



阪神間西部地域における地盤構成と地震動増幅特性

南部, 光弘

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 7:135-152

(Issue Date)

2003-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00406480>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00406480>



阪神間西部地域における地盤構成と地震動増幅特性

Geological Composition and Amplification Factor of Earthquake Motion

in Western Hanshin District

南部 光広¹⁾

Mitsuhiro Nambu

概要: 阪神間西部地域(芦屋・西宮・宝塚の3市)における地盤構成と地震動増幅特性を把握するために, 各種地盤データを収集して各市域の地盤構成を明らかにし, 代表測線において重複反射理論を用いての地震動解析を行った. その結果, 上部に沖積層が厚く分布する芦屋市と西宮市においては, 建物被害と地表面地震動との間に相関性があり, 本論文で用いた手法が両市域の地震動解析をする上で有効な手法であることが確認され, 両市域における地震動増幅特性を明らかにすることができた. 一方, 沖積層がほとんど存在しない宝塚市においても, 地表面近くにある工学的基盤面を少し深くすれば, 地表面における最大加速度を適切に評価でき, 本論文で用いた地震動解析手法の適用性が高まることがわかった.

キーワード: 地盤構成, 地盤物性, 重複反射理論, 地震動解析, 地震動増幅度, 建物被害

1. まえがき

兵庫県南部地震により阪神間西部地域においても建物などの各種構造物に著しい被害が発生した. これら被害は地震の揺れによって発生したものであり, 各市域における地震動増幅特性を把握するために, 各種地盤データを収集して各市域の地盤構成を明らかにし, これらのデータを用いて地震動解析を行い, 地震動の増幅特性を検討した. 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. 同手法による地震動解析については, 神戸地域ですでに実施されており¹⁾²⁾, その適用性については一応の評価が得られている. 本論文においては, 阪神間西部地域における地盤構成と, そこにおける地震動増幅特性を明らかにするとともに, 本論文で用いた手法を阪神間西部地域へ適用するにあたり, 地盤モデルならびに地盤物性等をどのように設定すれば解析精度が向上するかを明らかにし, 本論文で用いた解析手法の適用範囲を広げる方法を検討した.

2. 既往研究成果

兵庫県南部地震以降, 多くの機関で地震動や地盤構造, 震災被害等に関する研究が行われている. これらの研究成果から, 本研究で対象とする阪神間西部地域(芦屋・西宮・宝塚の3市)における地震動や地盤構造, 震災被害等についての研究成果(学会論文等)をまとめると, (1)震源に関するもの, (2)地震動分布に関するもの, (3)地盤構造に関するものになる. 以下に研究成果を要約する.

(1) 震源に関するもの

綾瀬ら⁴⁾は「大局的に見て, 被害の大きかった地域は地震動が大きかった地域に一致すると考えられるので, 断層モデルと付近の地下構造モデルを用いたシミュレーションから, 震災の帯が大筋で再現されるべきである」という前提に立ち, 震災の帯の生成されるメカニズムと, そのメカニズムから断層モデルに要求される条件を考えることにより, 新たな断層モデル構築を検討している. すなわち, 総合的な震源断層モデルとして, 既往の研究成果による断層モデルに, 芦屋断層の南端部を追加するモデルを検討している. 芦屋断層を含めたモデルは, 大局的に一致しているものの, 芦屋断層を含まないモデルと比較して, 推定波形が2.5%改善されるに過ぎない. また, 推定される芦屋断層のすべりの量も少ないため, 強震動域と被害分布の一致が著しく改善されることは難しい.

(2) 地震動分布に関するもの

翠川ら⁵⁾は神戸市およびその周辺での地形分類データを作成し, 地形条件と墓石の転倒率との関係を定量的

に評価した。さらに、これらの関係に基づいて、被災地域での墓石の転倒率分布を求め、これを最大速度分布に変換して神戸市での震度分布の推定を試みた。

結論として、

- ① 地形条件と墓石の転倒率との関係から緩扇状地で最も被害が大きく、標高が高いほど被害は減少する。
- ② 地形計測値と墓石の転倒率との関係から、斜面や台地、段丘などは標高および勾配が大きくなるほど被害が小さくなるが、低地では標高および勾配が大きくなるほど被害も大きくなる。
- ③ 推定最大速度は、緩扇状地とその周辺で100cm/sを超え、それよりも山側では急激に減少する。一方、海側においては緩やかに減少し、震度7の帯や建築物の被害分布と最大速度の大きいところと一致している。

次に林ら⁶⁾は兵庫県南部地震における低層家屋被害と最大速度との関係式を導き、その関係式をもとに神戸市域とその周辺地域の最大速度分布の推定を行った。さらに、推定結果と観測記録との整合性の検討を行った。その結果、推定した最大速度分布は低層家屋の建築年代や、構造形式の地域性を考慮していないにも関わらず、神戸市から尼崎市、宝塚市に至る検討範囲内では、ほぼ地表の観測記録と整合の取れた結果であることを示した。

続いて林ら⁷⁾は独立住宅以外の被害(関数)も考慮することによって、低層独立住宅棟数の十分でない地域の最大速度を推定するとともに、大字単位での最大速度の推定に町丁目単位での推定を併用することを考え、文献¹⁰⁾で得られた最大速度分布の再評価を行い、再評価をした最大速度分布と、兵庫県南部地震を対象とした地震動再現結果との整合性の検討を行った。

その結果、低層独立住宅被害とそれ以外の建物被害は大字単位でも概ね相関があり、再評価された最大速度分布は、低層独立住宅だけから推定された最大速度分布とほぼ対応していた。また、再評価で得られた最大速度分布は、観測記録や兵庫県南部地震を対象とした神戸市の地震動再現結果と概ね整合していた。

(3) 地盤構造に関するもの

盛川ら⁸⁾は西宮市を南西から北東にかけて横断する甲陽断層付近の地盤構造、基盤構造の把握を目的として、長周期地震計を用いてやや長周期微動観測を実施した。その際に得られた記録の上下動成分の一部を用いて、F-Kスペクトル解析を行い、微動の波動伝播特性の検討を行うとともに、解析で得られた位相速度の分散曲線から逆解析により地盤構造の推定を行った。

その結果、甲陽断層を挟む南北の地域で基盤岩深度が500mほど異なること、甲陽断層の北側では西から東に向かって基盤が緩やかに深くなっていることが分かった。また、過去の研究成果との比較から、甲陽断層の南側の地盤構造は伊丹市と非常に類似していること、甲陽断層の位置から西宮市の海岸に向かって基盤岩深度の大きな変化が存在する可能性が明らかになった。

石田ら⁹⁾は神戸から芦屋、西宮にかけての7つの南北測線で、やや長周期微動の水平/上下スペクトル比を、レイリー波を対象として求めた。これに基づいた大深度地盤構造の推定手法を提案するとともに、この手法を神戸地域に適用して基盤岩上面の深度分布を推定し、大深度における段差構造の存在を確かめ、その形状の評価を行った。

その結果、以下のことが考察された。

- ① 水平/上下スペクトル比による手法は、パワースペクトル同士の比による手法より、レイリー波の水平/上下スペクトル比を推定するためには有効である。
- ② 六甲山地から南下するにつれて基盤面は急速に深さを増すが、1kmを超えると傾斜は非常に緩やかになり、海岸付近では1~1.5km程度となる。
- ③ 兵庫県南部地震の際に、地震動の焦点効果を引き起こしたとされている大深度に至る地盤の段差構造は、神戸市の須磨区から西宮市にかけて連続して存在すると推定される。
- ④ 堆積層の層厚変化のケースとして、層厚比を一定に保ちながら2層同時に変化する場合と最表層のみが変化する場合の2ケースを想定したが、②で述べた結果はこれらのケースには大きくは依存しない。
- ⑤ 既往の地盤調査結果が存在する地区については、それらの結果と良く整合している。

木下ら¹⁰⁾は兵庫県南部地震において被災した地域の強震動特性の解明に必要な弾性波速度等の情報を得る目的で、神戸地域の地下構造調査を、常時微動を用いて行った。

得られた結果は、基盤深度において重力探査の結果と調和的であり、その推定構造はこの地域の地震記録におけるSP変換波の出現時間を説明できるものであった。これらのことは、常時微動による地下構造推定が、小規模な平野地で十分な見かけ速度の分散曲線が得難い場合においても有用であることを示すとともに、この地域の基盤岩深度が1~1.5kmの深さに達することを示している。

以上7件の文献について述べたが、全般的な傾向として、神戸市域を対象とした研究成果は多く存在するが、阪神間西部地域(芦屋・西宮・宝塚の3市)を対象とした研究成果は少ないことが判明した。なお、上記で示し

た7件以外に関西地盤情報活用協議会から、神戸および阪神間地域の地盤についての研究・分析結果をまとめた「新関西地盤 神戸および阪神間 1998」¹¹⁾という書籍が出版されており、ここではボーリングデータや既往の調査結果等をもとに、神戸および阪神間の地質構成、地質構造、土質特性、動的特性等が良くまとめられており、本解析においてもこれらのデータを有効に活用させていただいた。

3. 地震動解析手法

本論文で用いた解析手法は、佐藤¹²⁾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手法である。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.¹³⁾およびIrikura et al.¹⁴⁾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¹⁵⁾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¹⁶⁾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。

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、そのままの状態に取り込めるという利点がある。すなわち、各市域に多数分布する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されている地層構造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。

