

# コンパクトなウレタン注入機でトンネル補修 アキレス Tn-p 工法（発泡ウレタン裏込注入工法）の紹介

田中 弘 栄

これまでトンネル覆工の背面空洞を埋める裏込注入材として、セメント系注入材が多く使用されてきた。本報では、セメント系注入工法よりもコンパクトな機械設備で施工できる発泡ウレタンを使用した「アキレス Tn-p 工法」（以下本工法という）を紹介する。とくに近年では、40倍発泡という従来より高発泡タイプの発泡ウレタンを開発し、コスト削減と施工性の向上を達成し、多くのトンネル補修工事で採用されるようになった。この40倍発泡ウレタンを使用した裏込注入工法の説明を中心に、従来のセメント系注入工法との違い等を解説する。

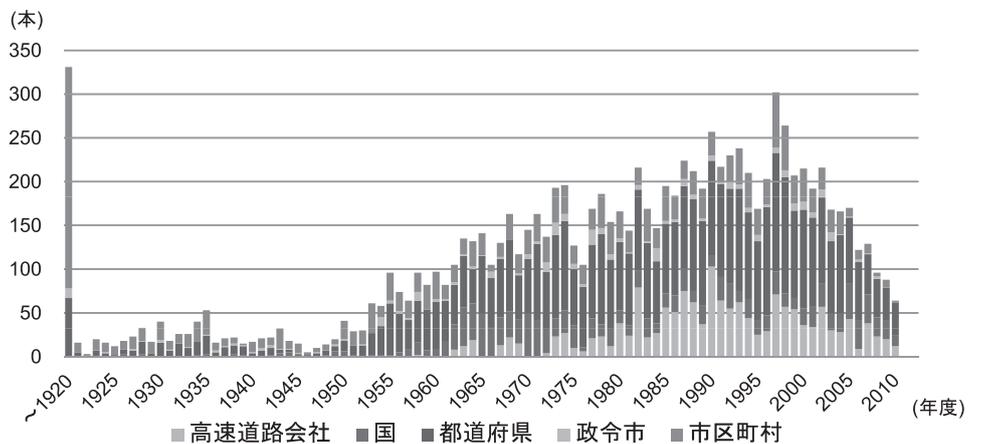
キーワード：トンネル補修、裏込注入、発泡ウレタン、40倍発泡、ノンフロン

## 1. はじめに

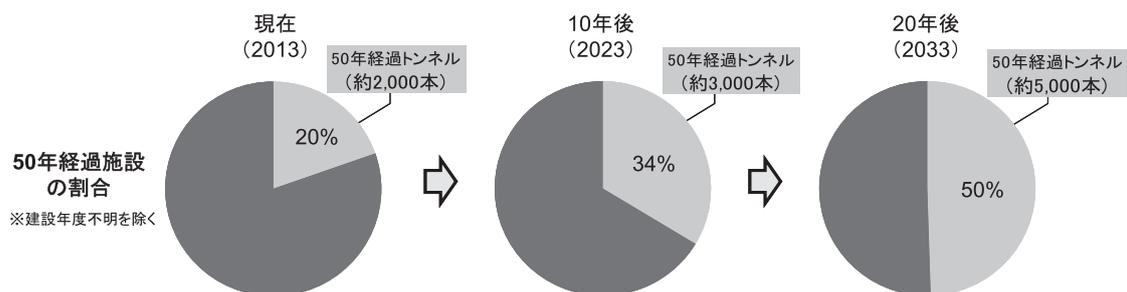
近年、「笹子トンネル天井板崩落事故」等により、土木構造物の老朽化問題が注目されている。高度経済成長期である1960～70年代から道路トンネルの建設本数は急増しており（図一1）<sup>1)</sup>、現在20%ある建設

後50年以上経過した道路トンネルが10年後には34%、20年後には50%に急増する見込みである（図一2）<sup>1)</sup>。今後これらの老朽化したトンネルを定期的に点検・診断し、適宜対策していくことが求められている。

