

TBM先進導坑坑壁画像を用いた 本坑大断面トンネル安定性評価システムの開発

南 浩 輔 久 慈 雅 栄
三 宅 克 也*¹ 野 村 義 孝*²

要 旨

トンネルの大断面化に伴い、TBM (Tunnel Boring Machine) 導坑先進拡幅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。また、大断面トンネルでは断面形状が偏平化し、従来以上に不連続面により形成されるキーブロックの影響を受けることが予想される。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。

本論文では、TBM先進導坑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。

開発システムを用いた結果、TBM坑壁の自動撮影・展開画像化による不連続面のDB化およびキーブロック連続解析を行なえ、従来に較べ大幅に省力化・スピード化を図ることができた。

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

目 次

- | | |
|----------------------|---------------|
| 1. はじめに | 5. キーブロック安定解析 |
| 2. TBM坑壁画像撮影システム | 6. 岡部トンネルへの適用 |
| 3. 坑壁画像展開図からの不連続面の抽出 | 7. 結論 |
| 4. 本坑施工時のキーブロック形成 | 8. 今後の課題 |

THE DEVELOPMENT OF THE STABILITY EVALUATION OF A WIDENING TUNNEL SYSTEM BY DIGITAL IMAGE OF THE WALLS DRIFTED BY TBM.

Kosuke MINAMI Masayoshi KUJI
Katsuya MIYAKE Yoshitaka NOMURA

Synopsis:

In order to widening the tunnel there might be a case that we may use Advanced Widening Drift Technique by TBM (Tunnel Boring Machine). Presently there are only a few execution results of widening tunnel so it is very rare that we can rely on our experiences. Also when widening a tunnel the enlarged surfaces becomes flat and we predict that it may influence the key blocks caused by discontinuities even more. Because of this matter it is very important to develop a new technique that can reflect the condition of ground data to drafting and constructing.

In this thesis we would like to make a report that we developed a system that evaluates the stability of a widening tunnel by continuously analyzing the key blocks using a data base containing the information of discontinuities from a digital image of the walls drifted by TBM.

By installing this newly developed system, we were able to take photos of the wall automatically, to make a DB format of the discontinuities from the enhanced digital image, to have continuous analysis of key blocks and to reduce labor costs and to speed up tremendously.

* 1 (株) 銭高組 名古屋支店 * 2 中部支店

1. はじめに

トンネルの大断面化に伴い、TBM (Tunnel Boring Machine) 導坑先進掘削工法が実施される場合がある。TBM 先進導坑は、本坑掘削に対する地質調査横坑・水抜き坑・補助工法施工等の役割を担っている。

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。また、大断面トンネルでは断面形状が偏平化し、従来以上に不連続面により形成されるキープロックの影響を受けることが予想される。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。

本報では、TBM 先進導坑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プ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

通常、山岳トンネルでは切羽で地質を観察している。しかし、TBM ではルーフ後方の坑壁で地質を観察することになる。TBM の掘進速度を考えると、坑壁観察を人間が対応するのは難しいので、坑壁を画像データとして取得することを考えた。表-1 に今回検討を実施した坑壁画像撮影方式比較表を示す。これより、できるだけ撮影手間が少なく、画像を連続させることを考慮し、CCD カメラの複合台常設案（表中太枠内）を採用した。

本システムでは TBM 先進導坑 ($r=2.5\text{m}$) の高速掘進 (20m/日 程度の進行が可能) に対応するため、TBM に取り付けた CCD カメラユニット (3 台×2 ユニット) 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 6 分割撮影する。

図-1 に、TBM 坑壁画像撮影カメラの位置を示す。

これを図-2 に示すように、画像の切り取り・歪み補正などの画像処理を行い、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。第 2 東名高速道路 岡部トンネル工事に適用したところ、撮影準備から画像取得まで 1 分足らず、1 日分のデータ処理は移動を含めて 1 時間程度であった。得られた TBM 坑壁展開画像の一例を図-3 に示す。

キープロック解析では、不連続面の連続性がポイントとなる。本システムでは本坑断面幅の半分以上に 10m 以上連続性を有する不連続面を、抽出対象不連続面とした。図-4 に開口幅とトレース長（坑壁で確認できる不連続面の長さ）の関係¹⁾を示す。図-4 より、開口幅とトレース長との間には正の相関関係が認められる。トレース長 10m を得られる開口幅は、中間値で評価すると約 3mm となる。これより、画像の分解能は 3mm を目標とした。

