

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

1. 緒言

トンネル軸に沿う地盤の動的特性が急激に変化している場合、トンネルに軸方向変形、曲げ変形及び断面変形が生じることはすでに報告されており、この考えは設計にも広く用いられている。しかし、シールドトンネルについては特殊な地盤条件のもとで、トンネルにねじり変形が生じることがある。今回は、このねじり変形に注目をして、地盤にゼラチンゲルを、トンネルにネオプレンゴムを用いたシールドトンネル模型振動実験を行なった。その場合、今まで充分な測定精度が得られていなかった低ヤング率をもつトンネル部材のひずみに対して、より精度の高い測定値が得られる測定方法を案出したので、あわせて報告する。

2. トンネル部材のひずみ測定法

この実験ではトンネル部材のひずみ測定に際し、トンネル部材に用いるネオプレンゴムに紙ゲージの台紙に用いられている和紙(以後、補強紙と呼ぶ)を貼付し、その上に紙ゲージを貼付することによりひずみの検出精度の向上を図った。このひずみ検出のためにはFig. 1に示すようなネオプレンゴムの面に補強紙を1~4枚と貼りつけて引張試験を行なった。その結果、Fig. 2に示すように補強紙の枚数を増加することによってひずみ出力比(ひずみゲージによるひずみ出力と実ひずみの比)が増加することが分った。そこで、実験結果に基いて、補強紙を3枚とし、補強紙を貼付したトンネル部材による引張試験、曲げ試験、ねじり試験を行ない、ひずみ出力比の検定を行なった。その結果、実ひずみの50%程度まで検出することが可能となった。

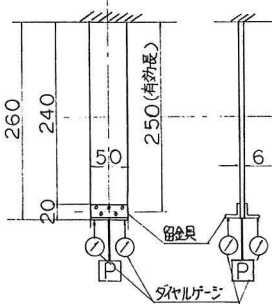


Fig. 1 引張試験

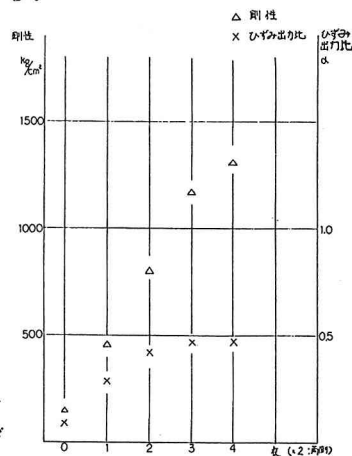


Fig. 2 補強紙 - ひずみ出力比 - 剛性

Fig. 2に示すように補強紙の枚数を増加することによってひずみ出力比(ひずみゲージによるひずみ出力と実ひずみの比)が増加することが分った。そこで、実験結果に基いて、補強紙を3枚とし、補強紙を貼付したトンネル部材による引張試験、曲げ試験、ねじり試験を行ない、ひずみ出力比の検定を行なった。その結果、実ひずみの50%程度まで検出することが可能となった。

3. 実験

(1). 2次元模型実験

Fig. 3に示すような2次元模型振動実験を行なって、トンネル断面の挙動を解析した。

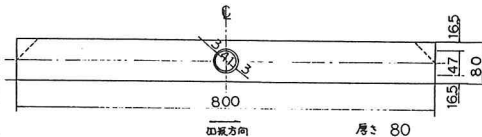


Fig. 3 2次元模型図

実験では、トンネル軸直交断面の2次元模型を振動台上に設置し、水平方向に正弦波で加振して1次共振時のトンネルの変形を視察すると共に、写真撮影も併せ行なった。その結果、トンネルの主な変位はFig. 4に示すように地盤のせん断変形に基づく移動と回転によって生じていることが分った。

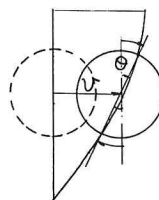


Fig. 4

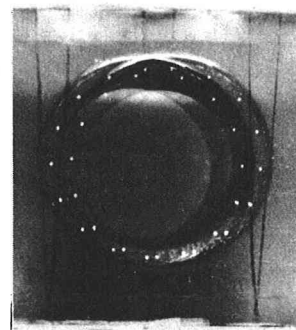


Photo トンネル変形

(2). 3次元模型実験

地震時におけるトンネルの挙動には、その周辺の地盤の挙動がそのまま影響すると考えられる。そこで、地盤だけのモデルの振動実験を行なうと共に、トンネルを含んだ模型実験を実施し、両者を比較対照することにより

地盤とトンネルの挙動を実験的に解析した。モデルとしては、トンネル軸にぞって地盤が急変している場合を想定し、急変部の両側の地盤（層厚 8 及び 12cm）の振動周期及びそれらの相違に主眼をおいて Fig. 5 に示すものを採用した。模型を振動台上に設置し、トンネル軸垂直方向に水平方向正弦波を入力して急変部の両側の地盤の夫々の 1 次共振状態における地盤及びトンネルの挙動を視察し、写真撮影を行ない、また、トンネル部材に発生するひずみを測定した。ひずみゲージの設置位置は、Fig. 6 の様に大きなひずみが発生すると考えられる層厚の急変部付近の NO. 1 及び NO. 2 断面、更に層厚急変の影響が小さく考えられる NO. 3 断面の 3 ヲ所とし、各断面では次記の目的のために夫々 10 枚のひずみゲージを貼付している。

