

新支保部材を活用したトンネルの設計・施工の高度化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 25～平 27

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：砂金伸治、小出孝明、日下敦

【要旨】

近年、公共投資財源が制約される中で山岳トンネルの建設においてもコストを縮減する必要性が増している。また、震災などに対する復興などの観点からトンネル工事の工期の短縮が求められている。このような社会的要請に対して、新支保部材(高強度吹付けコンクリート・高耐力ロックボルト・高規格鋼アーチ支保工)を用いることで部材数量の低減や1掘進長を延伸することなど、トンネルの設計・施工の高度化への試みがある。本研究ではこれらの部材や考え方を活用した新たな支保構造について地山や支保構造の力学的な安定性、施工における安全性などを検証し、新支保部材を適用する場合の構造や地山条件について考慮すべき事項を検討した。

キーワード：山岳トンネル、高強度吹付けコンクリート、高規格鋼アーチ支保工、1掘進長延伸

1. はじめに

高強度吹付けコンクリート、高耐力ロックボルト、高規格鋼アーチ支保工などの新支保部材は、主に不安定な地山や大断面トンネルなどにおいて支保部材に発生する大きな応力への対策などを目的として使用が開始された。そこから使用実績を重ねて、近年では高強度であることを利用した部材数量の低減や1掘進長の延伸などが試行され、コスト縮減や工期短縮の効果が期待されている。一方でトンネル支保工は多様な地山状況に対応して安定的に内空を確保するための構造物であり、必要とされる機能とその効果は多岐におよぶため支保工および地山の相互作用などの力学的メカニズムが複雑である。そのため、試行される新たな支保構造を評価する指標や適用可能な地山状態などに明らかではない点がある。本研究ではこれらの新たな支保構造について地山や支保構造の力学的な安定性、施工における安全性などを検証し、新支保部材を適用する場合の支保構造や地山条件について考慮すべき事項を検討する。

2. 研究方法

2.1 新支保部材による新たな支保構造の分析

2.1.1 高規格鋼アーチ支保工の耐力に関する実験

新支保部材として高規格鋼を採用し、従来鋼と同程度の曲げ耐力を確保しながら部材断面積を縮小して部材数量を低減する試みがある。これについて本研究では施工上の安全性や安定性、耐久性、適用する場合の地山条件などの確認を目的として表-1 に示すように

表-1 供試体に用いた H 形鋼の性能諸元

名称	材質	形状	断面積 [m ²]	単位 質量 [kg/m]	断面2次 モーメント [m ⁴]	降伏 軸力 [kN]	降伏 曲げ [kNm]	降伏 応力 [MPa]
NH150	SS400	150×150× 7×10×8	3.97×10 ⁻³	31.1	1.62×10 ⁻⁵	971	52.9	245
HH108	HT590 /SS540	108×104× 10×12×8	3.39×10 ⁻³	26.6	6.36×10 ⁻⁶	1492	51.9	440



写真-1 実験状況

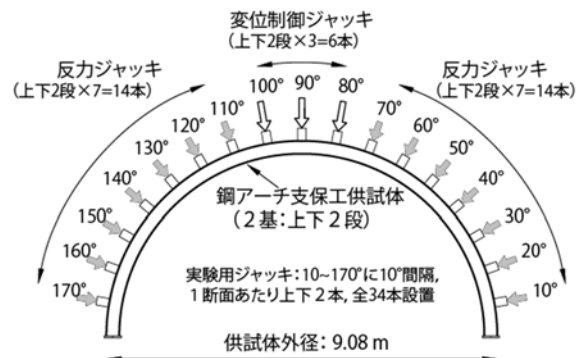


図-1 荷形式の模式図

従来鋼 NH150(SS400)と同程度の曲げ耐力を有する高規格鋼 HH108(HT590/SS540 相当)を用いて製作した実大規模の鋼アーチ支保工に対して**写真-1**のように覆工載荷装置を用いて載荷実験を行い、耐荷力特性を確認した。実験の詳細を以下に示す。