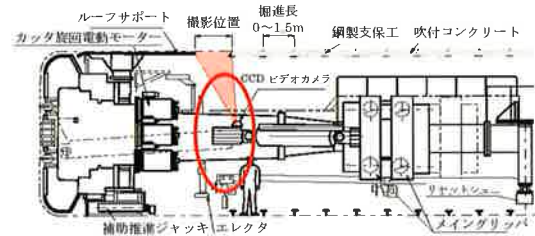


図-1 TBM 坑壁画像撮影システム

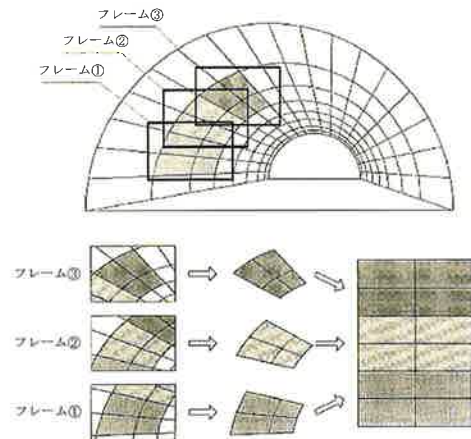


図-2 坑壁写真変換状況

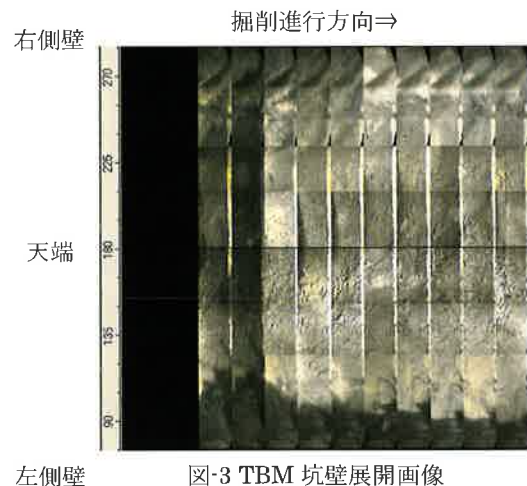


図-3 TBM 坑壁展開画像

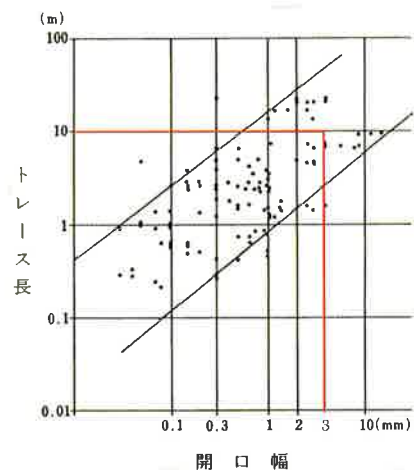
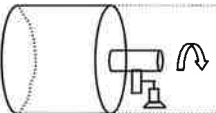


図-4 節理トレース長と開口幅の関係¹⁾

表-1 坑壁画像撮影方式比較表

既存撮影方式		今回検討撮影方式		
概 要	TBM 本体に CCD カメラを複数台設置し、TBM の進行に同期して、坑壁画像を連続撮影し、周方向に接合する 	エレクタに DV を搭載し、1 周 (半周) 廻して連続画面を取得し、展開画像を撮影、軸方向につなげる 	TBM 本体に CCD を複数台設置し、掘削サイクル毎に分割して画像を取得、周方向、軸方向に接合する 	TBM 本体に CCD を複数箇所設置する治具を設置し、1 台の CCD で場所を変えて分割して画像を取得、周方向、軸方向に接合する 
撮影範囲	60° × 3 台、各画像は連続しない	360° 可能	カメラの設置台数方向により、360° 可能 200° 以上を目標、各画像は連続させる	同左
撮影手間 (人手)	完全自動化 (TBM の進行に同期)	自動化可能 (スタート操作は人間)	自動化可能 (スタート操作は人間)	自動化困難、人間が撮影 (20 回/日程度、10 分/回程度)
データ回収	データ回収は自動 (コンピュータ自動取込)	データ回収は自動 (コンピュータ) or 人間 (テープ)	データ回収は自動 (コンピュータ自動取込)	データ回収は人間
長 所	・ 完全自動で画像を取込むことができる ・ 電源コードの取回しはスムーズである ・ TBM に同期し、各カメラの部分の画像を使うため歪みは少ない	・ 裸岩部に正対して画像を撮影するため、歪みが少ない。 ・ 周方向の画像はスムーズなものとなる	・ 吹付け位置から離れるため汚れは少ない ・ 完全自動で画像を取込むことができる ・ 電源、コードの取回しはスムーズである	・ 吹付け位置から離れ、都度設置するため汚れは少ない
短 所	・ カメラと坑壁の間を人間が通ると画像の質が低下する ・ 坑壁画像の周方向は連続していないため不連続面の評価が難しい	・ 吹付けのリバウンド等を直接カブるため、充分な防護必要 ・ エレクタがスムーズに動かない可能性高い ・ コードの取回しが難しい (巻きつくおそれあり)	・ 裸岩部に対し斜めから画像を撮影するため歪みが発生し、補正が必要となる	・ 裸岩部に対し、斜めから画像を撮影するため、歪みが発生し、補正が必要となる ・ 撮影の手間が最も多い

