

トンネル天端部の傾斜計測による切羽前方地山予測手法の適用可能範囲に関する検討

大成建設 正会員 ○坂井 一雄 谷 卓也

大成建設 フェロー会員 青木 智幸

京都大学 正会員 岸田 潔

1. はじめに

山岳トンネルの安全な施工には、掘削時の計測や観察結果から、切羽前方地山の硬軟変化を精度良く把握することが重要である。筆者らは掘削中に生じるトンネル天端部の微小な傾斜角度の変化を計測する事で、切羽前方地山の硬軟変化を予測する手法を研究し、数値解析や現場計測試験で提案手法の有効性を確認してきた¹⁾。しかし、計測器械の精度や計測頻度で決まる手法の適用可能範囲も存在する。そこで、傾斜角度の変化に影響を与えうる土被り（初期地圧）の大きさと地山剛性をパラメータとした感度解析を実施し、提案手法の適用可能範囲を検討した。

2. 傾斜計測による切羽前方地山予測手法

地山物性や応力状態が切羽進行方向に一樣な理想的な条件を仮定した場合、切羽近傍においてトンネル天端部の傾斜角度の微小変化の計測を開始すると、切羽進行に伴い計測断面よりも切羽側での内空側への変形量が大きくなるため、切羽側へ傾くような傾斜が計測される。傾斜角度の大きさは、図-1(a)で示すように、掘削対象となる地山性状が一樣である場合には、同じ切羽離れで評価すると一定の値となる。一方、現在掘削中の地山条件と比較して剛性の小さい軟弱層が存在する場合、剛性コントラストにより、掘削に伴い、地層境界の手前の硬質層側に応力集中が生じる。このため、図-1(b)のように硬質層側から軟弱層側へ向かって掘削した際には、切羽が軟弱層に到達するまでに傾斜角度が切羽側へ増加する。提案する切羽前方地山予測手法は上記の地山挙動を利用して、切羽進行方向にある一定の計測間隔で傾斜角度の計測を実施し、既掘削区間の傾斜角度値からの相対的な変化に基づき定性的に切羽前方地山の硬軟変化を把握しようとするものである。

図-2 にトンネル天端での傾斜計測に特化した小型かつ細径の天端傾斜計の外観を示す。詳細な仕様は参考文献¹⁾に示すが、計測分解能は 0.001° で、計測精度は 0.01° である。

3. 解析条件

図-3 に感度解析に用いた三次元解析メッシュを示す。トンネルは掘削半径 $r_0 = 5\text{ m}$ の円形トンネル（無支保）とし、トンネルの土被りは50, 100, 150, 200, 300, 400, および500 mのケースを検討した。初期地圧は土被り相当の鉛直方向応力、および側圧係数 K から定まる水平方向応力を地山要素に初期応力条件として与えた。参考文献²⁾に基づき、土被り50 mでは $K = 0.75$ 、土被り100 m以上のケースでは $K = 1.00$ とした。地山の応力-ひずみ関係は線形弾性モデルで、変形係数とポアソン比は道路トンネルの地山等級の代表物性値で与えた。表-1 に解析に用いた地山等級毎の物性値と1掘進長

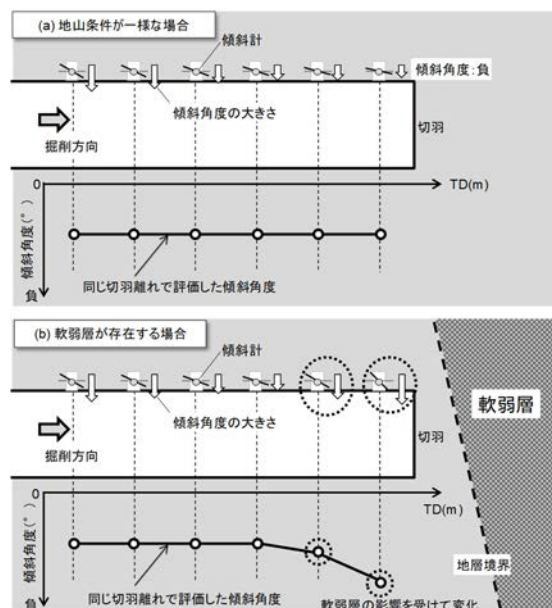


図-1 傾斜角度のトンネル距離程分布の概念図



図-2 天端傾斜計

キーワード 山岳トンネル 傾斜計測 切羽前方地山予測 数値解析

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設株式会社技術センター TEL : 045-814-7221

を示す。図-3の三次元解析メッシュでは、切羽進行方向の中央位置に地層境界を設け、その前後には表-1に示す地山等級の組み合わせで、異なる変形特性を持つ地山が存在することを仮定した。土被り1ケースあたり、領域Ⅰと領域Ⅱの地山条件の組み合わせが20通りあるため、7ケースの土被り条件で合計140ケースの感度解析を実施した。

4. 解析結果と考察

図-4に解析結果の一例として、土被り300mで領域Ⅰの地山等級がDI、領域Ⅱの地山等級がDI以外であるときの傾斜角度のトンネル距離程分布を示す。傾斜角度は算出断面前後の天端部の変位差から算出した。図-4は切羽離れ0.5m時点で初期値（傾斜角度0°）を取り、切羽離れ2.5m（初期値取得後から2掘進後）の傾斜角度である。

