

馬蹄形導水路トンネルにおける鋼板内巻改修工法の開発

Development of Steel Tunnelling Repairment Method for Old Horse Shoe Shape Tunnels

竹内 貴司*⁽¹⁾ 柿崎 稔*⁽²⁾ 川口 周作*⁽²⁾ 柳本 速雄*⁽³⁾
Takashi TAKEUCHI Minoru KAKIZAKI Shusaku KAWAGUCHI Hayao YANAGIMOTO

抄 録

老朽馬蹄形水路トンネルの補強・改修工法として、トンネルの全荷重（土圧・水圧）を考慮でき、改修後の断面減少を最小限に抑えた鋼板内巻改修工法を開発した。本工法は既設トンネル周辺地山に影響を及ぼすことのない安全施工を可能とし、通水性能の向上、水路施設への安定流水等トンネルの全機能が回復され、更に専用台車の開発により鋼板のトンネル内運搬・据付け作業が迅速に行われることから、全体工期の短縮が図れる優れた工法である。

Abstract

For the reinforcement and repairs of old horse shoe shape tunnels, Nippon Steel Corporation has developed a steel tunnelling repairment method in which repairs can be made with the total load of the tunnel (earth pressure and water pressure) taken into due consideration, thereby minimizing the reduction in cross section of the tunnel after repair. This method enables safe repairs without exerting an adverse effect on the earth in the neighborhood of the tunnel, improves the driving performance, recovers all of the functions of the tunnel, such as stable flow to the aqueduct facilities, and permits rapid transportation and installation of steel plates within the tunnel by using a newly developed special car. Accordingly, the term of work is considerably shortened by using this method.

1. 緒 言

我が国の導水路トンネルは、1920年代から1950年代に建設されたものが多い。これらのトンネルの中には、施設の老朽化、トンネル寿命などから改修が必要となってきたものが数多く見られる。

新日本製鐵では、このような老朽化トンネルの改修工法として、安全性、工期、経済性に優れた鋼板内巻改修工法(Steel Tunnelling Method: STM工法)を開発した。本報告は、STM工法が初めて適用された信濃川左岸農業用水路トンネルの工事実績例を中心に、開発成果について報告する。

2. STM工法

2.1 工法の概要

本工法は、既設トンネル断面より、僅かに小さい断面の鋼板製トンネルを設置する工法である。鋼板は、スプリングラインより上部のクラウン材及び下部のインバート材の二つ以上に分割して工場製作され、現地搬入後、専用台車で既設トンネル内へ運搬、据付けを行い、溶接接合される。

北陸農政局信濃川左岸二期農業水利事業所の2号幹線内3号及び

4号トンネル（以下、信濃3号、4号トンネルと略す）における改修前、改修中、改修完了の状況を写真1、2、3に示す。

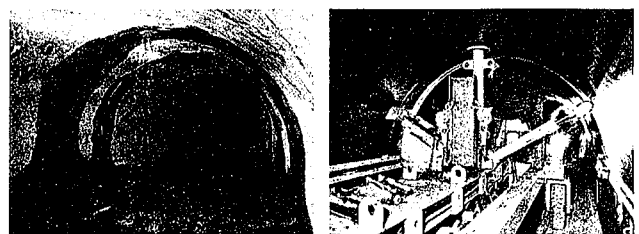


写真1 施工前の既設トンネル状況 写真2 鋼板内巻改修工事状況

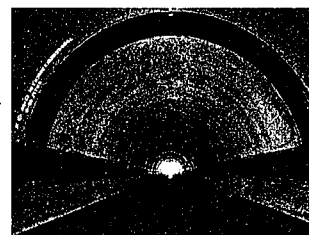


写真3 鋼板内巻改修工事完了後のトンネル状況

*⁽¹⁾ 鉄構海洋事業部 水道・水処理施設部 掛長

*⁽³⁾ 鉄構海洋事業部 技術開発部 掛長

*⁽²⁾ 鉄構海洋事業部 水道・水処理施設部

2.2 工法の特徴

トンネルの改修方法には、STM 工法の他に全面覆工コンクリート巻替工法、盤下げ+内巻きコンクリート工法及び新設バイパス建設などがある。STM 工法をこれらの工法と比較して、その特徴を以下に示す。

