまり影響しないと言える。
- ② 地盤のせん断波速度 $V_s = 700 \text{ m/s}$ を外し 1000 m/s 以上で判断した場合の適正範囲は、1.5Hz で 40%以上の大きな減衰比と組合せた場合に適正と判断できる点を除いて基本的に同じになった。地盤条件についても、適正範囲への影響の度合いは小さいと言える。
- ③ 人工地震波だけで判断した場合、適正範囲は若干広がる。0.8 Hz の場合、10 % 程度の減衰比があれば成立する。
- ④ 逆に、観測地震波(神戸、El Centro、La Union)の3波だけで判断した場合、免震振動数が 1.5Hz の場合まで、適正領域が広がった。
- ⑤ ③④の2つの検討例だけで、結論を導くことは困難であるが、上下免震の成立性を判断するのに際して、どのような地震波を考慮するのかで評価結果が変わることになる。従って、検討する波の選定に十分な検討、配慮が必要である。

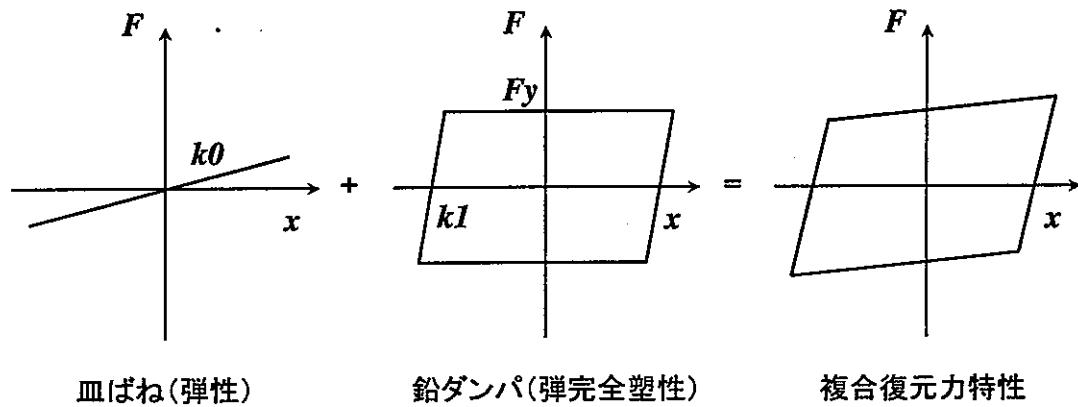
- ⑥ 相対変位の制限条件を外した場合、検討した最低振動数 0.8 Hz において、減衰比の選択可能な領域が若干広がり、10 % 以上で適正となる。
- ⑦ 規格化加速度の制限条件を外した場合、免震振動数が 2.5 Hz でも適正な領域が存在するとともに、1.5Hz の場合に要する減衰が 2% にまで低下する。
- ⑧ 規格化床応答の制限を削除しても、適正領域の拡縮はなかった。
- ⑨ ⑥～⑧の結果は、前述の判定条件の影響の検討結果と矛盾しない。

線形解析の結果、検討した全ての条件（地震波、地盤、積層ゴムの上下方向剛性）を同時に満たす最適なパラメタとして、免震振動数 1.2Hz、減衰比 15%以上という結論が得られた。同時に、機器上下免震の成立性はあるものの、適切な領域は比較的狭いことも分かった。3次元免震を実現するためには、免震周波数、減衰比といった基本的なパラメタの選択も含め、十分な検討が必要であることがわかる。

3.2 鉛ダンパの使用を想定した非線形解析

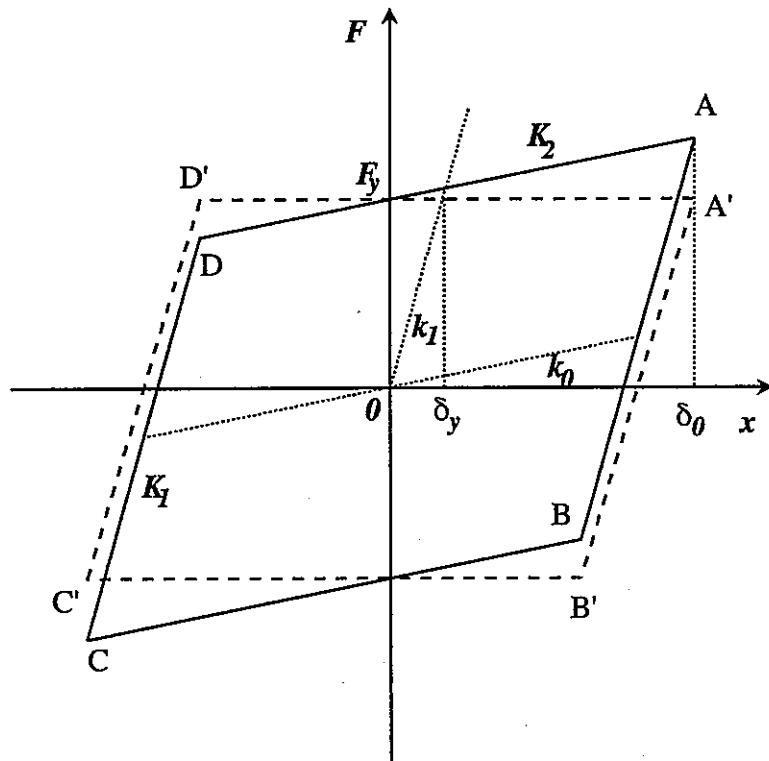
3.2.1 非線形解析の方法と条件

図のように、皿ばねの弾性剛性と鉛ダンパの弾完全塑性剛性の並列による複合復元力を考える。



(1) 二直線モデルによる復元力特性の設定

図のように、免震要素の復元力を弾塑性の二直線で表現できるものとする。



皿ばね及び鉛ダンパの剛性、復元力特性を決めるパラメタは以下の通りである。

- 皿ばね(弾性) 剛性: k_0
- 鉛ダンパ(弾完全塑性) 剛性: k_1
降伏荷重: F_y
降伏変位: δ_y

調和加振に対する系の等価振動数 f_{eq} と等価減衰定数 h_{eq} はそれぞれ、

$$f_{eq} = \sqrt{1 + \alpha/\mu} \cdot f_0 \quad (3-1)$$

$$h_{eq} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\mu - 1}{\mu(\mu/\alpha + 1)} \right] \quad (3-2)$$

ただし、

$$f_0 \left(= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_0 g}{W}} \right) \quad \text{弹性固有振動数、 } W: \text{支持重量}$$

$$\mu (= x/\delta_y) : \text{塑性率}$$

$$\alpha (= k_1/k_0) : \text{剛性比}$$

$$\beta (= F_y/W) : \text{降伏震度}$$

で与えられる。なお、式 (3-1)、(3-2) の導出は Appendix D 参照。等価振動数、等価減衰定数とともに、見かけ上は降伏震度 β に依存しないことに注意を要する。

式 (3-1)、(3-2) による等価振動数、等価減衰定数と塑性率の関係を Fig. 3.5 に示す。等価振動数、等価減衰定数とともに剛性比 α が大きいほど大きい。等価振動数は、最初は塑性率とともに急速に低下し、塑性率 μ の大きい領域では低減は緩やかになる。免震振動数の観点から、あまり大きな剛性比は好ましくないことがわかる。一方、等価減衰定数は塑性率 $\mu = 1$ で急速に立ち上がり、 $\mu = 2 \sim 6$ で極大値をとった後、緩やかに減少する。

仮に、減衰 10 % 以上を確保し、かつ振動数の増大を 30 % 程度に抑制しようとすると、 $\alpha = 2 \sim 5$ 程度の値が適当である。また、延性率は、等価振動数と等価減衰の振幅依存性を緩和する観点から、ある程度以上 ($\mu > 4$ 程度が適当と考えられ

る) となるのが望ましいと考えられる。

(2) 地震波応答に対する復元力特性の設定

地震波応答の場合には、調和応答と異なり、応答は継続時間中一定ではないため、所要の復元力特性を解析的に求めることは困難である。そこで、剛性比 α 及び降伏震度 β に関するパラメタサーベイを行うこととする。

- ① 支持重量は、W=12,000 ton を設定する。
- ② 免震振動数は、 $f_0 = 0.5 \sim 5.0$ Hz (10種類)に設定する。
- ③ 剛性比 α 、降伏震度 β についてはそれぞれ、 $\alpha = 1.0 \sim 20$ (10種類)、 $\beta = 0.01 \sim 0.2$ (13種類)に設定する。
- ④ 設定したパラメタから、以下の関係式を用いて、降伏荷重 F_y 、皿ばねの弾性剛性 k_0 、鉛ダンパーの剛性 k_1 、降伏変位 δ_y を算出する。

$$\left. \begin{array}{l} k_0 = (2\pi f_0)^2 W / g \\ k_1 = \alpha k_0 \\ F_y = \beta W \\ \delta_y = F_y / (k_0 + k_1) \end{array} \right\} \quad (3-3)$$

地震波(7種類)と地盤条件(3種類)、及び積層ゴム剛性の組合せ(2種類)が 42 ケースあるので、全解析ケース数は 54,600 ケースである。

なお、非線形解析を行うのに当たっては、入力地震波のレベルを統一するために、各地震波に線形解析において相対変位を比較する際に求めた係数 (Table 3.2 参照) を乗じた地震波を入力波とした。

3.2.2 非線形解析の結果

非線形解析による免震振動数 (設定値:皿ばねの弾性剛性のみで決まる値) と応答の関係を、地震波毎に Fig. 3.6.1～3.6.7 及び Fig. 3.7.1～3.7.7 に示す。Fig. 3.6 は、剛性比 α を 5 に固定し、降伏震度 β をパラメタとして整理した結果を示している。逆に Fig. 3.7 は、 β を 0.05 に固定し、 α をパラメタとして整理した。

図で、最大応答加速度と 5~12 Hz の床応答加速度の最大値については、それぞれ入力波の値によって規格化した。

本検討において、卓越振動数とは、入力加速度の床応答スペクトル($h = 5\%$)に対する、応答加速度の床応答スペクトル($h = 5\%$)の比が最大値となる振動数と定義して求めた。得られた卓越振動数を免震振動数(皿ばねの剛性だけで決まる振動数)で割り、規格化した。

また、等価減衰比の等価とは、最大応答相対変位が、適当な減衰比を与えた線形解析で得られる相対変位と等しくなる意で用いた。具体的には、予め 1~100 % の減衰比を与えた線形解析を行い、減衰比と相対変位の関係を求めておく。これを用いて、非線形解析の結果得られた相対変位から減衰比を内挿し、この値を等価減衰比とした。

なお、図には全解析結果のうち、積層ゴム剛性 20 Hz の結果を示している。

これらの結果を概観すると、以下のことがわかる。

【応答加速度】

- 規格化応答加速度は、免震振動数の低下とともに低減する。応答加速度の免震振動数依存性は地震波毎に若干異なっているが、加速度を低減するためには、免震振動数を約 2 Hz 以下に設定する必要がある。
- α 、 β に関する依存性は、相対速度の場合とほぼ同様となっている。 β に関する依存性は顕著であり、加速度低減のためには、 β は大きな値とすることが好ましい。

【相対変位】

- 線形解析の場合と同様に、相対変位は、概して免震振動数の低下とともに増大する。その傾向は、免震振動数が約 2 Hz を下回るあたりから、特に顕著になる。
- 剛性比 α が大きいほど、相対変位は小さい。免震振動数が約 1 Hz 以上の領域では、 α の依存性は小さい。
- 降伏震度 β の依存性は、全ての免震振動数域で顕著であり、相対変位抑制の観点から β は大きな値とすることが好ましい。

【床応答加速度】

- 規格化床応答加速度は、規格化加速度と同様に、免震振動数の低下とともに低減する。床応答を低減するためには、免震振動数を約 2 Hz 以下に設定する必要がある。
- α に関する依存性は、相対速度、加速度の場合とほぼ同様に小さい。
- β に関する依存性は顕著であるが、傾向が相対速度、加速度の場合と異なる。床応答の低減のためには、 β は小さな値とすることが好ましい。

【等価振動数】

- 規格化振動数についても、 α に関する依存性は小さく、 β に関する依存性は顕著である。
- β が 0.08 以上になると、規格化振動数は大きくなると同時に、ばらつく傾向がある。
- β が 0.05 以下であると、規格化振動数は 1 より若干大きい値となり、振動数依存性は小さい。この場合、振動数が約 1 Hz 以下の領域で大きくなる。

【等価減衰比】

- β が一定値の場合、 α に関する依存性は小さい。振動数が約 1 Hz 以下の場合、減衰比は急激に増大する。
- β が大きいほど、等価減衰比は大きい。
- β が 0.05 以下であると、規格化振動数は 1 より若干大きい値となり、振動数依存性は小さい。この場合、振動数が約 1 Hz 以下の領域で大きくなる。

3.2.3 非線形解析に基づく適切な免震特性の検討

非線形解析によるパラメタサーベイの結果に基づいて、上下免震システムとして適切な免震特性に関する検討を行う。検討の指標としては、線形解析の場合と同様に、

- 免震構造の最大相対変位
- 免震構造の規格化応答加速度

－免震構造の応答に基づく規格化床応答加速度
の3つの応答量を用いる。

【免震特性の判断の目安】

上下免震特性としての適切さの判断は、線形解析の場合と同様に、次の条件について行った。

条件	最大相対変位 mm	規格化 加速度	床応答	
			規格化 床応答	最大値 G
1	50	0.75	0.33 または 1	
2	75	0.75	0.33 または 1	
3	100	1.00	0.50 または 1	

【上下免震に適切なパラメタの組み合わせ】

Table 3.6.1～3.6.3 に、上記の免震特性の判断の目安に基づく条件 1～3 について、地震波毎の相対変位、規格化加速度、規格化床応答加速度に関する適正領域を示す。各表は、積層ゴム剛性 20 Hz の結果について、縦軸は α 、横軸は β で整理した。例えば、Table 3.6.1 (1/6) は、人工地震波 m について地盤条件3種類のケースについて、3つの応答量全てに適正と判断された領域を○で示した。このような判断を6種類の地震波(十勝沖地震、人工地震yと Vs=700m/s の組み合わせについて線形解析の場合と同様の理由で除いた)についてそれぞれ行い [Table 3.6.1 (1/6)～(6/6)]、Table 3.7 (1/3) に、6 種類の地震波全てについて判断した結果を示した。条件 2 [Table 3.6.2 (1/6)～(6/6)、Table 3.7 (2/3)] 及び 3 [Table 3.6.3 (1/6)～(6/6)、Table 3.7 (3/3)]について同様の様式で示している。

各条件とも、適正なパラメタの組み合わせは地震波毎に大きく異なっている。

条件 1 の場合、神戸地震波 [Table 3.6.1 (3/6)] では皿ばねの剛性のみで決まる免震振動数は 2.5 Hz まで、El Centro [Table 3.6.1 (2/6)] で 2.0 Hz 、人工地震 m [Table 3.6.1 (1/6)] や y [Table 3.6.1 (6/6)] で 1.5 Hz まで適正な領域

が存在するが、人工地震 x [Table 3.4 (5/24)] の場合 1.0 Hz 以下にしか適正な領域がないため、全ての地震波で適正と判断できる領域 [Table 3.7 (1/3)] は、免震振動数 1.0 Hz 以下に限られる。鉛ダンパのパラメタ α と β の組み合わせについては、免震振動数 0.8 Hz の場合、 $\alpha = 4 \sim 20$ 、 $\beta = 0.05 \sim 0.10$ の範囲における多くの組み合わせで適正となる。条件 2 の場合 [Table 3.7 (2/3)] でも、免震振動数は 1.0 Hz 以下の範囲に限定される。この条件の場合、適正な α と β の組み合わせについては、条件 1 の場合よりも広い。特に条件 1 の場合ほとんど適正な組み合わせがなかった免震振動数 0.5Hz の場合、 α が 3 以上で、 $\beta = 0.03 \sim 0.10$ の範囲の多くの組み合わせで適正となる。条件 3 [Table 3.7 (3/3)] まで判断目安を緩和すると、免震振動数は 1.2 Hz 以下の範囲に広がり、適正な α と β の組み合せも増える。

これらの結果を包括的に判断すると、最適なパラメタの組み合わせは、皿ばねの免震振動数は 0.8~1.0 Hz、鉛ダンパの剛性比 α は 4~6、降伏震度 β は 0.05~0.06 の範囲と判断できる。

【上下免震に適切な振動特性の領域】

これまでに、非線形解析に基づく、適正なパラメタの組み合わせを求めた。この中で条件 1 及び 2 を満たす組み合わせについて、卓越振動数、等価減衰比の関係について述べる。繰り返すことになるが、条件を満たすことは、6種類の地震波と3種類の地盤条件の合計 17 ケースで適正と判断されたことを意味する。3.1.2 節で述べた定義に従うと、この 17 ケースそれぞれに対応する卓越振動数、等価減衰比が求まる。この 17 個の卓越振動数、等価減衰比の平均値をとり、その関係を整理したものを Fig. 3.8 に示す。従ってこの図は、あらゆる地震波に対して、ある等価振動数とある等価減衰比を有する非線形上下免震システムの成立の可能性を示す目安になると解釈できる。

図中には、線形解析で適正と判断された組み合わせについても合わせてプロットした。線形解析の条件 1 で適正と判断されたのは、1.2Hz 以下の狭い範囲であったが、非線形解析ではこれに比べかなり広い範囲で適正となることがわかる。

線形解析の結果、適正な振動数は、1.2 Hz 以下であったのに対し、非線形解析では、免震振動数 1.0 Hz 以下の皿ばねを用いる必要があるが、適當な減衰要素を加えることで、システム全体の振動数として 1.0~2.0 Hz 程度までの範囲で成立の可能性があることが分かる。

免震振動数 0.5 Hz の皿ばねを用いる場合、減衰比 70%以上の減衰要素を必要とするので、適正な組み合わせを実現することは極めて困難と判断できる。一方、0.8 ~1.0 Hz の皿ばねであれば、減衰比 20 % 程度を与えることで、成立する見込みは十分ある。

Fig. 3.9.1~3.9.2 は、同じ免震振動数を有する皿ばね毎に、Fig. 3.8 に示す各プロットに対応する、鉛ダンパのパラメタ α 及び β の値を示すものである。これらの図を用いることで、ある等価な振動数、減衰比を有する免震システムが成立する可能性があるかどうかの目安(Fig. 3.8)に加え、これを達成する皿ばねの振動数、鉛ダンパのパラメタを概ね知ることが出来る。

3.3 上下免震特性に関するパラメタサーベイのまとめ

機器上下免震システムを想定した1自由度モデルを用いて、7種類の地震波に対する応答を、線形解析、非線形解析(弹性皿ばね+復元力特性が弾完全塑性で表せる鉛ダンパを想定)の 2 通りで実施した。上下免震システムの免震特性として、相対変位、規格化加速度、規格化床応答の3つの応答量に対する目安を設定し、適正なパラメタの組み合わせ領域を調べた。線形解析ベースでは、適正な振動数と減衰比の組み合わせの領域は狭いが、減衰要素を組み合わせることで、比較的広いパラメタの組み合わせで、効果的な免震特性が得られる可能性があること、すなわち、機器上下免震の実現可能性があることが示せた。

今後、検討する地震波の想定、必要な免震効果を具体化するとともに、皿ばねや鉛ダンパ等の免震要素の具体化と実現可能性の検討が必要となる。

Table 3.1 入力用上下地震動の最大値一覧

記号	地震名	最大速度(cm/s)	最大加速度(G)	最大変位(cm)
ec-0000	El Centro 地震	11.0	0.211	5.5
ku-0000	神戸地震	15.3	0.462	14.9
Lu-0000	La Union 地震	19.1	0.126	4.9
tt-0000	十勝沖地震	10.9	0.117	8.3
M2-0000	人工地震波 m	13.4	0.238	1.4
X2-0000	人工地震波 x	19.0	0.210	4.7
Y2-0020	人工地震波 y2-1	22.0	0.340	8.5
Y2-0010	人工地震波 y2-2	35.6	0.367	14.4
Y2-0007	人工地震波 y2-3	49.0	0.450	24.1

Table 3.2 入力地震動の倍率と最大値

地震動名	記号	加速度 m/s ²	床応答* m/s ²	速度 cm/s	倍率	加速度 m/s ²	床応答* m/s ²
El Centro	ec-0000	2.06	17.10	11.0	2.00	4.13	34.21
	ec-2020	4.97	37.27		2.00	9.94	74.53
	ec-1020	4.24	65.41		2.00	8.48	130.82
	ec-2010	3.22	19.81		2.00	6.44	39.63
	ec-1010	2.65	20.44		2.00	5.31	40.87
	ec-2007	2.21	12.88		2.00	4.42	25.75
	ec-1007	2.02	13.03		2.00	4.05	26.06
神戸	ku-0000	4.52	26.19	19.1	1.15	5.20	30.11
	ku-2020	6.13	44.37		1.15	7.05	53.33
	ku-1020	8.62	125.29		1.15	9.92	144.08
	ku-2010	5.45	34.73		1.15	6.26	39.94
	ku-1010	5.43	41.64		1.15	6.24	47.89
	ku-2007	4.59	23.49		1.15	5.28	27.01
	ku-1007	4.58	25.14		1.15	5.27	28.91
La Union	lu-0000	1.24	6.76	15.3	1.44	1.78	9.37
	lu-2020	1.81	15.72		1.44	2.60	22.64
	lu-1020	2.13	24.76		1.44	3.07	35.66
	lu-2010	1.54	6.99		1.44	2.22	10.07
	lu-1010	1.70	8.40		1.44	2.45	12.09
	lu-2007	1.43	4.89		1.44	2.05	7.04
	lu-1007	1.38	5.31		1.44	1.99	7.64
十勝沖	tt-0000	1.14	2.80	10.9	2.02	2.31	5.66
	tt-2020	1.28	6.20		2.02	2.58	12.65
	tt-1020	1.41	9.09		2.02	2.86	17.82
	tt-2010	1.36	3.06		2.02	2.74	5.93
	tt-1010	1.52	3.51		2.02	3.06	6.87
	tt-2007	1.32	2.28		2.02	2.67	4.56
	tt-1007	1.43	2.52		2.02	2.90	4.95
人工地震 m	m2-0000	2.34	20.84	13.4	1.64	3.83	34.18
	m2-2020	6.53	34.85		1.64	10.71	57.15
	m2-1020	5.59	102.42		1.64	9.17	167.97
	m2-2010	4.19	27.66		1.64	6.87	45.35
	m2-1010	3.85	33.11		1.64	6.32	54.30
	m2-2007	3.60	18.85		1.64	5.91	30.91
	m2-1007	3.26	20.27		1.64	5.35	33.25
人工地震 x	x2-0000	2.05	10.59	19.0	1.16	2.38	12.29
	x2-2020	3.42	18.97		1.16	3.97	22.01
	x2-1020	4.41	45.88		1.16	5.12	53.22
	x2-2010	2.68	14.22		1.16	3.11	16.49
	x2-1010	3.28	17.48		1.16	3.81	20.28
	x2-2007	2.52	9.86		1.16	2.92	11.44
	x2-1007	2.80	10.78		1.16	3.25	12.50
人工地震 y Vs=2000	y2-0020	3.21	19.51	22.0	1.00	3.21	19.51
	y2-2020	6.36	44.39		1.00	6.36	44.39
	y2-1020	5.89	88.52		1.00	5.89	88.52
人工地震 y Vs=1000	y2-0010	3.92	22.21	35.6	0.62	2.43	13.77
	y2-2010	4.36	28.37		0.62	2.70	18.08
	y2-1010	4.66	32.08		0.62	2.89	19.89
人工地震 y Vs=700	y2-0007	4.50	24.39	49.0	0.45	2.03	10.98
	y2-2007	4.65	21.05		0.45	2.09	12.27
	y2-1007	5.10	22.01		0.45	2.29	9.90

* 5Hz～12Hz間の床応答スペクトル(1%減衰)の最大値

Table 3.3(1/3) 線形解析に基づく地震波毎の免震特性適正領域

条件 1

m2-2020							m2-2010							m2-2007												
	2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60
0.8									0.8									0.8								
1.0									1.0									1.0								
1.2									1.2									1.2								
1.5									1.5									1.5								
2.0									2.0									2.0								
2.5									2.5									2.5								
3.0									3.0									3.0								
4.0									4.0									4.0								
ec-2020							ec-2010							ec-2007												
	2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60
0.8									0.8									0.8								
1.0									1.0									1.0								
1.2									1.2									1.2								
1.5									1.5									1.5								
2.0									2.0									2.0								
2.5									2.5									2.5								
3.0									3.0									3.0								
4.0									4.0									4.0								
ku-2020							ku-2010							ku-2007												
	2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60
0.8									0.8									0.8								
1.0									1.0									1.0								
1.2									1.2									1.2								
1.5									1.5									1.5								
2.0									2.0									2.0								
2.5									2.5									2.5								
3.0									3.0									3.0								
4.0									4.0									4.0								
lu-2020							lu-2010							lu-2007												
	2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60
0.8									0.8									0.8								
1.0									1.0									1.0								
1.2									1.2									1.2								
1.5									1.5									1.5								
2.0									2.0									2.0								
2.5									2.5									2.5								
3.0									3.0									3.0								
4.0									4.0									4.0								
x2-2020							x2-2010							x2-2007												
	2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60
0.8									0.8									0.8								
1.0									1.0									1.0								
1.2									1.2									1.2								
1.5									1.5									1.5								
2.0									2.0									2.0								
2.5									2.5									2.5								
3.0									3.0									3.0								
4.0									4.0									4.0								
v2-2020							v2-2010																			
	2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60
0.8									0.8									0.8								
1.0									1.0									1.0								
1.2									1.2									1.2								
1.5									1.5									1.5								
2.0									2.0									2.0								
2.5									2.5									2.5								
3.0									3.0									3.0								
4.0									4.0									4.0								

横軸: 減衰比 %
縦軸: 免震振動数 Hz

横軸: 減衰比 %
縦軸: 免震振動数 Hz

Table 3.3(2/3) 線形解析に基づく地震波毎の免震特性適正領域

条件2

m2-2020								m2-2010								m2-2007										
	2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60
0.8	○	○	○	○	○	○	○	○	0.8	○	○	○	○	○	○	○	0.8	○	○	○	○	○	○	○	○	
1.0	○	○	○	○	○	○	○	○	1.0	○	○	○	○	○	○	○	1.0	○	○	○	○	○	○	○	○	
1.2	○	○	○	○	○	○	○	○	1.2	○	○	○	○	○	○	○	1.2	○	○	○	○	○	○	○	○	
1.5	○	○	○	○	○	○	○	○	1.5	○	○	○	○	○	○	○	1.5	○	○	○	○	○	○	○	○	
2.0	○	○	○	○	○	○	○	○	2.0	○	○	○	○	○	○	○	2.0	○	○	○	○	○	○	○	○	
2.5	○	○	○	○	○	○	○	○	2.5	○	○	○	○	○	○	○	2.5	○	○	○	○	○	○	○	○	
3.0	○	○	○	○	○	○	○	○	3.0	○	○	○	○	○	○	○	3.0	○	○	○	○	○	○	○	○	
4.0	○	○	○	○	○	○	○	○	4.0	○	○	○	○	○	○	○	4.0	○	○	○	○	○	○	○	○	
ec-2020								ec-2010								ec-2007										
	2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60
0.8	○	○	○	○	○	○	○	○	0.8	○	○	○	○	○	○	○	0.8	○	○	○	○	○	○	○	○	
1.0	○	○	○	○	○	○	○	○	1.0	○	○	○	○	○	○	○	1.0	○	○	○	○	○	○	○	○	
1.2	○	○	○	○	○	○	○	○	1.2	○	○	○	○	○	○	○	1.2	○	○	○	○	○	○	○	○	
1.5	○	○	○	○	○	○	○	○	1.5	○	○	○	○	○	○	○	1.5	○	○	○	○	○	○	○	○	
2.0	○	○	○	○	○	○	○	○	2.0	○	○	○	○	○	○	○	2.0	○	○	○	○	○	○	○	○	
2.5	○	○	○	○	○	○	○	○	2.5	○	○	○	○	○	○	○	2.5	○	○	○	○	○	○	○	○	
3.0	○	○	○	○	○	○	○	○	3.0	○	○	○	○	○	○	○	3.0	○	○	○	○	○	○	○	○	
4.0	○	○	○	○	○	○	○	○	4.0	○	○	○	○	○	○	○	4.0	○	○	○	○	○	○	○	○	
ku-2020								ku-2010								ku-2007										
	2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60
0.8			○	○	○	○	○	○	0.8			○	○	○	○	○	0.8			○	○	○	○	○	○	
1.0			○	○	○	○	○	○	1.0			○	○	○	○	○	1.0			○	○	○	○	○	○	
1.2			○	○	○	○	○	○	1.2			○	○	○	○	○	1.2			○	○	○	○	○	○	
1.5			○	○	○	○	○	○	1.5			○	○	○	○	○	1.5			○	○	○	○	○	○	
2.0			○	○	○	○	○	○	2.0			○	○	○	○	○	2.0			○	○	○	○	○	○	
2.5			○	○	○	○	○	○	2.5			○	○	○	○	○	2.5			○	○	○	○	○	○	
3.0			○	○	○	○	○	○	3.0			○	○	○	○	○	3.0			○	○	○	○	○	○	
4.0			○	○	○	○	○	○	4.0			○	○	○	○	○	4.0			○	○	○	○	○	○	
lu-2020								lu-2010								lu-2007										
	2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60
0.8	○	○	○	○	○	○	○	○	0.8	○	○	○	○	○	○	○	0.8	○	○	○	○	○	○	○	○	
1.0			○	○	○	○	○	○	1.0			○	○	○	○	○	1.0			○	○	○	○	○	○	
1.2			○	○	○	○	○	○	1.2			○	○	○	○	○	1.2			○	○	○	○	○	○	
1.5			○	○	○	○	○	○	1.5			○	○	○	○	○	1.5			○	○	○	○	○	○	
2.0			○	○	○	○	○	○	2.0								2.0			○	○	○	○	○	○	
2.5			○	○	○	○	○	○	2.5								2.5			○	○	○	○	○	○	
3.0			○	○	○	○	○	○	3.0								3.0			○	○	○	○	○	○	
4.0			○	○	○	○	○	○	4.0								4.0			○	○	○	○	○	○	
x2-2020								x2-2010								x2-2007										
	2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60
0.8			○	○	○	○	○	○	0.8			○	○	○	○	○	0.8			○	○	○	○	○	○	
1.0			○	○	○	○	○	○	1.0			○	○	○	○	○	1.0			○	○	○	○	○	○	
1.2			○	○	○	○	○	○	1.2			○	○	○	○	○	1.2			○	○	○	○	○	○	
1.5			○	○	○	○	○	○	1.5								1.5			○	○	○	○	○	○	
2.0			○	○	○	○	○	○	2.0								2.0			○	○	○	○	○	○	
2.5			○	○	○	○	○	○	2.5								2.5			○	○	○	○	○	○	
3.0			○	○	○	○	○	○	3.0								3.0			○	○	○	○	○	○	
4.0			○	○	○	○	○	○	4.0								4.0			○	○	○	○	○	○	
y2-2020								y2-2010																		
	2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60		2	5	10	15	20	30	40	60
0.8			○	○	○	○	○	○	0.8			○	○	○	○	○	0.8			○	○	○	○	○	○	
1.0			○	○	○	○	○	○	1.0			○	○	○	○	○	1.0			○	○	○	○	○	○	
1.2			○	○	○	○	○	○	1.2			○	○	○	○	○	1.2			○	○	○	○	○	○	
1.5			○	○	○	○	○	○	1.5								1.5			○	○	○	○	○	○	
2.0			○	○	○	○	○	○	2.0								2.0			○	○	○	○	○	○	
2.5			○	○	○	○	○	○	2.5								2.5			○	○	○	○	○	○	
3.0			○	○	○	○	○	○	3.0								3.0			○	○	○	○	○	○	
4.0			○	○	○	○	○	○	4.0								4.0			○	○	○	○	○	○	

横軸:減衰比 %
縦軸:免震振動数 Hz

75 > 相対変位 (mm) 0.75 > 規格化加速度
 または 0.33 > 規格化床応答
 1 > 10Hz近傍の床応答の最大値(G)

Table 3.3(3/3) 線形解析に基づく地震波毎の免震特性適正領域

条件3

横軸: 減衰比 %
縦軸: 免震振動数 Hz

100 > 相対変位 (mm)

1.00 > 規格化加速度

0.50 > 規格化床応答

または $1 > 10\text{Hz}$ 近傍の床応答の最大値(G)

Table 3.4 線形解析に基づく免震特性の適正領域

条件1

	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8Hz						○	○	○
1.0Hz					○	○	○	○
1.2Hz				○	○	○	○	○
1.5Hz								
2.0Hz								
2.5Hz								
3.0Hz								
4.0Hz								
成立条件								
0.75 > 規格化加速度								
0.33 > 規格化床応答 または 床応答の最大値が1G以下								
50 > 相対変位 (mm)								

条件2

	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8Hz				○	○	○	○	○
1.0Hz				○	○	○	○	○
1.2Hz				○	○	○	○	○
1.5Hz								
2.0Hz								
2.5Hz								
3.0Hz								
4.0Hz								
成立条件								
0.75 > 規格化加速度								
0.33 > 規格化床応答 または 床応答の最大値が1G以下								
75 > 相対変位 (mm)								

条件3

	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8Hz		○	○	○	○	○	○	○
1.0Hz		○	○	○	○	○	○	○
1.2Hz		○	○	○	○	○	○	○
1.5Hz					○	○	○	○
2.0Hz							○	
2.5Hz							○	
3.0Hz							○	
4.0Hz							○	
成立条件								
1 > 規格化加速度								
0.5 > 規格化床応答 または 床応答の最大値が1G以下								
100 > 相対変位 (mm)								

Table 3.5.1 線形解析における不適正要因の分析(m2-2010、条件1)

m2-2010 条件1

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8				○	○	○	○	○
1.0			○	○	○	○	○	○
1.2			○	○	○	○	○	○
1.5	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0		○	○	○	○	○	○	○
2.5			○	○	○	○	○	○
3.0				○	○	○	○	○
4.0								

0.75 > 規格化加速度
0.33 > 規格化床応答
50 > 相対変位 (mm)

① 相対変位の条件を緩くした場合

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8		○	○	○	○	○	○	○
1.0	○	○	○	○	○	○	○	○
1.2	○	○	○	○	○	○	○	○
1.5	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0		○	○	○	○	○	○	○
2.5			○	○	○	○	○	○
3.0				○	○	○	○	○
4.0								

0.75 > 規格化加速度
0.33 > 規格化床応答
100 > 相対変位 (mm)

④ 相対変位の条件を厳しくした場合

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8								
1.0								
1.2						○	○	○
1.5					○	○	○	○
2.0				○	○	○	○	○
2.5				○	○	○	○	○
3.0					○	○	○	○
4.0								

0.75 > 規格化加速度
0.33 > 規格化床応答
30 > 相対変位 (mm)

② 規格化加速度の条件を緩くした場合

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8			○	○	○	○	○	○
1.0			○	○	○	○	○	○
1.2			○	○	○	○	○	○
1.5	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0	○	○	○	○	○	○	○	○
2.5	○	○	○	○	○	○	○	○
3.0	○	○	○	○	○	○	○	○
4.0								

1 > 規格化加速度
0.33 > 規格化床応答
50 > 相対変位 (mm)

⑤ 規格化加速度の条件を厳しくした場合

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8				○	○	○	○	○
1.0				○	○	○	○	○
1.2				○	○	○	○	○
1.5				○	○	○	○	○
2.0				○	○	○	○	○
2.5								
3.0								
4.0								

0.5 > 規格化加速度
0.33 > 規格化床応答
50 > 相対変位 (mm)

③ 規格化床応答の条件を緩くした場合

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8				○	○	○	○	○
1.0			○	○	○	○	○	○
1.2			○	○	○	○	○	○
1.5	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0		○	○	○	○	○	○	○
2.5			○	○	○	○	○	○
3.0				○	○	○	○	○
4.0								

0.75 > 規格化加速度
0.5 > 規格化床応答
50 > 相対変位 (mm)

⑥ 規格化床応答の条件を厳しくした場合

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8				○	○	○	○	○
1.0				○	○	○	○	○
1.2				○	○	○	○	○
1.5	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0		○	○	○	○	○	○	○
2.5					○			
3.0								
4.0								

0.75 > 規格化加速度
0.15 > 規格化床応答
50 > 相対変位 (mm)

Table 3.5.2 線形解析における不適正要因の分析(全地震波、条件2)

全地震波 条件2

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8			○	○	○	○	○	○
1.0			○	○	○	○	○	○
1.2			○	○	○	○	○	○
1.5								
2.0								
2.5								
3.0								
4.0								
0.75 > 規格化加速度								
0.33 > 規格化床応答								
75 > 相対変位 (mm)								

④ 観測地震波だけで判断した場合

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8				○	○	○	○	○
1.0				○	○	○	○	○
1.2				○	○	○	○	○
1.5				○	○	○	○	○
2.0								
2.5								
3.0								
4.0								
0.75 > 規格化加速度								
0.33 > 規格化床応答								
75 > 相対変位 (mm)								

① Hv=10Hzの場合

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8			○	○	○	○	○	○
1.0			○	○	○	○	○	○
1.2			○	○	○	○	○	○
1.5								
2.0								
2.5								
3.0								
4.0								
0.75 > 規格化加速度								
0.33 > 規格化床応答								
75 > 相対変位 (mm)								

⑤ 相対変位の条件を削除した場合

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8				○	○	○	○	○
1.0				○	○	○	○	○
1.2				○	○	○	○	○
1.5								
2.0								
2.5								
3.0								
4.0								
0.75 > 規格化加速度								
0.33 > 規格化床応答								

② Vs=700 の条件を削除した場合

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8			○	○	○	○	○	○
1.0			○	○	○	○	○	○
1.2			○	○	○	○	○	○
1.5				○	○			
2.0								
2.5								
3.0								
4.0								
0.75 > 規格化加速度								
0.33 > 規格化床応答								
75 > 相対変位 (mm)								

⑥ 規格化加速度の条件を削除した場合

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8					○	○	○	○
1.0					○	○	○	○
1.2				○	○	○	○	○
1.5	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0	○	○	○	○	○	○	○	○
2.5	○	○	○	○	○	○	○	○
3.0								
4.0								
0.33 > 規格化床応答								
75 > 相対変位 (mm)								

③ 人工地震波だけで判断した場合

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8		○	○	○	○	○	○	○
1.0		○	○	○	○	○	○	○
1.2		○	○	○	○	○	○	○
1.5								
2.0								
2.5								
3.0								
4.0								
0.75 > 規格化加速度								
0.33 > 規格化床応答								
75 > 相対変位 (mm)								

⑦ 規格化床応答の条件を削除した場合

Hz	2%	5%	10%	15%	20%	30%	40%	60%
0.8					○	○	○	○
1.0					○	○	○	○
1.2					○	○	○	○
1.5								
2.0								
2.5								
3.0								
4.0								
0.75 > 規格化加速度								
75 > 相対変位 (mm)								

Table 3.6.1(1/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域 (条件1)

m2													m2																
0.5 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1														
2															2														
3															3														
4															4														
5															5														
6															6														
8															8														
10															10														
15															15														
20															20														
0.8 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.5 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1														
2															2														
3															3														
4															4														
5															5														
6															6														
8															8														
10															10														
15															15														
20															20														
1.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	3.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1														
2															2														
3															3														
4															4														
5															5														
6															6														
8															8														
10															10														
15															15														
20															20														
1.2 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	4.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1														
2															2														
3															3														
4															4														
5															5														
6															6														
8															8														
10															10														
15															15														
20															20														
1.5 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	5.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1														
2															2														
3															3														
4															4														
5															5														
6															6														
8															8														
10															10														
15															15														
20															20														

○ 相対変位 < 50.0 mm 規格化加速度 < 0.75 規格化床応答 < 0.33

Table 3.6.1(2/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件1）

Table 3.6.1(3/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件1）

○ 相対変位 < 50.0 mm 規格化加速度 < 0.75 規格化床応答 < 0.33

Table 3.6.1(4/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件1）

Table 3.6.1(5/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件1）

x2

	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												
0.8 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.5 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												
1.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	3.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												
1.2 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	4.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												
1.5 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	5.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												

○ 相対変位 < 50.0 mm 規格化加速度 < 0.75 規格化床応答 < 0.33

Table 3.6.1(6/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件1）

<i>y₂</i>	0.5 Hz													2.0 Hz													
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1	○														1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												
0.6 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												
1.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												
1.2 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												
1.5 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												

○ 相対変位 < 50.0 mm 規格化加速度 < 0.75 規格化床応答 < 0.33

Table 3.6.2(1/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域 (条件2)

m2

	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
0.5 Hz	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1													
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2													
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3													
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4													
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5													
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6													
6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8													
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10													
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15													
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20													
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○														
0.8 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.5 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1													
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2													
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3													
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4													
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5													
6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6													
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8													
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10													
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15													
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20													
1.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	3.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1													
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2													
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3													
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4													
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5													
6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6													
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8													
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10													
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15													
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20													
1.2 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	4.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1													
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2													
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3													
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4													
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5													
6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6													
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8													
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10													
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15													
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20													
1.5 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	5.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1													
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2													
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3													
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4													
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5													
6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6													
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8													
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10													
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15													
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20													

