

## 1995年兵庫県南部地震における地震動特性について(その2)

Characteristics of Ground Motions during the 1995 Hyogoken - Nanbu Earthquake(Part.2)

キーワード:

1995年兵庫県南部地震 地震動  
最大地動パラメータ 非線形

末 富 岩 雄\*  
吉 田 望\*

### 研究概要

前報で1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震における地震動の特徴について報告した。本研究では、その後得られた新たな知見に基づき、地盤の非線形増幅特性に着目して、地震動の特徴を把握した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 最大加速度は洪積地盤, 最大速度, SI値, 計測震度は沖積地盤, 最大変位は軟弱地盤・埋立地盤で大きい。
- 2) 計測震度は, SI値, 最大速度と関係が深い。
- 3) 工学的基盤での最大速度が20cm/s程度を越えると地盤の非線形化が見られる。
- 4) 三宮断面について浅層地盤の一次元解析を行った結果, 湾岸部では地盤の非線形化により短周期成分が低下するが, やや長周期成分については三宮駅付近と湾岸部で大きな差は見られない。

### 目次

- |                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| 1 はじめに              | 4 三宮駅付近を通る南北断面での一次元解析 |
| 2 最大地動パラメータの距離減衰特性  | 5 おわりに                |
| 3 基盤波の特性と地盤の非線形化の関係 |                       |

### Abstract

The nonlinear behavior of the ground subjected to earthquake load is discussed through comparisons with the records observed during the 1995 Hyogoken - nanbu earthquake. Following conclusions are made:

- 1)PGA is large at diluvial deposits, PGV, SI-value and JMA seismic intensity are large at alluvial deposits and PGD is large at soft ground.
- 2)JMA seismic intensity is closely related to SI-value and PGV.
- 3)When PGV at the engineering bedrock is more than 20 cm/sec, nonlinear behavior of the ground is shown clearly.
- 4)PGA in the seaside is smaller than that near the Sannomiya station, on the other hand PGV in the seaside is as same as that near the Sannomiya station.

\* 中央技術研究所 土木研究部

# 1 はじめに

1995年兵庫県南部地震については、様々な機関により精力的な調査・研究が行われており、多くの耐震基準の改定が数年以内に行われる予定になっている。しかし、地震動についてはまだ十分にその実像が明らかにされているとは言い難い。本報告では、新たな知見に基づき、地盤の非線形増幅特性に着目して、兵庫県南部地震における地震動の特徴について検討を行う。

## 2 最大地動パラメータの距離減衰特性

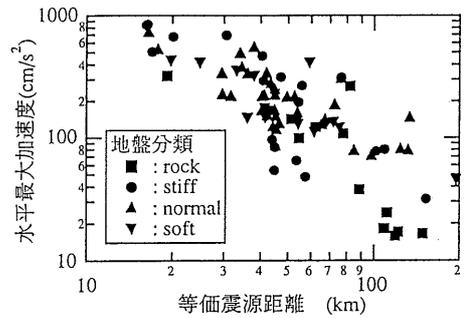
### 2.1 最大地動パラメータの距離減衰特性

前報では、断層からの最短距離を用いて最大加速度の距離減衰特性について検討を行った。断層近傍の観測値を扱う上で断層からの最短距離は震央距離・震源距離よりも適切であるが、断層の大きさの評価により場所によっては大きく値が異なるし、最大値が頭打ちになる。大野ら<sup>1)</sup>により提案されている等価震源距離を用いることにより、そのような問題を避け、断層近傍から遠方まで統一的に扱うことができるので、ここでは等価震源距離を用いることとする。等価震源距離を求めるためには、断層面でのモーメント解放量の分布が必要となるので、Sekiguchi et al.<sup>2)</sup>によるインバージョンの結果を用いる。ただし、文献<sup>2)</sup>では断層を3つに分割しているが、簡単のために1つにまとめた。観測点が多い神戸市中心部で整合するように定めた。また、地盤分類も重要である。澤田ら<sup>3)</sup>により、多くの観測点の地盤条件が調査されており、ここではその分類を参照した(1:岩盤 (rock), 2:洪積地盤 (stiff), 3:沖積地盤 (normal), 4:軟弱地盤 (soft))。土岐ら<sup>4)</sup>が示しているように、directivityの影響も大きいですが、ここでは考慮しなかった。

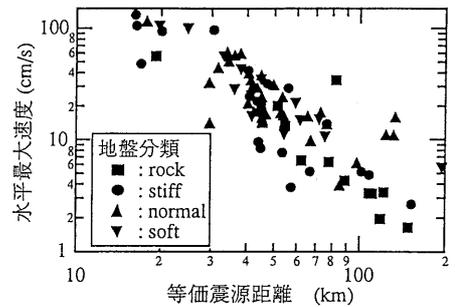
図-1に最大加速度、最大速度、最大変位、SI、計測震度の距離減衰特性を示す。これらは全て水平2成分を合成した値であり、デジタルデータが公開されている記録のみ用いた。等価震源距離が30km以下の観測点について見ると、最大加速度は洪積地盤、最大速度、SI値、計測震度は沖積地盤、最大変位は軟弱地盤で大きいことがわかる。これは、洪積地盤では短周期成分が増幅され、沖積地盤では1秒付近、軟弱地盤ではやや長い周期成分が増幅されるからであり、今回の地震では軟弱地盤では液状化により最大加速度が小さくなっているため、特に顕著になっている。この点については、3.で詳しく述べる。

