

研究成果報告書

研究開発課題名	トンネル空洞への現場発泡硬質ウレタンフォーム充填による機能回復技術の開発
研究総括者	長束 勇（島根大学生物資源科学部教授）
研究開発組合	アキレス株式会社 アップコン株式会社 岡三リビック株式会社 株式会社ジオデザイン
試験研究機関	国立大学法人島根大学 石川県公立大学法人石川県立大学

1 事業の実施内容

1.1 事業の背景及び目的

国営造成施設調査による“農業水利施設ストックデータベース”によれば、多くの農業用水路トンネルには大きな変状が発生しており、ストックマネジメントの観点から、その補修・補強が喫緊の課題となっている。

一方、農業用水路トンネルに発生している変状は農業水利施設特有の変状であり、農業水利施設以外の分野の工法の採用は不合理・不経済となる場合が多く、その変状の発生メカニズムを明らかにし、発生メカニズムを踏まえた合理的な補修・補強工法の開発が望まれている。

本研究開発事業では、特殊な現場発泡硬質ウレタンフォーム（以下、発泡ウレタン）を用いることにより、覆工背面に作用する圧力を制御して、空洞充填によるトンネル覆工の機能を補強または回復させる“改修工法”を開発することを目的とする。

1.2 事業の内容及び実施方法

(1) トンネル覆工空洞の実態把握

行政部局で収集されている事故事例を含む変状調査事例や機能保全対策工事事例の中から、本充填技術で対応できると考えられる事例を抽出する。抽出した事例を、トンネルの形式、変状の発生原因、変状の程度などにより典型的なタイプに分類し、タイプごとに詳細な実態を把握するための現地調査を行う。特に、現状の安定性を検討する事例については、数値解析に必要な各種データを取得する。

(2) 充填材料の目標性能の設定

空洞の充填による応力状態の変化が、覆工のひび割れや損傷を悪化させないことが重要であり、そのことを満足する充填工法とそのための充填材料を開発する必要がある。そこで、充填材料については、力学的な視点と耐久性の視点の両面から検討を行い、実現すべき力学的要求性能と耐久性の要求性能について具体的に数値を設定する。

（発泡圧、圧縮強さ、弾性係数、環境影響、長期耐久性）

(3) 充填材料の開発

発泡ウレタンの充填材料に要求される力学的性能を実現するため、適切な反応性と密度を得るための原料の配合の開発を行う。また、開発した材料の適切な発泡条件を確立する。

(4) 充填材料の特性及び耐久性の評価

前項により開発した材料の、発泡圧、圧縮強さ・曲げ強さ等の力学的性能を評価し、適切な密度と反応性を有する充填材料の条件を確立する。

その条件によるその他特性と耐久性（ 吸水率， 寸法安定性， 透水性， 流動性， 圧縮クリープ特性， 吸水による強度変化， 高温高湿下における強度変化， 溶出物の確認等）を評価する．

(5) 覆工背面を充填したトンネルの性能評価方法の開発

大学が開発している破壊解析を改良することによって，また，充填前の状況データを入力することによって，トンネルの現況性能を評価する．次に，充填施工中の覆工変位量などの事前予測解析を行い，充填施工中の安全性の確保と適正な充填施工の進展を図る．さらに，充填施工中および施工後の変状の回復状況，地圧の発達状況などをモニタリングし，要求性能の満足度合いを評価する．これら一連の評価を具体的に実施するためのノウハウの詳細を明らかにする．

(6) 品質管理を組み込んだ施工システム（充填工法）開発

本工法の目標性能が十分に満たされるような施工方法，管理手順を確立する．

プラント設備の開発

施工手順の確立

注入管理の確立

品質管理の確立-現場での日常の品質管理手法の確立

その他安全管理等-施工時の安全管理体制等の確立

実証試験に先立ち室内圧入実験による検証

(7) 品質管理・維持管理方法の開発

品質管理技術の開発

a) 発泡ウレタンの発泡時での高温に対応した圧力計および計測システムの開発

b) ひずみゲージタイプによるトンネル内空の変状計測システムの開発

c) レーザー変位計を用いた簡易多点計測システムの開発

d) 温度センサーを利用した温度計測システムの構築

維持管理技術の開発

a) 施工管理で用いた簡易多点計測システムの利用

b) トンネル変状調査ロボットの利用

(8) 実証試験

品質管理を組み込んだ施工システム（充填工法）の開発および品質管理・維持管理手法の開発に基づいた実現場における実証実験を実施し，本工法の目的が満足されているか否か等のデータ類の収集，および検証を繰り返し行い，本工法を確立する．

(9) 機能監視

実証試験後の経過観察をするため，実証試験完了約 1 年後のトンネル躯体の変位等の確認をする．

1 . 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

技術的問題点	対応
ひび割れ発生状況に応じた注入圧の確認	躯体および空洞調査を実施した結果を用いて，事前に数値解析（有限要素法など）による検討を行う．
材料の特性に応じた注入仕様	加圧式裏込注入工法に適用する材料は，A 液と B 液の反応速度を変化させる． 空洞充填工法と加圧式裏込注入工法の施工機器を変える．
ウレタンの加圧力の計測(施工管理)	注入時にウレタン発泡圧力を測定できる圧力センサーを開発する．

1.4 事業の実施体制

(1) 研究開発組合内の役割分担

個別研究テーマ	新技術研究開発組合			
	アキス	アップコン	岡三	ジ・デザイン
トンネル覆工空洞の実態把握				
充填材料の目標性能の設定				
充填材料の開発				
充填材料の特性及び耐久性の評価				
覆工背面を充填したトンネルの性能評価方法の開発				
品質管理を組み込んだ施工システム（充填工法）開発				
品質管理・維持管理方法の開発				
充填工法の現場実証試験				
機能監視				

(2) 試験研究機関と研究開発組合の役割分担

個別研究テーマ	セクター B		新技術研究開発組合			
	島根大学	石川県大	アキス	アップコン	岡三	ジ・デザイン
トンネル覆工空洞の実態把握						
充填材料の目標性能の設定						
充填材料の開発						
充填材料の特性及び耐久性の評価						
覆工背面を充填したトンネルの性能評価方法の開発						
品質管理を組み込んだ施工システム（充填工法）開発						
品質管理・維持管理方法の開発						
充填工法の現場実証試験						
機能監視						

1.5 事業の年度計画と実績

項目	平成 22 年度		平成 23 年度		平成 24 年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
トンネル覆工空洞の実態把握	■	■				
充填材料の目標性能の設定		■		■		
充填材料の開発		■	■	■		
充填材料の特性及び耐久性の評価		■	■	■		
覆工背面を充填したトンネルの性能評価方法の開発			■	■	■	
品質管理を組み込んだ施工システム（充填工法）開発			■	■		
品質管理・維持管理方法の開発		■	■	■	■	
充填工法の現場実証試験				■	■	■
機能監視						■

注) ■ は計画, ■ は実績.

1.6 研究開発の概要, 結果, 課題等

(1) トンネル覆工空洞の実態把握

収集事例

「農業水利ストック情報データベースシステム」の水路トンネル(1390件)から,水路トンネルを分類した結果,馬蹄形(66.6%),ほろ型(30.2%),円形(3.2%)であった.

抽出理由

上記に示したように水路トンネルで使用頻度の最も多い,馬蹄形とした.

トンネル形式、変状要因のタイプ分類

図-1.6.1.1 にトンネル形式、変状要因のタイプ分類を示す.ここで,内部要因はひび割れ,浮き,剥離・剥落,鉄筋露出など,外部要因は,変形・ひずみ,欠損・損傷,不同沈下,目地の変状は目地開き,段差,止水板の破断,漏水である.変状要因は,トンネル形式に依存しない.

