

不連続解析手法の大断面トンネルへの適用性検討

INVESTIGATION ON THE APPLICABILITY OF DISCONTINUUM ANALYSIS METHOD FOR THE LARGE CROSS SECTION TUNNEL

吉塚 守¹⁾ 伊藤哲男²⁾ 城間博通³⁾

Mamoru YOSHIZUKA, Tetuo ITOU and Hiromichi SHIROMA

As numerical models to take discontinuity of rock mass into account, the finite element method with joint elements (assuming infinitesimal deformation), finite difference dynamic discontinuum analysis in which motion equation is solved in order to deal with the large deformation problem, and other methods have been developed.

This report presents the outline of investigation on the field application of the numerical method to the tunnel support design, by means of comparing the results of discontinuum analysis and measured field data, as one method to design the rational support structure of large cross section tunnel in New Toumei-Meisin Expressway.

Key words: discontinuum analysis, large cross section tunnel, design of support structure

1. はじめに

第二東名・名神高速道路では、掘削幅が 18m を超える扁平大断面トンネルの施工が開始されている。

施工にあたっては、東名改築時の 3 車線トンネルの施工事例や FEM, 骨組み(フレーム)解析による解析結果などを参考として、内空断面、支保構造、覆工構造、掘削工法等についての基本案が定められ、これにより清水第三トンネルと栗東トンネルにおいて試験施工工事が行われている。

試験施工工事は、より合理的な支保構造の設定を目的として、高強度吹付けコンクリートや高規格鋼アーチ支保工などの高品質の新材料を用いた実証試験が行われ、平成 10 年 8 月現在、清水第三トンネルでは実証試験ケースの施工が終了し、栗東トンネルでは、上り線 TBM 導坑の掘削が完了し下り線 TBM 導坑の発進準備を行っている。

本報文はこのような中、清水第三トンネルの支保検討の一部として、節理の強度を直接的に評価できる、Q システム(ノルウェー地盤工学研究所(NGI)の Barton 博士が提唱)によって、節理(不連続面)の特性(強度や変形)を定量化した上で、解析的手法(個別要素法解析コード UDEC-BB)を用いた大断面トンネルの支保構造決定についての適用性検討を実施したので、その概要を報告するものである

-
- | | | | | | |
|--------|--------|-------|-------|---------|----|
| 1) 正会員 | 日本道路公団 | 試験研究所 | 道路研究部 | トンネル研究室 | |
| 2) 正会員 | 日本道路公団 | 試験研究所 | 道路研究部 | トンネル研究室 | 主任 |
| 3) 正会員 | 日本道路公団 | 試験研究所 | 道路研究部 | トンネル研究室 | 室長 |

2. 解析概要

(1) 解析コードの特徴

本検討で用いた解析コードは、UDECB-BB (Universal Distinct Element Code with Barton-Bandis model) で、その起源は剛体ブロックの個別要素法 (DEM) であり、さらにブロック内部を要素分割して変形性を持たせたものがUDECBである。UDECBの解析領域は不連続面で区切られた複数のブロックによって構成され、ブロック間はバネで結合されている。分割されたブロック内部の各要素には、弾性係数、ポアソン比、単位体積重量が与えられている。

プログラム内部では $\Delta t = 10^{-5}$ sec といったオーダーの微小な時間項を与えて節点の速度、さらに変位増分を求める

UDECB-BBには、BartonとBandis(1985)によって開発された非線形節理挙動モデルBarton-Bandis モデル (以下BBモデル) が組み込まれている。BBモデルでは、節理のせん断強度を3つのパラメータJRC、JCS、 ϕ_r によって定量化する。JRC (Joint roughness coefficient) は節理面の粗さを表す係数、JCS (Joint compressive strength) は節理面の圧縮強度、 ϕ_r は節理面の残留摩擦角である。これらのパラメータは比較的簡便な室内試験と原位試験によって精度よく測定することが可能である。BBモデルのせん断破壊基準は式(2.1)で表される。

$$\tau = \sigma_n \tan \left\{ JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right\} \tag{2.1}$$

