

兵庫県南部地震の観測加速度記録を用いた 地盤の動的物性定数の推定

小嶋 啓介¹ 荒井 克彦¹
本多 秀夫² 鎗 勉³

地震観測アレーによる加速度記録に基づいて、地盤のせん断波速度ならびに減衰定数などの動的パラメータを推定する逆解析手法を定式化し、兵庫県南部地震の観測記録に適用した結果を検討した。この逆解析手法は、観測加速度と対応する動的有限要素法による計算加速度のフーリエスペクトルの誤差二乗和を最小とすることにより、最適な動的パラメータを推定しようとするものである。ポートアイランドおよび福井大学アレーに適用した結果、推定された動的パラメータにより、地盤の応答の非線形性にもなう位相の遅れなどは表現できないものの、周波数特性は精度良く再現できること、ランニングスペクトルを用いることにより、地震継続中の構成特性の変化が直接推定できる可能性のあることなどが確かめられた。

1. まえがき

地盤の動的特性を求める試験は、一般に多くの費用を要する傾向にあると同時に、PS検層などの弾性波試験では微小ひずみレベルのみを対象としていること、振動三軸試験ではサンプリング時の攪乱や応力履歴の影響が不可避であることなど、本質的な問題点も残されている。そのため、動的問題に対しても、いわゆる逆解析手法が適用される機会が増加している。特に一次元問題を対象とし、鉛直アレー観測記録と重複反射法による伝達関数の誤差を最小化して、動的パラメータを推定しようとする研究は、ある程度の実績を残しつつあるように思われる¹⁾。著者らも、地震時の観測加速度と動的有限要素法による計算加速度を周波数領域で比較し、両者の誤差自乗和を最小とする動的物性定数を探索する逆解析手法を提案し、水平堆積地盤ならびにアースダムに適用した結果を報告している²⁾。兵庫県南部地震に際しては、ポートアイランドをはじめとする多くの地震観測アレーで、強震観測記録が得られたため、その記録を利用した逆解析に関する研究も多く公表されている。風間らは³⁾、慣性力を積分して求めた

応力と、観測点間の相対変位から求めたひずみから、各層の履歴変形特性を求め、剛性のひずみ依存性などを推定している。吉田、栗田⁴⁾は、マルチリニアモデルを設定し、拡張カルマンフィルタを利用することによって、またSato⁵⁾らは、重複反射法と最適勾配法を組み合わせた方法により、剛性の低下や減衰定数の変化などを推定している。

本研究では、文献2)の手法を修正した逆解析法を、ポートアイランドならびに福井大学グラウンドの鉛直アレーによって記録された兵庫県南部地震の地震観測記録に対して適用した結果を検討する。

2. 逆解析手法の定式化

(1) 動的有限要素法と物性定数

動的解析法としては、Newmarkの β 法による直接積分を用いた時間領域の動的有限要素法を採用し、減衰マトリックス[C]は、次の修正Rayleigh減衰を適用した。

$$[C] = (1 + \phi) \omega_1 h [M] + (1 - \phi) h / \omega_1 [K] \quad (1) \\ = \alpha [M] + \beta [K]$$

ここに、 h : 減衰定数、 $[M]$ 、 $[K]$: 質量および剛性マトリックス、 ω_1 : 1次固有振動数を示す。 ϕ は減衰の振動数依存性を調整する係数で、 $-1 < \phi < 1$ の範囲にあり、振動数依存性を小さくする場合には0.4~0.5程度がとられ、高次モードの減衰を大きくする場合には、 -1 に近い値が採用される。

