

# 1995年兵庫県南部地震での地盤の非線形振動特性と地盤物性

電力中央研究所 ○佐藤清隆 \*)  
 電力中央研究所 国生剛治 \*)  
 関西電力 松本正毅 \*\*)  
 吉沢技研 山田栄樹 \*\*\*)

神戸市ポートアイランドのボアホール鉛直アレー観測で得られた兵庫県南部地震の本震（マグニチュード7.2）および余震記録を用いて、その増幅特性に適合する地盤物性（S波速度、P波速度、Q値）をインバージョン解析により同定し、PS検層の結果と比較することによって液状化をともなった非線形効果を推定した。同様に、震源付近の3カ所のボアホール鉛直アレー観測での本震記録より地盤物性を同定し、ひずみレベルに応じた非線形効果を推定した。以上の結果を基に、本震による埋立土、沖積層、洪積層を含む表層地盤の非線形振動特性と地盤物性について検討を加え、地盤の増幅特性を明らかにした。

## 1. はじめに

1995年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震(気象庁マグニチュード7.2)では多くの地震記録が得られたが、震源域でも最大800galを越える加速度記録が得られた。一方、震源付近の数カ所でボーリング孔中に設置したダウンホールアレーの地震観測システムの記録も得られている。これらの記録は強震時の地盤の液状化現象やひずみレベルに依存した非線形特性を反映した貴重な記録で、今後の耐震研究に多大の貢献をすることが予想される。本文では4ヶ所のダウンホール記録にもとづき地盤の増幅特性の特徴を概観するとともに、とくに非線形特性の著しく現れたポートアイランドの記録をはじめとして、インバージョン解析法による地盤特性の同定を行い<sup>1)</sup>、得られた物性値に多少の検討を加えた。

キーワード：非線形、震動特性、インバージョン解析

\*我孫子研究所 0471-82-1181

\*\* 土木建築室 06-441-8821

\*\*\* 吉沢技研 0471-74-4753

## 2. ダウンホールでの観測記録

図-1は震源からの距離が異なる4ヶ所において得られたダウンホール観測点の位置と京都大学防災研究所により決定された本震、余震の震央分布である。図中の矢印の方向は、各地点のダウンホール記録の水平面内の軌跡（オービット）より求めた最大主軸方向を示し、本震、余震の震央分布の震源断層に最も近いポートアイランドにおいて震動の方向が断層に直交する方向へ著しく卓越することが認められた。

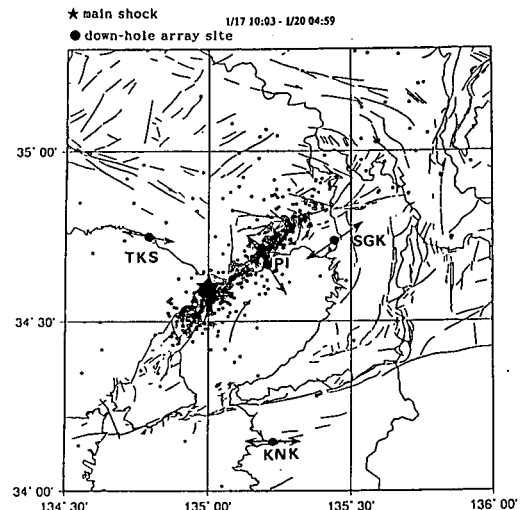


図-1 大阪湾周辺でダウンホール記録の得られた観測点と本震および余震の震央分布（京大防災研阿武山観測所の自動処理結果）

同一地点のダウンホール記録の水平面内の軌跡（オービット）より明らかに極性が逆方向を示したり、最大主軸の方向が20度を上回る回転をしている測点については、他の測点に一致するように極性および回転を修正した。また、最も深い測点は4地点ともGL-80mから100mの基盤にあり、この基盤層はKNKが硬岩であるほかは、いずれも大阪層群の砂礫層からなる。表層12m-20m程度は沖積の砂や粘性土からなり、ポートアイランド（PI）ではさらにその上に17.5mの厚さの埋め立て砂層がある。図-2は、4地点の最深点における観測波形の疑似速度応答スペクトル（減衰5%）を示す。その形状は1秒付近を中心に振幅が卓越する様子がうかがえる。

