

トンネル薄肉鋼製補強工の構造と施工事例

Structure and Construction Examples of Tunnel Reinforcement Method Using Thin Steel Panels

桐山和晃^{* (1)} 竹内貴司^{* (2)} 柿崎 稔^{* (1)} 羽上田 裕章^{* (1)}
 Kazuaki KIRIYAMA Takashi TAKEUCHI Minoru KAKIZAKI Hiroaki HAJOHTA
 高林 努^{* (3)} 矢野嘉孝^{* (4)} 広沢規行^{* (5)} 今福健一郎^{* (6)}
 Tsutomu TAKABAYASHI Yoshitaka YANO Noriyuki HIROSAWA Kenichiroh IMAFUKU

抄 録

トンネル構造物では、老朽化や地山変状、地震等の内的・外的要因によるトンネル覆工の剥落、亀裂や変形等の変状が各所で報告されており、適切な補修、補強を施しつつ、継続的に維持管理していくことが今後の重要な課題となっている。紹介する工法は、既設トンネルの補強対策として、覆工内空断面と相似形に曲げ加工し、かつ継手構造を備えた鋼製覆工板を覆工に内巻きする“トンネル薄肉鋼製補強工法”である。当該工法の開発は、水路トンネルの補強工事として行ってきた鋼板内巻改修工法と、セグメント技術を組み合わせて行ったものであり、その構造、設計法および施工事例に関して報告した。

Abstract

Recently, there have been many reports regarding tunnel structures where tunnel concrete lining has deformed (such as cracks, concrete flakes falling off and other types of deformation) due to external or internal factors such as aging, deformation of natural ground, and earthquakes. Therefore, going forward it will be increasingly important to provide proper repair and reinforcement to the tunnel lining, and consistently maintain and manage the tunnels. This paper introduces a method of reinforcing existing tunnel structure, called “Tunnel Reinforcement Method using Thin Steel Panels”, whereby steel panels are processed to a shape which is similar to the tunnel inner lining and installed within the tunnel as reinforcement. Each panel is bilaterally joined utilizing houndstooth- arrangement. This method has been developed by combining steel- board reinforcement work used for reinforcement of waterway tunnels and steel segment technology used for shield tunnels. We will introduce this method in this paper.

1. 諸 言

トンネル構造物では、老朽化や地山変状、地震等の内的・外的要因によるトンネル覆工の剥落、亀裂や変形等の変状が各所で報告されており、適切な補修、補強を施しつつ、継続的に維持管理していくことが今後の重要な課題となっている。特に交通の主要インフラストラクチャーである鉄道や道路においては、交通機能の確保を前提に、補修・補強工法に対しても施工段階にて交通の障害とならず、かつ安全なことが求められる。ここでは、これらのトンネルを対象に、既設覆工内面に鋼製覆工板(以下、パネル)を相似形に内巻きし、薄肉の覆工を迅速に構築するトンネル補強工法について報告する。

2. 補強工の特徴

2.1 本工法の特徴と位置付け

本工法はトンネル内面に8~20数mmの鋼板で出来たパネルを設

置し、パネルと既設覆工の隙間を確保する棒状部材(以下、スペーサー)を活用して形状調整後、隙間にグラウト材を充填する構造であり、覆工剥落防止や地山の変状等に対する補強対策工法である(図1)。以下に、本工法の特徴を列記する。

- ①薄肉構造：パネルで構成された補強構造体は既設覆工にあわせて任意の形状に加工でき、内空断面をほとんど変えることなく、建築限界と既設覆工の狭隘な隙間に対しても薄肉の補強覆工が構築可能である。
- ②プレファブ工法：工場製作された鋼製部材を嵌合して組立てるプレファブ工法であるため、部材の製作や現地施工精度が高い。また、防食品質が高い。
- ③高耐力：鋼製パネルと既設覆工との間に充填するグラウトにより既設覆工に拘束された自立したアーチ構造であるため、薄肉でありながら高い耐荷力を有する。
- ④恒久的対策：上述の自立性に加え、トンネル環境に応じた防食対策を施すことにより、恒久的な補強対策として機能する。

