

分置

機器上下免震構造に関する研究

—原子炉建物—免震構造の上下動連成振動解析—

1997年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Nareta-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

機器上下免震構造に関する研究

原子炉建物－免震構造の上下動連成振動解析

森下 正樹*

要 旨

コモンデッキ方式機器上下免震構造の地震応答特性が、これを支持する原子炉建物との動的相互作用の影響を受ける可能性について、解析によって検討した。原子炉建物と免震構造の連成モデル及び非連成モデルによる応答解析を実施し、両者の加速度応答の比較によって影響の程度を検討した。

検討の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 原子炉建物と機器上下免震構造の動的相互作用は顕著ではない。これは、免震振動数と地盤－建屋系の主要振動数が十分離れているためである。
- (2) 非連成モデルによる結果は実用上十分な精度を与え、かつ若干安全側となる。
- (3) 機器上下免震構造が原子炉建物の他の部位での振動挙動に与える影響も無視出来る程度である。

* 基盤部技術開発部 構造材料技術開発室

DEVELOPMENT OF SEISMIC ISOLATION SYSTEM IN VERTICAL DIRECTION

Coupled Response Analysis of Reactor Building and Common Deck Isolation System

Masaki MORISHITA*

Abstract

Study was made on the effect of dynamic interaction between reactor building and common deck isolation structure. Dynamic response analyses were made with a coupled and a decoupled model of the reactor building and the isolation structure. The effect of the dynamic interaction was evaluated by comparing these analysis results.

The results of the study can be summarized as below;

- (1) Dynamic coupling effect between reactor building and the common deck isolation structure is not significant. This can be attributed to the fact that the isolation frequency is sufficiently lower than the fundamental frequency of the soil-structure system.
- (2) The decoupled analysis model was found to give response results with practically sufficient accuracy and slight conservatism.
- (3) The effect of the response of common deck isolation structure on the response of the reactor building is also negligible.

* Structure and Material Research Section, O-arai engineering Center

目 次

1. まえがき	1
2. 検討計画	3
3. 検討結果	5
3. 1 振動解析モデルの作成	5
3. 2 上下動固有値解析	8
3. 3 上下動地震応答解析	8
3. 4 床応答スペクトル	9
3. 5 改良構造# 1の上下動地震応答解析	11
3. 6 改良構造# 1の床応答スペクトル	12
3. 7 改良構造# 2の上下動地震応答解析	13
3. 8 改良構造# 2の床応答スペクトル	13
4. まとめ	125
参考文献	126

表 リ ス ト

表3.1.1	コモンデッキ構造諸元	15
表3.1.2	建屋の材料定数	15
表3.1.3	コモンデッキ連成モデルの振動諸元	16
表3.1.4	コモンデッキ非連成モデルの振動諸元	17
表3.1.5	水平免震層の上下方向の特性	18
表3.1.6	機器上下免震層の特性	18
表3.1.7	地盤条件	19
表3.1.8	地盤ばね定数	19
表3.1.9	渡部の手法による上下地震動のコントロールポイント	48
表3.1.10	電力共通研究の手法による上下地震動のパラメタ	48
表3.2.1	固有値解析ケース	20
表3.2.2	固有値解析結果(Case 1-1)	21
表3.2.3	固有値解析結果(Case 2-1)	21
表3.2.4	固有値解析結果(Case 3-1)	21
表3.2.5	固有値解析結果(Case 1-2)	22
表3.2.6	固有値解析結果(Case 2-2)	22
表3.2.7	固有値解析結果(Case 3-2)	22
表3.2.8	固有値解析結果(Case 7-1)	23
表3.2.9	固有値解析結果(Case 8-1)	23
表3.2.10	固有値解析結果(Case 9-1)	23
表3.2.11	固有値解析結果(Case10-1)	24
表3.2.12	固有値解析結果(Case11-1)	24
表3.2.13	固有値解析結果(Case12-1)	24
表3.3.1	地震応答解析ケース	25
表3.3.2	機器免震部分の地震応答解析ケース (基礎固定1自由度モデル)	26
表3.3.3	コモンデッキの最大加速度	27
表3.3.4	コモンデッキの相対変位	28
表3.5.1	地震応答解析ケース(改良構造# 1)	29
表3.5.2	コモンデッキの最大応答加速度	30
表3.5.3	コモンデッキの相対変位	31
表3.7.1	地震応答解析ケース(改良構造# 2)	32
表3.7.2	コモンデッキの相対変位	33
表3.7.3	コモンデッキの最大加速度	33

図 リ ス ト

図3.1.1	平面図	35
図3.1.2	断面図	38
図3.1.3	機器上下免震構図	39
図3.1.4	軸断面積の評価	40
図3.1.5	振動解析モデル	44
図3.1.6	上下方向動的地盤ばね	45
図3.1.7	地震動のモデル化の概念	46
図3.1.8	検討用上下地震動の作成フロー	47
図3.1.9	上下入力地震動の加速度時刻歴波形	49
図3.1.10	上下入力地震動の加速度応答スペクトル	50
図3.2.1	解析モデル	51
図3.2.2	固有振動モード (Case 1-1)	52
図3.2.3	固有振動モード (Case 2-1)	53
図3.2.4	固有振動モード (Case 3-1)	54
図3.2.5	固有振動モード (Case 1-2)	55
図3.2.6	固有振動モード (Case 2-2)	56
図3.2.7	固有振動モード (Case 3-2)	57
図3.2.8	固有振動モード (Case 7-1)	58
図3.2.9	固有振動モード (Case 8-1)	59
図3.2.10	固有振動モード (Case 9-1)	60
図3.2.11	固有振動モード (Case10-1)	61
図3.2.12	固有振動モード (Case11-1)	62
図3.2.13	固有振動モード (Case12-1)	63
図3.3.1	最大応答加速度分布 (Case 1-1)	64
図3.3.2	最大応答加速度分布 (Case 2-1)	65
図3.3.3	最大応答加速度分布 (Case 3-1)	66
図3.3.4	最大応答加速度分布 (Case 1-2)	67
図3.3.5	最大応答加速度分布 (Case 2-2)	68
図3.3.6	最大応答加速度分布 (Case 3-2)	69
図3.3.7	最大応答加速度分布 (Case 4-1)	70
図3.3.8	最大応答加速度分布 (Case 5-1)	71
図3.3.9	最大応答加速度分布 (Case 6-1)	72
図3.3.10	最大応答加速度分布 (Case 4-2)	73
図3.3.11	最大応答加速度分布 (Case 5-2)	74
図3.3.12	最大応答加速度分布 (Case 6-2)	75
図3.3.13	最大応答加速度分布 (Case 7-1)	76
図3.3.14	最大応答加速度分布 (Case 8-1)	77
図3.3.15	最大応答加速度分布 (Case 9-1)	78
図3.3.16	最大応答加速度分布 (Case10-1)	79

図 リ ス ト (続 き)

図3.3.17	最大応答加速度分布 (Case11-1)	80
図3.3.18	最大応答加速度分布 (Case12-1)	81
図3.3.19	応答加速度倍率-機器免震振動数関係	82
図3.3.20	総体変位-機器免震振動数関係	82
図3.4.1	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数2.5Hz)	83
図3.4.2	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '93年度波, 免震振動数2.5Hz)	84
図3.4.3	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, Vs=700m/s)	85
図3.4.4	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, Vs=1000m/s)	86
図3.4.5	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '93年度波, Vs=2000m/s)	87
図3.4.6	床応答スペクトルの比較 (h=1%, 免震振動数2.5Hz, Vs=700m/s)	88
図3.4.7	床応答スペクトルの比較 (h=1%, 免震振動数2.5Hz, Vs=1000m/s)	89
図3.4.8	床応答スペクトルの比較 (h=1%, 免震振動数2.5Hz, Vs=2000m/s)	90
図3.4.9	床応答スペクトルの比較 (Case1-1とCase1-2)	91
図3.4.10	床応答スペクトルの比較 (Case2-2とCase2-2)	91
図3.4.11	床応答スペクトルの比較 (Case3-1とCase3-2)	92
図3.4.12	床応答スペクトルの比較 (Case4-1とCase4-2)	92
図3.4.13	床応答スペクトルの比較 (Case5-1とCase5-2)	93
図3.4.14	床応答スペクトルの比較 (Case6-1とCase6-2)	93
図3.4.15	床応答スペクトルの比較 (Case7-1とCase7-2)	94
図3.4.16	床応答スペクトルの比較 (Case8-1とCase8-2)	94
図3.4.17	床応答スペクトルの比較 (Case9-1とCase9-2)	95
図3.4.18	床応答スペクトルの比較 (Case10-1とCase10-2)	95
図3.4.19	床応答スペクトルの比較 (Case11-1とCase11-2)	96
図3.4.20	床応答スペクトルの比較 (Case12-1とCase12-2)	96
図3.4.21	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, Vs=700m/s)	97
図3.4.22	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, Vs=1000m/s)	97
図3.4.23	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, Vs=2000m/s)	98
図3.4.24	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '93年度波, Vs=700m/s)	98
図3.4.25	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '93年度波, Vs=1000m/s)	99
図3.4.26	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '93年度波, Vs=2000m/s)	99
図3.4.27	応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数2.5Hz)	100
図3.4.28	応答スペクトルの比較 (h=1%, '93年度波, 免震振動数2.5Hz)	100
図3.4.29	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, Vs=700m/s)	101
図3.4.30	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, Vs=1000m/s)	101
図3.4.31	床応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, Vs=2000m/s)	102
図3.4.32	床応答スペクトルの比較 (h=1%, 免震振動数2.5Hz, Vs=700m/s)	103
図3.4.33	床応答スペクトルの比較 (h=1%, 免震振動数2.5Hz, Vs=1000m/s)	103
図3.4.34	床応答スペクトルの比較 (h=1%, 免震振動数2.5Hz, Vs=2000m/s)	104
図3.5.1	最大応答加速度分布 (Case13-1)	105

図 リスト (続き)

図3.5.2	最大応答加速度分布 (Case14-1)	106
図3.5.3	最大応答加速度分布 (Case15-1)	107
図3.5.4	最大応答加速度分布 (Case16-1)	108
図3.5.5	最大応答加速度分布 (Case17-1)	109
図3.5.6	最大応答加速度分布 (Case18-1)	110
図3.5.7	応答加速度倍率－減衰関係	111
図3.5.8	総体変位－減衰関係	111
図3.6.1	応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数1.0Hz, $V_s=700\text{m/s}$)	112
図3.6.2	応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数1.0Hz, $V_s=1000\text{m/s}$)	113
図3.6.3	応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数1.0Hz, $V_s=2000\text{m/s}$)	114
図3.6.4	応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数2.5Hz, $V_s=700\text{m/s}$)	115
図3.6.5	応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数2.5Hz, $V_s=1000\text{m/s}$)	116
図3.6.6	応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数2.5Hz, $V_s=2000\text{m/s}$)	117
図3.6.7	応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数1.0Hz, $V_s=700\text{m/s}$)	118
図3.6.8	応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数1.0Hz, $V_s=1000\text{m/s}$)	118
図3.6.9	応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数1.0Hz, $V_s=2000\text{m/s}$)	119
図3.6.10	応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数2.5Hz, $V_s=700\text{m/s}$)	119
図3.6.11	応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数2.5Hz, $V_s=1000\text{m/s}$)	120
図3.6.12	応答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数2.5Hz, $V_s=2000\text{m/s}$)	120
図3.7.1	最大応答加速度分布 (Case19-1)	121
図3.7.2	最大応答加速度分布 (Case19-2)	122
図3.8.1	答スペクトルの比較 (h=1%, '94年度波, 免震振動数2.5Hz, $V_s=2000\text{m/s}$)	123

1. まえがき

本作業は、これまで動燃において検討してきた、高速炉の原子炉容器、中間熱交換器、および主循環ポンプを搭載する共通スラブ(コモンデッキ)を機器廻りで大型の皿ばねを用いた免震装置によって上下方向に免震支持する構造⁽¹⁾について、原子炉建物との連成モデルによる地震応答解析を行うものである。

ここで、上下機器免震の特性(固有振動数、減衰、免震される部分の重量)と原子炉内部コンクリート構造の振動特性との相互関係についてパラメータサーベイを行い、上下機器免震構造と建屋の動的相互作用が、上下機器免震構造の地震応答特性に与える影響を検討するためのデータを得ることを主な目的としている。

2. 検討計画

2.1 検討用振動モデルの作成

原子炉容器, 中間熱交換機, 及び主循環ポンプを搭載する共通スラブ(コモンデッキ)と原子炉建屋本体が連成する振動モデル(コモンデッキ連成モデル)および, 通常機器設計で採用される手法にあたる, 建屋系と機器系の分離解析モデル(コモンデッキ非連成モデル)を作成する。

2.2 固有値解析の実施

2.1 の検討で作成モデルに対して, 地盤条件, 機器免震振動数をパラメータとして固有値解析を実施し, 機器-建屋連成系の上下動振動特性を把握する。

2.3 地震応答解析の実施

2.1 で作成した上下動振動解析モデルを用い, 地盤条件, 機器免震振動数, 入力地震動をパラメータとして上下動地震応答解析を実施し, 機器-建屋連成系の上下動応答特性を把握する。

また, 上下機器免震構造と建屋の動的相互作用が, 上下機器免震構造の地震応答特性に与える影響を検討するために, コモンデッキ連成モデルとコモンデッキ非連成モデルの結果を比較する。

さらに, 改良構造#1および改良構造#2として, 機器免震の減衰および機器免震される部分の重量をパラメータとした場合の検討も行う。

2.4 床応答スペクトルの作成

2.3 の結果を基に, 原子炉容器据え付け位置での加速度応答スペクトルを算出し, 地盤条件, 機器免震振動数, 入力地震動をパラメータとして, 上下機器免震構造と建屋の動的相互作用が, 上下機器免震構造の床応答スペクトルに与える影響を把握する。

また, 上下機器免震構造と建屋の動的相互作用が, 上下機器免震構造の地震応答特性に与える影響を検討するために, コモンデッキ連成モデルとコモンデッキ非連成モデルの結果を比較する。

さらに, 改良構造#1および改良構造#2として, 機器免震の減衰, および機器免震される部分の重量をパラメータとした場合の検討も行う。

3. 検討結果

3.1 振動解析モデルの作成

3.1.1 建屋の概要

検討建屋モデルは、建屋全体水平免震に機器上下免震を組み合わせた構造となっている。機器上下免震は、原子炉容器、中間熱交換機、および主循環ポンプを搭載する共通スラブ(コモンデッキ)を、機器廻りで皿ばねを用いた免震要素により上下方向に支持する構造となっている。

建屋は、外周建屋地上3階(地上高さ 14.2m)、格納容器高さ 46m、地下4階(基礎版下端高さ-30.3m)で、平面形状が短辺方向 74.0m、長辺方向 84.9m の建物である。上部基礎版厚は格納容器内で 7.5m、その他の部分で 3.5m となっている。図 3.1.1、図 3.1.2 に耐震建屋の各階の平面図、断面図を示す。また、本検討で採用したコモンデッキ方式の上下機器免震構造を図 3.1.3 に、その構造諸元を表 3.1.1 に示す。

建屋の振動解析モデルは、大型炉設計研究「130 万 kWe 級大型炉の床応答評価」^(3.1)で用いた耐震建屋モデルを参考にして作成し、免震化に伴う壁厚の低減は行わない。免震化した場合の、上部基礎版は耐震建屋と同一とし、下部基礎版の版厚は 3.5m とする。なお、耐震部分の構造計画では、格納容器内部コンクリートと外周建屋の一体化を考慮する。また、建屋の材料定数を表 3.1.2 に示す。

3.1.2 建屋振動モデルの作成

(1) 上部耐震建屋のモデル化

建屋重量は 1993 年度報告書で用いた方法で算出する。質点レベルは原則として各床免上面位置及び基礎中心とする。建屋の軸剛性は、主要壁の軸断面積に軸剛性を乗じて評価する。評価対象とする主要壁は、壁厚 80cm 以上かつ基礎版から連続して立ち上がっている壁とする。軸剛性評価した各床レベルでの主要壁を図 3.1.4 に示す。

(2) 建屋全体免震のモデル化

建屋全体を積層ゴムを用いて水平免震した建屋を想定し、上下方向の免震層の振動特性を定める。電中研研究および原電免震研究等にならない水平免震振動数 1.0Hz と想定し、上下振動数は 20Hz とする。また、上下方向の積層ゴムの減衰は 2% とする。

(3) 機器上下免震のモデル化

皿ばねで支持されたコモンデッキ方式の機器上下免震を想定する。上下免震振動数は 2.5Hz、1.6Hz、1.0Hz の3つのケースを検討対象とし、減衰は 20% とする。

以上の方針に基づき振動解析モデルを作成する。コモンデッキにより機器免震した場合の振動モデル(コモンデッキ連成モデル)および上下機器免震構造と建屋の動的相互作用が、上下機器免震構造の地震応答特性に与える影響を検討するために、原子炉

建屋とコモンデッキが連成しないモデル(コモンデッキ非連成モデル)を作成する。

作成したコモンデッキ連成モデルおよびコモンデッキ非連成モデルの振動解析モデルを図 3.1.5 に、またそれぞれの振動諸元を表 3.1.3、表 3.1.4 に示す。振動モデルのコモンデッキの総重量(質点26)を 12,000ton とする。コモンデッキ連成モデルのコモンデッキ支持位置にあたる質点5の重量は、コモンデッキ非連成モデルの原子炉容器据え付け位置にあたる質点5の重量 52,038ton から、コモンデッキ総重量を 12,000ton を引いた 40,038ton としている。また、水平免震層の上下特性を表 3.1.5 に、上下機器免震層の特性を表 3.1.6 に示す。

3.1.3 地盤のモデル化

支持地盤は、せん断波速度 $V_s=700\text{m/s}$, 1000m/s , 2000m/s の3種類の岩盤とし、半無限の一樣地盤と仮定する。検討に用いた地盤条件を表 3.1.7 に示す。

基礎版底面における上下地盤ばねは波動論により評価する。図 3.1.6 に波動論により求めた各地盤条件に対する上下地盤ばねを示す。地盤ばねは振動数に依存した複素剛性として与えられるが、ばね定数としては実部の静的な値を、また減衰係数としては地盤-建屋連成系の1次振動数に対応する虚部の値と、原点を結ぶ直線の傾きを採用することにより近似する。表 3.1.8 に算定した上下地盤ばね定数および減衰係数を示す。

3.1.4 検討用上下地震動の設定

上下動の標準的な検討用入力地震動の作成方法は現在のところ設定されていない。そこで、本検討では以下の2通りの手法によって作成した地震動を用いる。

(1) 渡部の方法^(3.2)

目標スペクトルに関して文献(3.2)では、米国で観測された震源近傍の記録を用い、水平動と上下動のスペクトルの関係を検討し、現行の水平動基準地震動のコントロールポイント D の周期を3倍とし、上下動と水平動と中心周期、応答スペクトル比をそれぞれ 0.68, 0.55 とし上下動の応答スペクトルを算出する方法を提案している。

ここでは、この方法で作成した地震波を 93 年度波と呼ぶことにする。

(2) 電力共通研究の方法^(3.3, 3.4)

目標スペクトルに関しては文献(3.3, 3.4)による方法を用いる。この方法は、図 3.1.7 に示すように、地震動を近年の地震学や地震工学の分野における知見を反映して、震源から解放基盤表面までの地震動の特性を震源特性、伝播特性、表層地盤の増幅特性に分けて考えていることに特徴がある。

以下に任意のサイトで想定される平均的な応答スペクトルの距離減衰式を示す。

$$\log S(T) = a(T)M - \left\{ b(T)X_{eq} + \log X_{eq} \right\} + c_i(T) \quad (3.1.1)$$

$$c_i(T) = c_0(T) + d_i(T) \quad (3.1.2)$$

ここで、

$S(T)$: 地盤基盤における平均的スペクトル
$a(T)$: マグニチュード係数
$b(T)$: 距離係数
$c_i(T)$: 各観測点のサイト係数
$c_0(T)$: 地盤基盤が露頭する観測点のサイト係数
$d_i(T)$: サイト係数の差, 地盤の増幅特性に対応
M	: 対象地盤マグニチュード
X_{eq}	: 等価震源距離

任意の解放基盤における平均的応答スペクトルは, (3.1.1)式から求めた応答スペクトルに, 地震基盤における地盤の増幅の補正項を掛け合わせて求める。上下動の応答スペクトルは, 地震基盤の水平動に対する, 解放基盤の上下動のスペクトル比を水平動の地震基盤のスペクトルに掛け合わせて求める。

目標スペクトルは, 設計での余裕度を見込むことから平均的スペクトルを2倍とし, さらに平均的なスペクトルはデータベースのローカルな特性を含んでいると考えられるため, ハニングウィンドウを30回かけスムージングして算定する。

平均的スペクトルに関してはマグニチュード M , 等価震源距離 X_{eq} , 表層のS波速度 V_s , P波速度 V_p , 表層地盤の一次卓越周期 $TS1$, $TP1$ をパラメータとする。また, 検討対象地盤は700, 1000, 2000m/sの3種類であることから, 3つのスペクトルを作成することになる。検討用上下地震動の作成フローを図 3.1.8 にまとめる。

ここでは, この方法で作成した地震波を94年度波と呼ぶことにする。

(3) 検討用上下地震動

(1), (2) で示した方法により検討用上下入力地震動を作成する。

渡部の手法で算定した目標スペクトルのコントロールポイントを表 3.1.9 に示す。時刻歴波形作成の際には「もんじゅ」の設計用水平基準地震動(S1)の位相を用いる。

電力共通研究の手法で用いる検討用入力地震動の作成用のパラメータを表 3.1.10 に示す。表層地盤の1次卓越周期 $TP1$ は明確でないためパラメータとしていない。サイトの地層構造が設定され, 表層地盤の1次周期が既知となれば, その周期に応じ長周期帯域でスペクトルの低減が期待される。なお, 本検討では時刻歴波形作成の際には「もんじゅ」の設計用水平基準地震動(S1)の位相を用いる。

作成した上下地震動の加速度時刻歴波形を図 3.1.9 に, その加速度応答スペクトルを図 3.1.10 に示す。

3.2 上下動固有値解析

(1) 解析方針

コモンデッキ連成モデルおよびコモンデッキ非連成モデルを用いて、3種類の地盤条件 ($V_s=700\text{m/s}$, 1000m/s , 2000m/s) に対して、地盤—建屋連成の固有値解析を行う。コモンデッキ連成モデルに関しては機器上下免震振動数 (2.5Hz , 1.6Hz , 1.0Hz) もパラメータとする。

固有値解析の解析ケースを表 3.2.1 に、解析モデルを図 3.2.1 に示す。

(2) 解析結果

各解析ケースに対する固有値解析結果の一覧を表 3.2.2～3.2.13 に示す。また、固有振動モードを図 3.2.2～3.2.13 に示す。

3.3 上下動地震応答解析

3.3.1 解析方針

3.1 で作成したコモンデッキ連成モデルおよびコモンデッキ非連成モデルを用い、3種類の地盤条件 ($V_s=700\text{m/s}$, 1000m/s , 2000m/s) について地盤—建屋連成の地震応答解析を行う。コモンデッキ連成モデルに関しては機器上下免震振動数 (2.5Hz , 1.6Hz , 1.0Hz) もパラメータとする。

入力地震動は 3.1 で示した上下地震動を用い、解放基盤面に直接入力する。解放基盤面は昨年度と同様、建屋応答に保守的になるよう、建屋基礎底面レベルとする。

コモンデッキ非連成モデルに関しては、基礎固定とした機器免震部分モデル (1自由度、固有振動数は Case1～6 で 2.5Hz , Case7～9 で 1.6Hz , Case10～12 で 1.0Hz , 減衰は全て 20%) に、コモンデッキ非連成モデルの質点 5 の応答を入力した場合の応答解析も実施する。解析ケースを表 3.3.1, 表 3.3.2 に示す。

3.3.2 解析結果

最大加速度分布を解析ケース毎に、図 3.3.1～図 3.3.18 に示す。

表 3.3.3 にコモンデッキの最大応答加速度をコモンデッキ連成モデルとコモンデッキ非連成モデルの結果を比較して示す。コモンデッキ連成モデルは質点 26 の応答、コモンデッキ非連成モデルはコモンデッキ非連成モデルの質点 5 の応答を、基礎固定とした機器免震部分モデル (1自由度、機器固有振動数は Case1～6 で 2.5Hz , Case7～9 で 1.6Hz , Case10～12 で 1.0Hz , 減衰は全て 20%) に入力した場合の応答である。どのケースについてもコモンデッキ連成モデルおよび非連成モデルの最大加速度はほぼ同じであるが、非連成モデルの方が若干安全側の結果となっている。

また、コモンデッキ (質点 26) とコモンデッキ支持位置 (質点 5) の間の最大相対変位を表 3.3.4 に示す。機器免震振動数が小さくなると、コモンデッキ (質点 26) とコモンデッキ支持位置 (質点 5) 間の相対変位は、大きくなる傾向にあるが、コモンデッキの自重変形

(25cm)よりも小さくなっている。

入力地震動の最大加速度に対するコモンデッキの最大応答加速度の倍率と機器免震振動数の関係を、図 3.3.19 に示す。機器免震振動数が大きくなると応答加速度倍率が大きくなる。これは、機器免震振動数が大きくなると、地盤-建屋連成系の主要振動数に近づくためと考えられる。また同図より、地盤が柔らかい程、応答倍率が大きくなることがわかる。

コモンデッキ(質点26)とコモンデッキ支持位置(質点5)の間の最大相対変位と機器免震振動数の関係を図 3.3.20 に示す。機器免震振動数が大きくなるとコモンデッキの相対変位は小さくなる。また同図より、地盤剛性が柔らかい程、相対変位が大きくなることがわかる。

3.4 床応答スペクトル

3.4.1 床応答スペクトルの算定方針

上下動地震応答解析の結果を基に、格納容器内部コンクリートのコモンデッキを支持する位置(質点5:FL-8.3m)および原子炉容器を支持するコモンデッキ(質点26:FL+0.2m)などにおける減衰1%の加速度応答スペクトルを算定する。

ここで、コモンデッキ非連成モデルの質点5の応答を、基礎固定とした機器免震部分モデル(1自由度、固有振動数はCase1~6で2.5Hz, Case7~9で1.6Hz, Case10~12で1.0Hz, 減衰は全て20%)に入力した時の応答と、コモンデッキ連成モデルの質点26の応答の比較も行う。

3.4.2 床応答スペクトルの算定結果

1) 地盤剛性が応答に与える影響

地盤剛性が応答に与える影響を検討するために、Case1-1~Case6-1の $V_s=700, 1000, 2000\text{m/s}$ の加速度応答スペクトルを比較して図 3.4.1, 3.4.2 に示す。図 3.4.1, 図 3.4.2 はそれぞれ入力地震動に'94年度波, '93年度波を用いた結果である。

図 3.4.1 のコモンデッキ支持部(FL-8.3m)の応答スペクトルより、地盤-建屋連成系のピークは $V_s=700\text{m/s}, 1000\text{m/s}, 2000\text{m/s}$ の場合それぞれで、0.24秒, 0.17秒, 0.10秒付近にみられる。コモンデッキの応答をみると、地盤が硬い程ほど、コモンデッキの機器免震周期に対応する0.4秒の応答が小さくなっている。これは3.1で示したように、'94年度波は、地盤が硬い程スペクトルが小さくなるのが原因である。

図 3.4.1 と図 3.4.2 のコモンデッキの機器免震周期に対応する0.4秒付近の床応答スペクトルを比較すると、図 3.4.2 の'93年度波を入力地震動として用いた方が、地盤剛性に対する応答スペクトルの差異は小さい。これは、'93年度波のスペクトルは地盤剛性に係わらず一定であること、および、このピークが地盤-建屋連成系の主要周期からはずれており、地盤剛性の差異が応答にほとんど影響を与えないことが理由と考えられる。実際、

コモンデッキの入力となるコモンデッキ支持部(FL-8.3 m)の、0.4秒付近の応答スペクトルについてみると、地盤剛性による差異はほとんどない。

2) 機器免震振動数が応答に与える影響

図 3.4.5 は機器免震振動数をパラメータとした場合の比較であり、入力地震動は'94 年度波を用いている。図 3.4.3, 図 3.4.4, 図 3.4.5 はそれぞれ $V_s=700\text{m/s}$, 1000m/s , 2000m/s の場合である。免震振動数が低くなると(周期が長くなる)と、コモンデッキの応答が小さくなる傾向がある。一方、コモンデッキ支持部(FL-8.3m)の応答は、免震周期に係わらず、せん断剛性毎に一致していることから、機器免震振動数はコモンデッキ以外の部位の応答にほとんど影響を与えていないと考えられる。

3) 入力地震動が応答に与える影響

入力地震動による比較を $V_s=700\text{m/s}$, 1000m/s , 2000m/s の場合それぞれについて図 3.4.6～図 3.4.8 に示す。コモンデッキの免震振動数における床応答に着目すると、 $V_s=700\text{m/s}$, 1000m/s の場合は'94 年度波を用いた方が'93 年度波よりも応答が大きくなっているが、 $V_s=2000\text{m/s}$ の場合は、両者の結果がほぼ等しくなっている。これは、'94 年度波は地盤が硬くなるとスペクトルが小さくなることや、全般的に'93 年度波と比べ長周期側でもスペクトルがあまり低下しないことが原因と考えられる。

4) 建屋－機器免震の連成が応答に与える影響

コモンデッキ連成モデルの質点26の応答スペクトルと、コモンデッキ非連成モデルの質点5の応答波形を、基礎固定とした機器免震部分モデル(1自由度、固有振動数は Case1～6 で 2.5Hz, Case7～9 で 1.6Hz, Case10～12 で 1.0Hz, 減衰は全て 20%)に入力した時の応答スペクトルを比較して、図 3.4.9～図 3.4.20 に示す。両者はほぼ等しいか、あるいは、コモンデッキ非連成モデルの方がコモンデッキ連成モデルよりも応答が大きくなっている。

地盤が軟らかい程、また機器免震振動数が高いほど、両者の差異が大きくなる傾向にある。これは、地盤が軟らかくなる、あるいは機器免震振動数が高くなると、地盤－建屋連成系の主要振動数と機器免震振動数が近づき、機器免震構造が機器－建屋連成系振動に与える影響が大きくなったことが原因と考えられる。

以上から、検討したパラメータの範囲では、機器－建屋連成解析を行わずとも、コモンデッキ非連成モデルの応答を、基礎固定機とした機器免震部分モデルに入力して応答解析を行えば、コモンデッキの応答を安全側に評価できることがわかる。

5) 機器免震がコモンデッキ支持部およびポーラークレーン位置の応答

コモンデッキ支持部(質点5, コモンデッキ非連成モデルでは原子炉容器据えつけ位置に対応)およびポーラークレーン位置(質点20)の、コモンデッキ連成モデル(機器免震)とコモンデッキ非連成モデル(耐震)の応答を比較して、図 3.4.21～3.4.26 に示す。図

3.4.21～3.4.23 は'94 年度波, 図 3.4.24～図 3.4.26 は'93 年度波を入力したもので, 図 3.4.21, 図 3.4.24 は $V_s=700\text{m/s}$ の場合, 図 3.4.22, 図 3.4.25 は $V_s=1000\text{m/s}$ の場合, 図 3.4.23, 図 3.4.26 は $V_s=2000\text{m/s}$ の場合である。

$V_s=2000\text{m/s}$ の場合のポーラークレーン位置における, 地盤—建屋連成周期(0.08 秒付近)の応答は, 機器免震と耐震で若干の差異がみられるが, 他のケースでは機器免震と耐震の応答スペクトルは概ね等しくなっている。これより, 機器免震を採用しても, コモンデッキ支持部およびポーラークレーン位置の応答は, ほとんど変わらないことがわかる。

機器設計で重要な周波数帯域(0.05～0.1 秒)におけるコモンデッキ非連成モデル(耐震)の原子炉容器据え付け位置の加速度応答スペクトルの最大値は, 0.4～2 G 程度である。しかしながら, 1)～3)のコモンデッキの応答スペクトルからわかるように, 機器免震を採用することで, 最も応答が大きな場合でも 0.2G 程度まで応答が低減される。

6) 耐震建屋と機器免震建屋の原子炉容器支持部の応答比

5)までの検討から, コモンデッキ連成モデル(機器免震)のコモンデッキ支持部の応答と, コモンデッキ非連成モデル(耐震)の原子炉容器据え付け位置の応答はほとんど等しいことがわかった。よって, 耐震建屋の原子炉容器据え付け位置の応答と機器免震建屋のコモンデッキ支持部の応答を比較するには, コモンデッキ連成モデルの, コモンデッキの応答とコモンデッキ支持部の応答を比較すれば良いことになる。そこで, 参考として, 5)までで検討した各解析ケースの, コモンデッキ支持部とコモンデッキの加速度応答スペクトルの比を求め, 図 3.4.27～図 3.4.34 に示す。

3.5 改良構造#1の上下動地震応答解析

3.5.1 解析方針

本節では, 3.4 までで検討したモデルの改良構造として, 機器免震の減衰を変えた場合の検討を行う。表 3.5.1 に解析ケースを示す。機器免震振動数を 1.0Hz, 減衰を 10%とした場合, 機器免震振動数を 2.5Hz, 減衰を 40%とした場合に関して, 3種類の地盤条件($V_s=700\text{m/s}$, 1000m/s , 2000m/s)について地盤—建屋連成の地震応答解析を行う。入力地震動は 3.1 で示した'94 年度波を用い, 解放基盤面に直接入力する。解放基盤面は, 建屋応答に保守的になるよう, 建屋基礎底面レベルとする。

3.5.2 解析結果

最大加速度分布を解析ケース毎に, 図 3.5.1～図 3.5.6 に示す。コモンデッキの最大応答加速度を 3.3 で検討した結果と比較して表 3.5.2 に示す。コモンデッキ支持位置(質点5)とコモンデッキ(質点26)の間の最大相対変位を表 3.5.3 に示す。また, 入力地震動の最大加速度に対するコモンデッキ最大加速度比と減衰の関係を図

3.5.7 に、相対変位と減衰の関係を図 3.5.8 に示す。

機器免震の減衰を 10% から 20% へ、あるいは 20% から 40% へ上げることにより、入力地震動の最大加速度に対するコモンデッキ最大加速度比およびコモンデッキの相対変位は小さくなることがわかる。

3.6 改良構造#1の床応答スペクトル

3.6.1 床応答スペクトルの算定方針

3.5 で行った改良構造の上下動地震応答解析の結果を基に、格納容器内部コンクリートのコモンデッキを支持する位置(質点5:FL-8.3m)および原子炉容器を支持するコモンデッキ(質点26:FL+0.2m)などにおける減衰1%の加速度応答スペクトルを算定する。

3.6.2 床応答スペクトルの算定結果

1) 機器免震の減衰が応答に与える影響

応答スペクトルに与える、機器免震の減衰の影響を把握するために、機器免震振動数 1.0Hz の場合について、Case13-1~Case15-1 と Case10-1~Case12-1 を比較して図 3.6.1~図 3.6.3 に示す。また、機器免震振動数 2.5Hz の場合について、Case16-1~Case18-1 と Case1-1~Case3-1 を比較して図 3.6.4~図 3.6.6 に示す。

図 3.6.1~図 3.6.3 のコモンデッキの免震振動数での応答は、機器免震振動数 1.0Hz で、減衰を 10% から 20% に上げると 40% 程度応答が低減される。一方、図 3.6.4~図 3.6.6 の機器免震振動数 2.5Hz の場合で、減衰を 20% から 40% に上げると 33% 程度応答が低減される。コモンデッキ支持部(FL-8.3m)の応答に着目すると、全てのケースについて、機器免震の減衰を変えてもほとんど変わらないことがわかる。

2) 建屋-機器免震の連成が応答に与える影響

3.4 において、コモンデッキ連成モデルのコモンデッキ(質点26)の応答スペクトルと、コモンデッキ非連成モデルの原子炉容器据え付け位置(質点5)の応答波を、基礎固定とした機器免震部分モデルに入力した場合の応答スペクトルの比較を行い、機器免震部分モデルがコモンデッキ連成モデルの応答を上回ることがわかった。つまり、コモンデッキ非連成モデルの応答を、基礎固定とした機器免震部分モデルに入力して応答解析を行っても、コモンデッキの応答を安全側に評価できることを確認した。機器免震の減衰を変えても、コモンデッキ支持部の応答がほとんど変わらないことから、機器免震の減衰をパラメータとした場合でも、同様の結論が導かれると考えられる。

3) 耐震建屋と機器免震建屋の原子炉容器支持部の応答比

検討したパラメータ範囲内で機器を免震化しても、コモンデッキ支持部の応答は変わらなかったことから、コモンデッキ連成モデル(機器免震)のコモンデッキ支持部の応答は、コモンデッキ非連成モデル(耐震)の原子炉容器据え付け位置の応答とほとんど等しいと

考えられる。よって、耐震建屋の原子炉容器据え付け位置の応答と機器免震建屋のコモンデッキ支持部の応答を比較するには、コモンデッキ連成モデルの、コモンデッキの応答とコモンデッキ支持部の応答を比較すれば良いことになる。そこで、参考として、各解析ケースのコモンデッキ支持部とコモンデッキの加速度応答スペクトルの比を求め、図 3.6.7～3.6.12 に示す。

3.7 改良構造#2の上下動地震応答解析

3.7.1 解析方針

本節では、機器免震される部分の重量が、コモンデッキおよびコモンデッキ支持部に与える影響を検討する。機器免震振動数を 2.5Hz、機器免震減衰を 20%、せん断波速度 $V_s=2000\text{m/s}$ とした場合に関して、機器免震される部分の重量をパラメータ(12,000ton (Case3-1), 24,000ton (Case19-1), 36,000ton (Case19-2))として、地盤—建屋連成の地震応答解析を行う。解析ケースを表 3.7.1 に示す。

なお、Case19-1 は FL+0.2 から FL22.8 まで (FL+0.2～FL-22.8 の原子炉容器内の重量は約 23,000ton)、Case19-2 は FL+0.2 から FL-26.8 まで (FL+0.2～FL-26.8 の原子炉容器内の重量は約 38,000ton) の原子炉格納容器内の全領域を免震化した場合に概ね対応する。

入力地震動は 3.1 で示した'94 年度波を用い、解放基盤面に直接入力する。解放基盤面は、建屋応答に保守的になるよう、建屋基礎底面レベルとする。

3.7.2 解析結果

最大加速度分布を解析ケース毎に、図 3.7.1、図 3.7.2 に示す。コモンデッキ支持位置(質点5)とコモンデッキ(質点26)の間の最大相対変位を表 3.7.2 に示す。また、コモンデッキの最大応答加速度を表 3.7.3 に示す。

機器免震される部分の重量を変えても、最大加速度分布および相対変位には、ほとんど影響が無いことがわかる。

3.8 改良構造#2の床応答スペクトル

3.8.1 床応答スペクトルの算定方針

3.7 で行った改良構造#2の上下動地震応答解析の結果を基に、格納容器内部コンクリートのコモンデッキを支持する位置(質点5:FL-8.3m)および原子炉容器を支持するコモンデッキ(質点26:FL+0.2m)などにおける減衰1%の加速度応答スペクトルを算定する。

3.8.2 床応答スペクトルの算定結果

1) 機器免震部分の重量が応答に与える影響

機器免震のコモンデッキ重量が、応答スペクトルへ与える影響を把握するために、Case3-1, Case19-1 および Case19-2 を比較して図 3.8.1 に示す。

コモンデッキおよびコモンデッキ支持部の応答は、機器免震される部分の重量により影響を受けないことがわかる。これは、機器免震振動数が地盤－建屋連成系の主要振動数から大きくはずれていることが原因と考えられる。付録に示すように機器免震振動数を 10.0Hz とし、地盤－建屋連成系の主要振動数に近づけた場合は、コモンデッキの重量により、コモンデッキおよびコモンデッキ支持部の応答は変化する。

2) 建屋－機器免震の連成が応答に与える影響

3.4 において、機器免震振動数をパラメータとして、コモンデッキ連成モデルのコモンデッキ(質点26)の応答と、コモンデッキ非連成モデルの原子炉据え付け位置(質点5)の応答を、基礎固定とした機器免震部分モデルに入力した場合の応答スペクトルの比較を行い、機器免震モデルの応答がコモンデッキ連成モデルの応答を上回るこがわかった。つまり、機器－建屋連成モデルを用いなくても、コモンデッキ非連成モデルの応答を、基礎固定とした機器免震部分のみのモデルに入力して応答解析を行えば、コモンデッキの応答を安全側に評価できることを確認した。機器免震される部分の重量を変えても、コモンデッキ支持部の応答がほとんど変わらないことから、機器される部分の重量をパラメータとした場合でも、同様の結論が導かれると考えられる。

表3.1.1 コモンデッキ構造諸元

(a) コモンデッキの主要寸法

	寸法
デッキ寸法	$\phi 40\text{m} \times 2\text{m}$
原子炉容器貫通孔	$\phi 13.5\text{m}$
IHX貫通孔	$\phi 4.6\text{m}$
ポンプ貫通孔	$\phi 2.4\text{m}$

(b) コモンデッキの重量内訳

	重量(t)
原子炉容器重量	4695
IHX重量	194
ポンプ重量	199
デッキ重量	5868
総計	10956

*解析ではその他の重量も考え12000tonとする。

表3.1.2 建屋の材料定数

	ヤング係数 $E(\text{kg}/\text{cm}^2)$	せん断弾性係数 $G(\text{kg}/\text{m}^2)$	ポアソン比 γ	減衰定数 $h(\%)$
鉄筋コンクリート	$2.70 \times 10^5 *$	1.157×10^5	0.167	5
鋼材	2.10×10^6	0.808×10^6	0.3	2

*建築学会の算定式による

$$E = 2.1 \times 10^5 \times (\gamma / 2.3) \times \sqrt{F_c / 200}$$

F_c : コンクリートの設計基準強度 (kg/cm^2) = $330 \text{Kg}/\text{cm}^2$

γ : コンクリートの単位体積重量 (t/m^3) = $2.3 \text{t}/\text{m}^3$

表3.1.3 コモンデッキ連成モデルの振動諸元

標高 FL. m	外周部				鋼製部				コモンデッキ			
	質点 番号	重量 (t)	はり 要素 番号	軸断 面積 (m ²)	質点 番号	重量 (t)	はり 要素 番号	軸断 面積 (m ²)	質点 番号	重量 (t)	ばね 要素 番号	ばね 定数 (t/m)
46.0	12	3050	—	—	21	400	—	—	—	—	—	—
31.7	11	4850	11	120.6	—	—	—	—	—	—	—	—
25.2	10	2550	10	201.2	20	1000	20	3.4	—	—	—	—
21.2	9	10350	9	201.2	19	200	19	4.5	—	—	—	—
14.2	8	22200	8	512.1	18	250	18	4.5	—	—	—	—
7.2	7	27350	7	616.5	17	250	17	4.5	—	—	—	—
0.2	6	31962	6	840.1	—	—	16	4.5	26	12000	—	—
-8.3	5	40038	5	1181.8	—	—	—	—	—	—	25	3021
-13.8	4	32750	4	1348.6	—	—	—	—	—	—	—	—
-19.8	3	54950	3	1390.0	—	—	—	—	—	—	—	—
-28.6	2	90900	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
-33.9	1	52774	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
備考	<p>○上部総重量 335050 ton</p> <p>○下部総重量 52774 ton</p> <p>○総重量 387824 ton</p> <p>○建屋の材料定数</p> <p>・RC部 ヤング係数：E= 270,000 (kg/cm²) せん断弾性係数：G= 115,700 (kg/cm²) ポアソン比：ν= 0.167 減衰定数：h= 0.05</p> <p>・鋼製部 (*印を付けた部材) ヤング係数：E= 2,100,000 (kg/cm²) せん断弾性係数：G= 808,000 (kg/cm²) ポアソン比：ν= 0.3 減衰定数：h= 0.02</p>											

表3.1.4 コモンデッキ非連成モデル振動諸元

標高 FL. m	外周部				鋼製部			
	質点 番号	重量 (t)	はり 要素 番号	軸断 面積 (m ²)	質点 番号	重量 (t)	はり 要素 番号	軸断 面積 (m ²)
46.0	12	3050	—	—	21	400	—	—
31.7	11	4850	11	120.6	—	—	—	—
25.2	10	2550	10	201.2	20	1000	20	3.4
21.2	9	10350	9	201.2	19	200	19	4.5
14.2	8	22200	8	512.1	18	250	18	4.5
7.2	7	27350	7	616.5	17	250	17	4.5
0.2	6	31962	6	840.1	—	—	16	4.5
-8.3	5	52038	5	1181.8	—	—	—	—
-13.8	4	32750	4	1348.6	—	—	—	—
-19.8	3	54950	3	1390.0	—	—	—	—
-28.6	2	90900	2	—	—	—	—	—
-33.9	1	52774	1	—	—	—	—	—
備 考	○上部総重量				335050 ton			
	○下部総重量				52774 ton			
	○総重量				387824 ton			
	○建屋の材料定数							
	・ R C 部				・ 鋼製部 (* 印を付けた部材)			
	ヤング係数：E=		270,000 (kg/cm ²)		ヤング係数：E=		2,100,000 (kg/cm ²)	
	せん断弾性係数：G=		115,700 (kg/cm ²)		せん断弾性係数：G=		808,000 (kg/cm ²)	
ポアソン比：ν=		0.167		ポアソン比：ν=		0.3		
減衰定数：h=		0.05		減衰定数：h=		0.02		

表3.1.5 水平免震層の上下方向の特性

ばね剛性 (t/cm)	減衰 (%)	振動数 (Hz)
5.399×10^6	2	20

表3.1.6 機器上下免震層の特性

機器免震振動数 (Hz)	ばね剛性 (t/cm)	減衰 (%)
2.5	3.021×10^3	20
1.6	1.238×10^3	20
1.0	4.834×10^2	20

表3.1.7 地盤条件

	せん断波速度 Vs(m/s)	単位体積重量 γ (t/m ³)	ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G(t/m ²)	減衰定数 h (%)
地盤条件	700	1.8	0.42	0.90×10^5	2
	1000	2.0	0.40	2.04×10^5	2
	2000	2.7	0.33	11.0×10^5	2

表3.1.8 地盤ばね定数

せん断波速度 Vs(m/s)	Kv (t/cm)	Cv (t · sec/cm)	減衰係数の算定 に用いた振動数 (Hz)
700	2.78×10^5	1.57×10^4	4.2
1000	6.10×10^5	2.41×10^4	5.9
2000	2.95×10^6	5.88×10^4	10.3

表3.2.1 固有値解析ケース

Case	コモンデッキ連成	せん断波速度 Vs(m/s)	機器免震振動数 (Hz)
1-1	連成	700	2.5
1-2	非連成		—
2-1	連成	1000	2.5
2-2	非連成		—
3-1	連成	2000	2.5
3-2	非連成		—
7-1	連成	700	1.6
8-1		1000	
9-1		2000	
10-1		700	1.0
11-1		1000	
12-1		2000	

表3.2.2 固有値解析結果 (Case1-1)

次数	Vs=700m/s、機器免震振動数=2.5Hz			
	固有周期 (秒)	刺激係数	モード減衰定数 (%)	備考
1	0.4039	1.55	20.57	機器免震周期
2	0.2389	1.06	68.49	地盤・建屋連成1次
3	0.0512	0.14	14.97	
4	0.0436	0.01	2.11	格納容器1次
5	0.0310	0.07	7.83	

表3.2.3 固有値解析結果 (Case2-1)

次数	Vs=1000m/s、機器免震振動数=2.5Hz			
	固有周期 (秒)	刺激係数	モード減衰定数 (%)	備考
1	0.4016	1.22	20.04	機器免震周期
2	0.1684	1.19	63.59	地盤・建屋連成1次
3	0.0503	0.30	19.92	
4	0.0436	0.03	2.11	格納容器1次
5	0.0309	0.15	9.20	

表3.2.4 固有値解析結果 (Case3-1)

次数	Vs=2000m/s、機器免震振動数=2.5Hz			
	固有周期 (秒)	刺激係数	モード減衰定数 (%)	備考
1	0.4006	1.06	19.97	機器免震周期
2	0.0970	1.67	33.44	地盤・建屋連成1次
3	0.0457	1.11	29.51	
4	0.0436	0.30	2.18	格納容器1次
5	0.0303	0.60	12.48	

表3.2.5 固有値解析結果 (Case1-2)

次数	Vs=700m/s、コモンデッキ非連成			
	固有周期 (秒)	刺激係数	モード減衰定数 (%)	備考
1	0.2450	1.09	67.70	地盤・建屋連成1次
2	0.0512	0.14	14.85	
3	0.0436	0.01	2.11	格納容器1次
4	0.0312	0.08	8.29	
5	0.0229	0.04	10.25	

表3.2.6 固有値解析結果 (Case2-2)

次数	Vs=1000m/s、コモンデッキ非連成			
	固有周期 (秒)	刺激係数	モード減衰定数 (%)	備考
1	0.1719	1.19	62.44	地盤・建屋連成1次
2	0.0503	0.30	19.67	
3	0.0436	0.03	2.11	格納容器1次
4	0.0311	0.16	9.89	
5	0.0228	0.08	12.63	

表3.2.7 固有値解析結果 (Case3-2)

次数	Vs=2000m/s、コモンデッキ非連成			
	固有周期 (秒)	刺激係数	モード減衰定数 (%)	備考
1	0.0988	1.65	32.95	地盤・建屋連成1次
2	0.0458	1.09	28.27	
3	0.0436	0.28	2.16	格納容器1次
4	0.0304	0.63	13.46	
5	0.0223	0.29	16.15	

表3.2.8 固有値解析結果 (Case7-1)

次数	Vs=700m/s、機器免震振動数=1.6Hz			
	固有周期 (秒)	刺激係数	モード減衰定数 (%)	備考
1	0.6262	1.18	20.04	機器免震周期
2	0.2404	1.09	69.10	地盤・建屋連成1次
3	0.0512	0.14	14.97	
4	0.0436	0.01	2.11	格納容器1次
5	0.0310	0.07	7.83	

表3.2.9 固有値解析結果 (Case8-1)

次数	Vs=1000m/s、機器免震振動数=1.6Hz			
	固有周期 (秒)	刺激係数	モード減衰定数 (%)	備考
1	0.6253	1.08	19.99	機器免震周期
2	0.1688	1.20	63.70	地盤・建屋連成1次
3	0.0503	0.30	19.92	
4	0.0436	0.03	2.11	格納容器1次
5	0.0309	0.15	9.20	

表3.2.10 固有値解析結果 (Case9-1)

次数	Vs=2000m/s、機器免震振動数=1.6Hz			
	固有周期 (秒)	刺激係数	モード減衰定数 (%)	備考
1	0.6247	1.03	19.99	機器免震周期
2	0.0971	1.67	33.44	地盤・建屋連成1次
3	0.0457	1.11	29.50	
4	0.0436	0.30	2.18	格納容器1次
5	0.0303	0.60	12.48	

表3.2.11 固有値解析結果 (Case10-1)

次数	Vs=700m/s、機器免震振動数=1.0Hz			
	固有周期 (秒)	刺激係数	モード減衰定数 (%)	備考
1	1.0015	1.06	19.99	機器免震周期
2	0.2408	1.09	69.19	地盤・建屋連成1次
3	0.0512	0.14	14.97	
4	0.0436	0.01	2.11	格納容器1次
5	0.0310	0.07	7.83	

表3.2.12 固有値解析結果 (Case11-1)

次数	Vs=1000m/s、機器免震振動数=1.0Hz			
	固有周期 (秒)	刺激係数	モード減衰定数 (%)	備考
1	1.0010	1.03	19.99	機器免震周期
2	0.1690	1.20	63.72	地盤・建屋連成1次
3	0.0503	0.30	19.92	
4	0.0436	0.03	2.11	格納容器1次
5	0.0309	0.15	9.20	

表3.2.13 固有値解析結果 (Case12-1)

次数	Vs=2000m/s、機器免震振動数=1.0Hz			
	固有周期 (秒)	刺激係数	モード減衰定数 (%)	備考
1	1.0006	1.01	19.99	機器免震周期
2	0.0971	1.67	33.44	地盤・建屋連成1次
3	0.0457	1.11	29.50	
4	0.0436	0.30	2.18	格納容器1次
5	0.0303	0.60	12.48	

表3.3.1 地震応答解析ケース

Case	コモンデッキ連成	せん断波速度 Vs(m/s)	機器免震振動数 (Hz)	入力地震動
1-1	連成	700	2.5	'94年度波 (電力共通 研究の方法)
1-2	非連成	700	—	
2-1	連成	1000	2.5	
2-2	非連成	1000	—	
3-1	連成	2000	2.5	
3-2	非連成	2000	—	
4-1	連成	700	2.5	'93年度波 (渡部の 方法)
4-2	非連成	700	—	
5-1	連成	1000	2.5	
5-2	非連成	1000	—	
6-2	連成	2000	2.5	
6-2	非連成	2000	—	
7-1	連成	700	1.6	'94年度波 (電力共通 研究の方法)
8-1		1000		
9-1		2000		
10-1		700	1.0	
11-1		1000		
12-1		2000		

表3.3.2 機器免震部分の応答解析ケース
(基礎固定1自由度モデル)

Case	機器免震振動数 (Hz)	入力	せん断波速度 Vs(m/s)
1-2	2.5	Case1-2の質点5	700
2-2		Case2-2の質点5	1000
3-2		Case3-2の質点5	2000
4-2		Case4-2の質点5	700
5-2		Case5-2の質点5	1000
6-2		Case6-2の質点5	2000
7-2	1.6	Case1-2の質点5	700
8-2		Case2-2の質点5	1000
9-2		Case3-2の質点5	2000
10-2	1.0	Case1-2の質点5	700
11-2		Case2-2の質点5	1000
12-2		Case3-2の質点5	2000

表3.3.3 コモンデッキの最大加速度

コモンデッキ連成モデル ^{*1}		コモンデッキ非連成モデル ^{*2}		入力地震動 最大加速度 (Gal)
Case	最大加速度 (Gal)	Case	最大加速度 (Gal)	
1-1	239	1-2	275	196
2-1	198	2-2	212	167
3-1	131	3-2	132	130
4-1	134	4-2	166	157
5-1	144	5-2	159	
6-1	139	6-2	140	
7-1	194	7-2	197	196
8-1	143	8-2	149	167
9-1	92	9-2	96	130
10-1	132	10-2	134	196
11-1	102	11-2	103	167
12-1	68	12-2	71	130

*1：コモンデッキ連成モデルの質点26の応答

*2：コモンデッキ非連成モデルの質点5の応答波形を
基礎固定機器系モデルに入力したときの応答

表3.3.4 コモンデッキの相対変位

Case	せん断波速度 Vs(m/s)	機器免震振動数 (Hz)	入力地震動	最大相対変位 (cm)
1-1	700	2.5	'94年度波	0.96
2-1	1000			0.77
3-1	2000			0.50
4-1	700	2.5	'93年度波	0.55
5-1	1000			0.56
6-1	2000			0.52
7-1	700	1.6	'94年度波	1.80
8-1	1000			1.33
9-1	2000			0.85
10-1	700	1.0		3.13
11-1	1000			2.41
12-1	2000			1.0

表3.5.1 地震応答解析ケース（改良構造#1）

Case	コモンデッキ 連成	せん断波速度 Vs(m/s)	機器免震振動数 (Hz)	機器免振減衰 (%)	入力地震動
13-1	連成	700	1.0	10	'94年度波
14-1		1000			
15-1		2000			
16-1		700	2.5	40	
17-1		1000			
18-1		2000			

表3.5.2 コモンデッキの最大応答加速度

Case	せん断波速度 Vs(m/s)	機器免震 振動数 (Hz)	機器免震 減衰 (%)	最大加速度 (Gal)	最大相対変位 (Gal)
10-1	700	1.0	20	132	196
11-1	1000			102	167
12-1	2000			68	130
13-1	700	1.0	10	194	196
14-1	1000			146	167
15-1	2000			93	130
1-1	700	2.5	20	239	196
2-1	1000			198	167
3-1	2000			131	130
16-1	700	2.5	40	165	196
17-1	1000			152	167
18-1	2000			114	130

表3.5.3 コモンデッキの相対変位

Case	せん断波速度 Vs(m/s)	機器免震 振動数 (Hz)	機器免震 減衰 (%)	最大相対変位 (cm)
10-1	700	1.0	20	3.13
11-1	1000			2.41
12-1	2000			1.66
13-1	700	1.0	10	4.82
14-1	1000			3.63
15-1	2000			2.34
1-1	700	2.5	20	1.80
2-1	1000			1.33
3-1	2000			0.85
16-1	700	2.5	40	0.61
17-1	1000			0.51
18-1	2000			0.36

表3.7.1 地震応答解析ケース（改良構造# 2）

Case	コモンデッキ 重量 (ton)	せん断波速度 (m/s)	機器免震振動数 (Hz)	機器免震減衰 (%)	入力地震動
19-1	24,000	2000	2.5	20	'94年度波
19-2	36,000		2.5		

表3.7.2 コモンデッキの相対変位

Case	コモンデッキ重量 (ton)	機器免震振動数 (Hz)	最大相対変位 (cm)
3-1	12,000	2.5	0.50
19-1	24,000	2.5	0.50
19-2	36,000	2.5	0.50

表3.7.3 コモンデッキの最大加速度

Case	コモンデッキ重量 (ton)	機器免震振動数 (Hz)	最大加速度 (Gal)	入力最大加速度 (Gal)
3-1	12,000	2.5	131	131
19-1	24,000		131	
19-2	36,000		131	

