

非線形地盤応答から同定された土の動的物性のひずみ依存性

中央大学 國生 剛治*
関西電力 松本 正毅**
電力中研 佐藤 清隆***

1995年兵庫県南部地震においては、震源断層近傍を含む4地点の鉛直アレーにおいて地震記録が得られた。これら深さ100m程度の表層地盤の加速度記録において、加速度レベルの違いによる軟質地盤の明瞭な非線形増幅特性がみられた。これらの記録に基づき地盤のS波速度と水平加速度増幅率さらにP波速度と上下加速度増幅率の間に明瞭な相関関係があることが見いだされた。また、1次元重複反射を仮定した逆解析により、地盤を構成する各土質のせん断剛性と減衰定数を同定し、それらが明瞭なひずみ依存性を示すこと、さらに室内土質試験によるひずみ依存性カーブと土質の種類ごとに基本的に整合することを明らかにした。

1. まえがき

表層地盤での増幅特性はサイスミックゾーネーションや重要構造物での地震動評価に際しての重要な要素のひとつである。増幅率は地盤の弾性波速度、減衰定数、密度により基本的に支配される。一方、軟質な土質地盤においては、地盤物性の非線形性に起因した増幅特性の非線形が顕著となり構造物の耐震性に重大な影響を及ぼすと考えられる。

地盤の地震応答の非線形性については等価線形や非線形解析法により解析的には1970年代よりその重要性が指摘されてきた¹⁾、²⁾。また、模型実験についても、1980年以前からすでにせん断土槽を用いた水平地盤の1g振動台実験³⁾などが行われ、またもっと最近においては遠心振動台試験によって非線形応答の重要性が実証的に示されてきた。しかし、実地盤での実測の強地震データの不足により、地震応答の非線形性をどの程度設計で考慮すべきかについては意見が分かれていたと言えよう。

兵庫県南部地震では震源断層の近傍を含む4地点に設置された深さ100m程度の鉛直アレーにより、明瞭な非線形応答記録が得られた。これらは断層からの距離の違いにより、入力加速度が段階的に異なっており、それに応じて程度の異なった非線形性を示した。

2. サイト条件と増幅率

図1に、大阪湾近隣での4箇所の鉛直アレーサイトの位置を、本震の震央ならびに震源断層に対応した余震分布位置とともに示す。図中に示した矢印は主要動の主軸の方向を表している。図2は各サイトの地層構成、標準貫入試験のN値と板たたき法によるP波S波速度の深度分布および地震計設置深度を示している。もっとも深い地震計の設置レベルはPIではGL-83m、SGIではGL-97m、TKSとKNKではGL-100mである。また、その基盤レベルでの地盤条件はPI、SGK、TKSでは $V_s = 380 \text{ m/s}$ の更新統の砂礫層・硬質粘土層であり、KNKでは $V_s = 1630 \text{ m/s}$ の硬質の岩盤である。

図3にこれら4地点での本震記録に基づいた水平2方向と鉛直方向の最大加速度の深度分布を示す。最深レベルでの最大加速度は、断層に最も近いPIでの 680 gal から最も遠いKNKの 26 gal まで段階的に大きく異なっており、それに応じて表

