

(36) 傾斜基盤上の表層地盤の振動特性解析への 波面追跡手法の適用

東京大学大学院
東京大学生産技術研究所
東京大学生産技術研究所

学生員 ○ 鄭 京 哲
正 員 田村 重四郎
正 員 小長井 一男

1. まえがき

実際の地盤においては 地表層の表面がほぼ水平で その基盤又は設計基盤が複雑に変化しているのが一般的である。このような場合には その地表面における地震動が場所により変化し、局地的特性を持っていることが認められている。このような地形、あるいは地盤構造の性状が地盤の震動応答に及ぼす影響については、差分法、積分方程式の利用、有限要素法などを用いて解析されている。

ここでは 波面の進行を追跡して、地表面における応答を算出する方法を提案し、基盤が傾斜している場合の表面層の振動特性を検討した。波面追跡手法によると 計算が非常に簡単になり、解析対象波形の周波数に係わる計算上の考慮が不要で、また過渡的応答特性を容易に分析することができる。

2. 波面追跡による応答計算法

一つのSHOCKが基盤から表層地盤に入射する場合を考える。表層に入射した波は表層で反射と透過を繰り返して、SHOCKの数が増え、その大きさも変化してくる。個々のSHOCKの大きさの変化は反射率と透過率によって 又伝播の時間は波線を追跡することから簡単に計算できる。そこで観測点に到着したSHOCKを注目すると、当地点におけるSHOCKの時系列が得られる(図-1)。このSHOCKの時系列を用いて、任意の入力に対する観測点における応答が算出できる。このSHOCKの時系列のフリーエ変化を行うことで地盤の伝達関数が簡単に求められる。

$$\begin{aligned} \text{入力: } f(t) \quad \text{応答: } \sum_k A_k * f(t-t_k), \text{ 但し } f(t-t_k) &= \begin{cases} 0 & , t < t_k \\ f(t-t_k) & , t \geq t_k \end{cases} \\ \text{伝達関数: } \sum_k A_k * \text{EXP}(i\omega t_k), \text{ 但し } t_k &= t_k - t_0 \end{aligned}$$

波動の距離減衰は波動の伝播距離を r として $\text{EXP}(-\alpha r)$ で表現する。

境界線に達しない波面が伝播する場合、波面縁端からの回折波の振幅の変化は、差分法による解析結果に基づいて近似することで表現している。

3. 数値計算および考察

まず面外波動(SH波)の場合を考えることにする。

1) 応答の強度特性について

ここでは図-2に示す地盤モデルを用いた数値計算例を紹介する。入力は正弦半波を用いることにした。

a) 基盤を剛体とした場合(ケース1) 地表面における応答変位の計算結果を図-3に示す。その結果によると、表層地盤の縁端の近くでは、間隔の小さいSHOCKが互に重複するため、合成された波形が複雑になり、振幅も大きくならない。縁端から少し離れた領域では、変位の振幅は増加し、その変化も激しい。更に離れた領域では SHOCKの時間間隔が増して、SHOCKは時間軸上で各々独立して現れる。

上の結果から縁端からの距離によるSHOCKの間隔の変化が非常に重要な要素と考えられるので、相隣れるSHOCKの時間間隔が1/4周期となる縁端距離の傾斜角度による変化を図-4に示す。波長で無次元化した縁端距離は勾配が 16° ~ 28° でほぼ一定値をとり、これより緩傾斜でも急傾斜でも大きくなる。

b) 基盤を弾性体とした場合 基盤に入射した波の振幅に対し、これが表層に入射し、表面で反射した後再び基盤で反射した後波の振幅の変化($R*11$)を、表層と基盤のインピーダンス比($V_p/V_B \rho_B$)の関数として図-5に示す。図-6は $V_p/V_B \rho_B$ が0.5と0.3639の場合の地表面の応答変位である。剛体

基盤の場合と比較すると、 $V_p/V_B \rho_B$ が0.5の場合では反射を繰り返した後の波の振幅が小さくなり、 $V_p/V_B \rho_B$ が0.3639のケースでは後続の波は基盤内に完全に逸散し、地表面には現れてこない。