国土交通省は、今年6月に「道路トンネル定期点検



図一1 建設年度別道路トンネル本数



図一2 50年経過トンネル割合推移

要領」<sup>2)</sup>を策定、7月にはすべての道路管理者に対し法令に基づくトンネルの定期点検を義務付けた。また、地区毎に国・都道府県・市町村・高速道路会社等が連携する「道路メンテナンス会議」も次々と設置され、地方公共団体の維持管理に関する問題点である人不足・技術力不足・予算不足を改善するべくさまざまな対応がなされている。

## 2. 矢板工法によるトンネルの背面空洞

高度経済成長期に山岳トンネルで主に採用されていた矢板工法では、覆工背面に空洞が残ることが多く、地質条件によってはこの空洞が原因で、地震や豪雨等により地山の突発性崩壊が発生し、トンネルの損傷や事故につながる可能性がある(図-3)。国土交通省が策定した「道路トンネル定期点検要領」にも「過去において、矢板工法で施工されたトンネルで、アーチ部の有効な覆工厚が30cm以下で、覆工背面に30cm程度以上の空げきがあり、かつ背面の地山が岩塊となって崩落する可能性のある場合、覆工表面には比較的軽微な変状しか見られなかった状態でトンネルが突然崩壊する突発性崩壊が生じた事例がある。」と記載されている。



図-3 背面空洞イメージ

現在、山岳トンネルで多く採用されている NATM 工法は空洞が生じにくいと言われているが、道路トンネルにおいては1990年頃から本格的に採用されており、現存する国内の道路トンネル約10,000本(総延長距離約4,000km)のうち過半数は矢板工法によるトンネルと推定される。鉄道トンネルにおける NATM 工法の採用は、1976年の上越新幹線中山トンネルで一部 NATM 工法を試行したことを転機に広まったと言われているが、ほとんどのトンネルがそれ以前に建設されており(JR 関連のトンネル総延長距離約2,300km)、多くの矢板工法によるトンネルが存

在すると考えられる。

## 3. トンネル補修工事の課題

トンネルに限らず補修工事の大きな課題として、現在共用している交通等を如何に妨げることなく施工するか?という問題がある。とくにトンネルに関しては迂回路がない場合が多く、道路トンネルでは片側車線規制で施工することがほとんどである。また、交通量が多い場合は夜間での規制工事となる。ましてや鉄道トンネルの場合、列車を止めることは通常不可能なので、列車が走っていない夜間2~3時間程度(軌電停止可能時間)での対応となり、水路トンネルにおいても通水を止められる期間は、かなり限定されることが多い。

このような制約の多い条件で施工するためには、機動性に富むコンパクトな機械設備で施工できる工法が望ましい。且つ夜間でも材料供給に支障がないよう、現場近くに材料を保管しておけることがいいと考えられる。

## 4. 本工法の概要

本工法は、古いトンネルの覆工背面の空洞に発泡ウレタンを注入充填することで、トンネルの損傷や災害を防除する補修工法(裏込注入工法)であり(図-4)、トンネルの老朽化対策に有効な工法と考える。