1) 載荷装置

半円形の反力枠に容量 500kN の油圧ジャッキが 10° 間隔で 17 断面に設置されている。ジャッキは各断面で高さ 100cm の供試体を高さ 30cm と 70cm の位置で載荷板を介して載荷できるように 2 本設置されている。また、油圧バルブを閉めることで地盤バネが模擬できるようにした。なお、供試体の脚部は回転および半径方向の滑動は可能であるが接線方向には固定されて動かない構造にした。

2) 供試体

外径 9.08m の半円形の鋼アーチ支保工 2 基をタイロッド接合して 1 組とする。従来鋼 NH150 と高規格鋼 HH108 で各 1 組ずつ計 2 組を作成した。

3) 載荷形式

図-1 に示すとおり載荷形式は地山の拘束がある状態で天端部にのみ荷重が作用するケースを想定している。載荷方法は部材の外側から 10 度ピッチ、17 断面、上下 2 段で設置されているジャッキを使用し、ジャッキ 1 本当たり 20 kN まで載荷して軸力を導入し、その後は天端部に相当する 80、90、100 度のジャッキで載荷荷重が同一となるように変位制御を行い、供試体の挙動が不安定になるまで載荷を継続した。なお、地山拘束時の各ジャッキのバネ値は概ね 100~200 MN/m 程度であった。

4) 計測項目

本実験では、図-1 に示すように供試体に 0~180 度で角度を付し位置を定義している。計測項目は載荷荷重、供試体の変位、供試体のひずみである。供試体のひずみは H 鋼のウェブの外側(ジャッキ側)と内側(内空側)において周方向にひずみゲージを貼り付けることにより、鋼アーチ支保工の軸方向ひずみの計測を実施した。実験中は載荷荷重、供試体の変位とひずみをリアルタイムでモニタリングしながら、一定の載荷荷重

ごとに目視観察を行い、座屈等の発生状況を観察した。

2.1.2 1 掘進長の延伸の分析

山岳トンネルでは地山状態に合わせて支保パターンを選定しながら掘削するが、地山状態は複雑であり変化も不規則であるため一様に評価することが難しい。特に各支保パターンの適用範囲の中間的な地山状態においては選定する支保パターンの判断に苦慮するケースも見られる。このような状況を踏まえると、支保パターンごとに定められている標準 1 掘進長¹⁾に対して、高強度吹付けコンクリートを使用して地山の安定と作業の安全を確保しながら 1 掘進長を延伸する試みにより、支保パターン選定における不確実性を補いコスト縮減や工期短縮などに繋がる可能性がある。しかしながら、これに関する技術的な知見は限定されており、構造の妥当性や実施の可否の評価指標、得られる効果などに不明確な点があり課題となる。本研究では表-2 に示すような試験施工を実施し、得られた結果を用いてこれらの課題について分析した。

なお、1 掘進長の延伸施工時には素掘り面からの抜け落ちを防止して安全を確保するために、吹付けコンクリート強度を標準の 18N/mm² から 36N/mm² に変更して初期材齢強度を高めた。また、鋼アーチ支保工およびロックボルトのトンネル縦断方向の間隔は掘進長に合わせた。また、効果確認のために同様な地質が続く区間で 1 掘進長の延伸を実施する区間(以後、延伸区間)と実施しない区間(以後、比較区間)を設けて比較した。

2.2 小断面トンネル(NATM)の支保構造の分析

山岳トンネルでは内空幅 3.0~5.0m 程度のものが小断面と区分され、主に避難坑などに採用されている。そのため、小断面トンネルの使用目的と求められる機能および施工条件などは通常断面トンネルとは異なり、支保構造にも特徴があると思われる。しかしながら、これまでに小断面トンネルにおける施工事例などのデータは少なく、支保構造についても検証の余地があると考えられる。本研究では支保構造の力学的特性に関する知見を得ることを目的として、7 本の避難坑の延長 17km におよぶ施工実績のデータを収集し分析した。

表-2 試験施工を実施したトンネルの概要(1)

