

土 木 研 究 所 資 料

平成7年兵庫県南部地震による被害の 地形・地質学的検討（その2） — 地質学的検討 —

平成11年2月

建設省土木研究所
環境部地質研究室

Copyright©(1999)by P.W.R.I.

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

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

平成7年兵庫県南部地震による被害の 地形・地質学的検討（その2） — 地質学的検討 —

環境部 地質研究室 室 長 協坂 安彦
主任研究員 梶川 昌三

要 旨

兵庫県南部地震による地表面の加速度等を、地盤の物性などのモデル化を行い、表層部の地質特性を考慮した一次元地震応答解析及び基盤岩の構造を考慮した二次元の地震波応答解析により検討した。次に、地質的な基盤以浅を対象に擬似スペクトル法による強震度解析を行った。その結果、一次元地震応答解析では表層地質が薄くなるほど地表面加速度が大きくなるという結果が得られ、一方、二次元地震応答解析では北側の表層地盤の薄い地域では加速度が小さくなって、地震による構造物倒壊率の分布と調和的となり、震度7の震災の帯の説明が可能ながことが明らかとなった。擬似スペクトル法による解析でも地震による構造物倒壊率の分布と地表面加速度の大きさの分布が比較的調和的であることが明らかとなった。結果、震災の帯の原因は深部地盤構造の影響によるものである可能性があることが明らかとなった。

キーワード：平成7年兵庫県南部地震，地震応答解析，地表面加速度

目 次

1. はじめに	1
2. 被害地域の地質構造	2
2. 1 基盤構造	2
2. 2 阪神沿岸部、西宮～伊丹地域の地下地質	2
2. 3 芦屋～神戸の地下地質	2
2. 4 地下の地質構造	4
3. 表層部の地質特性を考慮した一次元地震応答解析	5
3. 1 基盤の検討	5
3. 2 入力地震動の検討	5
3. 3 観測波の収集と「SHAKE」による基盤波への変換	5
3. 4 「SHAKE」概要	11
3. 5 各地点のモデル化	11
3. 6 基盤波形のスペクトル特性	23
3. 7 震源断層及び距離減衰	25
3. 8 解析概要	27
3. 9 解析地点及び解析モデル	27
3. 10 入力地震動波形及び基盤の最大加速度	33
3. 11 解析結果	34
3. 12 解析結果図	40
3. 13 被害調査結果との比較	50
4. 基盤岩の構造を考慮した二次元地震応答解析	56
4. 1 解析概要	56
4. 2 「FLUSH」概要	56
4. 3 工学的基盤以浅モデルの解析	57
4. 4 岩盤モデルの解析	80
5. 擬似スペクトル法による強震動解析	89
5. 1 解析方法	89
5. 2 地質構造モデル	89
5. 3 計算結果	93
6. まとめ	98
7. 今後の課題	99

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震は大都市直下の地震であり、神戸市や西宮市などを中心とした地域および淡路島の土木構造物や建築物に多大な被害を与え、多くの死者を出した。

この震災においては1949年福井地震直後震度7が設定されて以来初めて震度7が観測され、東西にのびた震度7の帯として現れた。この震災の帯の出現の原因としては様々な説が出されているが、この震災の帯の下に今回の地震の起震断層が隠されているという伏在断層説はほぼあり得ないということとなっている(たとえば入倉(1996a¹⁾, 1996b²⁾, 1997³⁾)。しかしながらいまだにこの震災の帯の出現の原因については統一した見解は得られていない。その原因として、1) 対象とする地域や地形区分が研究者により異なっている、2) 地下地質情報が十分でないために、地質条件に不確定さがある、3) 被害分布には地形、表層地質、深部地質、地質構造などの条件が相互に関係し合っている、4) 被害を受けた建築物等の分布、種類等に元々不均質性があった、などが考えられている。地形と被害との関係については先にその検討結果が報告されているが、地質構造を考慮した検討も行っておく必要がある。

本報告書ではこの地域の地質の構造および物性の分布に着目し、地盤のモデル化を行った上で、各モデルについて地震波の応答解析を行ない、震災の帯の成因の考察をした。地盤のモデル化に当たっては、既存のボーリング資料はじめ、建設省近畿地方建設局に依頼して行った13本のボーリング結果(地質分析、各種検層、各種室内試験の結果)、および長周期微動探査の結果を用いた。手法としては兵庫県南部地震時に実際に得られた観測波から基盤入力時震動を決定し、設定した地質測線上において表層部の地質特性を考慮した一次元の地震応答解析、及び基盤岩の構造を考慮した二次元の地震応答解析を行い、家屋倒壊等の被害分布(震災の帯)との比較・検討を行った。

2. 被害地域の地質概要

2.1 基盤構造

大阪盆地の基盤の深度は、大阪湾の東側（大阪側）で1500m、西側（淡路島側）で最深3000mと、全体として西に傾斜する。阪神地域沖の基盤深度は、2000～2千数百m程度と、大阪の低地部の1400mよりも深い。尼崎、西宮、芦屋、神戸の沿岸部は、西に傾動する基盤盆地の北縁にあたり、東から西へと基盤は次第に深くなっていると推定される。

南北方向で考えてみると、阪神地域の北側には基盤隆起山地が連なっており、沿岸部の深い基盤との間には、市街地となっている低地～丘陵地の地下で基盤深度の大きなギャップを想定せざるを得なく、そのギャップは西へ行くほど大きくなるはずである。阪神地域の地下地質の最も顕著な特徴は、この基盤岩の大きなギャップの存在であり、このギャップの位置・規模・センスが被覆層の分布・構造を規制しており、平面的な地震動の強弱分布を生じた地質的背景となっている。

2.2 阪神沿岸部、西宮～伊丹地域の地下地質

兵庫県西宮以西の地下地質について、大阪市港区のOD-1（大阪深層ボーリングNo.1）の層序を基準とし、火山灰層や微化石（層序・堆積環境）によって層序区分と対比を行った。

OD-1において、Ma10層上限までが大阪層群（Ikebe N et al., 1970）⁴⁾、Ma12層を含む地層が中位段丘堆積層（古谷（1978））⁵⁾である。その間には、Ma11層とさらに2層の海成層（Ma11(2)層とMa11(3)層）が挟まれる。

阪神地域沿岸部において、これらの地層は、西に向かってしだいに層厚と伏在深度を増す傾向を示し、現在知られている情報の中で六甲アイランドが最も地層が厚い。しかし、六甲アイランドの西側にあるポートアイランドでは、Ma11層やMa12層は10～20m浅くなっていて、ここでは逆の傾向を示すようになり、基盤のギャップを予想させる。

甲子園沖から北への各地層の分布は、地下のMa9層～Ma12層はゆるい傾斜で次第に深度を減じ、Ma12層は尼崎市北部・伊丹市・川西市南部で地表に姿を現し、伊丹台地を形成する中位段丘堆積層に連続する。これらの地域の低地では、ゆるく傾斜するMa12層を覆って礫層と完新統がオーバーラップする。神戸地域と比較すると、当地域の陸上低地部ではMa12層に大きな構造的変位は認められない。

2.3 芦屋～神戸の地下地質

前述の層序区分に基づいて、西宮～神戸の沿岸部埋立地の地下約100mまでの地層の連続を推定した。地下に分布する地層はMa12層（中位段丘堆積層中部層）、中位段丘堆積層上部層、低位段丘堆積層ならびに完新統である。

Ma12層は、大阪港から尼崎東部（北西方向の断面）でほぼ水平に分布するが、尼崎西部以西の地域（東西～西南西方向の断面）では、甲子園沖、六甲アイランドとポートアイランドの間、和田岬の3地区で西へゆるく東へ急な撓曲構造を示しながら、大局的には西へ傾斜する。

Ma12層より上位の地層は、甲子園沖を境として、東側では完新統下部もしくは更新統最上部の礫層（難波累層下部層）がMa12層をほぼ水平に覆っているのに対して、西側では中位段丘堆積層上部層や低

低位段丘堆積層が厚く発達し、対照的な様相を示す。低位段丘堆積層は、中位段丘堆積層の背斜凹部を埋めるように分布するが、大阪南港にも分布する(古谷ほか(1992))⁹⁾ことから甲子園沖以東でも本来Ma12層を厚く覆っていたと考えられる。一方、完新統は甲子園沖以東で厚く、以西で薄いという全く逆の分布傾向を示している。

次に旧海岸線に沿う地質分布を推定した。神戸市中央区の西半部と東灘区から西宮市にかけて、深度15~30mに連続する海成層はMa12層と判断され、中央区で背斜構造を呈する。この背斜構造は、沿岸部のMa12層の構造からすると、和田岬の撓曲構造の軸部に連続すると推定される。中央区以東も同じく沿岸部の情報からMa12層の連続を推定することができる。

完新統の基底は起伏に富み、埋積谷をなす部分では深度15m付近に谷底がある。西宮市東半部で完新統の基底が深くなるのは、沿岸部の場合と同じである。完新統は、下位より礫層、砂層、粘土層、砂層、礫層よりなり、最上部の礫層は扇状地性堆積物である。完新統の粘土層は、中央区や西宮市に分布するが、いずれも層厚は5m程度であり、完新統はほとんど砂層よりなる。

完新統、とくに粘土層が阪神地域においてどのように分布するのかは、地震動の伝播や地表振動の軟弱地盤による増幅など地震被害との関係から見ても注目される。六甲アイランドから神戸市東部の市街地にかけて南北方向の地下地質状況を概念的に記述する。六甲アイランド地下の深度70m以深にはMa12層が分布し、これを覆って中位段丘堆積層上部(厚さ13m)、低位段丘堆積層(厚さ27m)、完新統(厚さ10~17m)および埋立人工土(厚さ20m)が分布する。

完新統の海成粘土層は、埋立地では浚渫や盛土によって攪乱されているが、標高-3m付近まで陸側に追跡することができる。上下の砂層を含む完新統は標高10m付近まで分布すると推定され、上位を厚さ7~10mの不淘汰でゆるい砂・礫層によって覆われる。この砂・礫層は、完新統上部の扇状地性堆積物を主体にするものと推定され、芦屋~神戸の緩傾斜地形部の表層地質の特徴である。ただし、標高20~30m付近になると、ゆるい砂・礫層は薄くなり、ある程度締まった砂・礫層と薄い粘土層の互層が地表近くに現れる。この互層が沿岸部から連続してくる低位段丘堆積層であり、低位段丘面を形成している可能性がある。同じく、その背後には、Ma12層層準を含む中位段丘堆積層が段丘を形成するものと考えられる。

神戸市中央部の地域の層序区分の基準は、ポートアイランドII期(ポートアイランドの沖合に造成中の人工島)内の深度250mの調査ボーリング(KH-1)である。ここでは下位よりMa9層、Ma10層、Ma11(2)層、Ma11(3)層、Ma12層の各海成層や10数層の火山灰層の特徴が詳しく把握されている。Ma12層の上位には、中位段丘堆積層上部に相当する海成~汽水成の地層と、これを不整合に覆って亜寒帯植物花粉化石を産出し、始良火山灰層を挟在する低位段丘期の堆積物(富田累層)と厚さ14mの海成層を挟在する完新統が分布する。

Ma12層を沖側から陸側へ追跡すると、ポートアイランドII期やポートアイランドではほぼ水平であるが、旧海岸線の神戸港第四突堤付近で本層は急激に深度と層厚を減ずる。この間のMa12層下限の深度差は約40mである。同じ構造を海岸部に沿う走向方向の断面でみると、Ma12層の下限深度は深度40mから20mへと変化する。Ma12層の急傾斜に伴って、低位段丘堆積層相当層は薄くなり削剝されて、完新統がオーバーラップする。完新統の粘土層は砂層に移化し、砂層は間に礫層を挟みながら標高10m付近に

まで分布している。これは阪神地域の海岸低地の完新統の分布様相の一例であり、扇状地堆積物に覆われている点が特徴である。

以上のような各地層の分布状況からみると、浅層部の地層の分布や岩相は、ベースとなっているMa12層の分布・構造に支配されている点が指摘される。つまり、地表に近い数十mの深さの地層の分布・岩相を区分・追跡し、立体的な表層部の地質分布を明らかにするためには、Ma12層の追跡が欠かせない作業となる。

2.4 地下の地質構造

神戸港第四突堤付近を通過するMa12層の撓曲構造は、大阪層群上部～中位段丘堆積層の地層を大きく変位させている意味で注目すべき構造である。

神戸港南西部の和田岬地下では、Ma12層などの地層に20数mの変位がみられるとして「和田岬断層」と名付けられた（藤田・前田(1983)）⁷⁾。この付近には見かけ上東落ちの撓曲構造があり、この間で深度300mの地層が180m、深度100mの地層が40m程度の深度変化がある。この変位規模は第四突堤付近の地層変位とほぼ同じであり、この構造は一連のものである可能性がある。

六甲アイランドとポートアイランドの間の撓曲構造は、深度300mの地層が250m、深度100mの地層が80m程度の深度変化であり、その平面的連続性は未知であるが、上記の撓曲構造と同じ連続方向を持つのではないかと予測される。

神戸地域において、堆積盆地の輪郭を形作る須磨断層や諏訪山断層が東北東～西南西の連続方向を持つものに対して、中位段丘堆積層など新しい地層を変位させている上記の構造は北東～南西方向であり、異なる位置と方向を持っている。

そしてこの構造は、大局的には西へ傾動する基盤構造であり、その西縁部において被覆層は少なくとも3地区で「のこぎりの刃」状の東に急な撓曲構造を示し、この部分では基盤の逆断層の存在が推定される。こうしたセンスの被覆層の構造ならびに基盤断層は、大阪湾西部に推定される断層と軌を一にするものである。

Ma12層の撓曲部において、もう一つ重要なことは、低位段丘堆積層までも構造的変位がおよんでいる可能性が高いということであり、さらに完新統にまで及ぶ可能性もある。

大阪平野を縦断する仏念寺山～上町撓曲構造（基盤断層という意味で上町断層と呼ばれている）はほぼ南北に連続するが、西大阪平野におけるMa12層の撓曲構造は、位置・方向とも異なり、北東～南西方向に延びている。大阪平野において、このMa12層の撓曲構造は、その北側には完新統が厚く堆積し、南側は砂層が主体で層厚も薄いなど、低位段丘堆積層や完新統の分布・岩相に影響を与えている。

堆積盆地の輪郭を作った基盤の断層構造とは別に、盆地内の新しい地層を変位させているアクティブな構造が存在し、これが神戸と大阪で符合する。大阪湾を含む大阪堆積盆地内にはこれらと同じセンスの構造が複数存在すると予察される。神戸と大阪のこれらの変位速度は、Ma12層の堆積年代が13万年とすると、平均1.5～3 m/1万年程度である。

3. 表層部の地質特性を考慮した一次元地震応答解析

3.1 基盤の検討

地震応答解析を実施するにあたっては、基盤に入力する地震動を解析地点に応じて、より現実的なものとする必要がある。Kanai et al. (1959⁹⁾、1968¹⁰⁾によれば基盤地震動は地震時の震動予測の基準値として、予想される地震のマグニチュードと距離さえ与えれば、どの地点でも同一の波形が与えられるものと定義されている。さらに太田・嶋 (1967)¹⁰⁾は、地下の適当な深さでインピーダンス比のあまり大きくなならない地層境界に基盤面を想定し、そこに入射する地震波を考えるならば、震源からの距離のあまり遠くない地域では入射波はどこでも同じ波形を与えることができるとして、このような基盤面を地震基盤と呼ぶことを提案した。この地震基盤の概念は地質学的な意味での基盤とは異なって定義されていると考えるべきである。

また、太田・嶋は川崎市を対象とした基盤面設定として第三紀の泥岩層 ($V_s 700\text{m/s}$) を適当とした。道路橋示方書・V耐震設計編では粘土層でN値が25以上、砂層でN値50以上もしくは、 $V_s 300\text{m/s}$ 程度以上の地層上面としている。今回の検討では基盤面を以下のように設定した。

- ・Ma12層の下面
- ・Ma12層が存在しない場合は $V_s 350\text{m/s}$ 以上、あるいは砂層でN値50以上、粘土層でN値30以上の層の上面

3.2 入力地震動の検討

基盤入力地震動は今回の検討では図3.2.1に示す方法により基盤波を作成するものとした。すなわち、各機関において公表されている兵庫県南部地震の記録を収集し、それらを「SHAKE」によって基盤露頭波に変換する。これら基盤露頭波のSA (加速度応答スペクトル $h=0.05$) を計算し、比較する。比較検討の結果、共通の基盤入力波の基本スペクトルを設定する。設定した基本スペクトルを基に、適当な基盤波の一つを用い、その波形の位相を利用して基本スペクトルにスペクトルフィッティングさせ、基本基盤波を作成する。また、別途、既往研究結果より震源域を設定し距離減衰式より各解析地点の基盤最大加速度値を設定する。解析は入力加速度波形としては、作成した基本基盤波形を用い、その最大値を距離減衰式で求められた値を使用して実施するものである。

表3.2.1に基盤波の設定に用いる観測地震地点を示す。図3.2.2に観測地点の位置図を示す。

3.3 観測波の収集と「SHAKE」による基盤波への変換

表3.2.1に示した観測地震波は、関西地震観測研究協議会より入手したものであるが、この7地点を対象とした理由は以下の通りである。

- ①作成した地層断面の近傍にあり、地震加速度値が大きいもの
- ②観測点の柱状図などが比較的そろっているもの
- ③観測点の地盤状況がバラエティーに富んでいること

図3.3.1に「SHAKE」解析に用いた各地点の観測波形を示す。この波形のうちポートアイランドと東神戸大橋以外については、地表面の波形を用いて基盤波への変換を行った。ポートアイランドと東神戸

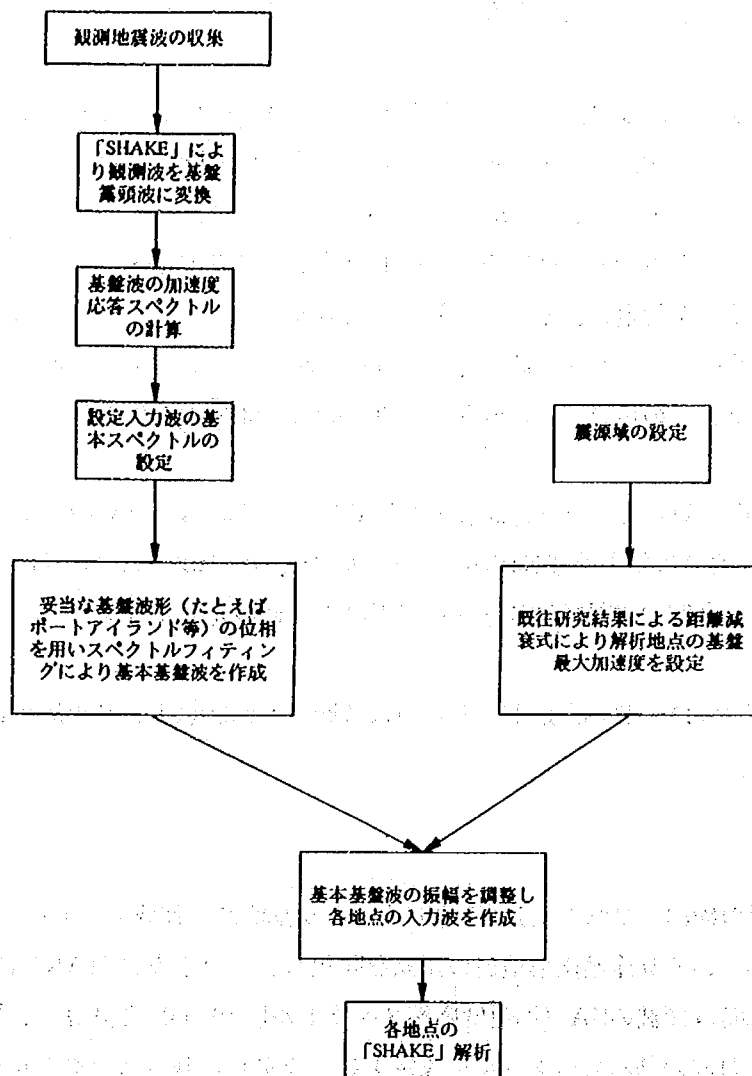


図-3.2.1 基盤波の作成方法

表-3.2.1 基盤波の設定に用いた観測地震波

観測地点	住所	位置		地表最大加速度(gal)		
		北緯	東経	NS	EW	UD
大阪瓦斯共合	神戸市中央区北本町	34° 41' 42"	135° 12' 39"	687	802	-
ポートアイランド	神戸市中央区港島	34° 40' 15"	135° 12' 39"	341	284	559
神戸海洋気象台	中央区楠谷町	34° 41' 20"	135° 10' 40"	818	617	332
東神戸大橋	神戸市東灘区	34° 42' 25"	135° 17' 43"	327	281	395
尼崎高架橋	尼崎市南城	34° 42' 38"	135° 25' 20"	265	294	324
新神戸変電所	神戸市灘区土山町	34° 43' 50"	135° 15' 00"	511	584	495
関電総合技術研究所	尼崎市若王子	34° 44' 35"	135° 26' 30"	299	507	205

- 1、作成した地層断面の近傍にあること
- 2、観測点の柱状図などが比較的そろっていること
- 3、観測点の地盤状況がバラエティーに富んでいること

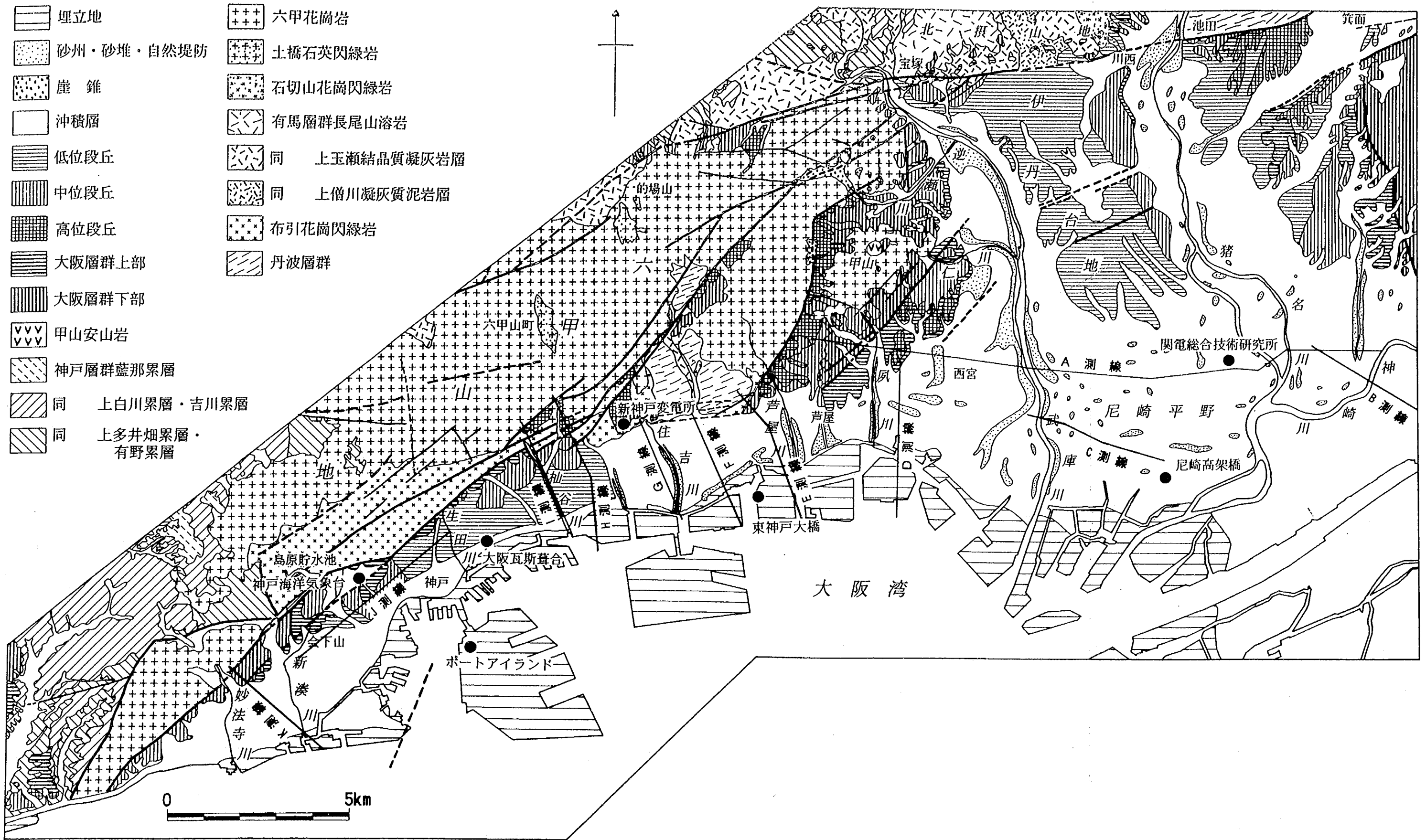
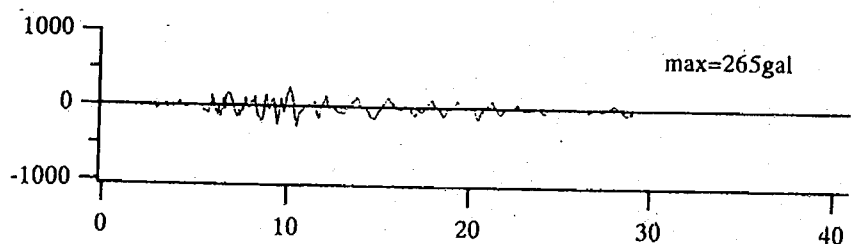
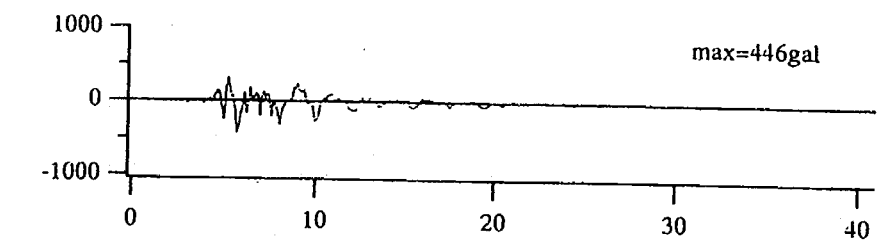
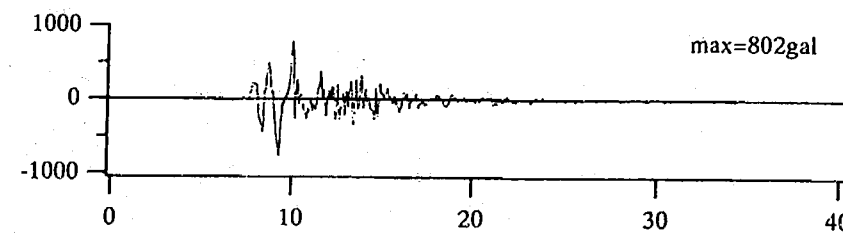
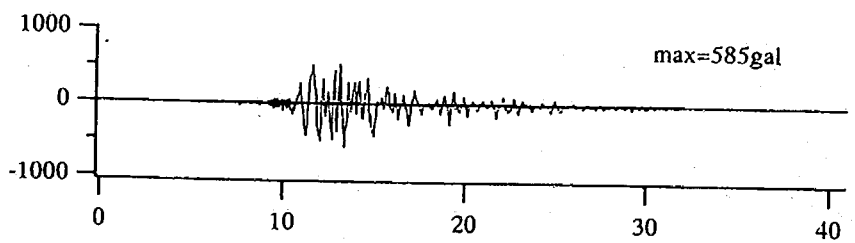
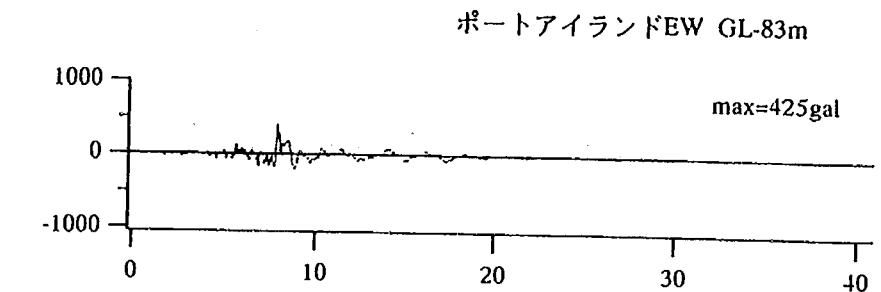
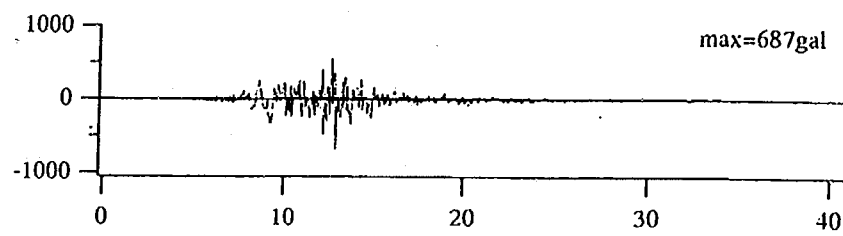
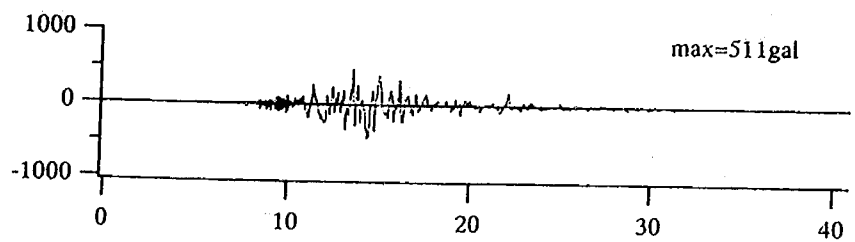
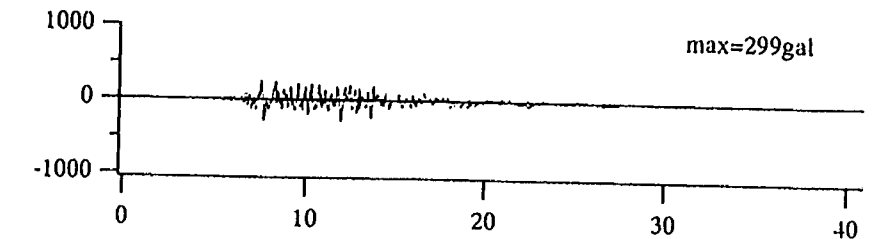
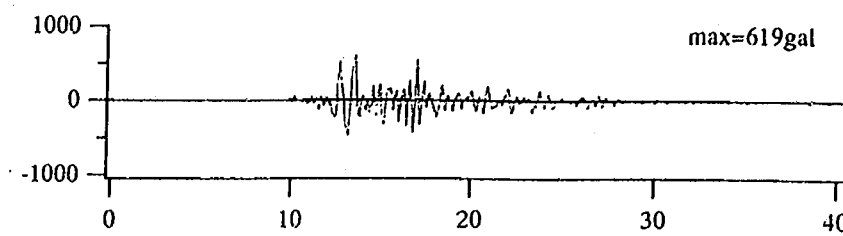
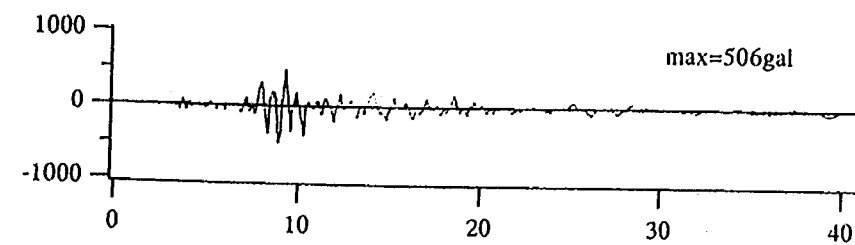
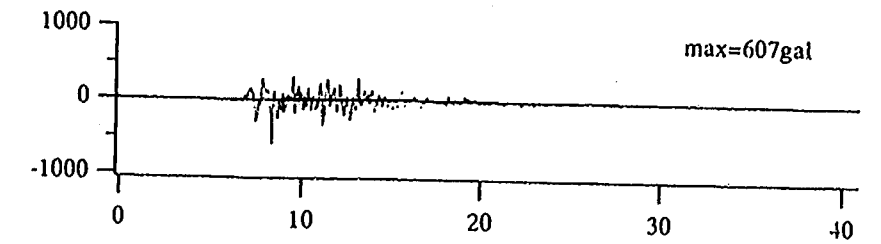
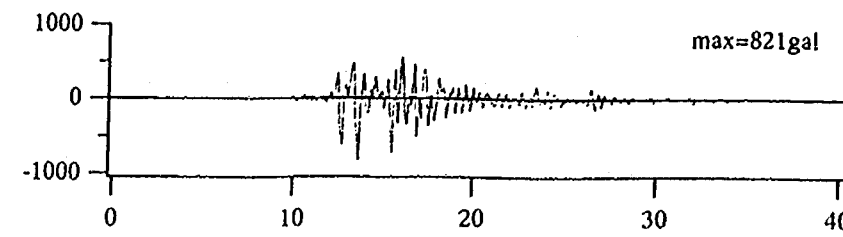
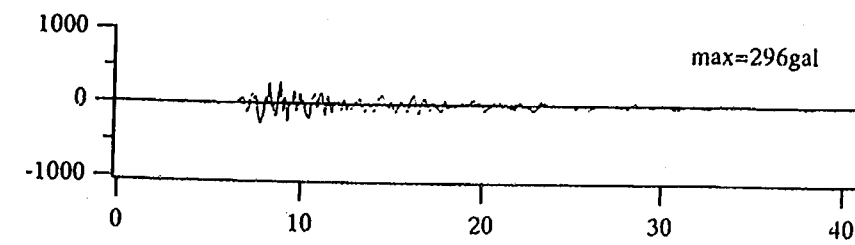


図-3.2.2 収集した地震波の観測地点と地質断面位置



大阪ガス葦合EW

東神戸大橋EW GL-33m

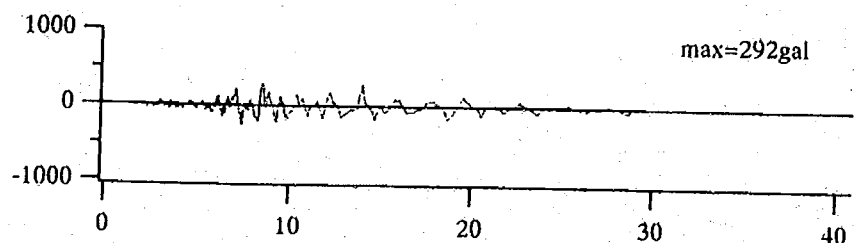


図-3.3.1 観測波形図

大橋では、基盤部 (GL-83m) および GL-33m 地点の波形を用いている。これは両地点の地表部では液状化が発生したとの報告もあり、地表面波を用いると液状化の影響で、等価線形法による「SHAKE」では、基盤波の変換に悪影響があると考えられるためである。

3.4 「SHAKE」概要

現在、地盤の地震応答解析プログラムとして多方面で利用されているのが「SHAKE」である。同プログラムは地震時における地盤の非線形性が等価線形で考慮されているという仮定を持つ 1 次元解析法ではあるものの、その使用の容易さから地震時の応答を推算するために頻繁に利用されている。