* (1) 鉄構海洋・エネルギー事業部 水道施設部 マネジャー
 東京都千代田区大手町2-6-3 〒100-8071 TEL:(03)3275-5753

* (2) 鉄構海洋・エネルギー事業部 水道施設部長 工博

* (3) 鉄構海洋・エネルギー事業部 水道施設部

* (4) 鉄構海洋・エネルギー事業部 エンジニアリングサポートセンター
 機械・計測技術グループ グループリーダー

* (5) 建材事業部 建材開発技術部 マネジャー

* (6) 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員

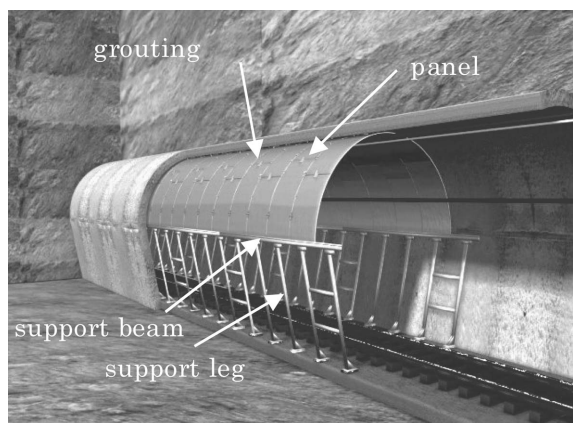


図1 基本構造
Image of basic structure

⑤ 溶接無し、省力化による急速施工：嵌合継手を用いる溶接無しの組立てが可能であるため、深夜のごく僅かな作業時間内でも迅速に組立てられ、かつ施工期間内にも通常通りのトンネル内の通行が可能である。

⑥ 内面平滑：内面が平滑であるため、美観、防汚性に優れている。

2.2 本工法メニューと特徴

本工法は構造と施工の違いから、次の三つのタイプに分類される。

- ① 大パネルタイプ：周方向に1枚鋼板を設置，機械施工
- ② 中パネルタイプ：周方向に鋼板を分割して設置，機械施工
- ③ 小パネルタイプ：周方向に鋼板を分割して設置，人力施工

(1) 構造の特徴

大パネルタイプは水路トンネル等のように、既設覆工内に設置物が無い場合に適用できる。ここでは、施工条件に対して汎用性の高い中パネルおよび小パネルタイプについて述べる。構造の特徴は、パネルの周囲にリング間、周方向ピース間を連結する嵌合継手を配したパネルが千鳥組で配置され、鋼板および継手強度により荷重を受け持つ(図2)。

