

動的有限要素解析における仮想境界の影響

京都大学防災研究所 正員 土岐憲三
 京都大学防災研究所 正員 佐藤忠信
 京都大学 工学部 学生員 O品川英明

1. まえがき

地盤-構造物系の震動解析を行う場合、有限要素法などにより、系を有限な振動系に置き換えて解析する事が多い。著者らは、仮想境界を通して遠散する波動のエネルギーを評価するために、仮想境界上で成立する積分方程式を離散系の方程式に置換することによって、境界上の剛性マトリックスなうびに入射波動による仮想境界上の節点力を算出できることを示し、任意形状を有する地盤-構造物系の震動解析を行うための手法を開発してきた。^{1,2)} しかしながら、開発した手法では、半無限弾性体の特異解として、周波数領域における解を用いていたため、解析は線形系に限定され、強震時において問題となる非線形応答解析に適用できなかった。本研究では、周波数領域で求めた仮想境界上の剛性マトリックスを高周フーリエ変換を用いることにより時間領域に変換し、波動の遠散効果を完全に評価した、逐次積分法による震動解析を行う。

2. 解析手法の概略

図1に示すような水平な成層地盤 B 上に不規則な形状を有する領域 A が載っている場合を考えると、領域 A を有限要素にした場合の運動方程式は次式のように表わされる。³⁾

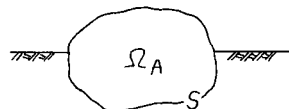


図-1 解析モデル

$$\begin{bmatrix} M_A & M_c \\ M_c^T & M_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{S}_A \\ \ddot{S}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_A & C_c \\ C_c^T & C_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{S}_A \\ \dot{S}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_A & K_c \\ K_c^T & K_s + K_s^*(t) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_A \\ S_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -f_0 + \int_0^t K_s^*(t-\tau) \{ \dot{S}_0(\tau) + \ddot{S}_0(\tau) \} d\tau \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 S の添字の付いた変数は仮想境界上の節点に関する

ものであり、 A の添字は不規則性を有する領域内の節点に関するものである。 f_0 、 $\dot{S}_0$ は $z-z'$ を地表面とする仮想地盤内の S 面上の節点力なうびに節点変位であり、 $K_s^*(t)$ は S 面上の複素剛性マトリックスをフーリエ変換により、時間領域へ変換したものである。

3. 数値解析例

図2は解析に用いた地盤-構造物系のモデルであり、地表面に三角形の堤防が設けられている場合である。入射波動としては El Centro (1942) の加速度記録の NS 成分を用いた。式(1)を用いて解析を行うが、数値積分は Newmark の β 法を用いた。この場合、前もって $K_s^*(t)$ の値を求めておかなければならぬ。図-2, 3 に $K_s^*(t)$ の代表的な計算結果の一部を示した。各々、節点番号 10 と 3 に関係した剛性マトリックスの成分が示してある。図から、節点 10 の対角成分はインパルス状になっており、非対角成分は

対角成分の $1/10$ 以下に落ちていることが判明する。二のような性状は、仮想境界の形状が急変する領域に存在する節点3の成分については認められず、対角成分と非対角成分の大きさがほぼ同じである。これは、形状の急変する領域の影響が広い範囲におよぶことを表わしている。なお、2秒以上の遅延時間を取れば、剛性マトリックスの各成分は無視できるほど小さくなるので、式(1)に現われるたみ込み積分の遅延時間としては、2秒程度を用いれば良く、解析時間の短縮がはかれる。

図-4(a) は一様な SH 波が鉛直下方から入射する場合の堤頂 P における加速度応答波形を示している。図(b) は入射角が 60° の場合の加速度波形である。入射角によって、堤体の応答特性がかなり異なることがわかる。

図-5は、堤体の右方から Love 波が入射する場合の堤頂の加速度応答波形を示している。表層の層厚を 25m, 50m とし、堤体のせん断波速度を 160m/sec, 320m/sec とした4種類の解析例が示されている。表層層厚が減少すると応答値が増加し、堤体の剛性が減少することによっても、応答値が増加することが明らかにされる。地表面近傍に設けられた大規模な土構造物は、表層地盤の層厚や地盤と構造物のインピーダンス比などによって、応答特性がかなり異なるわけであるから、地表面近くに存在する剛性の小さい地層が、二のような構造物の耐震性を論ずる場合、重要な要素になることを示唆している。

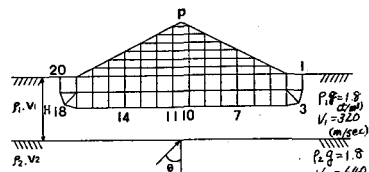


図-2 堤体のモデル化

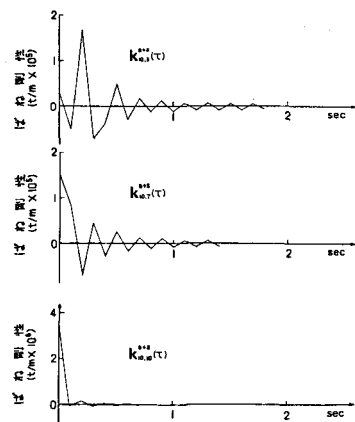


図-2 節点10の剛性マトリックス成分

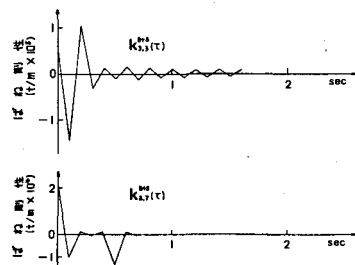


図-3 節点3の剛性マトリックス成分

参考文献

- 1) 土佐・佐藤：第6回世界地震工学会論文集, pp.281-286, 1977.1 (ニエデリー)
- 2) 土佐・佐藤・打田：土木学会第32回年次学術講演会講演概要集 I, pp.422-423, 1977.10
- 3) 土佐・佐藤：第27回応用力学連合講演会概要集, pp.113-114, 1977.11.

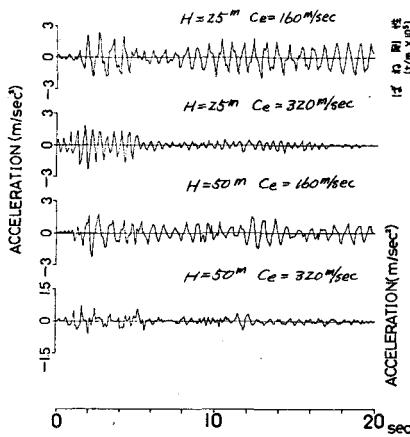


図-5 Love波が入射する時の応答

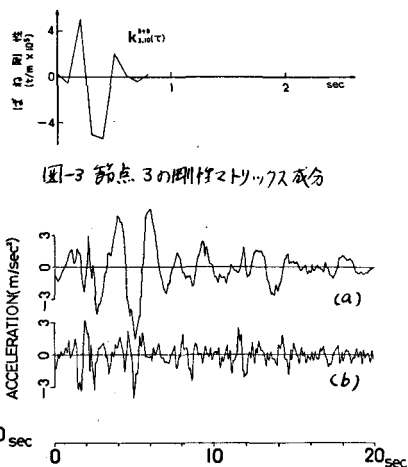


図-4 SH波が入射する時の応答