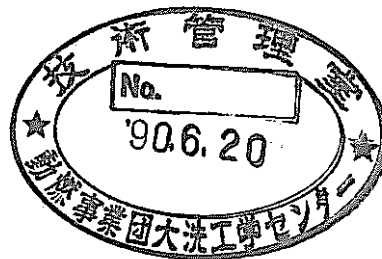


第四紀地盤上の高速実験炉「常陽」の地震時応答特性(その4)

— 地震時挙動の数値シミュレーション —



1990年3月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	Y9469 90-001
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

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ください。

〒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

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, 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)

第四紀地盤上の高速実験炉「常陽」の地震時応答特性(その4)

— 地震時挙動の数値シミュレーション —

沢田 誠* , 花田和史**, 八島 浩**
沢田義博***, 山下芳興*

要 旨

当事業団は、第四紀地盤立地方式に係わるライセンスビリティのための実証データの提供を目的として、「常陽」地震時応答特性に係わる実験的研究を(財)電力中央研究所(我孫子研究所)との共同研究で進めている。研究は、「地盤物性」、「起振実験」、「地震観測」、及び「数値解析」の各項目から成り、本報告は、研究の最終項目である「数値解析」について報告するものである。

主な成果を、以下に示す。

(1) 地震時挙動のシミュレーション

3次元挙動を扱うSR法、点加振薄層要素法(RESP)、及び2次元挙動を扱う格子法(LATT)のいずれの手法とも、埋込みを有する建屋の地震時挙動をほぼ的確に評価できることを確認した。これより、現在最も広く用いられているSR法でも深く埋設された原子炉建屋の耐震解析手法として十分活用できることを実証できた。

(2) 地盤剛性が応答に及ぼす影響

地盤剛性が小さいと応答は小さく、剛性が大きくなると応答も大きくなる傾向を確認した。また、応答スペクトルの分析結果より、地盤剛性は主としてロッキング動に影響を与えることを確認した。

* 実験炉部技術課

** (財)電中研(我孫子研究所)耐震部耐震研究室

*** (財)電中研(我孫子研究所)原子力総合推進室

Earthquake Response Characteristics of Experimental
Fast Reactor "JOYO" on Quarternary Ground (IV)

Simulation Analysis for Actual Recorded Earthquake Data

M. Sawada*, K. Hanada**, H. Yajima**,
Y. Sawada**, Y. Yamashita*

Abstract

Ground surveying, forced vibration test and earthquake observation were carried out at the site of Experimental Fast Reactor "JOYO" which is deeply embedded in compacted sand and granular quarternary ground in order to examine the earthquake resistant properties of the structure.

Objective of this study is to evaluate current SSI analysis methodologies by using actual recorded earthquake data (free-field and structure response).

The results of this work were as follows:

(1) Post Analysis

Each calculated result of the general programs which are based on the Sway-Rocking Method, Point Exciting Thin Layer Method (RESP), and the Simple Soil Colum Method, was in good agreement with the observed motions of the structure during some earthquakes, respectively. Through the simulation studies, it was proved that the above mentioned programs had a capability which was able to predict almost exactly the carthquake response of the embedded structure.

(2) Effect of Soil Stiffness

It was assured that the earthquake response of the embedded structure had a tendency to be proportional the soil stiffness; i.e., the response becomed greater in the case of the surrounding ground was hard, and in the case of the ground was soft, the response becomed little reversely. Besides, it was confirmed that the soil stiffness had mainly influenced on the rocking

PNC TY9469 90-001

CRIEPI - U 9 0 0 0 1

motion of the embedded structure, by the evaluating results on the observed response spectrums.

-
- * Reactor Technology Section, DEC.
 - ** Central Research Institute Electric Power Industries (CRIEPI), Abiko Research Laboratory.

目 次

1. 緒 言	1
2. 「常陽」とその動的挙動	2
2.1 構造物と地盤の概要	2
2.2 起振実験時の挙動	2
2.3 地震時の挙動	3
3. 解析手法の種類	5
3.1 スウェイ・ロッキング(SR)法	5
3.2 点加振薄層要素法(RESP)	6
3.3 格子型法(LATT)	7
4. 解析条件	8
4.1 解析対象観測地震波	8
4.2 Control Motion (基準地震動)	8
4.3 解析モデル	9
5. 解析結果	10
5.1 地盤挙動(地盤内伝播解析)	10
5.2 地震時挙動	10
5.2.1 SR法	10
5.2.2 点加振薄層要素法(RESP)	12
5.2.3 格子型法(LATT)	13
6. 解析結果のまとめ	14
7. 結 言	15
8. 謝 辞	17
9. 参考文献	18
付 録	
付録-A 点加振薄層要素法(RESP)コード説明	62
付録-B 格子型法(LATT)コード説明	64

表 リ ス ト

表 2.1 - (1)	「常陽」地震観測 観測地震の諸元	19
表 2.1 - (2)	”	20
表 4.1	最大加速度振幅値一覧	21

図 リ ス ト

図 2.1	「常陽」炉建屋，周辺建屋及びボーリング孔位置	22
図 2.2	「常陽」原子炉建屋の平面と断面図	22
図 2.3	「常陽」地点の地盤構造モデル	23
図 2.4-(1)	「常陽」構造物モデル(建屋解析モデル)	24
図 2.4-(2)	「常陽」構造物モデル(建屋解析モデルの剛性諸元)	25
図 2.5-(1)	地震観測・測点配置概要(断面)	26
図 2.5-(2)	観測点配置(平面)	27
図 4.1	観測された地震の震央と地震規模	28
図 4.2	S R 法のモデル概念	29
図 4.3-(1)	S R 法の地盤ばね(側面ばね)	30
図 4.3-(2)	“(側面・底面ばね)	31
図 4.4	R E S P の解析概念	32
図 4.5	R E S P の排土部分要素分割	32
図 4.6	L A T T のモデル概念	33
図 5.1-(1)	地盤の増幅率関数(モデルと実測値の比較) (a)G ₃ /G ₄ (b)G ₂ /G ₄	34
図 5.1-(2)	“(c)G ₄ /G ₃ (d)G ₂ /G ₃ (e)G ₄ /G ₂ (f)G ₃ /G ₂	35
図 5.2-(1)	最大加速度分布(基本モデル・EQ.04)	36
図 5.2-(2)	“(基本モデル・EQ.12)	36
図 5.3-(1)	F1 応答スペクトル(基本モデル・EQ.04)	37
図 5.3-(2)	“(基本モデル・EQ.12)	37
図 5.3-(3)	F5 応答スペクトル(基本モデル・EQ.04)	38
図 5.3-(4)	“(基本モデル・EQ.12)	38
図 5.3-(5)	F8 応答スペクトル(基本モデル・EQ.04)	39
図 5.3-(6)	“(基本モデル・EQ.12)	39
図 5.4-(1)	最大加速度分布—地盤物性による影響評価— (S R 法・基本モデル準拠・EQ.04)	40
図 5.4-(2)	“(S R 法・基本モデル準拠・EQ.12)	40
図 5.5-(1)	F1 応答スペクトル—地盤物性による影響評価— (S R 法・基本モデル準拠・EQ.04)	41
図 5.5-(2)	“(S R 法・基本モデル準拠・EQ.12)	41

図 5.5-(3)	F 5 応答スペクトル—地盤物性による影響評価— (S R 法・基本モデル準拠・EQ.04)	4 2
図 5.5-(4)	” ” (S R 法・基本モデル準拠・EQ.12)	4 2
図 5.5-(5)	F 8 応答スペクトル—地盤物性による影響評価— (S R 法・基本モデル準拠・EQ.04)	4 3
図 5.5-(6)	” ” (S R 法・基本モデル準拠・EQ.12)	4 3
図 5.6-(1)	最大加速度分布—モデルパラメータによる影響評価— (S R 法・摂動モデル1,2・EQ.04)	4 4
図 5.6-(2)	” ” (S R 法・摂動モデル1,2・EQ.12)	4 4
図 5.7-(1)	F 1 応答スペクトル—モデルパラメータによる影響評価— (S R 法・摂動モデル1,2・EQ.04)	4 5
図 5.7-(2)	” ” (S R 法・摂動モデル1,2・EQ.12)	4 5
図 5.7-(3)	F 5 応答スペクトル—モデルパラメータによる影響評価— (S R 法・摂動モデル1,2・EQ.04)	4 6
図 5.7-(4)	” ” (S R 法・摂動モデル1,2・EQ.12)	4 6
図 5.7-(5)	F 8 応答スペクトル—モデルパラメータによる影響評価— (S R 法・摂動モデル1,2・EQ.04)	4 7
図 5.7-(6)	” ” (S R 法・摂動モデル1,2・EQ.12)	4 7
図 5.8-(1)	R E S P 最大加速度分布と観測値の比較 (a)2-4, 2, 0-R (b)4-4, 3, 2, 0-R (c)5-4, 2, 0-R (d)8-4, 2, 0-R	4 8
図 5.8-(2)	” ” (e)9-4, 2, 0-R (f)11-4, 2, 0-R (g)12-4, 3, 2, 0-R	4 9
図 5.9-(1)	R E S P 応答スペクトルと観測値の比較 (a)4-4, 3, 2, 0-R-F1 (b)4-4, 3, 2, 0-R-F5 (c)4-4, 3, 2, 0-R-F8 (d)12-4, 3, 2, 0-R-F1	5 0
図 5.9-(2)	” ” (e)12-4, 3, 2, 0-R-F5 (f)12-4, 3, 2, 0-R-F8 (g)2-4, 2, 0-R-F5 (h)5-4, 2, 0-R-F5	5 1
図 5.9-(3)	” ” (i)8-4, 2, 0-R-F5 (j)9-4, 2, 0-R-F5 (k)11-4, 2, 0-R-F5	5 2
図5.10	L A T T 最大加速度分布と観測値の比較 (a)4-4, 3, 2-L (b)12-4, 3, 2-L	5 3
図5.11	L A T T 応答スペクトルと観測値の比較 (a)4-4, 3, 2-L-F5 (b)12-4, 3, 2-F5	5 4
図 6.1-(1)	最大加速度分布 (全解析法, EQ.04)	5 5
図 6.1-(2)	” (全解析法, EQ.12)	5 5
図 6.2-(1)	各種解析法による応答スペクトルの比較 (a)4-4-R, □-F1 (b)4-4-R, □-F5 (c)4-4-R, □-F8	5 6

図 6.2 - (2)	各種解析法による応答スペクトルの比較 (d) 12-4-R, □-F1 (e) 12-4-R, □-F5 (f) 12-4-R, □-F8	57
図 6.3 - (1)	各種解析法による増幅率関数の比較 (a) 4, 12-4-R, □-F1 (b) 4, 12-4-R, □-F3 (c) 4, 12-4-R, □-F5	58
図 6.3 - (2)	〃 (d) 4, 12-4-R, □-F7 (e) 4, 12-4-R, □-F8	59
図 6.4	薄層要素法のモデル概念	60

1. 緒 言

現行の耐震設計審査指針（昭和56年7月制定）では、「原子炉施設の重要な構造物は岩着させる」ということが明示されている。しかしながら、将来的にはこうした堅固な地盤への立地は地盤の枯渇により困難になることが予想されており、この立地難対策の一環として、第四紀層地盤への立地方式に対する研究・検討が進められている。

こうした背景を踏まえ、当事業団と財団法人電力中央研究所・我孫子研究所とは、昭和60年2月から平成3年3月までを期間として、高速実験炉「常陽」を対象に「常陽」地震時応答特性に係る実験的研究を行っている。

本研究は、「地盤物性調査」、「起振実験」、地震観測」及び「数値解析」の研究項目から成り、第四紀層地盤立地方式のライセンスビリティのための実証データ（埋設建物の地震時応答特性とその評価方法）の提供を目的として行われている。これまでに、「地盤物性調査¹⁾」、「起振実験²⁾」、及び「地震観測³⁾」について検討結果を報告している。

本報告は、各種解析手法に対する精度検証を目的として行われた研究の最終項目である「数値解析」について報告するものである。

2. 「常陽」とその動的挙動

本報告の主題である「数値シミュレーション」の報告に入る前の準備として、これまで行った「地盤物性調査」，「起振実験」，及び「地震観測」の各研究より得られた成果概要を説明する。

2.1 構造物と地盤の概要

図 2.1 に「常陽」の原子炉施設と周辺関連施設の配置および地盤調査を実施したボーリング孔位置を示す。地盤調査孔の位置は「常陽」建屋の北側壁面より 84m 離れているが、建屋の東側直近の位置でも建屋基礎面までの地盤調査が別途実施されている。

建屋の概念を図 2.2 に示す。基礎平面の寸法は約 50m×55m，全高 58.5m であり，全高の 1/2 以上が地盤中に埋設されていて，接地圧は 60ton/m² を超える。「常陽」は同図にも示すように，原子炉付属建屋，原子炉格納容器および原子炉建屋より構成されている。周辺地盤と接しているのは付属建屋であり，これらの建屋は基礎のほぼ中央を中心として，付属建屋が原子炉格納容器を，原子炉格納容器が原子炉建屋をそれぞれ包込む配置になっている。

「常陽」地点の地盤構造を図 2.3 に示す。本地点の地盤は主としてよく締まった砂地盤から構成されており，一部に粘性土層 (G.L.-10~-16m)，粒径 2~50mm のよく締まった砂礫層 (G.L.-23~-28m) などが部分的に介在する第四紀地盤である。地下水位は G.L.-29m と低く，ほぼ基礎底面の位置である。G.L.-114m 以深は砂質泥岩となり，本地点周辺の基盤層と見られている。同表の地盤物性値は，原位置地盤試験・弾性波による速度検層および現地で採取された試料に力学試験を施した結果をもとに，後述 (4.1) の地震時挙動によって若干の修正を行って定められたものである。特に，減衰定数は他地盤における地震観測結果も参考にして，主として地震観測結果から定めた。なお，建屋直近の地盤物性は地盤調査試験を実施した調査孔位置の物性と差が少ないため，以降の解析では本地点の地盤構造として同表の値を用いている。

設計時に定められた建屋構造の集中質点-ビームモデルとその定数を図 2.4-(1)，(2) に示す (設計時の格納容器構造の減衰は 1% であるが，本報告では解析精度上の理由から，これを 3% として用いた)。本構造図にも示されているように，各主要構造は基礎を共通としているが，上部では結合されていない。

2.2 起振実験時の挙動

起振実験の結果，判明した主な挙動特性は以下の通りである。

- ① 建屋の1次固有振動数は4.3Hzであり、モード減衰は56%と極めて大きい。1次モードはスウェイ・ロッキングで、スウェイ：ロッキング：弾性変形の割合は、28%：65%：7%であり、弾性変形の占める比率が非常に小さい。
- ② 上下方向の起振実験では、構造物挙動は剛体的と言える。1次固有振動数は3.2Hz、モード減衰は74%である。1次モードでは全ての点が概ね同位相で挙動し、建屋の弾性変形は認め難い。
- ③ 起振実験の結果を検討して、建屋の固有振動数とピーク値が実験値と同程度になる建屋モデルでは、原子炉建屋と原子炉付属建屋の有効断面積が図2.4-(2)に記された値の2倍、原子炉建屋の断面2次モーメントが1.5倍、格納容器の減衰定数が5%であった。

2.3 地震時の挙動

「常陽」建屋の地震時挙動を観測するために、図2.5-(1)、(2)に示すような建屋系と地盤系にそれぞれ加速度計を配置した。建屋観測点としては、原子炉付属建屋にF1(GL.-19.45m：基盤上面B2床)、F3(GL.-7.3m：B1床)、F5(GL.0.2m：地上1階床)、F7(GL.85m：2階床)、F8(GL.13.7m：屋上床)の5床8観点14成分が設けられている。各階における観測点の平面配置を図2.5-(2)に示す。F1～F8ではいずれもNS(南北)、EW(東西)の水平2方向を観測するほかF1に3台とF8に1台の上下動成分センサが配置されている。地震時の構造物挙動の算定には、構造物挙動に影響されない挙動を行う地盤(以下、自然地盤と称する)の挙動を定める必要がある。地盤の観測点としては、前述の地盤調査孔を自然地盤地震観測に転用してG1(GL.-130m)、G2(GL.-32m)、G3(GL.-18m)、G4(GL.-1m)の計4点10成分が設けられている。G1は本地点の基盤に、G2は炉建屋基礎底面、G3は基礎上面、G4はほぼ地表面に相当する深さに相当する。G1とG4は3成分観測、G2、G3は水平2成分観測である。1985年7月から観測を開始して以来、1989年1月までに35事象の地震波が記録された。観測地震波の諸元を、表2.1-(1)、(2)に示す。

これらの観測結果を整理、解析した結果、次の成果を得た。

- ① EW水平成分の最大加速度増幅率は、基盤/地表では平均2.8倍、構造物の上部/基礎では平均2.2倍である。ただし、基礎/基盤では平均で0.6倍と減衰しており、このため建屋上部/基盤は1.3倍程度と増幅は少ない。上下成分で、地表/基盤は平均で4.1倍、基礎/基盤で1倍、建屋上部/基盤では平均2倍であり、構造物の上下方向に対する増幅はほとんど見られない。
- ② 4種類の入力波(地表波、開放基盤波、基礎直下波、基礎レベル地中波)を設定し、3種類の簡易モデルを用いて地震時挙動を数値模擬した。その結果、深い根入

PNC TY9469 90-001

CRIEPI-U90001

れを有する構造物の地震時応答は入力波形の及ぼす効果が大であり，入力波形としては基礎レベルの地中波を用いると精度のよいことがわかった。

3. 解析手法の種類

地盤-構造物系の地震時挙動解析法は、半無限地盤の取扱いによって、直接法と重畳法（部分構造法）とに大別される。直接法とは、地盤-構造物系の全体を地盤をも含めてモデル化し、これを解析する手法であり、有限要素法や格子型法が直接法に属する。一方、重畳法は、地盤-構造物系を地盤部と構造物部の部分構造に分割し、地盤部の解析で得られる地盤ばねを構造物に付加してその挙動を解析する。SR法や点加振薄層要素法が本手法に属する。

一方、解析において取り扱われる振動系1節点の自由度によって、解析法を分類することが可能である。SR法や軸対称有限要素法は、構造物の重心を原点とする軸対称表現により地盤挙動の3次元挙動を表現する2自由度解析である。格子型法は平面ひずみモデルを用いているが、一般的には地盤の上下方向挙動を認めない1自由度解析である。ただし構造物の回転動を評価することが可能であり、かつ地盤の3次元の拡がりに伴う地下逸散減衰を擬似的に表現できるよう配慮されている。点加振薄層要素法は3自由度を扱っている。

さらに、振動現象を振動数領域で扱う場合と時刻歴領域で扱う場合に分類できる。対象物の挙動に非線形性が見られず重ね合わせが可能なこと、および地盤-構造物の相互作用解析では地盤ばねが振動数の関数で表現されるため、本報告では全てのケースで振動数領域による解析を実施し、フーリエ逆変換によって振動数領域の解を時刻歴領域の解に変換している。解析方法のこれらの特徴を勘案して、本報告では、最も一般的に用いられているSR法と3次元・重畳法を用いる点加振薄層要素法、並びに2次元・直接法に分類される格子型法の3手法について精度検証を行った。以下に、各解析法の概要を示す。

3.1 スウェイ・ロッキング（SR）法

SR法は、構造物モデルに弾性波動論などから評価される地盤ばねを付加し、地盤ばねを介して地震力を印加して地震時挙動を算定する。このため、地盤ばねと切り欠き力の設定を行う必要がある。

地盤ばねには、建屋底面に作用する地盤ばね、と地下部外壁に作用する地盤ばねの2種がある。一般には、建屋の底面に作用する水平ばねと回転ばねの算定には弾性波動論に基づいた地表面加振の理論解法により行い、地下部外壁に作用する地盤ばねとしてNovak⁴⁾により提案されている複素形式で表現された地盤複素ばねが用いられる。Novakにより示されている地盤複素ばねの値は振動数の複雑な関数である（以下EB法と称する）ため、近年の設計では、EB法を直線で近似評価するED法が用いられる場合が多⁵⁾。この場合には、実数部は振動数に依存せず静的値による一定の値と

し、虚数部を建屋の1次固有値でNovakの値をとる振動数比例型の関数を用いる。

Novakの地盤複素ばねは、基盤上に1層の表層が堆積する地盤に円筒状の構造物が建設された場合を対象として求められる。実用問題ではこのような条件が成立しないことが多い。このため、評価すべき地盤複素ばねに対応する地盤の厚さを表層の厚さに見なしてばね値を算定する。地盤複素ばねに関しては、水平方向地震動に対しては直応力による水平ばねとせん断応力による回転ばねを用い、上下方向地震動に対してはせん断応力による上下ばねを用いる。

本モデルへの入力地震動に関しては、地盤ばねを介して作用する自然地盤の地震時挙動に加えて、構造物に別の力 p を作用させる。 p は構造物と置換される地盤を自然地盤と同様に变形させる力として表される。これらの力は地中部分にある構造物の各節点で定義することができるが、本モデルでは建屋底面位置における地盤のせん断応力と建屋底面積の積を採用する。

3.2 点加振薄層要素法 (RESP)

SRモデルと同様に部分構造解析を主体とする。地盤や建屋の非線形性を扱うことは困難であり、必要な場合には等価線形解析を行う。

点加振薄層要素法では、地盤は水平な薄層に分割され、水平方向には均質な連続体として、深さ方向に対しては分割層毎に異なる物性を有する層として扱われる。このとき各薄層の厚さ方向に沿う変位分布を直線と仮定して定式化を行うと、地盤を伝播する正弦波動解析はラブ波とレーレー波の波数に関する代数固有値問題に帰着され、与えられた振動数のもとで、地盤の挙動は波数に関するモードの重ね合わせで表される。したがって、水平成層地盤の任意分割面上に正弦波点加振を与えたときの3次元波動伝播の解(グリーン関数)を解析的に求めることができる。

3次元点加振解は水平成層地盤を対象とする解である。したがって解を埋設基礎の相互作用解析に用いるためには、半無限状の水平成層地盤を、構造物によって置換される地盤と構造物の建設後にも残る地盤の2種の部分構造に分解し、これに構造物を加えた3部分の釣合式から、構造物と地盤の挙動を算定する。解の適用には、加振点を、構造物と地盤の境界面に設けた接点群に限定して適用する方法(境界法=Flexible Boundary Method, 以下FB法)と、基礎と入れ換わる地盤内に空間的に分布された接点群に適用する方法(容積法=Flexible Volume Method, 以下FV法)などいくつかの手法が提案されている。本報告では、両手法のたがいの長所のみを用いる薄膜法(Skin Method)の変形版を用いている。

本モデルへの入力地震動は、自然地盤に襲来する地震動をそのまま用いれば、構造

物によって置換される地盤の影響を考慮する際に、いわゆる切り欠き力を併せて評価できる。したがって本解析では一次元波動論で算定される自然地盤の挙動を直接に入力することができる。

本解析法をコード化した電中研殿所有のプログラム⁶⁾は、便宜上“RESP”と名付けられている(付録-A参照)。このため、以下では点加振薄層要素法による解析を略してRESP結果と呼ぶ。

3.3 格子型法(LATT)

地盤-構造物系を一体としてモデル化して解析する。構造物の支持地盤を幾つかの土柱の集合として扱い、その土柱を集中質量・ばね・およびダンパー(タッチポット)を用いてモデル化し、基礎版を介して建屋-地盤連成モデルを作成するものである。土柱のモデル化には平面ひずみ体が選ばれる。ただし地盤部の自由度を水平方向にのみ与えるため、構造物の回転によって生じる地盤からの復元力を表現できない。このため、対応する地盤の回転ばねには半無限弾性論や有限要素法から得られる値を用いる。

地盤の非線形性や建屋の弾塑性解析を行うことは可能であるが、現状では等価線形解析によることが多い。上下方向地震動に関する解法もいくつか提案されてはいるが、定評が得られているとは言えないのでここでは水平方向地震動に対する解法のみを用いる。

解析計算量に関しては、薄層要素法やFEMモデルに比して簡便であるが、SR法よりは計算量を要する。

本解析法をコード化した電中研殿所有のプログラムは、便宜上“LATT”と名付けられている(付録-B参照)。以下では格子型法による解析を略してLATT結果と呼ぶ。

4. 解析条件

4.1 解析対象観測地震波

表 2.1-(1), (2)に示した地震波のうち、本報告ではEQ-02, EQ-04, EQ-05, EQ-08, EQ-09, EQ-11, 及びEQ-12の7波を解析対象波とした。

各地震計において得られた最大加速度一覧を表 4.1 に、また、震央分布を図 4.1 に示す。観測地点において最も大きな加速度を与えた地震はEQ-12であり、基盤G1での加速度値はNS:19gal, EW:19gal, UD:10galであった。本報告では、各地震波に対して最大加速度分布と5%応答スペクトルを算定し、これらの観測結果と解析値との比較を行う。

4.2 Control Motion (基準地震動)

地震時の構造物挙動の算定には、構造物挙動に影響されない挙動を行う地盤(以下、自由地盤と称する)の挙動を定める必要がある。自由地盤挙動に近い値を観測するために、前述のようにG1~G4の地盤観測が行われている。しかしこれらG1~G4で観測された全ての地震時挙動を満足する単一の地盤モデルと入力地震動を定めることは現状では困難である。このため、特定された地盤モデルを用いて、ある観測点の地盤挙動を観測値に合致させる入力地震動を地震ごとに設定する。目標とする観測点の地震時挙動をControl Motion(以下、基準地震動と呼ぶ)と一般に称している。本報告では基準地震動としてG4波形を選び、このケースを標準とする。その他のケースでは建屋に近いG2, G3を基準地震動として使用する。なお、自然地盤挙動の一つとして内挿波と称される仮想の波形群を作成している。RESPにのみ適用できる地盤挙動であって、 $z = -32\text{m}, -18\text{m}, -1\text{m}$ ではG2, G3, G4の波形を持ち、これらの中間の深さでは対応する土質構造に適合する理論解である。

各解析モデルへの入力波は、解析法によって異なっている。薄層要素法では構造物の節点に対応する位置の自然地盤挙動を必要とし、SR法ではこれに加えて同位置の切り欠き力を算定する。また、格子型では地盤モデル底面に作用する地震波あるいは入射波が必要である。これらを統一して検討するために、自由地盤を対象として次元波動論による解析を行う。解析の入力波には自由地盤地表面の記録波を用い、相互作用ばねを介して構造物各質点に作用する挙動、あるいはモデル化された地盤への入力には、各レベルの自由地盤応答の波を用いる。なお、解析においては入力波を低周波濾波して用いた

4.3 解析モデル

(1) 建屋・地盤モデル

建屋・地盤モデルは、各解析法に共通のモデルを用いた。建屋モデルについては図 2.4-(1)、(2)に、また、地盤モデルについては図 2.3 に示した通りである。

(2) S R モデル

S R モデルについては、最も一般的に使用されるモデルという点を鑑みて、モデルパラメータの違いに対する精度評価を行った。モデルは、次の3つのモデルとした。

- ① 基本モデル：地下部外壁に作用する地盤ばねの実数部には、E B 法より得られる静的ばね値を用い、虚数部には3 Hz の値を通過するように直線近似を行う。外壁の各節点には水平方向ばねと回転方向ばねがともに接続されている。モデル概念を図 4.2 に示す。建屋基礎の底面に作用する水平・回転方向地盤ばねは弾性理論（振動アドミッタンス理論）より定める。これらの地盤ばねの値を図 4.3-(1)、(2)に示す。
- ② 振動モデル 1：地盤ばねの虚数部を3 Hz の値で一定値とする。
- ③ 振動モデル 2：外壁に作用する地盤ばねより回転ばねを外す。

(3) 点加振薄層要素モデル

本報告で用いたRESPのモデル概念を図 4.4 に示す。解析モデルは、構造物と切欠き状の残余地盤モデルに分割され、残余地盤モデルは自然地盤から排土地盤を取り除くことで表現する。排土部分の要素分割図を図 4.5 に示す。

(4) 格子型モデル

LATTによるモデル概念を図 4.6 に示す。解析では、地盤部の範囲を水平方向には建屋基礎幅の5倍、深さ方向には建屋基礎幅の2倍をモデル化し、この解析領域の1/2を5本の土柱モデルに置換した。また、地盤モデルの底面、側面および奥行きそれぞれの境界には粘性境界を設け擬似3次元効果を考慮している。地盤モデルり層厚さは最大解析振動数を15 Hz とし、最小波長の1/4以下となるように設定した。建屋基礎のロッキングばねは半無限弾性論より定めた。

5. 解析結果

5.1 地震挙動（地盤内伝播解析）

図 2.3 に示した地盤モデルを用い、平面波が鉛直に入力すると仮定した場合に得られる地盤の増幅率関数を、計算コードSHAKEを用いて算定し、7地震による実測値の増幅率関数と比較して、図 5.1-(1), (2)に示す。図 5.1-(1)(a, b)ではG4を基準としてG2, G3の挙動を表示している。また、図 5.1-(2)(c~f)に、G2, G3を基準とした場合の7地震の観測値の平均と計算値を示している。増幅率の観測値は、観測された各時系列のフーリエ変換値を基準波の変換値で除して得ており、平均値は絶対値の算術平均で求めた。図 2.3 の地盤モデルは、同図に示した比較を繰り返して最終的に決定されたものである。同図(a, b)で示された観測値の関数は、11~12 Hzより高い振動数では大きく乱れている。モデルの関数形状は山谷の位置、特に共振点の高さ(G3/G4の例では、4.5 Hz, 10 Hzの谷の位置)は比較的に観測値と一致しているが、4~12 Hzの範囲の値は観測値と大きく異なっている。

これらの図に示された観測値とモデルの応答差は、地層構造や地層厚さの乱れ、局部的に発生する表面波や波動の伝播形態などに起因すると考えられる。いくつかのモデル化法が提案されているが、まだ一般に適用できる手法はない。本報告では地盤のモデル化法を追求せず、自然地盤応答の決定には、先に示した地盤モデルを使用し、平面波の鉛直入力仮定を用いた。なお、12 Hz以上の領域における観測値のばらつきを考慮して、対象とする最大振動数を15 Hzとした。

5.2 地震時挙動

5.2.1 SR法

(1) 基本モデル

4.3項にて示した基本モデルを用いて、観測結果のシミュレーション解析を行った。地震EQ-04及びEQ-12において、建物各階で観測された最大加速度分布に関する解析結果を、図 5.2-(1), (2)に、また、地震計F1, F5, F8において得られた応答スペクトルに対する解析結果を図 5.3-(1)~図 5.3-(6)に示す。

最大加速度分布では、EQ-04; EQ-12とも埋設部分の解析値は観測値よりも低めであるが、地上部では両者の差が縮まり、特にEQ-12ではF8(GL.13.7 m)の観測値は解析値を上回る。全体的に観測値の最大値分布が直線的であるのに比して、解析値ではF1(GL.0.2m)で折れ曲がる形状を持っている。建物の下部では解析値は観測値ときわめて良く一致しており、全体的な挙動傾向に

についても比較的良好に表現できていると言えよう。

応答スペクトルについては、本建屋は深い埋め込みを持っているために、明瞭な固有モードがみられない。他の検討を通じて、観測値にみられる 0.55 sec の増幅は建屋の水平動が主体であり、0.25～0.30 sec の増幅は建屋のロッキング振動が主体であると解釈される。解析値の加速度応答スペクトルでは、0.25 sec (4 Hz) に増幅がみられる。EQ-12 では観測値においても同様の増幅があるが、EQ-04 では周期がややずれ、0.3 sec の成分が増幅している。このため解析値と観測値の対応は EQ-12 のほうがやや良いが、ともに 0.55 sec の増幅も表現している。地震動によってそれぞれ異なる峰が発生するが、解析の結果は観測結果に発生している峰とよく対応し、いずれの地震時挙動も全体的に的確にシミュレーションできている。

(2) 地盤物性の影響評価

せん断弾性係数 (G) が、解析結果にどの程度影響を与えるかを評価するため、図 2.3 に示した物性値 (G) を変化させて基本モデルに準じたモデルを作成し、その応答を求めた。解析ケースは、図 2.3 に示した G を基準値 (G_0) とし、その G_0 の $\frac{2}{3}$ とした場合と $\frac{4}{3}$ とした場合の 2 ケースとした。両ケースの解析結果を前項の基本モデル挙動と比較して、図 5.4 - (1), (2) に最大加速度分布を、図 5.5 - (1)～図 5.5 - (6) に応答スペクトルを示す。

最大加速度分布では、地盤剛性が小さいと応答値は小さく、剛性が大きいと応答値も大きくなる傾向が得られた。本報告では割愛しているが、構造物に発生する層せん力や曲げモーメント分布の解析でも同様の結果が得られている。微細にみれば建屋の下部では地盤剛性に関わらず最大加速度値は同じ程度であるが、地表面、建屋上部で上記の傾向が顕著にみられている。

3 モデルの結果を応答スペクトルで見れば、建屋の剛体的な水平動は地盤剛性の変化には変動を受けず、地盤剛性が大きいとロッキングが顕著となり、剛性が小さくなればロッキング動も抑えられている。建屋上部の周期が小さい部分では、地盤剛性の大小と応答の大小は概ね比例する傾向にあり、建屋の下部の周期が小さい部分では地盤剛性はあまり建屋の応答に影響を与えていない。これらのスペクトル特性から、本構造物では地盤剛性は主としてロッキング動に大きな感度を持ち、最大加速度分布の変化もロッキングによって発先していると解釈できる。