キーワード：鉛直アレー、地盤震動増幅、地盤物性、ひずみ依存性、せん断波速度

* 中央大学理工学部、03-3817-1798

** 関西電力(株)建設部 06-441-8821

*** (財)電力中研我孫子研究所 0471-82-1181

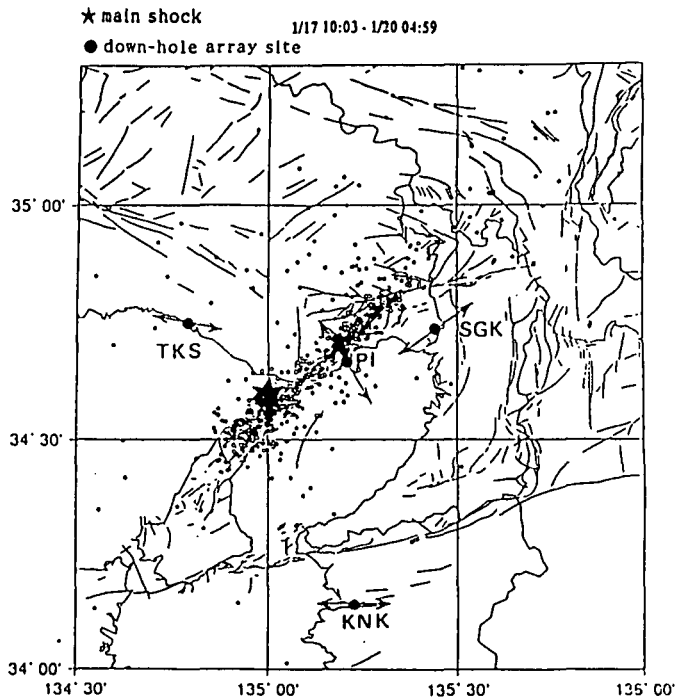


図1 4地点の鉛直アレーの位置と本震・余震の震央分布

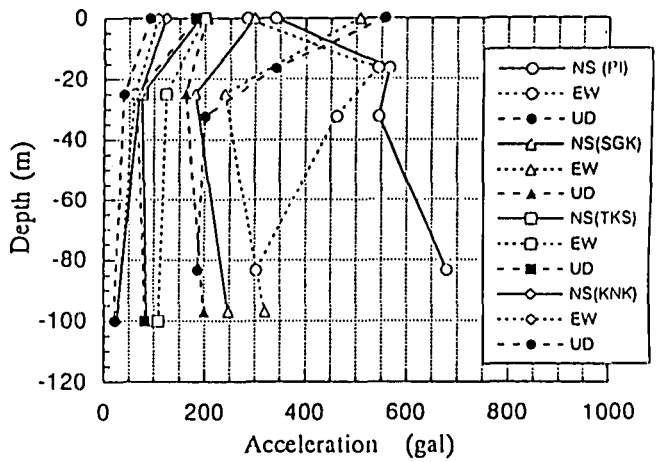


図3 鉛直アレーによる最大加速度の深度分布

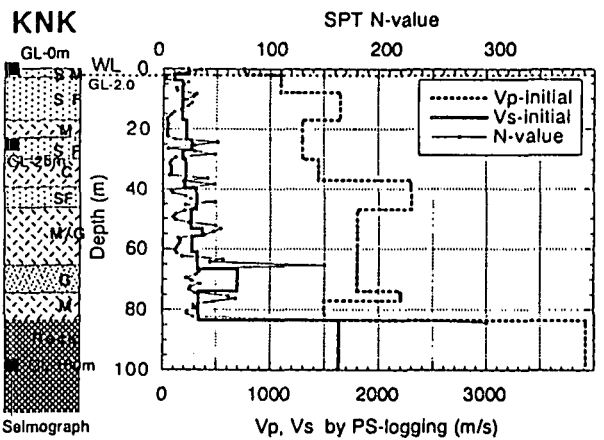
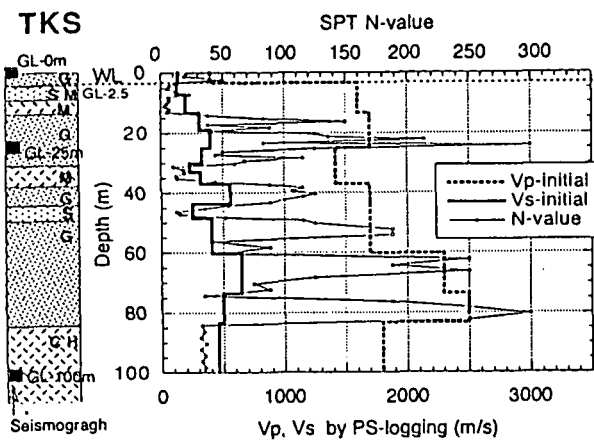
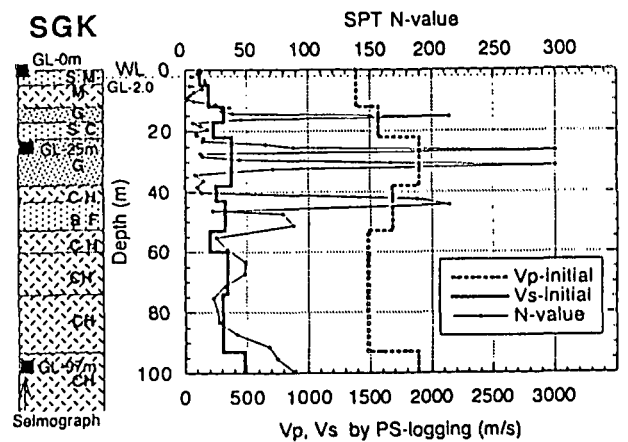
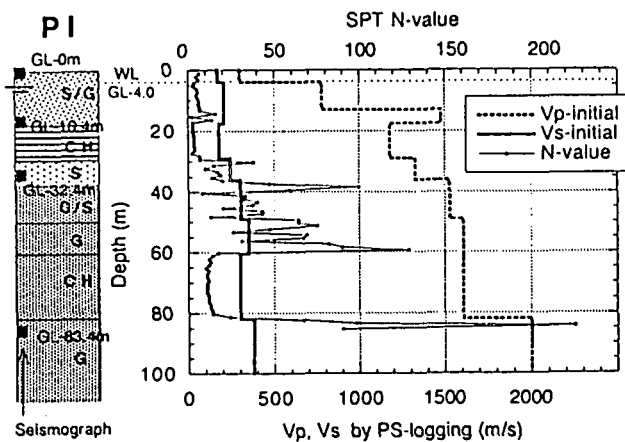


