

佐藤工業 正員 秋山伸一

早稲田大学理工学部 正員 宮原 玄

1. はじめに

非均質地盤の応答特性を調べることは地震動解析において重要であり、有限要素法—FEMや境界要素法—BEMを用いた解析が数多く行なわれて来た。一方、最近ではBEMとFEMの長所を生かした結合解法が注目されている。本稿では、この手法の妥当性を検討した上で、非均質地盤の動的応答解析を行ない、地震波の入射方向や地盤構造などが地震応答にどのような影響を与えるのかについて考察した。

2. 解析条件

解析は、二次元定常問題を対象として、Fig.1に示す非均質地盤に平面SH波が入射すると仮定する。ただし、Fig.1で、 V_e は半無限均質地盤、 V_i は V_e と地盤定数の異なる堆積層である。

基礎方程式は、Helmholtz方程式である。

$$(\mu \nabla^2 + \rho \omega^2) U(\mathbf{r}) = 0 \quad (\because \mathbf{r} \equiv (x, y)) \quad (1)$$

境界条件は、

$$\partial U / \partial n = 0 \quad (y = 0) \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} U_i &= U_e \\ \mu_i \cdot \partial U_i / \partial n &= \mu_e \cdot \partial U_e / \partial n \end{aligned} \right\} \quad (\mathbf{r} \in \Gamma) \quad (3)$$

波動は、入射波 U^i 、地表面からの反射波 U^r 、堆積層による散乱波 U^s の3成分に分けられる。さらに、 U^i と U^r の合成波 U^0 は、次式で表わされる。

$$U^0 = 2 \exp[-i\omega x \cdot \cos\theta / C_e] \cdot \cos(\omega y \cdot \sin\theta / C_e) \quad (4)$$

3. 解析手法

本解析では、堆積層にFEM、外部半無限地盤にBEMを適用し、両者を結合する。

3-1. FEMによる定式化(堆積層)

(1)式を、Galerkin法を用いて、次式に変換する。

$$\int_{V_i} [\mu_i \nabla U_i(\mathbf{r}) \cdot \nabla \delta U_i(\mathbf{r}) - \rho_i \omega^2 \cdot U_i(\mathbf{r}) \cdot \delta U_i(\mathbf{r})] dV = \int_{\Gamma} \mu_i \frac{\partial U_i(\mathbf{r})}{\partial n} \delta U_i(\mathbf{r}) dS \quad (\mathbf{r} \in V_i) \quad (5)$$

(5)式を離散化して、マトリックス表示する。

$$[\mathbf{K}] \cdot \{\mathbf{U}_i\} = \{\mathbf{F}\} \quad (6)$$

3-2. BEMによる定式化(外部半無限地盤)

(1)式を、Greenの公式と、Sommerfeldの放射条件により、次式に変換する。

$$U_e(\mathbf{r}) = \int_{\Gamma} \left[\frac{\partial G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)}{\partial n_0} U(\mathbf{r}_0) - G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) \frac{\partial U(\mathbf{r}_0)}{\partial n_0} \right] dS_0 + U^0(\mathbf{r}) \quad (\mathbf{r} \in V_e) \quad (7)$$

ただし、 $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$ はGreen関数である。

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = -\frac{i}{4\mu_e} \left[H_0^{(2)}(K_e |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|) + H_0^{(2)}(K_e |\mathbf{r} - \mathbf{r}'_0|) \right] \quad (\because K_e = \frac{\omega}{C_e}) \quad (8)$$

$H_0^{(2)}$ は第2種0次Hankel関数、 $\mathbf{r}'_0$ は x 軸に対する $\mathbf{r}_0$ の鏡像点である。(7)式の $\mathbf{r}$ を極限操作により、 Γ 上に移行し、離散化すると、次のマトリックス表示となる。

$$[\mathbf{H}] \cdot \{\mathbf{U}_e\} + [\mathbf{G}] \cdot \{\mathbf{Q}_e\} = \{\mathbf{U}^0\} \quad (9)$$

3-3. 結合解法

BEMとFEMでは、境界 Γ 上で応力ベクトルの次元が異なるので、(6)式の右辺を次式に改める。

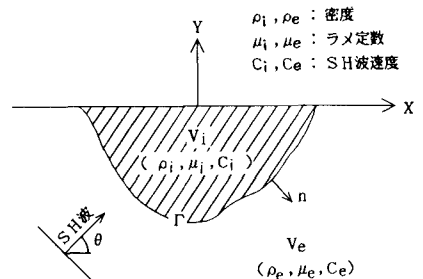


Fig.1 解析モデル

$$\{F\} = [M] \cdot \{Qe\} \quad (10)$$

(10)式中の $[M]$ は分布マトリックスであり、この式から、(6)式と(10)式を結合させることができる。

4. 解析結果

最初に、本解析法の精度検証のため、半無限地盤と堆積層の地盤定数を一致させ、数値解を厳密解と比較したが、良好な精度を示すことが確認された。次に、Fig. 2 に示す地盤モデルを用いて解析を行なった。以下にその結果を示す。なお、Fig. 3, 4 で、地表面上の距離を X/A 、周波数を $K \cdot A = 2\pi A/L$ (ただし、 L は入射波長) として無次元化した。