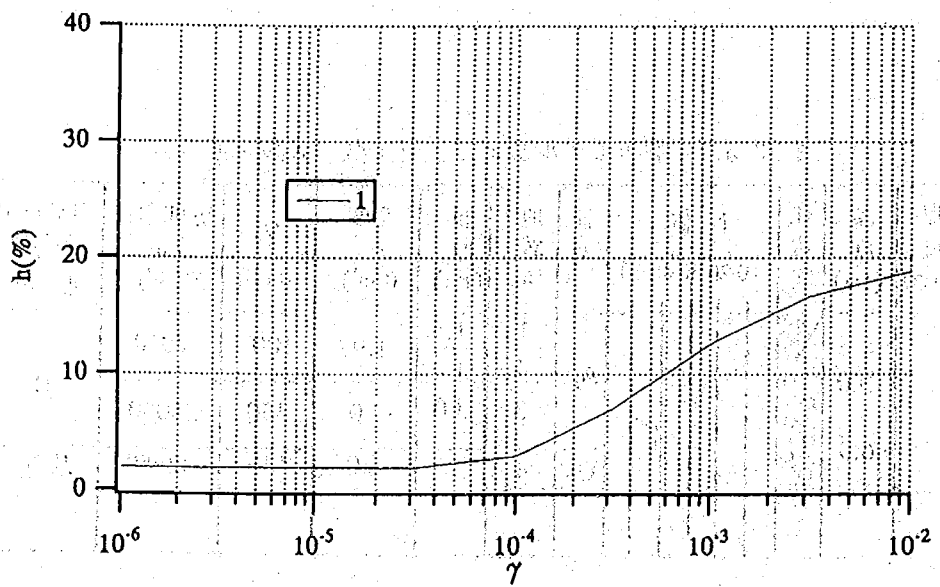
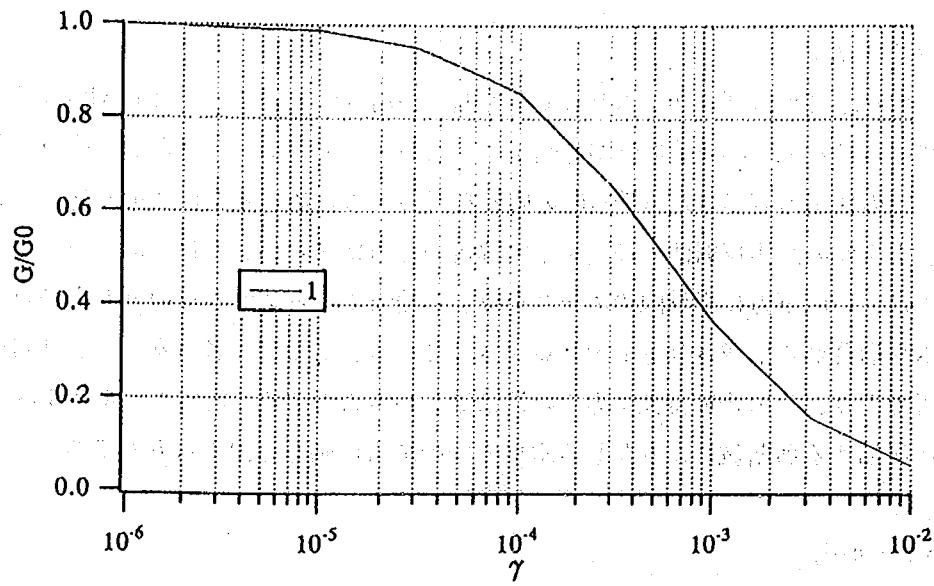
「SHAKE」は 1 次元の重複反射法の理論を数値解析のためにプログラム化したものである。したがって、計算モデルは、鉛直下方に半無限の広がりを持つ地盤である基盤とその上の水平方向に無限の広がりを持つ水平層群から構成されるものと見なされている。ここで、各 (水平) 層は同一層内において等方かつ均質であり、その物理特性や力学特性は等しいものとする。計算モデルは 1 次元モデルであり、鉛直方向に伝播する剪断波により生じる水平方向の地盤振動を算出するものである。

3.5 各地点のモデル化

各地点のモデル化は、地盤物性及び層構造については、資料に示されている場合はそれを用い、それがない場合は今回の地質調査での近傍の結果を用いることとした。表 3.5.1～表 3.5.7 に各観測地点の解析モデルを示す。また図 3.5.1～図 3.5.7 に各地層の非線形特性を示す。

表-3.5.1 解析モデルおよび土質定数 大阪瓦斯葺合

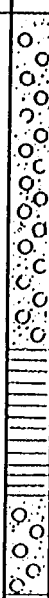
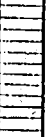
標尺 (m)	深度 (m)	柱状図	N 値					記号	地層 No.	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	V_s (m/s)	初期剛性 G_0 (t/m^2)	G/ $G_0 \sim \gamma$ 曲線 No.
			10	20	30	40	50							
	3.0							Ag	1	1.5	1.97	100	2010	①
									2	1.5				
	6.0								3	3.0	2.0	350	25000	
								Os	4		2.0	400	32650	基盤

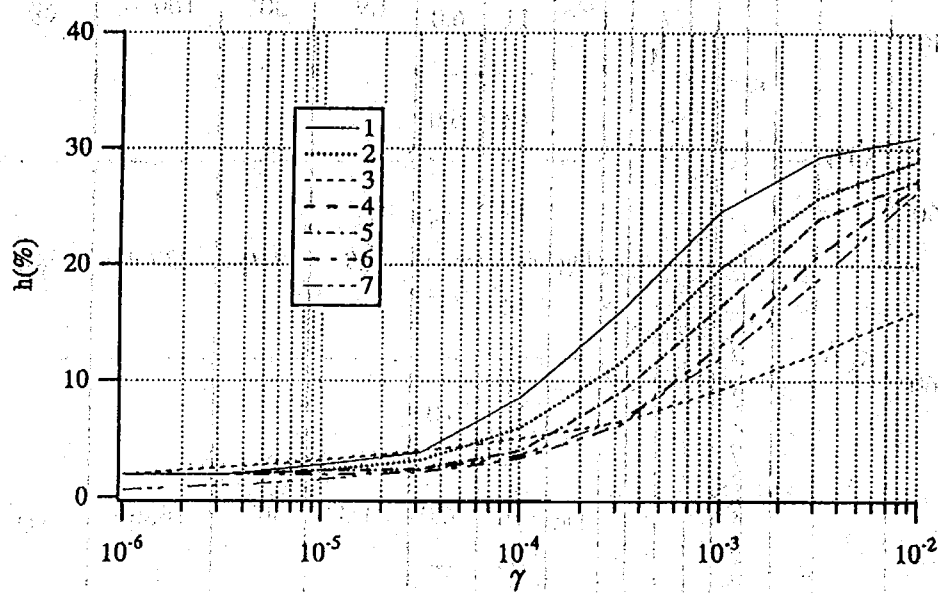
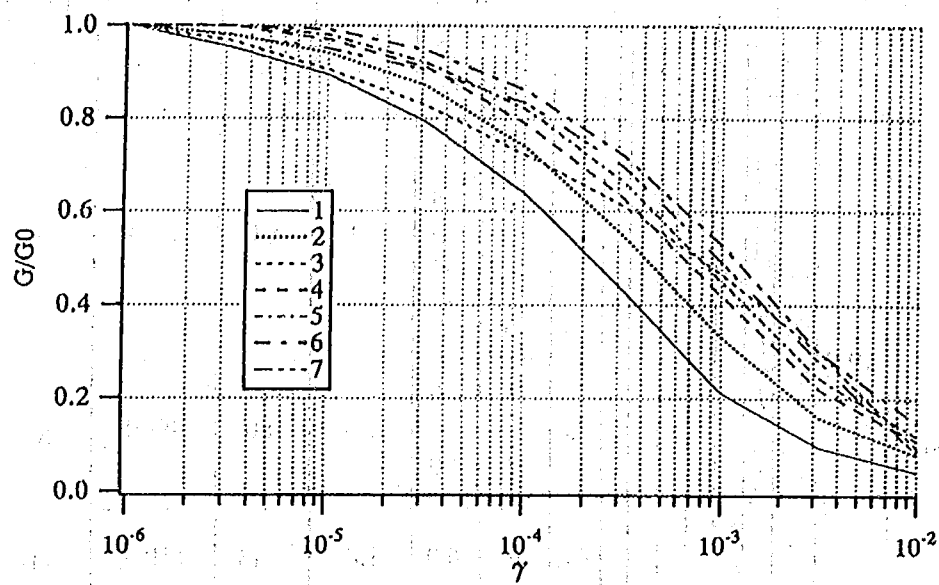


図中のNoは解析モデルの曲線Noに対応

図-3.5.1 非線形特性 (大阪瓦斯葺合)

表-3.5.2 解析モデルおよび土質定数 ポートアイランド

標尺 (m)	深度 (m)	柱狀圖	N 值					記号	地層 No.	層厚 (m)	密度 ρ (t/m ³)	Vs (m/s)	初期剛性 Go (tf/m ²)	G/Go~r h- γ 曲線No.
			10	20	30	40	50							
-0	-5.0							B	1	2.5	1.9	170	5600	①
									2	2.5				
									3	3.5	1.9	210	8550	②
									4	3.5				
									5	3.5				
									6	3.5				
-10	-19.0							Ac	7	4.0	1.5	180	4960	③
									8	4.0				
-20	-27.0							Ag	9	6.0	1.8	245	11030	④
									10	6.0				
									11	6.0				
-30	-33.0							Dg	12	5.0	1.9	305	18040	⑤
									13	5.5				
-40	-50.0							Dg	14	5.5	1.9	350	23750	⑥
									15	6.0				
-50	-61.0							Dc	16	6.0	1.8	303	16860	⑦
									17	6.0				
									18					

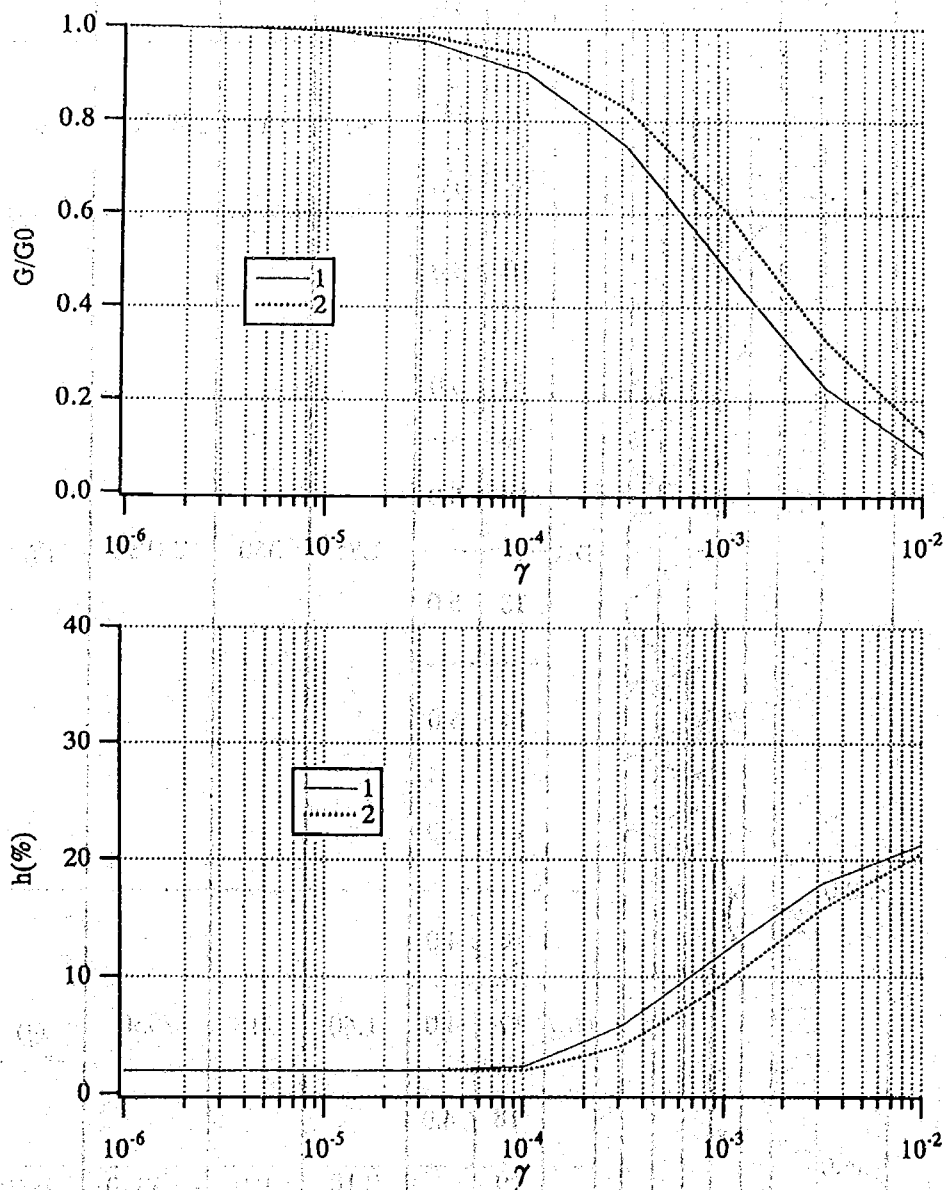


図中のNoは解析モデルの曲線Noに対応

図-3.5.2 非線形特性 (ポートアイランド)

表-3.5.3 解析モデルおよび土質定数 神戸海洋気象台

標尺 (m)	深度 (m)	柱狀圖	N 值					記 號	地 層 No.	層 厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	V_s (m/S)	初期剛性 G_0 (tf/m^2)	$G/G_0 \sim \gamma$ 曲線No.	
			10	20	30	40	50								
	4.0							Tmg	1	0.1	1.96	200	8000	①	
									3	1.5	1.96	250	12500		
									4	1.5					
	10.0								Os	5	2.0	1.97	300	18090	②
										6	2.0				
									Os	7	2.0	2.0	400	32650	基盤
										8					



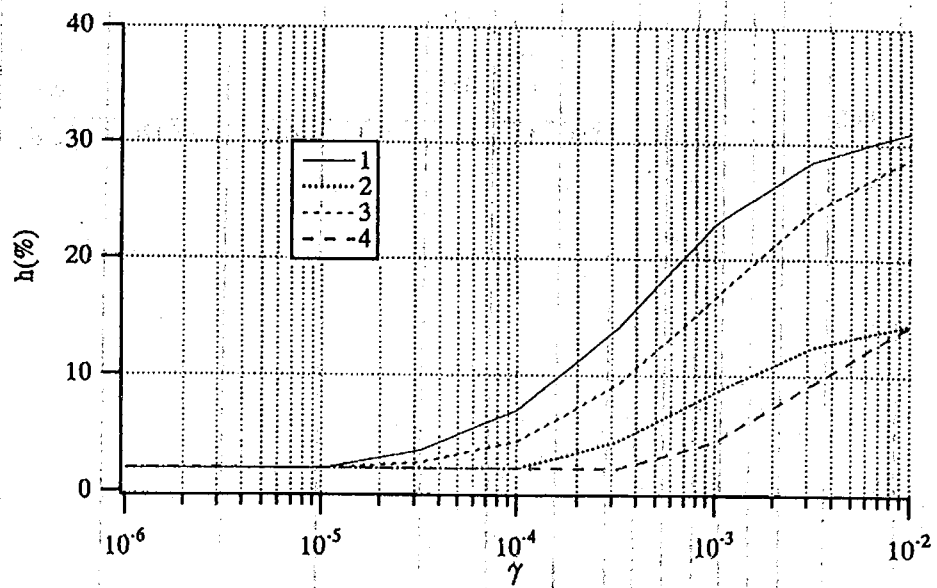
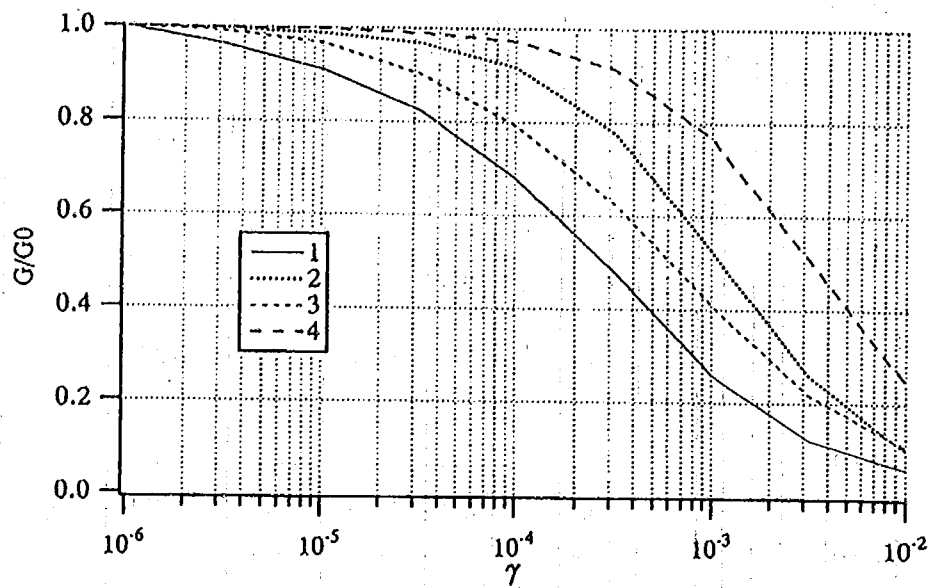
図中のNoは解析モデルの曲線Noに対応

図-3.5.3 非線形特性 (神戸海洋気象台)

表-3.5.4 解析モデルおよび土質定数 東神戸大橋

標尺 (m)	深度 (m)	柱状図	N 値					記号	地層 No.	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	V_s (m/s)	初期剛性 G_0 (tf/m^2)	G/ $G_0 \sim r$ h- γ 曲線No.
			10	20	30	40	50							
								B	1	3.0	1.90	190	7000	①
									2	3.0				
									3	3.0				
									4	3.0				
									5	3.0				
	15.0							Ac	6	2.0	1.50	135	2790	②
									7	2.0				
									8	2.0				
									9	2.0				
	23.0							Ds1	10	5.0	1.85	350	23130	③
									11	5.0				
									12	5.0				
									13	5.0				
									14	5.0				
									15	5.0				
	52.0							Mal2	16	4.0	1.60	215	7550	④
									17	4.0				
									18	4.0				
	64.0								19		2.10	460 (360)	45340 27800	基盤

入力位置

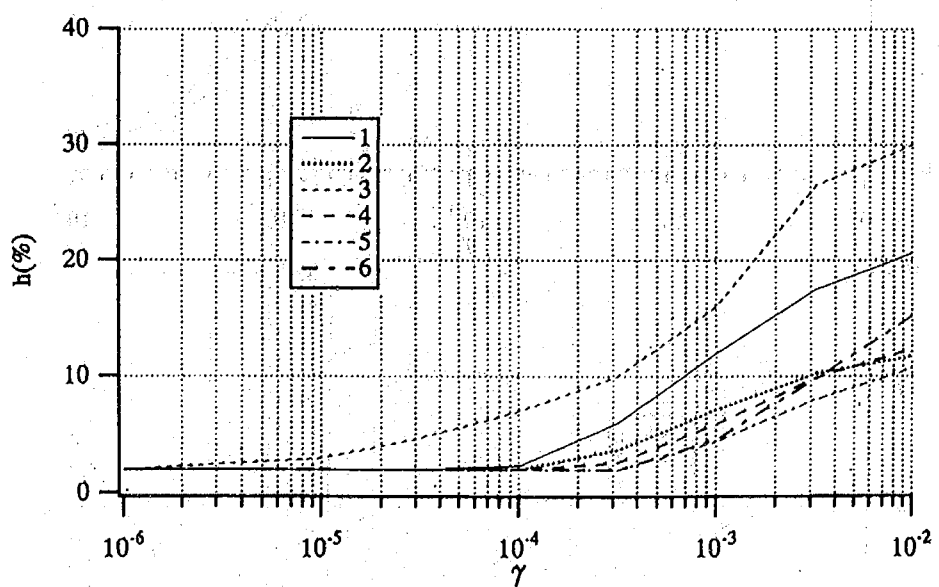
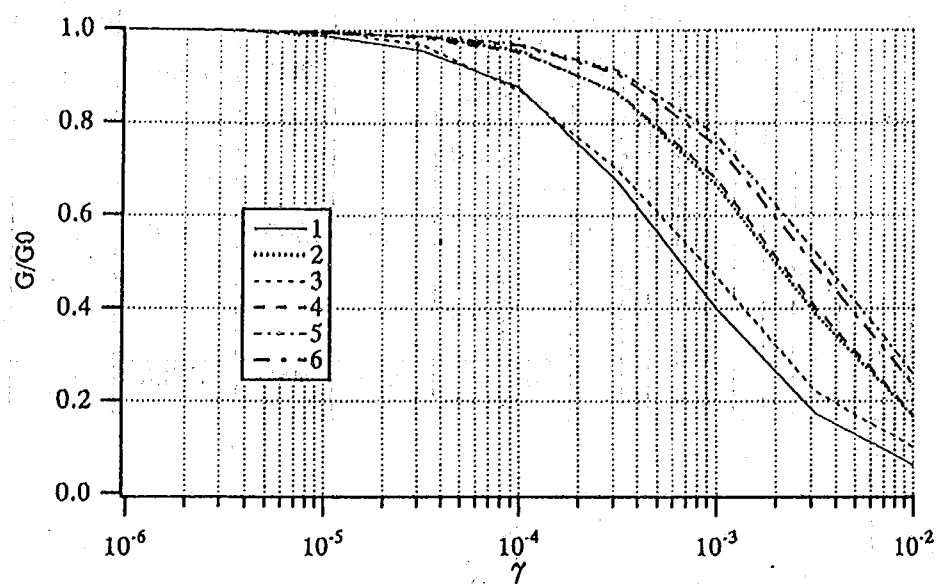


図中のNoは解析モデルの曲線Noに対応

図-3.5.4 非線形特性 (東神戸大橋)

表-3.5.5 解析モデルおよび土質定数 尾ヶ崎高架橋

標尺 (m)	深度 (m)	柱狀圖	N 值					記 号	地 層 No.	層 厚 (m)	密度 ρ (t/m ³)	Vs (m/S)	初期剛性 Go (tf/m ²)	G/Go~r h- γ 曲線No.
			10	20	30	40	50							
	-10.0							As	1	2.5	1.83	170	5400	①
							2		2.5					
							3		2.5					
							4		2.5					
	-19.0							Ac	5	2.5	1.56	140	3120	②
							6		2.5					
							7		2.0					
							8		2.0					
	-23.0							Ag1	9	4.0	2.10	395	33400	③
								Ma12	10	3.0	1.6	190	5890	④
							11		3.0	⑤				
							12		3.0					
							13		3.0					
							14		3.0					⑥
	-38.0							Tmg	15		2.1	410	36020	基盤

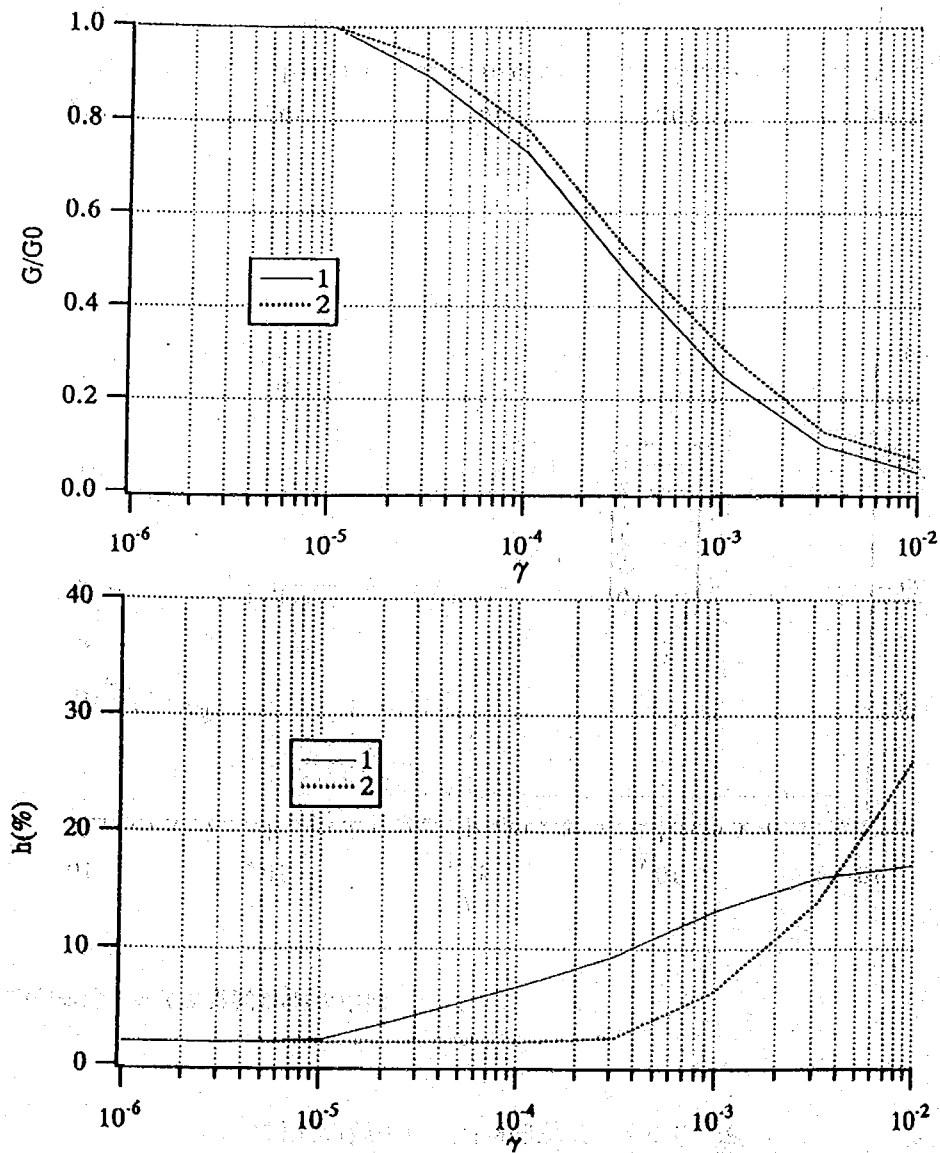


図中のNoは解析モデルの曲線Noに対応

図-3.5.5 非線形特性 (尼崎高架橋)

表-3.5.6 解析モデルおよび土質定数 新神戸変電所

標尺 (m)	深度 (m)	柱状図	N 値 10 20 30 40 50	記号	地層 No.	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	V_s (m/s)	初期剛性 G_0 (t/m^2)	$G/G_0 \sim \gamma$ 曲線No.
	3.0			B	1	1.5	1.9	200	7760	①
					2	1.5				
					3	2.0				
				Gr	4	2.5	2.0	300	18370	②
					5	2.5				
	10.0			Gr	6		2.10	450	43400	基盤

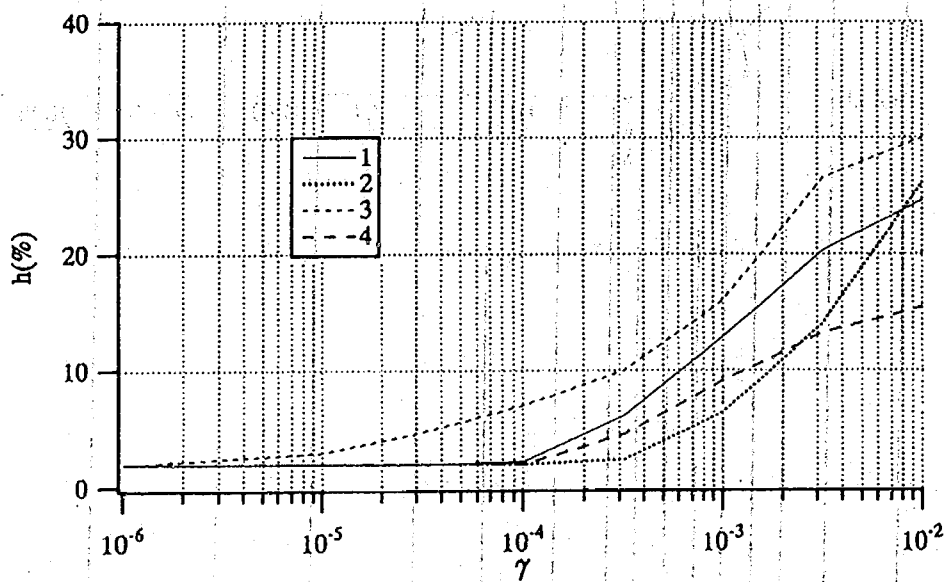
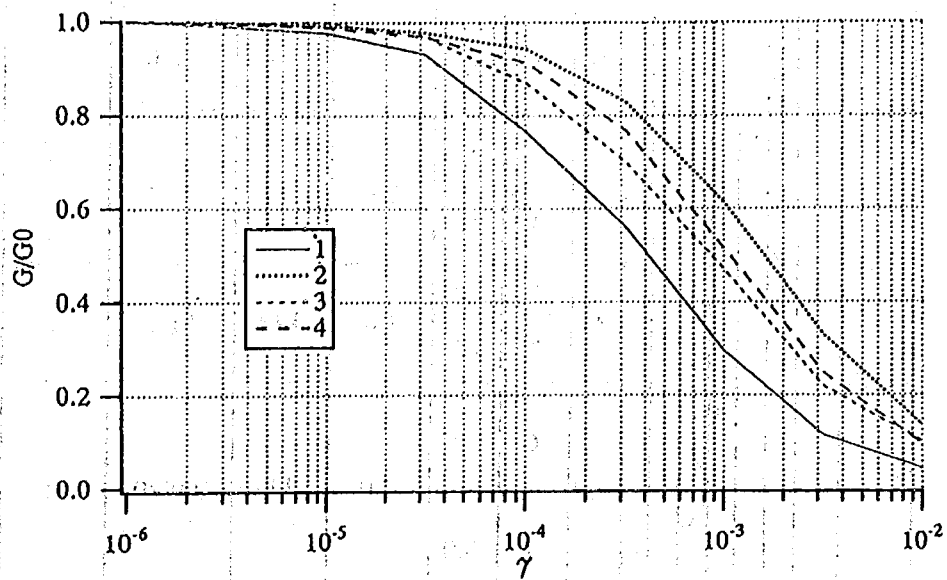


図中のNoは解析モデルの曲線Noに対応

図-3.5.6 非線形特性 (新神戸変電所)

表-3.5.7 解析モデルおよび土質定数 関電総合技術研究所

標尺 (m)	深度 (m)	柱狀圖	N 值					記 号	地 層 No.	層 厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	V_s (m/S)	初期剛性 G_0 (tf/m^2)	G/ $G_0 \sim r$ h- γ 曲線No.	
			10	20	30	40	50								
	-2.5							B	1	2.5	1.4	98	1370	①	
								As	2	2.5	1.7	117	2375		
									3	2.0					
	-7.0							Ac	4	1.5	1.6	149	3625	②	
									5	2.0					
	-10.5							Ag1	6	3.5	2.0	342	23870	③	
									7	3.0					
	-17.0							Ma12	8	3.5	1.86	250	11860	④	
									9	3.5					
	-24.0								10		2.1	470	47540	基盤	



図中のNoは解析モデルの曲線Noに対応

図-3.5.7 非線形特性 (関電総合技術研究所)

3.6 基盤波形のスペクトル特性

図3.6.1には各地点の基盤波の加速度波形及びその加速度応答スペクトルを全て重ねたものを示す。この図から各地点の基盤のスペクトルはどの地点でも、またどの方向でもおおむね同様のスペクトル形状を示していることがわかる。このことは、今回の地震においても、金井、太田らの地震基盤の考え方の正当性を示している。図3.6.1には、この結果より全体の平均的なスペクトルとして設定したものも示す。

このスペクトルを用い強震記録をポートアイランドの基盤波とした振幅特性の調整を行った。図3.6.2には基準波形、調整波形、スペクトル図を示す。

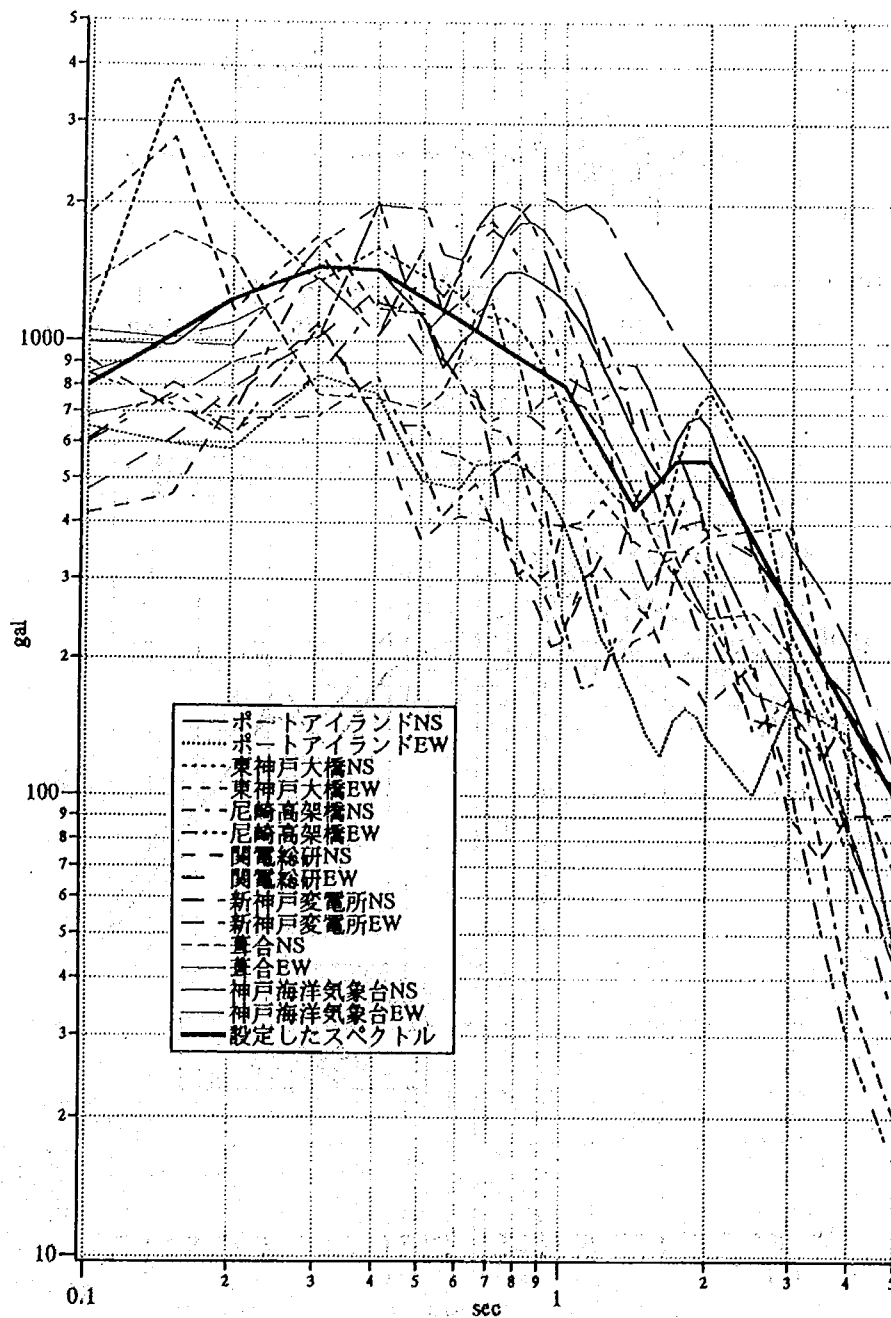
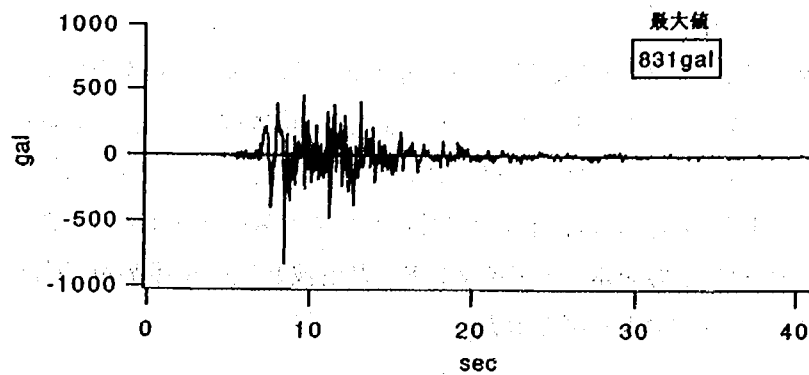
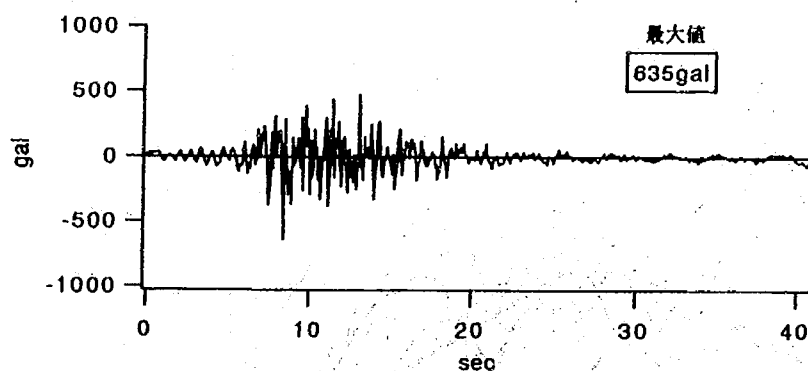


