

S 1. 曲線鋼管による既設トンネル補強工法の研究

横澤圭一郎

安井 成豊

藤田 一宏

○近藤 亮

1. はじめに

近年、供用中の高速道路のトンネルにおいて、舗装版が隆起する変状現象が報告されている。これらの変状はいずれもインバートが設置されていない箇所で生じていることから、新たにインバートを設置して断面閉合を行うことが最も効果的な対策であると考えられる。

しかし、インバートを設置するために供用中の高速道路を長期間通行止めにすることは、現実的には困難である。

以上を背景として、トンネルの通行を確保しながらインバートを設置する施工方法を開発することを目的に、首都大学東京、高速道路総合技術研究所、施工技術総合研究所の三者による共同研究を平成21年度から開始した。

共同研究の主な役割分担は、表-1 に示すとおりである。このうち本稿では施工技術総合研究所が担当した施工方法の検討について報告する。

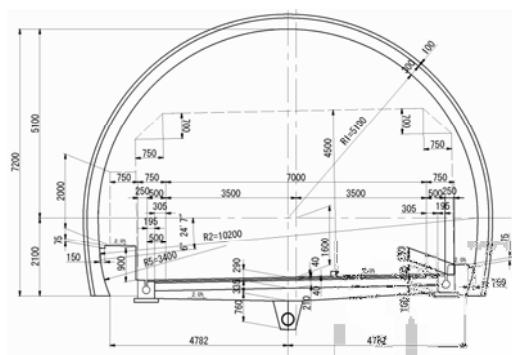


図-1 検討の対象とするトンネル断面

3. 施工方法の検討

前述の条件のとおり，既設トンネルにおいて片側（一車線）の交通を確保したまま，インバートの設置が可能と考えられる３種類の施工方法を立案し，その適用性について検討を行った。以下にその概要を示す。

表-1 共同研究の役割分担

	役割分担
首都大学東京	解析手法の検討 解析による構造検討
高速道路総合技術研究所	実現場への適用性検討 経済性の評価 研究成果の総合とりまとめ
施工技術総合研究所	施工法検討 施工計画検討

2. 検討対象条件

本研究が対象とするトンネル断面を図-1 に示し、施工時の交通規制条件を表-2 に示す。

表-2 施工時の交通規制条件

項目	内 容
車道幅員	3.5m
路肩幅員	左 0.5m、右 0.5m+0.25m
全 幅	4.75m
規制速度	50km/h
建築限界	高さ：4.5m
道路規格	第1種 第3級相当
規制延長	トネル全線（工事箇所は、仮設防護柵を設置）
規制期間	GW 明け～お盆、お盆明け～雪氷時期

3.1 曲線ボーリング方式

曲線ボーリング方式は、インバート部分に曲線の鋼管をボーリングマシンにより打設して補強する方法である。本方式は既存の工法を組み合わせたものであり、技術的に大きな課題は特にないため、本研究が対象とする施工条件への適用性は比較的高いものと考えられる。

本方式の施工イメージを図-2 に示す。

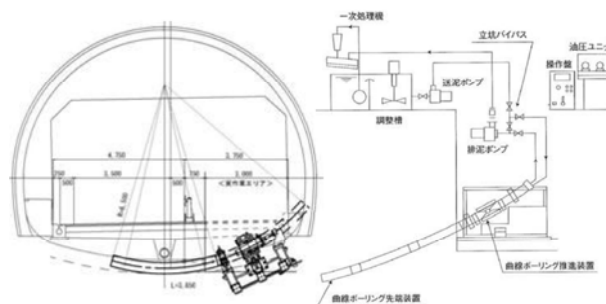


図-2 曲線ボーリング方式
(施工イメージとシステム)

3.2 チェーンカッタ方式

都市部のトンネル施工法として、チェーンカッタによりトンネル外周部を切削し、コンクリートを打設した後、切羽を切削する「NEW PLS 工法」がある。チェーンカッタ方式は、この工法を応用してインバート部分をチェーンカッタで切削後、インバートコンクリートを打設する方法である（写真-1 参照）。

