

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.34(2002)No.1

新機能線材・棒鋼小特集号

スチールライニング工法によるシールドトンネル補強技術

Steel Lining Method for Shield Tunnel Reinforcement

増田 敏一 (Masuda, T.) 足立 明 (Adachi, A.) 村上 優 (Murakami, M.) 沢田 充
弘 (Sawada, M.) 鎌田 敏正 (Kamata, T.) 橋本 正 (Hashimoto, T.)

要旨：

通信ケーブル用トンネルや共同溝など、活線状態のライフラインが設置されたシールドトンネルの補修・補強工法として、「スチールライニング工法」を開発・実用化した。同工法は、鋼管を軸方向に二分割し、フランジと差込継手を設けた「二分割鋼管セグメント」を既設トンネルに敷設する工法である。本工法による補強トンネルの構造安全性を確認するために、 $\phi 825\text{mm}$ の縮小モデルで圧縮試験を実施し、良好な結果を得た。その後、 $\phi 3850\text{mm}$ の鋼管セグメントを用いた実工事により、施工性能・止水性能を確認した。本工法によれば、既設トンネルの有効断面を損なうことなく、活線状態のままで安全に短工期で、既設老朽トンネルの補強工事を行うことができる。

Synopsis：

A Steel Lining Method suitable to repair or reinforce a shield tunnel in service for communication cables and pipelines has been developed. The method sets up two split-type steel pipe segments which have flange joints and spigot joins in the tunnel. The effectiveness of the method was checked experimentally by compressive tests with $\phi 825\text{mm}$ structural models and confirmed the safety of the reinforced tunnel. On-site operation of the method with $\phi 3850\text{mm}$ segments proved the excellent performance of the segments in construction and water-sealing. The method realizes to reinforce a shield tunnel with a minimum reduction of the cross-section area of the tunnel. The operation of the method for a tunnel in service can be performed in safety and in a short term without giving damage to existing cables and pipes.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

スチールライニング工法による シールドトンネル補強技術*

川崎製鉄技報
34 (2002) 1, 29-34

Steel Lining Method for Shield Tunnel Reinforcement



増田 敏一
Toshikazu Masuda
エネルギー・水道事業
部 技術部 主査



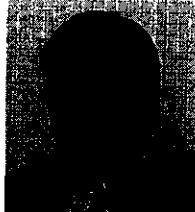
足立 明
Akira Adachi
エネルギー・水道事業
部 技術部 主査



村上 優
Masaru Murakami
エネルギー・水道事業
部 技術部 主査



沢田 充弘
Mitsuhiko Sawada
大阪市交通局 建設技
術本部 建設部土木課
技術係長



鎌田 敏正
Toshimasa Kamata
エヌ・ティ・ティ・イ
ンフラネット(株) 関
西支店 部長



橋本 正
Tadashi Hashimoto
(財)地域 地盤 環境 研
究所 特別技術研究室
室長

1 はじめに

近年、多数のシールドトンネル（以下、とう道）で老朽化が進行している。また、地下空間の過密化が進み、とう道に近接する地下建設工事の計画が増加している。

このような状況の中、大阪市蒲生4丁目において、日本電信電話(株)の通信用とう道の直上に、大阪市交通局による地下鉄8号線の駅舎部建設が計画された。建設時の土留め掘削にともなう荷重変化により、とう道に発生する応力が増加するため、地下鉄工事に先立ち、とう道を補強して対処することになった。

現用の通信ケーブルに支障をきたすことなく、補強後の内空断面を確保するために、この技術課題を解決する補強方法として、二分割鋼管セグメントによるスチールライニング工法を開発した。本報では、工法の概要、補強効果確認試験結果ならびに現場への適用結果について述べる。

2 スチールライニング工法の概要

鋼管を軸方向に二分割し、フランジと差込継手を取り付けた「二分割鋼管セグメント（以下、鋼管セグメント）」を既設トンネル内

要旨

通信ケーブル用トンネルや共同溝など、活線状態のライフラインが設置されたシールドトンネルの補修・補強工法として、「スチールライニング工法」を開発・実用化した。同工法は、鋼管を軸方向に二分割し、フランジと差込継手を設けた「二分割鋼管セグメント」を既設トンネルに敷設する工法である。本工法による補強トンネルの構造安全性を確認するために、 $\phi 825$ mm の縮小モデルで圧縮試験を実施し、良好な結果を得た。その後、 $\phi 3\,850$ mm の鋼管セグメントを用いた実工事により、施工性能・止水性能を確認した。本工法によれば、既設トンネルの有効断面を損なうことなく、活線状態のままで安全に短工期で、既設老朽トンネルの補強工事を行うことができる。

