

光ファイバー計測を用いた下部通過シールドによる既設トンネルの3次元挙動とその影響解析

奥 要治¹・堀地 紀行²・小泉 淳³・Laurence.F.Boswell⁴・小野 勇⁵

¹正会員 サンワコムシス(株) (〒166-0003 東京都杉並区高円寺南2-12-3)

²正会員 国士舘大学 教授 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷4-10-5)

E-mail:horichi@kokushikan.ac.jp

³正会員 早稲田大学 教授 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

⁴ICE会員 ロンドン市立大学 教授 (Northampton Square London, EC1V 0HB, UK)

⁵正会員 国士舘大学 職員 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷4-10-5)

都市の高度集積化に伴い、地下空間では交通、エネルギー、上下水、通信などのライフライン施設が輻輳し、既設のトンネルに新規のトンネルが近接して施工される事例に遭遇する。新設されるシールドトンネルが既設通信用トンネルの下部を通過する近接施工の影響を管理する目的で、光ファイバー計測によるBOTDR方式を用いて既設の通信用シールドトンネルを3次元的に計測した。本論文では得られた計測データを分析し、新設のシールドトンネル掘削による既設シールドトンネルへの影響を、内空変位とトンネル縦断方向の沈下量について経時的に分析し3次元構造として挙動を吟味した。また計測結果から得られた知見を基に新設鉄道用シールドの下部通過時の通信用トンネルの断面力の変化を解析的に計算し、トンネルの中長期的な計測管理手法の提示も試みた。

Key Words: BOTDR, fiber-optics, close-proximity shield tunneling, segmental lining ring analysis of an existing tunnel, construction work control

1. 序論

(1) はじめに

情報伝送路の光ファイバーケーブルは、電話やインターネット、映像などの情報通信分野において、生活に欠かせない重要な社会基盤となり、短期間に我国で広く普及するに至った。

光ファイバーケーブルの周辺技術に、ケーブル本体の伸縮をセンサーとして利用する計測技術¹⁾であるBOTDR方式が開発されており、橋梁、トンネル、管路、土構造など、土木構造物において防災、保守、施工管理などを目的に、近年、導入事例も散見され、光ファイバーケーブルを用いた計測固有の特徴的な成果も見受けられるようになってきた^{2)~10)}。

本報告では、既設の通信用トンネルに対して、下部を通過する、つくばエクスプレス線の大断面新鉄道用シールドの掘進の影響について、既設の通信用トンネル内に、計測用の光ファイバーケーブルを敷設して得たトンネル内空変位とトンネル縦断方向の沈下量の計測結果を経時変化を踏まえて示し、空間3次元的に議論を行ったものである。また、あわせて得られた知見から、より簡便な既設シールドトンネルの断面力影響解析手法も提案した。なお、新設トンネル交差部直上に位置する既設通信用トンネルの中央断面の計測データは、かつて著者らによ

り文献²⁾で一部が発表されている。

本報告は、この中央断面の内空変位のデータに、他の4断面の内空変位のデータを新たに加え、再構成、再吟味したもので、新規の論文との立場に立っている。

ここで、光ファイバーセンサーとは、光ファイバーケーブル本体をセンサーとしたもので、腐食に強く、可撓性に富み、電磁気的な影響も受けないといった特徴を有している。本報告の計測に用いたBOTDR方式とその原理は、Fig1-1に示すように、ケーブル自体の伸びとケーブル内のレーザー反射光の波長変化が線形関係にあることに由っている。また頭文字のBは発見者であるブリルアン (Brillouin) 頭文字に因んでいる。現在の測定器の精度では、ケーブル1mあたり0.1mmの変位、ひずみ換算で100μの測定が可能である。また測定に必要なケーブル長(ゲージ長)は1mが要求される。他の方式として、電気抵抗式ひずみゲージとほぼ同等の精度を有するFBG (Fiber Bragg Grating)^{8),9)}センサーや、赤外線を用いたOSMOS (Optical strand monitoring system)¹⁰⁾センサーなどがある。

2. 現場の状況と計測の概要

(1) 現場の状況

計測が行われたトンネルは、シールド工法により建設され

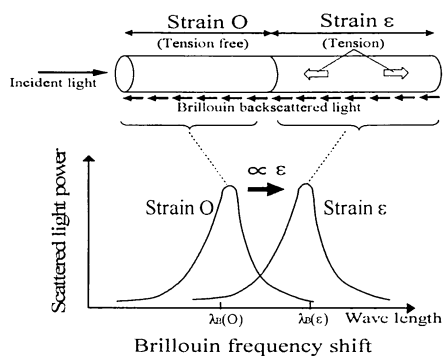


Figure 1-1 Brillouin frequency shift caused by strain

た通信用トンネルで、一次覆工には外径 3.15 m の鋼製 セグメントが用いられている。また二次覆工は約 20 cm の無筋コンクリートで、応力分担を考慮しない化粧巻きとして施工されている。Fig. 2-1 に計測を行った現場の地質の状況を示す。現場は台東区西浅草 1 丁目、雷門 1 丁目、寿町が接する国際通りと浅草通りの交差点の直下で、浅草通りに沿って土被り約 31 m、平均 N 値約 15 の洪積シルト層内に、NTT の通信用トンネルがシールド工法で建設されている。一方、土被り約 38 m で、天端付近にシルト層を一部含みながら、東京礫層を起点の御徒町から南千住方向に掘進して来る、つくばエクスプレス線（建設時は常磐新線、以下「新鉄道用シールド」と称す。）の鉄道複線断面の外径 10.2 m を有する泥水式シールドが、上下方向 3.07 m のクリアランスで、交差角 85 度でほぼ直角に交差する箇所である（Fig2-1 参照）。