トンネル	トンネル延長 (m)	延伸区間長 (m)	地質	岩質	支保パターン	標準 1掘進長 (m)	延伸 1掘進長 (m)	吹付けコンクリート			鋼アーチ支保工			ロックボルト			掘削方式
								強度(N/mm ²)		厚さ (cm)	規格	間隔 (m)	範囲	長さ (m)	間隔 (m)	範囲	
								標準	試験施工								
A	2736	8	花崗閃緑岩	硬質岩	CI	1.5	2.0	18	36	10	-	-	-	3	2.0	上半	発破
B	2380	37.5	砂岩・泥岩	中硬質岩(層状)	CII-b	1.2	1.5	18	36	10	H-125	1.5	上半	3	1.5	上下半	発破
C	2778	12	泥岩・頁岩	中硬質岩(層状)	CII-b	1.2	1.5	18	36	10	H-150	1.5	上半	3	1.5	上下半	発破
D	697	12	凝灰質礫岩	軟質岩(塊状)	DI-b	1.0	1.2	18	36	15	H-125	1.2	上下半	4	1.2	上下半	機械

3 研究結果

3.1 新支保部材による新たな支保構造の分析結果

3.1.1 高規格鋼アーチ支保工の耐力特性の分析結果

本実験により得られたジャッキ1本当たりの荷重と天端部(85度)の内空側変位の関係を図-2に、荷重とウェブひずみ(肩部70度)の関係を図-3に示す。NH150では、荷重がおおよそ155kN/本、天端の内空側変位がおおよそ42mmに達した時点で荷重変位曲線の傾きが変化し、ウェブでのひずみ(引張側を正とする)は最大-2500 μ 程度であった。その後、変位が急激に増加し、荷重が175kN/本を超えた時点でフランジの局所的な座屈が認められ、最大荷重179kN/本を迎えたところで鋼アーチ支保工の安定性が損なわれた。一方、HH108ではNH150より剛性が低いため、当初の荷重変位曲線の傾きは緩やかとなり、荷重に対して変位が大きくなる挙動を示した。その後、荷重が141kN/本内空側変位が56mmに達した時点で荷重変位曲線の傾きが変化し、ウェブのひずみは最大-4000 μ 程度であった。その後、変位が急激に増加したが局所的な座屈は認められず、最大荷重162kN/本を超えた時点で天端部にH鋼の弱軸方向に大きく湾曲した形で座屈が発生し、鋼アーチ支保工の安定性が損なわれたため実験を終了した。

荷重変位曲線の傾きが変化した時点と最大荷重時のウェブのひずみ分布を図-4、図-5に示す。いずれのケースにおいても、天端部のジャッキ側とその両側の肩部内空側の3点で降伏ひずみを超過し、塑性ヒンジが形成されていることを示唆する。荷重変位曲線の傾き変化後から最大荷重を迎えるまで、この塑性ヒンジ部を中心に局所的にひずみが増加し、その他の位置でのひずみの増加は顕著ではない。最大荷重に対する荷重変位曲線の傾き変化時の荷重の比率は、従来鋼と高規格鋼で共に87%程度であり、荷重の観点からは、従来鋼と高規格鋼の両方で構造が不安定となるまでの余裕は比較的少ないと考えられる。一方、最大荷重時の変位はNH-150で87mm、HH-108で98mmとなり、高規格鋼で若干大きな値を示すが、最大荷重時に対する荷重変位曲線の傾き変化時の変位の比率はNH-150で48%、HH-108で57%となり変位の追随性は従来鋼で余裕幅が大きい傾向が認められた。