Synopsis:

A Steel Lining Method suitable to repair or reinforce a shield tunnel in service for communication cables and pipelines has been developed. The method sets up two split-type steel pipe segments which have flange joints and spigot joints in the tunnel. The effectiveness of the method was checked experimentally by compressive tests with $\phi 825$ mm structural models and confirmed the safety of the reinforced tunnel. On-site operation of the method with $\phi 3\,850$ mm segments proved the excellent performance of the segments in construction and water-sealing. The method realizes to reinforce a shield tunnel with a minimum reduction of the cross-section area of the tunnel. The operation of the method for a tunnel in service can be performed in safety and in a short term without giving damage to existing cables and pipes.

に敷設する工法である。

2.1 本工法の特長

本工法の特長は、以下のとおりである。

2.1.1 補強効果の確保と内空断面の減少抑止

鋼製リングビーム巻立方式、中間支柱方式などの従来工法では、補強による内空断面の減少が著しく、また、補強箇所に応力集中が発生し、補強効果が不均一になる場合があった。

本工法では、鋼管セグメントの自在性を利用し、とう道の内径とほぼ同等のセグメント外径を確保するとともに、セグメント内面を平滑化することにより、補強による内空寸法の減少を最小限として

* 平成13年10月2日原稿受付

いる。

前記の大阪市における現場施工では、とう道の内径 3 950 mm に対し、鋼管セグメント寸法は $3\ 850\phi \times 25\ t \times 3\ 000\ L$ 、補強後の内径は 3 800 mm となっている。すなわち、内空寸法の減少を 150 mm (内径比率 3.8%) に抑えて、トンネルの耐荷重特性向上による補強効果を得ることが可能となった。

2.1.2 活線状態での安全、かつ高速施工

補強工事に際し、とう道に収用した通信ケーブルや配管を切り替えることは、お客様に多大な迷惑を掛ける。こうした場合は、PIP (pipe in pipe) 工法の適用は不可能であり、また、通常の鋼製セグメントによる工法では、セグメントが 6~7 分割され、かつ長さが 1 m と短いことから、施工能率が劣っていた。