- ① 地表面上の変位応答は、入射波の角度により大きく変化している。(Fig. 3 参照)
- ② 地盤内の変位応答は、地盤の非均質性により波が反射・屈折することから、応答が複雑に現われる様子がわかる。(Fig. 4 参照)
- ③ 入射波の角度が水平に近づくにつれ、波のエネルギーは軟弱な表層に集中する傾向があり、表面波を形成していることがわかる。(Fig. 4 参照)

5. まとめ

地震動の特性は、地盤構造によってのみ支配されるわけではなく、入射波の角度によっても大きな影響を受けることがわかった。特に、水平に近い入射の場合、解析上、十分な検討が必要であると思われる。

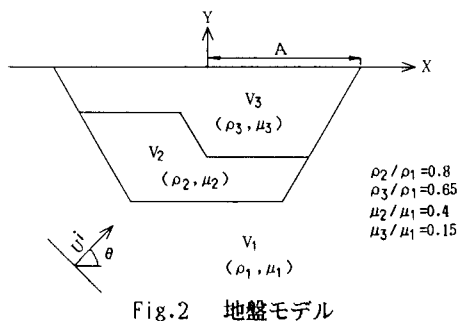


Fig.2 地盤モデル

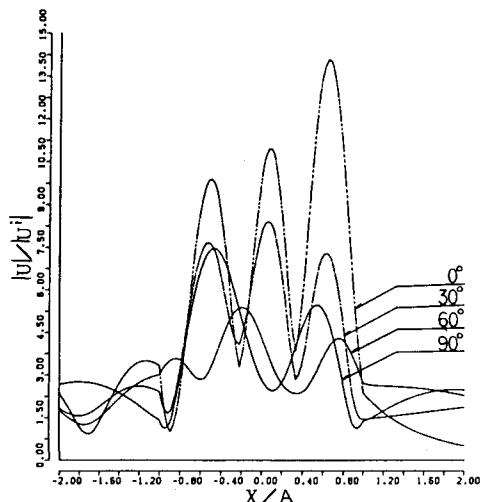


Fig.3 地表面-変位応答倍率 (KA=1.0π)

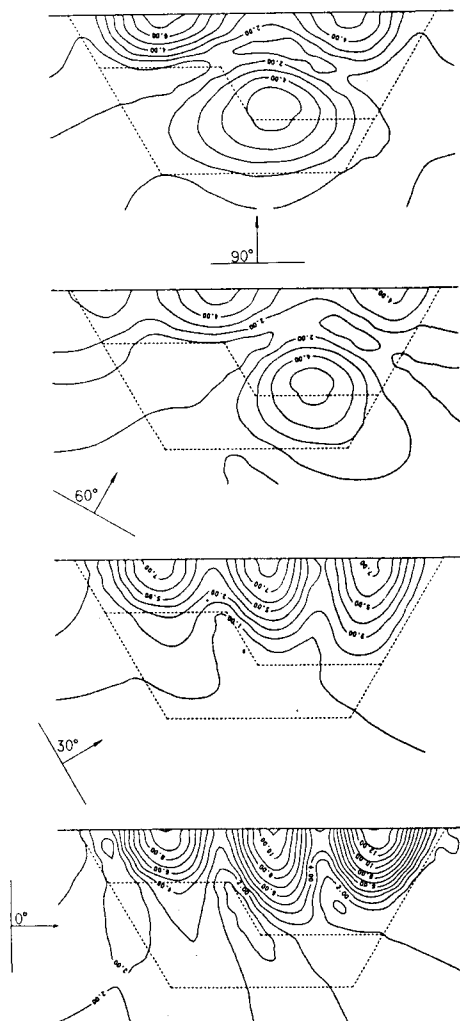


Fig.4 地盤内-変位応答倍率 (KA=1.0π)

参考文献

- 1) 境界要素法入門 : C.A.Brebbia 培風館
- 2) 閉領域問題のための有限/境界要素法 : 加川幸雄 サイエンス社
- 3) 弾性波動論 : 佐藤孝夫 岩波書店
- 4) Surface Motion of a Semi-Elliptical Alluvial Valley for Incident Plane SH Waves : H.L.Wong, M.D.Trifunac, Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 64, NO. 5 pp1389-1403, 1974
- 5) Effect of Canyon Topography on Strong Ground Motion : H.L.Wong, P.C.Jennings, Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 65, NO. 5, pp1239-1257, 1975