ここで、 τ : 節理のせん断強度、 σ_n : 節理面に働く垂直応力である。

詳細については、「ノルウェートンネル工法(NMT)の概要」(トンネルと地下 1995 年 12 月) ¹⁾ に示される関連項目「(3) UDECB-BB と 3DEC を用いた NMT の設計検証のための数値モデル化」を参照されたい。

(2) 解析ケースと解析条件

今回の解析では、第二東名清水第三トンネル支保実証試験の計測値と解析結果を比較し、トンネルの挙動を再現しうる入力データを検証する事を主な目的として、表 1 に示す解析ケース(支保区分)を選定した。

表 1 解析ケース

	吹付けコンクリート	鋼アーチ支保工	一掘進長	ロックボルト
ケース A	高強度鋼繊維 $\sigma_{ck}=36\text{Mpa}$ 、 $t=200\text{mm}$	なし	1.5m	L=6.0m 耐力 18tf 周方向ピッチ P=1.2m
ケース B	高強度 $\sigma_{ck}=36\text{Mpa}$ 、 $t=200\text{mm}$	高規格 H-154 SS540		
ケース C	普通 $\sigma_{ck}=18\text{Mpa}$ 、 $t=200\text{mm}$	H-200 SS400		

比較検討の手順は、以下のとおりとした。

- ① 吹付けコンクリートとロックボルトのみからなるケース A の解析を行い、吹付けコンクリートとロックボルトの入力値の妥当性について検討する。
- ② この時の高強度吹付けコンクリートの物性値は、ヤング率 $E=15\text{ GPa}$ (NGI 提案値)、 $E=6\text{ GPa}$ (国内の提案値) の 2 とおりを試し、解析結果を計測値と比較し、より適切なヤング率を選択する。
- ③ ロックボルトの物性値は、後述するようにロックボルト本体とグラウト材の剛性から等価なバネ定数を算定するが、グラウトのヤング率についても NGI の提案値と国内の提案値の両方を試すこととした。

④ 次に、ケースAに鋼アーチ支保工を追加したケースBの解析を行い、変位量、部材力を計測値と比較し、鋼アーチ支保工の入力値の妥当性を検討した。

⑤ さらに、従来型の支保パターンにも対応できることを確認するため、ケースCの解析を行い、計測値との比較を行うこととした。この時の吹付けコンクリート(普通)のヤング率は、高強度吹付けコンクリートの検討結果(②での比較検討)を参考にして決定することとした。

モデル化に必要な地山物性値等については、事前検討(平成7年)においてQシステムによる綿密な地山評価が行われており、原則として変更しないで用いることとした。(表2, 3参照)

表2 岩盤基質の物性値

パラメータ	入力値
変形係数 E (Gpa)	10
ポアソン比 ν	0.25
密度 γ (kN/m ³)	25.0

表3 節理の物性値

パラメータ	節理系 J1	節理系 J1, J2
節理の粗さ係数 JRC ₀	3	7
節理面の圧縮強度 JCS ₀ (Mpa)	30	40
室内試験の節理長 L ₀ (m)	0.1	0.1
原位置の節理長 L _n (m)	0.5	0.5
残留摩擦角 ϕ_r (°)	25	30
一軸圧縮強度 σ_c (Mpa)	50	50

3. 支保材料のモデル化

(1) 吹付けコンクリートのモデル化

吹付けコンクリートモデルはビーム要素を使用した。

UDEC-BBのビーム要素の特徴は、地山とのインターフェイスの特性を考慮できることである。地山とビーム要素はバネで結合されている。これに、引張強度、粘着力、摩擦角を与え、破壊後はバネが切断される。

高強度吹付けコンクリートの物性値は、ヤング率 E=15 GPa (NGI 提案値)、E=6 GPa (国内の提案値)の2とおりを試すこととした。表4に吹付けコンクリートの物性値を示す。

表4 吹付けコンクリートの物性値

パラメーター	物性値
弾性係数 E (GPa)	15 or 6
ポアソン比 ν	0.15
密度 ρ (tf/m ³)	2.5
圧縮強度 YCOMP (MPa)	36
引張強度 YIELD (MPa)	3.6
残留引張強度 YRESID (MPa)	2
地山との摩擦角 JFRIC (°)	60
地山との粘着力 JCOH (MPa)	0.86
地山との引張強度 JTENS (MPa)	0.5

