

阪急電鉄

正員 神谷 昌平

京都大学工学部 正員 丹羽 義次

東海大学海洋学部 正員 北原 道弘

京都大学工学部 正員 廣瀬 壮一

1. はじめに 大規模な土木構造物の代表的存在であるフィルタムは、堤体内において物質定数が漸次変化するように設計、建設される。そのため、地震が発生した際には堤体内の動的な変形特性が複雑となり、堤体の構造と強度を十分に解明できないという問題点が存在する。本研究では、まず、フィルタムのコア部を想定した地盤に根入れを有する非均質構造物に、P波・S波が入射する場合の過渡的地震応答を求めた。数値解析の手法としては、数値的グリーン関数を用いた境界積分方程式法により定式化し、定常解を求め、それを逆フーリエ変換することにより過渡的応答を求めた。次に、その非均質構造物の粗み合せで堤体が構成されていると考えられるフィルタムの解析に本手法を適用した。

2. 定常弾性問題の定式化 本研究では、数値的グリーン関数を用いた境界積分方程式法により、非均質弾性体がある閉領域に眼られている均質半無限弾性体に対する定常弾性問題を次のように定式化した。(Fig. 1 参照)

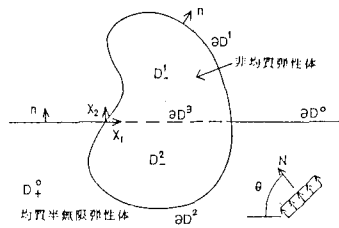


Fig. 1 根入れのある非均質構造物

まず、非均質弾性体に対しては、物質定数であるLamé定数を次のように表記する。

$$\lambda(\mathbf{x}) = \lambda^* + \bar{\lambda}(\mathbf{x}), \quad \mu(\mathbf{x}) = \mu^* + \bar{\mu}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ただし、 λ^* と μ^* は一定部分で、 $\bar{\lambda}$ と $\bar{\mu}$ は変化部分(非均質に関係する項)である。そうして、非均質弾性体の基礎式において、上記の非均質部分に関係する項と加速度項を見かけの物体力項とみなす。均質弾性体の基本解 $\mathbf{V}$ を用いて、この見かけの物体力項を有する均質弾性体の基礎式に対して変位の積分表示を定式化する。その結果、非均質物質における変位は次式のように表わせる。

$$\begin{aligned} \mathbf{e}(\mathbf{x}) \mathbf{u}(\mathbf{x}) = & \int_{\partial D} \mathbf{V}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \mathbf{t}(\mathbf{y}) dS_{\mathbf{y}} - \int_{\partial D} \mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \mathbf{u}(\mathbf{y}) dS_{\mathbf{y}} \\ & + \int_{\partial D} \mathbf{\tilde{V}}(\mathbf{x}, \mathbf{Y}) \mathbf{u}(\mathbf{Y}) dV_{\mathbf{Y}} + \int_{\partial D} \left\{ \bar{\lambda}(\mathbf{Y}) - \frac{\bar{\lambda}^*}{\lambda^*} \bar{\mu}(\mathbf{Y}) \right\} \mathbf{\tilde{V}}(\mathbf{x}, \mathbf{Y}) \mathbf{u}(\mathbf{Y}) dV_{\mathbf{Y}} \\ & + \rho \omega^2 \int_{\partial D} \mathbf{V}(\mathbf{x}, \mathbf{Y}) \mathbf{u}(\mathbf{Y}) dV_{\mathbf{Y}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\mathbf{e}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \mathbf{C}(\mathbf{x}) & \mathbf{x} \in D^1 \text{ or } D^2 \\ \frac{1}{2} \mathbf{C}(\mathbf{x}) & \mathbf{x} = \mathbf{x} \in \partial D^1 \cup \partial D^2 \cup \partial D^3 \\ \mathbf{0} & \mathbf{x} \in D_+^0 \end{cases}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}) = \frac{\mu^* \lambda(\mathbf{x}) + \lambda^* \mu(\mathbf{x}) + 2\mu^* \mu(\mathbf{x})}{2\mu^* (\lambda^* + 2\mu^*)} \mathbf{1}$$

