

膨張性地山での NATM 支保部材の役割とその有効活用

STUDY AND PRACTICAL USE OF NATM SUPPORT MEMBERS IN SQUEEZING ROCKS

北川修三¹⁾・梶原雄三²⁾

Shuzo KITAGAWA, Yuzo KAJIWARA

In this paper, we evaluated the sensitivity of each support members for displacement control by using FEM analysis. Furthermore, we measured the support member stresses and examined a limit of displacement capacity. The following things are found out as the result. 1) Shotcrete linings have effect on displacement control after complete closing of linings. 2) Rock bolts have effect on displacement control without closing of linings. 3) The reduction of support can be attempted when about displacement is permitted setting up the displacement capacity which makes 150mm a limit.

Key Words : squeezing, support, FEM analysis, displacement capacity

1. はじめに

北陸新幹線飯山トンネルでは大きな膨張性土圧の発生が懸念されている。最初に工事にかかった富倉工区では土被りの増加とともに坑壁の変位が増加し、膨張性土圧の発生が現実的な課題となりつつある。

そこで、FEM解析により、NATMで使用される各支保部材の抗土圧部材としての効果に関する感度分析を行い、膨張性地山における支保の役割と特性について検討した。さらに、富倉工区での現地施工結果を分析し、これらの支保部材の特性をより有効に生かすための検討を行った。

本稿はこの検討結果を踏まえ、NATM 支保部材の選定や施工時期等に関する基本的な考え方を提案するものであり、現在、飯山トンネルではこの考え方にに基づき施工を実施している。

2. 支保部材の役割分担に関する解析的 検討

2. 1 検討概要

検討にあたっては、2段階でFEM解析を行った。第1段階では主として各支保部材の抗土圧部材としての寄与率を検討するため、部材の一部を施工しないケースを設定しFEM解析を行った。第2段階では実際の施工法を考慮した断面の閉合効果を検討した。

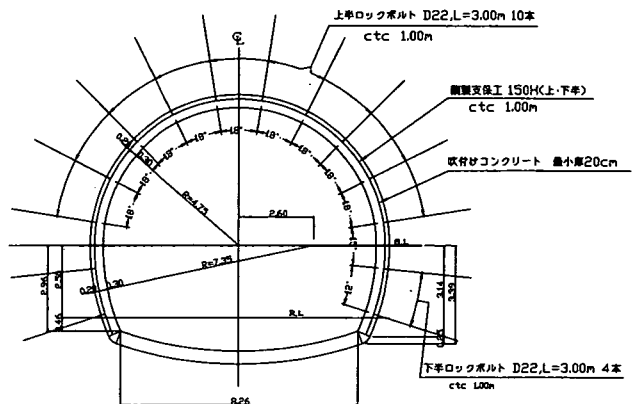


図-1 標準支保パターン

1) フェロー会員 日本鉄道建設公団 本社 審議役

2) 正会員 日本鉄道建設公団 北陸新幹線建設局 計画課補佐

FEM解析のプログラムは電中研法を用いている。支保パターンは、図-1 に示す新幹線トンネルの岩Ⅰ標準パターンとした。

地山の変形特性および強度特性は、飯山トンネルの現地状況より、鉄道トンネルでの岩Ⅰ地山の解析に広く用いられている値として表-1 のように定めた。また、支保部材の強度特性についても同表のとおりとした。なお、鋼製支保工の扱いは、鋼とコンクリートの弾性係数比 n で吹付けコンクリートに換算し、吹付けコンクリートの剛性として合わせて評価した。

表-1 地山および支保部材の物性値¹⁾

地山および支保部材の物性値		単位	岩Ⅰ	記 事
地 山	土被り	□	100,200	
	初期圧係数	-	1.0	
	単位体積重量	kN/□ ³	19	
地山の 変形特性	初期変形係数	MPa	50	
	破壊時変形係数	MPa	5	初期の1/10
	初期ポアソン比	-	0.3	
	破壊時ポアソン比	-	0.45	
	弾性限界パラメータ	-	4	
	非線型指数	-	2	
地山の 強度特性	粘着力	MPa	0.7	
	内部摩擦角	度	25	
	引張強度	MPa	0.0	
支保の 強度特性	吹付けコンクリートの弾性係数	GPa	3.4	
	ロックボルトの弾性係数	GPa	210	
	鋼製支保工の弾性係数	GPa	210	

