

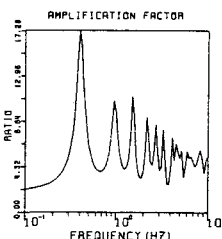
徳島大学工学部・学生員 権野 彰浩

徳島大学工学部 正員 沢田 勉

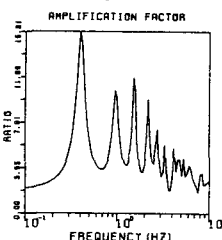
徳島大学工学部 学生員 芳賀 正史

1. はじめに 地震動は震源機構、伝播経路、表層の地盤性状等の影響を受けて複雑に変動する現象である。とくに、表層の地盤条件は地震動特性に大きな影響を与えるため、構造物を建設する際には、その地点の地盤条件を標準貫入試験等により調べ、構造物基礎を支持する層（以後、建設基盤と呼ぶ）を捜さねばならない。近年、構造物の大型化、長周期化にともなう、地震波に含まれる長周期成分が重要になってきた。この長周期成分は、建設基盤から基礎岩盤（以後、地震基盤と呼ぶ）に至る深層の地盤特性の影響をもうけるため、深層の地盤条件を知る必要がある。深層の地盤条件を知るには、深いボーリング調査を行なわねばならないが、多大の経費と労力を必要とするため、国内では数地点（東京、ハブ等）を除いては、そのようなデータは得られていない。本研究の目的は、地表で得られた記録のフーリエスペクトルと重複反射理論による地盤の伝達関数の相似性を用いて、建設基盤以深の地盤条件を推定することにあるが、ここでは、その予備段階として、ある地盤の伝達関数を与え、それに一致する伝達関数を持つような地盤を推定する一手法を提案した。

2. 本研究の概要と定式化 本研究では、次のような仮定を設けた。(1)地震基盤での加速度フーリエスペクトル（以下スペクトルと略す）の振中がある周波数領域で一定であり、表層でのスペクトル形状と地盤の伝達関数は相似形である。この仮定の妥当性は、小林らによる9個所の地震計設置場所における平均的な伝達関数の推定⁽¹⁾および、奥利より求めた伝達関数との比較により検討されている⁽²⁾。(2)地震基盤以浅の地盤を特性の異なる層の地盤（たとえば、沖積層、氷積層、第3紀層）でモデル化する。この仮定の妥当性を検討するため、ハブにおける実際の地盤条件を用いた。Fig. 1、Table 1にハブにおける実際の地盤性状とそれより計算される伝達関数を示している。Fig. 2、Table 2にはそれを3層近似した場合を示している。Fig. 1、Fig. 2を比較すると、伝達関数の形状に差はほとんど見られない。Table 3に地震動の重要な性質の1つである卓越周期を示したが、これに関してほぼ一致している。(3)1層目の地盤性状（層厚、S波速度、減衰に関する定数）は、標準貫入試験のデータより求められる値を用いる。(4)地震基盤のS波速度は3 Km/sとする。以上のような仮定のもとに、地表でのスペクトル（ここでは、モデル地盤の伝達関数を与えるものとする）に一致するような伝達関数を持つ、第2層、第3層の地盤特性値（層厚、S波速度、Q値）を次のような手法により推定する。すなわち、地表でのスペクトルを伝達関数で除した値を地震基盤でのスペクトルとし、そのスペクトルが工学的に重要な周波数領域（0.1～10 Hz）において一定値になるように第2層、第3層の地盤性状を決定する。他方、地表でのスペクトル形状を考えた場合、その振中がピーク値となる周期（地盤の卓越周期）が重要となるので、地表のスペクトルと伝達関数の卓越周期が一致する必要がある。ここでは、長周期側より数個の卓越周期を取り出して地表でのスペクトルと求める伝達関数のそれと一致するという制約を設けた。地盤伝達関数は、地盤性状の関数であるので次のように示すことができる。



1 2層よりなるハブ地盤より
得られる周波数応答関数
Fig. 1



3層地盤近似のとき得ら
れる周波数応答関数
Fig. 2

Table 1

D	Vs	H	Q
1	11.8	107	2.0
2	11.8	176	2.0
3	11.9	201	2.5
4	11.9	193	2.5
5	11.7	239	6.5
6	11.7	234	6.5
7	11.8	248	10.0
8	11.8	309	8.0
9	11.8	378	10.0
10	11.7	379	130.0
11	2.0	690	180.0
12	2.1	1100	20.0
13	2.5	3000	-
			200

1 2層地盤構造

D : 密度
H : 層厚
V : せん断波速度
Q : 減衰を考慮する定数

Table 2

D	Vs	H	Q
1	11.8	220	30.0
2	11.9	380	150.0
3	2.0	730	200.0
4	2.5	3000	-
			100

3層地盤構造

Table 3

	TG1	TG2	TG3	TG4
12L	2.512	1.047	0.661	0.457
4L	2.484	1.031	0.648	0.457

1 2層と3層近似のものより
得られる卓越周期の相違

$A(f) = g(f, x_1, x_2, \dots, x_n)$ —— (1) ただし A は各周波数における伝達関数の値で $x_1 \sim x_n$ は地盤特性を表す変数で、層厚 (H)、 S 波速度 (V)、減衰に関する定数 (Q) である。一方、地表でのスペクトルを $F_s(f)$ とすると、地震基盤でのスペクトル $B(f)$ は次式で示される。 $B(f) = F_s(f)/A(f)$ —— (2) この $B(f)$ が対象とする周波数領域で一定であるためには、 $F_s(f)/A(f) \approx \bar{b}$ —— (3) という関係が成立しなければならない。式(1)において、 x_i に適当な値を選ばず式(3)は近似的に満足される。式(3)を近似的に満足するような x_i を求めるには、 $\bar{b}$ と $F_s(f)/A(f)$ の自乗誤差を最小にするという基準で選ぶ。ここで $\bar{b}$ は近似的に、対象とする全ての周波数領域での $F_s(f)/A(f)$ の平均値とする。したがって、モデルの定数 x_i を決定する問題は次式で与えられる。