3.1.2 1掘進長の延伸の分析結果

1) 変位計測の結果

図-6に施工時の変位計測データを示す。グラフは各トンネルの試験施工区間において計測された天端沈下および上半水平内空変位の収束値を示している。結果

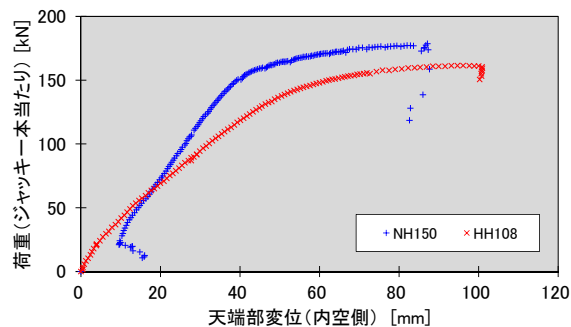


図-2 荷重変位曲線

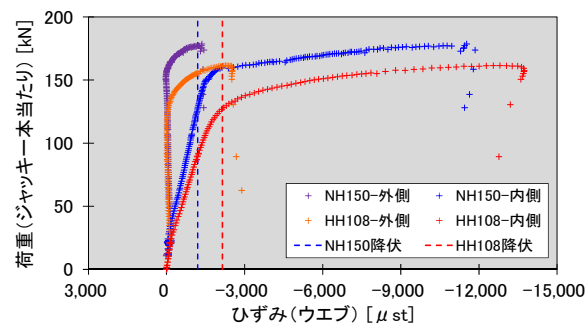


図-3 ウェブのひずみ変化(肩部70°)

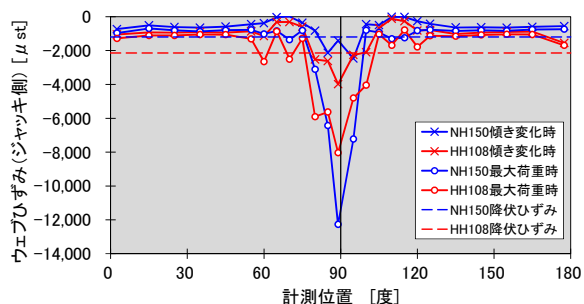


図-4 ウェブのひずみ分布(ジャッキ側)

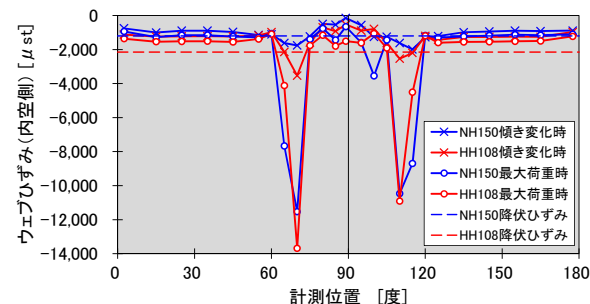


図-5 ウェブのひずみ分布(内空側)

としては全てのトンネルで天端沈下および上半水平内空変位はともに10mmを下回る小さい値であり、各トンネルの管理レベルを下回っている。また、延伸区間と比較区間の差も確認できなかった。このように掘削時の変位が小さい比較的地山状態の良好な場合には延伸することでトンネルの安定性が損なわれる可能性が低いことが確認された。

2) 切羽観察記録の結果

図-7 に各トンネルにおける切羽評価点を延伸区間と比較区間の対比形式で示す。切羽観察様式の違いによる評価結果の差も確認するために、(a)に示す A、B トンネルにおいては文献 2) に記載されている様式に基づき採点した。また、(b)に示す C、D トンネルにおいては文献 3) に記載されている様式により採点した。ここで、2 つの様式の大きな違いは採点方法であり文献 2) の様式では重み付き評価点により採点され点数が高いほど地山状態が悪いと評価される。また、