### 2.2 計測震度の特性

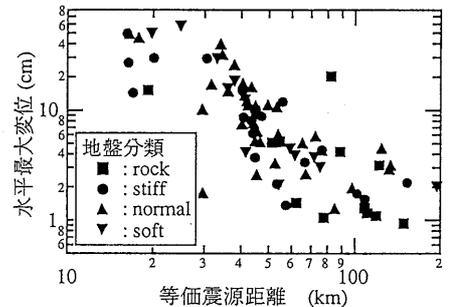
兵庫県南部地震以後、気象庁や自治体により多くの



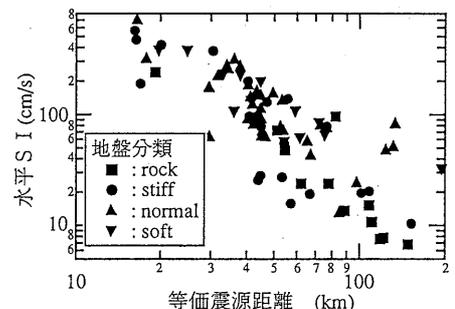
(a) 最大加速度



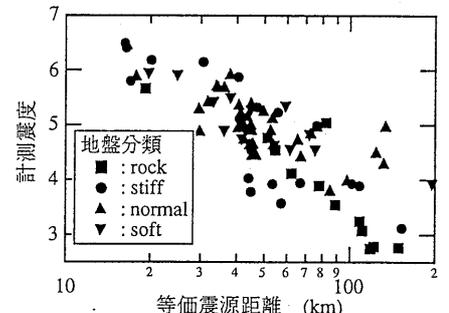
(b) 最大速度



(c) 最大変位

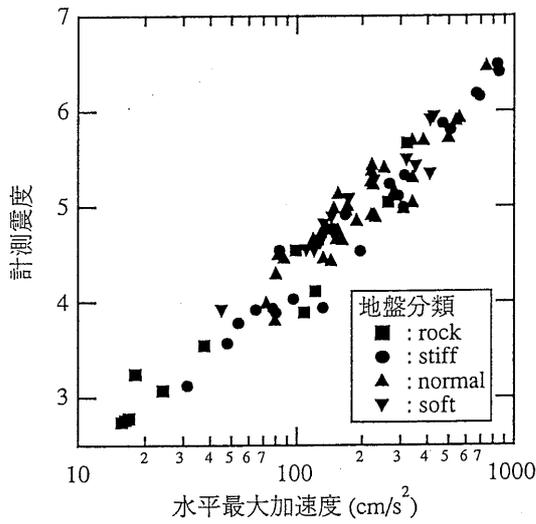


(d) SI値

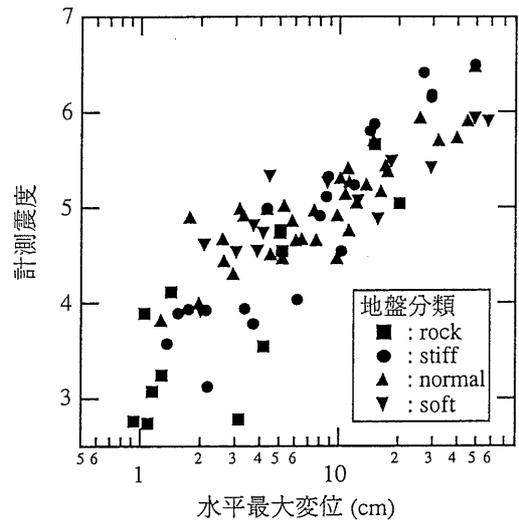


(e) 計測震度

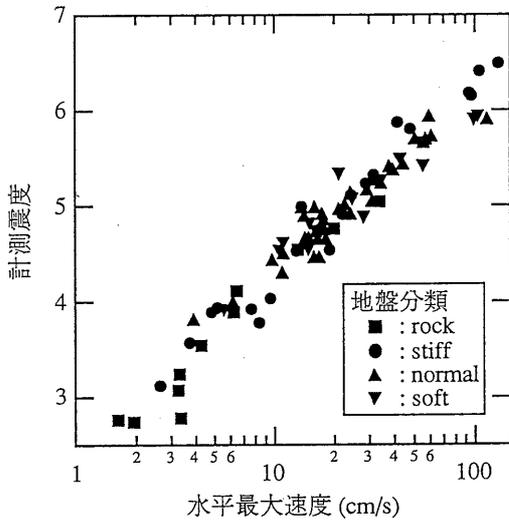
図-1 最大地動パラメータの距離減衰特性



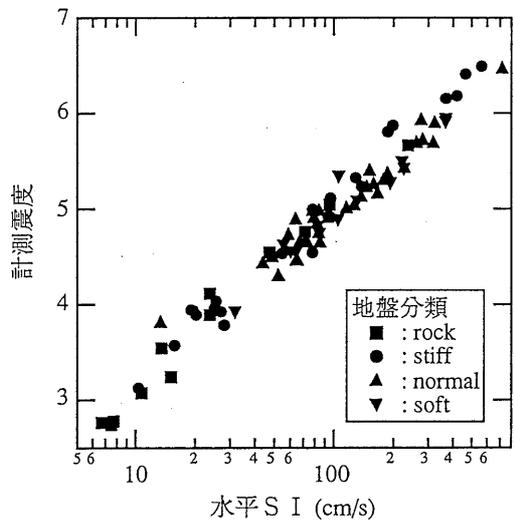
(a) 最大加速度と計測震度



(c) 最大変位と計測震度



(b) 最大速度と計測震度



(d) SI値と計測震度

図-2 計測震度と最大地動パラメータの関係

震度計が設置されており、地震後速やかにその値が公表され、救助・復旧活動に役立てる体制が整いつつある。また、計測震度の計算法が修正され、平成8年4月より新しい震度観測が開始されている<sup>5)</sup>。この計算法による計測震度と従来の最大地動パラメータとの関係を図-2に示す。