図2 4地点の地盤性状、地震計設置位置、標準貫入N値・Vp、Vsの深度分布

層地盤の増幅も大きく異なっている。すなわち地表と最深レベルでの水平最大加速度の比はKNKで4~5倍、TKSで2倍、SGKで1~1.2倍、PIでは0.5~1倍となっている。このうち、PIとTKSは地表層で液状化が生じたことが確認されており、増幅特性は液状化の影響を受けていると考えられる。

地表と最深レベル（ここでは便宜的に基盤と呼ぶ）の間での加速度増幅率をさらに分析するため、Vsや基盤での加速度との関連を検討した。図4は縦軸に加速度増幅率をとり、基盤と地表でのVsの比に対してプロットしたものである。図中の白丸印は後述のように応答がほとんど線形的であったKNK地点と余震での線形応答に対応している。これらを結んだ図中の実線はあきらかに右上がりであり、Vs比の増加に対して増幅率が増加する傾向を示している。同図の破線は鳴⁴⁾が1次元線形重複反射解析で求めた多くの地盤についての伝達関数の最大値と基盤/地表間のVs比の関係である。実線と破線の比はほぼ0.4程度の一定値となっており、定常応答倍率と今回の地震での倍率の比に対応している。この線形応答に比べ黒丸で示したPI、SGK、TKSでの応答倍率は明らかに下回っており、震動応答の非線形の影響が明らかに表れている。図4では表層のVsとして地表付近の値を採用したが、図5ではそれに代わり地表から30mまでの地盤の平均Vsを用い同じデータをプロットしたものである。やはりVs比に対して右上がりの類似の関係が得られることがわかる。

図6は基盤加速度に対する加速度増幅率の関係を示している。ここで基盤が土質地盤でVs比が2~4の場合と岩盤でVs比が7の場合に分けて示している。Vs比による影響は明らかに大きいものの、同程度のVs比の地盤においては加速度が大きくなるほど増幅率が低下する非線形性増幅特性が表れていると解釈できる。データのばらつきは小さくはないが、近似式を当てはめると次式で表される（ただしAccはgal単位）。

$$\text{Acc}_{\text{surface}}/\text{Acc}_{\text{base}} = 2.0 \exp(-1.7\text{Acc}_{\text{base}}/980)$$

これによれば、 $\text{Acc}_{\text{base}}/980 = 0.4$ 付近で増幅率は1.0を下回ることになる。

次に上下加速度の増幅率についても同様の考え方でVpの基盤と表層の間の比に対しての整理を行い、その結果を図7に示した。図中の白丸は地表のVpをとり黒丸は地表から30mの深さまでの平均Vpをとった場合である。いずれも右上がりの明瞭な相関関係が認められ、上下動に関しても加速度増幅率は弾性波速度比とよい相関があることが明らかとなった。

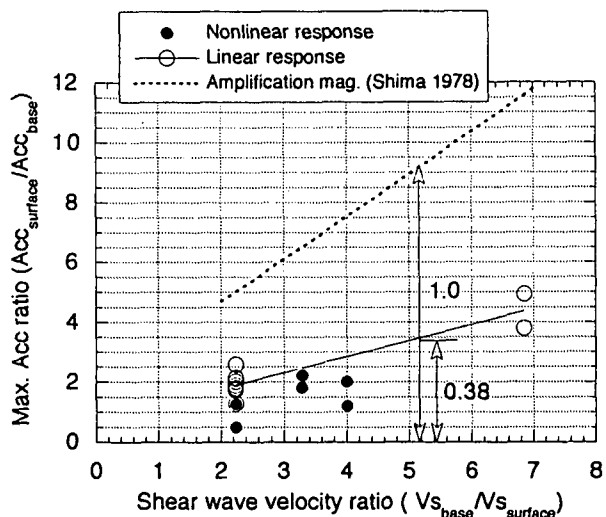


図4 地表と基盤の間での水平加速度増幅率とVs比の関係

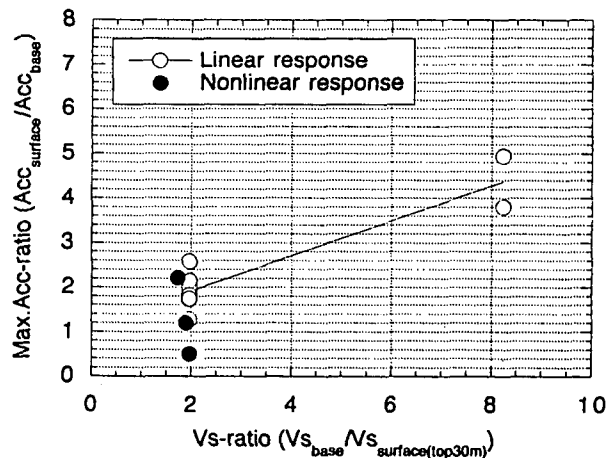


図5 地表と基盤の間での水平加速度増幅率とVs比の関係
(表層30mの平均Vsを用いた場合)