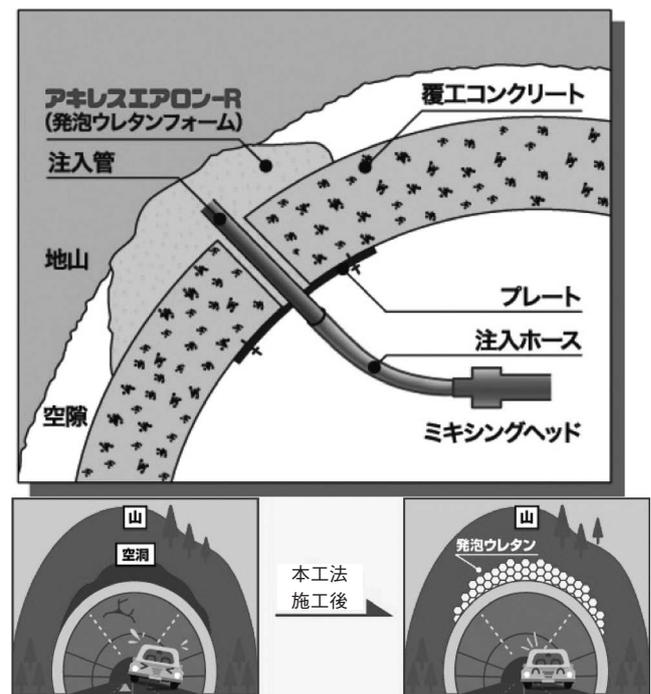


図-4 注入状況イメージ

主な特長は、①密度が30～100 kg/m<sup>3</sup>と超軽量なため、覆工への荷重負荷を軽減できる、②注入設備がコンパクトで、注入材料詰めトラック1台に積載可能、③数分で固化するので、材料流出の危険性が少ない、④ノンフロン発泡で地球環境に配慮、などが挙げられる(図-5)。とくに片側車線規制での工事となることが多い道路トンネル(写真-1)や夜間の短時間施工が必要な鉄道トンネル(写真-2)、小断面で延長の長い水路トンネルの補修工事には好適であると考えている。

また、従来の一般的な発泡ウレタン裏込注入工法に対する特長として、①地球温暖化係数の高いフロンを一切含まないノンフロン発泡、②注入プレートの設置で安全性が向上、③注入材はドラム缶からエアポンプで供給する簡単安心施工、④注入作業人員の削減でコストダウン可能等がある。

- 1 超軽量で安全性向上
- 2 注入設備がコンパクト
- 3 急速固化でリーク減少
- 4 環境対応型ノンフロン



図-5 本工法の特長



写真-1 道路トンネル施工状況



写真-2 鉄道トンネル施工状況

注入設備については、小型の注入機(写真-3)と発電機(25 KVA)、コンプレッサー(3.7 kW)のみであり、道路トンネルの場合4tトラック1台にこれら注入設備一式と1日分の注入材料を積載(図-6、写真-4)して施工できる。



写真-3 Tn-p 注入機

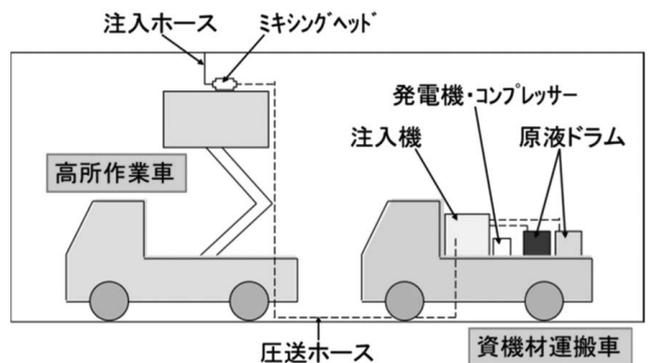


図-6 注入設備概要



写真-4 注入設備積載状況

## 5. 裏込注入工における発泡ウレタンの適用

### (1) 注入材の選定指針(圧縮強度)

現在、道路トンネル維持管理の指針となっている(社)日本道路協会(平成5年11月発行)の「道路トンネ

ル維持管理便覧<sup>3)</sup>では、注入材の選定の留意点のひとつに「前略…強度としては通常 10～15 kg/cm<sup>2</sup> 程度のものを用いる。」とあり、長い間、特殊な現場条件以外では、セメント系注入材が主に採用されてきた。とくに近年では、水による材料分離を起こしにくくと言われている可塑性エアモルタルが多用されるようになった。

(財)鉄道総合技術研究所(平成10年2月発行)の「変状トンネル対策工設計マニュアル」<sup>4)</sup>も注入材選定にあたっての留意点のひとつとして「前略…通常岩盤地山の場合で圧縮強度が1 N/mm<sup>2</sup>程度のものが用いられている。」とあり、農林水産省構造改善局(平成8年10月発行)の「土地改良事業計画設計基準 設計「水路トンネル」基準書 技術書」<sup>5)</sup>の注入材の選定項目のひとつに「注入材料の強度は、 $\sigma_{28} = 10 \text{ kgf/cm}^2$ 程度とする。」とある。東・中・西日本高速道路(株)(平成18年10月発行)の「矢板工法トンネルの背面空洞注入工 設計・施工要領」<sup>6)</sup>は、注入材の品質規格として「圧縮強度 1.5 N/mm<sup>2</sup>以上」と明記されている。これらいずれの指針もセメント系注入材を前提とした圧縮強度の設定になっていると思われる。

