I-246　地下鉄構築及びその周辺地盤の振動解析の一方法

東京大学大学院　学員　中村 豊
東京大学生産技術研究所　正員　田村 重四郎

1. まえがき

地下鉄構築と地盤のように構造物と地盤が密接に結びついている振動系の応答を算定する場合，振動エネルギーの地中への散逸を考慮する必要がある。しかしながら一般に，数値解法で問題を処理しようとする場合，対象とするモデルの領域が有限なものであるため，計算結果に境界の影響があらわれる。この有限な拡がりをもつモデルの問題点の解決に対しては２，３の方法[1]が呈示されている。これらの方法は主として定常振動に対するものである。

ところで，一つの衝撃が系に入力されてから，入力波が解析モデルの境界で反射され応答をみるために着目している点に到達するまでの間は，この着目点の応答は境界の有無にかかわりない。本文ではこの事実にもとづいて無限の拡がりをもつモデル内部の振動応答を計算する方法について述べる。

2. 計算方法

この方法は２つの部分から成立っている。第一は単一パルスに対する系の応答（以下SHOCK応答という）を求め入力波形に対する応答はSHOCK応答の重ね合せとして求めるものであり，第二は境界条件を工夫することによって境界からの第１反射波を消去して計算の対象となるモデルの縮小を図るものである。

2-1. SHOCK応答

離散化された系の運動方程式をモード展開によって，一自由度系の方程式に分解する。図-1のような三角形パルス入力に対する各一自由度系の応答はN.C.Nigamらの方法[2]によって算定する。これを重ね合せて系のSHOCK応答Bを求め，折線で与えられる任意の入力波形Aに対する応答Cを次式によって算定することができる。

$$C(j\Delta t)=\sum_{i=0}^{j}A(i\Delta t)B((j-i)\Delta t) \qquad (1)$$

この重ね合せを，パルスが加えられた時刻０から，当該点に境界からの反射波が到達する時刻tまで行えば，その応答は，境界がないとしたモデルの応答と同じものである。

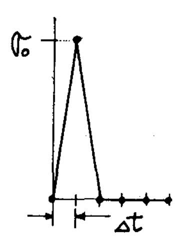

図-1

2-2. 第一反射波の消去

計算上からは対象となるモデルは狭いほど有利であり，これは第一反射波を消去することによってある程度達成される。

境界条件の異なる２つのモデルを考え，境界への入射波に対する反射波の性質がそれぞれの境界で全く反対になるように境界条件を設定して，この２つのモデルに対する応答を重ね合せると境界からの第一反射波は打ち消し合って消去される。図-2に示されるような２種の境界について考えると，これら２種の境界への入射波に対する反射波は，入射波と同種の波動だけであり，また互いに逆相となっている。つまり２つのモデルの境界としてこのようなものを考えると，この２つのモデルに対する波動には境界からの第一反射波は含まれない。このようにして見掛け上モデルを広くすることができる。

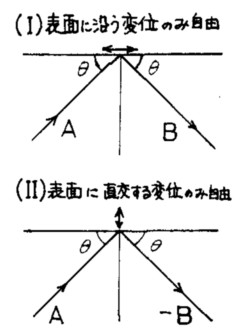

図-2

2-3. 距離減衰効果の算入

一般に，幾何減衰以外の距離による振巾減少の効果は，$exp(-\alpha r)$であらわされる。ここにrは振動源からの距離であり，αは距離減衰係数である。このαと減衰定数hとは次の関係にあるから，モード解析法を用いる本方法では，αの効果を簡単に算入できる。　$\alpha=2\pi h/(\lambda\sqrt{1-h^2})$ 又は $h=1/\sqrt{1+(\frac{2\pi}{\lambda\alpha})^2}$，$\lambda$；波長

3. 計算例

上述の方法の計算例として図-3のような無限弾性体中の円孔の内面に一様な圧縮応力が加わった場合の変位応答を取り扱う。円孔の半径を3m, P波速度を100m/s, ポアソン比を0.25, 密度を1.0g/cm³とする。軸対称問題であるから, 全周の一部(中心角20°, 中心から外側境界までの距離23m の扇形部分)を平面歪問題として解析する。モデルの離散表示にはハイブリッド有限要素を用い, 集中質量マトリクスを採用する。なお節点の自由度は半径方向のみとする。要素分割図を図-4に示す。