Key Words : Back-Analysis, Shear Wave Velocity, Damping Coefficient

¹福井大学 工学部 環境設計工学科 0776-27-8592

²(株)サンワコン 地質部 0776-36-2790

³福井大学 大学院 環境設計工学専攻 0776-27-8592

地盤の構成モデルとしては、線形弾性とした場合、あるいはHardin-Drnevichモデルに等価線形化法を組み合わせたものを採用する。この場合、入力すべき地盤物性定数としては、地盤各層の密度 ρ 、せん断波速度 V_s (初期せん断剛性係数 G_0)、ポアソン比 ν 、減衰定数 h (大ひずみ時の減衰定数 h_{max}) と基準ひずみ γ_r が必要となる。これに対し、対象地点の地盤の事前情報としては、概略的土質区分とN値のみしか与えられない場合も多いと考えられる。土層ごとの上記のすべてを未知として逆解析を行うことは、解の一意性や、収束計算の安定性などの点で実用的でないため、逆解析の対象とするパラメータを選択する必要がある。密度、ポアソン比および基準ひずみはとり得る範囲が限られ、応答解析結果に与える影響が比較的小さいことから既知とする。せん断波速度については、Imai⁵⁾ による次のN値との回帰式により、地盤の不均一性を表わす。

$$V_s = a N^b \quad (2)$$

ここに、 a 、 b ：土質特性を表す定数である。係数 b は、0.29~0.33前後をとるが、土質による変動幅が小さいため、ここではすべての土質に対する回帰式の値である0.314に固定した。減衰定数については、せん断波速度との依存性は小さく、土質ごとに設定すべきとする研究も発表されているが、事前に与えられる情報からは定量的に評価できる材料は少なく、逸散減衰などの効果も加味する必要がある。ここでは第一段階として、地盤各層の減衰定数は、逸散減衰の効果も含めた一つの値をとるとし、逆解析を安定して行うために、 $h = \exp(c)$ と表し、 c を推定することとする。以上の仮定から、逆解析の対象となるパラメータは、せん断波速度および減衰定数を決定する係数 a 、 c ならびに減衰の振動数依存性を調整する係数 ϕ の3個となる。

(2) 逆解析手法

観測および計算加速度の時間領域での厳密な比較は容易ではなく、逆解析の際の安定性などの面で問題があるため、時刻歴データを周波数領域に変換したフーリエスペクトルの観測値と計算値を比較する。また、逆解析における収束計算を安定させるため、フーリエスペクトルにParzenウィンドウによる平滑化処理を施す。以上より、動的物性定数の逆解析問題は、次式を最小化するパラメータ a 、 c ならびに ϕ を探索する最適化問題として定式化できる。

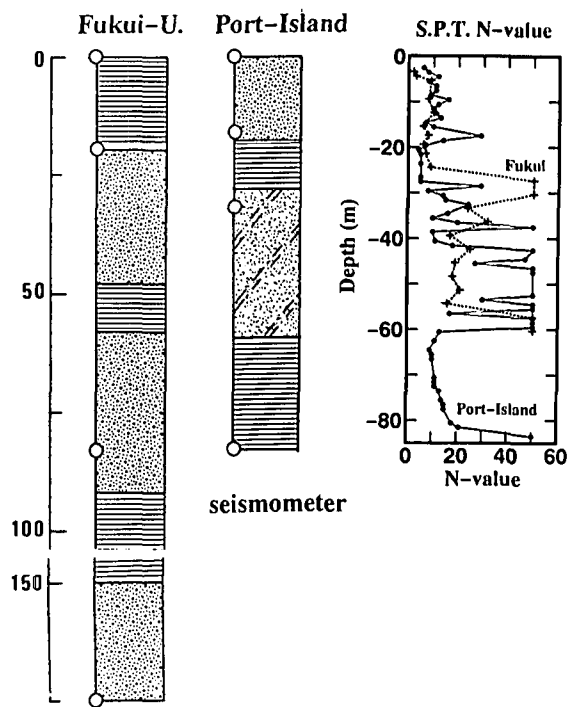


図-1 アレー観測地点の土質柱状図

表-1 地表面と基盤の最大加速度 (gal)

PI (NS)	GL	-83m
Main-Shock	34.1	53.5
After-Shock(1)	1.6	4.9
After-Shock(2)	2.1	5.9
FG (NS)	GL	-17.5m
Main-Shock	2.7	1.2
After-Shock	2	1

