

## (23) 軟弱地盤中のトンネルの地震時における捩り変形について

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

### 1. 緒言

著者等は軟弱地盤中に建設されたトンネルの耐震性の研究を行ない、地震時のトンネル軸方向に沿う変形ならびにトンネル断面の変形に対して解析用モデルの提案を行なってきた。トンネル軸方向に沿う変形を検討する場合、トンネルを弾性(必ずしも線形とは限らない)床土の梁として取り扱っているが、地盤の変形に対応してトンネルが変形するとすれば、場合により地震時にトンネル軸の廻りに回転し、捩り変形をも生じることになる。このことは今までの調査でも認められ、また、通常定量的にもそう大きな値にはならないことが推測されていた。本研究では室内模型振動実験、数値計算により捩り変形の検討を行なったので報告する。

### 2. 模型振動実験

地盤の地震時の挙動がトンネル軸に沿って変化する場合、トンネル軸方向変形、曲げ変形、せん断変形の他に捩り変形を生ずることになる。そこで、基本となる地盤とトンネルの挙動をトンネルを含めた2次元模型振動実験で調べると共に、地盤状態を急激に変化させた地盤にトンネルを埋設した3次元模型の振動実験を行ない、捩り変形の検討を行なった。模型材料にはトンネル及び地盤に対し夫々ゴム、ゼラチンゲルを採用している。

#### 2-1. 2次元模型振動実験

写真-1は地盤の1次元振動の場合の振動状態をストロブライトを用いて撮影したものである。地盤の厚さは8cmで、トンネル外径は4.7cmであり、トンネル断面上にある白印は変位、変形を測定するための標的である。白印は2個づつ対になっていて変位位置を示しているが、明らかにトンネルが平行移動の他に回転変位していることが分る。また、トンネルの下部分の地盤は局部的にトンネルの存在により動きが乱されていることが分っている。

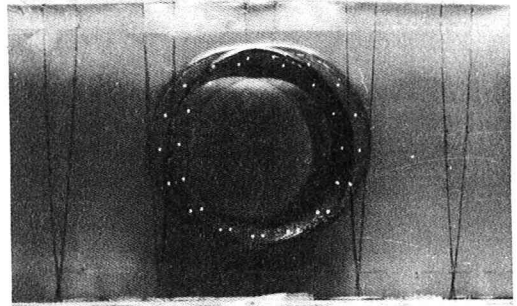


写真-1 2次元模型振動実験 トンネル変位

#### 2-2. 3次元模型振動実験

図-1に示してあるのはこの実験のモデルで、モデルの中央部で地盤の厚みが8cmから12cmに急変させてある。この図から分る様に、厚さ8cmの地盤の中心に4.7cmのトンネルを置いているわけで、特殊な条件を再現していると考えられる。

計測器は加速度計及び、トンネル壁に貼付した紙ベースの歪計である。歪計の示度は実歪の約50%である。

図-2及び写真-2は夫々厚さ12cmの層が共振している場合の地盤表面とトンネル(点線)の変位モード及び振動中シャッターを開放して撮った写真である。地盤の動特性の差の影響が明りょうに認められる他、観察によりトンネルの平行移動と回転変