図-3.6.1 基盤波の加速度応答スペクトル



基準波形 (ポートアイランド基盤波)



調整波形

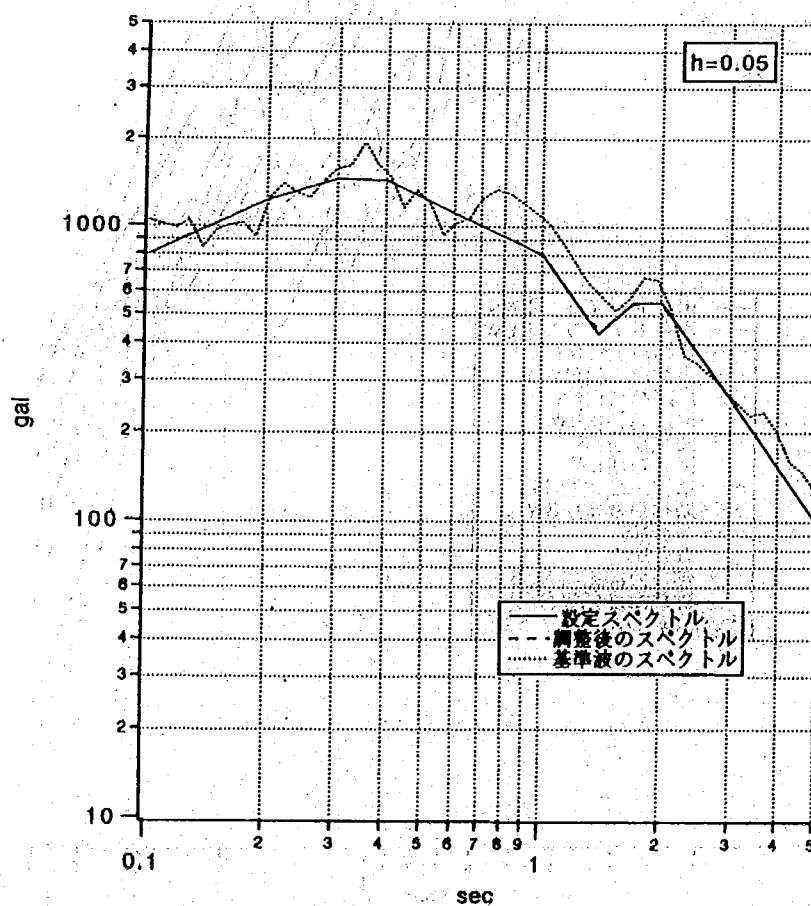


図-3.6.2 加速度応答スペクトルと波形

3.7 震源断層及び距離減衰

基本の加速度波形が決定したので、次に各解析地点の基盤の最大加速度値を設定し、基本加速度波形の最大値をそれに合わせてやれば入力波が決定する。最大加速度値を決定するには震源を設定し、地震基盤での加速度を決めるための距離減衰式を設定する必要がある。

土岐ほか(1995)¹¹⁾は断層面を設定し、最大加速度Aの距離減衰式として、水平鉛直成分とも同形の式(1)を用いた。Bは伝播経路の内部減衰を表す係数である。

$$\log A = -\log X_{eq} - B X_{eq} + C \cdots (1)$$

これは最大加速度の距離減衰特性に関する項を幾何減衰項と内部減衰項に分離したもので、全無限媒質に点震源をおいた場合について理論的に誘導される。式中の X_{eq} は等価震源距離と呼ばれ、これを一般的な震源距離や断層最短距離等の代わりに用いることにより、断層近傍から遠方まで統一的に取り扱うことが可能となる。

図3.7.1に X_{eq} の概念図を示す。同計算においては断層面を関口ほか(1995)¹²⁾の断層位置を直線化して用いた(図3.7.2)。この中で関口は、観察された断層と観測された地震記録波形のインバージョン解析により震源断層を決定している。この断層位置はその他の断層モデルや震源の位置とほぼ一致しており、基盤の最大加速度を決定するに十分なモデルと考えられる。断層の南西端地表面(北緯31.52, 東経134.90)を原点として、40×15kmの断層面を1km四方のセグメントに分割して、各セグメントにおける解放地震モーメントは等しいとして、各セグメント中心から観測点までの X_{ij} から次式により求めている。

$$\frac{1}{(X_{eq})^2} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{1}{(X_{ij})^2}}{N \times M} \cdots (2)$$

ここでは $N=40$, $M=15$ である。

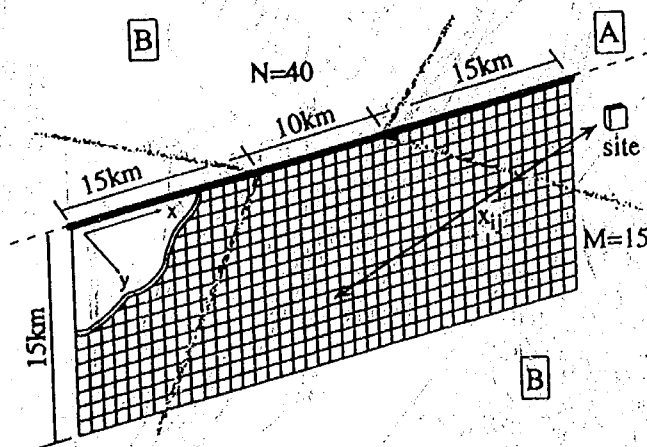
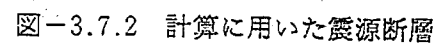


図-3.7.1 X_{eq} の概念図



3.8 解析概要

地盤の地層状況が水平方向にほぼ同じように連続した場合、一次元の地震応答解析により地盤の地震応答をシミュレートすることができる。この場合、表層地盤や基礎地盤の傾斜の影響は考慮されないが、表層地盤の一次元的な応答特性を把握することはできる。

今回の検討では、A～Kまでの断面のうちPS検層及び土質試験を実施した断面を中心として、8断面、80地点について一次元モデルを作成し、「SHAKE」を実施した。結果は、地表面の最大加速度、最大速度、最大変位、SI、地盤の固有振動数等について地点ごとにまとめた。

3.9 解析地点及び解析モデル

図3.9.1に凡例を、図3.9.2～図3.9.9には、断面図と解析地点を示し基盤線も合わせて示してある。解析する断面はA、C、D、E、F、G、J、Kとし、各断面に9～15点の解析地点を設けた。

解析モデル及び定数は、地質断面図、PS検層結果、動的変形特性試験結果から適宜設定した。すなわち今回実施したボーリング地点については、PS検層結果及び動的特性試験があるので、その値からモデル定数を設定したが、ボーリング地点以外の点ではそれらを基に地質断面図の層区分ごとに物性値、動的特性を区分し、それを用いてモデル定数の設定をしている。ただし、今回礫層において、動的特性試験が不可能であった層については既往研究結果より引用して設定した。

地層区分一覽

地質時代	記号	地 質 区 分
第 四 紀	現世	B 盛土・埋土層
	完 新 世	A s 沖積砂層
		A c 沖積粘土層
		A g 沖積礫層
		Agf 沖積礫層(扇状地堆積層)
		Ag1,2 沖積礫層(天満礫層相当)
	更 新 世	T t g 低位段丘堆積層礫層
		T t c 低位段丘堆積層粘土層
		T m g 中位段丘堆積層礫層
		T m c 中位段丘堆積層粘土層
		M a l l 上部洪積層粘土層
		O s 大阪層群砂層
		O c 大阪層群粘土層

図-3.9.1 地層断面図凡例

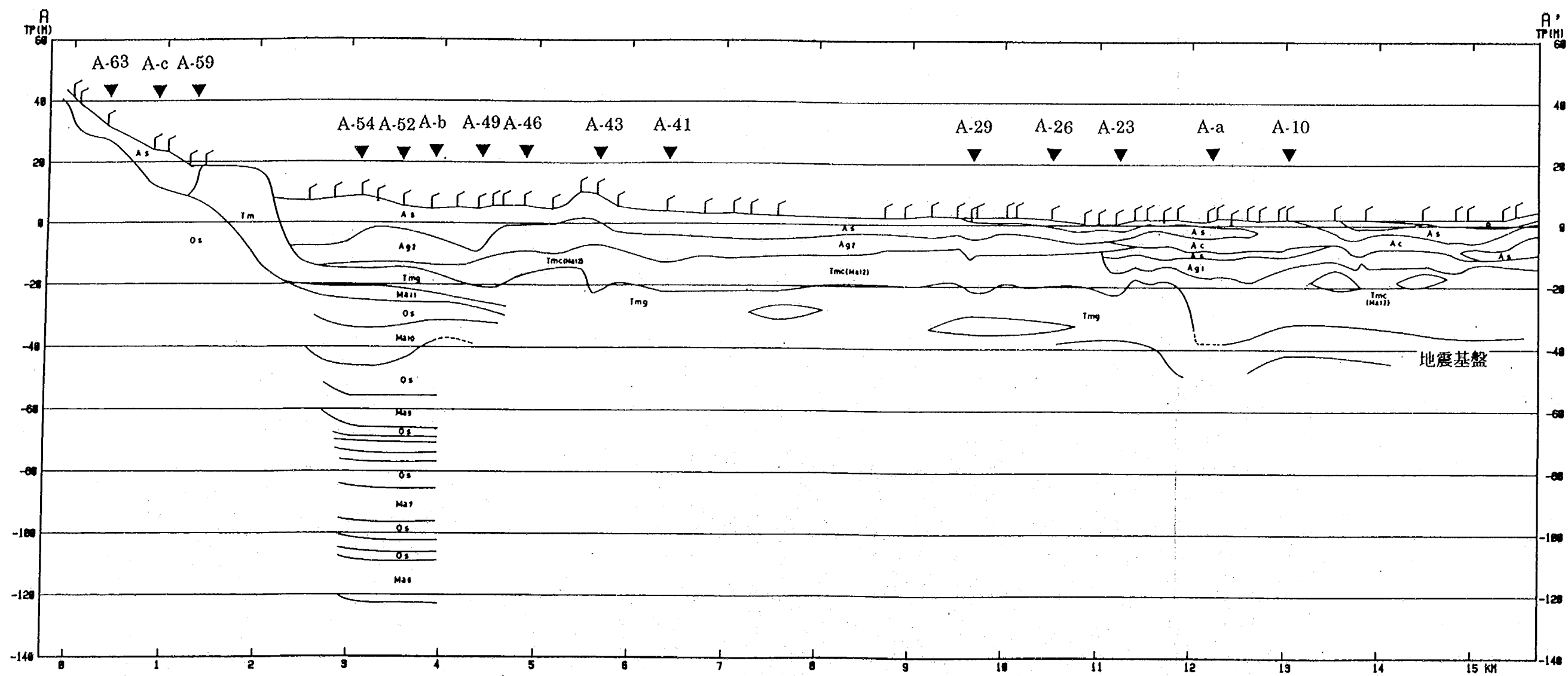


图-3.9.2 「SHAKE」解析地点 (A断面)

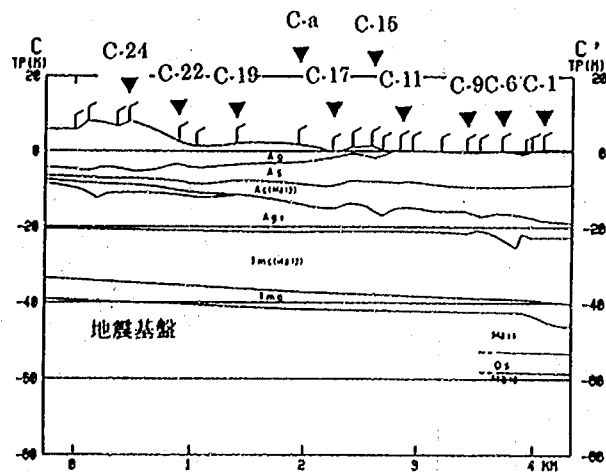


圖-3.9.3 「SHAKE」解析地点 (C断面)

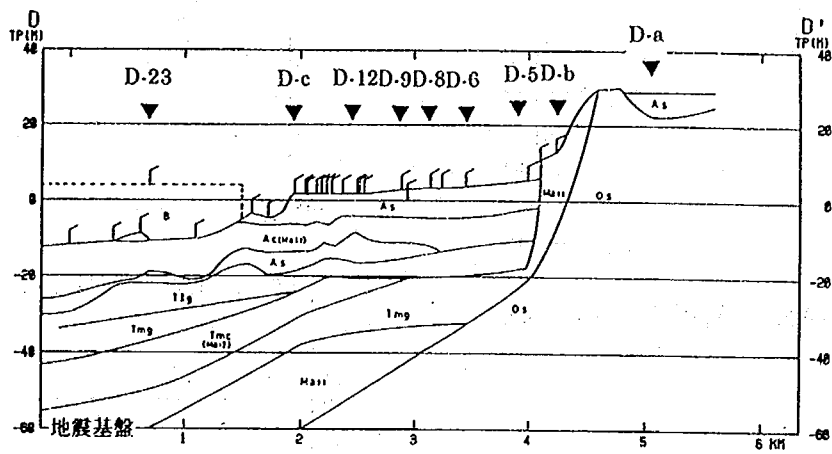


圖-3.9.4 「SHAKE」解析地点 (D断面)

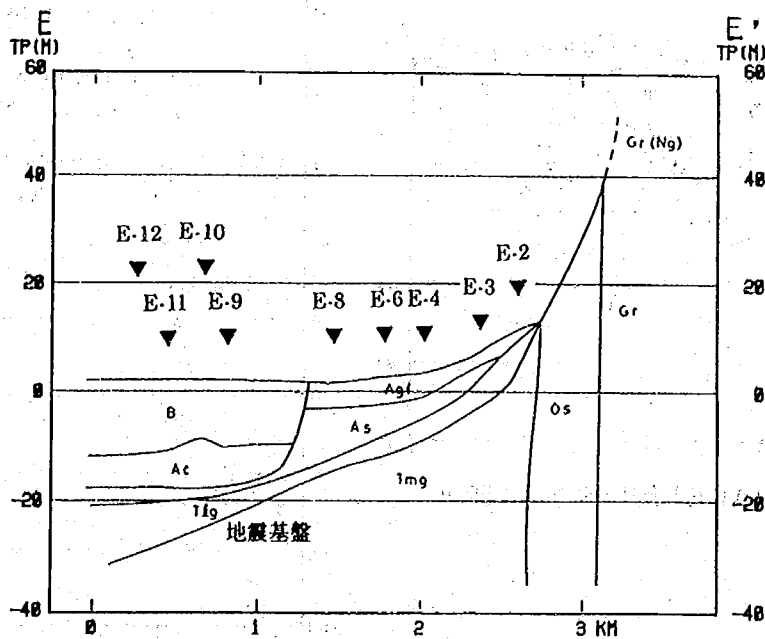


圖-3.9.5 「SHAKE」解析地点 (E断面)

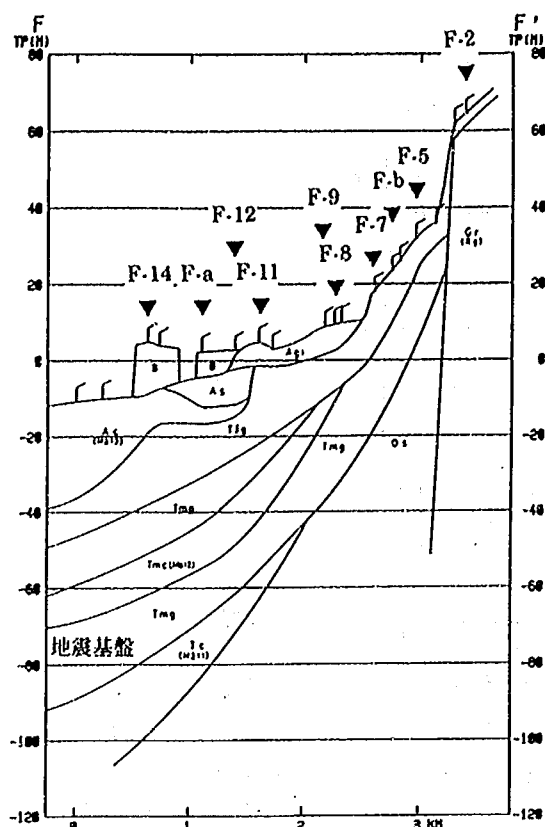


图-3.9.6 「SHAKE」解析地点 (F断面)

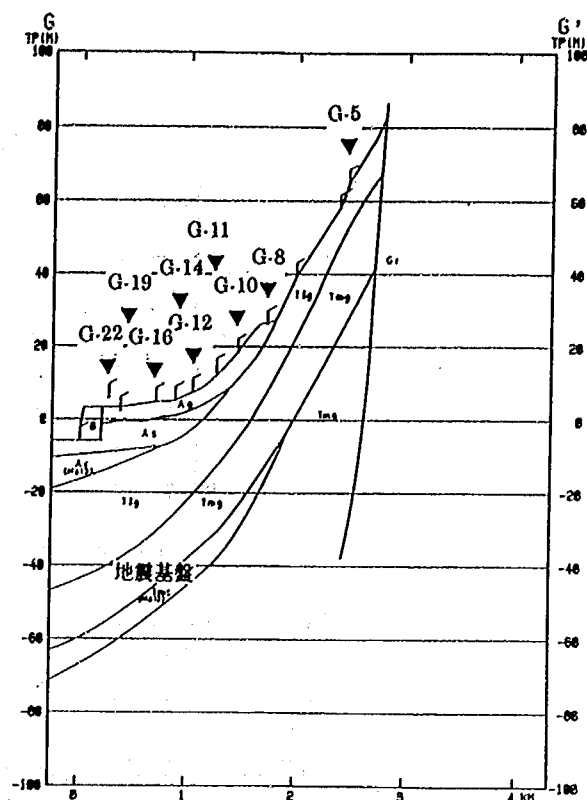


图-3.9.7 「SHAKE」解析地点 (G断面)

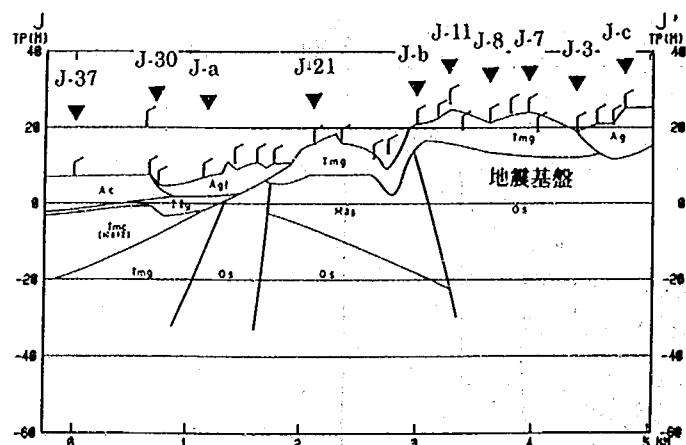


图-3.9.8 「SHAKE」解析地点 (J断面)

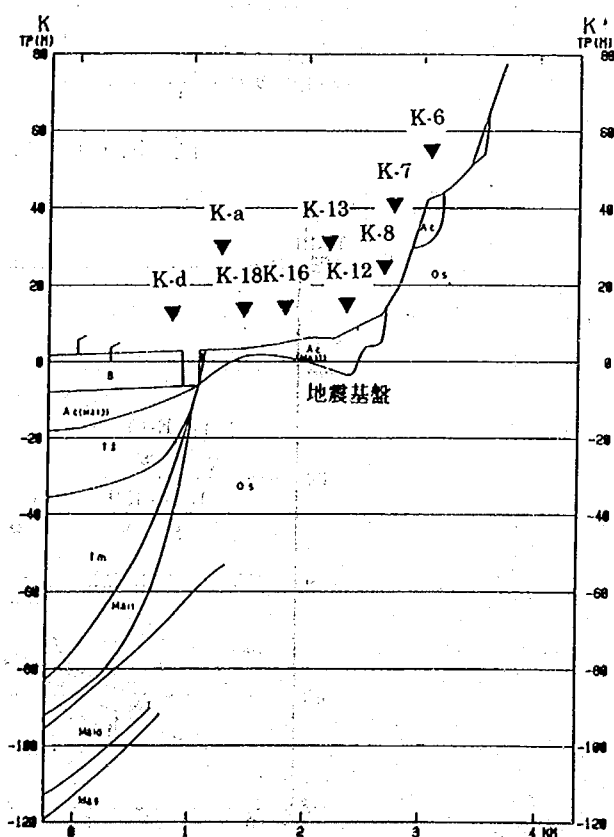


图-3.9.9 「SHAKE」解析地点 (K断面)

3.10 入力地震動波形及び基盤の最大加速度

一次元解析に用いる入力地震動波形は、3. 2で設定した波形を用いた。図3.10.1に入力加速度波形図を示す。また、各地点での基盤の最大加速度は3. 7で記述した手法により計算して設定した。

表3.10.1及び表3.10.2に各点の基盤の最大加速度を示す。この最大加速度値および入力地震動波形は基盤露頭面のものである。

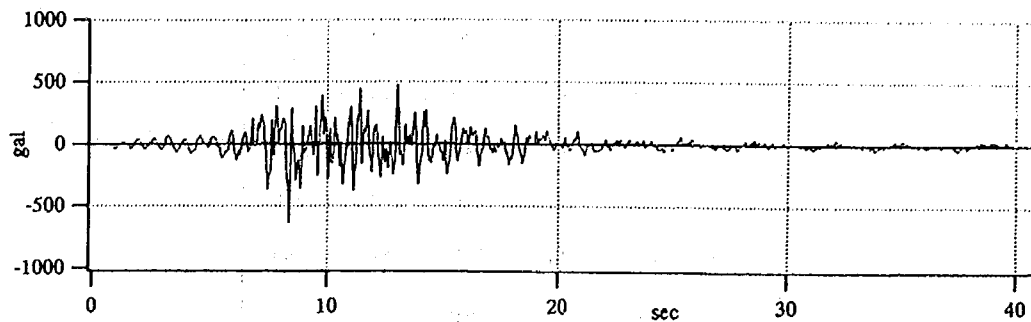


図-3.10.1 入力加速度波形図

表-3.10.1 各点の基盤最大加速度 (A～F)

地点	基盤最大加速度(gal)	地点	基盤最大加速度(gal)	地点	基盤最大加速度(gal)	地点	基盤最大加速度(gal)	地点	基盤最大加速度(gal)
A-10	267	C-1	312	D-a	519	E-2	688	F-2	776
A-a	279	C-6	318	D-b	519	E-3	685	F-5	754
A-23	292	C-9	330	D-5	519	E-4	674	F-b	748
A-26	303	C-11	337	D-6	519	E-6	669	F-7	745
A-29	315	C-15	343	D-8	519	E-8	658	F-8	733
A-41	443	C-17	353	D-9	519	E-9	642	F-9	730
A-43	459	C-a	359	D-12	519	E-10	639	F-11	714
A-46	480	C-19	371	D-c	519	E-11	631	F-12	708
A-49	491	C-22	382	D-23	519	E-12	629	F-a	699
A-b	498	C-24	394					F-14	683
A-52	510								
A-54	519								
A-59	561								
A-c	570								
A-63	582								

表-3.10.2 各点の基盤最大加速度 (G~K)

地点	基盤最大加速度(gal)	地点	基盤最大加速度(gal)	地点	基盤最大加速度(gal)
G-5	804	J-c	820	K-6	821
G-8	793	J-3	820	K-7	821
G-10	789	J-7	820	K-8	821
G-11	786	J-8'	820	K-12	821
G-12	781	J-11	820	K-13	821
G-14	778	J-b	820	K-16	821
G-16	776	J-21	820	K-18	810
G-19	771	J-a	820	K-a	794
G-22	764	J-30	820		
		J-37	820		

3.11 解析結果

表3.11.1~表3.11.8に一次元解析の結果を一覧表とした。表にはまず各測線の起点と終点の北緯、東経を示している。ここで起点は断面図の左端になっており、南北の測線では南側、東西の測線では西側となっている。

次に表では、①地点名、②起点からの測線距離、③基盤に入力した加速度の最大値、④地表面の最大加速度値、⑤地表面の最大速度値、⑥地表面の最大変位値、⑦SI、⑧初期剛性による地盤の卓越周期、⑨収束剛性による地盤の卓越周期、⑩地表面の加速度応答スペクトルの卓越周期、を各解析地点ごとに示している。地表面の最大速度は、「SHAKE」の解析では直接計算されないで、加速度波形を積分して求めている。変位は基盤との相対変位である。

地震被害と地表面の最大加速度を対比して検討することはよく行われるが、観測された加速度記録の最大値は加速度計の特性または計器の設置状況により建築物や土木構造物の振動には直接結びつかないような高振動成分（ノイズ成分）によって決まってしまう場合がある。そこで、土木研究所では地震応答スペクトル強度SI値を提案している。今回の検討では一次元解析で得られた加速度波形よりSIを計算して求めている。ただし、今回のように一次元解析の結果得られた地表面の最大加速度値は10Hz以上の高周波成分をカットしたものであり、観測波のようにノイズ成分で最大値が決まるようなことはない。

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} Sv(T, h=0.20) dT$$

ここでSI：地震応答スペクトル強度 (cm)

Sv：速度応答スペクトル (cm/sec)

T : 固有周期 (sec)

h : 減衰定数

ここで地盤の卓越周期と、地表面の加速度応答スペクトルの卓越周期について説明を行う。初期剛性による地盤の卓越周期は、常時微動における地盤の卓越周期に対応する。収束剛性による地盤の卓越周期は、地震時の地盤の卓越周期ということになる。地盤の定数は地震時には非線形性により低下し、結果的に収束剛性による固有周期は初期剛性のものよりも長くなる。基盤に入力された地震動は表層地盤内を透過、散逸、反射を繰り返しながら地表面に到達する。この関係は、入力地震動に、あるフィルターをかけることで地表面の地震動を決定することと等価である。このフィルターは、表層地盤の物理特性によって決定されるが、初期剛性及び収束剛性による地盤の卓越周期は、このフィルターのピークの周期である。このフィルターを伝達関数といい、一次元解析「SHAKE」により計算される。すなわち地表面のスペクトルは入力波のスペクトルに伝達関数をかけたものである（図3.11.1）。

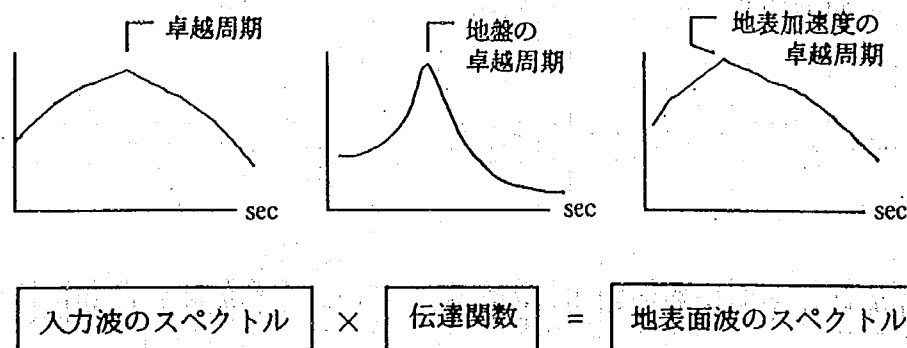


図-3.11.1入力波スペクトル，伝達関数，地表面波のスペクトルの関係

表-3.11.1 SHAKE解析結果一覧表 (A測線)

A断面 No.	基点位置 地点	北緯 基点距離 (km)	34度44分55秒 基盤最大加速度 (gal)	東経 地表面最大加速度 (gal)	135度19分05秒 地表面最大速度 (cm/sec)	終点位置 地表面最大変位 (cm)	北緯 SI (cm)	34度44分45秒 地盤固有周期 初期(sec)	東経 地盤固有周期 収束(sec)	135度29分30秒 応答スペクトル 卓越周期(sec)
1	A-10	13.29	267	384	40.601	4.708	118.583	0.55	0.84	0.65
2	A-a	12.39	279	312	43.913	5.521	110.173	0.64	0.98	0.65
3	A-23	11.46	292	348	41.518	3.971	107.422	0.37	0.83	0.65
4	A-26	10.78	303	346	42.650	3.829	105.835	0.33	0.82	0.65
5	A-29	9.97	315	348	46.055	4.502	110.356	0.38	0.91	0.95
6	A-41	6.62	443	557	52.961	4.079	161.400	0.36	0.62	0.55
7	A-43	5.87	459	572	60.139	5.257	164.091	0.42	0.75	0.40
8	A-46	5.09	480	594	60.983	3.768	171.794	0.31	0.55	0.55
9	A-49	4.60	491	526	68.932	6.342	164.881	0.41	0.90	0.70
10	A-b	4.29	498	608	61.081	4.359	182.010	0.34	0.61	0.55
11	A-52	3.79	510	677	70.153	4.091	198.286	0.28	0.54	0.55
12	A-54	3.34	519	570	70.862	6.245	173.093	0.38	0.82	0.65
13	A-59	1.46	561	669	67.315	3.191	182.611	0.22	0.47	0.40
14	A-c	1.02	570	644	68.674	3.663	187.528	0.25	0.52	0.55
15	A-63	0.58	582	696	66.840	1.551	185.634	0.16	0.29	0.30

表-3.11.2 SHAKE解析結果一覧表 (C測線)

C断面 No.	基点位置 地点	北緯 基点距離 (km)	34度43分00秒 基盤最大加速度 (gal)	東経 地表面最大加速度 (gal)	135度25分25秒 地表面最大速度 (cm/sec)	終点位置 地表面最大変位 (cm)	北緯 SI (cm)	34度43分45秒 地盤固有周期 初期(sec)	東経 地盤固有周期 収束(sec)	135度22分45秒 応答スペクトル 卓越周期(sec)
16	C-1	4.43	312	276	52.845	6.320	113.406	0.84	1.20	0.95
17	C-6	4.08	318	306	52.529	5.636	117.552	0.79	1.11	0.95
18	C-9	3.56	330	375	60.911	6.575	132.606	0.84	1.12	0.95
19	C-11	3.36	337	378	60.279	6.549	133.677	0.83	1.09	0.95
20	C-15	2.95	343	375	61.988	6.786	136.233	0.84	1.13	0.95
21	C-17	2.60	353	397	62.737	6.916	140.557	0.80	1.09	0.95
22	C-a	2.32	359	425	66.312	8.137	159.056	0.84	1.15	0.55
23	C-19	1.74	371	405	65.620	10.298	170.699	0.80	1.17	0.65
24	C-22	1.24	382	303	71.177	12.142	169.283	0.78	1.22	0.95
25	C-24	0.82	394	136	63.118	25.029	76.167	0.91	2.97	1.00

表-3.11.3 SHAKE解析結果一覧表 (D測線)

D断面	基点位置	北緯	34度42分05秒	東経	135度20分20秒	終点位置	北緯	34度45分00秒	東経	135度20分00秒
No.	地点	基点距離 (km)	基盤最大加速度 (gal)	地表面最大加速度 (gal)	地表面最大速度 (cm/sec)	地表面最大変位 (cm)	SI (cm)	地盤固有周期 初期(sec)	地盤固有周期 収束(sec)	応答スペクトル 卓越周期(sec)
26	D-a	5.22	519	606	61.784	4.838	177.574	0.39	0.67	0.40
27	D-b	4.49	519	576	65.115	3.298	175.596	0.13	0.53	0.55
28	D-5	4.15	519	239	83.200	20.742	175.418	0.55	1.97	1.90
29	D-6	3.61	519	250	78.565	21.521	155.451	0.50	2.18	2.00
30	D-8	3.31	519	251	78.439	21.428	155.644	0.50	2.18	2.00
31	D-9	3.04	519	251	79.600	19.086	172.714	0.50	1.89	1.80
32	D-12	2.66	519	267	87.178	13.881	177.158	0.42	1.46	1.70
33	D-c	2.19	519	257	86.021	25.157	158.106	0.66	2.31	2.00
34	D-23	1.25	519	242	91.219	29.424	153.117	1.12	2.42	2.00

表-3.11.4 SHAKE解析結果一覧表 (E測線)

E断面	基点位置	北緯	34度42分10秒	東経	135度18分30秒	終点位置	北緯	34度44分10秒	東経	135度17分25秒
No.	地点	基点距離 (km)	基盤最大加速度 (gal)	地表面最大加速度 (gal)	地表面最大速度 (cm/sec)	地表面最大変位 (cm)	SI (cm)	地盤固有周期 初期(sec)	地盤固有周期 収束(sec)	応答スペクトル 卓越周期(sec)
35	E-2	2.58	688	715	76.523	1.247	210.276	0.13	0.22	0.30
36	E-3	2.43	685	729	75.584	0.922	201.184	0.15	0.21	0.20
37	E-4	2.04	674	823	76.227	2.600	217.836	0.21	0.35	0.40
38	E-6	1.85	669	798	78.786	3.484	215.421	0.25	0.45	0.40
39	E-8	1.48	658	684	75.169	4.406	207.489	0.31	0.58	0.55
40	E-9	0.83	642	241	93.993	30.644	150.877	0.69	2.49	2.00
41	E-10	0.74	639	259	96.118	28.147	168.513	0.69	2.33	2.00
42	E-11	0.41	631	229	90.979	29.452	144.323	0.76	2.50	2.00
43	E-12	0.36	629	231	91.280	29.643	145.057	0.77	2.52	2.00

表-3.11.5 SHAKE解析結果一覧表 (F測線)

F断面	基点位置	北緯	34度41分55秒	東経	135度17分30秒	終点位置	北緯	34度43分55秒	東経	135度16分35秒
No.	地点	基点距離 (km)	基盤最大加速度 (gal)	地表面最大加速度 (gal)	地表面最大速度 (cm/sec)	地表面最大変位 (cm)	SI (cm)	地盤固有周期 初期(sec)	地盤固有周期 収束(sec)	応答スペクトル 卓越周期(sec)
44	F-2	3.58	776	723	90.067	6.501	240.678	0.12	0.74	0.65
45	F-5	3.15	754	840	93.907	4.420	250.838	0.12	0.49	0.40
46	F-b	2.94	748	678	103.827	11.652	251.128	0.23	0.97	0.95
47	F-7	2.78	745	848	98.363	7.547	286.652	0.22	0.63	0.55
48	F-8	2.44	733	875	85.233	3.550	239.152	0.28	0.41	0.40
49	F-9	2.36	730	867	89.024	5.016	246.949	0.37	0.52	0.40
50	F-11	1.77	714	748	90.898	7.529	222.199	0.64	0.82	0.70
51	F-12	1.56	708	340	116.250	18.252	231.197	0.74	1.45	1.70
52	F-a	1.21	699	304	111.249	20.819	229.544	0.80	1.68	1.70
53	F-14	0.81	683	234	109.210	43.481	133.791	1.07	2.91	2.50

表-3.11.6 SHAKE解析結果一覧表 (G測線)

