

(28) 強震記録による深層地盤構造の推定値に対する2・3の考察

徳島大学工学部 正員 ○椎野 彰浩 沢田 勉

1. はじめに

近年の構造物の大型化、長周期化にともない、従来ではあまり考慮されなかつた地震波に含まれる長周期成分表に対する配慮が重要とようになってきている。この長周期成分波は、構造物の支持基礎（以後建設基礎と呼ぶ）より深層の地盤条件の影響を受けるため、建設基礎から基礎岩盤（以後地震基礎と呼ぶ）に至る深層の地盤条件を知る必要性を生じさせた。本研究は、地表で得られた強震記録より、深層の地盤特性値を推定するための簡便な方法を提示するとともに、2・3の解析例により本手法の妥当性を検討するものである。解析方法は、太田⁽¹⁾と同様に重複反射理論および、最適化手法によるものとした。以下、本研究で用いた手法ならびに、その妥当性について述べる。

2. 用いた手法の概要

本研究は、建設基礎から地震基礎に至る深層の地盤構造を推定するものである。ここで、建設基礎で浅い地盤特性値は、標準貫入試験のデータより容易に得られることを考慮して、本手法では既知量とした。以下、手法の概要を、Fig. 1を参考にして説明する。

地表で得られる強震記録は、基礎入射波特性に表層での増幅度特性を加味したものである。この増幅度特性は、特性の異なる層の層厚および、せん断波速度等により変化し、周波数ごとの増幅度を示す周波数伝達関数として表現される。これは、重複反射理論により容易に算出される。いま、基礎入射波の加速度フーリエ振幅が工学的に重要な周波数領域（0.1～10Hz）で一定と考えると⁽²⁾、地表での加速度フーリエスペクトルと地盤の周波数伝達関数の形状は、相似形となる。ここでは、入射波スペクトル振幅がある周波数帯域で一定であると考えているが、この事項については次節で検討する。また、地質学によれば、一般に、表層地盤は地表より沖積層、洪積層、第3紀層および、岩盤（中・古生層）より構成されているとしている。いま、岩盤を地震基礎と考え、建設基礎より上層を沖積層と考えると、建設基礎から地震基礎の間には特性の異なる2層が存在することになる。以下、これらの2層の上層を第1中間層、下層を第2中間層と呼ぶ。以上の情報をもとに、深層の地盤構造を推定する方法を次のように考える。

重複反射理論によれば、地盤の周波数伝達関数 $U(f_k)$, $k=1, \dots, N$ は、地盤特性値（層厚、せん断波速度等） d_j , $j=1, \dots, m$ の関数として表わされる。一方、観測点における複数の強震記録（ N 個）の加速度フーリエスペクトルを $F_{si}(f_k)$, $i=1, \dots, N$ とし、各記録の基礎入射波スペクトル振幅のレベルを一定値 d_{mi} , $i=1, \dots, N$ と仮定する。ここで、フーリエスペクトルと伝達関数の形状の相似性に着目し、両者の相似比を入射波スペクトル振幅レベル d_{mi} と考えると、地盤特性値を決定する問題は、次式に示す残差平方和の最小化問題となる。

$$S_e = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N \{ F_{si}(f_k) / d_{mi} - U(f_k) \}^2 = G(d_1, d_2, \dots, d_m, d_{m+1}, \dots, d_{m+N}) \longrightarrow \text{minimize} \quad (1)$$

$$d_j \geq 0, \quad j=1, \dots, m+N \quad (2)$$

ところで、上式は非線形最適化問題であるので、そのままでは解くことができない。そこで、これを解くために反復線形計画法（SLP法）を用い、最適な深層地盤特性値を決定した。なお、今回推定の対象とした諸量は、各層の層厚および、せん断波速度であり、周波数伝達関数の形状にほとんど関係がないと思われる密度は、既知量として扱い、推定値に与える影響については、次節の計算例で検討した。前述のSLP法は、非線形最適化問題の制約条件および、目的関数を任意の説明変数のまわりにラーラー展開し、説明変数の変化量に関する線形な制約条件および、目的関数を近似し、線形計画法の手法を繰り返して用いることにより最適解を得る方法