ただし、 $\mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{V}(\mathbf{x}, \mathbf{y})^T (\lambda, \mu; \partial \mathbf{y})$

$$\{\mathbf{\tilde{V}}(\mathbf{x}, \mathbf{Y}) \mathbf{u}(\mathbf{Y})\}_i = \left\{ \bar{\lambda}(\mathbf{Y})^i V_{ik}(\mathbf{x}, \mathbf{Y})^k + \bar{\mu}(\mathbf{Y})^i V_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{Y})^j + \bar{\mu}(\mathbf{Y})^i V_{ik}(\mathbf{x}, \mathbf{Y})^j \right\} u_j(\mathbf{Y})$$

$$\{\mathbf{\tilde{V}}(\mathbf{x}, \mathbf{Y}) \mathbf{u}(\mathbf{Y})\}_i = V_{ik}(\mathbf{x}, \mathbf{Y})^k u_j(\mathbf{Y}) \quad \text{である。}$$

一方、半無限均質弾性体に対しては、弾性問題の基本解 $\mathbf{U}$ を用いて変位の積分表示を次のように定式化する。

$$\mathbf{e}(\mathbf{x}) \mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}^T(\mathbf{x}) + \int_{\partial D} \mathbf{U}(\mathbf{x}, \mathbf{y}; \omega) \mathbf{t}(\mathbf{y}) dS_{\mathbf{y}} - \int_{\partial D} \mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{y}; \omega) \mathbf{u}(\mathbf{y}) dS_{\mathbf{y}} \quad (3)$$

$$\mathbf{e}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \mathbf{1} & \mathbf{x} \in D_+^0 \\ \frac{1}{2} \mathbf{1} & \mathbf{x} = \mathbf{x} \in \partial D^0 \cup \partial D^2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{x} \notin D_+^0 \cup \partial D^0 \cup \partial D^2 \end{cases}$$

次にマッチングの手法を示す。Fig. 1における $\bar{D}^1$ と $\bar{D}^2$ に対しては(2)式より解表現を得、 $\bar{D}_+^0$ に対しては(3)式より解表現を得ることができる。ここで、 ∂D^2 と ∂D^3 において変位と応力の連続条件を課すことにより変位を決定できる。Fig. 2に示したフィルタムの解析も同様にやる。 $\bar{D}^1, \bar{D}^2$ に対しては、

(2)式より解表現 Fig. 2 フィルタムのモデルを得、 $\bar{D}_+^0$ に対しては(3)式より解表現を得る。さらに、 $\partial D^2, \partial D^4, \partial D^6, \partial D^8$ において変位と応力の連続条件を課すことにより、未知の変位を決定することができる。

3. 非定常応答の解析法 非定常問題における平面入射波 $\mathbf{u}^T(\mathbf{x}, t)$ を N 方向に速度 c で進む波とすると、

$$\mathbf{u}^T(\mathbf{x}, t) = \mathbf{A} \delta(t - \frac{N \cdot \mathbf{x}}{c}) \quad \text{と表わすことができる。上式にフーリエ変換を作用させると、} \mathbf{A} \text{を定数として、}$$

$\hat{\mathbf{u}}^T(\mathbf{x}, \omega) = \mathbf{A} e^{ikN \cdot \mathbf{x}} \hat{\delta}(\omega)$ となる。線形システム論の考え方をいれると、 $\mathbf{A} e^{ikN \cdot \mathbf{x}}$ は定常問題の入射波に対応していることがわかる。つまり、任意の入射波が系に入射した時の非定常応答を求めるには、入射波に対する応

答倍率を表す定常解に入射波 $\hat{u}(t)$ のフーリエ変換 $\hat{u}(\omega)$ だけの重みをかけて逆フーリエ変換すればよい。

4. 数値解析例 本研究では、長方形の非均質構造物、及びアースフィルタムの過渡的応答を解析した。その物質定数は、Fig.3、Fig.4のように設定した。また、本報告では、Fig.5に示すRicker-Waveletの波形を持つ平面波

