

軟岩地山における支保効果について

SUPPORT EFFECTS FOR SOFT ROCK MASS

三浦 克* ・ 八木 弘**

Katushi MIURA ・ Hiroshi YAGI

1. はじめに

日本道路公団では、昭和58年から山岳トンネル工法で施工するトンネルを対象に、吹付けコンクリートとロックボルトを主たる支保工とする、いわゆるNATMを標準工法として導入している。NATMのトンネルを効率的かつ合理的に建設するために、事前調査結果をもとに設計・施工と対応した地山評価すなわち地山分類を行い、標準となる設計支保パターンを設定し、施工段階の適切な地山評価と技術的判断に基づいて、トンネルの実態に即応した支保パターンに変えていくことを基本的な考え方としている。

本文は、北陸自動車道上越～糸魚川間の第三紀層泥岩の施工結果をもとに、地質調査などから得た地山評価にもとづく当該区間のトンネルの変形挙動の予測手法や支保工の設計・施工、計測結果等について紹介し、泥岩を対象とした軟岩地山における支保工の効果について述べる。

なお、今回対象とする道路トンネルは三心円の馬蹄形で、掘削断面積は約85m²である。

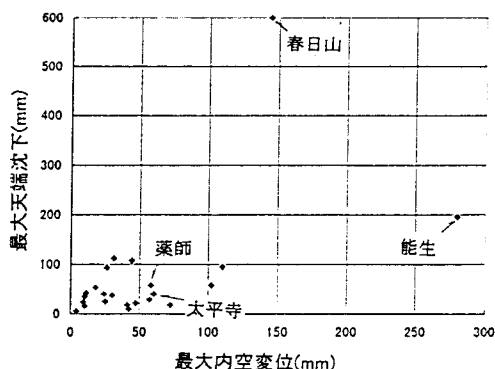
2. 検討対象区間の概要

今回、検討の対象とする北陸自動車道上越～糸魚川間の第三紀層泥岩は、中新世中期から著しく沈降した地帯であり、中新世の久比岐層群の上に下位から椎谷層（能生谷層）、川詰層、名立層、および鬼伏層（谷浜層）の各層が堆積している。泥岩の物理的性質や力学的性質は、固結度及び粒度などによって大きな差異が見られる。特に固結度の差は堆積後の上載荷重によって受けた応力（先行圧密圧）、及び堆積後のセメンテーションなどの化学的变化の差（地層の古さ）に基づくもので、これらは泥岩の基本的性質を決定する大きな要素となっている。当該区間の各地層間には粘土鉱物組成に顕著な相違が認められ、トンネル掘削による支保工に作用する応力や変形特性も異なる。

北陸自動車道の泥岩あるいは泥岩・砂岩互層地山を対象とした23トンネルにおける施工実績から求めた最大天端沈下及び最大内空変位を図一1に示す。

図から分かるとおり、新第三紀層泥岩あるいは泥岩・砂岩互層地山においては、トンネルによって変形特性に大きな差があることがわかる。当該区間の泥岩地山は、地質層序によって比較的大変位の大きい椎谷層（能生谷層）と比較的小変位の小さい西山層（名立層、川詰層）や灰爪層（鬼伏層）に分類できる。