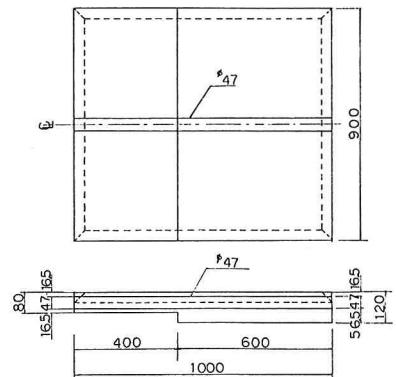
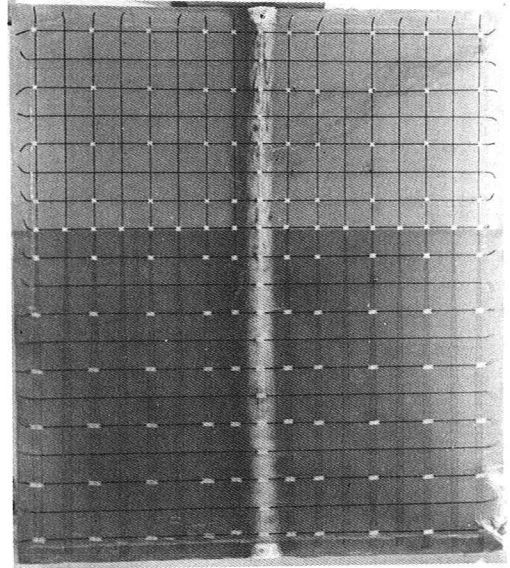
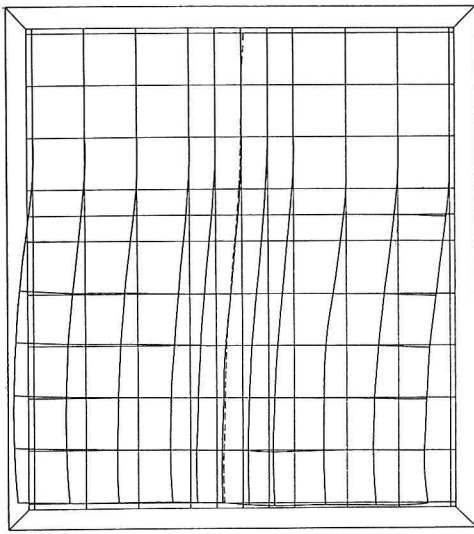


図-1 3次元模型振動実験モデル

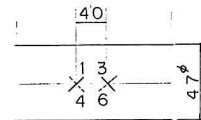
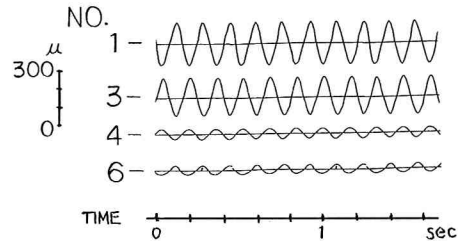
位が認められている。8cmの厚さの地盤が共振状態になる場合も、略々同様である。従って、地盤が急変している部分でトンネルに捩り変形が発生していることは、前節の結果を併せ考慮して推定されることである。



Q1

図-2 3次元模型振動実験 変位モード (厚さ12cm層 1次共振) 写真-2 3次元模型振動実験 変位モード (厚さ12cm層 1次共振)

図-3はトンネルの変位形で、NO.1, 3, 4, 6はトンネル軸線の一点で貼付した歪計を指す。NO.1, 3はトンネル上面でトンネル軸方向に向って左右に45°づつふたつた方向に、NO.4, 6はトンネル下面に同様に貼付されている。NO.1と4, NO.3と6は夫々対をなしているが、左右のふたつの方向は逆になっている。これ等の4つの波形から、トンネルのせん断変形及び捩り変形を略々見出すことができる。この場合、せん断変形に対応する程度の捩り変形が生じていることがわかる。



NO. 1,3:トンネル上面  
NO. 4,6:トンネル下面

図-3 トンネルひずみ波形

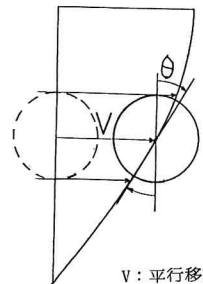
### 3. 捩り変形のモデル化

トンネル捩り変形を動的解析に組み込むために、単純化して図-4の様をモデル化であらわした。トンネル断面の範囲では地盤のせん断変形を一定とみなし、トンネルの挙動を平行移動と回転変位とに分けたものである。トンネル軸直交水平方向で、トンネル位置における地震時の地盤の平均変位( $U_G$ )及び回転角( $\theta_G$ )が求まっている場合、トンネルの平行移動( $v$ )及び回転変位( $\theta$ )を次式で算定する。

$$EI \frac{d^2 v}{dx^2} + K_{vv}(v - U_G) + K_{v\theta}(\theta - \theta_G) = 0$$

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

ただし、 $EI$ : トンネルの曲げ剛性  $GJ$ : トンネルの捩り剛性  
 $K_{vv}, K_{v\theta}, K_{\theta v}, K_{\theta\theta}$ : トンネルと地盤との間に働くバネ係数  
 $x$ : トンネル軸方向に測った座標



v: 平行移動  
theta: 回転変位

図-4 トンネルと地盤の変位

着者が先に提案した地盤の動的解析モデルに、この振り変形のモデルを付加してトンネルの解析モデルを表現すれば、図-5の様になる。(パネ-マス系モデルと呼ぶ)