G断面	基点位置	北緯	34度42分30秒	東経	135度16分10秒	終点位置	北緯	34度44分20秒	東経	135度15分15秒
No.	地点	基点距離 (km)	基盤最大加速度 (gal)	地表面最大加速度 (gal)	地表面最大速度 (cm/sec)	地表面最大変位 (cm)	SI (cm)	地盤固有周期 初期(sec)	地盤固有周期 収束(sec)	応答スペクトル 卓越周期(sec)
54	G-5	2.61	804	1014	91.589	3.431	266.036	0.17	0.37	0.40
55	G-8	1.94	793	876	87.753	2.619	238.567	0.23	0.34	0.40
56	G-10	1.67	789	866	89.831	4.020	245.903	0.29	0.44	0.40
57	G-11	1.47	786	877	90.221	4.323	248.157	0.30	0.47	0.40
58	G-12	1.25	781	846	90.701	5.595	252.084	0.36	0.59	0.55
59	G-14	1.09	778	818	89.134	6.129	249.856	0.39	0.65	0.55
60	G-16	0.91	776	669	101.591	9.568	240.781	0.45	0.91	0.95
61	G-19	0.57	771	381	121.706	19.146	237.004	0.55	1.46	1.70
62	G-22	0.23	764	318	112.772	26.072	226.657	0.66	1.92	1.80

表-3.11.7 SHAKE解析結果一覧表 (J測線)

J断面	基点位置	北緯	34度40分00秒	東経	135度9分25秒	終点位置	北緯	34度41分50秒	東経	135度12分00秒
No.	地点	基点距離 (km)	基盤最大加速度 (gal)	地表面最大加速度 (gal)	地表面最大速度 (cm/sec)	地表面最大変位 (cm)	SI (cm)	地盤固有周期 初期(sec)	地盤固有周期 収束(sec)	応答スペクトル 卓越周期(sec)
63	J-c	5.18	820	976	89.038	0.569	232.401	0.08	0.13	0.15
64	J-3	4.82	820	1005	125.000	12.276	310.214	0.28	0.82	0.65
65	J-7	4.19	820	939	98.439	5.129	268.242	0.31	0.50	0.40
66	J-8'	3.85	820	954	91.965	3.535	254.459	0.27	0.39	0.40
67	J-11	3.52	820	973	93.588	3.938	263.843	0.28	0.41	0.40
68	J-b	3.19	820	1003	93.080	3.721	266.426	0.24	0.39	0.40
69	J-21	2.34	820	966	92.775	2.842	257.061	0.24	0.33	0.40
70	J-a	1.45	820	1185	121.170	6.229	327.385	0.13	0.49	0.40
71	J-30	0.92	820	1112	95.918	1.790	270.264	0.20	0.24	0.30
72	J-37	0.23	820	1055	127.736	12.577	303.249	0.39	0.84	0.65

表-3.11.8 SHAKE解析結果一覧表 (K測線)

K断面	基点位置	北緯	34度38分35秒	東経	135度9分55秒	終点位置	北緯	34度40分00秒	東経	135度8分10秒
No.	地点	基点距離 (km)	基盤最大加速度 (gal)	地表面最大加速度 (gal)	地表面最大速度 (cm/sec)	地表面最大変位 (cm)	SI (cm)	地盤固有周期 初期(sec)	地盤固有周期 収束(sec)	応答スペクトル 卓越周期(sec)
73	K-6	3.84	821	390	123.846	31.686	270.007	0.51	1.95	1.90
74	K-7	3.51	821	885	127.611	12.307	287.703	0.28	0.92	0.95
75	K-8	3.40	821	1173	118.902	6.211	324.352	0.23	0.49	0.40
76	K-12	3.12	821	678	141.410	17.213	308.825	0.39	1.14	0.95
77	K-13	2.97	821	1010	128.361	13.234	311.695	0.34	0.86	0.65
78	K-16	2.71	821	963	124.765	12.432	308.416	0.31	0.84	0.65
79	K-18	2.40	810	864	88.360	4.872	234.948	0.33	0.57	0.55
80	K-a	2.20	794	964	88.292	3.347	240.439	0.25	0.40	0.40
81	K-d	1.20	790	281	116.383	39.262	175.704	0.57	2.58	2.00

3.12 解析結果図

図3.12.1に各測線での収束剛性による地盤卓越周期、土地表面と基盤の最大加速度の比(地表/基盤)およびSIとの関係を示す。この図から地盤の卓越周期が長いほど加速度の比(増幅倍率)およびSIは小さくなる傾向が読みとれる。地盤の固有周期が長いということはS波速度が遅く、表層厚が厚い地層の特徴であり、今回の解析においては標高5m以下の海岸低地の沖積層海成堆積物の区域が地盤の卓越周期の長い地域と考えられる。つまり、海岸低地部では地盤の非線形性が発揮され加速度は増幅されず、むしろ減少した可能性がある。

図3.12.2には地表面加速度応答スペクトルの卓越周期と地表面最大加速度の関係を示す。この図から地表面最大加速度が800galを越すような場合、そのスペクトルの卓越周期は0.4~0.5秒程度であることがわかる。また、周期が長くなるほど最大加速度値は小さくなっている。このことから震度7を越す地域での地震動の周期特性はほぼ0.4~0.5秒程度に卓越周期を持ち、構造物の周期がそれに一致した場合には、被害が増大したであろうことが想像される。

早川・仲野(1996)¹³⁾は神戸市内で常時微動観測を行い地震被害との関係を検討している。その結果「超震度7の地域には常時微動の卓越周期が1.0秒付近の長周期がなく、0.2~0.3秒の短周期のみが卓越する傾向にある」としている。図3.12.3に初期剛性による地盤の卓越周期と地表最大加速度の関係を示すがここでは600galを越す加速度では地盤の卓越周期は0.2~0.3秒程度にあり、早川らの測定結果と一致している。このこと理由としては、常時微動レベルで卓越周期0.2~0.3秒の地盤では地震時には、土の非線形性により卓越周期は0.4~0.5秒程度になる。入力地震動のスペクトル特性は3.6で示したように0.3~0.4秒にピークを持ち、地盤の卓越周期とほぼ一致したため加速度値が増大したものと考えられる。

図3.12.4にF測線断面図を例として地表面最大変位、最大加速度分布、最大速度分布とSIを重ねた図を示す。これらの図からも海岸低地の海成堆積物の区域ではSIは他の区域に比較して小さくなっている。これは、被害の特徴と一致している。最大変位については最大加速度と逆の傾向があり、これは地盤が軟弱になれば変位は増大するわけであり当然の結果である。また、最大速度については、各地点であまり明確な差は現れていない。今回の震災では液状化の被害等を別にすれば被災の帯は、最大加速度値及びSIとの相関がよいようである。

図3.12.5及び図3.12.6には全測線での地表面の最大加速度及びSIの値を平面的にプロットした。

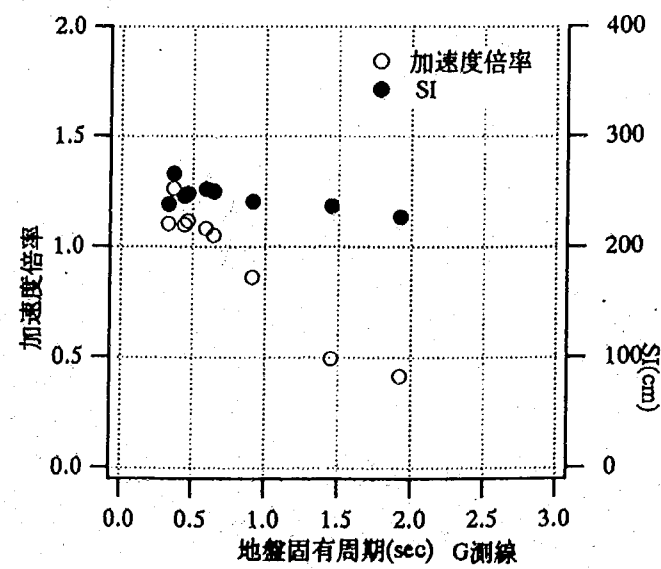
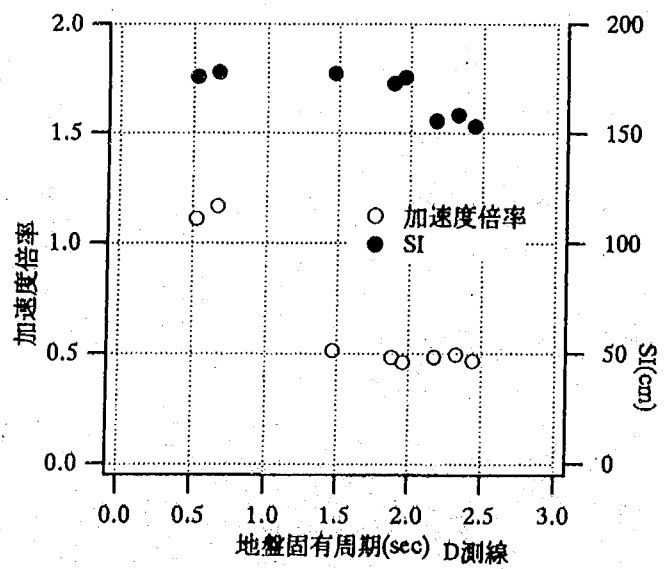
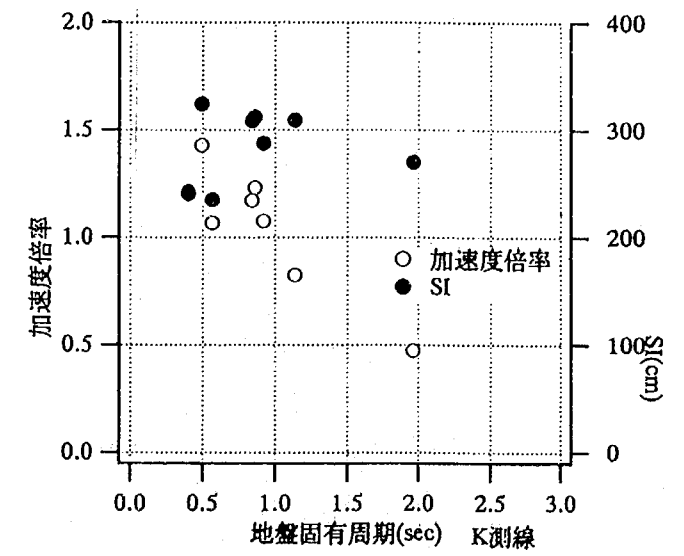
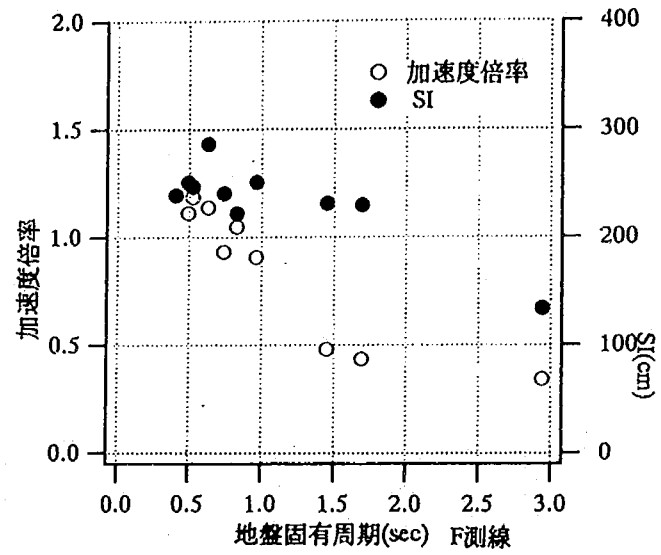
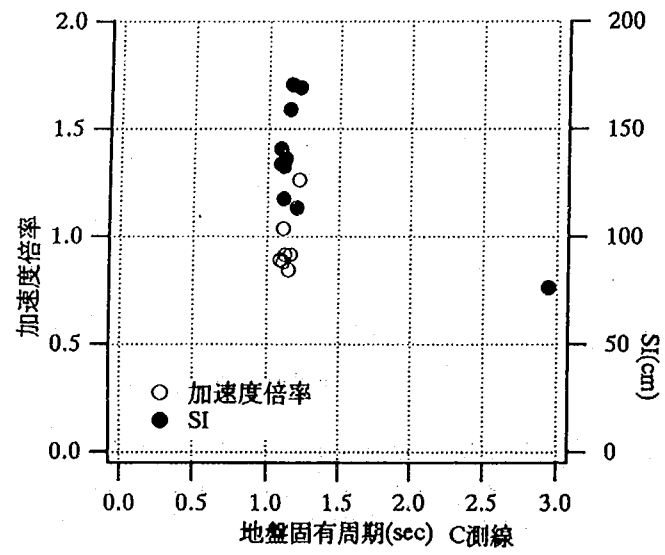
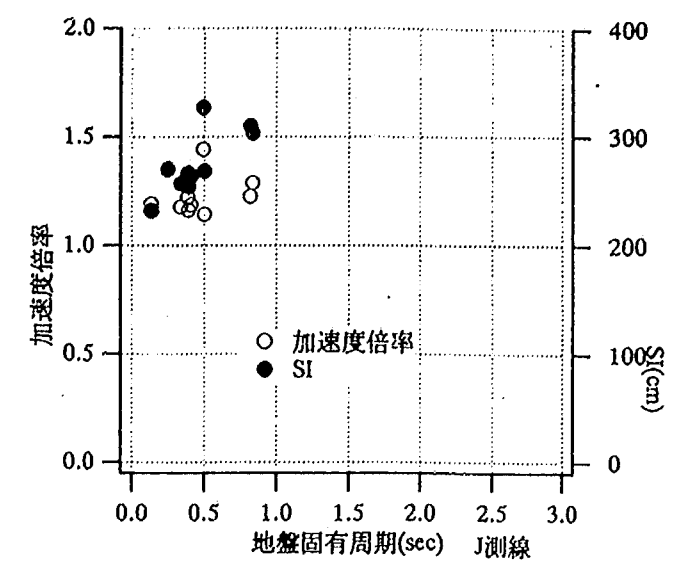
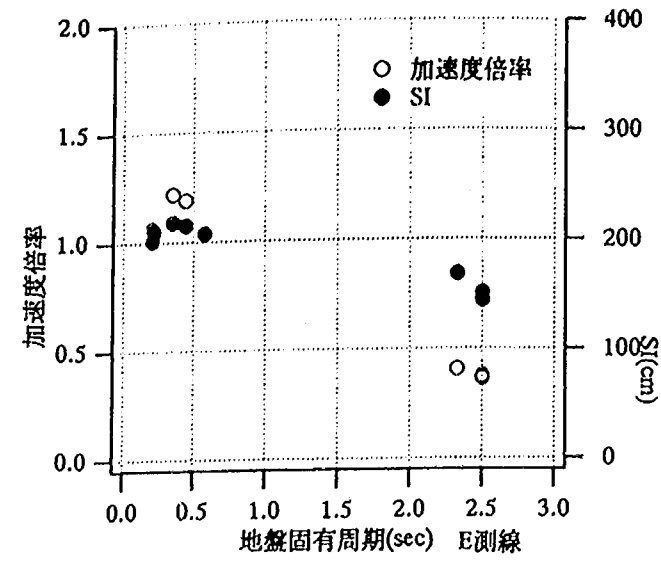
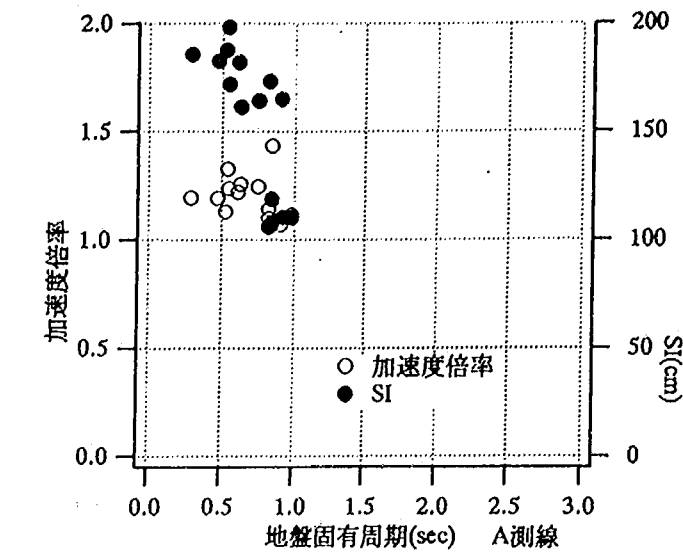


図-3.12.1 地盤固有周期（収束剛性）と地表面と基盤の最大加速度比、SIの関係

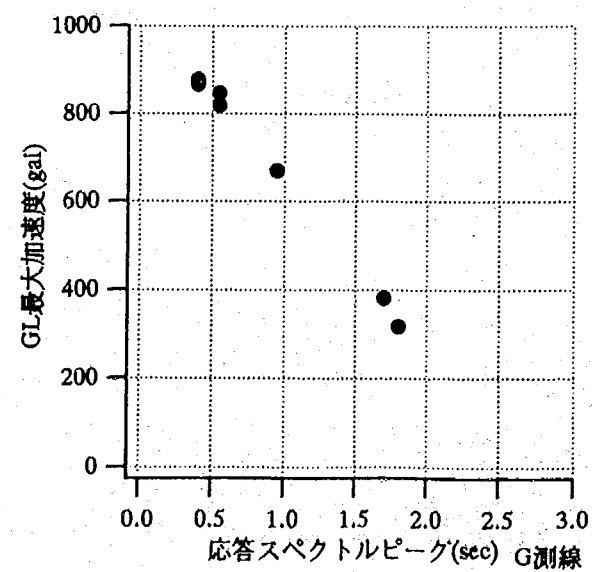
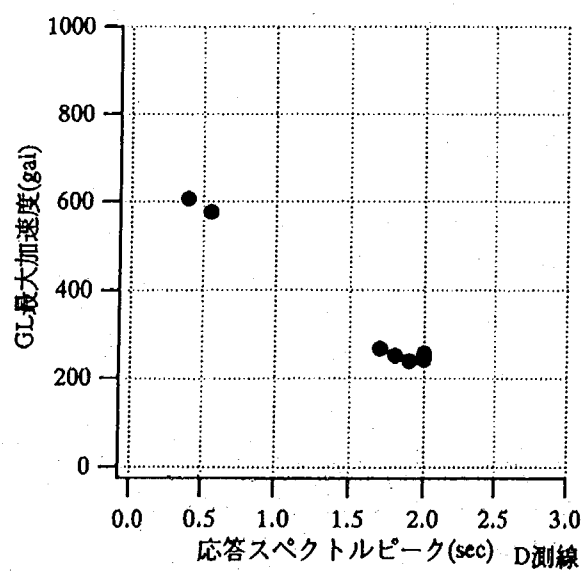
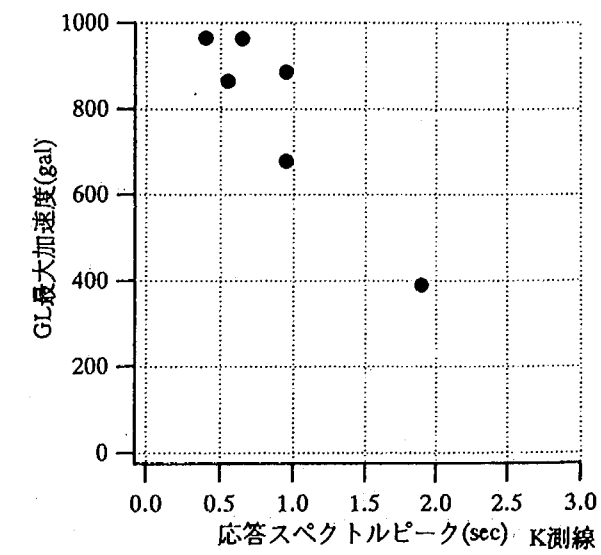
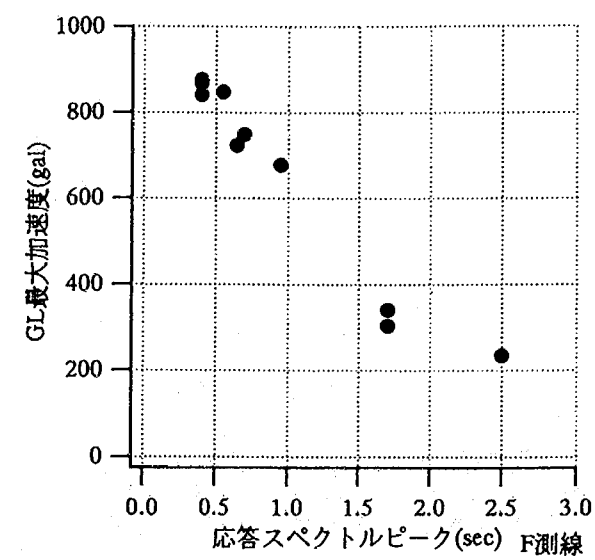
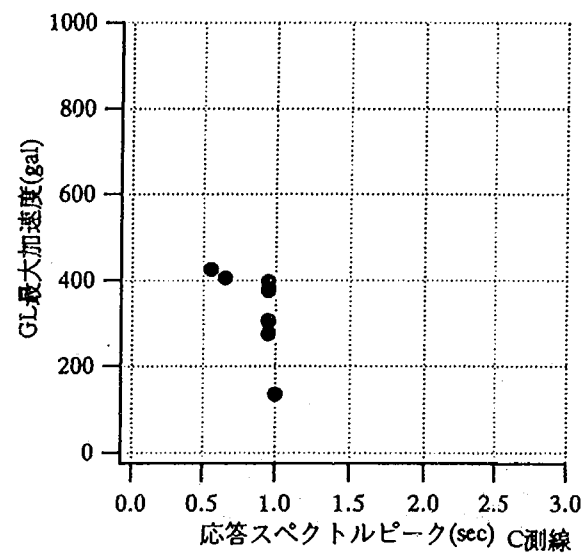
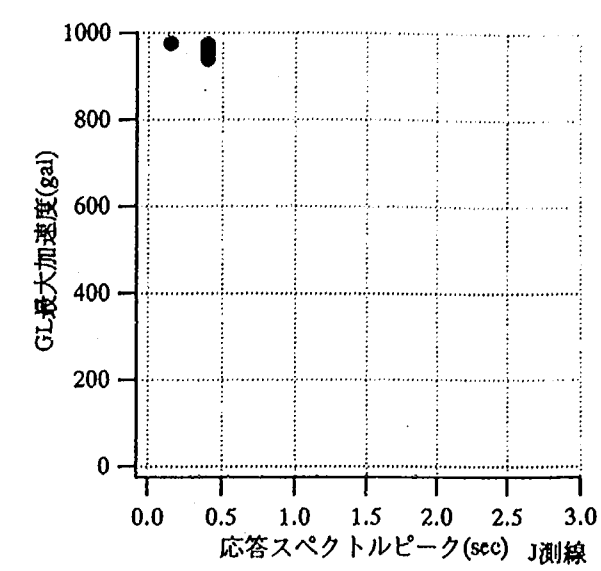
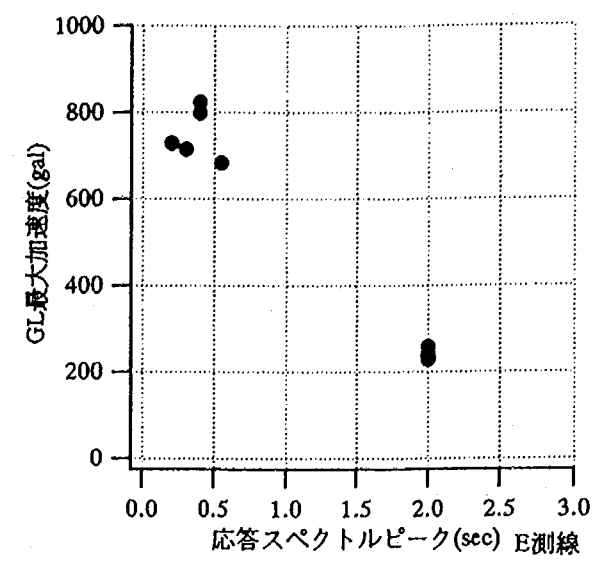
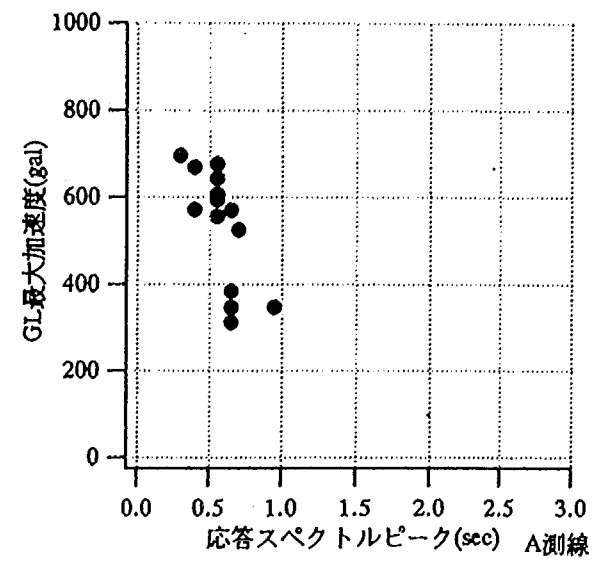


図-3.12.2 地表加速度の応答スペクトルのピークと地表最大加速度の関係

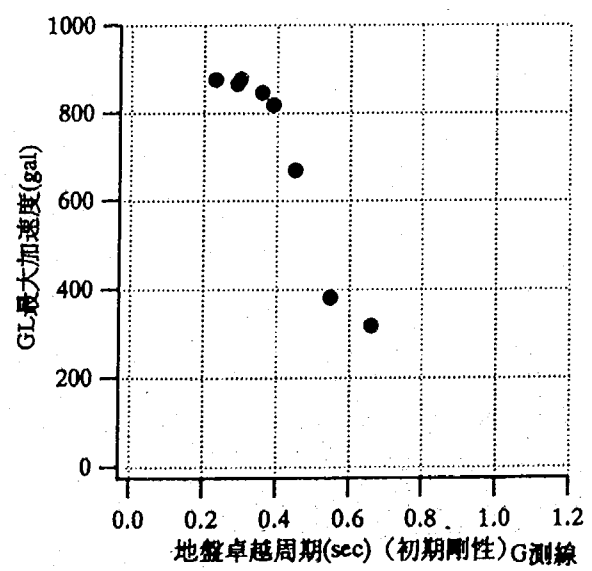
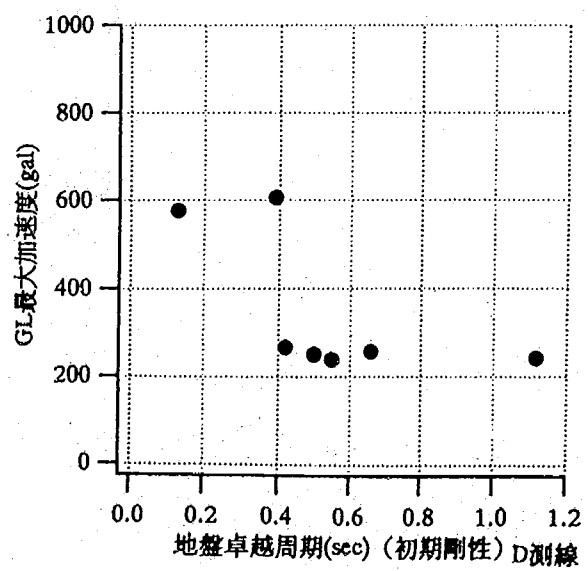
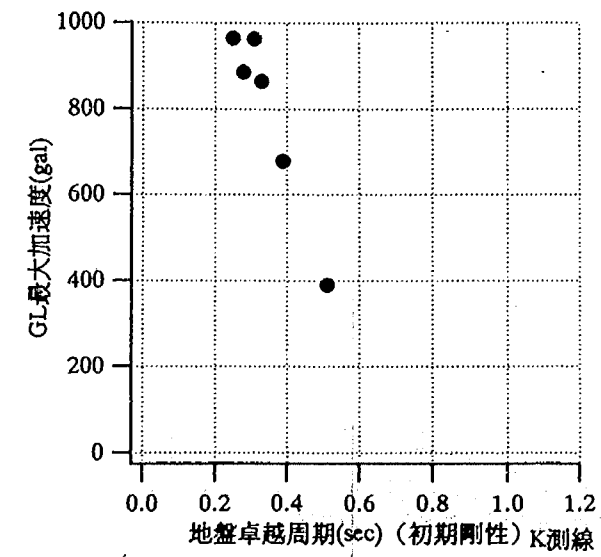
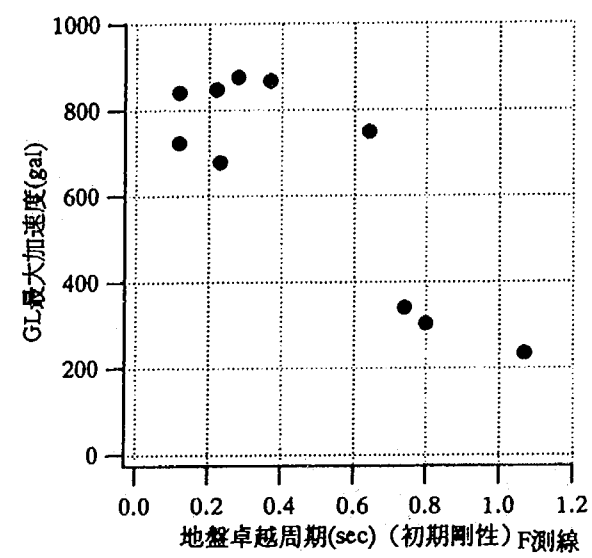
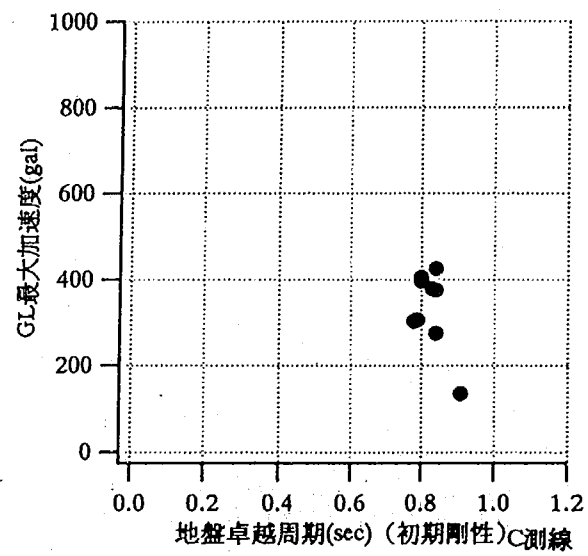
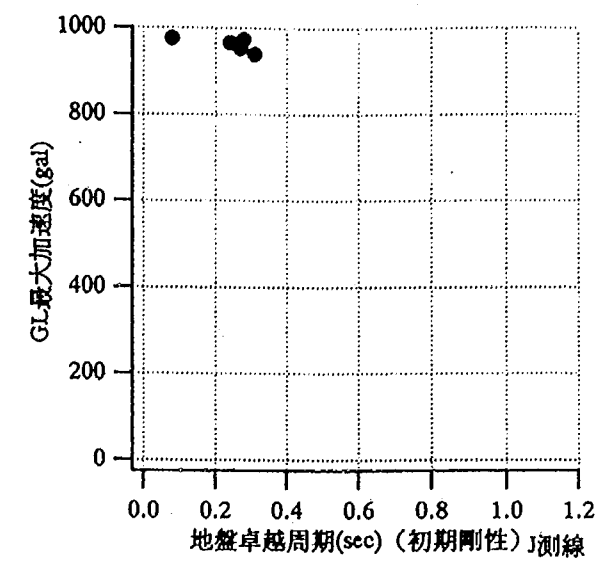
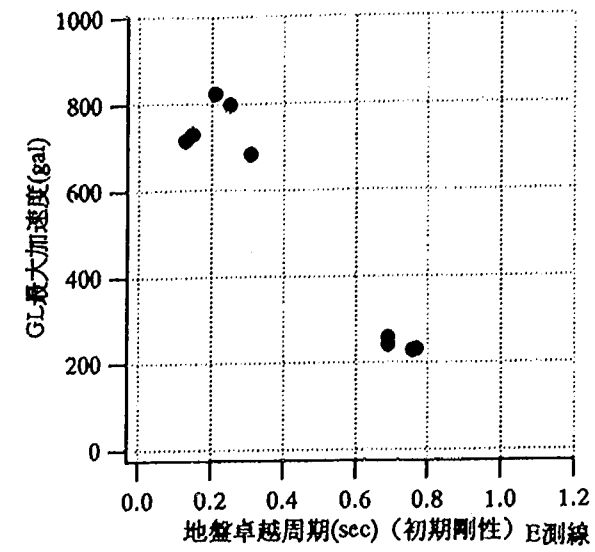
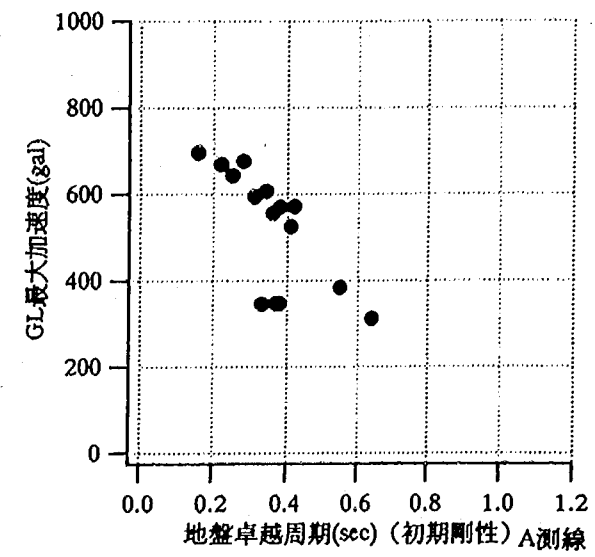


図-3.12.3 地盤卓越周期(初期剛性による)と地表最大加速度の関係

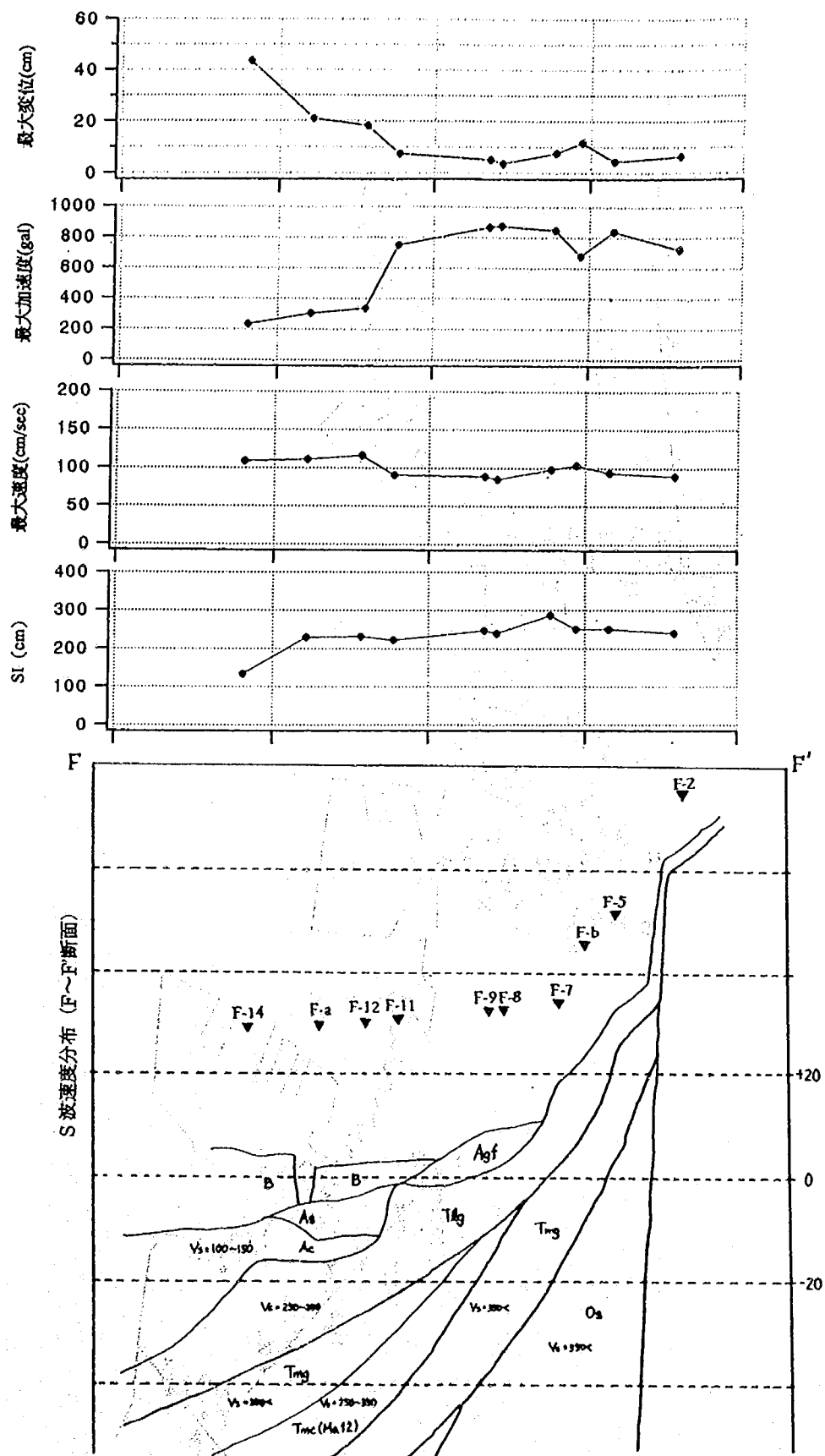


図-3.12.4 最大変位, 最大加速度, 最大速度, SIの測線分布 (F断面)

