

Chapter 4

部分分割法と境界要素法による不整形地盤の応答解析

4.1 部分分割法と境界要素法による不整形地盤の応答解析の要約

4.1.1 まえがき

S波速度 3-4km/s 程度の地震基盤から S波速度 0.5-1km/s 程度の工学基盤までの深層地盤における地震波の増幅特性、および工学基盤から地表面までの浅層地盤の増幅特性は、地表面における地震動に影響する。そこで、これら2つの増幅特性を評価する方法として、厳密な方法および水平成層地盤と不整形多層地盤に適用できる近似的な方法を提案し、その適用限界を明らかにしたのでその概要を述べる。

4.1.2 近似的な部分分割法の概要とその適用限界の検証

図 4.1-1(a) のように半無限地盤上における 2 層の水平成層地盤が入射波を受ける場合の応答変位 $\mathbf{u}(z_m)$ は、次式の剛性方程式から厳密に計算される。ここに、 $\mathbf{u}_{free}(z_2)$ は、入射波を受ける半無限地盤の地表面での変位、 \mathbf{K}_{Half} は半無限地盤の剛性マトリックスを表す。また、 \mathbf{K}_{ij}^m は第 m 層の要素剛性マトリックスを表わす。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11}^1 & \mathbf{K}_{12}^1 & 0 \\ \mathbf{K}_{21}^1 & \mathbf{K}_{22}^1 + \mathbf{K}_{11}^2 & \mathbf{K}_{12}^2 \\ 0 & \mathbf{K}_{21}^2 & \mathbf{K}_{22}^2 + \mathbf{K}_{Half} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}(z_0) \\ \mathbf{u}(z_1) \\ \mathbf{u}(z_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{Half} \mathbf{u}_{free}(z_2) \end{pmatrix} \quad (4.1-1)$$

部分分割法を使うと、式 (4.1-1) を境界 $z = z_1$ で 2 つの地盤に分割して解析することができる。しかし、厳密な部分分割法では、境界 $z = z_1$ を自由地盤としたときの z_1 以深の

地盤における剛性マトリックスを新たに計算する必要が生じる。これを避けるため、境界 $z = z_1$ 以深の地盤を半無限地盤と近似するものとした。したがって、近似部分分割は次のようになる。図 4.1-1(a) の地盤を $z = z_1$ の境界で (b),(c) の 2 つの地盤に分けて、次式の剛性方程式から応答を計算する。ここに、 \mathbf{K}_r は図 4.1-1 の (b) 地盤の第 2 層を半無限地盤と仮定したときの剛性マトリックスを、 $\mathbf{u}_{free}(z_1)$ は (c) 地盤の地表面変位を表わす。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11}^1 & \mathbf{K}_{12}^1 \\ \mathbf{K}_{21}^1 & \mathbf{K}_{22}^1 + \mathbf{K}_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}(z_0) \\ \mathbf{u}(z_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_r \mathbf{u}_{free}(z_1) \end{pmatrix} \quad (4.1-2)$$

式 (4.1-1) の厳密解と式 (4.1-2) の近似解から得られる単位入射振幅に対する地表面の振動数伝達関数の違いを図 4.1-2 に例示する。厳密解と近似解による伝達関数の違いを式 (4.1-3) で評価し、この誤差が第 1 層と第 2 層のインピーダンス比 P と第 2 層の層厚 d とどのように関係しているかを調べた。ただし、 ρ は密度、 C_s は S 波速度であり、添字 1, 2 は層番号を示す。

$$Error = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (|v_R| - |v_A|)^2}{\sum_{i=1}^n |v_R|^2}} \quad (4.1-3a)$$

$$P = \frac{\rho_2 C_{S2}}{\rho_1 C_{S1}} \quad (4.1-3b)$$

ここに、 v_R は厳密解による振動数伝達関数、 v_A は近似解による振動数伝達関数である。

図 4.1-3 にインピーダンス比 P と誤差パラメータ $Error$ の関係をプロットした。誤差パラメータ $Error$ には、層厚 d よりも、インピーダンス P による影響が大きく、インピーダンス $P \geq 2$ では、 $Error$ は 10% 以下となることがわかった。この図から近似方法の適用性を判断することができよう。