本工法では、専用のセグメント搬送・組立台車を開発導入することで、通信ケーブルや配管を活かした状態で、高速で安全に施工できる。

2.2 二分割鋼管セグメントの概要

二分割鋼管セグメントは、Fig. 1 に示すように、鋼管を軸方向に二分割してフランジと差込継手を取り付けたものである。

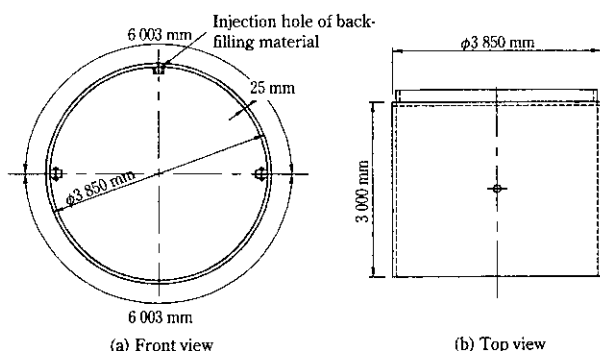


Fig. 1 Two split-type steel pipe segments

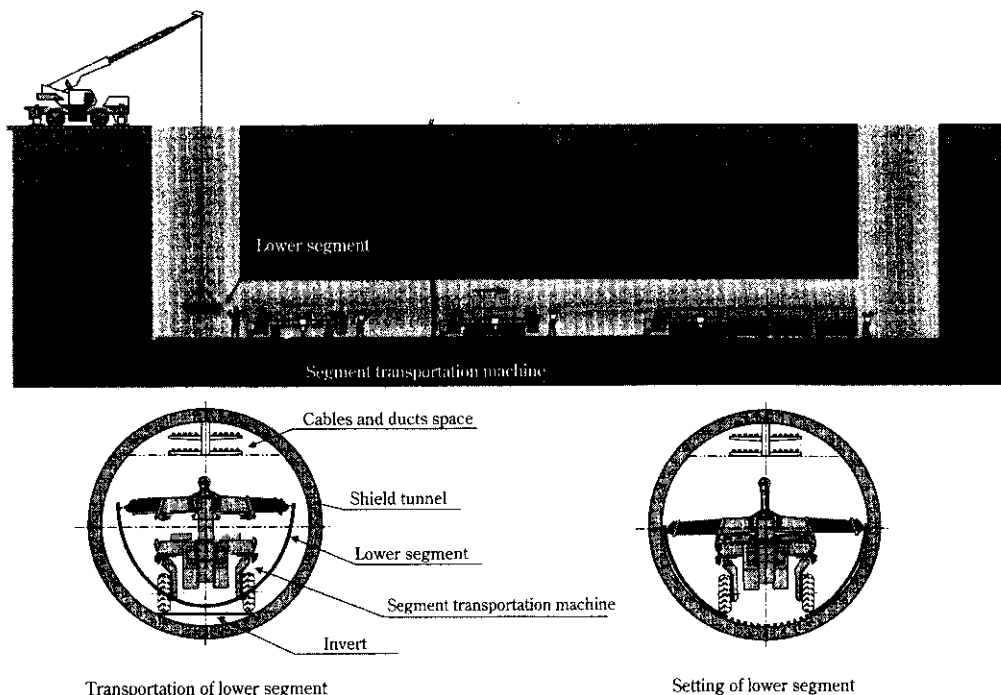


Fig. 2 Transportation and setting of lower segment in the tunnel

鋼管セグメントは、弾性範囲内で縮径してとう道内を運搬後、フランジをボルトで締結して円形断面に復元し、差込継手により連結する。

2.3 施工手順

本工法の施工手順を、Fig. 2 と 3 に示す。なお、完成後の断面は Fig. 3 のようになる。

- (1) 通信ケーブルなどの防護
- (2) 立坑からの下部セグメント吊り下ろしと、台車での搬送・仮置き (Fig. 2)
- (3) 通信ケーブル・配管の移設 (上部から下部へ)
- (4) 立坑からの上部セグメント吊り下ろしと、台車での搬送・組立 (Fig. 3)
- (5) 既設トンネルと鋼管セグメントとの間隙への充填材注入

3 二分割鋼管セグメントの単体性能評価試験

3.1 フランジ継手の強度と剛性

鋼管と鋼管セグメントの継手強度と剛性を確認するため、 $\phi 825 \times 6\ t$ の供試体を用いて、扁平試験を実施した。内空変位量と載荷荷重の関係を Fig. 4 に示す。図より、鋼管、鋼管セグメントとも、ほぼ鋼管の理論値と同等の荷重変位特性を示すことが分かる。

二分割セグメントの継手強度と剛性は鋼管と同等であり、補強用鋼管セグメントは、鋼管として設計することが可能である。

荷重に対する変位量の理論値は、(1) 式で求められる。

$$\Delta\delta = 0.149 \frac{p \cdot R_m^3}{E \cdot I} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 p : 載荷荷重 (N)

R_m : 管中心半径 (mm)

E : 鋼材のヤング係数 ($2.1 \times 10^5\ \text{N/mm}^2$)

