

I-324 不整形地盤における周波数応答のモード展開手法

佐藤工業(株) 正会員 秋山伸一
東京理科大 正会員 東平光生

1. はじめに

不整形地盤の地震動特性を調べる上で地震応答を構成する波動を識別することは重要である。地震応答を構成する波動は一般的に水平方向の伝播速度が各々異なる。このため時間領域の応答を見ると、各々の波動は異なる時刻に現れ、視覚的な波動の識別が可能となる。こうした理由から、最近では時間領域の波動解析によって不整形地盤の地震動特性を明らかにしようとする研究¹⁾が盛んに行われている。一方、周波数領域の応答からは視覚的な波動の識別は困難である。しかしながら、周波数応答による識別が可能となれば、時間領域の解析と比べて、より効率的に不整形地盤の地震動特性を評価できることが期待される。ここでは、周波数領域における地表面応答をモード展開することによって波動を識別する方法を提案し、その有効性について述べる。

2. モード展開手法

ここに示す手法は波動解析から得られる地表面変位応答とその波数スペクトルを用いて卓越する波数成分およびそれに対応する波動の振幅を求めるものである。ここではこうした波数成分や振幅を求める操作をモード展開と呼ぶことにする。まず、地表面変位応答はモード展開することによって、次式で表される。

$$u(x) = \sum_j A_j \exp(-i \xi_j x) \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \xi_j = k_j (1 - i h_j)$$

ここに、 $u(x)$ は波動解析から得られる地表面変位応答、 x は地表面座標、 i は虚数単位を示す。また A_j 、 k_j 、 h_j は各々 j 次モードの振幅、波数および減衰定数を示す。式(1)に示した A_j 、 ξ_j は未知量であるから、これらの未知量を求めることによってモードが決定される。そこで、式(1)を A_j 、 ξ_j の近似値 A_{0j} 、 ξ_{0j} でTaylor展開すると次式が得られる。

$$u(x) - \sum_j [A_j - i(\xi_j - \xi_{0j})x A_{0j}] \exp(-i \xi_{0j} x) = 0 \quad (2)$$

式(2)は A_j 、 ξ_j についての線形方程式であるから最小二乗法によって A_j 、 ξ_j を決定することができる。ただし、 A_j 、 ξ_j を精度良く決定するためには、あらかじめ設定される近似値 A_{0j} 、 ξ_{0j} が真の値になるべく近いことが要求される。ここではこのような近似値を波数スペクトルを用いて設定する。式(1)に対する波数スペクトルは次式で表される。

$$U(\xi) = i \sum_j \frac{A_j}{\xi - \xi_j} \quad (3)$$

ここに $U(\xi)$ は $u(x)$ に対する波数スペクトル、 ξ は波数を示す。式(3)では式(1)に示した ξ_j が波数スペクトルの1位の極となっている。東平・大町²⁾に従えばこの極 ξ_j の近傍では次式が成り立つ。

$$(\xi - \xi_j)U(\xi) - i A_j = 0 \quad (\xi \sim \xi_j) \quad (4)$$

式(4)は A_j 、 ξ_j に関する線形方程式であるから、ここでも最小二乗法を用いて A_j 、 ξ_j を決定することができる。ところで、数値解析から得られる変位応答は地表面上有限区間内のものである。したがって、このような応答から求められる波数スペクトルには式(3)に対して誤差が含まれることになる。このような意味において、式(4)から決定される A_j 、 ξ_j は近似値である。

ここで示したモード展開手法には、上記の手順に従って求められた A_j 、 ξ_j の精度が不十分な場合、これらの A_j 、 ξ_j を再び近似値と置き、 A_j 、 ξ_j を求め直すことで精度の向上を計れるといった特長がある。

3. 傾斜層における地表面応答のモード展開

ここでは上記のモード展開手法を用いて傾斜層で発生する回折波の性質について調べてみる。図1に地盤モデルを示す。ここで、 μ と C は地盤のLamé定数とS波速度を示し、 u_0 と L_0 は入射波の振幅と波長を示す。

この地盤に入射角 45° から平面SH波が入射する場合の地表面変位応答をBEMおよびIshii and Ellis³⁾の方法を用いて求める。その結果を図2に示す。ここから両者の結果は大きく異なることがわかる。図3に示すように、Ishii and Ellisの方法では傾斜層および基盤の波動伝播を平面波で表すため、破線で示した不連続面から発生する回折波は含まれない。一方、BEMから求められる応答には回折波も含まれる。したがって、両者の差は回折波の有無によって現れると考えられる。

