

山岳トンネル工法における止水技術の提案

A PROPOSAL OF WATERPROOFING METHOD ON THE MOUNTAIN TUNNELING

小松 敏彦¹⁾・中村 敏夫²⁾・赤坂 雄司³⁾・黒木 繁盛⁴⁾

Toshihiko KOMATSU, Toshio NAKAMURA, Yuuji AKASAKA, Shigemori KUROKI

The mountain tunneling method has recently been adopted in an increasing number of cases in urban areas. There have, however, been few cases where complete watertightness was achieved, which resulted in massive repair and increased life-cycle cost. Our company developed new waterproofing technology that provides a "watertight structure that does not prevent concrete filling and is in close contact with the shotcrete". The technology enables the construction of a highly watertight structure that is applicable to urban mountain tunnels. Applying the technology is expected to greatly improve the quality of waterproofing systems and linings not only in urban watertight tunnels but also in ordinary mountain tunnels. This paper describes the application of the technology at the Minaminagareyama Tunnel.

Key Words : mountain tunneling method, waterproofing, watertight tunnel, lining

1. はじめに

近年、山岳トンネル工法は、適切な補助工法を採用することによって、より困難な条件下での施工を可能にしてきた。都市部での適用事例は増加傾向にあり、シールド工法や開削工法で対応できない環境に対し、都市トンネルの重要な工法の一つとして期待されている。

都市トンネルでは、地下水環境面からウォータータイト構造、非排水のトンネルとする必要がある。しかし、山岳トンネルの構造は、裏面排水や中央排水などによりトンネル周辺の水を排水するのが一般的であり、これまで山岳トンネルで完全防水を成功させた事例はきわめて少ない。

当社は、新しい止水技術の開発により「コンクリートの充填を妨げず、かつ吹付けコンクリートに密着するような防水構造」を実現し、山岳トンネルで都市部にも適用できる高度なウォータータイト構造を可能にした。この技術の応用により、都市部でのウォータータイトトンネルのみならず、一般的な山岳トンネルでも防水および覆工の品質が大きく向上することが期待される。ここでは、つくばエクスプレス南流山トンネルの施工に適用した止水技術について記述する。

2. 従来の方法の問題点

トンネルの覆工コンクリートには所要の強度、水密性、耐久性が要求される。山岳工法では、覆工コンクリートの外部拘束によるひび割れ、ひび割れからの漏水を防止するため、一般に吹付けコンクリートに防水シートを張り付ける方法が採用されている。吹付けコンクリートの仕上がり面には、その施工方法から必然的に凹凸が発

1) 前田建設工業 東関東支店 西平井作業所

2) 前田建設工業 土木部トンネルグループ

3) 前田建設工業 技術研究所

4) 前田建設工業 土木設計部

生するため、防水シートには、この凹凸への変形追従性を考慮した適切な余裕が必要となる。しかし、防水シートに余裕不足や余裕過多があると引張りやたわみが発生し、覆工コンクリートの充填を妨げる要因となる。

以下に、「吹付けコンクリートの凹凸」と「防水シートのたわみ」から発生する問題点を示す。

- ① 防水シートの引張り抵抗により、吹付けコンクリートの凹部にコンクリートが十分に充填されない。
- ② 吹付けコンクリートと覆工コンクリートのアイソレーション（拘束の縁切り）にばらつきがあり、覆工コンクリートにクラックが入りやすい。
- ③ 鉄筋組立作業において鉄筋の端部で傷つけて防水シートを破損しやすい。
- ④ 破損個所がたわみの陰になった場合、点検で見落とす可能性が大きい。
- ⑤ 吹付けコンクリートと防水シート、ウォーターバリアが密着した構造とならないため、破損個所の背面から水圧がかかった場合、防水シートとの境界面に水みちが発生し、広範囲の漏水を招く。

このため、防水シート背面（吹付けコンクリート表面）を出来るだけ平滑に仕上げるようにしているが、施工サイクルの遅延や余吹きなどによるコスト増が大きく、十分な施工が行われていないのが現状である。

3. 新工法の提案

山岳トンネルの覆工において「コンクリートの充填を妨げず、かつ吹付けコンクリートに密着するような防水構造の実用的な開発」が強く望まれている¹⁾。ここでは、既存の技術に対してどのような改善が必要かを検討し、新工法のイメージを具体化した。

- ① 防水シートが吹付けコンクリート面に密着した構造とする（防水シートの背面に空隙がない）。
- ② 防水シートがトンネル形状の円滑な仕上がりとなる（アイソレーションが一定になる）。
- ③ 延長方向に幅の広い防水シートが施工できる（溶着作業の減少により施工性および品質が向上する）。
- ④ 実用的な方法である（既往の技術で対応可能、かつ施工性、経済性に優れる）。