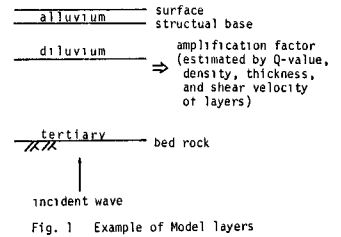


Fig. 1 Example of Model layers

である。いま、式(1)、(2)の d_j に適当な初期値 d_j^0 を与え、初期値のまわりにテーラー展開し、2次以上の微小項を無視することにより線形化すると次式を得る。

$$S_e = G(d_1^0 + \Delta d_1, \dots, d_m^0 + \Delta d_m, \dots, d_{m+n}^0 + \Delta d_{m+n})$$

$$\approx G(d_1^0, d_2^0, \dots, d_{m+n}^0) + \sum_{j=1}^{m+n} \frac{\partial G}{\partial d_j} \Delta d_j \longrightarrow \text{minimize} \quad (3)$$

$$\Delta d_j \geq -d_j^0 \quad j=1, \dots, m+n \quad (4)$$

ニニに、添字⁰は初期値を示す。なお、解の発散を防ぐために *move limit* として次の制約を設ける。

$$\text{move limit} \quad -\gamma d_j^0 \leq \Delta d_j \leq \gamma d_j^0 \quad (5)$$

ただし、 γ は微小な正值であり、ニニでは、 $\gamma = 0.1$ とし、解が振動しはじめると除々に小さくしてゆき、最適解への収束をやめた。ニのように、式(1)、(2)の非線形問題も、式(3)~(5)の線形問題に帰着する。とニニで、非線形問題は、初期値の与え方により異なる解に収束する場合がある。ニは、いわゆる局所的な最適解と全域的な最適解に付随する問題であり、現時点では未だ解決されていない。ニの問題に対して、本研究では数個の初期値の組を与え、それらに対する解より計算される周波数伝達関数と地表の加速度フーリエスペクトルの形状と比較し、適当と思われる解を視察により決定した。

3. 推定手法の妥当性の検討

本手法の妥当性の検討のため、以下の3項目の解析を行った。解析に用いた地点は、深層地盤構造が実測により推定されている川戸老考である。(1)

(1) 基盤入射波スペクトル振幅の一定性が本手法の解析結果に与える影響について

一般に、入射波の加速度フーリエ振幅は、工学的に重要な周波数帯域で、一定と考えられており本手法でも、ニの考えを採用した。しかし、最近の研究において、小林ら⁽³⁾は、入射波スペクトル振幅がマグニチュード、震央距離の影響を受け、周波数とともに若干変動するとしている。ニニを考慮に入れ、入射波スペクトル振幅の一定性が本手法の解析結果に及ぼす影響を以下の3ケースにより検討した。

- Case 1 入射波スペクトル振幅のレベルを対象とする周波数帯域(0.1 ~ 10 Hz)で一定とする。
- Case 2 入射波スペクトル振幅のレベルを高周波数になるにつれて直線的に増大させる。
- Case 3 入射波スペクトル振幅のレベルを高周波数になるにつれて直線的に減少させる。

ニニで、Case 2、3の傾きは、小林らによる基盤での速度応答スペクトルの傾きを参考にし、一律5%とした。Fig. 2に各ケースにおける推定地盤構造を示した。ニの図は、各層の層厚およびせん断波速度を示したもので、深さ方向のせん断波速度の変化を示している。Fig. 2の(1)~(3)の3ケースの推定値(実線)と比較すると各ケースとも実測による地盤構造(点線)とはほぼ一致しており、(1)~(3)各ケース間の推定値もおおむね一致している。ニニとより、入射波スペクトル振幅のレベルが周波数により若干変動しても解析結果にほとんど影響の無いことがわかる。したがって、以下の解析では、入射波スペクトル振幅のレベルを対象とする周波数帯域で一定とした。

