

I-556

大断面併設トンネルの地震時横断面変形に関する実験と考察

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

1.はじめに 地中線状構造物の耐震設計を行う際、比較的小口径の構造物では主にその軸方向に沿った地盤変位とその分布を対象にしているが(トンネルの軸線に沿う伸縮・曲げ変形に対応)、大断面の構造物ではこれに加え、横断面方向の地盤変形も地盤条件によっては対象になると考えられる。また、トンネルの横断面の変形メカニズムは、単設と併設のトンネルでは異なることも予想される。そこで、断面変形について模型振動実験と平面歪み状態のもとで二次元FEMモード解析を行ったので報告する。

2.模型振動実験・FEMモード解析 地盤モデル材料としてアクリルアミドゲル($\gamma=1.15\text{gf/cm}^2$, $E=0.21\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.495$, $h=0.7\%$)、トンネルモデル材料としてネオプレンゴム($\gamma=1.45\text{gf/cm}^2$, $E=22.8\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.43$)を使用し、1)地盤モデル、2)単設トンネルモデル、3)2本併設トンネルモデル、4)3本併設トンネルモデルの4ケースについて実施した。トンネルモデルではトンネル位置を地盤のせん断変形の著しい基盤付近に置き、その深さは2)~4)で一定とし、併設トンネルの場合はその影響を強調するため、トンネル中心間の距離を $1.5D$ (D :トンネル外径)としている。また、地盤模型の形状・寸法は、地盤モデルでモード解析を行い、模型端部での波動の反射の影響が少なく、模型中央付近(トンネル付近)で振幅が一定になる様定めている。

振動実験では基本振動のぶれ写真を撮影し、FEMモード解析は模型を対象に行い、振動数、モードを比較した。ここで、質量マトリックスは整合質量マトリックスを用いている。写真-1、図-1に各々3本併設トンネルモデルのぶれ写真、一次モード図を示す。

3.実験解析とFEM解析の照査 1)変位量について…ケース4のFEMメッシュの一部を図-2に示す。図中に写真-1からピックアップした測定点の位置が黒丸に示してある。モデル中央の表面から 1cm の位置の振幅で各点の振幅を規準化し、これらを図-1の節点位置にベクトル表示し、モード図と重ねたものを図-3に示す。これから、両者は視覚的には良い一致を示していることが解る。次に、両者の相違の程度を表すため、式(1)に示す $X(I, J)$ を母数とし、この平均値、標準偏差、確率分布を求め、表-1に示す。平均値は、実験結果がゲル部分で $1\sim 3\%$ 、トンネル部分で $3\sim 10\%$ 程度大きな値を示している。この主な原因は実験模型の両端部底面の付着が完全でなかったこと、トンネル部のターゲットにシャープ差が欠けたこと等が挙げられるが、確率分布は分散の小さいガウス分布を示し、平均値も 1.0 に近い値であることから、両者は良く一致するといえよう。

2)振動数について…模型振動実験、FEMモード解析より得られた一次振動数を表-2に示す。両者を比較すると、トンネルモデルではその差は 3% 以下の範囲にあり、良い一致を示している。しかし、地盤モデルで振動数に差がみられるのは実験時の気温の影響によるものである。

4.半無限地盤における併設トンネルの影響 解析方法の妥当性が確かめられたので、前述の諸物性値を用いて半無限地盤の状態(模型端部の影響がほとんど現れないほど十分に長い地盤モデル)でFEMモード解析を実施した結果を表-3に示す。一次振動数は全ケースとも 4.1Hz であり、半無限地盤状態ではトンネルの影響は見られない。一方、模型中央表面の水平変位(δ_{cs})のトンネルから十分離れた表面の水平変位(δ_0)に対する比率(表-3)をみると、トンネル近辺の地盤はトンネルの影響を受けて動きが拘束されていることが解る。この傾向は本数が増える程大きくなる。また、トンネルを剛体と考え、式(2)からトンネルの並進量: δ 、回転量: ϕ を求め比較すると、併設本数が増える程、並進量・回転量はともに減少することから、トンネル周辺地盤の動きがトンネルに拘束されていること、3本併設トンネルモデルでは中央のトンネルの動きが両端のトンネルに拘束され並進量・回転量が減少すること等が解る。