対象とする変形形態

供用中のトンネルに発生したひび割れに多く見られる特徴は,スプリングライン付近に生じている点である.これらのひび割れ原因として,トンネル天端背面に存在する空洞が考えられる.この空洞は,施工技術の未熟な時代に施工されたトンネルで多く見られ,図-1.6.1.2 に示すように天端部分の裏込めコンクリートが充填不足となることで,発生したものと推察されている.設計時に前

■内部要因 ■外部要因 ■目地の変状

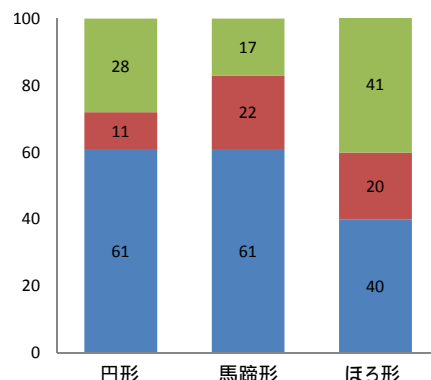


図-1.6.1.1 トンネル形式、変状要因のタイプ分類

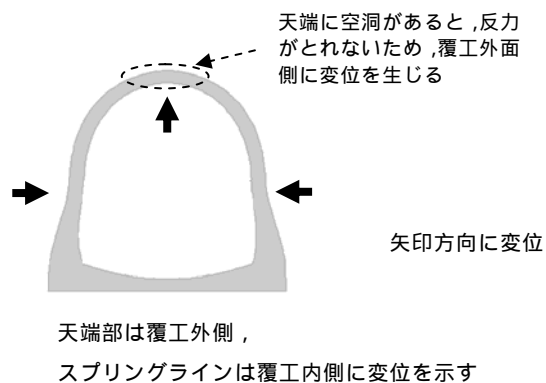


図-1.6.1.2 トンネルの推定変形形態

提としたトンネル外周地圧が全周等分布の状態になるという状況を満足しなくなり、ひび割れが発生した可能性がある。

(2) 充填材料の目標性能の設定

1) 空洞充填工法

本研究では、発泡倍率の異なる発泡ウレタンを用いてトンネルの裏込め充填工法を疑似再現することによって、適切な発泡倍率を検討した。荷重試験には、図-1.6.2.1 に示す分割エアバッグ荷重装置を用いた。分割エアバッグ荷重装置は、エアバッグに空気を注入し、その空気圧によって設置された供試体を荷重する装置である。図-1.6.2.2 に1点抜きにおける発泡ウレタンなし、発泡倍率40倍、30倍、20倍の4つのパターンの荷重圧力と変位の関係を示す。天端背面の空洞に発泡ウレタンが存在しない場合（以下「ウレタンなし」）と空洞部に発泡ウレタンが存在する場合（以下「ウレタンあり」）を比較すると、ウレタンなしの方が単位荷重増に対する変位量が大きくなっていることがわかる。特に、発泡ウレタンが存在しない場合のひび割れ発生後は、変位量が非常に大きくなっている。天端の変位を大きく許せば、スプリングライン覆工内面の引張応力が增大するため、ひび割れ幅が拡大する。しかし、ウレタンの存在によって、天端の外面向の変位が抑制されたため、ひびわれ幅の拡大も抑制されると考えられる。

2) 加圧式裏込め注入工法

加圧式裏込め注入工法では、空洞を発泡ウレタンで充填させた後、さらにウレタンで充填された部分に発泡ウレタンによって加圧力を作用させるものである。そこで、加圧力が作用するか否かを検証するため、実大模型実験を

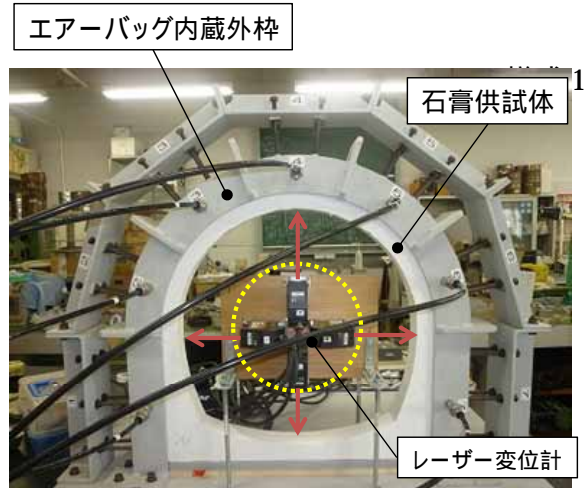


図-1.6.2.1 分割エアバッグ荷重装置

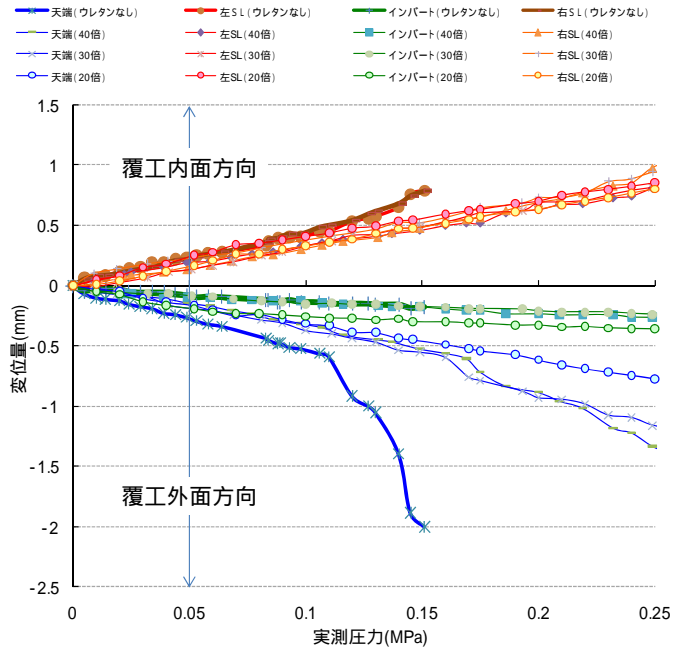


図-1.6.2.2 1点抜きにおける荷重圧力と変位の関係（発泡ウレタンなし，発泡倍率40倍，30倍，20倍）

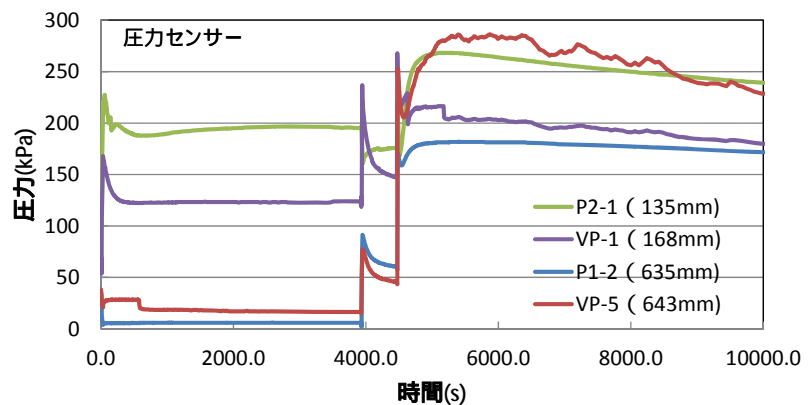


図-1.6.2.3 加圧式裏込め注入工法による躯体への加圧力

行った。実験では、圧力センサーを注入孔から 135mm～643mm 離れた位置に設置した。実験結果を図-1.6.2.3 に示す。図の凡例に示される括弧内は注入孔からの離隔を示している。図-1.6.2.3 を見ると、同一の発泡倍率（30 倍発泡）であるが、空洞充填時と加圧時とで発泡する時間（ゲルタイム）を変化させることで、躯体に加圧力を作用させることが可能であることが分かった。

これらのことから、空洞を充填するのみの空洞充填用の充填材料と、トンネルの機能を回復させるための加圧式裏込注入用の充填材料の目標性能は次のように設定した。

表-1.6.2.1 充填材料の目標性能

項目	空洞充填のみ (40 倍発泡：SK-02)	加圧用（タイプ A,B） (30 倍発泡：SK-01A,B)
泡圧	/	発泡圧（加圧力）については、トンネル躯体や天端空洞の状況に応じて解析的に求める
圧縮強さ		0.20 (N/mm ²)以上
性係数	0.14 (N/mm ²)以上	25(N/mm ²)以上
境影響	水道基準を満足すること。	
期耐久性	吸水による強度・圧縮特性に変化がないこと	