## (2) 各指針に相当する発泡ウレタン

従来は、前述した圧縮強度の指針(1.0 N/mm<sup>2</sup>)に相当する発泡ウレタンとして12倍発泡品が使用されてきた。これは、セメント系注入材である可塑性エアモルタルと比べて直工単価で約3倍となり、セメント系注入材で対応できない条件でのみ使用された。また、一部で現場の設計条件によって、より安価な20倍発泡品や30倍発泡品も適宜使用されてきたが、当時最も安価であった30倍発泡品でも可塑性エアモルタルより直工単価で約1.2～1.3倍のコスト高となり、機械設備が比較的大掛かりであるセメント系注入材ではトータルコストが高くなりがちな小規模物件での採用がほとんどであった。

## (3) 道路トンネルの新たな指針(案)

平成15年2月に(独)土木研究所が示した「道路トンネル変状対策工マニュアル(案)」<sup>7)</sup>(以下、「マニュアル(案)」という)の設計基準強度は、「前略…セメント系材料の場合、一般に品質管理上1 N/mm<sup>2</sup>以上あればよいといわれている。…中略…注入後の材料品質のばらつきを少なくするために、余裕を見込んで設計基準強度(28日強度)を1.5 N/mm<sup>2</sup>以上とする。」とある。その一方で、「発泡ウレタン系の場合には…中略…対策の目的(外力対策、地山の突発性崩壊対策

等)により、対策工の設計者が個別に設計基準強度を設定する(セメント系注入材の設計基準強度は、材料の品質管理上の理由から設定された値であり、一律これに準じて同じ値を用いる必要はない。)」と明記された。

この「マニュアル(案)」により、セメント系注入材と発泡ウレタン系注入材を圧縮強度において、必ずしも同列に扱う必要のないことが初めて公的機関において示された。

## (4) 注入材の圧縮強度に関する考察

平成6年の土木学会で発表された論文「欠陥を有するトンネル覆工の変形挙動と内面補強工の効果」<sup>8)</sup>に、裏込注入工及び内面補強工の効果を模型実験と骨組解析により検討したものがある。

裏込注入工の模型実験では、天端巻圧が不足しており60°の範囲に背面空洞があると想定し、①裏込注入なし、②軟質材(圧縮弾性係数3.0 Mpaの板ゴム)による裏込注入、③硬質材(圧縮弾性係数890 Mpaのエポキシ樹脂)による裏込注入の3パターンについて、徐々に覆工へ荷重をかけていき覆工内面の変位量を計測した結果が示されている。それによると、「前略…背面空洞への裏込注入工は覆工耐力の強化に大きな効果を発するが、その効果の程度は注入材料の剛性に大きくは左右されないことが分かる。」と結論づけている。

裏込注入材の剛性に関する骨組解析では、「裏込注入材の剛性が大きければ覆工の変形性は小さくなり、対策効果が向上することが分かる。しかしながら、ある程度以上は材料剛性を大きくしても顕著な変形抑制効果の向上は見られないことが分かる。これは、覆工模型実験結果から得られた傾向と一致している。」とあり、パラメータ感度解析結果グラフ(図-7)でも、裏込注入材の圧縮弾性係数が4 Mpa程度以上になると急激に覆工の変形性(変形抑制効果)が小さくなることが示されている。

本工法に使用する発泡ウレタンの圧縮弾性係数は、最も圧縮強度の低い40倍発泡品の実測値で約7 Mpa、最も圧縮強度の高い12倍発泡品の実測値で約27 Mpaである。現場の地盤条件や覆工の状態は様々であり、必ずしもこの論文の結果と同様のことが言えるとは限らないが、設計の目的が「マニュアル(案)」でいう外力対策であっても発泡ウレタンが適用できる可能性があるということを示唆しているのではないかと考える。