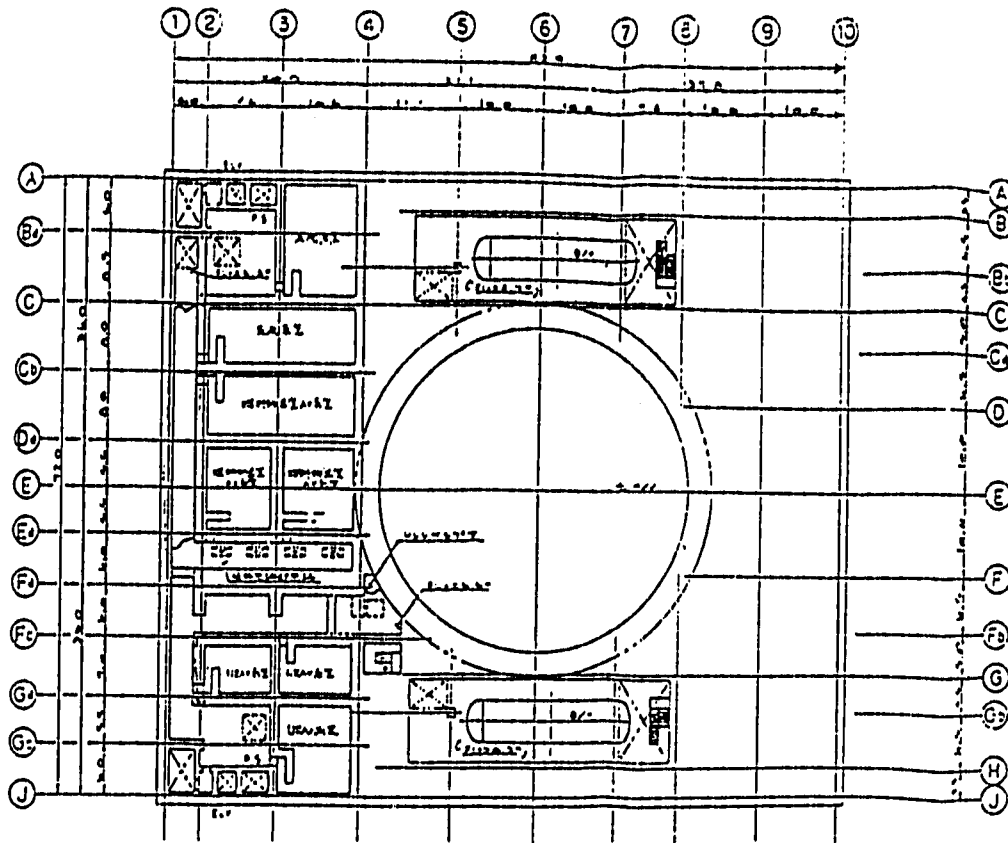


图3.1.1 平面图 (1) : FL-26.8m

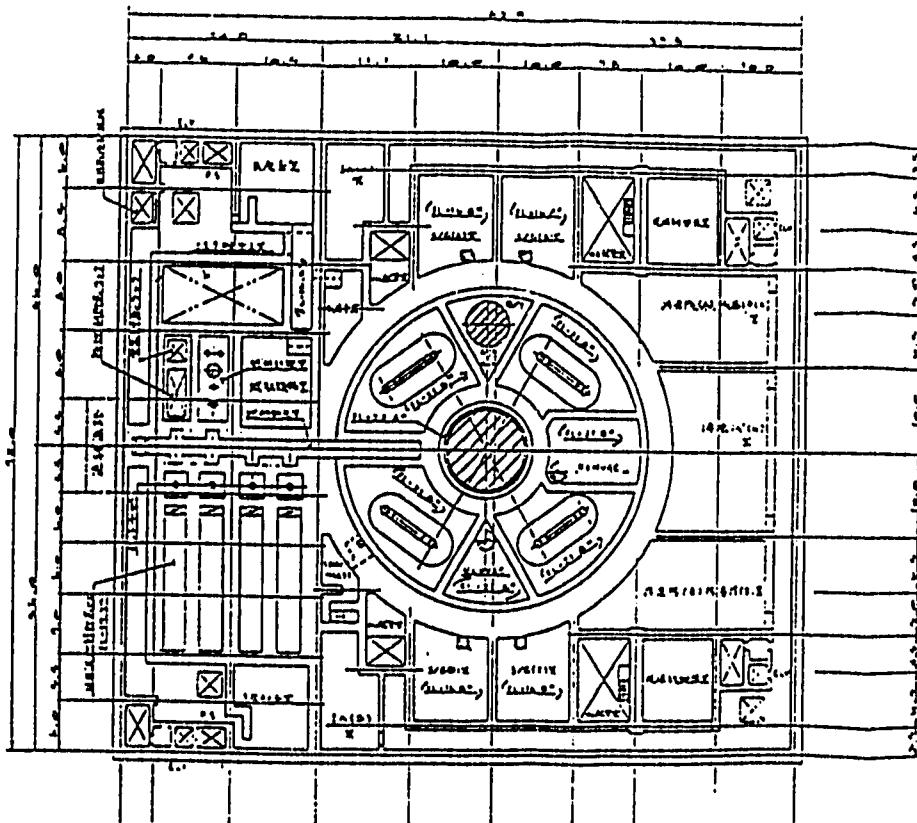


图3.1.1 平面图 (2) : FL-19.8m

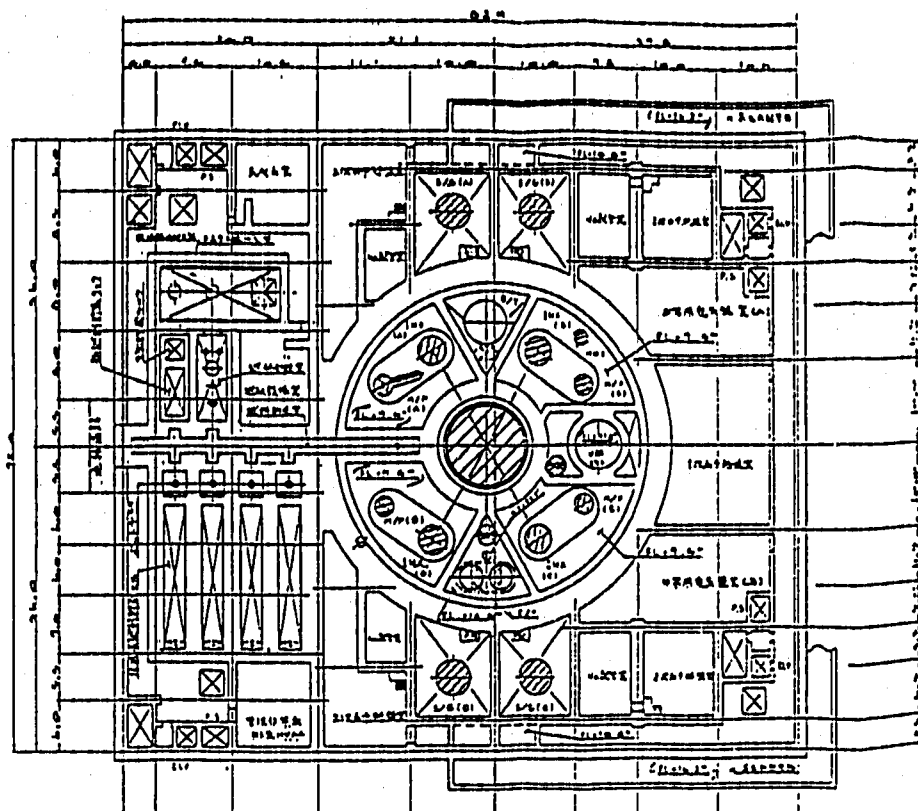


图3.1.1 平面图 (3) : FL-13.8m

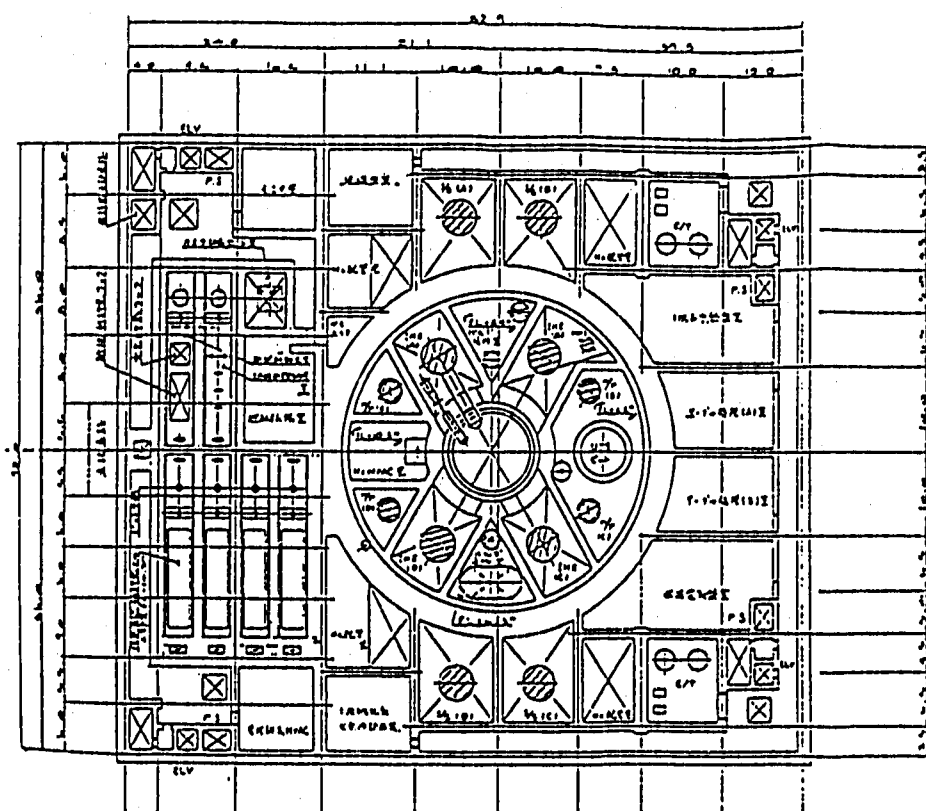


图3.1.1 平面图 (4) : FL-8.3m

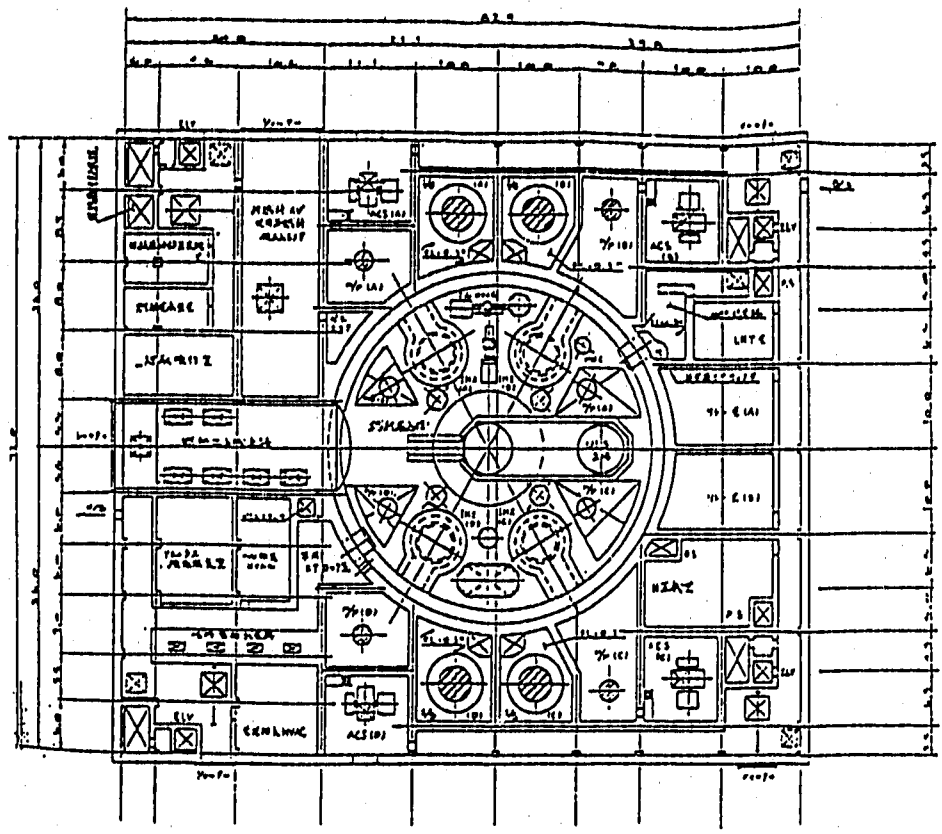


图3.1.1 平面图 (5) : FL+0.2m

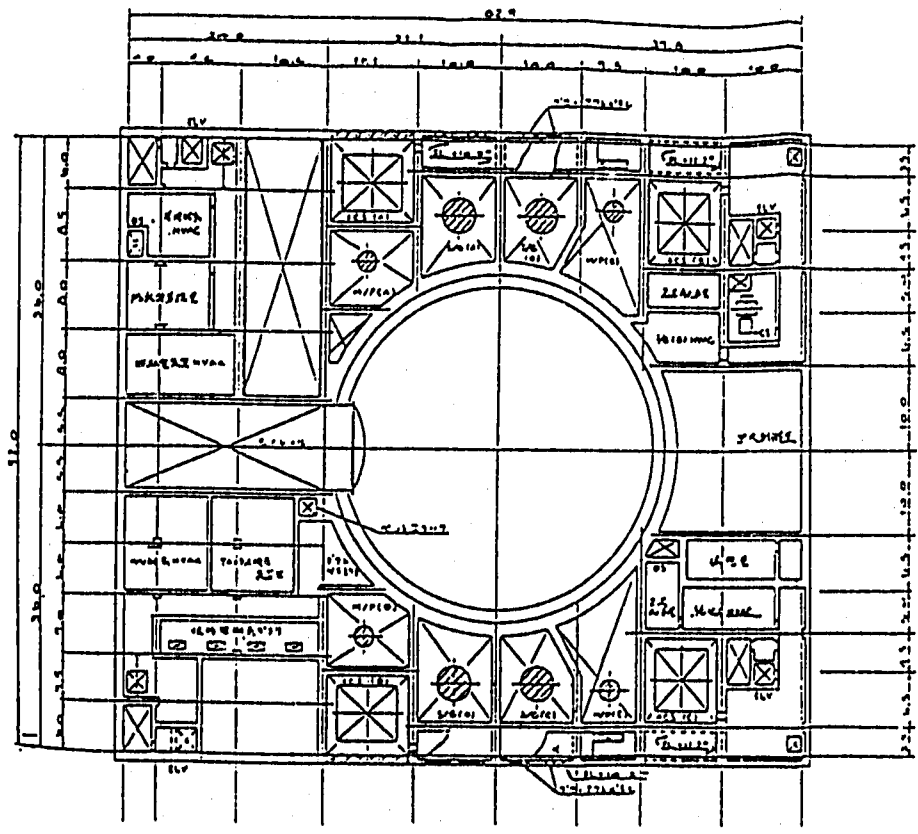


图3.1.1 平面图 (6) : FL+7.2m

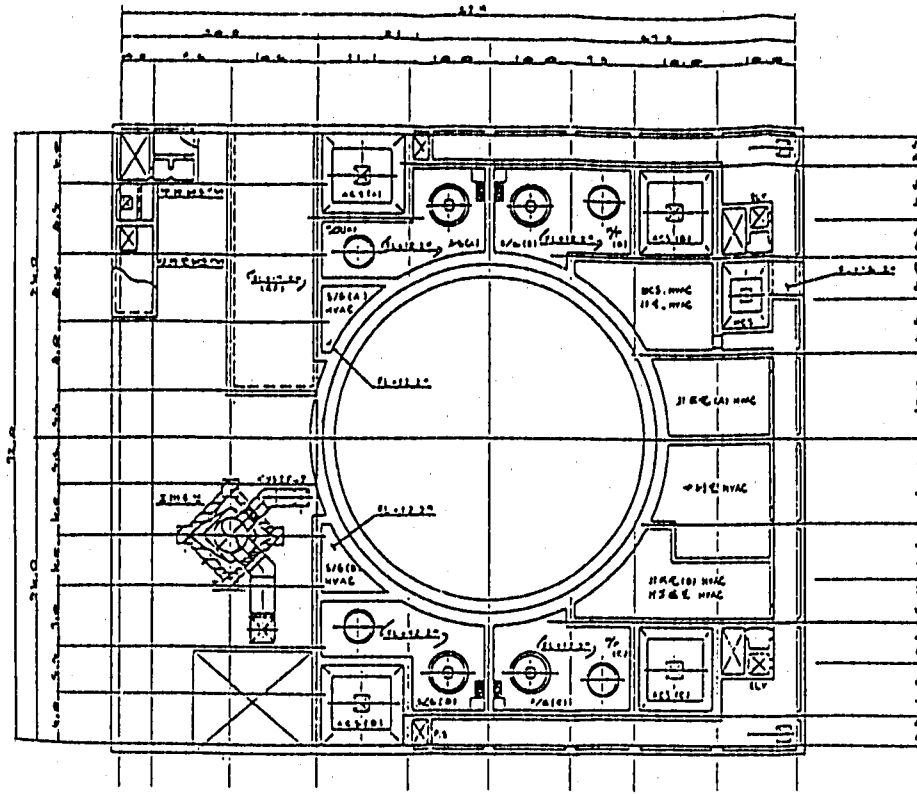


图3.1.1 平面图 (7) : FL+14.2m

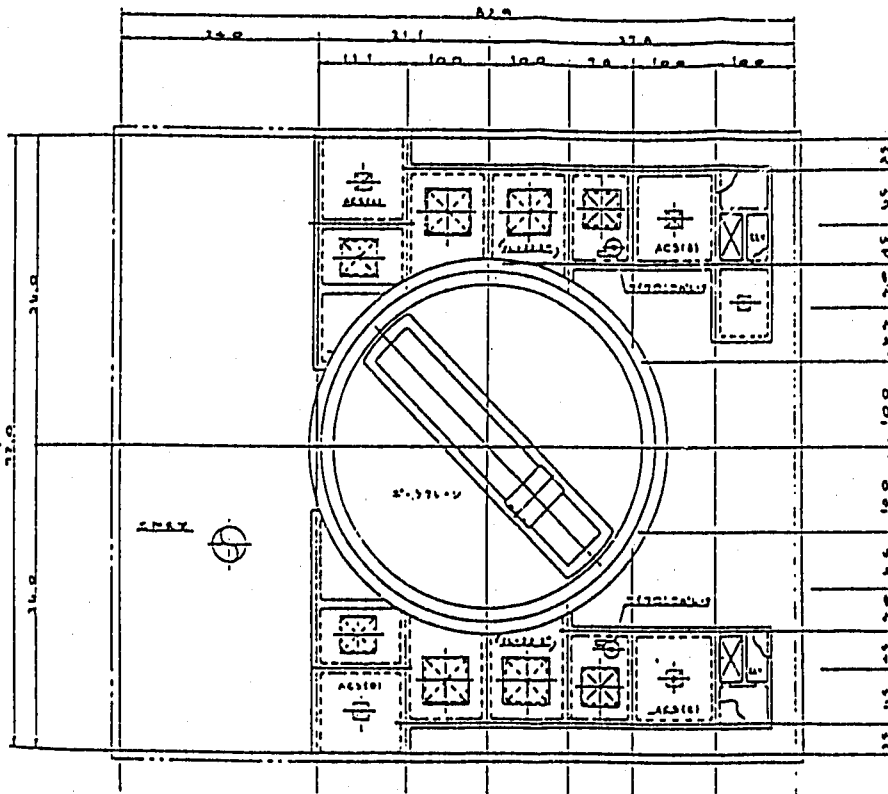


图3.1.1 平面图 (8) : FL+21.2m

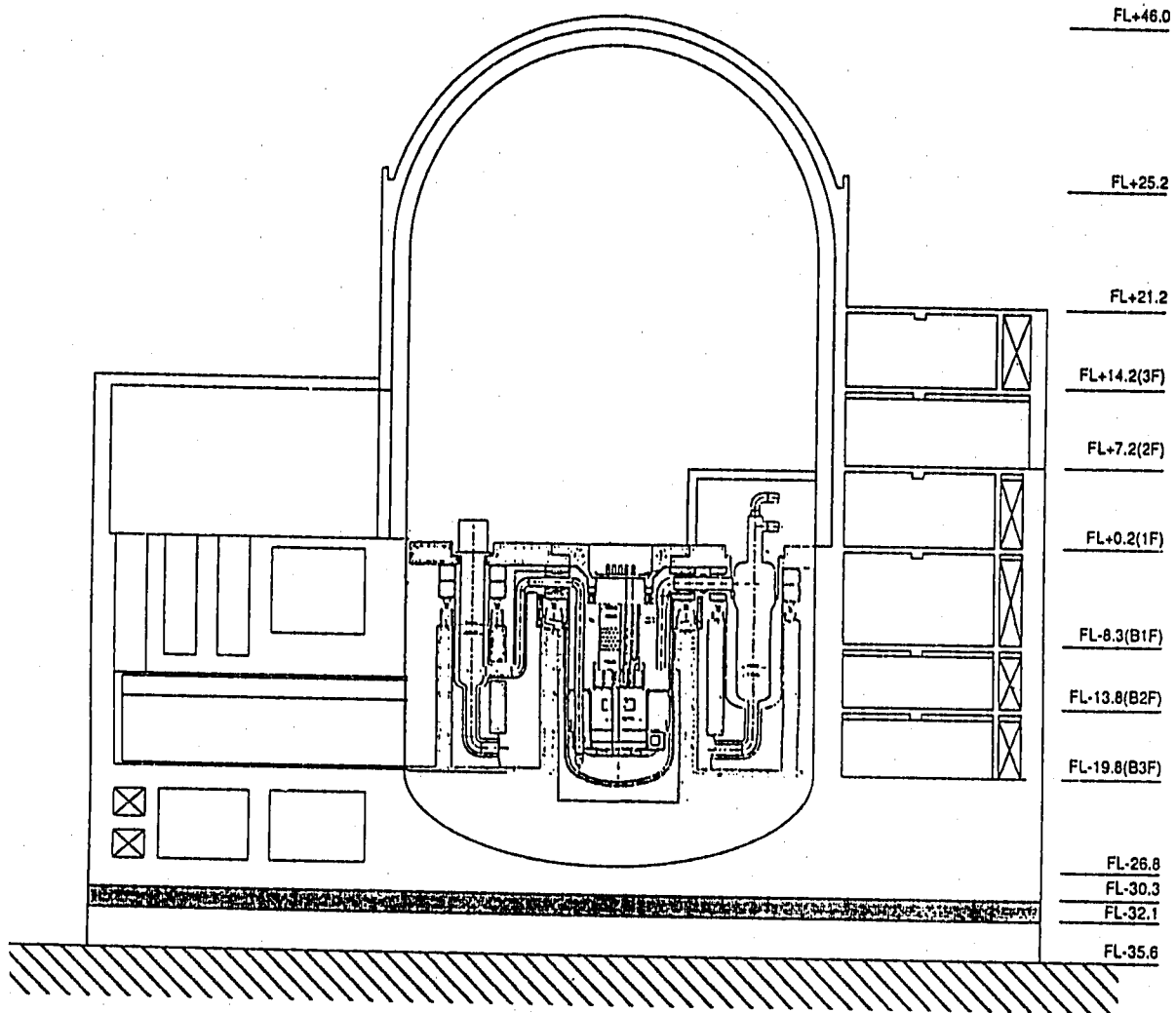


图3.1.2 断面图

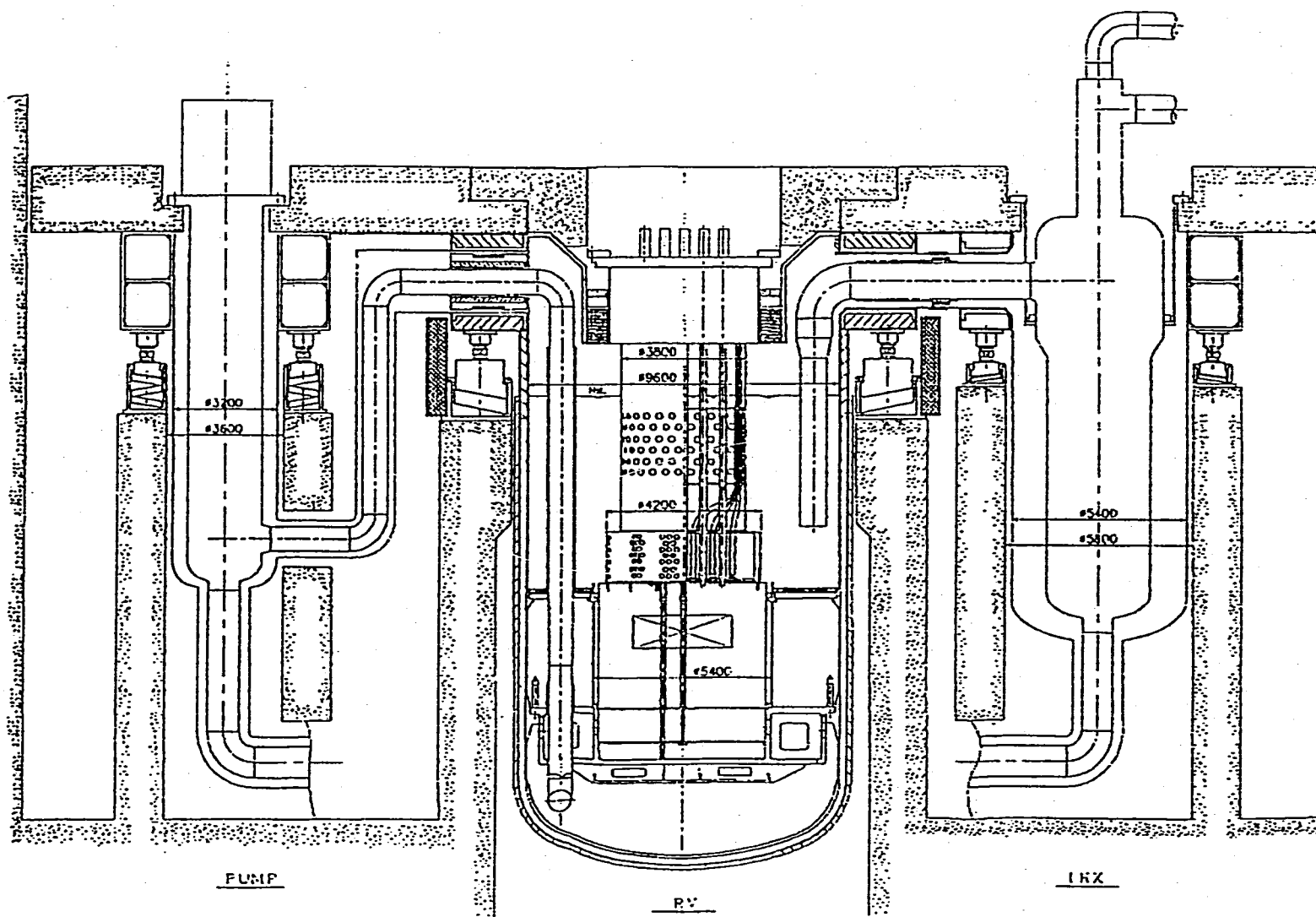
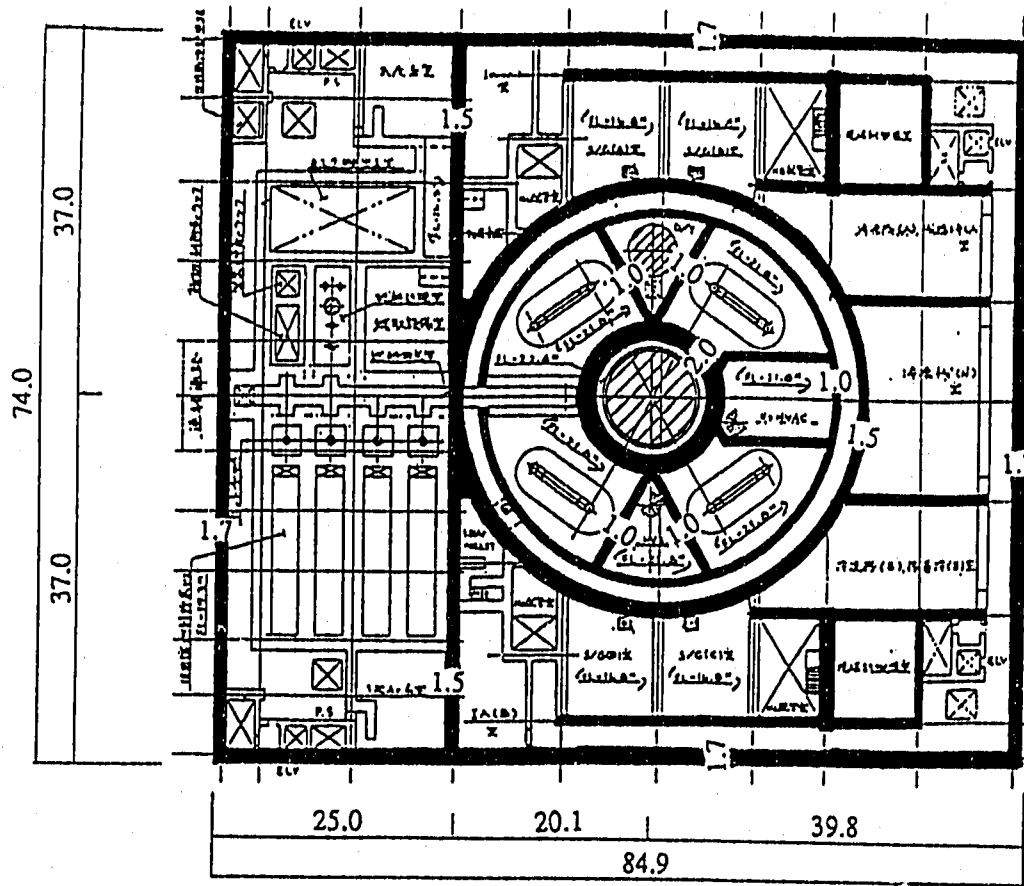
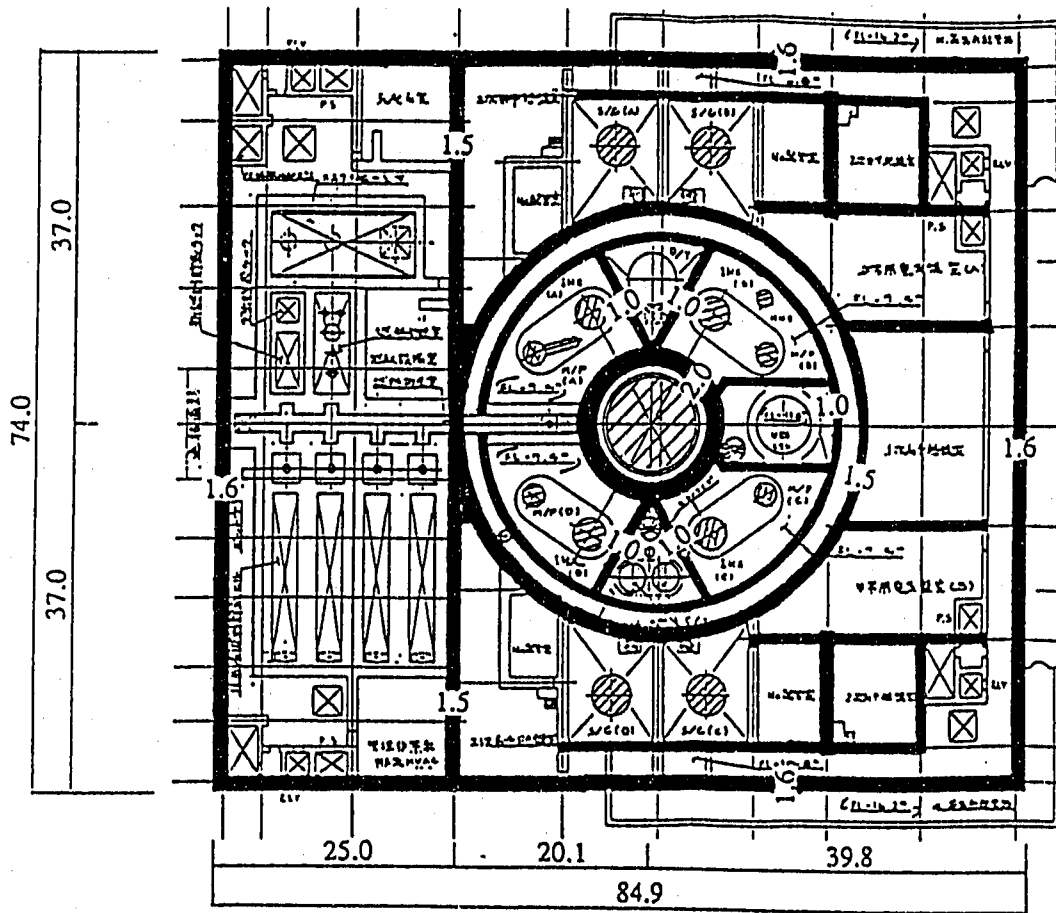


图3.1.3 上下機器免震構造

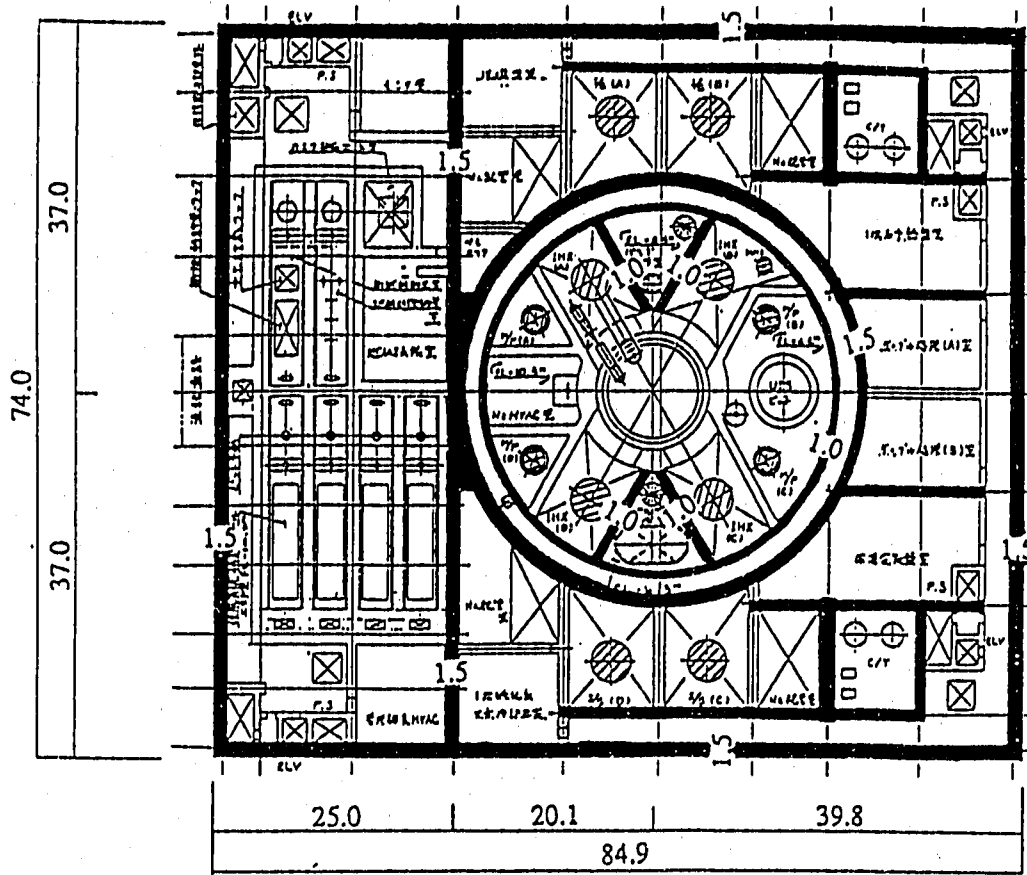


FL-19.8

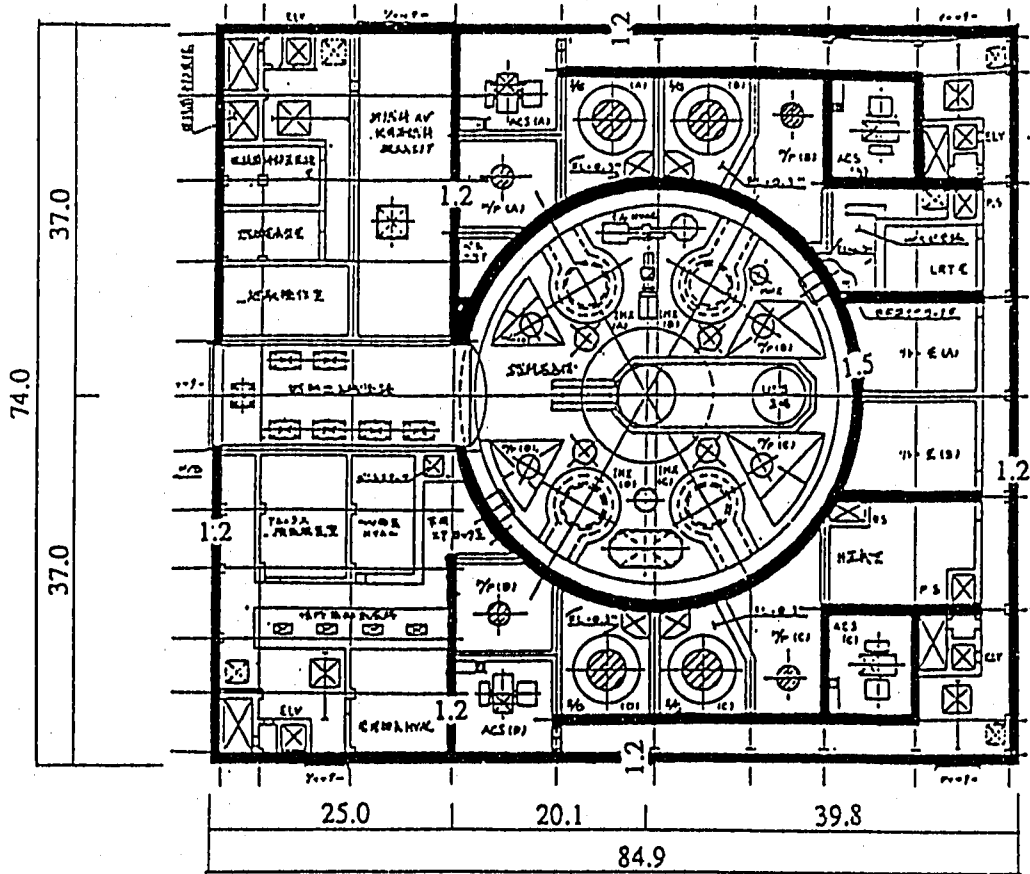


FL-13.8

図3.1.4 軸断面積の評価(1)

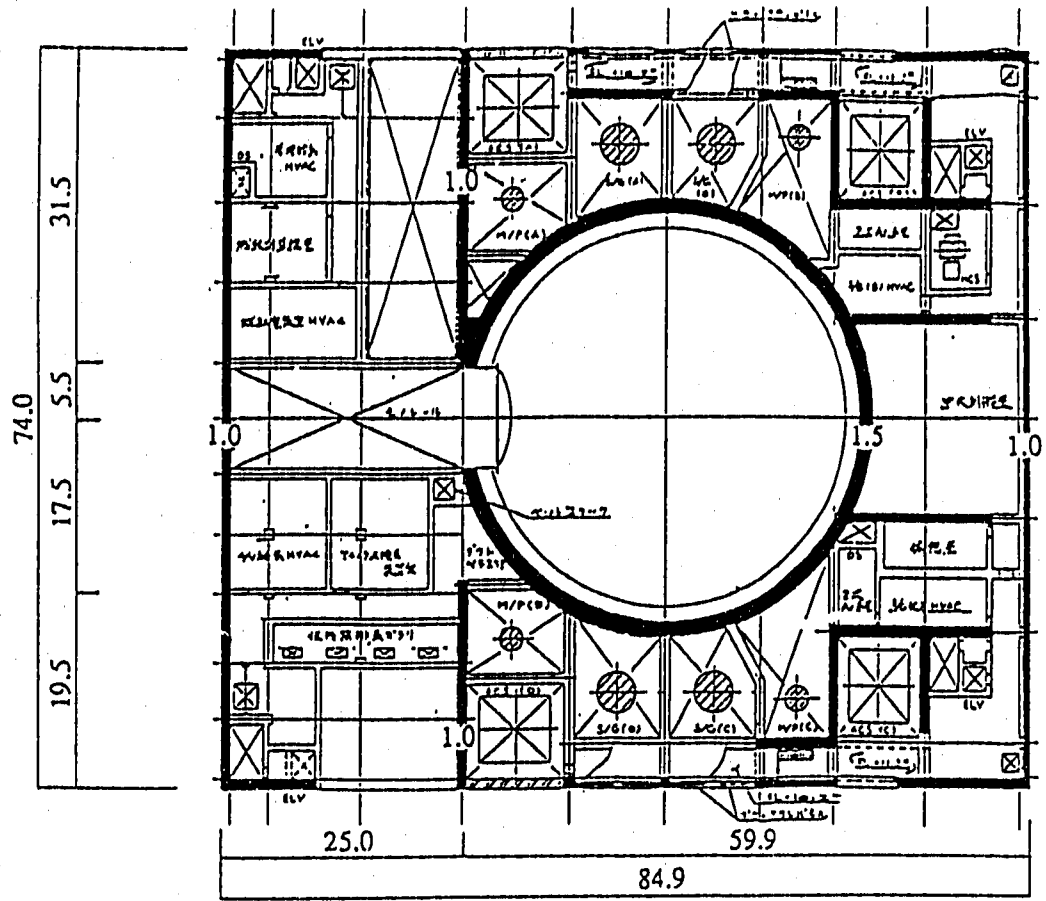


FL -8.3

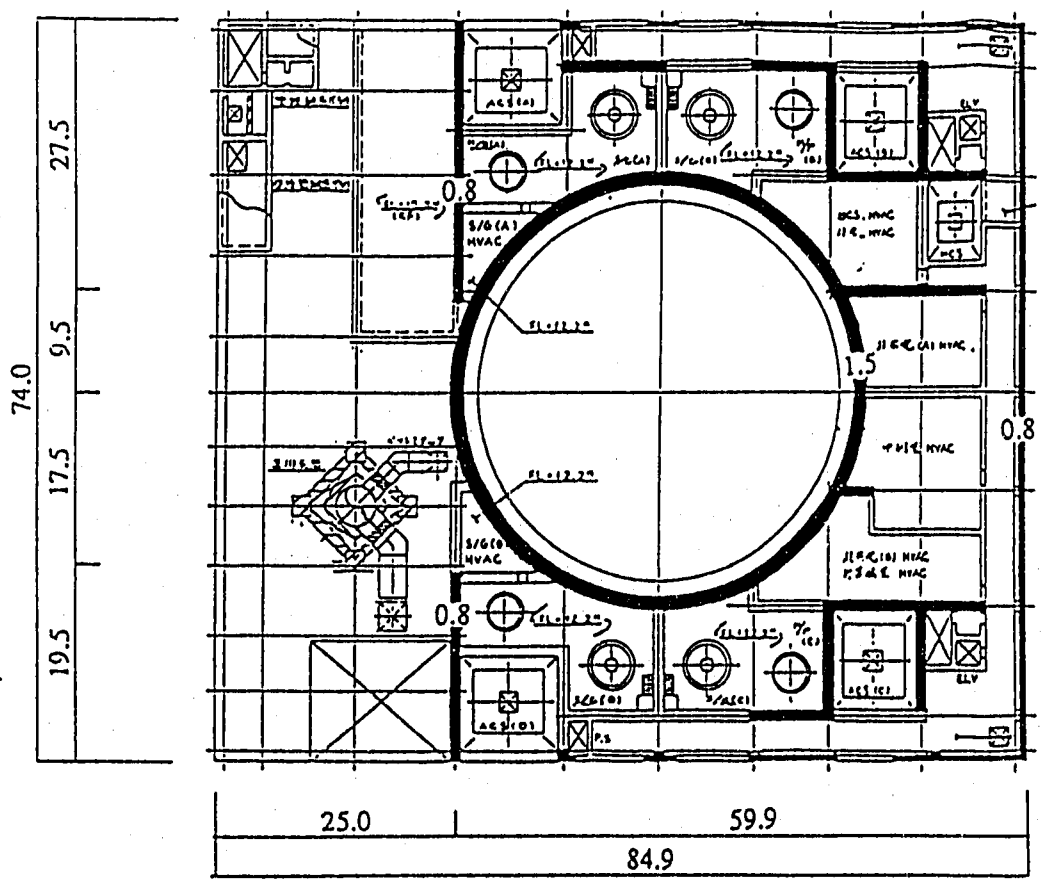


FL +0.2

図3.1.4 軸断面積の評価(2)

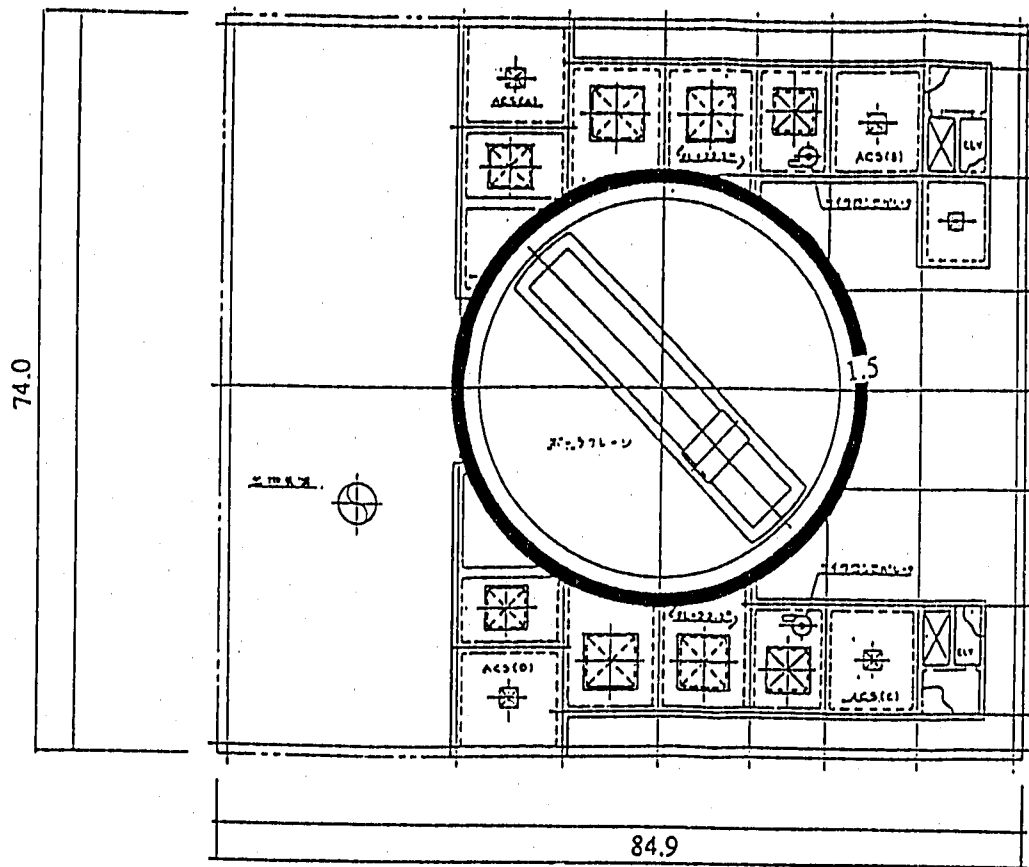


FL +7.2



FL +14.2

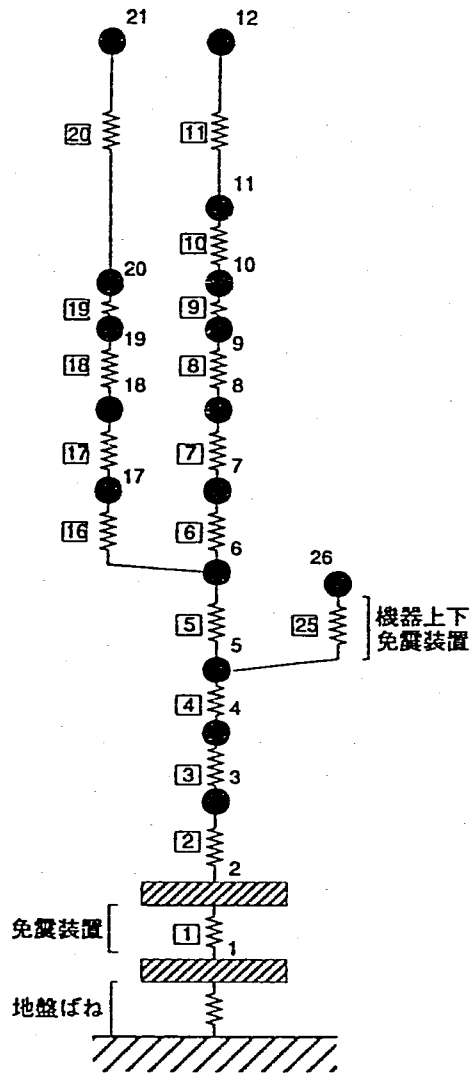
図3.1.4 軸断面積の評価(3)



FL +21.2

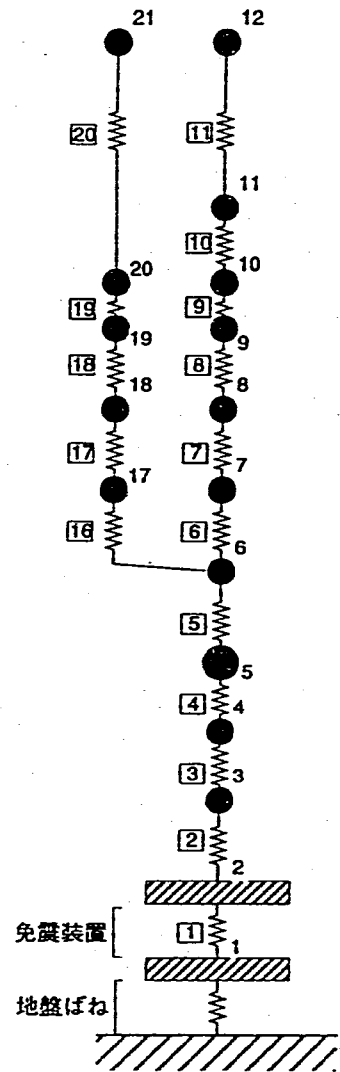
図3.1.4 軸断面積の評価(4)

FL+46.0
 FL+31.7
 FL+25.2
 FL+21.2
 FL+14.2(3F)
 FL+7.2(2F)
 FL+0.2(1F)
 FL-8.3(B1F)
 FL-13.8(B2F)
 FL-19.8(B3F)
 FL-26.8



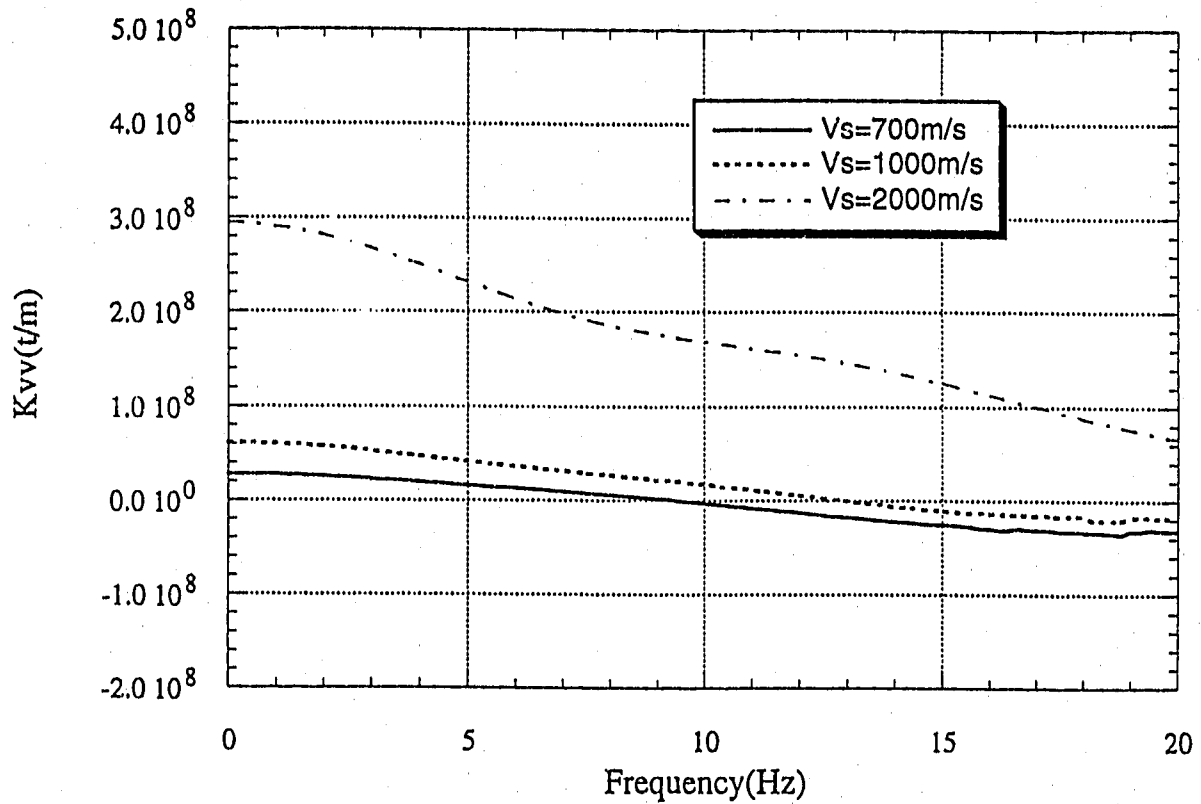
(1) コモンデッキ連成モデル

FL+46.0
 FL+31.7
 FL+25.2
 FL+21.2
 FL+14.2(3F)
 FL+7.2(2F)
 FL+0.2(1F)
 FL-8.3(B1F)
 FL-13.8(B2F)
 FL-19.8(B3F)
 FL-26.8

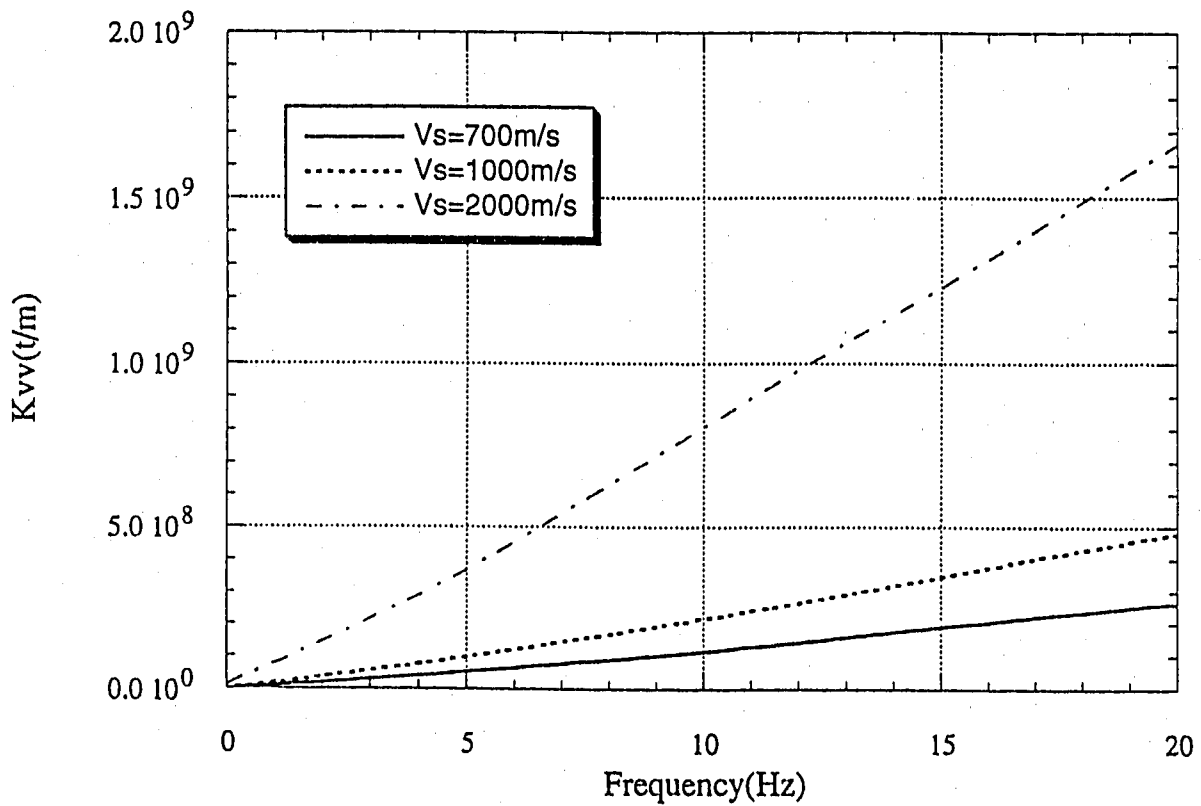


(2) コモンデッキ非連成モデル

図3.1.5 振動解析モデル

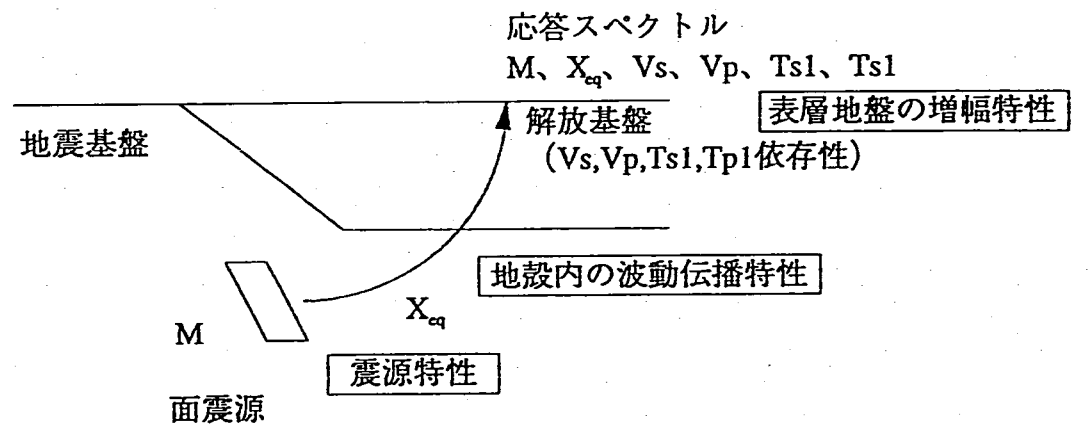
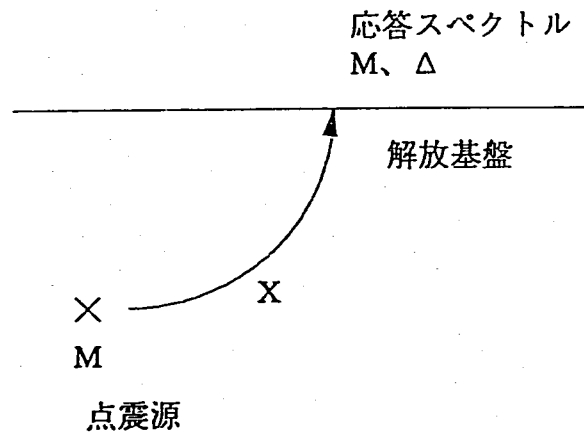


(1)Kvv Real.



(2)Kvv Imag.