図-7は基盤からの入射角と $R \cdot T_1$ の関係を示している。入射角度によって地表面の変位に大きな影響の現れることがわかる。

2) 応答の周波数特性について

観測地点に到着したSHOCK時系列の結果がわかれば、地盤の伝達関数が得られ、周波数領域での計算が非常に簡単にできる。ここでは、傾斜基盤を有する表層地盤の伝達関数について検討してみる。

$\theta=10$ 度の場合では地表面に到着したSHOCKの数は五つである。この場合の伝達関数を計算すると、図-8のようになる。 $\theta=30$ 度の場合の伝達関数を図-9に示す。また地表面の観測点から基盤までの深さを持つ水平一層の地盤の伝達関数を計算し、傾斜角が10度の場合のそれと比較するものを図-10に示す。横軸は縁端距離 x と表層のせん断波速度 v で無次元化された円振動数であるが、これは同時に波長 L で割った縁端距離の 2π 倍に相当する。傾斜角度10度の場合 $\omega X/V$ が 3.88π , 6.66π のときに、傾斜角度が10度の場合 $\omega X/V$ が 2π , 6π のときに表層の増幅倍率は極大値になる。これは x を当地点の深さで置き換えた場合は、 $\omega D/V$ が、10度、30度それぞれの傾斜角で 0.684π , 1.174π 、および 1.155π , 3.464π で増幅倍率は極大値になることを意味している。平行な表層を仮定した場合には相当する $\omega D/V$ は 0.5π , 1.5π , ...になるが、傾斜角が大きくなるにつれ、この値のずれは大きくなる。

SV波あるいはP波の場合は、SHOCKの時系列はさらに複雑になる。傾斜角度が10度の場合を例にし、SV波が垂直に入射する場合を考える。水平方向と上下方向それぞれのSHOCKの時系列を図-11に示す。正弦一波の入力による変位応答を図-12に示す。その結果から、縁端距離によって水平動と上下動の振幅の大小関係が変化する様子が認められる。

4. まとめ

傾斜基盤を有する表層地盤の地表面の振動特性を波面追跡手法によって解析した。その結果、傾斜基盤の傾斜角度、表層地盤と基盤のインピーダンスの比および波動の入力角度が地盤の動特性に与える影響の大きいことが確認できた。特に表層の縁端から、地表面における応答変位また応答ひずみは増加して行き、最大値をとった後、再び距離より、減少して行くこと、また傾斜基盤上の表層地盤の伝達関数が水平一層のそれになんとも異なることがわかった。

ここで提案した手法はもっと複雑な形状の地盤にも応用できるが、別の機会で紹介するつもりである。

〔参考文献〕

- 1) 波多野匠：地震応答に及ぼす表層地盤の構成の影響に関する基礎的研究，修士論文(1987)
- 2) 岡本舜三：耐震工学，オーム社(1973)
- 3) 佐藤泰夫：弾性波動論，岩波書店(1977)

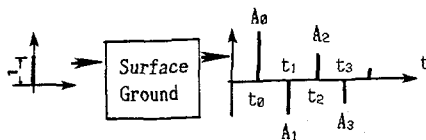


Fig. 1 Calculation of SHOCK Time Series

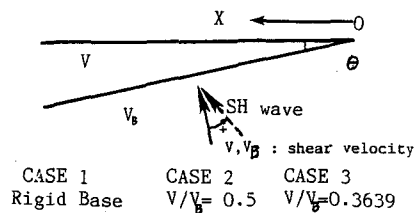


Fig. 2 Ground Model

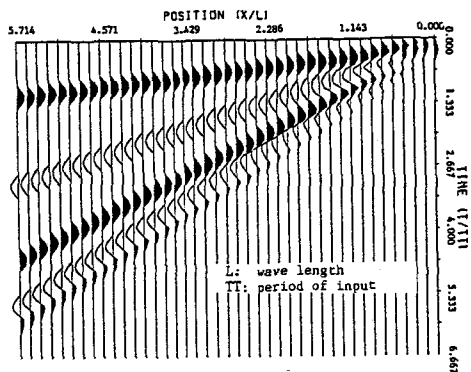


Fig. 3 Displacement Response(case1)