注1) NATM設計施工指針：日本鉄道建設公団、平成8年2月より作成

2. 2 各部材の寄与率の検討

主要な支保部材であるロックボルトや吹付けコンクリートが、内空の変位抑制にどのように寄与しているかを検討するため、表-2 に示すように支保部材の一部を施工しないケースを設定し土被り 100m で FEM解析を行った。

解析にあたって、切羽到達時点の先行変位量については、掘削直後の状態で応力解放率を 30% として考慮した。なお、インポート打設位置は切羽からかなり離れるので支保部材として組み入れないものとした。

図-2 に各ケースの内空変位の発生状況を示す。この図は各ケースの内空変位をステップごとに示しているが、内空変位の測定点設置は掘削後となるので、上半掘削直後のステップを 0 cm としてその後の変位を内空変位量として図示している。これによるとロックボルトをはずした時の変位増加量が最も多く、基本ケースに比べて 53% の増となっている。

ロックボルトに発生する軸力は図-3 に示すように最大 1715kN となっている。これは、地山とロックボルトの付着が最後まで切れないものとしていることによるものであり、現実的ではないが、何らかの方法でそ

表-2 解析ケース一覧（土被り 100m）

岩種	解析ケース	ロックボルト 3m×14本	鋼製支保工 150H	吹付厚 20cm
岩Ⅰ	①基本ケース	○	○	○
	②ロックボルト無	×	○	○
	③鋼製支保工無	○	×	○
	④吹付コンクリート無	○	○	×

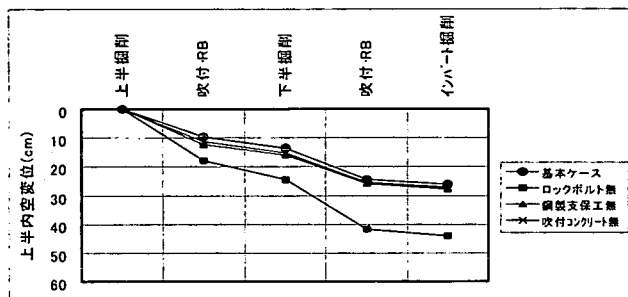


図-2 支保部材の一部を施工しない場合の内空変位の発生状況

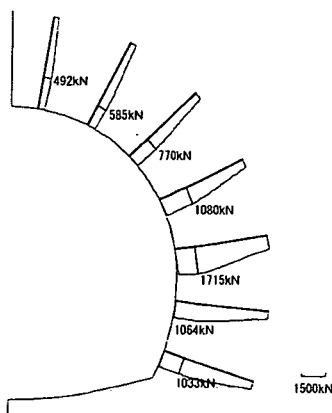


図-3 ロックボルト軸力分布（基本ケース）

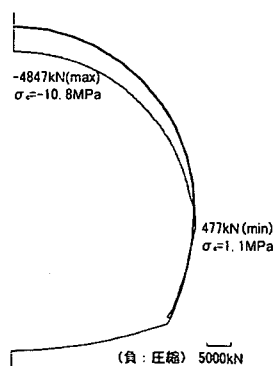


図-4 吹付けコンクリート応力分布（基本ケース）

れに近づけることができればロックボルトの効果は非常に期待できると考えて良い。

吹付けコンクリート（鋼製支保工を含む）の支保効果を内空変位量の差で見ると、数%以下で非常に小さく一般の認識と著しく異なっている（図-2）。これはインバートが生かされていないために側壁部で吹付けコンクリートに十分な軸力が発生していないことによるものである（図-4）。

2. 3 全断面閉合効果の検討

吹付けコンクリートの効果を十分発揮させるためには、全断面を早期に閉合する必要がある。そこで、吹付けコンクリートで閉合したモデルのFEM解析を行った。なお、解析にあたって採用した地山や支保の物性値は、前出の表-1と同様であるが、土被りについては200mとして初期地圧条件を厳しくしている。

解析ケースを表-3に示す。Case1はインバートを含め支保すべての施工後70%の応力解放を行うもので、切羽ですべての支保がなされた最も理想的な施工状態を示している。またCase3では、インバートが週1回程度にまとめて打設される場合を想定して、インバートを除く吹付けコンクリートとロックボルトの施工後50%の応力解放を行い、その後インバートを施工するものとして、残り20%の応力解放を行った。

なお、比較のためインバートが無い場合とロックボルトが無い場合についても検討している。

図-5に各ケースでの内空変位を示す。これによると吹付けコンクリートの閉合でほとんど内空変位量が決まることがわかる。吹付けコンクリートが即時閉合された場合には吹付けコンクリートの効果が著しく大きく、ロックボルトの有無はあまり影響していない。