图3.1.6 上下方向動的地盤ばね



任意の解放基盤における標準応答スペクトル = 地震基盤におけるスペクトル × 地盤増幅の補正項

(1) 現行手法
(水平動)

1993年度の上下地震動は現行手法による水平動のスペクトルをシフトして作成

(2) 本検討で用いる策定法
(水平動・上下動)

図3.1.7 地震動のモデル化の概念

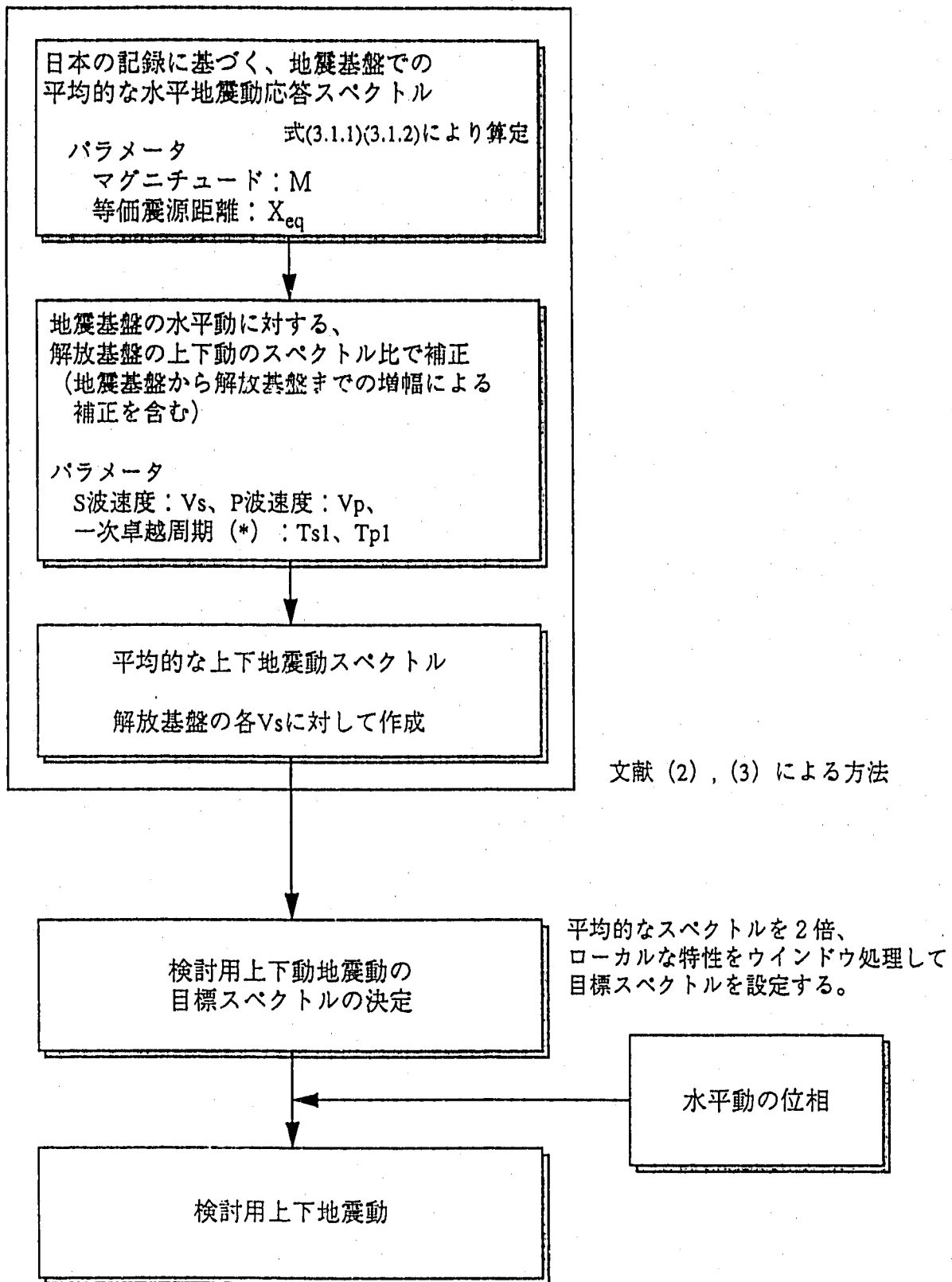


図3.1.8 検討用上下地震動の作成フロー

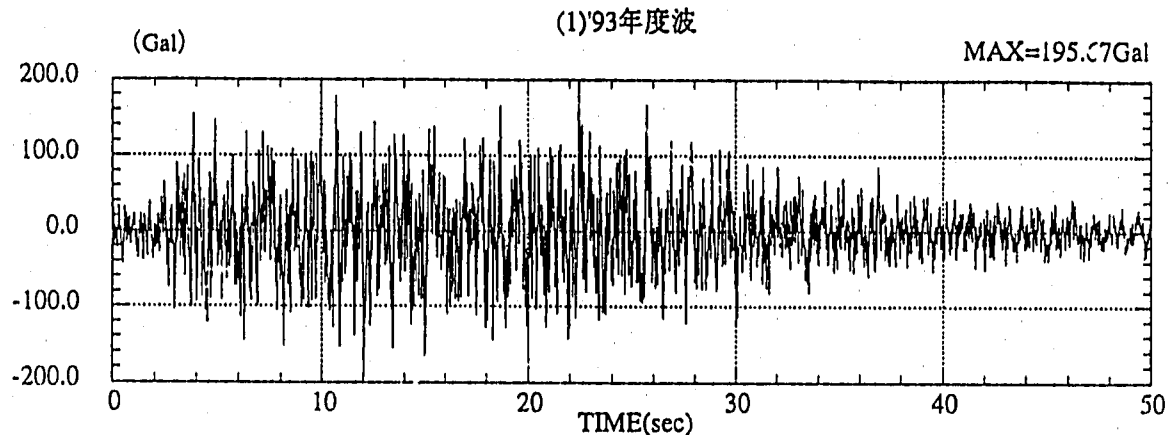
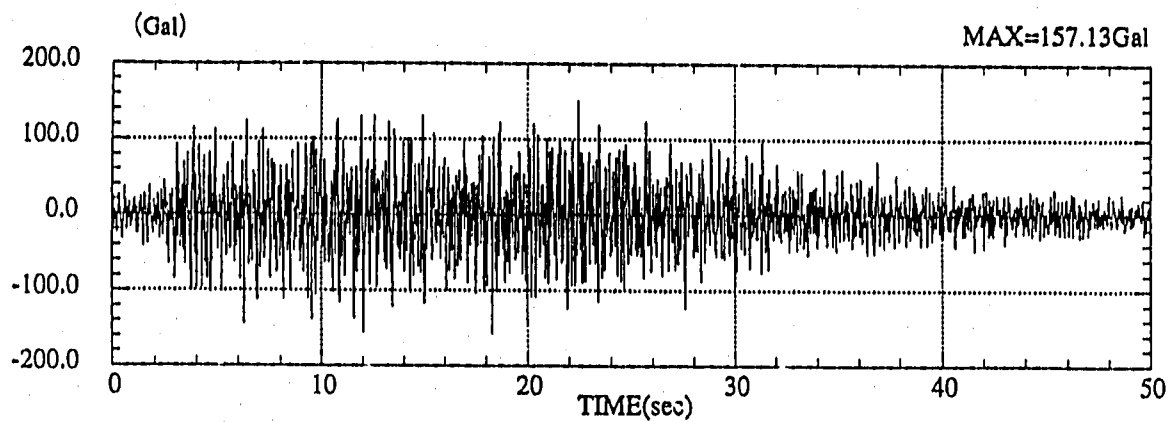
(*) 本検討ではサイトの地盤構造が明確でないため地盤の1次周期による補正は行わない。

表3.1.9 1993年度手法による上下地震動のコントロールポイント

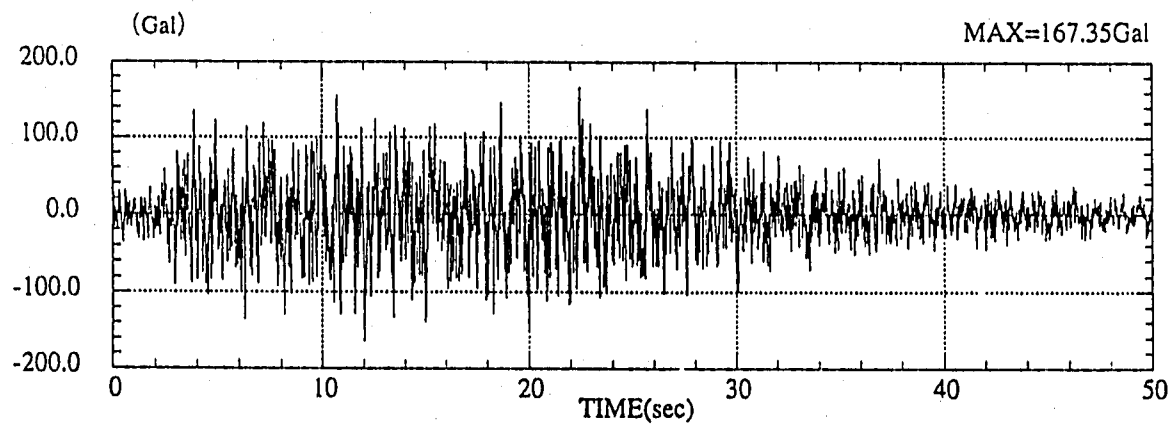
レベル		A	B	C	D	E
S1	周期(sec)	0.02	0.10	0.22	1.47	2.00
	速度応答スペクトル(kine)	0.30	6.74	16.04	16.04	13.61

表3.1.10 1994年度手法の上下地震動のパラメータ

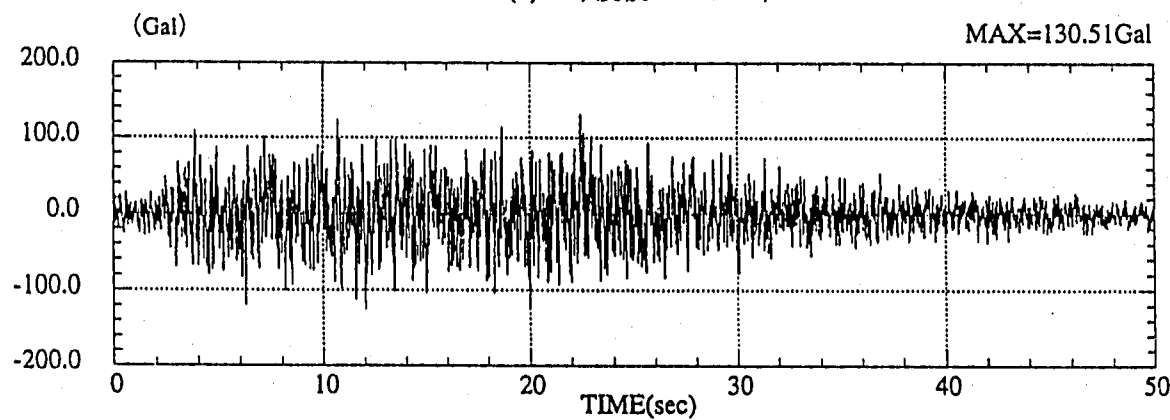
地震 レベル	マグニチュード M	震央距離 Δ (Km)
S1	8.0	57.0



(2)'94年度波 $V_s=700\text{m/s}$



(3)'94年度波 $V_s=1000\text{m/s}$



(4)'94年度波 $V_s=2000\text{m/s}$

図3.1.9 上下入力地震動の加速度時刻歴波形

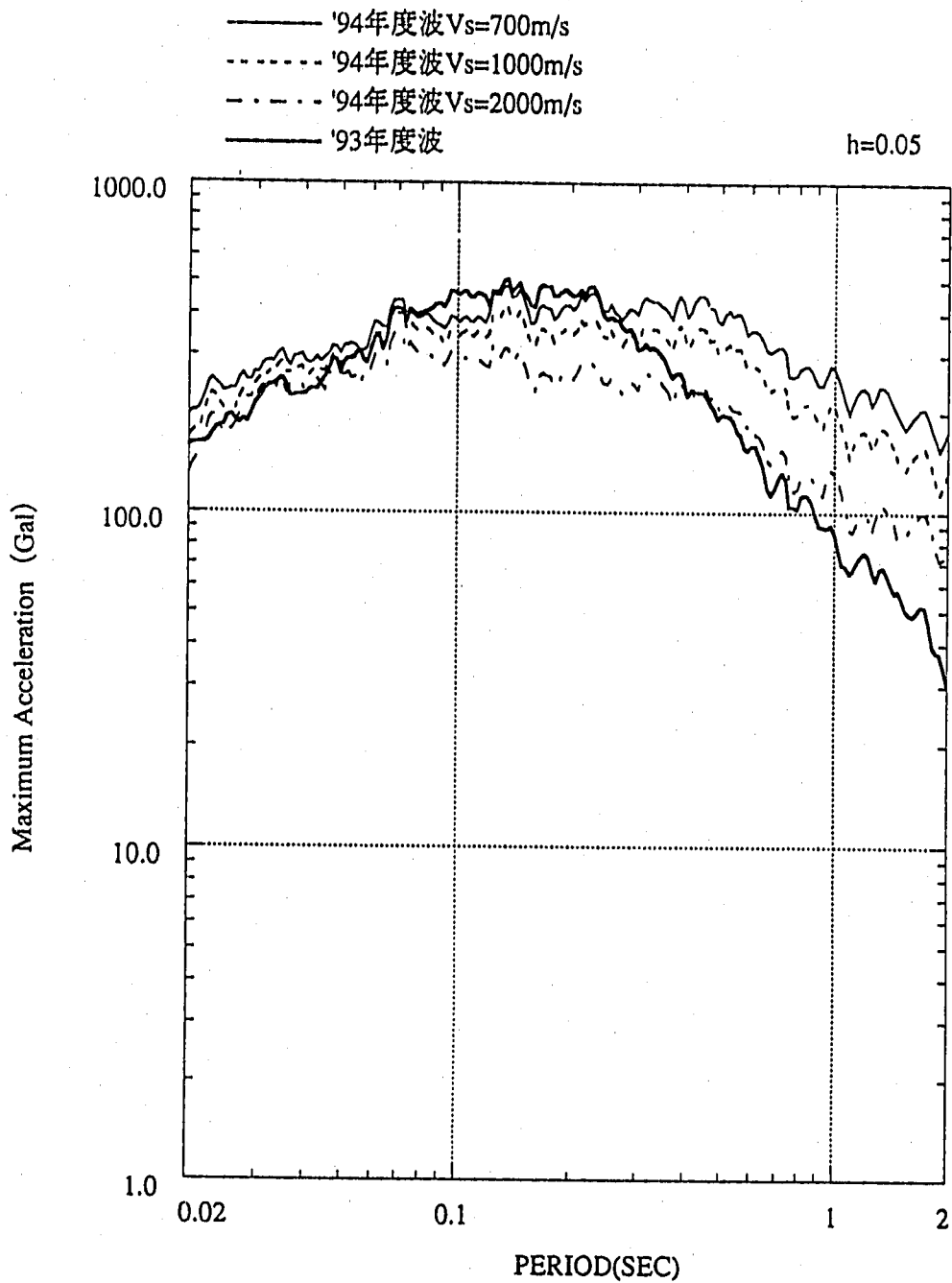
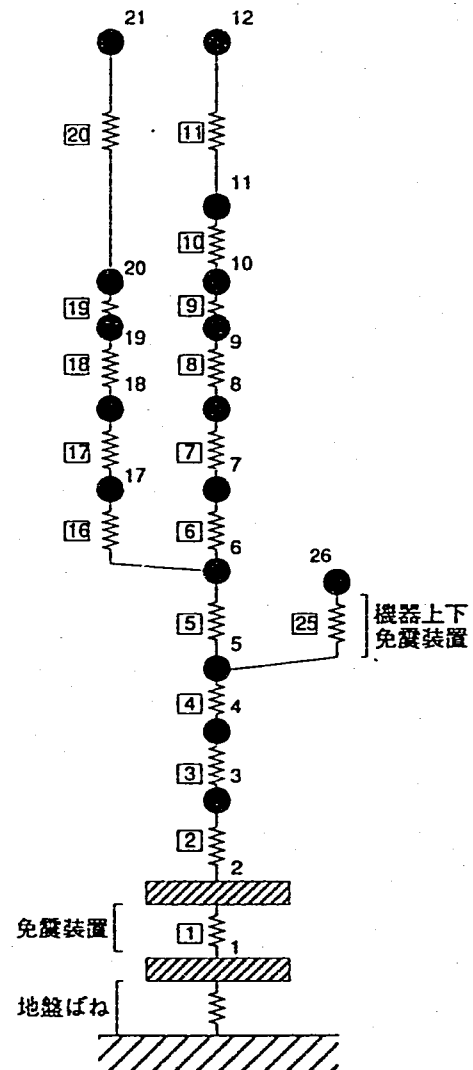


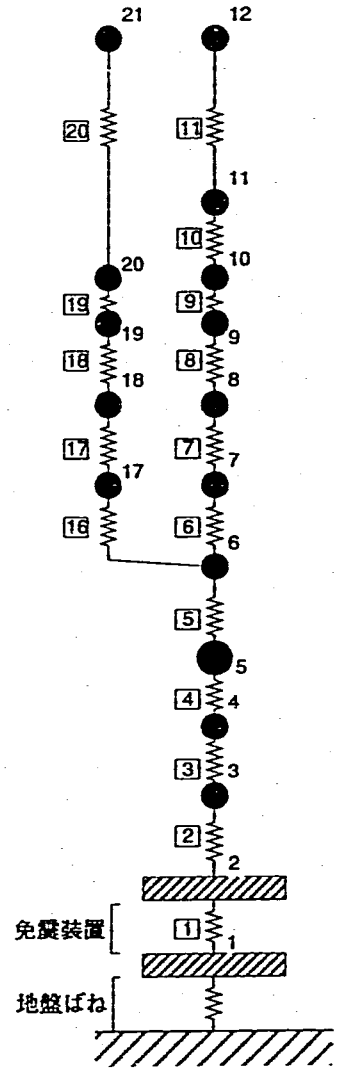
図3.1.10 上下入力地震動の加速度応答スペクトル (h=5%)

FL+46.0
 FL+31.7
 FL+25.2
 FL+21.2
 FL+14.2(2F)
 FL+7.2(2F)
 FL+0.2(1F)
 FL-8.3(B1F)
 FL-13.8(B2F)
 FL-19.8(B3F)
 FL-26.8



(1) コモンデッキ連成モデル

FL+46.0
 FL+31.7
 FL+25.2
 FL+21.2
 FL+14.2(3F)
 FL+7.2(2F)
 FL+0.2(1F)
 FL-8.3(B1F)
 FL-13.8(B2F)
 FL-19.8(B3F)
 FL-26.8

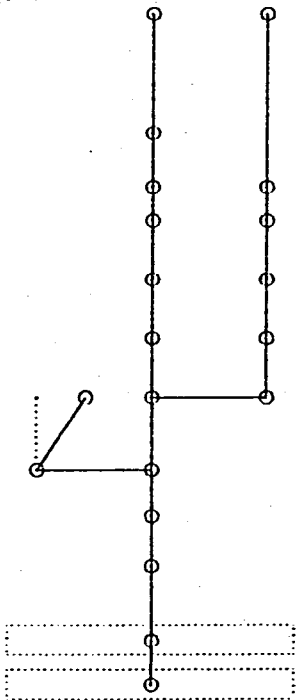


(2) コモンデッキ非連成モデル

図3.2.1 解析モデル

CASE1-1

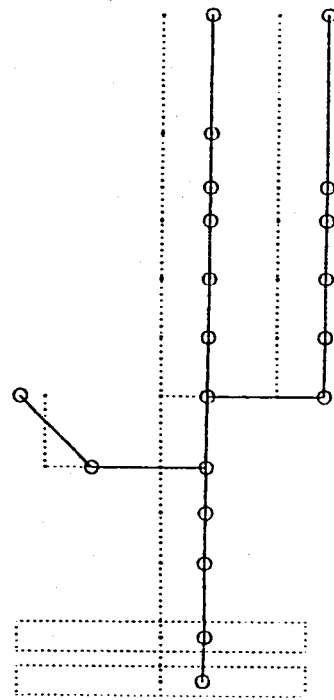
MODE NO=1
 T = 0.4039 (S)
 a = 1.5454
 h = 20.574 (X)



(a) 1次モード

CASE1-1

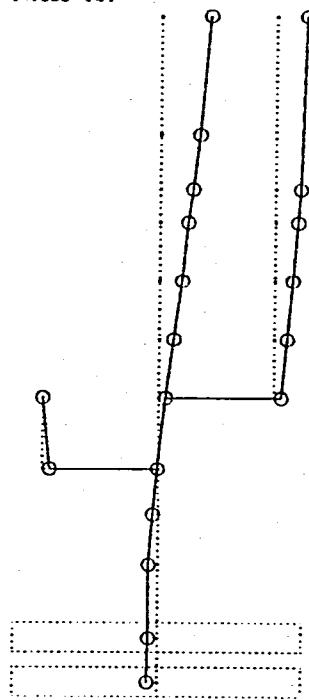
MODE NO=2
 T = 0.2389 (S)
 a = 1.0646
 h = 68.493 (X)



(b) 2次モード

CASE1-1

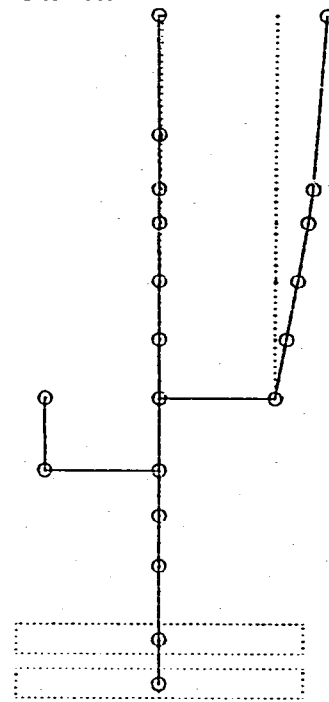
MODE NO=3
 T = 0.0512 (S)
 a = -0.1413
 h = 14.966 (X)



(c) 3次モード

CASE1-1

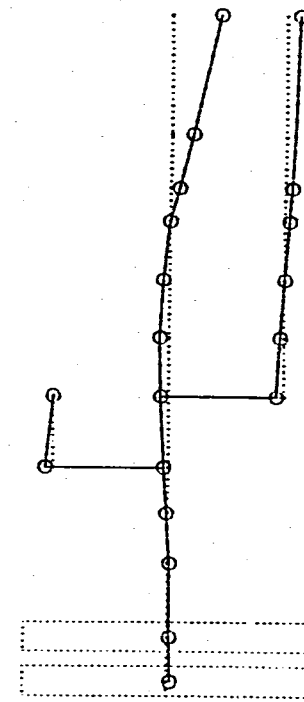
MODE NO=4
 T = 0.0436 (S)
 a = -0.0115
 h = 2.107 (X)



(d) 4次モード

CASE1-1

MODE NO=5
 T = 0.0310 (S)
 a = 0.0704
 h = 7.825 (X)

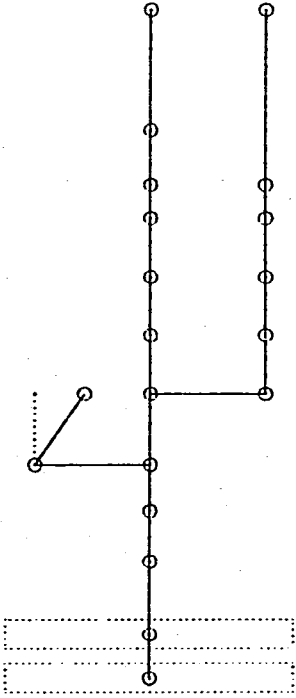


(e) 5次モード

図3.2.2 固有振動モード (Case1-1: コモンデッキ連成、Vs=700m/s、機器免震振動数2.5Hz)

CASE2-1

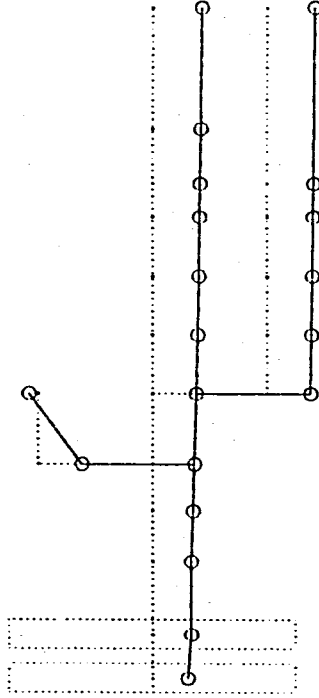
MODE NO=1
 $T = 0.4016$ (S)
 $a = 1.2185$
 $h = 20.048$ (X)



(a) 1次モード

CASE2-1

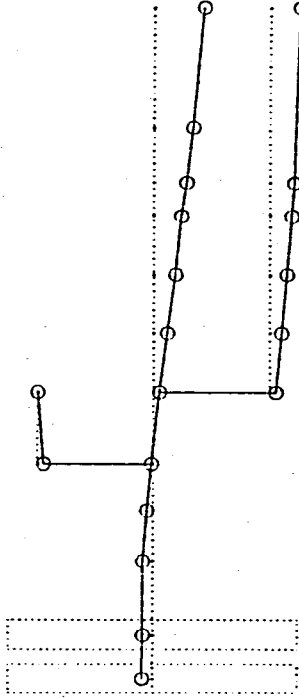
MODE NO=2
 $T = 0.1684$ (S)
 $a = 1.1897$
 $h = 63.593$ (X)



(b) 2次モード

CASE2-1

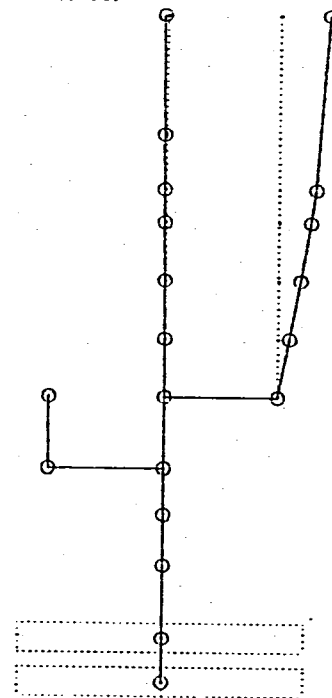
MODE NO=3
 $T = 0.0503$ (S)
 $a = -0.3015$
 $h = 19.918$ (X)



(c) 3次モード

CASE2-1

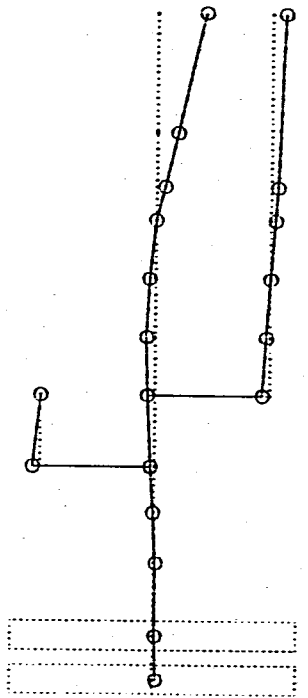
MODE NO=4
 $T = 0.0436$ (S)
 $a = -0.0272$
 $h = 2.108$ (X)



(d) 4次モード

CASE2-1

MODE NO=5
 $T = 0.0309$ (S)
 $a = 0.1508$
 $h = 9.198$ (X)

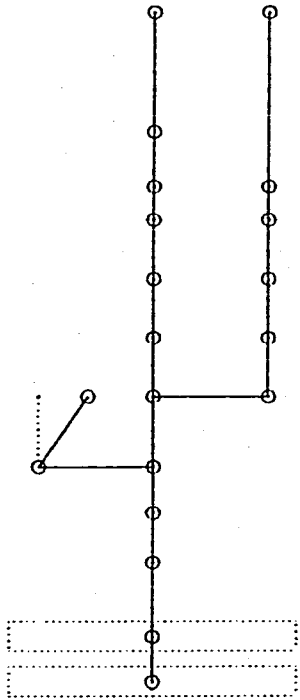


(e) 5次モード

図3.2.3 固有振動モード (Case2-1: コモンデッキ連成、 $V_s=1000$ m/s、機器免震振動数2.5Hz)

CASE3-1

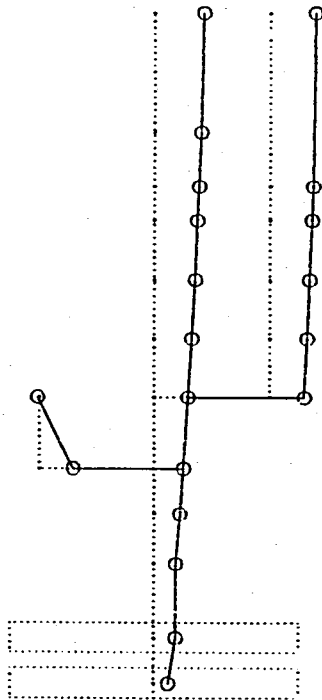
MODE NO=1
 T = 0.4006 (S)
 θ = 1.0631
 h = 19.969 (X)



(a) 1次モード

CASE3-1

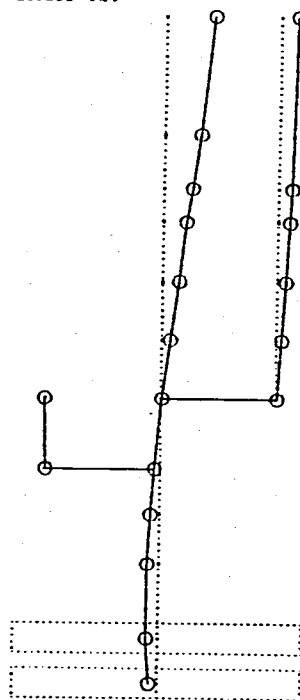
MODE NO=2
 T = 0.0970 (S)
 θ = 1.6679
 h = 33.442 (X)



(b) 2次モード

CASE3-1

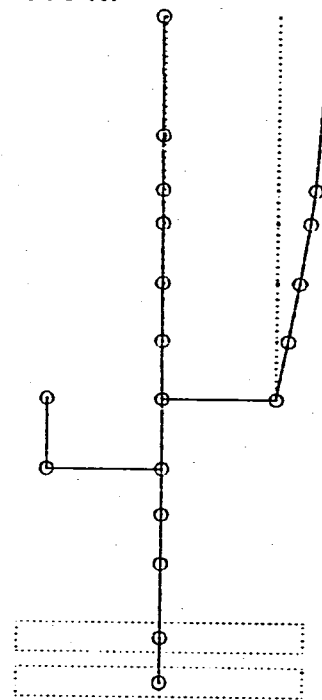
MODE NO=3
 T = 0.0457 (S)
 θ = -1.1081
 h = 29.509 (X)



(c) 3次モード

CASE3-1

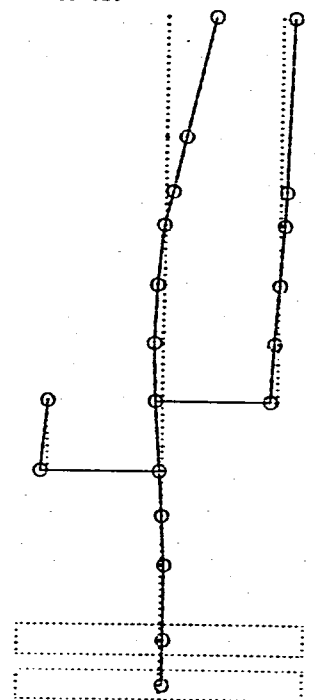
MODE NO=4
 T = 0.0436 (S)
 θ = -0.3020
 h = 2.178 (X)



(d) 4次モード

CASE3-1

MODE NO=5
 T = 0.0303 (S)
 θ = 0.6016
 h = 12.480 (X)

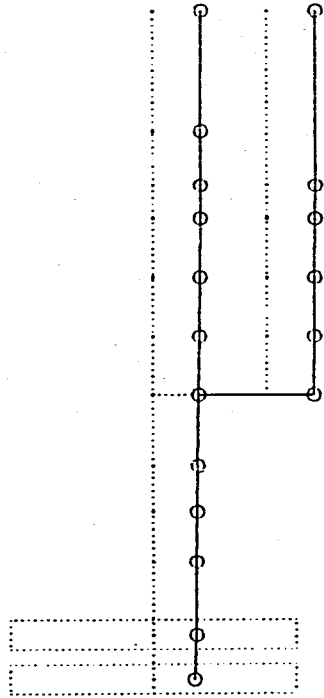


(e) 5次モード

図3.2.4 固有振動モード (Case3-1: コモンデッキ連成、 $V_s=2000\text{m/s}$ 、機器免震振動数 2.5Hz)

CASE1-2

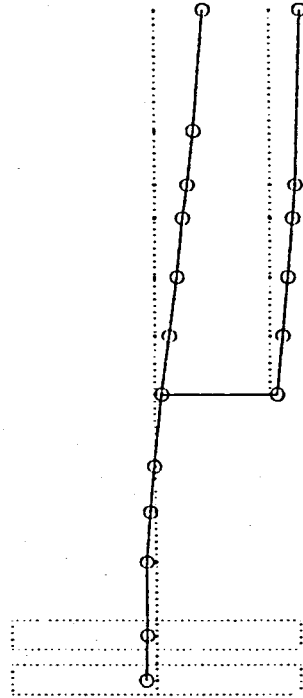
MODE NO=1
 $T = 0.2450$ (S)
 $\theta = 1.0922$
 $h = 67.696$ (X)



(a) 1次モード

CASE1-2

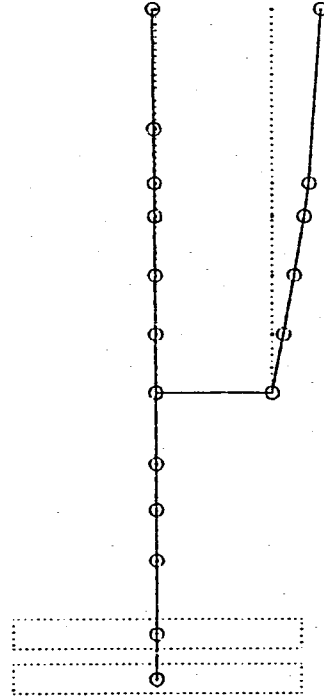
MODE NO=2
 $T = 0.0512$ (S)
 $\theta = -0.1410$
 $h = 14.847$ (X)



(b) 2次モード

CASE1-2

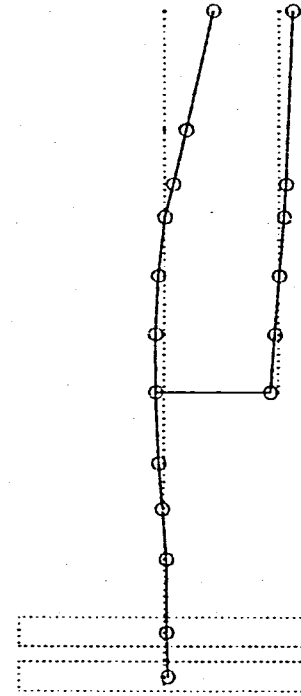
MODE NO=3
 $T = 0.0436$ (S)
 $\theta = -0.0116$
 $h = 2.107$ (X)



(c) 3次モード

CASE1-2

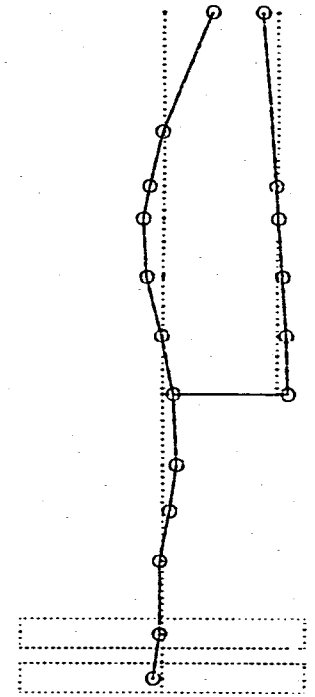
MODE NO=4
 $T = 0.0312$ (S)
 $\theta = 0.0754$
 $h = 8.292$ (X)



(d) 4次モード

CASE1-2

MODE NO=5
 $T = 0.0229$ (S)
 $\theta = -0.0396$
 $h = 10.247$ (X)

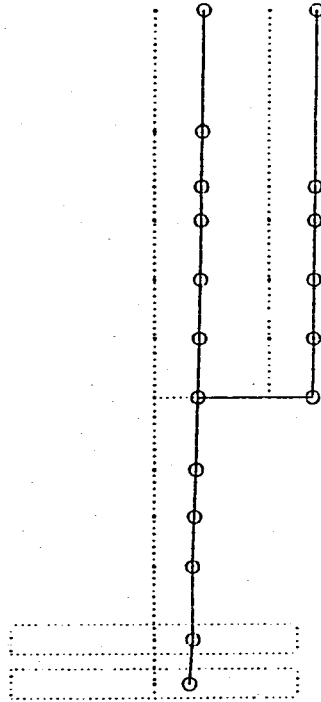


(e) 5次モード

図3.2.5 固有振動モード (Case1-2: コモンデッキ非連成、 $V_s=700$ m/s)

CASE2-2

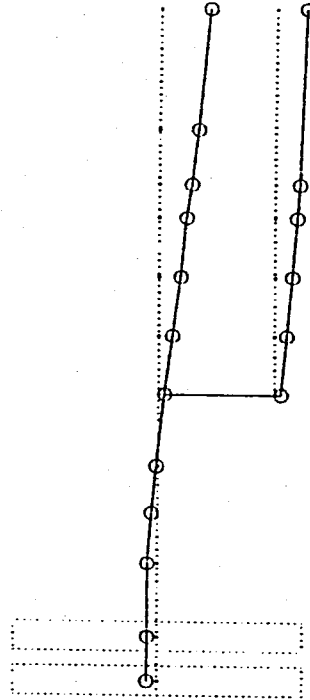
MODE NO=1
 $T = 0.1719$ (S)
 $\theta = 1.1947$
 $h = 62.437$ (X)



(a) 1次モード

CASE2-2

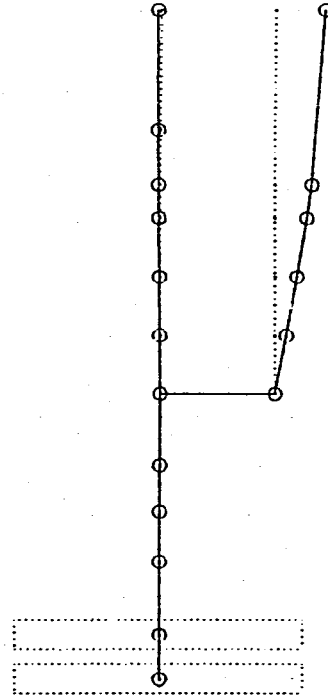
MODE NO=2
 $T = 0.0503$ (S)
 $\theta = -0.3002$
 $h = 19.668$ (X)



(b) 2次モード

CASE2-2

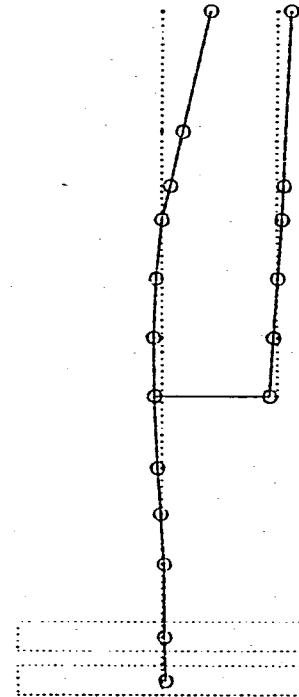
MODE NO=3
 $T = 0.0436$ (S)
 $\theta = -0.0275$
 $h = 2.109$ (X)



(c) 3次モード

CASE2-2

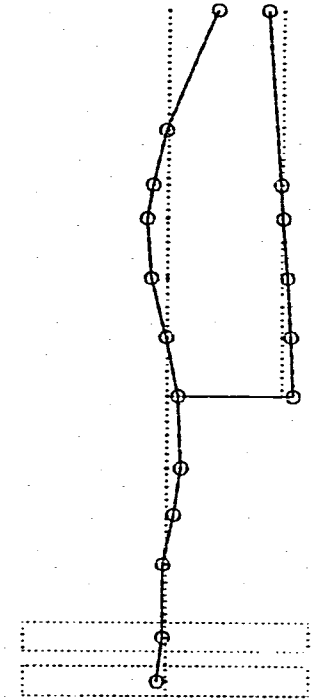
MODE NO=4
 $T = 0.0311$ (S)
 $\theta = 0.1611$
 $h = 9.888$ (X)



(d) 4次モード

CASE2-2

MODE NO=5
 $T = 0.0228$ (S)
 $\theta = -0.0830$
 $h = 12.625$ (X)

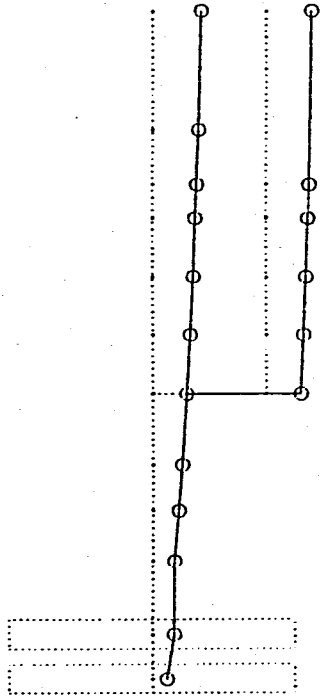


(e) 5次モード

図3.2.6 固有振動モード (Case2-2: コモンデッキ連成、 $V_s=1000\text{m/s}$)

CASE3-2

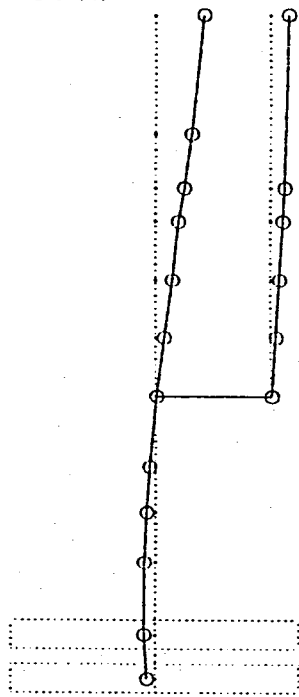
MODE NO=1
 $T = 0.0988$ (S)
 $\theta = 1.6527$ (°)
 $h = 32.953$ (cm)



(a) 1次モード

CASE3-2

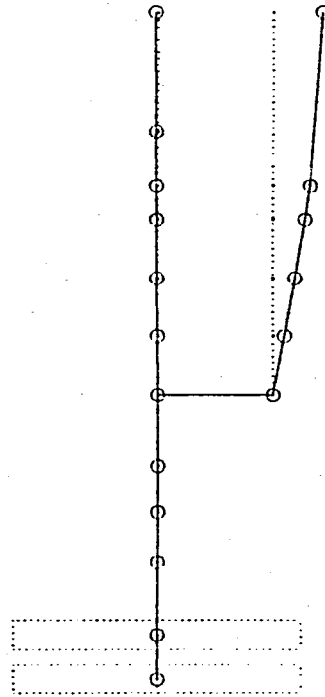
MODE NO=2
 $T = 0.0458$ (S)
 $\theta = -1.0947$ (°)
 $h = 28.270$ (cm)



(b) 2次モード

CASE3-2

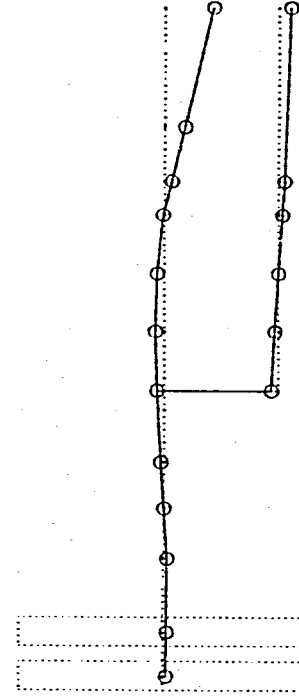
MODE NO=3
 $T = 0.0436$ (S)
 $\theta = -0.2803$ (°)
 $h = 2.165$ (cm)



(c) 3次モード

CASE3-2

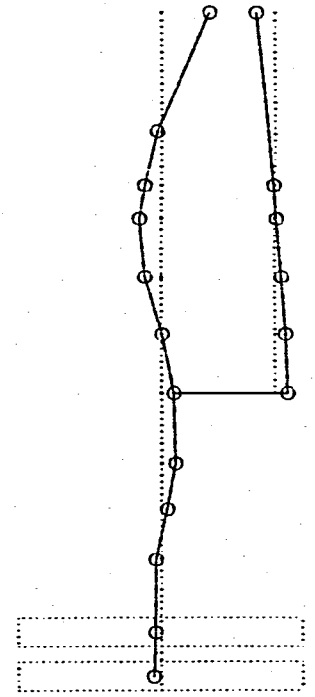
MODE NO=4
 $T = 0.0304$ (S)
 $\theta = 0.6329$ (°)
 $h = 13.461$ (cm)



(d) 4次モード

CASE3-2

MODE NO=5
 $T = 0.0223$ (S)
 $\theta = -0.2891$ (°)
 $h = 16.147$ (cm)

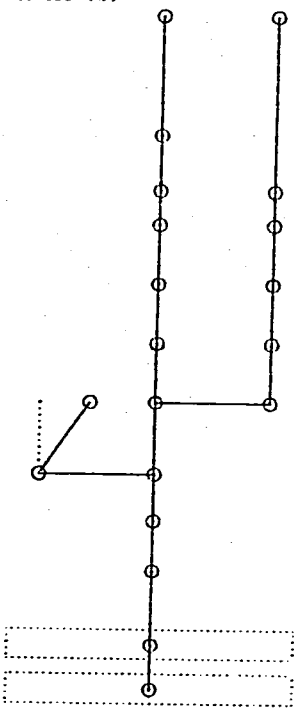


(e) 5次モード

図3.2.7 固有振動モード (Case3-2: コモンデッキ連成、 $V_s=2000\text{m/s}$)

CASE7-1

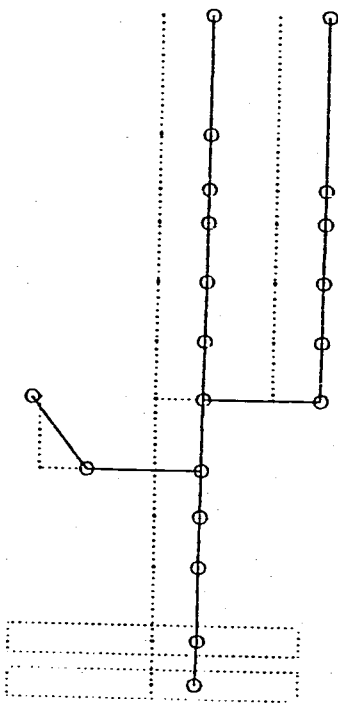
MODE NO=1
 T = 0.6262 (S)
 a = 1.1751
 h = 20.039 (Σ)



(a) 1次モード

CASE7-1

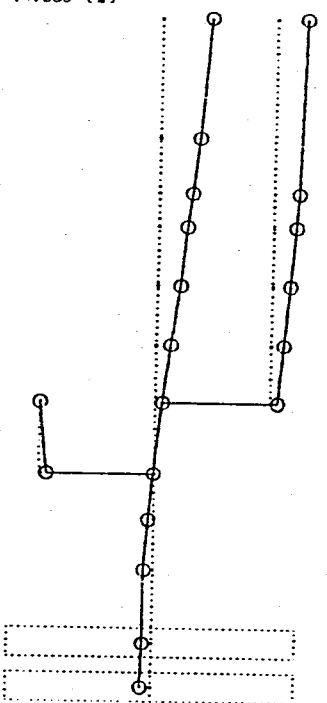
MODE NO=2
 T = 0.2404 (S)
 a = 1.0871
 h = 69.097 (Σ)



(b) 2次モード

CASE7-1

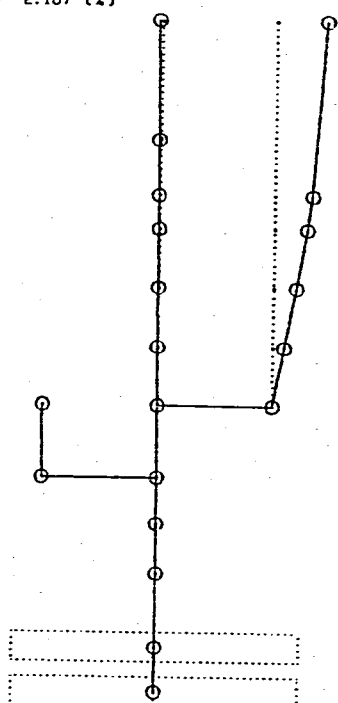
MODE NO=3
 T = 0.0512 (S)
 a = -0.1413
 h = 14.966 (Σ)



(c) 3次モード

CASE7-1

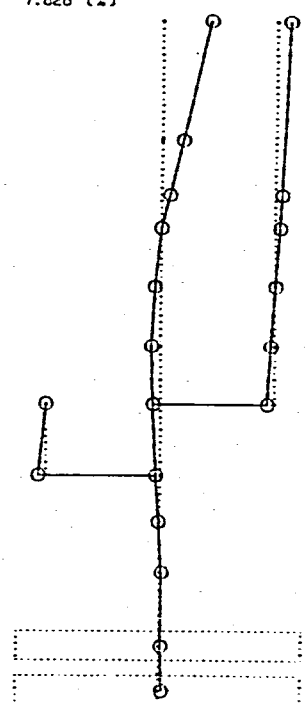
MODE NO=4
 T = 0.0436 (S)
 a = -0.0115
 h = 2.107 (Σ)



(d) 4次モード

CASE7-1

MODE NO=5
 T = 0.0310 (S)
 a = 0.0704
 h = 7.826 (Σ)

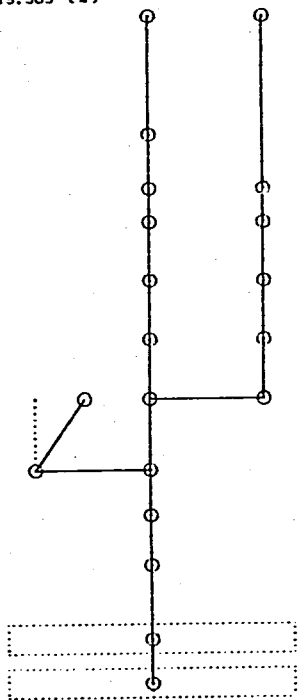


(e) 5次モード

図3.2.8 固有振動モード (Case7-1 : コモンデッキ連成、Vs=700m/s、機器免震振動数1.6Hz)

CASE8-1

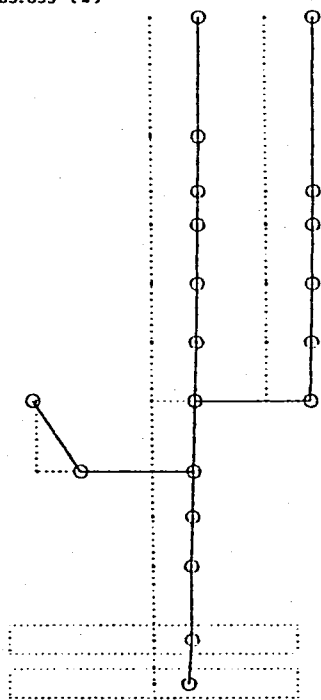
MODE NO=1
 $T = 0.6253$ (S)
 $\theta = 1.0805$
 $h = 19.989$ (Z)



(a) 1次モード

CASE8-1

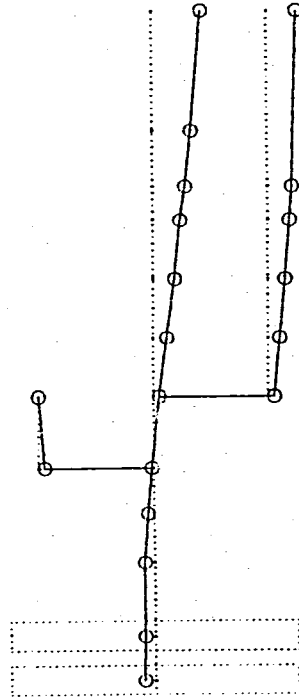
MODE NO=2
 $T = 0.1688$ (S)
 $\theta = 1.1952$
 $h = 63.695$ (Z)



(b) 2次モード

CASE8-1

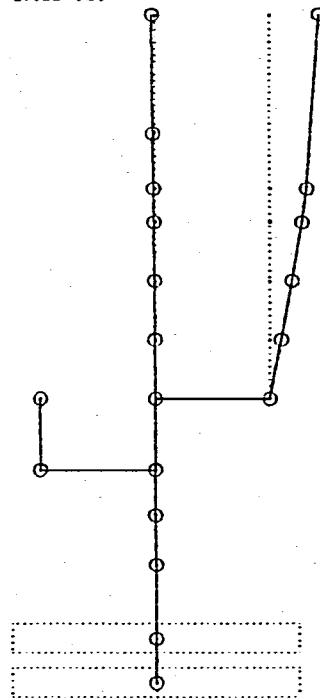
MODE NO=3
 $T = 0.0503$ (S)
 $\theta = -0.3015$
 $h = 19.916$ (Z)



(c) 3次モード

CASE8-1

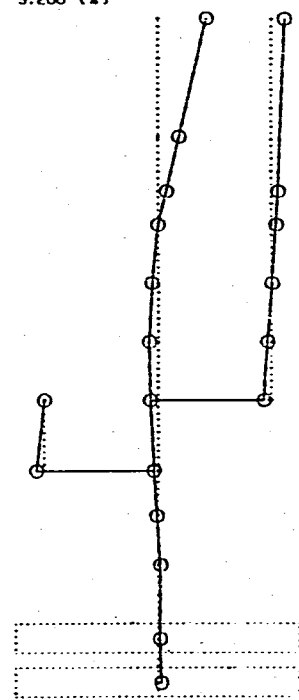
MODE NO=4
 $T = 0.0436$ (S)
 $\theta = -0.0272$
 $h = 2.108$ (Z)



(d) 4次モード

CASE8-1

MODE NO=5
 $T = 0.0309$ (S)
 $\theta = 0.1509$
 $h = 9.200$ (Z)

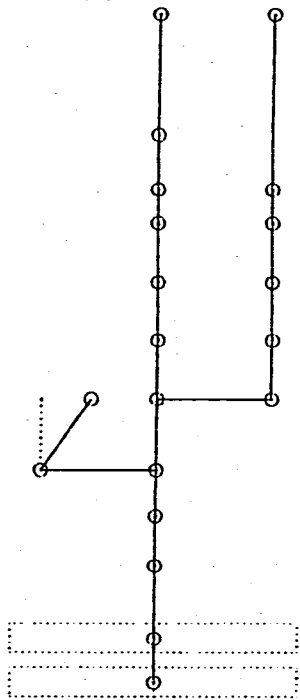


(e) 5次モード

図3.2.9 固有振動モード (Case8-1: コモンデッキ連成、 $V_s=1000\text{m/s}$ 、機器免震振動数1.6Hz)

CASE9-1

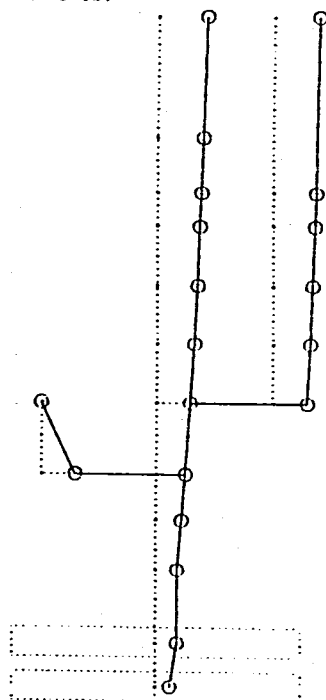
MODE NO=1
 $T = 0.6247$ (S)
 $\theta = 1.0251$
 $h = 19.985$ (%)



(a) 1次モード

CASE9-1

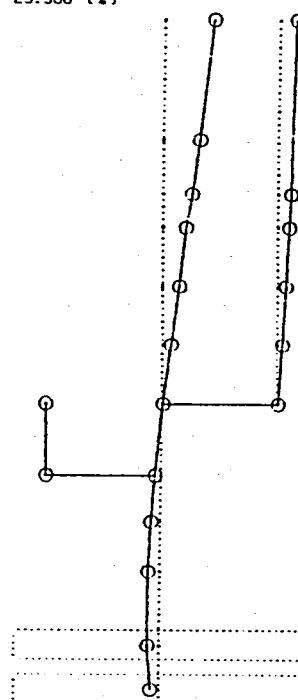
MODE NO=2
 $T = 0.0971$ (S)
 $\theta = 1.6697$
 $h = 33.443$ (%)



(b) 2次モード

CASE9-1

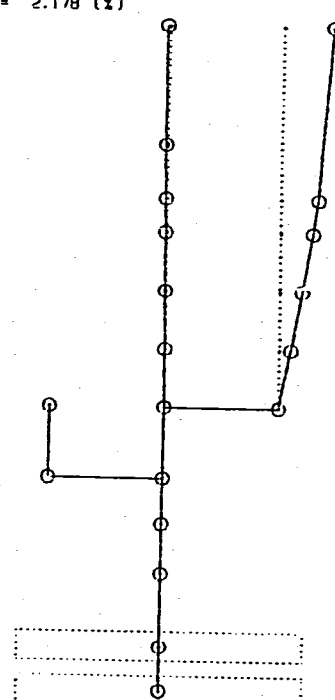
MODE NO=3
 $T = 0.0457$ (S)
 $\theta = -1.1081$
 $h = 29.500$ (%)



(c) 3次モード

CASE9-1

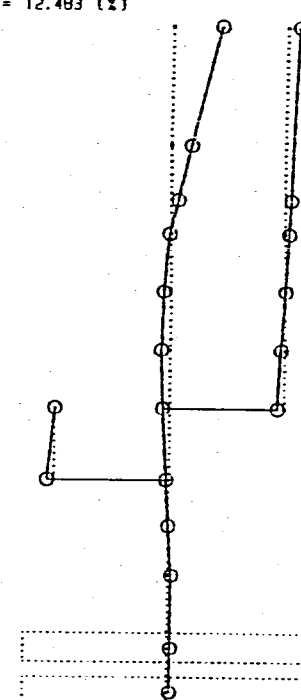
MODE NO=4
 $T = 0.0436$ (S)
 $\theta = -0.3018$
 $h = 2.178$ (%)



(d) 4次モード

CASE9-1

MODE NO=5
 $T = 0.0303$ (S)
 $\theta = 0.6017$
 $h = 12.483$ (%)

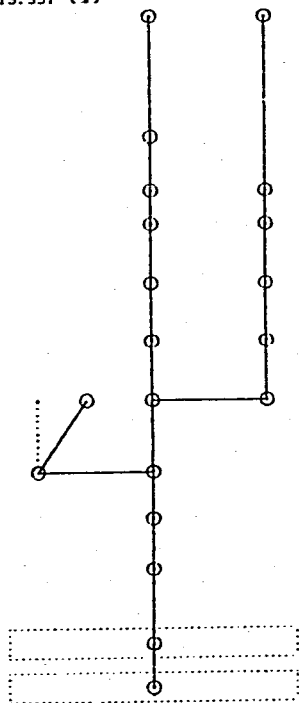


(e) 5次モード

図3.2.10 固有振動モード (Case9-1: コモンデッキ連成、 $V_s=2000$ m/s、機器免震振動数1.6Hz)

CASE10-1

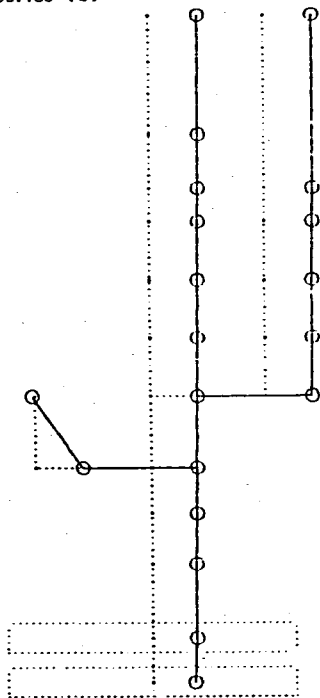
MODE NO=1
 T = 1.0015 (S)
 a = 1.0522
 h = 19.991 (Σ)



(a) 1次モード

CASE10-1

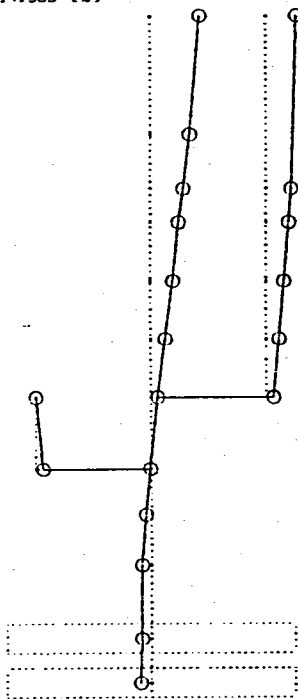
MODE NO=2
 T = 0.2408 (S)
 a = 1.0919
 h = 69.188 (Σ)