これより、速度、特にSI値との相関が非常に高いことがわかる。震度計で計測しているのは加速度であるが、図-3に示すようなフィルタ処理を行っているため、結果的に速度と関係の深い量となっている。建築物の耐震設計は工学的基盤における速度によって規定されており、建物被害との相関を考慮して決められた計測震度が速度とよく対応するのは当然とも言える。

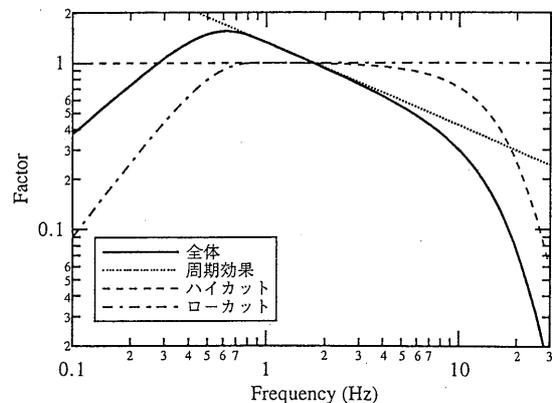


図-3 計測震度の算出に用いられるフィルタ

### 2.3 水平動と上下動の関係の周期特性

上下動の影響について前報では、全体的には既往の見解と同様、最大加速度は水平の1/2程度であるが、岩盤、液状化サイトでは1.0を越える場合もあることを示した。ここでは、周期帯との関係について考察する。図-4に主要観測点での速度応答スペクトル ( $h = 5\%$ ) の上下/水平を示す。これより、0.2秒以下の短周期側では上下動の方が大きくなる場合もあるが、周期1秒以上では水平の1/2程度であることがわかる。ただし、顕著な液状化が発生したポートアイランドでは全体的に他の地点の記録に比べて大きい。これは、上下動が大きいというよりも液状化により水平動が小さくなったことが主な原因と考えられるが、周期3秒付近については上下動自体が大きい。近くの神戸港工事事務所では大きなやや長周期の上下動は見られず、この理由は今後明らかにする必要がある。

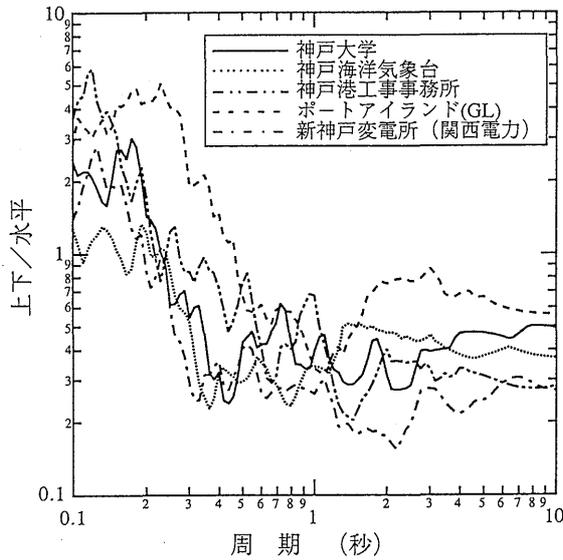


図-4 速度応答スペクトルの比 (上下/水平)