比較的大変位の大きい椎谷層には能生トンネルや春日山トンネルが、比較的小変位の小さい西山層には薬師トンネルや太平寺トンネルなどがあげられる。



図一1 23トンネルにおける最大変位量

3. 泥岩トンネルにおける膨張性の予測

一般的に泥岩は比較的低固結度が低く、場合によっては地滑りやトンネル掘削時に膨張性土圧を示すなど施工上多

* 正会員 日本道路公団 技術部 調査役

** 日本道路公団 技術部 道路技術課長代理

大な影響を及ぼす事例も見られる。これまでの施工事例から膨張性土圧の著しい場合の特性として、

ア) 粘土分が多い。

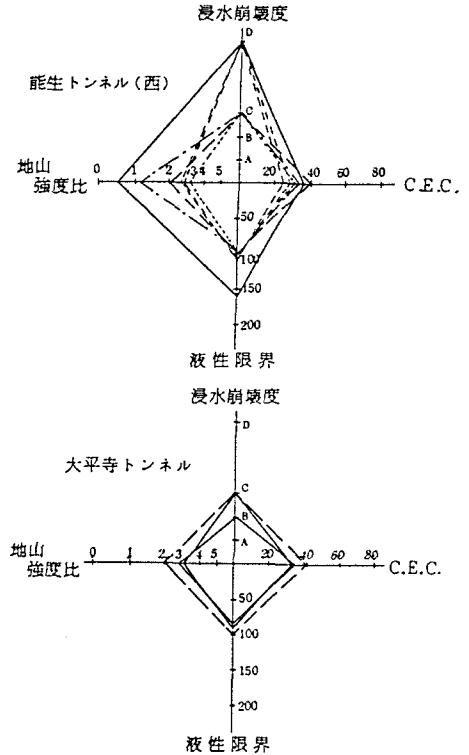
イ) 地山強度比が小さい。

ウ) 塩基置換容量が大きい。

エ) 浸水崩壊性が著しい。

などがあり、微粒分が多いこと、モンモリロナイトなど粘土鉱物を多量に含有していることが膨張性に大きく影響していることが分かっている。

第三紀層膨張性泥岩を有する過去の各トンネルの施工実績から、膨張性の指数や指標が提案されているが、浸水崩壊度、地山強度比、塩基置換容量などの試験結果を用い、ダイアグラムを作成することにより膨張性土圧発生の可能性を判定するための判断材料として有効に活用することが可能であると考えられる。過去の膨張性泥岩トンネルのデータをもとに種々検討の結果、北陸自動車道におけるダイアグラムの要素として、地山強度比、浸水崩壊度、塩基置換容量、液性限界を採用するとともに、これらの4要素による点数表示することにより膨張性の予測を行い、トンネル支保工選定の目安とした。



図一 2 膨張性予測ダイアグラムによる整理例

4. 施工中のデータによるトンネル挙動の予測

トンネルを安全かつ経済的に建設するためには、事前調査段階における設計とともに施工段階で得られるデータを有効に活用し、適切な地山評価によるトンネルの挙動を予測することが重要である。

北陸自動車道では、掘削初期に得られるデータを基に現場で具体的に活用できる項目について検討を行い、トンネルの安定や支保設計及び対策工の判断材料とした。

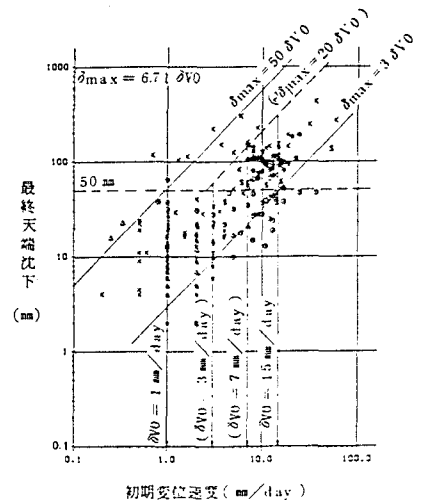
4-1 初期変位速度と最終変位量

当該区間におけるデータでは、天端沈下、上半水平変位ともに初期変位速度の増加にともない最終変位量が増加する傾向にあるが、地質層序によって異なった傾向を示す。

特に大きな変位を記録した椎谷層においては、図一3に示すように初期変位速度が7 mm/日以上となる場合は、最終沈下量が最終管理値（天端沈下50 mm）を半数以上超え、15 mm以上になるとほとんど最終管理値を超えることが確認されている。

4-2 地山強度比と最終変位量

一般的に地山の強度と空洞変位量は比較的關係が高いものと考えられ、地山を定量的に評価する指標である地山強度比（一軸圧縮強度/土被り圧）と変位量との関係を整理すると、いずれの地層においても地山強度比が小さくなると変位は大きくなる傾向にある。特に、能生トンネルや春日山トンネルなどの位置する椎谷層においては、図一4に示すように地山強度比と最終変位量には明瞭な相関が表れており、地山強度比が4以下になると急激に最終変位量が大きな値を示している。これまで一般的に「地山強度比2以下になると掘削に伴う応力開放により塑性領域が発生し、変位が大きくなる可能性がある」と言われているが、堆積岩における一軸圧縮強度は資料採取方法に



図一 3 初期変位速度と最終変位量

左右されることも考慮し、留意する必要がある。

5. 薬師トンネルⅡ期線の事例

5-1 地質概要

薬師トンネルは新潟県上越市に位置する延長1、468mのトンネルで、地質は新第三紀鮮新世の名立層と呼ばれる泥岩主体の砂岩・泥岩互層である。塊状泥岩はほとんど見られず、少なくとも数十cm間隔で薄い砂岩を挟んでおり、層理が発達している。

