

近接しているとう道は、主に昭和41年～45年にシールド工法で建設されたトンネルであり、一次覆工はプレート厚2mmの鋼製セグメント、二次覆工は厚250mmの無筋コンクリートとなっている。また、とう道内には非常に多くの通信用メタルケーブル・光ファイバーケーブルが収容されている。そのため、非常に緻密な施工管理を要求された。それにより、工事に伴う影響が懸念される区間において、B-OTDR方式(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)の光ファイバーを使用した連続的で広範囲にわたる、とう道の変状計測、監視を実施する事となった。

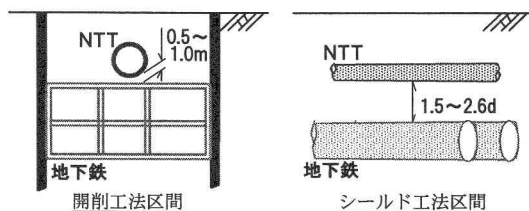


図-2 とう道との近接状況

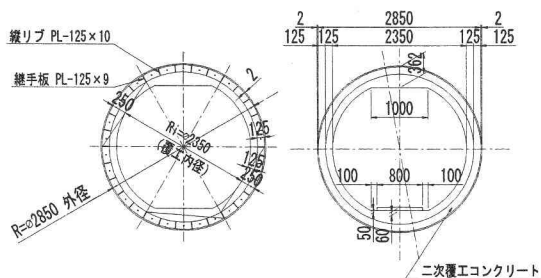


図-3 とう道構造断面図

2. 光ファイバー計測の概念と特徴

(1) 光ファイバー計測の概要

近年図-4に示すように、各分野において光モニタリング技術が実用段階に入ってきている。この光モニタリングに用いられる光ファイバーセンサは防腐蚀性、耐雷、耐電磁誘導に富み、シンプルな配線形態

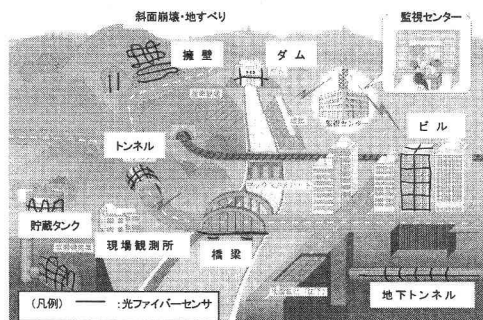


図-4 光ファイバーによる各種センシング

で広範囲の計測ができ長寿命であることを特長としている。光モニタリングの代表的な方式として、FBG(Fiber Bragg Grating)、B-OTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)を利用した歪み計測や、FBGを応用した沈下計測であるが、OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)を利用した変状の有無を計測する手法や、DTS(Distributed temperature sensor)のように温度分布の計測に利用されている手法もある。

(2) 計測原理

a) FBG方式(Fiber Bragg Grating)

FBG方式の計測原理を図-5に示す。シングルモード型光ファイバーのコア部に紫外線を照射し、屈折率を一定周期で変化させたファイバークレーティング部(1mm当り約2000個)を作成する。この光ファイバーに入射光を入れるとファイバークレーティング部でBragg波長といわれる特定の波長のみを反射(反射光をBragg光という)し、他の波長の光はファイバークレーティング部を透過する。もし光ファイバーの軸方向の歪みが増加するとファイバークレーティング部の屈折率周期(Λ :格子間隔)が変化し、歪み変化量に比例してBragg波長がシフトする。このシフト量を検出することにより歪みを算出することができる。このようにFBG方式は、光ファイバーケーブルの任意の位置に加工した微小なファイバークレーティング部がセンサとなり、ポイント型の計測手法であるといえる。

b) B-OTDR方式(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)

