

山岳工法 (NATM) によるトンネル構造物の高度な防水構造の提案 (その2)

A PROPOSAL OF HIGH WATERTIGHT STRUCTURE ON THE MOUNTAIN TUNNELING (NATM) (Vol.2)

小松 敏彦¹⁾・赤坂 雄司²⁾・黒木 繁盛³⁾・桜井宏⁴⁾

Toshihiko KOMATSU, Yuuji AKASAKA, Shigemori KUROKI, Hiroshi SAKURAI

Along with increases of social overhead capital, expenses for maintaining the structures have increasingly augmented, and reduction of total costs or life-cycle costs is an urgent necessity. New Austrian Tunneling Method (NATM) is increasingly used to construct tunnels in urban districts as well as in mountainous areas because the method is rational and economical. Cracks on lining concrete and water leakage are a cause of deterioration and are a serious problem. Since tunnels are difficult to repair while in service, maintenance and repair works should be minimized.

The Authors has developed a system that enables smooth application of waterproofing sheets, free from the effects of unevenness on shotcrete surface. The resultant linings are highly watertight and are little prone to cracks. The high quality of the linings will minimize necessary maintenance and repair works and prolong the service life of the tunnel. The system can also be applied to construct perfectly watertight tunnels in urban areas. This paper describes the subjects and treatments for practical use.

Key Words : mountain tunneling method, lining, maintenance

1. はじめに

山岳トンネルの防水工として、一般に吹付けコンクリートと覆工コンクリートの間にシート防水材を敷設する工法が用いられている。シート防水材は、漏水防止のほか、覆工背面の拘束低減・ひび割れ防止の目的で用いられているが、吹付けコンクリートの仕上がり面やロックボルトなどの凹凸により、平滑に敷設することが難しく、必ずしも初期の目的を達成しているとは言い難い。

このたび筆者らは、吹付けコンクリートなどの不陸に影響されずにシート防水材を円滑に展張りするシステムを開発した。このシステムにより、従来、ひび割れ発生の原因であった覆工背面の拘束や覆工背面の空洞といった問題を解決することが可能となった。また同時に、幅広の防水シートを使用することで現場溶着回数の減少、不陸を修正することで防水シート破損の減少を図ることができ、覆工のひび割れ発生の低減とあわせ止水性の高い防水構造を実現した。この結果、覆工品質が向上し、将来にわたる維持管理・補修の軽減、トンネルの長寿命化が可能だと考えられる。ここでは、つくばエクスプレス「南流山トンネル」での実施工から得られた新工法の実用化・普及に際しての課題を取り上げ、新防水工の問題点とその対策について記述する。

キーワード：山岳工法 (NATM), 覆工, 維持管理

- 1) 前田建設工業株式会社 東北支店 盛岡北山トンネル作業所
- 2) 前田建設工業株式会社 技術研究所
- 3) 前田建設工業株式会社 土木技術部
- 4) (株) ケー・エフ・シー 東京土木営業部

2. 新防水工の考え方

従来工法の防水構造を図-1、図-2 に、新工法の防水構造を図-3、図-4 に示す。新工法は、シート型枠上に敷設したシート防水材と吹付け間の空隙に充填材を注入し、防水シートと積層構造をなす不織布と充填材との付着力を確保することで、注入と同時にシート防水材の展張りを可能とする方法である。