(2) ロックボルトのモデル化

ロックボルトのモデルは、節理とロックボルトの交差点におけるバネで表現する。清水第三トンネルのようにインタクトロックのヤング率が非常に高く、節理の挙動が支配的である地山においては、ロックボルトの周面とインタクトロックの間の相対変位は無視し得るほど小さく、節理との交差点においてロックボルトが節理の変位に抵抗することによって軸力が発生し、支保効果を発揮する。このような現象を表現するために考案されたのがUDECに組み込まれているLocal reinforcement modelである。モデルの概念図を図1に示す。

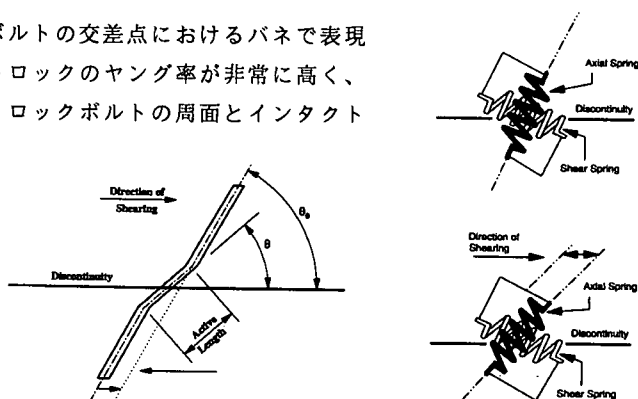


図1 ロックボルトモデルの概念図

(3) 鋼アーチ支保工のモデル化

鋼アーチ支保工のモデルは、吹付けコンクリートと同様のビーム要素を使用した。材料の特性として吹付けコンクリートとまったく異なる点は、破壊形態である。鋼材の場合は延性的な破壊形態をとるから、解析モデルとしてはビーム要素の残留強度を降伏強度と同じ値に設定しておくことによってある程度表現可能である。今回は、鋼アーチの破壊が問題となるような極限的な条件での解析ではないから、弾性域の定数を適正に設定することによって十分なモデル化が可能であると考えられる。

4. 解析結果と計測値の比較

(1) ケース A

ケース A について、吹付けコンクリートのヤング率を $E=15\text{GPa}$ 、 $E=6\text{GPa}$ の 2 おりを用いて解析を行った。表 5 に計測値(変位量は収束値,支保部材応力は最大値,以下同様に記す。)と解析結果の代表値(各項目の最大値)を示す。図 2、3 に変位ベクトルと節理のせん断変位を示す。

天端沈下、水平内空変位、ロックボルト軸力の 3 項目については、解析の両ケース間に大きな差はなく吹付けコンクリート軸力については、 $E=6\text{GPa}$ の方が計測値に近い。

表 5 計測値と解析結果の代表値 ケース A

(上段：上半収束値、下段：下半収束値)

区 分 項 目	計測値 ケース A	計測値の範囲	解析結果 ケース A 吹付けコンクリート $E=15\text{GPa}$	解析結果 ケース A 吹付けコンクリート $E=6\text{GPa}$
天端沈下 mm	-3 -5	+1~-4 -3~-6	-6.0 -6.3	-6.1 -6.4
水平内空変位 mm	-2 -2	+3~-3 +3~-13	-7.2 -8.9	-7.4 -9.3
吹付けコンクリート軸力 tf	-37.1 -64.3	-39~-79 -66~-105	-108.0 -134.5	-71.9 -89.8
ロックボルト軸力 tf	5 16	5~16 13~20	15.4 15.5	14.9 14.9

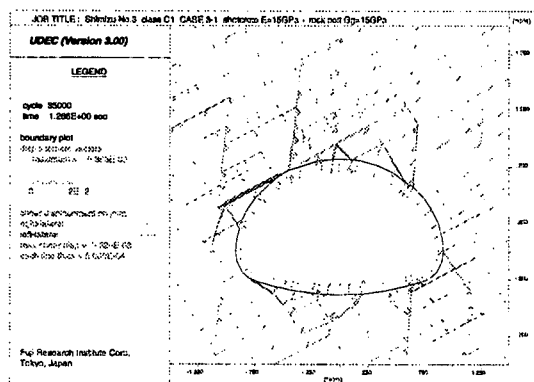


図 2 変位ベクトルと節理のせん断変位(15GPa)

