

I-175 負の群速度の表面波モードについて

東京理科大学 (正) 東平光生

1. はじめに

剛基盤上の表層地盤のRayleigh波のモードの中には、負の群速度を示すものが存在する¹⁾。しかし、このモードの実体についての明確な概念は、十分に把握できていないと言えようである。ここでは、著者が展開してきた薄層要素-離散化波数法²⁾⁻⁴⁾を用いて、負の群速度のモードによる波動について考察を行う。

2. 薄層要素-離散化波数法の概要

薄層要素-離散化波数法の特徴は、波数領域の弾性波動方程式の解を表面波モードの重ね合わせで表現する点にある。そして、この波数領域の解を離散的に重ね合わせることで、弾性波動方程式の解を得る。円筒座標系 (r, θ, z) での3次元弾性方程式の解を、この手法で表現すると次のようになる⁴⁾。

$$\{u(r, \theta, t)\} = \sum_{m=-1}^{+1} \sum_{k_n} \int_{-\infty}^t [H_{k_n}^m(r, \theta)] [V_{k_n}^m] [\Lambda_{k_n}^m(t-\tau)] [V_{k_n}^m]^T \{Q(\tau)\} d\tau \quad (1)$$

ここに、 $\{u(r, \theta, t)\}$ は、薄層要素の境界面の変位をベクトル化したものであり、 t は時間である。また、 k_n は離散化波数、 m は θ に関するFourier級数の次数、 $[V_{k_n}^m]$ はモーダルマトリックス、 $\{Q(\tau)\}$ は、非同次項で、その空間変動はデルタ関数によって記述される特異性を有するものとする。また、 $[H_{k_n}^m(r, \theta)]$ は、解の水平方向の空間変動を記述するマトリックス、 $[\Lambda_{k_n}^m(t-\tau)]$ は表面波モードの時間変動を記述する対角マトリックスである。

式(1)は、表面波モードの重ね合わせで解を表現することから、解の中での表面波モードの役割を調べる上で有用な表現であると言える。

3. 負の群速度モードの検討

式(1)を用いて、負の群速度モードの性質について検討を行う。ここでは、Fig.1に示す解析モデルの衝撃応答解析を式(1)を用いて行う。そして、衝撃応答の中に含まれる負の群速度の波動の影響について調べる。

Fig.1は、剛基盤に水平に堆積した3次元の均質地盤である。表層地盤の層厚は1.0km、せん断波速度は1.0km/s、ポアソン比は1/3、質量密度は $2.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。

Fig.2は、解析モデルを均等に10層に薄層要素分割して固有値解析を行い、Rayleigh波の分散曲線を示したものである。この図は、Rayleigh波の波長と群速度の関係を表し、図中の λ 、 c 、 h はRayleigh波の波長と群速度、ならびに、表層地盤の層厚を示す。これによれば、Rayleigh波のモードのうち、M21波とM22波が、波長の長い領域で負の群速度を示している。

Fig.3は、Fig.2の結果を基に、負の群速度モードによる衝撃応答を見たものである。この波形は、

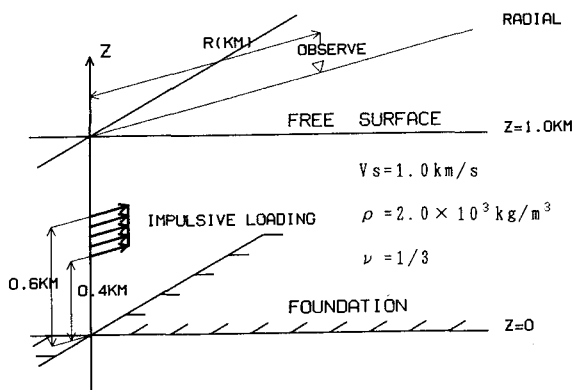


Fig. 1 Analyzed model

式(1)において、M22波のみを考慮し、かつM22波が負の群速度を示す波数領域のみを重ね合わせたものである。また、Fig.3では、破線は振源からの水平距離が4.0kmの波形を、実線が振源からの水平距離が5.0kmの波形を示している。これらの波形は r 方向の地表面上の変位時刻歴である。