(3) モデルパラメータによる影響評価

4.3 項に示した摂動モデルについて、モデルパラメータに対する解析精度への影響評価を行った。図 5.6 - (1), (2) に最大加速度分布に関する結果を、また、

図 5.7-(1)～図 5.7-(6)に応答スペクトルに関する解析結果を図示する。摂動モデル 1 は地盤ばねの虚数部を一定とした場合のモデルであるが、最大加速度分布、応答スペクトルの両出力とも、基本モデルを用いた場合とほぼ同一の結果が得られた。一方、摂動モデル 2 は側面の回転ばねを無視したモデルであるが、最大加速度分布及び応答スペクトルとも、建物上部になるほど応答が大きくなるという傾向が顕著に現われており、側面の回転ばねを無視した場合は、建物挙動を安全側に推定できることが確認された。

5.2.2 点加振薄層要素法 (RESP)

(1) 最大加速度分布

7 個の地震により観測された水平方向の最大加速度分布と RESP によって算定された値を比較して図 5.8-(1), (2)に示す。解析値では G2 (GL-32m), G3 (GL-18m), G4 (GL-1m) をそれぞれ基準地震動とした場合の各地震時挙動を併せて示している。本図からでは、G2, G3, G4 のいずれかが特に基準地震動として最適であるとは判断できず、観測値に近い値が得られる基準地震動は地震によって異なっている。また、G3 による結果が G2 と G4 の結果の中間の値を取るという傾向も見られない。しかし、これらのいずれをとっても、最大加速度分布のレベルと全体的な傾向はよく表現されていると言えよう。一方、内挿波方式で自然地盤挙動を与えた最大加速度分布は良く観測値と一致している。先の検討では、G2～G4 のうちいずれが最も良好な模擬ができるか地震によって異なっており決定できなかったが、全ての挙動を取り入れる内挿波方式の結果が最も良好であった。

(注) RESP と後述の LATT については、解析ケースを図中次のように a-b-c と略記して示している。

a(1～12) : 地震番号を表す。1=EQ-01, 2=EQ-02, …… EQ-12

b(0～4) : 基準地震動を表す。0=G2, G3, G4 の内挿波, 2=G2, 3=G3, 4=G4

c(R, L) : 解析手法を表す。R=RESP, L=LATT。RESP, LATT 以外の手法は常にまとめて示しているため、これを □ で代用する。

ただし、応答スペクトルのように観測点または質点に関する出力は、-d を付し、d に測点名を記す。

(2) 応答スペクトル

図 5.9-(1)～図 5.9-(3)に、RESP で算定された 7 個の地震による応答スペクトルと対応する観測値を示す。同図には、EQ-04 と EQ-12 の地震による場合のみ、F1, F5, F8 の応答を示し、他の地震では建屋挙動の代表点として F

5点のみを掲げている。基準振動を、G2とくにG3とした場合には、特定の周期(0.15~0.25 sec)において観測値とは大きく異なる解析値が得られている場合が多い。0.15~0.25 secの範囲は、先に地盤の増幅率関数で示したように、最もG2-G3-G4関係を表現し難い振動数範囲に相当している。これに比べてG4を基準地震動とした場合には地震によらず平均して解析値と観測値がよく一致しているといえよう。一方、G2,G3,G4全ての観測値より定めた地盤震動を表現するG0によって、全地震動に対する応答が、最大加速度分布の場合と同様に比較的良好に得られており、本構造物のように深く埋設された構造物の地震時挙動の算定法は妥当であるとともに、自然地盤時挙動を正確に推定することの重要性を示唆している。

5.2.3 格子型法(LATT)

図5.10に代表的な2地震(EQ-04, EQ-12)に対するLATTの最大加速度分布の結果を示す。LATTでは基礎底面の最大値がRESPに比して大きく評価されており、地上部分でもややRESPとは異なった挙動を評価しているが、基準地震動に対する全体の傾向はRESPとよく似ている。

図5.11に掲げるLATTによる応答スペクトルについても、RESPによる場合と全く同様の傾向が得られた。ただし、LATTでは手法の制約から自然地盤挙動をG0で与えることはできない。

6. 解析結果のまとめ

前述の3手法の他、薄層要素モデル^(注)を用いた手法も加えて代表地震波EQ-04とEQ-12に対する各解析手法による解析結果の比較を行った。図6.1-(1), (2)に最大加速度分布について、また、図6.2-(1), (2)に応答スペクトルを、並びに図6.3-(1), (2)に地表G4に対する建屋の増幅率関数を図示する。

最大加速度分布については、全体的に観測値が直線的であるのに対して解析値では地表レベルで折れ曲がる形状を持つ。また、埋設部分の解析値は観測値よりも低めであるが、地上部では両者の差が縮まる傾向にある。解析精度的には、建物の下部で観測値と良く一致しており、全体的な挙動傾向についても比較的良く表現できていると言え、解析手法による顕著な差はみられなかった。

応答スペクトルでも、互いに類似の解析結果が各手法で得られている。本建屋は深い埋め込みを持っているために明瞭な固有モードがみられない。地震動によってそれぞれ異なる峰が発生するが、解析の結果は観測結果に発生している峰とよく対応し、いずれの地震時挙動も全体的に的確にシミュレーションできている。

増幅率関数で見れば、薄層要素法とSR法はRESPとよく似た応答が得られているが、格子型法の結果はやや異っている。格子型法の結果は約10Hz程度まではLATTの結果とほぼ完全に一致しているが、高振動数域では大きく増幅している。応答スペクトル結果では格子型法の結果とLATTの結果はよく一致しているため、格子型法による応答結果の伝達関数処理法に差異があるものと判断した。

以上の結果から、3次元挙動を扱うRESP、薄層要素法、SR法のグループと、2次元挙動を扱うLATT、格子型法とでは算定される応答に若干の違いがあるが、その差異は解析値の平均と観測値の差異程度である。すなわち、一般に提案されているコードによってほぼ同一の挙動予測が可能であることが実証された。

(注) 薄層要素法

直接法に分類される解析手法であり、地盤は水平な薄層に分割され、水平方向には均質な連続体として、深さ方向に対しては分割層毎に異なる物性を有する層として扱う。薄層要素法のモデル概念を図6.4に参考として示す。本解析では、地盤のモデル化範囲を130mまでとし、下端に粘性境界を設定したモデルとした。

7. 結 言

地盤-構造物系の相互作用解析のうち代表的と判断される解析法を用いて、「常陽」の地震時挙動を解析し、地震観測資料をもとに解析精度を検討した。得られた成果を、以下にまとめる。

(1) 地震時挙動のシミュレーション

現在提案されているいずれの解析法とも建屋挙動の傾向をよく把握しており、埋込みを有する構造物の地震時挙動を的確に評価し、その信頼性も高いことが確かめられた。基準地震動を地表面に設定すれば、最大加速度分布・応答スペクトルとも良好に模擬できるが、地中地震動の観測値に適合する地盤震動を設定すれば、解析精度はさらに向上できることを確認した。最大加速度分布に関しては、埋設部分の解析値は観測値よりも低めであるが、地上部では両者の差が縮まる。全体的に観測値の最大加速度分布が直線的であるのに比して、解析値では地表面レベルで折れ曲がる形状を持つ。建物の下部では解析値は観測値ときわめて良く一致しており、全体的な挙動傾向についても比較的よく表現できていると言えよう。解析法によって解析結果と観測値との一致の程度は異なるが、対象とする地震や基準地震動によっても差があり、全体では解析法による顕著な差異はみられない。応答スペクトルに関しても、互いに類似の解析結果が得られている。本建屋は深い埋め込みを持っているために明瞭な固有モードがみられない。地震動によってそれぞれ異なる峰が発生するが、解析の結果は観測結果に発生している峰とよく対応し、各地震時挙動も全体的に的確にシミュレーションができています。

(2) 地盤の剛性が応答に及ぼす影響

建屋の水平方向挙動に与える地盤剛性の影響を、SRモデルを用いて検討した。解析結果より、地盤剛性が小さいと応答値は小さく、剛性が大きいと応答値も大きくなる傾向が確認された。詳細にみれば建屋の下部では地盤剛性に関わらず最大加速度値は同じ程度であるが、地表面、建屋上部で上記の傾向が顕著にみられた。応答スペクトルに対する検討結果より、本構造物では地盤剛性は主としてロッキング動に大きな感度を持っていることが確認できた。

(3) モデルパラメータが応答に及ぼす影響

SRモデルを用いてモデルパラメータに対する解析精度への影響評価を行った。摂動ケースに関しては、最大加速度分布、応答スペクトルの両出力とも、基本モデルを用いた場合とほぼ同一の結果が得られている。これより本報告に用いられた解析手法の結果は、解析実施者らのパラメータ選択・決定に大きくは依存しない解析法の特徴が抽出されていると判断された。

以上に記した解析から、建屋の地震時挙動のシミュレーション精度、及び地盤剛性の変

化やモデルパラメータが建屋の応答に与える影響が定量的に把握された。いずれの解析法も建屋挙動の傾向をよく把握しており、埋め込みを有する構造物の地震時挙動を的確に評価し、その信頼性も高いことが確かめられた。

謝 辞

解析作業において、電力計算センターの中園直秀氏と(現)日本大学の鈴木順一博士に多大なる御助力を頂いた。ここに、末筆ながら深い感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) PNC SY9469 87-002, CRIEPI-U87004, 第四紀地盤上の高速実験炉「常陽」の地震応答特性(その1) - 地表からの地盤調査法の適用 -, 1987年8月
- 2) PNC SY9469 87-001, CRIEPI-U86005, 第四紀地盤上の高速実験炉「常陽」の地震応答特性(その2) - 起振実験結果を基にした床応答曲線の再評価 -, 1987年5月
- 3) PNC SY9469 87-003, CRIEPI-U87005, 第四紀地盤上の高速実験炉「常陽」の地震応答特性(その3) - 地震観測に基づく地盤~建屋の応答特性と根入れ効果の簡易予測手法 -, 1987年8月
- 4) Y. Beredugo, M. Novak "Coupled Horizontal and Rocking Vibration of Embedded Footings" Canadian Geotech. Journal Vol.9, Nov. 1972
- 5) 電気技術基準調査委員会・原子力発電耐震設計特別調査委員会「建屋埋込み効果の評価法の標準化に関する調査報告書」 日本電気協会 昭和62年5月
- 6) 花田, 「点加振解を利用した3次元地盤-構造物の応答解析法」 電力中央研究所研究報告 U86026 1987年

表 2.1 - (1) 「常陽」地震観測 観測地震の諸元

36° 15' 48"
140° 33' 30"

地震番号	震源時	震央位置	緯度	経度	深さ (km)	M	震央 (震源) 距離 (km)	最大値 (gal)	備考
01	85/07/29 03:05:45	福島県沖	37° 3.9'	141° 14.5'	52	4.7	107.9 (119.5)	5.10	
○ 02	85/07/29 04:33:21	福島県東部	37° 18.5'	140° 41.3'	90	5.5	116.6 (146.9)	17.78	解析
03	85/09/09 20:09:26	茨城県沖	36° 22.3'	140° 58.7'	41	3.7	39.6 (56.9)	5.65	
○ 04	85/10/04 21:25:51	茨城県南部	35° 52.1'	140° 9.5'	78	6.1	56.7 (96.1)	34.06	解析
○ 05	85/10/13 02:21:54	茨城県沖	36° 40.2'	141° 19.1'	44	5.0	81.7 (92.6)	13.95	解析
06	85/10/17 22:06:21	埼玉県東部	35° 52.1'	139° 52.5'	67	4.5	75.6 (100.6)	6.88	
07	85/10/26 15:14:40	茨城県南部	36° 10.7'	140° 23.1'	69	4.3	18.2 (71.3)	6.18	
○ 08	85/11/19 01:08:56	茨城県沖	36° 38.7'	140° 59.5'	51	4.2	57.5 (76.8)	7.18	解析
○ 09	85/11/22 13:17:00	茨城県南西部	36° 01.9'	139° 58.6'	52	4.9	58.3 (77.9)	8.60	解析
10	85/12/21 20:21:29	茨城県北部	36° 30.4'	140° 32.0'	56	3.6	27.1 (62.2)	5.10	
○ 11	86/01/11 02:52:06	茨城県沖	36° 41.9'	141° 13.6'	46	4.3	76.9 (89.5)	8.27	解析
○ 12	86/02/12 11:59:31	茨城県沖	36° 25.0'	141° 05.0'	44	6.1	50.1 (66.6)	51.32	解析
13	86/02/12 12:47:10	茨城県沖	36° 23.3'	141° 02.2'	44	4.1	45.1 (63.0)	6.55	
14	86/02/14 10:25:45	茨城県沖	36° 23.7'	141° 10.3'	42	4.5	57.0 (70.7)	4.18	
15	86/03/02 16:09:26	宮城県沖	38° 28.2'	142° 18.9'	33	6.0	290.2 (291.3)	6.87	
16	86/04/05 09:29:45	宮城県沿岸	36° 29.0'	140° 39.0'	56	3.9	25.8 (61.7)	9.30	
17	86/05/05 22:27:24	福島県沖	36° 55.2'	141° 31.4'	78	4.9	113.0 (136.9)	11.48	
18	86/05/15 02:11:49	福島県東部	37° 31.9'	140° 43.4'	83	4.9	141.5 (163.5)	10.63	
19	86/06/24 11:53:09	房総半島南東沖	34° 49.4'	140° 43.2'	73	6.5	160.7 (175.5)	15.53	
20	86/07/10 11:10:44	茨城県北部	36° 12.9'	140° 35.9'	81	4.8	6.7 (81.3)	27.85	
21	86/11/29 07:29:35	茨城県沖	36° 23.5'	141° 10.8'	42	5.8	57.6 (71.2)	64.88	
22	87/02/06 21:23:44	福島県沖	36° 56.2'	141° 56.1'	30	6.4	144.0 (146.8)	16.52	
23	87/02/06 22:16:15	福島県沖	36° 57.7'	141° 53.8'	35	6.7	142.5 (146.4)	64.43	
24	87/02/11 02:51:45	茨城県南西部	36° 09.0'	139° 50.9'	61	4.6	65.1 (88.9)	21.40	
25	87/02/13 19:01:37	茨城県沖	36° 37.1'	141° 03.8'	48	5.2	59.9 (76.7)	29.37	

○ 解析の対象とした地震波

表 2.1 - (2) 「常陽」地震観測 観測地震の諸元

36° 15' 48"
140° 33' 30"

地震番号	震源時	震央位置	緯度	経度	深さ(km)	M	震央(震源)距離(km)	最大値(gal)	備考
26	87/04/07 09:40:43	福島県東方沖	37° 18.0'	141° 52.0'	44	6.6	163.9 (169.3)	40.27	
27	87/04/10 19:59:40	茨城県南西部	36° 07.2'	139° 52.5'	60.9	4.9	63.5 (87.7)	25.53	
28	87/06/30 18:17:07	茨城県南西部	36° 11.0'	140° 05.3'	56.5	4.9	43.2 (71.0)	62.79	
29	87/09/24 13:55:21	茨城県東方沖	36° 37.6'	141° 18.7'	42.5	5.8	78.7 (89.2)	26.59	
30	87/12/17 11:08:17	千葉県東方沖	35° 22.3'	140° 29.8'	57.9	6.7	99.1 (114.2)	47.46	*1
31	88/01/30 06:18:48	茨城県東方沖	36° 41.1'	140° 49.9'	61.5	4.9	53.1 (81.2)	23.55	*1
32	88/03/18 05:34:29	東京都東部	35° 39.7'	139° 38.8'	96.1	6.0	105.9 (142.3)	20.68	*1
33	88/09/16 03:18:56	茨城県南西部	36° 12.0'	140° 04.0'	61.2	4.5	44.8 (75.7)	15.92	*1
34	88/09/26 17:23:19	銚子付近	35° 32.5'	141° 10.9'	35.7	5.8	97.9 (103.8)	7.79	*1
35	89/01/28 16:36:	鹿島灘	36° 28. '	141° 40. '	51.	4.4	25. (57.)	21.20	*2
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	
	/ / : :		° . '	° . '		.	. (.)	.	

(89/02/07現在 *1:速報値, *2:緊急暫定値)

表4.1 最大加速度振幅値一覧

解析の対象とした地震○ (単位: gal)

CH	観測点	EQ-01	EQ-02	EQ-03	EQ-04	EQ-05	EQ-06	EQ-07	EQ-08	EQ-09	EQ-10	EQ-11	EQ-12	EQ-13	EQ-14	EQ-15	EQ-16	EQ-17	EQ-18	EQ-19	EQ-20
1	G1 NS	1.37	5.56	1.39	8.77	3.63	0.99	1.58	1.94	1.77	1.76	2.24	19.05	2.29	1.39	1.86	3.22	2.34	2.45	4.50	4.71
2	EW	1.21	4.44	1.64	11.19	3.16	1.13	1.30	1.91	2.38	1.24	2.84	13.01	1.66	1.52	2.13	2.75	2.43	2.27	5.39	7.37
3	UD	0.95	3.03	1.19	7.73	1.93	0.77	0.90	1.72	1.50	0.75	1.46	10.42	1.54	0.98	1.29	2.22	-	-	-	-
4	G2 NS	1.92	6.58	1.54	16.33	4.08	1.00	2.51	3.28	2.88	1.66	3.09	20.45	1.88	1.68	2.20	3.31	2.41	2.58	6.44	6.65
5	EW	1.05	4.87	1.42	10.78	3.38	0.88	1.10	3.11	2.19	1.02	2.11	13.20	1.13	1.16	1.51	2.99	2.40	1.76	4.98	4.59
6	G3 NS	2.19	7.59	2.13	15.91	3.50	1.45	2.59	2.50	3.07	2.94	3.42	20.03	2.51	1.81	1.95	4.42	2.62	-	-	-
7	EW	1.99	6.26	1.65	12.58	3.90	1.21	1.42	2.85	2.64	1.87	3.84	17.74	1.58	1.81	2.04	3.76	3.70	-	-	-
8	G4 NS	5.10	17.78	5.65	33.73	13.95	6.88	6.18	6.48	8.60	5.10	8.27	51.32	6.55	4.18	6.87	9.30	11.48	10.63	15.53	27.85
9	EW	3.29	16.91	2.58	34.06	11.50	5.79	3.89	7.18	5.28	2.61	7.97	26.86	3.42	3.39	5.76	6.52	5.88	10.42	10.44	16.36
10	UD	4.90	13.75	5.24	24.97	8.95	4.01	3.77	6.40	5.19	5.49	6.48	36.28	4.57	4.63	4.31	7.37	-	-	-	-
11	F1 NS	0.44	2.16	0.51	12.67	1.66	0.63	1.13	0.80	1.65	0.53	0.91	10.38	0.70	0.94	1.31	1.23	1.37	1.17	5.59	2.99
12	EW	0.55	3.45	0.53	9.64	2.32	0.56	0.95	1.12	0.88	0.37	1.20	9.78	0.71	0.85	1.51	0.90	1.88	1.21	4.97	3.55
13	UD1	0.78	3.96	0.63	8.86	2.66	1.00	1.15	0.92	2.14	0.62	-	-	-	-	-	1.34	-	1.73	4.30	4.22
14	UD2	0.83	3.58	0.81	7.53	2.03	0.91	1.17	1.48	1.85	0.54	1.54	13.17	0.86	1.11	1.65	1.16	-	-	-	-
15	UD3	0.72	4.01	0.84	8.12	2.71	0.74	1.12	1.07	1.78	0.54	1.96	12.70	0.67	0.90	1.60	1.24	-	2.80	3.84	4.47
16	F3 NS	0.51	2.34	0.51	12.53	2.22	0.69	1.34	0.91	1.93	0.54	1.03	12.59	0.86	1.12	1.44	1.27	1.49	-	-	-
17	EW	0.67	4.27	0.55	11.43	2.87	0.63	1.04	1.12	1.57	0.53	1.50	13.08	1.05	1.18	1.71	1.30	1.97	-	-	-
18	F5 NS	0.61	2.76	0.76	13.94	2.63	0.69	1.55	0.96	2.20	0.55	1.52	14.66	1.03	1.24	1.65	1.30	1.75	1.57	5.45	3.41
19	EW	0.84	4.68	0.67	12.45	3.10	0.91	1.33	1.29	2.01	0.61	2.51	16.03	1.13	1.26	2.14	1.54	2.02	1.94	5.32	6.06
20	F7 NS	0.82	4.18	1.36	16.15	3.53	1.10	1.97	1.71	2.64	0.65	2.30	16.72	1.32	1.38	1.97	1.93	1.99	2.19	5.81	4.84
21	EW	1.17	5.56	1.18	14.07	4.05	1.49	1.75	1.93	2.44	1.14	4.30	18.58	1.66	1.65	2.92	2.45	2.67	2.69	5.76	7.08
22	F8 NS	0.96	4.55	1.65	16.58	3.75	1.31	2.13	2.10	2.85	0.91	2.59	17.44	1.44	1.53	2.06	2.40	2.09	2.37	6.15	5.40
23	EW	1.35	6.80	1.45	14.98	4.54	1.80	2.02	2.56	2.75	1.39	5.21	21.19	2.03	1.77	3.33	3.36	3.13	3.21	5.96	8.63
24	UD	0.99	4.18	0.92	8.18	2.85	0.98	1.06	2.23	1.86	1.00	2.37	11.88	1.31	1.21	1.59	1.72	-	3.31	4.81	4.38

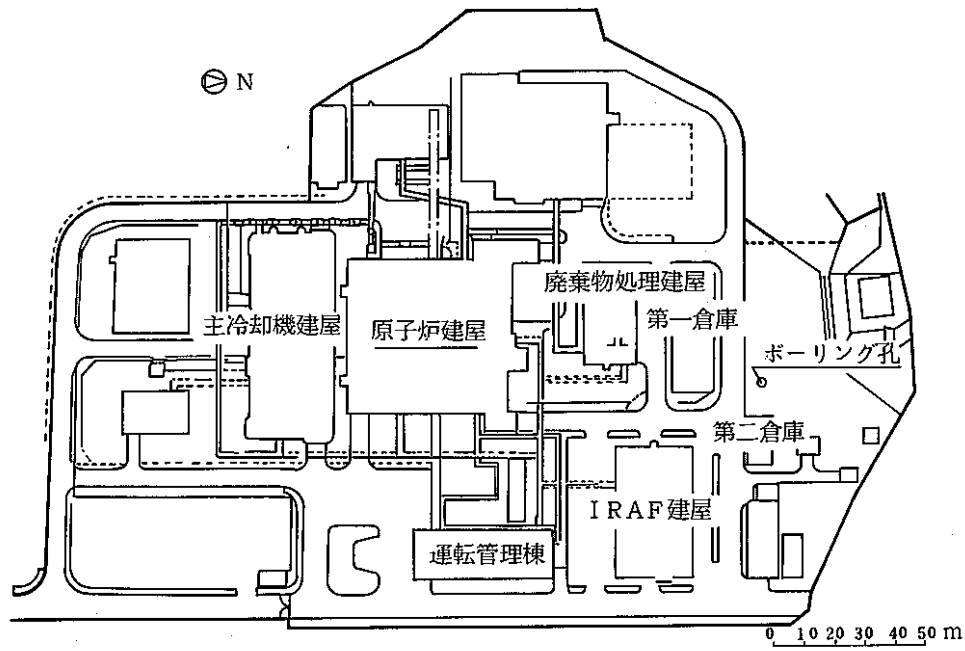


図 2.1 「常陽」炉建屋，周辺建屋及びボーリング孔位置

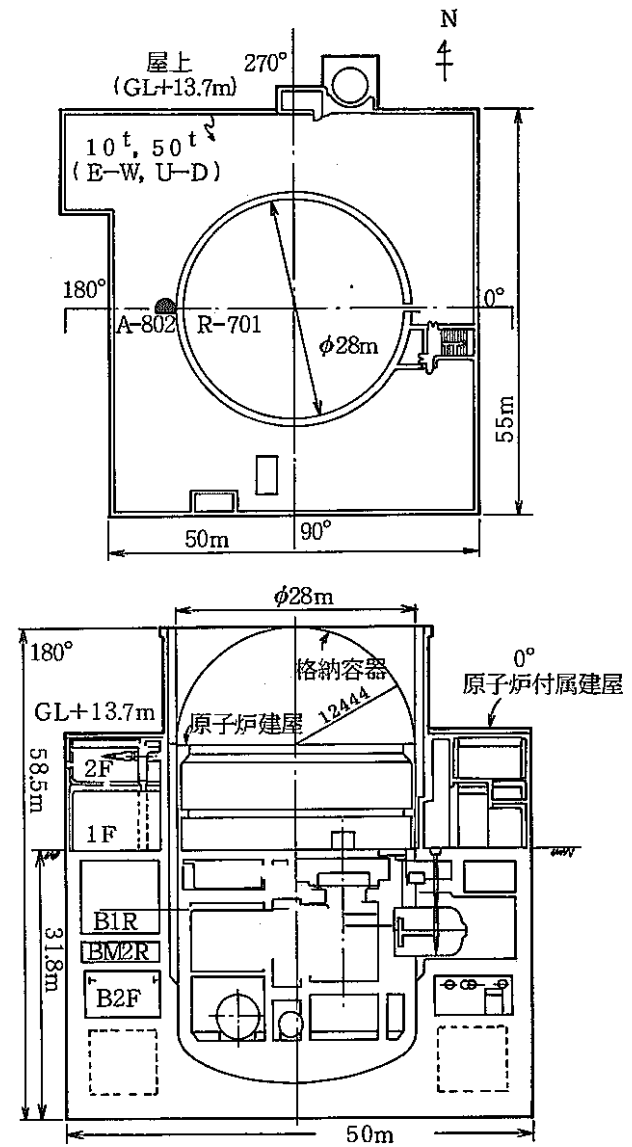
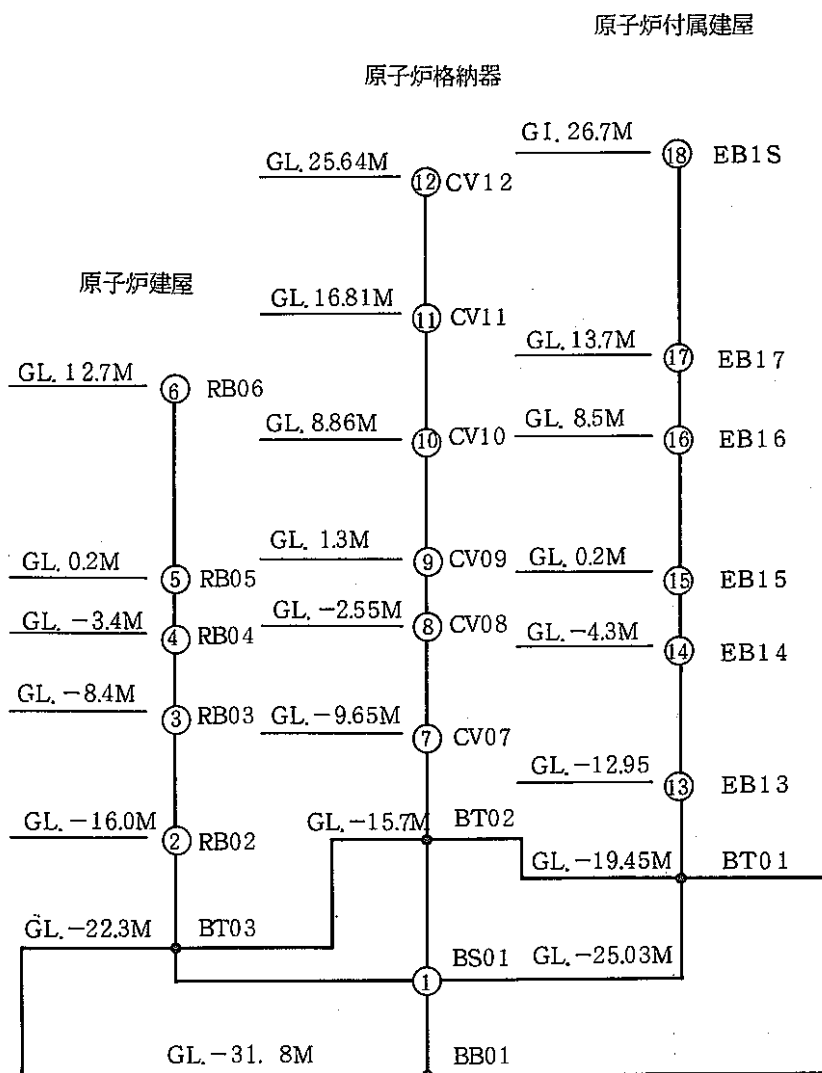


図 2.2 「常陽」原子炉建屋の平面と断面図

深さ (GL m)	地質および 地中観測点	せん断波速度 V_s (m/s)	縦波速度 V_p (m/s)	単位体積重量 γ (t/m ³)	ポアソン比	減衰定数
G4	盛土 ローム	120	250	1.88	0.35	0.10
-10		160			0.15	
-5.0	細砂～中砂 粘土・砂	350	700	1.88	0.37	0.05
-16.0				1.93		0.01
-18.0						
-22.0	砂 細砂	570	900	2.1	0.47	0.01
-31.0						
-35.0	細砂	470	1600	1.91	0.45	0.01
-41.0				2.0		
-64.0	シルト質砂 細砂	350	1600	2.0	0.475	0.01
-80.0	細砂、シル ト混じり 細砂	400	1600	2.0	0.47	0.01
-114.0	細砂、シル ト混じり 細砂	470	1600	2.0	0.45	0.01
G1		530	1600	2.0	0.44	0.01
-130.0						

図 2.3 「常陽」地点の地盤構造モデル



	$E (t/cm^2)$	$C (t/cm^2)$	$h (\%)$
原子炉建屋	211.	90.2	5.0
原子炉付属建屋	211.	90.2	5.0
原子炉格納容器	2110.	812.	3.0

図 2.4 - (1) 「常陽」 構造物モデル (建屋解析モデル)

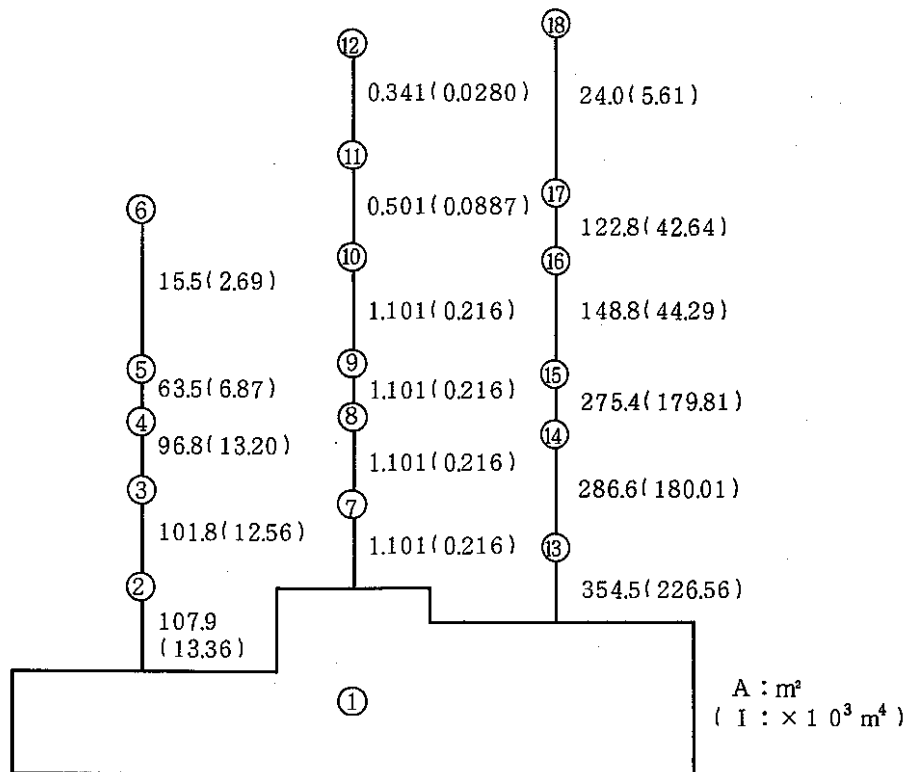
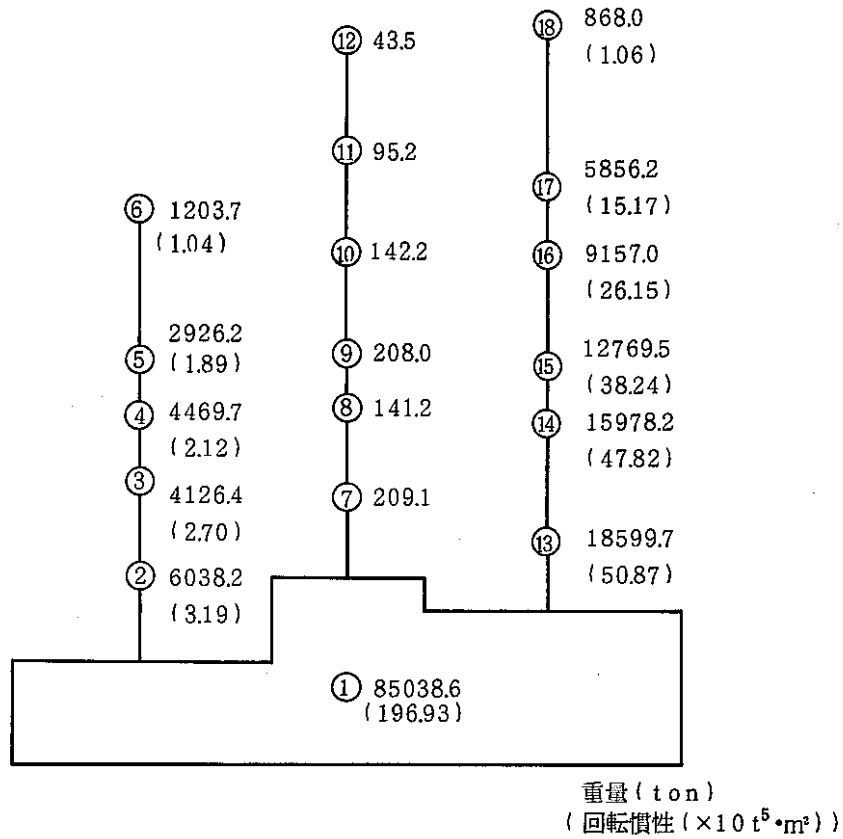