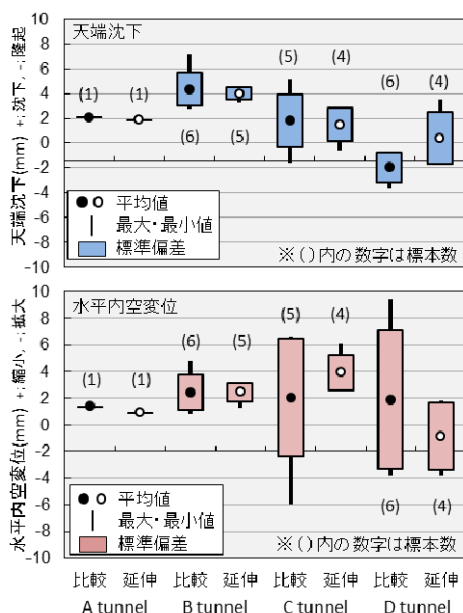
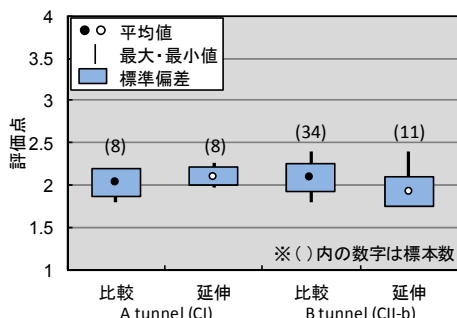
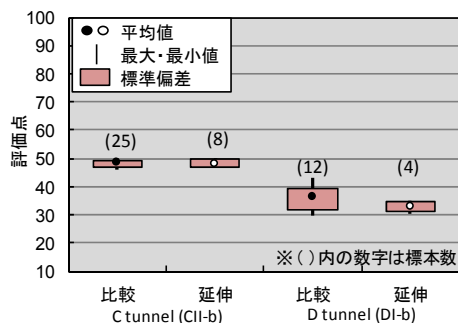


図-6 変位計測結果



(a) 文献 2) による評価



(b) 文献 3) による評価

図-7 切羽評価点

文献 3) の様式では加重平均点により採点され点数が低いほど地山状態が悪いと評価される。このようにして実施した試験結果からは延伸の有無による点数の差は確認されなかった。

この結果を受け、さらに検証を進めるために選択肢を細分化することで採点結果に差が生じるかを確認する試験施工を表-3 に示す B、E トンネルにおいて実施した。具体的には表-4、5 に示すように切羽観察項目で延伸の可否を判断する際に重要視されていると思われる A、B、C、E、F の評価区分 2 を 2a、2b に、評価区分 3 を 3a、3b に分割して評価区分を 4 段階から 6 段階に増やして採点した。これを文献 2) に記載される従来の採点方法では延伸区間と比較区間の評価に差が現れない状況下で実施した。図-8 に示す結果で観察項目 A~C の 2a と 2b の選択割合を比較すると、延伸区間では 2a が比較区間では 2b が多く選択されている。一方で観察項目 E、F では延伸区間でも比較区間でも選択割合の傾向は概ね同様であり、2b と 3b を選択した割合が多かった。この結果からは掘進長延伸の可否を判断する際には観察項目 E、F で評価する割れ目の間隔や状態といった抜け落ちの原因となる要素よりも、

表-3 試験施工を実施したトンネルの概要(2)

トンネル	トンネル延長 (m)	試験施工延長 (m)	断面数		地質	岩質
			標準	延伸		
B	2380	37.5	9	9	砂岩・泥岩	中硬質岩(層状)
E	1530	200	34	11	粘板岩	中硬質岩(層状)

表-4 細分化した項目の内容

地山の状態	2a	2b	3a	3b
	A : 切羽の状態	小岩塊(1~2cm程度)まれに抜け落ちの可能性	小岩塊抜け落ち・中岩塊(5~10cm程度)まれに抜け落ちの可能性	小・中岩塊抜け落ち、大岩塊(数10cm程度)まれに抜け落ちの可能性、押し出しあり
B : 素掘り面の状態	地面においてハンマー強打で割れる	手に持って軽い打撃で割れる	軽い打撃で割れる、岩片どうしてたたき合わせると割れる	両手で割れる
C : 圧縮強度	1m~50cm	50cm~20cm	20cm~10cm	10cm~5cm
E : 割れ目の間隔	一部開口	多く開口	開口	開口
F : 割れ目の状態				粘土はさむ