このとき吹付けコンクリートに発生する軸力は全周ほぼ均等で理想的な応力分布を示している（図-6）。

インバートまとめ打ちの場合は、内空変位はそれなりに大きくなる（図-5）。しかし、変状の確認が難しく最も補修の困難なインバート部の応力度が比較的小さいというメリットもあり（図-7）、地山状況によっては適切な工法となりうる。飯山トンネル富倉工区では、掘削効率を上げるため土曜日に早強セメントを使用

表-3 全断面閉合の効果検討ケース

Case	閉合条件	RBの有無	インバートの有無
Case1	全断面閉合	有	有：即時閉合
Case2	全断面閉合	無	有：即時閉合
Case3	全断面閉合	有	有：まとめ打ち
Case4	閉合せず	有	無

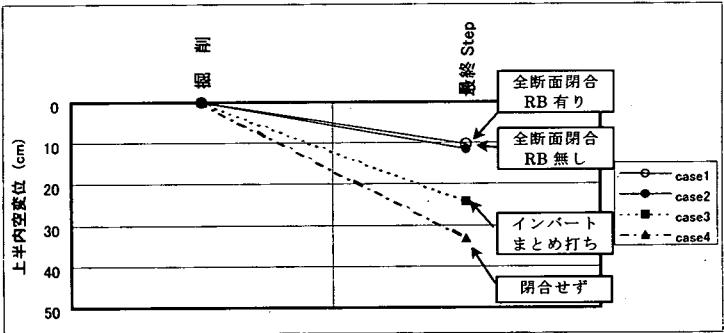
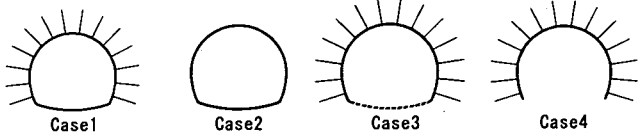


図-5 内空変位の発生状況からみた全断面閉合効果

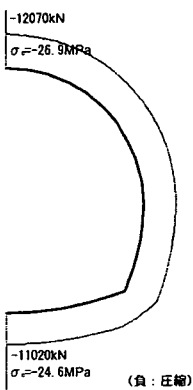


図-6 吹付けコンクリート軸力分布(全断面閉合時)

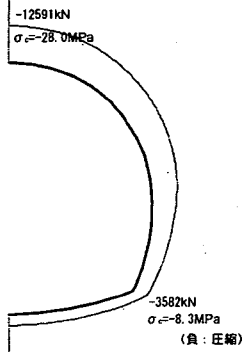


図-7 吹付けコンクリート軸力分布(インバートまとめ打ち)

してインバートをまとめて打設し、月曜日からその上に大型機械を移動させて掘削するミニベンチカット工法を採用している。図-8 は一般的な箇所での吹付け及びインバートコンクリートの応力測定結果を示す。応力分布は概ね解析結果とよく符合した形状を示しており、期待通りの成果が得られた。

3. 支保部材耐力の有効活用に関する現地検証

3. 1 即効性ロックボルトの変位抑制効果

飯山トンネル富倉工区では、前述のようにベンチ長を 4m 程度とするミニベンチカット工法が採用されている。しかし地質の悪化とともに変位速度が大きくなり、上半掘削時点で既に大きな坑壁変位が発生したため下半断面と合わせた時にスムーズな断面形状を確保できない事態が生じた。そこで掘削直後の初期変位を極力抑えるため、打設直後から効果を発揮する即効性ロックボルト（商品名スウェレックスボルト）を試験的に打設した。

図-9 は、即効性ロックボルトの初期拘束効果を検証するため、同一断面で上半部に通常ロックボルトを下半部に即効性ロックボルトを打設し、上・下半の初期変位速度を比較したものである。なお参考に上・下半とも通常ロックボルトを施工したケースも併記している。これによると通常ロックボルトのみ施工した区間では上・下半の初期変位速度にはほとんど差がないのに対し、即効性ロックボルトを下半に施工した区間では上半部の初期変位速度（n1 側線）に比べ下半部の初期変位速度（n2 側線）は著しく小さくなっており、掘削直後における即効性ロ

