

近接施工に伴う既設シールドトンネルの 補強工事と長期変状監視

Reinforcement work and long term monitoring deformation for existing shield tunnel
due to neighboring construction

奥野正富¹・太田拓²・譽田孝宏³・柳川真次⁴・増田敏一⁵

Masatomi Okuno, Hiromu Oota, Takahiro Konda, Shinji Yanagawa and Toshikazu Masuda

¹正会員 エヌ・ティ・ティ・インフラネット株式会社 関西支店(〒541-0056 大阪市中央区久太郎町2-4-11)

E-mail:okuno@ksi.ntinf.co.jp

²正会員 工修 大阪市交通局 建設技術本部(〒550-8552 大阪市西区九条南1-12-62)

³正会員 工修 財団法人 地域地盤環境研究所 地盤工学研究部門(〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

⁴日本コムシス株式会社 社会基盤事業本部(〒540-0012 大阪市中央区谷町4-9-7)

⁵JFEエンジニアリング株式会社(〒100-0005 東京都千代田区丸の内1-1-2)

As a countermeasure to a local load acted on the existing tunnel lining from neighboring braced excavation, “Steel Lining Method” with steel pipe segment was developed. The paper will report about its construction technique. It is considered that this method is effective for renewal and sustenance for decrepit lifeline tunnel. In order to monitor the tunnel deformation behavior and structural safety in construction period, a monitoring system with fiber optics sensing was established. This monitoring system is able to collect data continuously for a longitudinal structural over a long period. These technologies will be useful not only as a countermeasure to neighboring construction but also as a maintenance method of existing tunnel.

Key Words : *neighboring construction, stiff clay, steel pipe segment, long term monitoring*

1. はじめに

近年、地下空間の有効活用により地下の過密化が進み、NTTの通信用トンネル(以下、とう道)に近接して施工される地下建設工事が増加してきている。

このような状況下において、セグメント外径4,750 mmのとう道直上に、大阪市地下鉄第8号線の停留場部建設が計画された。停留場築造工事に伴って発生する外荷重変化により、とう道覆工発生応力が変化し、許容応力度を超越したため、地下鉄工事に先立ち、とう道を補強することになった。現用の通信ケーブルに支障をきたすことなく、かつ補強後の内空断面を確保することを目的に、これら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(以下、鋼管セグメント)を開発した¹⁾。

また、工事期間中におけるとう道の変形挙動や安

全性を確認するために、光ファイバセンサを用いた監視システムを構築し、広範囲かつ長期間のとう道変状監視をおこなった。

2. 工事概要

地下鉄第8号線(延長約12km, 11停留場)は、既成市街地で人口密度が高いが大阪市東部地域において、都心に対して放射状に整備されている既設地下鉄、JR、京阪等の鉄道と連絡することにより、放射状路線の混雑緩和や東部地域の移動を円滑にし、同地域のまちづくりの促進、地域の活性化に寄与する路線である。このうち、蒲生四丁目停留場は、とう道と近接施工(図-1, 2参照)することから、とう道覆工に対して局所的に偏荷重が作用すると予測された。

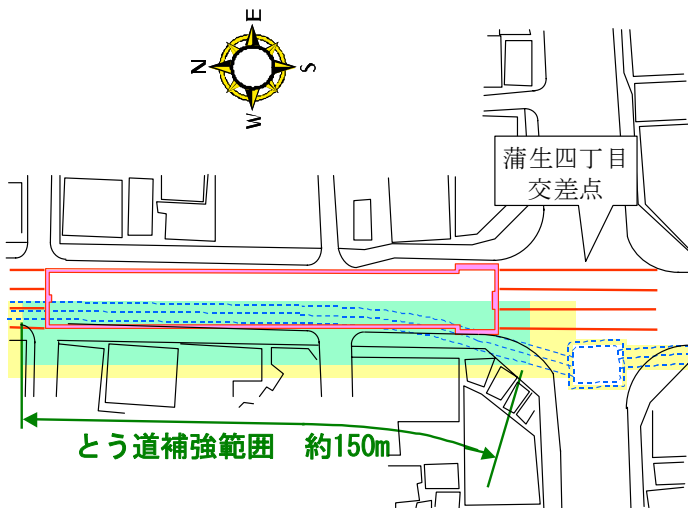


図-1 とう道補強部の平面図

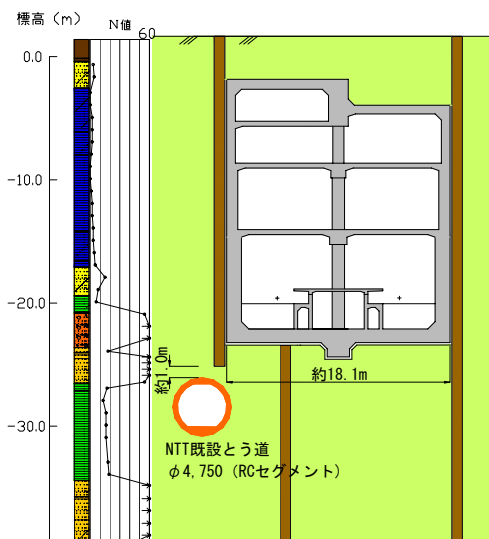


図-2 とう道補強部の横断面図(南側立坑部付近)