表-5 切羽観察の項目

地山の状態	従来	本研究
A : 切羽の状態		6段階
B : 素掘り面の状態		4段階
C : 圧縮強度	4段階	6段階
D : 風化変質		4段階
E : 割れ目の間隔		6段階
F : 割れ目の状態		4段階
G : 割れ目の形態		4段階
H : 湧水		4段階
I : 水による劣化		

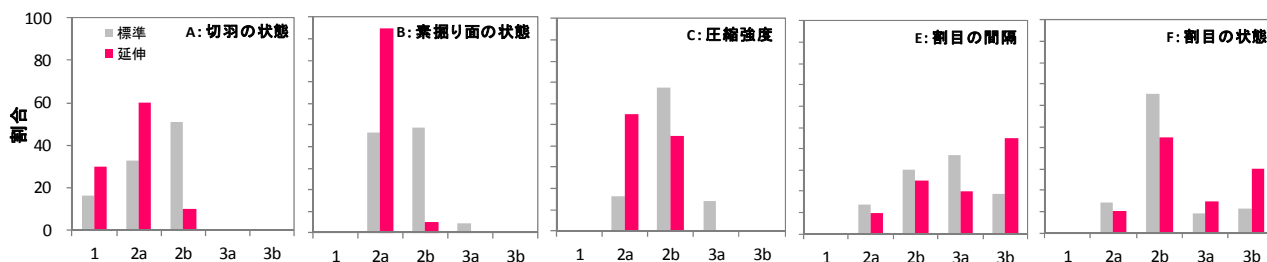


図-8 細分化した評価結果の割合

観察項目 A、B で評価する実際の発生現象である抜け落ちの規模や頻度の方が重要視されていることが推測される。従来の観察項目 A の評価区分 2 では「鏡面から岩塊が抜け落ちる」、観察項目 B の評価区分 2 では「時間がたつと緩み肌落ちする」という評価にとどまり差が現れなかったが、これらを分割して細かく評価できれば 1 掘進長の延伸を判断する指標になり得る可能性がある。しかしながら、現段階ではデータが少なく今後も継続したデータ収集、分析を行い本研究で実施したような評価方法の適用性について更なる検証が必要である。

3.2 小断面トンネル(NATM)の支保構造の分析結果

1) 断面形状について

施工実績のデータを整理すると、小断面トンネルの断面形状は図-9(a)に示すように側壁部が直線形状であり、断面サイズは掘削高さ 4m、掘削幅 5m 前後で設計されていた。通常、トンネルの支保構造は全体をアーチ形状としているため、この特徴的な断面形状が構造安定性に与える影響について 2 次元有限要素法による線形弾性解析を実施して確認した。解析モデルは図-9(a)の①上半がアーチ形状で側壁が直線形状、図-9(b)の②全体をアーチ形状とした。地山は一様な状態とし単位体積重量を 23kN/m^3 、土被りを 2D、側係数は 0.5、支保部材は厚さ 10cm の吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工である H-100 を合成した梁要素とし、ロックボルトはモデル化していない。また、モデル②の形状を決める際には路盤高さにおける幅員をモデル①と同一にし、アーチ形状について下半の半径を上半の 2 倍程度とした。解析結果として変形図を図-9 に、断面力図を図-10 に示す。まず、変形図を確認すると水平方向の内空変位量の最大値はモデル①では 15.4mm である。これに対してモデル②では 12.0mm となりモデル①と比較して 22% の減少が見られた。これにより同様の地山状態にあっても支保構造の形状により変位量に一定の差が生じることがわかった。そのため、変位量を支保構造変更の判断材料にする際は形

状の影響を考慮する必要がある。また、変形の状態についてモデル①では上半部材はアーチ形状を保ったまま圧縮されているが、直線形状の側壁部では曲げ変形が顕著になっている。これに対してモデル②では支保構造全体がアーチ形状を保持しながら圧縮されている様子がわかる。この状態を断面力で確認すると、モデル①の側壁部には最大で $M=31.5\text{kN}\cdot\text{m}$ の曲げモーメントが発生している。この断面力を吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の分担に分け、吹付けコンクリートに発生する縁応力度を算出すると、 $\sigma_c = -1.35\text{N/mm}^2$ となり引張応力が発生している。これに対してモデル②の側壁部に発生する曲げモーメントの最大値は $M=17.5\text{kN}\cdot\text{m}$ で縁応力度は $\sigma_c = 1.50\text{N/mm}^2$ となり支保構造全体も圧縮応力状態にある。この結果から地山条件によっては直線形状の側壁部は支保構造の弱点になりうるということが分かった。