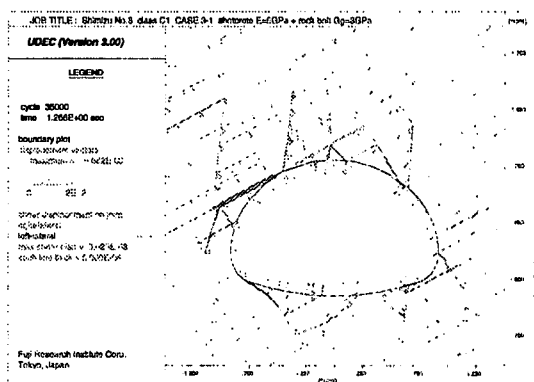


図 3 変位ベクトルと節理のせん断変位(6GPa)

(2) ケース B

ケース B の解析は、鋼アーチ支保工とプレーンの高強度吹付けコンクリートの組合せとしたが、吹付けコンクリートの物性値は 6GPa として、ケース A に鋼アーチ支保工を追加したものとした。

図4に変位ベクトルと節理のせん断変位、図5に吹付けコンクリート、鋼アーチ支保工、ロックボルトの軸力を示す。表6に計測値とケースBの解析結果の代表値（各項目の最大値）を示す。

表6 計測値と解析結果の代表値 ケースB

(上段：上半収束値、下段：下半収束値)

区 分 項 目	計測値 ケースB	計測値の範囲	解析結果 ケースB	解析結果(参考) ケースA 吹付けE=6GPa
天端沈下 mm	-4 -6	+1~-4 -3~-6	-6.1 -6.3	-6.1 -6.4
水平内空変位 mm	+3 +3	+3~-3 +3~-13	-7.3 -9.1	-7.4 -9.3
吹付けコンクリート軸力 tf	-50.2 -92.4	-39~-79 -66~-105	-61.3 -76.1	-71.9 -89.8
鋼アーチ支保工軸力 tf	-26 -43	-21~-44 -38~-68	-25.4 -32.5	鋼アーチなし
ロックボルト軸力 tf	未計測	5~16 13~20	14.9 15.0	14.9 14.9

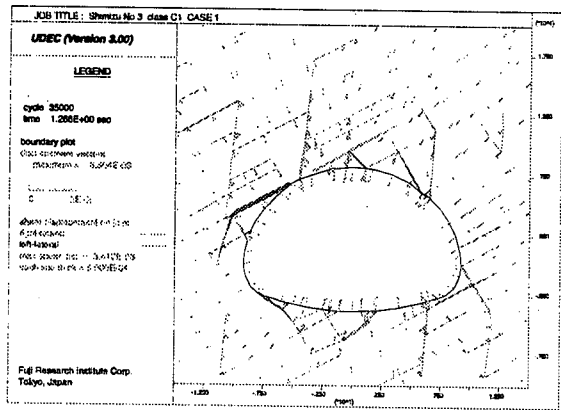


図4 変位ベクトルと節理のせん断変位

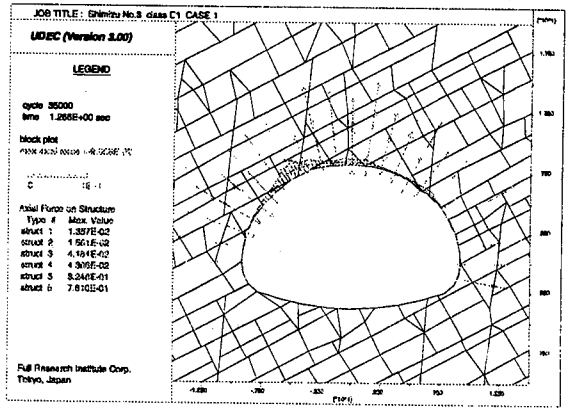


図5 吹付け、鋼アーチ支保工、ロックボルトの軸力

(3) ケースC

表7にケースCの計測値と解析結果の代表値（各項目の最大値）を示す。

表7 計測値と解析結果の代表値 ケースC

(上段：上半収束値、下段：下半収束値)