3. 坑壁画像展開図からの不連続面の抽出

上記処理を経た展開画像を用い、坑壁に分布する不連続面をパソコン画面上でトレースすることにより、出現位置・走向・傾斜を自動的に抽出し不連続面のデータベースを作成するシステムを開発した。以下に不連続面の抽出手順を示す。

3.1 不連続面の表現

以下では、不連続面を岩盤内部で岩体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 (3 次元座標)
 - ・y 軸を北方向、x 軸を東方向とする走向 α ・傾斜 β

3.2 TBM 坑壁展開画像上での不連続面分布

TBM 先進導坑は完全な円形であるため、3.1 節で述べた条件を満たす不連続面は、TBM 坑壁展開画像上ではサインカーブを描く。したがって、TBM 坑壁展開画像上の 3 点以上を特定することにより、最小二乗法により近似不連続面を求めることができる。また、求められた近似不連続面と TBM トンネル線形の位置関係から、不連続面のパラメーターである出現位置、方向性 (走向・傾斜) を自動計

算することができる。

3.3 不連続面の数学的表現と走向・傾斜

前節で述べた不連続面分布の数学的表現を以下に示す。ただし、展開式は図-5 に示す座標系によるものとする。

(1) 不連続面の表現

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

$$(a:b:c = \text{方向余弦 } a^2 + b^2 + c^2 = 1)$$

(2) トンネル形状 (TBM 導坑) の表現

$$x = r * \cos \theta, \quad z = r * \sin \theta, \quad (y = \text{any}) \quad [2]$$

(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 (北方向) 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により [5] 式が得られる。得られた結果を図-6 に示す。

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

但し、 $\gamma = \tan^{-1}(c/a)$

3.4 不連続面抽出基準と抽出方法

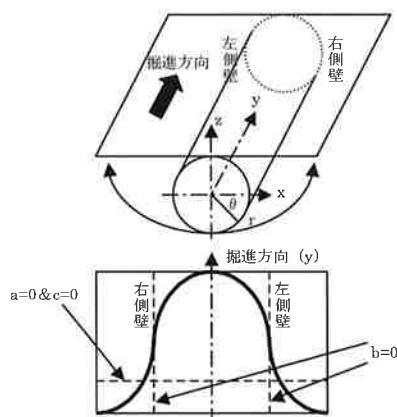
本システムでは以下の手順に従い不連続面を抽出し、不連続面情報のDB（データベース）化を行っている。

①坑壁画像から以下のいずれかの条件を満たす不連続面をトレースする（図・6a 参照）。

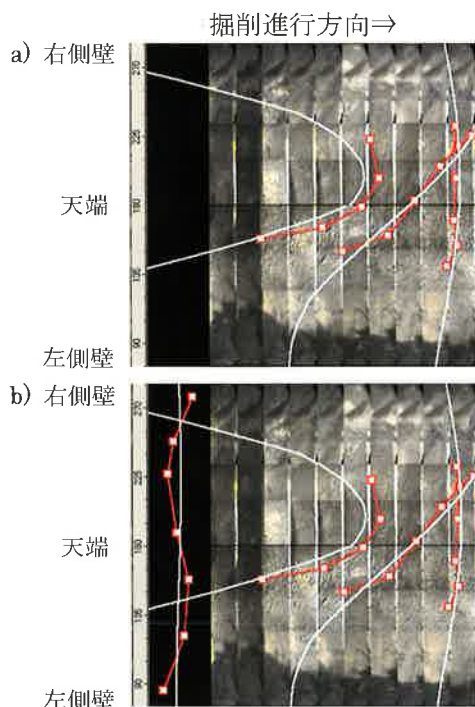
- ・トンネル縦断方向に 10m 以上連続性を有する不連続面
- ・トンネル横断方向に 90° 以上の連続性を有する不連続面
- ・開口亀裂、シーム（白色粘土脈）、断層（両断層面を抽出）

②坑壁調査結果（ライナー区間等の坑壁画像が得られなかった部分）から得られた不連続面を①で得られた結果に追加する（図・6b 参照）。

図・6 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。図・6 に示す通り坑壁展開画像上の 3 点以上（白抜き赤丸）をトレースすることにより、TBM 導坑に出現する不連続面を特定し DB 化することができる（6 章参照）。



図・5 展開図座標系



図・6 TBM 坑壁展開画像と不連続面

4. 本坑施工時のキーブロック形成

本章では、前章で述べた不連続面 DB を用いた、本坑大断面トンネル掘削時に形成されるキーブロックについて述べる。以下に、本システムを構築する際に問題となった検討項目を示す。

