

半無限地盤の時間領域一解法

日本大学理工学部 正会員 ○塩尻 弘雄
 日本大学理工学部 正会員 小林 義和
 前田建設工業 丸山 拓也

1. 目的

半無限地盤の数値解析に関しては、十分に広い領域を有限要素等でメッシュ分割し、境界に近似的なエネルギー逸散境界を適用するか、構造物近傍は有限要素法で、離れた部分については時間領域境界要素法を用い、組み合わせて用いる方法が提案されている^{(1),(2)}。前者は、有限要素等の自由度がかなり大きくなりうるし、後者は、境界要素法解析の安定性に問題のある場合がある。ここでは人工的に粘性を加えた領域を解析対象の外部に設け、振動を減衰させるとともに減衰を加えた影響を低減・除去することにより、半無限地盤条件を再現する手法(damping-solvent extraction 法)⁽³⁾のFEM相互作用解析への適用について検討する。

2. 解析法

(1) 半無限の取扱い

$[K]$, $[M]$ を剛性マトリクス, 質量マトリクス, 角振動数を ω とすれば, 振動数領域でのインピーダンスマトリクス $[S(\omega)]$ は次式で表される。

$$[S(\omega)] = [K] - \omega^2 [M], \quad [K] = Gr_0^{s-2} [\bar{K}], \quad [M] = \rho r_0^s [\bar{M}] \quad (1)$$

ここに、せん断剛性 G , 密度 ρ , 基準長さ r_0 , s は空間次元(=2or3), $[\bar{K}]$, $[\bar{M}]$ は無次元剛性, 質量マトリクスである。次に減衰 ζ を付加すると次式のようになる。

$$[M]\{\ddot{u}^t\} + 2\zeta[M]\{\dot{u}^t\} + ([K] + \zeta^2[M])\{u^t\} = \{P\} \quad (2)$$

振動数領域であらわすと、

$$[S_\zeta(\omega)] = Gr_0^{s-2} ([\bar{K}] - a_0^2 [\bar{M}]) = Gr_0^{s-2} [\bar{S}(a_0^*)] \quad (3)$$

$$a_0^{*2} = \frac{(\omega - i\zeta)r_0}{c_s}, \quad c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4)$$

これをテイラー展開し、1次の項までとれば、人工減衰を加えないインピーダンスマトリクスは結局次式のように表される。

$$[S(\omega)] = [S_\zeta(\omega)] + i\zeta [S_\zeta(\omega)]_{,\omega} \quad (5)$$

人工粘性を加え、端部にさらに粘性境界を設けることで、境界からの反射波を吸収できるので、左辺のインピーダンスは境界からの反射を含まない半無限地盤領域のインピーダンスマトリクス $[S^\infty(\omega)]$ に近似する。

式(5)のフーリエ逆変換により結局次式を得る。

$$R(t) = (1 + \zeta t) \{R_\zeta(t)\} - \zeta \{R_{\zeta r}(t)\} \quad (6)$$

$$\{R_\zeta(t)\} = \int_0^t [S_\zeta(t-\tau)] \{u(\tau)\} d\tau, \quad \{R_{\zeta r}(t)\} = \int_0^t [S_\zeta(t-\tau)] \tau \{u(\tau)\} d\tau \quad (7)$$

ここで、 $R(t)$ は反力, $u(\tau)$ は変位, $[S_\zeta(t)]$ は $[S_\zeta(\omega)]$ のフーリエ逆変換である。

キーワード FEM, 時間領域解析, 半無限地盤, damping-solvent extraction 法

連絡先 〒101-8308 東京都千代田神田駿河台 1-8 日本大学理工学部 TEL 03-3259-0876

有限要素法に組み込む場合、これを畳み込み積分を行わないで求めることが望ましい。そのためには、図1のような3領域を考え、接合部で領域2の反力を $(1+\xi t)$ 倍、領域3の変位を領域1の t 倍とし、動的平衡方程式から加速度を求めればよい。

