

鉄道・道路トンネルにおける鋼製薄肉補強工法の構造と施工事例

桐山和晃¹・竹内貴司²・柿崎稔³・羽上田裕章¹・高林努³・矢野嘉孝⁴・広沢規行⁵・今福健一郎⁶

¹正会員 新日本製鐵株式会社 水道施設部 (〒100-8701 東京都千代田区大手町 2-6-3)

²正会員 工博 新日本製鐵株式会社 水道施設部 (〒100-8701 東京都千代田区大手町 2-6-3)

³新日本製鐵株式会社 水道施設部 (〒100-8701 東京都千代田区大手町 2-6-3)

⁴新日本製鐵株式会社 エンジニアリングサポートセンター (〒229-1131 神奈川県相模原市西橋本 5-9-1)

⁵新日本製鐵株式会社 建材開発技術部 (〒100-8701 東京都千代田区大手町 2-6-3)

⁶正会員 新日本製鐵株式会社 鉄鋼研究所 (〒100-8701 東京都千代田区大手町 2-6-3)

トンネル構造物では、老朽化や地山変状等の内的・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いる。しかしながら、既存の供用されているトンネルに対する覆工内面への補修・補強対策では、トンネル覆工と建築限界の間が非常に狭隘である場合や、車両の全面通行止めができないという制約条件により、工事が不可能もしくは非常に困難である場合が多く見られる。

ここでは、上記のトンネル条件にも対応可能なトンネル補強工法として、簡易な嵌合継手を備えた鋼製覆工板をトンネル覆工に迅速に内巻きし、自立した構造性能をもつ薄肉の補強覆工を構築する工法について報告する。

キ - ワ - ド：トンネル，既設覆工，補強，補修，鋼板，パネル，薄肉，自立構造，嵌合継手

1. はじめに

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。

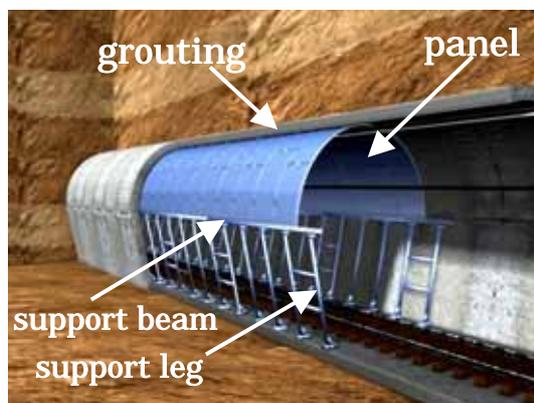


図-1 基本構造

2. 補強工の特徴

(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。

a) 薄肉構造

パネルは既設覆工にあわせて任意の形状にて内巻き設置を行い、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。

b) 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。

c)高耐力

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。

d)恒久的対策

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。

e)溶接レス・省力化による急速施工

嵌合継手を用いる溶接レス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。

f)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)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3つのタイプに分類される。

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

a)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(図-2)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、パネルおよび継手強度により荷重を受け持つ(図-3)。

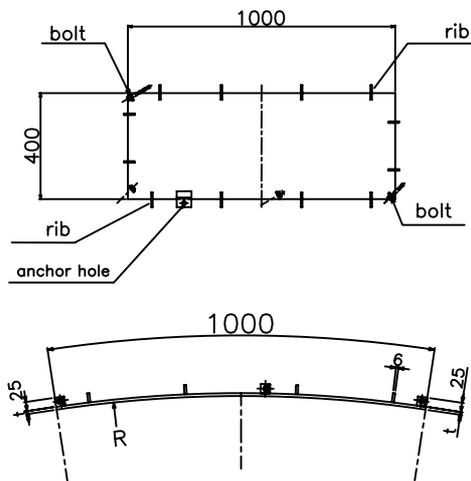


図-2 パネル構造例

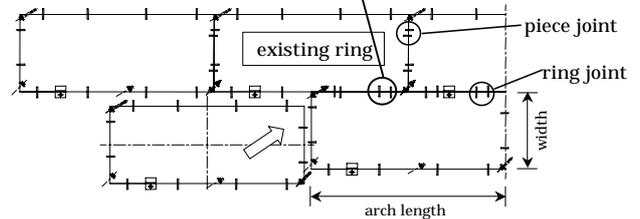
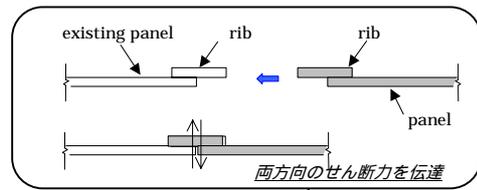