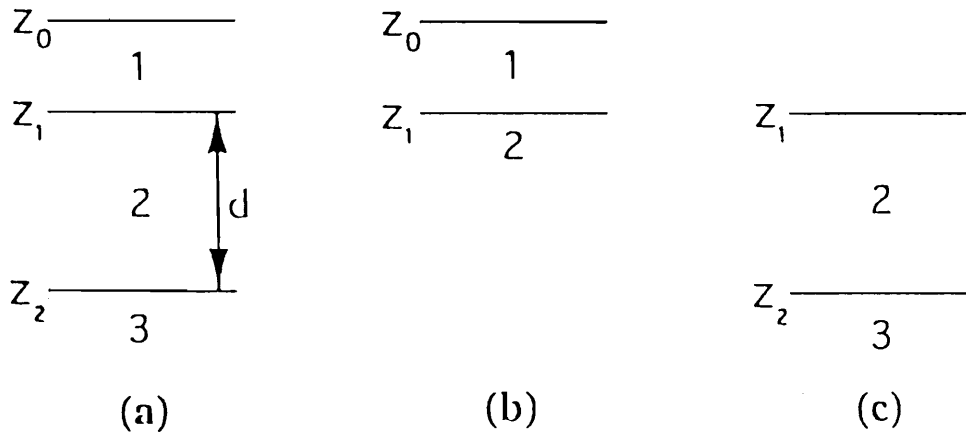


Fig.4.1-1 半無限地盤上における2層の水平成層地盤モデル (a) と部分分割法の説明のための分割地盤モデル (b),(c)

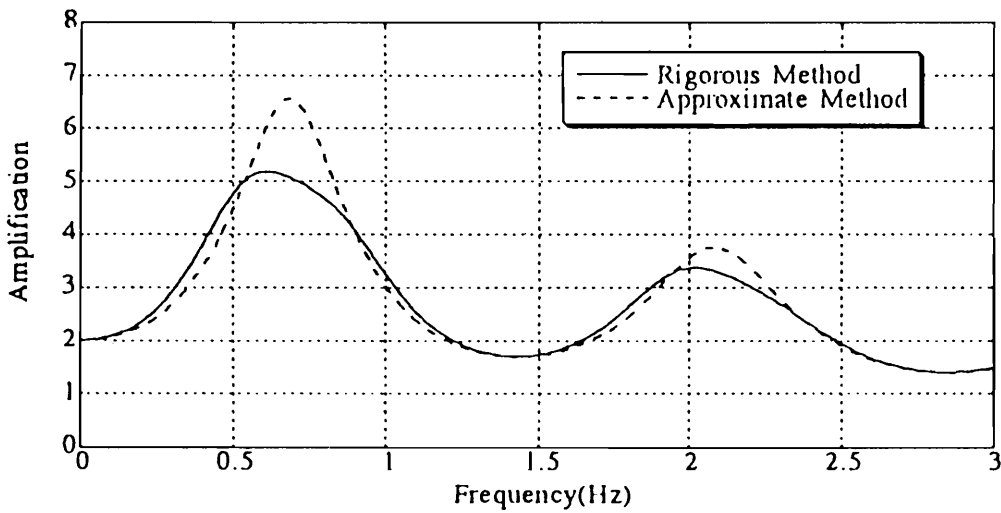


Fig.4.1-2 単位入射振幅に対する地表面の振動数伝達関数の例 ($C_S=250\text{m/s}, d=90\text{m}$)