$G=0.5G_0$	
$\rho=\rho_0$	
$\mu=\mu_0$	
$G=2.0G_0$	$\nu_0=0.25$
$G=2.0G_0$	

Fig.3 長方形非均質構造物の物質定数

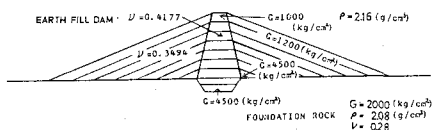


Fig.4 アースフィルタムの物質定数

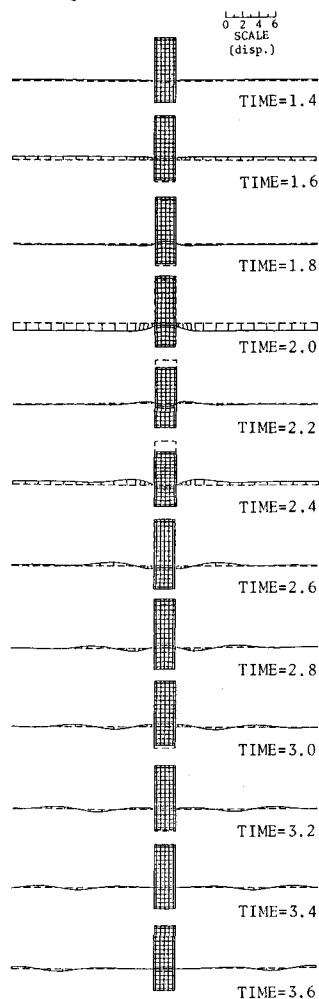


Fig.6 非均質構造物の過渡的応答

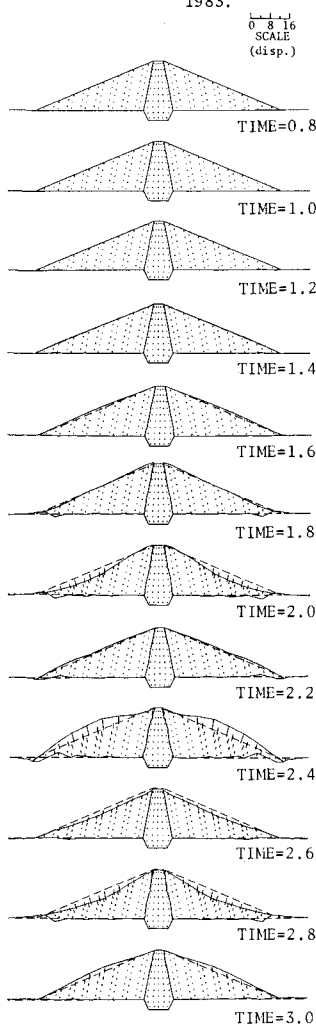


Fig.7 アースフィルタムの過渡的応答

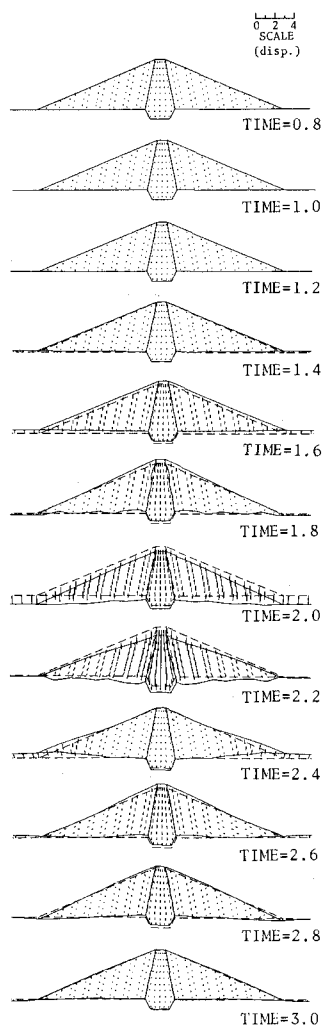
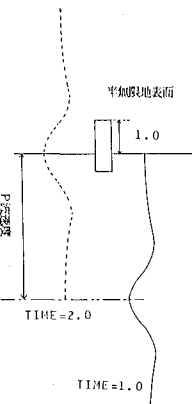


Fig.8 均質フィルタムの過渡的応答

が垂直に入射した場合の解析例を示した。なお、入射波は時刻1.0において地表面の位置に到達し、時刻2.0において入射波のピークが地表面に達するように設定した。Fig.6、Fig.7にはP波が入射した時の西モデルに対する数値解析例を示した。Fig.8には比較のために、堤体の物質定数が基礎岩盤と同一で均質であるフィルタムに対する数値解析例を示した。

Fig.5 入射波の進行



1) Niwa, Y., M. Kitahara and S. Hirose; Elastodynamic problems for inhomogeneous bodies., In: Boundary Elements, Eds. C.A. Brebbia et al., 751-763, Springer, 1983.