①TBM 導坑と本坑断面の位置関係。

（設計トンネル線形と実績トンネル線形のズレ）

②不連続面の組み合わせによるキーブロックの複数化。

（内包ブロックの取り扱い）

③キーブロック連続自動解析手法の考案。

（不連続面で囲まれるキーブロックの算出：不連続面の組合せ計算）

4.1 TBM 導坑と本坑断面の位置関係

設計では、本坑線形と TBM 導坑線形は、高さ方向に一定の離隔を持って同一線形上に存在している。しかし、いかに厳密に管理を行なっても、実績線形は設計線形から多少のズレが生じてしまう。

このズレを放置すると、TBM 導坑で得られた不連続面を本坑断面に投影する際、本来あるべき場所と異なる場所に出現してしまう。そこで、本システムでは以下の手順を踏まえる事で上記問題を解決した。

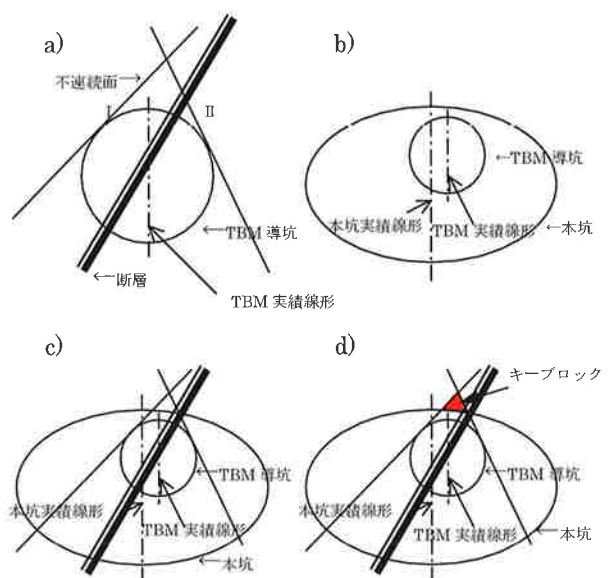
①TBM 先進導坑の設計線形と TBM 実績シフト量データを用いて、TBM 実績線形データを自動作成する（図・7a）。

②本坑設計線形と本坑実績シフト量を用いて、本坑実績線形データを自動作成する（図・7b）。

③TBM 実績線形と本坑実績線形を比較する事により、本坑と TBM の位置関係を自動計算する（図・7b）。

④TBM 導坑坑壁に出現した不連続面を本坑断面に投影する（図・7c）。

⑤本坑断面に作用するキーブロックを抽出する（図・7d）。



図・7 不連続面情報の本坑への投影

4.2 不連続面の組み合わせによるキーブロックの複数化

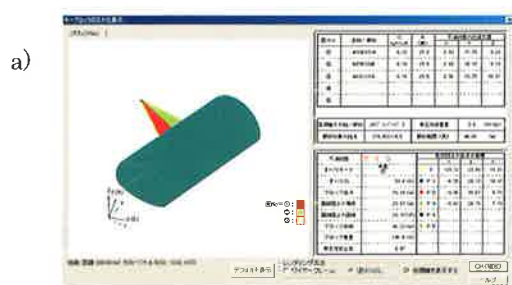
キーブロックは、トンネル面+3面以上の不連続面が交差することにより形成される。キーブロック解析により算出されるブロックについて注意しなければならない点として、不連続面の組み合わせによるブロックの重複化を考えなければならない。これは、キーブロック解析が解析対象範囲内に存在する不連続面の組み合わせ（現状：最大5面）により、ブロック形成可能性のある全てのブロックを計算するためである。例として、以下のような亀裂構成を持つ岩体を考えた場合、組み合わせられる不連続面によって数種の岩体（図-8a～8c）が算出される。この時、形成される全てのブロックを支える必要はなく、形成される最大ブロック（図-8c）を支えることで、そのブロックに内包される（最大ブロックの中に形成されるブロック）全てのブロックを支えることになる。

<不連続面>

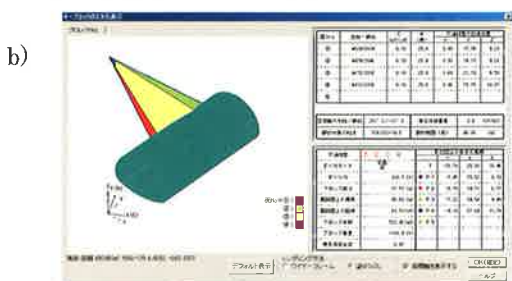
①N58W/65SW ②N47W/26NE ③N67E/20SE

④N80E/44SE ⑤N41E/23SE

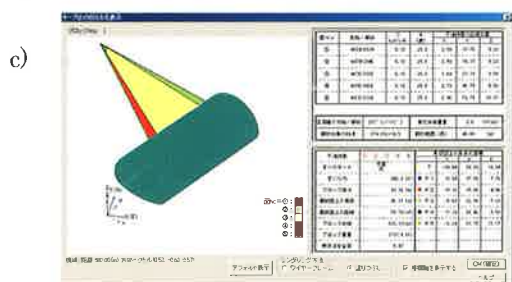
本システムでは、ブロックを構成する各不連続面にコードNoを持たせることにより、算出されたキーブロックが如何なる条件で形成されているか判断し、必要なブロックのみを支えることで上記問題を解決している。



