

TBM 先進導坑壁面情報を用いた不連続面評価とキーブロック連続解析システムの開発

前田建設工業(株)技術研究所 ○正会員 南 浩輔
(株)銭高組名古屋支店 正会員 三宅 克哉

前田建設工業(株)技術研究所 正会員 久慈 雅栄
前田建設工業(株)中部支店 野村 義孝

1.はじめに

トンネルの大断面化に伴い、TBM 導坑先進掘削工法が実施される場合がある。大断面トンネルは現在のところ施工実績が少なく経験的手法が使えない場合が多い。その為、地山データを設計・施工に反映できる技術の開発が重要となる。

硬岩に代表される岩盤中では多数の不連続面が互いに交差し、岩盤を多様な形状のブロックに分割している。よって、岩盤は多数の岩体ブロックが隙間なく積み重なった構造と考えることもできる。大断面トンネルでは、従来以上に不連続面により形成されるブロックの影響を受けることが予想される。

本報では、TBM 先進導坑掘削より得られる坑壁情報を画像として取り込み、不連続面を抽出・データベース化し、それに基づいてキーブロック連続解析を行い、大断面トンネルの安定性を評価するシステムを開発したので報告する。

2. TBM坑壁画像撮影システム

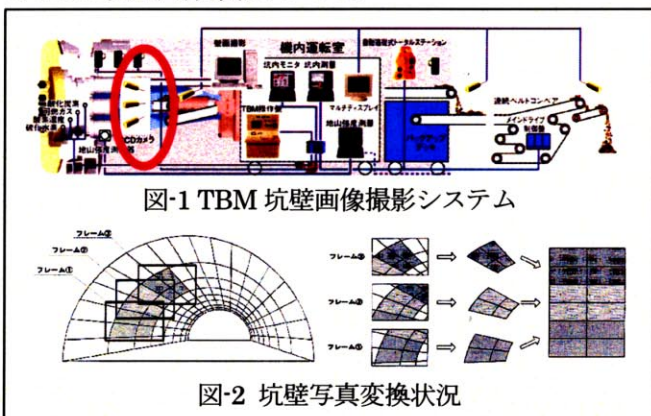


図-1に、TBM 坑壁画像撮影システムの概要を示す。TBM 先進導坑(R=2.5m)の高速掘進に対応するため、本システムではTBMに取り付けた CCD カメラユニット(6台)により、1掘進毎に坑壁画像を静止画像として天端中心 220° の範囲を分割撮影する。これを図-2に示すように、画像の切り取り・歪みの補正など画像処理を行い、円周方向・延長方向に連続した展開画像を自動作成するようにした。得られた展開画像より、坑壁に分布する不連続面をトレースすることにより、位置・走向・傾斜を自動的に抽出しデータベースを作成する。

3. 先進導坑・不連続面・走向・傾斜・展開図の数学的表現

(1)不連続面の表現

以下では、不連続面を岩盤内部で岩体素材を分離する構造的な弱面と定義し、層理・節理・断層などを対象とする。

本研究では、不連続面に対して以下のような仮定を用いている。

①不連続面は、完全な平面である。

②不連続面は、注目する岩盤内で無限の広がりを持って存在する。

③不連続面および掘削面の幾何学条件は既知であり、以下の位置と方向性を示すデータがパラメーターとなる。

- ・不連続面の測定位置(基準点からの x, y, z 座標)
- ・ y 軸を北方向, x 軸を東方向とする走向 α ・傾斜 β

不連続面を図-3に示す座標系における平面の方程式として表わす。TBM 坑壁画像から不連続面上の3点以上を選択することで、最小二乗法による近似不連続面を計算する。〈ボアホールカメラからの不連続面の抽出方法を TBM 導坑に展開〉

$$ax+by+cz+d=0 \quad [1]$$

(a:b:c=方向余弦 $a^2+b^2+c^2=1$)