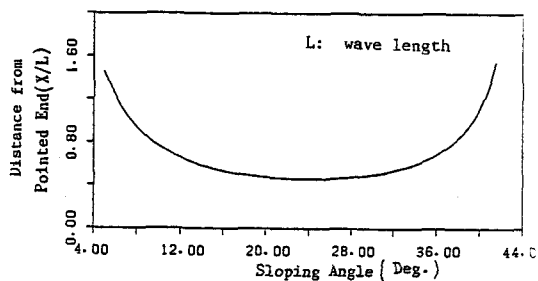


Fig. 4 Relation of Sloping Angle to the Distance from Pointed End when Time Difference between First two Shocks reaches $T/4$.

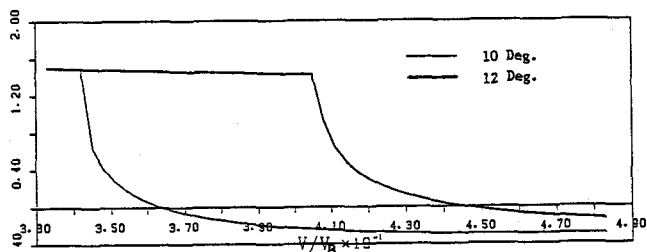


Fig. 5 Relation of Ratio V/V_B to the coefficient $R*Tl$

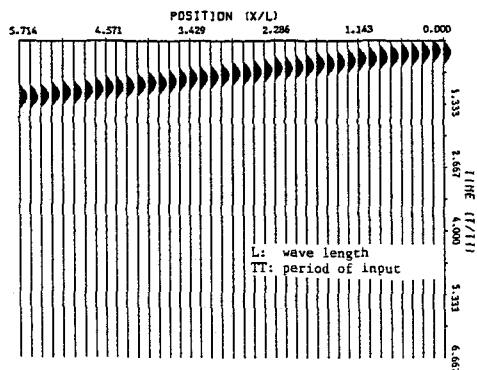


Fig. 6(b) Displacement Response(case3)

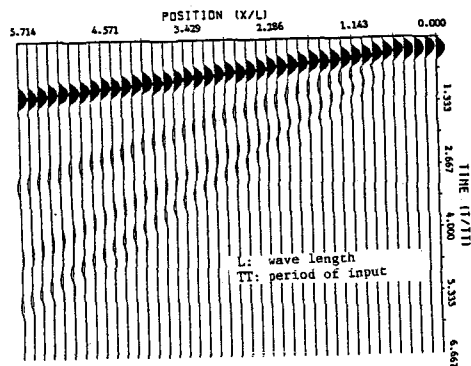


Fig. 6(a) Displacement Response(case2)

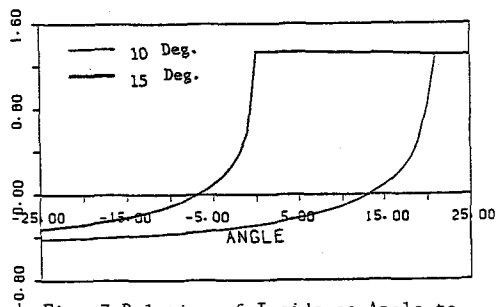


Fig. 7 Relation of Incidence Angle to the coefficient $R*Tl (V/V_B = 0.5)$

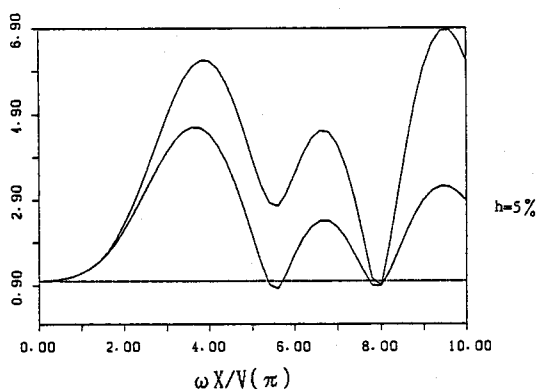


Fig. 8 Transfer Function of Surface with Sloping Rigid Base($\theta=10$)