(1)性能の向上

既設トンネルと鋼板内巻きトンネルとの隙間は標準50mm であるため、通水断面の減少が極めて少なく、粗度係数の改善によって、トンネルの通水性能は向上する。信濃4号トンネルでは、通水断面が7%減少するが、通水能力は5%向上することになる。但し、粗度係数は既設トンネルを0.015、改修後を0.013とし、フリーボードをトンネル内空高さの20%とした。

(2)耐久性向上

土圧、地下水圧等の荷重を考慮して鋼板厚を決定するので、強度面での機能回復が図れる。

(3)安全性の確保

現況のトンネル状態のまま改修作業を行うので、盤下げ等による地山の応力解放がなく、平衡状態にある地山のグランドアーチを保持できることから、安全な施工が可能である。

(4)短工期

大規模な仮設工事が不要であり、鋼板の運搬、据付けは専用台車により行うので工期の短縮が図れる。

3. 信濃3号, 4号トンネルの改修工事

3.1 老朽トンネルの現況及び地質

3.1.1 現況

信濃3号, 4号トンネル共に1949年から1952年に施工されたもので、ライニングの摩耗が著しく、風化、剝離が随所に見られ、偏圧によるクラック発生箇所も多い。又、ライニング厚も部分的に薄い箇所が確認された。

3.1.2 地質

信濃3号, 4号トンネルは、小栗田原段丘の東斜面断崖下部にあり、地下水の集水暗渠的存在となっている。3号トンネルの坑口から400m ほどは魚沼層の礫層であるが、その他は小栗田原段丘堆積層を貫通している。3号, 4号トンネルの土被りは、それぞれ5~25m, 5~10m であり、薄い。

3.2 設計

本工法の設計は、既設トンネルの土質ボーリング調査及び坑内路線、横断測量結果等から設計条件を設定し、トンネルの必要通水量により通水断面を決定した後に、内巻鋼板の断面構造検討を実施した。

(1)内巻鋼板の断面構造検討

既設トンネルが土圧及び上載荷重を将来的に負担できないものとし、内巻鋼板が土圧、上載荷重及び地下水による水圧の全荷重を負担することとして構造検討した。

まず、土圧に対する検討は、内巻鋼板上載荷重、鉛直土圧(テルツァギーのゆるみ土圧)、側土圧、地下水圧及び鋼板自重が作用するものとし、地質調査に基づいてN値50相当の周辺地盤ばね(非線形ばね)で支持された馬蹄形鋼板構造を、“有限要素法による汎用非線形構造解析プログラム”により解析し、最大発生応力のチェックを行い鋼板厚さを求めた。