2) 実施支保パターンの割合について

次に支保パターン(表-6)の採用実績について、各支保

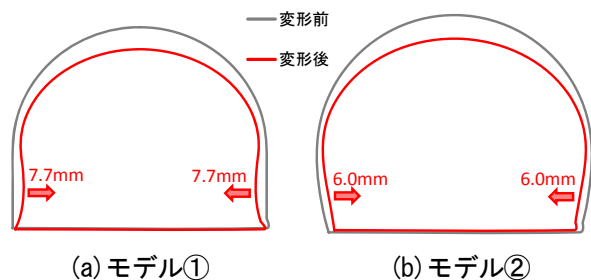


図-9 解析モデル図および変形図

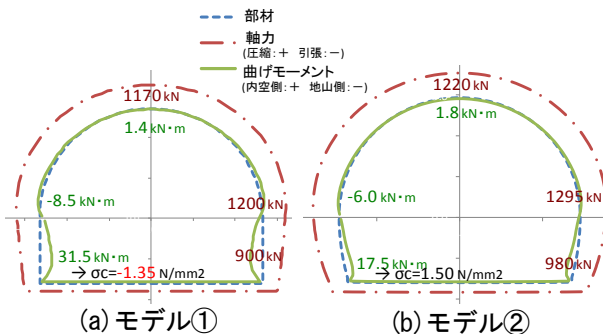


図-10 断面力図

パターンが全体に占める割合を設計と実施について図-11にまとめた。実施支保パターン割合ではCIIパターンが40%、DIパターンが45%となり合わせて85%を占める明確な傾向が現れた。設計支保パターン割合と比べるとB~CIパターンが1/3程度に減少するのに対してDI~DIIパターンが倍増している。結果として50%以上の地山状態において鋼アーチ支保工を含む支保パターンが採用されていた。

DIパターンの割合の増加を分析すると、要因の一つにCIIパターンとDIパターン間の構造全体としての大きな剛性の差(表-6)が挙げられる。変形しやすい断面形状に対して、変形を抑えるための剛性が必要になると考えられる。もう一つには各支保部材の特性が挙げられる。曲げ変形に対して、部材特性として引張力に弱い吹付けコンクリートだけでは不安定なため、引張力に強い鋼アーチ支保工の曲げ抵抗による安定の確保が必要になると考えられる。加えて、設置直後に十分な強度が期待できない吹付けコンクリートに対して鋼アーチ支保工は地山の抜け落ち防止に見られるような短期的な安全の確保などに大きな役割を果たしていると考えられる。

また、85%の地山状態にCII、DIパターンが適用されている状況について、新たに中間的支保パターンを設けて該当する地山状態を分担させれば、安全性、安定性を確保した上でコストの適性化が図れるため支保構造の合理性が高まる可能性がある。そのため、CII、DIパターンにおける標準1掘進長、鋼アーチ支保工、吹付けコンクリートの関連性を精査する必要がある。

3. まとめ

本研究における事例分析や数値解析、試験施工により以下の知見が得られた。

- 1) 高規格鋼アーチ支保工は従来の鋼アーチ支保工と比べて耐力や破壊形態、塑性化の傾向や不安定化までの余裕など概ね同程度と評価されるが、従来の鋼アーチ支保工と比較して剛性が小さいことから変位が大きい。そのため、これを認識した上で、掘削時の計測・観察を実施し注意深く施工することが重要である。
- 2) 1掘進長の延伸は掘削時の変位が小さい比較的安定的な地山への適用が可能であり、試験施工で採用した支保構造により安定が確保できた。また、延伸の可否を判断するために切羽の状態や素掘り面の状態などの評価を細分化することが有効となる可能性がある。
- 3) 支保構造の安定性や施工上の安全性を確保するためには耐力のみでなく、剛性や断面形状、各支保部材の特性などの様々な要素を総合的に評価する必要がある。