Figure 2-1 Geological map on the site

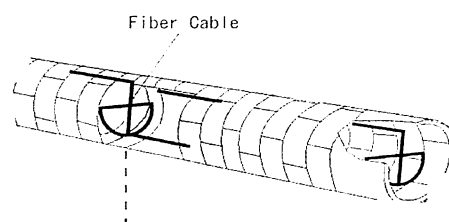


Figure 2-2 Fiber optic cable installation
in the NTT tunnel

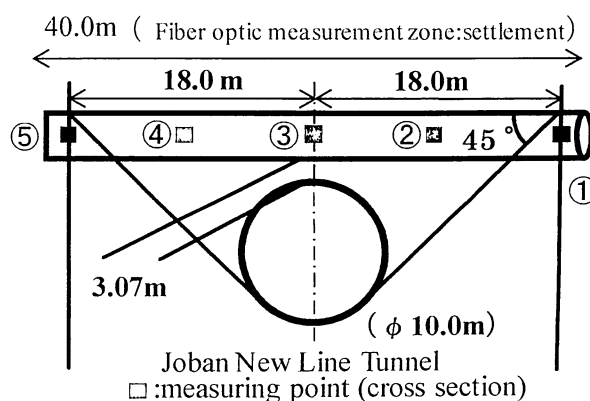


Figure 2-3 The arrangement of measuring system on the site

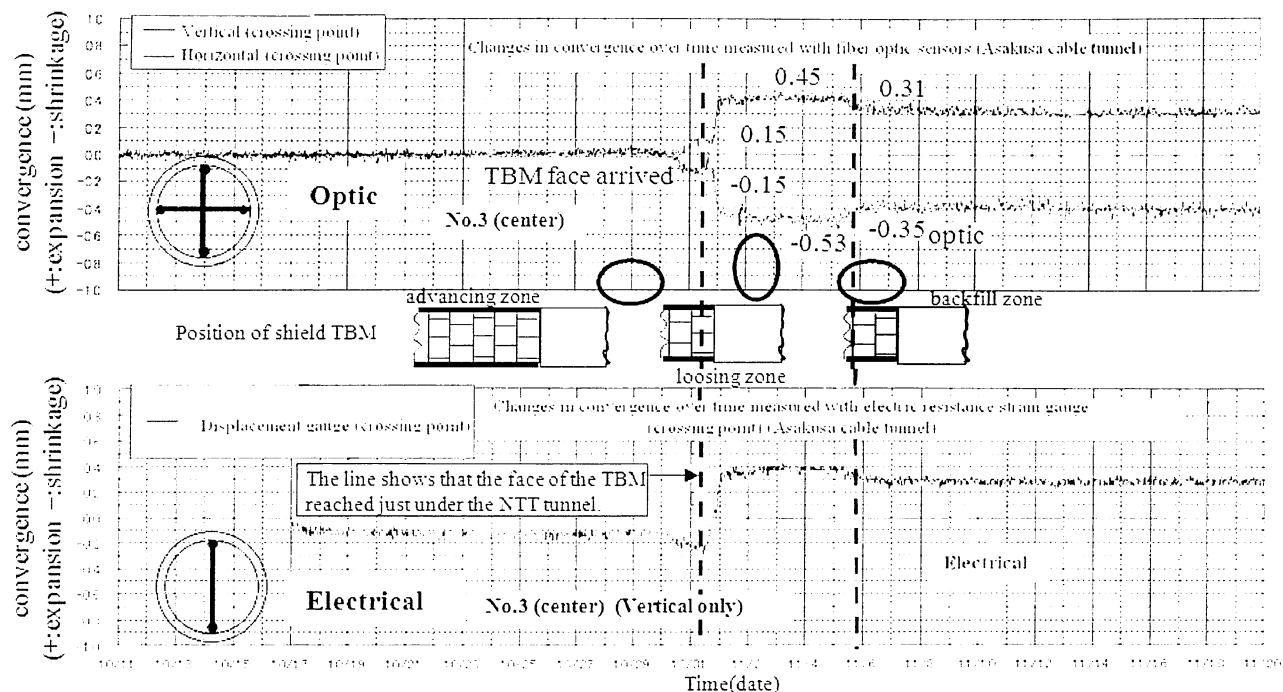


Figure 3-1 Fiber optic measurement result on the point No.3(center) and comparison with electrical resistance strain gauge measurement result

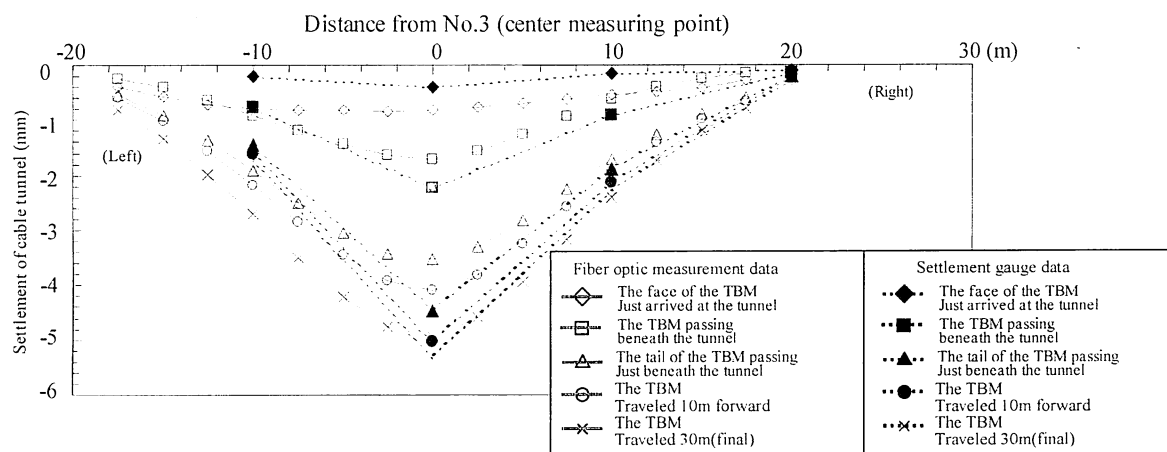


Figure 3-2 Settlement measured along the axis of the cable tunnel

た。計測範囲と計測断面の配置について、Fig.2-3に示す。

3. 既設通信用トンネルに及ぼす下方交差の新鉄道用シールド掘進の影響

(1) 新鉄道用シールドの施工状況

新鉄道用シールドは掘進施工データから通信用トンネル直下を通過する際に、切羽水圧は 299 ～ 305 kPa で、また裏込注入圧は 460 ～ 470 kPa で掘進通過した。この付近の土被りは約 38 m、地下水位は G.L. - 6 m で、地下水圧も静水圧に近い約 300 kPa であった。この地盤の単位重量は約 16.5 kN/m³であり、以上

