

トンネルの防水対策 THE WATERPROOFING TECHNOLOGY OF TUNNEL

鬼頭 誠*・越智 修*・可児 正人**・栗田 充**

Makoto KITOH, Osamu OCHI, Masando KANI, Mitsuru KIWADA

Recently Tunneling Methods have been greatly developed giving good results. On the one hand, the tunnels in use are suffering from water leakage reportedly at the section longer than a half of the total length. The maintenance work for the leakage requires a great labour and cost expenses because of serious work in the closed narrow space. The reduction of leak itself is expected in the nature of things.

Here are reported the effective tunnel waterproof methods by use of the lately progressed Sheet Waterproof Technology for construction of the reliable tunnel of the extremely less leakage.

Keywords: tunnel, water leakage, maintenance, waterproofing sheet(membrane)

1. はじめに

我が国は第二次世界大戦後このかた約50年間に著しい経済発展を達成し、GNP世界第二位となり、各種社会資本の整備が推進されてきた。こうした社会・経済の発展に伴って交通網や都市機能の改善、環境整備等のプロジェクトが遂行され、技術も進歩してきた。これらのプロジェクトには多くのトンネルが計画され、工事が行われ、NATMやシールド等の技術開発が進展し、かなりの実績を挙げている。

しかしながら、供用トンネルの調査によれば延長の半分以上が漏水^{1) 2)}しており、狭隘で閉塞した空間における極めて困難で厳しい作業条件下でのメンテナンスには、多大な労力と費用を要するものとなっていることから、今後のトンネル建設にあたっては漏水の削減が強く望まれているところである。

最近、水は貴重な資源との認識が高まり、また漏水による環境への種々の影響も考慮されるようになり、今後はトンネルの漏水も厳しく規制されると予想される。欧州でも耐久性、環境、保守等の問題からウォータータイトなトンネルが多く施工される傾向にある。こうした事情を考慮すると、我が国でも今後は漏水の極めて少ないトンネルを構築することが必須と考えられる。

本報告は、トンネル漏水の実態と対応策を検討し、今後、漏水の極めて少ないトンネル（ウォータータイトなトンネル）を構築するため、建設段階において最近のシート防水技術を用いて行うトンネルの防水対策の効果的な設計・施工法を述べるものである。

* 正会員 日本鉄道公団設計室

** 正会員 鉄建建設株式会社エンジニアリング本部

2. トンネル漏水による被害の例

トンネル漏水の実態をみると、供用当初は、コンクリートの打ち継目やひびわれなどから、じわじわ滲み出ているが、やがて大きく流れ出すようになる。10年、20年を越える長期間を経ると、覆工が劣化し、遂には変状して使用に支障をきたすようになる。交通用（鉄道、道路等）トンネルでは、電力、架線、信号、通信等の電気設備の機能傷害の原因となり、更には腐食を加速し大きな影響を与えているのが実態である。

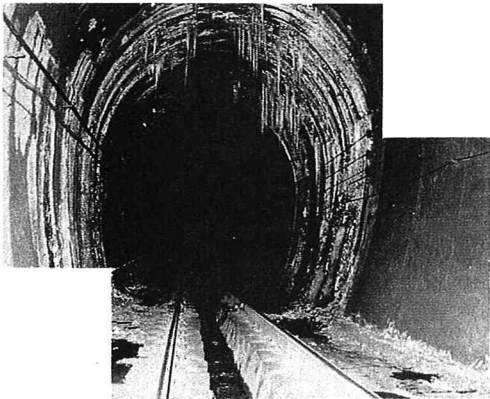
(1) 山岳トンネル

写真－1は、寒冷地でつららが発生し、通行に支障をきたした例である。我が国の鉄道トンネル調査によれば、つらは北海道から九州にいたるまでの広い範囲で発生している。

写真－2は、覆工のひびわれなどの漏水が長期間を経て、コンクリートの劣化、崩落を引き起こし、覆工の変状の原因ともなり使用に支障をきたした例である。なお、茶褐色の微生物等により目詰まりしたり、排水工が適切でないため、浸水や変状の原因となっている例も多い。