3面（①,②,⑤）により形成されるキーブロック



4面（①,②,③,⑤）により形成されるキーブロック



5面（①,②,③,④,⑤）により形成されるキーブロック

図-8 不連続面の組み合わせによるブロックの形成

4.3 キーブロック連続自動解析手法

これまでのキーブロック解析では、トンネルに分布する不連続面よりキーブロックを想定し、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ケースずつ地山物性や支保パターンを与えながら解析を実施するため多くの時間と労力を要してきた。

本解析システムでは、不連続面の組み合わせ計算および安定解析を効率良く実施するため、以下の手法を考案した。

①TBM 導坑で得られた不連続面を、TBM 導坑と本坑の両者のトンネル線形関係から本坑断面に自動投影する（4.1 節参照）。

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解析範囲に設定する。

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ブロック組み合わせ計算を行なう。

キーブロック理論²⁾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、実際の地山ではある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、本解析システムでは、解析地点(TBM 導坑中心)から半径R（任意設定）の円内（不連続面有効解析範囲）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、キーブロックの組み合わせ（最大：不連続面5面+トンネル掘削面）を求めている（図-9）。

上記の手法を用いることで、本解析システムは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ブロックの算出を行なえるようになった。

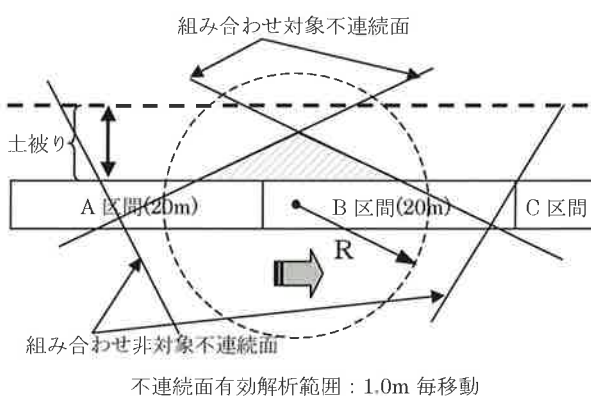


図-9 不連続面有効解析範囲

5. キーブロック安定解析

5.1 崩落岩体のタイプによる解析上の地山物性値(c, ϕ)の取り扱い

本解析システムでは、地山が有する抵抗力（ブロックの

落下に対する)をブロックの落下力が上回った場合にキーブロックが発生する。このとき、ブロックの崩落形態により地山物性値の取り扱いが異なる。以下に、キーブロック安定解析計算時の崩落タイプによる地山物性値(c, ϕ)の取り扱いを示す。本解析では、 c は0か介在粘土の c 、 ϕ は健全な岩の ϕ を用いている。

＜落下型岩体＞

岩体の（落下）合力方向がどの不連続面にもかからず、空洞面を向いている岩体。重力方向に自由落下するため、不連続面の粘着力は考慮されない。本解析システムでは崩落型岩体の場合、自動的に粘着力 $c=0$ となる。

＜すべり型岩体＞

岩体の（すべり）合力方向が不連続面に作用し、それらの不連続面がすべり面として働く岩体。不連続面が有する粘着力がすべり岩体に対する抵抗力($c \times$ すべり面面積)として働く。

5.2 トンネル支保部材と設計耐力の定義

本解析で使用している各支保部材と設計耐力の取り扱いについて以下に示す。

(1) 吹付けコンクリート

- ・支保耐力 = 吹付け厚 $\times$ ブロック周長(空洞面の周長) $\times$ 吹付けコンクリートせん断強度

(2) ロックボルト

個々のロックボルトに対して以下の演算を行い、有効ロックボルトの合計値を支保耐力とする。

- ①所定の定着長・影響長の双方を満足するロックボルトを有効とする。⇒満足しない場合は効果を考慮しない
- ②有効なロックボルトに対して、以下の付着応力と周面摩擦力とを比較し、小さい方を支保耐力とする。本解析では周面摩擦力の付着に対する安全率は1.5としている。
 - ・付着応力 = ボルトの周長(ボルト径 $\times \pi$) $\times$ 定着長 $\times$ 付着応力度
 - ・周面摩擦力 = 削孔の周長(削孔径 $\times \pi$) $\times$ 定着長 $\times$ 周面摩擦応力度 $\div$ 付着に関する安全率