光ファイバー中で生じている音波は光ファイバー

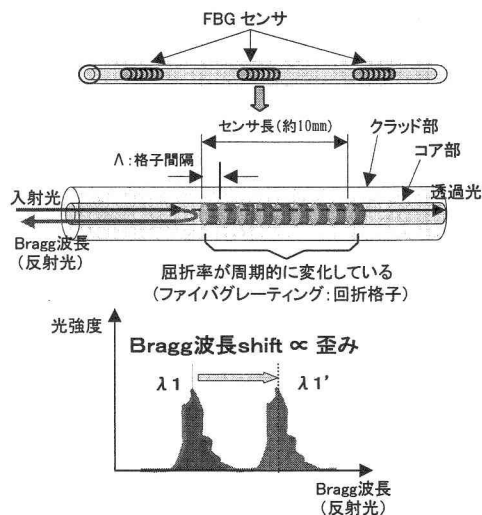


図-5 FBG方式の計測原理

媒質中で屈折率ゆらぎをもたらし、光ファイバー中に入射された光パルスはBragg反射され、入射口側への後方散乱光として戻ってくる。この後方散乱光をブリルアン散乱光という。ブリルアン散乱光の周波数は光ファイバ中の音速によるドップラー効果のため γB だけ異なって戻ってくる。この γB はブリルアン周波数シフトと呼ばれ、光ファイバーの屈折率を n 、光ファイバ媒質中での音速を V 、入射光の波長を λ とするとブリルアン周波数シフト γB は次の式(1)で求められる。

$$\gamma B = 2nV/\lambda \quad (1)$$

光ファイバーに歪みが発生すると音速が変化するため γB も変化する。 γB は通常のシングルモード光ファイバーの場合、 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ において $493\text{MHz}/\%$ (strain)であり、この関係を図-6示す。

B-OTDR方式の計測原理を図-7に示す。B-OTDR方式では歪みを分布として求めるために光ファイバーにパルス光を入射し、戻ってくるブリルアン散乱光強度パワーを時間分解して計算する。このとき、ファ

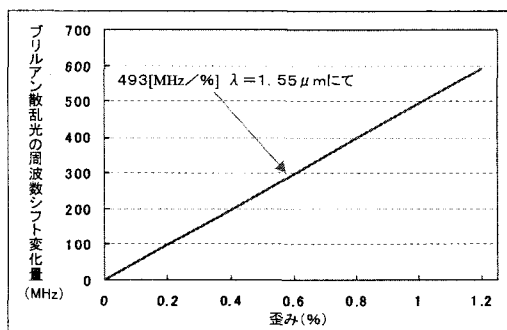


図-6 ブリルアン周波数シフトと歪みの依存性

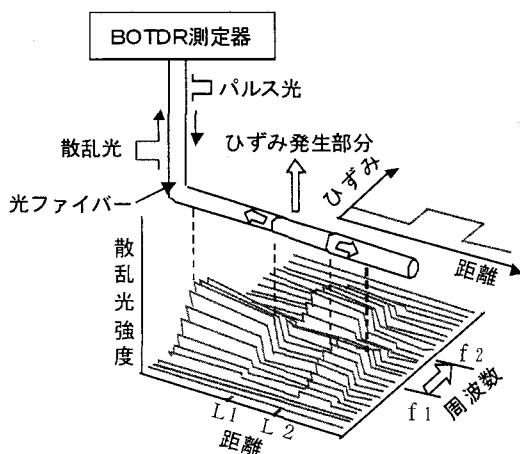


図-7 B-OTDR方式の計測原理

イバーの距離 z (ブリルアン散乱光の発生位置)は、パルス光を入射してからブリルアン散乱光を検出するまでの時間を T 、光速を c とすると、次の式(2)で求められる。

$$z = (cT)/(2n) \quad (2)$$

同様の計測を図-7に示すように周波数を少しずつずらしながら行なうと周波数毎の散乱光強度分布が得られる。この波形群を光ファイバの距離方向のある位置で周波数軸に沿った断面を考えると、その位置での散乱光スペクトルが得られる。すべての位置におけるスペクトルから γB を求めることにより、歪みを分布として計測することができる。

このようにB-OTDR方式は光ファイバー延長方向の歪み分布が計測可能な分布型センサ(線の計測)であり、センサの設置形態により非常に広範囲な歪み計測が可能であるという特長をもっている。この方式を用いた計測は、斜面崩壊・地すべり検知等の防災モニタリングやトンネル等の構造物の変状モニタリング等幅広い分野に応用されている。

c) その他の方式

レーリー散乱光を応用したOTDR方式 (Optical Time Domain Reflectometer)は、計測対象物の変状に併せて光ファイバーに曲げ損失もしくは断線等が発生させる機構部を設け、光の伝送損失の変化を測定し、変状の有無を検知する計測手法である。