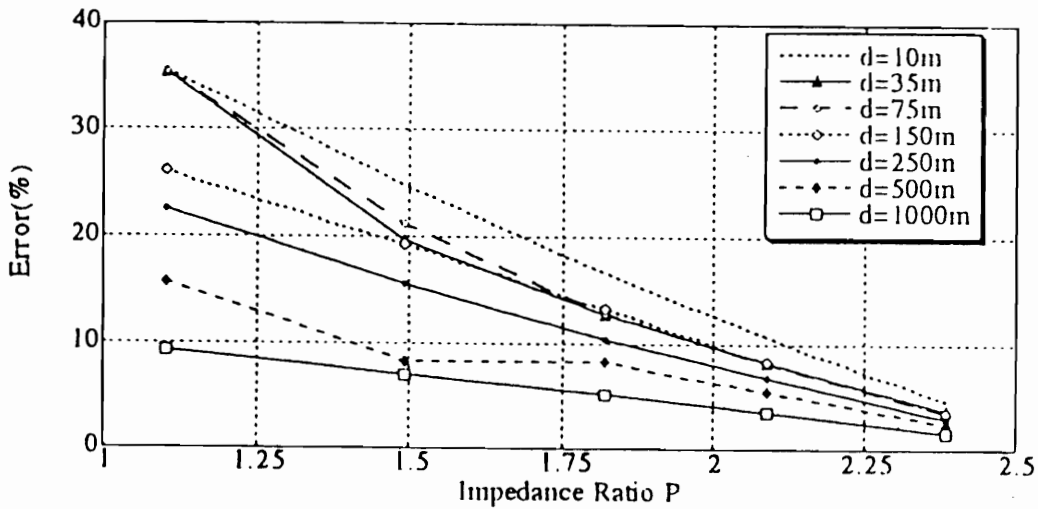


Fig.4.1-3 誤差パラメータの特性

4.1.3 不整形地盤における近似的な部分分割法の適用

S H波入射において図 4.1-4 に示す不整形境界面を有する矩形谷の 3 層地盤を一括して応答解析する全体解析と、地盤を (b),(c) に示すように第 2 層で分割する近似部分分割法を直接境界要素法に適用し両者を比較した。インピーダンス比は $P = 3.14$ である。

図 4.1-5(a) に $x = 1980(m)$ 地点における振動数伝達関数を示す。また、図 4.1-5(b),(c) に全体解析と近似解析による伝達関数から計算した $x = 1980(m)$ 地点における地表面の加速度時刻歴を示す。図 4.1-5 から近似法の精度のよいことがわかる。最後に、近似法の適用例として、図 4.1-6(a),(b) に示す宮崎市の浅い地盤モデル (a) と宮崎市の深い地盤モデルを一体化した大規模地盤モデルの応答を計算した。その結果を図 4.1-7 に示す。図 4.1-7 の点線は浅い地盤モデルにおける振動数伝達関数であり、深い地盤モデルの影響がこの図よりわかる。なお、(a) のモデルは、(b) のモデルの $-37 \sim 27(km)$ 区間における真上の地盤である。