図 2.4 - (2) 「常陽」構造物モデル (建屋解析モデルの剛性諸元)

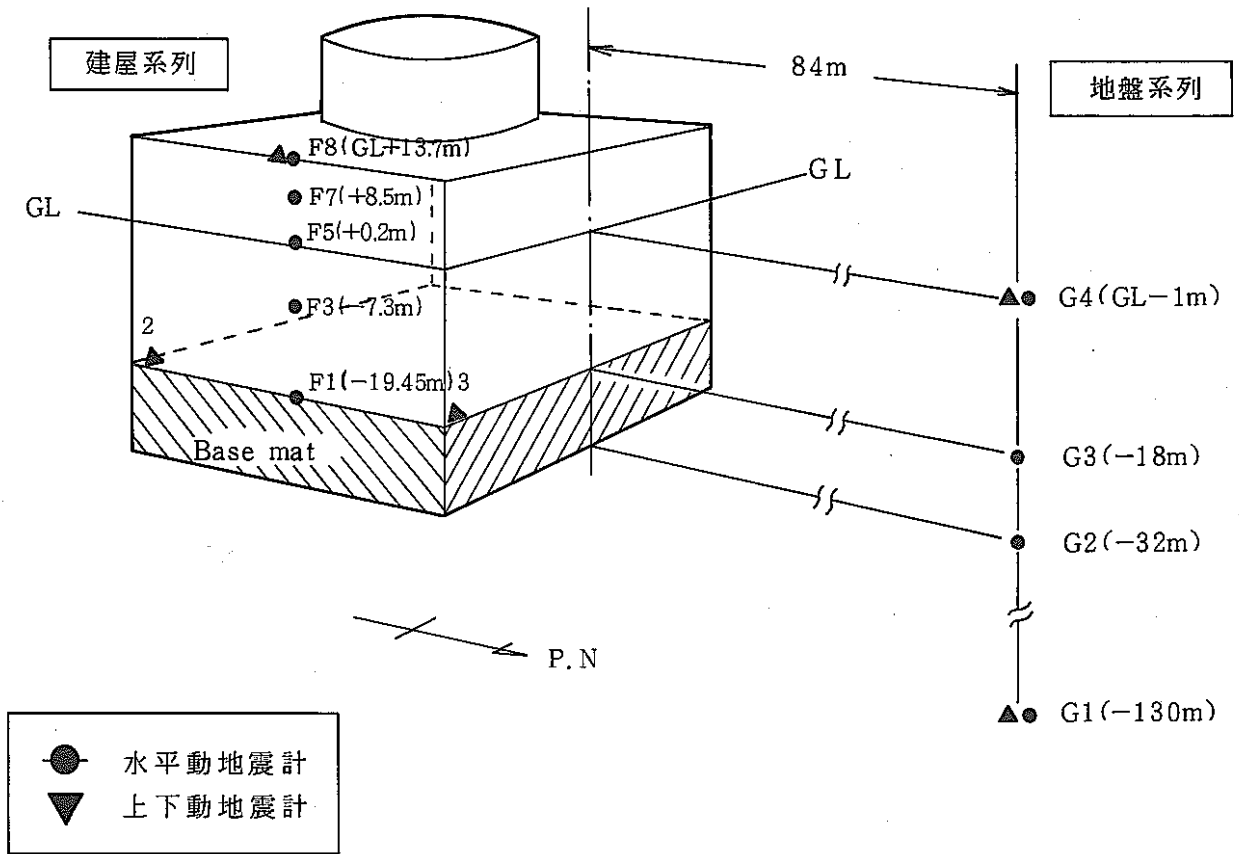


図 2.5 - (1) 「常陽」地震観測・測点配置概要 (断面)

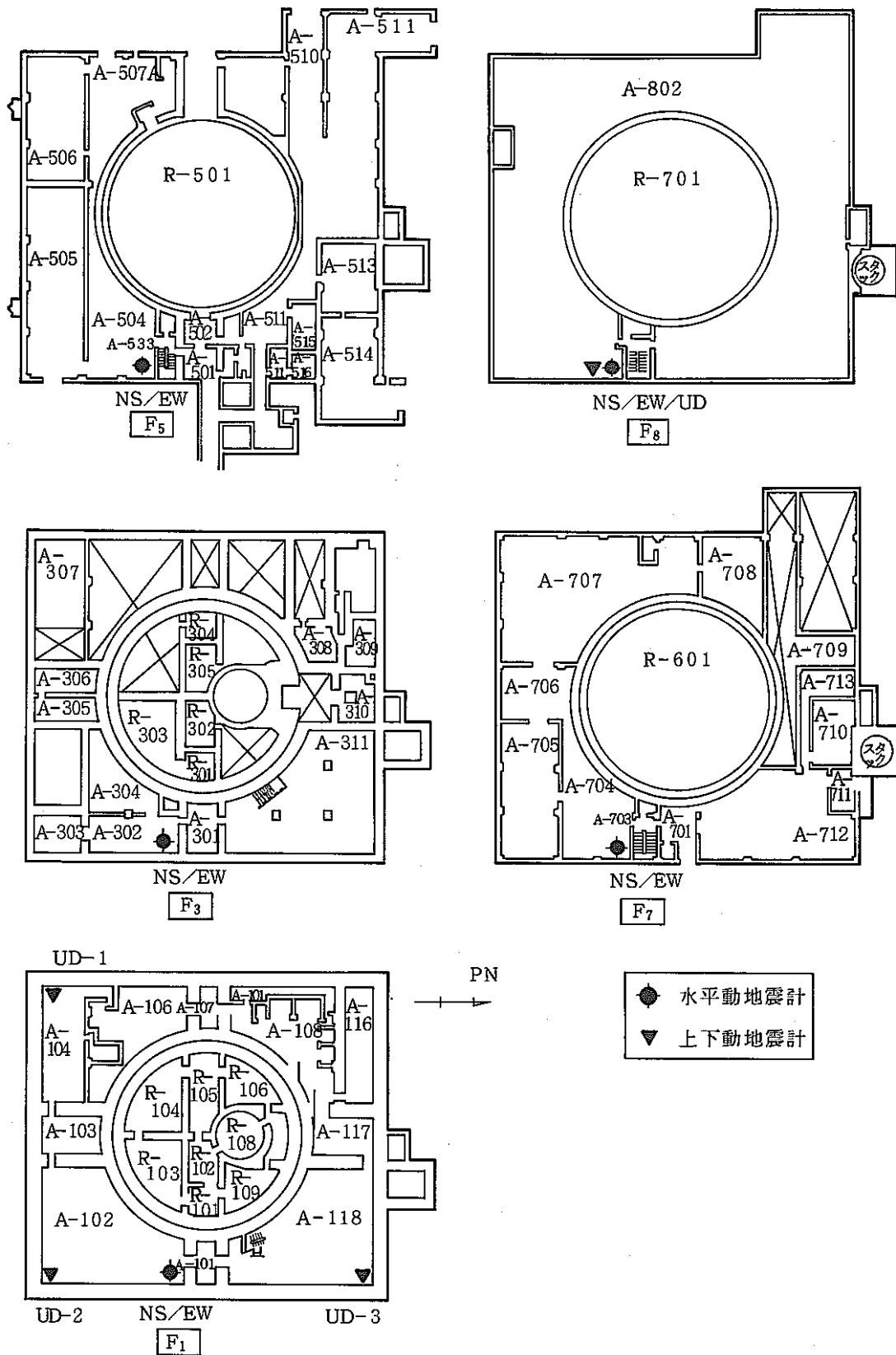


図 2.5 - (2) 観測点配置 (平面)

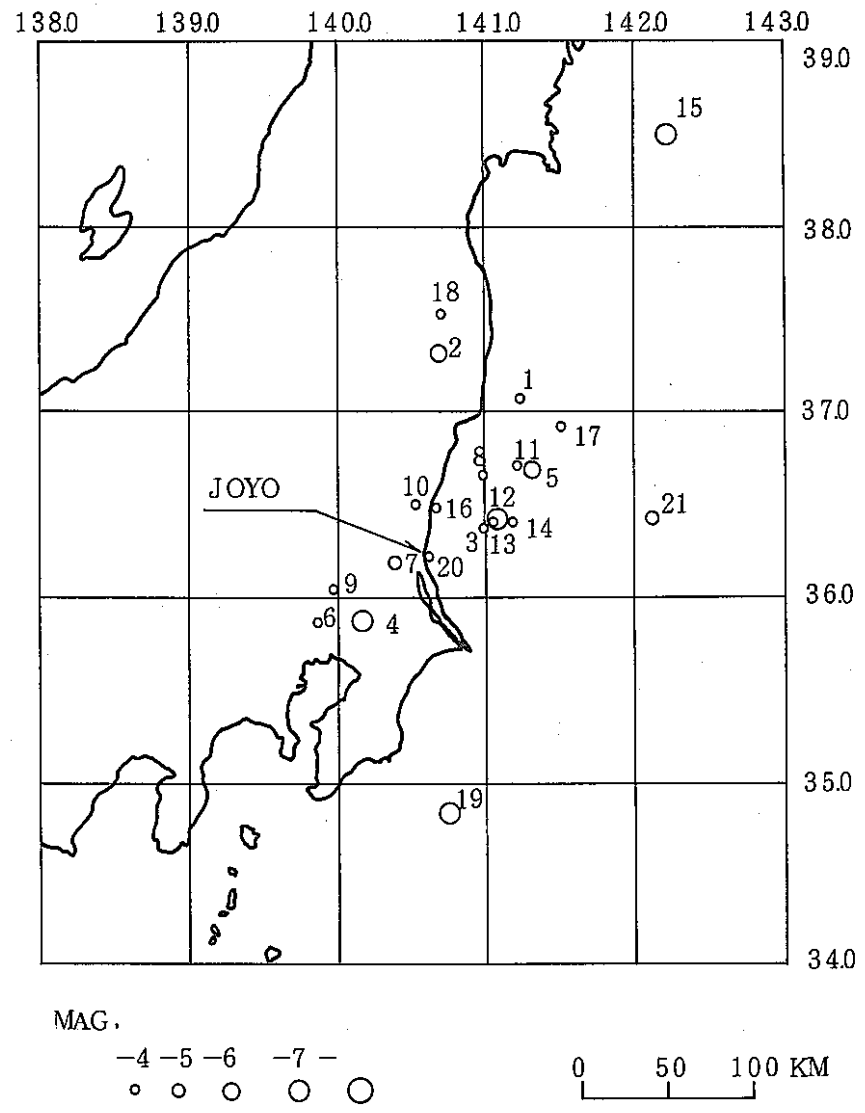


図 4.1 観測された地震の震央と地震規模

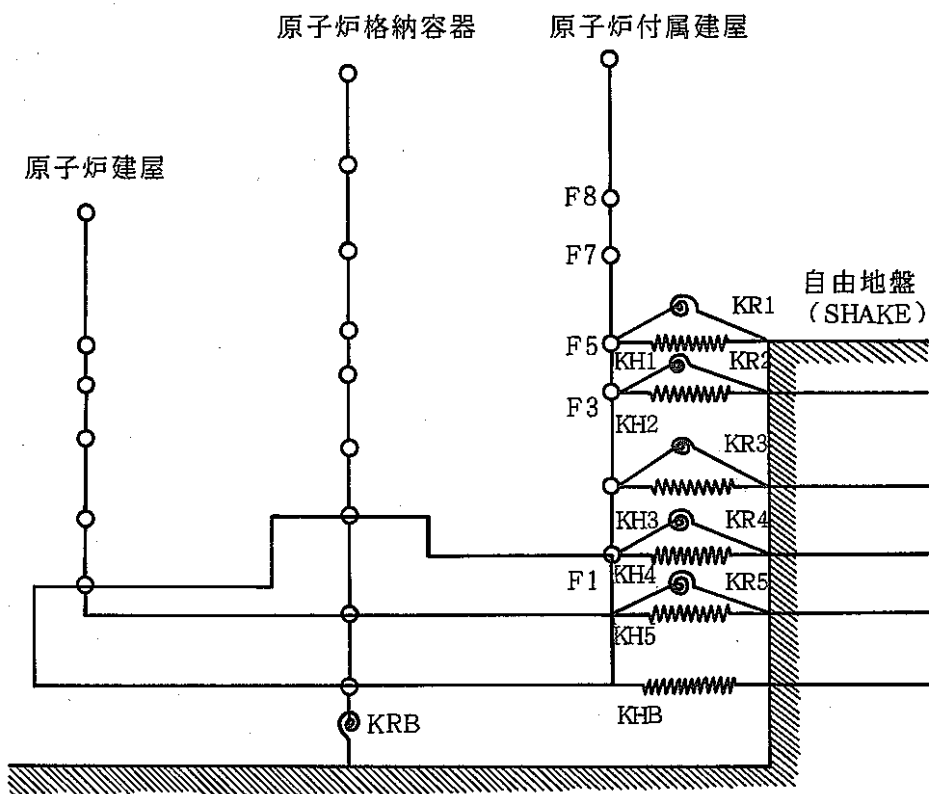
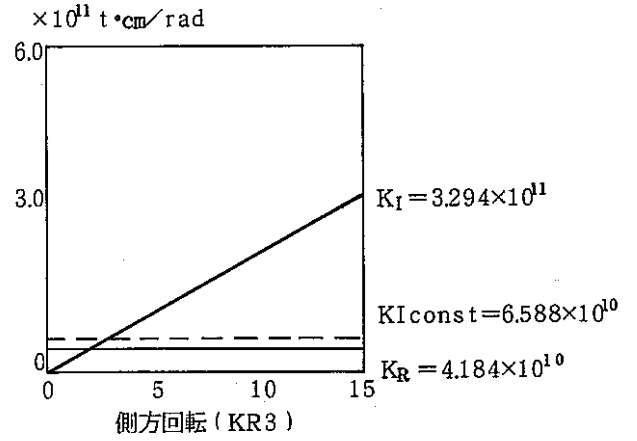
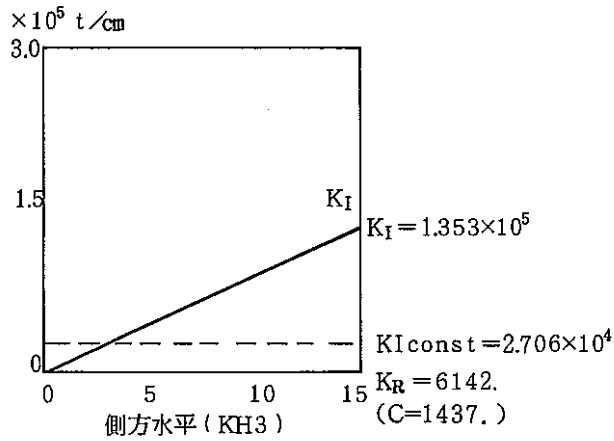
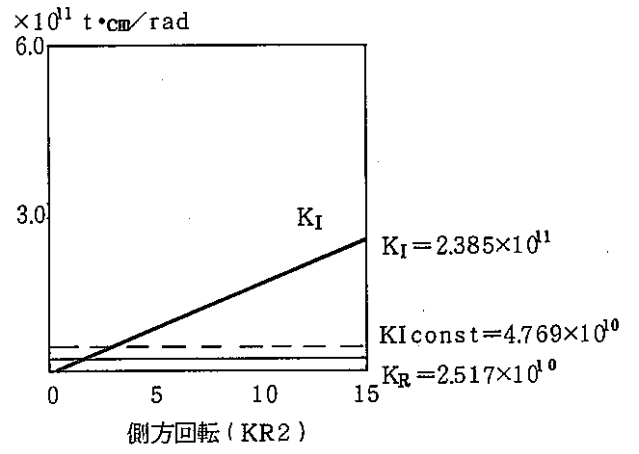
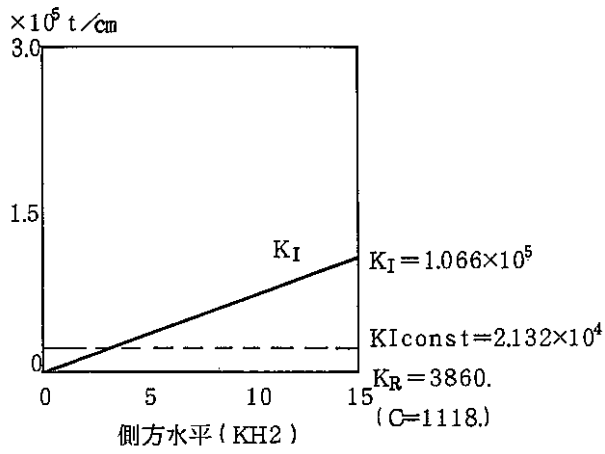
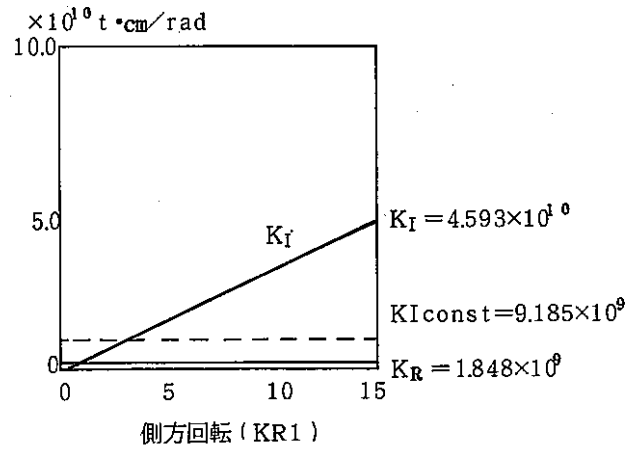
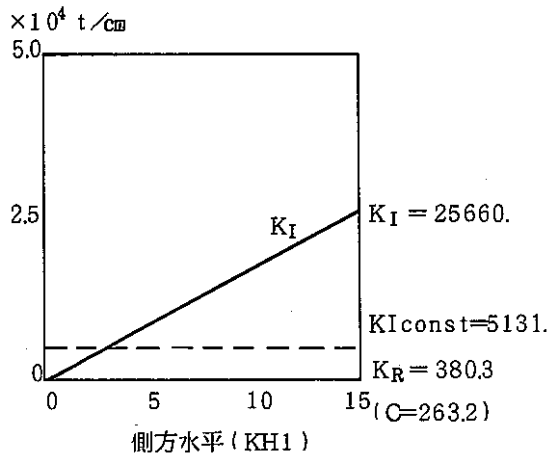
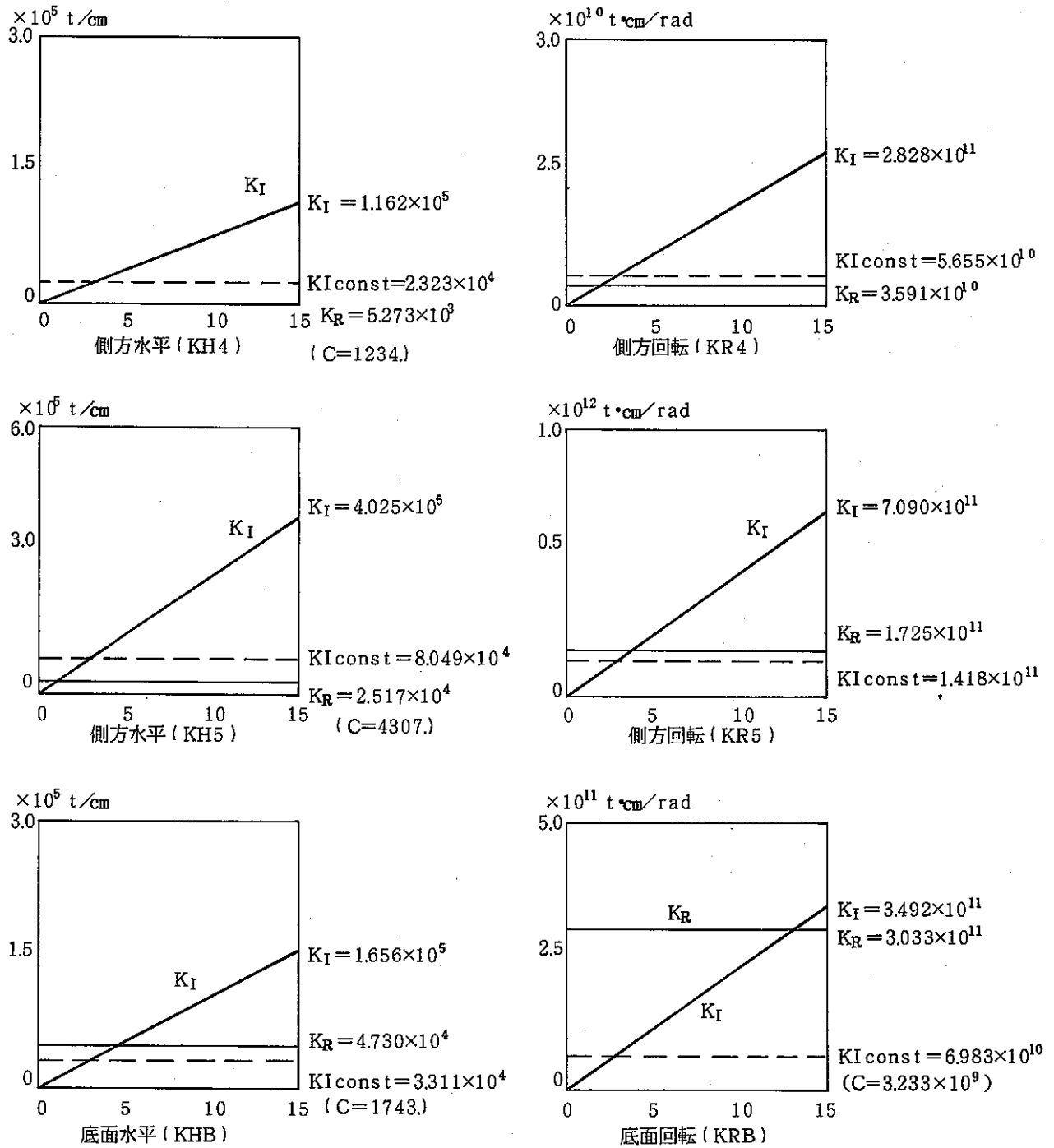


図 4.2 SR法のモデル概念



C=**** は振動モデル2の減衰定数
は振動モデル1の虚数バネ

図 4.3 - (1) SR法の地盤ばね (側面ばね)



C=**** は振動モデル2の減衰定数
は振動モデル1の虚数バネ

図 4.3 - (2) S R 法の地盤ばね (側面・底面ばね)

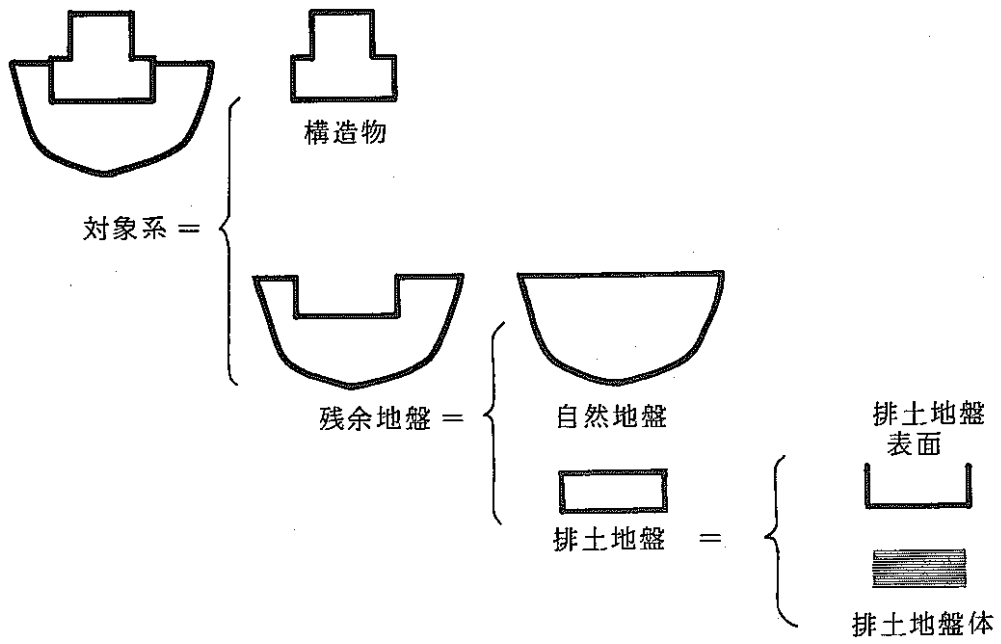


図 4.4 RESP の解析概念

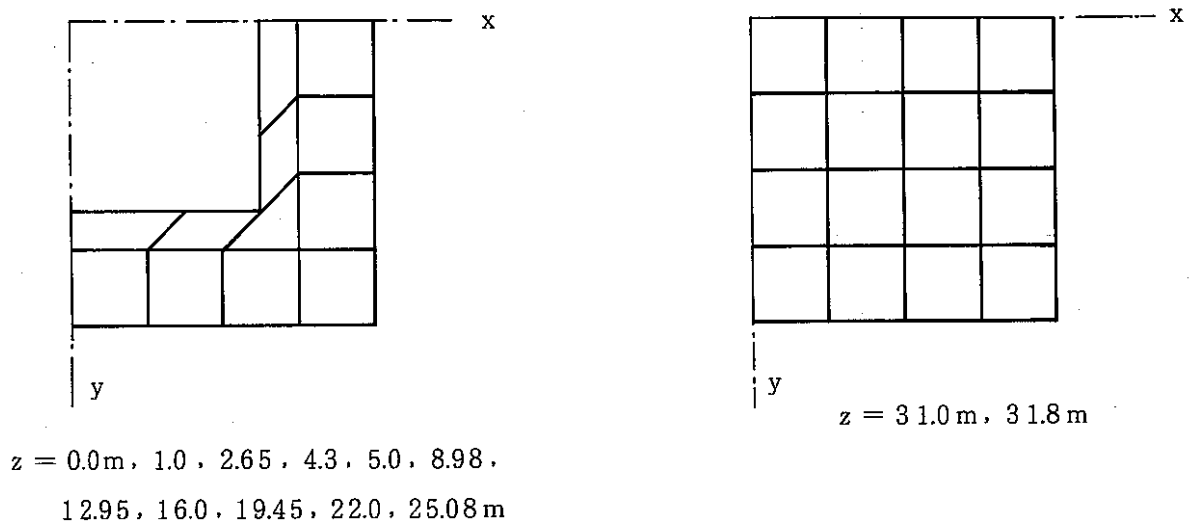


図 4.5 RESP の排土部分要素分割

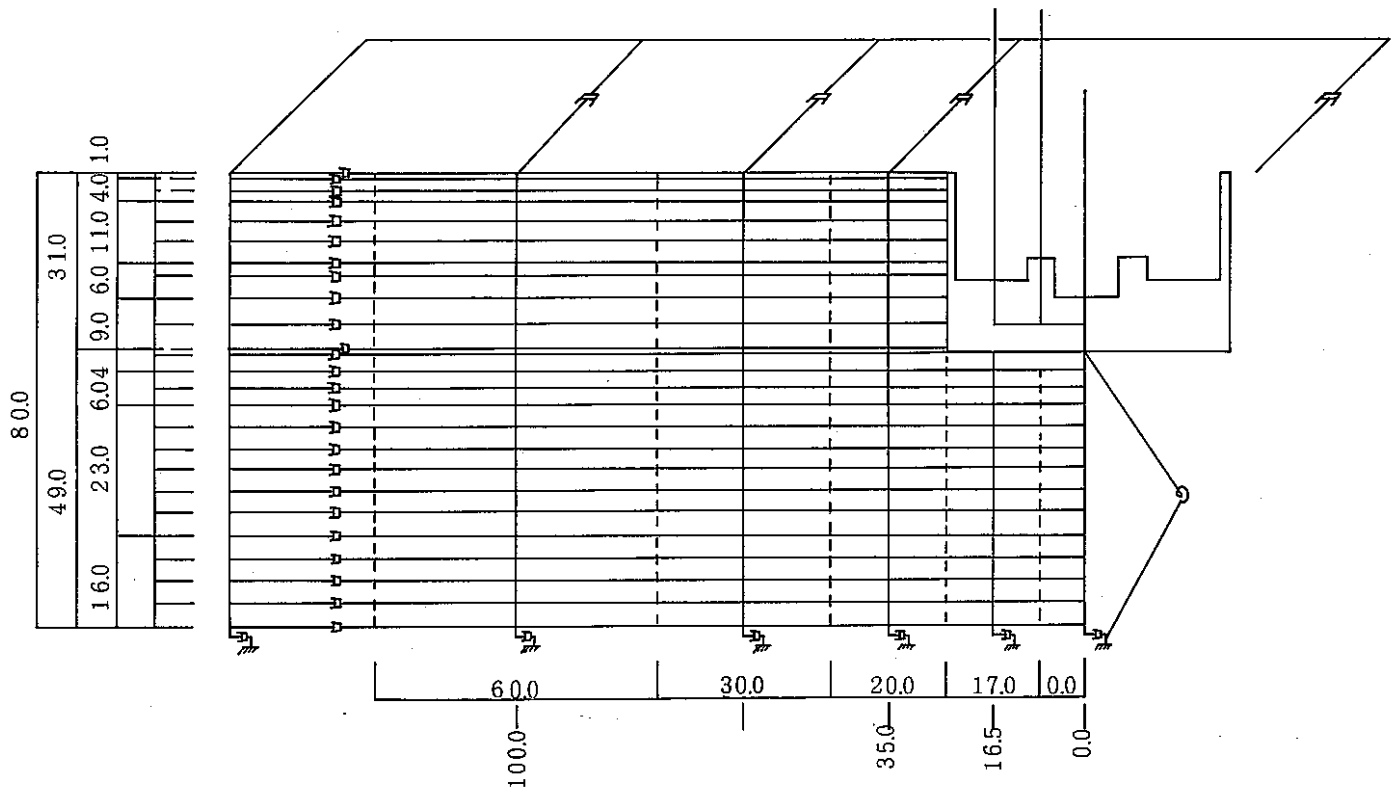
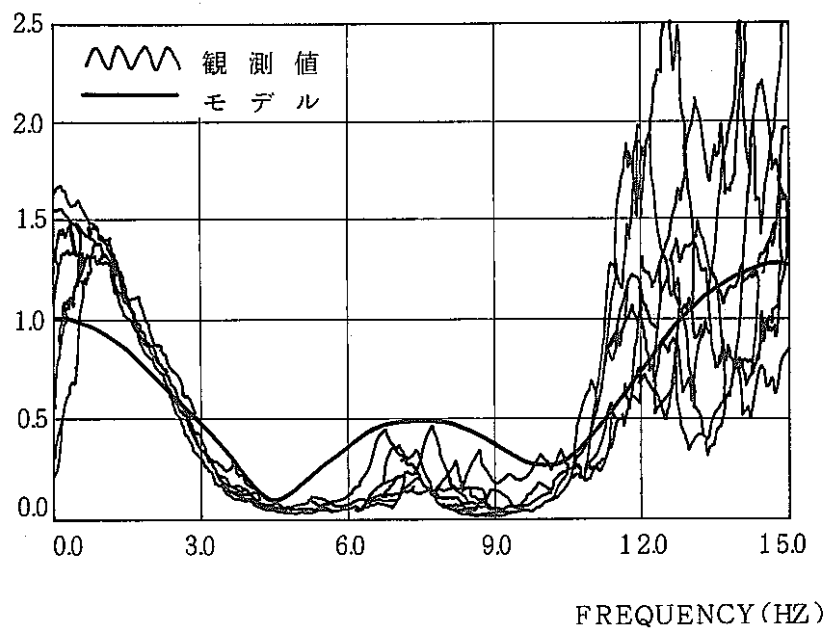
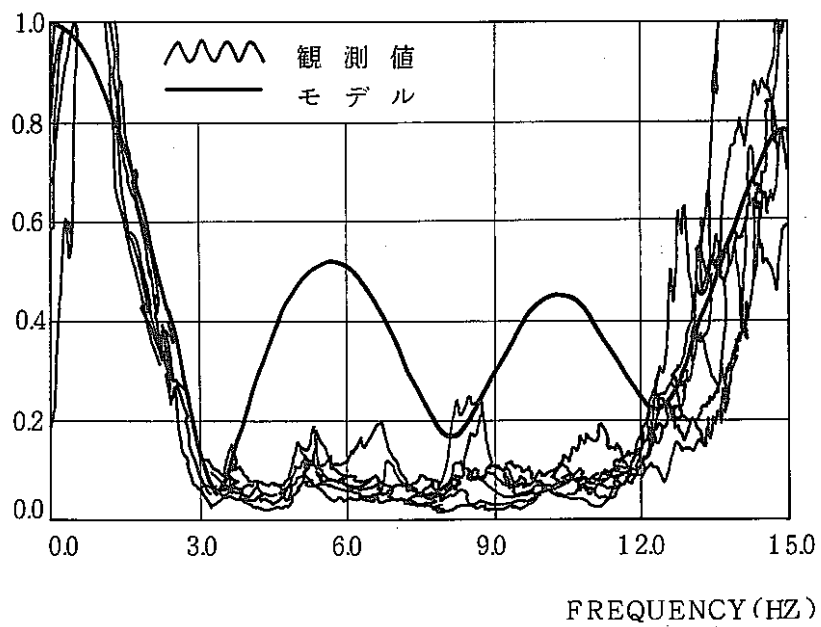