(2) 都市トンネル

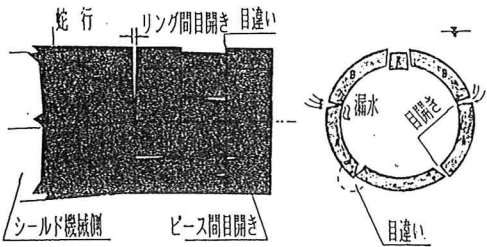
これまでの都市トンネルは、セグメント覆工が多く、セグメント幅 90 ～ 120cmで 6～ 8分割されているので継目総延長が長い。継手部は線状防水工（水膨張ゴム等）が施工されているが、図－1 に示すように、目開き、目違いもある。長期的には止水材の劣化等が起こり、図－2 に示すように継手部、継手ボルト部、ひびわれ等から漏水を生じ、長期間を経て漏水が増加し、トンネル周辺構造物へ影響を及ぼしている例も多いと言われている。



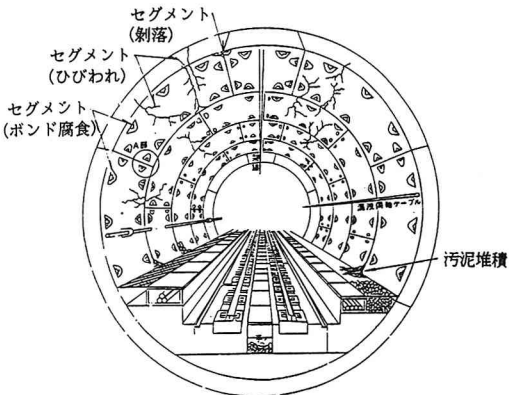
写真－1 漏水による天端からのつららの例



写真－2 長期にわたる漏水による覆工劣化の例



図－1 セグメント覆工の目開き，目違い



図－2 セグメント覆工の漏水被害の例

(3) 漏水発生割合

図-3に旧国鉄で行ったトンネル漏水発生割合の調査例¹⁾を示す。即ち、

①漏水は、トンネルの総延長(1,834km)の約7割の区間で発生している。

②漏水の発生箇所は、半数近くがアーチ部である。

③凍結(つらら、側氷、氷盤)の発生は、トンネル箇所数の約3割に及んでいる。

また、建設省の平成2年度の調査によると、供用中の道路トンネル箇所数 6,705箇所中の総延長 1,970kmの約6割程度の区間で漏水していると報告²⁾されている。

これらの漏水の実態と今後更に厳しくなる労働力不足や経済環境を考慮すれば、建設後も、長期間有効で効果的な防水対策を講じる必要性は益々高まると想定される。

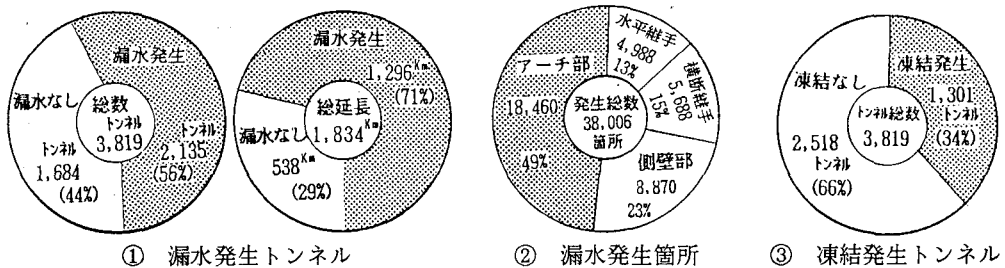


図-3 トンネル漏水発生割合の例

3. トンネルの防水対策

3.1 基本的な考え方

従来は主として、トンネルの覆工背面の地下水を導水型の排水機構により排水して漏水に対処してきたが長期的には、トンネル周辺の地下水の変動、コンクリートのひびわれの進行、打ち継目や構造継手部(セグメント)の劣化、排水口の目詰り等が漏水対応機能を低下させ、確実な排水が行われず、漏水しているトンネルが多いと言われている。

従って、今後はメンテナンスの削減、地下水の規制、大深度化等を考慮し、出来るだけ漏水を少なくしようとするれば、これまでの導水型排水方式だけでは対応が困難と考えられる。そこで、効果的な防水対策の調査、研究を行った結果、信頼性が高いため、欧州での施工実績が多いシート防水工を基本工法として検討した。以下に、最近のシート防水工技術を用いる設計・施工法の概要を報告する。