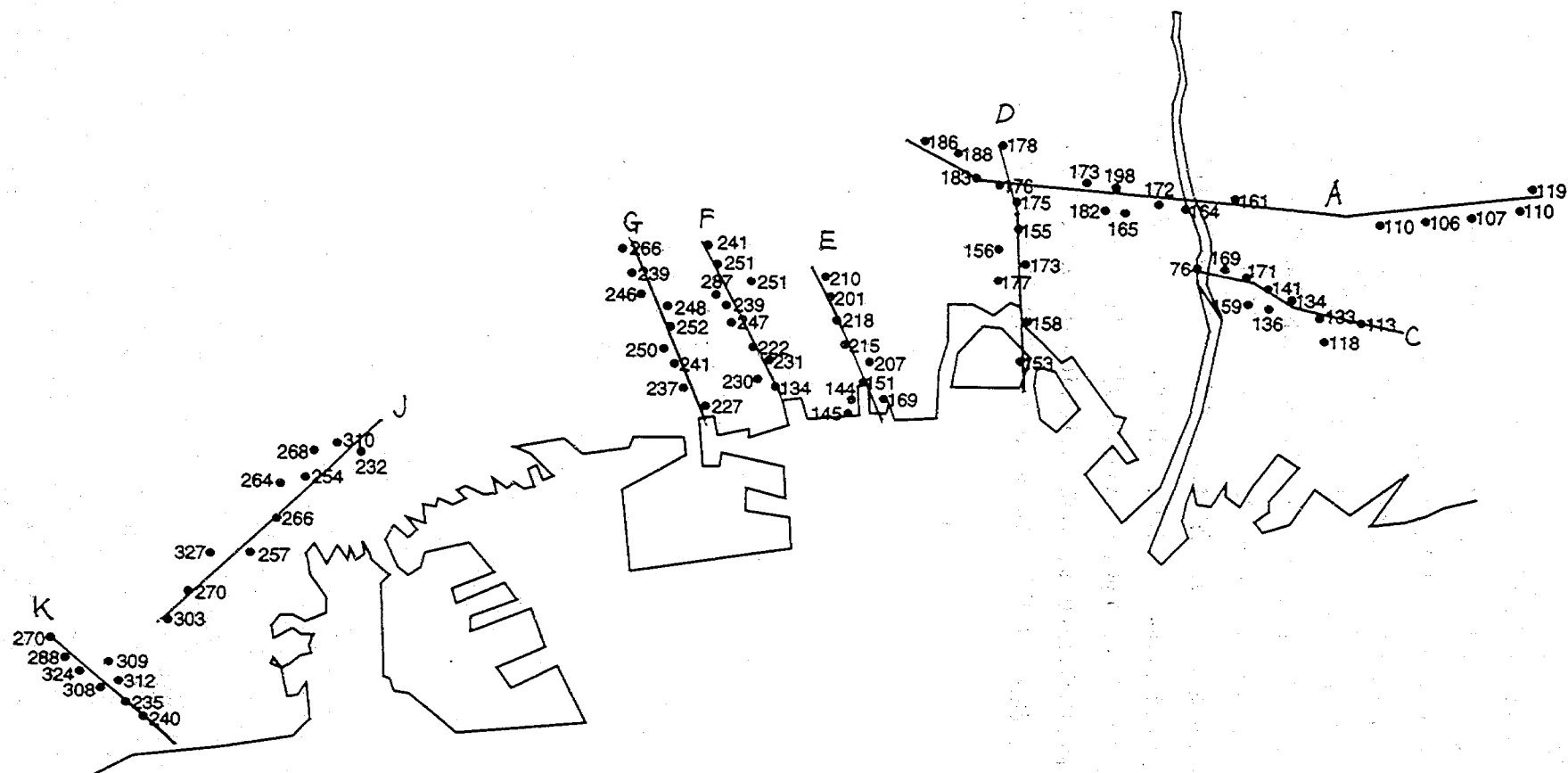


図-3.12.6 位置次元解析による地表面SI (cm)

3.13 被害調査結果との比較

既往の被害調査結果と今回の一次元応答解析結果を対比した。図3.13.1に倒壊家屋図に今回の一次元応答解析による地表面の最大加速度を重ね書きしたものを示す。この図を見ると震度7以上の被害域においては、地表面の加速度は600galを越えており震災の帯と地表面の最大加速度はほぼ一致している。ただし、震災の帯から北にはずれた測線E、F、Gの高位段丘部でも震災の帯程度か、それ以上の最大加速度となっており、被害調査結果とは少し異なる。また、J測線、K測線において最大加速度が1000galを超える部分がある。観測記録として報告されている最大加速度は830gal程度であり、大きすぎる。

次に今回の一次元応答解析のE、F、K測線の近傍で精査による倒壊率の調査が実施されており、図3.13.2～図3.13.4にそれらを並べて示した。各図において水平方向の位置はほぼ一致させている。これらの図から海岸低地で最大加速度は低下しており、これと倒壊率の関係はよく一致している。しかしF測線で北側の阪急神戸線付近で倒壊率が低下しているのに対し、最大加速度は震災の帯の部分よりも若干低下しているものの700gal程度はあり、顕著な低下は見られない。ただし、建築物の倒壊率においては、その建物の建築年度や固有周期なども考慮する必要がある、単純には地表面の最大加速度と比較できない。

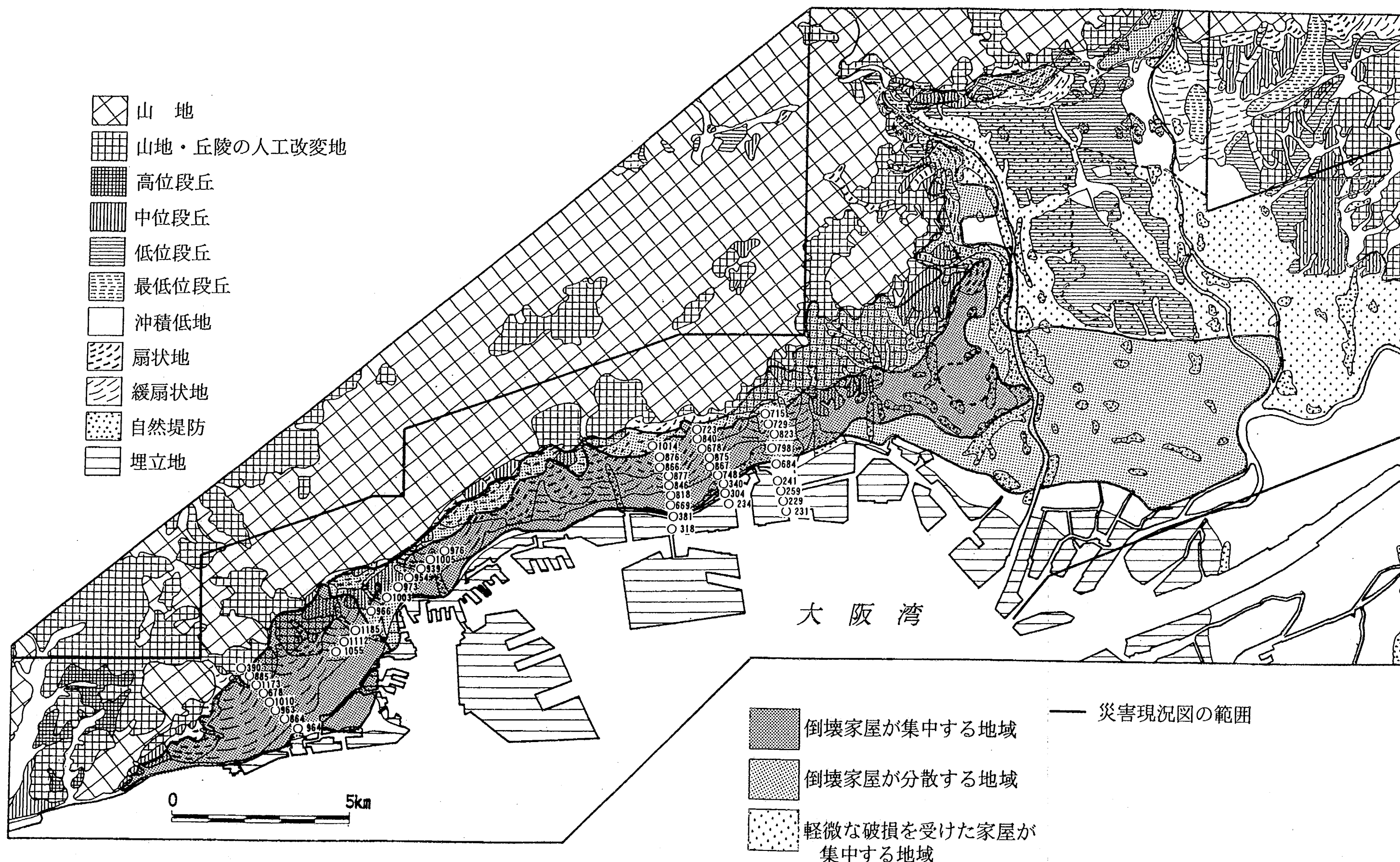
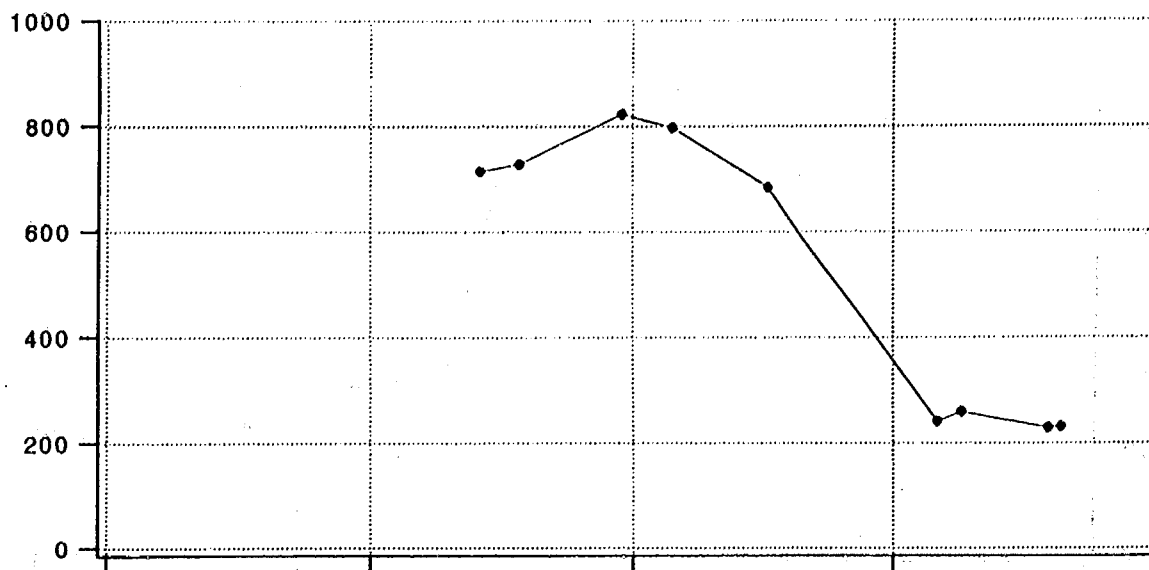


図-3.13.1 一次元解析による地表最大加速度値 (gal) と倒壊家屋分布の相関図

最大加速度(gal)



一次元解析による地表最大加速度 (E測線)

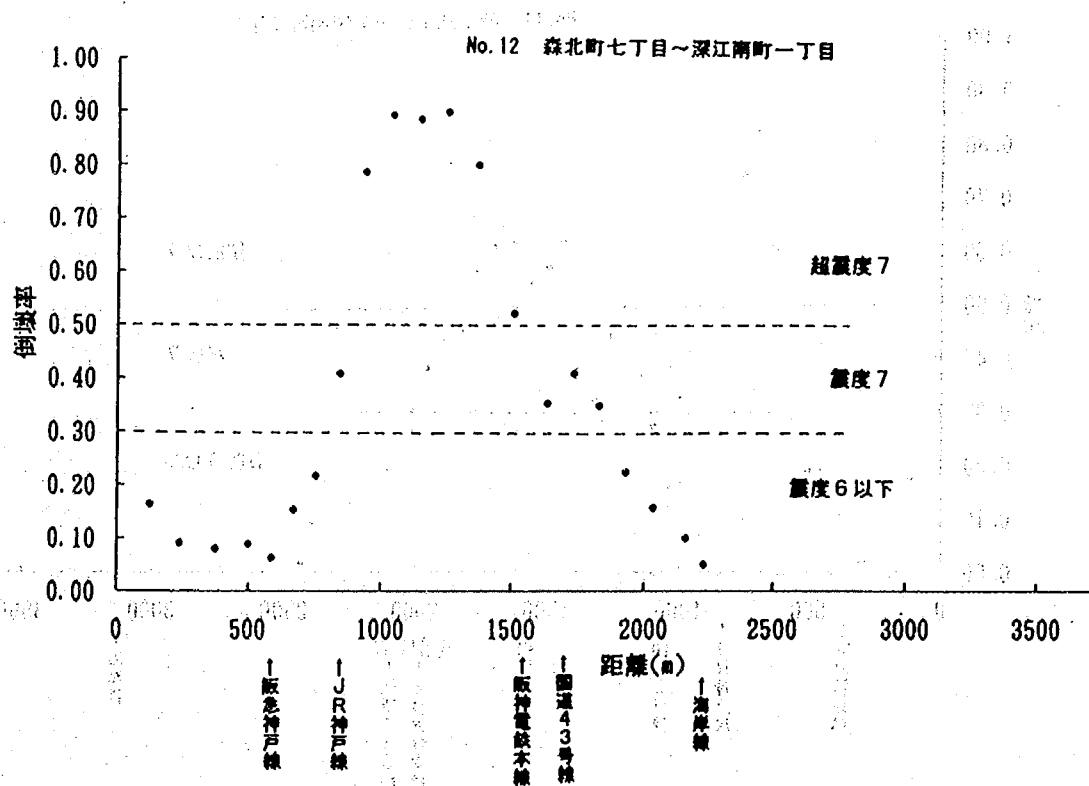
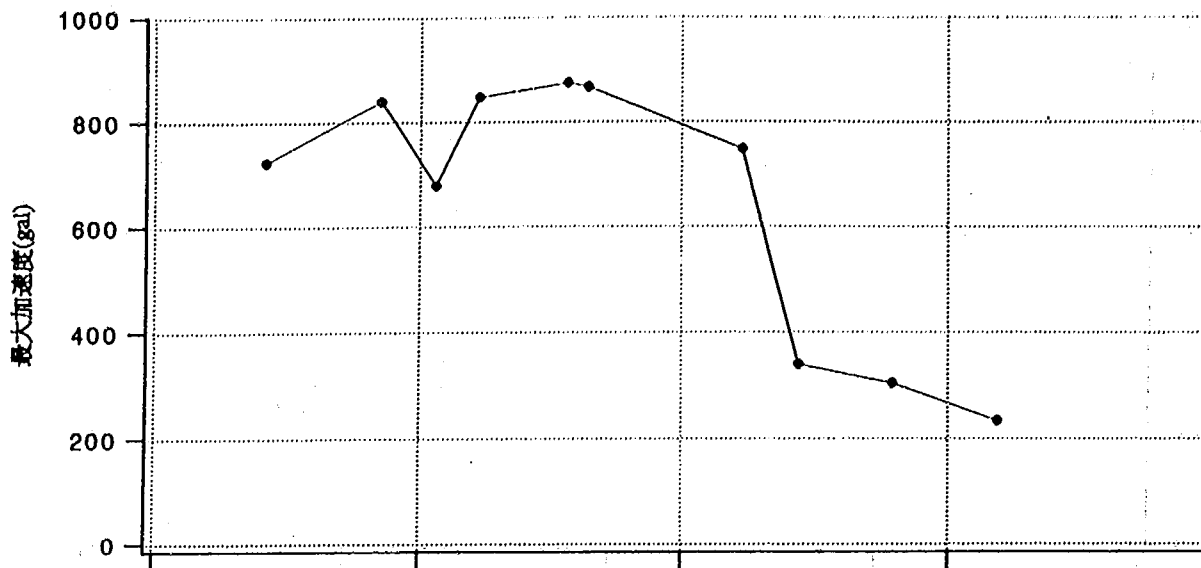


図-3.13.2 木造家屋の倒壊率 (神戸の地形・地質・地盤と構造物の
带状, 島状被害: 石川浩次 (1995) 発刊)



一次元解析による地表最大加速度 (F 測線)

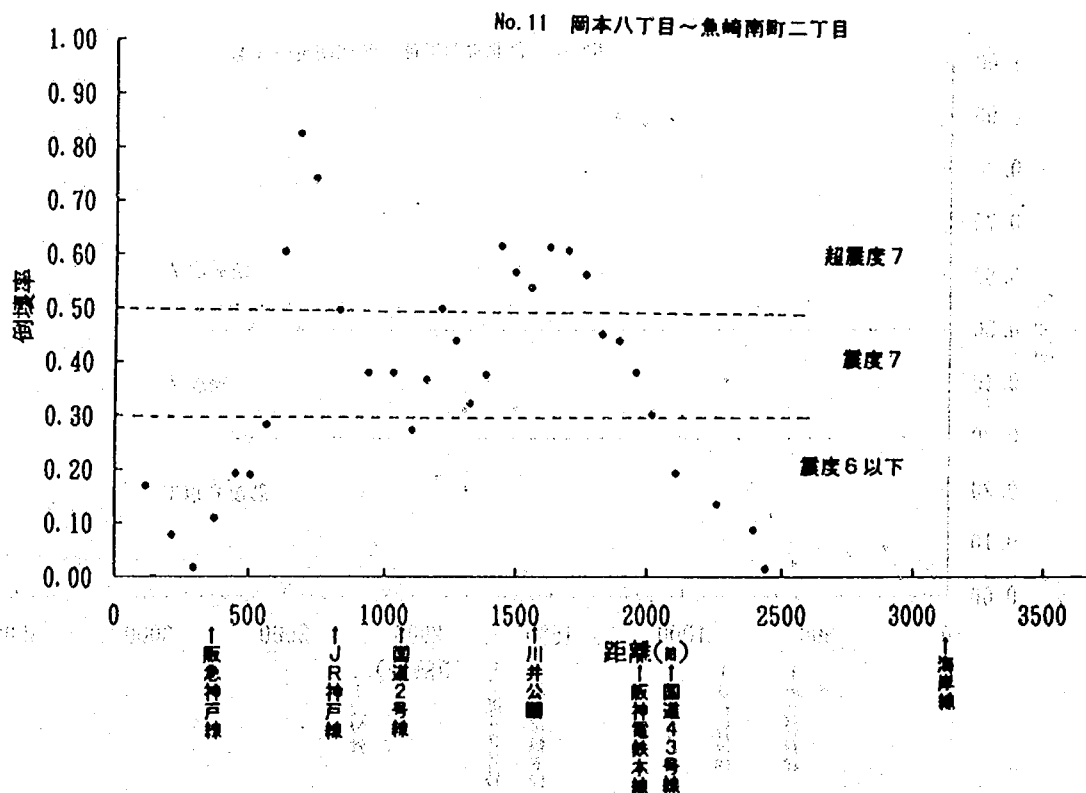
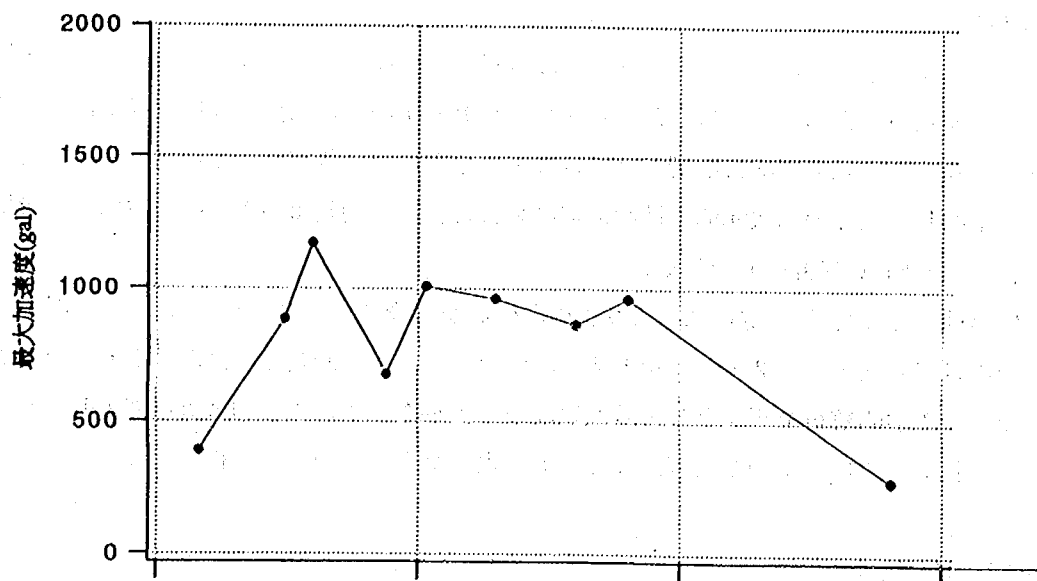


図-3:13.3 木造家屋の倒壊率 (神戸の地形・地質・地盤と構造物の
 带状, 島状被害: 石川浩次 (1995) 第(4))



一次元解析による地表最大加速度 (K測線)

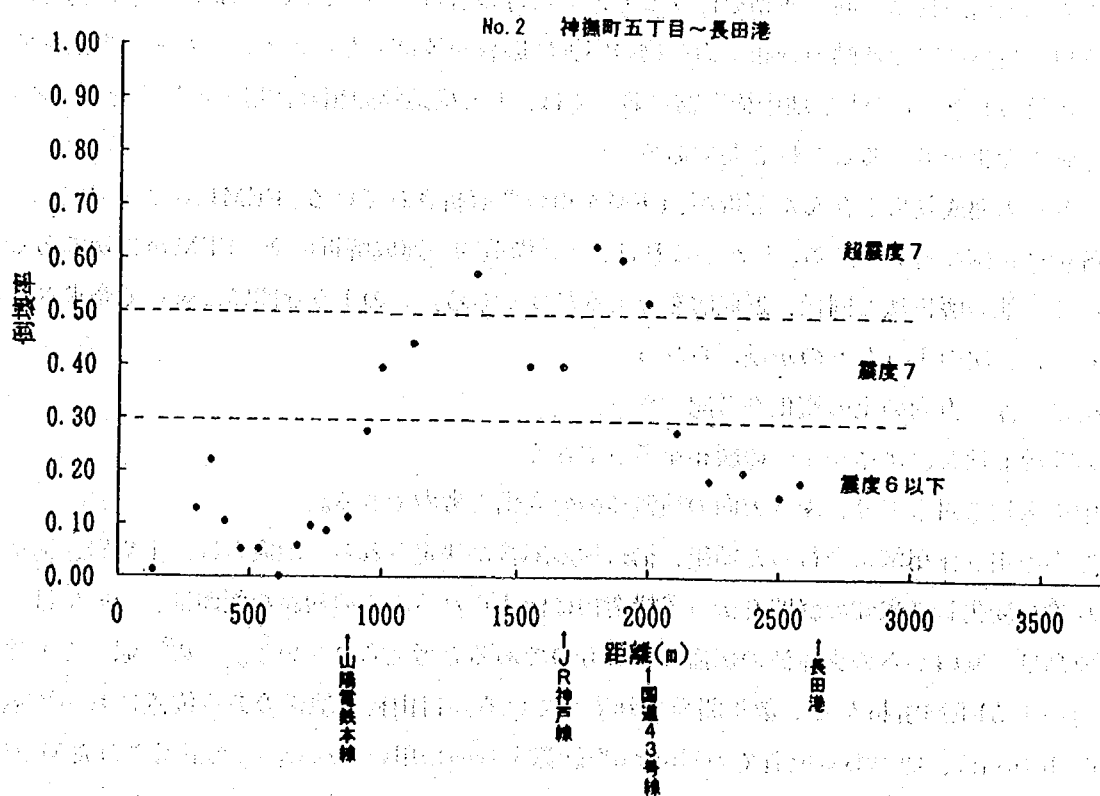


図-3.13.4 木造家屋の倒壊率 (神戸の地形・地質・地盤と構造物の)
 带状, 島状被害: 石川浩次 (1995) (著)

4. 基盤岩の構造を考慮した二次元地震応答解析

4.1 解析概要

3章の一次元地震応答解析結果では、軟弱な沖積層の厚い海岸部での地表面加速度は全体的に小さくなっており、実際の被害率等と一致した。しかし、震災の帯の北側部分では加速度値は震災の帯と同程度となっており、一次元地震応答解析だけでは被害の分布を全て説明できる結果とはならなかった。そこで、工学的基盤以浅の二次元的な地層構造の影響と、工学的基盤面以深の地層構造の影響を考慮するために、二次元FEM解析を実施した。

二次元FEM解析には、等価線形法により土の非線形を考慮できるプログラム「FLUSH」を用いた。解析対象断面はF断面とし、2モデルを考えた。すなわち、工学的基盤以浅の二次元的な地層構造の影響を見るために工学的解析モデルとして基盤以浅のモデルを、また工学的基盤以深の基盤層での地震動の増幅特性を見るために工学的基盤深部までモデル化したものについて解析を実施した。

4.2 「FLUSH」概要

コンピュータプログラム「FLUSH」は、有限要素解析プログラム「LUSH」の拡張版として開発されたものである。

構造物に地震が作用するような場合、土—構造物の相互作用効果の解析には2つの方法がある。その一つは、構造物と周りの土がそれぞれ異なった運動を行うと考えた完全な連成解析と、もう一つは、基盤より上の土と構造物は、同じ運動を行うと考えた場合の解析である。地表面にある構造物では、地中における自由自然地盤の運動の分布が構造物の応答に影響を及ぼさないで、どちらの方法を使ってもよい結果が得られる。しかし、地中構造物においては、土と構造物の相互作用を正しく評価するために、地中の運動の変化を考えることは必要である。

最近これらの連成効果を含んだ解析が、FEMを用いて解析されている。FEMによる方法では、地中構造物の解析に正確な解を与える。しかしこれは、土と構造物の連成解析に全てFEMが有効であるというのではなく、他の解析法と同様、近似解を与えるだけである。このような問題に対して要求される解析機能としては、次のようなものが挙げられる。

- ①解析は、深さ方向の土の変化を考慮できる。
- ②土の非線形性と、エネルギーの緩和を考慮できる。
- ③地中構造物に対しては、深さ方向の地盤運動の変化を考慮できる。

土と構造物の相互作用解析を行った結果、構造物の応答が決定される。地震力は、土や岩、構造物の周辺でそれぞれ変化し、未知の経路を伝って構造物に伝えられる。この複雑な問題は、一般には、構造物周辺の運動は、基盤からの実体波の伝播によるものであると考えられている。この近似をもとに前述の要求を満足するFEM解析がここ数年開発されてきている。自由自然地盤のある位置において示されるControl Motionは、他のある位置でのMotionを計算するのに用いられる。この計算されたMotionが土—構造物のFEMモデルのインプットとして使われ、任意点で応答が計算されるのである (Lysmer et al. 1975)¹⁴⁾。

解析は、土質性状がひずみ依存である非線形性を満足するまで繰り返し実行される (Seed and Idriss,

1969¹⁵⁾; Schnabel et al.1972¹⁶⁾)。各々の繰り返しにおいて、解析は線形であるが、土性状は計算されたひずみにしたがって修正され、ある繰り返しから次の繰り返しまで収斂するまで繰り返される。この方法により、全ての要素に対して、異なった土性状が与えられる。

4.3 工学的基盤以浅モデルの解析

図4.3.1に解析モデルを、表4.3.1、4.3.2に土質定数と非線形特性、図4.3.2に非線形特性図を示す。これら定数はF測線での測定値等より設定しており基本的に一次元解析で用いたものと同一である。また、左サイドには側方伝達境界を設けている。右サイドは上下方向のみ固定とした。基盤部は剛基盤とし解析した。

入力地震動は解析基盤を剛基盤としていることから、E+F波を作成しなければならない。そこで一次元解析で用いたF-a地点のモデルによりE+F波を算出して剛基盤の入力地震動とした。図4.3.3に入力地震動波形とその加速度応答スペクトルを示す。

解析結果を以下の図として示す。各図の上下・水平のスケール比は1:100である。図4.3.4最大加速度分布図、図4.3.5最大変位分布図、図4.3.6水平応力 σ_x 最大値分布図、図4.3.7鉛直応力 σ_y 最大値分布図、図4.3.8剪断応力 τ_{xy} 最大値分布図、図4.3.9有効剪断歪分布図、図4.3.10地表面の最大加速度分布図、図4.3.11地表面の最大変位分布図。

変位分布を見ると特にAc層で変位が増大していることがわかる。また有効剪断歪の分布でもAc層に歪が集中している。Ma12層では変位はさほど大きくなっていないが、有効剪断歪は、ある程度増大している。水平応力 σ_x は埋立の盛土部分で大きくなっている。地表面の変位の最大値分布では、海側に向かうほど大きくなっており、「SHAKE」の結果とほぼ一致している。加速度の分布を見ると海岸部ではAc層から上で加速度が減少しているのがわかる。地表面の最大加速度の分布では海側では比較的小さく、これは「SHAKE」の結果と一致している。また、高位段丘部で加速度が低下する傾向が見られる。これは「SHAKE」の結果では現れていない傾向である。これは明らかに地形的な影響と考えられ、層厚が急に薄くなる部分では加速度値が減少する傾向があるものと考えられる。

図4.3.12には一次元解析においても比較して示した、倒壊率と地表の最大加速度を両者の位置を合わせて示している。これを見ると一次元解析ではうまく表せなかった被災の帯と最大加速度の分布が非常によく一致していることがわかる。このことから地層の二次元的な構造を考慮すると被害の分布を加速度最大値で説明することができそうである。

表-4.3.1 定数一覧表

	No.	ポアソン比	単位重量 (ton/m ³)	低歪での剛性率 (ton/m ²)	初期剛性率 (ton/m ²)	初期減衰	非線形材料 No.
B1	1	0.49	1.90	17450	17450	0.02	1
Agf	2	0.49	1.90	7760	7760	0.02	1
As	3	0.49	1.94	7920	7920	0.02	1
Ac	4	0.49	1.63	3740	3740	0.02	2
B2	5	0.49	1.90	1940	1940	0.02	6
Tlg1	6	0.49	2.00	18370	18370	0.02	5
Tlg2	7	0.49	2.10	27770	27770	0.02	5
Tmg	8	0.49	2.10	27770	27770	0.02	3
Mal2	9	0.49	1.62	12960	12960	0.02	4

表-4.3.2 非線形特性

No.	孔名	深度(m)	成分	地盤歪 γ											
				10^{-6}	$10^{-5.5}$	10^{-5}	$10^{-4.5}$	10^{-4}	$10^{-3.5}$	10^{-3}	$10^{-2.5}$	10^{-2}	$10^{-1.5}$	10^{-1}	
①	F-a	10.00~ 10.95m	G/G0	1.0	0.998	0.996	0.978	0.922	0.789	0.538	0.270	0.103	0.035	0.035	
			h(%)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.2	6.0	13.2	20.8	25.4	27.3	27.3	
②		16.00~ 16.80m	G/G0	1.0	0.999	0.995	0.985	0.951	0.850	0.645	0.372	0.103	0.055	0.055	
			h(%)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.96	7.12	12.7	17.0	18.8	18.8	
③		46.60~ 47.60m	G/G0	1.0	0.998	0.995	0.980	0.932	0.816	0.580	0.305	0.120	0.043	0.043	
			h(%)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	4.20	9.6	15.8	20.0	21.8	21.8	
④		53.00~ 53.50m	G/G0	1.0	1.0	0.988	0.995	0.977	0.922	0.782	0.536	0.263	0.102	0.102	
			h(%)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	3.92	8.32	13.2	16.08	16.08	
⑤		Tlg	電中研	G/G0	1.0	1.0	1.0	0.970	0.87	0.7	0.47	0.22	0.1	0.1	0.1
				h(%)	2.0	2.5	3.0	4.7	7.0	10.0	16.0	26.5	30	30	30
⑥	B	p=0.1kgf	G/G0	1.0	0.93	0.86	0.74	0.57	0.35	0.15	0.06	0.03	0.03	0.03	
			h(%)	2.0	2.0	3.0	5.5	11.0	19.0	27.0	30.5	32.0	32.0	32.0	

表一 定数一覧表

	材料No.	ポアソン比	単位重量 (ton/m^3)	低歪での剛性率 (ton/m^2)	初期剛性率 (ton/m^2)	初期減衰	非線形材料 No.
B1	1	0.49	1.90	17450	17450	0.02	1
Agf	2	0.49	1.90	7760	7760	0.02	1
As	3	0.49	1.94	7920	7920	0.02	1
Ac	4	0.49	1.63	3740	3740	0.02	2
B2	5	0.49	1.90	1940	1940	0.02	6
Tlg1	6	0.49	2.00	18370	18370	0.02	5
Tlg2	7	0.49	2.10	27770	27770	0.02	5
Tmg	8	0.49	2.10	27770	27770	0.02	3
Mal2	9	0.49	1.62	12960	12960	0.02	4