から新鉄道用シールド天端付近の鉛直方向の土水圧の合計はおおよそ 600 kPa と考えられる。

(2) 光ファイバー計測と電気抵抗式ひずみゲージ

Fig.3-1 に光ファイバー計測と電気抵抗式ひずみゲージによる内空変位の比較を示す。ただし、電気抵抗式は鉛直方向の内空変位のみを測定し、両グラフは 40 分のデータ採取間隔で測定された。電気抵抗式では、初期の設置に関すると思われる変位が、0.1 mm ほど鉛直方向で縮んだ内空変位として検出されている。しかし、新鉄道用シールドが接近し、内空変位の変化が検知され始め、直下を通過してゆくまでの過程では、両者の

データは内空変位の変化の状況や、個々の値の対応関係など、良い一致を示していると言える。

(3) 既設の通信用トンネル中央断面の内空変位の変化

Fig3-1 のBOTDRにより計測された内空変位から、新鉄道用シールド切羽接近に伴い、最大 0.2 mm 程度の水平方向の内空変位の増加と鉛直方向の内空変位の減少が読みとれる。新鉄道用シールド切羽が既設通信用トンネルの中心に到達する約 12 m 手前の位置から、内空変位の変化が認められ、この横長変形の最大値は新鉄道用シールド切羽が通信用トンネル中心の直下の位置に到達した時点で発生している。こうした通信用トンネルの内空変位挙動の主な理由として、泥水圧やカッター圧などの新鉄道用シールドの切羽前面圧が、既設の通信用トンネルの下半周辺の地盤に、付加的な応力として伝播したと考えられる。その結果、新鉄道用シールド接近側の側方下部より力が作用し、トンネル断面を横長、つまり扁平に変形させたと考えられる。この横長変形は、新鉄道用シールドが接近し、通信用トンネル中心の直下に到達するまで増加傾向を示す。(Fig3-1 の中段に示す通信用トンネルと掘進中のシールドの位置関係参照。)通信用トンネルが横長変形モードの最大内空変位 0.2 mm を計測後、新鉄道用シールドの掘進に伴い、水平方向の内空変位は減少し始め、鉛直方向の内空変位はそれとは反対に増加し、切羽通過約 4 m の位置で内空変位は初期値のゼロの状態に戻る。この水平方向の内空変位の減少はさらに継続し、新鉄道用シールドの進行に伴い、水平方向の内空変位は減少を続け、逆に鉛直方向の内空変位は増加して、切羽通過約 8 m のシールドのテール約 1.8 m 手前付近で、初期値をベースとして 0.5 mm 程度の鉛直方向の内空変位が増加し、同じく 0.5 mm 程度の水平方向の内空変位が減少した、縦長の変形モードを測定した。つまり新鉄道用シールド切羽到達直前から通過後に及ぶ期間において、横長の変形モードとは逆の縦長の変形モードを、既設通信用トンネルの内空変位として確認した。なお、新鉄道用シールドの機長は、9.8 m である。

ここで、シールドの泥水圧は水平方向の土圧を念頭に設定されている。この泥水圧にシールドのカッター圧の影響を加圧要素として考慮し、泥水圧などのシールドの切羽前面圧は、切羽前方の地山の初期応力、特に水平方向の応力に付加的な応力を与えられと考えられる (Fig3-1 の中段の左図参照)。一方既設の通信用トンネルを通過する際、新鉄道用シールドの泥水圧は施工データからスプリングラインで 300 kPa 程度であった。

また、シールド切羽直上の、天端付近の鉛直土水圧は土盛り約 38 m、地下水位 G.L. - 6 m などから約 600 kPa と評価され、これらを考慮すると新鉄道用シールドの天端付近では、通信用トンネルを通過する際のシールドの姿勢や、シールドと地盤の摩擦に起因する通信用トンネル下部の土圧の減少に加え、新鉄道用シールド先端の天端付近に作用する泥水圧と鉛直土水圧との不均衡なども影響を及ぼしたと考えられ、新鉄道用シールドが通過中の、既設の通信用トンネル直下の地山は、応力解放状

態にあったと理解できる。このため通信用トンネルの鉛直方向内空変位が増加し、閉合された円形断面であるため、水平方向の内空変位が減少したと考えられる。

(4) 既設の通信用トンネルの縦断方向の沈下

Fig3-2 に光ファイバー計測から得られた既設の通信用トンネルの縦断方向の沈下量と、比較のため、ゲージデータの水盛り式沈下計の値を示す。なお、水盛り式沈下計の水槽は交差中心から 20 m 以遠の沈下の影響範囲外に設置した。新鉄道用シールドとの交差中心断面の位置をピークとして前後約 20 m の範囲で、滑らかな沈下曲線が確認された。沈下の値は、新鉄道用シールド切羽が既設の通信用トンネル直下に到達したあたりから発生し始め、新鉄道用シールド中胴部通過中、テール通過、テール通過後に約 10 m 進行した通過 1 D の状態、切羽到達後 10 日ほど経過した切羽通過 30 m の沈下量が安定した最終状態まで、既設の通信用トンネルの縦断方向の沈下量は漸増し、トンネルの交差中心断面の位置で最大値約 5 mm を示して収束した。なお、通信用トンネル縦断方向の沈下量は、シールドトンネルの縦断方向をはりと評価し、トンネル縦断方向の上縁と下縁で測定された 1 m あたり 100 μ の精度の縦断方向ひずみから、はりのたわみの微分方程式の関係を用いて求めている。また、計測の結果、光ファイバー計測から得られた通信用トンネルの縦断方向の沈下量と、水盛り式沈下計による沈下量とは比較的良好な関係を示した。