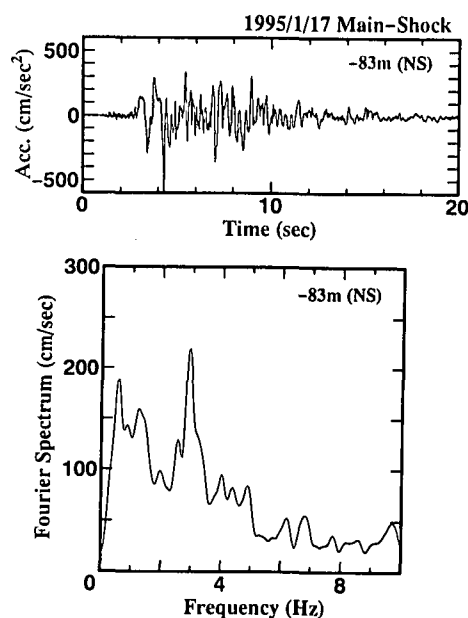


図-2 PIの入力加速度とそのフーリエスペクトル

$$J = \sum_{i=1}^{N_m} \left\{ \sum_{k=1}^{N_f} (x_{ik}/X_{ik} - 1)^2 / N_f \right\} \quad (3)$$

ここで、 J ：目的関数、 X_{ik} ： i 番目の地震計の

観測加速度の k 番目の周波数のフーリエスペクトル, $x_{ik} : X_{ik}$ に対応する計算加速度のフーリエスペクトル, N_m : 加速度計の設置個数, N_f : 比較する周波数の上限の数を示す. 上式の {} 内は比較するすべての周波数で計算値 x_{ik} が 0, あるいは観測値 X_{ik} の 2 倍となる場合は 1 となり, 観測地震波が完全に再現されている場合 ($x_{ik} = X_{ik}$) では 0 をとる. 最適パラメータの探索には, 準Newton法に属するPowell法⁶⁾を採用した.

3. 適用結果

(1) 地震観測地点

適用対象は, ポートアイランドの鉛直アレー観測地点と, 福井大学グラウンドを選択した. なお以下では, ポートアイランドを P I, 福井大学グラウンドを F G と表記する. 土質柱状図を図-1に示す. P I は約18mがマサ土による埋め土で, その下部には約11mの沖積粘土(Ma13)が存在し, 洪積の砂礫層および粘性土層(Ma12)が続く構成となっている. F G は福井平野のやや南部に位置し, 表層の約20mは, N値が10以下の薄い砂層を挟んだ沖積粘性土層であり, その下部には砂礫を主体とした約150mの厚い洪積層が存在している. 同図にはN値の分布も示すが, P I では基盤層までの値が求められているのに対し, F G では表層約65mまでしか求められていない.

図-1の○印に地震計の位置を示す. P I では3成分加速度計が, 地表面, G L -16m, -32mおよび-83mに設置され, すべて記録が得られているのに対し, F G では地表面の3成分と-175mの水平2成分のみの値が利用できる状態にある. なおP I の記録は関西地震観測研究協議会を通して入手した. 表-1は解析に利用した地震の一覧と, 地表面ならびに入力加速度の最大値を示している. 本震のK G における観測加速度はP I の余震と同程度であることがわかる.

(2) ポートアイランドへの適用結果

図-2は-83mの地震計の本震の主要動を含む約20秒間の, N S 方向の加速度時刻歴とそのフーリエスペクトルである. 4Hz以下の成分が優勢であり, 0.6, 1.2および2.9Hz前後にピークが認められる. 図-3の点線は, 地表面, -16m, -32mの加速度時刻歴である. 広く認識されているように, 当地では全般的な液状化が発生したとされており, 水平動

