

**投稿論文(和文ノート)
TECHNICAL
NOTES**

重錐落下試験に基づく地盤の動的物性定数の逆解析

小嶋啓介¹・本多秀夫²・荒井克彦³・一二幸蔵⁴

¹正会員 工博 福井大学助教授 工学部環境設計工学科 (〒910 福井市文京3-9-1)

²正会員 工博(株)サンワコン 地質部 (〒910 福井市花堂北1-7-25)

³正会員 工博 福井大学教授 工学部環境設計工学科 (〒910 福井市文京3-9-1)

⁴真柄建設(株) (〒920 金沢市彦三町1-13-43)

本研究では、現位置での重錐落下振動実験で観測される地表面の鉛直加速度の時刻歴から、地盤のせん断波速度ならびに減衰定数を推定する逆解析手法を開発し、いくつかの地盤に適用した結果を検討する。逆解析においては、地盤を線形弾性体と仮定し、振動実験による地表面の鉛直観測加速度と、動的有限要素法を用いて求められた計算加速度を、周波数領域において比較し、両者の誤差二乗和を最小とするような動的物性定数を探査する。この逆解析手法を実地盤に適用した結果、比較的単純な地層構成の地盤に対しては、その振動特性を精度良く再現できる物性定数が推定できること、逆解析法に基づく剛性係数および減衰係数は振動三軸試験で求まる微小ひずみレベルの値に近いことなどが確かめられた。

Key Words : back-analysis, finite element analysis, measurement, shear wave velocity, damping coefficient, dynamic triaxial test

1. まえがき

地盤の地震時応答や、交通機関等からの振動の距離減衰などを的確に評価するためには、せん断波速度や減衰定数などの地盤の動的物性定数を適切に決定する必要がある。P-S検層や振動三軸試験のように、動的特性を対象とした試験は、静的強度や変形性を求める試験に比較して多くの費用と時間を要する傾向がある。地表面における板叩き法などから、弾性波速度を求めることが可能であるが、弾性波の到達時間差のみを利用する場合には、現地盤の振動特性や減衰特性まで議論するには無理があると考えられる。以上のような現状から、地盤応答解析の際に、せん断波速度の推定にはN値との回帰式を、減衰定数の推定には土質に依存した経験値が使われることも少なくないようである。

著者らは、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、両者の誤差二乗和を最小とする動的物性定数を探査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^{1), 2)}。辻原ら³⁾、時松ら⁴⁾も同様に、実地震波の観測結果から、地盤の動特性を推定する手法を提案している。これらの方法は、地中と地表での加速度計設置を前提として、地盤の比較的深部から表層までの動特性を推定することを目的としたものである。本論文では、地盤の比較的表層の動特

性を簡便に求めることを目的とし、重錐落下振動実験から動的物性定数を推定する方法を提案する。この方法をいくつかの現場に適用し、振動三軸試験結果などと比較した結果を示す。

2. 重錐落下実験

(1) 重錐落下実験の概要

重錐落下振動実験装置の設置状況を図-1に示す。重さ22.58kgfの円筒形のおもりを、鉛直に立てたガイド棒を用いて、1mの高さから鉛直に落下させ、周辺地盤の鉛直加速度を測定するという簡単な実験を行う。加速度計は2台を一組として用い、おもりの落下中心位置から水平に2mと3m、2mと4m、…などの距離の組み合わせで地表面に配置する。おもりの落下実験を行うごとに、データレコーダーで各点の加速度波形を確認後、サンプリング間隔1/1000秒の時刻歴データとして、逆解析に用いる現場情報とした。

(2) 重錐落下実験結果

図-2は重錐落下振動実験を行った3つの観測場所の土質柱状図とN値の深度分布を示している。同図における福井は福井大学構内、春江は福井平野のほぼ中央である春江町内の企業の遊休地、三国は三国町の海岸部の海砂の保管場所である。同図より福井は砂質土