図 4.6 LATT のモデル概念

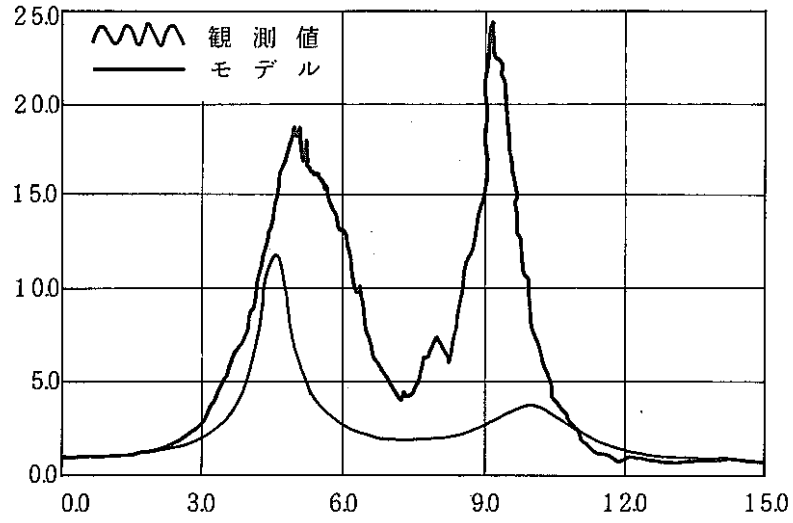


(a) G3/G4

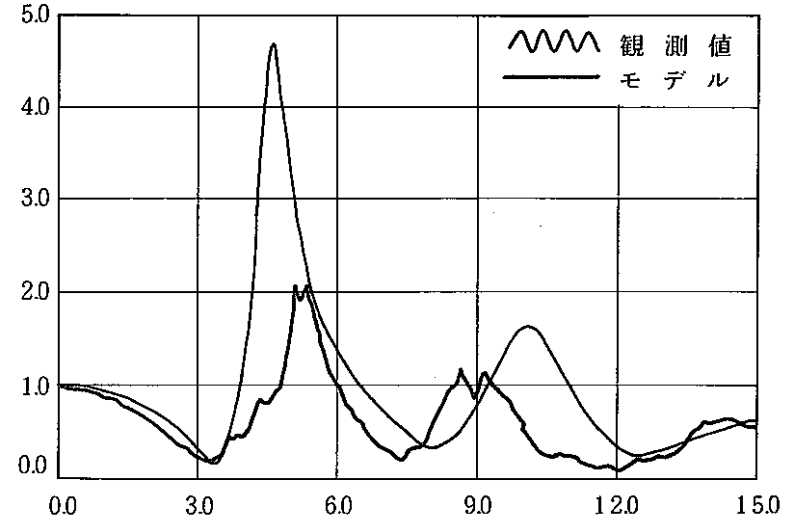


(b) G2/G4

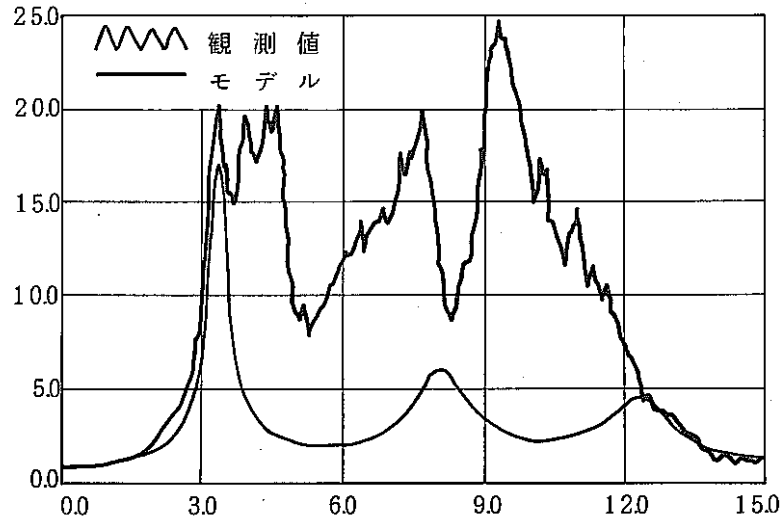
図 5.1 - (1) 地盤の増幅率関数 (モデルと実測値の比較)



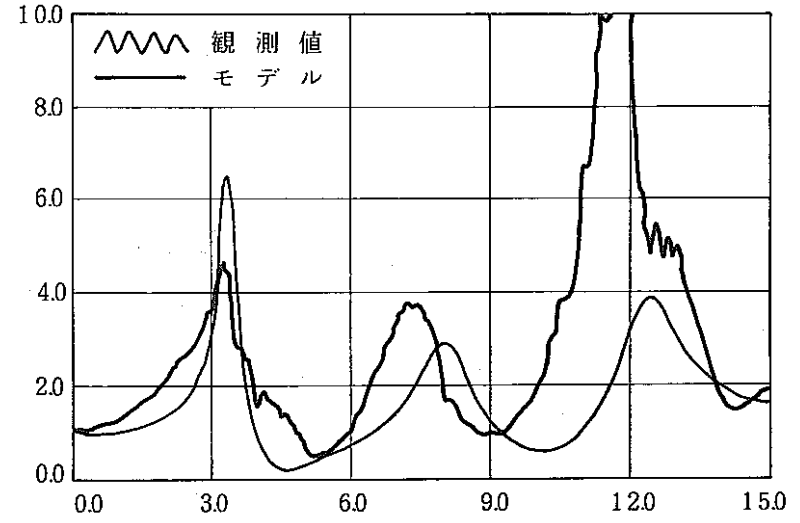
(c) $G4/G3$ FREQUENCY(HZ)



(d) $G2/G3$ FREQUENCY(HZ)



(e) $G4/G2$ FREQUENCY(HZ)



(f) $G3/G2$ FREQUENCY(HZ)

図 5.1 - (2) 地盤の増幅率関数 (モデルと実測値の比較)

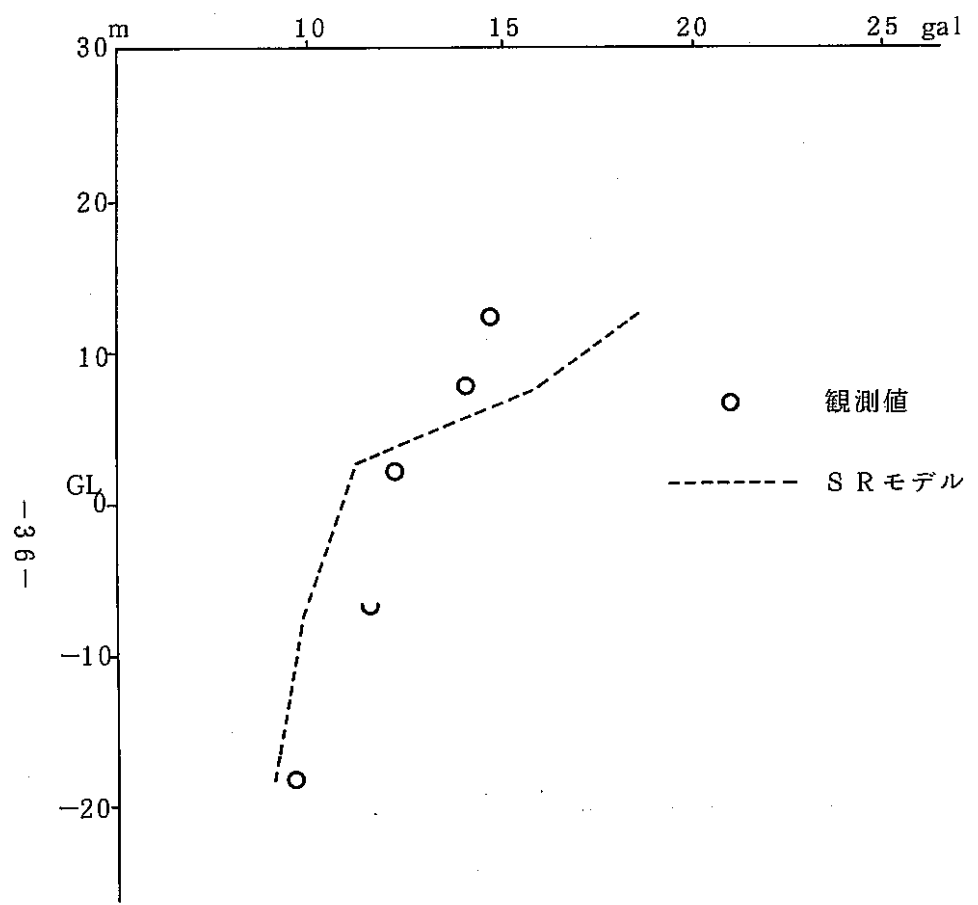


図 5.2 - (1) 最大加速度分布 (基本モデル・EQ. 04)

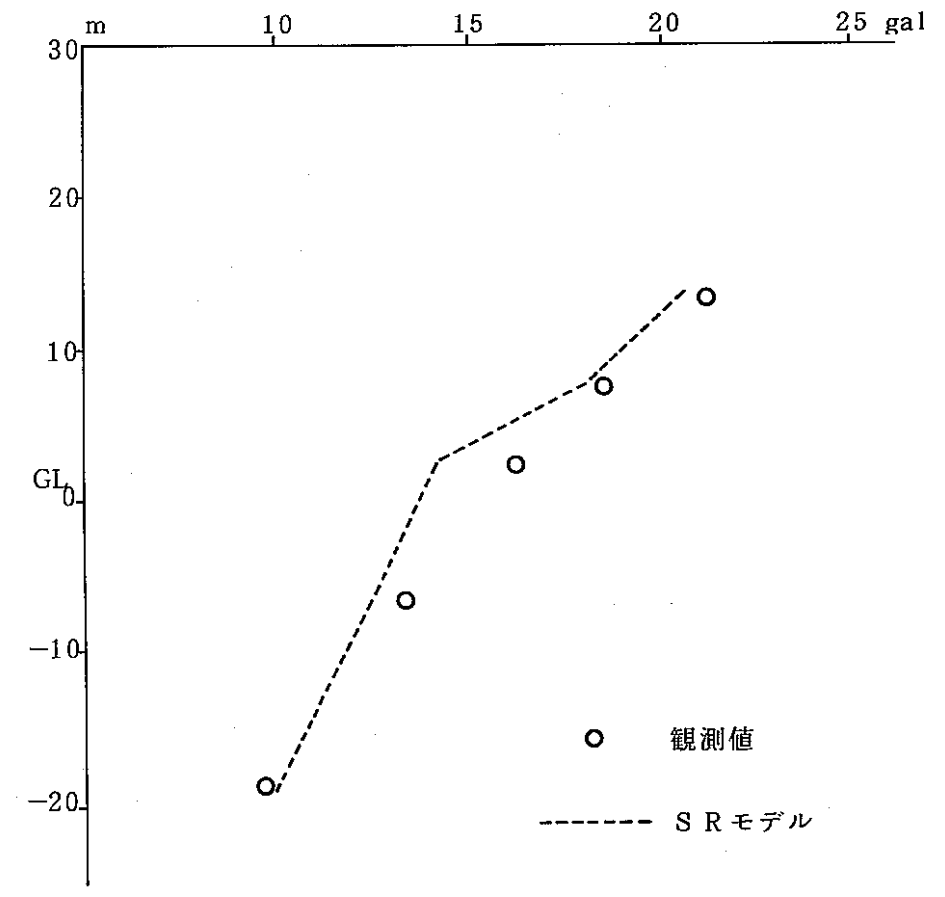


図 5.2 - (2) 最大加速度分布 (基本モデル・EQ. 12)

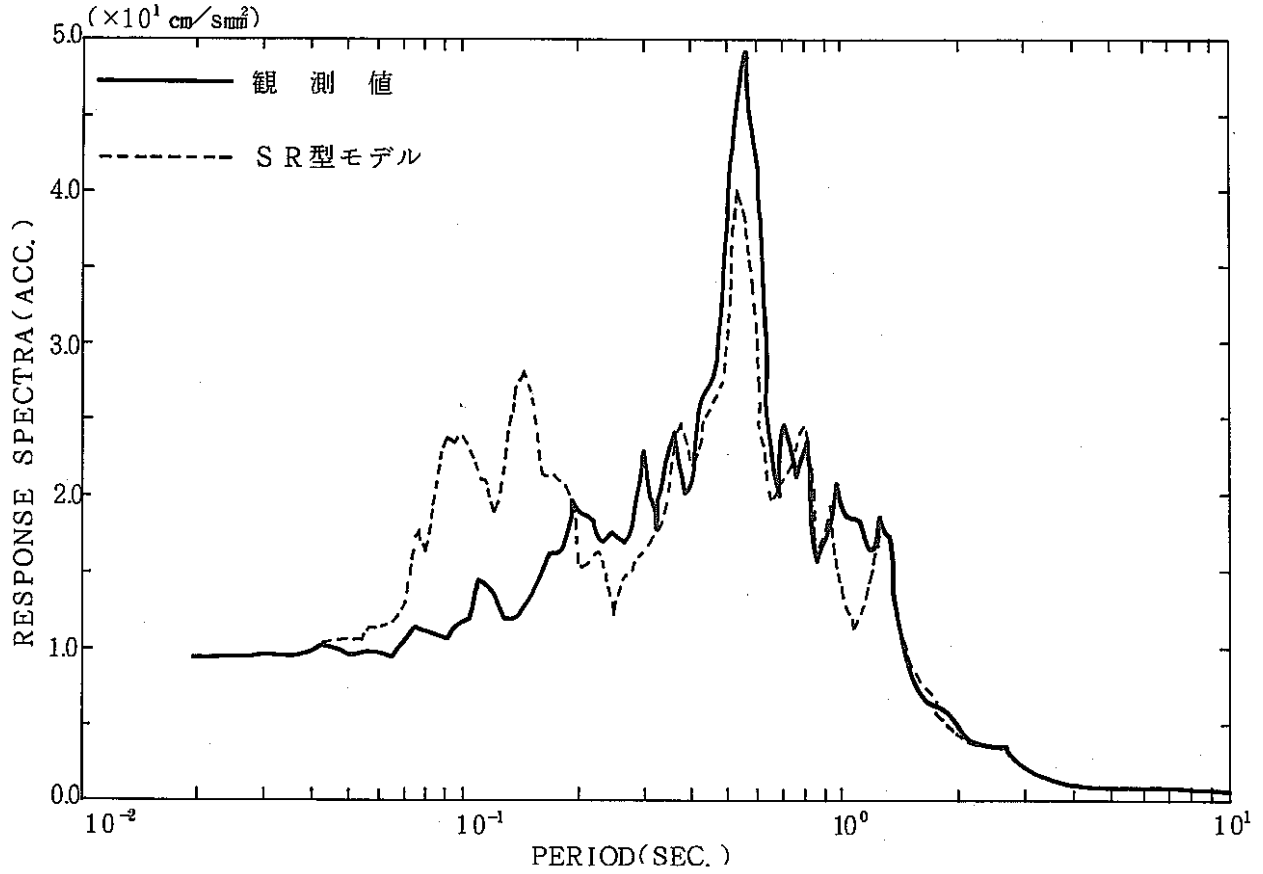


図 5.3 - (1) F 1 応答スペクトル (基本モデル・EQ. 04)

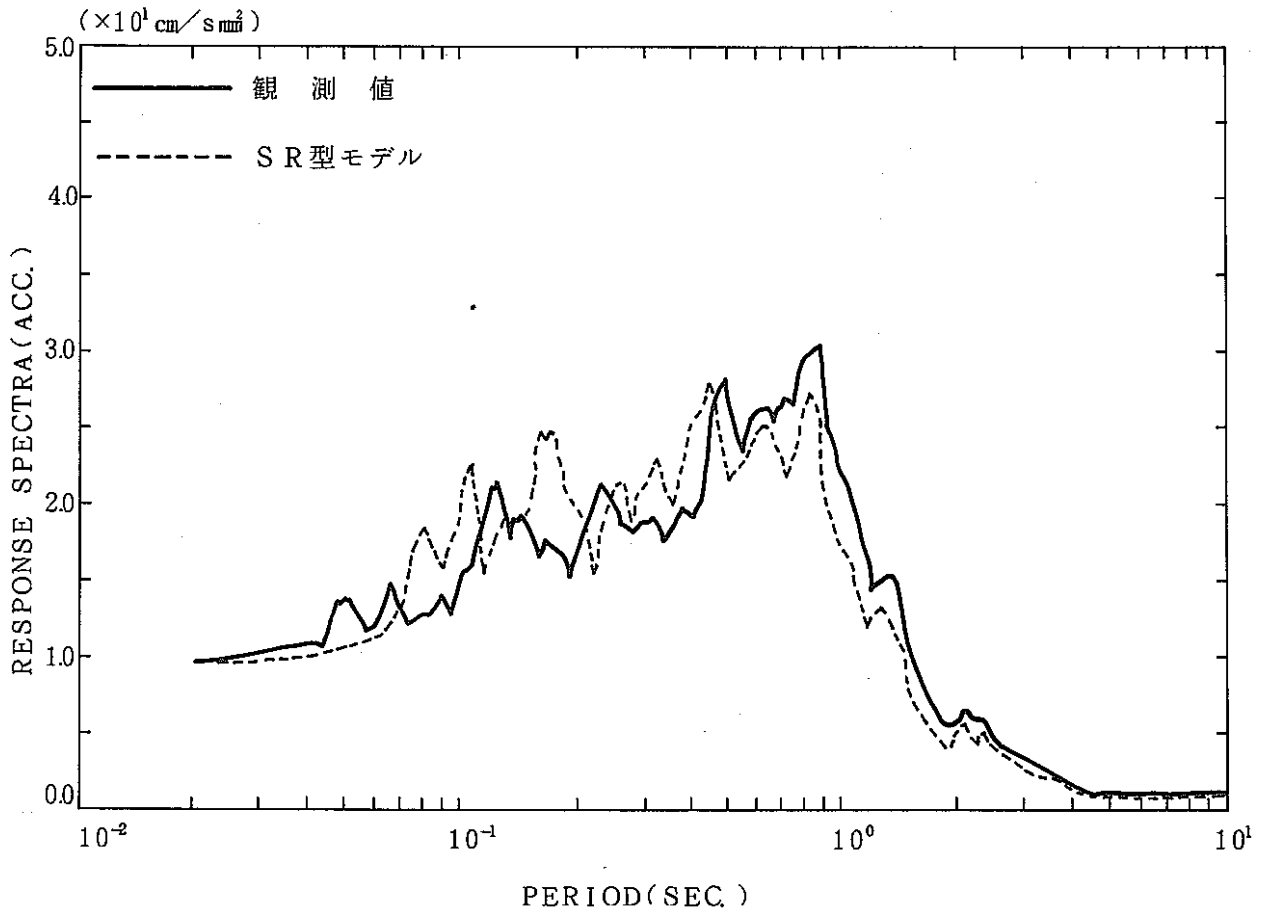


図 5.3 - (2) F 1 応答スペクトル (基本モデル・EQ. 12)

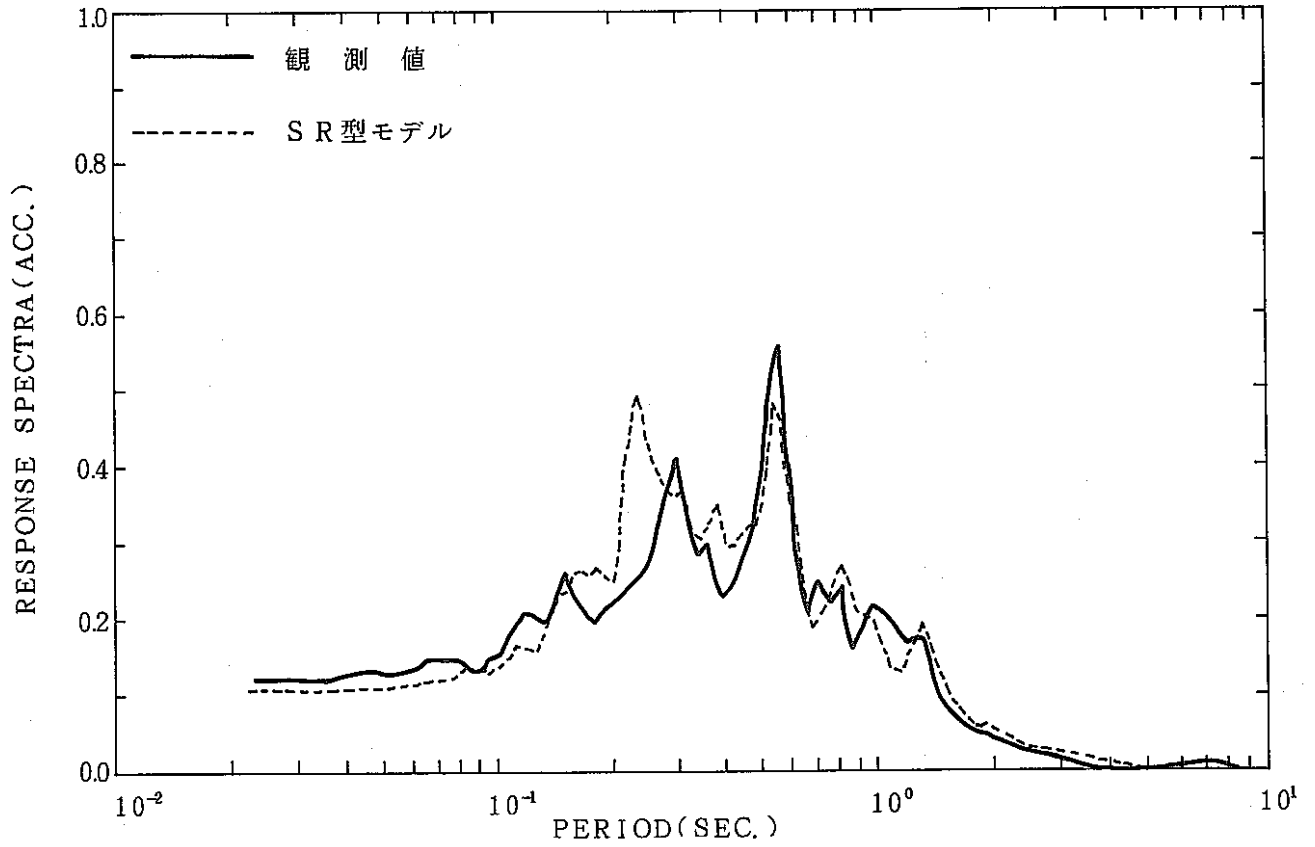


図 5.3 - (3) F 5 応答スペクトル (基本モデル・EQ. 04)

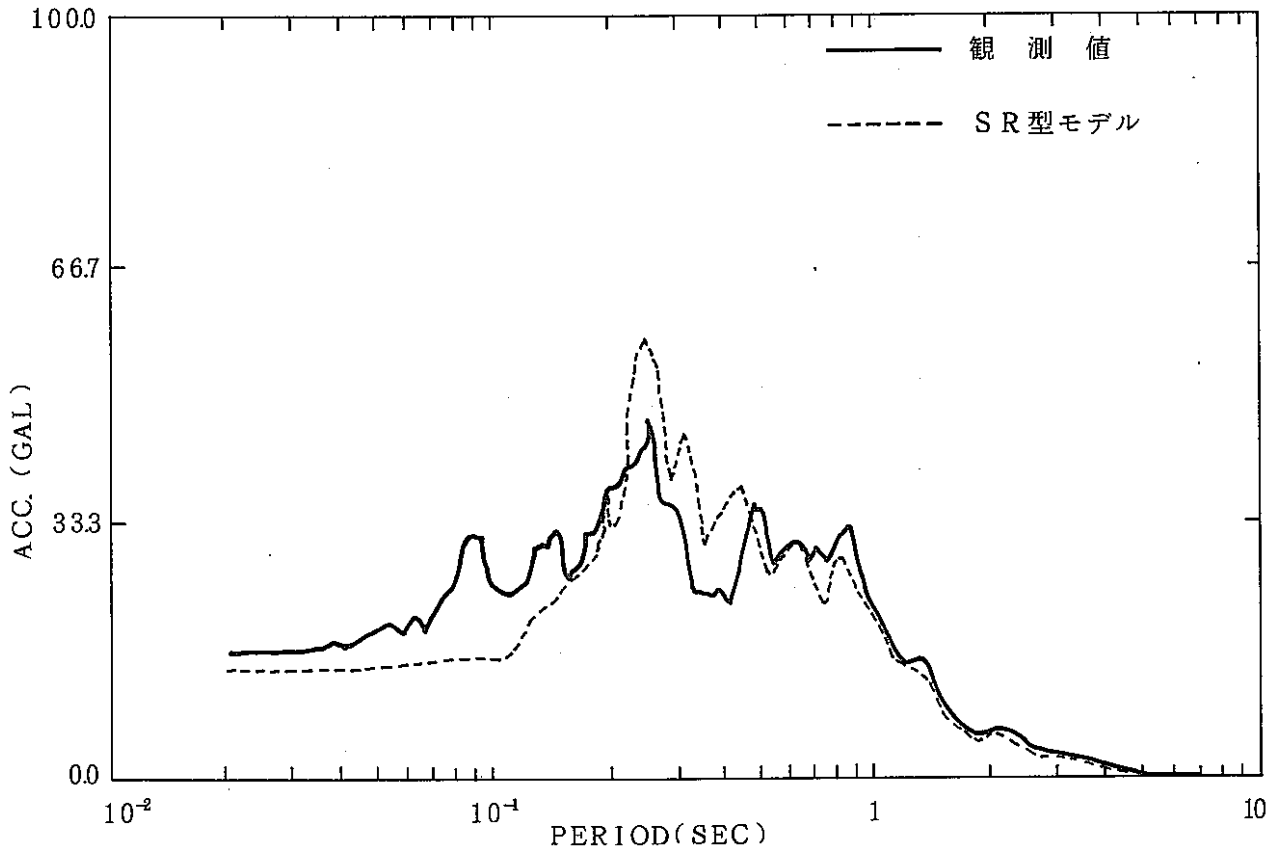


図 5.3 - (4) F 5 応答スペクトル (基本モデル・EQ. 12)

CRIEPI-U90001
($\times 10^2 \text{ cm/smm}^2$)

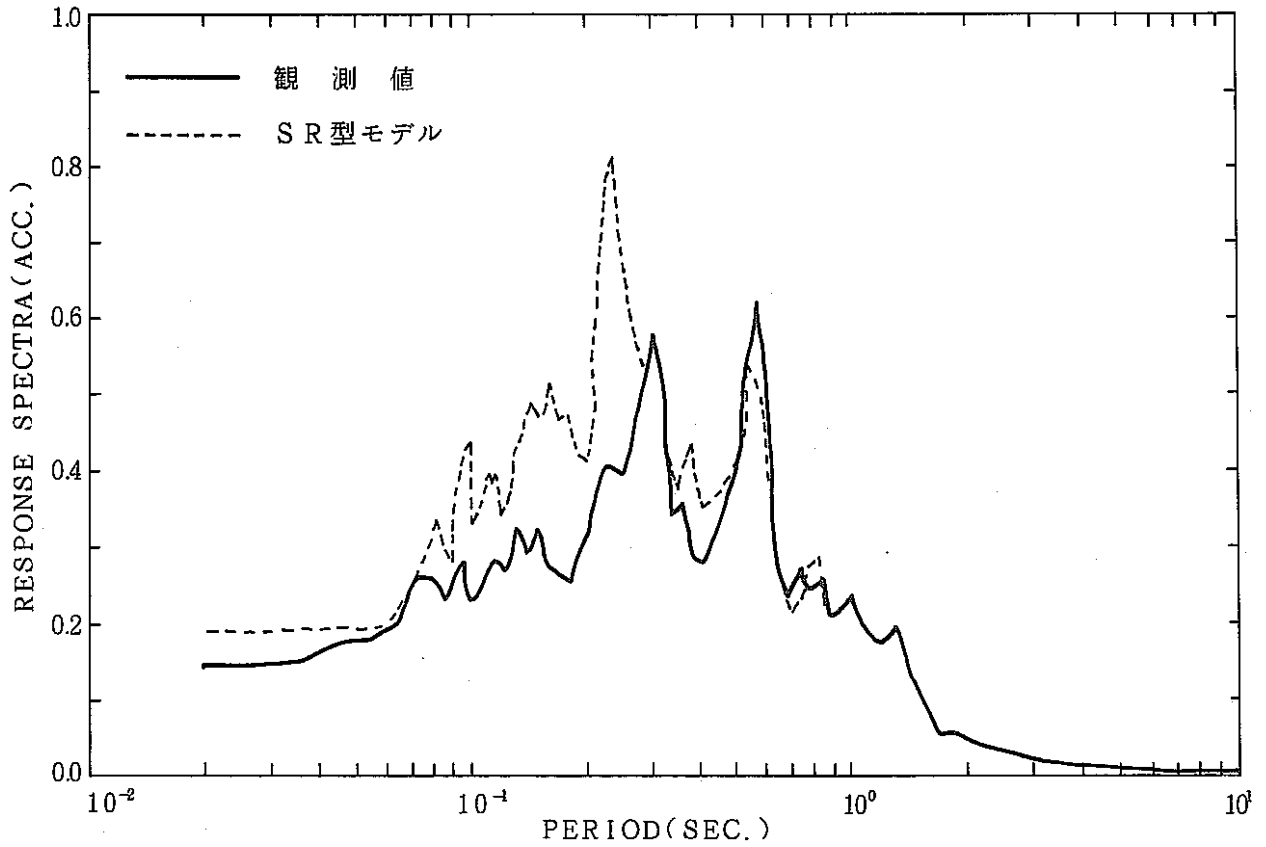


図 5.3 - (5) F 8 応答スペクトル (基本モデル・EQ. 04)

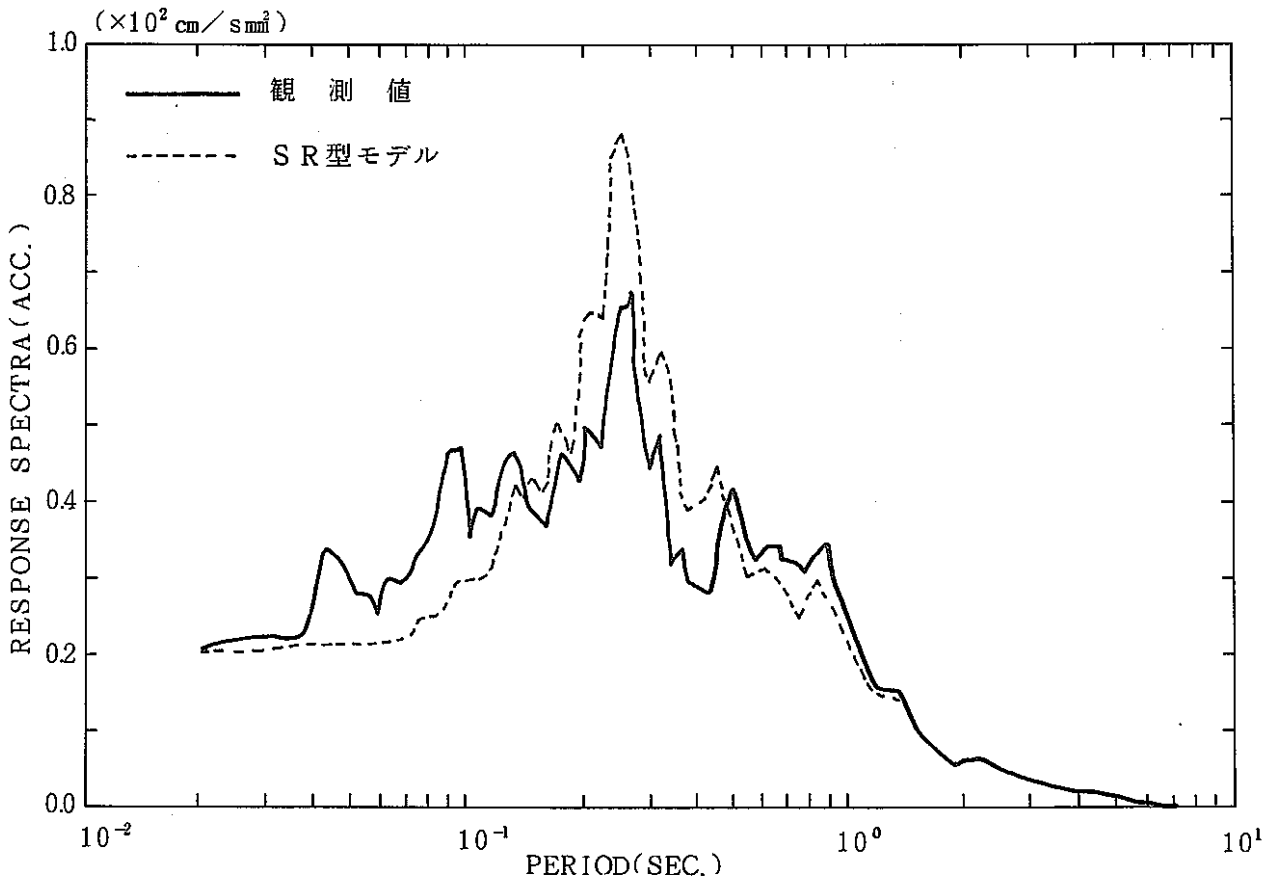


図 5.3 - (6) F 8 応答スペクトル (基本モデル・EQ. 12)