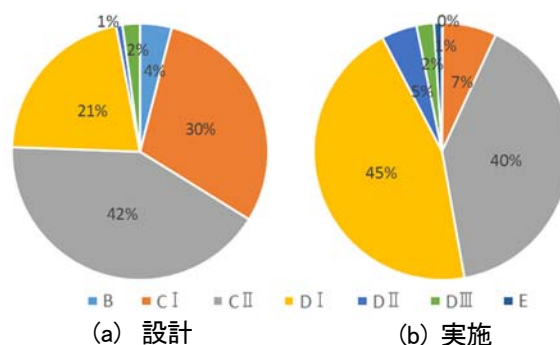


図-11 支保パターンの割合

表-6 小断面トンネルの標準的な支保構造の組み合わせの目安¹⁾

地山等級	支保パターン	標準1掘進長 (m)	ロックボルト			鋼アーチ支保工			覆工厚 (cm)
			長さ (m)	施工間隔 (m)	施工範囲	種類	建込間隔 (m)	吹付け厚 (cm)	
B	B	2.0	なし	-	-	なし	-	5	20
CI	CI	1.5	2.0	1.2	上半 1.2 下半 1.5	なし	-	5	20
CII	CII	1.2	2.0	1.0	1.0	なし	-	5	20
DI	DI	1.0	2.0	1.0	1.0	H-100	1.0	10	20
DII	DII	1.0	2.0 ~ 3.0	1.0 以下	1.0	H-100	1.0	10 ~ 12	20

注) 該トンネルの利用状況および地山状況などを考慮し、覆工の省略を検討する必要がある。

4) 小断面トンネルの標準的な支保パターンの細分化の必要性について確認した。

今後は高耐力ロックボルトによる打設間隔の拡大や高強度吹付けコンクリートによる薄肉化についても研究する必要がある。特に吹付けコンクリートについては機能とその効果が付着力に大きく左右されることや材料特性として引張力に弱いこと、破壊形態が脆性的であることなどに着目して検討し設計・施工の高度化を図る必要がある。また、新支保部材を使用した新たな支保構造は従来の支保構造と比較して剛性が小さく変位が大きくなる傾向が確認され、従来の支保構造による現在までの実績とは異なる現象が発生する可能性は否定できない。例えば膨張性地山や地震などにより供用後に加えられる外力などに対する変形やその影響など、中・長期的な構造安定性について研究していくことが必要である。

参考文献

- 1) 道路トンネル技術基準 (構造編)・同解説、日本道路協会、2003。
- 2) 道路トンネル観察・計測指針、日本道路協会、2012。
- 3) トンネル施工管理要領、東・中・西日本高速道路株式会社、2009。

RESEARCH ON ADVANCED DESIGN AND CONSTRUCTION OF TUNNEL BY ADOPTING NEW TUNNEL SUPPORT MEMBERS

Budget : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2013-2015

Research Team : Road Technology Research
Group (Tunnel)

Authors : ISAGO Nobuharu
KOIDE Takaaki
KUSAKA Atsushi

Abstract: In recent years, public investments had been restricted and the needs for cost reduction in mountain tunnel construction had been increasing. At the same time the needs for time reduction had been increasing in terms of quick recovery from such as great earthquake. In response to these social demands, size down of support members and extending a length of excavation by adopting new tunnel support members (high-strength spray concrete, high-strength rock bolts, high-standard steel arch supports) had been tried. In this research, we validate the mechanical stability of ground and structures, safety of works, and we propose the considerations about the terms of structures and ground in apply the new support members.

Keywords: mountain tunnel, high-strength spray concrete, high-standard steel arch support, stretching a length of excavation