#### 4. 数値解析

トンネルの振り変形を含めて動的解析を行なうためには3次元モデルの設定が必要である。ここでは、前項の図-5で示した解析モデル及び3次元有限要素法を用いて数値解析を行なった。解析対象モデルは模型振動実験で使用したモデルであるが、ここでは3次元モデルのみについて説明する。

##### 4-1. 数値解析

図-6はモデルの要素分割を、図-7はこれによって求めた厚さ12cmの層が共振状態にある場合のモードを夫々示している。写真-2と対比してかなりよく類似していることがわかる。算出された固有振動数と実験値は低次振動でよく一致している。この様にして得られた地盤の変位及び回転角を弾性床上のチモシェンコ梁とみなしたトンネル模型に作用させ、トンネルの断面力を求めた。本計算では分割要素の厚みが4cmとなっており、深さ方向の振動モードをあらわすには必ずしも充分ではない。

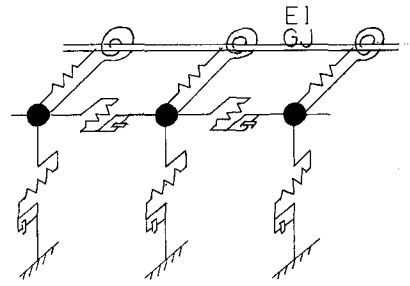


図-5 トンネルの解析モデル

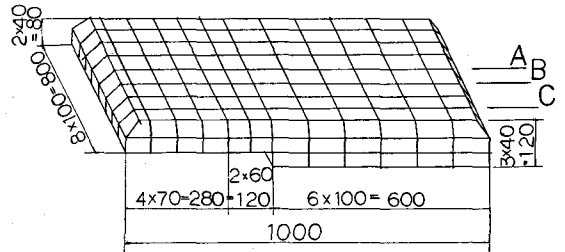


図-6 3次元有限要素法モデル要素分割

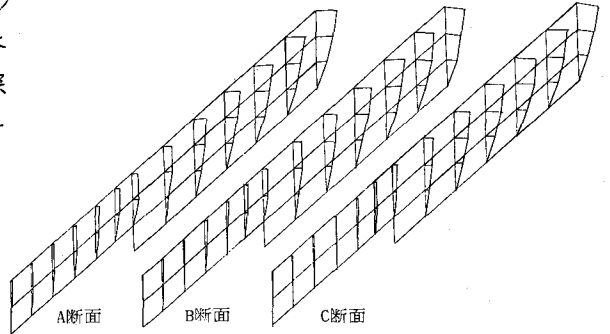
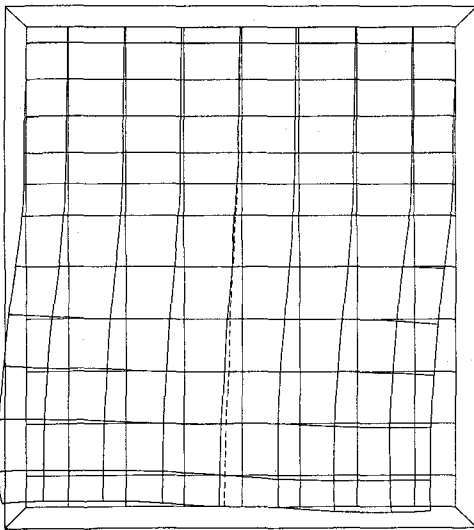


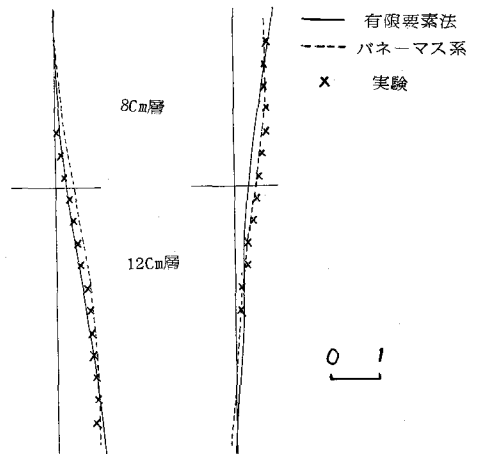
図-7 3次元有限要素法変位モード (厚さ12cm層1次共振)