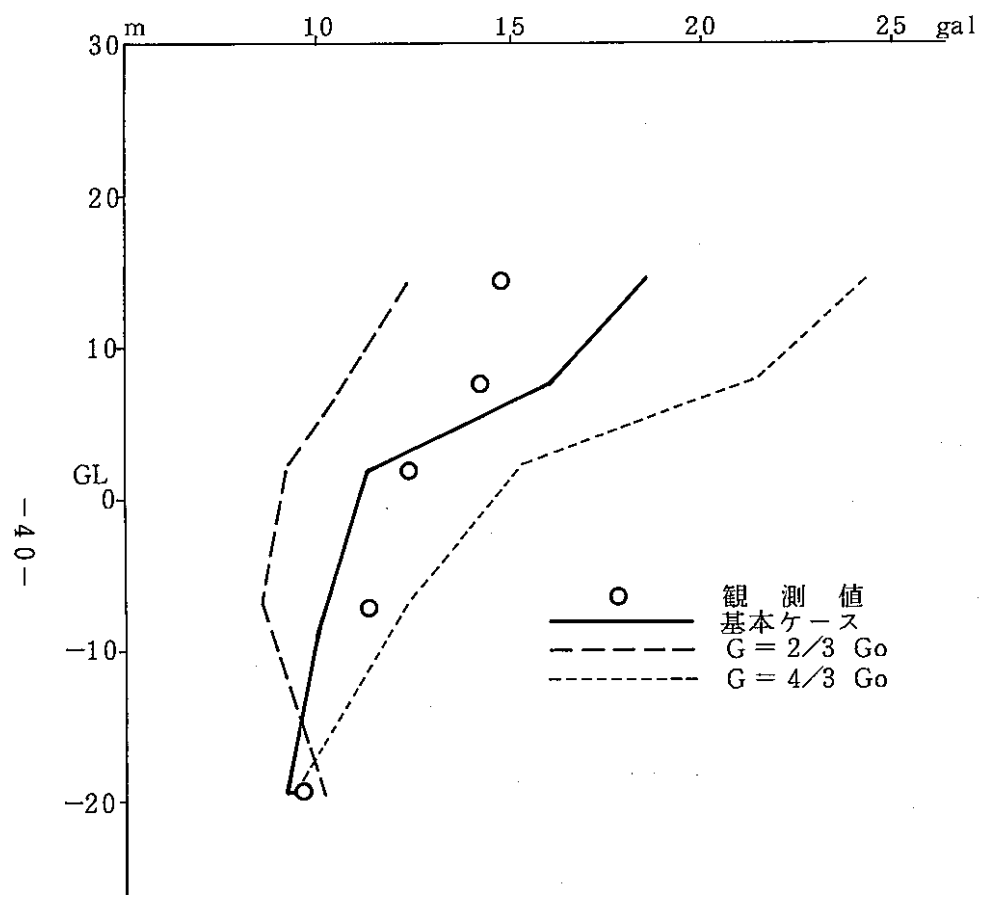


図 5.4 - (1) 最大加速度分布 - 地盤物性による影響評価 -
 (SR法・基本モデル準拠・EQ.04)

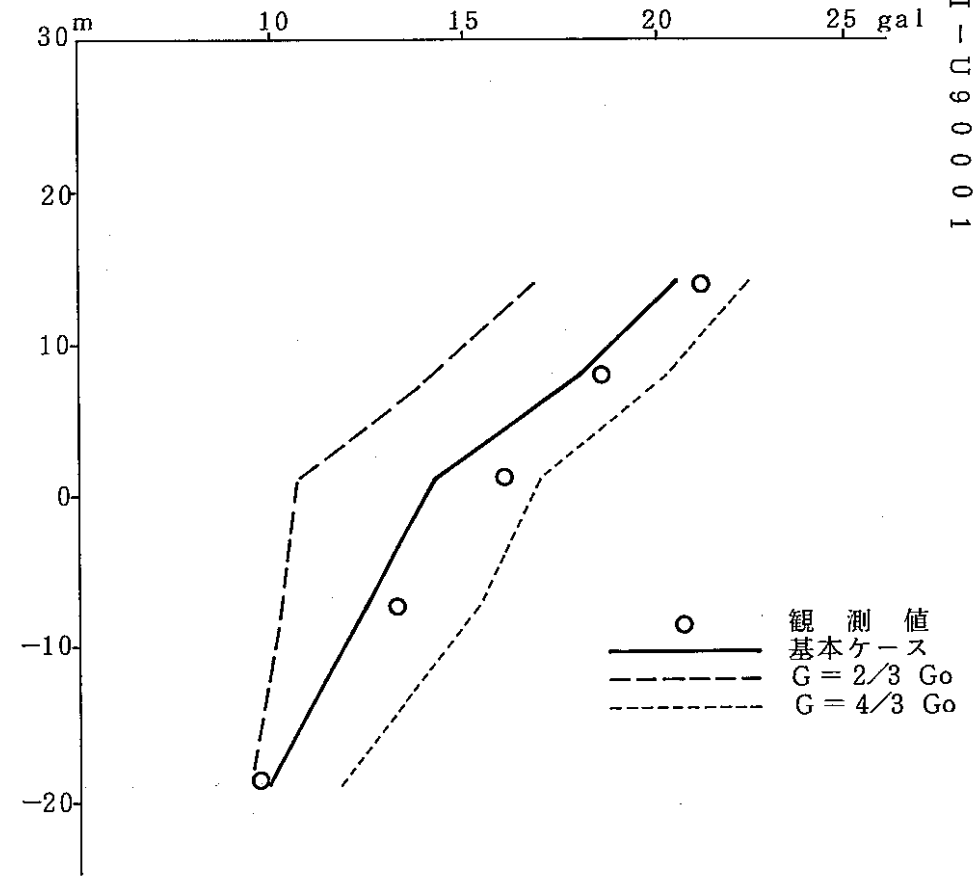


図 5.4 - (2) 最大加速度分布 - 地盤物性による影響評価 -
 (SR法・基本モデル準拠・EQ.12)

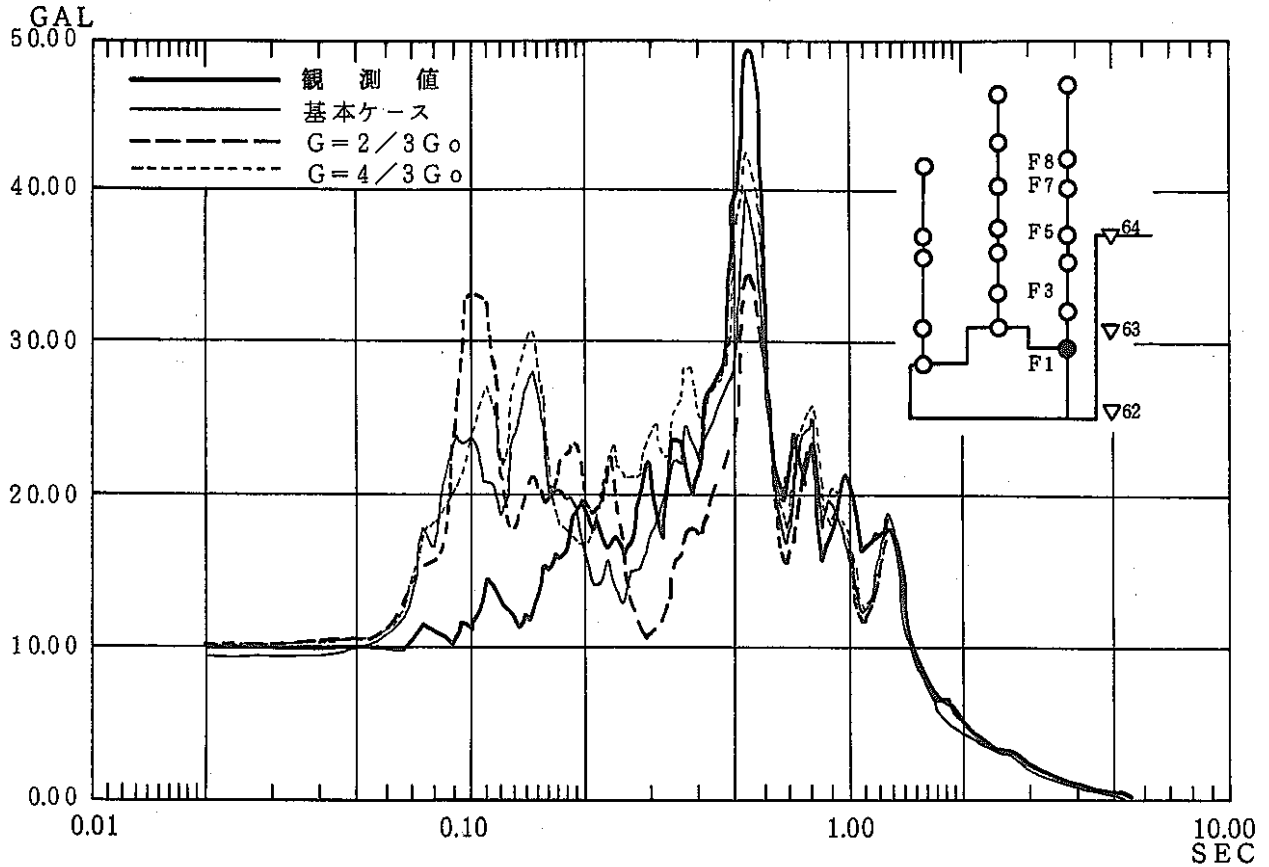


図 5.5 - (1) F 1 応答スペクトル—地盤物性による影響評価—
 (SR法・基本モデル準拠・EQ.04)

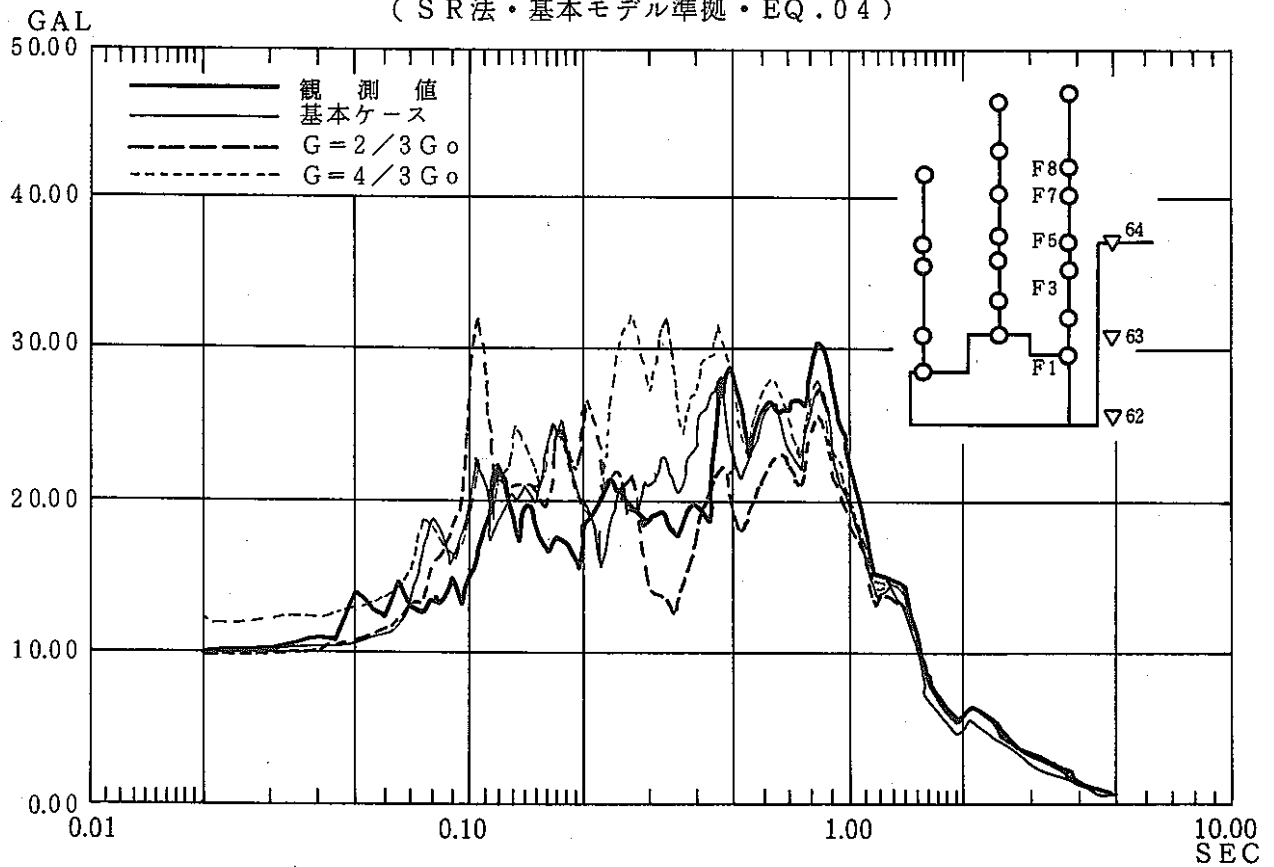


図 5.5 - (2) F 1 応答スペクトル—地盤物性による影響評価—
 (SR法・基本モデル準拠・EQ.12)

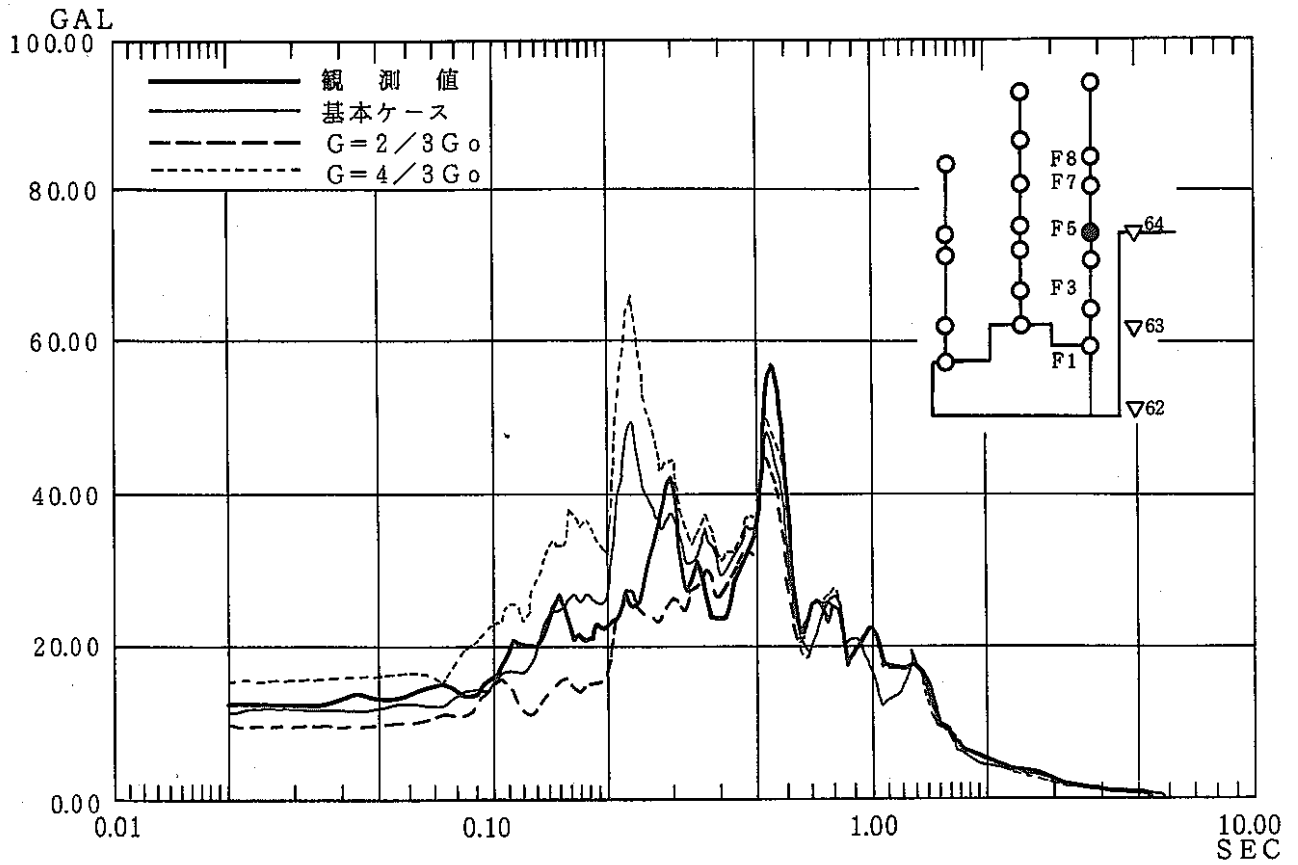


図 5.5 - (3) F 5 応答スペクトル—地盤物性による影響評価—
 (SR法・基本モデル準拠・EQ.04)

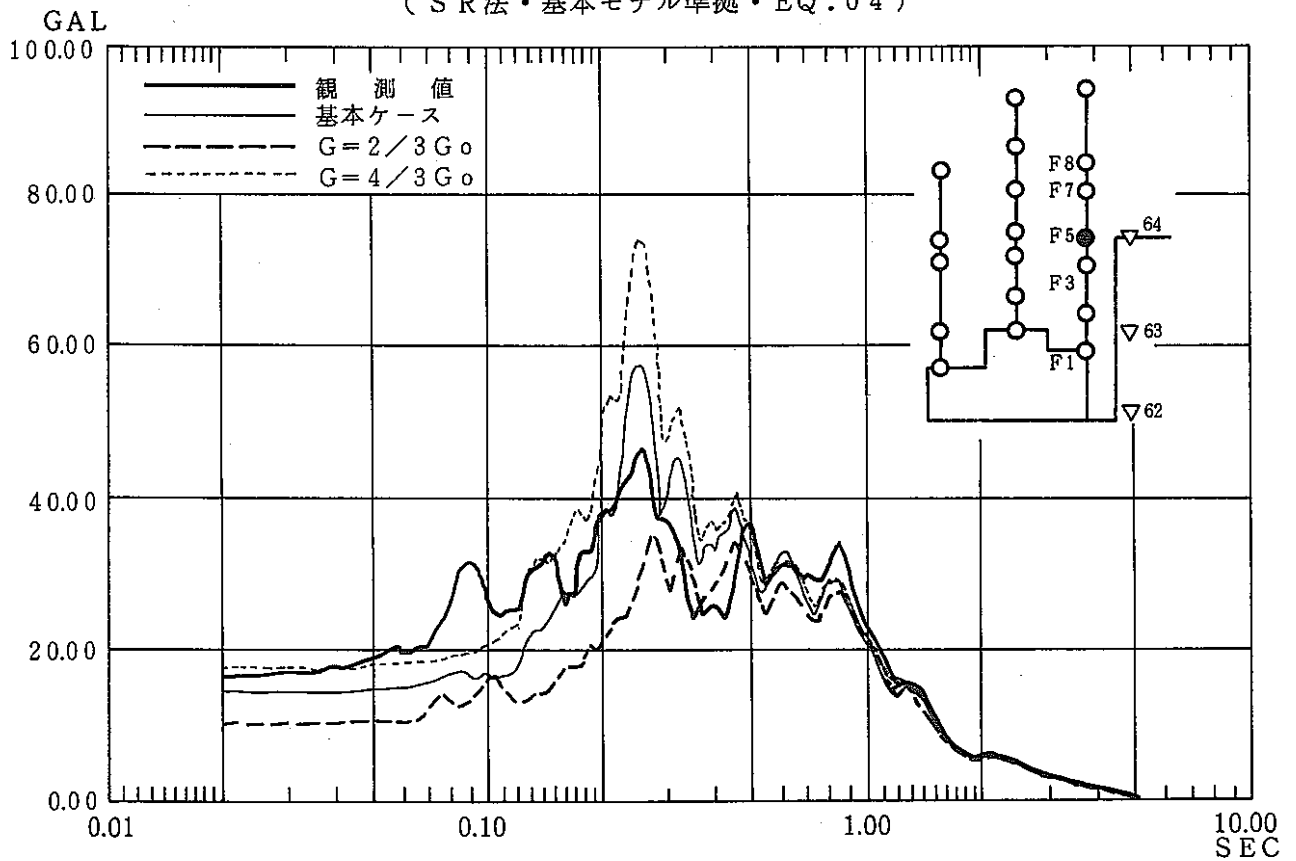


図 5.5 - (4) F 5 応答スペクトル—地盤物性による影響評価—
 (SR法・基本モデル準拠・EQ.12)

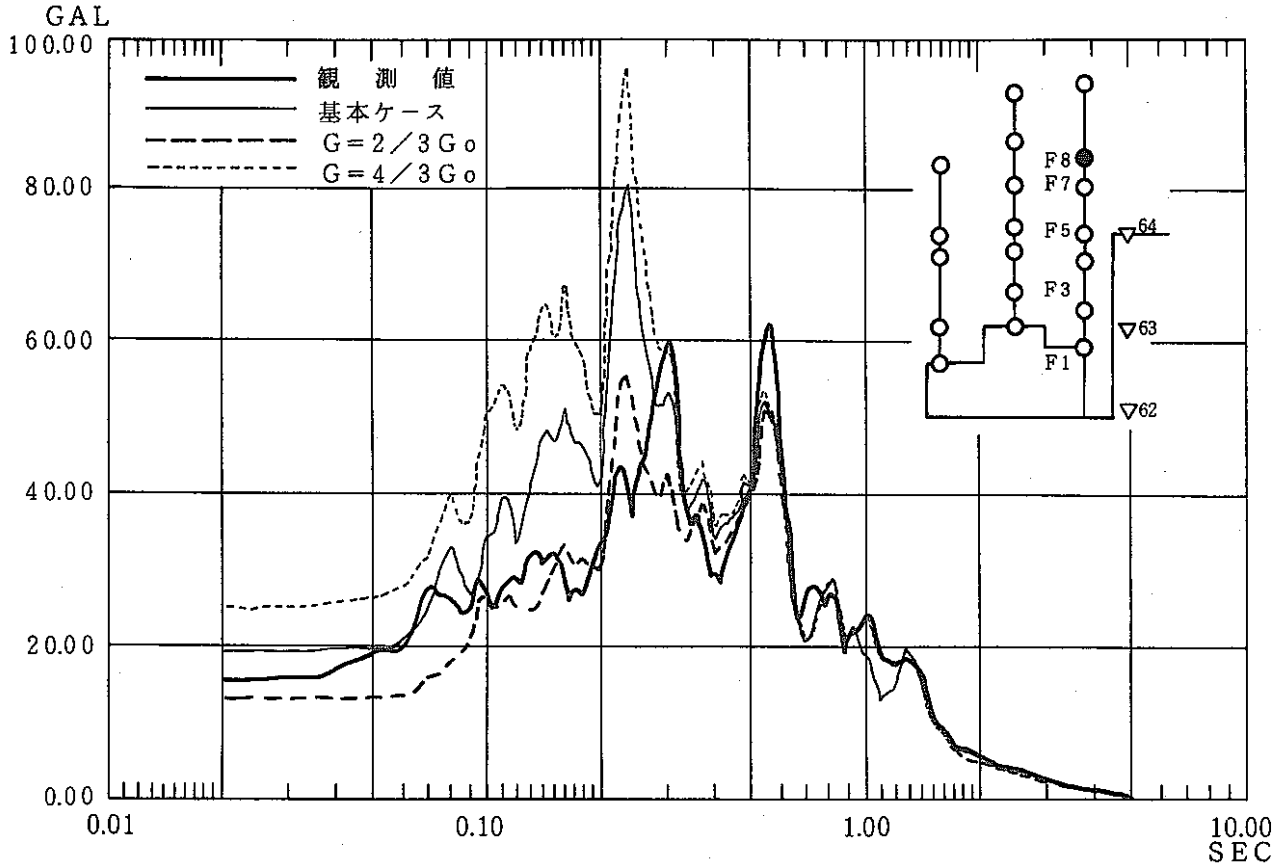


図 5.5 - (5) F 8 応答スペクトル—地盤物性による影響評価—
 (SR法・基本モデル準拠・EQ.04)

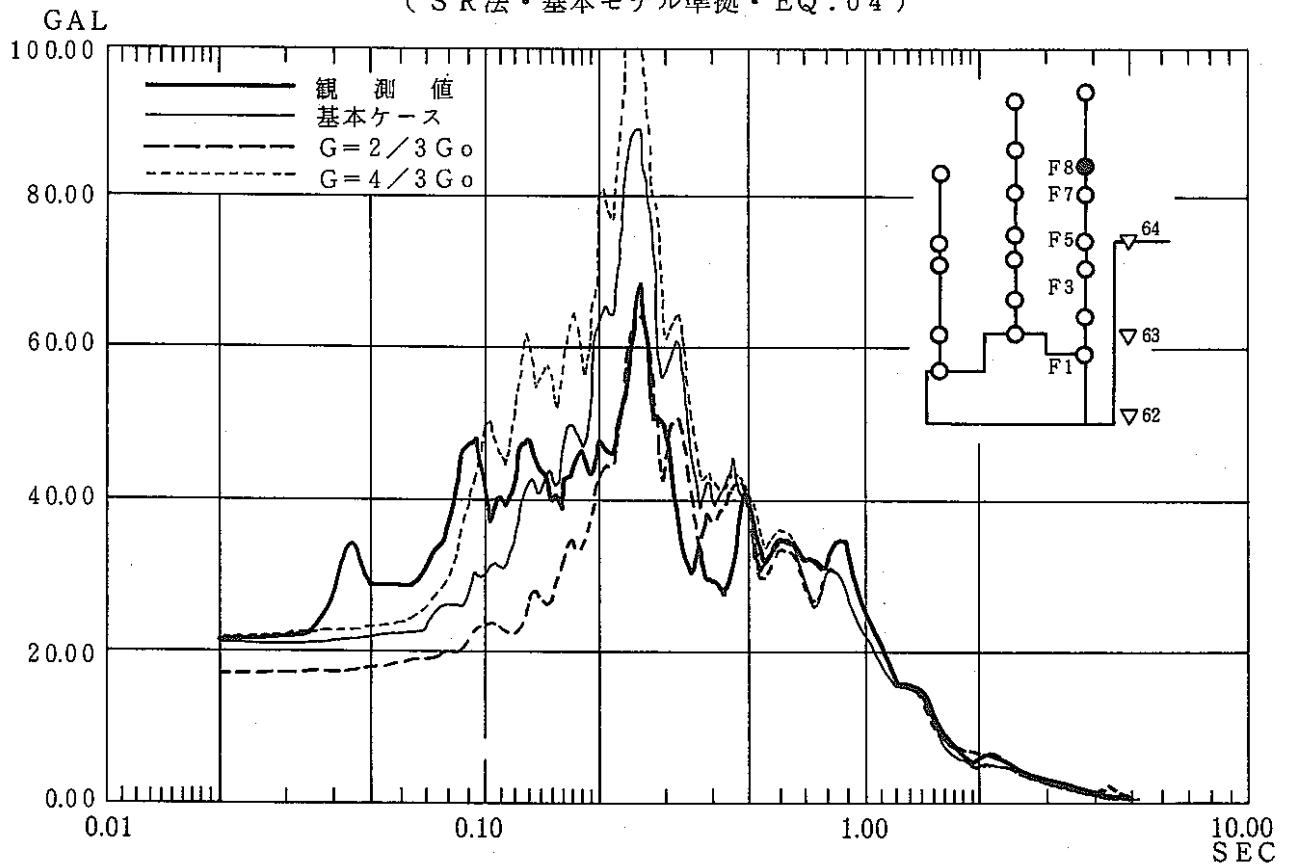


図 5.5 - (6) F 8 応答スペクトル—地盤物性による影響評価—
 (SR法・基本モデル準拠・EQ.12)

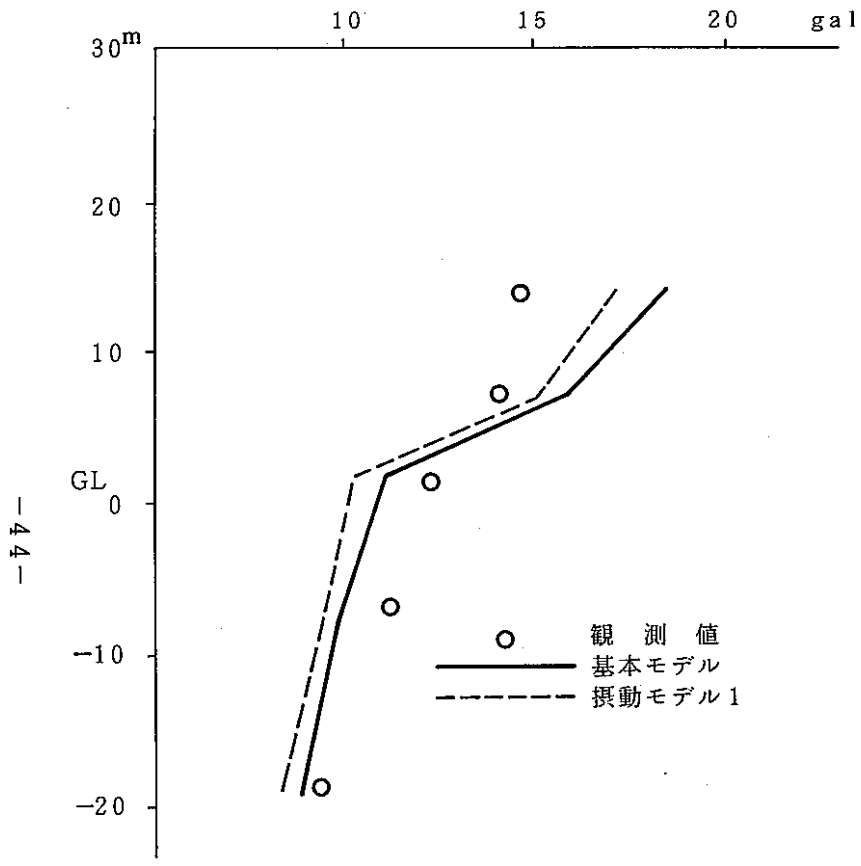


図 5.6 - (1) 最大加速度分布 - モデルパラメータによる影響評価 -
(SR法・摂動モデル1, 2・EQ.04)