○ 相対変位 < 75.0 mm 規格化加速度 < 0.75 規格化床応答 < 0.33

Table 3.6.2(2/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件2）

○ 相対変位 < 75.0 mm 規格化加速度 < 0.75 規格化床応答 < 0.33

Table 3.6.2(3/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件2）

KU													KU														
0.5 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1														1													
2														2													
3														3													
4														4													
5														5													
6														6													
8														8													
10														10													
15														15													
20														20													
0.8 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.5 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1														1													
2														2													
3														3													
4														4													
5														5													
6														6													
8														8													
10														10													
15														15													
20														20													
1.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	3.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1														1													
2														2													
3														3													
4														4													
5														5													
6														6													
8														8													
10														10													
15														15													
20														20													
1.2 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	4.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1														1													
2														2													
3														3													
4														4													
5														5													
6														6													
8														8													
10														10													
15														15													
20														20													
1.5 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	5.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1														1													
2														2													
3														3													
4														4													
5														5													
6														6													
8														8													
10														10													
15														15													
20														20													

○ 相対変位 < 75.0 mm 規格化加速度 < 0.75 規格化床応答 < 0.33

Table 3.6.2(4/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域 (条件2)

IL														IL															
0.5 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		1														
2		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		2														
3		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		3														
4		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		4														
5		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		5														
6		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		6														
8		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		8														
10		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		10														
15		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		15														
20		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		20														
0.8 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.5 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1			○												1														
2			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		2														
3			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		3														
4			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		4														
5			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		5														
6			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		6														
8			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		8														
10			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		10														
15			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		15														
20			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		20														
1.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	3.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1				○	○										1														
2				○	○	○									2														
3				○	○	○	○								3														
4				○	○	○	○	○							4														
5				○	○	○	○	○	○						5														
6				○	○	○	○	○	○	○					6														
8				○	○	○	○	○	○	○	○				8														
10				○	○	○	○	○	○	○	○	○			10														
15				○	○	○	○	○	○	○	○	○			15														
20				○	○	○	○	○	○	○	○	○			20														
1.2 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	4.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1					○	○									1														
2					○	○									2														
3					○	○									3														
4					○	○									4														
5					○	○									5														
6					○	○									6														
8					○	○									8														
10					○	○									10														
15					○	○									15														
20					○	○									20														
1.5 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	5.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1														
2															2														
3															3														
4															4														
5															5														
6															6														
8															8														
10															10														
15															15														
20															20														

○

相対変位 < 75.0 mm

規格化加速度 < 0.75

規格化床応答 < 0.33

Table 3.6.2(5/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域 (条件2)

x2

0.5 Hz													2.0 Hz												
0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1													1												
2													2												
3													3												
4													4												
5													5												
6													6												
8													8												
10													10												
15													15												
20													20												
0.8 Hz													2.5 Hz												
0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1													1												
2													2												
3													3												
4													4												
5													5												
6													6												
8													8												
10													10												
15													15												
20													20												
1.0 Hz													3.0 Hz												
0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1													1												
2													2												
3													3												
4													4												
5													5												
6													6												
8													8												
10													10												
15													15												
20													20												
1.2 Hz													4.0 Hz												
0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1													1												
2													2												
3													3												
4													4												
5													5												
6													6												
8													8												
10													10												
15													15												
20													20												
1.5 Hz													5.0 Hz												
0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1													1												
2													2												
3													3												
4													4												
5													5												
6													6												
8													8												
10													10												
15													15												
20													20												

○

相対変位 < 75.0 mm

規格化加速度 < 0.75

規格化床応答 < 0.33

Table 3.6.2(6/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件2）

<i>y</i> ²	0.5 Hz													2.0 Hz													
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1	○														1												
2		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				2												
3			○	○	○	○	○	○	○	○	○				3												
4				○	○	○	○	○	○	○	○				4												
5					○	○	○	○	○	○	○				5												
6						○	○	○	○	○	○				6												
8							○	○	○	○	○				8												
10								○	○	○	○				10												
15									○	○	○				15												
20										○	○				20												
<i>y</i> ²	0.6 Hz													2.5 Hz													
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												
<i>y</i> ²	1.0 Hz													3.0 Hz													
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												
<i>y</i> ²	1.2 Hz													4.0 Hz													
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												
<i>y</i> ²	1.5 Hz													5.0 Hz													
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1															1												
2															2												
3															3												
4															4												
5															5												
6															6												
8															8												
10															10												
15															15												
20															20												

○ 相対変位 < 75.0 mm 規格化加速度 < 0.75 規格化床応答 < 0.33

Table 3.6.3(1/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件3）

Table 3.6.3(2/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件3）

○ 相対位変 < 100.0 mm 規格化加速度 < 0.75 規格化床応答 < 0.50

Table 3.6.3(3/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件3）

Table 3.6.3(4/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件3）

iu														iu													
0.5 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1					○	○							
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2													
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3													
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4													
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5													
6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6													
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8													
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10													
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15													
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20													
0.8 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.5 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1													
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2													
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3													
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4													
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5													
6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6													
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8													
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10													
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15													
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20													
1.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	3.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1													
2		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2													
3			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3													
4			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4													
5			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5													
6			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6													
8			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8													
10			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10													
15			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15													
20			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20													
1.2 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	4.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1													
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2													
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3													
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4													
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5													
6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6													
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8													
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10													
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15													
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20													
1.5 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	5.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1														1													
2														2													
3														3													
4														4													
5														5													
6														6													
8														8													
10														10													
15														15													
20														20													

○ 相対変位 < 100.0 mm 規格化加速度 < 1.00 規格化床応答 < 0.50

Table 3.6.3(5/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件3）

x2

	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1													
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2													
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3													
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4													
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5													
6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6													
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8													
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10													
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15													
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20													
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.5 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1													
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2													
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3													
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4													
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5													
6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6													
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8													
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10													
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15													
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20													
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	3.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1													
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2													
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3													
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4													
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5													
6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6													
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8													
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10													
15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15													
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20													
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	4.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1		○	○											1													
2		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2													
3		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3													
4		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	4													
5		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	5													
6		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	6													
8		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	8													
10		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10													
15		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15													
20		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	20													
	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	5.0 Hz	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1														1													
2														2													
3														3													
4														4													
5														5													
6														6													
8														8													
10														10													
15														15													
20														20													

○ 相対変位 < 100.0 mm 規格化加速度 < 1.00 規格化床応答 < 0.50

Table 3.6.3(6/6) 非線形解析に基づく地震波毎の免震特性の適正領域（条件3）

y2														y2															
0.5 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1		○	○	○	○	○	○								1														
2		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		2														
3		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		3														
4		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		4														
5		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		5														
6		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		6														
8		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		8														
10		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		10														
15		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		15														
20		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		20														
0.8 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	2.5 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		1														
2		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		2														
3		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		3														
4		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		4														
5		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		5														
6		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		6														
8		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		8														
10		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		10														
15		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		15														
20		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		20														
1.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	3.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		1														
2			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		2														
3			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		3														
4			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		4														
5			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		5														
6			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		6														
8			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		8														
10			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		10														
15			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		15														
20			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		20														
1.2 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	4.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		1														
2				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		2														
3				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		3														
4				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		4														
5				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		5														
6				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		6														
8				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		8														
10				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		10														
15				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		15														
20				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		20														
1.5 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	5.0 Hz		0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2
1					○	○	○	○	○	○	○	○	○		1														
2					○	○	○	○	○	○	○	○	○		2														
3					○	○	○	○	○	○	○	○	○		3														
4					○	○	○	○	○	○	○	○	○		4														
5					○	○	○	○	○	○	○	○	○		5														
6					○	○	○	○	○	○	○	○	○		6														
8					○	○	○	○	○	○	○	○	○		8														
10					○	○	○	○	○	○	○	○	○		10														
15					○	○	○	○	○	○	○	○	○		15														
20					○	○	○	○	○	○	○	○	○		20														

○ 相対変位 < 100.0 mm 規格化加速度 < 1.00 規格化床応答 < 0.50

Table 3.7(1/3) 非線形解析に基づく免震特性の適正領域 (条件1)

全地震波

	0.01	0.02	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20
0.5 Hz	0.01	0.02	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20
1													
2													
3													
4													
5													
6													
8													
10													
15													
20													○
0.8 Hz	0.01	0.02	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20
1													
2													
3													
4													
5									○	○	○		
6								○	○	○	○		
8						○	○	○	○	○	○		
10					○	○	○	○					
15					○	○							
20					○	○							
1.0 Hz	0.01	0.02	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20
1													
2													
3								○					
4							○						
5						○	○	○	○	○	○		
6						○	○	○					
8						○	○						
10						○	○						
15					○	○							
20					○								
1.2 Hz	0.01	0.02	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20
1													
2													
3													
4													
5													
6													
8													
10													
15													
20													
1.5 Hz	0.01	0.02	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20
1													
2													
3													
4													
5													
6													
8													
10													
15													
20													

○ 相対変位 < 50.0 mm

規格化加速度 < 0.75

規格化床応答 < 0.33
または 床応答の最大値 < 1G

Table 3.7(2/3) 非線形解析に基づく免震特性の適正領域（条件2）

全地震波

	0.01	0.02	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20
0.5 Hz	1 2 3 4 5 6 8 10 15 20						○	○	○	○	○	○	○
0.8 Hz	1 2 3 4 5 6 8 10 15 20					○	○	○	○	○	○	○	○
1.0 Hz	1 2 3 4 5 6 8 10 15 20					○	○	○	○	○	○	○	○
1.2 Hz	1 2 3 4 5 6 8 10 15 20					○	○	○	○	○	○	○	○
1.5 Hz	1 2 3 4 5 6 8 10 15 20												

○ 相対変位 < 75.0 mm

規格化加速度 < 0.75

規格化床応答 < 0.33
または 床応答の最大値 < 1G

Table 3.7(3/3) 非線形解析に基づく免震特性の適正領域（条件3）

全地震波

	0.01	0.02	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20
0.5 Hz													
1			○	○	○								
2			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
3	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
4	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
5	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
6	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
8	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
10	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
15	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
20	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
0.8 Hz	0.01	0.02	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20
1							○	○					
2					○	○	○	○	○	○	○	○	
3					○	○	○	○	○	○	○	○	
4					○	○	○	○	○	○	○	○	
5					○	○	○	○	○	○	○	○	
6					○	○	○	○	○	○	○	○	
8					○	○	○	○	○	○	○	○	
10					○	○	○	○	○	○	○	○	
15					○	○	○	○	○	○	○	○	
20					○	○	○	○	○	○	○	○	
1.0 Hz	0.01	0.02	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20
1						○	○	○	○	○			
2				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
3				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
4				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
5				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
6				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
8				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
10				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
15				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
20				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
1.2 Hz	0.01	0.02	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20
1													
2						○	○	○	○				
3					○	○	○	○	○	○	○	○	
4				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
5				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
6				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
8				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
10				○	○	○	○	○	○	○	○	○	
15				○	○								
20													
1.5 Hz	0.01	0.02	0.02	0.025	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.20
1													
2													
3													
4													
5													
6													
8													
10													
15													
20													

○ 相対変位 < 100.0 mm

規格化加速度 < 1.00

規格化床応答 < 0.50
または 床応答の最大値 < 1G

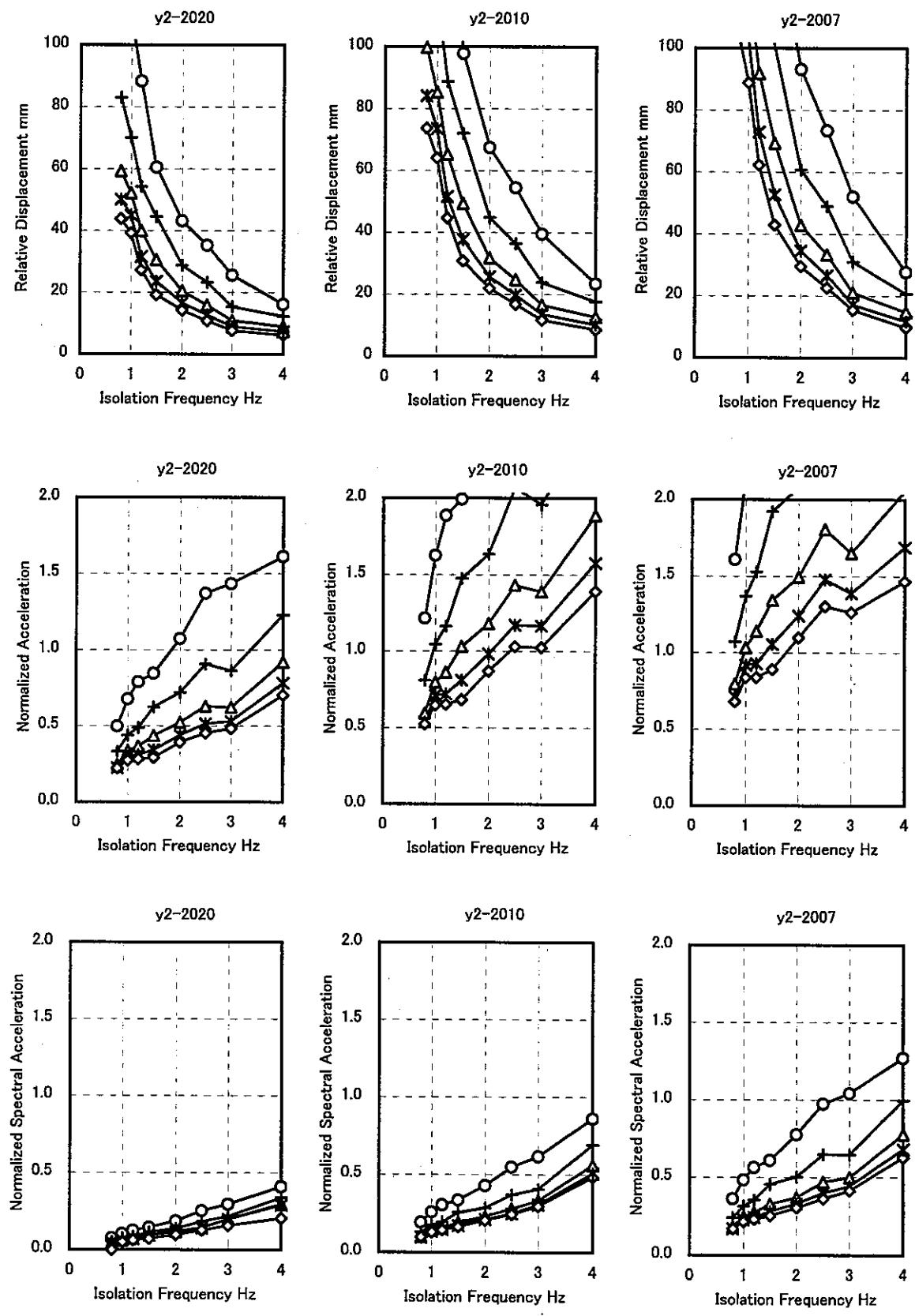
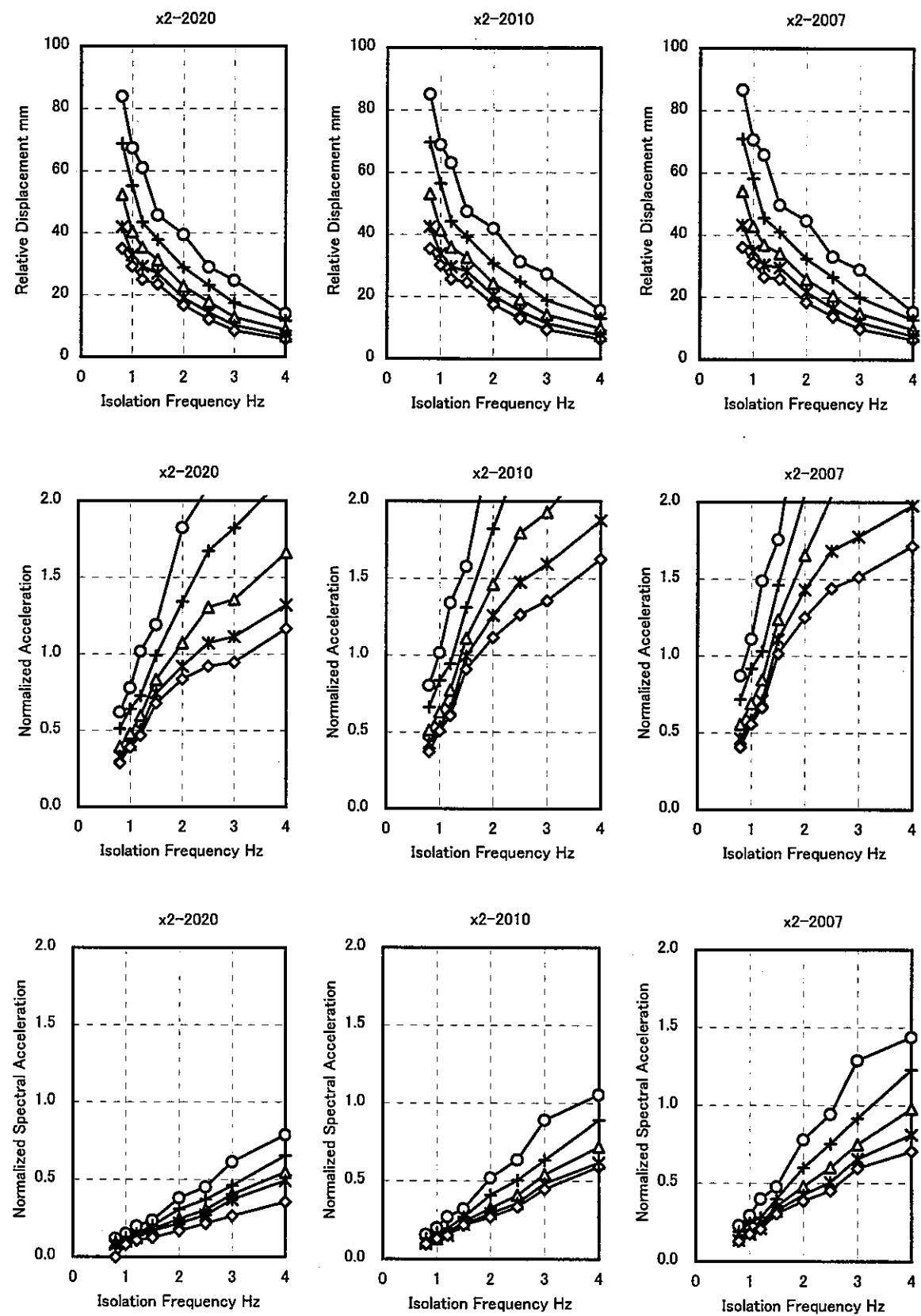
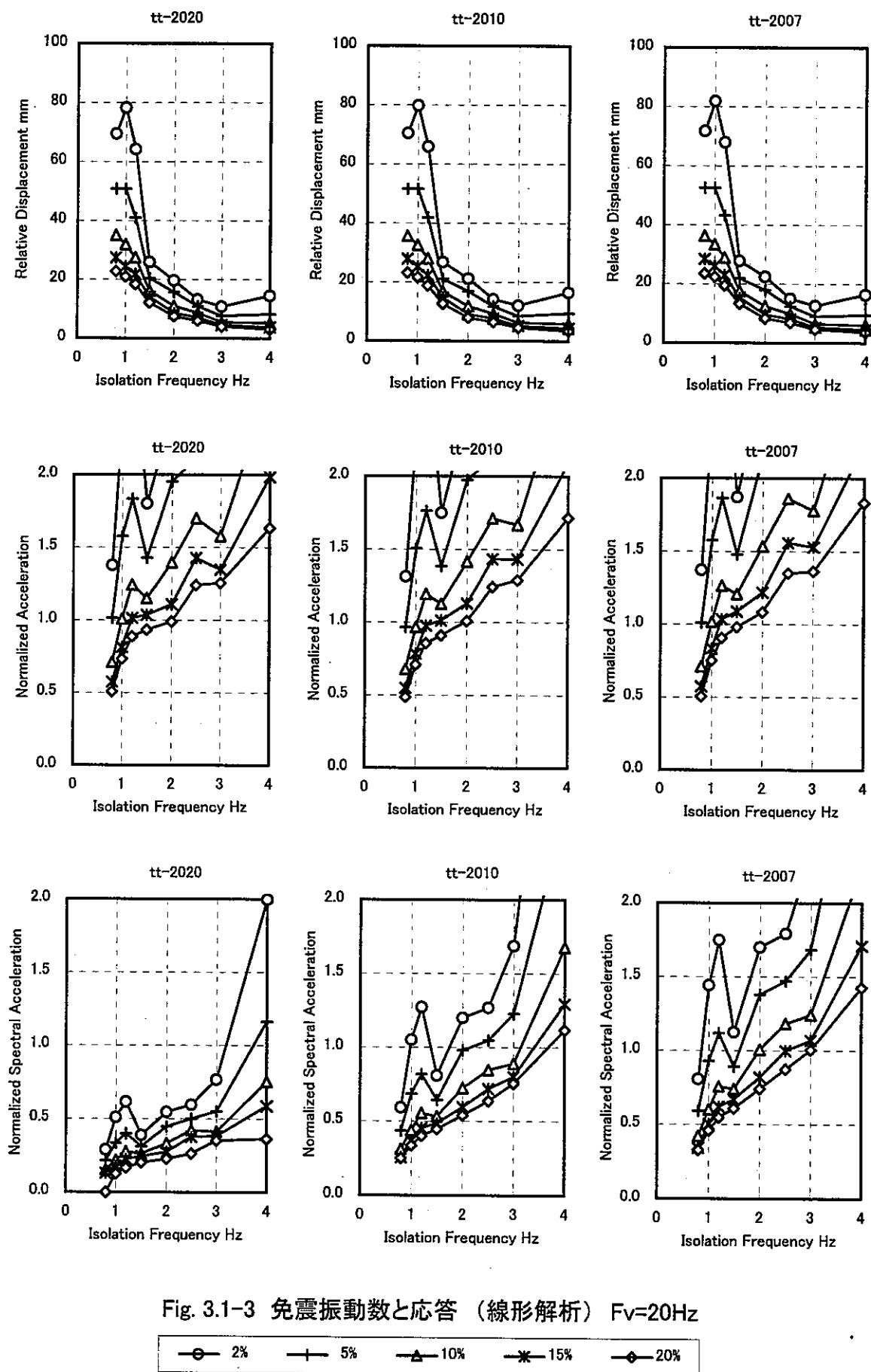


Fig. 3.1-1 免震振動数と応答（線形解析） Fv=20Hz

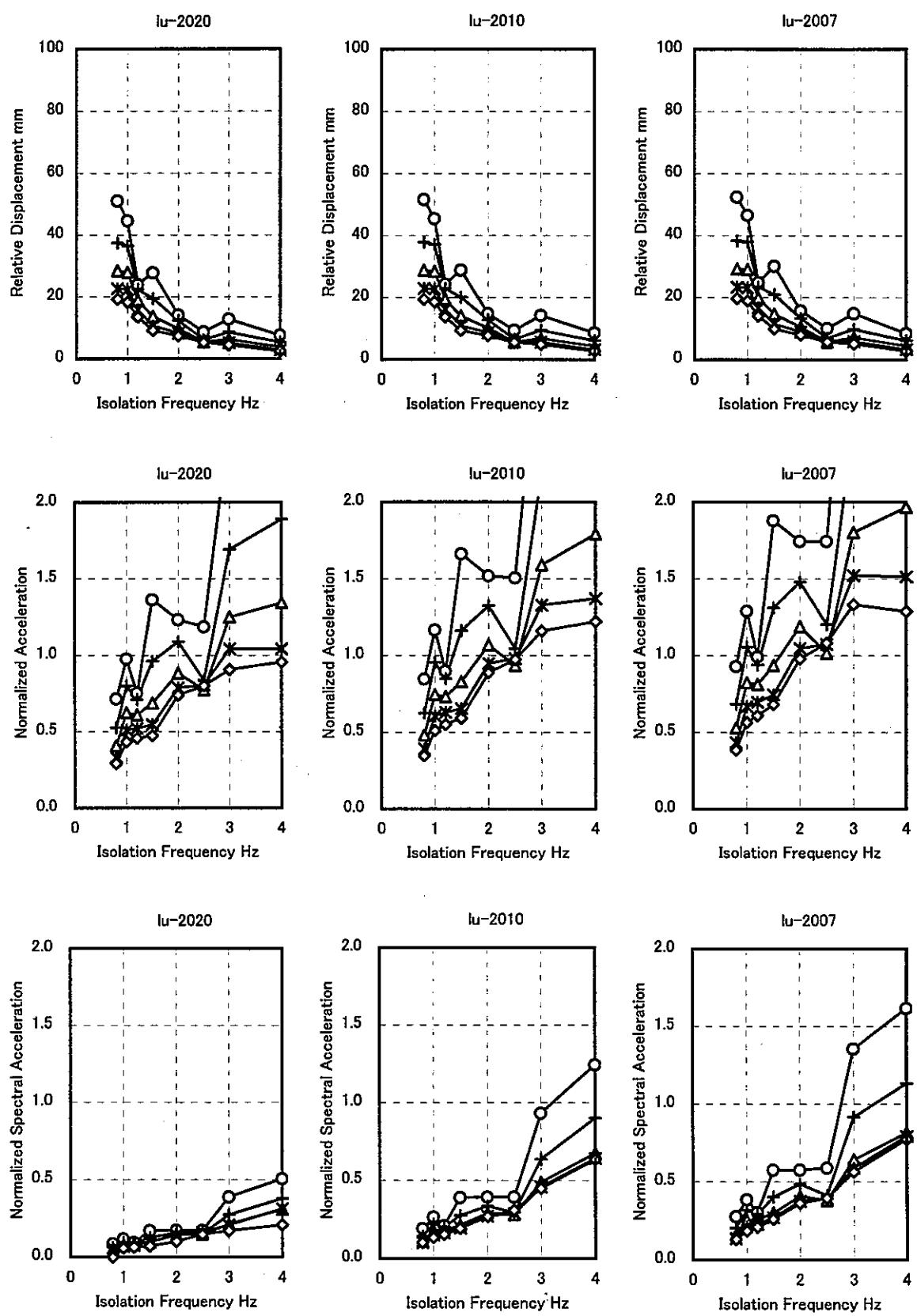
— 2% — 5% — 10% — 15% — 20% —

Fig. 3.1-2 免震振動数と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$

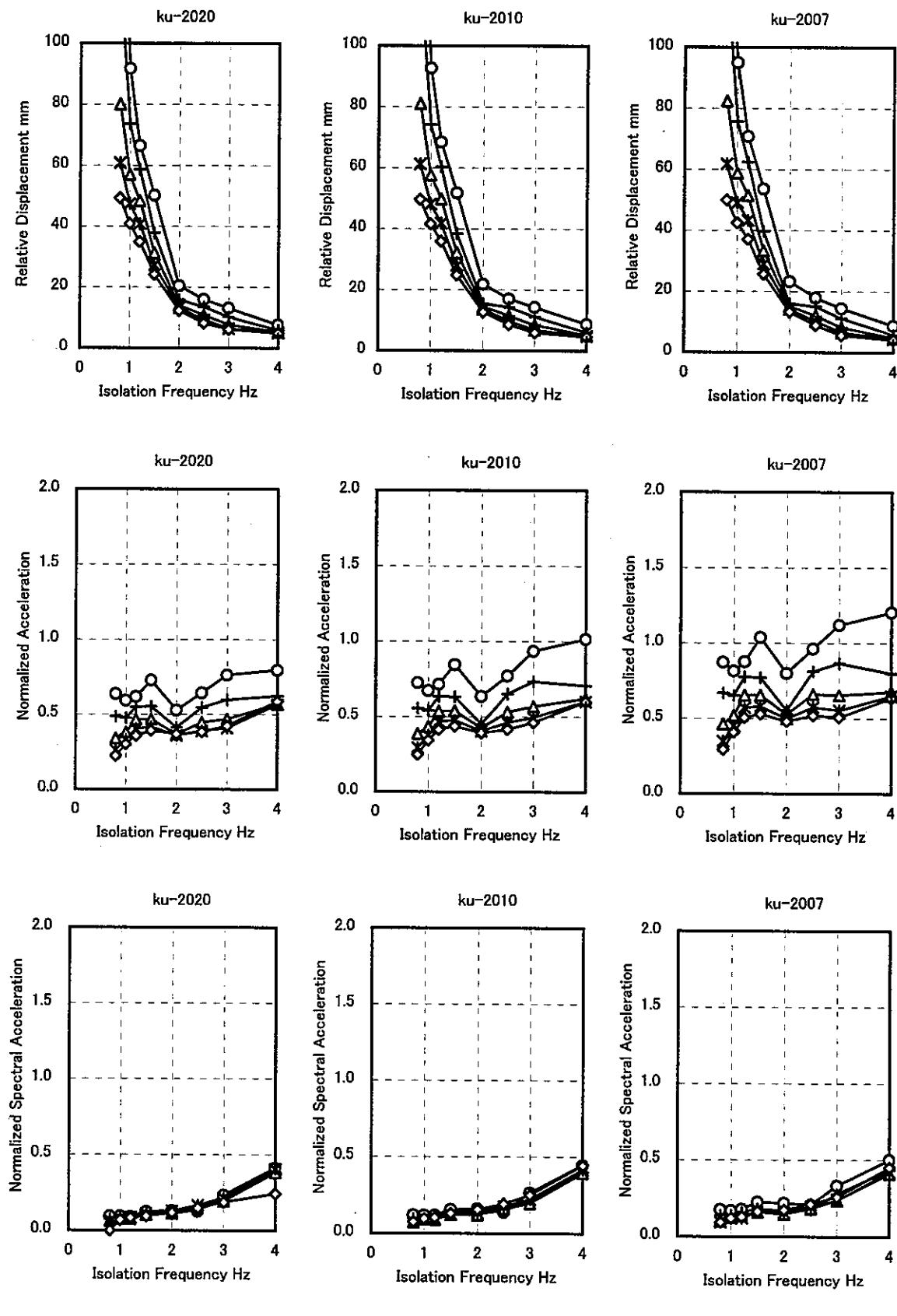
● ○	2%	+	5%	△	10%	*	15%	◆ ◇	20%
-----	----	---	----	---	-----	---	-----	-----	-----

Fig. 3.1-3 免震振動数と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$

—○— 2%	—+— 5%	—△— 10%	—*— 15%	—◆— 20%
--------	--------	---------	---------	---------

Fig. 3.1-4 免震振動数と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$

● 2%	+ 5%	▲ 10%	* 15%	◆ 20%
------	------	-------	-------	-------

Fig. 3.1-5 免震振動数と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$

—○— 2%	—+— 5%	—△— 10%	—*— 15%	—◆— 20%
--------	--------	---------	---------	---------

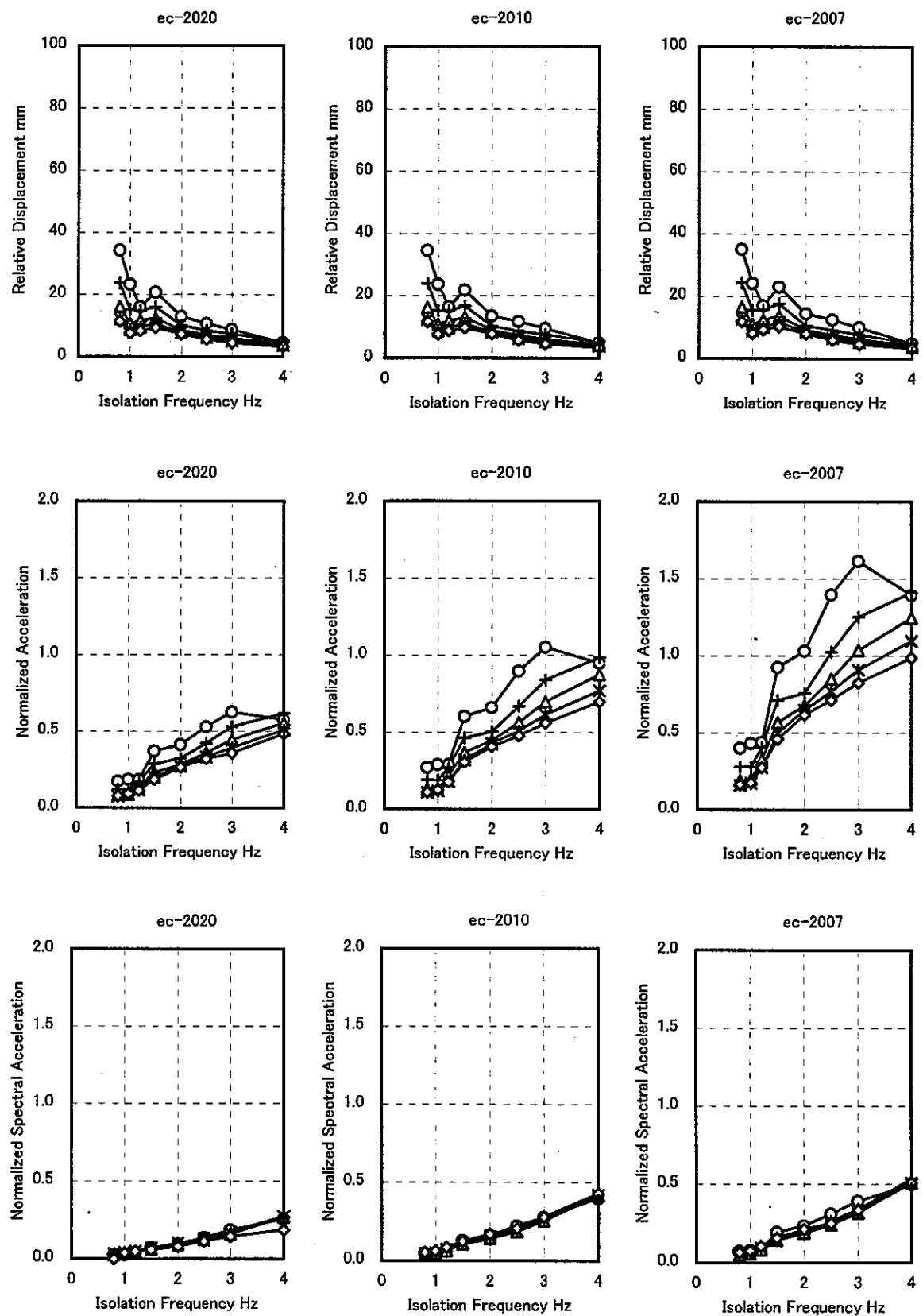
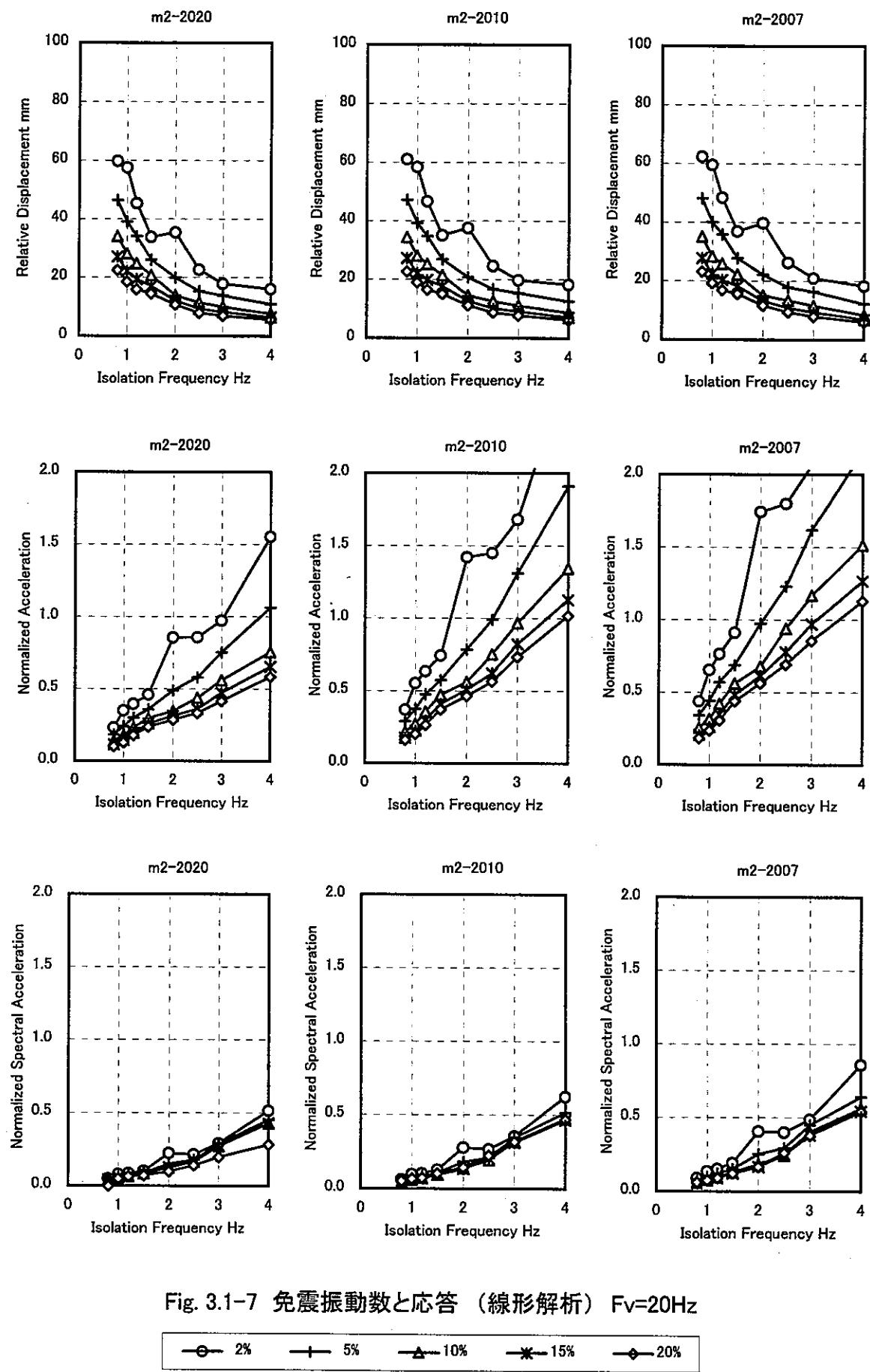
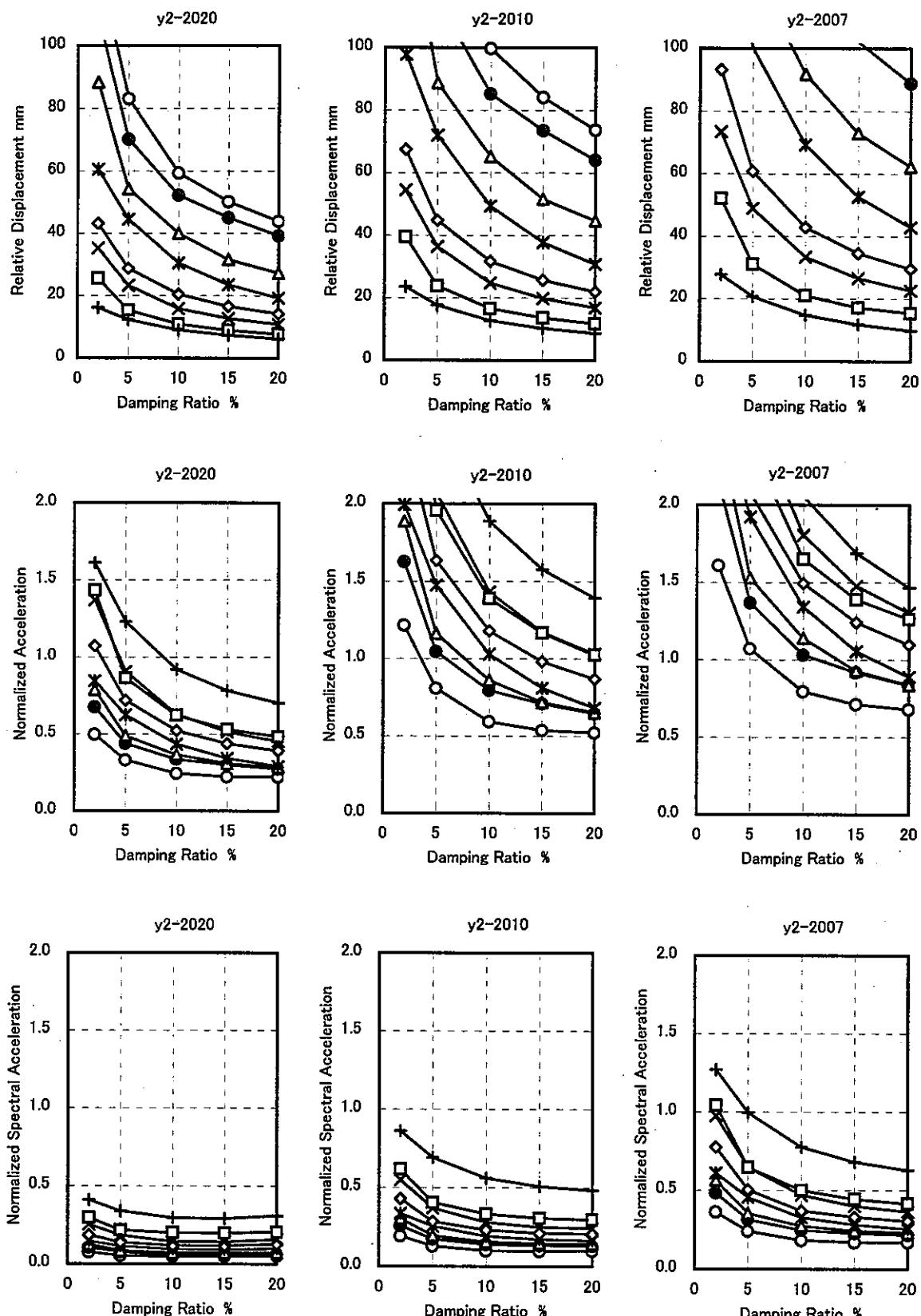