ラマン散乱光を応用した DTS 方式 (Distributed temperature sensor)は、布設したセンサ用光ファイバーケーブル延長方向の温度分布が測定できることから、道路の凍結監視、トンネルの火災検知やプラントの温度監視等に用いられている。

(3) 各光センサ方式の比較

現在、各方式によりそれぞれの特徴を生かした計測に利用されている。その特徴を以下にまとめる。

① B-OTDR 方式

1本の光ファイバーで広範囲(2~10 km程度)の連続的な計測ができ、計測対象全体の変状把握に適する。

② FBG 方式

測定対象の変化をリアルタイムかつ高精度に測定でき、特定(点)の測定箇所を詳細に計測をおこなう場合に適する。

③ OTDR 方式

測定システムが比較的安価であり、計測結果を変化状況の有り無しとして出力する。

今回の工事では、B-OTDR方式光ファイバー歪み計測を採用した。

3. 地下鉄13号線工事での光ファイバー計測

(1) 開削工事におけるとう道の防護

地下鉄13号線建設工事における、とう道と平行して近接施工となる箇所として、西早稲田駅(仮称)、新宿七丁目駅(仮称)がある。

そのうち、新宿七丁目駅(仮称)は図-8に示すように、372mのうち355mを開削工法にて施工し、明治通りと大久保通り交差点(大久保二丁目交差点)の17mについては、種々の大型埋設物と交差近接、縦断近接となっており、開削工法による施工が困難なためパイプルーフ工法を採用している。

今回の工事では、駅構造物直上に平行しているとう道を吊り防護し、とう道を現状の位置にて機能を保持することとした。また、吊り防護が完了したのちに地下鉄構造物の上床スラブを逆巻き施工し、下受けすることにより、吊り防護期間を短くすることとした。

吊り防護方法としては図-9に示すとおりである。横桁にH形鋼材を、吊桁に溝形鋼材を縦断方向に架設し、そこからタイロッドで下受け桁を介してとう道を吊り防護する。下受け桁にはH形鋼材を使用し、とう道セグメントの1リング(0.75m)に対して1本設置する方法とした。

上床スラブへの受け防護は、離隔が0.5~0.6m程

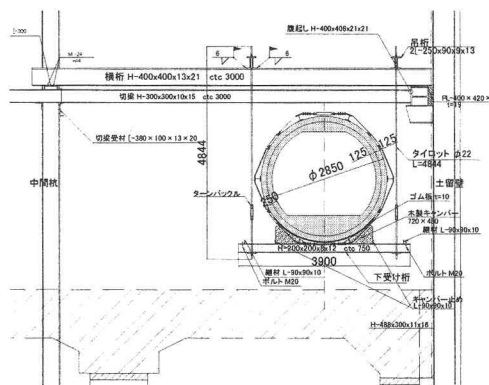


図-9 とう道吊り防護方法

度と狭いため、とう道と上床スラブの隙間に間詰めコンクリートを施工する方法で計画している。

(2) 開削工事におけるとう道の計測方法

図-10に光ファイバーセンサーの設置概要、設置状況写真を示す。光ファイバーセンサーの設置は、とう道延長方向に対し縦断方向センサを上下対角線に5m間隔に固定設置し、とう道断面に対し内空変位センサを15m間隔で鉛直方向、水平方向に設置した。この光ファイバセンサは光ファイバーを一筆書き状に配線しセンサ部を構成しており、計測装置本体である光歪みアナライザまでの伝送路も光ファイバケーブルで構成されている。計測管理は縦断方向においては固定端間5mの歪み値、内空変位では計測した歪み値と固定端間距離の積から変形量(mm)に換算し管理している。また、計測システムは現場観測所に設置したB-OTDR計測器から管理事務所に対しデータ配信させ、さらに管理事務所から工事監督者事務所および施工会社事務所へのデータ配信をすべて自動化し、管理値に達した場合には計測管理者に対し警報連絡が入るようシステム化するなど計測管理体制の強化を図っている。