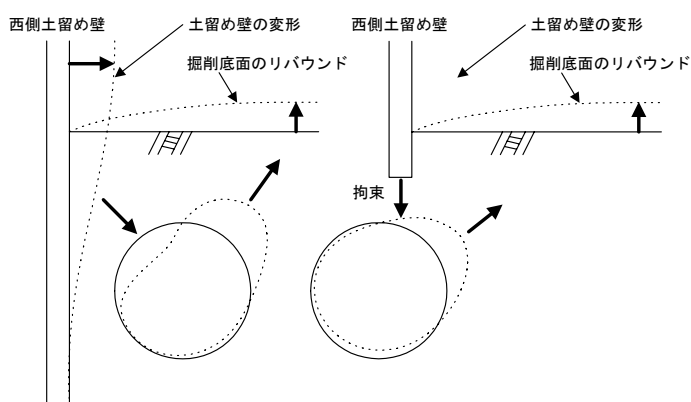


図-3 外荷重変化に伴うとう道覆工の変形概念図

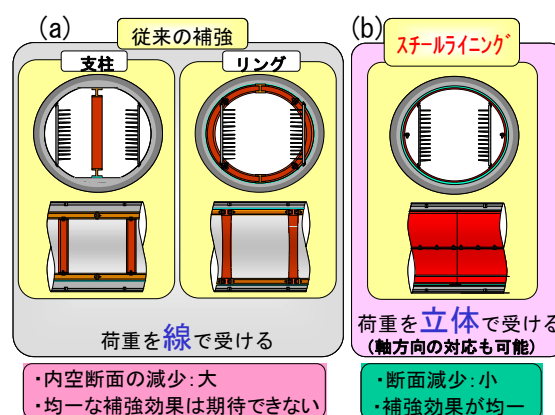


図-4 従来補強方法とスチールライニング工法の比較

本現場は、上町台地の東側に位置しており、東大阪特有の超鋭敏な軟弱沖積粘性土層(上部: $N=0$ (モンケン自沈), $q_u=40\sim 50\text{kN/m}^2$, $I_L \approx 1.0$, 下部: $N=0\sim 4$, $q_u=70\sim 140\text{kN/m}^2$, $I_L=0.7\sim 0.9$)が $15\sim 20\text{m}$ 程度の層厚で堆積しているのが特徴的である。とう道は、天端部付近に硬質な大阪層群砂層(Os8層, $N>60$)が存在するが、大部分は硬質の大阪層群粘土層(Oc7層, $c_{un}=280\sim 300\text{kN/m}^2$)に位置している。

北側立坑部から停留場中央部付近までのとう道は、停留場部の最終掘削底面下約 5m に西側土留め壁側に偏って位置しているが、土留め南側立坑部付近において斜横断する線形になっている。よって、土留め掘削に伴うリバウンドによる影響と、土留め壁の変形に伴う影響から、とう道覆工には図-3に示すような局所的な偏荷重が作用し、とう道が変形すると想定された。特に、南側立坑部付近では、西側土留め壁下部をとう道が斜横断している関係上、リバウンドに連動してとう道が隆起するのを土留め壁が拘束することになることから、厳しい近接施工状態が予想された。偏荷重によって発生するとう道覆工発生応力の変化量を、二次元線形弾性 FEM を

用いて予測解析し、原設計の応力状態に足しこむことによって応力度照査をおこなった。その結果、土留め最終掘削時において、とう道天端から西側に $30\sim 60^\circ$ の範囲における RC セグメント内の鉄筋について、長期許容応力度以上の引張応力が発生することが明らかになった。なお、応力度照査については、リバウンドによる影響や土留め壁変形による影響が、本体構造物構築後にある程度元の状態に戻ることが想定されるものの、完全に初期状態に帰する可能性が低いことから、安全側を考慮して、荷重の割り増しを見込んでいない。

当初、図-4(a)に示すような偏荷重を支柱やリングビーム等の「線」で受け持つ補強方法を検討した。しかし、とう道の全体剛性を高めることによって、とう道覆工に発生する断面力も大きくなることから、鉄筋に発生する引張応力を許容応力度内に収束させることができず、期待するような効果が得られなかった。また、これらの補強は永久補強部材になることから、桁高の関係などから必要内空を確保することもできず、「剛構造」による補強方法の限界に至った。

