トンネルの現有耐力と対策工に関する評価・診断技術の研究

土井 至朗*1·松岡 茂*2·松浦 和也*3

概 要

トンネルのロックボルトや吹付けコンクリートといった支保効果の定量的な評価を 可能にすることを目的に,施工箇所の地山を硬岩地山と軟岩地山の場合に分け,それぞ れの特徴を考慮した手法で FEM 解析を行った。硬岩地山の場合には亀裂面に囲まれた岩 塊の崩落に関して,不連続面の滑動を考慮した FEM 解析を行い,軟岩地山の場合には応 力・時間依存性を考慮した地山のクリープ解析を行うことで,それぞれの支保効果を評 価することが出来た。

キーワード:トンネル、補修・補強、解析、クリープ

STUDY OF EVALUATION AND DIAGNOSIS TECHNIQUES FOR ACTUAL STRENGTH OF TUNNELS AND SUPPORTS

Shiro DOI^{* 1} Shigeru MATSUOKA^{* 2} Kazuya MATSUURA^{* 3}

Abstract

In order to quantitatively evaluate the support effect of tunnel rockbolts and shotcrete, types of bedrock at tunneling sites were classified into hard rock and soft rock zones, and using techniques suitable for the specific properties of such rock zones, FEM analyses were made. For hard rock, FEM analysis considered slides of discontinuous planes, relating to fall of rock mass surrounded by cracked planes. For soft rock, ground creep was analyzed, considering stress dependency on time. These analyses enabled effective evaluation of the effects of different supports in each rock zone.

Keywords: tunnel, repair and reinforcement, analysis, creep

^{*1} Material / Structure Group, Engineering Technology Center, Engineering Division

^{*2} Deputy General Manager, Technology Center, Engineering Division

^{*3} Geotechnical Engineering Group, Engineering Technology Center, Engineering Division

1. はじめに

トンネルの安定を評価する手法としては,周辺 地山を連続体としてモデル化した有限要素法や地 山を不連続体の集合として取り扱う個別要素法な どの方法が提案されている。その大部分が,トン ネル掘削後に生じる周辺地山の応力再配分による 影響を主眼とした計算手法であるため,特殊な計 算手法を除いて長期間変状が継続するような場合 には適用できない。また,岩盤自体が硬岩であり, トンネル掘削による応力再配分で岩石自体が不安 定化しない地山で課題となる岩塊ブロックの抜け 出しについても,トンネル掘削に伴う応力再配分 による影響のみを考慮した従来の解析手法では評 価することができない。そこで,岩塊ブロックの 抜け出しが問題となる硬岩地山と長期間変位が継 続する軟岩地山を対象として計算手法を開発した。

岩塊ブロックの抜け出しに対する評価方法とし ては、節理面などの不連続面をモデル化した方法 が提案されているが、不連続面の強度特性などの 評価方法が一般的でないことなどの理由で適用事 例は少ない。そこで、トンネルの安定解析で多く 用いられている有限要素法解析を用いて、岩塊ブ ロックの安定評価を行う手法を開発した。

長期間変位が継続するトンネルを対象とした解 析手法としては、時間依存性を考慮したクリープ 解析などが提案されている。しかしながら、提案 されている計算手法の大部分が地山のクリープ特 性の応力依存性を考慮していないため、ロックボ ルトなどの支保効果を考慮して計算されていると は考えにくい。例えば、トンネル掘削後に押し出 し変位が長期間継続する場合には、吹付けコンク 土井 至朗*1·松岡 茂*2·松浦 和也*3

リートなどによる早期閉合やトンネル形状を円形 に変更することなどが変状を抑制する上で効果的 であることが経験的に知られているが,このよう な効果を時間依存性のみを考慮した解析手法で表 現することは困難であった。そこで,本研究開発 では,ロックボルトなどの支保により周辺地山に 与えられる支保内圧による影響やインバート施工 による応力集中の低減などの影響を評価するため, 時間・応力依存性を考慮した解析手法を開発した。