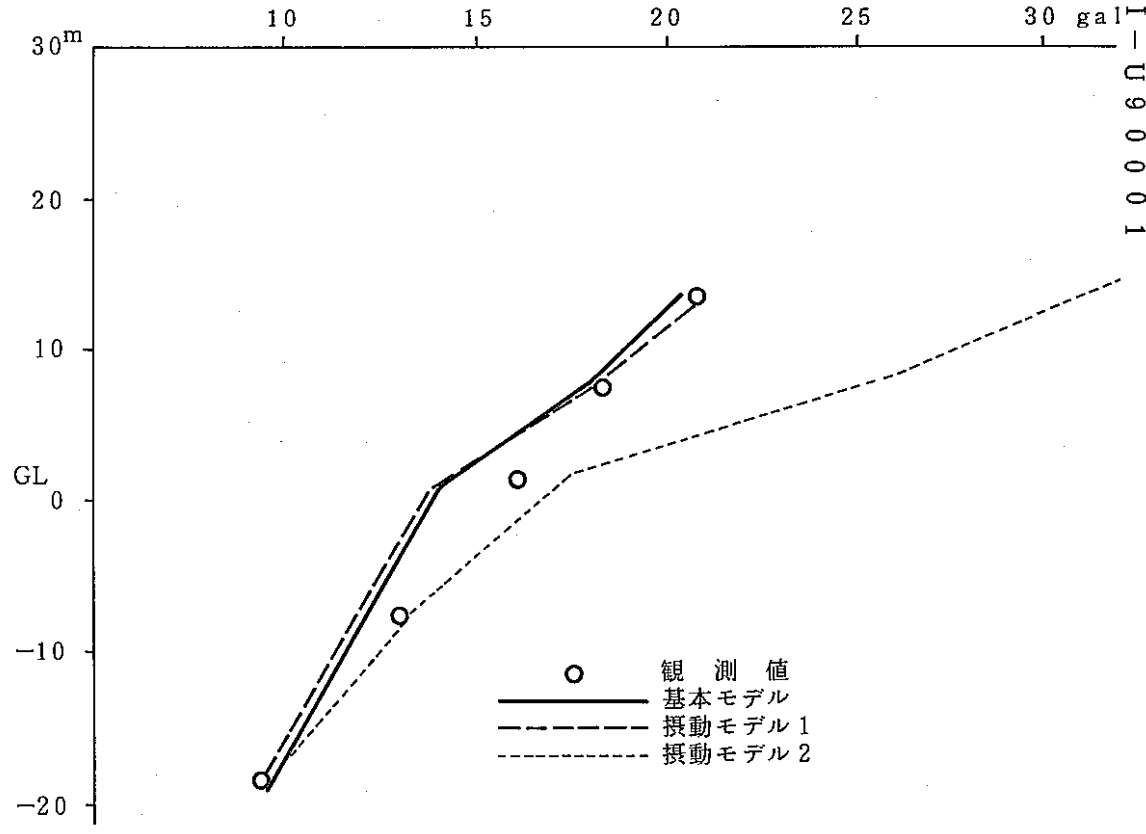


図 5.6 - (2) 最大加速度分布 - モデルパラメータによる影響評価 -
(SR法・摂動モデル1, 2・EQ.12)

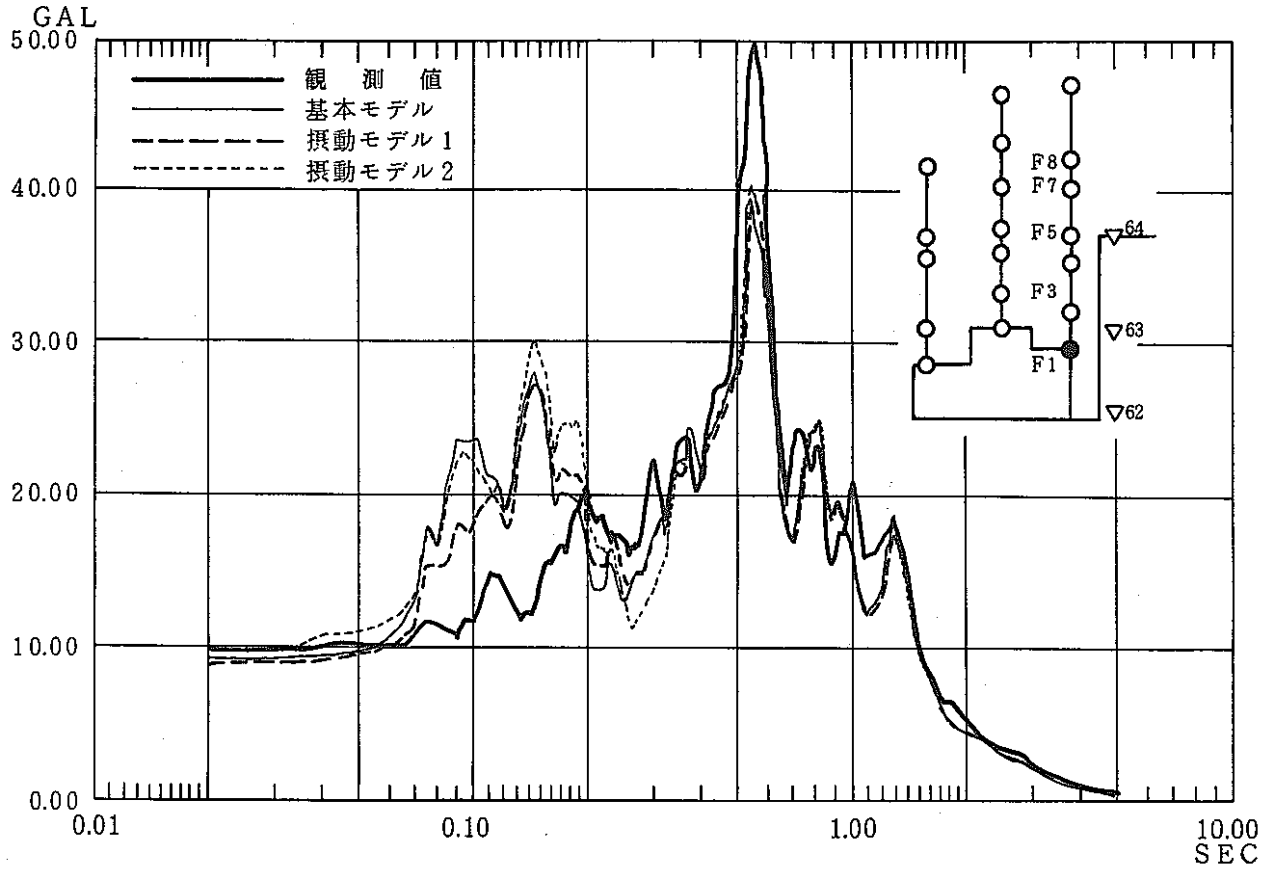


図 5.7 - (1) F 1 応答スペクトル—モデルパラメータによる影響評価—
(SR法・摂動モデル1, 2・EQ.04)

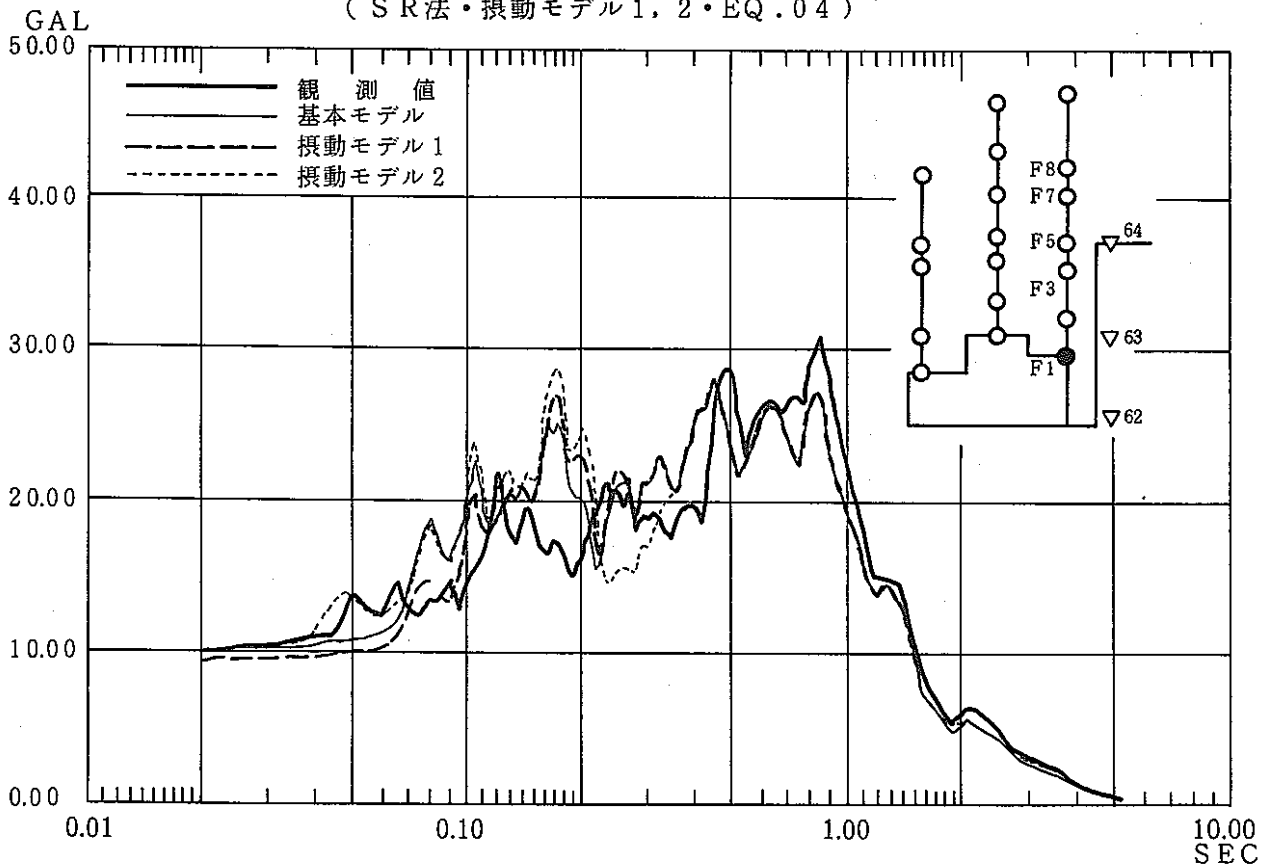


図 5.7 - (2) F 1 応答スペクトル—モデルパラメータによる影響評価—
(SR法・摂動モデル1, 2・EQ.12)

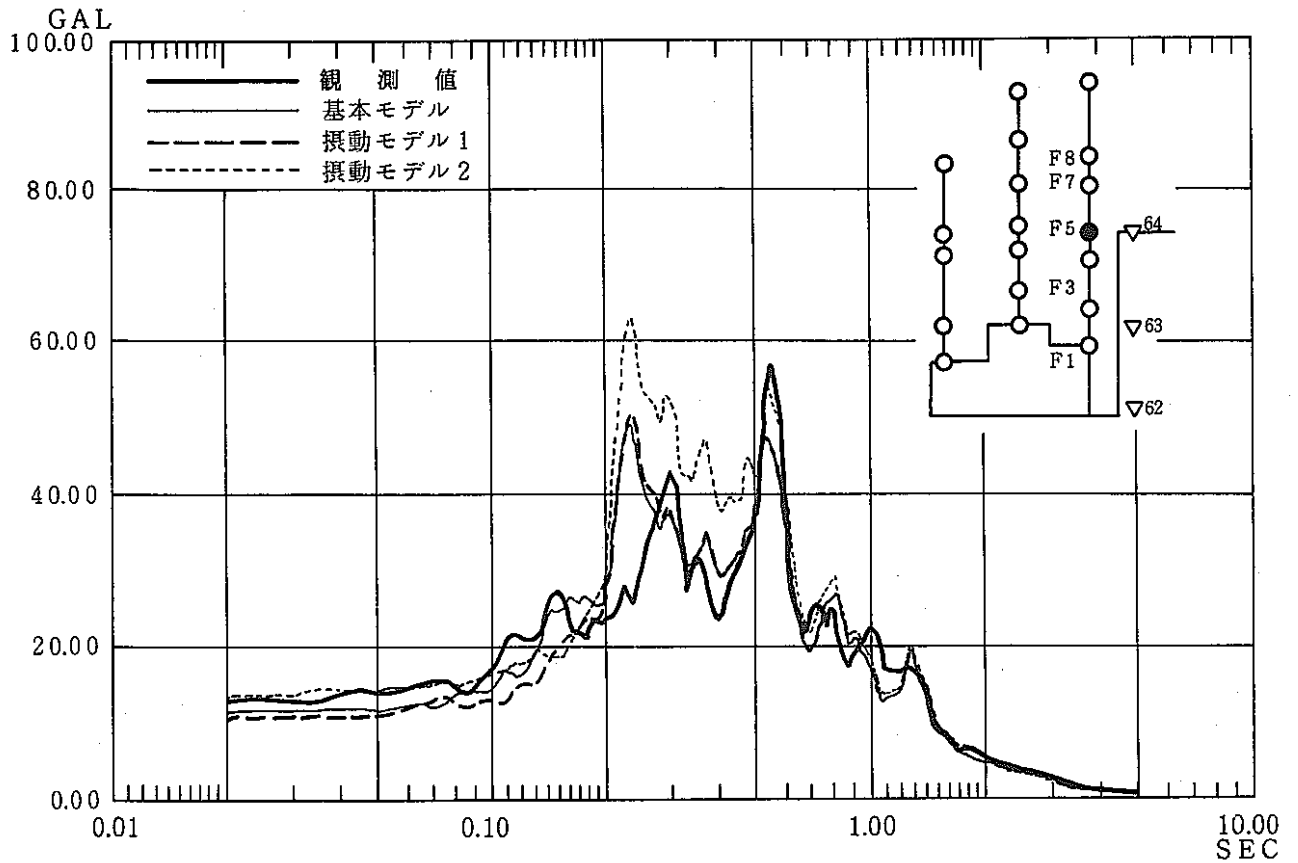


図 5.7 - (3) F 5 応答スペクトル—モデルパラメータによる影響評価—
 (SR法・摂動モデル1, 2・EQ.04)

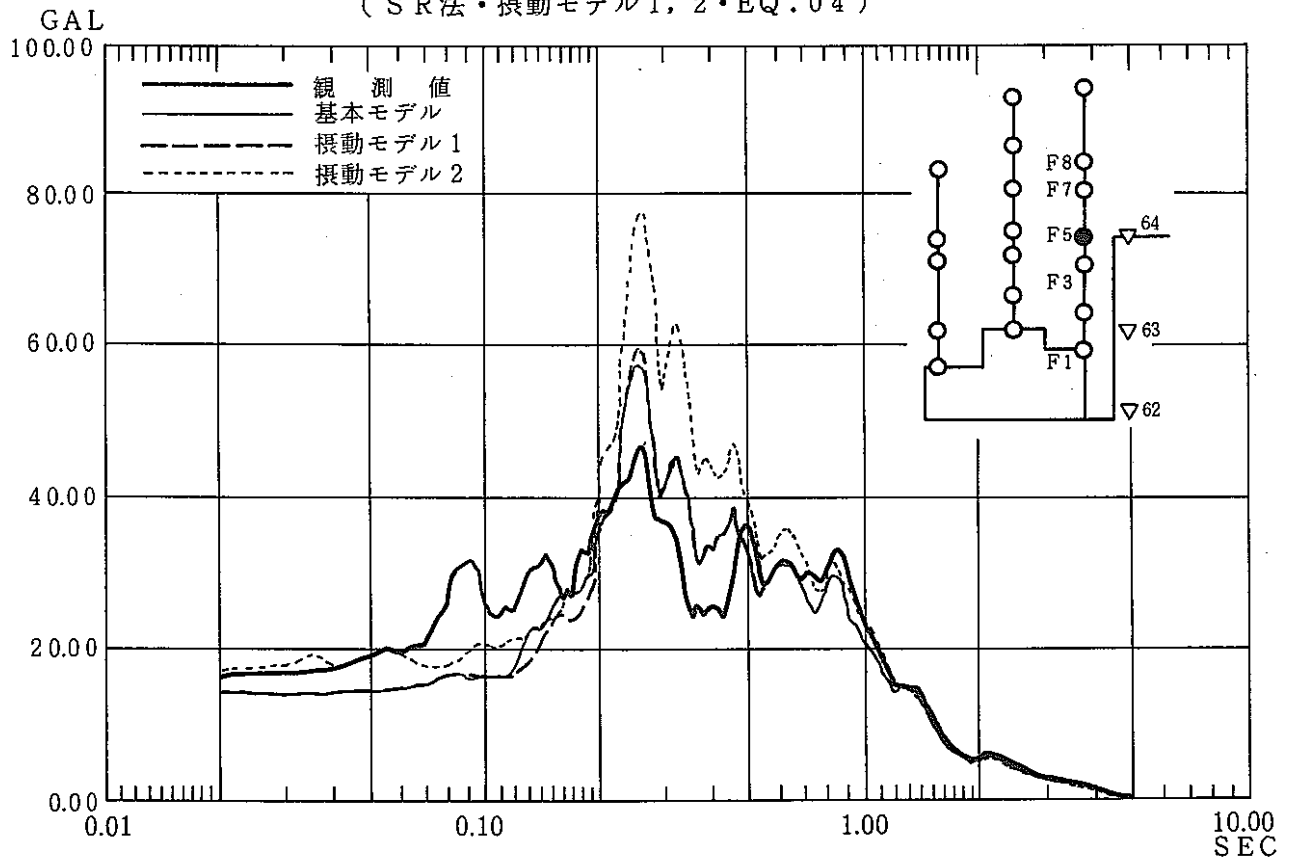


図 5.7 - (4) F 5 応答スペクトル—モデルパラメータによる影響評価—
 (SR法・摂動モデル1, 2・EQ.12)

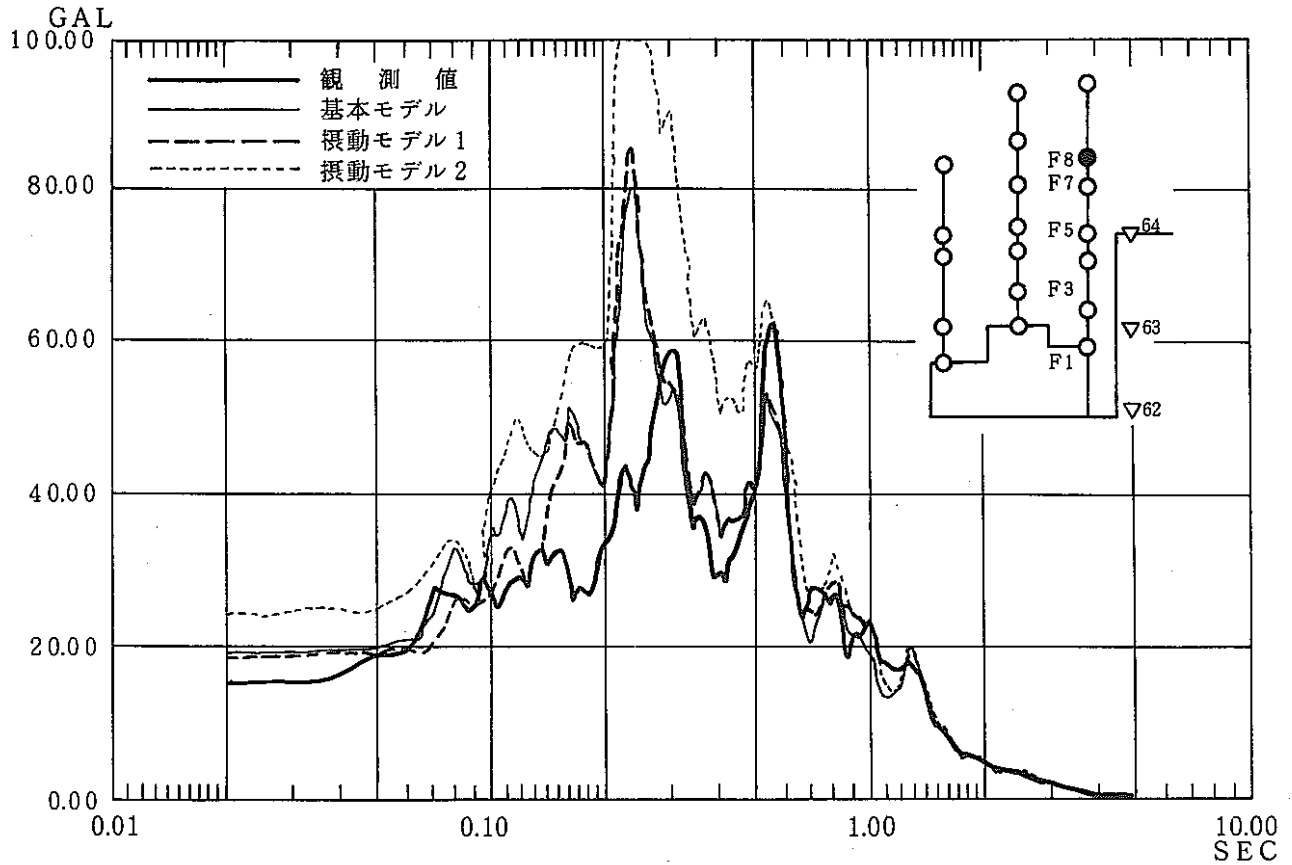


図 5.7-(5) F8 応答スペクトル—モデルパラメータによる影響評価—
 (SR法・摂動モデル1, 2・EQ.04)

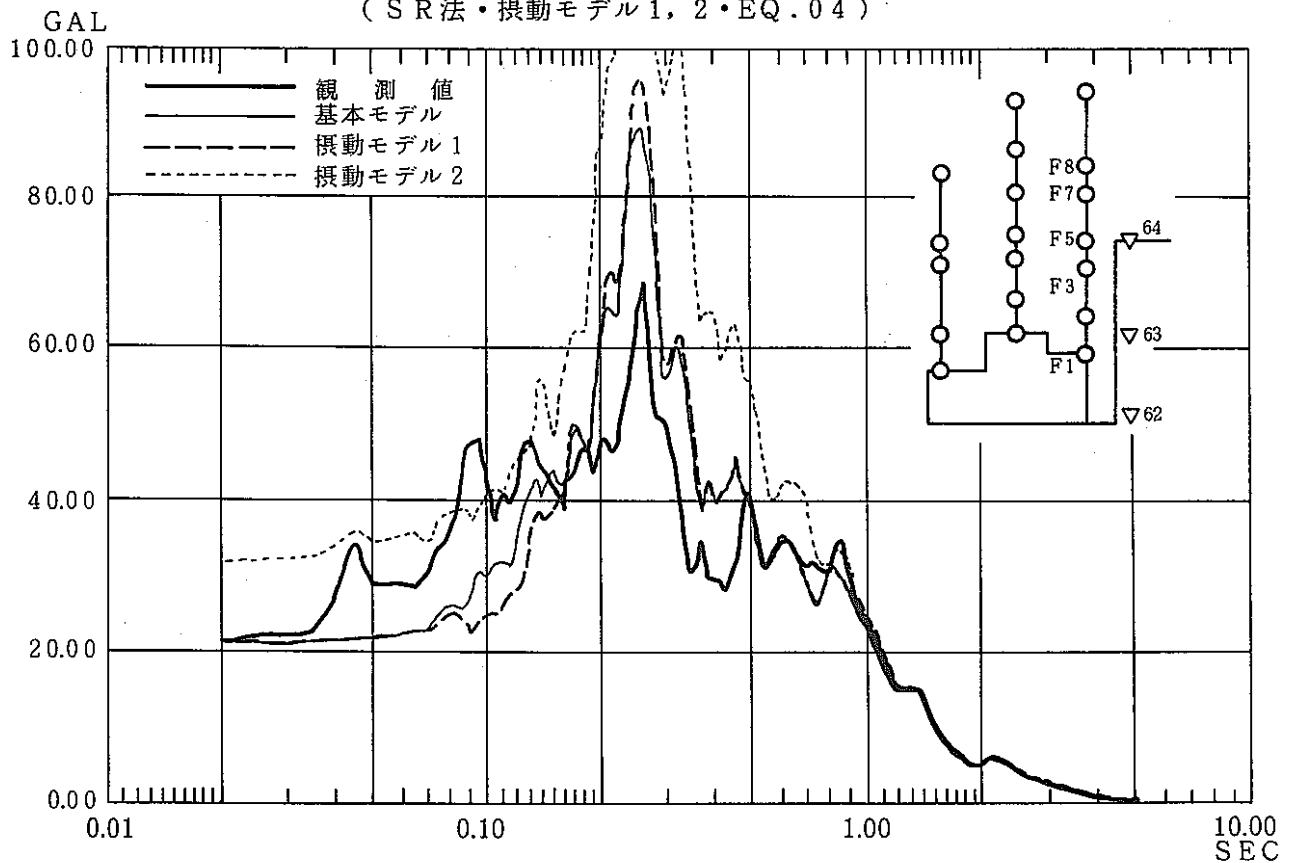
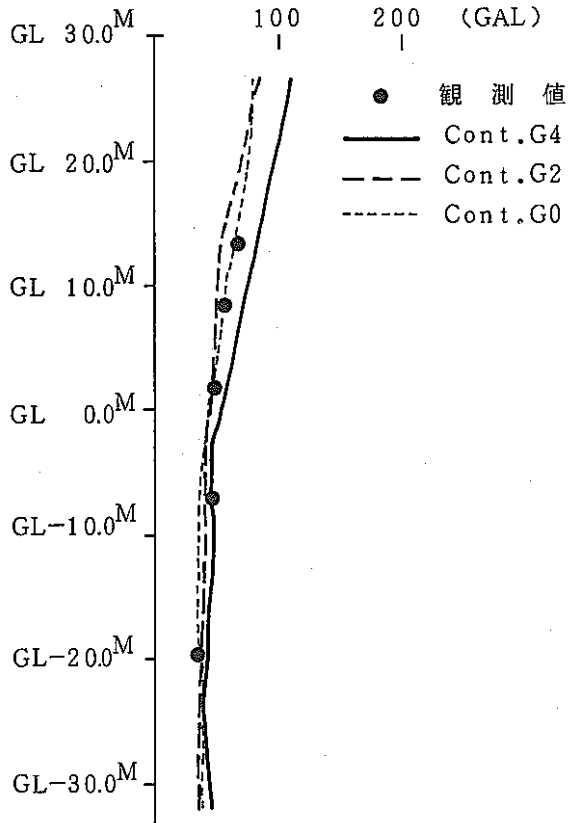
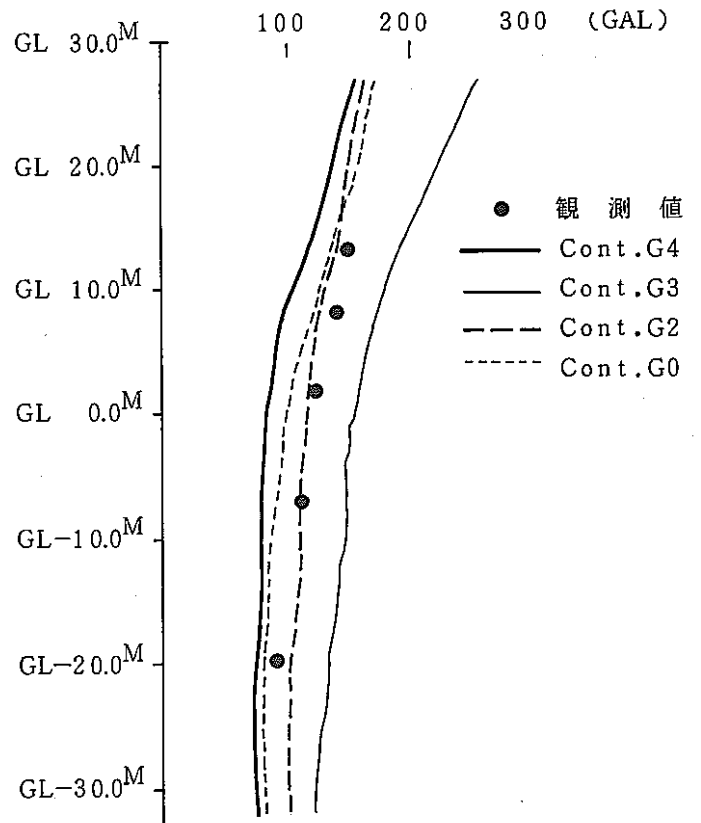


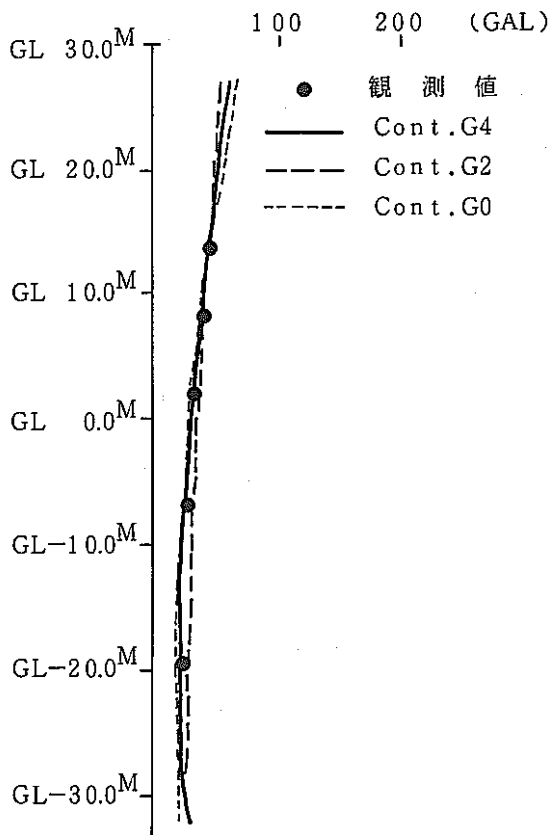
図 5.7-(6) F8 応答スペクトル—モデルパラメータによる影響評価—
 (SR法・摂動モデル1, 2・EQ.12)