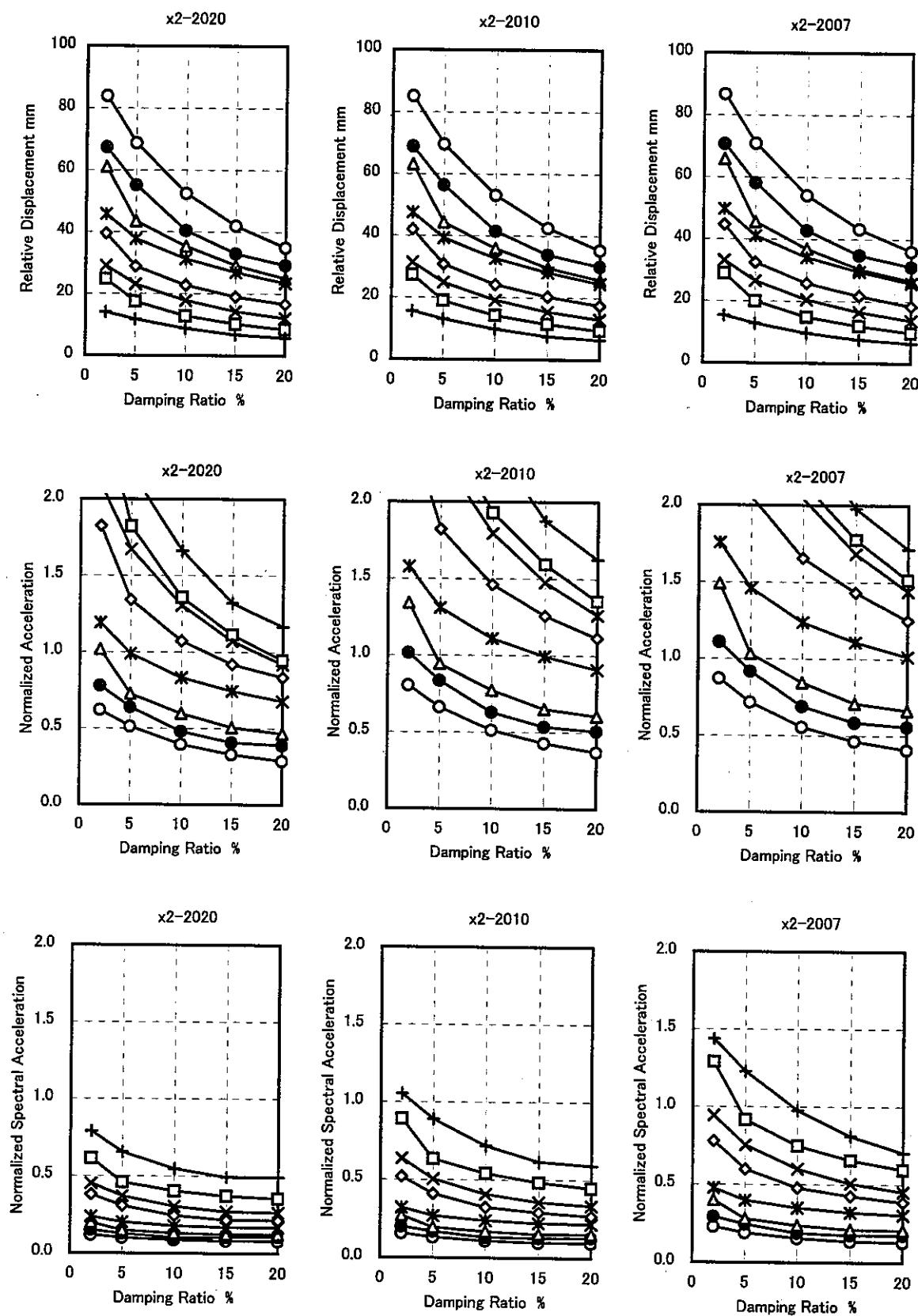
Fig. 3.1-6 免震振動数と応答（線形解析）Fv=20Hz

— 2% — 5% — 10% — 15% — 20%

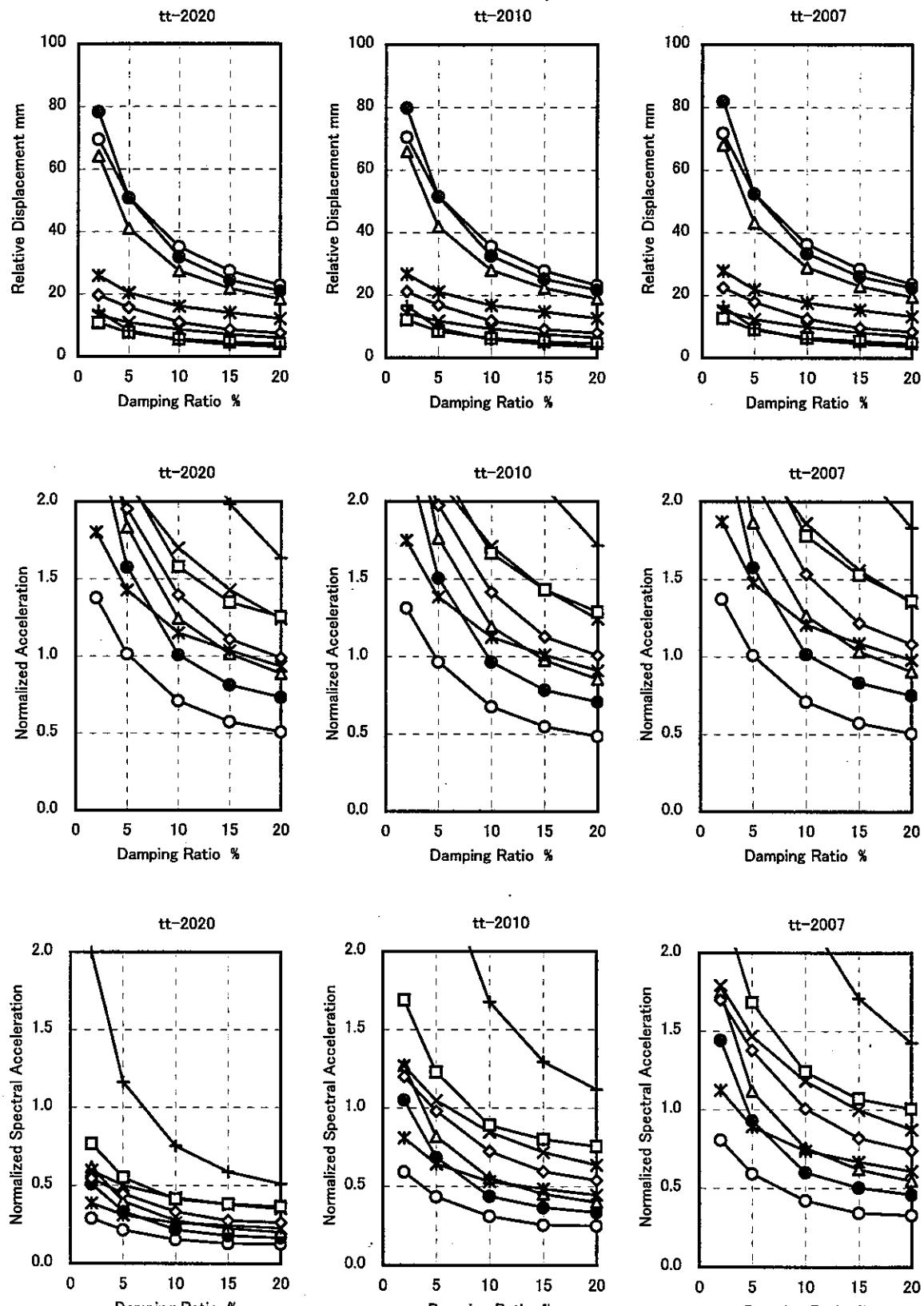
Fig. 3.1-7 免震振動数と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$

Fig. 3.2-1 減衰と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$

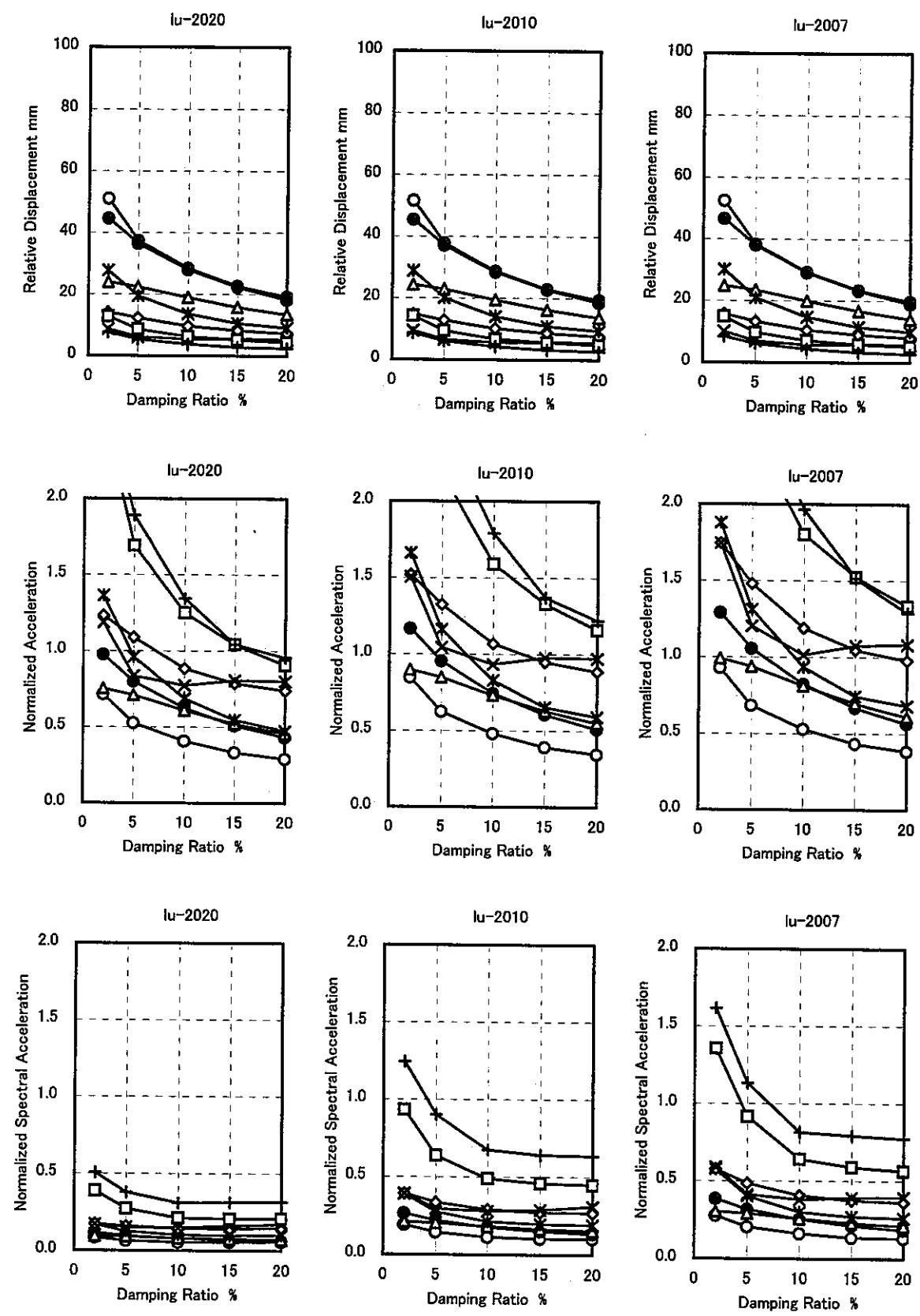
—○— 0.8Hz	—●— 1.0Hz	—△— 1.2Hz	—*— 1.5Hz
—◆— 2.0Hz	—×— 2.5Hz	—■— 3.0Hz	—+— 4.0Hz

Fig. 3.2-2 減衰と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$

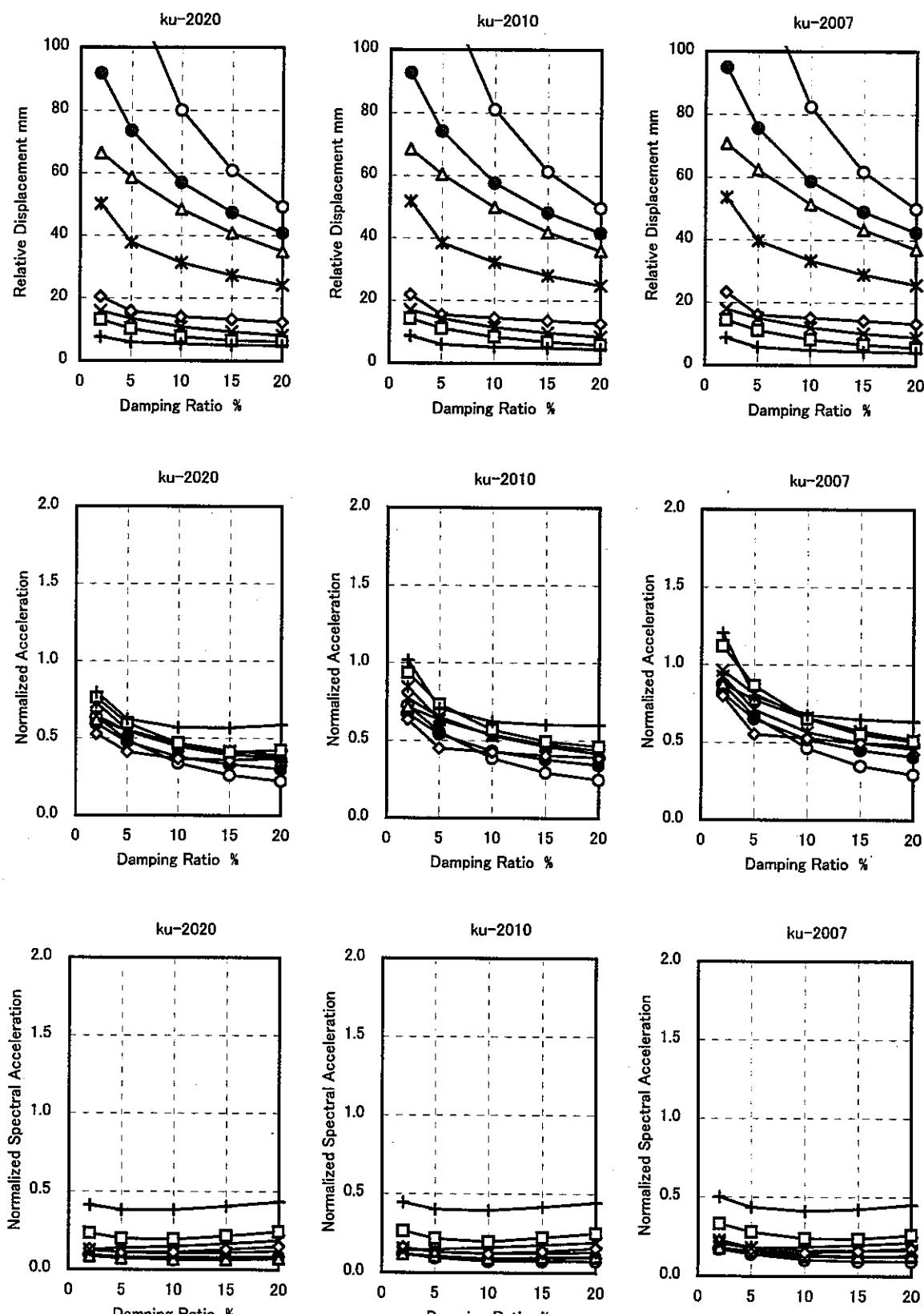
—○— 0.8Hz	—●— 1.0Hz	—△— 1.2Hz	—*— 1.5Hz
—◆— 2.0Hz	—×— 2.5Hz	—□— 3.0Hz	—+— 4.0Hz

Fig. 3.2-3 減衰と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$

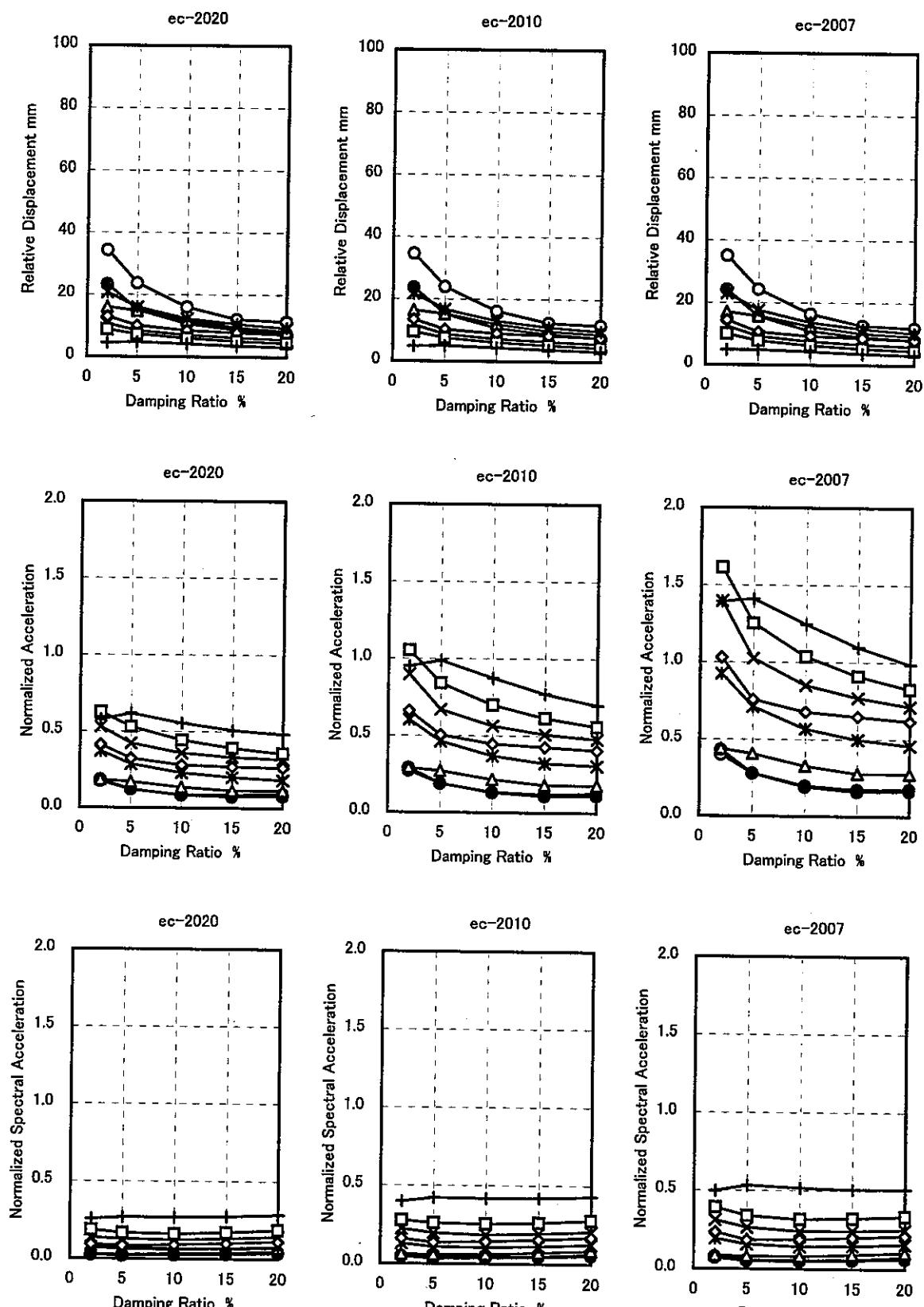
○	●	△	×
◆	×	□	+
0.8Hz	1.0Hz	1.2Hz	1.5Hz
2.0Hz	2.5Hz	3.0Hz	4.0Hz

Fig. 3.2-4 減衰と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$

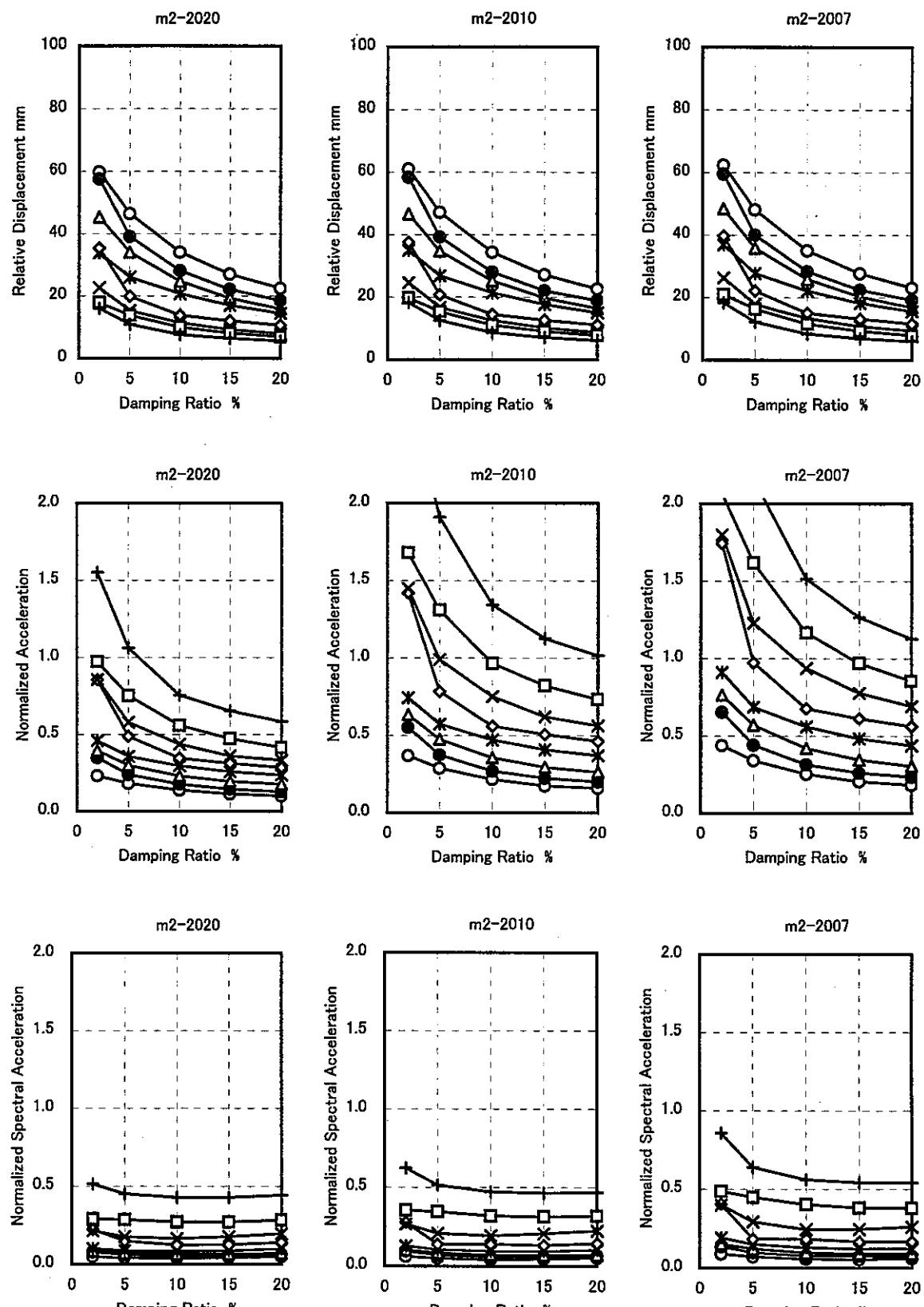
—○— 0.8Hz	—●— 1.0Hz	—△— 1.2Hz	—*— 1.5Hz
—◇— 2.0Hz	—×— 2.5Hz	—□— 3.0Hz	—+— 4.0Hz

Fig. 3.2-5 減衰と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$

—○— 0.8Hz	—●— 1.0Hz	—△— 1.2Hz	—×— 1.5Hz
—◆— 2.0Hz	—×— 2.5Hz	—□— 3.0Hz	—+— 4.0Hz

Fig. 3.2-6 減衰と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$

—○— 0.8Hz	—●— 1.0Hz	—△— 1.2Hz	* 1.5Hz
—◇— 2.0Hz	—×— 2.5Hz	—□— 3.0Hz	+ 4.0Hz

Fig. 3.2-7 減衰と応答（線形解析） $F_v=20\text{Hz}$

—○— 0.8Hz	—●— 1.0Hz	—△— 1.2Hz	—*— 1.5Hz
—◆— 2.0Hz	—×— 2.5Hz	—□— 3.0Hz	—+— 4.0Hz

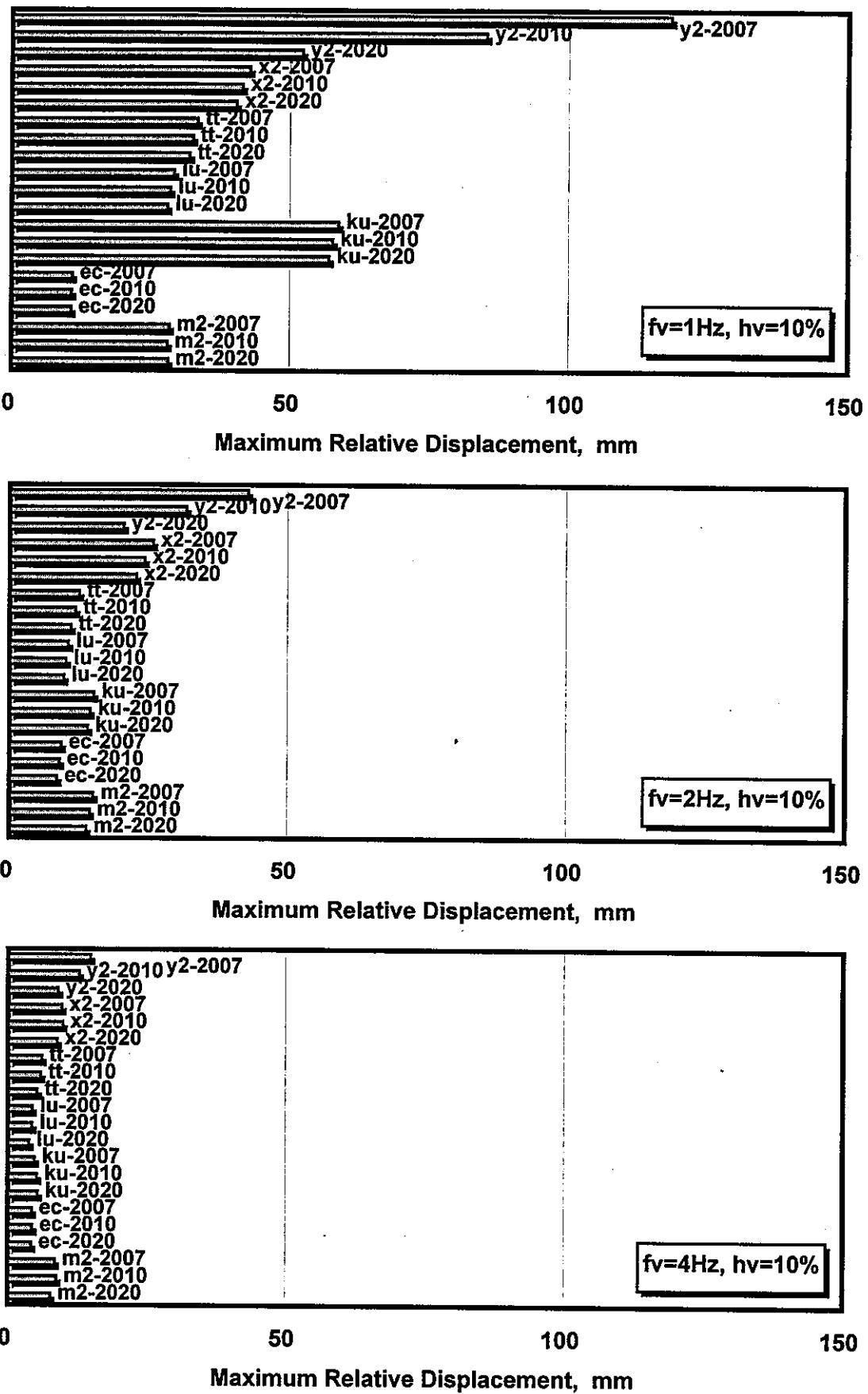


Fig. 3.3-1 入力条件による相対変位の比較

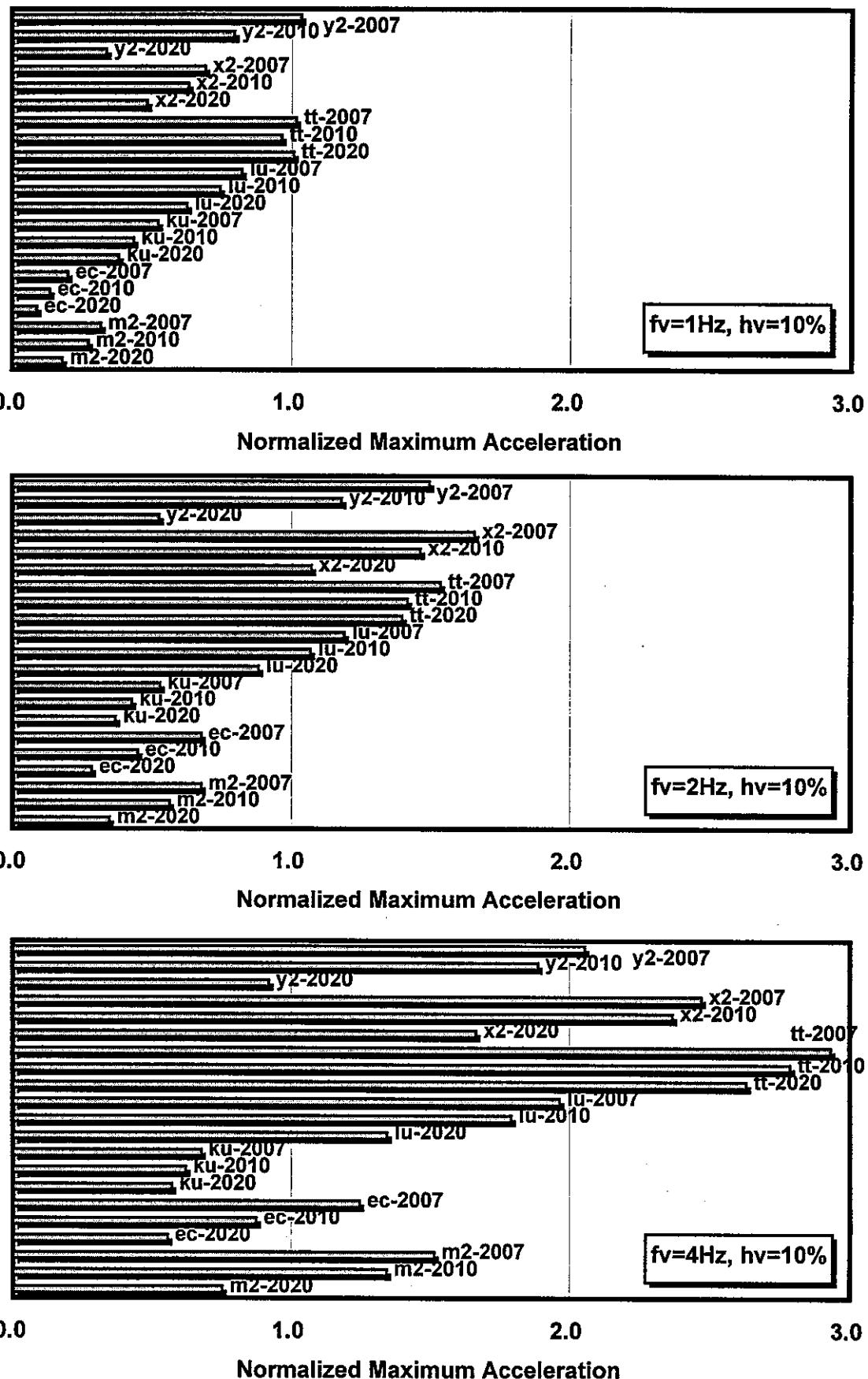


Fig. 3.3-2 入力条件による規格化応答加速度の比較

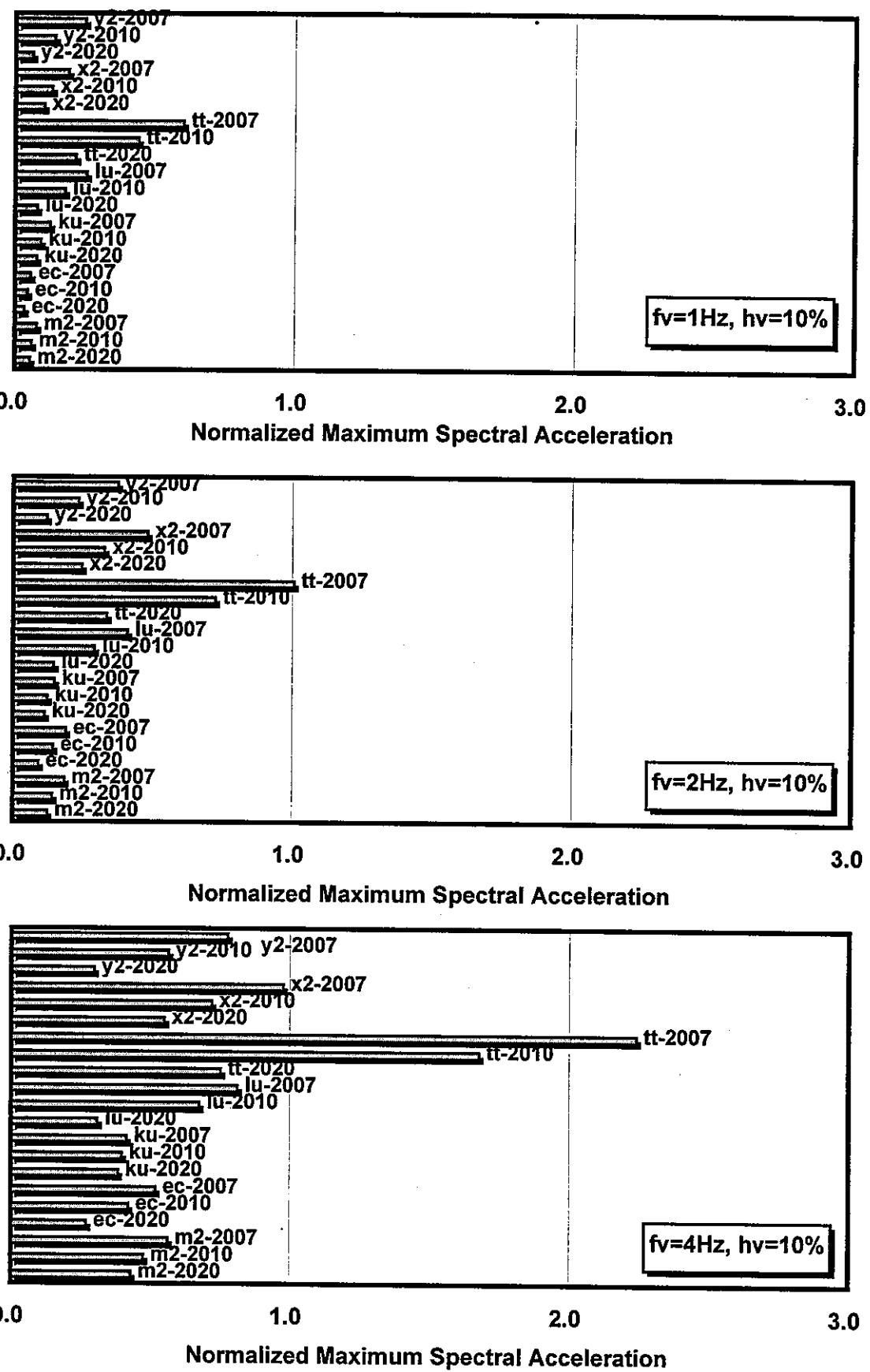
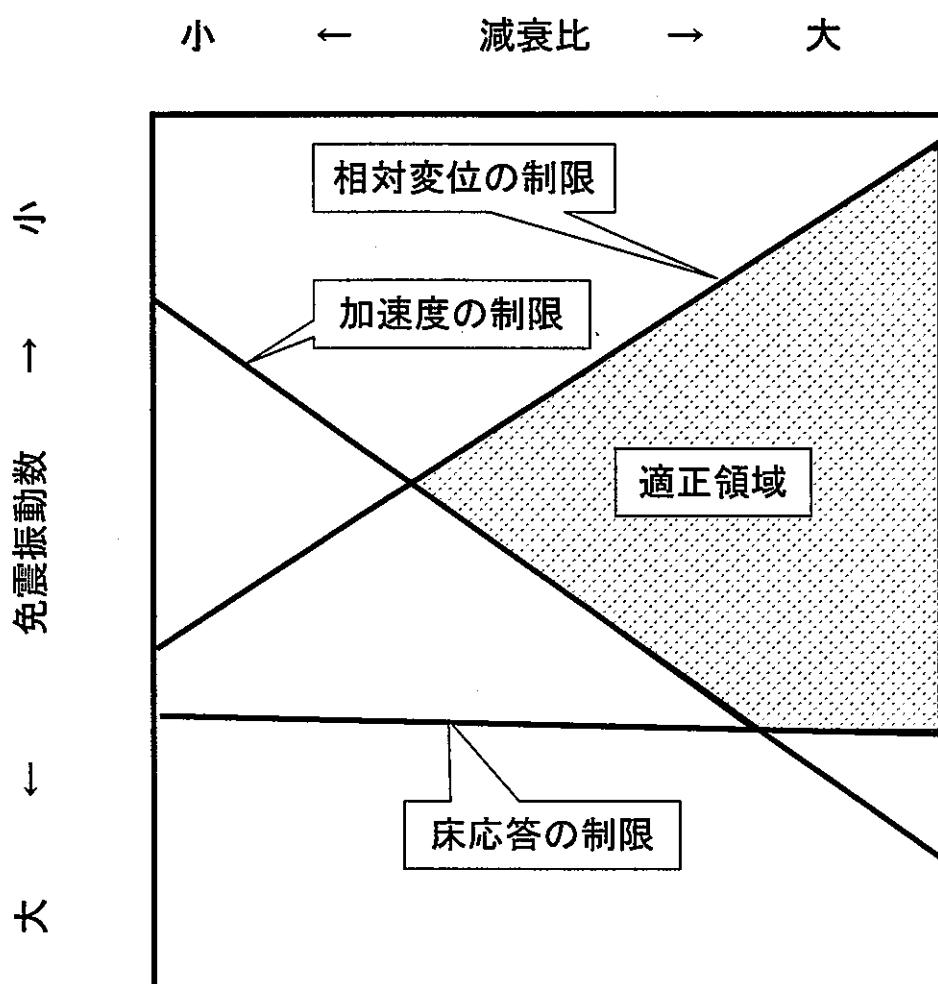