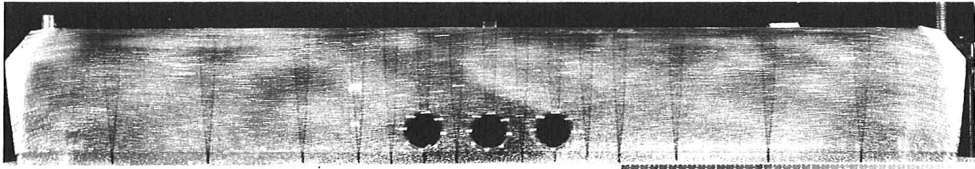


写真-1
ぶれ写真

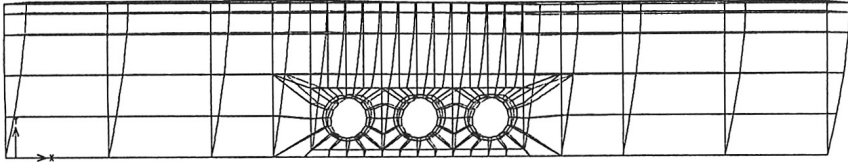


図-1
一次モード図

図-2 FEMメッシュと測定点の位置(ケース4)

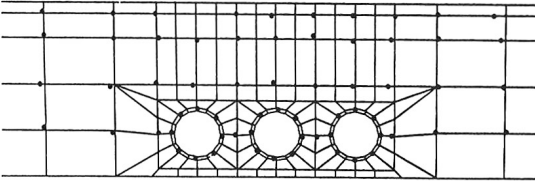


図-3 模型振動実験とFEMモード解析の比較(ケース4)

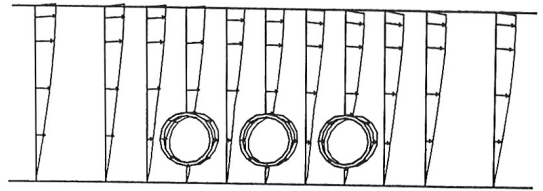


表-1 FEMモード解析と模型振動実験結果の比較 - 諸統計量 -

	アクリルアマイドゲル部分				トンネル部分		
	地盤モデル	単設トンネルモデル	2本併設トンネルモデル	3本併設トンネルモデル	単設トンネルモデル	2本併設トンネルモデル	3本併設トンネルモデル
平均値: μ	1.023	1.013	1.027	1.017	1.109	1.034	1.069
標準偏差: σ	0.043	0.033	0.069	0.077	0.071	0.124	0.138
$P(\mu - \sigma \leq X \leq \mu + \sigma) \%$	81.40	69.23	76.32	69.44	62.50	60.00	66.67
$P(\mu - 2\sigma \leq X \leq \mu + 2\sigma) \%$	93.02	94.87	94.74	97.22	100.0	100.0	100.0
$P(\mu - 3\sigma \leq X \leq \mu + 3\sigma) \%$	100.0	100.0	97.37	100.0	100.0	100.0	100.0

実験結果(6,1):
模型中央・表面
から深さ1cm

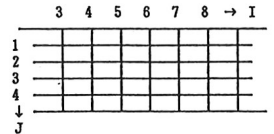
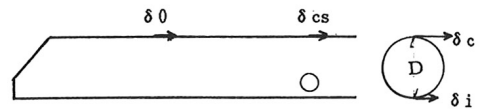


表-2 FEMモード解析(模型寸法)・模型振動実験の一次振動数の比較

項目	モデル	地盤モデル	単設トンネルモデル	2本併設トンネルモデル	3本併設トンネルモデル
模型振動実験 1次振動数: f_e (Hz)		4.74	4.38	4.38	4.27
FEM解析(模型) 1次振動数: f_F (Hz)		4.11038	4.23763	4.32910	4.40468
(関与係数)		(0.463)	(0.455)	(0.449)	(0.442)
振動数の比率: f_e / f_F		1.153	1.034	0.993	0.992

$$\text{母数: } X(I, J) = \frac{\{\text{実験結果}(I, J) / \text{実験結果}(6, 1)\}}{\{\text{FEM}(I, J) / \text{FEM}(6, 1)\}}$$

..... 式(1)



$$\text{並進量: } \delta = (\delta_c + \delta_i) / 2$$

$$\text{回転量: } \phi = (\delta_c - \delta_i) / 2$$

..... 式(2)

表-3 半無限地盤におけるFEMモード解析結果

	地盤モデル	単設トンネルモデル	2本併設トンネルモデル		3本併設トンネルモデル		
			左側	右側	左側	中央	右側
一次モード振動数 f_1 (Hz) (関与係数)	4.1 (0.422)	4.1 (0.439)	4.1 (0.448)		4.1 (0.447)		
$\delta_{CS} / \delta_0 \%$	98.3	70.1	59.5		47.0		
トンネル区分			左側	右側	左側	中央	右側
並進量: δ / δ_0	1.0	0.501	0.413	0.413	0.329	0.318	0.331
回転量: ϕ / δ_0	1.0	0.301	0.227	0.227	0.178	0.151	0.180

5.参考文献 1) 森地:
マッシブな構造物の動特性
に対する模型実験解析方法
とその応用研究; 東大博論