図-4より、領域Ⅰで地層境界より十分離れた傾斜算出断面の傾斜角度の値は-1.110°（DI地山における傾斜角度標準値）である。一方、傾斜算出断面が地層境界に近づくと、切羽前方の地山剛性の違いの影響を受けて、傾斜角度の値が変化する。図-4中の ΔI は地層境界手前2.5mの算出断面で、切羽離れ2.5m（すなわち、切羽が地層境界に到達した際）の傾斜角度標準値（-1.110°）からの変動量である。本検討では、 ΔI の絶対値が少なくとも天端傾斜計の計測精度である0.01°以上となること、切羽前方地山予測手法の成立条件と考えた。

他の土被りでも、表-1の地山条件の組み合わせで同じ検討を行い、図-5のように、計測精度以上に傾斜角度標準値からの変化がある時の切羽と地層境界の距離を、土被りと掘削中の地山条件（領域Ⅰ）に応じて算出した。赤点線枠内は解析で設定したどの等級の地山が存在しても、切羽が地層境界に到達するまで（縦軸 < 0 m）に、傾斜角度標準値から計測精度以上の変化が現れる範囲である。図-5よりCI地山の場合には土被り400m以上、CII地山の場合には土被り150m以上、DI地山以下の場合には土被り50m以上が、傾斜計測による切羽前方地山予測手法の適用可能範囲といえる。

5. まとめ

本研究では土被りと地山条件をパラメータとした感度解析により、筆者らが提案する傾斜計測による切羽前方地山予測手法が適用可能な地山条件について検討した。ただし、本検討は掘削半径 $r_0 = 5$ mの円形トンネルで、かつ全断面掘削を行った際の数値計算結果であるため、施工条件が異なる場合には理論解等を用いた数値解析結果の補正が必要である。

参考文献

- 1) 坂井, 他: トンネル天端の微小な傾斜角度の変化を用いた切羽前方地山予測手法の開発, 土論 F1, Vol.73, No.2, pp.32-46, 2017.
- 2) 日本道路公団試験研究所: トンネルの標準設計に関する研究報告書—数値解析と施工実績の分析—, 1986.

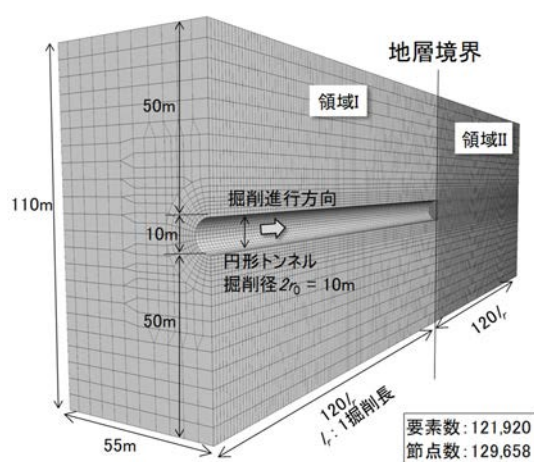


図-3 3次元解析メッシュ

表-1 解析用地山物性値と1掘進長

地山等級	変形係数 D (MPa)	ポアソン比 ν (-)	1掘削長 l_r (m)*
CI	2,000	0.30	1.5
CII	1,000	0.30	1.2
DI	500	0.35	1.0
DII	150	0.40	1.0
E	80	0.40	1.0

*領域Ⅰでの掘削長を領域Ⅱも継続する

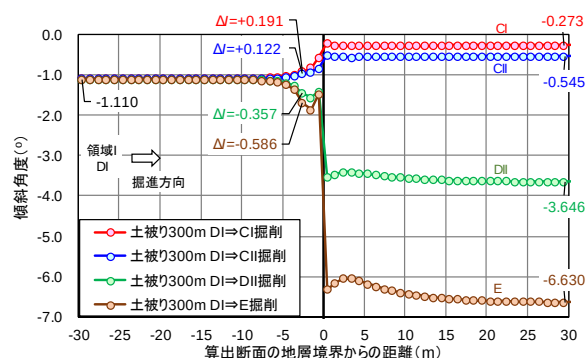


図-4 傾斜角度のトンネル距離程分布の例

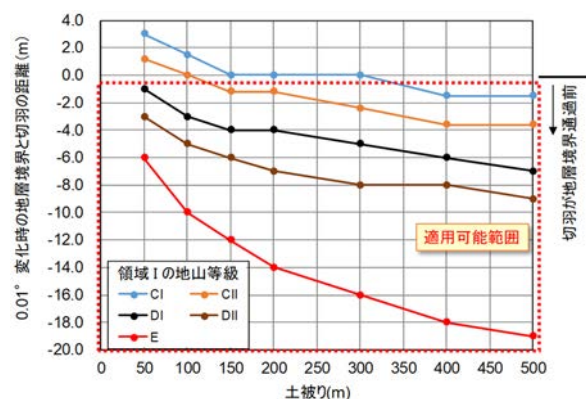


図-5 計測精度以上の傾斜変化が得られる時の地層境界と切羽の距離（赤枠が提案手法の適用可能範囲）