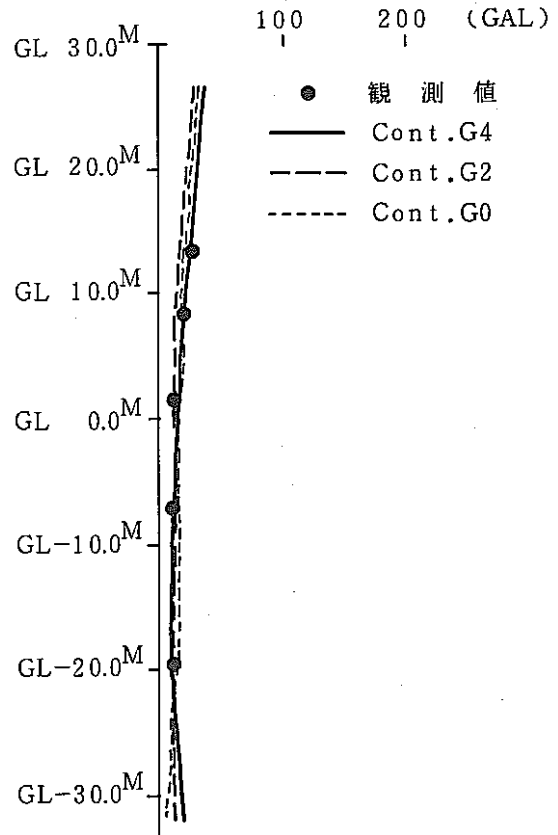
(a) 2-4, 2, 0-R



(b) 4-4, 3, 2, 0-R



(c) 5-4, 2, 0-R



(d) 8-4, 2, 0-R

図 5.8 - (1) RESP 最大加速度分布と観測値の比較

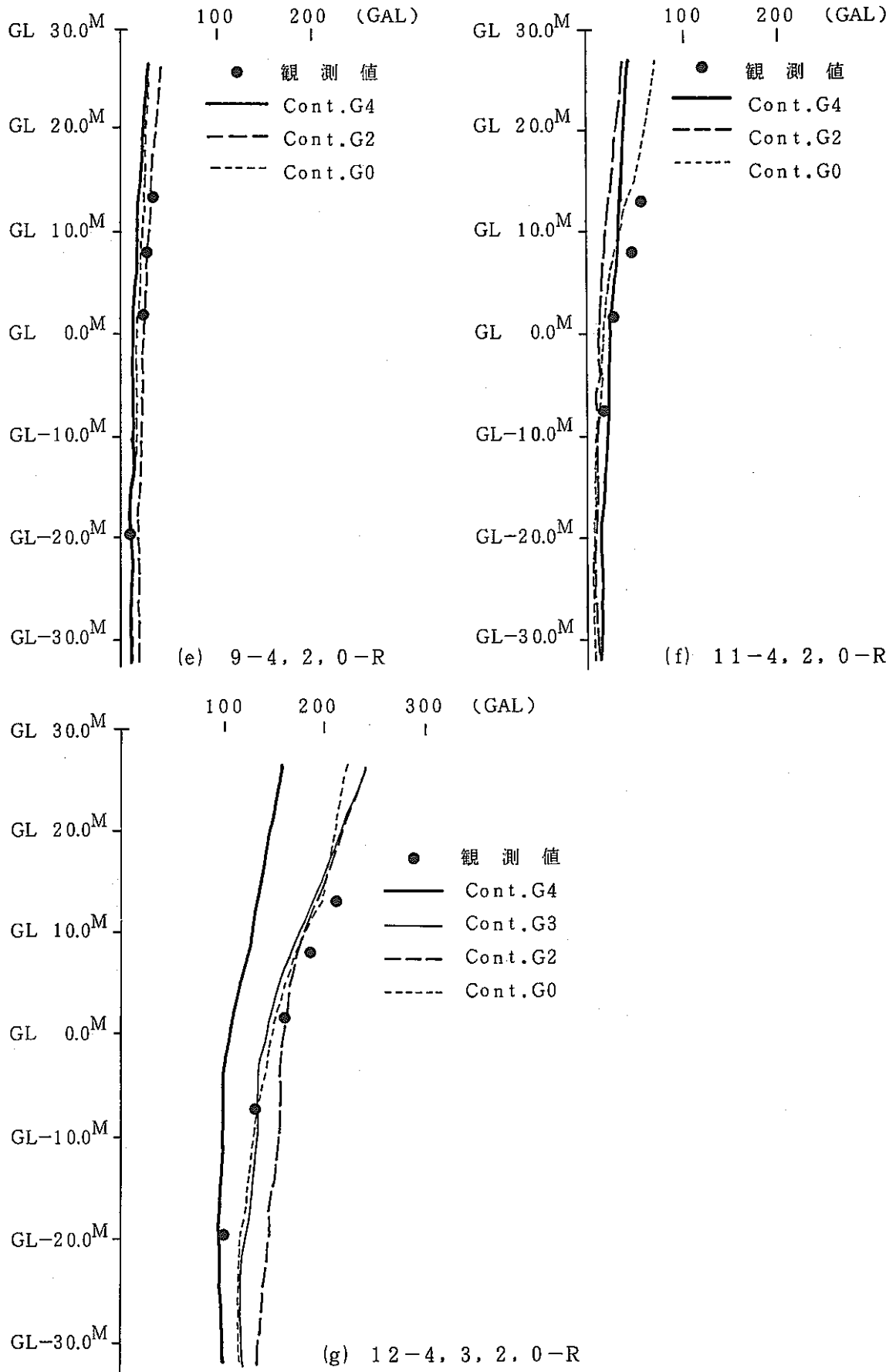


図 5.8 - (2) RESP 最大加速度分布と観測値の比較

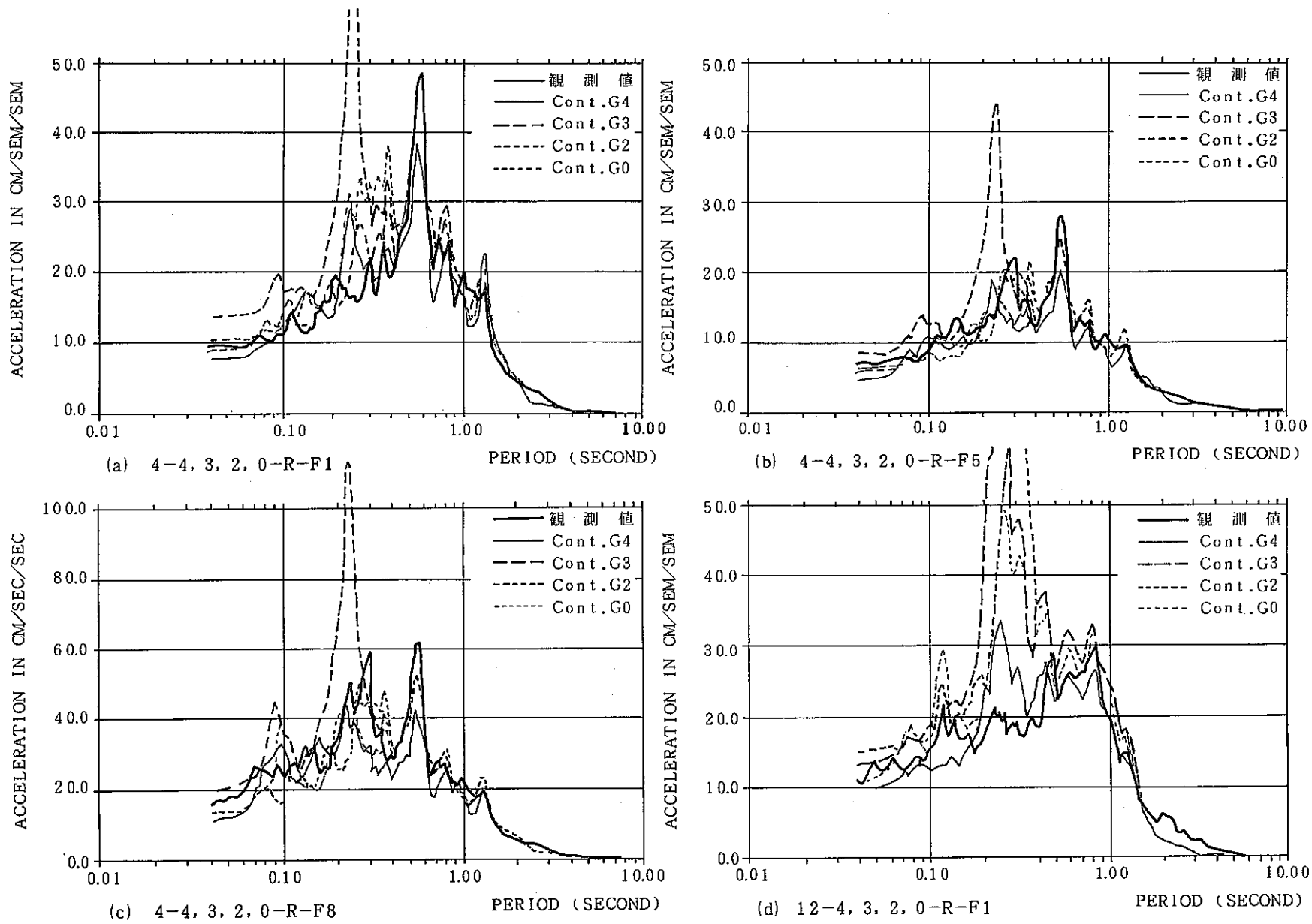
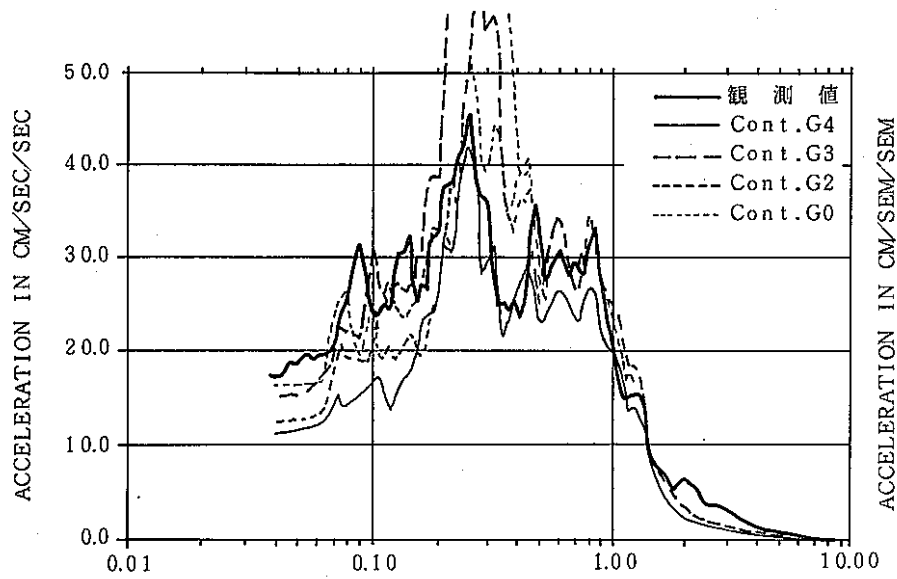
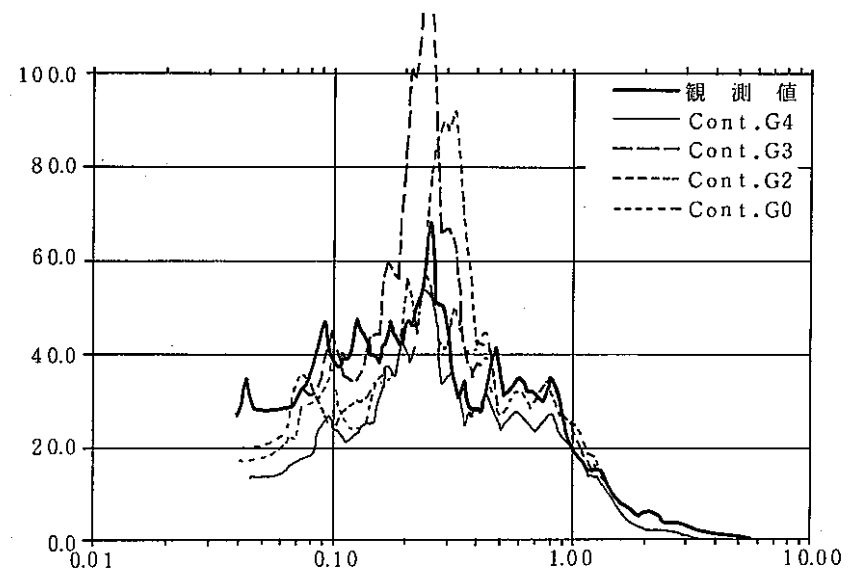


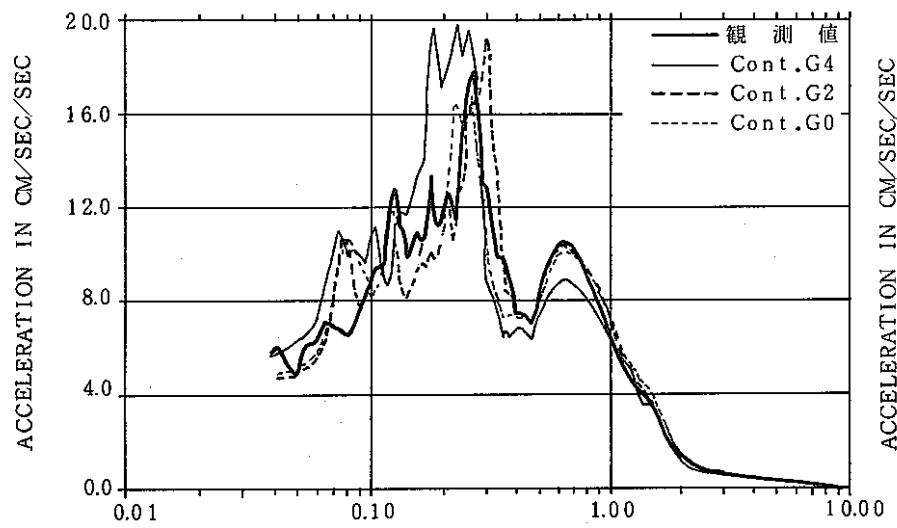
図 5.9 - (1) RESP 応答スペクトルと観測値の比較



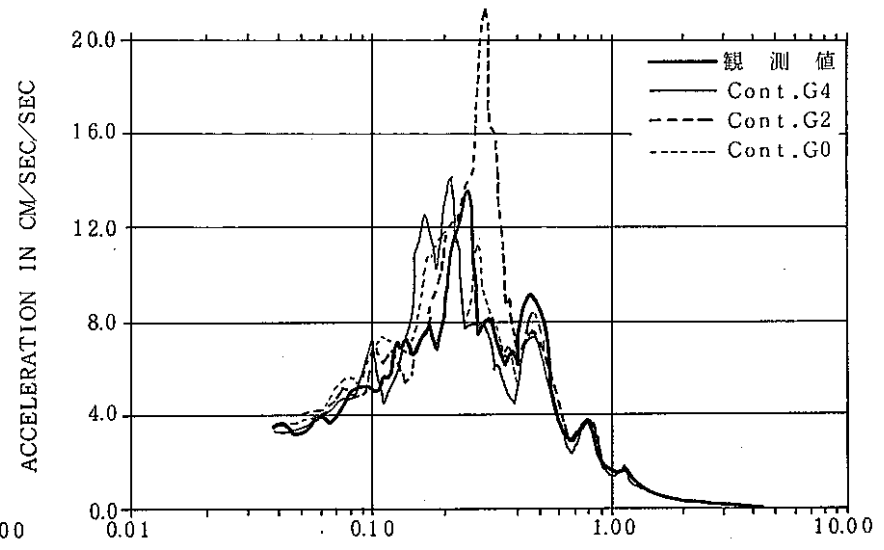
(e) 12-4, 3, 2, 0-R-F5



(f) 12-4, 3, 2, 0-R-F8



(g) 2-4, 2, 0-R-F5



(h) 5-4, 2, 0-R-F5

図 5.9 - (2) RESP 応答スペクトルと観測値の比較

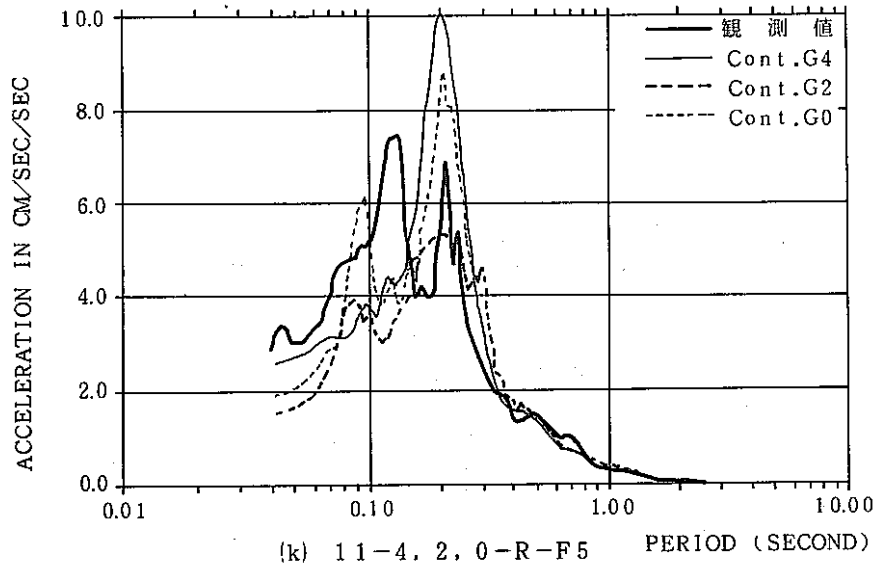
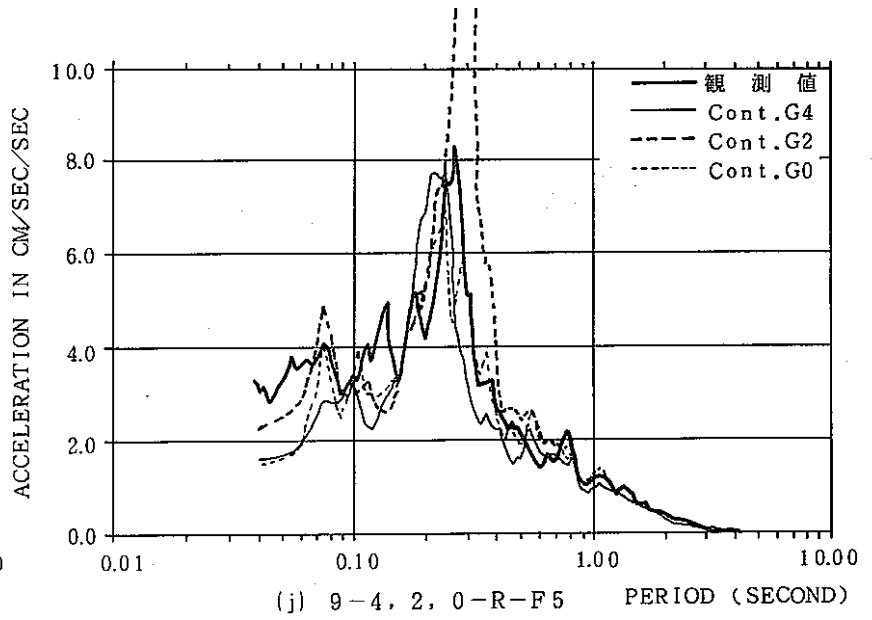
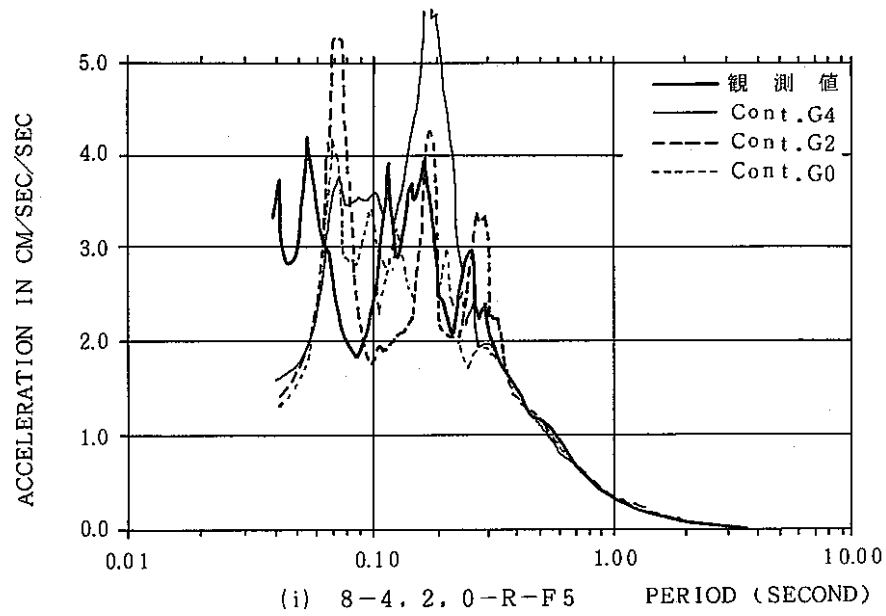
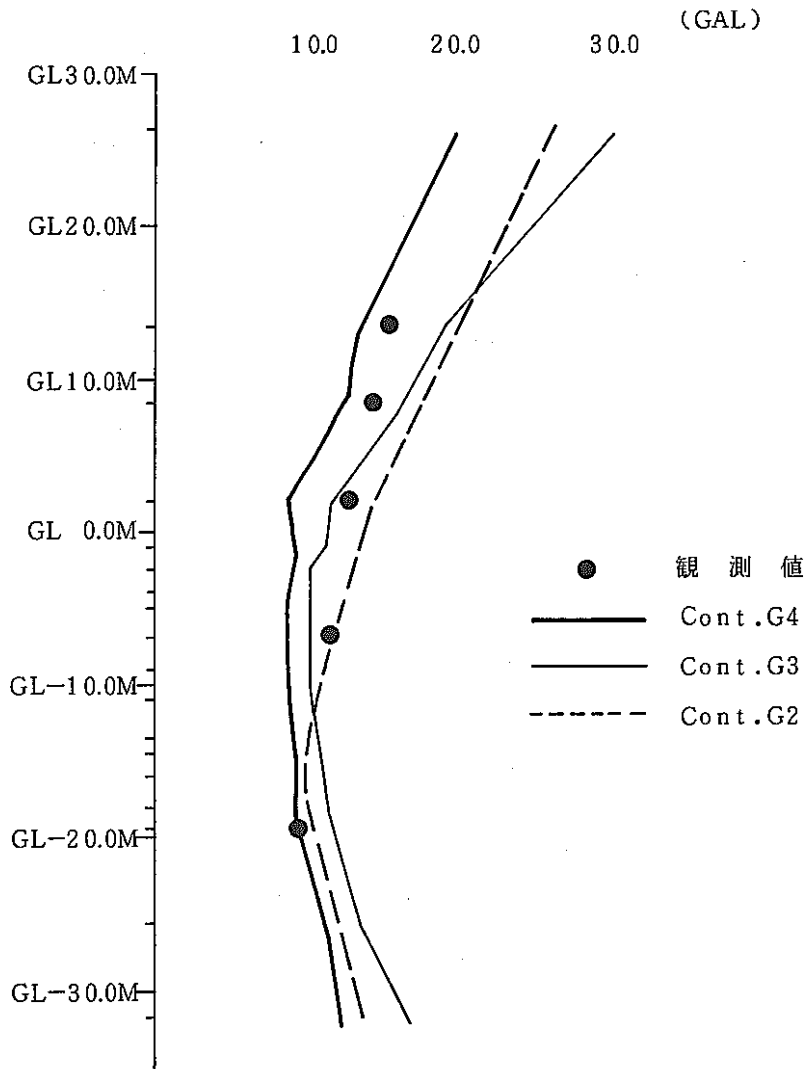
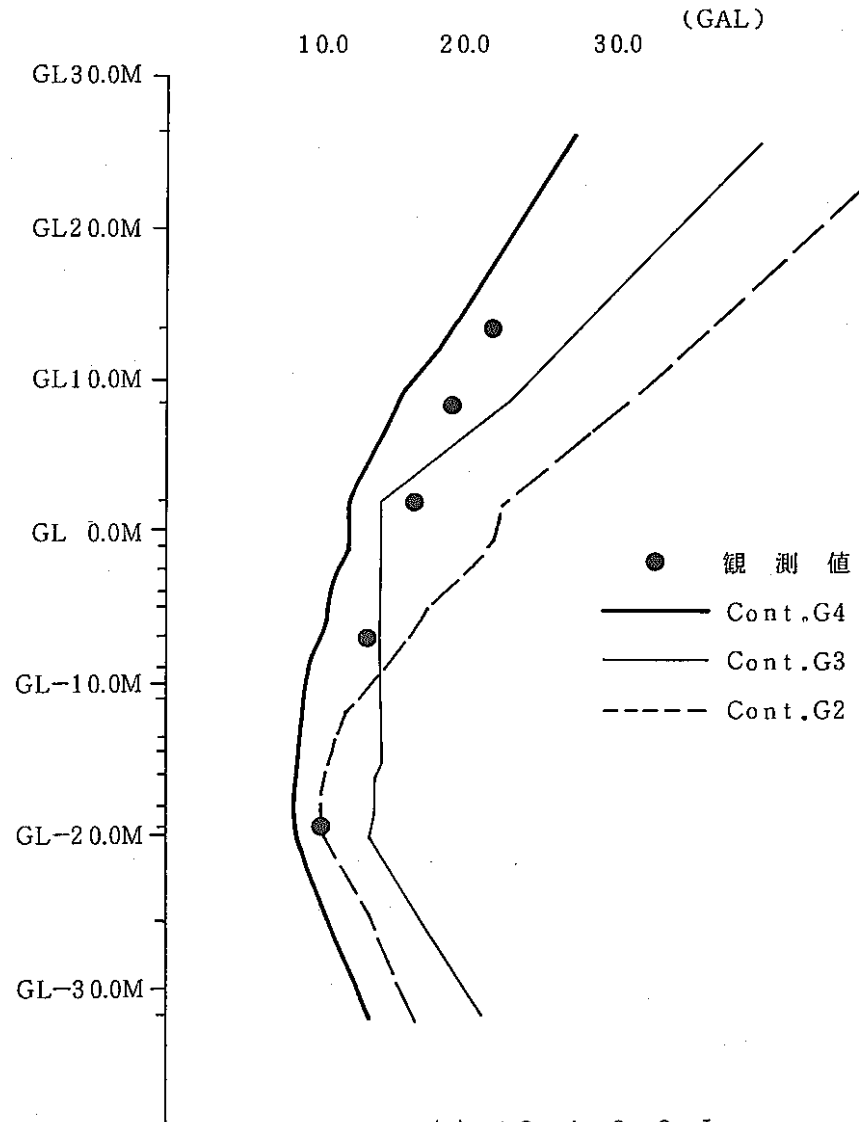


図 5.9 - (3) RESP 応答スペクトルと観測値の比較



(a) 4-4, 3, 2-L



(b) 12-4, 3, 2-L

図 5.10 LATT最大加速度分布と観測値の比較

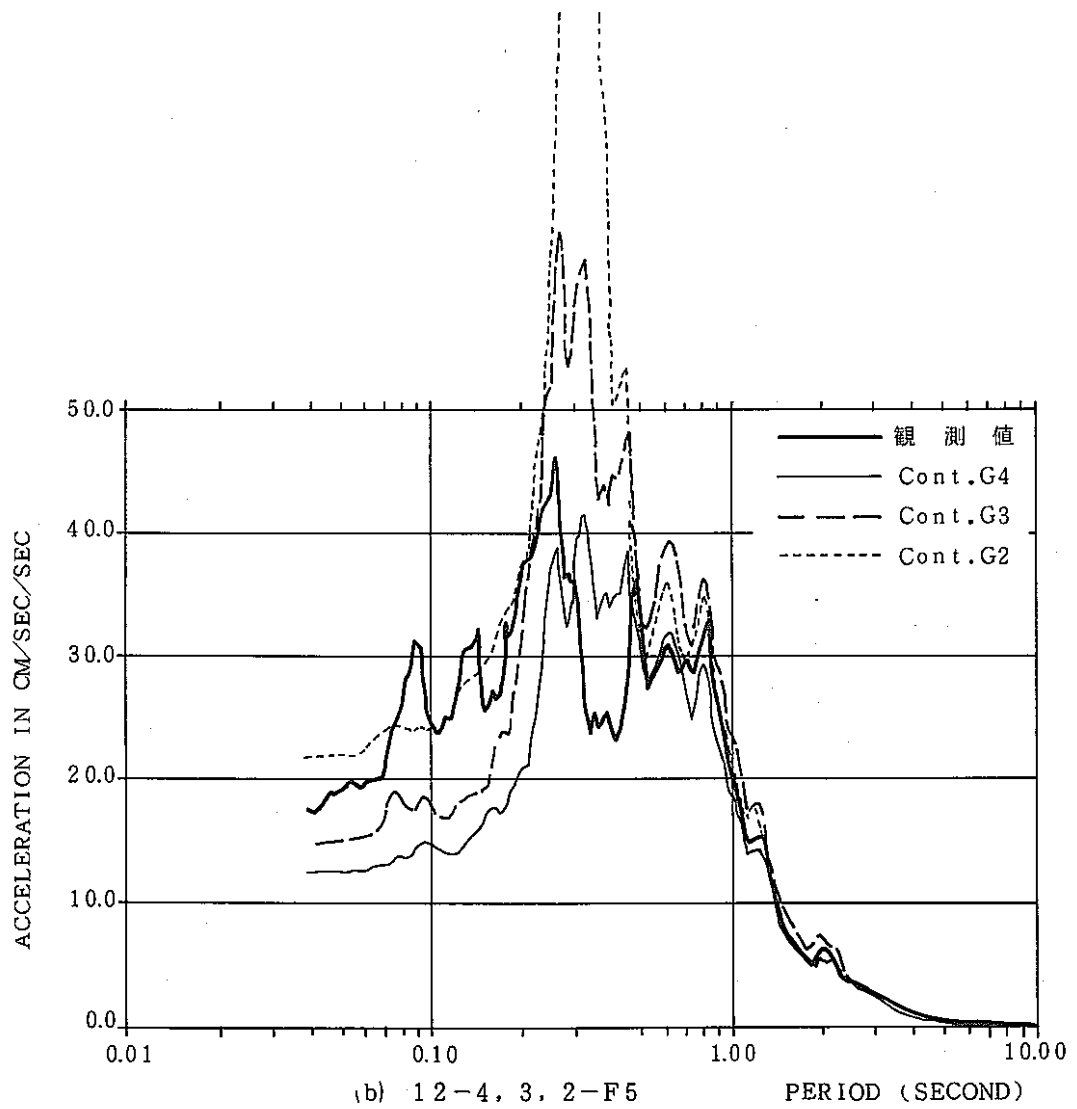
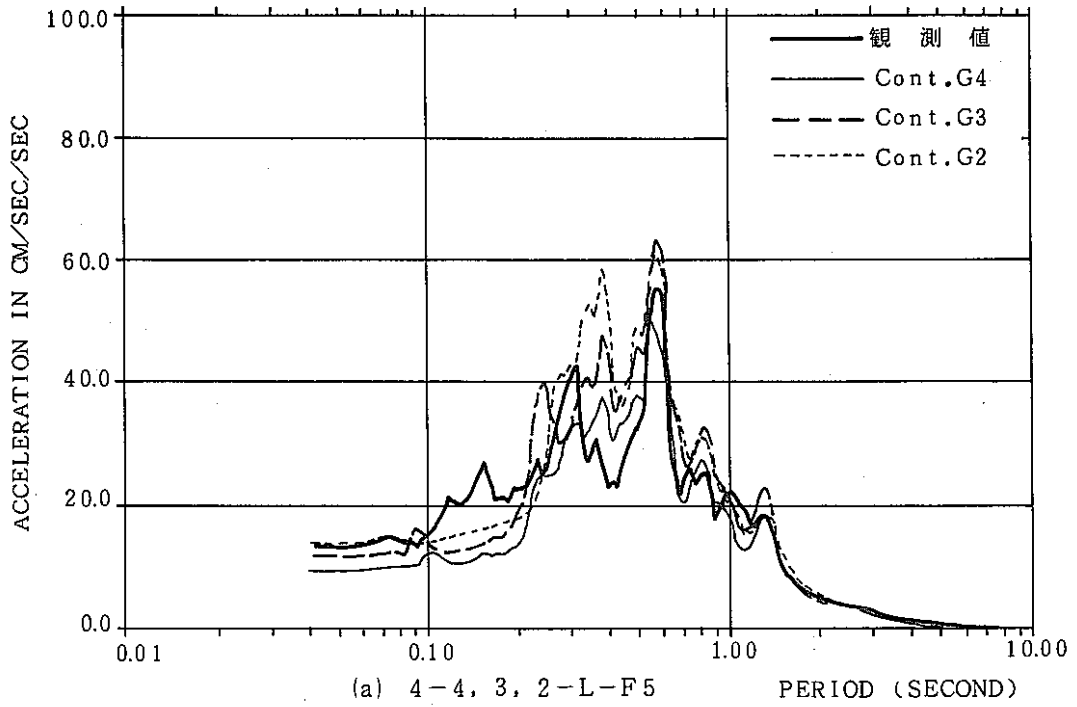


図 5.1 1 LATT 応答スペクトルと観測値の比較

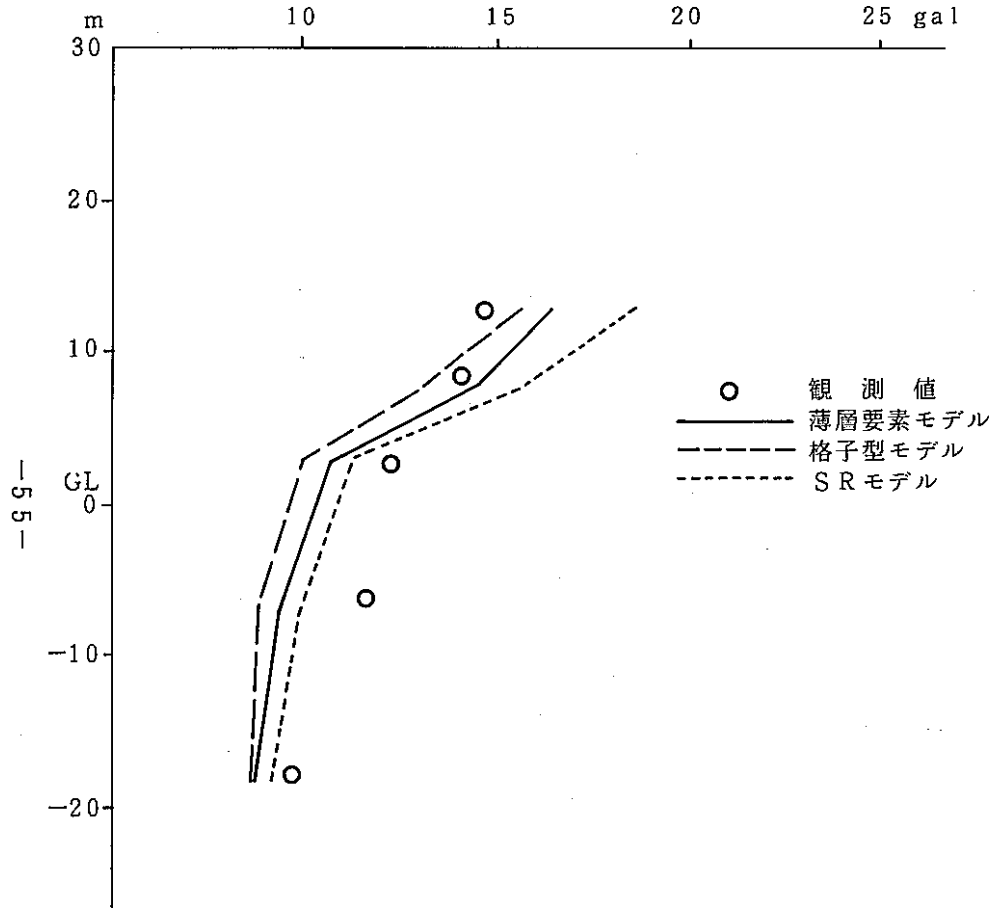


図 6.1 - (1) 最大加速度分布 (全解析法EQ.04)

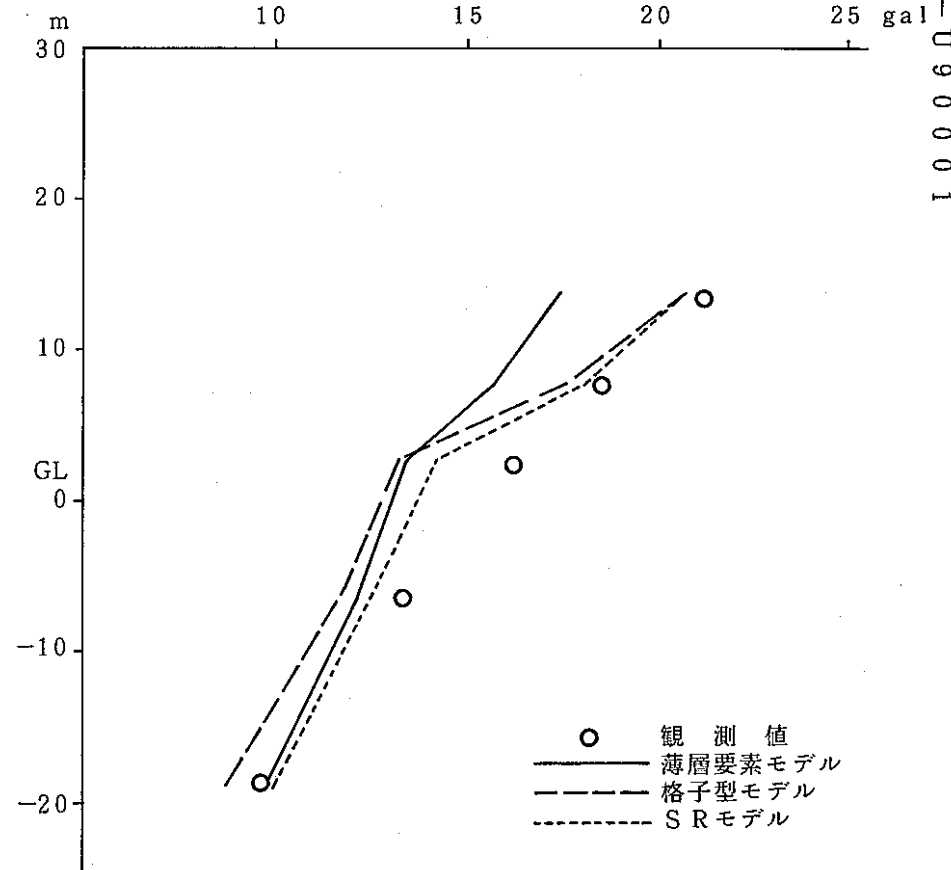


図 6.1 - (2) 最大加速度分布 (全解析法EQ.12)