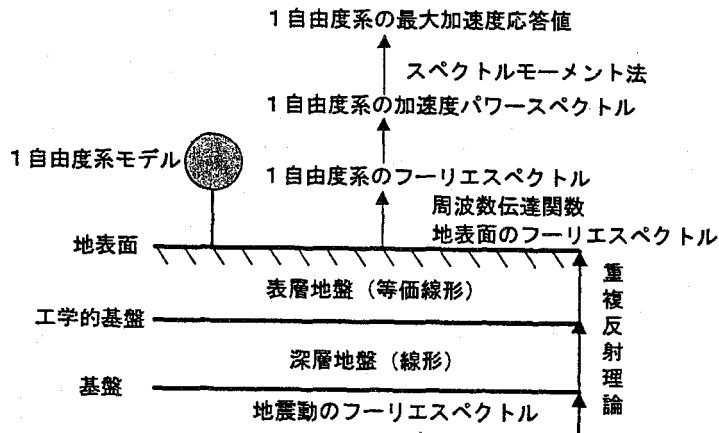


図-1 地震動解析手順

4. 既往地盤データの収集

4.1 地盤情報データベースからの入手データ

芦屋・西宮・宝塚の3市を含む地盤情報データベースとしては、兵庫県県土整備部の地盤情報データベースと関西地盤情報活用協議会の関西地盤調査情報データベースがある。兵庫県県土整備部地盤情報データベースには、ボーリングデータと粒度組成等の土質試験結果が登録されている。データは毎年更新されており、本研究で対象範囲とした芦屋・西宮・宝塚の3市には90本のボーリングデータが存在していた。

関西地盤調査情報データベースとは、社会基盤の整備・構築に役立てることを目的として関西地盤活用協議会にて作成されたものである。同データベースに登録されているボーリングデータのうち、芦屋・西宮・宝塚の3市付近の拡大したものを、図-2に示す。

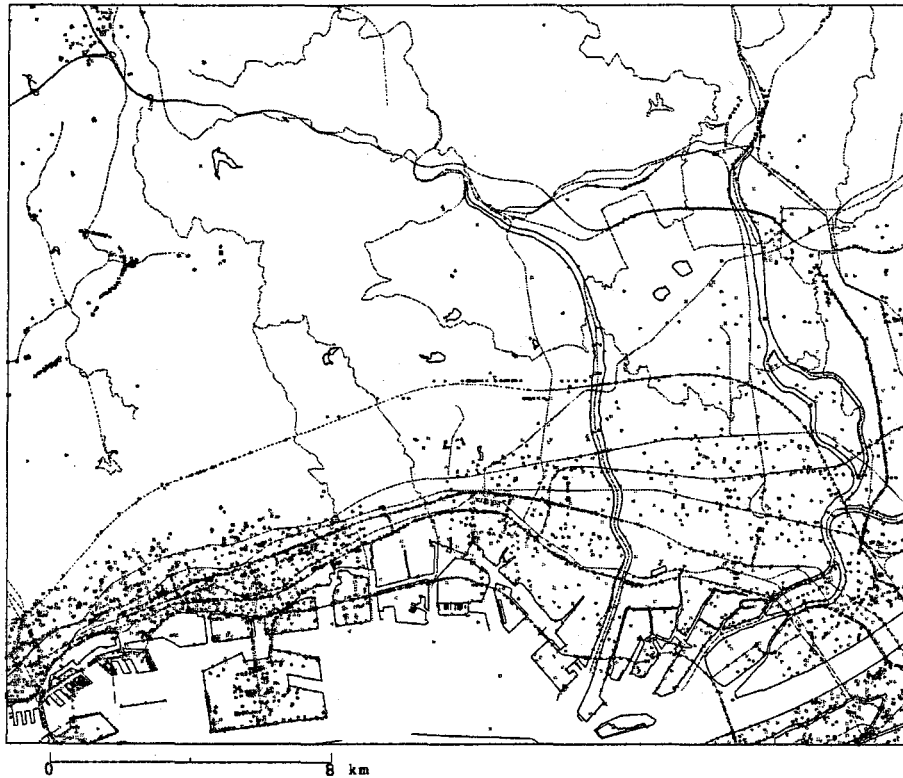


図-2 関西地盤調査情報データベースに登録されているボーリングデータ分布（阪神間西部地域）

図-2によると、芦屋・西宮・宝塚の3市におけるボーリングデータは、ほとんどが鉄道や道路沿いのものに限られており、宝塚市については鉄道や道路沿いのデータも非常に少ないことが分かる。関西地盤調査情報データベースに収録され、一般公開されているデータの内容は、兵庫県県土整備部の地盤情報データベースと同様で、ボーリングデータ、位置図、粒度組成等の土質試験結果ならびにPS検層結果などの原位置試験結果である。データ数としては3市で約1500本である。この関西地盤調査情報データベースには収録されているボーリングデータの数が非常に多く、この収録データをもとに様々な地盤の研究も行われており、本研究を進める上で非常に有効なデータベースであった。

4.2 各市からの入手データ

(1) 芦屋市

芦屋市の地盤情報については、建設部でまとめられた432本のボーリングデータが入手できた。それ以外には、同市発行の震災復興誌の中で市域の地質について概要をまとめられている。

(2) 西宮市

西宮市については、市内および市周辺都市のボーリングデータの収集が行われており、それらボーリングデータや既往の文献等から、市域の地盤分類が行われている。平成12年度までに同市で収録されているボーリングデータは、周辺都市分(68本)を含めて862本である。これら収集したボーリングデータをもとに、西宮市では市域の地盤特性の分析も行い、市街地(市域南部)を約15種類の地盤に分類している。

(3) 宝塚市

宝塚市については、平成7年度および8年度に実施された、地域防災計画改定事業の中で防災アセスメント調査(地震被害想定調査)が実施されている。この防災アセスメント調査では、有馬-高槻構造線と、南海トラフを震源とする地震について、地震被害想定調査を実施しており、前述した2つの地震による地震動推定、

液状化の推定、建物や土木構造物の被害の予測等を行っている。

地震被害想定調査の中で、市で実施したボーリングデータの収集を行い、地質構造や地盤特性を検討し、市内全域を250m×250mの正方形メッシュに分割して、それぞれについて基盤岩から地表までの地層構成や地盤の物性値を与えて、地震動の予測や液状化の予測を行うための地盤モデル作成が行われている。地震動を計算する地盤モデル作成にあたっては、地盤種区分の他に既往文献などにより市域の基盤岩深度を推定し、地盤種と基盤岩深度の組み合わせから約70種の地盤モデルに分類している。

このように、宝塚市では250m×250mのメッシュではあるが、基盤岩の深度までをモデル化している。本研究で用いる地震動解析手法でも、地表から基盤まで地盤をモデル化する必要があるが、通常は基盤岩の深度まで明らかになっていることは少ないので、これら地震被害想定調査のデータは貴重なデータである。これ以外にも宝塚市においては約1500本のボーリングデータが入手でき、そのうち626本のデータが掘進長が10m以上のデータであった。

5. 代表測線の地盤構成

(1) 芦屋市

深層地盤については、兵庫県阪神地域活断層調査委員会による「阪神・淡路地域活断層調査」報告書¹⁷⁾より芦屋市西端(芦屋市と神戸市東灘区の境界付近)に反射法地震探査結果がある。そこでは図-3に示すように、基盤岩である六甲花崗岩までの深層地盤構成が示されており、芦屋市街は山手の甲陽断層により基盤岩が深く沈み込んでいることがわかる。