一般的に泥岩は固結度が高く、砂岩は低い状況で、地層の走向はトンネルに直行し、切羽に向かって45°程度の流れ目を呈している。トンネル中央部の弾性波速度は1.9~2.2 km/secとかなり遅く、地山が軟質なことを示している。

地山強度比は1程度となっており、塑性化の可能性が高い。

5-2 計測結果

計測Bを実施した断面の天端沈下及び水平内空変位の経時変化グラフを図-5に示す。水平内空変位は天端沈下の約2倍程度となっており、ほぼ同様な変位傾向となっている。（ここでいうDは掘削径をいい、切羽からの離れを0.1D~2.0Dで表示する）

吹付けコンクリート、鋼アーチ支保工、ロックボルトの応力測定結果を図-6、7、8に示す。吹付けコンクリートは設計基準強度180 kgf/cm²に対し、最大でも40 kgf/cm²程度と応力的には余裕がある。鋼アーチ支保工は強度的には余裕があるものの、支保工施工直後において20 ton・f程度、最大時50 ton・f程度の軸力が発生しており、支保効果が表れている。

ロックボルトは天端部ではほとんど軸力が発生していないが、側壁部においてはいずれにおいても最終時15~20 ton程度の軸力が発生しており、十分な支保効果が発揮されているといえる。

各支保工の荷重分担の程度を比較する目的で、支保内圧を算出した比較図を図-9に示す。ここでいう支保内圧は吹付けコンクリート及び鋼アーチ支保工はトンネル単位延長当たりの平均軸力をトンネル半径で除したもの、ロックボルトは平均軸力とロックボルト本数からm²当たりに換算したものを内圧と呼ぶこととした。図より、支保工施工直後（0.1D）においては鋼アーチ支保工が他の支保工に比べ支保の分担率が高く、吹付けコンクリートは強度の発現に伴って支保内圧が高くなっていくことがわかる。ロックボルトは支保内圧としては他の支保工に比べ低くなっている。

