

# 地盤情報データベースを活用した神戸地域地震動解析

沖村 孝<sup>1</sup>・佐藤忠信<sup>2</sup>・南部光広<sup>3</sup>・若林亮<sup>4</sup>・岸本英明<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 理博 神戸大学 都市安全研究センター (〒657-0013 神戸市灘区六甲台町1-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 応用地質(株) 神戸支店 (〒652-0807 神戸市兵庫区浜崎通10-20)

<sup>4</sup>応用地質(株) 関西支社 (〒532-0021 大阪市淀川区田川北2-4-66)

<sup>5</sup>日本コンピュータコンサルタンツ(株) (〒540-0035 大阪市中央区釣鐘町2-1-4)

兵庫県南部地震による地震動分布の実態を把握し、「震災の帯」が形成された原因の究明を行う目的で、地盤情報データベースである「神戸JIBANKUN」を活用して、神戸市街地における地震動解析を行った。解析にあたって、必要なS波速度等の物性値は「神戸JIBANKUN」に登録されているデータより新たに求めた。解析の結果、神戸市街地で得られている観測値と解析で求められた値とが良い一致を示すとともに、解析地震動分布と木造建物被害分布との比較検討結果より、被害との相関が高い地震動パラメータを抽出するとともに被害率が高くなる境界値を明らかにすることができた。

**Key Words :** *geological information, database, earthquake, frequency spectrum, seismic intensity, wooden house damage*

## 1. まえがき

兵庫県南部地震により各種構造物は甚大な被害を受け、神戸市街地から西宮市にかけては被害の著しい「震災の帯」が形成された。これら地域における建物などの被害は、地震の揺れによって発生したものであるが、観測された地震動記録が僅かであったため、地域全体の地震動分布の詳細は不明な状態であり、このことは各種施設の被害原因を究明する上で大きな障害となっている。したがって、これら地域における兵庫県南部地震の地震動分布を把握することは、地震による各種被害原因究明のためには必要不可欠なことである。

本論文では、この問題を解決するべく、神戸市内の代表測線において地震動解析を行うとともに、結果の妥当性を検証するために地震動分布と木造建物被害との対比を行った。解析に用いた手法は、断層の破壊過程を想定して基盤地震動を求め、それを工学的基盤面および地表面まで1次元増幅により、地震動を求める手法である。解析に先立って、地盤の各種物性値を地盤データベース活用により詳細に検討するとともに、地震時に観測された地震動と解析で得られた値との比較検討を行い、解析モデルならびに各種パラメータの見直しを行って、モデルの精度向上を図った。建物被害については、構造が比較的単一である木造建物被害を取り上げ、地震動と建物被害との関係について分析を行い、被害に影響を与える地震動パラメータを検討した。

## 2. 地震動解析手法

兵庫県南部地震による地震動を推定し、建物被害との関係を分析するためには、任意地点における地震動を求めることができる手法を用いる必要がある。本論文で用いた解析手法は、佐藤<sup>1)</sup>らが開発した手法であり、分割された小断層領域からの波形を重ね合わせる構成式を使い、得られた結果をフーリエ変換して小領域における震源スペクトルを求める方法である。この手法では、任意地点での地震動予測を行うため、余震記録の代わりに推定した断層破壊過程より求めた震源スペクトルを用いている。すなわち、兵庫県南部地震における震源断層の破壊過程をSekiguchi et al.<sup>2)</sup>およびIrikura et al.<sup>3)</sup>が提示した断層破壊過程よりモデル化して基盤地震動を求め、それを重複反射理論<sup>4)</sup>によって地表面における地震動のフーリエ振幅スペクトルを解析的に推定する手法である。あわせて、それを入力とする1自由度系構造物の加速度パワースペクトルを計算し、スペクトルモーメント法<sup>5)</sup>により加速度応答スペクトルを推定する手法である。本手法は地表面におけるフーリエ振幅スペクトルや加速度応答スペクトルを求めることを目的として開発された手法であるため、地表面における時刻歴の加速度波形等は解析によって得られないが、加速度や速度の最大値、スペクトル強度などを求めることができる。

図-1に本手法の概念を示す。基盤より上部の地震動増幅特性については、重複反射法により鉛直に入射するSH

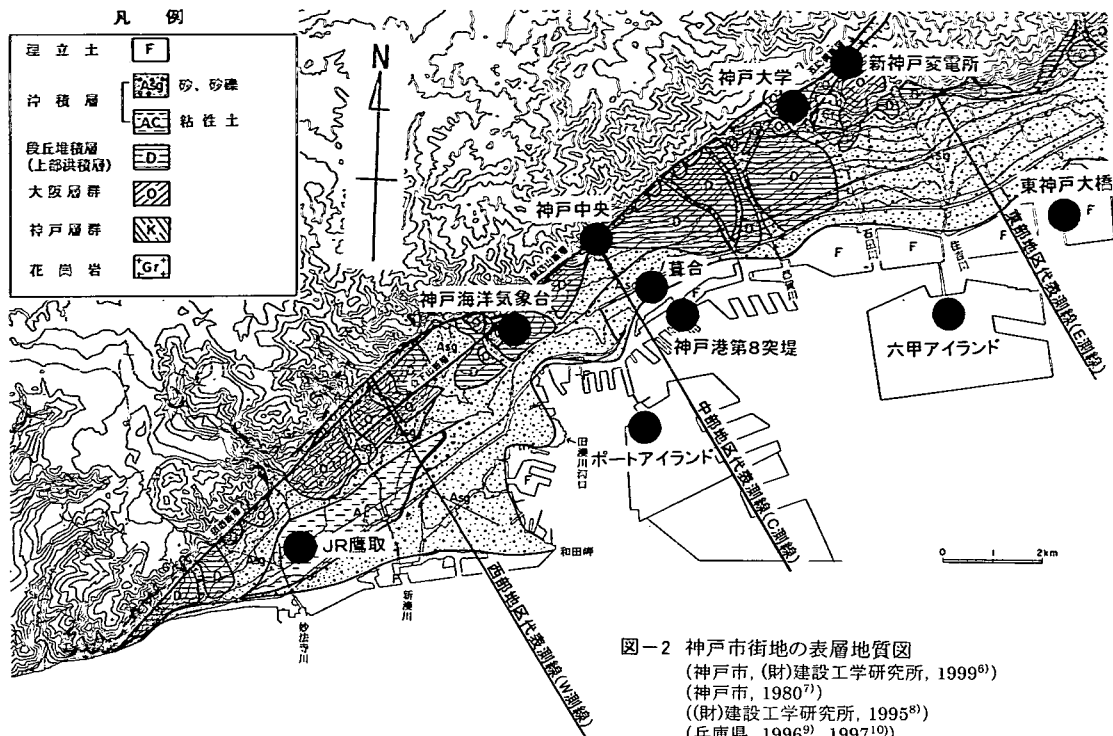


図-2 神戸市街地の表層地質図  
 (神戸市, (財)建設工学研究所, 1999<sup>6)</sup>  
 (神戸市, 1980<sup>7)</sup>  
 ((財)建設工学研究所, 1995<sup>8)</sup>  
 (兵庫県, 1996<sup>9)</sup>, 1997<sup>10)</sup>  
 (建設省近畿技術事務所, 1997<sup>11)</sup>  
 (地質調査所, 1982<sup>12)</sup>, 1983<sup>13)</sup>, 1984<sup>14)</sup>)に一部加筆

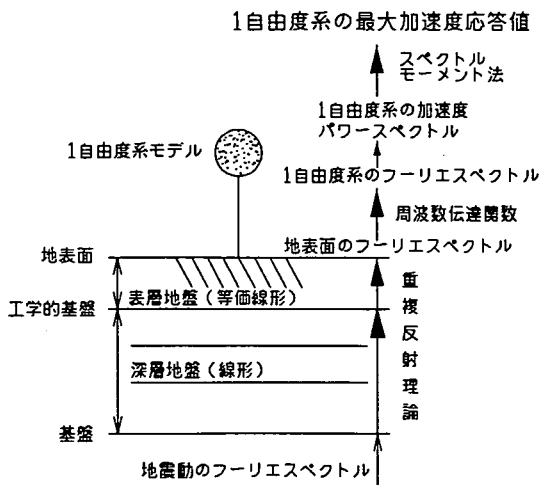


図-1 地震動解析手順

波に対する深層地盤および表層地盤の周波数伝達関数を求め、地表面におけるフーリエ振幅スペクトルを求めている。この手法の特徴は、地震動のパワースペクトルを理論的に求めているため、加速度時刻歴を必要とせずに加速度応答スペクトルを推定することができる点にある。本手法においては、震源断層の破壊過程をモデル化して震源スペクトルを求めているため、基盤レベルでの地震動は精度良く再現されていると考えられる。あわせて、本論文においては、解