3.2 シート防水工の施工範囲

トンネルの建設にあたっては、事前調査等で地下水を把握するほか、施工中や供用後の状況についても、十分検討を加え、適切な範囲にシート防水工を施工する必要がある。

山岳トンネルでは、一般に、坑口付近は地下水が多いが、施工中の湧水箇所は勿論、供用後の地下水の変動等も考慮し、十分な余裕を見込んでシート防水工を設置することを基本とする。

都市トンネルでは、地下水位以下に構築されることが多いので全区間にわたって防水工を施工することを基本とする。

また、トンネル断面方向については、地盤条件、地下水位、環境条件、メンテナンス等を考慮し、上半型または全周型で施工する。図-4に山岳トンネル、図-5に都市トンネルの場合の例を示す。

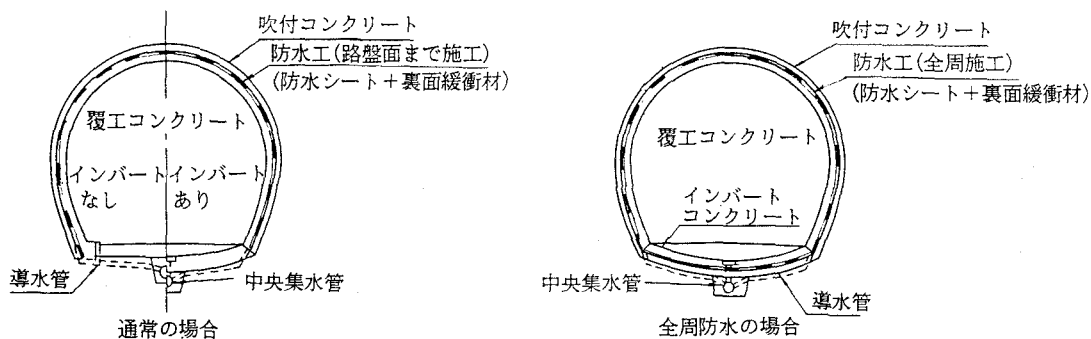


図-4 山岳トンネルのシート防水工配置方法の例

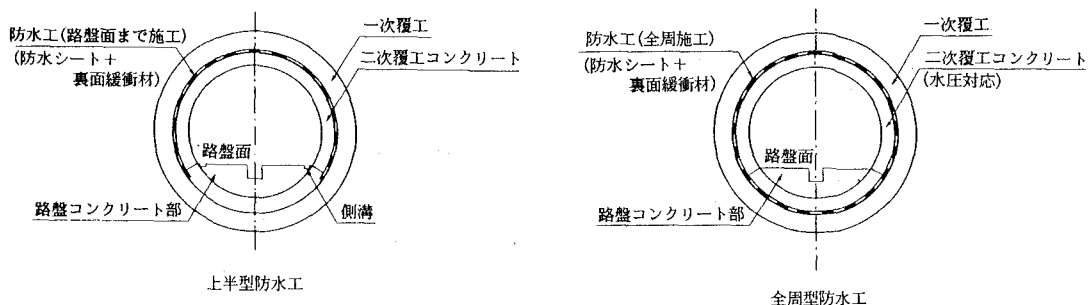


図-5 都市トンネルのシート防水工配置方法の例

3・3 シート防水材

(a) シート防水材

トンネル用シート防水材は、表-1に示すように防水シート本体と裏面緩衝材で構成され、その主な要件と種類および特徴は次のとおりである。

①防水シート

防水シートの主な要件は、確実に止水ができ、高水圧や施工中の作用荷重等に十分抵抗し、確実かつ容易に接合ができ、アルカリ等に対して耐久性に優れ、燃焼等による有害な塩素ガスの発生が少ないことである。

シートの種類は、表-2に示すようにゴムアスファルト系、合成ゴム系、プラスチック系等多岐に亘るが、我が国で、現在、トンネル防水に使用されている主な防水シートはプラスチック系である。

プラスチック系のうち、接合部の溶着作業性に問題があるPEと、燃えると有害なガスを発生するPVCは使用を避け、EVAとECBが多く用いられている。EVAとECBは表-3に示す試験を行い、基準に満足したものを使用する。