そこで、BEMの応答からIshii and Ellisの方法による応答を差し引くことによって回折波の応答を求め、この応答に対してモード展開を行う。図4には回折波の応答とモード展開の結果を示す。この結果を見ると、波数スペクトルおよび地表面変位応答において両者の結果はきわめて良く一致している。したがって、モード展開手法を用いると地表面変位応答から精度良く波動を識別できると考えられる。さらに表1にはモード展開によって得られた回折波の波数、振幅および減衰定数を示す。表1から回折波の応答は2種類のモードから成り立つことがわかる。まず次数1のモードは水平方向の位相速度が0.50であり、傾斜層のS波速度に一致することから傾斜層内で発生する回折波成分⁴⁾であると考えられる。一方、次数2のモードは位相速度が0.57であるから基盤で発生した回折波が傾斜層に透過したものと考えられる。傾斜層で発生する回折波は、基盤から透過してくる回折波と比べて、振幅は大きく減衰定数は小さい。

以上のように、モード展開手法を用いることで、傾斜層の周波数応答から回折波の性質を調べることができる。

4. おわりに

ここで示したモード展開手法は周波数領域の地表面応答から精度良く波動を識別できるので、不整形地盤の地震動特性を調べる上で有効な方法であると考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、Bard and Bouchon: The Seismic Responce of Sediment-Filled Valleys, Part I. The Case of SH Waves, BSSA, Vol. 70, 1263-1286, 1980
- 2) 東平・大町: 時間領域FE-BE法を用いた弾性基盤上のフィルダムの振動モード解析手法, 土木学会論文集, 416/1-13, 429-438, 1990
- 3) Ishii and Ellis: Multiple Reflection of Plane SH Waves by a Dipping Layer, BSSA, Vol. 60, 15-28, 1970
- 4) 秋山・吉田: 不整形地盤の地震応答に与える回折波の影響, 第20回地震工学研究発表会, 161-164, 1989

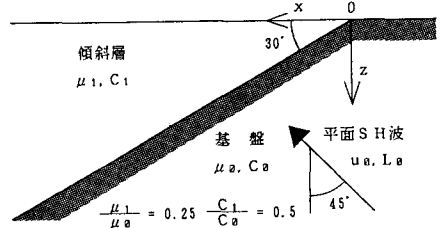


図1 地盤モデル

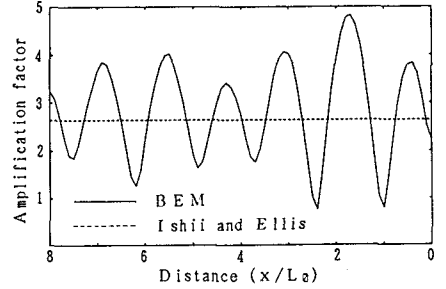


図2 波動解析結果

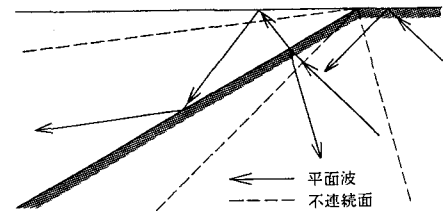


図3 平面SH波の波線図

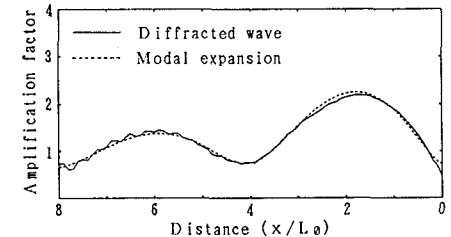
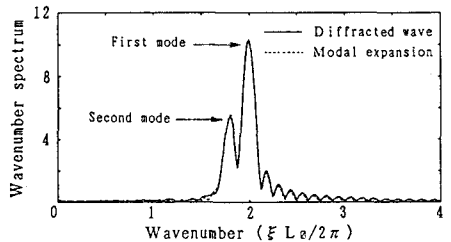


図4 回折波の応答とモード展開の比較

表1 モード展開による結果

次数 j	波数 $\frac{k_j L_0}{2\pi}$	振幅 $\frac{ A_j }{ u_0 }$	減衰定数 h_j (%)
1	2.000	1.787	0.731
2	1.761	1.085	1.725