

SH波入射による地盤応答に対する不整形地表面の影響

宮崎大学大学院
宮崎大学工学部学生員
正員寺本 諭司
原田 隆典

1. まえがき 地盤震動のこれまでの研究の多くは水平成層構造の地盤震動を検討したもので、これによって観測記録を解釈することが多い。したがって、水平成層構造でない、いわゆる不整形な構造の地盤の震動がどのようなかを検討しておくことは必要であり、最近、この種の問題を研究したものも増えてきている。不整形地盤の震動問題は数値解析法と波動方程式の閉じた形式の解を求める解析法の2つに大別できるが、本報告では、いわゆる摂動法による解析解の適用性について境界要素法による数値解析法を用いて検討する。

2. 摂動法に基づく解析解の概要 ここで示す解析解は図1に示すような半無限地盤上に表層地盤が存在する2層地盤で地表面の高さが場所によって異なる不整形地表面を有する場合のものである。もちろん、摂動法に基づく、図1に示す以外の不整形地盤に対しても、また、SH波以外のP-SV波および3次元問題に対しても解析解を導くことができる。図1の不整形地表面における応答変位の第1次近似解は振動数-波数領域で次のように求められる。

$$v^I(\kappa, f) = \left[\frac{p}{\cos \gamma H} \delta(\kappa - \kappa_0) + f(\kappa - \kappa_0) q \gamma_0 \frac{\sin \gamma H}{\cos \gamma_0 \cdot \cos \gamma H} \left(\frac{\kappa \kappa_0 - \kappa_0^2}{\gamma \gamma_0} - \frac{\gamma_0}{\gamma} \right) \right] 2v_{in} \quad (1)$$

ここに

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{\omega}{C_S}\right)^2 - \kappa^2}, \quad \operatorname{Re} \gamma \geq 0, \quad \operatorname{Im} \gamma \geq 0 (e^{-i\omega t}), \quad \operatorname{Im} \gamma \leq 0 (e^{i\omega t}) \quad (2)$$

$$p = \frac{1}{1 + i \frac{\mu \gamma}{\mu_1 \gamma_1} \frac{\sin \gamma_1 H}{\sin \gamma H}}, \quad q = p \frac{1 - i \frac{\mu \gamma}{\mu_1 \gamma_1} \frac{\cos \gamma H}{\sin \gamma_1 H}}{1 + i \frac{\mu \gamma}{\mu_1 \gamma_1} \frac{\sin \gamma_1 H}{\sin \gamma_0 H}} \quad (3)$$

式(1)において、右辺第1項は水平成層地盤の応答を表し、第2項は不整形地表面による散乱波の効果を表す。

3. 直接境界要素法による解析の概要と精度の検証 BEMによる解析の方法は成書に譲り、ここでは、本研究で用いたBEMの精度について検討しておく。図2に示すような半円形の谷または丘を有する地盤に対しては解析解がすでに求められているので、この解析解と本研究で用いたBEMの結果を比較しておく。図3に両者の比較を示すが極めてよい一致が得られ、BEMの精度が確認できたものと思われる。

4. 摂動法による解析解の検証 式(1)は表層地盤の平均深さがHでその変動深さが $f(x)$ で表せるような地盤に対するもので、図2のような地盤に対しても適用できるが、BEMの解が振動数毎の場所 x の関数として応答振幅を与えているので、式(1)とBEMの比較を行うためには式(1)の波数 κ に関するフーリエ変換を数値的に行う必要があり、解析解との直接的な比較ができないので、ここでの比較は図4に示すような正弦波的に変動する地表面を有する地盤に対して比較を行う。SH波は鉛直下方から入射されるものとする、この場合の解は式(1)より

$$v^I(x, f(x)) = \int_{-\infty}^{\infty} v^I(\kappa, f(\kappa)) e^{i\kappa x} d\kappa = [1 + f_0 \frac{(\frac{\omega}{C_S})^2}{\sqrt{(\kappa^*)^2 - (\frac{\omega}{C_S})^2}} \cos \kappa^* x] 2v_{in} \quad (4)$$

ここに、式(4)の右辺第2項の正負は式(2)の定義と同じである。また、 f_0 は不整形地表面の振幅を表し、 κ^* は不整形地表面の水平方向の波数を表す。水平成層地盤の場合には、 $f_0 = 0$ であるから地表面の応答は場所 x に依存する事なくどこでも $2v_{in}$ となる。摂動法では、散乱波動の第1次近似解を採用しているので、場所 x の変動としては不整形地盤の変動と同じく $\cos \kappa^* x$ で変動するものとなっている。 $\kappa^* = \omega/C_S$ の条件では、その変動の振幅が無限大となるような解となっているが、実際には、 $\cos \kappa^* x$ 以外の散乱波動も存在しているため、これらの散乱波の効果によって散乱波の振幅が無限大となることはあり得ない。事実、BEMによる解析では