よって、ここでは発想を転換し、**図-4(b)**に示すような、**とう道覆工**に作用する偏荷重に対して、「**剛構造**」ではなく「**柔構造**」で補強することを考えた。つまり、**鋼管セグメント**を二次覆工内面に内巻き、偏荷重を含む周辺地盤からの荷重全体を鋼管だけで「**立体的に**」保持させる補強工法(以下、**スチールライニング工法**)を考案した。これは、偏荷重によって既設とう道覆工にはクラックが発生してトンネル覆工剛性が低下し、構造上の安全性が確保できないケースを想定している。

3. スチールライニング工法の概要

(1) 本工法の特徴

a) 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、中間支柱方式等の在来工法では、補強後の内空断面の減少が著しく、また、補強箇所に応力が集中し、補強効果が不均一になることが想定された。それに対して鋼管セグメントは、柔軟な曲げ剛性を有していることから、偏荷重に対してフレキシブルに変形して対応することができる。本工事では、とう道の内空寸法を150mm(鋼管厚=25mm+RCセグメント~鋼管セグメント間の間詰め注入厚=50mm, 内空比率3.8%)程度の減少に抑制することができ、トンネルの耐荷重特性を向上させ、補強効果を得ることが可能となった。

b) 活線状態での安全かつ高速施工

補強工事に際し、とう道に収容した通信ケーブル等を切り替えることは、ケーブル代替ルート確保、代替ケーブルの布設、回線切り替えおよび復元等が必要となることから、ユーザーに多大な迷惑をかける場合が多く、PIP工法(Pipe in Pipe工法、既設トンネル内に新設の鋼管などを挿入してトンネルを再生させる方法)の適用は不可能であった。また、通常の鋼製セグメントを用いた工法では、1リングあたり6~7分割され、かつセグメント幅が1mと短いことから、施工能率の点で問題があった。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により、通信ケーブルや配管を活かしたままの状態、高速かつ安全な施工を可能にした。

(2) 二分割鋼管セグメントの概要

スチールライニング工法を用いた補強例を**図-5**に示す。既設とう道内部で二分割鋼管セグメントを搬入して組み立て、既設セグメント~鋼管セグメントの一体化を図るため、間詰め充填材を注入した。断面方向継手については、止水用シール材を挟み込ん

でボルト締結し、縦断方向継手については、止水用シール材を介して差込み構造になっている。

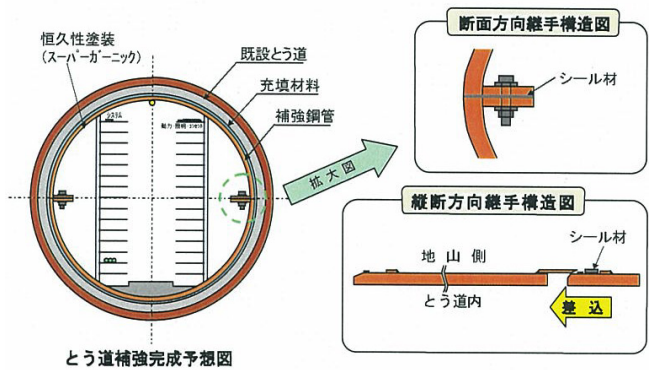


図-5 スチールライニング工法による補強例

鋼管セグメントは、**図-6**に示すように、鋼管を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。弾性範囲内で縮径し、とう道内に運搬後、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ことが可能な構造になっている。以上のことから、水密性はもちろん、耐震性にも優れた構造であると言える。