3号トンネルの数値計算結果例として、応力分布図、軸力図、曲げモーメント図をそれぞれ図1, 2, 3に示す。

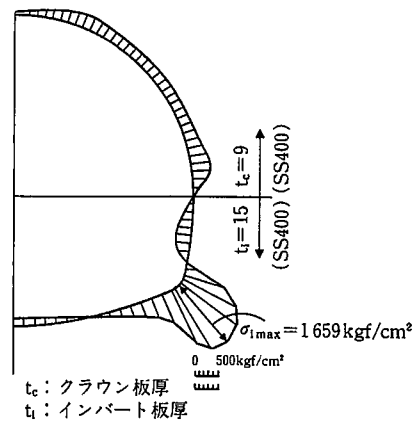


図1 応力分布図

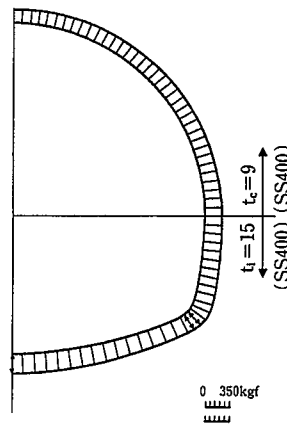


図2 軸力図

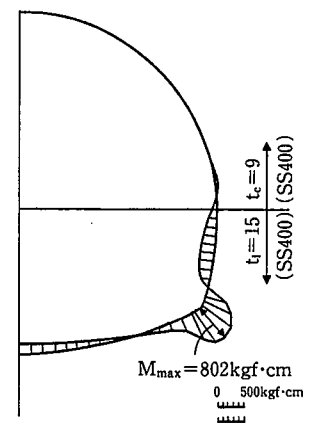


図3 曲げモーメント図

つぎに、地下水による水圧に対する検討の考え方として、将来的には荷重負担できないものの、現況既設トンネルは土圧及び上載荷重を負担しており、内巻鋼板は周辺を既設トンネル及び裏込めグラウトで囲まれた状態となる。従って、内巻鋼板と裏込めグラウトの隙間に地下水が浸透した場合、内巻鋼板は外側への変形を拘束された状態で外水圧を受けることになり、図4に示すような変形を起こす可能性がある。

