

技術報文

現場発泡ウレタンによるトンネル覆工背面の空洞充填

アキレス（株）防災販売部 田中 弘栄
 岡三リビック（株）営業部門 沼田 治

1. はじめに

2014年に全国の橋梁およびトンネルの5年に1度の点検義務化がスタートし、2019年には点検が2巡目に入っている。国土交通省の道路メンテナンス年報¹⁾によると、道路トンネルは全国に約11,000本あり、そのうち2022年3月末現在約24%ある建設後50年以上経過したトンネルが、10年後には約38%に増加する見込みである（図-1）。また、1巡目の点検で判定区分Ⅰ、Ⅱだったものが5年後の2巡目の点検で判定区分Ⅲ、Ⅳに遷移したものは全体の20%あり、とくに建設後21年以上経過したトンネルでの割合は高くなっている（図-2）。

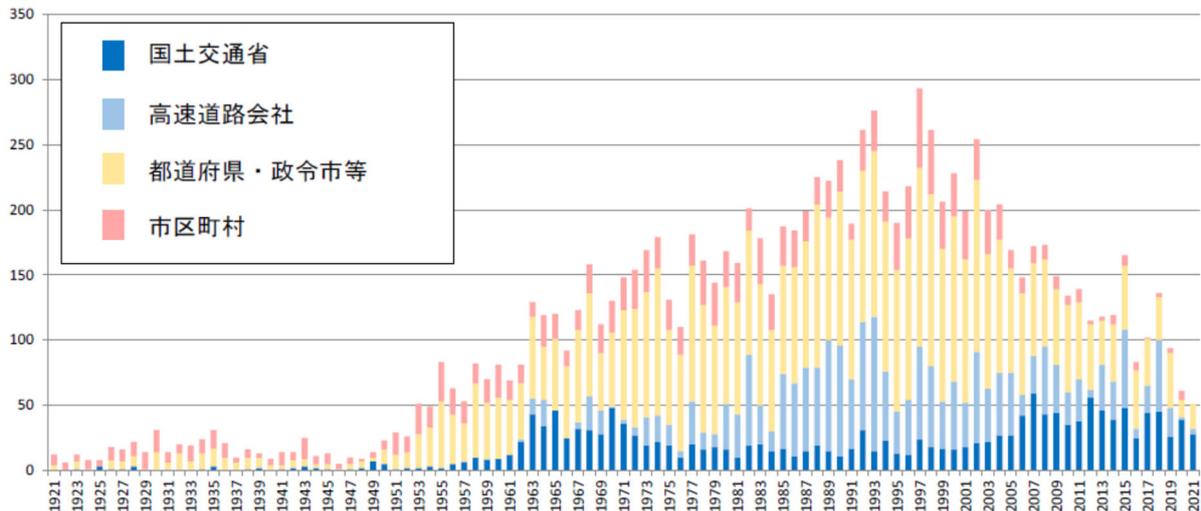


図-1 建設年度別トンネル本数¹⁾

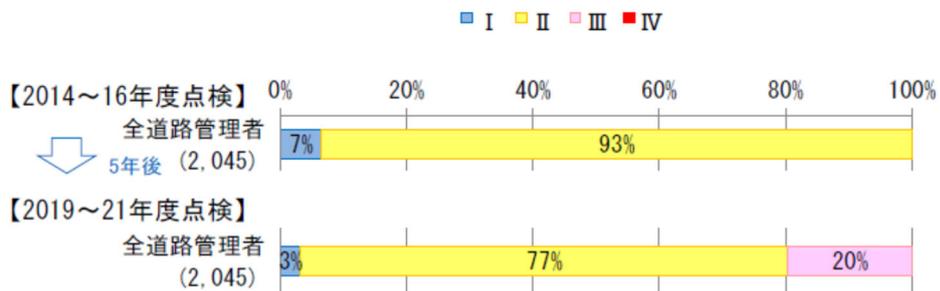


図-2 点検2巡目での遷移状況¹⁾

2. 「Tn-p 工法」（トンネル裏込補修用ウレタン注入工法）の概要

Tn-p 工法は、既設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、地震等の災害時に突発性崩壊によるトンネルの損傷を防止する工法である（図-3）。数分で固化するため、トンネル覆工背面の空洞への注入工事のほか擁壁背面や中空床版橋のボイド管等いろんな構造物