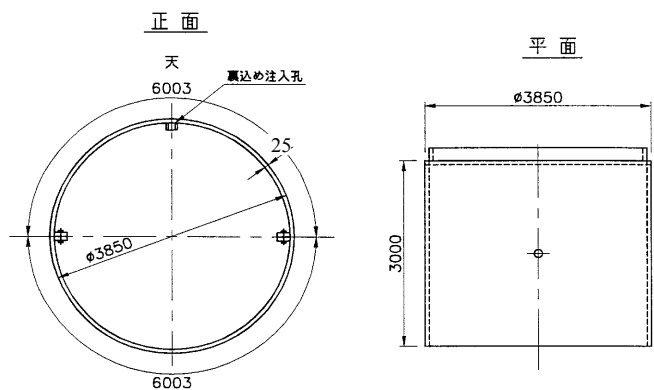
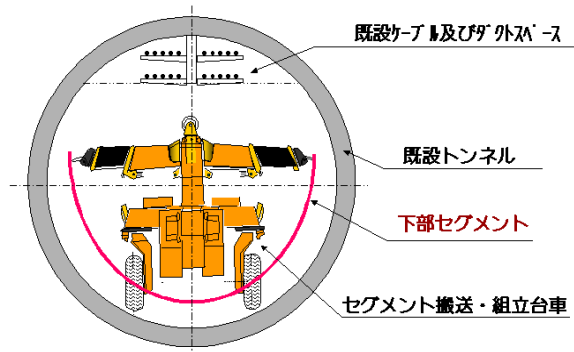
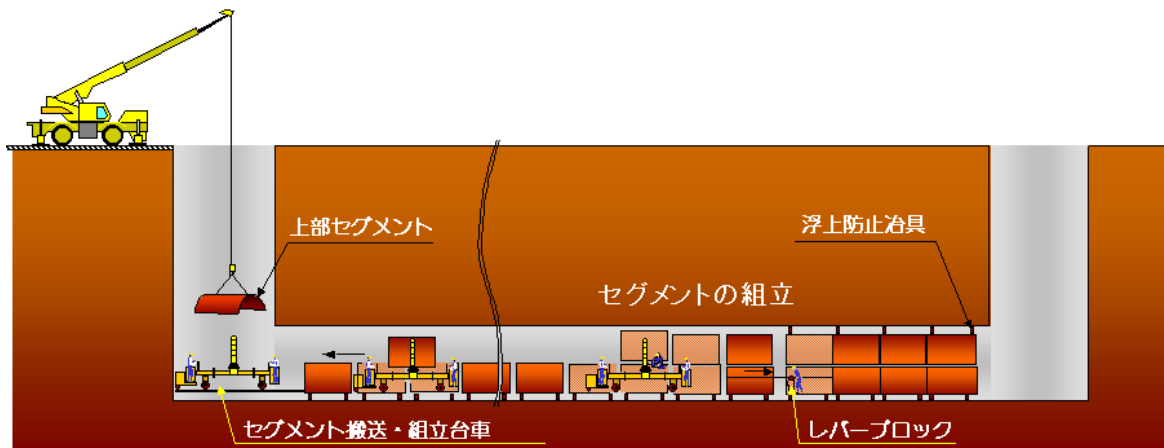


図-6 二分割鋼管セグメント

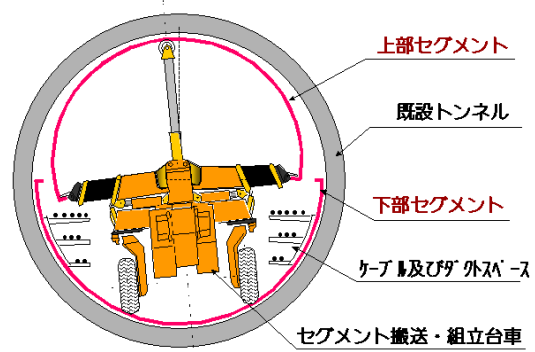
(3) 施工手順

本工法の施工手順を以下に示す(**図-7**参照)。

- 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
- 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
- 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



下部セグメントのトンネル内搬送



上部セグメントの搬送

図-7 スチールライニング工法の施工手順

4. 二分割鋼管セグメントの性能評価

(1) フランジ継手部の曲げ剛性

鋼管(ピース間継手なし)と鋼管セグメント(ピース間継手あり)の曲げ剛性を確認するため、 $\phi 900 \times t 6\text{mm}$ の供試体を用いて圧縮試験を実施した。内空変位量と載荷荷重の関係を図-8に示す。

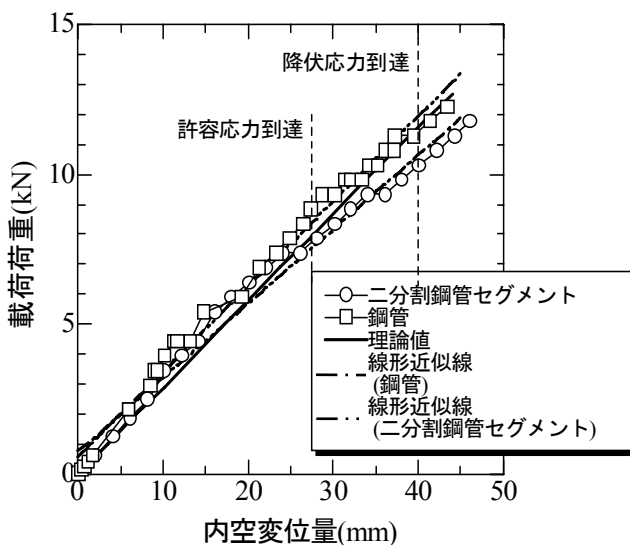


図-8 鋼管と二分割鋼管セグメントの荷重～変位関係

両者ともほぼ鋼管の理論値と同等の荷重変位特性を示していることから、鋼管セグメントも剛性一様リングとして取り扱うことができると判断した。

(2) 差込継手の施工性能および止水性能

曲線区間におけるセグメントについては、差込継手の施工性能確保のためにテーパ角が制限され、セグメント長が短くなるという問題があった。ここでは、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実現とした。このため、曲率半径110mの場合で、約3mの長尺セグメントが使用可能となった。

一方、止水機能に関しては、セグメントの製作精度管理と水膨張ゴムの採用により、実物大実験で0.5～1.0MPa程度の止水性能を持つことを確認した。

(3) 補強効果の検証

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おこなった。補強効果確認試験の状況を写真-1に、ヒューム管にクラックが