ここでは、内巻鋼板と既設トンネルの付着及びはく離を考慮した“大変形弾塑性有限要素法プログラム”により数値解析し、座屈耐力を求め、鋼板厚さを決定した。

以上の断面構造検討により求められた土圧に対する設計板厚と水圧に対する設計板厚で、厚い方に余裕代1mmを考慮して設計板厚と

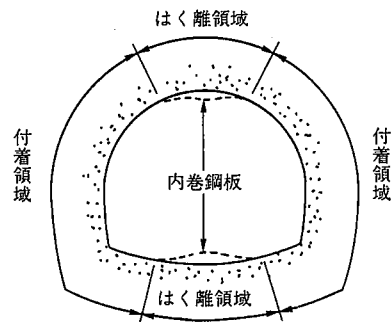


図4 周辺拘束状態での鋼板変形

した。設計フローを図5に示す。最終決定板厚は、高張力鋼採用による薄板化の経済性を検討の上、決定した。

3号トンネルの最終決定板厚を表1に示す。尚、最小板厚 (t_{min}) は、設計上より水門鉄管技術基準の

$$t_{min} = (D + 800) / 400 \quad D: \text{管径}$$

及び、製作上より決定される最小製造可能板厚の大きい方を採用した。3号トンネルの場合は、 $t_{min} = 10\text{mm}$ であった。

(2)内巻鋼板の搬入長検討

現地施工面より、既設トンネル曲がり部の通過可能な鋼板長さを検討し、最終搬入長を決定した。尚、内巻鋼板の工場加工上、鋼板曲げロール及びプレス幅から最大6mとした。

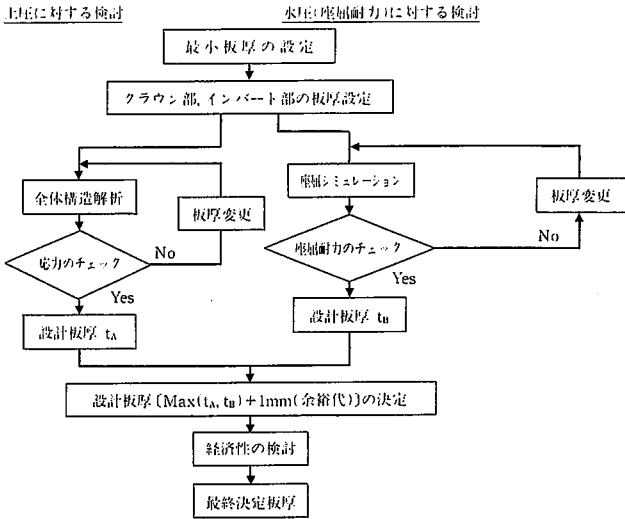


図5 設計フロー

3.3 現地施工

3.3.1 施工フロー

施工フローを図6に示す。鋼板の防食は、土砂吐き上流に位置し、

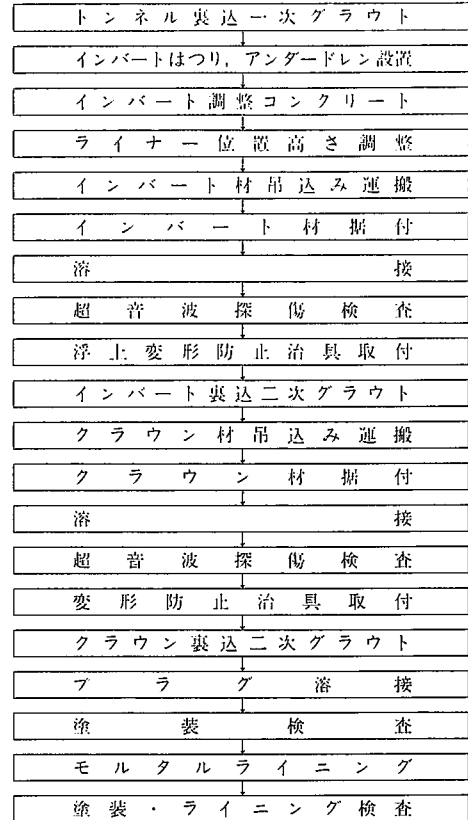


図6 施工フロー

表1 3号トンネル最終決定鋼板厚さ

ケース	クラウン 最終決定 鋼板板厚 (mm) (材質)	インバート					最終決定 鋼板板厚 (mm) (材質)
		土圧による 設計板厚 (mm)		座屈耐力による 設計板厚 (mm)	設計板厚 (mm)		
		SS400	SM490		SS400, SM490	SS400	
1	10 (SS400)	15	12	13	16	14	14 (SM490)
2	10 (SS400)	13	10	13	14	14	14 (SS400)
3	10 (SS400)	11	9	12	13	13	13 (SS400)
4	10 (SS400)	10	9	11	12	12	12 (SS400)
5	10 (SS400)	10	9	10	11	11	11 (SS400)
6	10 (SS400)	9	8	10	11	11	11 (SS400)
7	10 (SS400)	9	8	10	11	11	11 (SS400)
8	10 (SS400)	9	8	9	10	10	10 (SS400)
9	10 (SS400)	17	14	14	18	15	15 (SM490)
10	10 (SS400)	19	15	15	20	16	16 (SM490)
11	10 (SS400)	19	15	15	20	16	16 (SM490)

設計条件(土被り, 地下水位, 上載荷重)の異なる11ケースについて検討した

トンネル延長の長い3号トンネルは維持管理面を考慮してインバート底面をラス入りモルタルライニング(5cm)、アーチサイド及び天端はタールエポキシ樹脂塗装(0.5mm)とした。4号トンネルはインバート底面に耐摩耗性ガラスフレック入りタールエポキシ樹脂(1.0mm)、この範囲以外は3号トンネルと同仕様の塗装とした。

3.3.2 施工内容

(1)トンネル裏込一次グラウト

既設トンネル覆工裏面と地山との空隙にベントナイトモルタルを充填して受働抵抗の増大を図るもので、既設トンネル覆工天端に注入孔及び確認孔、アーチサイド下端に確認孔を穿孔し、グラウチングした。

(2)インバート研り、アンダー dren 設置、調整コンクリート打設
老朽化したインバートコンクリートを機械、人力の併用により研り取り(写真4参照)、湧水量に応じたアンダー dren(3号トンネル250mmφ、4号トンネル200mmφ)を設置後、内巻鋼板と同様曲率の調整コンクリートを打設した。なお、道路下横断部等についてはコンクリート打設時にインバートストラットの設置を併行して行った(写真5参照)。