2. 硬岩地山に対する解析手法

2.1 解析モデル

硬岩地山では,節理面などの不連続面で囲まれ た岩塊崩落がトンネルの安定を確保する上で重要 な課題である。そこで、図-1に示すように地山 モデルを仮定し,図中に示すように不連続面で囲 まれた岩塊の崩落に対する安全性を評価する手法 を開発した。この手法では,周辺地山および不連 続面で囲まれた岩塊は弾性体とし,不連続面(図 中の太い実線)のみをモール・クローンの破壊規

準で破壊が決定される
 定は体として取りる
 するおおいては、
 するの形は、
 マー1にしめすよるの
 たが1:
 た、岩塊



図-1 岩塊ブロック形状表-1 岩塊の大きさ

	高さ (m)	底辺 (m)
B級地山	8	8
C級地山	5	5
D級地山	2	2

*1 エンジニアリング本部 技術センター 材料・構造グループ
*2 エンジニアリング本部 技術センター 副所長
*3 エンジニアリング本部 技術センター 地盤グループ

の大きさについても、同様に第二東名・名神の施 エデータ²)に基づいて**表**-1のように定めた。な お、岩塊の大きさについては、実際に発生した崩 落事例に基づいて定めることが望ましいが、報告 書で記載されている崩落事例はC級地山の1例の みであることから、実際の運用においては不連続 面の頻度などを考慮して適用することが望ましい。

地山の弾性係数などの特性値は、旧日本道路公 団の設計要領に準拠して**表**-2に示す値を用いた。 不連続面については、GAP 要素と呼ばれる要素で モデル化した。GAP 要素とは、 $\mathbf{2}$ に示すよう に厚さを有しない四辺形要素であり、GAP 要素に 作用する鉛直応力 σ とせん断応力 τ は四辺形を構 成している各節点から式(1)、(2)で算定される。

$$\sigma = \frac{1}{l} (F_{n,K} + F_{n,L})$$
(1)
$$\tau = \frac{1}{l} (F_{s,K} + F_{s,L})$$
(2)

ここで、1:GAP 要素の長さ、F:節点力である。 GAP 要素は、要素に発生する応力が図-3に示 すようにモール・クローンの破壊規準に達すると 不連続面は滑り出すものとする。つまり、せん断 応力を保持した状態でGAP 要素の滑りが発生する。 GAP 要素の強度特性については、健全な岩盤中に 不連続面が形成されていることを考慮し、残留強 度とした。その残留強度については、**表**-3に示 すように粘着力を考慮しないものとした。

トンネル支保として、ロックボルトと吹付けコ ンクリートに代表される覆工を考慮し、この2つ の支保の岩塊崩落防止効果を次のようなモデルで 計算を行う。

不連続面を貫通したロックボルトの挙動につい ては、吉中ら³⁾が報告しており、その結果によ ると不連続面を貫通したロックボルトは不連続面 の滑りを抑制する効果があることが確認されてい る。その抑制効果は、ロックボルトと不連続面と の交差角度の影響を受けることと、ボルトに発生 する応力は不連続面近傍のみであることが報告さ れている。このようなボルトの挙動は、鉄筋コン クリート部材のひび割れ面近傍の鉄筋と近似して いる。そこで、コンクリートのひび割れ面で発生 する鉄筋のダウエル効果に関する計算モデルを参 考にロックボルトの効果を算定するモデルを作成 した。このモデルでは、図-4に示すように不連 続面を貫通したボルトを2つのばね要素で表現す る。

表-2 地山特性值

地山等級	構成式	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
В	弾性	5000	0.25	24.5
CI	弾性	2000	0.30	22.6
CII	弾性	1000	0.30	22.6

表一3 GAP 要素の強度特性

地山等級	粘着力 (N/mm ²)	内部摩擦 角	引張強度 (N/mm ²)
В	0	20~30	0
С	0	20~30	0
D	0	10~30	0







図-3 GAP 要素の破壊基準



図-4 ロックボルトのモデル化

この要素のばね係数は,式(3),(4)で計算される ものとする。

$$k_A = \frac{E \cdot A}{L} \tag{3}$$

$$k_s = \frac{12EI}{L} \tag{4}$$

ここに, k_A: ロックボルトの軸方向ばね係数, ks: ロックボルトのせん断方向ばね係数, E: ロックボルトの弾性係数,A:ロックボルトの公 称断面積, I:ロックボルトの断面2次モーメン ト,L:影響区間である。この影響区間とは,不 連続面の滑りでロックボルトが変形する区間であ り、この区間の長さは岩盤、充填モルタルなどの 影響を受けると考えられる。しかしながら、影響 区間に着目したデータが乏しいため、現状では影 響区間に与える要因を分析することが困難である。 そこで,本論文では,吉中らが行った実験結果か ら影響区間長を逆算した値を使用するものとし, 影響区間をパラメータとした試算を行った。その 結果, 図-5に示すよう影響区間を 100mm とし た計算結果が実験結果と比較的良い整合を示した ことから、影響区間を100mmとしてロックボルト をモデル化したばね要素の物性値を算定するもの とした。