本方式の課題としては、チェーンカッタ機は軟岩程度までの切削は可能であるが、硬岩の場合には切削が困難であることや、現存する機械が無いため、新たに機械を製作しなければならないことなどが挙げられる。



写真-1 チェーンカッタ

3.3 パイプフロア方式

パイプフロア方式は、トンネルの先受け工法として天端部に鋼管を打設するパイプルーフ工法を応用して、図-3 に示すように、インバート部に直線鋼管を打設して、底版部の補強を計るものである。本方式は、特殊な機械を必要とせず、汎用の機械で施工が可能である。ただし、課題としては、覆工コンクリートと閉合しないため、構造系として成立するか解析的な検討が必要である。

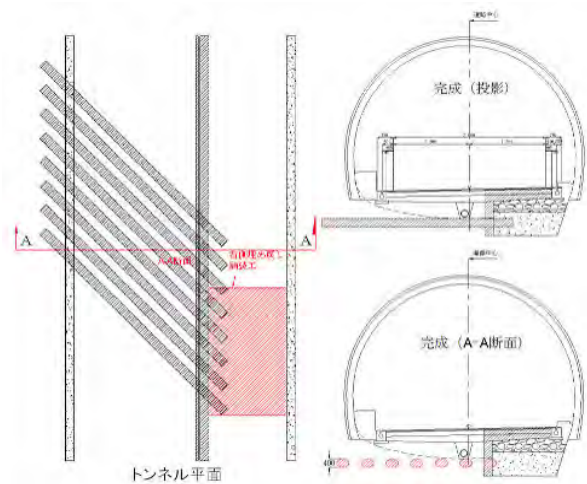


図-3 パイプフロア方式（完成模式図）

3.4 施工方法の選定

上記 3 つの施工方式について、交通規制条件等を踏まえて、実現場に対する適用性評価を行った。その結果、曲線ボーリング方式を本研究の基本的な施工方法として選定した。表-3 に適用性評価一覧を示す。

表-3 施工方式の適用性評価一覧

接続方法	溶接	ネジ	圧着
作業時間(分)	30	10	15
作業性	×鋼管のセットに時間がかかる。	○容易	○容易
剛性・強度	○最も優れる	×現状ではゆるみが生じる	○問題なし
検討事項	・光り、塵が発生するため、適用させながらのトンネル現場に適用可能か	・鋼管をぶつけたりして、ねじ山がつぶれると接続が出来なくなる。	・圧着機が重い。コンパクト化が望ましい。
経済性	○鋼管の加工は特に不要	△鋼管の加工が必要	○鋼管の加工は軽微
総合評価	△	△	○