0.1 モデル表面

##### 4-2 数値解析結果の検討

図-8には実験及び数値解析で求められたトンネル変位を示してある。実験ならびに数値解析の結果得られた地盤の最大変位を同値として規準化してある。(最大変位を1としている。)



厚さ12cm層 1次共振 厚さ8cm層 1次共振

図-8 3次元モデル トンネル変位

図にみられる様に、3種類の方法による結果はかなりよく一致している。特に、バネ-マス系モデルによる結果と実験結果とがよく対応していることがわかる。

図-9、10は数値解析ならびに実験から求まったトンネル断面力のトンネル軸に沿う分布をあらわしている。図-9はトンネルの両端のモデルの側面を固定した場合であり、図-10は何の拘束も加えない場合である。×印は実験結果、点線、実線は夫々バネ-マス系と有限要素法の数値解析結果である。これらは全般的によく一致を示しているが、特にバネ-マス系の結果と実験の結果との一致が良好である。これは前述の理由によるものと考えられる。

### 5. 結論

模型振動実験及び数値解析により、地震時のトンネルの捻り変形

の挙動を表現する実用的なモデルの作成を試みた。その結果、次の様なことが分った。

- 1). トンネル軸に沿う地震時の地盤の挙動が一様でないことにより、トンネルには捻り変形が生じることがある。
- 2). トンネルの捻り変形を算入する場合、通常の地盤では、従来トンネルの動的解析に用いられているバネ-マス系モデルは、わずかな変更を加えればそのまま使用することができる。
- 3). トンネル軸に沿う地震時の地盤の変位の相対的な変化が特に大きいとみなされる場合、捻り変形を検討することが必要である。

### 参考文献

- ・ C. TAMURA, S. OKAMOTO, AND M. HAMADA  
DYNAMIC BEHAVIOR OF A SUBMERGED TUNNEL DURING EARTHQUAKES  
東京大学生産技術研究所報告 第24巻 第5号
- ・ 田村重四郎、山口良雄、河田博之  
シールドトンネル模型の振動実験 昭和51年 第31回年次学術講演会 土木学会
- ・ 岡本舜三  
耐震工学 オーム社

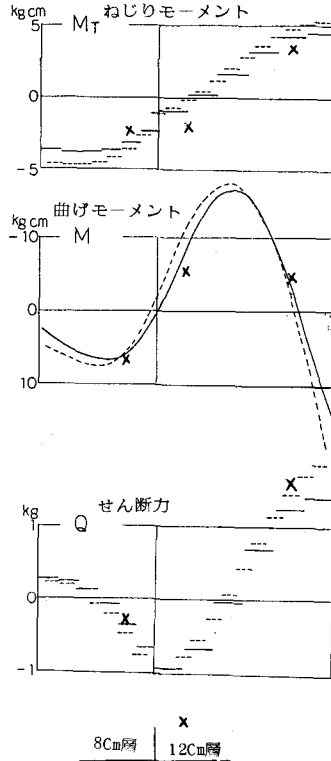


図-9 トンネル断面力 両端固定  
(厚さ12cm層共振)

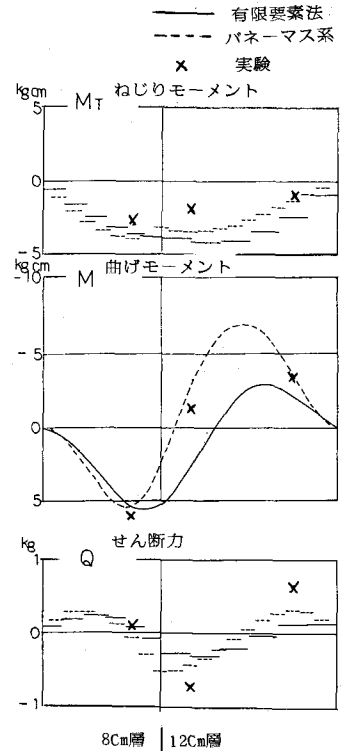


図-10 トンネル断面力 全周自由  
(厚さ12cm層共振)