(b) 2次モード

CASE10-1

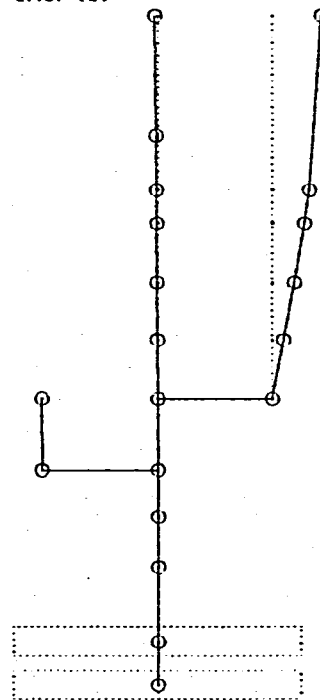
MODE NO=3
 T = 0.0512 (S)
 a = -0.1413
 h = 14.965 (Σ)



(c) 3次モード

CASE10-1

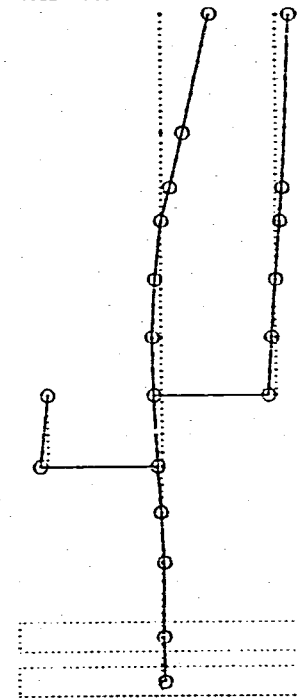
MODE NO=4
 T = 0.0436 (S)
 a = -0.0115
 h = 2.107 (Σ)



(d) 4次モード

CASE10-1

MODE NO=5
 T = 0.0310 (S)
 a = 0.0705
 h = 7.827 (Σ)

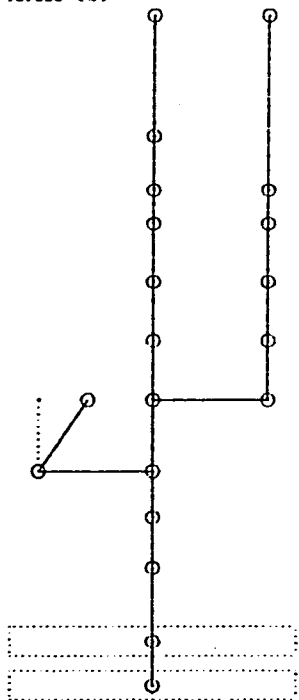


(e) 5次モード

図3.2.11 固有振動モード (Case10-1: コモンデッキ連成、Vs=700m/s、機器免震振動数1.0Hz)

CASE11-1

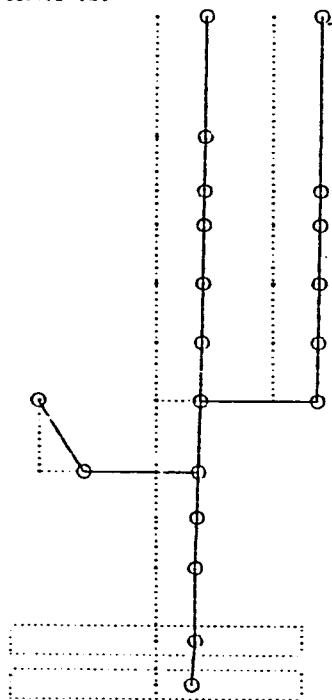
MODE NO=1
 T = 1.0010 (S)
 θ = 1.0300
 h = 19.990 (Σ)



(a) 1次モード

CASE11-1

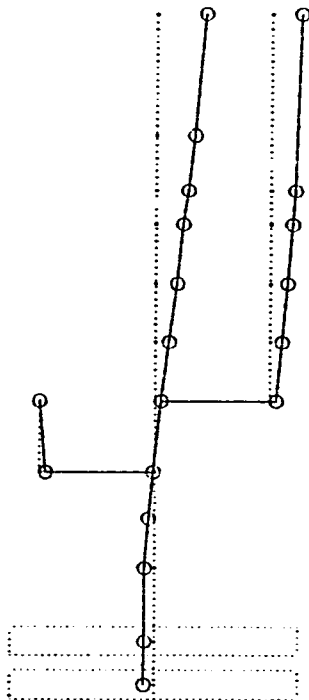
MODE NO=2
 T = 0.1690 (S)
 θ = 1.1982
 h = 63.718 (Σ)



(b) 2次モード

CASE11-1

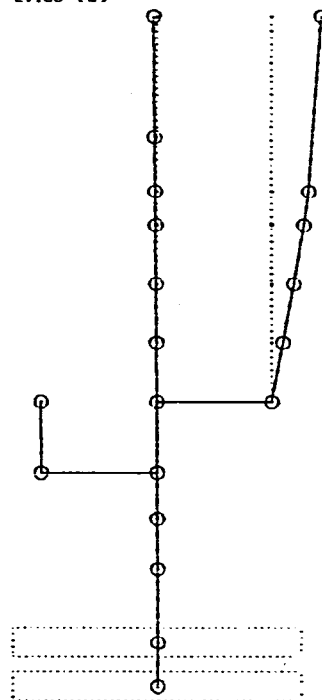
MODE NO=3
 T = 0.0503 (S)
 θ = -0.3015
 h = 19.915 (Σ)



(c) 3次モード

CASE11-1

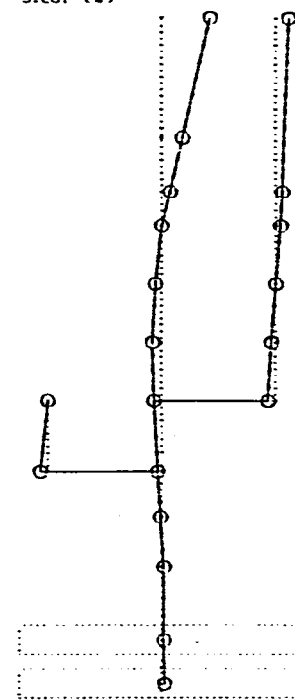
MODE NO=4
 T = 0.0436 (S)
 θ = -0.0272
 h = 2.108 (Σ)



(d) 4次モード

CASE11-1

MODE NO=5
 T = 0.0309 (S)
 θ = 0.1509
 h = 9.201 (Σ)

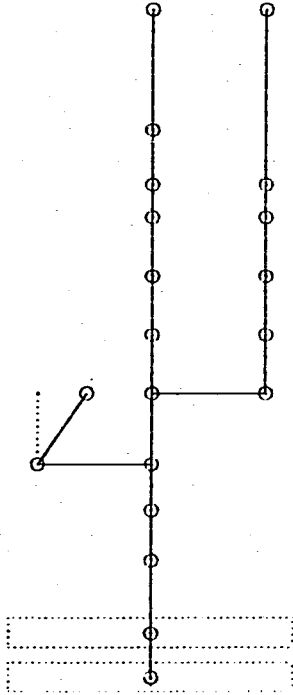


(e) 5次モード

図3.2.12 固有振動モード (Case11-1: コモンデッキ連成、Vs=1000m/s、機器免震振動数1.0Hz)

CASE12-1

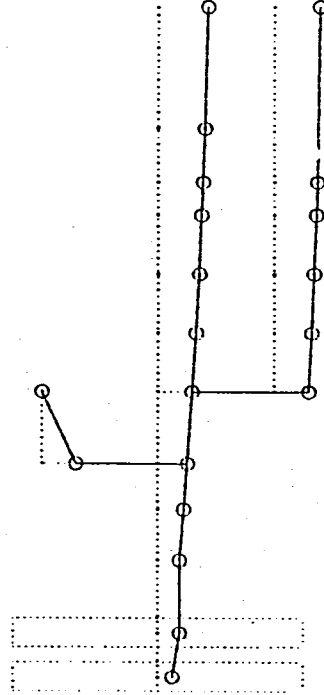
MODE NO=1
T = 1.0006 (S)
a = 1.0096
h = 19.994 (Σ)



(a) 1次モード

CASE12-1

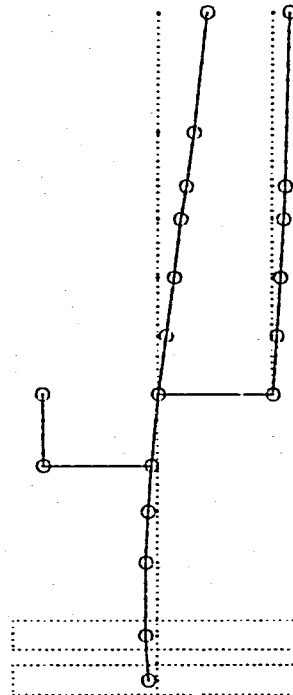
MODE NO=2
T = 0.0971 (S)
a = 1.6703
h = 33.443 (Σ)



(b) 2次モード

CASE12-1

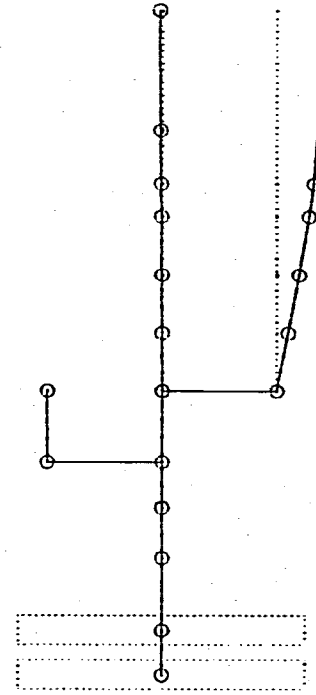
MODE NO=3
T = 0.0457 (S)
a = -1.1081
h = 29.496 (Σ)



(c) 3次モード

CASE12-1

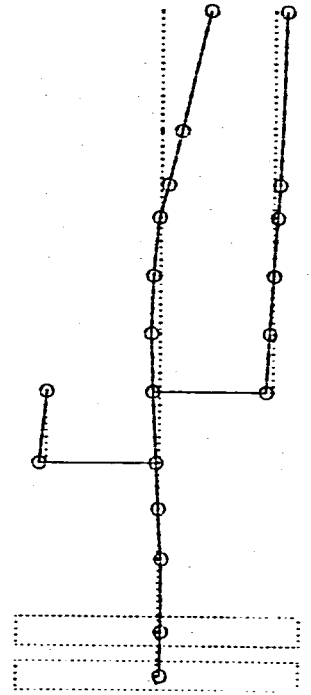
MODE NO=4
T = 0.0436 (S)
a = -0.3017
h = 2.178 (Σ)



(d) 4次モード

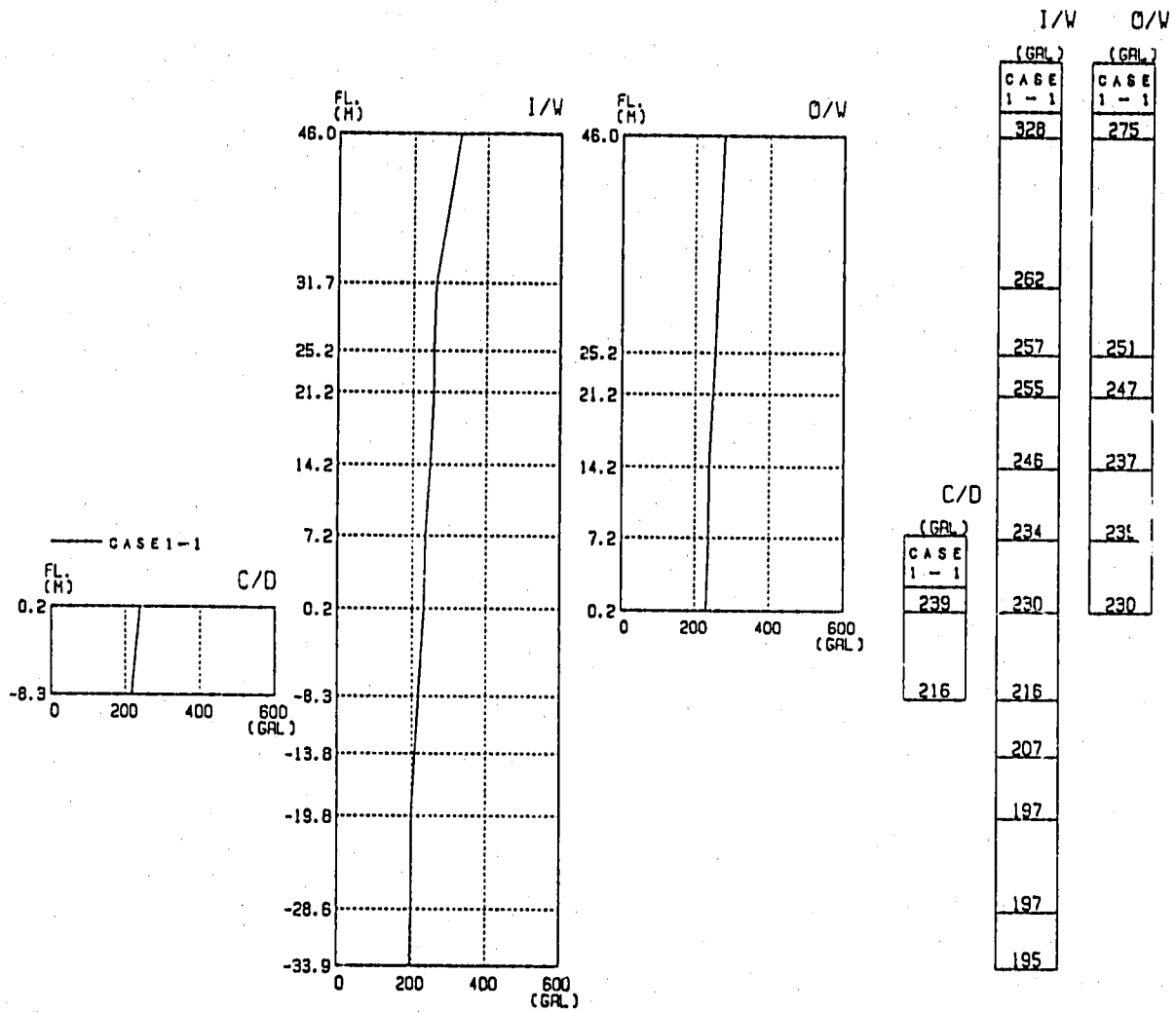
CASE12-1

MODE NO=5
T = 0.0303 (S)
a = 0.5017
h = 12.484 (Σ)



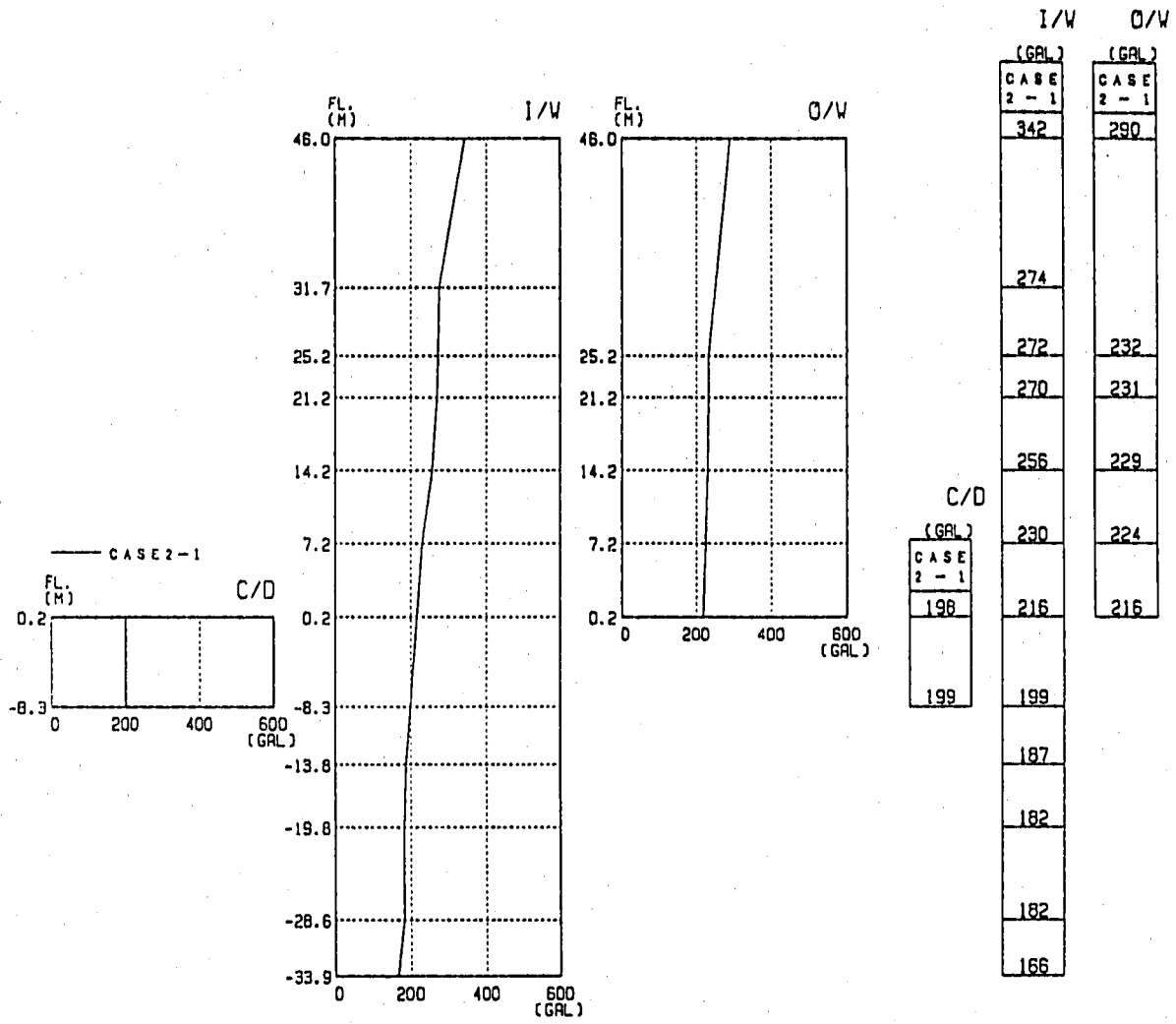
(e) 5次モード

図3.2.13 固有振動モード (Case12-1 : コモンデッキ連成、Vs=2000m/s、機器免震振動数1.0Hz)



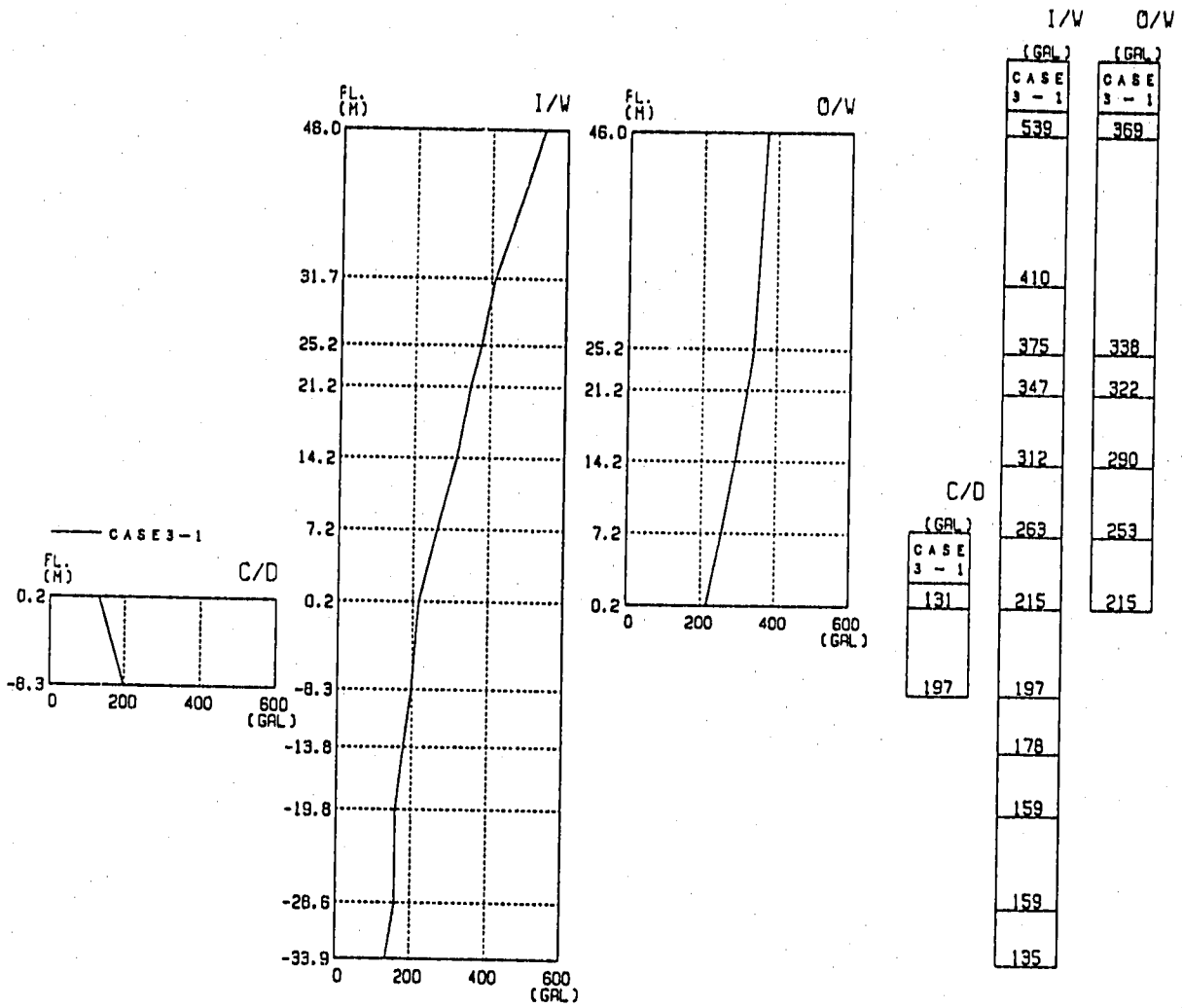
最大応答加速度

図3.3.1 最大応答加速度分布 (Case1-1)



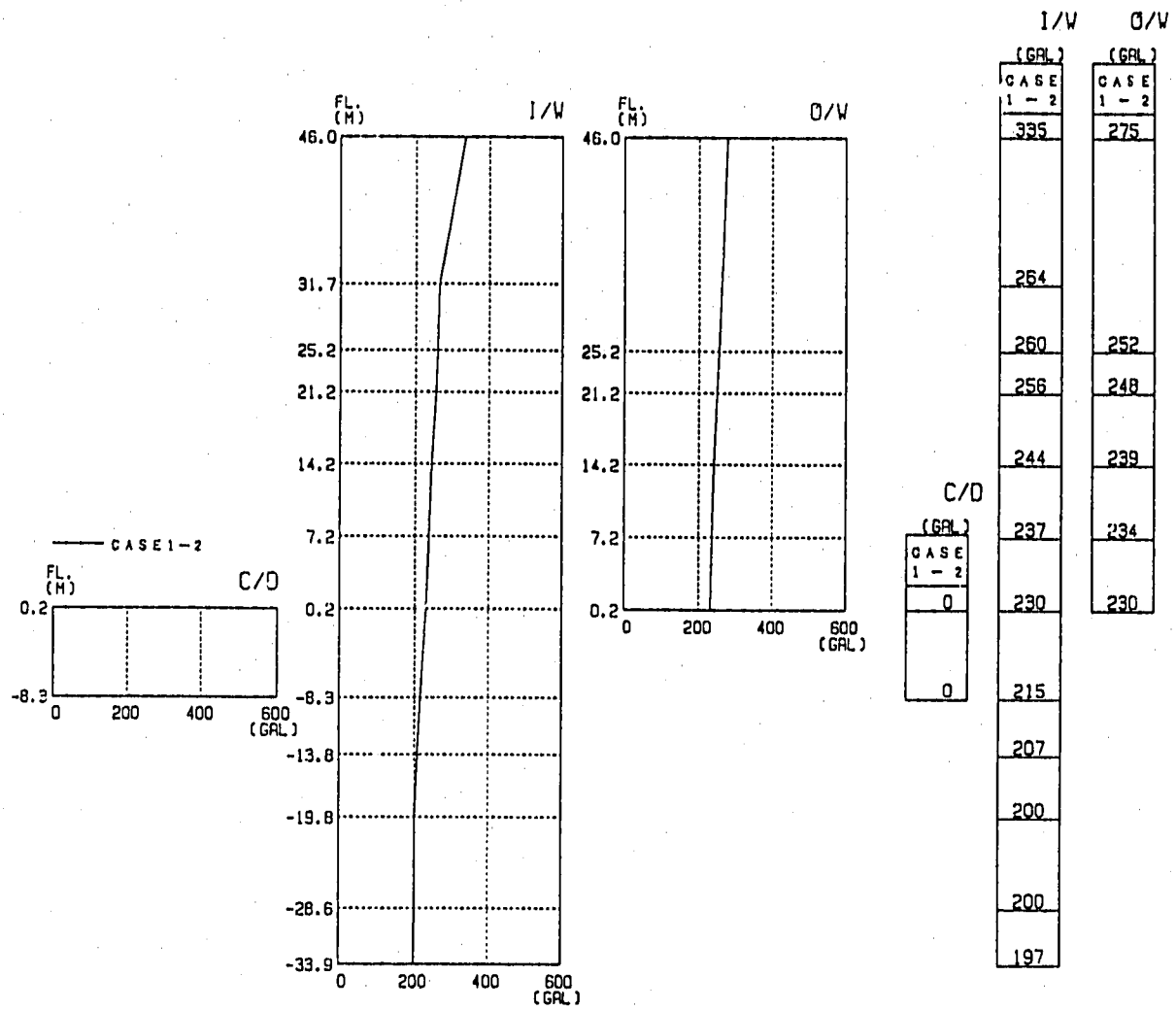
最大応答加速度

図3.3.2 最大応答加速度分布 (Case2-1)



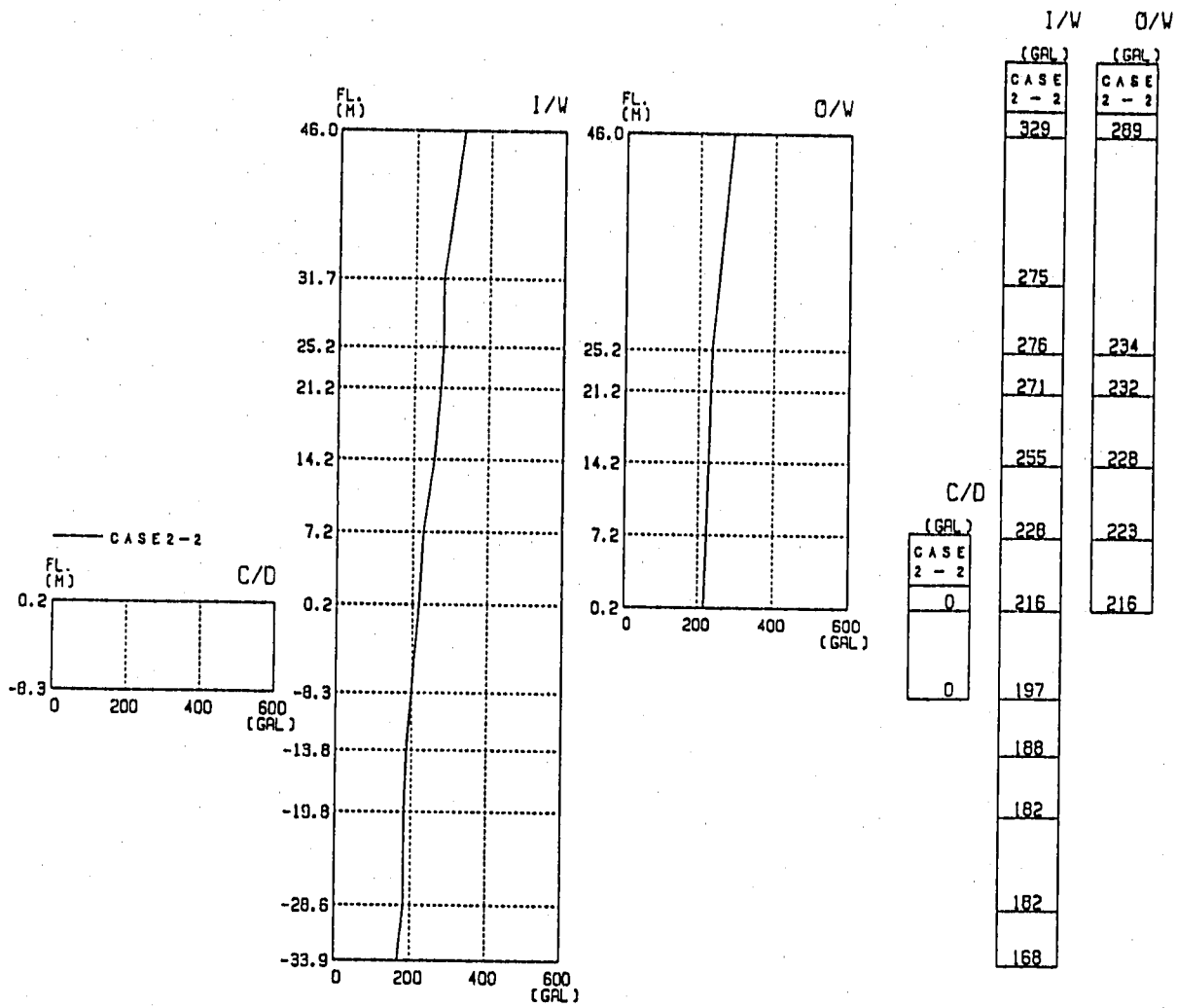
最大応答加速度

図3.3.3 最大応答加速度分布 (Case3-1)



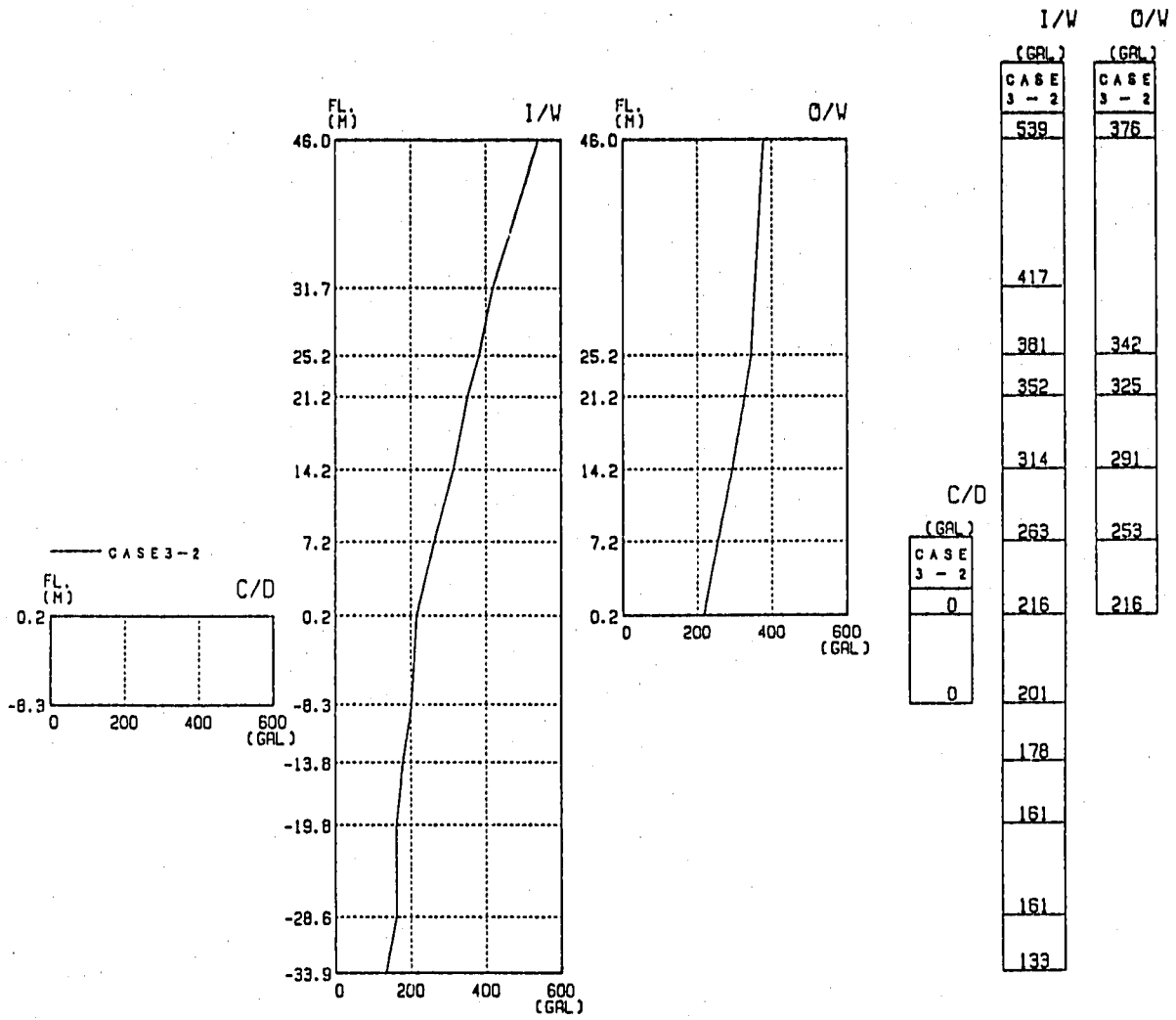
最大応答加速度

図3.3.4 最大応答加速度分布 (Case1-2)



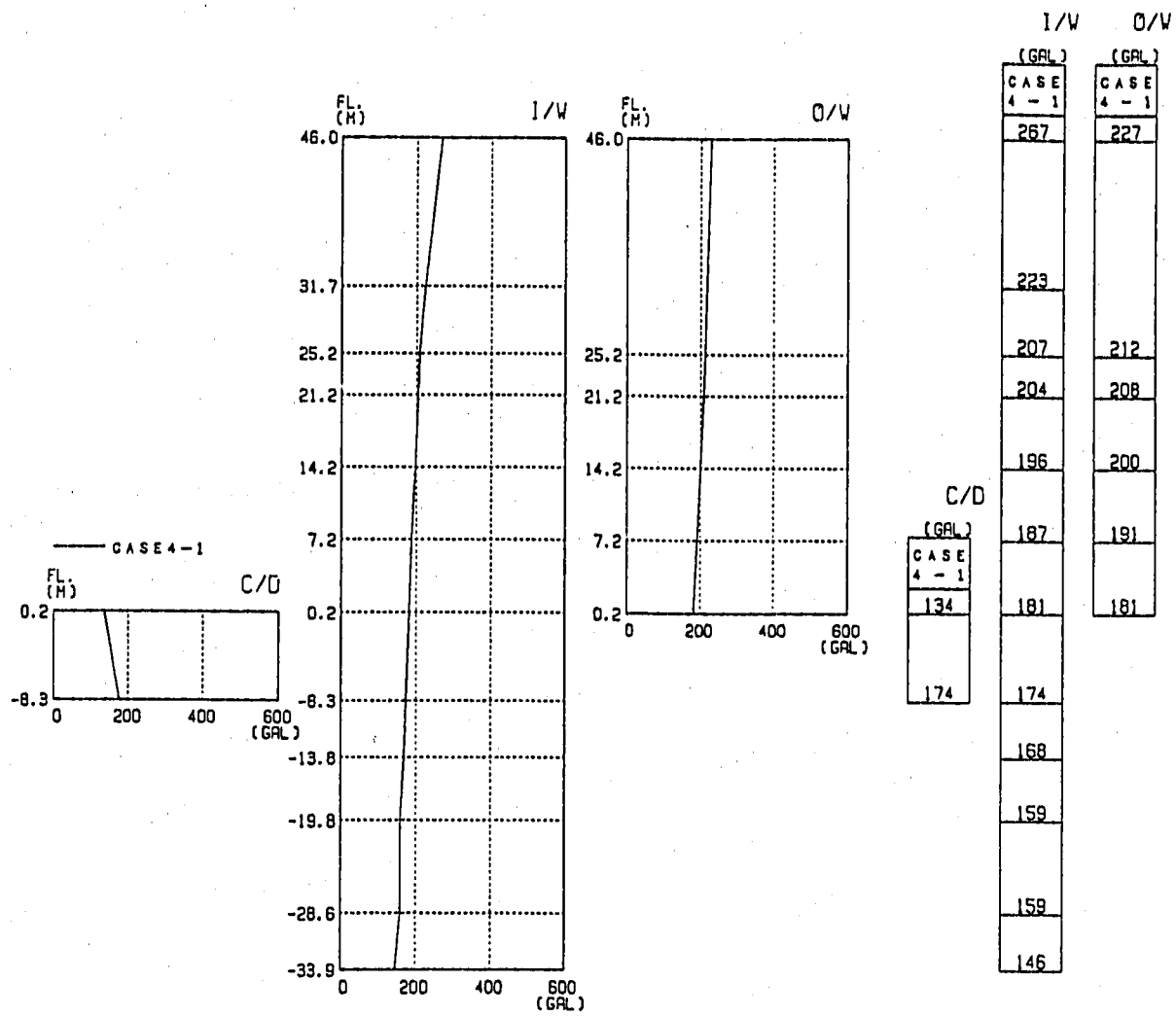
最大応答加速度

図3.3.5 最大応答加速度分布 (Case2-2)



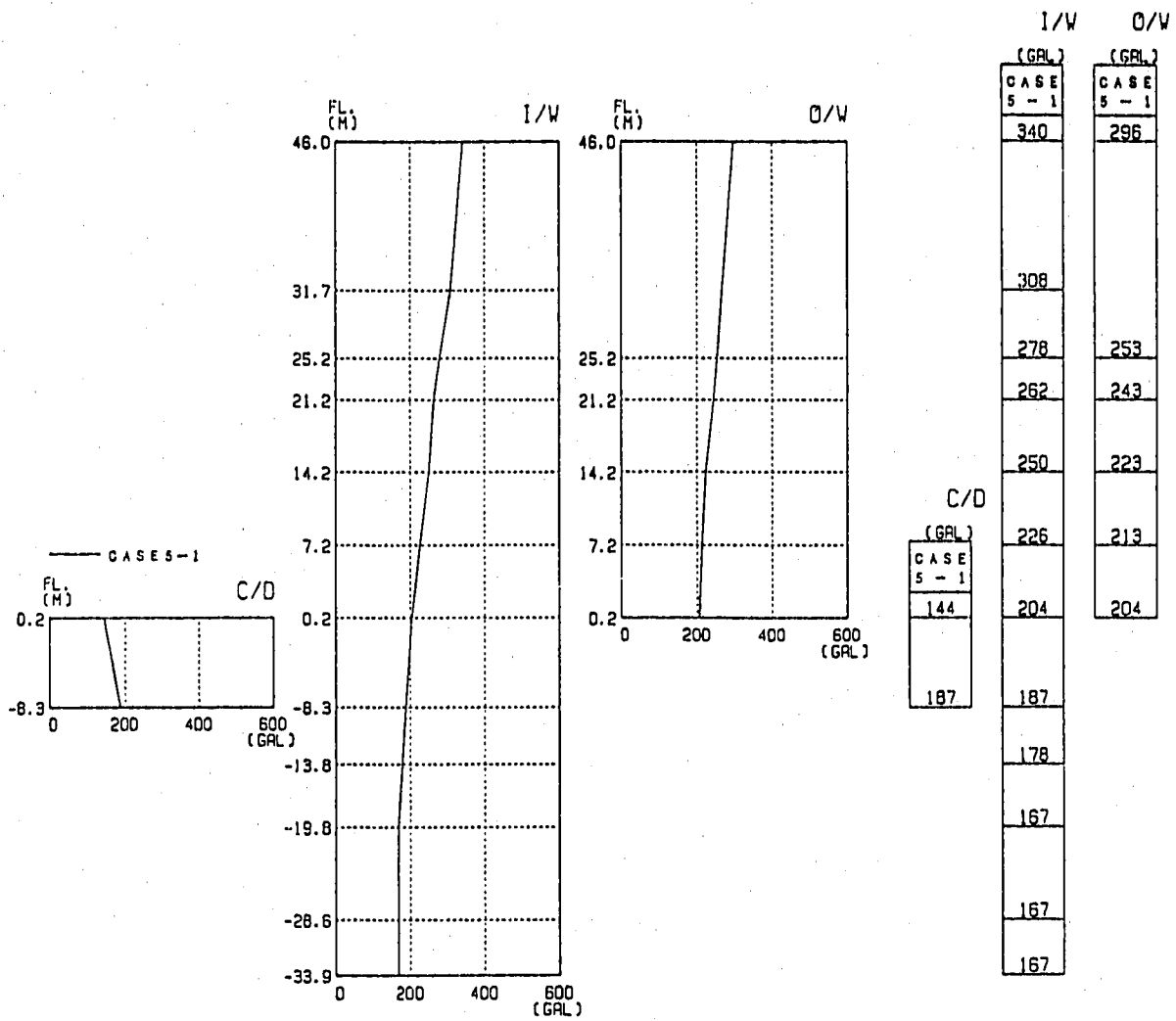
最大応答加速度

図3.3.6 最大応答加速度分布 (Case3-2)



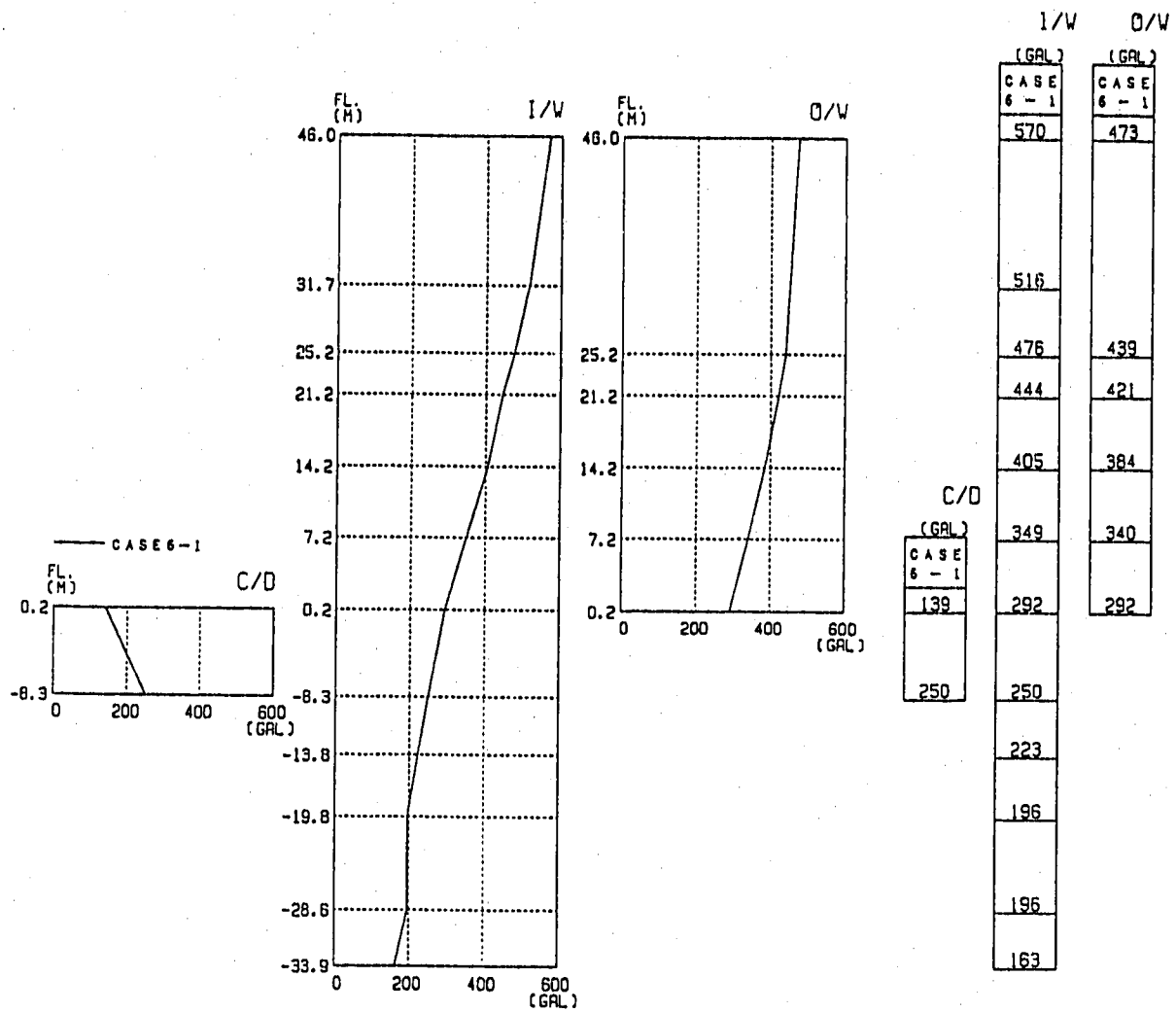
最大応答加速度

図3.3.7 最大応答加速度分布 (Case4-1)



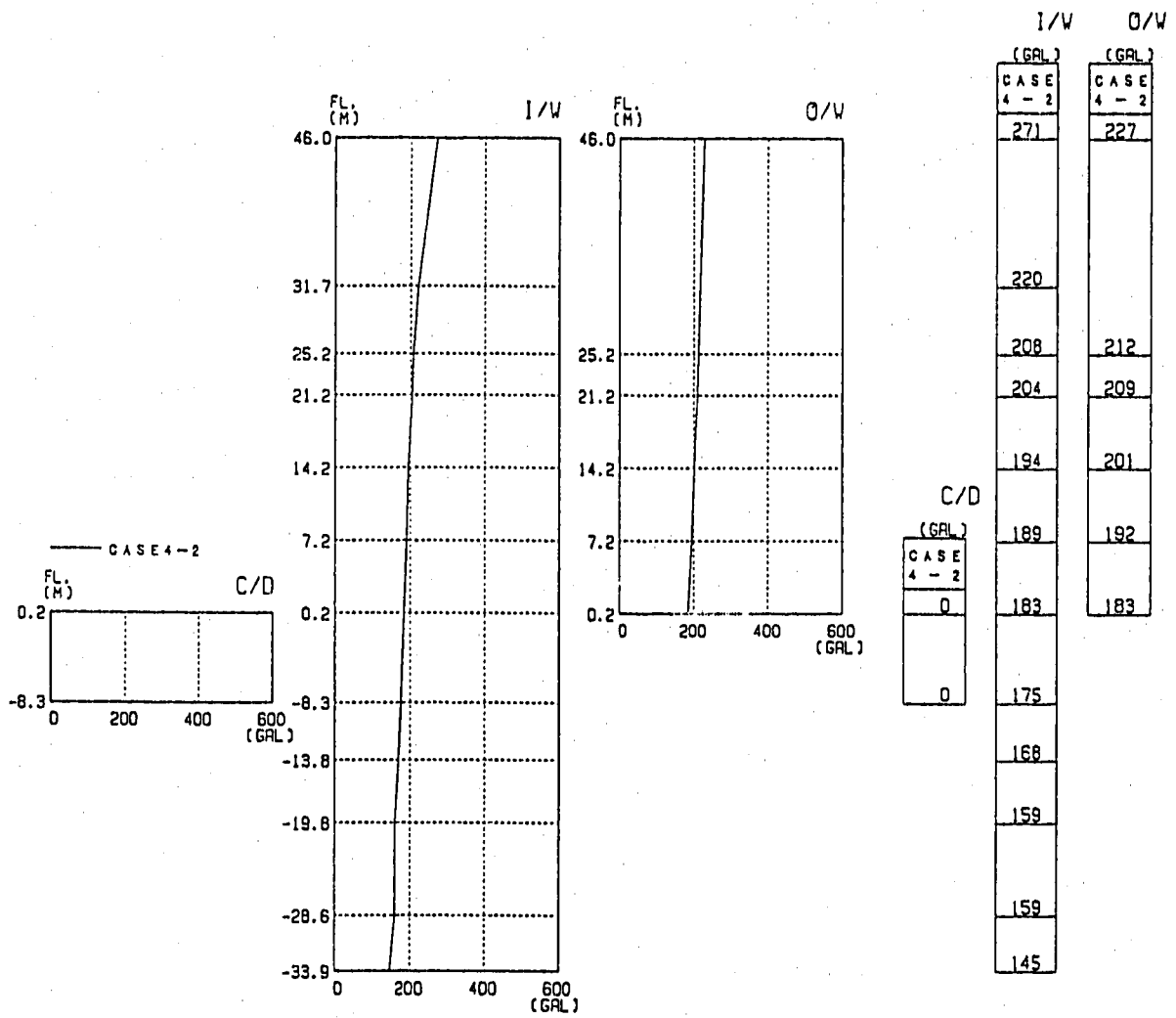
最大応答加速度

図3.3.8 最大応答加速度分布 (Case5-1)



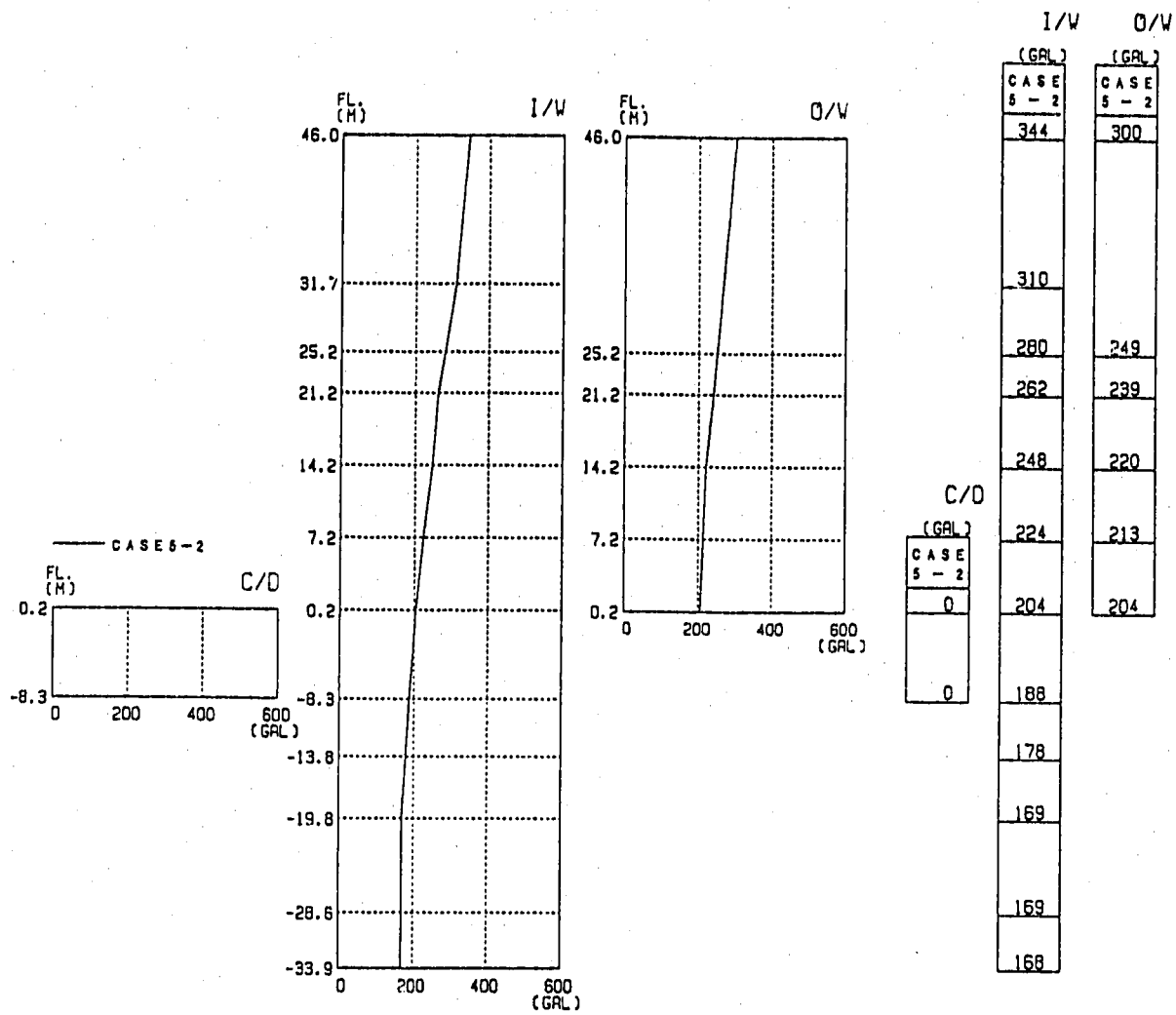
最大応答加速度

図3.3.9 最大応答加速度分布 (Case6-1)



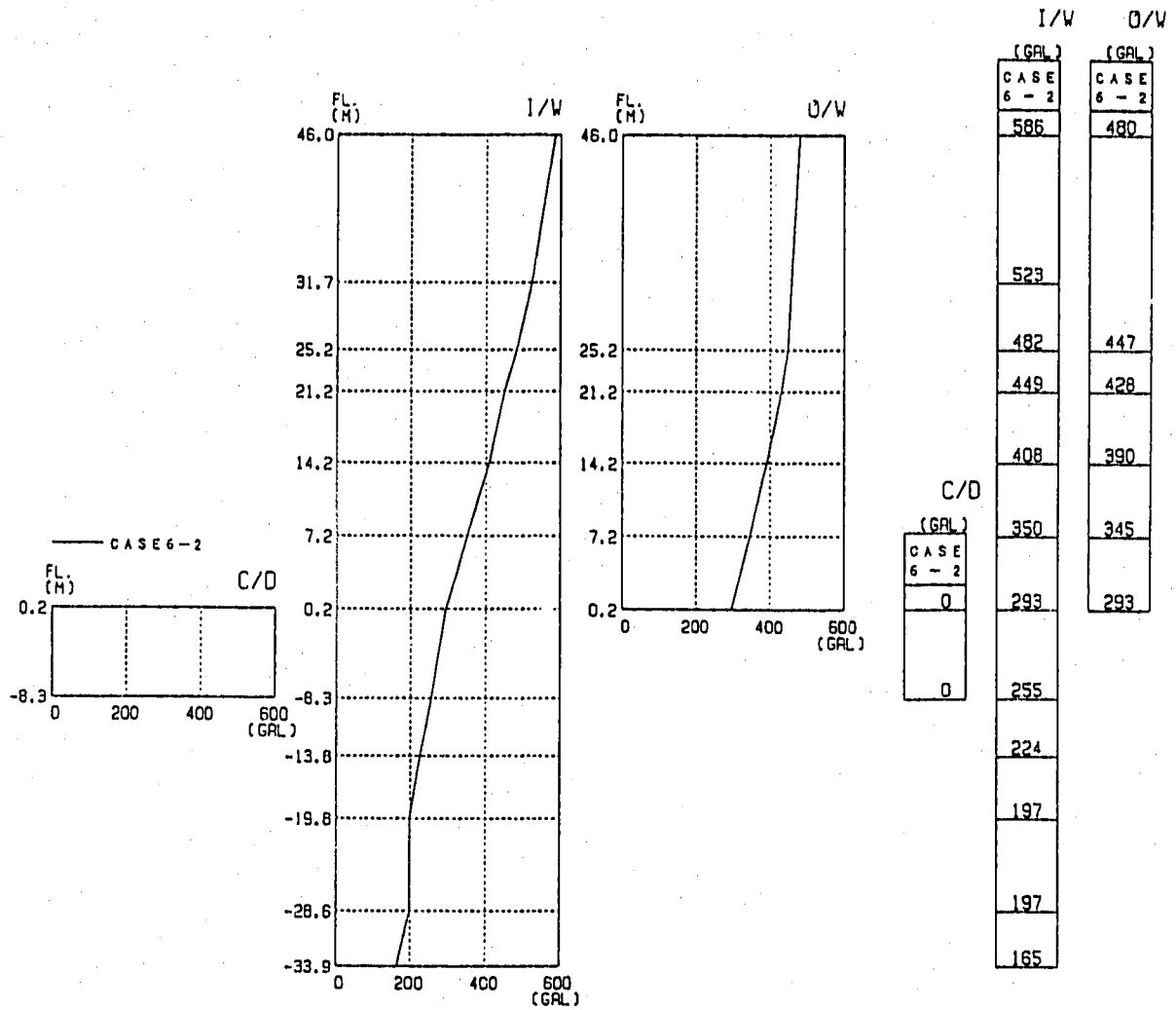
最大応答加速度

図3.3.10 最大応答加速度分布 (Case4-2)



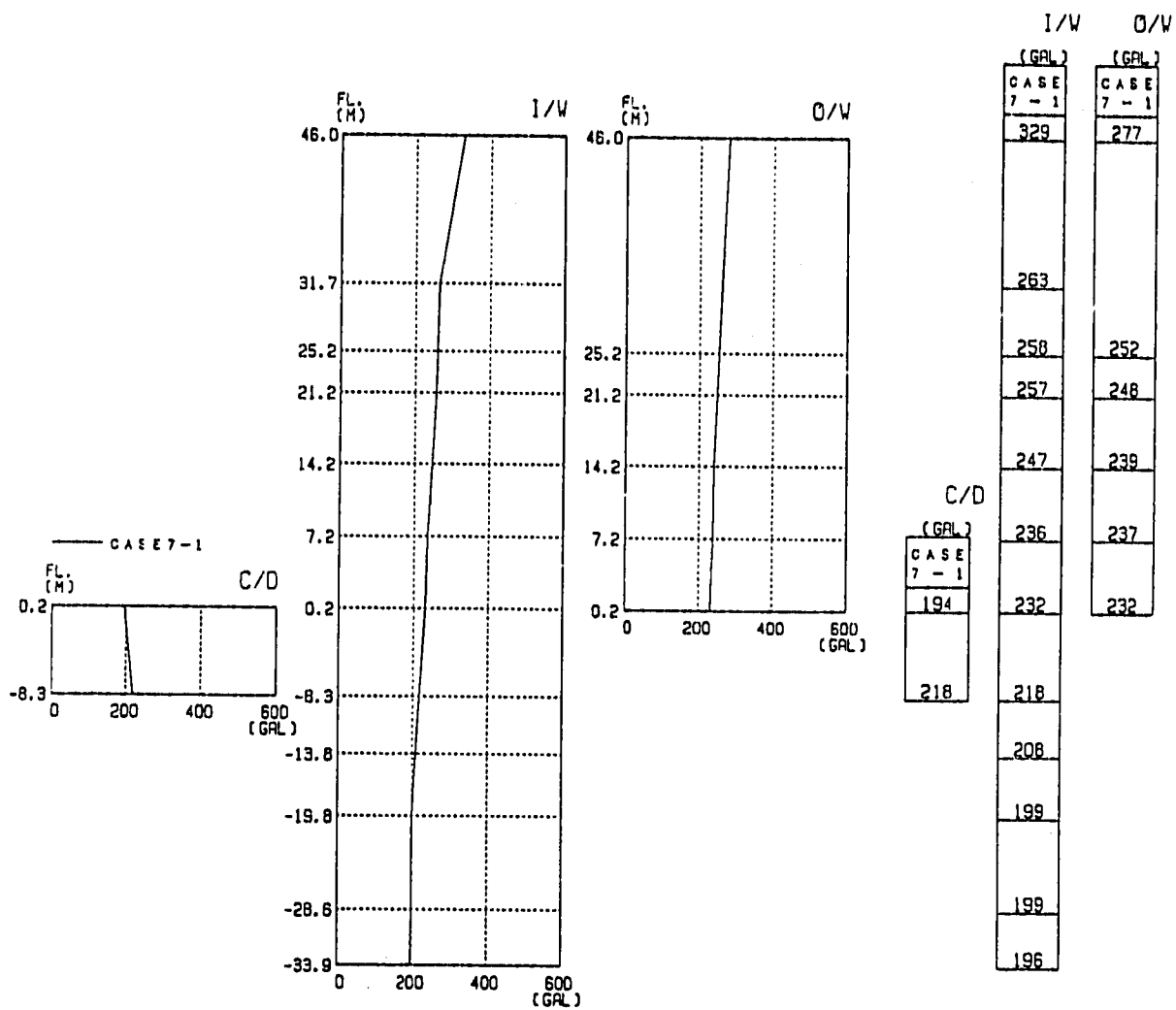
最大 応 答 加 速 度

图3.3.11 最大应答加速度分布 (Case5-2)



