

表層地盤内における表面波の重複反射について

東北工業大学 正員 神山 真

1 はじめに

地盤の地震時挙動を論ずるのに実体波の重複反射がよく用いられる。この理論は実際の現象の単なる第1近似であるが、その簡便性のゆえに広く重用されてきた。一方、近年、強震記録の蓄積とともに地震波動の実体論的研究が可能となってきた。その結果、表面波をはじめ重複反射以外の波動の重要性が指摘されるようになってきており、これらの波動による構造物の地震時挙動をなまする気運もできつつある。もし、表面波が強震時の主たる波動であるとするれば、これまでの地盤変動の考え方を再構築する必要が出てくる。

本文は以上のことを考慮して、地盤変動の一つの考え方として表面波の重複反射という現象について理論的に検討を試みたものである。

2 問題の考え方

問題の考え方をより明瞭にするために例に沿って議論をすすめる。図-1は我国でよく見られる沖積平野の断面を模式的に示したものである。これまでの地盤変動の考え方はAで示されるように鉛直下方からの実体波の入射に基づいてなされてきた。

一方、まったく立場を変えて図-1のB方向から表面波が入射

したときはどうか？ この場合、地盤Ⅰから地盤Ⅱへの表面波の入射に伴ない境界1で反射表面波と透過表面波が生じる。しかも、もし地盤Ⅱが地盤Ⅰに比し軟弱であるとき地盤Ⅱへ透過した表面波は著しく増幅を受ける。地盤Ⅱへ透過した表面波は境界2に到達して再び反射、透過を受けることになる。このとき、地盤Ⅱが地盤Ⅲに対して軟弱であると、今度は境界1での反射、透過とは逆に到達した大半のエネルギーが反射表面波に交換される。境界2で反射された表面波は再び境界1の方向へ伝播し、境界1で再度の反射、透過を受ける。このようにして、境界1、2で交互に反射、透過が繰り返されることになる。ここでは、このような現象を表面波の重複反射と呼ぶことにする。ここで、特に耐震工学的に問題となるのは地盤Ⅱが地盤Ⅰ、Ⅲに比し軟弱であるときである。このとき、上述のように著しく増幅を受けた表面波のエネルギーが軟弱地盤内に閉塞され、極度に大きな震動をもたらされることが考えられる。しかも、表面層厚H、長さL、地盤の物性値などが複雑にからみあって、実体波の重複反射では生じ得ない特異な挙動をもたらされることが予想される。

3 問題の数理的処理

図-1のような地盤構造不連続を厳密に考慮して、上述の現象を考察することは困難である。ここでは、必要以上の厳密性より単純化を優先させて、図-1のような地盤構造を図-2のように成層地盤が鉛直不連続面で接する地盤構成に単純化する。さらに、表面波としてLove波を考慮することにする。

いま、図-2のような座標でxの正方向へ伝播するLove波のPモードにおける変位のフーリエ変換 $U(\omega, x, z)$ は次のように表わされる。

$$U(\omega, x, z) = A_p \cdot \phi_p(\omega, z) \cdot \exp(-i k_p \cdot x) \dots (1)$$

ここに、 A_p :振幅係数、 ϕ_p :Pモードの振動形(固有関数)、 k_p :Pモードの波数、 ω :円振動数。

式(1)がLove波の入射波とするとき、不連続面で生じる透過Love波、反射Love波のフーリエ変換は式(1)に透過波の振幅係数 $t(\omega)$ 、反射波の振幅係数 $a(\omega)$ を乗ずることにより表わされる。このときの振幅係数 $t(\omega)$ 、

図-1 地盤構造の模式図

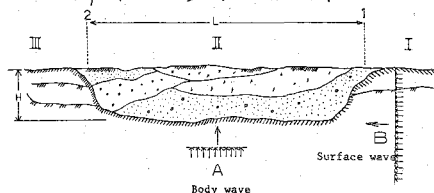
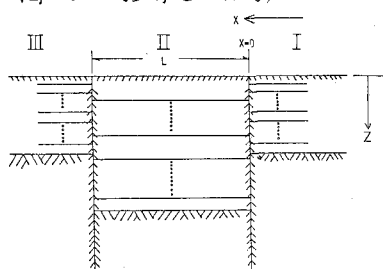


図-2 地盤構造不連続のモデル化



$a(\omega)$ は不連続面での境界条件を適用することにより数値的に求まる。¹⁾以上を発展させると、地盤Ⅱにおいて重複反射する Love 波の素波は形式的に表わすことができる。さらに、この素波を両端における不連続面での反射の時間差を考慮して重ねると重複反射する Love 波の解が求まる。その誘導は煩雑なので省略し、結果のみを示す。図-2で地盤Ⅰ、Ⅱが同一の構成から成ると単純化し、かつモードとして基本モードのみを考えたとき、地盤Ⅱの x における重複反射 Love 波の不規則波 $u(t, x)$ は次のようになる。