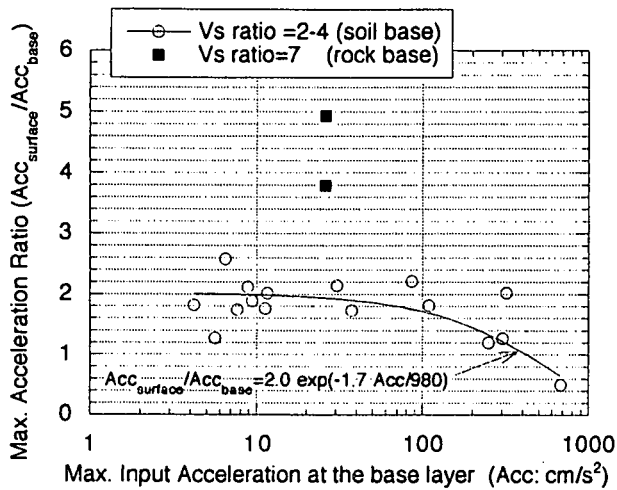


図6 地表と基盤の間での水平加速度増幅率と基盤加速度の関係

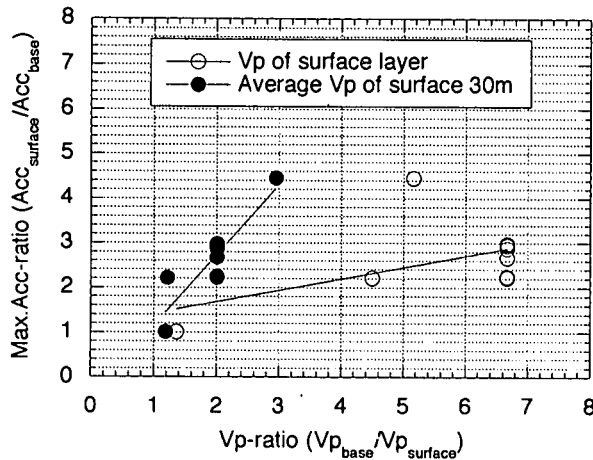


図7 地表と基盤の間での上下加速度増幅率とVp比の関係

3. 地盤物性のひずみ依存性

4 地点の鉛直アレー記録に基づき、地盤のせん断波速度 V_s と減衰定数 h を同定する逆解析を行った。用いた波形は地震計の各設置レベルの水平加速度記録であり、あらかじめ方向の誤差を修正したものである⁵⁾。用いた解析コードは太田⁶⁾により開発されたSH波の1次元重複反射の仮定によるもので、図1に示す地層モデルに基づき地層間の伝達関数を計算し、実測の伝達関数との差異が最小となるような V_s と h を反復計算により同定した。各地層の密度は土質から推定し、 V_s と h の初期設定値については、板たたき法によるS波速度と既往の室内試験での土質ごとの減衰定数に基づき、本震におけるひ

ずみレベルを考慮して設定した。逆解析の結果の詳細は文献⁵⁾、⁷⁾に述べられているが、最も震源断層に近かったPIでは同定された V_s は板たたき法によるS波速度に比べ80~20%も低下したのに対し、最も遠かったKNKでは低下率は20~5%とわずかで、震動がほぼ線形的であったことが示された。

図8は同定された物性値を用いて行った1次元重複反射解析により得られた最大加速度の深度分布を示すが、実測加速度をかなり良く再現している。図9は同じく最大せん断ひずみの深度分布を示しているが、地点によりひずみレベルのオーダーが異なっており、発揮された非線形性の程度に大きな差があることが分かる。

図10は V_s の同定値に基づき算定したせん断剛性比 G/G_0 とせん断ひずみの関係である。すなわち、各地層ごとに上に述べた V_s の低下率を2乗することにより算定される G/G_0 を有効ひずみ γ_{eff} に対してプロットしたものである。ここに γ_{eff} は図9に示した最大せん断ひずみ γ_{max} より、通常の等価線形化法にならない、 $\gamma_{eff} = \gamma_{max} \times 2/3$ により算定した。図中の矢印で示した点は液状化が生じたと考えられる地層に対応している。このグラフより、データの分布幅は大きい γ が大きくなるに従って、 G/G_0 が低下する傾向は明瞭に見て取れる。ところで、このグラフには G/G_0 が1.0を越えるデータがかなり含まれているが、それらはすべてKNK地点のデータであり、この地点については地盤モデルの設定あるいは解析に関して何らかの誤差要因が含まれていると考えられる。

図11は減衰定数 h の同定値と有効せん断ひずみの関係である。PI地点の液状化層ではみかけ上50%もの大きな減衰定数が算定されたが⁷⁾、ここでは比較的信頼性が高いと考えられる $h = 20\%$ 以下の範囲について示している。データのばらつきは少なく、特にひずみの小さな範囲で極めて明瞭なひずみ依存性カーブを示している。