図-3 パネル組立て方法

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。

b)施工法の特徴

中パネルタイプの鉄道トンネルを例に施工手順を図-4 に示す。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

(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。パネル内巻き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-5 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,

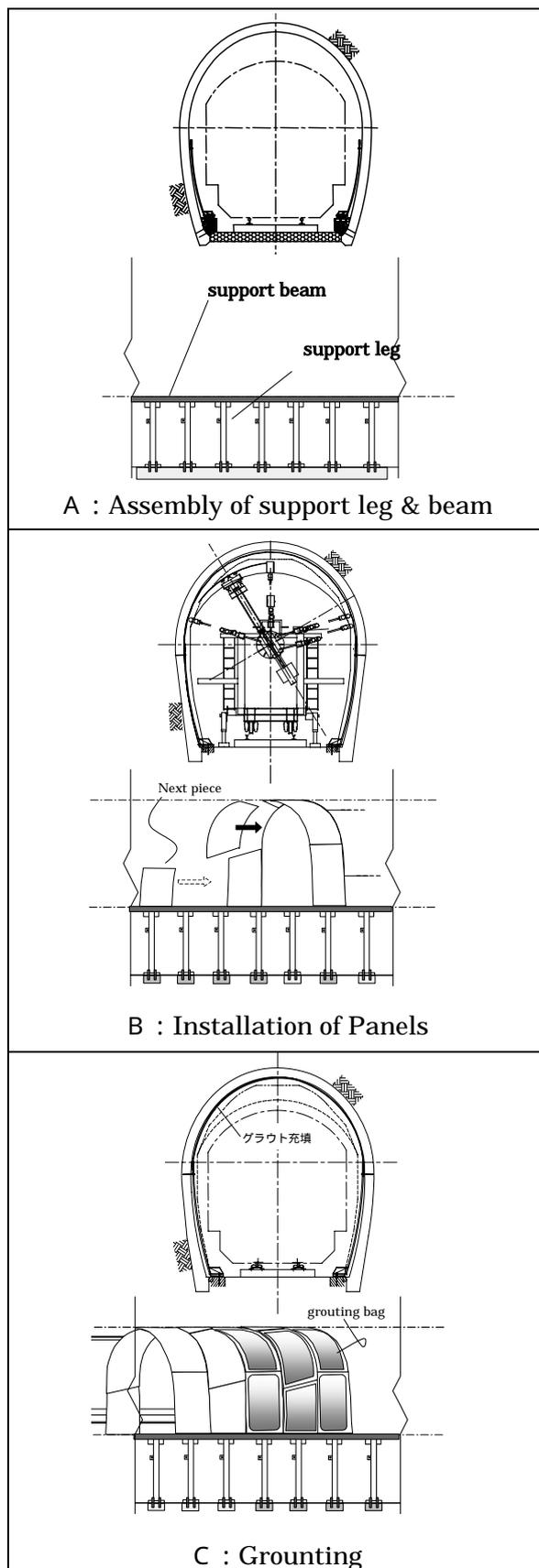


図-4 中パネルタイプの施工手順

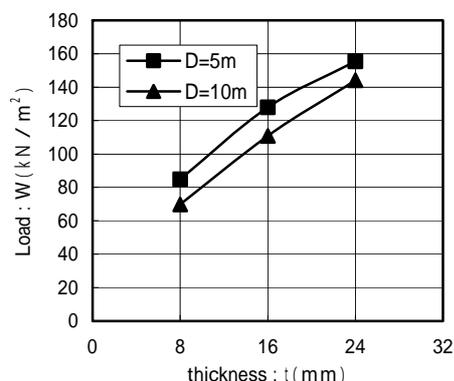
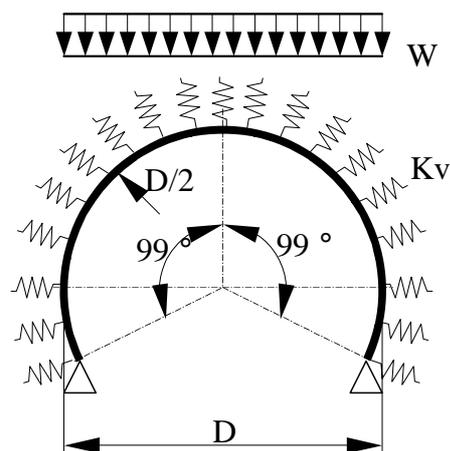


図-5 構造検討モデルと解析結果

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、地盤バネは非線形のノンテンションバネとし、圧縮側バネ定数(Kv)を砂質地山として若干低い値である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,道路協示方書)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。

(2)継手構造

