

1. はじめに

一般的にトンネルは地山で取り囲まれているため、その挙動も周辺地山の挙動に支配される。周辺地山が地震時に安定しているならば、トンネルも耐震性に富む構造物と見なされてきた。このため地震による影響は考えられてこなかった。しかし兵庫県南部地震において被災地近郊の山岳トンネルでは開削トンネル等と比較して小さいもののいくつか被害を受けていた。山岳トンネルの覆工の力学的挙動に関しては覆工に常時作用する地山の圧力でさえ不明な点が多く静的外力を受けた時の挙動も詳細に分かっていないのが現状である。

本研究は山岳トンネルの耐震性能の把握、および耐震設計法の確立を目的とし、地山と覆工を簡易にモデル化できるFEM応答変位法を用いて、SH波の入射時の主ひずみ方向の変化と覆工の挙動との関係について検討を行う。

2. 解析方法

地盤内に生じるひずみは地震波の入射角により変化する。さらに、トンネルの形状は上下で曲率が異なる形状をしていることから、地盤の変形、つまりひずみの方向に応じて発生する断面力やその分布は異なる。このことから主ひずみの方向変化に応じてのトンネル覆工に発生する断面力をFEM応答変位法を用いて算出する。FEM応答変位法は地中にある構造物に地盤から伝わる応力を静的な外力として作用させる手法である。

解析を行う際に作用する、地震波の入射方向に応じたひずみの方向の変化に対する入力条件の設定方法を示す。

地盤にSH波またSV波が入射したと仮定すると、地盤内には単純せん断状態の変形が生じる。その変形は入射波の方向を基準座標としていることから、その変形をx、y座標（水平、鉛直）系に変換することにより、x、y座標系での変形を得ることができる。式(1)には水平面より反時計回りにθの方向に地震波が入射した際の単純せん断状態のひずみテンソルをx、y座標系のひずみテンソルへの変換を示す。式(1)は入射角に対するせん断変形のx、

y座標系での変形の表現となっている。このことはx y座標系におけるε_x、ε_y、γ_{xy}を制御することにより地震波の入射角に応じたひずみを制御できることを示している。

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \epsilon_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2}\gamma \\ \frac{1}{2}\gamma & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \gamma \sin\theta \cos\theta & \frac{1}{2}\gamma(\cos^2\theta - \sin^2\theta) \\ \frac{1}{2}\gamma(\cos^2\theta - \sin^2\theta) & -\gamma \sin\theta \cos\theta \end{pmatrix} \dots(1)$$

ここで、x、y座標の各ひずみは図1に示すように解析の対象となる地盤構造物モデル（高さH、幅D）の境界より強制変位として与えることと等価である。その際の変位分布を規定する変位は式(2)のように表される。

$$\gamma_{xy} = \frac{\delta_{x2}}{D}, \epsilon_x = \frac{\delta_{x1}}{D}, \epsilon_y = \frac{\delta_y}{D} \dots(2)$$

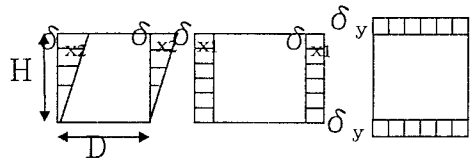


図1 強制変位の入力

3. 解析モデルと諸物性値

FEMの解析モデルはトンネル周辺の地山を高さ幅共に70mの区間を2805の節点、2933の要素で分割を行い覆工とインバートを線形の梁要素モデルで、地山をソリッド要素でそれぞれモデル化したそのFEMモデルを

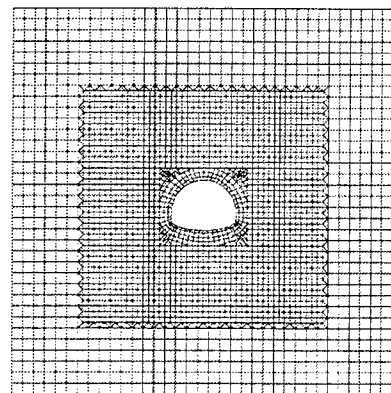


図2 FEMメッシュモデル

図-2に、地山とトンネルの覆工及びインバートの物性値をそれぞれ表1、表2に示す。

表-1 地層、覆工コンクリートの物性値

V_s (m/s)	700.0	F_{ck} (N/mm ²)	30
γ (kN/m ³)	18.6	E_c (kN/mm ²)	28
G (kN/m ³)	931000.0	γ (kN/m ³)	23.0
ν	0.35	G_c (kN/m ²)	11433000.0
		ν	0.2