薄肉の補強覆工を構築でき、最小50mm内空側に張り出す程度であり、建築限界が厳しい部分でも設置が可能である。

継手はシールドセグメントと同様に添接効果による荷重伝達の役割を果たし、2リング以上で外力に抵抗することができる。

(2) 施工法の特徴

中パネルタイプの鉄道トンネルを例にした施工手順を図3に示す。

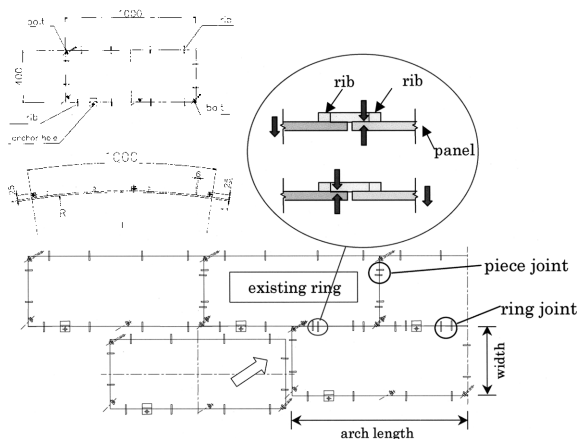


図2 パネル構造と組立方法
Panel details and assembling method

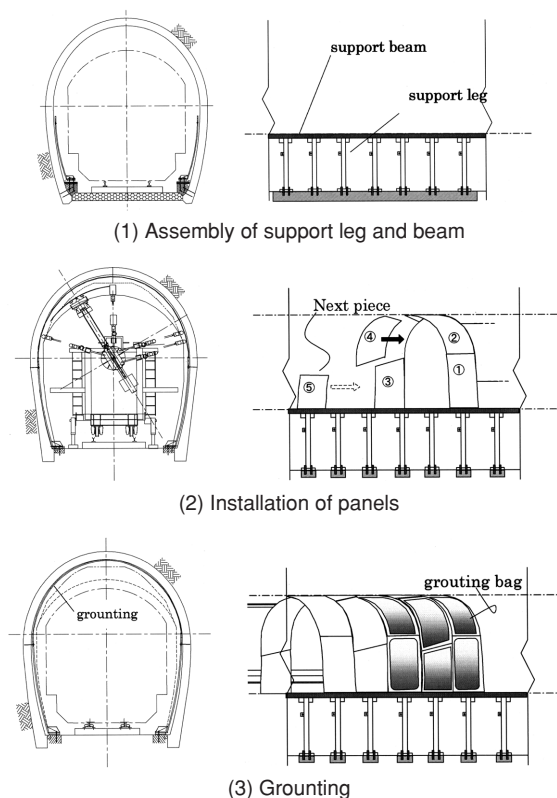


図3 中パネルタイプの施工手順
Installation process by elector machine

す。パネル寸法は板厚8mm～20数mm×幅1m×周長2～3m程度となる。パネルを把持する機械としてシールドトンネルのセグメント施工台車に類似したセグメント把持腕機構(以下、エレクター)を装備した台車により組立てる。機械施工であるため急速な組立てが可能である。小パネルタイプでは、人力により組立てるためパネルを30kg/枚以下とし、サイズを板厚8mm×幅400mm×弧長1000mm程度としている。小規模工事や施工台車の使用が不可能なトンネルの場合に適し、機動性に優れている。

3. 構造特性と設計法

3.1 構造特性

パネルは、アーチ構造を形成し、前述のようにパネルと既設覆工との間に充填されたグラウトを介して既設覆工および地山によって拘束された自立のアーチ構造である。そのため、薄肉であっても既設覆工の剥落や地山の変状等の外力に対して抵抗できる。鋼板を内巻きすることによる補強効果を概略的に把握するために、覆工に一樣厚さの一枚の鋼板を設置した基本構造について試算した結果を図4に示す。解析は覆工剥落あるいは緩み土圧を想定し、図のような分布荷重(W)に対して、鋼板厚(t)を8mm, 16mm, 24mm, トンネル直径(D)を5mと10mとに変化させた6ケースについて行った。

ここで、パネルははりモデル、地盤ばねは非線形のノンテンションばねとし、圧縮側ばね定数(Kv)を砂質地山として若干小さめの50MN/m³とした。鋼板はSM490とし許容応力度($\sigma_a=185\text{N/mm}^2$ と仮定 参考：日本道路協会、日本道路協会示方書)に達するときの荷重を計算した。計算の結果、土の比重を18kN/m³とした場合に緩み土圧に換算するとトンネル直径の0.4～1.8倍の緩み高さ(D=5mの場合、H=4.81～8.81m, D=10mの場合、H=3.95～8.17m)の土圧に耐えられることが分かる。

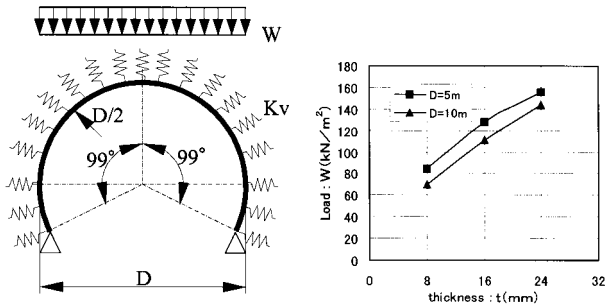


図4 構造検討モデルと解析結果
Calculation model and result

3.2 継手構造

継手は、機械式の嵌合継手構造(図2)である。組立て時は軸・周方向のパネルの目開き防止として斜め方向に設置されたボルトによりパネル間を締め付ける。継手部材として、平鋼を相互のパネル間に設け、パネルのせん断方向の変位を互いに拘束することによる添接効果を期待し、半径方向のせん断力を隣接リングや同一リング内の隣接パネルに伝達する構造とした。その結果、向かい合うリブが1対となって正負どちらでもせん断力を伝達することができる(図2)。パネル間には、パネル周囲に配置したスポンジ状の止水材を施し、トンネル内の漏水を抑制する。

3.3 継手強度試験

パネルの耐荷特性、継手強度特性を把握するために載荷実験を行った。載荷状況を写真1に示す。試験体は小パネルタイプ(板厚8mm×幅400mm×周長1000mm, R4200(鋼板外面))とし、3リング分のパネルを組合わせた状態の一部(全体寸法で、幅1m、周長2m)を取り出した形状で、中央部へ集中荷重載荷を実施した。