の空洞を充填する工事に適用されている。



図-3 Tn-p 工法のイメージ図

(1) 材料物性

Tn-p 工法で使用する発泡ウレタンは、要求される圧縮強度により 7～40 倍発泡があり、その基本物性は表-1 のとおりである。

表-1 材料の基本物性

項目	単位	品 種					
		SK-01	SK-02	SK-03	SK-04	SK-05	SK-06
発泡倍率	倍	30	40	12	20	8	7
密度	kg/m ³	40±4	30±3	100±20	60±9	150±30	175±30
圧縮強度	N/mm ²	0.20 以上	0.14 以上	0.90 以上	0.45 以上	1.00 以上	1.50 以上

(2) 特長

Tn-p 工法の主な特長は、①密度が約 30kg/m³ (40 倍発泡の場合) と超軽量なため、覆工への荷重負担を軽減できる ②注入設備がコンパクトで、注入材含め 4t トラック 1 台に積載が可能 (図-4) ③数分で発泡固化するので、材料流出の危険性が少ない ④ノンフロム発泡で地球環境に配慮、などが挙げられる。とくに片側車線規制での工事 (写真-1) となることが多い道路トンネルの補修工事では、施工途中での坑内への材料供給が不要となるため、従来工法であるセメント系注入工法に比べ、安全性の向上を図ることができる。

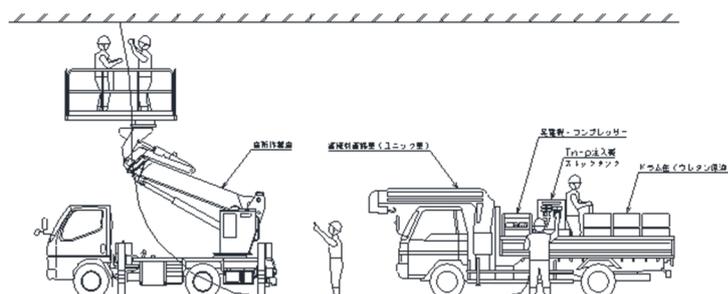


図-4 Tn-p 注入設備の概要



写真-1 片側車線規制での施工

3. 「Tn-p 工法」の設計施工

(1) 設計方法

道路トンネルの場合、基本的には(公社)日本道路協会が発行している「道路トンネル維持管理便覧【本體工編】」(令和 2 年 8 月)²⁾ (以下、「便覧」という)に準拠して設計している。まず材

料選定においては、「背面空洞の状態、覆工コンクリートの巻厚や強度、湧水状況、地質状況、坑内外の施工ヤードの状況、環境に与える影響、施工性、経済性、施工量を考慮し、適切なものを選定する。」としている。表-2 に材料選定の目安を示す。

材料選定の目安からもわかるとおり、発泡ウレタンを選定するポイントとしては、①巻厚不足や有効巻厚が減少している場合②湧水が多い場合③車線規制で施工する場合④夜間施工で生コン工場の稼動が困難な場合⑤地下水への影響が懸念される場合等が挙げられる。その他、施工性や経済性等を勘案して、適用する工法を選定する必要がある。

表-2 材料選定の目安²⁾

選定項目		セメント系				非セメント系 発泡ウレタン
		非可塑性注入材		可塑性注入材		
		非エア系	エア系	エア系	非エア系	
		モルタル、セメントベントナイト	エアモルタル、エアミルク	エアモルタル+添加剤	ポリマーセメント	
覆工への影響	荷重増加	大	中		小	
巻厚不足箇所への適用		内巻補強工、内面補強工等の検討を要する				可(ただし、注入圧や発泡圧の検討が必要)
湧水箇所への適用性		適	不適 (材料分離しやすい)	適	適	
空洞細部への充填性		充填しにくい	細部まで充填できる	加圧により充填できる	注入孔を設けることで充填できる	
車線規制下での施工機材配置		内空断面が小さい場合には要注意				施工機材が小規模でとくに注意を要さない
坑外の仮設ヤード		坑内で直接生コンを荷受けできない場合必要				不要
施工後の坑内排水pH		変動する可能性あり				変化しない ^{注1)}
冬施工		可				10℃以下の場合には注意を要する ^{注2)}
備考		機械化による大量施工に不向き	—	近年、新材料の開発、適用例が増えている	—	

