

東京大学生産技術研究所 正員 田村重四郎  
 日本国有鉄道 正員 O湯山 和利  
 (株) 熊谷組 木戸 義和

## 1. 概説

従来、トンネル設計上トンネルの軸方向の変形、曲げ変形及び断面変形が考慮されてきた。しかしながら、トンネルの軸に沿って地盤の動特性が急激に変化している条件下では、トンネルにねじり変形が生じることがある。今回、円形断面をもつトンネルの地震時のねじり変形に関し、別に行なったビラチンモデルによる振動実験結果を踏まえ、数値解析を行なった。解析手法としては、ねじり等動を解析するには3次元元的な考察が不可欠であると考え、3次元FEMを採用した。また、現在広く用いられているバネ・マス系解析モデルにねじり変形をとりいれたものを作成し、両者による数値解と実験結果との比較検討を試みた。

## 2. 数値解析

数値解析は、3次元FEM及びバネ・マス系によるものとし、まずトンネルを考慮しない地盤モデルによって固有値解析を行ない、トンネルに発生する断面力はトンネルを弾性支承上のはりと考え、

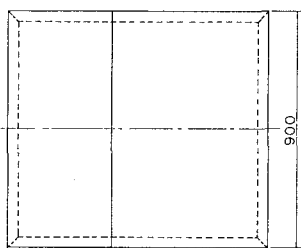


Fig.1 地盤モデル図 ---- 振動切断面

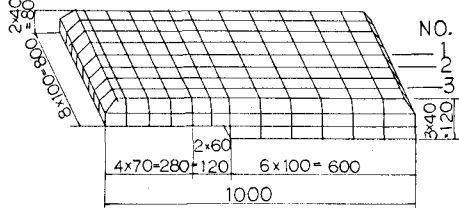


Fig.2 FEM解析モデル図

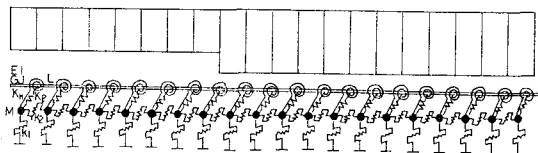


Fig.3 バネ・マス系解析モデル図

地盤モデルから求めたトンネル位置での地盤の変位を与えることにより求めた。地盤モデルとしては、振動時においてトンネルのねじり変形が顕著になるような地盤構造を想定する必要がある。そこで、Fig.1に示すような実験模型と同じモデルを採用して数値解析を行ない、実験

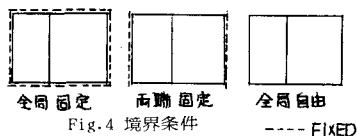


Fig.4 境界条件 ---- FIXED

結果と比較検討を行なった。FEM解析においては、直方体要素を用いて、Fig.2に示すような要素分割を行ない、バネ・マス系解析においては、埋設地盤をFig.3に示すような等価な質点・バネ系に置換した。計算にあたって、モデルの境界条件はFig.4に示す様に次の3種類とした。

1) モデルの周囲がすべて固定されている場合——全周固定

2) トンネルが埋設されている場合に、その軸方向のモデルの端面が固定されている場合——両端固定

3) モデルの周囲がすべて開放されている場合——全周自由

以上のモデル化と各境界条件によって、地盤モデルの固有値解析を行なった。急変部の両側の地盤(層厚8及び12cmの地盤)の1次及び2次の共振数を実験によって得られたものとあわせてTable.1に示した。この表によると、全周固定を除けばかなりよい精度で固有振動数が求められているものと判断され

| 層厚   | 次数 |       | HZ   |      |      |
|------|----|-------|------|------|------|
|      |    |       | 全周固定 | 両端固定 | 全周自由 |
| 12cm | 1  | 実験    | 7.01 | 6.61 | 6.02 |
|      |    | FEM   | 8.86 | 6.49 | 6.03 |
|      |    | バネ・マス | —    | 6.12 | 5.98 |
|      | 2  | 実験    | 21.2 | 17.5 | 17.8 |
|      |    | FEM   | —    | 16.8 | 16.0 |
|      |    | バネ・マス | —    | 17.5 | 17.5 |
| 8cm  | 1  | 実験    | 11.1 | 9.78 | 9.24 |
|      |    | FEM   | 12.1 | 9.36 | 9.10 |
|      |    | バネ・マス | —    | 9.34 | 9.05 |
|      | 2  | 実験    | 27.0 | 28.3 | 28.1 |
|      |    | FEM   | —    | —    | 28.0 |
|      |    | バネ・マス | —    | 26.3 | 26.3 |