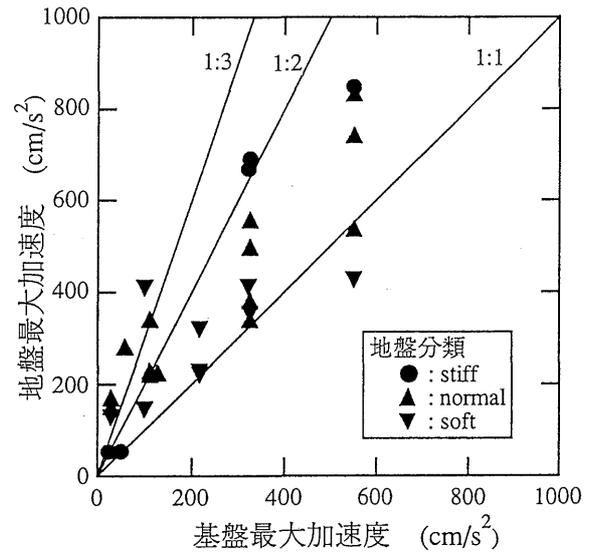
## 3 基盤波の特性と地盤の非線形化の関係

### 3.1 観測最大地動パラメータから見た非線形化

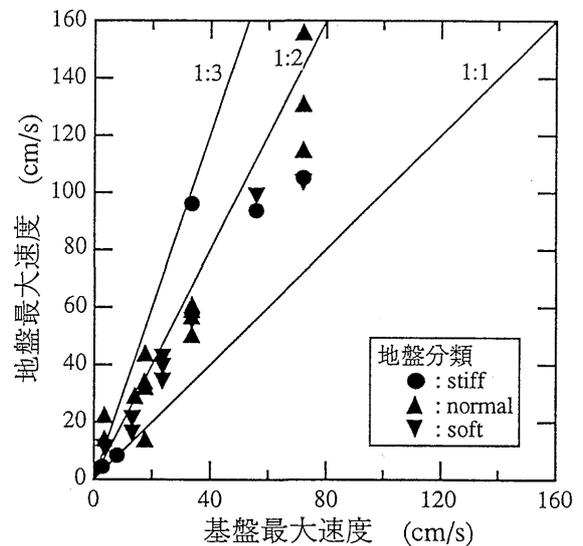
基盤加速度と地表加速度の関係 (水平2成分の合成値) を図-5 (a) に示す。観測点から数km以内にある露出岩盤や深度数十mの地中記録を基盤記録と見なした。基盤の扱いが同等でないものの概してみれば、軟弱地盤 (soft) では基盤最大加速度が小さい時には大きな増幅率が見られるが、基盤最大加速度が大きくなるにつれ増幅率は小さくなっており、顕著な地盤の非線形化が生じていることがわかる。特に、ポートアイランド等液状化が発生した地点では、増幅率は1前後となっている。このような加速度の頭打ち現象は、

地盤の応力がせん断強度近くになると、それ以上のせん断応力の伝達が阻止されることにより生じる。液状化が生じる場合には、過剰間隙水圧の発生によりせん断強度も減少する。一方、洪積地盤 (stiff) ではあまり増幅率は変化していない。

同様の関係を最大速度について示したのが図-5 (b) である。最大速度についても、基盤速度が大きくなるにつれて増幅率は小さくなるが、最大加速度の場合ほど顕著ではなく緩やかである。



(a) 最大加速度



(b) 最大速度

図-5 基盤と地表の最大応答の関係

### 3.2 周波数特性の影響に関するケーススタディ

今回の地震記録の特徴として、図-6の加速度応答スペクトル (減衰5%) の比較からわかるように、1秒

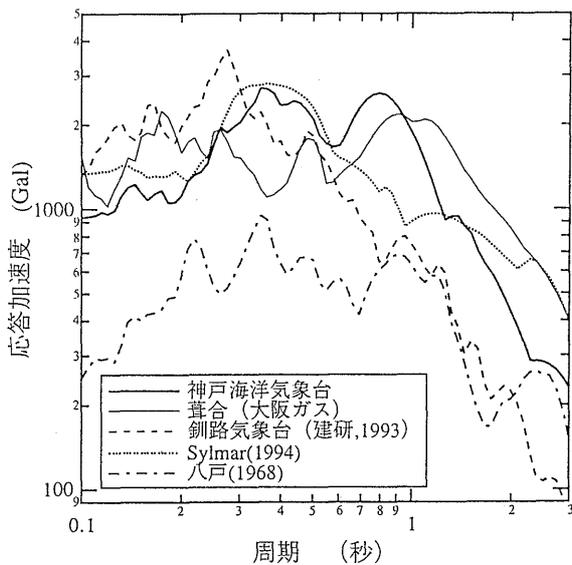


図-6 他の地震における観測記録の加速度応答スペクトル(減衰5%)との比較

付近のやや長い周期成分が大きかったことが挙げられる。最大加速度が大きかったことのみならず、やや長周期成分が大きかったことも、顕著な地盤の非線形化現象が見られた理由と考えられる。

最大加速度が同じでも周波数特性が異なれば地盤変位が異なるので、せん断ひずみも異なり地盤の挙動も異なるはずである。周波数特性の影響を明らかにするためにケーススタディを行う。鉛直アレーで観測されているポートアイランドのGL-32.4mでの本震(ケース1)と余震(1/17 5:50, M=4.9; ケース2)のNS成分、関西電力(株)総合技術研究所(以下、関西電力技研)のGL-24.9mの本震(ケース3)のEW成分の3つの波について、入力波の最大加速度振幅を50, 100, ..., 500cm/s<sup>2</sup>と変化させ、一次元等価線形解析により地表における最大加速度、最大速度を求める。ポートアイランド、関西電力技研の地盤のモデル化は吉田・他<sup>6)</sup>に基づいている。