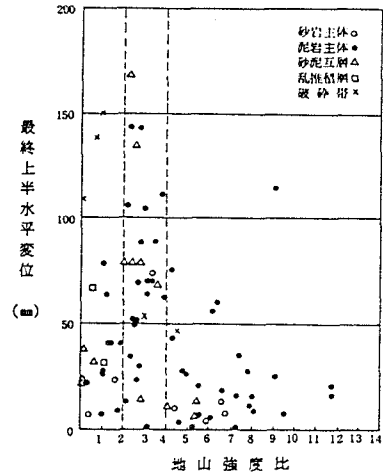


図-4 地山強度比と最終変位量

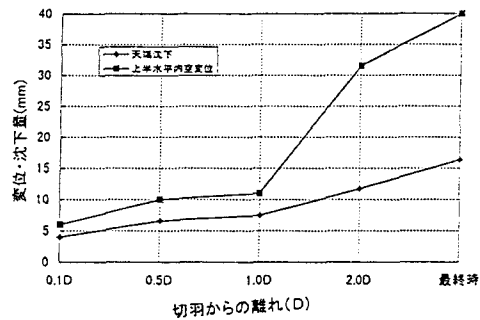


図-5 切羽からの離れと変位量

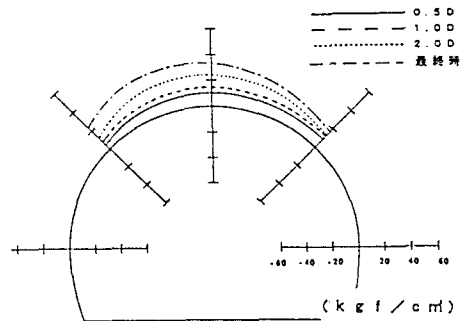


図-6 吹付けコンクリート応力

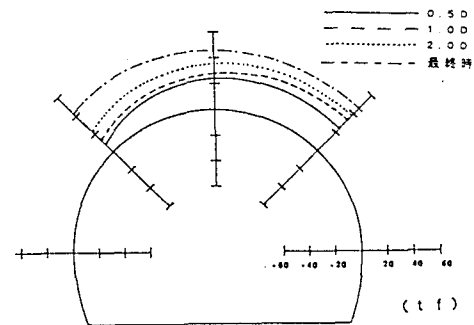


図-7 鋼アーチ支保工軸力

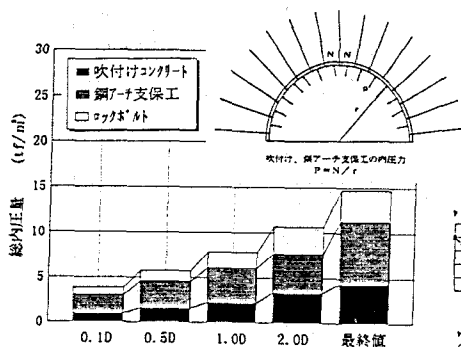


図-9 支保内圧比較図

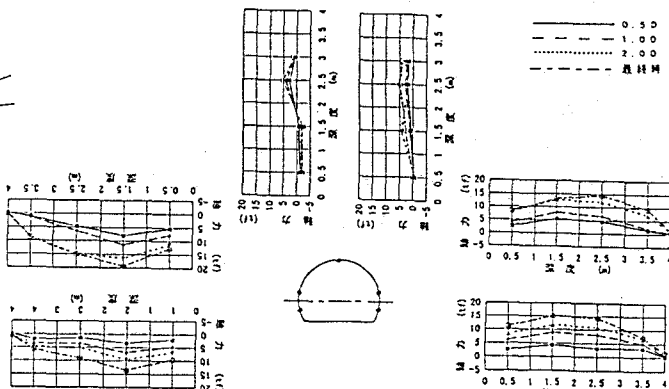


図-8 ロックボルト軸力

6. 能生トンネルⅠ期線の事例

6-1 地質概要

能生トンネルは、新潟県能生町に位置する延長2,992mのトンネルである。当地域は標高150～300mの山地であり、地滑り地としても名高い。地質は新第三紀層に属する能生谷層の泥岩を主体として構成されており、凝灰質で固結度の低い粘土～シルトの薄層を介在する。

事前調査によって大きな変位が予想された区間には、変形余裕量上半100mm、下半50mmを確保した支保パターンDⅡを適用し、さらに大きな膨圧が確認された区間は支保量を増やし、変形余裕を上半150mm、下半100mmとしたDVパターン(フォアパイリング有り)を適用した。

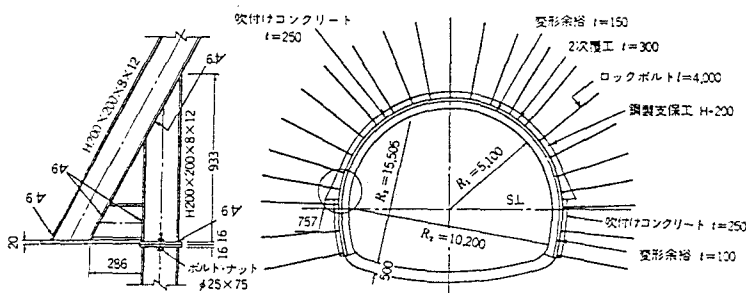


図-10 DVパターン (ウイングリブ型支保工)

6-2 計測結果

1) 吹付けコンクリート

吹付けコンクリートは、設計基準強度に対し、天端部において下半収束時140 kgf/cm²の応力が発生している。上半脚部においては最大90 kgf/cm²程度となっているが、図-12に示すように逆解析結果から脚部においては地山にせん断応力(最大20 kgf/cm²)が発生しており、このせん断応力は支保を施工することによって大きく低下していることから、吹付けコンクリートが地山の反力との相互作用を通して支保効果を発揮していることがわかる。

(逆解析条件: ケース1は素掘り状態、ケース2は吹付けコンクリート+ロックボルト、ケース3は吹付けコンクリートのみ、4はロックボルトのみ)

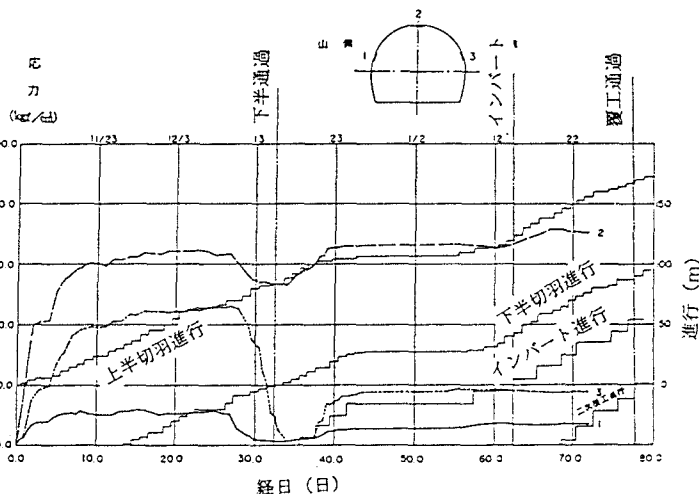


図-11 吹付けコンクリート応力測定

2) ロックボルト

ロックボルトは、軸力測定からも最大20t程度の数値を示しており、十分な支保効果を発揮しているといえる。今回の計測断面におけるゆるみ領域は、ロックボルト長(4m)以深まで拡大している可能性もあるが、軸力分布や施工性から判断しても4mのボルト長は妥当と思われる。また、応力集中の著しい側壁部においては、ロックボルトは単独では十分な支保効果が期待できないが、吹付けコンクリートと一体となって高い支保効果を発揮していると思われる。