このシステムの特長を表-1 に、従来工法と新防水工によるシート展張りの仕上がり状況を写真-1 に示す。

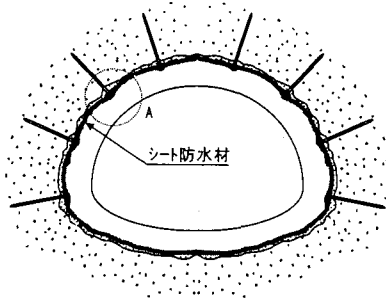


図-1 従来工法概要図

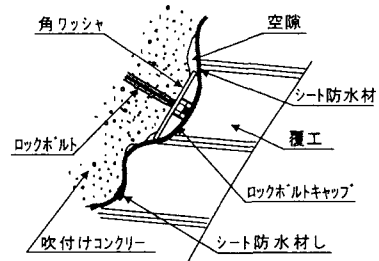


図-2 A部詳細図

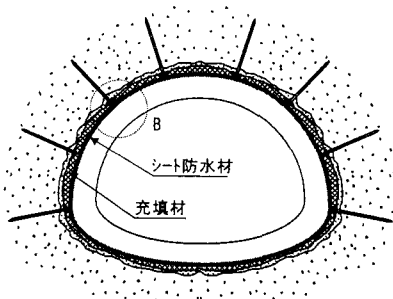


図-3 新工法概要図

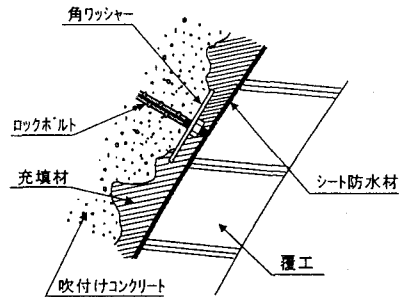
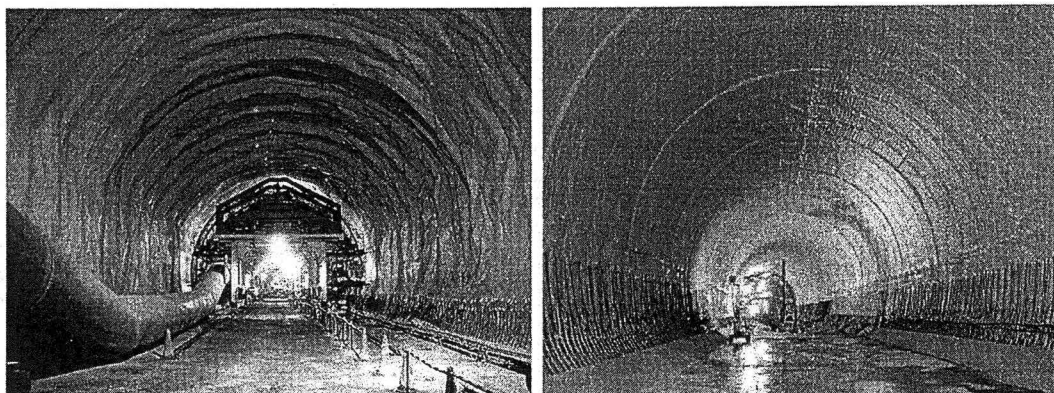


図-4 B部詳細図

表-1 新防水工の特長

該当箇所	内 容
吹付けコンクリート	・ 吹付けコンクリートの凹凸仕上がり規定を緩和できる。
突起物処理	・ ロックホルト頭部や座金などの突起物処理が不要となる。
防水シート	・ 吹付けコンクリートやロックホルトの凹凸が原因となる防水シート破損の減少を図ることができる。 ・ 防水シート面が平滑となり、鉄筋組立による防水シート破損の減少を図ることができる。 ・ 幅広の防水シートを使用することで溶着回数が減り、品質の向上、展張作業の軽減を図ることができる。 ・ 防水シート面が平滑に仕上がるため、コンクリートとの接着性シートを採用することにより接着性の機能が最大限生かされ、覆工との界面を走る漏水の水みちをなくすることができる。
鉄筋組立て	・ 防水シート面が平滑となり、鉄筋組立作業の軽減を図ることができる。
覆工コンクリート	・ 覆工の背面拘束や巻厚の大小によるひび割れ発生を低減できる。 ・ 覆工（防水シート）背面の凹凸・空洞がなくなり、応力集中や圧さなどの現象を抑制することができる。



従来工法

新工法

写真-1 シート防水材展張り状況の比較

3. 新工法での課題と対策の方向性

南流山トンネルにて実施工を行ったところ、部分的に天端からの漏水、シート防水材と充填材の剥離が発生した。また、コストに関して試算を行ったところ、単位面積(1m²)あたり 91%、新工法のコストが高くなる結果となった²⁾。これらの課題とその対策の方向性について、①止水性の向上、②充填材料・注入方法の改良、③経済性比較として以下にまとめた。