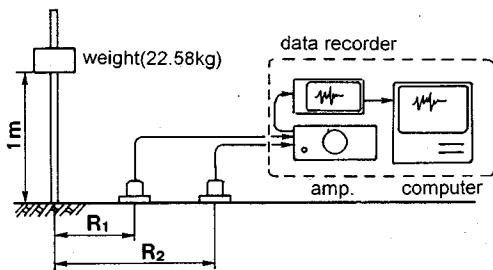


図-1 重錐落下試験システムの概要

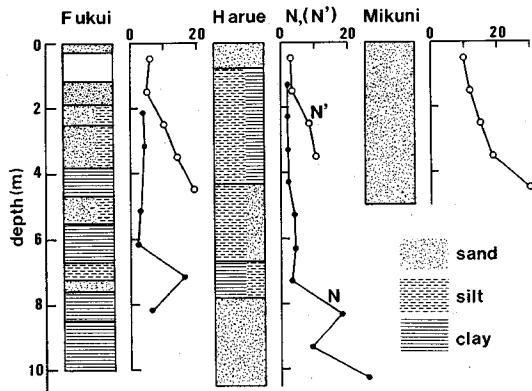


図-2 適用場所の土質柱状図、N値の深度分布

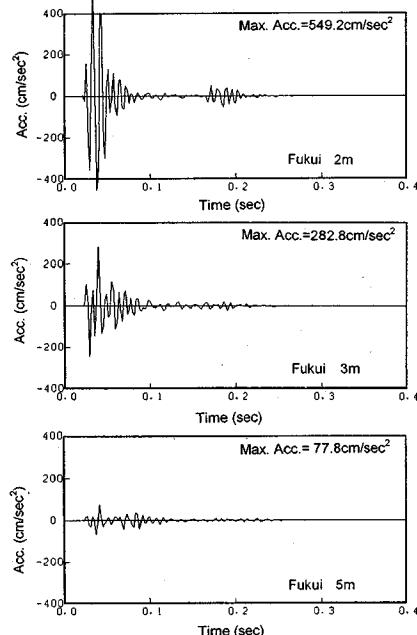


図-3 観測加速度時刻歴 (福井)

と粘性土の薄い層が互層を成した地盤であり、後ほど行われた掘削工事の際に、旧校舎の中梁等の埋設も確認されており、非常に不均一な地盤であるといえる。春江はシルト質粘土と砂からなる比較的単純な地盤であり、三国は均一な砂地盤であるといえる。N値の深度分布において、●は標準貫入試験によるもの、○は

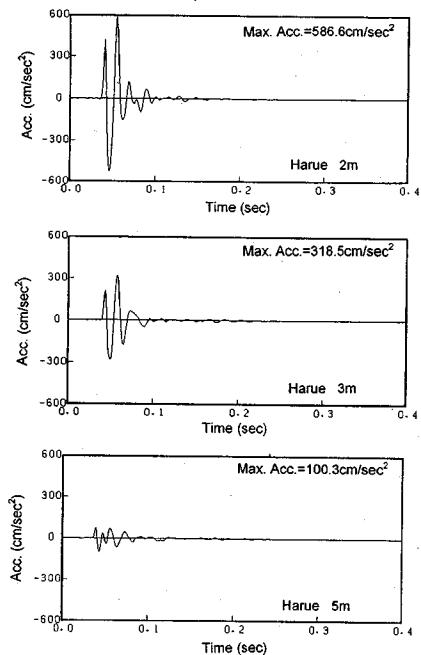


図-4 観測加速度時刻歴 (春江)

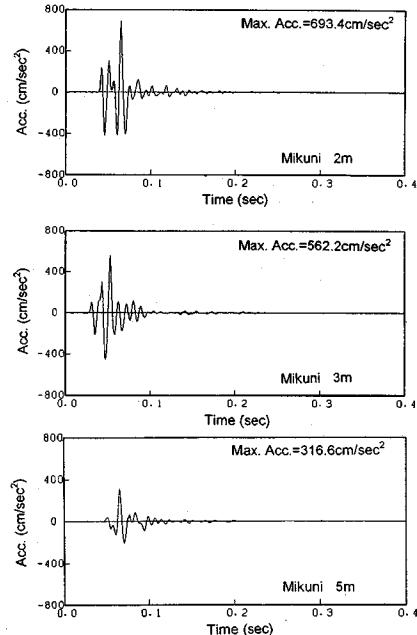


図-5 観測加速度時刻歴 (三国)