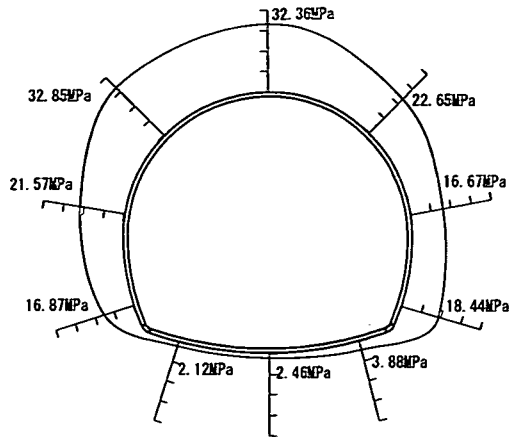


図-8 吹付けコンクリート応力分布
(153km485m 実測値)

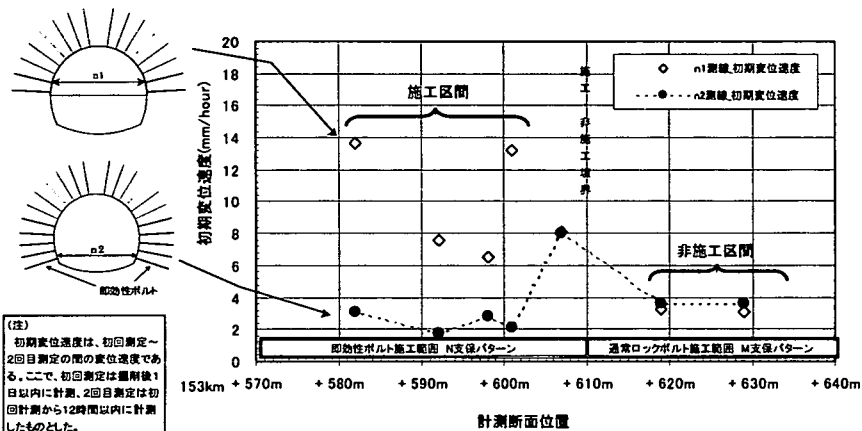


図-9 即効性ロックボルトの有無と初期変位速度

通常ロックボルト		即効性ロックボルト	
ボルトの種類	T D 2 4	ボルトの種類	スウェレックスボルト
ボルト長	4.0m	ボルト長	4.0m
孔径・孔長	φ45mm、4.3m	孔径・孔長	φ45mm、4.5m
定着材	S N ドライモルタル	定着材	なし
養生期間	24h	養生期間	—

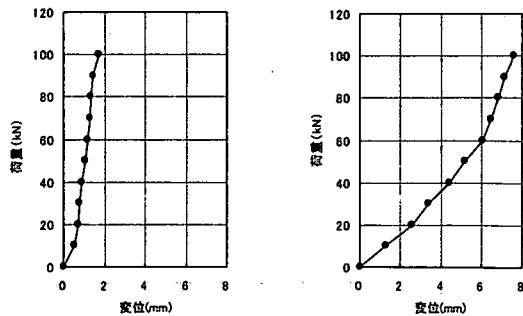
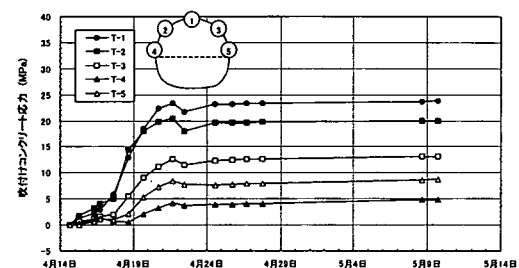
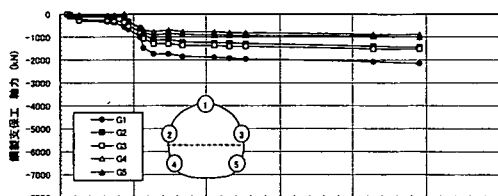
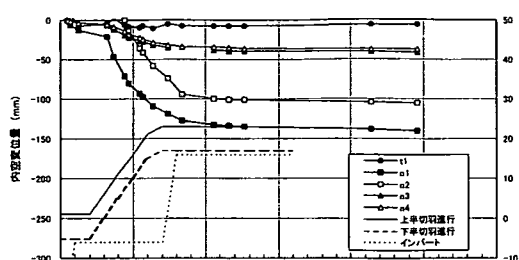
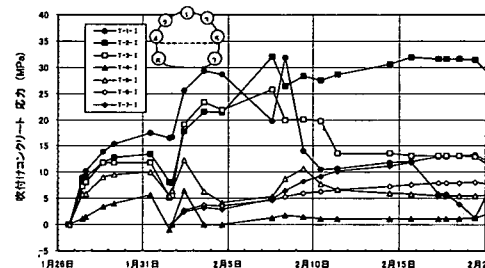
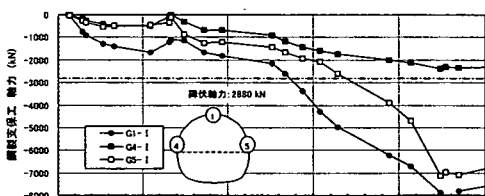
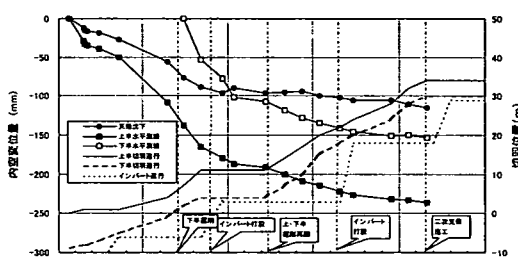