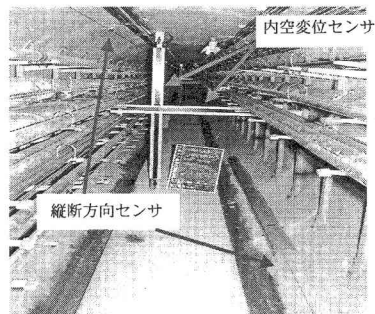
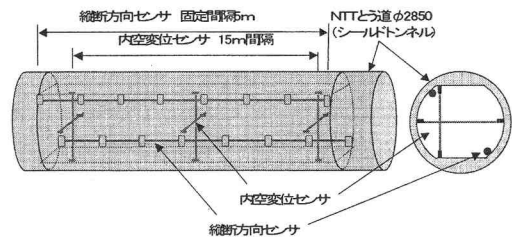


図-10 光ファイバセンサ設置概要

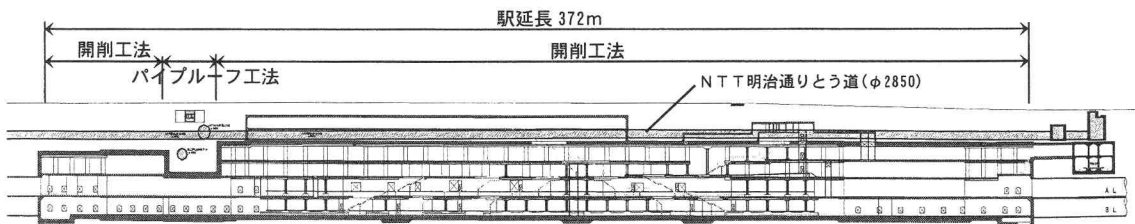


図-8 新宿七丁目駅(仮称)縦断面図

4. とう道の変状と対策

(1) 管理値

とう道の二次覆工は無筋コンクリートであるため、とう道の変形に伴う二次覆工コンクリートのクラック発生・剥落による、ケーブルの損傷が懸念された。そのため、縦断方向のひずみ・横断の内空変位ともに、一次管理値は無筋コンクリートの引張許容応力度から算出した。

二次管理値についてはリング間ボルトの長期引張応力度の60%とし、許容管理値については、縦断方向はリング間ボルトの長期引張応力度を、横断方向は長期許容応力に至る変位量を根拠とし算出した。

表-1に管理値及び算出根拠を示す。

表-1 管理値及び算出根拠

計測項目	管 理 値	許容応力
とう道 縦断方向	引張歪	
	1次管理値 2次覆工コンクリートのクラック	100 μ
	2次管理値 許容管理値の60%	300 μ
	許容管理値 継手ボルトの長期許容引張応力相当	550 μ
とう道 横断方向	圧縮歪	
	1次管理値 許容管理値の60%	550 μ
	2次管理値 2次覆工コンクリートの圧縮破壊相当	900 μ
	許容管理値 2次覆工コンクリートのクラック	$\pm 1\text{mm}$
とう道 横断方向	内空変位	
	2次管理値 許容管理値の60%	水平 -5mm<X<2mm 鉛直 -2mm<Y<5mm
	許容管理値	水平 -8mm<X<3mm 鉛直 -3mm<Y<8mm
	初期状態から長期許容応力に至る変位	2N/mm ² 140N/mm ²

(2) 事前解析と変状への対策

今回の開削工事におけるとう道の変状として、とう道上部の掘削に伴う周辺地盤の変状により発生するとう道の浮き上がり(以下、リバウンド現象)、露出掘削時および吊り防護完了後のとう道自重に伴う変形および沈下が予想された。そのため、事前にモデルを組み、掘削に伴うとう道の変状について解析・検討を行った。

ここでは新宿七丁目駅(仮称)での工事を事例として書く。リバウンド現象については、図-12のとおり施工ブロック延長を施工性の面を考慮し25mとしてFEM解析を行ったところ、図-13に示すとおり縦断方向では地盤の変状として最大7.1mmのリバウンドが発生する結果であった。これを、とう道のセグメント・リング継手系の剛性と等価な剛性をもつ梁としたモデルに変位を与えフレーム解析を