I : 管体の断面二次モーメント

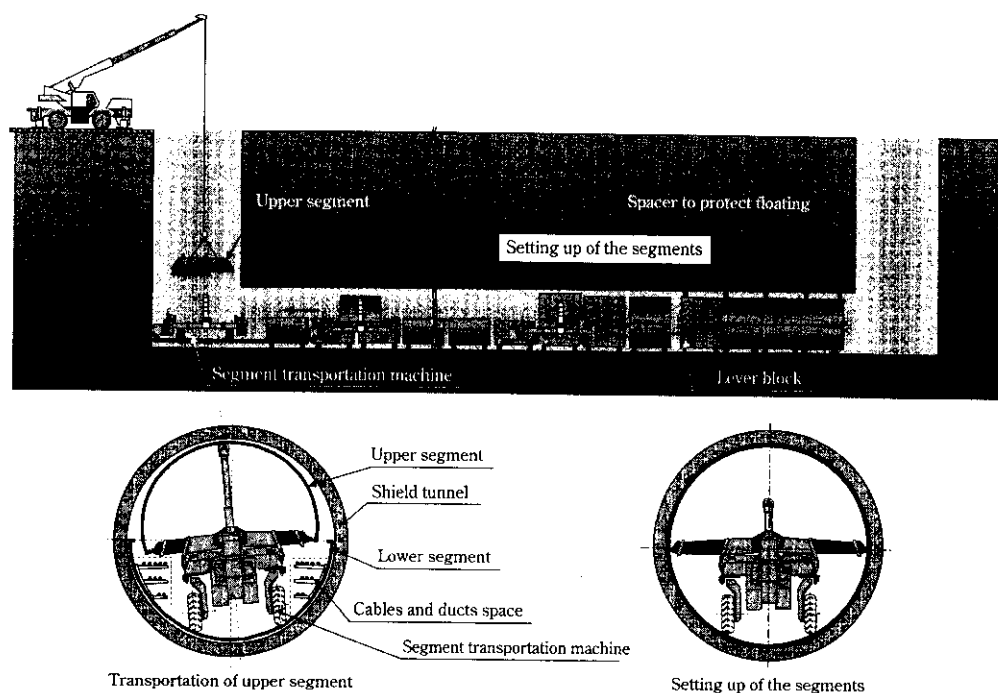


Fig. 3 Upper segment transportation and segments setting up

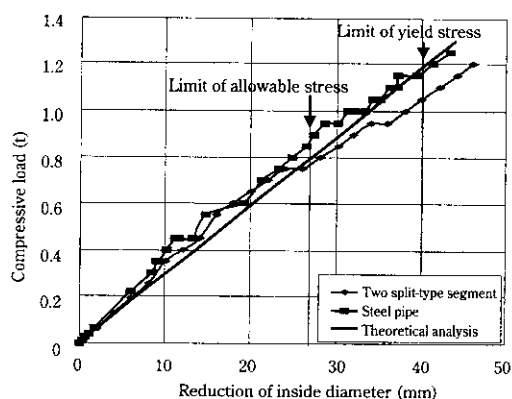


Fig. 4 Deformation performance of two split-type segments in flattening tests

3.2 差込継手の施工性能ならびに止水性能

曲線区間におけるセグメントでは、差込継手の施工性能確保のためテーパ角が制限され、セグメントの長さが短くなるという問題があった。そこで、差込継手をテーパ角分だけ傾けて溶接し、継手とセグメントを平行にすることで、1セグメントで3°前後までの曲がりを可能とした。これにより、前記の現場施工では、曲率半径110mの曲線区間でも、約3mの長尺セグメントが使用可能となり、直線部と同等の施工性能を確保できるようになった。

一方、止水性能に関しては、セグメントの製作精度管理と水膨張ゴムの採用により、実物大試験で0.5～1.0MPa程度の止水性能を持つことが確認された。

4 合成構造形成時における性能評価実験

4.1 実験目的

既設コンクリートセグメントの内側に鋼管セグメントを挿入して、シールドトンネルを補強する場合を想定し、既設セグメントの

代わりにヒューム管を使用した縮小モデルによる実証実験を行った。検証の目的は以下のとおりである。

- (1) シールドトンネル補強効果
- (2) 既設コンクリートセグメントの破壊時に、破片によって生じると想定される集中荷重に対する、鋼管セグメントの安全性（以下、想定集中荷重に対する安全性）
- (3) 既設コンクリートセグメントと鋼管セグメントとの間に充填する、充填材の適正強度

4.2 実験の概要

供試体に用いた鋼管セグメント、ヒューム管、充填材の仕様を以下に示す。供試体の例をFig. 5に示す。

- (1) 鋼管セグメント
 - (a) 外径×管厚×長さ： $\phi 825 \times 6t \times 800L$
 - (b) 材質：SM490
- (2) ヒューム管
 - (a) 呼び径×管厚×長さ： $\phi 900$ （内径） $\times 90t \times 800L$
 - (b) 種類：2種-500