吹付けコンクリートなどの覆工の支保効果につ いては、岩塊が崩落する時に覆工には押し抜きせ ん断力が作用すると考えられる。コンクリートの 押し抜きせん断強度については、三谷らが実験と 数値解析を実施し、図-6に示すように軸力比 との関数として表している。そこで、本手法にお いても、図-6の押し抜きせん断強度を用いる ものとした。また、覆工については、押し抜きせ ん断破壊以外の曲げ破壊および圧縮破壊も想定さ れることから, 覆工については図-7に示すよ うな手順で破壊に対する照査を行うものとした。 具体的には、曲げ破壊および圧縮破壊に対しては、 「コンクリート標準示方書 構造性能照査編」に 基づいて曲げ耐力線を算出し,その耐力線を用い て照査し、押し抜きせん断に対しては図-6の 耐力線で照査する。

2.2 硬岩地山の計算結果

トンネル掘削による岩塊崩落に対する安定解析 では、通常のトンネル解析と同様に掘削相当外力 を解放することで掘削状態を評価している。計算 では、図-8に示すようにトンネル断面に対す



図-5 ロックボルトの影響長さの違い によるせん断挙動の違い



図-6 軸力比と押し抜きせん断強度



図-7 覆工の破壊照査のフロー



図-8 計算に用いた岩塊の位置

る岩塊位置を変化させ,最も崩落に対する安全性 が低いものに着目して検討を実施した。岩塊の安 定は,トンネル断面形状による影響を受けるが, 一般的に側圧係数が小さい場合には天端部の岩塊 が不安定になり易く,側圧係数が大きくなるのに 従って不安定になる岩塊がSLに近づく傾向を示 す。

図−9に岩塊の不連続面に発生する応力履歴 を示す。応力履歴によると、掘削前の状態(掘削 相当外力の解放率が 0%) では不連続面に発生す る応力は全て破壊規準以下である。掘削相当外力 の解放率が大きくなるのに伴って、不連続面の応 力状態(鉛直応力とせん断応力)は破壊規準に近 づき、最終的には全ての部分で破壊規準に達する。 不連続面をモデル化した全ての要素が破壊規準に 達した時点で岩塊が崩落すると判定する。岩塊が 不安定化する解放率を把握するために図-10 に各要素が破壊する解放率を整理した。同図に示 すように、不連続面の破壊はトンネル壁面から発 生し, 徐々に岩塊の頂点に向かって拡大しており, 最終的には解放率が 92%で岩塊の不連続面が全 て破壊し,岩塊が崩落したと判定された。掘削相 当外力の解放率 100%以下で岩塊が崩落すると判 定された場合には、トンネル掘削において何らか の支保が不可欠である。

次に、ロックボルトの支保効果を検証した計算 を行った。なお、トンネル支保については、掘削 時の初期応力の解放を 40%として計算を行ってい る。提案する手法では、ロックボルトについては、 不連続面との交差部のみをモデル化すれば良い。 ロックボルトを考慮した計算結果は、図-10 に示すように破壊が発生する個所がロックボルト の影響を受けないトンネル壁面であるので、不連 続面の破壊が発生する解放率は無支保のものと同 様である。しかしながら、不連続面の破壊がロッ クボルト打設位置まで達するとボルトの効果が発 揮され、破壊に至る解放率が大きくなっている。 本ケースの計算結果では、ロックボルトによる支 保効果は掘削相当外力の解放率で約 4%と判定さ れた。 吹付けコンクリートなどによる覆工の効果につ いては、トンネル壁面に覆工をモデル化した梁要 素を用いて計算を行った。なお、覆工をモデル化 した梁要素と周辺地山との間にはダミー要素を配 置し、覆工と地山が離れるような挙動を示す場合 には、ダミー要素は応力伝達をしないものとした。 覆工に発生する断面力を図-11に示すように 別途計算した曲げ耐力線およびせん断耐力線で照 査する。具体的には、図-11に示すように覆 工に生じる断面力が曲げ耐力あるいはせん断耐力