これまでの例では、等価線形解析でも液状化地域における最大応答を概ね説明できている<sup>6)</sup>。これは、室内試験で得られるひずみ依存性が液状化発生も考慮して計測されていることによる。すなわち、動的変形試験は通常非排水条件下で行われ、したがって過剰間隙水圧も発生し、その結果がG- $\gamma$ , h- $\gamma$ 関係に影響しているため、得られた動的変形特性の中には過剰間隙水圧発生の影響が含まれており、結果的には完全に液状化の発生を無視しているわけではないことになる。

得られた入力最大加速度と地表最大加速度・最大速度の関係を図-7に示す。本震記録を入力した場合、関西電力技研の方がポートアイランドよりも増幅率が

大きいという違いはあるものの、いずれも基盤最大加速度 $A_B$ が150cm/s<sup>2</sup>になると地盤の非線形特性の影響が現れ、地表最大加速度 $A_C$ の増加が緩やかになり(増幅率が小さくなり)、さらに $A_B$ が400cm/s<sup>2</sup>になると $A_C$ はむしろ小さくなり始めている。地表最大速度 $V_C$ は $A_B$ が400cm/s<sup>2</sup>まではほぼ直線的に大きくなり、450cm/s<sup>2</sup>になって緩やかな増加となっている。一方、ポートアイランドの余震記録を用いた場合、 $A_B$ が250cm/s<sup>2</sup>まで $A_C$ は直線的に大きくなっており、500cm/s<sup>2</sup>まで $V_C$ は直線的に大きくなっている。これは、余震記録を用いた場合の $A_C$ が500cm/s<sup>2</sup>入力に対しても42cm/sと、本震記録を用いた場合の1/2以下と小さいことから明らかなように周波数特性の違いによる。1秒付近のやや長周期成分が大きかったことも、今回の地震で地盤の顕著な非線形化が認められた大きな理由と考えられる。

図-7の結果は、地盤の非線形性に関する指標として、翠川<sup>7)</sup>も述べているように地盤のひずみレベルと関係の深い最大速度の方が最大加速度よりも適切であることを示唆している。図-8に入力最大速度をパラメータとして同様に解析を行った結果を示す。最大加速度をパラメータとした場合でも、ポートアイランドと関西電力技研の差は小さかったが、最大速度をパラメータとした場合、さらに両者の差は最大加速度、最大速度とも小さい。余震記録を用いた場合の地表最大加速度は顕著に地盤の非線形化の影響を受けている。3つのケースとも $V_B$ が15cm/sまでは直線的に増加しており、20cm/sから緩やかになっている。この値は、多くの強震記録についてまとめた翠川による値<sup>7)</sup>と一致する。図-5の兵庫県南部地震の観測記録でもそのような傾向が見られ、工学的基盤で最大速度15~20cm/s程度を地盤の非線形化が影響し始める目安と考えてよいと思われる。余震記録の場合にはその影響は小さく、70cm/sになると急激に低下し、80cm/s以上ではほぼ500cm/s<sup>2</sup>程度であまり変化していない。地表最大速度については、いずれも概ね直線的に増加しているが、余震の場合、本震に比べ、やや緩やかな増加となっている。