セグメントの破壊を想定し、一部のヒューム管は、Fig. 6に示す2種類のスリット加工を施している。

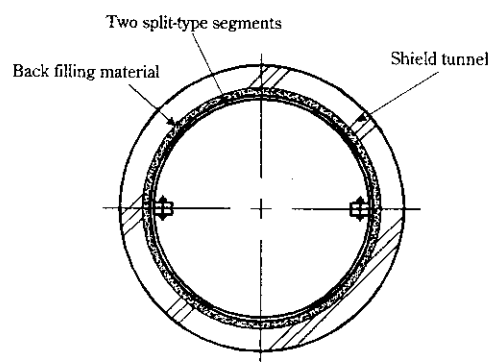


Fig. 5 Structural model for compressive test

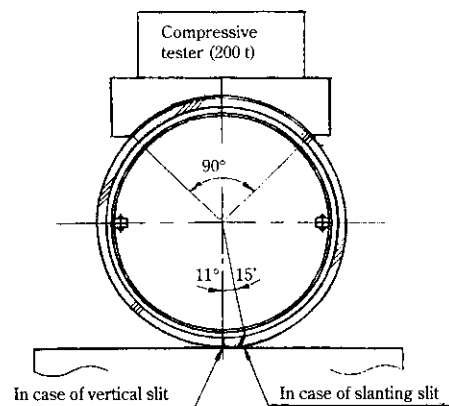


Fig. 6 Compressive test specimen and tester

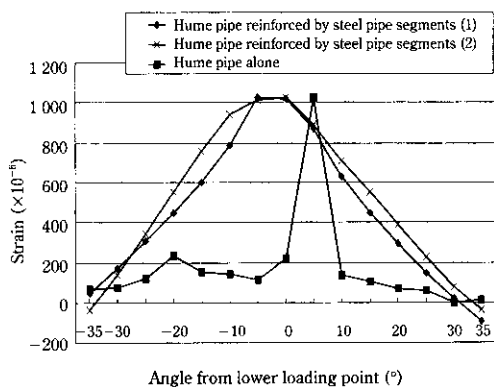


Fig. 7 Strain distribution at the inside surface of specimens

(3) 充填材

(a) 軟質充填材：実測強度 $\sigma_{ck} \approx 0.4 \text{ N/mm}^2$

(b) 硬質充填材：実測強度 $\sigma_{ck} \approx 21.4 \text{ N/mm}^2$

Fig. 6 に示す試験装置にて供試材を上下より圧縮し、内空変位量・内面歪と載荷荷重を計測した。

4.3 実験結果および考察

4.3.1 圧縮試験における変形状況と補強効果

実験では底部に集中荷重が作用するため、内面歪は底部付近で最大となる。ヒューム管単独の場合と補強したヒューム管の場合に対して、底部の歪量が鋼材の許容歪量 ($\epsilon_s = 1.024 \mu$) に達するときの、底部近傍の歪量分布と荷重値を Fig. 7 に示す。図より、以下の補強効果が確認された。

ヒューム管単独の場合、ひび割れ発生点に歪が局部的に発生して、小さい変形で破壊に至る。一方、鋼管セグメントによる内巻き補強を施したヒューム管の場合、内面の歪分布は比較的均一化しており、たとえヒューム管にひび割れや一部破壊が発生しても、鋼管セグメントが大きな変形まで荷重を支え続ける。これは、ヒューム管では 2mm 程度の変位でひび割れし破壊が進行するのに対し、鋼管セグメントでは 40mm 程度まで弾性的に変位するという、特性の違いを組み合わせた効果であり、変形に応じた地盤反力によって断面力の増加を防止することが可能となる。

補強したヒューム管では、途中に除荷を挿んで、約 100mm もの大変形を与えてヒューム管の鉄筋が完全に破壊され脱落するような状態まで、試験を継続した。試験後の様子を Photo 1 に示す。この場合の変形量と載荷荷重の関係を Fig. 8 に示す。図に示されたように、破壊にいたるほどの大変形時でも 81.8 kN の荷重を支える



Photo 1 Structural model after the compressive test

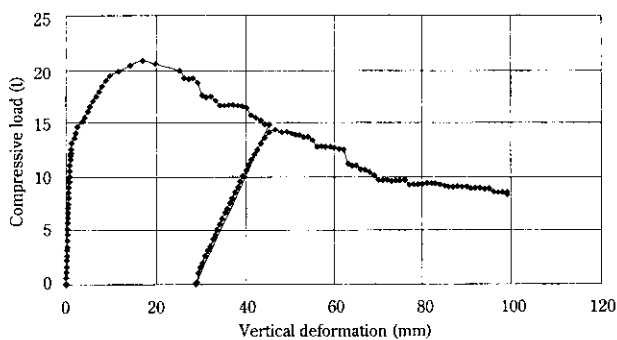


Fig. 8 Compressive load and deformation of a Hume pipe reinforced by steel pipe segments