図1に従来工法と新工法のトンネル構造断面の模式図を示す。

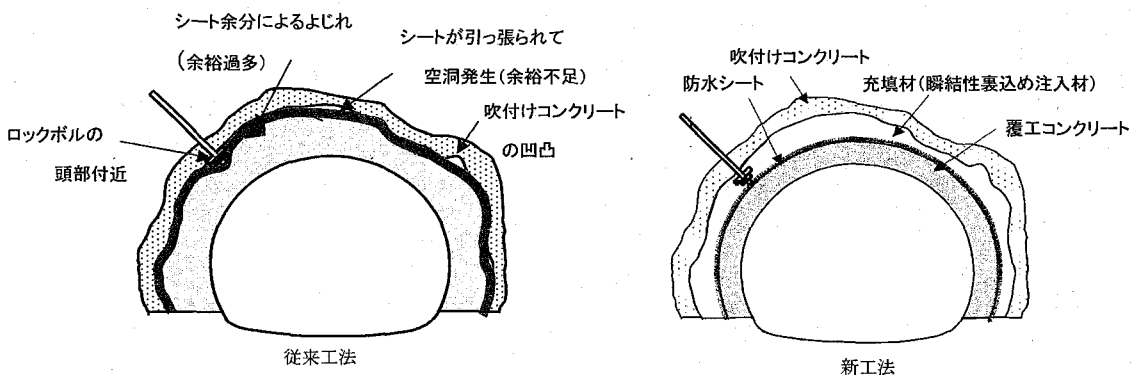


図1 トンネルの構造模式図

4. 実用化の検討

新工法の実用化への課題を以下に示す。

①裏込め充填方法、材料に関して

- ・流動性が高く、吹付けコンクリートと防水シートの狭い空間にむら（ボイド）のない充填ができる方法、材料

とする。

- ・ 1 サイクル（脱型～充填）/日を確保するために必要な付着強度を確保する。
- ・ 取扱い（製造作業、充填作業、片付け）が容易で、特殊な技術を必要としない材料とする。
- ・ 材料費は覆工コンクリートと同程度を目標とする。

②防水シート材料に関して

- ・ 裏込め充填材との間に必要な付着強度をもつ材料とする。
- ・ 工場にて幅の広い（4～6m）シートに加工した物を指定の長さで納入する。

③シート配設設備（型枠台車）に関して

- ・ 幅の広い（4～6m）シートの機械式展張りを可能とする設備である。
- ・ 1 サイクル（脱型～充填）/日の作業速度に対応できる設備である。
- ・ 取り扱いに特殊な技術を必要としない設備である。

④作業性に関して

- ・ 覆工コンクリートの作業と同程度の技量で可能な作業とする。
- ・ 4～5名程度で1 サイクル（脱型～充填）/日の作業を毎日継続可能とする。
- ・ 1 サイクルの施工延長は、1 日当たりの掘削進行（4～6m）以上とする。

防水シートの材料は、従来工法と同じ構造（防水シート＋不織布 3mm）とし、工場でシートと不織布を接着加工して、充填材と不織布との付着強度によりシート全体を張り付ける構造とした。

シート配設設備（型枠台車）の製造およびシート張り作業は、既往のトンネル施工技術で十分に対応が可能であるが、裏込め充填材料に関しては施工性、および吹付けコンクリート・不織布との付着強度に基礎的な実験が必要であると考えられた。

5. 裏込め充填の施工、および付着強度の確認

① 裏込め材料の選定

裏込め材料として、エアーミルクとシールド工法で使用される二液型瞬結性注入材の 2 種類を候補に検討を進めた。

試験施工の結果、エアーミルクは、注入時圧力によりエアーがつぶれて材料がかさむこと、想定を上回る硬化熱が発生することが分かった。また、硬化時間が長いため、吹付けコンクリートの凹凸と妻型枠（エアバルク）から多量のリーク、作用荷重による型枠の変形も発生した。以上の結果より、エアーミルクは当工法の充填材には適さないと考えられた。

これに対し、シールド工法で使用される二液型瞬結性注入材は、上記のようなリークの問題がなく、作業能率も大きく改善された。この結果、裏込め注入材として二液型瞬結性注入材を採用することとした。

② 二液型瞬結性注入材による基礎実験

充填材料には、高流動性のほかに、リークへの対応が容易にできること（瞬結性）が求められる。材料のゲルタイムを 10～30 秒の間で変化させて室内試験を行い、30 秒のゲルタイムを目標として注入材の配合を決定した。また、上記材料にて付着強度の基礎試験を実施した。付着強度は、吹付けコンクリートと充填材、および充填材と防水シート側の不織布の両面より確認した。

なお、必要となる基準強度は各材料の自重から、【吹付けコンクリートと充填材】は 1.77×10^5 [N/mm²]、【充填材と不織布】は 1.39×10^3 [N/mm²]とし、これらに対して 20 以上の安全率を確保することを目標とした。