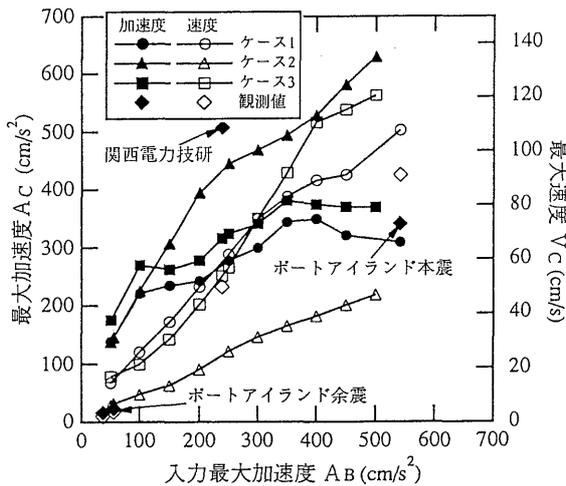


図-7 数値計算による基盤最大加速度と地表における最大加速度・最大速度の関係

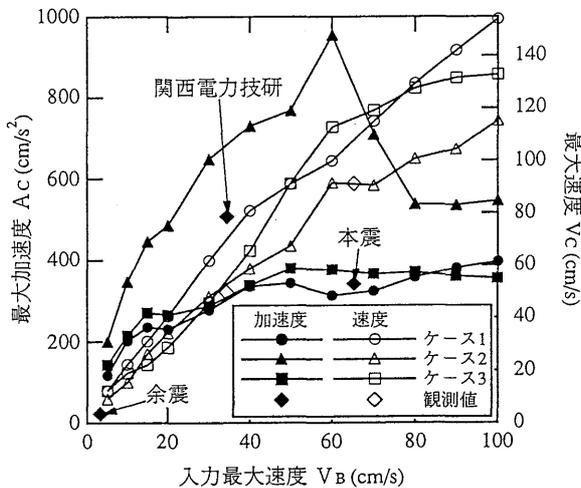


図-8 数値計算による基盤最大速度と地表における最大加速度・最大速度の関係

ポートアイランドの本震記録を用いた場合と余震記録を用いた場合の最大せん断ひずみの鉛直分布を図-9に示す。本震記録を用いた場合には、GL-25m付近のやや深いところで大きなひずみが生じ、入力レベルが大きくなるにつれて、この部分のひずみが大きくなっている。一方、余震記録を用いた場合には、GL-5m以浅のところで大きなひずみが生じ、 $V_B$ が大きくなるとここで生じるひずみは頭打ちになって、本震記録の場合と同様にGL-25m付近でのひずみが大きくなっている。

そこで、GL-3.5mとGL-27mでの剛性と減衰の変化の様子を図-10に示す。図より、GL-27mでの剛性が $2000\text{t/m}^2$ より小さくなったあたりで地表最大加速度はあまり増加しなくなっている。すなわち、入力地震動の周波数特性がせん断ひずみの分布にも影

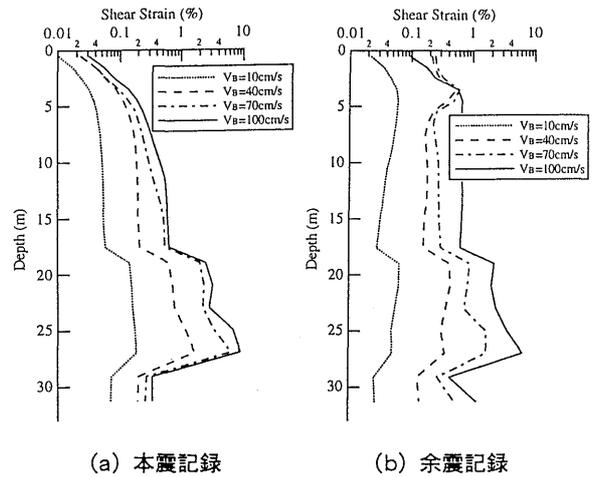
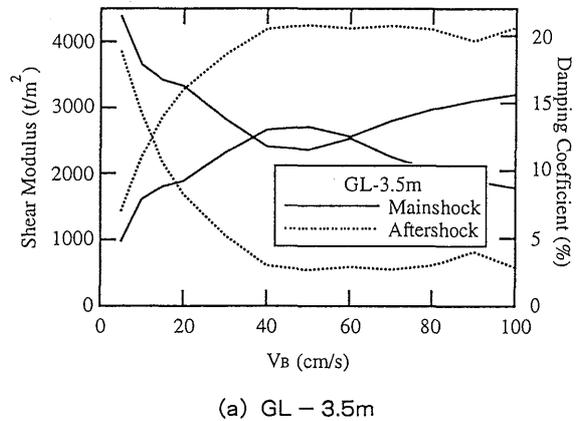
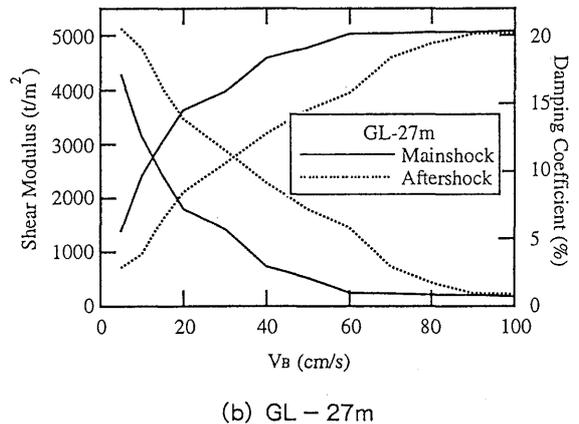


図-9 入力最大速度と最大せん断ひずみの鉛直分布の関係



(a) GL-3.5m



(b) GL-27m

図-10 入力最大速度とG, hの関係

響し、それが地表での応答に大きく影響することがわかる。

#### 4 三宮駅付近を通る南北断面での一次元解析

##### 4.1 地盤のモデル化

神戸市域では六甲山系から海側へと南北の変化が明

瞭である。例えば、三宮駅付近を通る南北断面の浅層地盤構造については、ボーリングデータに基づき安田・他<sup>8)</sup>により図-11のようにモデル化されている。山側および海岸付近では建物の被害が小さかったのに対し、三宮駅周辺では大きな被害が見られた。浅層地盤構造の差異により地震動がどのように異なるかを明らかにするために、図中に柱状図が示されている地点について一次元等価線形解析を行う。ここで、二次元解析を行わない理由は、①沖積層と洪積層との境界の傾斜は平均的には1%程度と緩やかである、②本震時に浅層地盤では減衰定数が10%以上になったと考えられ、浅層地盤を側方へ伝播する波動成分は小さいと考えられる、等である。