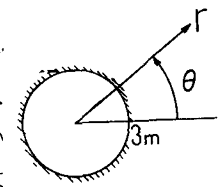

図-3

3-1. SHOCK応答, 正弦波応答, 距離減衰効果

図-1に示す三角形パルスにおいて $\Delta t = 5/1000$ 秒, $\sigma_0 = 3.821 \times 10^{-4}$ kg/cm² とした場合のSHOCK応答変位を図-5に示す(使用したモードは100次まで)。上から順に境界条件(I)のモデルに対する応答, 境界条件(II)のモデルに対する応答, 三番目以降はこの2つのモデルに対する応答を重合した応答波形を示し, 丸で囲まれた数字は図-4に示した節点をあらわす。図に示された節点①(加振点)の応答をみると, 境界からの第一反射波が2つの応答波形を重ね合せることにより消去されていることがよくわかる。また, ピークの伝達時間より計算されるP波速度は95.9m/sとなり, 理論値100m/s とほぼ一致する。このSHOCK応答を式(1)に従って重ね合せ, 8.33Hzの正弦波に対する応答を求めて, 反射波が到達する前のほぼ定常状態の変位全振巾と位相差を読みとったものを図-6に○印で示す。図中実線は理論解である。理論解と本計算方法で求めた解とはよく一致している。

8.33Hzで $\alpha = 0.02$ となるようなhを用いてSHOCK応答を求め, さらにこれを重合して8.33Hzの正弦振動に対する応答を求めて, その全振巾及び位相差を図-6に×印で示す。図中破線は $\alpha = 0.02$ に対する理論解で, 本方法による解はこれとよい一致を示している。

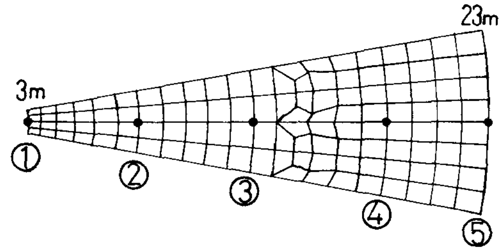

図-4 要素分割図

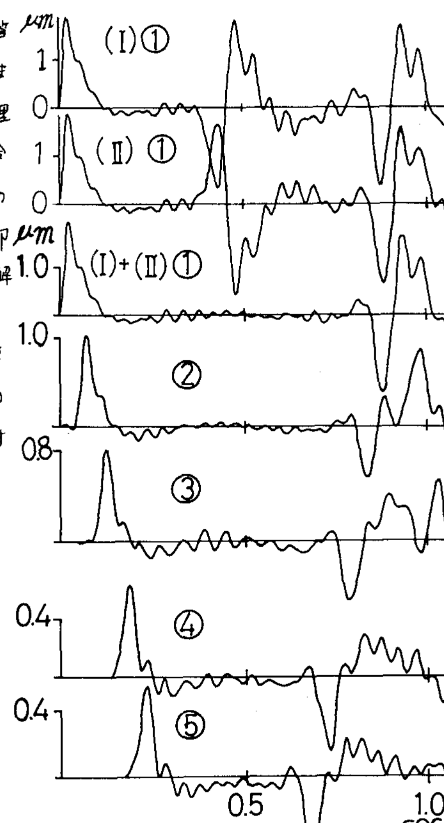

図-5 SHOCK応答変位

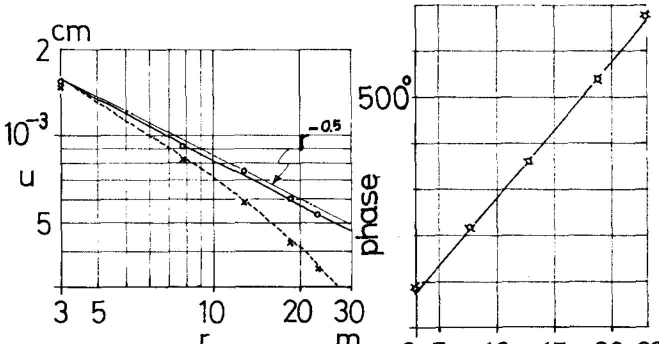

図-6 (イ),(ロ)

4. むすび

以上、有限な拡がりをもつモデルを用いて, 無限の拡がりをもつ系の応答を求める計算方法とその例を示した。

[参考文献] 1) 例えば,「FINITE DINAMIC MODEL FOR INFINITE MEDIA」Lysmer他, ASCE, vol.95, 2)「Calculation of Response Spectra from Strong-Motion Earthquake Records」Nigam他, B.S.S.A. Vol.59, No.2, 3)「波動エネルギーの地下逸散を考慮した地盤振動の一解析方法」田村,中村 生産研究 S.51.8