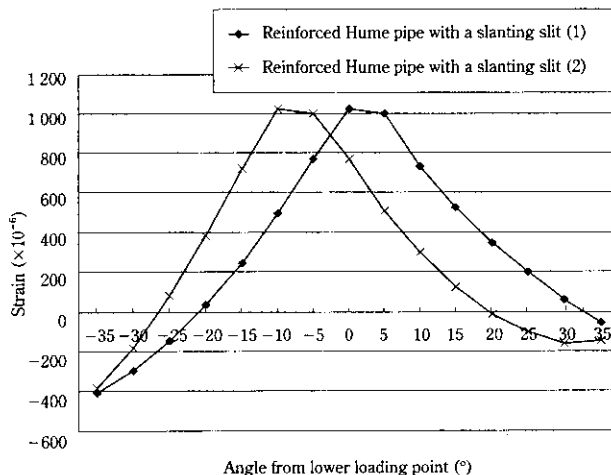


Fig. 9 Strain distribution at the inside surface of specimens (Reinforced Hume pipe with a slanting slit)

ことができることは、特筆すべき鋼管セグメントの補強効果といえる。

実際のとう道でも、鋼管セグメントの効果は上述の特性と同様と考えられるので、鋼管セグメントによる補強効果により、既設セグメントの耐力低下時にも、とう道の構造的安全性を十分確保可能である。

4.3.2 想定集中荷重に対する安全性の検証

補強した斜めスリットヒューム管への載荷荷重と底部付近の歪量との関係を Fig. 9 に示す。実験では、Photo 2 に見られるようにスリット部に鋼管セグメントへの集中荷重が発生したが、Fig. 9 では鋼管セグメントには局部的に突出した歪の発生は見られない。

Fig. 9 および Photo 2 より、土砂荷重が破壊した既設コンクリートセグメントを介して、集中荷重として鋼管セグメントに作用したとしても、鋼管セグメントには局部的に突出した応力・歪が発生することはなく、とう道の安全性を十分確保できることが分かる。

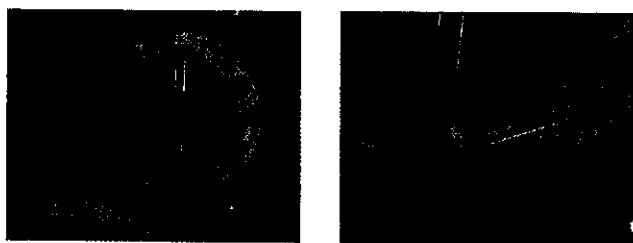


Photo 2 Deformation of the specimen under compressive test
(Reinforced Hume pipe with a slanting slit)

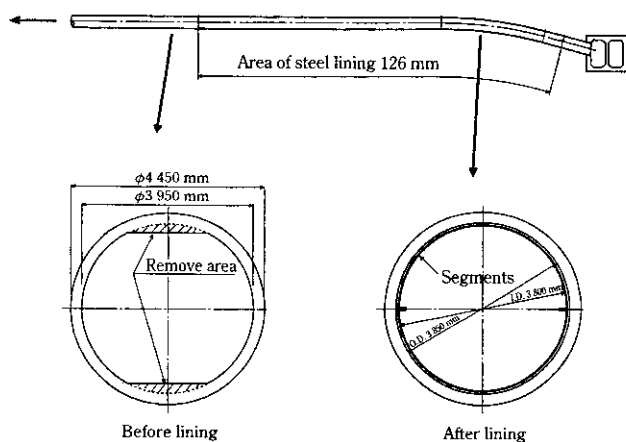


Fig. 10 Working diagram of Steel Lining for a NTT shield tunnel in Osaka

前述の実験結果より、円形断面機能をなくした既設コンクリートセグメントは、補強鋼管セグメントに悪影響を及ぼすことはなく、鋼管セグメント単独で設計しておけば問題ないと判断される。

4.3.3 充填材の適正強度の決定

Fig. 7 で、(1) が軟質充填材を、(2) が硬質充填材をそれぞれ充填したものである。両者を比較すると、硬質充填材の方が、歪の均等分布範囲がやや広い傾向がみとめられる。このことから、本稿で述べた実験結果によれば、硬質充填材の方が有利と考えられる。しかし、軟質材を用いた場合でも、特に悪い要素はみられないので、実用上は問題ないと考えられる。