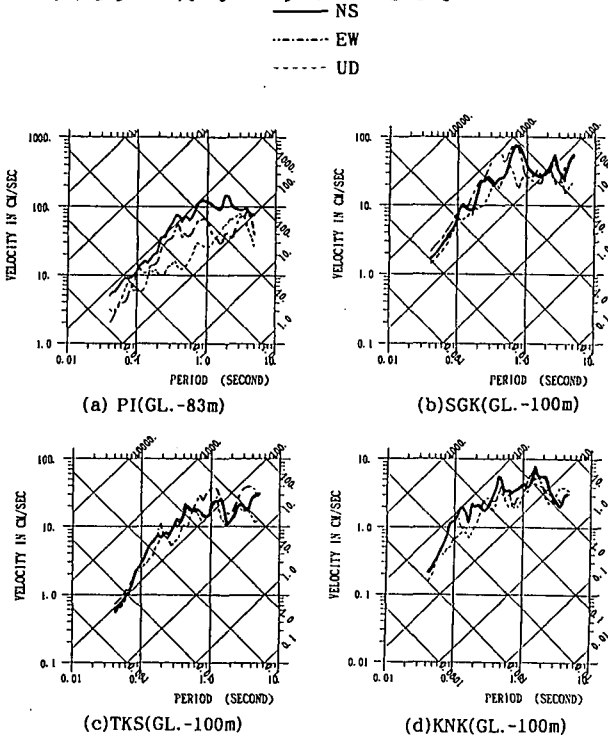


図-2 疑似速度応答スペクトル（減衰5%）

図-3には4地点での水平2方向（NS, EW）と鉛直方向（UD）の最大加速度の深度分布を示す。最深点での水平加速度の最大値は4地点においてKNKの26galからPIの679galまで段階的に変化しており、それに応じて上部層での最大加速度の増幅特性が明瞭に変化していることが観察できる。すなわち水平加速度についてみると、KNKでは基盤と表層の間で4-5倍の増幅を示しているのに対し、TKSでは約100galの基盤加速度に対し約2倍の増幅、SGKでは約300galの基盤加速度に対し1-2倍の増幅、そしてポートアイランドでは680gal（NS方向）-300gal（EW方向）の基盤加速度に対しNS方向では地表加速度はかえって1/2に減少している。PIにおいては人工島のほぼ全域で埋め立て砂層が液状化を生じたことが確実であり、その影響を受けてこの部分での水平加速度の著しい減少が読みとれる。

一方、鉛直加速度の基盤と地表での増幅に関しては、KNKで4.5倍、TKSでは2倍、SGKでは1倍と一見加速度の応じて低下するようにみえるが、PIでは3倍の大きな値を示す点が大きな特徴である。すなわち、PIにおいては水平加速度がとくにNS方向で液状化した埋め土層で低減するのに対し、鉛直加速度は同じ区間で大きく増幅するため地表では水平方向よりもはるかにおおきな値となってしまうことがわかる。

図-4には横軸に水平最大加速度を、縦軸に鉛直最大加速度をとってPIの各深度

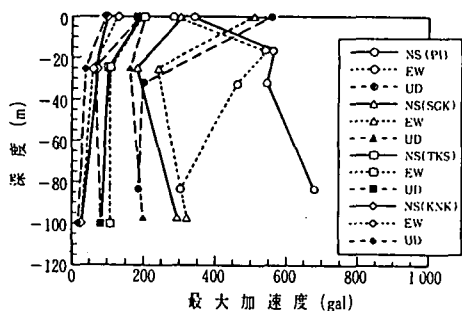


図-3 4観測点での最大加速度の深度分布

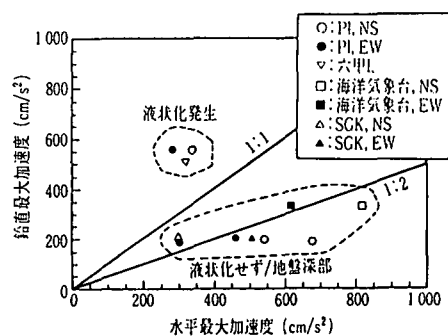


図-4 鉛直加速度と水平加速度の対比

での値と震源域での代表的観測点での値をプロットしてある。図中には鉛直対水平の比が1:1と1:2の線が記入されているが、1:1の線を上回るのはポートアイランドや六甲アイランドのような明らかに液状化を生じたか、その他埋立地で液状化が生じた可能性の高い地点で、神戸海洋気象台のような液状化が生じなかった地盤やポートアイランドの液状化層より下の地盤ではその比は従来から言われている1:2の線に近いことがわかる。