(3)ライナー位置高さ調整

鋼板高さ調整用に取り付けられているインバート材外面の硬質ゴムライナー(厚さ3cm)位置で、調整コンクリートの高さ測量を行い、急結モルタルにより所定高さに調整した(モルタル厚を標準2cm)。

(4)インバート材運搬、据付、溶接(図7参照)

工場加工されたインバート材をトレーラーにより現地搬入、仮置きし、クレーンにより発進坑口内に吊り卸し、専用台車の載置装置及び締め込み治具による絞り込み、上下伸縮装置の吊り上げにより、既設トンネル内に搬入した(写真6参照)。既設トンネル内への運搬は、専用台車と接続されたけん引車により行った(写真7参照)。

据付けは、専用台車の前後移動装置、左右横移動装置、上下伸縮装置の併用により、既に据付けられたインバート材の裏当金上に合わせ、目違い調整用治具により全周の肌合わせを行い、仮付溶接した(写真8参照)。本溶接は、作業能率の向上のために半自動溶接を採用した(写真9参照)。

(5)溶接検査

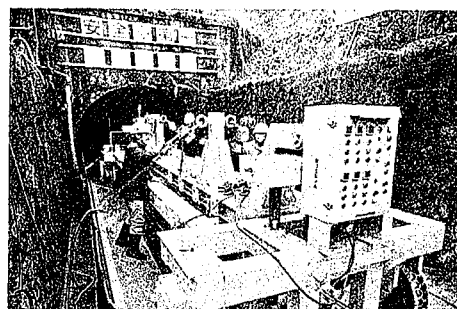


写真6 専用台車によるインバート材絞り込み状況

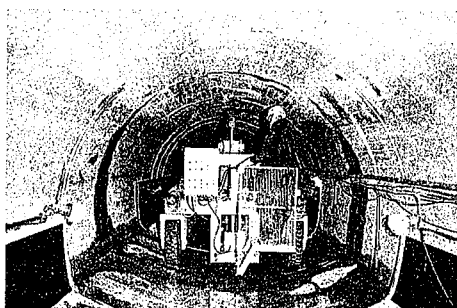


写真7 インバート材坑内搬入状況



写真4 既設トンネルインバートコンクリート研り状況

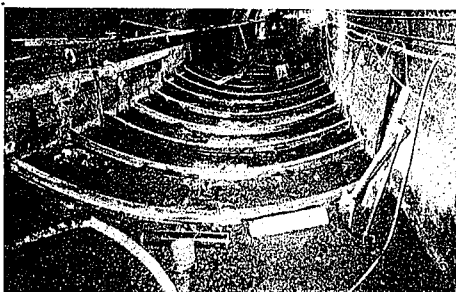


写真5 インバートストラット設置状況

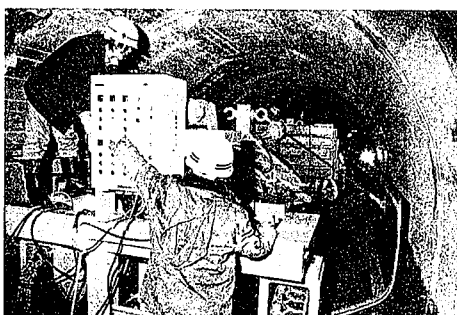


写真8 インバート材据付け状況

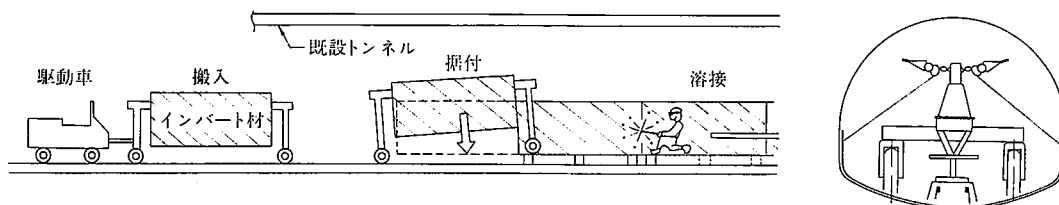


図7 インバート材据付け状況

溶接部の検査は超音波深傷による非破壊検査を実施した。

(6)インバート材裏込二次グラウト

インバート材と既設トンネル覆工との隙間に、ベントナイトモルタルを注入した(写真10参照)。

(7)クラウン材運搬、据付、溶接(図8参照)