(2)トンネル形状(TBM 導坑)の表現

$$x=R*\cos\theta, z=R*\sin\theta, (y=any) \quad [2]$$

(3)不連続面の走向・傾斜

[1]式より $z=n$ 平面 ($n=0$:x-y 平面)における直線の傾き(=トンネル座標系における走向:[みかけの走向])は[3]式として表される。

$$\alpha=\tan^{-1}(b/a) \quad [3]$$

また、[1]式の面と $z=n$ 平面 ($n=0$:x-y 平面)とのなす角度(=傾斜:[みかけの傾斜])は[4]式として表される。

$$\beta=\cos^{-1}(c/\sqrt{a^2+b^2+c^2}) \quad [4]$$

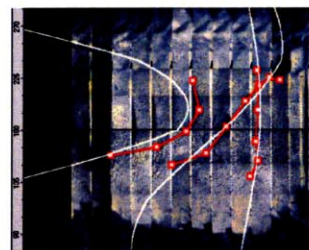
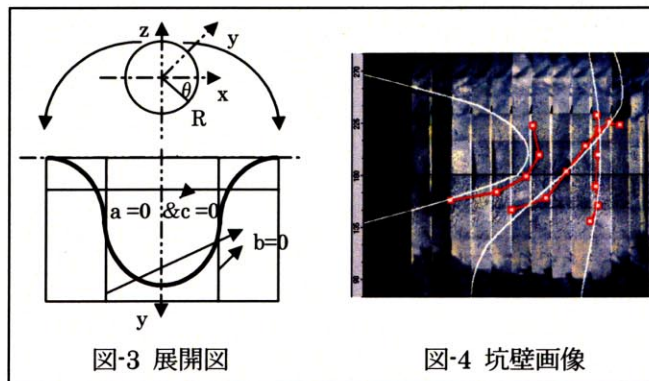
(4)展開図

展開図は掘削軸方向:y と周方向: $w=R*\theta$ との関数であるから、[2]式を[1]式に代入し整理することより[5]式が得られる。得られた結果を図-4に示す。

$$b(y+k)=-R*\sqrt{a^2+c^2}*\sin(\theta+\gamma) \quad [5]$$

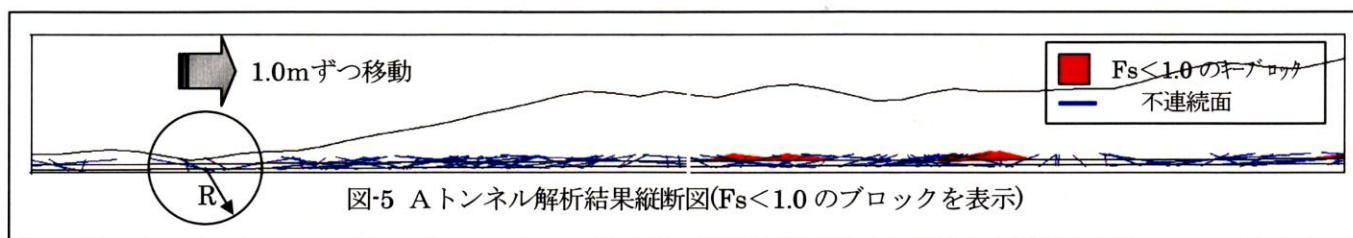
但し、 $\gamma=\tan^{-1}(c/a)$

図-4に実際の坑壁画像と不連続面の抽出例を示す。図中、赤の実線は人間の目で確認した不連続面位置、白の曲線はその近似不連続面である。



キーワード: TBM 先進導坑/不連続面/キーブロック連続解析/不連続面有効解析範囲

連絡先: [住所] 〒179-8914 東京都練馬区旭町 1-39-16 [TEL] 03-3977-2614 [FAX] 03-3977-2251



4.不連続面で囲まれるキープロックの算出

本研究では、以下の手順によりキープロックの算出を実施した。

- ①TBM 導坑で得られた不連続面を、TBM 導坑と本坑の両者の線形関係から本坑断面に自動投影する。
- ②TBM 導坑より得られた地山データを基に、区間(20m)毎に岩盤データならびに本坑掘削時の通常支保パターンを設定する。
- ③解析区間内で不連続面有効解析範囲を 1m ずつ進めていくことにより、不連続面データベースから自動的にキープロック組み合わせ計算を行なう。

キープロック理論¹⁾では、不連続面は注目する岩盤内で無限の広がりを持って存在するとされているが、実際の地山では3~5D程度の影響範囲を持つ不連続面が多く、全線に渡りトンネル安定性に影響を及ぼす不連続面は少ないと考えられる。そこで、本解析プログラムでは、解析地点(TBM 導坑中心)から半径 R の円内に分布する不連続面を、その解析地点での解析対象不連続面として、キープロック組み合わせ(最大:不連続面5面+トンネル掘削面)を求めている。