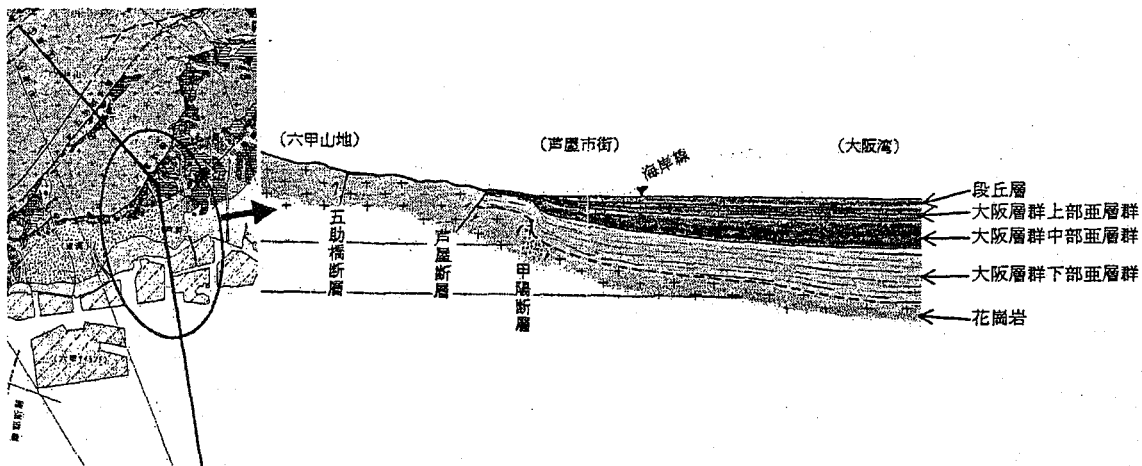


図-3 芦屋市深層地盤代表断面図

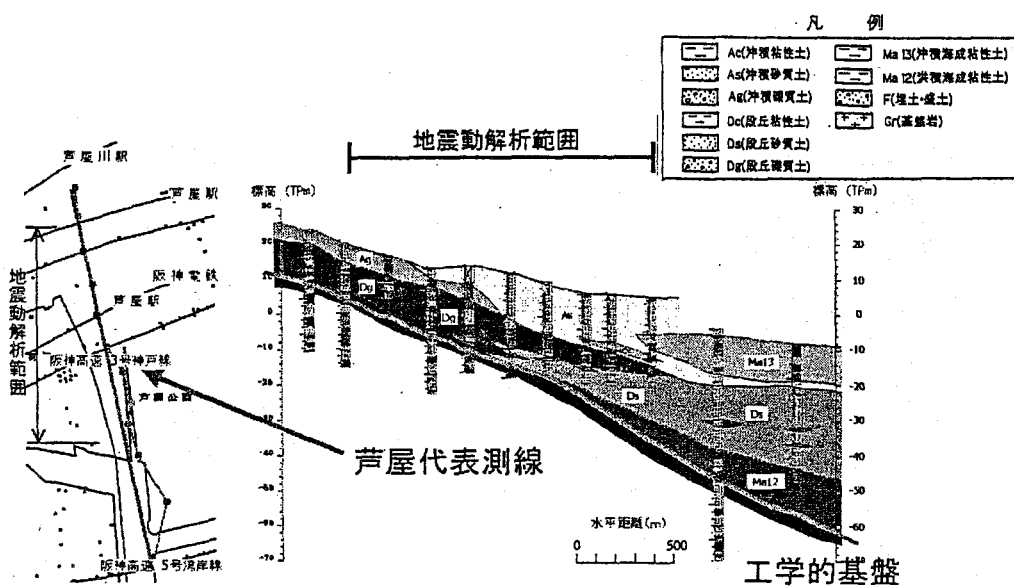


図-4 芦屋市浅層地盤代表断面図

一方、図-3 に示す代表断面での浅い地盤構成は、関西地盤調査情報データベースに登録されている柱状図をもとに推定すると図-4 のようになる。同図によると市街地の中心は沖積砂質土層 (As 層) で覆われており、山手に近づくと礫質土層 (Ag 層) となる。一方、沿岸地域より海底面に向かっては沖積海成粘性土層である Ma13 層が海底面に厚く分布し、その下部には段丘砂質土層 (Ds 層) が分布している。陸域においては Ds 層は順次薄くなり、礫質土層 (Dg 層) へと変化している。沿岸域より海底面に向かっては海性粘性土である Ma12 層が分布しており、沖合になるにしたがって厚くなっている。神戸地域の解析結果¹⁾より、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。このことより、本解析においても 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。山側で 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/s 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。N 値と Vs との関係については神戸地域で得られた関係式¹⁾を用いた。

(2) 西宮市

西宮市では平成 12 年度に実施された「地盤図作成業務」で深層地盤についても断面図が示されている。それを図-5 に示す。この断面図は、甲山から阪急甲陽園駅、阪急夙川駅を通り、夙川の東岸を西宮浜に抜ける位置にあり、基盤岩である六甲花崗岩は、甲陽断層、上ヶ原断層、西宮断層によって深く沈み込んでいる。同報告書によると、図-5 に示す深層地盤断面とほぼ同じ位置に、浅層地盤の断面図が示されている。これを、西宮市の代表断面として、図-6 に示す。これによると芦屋市と同様、西宮市においても市街地の地表には沖積砂質土層 (As 層) が分布している。埋立地 (B 層) の下部および海底面には Ma13 層が分布しており、芦屋市と異なり Ma13 層が市街地の中まで入り込んでいるのが特徴である。Ms13 層の下部にも As 層が分布しており、その下部には段丘層 (上部洪積層) の Dg 層および海成粘性土層である Ma12 層が分布している。Ma13 層と同様、Ma12 層も陸域まで入り込んだ状態となっている。また、同図には工学的基盤面も併記した。

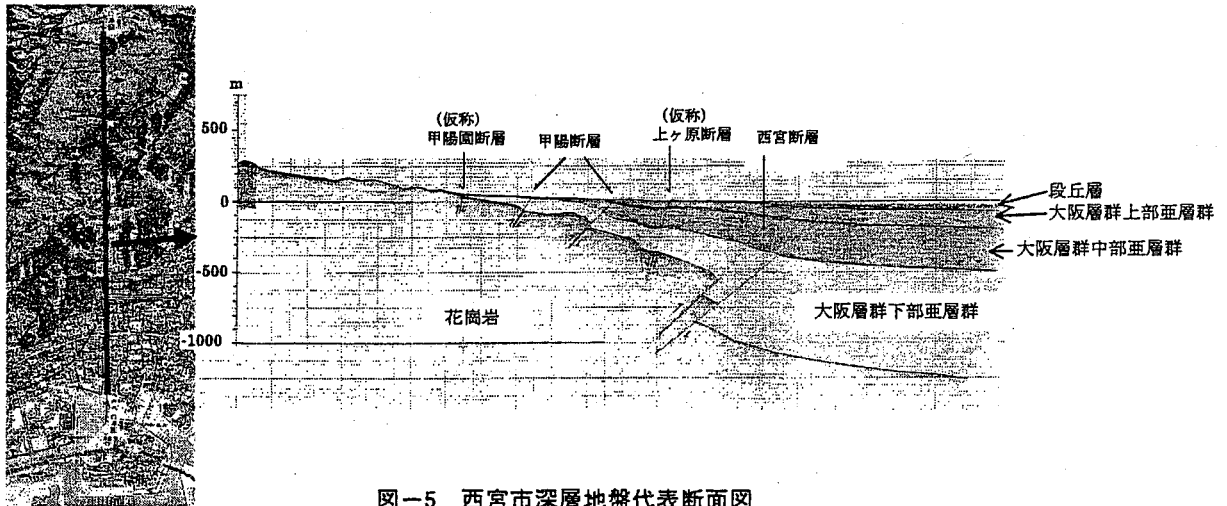


図-5 西宮市深層地盤代表断面図

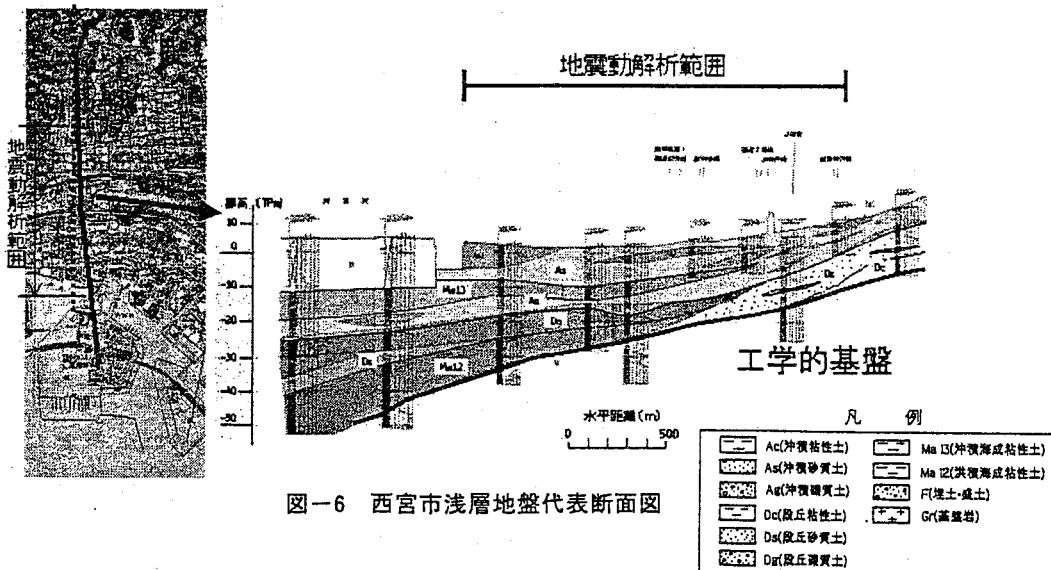


図-6 西宮市浅層地盤代表断面図

(3) 宝塚市

深層地盤については、「阪神・淡路地域活断層調査」報告書¹⁷⁾によると図-7に示す位置で、反射法地震探査結果が示されている。それを、図-7に示す。この測線は武庫川沿いの測線であり、3条の伏在断層は認められるもの、芦屋、西宮地域に比べると基盤である六甲花崗岩の急激な落ち込みはなく、比較的なだらかな形状で深くなっている。そして、武庫川の上流域にあたる宝塚地域においては、芦屋、西宮に比べると六甲花崗岩が浅く分布していることがわかる。

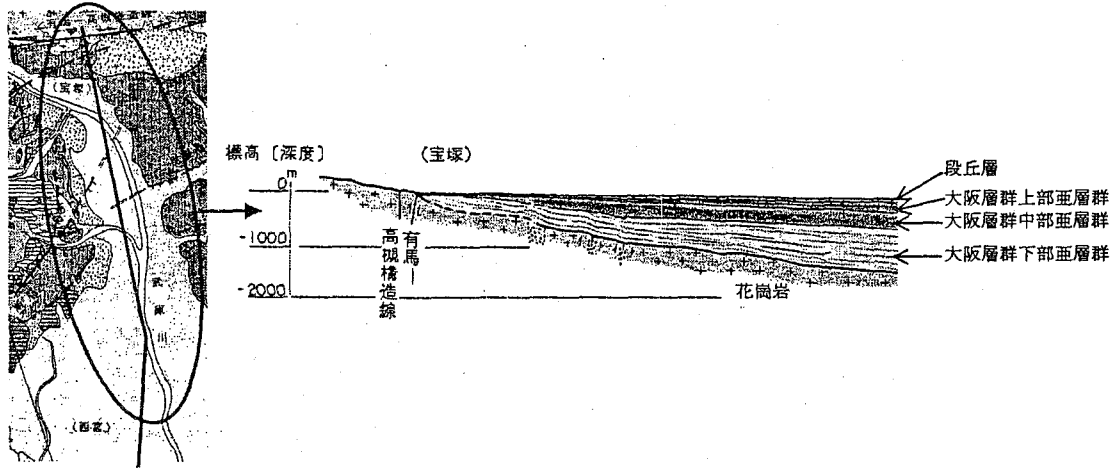


図-7 宝塚市深層地盤代表断面図

一方、浅層地盤については、関西地盤調査情報データベースによるボーリングデータならびに西宮市収集ボーリングデータより作成した代表断面図を図-8に示す。同断面図作成にあたっては、既存ボーリングデータからの情報が十分ではなかったために、「阪神・淡路地域活断層調査」報告書¹⁷⁾に示されている浅層地盤の地質断面図も参考とした。