Fig. 3.3-3 入力条件による規格化床応答の比較

Fig.3.4 不適正となる要因の概略図



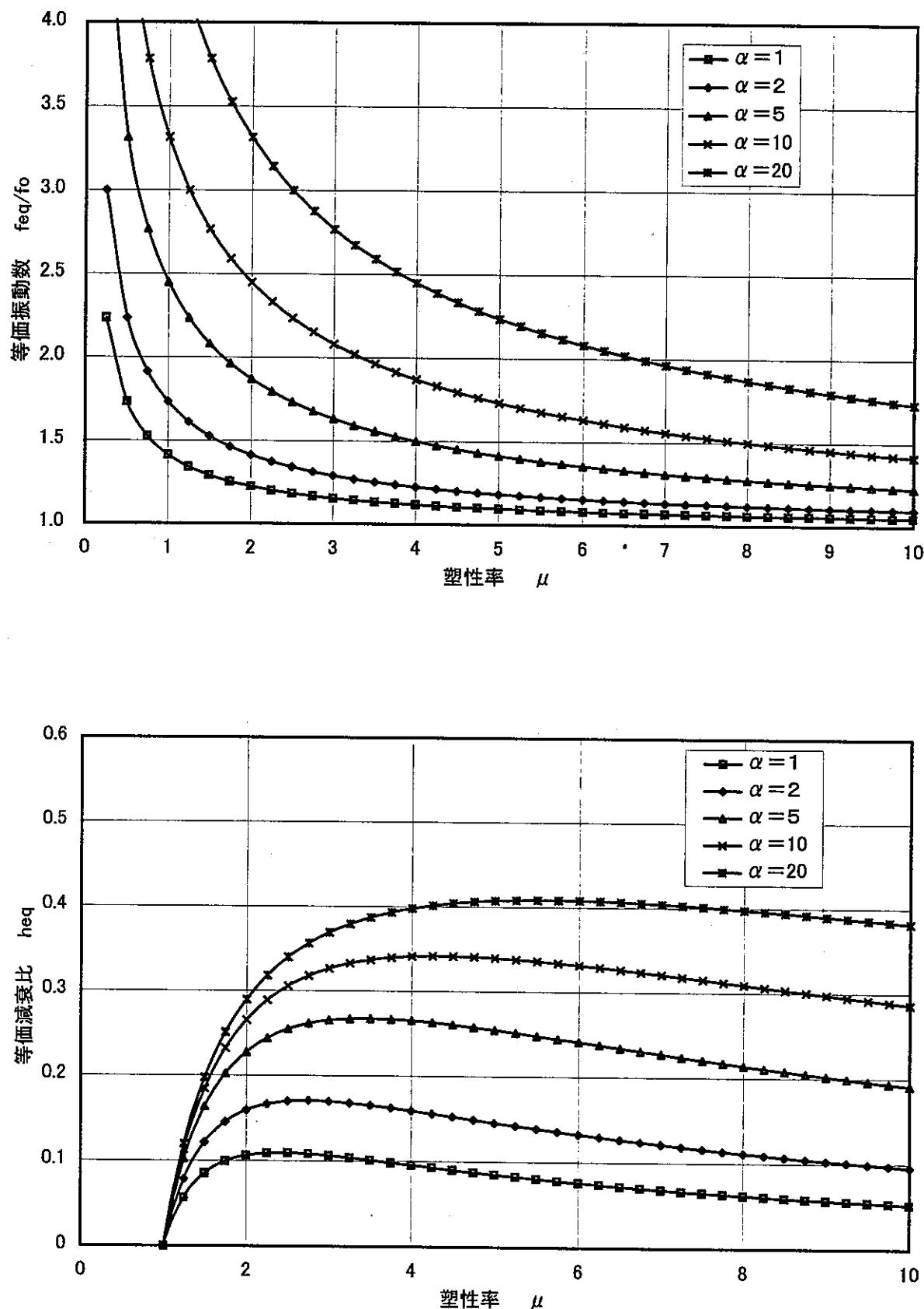
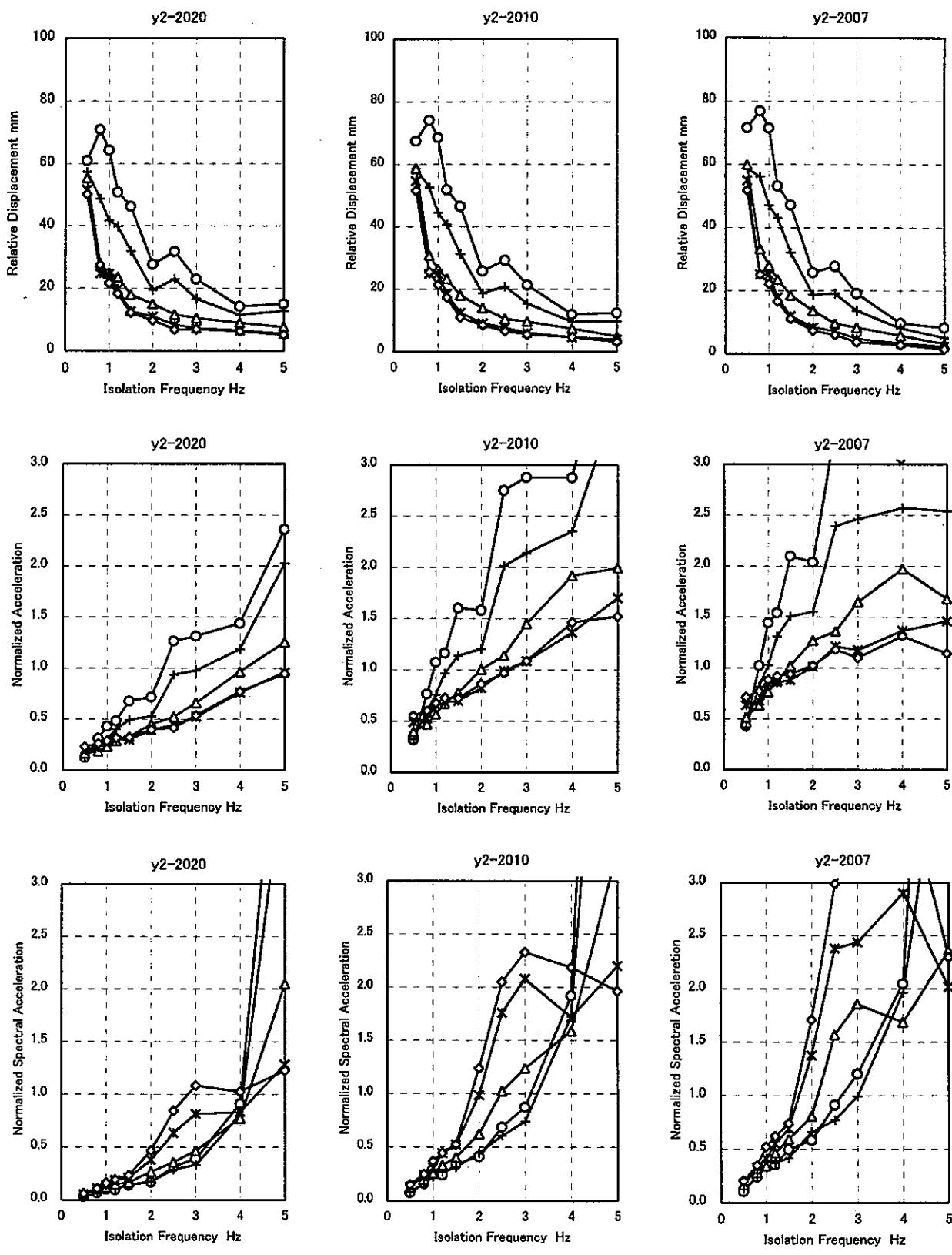
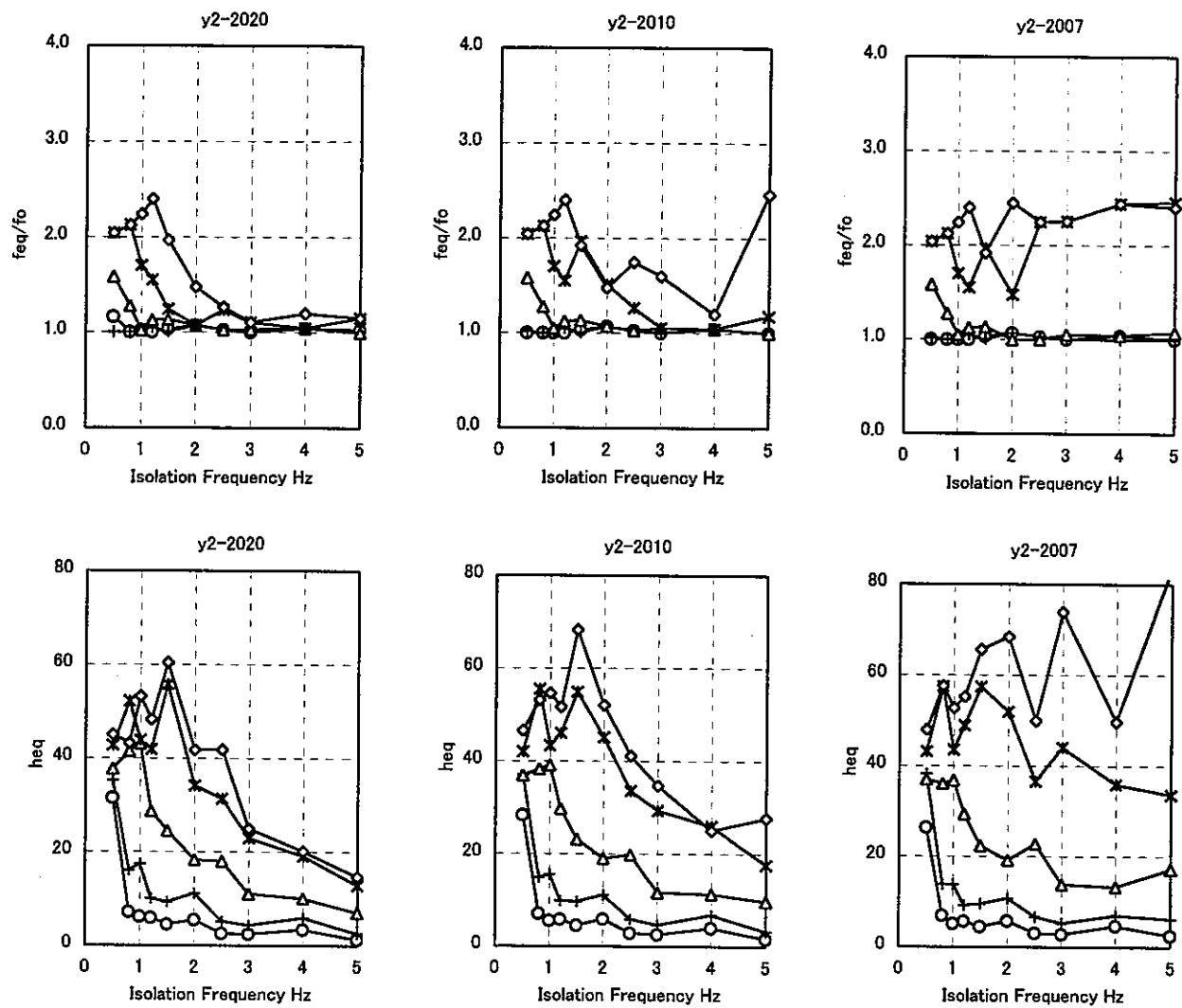
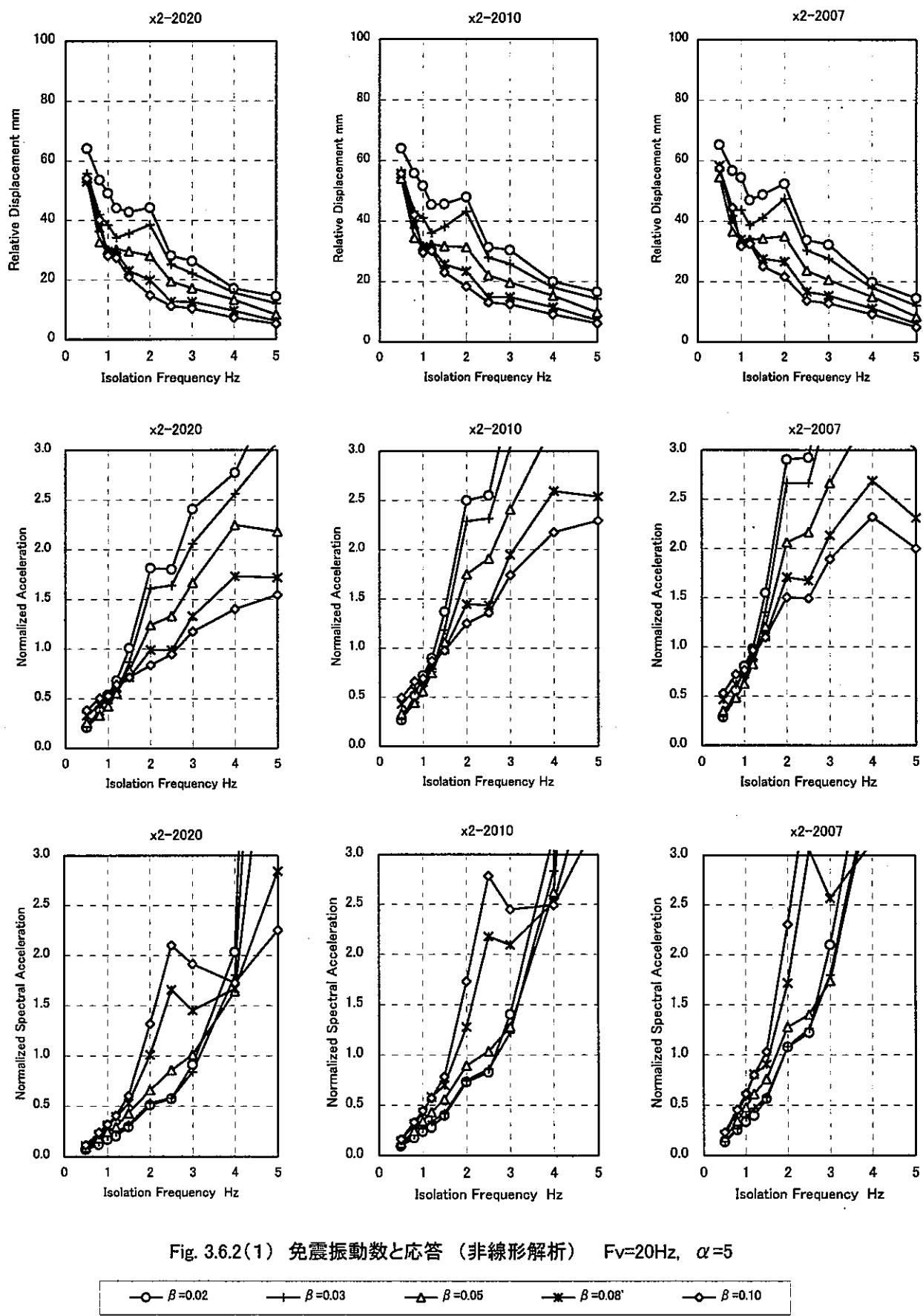


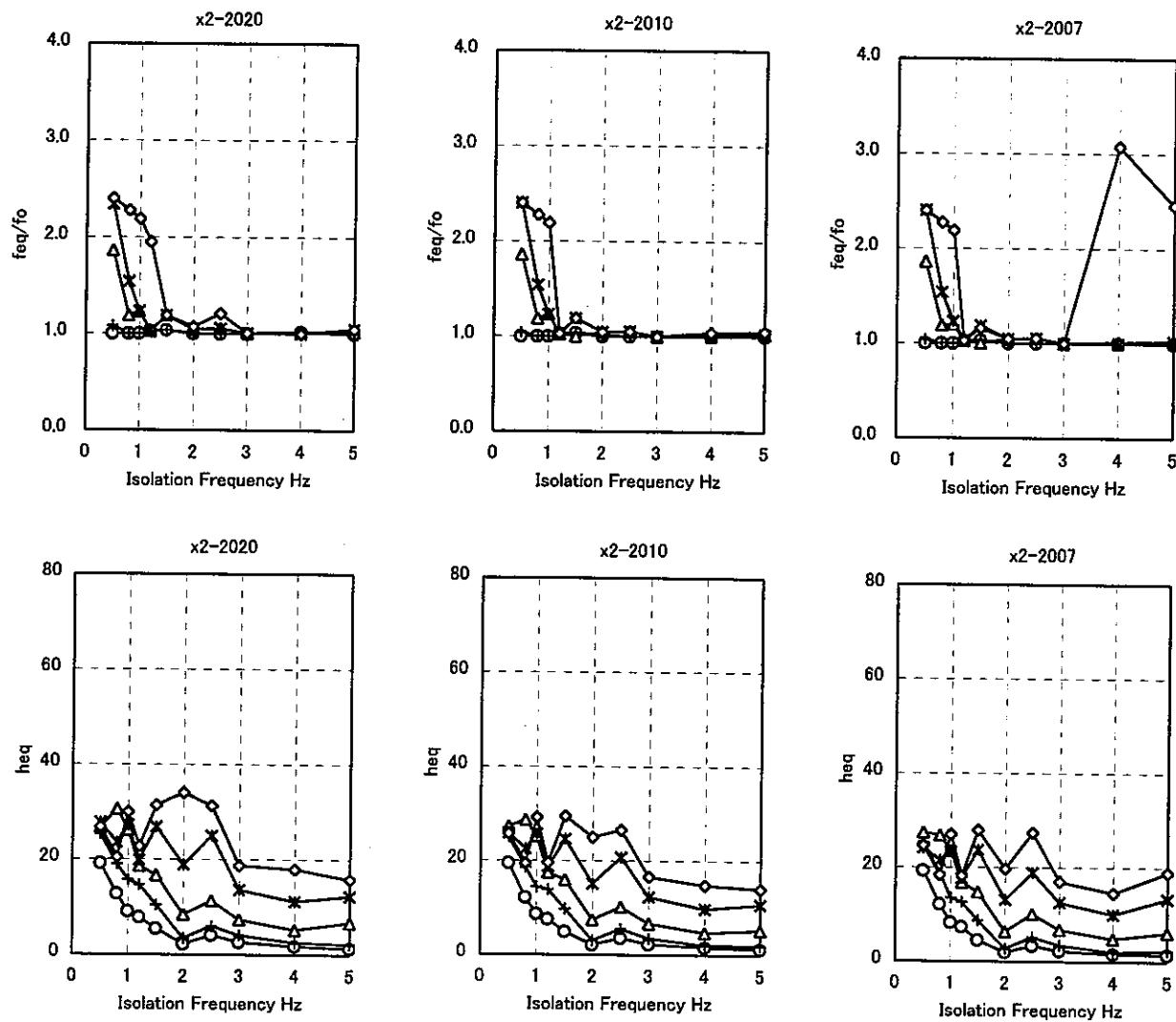
Fig. 3.5 塑性率と等価振動数及び等価減衰比の関係

Fig. 3.6.1(1) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\alpha=5$

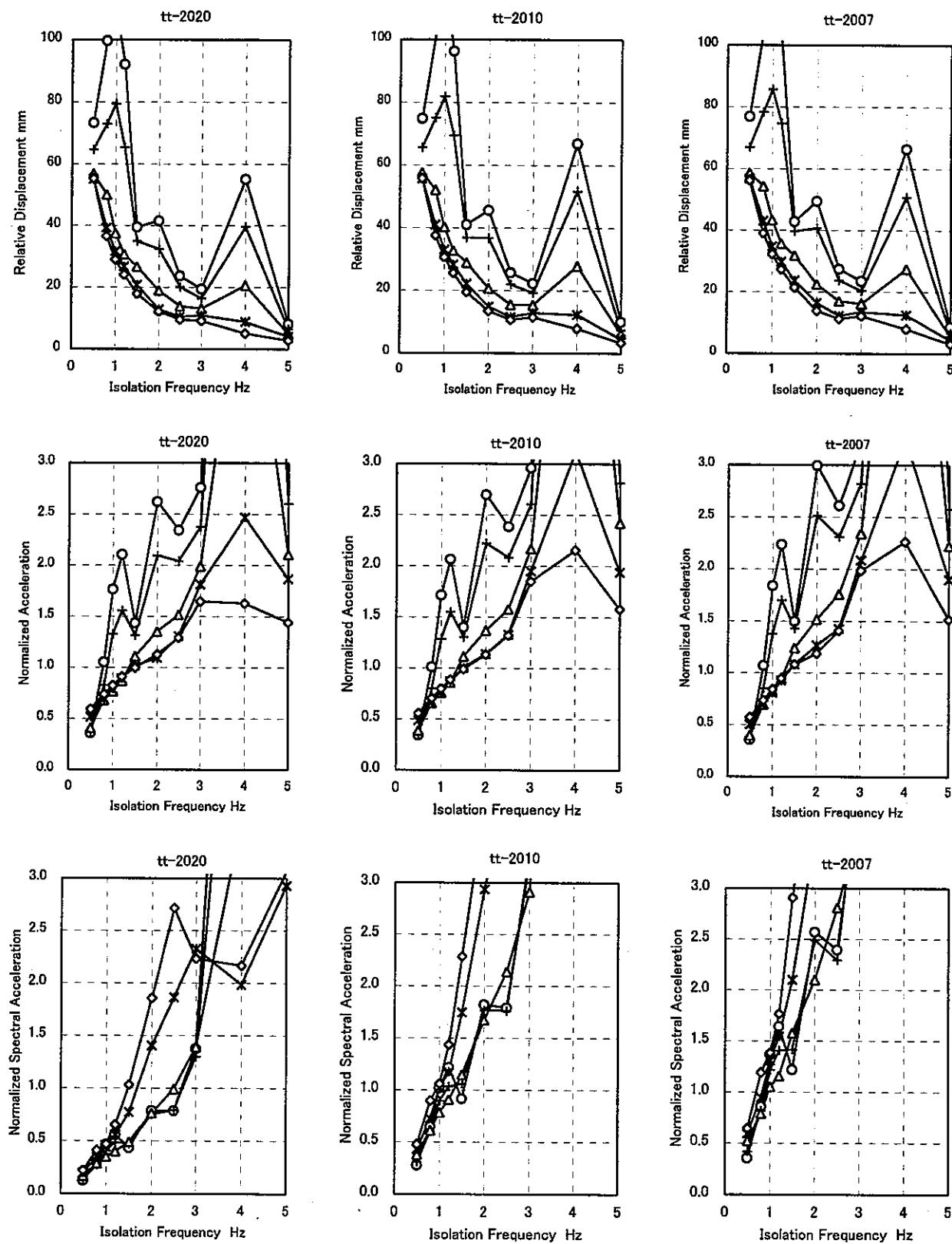
Fig. 3.6.1(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}, \alpha=5$

$\circ - \beta = 0.02$	$+ - \beta = 0.03$	$\triangle - \beta = 0.05$	$\times - \beta = 0.08$	$\diamond - \beta = 0.10$
------------------------	--------------------	----------------------------	-------------------------	---------------------------

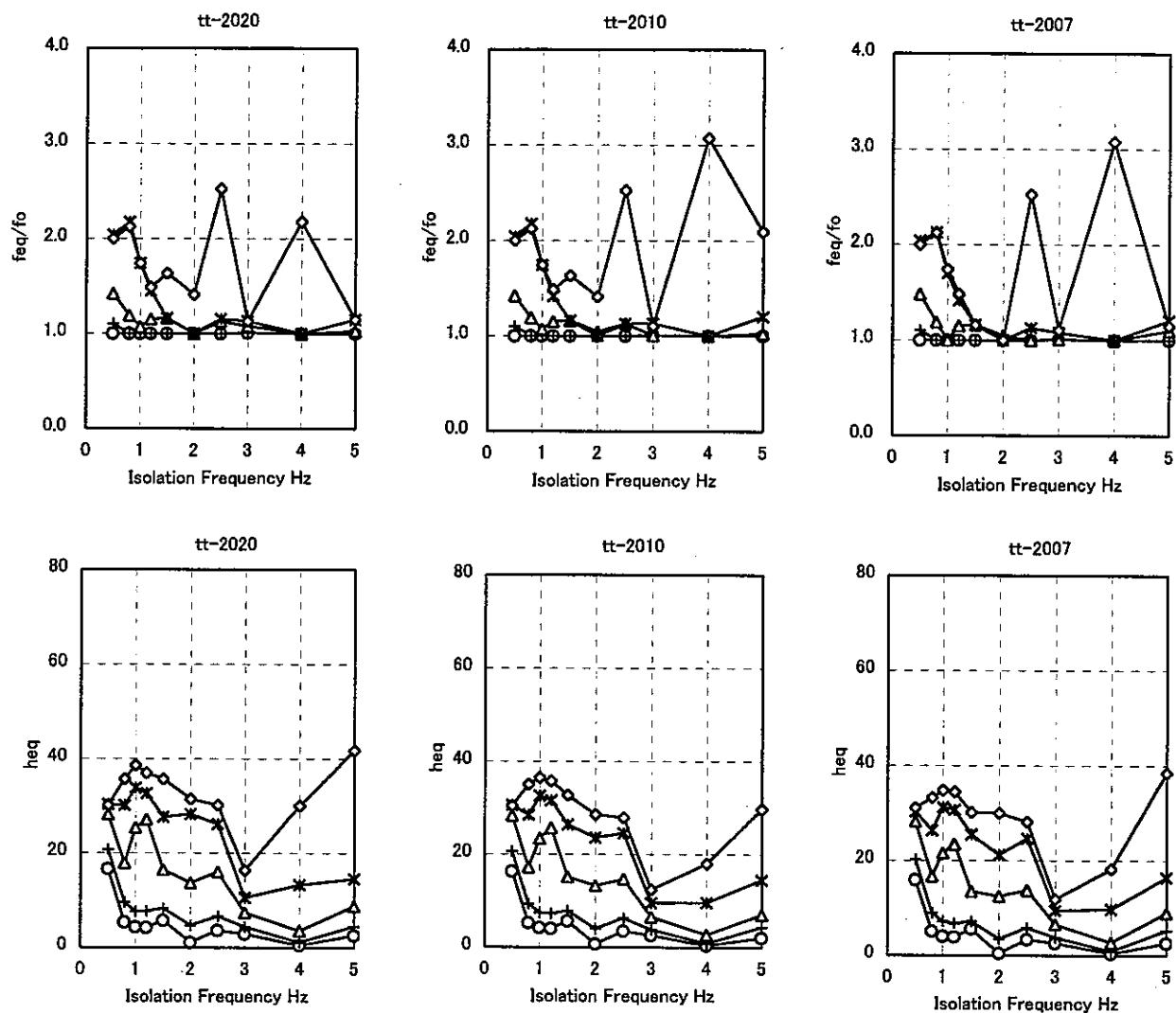
Fig. 3.6.2(1) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\alpha=5$

Fig. 3.6.2(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\alpha=5$

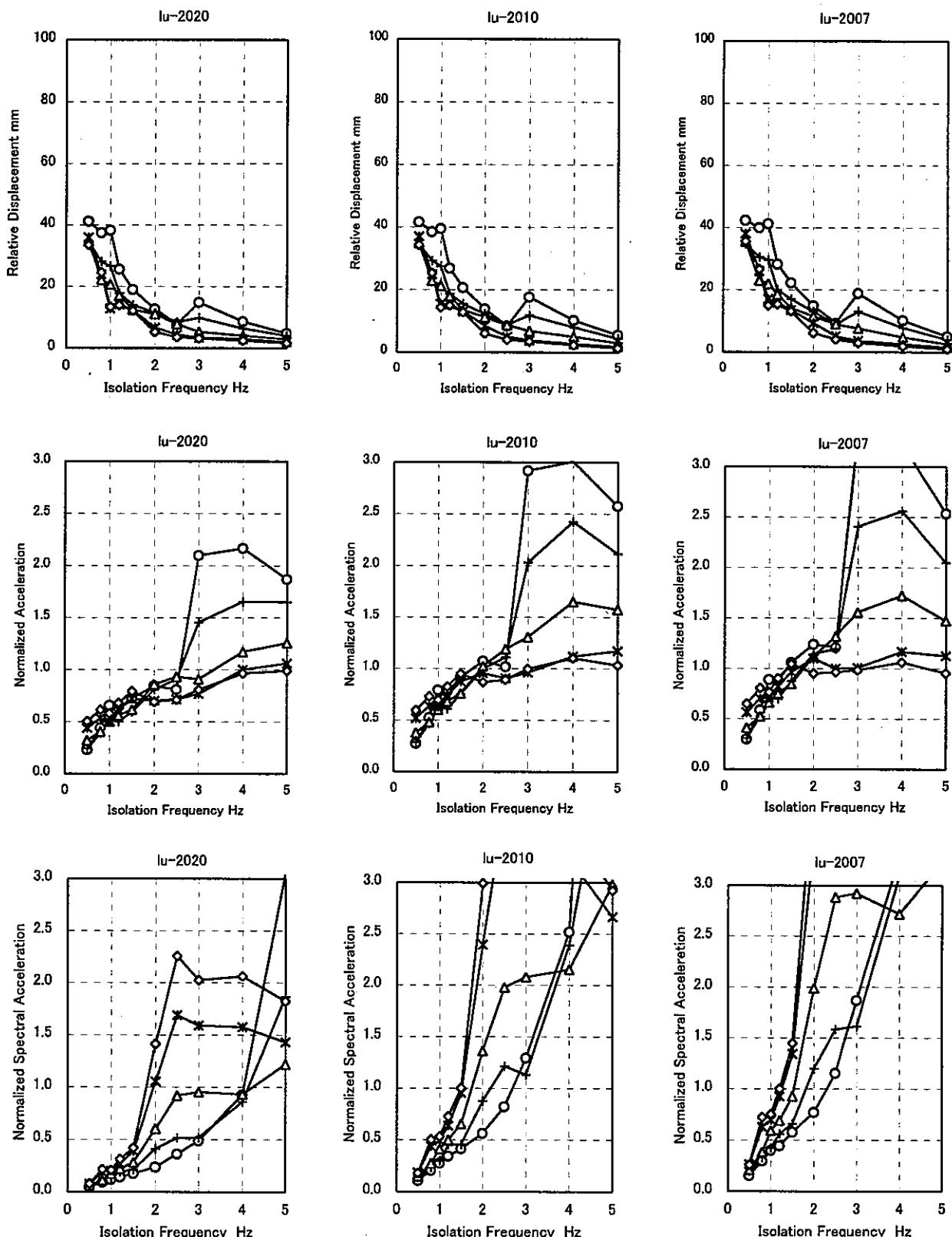
\circ $\beta = 0.02$	$+$ $\beta = 0.03$	\triangle $\beta = 0.05$	$*$ $\beta = 0.08$	\diamond $\beta = 0.10$
------------------------	--------------------	----------------------------	--------------------	---------------------------

Fig. 3.6.3(1) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\alpha=5$

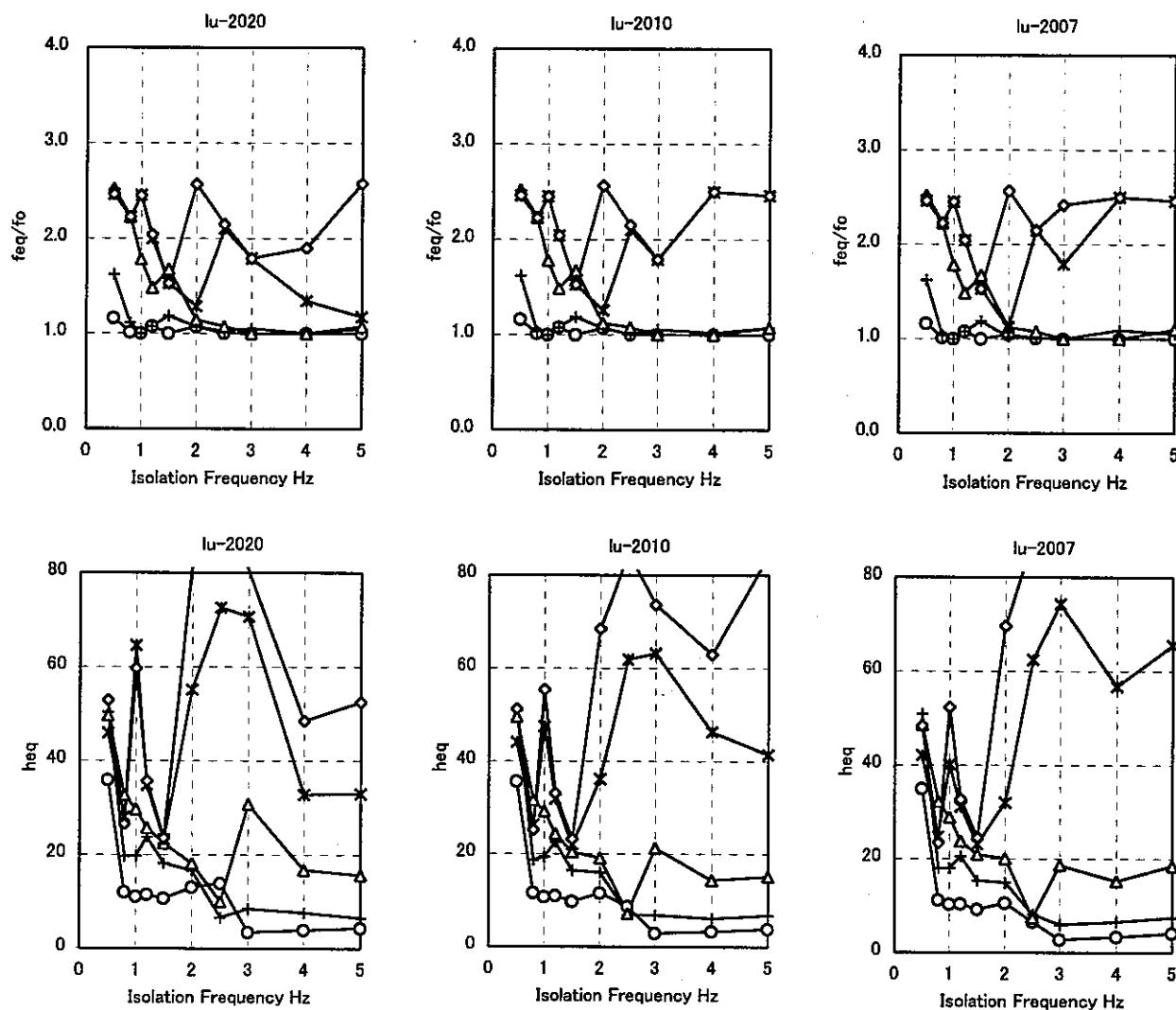
\circ $\beta = 0.02$	$+$ $\beta = 0.03$	\triangle $\beta = 0.05$	$*$ $\beta = 0.08$	\diamond $\beta = 0.10$
------------------------	--------------------	----------------------------	--------------------	---------------------------

Fig. 3.6.3(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\alpha=5$

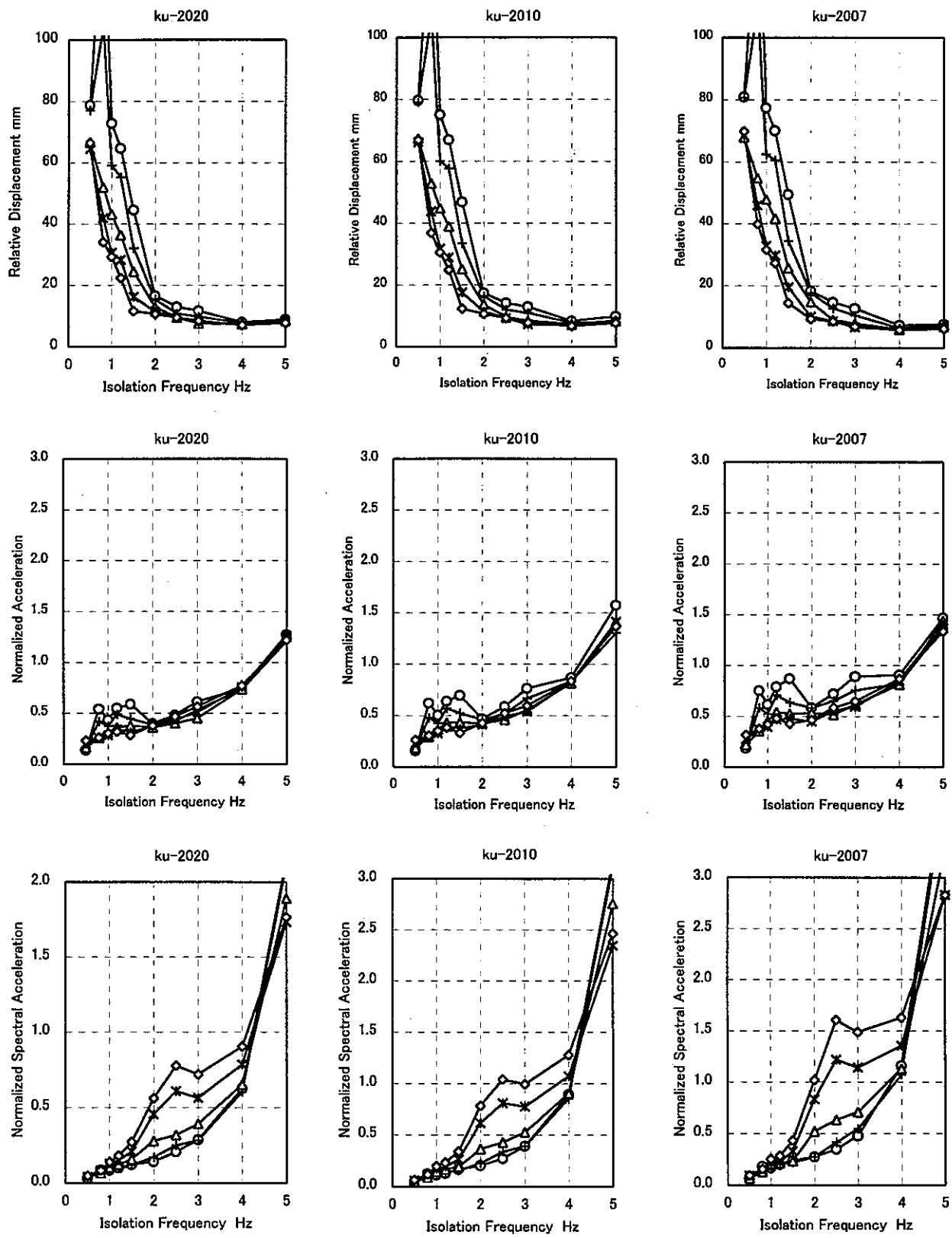
\circ $\beta = 0.02$	$+$ $\beta = 0.03$	\triangle $\beta = 0.05$	$*$ $\beta = 0.08$	\diamond $\beta = 0.10$
------------------------	--------------------	----------------------------	--------------------	---------------------------

Fig. 3.6.4(1) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\alpha=5$

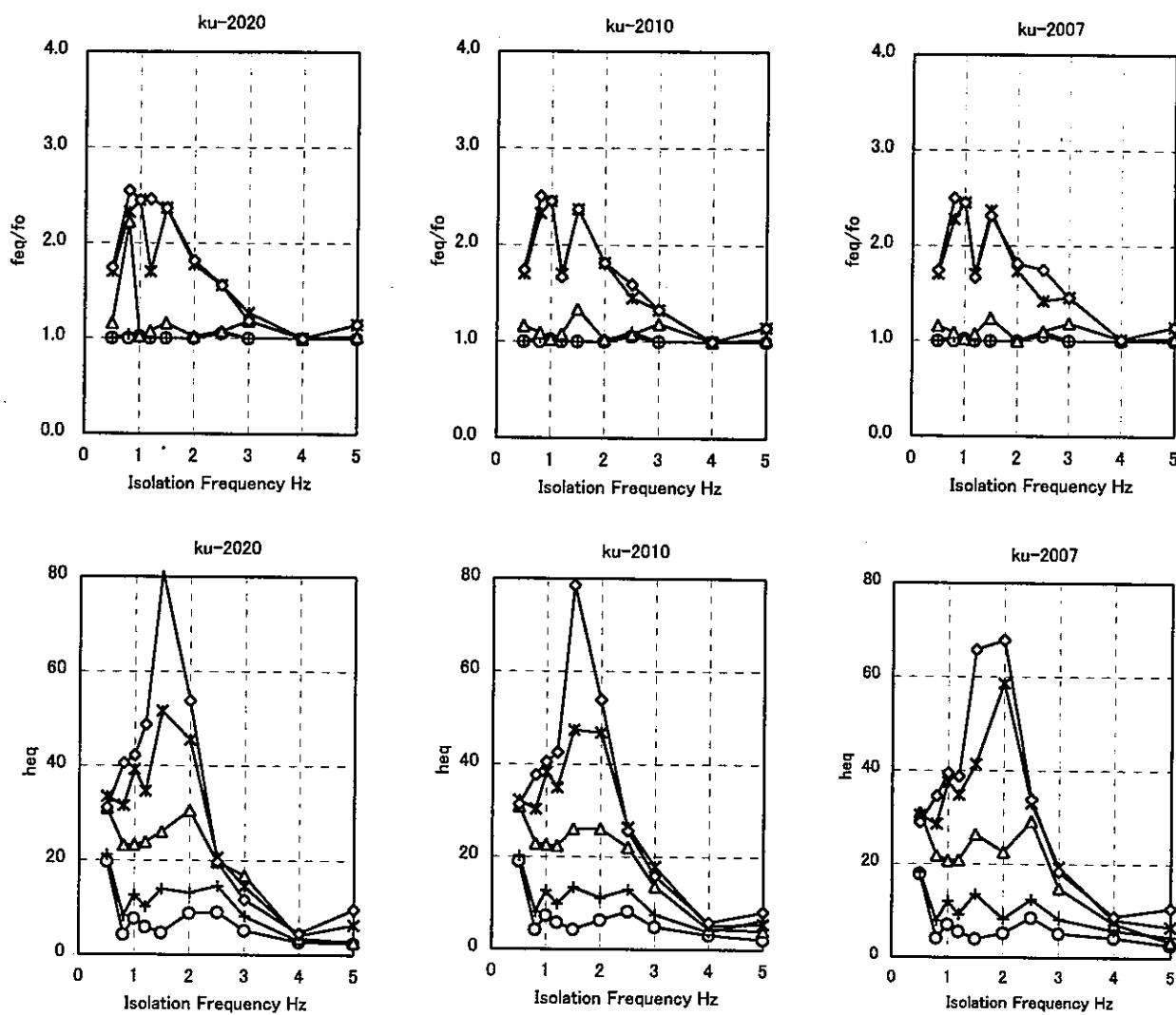
\circ $\beta = 0.02$	$+$ $\beta = 0.03$	\triangle $\beta = 0.05$	$*$ $\beta = 0.08$	\diamond $\beta = 0.10$
------------------------	--------------------	----------------------------	--------------------	---------------------------