発生した場合を想定した鋼管セグメント大変形時の状況を写真-2に、実験結果を図-9に示す。

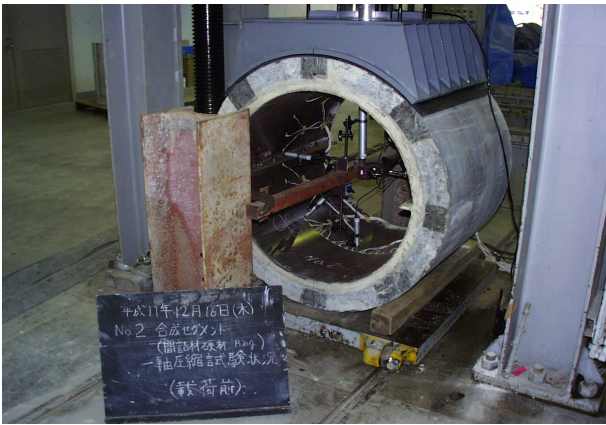


写真-1 補強効果確認試験の状況



写真-2 鋼管セグメント大変形時の状況

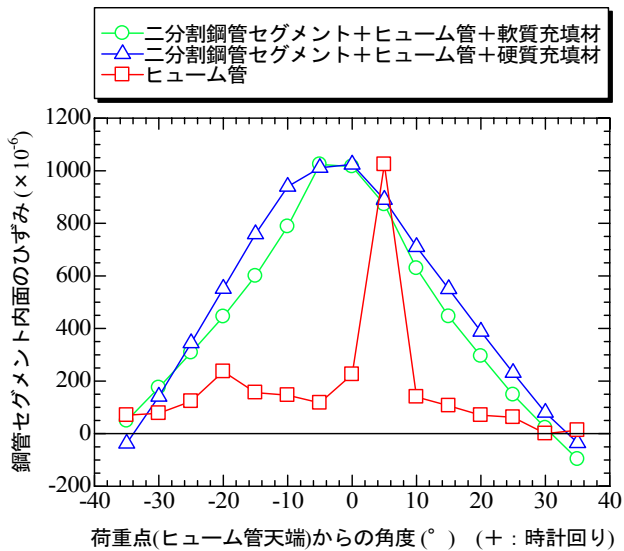


図-9 載荷点付近のひずみ分布

ヒューム管単独の場合、ひび割れ発生点にひずみが局所的に発生して、小さい変形で破壊に至っている。しかし、スチールライニング工法を施したヒューム管の場合は、ヒューム管単独に比べて比較的なだらかなひずみ分布形状を示しており、ヒューム管

にひび割れや一部破壊が発生した場合でも、鋼管セグメントが外荷重を分散支持し、大きな変形まで安定した性能が得られることを確認した。以上のことから、既設セグメント耐力低下時においても、スチールライニング工法を採用することによって、とう道の構造的な安全性が十分確保できることが実証された。なお、間詰め注入材については、材料硬度の違いによる実験結果の差異は見られなかった。

5. スチールライニング工法による現場施工例

大阪市城東区蒲生四丁目においてとう道(全長約360m)の内、近接する約150m区間について鋼管セグメントを使用して補強をおこなった。とう道は、4,750mmの既設コンクリートセグメントの内側に、内径3,950mmの二次覆工が施されており、上下にはインバートが設置されていたが、補強区間に対しては、事前にハツリ撤去工事を実施した。使用した鋼管セグメント寸法はφ3,850×t 25×L 3,000mmである。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。



写真-3 地上組立後の二分割鋼管セグメント



写真-4 上部鋼管セグメント搬入および組立状況

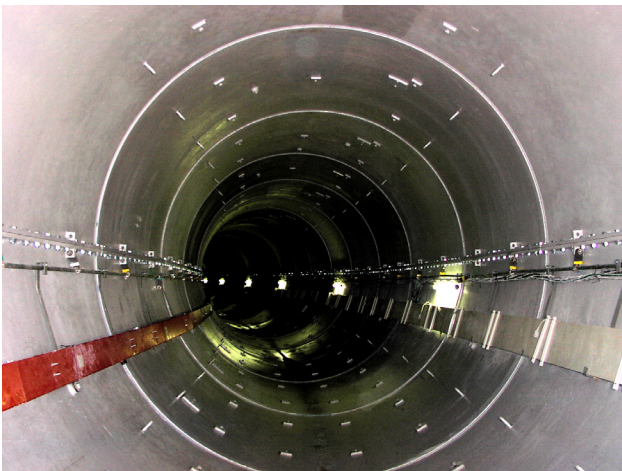


写真-5 施工後のトンネル内部状況

地上において鋼管セグメントを組立てた状況を写真-3に、下部鋼管セグメントの仮置き後に上部鋼管セグメントを搬入して組立中の状況を写真-4に、施工後の状況を写真-5に示す。