析モデルの精度をより一層高めるために、神戸市内における地震動観測点において、観測記録から求めた加速度応答スペクトルと解析から得られた加速度応答スペクトルとを比較検討し、最適な深層地盤の減衰率などを検討した。

本手法では、面状に広く分布する多地点の地震動を短時間で計算できるとともに、地盤データをあまり加工せずに、そのままの状態を取り込めるという利点がある。すなわち、神戸市域に多数分布する「神戸JIBANKUN」<sup>6)</sup>のボーリングデータをそのまま用いることができ、ボーリングデータに表わされている地層構成ならびに物性値等を用いることにより、地盤情報を忠実に反映した地震動解析を行うことができる。

### 3. 神戸市域の地盤特性

#### (1) 地質分布

神戸市街地は、北側に六甲山地を控えた東西に狭長な扇状地に位置している。地質的には、六甲山地の隆起に伴ない、継続的に供給された堆積物によって構成されている。このため、基盤岩を覆っている被覆層の地層変化が著しく、連続性に乏しい。

被覆層は、古いものから新生代第三紀鮮新世～第四紀更新世に属する大阪層群、更新世の段丘層、完新世の沖積層などである。最も表層に分布する沖積層は、最終氷期

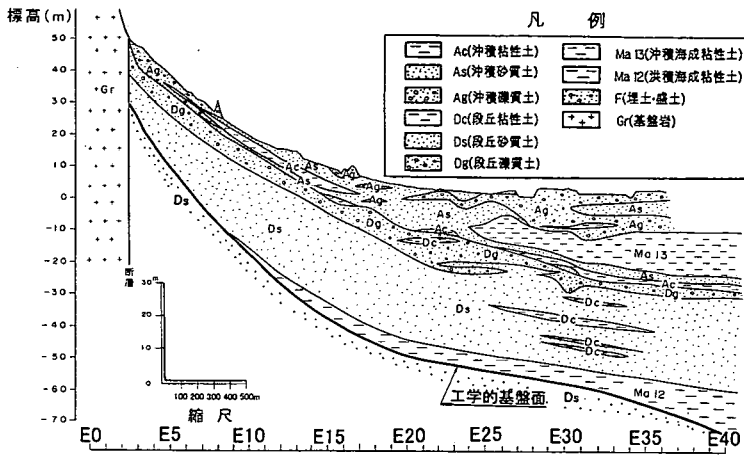


图-3 东部地区代表测线地质断面图

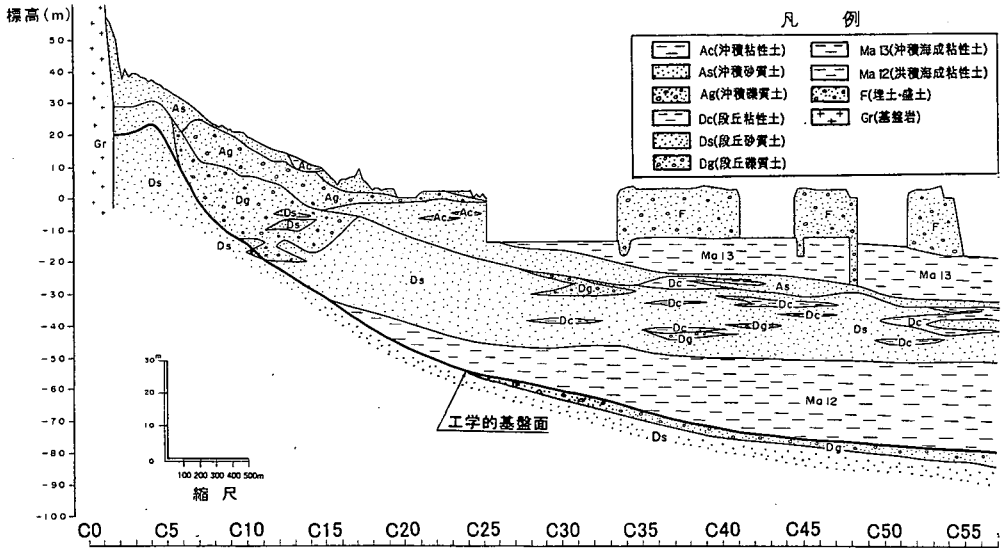


图-4 中部地区代表测线地质断面图

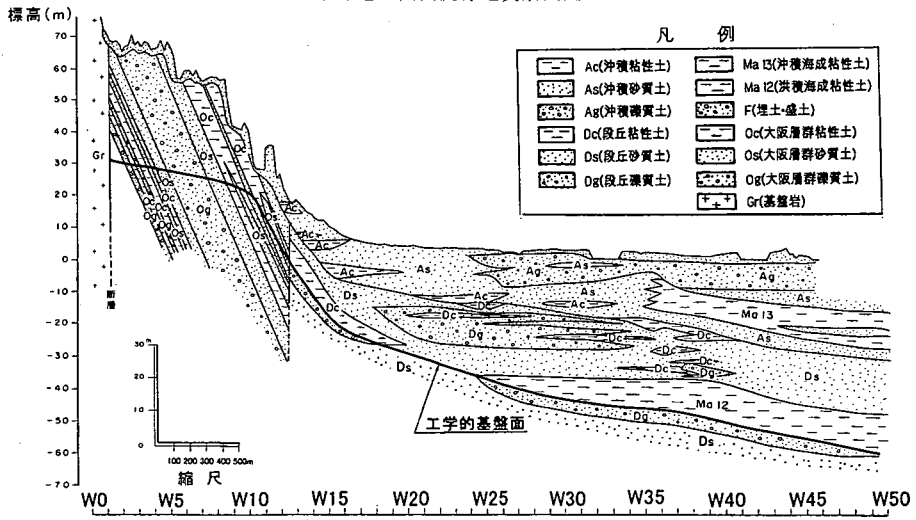


图-5 西部地区代表测线地质断面图

である約2万年前以降に形成された地層であり、沿岸部では主として海成粘土層(Ma13)により構成されている。一方、市街地の中心部においては、山地から供給された土砂が、扇状地堆積物となって分布しているため、表層地盤を構成する地層は礫質土が主体となっている。

このような特徴は段丘層や大阪層群にも認められ、気候変動に伴う海水面の昇降によって、堆積物の種類が異なるとともに、河川における堆積場と侵食場が繰り返し起こったため、地層の変化が著しい特徴がある。

図-2は、これまでに発表された各種資料<sup>6)~14)</sup>をもとに、一部加筆をして作成した神戸市街地の表層地質図である。これによると神戸市街地の表層地質は、大きく東灘区～灘区にかけての東部地区、中央区の中部地区、兵庫区～須磨区にかけての西部地区に大別される。すなわち、東部地区に分布する沖積層は砂質土、礫質土を主体としているのに対して、西部地区は和田岬を突端とする砂州の後背地であることを反映して、表層付近に粘性土の分布しているところがある。一方、中部地区は生田川の扇状地に代表され、沖積層は礫質土を主体としている。

図-3～5は、それぞれの地区を代表する地質断面図である。測線の位置は図-2に示した。これらの図と図-2をあわせて、東部地区をもう少し詳しく見ていくと、沖積層が分布するのは、住吉川を中心とする東灘区全域と灘区の海岸に近い区域である。これらの地域では、砂質土、礫質土が主として分布している。代表測線の深度方向分布について見ると、海岸から少し内陸に入ったところまでは、Ma13層が分布しているが、それより内陸部に入ると海浜性の砂質土層(As)が分布している。沖積層の下部に分布する段丘層も砂質土を主体としているところが多く、山麓部に近づくとも礫を混じえるところが多くなる。

中部地区においては、全体に山地と海岸線との距離が狭く、このことを反映して沖積層は礫質土が主体となっている。ただ、海岸線近くになると礫質土が砂質土に漸移しており、ポートアイランドなどの埋立地に及ぶと、Ma13層が旧海底面より分布している。代表測線の深度方向分布について見ると、Ma13層はほとんど内陸部には分布しておらず、海岸線より海側に分布している。内陸部においては、沖積層および段丘層とも礫質土を主体としており、海岸線に近くなると砂質土が主体となっている。

西部地区では、兵庫区南部の和田岬とその西方に分布する砂州の周辺や旧湊川河口付近の沖積層は、砂質土、礫質土を主体としているのに対して、その後背地では、粘性土が分布している。一方、六甲山地縁辺部にあたる会下山、池田上町等の丘陵地には、大阪層群やこれを覆って段丘層などが分布している。代表測線の深度方向分布について見るとMa13層は海岸線より少し内陸部まで入り込んでいるが、それより内陸部では砂質土、礫質土が分布している。西部