3.1 止水性の向上

南流山トンネルはウォータータイトトンネルとして施工されていたが、数ブロックの天端部打継目から若干の漏水が認められた。この原因として、防水シートの損傷部からの漏水が、復水に伴い溶着部の間隙を通して覆工天端に達したこと、また、天端縦断方向に覆工コンクリート充填不足のため若干の空隙が存在し、その縦断方向の空隙を伝って近くの打継目から漏水したと考えられる。この問題に対しては以下の対策が有効であると考えられる。

(1) 接着性防水シートの使用

南流山トンネルでは、防水シート表面に特殊な処理が施された接着性シートを採用した。これはフレッシュコンクリートと接した防水シート表面が化学反応を起こして覆工コンクリートと接着、一体となるもので、防水シートに損傷部が存在したままコンクリートが打設された場合でも、損傷部から流出した地下水が覆工との界面を迷走することなく、漏水を最小限に抑えることができるものである(図-5)(図-6)。

南流山トンネルでは、この接着性シートを採用したこともあって、復水後の覆工からの漏水発生はこれまでのウォータータイトトンネルと比べ、格段に少なく抑えることができたと考えられる。

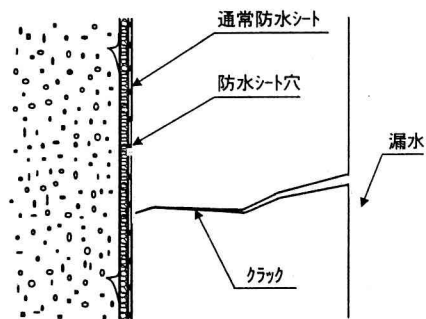


図-5 通常防水シートの漏水

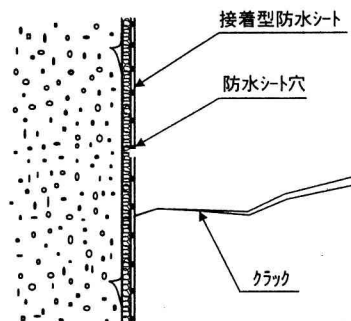


図-6 接着型防水シートの機能

(2) 重ね合わせ溶着方式の採用

南流山トンネルの防水シート溶着（アーチ部）は、後方でまとめて作業ができる利点から拌み合わせ溶着方式を採用した。このため、図-7に示す折返し部で連続した未溶着部（隙間）が横断方向に形成され、インバート接合部（三重溶着部）における溶着不具合箇所などからの漏水が、この未溶着部を伝って天端部まで上昇したものと考えられる。この対策として、重ね合わせ溶着方式の採用、覆工後のコンタクトグラウトや打継目部へのウォーターバリア設置等（図-8）の対策が有効だと考えられる。

(3) 高強度防水シート

シート防水材の敷設後には鉄筋組立や覆工の作業が行われる。新工法ではシート防水材の仕上がり面が平滑となるが、鉄筋を引っ搔けて防水シートを傷付けたり、防水シートの損傷部を見逃したりすることが皆無になったわけではない。従って、新工法であっても破損しにくい防水シート材を採用することが望ましいと考えられる。

一般的に高強度の材質では柔軟性や溶着性が悪いため、通常の凹凸のある吹付け面に設置される防水シート材は、適度に柔軟性があり、溶着性がよい材質が選定される（例えば日本ではEVA）。廃棄物処分場等の遮水シートで使われているHDPE（高密度ポリエチレン）シートは高強度で耐薬品性等にも優れているが、柔軟性や溶着性が悪いため従来のトンネルでは使われることはなかった。

新工法では防水シートは平滑に展張りすることができるため、凹凸に馴染ませる柔軟性は必要とされず、また防水シートの裏面にも空隙が殆どなく、溶着の条件も整っていることから、HDPE（高密度ポリエチレン）製の高強度の防水シートを採用することが可能であると考えられる。

3.2 充填材料・注入方法の改良

新工法では、シート防水材を釘で固定するのではなく、防水シート裏面の不織布表面の繊維に充填材が入り込んで硬化することによって付着力を確保している。また、充填材は吹付け面との付着力も有しており、吹付け面とシート防水材を固定する接着剤の役割を果たしている。