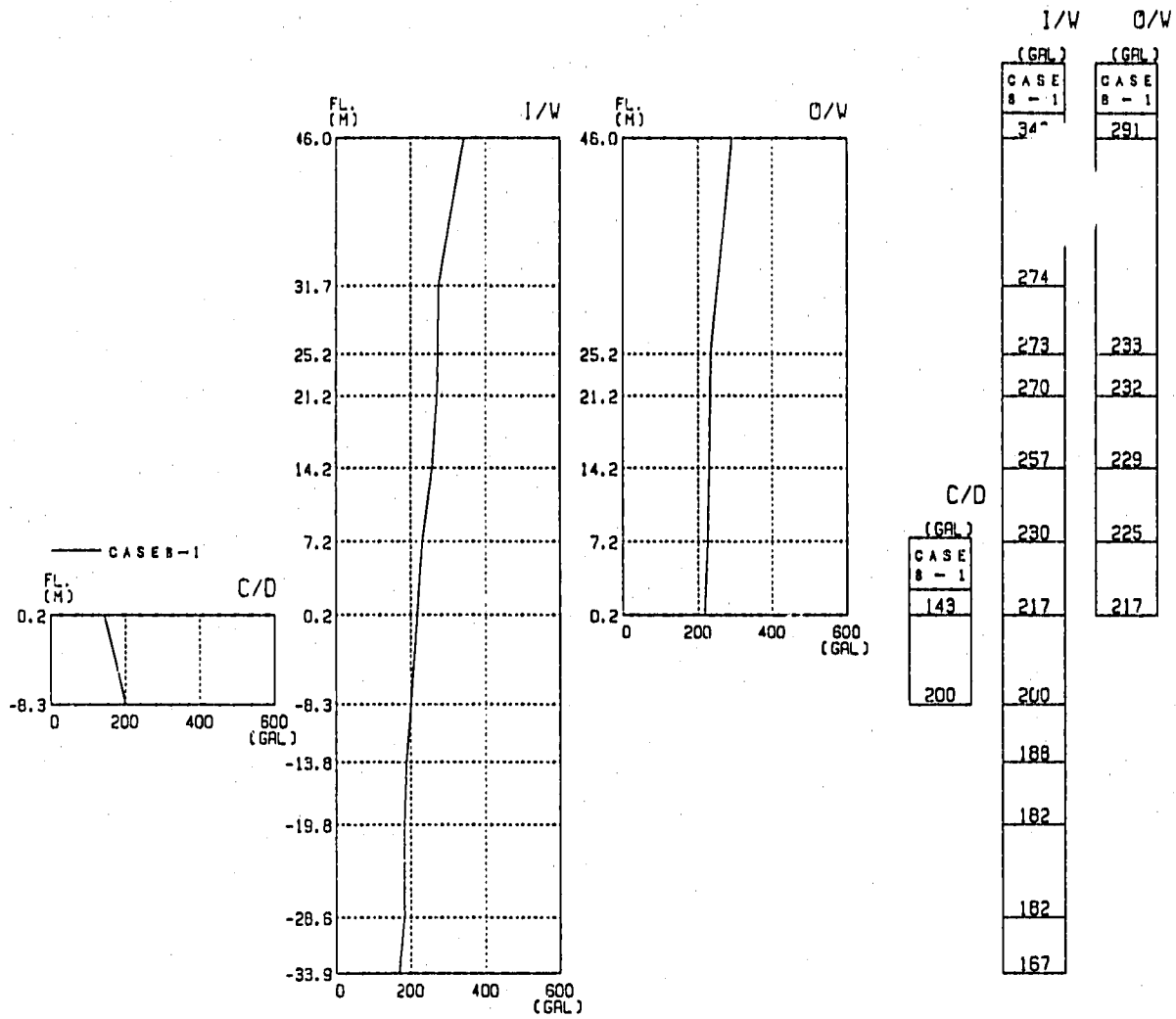
最大応答加速度

図3.3.12 最大応答加速度分布 (Case6-2)



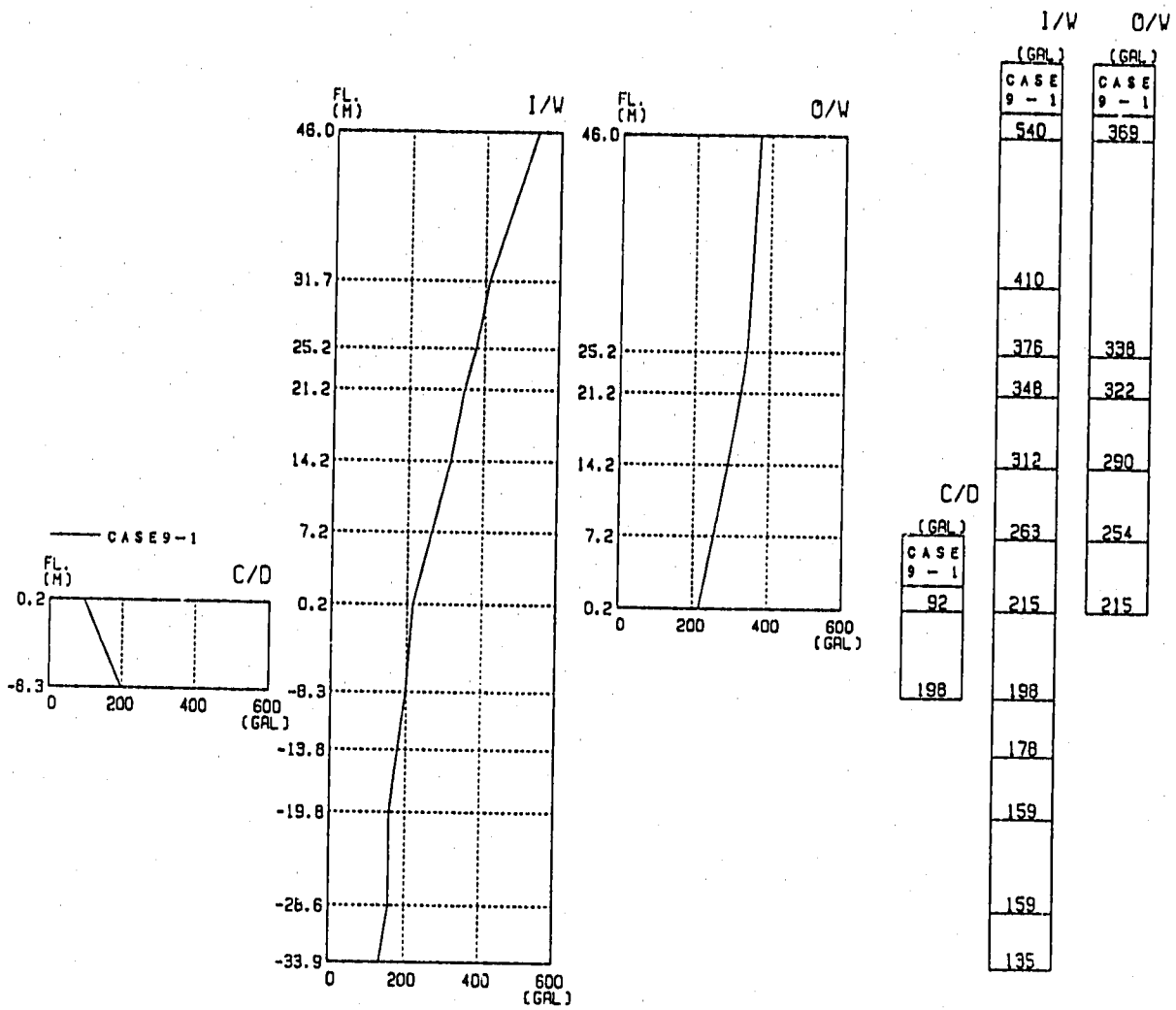
最大応答加速度

図3.3.13 最大応答加速度分布 (Case7-1)



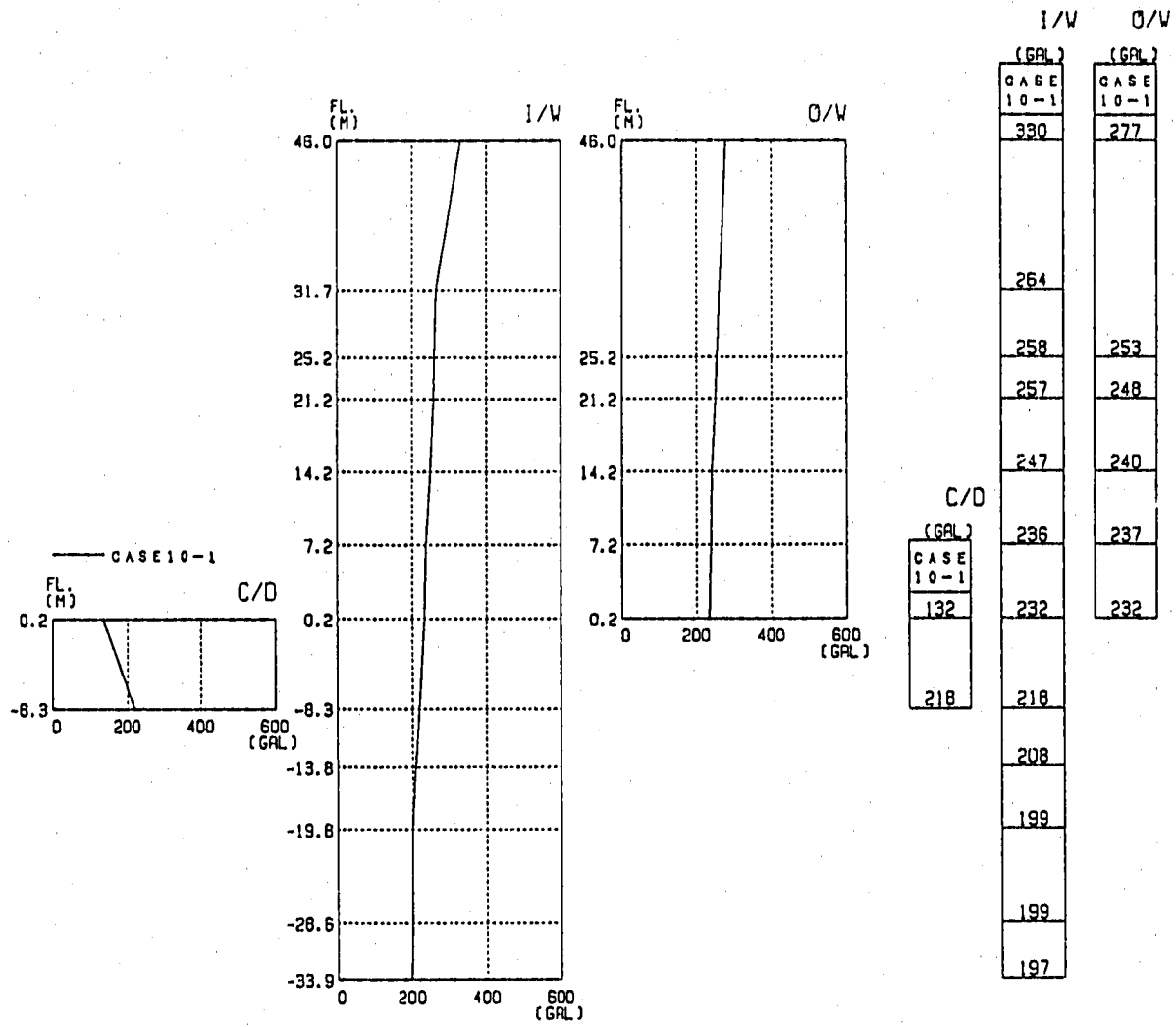
最大応答加速度

図3.3.14 最大応答加速度分布 (Case8-1)



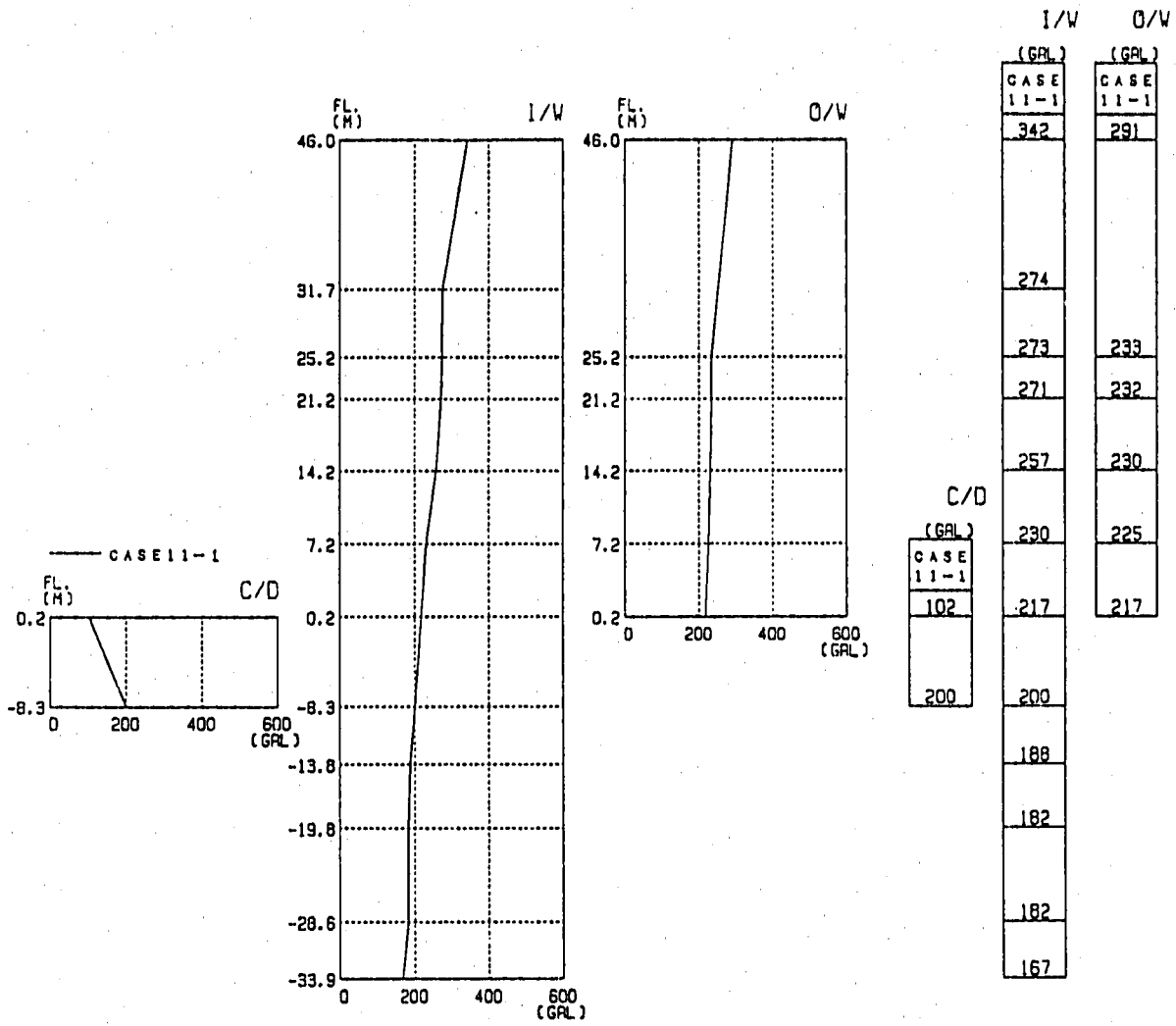
最大応答加速度

図3.3.15 最大応答加速度分布 (Case9-1)



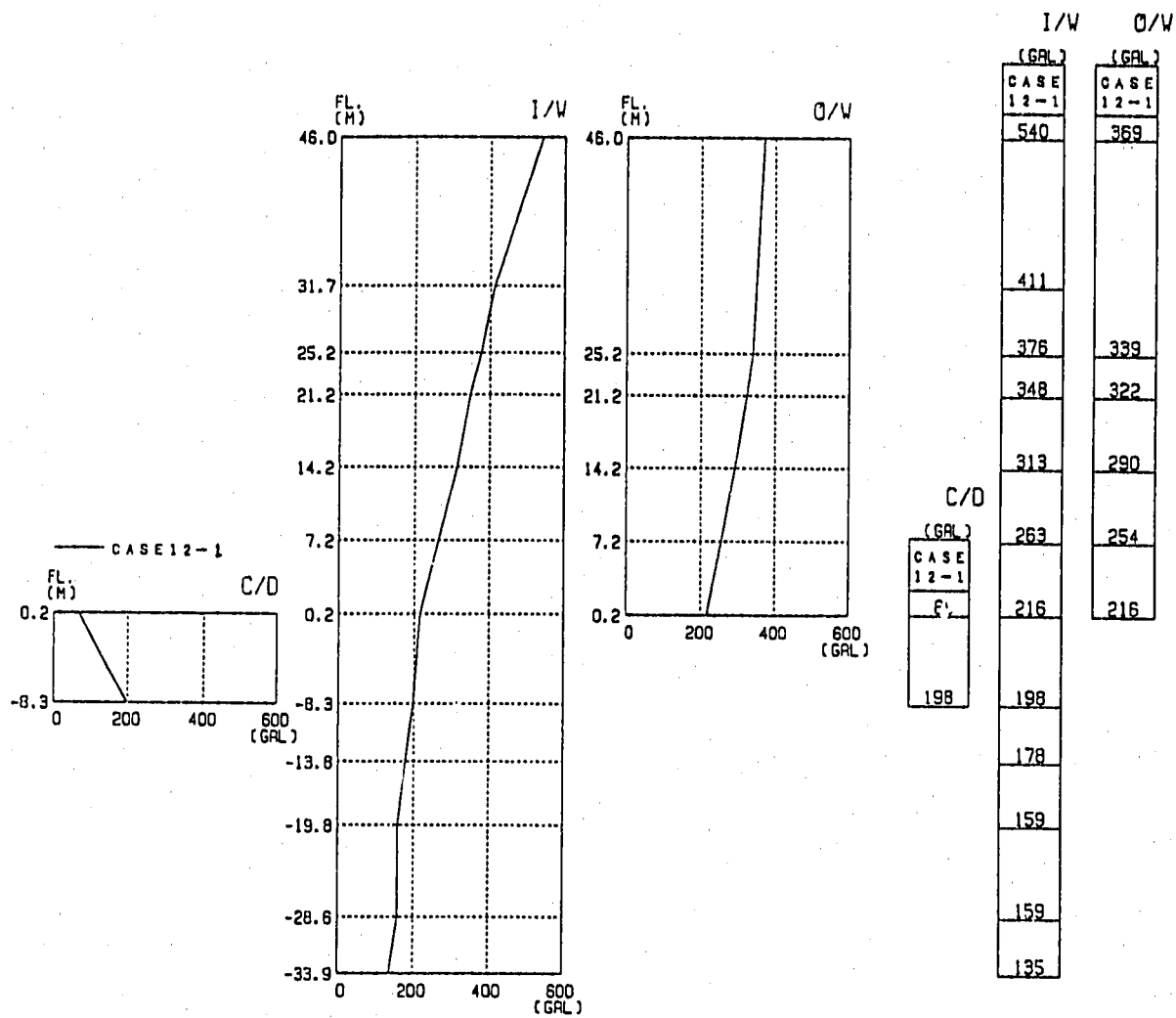
最大応答加速度

図3.3.16 最大応答加速度分布 (Case10-1)



最大応答加速度

図3.3.17 最大応答加速度分布 (Case11-1)



最大応答加速度

図3.3.18 最大応答加速度分布 (Case12-1)

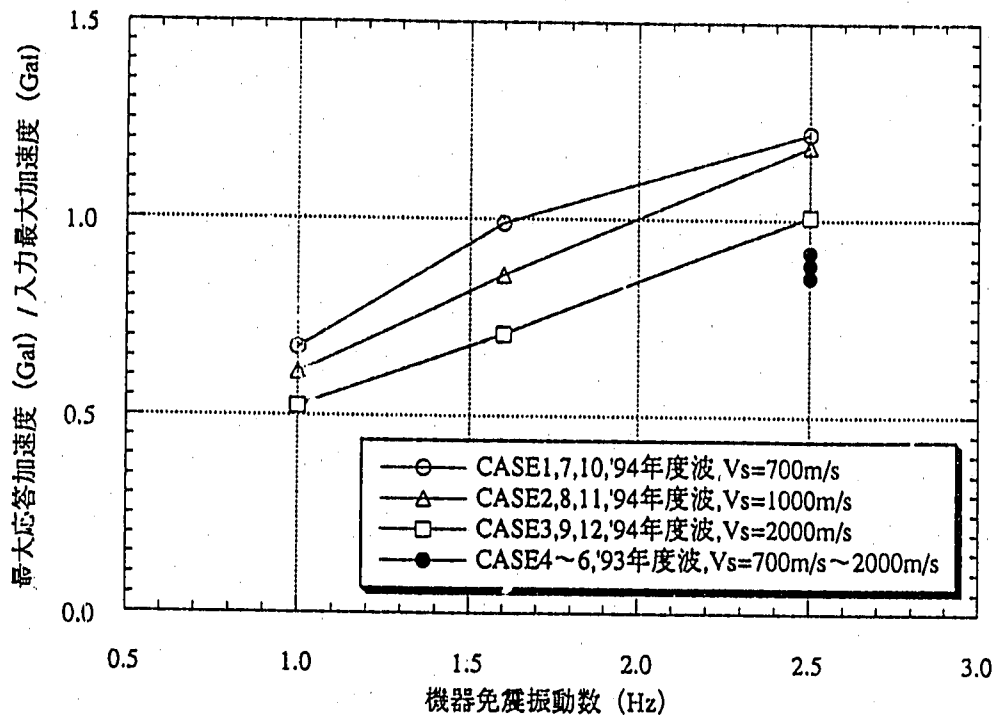


図3.3.19 応答加速度倍率 (コモンデッキ最大応答加速度/入力最大加速度) - 機器免震振動数関係

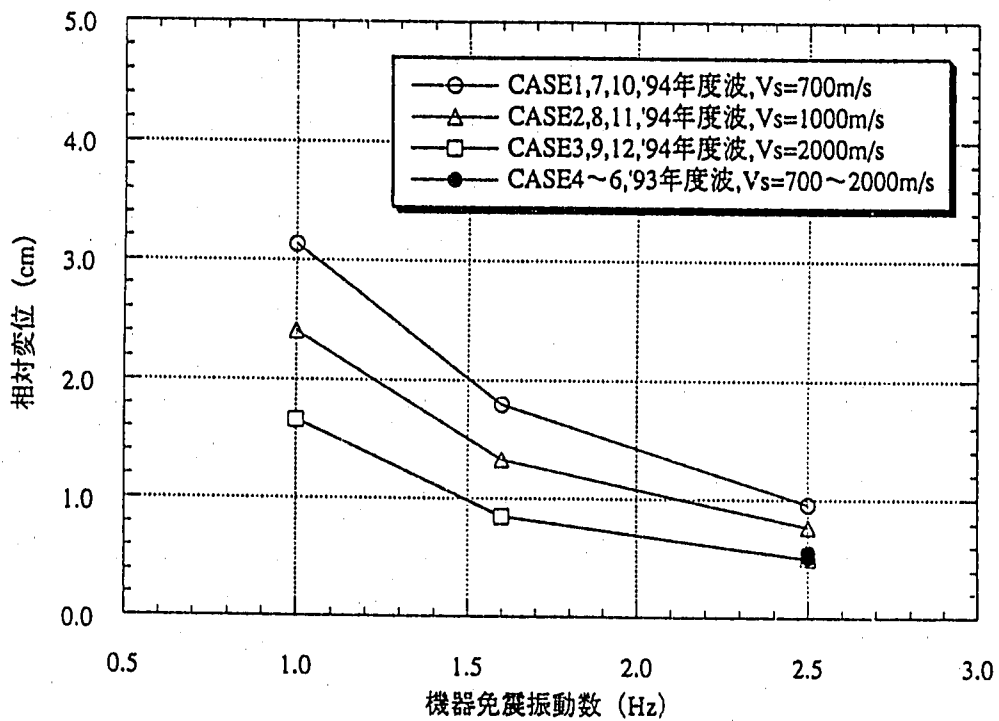


図3.3.20 相対変位 (コモンデッキとコモンデッキ支持部間) - 機器免震振動数関係

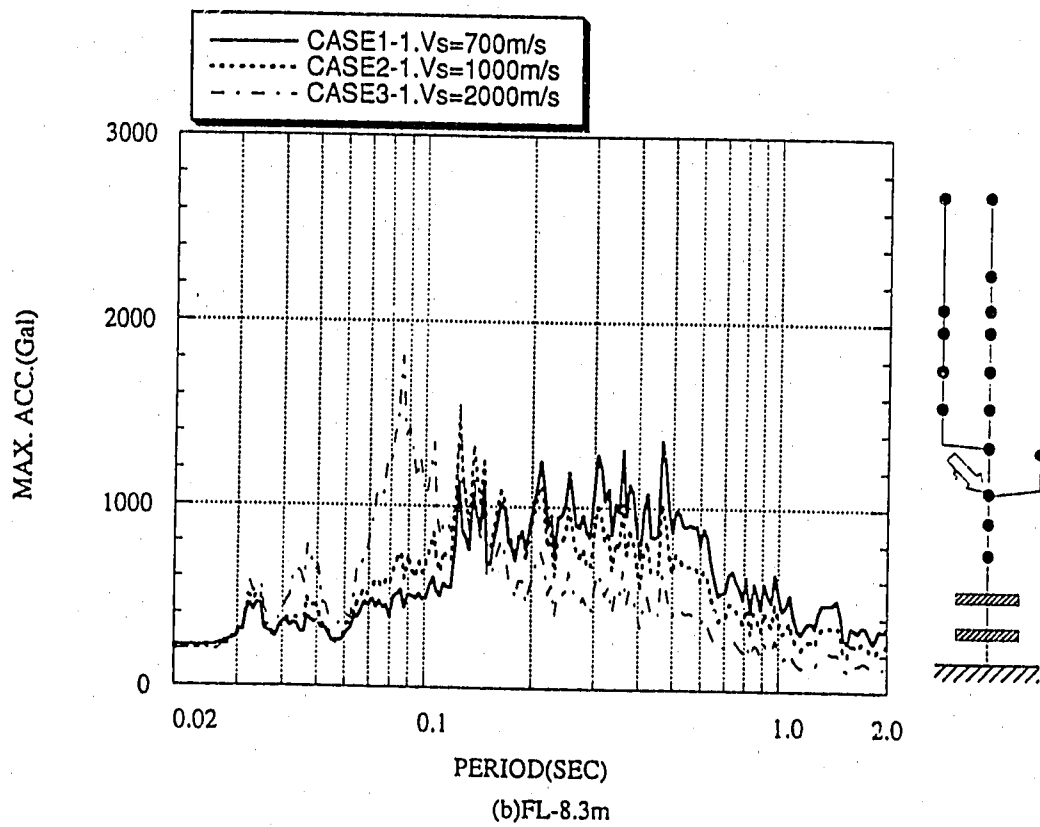
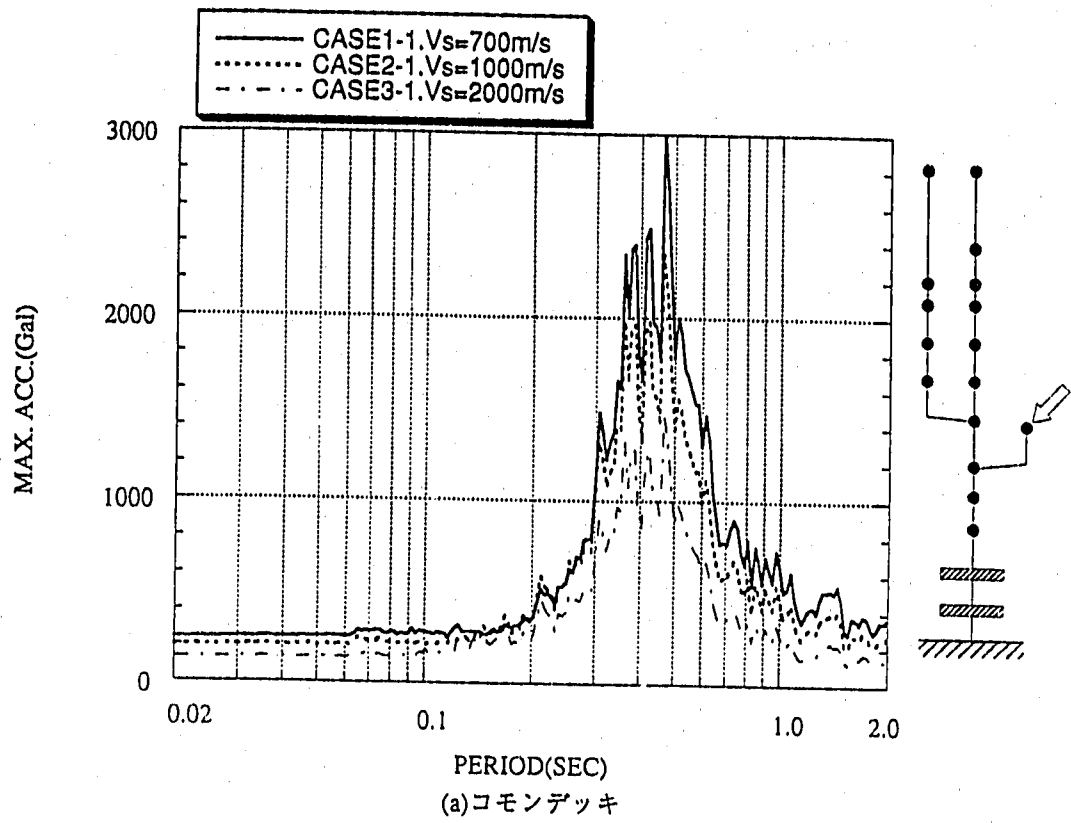


図3.4.1 床応答スペクトルの比較
 ($h=1\%$ 、'94年度波、機器免震振動数2.5Hz)

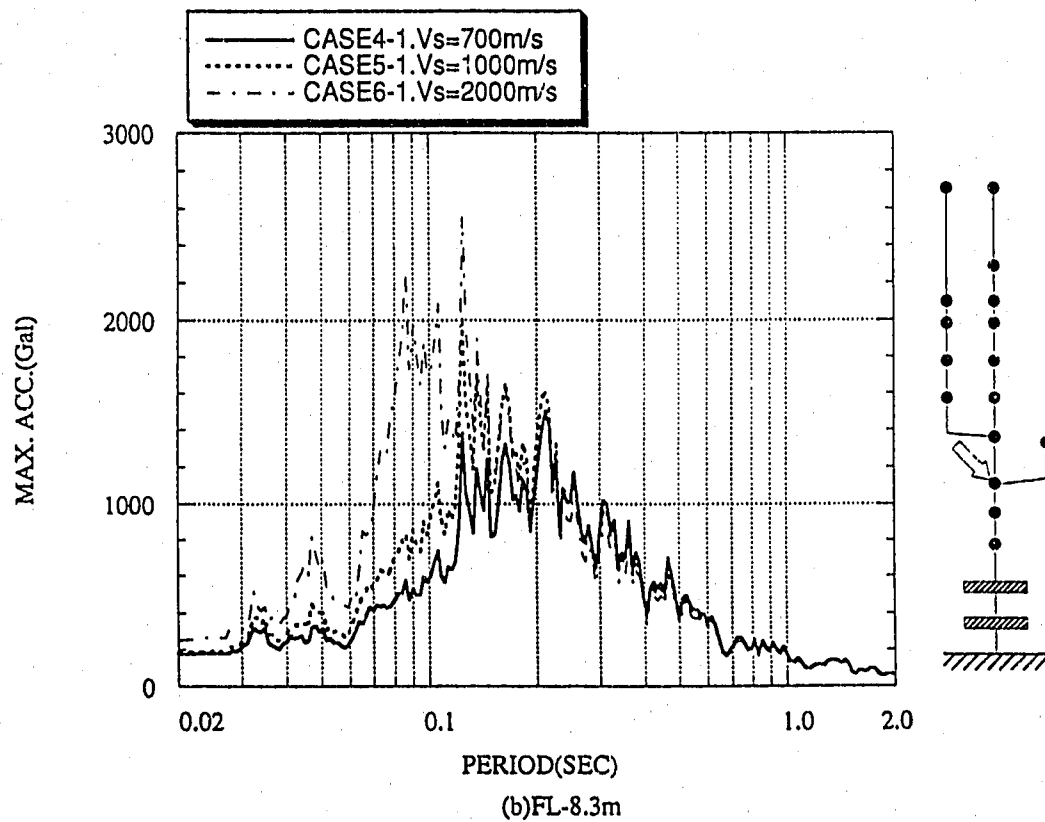
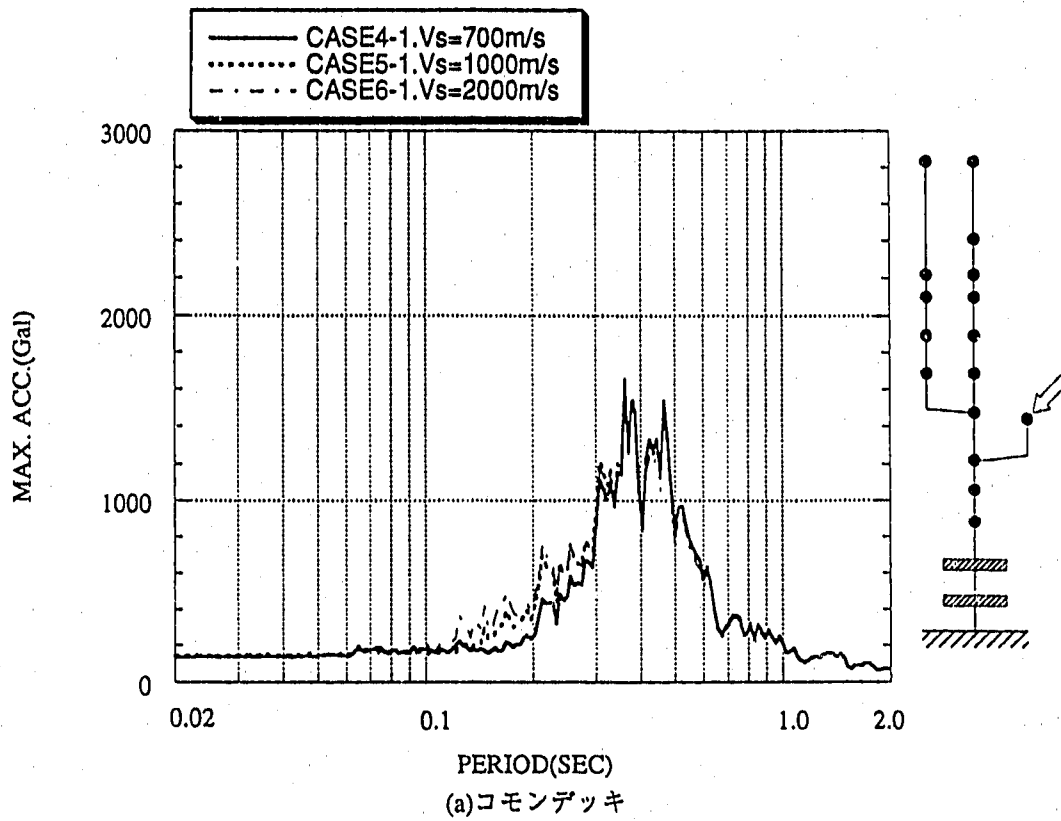


図3.4.2 床応答スペクトルの比較
 (h=1%、'93年度波、機器免震振動数2.5Hz)

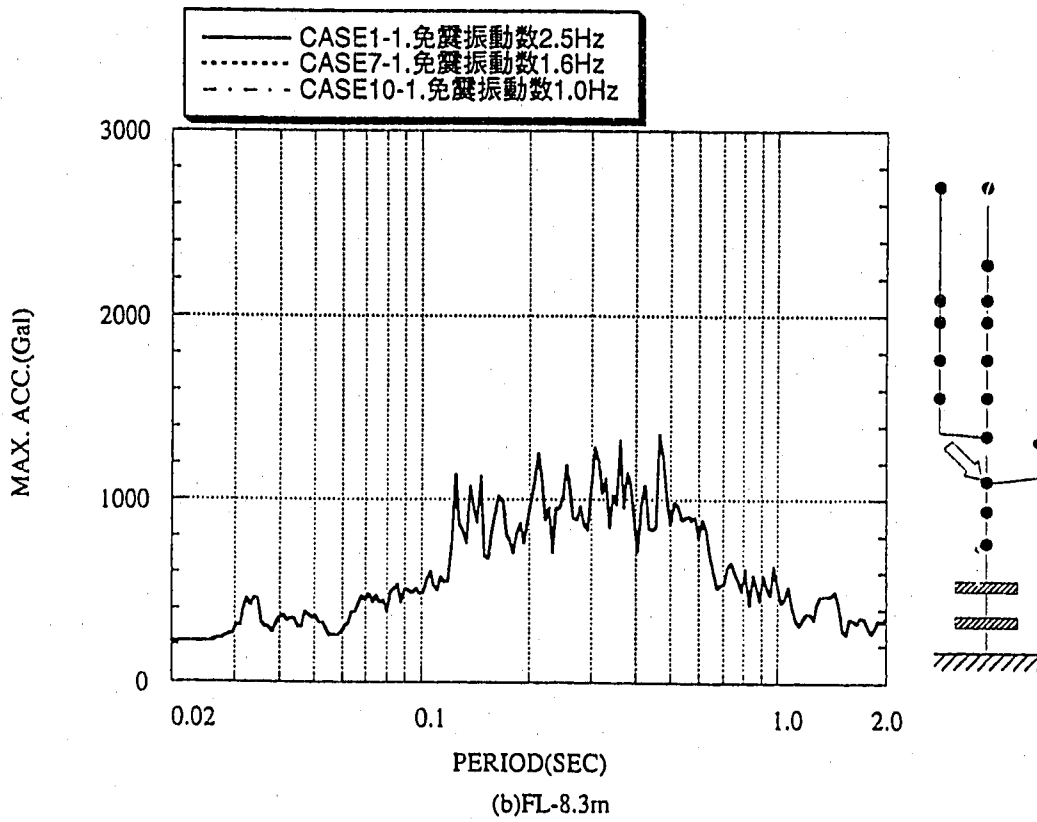
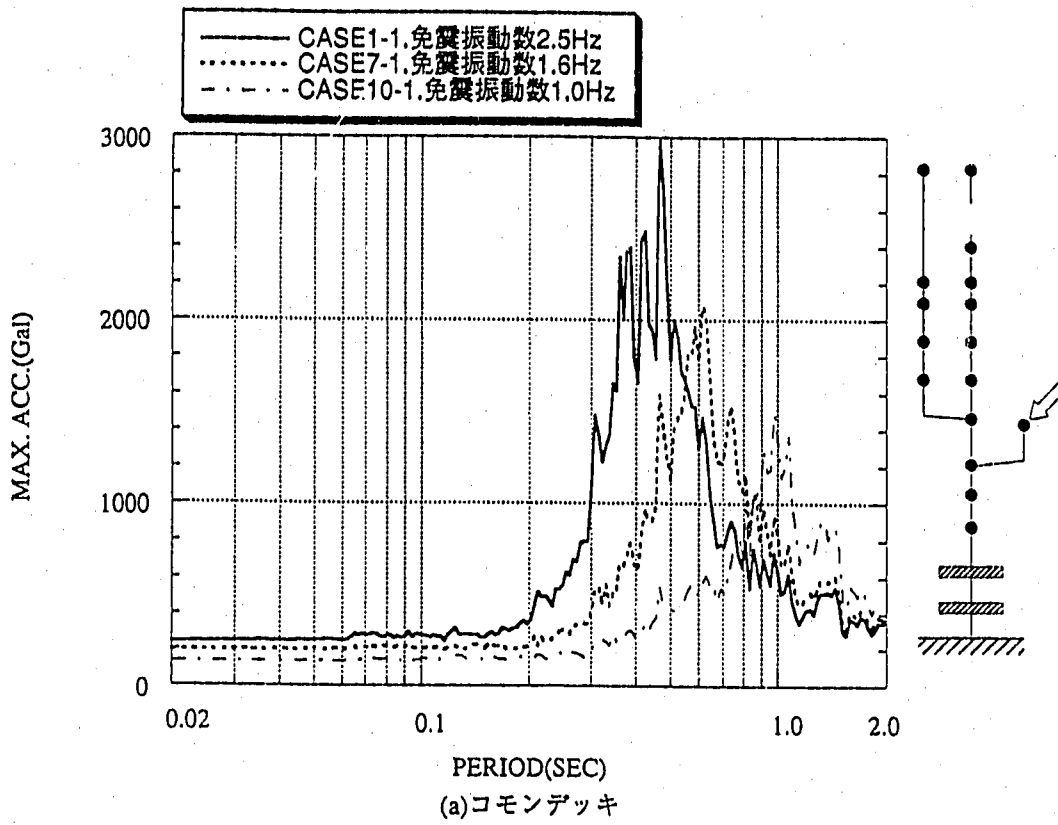


図3.4.3 床応答スペクトルの比較
 (h=1%、'94年度波、Vs=700m/s)

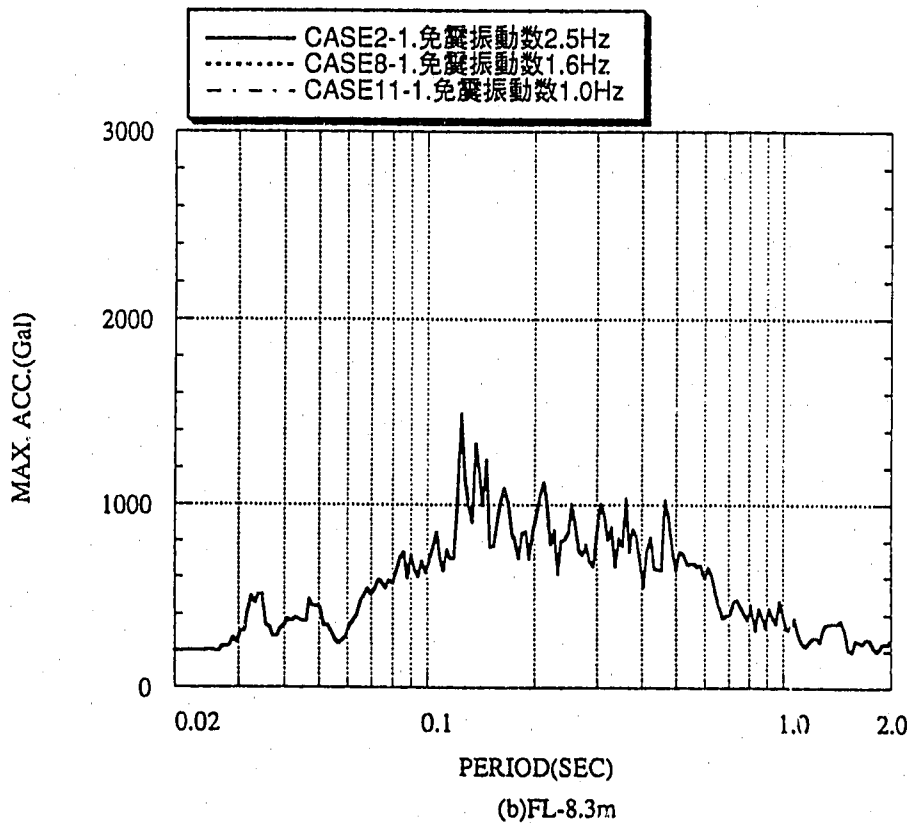
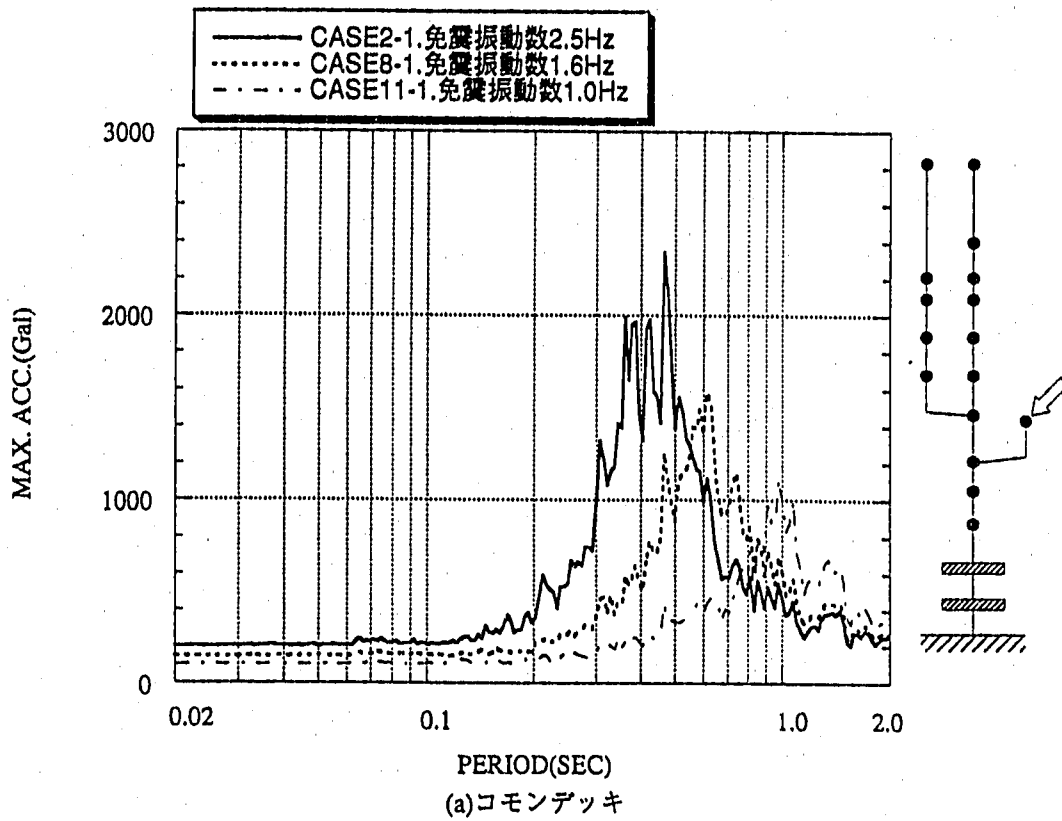


図3.4.4 床応答スペクトルの比較
($h=1\%$ 、'94年度波、 $V_s=1000\text{m/s}$)

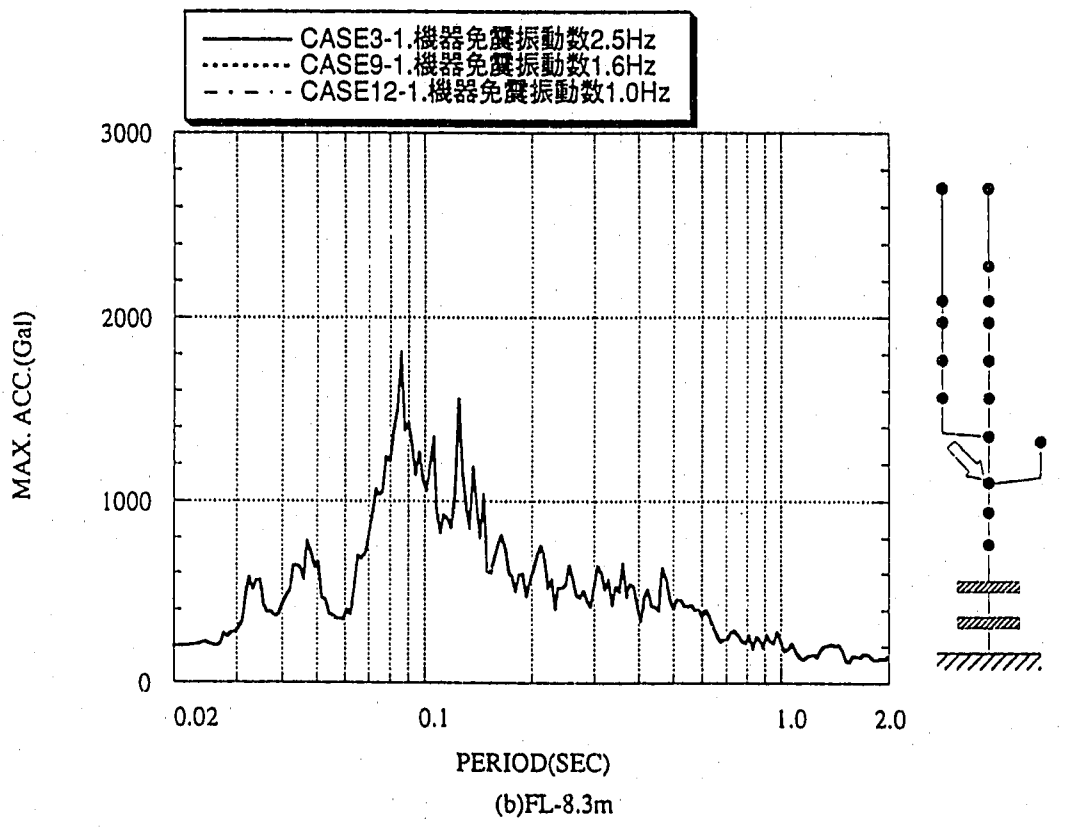
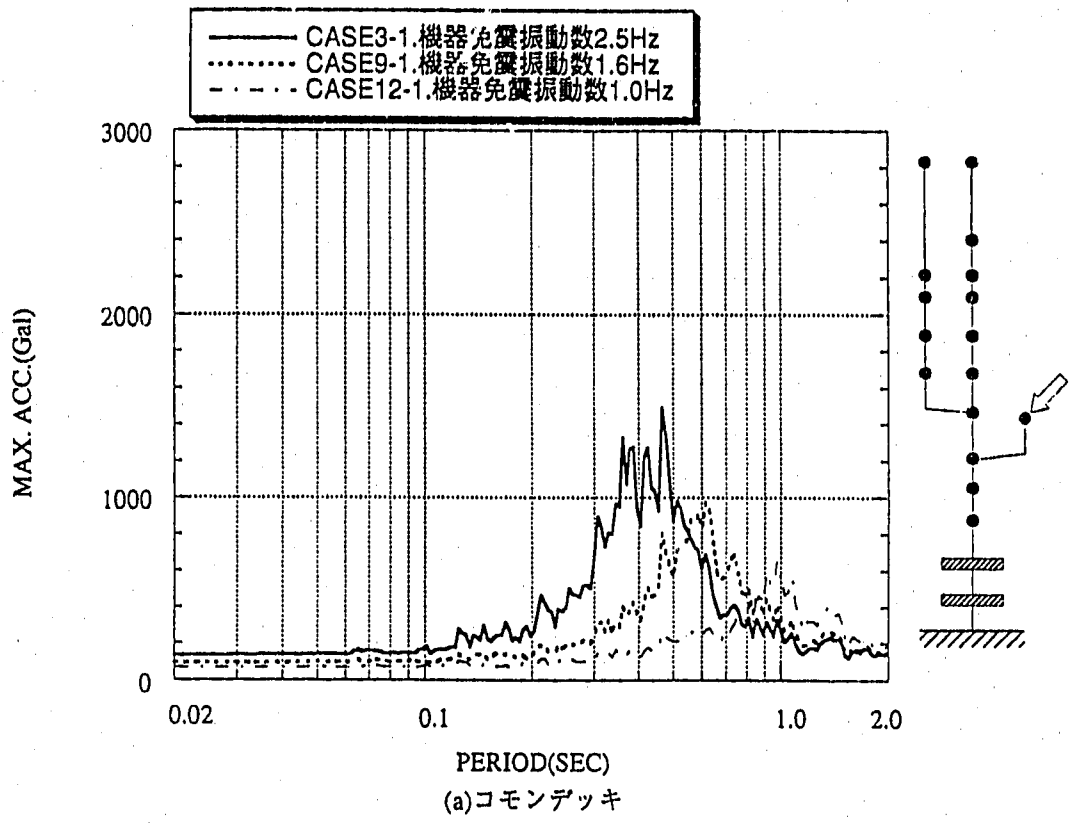


図3.4.5 床応答スペクトルの比較
($h=1\%$ 、'94年度波、 $V_s=2000\text{m/s}$)

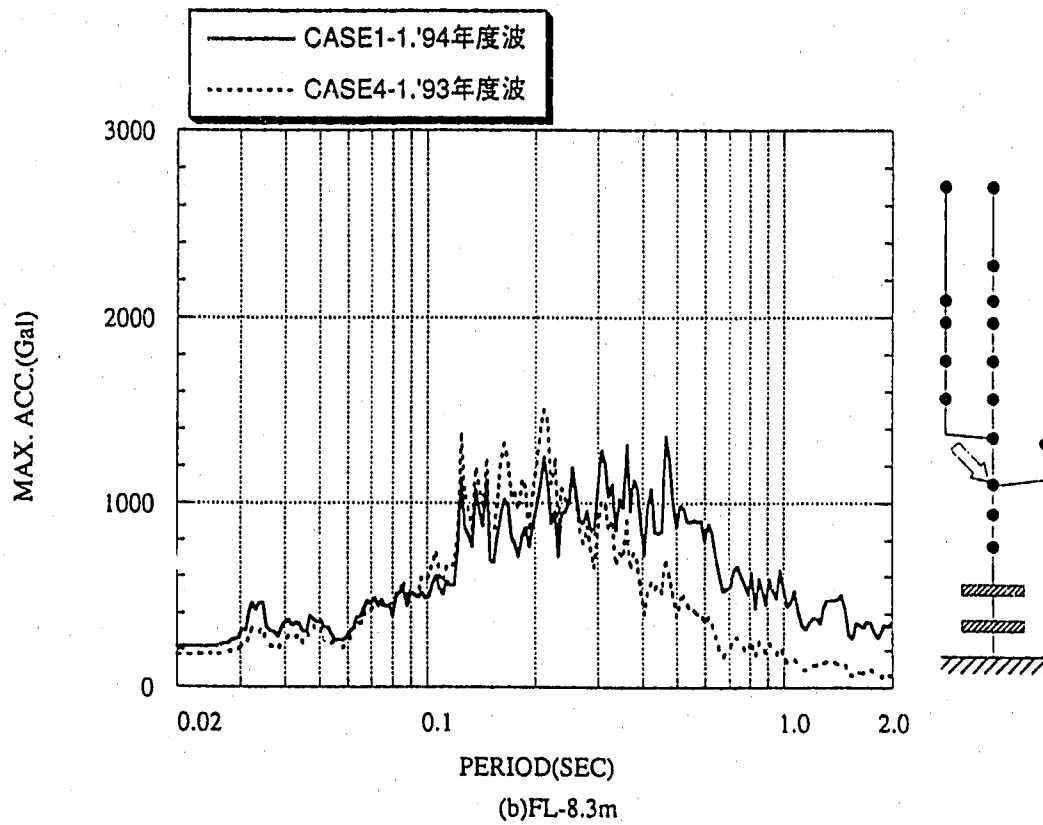
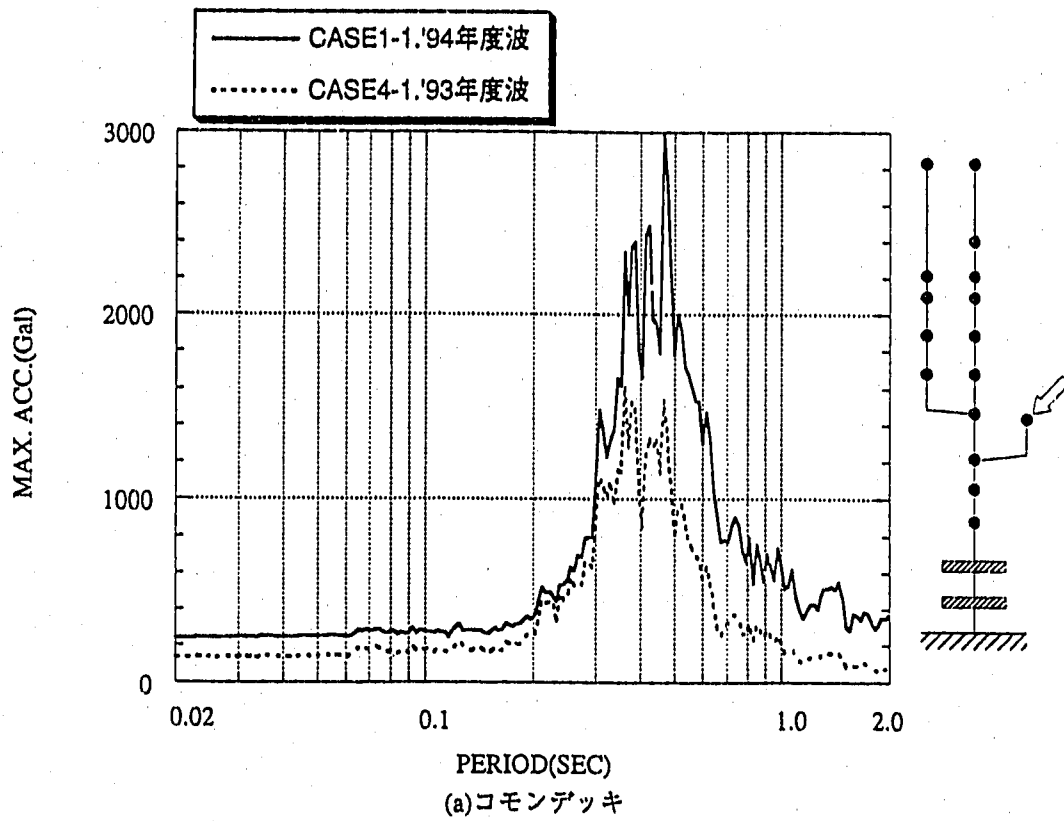


図3.4.6 床応答スペクトルの比較
($h=1\%$ 、機器免震振動数 2.5Hz 、 $V_s=700\text{m/s}$)