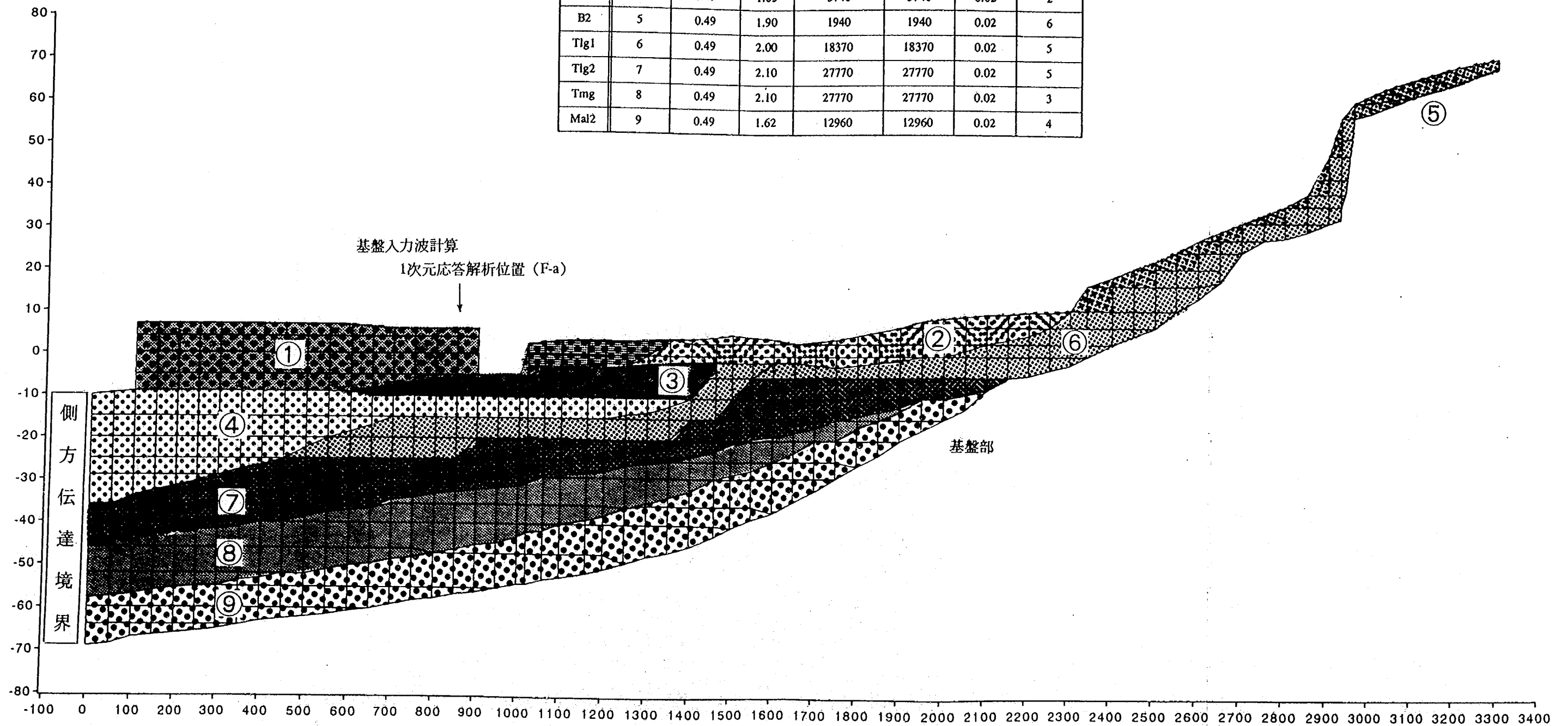


図-4.3.1 工学的基盤以浅のモデル

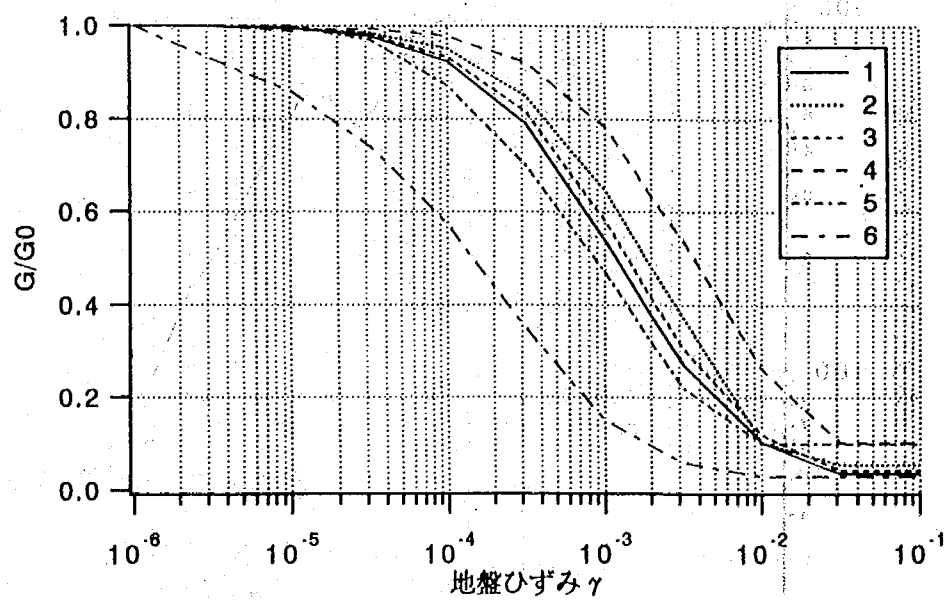
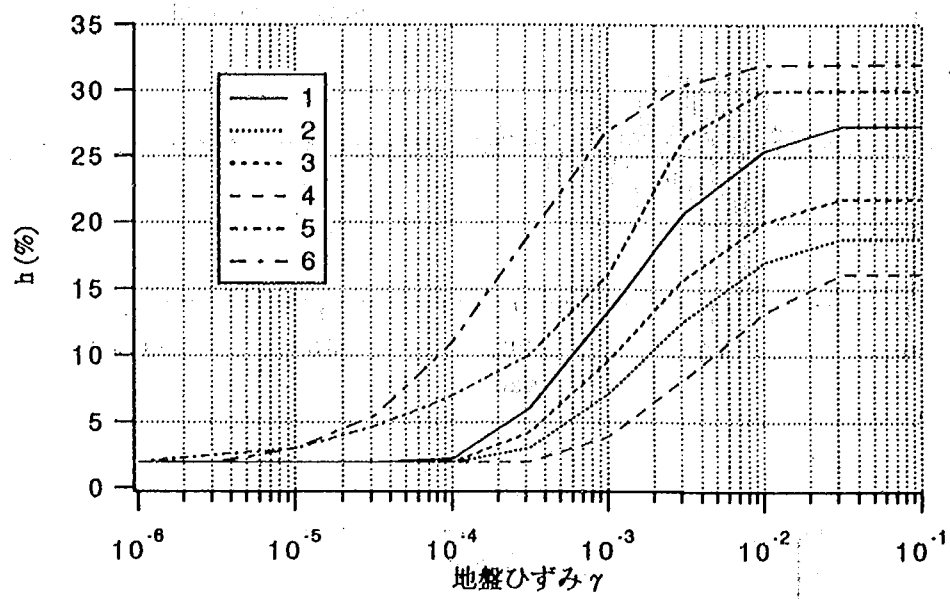


図-4.3.2 非線形特性

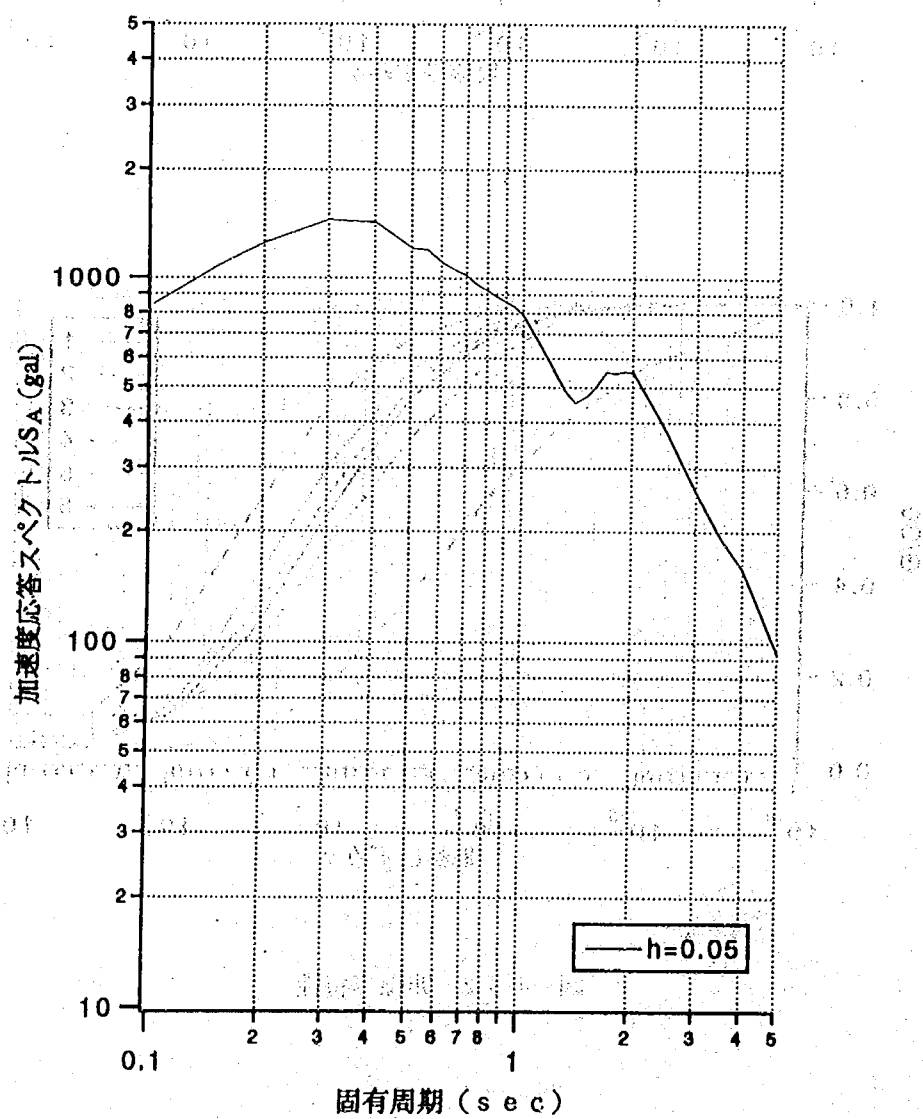
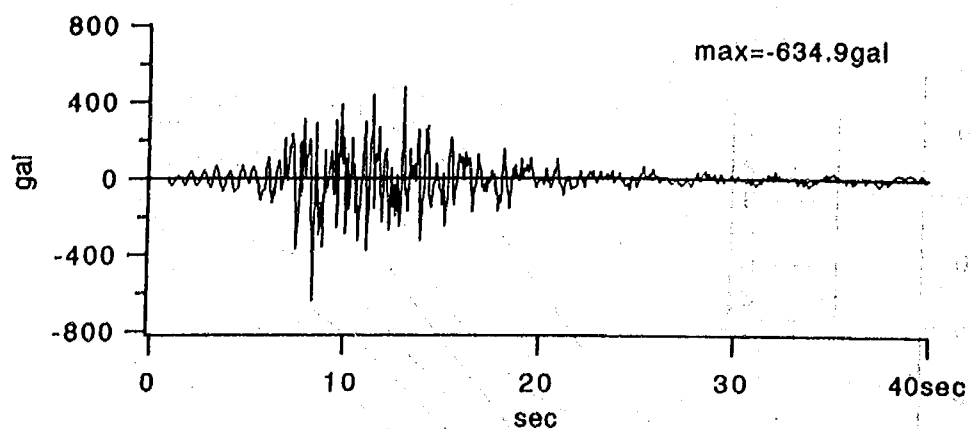


図-4.3.3 入力地震動波形および加速度応答スペクトル

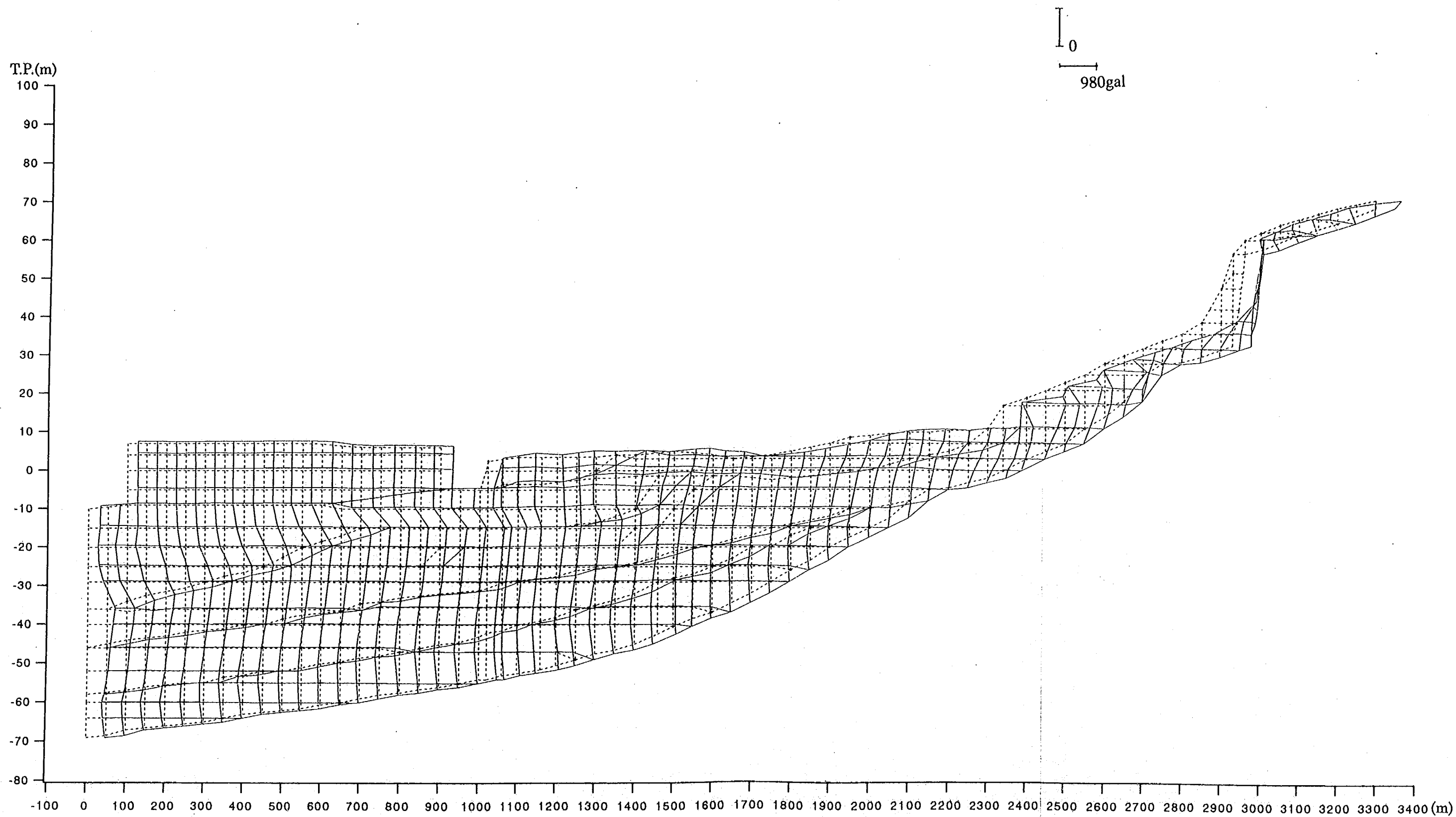


図-4.3.4 FLUSH・最大加速度分布図 (F測線・モデル1)

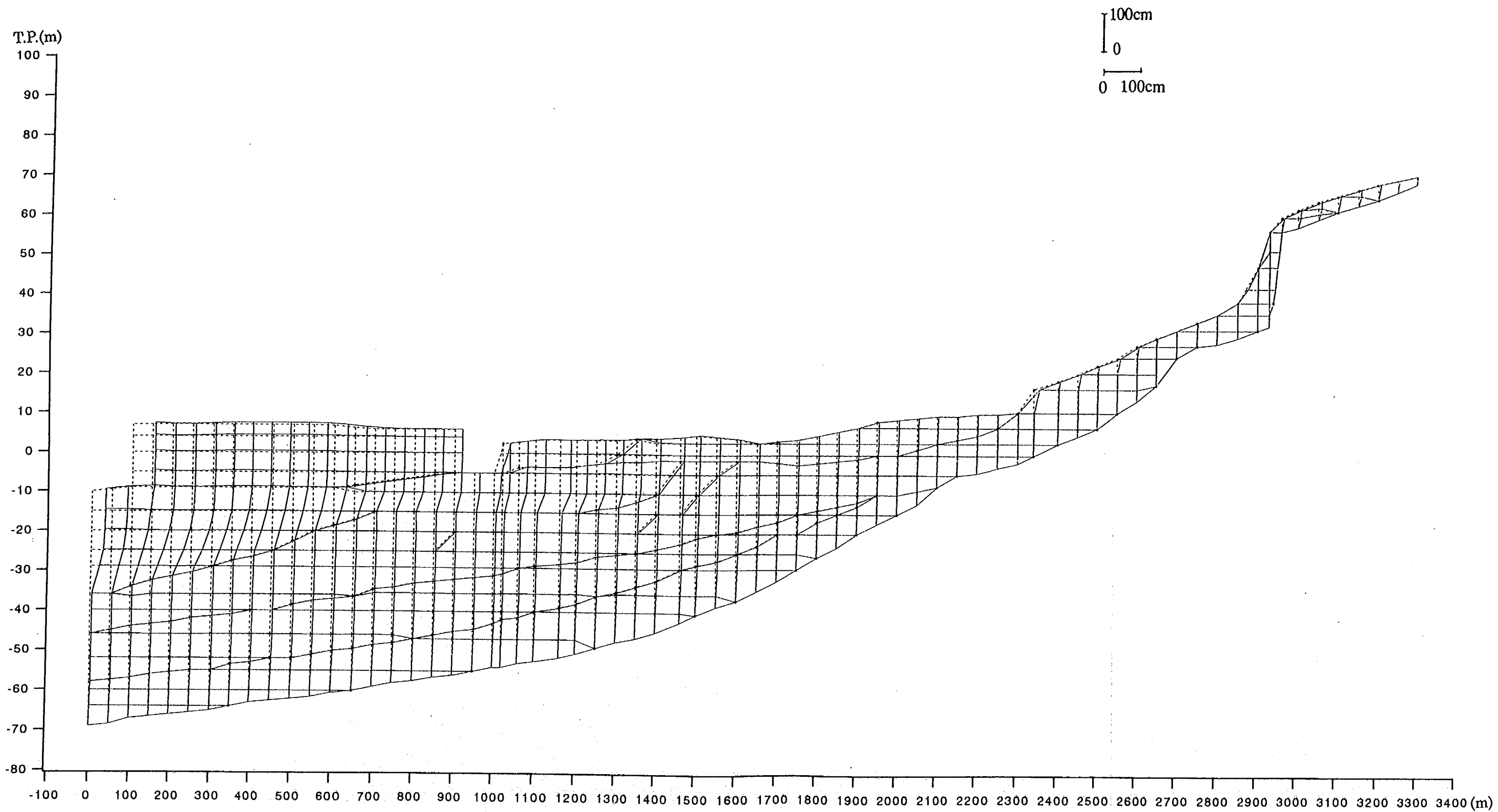


図-4.3.5 FLUSH・最大変位分布図 (F測線・モデル1)

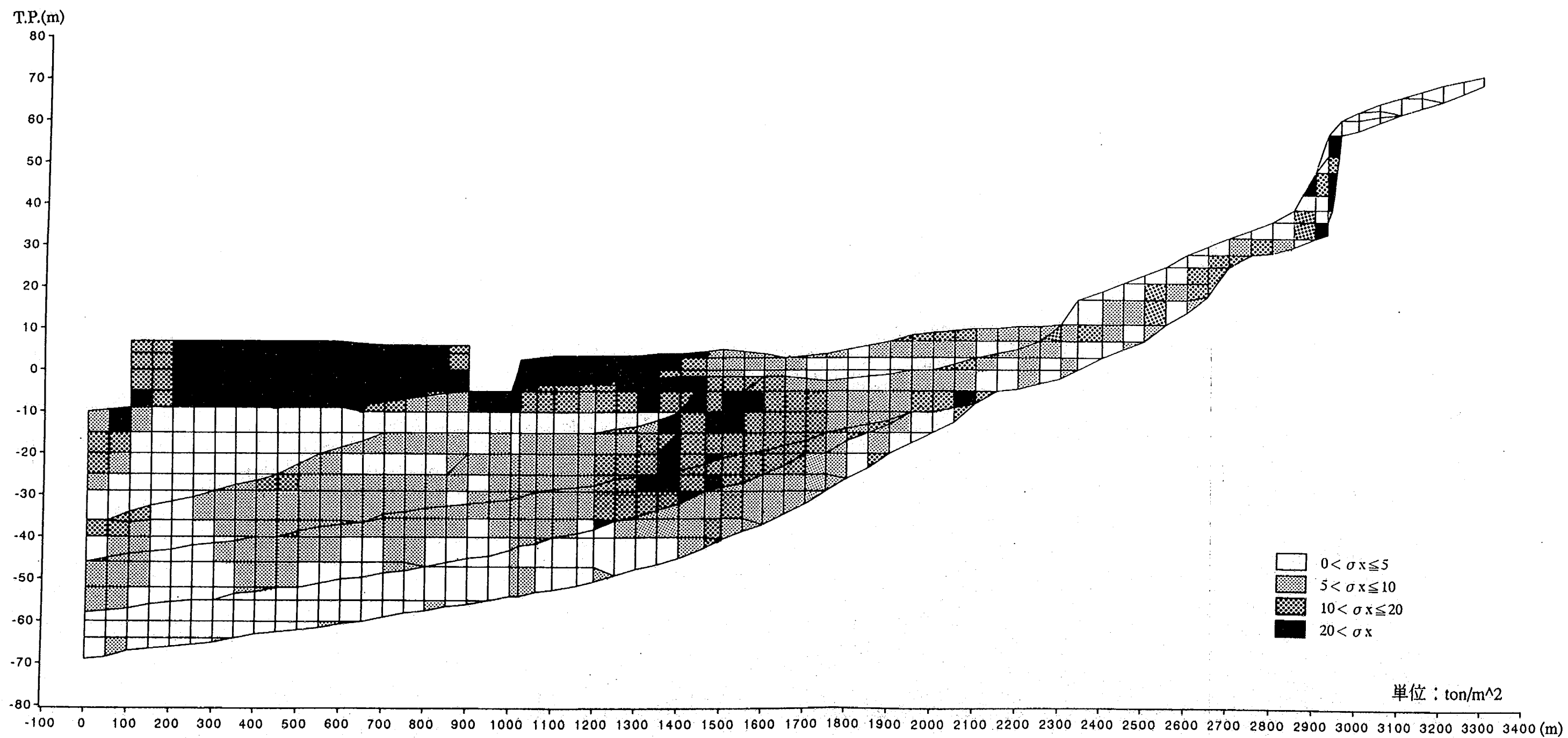


図-4.3.6 2次元地震応答解析の水平応力 σ_x (F測線・モデル1)

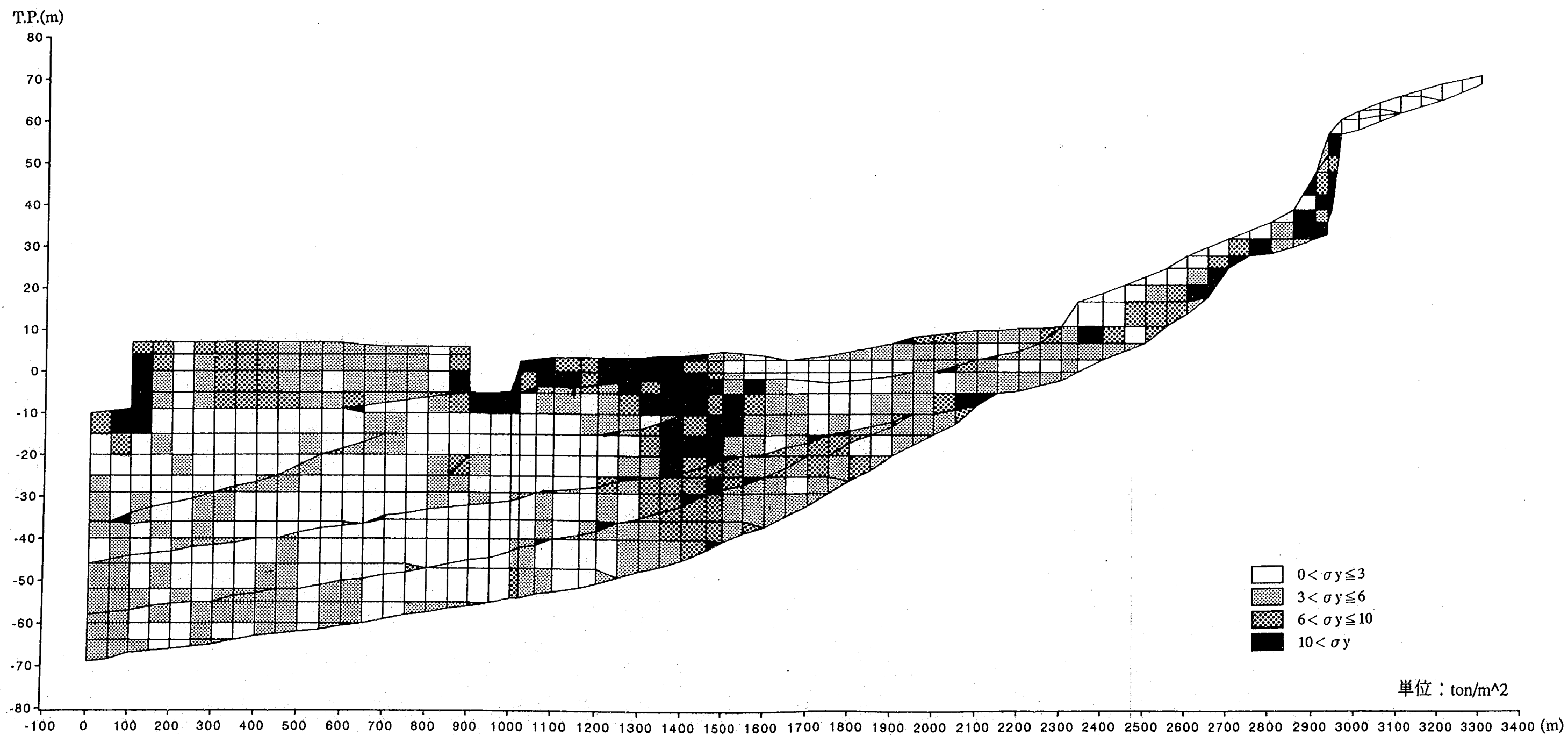


図-4.3.7 2次元地震応答解析の鉛直応力 σ_y (F測線・モデル1)

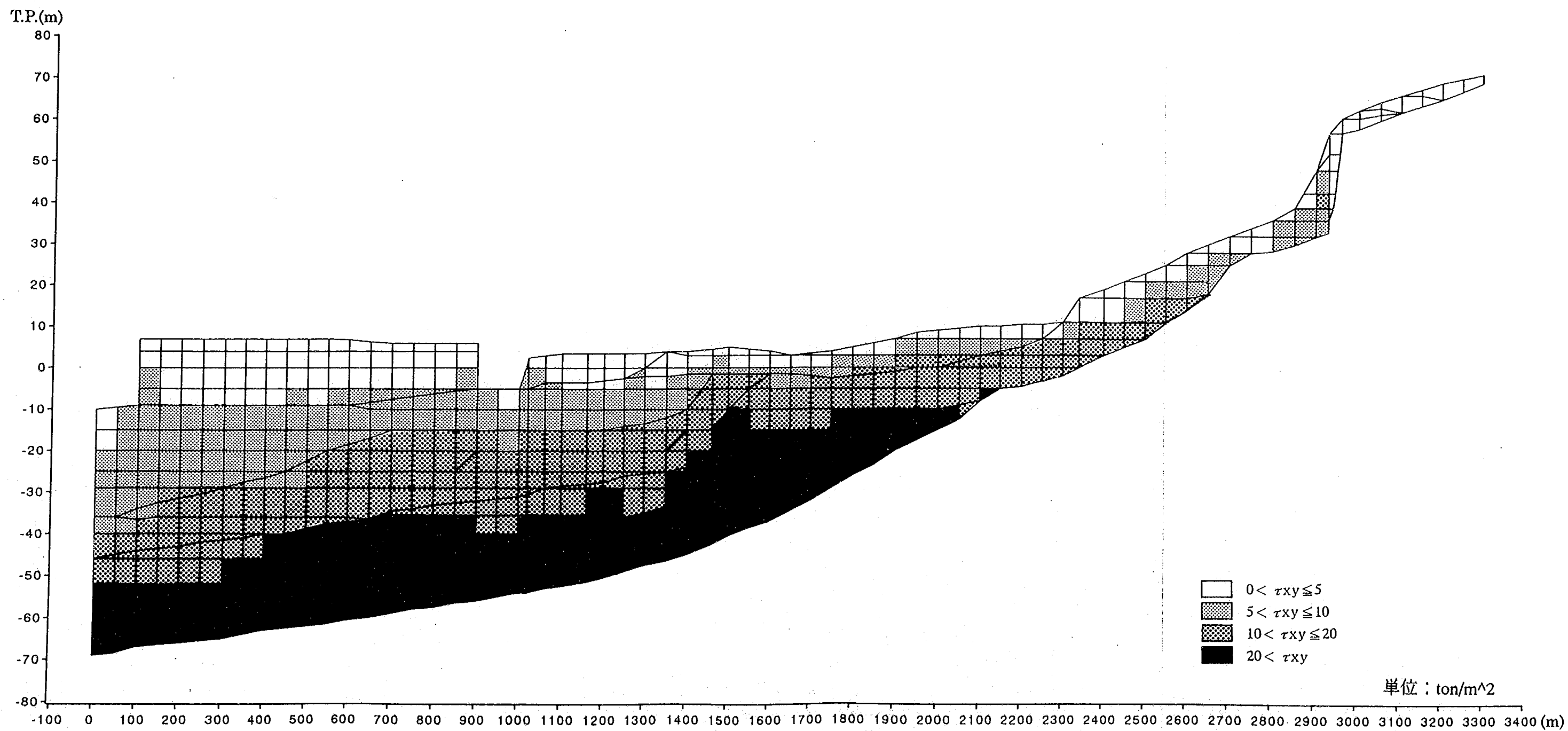


図-4.3.8 2次元地震応答解析のせん断応力 τ_{xy} (F測線・モデル1)

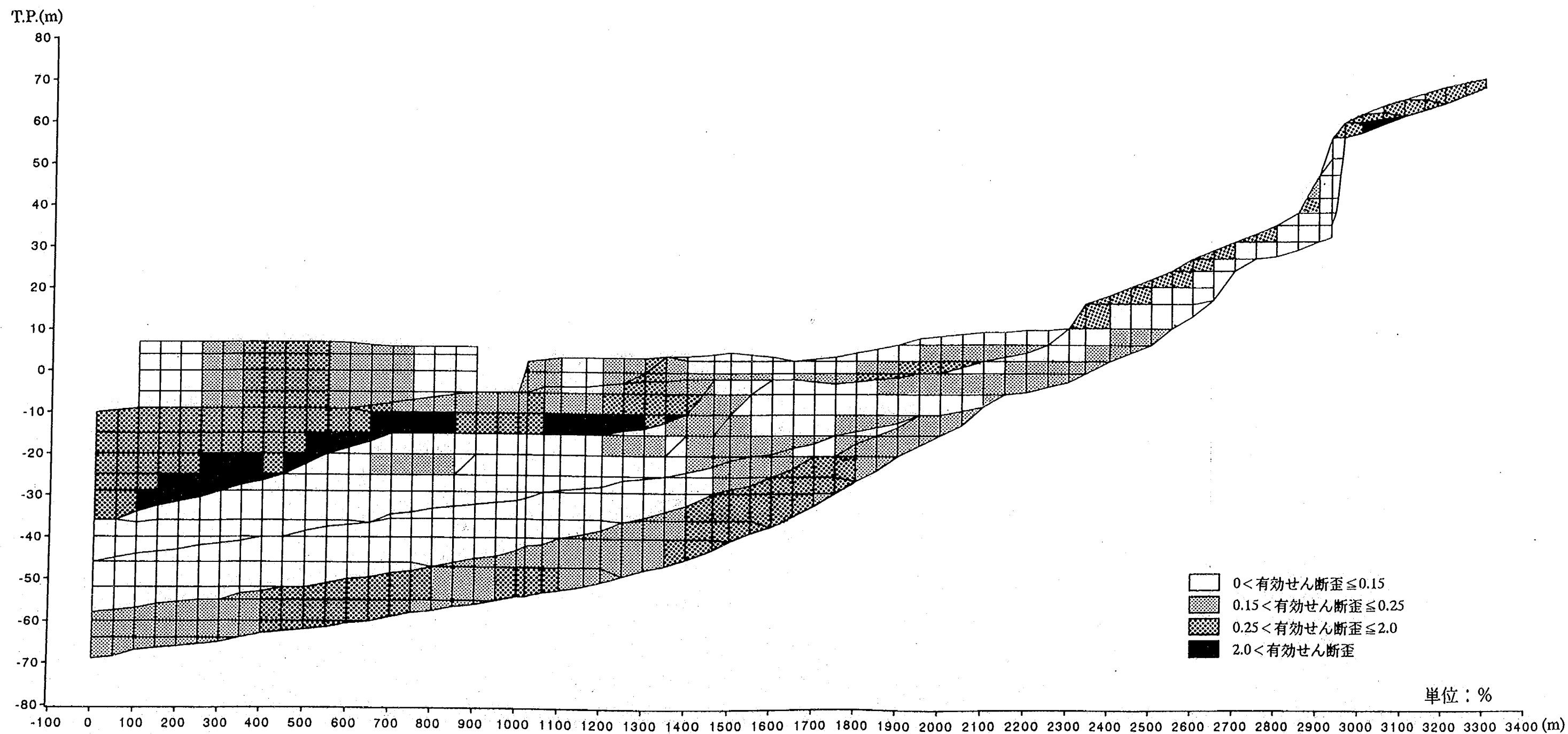


図-4.3.9 2次元地震応答解析の有効せん断歪 (F測線・モデル1)