表-1 各地区・各地層毎の平均N値

地層名		西部地区 (約700本) 平均N値	中部地区 (約550本) 平均N値	東部地区 (約400本) 平均N値	全地区合計 (約1650本) 平均N値
Ac	沖積粘性土	11	9	11	11
As	沖積砂質土	25	23	23	24
Ag	沖積礫質土	39	42	33	39
Dc	段丘粘性土	22	23	23	23
Ds	段丘砂質土	43	42	45	43
Dg	段丘礫質土	54	50	52	52
Ma13	沖積粘性土	10	3	3	5
Ma12	洪積粘性土	18	16	14	16
F	盛土・埋土	11	17	11	16
Oc	大阪層群粘性土	30	26	41	30
Os	大阪層群砂質土	48	51	59	49
Og	大阪層群礫質土	52	38	43	52

注) N値60以上はN値=60としている。

地区の特徴としては、和田岬を中心とする砂州、砂堆域においては礫質土が分布しており、それより内陸部に入ると砂質土が主体となっている点が挙げられる。一方、段丘層は内陸部では礫質土が主体であり、海岸線近くなるにしたがって砂質土が主体となっている。

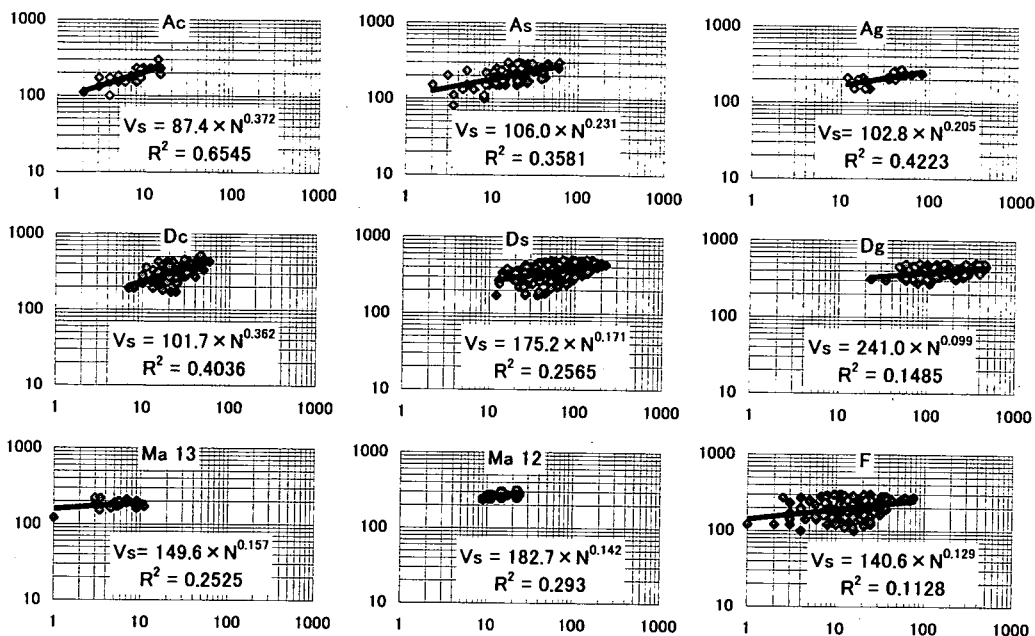
以上のように、神戸市街地は、六甲山麓に発達する小規模な扇状地の複合帯よりなっている。このため、河川の流下方向である南北方向だけでなく、それと直角の東西方向にも地層の連続性は乏しく、その地盤は大阪の地盤などに比べると極めて複雑である。

## (2) 地盤物性値の検討

2章で述べた手法によって、地表地震動を推定するためには、推定地点の地盤情報が必要不可欠である。ここでは、「神戸JIBANKUN」に登録されている約4,500本のボーリングデータをもとに、各種地盤物性値の検討を行い、その結果から地震動解析に必要な地盤モデルを作成した。

### a) N値特性

図-2に示す東部、中部、西部を代表する測線を中心に、それぞれの地区において、約2km幅に分布するボーリング柱状図のN値特性を、地層毎に深度との関係で調べた。各地層とも値は広範囲に及んでいるが、そのうち各地区毎にN値の平均値をまとめたものが表-1である。これによると沖積層のうちAc層、As層は各地で大きな差は認められないが、Ag層では東部地区で小さくなっている。これに対して、段丘層に相当するDc、Ds、Dg層は各地区で大きな差は認められなかった。Ma13層は東部、中部地区ではN値が約3であるのに対して、西部地区では約10と大きな値を示している。一方、Ma12層は各地区で大きな差は認められなかった。



注1) 各グラフとも縦軸がS波速度 ( $V_s$ ) (m/sec), 横軸がN値(回)  
 注2) N値60以上の場合は30cm貫入に要するN値(換算N値)を算出し, それを使用している。  
 注3)  $R^2$ は決定係数である。

図-6 各地層毎のN値とS波速度との関係

### b) N値とS波速度との関係

「神戸JIBANKUN」に登録されているボーリングデータは, 標準貫入試験しか行われていないものがかなりの部分を占めている。このことより, ボーリング各地点における地盤のS波速度を求めるためには, N値からS波速度 ( $V_s$ ) を推定する等の工夫が必要である。

そこで「神戸JIBANKUN」に登録されているボーリングデータのうち, PS検層が実施されている50本のデータについて, 地層毎にN値と $V_s$ とを抽出し, 両者の関係より各地層毎にN値から $V_s$ を換算するための回帰式を求めた。その結果を図-6に示す。なお, ここでデータを抽出するにあたり, N値が60を超えるものについては, 30cm貫入に要する打撃回数を算出し, それをN値として用いた。ここで, 標準貫入試験において, 大きな礫などを打設し, 貫入量がほとんどなく, 地盤の性状を表わしていると判定しがたいデータについては削除した。ただ, これらのデータは極く一部であった。

図-6にはデータの分布程度を表わす決定係数も示しているが, Dg, Ma13, Fはデータの変動幅が大きく, 決定係数は小さい値となっている。一方, Ac, Ag, Dc層では決定係数が0.4以上を示し, 特にAc層では0.65となっている。ここで決定係数は  $y = a \times x^b$  ( $a$  と  $b$  は定数) の形で表わされる累乗近似により回帰曲線を求めた場合の回帰度を表わす指標であり, 次式で与えられる。

表-2  $V_s$ とN値との相関式における係数比較

地層名	IMAI et al. <sup>15)</sup>			神戸地域		
	A	B	データの分布範囲 (m/sec)	A	B	データの分布範囲 (m/sec)
Ac	107	0.274	50~400	87.4	0.372	100~300
As	81.8	0.292	80~500	106.0	0.231	80~300
Ag	75.4	0.351	170~500	102.8	0.205	150~270
Dc	128	0.257	90~500	101.7	0.362	170~520
Ds	110	0.285	120~650	175.2	0.171	170~500
Dg	136	0.246	200~700	241.0	0.099	270~510
Ma13	-	-	-	149.6	0.157	120~220
Ma12	-	-	-	182.7	0.142	240~310
F	91.7	0.257	80~500	140.6	0.129	100~300

注1)  $V_s = A \times N^B$  (m/s)  
 注2) 盛土・埋土におけるIMAI et al. の値は, 文献<sup>15)</sup>に示されている盛土(砂質土):  $F_s$ の値を示している。

表-3 各地層別の平均密度

地層名	平均密度 ( $\text{t/m}^3$ )
Ac	1.71
As	1.83
Ag	1.86
Dc	1.84
Ds	1.96
Dg	2.02
Ma13	1.66
Ma12	1.71
F	1.84