(2) 深層地盤構造の推定に与えるQ値の影響について

一般に、地盤の内部減衰特性(Q値)は、その値を推定することが困難であり、深層の地盤構造が既知とされている川戸老考を例にとっても、モデル提案者によりかなり異なる。^{(1),(3)}また、重複反射理論によると、Q値は伝達関数のレベルに大きな影響を与えるが、卓越周期にはほとんど影響を与えない。ニは、卓越周期に影響の大きい深層地盤構造の層厚および、せん断波速度の推定に対して、Q値の与える影響が小さいことを意味している。ニニでは、層厚および、せん断波速度の推定に与えるQ値の影響を、以下の3ケースについて検討した。

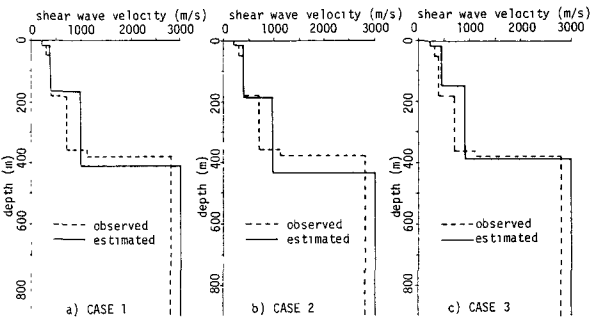


Fig. 2 Shear Wave Velocity of Observed and Estimated Subsurface

- Case 1 深層の2層すなわち、第1中間層、第2中間層のQ値をそれぞれ、10、10とする。
- Case 2 深層の2層すなわち、第1中間層、第2中間層のQ値をそれぞれ、10、100とする。
- Case 3 深層の2層すなわち、第1中間層、第2中間層のQ値をそれぞれ、20、100とする。

ニニで、各ケースのQ値は文献(1)、(3)、(4)を参考に与えた。Fig. 3(a)~(c)に各ケースにおける層厚および、せん断波速度を示した。ニから3ケース間の推定値(実線)と比較すると、おおむね一致しており、深層の層厚および、せん断波速度の推定にQ値がほとんど影響していないことがわかる。したがって、以下の解析では、深層の2層のQ値を20、100とし、定数とした。

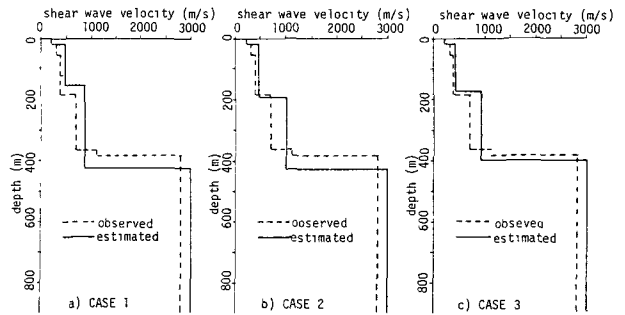


Fig. 3 Shear Wave Velocity of Observed and Estimated Subsurface

(3) 基礎深さ既知の場合の推定精度について

ニニでは、弾性波探査法(反射法)や地質学的な情報等により基礎深さがあらかじめ推定されている場合に、本手法を適用したときの推定精度について述べる。基礎深さが既知であるという制約条件を設けて、八戸港湾の深層地盤構造を推定した結果がFig. 4である。この図によると、層厚および、せん断波速度ともに推定値(実線)と実測値(点線)の差はほとんどなく、それらの誤差は、5%弱である。このことより、基礎深さが既知の場合には、推定精度にかなりの向上がみられ、このような場合に本手法を用いることは、効果的であると考えられる。