Fig. 3.6.4(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\alpha=5$

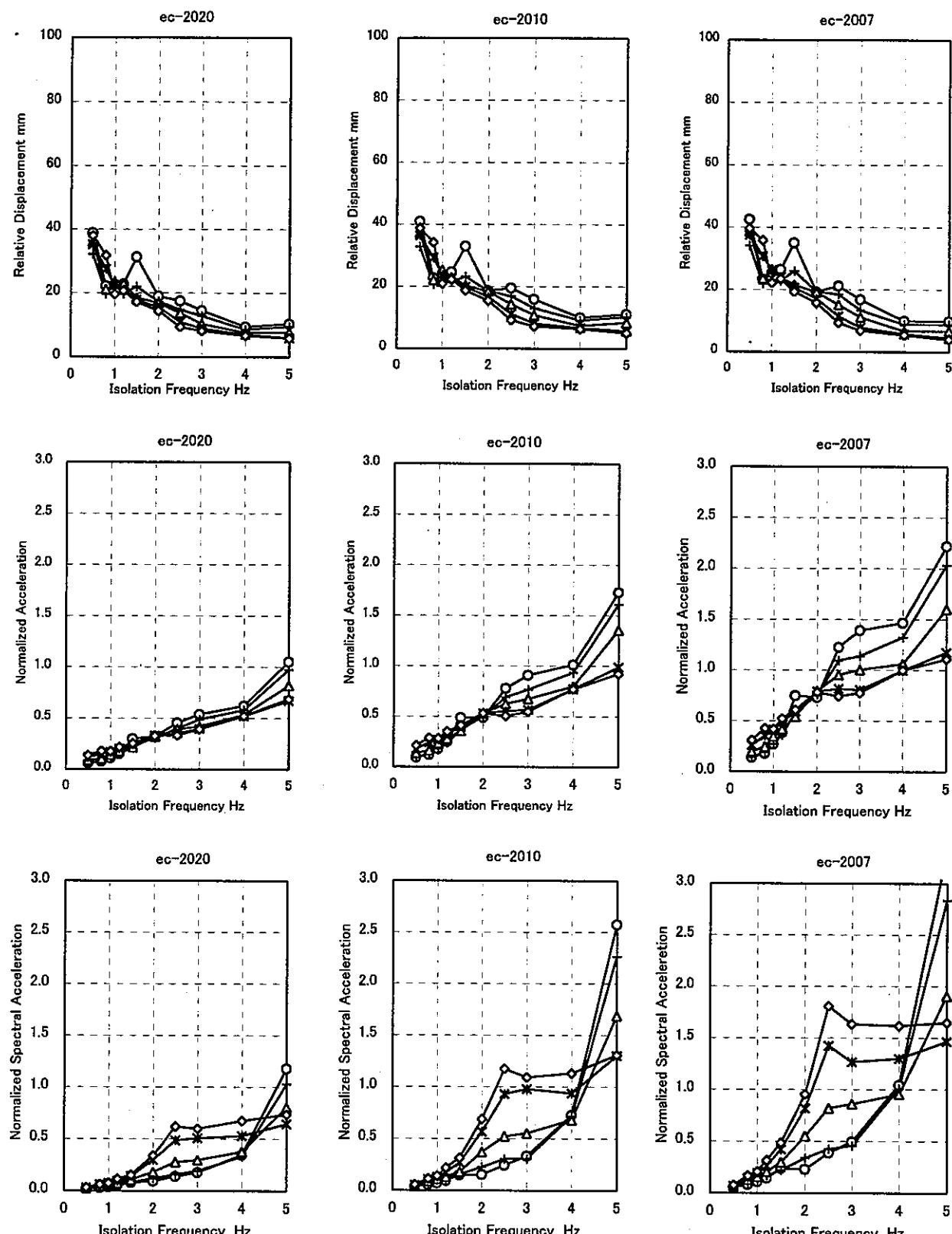
\circ $\beta=0.02$	$+$ $\beta=0.03$	\triangle $\beta=0.05$	$*$ $\beta=0.08$	\diamond $\beta=0.10$
----------------------	------------------	--------------------------	------------------	-------------------------

Fig. 3.6.5(1) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\alpha=5$

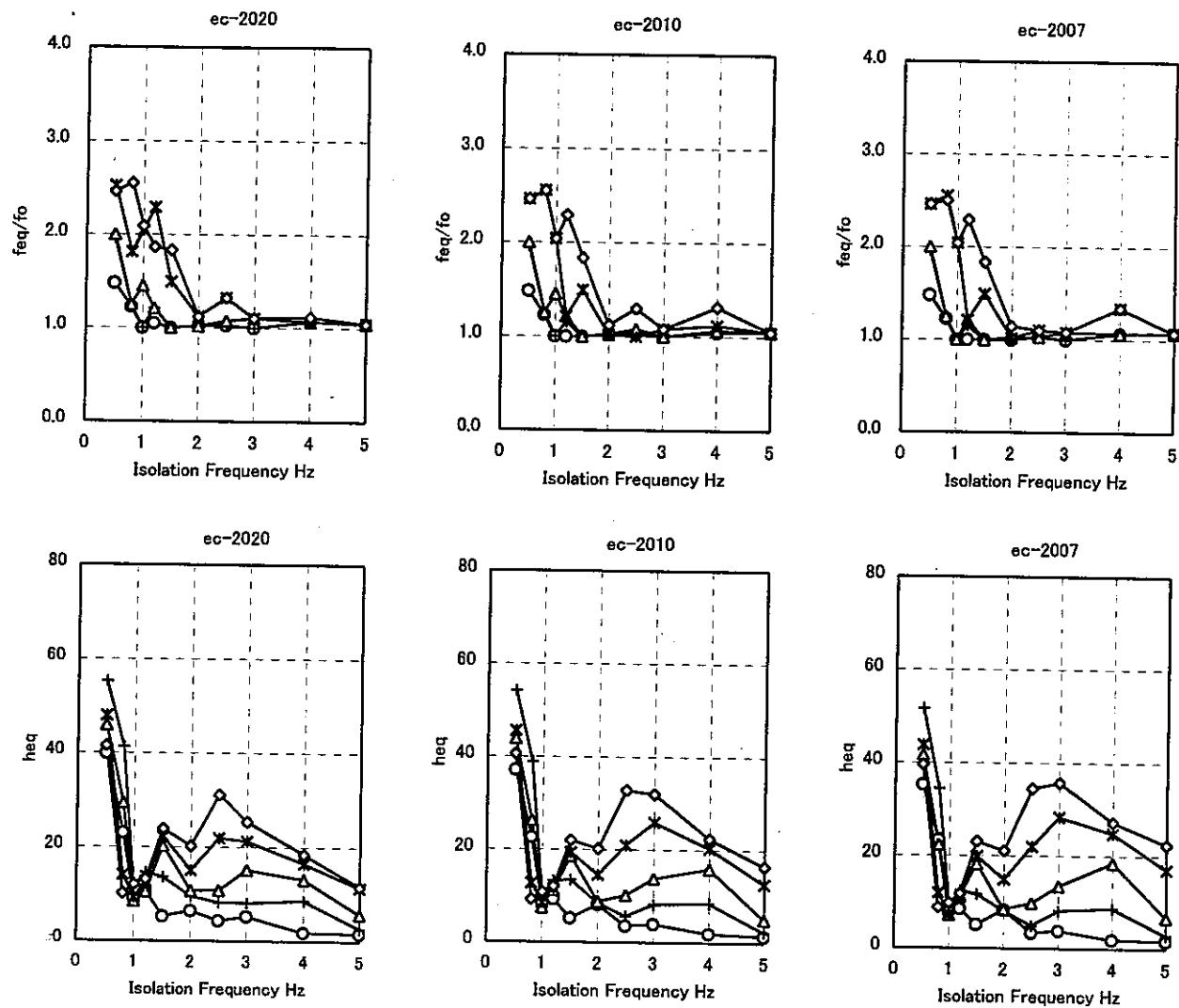
$\beta = 0.02$	$\beta = 0.03$	$\beta = 0.05$	$\beta = 0.08$	$\beta = 0.10$
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Fig. 3.6.5(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\alpha=5$

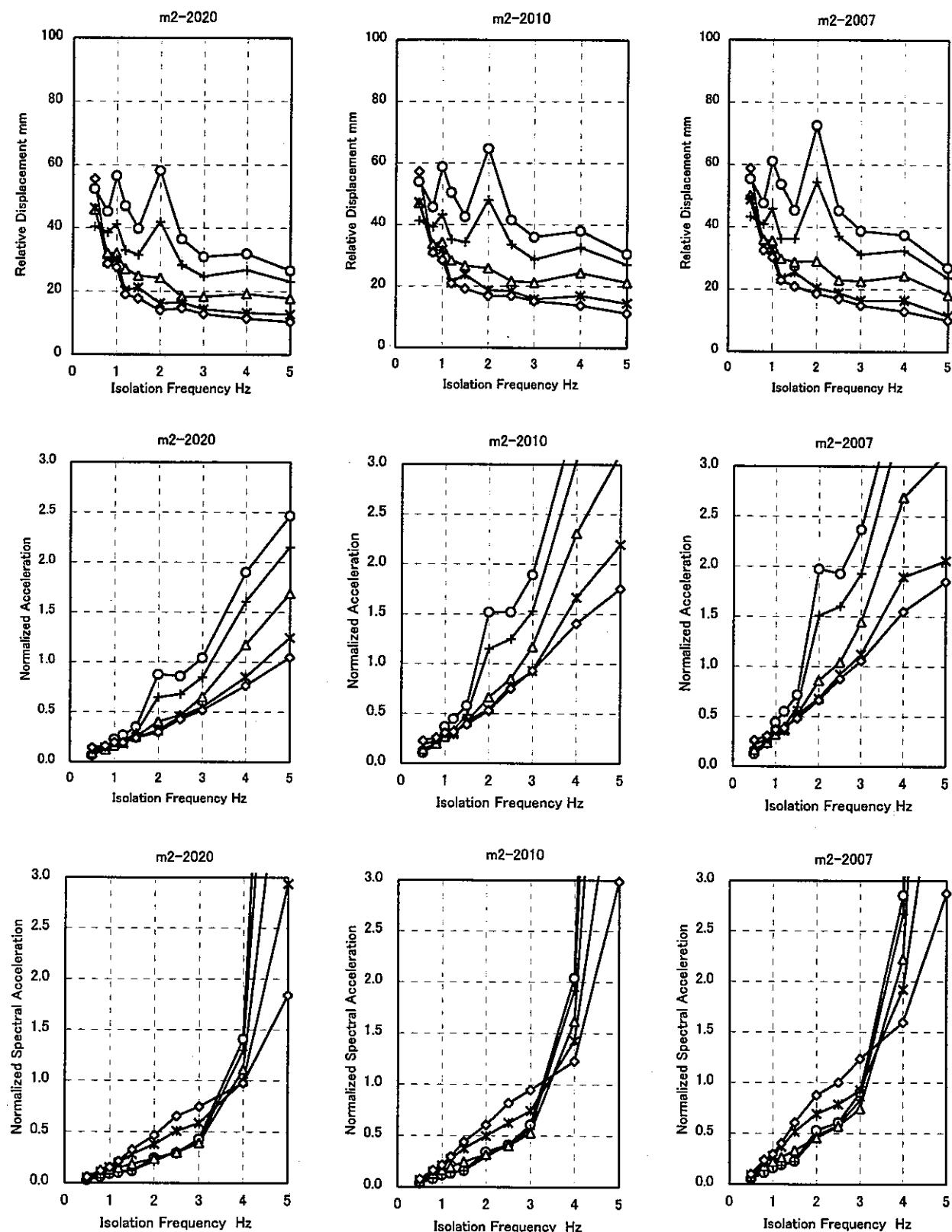
\circ $\beta = 0.02$	$+$ $\beta = 0.03$	\triangle $\beta = 0.05$	$*$ $\beta = 0.08$	\diamond $\beta = 0.10$
------------------------	--------------------	----------------------------	--------------------	---------------------------

Fig. 3.6.6(1) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\alpha=5$

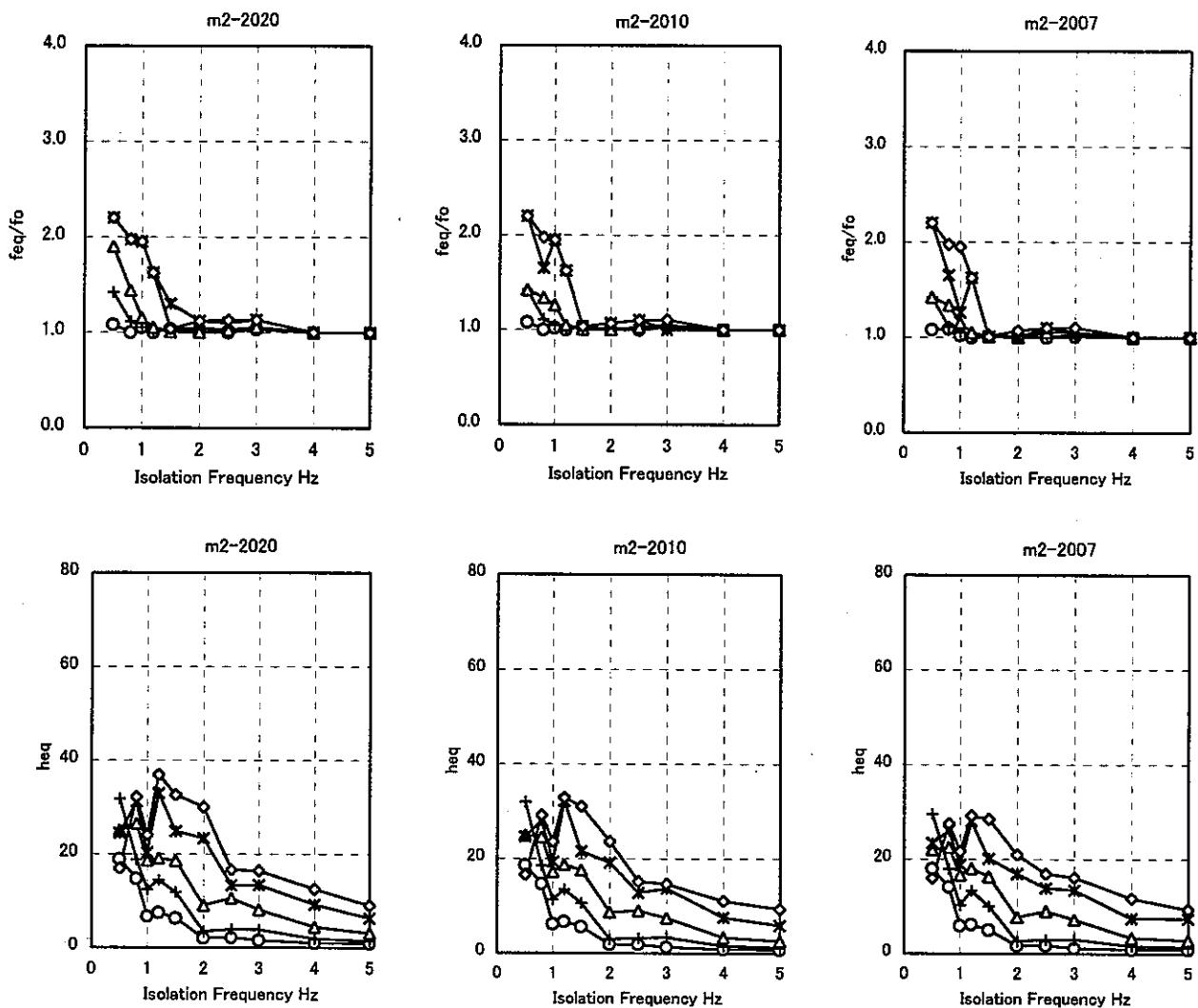
$\text{---} \circ \text{--- } \beta = 0.02$	$\text{---} \times \text{--- } \beta = 0.03$	$\text{---} \triangle \text{--- } \beta = 0.05$	$\text{---} * \text{--- } \beta = 0.08$	$\text{---} \diamond \text{--- } \beta = 0.10$
---	--	---	---	--

Fig. 3.6.6(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\alpha=5$

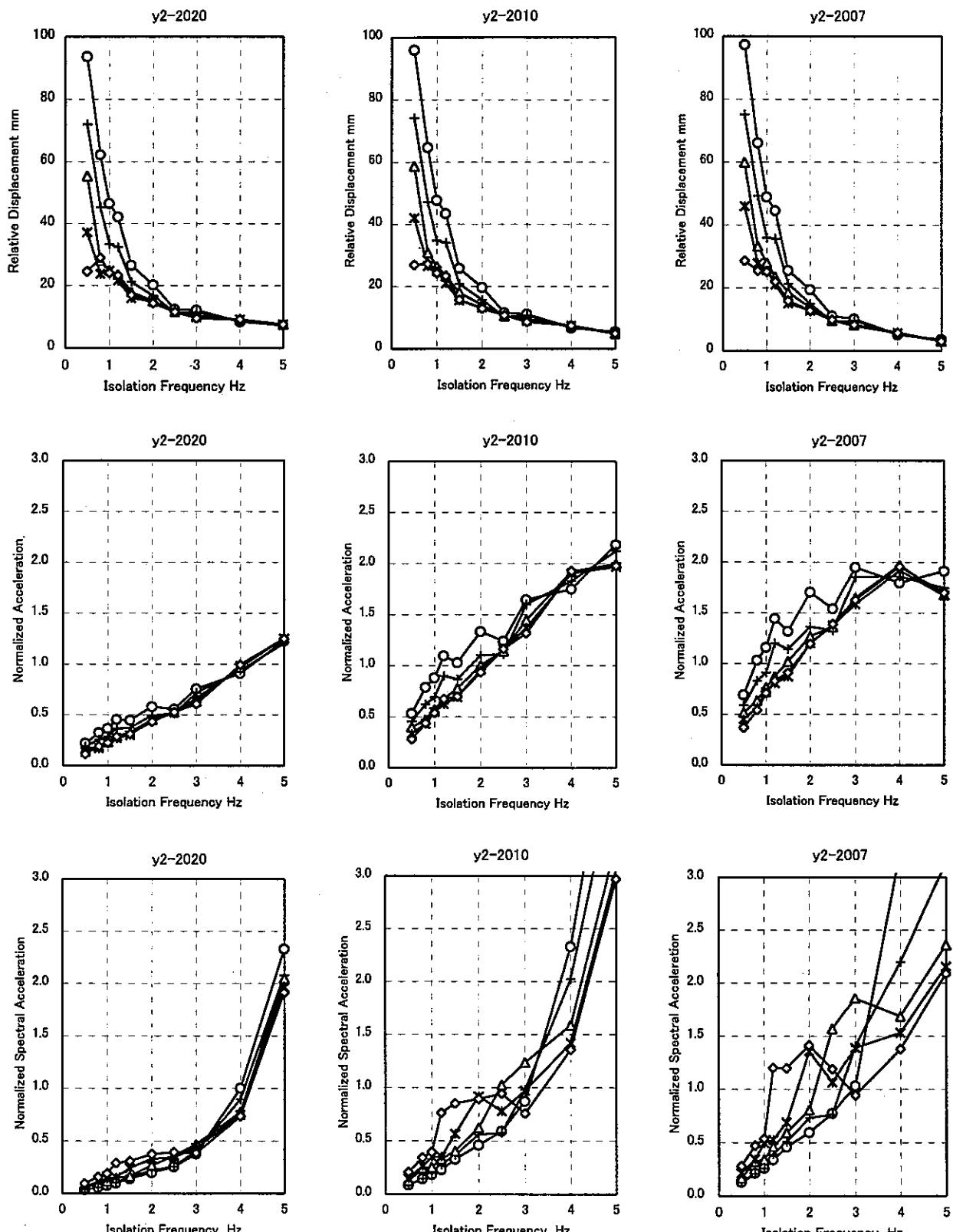
$\text{---} \circ \text{---}$ $\beta = 0.02$	$\text{---} + \text{---}$ $\beta = 0.03$	$\text{---} \triangle \text{---}$ $\beta = 0.05$	$\text{---} * \text{---}$ $\beta = 0.08$	$\text{---} \diamond \text{---}$ $\beta = 0.10$
--	--	--	--	---

Fig. 3.6.7(1) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\alpha=5$

\circ $\beta = 0.02$	$+$ $\beta = 0.03$	\triangle $\beta = 0.05$	$*$ $\beta = 0.08$	\diamond $\beta = 0.10$
------------------------	--------------------	----------------------------	--------------------	---------------------------

Fig. 3.6.7(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\alpha=5$

\circ $\beta = 0.02$	$+$ $\beta = 0.03$	\triangle $\beta = 0.05$	$*$ $\beta = 0.08$	\diamond $\beta = 0.10$
------------------------	--------------------	----------------------------	--------------------	---------------------------

Fig. 3.7.1(1) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

$\circ - \alpha=1$	$+- \alpha=2$	$\Delta - \alpha=5$	$* - \alpha=10$	$\diamond - \alpha=20$
--------------------	---------------	---------------------	-----------------	------------------------

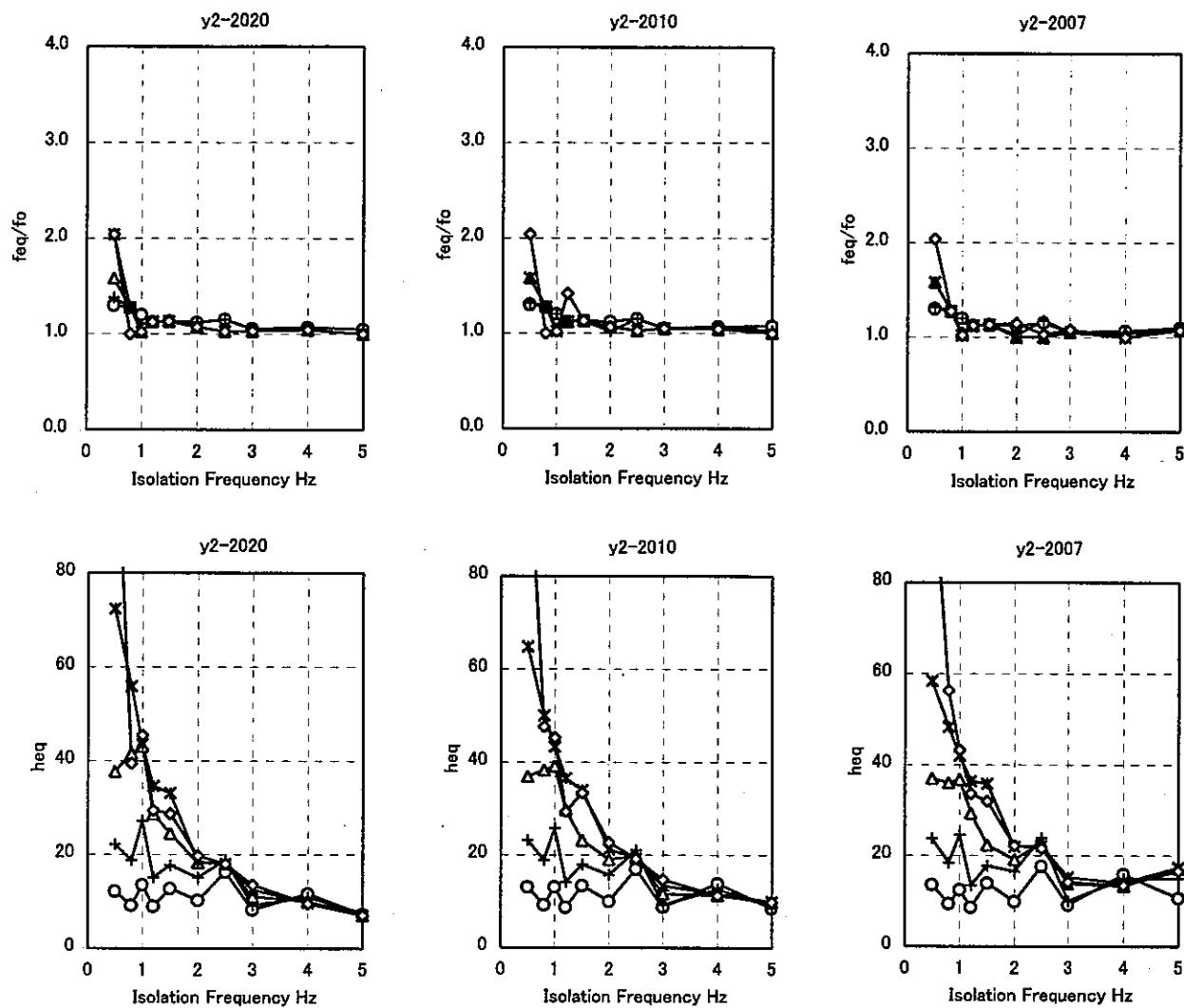
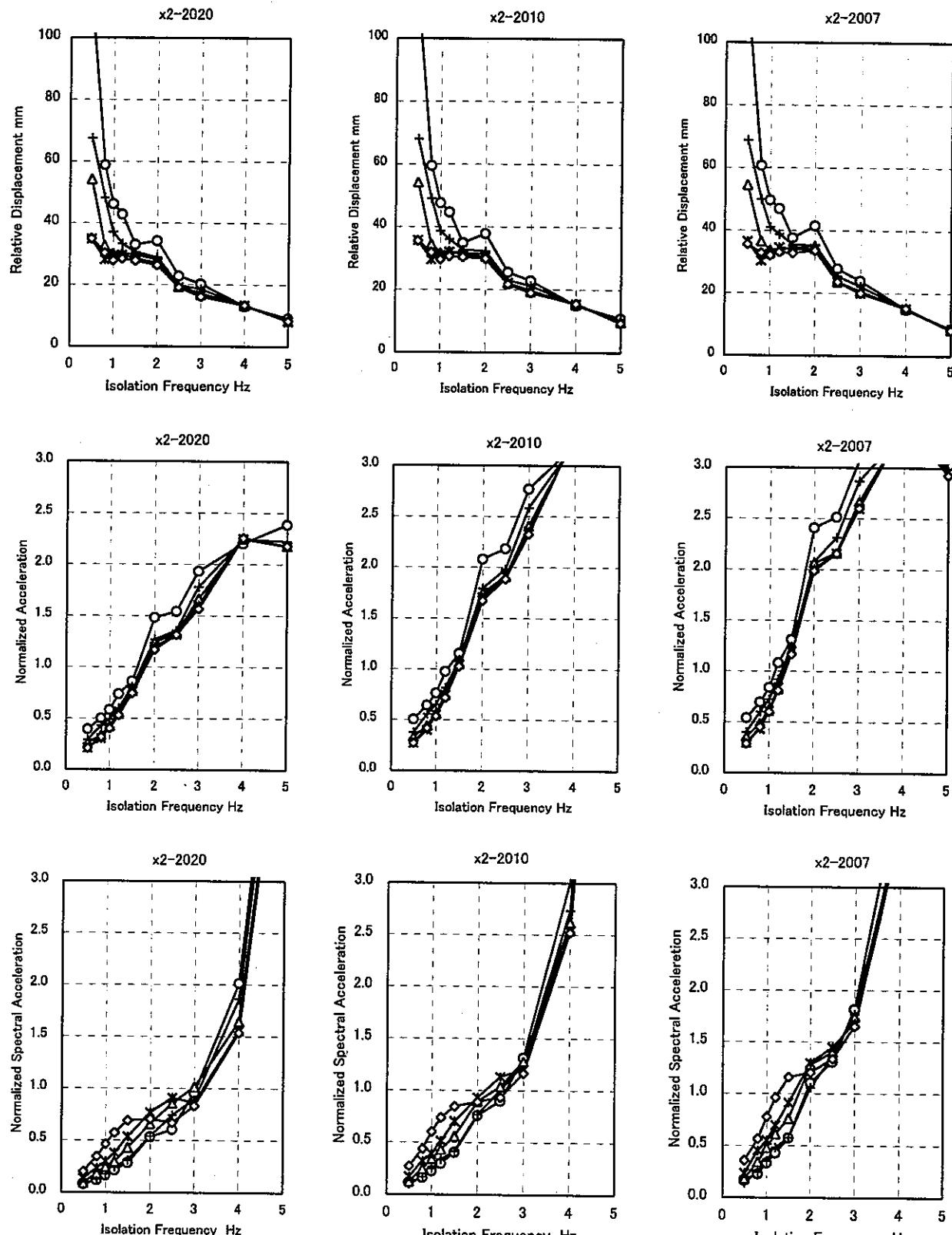
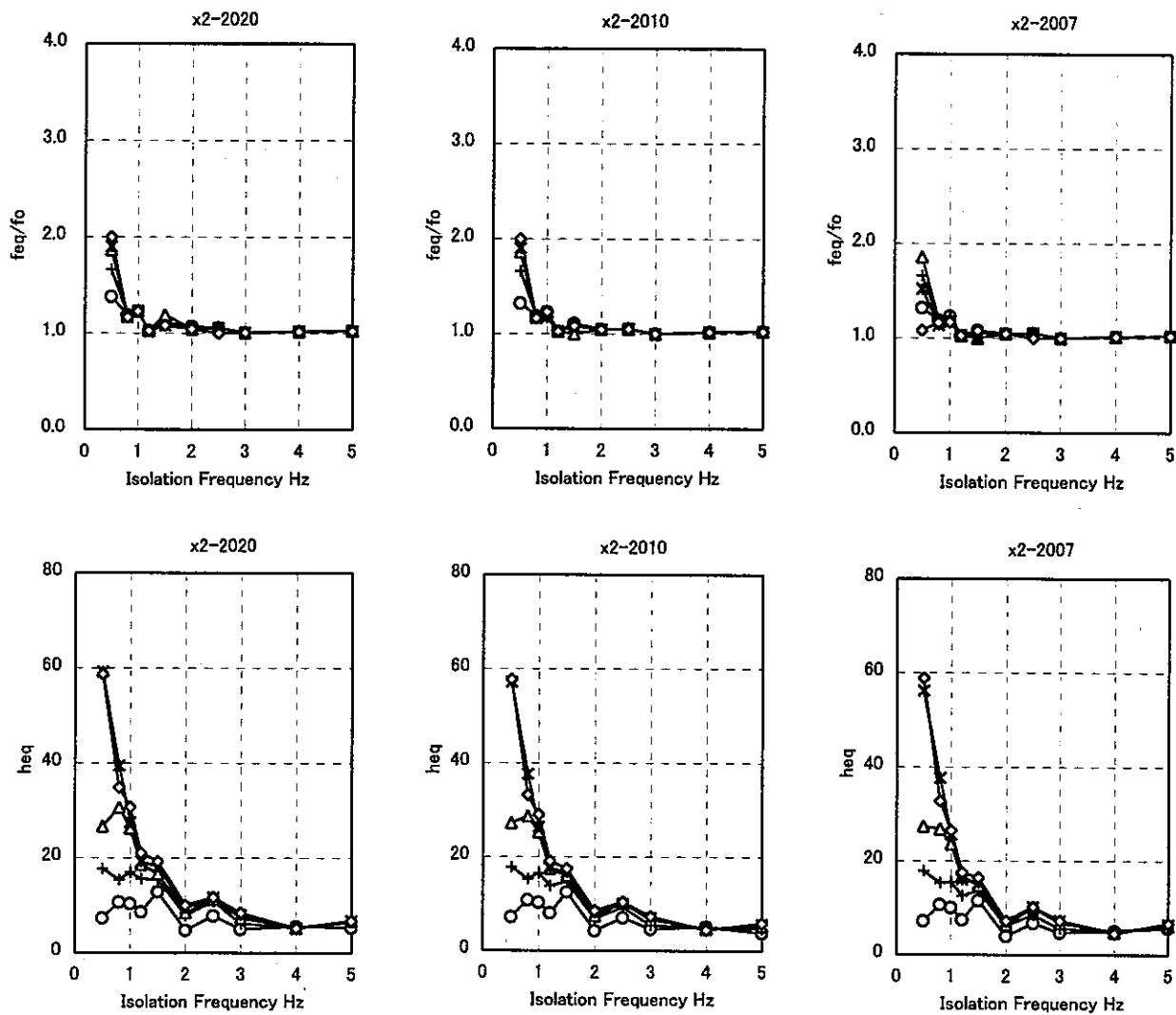


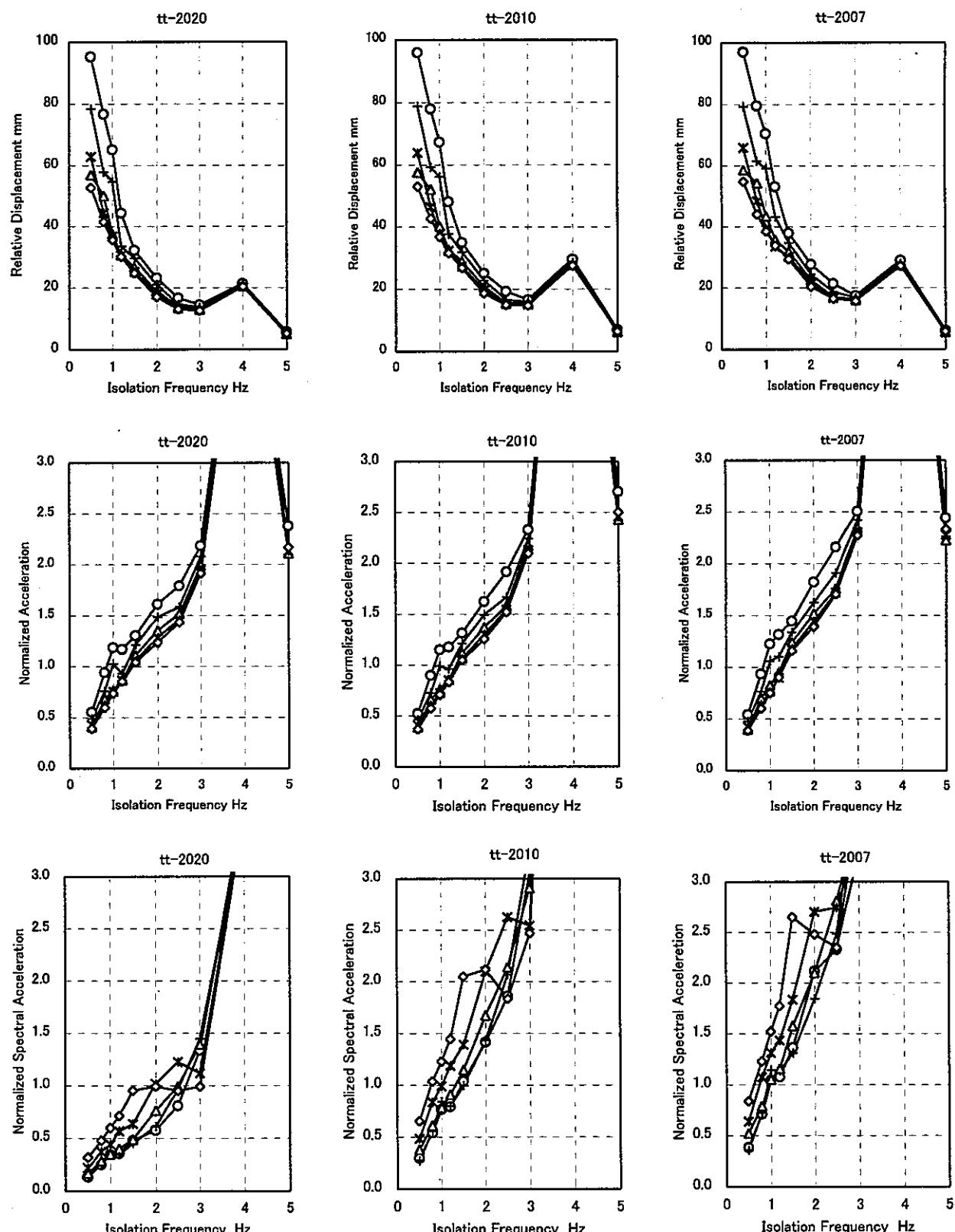
Fig. 3.7.1(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

$\text{---} \circ \text{--- } \alpha=1$	$\text{---} + \text{--- } \alpha=2$	$\text{---} \triangle \text{--- } \alpha=5$	$\text{---} * \text{--- } \alpha=10$	$\text{---} \diamond \text{--- } \alpha=20$
---	-------------------------------------	---	--------------------------------------	---

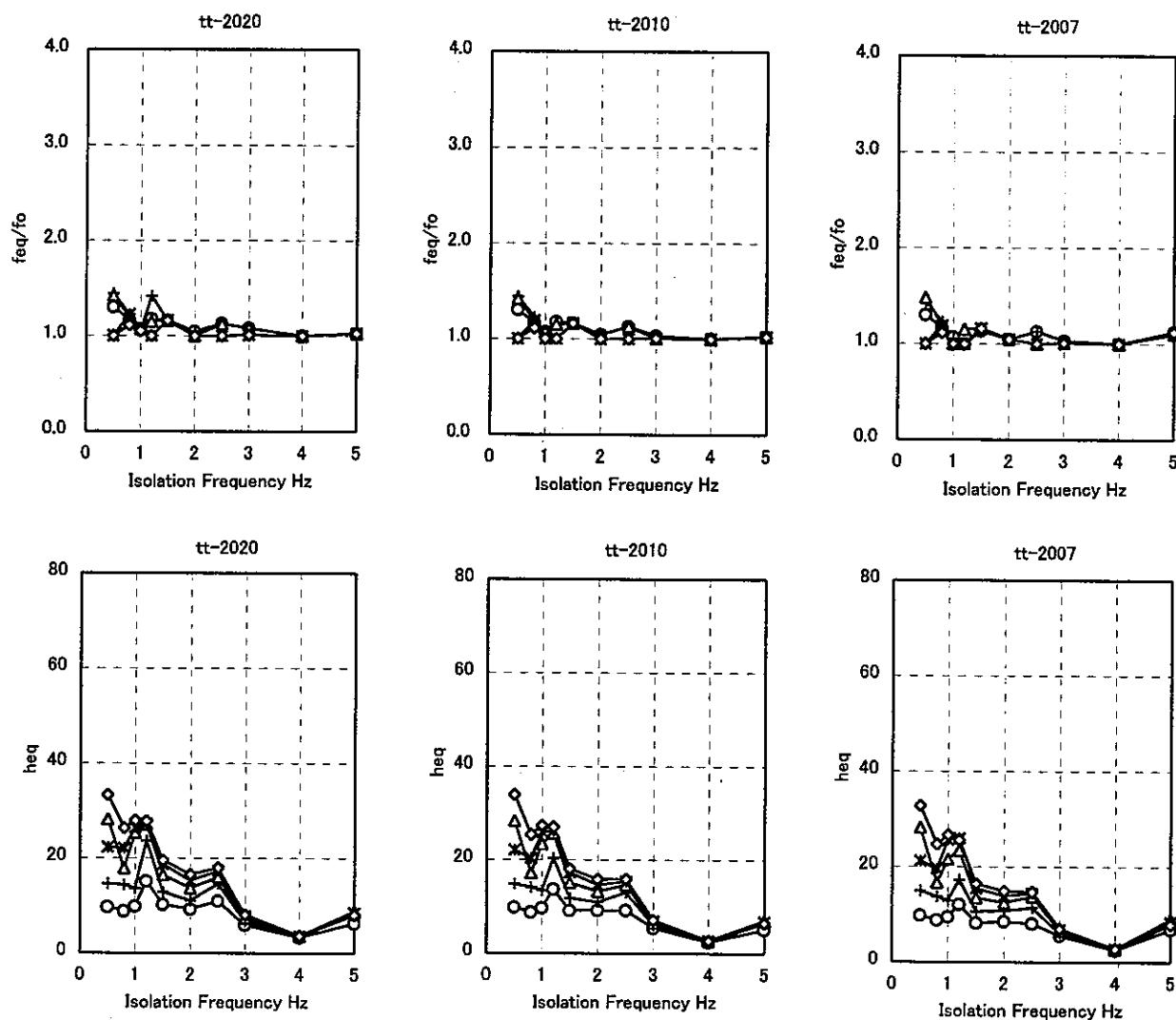
Fig. 3.7.2(1) 免震振動数と応答 (非線形解析) $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