表-2 覆工及びインバートの断面積等の値

	覆工	インバート
厚さ(m)	0.4	0.5
断面積(m ²)	0.4	0.5
断面2次モーメント(m ⁴)	0.0053	0.01047

4. 解析結果

地震波の入射角 θ が 0° 、 90° に対し解析領域の地盤せん断ひずみが0.1となるように境界に強制変位分布を与えることにより得られた各接点の変位ベクトルを図3、4に示す。入射角に応じた変形が生じていることが分かる。トンネルの覆工に発生する軸力分布を図5、6、モーメント分布を図7、8に示す。軸力はいずれの入射角においてもトンネルの上部の 45° 方向で最大の引張力また圧縮力が発生している。曲げモーメントについてはインバート部にて極めて大きな値となっているが、他の部分は小さな値となっている。インバート部における曲げモーメントには、要素分割が影響しているものと考えられるが、その状況は今後の課題とする。

参考文献

1) 浜田政則・泉博允・岩野政浩・志波由紀夫：地盤空洞の地震時ひずみの解析と耐震設計(1984)

土木学会論文集 第341号1984年1月 P197-205

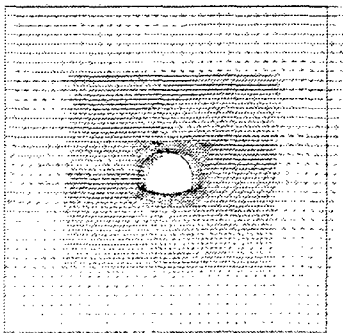


図-4 入射角 $\theta=0^\circ$ の時の変位分布

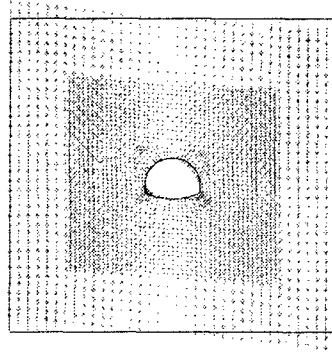


図-4 入射角 $\theta=90^\circ$ の時の変位分布

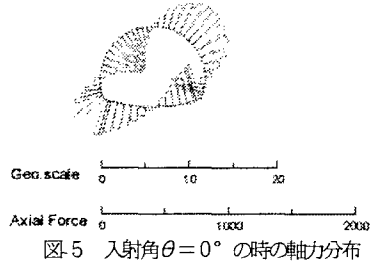


図-5 入射角 $\theta=0^\circ$ の時の軸力分布

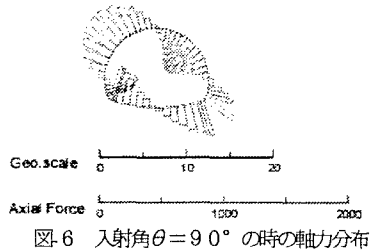


図-6 入射角 $\theta=90^\circ$ の時の軸力分布

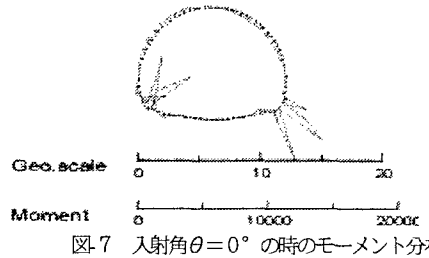


図-7 入射角 $\theta=0^\circ$ の時のモーメント分布

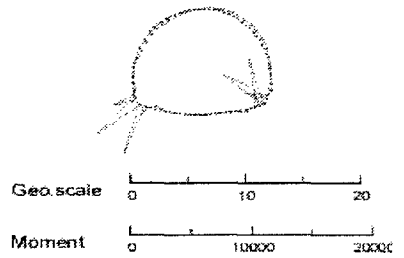


図-8 入射角 $\theta=90^\circ$ の時のモーメント分布