4. 施工性の検討

4.1 曲線鋼管による補強工法の構造と施工手順

本工法は、交通規制が困難で掘削が行えない道路中央部は、曲線鋼管を挿入し、側壁部については、底盤を掘削してコンクリートを打設して鋼管と一体化させる複合構造である。

本工法の構造イメージを図-4 に示し、施工手順を図-5 に示す。

なお、本工法の複合構造については、構造解析により従来のコンクリートによるインバートと同等程度の抑止効果を有することを確認している。

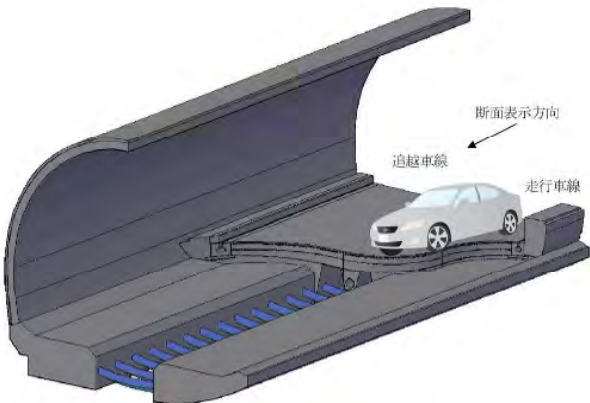


図-4 曲線鋼管による補強工法の構造イメージ

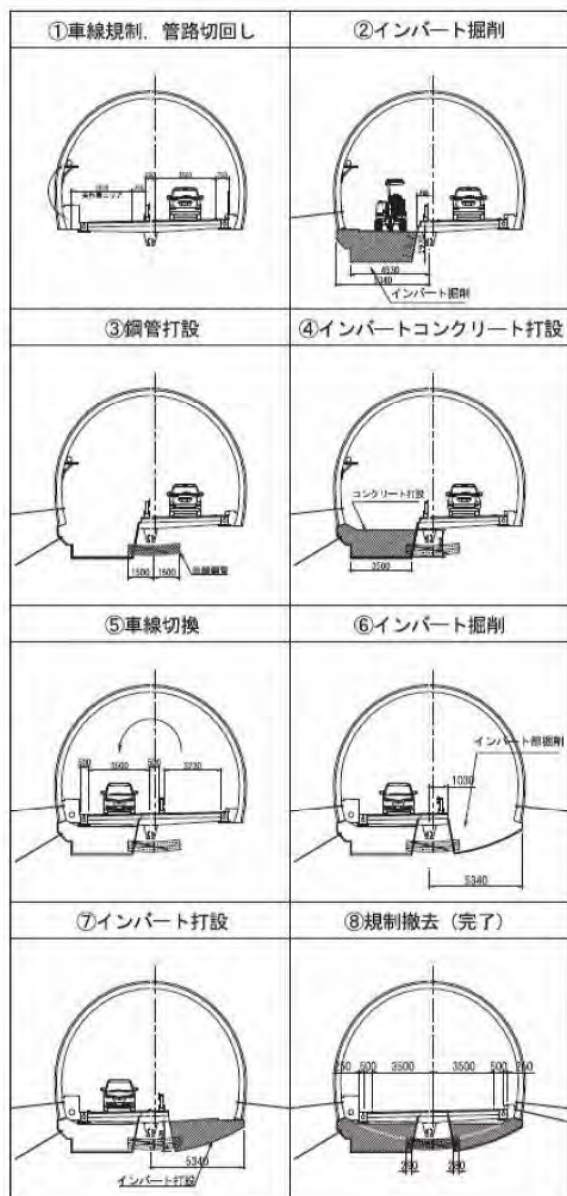


図-5 施工手順図

4.2 地山条件

変状現象が報告されているトンネルは、昭和 60 年の設計要領で建設されたトンネルに多く見られている。これらのトンネルでは当時、長期耐久性に問題が生じる場合があると考えられている泥岩、凝灰岩、蛇紋岩等の地質でも、当時は地山等級が C 級と判定されていれば、インバートが施工されていない事例があり、変状が生ずる要因のひとつとされた。

以上のように、現在問題が生じているトンネルは、施工時に地山等級 C 級と判断されたトンネルでも生じている。したがって、本工法で想定する地山等級は C 級～D 級とした。

4.3 施工条件

インバートの力学的機能、実現場の作業スペースなどを踏まえた本工法の施工条件を以下に示す。

(1) 曲線鋼管のサイズ

曲線鋼管のサイズは、力学的には太い径の方が有利になるが、施工時の作業性、削孔機械の能力等を総合的に考慮して、 $\phi 216\text{mm}$ の鋼管を施工可能な最大径であると判断した。また、鋼管の曲率半径は、既往のインバート対象事例を踏まえて 10m を施工条件に設定した。なお、この鋼管径 216mm および曲率半径 10m については、構造解析によりその補強効果を確認している。

