

層理面の傾斜角の影響を考慮したトンネル内空断面の変形挙動の解明

長崎大学工学部 学生会員 ○武石 将和
長崎大学大学院 正会員 李 博 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 正会員 井浦 智実
長崎大学大学院 学生会員 平井 光希

長崎大学大学院 フェロー会員 蔣 宇静
長崎大学大学院 学生会員 早川 輝

1. はじめに

我が国の国土は広く軟岩で覆われており，道路トンネルや鉄道トンネルの大半が軟岩で構成される地山で施工されている．軟岩は脆弱であるため，緩み圧や塑性圧によるトンネル内空側への地山の押し出しが顕著であり，塑性領域が拡大しやすい性質を有している．この性質に加え，図-1 に示すように，軟岩層が傾斜している地山を掘削する場合，層理面がすべり面となり，特異的な変形挙動を示す事例が報告されている．そこで本研究では，傾斜する層理面がトンネルの変形挙動へ与える影響を数値解析に基づいて考察することを目的とする．

2. 解析モデルの概要

対象トンネルの解析モデルを図-2 に示す．解析領域は掘削によって発生する塑性領域・緩み領域の範囲を考慮して設定した．トンネル直径を D としたとき，上下方向に $3D$ ，水平方向に $5D$ とし，掘削面周辺の状況を詳細に把握できるように掘削面から $4m$ の範囲のメッシュを細かく区切っている．また，境界条件としては左右両端がローラー境界，下端がヒンジ，上端が非拘束状態とした．層理面の存在により，岩盤の変形係数は異方性を有することになり，その値は層理面の法線方向変形剛性 E_n とせん断方向変形剛性を E_s 用いて式(1)より求められる¹⁾．

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ E_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中の θ の値は水平からの層理面の傾きを表している．表-1 に E_x/E_z に応じた傾斜角度 θ を示す．

本研究では， $E_x/E_z = 0.1 \sim 2.0$ の範囲で応力と変形解析を行い，上載圧は土被り 23.5m，65m，195m の 3 パターンを考慮して解析を行った．また解析に用いたトンネル周辺岩盤の物性値・解析ケースを表-2 に示す．なお，入力物性値は軟岩を想定するものとして地山等級DII級²⁾の地山パラメータを用いた．層理面により生じる変位を容易に捉えることができるよう，覆工部分の物性値はトンネル周辺岩盤と同じ値とした．また，本研究は有限差分法を用いて解析を行った．この解析法では，降伏すると塑性流動を呈する土や岩などで構成される構造体の挙動のシミュレーションを行うことができる．

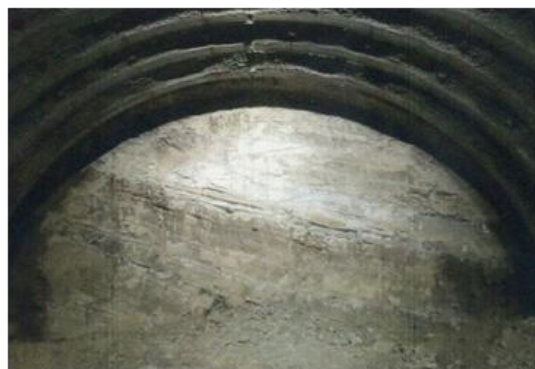


図-1 トンネル掘削断面の一例

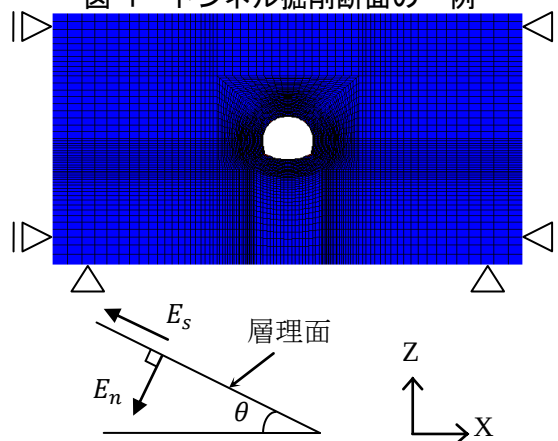


図-2 解析モデルの概要

表-1 E_x/E_z に応じた傾斜角度 θ の変化

E_x/E_z	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0
θ	0°	23°	45°	59°	67°

表-2 入力物性値

密度 ρ (kg/m ³)		2100
ポアソン比 ν		0.35
水平方向変形係数 E_x (MPa)		147
鉛直方向 変形係数 E_z (MPa)	case1($E_x/E_z=0.1$)	1470
	case2($E_x/E_z=0.5$)	294
	case3($E_x/E_z=1.0$)	98
	case4($E_x/E_z=1.5$)	73.5
	case5($E_x/E_z=2.0$)	14.7

3. 解析結果と考察

図-3 に示すようにトンネル内の上部、下部、左右側方部の4点で変位の計測を行った。図-4(a)～(c)に、 E_x/E_z と、トンネル内空変位の関係を示す。ここで、内空側へ押し出す変位を正とした。 $E_x/E_z=0.1$ の時、横軸方向の変形係数が縦軸方向の変形係数と比べて非常に小さいので、側方変位は常に負の値となり、いずれのケースにおいても E_x/E_z の増加に伴い変位量が増加している。これは E_z の減少($E_x=\text{constant}$)が、トンネル周辺岩盤の縦軸方向への変形を促進したことが原因であると考えられる。

図-5(a), (b)に変位のコンター図を示す。 $E_x/E_z=0.1$ の時、トンネルの上部と下部の変位が大きく、最大変位は14.53mmとなっている。 $E_x/E_z=2.0$ の時、トンネルの周りにはほぼ均等に変位が発生し、トンネル下部で最大変位の47.32mmが発生している。