Fig. 3.7.2(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

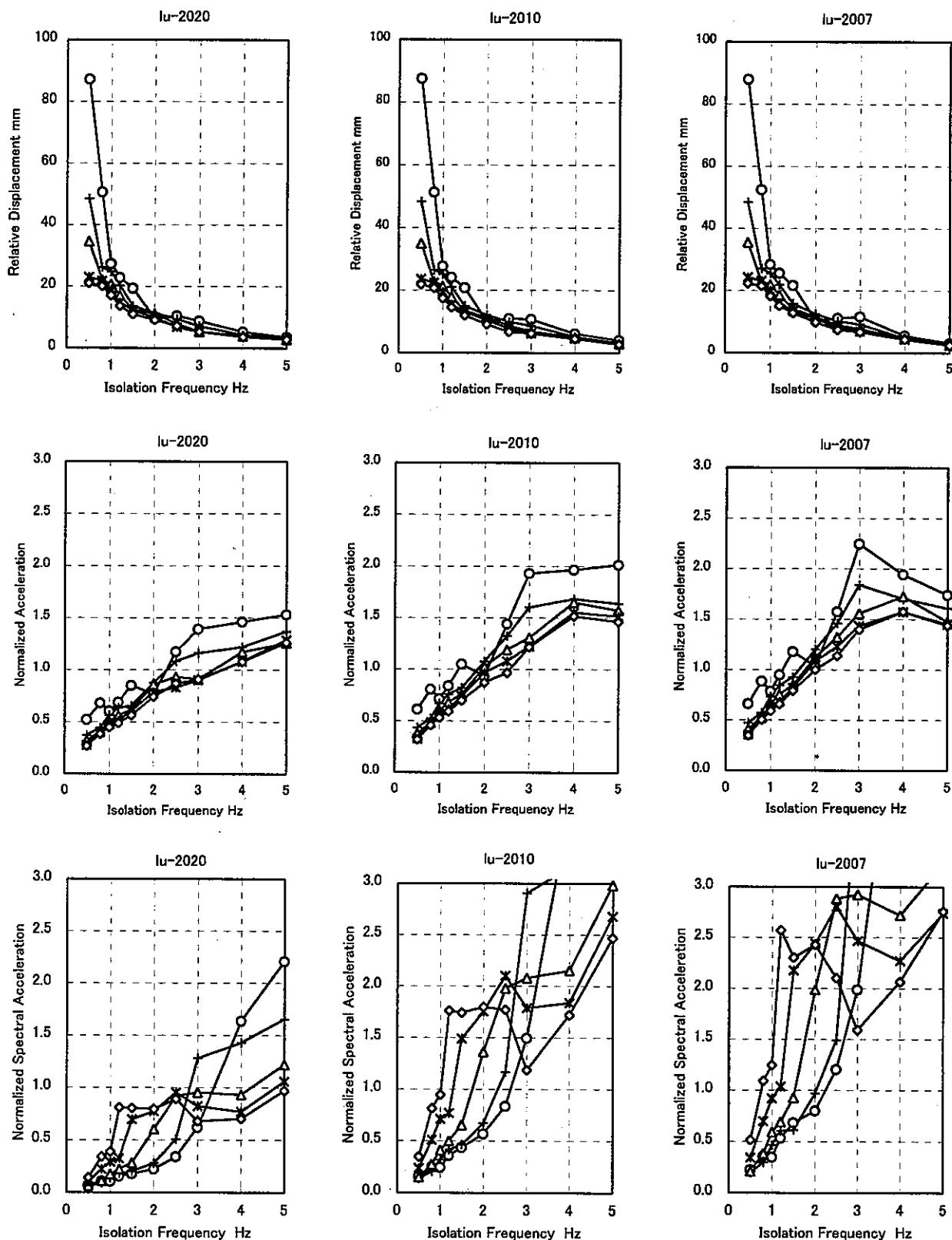
\circ $\alpha=1$	$+$ $\alpha=2$	Δ $\alpha=5$	$*$ $\alpha=10$	\bullet $\alpha=20$
--------------------	----------------	---------------------	-----------------	-----------------------

Fig. 3.7.3(1) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

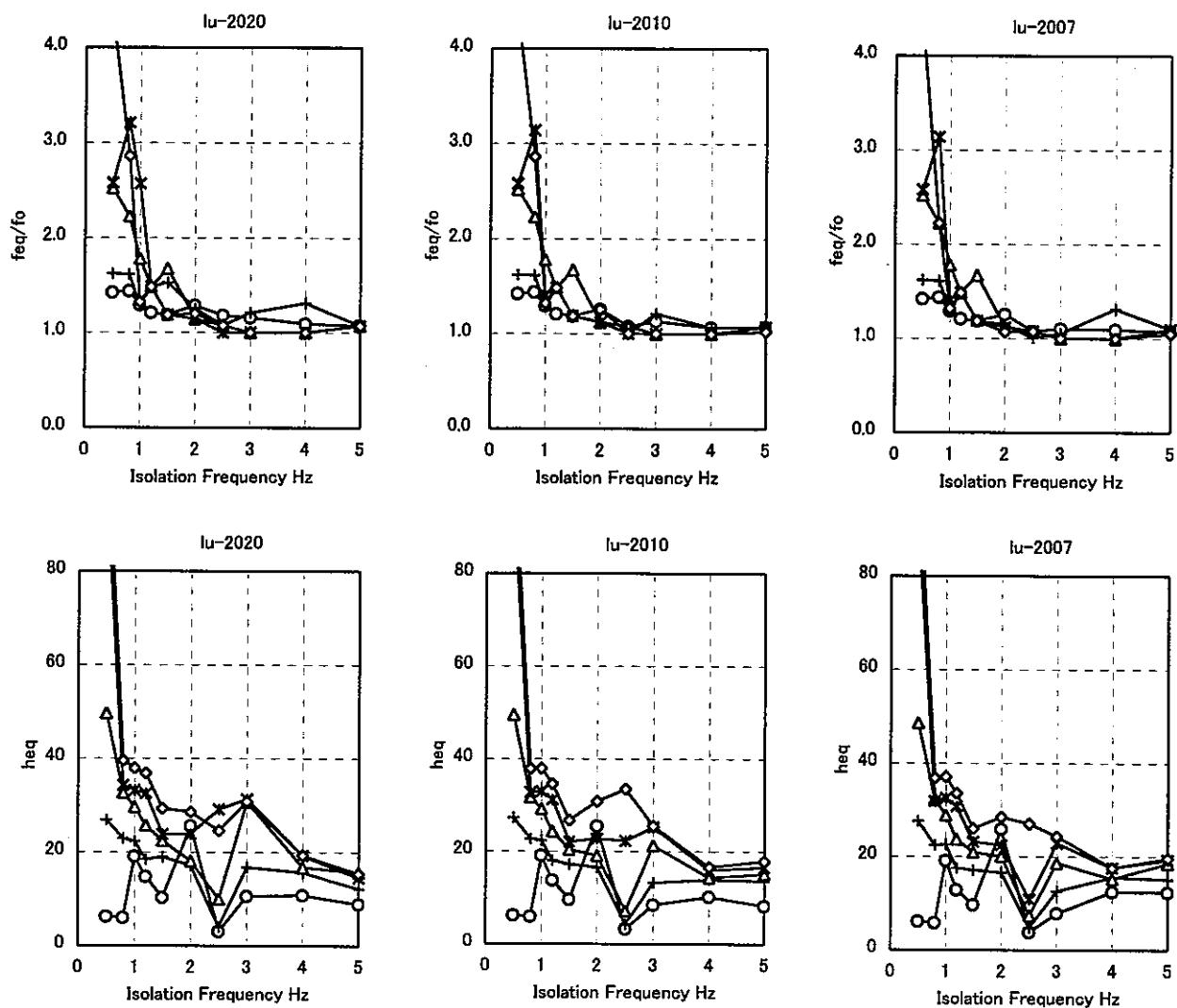
\circ $\alpha=1$	$+$ $\alpha=2$	\triangle $\alpha=5$	\times $\alpha=10$	\diamond $\alpha=20$
--------------------	----------------	------------------------	----------------------	------------------------

Fig. 3.7.3(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

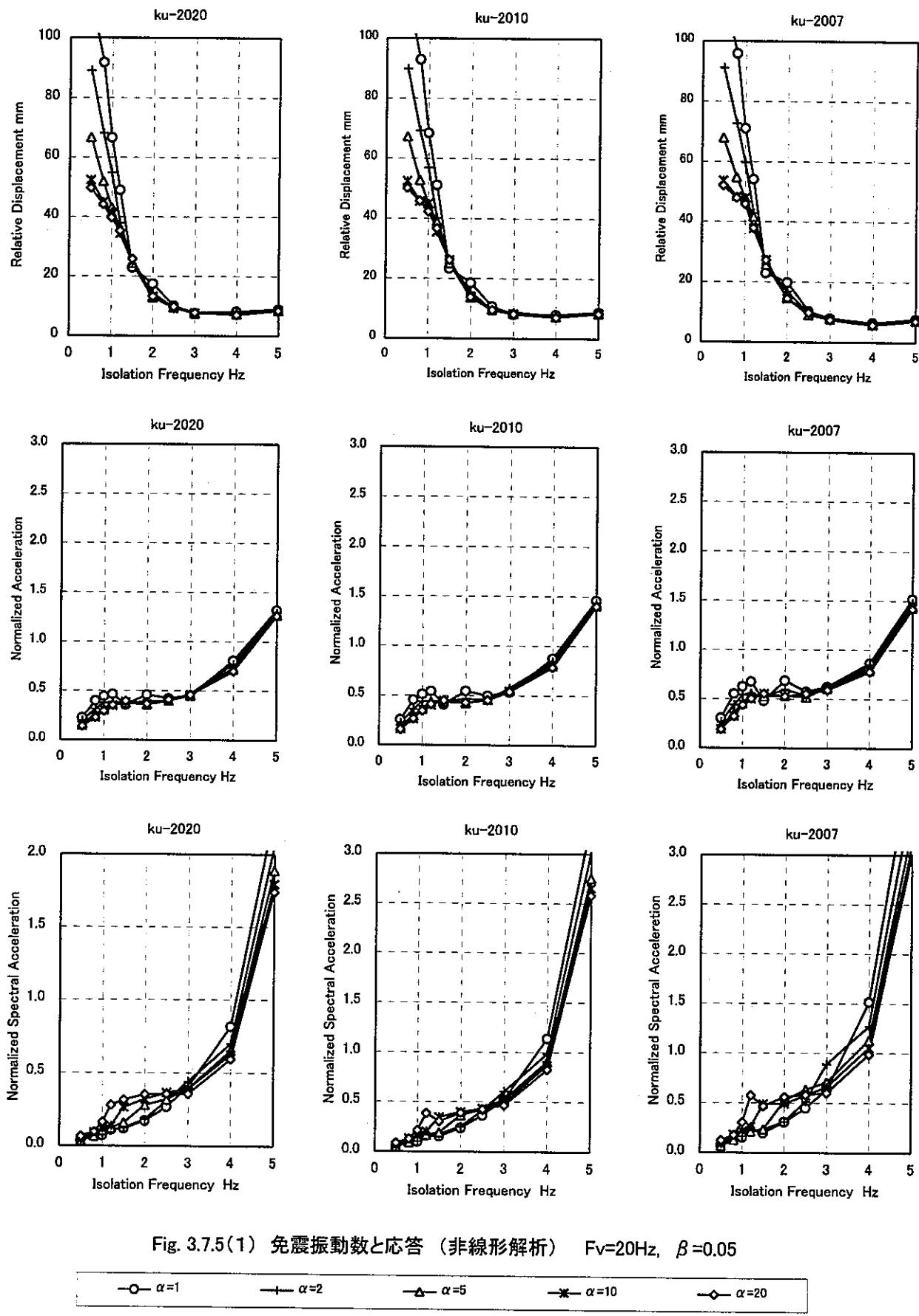
\circ $\alpha=1$	$+$ $\alpha=2$	\triangle $\alpha=5$	$*$ $\alpha=10$	\diamond $\alpha=20$
--------------------	----------------	------------------------	-----------------	------------------------

Fig. 3.7.4(1) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

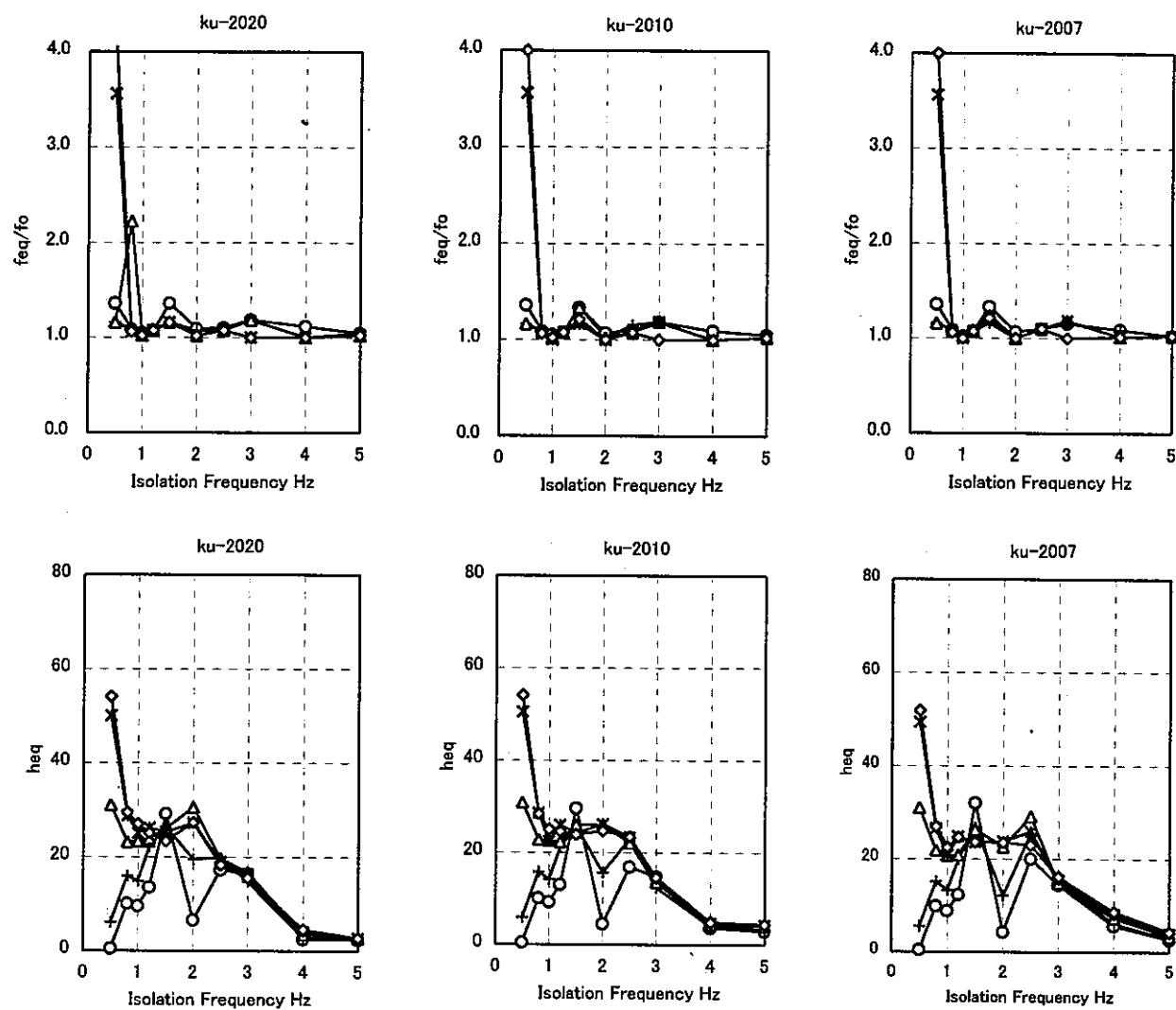
—○— $\alpha=1$ —+— $\alpha=2$ —△— $\alpha=5$ —*— $\alpha=10$ —◇— $\alpha=20$

Fig. 3.7.4(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

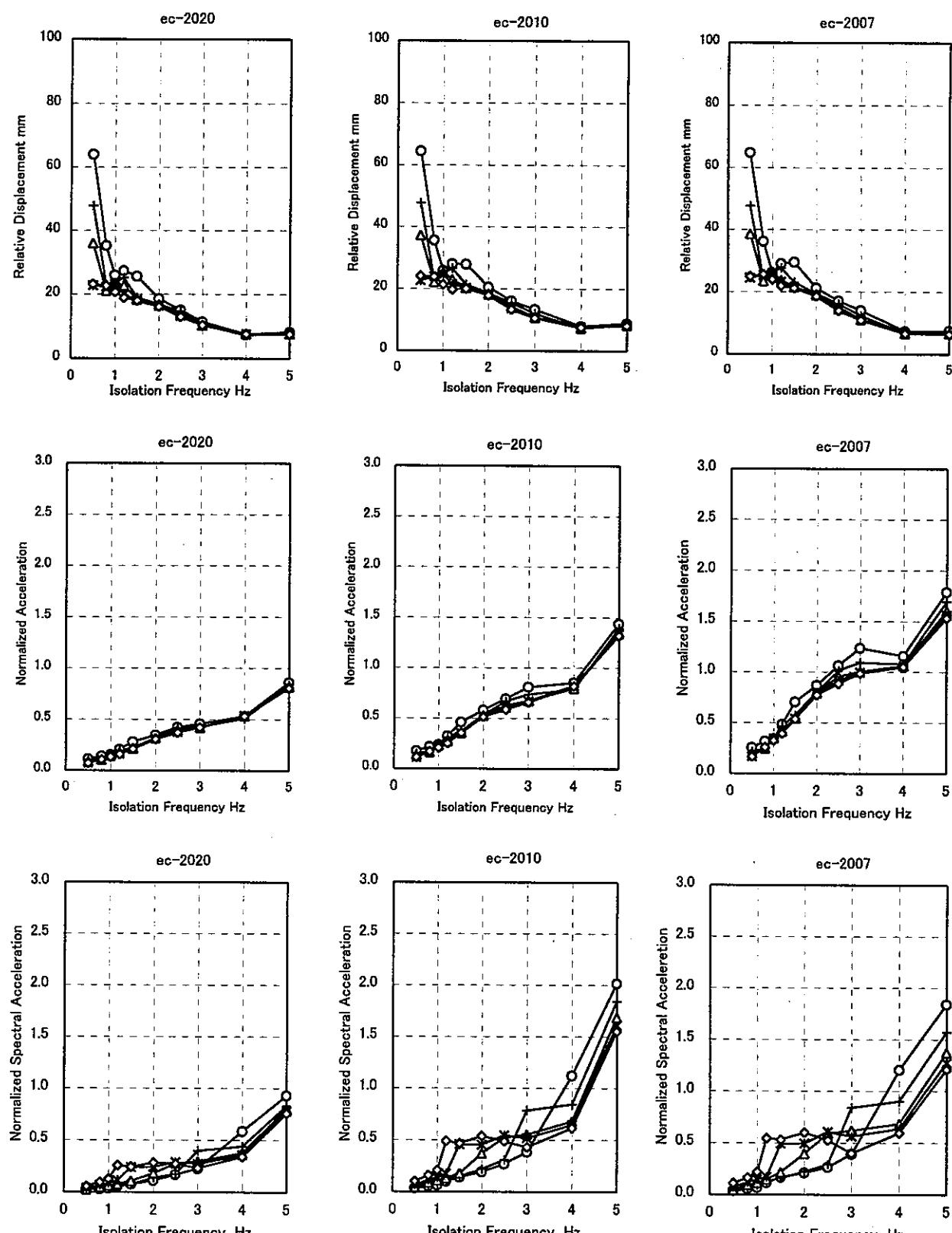
\circ $\alpha=1$	$+$ $\alpha=2$	\triangle $\alpha=5$	$*$ $\alpha=10$	\diamond $\alpha=20$
--------------------	----------------	------------------------	-----------------	------------------------

Fig. 3.7.5(1) 免震振動数と応答 (非線形解析) $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

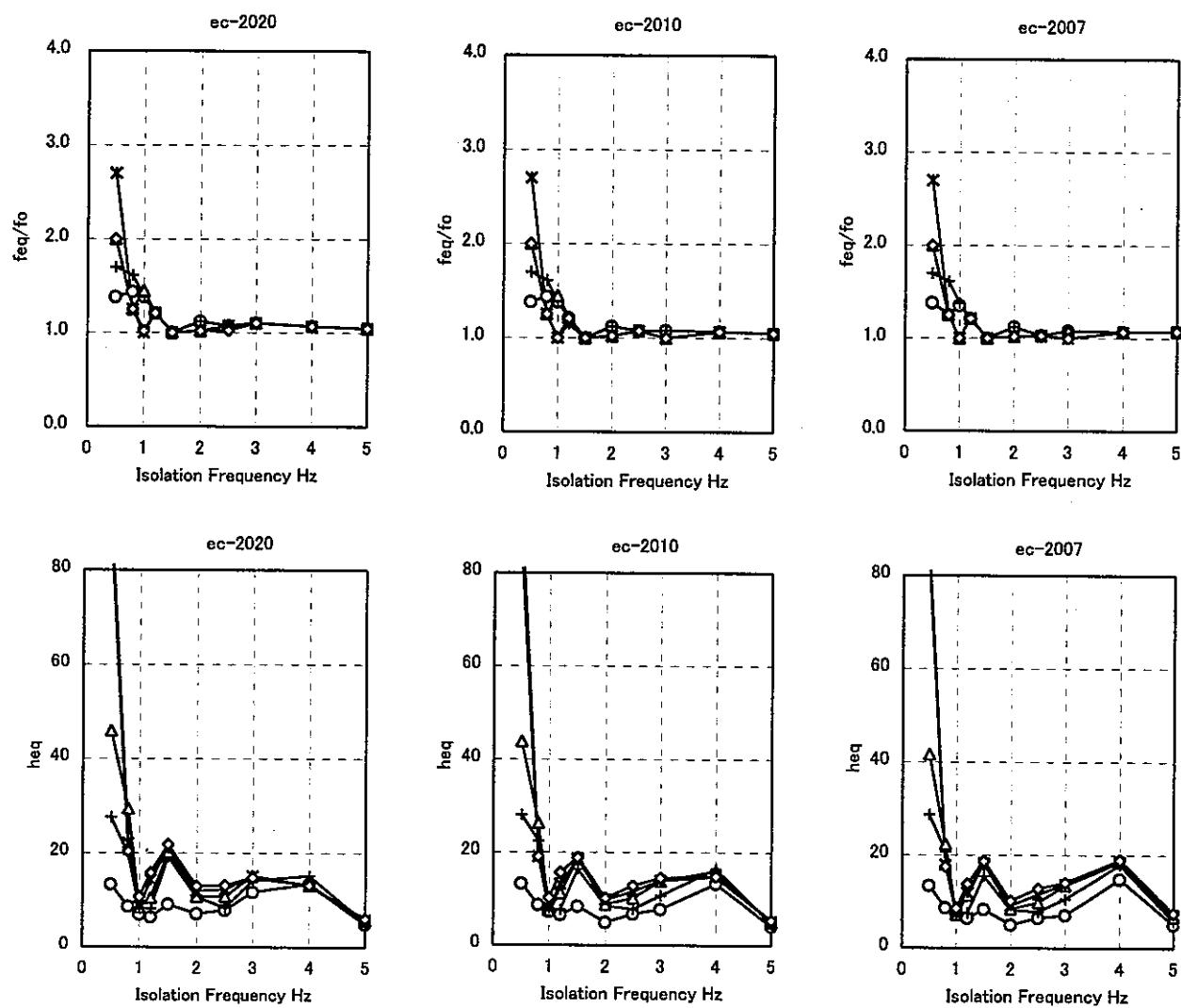
\circ $\alpha=1$	$+$ $\alpha=2$	\triangle $\alpha=5$	$*$ $\alpha=10$	\diamond $\alpha=20$
--------------------	----------------	------------------------	-----------------	------------------------

Fig. 3.7.5(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

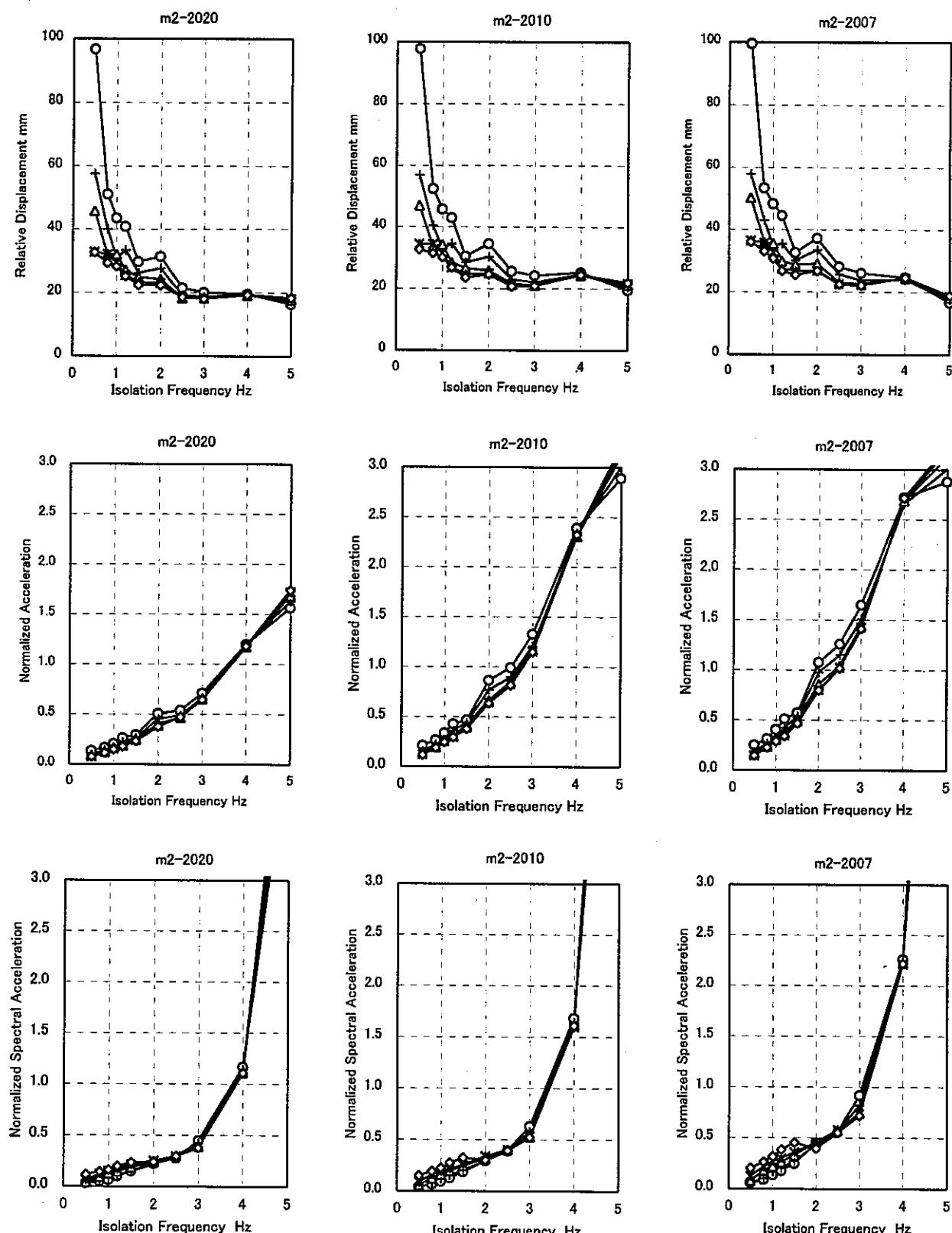
\circ $\alpha=1$	$+$ $\alpha=2$	\triangle $\alpha=5$	$*$ $\alpha=10$	\diamond $\alpha=20$
--------------------	----------------	------------------------	-----------------	------------------------

Fig. 3.7.6(1) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

\circ $\alpha=1$	$+$ $\alpha=2$	\triangle $\alpha=5$	$*$ $\alpha=10$	\circ $\alpha=20$
--------------------	----------------	------------------------	-----------------	---------------------

Fig. 3.7.6(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

\circ $\alpha=1$	$+$ $\alpha=2$	Δ $\alpha=5$	$*$ $\alpha=10$	\diamond $\alpha=20$
--------------------	----------------	---------------------	-----------------	------------------------

Fig. 3.7.7(1) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

\circ $\alpha=1$	$+$ $\alpha=2$	\triangle $\alpha=5$	$*$ $\alpha=10$	\diamond $\alpha=20$
--------------------	----------------	------------------------	-----------------	------------------------

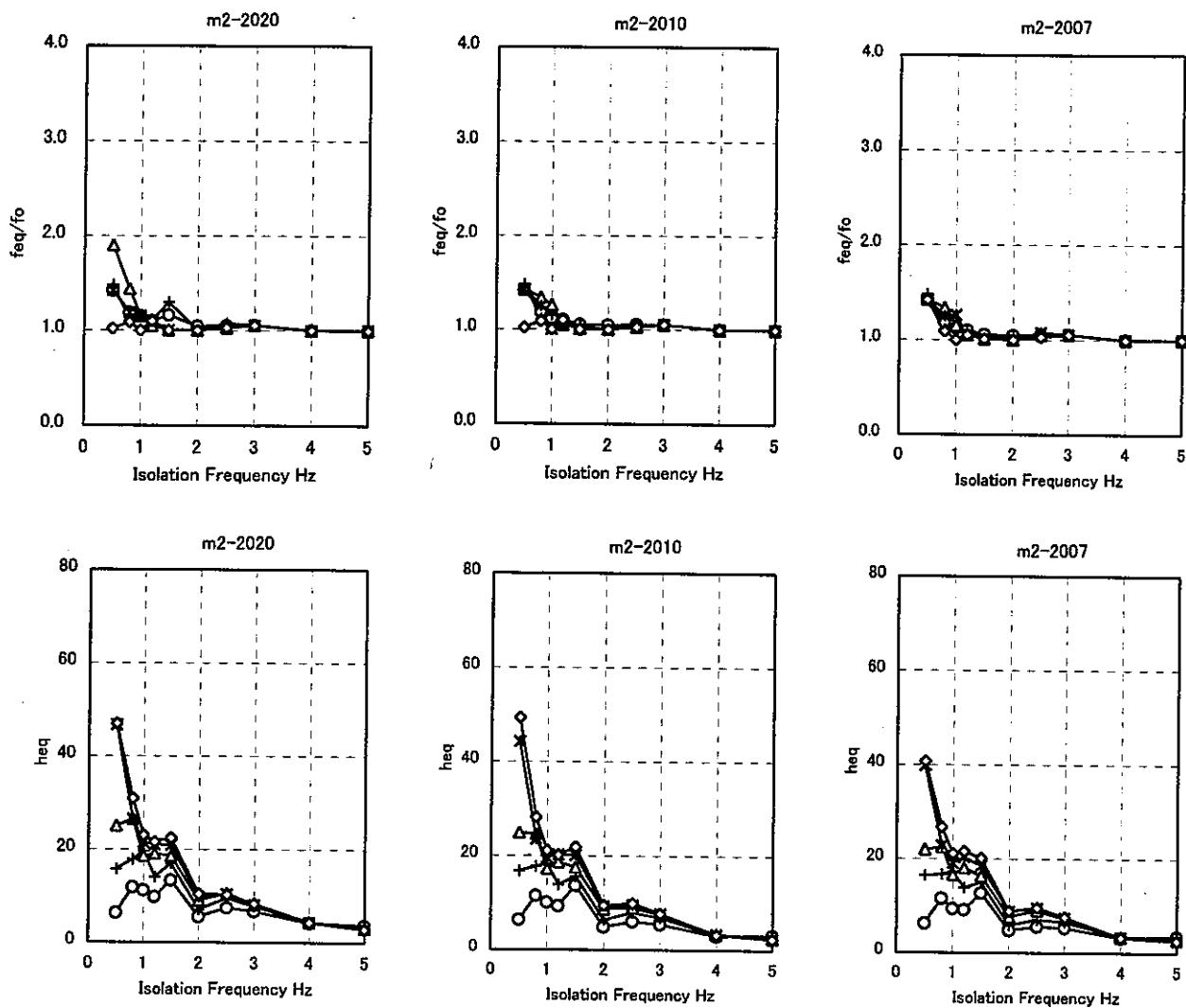


Fig. 3.7.7(2) 免震振動数と応答（非線形解析） $F_v=20\text{Hz}$, $\beta=0.05$

\circ $\alpha=1$	$+$ $\alpha=2$	\triangle $\alpha=5$	$*$ $\alpha=10$	\diamond $\alpha=20$
--------------------	----------------	------------------------	-----------------	------------------------