3) 鋼アーチ支保工

鋼アーチ支保工の支保効果については、吹付けコンクリートの強度発現までの間、ゆるみ荷重を支保し、変形を抑制する効果が高く、吹付けコンクリートの硬化後も相応の荷重分担を担っていることは既往の研究から分かっている。今回、特に脚部における支持力が問題となる区間でDⅣパターンを設定し、ウイングリップ付き鋼アーチ支保工を採用した。DⅣパターンの支保効果の検討のため、DⅡパターンを施工したSTA223+65断面とDⅣパターンを施工したSTA223+87の内空変位と天端沈下と比較した。両断面間は22m離れているが、地質的には同様な状態であった。

最終変位量はDⅡパターンがDⅣパターンに比べ、天端沈下で1.3倍、内空変位で2.7倍に増加した。特に内空変位は上半の初期変位速度が大きく異なり、天端沈下は下半到達前の沈下量が異なった。よって、DⅣ区間のように膨張性泥岩地山においても、ウイングリップ付き鋼アーチ支保工やフォアパイリングなどによって地山の変形を抑制する施工が可能であることがわかる。また、鋼アーチ支保工はロックボルトとともに、吹付けコンクリートに作用する曲げモーメントやせん断力に対し、変形を抑制し発生する応力を低減する効果がある。

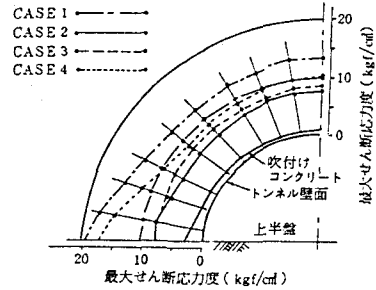


図-1 2 逆解析による地山せん断応力

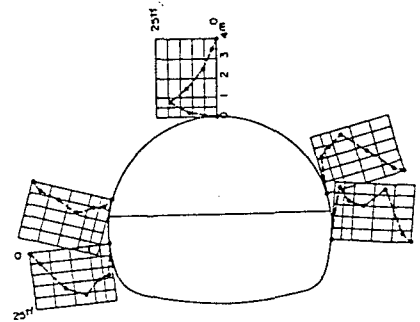


図-1 3 ロックボルト軸力

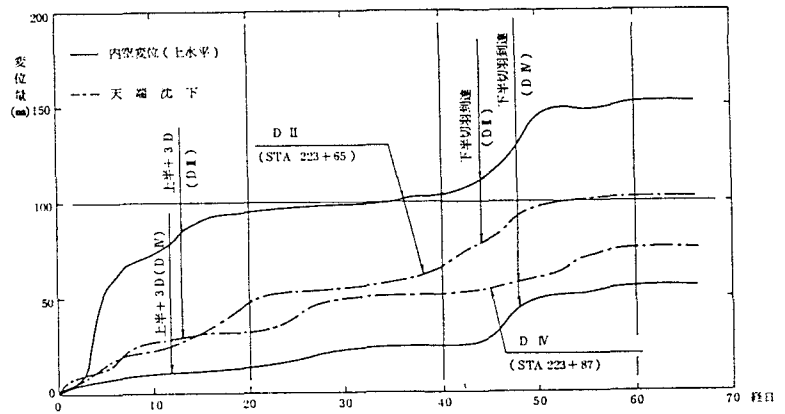


図-1 4 DⅡ及びDⅣパターンにおける変位量の変化

7. おわりに

トンネルの支保部材としては、吹付けコンクリートやロックボルト、鋼アーチ支保工などがあるが、地山条件が悪い場合は覆工コンクリートも支保部材の一部として用いることもある。これらの支保部材がどのような地山条件の基で、どの程度効果を発揮するか、施工段階においてどのように支保工を設計すれば良いかについては未だ確立された手法はない。

今回、これまでの一部施工事例をもとに検討を加えたが、今後の支保工の作用効果や支保のメカニズムの解明の一助となれば幸いである。