(3) 充填材料の開発

「(2) 充填材料の目標性能の設定」での検討結果を考慮し、農水路トンネル空洞充填用として以下の基本配合を開発した、また、空洞充填用としての適合性を確認した。表-1.6.3.1 に農水路トンネル空洞充填用基本配合の特性値を示す。

表 1.6.3.1 農水路トンネル空洞充填用基本配合の特性値

項目	単位	40 倍発泡 (SK-02)	30 倍発泡 (SK-01)	備考
混合液比重	-	1.18	1.19	
フリーフォーム密度	kg/m ³	30±3	40±4	
圧縮強さ	N/mm ²	0.14 以上	0.20 以上	JIS K 7220
クリームタイム	秒	14±5		
ゲルタイム	秒	60±10		

トンネルの空洞充填に当たっては空洞充填工法と加圧式裏込注入工法に対応した材料開発を行った。

1) 空洞充填工法用材料（機能回復を要しない充填のみ）

40 倍発泡品である SK-02 で充填が可能であることを確認した。

2) 機能回復工法用（加圧式裏込注入工法用）材料

充填材料

機能回復のための加圧用と同等の密度が必要であることから、機能回復用の充填材料としては「SK-01」が適切であることを確認した。

以下、加圧式裏込注入工法において、充填を目的とする材料を“タイプ A”とし材料品番を「SK-01A」とする。

加圧用材料

の「SK-01A」を充填後、機能回復加圧用ウレタンを注入し、この発泡圧によりトンネル天端躯体に圧力を加えるために、SK-01A と同密度とし、圧力管理上、早期に発泡させる必要があることから反応速度（ゲルタイム）の短縮をさせた。

加圧式裏込注入工法において、加圧用材料を以下“タイプ B”とし材料品番を「SK-01B」とする。

表-1.6.3.2 加圧用材料の特性値

項目	単位	30倍発泡 (SK-01A)	30倍発泡 (SK-01B)	備考
混合液比重	-	1.19	1.19	
フリーフォーム密度	kg/m ³	40±4	40±4	
圧縮強さ	N/mm ²	0.20以上	0.20以上	JIS K 7220
クリームタイム	秒	14±5	14±5	
ゲルタイム	秒	60±10	15±10	

(4) 充填材料の特性及び耐久性の評価

発泡圧の測定

発泡圧測定装置を開発し、ウレタン材料を標準量以上の量を注入した場合の、発泡による圧力を測定した。使用材料はSK-02とし、測定充填率は105%、110%、120%、130%、135%、160%、170%、200%とし、それぞれの発泡圧を確認した。その結果、充填率が上がると発泡圧が高くなることが確認でき、試験装置の妥当性が確認できた。

材料特性評価

開発した材料の以下特性について試験評価し、裏込め材料として適切であることを確認した。

- () 圧縮強さ・弾性係数・曲げ強さ、 () 吸水量、 () 寸法安定性、 () 透水性、
- () 圧縮クリープ、 () 吸水による強度変化、 () 溶出物の確認

うち、() 圧縮クリープの結果を図 1.6.4.1 に示す。

(当データは「ウレタン LH 工法・技術マニュアル」を引用した。)

載荷応力が大きくなるとクリープひずみも大きくなるが、クリープ応力比によらず、長期的にはひずみは安定する。更に長期変化を確認するため、2年経過の試験を実施することとする。

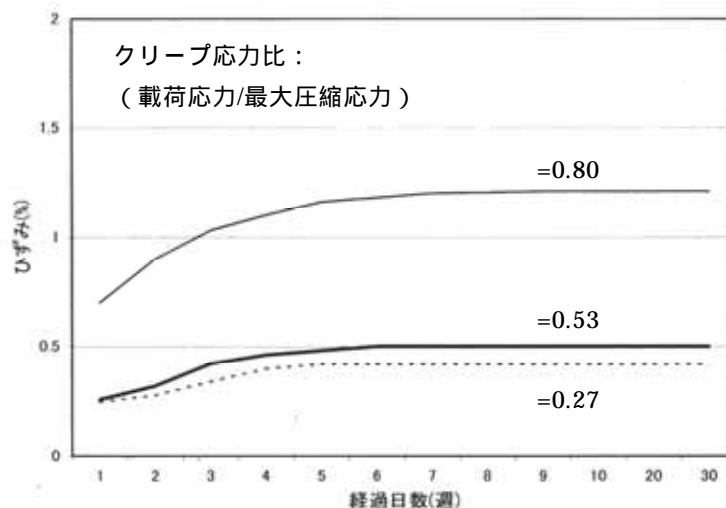


図-1.6.4.1 クリープ試験結果

流動性

H200×W3,200×D3,200(八角形)の型枠の中心部から上に向けてウレタンを吐出させ、発泡ウレタンの充填範囲の確認を行った。その結果、半径1,600mmで充填可能なことが確認できた。

(5) 覆工背面を充填したトンネルの性能評価方法の開発

1) 最大充填圧の決定手順

充填工法の対象となるトンネルは、ひび割れが生じているものの破壊には至っていないものがほとんどであると考えられる。そこで事前調査が行われることを前提に、以下の手順で背面からの岩圧・土圧を推定し、さらには充填圧力を決定することとする。

レーダー探査で得られた覆工厚とコアから得られたコンクリートの物性に基いて、覆工の構造モデルを作成する。厚さを求めることが困難なインバートについては、設計断面に等しいものとする。

底版の支持条件として、両端で支持する最も弱いもの(以下、単純支承とする)と底版の下面を固定する最も強いもの(以下、底版固定とする)を考える。実際の支持条件はある剛性を持った弾性床の上に底版が載るというものであり、解析で仮定する単純支承と底版固定の間となる。もちろん、両者のどちらに近いかは現場によって異なる。

背面からの荷重は等方等圧とし、レーダー探査で得られた背面空洞を除く部分に作用させる。背面が土砂である場合など、等方等圧と異なる荷重が作用することが明らかな場合には、現場の状態に即した荷重分布とする。

単純支承と底版固定のそれぞれについて、現場の状態に近いひび割れが生じる最小限の荷重(以下、ひび割れ荷重とする)と覆工が破壊される直前の荷重(以下、破壊荷重とする)の両者を破壊解析で求める。

単純支承と底版固定のそれぞれについて、ひび割れ荷重や破壊荷重の作用下で空洞部分に別途荷重を作用させ、空洞充填を模擬した解析を行う。そして覆工に新たなひび割れが生じる充填圧や覆工が破壊される充填圧(以下では両者を区別せず、損傷充填圧とする)を求める。

単純支承+ひび割れ荷重、単純支承+破壊荷重、底版固定+ひび割れ荷重、底版固定+破壊荷重の4条件のそれぞれについて得られた損傷充填圧の中から、最小のものを施工管理上の最大充填圧とする。

2) 充填圧の決定例

以上の方法に基づいて、充填圧を決定した例を示す。対象とした覆工断面は、 $R=1.1\text{m}$ 、アーチ部の巻厚が0.25mの標準的なR-2R標準馬蹄形である。コンクリートの圧縮強度は設計基準強度の 18N/mm^2 とし、解析に必要な引張強度と弾性係数は2007年版のコンクリート標準示方書[設計編]に示された手法を用い、圧縮強度から推定した。推定値は引張強度が 1.58N/mm^2 、弾性係数が 22kN/mm^2 である。

これらの条件について求めた損傷充填圧を表-1.6.5.1に示す。表中の***は現実には生じえない破壊やひび割れを生じたもの、 >0.5 は 0.5MPa より大きくなり、計算を打ち切ったものである。

表中に太字で示しているように、各空洞条件に対する最も小さい損傷充填圧は、すべて単純支承において生じている。支持条件以外の条件すべてが正しく解析で設定されていると仮定すると、覆工が損傷する充填圧は空洞条件ごとの最小値と最大値の間の値となる。充填圧の管理は最小の値に基づいて行わなければならない、底版固定に関する検討を省略すべきではないと考えられる。

表-1.6.5.1 条件ごとの損傷充填圧 (MPa)

空洞 支持	覆工 状態	5 度	10 度	15 度	20 度	25 度	30 度	35 度	45 度
単純支承	ひび 割れ	>0.5	0.364	0.280	0.236	0.216	0.196	0.174	0.154
	破壊	***	***	***	0.246	0.214	0.192	0.176	0.154
底版固定	ひび 割れ	>0.5	>0.5	>0.5	0.456	0.358	0.312	0.292	0.294
	破壊	>0.5	>0.5			0.364	0.344	0.318	0.322