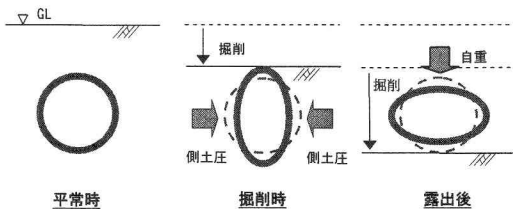


図-11 とう道の横断方向変形

行った。とう道の等価剛性の算出については、セグメントの延長方向に曲げモーメントが作用した場合、圧縮側はセグメント断面、引張側はリング継手で抵抗するものとし以下の仮定を設けた。

- ① 中立軸は断面中央から距離 x だけ圧縮側にシフトする
- ② リング継手断面においてセグメントの端面は、中立軸を境に引張側と圧縮側とで、それぞれ傾きの異なる平面を保持する。
- ③ 中立軸はリング延長方向で一定とする。
- ④ セグメント及びリング継手の剛性は線形とする。

よって次の式(3)で求められる。

$$(EI)_{eq} = \frac{\cos^3 \phi}{\cos \phi + \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \phi} \cdot Es \cdot Is \quad (3)$$

Es : セグメントの弾性係数
Is : セグメントの断面二次モーメント
 ϕ : トンネル断面中央軸から中立軸までの角度

ただし、 ϕ については次の式(4)を満足するよう収束計算を行う。

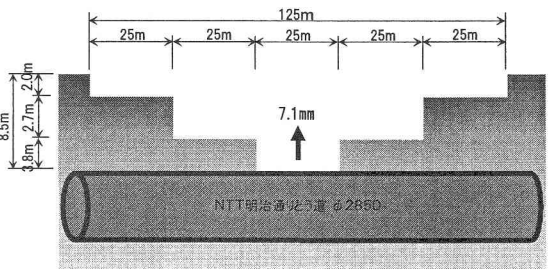


図-12 とう道の露出掘削方法

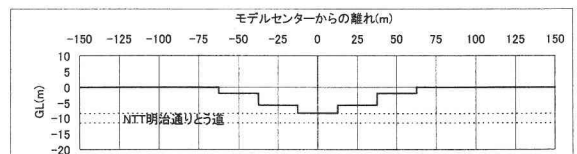


図-13 縦断方向の解析モデル及び変位値

$$\phi + \cot \phi = \pi \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{kj}{\frac{Es \cdot As}{ls}} \right) \quad (4)$$

$\left\{ \begin{array}{l} K_j: \text{リング継手全体の軸剛性} \\ A_s: \text{セグメント断面積} \\ l_s: \text{リング長} \end{array} \right.$

フレーム解析の後、発生モーメント・発生せん断力からセグメントリング間継ぎ手ボルトに対する発生応力を照査したところ、曲げ応力で $1.765 \text{ N/mm}^2 < 160 \text{ N/mm}^2$ 、せん断応力で $1.375 \text{ N/mm}^2 < 80 \text{ N/mm}^2$ であり、応力的には問題がない結果であった。

しかし、二次覆工コンクリートは無筋コンクリートであるので、クラックの発生・剥落の可能性を考え、ナイロンネットを設置し簡易的にケーブル防護を行い、工事中のとう道内の監視も強化することで対応することとした。

露出掘削時の側圧及びとう道自重に伴う変形については、図-14のとおり上載荷重を取り除いたモデルでの検討を行った。横断方向で最大 -1.67 mm (水平方向) 変形し、セグメントに対する発生応力として最大 27.12 N/mm^2 となる結果であった。また、吊り防護完了時(露出掘削後)に起こる自重による変形について検討したが、横断方向で最大 -2.75 mm (鉛直方向) 変形し、セグメントに対する発生応力として最大 31.29 N/mm^2 となる結果であった。これらについては、一次覆工である鋼製セグメントの主桁の許容応力度が 140 N/mm^2 であるため、応力的には問題はない。しかし、変形量が二次覆工コンクリートの一次管理値を超えてしま