簡易貫入試験によるものを示している。簡易貫入試験は、標準貫入試験の補足として実施したものである。

図-3～5は3つの観測場所における振動実験の際に記録された鉛直加速度の時刻歴を示す。おもりの落下地点から2m地点の加速度のピークレベルを見ると、福井および春江では550から590galであるのに対し、三国では690galであり、5m地点で比較しても、三国の加速度レベルが相対的に大きいことがわかる。また、

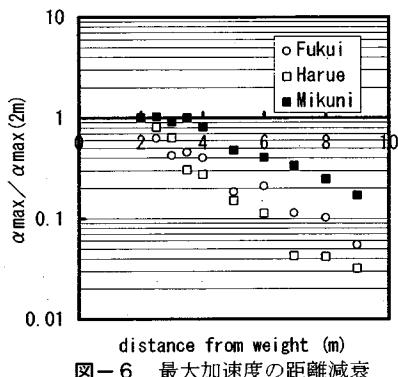


図-6 最大加速度の距離減衰

福井の観測波形が最も短周期成分が強く、以下、春江、三国、春江の順で長周期側に移行している。図-6は各観測場所での観測地点ごとの加速度のピークを、おもりの落下中心から2m地点のピークで規準化した距離減衰を示す。砂質地盤である三国の減衰率が明らかに小さいことが認められる。以上の結果から、振動実験で測定される地表面の鉛直加速度は、地盤の動的特性を内包したものといえ、このデータを基に地盤の動的特性を推定できる可能性を示すものと考えられる。

3. 逆解析手法の定式化

(1) 動的有限要素法と物性定数

動的解析手法としては、おもりの落下地点を中心とする軸対称の動的有限要素法を採用し、積分公式としてはWilsonのθ法 ($\theta = 1.37$) を用いた。動的解析プログラムは、著者らが作成したものであり、理論解および重複反射法との比較により、精度を検証している。減衰マトリックス[C]は、Rayleigh減衰を修正した次式を用いて求めた。

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

ここに、[M], [K] : 質量および剛性マトリックス、 ϕ : 減衰の周波数依存性を調整する係数 ($\phi = 0.4$)、 ω_1 : 1次固有振動数を示す。

地盤は線形弾性体と仮定する。この場合動的有限要素解析には、地盤各層のせん断波速度 V_s 、減衰定数 h 、密度 ρ およびボアソン比 ν が必要となる。しかしながら、これら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、コストなどの点で実用的でないため、逆解析問題を簡潔化し、逆解析の対象とするパラメータを少なくする必要がある。密度は事前に比較的精度良く求められ、ボアソン比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した。また、せん断波速度については次式のN値との回帰式を導入し、地盤の不均一性を表わす²⁾

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

ここに、 a , b : 土質特性を表す定数である。今井に

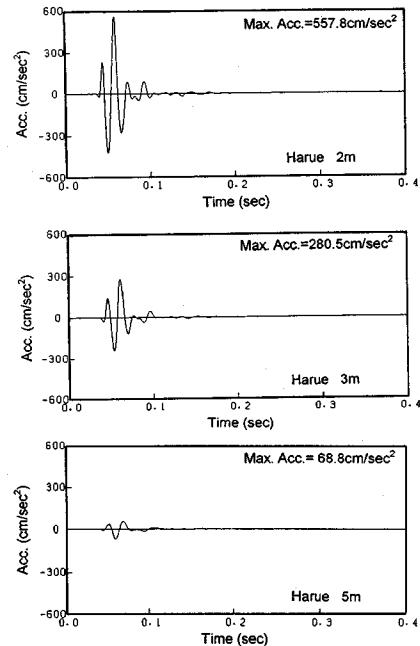


図-7 計算加速度時刻歴(春江)