鋼管セグメント搬送・組立用に作成した専用機械は、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を確認した。鋼管セグメントは、左右フランジ間の距離を500mm程度縮径して搬送した。

充填材には、流動性および作業性を考慮して、無収縮エアモルタルを使用した。鋼管セグメント内面の各所に充填用の孔を設け、鋼管セグメント～二次覆工の間の隙間に充填材注入した。その際、隙間なく十分に充填することによって極力一体化構造に仕上げることを目標に、トンネル天端部付近にエア抜き孔を設け、充填作業に伴って逃げ場を失ったエアを追い出し、最終的にこのエア抜き孔から充填材が出てきた時点で充填完了とした。なお、充填材注入時において、継手部から充填材の漏出は見られなかったことから、鋼管セグメントの止水性能は実証された。

6. 光ファイバセンサによるとう道変状監視

スチールライニング工法により補強されたとう道において、工事に伴うとう道の変形挙動を常時監視しながら、安全に施工をおこなうため、とう道変状監視として、広範囲かつ長期間にわたって現場計測を実施した。

従来の内空変位計やひずみゲージに代表される既存の計測手法では、計測データが「点」での離散的なデータであることや、計測が広範囲かつ長期間と

なる場合、センサの耐久性や設置の拡張性等に問題があった。そこで今回、以下の特徴を有する光ファイバセンサ(B-OTDR方式：Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)を用いたトンネル監視システムを構築し、とう道の変状計測をおこなった²⁾。

- ①光ファイバ自体をセンサとして利用することから「線」としての計測が可能であり、光ファイバを網状に配置することによって面的計測も可能となった。
- ②光信号による計測であるため、センサへの給電が不要であり、誘導等の影響を受けない。
- ③1本の光ファイバで計測対象から遠く離れた位置での遠隔監視が可能であり、かつ配線がシンプルである。
- ④光ファイバの増設のみで容易に計測対象エリアの拡大が可能である。

光ファイバセンサは、トンネル内空変位を対象として横断方向(水平および斜め2方向の三角形)に6断面と、トンネル軸方向の鉛直変位を対象として縦断方向に2測線(トンネル天端と下端)を配置した(図-10、11参照)。

【計測項目】:内空変位

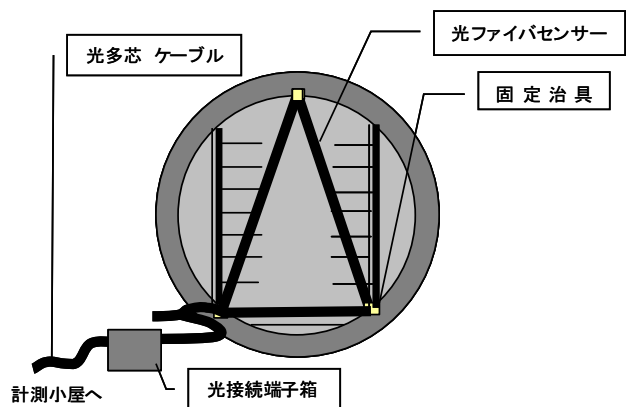


図-10 光ファイバセンサ配置(横断方向)

【計測項目】:表面ひずみ

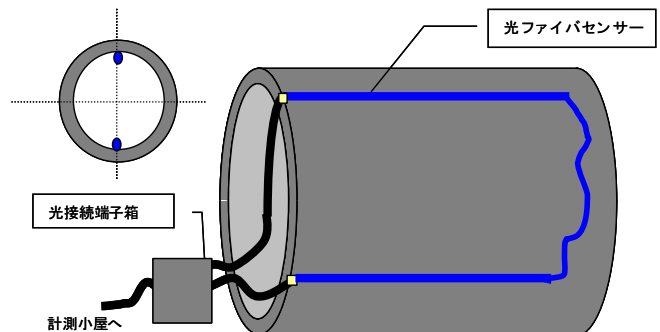


図-11 光ファイバセンサ配置(縦断方向)

計測結果の一例を図-12, 13に示す。

停留場中央部付近で計測したトンネル内空変位の計測結果については、土留め掘削の進行に伴って上載荷重が除荷され、縦たまご型の変形増分モードを示した。この傾向は、とう道上部地盤の土被り厚が3D(D: とう道直径)程度になった5次掘削頃から発生し、2D程度になった8次掘削頃から顕著化し、最終

的には鉛直方向の最大伸び量は、15mm程度に達した。その後、本体構造物の築造に伴って、上載荷重が再載荷されたことから、縦たまご型変形増分モードが元に戻る傾向を示した。しかし、最終的には最大変位量の2割程度しか回復しなかった。