### 3. ポートアイランドでの観測記録のインバージョン解析

この記録は島の北西部に神戸市開発局が設置したダウンホールアレイにより観測されたもので、関西地震観測研究協議会（電話：06-536-1741）からフロッピーディスクの入手が可能である。

観測点の地盤状況は図-5に示すように地表部17.5mがマサからなる埋め土で、その下に沖積の粘土（Ma13）と砂の層を経て洪積の砂礫層や粘土層（Ma12）が続く構成となっている。地震計は3方向の加速時計が図示のように4レベルに設置されており、最深のものはN値が60以上の砂礫層に位置している。同図にPS-検層により得られたS波速度（Vs）とP波速度（Vp）を示すが、Vsは表層で200m/s、最深部で400m/s弱である。一方、地表で300m/sのVpは地下水面下でも埋め土層では800m/s程度にしか増大せず、最深部で2000m/sに達する。このようなVs分布がこのサイトでの鉛直加

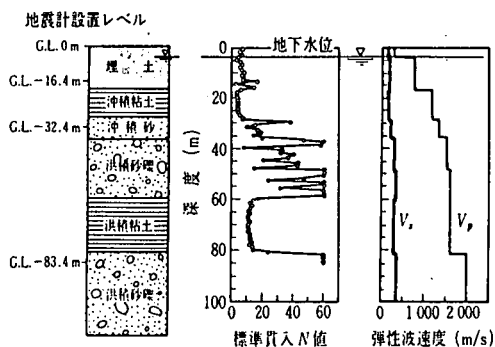


図-5 PI地点の地盤構造、N値、弾性波速度

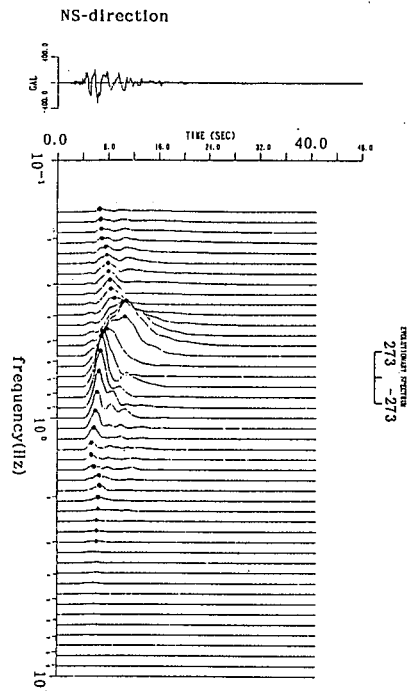


図-6 ポートアイランドの地表波形の非定常スペクトル（減衰5%）

速度の増幅特性に反映しているものと推定される。

図-6に示す本震の地震波形（NS方向）と非定常スペクトル（減衰定数5%）によれば、本震の水平動はS波の初動2波にパワーの大部分が集中しており、約0.75Hzの周期成分が卓越している。その後続に0.4Hz付近に卓越する表面波成分が認められる。

インバージョン解析では本震とともにその約2分後に起きた最初の余震（地表水平加速度10gal程度）についても解析を行なった。解析コードはHaskellの方法に基づき水平成層地盤でのSH波の重複反射を仮定したもので<sup>2)</sup>、石田らの研究<sup>3)</sup>で用いたものである。今回の解析では地盤モデルとしては図-5に示す層構造を与え、PS検層による弾性波速度分布に基づき本震時のひずみ依存低下を考えたVs、Vp分布を設定し、各層間の伝達関数を最も良く再現する速度値と減衰定数を同定した。

図-7はその結果得られたNS、UD方向のVsの同定値の深度分布を示している。まず、本震NS方向記録の全体（20秒間）を対象として同定したVs値は、GL-37m以深の洪積層においてPS検層の値に比べ約20%程度の低下を示し、沖積層では約40%

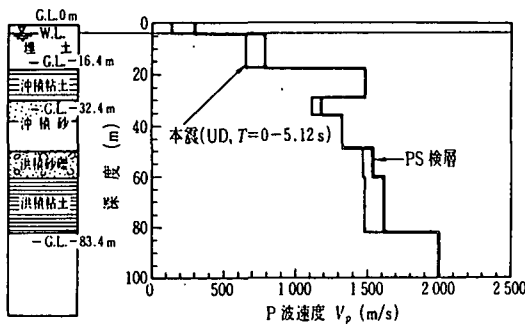
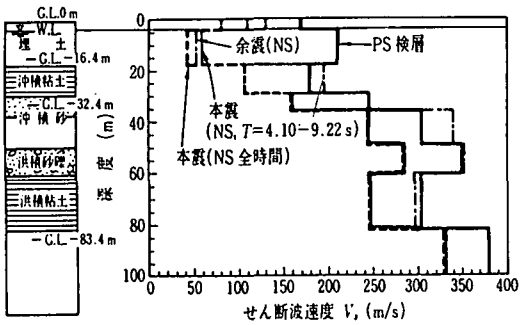