図-9 不連続面の応力履歴



図-10 不連続面の要素の破壊解放率



図-11 覆工の曲げ、せん断耐力線

線に達した時の掘削相当外力の解放率を覆工が破 壊する値と仮定する。その後,覆工が破壊したと 仮定し,岩塊の安定を再計算するが,通常は覆工 の岩塊崩落抑制効果は高いことから,覆工が破壊 すると岩塊は直ちに不安定化する場合が多い。

以上の計算を行うことで,硬岩地山における岩 塊崩落に対する支保効果を定量的に評価すること が可能となる。また,既設トンネルにおいても, 近接施工の影響あるいは拡幅工事に対する安全性 の検討などに本手法は適用することが可能である と思われる。

3. 軟岩地山を対象とした解析手法

3.1 解析モデル

軟岩地山の中にはクリープ特性を有しており, トンネル掘削後に長期間変状が継続するものがあ る。このようなトンネルでは,施工は勿論のこと, 供用開始後の維持管理に支障が発生することが予 想される。そこで,地山のクリープ特性を考慮し た解析モデルを作成した。

岩石のクリープ特性は、一般的には図-12 に示すように載荷直後にひずみが急増する一次ク リープと、その後緩やかにひずみが増加する二次 クリープ、再びひずみが急増し破壊に至る三次ク リープに分けられる。また、そのクリープ特性は 拘束応力の影響を受けることが知られている⁴⁾。 トンネル周辺地山が三次クリープに達すると急激 に変状が進行し、トンネルの安定性が損なわれる ことから、工学的には三次クリープを取り扱う必 要性が低いと判断した。以上のことから、ここで はクリープ特性としては二次クリープまでを取り 扱うものとし、周辺地山のクリープ特性は式(5) で表されるものとした。

$$\overline{\varepsilon} = A \cdot \overline{\sigma}^{n} \cdot t^{m}$$

$$\overline{\sigma} = \frac{\sigma_{\max} \left(1 - \sin \phi_{c}\right) - \sigma_{\min} \left(1 + \sin \phi_{c}\right)}{2 \cos \phi_{c}}$$
(5)

ここで、 ε :相当クリープひずみ、A, m、n:係 σ :相当応力、t:時間、 ϕ_c :クリープ特性 を決定する内部摩擦角である。相当応力は、式 (6)および図-13に示すようにモール・クローンの破壊規準を適用した。なお、 φc は、 クリープ特性に関するものであり、岩盤のせん断強度とは無関係である。

ロックボルトなどの支保により,周辺地山には 図-14に示すように支保内圧が反力として伝



図-12 岩石のクリープ特性



図-13 モールクーロンの破壊基準



図-14 トンネル壁面近傍の応力状態



達される。トンネル壁面では、接線方向応力が卓 越しており、支保内圧は図-14に示すように 接線方向応力と直交方向の拘束応力として作用す る。支保内圧による拘束応力が増加すると式(6) および図-13に示すように相当応力が小さく なり、その結果として式(5)で計算されるクリー プひずみが小さくなる。

3.2 計算結果

本論文で提案している手法を供用開始後も変状 が継続しているトンネルに適用した結果を図ー 15に示す。当該トンネルは、供用開始後6年 間の変位測定結果を有していたので、この計測 データから式(5)のクリープ特性に関わる係数を 算定した。