充填時の安全確保は充填圧の管理に加えて、覆工の変形を測定することによっても行わなければならない。

空洞の充填によって覆工は上下方向に圧縮され、その結果左右方向に広がる。充填開始時点から充填圧によって覆工にひび割れが発生、あるいは覆工が破壊されるまでの内空変位量は、概ね 1mm をやや下回る値となっており、単純支承と底版固定でそれほど大きな差異はない。単純支承の場合は空洞が小さくなるほど大きい変位に耐えるようになるが、底版固定では逆の傾向がみられる。損傷に至る変位量は覆工の大きさによって変化すると考えられるが、今回の対象とした条件下では、変位が 1mm を超えないような施工管理が必要であると言える。

(6) 品質管理を組み込んだ施工システム (充填工法) 開発

大川瀬導水路 12 号トンネル実証試験工事を通して、本工法の目標性能が十分に満たされるような施工方法、管理手順の確立をおこなった。

まず、「タイプ A」注入機械については、既に道路トンネル等のウレタン空洞充填工事で実績のある TN 型低圧注入発泡機を使用した。その中でもより小型で坑内搬入時に分割可能な TN-2 型を使用した。また加圧注入用の「タイプ B」注入機械についても既に発泡ウレタンを用いたコンクリート床スラブ沈下修正工法で実績のある電動リアクター式注入発泡機を使用し、その中でも小型でかつ優れた注入圧力性能を備えた E-30 型を使用した。

両タイプとも操作性、作業性、安全性など問題なく、本工法において求められる注入発泡設備性能を満たしていることが確認出来た。

施工手順の確立

以下の図 1.6.6.1 に示すフローのとおり施工を実施し、トンネル機能の性能回復効果における満足できる試験結果を得ることができた。また、作業性、安全性についても特に問題なく作業をおこなうことが出来た。

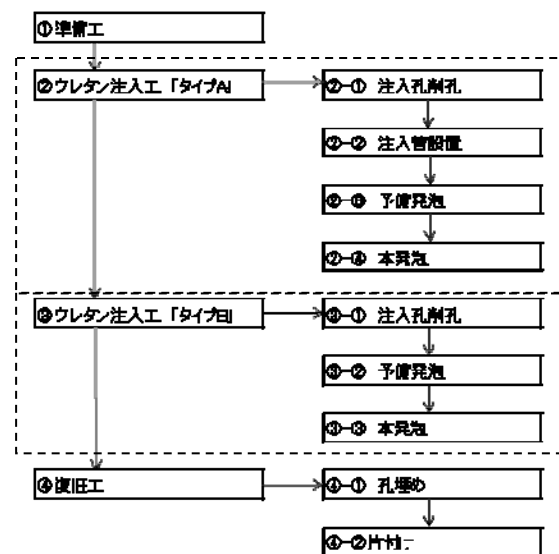


図-1.6.6.1 施工フロー

注入管理の確立

タイプ A においては温度センサーを適宜配置して、空洞内にウレタンが充填されていることを確認した。

タイプ B での注入管理においては圧力センサー及び簡易多点レーザーを併用することにより十分本工法の性能を満足するような管理をおこなえることを確認した。

品質管理の確立・現場での日常管理手法の確立

道路トンネル等におけるウレタン裏込注入工法でおこなわれている品質管理手法に則りおこなった。おこなった管理項目は以下の表-1.6.2.1、表 1.6.2.2 のとおりである。

表-1.6.6.1 品質管理項目

段 階	項 目	内 容
施工前	材料品質確認	試験成績表により確認する
	注入材の配合確認	キャリブレーションにより配合比率と流量計の精度を確認する
	注入材の発泡確認	注入材の発泡状態を確認する
施工中	注入材の配合確認	空缶検査にて配合比率と流量計の精度を確認する
	注入量の確認	注入量を流量計及び空缶にて管理する
	注入圧の確認	注入圧を圧力計にて管理する

表-1.6.6.2 品質管理基準値

項目	確認方法	規格値	測定時期	頻度
配合比率	吐出量を台秤で計量	タイプ A I : R = 100:71 ± 3 タイプ B I : R = 100:100 ± 3	施工前	適宜
発泡倍率	供試体にて計量	30 ± 3	施工前	1回/日
コア密度	供試体にて計量	40 ± 4	施工前	1回/日
圧縮強度	供試体にて計測	0.20 N/mm ² 以上	施工後	1回
注入量	チャート, 空缶, タンク残量		施工後	1回/日

その他安全管理等・施工時の安全管理体制等の確立

- 1) 資材搬出入装置, 坑内仮設作業足場の組み立て, 設置, 坑内電源の確保, 坑内照明の設置等.
- 2) 落下防止装置の設置など十分な安全対策を講じた
- 3) 坑内電源の確保のためキャブタイヤケーブルを複数接続
- 4) 施工箇所下流部にはネット, オイルマットなどを設置し, 現場下流に残材・油等の流出を防止.
- 5) 水質試験を実施する.
 -) 現場簡易水質検査: pH, 過マンガン酸カリウム消費量, 蒸発残留物簡易試験
 -) 室内水質検査: 有機体炭素 (TOC), 全蒸発残留物, 1,1,1-トリクロロエタン, ジクロロエタン

(7) 品質管理・維持管理方法の開発

品質管理技術の開発

a) 発泡ウレタンの発泡時での高温に対応した圧力計および計測システムの開発

市販の圧力センサーを円柱棒状先端に設置し, 躯体天端に内空から挿入できるようにした (図-1.6.7.1 挿入型圧力センサー).

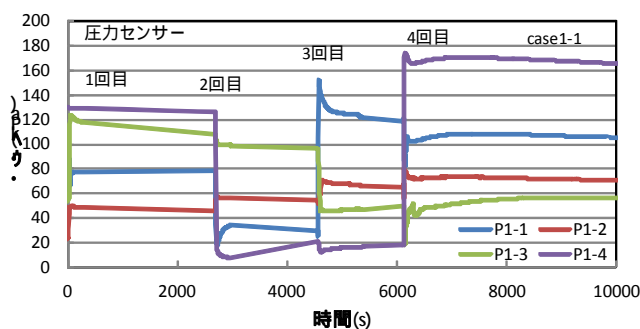


図-1.6.7.2 挿入型圧力センサーによる計測結果 (平成 23 年度実大模型実験)

b) ひずみゲージタイプによるトンネル内空の変状計測システムの開発

コンタクトゲージを採用することとした.

c) レーザー変位計を用いた簡易多点計測システムの開発

高精度のレーザー変位計を用いた, 水平 2 点直上 1 点を計測できる計測システムを開発した.

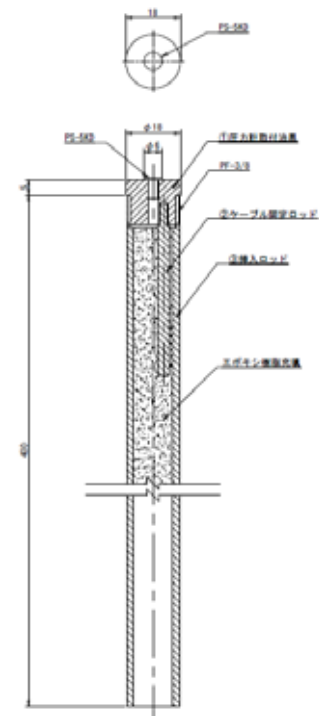


図-1.6.7.1 挿入型圧力センサー

d) 温度センサーを利用した温度計測システムの構築

空洞を模擬した実大模型実験の型枠内に温度センサーを配置し、ウレタンの注入によりすべての温度センサーは温度が上昇することを確認した。

維持管理技術の開発

a) 施工管理で用いた簡易多点計測システムの利用

1) 概要

施工後、水路トンネルに異常な変形が生じていないかを把握するため、施工管理で用いた簡易多点計測システムの利用を検討した。

2) 結果

施工時に用いたレーザー変位計による簡易多点計測では、施工前後で計測機の計測位置を一致させることが難しいことが分かった。一方、コンタクトゲージの計測では、計測ブロックを躯体に接着させ、ブロック間の変位を計測する。施工前後での計測位置のズレが無いため、コンタクトゲージによる計測が有効であると判断した。

b) トンネル変状調査ロボットの利用

1) 概要

水路トンネル内の維持管理では、水路トンネル内の水量調整を行うことができないことがあるが、地震時直後など、水路トンネル内に流水がある状態でトンネル内の状況を把握する必要がある。そこで、小口径の水路トンネル内の躯体内面を調査するロボットカメラを利用する。