以上、深層地盤構造を推定する際に影響を及ぼすであろう項目について検討を加えた。ニからの検討結果より、今回提案した手法は、深層地盤構造の層厚および、せん断波速度を推定するのに、おおむね十分な方法と考えられる。また、基礎深さがあらかじめわかっている場合には、その推定値にかなりの精度向上がみられ、有益な情報が得られると考えられる。

4. 各地の深層地盤構造の推定とその妥当性

ニニでは、3.の検討結果をもとに、港湾技術研究所の観測点(八戸、釧路、鹿島、鹿島事務所、鹿島港、塩釜工場、青森)での深層地盤構造の推定を行い、得られた推定値の妥当性を検討する。

まず、弾性波探査法等により深層の地盤構造の概略がわかっている八戸および、釧路に本手法を適用した結果について述べる。Fig. 5(a)、(b)に両地点で得られた推定地盤構造を示した。この図において点線は実測によるものであり、実線は今回推定したものである。ニニで、釧路の実測値は文献的によった。ニからの図より、両地盤とも実測値と推定値は、おおむね一致していることがわかる。また、基礎深さについてみると、両地盤とも実測と推定による深さの差は、10%程度である。Fig. 6(a)、(b)には、両地点で推定した地盤構造より得られる周波数伝達関数と強震記録の加速度フーリエスペクトルを示した。図中の大線は伝達関数であり、細線はスペクトルである。ニからニ

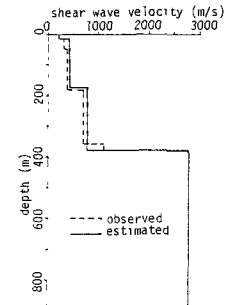


Fig. 4 Shear Wave Velocity of Observed and Estimated Subsurface

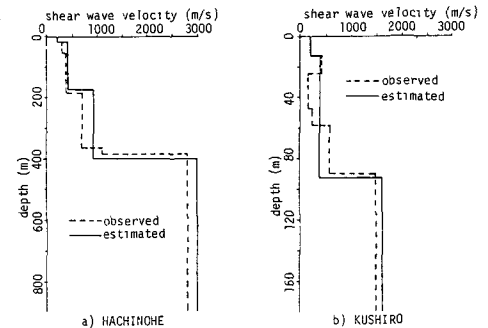


Fig. 5 Shear Wave Velocity of Observed and Estimated Subsurface

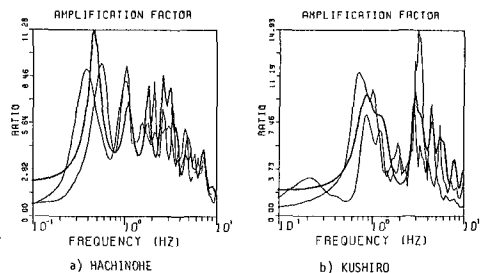


Fig. 6 Amplification Factor of Estimated Subsurface and Fourier Spectra

ると、双方とも伝達関数とスペクトルの形状は、おおむね一致しており、両者の卓越周期もほぼ一致している。以上の結果から、本手法により強震記録のスペクトル特性と相似形の伝達関数とを有する地盤構造が推定でき、得られた推定地盤構造は、実測によるものとはほぼ一致する事がわかった。

次に、鹿島、鹿島事務所、鹿島造函の3地点で得られた記録に本手法を適用した結果について述べる。これらの観測点は、互いに1mあたり数100mしか離れておらず、地質学上の立場から考えれば3つの観測点下には共通の層が存在している可能性はある。このような観測点に立ち、推定した深層地盤構造に検討を加える。Fig. 7(a)~(c)に3観測点で推定した層厚およびせん断波速度を示した。これらの図によると、各観測点下の第1中間層のせん断波速度は、420 m/s、415 m/s、500 m/s