図12は従来より行われてきた室内土質試験によって、砂と粘性土について得られた G/G_0 のひず

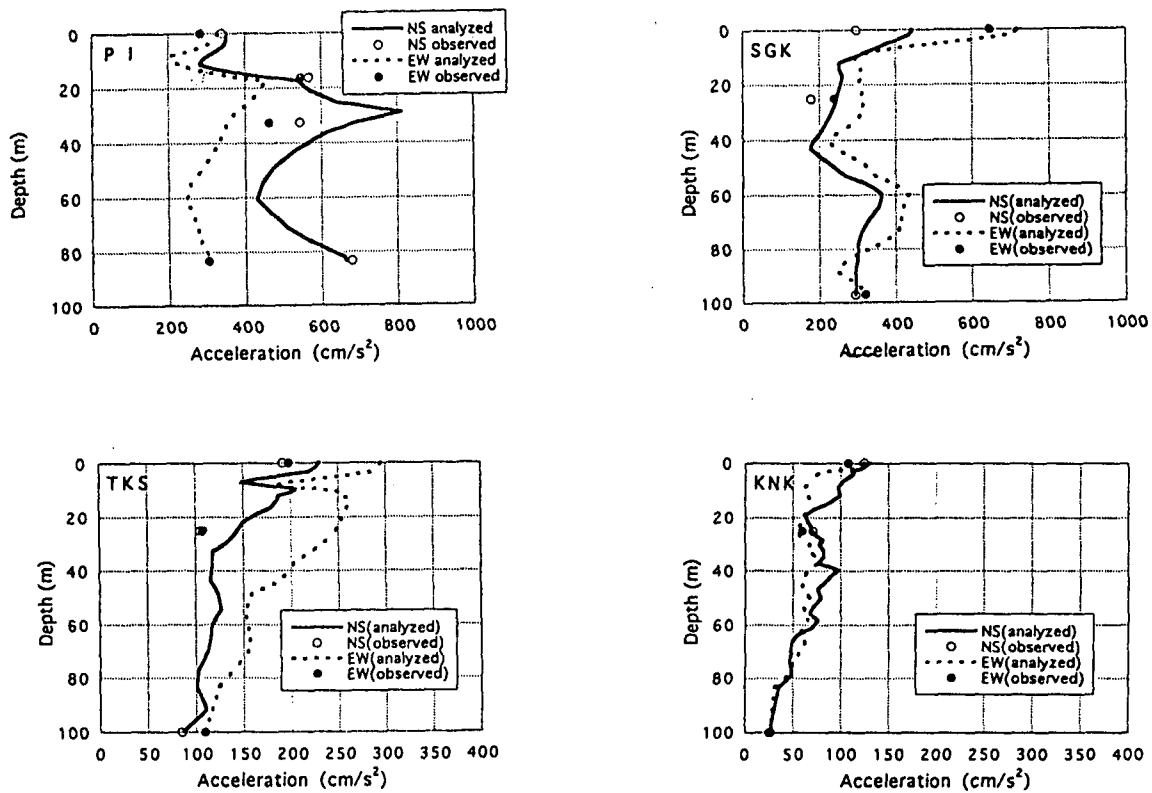


図8 同定された地盤物性による深度方向の最大加速度分布の解析結果と実測との対比

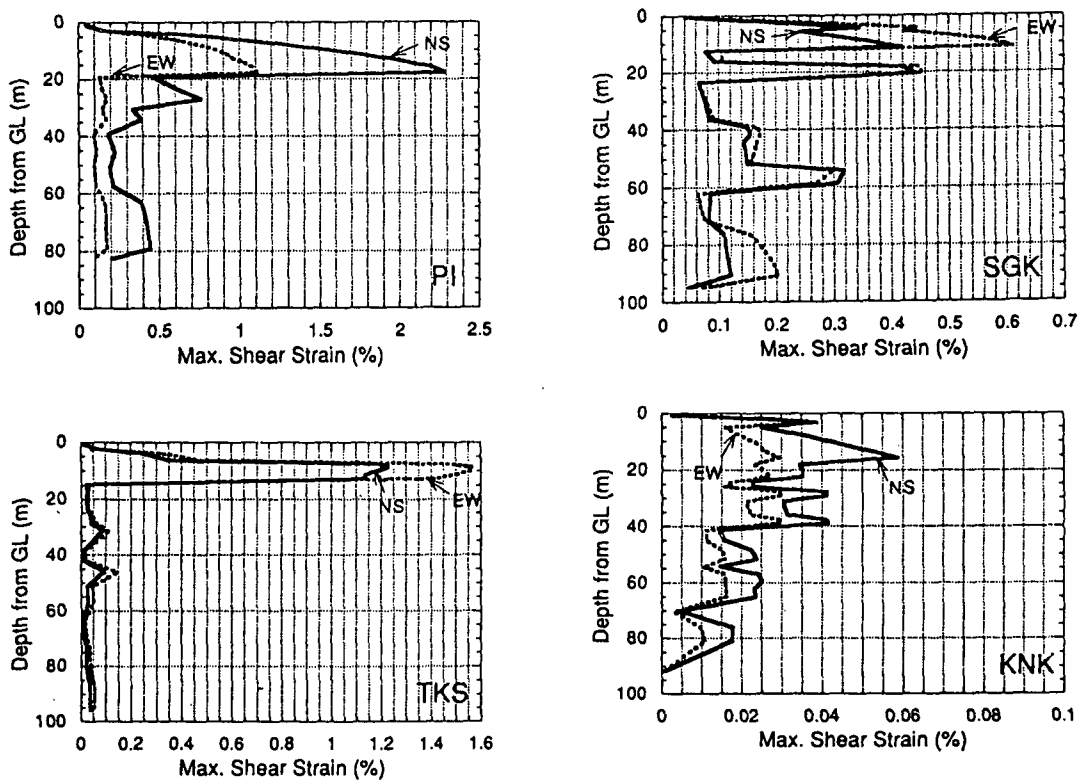


図9 同定された地盤物性による深度方向の地盤最大ひずみ分布の解析結果

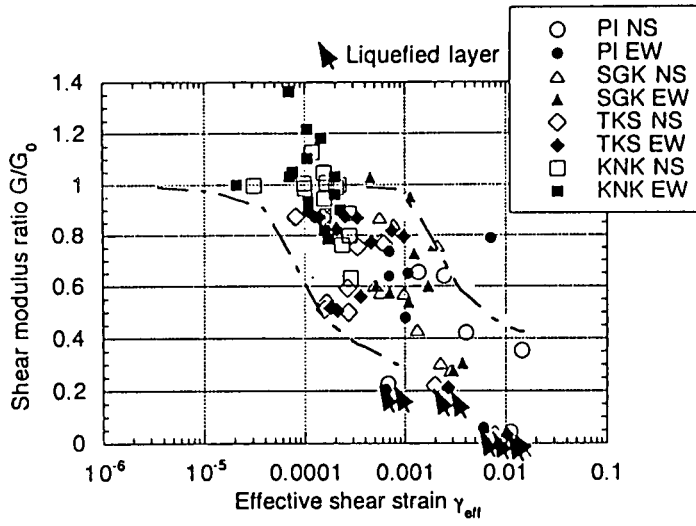


図10 逆解析により算定された4地点でのせん断剛性比 G/G_0 と有効ひずみ γ_{eff} との関係

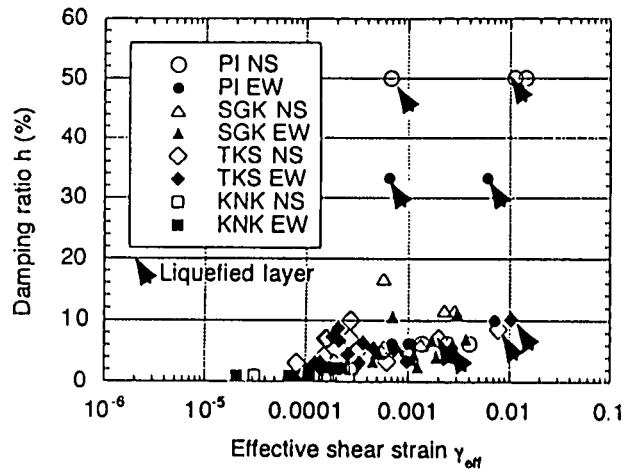


図11 逆解析により算定された4地点での減衰定数 h と有効ひずみ γ_{eff} との関係

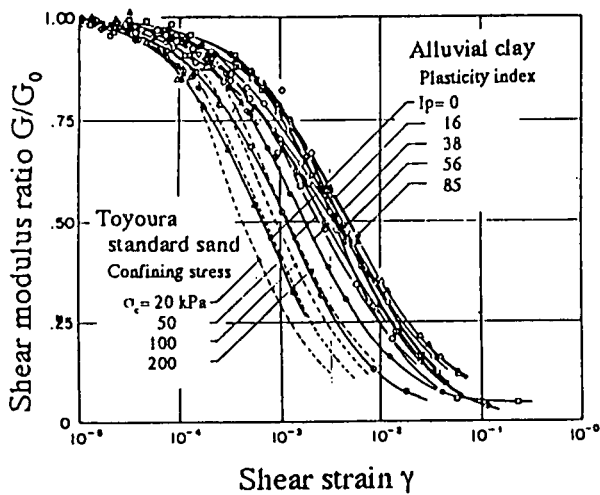