2) 結果

上水道、下水道、工業用水道で実績のある水路トンネル内面調査ロボットに対して、農業用水路に適用できるように改良を行った。改良点を以下に記す。

ライトをヒップアップし前方が明るくなるようにした。

鮮明な画像を取得できるようにするため、蛍光灯 2 本から LED 照明 4 本に改良した。

また、内側の LED 照明を天井方向に、外側の LED 照明は側面側に向けた。

1.7 実証試験（現場適用）の概要、結果、課題等

(1) 概要

官民連携新技術研究開発事業「トンネル空洞への現場発泡硬質ウレタンフォーム充填による機能回復技術の開発」の一環として、現場実証試験工事を実施した。本実証試験工事では、農業用導水路トンネルの躯体天端背面に生じていると考えられる地山空洞部に現場発泡硬質ウレタンフォーム、タイプ A を充填させ、さらにタイプ B によって圧力を作用させることにより、トンネル本体の健全性・耐久性向上を確保することを目的としている。また、本工法を実施するにあたり、設計・施工上、トンネルの躯体天端背面部の空洞量、トンネルに作用させる圧力値を設定する必要があるため、躯体の調査および空洞量の調査を実施した。また、実証試験工事では、ウレタン注入時のウレタン充填による躯体への圧力計測、ウレタンの充填性確認のための温度計測、躯体の安全性確認のための躯体の変状計測を実施した。

施工日数

・準備工：

平成 23 年 12 月 26 日～平成 23 年 12 月 28 日

平成 24 年 1 月 5 日

・ウレタン注入：

タイプ A 平成 24 年 1 月 6 日

タイプ B 平成 24 年 1 月 7 日

- ・仮設撤去：
平成 24 年 1 月 8 日

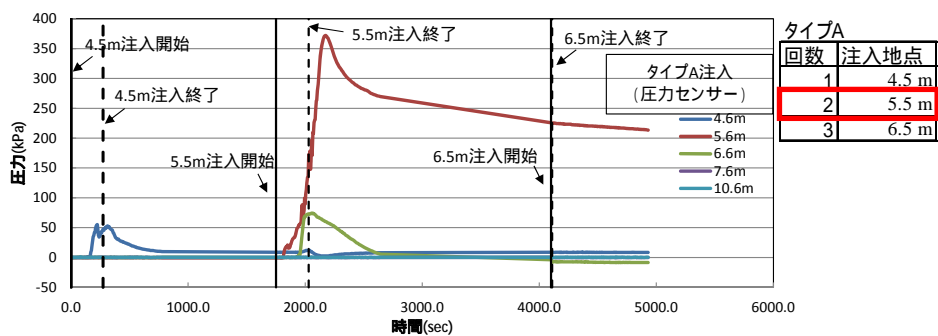
施工延長

東播用水地区大川瀬導水路 12 号トンネル パレル No. 10 (L=12m)

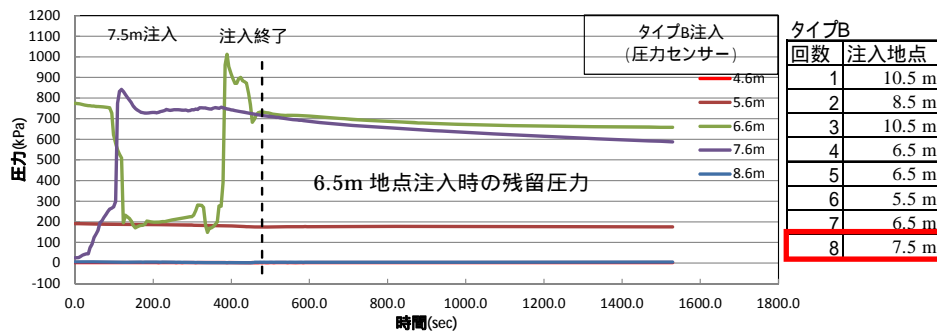
(2) 結果

【圧力センサー】

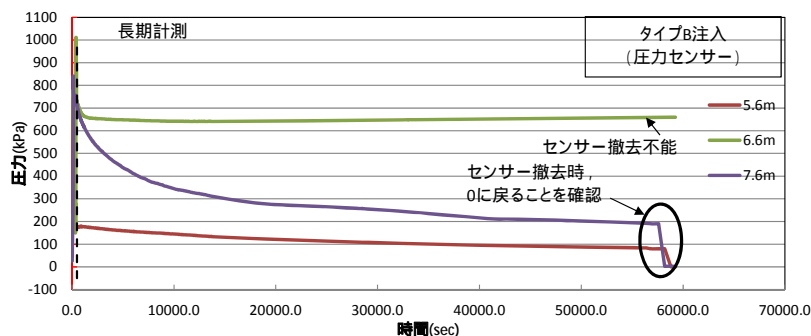
ウレタン注入における圧力センサーの結果を示す．圧力センサーは注入孔から 10cm 離れた位置に設置している．タイプ A,タイプ B によらず,注入地点の圧力センサーは,注入中および発泡中に応答した．また,加圧式裏込め注入後の圧力は,低下するものも見られたが,加圧力がゼロとなることはなかった．



(a) 計測結果-空洞充填時 (タイプ A)



(b) 計測結果-加圧材注入時 (タイプ B)



(c) 計測結果-加圧式裏込め注入後の長期計測

図-1.7.2.1 圧力センサーによる計測結果

【亀裂変位計】

亀裂変位計による計測結果を示す。ウレタンの注入時でのクラックの変状を計測できることを確認した。

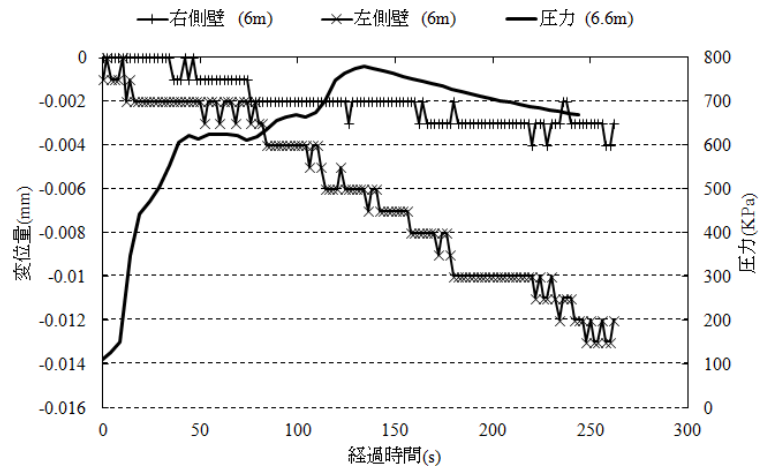


図-1.7.2.3 亀裂変位計による計測結果

【温度センサー】

注入孔付近の地盤内の温度は、ウレタン注入によって上昇する傾向を示す。その温度は約 60 である。温度センサー受感部がウレタン内にある場合は、約 150 上昇する。実証試験において温度センサーが 150 まで上昇しなかったのは、空洞内の崩積土の影響と考えられた。しかし、温度が上昇していることから、ウレタンの出来形管理には利用できると考えられる。