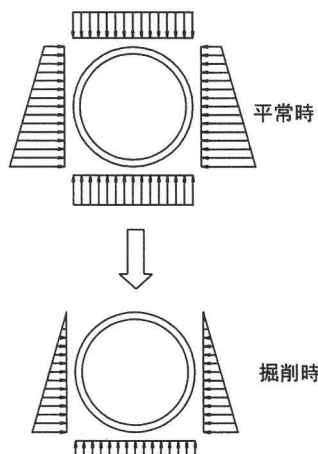


図-14 露出掘削時の荷重モデル

う結果であるので対策を検討した。今回の吊り防護方法は、施工性および工程を考慮し、下受け桁を使用する方法をとっているため、とう道を円形に拘束することが出来ない。そのため、対策として変形防止リングの設置を行うこととした。図-15に示すように、ワイヤーロープで縦断方向に設置しH形鋼材を介してとう道を拘束する方法である。露出掘削の手順としてとう道上部までは1ブロックの露出掘削・吊り防護・変形防止リング設置の作業をセグメント1リング毎に連続的に行うよう計画し、自重による変形が進行することを防ぐこととした。

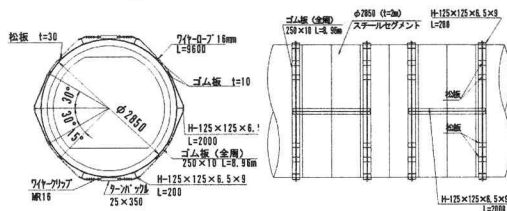


図-15 変形防止リング設置断面図

(3) 施工実績

開削区間中央部に着目してみる。縦断センサでは図-16のとおり、'04.4中旬～'04.9中旬までで、上部・下部センサともに $+50 \sim -50 \mu$ 程度の微量な変位が見られる。これは、'04.4中旬より路面覆工の架設、'04.5下旬から掘削を進めとう道の露出を行っている。下部センサが- (圧縮) を、上部センサが+ (引張り) を検知している事から、微量ではあるがリバウンド現象が発生しているものと考えられ

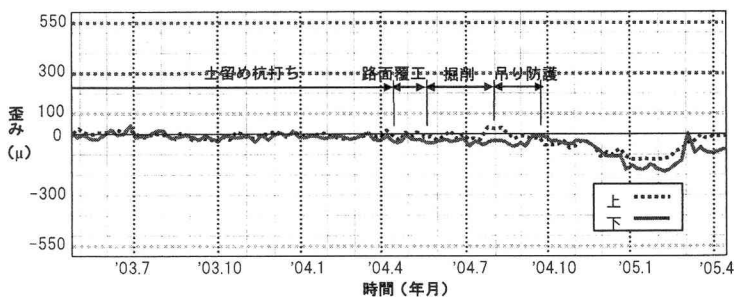


図-16 中央部縦断歪み

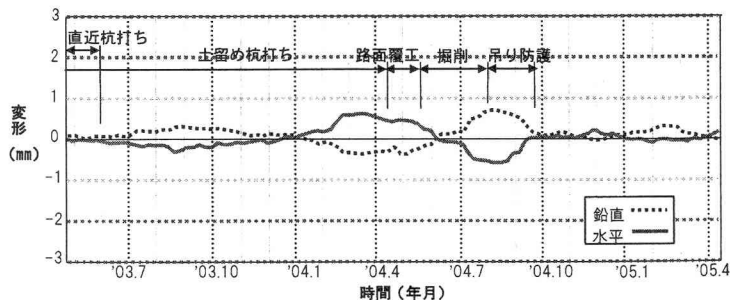


図-17 中央部横断変形

る。'04.11からは上部・下部センサともに $-50 \sim -180 \mu$ 程度の $-$ (圧縮)歪みを検知している。'04.9下旬に吊り防護が完了した後は、とう道が露出されたため、冬季の外気温低下の影響を受けとう道に収縮が起きているのではないかと推測される。内空センサでは図-17のとおり、'03.6月上旬までは直近での土留め杭施工の影響のため、 0.3 mm 程度の変形を水平センサが $+$ (伸び)、鉛直センサが $-$ (縮み)で検知しており、側土圧が低減し横方向の変形を起こしていることがわかる。'04.6月上旬からは、 $0.6 \sim 0.8 \text{ mm}$ 程度の変形を、水平センサが $-$ (縮み)、鉛直センサが $+$ (伸び)を検知しており、縦方向の変形を起こしていることがわかる。掘削を開始したことにより上載荷重が低減し側圧を受けることに伴う変形であると考えられる。吊り防護を開始した'04.8月上旬をピークに、変形が収束していることがわかる。