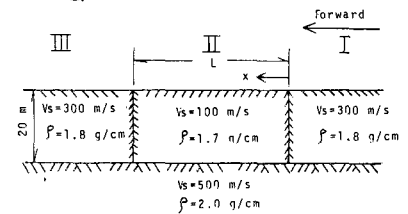
$$u(t, x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\delta(\omega) \cdot \{ e^{-i\omega x} + a(\omega) \cdot e^{i\omega(x+2L)} \}}{1 - a^2(\omega) \cdot e^{-i\omega \cdot 2L}} \cdot F(\omega) \cdot e^{i\omega t} \cdot d\omega \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $F(\omega)$: $x=0$ への入射 Love 波の $7/12$ 変換、 $\delta(\omega)$: 透過 Love 波の振幅係数、 t : 時間、
 $a(\omega)$: 反射 Love 波の振幅係数、 L : 波数。

上式で被積分項における $F(\omega) \cdot e^{i\omega t}$ を除いた項が重複反射 Love 波の周波数応答関数である。

4 Love 波重複反射の計算例

図-3 モデル地盤



ここで、例として図-3の地盤構造についての計算結果を示す。
 図-4は図-3の堅固地盤(Ⅰ)から軟弱地盤(Ⅱ)へ Love 波が入射したときの透過 Love 波の振幅係数 $\delta(\omega)$ を求めた結果である。
 図-5は逆に軟弱地盤(Ⅱ)から堅固地盤(Ⅰ及びⅢ)へ Love 波が入射したときの反射 Love 波の振幅係数 $a(\omega)$ である。図-4、5の結果から、軟弱地盤が堅固地盤に囲まれているとき、著しい増幅を受けると同時に表面波のエネルギーが軟弱地盤内に閉塞されることがわかる。

図-4 振幅係数 $\delta(\omega)$

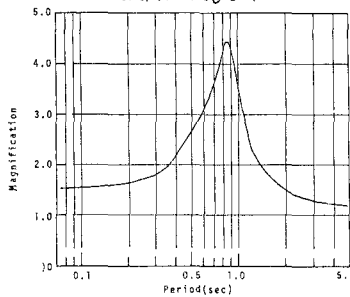


図-5 振幅係数 $a(\omega)$

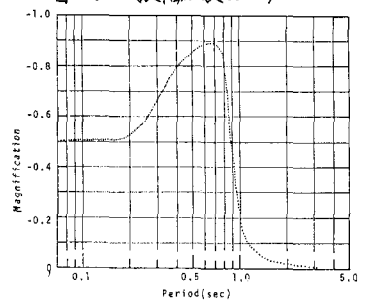


図-6は図-3の地盤構造で $L=700m$ のときの代表的地点 ($x=0m$; $350m$; $700m$) での重複反射 Love 波の周波数応答関数(絶対値)を求めた結果である。各点ごとに大中に特性が変わるとともに、 $x=350m$ (軟弱地盤の中心点)で著しい増幅を受けることがわかる。一方、図-7は $L=1000m$ としたときのものである。
 $L=700m$ と比較すると増幅特性が変わることがわかる。この結果から、表面波の重複反射では軟弱地盤の物性、層厚 H の他に長さ L が重要な役割を演ずることがわかる。即ち、鉛直方向の層構造のみならず、水平方向の広がりも重要な意味をもつことになる。

図-6 Love波重複反射の周波数応答関数 ($L=700m$)

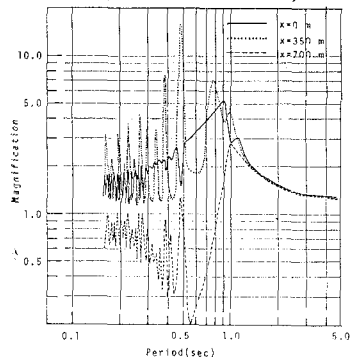
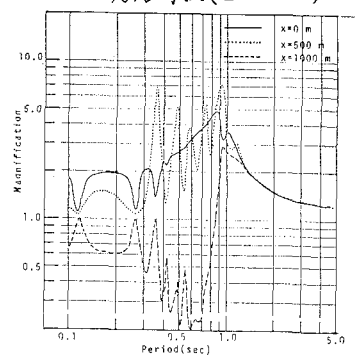


図-7 Love波重複反射の周波数応答関数 ($L=1000m$)



5 おわりに

数値的関係で十分に意を尽せないが、予想に違わず興味をそそる現象がみられる。今後、実際の地盤振動、震害への適用も含めて、さらに検討をすすめた。 (参考文献) 1) 柳山:土木学会論文報告集, 第284号