試験結果を図5に示す。図中には嵌合継手をせん断ばねとした、はりばねモデル(後述図6参照)による計算値と実験値を示す。解析では、荷重(P)に対するよるパネルのせん断方向のたわみ(δ)で評価し、せん断ばね定数($K_r=P/\delta$)を設定した。

解析での継手のばね定数を変化させ、実験値との整合が図れる値を導くことにより、せん断ばね定数を確定することができた。

3.4 設計法

3.4.1 構造モデル

(1)構造モデル

設計では、実験との整合が取れた前述の手法として、パネルを周方向のはりモデルとし、継手は下記のようにモデル化した“はり-

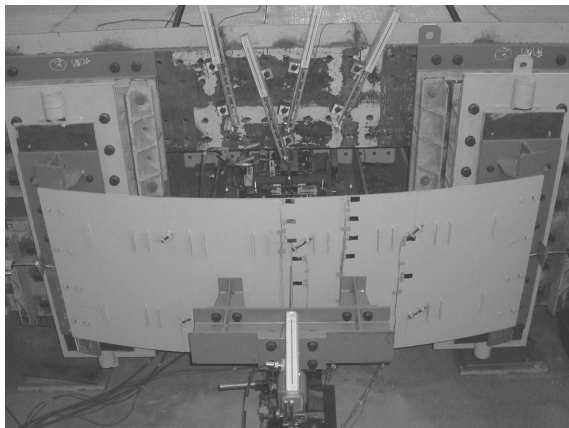


写真1 パネル載荷試験状況
Loading experiment

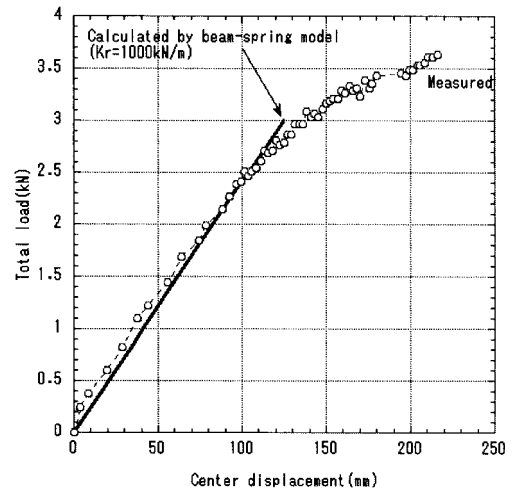


図5 試験結果と解析結果
Comparison for experiment result and FEM analysis

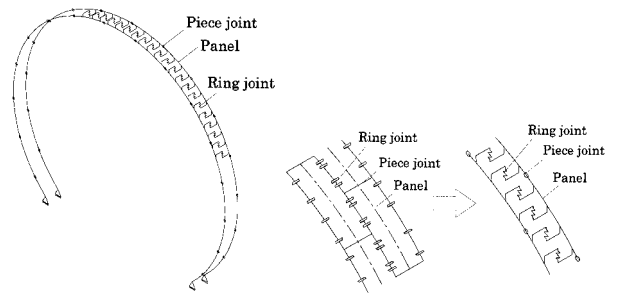


図6 解析モデル
Frame-spring analysis model

ばねモデル”による解析を行う(図6)。

(i)リング間継手

リング間継手は半径方向のせん断ばねにモデル化する。せん断ばねのばね定数は、前述の実験により求めたばね定数を設定する。

(ii)ピース間継手

周方向のパネル間(ピース間継手)の軸力は伝達するが、曲げモーメントは伝達しない、ピン接合としてモデル化する。

(2)地盤ばね

施工時検討では、半径方向に地山~スパーサーを介した点支持型の地盤ばねとして、非線形ノテンションばねのみを考慮する。

完成後の恒久構造としての検討では、グラウト~地山からの反力を考慮し、地盤ばねは半径方向に地山~グラウトを介した分布ばねとした非線形ノテンションばねを考慮する。

3.4.2 設計荷重

設計荷重は、完成時はパネル自重、列車または車両走行時の空気圧、グラウト材自重、剥落荷重や土荷重を考慮する。施工時はグラウト材の充填過程に応じた荷重を考慮する。

4. 工種と施工法

4.1 測量工および設計

既設トンネル断面形状は、光波測距儀等により詳細な測量を行う。これにより既設覆工と建築限界線との相対位置を捕らえ、補強後の断面縮小を極力小さくできるように、パネルの設置断面を設計する。