$$S_e = \sum \{ F_s(f)/A(f) - \bar{b} \}^2 = G\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \longrightarrow \min \quad (4)$$

制約条件 $x_i \geq 0, (1-\gamma)T_{gi} \leq \tilde{T}_{gi} \leq (1+\gamma)T_{gi} \quad (5)$

ここで T_{gi} はスペクトルの卓越周期、 $\tilde{T}_{gi}$ は伝達関数の卓越周期であり、 γ は卓越周期の推定値 $\tilde{T}_{gi}$ に上下限を設けるために導入した定数で微小な値とする。この問題は式(4)の制約条件のもとに式(4)を最小にする最適化問題となる。この式(4)への解法には反復線形計画法を用いる。まず、 x_i の初期値として $x_i^{(0)}$ を与え、式(4)への初期値のまわりにテラー展開し、2次以上の微小項を無視すると次式のようになる。

$$S_e = G(X_i^{(0)} + \Delta X_i) = G(X_i^{(0)}) + \sum \frac{\partial G}{\partial X_i} \Delta X_i \longrightarrow \min \quad (6)$$

制約条件 $(1-\gamma)T_{gi} \leq \tilde{T}_{gi}(X_i^{(0)} + \Delta X_i) + \sum \frac{\partial \tilde{T}_{gi}}{\partial X_i} \Delta X_i \leq (1+\gamma)T_{gi} \quad (7)$

式(7)の制約のもとに式(6)の目的関数を最小にする ΔX_i を求めるが、解の発散を防ぐために次の制約が必要となる。

move limit $-\gamma X_i^{(0)} \leq \Delta X_i \leq \gamma X_i^{(0)} \quad (8)$

以上のようにすると、この問題は式(7)~(8)の制約条件のもとに式(6)の目的関数 S_e を最小にする変数 ΔX_i を求める線形計画問題となるから、LPの手法をくり返し用いることにより解くことができる。

3. 計算結果 この手法の妥当性の検討のために次のような計算を試みた。

地表でのスペクトルの代わりに任意の地盤モデルを設定し、その地盤性状より計算される伝達関数を地表のスペクトルとする。このスペクトルと相似形となる伝達関数を持つ地盤性状を、本手法により推定する。以下に計算結果を示す。モデル地盤としては、Table 2 の18層3層モデルを用いた。初期値として1層目の地盤性状は上述のとおり標準貫入試験による値を用い既知とした。2, 3層目の地盤性状はTable 4のように設定した。これは一般に深層ほど S 波速度は大きいと考え、密度、 Q 値に関しては文献(3)などのデータにより与えたものである。これらの初期値による最適解をTable 5、Table 6に示す。これらの表より最適解が複数個存在する場合がある。これは、この種の非線形最適化問題には、局所的な最適解がいくつか存在するためである。このような場合、いくつかの初期値より出発し、それらのうちで自乗誤差が最小なものを選択すればよい。したがって、このモデル地盤に対する最適解はTable 6のNo. 2となり、Table 2のモデル地盤とはほぼ同程度の地盤が推定できた。

4. まとめ 今回はモデル地盤を想定して、本手法の妥当性の検討を行い、ほぼ妥当な結果となった。現在、表層での観測より得られる記録のスペクトルを用い、地盤性状を推定することを考えている。

5. 参考文献 (1) 小林・長橋; 地表で観測された地震動の周期特性から求めた地盤の増幅特性と地震基盤における地震動の性質 日本建築学会論文報告集 No. 240 (2) 小林・翠川; 地震動の地震基盤からの入射スペクトルの性質 同 No. 273 (3) 土木学会東北支部; 1978年宮城県沖地震調査報告書(第2章 地震)

Table 4

層番号	密度 D	減衰定数 Q	せん断波速度 V	層厚 H
1	既知量	既知量	既知量	既知量
2	1.9	30	500	$H_2 = T_2 \times V_2 / 4$
3	2.0	100	1000	$H_3 = T_3 \times V_3 / 4$
基盤	2.5	200	3000	—

Table 5

初期値設定による収束性および収束値

T_2/T_1	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
0.5	—	—	—	No. 1	No. 1	—
1.0	—	—	No. 2	No. 1	—	—
1.5	—	No. 2	No. 2	—	—	—
2.0	No. 2	No. 2	—	—	—	—
3.0	—	—	—	—	—	—
5.0	—	—	—	—	—	—

— は解ないものを示す。

Table 6

No. 1			No. 2		
	H	V		H	V
1	30	220	1	30	220
2	54	370	2	170	420
3	430	820	3	220	810
4	—	3000	4	—	3000
S.ERROR = 2.45			S.ERROR = 0.139		