4. 新鉄道用シールド下部交差の影響による既設通信用トンネルの 3 次元挙動

(1) 5 箇所の計測断面の内空変位と沈下量

新鉄道用シールドの切羽が通信用トンネルの直下に到達するまでの間、通信用トンネルの内空変位は横長の楕円形状への変形と、元の形状への回復という特徴的な挙動を示した。Fig.4-1 に示すように、この挙動は中間位置の断面である No.2 と No.4 で確認され、中央断面 No.3 ではそのまま縦長の楕円形状へ移行する。しかし、両端の No.1 と No.5 断面ではそうした挙動は確認できなかった。このように進行方向のほぼ正面に当たる No.3 で最も顕著であり、中間断面の No.2 と No.4 で傾向が認められ両端部では不明確なことから、通信用トンネルに新鉄道用シールドが接近するに際し、進行する新鉄道用シールドの切羽前面圧の影響は、シールド進行方向の正面を最大とすればこの進行方向に対する方位角や既設通信用トンネルの各計測断面までの距離に対し減衰しながら、加圧要素として既設通信用トンネルに作用していると推測できる (Fig.2-3 参照)。

(2) 各段面における沈下量と内空変位の相関関係

Fig4-2 は新鉄道用シールドが、通信用トンネルを 10 m ほど通過した (1 D passed) の時点の通信用トンネルの縦断方向の沈下量とそれにほぼ対応した同時刻の内空変位の関係と、同じく

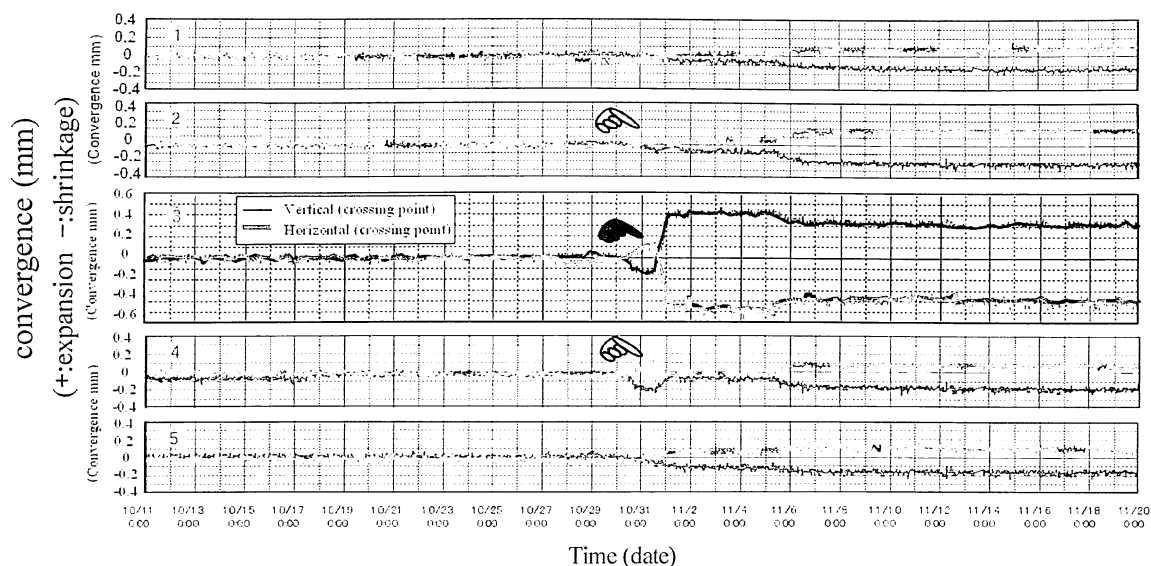


Figure 4-1 Fiber optic measurement results of the other four measuring points including for No.3(center)