*注：有効と判断されたロックボルトの定着長は、図-10のように岩体に作用する位置によってそれぞれ長さが異なる。耐力計算時、ロックボルトごと定着長の長さを考慮

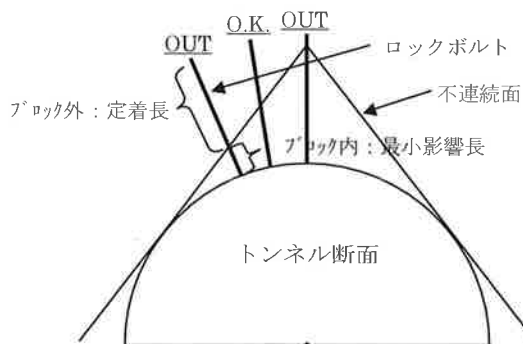


図-10 ロックボルト有効性判別

して計算している。

(3) 鋼製支保工

解析範囲内に設置された鋼製支保工が、想定されたキーブロックに接している時、その支保を有効とする。

- ・支保耐力 = せん断抵抗値 $\times$ 有効本数

(4) ケーブルボルト

個々のケーブルボルトに対してロックボルトと同様の演算を行い、有効ケーブルボルトの合計値を支保耐力とする。

- ①所定の定着長・影響長の双方を満足するケーブルボルトを有効とする。
- ②有効なケーブルボルトに対して、以下の付着応力と周面摩擦力とを比較し、小さい方を支保耐力とする。本解析では周面摩擦力の付着に対する安全率は1.5としている。
 - ・付着応力 = ボルトの周長(ボルト径 $\times \pi$) $\times$ 定着長 $\times$ 付着応力度
 - ・周面摩擦力 = 削孔の周長(削孔径 $\times \pi$) $\times$ 定着長 $\times$ 周面摩擦応力度 $\div$ 付着に関する安全率

6. 岡部トンネルへの適用

本章では上記解析システムを第2 東名高速道路 岡部トンネル工事に適用した結果について述べる。

6.1 岡部トンネル概要

表-2 に適用現場概要を、図-11 に地質縦断面図、図-12 に本坑標準断面図を示す。

表-2 現場概要

工事名	第2 東名高速道路岡部トンネル工事
工事場所	自) 静岡県志太郡岡部町桂島 至) 静岡県静岡市飯間
発注者	JH 静岡建設局 静岡工事事務所
トンネル延長	【下り線】 本坑 : 2,419m TBM 導坑 : 2,340m
地質区分	泥岩優勢、砂岩・泥岩互層

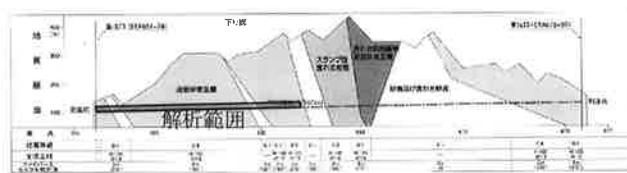


図-11 地質縦断面図

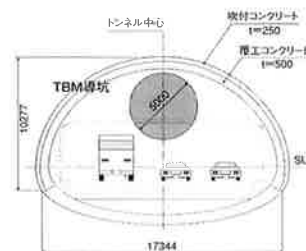


図-12 本坑 標準断面図 (D I・b パターン)

6.2 解析パラメーター

(1) 不連続面物性値の設定

a) 単位体積重量： γ_t

地質調査結果³⁾より湿潤密度の平均値を用いる事とする。

$$\gamma_t = 25.134 \text{ kN/m}^3$$

b) 内部摩擦角： ϕ

崩落部の地質状況から内部摩擦角については軟岩相当⁴⁾とし、以下の値を用いる事とする。

$$\phi = 25.0^\circ$$

c) 粘着力： c

一般的には地質ハンマー試験による壁面強度 (ISRM 指針)⁵⁾より、“柔らかい粘土”下における粘着力は $0.012 \sim 0.025 \text{ N/mm}^2$ と想定される。

次に、過去の崩落事例から崩落岩体と粘着力の関係について検討を行なった。TBM 内で崩落したと考えられる岩体を図-13 に示す。

今回、粘着力の算出に際して、粘着力 (付着力) を落下力 (岩体重量) と平衡状態にあるとして理論計算を実施した。理論値の算出に際しては、崩落岩体を正四角錐モデルとして取り扱っている (図-14 参照)。

表-3、図-14 より判る通り、図-13 で示される崩落岩体を想定した場合、粘着力は $c = 0.018 \text{ N/mm}^2$ に漸近する傾向を取り、岩体サイズの拡大に相反する形で粘着力は収束する傾向を示す。このことから、崩落岩体の粘着力は $0.0 \sim 0.02 \text{ N/mm}^2$ の間に存在していると考えられる。また、坑壁調査結果から湧水を伴う崩落箇所ではさらに地質状況が悪く、理論値で得られている粘着力が十分発揮されていないと考えられる。このことから、本解析では理論値より粘着力が低下していると考え、以下の値を用いる事とした。

$$c = 0.01 \text{ N/mm}^2$$

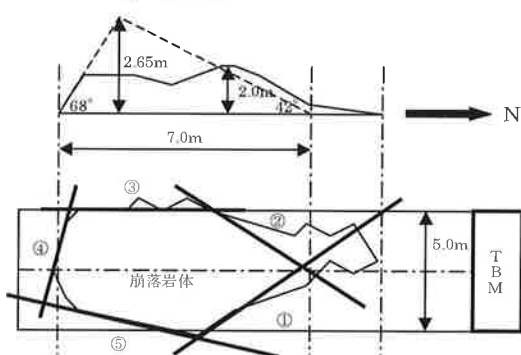
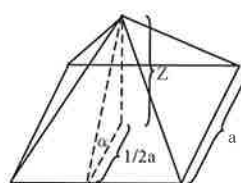