そのような現象は認められない。式(4)を改良するために見かけ上、材料減衰定数を導入して、せん断波速度 C_S を次のような複素数とし、 $D = 0.08$ を採用すると、BEMとの一致がよいようである（図5参照）。

$$C_S^* = C_S(1 \pm iD), \quad (e^{\pm i\omega t}), \quad D = 0.08 \quad (5)$$

5. まとめ 摂動法による解析解の適用限界を明らかにしておく必要があるが、これまでの検討により工学的な振動数範囲、地盤条件で、摂動法による解は十分適用できるものと思われる。適用範囲の目安としては、

$$f_0 \leq \alpha\lambda, \quad f_0 \leq \frac{\beta}{4}l, \quad \alpha = 0.1 \sim 0.2, \quad \beta = 0.25 \quad (6)$$

ここに f_0 = 不整形地盤の高さ、 λ = S波の波長、 l = 不整形地盤の最小波長

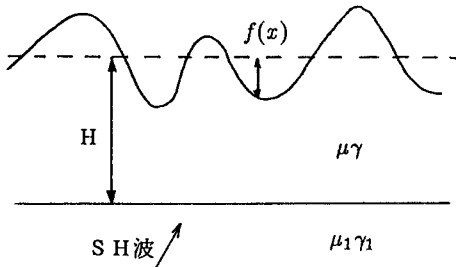


図1 不整形地表面を有する2層地盤

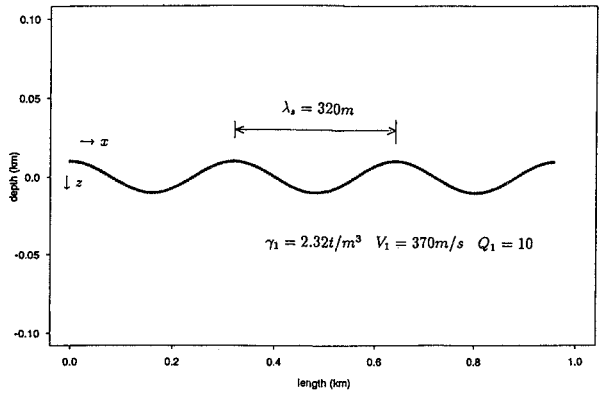


図4 計算例の地盤モデル

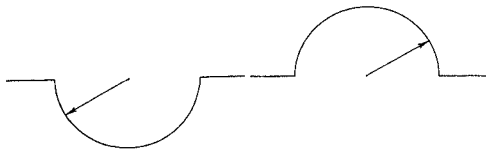


図2 半円形の谷と丘モデル
(厳密解とBEMの比較)

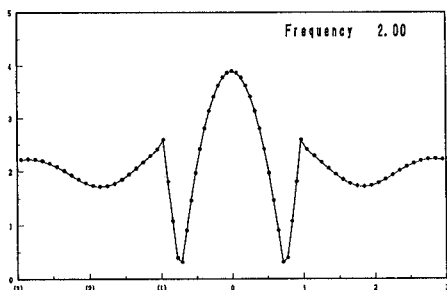
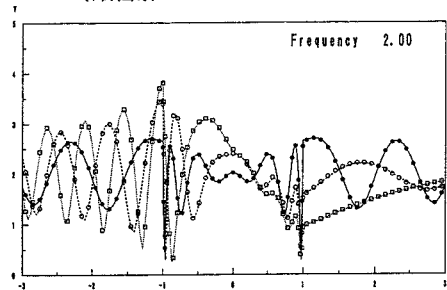
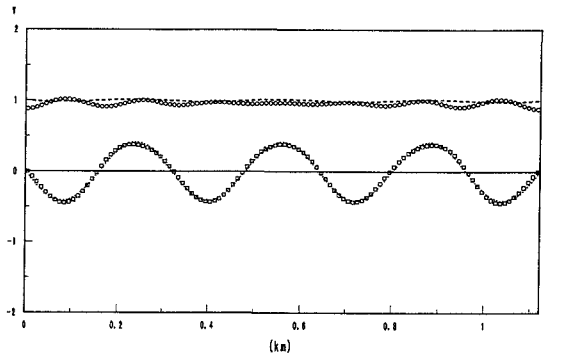


図3 厳密解とBEMの結果との比較



ハ' - タベ - ション実数部 Frequency 2.0
----- Damping 0.08
ハ' - タベ - ション虚数部
.....

BEM実数部

○

BEM虚数部

□

図5 摂動法とBEMの結果の比較