また、便覧では発泡ウレタンの設計基準強度の選定基準として、「緩み土圧等の外力対策を目的とした注入なのか、空洞があっても長期間安定していた地山での、将来の突発性崩壊の防止を目的とした注入なのかなどの対策の目的を明確にし、個別に設計基準強度を設定する。」とある。「既存の材料には数倍から 40 倍発泡までの材料があるが、外力対策が必要な場合には、12 倍程度の材料が用いられている。」と示されている。これは、対策の目的が突発性崩壊対策であれば、40 倍発泡の発泡ウレタンでも問題ないことを示唆していると考えられる。表-3 に対策の目的別の発泡ウレタン選定の目安を示す。Tn-p 工法においては、突発性崩壊対策では「SK-02」、外力対策では「SK-03」が選定されることになる。

表-3 発泡ウレタン選定の目安³⁾

なお、道路トンネルでの実績としては最も経済性に優れた SK-02 (40 倍発泡) の採用事例が多い。

項目	発泡倍率	設計基準強度
対策の目的		
突発性崩壊対策	40倍	0.14N/mm以上
外力対策	12倍	0.90N/mm以上

(2) 注入孔の配置と充填性

Tn-p 工法では、流動性試験³⁾ (写真-2、3) において SK-02 (40 倍発泡) の流動性を確認しており、SK-02 についてはφ3m 程度を充填範囲と想定して注入孔を配置している。図-5 に SK-02 の注入孔の配置例を示す。また、H 鋼等の障害物がある場合の充填性試験³⁾ (図-6、写真-4) や実物大

のトンネル覆工背面の空洞を模した型枠 (t300×W3084×L上 2500/下 3000 mm) への充填性試験³⁾
 (図-7、写真-5~9) を行い、トンネル覆工背面の空洞への充填性についても検証している。

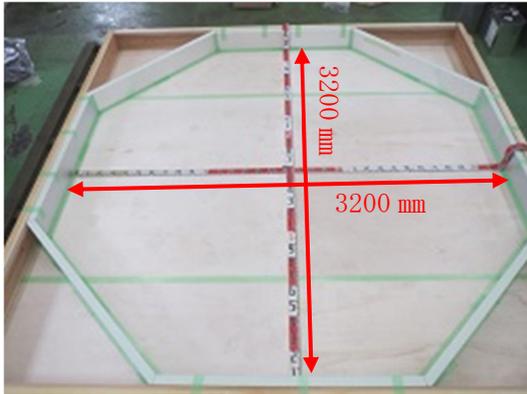


写真-2 流動性試験 (充填前)

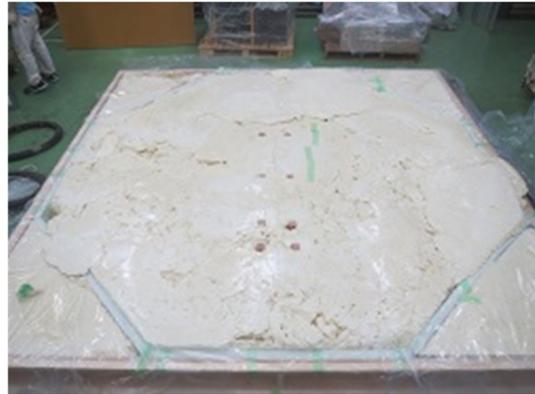


写真-3 流動性試験 (充填後)