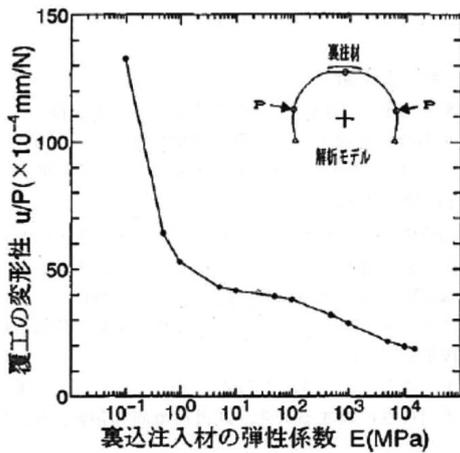


図-7 パラメータ感度解析結果グラフ

(5) 40倍発泡ウレタンの開発

平成18年(「マニュアル(案)」)が示された3年後、本工法の発泡ウレタン注入材として、経済的で優位性のある40倍発泡品が開発された。40倍発泡品は、材料費の削減だけでなく、「マニュアル(案)」に示された注入孔設置例より広い範囲まで充填できることを流動性試験により確認し(写真-5)、さらなるコスト削減と施工性の向上を図ることができた。図-8に注入孔設置例を示す。

この40倍発泡品の開発により、可塑性エアモルタルと直工単価でも同等となり(表-1)、セメント系



写真-5 流動性試験状況

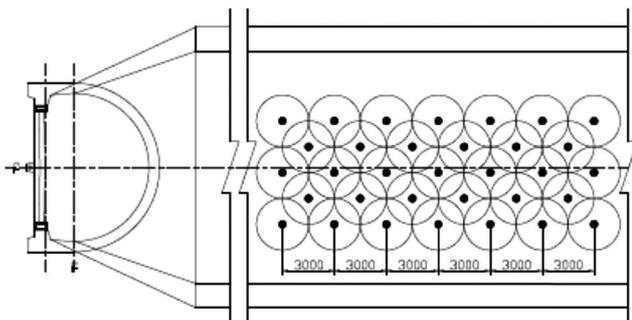


図-8 注入孔設置例

表-1 注入材の比較表

充填材料	発泡ウレタン	可塑性エアモルタル
直工単価	約43,200円/m <sup>3</sup>	約44,900円/m <sup>3</sup>
注入設備	車両2台	車両7台程度
固化時間	10分程度	約24時間
施工能力	20~50m <sup>3</sup> /日	25~35m <sup>3</sup> /日
材料物性	密度:30~100kg/m <sup>3</sup> 圧縮強さ:0.2~1N/mm <sup>2</sup>	密度:1,100kg/m <sup>3</sup> 圧縮強さ:1.5N/mm <sup>2</sup>

表-2 近年の主な施工事例

地区	物件名	発注者
福島県	車トンネル補修工事	国)郡山国道事務所
愛媛県	大場の鼻トンネル補修工事	国)大洲河川国道事務所
高知県	国道439号(矢筈トンネル)防災・安全交付金工事	県)須崎土木事務所
愛媛県	蓮乗寺トンネル補修工事	国)大洲河川国道事務所
愛媛県	国道197号災害防除工事(大峠トンネル)	県)八幡浜土木事務所
静岡県	伊東修善寺線トンネル防災工事(冷川トンネル補修)	県)沼津土木事務所
群馬県	新天神山トンネル補修工事	県)安中土木事務所

注入材に比べ注入設備がコンパクトで品質管理も比較的容易な発泡ウレタンは、「マニュアル(案)」に示されたように地山の突発性崩壊対策を目的とする道路トンネルには、多く採用されるようになった。表-2に40倍発泡ウレタンの近年の主な施工事例を示す。

(6) 環境に対する配慮

公共工事において経済性や施工性は、工法選定における重要な要素であるが、環境に対する影響も忘れてはならない。セメント系注入材はアルカリ成分による農作物への影響が懸念されるが、本工法の発泡ウレタンは、中日本高速道路(株)(平成17年10月発行)の「山岳トンネル工法におけるウレタン注入の安全管理に関するガイドライン」<sup>9)</sup>(以下、「ガイドライン」という)に適合した注入材であることを溶出試験により確認している。施工現場においても「ガイドライン」に示された「地下水等の水質管理」に準じて水質監視を実施しており、とくに「ガイドライン」において重点項目とされるpHと過マンガン酸カリウム消費量(有機物量)については、施工中毎日水質確認を行っている。なお、発泡ウレタンはpHを6程度の弱酸性にする性質を持つ。