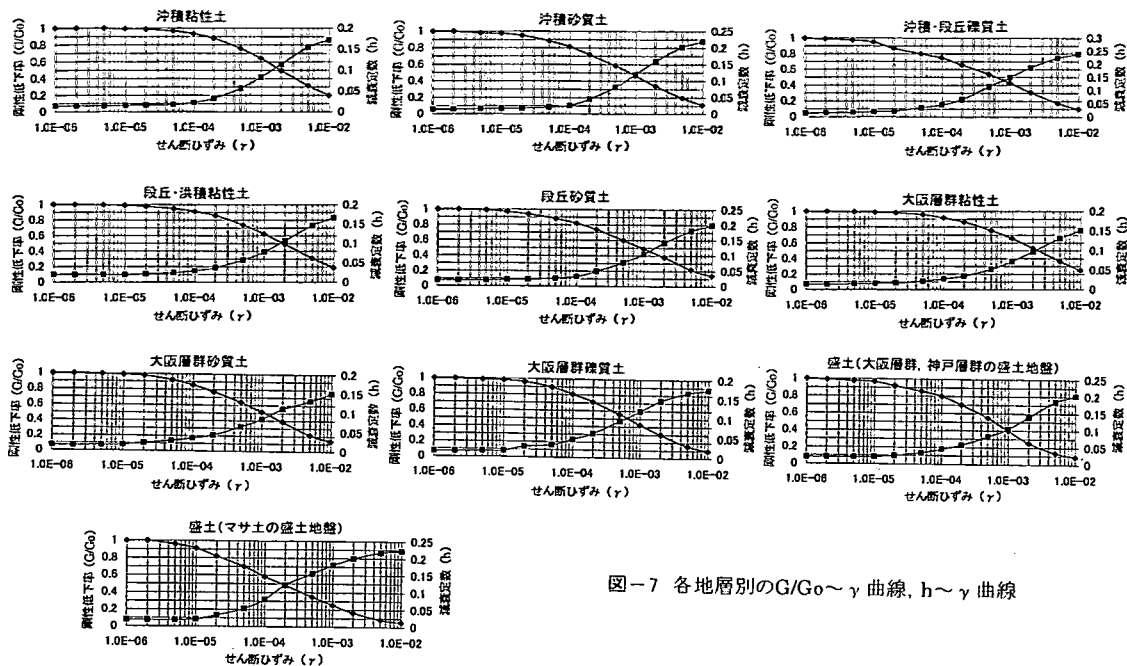


図-7 各地層別のG/Go~γ曲線, h~γ曲線

$$R^2 = \frac{\{(n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y))\}^2}{\{(n \sum x^2 - (\sum x)^2)(n \sum y^2 - (\sum y)^2)\}} \quad (1)$$

ここで  $x, y$  は変数である。  $R^2$  値は0から1の値で与えられ、この値が1に近づくほど回帰度が高くなる。図-6に示す回帰式の係数一覧を表-2に示す。

図-6によると沖積層に比べて段丘層の  $N$  値は大きく、  $V_s$  も大きい値を示している。段丘層のうち  $D_s$  層では  $V_s$  が概ね 170~500m/sec、  $D_g$  層では 270~510m/sec であり、全般に下部になるほど  $N$  値が大きく、  $V_s$  が大きい値となっている。一方、  $Ma12$  層は段丘層相当の洪積海成粘性土層であり、  $V_s$  が概ね 240~310m/sec を示している。  $D_s$  や  $D_g$  層に比べると  $N$  値は小さい値を示しているが、同じ海成粘性土層である  $Ma13$  層に比べると大きい  $N$  値となっており、硬く固結している状態であるために  $V_s$  もある程度大きい値を示している。

次に、表-2の脚注に示されている回帰式の係数  $A$  と  $B$  について見ると、段丘層では  $A$  の値が大きく、沖積層や盛土・埋土では  $A$  の値が小さくなる傾向が認められる。指数である  $B$  の値は、  $Ac$  層、  $Dc$  層でそれぞれ 0.372、 0.362 と多少大きい値を示しているが、他は概ね 0.1~0.23 の範囲に分布している。なお、使用したデータについては、深度毎の分析、地区毎の分析も行ったが、各地層とも深度や地区による傾向の違いはほとんど見られなかった。

表-2には、 Imai and Tonouchi<sup>19)</sup> がまとめた分析結果も示したが、それらに比べると傾向は似ているが、係数  $A, B$  の値は少し異なっている。すなわち、沖積粘性土ならびに段丘粘性土では、神戸地域の方が  $A$  の値が小さく、  $B$  の値が大きく表われている。そして、  $N$  値の小さい領域では  $V_s$  が多少

小さい値となっており、  $N$  値が大きくなるにしたがって  $V_s$  の増大傾向が今井らがまとめた結果よりも顕著である。一方、沖積砂質土、沖積礫質土、段丘砂質土、段丘礫質土、盛土・埋土では逆に神戸地域の方が  $A$  の値が大きく、  $B$  の値が小さく表われており、中でも特に段丘礫質土では図-6に示すように  $V_s$  が 250m/sec 以上と大きい値を示すかわりに、  $N$  値に対する  $V_s$  の増大傾向が今井らがまとめた結果ほど顕著でない。

#### c) 各地層別の密度

地盤の密度を推定するために、「神戸JIBANKUN」に登録されている46本の密度検層のデータから各地層毎の平均密度を求めた。その値を表-3に示す。沖積層に比べると段丘層の密度は全体に大きくなっている。

#### d) 剛性率比、減衰定数

「神戸JIBANKUN」には剛性低下率( $G/Go$ )~せん断ひずみ( $\gamma$ )曲線ならびに減衰定数( $h$ )~せん断ひずみ曲線( $\gamma$ )が登録されていない。このことより、本解析においては、阪神地区における試験値をまとめたデータ<sup>16)</sup>より、平均的な値を採用することにした。各地層の  $G/Go$ ~ $\gamma$  曲線、  $h$ ~ $\gamma$  曲線を図-7に示す。なお、沖積礫質土についてはデータがなかったため、段丘礫質土と同一の値を用いることとした。各地層とも粘性土に比べると砂質土、礫質土の方がせん断ひずみの増大に伴って剛性率の低下が激しくなっている。

### (3) 工学的基盤面の設定

図-3~5に示す  $D_s$  もしくは  $D_g$  層は、全般に深度が深くなるに従って  $N$  値の大きくなる傾向が認められ、  $V_s$  もそれに

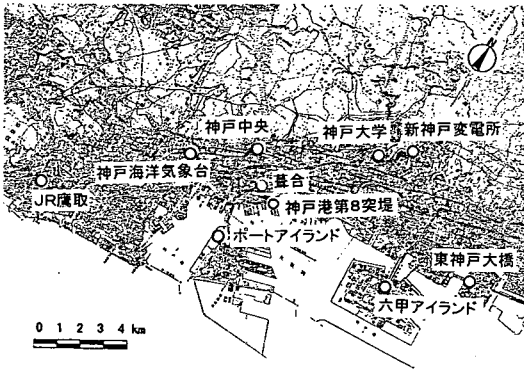


図-8 兵庫県南部地震における地震動観測地点位置図

比例して大きい値を示すようになる。Ma12層より下部に分布する地層ではVsが概ね500m/sec以上を示すようになり、Ma12層のVsに比べると明らかに大きい値を示している。これらのことより、本解析においては、Ma12層とそれより下部に分布する地層との境界面を工学的基盤面として設定することとした。

図-3~5において、山側(メッシュ番号の若いエリア)でMa12層が分布していないところについては、N値の大きさよりVsが概ね500m/sec以上を示すと推定された深度を結び、この深度線を工学的基盤面として設定した。なお、図-5に示す大阪層群(Oc, Os, Og層)は段丘層よりも古い年代に堆積した地層であるが、これらの地層についてはN値が50以上を示す深度を工学的基盤面とした。

#### 4. 地震動観測値と解析値との比較検討

##### (1) 神戸市内における観測値

兵庫県南部地震における地震動は、神戸市内の何点かで観測されているが、その数は必ずしも多くない。あわせて、観測値があっても最大値が測定可能範囲を越えているものや、最大加速度だけしか記録されていないものが含まれている。これらのデータのうち、地震動の最大値が測定範囲内に収まり、波形が記録されているものを示すと図-8に示す10地点となる。この図より明らかなように、観測記録が得られているのは、六甲山の山麓もしくは沿岸部、埋立地であり、被害の激しかった内陸部にはほとんどデータのないことがわかる。ここでは、図-8に示す10地点のうち、内陸部もしくは沿岸部、埋立地に位置する7地点(東神戸大橋、六甲アイランド、葺合、神戸港第8突堤、ポートアイランド、神戸海洋気象台、JR鷹取)について観測値<sup>15)~18)</sup>と解析値との対比を行った。なお、残りの3地点(神戸中央、神戸大学、新神戸変電所)については、地震計の設置されている位置が基盤である六甲花崗上にあり、それより上位に分布する大阪層群、段丘層、沖積層の地震動増幅特性を調べる上では解析値との対比ができないので検討には用いないこととした。

上記7地点における観測値は、表-4に示す各機関において観測されたものである。表-4によると葺合および神戸海洋気象台においては、最大加速度が800cm/sec<sup>2</sup>を越える値が観測されている。最大加速度で見ると、全般に埋立地よりも内陸部における地震動の方が大きい値を示している。