停留場北立坑部付近では、土留め掘削に伴って停留場部に位置するとう道は隆起するのに対して、計

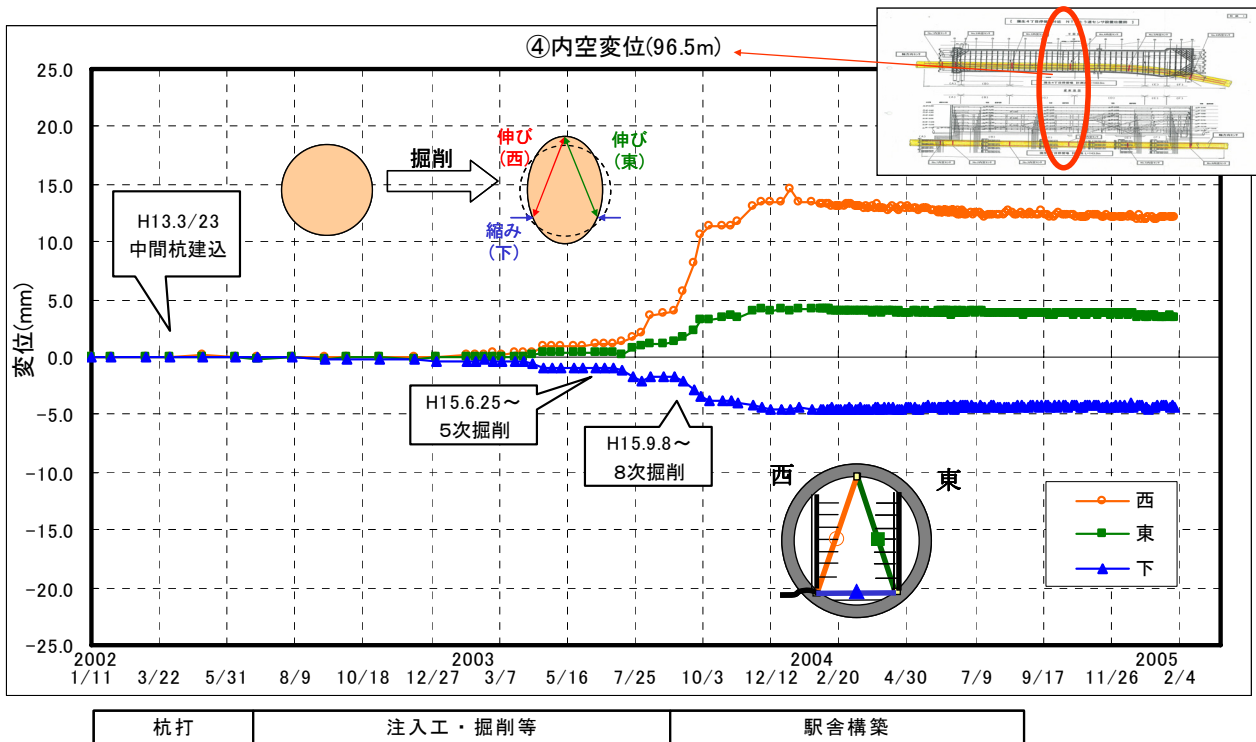


図-12 トンネル内空変位計測結果例

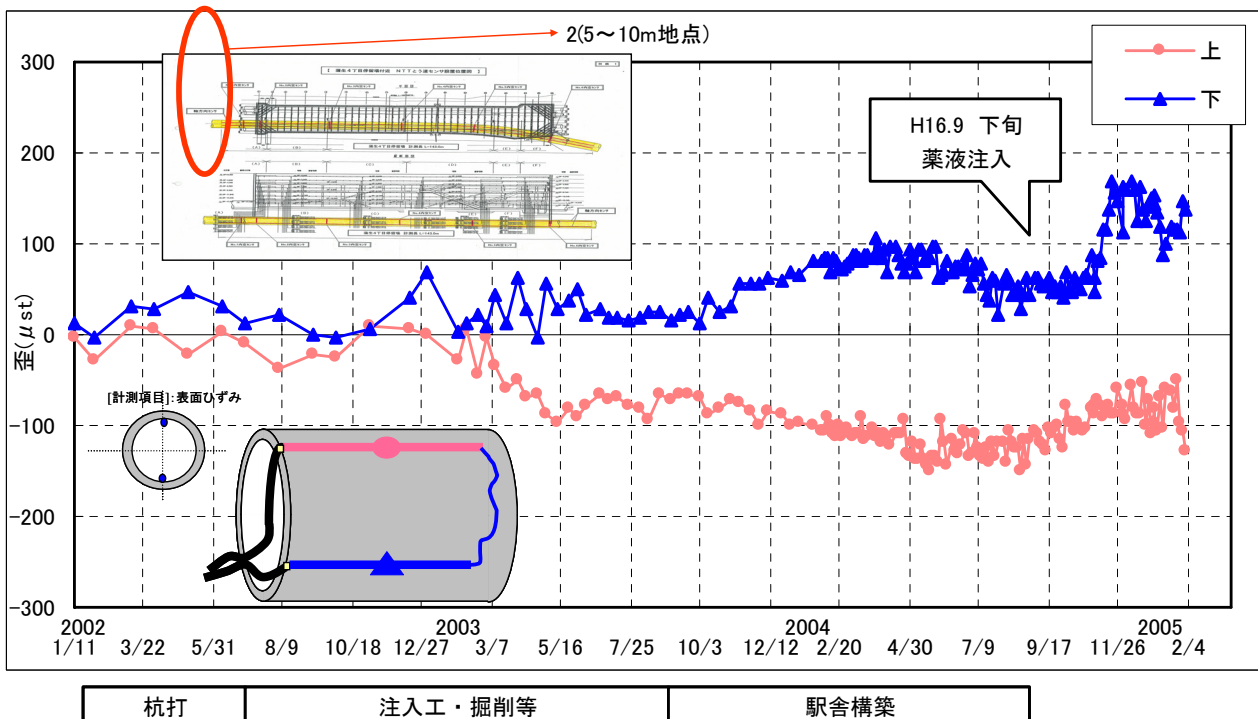


図-13 トンネル軸方向鉛直変位計測結果例

測位置のとう道上部に地盤が残存していることから、ともあがり挙動を押さえつける状態にあり、トンネル軸方向の変形曲率が最も厳しい地点であった。トンネル軸方向鉛直変位の計測結果については、土留め掘削中および本体構造物構築中にわたって顕著な変化は見られず、トンネル天端部において圧縮ひずみが、トンネル下端部において引張ひずみが緩やかに増加する程度であった。その後、本体構造物完成後にシールド発進・到達防護用の注入工がとう道上部地盤内で実施されたが、とう道天端部において圧縮ひずみが、とう道下端部において引張ひずみが顕著に発生した。つまり、とう道を上部より押さえつけるような注入圧がとう道覆工に作用したことが考えられた。

以上のことから、事前影響解析時に予測された変形モードに一致した計測結果が得られたことから、本システムが的確にトンネル挙動を捉えていることが立証された。また、従来の計測では困難であった縦断方向の連続的なデータが取得され、本システムの有効性も確認できた。

7. まとめ

本報告では、土留め掘削に伴ってとう道覆工に発生する局所的な偏荷重に対応するため、鋼管セグメントを用いたスチールライニング工法を開発し、その施工方法について説明をおこなった。また、光ファイバセンサーを用いたとう道変状計測を実施することによって、とう道の変状監視はもちろん、本計測システムの有効性およびスチールライニング工法の効果についても検討をおこなった。

以下に得られた知見を列記する。

・スチールライニング工法について

- (1) 土留め掘削に伴って発生するリバウンドおよび土留め壁の変形により、とう道覆工に偏荷重が作用することが予測されたが、鋼管セグメントをとう道内面に巻き立てることによって、フレキシブルな変形対応による「柔構造」補強が可能となった。