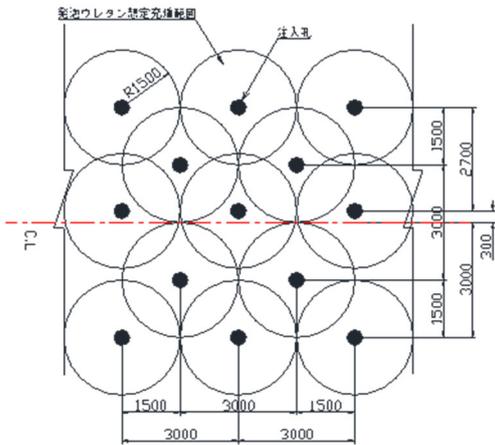


図-5 SK-02 の注入孔配置例



写真-4 充填性試験 (障害物あり)

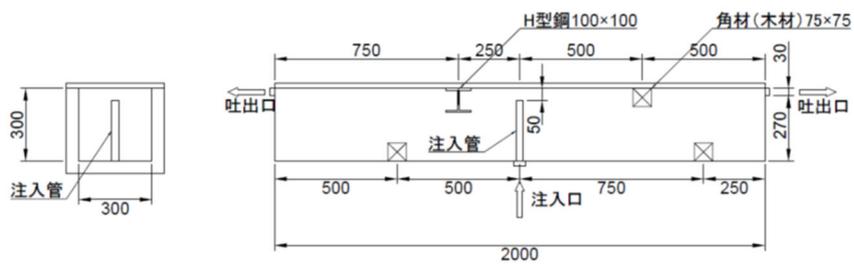


図-6 充填性試験 (障害物あり)

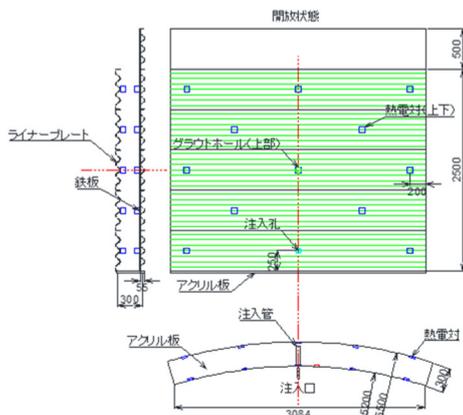


図-7 実物大充填性試験

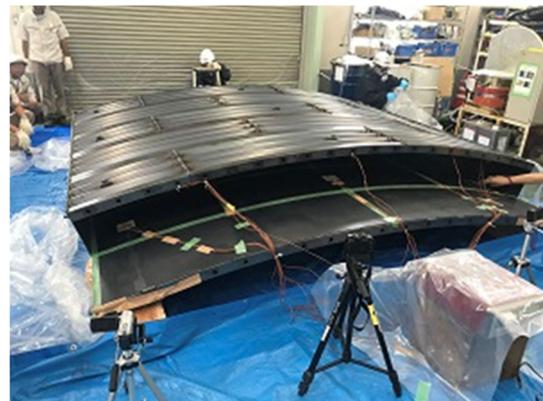


写真-5 実物大充填性試験の型枠



写真-6 充填状況（注入孔側）

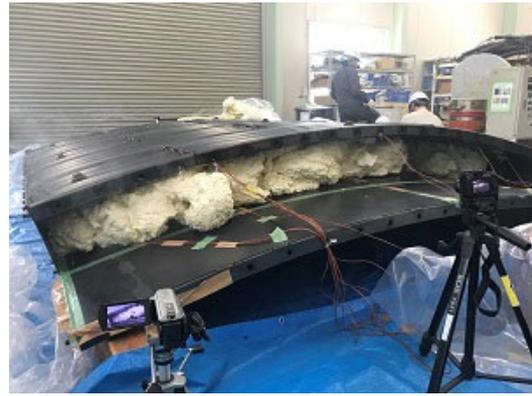


写真-7 充填状況（下流側）



写真-8 解体後充填状況（上面側）



写真-9 解体後充填状況（下面側）

(3) 施工手順

Tn-p 工法の施工手順を図-8、写真-10~13 に示す。Tn-p 工法の大きな特長は、注入管を固定するために注入プレートを使用することである。注入プレートで固定することにより、注入中の注入管抜け落ちによるウレタン原液の飛散リスクを軽減し安全性を高めることができる（写真-12）。