Table.1 共振振動数

る。全周固定条件において差がみられるのは、実験における固定条件が完全でなかったことに原因があると思われる。

Fig.5に、1次振動におけるモデル表面のモードを示した。(全周自由・厚さ12cmの地盤の共振の例) この結果をみても、実験と数値解析がよく一致していることが分る。FEMによって求めたFig.2のNO.1, 2, 3列に関する深さに沿う変位分布もあわせてFig.6に示している。この変位分布を見ると厚さ12cmの地盤において、1次せん断振動形を覆わす正弦曲線の変位形になっていることが分る。

次に、固有モード計算によって求めたトンネル位置での地盤変位を、トンネルをあらわしている弾性支承上のはりに静力学的に加えることにより、トンネルに発生する断面力を算定した。本研究においてはトンネルのねじり変形を検討対象としているため、トンネル軸に対して直角方向の水平変位及び回転変位を考慮し、Fig.3に示している様に入力点とトンネルを結ぶバネに回転バネを付加すればよいと考える。地盤の水平変位及び回転変位の算定は、1次振動形の場合、Fig.7のようにして求められ、次式によりトンネルに発生する変位が求まり、断面力を計算することができる。

$$EI \frac{d^4 U_P}{dx^4} + K_{U1}(U_P - U_G) + K_{U2}(\theta_P - \theta_G) = 0$$

$$GJ \frac{d^2 \theta_P}{dx^2} + K_{\theta 1}(U_P - U_G) + K_{\theta 2}(\theta_P - \theta_G) = 0$$

ここに  $K_U$ : 軸力バネ  $K_\theta$ : 回転バネ  $U$ : 水平変位  $\theta$ : 回転変位

$P$ : トンネル位置  $G$ : 地盤位置

この数値計算で求めた断面力と実験によるものをFig.8に示した。(全周自由厚さ12cmの地盤の共振の例) 図を見ると、実験で得られた値と計算値はほぼ同様な結果となっている。FEMに比べてバネ・マス系によるものが実験値によく近似している理由として次のことが考えられる。

1) バネ・マス系による数値解析では、各バネに所定の振動周期になるせん断バネを用いているため、モード計算においては割合正確になると考えられる。 2) 3次元FEMの場合、計算精度上、節点数を多くできないため、要素の分割が粗大かであること。

しかし、複雑な地盤条件での局部的解析においては、3次元FEMによる解析が有効になると考える。

### 3. まとめ

模型振動実験によって懸変地盤においてトンネルにねじり変形が生じることが分り、それを求めるための数値解析も精度よく行なえる確証を得た。

参考文献 (1) 田村他: シールドトンネルの地震時変形の実験的研究 土木学会第36回年次学術講演会/1981

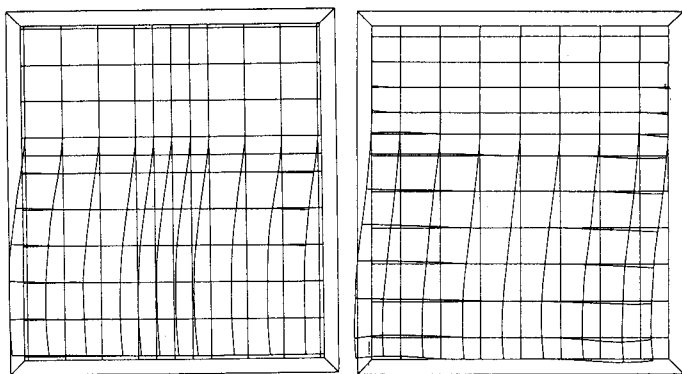


Fig.5 実験による変位モード図

Fig.5 FEMによる変位モード図

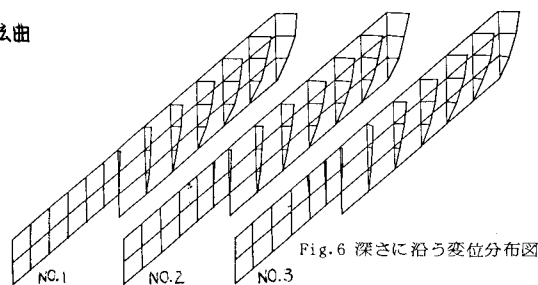


Fig.6 深さに沿う変位分布図

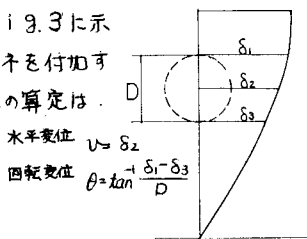


Fig.7 トンネル変位図

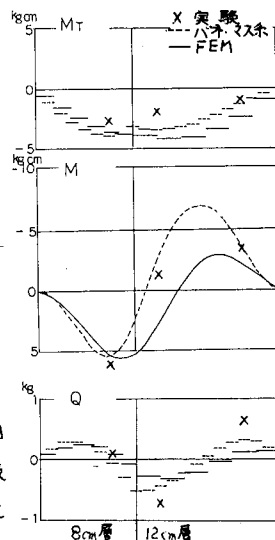


Fig.8 断面力図