4.2 配線移設工

トンネル内の電気配線、通信・信号線、照明、およびそれぞれの支持金具等の覆工設置物は、配線の安全性確保と施工性の向上の観

点から可能な限り施工前に取外し、または仮移設を行う。

4.3 パネル脚部材および梁部材設置工

パネル設置下端部には、支持部材としてトンネル軸方向にパネルを挿入できる溝形状をした梁部材を設置する。トンネル断面上半範囲のみパネル設置する場合は、地上よりパネル設置下端部まで脚部材を立て、梁部材を脚部材上部に設置してパネルを支持する。脚部材を立てる場合、脚部背面にはグラウト袋を事前に設置しておき、設置後に袋内にグラウトを充填して既設覆工との隙間を埋める。

4.4 パネル設置工

小パネルでは簡易な作業足場を使用し、人力により持ち上げ、組立てる。特殊な装置を使用せずに汎用工具(レンチ等)により周方向に連続的に組立てを行う。また、組立て時においては、パネルの位置出し、形状調整のためのパネルと既設覆工との隙間管理や、グラウト充填時の変形防止を目的に、仮設のアンカーにてパネルを既設覆工に仮固定しつつ組み立てる。

中パネルでは重量が大きくなるため、エレクターを装備した施工台車により持ち上げ、小パネルと同要領にてパネルを設置する。

4.5 グラウト充填工

パネル背面へのグラウト充填は、袋体を使用する場合と直接充填する場合がある。袋体内充填では、組立て前にパネル背面に袋体を取り付けておき、全区間にパネル設置完了後、パネル内空側より注入孔を通してグラウトを充填する。グラウト材は一般的なセメント系材料を使用し、地山と同程度以上のばね剛性を持つ配合とする。グラウトは直接充填を基本とするが、現場条件に応じて袋体内充填を選択する。グラウト充填において、袋体を使用する効果は下記の通りである。

- ① 覆工からの漏水に対して袋間から排水可能
- ② グラウトの端止め工が省略できる
- ③ 覆工の亀裂等からグラウトが流出しない
- ④ 漏水とグラウト材が混じることなく品質が確保される

4.6 配線類復旧工

施工後は、パネルに支持金具を取り付け、仮移設した配線や照明等を含め、元の位置に復旧する。

5. 工事事例

5.1 地下鉄トンネルにおける施工

用途：地下鉄単線トンネル(建設年次：1963年)
 トンネル径：高さH=5.4m, 幅B=6.8m
 施工延長：直線部4m
 パネル構造：小パネル(16枚/リング×10リング), t=8mm
 施工時間：約3時間/日

(終電後のき電停止～始発前のき電復旧)

本工事は、一次覆工がコンクリートセグメント、二次覆工にコンクリート内巻きにより築造された地下鉄トンネルにおいて、二次覆工コンクリートの剥落防止対策としてトンネル内面全周にパネルを内巻きする工事として実施した。パネルは小パネル構造で、人力組立て施工を行った。トンネル内に設置された配線類は地上に移設することができなかつたため、配線の支持金具を取り替えて、パネルが挿入できる程度に既設覆工との離隔をとることとした。トンネル断面および補強構造体設置断面を図7に示す。

施工台車は作業足場が鉛直方向上下に伸縮する台車を利用し、2～3リング/日の施工進捗を得ることができた。

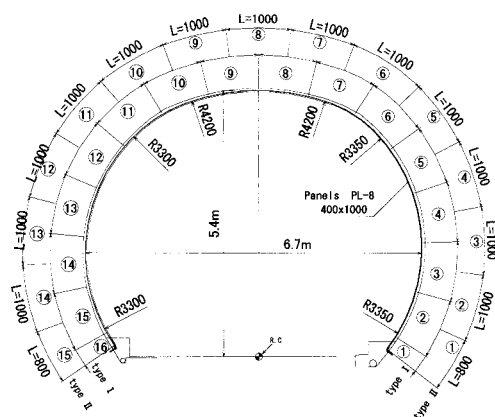


図7 パネル配置
Panel arrangement for tunnel section



写真2 地下鉄での工事事例
Example of construction for subway tunnel

パネル背面へのグラウト充填は、袋体を用いずにグラウトを直接全面に充填した。パネル間には止水材として厚さ5mmのスポンジを挟み込んでいる。この止水性については、室内実験により圧力0.2MPa以上を負荷したが、グラウト漏れが無いことを確認している。