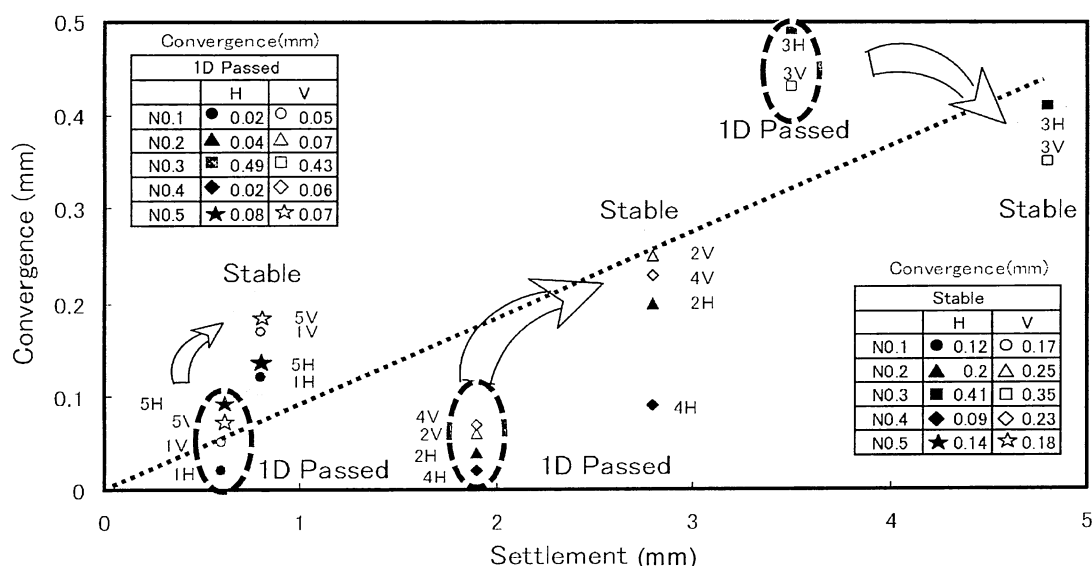


Figure 4-2 Relation between Convergences and Settlements in NTT cable tunnel

通信用トンネルを通過し 10 日ほど経過した安定期 (Stable) のトンネル縦断方向の沈下量とそれに対応したほぼ同時刻の内空変位との関係を整理したグラフである。なお、ここで通信用トンネルの内空変位とは、新鉄道用シールドの施工前の、通信用トンネルが単独の状態にあった時の内空変位の値をゼロとし、新鉄道用シールドの施工の影響による内空変位の変化量を本文中では内空変位と表現している。Fig.42 を見ると、断面 No.4 の水平方向の値がやや小さめであることを除けば、中央断面 No.3 を中心に、左右対称な位置関係にある断面 No.1 と No.5、No.2 と No.4 の内空変位は良好な対応関係を示している。この安定期の各断面の値を比較すると、中央断面の No.3 を除く 4 断面では、通信用トンネルの縦断方向の沈下量が大きくなれば内空変位もそれに比例して増加する傾向を示している。また、大きく相違する点は No.3 は縦長変形であり、それ以外の 4 断

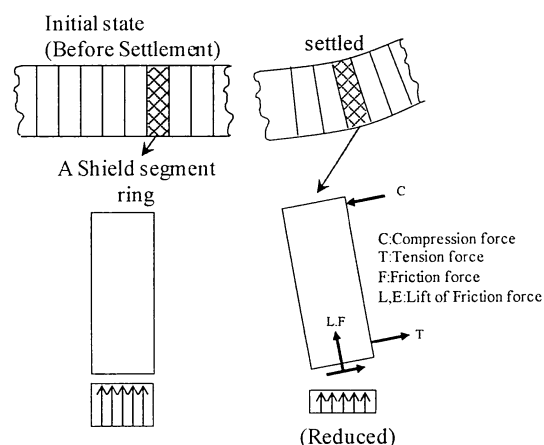


Figure 4-3 The change of balance of forces in an existing tunnel during excavation of the TBM

面は横長変形であるという内空変位の発生モードが相反することである。Fig. 4-2 の各点の内空変位を絶対値で記載しているため No. 3 と他の 4 断面の内空変位の変位モードが相違することを念頭に論議を進める。

新鉄道用シールドの切羽が既設通信用トンネルの直下から約 10 m 進んだ時 (1 D passed) から安定期 (stable) へ向け、通信用トンネルの縦断方向の沈下の継続過程において、No. 1, No. 5 の内空変位はともに増加傾向を示し、横長変形を助長する。

さらに No. 2 と No. 4 断面でも、通信用トンネルの縦断方向の沈下量が安定期に向けて増加するに伴い、内空変位は増加し横長変形を助長する。そして、No. 2 と No. 4 断面では新鉄道用シールドが通信用トンネルの下部を通過中に、いったん真円の初期状態に戻る、といった現象を示している。この原因は次のようなことが考えられる。ちなみに、中央断面の No. 3 では新鉄道用シールドの通過中に最大の内空変位を示すが、シールド切羽が通過して 10 m ほど進み (1 D passed), No. 3 の内空変位はわずかに減少しながら、ほぼ安定する。Fig. 4-1 から、No. 2 と No. 4 断面の真円の初期状態に戻る、といった現象は、No. 3 断面付近と同様、新鉄道用シールドから切羽前面圧の影響を受けた際の応答と解消、さらには後続する縦断方向の沈下に呼応した内空変位の変化挙動と推測できる。また、新鉄道用シールド通過中から縦長変形の No. 3 断面を除く残りの 4 断面は、トンネル縦断方向の沈下に伴って水平方向が伸び、鉛直方向が収縮する方向での内空変位の増加傾向を示し、No. 3 の中央断面と相反する横長モードをとる。一方で、No. 3 断面では沈下量の増加に伴い内空変位は逆に減少傾向を示す。しかしこれらは、内空変位を絶対値ではなく正負の値をベースに捉えれば、中央断面 No. 3 の内空変位も水平方向が伸び、鉛直方向が収縮した結果であり、既設通信用トンネルの縦断方向の沈下の増加に対応する 5 断面の内空変位の発生傾向は同様の傾向を示すといえる。

また、これらの現象を覆工と地盤、相互の力の釣り合いで説明すると、まず断面 No. 3 付近直下で新鉄道用シールド通過により、通信用トンネルの下部地盤が応力解放を受け、地盤反力の低下などから No. 3 断面付近に沈下が生じる。この時点で比較的大きな縦長の内空変位も中央断面で発生している。新鉄道用シールド掘進時の地盤の攪乱により、通信用トンネル全体でも沈下が発生し始め、これに伴いトンネルが微小に傾斜し、トンネル縦断方向の上面に圧縮力、下面に引張力が発生、地盤とトンネル外周面との摩擦抵抗が増加し、No. 3 断面付近ではトンネル縦断方向の軸力やトンネル外周の摩擦力が鉛直反力の減少量と釣り合い、縦断方向の沈下は安定したと考えられる (Fig. 4-3 参照)。

以上、Fig. 4-1 Fig. 4-2 などの分析から、通信用トンネルの各 5 断面の内空変位の変化状況を見ると、トンネル縦断方向の沈下そのものが、各断面に横長変形の内空変位を助長させる要因の一つと推察される。沈下の主要因である新鉄道用シールドの掘削による周辺地山の物性の変化、通信用トンネル下面の地盤反力の低下、通信用トンネル上部の緩みによる鉛直圧の増加など

も横長変形を与える内空変位の独立した基本的な要因と考えられる。それを裏付けるデータとして、Fig. 4-1 では、時間軸の 11 月/5 日後から縦変形の No. 3 断面も含め No. 2, No. 3, No. 4 の各断面では明らかに水平方向が 0.2 mm ほど伸び、縦方向が同じく 0.2 mm ほど収縮した、横長変形を進展させた。また No. 1, No. 5 の断面も同時期に緩やかではあるが、同様の傾向を示している。さらに Fig. 3-2 からは、新鉄道用シールドの切羽が通信用トンネル断面の中央に到達してから完全にテール通過まで (1D passed) に、No. 3 断面で全沈下量の 50 % にあたる約 2.5 mm の沈下量が発生している。この時期は、言い換えれば通信用トンネルの縦断方向の曲げ変形が進展した時期であり、さらに構造力学的には、円環断面の軸方向曲げ変形が、円環断面を扁平に変形¹⁾させることも知られている。通信用トンネルが鋼コンクリートとボルト等の複合構造であることや、形状、寸法的にこの状況が発生したかの判定は容易ではないが、この横長変形の扁平現象にとっては少なからず増加要素であると思われる。このほかに、通信用トンネル下半断面に近い新鉄道用シールドテールからの裏込め注入も時期的に符合し、通信用トンネルの横長扁平進展の原因の一つと推測される。