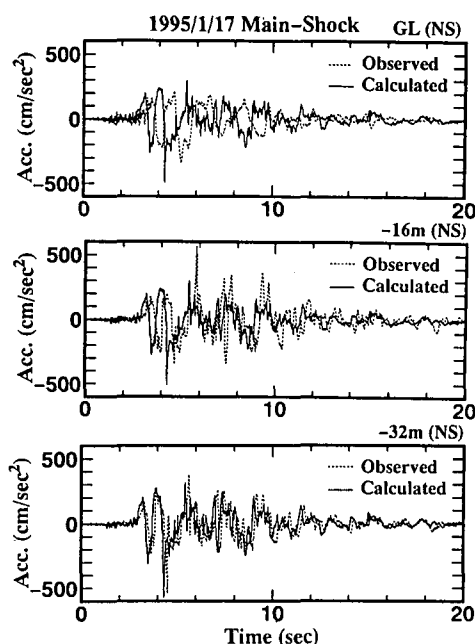


図-3 P I の観測加速度と計算加速度

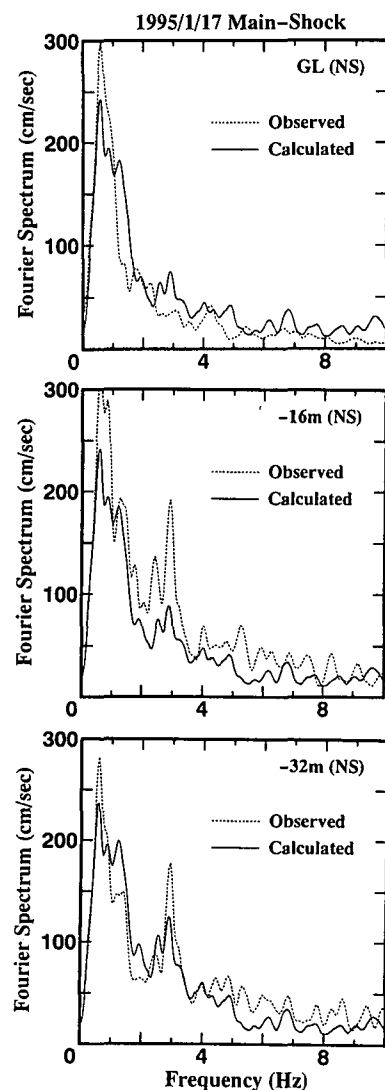


図-4 P I の観測・計算加速度のフーリエスペクトル

の増幅は見られず, 地表面付近では最大加速度の大幅な減衰と長周期化が認められる. 図-4の点線は

観測加速度のフーリエスペクトルである。基盤で見られた3Hz前後の成分が、地表面に近づくにつれて減衰し、地表面では0.6Hz前後の単一のピークのみを有するスペクトルに変化している。

図-5は式(1)の ϕ を-0.9とし、図-2に示した観測加速度を入力した場合の逆解析結果である。パラメータaは初期値の100から115へ、cは-3(h=5%)から0.35に修正され、Jは初期値による3.8から0.17程度に改善されていることが読みとれる。

図-3の実線は逆解析されたパラメータを用いた計算加速度の時刻歴である。GL-16mで見られるスパイク状に近い成分を除いて、観測加速度の波形は良好に再現しているといえるが、地表面に近づくにつれて大きくなる位相の遅れは表現し切れていない。これは、液状化ならびに大ひずみ履歴を受けた地盤の非線形応答に基づくものと思われ、線形計算を行っている本手法では、当然の結果であるといえる。

この逆解析手法によって求められた動的パラメータは初期値に依存しており、局所的な最適解である可能性も否定できない。図-6は最適解の近傍で、パラメータaおよびcを変化させて、目的関数Jの変化傾向を調べたものであり、図-7は逆解析過程におけるパラメータa、cの探索経路を示したものである。これらの図から、パラメータa、cの関数である目的関数Jは、最適解付近で大きな不連続はなく、探索経路も自然なものとなっており、不適切な解に収束した可能性は小さいといえる。

図-8は逆解析されたせん断波速度とPS検層による値との比較である。50mより深いところで、両者の相違が大きくなっているが、これは50以上とされているN値をあえて推定せず、50としていることに起因するものである。

図-9は余震1の地表面のNS方向の加速度時刻歴と、主要動部分の10.24秒を前後5.12秒のデータに分割し、各々のフーリエスペクトルを表示したものである。後半の地震動では4Hz以上の振動数成分が大きく減衰していることがわかる。このように加速度時刻歴をいくつかに分割し、いわゆるランニングスペクトルに基づいて、地盤の動的物性定数を推定する場合には、線形弾性を仮定していても、地震継続時の剛性および減衰の経時変化が推定できる可能性がある。表-2は、2分割した時刻歴を用いて逆解析を行った結果である。また、逆解析に際し、式(1)の ϕ を変化させ、減衰の周波数依存性についても検討した。同表より、主要動の後半部分では、