宝塚市では地表付近から段丘層の分布しているところが多く、沖積層は武庫川等の河川付近で見られる程度である。図-8に示す武庫川沿いでは最上部に2~8mの厚さで沖積礫質土層 (Ag層) が分布しており、その下部に段丘礫質土層 (Dg層) が分布している。工学的基盤面は既往の研究成果¹⁾よりMa12層の下面としているが、当該地区においてはMa12層が分布していても非常に薄い層であり、Dg層中にMa12層が途中で消滅している。ここでは、代表断面と直交する断面⁹⁾でMa12層の薄層が認められているところがあり、そこでのDg層ならびにMa12層の層厚を参考にして代表断面における工学的基盤面を設定した。

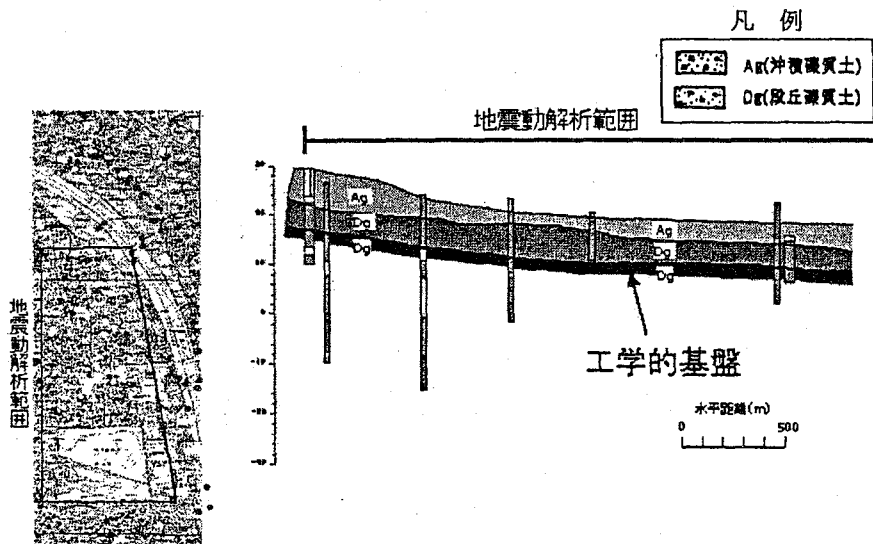


図-8 宝塚市浅層地盤代表断面図

6. 兵庫県南部地震による建物被害

(1) 芦屋市

芦屋市が作成された「阪神・淡路大震災 芦屋市の記録 '95~'96」¹⁸⁾によると、芦屋市南部での兵庫県南部地震による建物被害分布は図-9に示す通りである。芦屋市では、全建物15,421棟のうち、全・半壊は8,784棟で、全体の約57%に相当していた。特に、阪急神戸線～国道2号線の間で（全壊+半壊）の割合が62.40%、国道2号線～国道43号線の間で、71.92%と大きな値を示していた。図-9ではすべての年代での建物被害が示されているが、同資料での年代別被害率分析結果を見ると年代の古い建物ほど被災率が高くなっている。

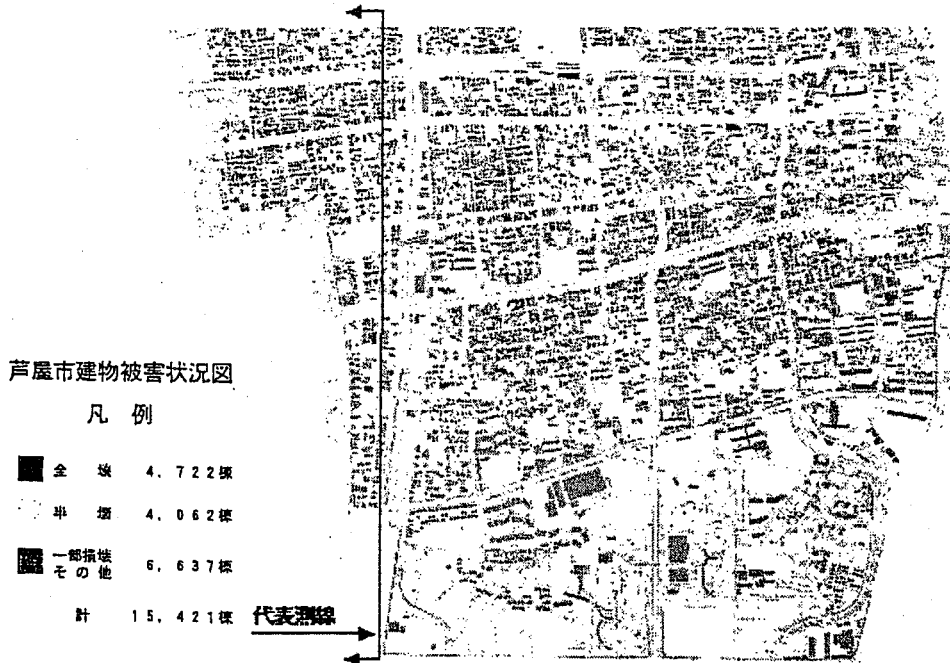


図-9 兵庫県南部地震による芦屋市南部での建物被害分布¹⁸⁾

(2) 西宮市

西宮市が作成された「復興に向けて 阪神・淡路大震災の記録」¹⁹⁾によると兵庫県南部地震直後（1995年1月末時点）の市域南部街区別の全壊世帯数状況図が示されている。その図のうち、阪急神戸線付近より南側を抽出したものを図-10に示す。

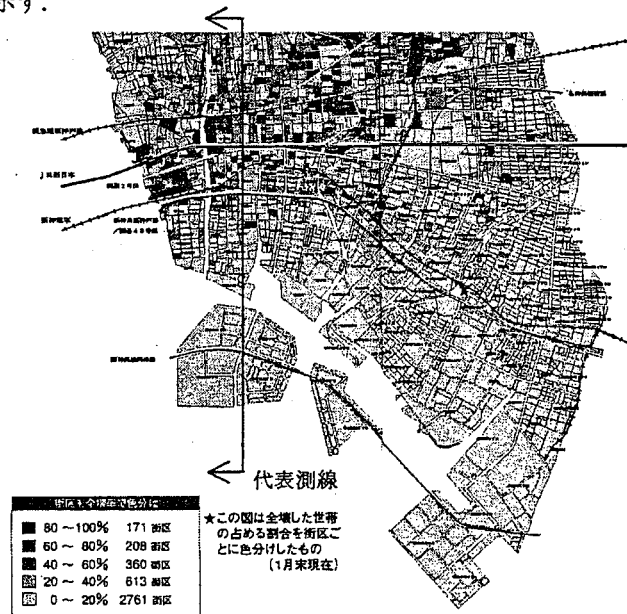


図-10 西宮市街区別全壊世帯状況図¹⁹⁾

この図によれば、街区毎の全壊率は市域の南西部から北東部にかけて多くなっており、特に阪急甲陽線と阪急今津線、および阪神電鉄線で囲まれた地域での全壊率が高くなっている。一方、市域の南東部や臨海部（埋立地）、および市域の北西部においては、全壊率の高い街区は少なくなっている。また、同市が作成された「一阪神・淡路大震災－震災復興6年の総括」²⁰⁾によると、平成5年の市内住宅総数は167,830戸であり、そのうち居住者のいる住宅は146,650戸であった。兵庫県南部地震による全半壊数は6万世帯を超え、震災による住宅の滅失戸数は31,093戸（公費解体処理件数）であった。居住者のいる住宅数を基準にすれば、震災による住宅の滅失率は全体で21.2%となる。このうち、木造住宅の滅失戸数は27,341戸であり、滅失率にすれば41.3%にも達している。一方、これに対して鉄骨、鉄筋などの非木造住宅の滅失率は4.7%であった。

(3) 宝塚

宝塚市が作成された「阪神・淡路大震災－宝塚市の記録1995－」²¹⁾によると、全壊・半壊・一部損壊の被災世帯数が町丁目毎にまとめられており、全半壊率の高いところでは、概ね30～50%を示している。同市が作成した「H7防災アセスメント調査業務報告書」²²⁾には、兵庫県南部地震による建物被害履歴図が示されており、そのうちの一部を図-11に示す。