以下に基礎実験のデータを示す。

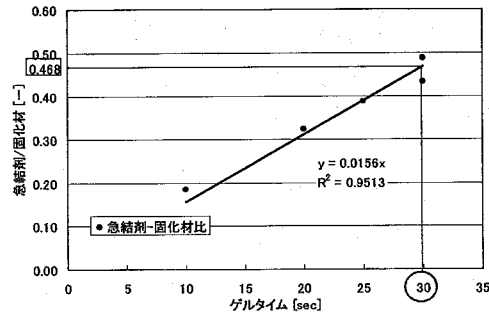


図2 目標ゲルタイムによる急結剤／固化材の割合の算定

表1 充填材料

種 類	単位容積質量 (g/cm³)
固化材	3.07
助 剤	2.60
安定剤	1.18
急結剤	1.30
水	1.00

表2 配合表

A液 (1m³)				B液
固化材	助 剤	安定剤	水	急結剤
400kg	30kg	5%	854%	144%

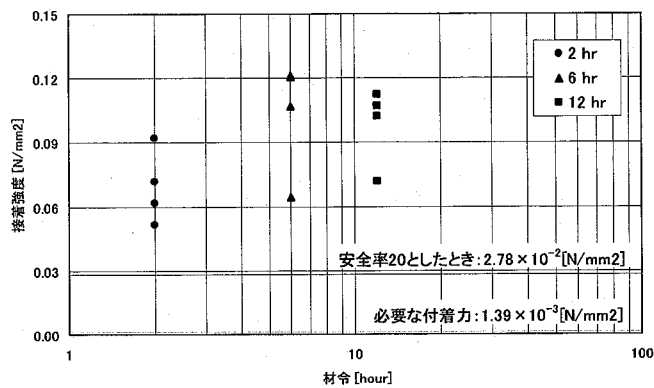


図3 充填材と吹付けコンクリートの付着強度

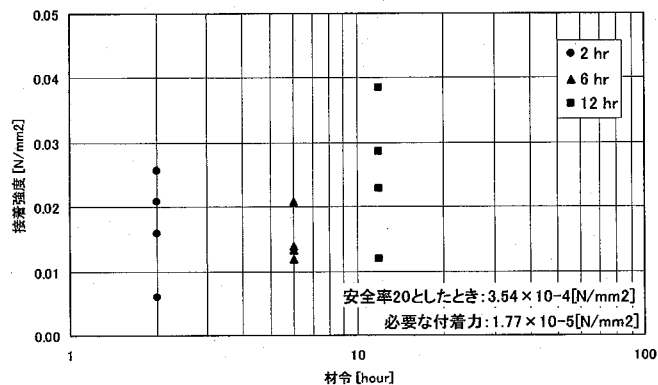


図4 充填材と不織布の付着強度

付着強度は、材令2時間で吹付けと充填材（安全率を20としたときの目標値 0.028N/mm^2 ）、充填材と不織布（同 $3.5\times 10^{-4}\text{N/mm}^2$ ）、ともに目標安全率20を大幅に上回る結果となった。実施工では10時間以上の養生時間を計画していることから、二液型瞬結性注入材は、充填材の要求性能の一つである付着強度を満足することが確認された。

③ 充填作業方法

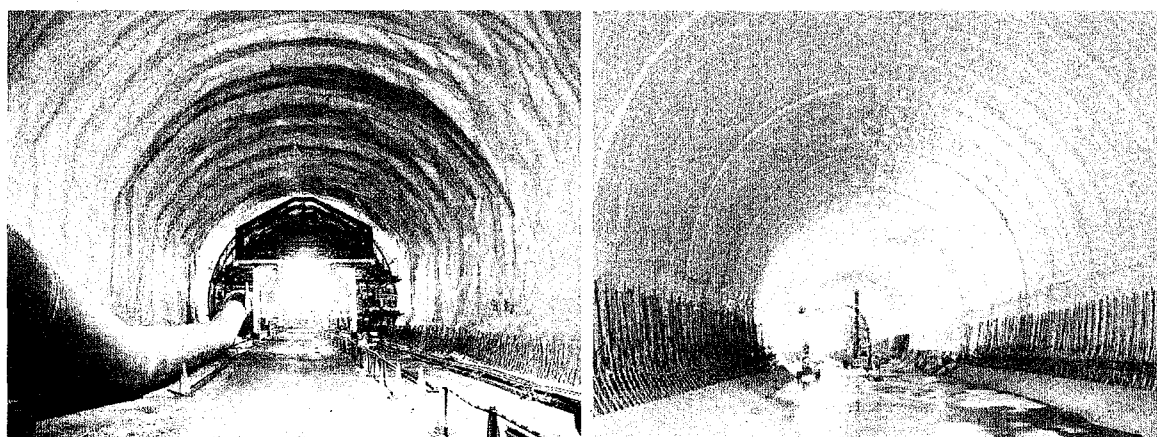
防水シートを型枠に配設後、型枠の高さ、センターをセットする。充填（注入）範囲の外周にエアークラックを配し、妻型枠を構築する。注入口は3箇所とし、まず両肩部（SL+4m位置）から片側ずつ注入、次に天端のセンター部から注入する。天端部に設置しているエアークラックから充填材がリターンするのを確認して、充填完了とする。