また、これまでのキープロック解析ではトンネルに分布する不連続面よりキープロックを想定し、一つずつ不連続面の組み合わせを手作業で指定してやる必要があった。その為、不連続面の組み合わせを考え、1ケースずつ解析を実施するには多くの時間と労力を要していた。当解析システムでは、不連続面有効解析範囲を任意設定することにより、トンネル全線を通して自動的に不連続面の組み合わせを求め、連続して出現確率の高いキープロックの算出を行なえるよう工夫した。図-5にAトンネルでの適応事例を示す。図-5はトンネル断面図を示すが、青の実線は不連続面分布を、赤の塗り潰しは $F_s < 1.0$ のキープロックを示している。

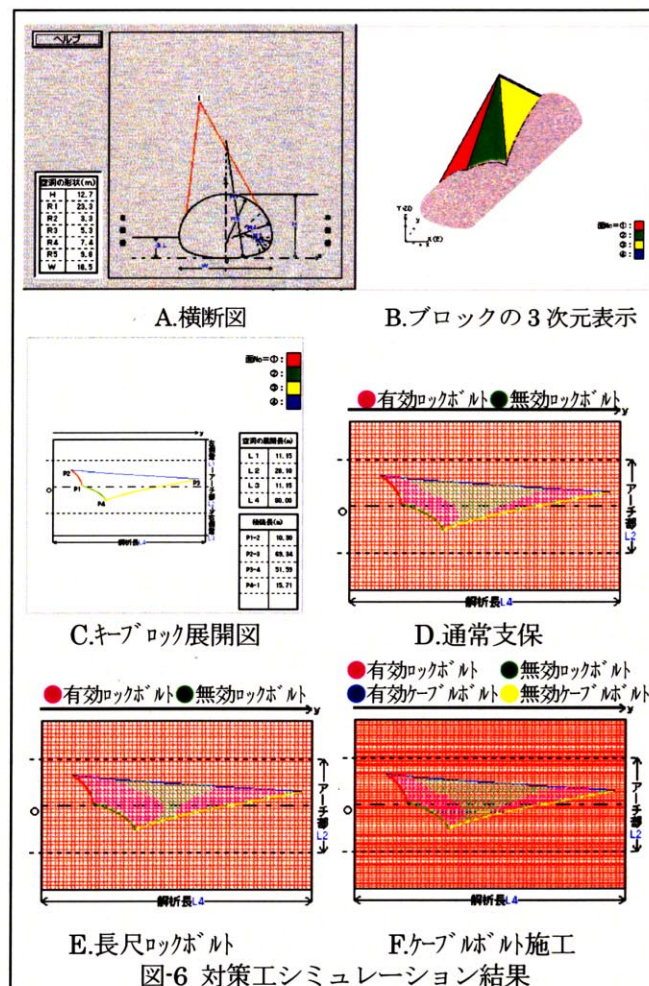


図-6 対策工シミュレーション結果

対策工A: 長尺ロックボルトの採用<通常支保より 2.0m 長物>

対策工B: ケーブルボルト+通常ロックボルト

<TBM 導坑より L=10.0m のケーブルボルトを施工>

表-2 対策工まとめ

	長尺ロックボルト	ケーブル+通常ロック	安全率
通常支保	×	×	0.69
対策工A	○	×	0.98
対策工B	×	○	1.04

5.キープロック詳細解析

通常支保パターンによるトンネル全線連続解析が終了した後、崩落危険性が高いブロックに対して個別に対策工を講じた詳細解析を実施した。詳細キープロック解析システムは、上記キープロック連続解析結果を取り込むことで容易に実施することが可能である。表-1に実施結果を示す。

表-1 ブロック諸元(通常支保工施工時)

構成亀裂	N60W/29SW N10E/70SE	N43E/48SE N25E/89NW
岩体重量[kN]	68381.8	
岩体体積[m ³]	2724.3	
岩体高さ[m]	18.7	
安全率[-]	0.69	
通常支保(D I 相当)	ロックボルト 6.0m	吹付け 250mm

対策工によるシミュレーション結果を図-6、表-2に示す。

6.結論

TBM 坑壁画像撮影システム・キープロック連続解析システムを構築し、本坑掘削時の支保工に対する安定性を評価することができた。坑壁撮影システムによる TBM 坑壁の自動撮影・展開画像化による不連続面の抽出、連続解析システムを用いることで、従来に較べ大幅な省力化・スピード化を図ることができた。

7.参考文献

- (1)Goodman,R.E.and Shi,G.:Block theory and its application to rock engineering, Prentice-Hall International Inc...