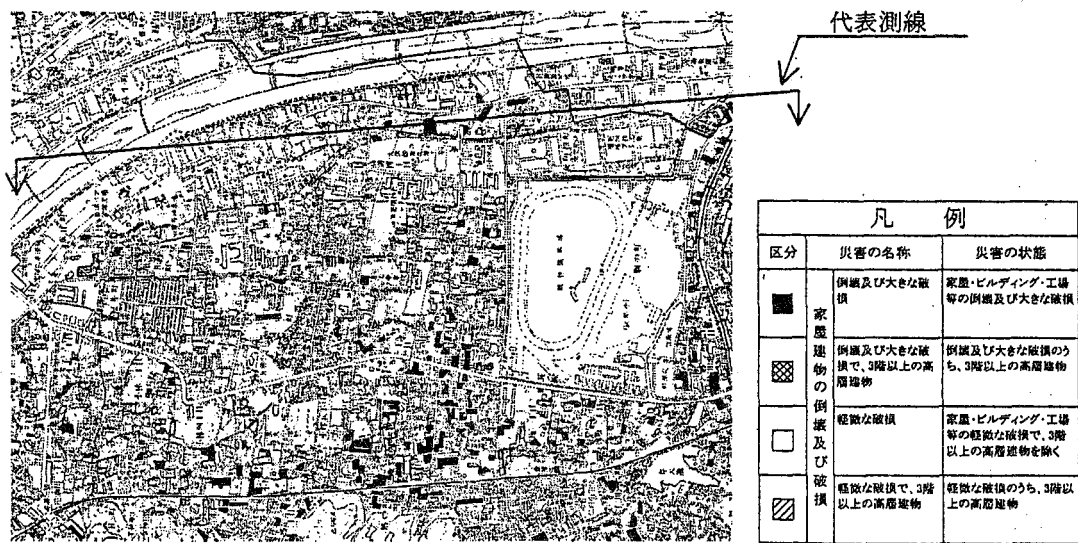


図-11 宝塚市阪神・淡路大震災被害履歴²²⁾

同図には、兵庫県南部地震による個々の建物の崩壊や破損状況が示されている。これらの資料によると兵庫県南部地震による建物被害では、木造家屋で、土をふいて瓦をのせた重い屋根や筋交いの入っていない壁などを有する、建築後30年以上経過した家屋に被害が多かった。ビルの崩壊も相当数あり、特に新耐震基準施行以前に建てられたビルの被害が多かった。震災で家屋被害の甚大な地域は、武庫川の左岸地域では、阪急宝塚線および旧176号線に被害が集中していた。地域的に見ると、宮ノ町、川面1丁目、清荒神1丁目～4丁目、売布1丁目～3丁目、星の荘一帯、旧176号線北側の地域で中山寺1・2丁目、さらに今里町から中筋地域にかけてである。

武庫川右岸地域は、湯本町地域と阪急今津線の小林駅から以南の地域、県道宝塚仁川線添の中野町、大成町および鹿塩1・2丁目、仁川台、仁川見ガ丘、小仁川添の仁川2丁目地域に被害が集中していた。なお、宝塚市全体では全76,265世帯中、全壊世帯が5,535世帯（全壊率7.3%）、半壊世帯が14,737世帯（半壊率19.3%）、一部損壊世帯が20,905世帯（一部損壊率27.4%）であり、全被災世帯数は41,177世帯（被災率54.0%）であった。

7. 代表測線における地震動解析

4章で作成した3市の代表断面について、地震動の増幅特性を把握する目的で地震動の解析を行った。解析に先立って地盤の物性値を設定する必要があるが、浅層地盤については、神戸市域における研究で求めた神戸市域の平均値¹⁾²⁾を使用し、深層地盤については、同じく神戸市域における研究で過去の研究成果²³⁾を参考にして設定した神戸市東部地区の物性値¹⁾²⁾を使用した。表-1に深層地盤の物性値を示す。

表-1 深層地盤の物性値

地層名	基本物性		
	Vs (m/sec)	単位体積重量 (kN/m ³)	減衰 (%)
段丘層	500	20	1.5
上部亜層群	634	18.5	1.5
中部亜層群	680	20	1.5
下部亜層群	1027	22.5	1.1 (石田の式)

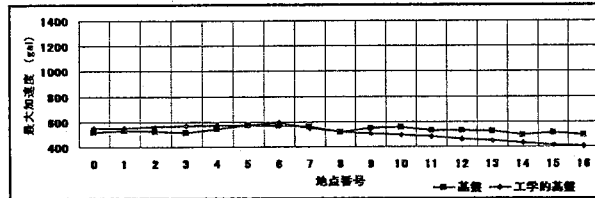
以下に、各市における代表測線の地震動解析結果について述べる。

(1) 芦屋市

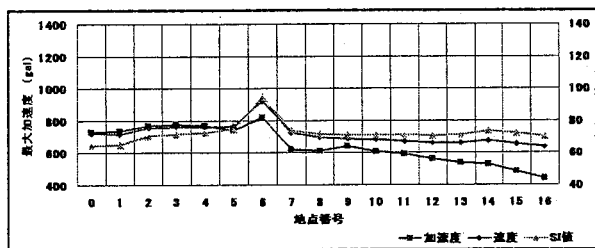
芦屋市については図-4に示す1.6kmの区間について、100m毎に代表地点を設定して地震動の解析を行った。その結果を図-12に示す。

同図によると、基盤および工学的基盤における最大加速度は400~600galを示し、基盤における最大加速度は、測線の山側、海側に関わらず大きな差はない。工学的基盤における最大加速度は測線の中央付近が最も大きく、海側の方で小さくなっている。

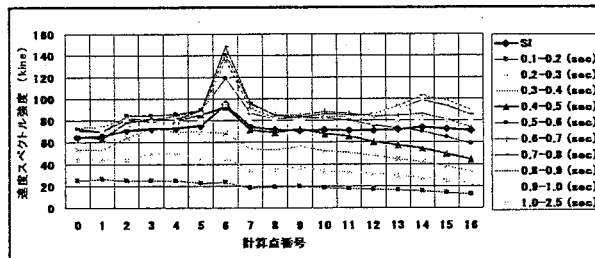
地表面における最大加速度は400~800galと幅広い値を示しており、測点番号6番を境に、海側へ向かって徐々に小さくなっている。一方、最大速度およびSI値は測線全般で60~80kineであるが、測点6番だけ約90kineと大きくなっている。周期帯域を変えて速度スペクトル強度を算出した図が、図-12(c)図であるが、これによると0.4~0.5秒速度スペクトル強度が70kineを超えるところで建物被害率が高くなっている。既往の研究²⁴⁾によると建物の建築年代が昭和20年~45年の建物は固有周期が概ね0.4~0.5秒であり、被害を受けた建物の建築年代が古い時代のものであることを考慮すると建物被害と建物固有周期帯地震動の大きさが大きく関係していることがわかる。地盤毎の地震動増幅度は図-12(c)によると固有周期毎で少し異なっており、海に近い測線後半では、0.3~0.4秒、0.4~0.5秒、0.5~0.6秒速度スペクトル強度が山側に比べて小さくなっている。図-9の建物被害分布図においても山側に近い測線前半部で被害率が高くなっており、地震動解析結果とほぼ一致している。



(a) 基盤および工学的基盤面における最大加速度分布



(b) 地表面における最大加速度、最大速度、SI値分布



(c) 地表面における各周期帯毎の速度スペクトル強度分布

図-12 芦屋市代表測線における地震動解析結果

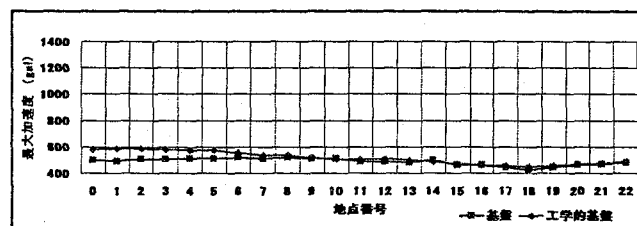
(2) 西宮市

西宮市については図-6に示す2.2kmの区間について、100m毎に代表地点を設定して地震動解析を行った。その結果を図-13に示す。

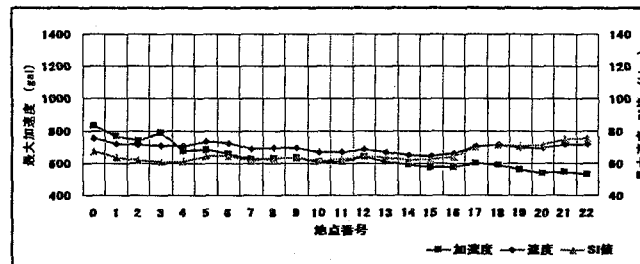
西宮市代表測線における地震動解析結果では、基盤および工学的基盤における最大加速度は芦屋市と同様 400～600gal を示している。基盤における最大加速度は測線の海側で若干小さくなる点が認められるものの、測線全般で大きな差は見られない。工学的基盤における最大加速度は、測線の前半（測点番号0～6番）で若干大きな値を示しているが、他の地点における最大加速度の大きさは、基盤も工学的基盤もほとんど同じ値である。

地表面における最大加速度は500～800galであり、測線の起点側（山側）で大きく、終点側（海側）へなるにしたがって小さくなっている。一方、最大速度およびSI値は測線全般で60～80kineであり、大きな値の差は認められない。ただし、測線の前半では最大速度の方がSI値より大きく、測線終点付近ではSI値が最大速度を上回っている。