##### (2) 解析加速度応答スペクトルと観測値との比較検討

観測値が得られている表-4に示す7地点を対象に深層地盤の減衰率やその他のパラメータについて検討を行った。ここで、深層地盤とは、基盤である花崗岩上面より、工学的基盤面としたMa12層下面までの地層を指す。地層構成としては、段丘層と大阪層群よりなり、各観測地点における層厚等は、兵庫県がまとめられた資料<sup>22)</sup>より推定した。各地層の物性値については、過去の研究成果<sup>23)</sup>を参考にして設定した。その物性値の一覧を表-5に示す。一方、観測点における工学的基盤面より上部の地盤構成については、「神戸JIBANKUN」に登録されている近傍ボーリングデータより推定した。

深層地盤の減衰率については1.0%、1.5%、2.0%について解析を行ったが、解析値と観測値との比較検討の結果、減衰率を1.5%とした場合に両者の整合性が最も高かったため、これ以降の解析においては深層地盤の減衰率を1.5%とした。また、地表における加速度応答スペクトルにおいて局部的に異常に大きい値が認められたので、最大応答加速度の期待値を計算する場合のピーク係数(p)は3を超えないものとした。ここでピーク係数とは、パワースペクトルのスペクトルモーメント( $\lambda_0$ )を用いて、最大加速度応答の期待値( $q_{max}$ )を求める場合に用いる係数であり、スペクトルモーメントと継続時間の関数値となっている<sup>4)</sup>。なお、 $p$ 、 $\lambda_0$ 、 $q_{max}$ の関係は次式で与えられる。

$$q_{max} = p\sqrt{\lambda_0} \quad (2)$$

表-6に地表面における解析値と観測値との比較表を示した。同表に示す解析値は水平地震動の最大値を示しており、観測値は表-4に示す最大加速度の最大値を掲げた。すなわち、JR鷹取を除く6地点はNS成分をJR鷹取はES成分の値を掲げた。同表によると最大加速度値が大きいところで20~30%の違いは見られるものの、両者は概ね一致する傾向が見られている。

本論文で用いた解析手法は、図-1に示したように工学的基盤面より地表面までは重複反射理論に基づいた、双曲線型応力-ひずみモデルによる等価線形解析を用いており、液状化が発生したと推察されるポートアイランドなどにおいても観測値と同程度の加速度値となっている。これらの地点においては、解析で得られたひずみが1%以上となる場合もあるが、それら領域における剛性率、減衰率の値は図-7に示す  $G/G_0 \sim \gamma$  曲線、 $h \sim \gamma$  曲線において1%の値がそ

表-4 強震観測記録

観測地点	観測機関	緯度	経度	最大加速度 (cm/sec <sup>2</sup> )		
				NS	EW	UD
東神戸大橋 <sup>1,7)</sup>	建設省土木研究所	34.707	135.296	327.3	280.7	394.8
六甲アイランド <sup>1,8)</sup>	積水ハウス株式会社	34.689	135.273	319.6	195.6	507.8
葦合 <sup>1,7)</sup>	大阪ガス	34.695	135.211	802.0	686.5	—
神戸港第8突堤 <sup>1,7)</sup>	運輸省港湾技術研究所	34.688	135.217	683.1	394.0	333.6
ポートアイランド <sup>1,7)</sup>	神戸市	34.670	135.208	341.2	284.3	555.9
神戸海洋気象台 <sup>1,9)</sup>	気象庁	34.689	135.179	818.0	617.3	332.2
JR鷹取 <sup>2,0)</sup>	鉄道総合技術研究所	34.649	135.138	605.5	657.0	279.3

表-5 深層地盤の物性値

深層地盤の物性値	東部地区		中部地区		西部地区	
	Vs(m/sec)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vs(m/sec)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vs(m/sec)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )
大阪層群上部亜層群	634	1.85	534	1.85	603	1.85
大阪層群中部亜層群	680	2.00	645	2.00	719	2.00
大阪層群下部亜層群	1027	2.25	1053	2.25	1086	2.25
基盤 (六甲花崗岩)	3375	2.60	3375	2.60	3375	2.60

表-6 解析値と観測値との比較

波の特性 地点名	解析値					観測値 加速度 (gal)
	地表面			工学的 基盤面	基盤	
	加速度 (gal)	速度 (kine)	SI値 (kine)	加速度 (gal)		
東神戸大橋	257.9	52.2	49.3	430.4	491.1	327
六甲アイランド	338.3	53.5	58.5	429.1	498.8	320
葦合	653.1	113.2	119.9	693.5	553.1	802
神戸港第8突堤	529.1	106.9	119.3	594.8	594.8	683
ポートアイランド	343.6	83.1	82.6	475.4	485.9	341
神戸海洋気象台	828.3	93.1	107.0	1092.4	601.2	818
JR鷹取	821.7	116.9	120.5	1004.2	690.7	657

のまま保持されるものとして解析を行った。

液状化の発生したところについては、厳密には有効応力解析で行うべきところであるが、今回の解析結果より、本論文で用いた等価線形解析でも、推定地震動は一応の精度で求めることができると考えられる。

次に深層地盤の減衰率を1.5%とした場合の加速度応答スペクトル(水平成分)について解析値と観測値とを比較したものを図-9に示す。観測値の方は表-6と同様にJR鷹取はEW成分をそれ以外の地点はNS成分の加速度応答スペクトルを用いている。各地点における比較結果は以下に示す通りである。

(1) 東神戸大橋

加速度応答スペクトルがピークを示す周期0.8秒付近で両者は一致している。他の周期帯においては傾向は一致しているが解析値の方が観測値より少し小さい値を示している。観測値において周期2.5秒付近で900gal程度と大きな値を示しているが、当該地点は近傍にある東神戸大橋の橋台とわずか50mしか離れておらず、得られた加速度波形記録<sup>21)</sup>より見ると揺れの水平成分が地震動開始より2~3秒後に長周期化しており、橋台の揺れの影響を受けている可能性が考えられる。すなわち、周期1~3秒ではスペクトルの傾向は一致しているものの、値は観測値の方が大きくなっており、このことは橋台の揺れの影響によるものではないかと思われる。

(2) 六甲アイランド

周期0.5秒から0.8秒において解析値の方が実測値よりも大きい値を示している。一方、周期2~3秒では、実測値の方が大きい値を示している。周期0.5秒未満ならびに0.8~2秒間は両者が比較的良く一致している。

(3) 葦合

周期0.3秒から0.5秒で解析値の方が大きい値を示しているが、他の周期帯では両者の値が概ね一致している。

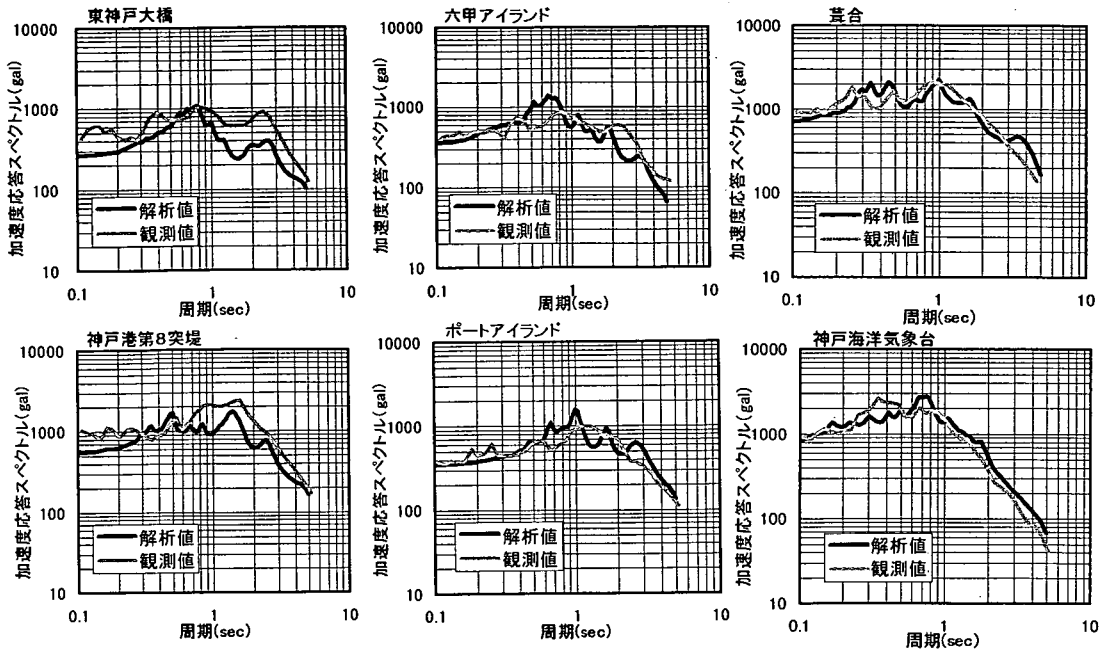
(4) 神戸港第8突堤

両者は概ね同じような値の傾向を示している。ただ、周期0.3秒より短い帯域および周期0.7秒より長い帯域では観測値の方が大きい値を示している。

(5) ポートアイランド

周期0.6~1秒付近では解析値の方が多少大きくなっていく。他の周期帯では値の傾向として概ね一致している。加





速度応答スペクトルの最大値としては、観測値が1000gal程度であるのに対して、解析値では1500gal程度の値を示している。

#### (6) 神戸海洋気象台

スペクトルの最大値を示すところが、解析値では周期0.7～0.8秒付近であるのに対して、観測値の方では0.3～0.5秒付近と少し差が認められる。ただ、最大値そのものは同程度の値である。周期帯が0.3秒以下および0.8秒以上では両者は良く一致している。