図12 砂と粘性土について室内試験で求めたせん断剛性比のひずみ依存性カーブ

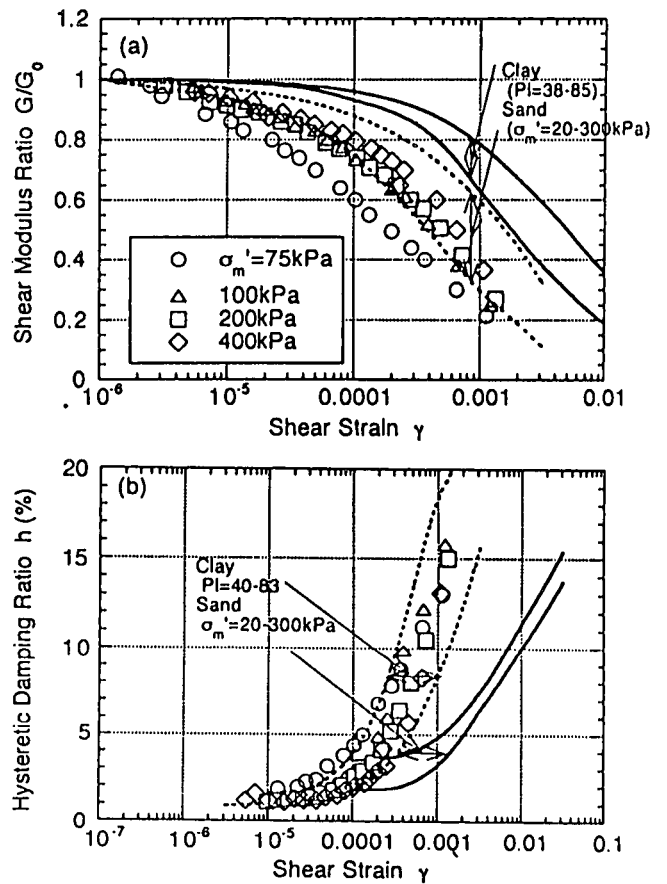


図13 更新統の礫について室内試験で求めたせん断剛性と減衰定数のひずみ依存性カーブ

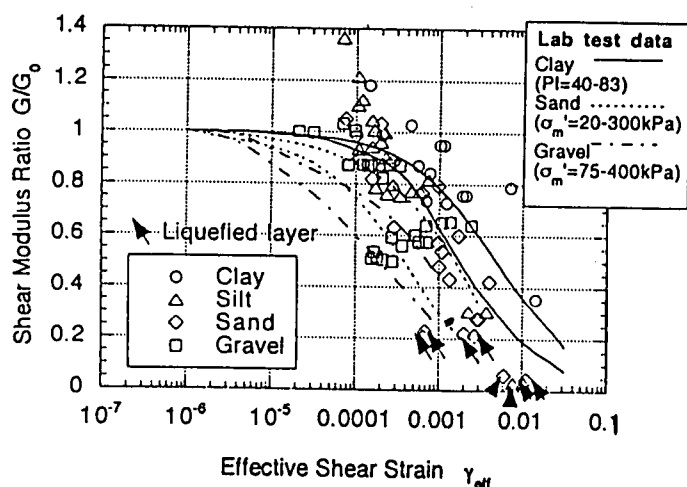


図14 逆解析により算定された土質別のせん断剛性比 G/G_0 と有効ひずみ γ_{eff} との関係ならびに室内試験との比較

み依存性カーブの例である⁸⁾。良く知られているように、砂に比べて粘性土は G/G_0 が低下する位置がひずみの大きい方に寄っており、また砂は拘束圧によりカーブの位置が変化するのに対し、粘性土は塑性指数によってカーブが移動する。また、図13は更新統の礫の不攪乱試料について室内試験から得られた G/G_0 と h のひずみ依存性カーブ⁹⁾を示しており、やはり拘束圧によってカーブの位置が移動する傾向が見られる。

このように従来室内土質試験により測定されてきたせん断剛性や減衰定数のひずみ依存性カーブが果たして原地盤にどの程度適用できるのかは、耐震工学での大きな関心事である。そこで、図11、図12に示したデータの点を土質の種類別に分類して再プロットして示したのが図14と図15である。ここに土質分類は図2の地層モデルに示す統一土質分類に基づき、粘土、シルト、砂、礫の4種類に分けた。逆解析により同定されたせん断剛性比のひずみに対する変化傾向は図14に示すように土質の種類ごとにかかなり明確に分離し、室内試験と同様に砂・礫に比べて粘性土の点はひずみの大きい側に位置していることが分かる。同図に示した室内試験によるカーブとの比較によれば、室内試験での土質試料が当該地点から採取したものではないにも関わらず、粘土についてカーブの位置に多少のずれがあるものの、ほかの土質についての一貫度は悪くない。また、