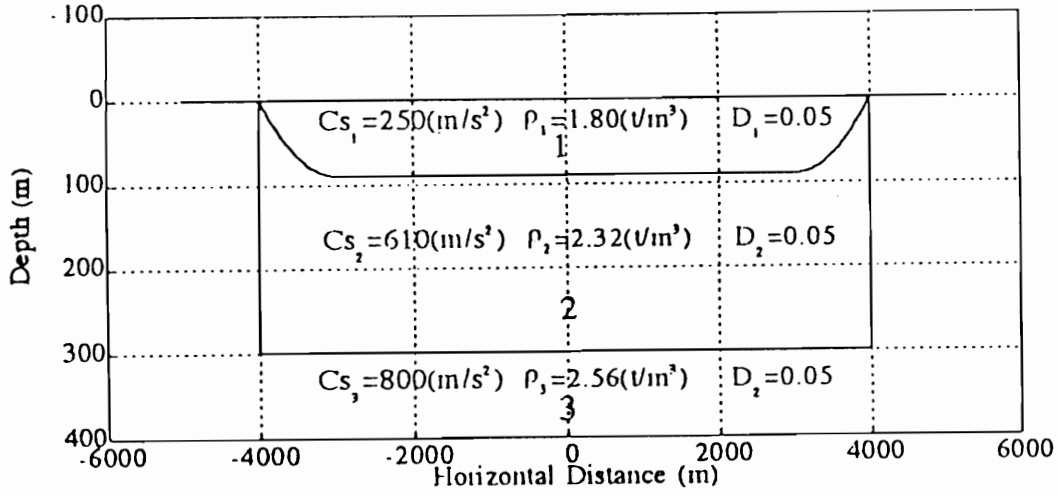


Fig.4.1-4 不整形境界を有する3層地盤モデル

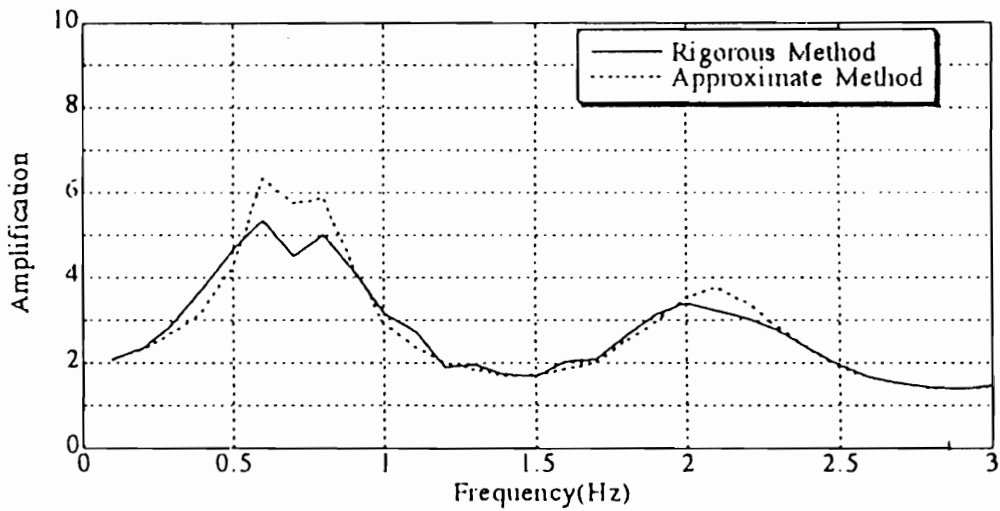