図-10 ロックボルト引き抜き試験



153km353m 断面計測結果



153km546m 断面計測結果

図-11 内空変位量と支保に発生する応力

クボルトの変位拘束効果が明確に認められた。なお、即効性ロックボルトの地山定着は周面摩擦のみであるため、通常のモルタル定着ロックボルトに比べ引き抜き試験時の変位量はむしろ大きい結果となっている(図-10)。

以上のようなことから、初期変位速度が大きすぎてスムーズな断面形状の確保が難しく吹付けコンクリート内の軸力伝達に支障の出る恐れがある場合には、全周に即効性ロックボルトを施工した。

3. 2 内空変位量と支保の健全度

変位の大きい地山では支保の変形余裕をとることが一般に行われている。この場合、どの程度の変形を許容できるかが常に問題となる。

富倉工区では吹付けコンクリート応力および鋼製支保工軸力の測定を実施している。図-11 にその代表例を示す。153km353m では吹付けコンクリート、鋼製支保工とも大きな力が作用しているが破壊には至っていない。このときの内空変位量は 150mm 弱で、概ね収束している。一方、153km546m では吹付けコンクリート、鋼製支保工ともアーチ天端で破壊していることが伺われる。このことは現地の支保の変状状況からも観察され、天端部からの吹付けコンクリートの剥落と鋼製支保工の座屈が多数発生した。なおこのときの内空変位量は 200mm を越えておりしかも変位速度は小さくなっているものの収束には至っていない。

以上の結果から、飯山トンネルでは内空変位量 150mm 以内であれば変形余裕を設定する事で膨張性土圧に対処する事としている。

4. 結 論

以上のような検討結果から、膨張性地山でのNATM支保に関する基本的考え方を整理すると次のようになる。

① 吹付けコンクリートは閉合してはじめて効果を発揮

吹付けコンクリートは曲げ応力にはほとんど無力であり、軸力をうまく伝達することでその機能を発揮する。したがって、スムーズな形状に早期に閉合することが重要であり、断面閉合後は最も強力な支保部材となる。

② ロックボルトは断面閉合前に効果を発揮

吹付けコンクリートの即時閉合は現実的ではなく、また施工できても硬化までには時間を要する。その間の変位抑制にはロックボルトが重要な役割を果たす。したがって、ロックボルトの打設はシステムボルトとして極力切羽近くで施工するのが効果的であり、切羽後方での増しボルトは一般には有効ではない。

なお、掘削直後の変位速度が大きく、通常のロックボルトでは充填材固化前に大きな変位が生じる場合には、打設直後から効果を発揮する即効性ロックボルトを打設し初期変位を抑えることがスムーズな閉合断面の確保に有効である。

③ 変形が大きいときは変形余裕を考慮

変形を完全に押さえ込もうとすれば支保工に過大な応力が発生し合理的な設計とはならない。したがって、膨張性地山では変形余裕を設けてある程度の変位を許容し支保の軽減を図るのが良い。この場合、吹付けコンクリートの損傷が少なくリングシェルとしての機能が保持されていることが必要であり、新幹線断面では概ね150mm程度が許容できる内空変位量の限界である。

5. おわりに

飯山トンネルでは膨張性を有する地山は全長22.2kmのうちの約半分と予想される。トンネルの掘削はこれから本番であり、今回の検討結果を踏まえ合理的かつ経済的な施工を進めていく所存である。なお、現時点においても変形余裕を大きく侵す地山が出現しており、そこでは、一次支保の健全度保持に拘らない二重支保工法を実施し成果を得ている。この詳細については別途報告する予定である。