パネルのリング間継手として、パネル背面に平鋼リブを溶接し、組立て時には既設と新設のパネルがリング間で相互に噛み合う構造とした(図-3)。これにより、片側のパネルがせん断方向に変位しようとする場合、背面のリブが隣接パネルにより拘束され、パネルの変位は制限される。この機構により、パネル間の曲げモーメントを隣接リングに伝達する添接効果が発揮できる構造とした。また、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ボルトを通してパネル間を締め付ける。パネル間およびリング間には、パネル周囲にスポンジ状の止水材料を施し、トンネル内の漏水を抑制する。

4. 設計法

(1)解析モデル

a)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 パネモデル」による解析を行う(図-6)。

b)リング間継手

リング間継手は半径方向のせん断バネにモデル化する。せん断バネのバネ定数は、前述の実験により求めたバネ定数を設定する。

c)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。

d)地盤バネ

グラウト~地山からの反力を考慮し、地盤バネは半径方向に地山~グラウトを介した分布バネとした、非線形のノンテンションバネを考慮する。

(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。

5. 工種と施工法

(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、パネルの設置断面を設計する。

(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。

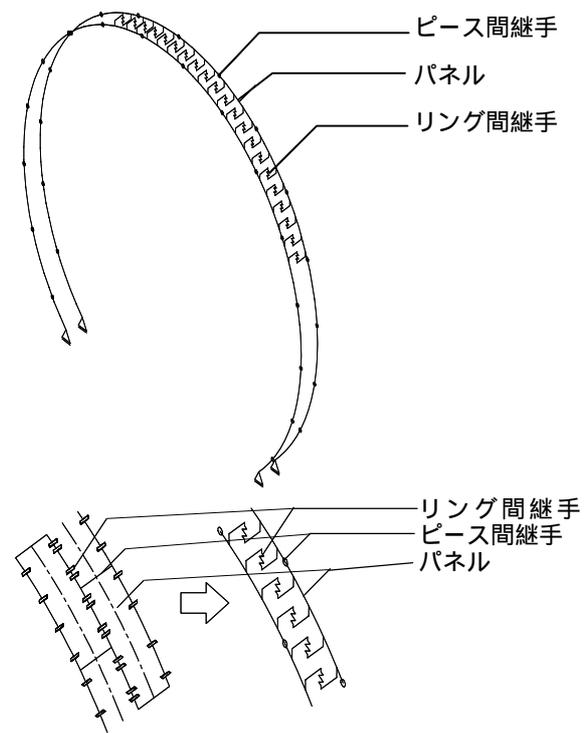


図-6 解析モデル

(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。その場合、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)パネル設置工