図-6に土被り195mでトンネルの掘削による地表面の鉛直変位を示す。地表面X座標の0点の直下にトンネル天端部の頂点が位置する。 E_x/E_z の増加、つまり E_z の減少によりトンネル周辺岩盤の縦軸方向が変形しやすくなることから、 E_x/E_z の値が増加するとともに地表面の沈下量と沈下範囲は大きくなっている。

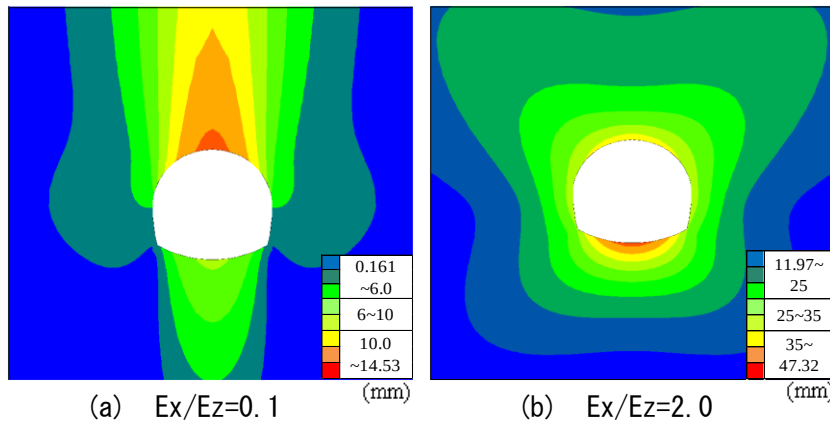


図-5 変位コンター図

4. おわりに

本研究では有限差分法により、層理面の傾斜角度 θ の影響を表す E_x/E_z と、トンネル内空変位との関係性を考察した。傾斜角が変化する場合に、トンネル周辺岩盤の変形モードや最大変形量などの変化を定量的に評価することができた。今後は異なる地山等級、覆工等を考慮した数値解析を実施し、掘削による層理面のすべりを考慮した軟岩地山の変形挙動について考察していく。

5. 参考文献

- 1)日本材料学会：ロックメカニクス，技報堂，pp.103-108，2002.
- 2)建設省土木研究室：土木研究所，トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル，pp.20-21，1994.
- 3)後藤知治，内田雅洋，高山藤博：TSP など切羽前方予測を試みつつ膨潤性地山に挑む-九州新幹線西九州ルート俵坂トンネル(西)-，トンネルと地下，Vol.42，No.3，pp.7-14，2011.

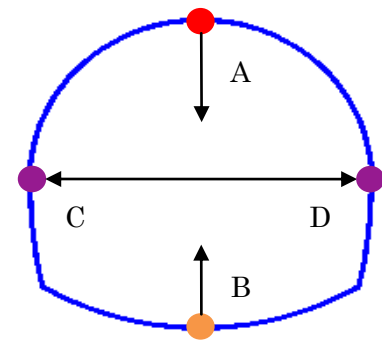
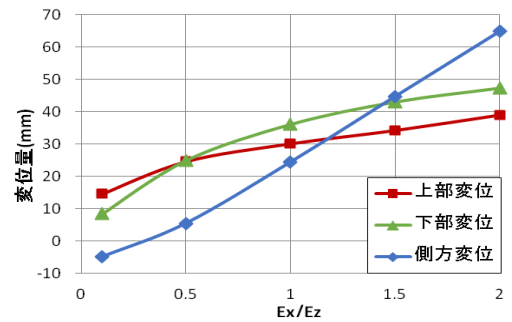
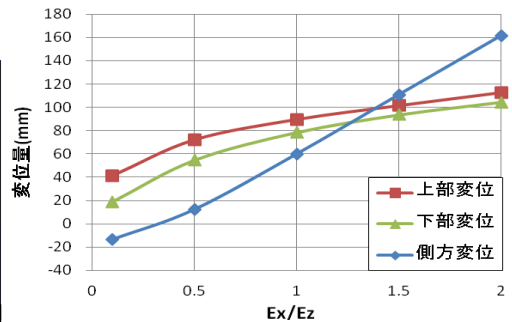


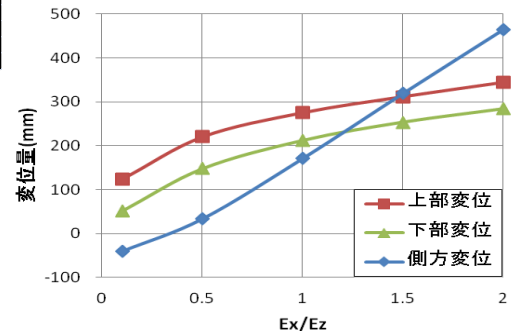
図-3 変位の観測点



(a) 土被り 28.5m



(b) 土被り 65m



(c) 土被り 195m

図-4 異方性と変位の関係

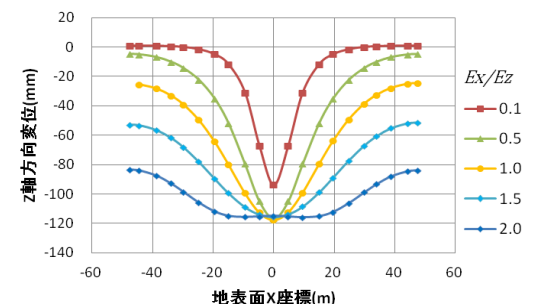


図-6 地表面のZ軸方向変位