図-13 TBM 坑内で発生した崩落岩体

表-3 正四角錐モデルによる粘着力の理論値

項目	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	単位
底面辺長:a	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	[m]
傾斜角: α	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	[度]
四角錐高さ:Z	0.54	1.16	2.00	3.46	7.46	[m]
摩擦面積:S	16.56	18.48	22.63	32.00	61.82	[m ²]
四角錐重量:W	71.8	154.8	268.1	464.4	1000.6	[kN]
粘着力:c	0.004	0.008	0.012	0.015	0.016	[N/mm ²]

※Case1～5: 底辺一定条件で傾斜角を 15° ずつ増加させた場合の岩体諸量



$$F_s = c \cdot S / W = 1.0 \text{ より逆算} \\ c = W / S$$

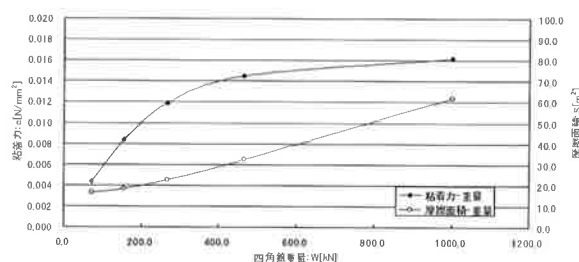


図-14 粘着力・岩体重量、粘着力・摩擦面積の関係

(2) 標準設計支保パターン解析パラメーター

標準設計支保パターンより解析パラメーターを表-4 のように設定した。

表-4 解析パラメーター一覧表

支保パターン	C I-P	D I-P	D III-P
吹付けコンクリート			
吹付け厚 (cm)	15.0	20.0	25.0
設計基準強度 (N/mm ²)	36.0	36.0	36.0
許容せん断応力度 (kN/m ²)	500.3	500.3	500.3
ロックボルト			
ボルト長 (m) 『アーチ部分』	6.0	6.0	6.0
ボルト径: d (mm)	25.0	25.0	25.0
耐力・上半 (kN)	290	290	170
削孔径: D (mm)	40.0	40.0	40.0
許容付着応力度: τ_1 (kN/m ²)	1569.6	1569.6	1569.6
周面摩擦応力度: τ_2 (kN/m ²)	588.6	588.6	588.6
定着長: l_1 (m)	0.5	0.5	0.5
最小影響長: l_2 (m)	0.5	0.5	0.5
トンネル周面方向ピッチ (m)	1.5	1.2	1.0
トンネル軸方向ピッチ (m)	2.0	1.2	1.0
鋼製支保			
鋼アーチ支保工	—	HH154	HH200
強軸方向降伏曲げモーメント (kN)	—	114	210
せん断抵抗 (kN)	—	122.4	186.0
トンネル軸方向ピッチ (m)	—	1.2	1.0

6.3 キーブロック連続解析結果

前節までの入力パラメーターを用いて、本坑断面によるキーブロック解析を行なった。解析範囲は STA.No652+14.5～662+98.6 (1084.1m 区間) である。

本解析ではTBM 先進導坑地質調査結果より得られた地山等級を基に、想定支保パターンを作成しキーブロック連続解析を実施した (図-15)。また、上記解析区間で特定された不連続面数は107枚である。図-15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 $F_s < 1.0$ のキーブロックを示している。

解析の結果、本坑 1084.1m 区間において466個のキーブロック形成が認められた。キーブロックの傾向としては、 10 m^3 未満の小さなブロックが全体の1/3を占め、ブロック高さが8.0mを超える背の高いブロックが全体の1/3を占める。分布状態については、全線に渡り大小様々なブロッ

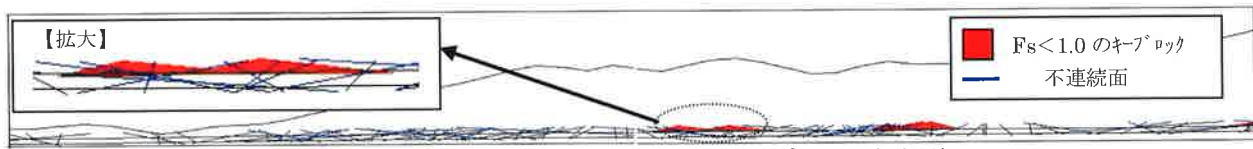


図-15 トンネル解析結果縦断面図 (Fs<1.0 のブロックを表示)