また、発泡剤に地球温暖化係数の高いフロン(CO<sub>2</sub>の約800~1,000倍)<sup>10)</sup>を使用した発泡ウレタンが、いまだに多く使用されているが、本工法の発泡ウレタンは、フロン類を一切含まないノンフロン発泡であり、地球環境にも配慮した注入材料である。

## 6. トンネル以外での適用事例

本工法は、コンパクトな注入設備や超軽量、急速固化等の特長を活かし、トンネル補修以外の分野でも使用されている。発泡ウレタンは比較的酸やアルカリにも安定した注入材であり、劣化要因となる紫外線が当たらない環境であれば、様々な空洞充填に適用できると考えられる。以下にトンネル補修以外の分野での適用事例を紹介する。

### (1) 深礎杭のライナープレート背面

通常、深礎杭のライナープレート背面にはグラウト注入で空洞充填するが、周辺地盤が脆く崩れやすいため、急速固化が可能な発泡ウレタンを注入充填した(写真-6)。本工法は、注入機の取扱いや注入材の品質管理も比較的容易なため、数日の技術指導で現場作業員にも施工可能であり、施工期間の長い深礎杭工事でも対応できる。ライナープレートは加工時に水抜き穴を加工できるので、この水抜き穴を注入孔及び確認孔として利用した。



写真-6 深礎杭での施工状況

### (2) 既設擁壁の空洞充填

古い石積み擁壁の背面に空洞ができたため、この空洞に発泡ウレタンを充填して補修することを計画。当初は安価なエアモルタルで計画検討していたが、擁壁の安定性等を考慮し、密度がエアモルタルの約1/30と超軽量の40倍発泡ウレタンで計画することとなった。石積み擁壁の下には国道があり、コンパクトな注入設備で施工できる本工法は、施工時の安全性等でも優位性があると考えられる。

## 7. おわりに

(独)土木研究所の「マニュアル(案)」が示されたこともあり、国土交通省や各地方公共団体の道路トンネルでは40倍発泡ウレタンが急速に普及し始めている。その他、ダム等の導水トンネルや(独)水資源機構の水路トンネルでは、一部40倍発泡ウレタンが採用されている。しかし、いまだ鉄道トンネルや農業用水路トンネルでは、ほとんど採用されていない。各高速道路会社が管理する道路トンネルも同様である。

今後、老朽化したトンネルが増加することは自明であり、これらを維持管理していくためには、あらゆる面で効率的な維持補修工法が求められると考える。コストの問題だけではなく人員不足も深刻化してきており、作業工程や機械設備面においても省力化が必要であると考えられる。

本工法 Tn-p 工法は、経済性・施工性・安全性・品質の安定性・環境対応性等の改良改善を積み重ねることで、現場に即した様々なソリューションを提供できるものと確信している。

JICMA

### 《参考文献》

- 1) 国土交通省「道路構造物の現状(トンネル)」2013年4月
- 2) 国土交通省「道路トンネル定期点検要領」2014年6月
- 3) (社)日本道路協会「道路トンネル維持管理便覧」1993年11月
- 4) 財団法人総合技術研究所「変状トンネル対策工設計マニュアル」1998年2月
- 5) 農林水産省「土地改良事業計画設計基準 設計「水路トンネル」基準書 技術書」1996年10月
- 6) 東・中・西日本高速道路(株)「矢板工法トンネルの背面空洞注入工 設計・施工要領」2006年10月
- 7) (独)土木研究所「道路トンネル変状対策工マニュアル(案)」2003年2月
- 8) 朝倉俊弘、安東豊弘、小俣富士夫、若菜和之、松浦章夫「欠陥を有するトンネル覆工の変形挙動と内面補強工の効果」土木学会論文集 No.493/Ⅲ-27,pp.89-98 1994年6月
- 9) 中日本高速道路(株)「山岳トンネル工法におけるウレタン注入の安全管理に関するガイドライン」2005年10月
- 10) 経済産業省「フロン類使用製品の低GWP・ノンフロン化促進制度のあり方について」2013年12月

### 【筆者紹介】

田中 弘栄 (たなか ひろしげ)  
アキレス(株)  
開発営業部  
主任技術員