図-7 ポートアイランドのS波速度  $V_s$  とP波速度  $V_p$  の同定結果

の低下を示している。さらにその上の埋め土層では約80%、地下水面上でも約50%の著しい低下を示しており、この地点が本震により液状化を生じたことを考え合わせるとその影響が  $V_s$  の低下に現れたものと考えられる。

一方、同じ図に本震のうちS波の立ち上がりの時点から後半の表面波成分が卓越してくる時点までのSH波が卓越した5.12秒間の区間のみを対象にした  $V_s$  の同定値も示されている。これよりSH波のみを対象としても  $V_s$  の低下割合は沖積層以深でほとんど変化せず、埋め土層では液状化の進展の途中階段が現れていると解釈できる。さらに興味深いのは余震による解析結果で、発生したひずみレベルが小さいため  $V_s$  値は沖積層以下ではほぼ初期の値に戻っているが、埋め土層では本震から約2分後の時点ではまだ液状化が継続していることが明瞭に示されている。EW方向については加速度がNS方向よりもかなり低いため  $V_s$  の低下割合はNS方向ほど著しくないが傾向とし

ては大差ない結果が得られた。

次に、水平動にSH波の重複反射の考え方を適用したのと同様に、P波の重複反射により成層地盤の鉛直動が説明できると考えて各深度での鉛直方向記録を用いてインバージョン解析を行った。ただし鉛直方向の記録のうち、P波の特徴の強く現れた最初から5.12秒までの範囲を対象にし、それ以降の表面波が卓越する部分は除外した。同定された  $V_p$  値は、PS検層での  $V_p$  よりも小さい値を示す部分があるが、地下水面上の地層を除いてその差はわずかで、計算誤差とも考えられる。すなわち、完全飽和地盤でのP波の伝盤理論から結論付けられるとうり、このような大きな鉛直動の下でも土質材料の非線形特性は現れず、不飽和層でのみ  $V_p$  が約50%に低下していることがわかる。

図-8はNS方向本震全時間記録から同定された減衰定数の深度分布である。同図には従来の室内試験を参考に推定した減衰が示されているが、同定された減衰値はそれよりかなり大きく、ひずみの小さな余震では洪積層では5%、沖積層と埋め土層では10-12%となっている。本震に対しては洪積層および沖積層では6%、それ以浅では50%のおきな値となる。減衰定数についての同定の精度  $V_s$  よりも低下する傾向があるが、この結果から少なくとも原地盤で発揮される減衰定数は室内試験で得られる値よりおおいこと、さらに液状化層での震動の非線形効果を表す等価な減衰定数はかなりおおい値となることが言えよう。

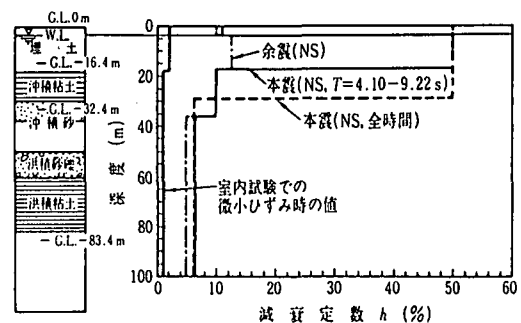


図-8 ポートアイランドの水平動(NS)による減衰定数  $h$  の同定結果

#### 4. P1地点の同定された物性値による応答解析結果

図-9には観測された本震の地震波形とインバージョン解析により同定した地盤物性にもとづく解析波形とを水平方向、鉛直方向について示している。

図に示したように各方向の4深度での観測波形との重ね書きは、水平方向については、地中の3レベルでの波形の一致度はきわめて良く、さらに液状化の影響を大きく受けている地表レベルにおいても振幅的には一致度は悪くない。ただし、位相については一定値のVsを用いた計算波形の方が時間と共に多少早くなる傾向が現れ、液状化に伴う物性の軟化を反映した観測記録との差異が見られる。また、計算波形の方が滑らかな傾向があり、短周期成分が十分に