次章のリング解析においては、本章で記述した、通信用トンネルの鉛直反力が低下し、そのアンバランスをセグメントリング周辺の地盤反力とトンネル構造で再配分するというメカニズムが、施工状況に近いものと考えられ、このような考え方を基にして、つぎに、新鉄道用シールドが既設通信用シールドの下部を通過するときの影響を解析する。

5. 新鉄道用シールド下方通過の影響による通信用トンネルへの荷重変化と断面力解析

(1) 作用荷重

既設の通信用トンネルの下部を新鉄道用シールドが通過することによる作用荷重の変化として、通過シールドの施工状況から次の 2 ケースが考えられる (Fig. 5-1)。

第一のケースは、新鉄道用シールド接近中に見られる通信用トンネルを横長に変形させる、側方下部から押し上げる力が作用していると想定される場合である。この場合、通信用トンネルの鉛直反力の増加として、新鉄道用シールドの施工時荷重が付加的に作用すると考えられる。これを簡単に付加的な一様荷重と評価し、通信用トンネルの鉛直方向の変位と一致させることにより、通信用トンネルの断面力の変化を把握できる。しかし、土被りが浅く、地下水位が高い場合や、土被りが深い位置であっても、緩み土圧が作用し、天端と底部付近に負の曲げモーメント、スプリングライン付近に正の曲げモーメントが作用するケースでは、通信用トンネルが縦長変形と成っているため、こうした新設トンネル接近による上向きの施工時荷重は、通信用トンネルの断面力に余裕を与え、多くの場合、安全側に働くと考えられ、特殊な事例を除き、断面力の検討は簡略化または省略できると考える。しかし、初期の状態で、通信用トンネル

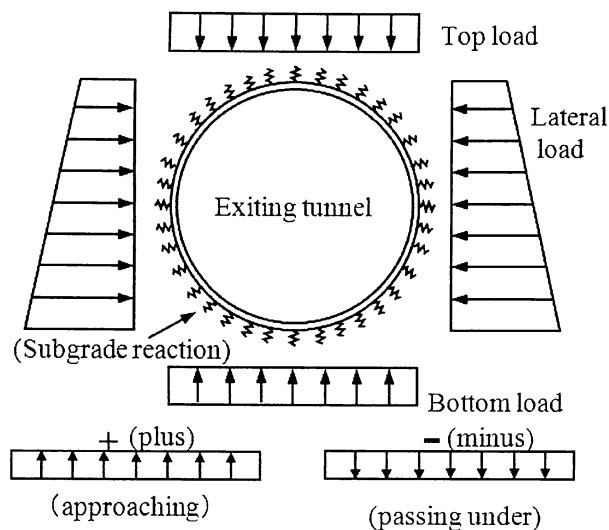


Figure 5-1 The arrangement of loads for lining ring analysis

Table5-1 Data on the segmental lining rings of the cable tunnel

Outside diameter	3150 mm
Bore	2842 mm
Width	1000 mm
Girder height in segment	154 mm
Number of segments per ring	6
joint type	Two-rings staggered joints
moment of inertia of segment	7318080 mm ⁴
Rotation spring constant for segment joint	2100k·m/rad
Ring joint	Rigid joint
Modulus of elasticity of segment	206GPa

K θ : Rotation spring(segment joint)
 K_{sh} : Shear spring(ring joint)

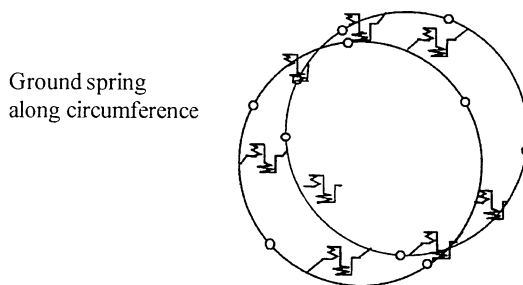


Figure 5-2 Multiple-ring frame analysis model

Table5-2 Loads used in ring analysis

Vertical earth reasser	47.07 kPa
Lateral earth and water pressure at top	28.22 kPa
Lateral earth and water pressure at bottom	38.81 kPa
Bottom reaction load (100%)	47.04 kPa
Bottom reaction load (97%)	45.63 kPa
Coefficient of Sub grade reaction(nomal)	3000kN/m ³
Coefficient of Sub grade reaction(tan grit)	1500kN/m ³
Coefficient of Sub grade reaction(pull)	750kN/m ³
Height of loosening bedrock	8.0m