(2) 作業スペース

想定するトンネル断面で、片側の交通確保を考慮すると、掘削出来る作業スペースは、幅 3m である。

4.4 曲線鋼管削孔実験

前記までの条件を踏まえ、本工法の施工性を確認するため、削孔実験を行った。

(1) 実験の概要と目的

本実験は、2 車線断面相当のトンネルのインバート中央部に約 3m の長さの曲線鋼管を打設することを想定し、打設箇所の地山を模擬した供試体を作製した。この模擬地盤に実際に曲線鋼管を打設し、削孔機械の能力、作業性を確認するとともに、技術的な課題を抽出し、実現場への適用性について確認することを目的とした。本実験で確認した主な項目は以下の通りである。

- ①施工ヤード内での施工性の確認
- ②鋼管接続方法の確認
- ③作業サイクルタイムの確認
- ④削孔精度の確認

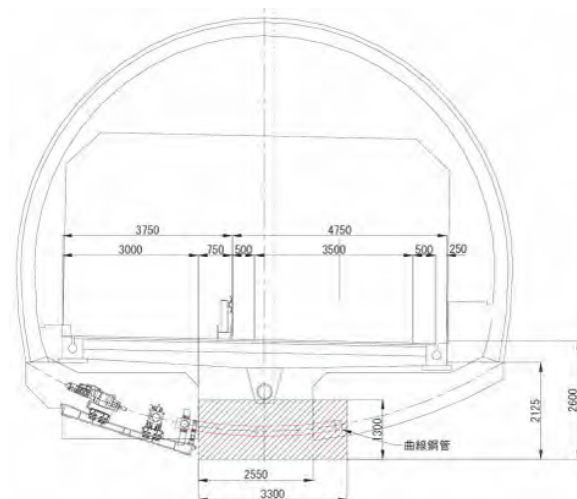


図-6 曲線鋼管の打設イメージ

(2) 削孔機械

削孔機械は、トンネル工事で使用するドリルジヤンボに搭載されているドリフタを改造して使用した。削孔機械の主な仕様を表-4に示す。

表-4 使用した削孔機械の仕様

ロータリーパーカッション用ドリフタ	
型式	NS-2020-30
全長(mm)	799
全幅(mm)	390
全高(mm)	381
打撃数(bpm)	2200
出力(kW)	30
打撃力(kg-m)	23
回転数(rpm)	30/60
回転トルク(kg-m)	125/250

(3) 模擬地盤の製作

模擬地盤には、軟岩、脆弱層、軟岩+脆弱層の地山状況を想定して3つの実験ケースを設定した。なお、試験体は6本の鋼管打設が行える寸法で製作した。

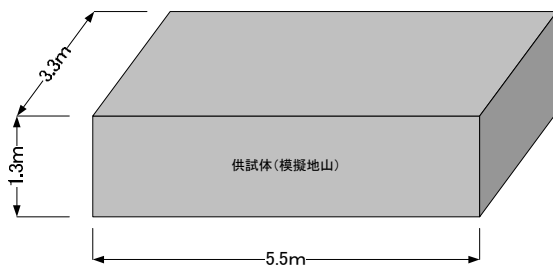


図-7 供試体（模擬地山）

(4) 鋼管の接続方法

作業スペース等の制約から、曲線鋼管は約1mの長さの鋼管を接続しながら施工する必要がある。接続方法は、溶接、ネジ、圧着の3種類について実施し、それぞれの作業性等について確認した。

(5) 実験ケース

実験は当初6本の鋼管を削孔する計画を立案したが、実験中に様々な課題が生じたため、これらを解決するために再実験、追加実験などを実施し最終的には8本の削孔実験を行った。

実際に実施した実験ケースを表-5 および図-8に示す。

表-5 実施した実験ケース

実験ケース	想定地山	供試体(実際の強度)	継手の形式	打設延長(m)	実施日
ケース1	軟岩	コンクリート(24N/mm ²)	溶接	1.8	4月25日
ケース2	脆弱層	エアモルタル(10N/mm ²)	溶接	3.3	4月22日
			圧着	1.3	4月27日
ケース2' (再実験)		エアモルタル(10N/mm ²)	圧着	3.3	6月8日
			ネジ	3.3	6月7日
ケース3	軟岩+脆弱層	コンクリート(24N/mm ²)、エアモルタル(10N/mm ²) +円礫(Gmax50)	ネジ	1.9	4月26日
ケース4 (追加実験)	脆弱岩	エアモルタル(10N/mm ²)	〈直結鋼管・ネジ〉アトラスハンマ	3.3	5月13日
			〈直結鋼管・ネジ〉ユビロンハンマ	1.7	5月14日