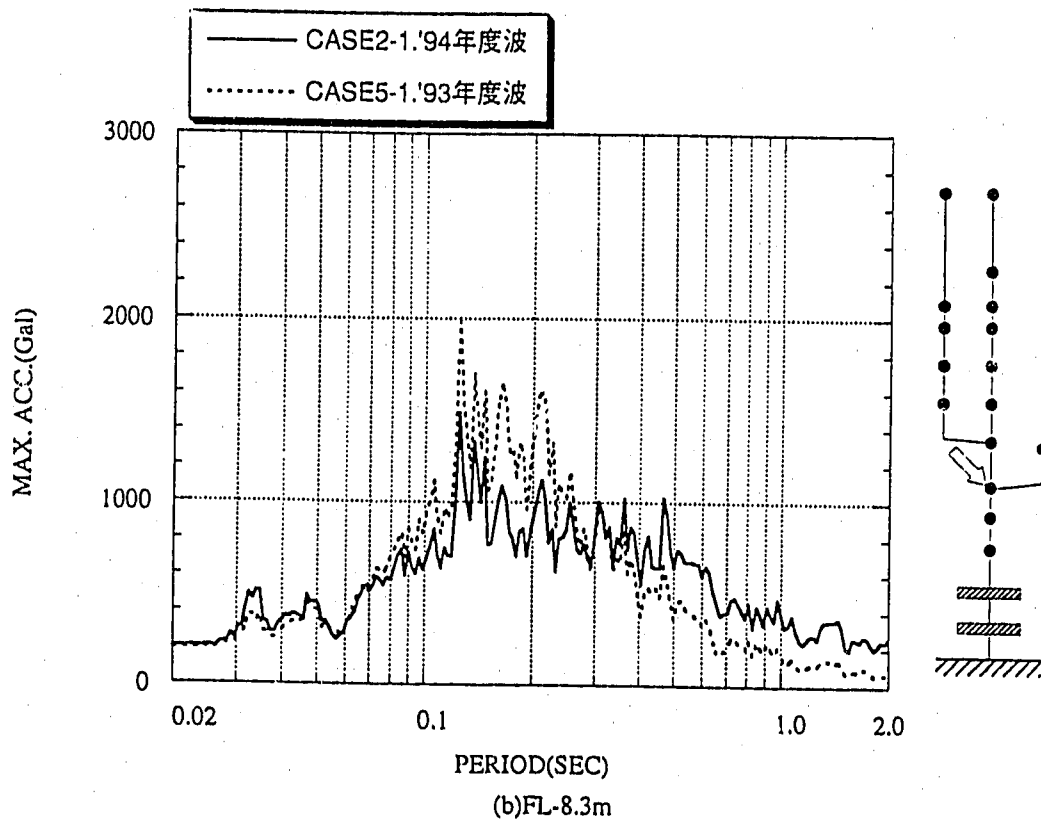
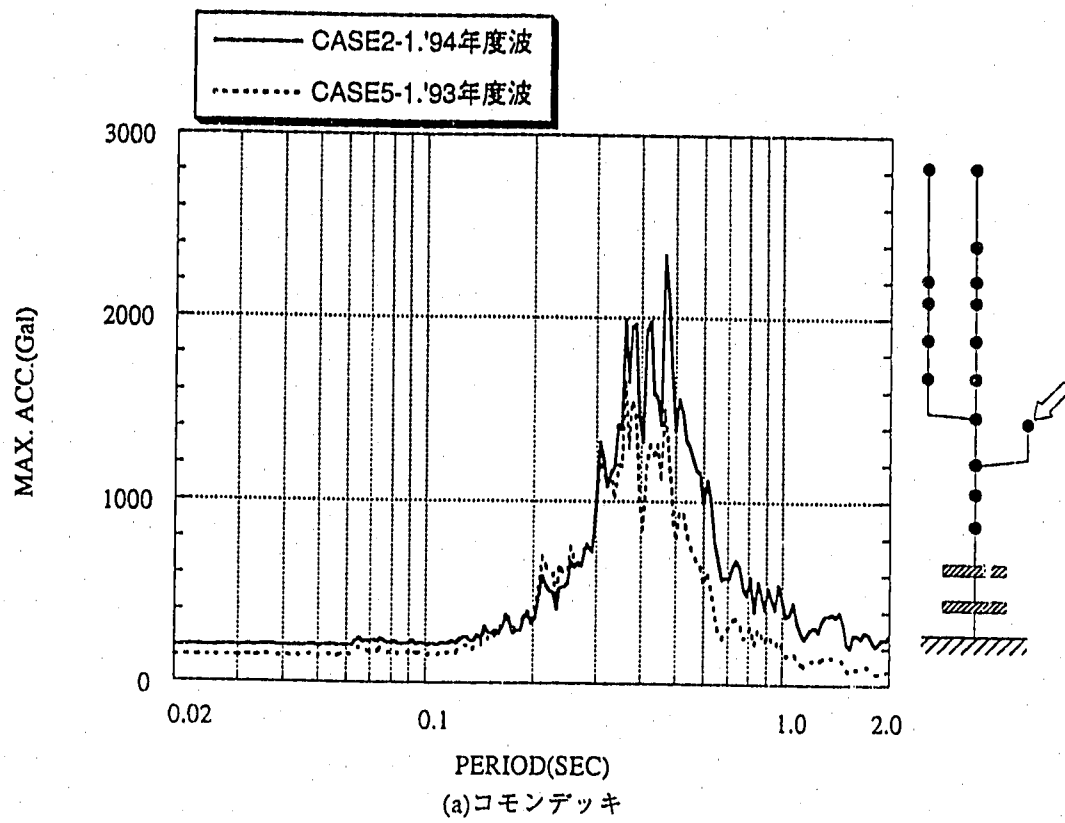


図3.4.7 床応答スペクトルの比較
 (h=1%、機器免震振動数2.5Hz、 $V_s=1000\text{m/s}$)

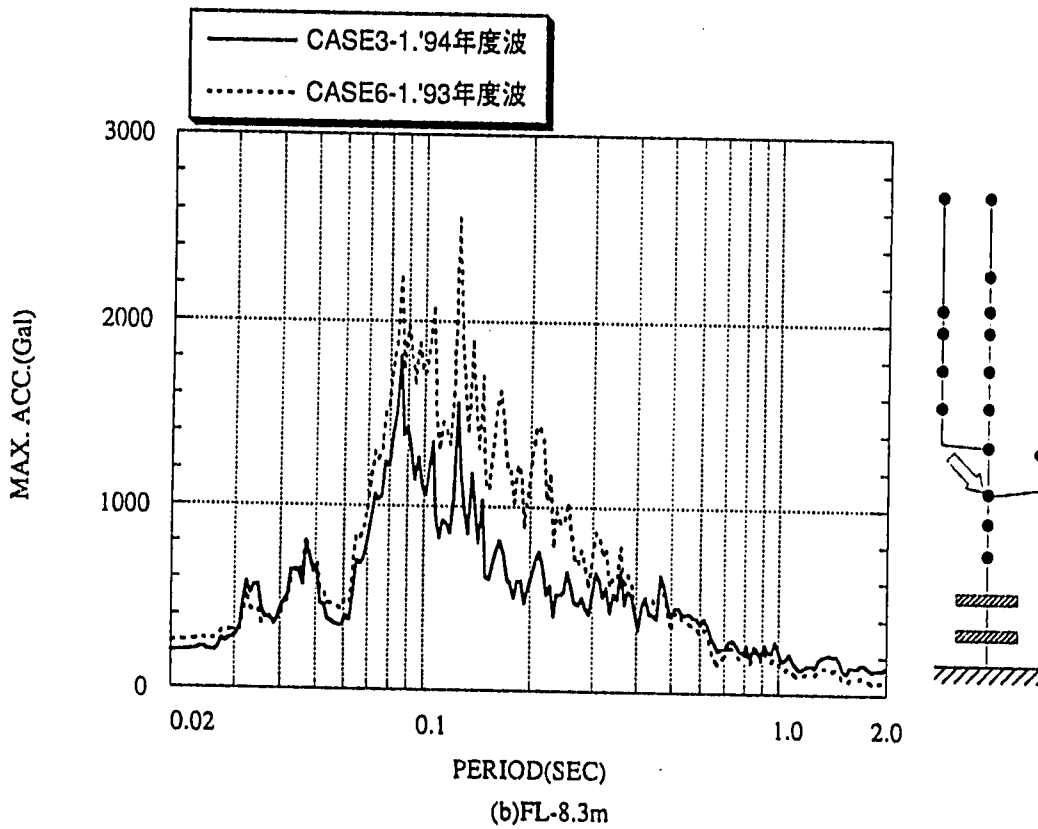
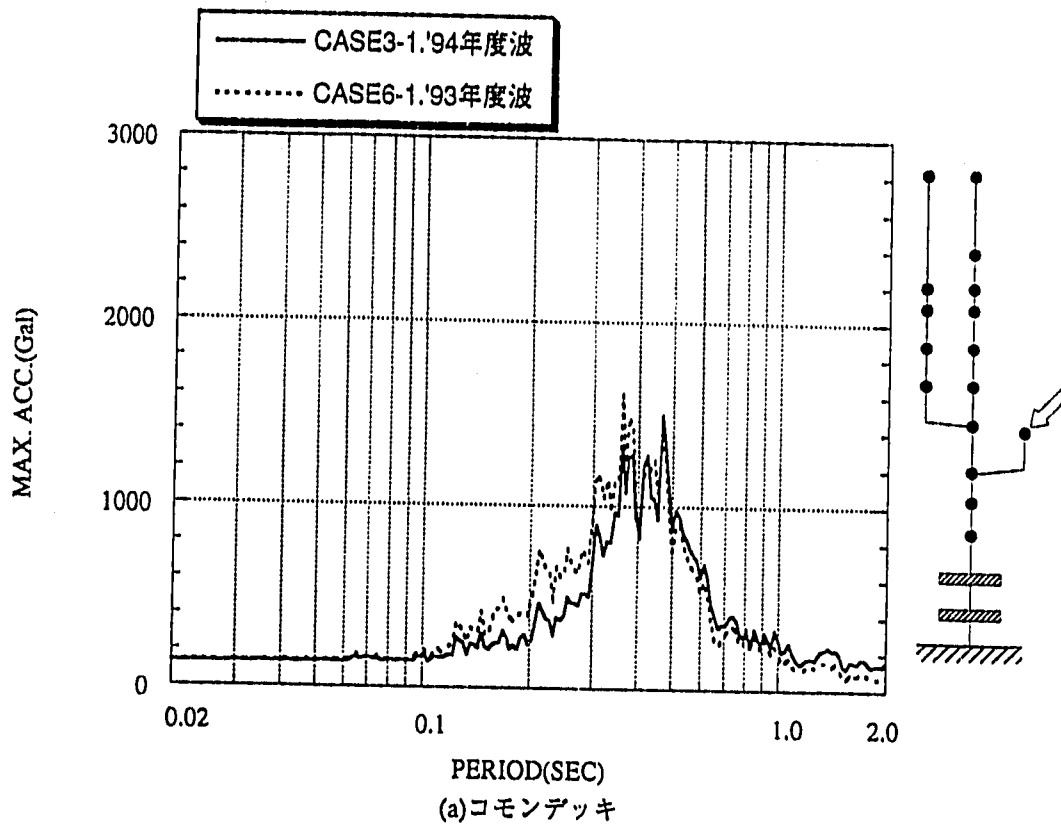


図3.4.8 床応答スペクトルの比較
 (h=1%、機器免震振動数2.5Hz、Vs=2000m/s)

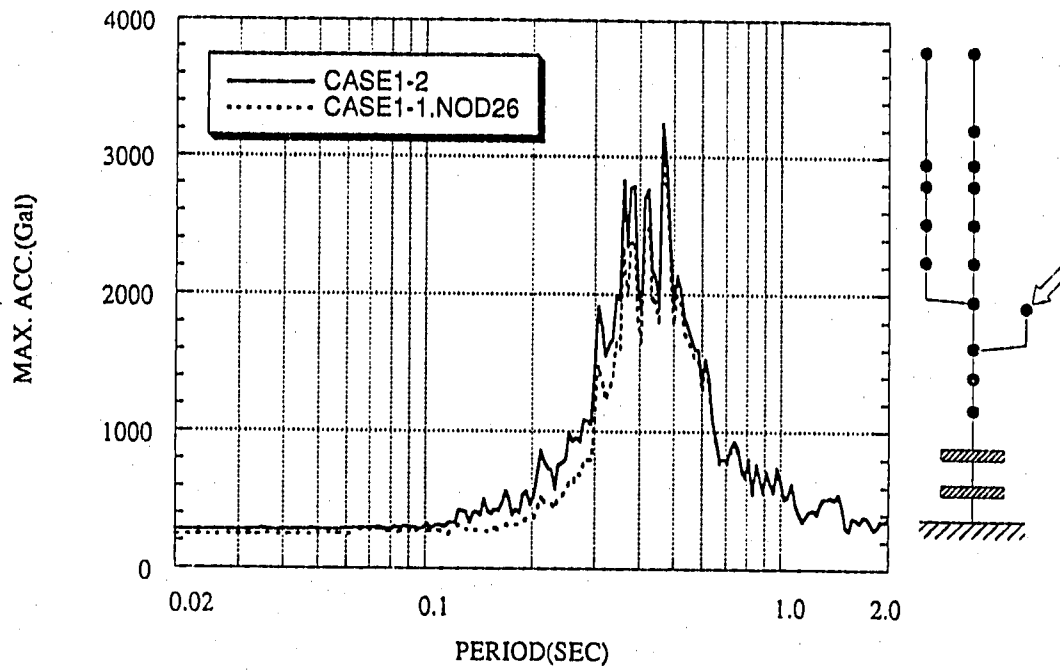


図3.4.9 床応答スペクトルの比較 (Case1-1 (コモンデッキ連成)、機器単独モデルにCase1-2 (コモンデッキ非連成) のNOD5の応答を入力、 $V_s=700\text{m/s}$ 、免震振動数2.5Hz、減衰1%)

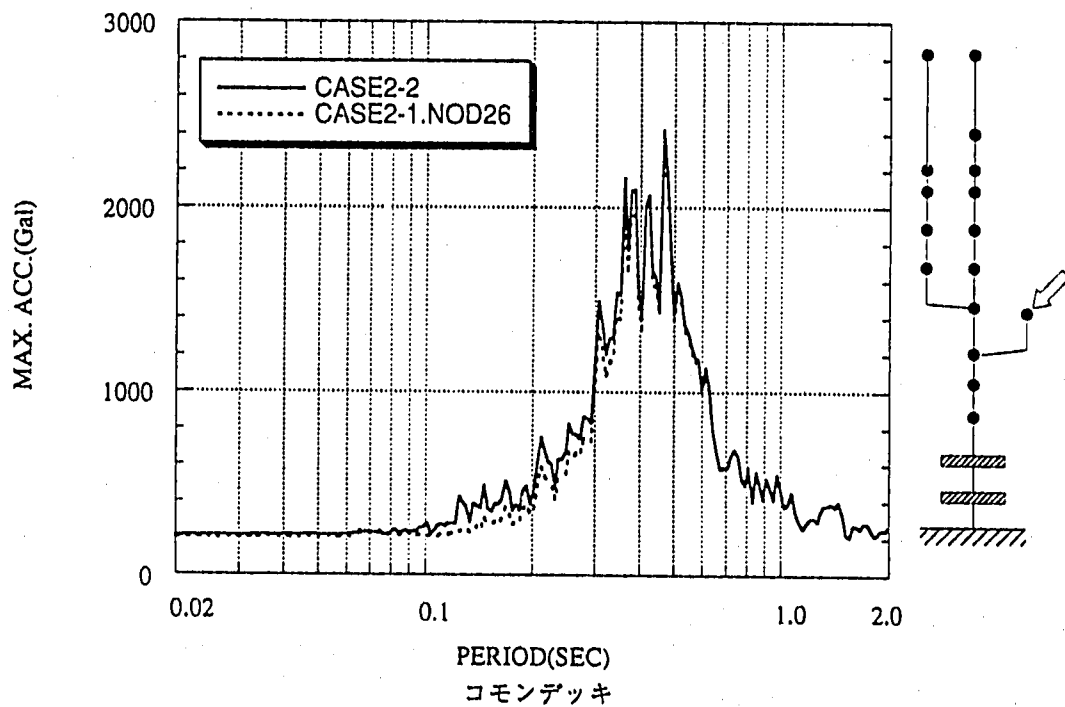


図3.4.10 床応答スペクトルの比較 (Case2-1 (コモンデッキ連成)、機器単独モデルにCase2-2 (コモンデッキ非連成) のNOD5の応答を入力、 $V_s=1000\text{m/s}$ 、免震振動数2.5Hz、減衰1%)

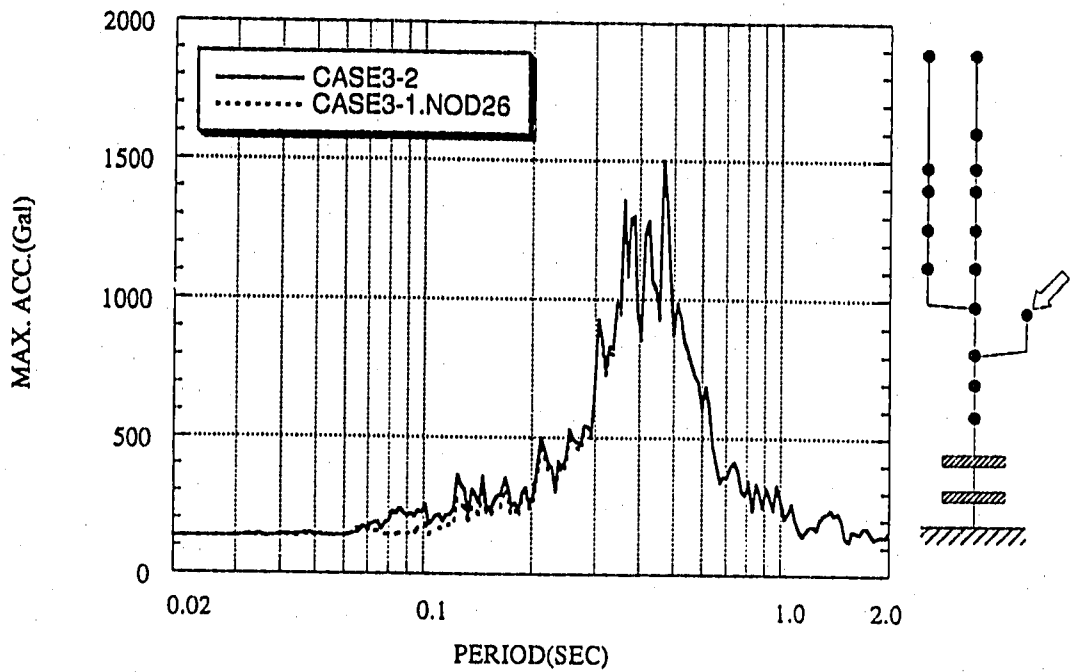


図3.4.11 床応答スペクトルの比較 (Case3-1 (コモンデッキ連成)、
機器単独モデルにCase3-2 (コモンデッキ非連成) のNOD5の応答を入力、
 $V_s=2000\text{m/s}$ 、免震振動数2.5Hz、減衰1%)

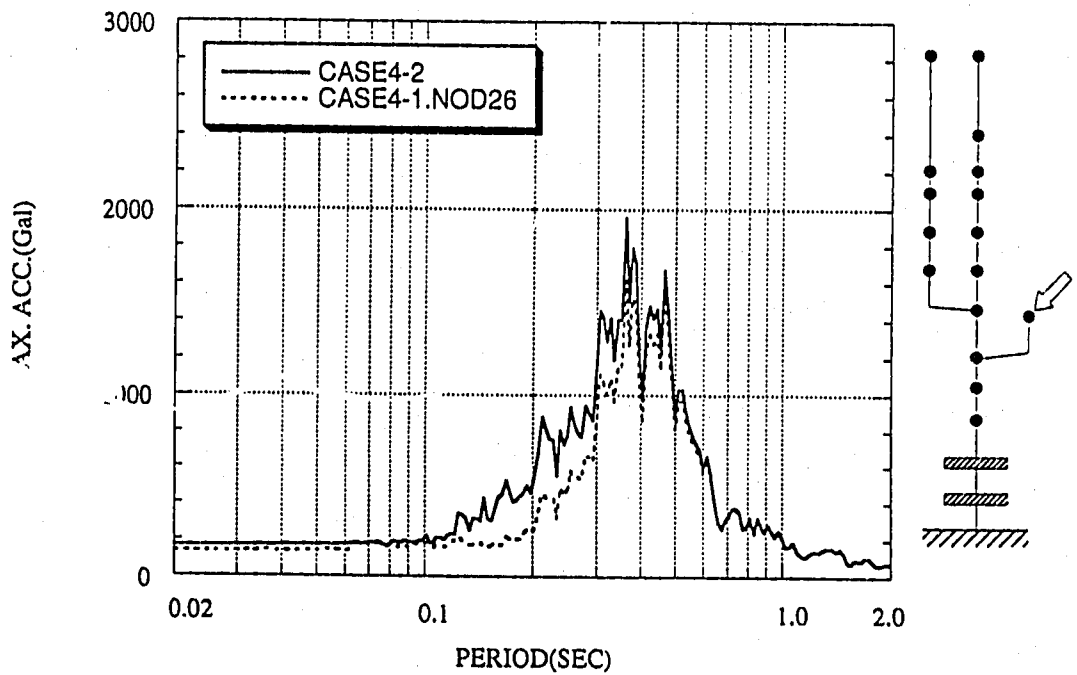


図3.4.12 床応答スペクトルの比較 (Case4-1 (コモンデッキ連成)、
機器単独モデルにCase4-2 (コモンデッキ非連成) のNOD5の応答を入力、
 $V_s=700\text{m/s}$ 、免震振動数2.5Hz、減衰1%)

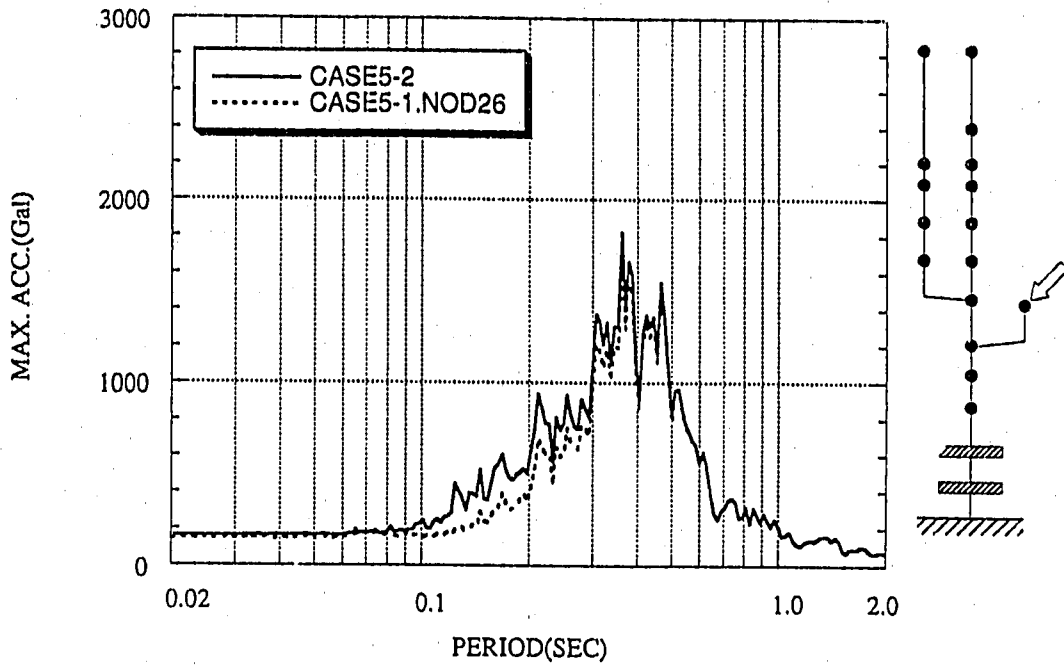


図3.4.13 床応答スペクトルの比較 (Case5-1 (コモンデッキ連成)、機器単独モデルにCase5-2 (コモンデッキ非連成) のNOD5の応答を入力、 $V_s=1000\text{m/s}$ 、免震振動数2.5Hz、減衰1%)

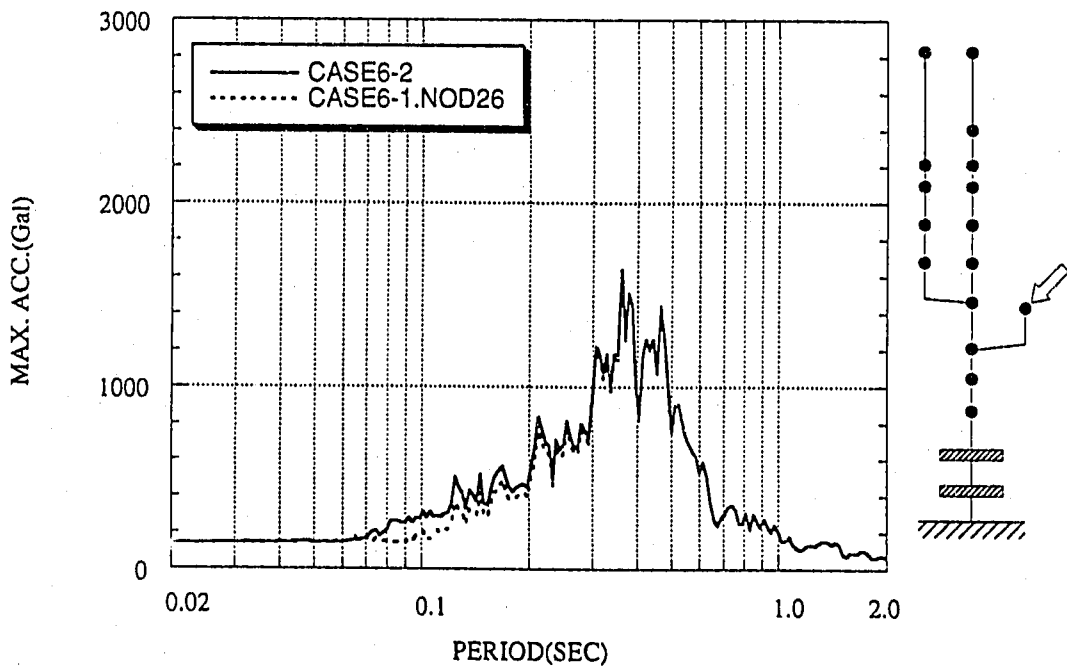


図3.4.14 床応答スペクトルの比較 (Case6-1 (コモンデッキ連成)、機器単独モデルにCase6-2 (コモンデッキ非連成) のNOD5の応答を入力、 $V_s=2000\text{m/s}$ 、免震振動数2.5Hz、減衰1%)

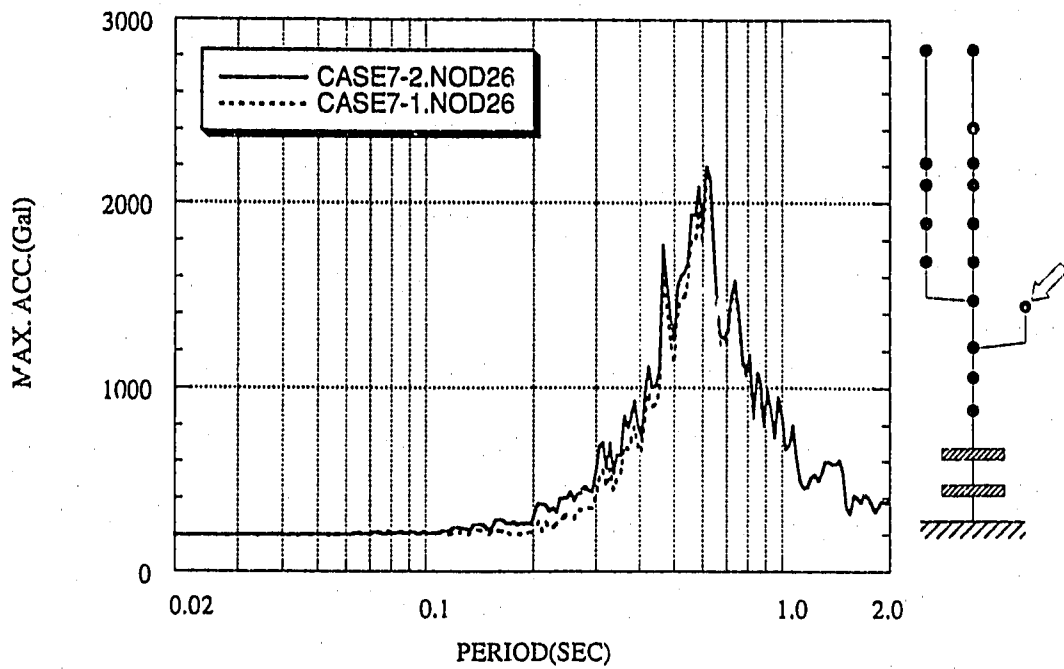


図3.4.15 床応答スペクトルの比較 (Case7-1 (コモンデッキ連成)、機器単独モデルにCase1-2 (コモンデッキ非連成) のNOD5の応答を入力、 $V_s=700\text{m/s}$ 、免震振動数1.6Hz、減衰1%)

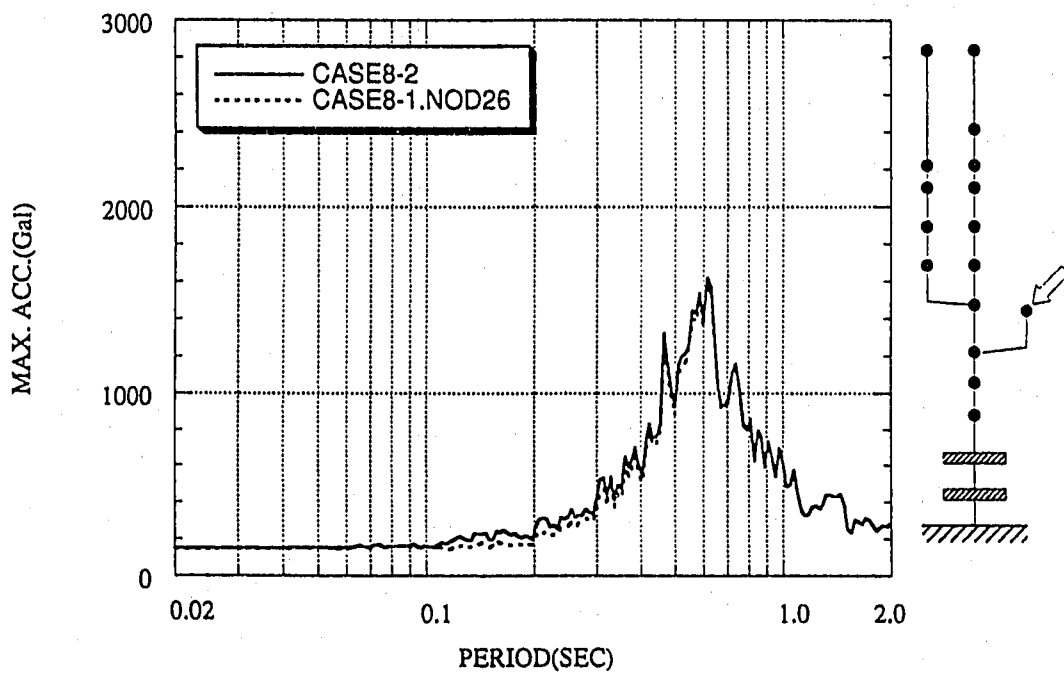


図3.4.16 床応答スペクトルの比較 (Case8-1 (コモンデッキ連成)、機器単独モデルにCase2-2 (コモンデッキ非連成) のNOD5の応答を入力、 $V_s=1000\text{m/s}$ 、免震振動数1.6Hz、減衰1%)

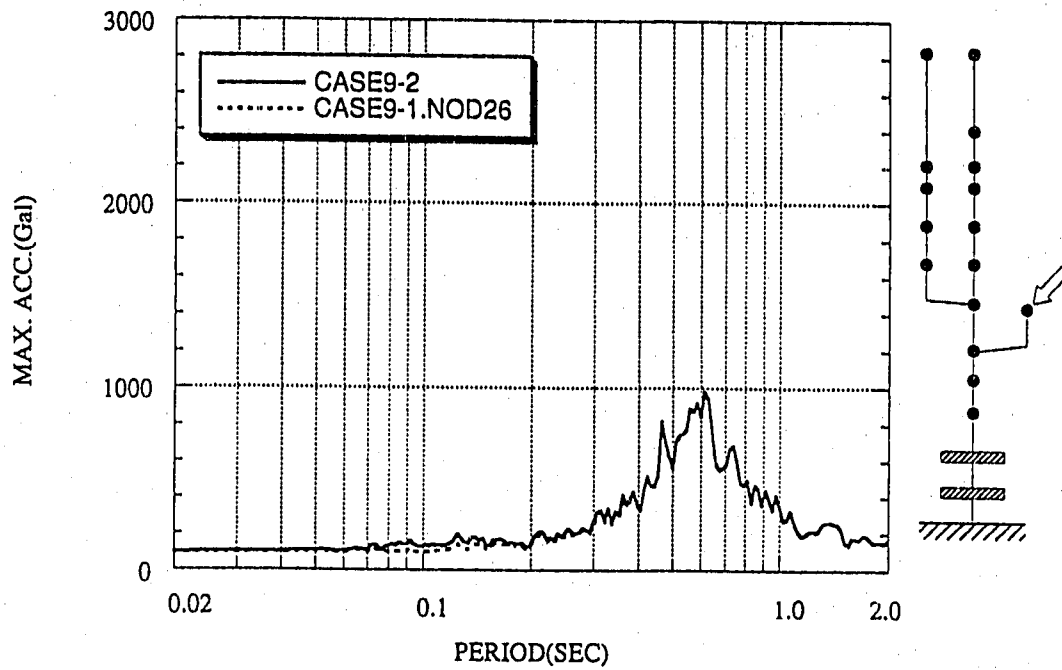


図3.4.17 床応答スペクトルの比較 (Case9-1 (コモンデッキ連成)、機器単独モデルにCase3-2 (コモンデッキ非連成) のNOD5の応答を入力、 $V_s=2000\text{m/s}$ 、免震振動数1.6Hz、減衰1%)

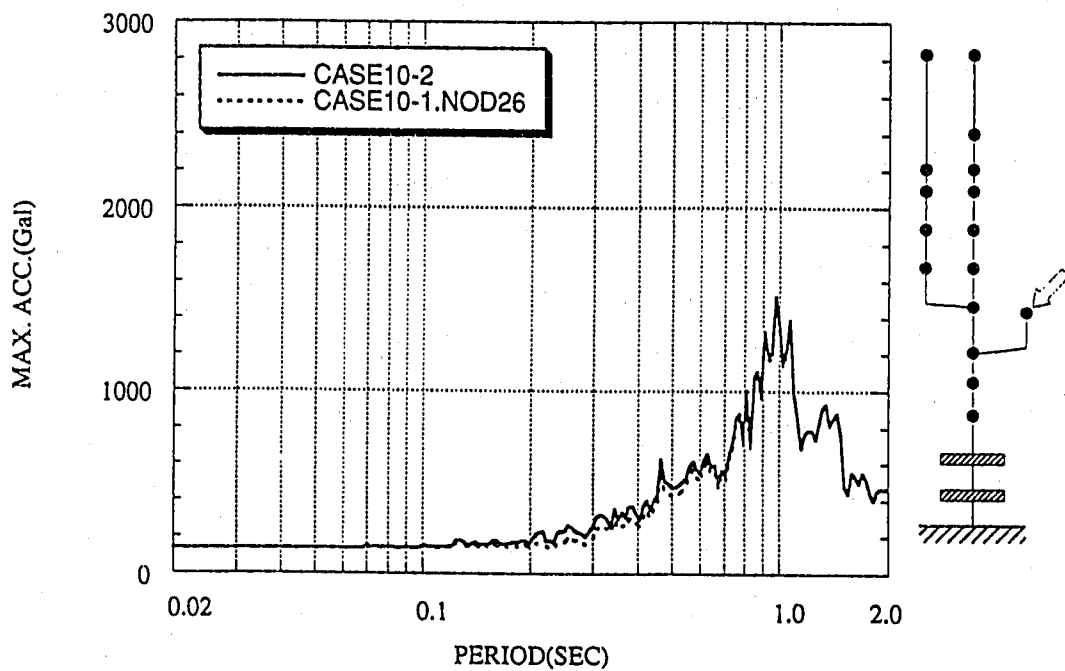


図3.4.18 床応答スペクトルの比較 (Case10-1 (コモンデッキ連成)、機器単独モデルにCase1-2 (コモンデッキ非連成) のNOD5の応答を入力、 $V_s=700\text{m/s}$ 、免震振動数1.0Hz、減衰1%)

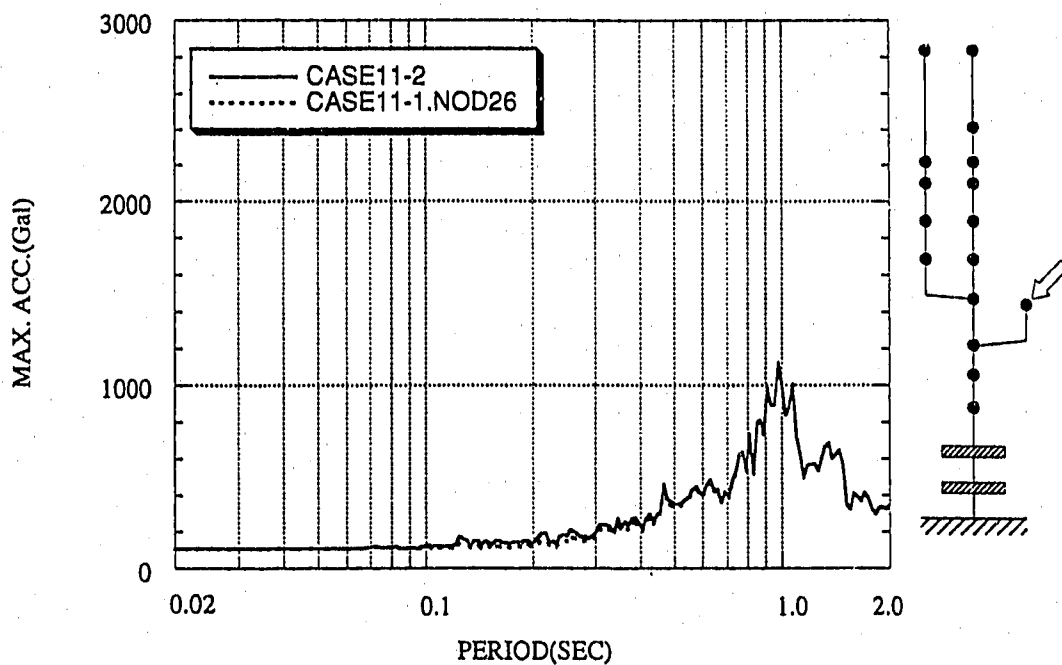


図3.4.19 床応答スペクトルの比較 (Case11-1 (コモンデッキ連成)、
機器単独モデルにCase2-2 (コモンデッキ非連成) のNOD5の応答を入力、
 $V_s=1000\text{m/s}$ 、免震振動数1.0Hz、減衰1%)

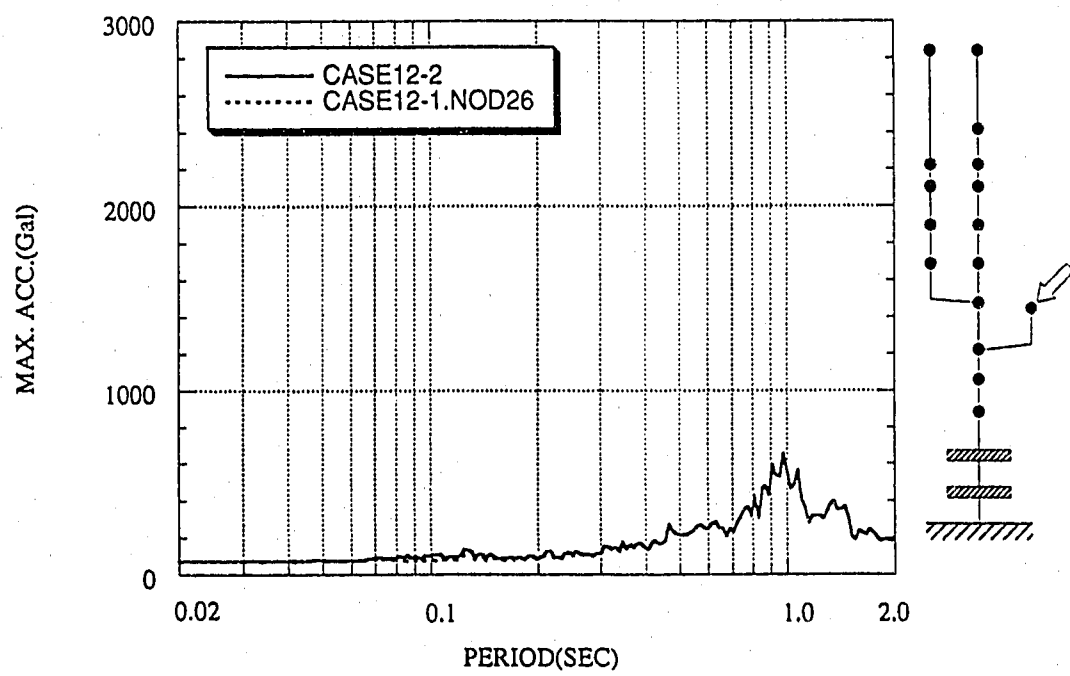


図3.4.20 床応答スペクトルの比較 (Case12-1 (コモンデッキ連成)、
機器単独モデルにCase3-2 (コモンデッキ非連成) のNOD5の応答を入力、
 $V_s=2000\text{m/s}$ 、免震振動数1.0Hz、減衰1%)

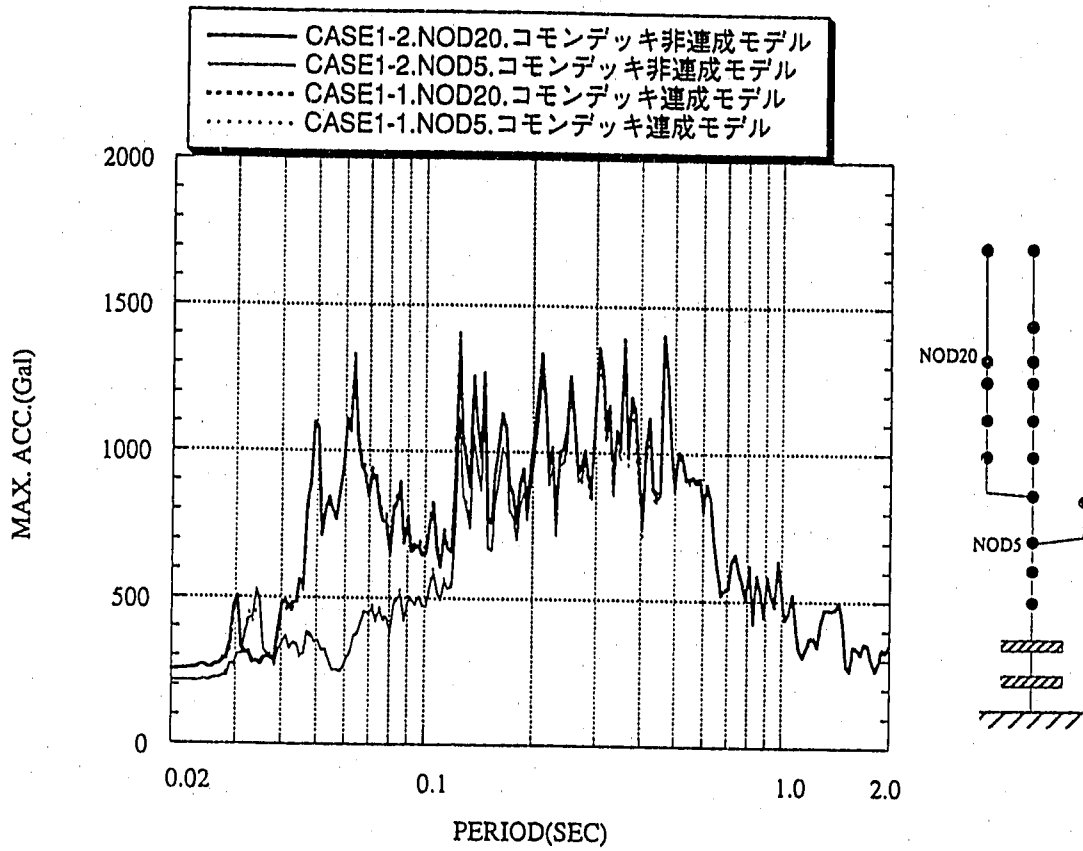


図3.4.21 床応答スペクトルの比較
($h=1\%$ 、'94年度波、 $V_s=700\text{m/s}$)

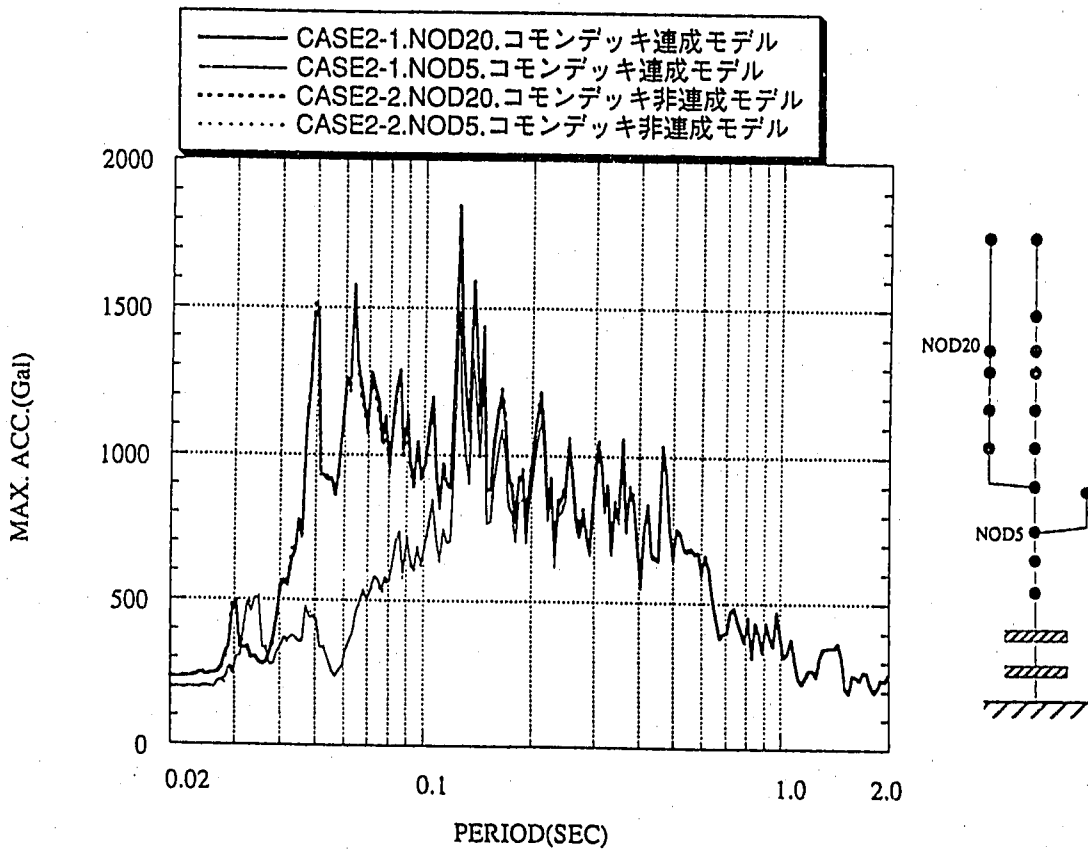


図3.4.22 床応答スペクトルの比較
($h=1\%$ 、'94年度波、 $V_s=1000\text{m/s}$)

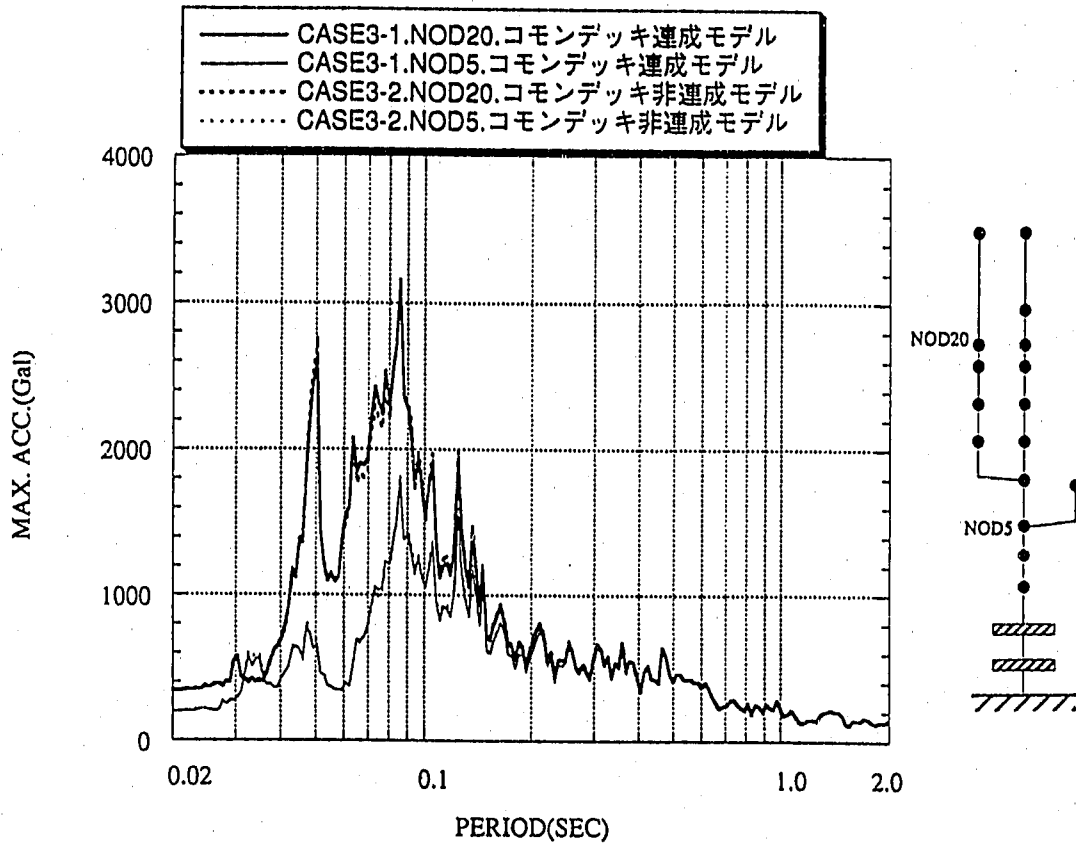


図3.4.23 床応答スペクトルの比較
($h=1\%$ 、'94年度波、 $V_s=2000\text{m/s}$)

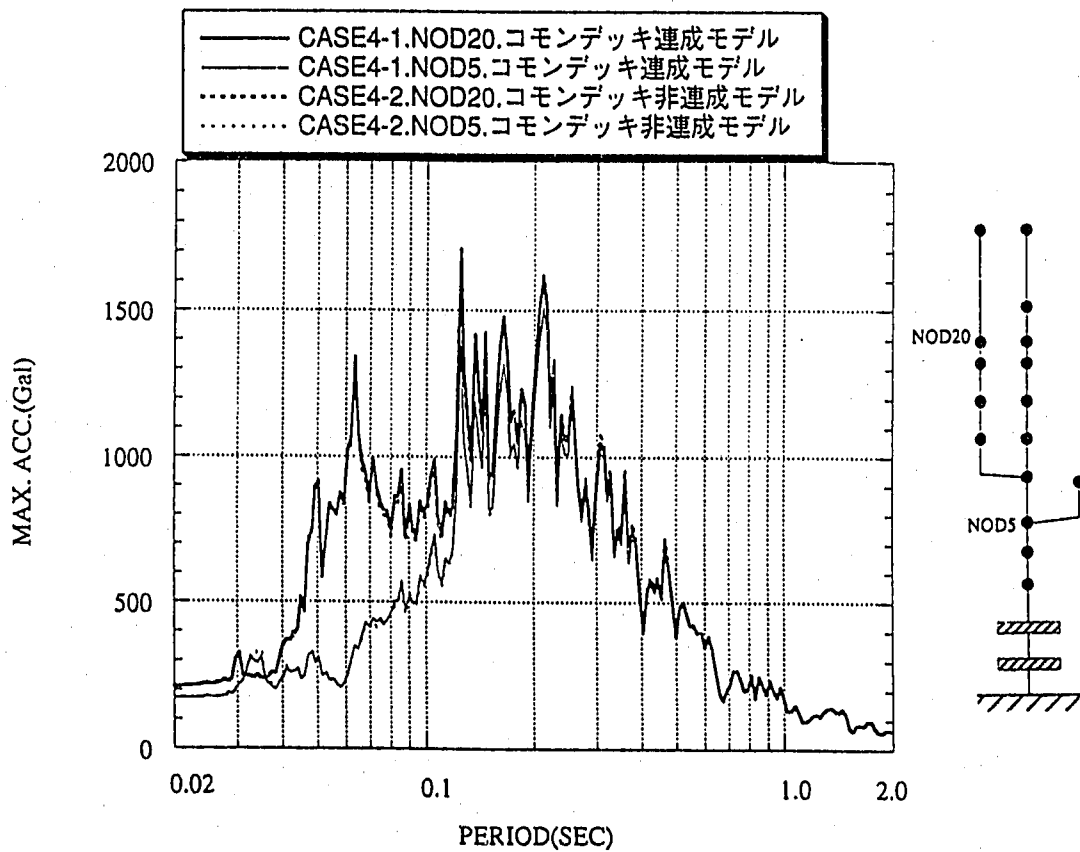


図3.4.24 床応答スペクトルの比較
($h=1\%$ 、'93年度波、 $V_s=700\text{m/s}$)

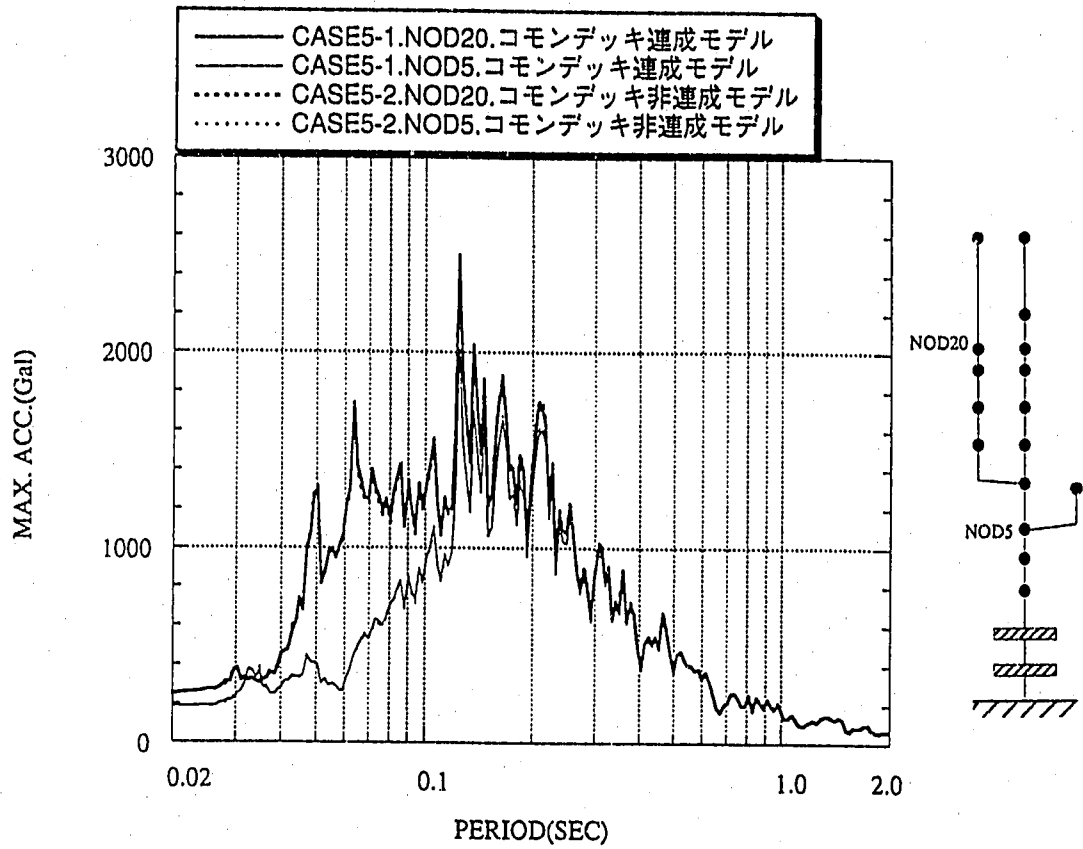


図3.4.25 床応答スペクトルの比較
($h=1\%$ 、'93年度波、 $V_s=1000\text{m/s}$)

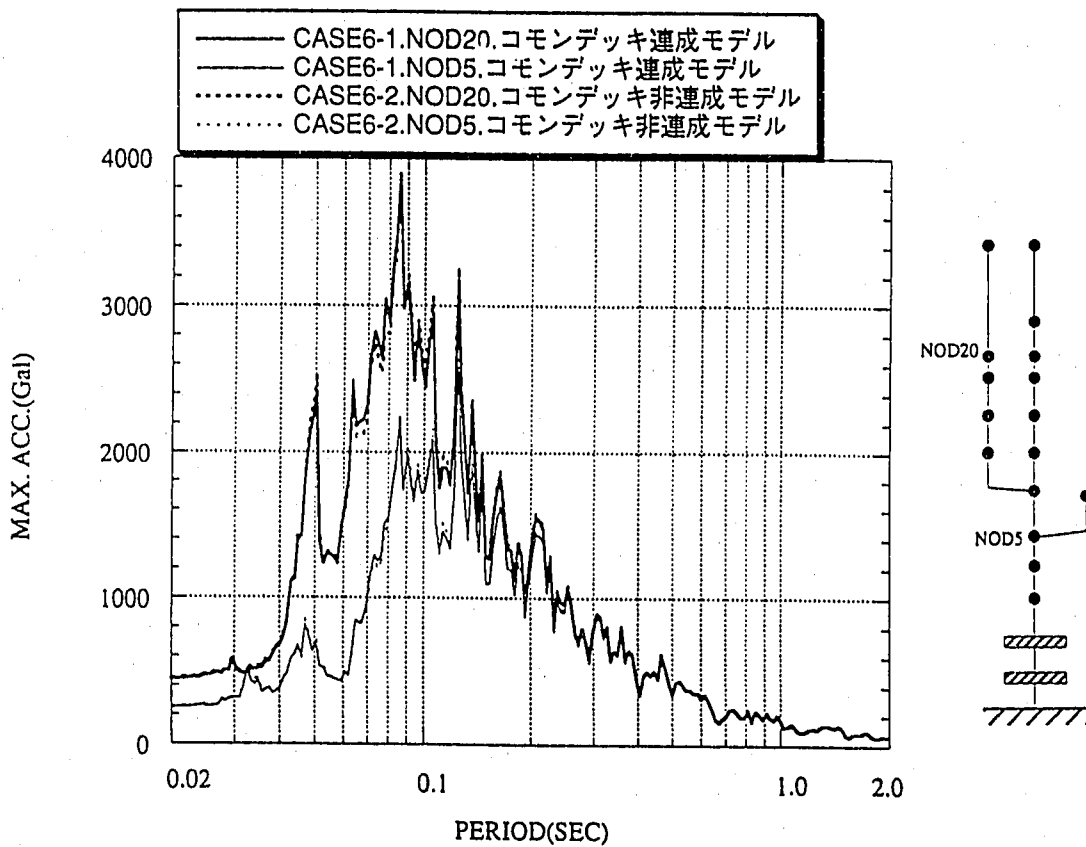


図3.4.26 床応答スペクトルの比較
($h=1\%$ 、'93年度波、 $V_s=2000\text{m/s}$)