インバート裏込二次グラウトの硬化養生後、クラウン材をクレーンで発進坑口に待機している専用台車上に吊り卸し、締め込み治具によりクラウン材を専用台車にセット、専用台車による絞り込み、上下伸縮装置の降下により、既設トンネル内に搬入した(写真11参照)。

けん引車と専用台車により既設トンネル内を運搬後、専用台車の前後移動装置、左右横移動装置、上下伸縮装置、斜め伸縮装置の併用により、既に据付けられたクラウン材周方向裏当金とインバート材軸方向裏当金に合わせ、目違い調整用治具により全周の肌合わせを行い(写真12参照)、仮付溶接し、その後インバートと同様に半自動溶接法で本溶接を行い(写真13参照)、超音波深傷による非破壊検査を実施した(写真14参照)。

(8)クラウン材裏込二次グラウト

クラウン材と既設覆工との隙間に、ベントナイトモルタルを注入した(写真15参照)。

(9)プラグ溶接



写真 11 クラウン材坑内搬入状況

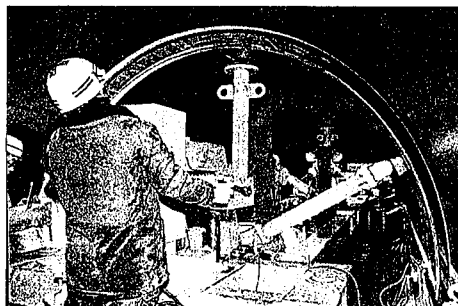


写真 12 クラウン材据付け状況



写真 9 半自動溶接によるインバート材溶接状況



写真 13 半自動溶接によるクラウン材溶接状況

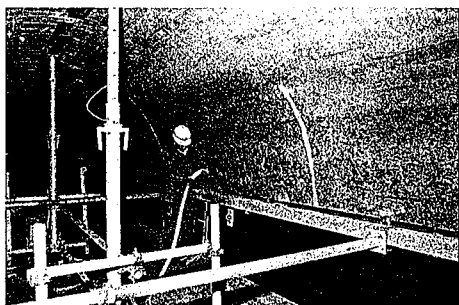


写真 10 インバート裏込二次グラウト注入状況



写真 14 超音波探傷による現地溶接部非破壊検査状況

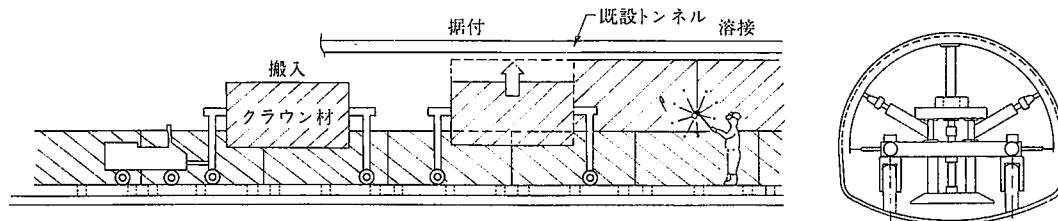


図 8 クラウン材据付状況

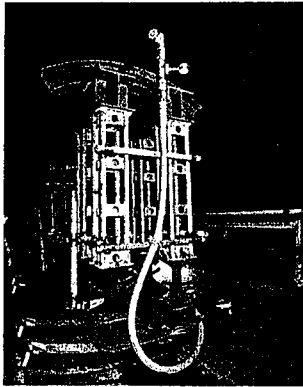


写真 15 クラウン裏込二次グラウト注入状況

クラウン材裏込二次グラウトの硬化養生後、クラウン材に取付られたグラウト注入用プラグの溶接を行った。

(10)内面塗装、モルタルライニング

現場溶接箇所等をサンドブラストし、防錆塗装後、刷毛、エアレススプレーにより全体塗装した。モルタルライニングはインバート材底面にラス受け鋼材を溶接し、鋼材とラスを結束しながら5cmにモルタル仕上げした。