この二つの波形は、ある程度時間が経過すると、時間の進行とともに、振幅が増大して行く。そして、波群はあたかも振源の方向へ向かって行くようである。すなわち、ここで示された波動は、負の群速度の波動であると考えられる。この負の群速度の波動は、衝撃力を加えた後、ある程度時間が経過して現れることが注目される。

Fig.3で示された波動が全体の衝撃応答の中で、どの程度の割合であるかを見る。Fig.4は固有値解析で得られるすべての表面波モードを十分広い波数領域で重ね合わせ、衝撃応答を計算したものである。ここでは、表層地盤を10層に薄層要素分割し、離散化波数は14/kmまで重ね合わせている。また、観測点は振源からの水平距離が4.0kmでの地表面である。

Fig.4によると、衝撃応答にはP波やS波の振動と考えられるものがはっきりと現れている。すなわち、遅延条件を満足する波動は、十分広い波数領域で表面波モードを重ね合わせることで得られると考えられる。この変位振幅のオーダーから、負の群速度モードによる衝撃応答の成分は非常に小さいものと考えられる。

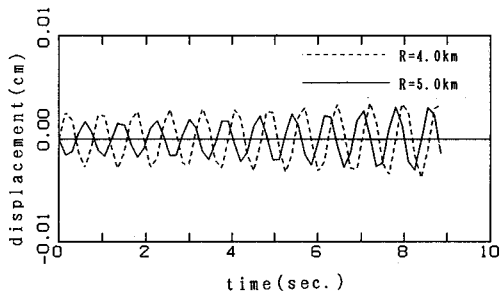
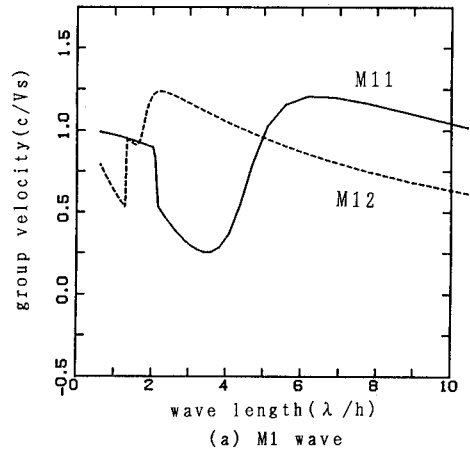


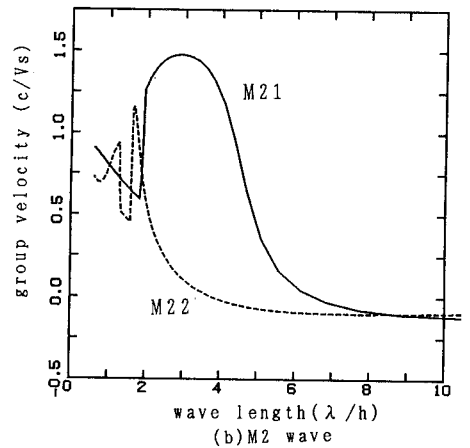
Fig.3 Time history of negative group velocity

4. おわりに

薄層要素-離散化波数法を用いて、負の群速度モードの検討を行った。負の群速度の波動は、衝撃力を与えてから、ある程度時間が経過して現れること、また、これらの波動は衝撃応答全体の中で、ごく小さな割合を示すに過ぎないことが分かった。



(a) M1 wave



(b) M2 wave

Fig.2 Dispersion property of Rayleigh wave

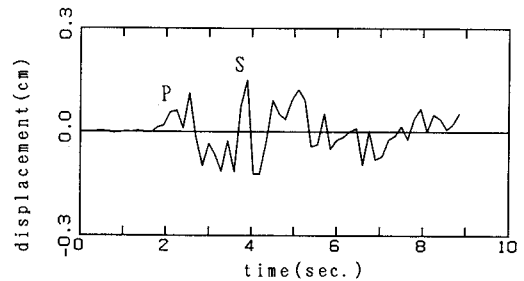


Fig.4 Impulsive response at the surface of the layer

1) Ohmachi, T. and A. Hasumi, Struc. Eng./Earth. Eng., Vol. 1 (proc. JSCE No. 416) pp. 159-167, 1990

2) 東平光生, 土木学会論文集, No. 459, pp. 119-128, 1993

3) 東平光生, 土木学会論文集, No. 463, 1993, 掲載予定

4) 東平光生, 土木学会論文集, 投稿中