よると⁵⁾、係数 a は土質によって 81~114、 b は 0.29 から 0.33 とされており、土質による相違は比較的小さい。また本研究では、1~2mごとに得られているN値を現位置の情報のよりどころとしており、砂質土と粘性土層が薄く互層になっている場合は、平均的なN値を表している。このような場合は、 a , b を土質によって変化させる方法は適用しにくい。以上のことから、係数 a , b は土質によらない定数とし、 b をすべての土質に対する回帰式の値である 0.314 に固定し、 a を逆解析の対象とする。一方減衰定数については、剛性係数やせん断波速度と一定の関係が見いだせない⁶⁾こと、土質による変化の幅が比較的小さいことから、地盤全体で 1 個の値を持つとする。なお、境界条件としては、基盤面で完全固定、側方は水平方向固定境界としているため、逆解析される減衰定数には、逸散減衰などの効果が含まれることに注意する必要がある。以上の仮定から、逆解析の対象となるのは、せん断波速度を決定する係数 a ならびに減衰定数 h の 2 個となる。

(2) 逆解析手法

観測加速度と計算加速度の時刻歴の誤差二乗和を直接比較すると、安定性などの面で問題があるため、両加速度の時刻歴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ウインドウによる平滑化を行う。以上より、動的物性定数の逆解析問題は、次式を最小化する式