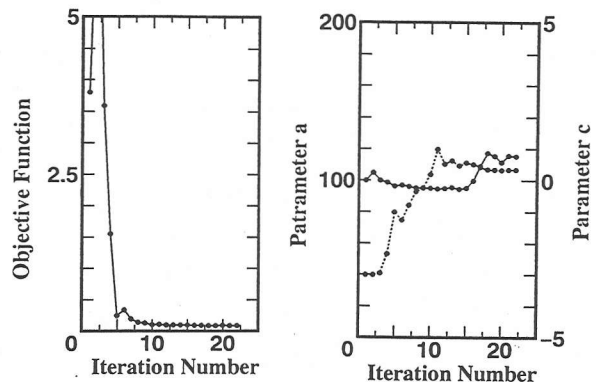


図-5 ポートアイランドの逆解析結果

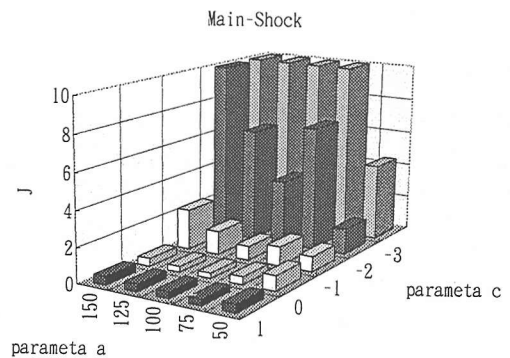


図-6 最適解近傍の目的関数の分布

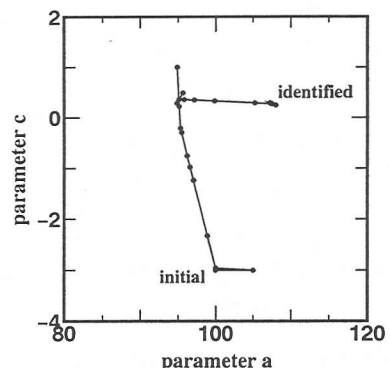


図-7 動的パラメータの収束状況

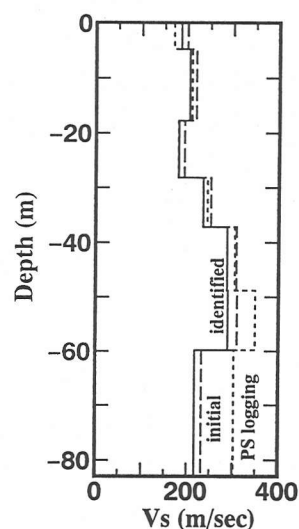


図-8 観測加速度と計算加速度の比較

パラメータaは小さく、cは大きく推定されており剛性の低下と減衰の増加が見受けられる。また、 ϕ の変化にともないa、cも異なった値に推定されて

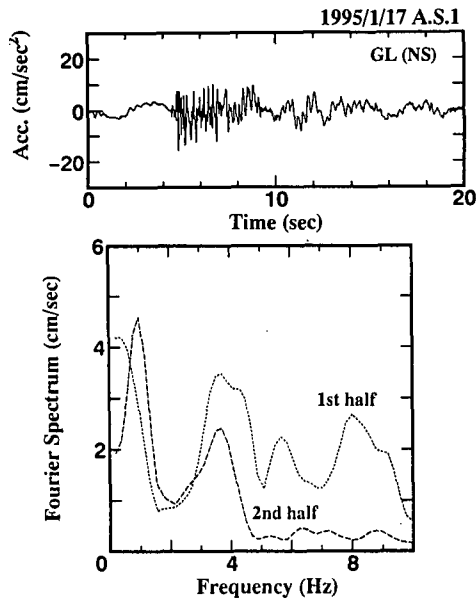


図-9 余震1の観測加速度とフーリエスペクトル

表-2 余震1の逆解析結果

	ϕ	0.5	0.0	-0.9
1st	Objective F. J.	0.149	0.136	0.199
	Parameter a	242	239	112
	Parameter c	-2.513	-1.576	-1.825
2nd	Objective F. J.	0.158	0.149	0.149
	Parameter a	129.7	142.2	101.4
	Parameter c	-2.192	-2.137	-1.432