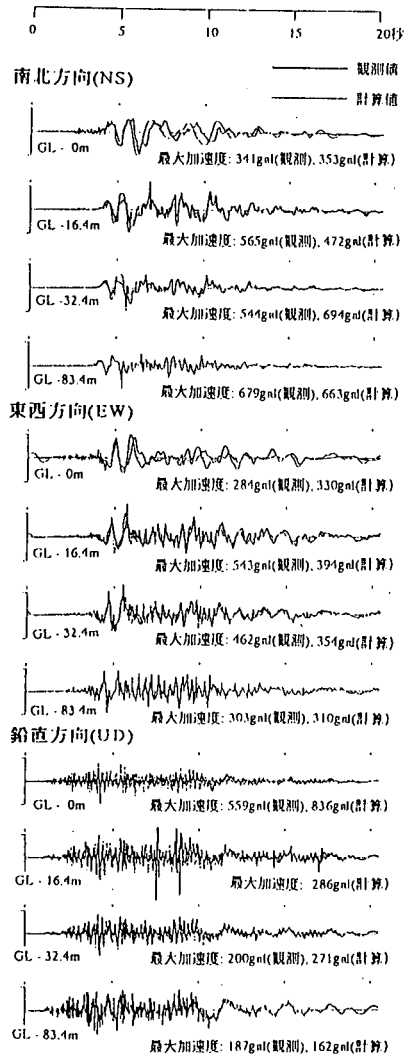


図-9 ポートアイランドの本震の時刻歴波形 (観測値: 太線、計算値: 細線)

は再現されていない傾向がある。

一方、鉛直方向については、両者の一致度は特に位相について良くP波の同定精度がよいことを示しているが、水平方向とは逆に計算結果は短周期成分を強調しすぎる結果となっている。なお、前述のように、GL-16.4mの記録には7.5秒付近からおおきなショックが混じっている。

図-10にはこの計算により得られた3方向の最大加速度の深度分布と4深度での実測値との対比を示している。両者は最大30%程度の開きのある場合もあるが、傾向的に良く一致している。図-11は最大ひずみの分布を示すが、液状化した埋め土層でのせん断ひずみはNS方向で2%以上に達し、一方EW方向は全体的にNS方向の半分かそれ以下のひずみであったとの結果になっている。また、鉛直については加速度は大きいですが、卓越周波数が短いことなど