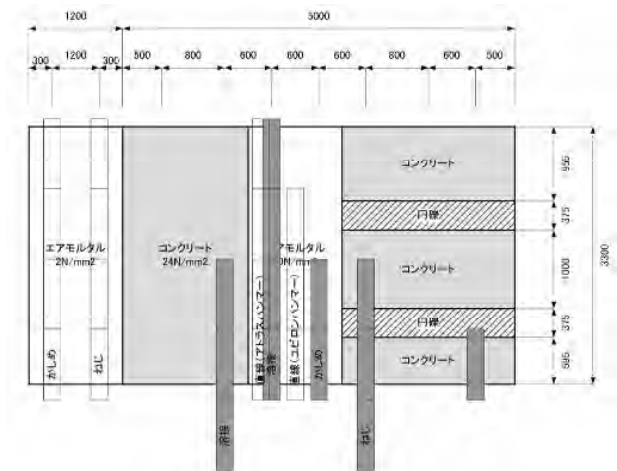


図-8 実施した実験ケースの概要図

(6) 実験結果

① 施工ヤード

写真-2に示すように、3m幅の作業スペースに機械を設置して削孔することができ、概ね制約条件の施工ヤードで作業が可能であることを確認した。



写真-2 削孔作業の状況

②鋼管接続方法

鋼管の接続は作業時間的には、ネジによる接続が最も早かったが、削孔時にゆるみが生じる状況であった。結果的には圧着による接続が適用性が高いと判断した。表-6 に接続方式の評価一覧を示し、写真-3 に圧着による鋼管接続の状況を示す。

表-6 接続方式の評価一覧

接続方法	溶接	ネジ	圧着
作業時間(分)	30	10	15
作業性	×鋼管のセットに時間がかかる。	○容易	○容易
剛性・強度	○最も優れる	×現状ではゆるみが生じる	○剛性なし
検討事項	・光り、塩が発生するため、張替えながらのトンネル現場に適用可能か	・鋼管をぶつたりして、ねじ山がつぶれると接続が出来なくなる。	・圧着電が重いため、コンパクト化が望ましい。
経済性	○鋼管の加工は特に不要	△鋼管の加工が必要	○鋼管の加工は軽微
総合評価	△	△	○



写真-3 圧着による曲線鋼管の接続

③作業時間

作業時間の大半は削孔時間であり、その削孔時間は地山の強度に大きく影響される。脆弱岩を想定した一軸圧縮強度 1N/mm^2 の箇所では3mの鋼管の純削孔時間は30分程度であるのに対して、軟岩を想定した 24N/mm^2 の強度の箇所では、約200分の削孔時間を要している。

1本当たりの削孔サイクルタイムについて整理したものを表-7に示す。

表-7 1本当たりの削孔サイクルタイム

		想定地山			備考
		脆弱層		軟岩	
		1N/mm2	10N/mm2		
①	平均削孔速度(m/分)	0.10	0.03	0.02	
②	削孔長(m)	3.3	3.3	3.3	
③	継足し回数(回)	3	3	3	
④	1回当たり継足し時間(分)	15	15	15	
サイクルタイム(分)	削孔時間	32.8	126.9	214.3	②÷①
	継足し時間	45	45	45	③×④
	計	77.8	171.9	259.3	