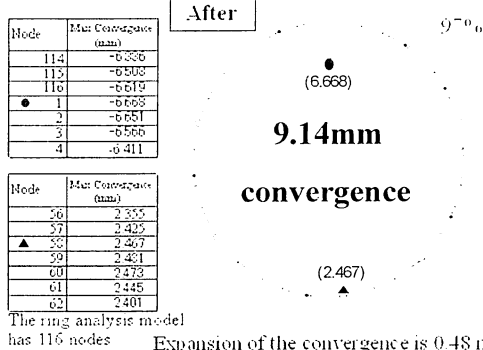
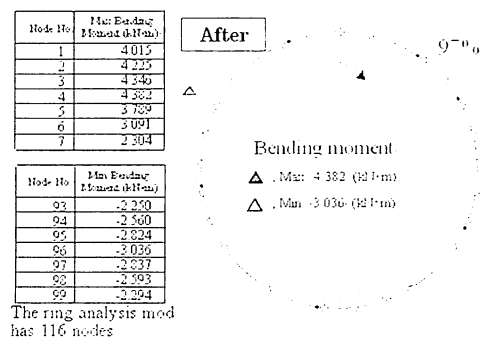
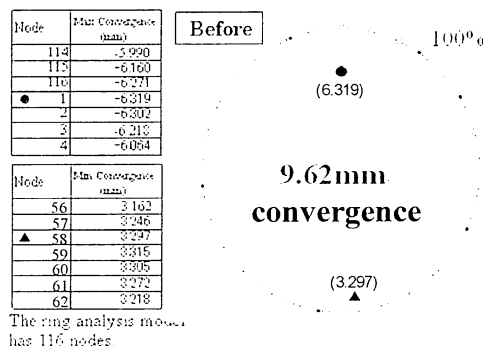
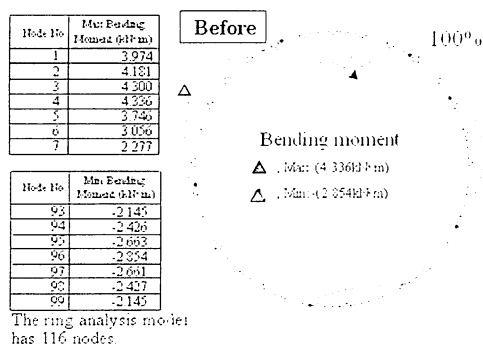


Figure 5-3 The bending moments and the convergences in the cable tunnel

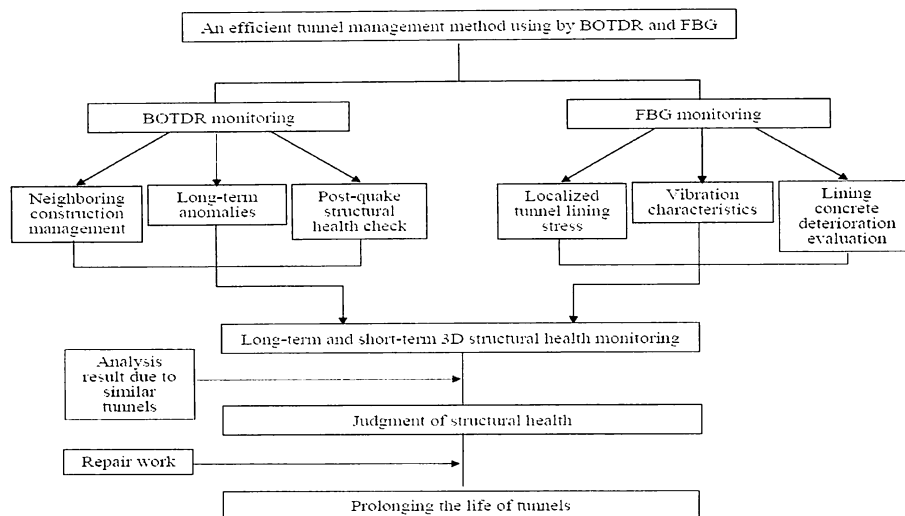


Figure 5-4 management flow chart

が横長変形している場合は、新鉄道用シールドの切羽前面圧は、通信用トンネルの鉛直反力を増加させる形で作用するので、この場合、断面力の余裕を減じる方向に働くので、解析的な検討が必要と考えられる。

第二のケースは、新鉄道用シールドが進行し、通信用トンネルの下部周辺地山が応力解放を受け、縦長に変形する場合である。土木学会トンネル標準示方書（シールド工法編・同解説）¹²⁾に記載された荷重の項目の中で、既設シールドトンネルの主に下部周辺地山の応力解放によると考えられる断面の縦長変形や、縦断方向の沈下などの挙動を、荷重の変化として比較的容易に説明できる事項としては、通信用トンネルの鉛直反力の低下であると評価した。

今回の解析事例においては、新鉄道用シールドが既設通信用トンネルの下部を通過中に、新鉄道用シールドの掘削の影響等から、上方に位置する通信用トンネルの下部周辺地山が応力解放されたと考え、初期の通信用トンネルの鉛直反力の低減としてとらえた。

（２）新鉄道用シールド下方通過の影響を考慮した既設の通信用トンネルの断面力解析

本解析において、通信用トンネルと新鉄道用シールドの交差離隔である 3 m を考慮し、最近の応力解放率の値などを参考に、底部の鉛直反力を低減させた。この時上部からの荷重と底部の鉛直反力は釣り合わないが、リング周辺の地盤反力を評価した地盤ばねが作用し、上下の力を均衡させる。なお一般的なシールド施工時における周辺地山の応力解放率は、2 次元解析では従来 20 % 程度^{13), 14)}とされていたが、最近の研究¹⁵⁾の成果によると、変位比較で 10 倍の開きがあるとの報告もあり、これらを参考に 2 % ないし 5 % 程度を目安に逐次計算を行った結果、計測された内空変位 0.5 mm と符合する解放率の値は 3 %

であった。また、通信用トンネルは当初の設計では、緩み荷重を適用して覆工等が設計されており、現場の地盤図からもその妥当性は理解される。本解析では、近接施工前の単独状態の通信用トンネルの断面力の算定には、当初設計と同様の緩み土圧¹²⁾を適用した。また、通信用トンネルの断面力解析には、Fig. 5-2 の既往の 2 リング骨組み解析モデルを用いて計算した。さらに、二次覆工の構造的評価については、当初設計との整合性、計測時の通信用トンネル内の状況、安全側の算定結果を得るなどの観点から、今回の計算では考慮していない。こうした条件から、新鉄道用シールドが通過中に通信用トンネル断面に発生していると評価した断面力の解析結果を Fig. 5-3 に示す。図の左側の上部は通信用トンネルの初期の曲げモーメント、下部は新設新鉄道用シールド下部通過による曲げモーメントの状況で、両者の差が変化量となる。図中の右側はそれぞれに対応した内空変位の解析結果であり、上部の単独の初期状態で 9.62 mm の鉛直内空変位が、新鉄道用シールド通過により 9.14 mm の鉛直内空変位と変化し、0.48 mm 伸びたことを示している。さらに、その時の底部の鉛直反力は初期単独の時と比較し 97 % であったことを示している。新鉄道用シールド下部通過による既設通信用トンネルへの影響は正の曲げモーメントで 1.1 % の増加、負の曲げモーメントで 6.4 % の増加であり、設計上の余裕幅に収まるものであった。既設通信用トンネルの下部近接交差解析に用いたトンネルの緒元を Table 5-1 に、入力荷重等を Table 5-2 に示す。なお、新鉄道用シールドの施工の前後において、解析対象となった既設通信用トンネルの地下水による荷重としての水圧には変化がないものとして評価した。