表-3 等価線形化法による逆解析結果

ϕ	0.5	-0.9
Objective F. J.	0.158	0.168
Parameter a	144.9	120.8
Parameter c	-1.176	-0.73

いるが、その際のJの変化は小さい。これは式(1)の α および β が、せん断波速度と層厚から求められる固有振動数、減衰定数および ϕ の乗除算によって算出されるため、各パラメータの個々の値に対する独立性が低いことによるものと思われる。

表-3は、余震1の後半部分について、等価線形化法を適用した結果である。目的関数の値は、線形弾性を仮定した表-2の結果とほとんど変わらないといえる。パラメータa、cとも線形弾性とした場合より大きく推定されているが、これは、微小ひずみのせん断波速度 V_{max} ならびに大ひずみの h_{max} を推定しているためである。等価線形化法を導入した効果が少なかった原因としては、等価線形化法で重要な役割を果たすせん断ひずみ自体も、推定すべき G_0 、 h_{max} によって計算されるため、不定問題的要素が入り込んだこと、地層構成が複雑で同一の材料の要素が少なかったこと等が考えられる。

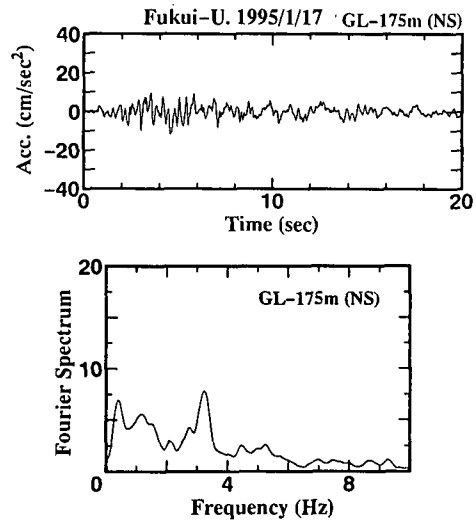


図-10 FGの入力加速度時刻歴とフーリエスペクトル

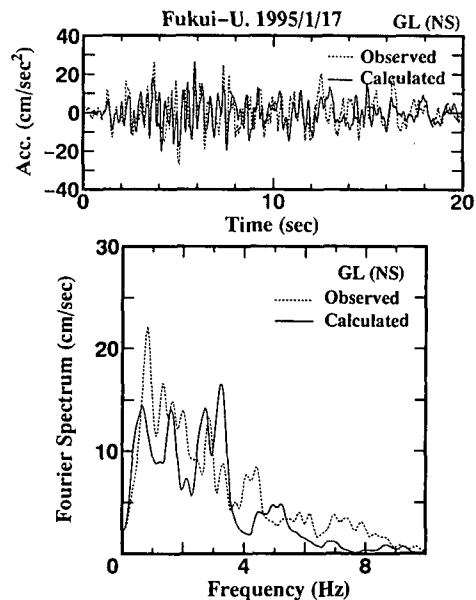


図-11 FGの観測・計算加速度のフーリエスペクトル

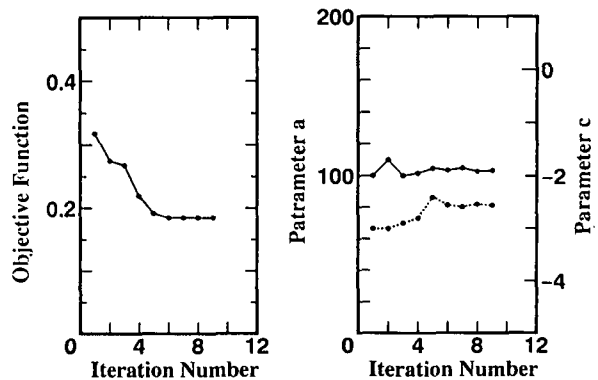


図-12 FGの逆解析結果

(3) 福井大学グラウンドへの適用結果

図-1に土質柱状図を示したが、当地ではN値が60m付近までしか求められていない。逆解析に際し

N値が必要であるため、60m以深のN値については、地表と基盤との水平動の到達時間差からせん断波速度を推定し、パラメータaを100とした時の値に設定した。図-10は本震のNS方向の入力加速度ならびにそのフーリエスペクトルであり、図-11の点線は地表面における同様の値である。図-11の実線は逆解析されたパラメータによる計算値である。特に12秒以降において、比較的周期の長い地震動が現れる部分の再現性が低く、フーリエスペクトルにおいても、0.5Hz前後の成分の振幅が小さく評価されている。図-12は逆解析結果であるが、パラメータaおよびcは、初期値の100、-3から、それぞれ102、-2.57へ修正され、それにともない目的関数は初期の0.32から0.18に改善している。ポートアイランドに比較して、地動の再現性が低いが、その原因としては、60m以深のN値が不明であったこと、福井平野では主要動到達後10秒程度で現れる「あとゆれ」が存在することなどが考えられるが、その寄与の度合いを定量的に把握することは現段階では困難である。

4. あとがき

観測加速度に基づいて、地盤のせん断波速度や減衰定数などを表現する動的パラメータを推定する手法を定式化し、兵庫県南部地震の観測記録に適用した結果を検討した。その結果、1) N値とせん断波速度の回帰式を用いることにより、多数の層からなる地盤に対しても、動的応答を精度良く再現できるパラメータが、効率よく推定できることが確かめられた。2) ランニングスペクトルを利用した逆解析

を行うことにより、地震継続中の地盤の構成特性の変化を直接推定できる可能性がある。3) 減衰の周波数依存性や等価線形化法を導入することはそれほど容易ではなく、せん断ひずみに替わり、構成特性に鈍感なせん断応力を利用した等価線形化法を利用するなどの工夫が必要であること、等の知見を得た。

参考文献

- 1) 谷口智広, 沢田勉, 平尾潔, 辻原治: 鉛直アレー観測記録によるQ値の周波数依存性の同定, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, 1B, 1240-1241, 1996.