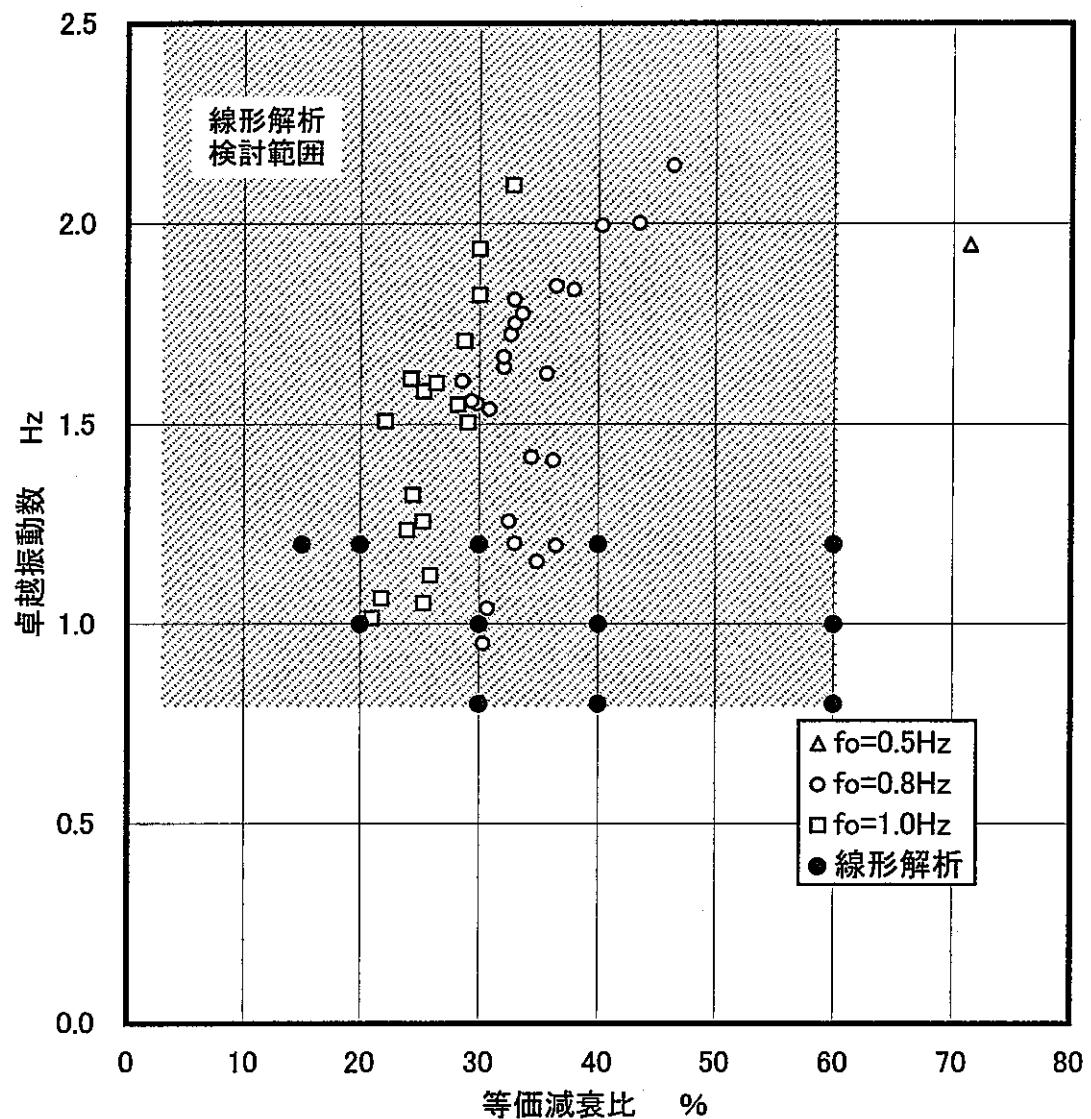


Fig. 3.8.1 非線形解析の適正領域(条件1)における等価減衰比と卓越振動数

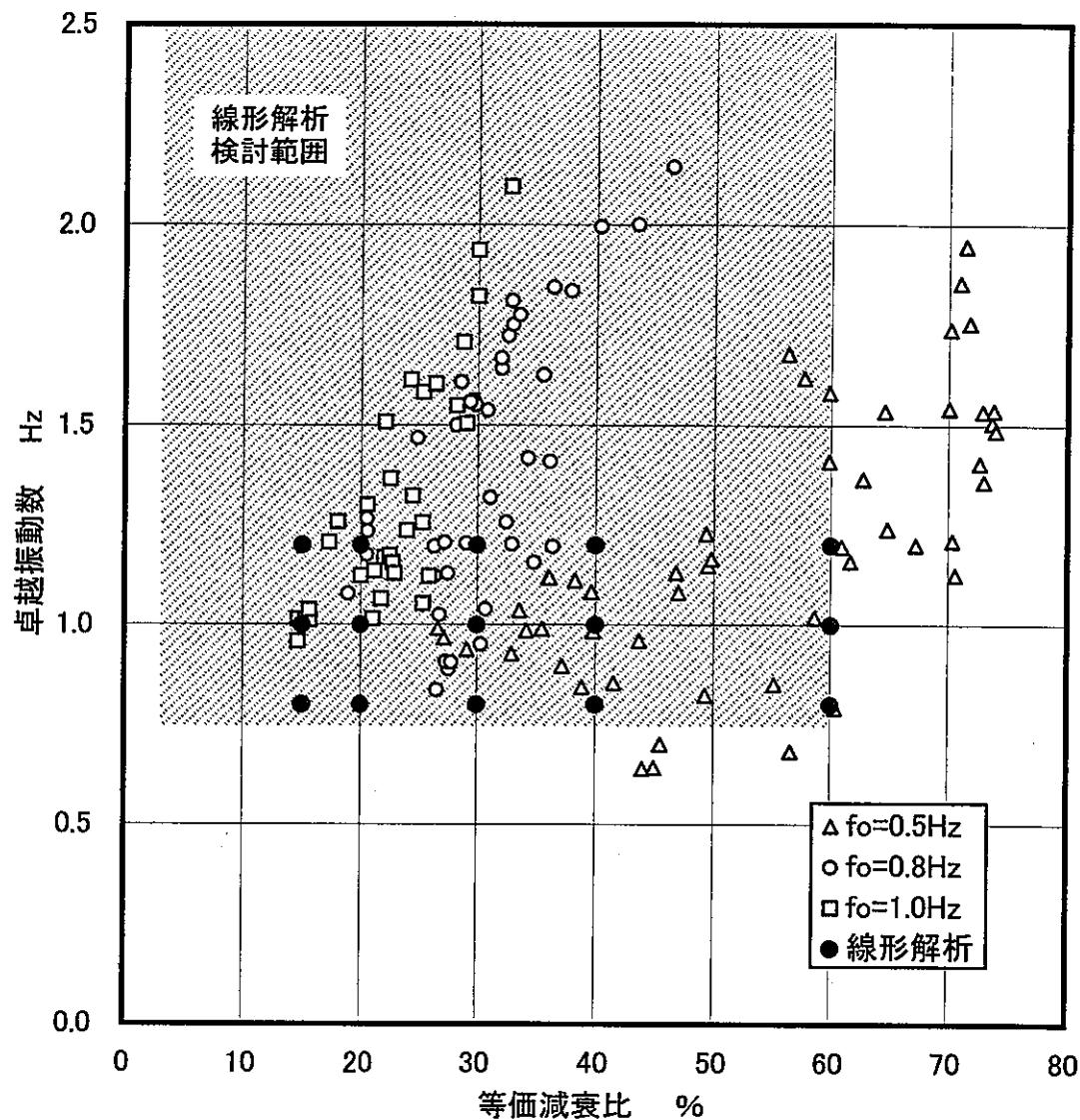


Fig. 3.8.2 非線形解析の適正領域(条件2)における等価減衰比と卓越振動数

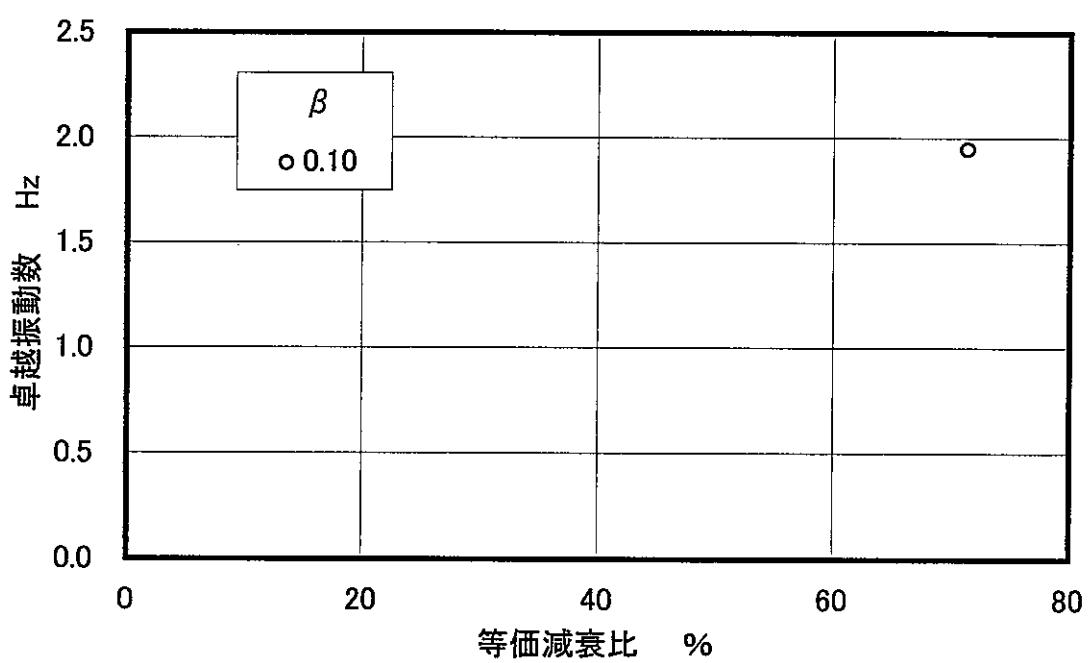
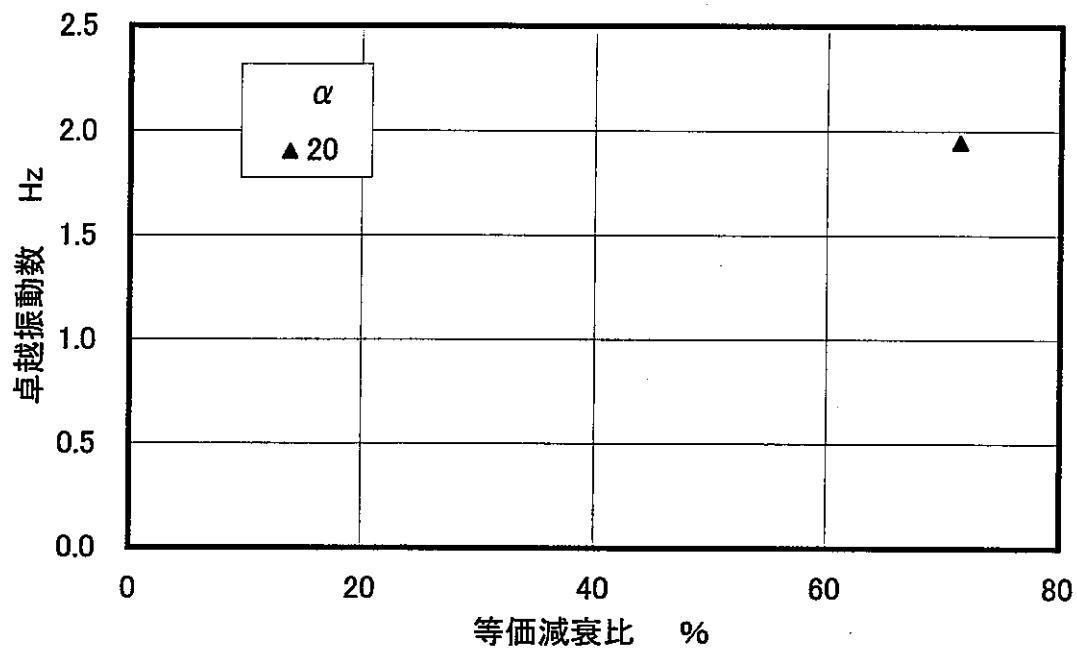
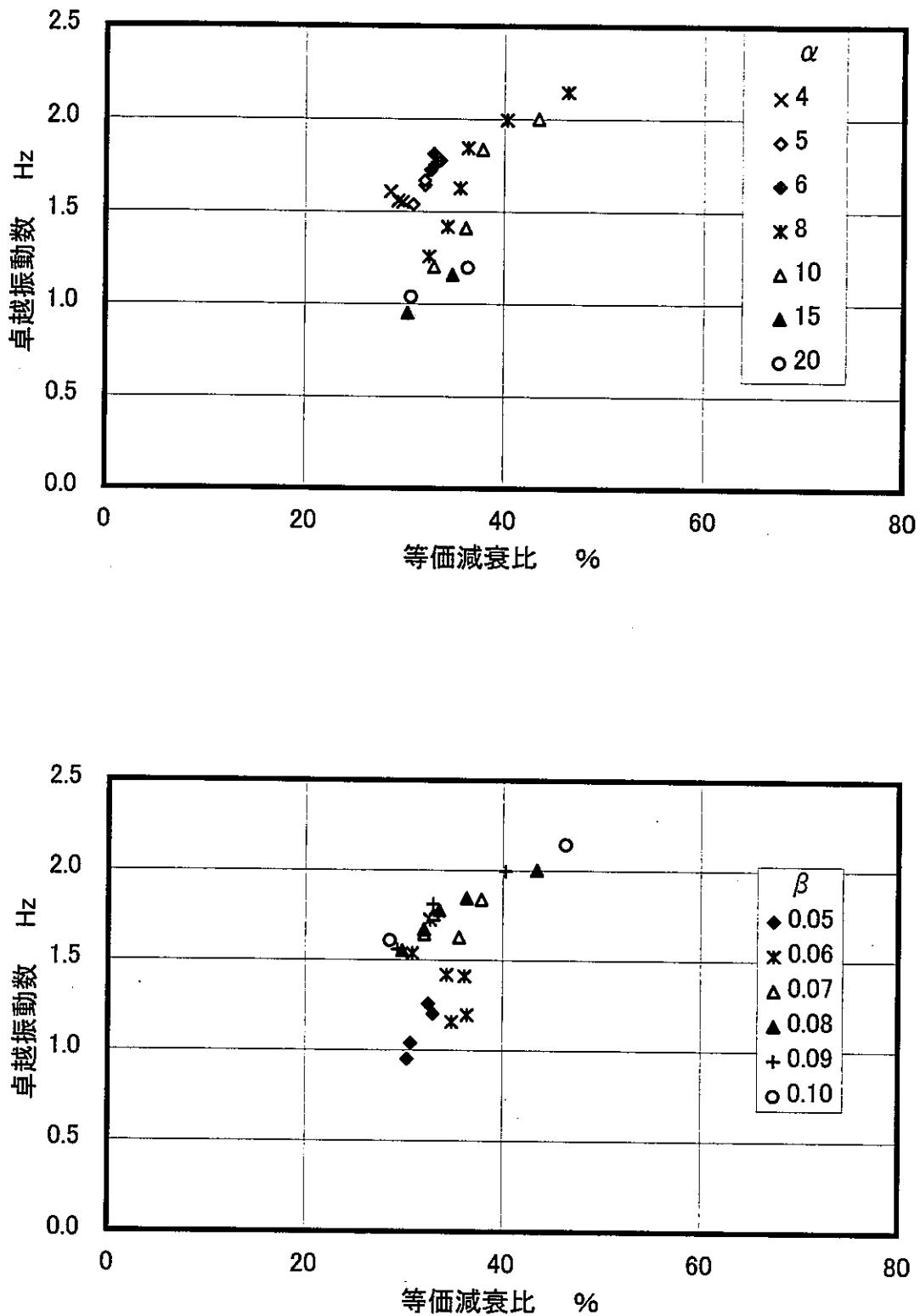
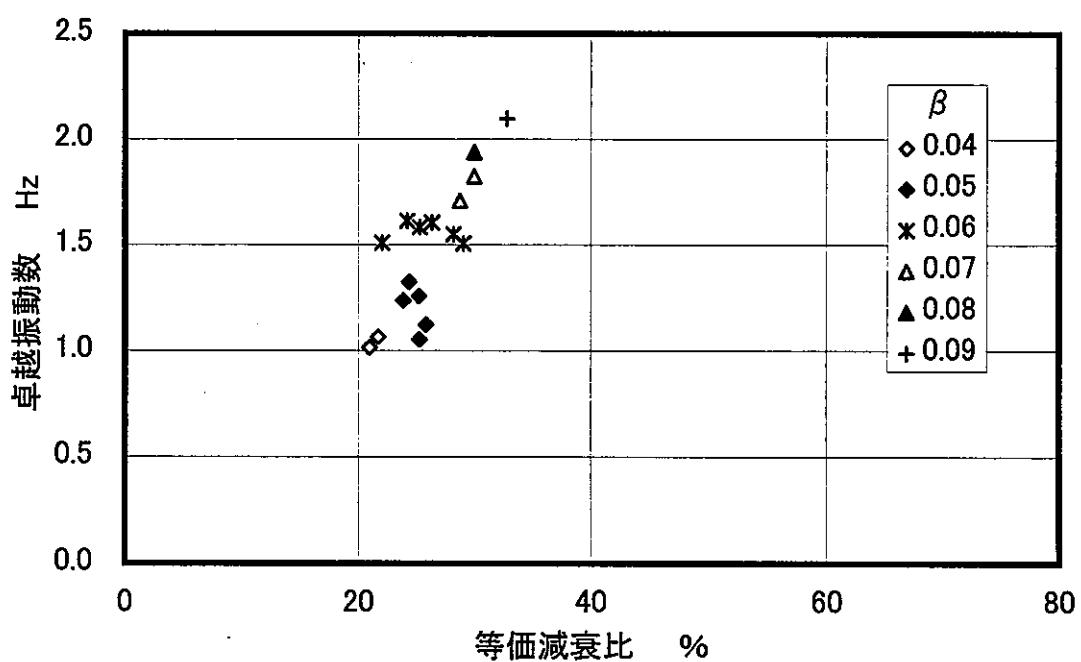
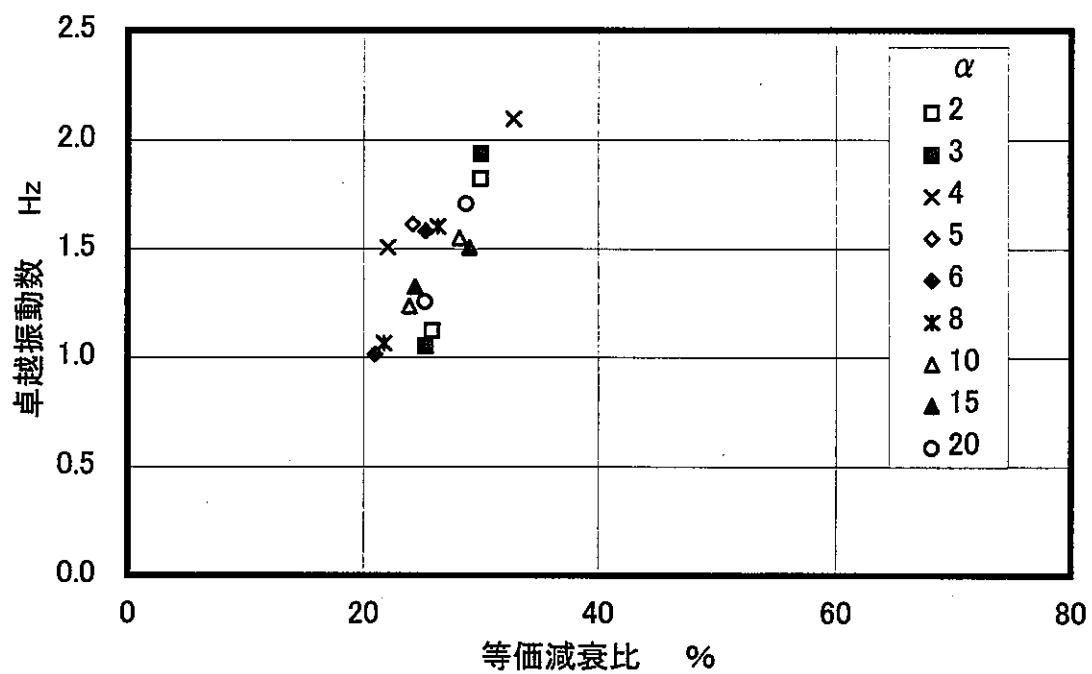
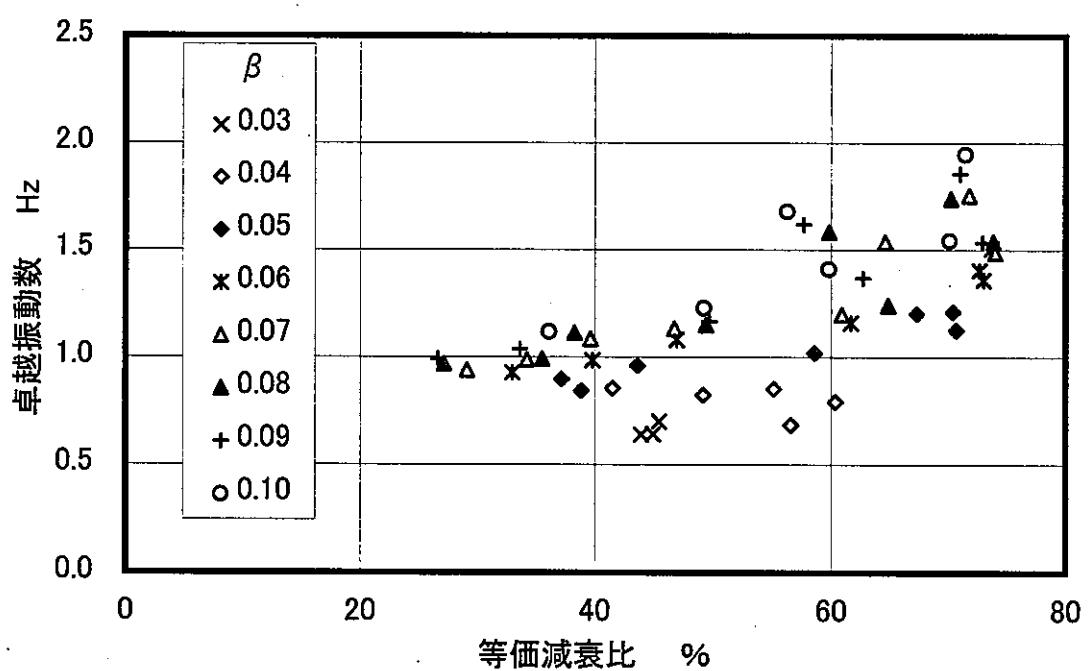
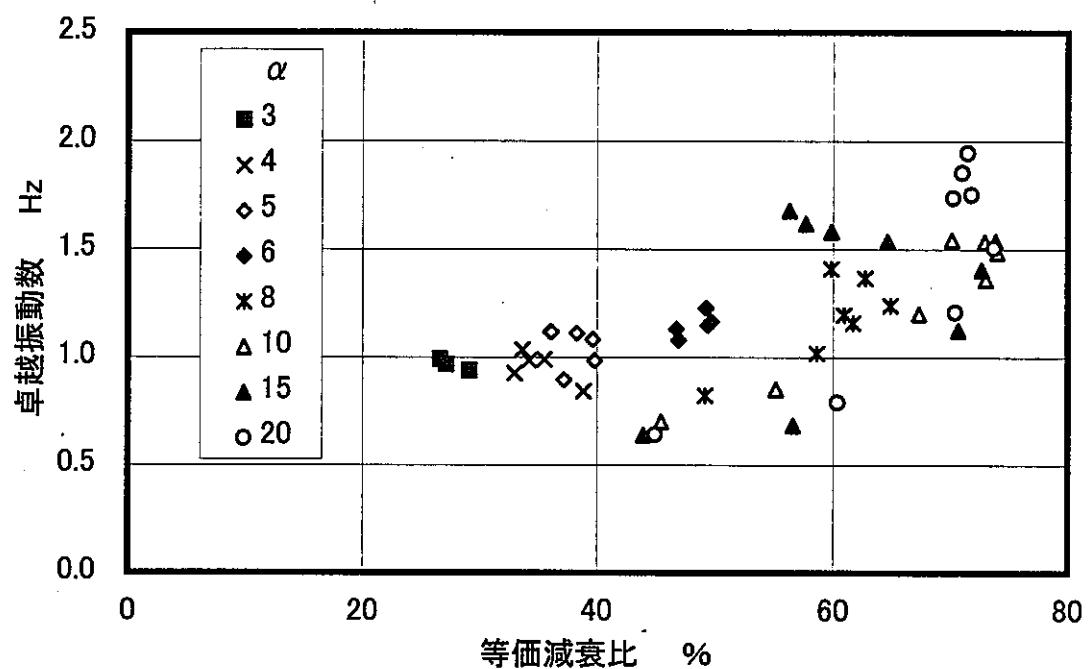


Fig. 3.9.1(1) 適正領域に対応する減衰要素パラメタ (条件1、 $f_0=0.5\text{Hz}$)

Fig. 3.9.1(2) 適正領域に対応する減衰要素パラメタ (条件1、 $f_0=0.8\text{Hz}$)

Fig. 3.9.1(3) 適正領域に対応する減衰要素パラメタ (条件1、 $f_0=1.0\text{Hz}$)

Fig. 3.9.2(1) 適正領域に対応する減衰要素パラメタ (条件2, $f_0=0.5\text{Hz}$)

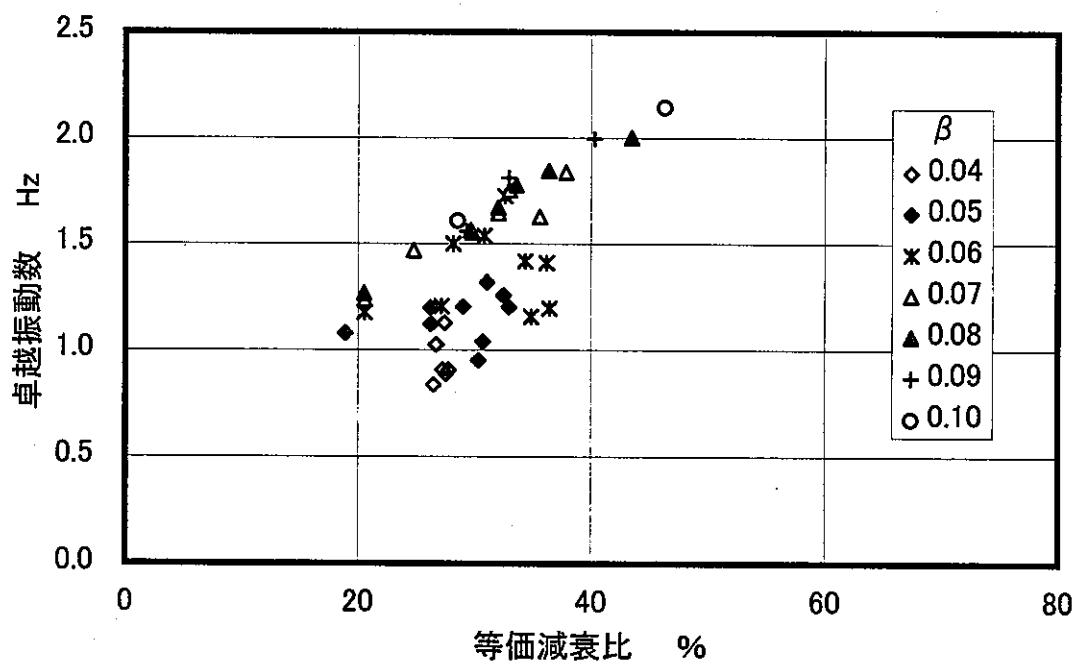
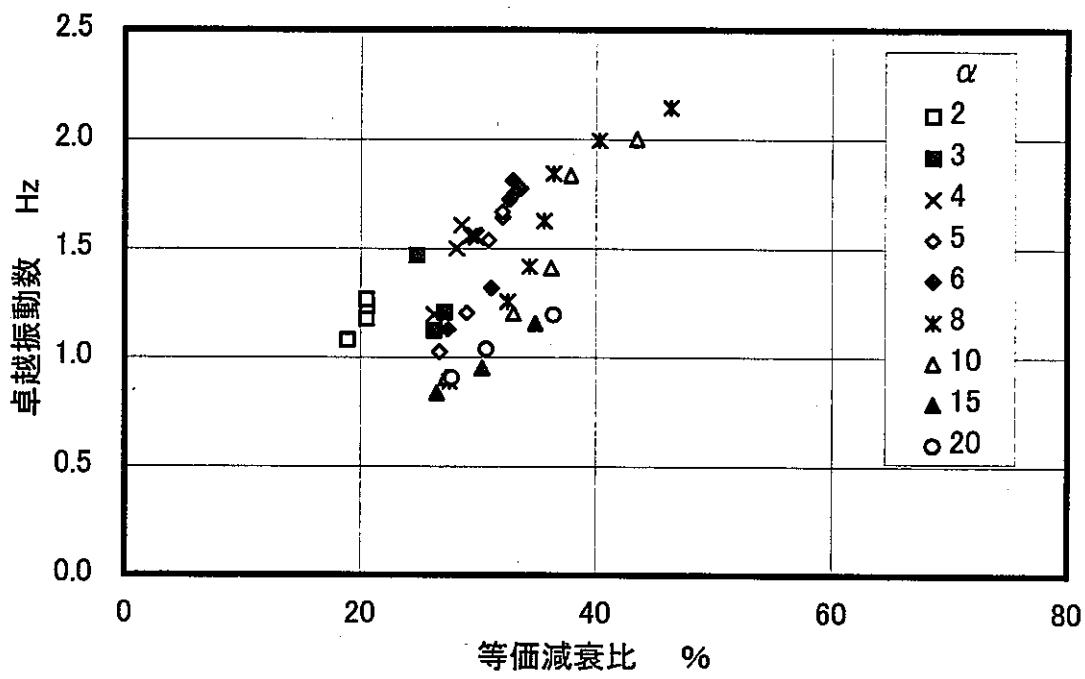
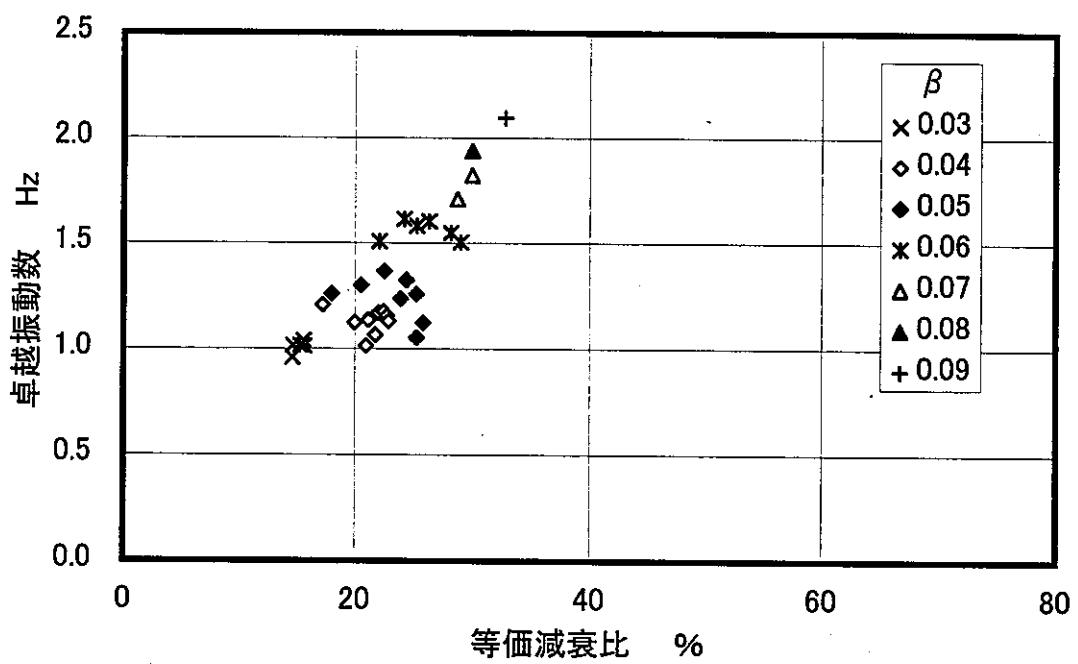
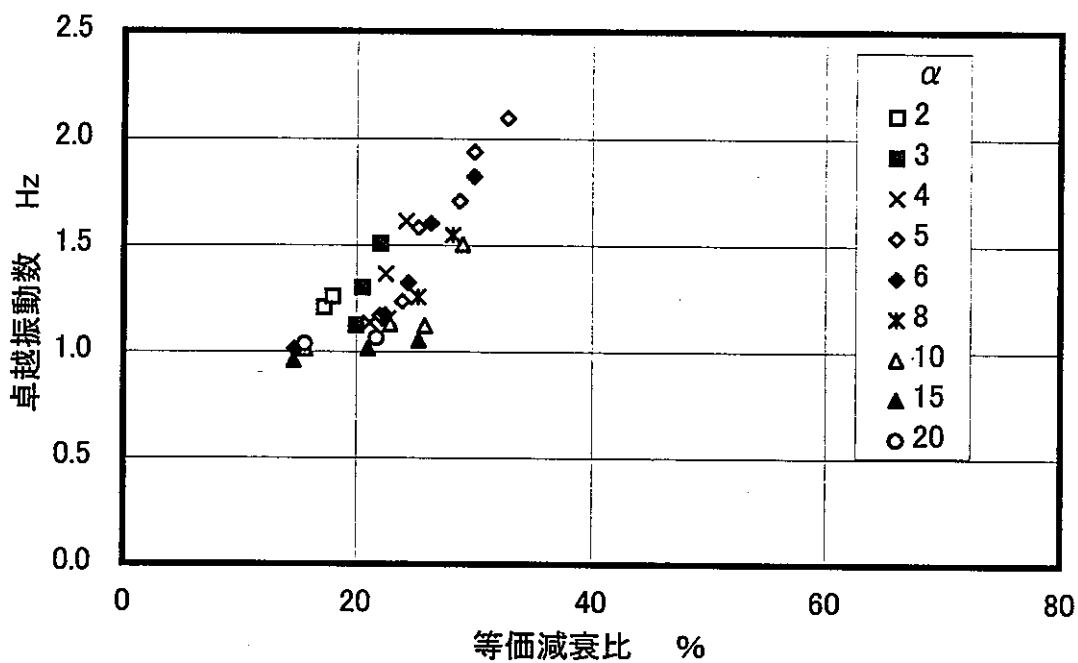


Fig. 3.9.2(2) 適正領域に対応する減衰要素パラメタ (条件2、 $f_0=0.8\text{Hz}$)

Fig. 3.9.2(3) 適正領域に対応する減衰要素パラメタ (条件2、 $f_0=1.0\text{Hz}$)

4. まとめ

共通床(コモンデッキ)に原子炉容器、一次系機器を搭載し、これを大型の皿ばねを用いた免震要素で上下方向に支持する構造概念(コモンデッキ方式)を対象に、適切な免震効果の設定に関する検討を行った。

入力地震動特性としては、4種類の自然地震波と3種類の人工地震波を地震入力として用い、地盤条件($V_s=700\sim 2000\text{m/s}$)や免震建物の特性($F_v=10, 20\text{Hz}$)を考慮し、水平免震建屋の地震応答解析を行い、免震支持レベルでの床応答と加速度時刻歴を整理した。

上記で得た免震支持レベルでの応答加速度を入力として(比較のため最大速度が 22cm/s となるよう入力レベルを調整した)、上下免震構造(支持重量 $12,000\text{t}$ を想定)の1自由度モデルによる免震構造の地震応答解析を行った。解析は、線形解析、非線形解析(復元力特性が弾性である皿ばねと弾完全塑性の減衰要素を想定)の2種類について実施した。線形解析では、免震振動数 $0.8\sim 2.5\text{Hz}$ 、減衰比 $2\sim 60\%$ の組み合わせについて検討した。非線形解析では、皿ばねの剛性のみで決まる免震振動数 $0.5\sim 5\text{Hz}$ 、剛性比 $1\sim 20$ 、及び降伏震度 $0.01\sim 0.2$ の範囲で検討した。上下免震システムの免震特性として、最大相対変位、規格化加速度(最大入力加速度に対する最大応答加速度の比)、及び規格化床応答(5~10Hz間の入力波の最大床応答加速度に対する応答波の最大床応答加速度)の3つの応答量の判断基準を設定し、適切なパラメタの組み合わせ領域について調べた。

判断基準として最大相対変位 50mm 、規格化加速度 0.75 、規格化床応答 0.33 を用いた場合、線形解析の結果から、免震振動数は $0.8, 1.0, 1.2\text{Hz}$ 、減衰比はそれぞれ $30, 20, 15\%$ 以上の組み合わせが適切であることがわかった。また非線形解析の結果、免震振動数 $0.8\sim 1.0\text{Hz}$ 、剛性比 $4\sim 6$ 、降伏震度 $0.05\sim 0.06$ の組み合わせが最適であることがわかった。等価減衰比が 20% 以上の減衰要素を用いることで、系全体としての卓越振動数が $1.0\sim 2.0\text{Hz}$ の範囲において適切な免震効果が得られることがわかった。

今後、入力地震動と必要な免震効果を特定していくとともに、皿ばね及び減衰要素の設計手法を確立しプラントへの適用可能性についての検討を行う。

参考文献

- [1-1] 森下； 機器上下免震構造に関する研究 第1報 研究開発計画及び基礎的調査検討、 PNC TN9410 94-311、 1994
- [1-2] 森下； 機器上下免震構造に関する研究 第4報 コモンデッキ免震方式免震構造の概念設計、 PNC TN9410 94-118、 1994
- [2-1] 森下； 上下動を考慮した免震建物の地震応答解析、 PNC TN9410 92-044、 1992

APPENDIX A

上下動スペクトルの作成方法

もんじゅの設計用基準地震動 S1(水平地震)にもとづく上下地震動の作成方法は以下のとおりである。(Fig. A. 1 参照)

- 1) まず、水平地震の基準地震動の目標スペクトルにおいて、長周期領域を卓越させるためにコントロールポイント D, E の周期を3倍にした修正大崎スペクトルを作成する。
- 2) 次に、修正したスペクトルに対してスペクトル比と中心周期比を用いた補正を行い、上下動の目標スペクトルとする。ここで
 - 中心周期比 T_c ($T_{cv} / T_{ch} = 0.68$):
米国の実地震観測記録を基に、加速度フーリエスペクトルが短周期側で急激に減少する周期から、加速度応答スペクトルが大きな値をとる周期範囲の中心的な周期 (T_c) を水平と上下の各方向について求め、その比をとったもの。
 - 応答スペクトル比 ($R_v / R_h = 0.55$):
米国の実地震観測記録を基に、水平と上下の各方向のスペクトルの周期軸をそれぞれ中心周期で正規化し、そのスペクトルの比をとったもの。

具体的には、以下の手順をとる。

- i) 修正スペクトルのコントロールポイントの周期を 0.68 倍する。
- ii) 各コントロールポイントの速度を 0.374 倍 (0.68×0.55) する。
- iii) 周期 0.02sec および 2.0sec の速度を対数軸で直線内挿する。
- iv) 最後に、S2 地震相当とするために全体を 1.5 倍する。

参考文献

- [1] M. Watabe et. al ; Peak Acceleration and response spectra of vertical strong-ground motions from near-field records in USA, 第8回日本地震工学シンポジウム梗概集, p301-306, 1990

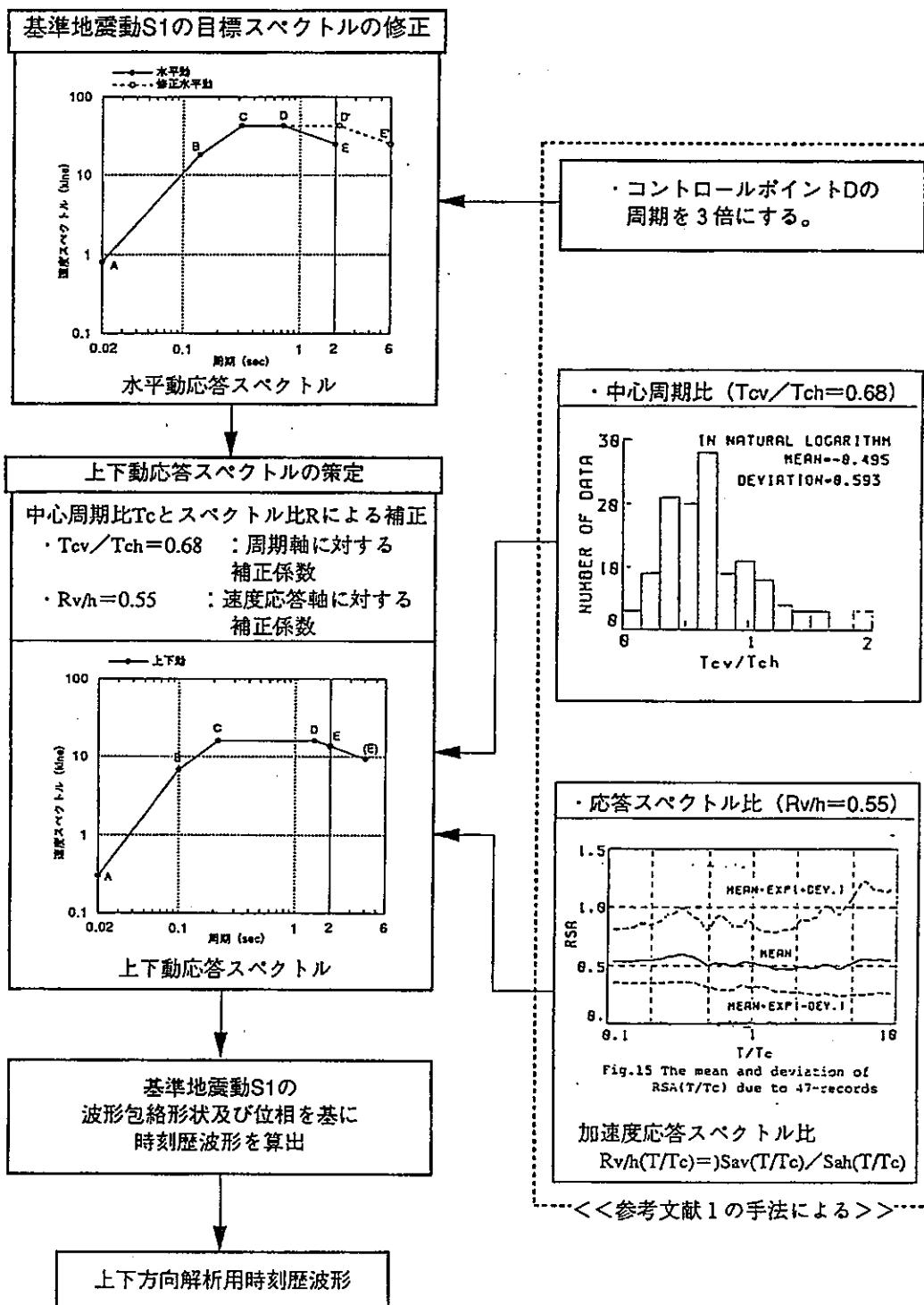


Fig. A.1 上下地震動の作成方法

APPENDIX B
免震建屋の上下動簡易解析

【定式化】

右図のように、地盤－免震層－建屋連成系を地盤ばね(K_1)、積層ゴム剛性(K_2)、及び下部基礎版(M_1)、上部基礎版(M_2)、並びに軸振動する一様な真直ぐ棒でモデル化する。

ここで、記号の意味は、

EA : 棒の軸剛性

K_1 : 地盤ばね剛性

K_2 : 積層ゴム軸剛性

L : 棒の長さ

M_1 : 下部基礎版質量

M_2 : 上部基礎版質量

\bar{m} : 棒の単位長さ当たり質量

x : 棒の下端を原点とする座標

z_1, z_2, z_3 : 上下部基礎版及び棒頂部の絶対変位

である。

棒の変位関数として、一端固定、他端自由の真直棒の軸振動に関する理論モードを採用する。

$$z = (z_3 - z_2) \sin \frac{\pi x}{2L} \quad (\text{B. 1})$$

系の運動エネルギー U とポテンシャルエネルギー V は、それぞれ、

$$2U = M_1 \dot{z}_1^2 + M_2 \dot{z}_2^2 + \int_0^L \bar{m} (\dot{z} + \dot{z}_2)^2 dx \quad (\text{B. 2})$$

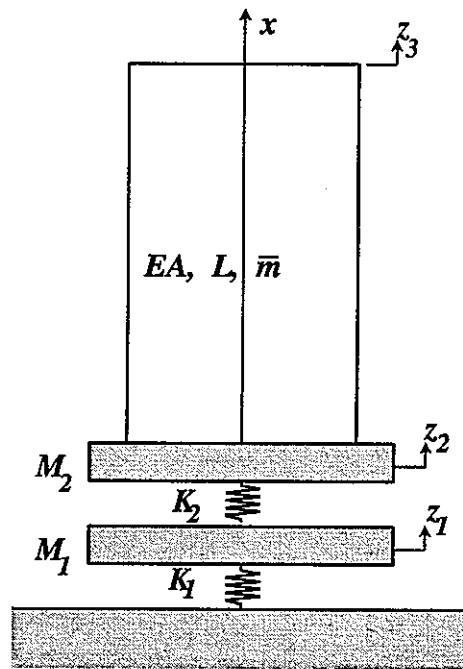
および

$$2V = K_1 z_1^2 + K_2 (z_2 - z_1)^2 + \int_0^L EA \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 dx \quad (\text{B. 3})$$

で与えられる。これらを Lagrange の式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial U}{\partial \dot{z}_i} \right) + \frac{\partial V}{\partial z} = 0, \quad i = 1..3 \quad (\text{B. 4})$$

に代入して運動方程式が得られる。



具体的に計算を実行すると,

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial U}{\partial \dot{z}_1} \right) &= M_1 \ddot{z}_1 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial U}{\partial \dot{z}_2} \right) &= (M_2 + mI_1) \ddot{z}_2 + mI_2 \ddot{z}_3 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial U}{\partial \dot{z}_3} \right) &= mI_2 \ddot{z}_2 + mI_3 \ddot{z}_3 \end{aligned} \right\} \quad (\text{B. } 5)$$

および

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial z_1} &= (K_1 + K_2)z_1 - K_2 z_2 \\ \frac{\partial V}{\partial z_2} &= -K_1 z_1 + (K_1 + K_2)z_2 - K z_3 \\ \frac{\partial V}{\partial z_3} &= -K z_2 + K z_3 \end{aligned} \right\} \quad (\text{B. } 6)$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \int_0^L \left(1 - \sin \frac{\pi x}{2L} \right)^2 dx = \frac{L}{2\pi} (3\pi - 8) \approx 0.22676L \\ I_2 &= \int_0^L \sin \frac{\pi x}{2L} \left(1 - \sin \frac{\pi x}{2L} \right)^2 dx = \frac{L}{2\pi} (4 - \pi) \approx 0.13662L \\ I_3 &= \int_0^L \left(\sin \frac{\pi x}{2L} \right)^2 dx = \frac{L}{2} = 0.5L \\ K &= EA \left(\frac{\pi}{2L} \right)^2 \int_0^L \left(\cos \frac{\pi x}{2L} \right)^2 dx = 1.2337 \frac{EA}{L} \end{aligned} \right\} \quad (\text{B. } 7)$$

最終的に、系の運動方程式は;

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M} \ddot{\mathbf{Z}} + \mathbf{K} \mathbf{Z} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{Z} &= [z_1 \ z_2 \ z_3] \\ \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 + \mu_1 M & \mu_2 M \\ 0 & \mu_2 M & \mu_3 M \end{bmatrix} \\ \mathbf{K} &= \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 & 0 \\ -K_2 & K_1 + K & -K \\ 0 & -K & K \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (\text{B. } 8)$$

ただし、

$$\left. \begin{array}{l} M = \bar{m}L \\ \mu_1 = I_1/L = 0.22676 \\ \mu_2 = I_2/L = 0.13662 \\ \mu_3 = I_3/L = 0.5 \end{array} \right\} \quad (\text{B.9})$$

である。

【検証】

単純化した免震建屋モデルを例にとって FINASとの比較を行って検証しておく。

問題

上部構造：一様なコンクリート矩体

高さ $L = 35 m$, 断面積 $A = 840 m^2$, 重量 $M = 2.13E+05 tonf$

下部基礎版重量 $M1 = 2.64E+07 kgf$

上部基礎版重量 $M2 = 2.64E+07 kgf$

縦弾性係数 $E = 2.7E+09 kgf/m^2$

		ケース1	ケース2	ケース3
地盤ばね定数 $K1 kgf/m$		3.00E+11	3.00E+11	2.80E+10
積層ゴム軸剛性 $K2 kgf/m$		3.43E+11	2.14E+11	3.43E+11

結果

		単位: Hz		
		1次	2次	3次
ケース1	簡易法	9.7	32.3	82.8
	FINAS	9.3	28.3	47.5
ケース2	簡易法	4.4	26.9	55.0
	FINAS	4.3	24.5	46.8
ケース3	簡易法	4.7	24.0	69.5
	FINAS	4.7	22.6	42.3

Fig. B. 1 にモードの比較を示すが、1次モードに関しては固有振動数、モード形状ともに簡易法によってほぼ正解が得られる。2次モードの固有振動数は若干精度が落ちるが簡易計算としてはほぼ実用に耐える。ただし、モード形状については、地盤ば

ねと免震層の変形寄与率は簡易法でもほぼ正解を与え、かつ地盤ばね及び免震層と建屋の振動が逆相である点では簡易法も一致しているが、建屋の振動モードが真直ぐ棒の基本振動モードである、という前提はずれている。3次モードは、実際には上部構造の高次モード成分が寄与してくるので、(真直ぐ棒の縦振動の基本モードを仮定した本方法では意味のある値が得られない。