②裏面緩衝材

裏面緩衝材は、防水シートの保護と水圧の分散のための通水性が主な要件である。この要件を満たす材料としては、ポリエステル(PET)、ポリプロピレン(PP)等の繊維状製品の使用実績が多い。

(b) 防水シートの厚さの選定

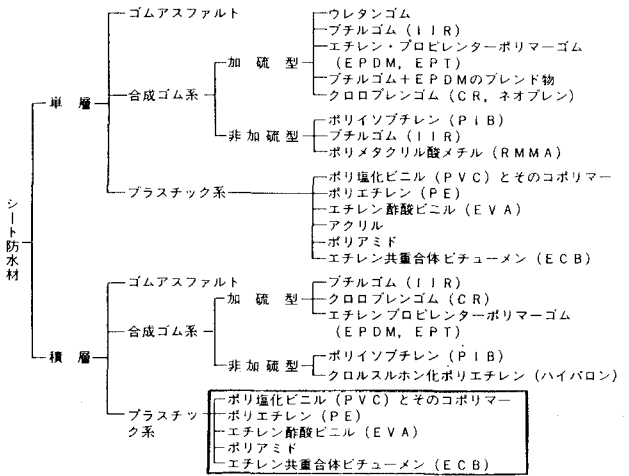
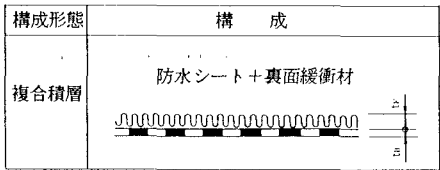
トンネル用防水シートの厚さと高水圧下における防水効果との関係は、まだ十分に確認されていなかったもので国内、国外の高水圧条件下での施工実績調査と各種評価試験結果に基づいて選定した。

①施工実績調査

施工実績調査によれば、高水圧の厳しい条件下では防水シートの90%以上が厚さ2.0mm以上となっており施工実績から判断すれば、厚さ2.0mm以上とする必要があると考えられる。

表－2 防水シートの種類

表－1 トンネル用シート防水材の形状と構成



表－3 防水シートの基準試験項目と基準値の例

試験番号	試験項目		試験方法	単位	基準値	
					EVA	ECB
①	比	重	JIS K 6773		0.95±0.05	0.95±0.05
②	硬	さ	JIS K 6773		85～98	85～98
③	厚	さ	JIS A 6008	%	+15～-10	+15～-10
④	引張強度特性	引張強度	20℃	JIS K 6773	kgf/cm ²	160以上
		引張強度	-10℃			
		引張強度	20℃	JIS K 6773	%	600以上
		引張強度	-10℃			
⑤	引張強度	接合部	20℃	JIS K 6773(準拠)	kgf/cm ²	10以上
		破断荷重	接合部試験			
⑥	引張強度	さ	JIS K 6301(準拠)	kgf/cm ²	50以上	50以上
⑦	耐アルカリ性		JIS K 6773(準拠)	%	±1以内	±1以内
8	せん断強度		JIS K 7214	kgf/cm ²	100以上	100以上
9	貫入強度		RST試験	kgf	100以上	100以上
10	耐熱老化性		JIS K 6773(準拠)	%	±1以内	±1以内
10	柔軟性	(低温脆化点)	JIS K 6773	℃	-30以下	-30以下

表－4 各種評価試験結果総括表

各種評価試験項目	シート厚さ		
	1mm	2mm	3mm
物理性能	◎	◎	◎
耐水圧性	○	◎	◎
溶着性	○	◎	◎
溶着部強度	△	○	○
圧縮耐久性	△	○	◎
引張延伸性	△	○	◎
耐溶接火花性	△	○	◎
総合評価	△	○	◎

◎：推奨できるもの

○：使用可能なもの

△：使用する場合注意を要するもの

②各種評価試験⁴⁾

高水圧の厳しい条件下でも合理的かつ十分な性能を確保できる防水シートの品質、厚さ等を推定するため物理性能、耐水圧性、溶着性等の試験を行った。試験結果を表－4に示す。試験結果、溶着により厚さが減少すること、高水圧により打ち継目等で窪みが生ずること、1.2mm 以下ではコンクリート打設により貫通穴等破損が見られることなどが確認された。総合的に判断すれば、1.0mm では問題があり、2.0mm では問題がなくなり、3mm では良好な結果が得られたと言える。

