

(32) 複雑な境界条件を持つ表層地盤の地盤応答解析のための数学モデルの提案

東京大学生産技術研究所 正員 田村重四郎
(株) 熊谷組技術研究所 正員 鈴木 猛康

1. 結言

トンネル埋設管等の地中構造物の地震時の挙動はこの20年間の研究で定性的には略々明らかにされ、構造物が通常規模の場合実用的には、周辺地盤の地震時の挙動で決まり、地上構造物のような構造物自身の固有振動は発生しないと考えられる。

埋設トンネルの動的解析のため、田村(1975)は表層地盤の地震時の挙動を求めるため、実用的な一次元の地盤モデルを提案した。

このモデルは地盤状態がかなり広い範囲で一様であるか、又はトンネル軸に水平直交方向で略々一様であるとみなされる時に適用性が良い。しかし局部的に地盤状態が著しく変化したり、比較的狭く、しかも複雑な平面形状を持っているような地盤を解析する事が必要な場合がある。このため、田村、鈴木(篤)(1983)は地盤をパネと質点に置き換えたモデルを提案した。この場合、パネにの設定により地盤に異方性を与えることになり、又ポアソン比の影響をうまく表示する上で困難があった。

これらの欠点を補い、且つ実用性を持つモデルとして、ここに擬似3次元地盤モデルを作成したので報告する。

2. 擬似3次元地盤モデル

提案した地盤モデルは、質点-パネ系と平面の有限要素モデルとのハイブリッドモデルである(図1)。まず、当該地域を三角形又は四角形に分割して、地盤を三角柱或は四角柱の地盤要素に分割し、各節点に質量を割り付ける。次にこの点の地盤状態から決まる固有周期を持つよう、パネで基礎とこの質量とを連結す

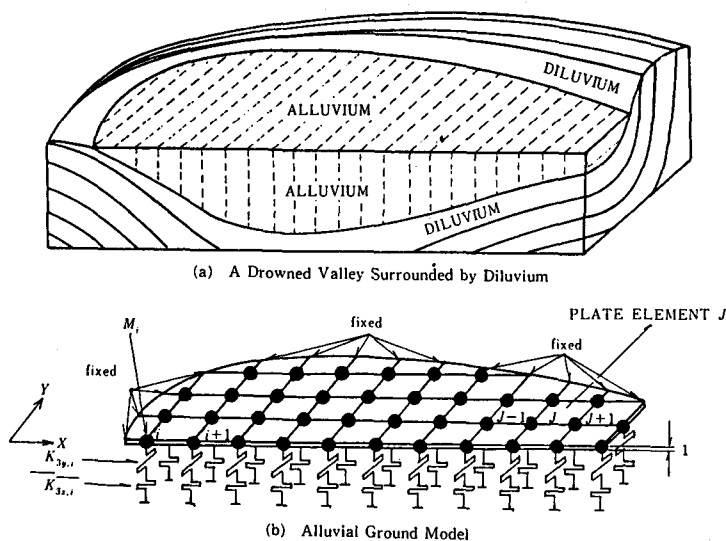


図-1 擬似3次元地盤モデル

る。一方、地盤要素毎に平均地盤状態を考え、各要素をこの状態を持つ平板要素と見なし、これにより質点を互いに連結するものである。

図-2の四角の地盤要素(J)について説明する。

i) 地盤要素jを平板に置き換える目的で、等価なヤング係数 E_j を次式で算出する。

$$E_j = \frac{\sum_{i=1}^4 (EF)_i}{4} \quad (1)$$

ここに、 $i = 1 \sim 4$ は節点の番号である

$(EF)_i$ は次式で求める。

$$(EF)_i = \int_0^{H_i} E'_i(z) F_i(z) dz \quad (2)$$

$$F_i(z) = \frac{\int_0^{H_i} m'_i(z) f_i(z) dz}{\int_0^{H_i} m'_i(z) dz} \quad (3)$$