区 分 項 目	計測値 ケースC	計測値 全体の傾向 (参考値)	解析結果 ケースC
天端沈下 mm	-10 -10	+1~-4 -3~-6	-6.1 -6.4
水平内空変位 mm	-5 -12	+3~-2 +3~-13	-7.3 -9.1
吹付けコンクリート軸力 tf	-30.1 -68.4	-37~-79 -64~-105	-46.5 -57.2
鋼アーチ支保工軸力 tf	-36 -55	-21~-44 -38~-68	-35.5 -45.4
ロックボルト軸力 tf	20 20	5~16 12~20	14.9 15.0

5. まとめと今後の課題

今回解析の対象とした清水第三トンネルの地山は、節理の発達した比較的堅硬な地山であることにより、トンネル掘削による地山の変位が概ね 10mm 以下と少ないため、支保パターンの違いによる変位量、部材力の差が出難い条件となっている。そのため比較検討においては、当該断面の計測値と直接比較するのではなく、計測値の全体的な傾向を読み取り、その傾向に解析結果が概ね一致していることによって、モデルと入力値の妥当性を確認するという手法をとった。

ケース B の解析において、吹付けコンクリート、鋼アーチ、ロックボルトの軸力は計測値全体の傾向とよく一致している。吹付けコンクリートと鋼アーチの軸力はケース A と比べて 1 割ほど減少し、鋼アーチ支保工に振り向けられている。その他、水平内空変位については、ケース B の計測値は拡大方向となっている。解析では側圧係数 1.0 としており、実際は側圧係数がこれよりも低い可能性もあるが、解析結果が計測値の範囲と一致していることから、側圧係数については新たな検討は加えないこととした。

ケース C の解析では、各項目とも標準ケースの計測値に比較的近い値となっている。これによって、普通コンクリートと従来型の鋼アーチ支保工を用いたパターンについても、解析モデルの妥当性が確認された。

今回の検討課題は、吹付けコンクリート、鋼アーチ支保工、ロックボルト等の支保部材の入力物性値を逆解析により推定することであるが、解析結果より以下のことが確認できた。

- ① 高強度吹付けコンクリートのヤング率については、計測値との比較の結果、国内で用いられている $E=6\text{GPa}$ の方が計測値に近い結果が得られることがわかった。
- ② 鋼アーチ支保工のモデルについては、吹付けコンクリートと同様のモデルを使用した結果、計測値に近い結果が得られることがわかった。
- ③ ロックボルトのグラウトの剛性については吹付けコンクリートヤング率との整合性の観点から、吹付けコンクリートの国内提案値と同様の方法で算定した物性値を用いることとしたが、特に問題はなかった。これらのことから、支保部材のモデル化および入力物性値の妥当性が確認されたと言える。

しかしながら、今回の解析と対比した計測値には支保パターン(支保剛性)の差異による、明確な差異は見あらず、解析結果もそれに類する傾向が確認できたにとどまった。よって、今後の解析においては地山強度や支保剛性がより明確に区分できうる範囲での確認(比較)が必要といえる。

6. おわりに

今回の検討においては、清水第三トンネルでの支保実証試験の計測値と UDEC-BB の解析結果を比較し、主に支保部材の解析モデルと入力値の妥当性について検討を行った結果、大断面トンネルにおける不連続解析の適用は支保部材のヤング率の設定によって充分可能である事が確認できたが、より合理的で経済的な支保構造を決定するためには、解析的手法(不連続解析)が有効である地山や節理(不連続面)特性(強度や変形)の範囲を見極めるための比較検討が必要不可欠であり、これらを適正に実施する上で統一的、客観的な地山判定法や不連続面強度の評価試験法の確立が重要となる。

JHにおいては、第二東名名神の大断面トンネルを含むすべての現場に於いて、平成9年度よりこれまでの施工記録の分析に基づく「新切羽評価点法」による地山の判定法が実施されている。また、TBMの機械データから地山等級を判定するなどの手法も試みられており、今後これらのデータを整理分析することにより、地山の判定法確立に向けた研究を進めていくとともに、切羽より採取した不連続面の簡易せん断試験の試行など、より合理的で経済的な大断面トンネルの支保構造を実現するための研究を進めていくこととする。

「参考文献」1) ノルウェートンネル工法(NMT)の概要. トンネルと地下, Vol 26, No.12, 1995 年 12 月