④打設精度

打設精度の確認は模擬地盤を貫通した箇所の鋼管の位置を測定して、計画の位置からのずれで評価することにした。

本実験で、幅約3.3mの模擬地盤を貫通することができたケースは脆弱地山を想定した箇所の3本であった。このうち目標到達位置と最もずれが生じたケースを図-9、写真-4に示す。このケースでは鋼管のセンターが目標よりも右に165mmのずれが生じ、鉛直方向はほぼ計画どおりの位置であった。

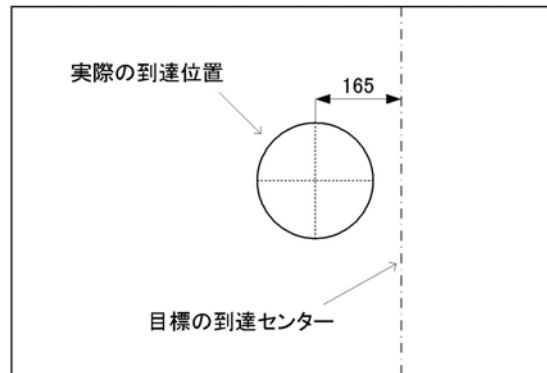


図-9 削孔精度の測定（脆弱層 10N/mm^2 ）



写真-4 鋼管貫通の状況

5. まとめ

5.1 実験で得られた知見

今回の削孔実験により得られた知見を以下に示す。

- ①削孔時の機械データを分析した結果、効率的な削孔を行うためには、最適な回転およびトルクがあると考えられる。ただし、これらの設定は地山の状況によっても異なる可能性がある。
- ②実験当初の段階では曲線鋼管のため、インナービットを引き抜くことが困難であったが、その後のビットの改造などにより、引き抜きを可能にすることが出来るようになり、曲率半径10m程度の鋼管であれば、十分に削孔可能である

ことを確認した。

- ③鋼管の設置，ロッドの継ぎ足し，鋼管の継ぎ足しの一連の削孔作業は当初想定した幅 3 m の作業空間で支障なく作業が可能であることを確認した。
- ④鋼管の接続方法については，作業性，剛性・強度，経済性で圧着が有利であるが，現状の圧着機は大きく，ハンドリングが悪いため，コンパクト化するのが望ましい。
- ⑤ 1 本当りのサイクルタイムは，圧着継手の場合，模擬地盤強度 1 N/mm² で約 80 分，10N/mm² で約 170 分，24N/mm² で約 260 分であった。
- ⑥削孔機械の据付・移動時間を加えると模擬地盤強度が 1 N/mm² の場合には，1 本当たり 2 時間程度で施工可能であり，1 方=8 時間とすると，1 方当たり 4 本となり，昨年度の検討結果である 5.1 本/方の約 80% の速度となる。
- ⑦削孔精度は，貫通した 3 ケースでは，右へ 165mm，右へ 114mm，左へ 65mm という結果であり，1 D 程度未満であった。
- ⑧鋼管の削孔作業は想定した作業スペースで行えることが確認出来た。
- ⑨以上より、選定した曲線鋼管によるインバート補強工法は、実現場へ十分に適用できるものと考ええる。

5.2 今後の課題

本実験により，以下に示す改善項目，課題が判明した。本共同研究は今後も継続して行い，これらの改善項目，課題の解決を図り，本工法の確立を目指す予定である。

- ①削孔能力の向上
 - ・インナービット形状を回転打撃による破砕効果が上がる形状とする。
 - ・破砕した地山の取り込みをより容易にする形状とする。
 - ・削孔速度を上げるためにドリフタの仕様を見直す。
 - ・効率の良い排泥方法を検討する。
- ②サイクルタイムの短縮
 - ・鋼管の接続回数を減らす。
 - ・圧着機とセンタライザーの配置を再検討する。
 - ・削孔機の位置合わせの精度を向上させる。
- ③コストの低減
 - ・より安価な捨てビットを検討する。
- ④作業ヤードの施工性向上
 - ・削孔機の高さを低くする。
- ⑤作業ヤードの施工安全性向上
 - ・土留工の必要性および構造を検討する。