- (2) 鋼管セグメントの自在性を有効利用し、内部補強に伴うとう道内の有効断面の縮小を最小限に抑えることが可能となった。今回の場合、とう道内空寸法の減少を150mm(内径比率3.8%)に抑制することができた。
- (3) とう道内の既設通信回線を切断するなどの支障をきたすことなく、確実な施工ができた。

(4) 偏荷重作用時に一次覆工の継手部や二次覆工クラック部から漏水する可能性があったが、本工法は水密性に優れていることから、内部補強後のメンテナンス費用が削減され、とう道の寿命を向上させることができた。

(5) 二次覆工コンクリート片脱落の危険性を考えると、ストックマネジメントの観点から見て、鋼管セグメントによる補強方法は有効である。

本工法は、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期間で補強工事を実施することが可能であることから、今回のようなNTT通信とう道のみならず、老朽化が進んでいるライフライン系トンネル構造物の再生、保生にも有効な工法であると言える。

一方、光ファイバセンサを用いたとう道監視システムについては、光ファイバセンサの特性を活用し、広範囲の区間を連続的にデータ採取でき、長期間にわたって線状構造物を監視することができた。

近年、トンネル構造物をいかに効率よく維持管理するかが求められているが、今回採用した「とう道補強(スチールライニング工法)」、「とう道変状監視(光センシングによる計測)」の技術が近接施工のみならず、トンネルの維持管理という観点からも、今後有効に活用されるものと考えられる。

参考文献

- 1) 沢田充弘, 鎌田敏正, 増田敏一, 橋本正: 二分割鋼管セグメントによるシールドトンネル補強, 土木学会, 第56回年次学術講演会, III-B098, pp. 196-197, 2001.
- 2) 松下晃, 鎌田敏正, 奥野正富, 関孝次郎, 坂田栄治: 光ファイバセンサを用いたトンネル監視システム(B-OTDR方式), 土木学会, 第57回年次学術講演会, VI-289, pp. 577-578, 2002.