

積分方程式による地盤-構造物系の震動解析

京都大学防災研究所 正会員 土岐憲三
 京都大学防災研究所 正会員 佐藤忠信
 京都大学大学院 学生員 打田剛生

1 まえがき 本研究は、構造物と地盤との境界面で成立する混合境界値問題を積分方程式に定式化し、その解を数値解析的に求め、数値解の精度および解析法の有用性についていくつかの数値シミュレーションを行い検討を加えたものである。積分方程式法では、波の地下逸散減衰を合理的に評価できるとともに、境界上の未知量のみを問題にすればよいので、数値計算に要する計算機の容量が少なくて済むという利点がある。

2 解析手法の概略 図-1に示すように、水平な成層地盤Bに構造物Aが根入れされ、波が任意の入射角 θ で入射する場合を考える。まず、図-2に示すように、構造物と地盤とを分離した時に設けられる地盤B内の境界 S_B 、 S_A の近傍に設けられる補助境界 S_B' を分割し、それに対応して構造物Aをも分割する。地盤Bについて考えると、境界上の節点変位ベクトル $\{u_B\}$ および節点力ベクトル $\{f_B\}$ は

$$\begin{aligned} \{u_B\} &= \{u_B^i\} + \{u_B^s\} \\ \{f_B\} &= \{f_B^i\} + \{f_B^s\} \end{aligned} \quad (1)$$

となる。ここに、 $\{u_B^i\}$ 、 $\{f_B^i\}$ は入射波による境界上の節点変位ベクトル、節点力ベクトルであり、 $\{u_B^s\}$ 、 $\{f_B^s\}$ は散乱波によるものである。また、散乱波による節点変位、節点力には次の関係式が成立つ。

$$\{f_B^s\} = K_B \{u_B^s\} \quad (2)$$

ここに、 K_B は境界 S_B における複素剛性マトリックスであり、 $D_B(x_i, y_i, z_i, n)$ 、 $P_B(x_i, y_i, z_i, n)$ をL-L'を地表面とする仮想の成層地盤における第1、第2基本特異解として、 $K_B = [P_B(x_i, y_i, z_i, n)] [D_B(x_i, y_i, z_i, n)]^{-1}$ となっている。同様にして構造物Aにおいては、 $\{u_A\}$ 、 $\{f_A\}$ を境界 S_A 上の節点変位ベクトルおよび節点力ベクトル、 K_A を境界 S_A における複素剛性マトリックスとして次式が成立つ。

$$\{f_A\} = K_A \{u_A\} \quad (3)$$

これらの式と、境界 S_B と S_A における変位なすびに応力の連続条件を考慮することにより未知量が決定できる。

3 数値解の精度 図-3に半無限地盤の場合の解析モデル

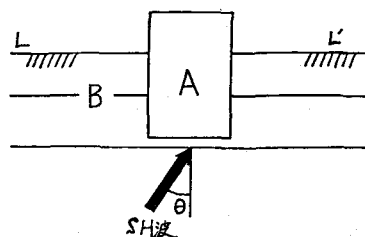


図-1 地盤-構造物系の概念図

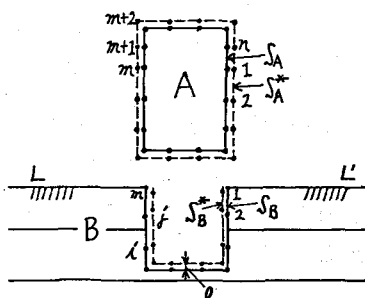


図-2 領域および境界の分割

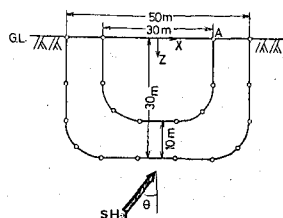


図-3 半無限地盤における解析モデル

ルを、図-4には2層系地盤におけるそれを示す。図-5には前者における節点Aの応答特性を、図-6には後者における節点Bの応答特性をそれぞれ重複反射理論より求まる厳密解と比較して示してある。厳密解との比較、検討を行うために、構造物に相当する領域の物理定数と地盤とのそれは一致させてある。まず、図-5より明らかなように、厳密解は波動の入射角 θ によらず全周波数領域において2.0となり、 α (境界と補助境界の距離 $l=6.5\text{m}$ 、領域Aの基本特異解が半無限の場合)では、数値解として1.97を得ており、厳密解との誤差は1.5%であり、よい精度を得ている。また、 β ($l=6.5\text{m}$ 、領域Aの基本特異解が無限解の場合)では、数値解が1.95となり、前者に比して精度が落ちることがわかる。さらに、 γ ($l=4\text{m}$ 、領域Aの基本特異解が半無限解の場合)では、数値解が1.78となり、精度は悪くなっている。次に、図-6の2層系地盤の場合には、 $l=6\text{m}$ 、領域Aの基本特異解として半無限解を用いる時に、数値解と厳密解との誤差は1.5%以内であり、よい結果を得ている。以上のことから、補助境界を実境界に近づけ過ぎると基本特異解の特異性により、精度が悪くなることがわかる。また、 α の場合の方が β の場合よりも精度がよいのは、半無限解は、地表面における境界条件が自動的に満足しているのに対し、無限解では、この力学条件を完全に満足するように境界節点の配置を選ぶ必要があるためと考えられる。しかしながら、図-5,6における波の伝播速度は、それぞれ 320m/sec 、 160m/sec であり、各解析モデルの節点間の距離は 10m であるから、1波長内に4~5節点あれば、十分な精度を得ることがわかる。

4 積分方程式による解析例 対象とする解析モデルを図-7に、その数値解析結果を図-8,9に示す。この場合、地盤における境界と補助境界の距離を 6m 、構造物におけるそれは 30m としているが、これは、地盤における複素剛性マトリックス K_0 と構造物における K_A ともに、その特異性を避けるためである。半無限地盤の場合の応答特性を示す図-8と2層系地盤における図-9とを比較して、表層地盤が構造物の応答特性に与える影響は大きいことがわかる。また、図-9から、共振点においては、入射角 θ の小さい順に、その応答値が大きい値をとることがわかる。

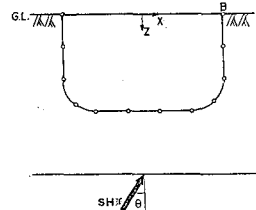


図-4 2層系地盤における解析モデル

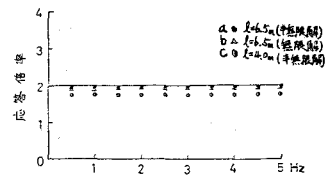


図-5 数値解の精度(半無限地盤)

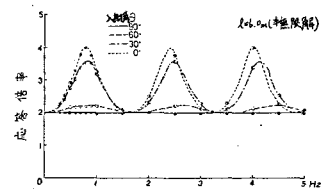


図-6 数値解の精度(2層系地盤)

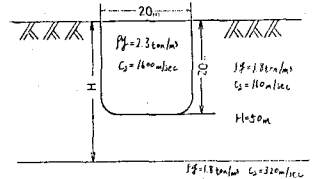


図-7 解析モデル

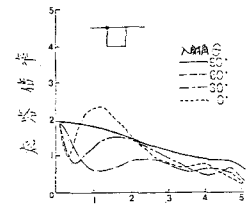


図-8 解析例(半無限地盤の場合)

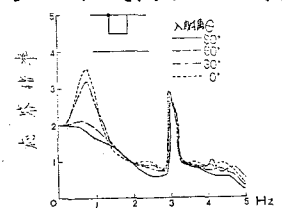


図-9 解析例(2層系地盤の場合)