南流山トンネルではエアバルクからの充填材のリーク減少や1サイクル/日を確保するため、30秒のゲルタイムや半日後の付着強度を目安として充填材の配合を決定した。

充填は上・中・下3段の注入孔から行われた（図-9）が、注入孔から排出された充填材は不織布表面に沿って下部へ流れ落ち、下から徐々に固結していく過程で層状に固結し、充填材間の剥離が生じて一部でシート防水材の剥離が見られた。この問題に対して以下の対策が考えられる。

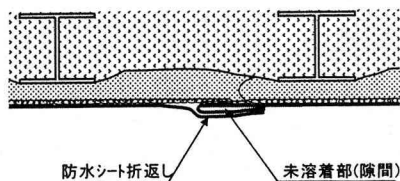


図-7 溶着部で発生した隙間

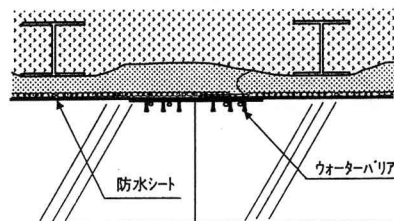


図-8 ウォーターバリアの設置

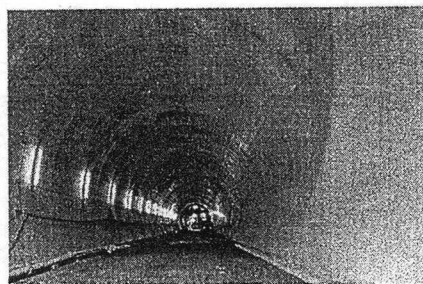


写真-2 南流山トンネルの覆工

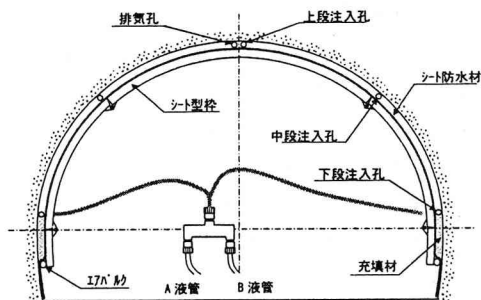


図-9 充填材の注入

(1) 充填材の改良，補強材の設置

シート防水材の剥離対策として、エアバルクからのリークが問題とならない程度にゲルタイムを延長すること、剥離が問題とならない配合へと見直しを行うこと、剥離を防止するための金網取付（写真-3）などが有効であると考えられる。なお、剥離を防止するための金網の取付方法として、図-10 に示すようにタイロッドを利用する方法が挙げられる。また、配合についてはコストの部分でも触れるが、その後の実験によってより貧配合（ $C=300\text{kg/m}^3$ ）の充填材でも成立が可能であり、剥離についても少なくなるという実験結果が得られている。



写真-3 充填前の金網取付

(2) 充填材の注入

充填はシート防水材裏面に均一に、平滑に、しかも空隙があってはならない。特に天端部の空隙はシート防水材の大きな剥離につながる可能性もあり、確実な排気を行って、充填材の注入を行う必要がある。特に一度に展張りする延長（シート防水材の幅）が長いほど確実な充填は難しくなり、注意が必要だと考えられる。

この対策の一つとして、天端部の最上部に注入孔や排気孔を確保するために、支保工の天端部センター付近をR止め加工からキックアップ型に変更する方法が考えられる（図-11）。

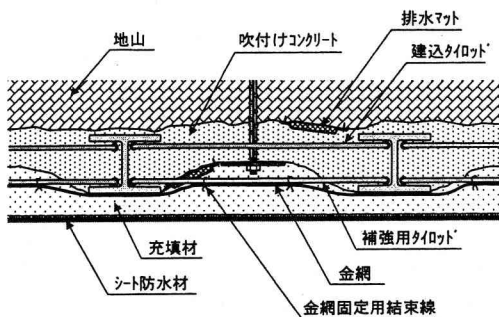


図-10 タイロッドを利用した剥離防止例

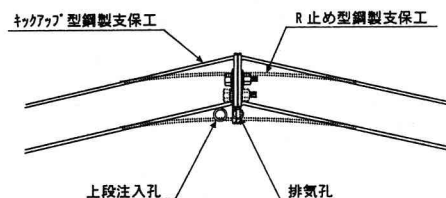


図-11 キックアップ型の鋼製支保工の配管例

3.4 経済性比較

新工法では、シート防水材を吹付けコンクリートに直接張り付ける従来工法（排水型トンネル）に比べ、充填材注入という工程が加わるためコストが大きくなる²⁾。コストの発生項目に着目すると、従来の工法と比較してシート型枠費、充填材材料費が大きな相違点となり、これらに要するコストを削減することで従来工法と同等の施工費を実現することが可能であると考えられる。