(2) のパラメータ a ならびに減衰定数 h を探索する最適化問題として定式化できる。

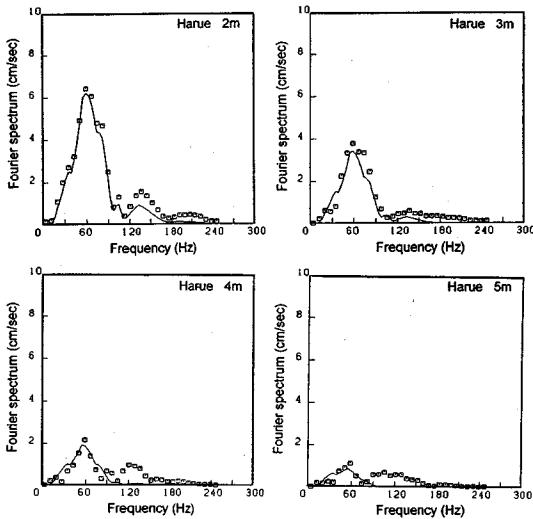


図-8 フーリエスペクトルの比較（春江）

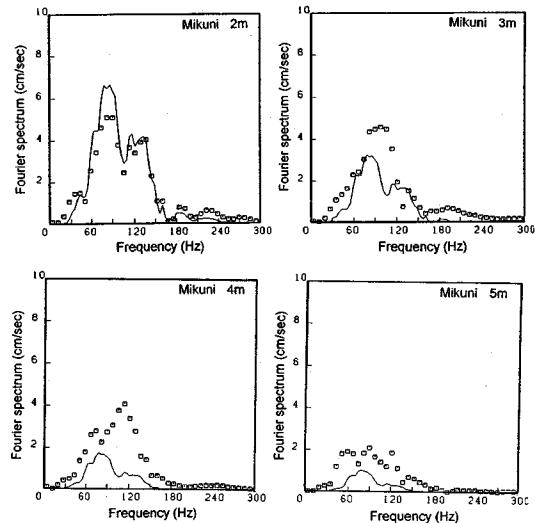


図-10 フーリエスペクトルの比較（三国）

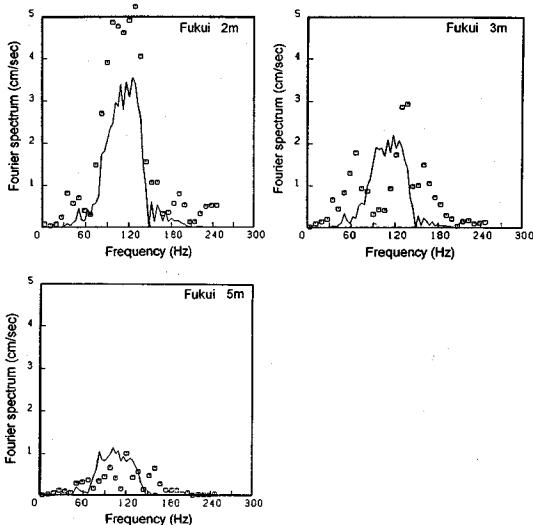


図-9 フーリエスペクトルの比較（福井）

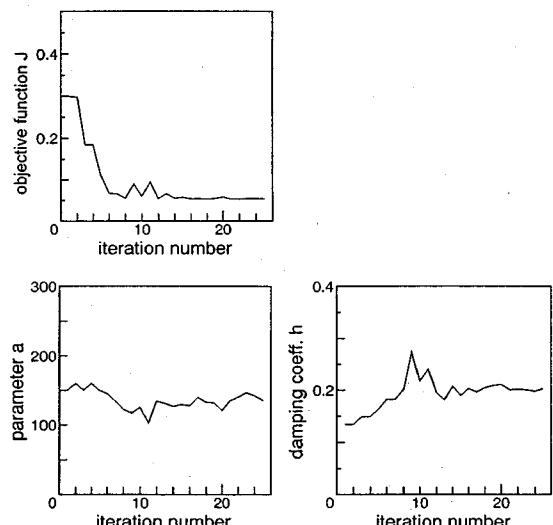


図-11 パラメータの収束状況（春江）

$$J = \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{k=1}^{N_f/2} (x_{ik} - X_{ik})^2 / \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{k=1}^{N_f/2} X_{ik}^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (4)$$

ここで、 J ：目的関数、 X_{ik} ：おもりの落下点から i 番目の距離に設置した加速度計によって計測された、鉛直方向加速度の 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 ：サンプリング数を示す。 J は観測加速度と計算加速度の誤差のパワーハー、観測加速度のパワーで規準化したような意味を持ち、地動の再現性の指標として、異なるレベルの地震に対しても誤差の大きさを相対的に比較する事

ができる。上式は観測時のサンプリング周波数に応じたすべての周波数成分で、スペクトルを比較する場合を示すが、実際には図-8 の□印で示すように、250 Hz 前後を上限とする代表的な周波数成分のみを比較の対象とした。最適パラメータの探索には、パラメータ数が比較的少ないときに有利な Simplex 法⁷⁾ を採用した。なお、おもり自体の加速度レベルは、加速度計の計測範囲を大きく越えていたため、次のような方法で入力荷重を求めた。加速度波形としては 2 m 地点での観測加速度を用いる。これに図-6 の減衰曲線から外挿される、おもりの半径位置の加速度レベルと、おもりの質量を乗じて、おもりの落下による荷重を求めた。

表-1 春江における逆解析結果の一覧

春江		
観測地点	J	a
全観測点	0.054	135.4
2, 3 m	0.021	156.5
4, 5 m	0.313	154.4
7, 9 m	0.293	136.3
		0.20
		0.26
		0.14

4. 逆解析手法の適用結果

(1) 振動特性の再現性

図-7は春江において、表-1に示したすべての観測加速度を与えて逆解析された物性定数による計算加速度の時刻歴を示す。図-8は観測加速度口と計算加速度（実線）のフーリエスペクトルの比較である。図-4と図-7の加速度時刻歴、ならびに図-8の周波数領域における比較から、おもりの落下地点から遠い部分では、計算加速度に高周波部分が若干現われ難い傾向はみられるものの、逆解析された物性定数により、現地盤の振動特性を良好に再現しているといえる。図-9、10は、福井およびの三国の観測データを基に逆解析されたパラメータによる計算加速度と、観測加速度のフーリエスペクトルの比較である。福井および三国では春江に比較して、現場観測結果の再現性に劣る点が見受けられる。この要因として、福井では地盤の構成が複雑であり、かつ旧校舎の地中梁が埋設されているため、軸対称条件が満足されない可能性などが考えられる。三国は均一な砂地盤であるものの、簡易貫入試験によるN値を用いたことがあげられる。図-2のN値の分布において、標準貫入試験と簡易貫入試験結果は、比較的浅い部分では一致しているものの、深さ4m程度になるとロッドの摩擦の影響のためか、簡易貫入試験によるN値が常に大きくなる傾向があり、このことが三国において、落下地点から4mおよび5m地点の再現性の低下につながった可能性がある。