小パネルで人力により組立てる。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。

(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．

袋体を使用する効果は下記の通りである．

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

(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．



写真-1 地下鉄での施工事例

6．工事事例

(1)地下鉄トンネルにおける施工¹⁾

用 途：地下鉄単線トンネル
 トンネル径：高さ H=5.4m，幅 B=6.8m
 施工延長：直線部 4m
 パネル板厚：t=8mm（小パネル）
 パネル枚数：16枚/リング×10リング=160枚
 施工時間：約3時間/日

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．

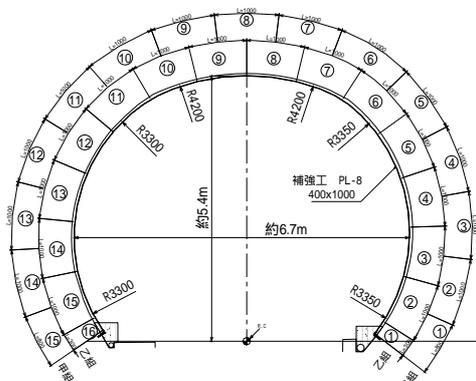


図-7 パネル配置

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．

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 程度の誤差で据付が完了しており，精度の高い施工が行えた．(写真-1)

(2)道路トンネルにおける工事事例^{1), 2)}

用 途：1方向2車線道路トンネル
 トンネル径：高さ H=6.4m，幅 B=9.9m
 施工延長：40m
 パネル板厚：t=24mm（中パネル）
 パネル枚数：9枚/リング×40リング=360枚
 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った工事であり，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．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，エレクター台車（写真-2，写真-3）を用い，先端にパネルの微調整が行える油圧式調整治具を取付け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．工事は，片側通行を活かした施工を行い，およそ1リング/日の進捗を確保した．また，照明等のトンネル内設備は施工前に地上に移設し，パネル設置後はパネル内面に，ボルト部材を入熱量の小さいスタッド溶接により取付け，これを利用し



写真-2 パネル設置状況（全体）



写真-3 パネル設置状況（把持部）

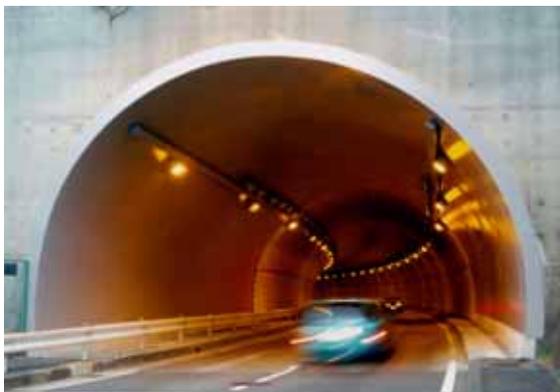


写真-4 完成状況

て設備取付け架台を設置し、設備等を復旧した。

(3) 鉄道在来線トンネルにおける施工¹⁾

用 途：在来線単線非電化トンネル

トンネル径：高さ H = 5.2m，幅 B = 4.6m

施工延長：31m

パネル板厚：t = 8mm（小パネル）

パネル枚数：8枚 / リング × 78 リング = 624 枚

施工時間：約 3 時間 / 日



写真-5 鉄道在来線トンネルでの施工例

本工事は、鉄道在来線トンネルの覆工補強を目的に、パネル内巻きを行った工事である。トンネル調査により、SL より上部に顕著な覆工劣化が見られ、地山荷重の支持、コンクリート剥落を防止することを目的に、面的な補強対策としてパネルを内巻きした。一方、側壁については、従来の補強センター対策と同様の構造として、厚肉平鋼を 1m ピッチに配置することで補強した。（写真-5）

トンネルは山岳部に位置し、現場への足場台車搬入は施工時間を縮小させてしまうため、簡易足場をトンネル内で組立ててパネルの設置作業を実施した。

7. おわりに

本工法により、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。

トンネル構造の更生を図る新たな恒久的対策として、今後、本工法が多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。

8. 謝 辞

本工法の開発にあたり東京大学名誉教授の松本嘉司先生には構造・施工法の確立に多大なご指導をいただき、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 桐山和晃ほか：新日鐵技報，2005.4
- 2) 木賀一美：日経コンストラクション，2004.10