z : 地表からの深さ

$H_i(z)$: 地点*i*における地表層の厚さ

$E'_i(z)$: 節点*i*で深さ*z*における地盤のヤング係数

$f_i(z)$: 節点*i*におけるセン断振動のモード

$m'_i(z)$: 節点*i*で深さ*z*における地盤の単位体積当りの質量

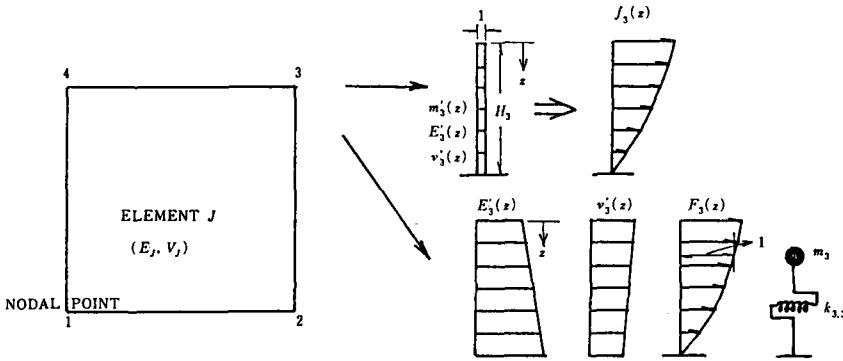


図-2 地盤要素とその構成

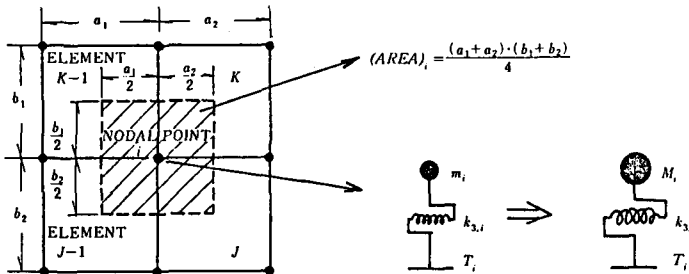


図-3 地盤質量 M_i と質量と基盤を結ぶバネの算定法

ii) 同様にして等価なポアソン比 (V_i) は次式で求まる。

$$V_i = \frac{\sum_{i=1}^4 v_i}{4} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \frac{1}{\int_0^{H_i} F_i(z) dz} \int_0^{H_i} F_i(z) v_i(z) dz \quad (4)$$

但し、 $v_i(z)$: 節点 i の深さ Z における地盤のポアソン比

v_i : 節点 i における平均ポアソン比

iii) 次に、節点 i における地盤質量 M_i 及び質量と基礎を結ぶバネ ($K_{3,i}$) を求める。

M_i は、図-3 に示される様に、通常の FEM の場合と同様にして次式で算出する。

$$M_i = m_i \cdot (AREA)_i \quad (5)$$

質点 i の地盤の質量と基礎地盤を結ぶバネ $K_{3,i}$ は次式で求める。

$$K_{3,i} = M_i \cdot \left(\frac{2\pi}{T_i}\right)^2 \quad (6)$$

但し、 T_i は i 点における地盤要素の固有振動周期である。

iv) このモデルの振動方程式は次の様である。

$$[M] \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{Bmatrix} + [C] \cdot \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} + [K] \cdot \begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix} = -[M_e] \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{W} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$M_{e,i} = (AREA)_i \cdot \frac{\left(\int_0^{H_i} m'_i(z) f_i(z) dz\right)^2}{\int_0^{H_i} m'_i(z) f_i^2(z) dz} \quad (8)$$

但し、 $[M]$: 質量 M_i のマトリックス

$[M_e]$: 有効質量 $M_{e,i}$ からなるマトリックス

$[C]$: 減衰マトリックス

$[K]$: 剛性マトリックスで $K_{3,i}$ と平板の変形平面応力状態に対する剛性ととの和

X, Y : 水平面内の x 方向及び y 方向の質点の変位

\ddot{U}, \ddot{W} : x 方向及び y 方向の基礎地盤の加速度

3. モデル実験

地盤状態が複雑な場合、地震時の挙動も亦複雑であろうことは地震被害の状況や、模型実験からも推測される。そこで、前述の数学モデルの特性を検討するため、ゼラチンを表層地盤モデルの材料として模型を作成して振動実験を行い、数学モデルとの比較を試みた。