次に開削区間に隣接する掘削範囲外の箇所に着目してみる。縦断センサでは図-18のとおり、'04.4下旬の路面覆工架設から'04.8月上旬の吊り防護開始までの期間ではほとんど変状はみられない。'04.8月上旬の吊り防護の開始から微量ではあるが $+10 \sim -50 \mu$ 程度の歪みを、上部センサが $+$ (引張り)を、下部センサが $-$ (圧縮)を検知している。これは坑内においてとう道を露出掘削し、吊り防護を行ったためとう道自重により沈下の変位が発生したことの影響を受けているものと推測される。'04.9下旬の吊り防護の完了後は、最大 $+250 \mu$ 程度の歪みを上部・下部センサともに $+$ (引張り)を検知している。これは坑内のとう道が自重により沈下しその影響で土中のとう道が引張りの変形を受けているものと考えられる。また、坑内の露出されたとう道が冬季の

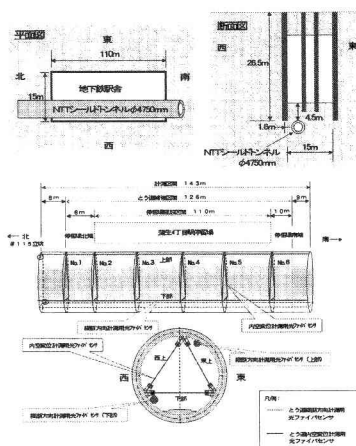


図-20 大阪市営地下鉄8号線における
施工概要および計測状況

外気温低下の影響を受けとう道に収縮が起きた事による影響も推測される。'04.12月上旬から上部・下部センサともに一次管理値を超えた値を検知したので、とう道内の点検を行ったところ二次覆工コンクリートにヘアクラックの発生を確認したが、剥落等の危険性は無い状況であった。内空センサでは図-19のとおり、微量ではあるが 0.5 mm 程度の変形を、水平センサが $-$ (縮み)、鉛直センサが $+$ (伸び)を検知している。'04.5下旬の掘削開始と、'04.9下旬の吊り防護完了に伴う変状の影響を受けているものと考えられる。

5. 他工事での光ファイバー計測事例

(1) シールドトンネル工事での計測

大阪市営地下鉄8号線工事では、NTTとう道との近接施工影響計測に光ファイバーセンサを使用している。図-20に計測概要を示す。とう道縦断方向はとう道内の天井部と床部に光ファイバーを設置し歪み計測を行い、とう道横断方向は内空断面に光ファイバーを三角形に結び内空変位量を測定している。これは工事の進捗によりとう道に対する影響位置が移るため、内空変位を三角形の三辺で評価計測を実施するためである。

(2) 矩形構造物の保全業務での経年的計測

RC矩形構造物の変状経過計測光ファイバーセンサ

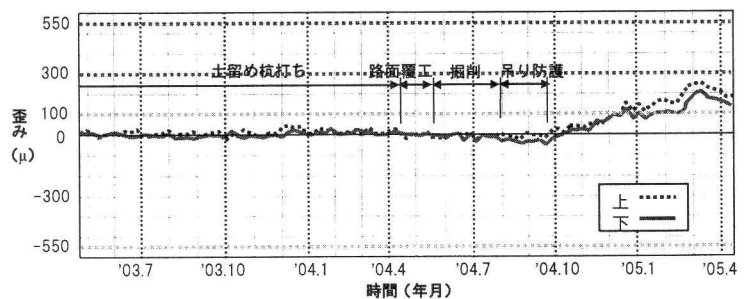


図-18 端部縦断歪み

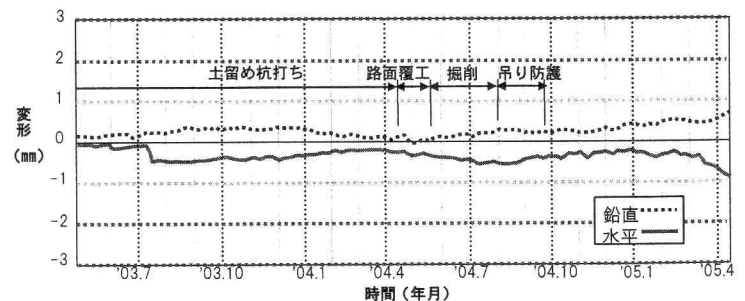


図-19 端部横断変形

を使用している例を示す。この構造物は過去に変形がみられ、補強・補修工事がなされた。

その後の構造物の変状を確認するため光ファイバセンサ監視システムを構築し、経年的なデータ収集を行い、効果的な保全業務を実施する目的で光ファイバセンサにより計測されている。計測は構造物縦断方向の変状を検知する歪みセンサを一定間隔(約3m)で設置し、横断方向の変状を検知する内空変位センサを鉛直・水平の2方向にそれぞれ設置し計測している。