- 2) 本多秀夫, 小嶋啓介, 荒井克彦: 実地震加速度記録に基づく地盤の動的物性定数の逆解析, 土木学会論文報告集, No. 517/Ⅲ-31, pp. 125-133, 1995.
- 3) 風間基樹, 柳沢栄治, 稲富隆昌, 菅野高弘, 稲垣紘史: アレー観測記録から推定した神戸ポートアイランドの地盤の応力-ひずみ関係, 土木学会論文報告集, No. 547/Ⅲ-36, 171-182, 1996.
- 4) 吉田郁政, 栗田哲史: 兵庫県南部地震の観測記録を用いたポートアイランドの表層地盤の動特性の逆解析, 土と基礎, No. 43-9, pp. 44-48, 1995.
- 5) K.Satho, T.Kokusyo, M.Matsumoto, H.yamada: Nonlinear seismic response and soil property during strong motion, Special Issue of Soils and Foundations, 41-52, 1996.
- 6) 神戸市開発局兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査(ポートアイランド, 六甲アイランド)報告書, 1995.
- 7) Imai, T.: P and S wave velocities of the ground in Japan, Pnoc. 9th ICSMFE, 1977.
- 8) M.J.D.Powell: An efficient method of finding the minimum of function of several variables without calculating derivatives, Computer J., 7, 155, 1964.

Estimation of Dynamic Soil Parameters based on the Observed acceleration during Hyogo-ken Nanbu Earthquake

Keisuke Kojima, Katsuhiko Arai, Hideo Honda and Tsutomu Yari

Described is a numerical procedure to back-analyze dynamic parameters of natural soil deposit based on the observed accelerations during earthquakes. The back-analysis procedure is formulated as an optimization problem to determine the dynamic soil parameters which minimize the sum of squares of difference of Fourier spectrum between monitored accelerations and calculated ones. In the analysis, a empirical relationships between shear wave velocity and N-value is introduced to describe the heterogeneity of the ground. The back-analysis is applied to monitored accelerations during Hyogo-Ken Nanbu Earthquake. From those applications, a fairly good agreement between monitored and calculated responses is observed by using back-analyzed soil parameters.