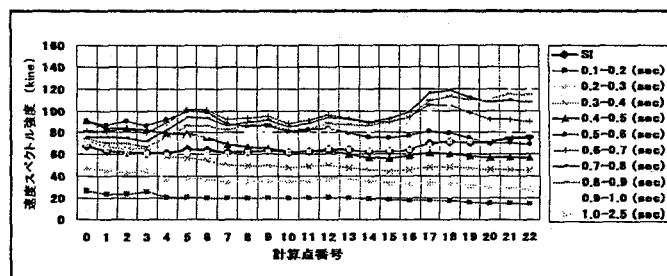
周期帯域を変えて速度スペクトル強度を算出した結果を見ると、芦屋市と同様に測線前半の0.4～0.5秒秒速度スペクトル強度が70kineを超えるところで建物被害率が高くなっている。これに対して測線後半の海側では0.4～0.5秒速度スペクトル強度が70kineよりも小さくなっており、これら地域においては図-10によると建物被害率が低くなっている。



(a) 基盤および工学的基盤面における最大加速度分布



(b) 地表面における最大加速度、最大速度、SI値分布



(c) 地表面における各周期帯毎の速度スペクトル強度分布

図-13 西宮市代表断面における地震動解析結果

(3) 宝塚市

宝塚市については図-8に示す2.4kmの区間について、100m毎に代表地点を設定し各地点について地震動解析を行った。地震動解析結果を図-14に示す。

宝塚市代表測線における地震動解析結果を見ると、基盤における最大加速度は他の2市よりも若干大きい目で、500～600galを示している。一方、工学的基盤面における最大加速度は600～1000gal程度を示し、特に測線の前半で非常に大きくなっている。基盤における最大加速度と工学的基盤における最大加速度の差は、測線の起点側

で400gal程度もあり、測線の終点付近でほぼ同じ大きさとなっている。

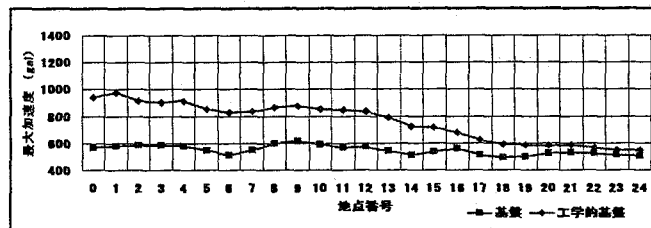
地表面における最大加速度は800~1300galであり、測線の前半で大きく、後半になるにしたがって小さくなっている。特に測点番号12, 13番付近を境に急激に小さくなるのが特徴である。一方、最大速度は80~100kineであり、最大加速度と同様に測線の後半で小さくなっている。SI値は50~100kineと値が広範囲であるが、測線の前半で90~100kineと大きく、測線中央付近(測点番号12, 13番付近)を境に急激に値が小さくなり、測点番号20番付近のSI値は、起点(測点番号0番)の約半分である。

周期帯毎の速度スペクトル強度では、芦屋、西宮と違って周期帯域によらず、測線の前半側で速度スペクトル強度が大きくなり、測線の後半側で速度スペクトル強度が小さくっている。一方、図-11に示すように宝塚市における解析測線付近では、建物の被害率は芦屋、西宮ほどには高くない。このことは、宝塚市における解析結果では他の測線と比較して、算出された地震動の大きさが大きなことが分かる。特に、芦屋市、および西宮市における工学的基盤面での最大加速度は、基盤での最大加速度とほぼ同じ値になっているのに対して、宝塚市における工学的基盤面の最大加速度は、測線の前半側で基盤の最大加速度の概ね2倍前後の値を示している。

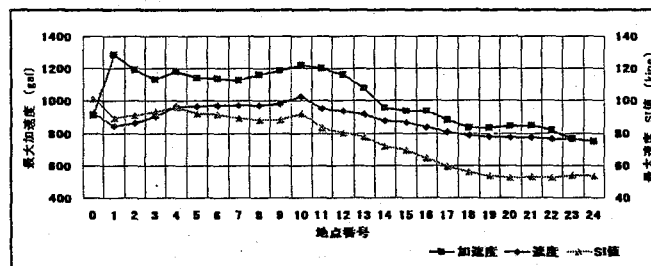
これは、神戸市域における研究の際も見られた傾向¹⁾²⁾であるが、山側の地域では沖積層が非常に薄く、地表に近いところから段丘層に入る地点、あるいは、基盤、工学的基盤の深度が浅い地点で、宝塚市の結果と同様な結果が得られている。すなわち、このようなところでは工学的基盤面での地震動が非常に大きくなり、結果として、地表面における各種地震動が大きくなることである。

このことより、基盤(あるいは工学的基盤)が浅く、沖積層が薄い地点における地震動の解析にあたっては、「工学的基盤面から基盤における深層地盤物性値の修正」が必要であることを示唆している。

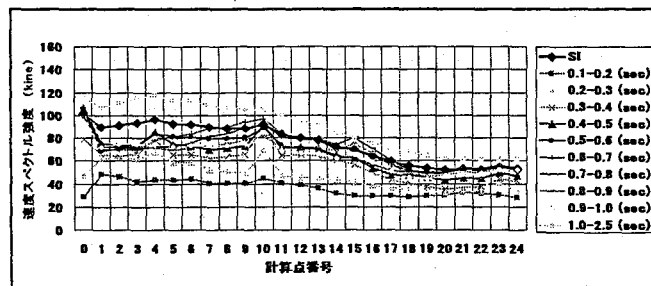
深層地盤の物性値は、既往の研究²³⁾をもとに設定しているが、基盤の浅い地域では地層の風化、劣化が進んでおり、堆積層が数百mある場合と数十mしかない場合では、深層地盤の物性も変わってくるものを思われる。そこで、基盤、あるいは工学的基盤面の深度に応じて、深層地盤のS波速度や密度を増減させる等、深層地盤の物性値に対する検討を行って最適な物性値の設定を行う必要がある。



(a) 基盤および工学的基盤面における最大加速度分布



(b) 地表面における最大加速度, 最大速度, SI値分布



(c) 地表面における各周期帯毎の速度スペクトル強度分布

図-14 宝塚市代表測線における地震動解析結果

8. 工学的基盤面が浅い地域での地盤特性

地震動の解析においては、一般に工学的基盤面より浅部は非線形、工学的基盤面より深部は線形で解析が行われている。このため、工学的基盤面の設定が不適切な場合、工学的基盤面上下で物性に大きな差が生じてしまう。そこで、拘束圧を考慮した動的変形曲線式(式(1))を導入し、基盤まで非線形性を導入して解析を行った。

Iwasaki らが豊浦標準砂で求めた砂質土に対する拘束圧を考慮した動的変形曲線式²⁵⁾は(1)式に示す通りである。なお、(1)式においては原式が $p = 1 \text{ kgf/cm}^2$ となっているが、これを $p = 100 \text{ kN/m}^2$ として表している。

$$\frac{G}{G_{\gamma=10^{-6}}} = \left(\frac{G}{G_{\gamma=10^{-6}}} \right)_{p=100 \text{ kN/m}^2} p^{m(\gamma) - m(\gamma=10^{-6})} \quad (1)$$

$$h = h_{\max}(1 - G/G_0)$$

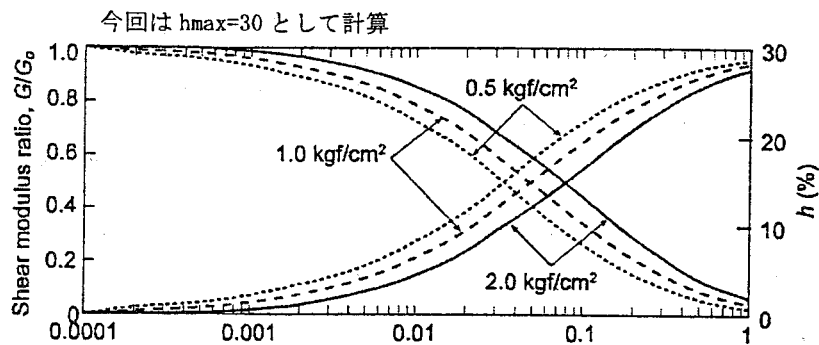


図-15 拘束圧に依存する動的変形曲線

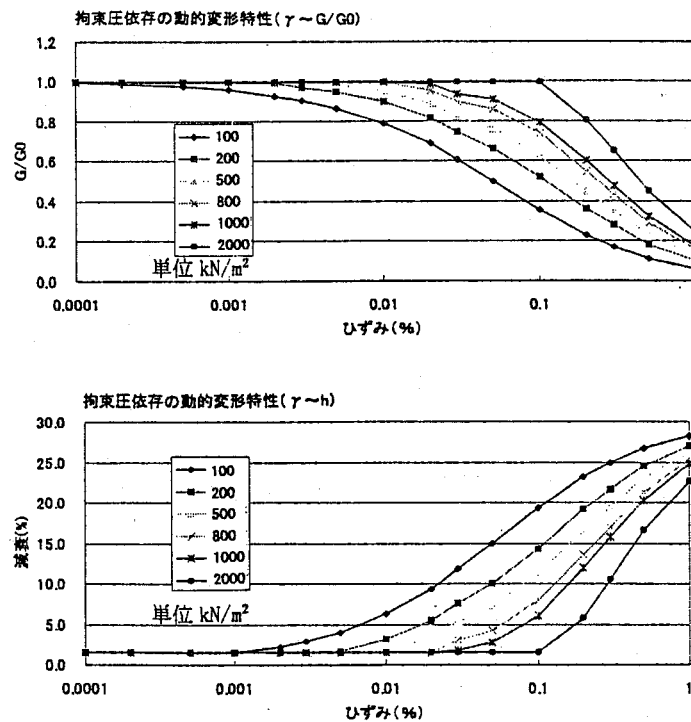
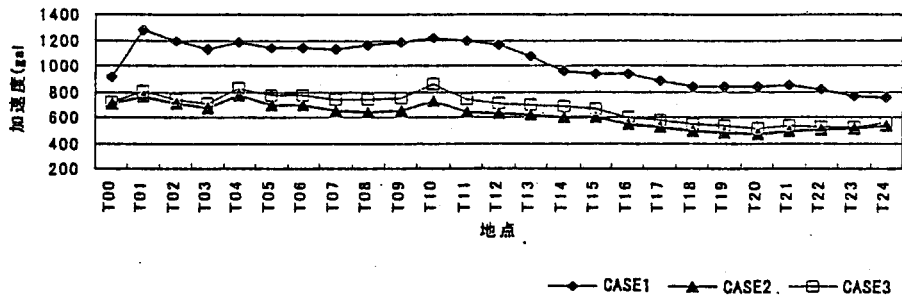