図-11は春江に対する逆解析の際の、目的関数Jならびに各パラメータの収束状況を示す。同図より、せん断波速度を決定するパラメータaと減衰定数hの変化に伴い、誤差を表わす目的関数Jが改善されていることが認められる。同様の傾向は他の場所の逆解析でも同様にみられた。

表-1は春江に対する逆解析結果をまとめたものであり、表中の観測地点の欄は、落下中心より2mから9mまでの地点に設置した加速度計のうち、どの地点の観測加速度を与えて逆解析を行ったかを示している。今井⁵⁾はパラメータaの値を81から114と提案しているが、逆解析された値はそれより20から30%程度大きく、落下点に近い観測データを与えた場合ほど、大きく推定される傾向も見受けられる。一方、減衰定数は、概ね0.2程度に推定されているが、加振点から遠い地

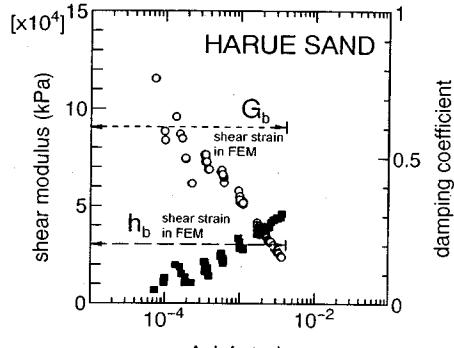


図-12 剛性係数、減衰定数の比較（砂質土）

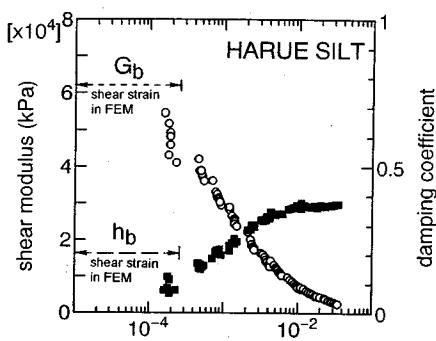


図-13 剛性係数、減衰定数の比較（シルト）

点の観測データを与えた場合には、30%程度小さな値として推定されている。また、目的関数は、加振点から遠い地点の観測値を与えた場合に大きい値に収束している。このことは、提案する逆解析法では、加振点から遠い観測点の振動性状の再現性は、近い部分に比較して相対的に低いことを意味している。以上のような結果が得られた理由として、次のようなことが考えられる。1)おもりの落下に伴う振動の到達性を考慮し、解析領域のうち、深さはN値が急増する10mより浅い層で、また側方は15mに限り、固定境界としたこと。2)地盤のせん断波速度の深さ方向の変化はN値で代表させているのに対し、減衰定数は逸散減衰などの効果も含め全層を通じて1個の値として推定していること。このため、遠距離の観測加速度を用いた場合ほど、逆解析された減衰定数が、より深い地盤、ひいては減衰性の低い地盤の影響を含んでいる可能性がある。3)観測加速度として、加振点から2m以遠のデータを用い、それより外側では非線形挙動が小さいものとして、線形弾性として逆解析を行ったこと。以上のような制約は、逆解析を円滑に行うために導入した仮定ではあるが、本逆解析手法によりどの程度の深さまで探査できるかという問題も含め、今後詳細に検討していく必要があると考えられる。