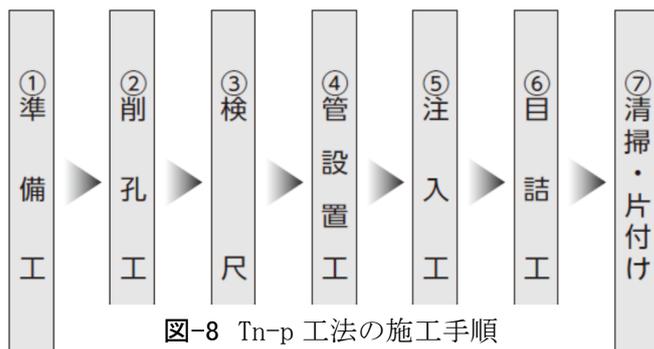


図-8 Tn-p 工法の施工手順



写真-10 ②削孔工

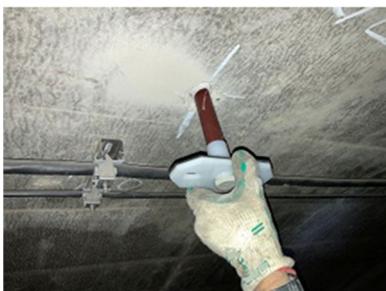


写真-11 ④管設置工



写真-12 ⑤注入工



写真-13 ⑤目詰工

4. 「Tn-p 工法」の採用事例

Tn-p 工法の採用実績としては、全体の約 8 割が道路トンネルであり、近年は水路トンネル（写真-14）の採用事例も増えており全体の約 1 割を占めている。残りが鉄道トンネル（写真-15）やその他構造物の空洞充填である。また、発泡倍率については先に述べたとおり過去 3 年間の実績では 94%が SK-02（40 倍発泡）である。



写真-14 水路トンネル



写真-15 鉄道トンネル

トンネル以外の採用事例について以下紹介する。

(1) 橋台背面の空洞充填

橋台の背面盛土が沈下し、橋台と盛土の間に生じた空洞を埋めるため軽量の Tn-p 工法が採用された。Tn-p 工法の発泡ウレタンは数分で発泡固化して 24 時間で設計強度に達するため、養生期間を短くでき工期短縮につながった。施工状況を写真-16 に示す。



写真-16 橋台背面の空洞充填

(2) 古墳石積みの空洞充填

古墳の大きな石積みの隙間に雨水の洗堀による空洞が生じており、軽量で早期固化、設備もコンパクトな Tn-p 工法が採用された。また、古墳の石積みが文化財のため、そのまま発泡ウレタンを注入すると石積みが発泡ウレタンが接着してしまうため、ジュウテンバッグという特殊な空洞充填用の袋体を事前に空洞内に設置し、そのバッグ内に発泡ウレタンを注入充填した。施工状況を写真-17、18 に示す。



写真-17 古墳石積みの空洞充填



写真-18 ジュウテンバッグ内に注入

5. まとめ

我々は、予防保全に有効なトンネル補修技術「Tn-p 工法」の品質・施工技術の向上及び普及拡大を目的に、2016年4月に「発泡ウレタン空洞注入協会」を設立し、2023年5月現在61社が活動している。協会活動として技術講習会を3回/年程度開催し、受講者には修了証を発行する等協会の意識向上と安全で品質の高い施工技術を習得するべく日々研鑽を積んでいる。今後も協会員とともに「Tn-p 工法」を広めていくことで、国土強靱化の一助となるよう微力ながら邁進していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省「道路メンテナンス年報」2022年8月
- 2) (公社)日本道路協会「道路トンネル維持管理便覧【本体工編】」令和2年8月.
- 3) 発泡ウレタン空洞注入協会「Tn-p 工法技術マニュアル」令和4年10月