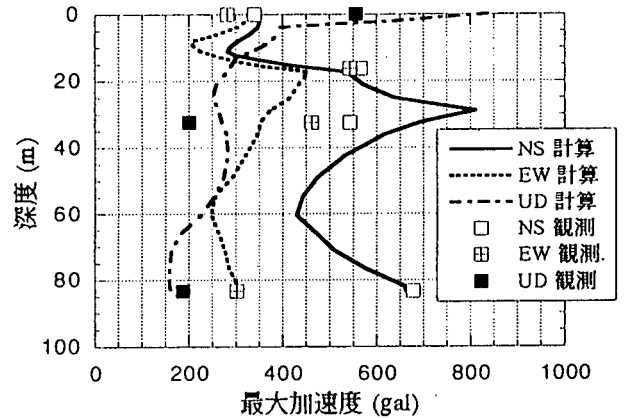


図-10 ポートアイランドの同定物性にもとづく解析と観測との最大加速度の深度分布

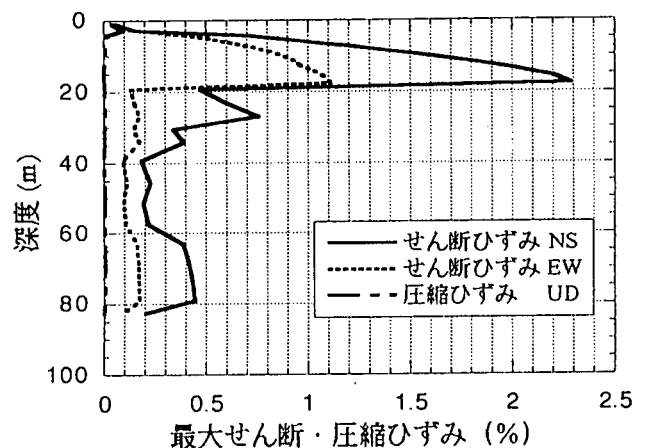


図-11 ポートアイランドの同定物性にもとづく解析の最大ひずみの深度分布

からその圧縮ひずみは非常に小さいレベルにとどまっている。

### 5. 地盤の動的物性のひずみ依存性の推定

図-7に示したVsの低下率と図-11の最大せん断ひずみの値に基づき、各地層ごとにせん断剛性ひずみに対する低下率を算定し、従来の室内試験データと比較した。図-12は横軸に各地層の有効ひずみの対数、縦軸にせん断剛性比 $G/G_0$  [ $G/G_0 = (V_s/V_{s0})^2$ により計算：ここに $G$ 、 $V_s$ と $G_0$ 、 $V_{s0}$ は本震とPS検層に対応したせん断剛性とせん断波速度]をとって各地層でのNSとEWの値を示したものである。なお、有効ひずみ $\gamma_{eff}$ と最大ひずみ $\gamma_{max}$ の関係は一義的には決めがたいが、通常良く用いられている $\gamma_{eff} = 2/3 \gamma_{max}$ により算定した。砂のような非粘性土の場合は拘束圧により、粘性土の場合には塑性指数によりカーブの位置が変化することが知られているので、現地の各地層の土質、有効上載圧や粘土の塑性指数( $I_p=60-80$ )を参考に図12中に各地層ごとのカーブを書き入れた。沖積粘土でEW方向剛性低下が少ない理由は不明であるが、NS方向に注目すると室内試験結果と良く一致しており、一方、沖積砂層の一致度は悪くなく砂の方が小さいひずみレベルから剛性低下が目立つ傾向が現地でも現れている。<sup>5)</sup>一方、洪積層については砂礫層と粘土層からなっているが、土質による差異は明瞭ではないが砂と粘土の間に分布しているように見える。

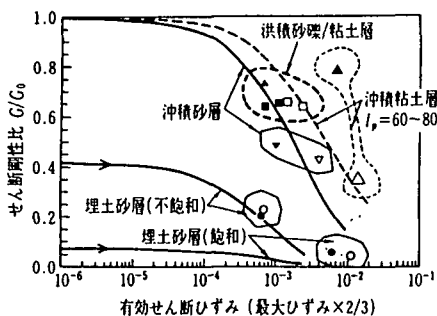


図-12 インバージョン解析による各土質別のせん断剛性比と室内実験に基づくカーブの対比(白印はNS方向、黒印はEW方向)

液状化が生じた埋め土層については、有効応力の減少による剛性低下割合を前述の余震で同定したVsから算定し、そこを出発点としてひずみに依存した剛性低下を考えた。液状化のような大ひずみ非線形現象に対しこのような考え方を適用することには限界があるが、それでも不飽和埋め土層についてはある程度の一貫性はあるといえよう。

### 6. 他の3地点の同定された物性による応答解析結果と増幅特性

前章までのPI地点と全く同様にSGK、TKS、KNKの3地点におけるインバージョン解析を実施し、同定した物性に基づく応答解析と観測による最大加速度の分布を図-13~15に示す。