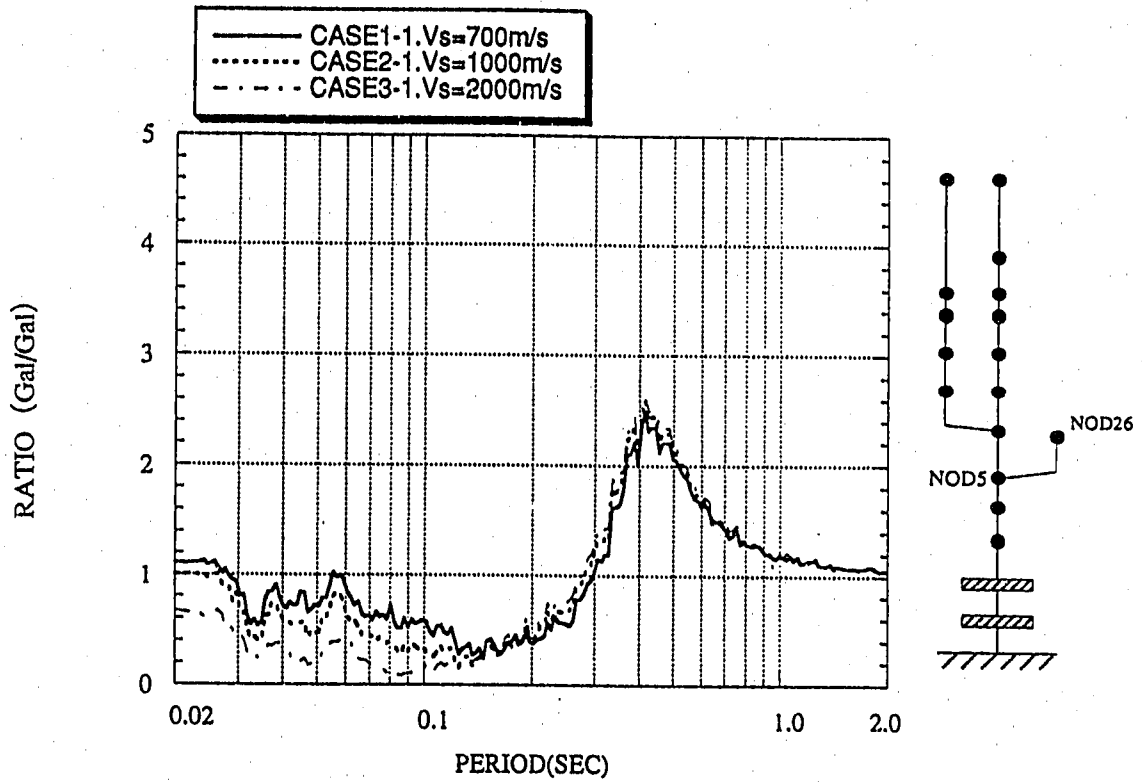


図3.4.27 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
($\eta=1\%$ 、'94年度波、機器免震振動数2.5Hz)

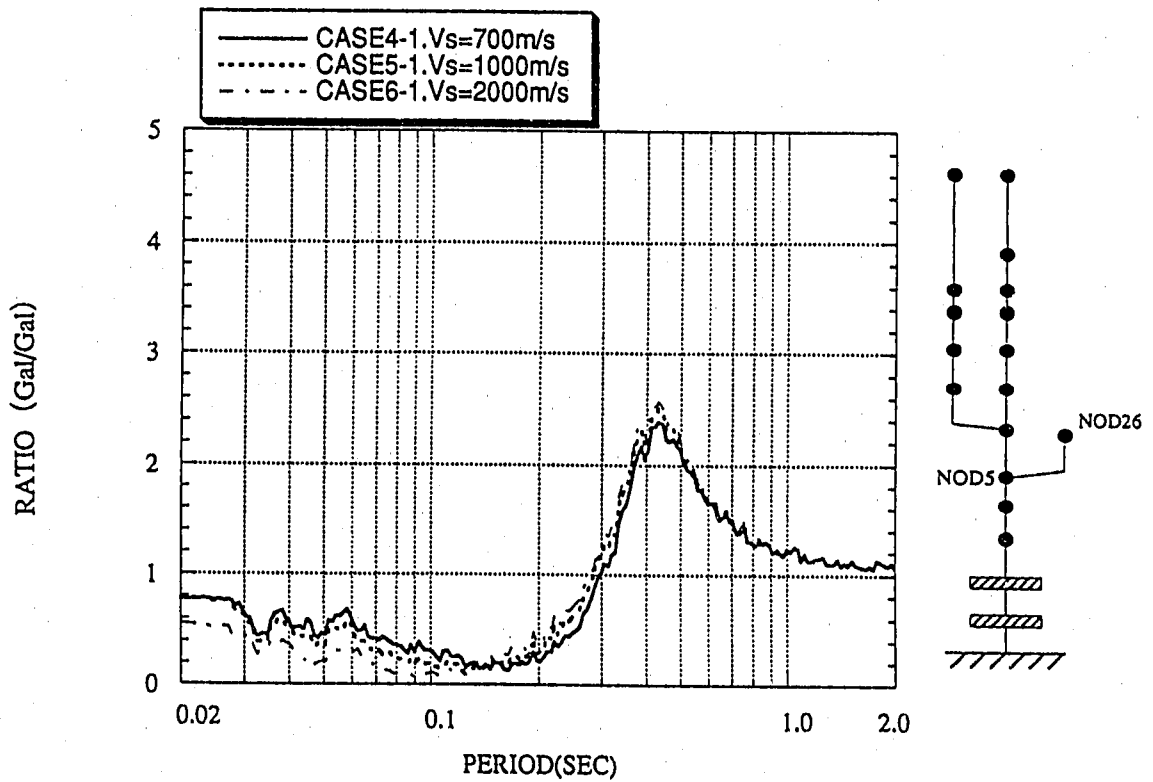


図3.4.28 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
($\eta=1\%$ 、'93年度波、機器免震振動数2.5Hz)

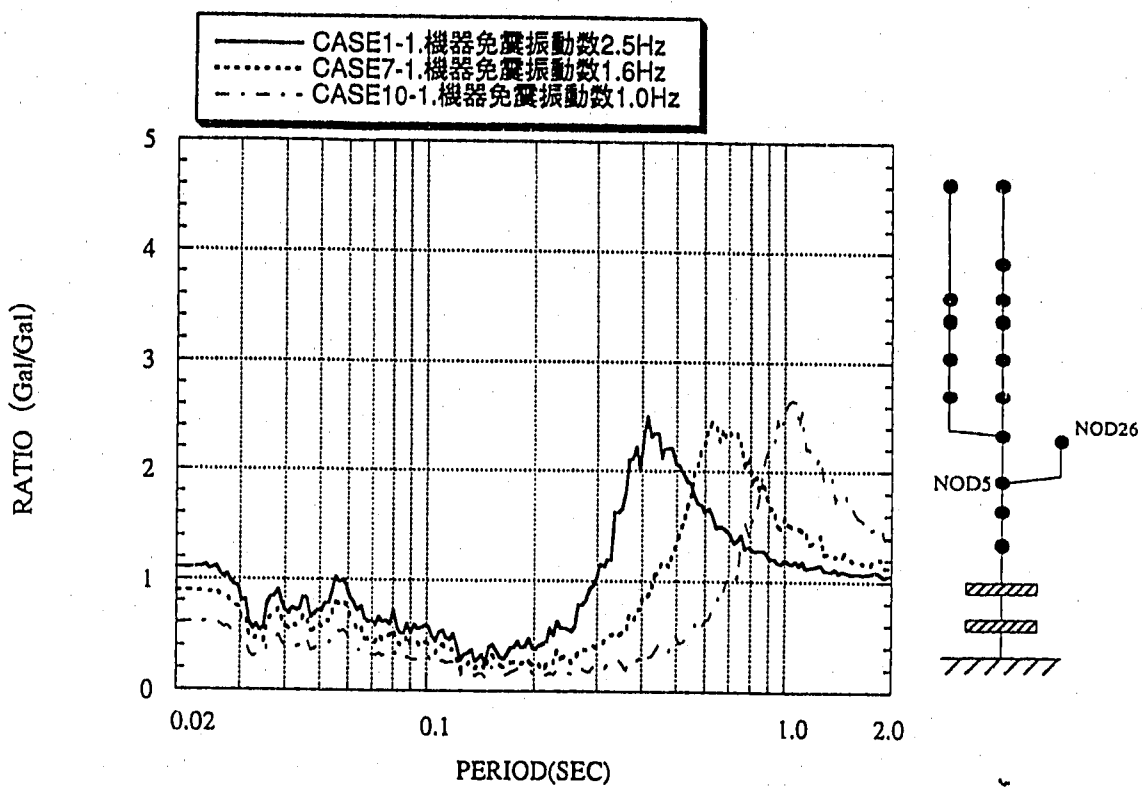


図3.4.29 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
(h=1%、'93年度波、 $V_s=700\text{m/s}$)

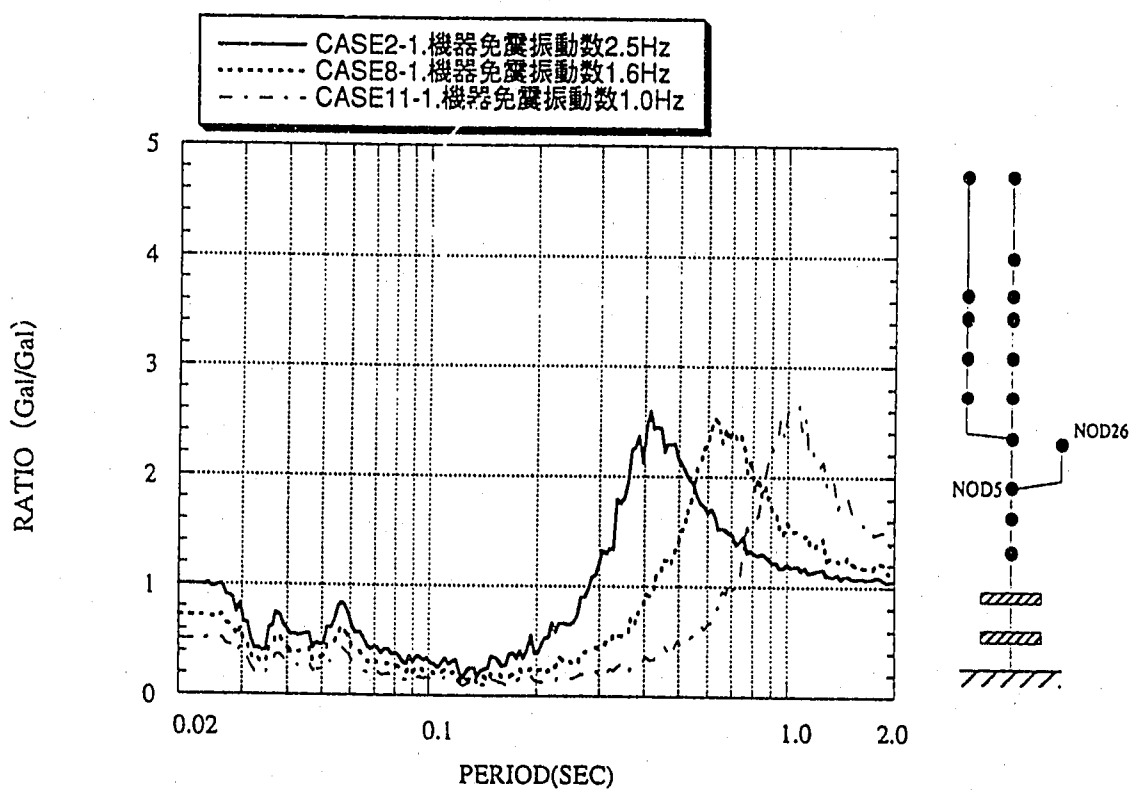


図3.4.30 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
(h=1%、'93年度波、 $V_s=1000\text{m/s}$)

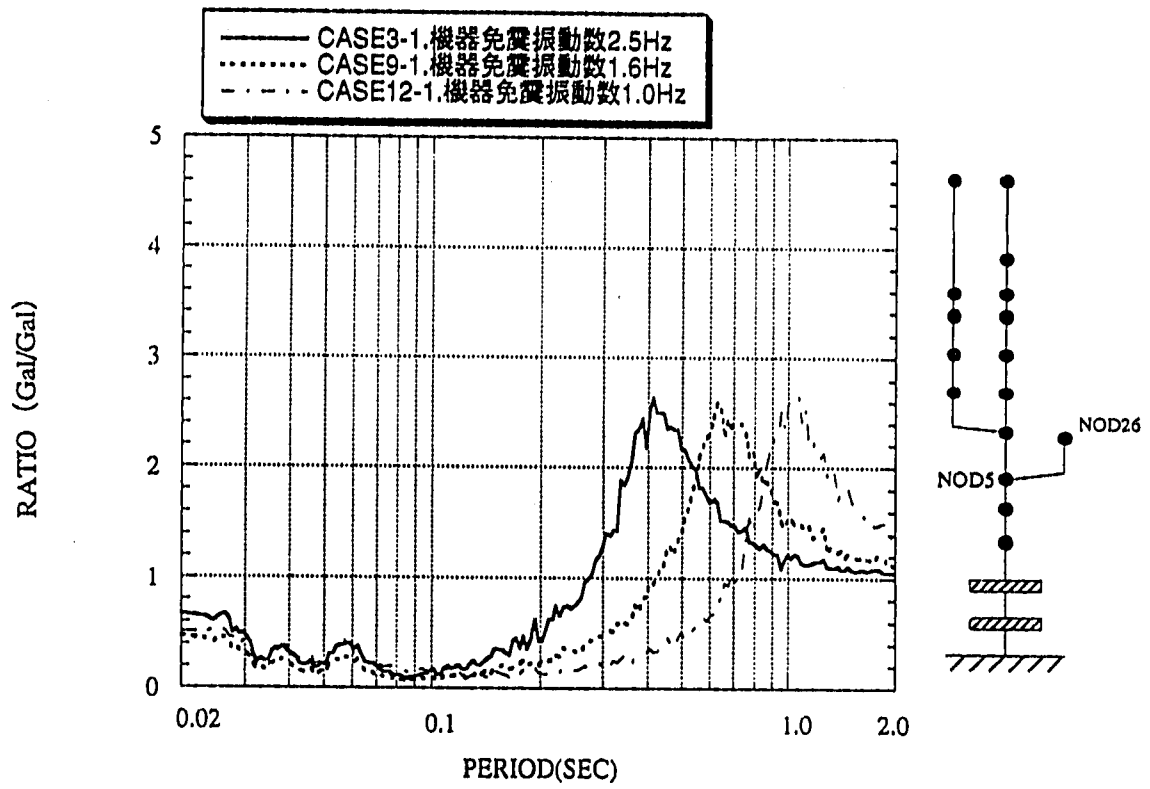


図3.4.31 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
 (h=1%、'93年度波、Vs=2000m/s)

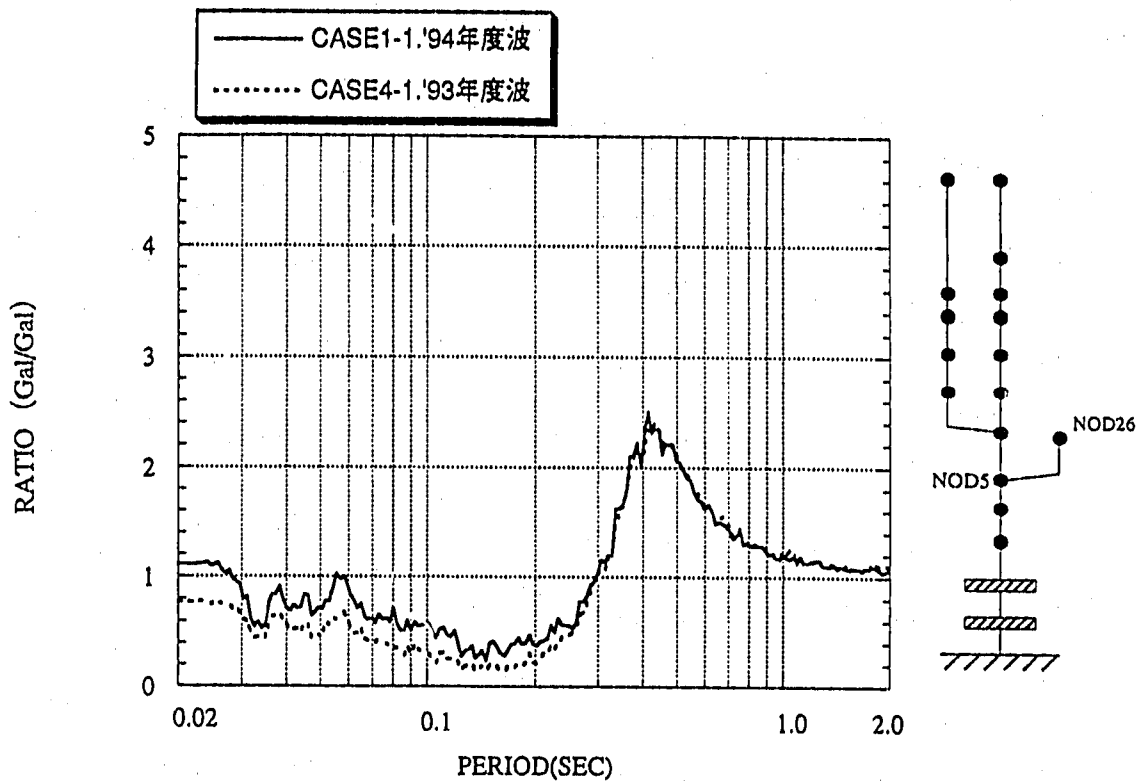


図3.4.32 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
 (h=1%、機器免震振動数2.5Hz、 $V_s=700\text{m/s}$)

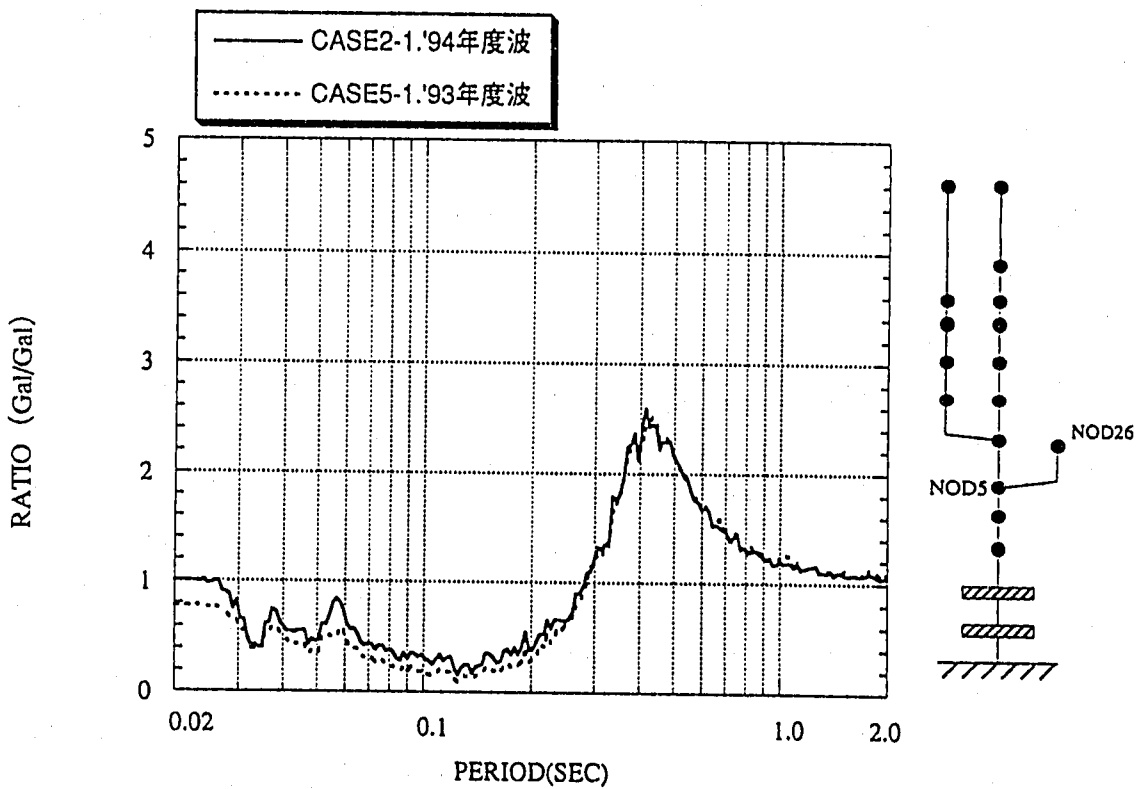


図3.4.33 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
 (h=1%、機器免震振動数2.5Hz、 $V_s=1000\text{m/s}$)

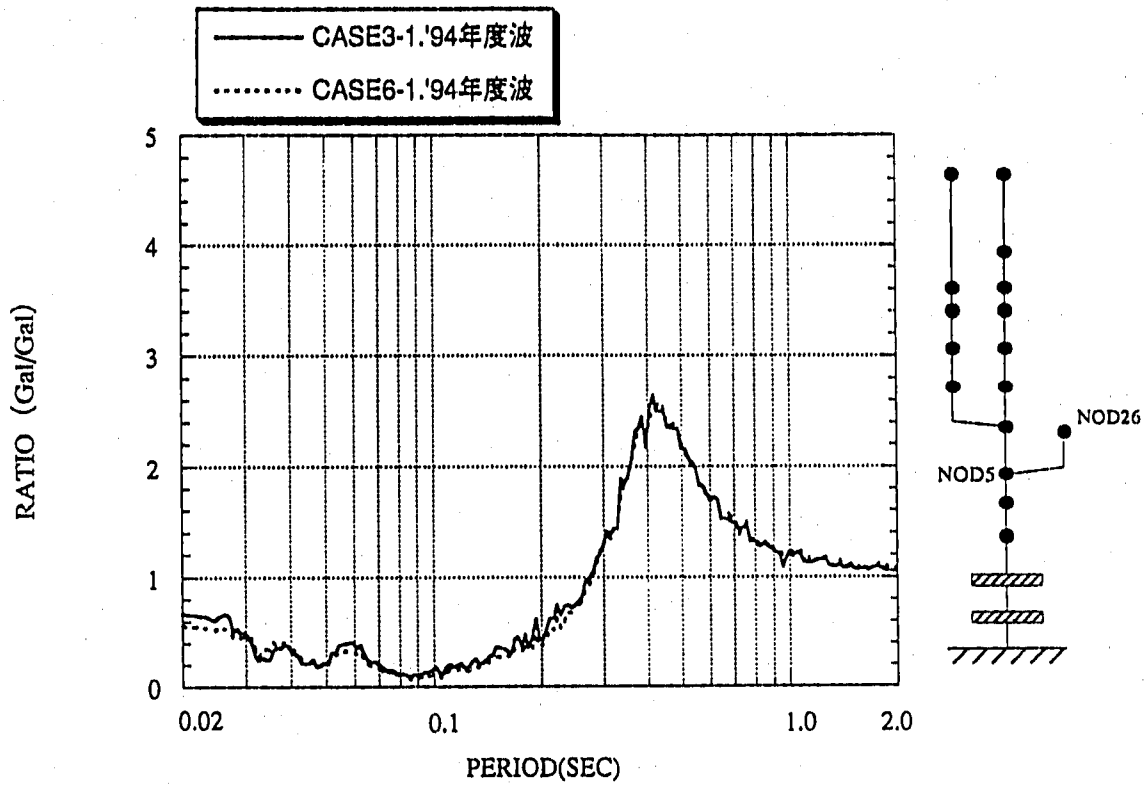
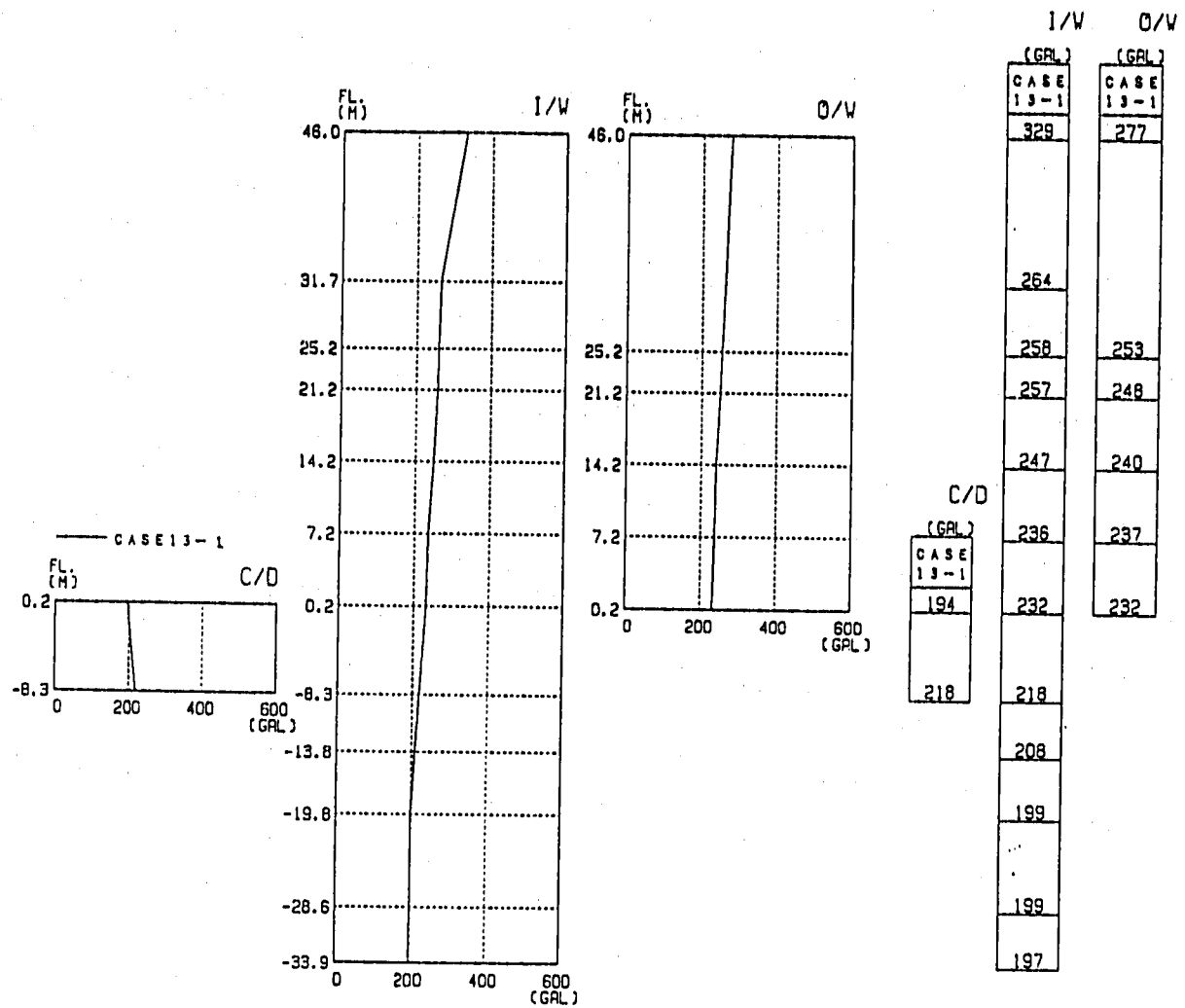


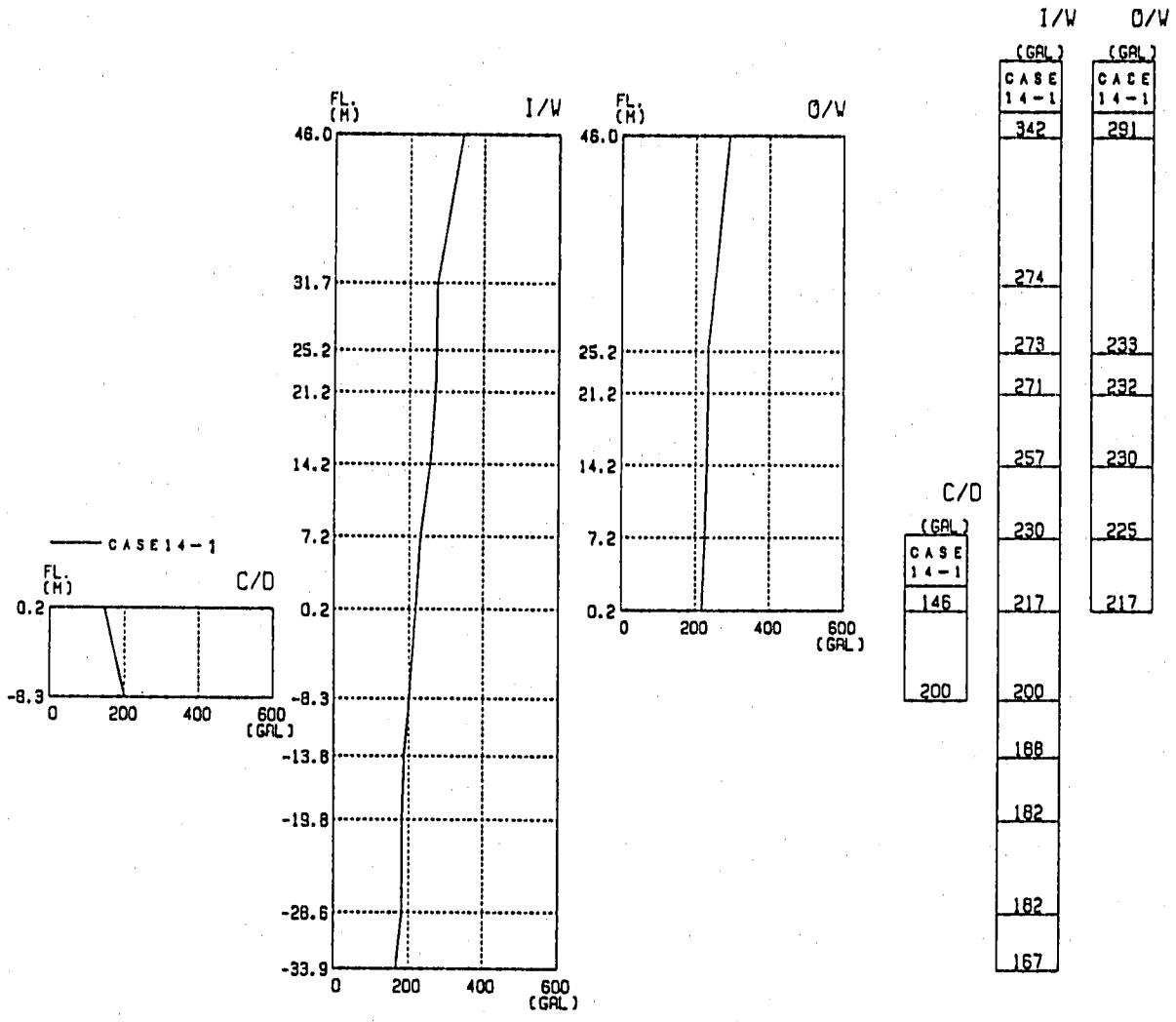
図3.4.34 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
 (h=1%、機器免震振動数2.5Hz、Vs=2000m/s)



最大応答加速度

図3.5.1 最大応答加速度分布 (Case13-1)

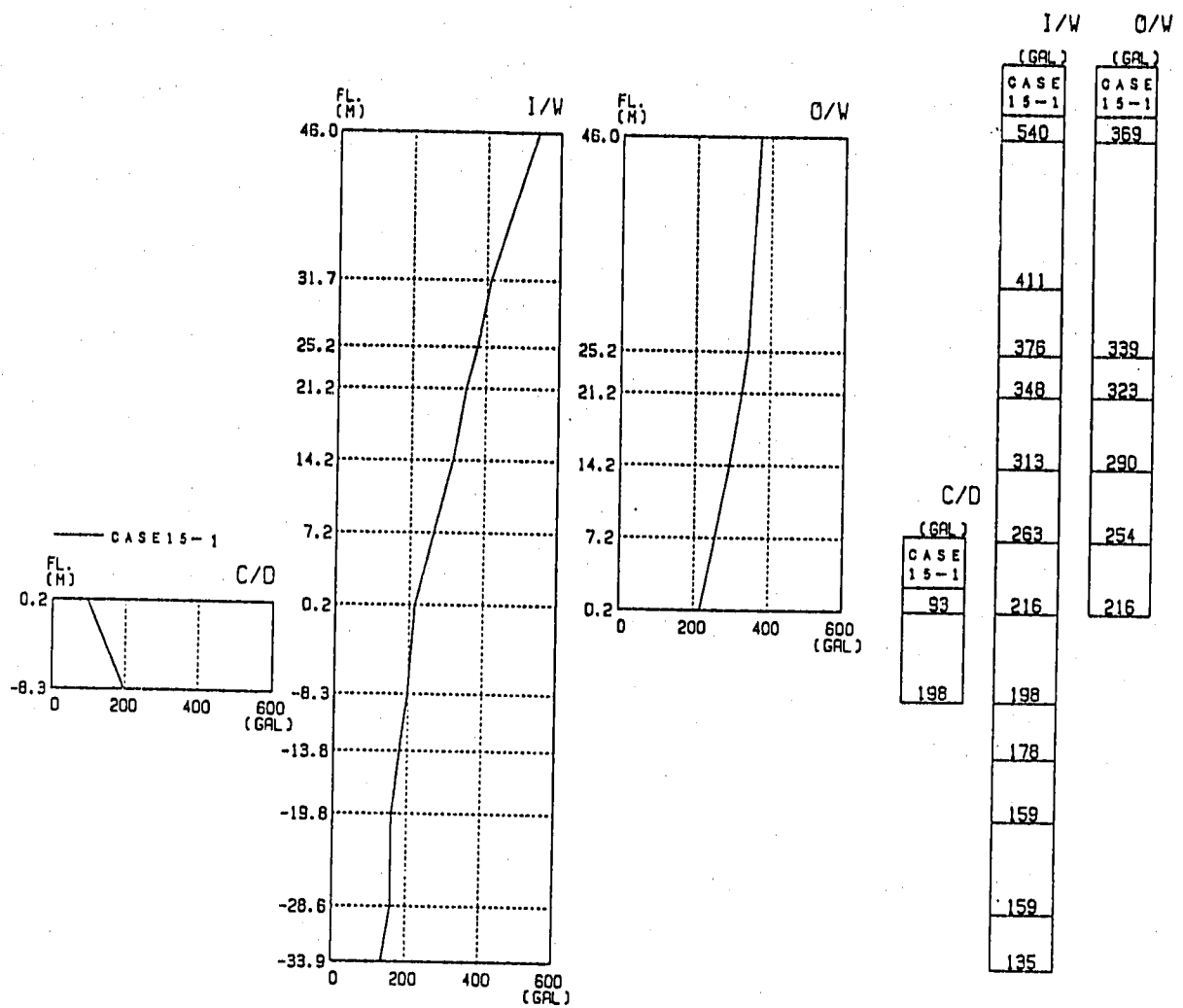
('94年度波、コモンデッキ連成モデル、機器免震振動数1.0Hz、機器免震減衰10%、 $V_s=700\text{m/s}$)



最大応答加速度

図3.5.2 最大応答加速度分布 (Case14-1)

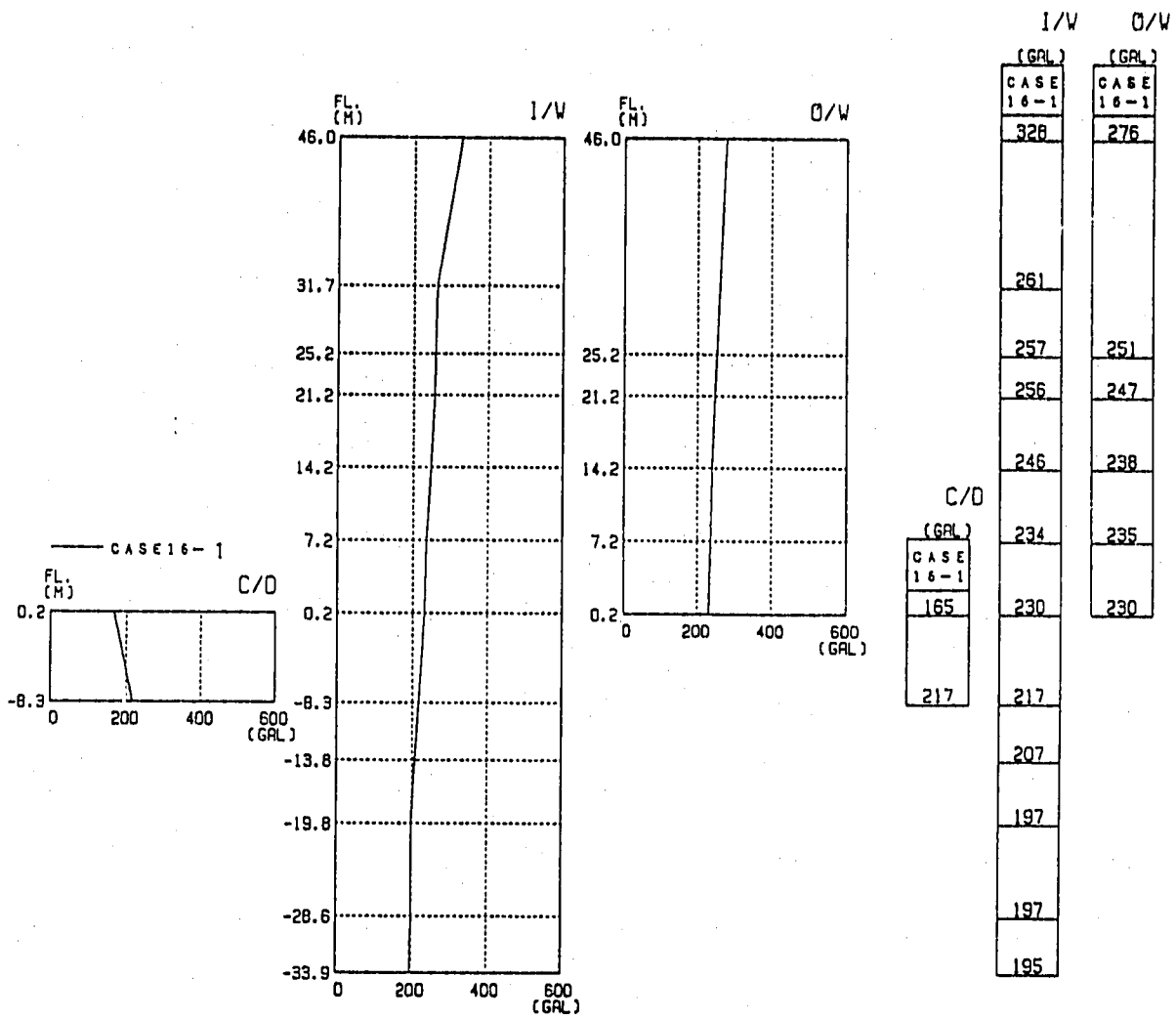
(’94年度波、コモンデッキ連成モデル、機器免震振動数1.0Hz、機器免震減衰10%、Vs=1000m/s)



最大応答加速度

図3.5.3 最大応答加速度分布 (Case15-1)

('94年度波、コモンデッキ連成モデル、機器免震振動数1.0Hz、機器免震減衰10%、 $V_s=2000\text{m/s}$)



最大応答加速度

図3.5.4 最大応答加速度分布 (Case16-1)

('94年度波、コモンデッキ連成モデル、機器免震振動数2.5Hz、機器免震減衰40%、 $V_s=700\text{m/s}$)

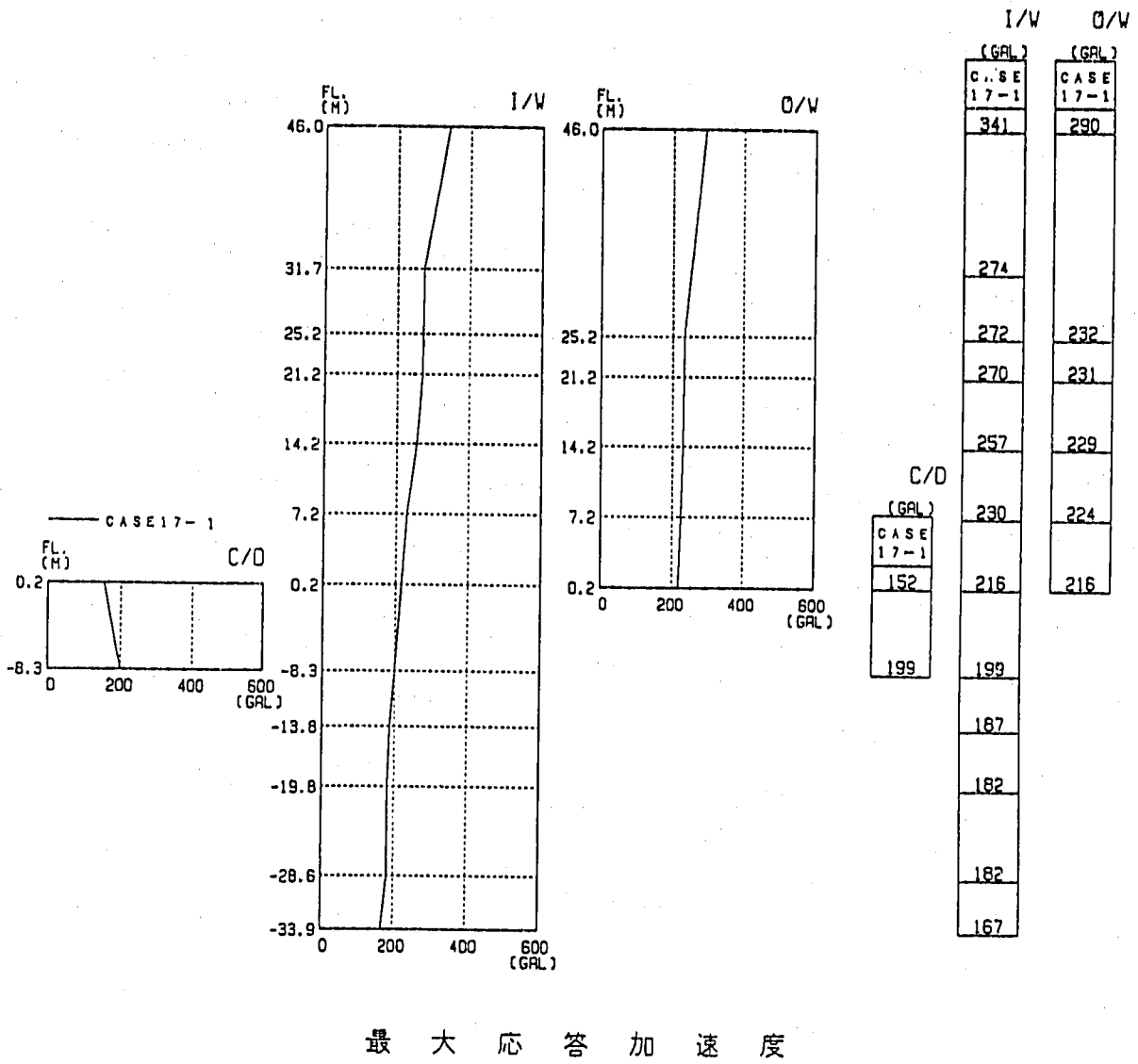
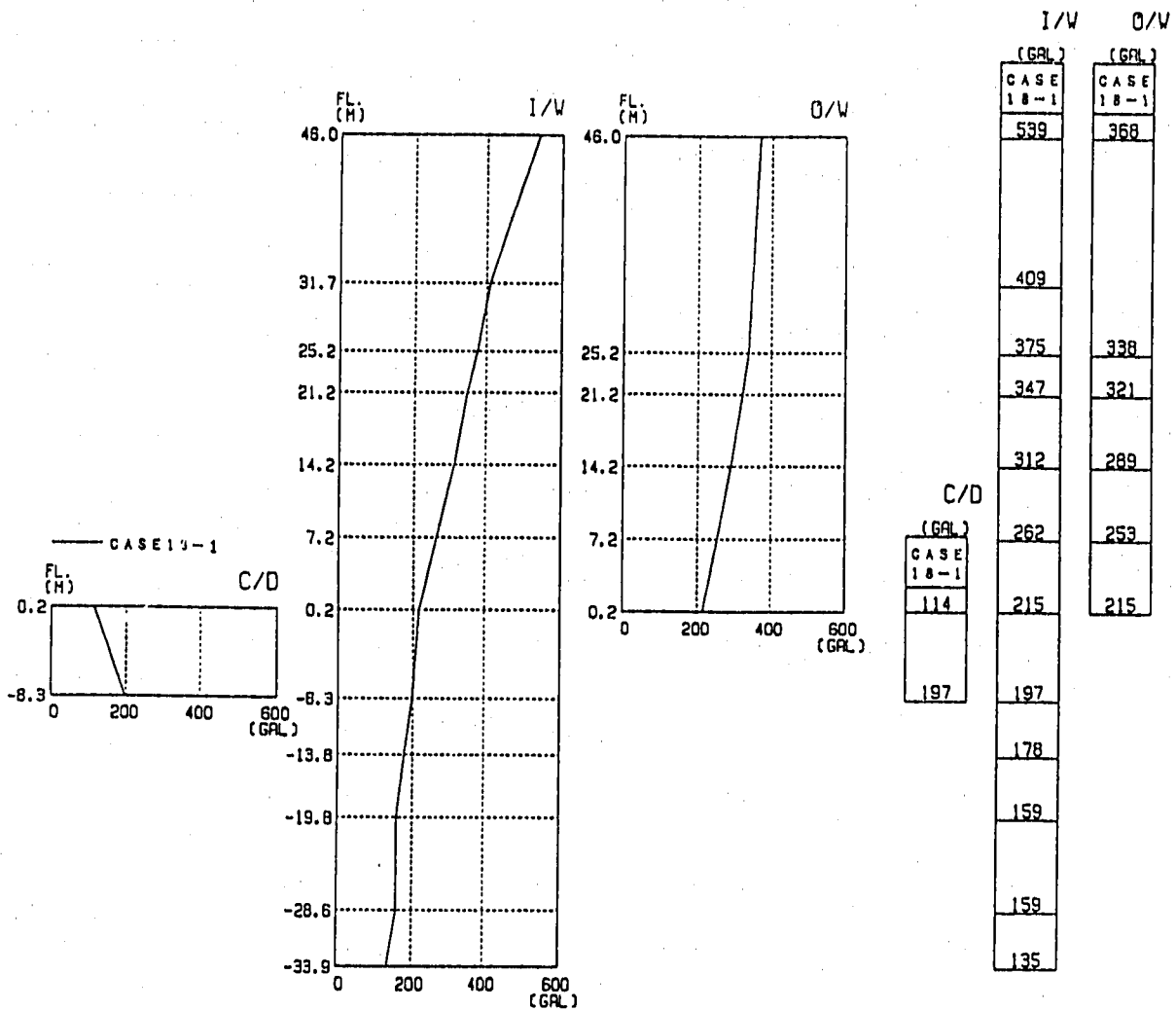


図3.5.5 最大応答加速度分布 (Case17-1)

('94年度波、コモンデッキ連成モデル、機器免震振動数2.5Hz、機器免震減衰40%、 $V_s=1000\text{m/s}$)



最大応答加速度

図3.5.6 最大応答加速度分布 (Case18-1)

('94年度波、コモンデッキ連成モデル、機器免震振動数2.5Hz、機器免震減衰40%、 $V_s=2000\text{m/s}$)

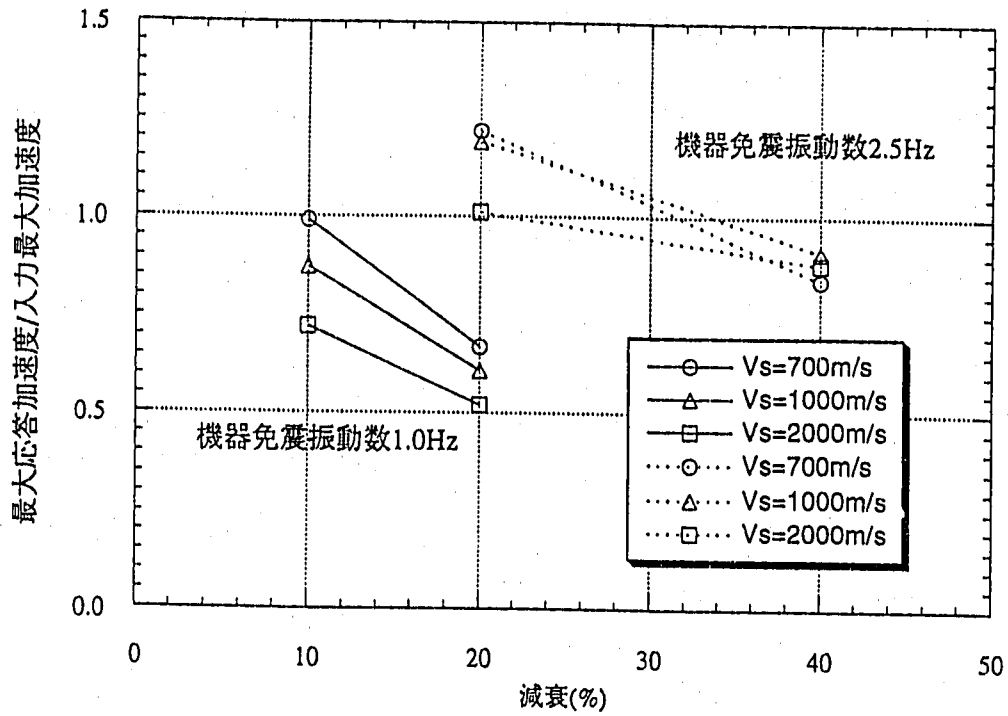


図3.5.7 応答加速度倍率（コモンデッキ最大応答加速度/入力最大加速度）－減衰関係

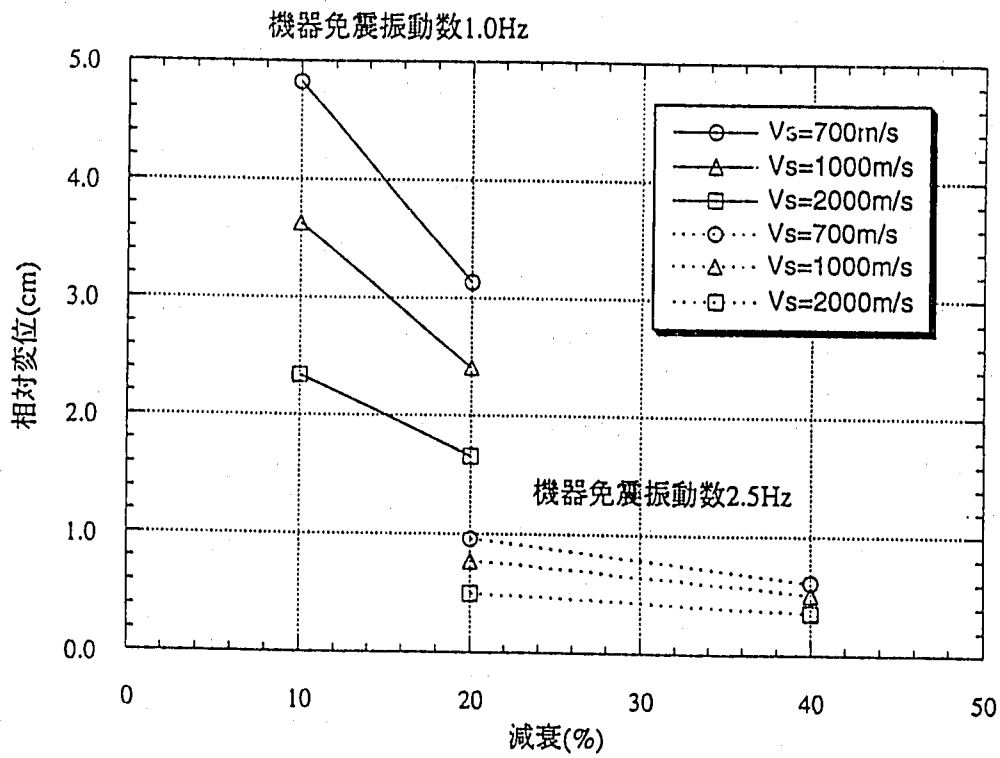


図3.5.8 相対変位（コモンデッキとコモンデッキ支持部間）－減衰関係

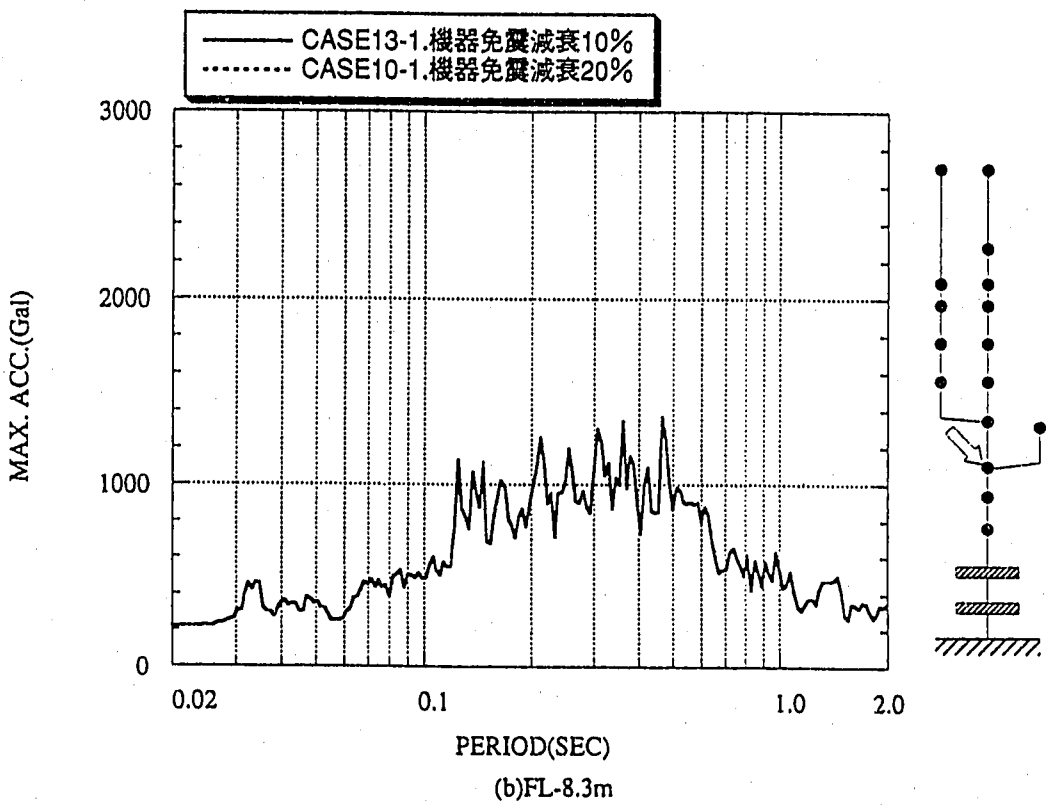
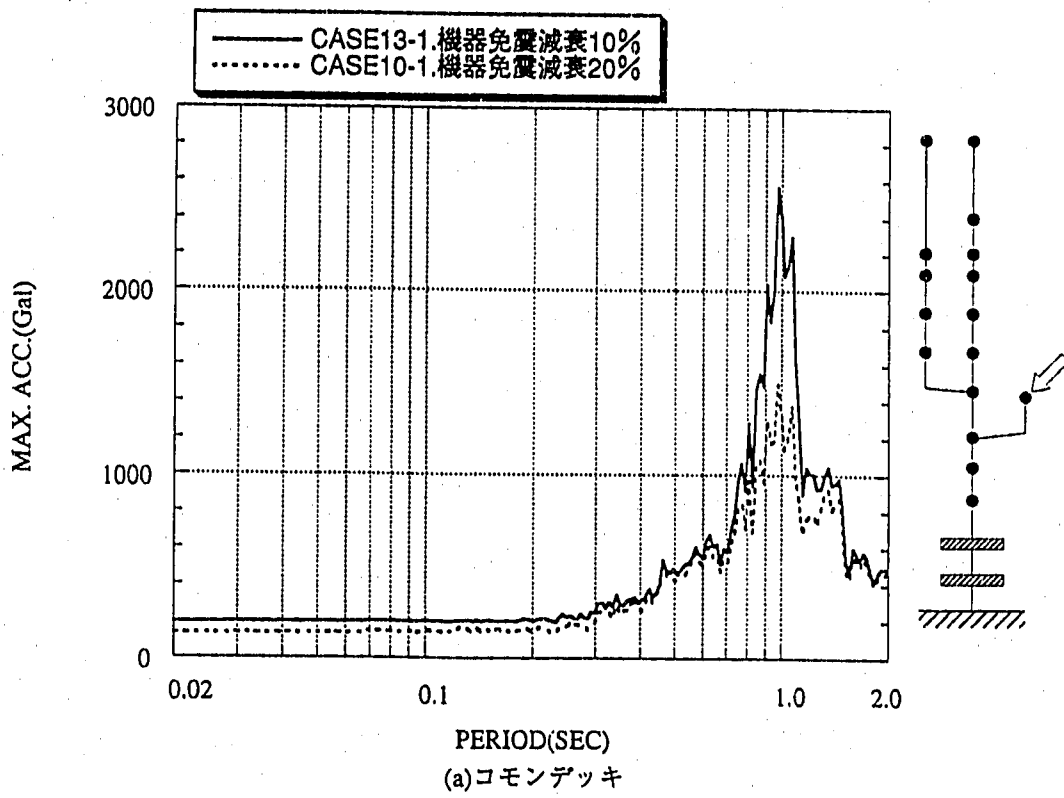


図3.6.1 床応答スペクトルの比較
 (h=1%、'94年度波、機器免震振動数1.0Hz、 $V_s=700\text{m/s}$)

