

(株)大林組 技術研究所 正員 〇後藤 洋三

(株)大林組 機械計算部 正員 太田 順

(株)大林組 機械計算部 正員 佐藤 拓男

1. まえがき

軟弱地盤中に建設される沈埋トンネルの地震時における挙動を明らかにしていくためには、1)土の動的性質、2)2次元的広がりでの入力地震波の特性、3)地盤と構造物の3次元的連成振動解析、の各分野について研究を進める必要がある。ここに発表する研究は、とりあえず地盤を弾性体と仮定し地震波はある速度と入射角で基盤から入力するという仮定の上に立って、地盤とトンネルを一体とした3次元的動F.E.M.による地震応答計算法を検討したものである。

3次元動的F.E.M.解析を行う上でまず問題となるのは、計算機の処理能力上の制約(特に容量と計算速度)をいかに克服するかという点である。我々は解析方向をトンネル軸直交方向に限定すると共に、不要な振動成分を除去するという考えに立った自由度減少法を開発し、この問題を解決することを試みた。以下にその方法と若干の計算結果を紹介する。

2 解析方法

2-1 解析モデル. 図-1に解析モデルの略図を示す。導入した仮定は次の通りである。

- 1) トンネル軸方向の適当な間隔で地盤を分割する。
- 2) 各ブロック内を平面歪問題と考えて任意に有限要素化する。(三角要素を用いる)
- 3) 隣接ブロック同志は地盤のパネ作用によってせん断力を伝えあうものとする。
- 4) 地盤の質量はブロック内の各要素頂点に集中しているものとする。

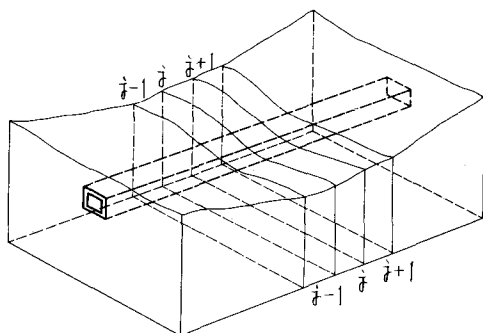


図-1

- 5) トンネルは曲げとせん断で抵抗する多質点系の梁に置換し、各質点は水平変位、上下変位、水平撓角、鉛直撓角、ねじれ角の5自由度をもつものとする。

2-2 運動方程式. 非減衰自由振動の運動方程式をjブロックについてたてると

$$[M_j] \begin{Bmatrix} \ddot{P}_j \end{Bmatrix} + [K_{i,j-1}] \begin{Bmatrix} P_{j-1} \end{Bmatrix} + [K_{j,j}] \begin{Bmatrix} P_j \end{Bmatrix} + [K_{j,j+1}] \begin{Bmatrix} P_{j+1} \end{Bmatrix} = [K'_{i,j-1}] Z_{j-1} + [K'_{j,j}] Z_j + [K'_{j,j+1}] Z_{j+1} \quad (1)$$

全体の方程式は

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{P}_1 \\ \ddot{P}_2 \\ \vdots \\ \ddot{P}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & & \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K'_{11} & K'_{12} & & \\ K'_{21} & K'_{22} & K'_{23} & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & & K'_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_n \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式(1),(2)中 P_j は j ブロックの変位ベクトル, z_j は j ブロック基盤の地震変位である。

式(2)は一般に膨大な未知数(自由度)を持つため数値積分の実行は非常に困難である。そこで必要な振動成分を除去する考えに立つて自由度の縮少をはかる。まず式(1)の $P_{j-1}=\{0\}$, $P_{j+1}=\{0\}$ として j ブロックのみの振動を考え、モード解析を行ってモーダルベクトル $[v_j]$ を求める。ここに

$$[V_j]^T [M_j] [V_j] = [I] \quad , \quad [V_j]^T [K_{jj}] [V_j] = [\text{dia}(\omega^2)] \quad \text{である。次に } [v_j] \text{ から主}$$