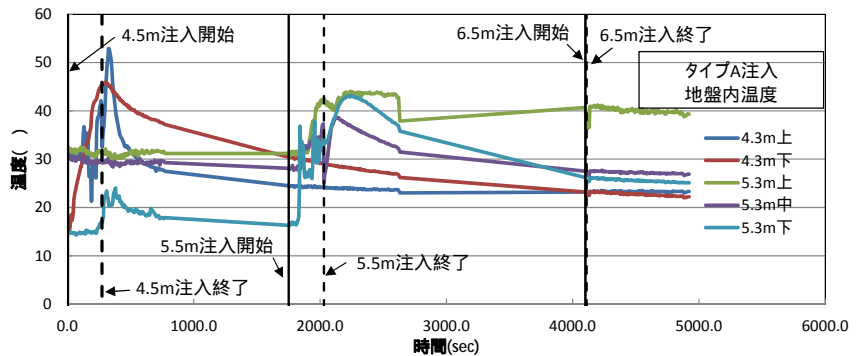


図-1.7.2.4 温度センサーによる空洞充填時の温度変化

【施工後のレーダー探査】

施工後にトンネルと地山との空洞量を調査した。発泡ウレタンは密度が小さいため、通常電磁波レーダーには反応しないため、空洞と識別される。一方、実証試験後の断面を見ると空洞無（地山）と判定された。これは、発泡ウレタンが崩積土砂を巻き込んだためと考えられる。このことから、温度センサーによる出来形管理は妥当と解釈できる。

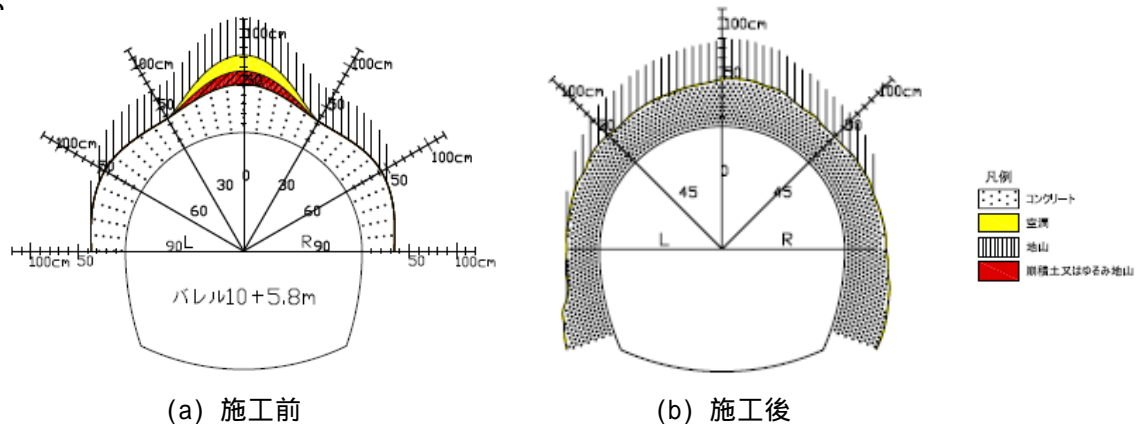


図-1.7.2.5 施工前後での電磁波レーダーによる空洞調査

1.8 機能監視の概要, 結果, 課題等

機能監視項目として, 施工 1 年後の躯体調査および水質について調査した。躯体調査については, ひび割れ位置の確認とコンタクトゲージを用いたひび割れ計測を行った。

(1) 目視による躯体確認

ひび割れ位置の確認を実施した, 実証試験前後で目視による躯体の違いは確認できなかった

(2) ひび割れ調査

計測位置を図-1.8.2.1 に示す。また, 計測結果を図-1.8.2.2 に示す。

施工後から 1 年後のひび割れ幅は, 右岸側ではひび割れ幅が施工前に近くなる傾向を示す。一方, 左岸側ではひび割れ幅が閉じる傾向を示していることが分かる。以上から, 加圧式裏込注入工法によるひび割れ幅は, 施工後 1 年経過しても施工前の態には戻らない傾向を示す。

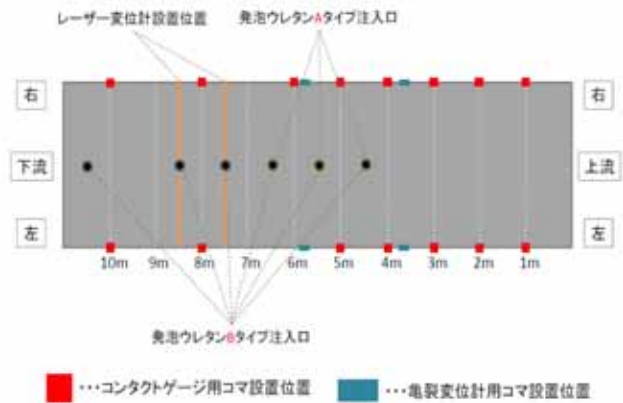


図-1.8.2.1 コンタクトゲージによる計測位置

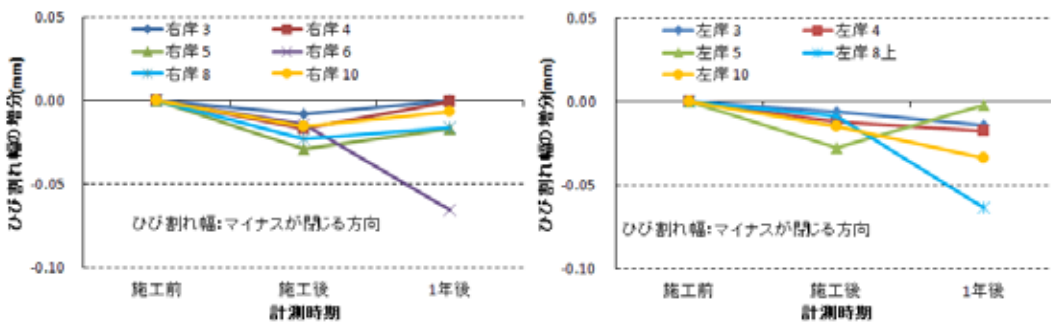


図-1.8.2.2 コンタクトゲージによる計測結果

上図では右岸と左岸で異なる挙動を示している。その原因として材料の応力緩和が考えられるが, 測定結果と過去の地盤改修実績から, 材料の応力緩和では無いと推定されるが, 今後, 長期的な材料強度の性能を確認するための応力緩和試験を実施する。

(3) 水質監視

1) 現場簡易検査結果

試験項目	結果	基準値
PH測定	8.5	5.8~8.6
簡易蒸発残量物測定	47ppm	施工前後の差が 500ppm 以下
過マンガン酸カリウム消費量	6ppm	10ppm 以下

2) 室内水質検査結果

試験項目	結果	基準値
1.1.1-トリクロロエタン	定量下限以下	検出しないこと
ジクロロメタン	定量下限以下	検出しないこと
有機体炭素 (TOC)	1.5 mg/L	5mg/L 以下
全蒸発残留物	120 mg/L	500mg/L 以下

2 事業の成果

2.1 成果の内容

(1) トンネル覆工空洞の実態把握

行政部局で収集されている事故事例を含む変状調査事例や機能保全対策工事事例の中から、本充填技術で対応できると考えられる事例を抽出した。また詳細な実態を把握するための現地調査を行った。現状の安定性を検討する現場実証試験対象のトンネルについては、数値解析に必要な各種データを取得した。

(2) 充填材料の目標性能の設定

本工法の目的は、背面空洞を充填することで、トンネル覆工の応力状態を当初のトンネル設計で意図した状態に戻すことである。そうすれば、覆工内に生じた引張応力を解消または低減し、さらなるひび割れの進展を防止すること、ひび割れの開口幅を狭くし、劣化要因が覆工内部に浸透するのを防ぐことが自ずと可能になる。充填材料については、力学的な視点と耐久性の視点の両面から行き、実現すべき力学的要求性能と耐久性的要求性能について具体的に数値を設定した。

(3) 充填材料の開発

農水路トンネル空洞裏込め材料に適する発泡ウレタン原料の開発の結果、タイプ A により空洞部を隙間なく充填し、タイプ B の注入により躯体への加圧を可能とした。

(4) 充填材料の特性及び耐久性の評価

充填材料の特性を評価した結果が、農水路トンネル空洞裏込め材料として適合することを確認した。

(5) 覆工背面を充填したトンネルの性能評価方法の開発

加圧式裏込充填工法における最大充填圧の決定方法を開発した。この解析方法を元に、底板の境界条件や空洞の幅を変化させた解析を実施した結果、加圧式裏込充填工法による躯体天端の鉛直変位量管理値は 1mm であることが分かった。また、この方法を元に、実際に実施した実証実験において、充填施工中の覆工変位量などの事前予測解析を行い、加圧式裏込注入工法の施工中の安全性の確保を図った。