6. まとめ

(1) とう道の変状

a) 縦断方向歪み

露出掘削時のリバウンドによるセグメントリング間継ぎ手ボルトに対する発生曲げ応力で比較すると、次のとおり実測値が解析値を上回る結果であったが、管理値内であった。

解析値 1.765 N/mm² (リバウンド最大値)

実測値 18.900 N/mm² (リバウンド最大値)

b) 横断方向変形

露出掘削時の上載荷重を取除いた状態での変形量を比較すると、次のとおり実測値が解析値を下回る結果であった。

解析値 水平 -1.67 mm , 鉛直 +1.59 mm

実測値 水平 -0.58 mm , 鉛直 +0.75 mm

また、吊り防護完了時に起こる自重による変形量を比較すると次のとおり実測値が解析値を下回る結果であった。

解析値 水平 +2.62 mm , 鉛直 -2.75 mm

実測値 水平 -0.04 mm , 鉛直 +0.13 mm

なお、吊り防護完了時に発生すると予想していたとう道自重による横方向の変形が解析値を大きく下回ったが、前述のとおりに変形防止リングを設置したこと、変形防止リングの設置を吊り防護作業とほぼ同時並行に行ったことにより、変形を抑制することが出来たと考えられる

(2) 計測手法

今回の近接施工は、シールド式とう道を長期間・広範囲にわたって露出・吊り防護するという、経験の少ない施工を行った。そのため、より緻密な計測が求められたこと、計測範囲が延長4.3kmと広範囲にわたっていることから、光ファイバによる計測を選定した。B-OTDR方式光ファイバ計測の大きな特徴としては、計測・解析機器を1セット導入し、

センサは1本の光ファイバケーブルを対象物に固定しモニタリングするという方法から、全体の変状を線的に把握する事ができ、コスト面では計測箇所・規模が大きい場合や、計測が長期間に渡る場合等は、従来の電気式計測よりも安価となる。現地に設置される機器は、光ファイバケーブルのみとなるので、従来の電気式のように各々の計測箇所への電源の供給も不要であり、配線がシンプルとなるので、メンテナンスが容易である。また、この光計測は沈下及び隆起のみではなく平面的な変位も検知することが出来るので、影響構造物が平行している場合にも利用が可能だと考えられる。しかし、あくまでも線的に歪み値を計測する方法のため、構造物に発生している応力を把握する事は可能であるが、変位が沈下なのか隆起なのかという事や、限定された箇所をポイント的に捉えて計測したい場合などには把握しづらいという面もある。例えば、重要構造物下への薬液注入や地盤改良工事などのように、絶対変位を監視しながら施工する必要がある場合などは、FBG方式を応用した沈下計との併用が望ましいと考える。

今後、各計測方式の長所を生かし、状況に適した計測方式の選定、運用方法などを検討していきたい。

参考文献

- 1) 和内, 栗原, 他: 光ファイバセンサ(B-OTDR)を用いた近接施工管理, 土木学会第 58 回年次学術講演会 III-478, 2003.9
- 2) 和内, 藤木, 他: 光ファイバセンサ(B-OTDR)による開削トンネル施工時の既設とう道の計測管理, 土木学会第 59 回年次学術講演会 VI-168, 2004.9
- 3) 藤橋: 光ファイバセンシング技術による地盤・構造物変状計測, 土木学会第 19 回建設用ロボットに関する技術講習会, 2001.12
- 4) 川島, 大日方: シールドトンネルの耐震性に関する研究-(その 1)シールドセグメントの等価剛性の評価および応答変位法の適用, 建設省土木研究所資料 第 2262 号, 1985.10