要な振動モード以外のモードを切除した縮少モーダルマトリックス $[v_j]$ を求め $\{P_j\} = [v_j] \{q_j\}$ なる変換を行って式(1)を書き改める。すなわち

$$[I] \{\ddot{q}_j\} + [k_{j,j-1}] \{q_{j-1}\} + [k_{j,j}] \{q_j\} + [k_{j,j+1}] \{q_{j+1}\} = [k'_{j-1,j}] z_{j-1} + [k'_{j,j}] z_j + [k'_{j+1,j}] z_{j+1} \quad (3)$$

$$\text{ただし } [k_{j,j-1}] = [v_j]^T [K_{j,j-1}] [v_{j-1}] \quad , \quad [k_{j,j}] = [v_j]^T [K_{j,j}] [v_j] \quad , \quad [k_{j,j+1}] = [v_j]^T [K_{j,j+1}] [v_{j+1}] \\ [k'_{j,j-1}] = [v_j]^T [K'_{j,j-1}] \quad , \quad [k'_{j,j}] = [v_j]^T [K'_{j,j}] \quad [k'_{j,j+1}] = [v_j]^T [K'_{j,j+1}]$$

全体の運動方程式を再構成すると

$$\begin{bmatrix} I \\ \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \vdots \\ \ddot{q}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & & \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \\ & & & \\ & & & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k'_{11} & k'_{12} & & \\ k'_{21} & k'_{22} & k'_{23} & \\ & & & \\ & & & k'_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(3)の縮少を適当に行えば式(4)を数値積分可能な大きさにすることができる。

2-3 入力地震波. 式(4)右辺の地震入力はいずれも各ブロック毎に基盤変位で与えている。これは地震動がトンネル軸方向に位相の遅れをもって作用するのを表現するためである。通常強震記録は加速度で与えられる。従って2重積分を行い変位記録を求めるが、その際発生するドリフトは最小自乗法とHighPass Filter で補正する。トンネル軸方向の位相遅れについては、地震波が基盤中をセン断波の伝搬速度と任意の指定した角度で入射してくるものと仮定して計算する。

2-4 境界条件その他. プログラミングに当って、各ブロックの境界条件は基盤は固定、側面は固定、スライド、自由の任意の条件が選択可能なものとした。軸方向端末の条件も固定、自由の選択が可能とした。換気塔などの構造物がトンネル軸中に設置される場合には、これを要素化するあるいはトンネル断面を対応ブロックについて括弧することにより考慮できる。トンネルにヒンジがある場合についても考慮できるよう現在プログラムを開発中である。

3 計算例

道路用沈埋トンネルを例に取り地震応答計算を行った結果を紹介する。図-2は沈埋トンネルの縦断面で全長1,100 mを10個のブロックに分割した。図-3に代表的な1ブロックの横断面と有限要素分割の状況を示した。図-4はトンネル断面の詳細である。1ブロック内の自由度は95で、各ブロック共これを自由度10まで縮少し系全体では自由度100となるようにした。図-5に1次モードの波形を示す。図-5aはトンネルの軸方向モードで、図-5b, c, dは代表的ブロックの面内変形モードである。入力地震波としてはE&Centro-40NSを用い、 1 km/sec の伝搬速度と 45° の入射角をもって基盤から入射した場合(各ブロック間で位相差あり)と 90° で入射した場合(同位相)の2様を考えた。図-6は入力地震変位である。図-7, 図-8は応答計算結果で、それぞれ各ブロックの