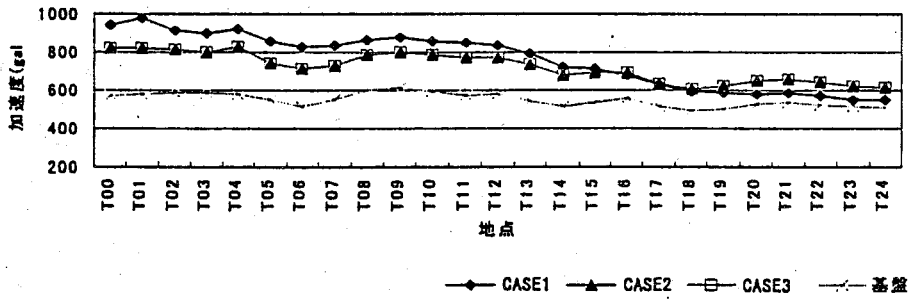
図-16 拘束圧 (100~2000kN/m²) で計算した場合の動的変形曲線

注) (1)式は拘束圧を 50~200kN/m² としたときの実験式である。それ以上の拘束圧については 50~200kN/m² での傾向を外挿する形で求めた。

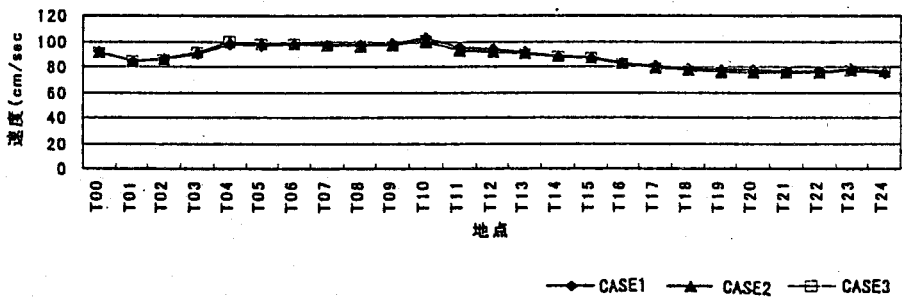
地表面の最大加速度



基礎及び工学的基礎の最大加速度



地表面の最大速度



地表面のSi値

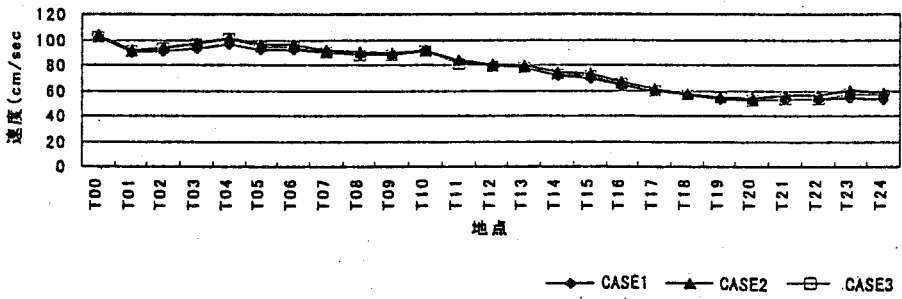
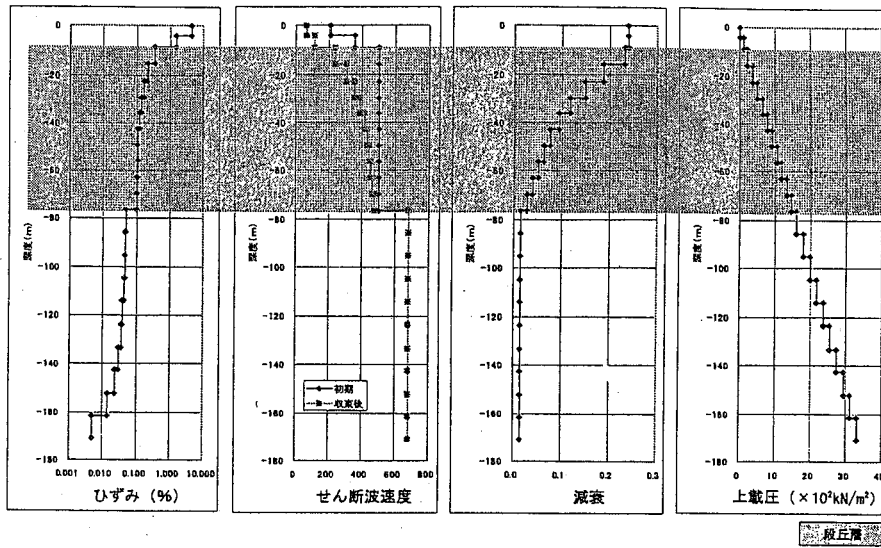
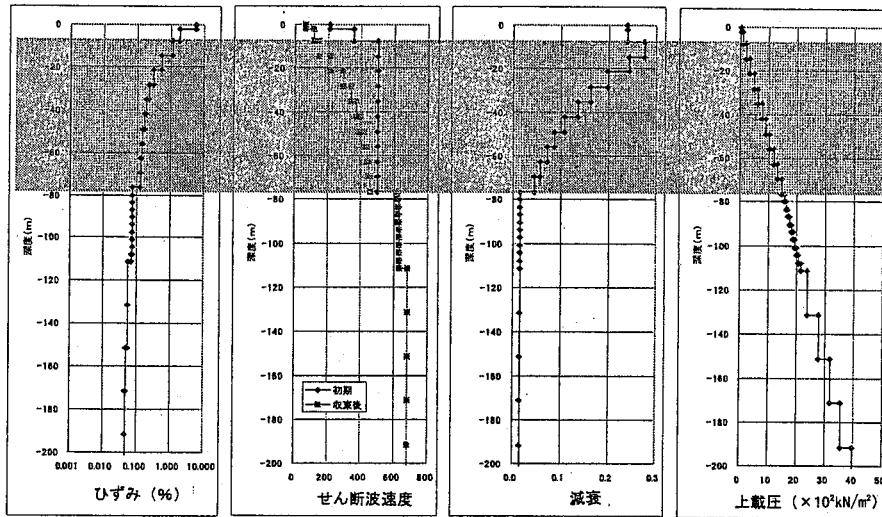


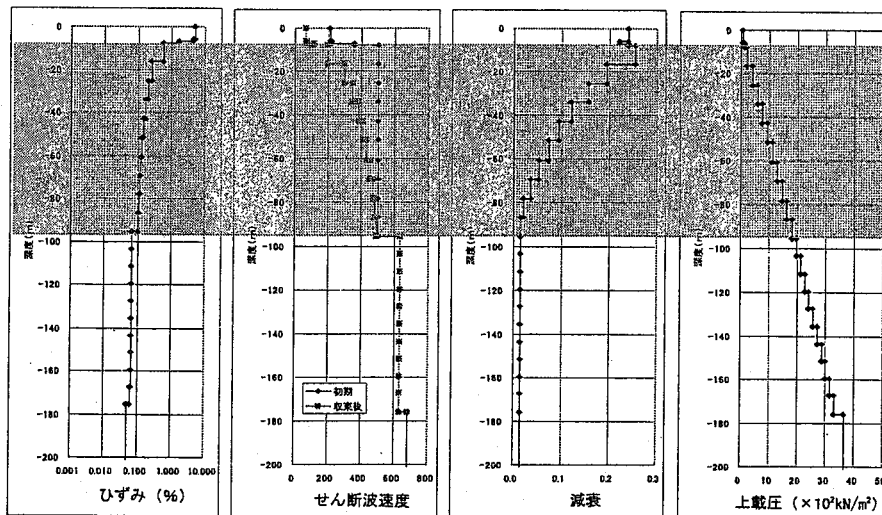
図-17 拘束圧依存動的変形曲線導入解析結果 (宝塚代表測線)
 (CASE1: S波速度の倍率 1.0, CASE2: 各層を 10 分割, CASE3: 各層を分割しない)



T01 地点 (測線の起点)



T12 地点地点 (測線の中間点)



T23 地点 (測線の終点)

図-18 宝塚代表測線 CASE3 (各層を 10 分割) における代表点での振動特性

CASE1は現状の設定条件にて計算した結果、CASE2は深層地盤（段丘層、大阪層群各亜層群）の各層を10分割し、その各層の中央の深度までの上載圧（P）にて動的変形特性を設定、CASE3は深層地盤の各層を1層とし、その層の中央の深度までの上載圧（P）にて動的変形特性を設定した。