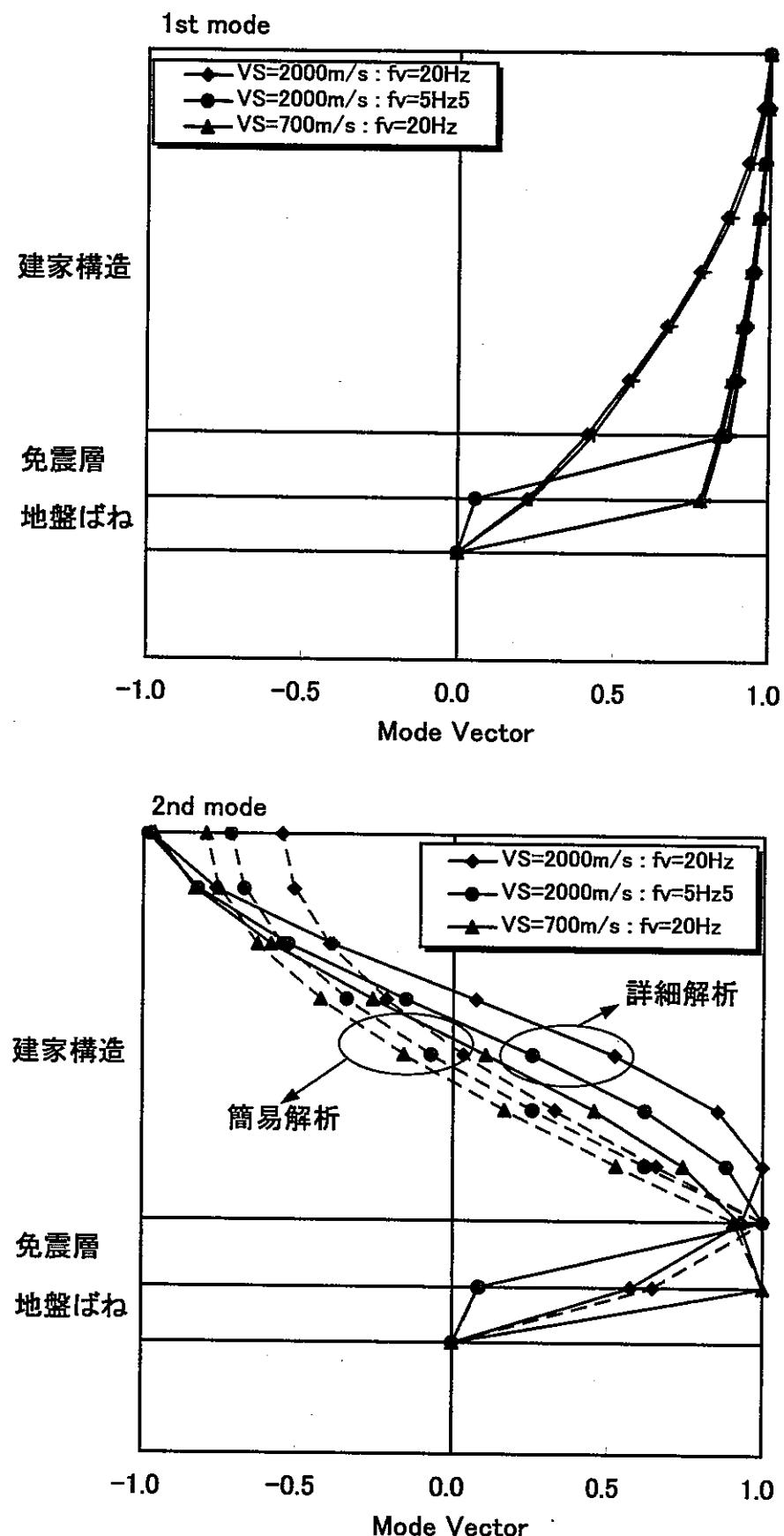


Fig. B. 1 振動モードの比較

APPENDIX C

入力地震波の加速度・速度・変位時刻歴

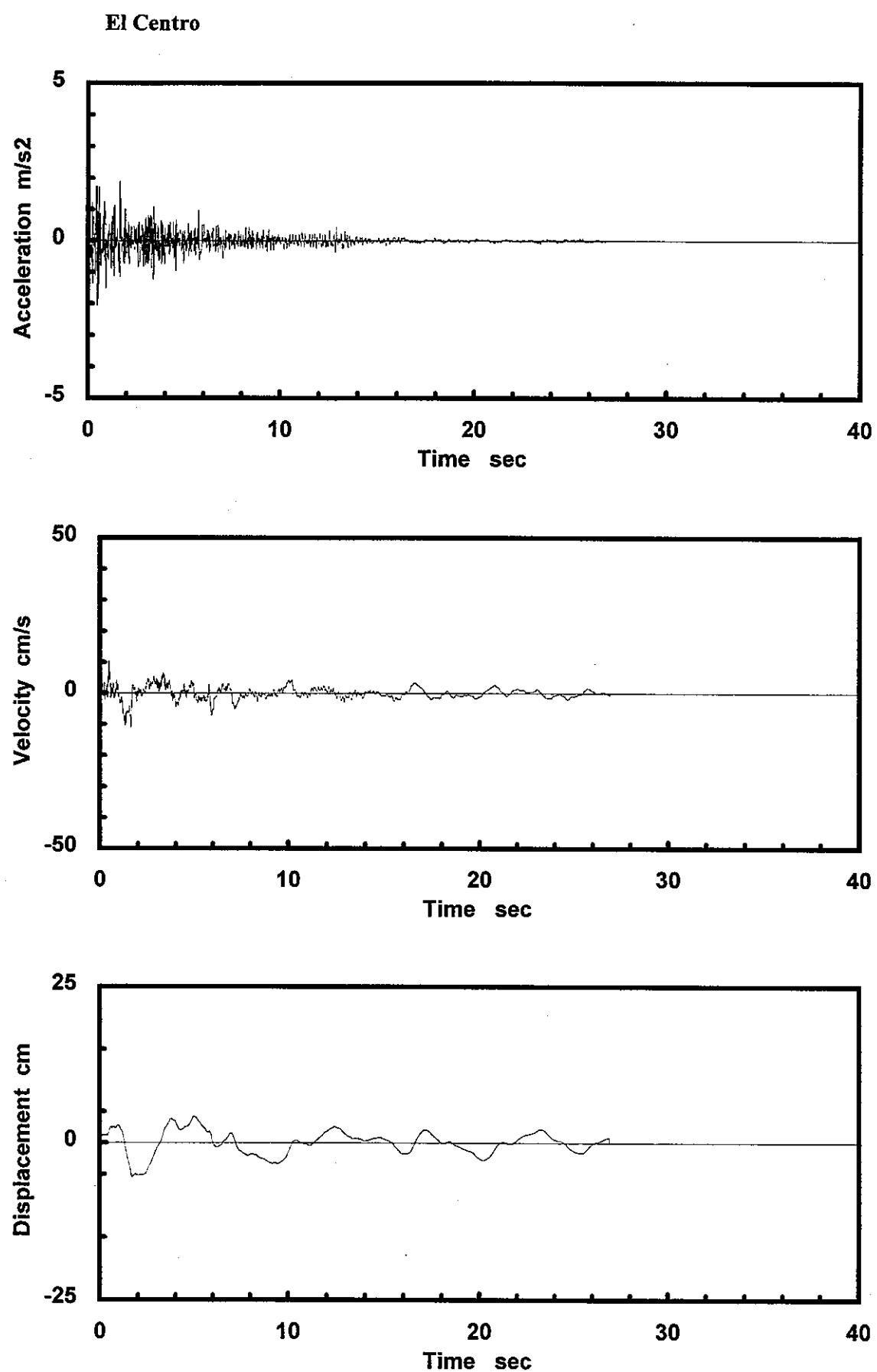


Fig. C. 1 入力地震波の時刻歴 (El Centro)

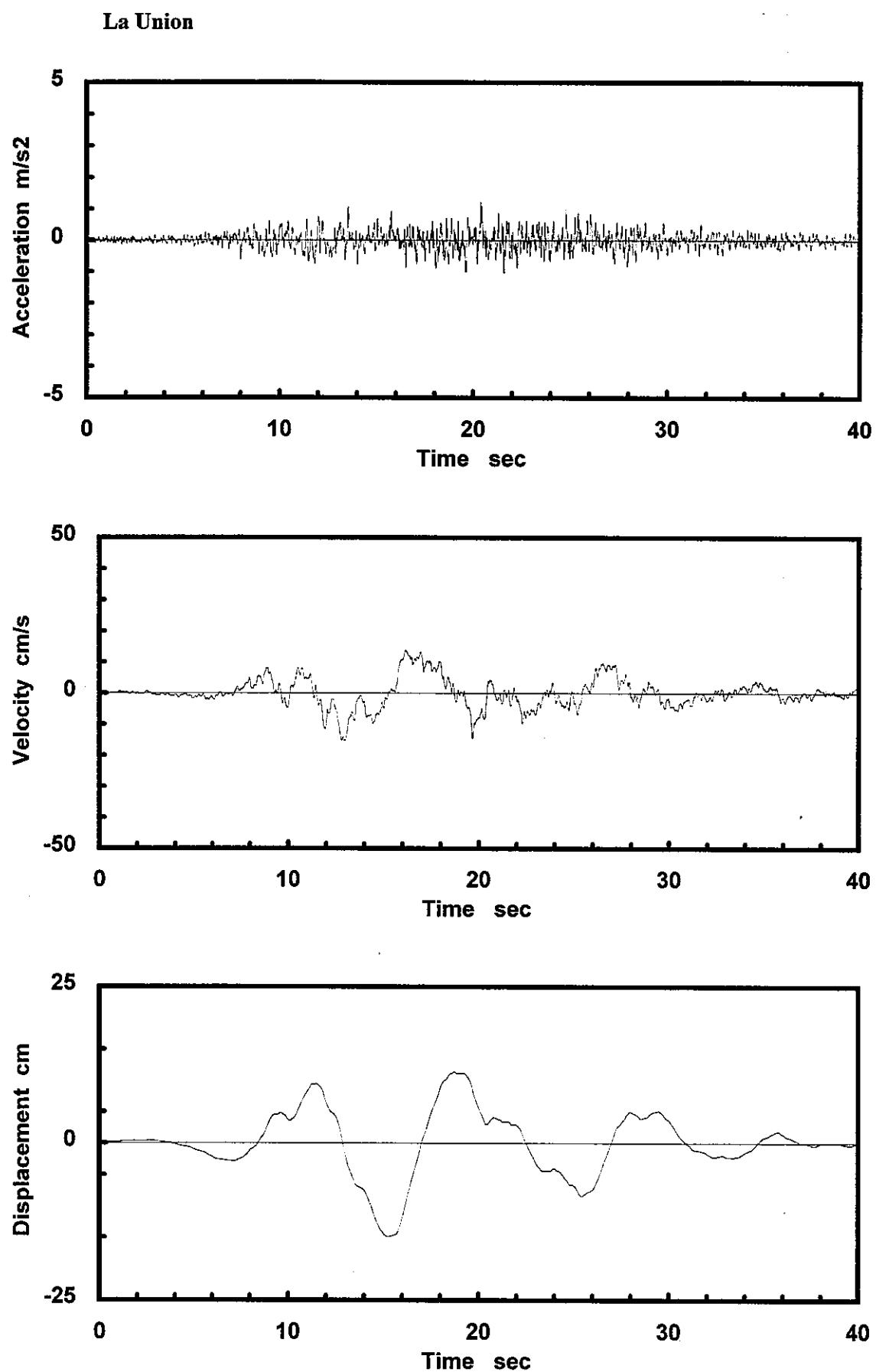


Fig. C. 2 入力地震波の時刻歴 (La Union)

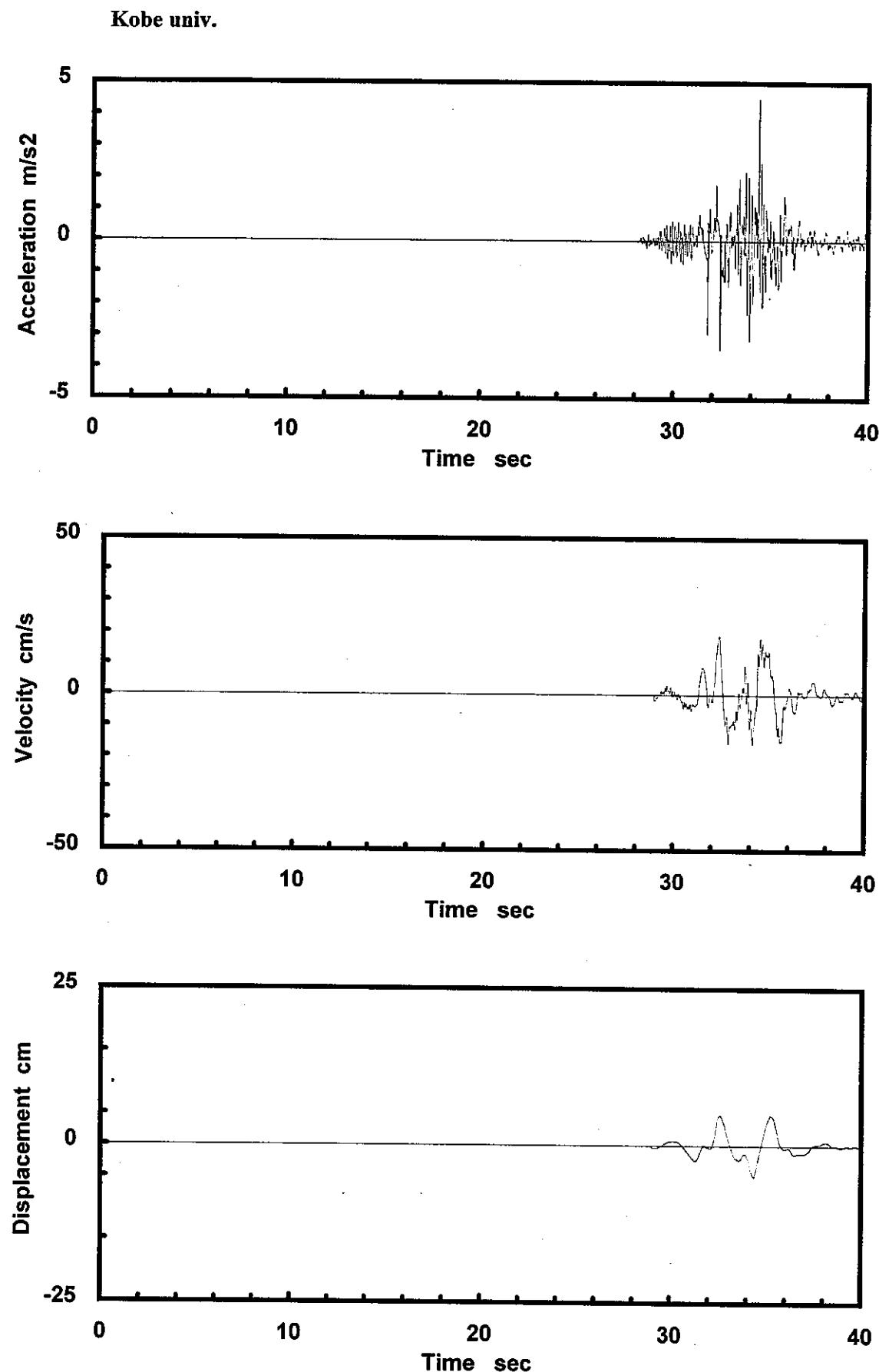


Fig. C. 3 入力地震波の時刻歴 (Kobe univ.)

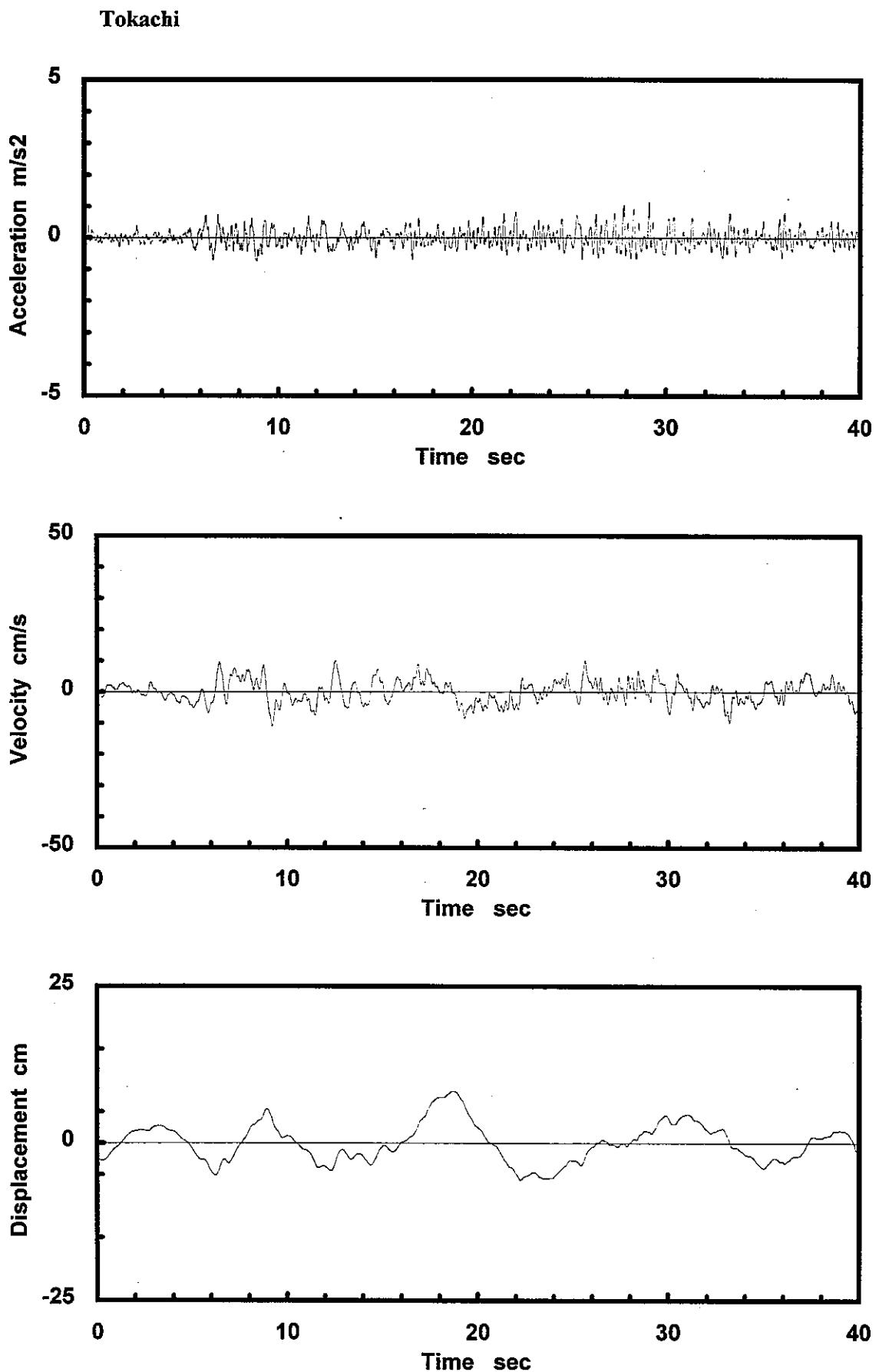


Fig. C. 4 入力地震波の時刻歴 (Tokachioki)

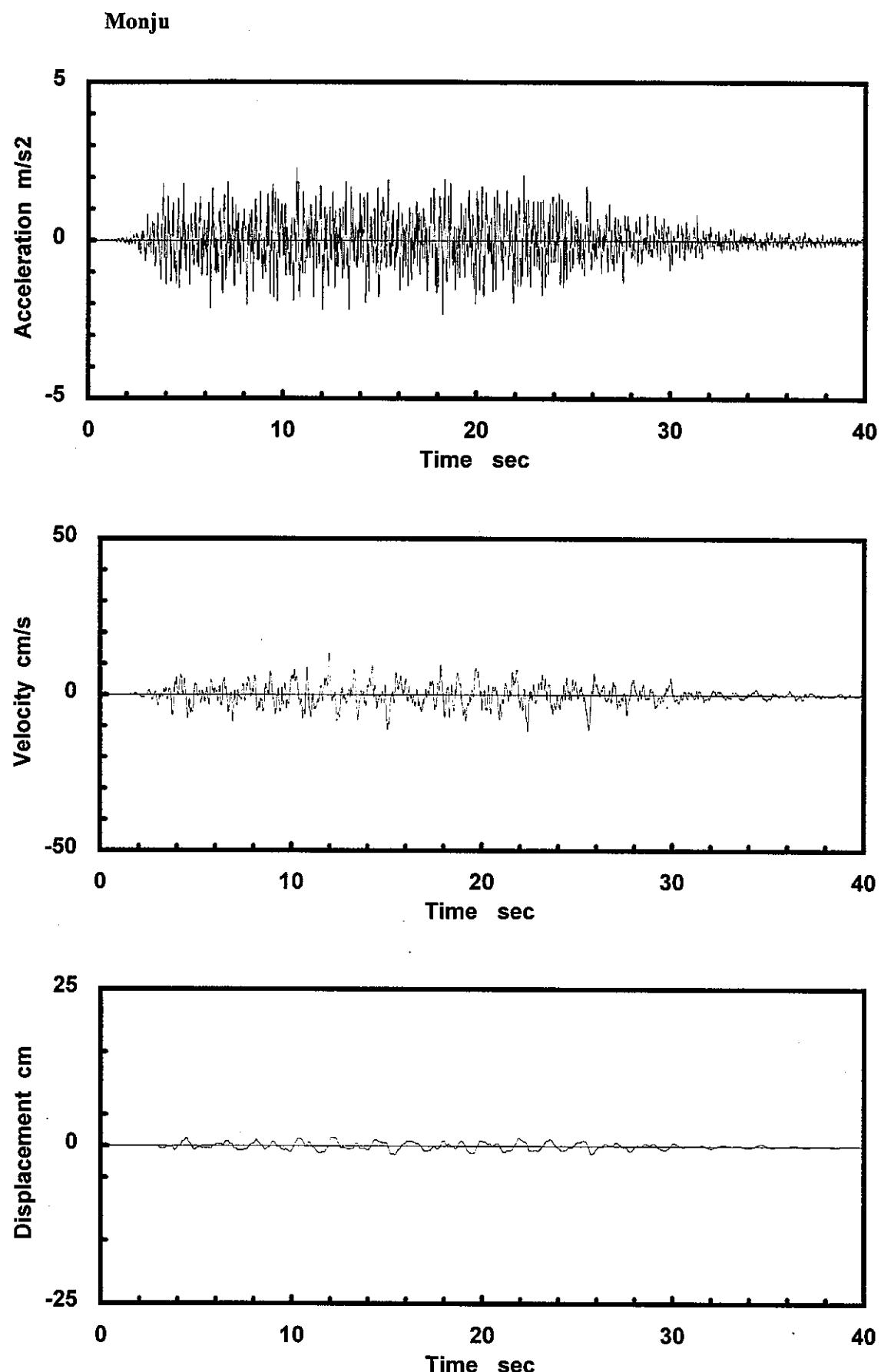


Fig. C. 5 入力地震波の時刻歴 (Monju)

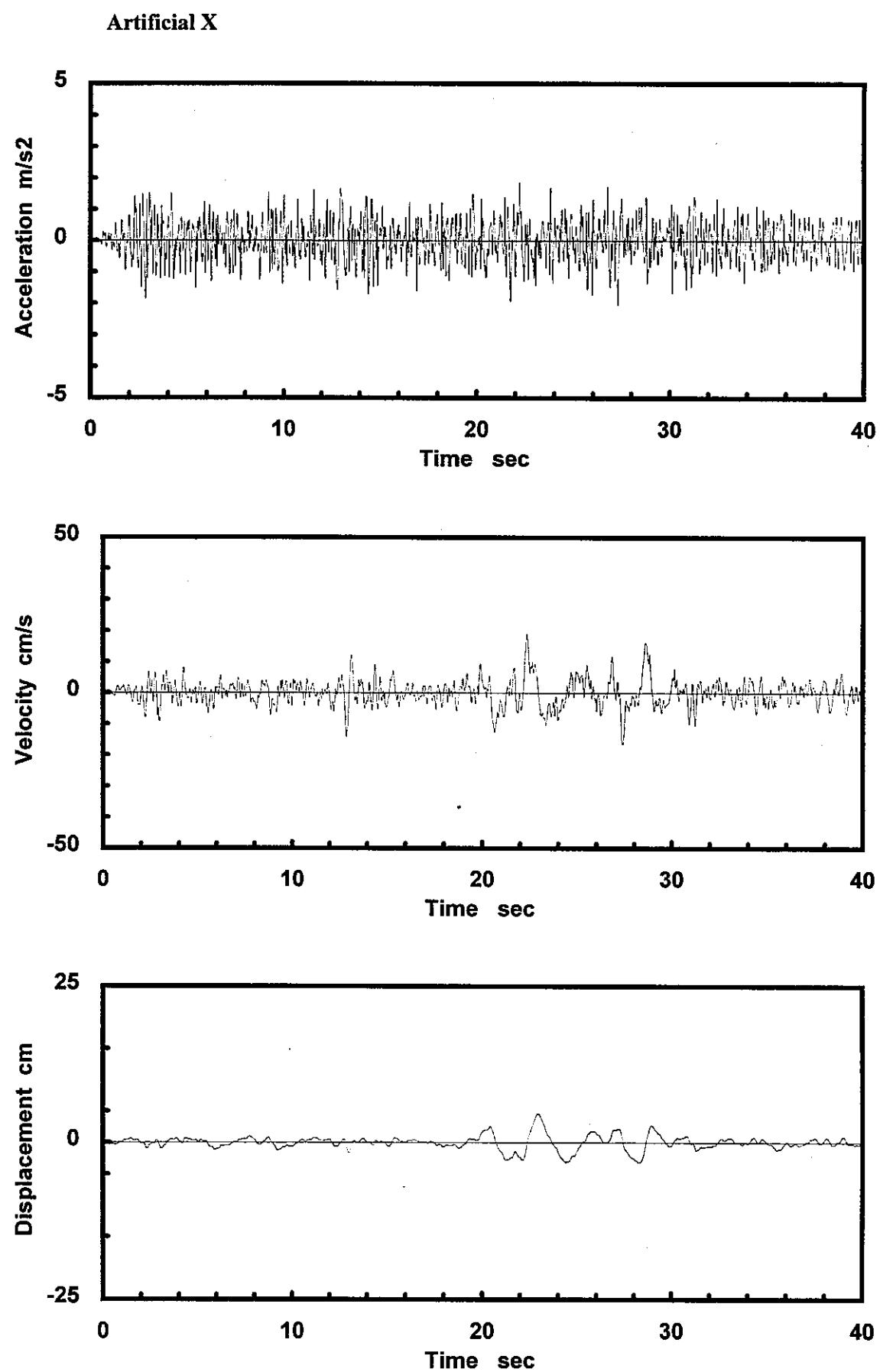


Fig. C. 6 入力地震波の時刻歴 (Artificial X)

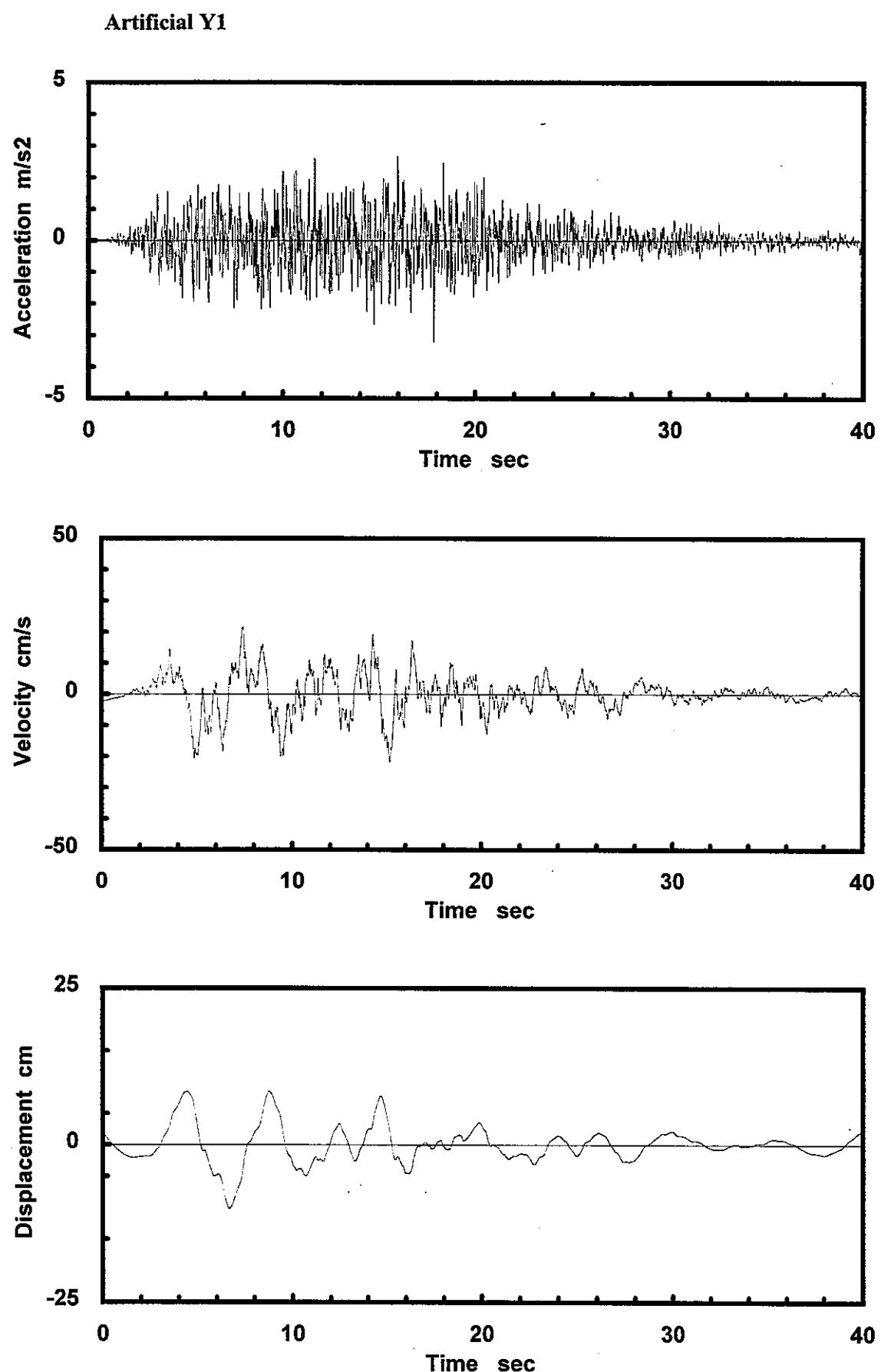


Fig. C. 7 入力地震波の時刻歴 (Artificial Y1)

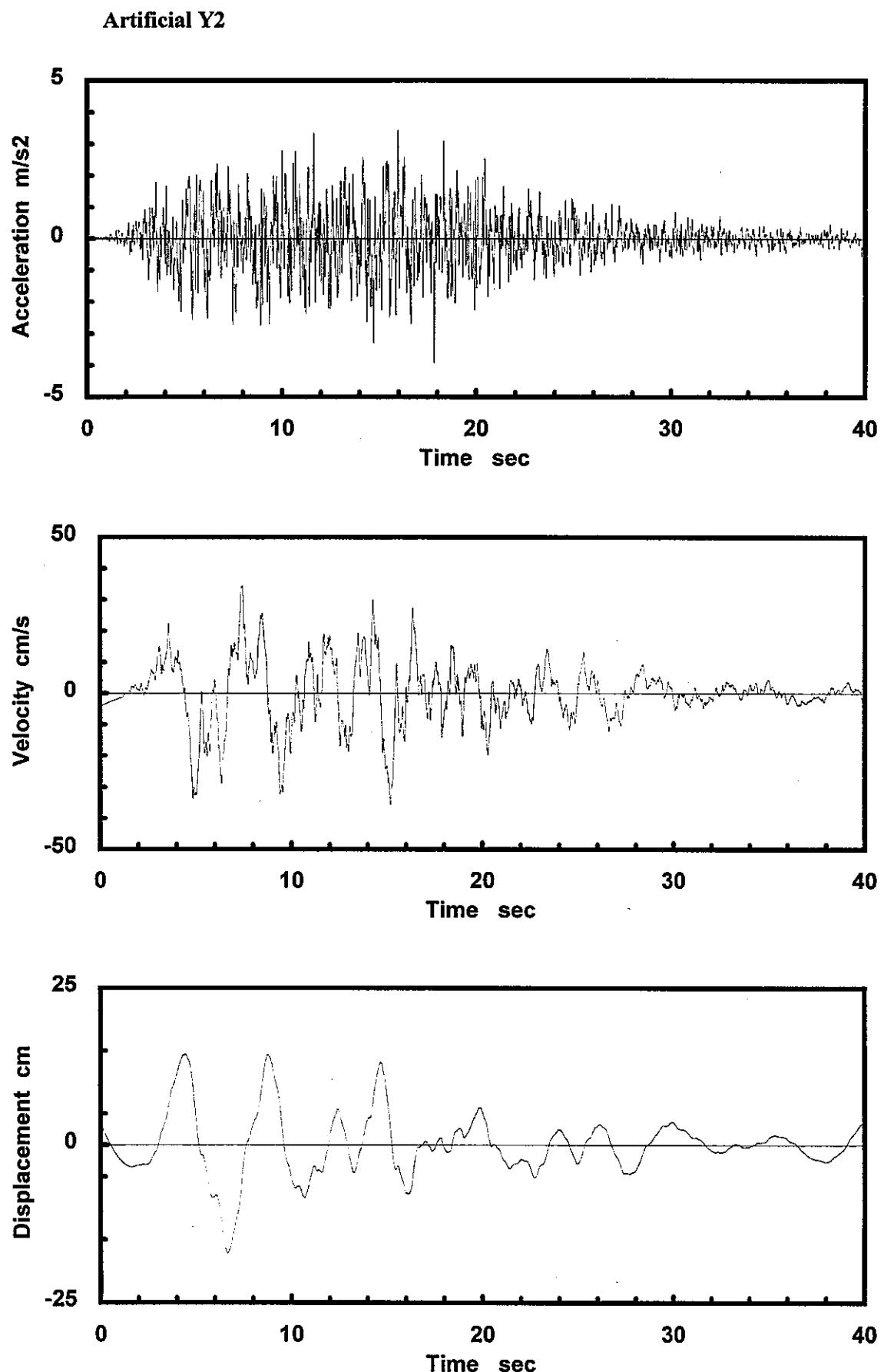


Fig. C. 8 入力地震波の時刻歴 (Artificial Y2)

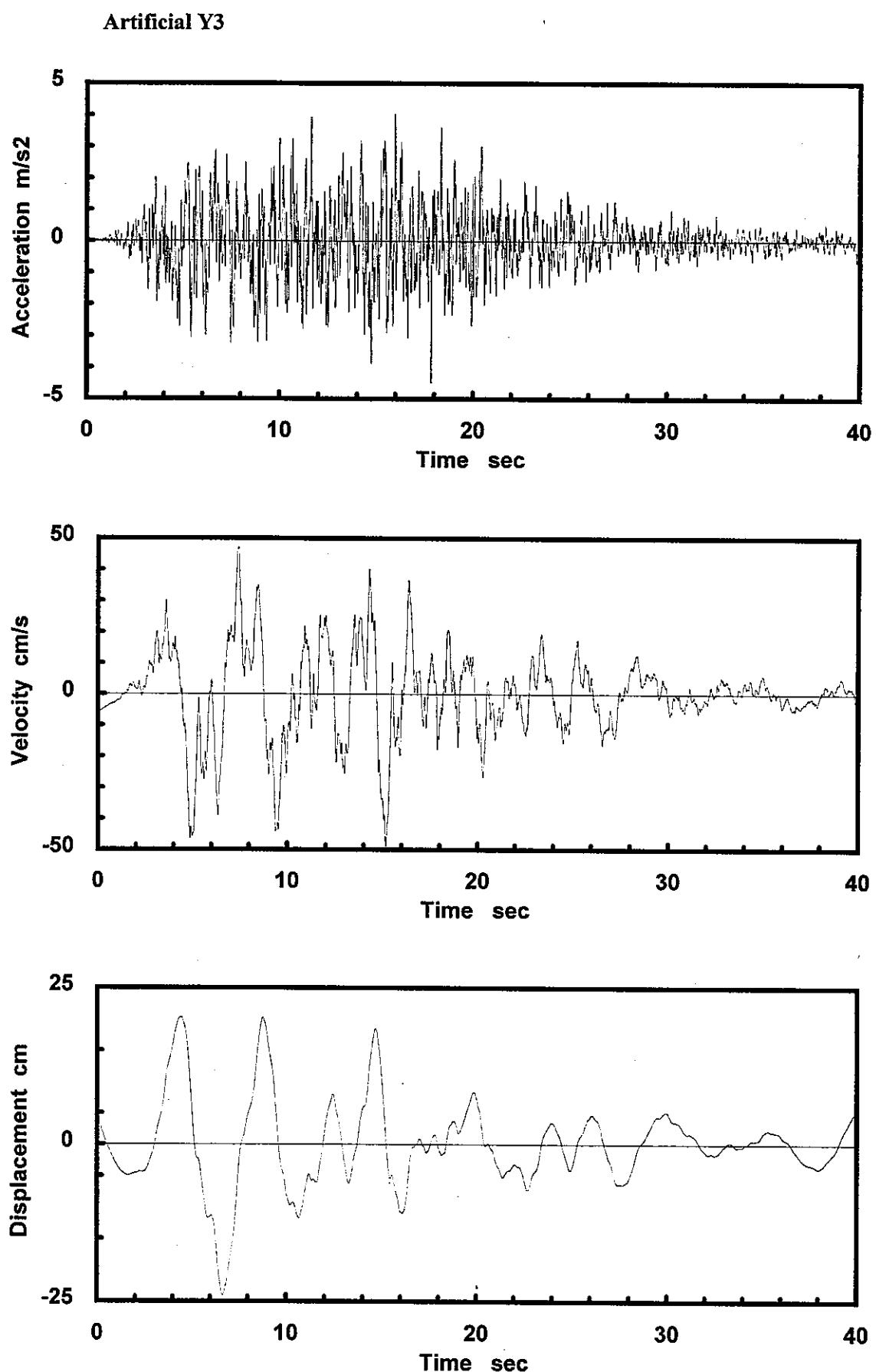
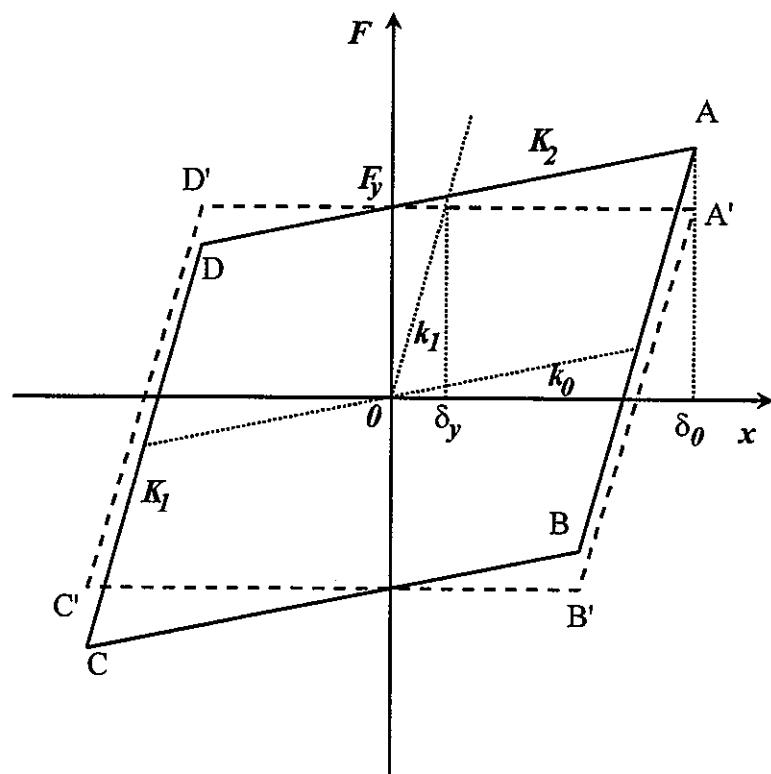


Fig. C. 9 入力地震波の時刻歴 (Artificial Y3)

APPENDIX D

二直線モデルによる等価剛性と等価減衰



上図で、ヒステリシスの各点の座標は；

$$\left. \begin{aligned}
 A &: (\delta_0, k_0\delta_0 + F_y) \\
 B &: (\delta_0 - 2F_y/k_1, F_y + k_0(\delta_0 - 2F_y/k_1)) \\
 C &: (-\delta_0, -k_0\delta_0 - F_y) \\
 D &: (-\delta_0 + 2F_y/k_1, F_y - k_0(\delta_0 - 2F_y/k_1))
 \end{aligned} \right\} \quad (D-1)$$

複合復元力の剛性は；

$$\left. \begin{aligned}
 K_1 &= k_0 + k_1 \\
 K_2 &= k_0
 \end{aligned} \right\} \quad (D-2)$$

等価剛性(割線剛性) K_{eq} は；

$$\begin{aligned}
 K_{eq} &= (k_0\delta_0 + F_y) / \delta_0 \\
 &= k_0(1 + \alpha/\mu)
 \end{aligned} \quad (D-3)$$

等価剛性に基づく等価振動数 f_{eq} は；

$$f_{eq} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{eq}}{m}} = \sqrt{1 + \alpha/\mu} \cdot f_0 \quad (D-4)$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= k_1 / k_0 \\ \mu &= \delta_0 / \delta_y \\ f_0 &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_0}{m}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{D-5})$$

等価減衰定数 h_{eq} は図で

$$\Delta W = \square ABCD, \quad W = \triangle OAB$$

として,

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (\text{D-6})$$

で与えられる。

$$\Delta W = 4F_y(\delta_0 - \delta_y) = 4k_1 \delta_y^2 (\mu - 1) \quad (\text{D-7})$$

及び

$$W = K_{eq} \delta_0^2 / 2 = k_0(1 + \alpha/\mu) \delta_0^2 / 2 \quad (\text{D-8})$$

であるから,

$$\begin{aligned} h_{eq} &= \frac{1}{4\pi} \frac{4k_1 \delta_y^2 (\mu - 1)}{k_0(1 + \alpha/\mu) \delta_0^2 / 2} \\ &= \frac{2}{\pi} \frac{(\mu - 1)}{\mu(\mu/\alpha + 1)} \end{aligned} \quad (\text{D-9})$$

さらに,

$$\frac{\partial h_{eq}}{\partial \mu} = -\frac{2}{\pi} \frac{\alpha(\mu^2 - 2\mu - \alpha)}{\mu^2(\mu + \alpha)^2} \quad (\text{D-10})$$

より、等価減衰 h_{eq} は

$$\mu = 1 + \sqrt{1 + \alpha}$$

において極値をとる。