#### (7) JR鷹取

周期0.2～0.4秒、0.6～1秒、2秒強以上では解析値の方が観測値よりも大きい値を示している。これに対して、周期1秒～2秒強では観測値の方が大きい値を示している。ただ、値の分布傾向としては良く似ている。

以上のことをまとめると加速度応答スペクトルは地点によって大きさの異なる場所が見られるが、傾向としては解析値と観測値とが概ね一致していると思なすことができると思われる。

### 5. 代表測線における地震動解析

図-2に示す東部、中部、西部の各地区を代表する3測線について地震動解析を実施した。地盤のモデル化にあたっては、工学的基盤面より上部については、図-3～5に示すように、100m毎に区切ったメッシュ毎で地層構成ならびに物性値を求めた。ここで物性値の推定にあたっては、メッ

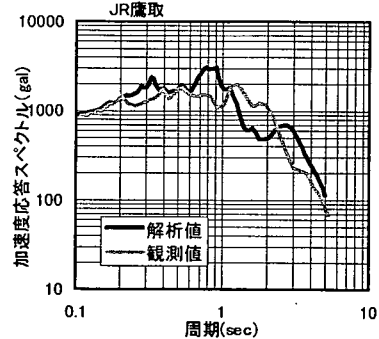


図-9 加速度応答スペクトルの解析値と観測値との比較

シュ内にボーリング資料がある場合には、そこで得られているN値より3章で得られた関係式を用いてN値よりVs等の物性値を求め、ボーリング資料がないメッシュについては、近傍のボーリング資料よりN値ならびにVs等を推定した。

地表面における地震動解析結果を図-10に示す。同図に示すSI値(Spectrum Intensity)とは地震による建物の振動の度合いを表したもので、周期0.1～2.5秒の間における20%減衰の速度応答スペクトルの平均値である。各地区別に考察を加えると以下ようになる。

#### (1) 東部地区

地震動水平成分の地表面最大加速度が300～900gal、最大速度およびSI値が50～100kineを示す。最大加速度は測線の起点側(山側)で大きく、測線の終点側(海側)で小さくなっている。これに対して最大速度とSI値は測線の中央よりやや後半側で大きくなり、測線の終点側で小さくなる傾向

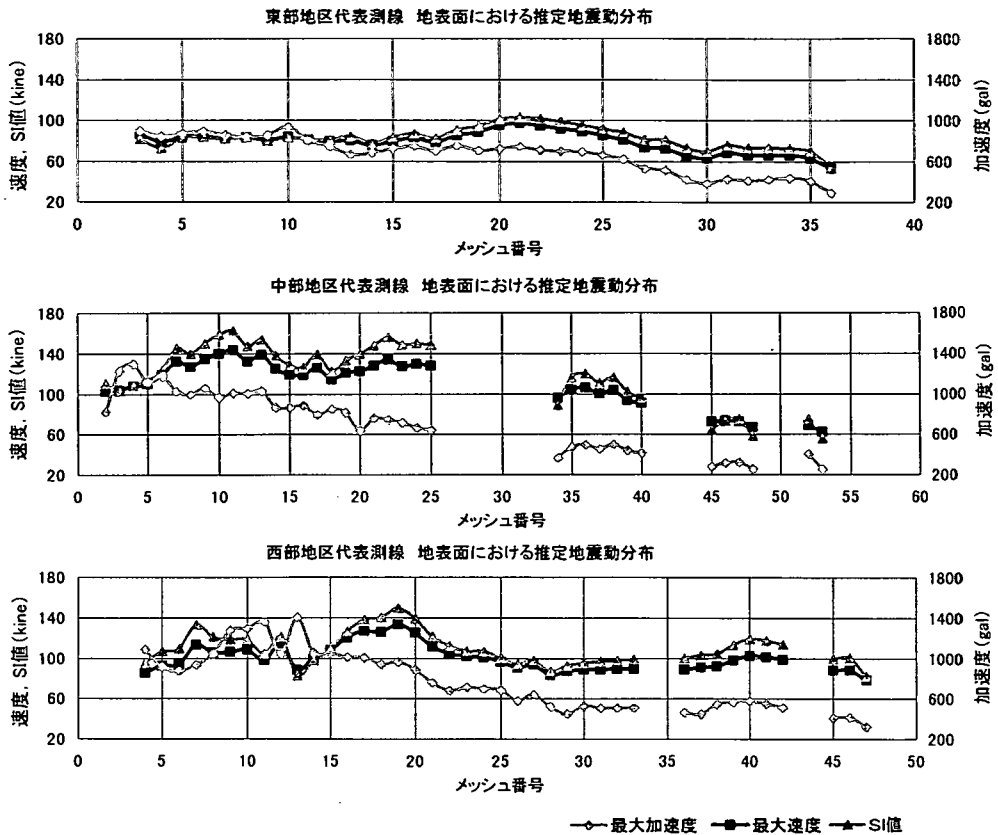


図-10 地表面における地震動解析結果

が見られている。

(2) 中部地区

地表面最大加速度は200～1300gal、最大速度は60～150kine、SI値は60～140kineと、東部地区に比べて値の幅が広がっている。値の特徴としては、測線の前半側で地震動が大きく、終点側に向かうにつれて徐々に小さくなり、終点付近の埋立地では前半側の半分程度の大きさになる地点も見られる。

(3) 西部地区

地表面最大加速度は300gal～1400gal、最大速度は80～130kine、SI値は60～150kineであり、値の幅としては中部地区とほぼ同程度の広がりを見せている。値の特徴としてはメッシュ番号20までは最大加速度がほぼ1000gal以上、最大速度が100kine以上、SI値が110kine以上を示しており、メッシュ番号が20以上のところでは、それらよりも値が小さくなっている。

6. 木造建物被害と地震動解析結果との対比

構造物被害と地震動分布との分析を行うに際して、分析対

象とする構造物を比較的単一な構造である木造建物とした。さらに、建築基準法の改正が行われた昭和45年を境として、それ以前と以降とに築造された建物の被害状況に差が認められ、「神戸JIBANKUN」に昭和45年以前築造の木造建物被害率が町丁目毎に登録されていたことより、本論文においては主たる分析対象を昭和45年以前に建築された木造建物とした。

兵庫県南部地震による建物の被害調査は、東灘区から須磨区までの市街地を対象として、神戸市において詳細に行われており、これらの結果に基づいて、建物の被災度や構造、建築年次等の情報が、各町丁目毎に「神戸JIBANKUN」に収録されている。これらのデータから、地震動解析を行った3測線付近における、昭和45年以前に建築された木造建物の被害状況を、町丁目毎の全壊ならびに滅失率分布として抽出した。そのうち、代表測線周辺における木造建物の被害率分布を図-11に示す。各地区における木造建物の被害特徴は以下のようなになる。