沈埋トンネルの最大変位と水平撓方向最大モーメントを示している。各図中実線は入射角 45° の場合であり破線は 90° の場合である。

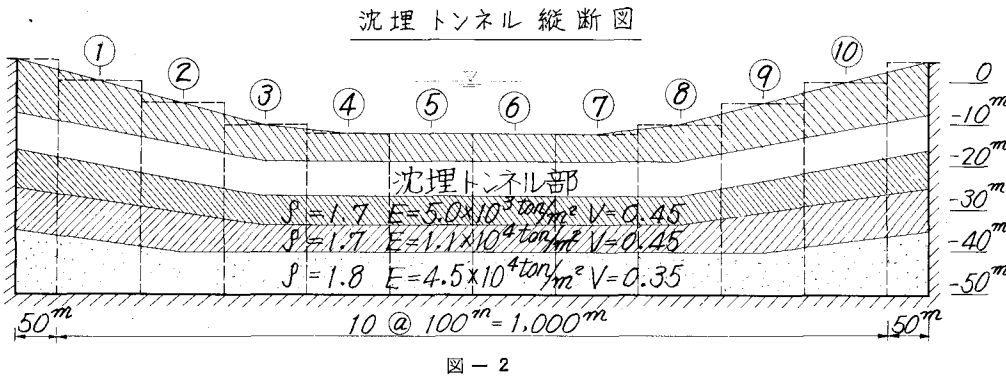
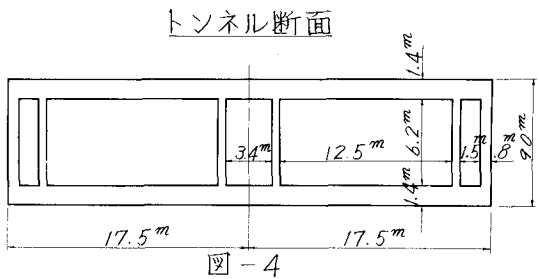
4. 考察と結論

図-7 の地震変位記録をみると積分過程で生じるドリフトが充分除去されておらず、地震波積分プログラムをさらに改良する必要がある。図-6 に示した 1 次モードでは計算誤差がみられないが高次モードになると計算誤差が現われる。これは式 (4) のモード解析時の桁落ち誤差によるものと考えられ、固有ベクトルを求めるサブルーチンを改善する必要がある。自由度減少による誤差を正確には確かめられないが、モード解析の結果と応答計算結果からみる限りでは大きな誤差は生じていない。

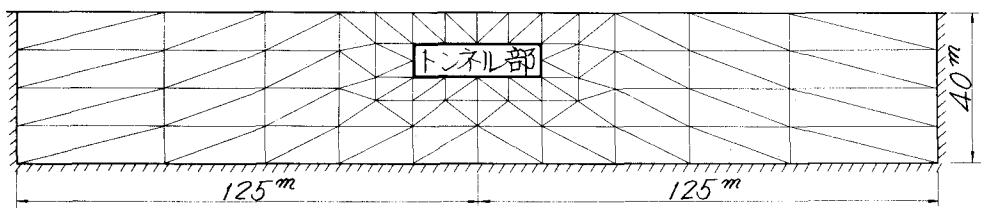
現在までの研究結果から得られた結論と今後の課題は次の通りである。

- 1) 本研究でとりあげた自由度減少法は合理的の考えに立った方法であり実用的と考えられるが、減少にもなる誤差についてはさらに検討を必要とする。
- 2) 沈埋トンネルの耐震性については軸方向の検討も重要であるが、本研究で開発した方法は軸方向にも適用可能と考えられる。
- 3) 沈埋トンネルの動的挙動は断面急変部の影響を大きく受ける。
- 4) また地震入力の変相遅れの影響も大きい。

なお本研究の遂行にあたり (株) 大林組技術研究所中川恭次次長、斎藤二郎室長の助力を得てきたことをここに付記し謝意を表する。



N0.3 ブロックの要素分割 (自由度 95)



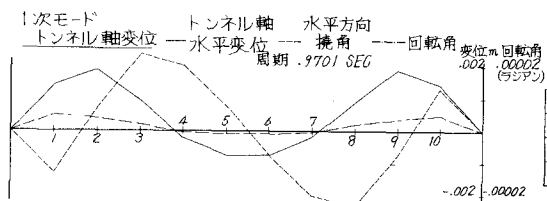


図-5a

1次モード N0.1ブロック内変位 周期 .9701 SEC.