クが混在する結果となっている。また、形成されたキーブロックの中で、想定支保パターンでは崩落する危険性が高いブロック(赤ブロック)は9個であった。

6.4 キーブロック詳細解析結果

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想定した詳細解析を実施した。詳細キーブロック解析システムは、上記キーブ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-5 に解析結果を示す。

表-5 ブロック諸元(通常支保工施工時)

構成亀裂	N60W/29SW	N43E/48SE
	N10E/70SE	N25E/89NW
岩体重量[kN]	68381.8	
岩体体積[m³]	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-16、表-6 に示す。

対策工A：長尺ロックボルト (l=8.0m) の採用

〈通常支保より 2.0m 長物〉

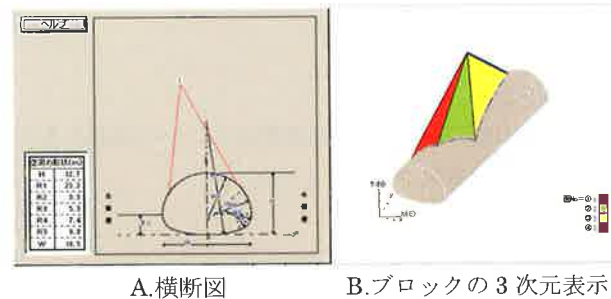
対策工B：ケーブルボルト+通常ロックボルト

〈TBM 導坑より L=10.0m のケーブルボルトを施工〉

表-6 対策工まとめ

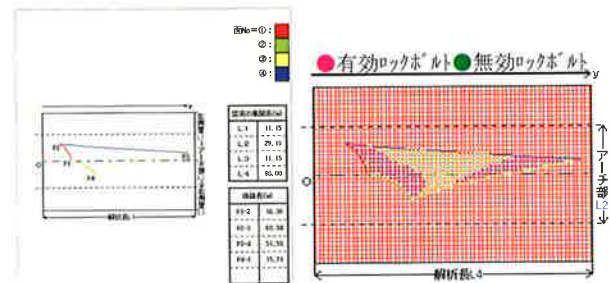
	長尺ロックボルト	ケーブル+通常ロック	安全率
通常支保	—	—	0.69
対策工A	☆	—	0.98
対策工B	—	☆	1.04

通常支保：図-16・D、対策工A：図-16・E、対策工B：図-16・F



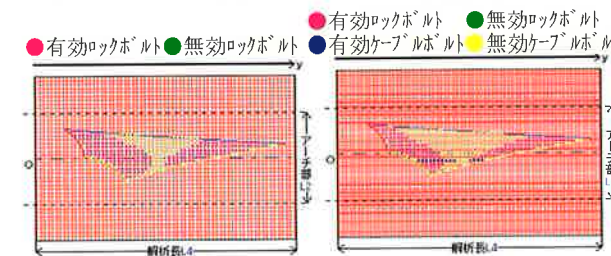
A.横断面

B.ブロックの3次元表示



C.キーブロック展開図

D.通常支保



E.長尺ロックボルト

F.ケーブルボルト施工

図-16 対策工シミュレーション結果

現するか等、妥当性の検討を行なう。

②基本的な技術システムが構築できたため、今後、通常の山岳トンネルや切土法面等への展開を図っていく。

7. 結論

TBM 坑壁画像撮影システム・キーブ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、従来に比べ大幅な省力化・スピード化を図ることができた。本システムでは、キーブロック 466 個の解析に約 5 時間 (pentiumIII 相当) を要するが、従来では 1 個のキーブロックの解析に 10 分要したとしても最低 80 時間を要し、1/16 の効率と言える。実際にはキーブロックと判定されていない組み合わせについても計算を行なっているため、効率は更に高いと判断される。

8. 今後の課題

①今回判定されたキーブロックが本坑断面に想定通り出

参考文献

- 1) 菊地宏吉：地質工学概論，土木工学社，p.84，1990
- 2) Goodman, R.E. and Shi, G.: Block theory and its application to rock engineering, Prentice-Hall International Inc...
- 3) 日本道路公団 静岡建設所, 静岡工事事務所, 大成基礎設計株式会社：第二東名高速道路 岡部トンネル第一次地質調査 報告書，p.114，1995
- 4) 社団法人 日本道路公団：設計要領第二集 橋梁・擁壁・カルバート，p.6-12，1997
- 5) 社団法人 土木学会：岩盤斜面の安定解析と計測，1994
- 6) 吉中龍之進, 大西有三：R.E.グッドマン, G.H.シー著 ブロック理論と岩盤工学への適用，土木工学社，1992
- 7) 社団法人 日本道路公団：設計要領第三集 第9編 トンネル トンネル本体工建設編，2001