どの地点も洪積砂礫層上に堆積する深さ20mより浅い沖積砂層内での水平成分の増幅度が高いことがわかる。最深点(深さ

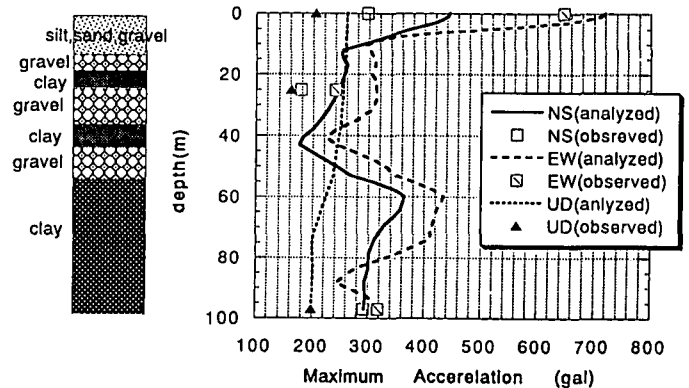


図-13 SGK地点の同定した物性にもとづく解析と観測による最大加速度の深度分布

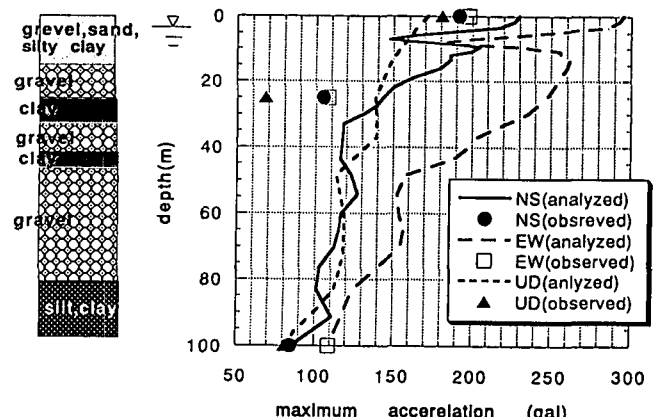


図-14 TKS地点の同定した物性にもとづく解析と観測による最大加速度の深度分布

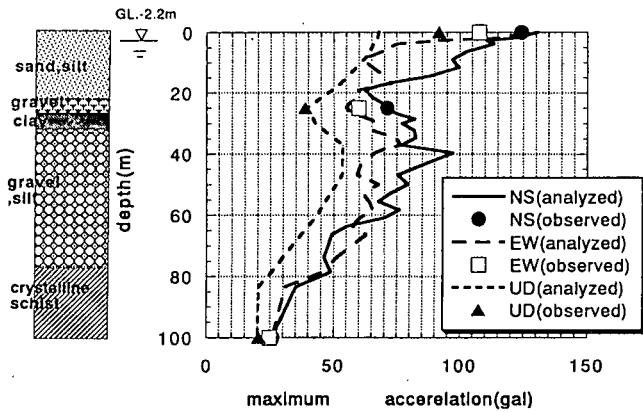
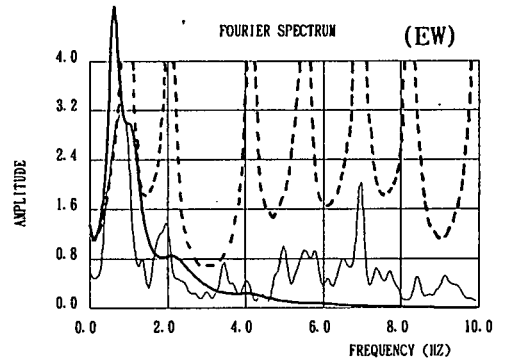


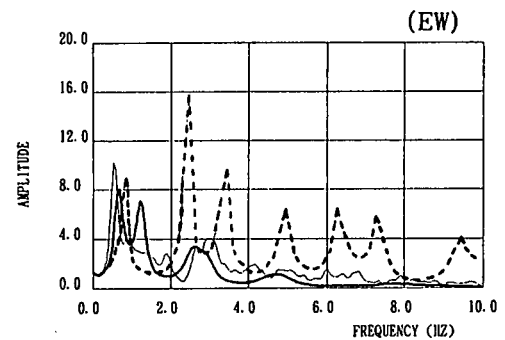
図-15 KNK地点の同定した物性にもとづく解析と観測による最大加速度の深度分布(100m)での最大加速度が300galを示すSGKでは、深さ20m付近の沖積砂礫および粘土層における地盤の剛性低下に伴い、地中の加速度が地表に向かっていったん低下し、その後表層付近で増大する傾向を示している。他方、震源から約50km遠方のKNK地点においては最深点(深さ100m)の最大加速度が約25gal程度であり、図-15に示すように地表に向かってほとんど線形に増幅する特性を示している。上記の2地点の震央距離のほぼ中間約24kmに位置するTKSでは、地表で液状化による噴砂を確認したことを考慮すると、地下水直下で水平動の加速度分布が極小値を示す解析結果がこれを反映している。また、上下動の地表の加速度が急激に増幅する傾向もPI地点に類似していることがうかがえる。

図-16に4観測地点の水平動の最深点に対する地表点の増幅関数を、本震の観測波形のフーリエスペクトル比で示し、インバージョン解析の初期値(P S検層)および同定値による計算値と比較した。その結果、液状化が確認されたPIおよびTKS地点では観測値および同定値の増幅率が初期値に比べて半分以下に極度に低下し、最大ピークは低周波数側にシフトしている。他方、SGK地点では2.5Hz以上の2次以上のピークでは振幅が初期値に比べて急激に低下しているが、地震動のパワーの大部分を占める1Hz付近の一次のピークはわずかに低周波側に移動するのみで増幅率はほとんど同じ特性を示している。また、KNK地点につ