6. 効果の確認

型枠設備、裏込め充填材プラント設備、作業手順、防水シート材料など、前述の具体的な課題については計画した通りの施工ができた。

図5に従来工法と新工法の防水シートの敷設が完了した状況を示す。

従来工法にシートの余裕過多や余裕不足が懸念されるのに対し、新工法ではシートの溶着部分を除いては、ほぼ平滑に仕上がっているのが分かる。



従来工法

新工法

図5 防水シート敷設完了状況

経済性について新工法と従来工法と比較すると、設備費で新工法が内型枠やシート配設設備等により、従来工法の約2倍となった。施工費（労務費・材料費・プラント費）は、新工法が従来工法に対して3.5%増とあまり変わらない結果となった。

上記より、新工法と従来工法の差は設備費によるものであることが分かった。これらの単位面積あたりの単価はトンネル延長に大きく影響されることから、当トンネルのように比較的短いトンネルの場合は、シート型枠設備を覆工セントルで兼用することにより、コスト低減を図ることが肝要だと考えられる。また、今回の施工では6m/日の施工としたが、1施工延長を10m程度まで伸ばすことは十分可能であり、労務費などを低減できるものと考えられる。充填材料の付着強度にしても、基準強度に比較して発現強度が大きいことから、配合の検討によりコスト低減の可能性も残っている。

以上、品質のほか、施工性や経済性の面からも新工法が実用的であることが確認できた。

新工法により期待できる効果を示す。

- ① 覆工コンクリートの品質のばらつきが少なくなる。
 - ・ 覆工コンクリートの巻厚が一定となり、空隙の発生が少なくなる。
 - ・ 防水シートが滑らかな形状となり、アイソレーションが向上し、かつ一定になる。
 - ・ シート側でのコンクリート充填の妨げが少なく、密着した構造となる。
- ② 防水性が向上する。
 - ・ 型枠長に合わせた幅の広いシートの展張りが可能になり、現場での溶着作業量を減らせるため、全体の品質の信頼性が向上する。
 - ・ ロックボルト頭部等、突起物による防水シートの破損が少なくなる。
 - ・ 鉄筋組立時に鉄筋端部でシートに傷をつけて破損させる事故が少なくなる。
 - ・ 防水シートが吹付けコンクリートに密着し、かつ平滑であるため、確実なウォーターバリアの形成が可能となり、広範囲への漏水の拡大が防止できる（補修場所が絞り込める）。
- ③ コストダウンに効果を発揮する（VEの可能性）。
 - ・ シート材料の品質を低下させても防水性が向上する。
 - ・ ロックボルトの頭部処理や吹付けコンクリートを平坦に仕上げる作業が軽減できるため、掘削工期の短縮や吹付けコンクリート材料の低減を図ることができる。
 - ・ 適用する部位やシート材料の選択により要求される防水性に対応した適切な構造を実現する。（施工継ぎ目部のみ適用、上半部のみ適用、全面適用など）
 - ・ 漏水処理費を少なくできる。
- ④ 作業の環境が良くなる。
 - ・ シート布設が人力作業から機械作業となり、省力化を図ることができる。
 - ・ シートのたるみがなくなるため、鉄筋組立の作業環境が改善され、施工能率が向上する。

7. 今後の課題とまとめ

以上、新工法の成立性について記述したが、今後の課題として、吹付けコンクリート表面から湧水がある場合の排水処理、裏込め材のクラウン部への確実な充填、トンネルの線形管理などが挙げられる。このうち、線形管理は特に重要で、以下に掲げる項目に対処していく必要がある。

- ① 支保工建て込み誤差を考慮した適切な余裕代の設定
- ② 曲線区間については、覆工型枠に対応した支保工建て込み線形管理（多角形）
- ③ トンネル最終内空変位の予測を生かした変形余裕量の適切な予測と設定
- ④ トンネル支保工変位の収束の適切な予測と設定

今回提案した新工法は、都市部での完全防水型トンネルのみならず、山岳トンネル全般の長寿命化に対して従来工法が抱える構造上の欠点を根本から改善するものである。

今後、上記課題を克服して施工事例を増やし、山岳トンネルの標準工法に成長させたいと考えている。

[参考文献]

- 1) 土木学会編：トンネルコンクリート施工指針（案），平成12年7月