

非均質波に対する重複反射解析法の適用限界

広島大学工学部 正会員 佐藤 誠
広島市 正会員○重田 光生

1. はじめに

今日では構造物や地盤の動的挙動に関して多くの汎用プログラムが開発され、入力データさえ与えればそれらの応答解析が容易に行われるようになってきている。しかし、数値解析におけるアルゴリズムによつては、必ずしも理論背景をそのまま反映した解が得られるとは限らない。本研究では、Haskell型の重複反射解析法を非均質波に適用する場合に、正解が得られる入射波の振動数に上限があることが判明したので、その振動数範囲と上限を拡大する方法を明らかにする。

2. 非均質波の応答解の性質

Haskell型の重複反射解析法を非均質波に対して適用限界を越えて適用したとき、どのような解が得られ、また、いかなるときに起きるかを、簡単のために半無限2次元モデルについて説明する。

いま、平面SV波が任意の角度 γ で入射する場合を考える。この場合、地表の水平動と上下動の振動数応答関数は入射波の振動数に無関係である。ところで、半無限体に対して重複反射解析法を適用する場合は、入射境界が必要であり、表層（任意層厚）と基盤の層定数が等しい2層地盤と考えることになる。解析モデルを図-1に示す。ここで、 ϕ と ψ はそれぞれP波とSV波のポテンシャル振幅である。

まず弾性媒体として、平面SV波が境界（2）へ入射するときの水平動の振動数応答関数 η_x を図-2に示す。いずれも入射SV波のポテンシャル振幅 ψ_3 を単位として示してある。表層の臨界角は $\gamma_c = 17.5^\circ$ であるからこの角度を越えた入射角 $\gamma = 18^\circ$ において、 η_x は50Hz以上の振動数になると振動を起こし、急激なピークを形成し振動数依存の応答をする。 $\gamma = 40^\circ, 60^\circ$ の場合も同様の現象を示している。また、 $\gamma \leq \gamma_c$ では、振動数によらず理論値に一致した一定値を示すことから、この現象は入射角が臨界角を越えた場合にのみ生じると推定される。

重複反射理論¹⁾において、弾性媒体内に非均質波が存在するとき、P波の伝播角 θ は純虚数となる。いま、 d を層厚、 C_T, C_L をそれぞれSV波およびP波の速度とし、入射波の円振動数 ω に対して $P = \omega d \cos \theta / C_L$ とすると、 ω が増加するとき P も増加するから、伝達行列の要素に含まれている $\cos P$ と $\sin P$ が、 $\omega \geq 1$ のとき

$$\cosh |P| \approx \sinh |P| \quad \text{または} \quad i \cos P \approx \sin P \quad (1)$$

となり、このことが上記の現象の原因であることを示せる。一方、粘弾性媒体内の非均質波の臨界角は特別の入射角でしか存在しないが、P波およびSV波の伝播角は常に複素数であり、臨界角に無関係に式(1)が成立する。

図-1において減衰ファクター $Q_s^{-1} = 0.1$ 、入射角 $\gamma = 60^\circ$ とし、

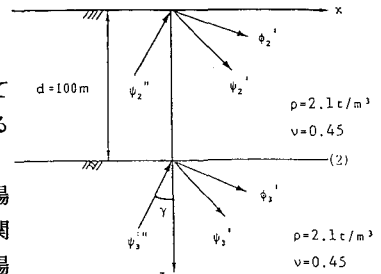


図-1 解析モデル

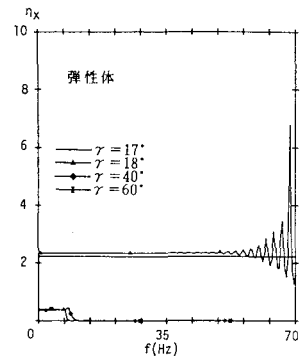


図-2 地表の振動数応答関数

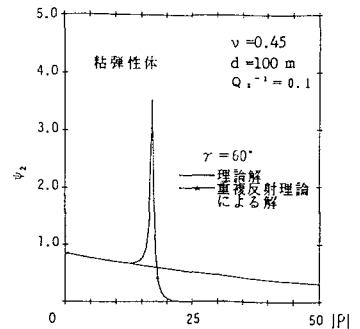


図-3 ポテンシャル振幅 ψ_2'

地表からの反射SV波のポテンシャル振幅 ψ_2' の理論解と数値解をPについて比較して図-3に示す。この場合には、 $|P|=12$ 付近から重複反射解析による解は理論解と異なることがわかる。