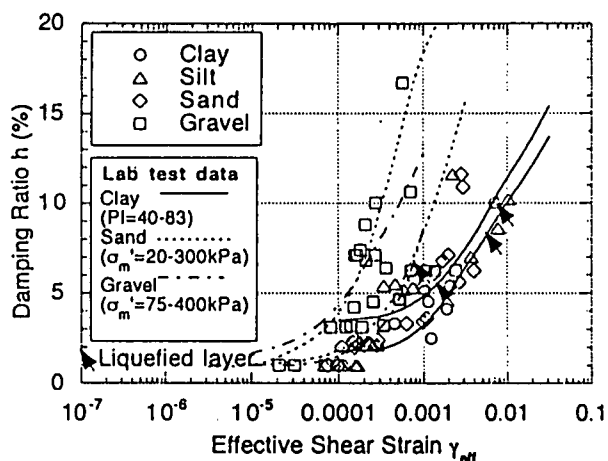


図15 逆解析により算定された土質別の減衰定数 h と有効ひずみ γ_{eff} との関係ならびに室内試験との比較

図15の減衰定数のひずみに対する変化も土質別にかかなり明確に分離でき、室内試験結果との対応も砂についてずれが見られるが、全体的には一致度は悪くない。したがって原地盤が強地震時に発揮するせん断剛性比と減衰定数のひずみ依存性は、室内試験で求められる土の動的物性とかかなりよい一致度を示すことを明らかにできた。

4. 結論

兵庫県南部地震の際に4地点で記録された鉛直アレーデータにより、軟質地盤の非線形震動の実証データが得られた。この波形記録と地盤データに基づき種々の分析と解析を行い、以下の知見を得た。

(1) 地表と基盤の間の水平加速度増幅率は線形震動に関してはその2レベル間の V_s 比と相関があることが確認された。また、上下加速度の増幅率についても V_p 比との良い相関関係の存在が認められた。さらに、 V_s 比がそれほど異ならない基盤が更新統からなるサイトについて水平加速度増幅率の基盤加速度に対する非線形的低下傾向の定式化を試みた。この式によれば、基盤加速度が $0.4G$ を越えると増幅率は 1.0 を下回ることになる。

(2) 逆解析により求めた地盤のせん断剛性比と減衰定数は明瞭なひずみ依存性を示すことが見いだされた。また、それらのひずみ依存性カーブは土質別に分離でき、各土質について室内試験により求められたひずみ依存性カーブとの一致度も悪くないこと

が分かった。したがって、強地震時に軟質地盤が発揮するせん断剛性比と減衰定数は原地盤からの採取試料に基づく土質試験の結果とほぼ一致することが実証された。

参考文献

- 1) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. "SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites" Report EERC 72-12, University of California Berkeley, 1972
- 2) Constantopoulos, I.V., Roesset, J.M. and Christian, J.T. "A comparison of linear and exact nonlinear analyses of soil amplification, Proc. 5th International Conference on SMFE, Rome, pp.1806-1815, 1073
- 3) 國生 剛治、岩楯たか広「軟弱地盤の非線形震動についての模型振動実験と解析」土木学会論文報告集 Vol. 285, pp 265~268, 1979

- 4) Shima, E. "Seismic microzoning map of Tokyo" Proc. 2nd International Conference on Microzonation, Vol.1, pp.433-443, 1978
- 5) Sato, K., Kokusho, T., Matsumoto, M. and Yamada, E. "Nonlinear seismic response and soil property during 1995 Hyogoken Nanbu earthquake" Soils and Foundations, Special Issue for the Hyogoken Nanbu earthquake, pp.41-52 January, 1996
- 6) 太田 裕 「地震工学への最適化法の適用ー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
- 7) Kokusho, T., Sato, K. and Matsumoto, M. "Nonlinear dynamic soil properties back-calculated from strong seismic motions during Hyogoken-Nanbu earthquake" 11th WCEE, Acapulco, 1996
- 8) Kokusho, T., Yoshida, Y. and Esashi, Y. "Dynamic soil properties of soft clay for wide strain range", Soils and Foundations, Vol.22, No.4, pp.1-18, 1982
- 9) Kokusho, T. and Tanaka, Y. "Dynamic properties of gravel layers investigated by in-situ freezing sampling" ASCE Convention (Atlanta), Geotechnical Special Publication No44 -Ground Failures under Seismic Conditions, pp121-140, 1994

NONLINEAR SITE RESPONSE AND BACK-CALCULATED STRAIN-DEPENDENT SOIL PROPERTIES

Takaji Kokusho, Masaki Matsumoto and Kiyotaka Sato

During the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake, vertical array records were obtained at four sites with much different epicentral distance in and around the earthquake fault zone which demonstrated conspicuous nonlinearity effect in seismic response. Based on these records, relationships between S-wave velocity ratio and acceleration amplification ratio are examined. A good correlation can be found between these parameters for linear site responses while lower amplification is evident for nonlinear response for strong seismic motions. These vertical array records are then analyzed by means of the inversion technique to back-calculate dynamic soil properties exhibited during the strong earthquake motion. Strain-dependent variations in the shear modulus and the damping ratio have been derived in the four sites, from which different strain-dependency curves can be separated for clay, silt, sand and gravel. They have also been found to qualitatively agree with those by laboratory tests, demonstrating that the nonlinear dynamic soil properties measured in the laboratory can be applicable to site response evaluation during strong earthquakes.