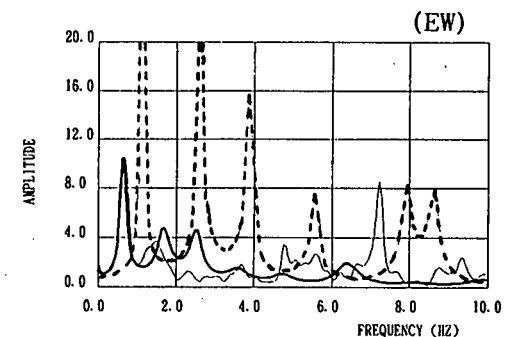
いては初期値とほぼ同じ増幅特性を示し、他の地点に見られる強震による非線形効果が全くないことが明らかである。



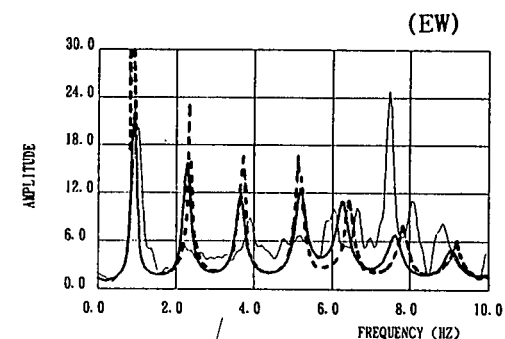
(a)PI GL.0m/GL.-83m



(b)SGK GL.0m/GL.-97m



(c)TKS GL.0m/GL.-100m



(d)KNK GL.0m/GL.-100m

図-16 4観測点の水平動の増幅関数(P S検層: 破線、計算値: 太線、観測値: 細線)

## 6. まとめ

(1) 兵庫県南部地震により得られた加速度記録のうち人工島や埋め立て地においては鉛直方向が水平よりも大きい場合が多く、これは液状化による影響と考えられる。

(2) PI地点でのダウンホールアレイで記録された本震の波形をインバージョン解析することにより、埋め土層のVsが液状化により初期値より80%も低下し沖積層や洪積層も40-20%の低下を示していることが明らかになった。一方、本震から2分後の余震の解析により、沖積・洪積層のVsはほぼ初期値に戻り、埋め土層については本震と同程度のVsで液状化の継続が確認された。

(3) 鉛直方向の記録によりP波速度の同定を行い、飽和地盤ではVpが非線形効果を示さないことを確認できた。

(4) 上記(2)の結果に基づき推定される原地盤のせん断剛性のひずみ依存性は室内実験で得られる同様な関係とほぼ一致することが明かとなり、従来より行われている等価線形解析が今回のような大きな地震にも適用性を有することが示された。

(5) 強震時の水平動の増幅特性は、液状化のない地点では、地震動の一次のピークではわずかに低周波側に移動する程度で、埋め立て地のような極度の非線形効果が認められなかった。

## 7. おわりに

本震および余震記録の貴重なデータを提供された関西地震観測協議会、観測記録の分析について御助言いただいた関西電力総合技術研究所の諸氏に深謝します。

### [参考文献]

1)佐藤清隆,国生剛治:兵庫県南部地震(本震,余震)による埋土地盤の非線形性の推定,土木学会第50回年次学術講演会,1995.

2)太田 裕:地震工学への最適化法の適用-1,八戸港湾SMA C設置点の地下構造推定,日本建築学会論文報告集,1975.

3)石田勝彦,佐藤清隆,沢田義博,矢島浩:地震観測にもとづく軟質地盤の地下構造の推定と基準化応答スペクトル特性,電力中央研究所研究報告385005,1985.

4)Kokusho,T.,Tohma,J.,Yajima,H.,Tanaka,Y.,Kanatani,M.and Yasuda,N.,Seismic response of soil layer and its dynamic properties,Proc. 10th World Conference on Earthquake Engineering,1992.

5)Kokusho,T.:In-situ dynamic soil properties and their evaluations, Proc.8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,1987.

### Nonlinear seismic response and soil property during the strong motion

Kiyotaka Sato,Takeji Kokusho,Masaki Matumoto,Eiji Yamada

During the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, strong acceleration records were obtained at several sites in and around the Kobe city. At some of the recording sites, multi-level vertical arrays had been installed, which demonstrated very peculiar nonlinear features of seismic amplification in reclaimed lands and Holocene and Pleistocene deposits. The down-hole acceleration records in the Port Island where one of the strongest accelerations were measured have been analyzed with the inversion technique to estimate S-wave velocity and damping ratio corresponding to the main shock as well as a small aftershock. Records of other three down-hole sites with much different epicentral distances to each other have been also analyzed with the same technique. These studies disclosed effects of soil liquefaction and nonlinear soil properties on the peculiar seismic amplification mechanism at these sites.