3. 層分割法

入射波の振動数 ω が小さくPの小さい領域では、演算上式(1)と判定されないから数値解で正解が得られる。したがって、 ω が増加したときPの増加を制限するためには、層厚dを小さくする以外に、図-4のように解析対象とする層を分割する。理論的には分割する層厚は任意であるが、ここでは等分割の場合を考える。

上述の半無限粘弾性体に対して層分割を行なった場合の、 ψ_2' を分割数(0, 2, 4, 10等分割)とPについて図-5に示す。これにより、分割数が増すと、正解を取り得るPの範囲が増加することがわかる。紙面の都合上ここでは示さないが、弾性、粘弾性媒体とも100等分割まで行った。正解が得られるPの範囲には上限があり、最も少ない分割数でPの上限に達する最適分割数は6等分割であることがわかった。また、分割を行うと分割しない場合と比較して、弾性、粘弾性体とも最も上限の低い場合の $\gamma=90^\circ$ に対して、正解が得られるPの範囲は弾性体では約3倍、粘弾性体では約3.5倍に増加する。

4. 検証例

ここでは、従来の解析で原因不明の解析困難な結果を生じた粘弾性モデル(図-6)に対して、上記の層分割法を適用して得られた最大応答曲線²⁾を図-7に示す。層分割を行わない場合には、臨界角とは無関係の入射角 $\gamma=48^\circ$ で卓越した応答が生じている。一方、この地盤に対して層分割法を行うと、 $\gamma=48^\circ$ での卓越した応答が現れていない。これより、問題にしている応答は円振動数 ω が重複反射解析の解析限界を越えていたために生じたことが判明した。

5. まとめ

以上の結果より、(1)非均質波に対して重複反射解析法の解析振動数に上限があること、(2)正解が得られる振動数領域を層分割法により増加させることができる。なお、ここではPに注目した場合を述べたが、弾性SV波の伝播角 γ が純虚数になる場合と、粘弾性体の場合には、Pと同じ意味を持つ $Q (= \omega d \cos \gamma / C_T)$ にも注目する必要がある。そのときには、両者のうちP、Qの虚部の大きい方で判定すればよい。

参考文献

- 1) 佐藤 誠: 平行多層地盤に対する調和SV波の伝播解析, 土木学会論文報告集, 第328/I-8, pp. 377~386, 1987.
- 2) 佐藤 他: 非均質波動による粘弾性地盤の臨界角と最大応答, 広大工学部研究報告, 38, 1, pp. 51~62, 1989.

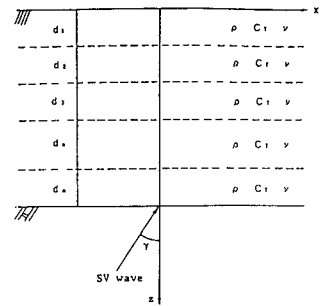


図-4 層分割モデル

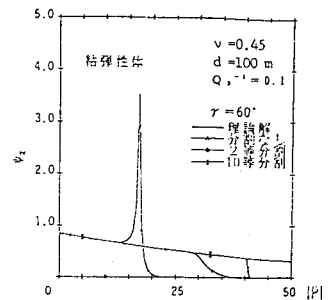


図-5 層分割による ψ_2'

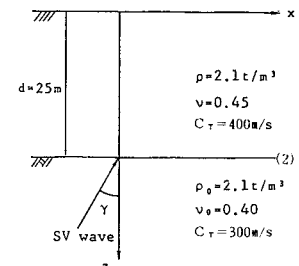


図-6 検証モデル

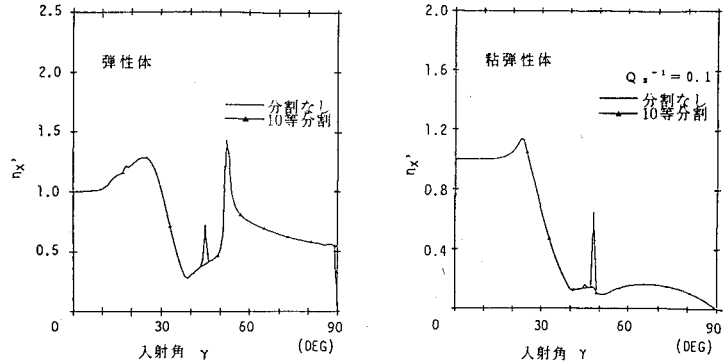


図-7 SV波の入射角 γ と最大応答 $\eta_{x'}$