上記の施工実績調査結果および各種評価試験結果等から判断すると、高水圧の厳しい条件下での防水シートは当面2mm 以上とする必要があるとの結論が得られた。

また、山岳トンネル等でNATMの排水型にシート防水工を用いる場合は、コンクリート打設による破損を考慮して、試験結果から、厚さは1.2mm 以上あればよいことが判明した。

なお、ドイツ連邦鉄道では水圧のかからない排水型の場合は、破損を考慮して厚さは2.0mm ，高水圧下では耐水性を考慮して厚さは3.0mm と規定している。

3・4 シート防水工の施工法

上記の状況に鑑み、日本鉄道建設公団ではシート防水工の手引き⁴⁾を作成した。その概要は次のようになっている。

(a) 取付け方法

防水シートには孔を明けずに取付ける。

図-6に示すように、裏面緩衝材と防水シートを予め工場で線付・点付等で加工しておき、現場では裏面緩衝材をコンクリートアンカー、ディスク、押さえ板等を用いて覆工壁面に取付ける。

(b) 防水シートの接合方法⁴⁾

接合部は、水圧下で十分な防水機能を保持し、均一な品質を確保するため、図-7に示すように自走式電気ゴテ溶着機で溶着する。施工にあたっては溶着機の温度、自走速度を管理して溶着する。また、施工管理のため溝付二重継目溶着方法により検査用の溝を設ける。

(c) 機械化施工

従来は幅1.6m程度の防水シートを用い作業架台で人力施工していたが幅5.0m程度までのシートが製造できるようになった現在では、接合箇所を少なくして品質の向上をはかるため広幅の機械化施工とする。なお、現場では幅3.6mの機械化施工が成果を挙げている。

(d) 施工管理⁴⁾

施工された防水工に設計通りの機能を期待するには、適切な検査を行い、損傷や不良箇所等の見落としがないようにしなければならない。従来は、目視検査によることが多かったが、最近は施工管理技術が向上したので図-8に示すように、圧縮空気検査と空気負圧検査を指定している。

4. おわりに

トンネルのシート防水工は、防水材の材質や厚さ、シートの接合方法、施工法等を適切に選択することにより『長期的に漏水が極めて少ないトンネル』の構築を可能にする。

トンネル総延長が益々増加する中で、メンテナンスを困難にする人手不足や環境条件が厳しくなる新時代の要請に応えるためには、シート防水工の採用により、『ウォータータイトなトンネル』を構築する必要があると考えている。

本報告にあたっては、早稲田大学小泉 淳教授はかトンネル防水工研究委員会、地下構造物防水工協会の皆様に多大なご指導を賜ったことを深く感謝する次第である。

引用文献および参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：トンネル補強・補修マニュアル 1990年10月
- 2) 土木学会トンネル工学研究発表会：道路トンネルの変状実態と対策 1990年10月
- 3) 日本トンネル技術協会：山岳トンネルにおける防水工指針（案）シート防水編 昭和61年6月
- 4) 日本鉄道建設公団：並進工法におけるシート防水工設計施工の手引（案）都市トンネル編 1991年11月

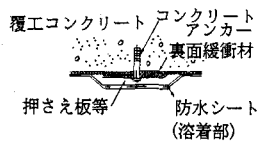
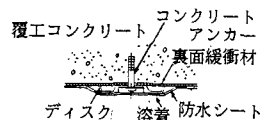


図-6 防水シート取付け方法の例

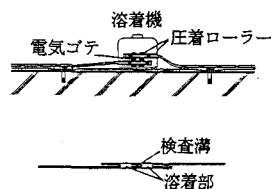


図-7 防水シート接合方法の例

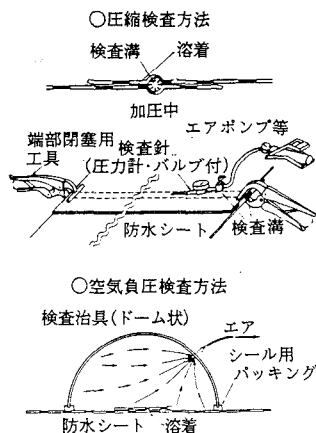


図-8 防水シート検査方法の例