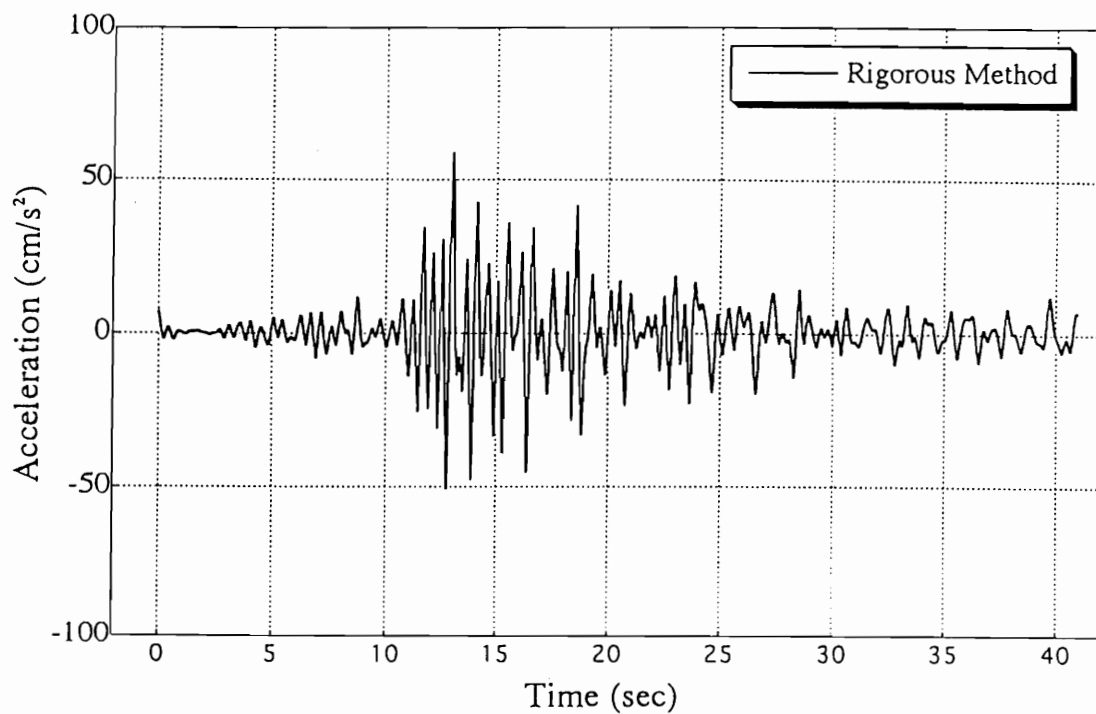
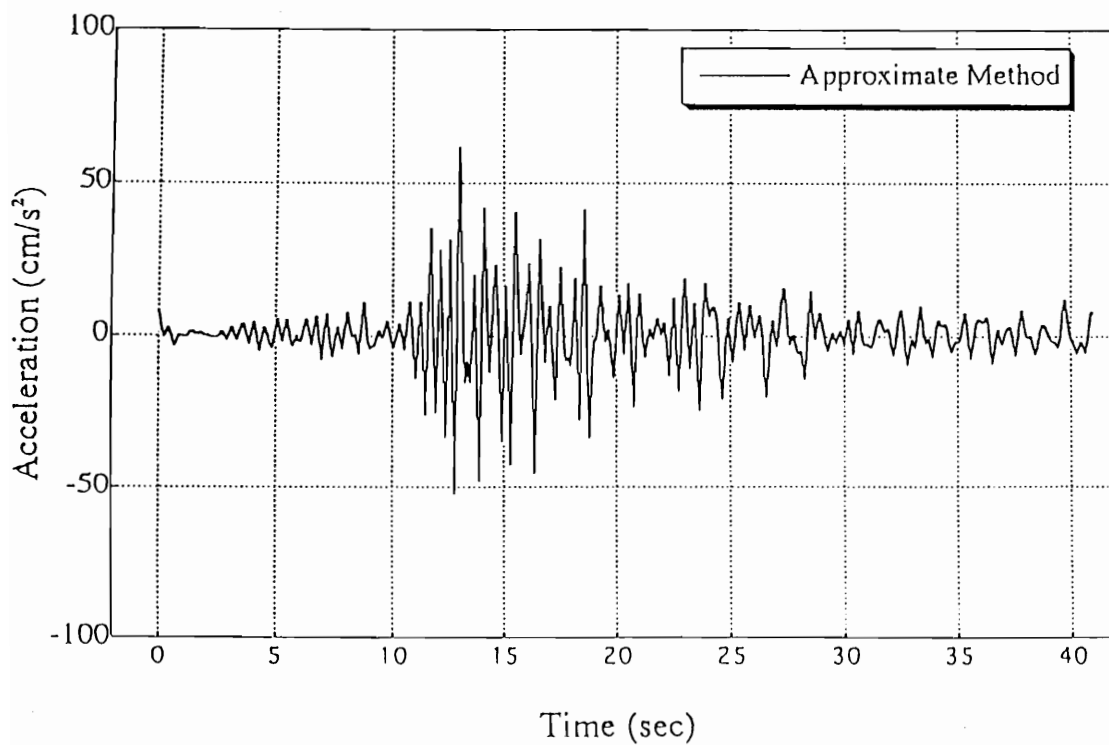