パネルは、施工後の断面形状において設計寸法から5mm程度の誤差で裾付けが完了しており、精度の高い施工が行えた(写真2)。

5.2 道路トンネルにおける工事事例¹⁾

用途：1方向2車線道路トンネル(建設年：1973年)
 トンネル径：高さH=6.4m, 幅B=9.9m
 施工延長：40m
 パネル構造：中パネル(9枚/リング), t=24mm
 施工時間：約8時間/日(片側車線規制～開放)

本工事は、地山荷重および上載荷重に起因したトンネル覆工変状に対する覆工補強対策として行われた工事であり、土被り9mの鉛直荷重を負担する構造であった。パネルは中パネル構造で、機械施工を実施した。トンネルおよびパネルの断面図および施工要領概略を図8に示す。パネルはSM490で□1m×2mであり、重量が400～500kgとなる。パネル組立てには、先端にパネル設置時の微調整が行える油圧式調整治具を取付けたエレクター台車(写真3)を用いることによりパネルのハンドリングを容易にし、組立て速度を向上させた。その結果、2車線道路の片側車線を交互に利用して、全面通行止めを行わずに片側車線を活かした施工条件にもかかわらず、およそ1リング/日の進捗を確保した。さらに、現場では仮設や作業

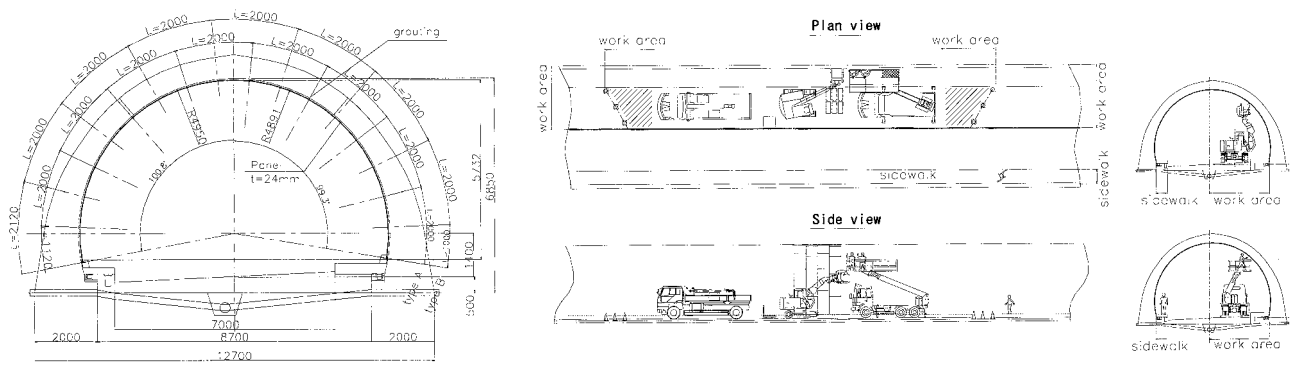


図8 パネル設計断面と施工要領
Section design and installation of panel



写真3 パネル設置状況
Installation of panel by elector machine



写真5 道路トンネル施工例
Example of road tunnel



写真4 完成状況
Completion



写真6 鉄道トンネル施工例
Example of railway tunnel

スペースの縮小を図り、周辺環境への阻害を極力低減するように配慮した(写真4)。

5.3 その他の施工事例

(1)道路トンネル(写真5)

用途：1方向1車線道路トンネル(建設年：1930年)

トンネル径：高さH=6.5m, 幅B=9.0m

施工延長：75m

パネル構造：小パネル(16枚/リング), t=8mm

(2)鉄道トンネル(写真6)

用途：在来線単線非電化トンネル(建設年：1933年)

トンネル径：高さH=5.2m, 幅B=4.6m

施工延長：31m

パネル構造：小パネル(脚部+8枚/リング), t=8mm

6. 結 言

本工法の実用化により、狭隘な建築限界に対しても補強構造を構築でき、車両交通を止めることなく急速かつ安全な施工が行えるこ

とが実証され、トンネル構造の更生を図る新たな恒久的対策を確立できた。今後、本工法が他方面のトンネル構造物において適用され、機能を発揮できることを期待したい。

謝 辞

本工法の開発にあたり東京大学 松本嘉司名誉教授には、構造・施工法の確立に多大なご教示をいただき、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 木賀一美:日経コンストラクション,(2004.10.8),32(2004)