3.3.3 鋼板運搬据付専用台車（以下、専用台車）

(1)専用台車の装置概要

本工法用に開発した専用台車は、インバート材を運搬、据付する下部ユニットとクラウン材を運搬、据付する上部ユニットで構成されている。装置概要を図9、10に示す。下部ユニットには6本の油

圧シリンダーによるインバート材載置装置がある。上部ユニットには6本の油圧シリンダーによる斜め伸縮装置がある。上下部共用の装置として、前後移動装置、上下伸縮装置、左右横移動装置がある。

(2)専用台車の特徴

専用台車に装備されている各種装置により、以下の特徴を持つ。

- (i)鋼板を弾性範囲内で縮径することにより、既設トンネル内の僅かなクリアランスで運搬することを可能にした。
- (ii)据付場所まで運搬した鋼板を三次元的にハンドリングすることにより、効率的な鋼板の肌合わせを可能にした。

4. 結 言

信濃3号、4号トンネルの工事事例を中心にSTM工法の開発成果について述べた。

STM工法は、内空断面7m²程度の農業、上水道、発電用水用トンネルに約2.5kmの実績がある。現在、30m²以上のトンネルへの適用検討も行っている。多種多様なトンネル改修工法のなかで、画期的な本工法の発展が大いに期待される。

本報告の事例と同時期に建設された導水路トンネルの中には、改修が必要となっているものも数多くあると思われる。本報告が改修工法を検討する際の参考の一助となれば幸甚である。

本工法の開発に際して、いろいろと御指導下さいました日本農業土木総合研究所及び同研究所が設立した検討委員会の諸先生方、農林水産省北陸農政局信濃川左岸二期農業水利事業所の皆様方、並びに東京工業大学 吉田裕教授に深く感謝の意を表します。

参照文献

- 1) 吉田 裕 ほか：土木学会第42回年次学術講演会論文集，1987，p.148
- 2) 増山琢也 ほか：第39回全国水道研究発表会講演集，1988，p.15-16
- 3) 木村哲夫 ほか：建設機械と施工法シンポジウム論文集，1990，p.110
- 4) 小林栄三：日本の水道鋼管．(45)，24（1990）
- 5) 柿崎 稔：第41回全国水道研究発表会講演集，1990，p.387
- 6) 柳本連雄：材料とプロセス．5（2），576（1992）

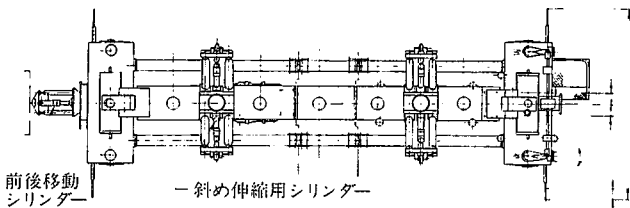


図 9 専用台車平面図

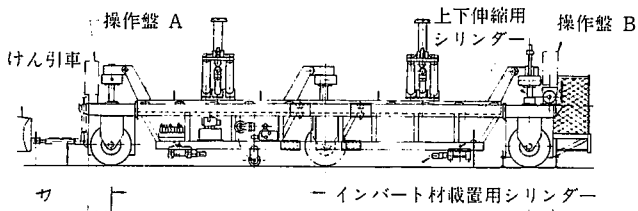


図 10 専用台車側面図