Fig4.1-5(a) $x=1980\text{m}$ 地点における振動数伝達関数

Fig4.1-5(b) $x=1980\text{m}$ 地点における厳密解による加速度時刻歴Fig4.1-5(c) $x=1980\text{m}$ 地点における近似解による加速度時刻歴

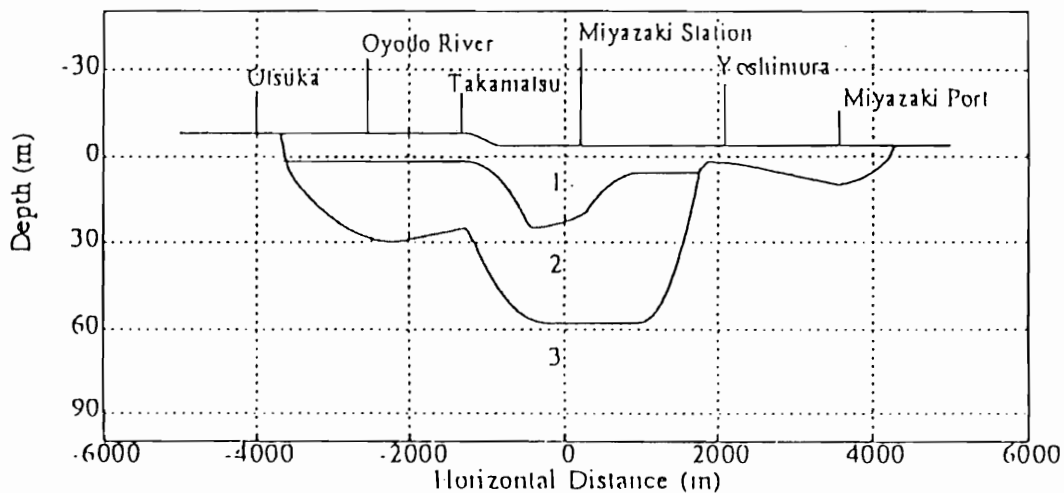


Fig4.1-6(a) 宮崎地域の浅層地盤モデル

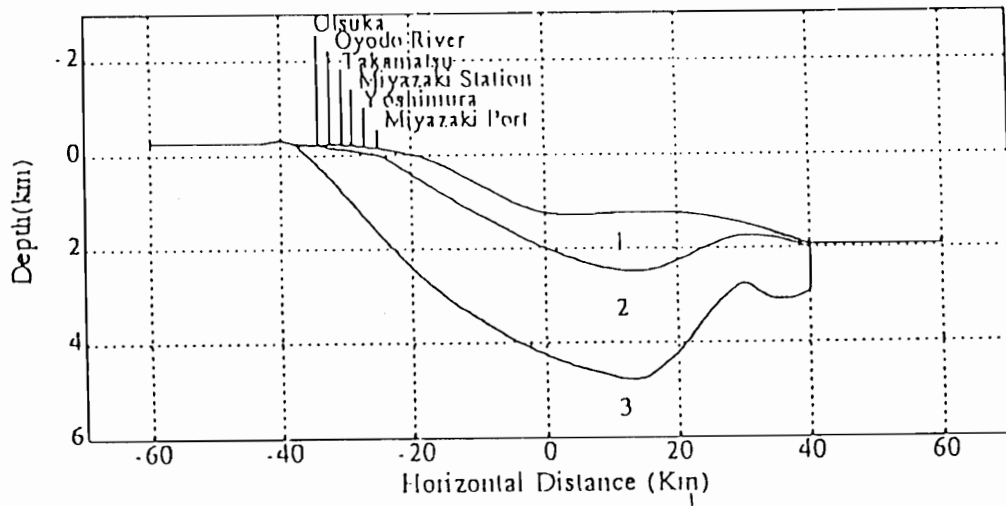


Fig4.1-6(b) 宮崎地域の深層地盤モデル

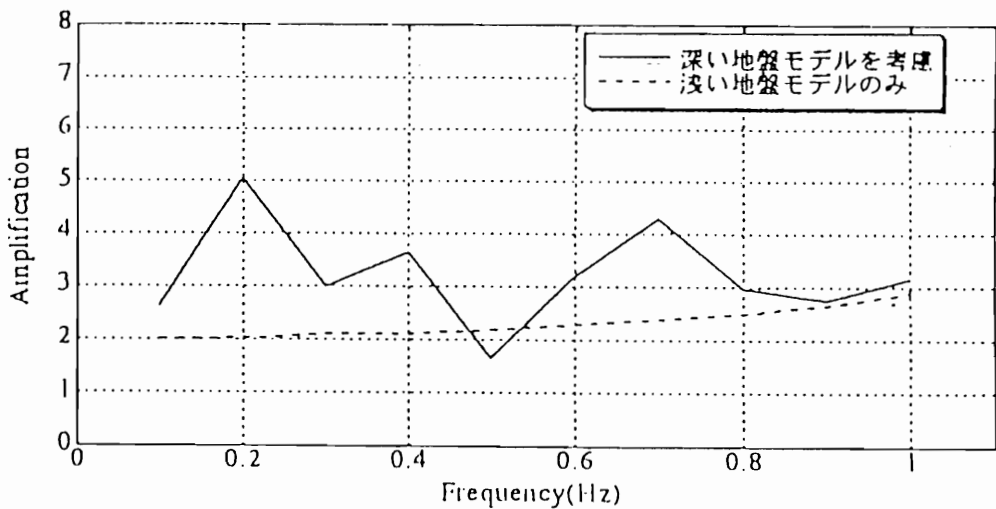


Fig4.1-7 浅層地盤モデルと深層地盤モデルを考慮した
宮崎駅における振動数伝達関数の比較

4.1.4 まとめ

SH 波入射問題という条件ではあるが、直接境界要素法を用いることにより、現実的な複雑な不整形多層地盤の応答が厳密に解析できるようになった。また、近似的な部分分割法を適用することにより、数値計算時間の短縮ができ、効率よく現実の地盤震動問題が解析できるようになった。

4.1.5 参考文献

- 1) Aki, K. and Richards, P. G., *Quantitative Seismology, Theory and Methods*, Vol.1 and Vol.2, Freeman and Company, 1980.
- 2) Kennett, B.L.N., *Seismic Wave Propagation in Stratified Media*, Cambridge University Press, 1983.
- 3) Haskell, N. A., The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.73, pp.17-34, 1953.
- 4) Thomson, W. T., Transmission of Elastic Waves through a Stratified Soil Medium, *J. Appl. Phy.*, Vol.21, pp.89-93, 1950.
- 5) Bravo, M.A., Sanchez-Sesma, F.J., and Chavez-Carcia, F.J., *Ground Motion on Stratified Alluvial Deposit for Incident SH Waves*, BSSA, Vol.78, No.2, pp.436-450, 1988.