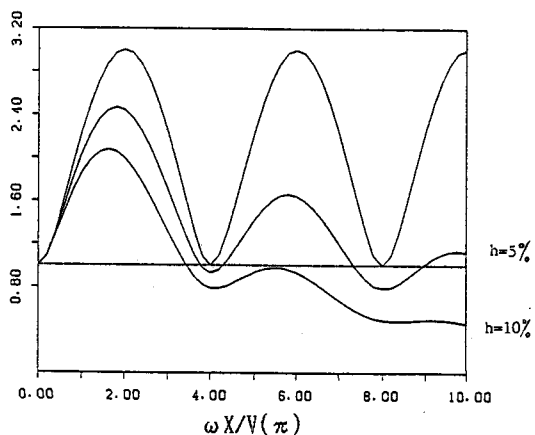


Fig. 9 Transfer Function of Surface with Sloping Rigid Base($\theta=30$)

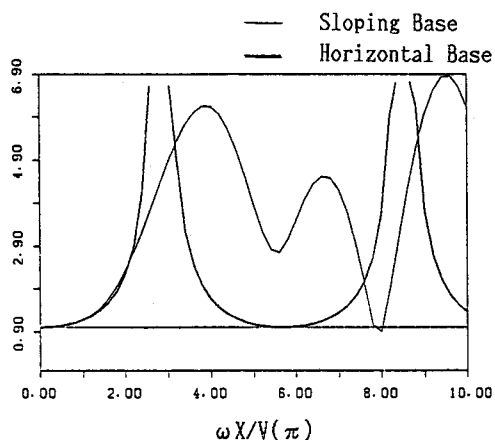


Fig. 10 Comparison of Transfer Function of Surface with Sloping Base and that of Surface with Horizontal Base

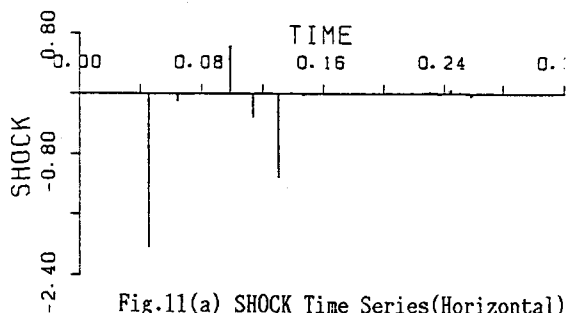


Fig. 11(a) SHOCK Time Series(Horizontal)

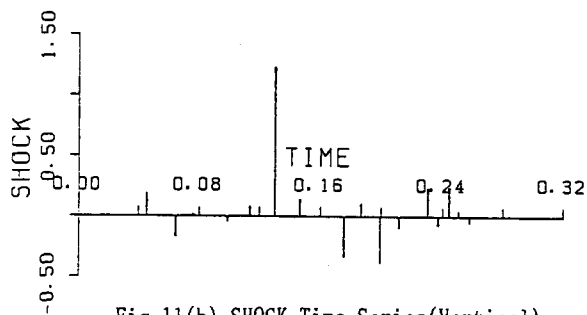


Fig. 11(b) SHOCK Time Series(Vertical)

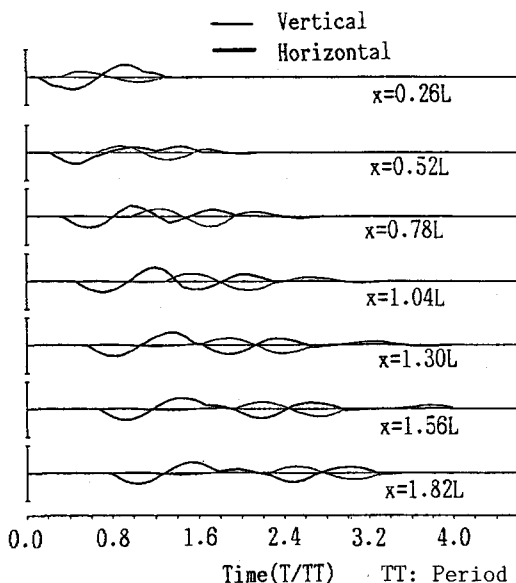


Fig. 12 Waveforms at Surface Level(SV incidence)