クリープ特性の係数を算定後に,供用開始後 6 年経過した時点(現状)で補修・補強を施工する ものとし,その効果を数値計算で推定した。計算 結果では,ロックボルトを打設することで変位速 度は減少する傾向を示すが,ロックボルトのみで はトンネル変状を完全に抑制することが難しいこ とが判明した。そこで,新たに覆工を施工するも のとして計算を行った結果,図-15に示すよ うに大幅にトンネルの変状を抑制できることが判 明した。 補修・補強を施工しない場合(図-15,16 の無対策と表示)には、図-16に示すように 側壁とインバートとの接合部およびアーチ部壁面 近傍に大きなクリープひずみが発生している。特 に、インバートとの接合部に大きなクリープひず みが発生することから、盤膨れの変状も生じてい る。補修・補強工法としてロックボルトのみを打 設した場合には、インバート接合部のクリープひ ずみの増大を防止する効果が小さく、盤膨れを抑 制することが出来ないことから、側壁の内空変位 についても抑制効果が低い結果となった。これに 対して、新規に覆工を施工した場合には、接合部 のクリープひずみの増加を防止することができる ために、盤膨れおよび内空変位を抑制することが

次に新設トンネルを対象として、支保の施工時 期による変位抑制効果を算定した結果を図-1 7に示す。計算結果によるとトンネル掘削後、 早期に支保を施工することで変位を抑制すること が可能である。しかしながら、早期に施工するほ ど支保に生じる支保内圧は大きくなることから、 図-17に示すように早期にロックボルトを打 設した場合には、比較的早い時期にロックボルト が全面降伏している。一方、トンネル掘削後 10



図-16 各支保を施工した場合のトンネル周辺地山のひずみ分布の違い



図-17 支保の施工時期の違いによる変状の差

日目にロックボルトを打設した場合には,変位拘 束効果と支保内圧の発生度合いが小さいので, ロックボルトが全面降伏するまでの期間が比較的 長い。計算結果によると最初に降伏するのは,ト ンネル壁面から少し地山側に入った個所であり, その後は時間の経過に伴って徐々に降伏領域が拡 大する。今回の計算では,ロックボルトの破断を 考慮していないが,ロックボルトの破断ひずみを 入力することでボルトの破断も検討可能である。 仮に,本ケースでボルトの破断を検討した場合に は,壁面近傍でボルトの破断が発生するものと想 定される。

本論文では、ロックボルトあるいは覆工の変位 抑制効果を試算した事例を示したが、提案した解 析手法はトンネル形状に起因する応力集中の影響 も考慮することができる。したがって、トンネル 壁面の応力集中が少ないほど、クリープによる変 状が少なくなる計算結果となることから、円形ト ンネルの変位量が最も少なくなる結果となる。ト ンネル形状が円形に近づくほど、クリープ特性に よる変状が小さくなるという計算結果は、経験的 に得られた知見と一致しており、長期間変状が継 続するトンネルに本解析手法は適用可能であると 判断できる。

4. まとめ

地山を岩塊の安定が問題となる硬岩地山と,ク リープ特性が問題となる軟岩地山の2つに分け, それぞれの地山の特徴を考慮したトンネルの解析 手法を開発し、トンネルの支保効果を検討した。

硬岩地山については,節理面などの不連続面で 囲まれた岩塊に着目し,その崩落に対する安全性 および支保の崩落防止効果を算定するものとした。 このような解析手法を用いることで,トンネル掘 削時における岩塊崩落の危険性を評価でき,支保 の岩塊崩落防止効果を算定できる。したがって, 節理面などの不連続面による影響が懸念されるト ンネルを施工する場合には,本解析手法を用いる ことで合理的な支保パターンを検討することが可 能である。

クリープ特性による押し出しが問題となる軟岩 地山のトンネルに対しては、応力依存性を考慮し たクリープ関数を用いた解析手法を開発した。こ の手法を用いることでロックボルトなどの支保の 変位抑制効果やトンネル形状による影響を定量的 に評価することが可能となった。支保の効果を定 量的評価することができることから、変状が生じ ている既設トンネルに対する最も効果的な補修・ 補強工法を提案することが可能である。

参考文献

- 旧JH試験研究所:第二東名・名神トンネル 施工データの分析(その2)報告書6章4節
- 旧JH試験研究所:第二東名・名神トンネル 施工データの分析(その3)
- 3) 吉中龍之進ほか:岩盤不連続面に対するロッ クボルトの最適敷設角にかんする実験的研究、
 第 19 回岩盤力学に関するシンポジウム講演 論文集, pp.481-485,1987
- (4) 國村ほか:軟岩地山におけるトンネル支保効果の解析的検討,土木学会年次学術講演会概要集 vol. 52, pp. 156-157, 1997