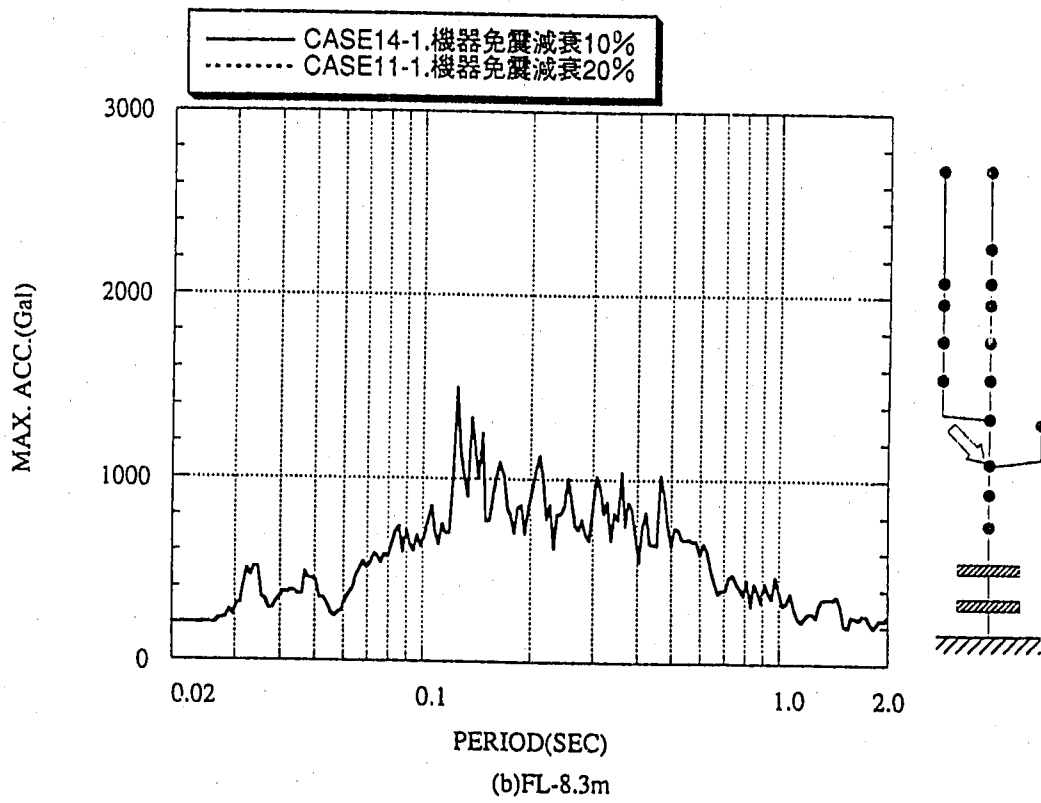
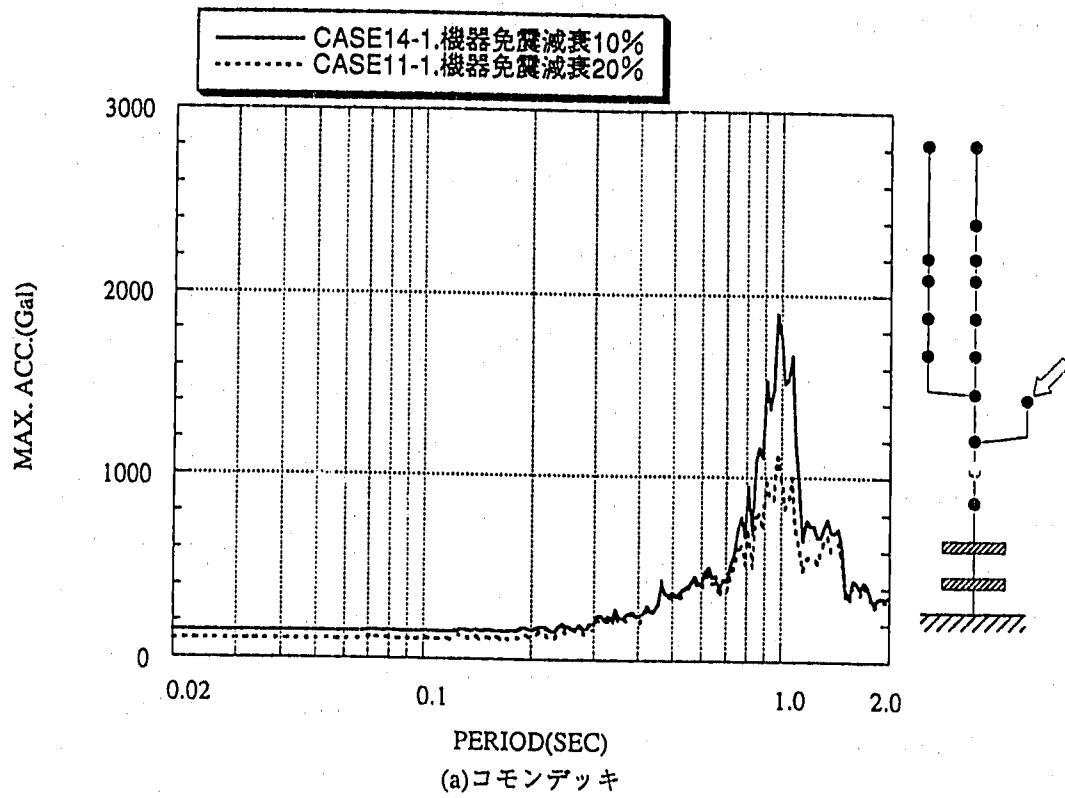


図3.6.2 床応答スペクトルの比較
 (h=1%、'94年度波、機器免震振動数1.0Hz、Vs=1000m/s)

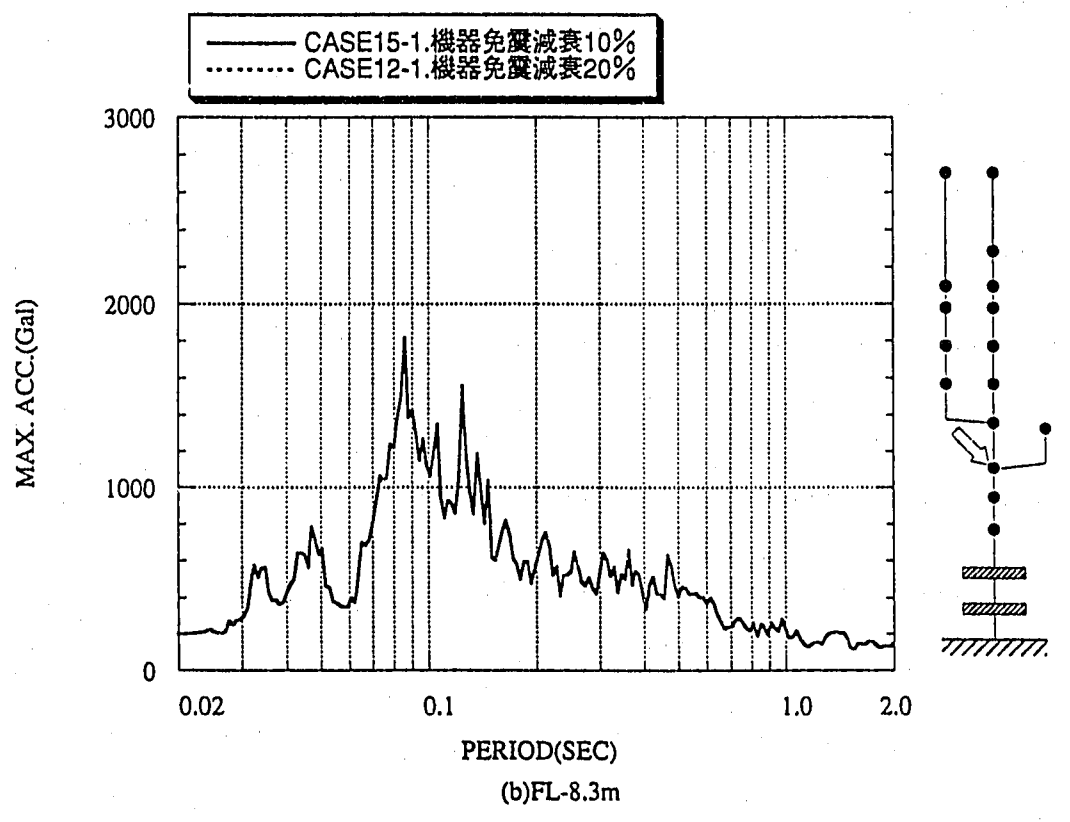
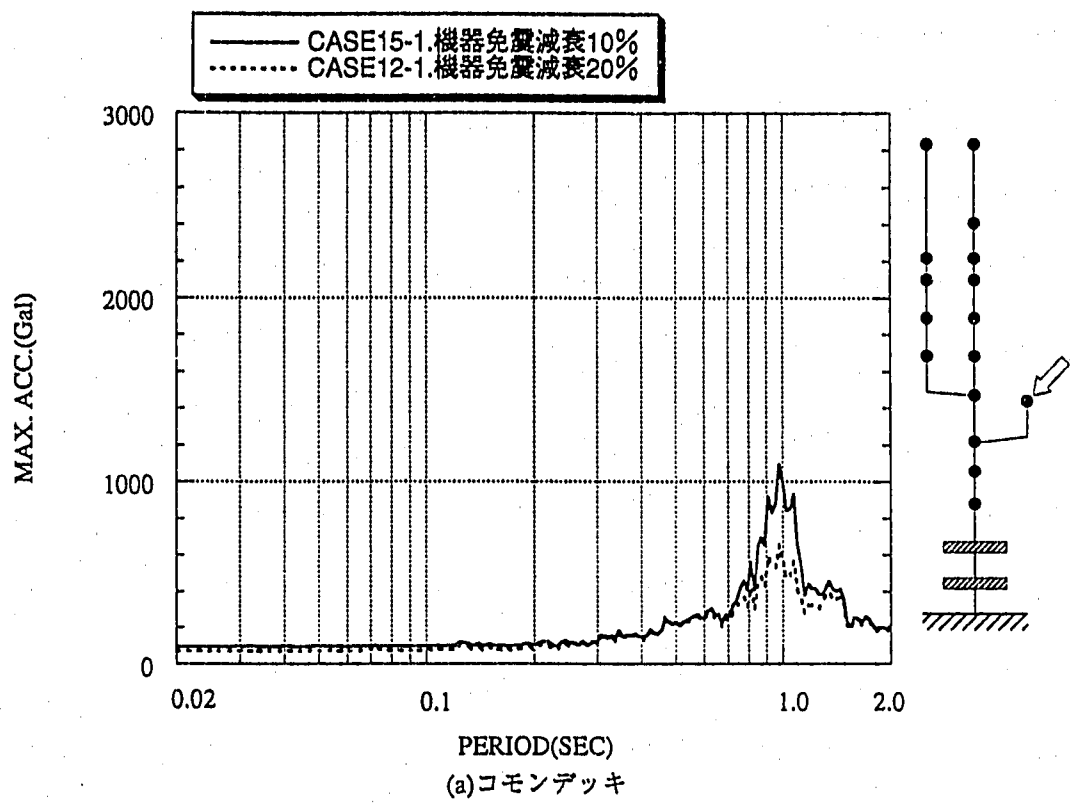


図3.6.3 床応答スペクトルの比較
(h=1%、'94年度波、機器免震振動数1.0Hz、Vs=2000m/s)

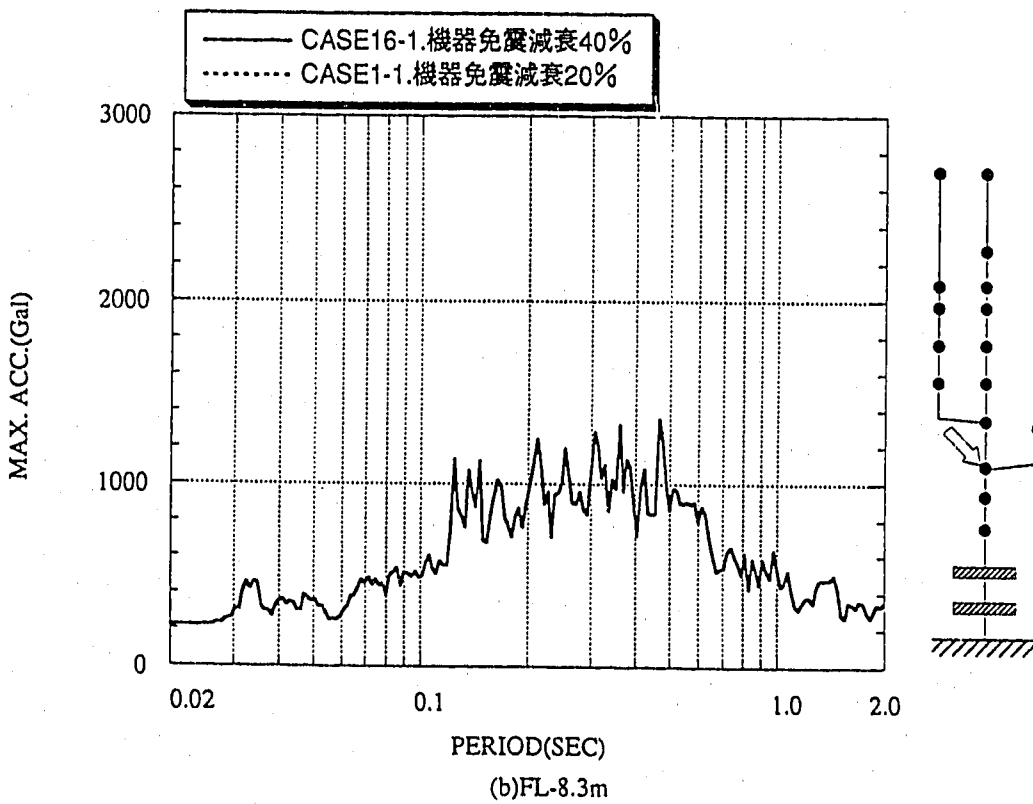
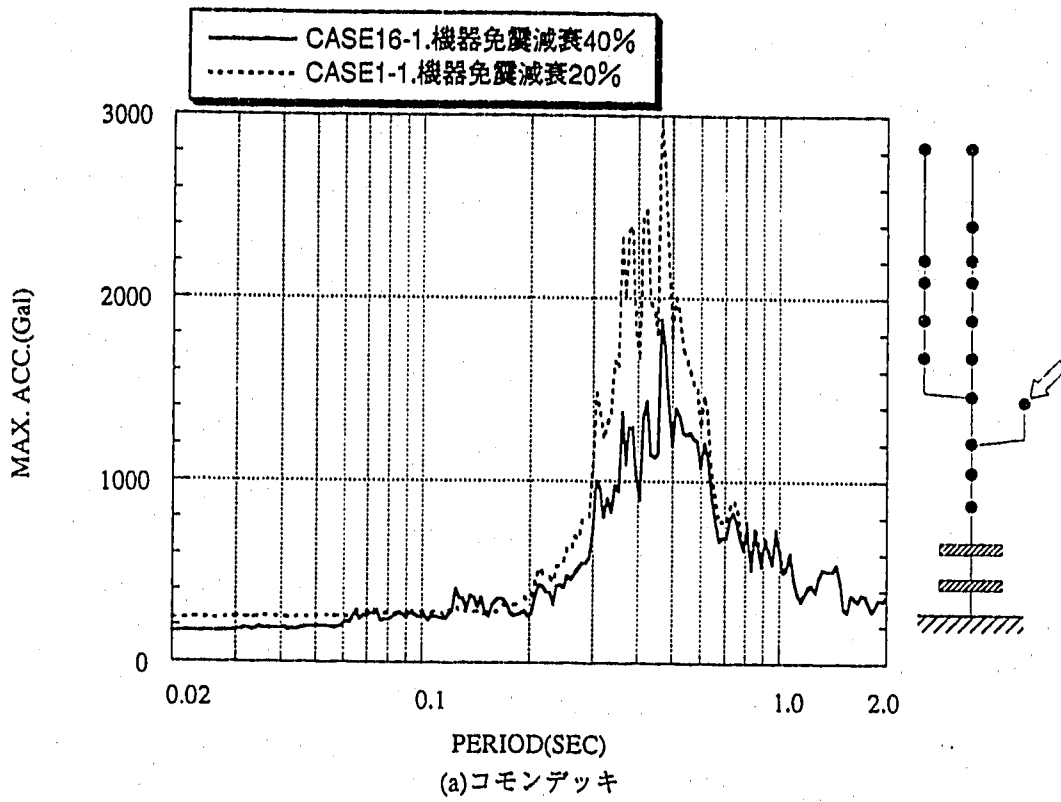


図3.6.4 床応答スペクトルの比較
 (h=1%、'94年度波、機器免震振動数2.5Hz、Vs=700m/s)

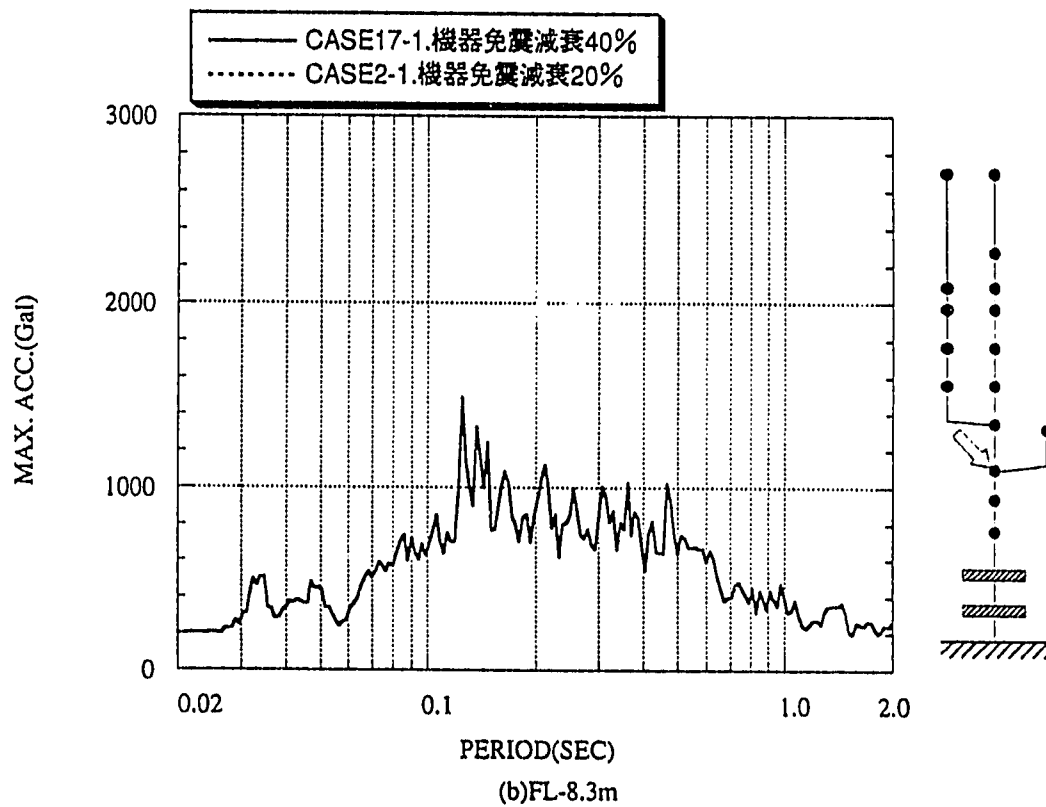
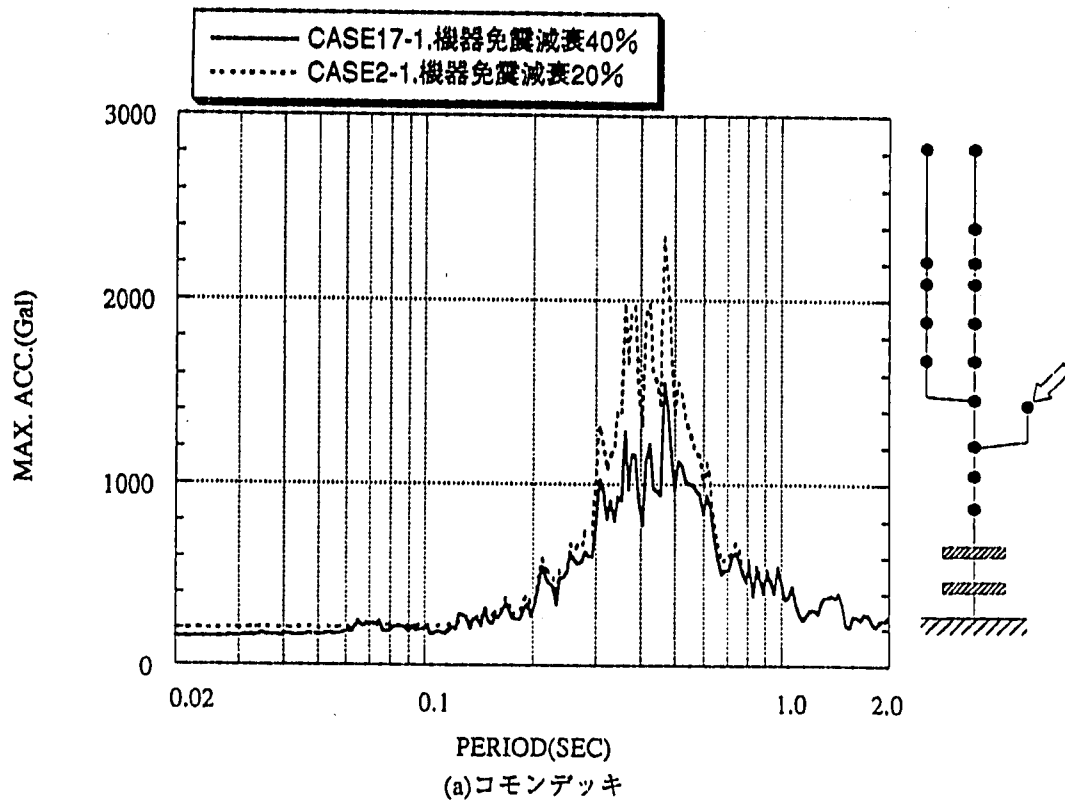


図3.6.5 床応答スペクトルの比較
 (h=1%、'94年度波、機器免震振動数2.5Hz、Vs=1000m/s)

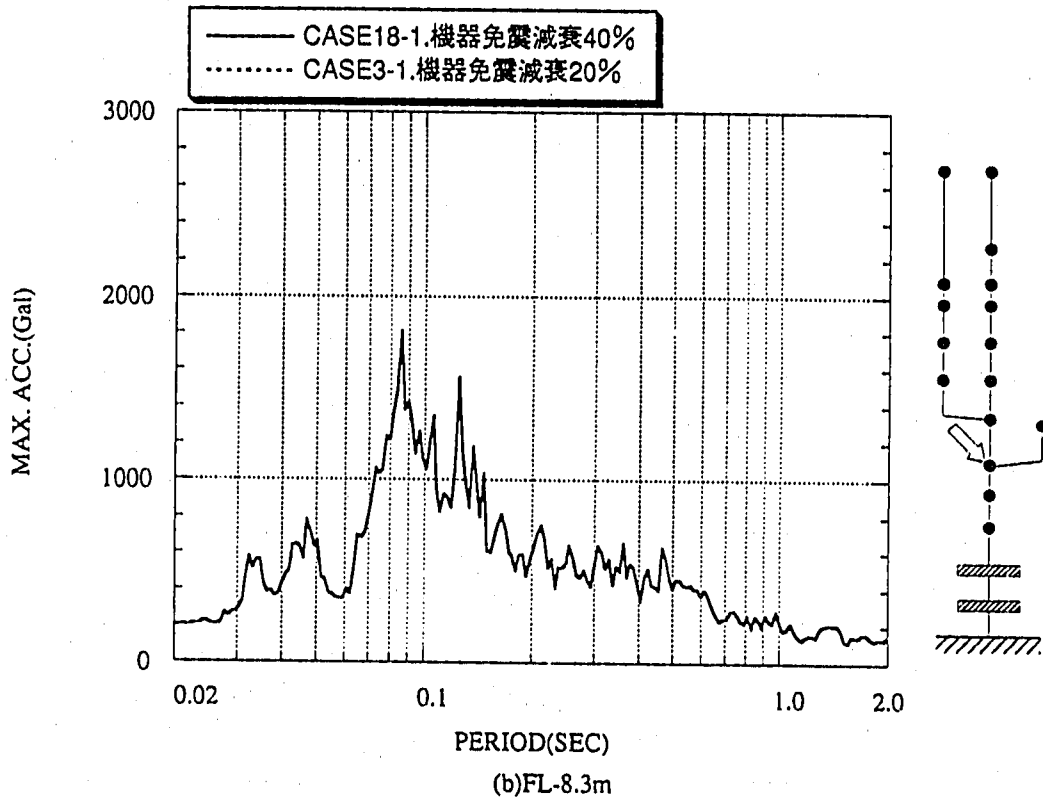
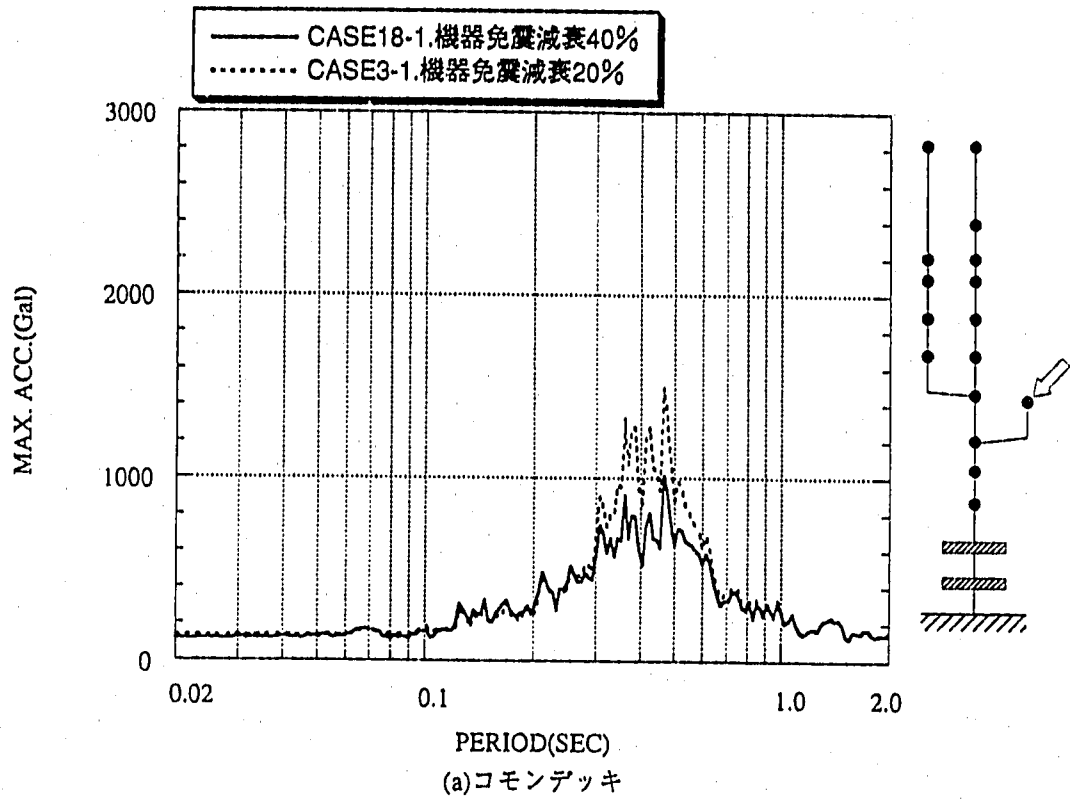


図3.6.6 床応答スペクトルの比較
 (h=1%、'94年度波、機器免震振動数2.5Hz、Vs=2000m/s)

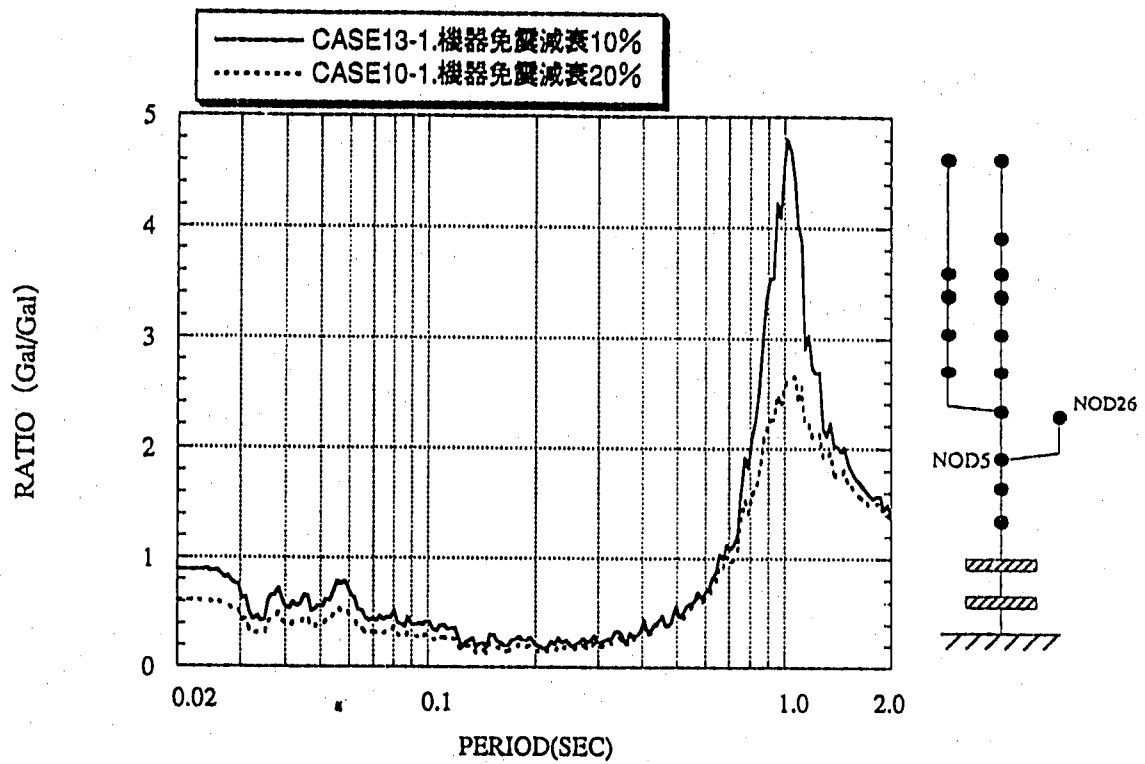


図3.6.7 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
 (h=1%、'94年度波、機器免震振動数1.0Hz、Vs=700m/s)

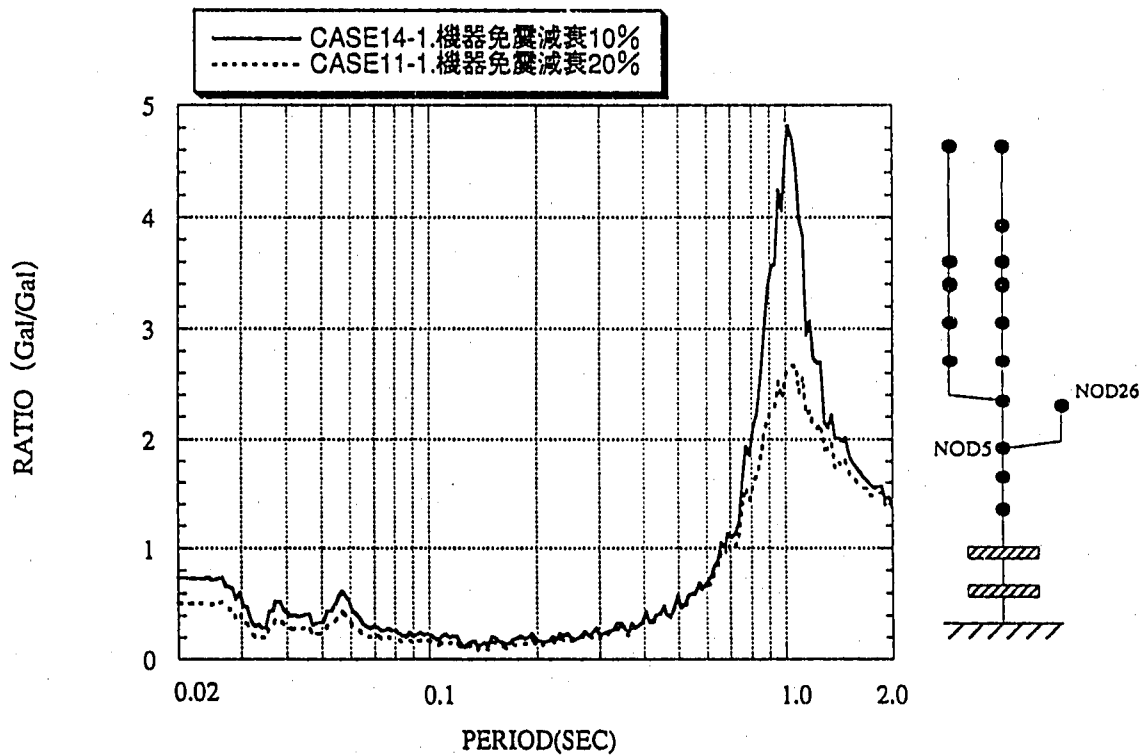


図3.6.8 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
 (h=1%、'94年度波、機器免震振動数1.0Hz、Vs=1000m/s)

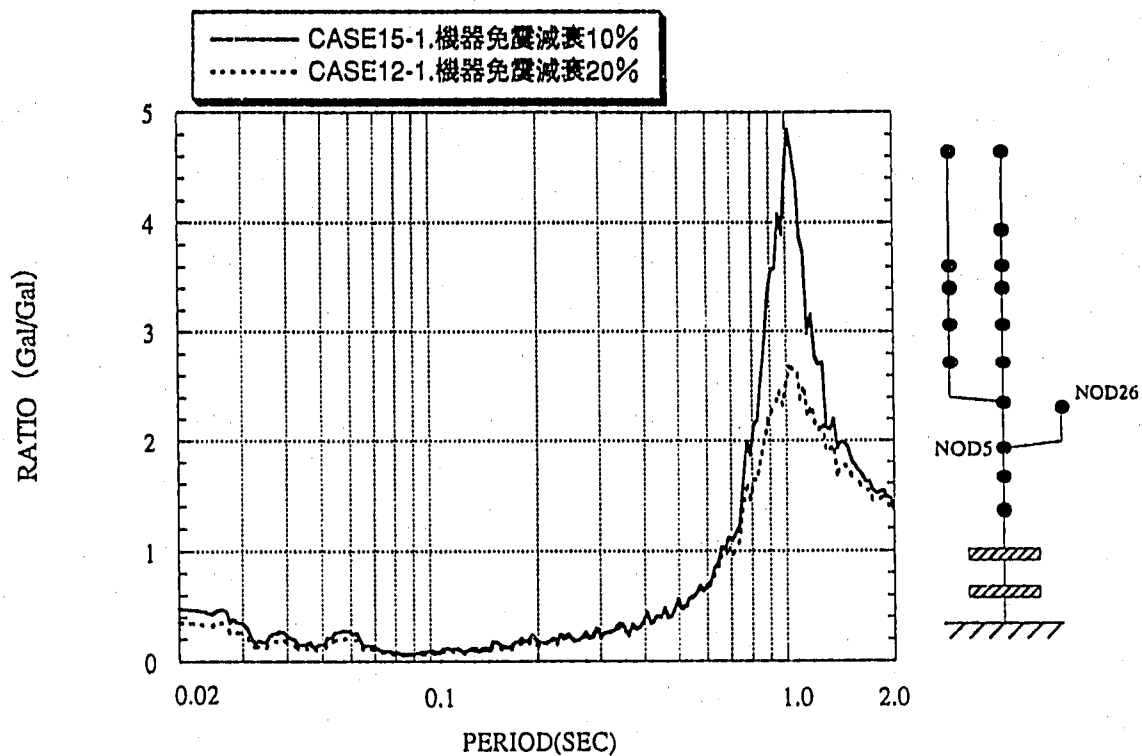


図3.6.9 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
 (h=1%、'94年度波、機器免震振動数1.0Hz、Vs=2000m/s)

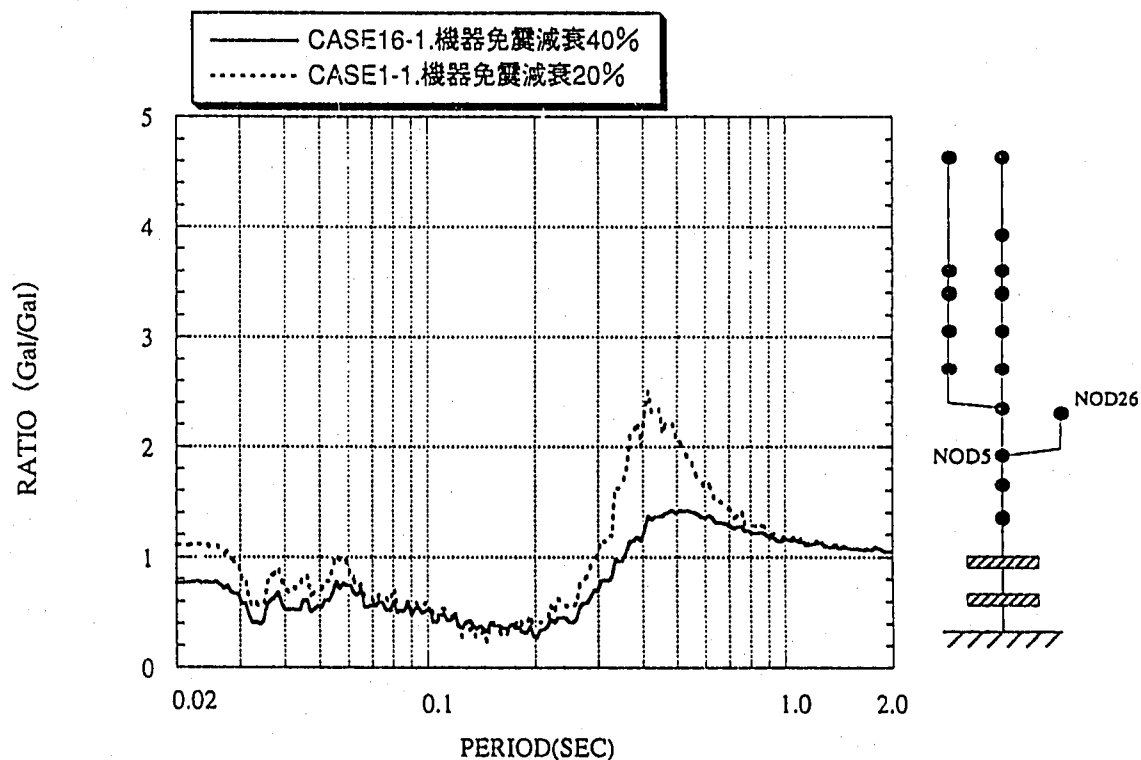


図3.6.10 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
 (h=1%、'94年度波、機器免震振動数2.5Hz、Vs=7000m/s)

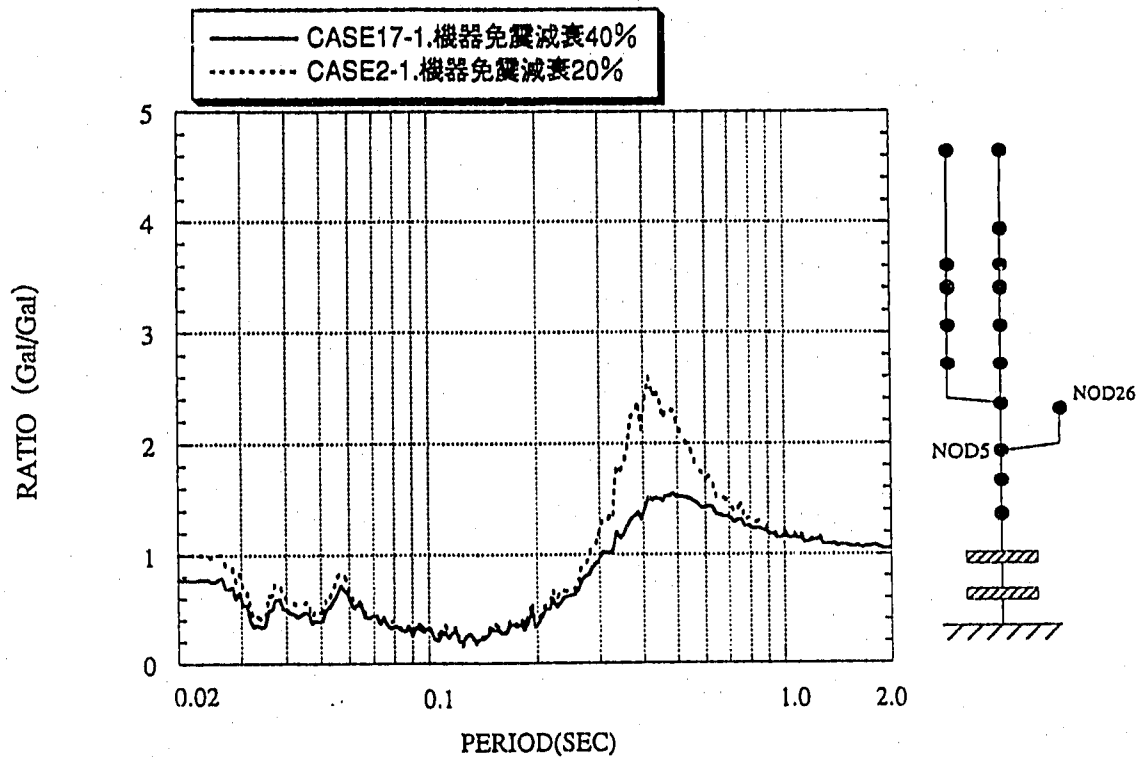


図3.6.11 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
 (h=1%、'94年度波、機器免震振動数2.5Hz、 $V_s=1000\text{m/s}$)

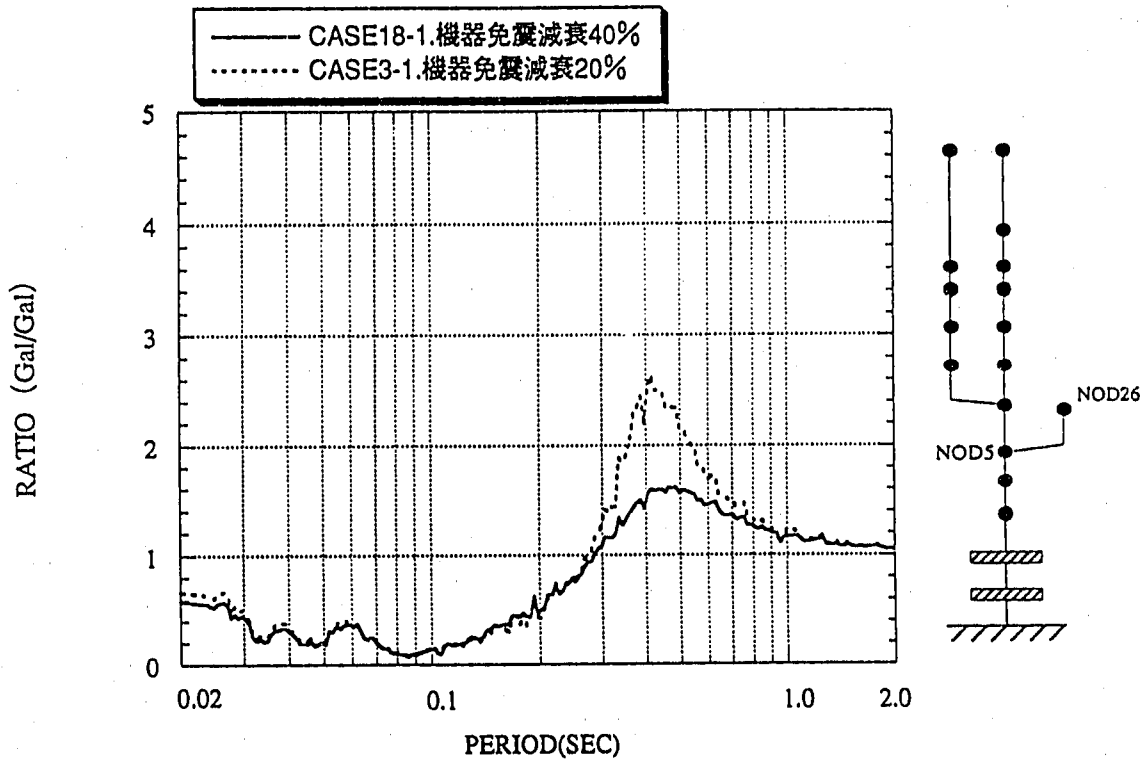
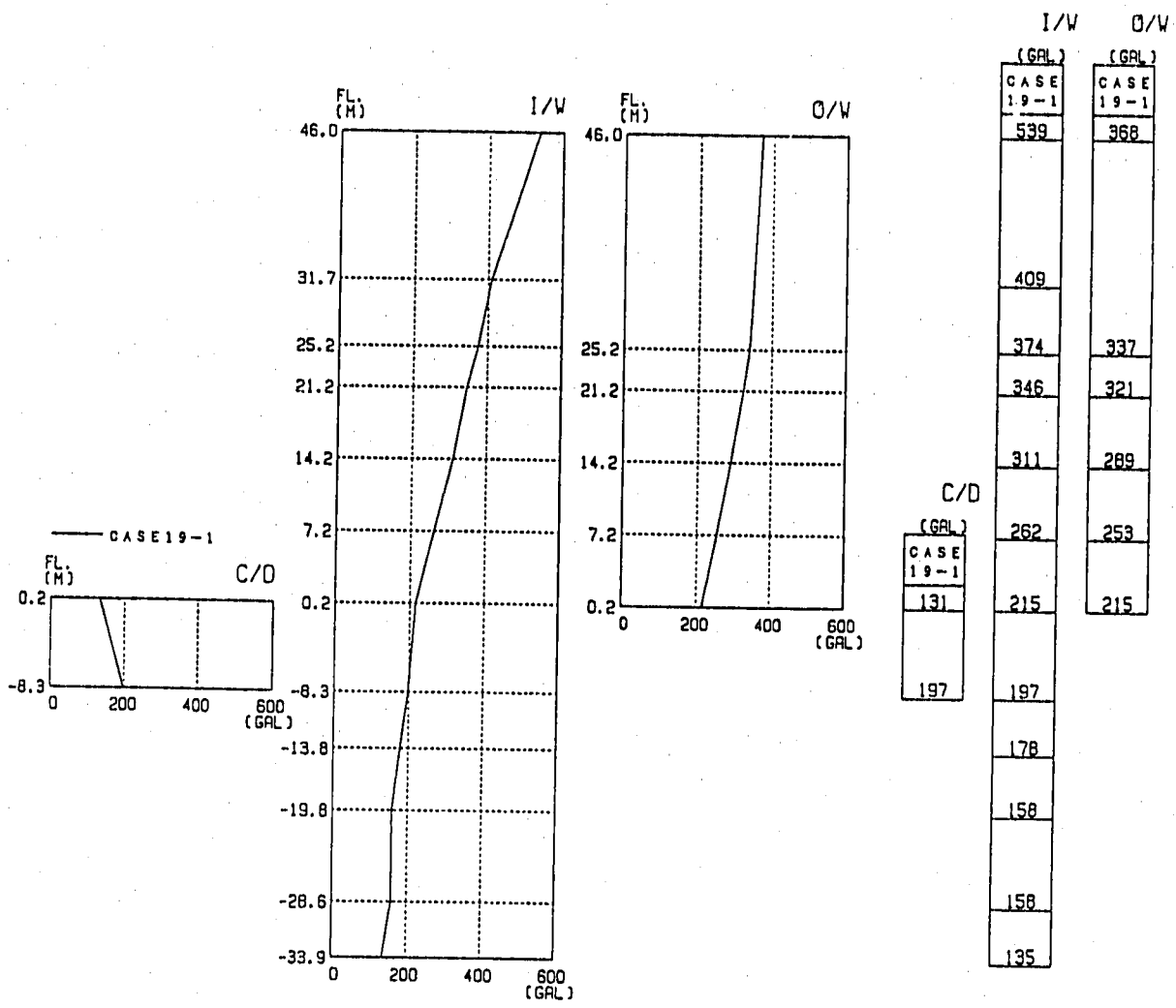
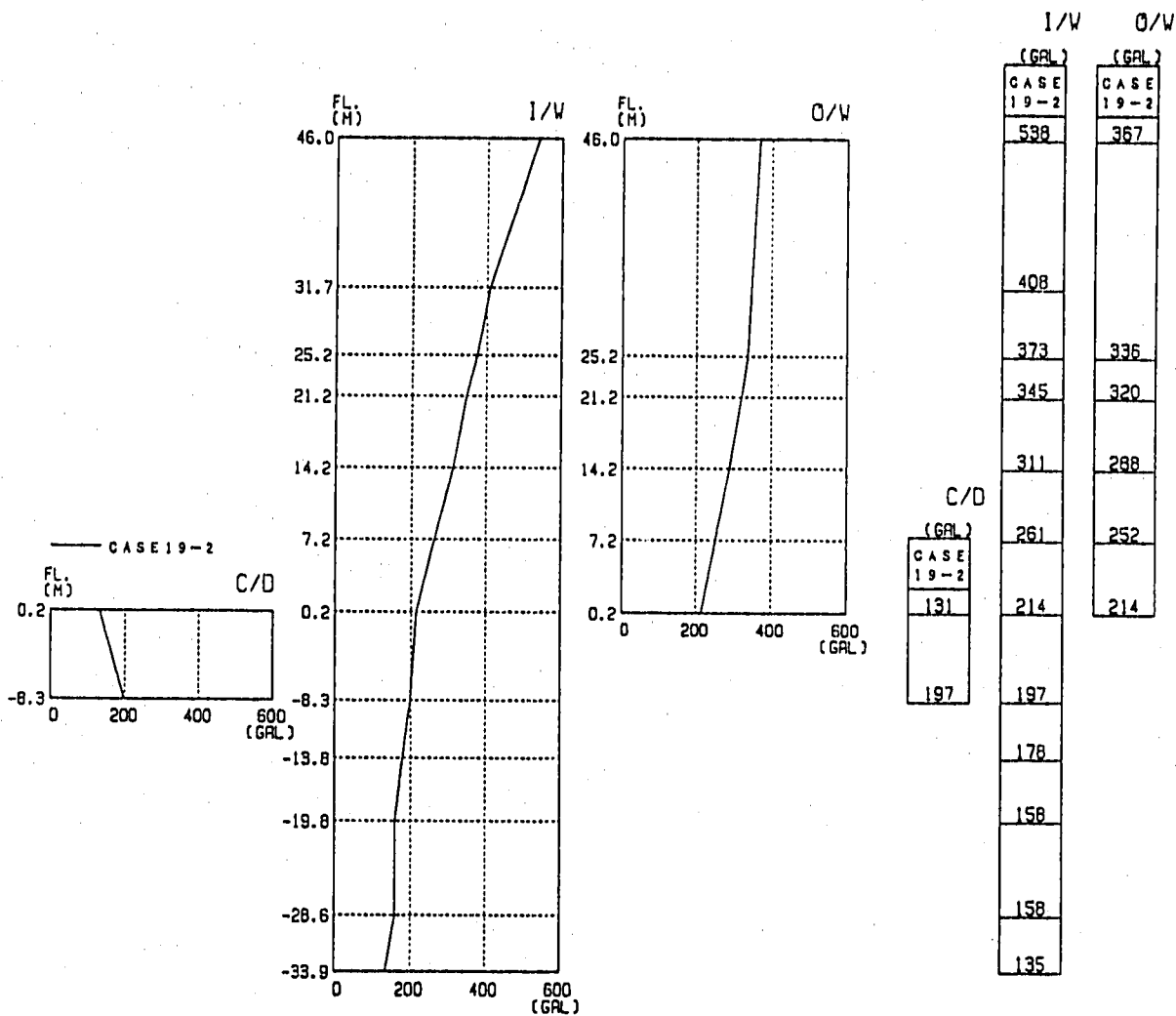


図3.6.12 床応答スペクトルの比 (NOD26/NOD5)
 (h=1%、'94年度波、機器免震振動数2.5Hz、 $V_s=2000\text{m/s}$)



最大応答加速度

図3.7.1 最大応答加速度分布 (Case19-1)



最大応答加速度

图3.7.2 最大応答加速度分布 (Case19-2)

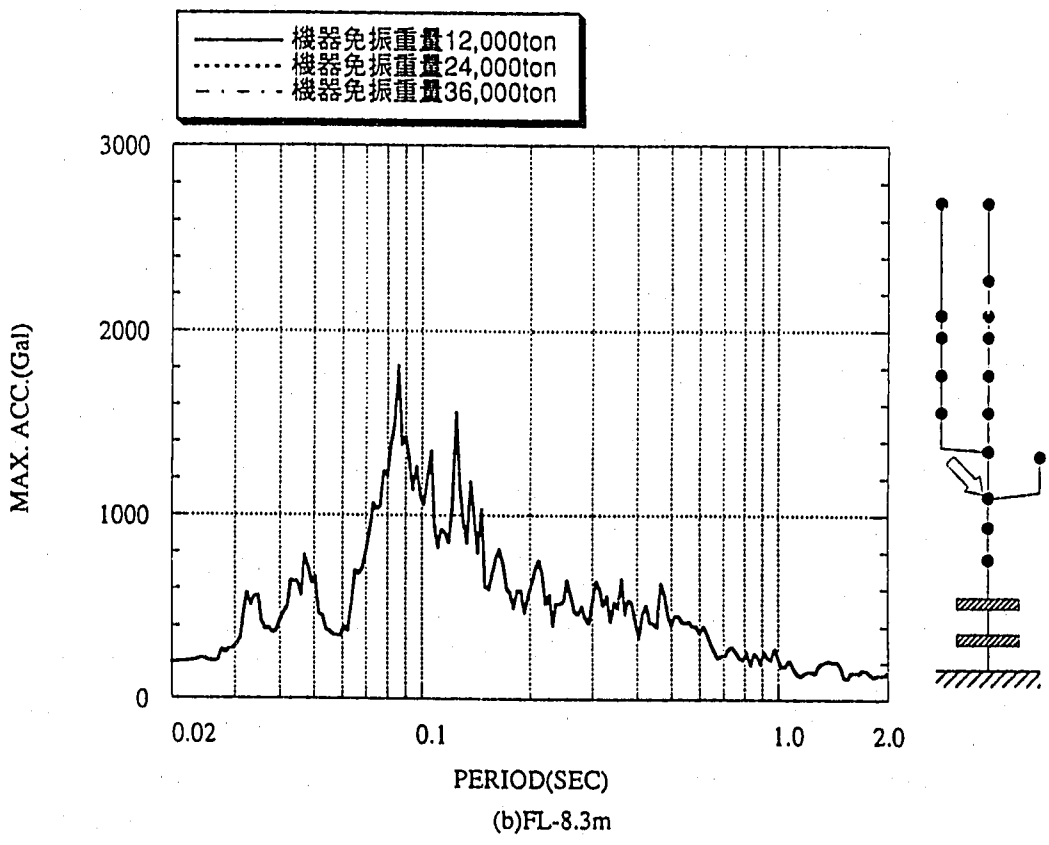
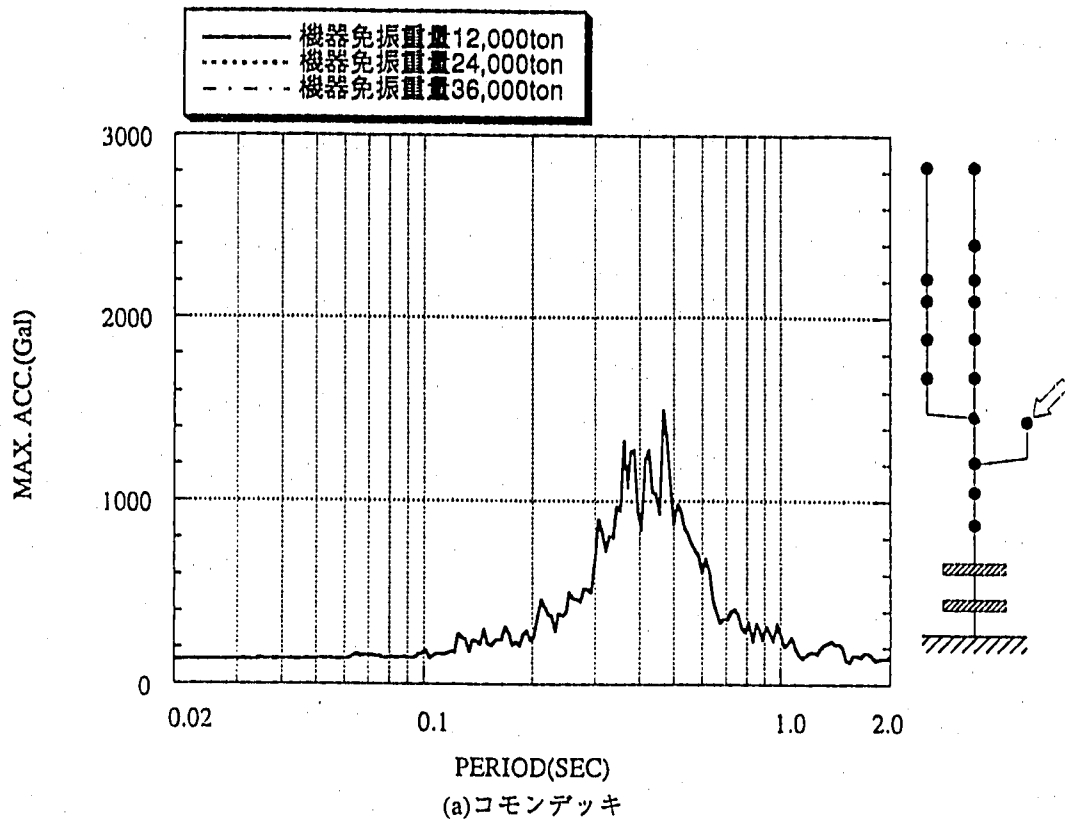


図3.8.1 床応答スペクトルの比較
 (h=1%、'94年度波、機器免震振動数2.5Hz、Vs=2000m/s)

4. まとめ

コモンデッキ方式機器上下免震構造と原子炉建物の動的相互作用が免震構造の地震応答特性に与える影響を検討するため、免震振動数お世に入力地震動をパラメタとして、免震構造と原子炉建物の連成モデルを用いた地震応答解析を行った。影響評価は非連成モデルとの比較によった。ただし、コモンデッキ免震構造は1自由度系とした。さらに、改良と構造として、上下免震構造の減衰を変化させた場合、及び機器免震構造の重量を変化させた場合についての検討も行った。

本検討によって得られた知見をまとめると以下のとおりである。

(1) 上下免震による応答の低減

耐震建屋では、機器設計で重要となる周期帯(0.05 sec ~ 0.1 sec)における原子炉容器据え付け位置での加速度応答スペクトル(減衰1%)は2G程度であるが、上下免震の採用により、最も大きい場合でも応答は0.2G程度まで低減されることを確認した。

(2) 機器上下免震構造がコモンデッキ以外の応答に与える影響

検討したパラメタの範囲では、機器上下免震の振動数、減衰、被支持構造物の重量は、コモンデッキ支持部及びポラークレーン位置での加速度応答にほとんど影響を与えないことがわかった。これは、検討対象とした機器上下免震振動数が、地盤-建屋連成系の主要な固有振動数から十分離れていることによるものと考えられる。

(3) コモンデッキ非連成モデルによる応答評価

連成モデルによるコモンデッキの応答と、非連成モデルによる応答を比較したところ、検討したパラメタの範囲では、非連成モデルによる結果(応答加速度)は実用上十分な精度を与え、かつ若干安全側となることがわかった。

参 考 文 献

- 1.1 森下 正樹, 機器上下免震構造に関する研究 第6報 Phase II 研究開発計画及び実機構造設計の改良(1), PNC ZN9410, 95-276, 1995年11月
- 3.1 森下 正樹, 一宮 正和, 1300Mwe 級大型炉の床応答評価解析, PNC ZN9410 94-181, 1994年5月
- 3.2 Watabe, M., et.al., Peak Acceleration and Response Spectra of Vertical Strong-motions from Near-filed Records in USA, 第8回日本地震工学シンポジウム, 1990
- 3.3 高橋 克也, 他, 硬質地盤における応答スペクトルの距離減衰式 その1 水平動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp362, 1994
- 3.4 藤堂 正喜, 他, 硬質地盤における応答スペクトルの距離減衰式 その2 上下動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp364, 1994