加圧式裏込注入工法による耐荷能力向上量の推定方法について提案し、耐荷力の向上量を数値的に表現できるようにした。

(6) 品質管理を組み込んだ施工システム（充填工法）開発

本工法の目標性能が十分に満たされるような施工方法、管理手順を確立した。

プラント設備の開発

注入発泡設備については、道路施設、鉄道施設などのトンネルに比べて農業用水路トンネルはトンネル断面が小さいため、その現場環境に適用出来るように小型化かつ、軽量化を図った。また空洞充填用、加圧式裏込注入用それぞれの特性を考慮した注入発泡設備を用いた。空洞充填用は予定注入数量、また任意の注入圧力に達したら注入を自動停止が可能な装置を装備し、加圧式裏込注入用においては、手で圧力操作が容易に行える発泡設備を用い、操作性、作業性、安全性などの確認をおこなった。

施工手順の確立

注入手順としては、過大な発泡圧力がトンネル覆工へ局所的にかからないようにタイプ A (空洞充填)、タイプ B (加圧力作用) の注入順序とし、実証試験工事をとおしてその施工手順の確立を行った。

注入管理の確立

特にタイプBの実施においては適切な圧力で充填を行うことが極めて重要であり注意を要した。よって注入時に注入量、注入圧力、躯体変位量の常時監視をおこない、実証試験工事を通してその管理手法の確立をおこなった。また、注入圧力と躯体変位量については大学で開発している破壊解析をもとに施工時における管理基準の数値を設定した。

品質管理の確立・現場での日常の品質管理手法の確立

品質管理は、設計で要求される品質、規格を確保するため、施工精度の標準を定めた。工法の要求性能を満足させる品質管理基準を定めるとともに、施工現場での日常管理手法を設定した。

その他安全管理等-施工時の安全管理体制等の確立

実証試験工事をおして、注入作業全体の安全を確保するための管理体制を整えた。また本工法の対象構造物は水利施設であるため、水質監視は重要項目であった。使用する注入材料は、「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」(平成4年10月:日本道路公団)に適した材料であるが、実証試験工事をおして、作業前・作業中・作業後の水質監視を実施し、水質監視に関する管理手法の確立をおこなった。

実証試験に先立ち室内圧入実験による検証

以下事項についての当技術への適合性が確認された。

- 1) 材料の適合性
- 2) 施工システムの適合性
- 3) 品質管理技術の適合性
- 4) 機能回復に必要な発泡圧の実現

(7) 品質管理・維持管理方法の開発

品質管理技術の開発

a) 発泡ウレタンの発泡時での高温に対応した圧力計および計測システムの開発

圧力センサー部に油性粘土を設置することで高温時に対応した挿入型圧力センサーを開発した。実大模型実験および実証試験において、ウレタンによる躯体への加圧力を計測することができた。

b) ひずみゲージタイプによるトンネル内空の変状計測システムの開発

発泡ウレタンの天端空洞充填での躯体のスプリングラインの変状を検討した結果、躯体の鉛直変位がそのままクラック変位と同等にならず、ひび割れ部の変位は回転のモードとなることが予想された。そのため、高精度の計測が必要であることが分かった。そこで、高精度の計測装置として、コンタクトゲージを採用することとした。実証試験において、コンタクトゲージを用いることにより、加圧式裏込注入時、躯体ひび割れが小さくなることを確認できた。加圧式裏込注入工において、コンタクトゲージによる計測が妥当であることを明らかにした。

c) レーザー変位計を用いた簡易多点計測システムの開発

安価なレーザー変位計を用いることを検討したが、計測能力が必要計測精度を満足しないことが分かったため、高精度のレーザー変位計を用いた、水平2点直上1点を計測できる計測システムを開発した。実証試験において、本計測システムを用いることにより、加圧式裏込注入時、躯体天端が変形することを確認できたことから、加圧式裏込注入工において、レーザー変位計を用いた簡易多点計測による計測が妥当であることを明らかにした。

d) 温度センサーを利用した温度計測システムの構築

施工による空洞のウレタン充填性(出来形)を確認するため、発泡ウレタンが発泡時に発生する温度を利用することにより、発泡ウレタンの空洞充填性を確認する温度計測システムを構築した。実大模型実験および実証試験において、空洞注入したウレタンの出来形管理に用いることができることを明らかにした。

維持管理技術の開発

a) 施工管理で用いた簡易多点計測システムの利用

施工時に用いたレーザー変位計による簡易多点計測では、施工前後で計測機器の計測位置を一致させることが難しいことが分かった。一方、コンタクトゲージの計測では、計測ブロックを躯体に接着させ、ブロック間の変位を計測する。施工前後での計測位置のズレが無い場合、コンタクトゲージによる計測が有効であると判断した。

b) トンネル変状調査ロボットの利用

既存の技術である小口径の水路トンネル内の躯体内面を調査するロボットカメラを利用することを検討し、ロボットカメラに設置されている照明を改良することにより農業用水路に適用できるようにした。

(8) 実証実験

今回開発したウレタン材料、水路トンネル用に選定した注入機、ウレタンの加圧力測定のための圧力計などを用いて実証実験を実施した。また、実証実験に先立ち、躯体の空洞調査、躯体の形状および強度について把握し、躯体に損傷与えないウレタンによる限界加圧力および天端の変位量を数値解析で設定した。その結果、ウレタンの発泡に伴う加圧力を躯体に作用させることが実証され、躯体に損傷を与えることなくひび割れ幅が減少することも確認できた。

(9) 機能監視

ひび割れ調査

ひび割れの位置とひび割れ幅について計測した。施工1年後において、1)ひび割れ位置は変化していない、2)ひび割れ幅は施工後の状態を維持する傾向にある、ことを確認した。

水質調査

発泡ウレタン注入1年経過後の水質検査により、有害物は全て基準以下であり、その安全性が確認された。

2.2 目標の達成度

(1) 成果から得られる効果

農業用水路トンネルに発生している変状は農業水利施設特有の変状であり、本事業ではその変状の発生メカニズムを明らかにし、発生メカニズムを踏まえた合理的な空洞充填技術について研究開発してきた。

その成果として、まず硬質発泡ウレタンにより既設の農業用水路トンネルの空洞を充填すると、トンネルの耐荷性能が向上することが模型実験で確認された。硬質発泡ウレタンは従来のセメント系エアモルタルなどの注入材と比較して、軽量であることから既設トンネルの荷重負荷を軽減でき、既設トンネルの延命化を図る効果が期待できる。また、硬質発泡ウレタンは比較的小型な設備で施工ができ、経済的な空洞充填工法の適用範囲を内空断面の小さい農業用水路トンネルにまで広げる効果がある。

次に本研究開発事業の成果として、覆工背面に充填する硬質ウレタンの発泡圧(加圧力)を利用して、覆工背面の圧力を増大させて、トンネルの変形性状を変化させることができることを確認できた。このことは、空洞充填によるトンネル覆工の機能を補強または回復させる“改修工法”となり得ることを示唆するものである。硬質発泡ウレタンを

トンネル覆工背面の空洞へ充填して既設トンネルの機能回復することにより、高価な従来の“改修工法”の適用が不要となり、ストックマネジメントに資すると考えられる。

(2) 従来技術との比較

本事業で研究開発した加圧式裏込め注入工法は、トンネル覆工の機能を補強または回復させるものであり、内張工法と比較できる。

表-2.2.2.1 改修工法の従来技術との比較

	内張工法 ¹⁾	内張工法 + 裏込め注入 ²⁾	加圧式裏込め 注入工法
経済性	1	1.1	0.9
工程	1	1.4	0.8
品質	-	-	同程度
安全性	-	-	同程度
施工性	-	-	設備の小型化で適用範囲が拡大
周辺環境への影響	-	-	同程度