前述のように、今回の地震では地盤の顕著な非線形化が現れているので、地盤のモデル化（特に動的変形特性）は慎重に行う必要がある。しかしながら、現時点では十分な情報は得られていないので、以下に述べるように既往の経験式により定めた。今後、詳細な情報が得られれば結果は大きく異なる可能性もあり、本解析は概略的な評価とならざるをえない。道路橋示方書に基づき、N値からS波速度を推定した。動的変形特性には、安田・山口による提案式<sup>9)</sup>を用いた。上半・中村<sup>10)</sup>が三宮駅周辺での常時微動観測により推定した地盤の卓越周波数と概ね対応するように基盤（500m/sを仮定）を設定した。これは、第2洪積層上面に概ね

相当しているのではないかと考えられる。入力地震波としては、ポートアイランドのGL-83.4mでの観測記録のNS成分から等価線形解析により算出した基盤入射波<sup>6)</sup>を用いた。

得られた最大加速度、最大速度、計測震度の分布を図-12に示す。図-11に加速度応答スペクトル（ $h=5\%$ ）の分布を示す。最大加速度は1500m付近より海側では急激に低下し、最大速度は山側で小さく500m位置より海側では大きな違いは見られない。1500m付近より海側では、沖積粘性土および埋土（マサ土）が現れることが、大きな影響を与えていると考えられる。ポートアイランドでの観測値（最大加速度341gal、最大速度91cm/s）、大阪ガス葺合供給所での観測値（最大加速度805gal、最大速度124cm/s）と良く対応している。計測震度は最大加速度ほど極端ではないが海側で低下しており、図-2では最大速度の方が良い対応を示したが、図-12では最大加速度の方が計測震度と良く対応している。山側で被害程度に比べ値が大きいように思える。これは、ポートアイランドの地中記録を山側の点にまで用いたことが理由と思われる。すなわち、ポートアイランドのGL-83mでは深層地盤でかなり増幅を受けているのに対し、山側ではあまり増幅されていないと思われる。