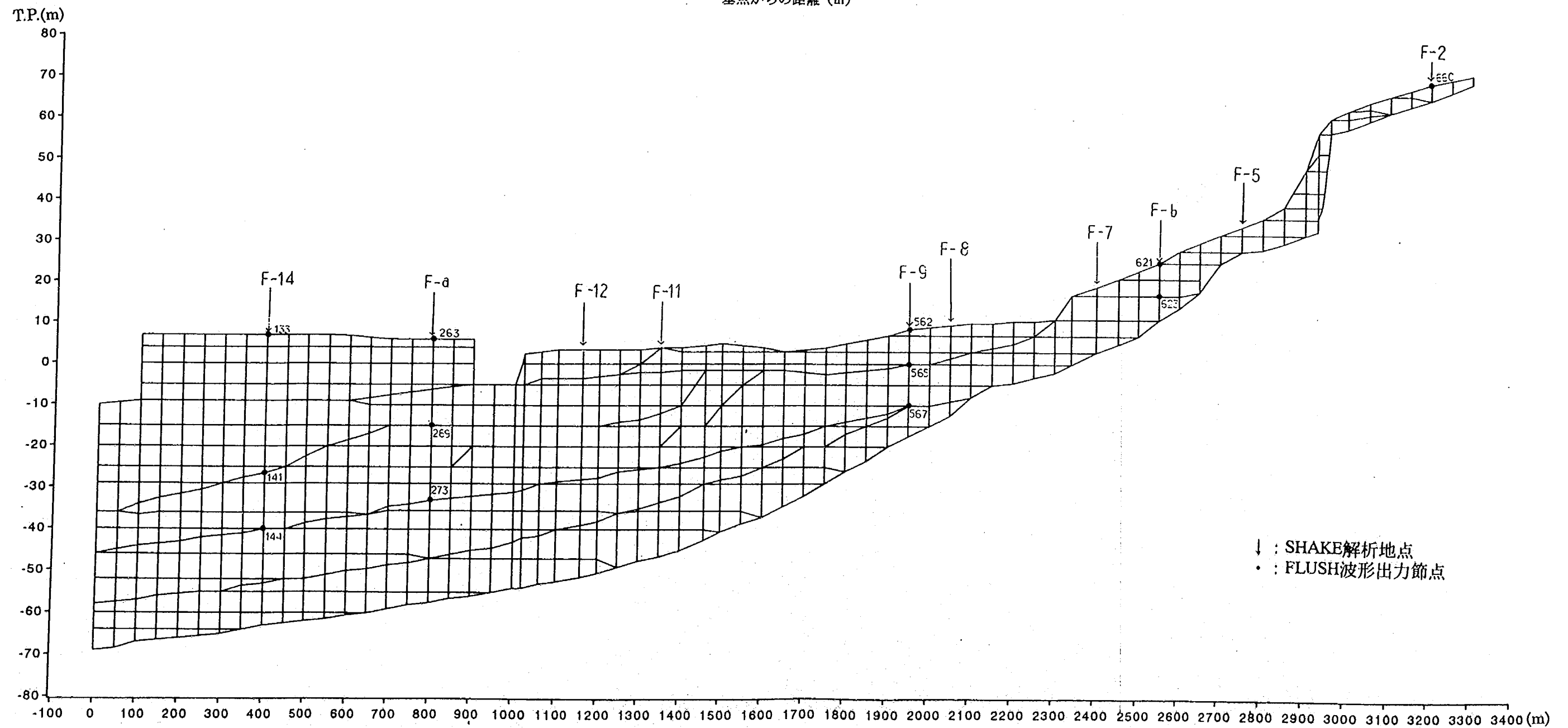
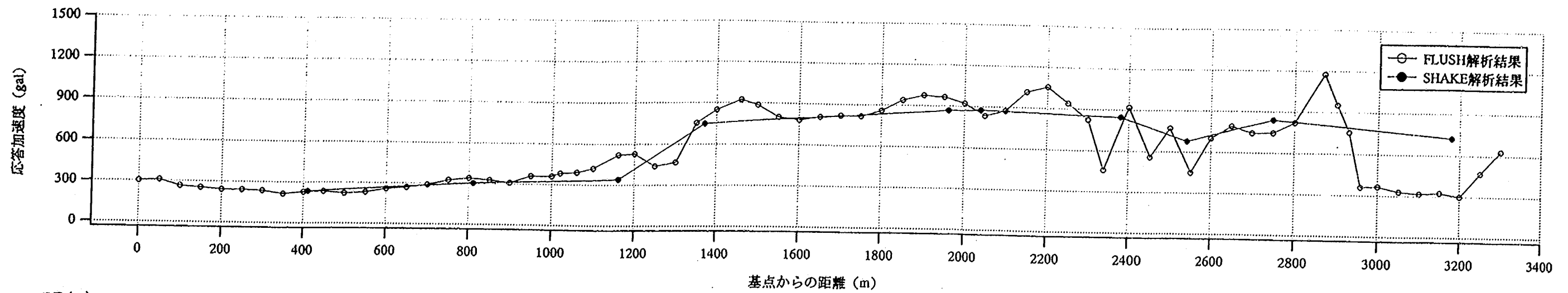


図-4.3.10 2次元地震応答解析の地表面の最大加速度分布図 (F測線・モデル1)

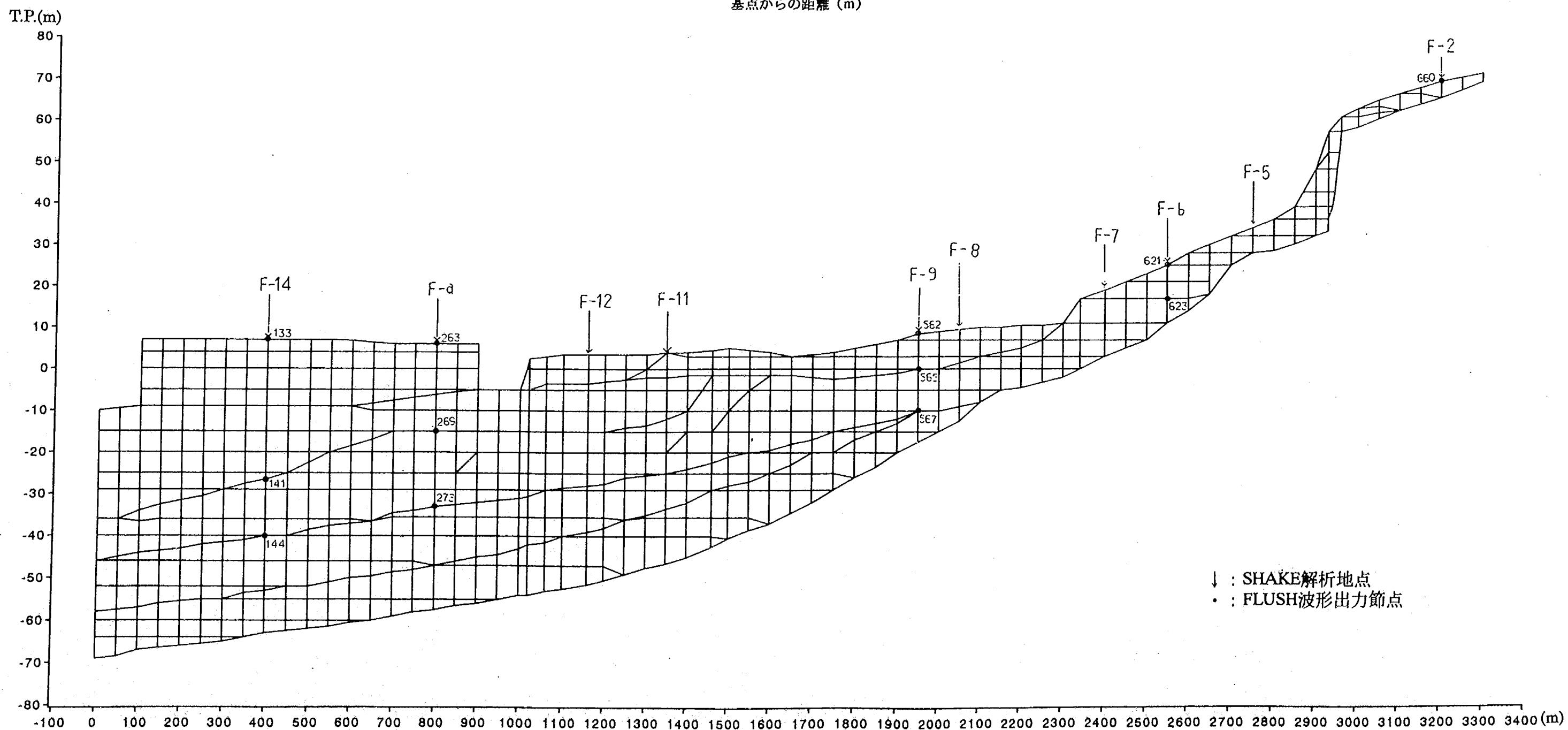
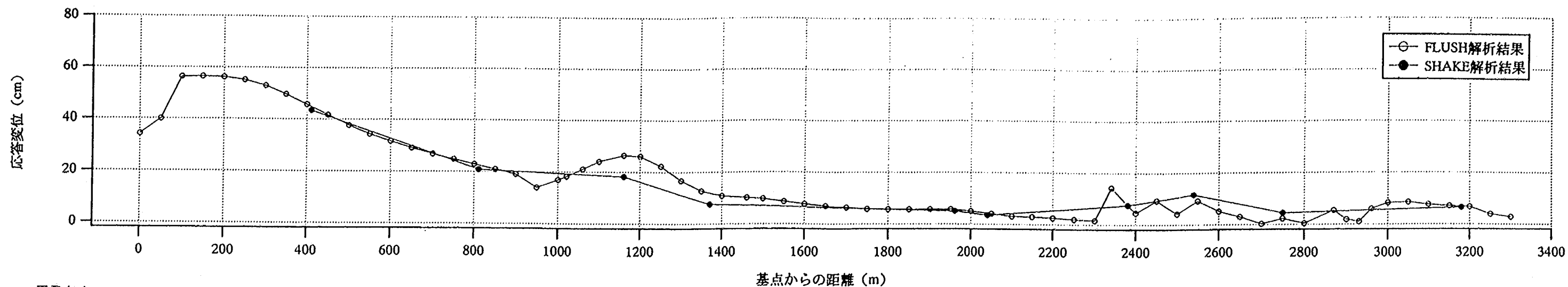


図-4.3.11 2次元地震応答解析の地表面の最大変位分布図 (F測線・モデル1)

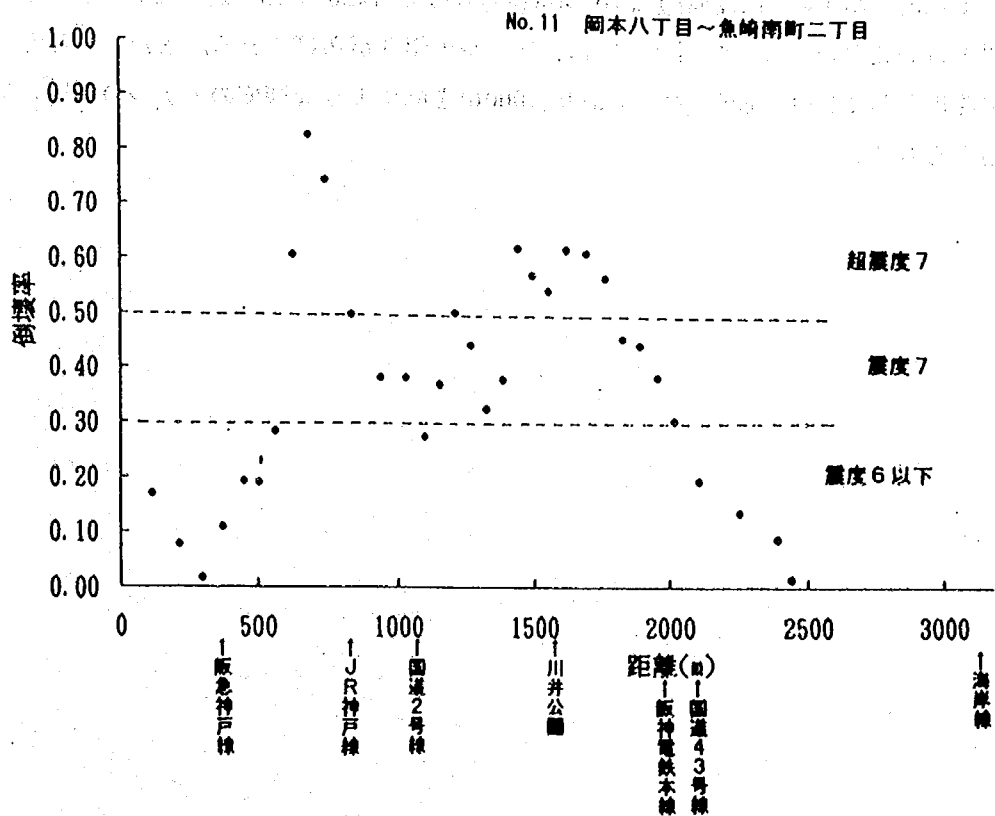
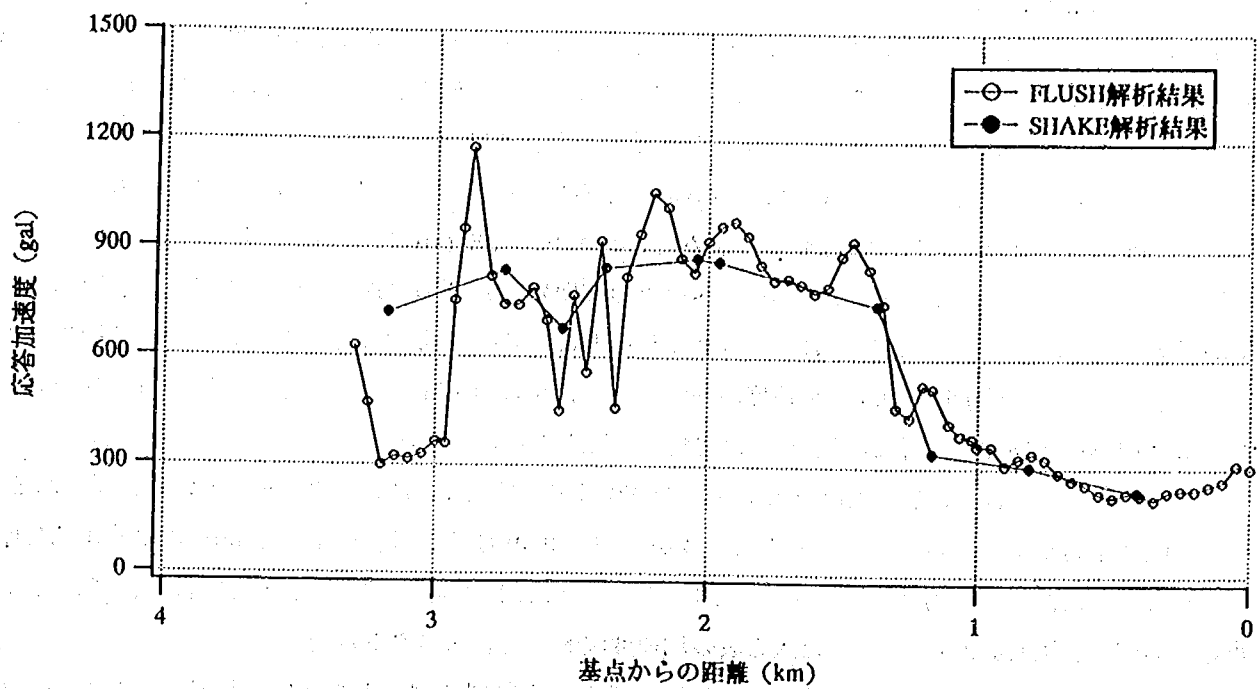


図-4.3.12 家屋の倒壊率と二次元解析地表最大加速度の比較

4.4 岩盤モデルの解析

3章における基盤波計の設定において既往の考え方として工学的基盤の最大加速度は、震源からの距離が等しければほぼ等しいとしてきた。しかし、表4.4.1に今回観測された地震記録から基盤に戻した場合の最大加速度と、距離減衰式により算出した基盤の最大加速度値を比較してみたが、神戸大学と新神戸変電所以外の場所では両者はほぼ一致するもののその2カ所においては距離減衰式により求めた加速度が800gal程度なのに対し、観測波から求めたものは300~400gal程度とかなり小さい。

神戸大学と新神戸変電所の基盤が $V_s700\text{m/s}$ 以上の花崗岩であるのに対し、他の地点の工学的基盤はMa12層の下層か、大阪層群としており、いずれも $V_s400\text{m/s}$ 程度の層である。このことから花崗岩部から洪積層のMa12下部層までの間で加速度の増幅があった可能性がある。そこで花崗岩岩盤を基盤とした2次元FEMモデルにより花崗岩部からの増幅を考察することとした。

入力地震動としては、3章で求めた工学的基盤の基盤波ではなく、岩盤上での波を用いる必要がある。そこで関西電力新神戸変電所における地表面波からGL-70.0m以深の基盤($V_s=780\text{m/s}$)に「SHAKE」によりもどした波形を入力地震動とすることにした。表4.4.2に解析モデル及び土質定数を、図4.4.1に非線形曲線を、図4.4.2に求められた入力波の加速度波形と応答スペクトルを示す。

図4.4.3に解析モデルを示す。岩盤の構造は次章で述べる擬似スペクトル法により設定したものである。表層地盤の定数値は工学的基盤以浅のモデルの解析での収束値を用いた。またそれ以深の定数については弾性体として解析した。よって解析は弾性解析となる。

ここでは解析結果の図は省略するが、地表面の加速度は2000galを越えており、この結果はあまり芳しい結果とはいえない。この原因としては、モデルの粗さがあげられる。また、もともと「FLUSH」は、解析の深度として100m程度が限界であり、1000mを越すような深度のモデルの解析としては不適當であると考えられる。

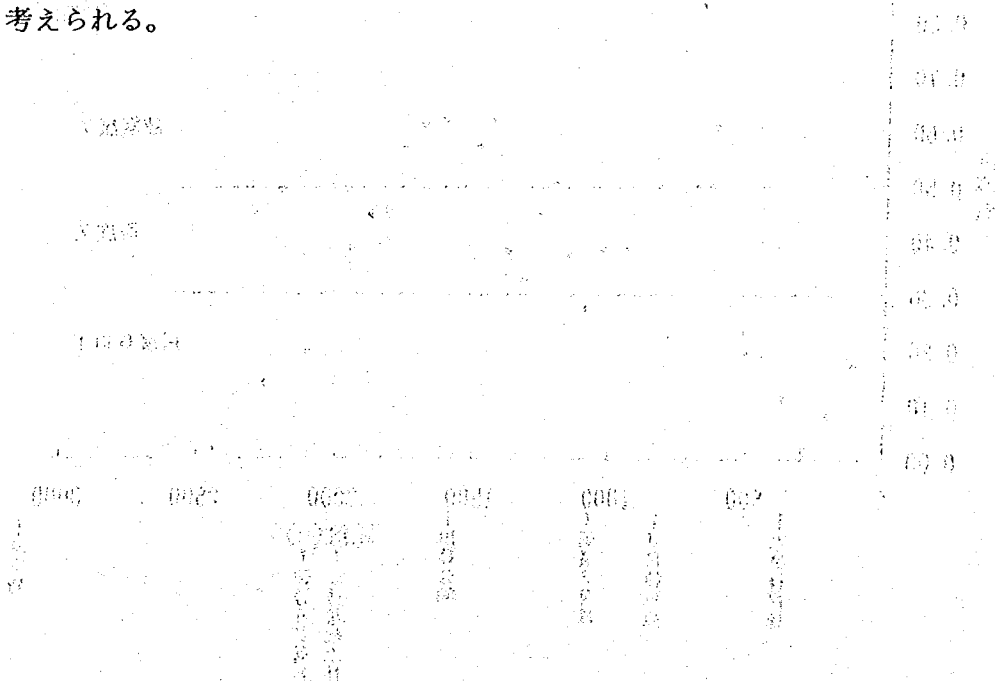


表-4.4.1 基盤最大加速度

観測地点	観測波から求めた基盤最大加速度		距離減衰式による 最大化速度(gal)	備考
	NS(gal)	EW(gal)		
大阪ガス葺合	668	813	817	洪積基盤
ポートアイランド	831	298	742	
神戸海洋気象台	776	602	820	
東神戸大橋	702	853	672	
尼崎高架橋	326	298	307	
関電総合技術研究所	259	385	284	
新神戸変電所	434	487	821	岩盤
神戸大学	324	391	820	

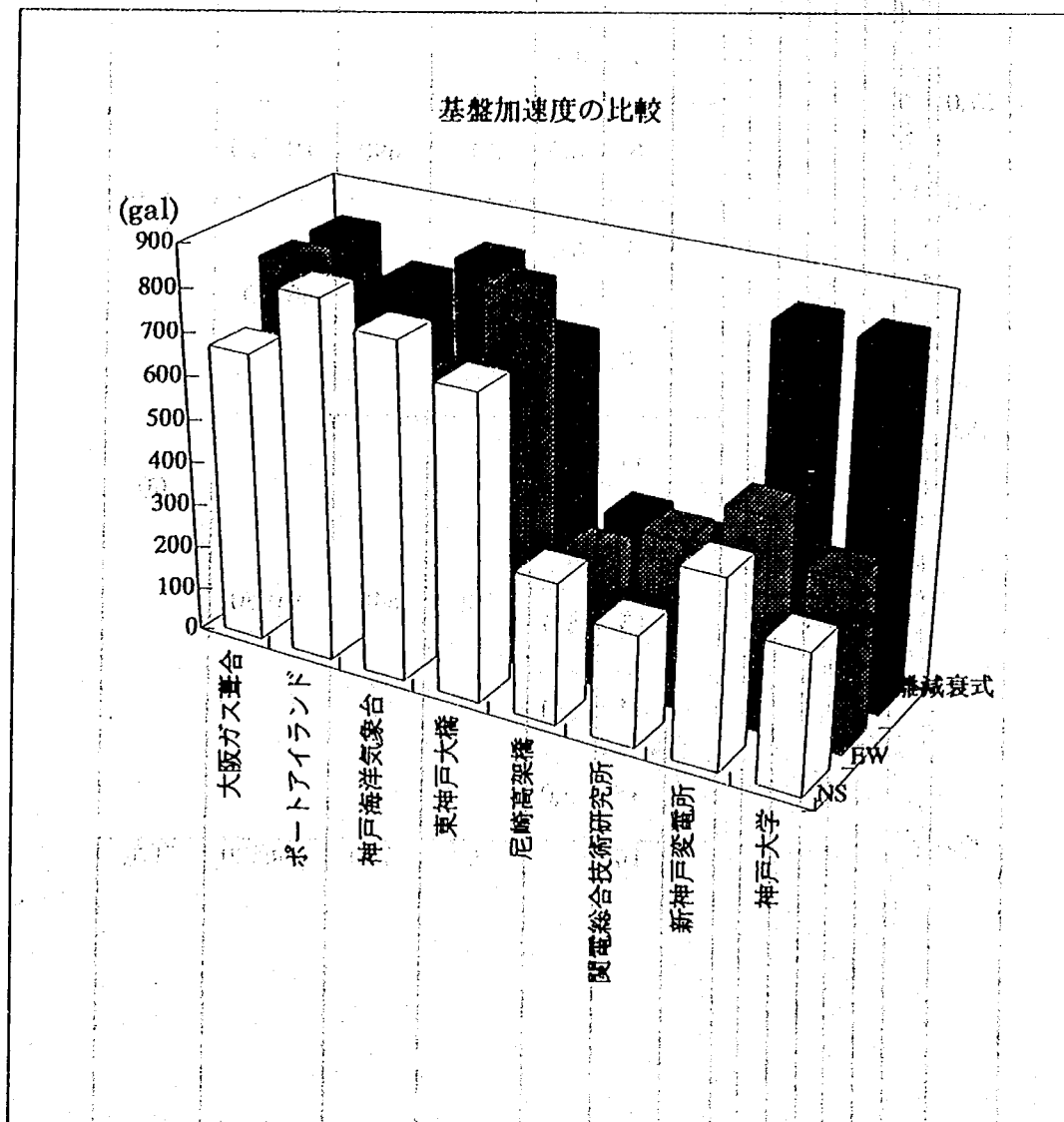
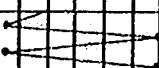
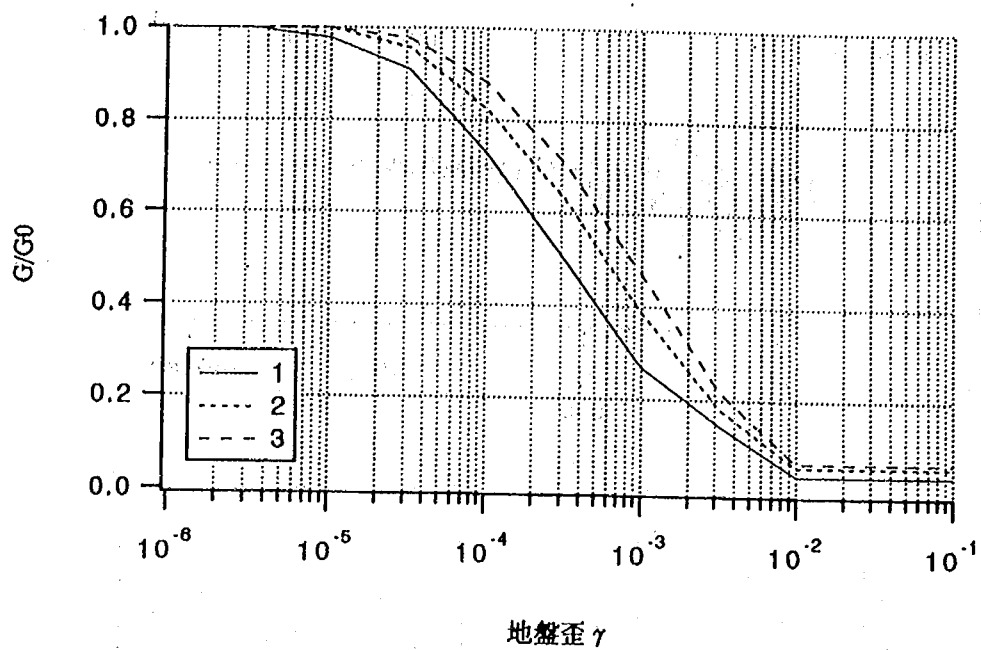
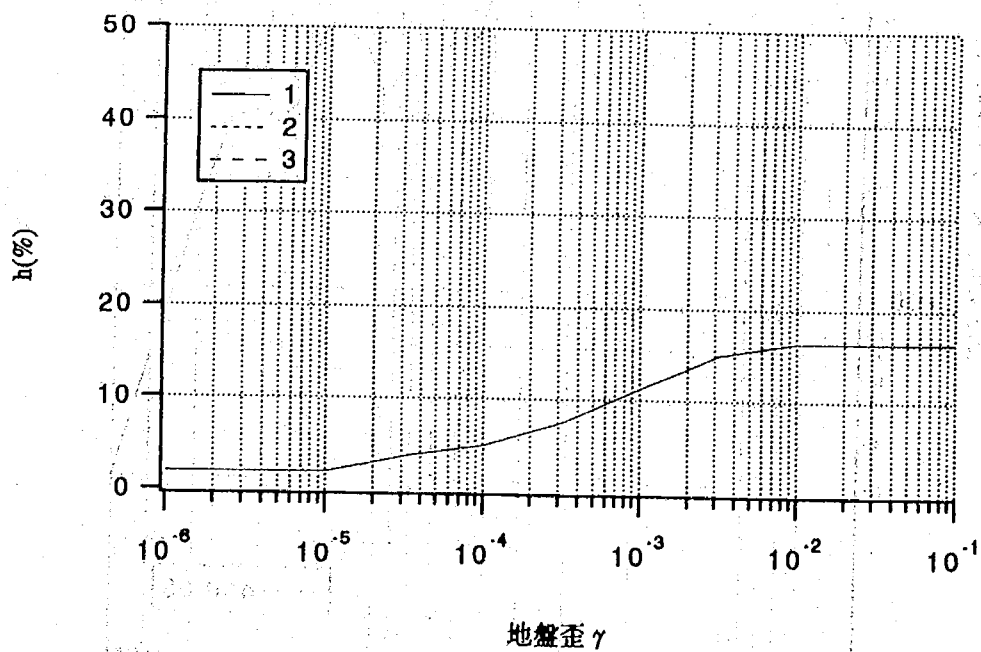


表-4.4.2 解析モデルおよび土質定数 (新神戸変電所)

標尺 (m)	深度 (m)	柱状図	N 値					記号	地層 No.	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	V_s (m/S)	初期剛性 G_0 (tf/m^2)	G/ $G_0 \sim r$ h- γ 曲線No.					
			10	20	30	40	50												
	-3.0								1	3.0	1.9	200	7760	①					
								2	3.5	2.0	300	18370							
								3	3.5										
	-10.0							4	4.0	2.1	450	43390							
								5	4.0										
								6	4.5										
								7	4.5										
	-27.0								8	6.0	2.1	690	102020	②					
	-33.0								9	6.0	2.1	450	43390						
									10	6.0									
	-45.0								11	5.0	2.2	640	91950						
									12	5.0									
									13	5.0									
									14	5.0									
									15	5.0									
	-70.0								16		2.2	780	136580	基盤					



(1) $G \sim \gamma$ 曲線



(2) $h \sim \gamma$ 曲線

図-4.4.1 非線形曲線 (FLUSH入力波形用SHAKE)

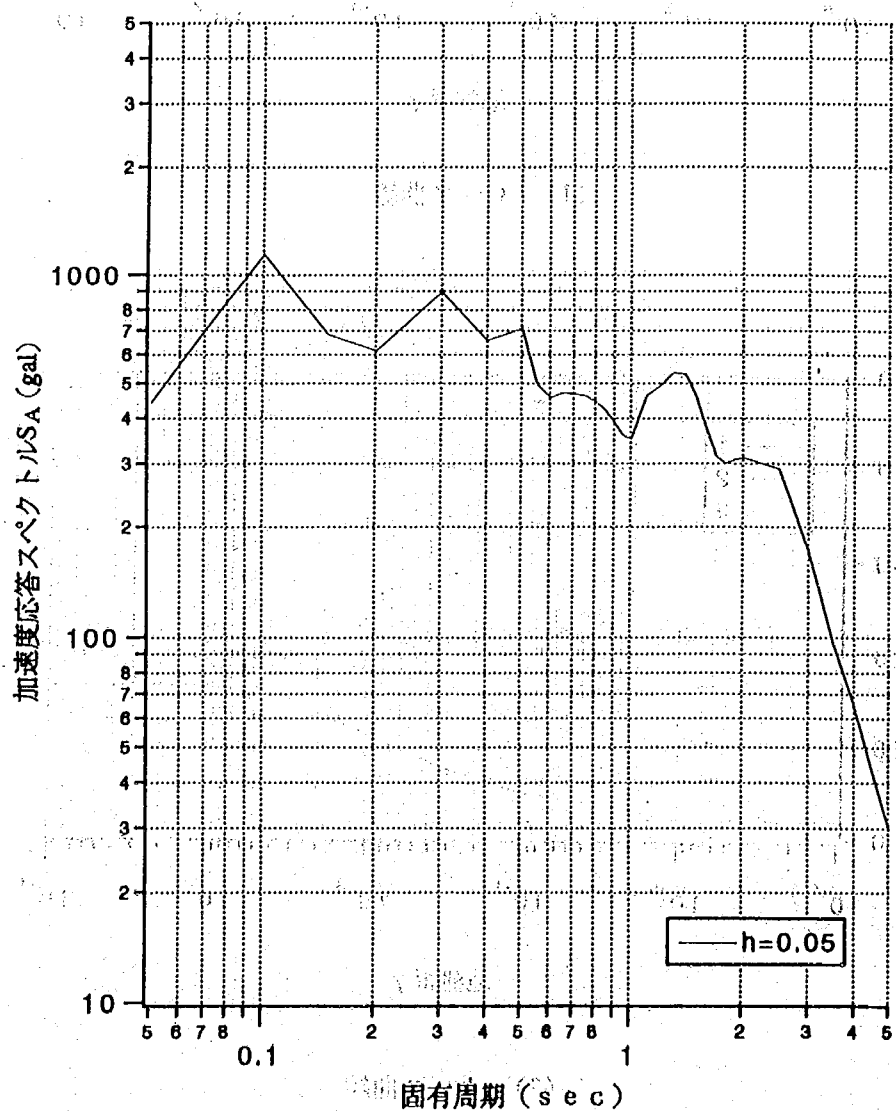
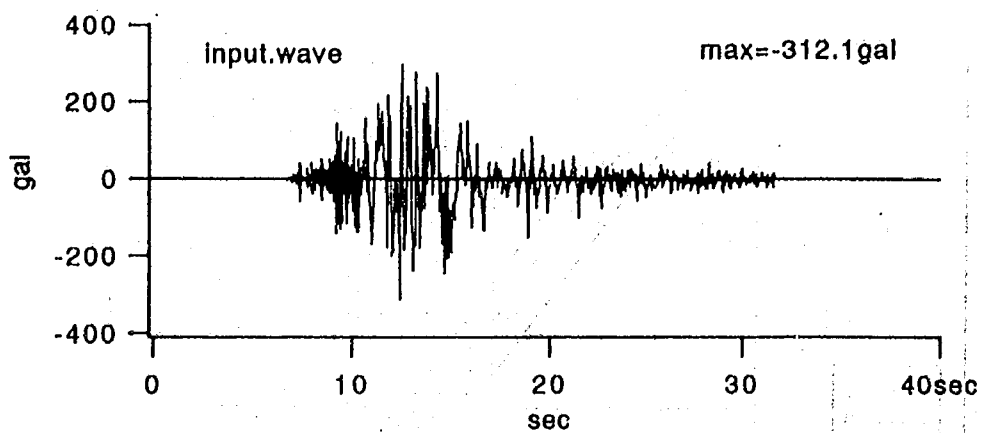


図-4.4.2 FLUSH・加速度応答スペクトル (全体モデル・入力波形)

表- 土質定数一覧表						
	材料No.	ポアソン比	単位重量 (ton/m^3)	低歪での剛性率 (ton/m^2)	初期剛性率 (ton/m^2)	初期減衰
B1	1	0.49	1.90	モデル1での収束値を用いた		
Agf	2	0.49	1.90			
As	3	0.49	1.94			
Ac	4	0.49	1.63			
B2	5	0.49	1.90			
Tlg1	6	0.49	2.00			
Tlg2	7	0.49	2.10			
Tmg	8	0.49	2.10			
Ma12	9	0.49	1.62			
I	10	0.2768	1.80	45918	45918	0.05
II	11	0.2958	1.80	90000	90000	0.05
III	12	0.2479	2.10	259285	259285	0.05

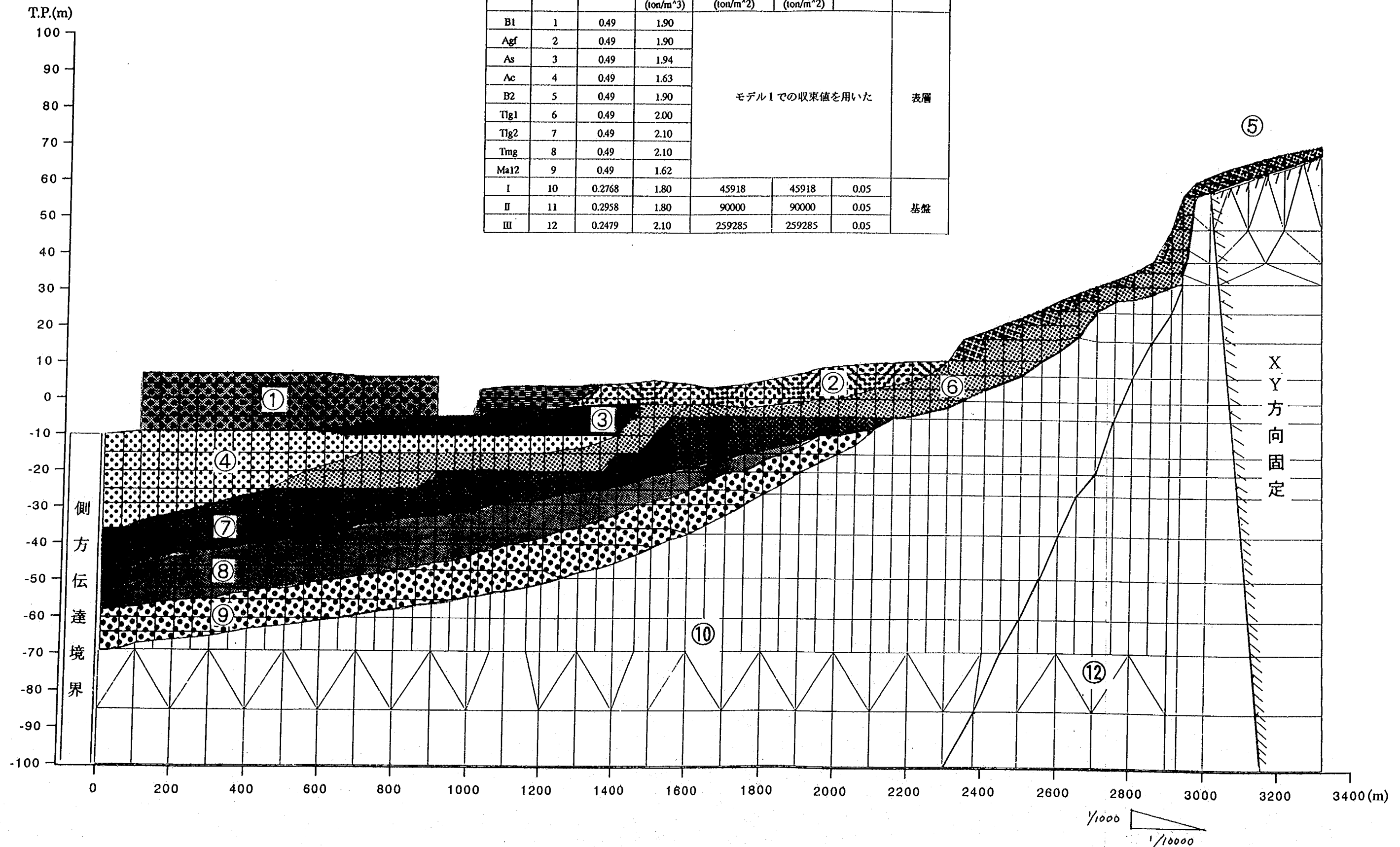


図-4.4.3(1) 解析モデル (表層部拡大図)