1：強化プラスチックによるもの。空洞充填は含んでいない。

2：裏込め注入剤は可塑性エアモルタルとした。

2.3 成果の利用に当たっての適用範囲・留意点

空洞充填用の硬質発泡ウレタン（SK-02，40倍発泡）はトンネル覆工背面と地山との空洞に充填して、地山のゆるみや崩落を事前に防止するために用いるものである。また、加圧式裏込め充填工法は、タイプAを充填した後に、タイプBにより覆工の背面を加圧して耐荷性能を回復させるものである。図-2.3.1.1に硬質発泡ウレタンを対策工として検討する手順の例を示した。加圧裏込め注入工法を適用するためには、以下の項目について調査して、覆工の耐荷性能を事前に予測しておく必要がある。

- a) 覆工厚
- b) 覆工コンクリートの圧縮強度
- c) 空洞範囲
- d) 地山からの土圧

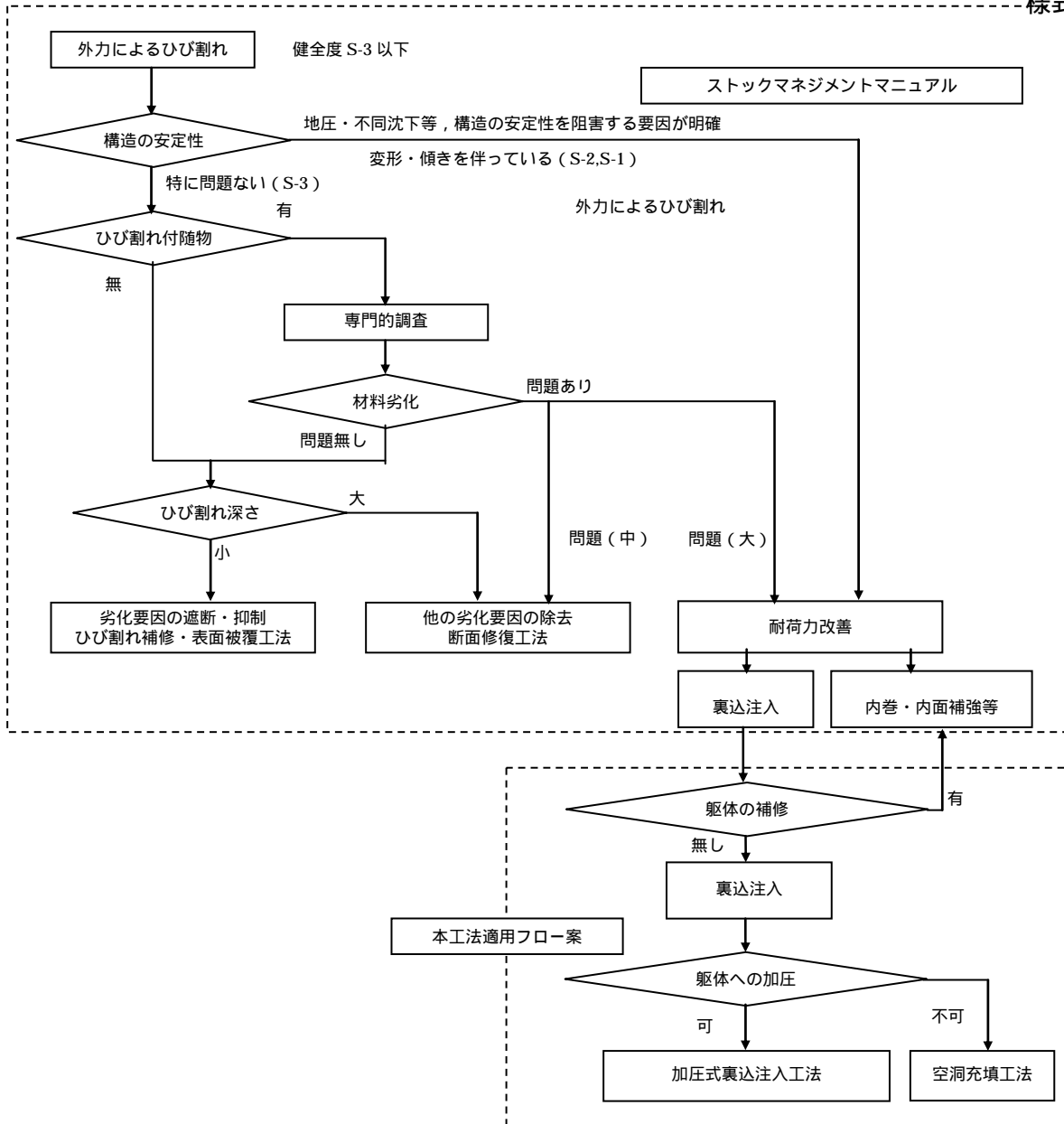


図-2.3.1.1 外力によるひび割れタイプの場合の対策検討フロー例

3 普及活動計画

3.1 想定される利用者

水路トンネル管理者（各地農政局，地方公共団体，土地改良区等）

3.2 利用者への普及啓発等の方法

- ・水路トンネル管理者への当技術情報（カタログ・マニュアル等）の提供
- ・説明会の実施
- ・ホームページ上での技術情報開示

3.3 利用者に対するサポート体制，参考資料等

1) サポート体制

項目	担当会社
設計資料提供	アキレス(株)，岡三リビック(株)
事前調査協力	(株)ジオデザイン
材料供給	アキレス(株)，岡三リビック(株)
施工供給	アップコン(株)

2) 参考資料

設計施工マニュアル

積算マニュアル

3.4 特許・実用新案等の申請予定

(1) 申請者予定者

島根大学，アキレス(株)，岡三リビック(株)，(株)ジオデザイン，アップコン(株)

(2) 申請予定時期

2013年2月予定

4 研究総括者による自己評価

項 目	自己評価	自己評価の理由
研究計画の効率性・妥当性	A	各大学と研究開発組合各社がそれぞれ得意とする技術分野を分担するとともに相互に補完し、効率的に研究開発を進めることができた。
目標の達成度	A	研究計画で想定した事例調査，模型実験，数値解析，試験施工の一連の研究手法を駆使して背面空洞充填の有効性を実証し，適正で的確な充填を可能にする技術を開発した。
研究成果の普及可能性	A	各地で生じているトンネル覆工の変状は，背面空洞が原因である場合が多いと考えられる．そのひび割れ発生メカニズムを踏まえた対策工法として普及が期待される。
<p>総合コメント</p> <p>本研究開発事業では，まず，供用中の農業用水路トンネルに発生している代表的な変状は，スプリングライン付近に生じているひび割れであることを事例調査により確認した．そして，その変状の原因はトンネル天端背面に存在する空洞と考えられ，施工技術の未熟な時代に施工されたトンネルでは天端部分の裏込めコンクリートが充填不足となることで発生したものであると考えられた．そこで，試作した分割エアバッグ載荷装置を用いてひび割れ発生メカニズムを明らかにするとともに，空洞充填による耐荷力増強効果を確認した．</p> <p>次に，これらの成果を踏まえた合理的な補修・補強工法として，現場発泡硬質ウレタンフォームによるトンネル天端空洞への充填工法の開発に着手し，実用工法として確立した．本工法の特長は，トンネル覆工背面と地山との空洞に空洞充填用の硬質発泡ウレタン（タイプA）を充填して地山のゆるみや崩落を事前に防止する工程を第一段階とし，タイプAを充填した後に加圧充填用の硬質発泡ウレタン（タイプB）により覆工の背面を加圧して耐荷性能を回復させる加圧式裏込め充填工程の第二段階としたことである．</p> <p>開発した工法は，破壊解析を用いた検討結果と連携した設計・施工マニュアルが用意されていることから，適正で円滑な工事実施が可能と考えられる．</p>		

注）評価結果欄は，A，B，Cのうち「A」を最高点，「C」を最低点として3段階で記入する．

5 今後の課題及び改善方針

(1) 加圧力の継続性

加圧式裏込め注入工法によって発泡ウレタンが形成された後，加圧力の経時変化があるか否か，変化がある場合はどの程度維持されていくのかを検討する．

(2) 材料の長期変形特性

加圧式裏込め注入工法によって形成された材料のクリープ試験を実施する．

(3) 注入装置の統一

現在の注入装置では，タイプAとタイプBとで異なっている．注入装置を統一することで，施工性の向上を図る．