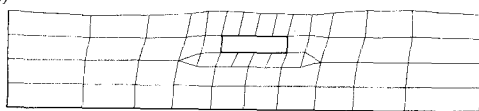


図-5b

1次モード N0.5ブロック内変位 周期 .9701 SEC.



図-5d

1次モード N0.3ブロック内変位 周期 .9701 SEC.

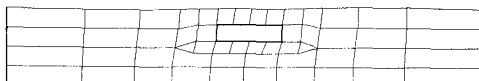


図-5c

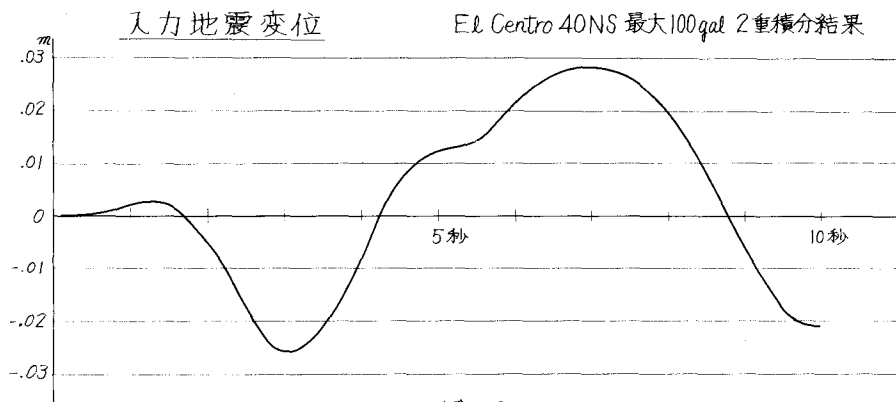


図-6

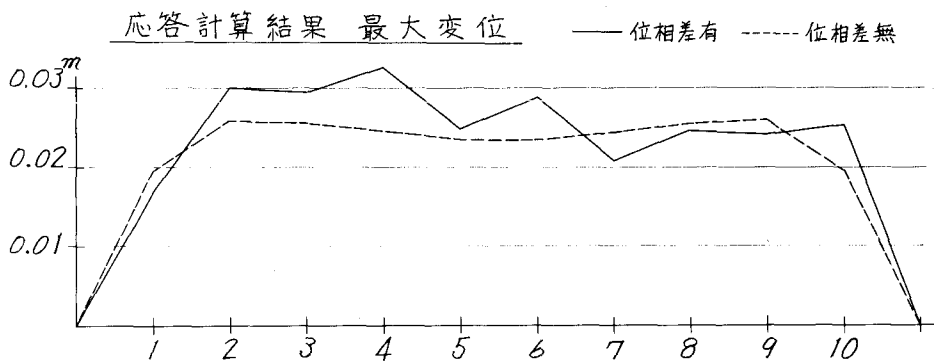


図-7

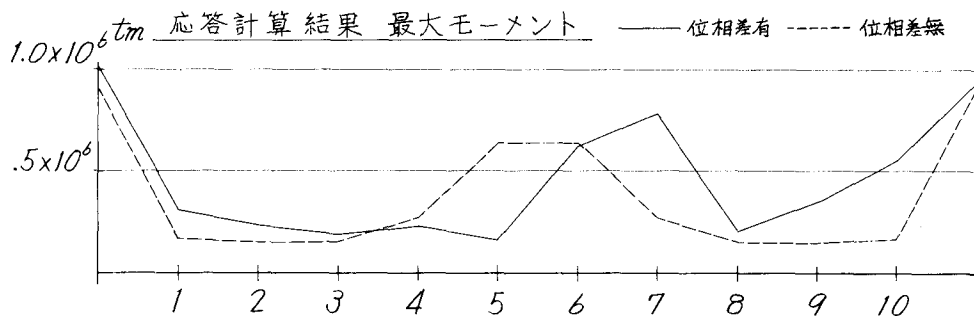


図-8