以上より、低層建物等の短周期構造物については、地盤の非線形化による入力地震動の低減という恩恵が

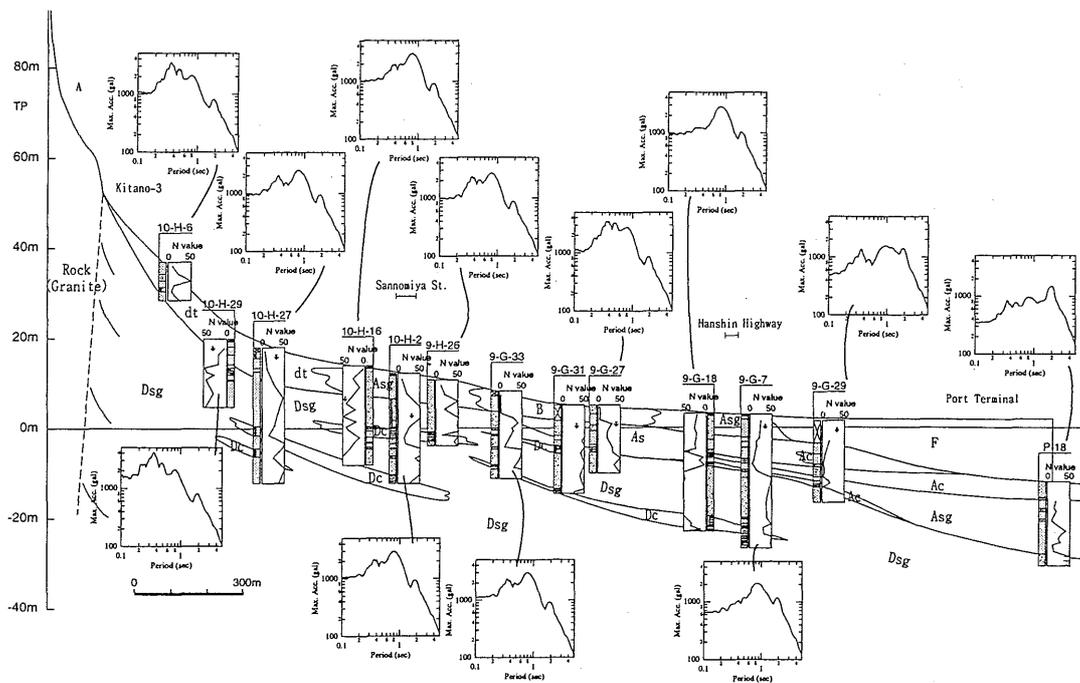


図-11 三宮駅付近を通る断面の浅層地盤構造と一次元解析により得られた加速度応答スペクトル

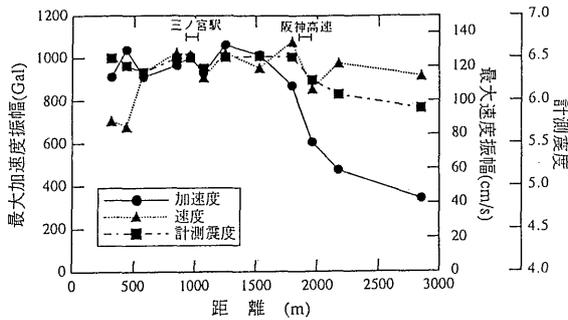


図-12 三宮駅を通る断面における最大加速度, 最大速度, 計測震度の分布

あったが、やや長周期構造物については低減効果は小さかったことになる。林・川瀬<sup>11)</sup>は、深層地盤の不整形構造を考慮した2次元解析を行い、基盤から上昇する実体波と盆地端部で発生して主として大阪層群を水平に伝播する盆地生成回折波・表面波がちょうど重なり合うことにより、三宮駅付近での地震動が著しく大きくなったと説明している。このようなメカニズムは確かに十分に考えられるので、三宮以外の地区も含めて検討していかねばならないが、いくつかの疑問もある。

- 1) 5Hz以下を対象としているにもかかわらず、最大加速度が1gを越えている。
- 2) 三宮地区には建設年代の古い建物が多く、大きな被害を受けた建物は古い建物がほとんどである。
- 3) 震災の帯より海側でも阪神高速道路やポートライナー等の大きな被害が生じている（特にハーバーハイウェイは最近建設されたものである）。
- 4) 断層からの距離で考えると、東灘地区では対応しなくなる。また、なぜ元町付近で被害が小さかったのか説明できない。

これらの問題は林・川瀬も検討課題としているが、震災の帯と表層地質との対応がよいことは明らかであり、震災の帯の成因は主として湾岸部で地盤の非線形化により短周期成分が増幅されなかったことにあり、これに浅層地盤・深層地盤の不整形による波動の集中効果等が加わったと考えるのが妥当と思われる。しかしながら、神戸市域における地震動分布を再現するには、地盤パラメータの設定、解析手法等にまだ問題も多く、今後さらに様々な点について検討を進めていく必要があると思われる。

## 5 おわりに

新たな知見を加えて検討した結果、以下のことがわかった。

- 1) 最大加速度は洪積地盤, 最大速度・SI値・計測震度は沖積地盤, 最大変位は軟弱地盤で大きい。
- 2) 計測震度は, SI値, 最大速度と関係が深い。
- 3) 工学的基盤での最大速度が20cm/s程度を越えると地盤の非線形化が見られる。
- 4) 三宮断面について浅層地盤の一次元解析を行った結果、湾岸部では地盤の非線形化により短周期成分が低下するが、やや長周期成分については三宮駅付近と湾岸部で大きな差は見られない。

本報告では、気象庁87型電磁式強震計波形データ、関西地震観測研究協議会・神戸市・運輸省港湾技術研究所・地震情報利用研究協議会（FDシリアル番号R-009）<sup>12)</sup>・大阪ガス（株）・関西電力（株）による観測記録を使用させて頂きました。関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Ohno, S, T.Ohta, T.Ikeura and M.Takemura ; Revision of Attenuation Formula considering the Effect of Fault Size to Evaluate Strong Motion Spectra in near Field, Tectonophisics, No.218, pp.69 - 81, 1993.
- 2) Sekiguchi, H, R.Takehi and K.Irikura ; Waveform Inversion of Strong Ground Motion for Fault Rupture Process of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, J.P.E (submitted).
- 3) Sawada, S, J.Ejiri, K.Toki and Y.Goto : Strong Ground Motion Records, The 1995 Hyogoken - Nanbu Earthquake - Investigation into Damage to Civil Engineering Structures, Committee of Earthquake Engineering, Japan Society of Civil Engineers, 1996, 6.
- 4) 土岐憲三・後藤洋三・江尻譲嗣・澤田純男；兵庫県南部地震の震源特性と地盤震動特性, 土木学会誌, Vol.80, pp.32 - 43, 1995年9月
- 5) 斎藤祥司；新しい震度観測について, 土木学会誌, Vol.81, pp.44 - 45, 1996年5月

- 6) 吉田望・中村晋・末富岩雄；1995年兵庫県南部地震における地盤の非線形挙動とその予測，第23回地盤震動シンポジウム，pp.39～52，1995年10月
- 7) 翠川三郎；強震時にみられる地盤特性の非線形性，地震，第2輯，第46巻，pp.207～216，1993年
- 8) 安田進・坪田邦治・小林利雄・西川修・野村博之；兵庫県南部地震による液状化発生地点の地層構成，第23回地震工学研究発表会，pp.217～220，1995年7月
- 9) 安田進・山口勇；種々の不攪乱土における動的変形特性，第20回土質工学研究発表会講演集，pp.539～542，1985年6月
- 10) 上半文昭・中村豊；常時微動による神戸市街における表層地盤の地震動特性 - 阪神淡路大震災に関連して - ，第23回地震工学研究発表会，pp.209～212，1995年7月
- 11) 林康裕・川瀬博；1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価，日本建築学会構造系論文集，第481号，pp.37～46，1996年3月
- 12) 中村豊・上半文昭・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ユレダス開発推進部，1996年3月