表-2 深層地盤の初期の設定条件

地層名	CASE1	CASE2	CASE3
段丘層	線形	非線形	非線形
上部亜層群	線形	非線形	非線形
中部亜層群	線形	非線形	非線形
下部亜層群	線形	非線形	非線形

注) CASE2:各層を10層に細分して計算。CASE3:各層を1層で計算

図-17に計算結果を示す。各層を10層に細分割したCASE2と細分割せず1層としたCASE3はともにほぼ同じ結果を示し、初期モデル(CASE1)に比べ最大加速度は小さくなった。一方、最大速度とSI値については、CASE1とほとんど変わらない結果が得られた。このことは、段丘層以深について非線形性を導入することで高周波成分の減衰が効いたため、最大加速度が低下し、最大速度とSI値はほとんど変わらない結果になったと考えられる。

図-18にCASE3における代表点での各層ひずみ、せん断速度（S波速度）、減衰、上載圧を示した。宝塚市の代表測線におけるT01地点は測線の起点、T12地点は測線の中間点、T23は測線の終点である。同図に示すように段丘層のみ減衰が大きくなっており、段丘層より下部の地層については初期状態の減衰から変化していない。さらに詳しく見るとひずみが大きく、せん断波速度が大きく低下しているのは、地表面よりの深度が20~40m程度以浅である。このことから、沖積層がほとんど分布せず、工学的基盤面が20mよりも浅いところについては、工学的基盤面をGL-20~40mにすれば最大加速度を適切に評価できることが分かる。

9. まとめ

本論文においては阪神間西部地域（芦屋市、西宮市、宝塚市）における地盤構成の研究と代表測線における地震動増幅特性を検討した。その結果をまとめると以下ようになる。

(1) 代表測線の地盤構成

- ① 芦屋市の深層地盤構成については、芦屋断層以南は未固結層である大阪層群、段丘層、沖積層が基盤である六甲花崗岩を覆っている。一方、浅層地盤においては、Ma12層が陸域に入り込んでおり、その上部には段丘層の砂質土層（Ds層）、礫質土層（Dg層）が分布し、さらにその上部には沖積層が分布している。沖積層、段丘層とも山麓部から沿岸部になるにしたがってDg層からDs層へと漸移している。海域の最上部には沖積海性粘性土層であるMa13層が分布している。
- ② 西宮市においても甲陽（園）断層より南~南東部においては、大阪層群、段丘層、沖積層が六甲花崗岩を覆って分布している。浅層地盤も芦屋市と同様にMa12層が陸域に入り込み、その上部にDg、Dsおよび沖積層が分布している。芦屋市と異なるのは、Ma12層、Ma13層が陸域の中に入り込んでいる割合が高いことがあげられる。さらにMa12層の上部に分布する段丘層も山麓から沿岸部になるほどDg層からDs層に変化していく傾向が明瞭に認められないことである。このことは、地形特性も関連していると考えられ、西宮市になると六甲山地が北東方向へ遠ざかり、武庫川の扇状地ならびに三角州としての影響が表れてくるためと思われる。
- ③ 宝塚市は芦屋市、西宮市に比べると基盤である六甲花崗岩は浅くなってくるとともに、沖積層がほとんど分布しない地盤構成となっている。段丘層においても海性粘性土層であるMa12層は分布せず、礫質土であるDg層主体となっている。

(2) 建物被害

- ① 芦屋市においては全半壊が全体で約57%と高かった。特に、阪急神戸線~国道2号線の間で全半壊の割合が62.40%、国道2号線~国道43号線の間で71.92%と大きな値を示していた。
- ② 西宮市においては震災による住宅の滅失率は全体で21.2%であり、木造住宅に限れば、41.3%にも達していた。芦屋市と同様、阪急神戸線から国道43号線間の被害率が高くなっている。
- ③ 宝塚市においては全体で全壊率が7.3%、半壊率は19.3%であった。町丁目毎のまとめの中で全半壊率の高いところでは30~50%を示していた。

(3) 代表測線における地震動解析

- ① 芦屋市, 西宮市においては基盤および工学的基盤面における最大加速度は 400~600gal を示している。地表面における最大加速度は芦屋市で 400~800gal, 西宮市で 500~800gal と同程度の値を示し, 全般に海側になるにしたがって小さい値を示している。
- ② 芦屋市, 西宮市における地表面最大速度は概ね 60~80kine となっている。昭和 20~45 年に築造された木造建物の固有周期が概ね 0.4~0.5 秒であるので, 各周期毎の速度スペクトル強度を求めると 0.4~0.5 秒速度スペクトル強度が 70kine を超えるところで建物被害率が高くなっている。
- ③ 宝塚市においては, 基盤における最大加速度は他の 2 市よりも若干大きい目で 500~600gal を示している。一方, 工学的基盤面における最大加速度は 600~1000gal、地表面における最大加速度は 800~1300gal と大きな値を示している。
- ④ 宝塚市における最大速度は 80~100kine, 0.4~0.5 秒速度スペクトル強度も 40~80kine となっている。0.4~0.5 秒速度スペクトル強度が 70kine を上回るのは測点 4~14 間 (1つの測点間が 100m) であり, 測線西側に分布する木造建物被害でもこの間に被害が多く見受けられる。ただ, 測線付近では鉄筋コンクリート造りの建物が多く被害は少なかった。
- ⑤ 工学的基盤面が浅く, 地表面に沖積層が分布していないところでは, 工学的基盤面を少し深くすれば, 最大加速度を適切に評価できる。

謝辞

本論文は(財)阪神・淡路大震災記念協会にて設けられている研究会での成果の一部をとりまとめたものである。成果作成にあたっては神戸大学の沖村教授をはじめ, 京都大学の佐藤教授, (株)日本コンピューターコンサルタンツの古川主任にいろいろとご指導をいただくとともに(財)阪神・淡路大震災記念協会, 兵庫県, 芦屋市, 西宮市, 宝塚市の方々に多大なご協力をいただきました。ここに関係各位に対しまして深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 沖村 孝, 佐藤忠信, 南部光広, 若林 亮, 岸本英明: 地盤情報データベースを活用した神戸地域地震動解析, 土木学会論文集, No. 701/III-58, pp. 121-134, 2002.
- 2) 沖村 孝, 佐藤忠信, 南部光広, 岸本英明: 地盤情報を活用した被災分布の究明—兵庫県南部地震の震源波を考慮に入れた地盤動的応答解析—, (財)阪神・淡路大震災記念協会沖村孝委員研究会調査研究報告書, pp. 1-17, 2001.
- 4) 額額一起, 吉田真吾, 植竹富一, 古村孝志: 被害分布データから推定される兵庫県南部地震の断層モデル, 第1回都市直下地震災害総合シンポジウム, pp. 66-69, 1996.
- 5) 翠川三郎, 藤本一雄: 墓石の転倒調査から推定した兵庫県南部地震の際の神戸市およびその周辺での震度分布, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp. 111-118, 1996.
- 6) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫, 川瀬博: 1995年兵庫県南部地震の低層建物被害率に基づく最大地動速度の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第494号, pp. 59-66, 1997.
- 7) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫: 1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地動速度分布に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第502号, pp. 61-68, 1997.
- 8) 盛川仁, 澤田純男, 土岐憲三, 中島大輔: 西宮市北部におけるやや長周期微動アレー観測記録に基づく深部地盤構造の推定, 土木学会論文集 No. 570/I-40, pp. 325-330, 1997.
- 9) 石田寛, 野澤貴, 古屋伸二, 高井剛, 加藤研一, 丹羽正徳: 神戸市街地直下における基盤岩深度分布の推定—やや長周期微動の水平/上下スペクトル比に基づく評価—, 日本建築学会構造系論文集, 第485号, pp. 63-72, 1996.
- 10) 木下繁夫, 香川敬生, 宮腰研, 赤澤隆士, 鶴来雅人, 和田安司: 常時微動群列測定による神戸地域の地下構造推定, 物理探査, 第49巻, 第6号, pp. 452-458, 1996.
- 11) 関西地盤情報活用協議会: 関西西地盤—神戸および阪神間—, 1998.
- 12) 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.
- 13) Sekiguchi, H., Irikura, K., Iwata, T., Kakehi, Y. and Hoshiya, 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.
- 14) 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.

- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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および付図，1998.
- 18) 芦屋市：阪神・淡路大震災 芦屋市の記録' 95～' 96,
- 19) 西宮市：復興に向けて 阪神・淡路大震災の記録,
- 20) 西宮市：－阪神・淡路大震災－震災復興6年の総括,
- 21) 宝塚市：阪神・淡路大震災－宝塚市の記録－1995,
- 22) 宝塚市：H7 防災アセスメント調査業務報告書,
- 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) 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.
- 25) Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y. : Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading, *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 1, pp. 39-56, 1978.

筆者：1) 南部光広，平成14年度神戸大学都市安全研究センター 客員教授

Geological Composition and Amplification Factor of Earthquake Motion in Western Hanshin District

Mitsuhiro Nambu

Abstract

For investigating the geological composition and amplification factor of earthquake motion in western hanshin district - Asiya, Nisinomiya and Takarazuca - , the various geological data has been collected and earthquake motion of the representative line has been analyzed by the multiple reflection theory. As a result, it is clear that this theory is effective to analyze the earthquake motion in Asiya and Nishinomiya that the alluvium accumulates thickly, and in Takarazuca that alluvium does not accumulate mostly, if setting the soil surface with consideration on nonlinear on nonlinear amplifiacion factor at a little deep position, this theory is similarly effective.