充填時の施工性、充填の確実性あるいは経済性を考慮して、これらの特性を満足する範囲で、硬質の充填材を選択することが望ましい。

5 スチールライニング工法による現場施工例

5.1 施工概要

大阪市城東区蒲生 4 丁目とう道（全長＝約 360 m）の内 126 m 区間について、鋼管セグメントを使用して補強する工事であった。Fig. 10 に既設トンネル断面と補強区間の断面を示す。

とう道は、4,750 mm の既設コンクリートセグメントの内側に、内径 3,950 mm の二次覆工が施され、上下にはインバートが設置されていたが、補強区間のインバートについては、事前にハツリ撤去工事を実施した。

鋼管セグメント寸法は前述のように $3,850\phi \times 25t \times$ 約 3,000 Lmm の 42 セットを使用した。曲線部セグメントのテーパ角度は、事前のトンネル線形測量結果に基づいて決定した。

Photo 3, 4 に鋼管セグメントと地上にて組立てた状況を示す。

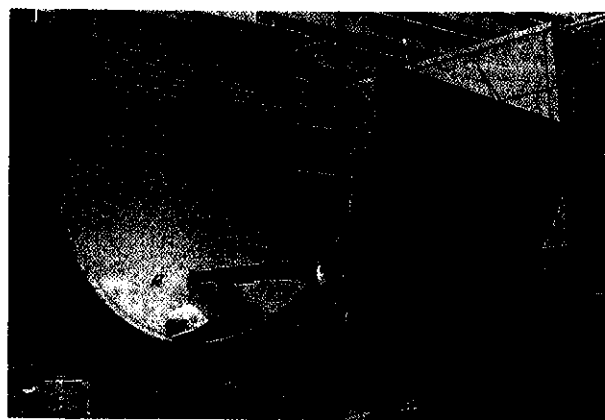


Photo 3 Two split-type steel pipe segment hanging down to the shaft

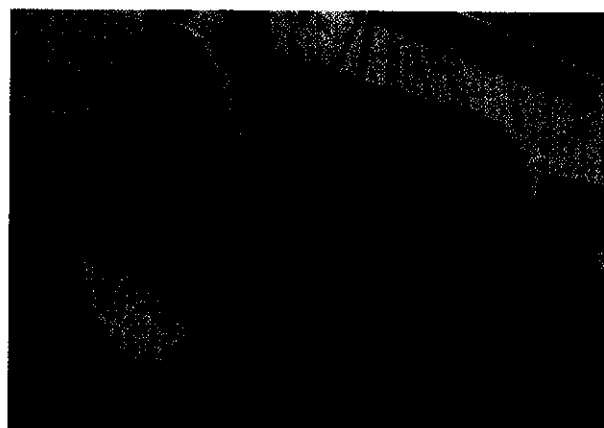


Photo 4 Two split-type segments constructed on the ground



Photo 5 Shield tunnel reinforced by the Steel Lining Method

5.2 施工結果

2001 年 5 月より鋼管セグメントの搬入を開始し、8 月に充填材の注入を完了した。Photo 5 に施工後の状況を示す。

鋼管セグメント搬送・組立用に、製作した専用機械は、トンネル内の環境を考慮してバッテリー駆動としたが、セグメントの把持・縮径・搬送・組立時の位置合わせ・継手差込の機能を十分に果たすことが確認された。鋼管セグメントは、左右フランジ間の距離を

500 mm 程度縮径して搬送した。

充填材注入時の漏出はみられず、鋼管セグメントの止水性能が実証された。

6 まとめ

- (1) 二分割鋼管セグメントによりシールドトンネルを補強する「スチールライニング工法」を開発した。本工法は、内空断面減少の抑制と補強効果の確保との両立が可能であり、さらに現

用ケーブルや配管に支障なく補強が可能となる。

- (2) 鋼管セグメントの変形特性は鋼管と同等であり、十分な既設トンネル補強効果が得られることを実験により確認した。
- (3) 現場施工により、本工法の施工性能・止水性能等が実証された。

以上により、「スチールライニング工法」によれば、既設シールドトンネルの有効断面を損なうことなく、活線状態のまま安全かつ短工期での補強工事が可能であり、老朽化が進んでいるライフライン系のトンネル構造物の再生、保生に有効である。