図-4 は基礎地盤の等深線図である。表層地盤の表面の標高は 0.0 としているので、最も厚い部分は 20cm になる。図-5, 6 は K_3 を基本振動数から決めた数学モデルを用いて算定した基本振動モード及び

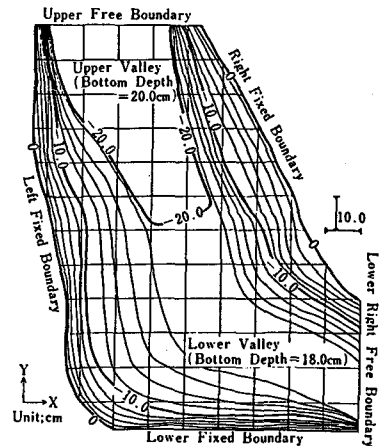


図-4 模型の基礎地盤等深線図

Frequency=3.72659 HZ
Participation Factor=0.13998

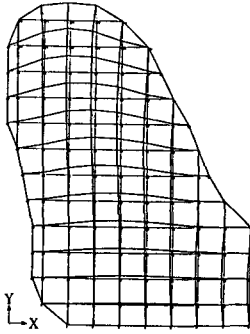


図-5 1次振動モード (解析結果)

Frequency=4.24109HZ
Participation Factor=0.35030

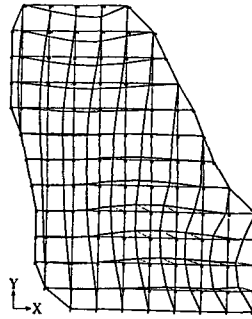


図-6 2次振動モード (解析結果)

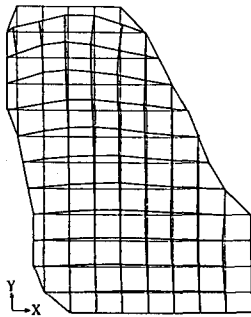


図-7 1次振動モード (実験結果)

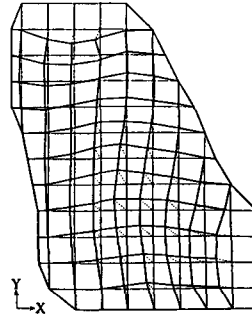


図-8 2次振動モード (実験結果)

第2次固有振動モードである。両者による関与係数の和は約50%になる。図-7、8は実験で得られた卓越振動モードで、振動数の低い方から並べてある。両者を比較した場合、基本振動モードは極めてよい一致を示すが第2次固有振動モードでは一部で一致しない点が見られる。第2次固有振動数のあたりでは、数学モデルでは3次、4次の固有振動が僅かの振動数の差で生ずること、又模型実験では材料の減衰係数が1%程度あることから、必ずしも2次の固有振動数をあらわしていないおそれがある。数学モデルから得た固有振動数と実験より得た振動数を比較すると、基本振動数では解析解が2.2%大きくなっているが2次、3次固有振動数では逆に3.8%、6.9%各々小さくなっている。

4. まとめ

この研究では、提案した地盤モデルは地盤の低次の卓越振動ではかなり良い解析解を得ることがわかる。地盤状況が更に複雑な場合、高次振動の取り扱いについて更に検討を進める必要がある。最後に本研究室、特に模型実験は東京大学生産技術研究所加藤勝行助手、稲森光洋研究員に負う所が大きいことをのべて謝意を表します。

5. 参考文献

- 1) Tamura, C., S. Okamoto and H. Hamada :Dynamic Behavior of Submerged Tunnel during Earth-quakes, Report of Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Vol.24, No.5, 1975
- 2) 鈴木 篤・田村 重四郎・加藤 勝行;平面パネマス系モデルによる3次元表層地盤の振動解析の一手法、第38回年次学術講演会、I-376、1983