(2) 振動三軸試験結果との比較

逆解析された物性定数と、振動三軸試験（ステージ載荷試験）結果との比較を行う。図-12, 13は春江の表層砂層ならびにその下のシルト層からサンプリングされた試料に対する振動三軸試験結果を示したものである。砂層については液化窒素を用いた凍結サンプリングにより、シルト層は通常のシンウォールンプラーを用いて資料を採取した。三軸試験機の制約により、 10^{-6} のひずみレベルでの議論はできないが、剛性係数○、減衰定数■のひずみ依存特性は、従来の研究と矛盾のない試験結果が得られていると考えられる。図中の破線の縦軸の値は、逆解析された係数 a と N 値および密度を用いて計算した剛性係数、ならびに逆解析された減衰定数であり、破線は各有限要素のひずみレベルの範囲を示している。図より、逆解析された剛性係数 G は、振動三軸試験による 10^{-4} 程度のひずみレベルの値と対応していることがわかる。定義が異なるため、逆解析された減衰定数と振動三軸試験で求まる減衰定数を直接比較することはできない。しかし、ダムなどの動的解析に際し、逸散減衰の効果として h に 0.15 程度を見込むこと⁸⁾ を考慮して、逆解析された減衰定数を補正してみると、逆解析された減衰定数も、振動三軸試験による 10^{-4} 程度のひずみレベルの減衰定数に近くなるという結果が得られている。

5. あとがき

重錘落下振動実験で観測される地表面の鉛直加速度の時刻歴から、地盤のせん断波速度ならびに減衰定数を推定する逆解析手法を定式化し、いくつかの地盤に適用した結果を検討し、以下の知見を得た。

1) 逆解析された動的物性定数により、地盤の地層構成の比較的単純な場合には、現地盤の動的特性を精度良くシミュレイトできることを確認された。

- 2) 逆解析された剛性係数は、動的有限要素解析における各要素で生じているひずみレベルの範囲で比較した場合、振動三軸試験による値に近い。
- 3) 逆解析された減衰定数は逸散減衰などの効果を含むため、振動三軸試験によるものと比較して若干大目であるが、ほぼ妥当な値が得られている。

以上の知見は地盤条件の極端に異なる 3 つの場所での適用結果によるものであり、今後、多くの場所における現場実験データを蓄積し、逆解析法を適用していく必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) Arai, K., Iida, K. and Konja, A. : A simple back-analysis in a seismic subsoil context, *Soils and Foundations*, Vol. 30, No. 4, pp. 175-182, 1990.
- 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) 辻原治、沢田勉、谷高博：鉛直アレー観測記録による地盤振動特性の同定、構造工学論文集、Vol. 36A, pp. 747-756, 1990.
- 4) 時松孝次、岩崎友洋：鉛直アレー強震記録から推定した地盤の非線形特性の深度分布、第29回土質工学研究発表会概要集、pp. 1127-1128, 1994.
- 5) Imai, T. : P and S wave velocities of the ground in Japan, *Proc. 9th ICSMFE*, 1977.
- 6) 石田勝彦、沢田義博他：地盤の減衰について—最適化手法の適用による Q 値の推定—、地震学会講演予稿集, pp. 149-150, 1984.
- 7) Nelder, J. A. and Mead, R. : A simple method for function minimization, *Computer Journal*, Vol. 7, pp. 308-313, 1965.
- 8) 土木学会編：動的解析と耐震設計、第3巻、技報堂出版、pp. 61-71, 1989.

(1995. 5. 25 受付)

BACK-ANALYSIS OF DYNAMIC SOIL PARAMETERS BASED ON DROPPING WEIGHT VIBRATION TEST

Keisuke KOJIMA, Hideo HONDA, Katsuhiko ARAI and Kouzou ICHINI

This study proposes a back-analysis method in which shear wave velocity and damping coefficient of soil deposit are back-calculated from the vertical accelerations measured in a dropping weight vibration test. In the back-analysis, comparison in frequency domain is made between the vertical acceleration monitored at ground surface and the ones calculated by finite element analysis in time domain. The problem is formulated as an optimization problem to find the dynamic soil parameters which minimize the sum of squares of difference between measured and calculated Fourier spectrum. The method is applied to some actual soil deposits and the result is discussed. When soil deposit is not so complicated, it is shown that the back-analyzed soil parameters duplicate precisely the actual accelerations, and that the back-analyzed soil parameters agrees fairly well with the soil parameters obtained from a conventional dynamic triaxial test.