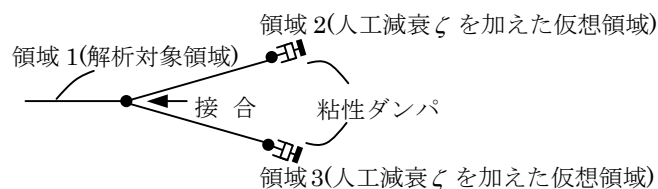


図1 有限要素モデル概念図

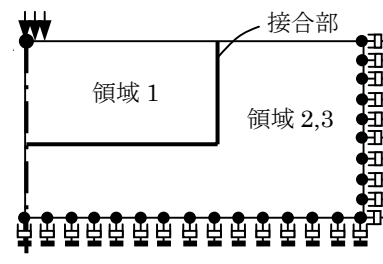


図2 解析モデル

3. 解析例

図2のような地盤の面内応答解析モデル（左右対称で右半分のみ解析）を用い、外力として地表に卓越振動数2のリッカーウェーブレット入射を加えた場合のA点の応答速度を図3-6に示す。

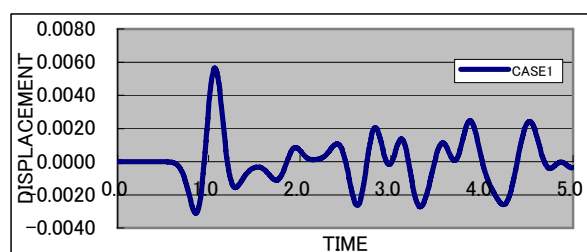


図3 A点応答変位($\zeta = 0.0$,ダンパー無し)

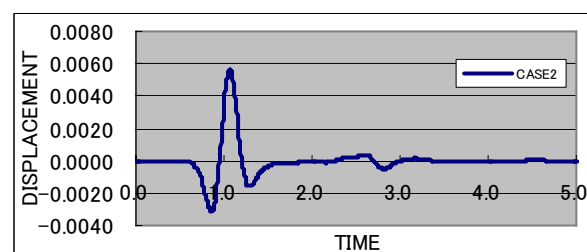


図4 A点応答変位($\zeta = 0.0$,ダンパー有り)

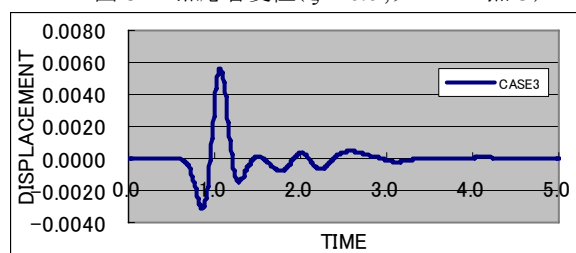


図5 A点応答変位($\zeta = 5.0$,インピーダンス調整なし)

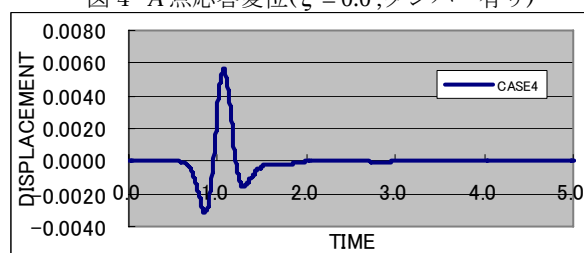


図6 A点応答変位($\zeta = 5.0$,インピーダンス調整あり)

人工粘性、粘性ダンパーがないと外部境界からの大きな反射波が存在する。粘性ダンパーを取付けると反射波は減少するがなお存在する。粘性ダンパーと人工減衰を加え、インピーダンス補正を行わないと仮想領域との接合部からの反射波が存在する。インピーダンス補正を行うと、境界及び、接合部からの反射波が低減する。

4. まとめ

FEMを用いた半無限地盤を含む時間領域相互作用解析に対して damping-solventextraction 法の適用を行い、その有効性を確かめた。

謝辞：本研究は、平成16年度文部科学省学術フロンティア推進事業（日本大学理工学部：継続）「環境・防災都市に関する研究」（研究代表者：石丸 辰治）の一環として実施したものである。

参考文献

- (1) J.P. Wolf, "Soil-Structure-Interaction Analysis in Time Domain" Prentice-Hall, 1988
- (2) 日本建築学会：入門・建物と地盤の動的相互作用、技報堂、1999 第2刷
- (3) J.P. Wolf, Chongmin Song, "Finite-Element Modelling of Unbounded Media" JOHN WILEY&SONS, 1996.