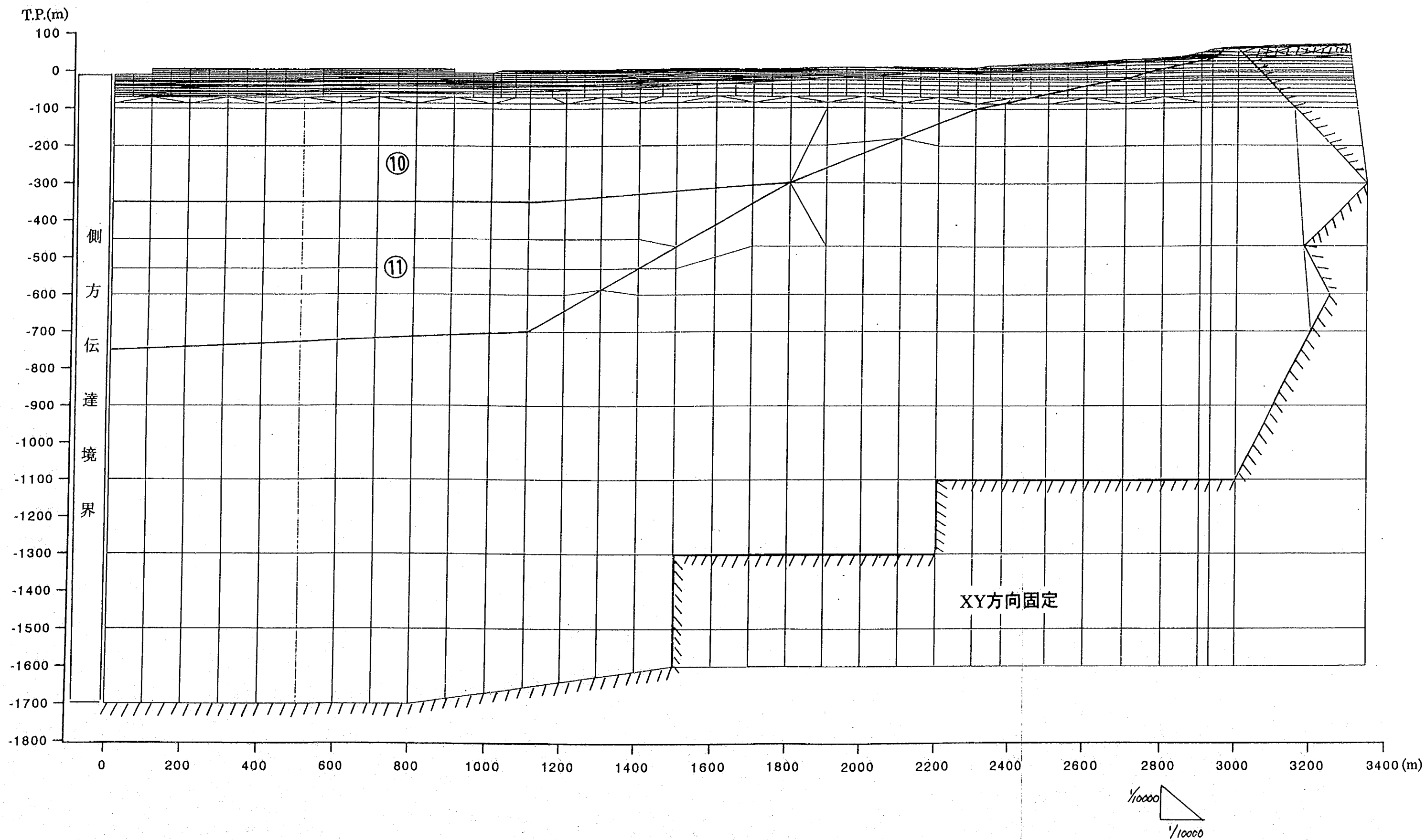


図-4.4.3(2) 解析モデル (全体図)

5. 擬似スペクトル法による強震動解析

5.1 解析方法

弾性波動の伝播問題を解く際に、最もよく使われる方法として、波動方程式を、時間—空間領域で離散化して解く差分法と有限要素法があげられる。これらは直接、時間—空間領域で扱われることから、波動方程式に現れる微分精度を高めるためには、計算のための時間間隔、空間の要素間隔を十分小さく設定しなければならない。

擬似スペクトル法は、差分法で解く際に波動方程式をフーリエ変換し、波動方程式に現れる微分を波数の積で表現する方法である。この方法によれば、離散化する間隔が差分法の安定化条件の範囲にさえあれば、比較的高い微分精度が得られる特徴がある。したがって、時間—空間領域で計算する場合に比べ、モデル化する際の要素数を相対的に少なくすることが可能である。

5.2 地質構造モデル

ここでは基盤岩として、六甲山等を構成する花崗岩質層を考える。F測線地域では、北側の六甲山地から南側の瀬戸内海に向かって、基盤岩が急激に深くなっていき、沿岸部ではその深度がおおよそ2000mに達する。本計算では、今回実施された微動探査（F測線のS波速度構造）の結果に基づき5つの構造モデルを仮定し、シミュレーションを行うこととした。図5.2に構造モデルを示す。図に示されている柱状図は、微動探査によるS波速度構造の結果である。また同時にそれぞれの構造モデルのデジタルモデルを併記する。

デジタルモデルでは、モデルを簡単化するために基盤岩より上の部分を3層に分けた。計算の際の空間格子間隔を100mとするために、最表層の低速度層（沖積層～上部洪積層）は無視し、その層厚分を下位の層厚（大阪層群上部）に加算した。モデルのパラメータを表5.2に示す。

図5.2(a)階段モデル1、及び(b)階段モデル2は、基盤岩が甲南大学付近で海側に垂直に落ち込む形になっており、それより海側に向かって基盤を階段状に変化させてあるが、それらの階段の位置に違いがある。(c)逆断層モデル1、及び(d)逆断層モデル2は、甲南大学付近での基盤の落ち込みを逆断層で仮定したものであり、それより海側に向かって、基盤が(c)は連続的に、(d)は階段状に変化するモデルを仮定している。(e)盆状モデルは、基盤が甲南大学付近より海側に向かって盆状に変化するモデルである。

表-5.2 S波速度構造モデル

層番号	S波速度(km/sec)	密度(g/cm ³)	地質
I	0.5	1.8	大阪層群上部
II	0.7	1.8	大阪層群中部
III	1.1	2.1	大阪層群下部
IV	2.2	2.5	基盤岩（花崗岩類）

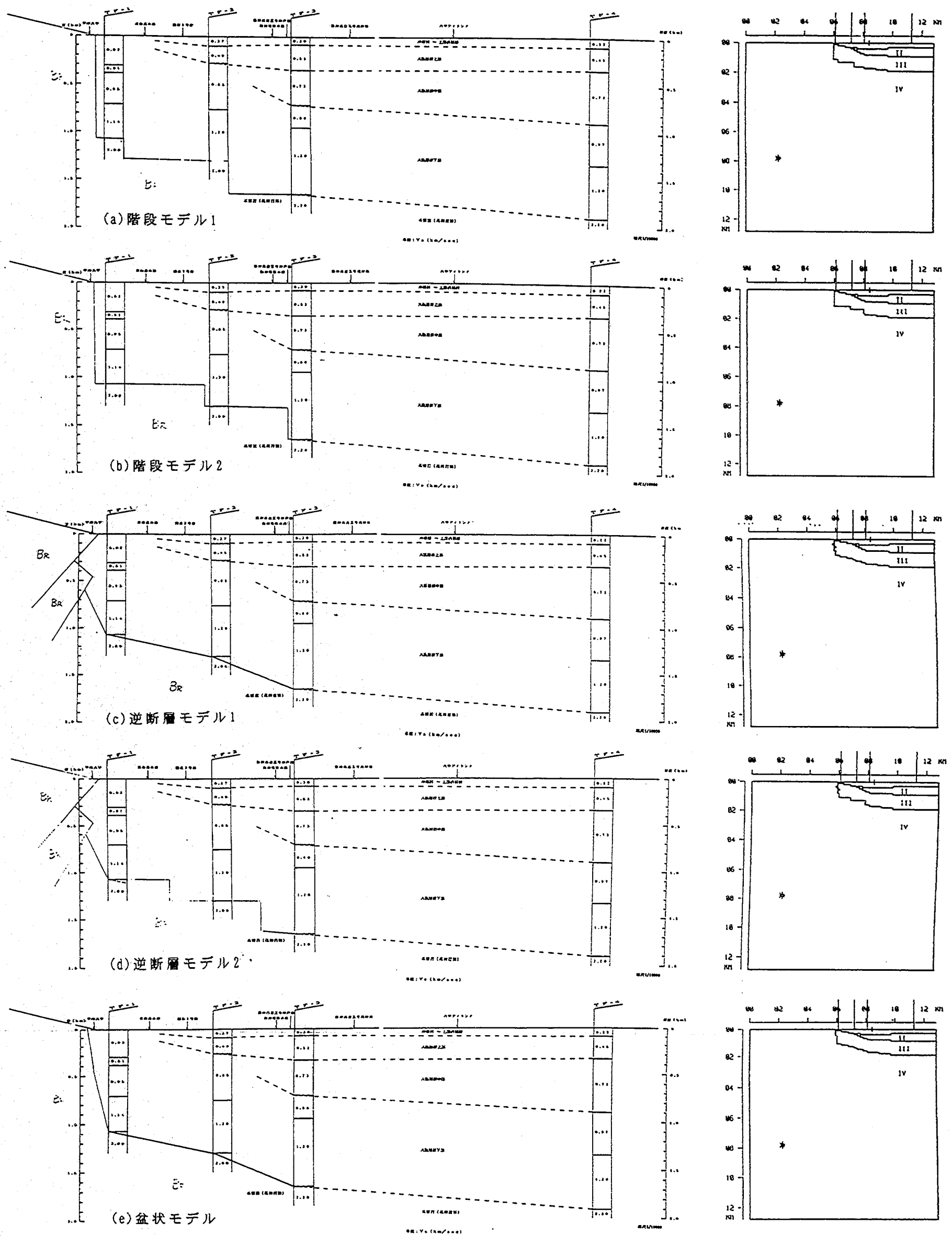


図-5.2 S波速度構造モデル

5.3 計算結果

本計算では、深さ 8 km に線震源を仮定した(紙面に垂直に無限に続く震源。図上では点震源として表される)。また震源断層の横座標については、甲南大学から北北西の方向に妬く 4 km と仮定した。

図5.3.1は、今回の方法で階段状に変化する基盤構造に対する地表地震動の計算を行った結果である(久保田ほか(1995))¹⁷⁾。震源の位置を変化させても、振幅の山谷の傾向はあまり変化しない。したがって、本計算における震源の座標に関する仮定は、結果の解釈を大きく変えることはないと考えられる。

図5.3.2は 5 つのモデルに対する地表振幅(速度及び加速度)分布の結果である。また図には石川(1995)¹⁸⁾による、倒壊率調査の結果(LINE11)も併記してある。いずれのモデルにおいても、基盤構造の落ち込み部より海側で振幅のピークが見られる。これはいわゆる地震波のフォーカッシング現象や、多重反射によって生成されるものと考えられる。

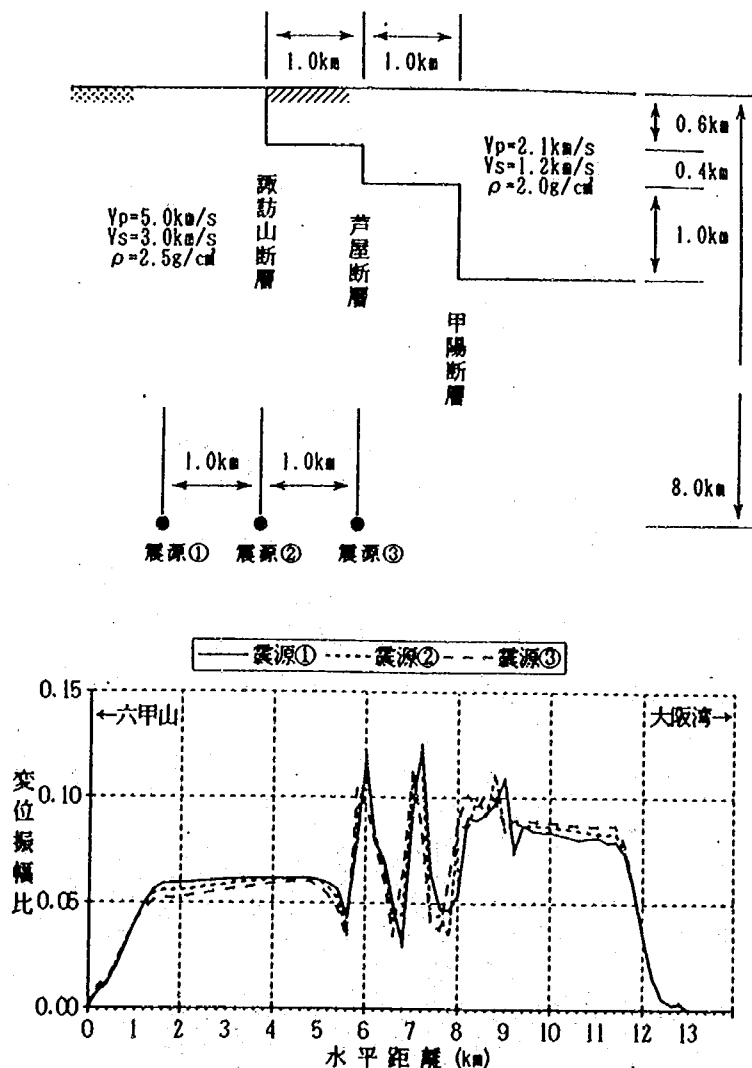
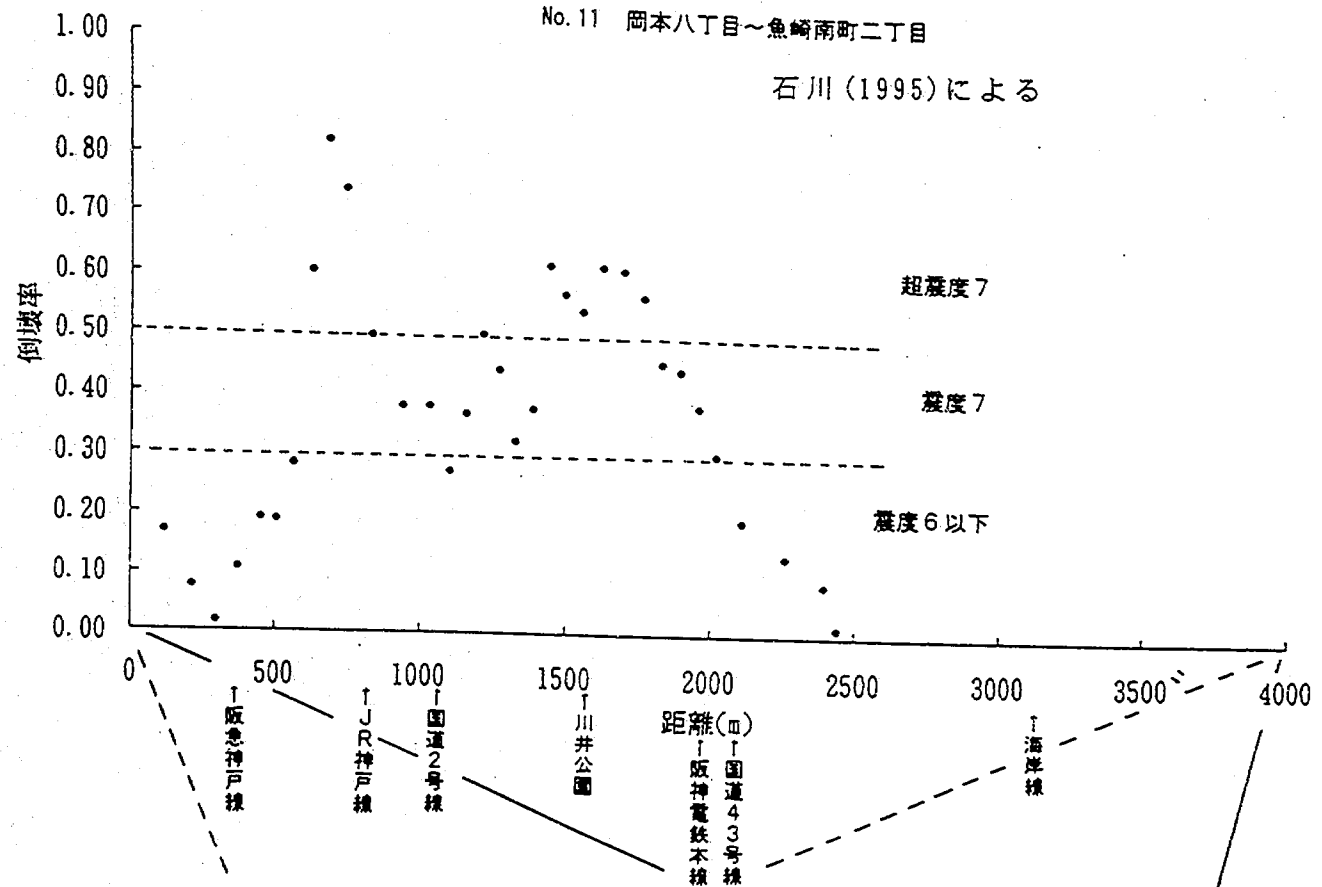
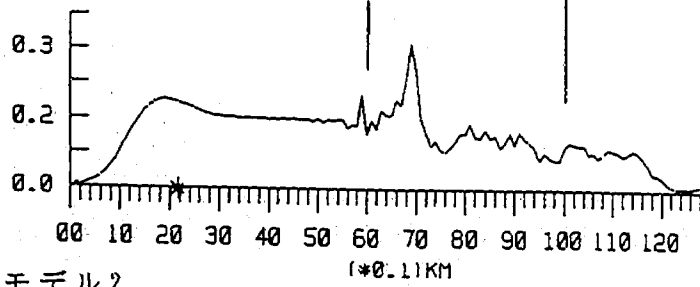


図-5.3.1 震源の位置と地表振幅分布 [久保田他 (1995) による]。

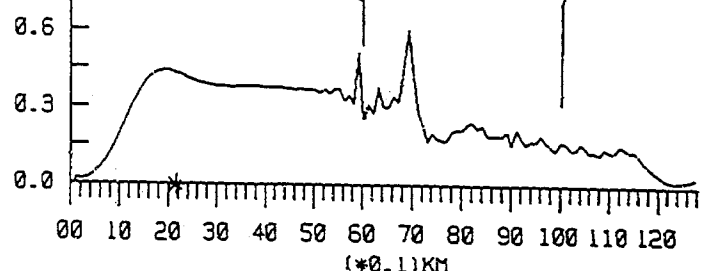


(a) 階段モデル1

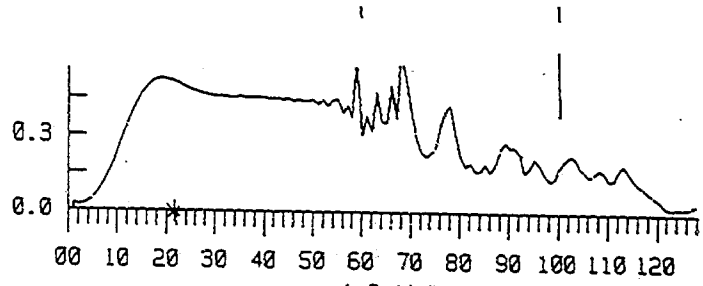
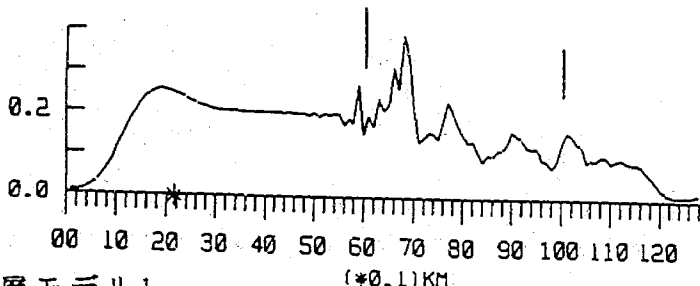
速度 $V_{YY} \times 10^{-11}$



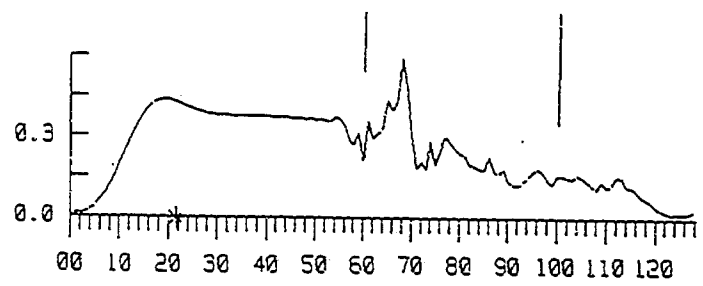
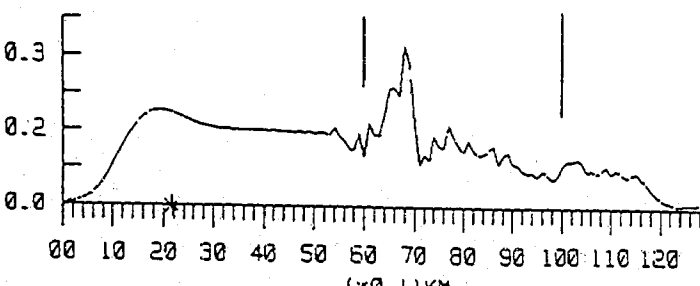
加速度 $A_{YY} \times 10^{-10}$



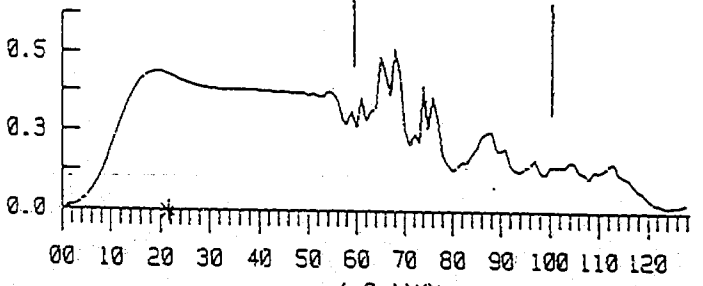
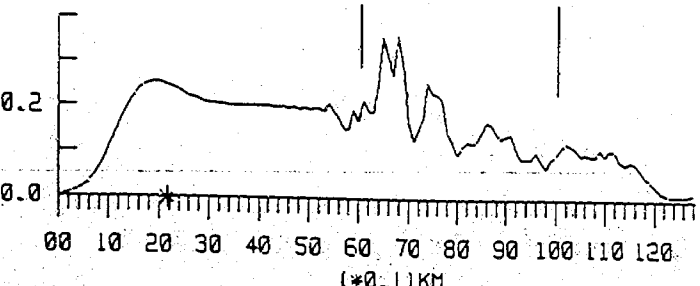
(b) 階段モデル2



(c) 逆断層モデル1



(d) 逆断層モデル2



(e) 盆状モデル

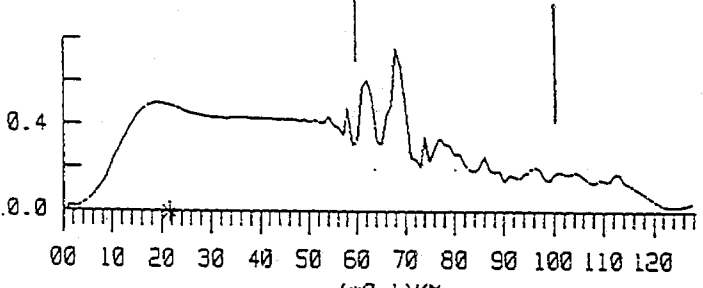
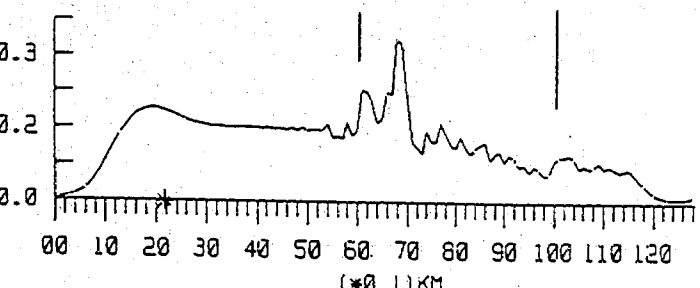


図-5.3.2 地表振幅分布と倒壊率分布

倒壊率分布の結果と最もよく調和している逆断層モデル2について、地震波線経路を計算した結果を図5.3.3に示す。地震波線は震源から2度毎に射出されている。また上部には地表に到達した波線の密度が示されており、波線密度の高い部分が振幅の大きいところに対応している。

また振幅の山谷の起伏が大きな部分は、いずれのモデルにおいても構造の落ち込み部から概ね2 km程度であり、それより海側では多少の起伏はあるものの、ほぼ一様に減衰していく。この2 kmという値は、基盤の落差にほぼ一致しており、基盤構造による局所的異常震域の出現範囲を示唆するものと考えられる。

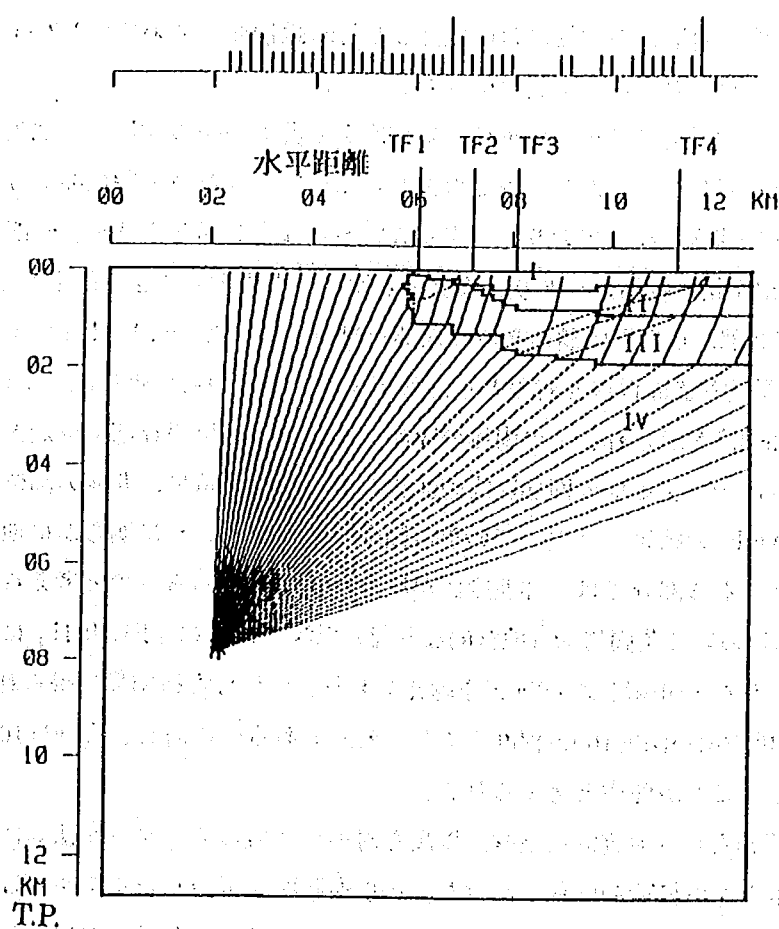


図-5.3.3 逆断層モデル2の地震波線経路と地表波線密度分布

6. まとめ

- 本解析を行うため、神戸地区7点において収集された観測地震波をもとに解析用基本基盤波を調整・作成した。その際、各地点観測波から得られる基盤のスペクトルはどの地点でも、またどの方向でも概ね同様のスペクトル形状を示しており、金井、太田などの地震基盤の考え方の妥当性が示された。
- 上記の基本基盤波を入力して行った「SHAKE」による全8測線81地点における一次元応答解析の結果では、地盤卓越周期が長いほど地表面と基盤の最大加速度の比および地震応答スペクトル強度SIは小さくなることが示された。すなわち、地表最大加速度が600galを越えるような地盤の示す卓越周期は、0.2~0.3秒程度（初期剛性による）となっており、このような地盤では地震時には土の非線形性により卓越周期が0.4~0.5秒程度になる。入力した基盤波のスペクトル特性は0.3~0.4秒にピークを持っていることから、この地盤の卓越周期とほぼ一致したために加速度値が増大したものと考えられる。阪神大震災の超震度7の地域の地盤において行った常時微動測定結果では0.2~0.3秒付近の短周期が卓越しているとする早川の報告を上記解析結果は裏付けている。
- 「SHAKE」による一次元応答解析の結果は、超震度7の震災の帯の地域では地表面の加速度は600galを越えていることを示した。しかし、震災の帯から北へはずれた高位段丘部でも震災の帯と同程度かそれ以上の地表面加速度となっており、被害調査結果とは少し異なるうえ、一部の測線においては最大加速度が1000galを超える部分があり、観測値と比べてやや大きすぎる結果となった。
- F測線において臨海部から六甲山麓の高位段丘部を対象に行った「FLUSH」による二次元地震応答解析の結果では、工学的基盤面以浅を対象としたモデルでは震災の帯付近においては700~900gal程度の高い地表面最大加速度が示され、その南側の臨海部と北側の高位段丘部では最大加速度が低下し、震災の帯の分布とほぼ一致する地表面加速度の変化が得られた。特に、北側の高位段丘部での最大加速度の低下は「SHAKE」の結果では現れていない傾向であるが、これは明らかに地形的な影響と考えられ、層厚が急に薄くなる部分では、加速度値が減少する傾向があるものと考えられる。
- 同様にF測線において花崗岩層（地質的な基盤）以浅を対象に「FLUSH」による二次元地震応答解析を行ったが、地表面加速度が2000galを越えており、有益な解析結果は得られなかった。これは、「FLUSH」の解析対象が深度100m程度までが一般的であるのに対し、今回は1000mを越えるような深度のモデルとしたことが理由と考えられる。
- F測線において花崗岩層（地質的な基盤）以浅を対象に「擬似スペクトル法」による強震度解析を行い、地表面加速度と基盤構造の関係を調べた。特に逆断層を考慮したモデルでは、地震による構造物倒壊率の分布と地表面加速度の大きさの分布が比較的良好に調和した結果が得られた。また、同モデルについて震源から2度毎に射出した地震波線経路を計算した結果では、波線密度の高い部分が地表面加速度の大きなエリアと対応していることが示された。

7. 今後の課題

一次元および二次元の地震波応答解析を行った結果、浅層地盤を考慮した二次元FEM解析においては阪神・淡路大震災時における震度7の震災の帯が再現できることが明らかとなった。

しかしながらこの解析はF測線でのみ行われたものであり、他の測線でも同様の結果がでるかどうかは不明である。また今回の解析においては浅層地盤のモデル化に結果が大きく左右されるということを注意すべきである。すなわち、地盤の持つ物性値や地盤の層構造などの精度がどの程度であることが望ましいかの検討は行われていない。つまり、地盤のモデル化の仕方いかんによってはその結果が大きく変わり、モデル化の精度によっては今回のように震災の帯の再現ができない場合も考えられる。

よって、今後は地盤のモデル化の精度等が解析結果にどのような影響を及ぼすかの検証を行うとともに、この結果をもとに他の地域においてもこの手法が適応できるようにモデル化の手法を一般化させる方法を開発する必要があると考えられる。また、今回は二次元解析であったが、今後は広がりを持った三次元解析を行うことによって、結果をさらに現実に近い形で表現することを考える必要がある。

参考文献

- 1) 入倉孝次郎、1996a、“震災の帯”をもたらした強震動、科学、66、86-92.
- 2) 入倉孝次郎、1996b、阪神・淡路大震災—防災研究への取り組み—阪神大震災を引き起こした強震動、京都大学防災研究所年報、第39号A、17-33.
- 3) 入倉孝次郎、1997、「兵庫県南部地震の強震動はすべてわかったのか?」、京都大学防災研究所研究集会資料集、251pp.
- 4) Ikebe N., Iwatsu J and Takenaka J., 1970, Quaternary geology of Osaka with special reference to land subsidence, Jour. Geosci. Osaka City Univ., 13, 39-98.
- 5) 古谷正和、1978、大阪平野西部の上部更新統、地質学雑誌、84、341-358.
- 6) 古谷正和・坂上敏彦・松本雅治・中村忠春・中林正司・幸左賢二、1992、湾岸線南伸部の地質構造、関西地盤の地質構造と土質特性に関する最近の知見シンポジウム発表論文集、土質工学会関西支部、79-84.
- 7) 藤田和夫・前田保夫、1983、須磨地域の地質、地域地質研究報告、地質調査所、101p.
- 8) Kanai K., Tanaka T and Yoshizawa S., 1959, Comparative studies of earthquake motions on the ground and underground, Bull. Earthq. Res. Inst., 37, 53-87.
- 9) Kanai K and Suzuki T., 1968, Expectancy of the maximum velocity amplitude of earthquake motions at base rock, Bull. Earthq. Res. Inst., 46, 663-666.
- 10) 太田 裕・嶋 悦三、1967、地震基盤について(1)、災害科学論文集、4、133-135.
- 11) 土岐憲三・後藤洋三・江尻譲嗣・澤田純男、1995、兵庫県南部地震の震源特性と地盤振動特性、土木学会誌、Vol.80、No.9、32-43.
- 12) 関口春子・入倉孝次郎・岩田知孝・寛楽麿・千場充之、1995、強震動記録の波形インバージョンによる兵庫県南部地震の破壊域と破壊過程、日本地震学会講演予稿集、1995年秋期大会、A75.
- 13) 早川清・仲野貴祐、1996、神戸市内の常時微動特性と地震被害との関係、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、土木学会、1-8.
- 14) Lysmer J., Seed H.B., Udaka T., Hwang N and Tsai C.F., 1975, Efficient finite element analysis of seismic structure, soil-structure interaction, Report No. EERC 75-34, University of California at Berkeley.
- 15) Seed H.B and Idriss I.M., 1969, Influence of Soil Conditions on Ground Motions During Earthquake, Journal of soil Mechanics and Foundations Division, A.S.C.E., Vol.94, SM1, 99-137.
- 16) Schnabel P.B., Lysmer J and Seed H.B., 1972, SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC 72-12, University of California at Berkeley.
- 17) 久保田隆二・趙志新・中田文雄、1995、地震基盤の構造変化による地震波の電波特性について、物理探査学会第93回講演論文集、130-134.
- 18) 石川浩次、1995、神戸の地形・地質・地盤と構造物の帯状・島状被害、「阪神大震災」中間報告会、日本応用地質学会、72-104.

謝 辞

今回の検討対象地域の地質情報に関して、近畿地方建設局には、兵庫県南部地震後に新規のボーリング調査（コア採取、各種物理検層、コアの室内試験）並びに長周期微動探査による地盤構造調査を実施していただきました。これらの調査に当たっては、近畿地方建設局企画部企画課の宮川勇二課長、近畿技術事務所の浦上康文副所長、岸田明雄課長、雀部和男係長、西田龍次技官に、大変お世話になりました。また、調査地点の確保等に関して、兵庫県阪神・淡路大震災復興本部土木部土木復興局復興対策室の浜田士郎係長、神戸市震災復興本部総括局の太田敏一計画課長、神戸市企画調整局総合計画課の橋田之宏地域政策係長にご協力いただきました。（所属はすべて、平成7年当時）また、本報告書を取りまとめるに当たっては、地質研究室招聘研究員の久保田隆二博士（川崎地質株式会社）に、種々ご教示いただきました。これらの方々に厚く御礼申し上げます。