(1) 東部地区

測線の前半で被害の度合いが高く、特に測線中央付近で最も被災の度合いが高くなっている。一方、測線の終点側で被害の度合いは低くなっている。

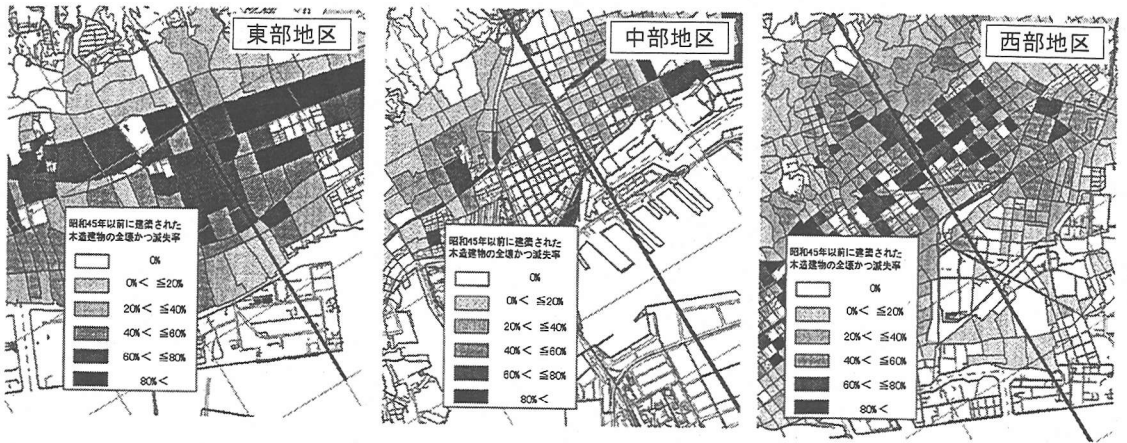


図-11 各地区における木造建物被害率分布

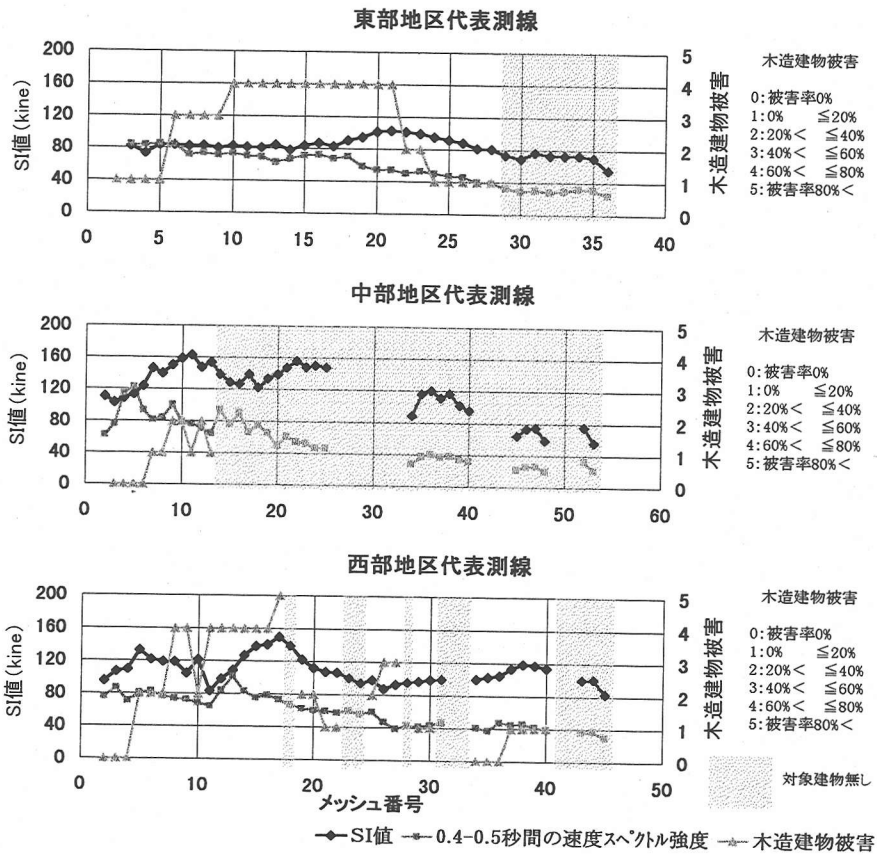


図-12 木造建物被害とSI値との対比

(2) 中部地区

測線の起点側に被災度の高い地区が見受けられるが、全体的には他の2地区に比べると被災度は低くなっている。ただ、中部地区は元来木造建物の少ない地区であり、海岸線の近いところの白色の部分は木造建物がほとんど存在しな

いところである。

(3) 西部地区

測線の起点側から測線中央部にかけて被災の度合いの高い地区が集中しており、逆に、測線の終点側では概ね被災度が低くなっている。

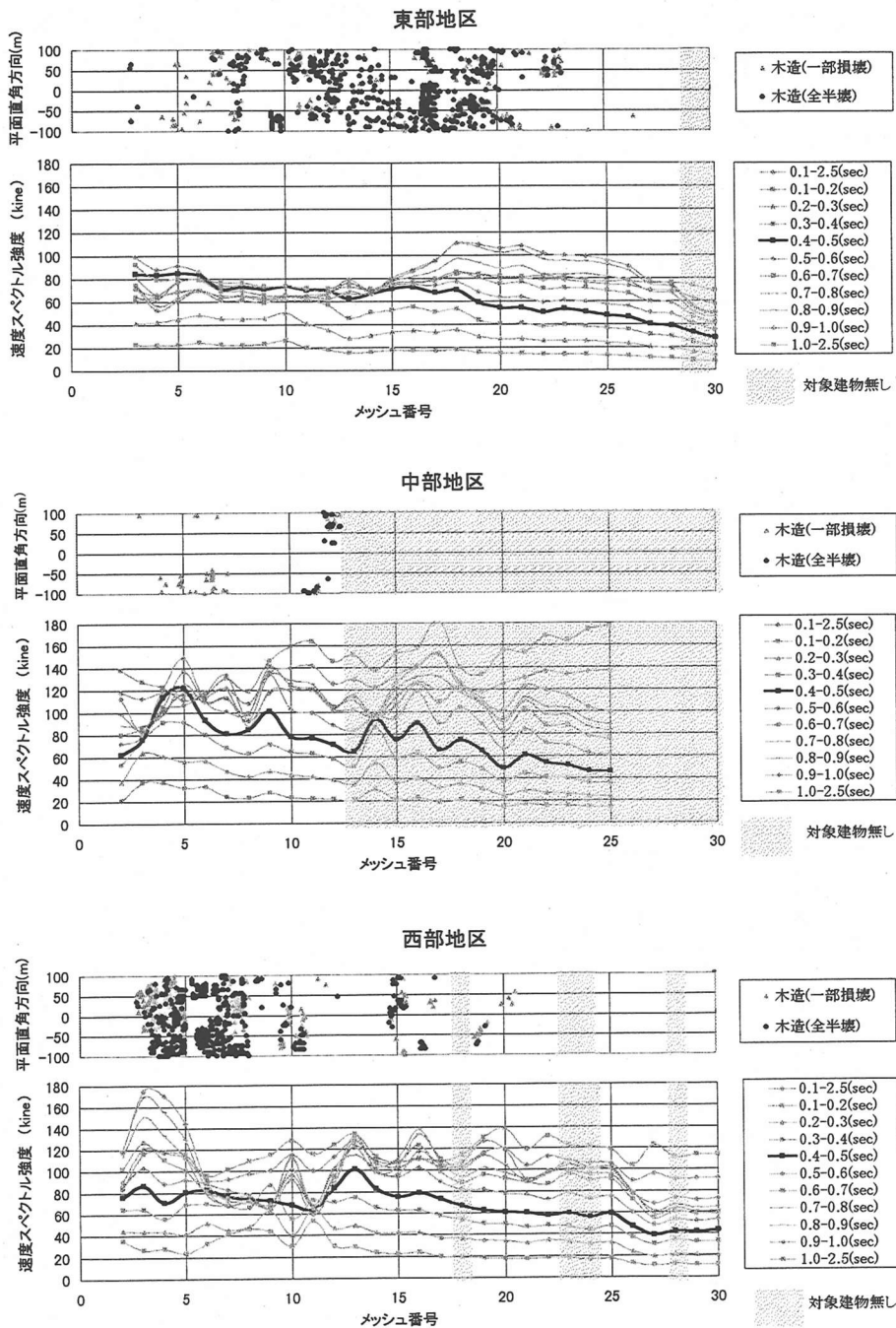


図-13 木造建物被害と固有周期毎の速度スペクトル強度との比較

次に地震動解析結果と兵庫県南部地震による木造建物被害データとを比較して、地震動解析値と実際の被害状況に、どのような相関があるかの検討を行った。ここで、地震動の指標としては一般的に構造物被害との相関が最も高いと言われているSI値を採用することとした。

図-12に代表測線におけるSI値と木造建物被害の分布を示した。東部地区においては、推定したSI値はメッシュ番号20番付近で最大となり、解析測線の両端(起点および終点付近)では小さくなっている。ただ、SI値そのものは後述する中部、西部地区に比べると地点間の差は小さい。一方、

木造建物被害はメッシュ番号10番から20番過ぎにかけて被害が集中しており、測線の両端では被害は少ない。メッシュ番号が18～26の区間はSI値が80kineを超え、他の地点に比べて少し大きい値を示しているが、この区間と木造建物被害の集中している区間とは必ずしも一致していない。

中部地区では、メッシュ番号13より若い地点において、SI値が100～160kineと大きな値を示しており、この地区に被害率の高いところが見られる。中部地区においては、図-12に示すようにメッシュ番号が13より大きい地点において、木造建物がほとんど存在しなかったために被害との対比はできなかった。