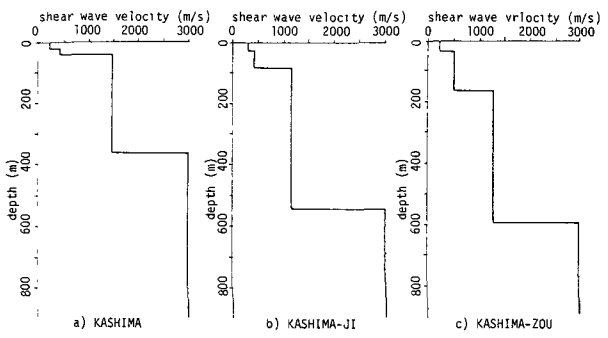


Fig. 7 Shear Wave Velocity of Estimated Subsurface

となり、第2中間層のそれは、1490 m/s、1160 m/s、1280 m/sであり、おおむね一致していることがわかる。また、特に近い地点（鹿島事務所、鹿島造函）での、せん断波速度の差異は、1mあたり10%程度にすぎず、両地点の第2中間層の層厚は、460 m/s、430 m/sでありほとんど差はない。これらの結果は、近接した地点での深層部には、共通の地層が存在している可能性を示しており、上述の推定値は地質学的にみて妥当と考えられる。

最後に、何らかの手法により基盤深さの概略がわかって113地点（塩釜工場および青森）に本手法を適用した結果について述べる。Fig. 8(a), (b)には、両地点で推定した深層地盤構造を示した。文献(6)によると、塩釜工場付近の基盤深さは、およそ200mであるとしている。本手法で推定した塩釜工場での基盤深さは250mであり、おおむね等しい値となっている。また、青森では、同地点での基盤深さが400~600mであるという報告があり(7)本手法で推定した、それは550mであった。

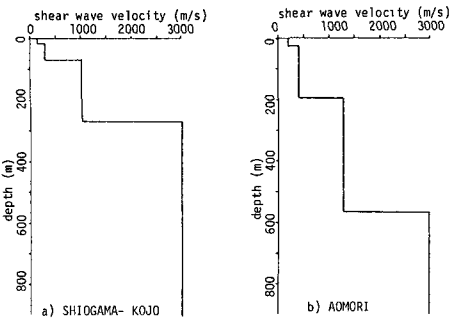


Fig. 8 Shear Wave Velocity of Estimated Subsurface

以上、クケ所の観測点における深層地盤構造の推定値について、実測値との比較、地質学的な考察等により、検討を加えた。その結果、本手法により得られた推定値は、おおむね妥当であることがわかった。

5. おわりに

今回提案した手法を用いると、地表の強震記録のみの情報で深層の地盤構造の概略を専門知識なしに容易に推定できる。しかも、これらの推定値は、弾性波探査法等による結果とおおむね一致しており、本手法は、深層地盤構造の推定に簡便で有効な手法と考えられる。また、今回の解析では、おもに深層の層厚および、せん断波速度の推定に重点を置いており、Q値の推定は行っていない。今後、Q値の推定も行える方法を考えるとともに、本手法の応用面について考えてゆきたい。なお、本研究で利用した強震記録は、京都大学工学部 後藤研究室所蔵のものである。記して謝意を表します。

参考文献 (1)太田; 地震工学へ最適化法の適用、建築論文集、第229号、1975 (2)K. Ishida; Study of the Characteristics of Strong Motion Fourier Spectra on Bedrock, 7th. WCEE, 1980, Vol. 2 (3)翠川 小林; 地震動の地震基盤からの入射波スペクトルの性質、建築論文集、第240号、1978 (4)田中、吉沢; 強震動に含まれる地盤特性、第4回日本地震工学シンポジウム (5)神山; 強震記録の波動論的考察、31周年講、1976 (6)土木学会東北支部; 1978年宮城県沖地震調査報告書 (7)鏡味ら; やや長周期微動観測と地震工学への応用、地震、1976