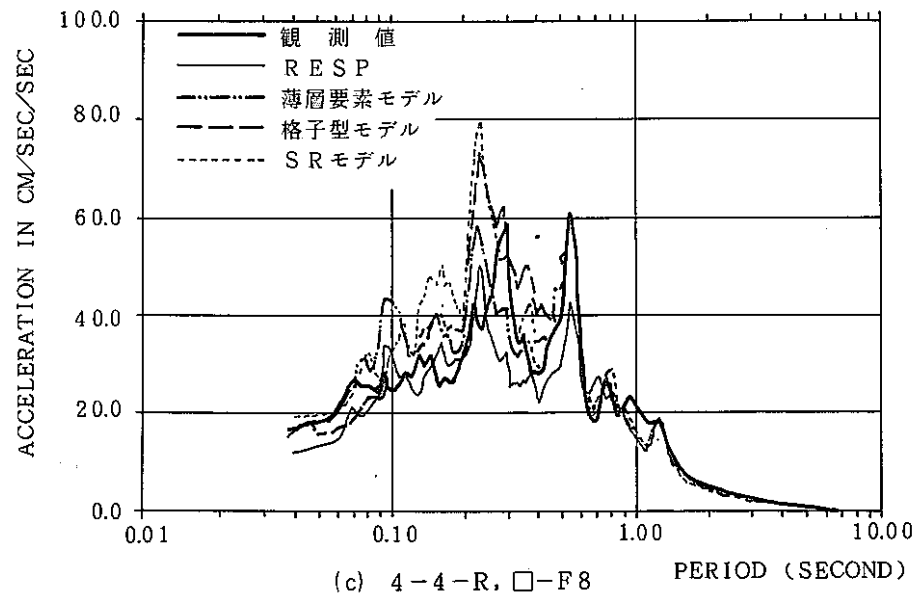
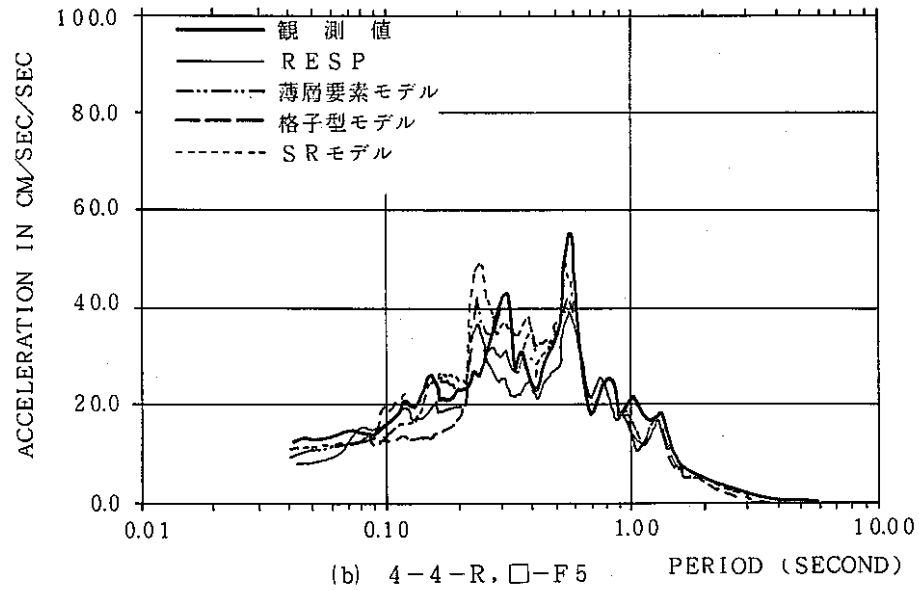
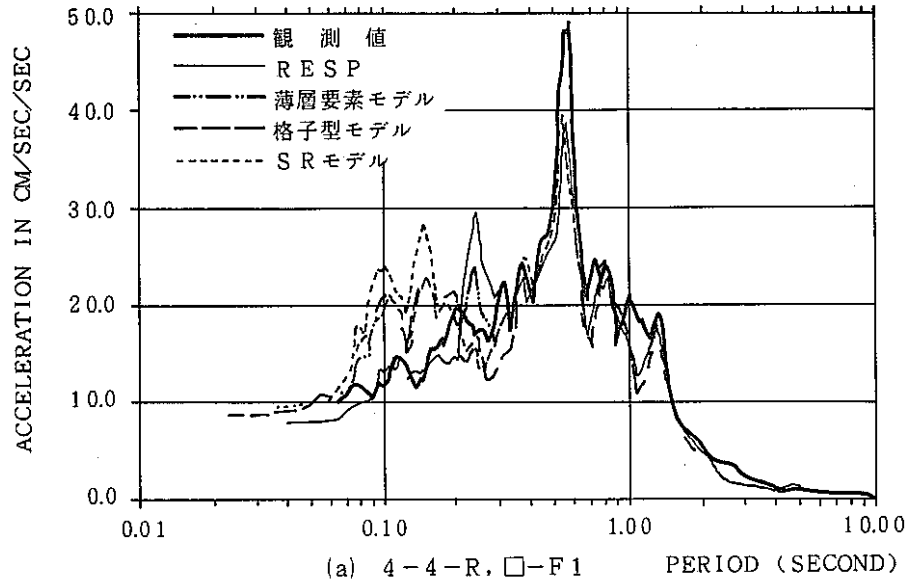


図 6.2 - (1) 各種解析法による応答スペクトルの比較

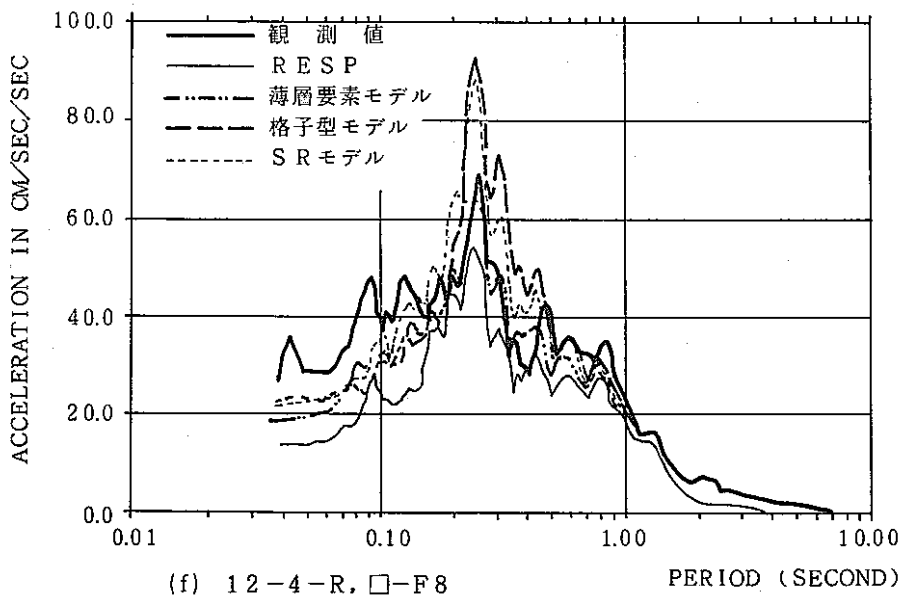
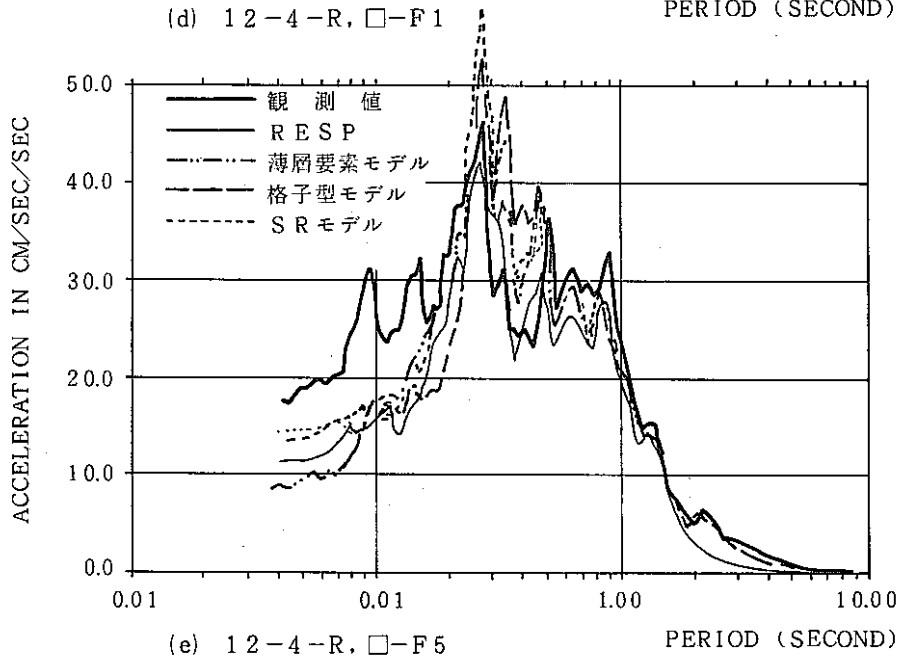
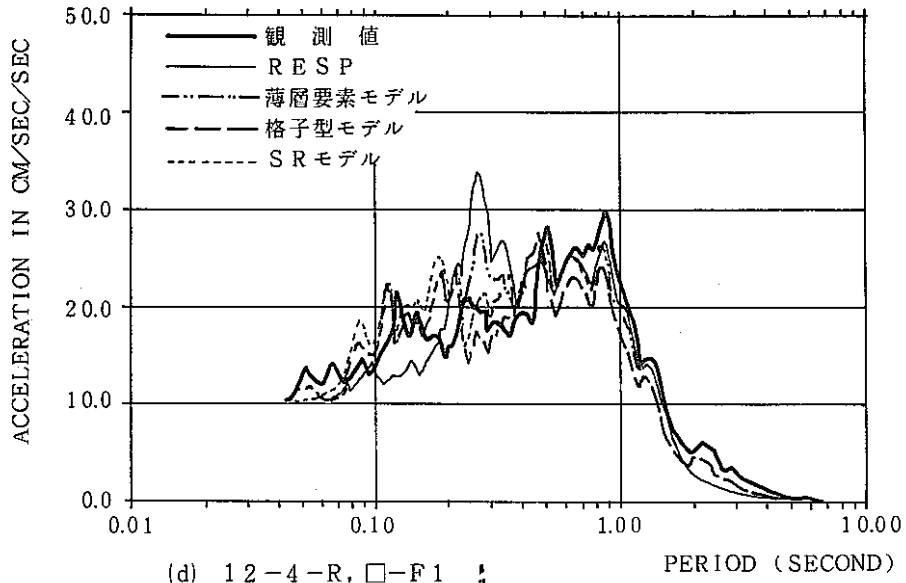
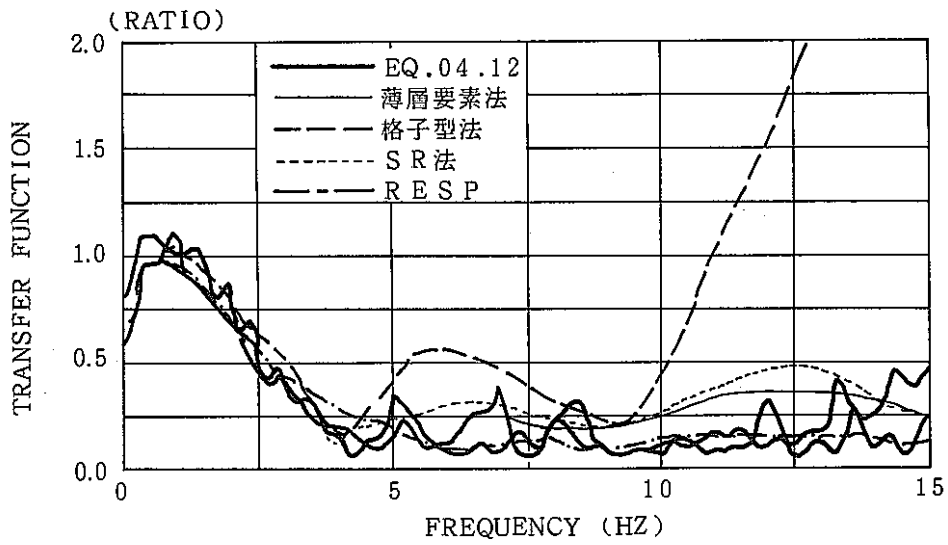
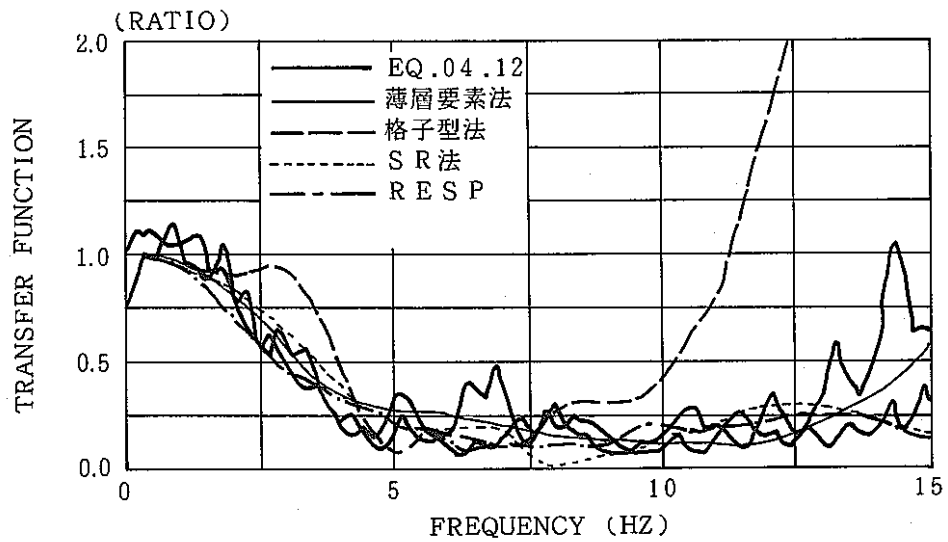


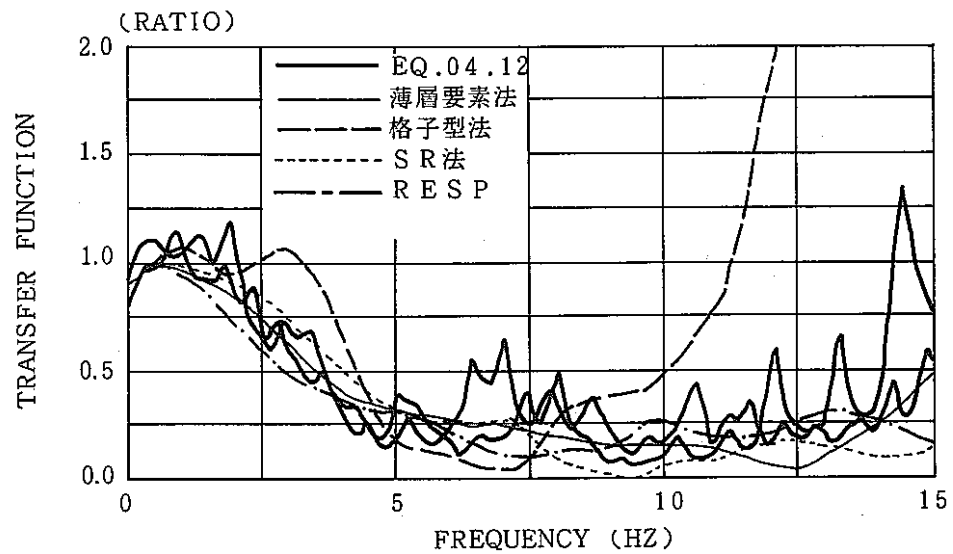
図 6.2-(2) 各種解析法による応答スペクトルの比較



(a) 4, 12-4-R, □-F1

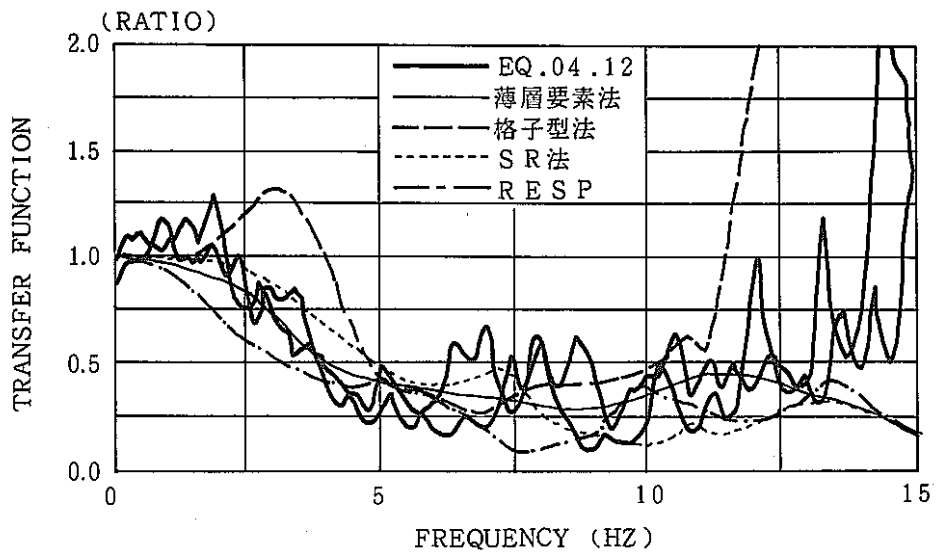


(b) 4, 12-4-R, □-F3

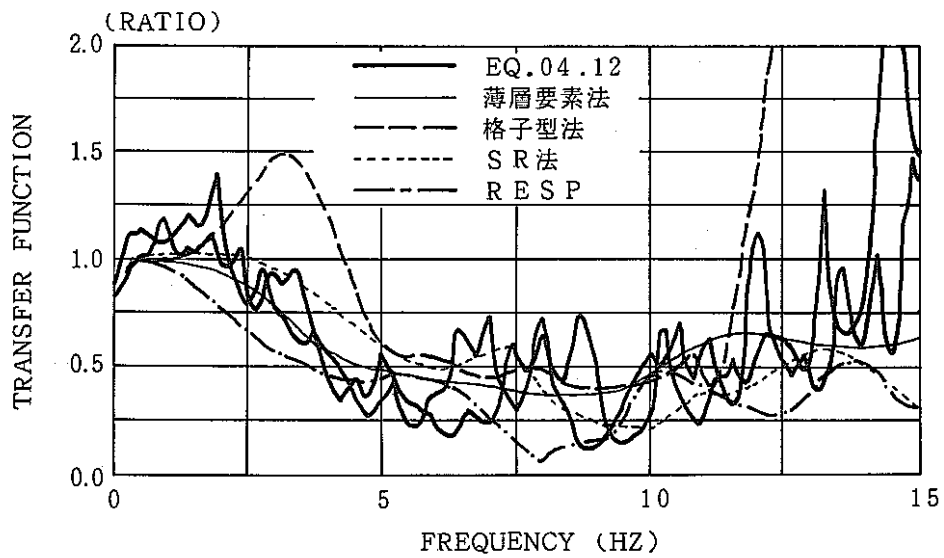


(c) 4, 12-4-R, □-F5

図 6.3 - (1) 各種解析法による増幅率関数の比較

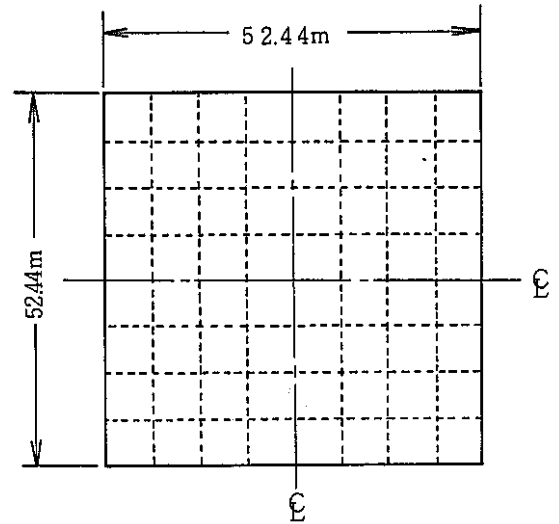


(d) 4.12-4-R, □-F7



(e) 4.12-4-R, □-F8

図 6.3 - (2) 各種解析法による増幅率関数の比較



GL (m)	H (m)	V_s (m/s ²)	$\rho \cdot g$ (tf/m ²)	ν	h (%)
0	4.0	160	1.88	0.47	6.8
5	11.0	350	1.88	0.37	11.5
16	6.0	350	1.93	0.37	8.0
22	9.0	570	2.1	0.17	7.0
31	4.0	470	1.91	0.45	5.5
35	6.0	470	2.0	0.45	2.0
41					
	23.0	350	2.0	0.475	2.0
64					
	16.0	400	2.0	0.47	2.0
80					
	34.0	470	2.0	0.45	2.0
114					
	16.0	530	2.0	0.44	2.0
130					
		530	2.0	0.44	0.0

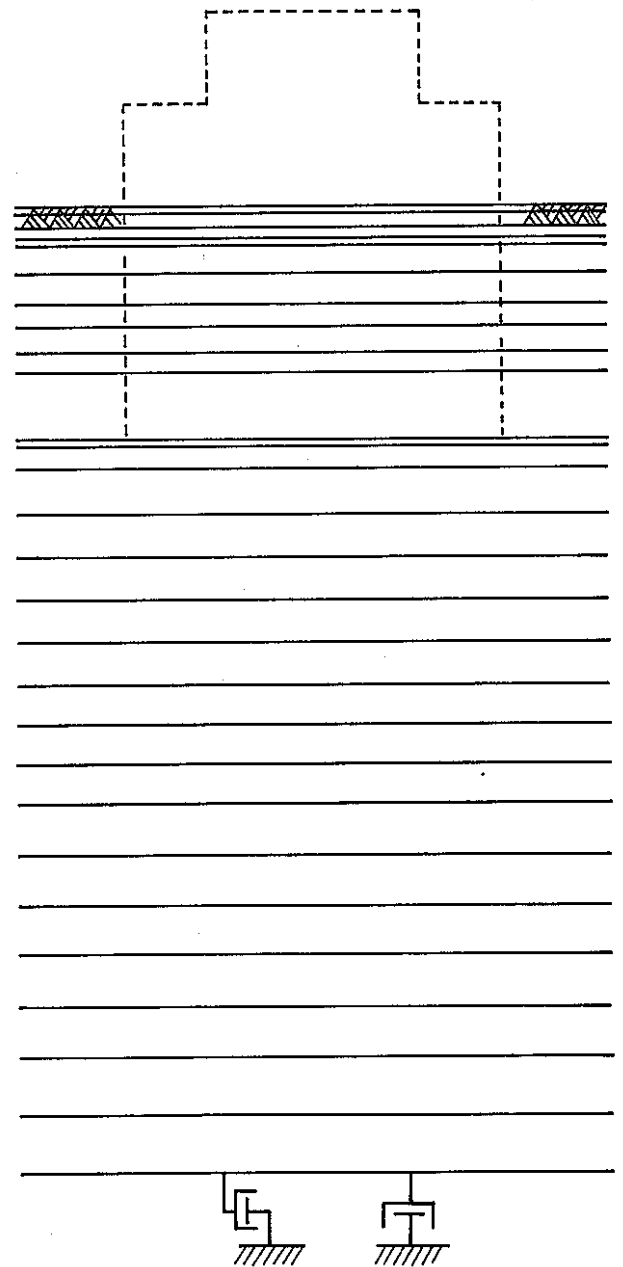


図 6.4 薄層要素法のモデル概念

PNC TY9469 90-001

CRIEPI-U90001

付 録

付録-A 点加振薄層要素法 (RESP) コード説明

付録-B 格子型法 (LATT) コード説明

付録－A 点加振薄層要素法 (RESP)コード説明

先に「点加振解を利用した3次元地盤－構造物の応答解析法」⁷⁾を報告し、RESPと名付けたコードを開発した。解析法を報告した時点のRESP ver.1の機能は、入出力関係が正常であることのみが確認されており、使用性の優れたものではない。

RESP ver.1の機能を以下に記す。

- ① 部分構造法の特長を活かした3段階解析を行う。
 - 1) 水平成層の点加振解作成
 - 2) 相互作用剛性・有効入力係数の作成
 - 3) 加振力、あるいは地震力に対する応答算定
- ② 点加振解の合成には薄膜法 (Skin Method) を用いる。
- ③ 自由度削減を図り、1軸対称と2軸対称機能を適用する。
- ④ 自然地盤底面の仮想境界に粘性境界を付加することができる。
- ⑤ 構造物に有限要素法によるソリッドおよび集中質点－ビーム系を使用できる。
ただし、ソリッド要素は加振実験シミュレーションのみに適用する。
- ⑥ 相互作用剛性算定と応答算定の振動数刻みを任意に変更できる。
- ⑦ モデル作成時に構造物と成層地盤の諸元を別途に入力し、省力化を図る。

以上の機能を具備したRESP ver.1により、JPDR、多度津振動台の応答算定を通じて本解析法とコードの有用性が確認された。これらのコード操作を通じて、主として操作機能性を向上する必要が判り、その目的で版が更新された。RESP ver.2に付加された機能は次の通りである。

- ① 通常の構造物形状が長方形であることを考慮して、点加振解を求めるルーチンを変更した。この結果、長方形平面を持つ構造物を対象とする場合の計算量がほぼ1/8に減少した (当所所有のM680Dで内部コア32MB容量モデルを対象とし、振動数範囲0~20Hz 振動数刻み0.25Hzの場合、CPU時間が360minから35minとなる)。
- ② さらに、VP機に対応できるようにプログラム構造を改良した。
- ③ 地震時および加振時の任意位置の地盤挙動 (変位) を算定する機能を追加した。
- ④ RESP前処理として実施していたSHAKE機能を内蔵し、基準地震動を直接に入力することができるように改造した。

さらに、今回の「常陽」シミュレーションを通じて次の機能が付加された。RESP ver.3に追加された機能およびver.3時に検討した内容は以下の通りである。

- ① 斜め入射波、表面波、これらの合成波や観測波など任意の地震動に対応できるように、ファイル構成を変更した。この結果、同一深さで異なる平面位置にある点に任意の異なる地震波を入力することができるとともに、本報告中のG0波応答が可能とな

った。

- ② 地震波に対してもソリッド要素により表現された構造物を適用可能とした。

この結果、構造物と接する地盤の応力解析、2次非線形解析や弾性基礎を対象とする解析が可能となった。ただし、この場合に必要となるメモリ容量は急激に増大した。図3.2に示す排土要素の外部にさらに1要素をそれぞれ付加する場合の内部コアは約128MBに達し、32MBモデルに比して約30倍の計算量を必要とする。

- ③ 変位系出力（加速度・速度・変位・伝達関数など）とともに、力系出力（せん断力・モーメント・応力・相互作用剛性など）を可能とした。
- ④ 点加振解の合成法を比較する目的で、薄膜法のみならず、容積法と柔境界法を選択できるようにした。さらに他の薄層要素法系のコードと照合するために、要素重心に節点をおく田治見式手法による解析を可能とした。
- ⑤ 薄膜法では、構造物と地盤の接面の自由度に加えて、接面と連結される排土中の節点を扱う必要がある。接面節点のみの自由度をとれば完全な柔境界解析が可能であるが、排土部分の剛性マトリクスの逆行列を算定する必要がある。この定式化を行った後に、これまでに対象とした構造物に即して薄膜法と完全柔境界法による計算量を見積った。巨大構造物であれば薄膜法が有利であり、小規模構造物では後者が一般には有利となる。モデルに応じて計算量を予め算定し、採用する手法を選択できるようにした。

以上の機能向上を経て、現時点ではRESPの増強を中断する。今後は、平成4年度に予定されている計算機能力の増強に合わせて2次非線形性を考慮する等価線形解析機能、薄膜法と完全柔境界法の選択機能を付加し、小規模構造物への適用性を向上する予定である。

付録－B 格子型法(LATT)コード説明

LATTは2次元平面ひずみモデルより格子型モデルを作成する、データ自動作成コードである。LATTにより作成されたデータから引続きコードFDAPを起動し、振動数領域法による応答計算を行う。従来より、適宜に格子型モデルを机上で作成してFDAPによる応答解析が行われていたが、構造物規模と地震領域の関係、地盤の土柱本数を含む対象地盤のメッシュ分割法、質点重量・ばね・減衰の算定法、構造物と地盤の接続法、仮想境界の処理法、基礎底面に接続する回転ばね・減衰の評価法、などがモデル作成者によって大きく異なっていた。このため時にはモデル設定のミスも混じることもあって、当所内では格子型法による応答解析結果に対する信用性が薄い状況である。

そこで、

- ① 構造物(集中質点-ビームモデル)とその地表面に対する位置関係および平面的な規模
- ② 自然地震構造
- ③ 基準地震動
- ④ 出力点とその種類

を最低限与えれば、所定の解析を実行するようにデータ発生コードを作成した。①～④のデータ構造はRESPと同一である。格子型法は薄層要素法系の解析手法に比して、モデル化自体にかなりの自由度があって、解析者の判断に待つ点が多い。そのため、標準的なパラメータの他に幾つかのメニューを用意して、特殊な系に対応できるよう配慮されているが、ここではLATTの標準手法を以下に示しておく。

- ① 構造物規模と地盤領域の関係：

水平方向には構造物の幅の5倍、深さ方向には基礎底面より3倍下までを地盤領域とする。自然地盤形状は、特別なパラメータを選ばない限り長方形である。ただし、解析振動数範囲によっては構造物基礎直下(支持地盤)の地盤物性 V_s によってモデル化範囲を自動的に拡張する。メニューにより、任意幅と深さを選択し、また丘状地形や傾斜成層地盤を対象とすることができる。

- ② 地盤の土柱本数を含む対象地盤のメッシュ分割法：

構造物基礎下には3本、周辺地盤を含めて合計7～11本が支持地盤の V_s によって選択される。また1土柱内の質点分割は最小波長の $1/5$ 以下を目安に生成されるが、構造物と地盤の接する位置や地盤構造の変化する深さでは必ず質点が設けられるため、最終的に再調整される。メニューにより土柱本数とその位置、最小波長比を選ぶことができる。

③ 質点重量・ばね・減衰の算定法：

質点の支配面積は隣接する上下左右の質点との中間点であり，その形状に即して平面ひずみモデルによる動的剛性が算定される。

④ 構造物と地盤の接続法：

平面図状で構造物と地盤の境界面に当たる位置には土柱を設けない。構造物下の土柱に属する最上部の質点（基礎底面に接続される質点）と基礎面間のせん断ばねは土中に属し，質量は基礎と土柱節点で折半する。

⑤ 仮想境界の処理法：

地盤底面・側面および奥行き方向の仮想境界は粘性境界を基本とする。メニューにより，底面固定，側面ローラーまたは伝達境界，奥行き平面ひずみ状態を選択できるとともに，ダンパー定数を変更することができる。

⑥ 基礎底面に接続する回転ばね・減衰の評価法：

田治見の成層補正を行って得られる回転剛性を用い，複素解析を主体とする。またメニューにより，任意の剛性値（振動数の関数でもよい）を指定することができる。

この他，本コード特有の機能として次の特長を有する。

① 地盤の任意の位置に任意の深さまで鉛直に掘り下げたトレンチを模擬できる。

② SHAKE機能を包含した基準地震動解析機能を持つとともに，質点間の相対変位からせん断ひずみを逆算し，せん断歪－せん断剛性関係を満足するように等価線形解析を行う。このため自然地盤のみならず，構造物周辺の2次非線形性を考慮することが可能である。

③ 質点重量・ばね・減衰の算定法に関しては，質点の支配形状に即して軸対称体による動的剛性がメニューにより算定される。本機能により，従来は困難であった格子型モデルによる上下動解析が可能である。

以上の機能は理論的なモデルにより検証を行うとともに，一部は本報告のように地震観測結果による検証を実施中である。今後，地盤－構造物系の非線形解析に適用することを最終目標として，RESP他のコードと相互検証を行う予定である。