- (1) NO. 1 ~ 3, 4 ~ 6 — トンネル上部及び下部のせん断ひずみ測定
- (2) NO. 7, 8 — トンネル軸方向の曲げモーメントによるひずみ測定
- (3) NO. 9, 10 (NO. 2, 5) — トンネル断面に生ずるひずみ測定

ここで、せん断ひずみはねじりモーメントによるひずみ ϵ_{MT} とせん断力によるひずみ ϵ_a との合成と考えられる。微小変形を仮定すれば、各断面力は独立に考慮できるため、次式により各ひずみを求めることができる。

$$\begin{aligned} \epsilon_{MT} + \epsilon_a &= \epsilon_1, \epsilon_3 \\ \epsilon_{MT} - \epsilon_a &= \epsilon_4, \epsilon_6 \\ \epsilon_1, \epsilon_3, \epsilon_4, \epsilon_6 &: \text{ゲージ NO. } 1, 3, 4, 6 \text{ で測定されるひずみ} \end{aligned}$$

以上のひずみから断面力を求め、模型の変位の最大値が 1cm となるように標準化を行ない Fig. 7 に示した。（層厚 12cm 共振の例）また、層厚 8 及び 12cm 層の共振数を Table. に、層厚 12cm の層の 1 次共振時の表面とトンネルの変位モードを Fig. 8 に夫々示した。

以上の実験結果から次のことが認められた。

① 地盤のせん断振動により、トンネルは水平方向変位の他に回転変位を生じ、そ

層厚	次数	地盤モデル	トンネルモデル
12cm	1	6.02	6.21
	2	17.8	18.5
8cm	1	9.24	10.1
	2	28.1	30.2

Table 共振振動数 HZ

れはトンネル軸に沿って一様でないこと、特に地盤の性質の急変する箇所ではその変化が急であることによってねじりモーメントが発生する。そのことは、ひずみの測定結果からも確かめられた。

② トンネルを埋設した場合でも層厚 8 及び 12cm の各層は夫々固有振動数において共振し、各層の共振数のちがいにより、急変部においては地盤とトンネルの変位もまた急変し、あたかも急変部は固定条件の様に作用している。また、トンネル埋設によってトンネル近傍地盤の変位は周辺部に比べてやや小さくなっている。

③ トンネル模型振動実験において、低ヤング率をもつトンネル部材に補強紙を貼付し、その上に紙ゲージを貼付することは、ひずみ測定においてかなり有効である。

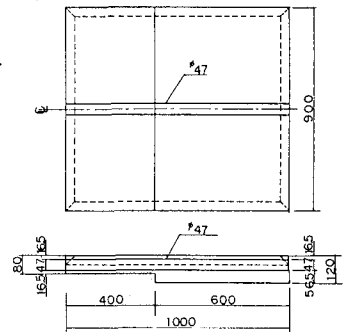


Fig. 5 3次元模型 (トンネル埋設) 図

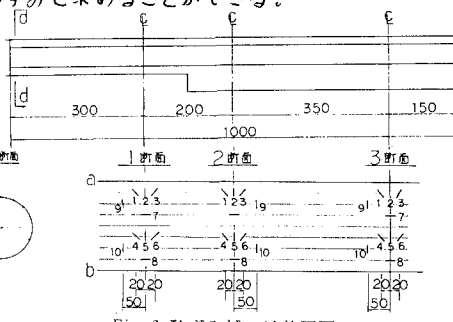


Fig. 6 ひずみゲージ位置図

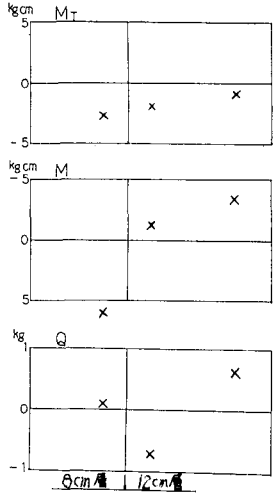


Fig. 7 断面力図

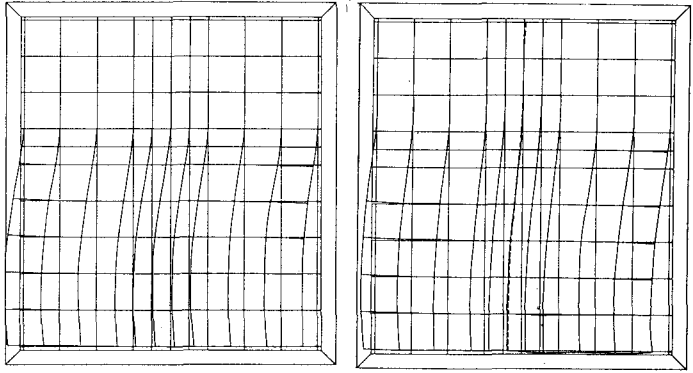


Fig. 8 地盤モデル モード図

トンネル埋設モデル モード図