なお、コスト削減に対する具体案として、シート型枠は覆工セントルや鉄筋組台車と兼用すること、充填材材料は、新規材料の開発あるいは南流山トンネルで用いた二液型瞬結性注入材の改良（その後の実験によって表-2、図-12 に示すようにセメント量および急結剤量を低減しても成立することを確認している）により、コスト削減が可能であると考えられる。

以下の3通りの施工で比較を行うと、 $B/A=1.91$ 、 $C/A=0.99$ という結果となった。

表-2 間隙充填材の配合例

固化材	助 剤	A 液 (1m ³)		B 液	
		安定剤	水	急結剤	
400 kg	30 kg	5.0 ℓ	854 ℓ	144 ℓ	
350 kg	30 kg	5.0 ℓ	870 ℓ	126 ℓ	
300 kg	30 kg	5.0 ℓ	887 ℓ	108 ℓ	
250 kg	30 kg	5.0 ℓ	903 ℓ	90 ℓ	

上記混合割合は、ゲルタイムが 30 秒となる混合比率。

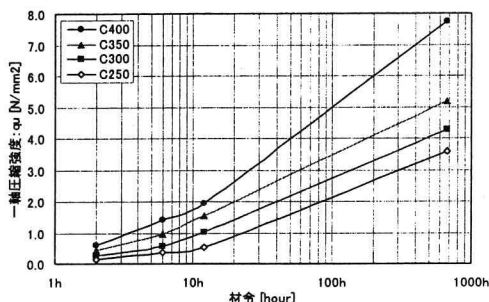


図-12 充填材の圧縮強度試験結果

CASE・A：一般の山岳 NATM トンネルでシート防水に要する費用

CASE・B：南流山トンネルの実績（延長 361m，充填材単価 20,000 円/m³）をもとに、一般の山岳 NATM トンネルで新防水工を採用した場合の費用

CASE・C：トンネル延長を 1,000m、充填材材料費を 14,000 円/m³と仮定のもと、新防水工を採用した場合の費用

CASE・C ではシート型枠費を計上したものの、CASE・A（従来工法）と比較して変わらない結果となった²⁾。なお、初期ひび割れなどをはじめとしたトンネルの品質では新工法が上回ると推測されることから、維持管理費を含めたトータルコストでは新工法が優位であると考えられる。

4. 今後の課題とまとめ

以上の方法により、より高品質なトンネルの覆工構築が可能であると考えられる。また、高品質化に伴って維持管理・補修費までを含め、1,000m 程度以上のトンネルであればトータルコストで新工法が優位となると考えられる。

今後の課題として、より一層の施工の効率性、経済性を求めて、簡易型枠、あるいは充填材料の開発といったものが挙げられる。また、上記課題に対して改善を加え、防水や覆工の品質といったものに着目して新工法の有意性を確認していく必要がある。

ここで提案した新工法は、山岳トンネルの長寿命化に対して従来工法が抱える、覆工背面の空洞や覆工背面の拘束といった構造上の欠点に対して改善を加えるものである。また、幅広シート防水材の採用、裏面に空隙のない平滑な防水シート面、HDPE（高密度ポリエチレン）等の高強度材質の採用等、極めて丈夫で信頼性の高い防水構造を実現することができ、都市部における完全防水型トンネルの実現も可能であると考えられる。今後、トンネル技術者として、日本のみならず海外のトンネルでこの新工法が利用されることを期待するものである。

参考文献

- 1) 小松敏彦ほか：山岳工法（NATM）によるトンネル構造物の高度な防水構造の提案，第 10 回地下空間シンポジウム論文集
- 2) ジェオフロンテ研究会編：型枠を利用したシート防水材の平滑展張り工法（仮題），2004 年 11 月