西部地区においては、メッシュ番号5～20の間においてSI値が100kine以上を示す地点が多くなっているが、この間において木造建物被害率が高くなっている。

以上、3地区の結果によると、SI値の大きいところと木造建物被害率の高いところが一致していないところがあることより、SI値の算出方法に工夫を施し、通常0.1～2.5秒の区間で計算するところを、固有周期が0.1秒間隔での平均速度スペクトル強度を求めるとした。その結果と、測線を中心とした幅200m間の木造建物戸別被害<sup>24)</sup>の併記したものを図-13に示す。ここで建物戸別の被害分布を取り上げたのは、町丁目毎の被害率では被害の状況が平均化されて、各地点における詳細な被害状況がわからなかったためである。図-13に示す木造建物被害については、昭和45年以前とそれ以降のものに区別されていないが、神戸市街地における過去の地形図を見ると、同図に示す建物は神戸市が戦災を受けた昭和20年以降～昭和45年までに建てられたものがほとんどであると推察された。

一方、過去の研究<sup>25)</sup>によると、木造建物の固有周期は建築年代によって分類できることが知られている。今回分析対象としている木造建物は、昭和20～45年に建築されたものが主たる対象であるので、その固有周期は文献<sup>22)</sup>によると0.4～0.5秒となる。図-13には、0.1秒きざみの速度スペクトル強度の分布を示したが、それによると、中部地区では木造建物が少なく、少し判然としない面があるものの、東部地区、西部地区においては固有周期が0.4～0.5秒間の速度スペクトル強度が70kineを超えるところで、木造建物の被害が多くなっていることがわかる。同じような考え方で、図-12にも0.4～0.5秒間の速度スペクトル強度を併記したが、この図によっても速度スペクトル強度が70kineを超えるところで木造建物被害率の高くなっているところが多く分布することがわかる。ただ、両者の相関は、現段階で必ずしも明瞭でないところがあり、今後木造建物の築造年代や規模をさらに細かく分類して、対比させていく必要のあることを示唆している。一方、地震動については比較対象とする構造物の固有周期を考慮することで、より相関の高い結果を得ることができ、木造建物については、固有周期帯の速度スペクトル強度が一つの指標となる可能性を示している。

## 7. まとめ

本論文で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- ① 「神戸JIBANKUN」に登録されている地盤データや既存資料から、神戸市域における地盤特性の検討を行い、各地層毎にN値からS波速度を換算する式や、各地層の平均密度値を得ることができた。
- ② 本論文で用いた地震動解析手法による解析値と、兵庫県南部地震の観測値とは概ね一致しており、本論文で構築した解析モデルならびに解析手法が地震動を推定する上で有効な手法であることがわかった。
- ③ 地震動解析結果と兵庫県南部地震による木造建物被害の分布状況を比較すると、昭和20年～45年に築造された木造建物は、建物の固有周期帯である0.4～0.5秒間の速度スペクトル強度が70kineを超えるところで建物被害の大きいところが多く分布することがわかった。ただ、両者の相関は現段階で必ずしも明瞭でないところがあり、今後、建物の築造年代や規模をさらに細かく分類して考察していく必要のあることがわかった。
- ④ 地震動については、対象とする構造物の固有周期を考慮することで地震動と被害とのより相関の高い関係を求められる可能性があり、木造建物については、その建物の固有周期帯における速度スペクトル強度が一つの指標になる可能性を示している。

現在のところ、引き続いて神戸市街地全域の地震動解析を実施中であるが、今後の課題として、地震動の面的な広がりについての検討や、木造建物被害の細かい分類ならびにそれ以外の施設についての被害検証などを行うことが挙げられる。

謝辞：本論文は(財)阪神・淡路大震災記念協会における研究会活動を通じて得られた成果である。研究を進めるにあたってご尽力いただいた記念協会の方々には厚く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 佐藤忠信, 北 勝利, 前田知就: 兵庫県南部地震で発生した強震域での加速度応答スペクトルの推定, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp. 149-159, 1997.
- 2) Sekiguchi, H., Irikura, K., Iwata, T., Kakehi, Y. and Hoshiba, M.: Minute Locating of faulting beneath Kobe and the waveform in version of the source process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake using strong ground motion records, J. Phys. Earth, 1996.
- 3) Irikura, K., Iwata, T., Sekiguchi, H. and Pitarka, A.: Lesson from the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake: Why were such destructive motions generated to buildings, Journal of Natural Disaster Science, Volume

- 17, Number2, pp. 99-127, 1996.
- 4) 土木学会編:動的解析と耐震設計(第2巻)動的解析の方法, 技報堂, pp. 195-198, 1989.
  - 5) Kiureghian, A. D. : A response spectrum method for random vibration analysis of MDF systems , *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9, pp. 419-435, 1981.
  - 6) 神戸市, (財)建設工学研究所:阪神・淡路大震災と神戸の地盤, 178p, 1999.
  - 7) 神戸市企画局総合調査課:神戸の地盤, 付図-2市街地地盤図, 神戸市都市整備公社, 1980.
  - 8) (財)建設工学研究所:阪神大震災被害状況調査報告書(概要版), pp. 66-80, 109-212, 1995.
  - 9) 兵庫県阪神地域活断層調査委員会:阪神・淡路地域活断層調査報告書, 付図-2~3地質図, 1996.
  - 10) 兵庫県都市住宅部土地対策課:土地分類基本調査-神戸-, 付図 表層地質図, 1997.
  - 11) 建設省近畿地方建設局近畿技術事務所:大阪・兵庫地域の地質構造特性調査業務報告書(概要版), p. 7, 1997.
  - 12) 通産省工業技術院地質調査所:大阪西北部地域の地質 5万分の1地質図, 1982.
  - 13) 通産省工業技術院地質調査所:神戸地域の地質 5万分の1地質図, 1983.
  - 14) 通産省工業技術院地質調査所:須磨地域の地質 5万分の1地質図, 1984.
  - 15) Imai, T. and Tonouchi, K. :Correlation of Nvalue with S-wave velocity and shear modulus, *Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing*, pp. 67-72, 1981.
  - 16) 南部光広, 寺田幸次, 村田芳信:阪神地域における地盤構成と神戸市街地地盤の特徴, 応用地質技術年報-兵庫県南部地震特集号-, pp. 47-62, 1997.
  - 17) 関西地震観測研究協議会:関西地震観測研究協議会 地震記録, 1995.
  - 18) 積水ハウス:六甲アイランドCITY 1995年兵庫県南部地震の地震動観測記録と分析, 1996.
  - 19) 建設省土木研究所:土木研究所資料 神戸海洋気象台における地盤調査, 1998.
  - 20) 中村豊, 上半分昭, 井上英司:1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(Ⅱ), JR地震情報No.23d, 財団法人鉄道総合技術研究所コレダス開発推進部, 1996.
  - 21) 阪神淡路大震災調査報告編集委員会:阪神・淡路大震災調査報告 共通編-2, 丸善, pp. 202-204, 1998.
  - 22) 阪神地域活断層調査委員会:阪神・淡路地域活断層調査報告書 付図-1, 兵庫県, 1996.
  - 23) 藤波宏:兵庫県南部地震による建築構造物被災分布と地盤特性, 神戸大学大学院修士論文, pp. 66-69, 1999.
  - 24) 神戸大学工学部建設学科土木系教室兵庫県南部地震学術調査団:兵庫県南部地震緊急被害調査報告書(第2報), 口絵写真10-12, pp. 20-41, 1995.
  - 25) 鈴木三四郎, 羽田浩二, 工藤一嘉:神戸市長田区の木造家屋地震被害検討, 第1回都市直下地震防災総合シンポジウム, pp. 215-216, 1996.

(2000.11.27受付)

## SEISMIC FREQUENCY ANALYSIS WITH GEOLOGICAL INFORMATION DATABASE IN KOBE DISTRICT

Takashi OKIMURA, Tadanobu SATO, Mitsuhiro NAMBU, Ryo WAKABAYASHI and  
Hideaki KISHIMOTO

The objective of the present paper is to investigate the distribution of the seismic frequency and the cause of the incidence of the disaster zone in Kobe district by Hyogoken-Nambu earthquake with Kobe Jibankun-the geological information database. The geological data of the secondary wave velocity and the others for the seismic frequency analysis are the pasts of the data that are collected in Kobe Jibankun. As the result of the analysis, the seismic frequencies that were observed correspond mostly to them that were analyzed by the method of the seismic frequency analysis, and by drawing the comparison between the distribution of the seismic frequency that was analyzed by it and the distribution of the wooden house damage in Kobe district, and the correlative seismic parameter relative to the wooden house damage was revealed, and it was clear that its ratio was rising suddenly while the parameter became more than the certain value.