（３）光ファイバー計測技術を用いたシールドトンネルの健全度監視

本報告では、光ファイバーの BOTDR 方式により、光ファ

イバーケーブル本体をセンサーとして、1 m 単位で 0.1 mm の測定精度で、新鉄道用シールドが通信用トンネルの下部を通過する際の通信用トンネルの挙動を高い精度で把握し、公衆回線の光ファイバーケーブルに接続することにより、遠隔的に集中監視できることを示した。今回の近接施工の短中期的計測のみならず長期的な監視や、地震発生直後のトンネルの変状箇所の把握にも有効と考えられる。また、地震発生中のトンネルの挙動の計測には加速度データの速度の関係から他方式を組み入れる必要があり、これにより多様なトンネル監視が可能となるが、報告は今後の機会に譲りたい。また予め統計的な手法から危険箇所を予測しておくことにより、さらに効果的なトンネル監視が可能となる。今後検討を進め、より適用性の高いものに発展させていきたいと考えている。光ファイバーによるトンネル計測管理の構成を Fig. 5-4 に示す。

6. 結論

(1) BOTDR による既設通信用トンネルの内空変位とトンネル縦断方向の沈下量は、従来の電気式ひずみ計や、水盛り式沈下計の測定結果と良い一致を示した。また本例のように公衆光通信回線に接続したことにより、高い精度を有する遠隔トンネルの計測管理事例となった。

(2) 通信用トンネルの下部を新鉄道用シールドが接近交差する際、通信用トンネル内に設置した BOTDR による 5 断面の内空変位と、連続的なトンネル縦断方向の沈下量を得た。通信用トンネルの内空変位とトンネル縦断方向の沈下量の関係を新鉄道用シールドの位置との対比から、経時的かつ空間 3 次元的に把握し分析した。その結果、新鉄道用シールドが交差する中央の断面は縦長変形し、他の 4 断面は相反する横長変形であった。通信用トンネルの内空変位は、主に新鉄道用シールド掘削時の切羽の影響と、その影響等を受けて時間的に変化するトンネル縦断方向の沈下挙動に強い相関性を示し、沈下の影響を受けた 5 計測断面全てにおいて、既設通信トンネルの縦断方向の沈下継続中に、各断面の内空変位は水平方向に伸長し、鉛直方向に収縮することを確認した。

(3) セグメントリングの解析モデルとして、既往の 2 リング骨組み解析モデルを用い、荷重については、シールド接近時には鉛直反力を割り増し、通過中、通過後については鉛直反力を低減させる荷重モデルを提案した。本事例のセグメントリングの断面力解析には、計測された内空変位と合致させるように、鉛直荷重を低減させ、交差施工時の断面力と変位を得た。本事例では、新鉄道用シールド通過直後の鉛直反力の低減率は 3 % であった。

謝辞：本研究における計測データは、NTT インフラネット㈱とアイレック技建㈱によって測定され、提供された。関係各位に厚く御礼を申し上げます。また、計測データの活用にあたっ

ては、(独) 鉄道・運輸機構のご理解を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Tateda, M., Horiguchi, T., Kurashima, T., Ishihara, K., First measurement of strain distribution along field-installed optical fibers using Brillouin spectroscopy. IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-8, pp. 1269-1272, Sep. 1990.
- 2) 奥要治, 堀地紀行, 小泉淳, 平岡慎雄: 光ファイバーケーブルによるシールド近接交差計測と通信用トンネルの断面力解析, 土木学会トンネル工学論文集, 第 15 巻 pp. 107-114, 2005.
- 3) 電気通信協会: 情報流通インフラを支える通信土木技術, 情報通信インフラ研究会編, pp. 192-217, 2000.
- 4) 高塚外志夫, 橋本暁典, 藤橋一彦: 光ファイバーセンサーを用いたトンネル構造物監視について第 56 回土木学会年次学術講演会, 第 III 部門, pp. 364-365, 2001.
- 5) 堀地紀行, 奥要治: 光ファイバー土木計測技術と欧州 (イギリス) におけるその動向, 国土館大学理工学部紀要 第 1 号, pp. 92-97, 2008.
- 6) 小島芳之, 栗原健一, 朝倉俊弘, 伊藤裕昌: 光ファイバーによるトンネル覆工の変状監視法, トンネルと地下第 36 巻 2 号, pp. 143-150, 2005. 2.
- 7) Mohanmad, H., Bennett, P. J., Soga, K., Mair R. J., Lim C. S., Knight Hassell, C. K. and Chun: Monitoring tunnel deformation induced by close-proximity bored tunnel using distributed optical fiber strain measurements. International Symposium on Field Measurements in Geomechanics (2007) ASCE, Boston
- 8) K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt, Optical Fiber Sensor Technology, Vol. 2, Published by Chapman & Hall, 1998.
- 9) T. L. Yeo, D. Eckstein, B. McKinley, L. F. Boswell, T. Sun and K. T. V. Grattan, Demonstration of a fibre-optic sensing technique for measurement of moisture absorption in concrete. Institute of Physics Feb. 2006.
- 10) J. Braunstein, J. Ruchala and B. Hodac, Fiber-optic deformation and displacement monitoring. Smart Structures IABMAS 2002 Balcerona 14-17, 2002
- 11) 上村充範, 松岡理, 山田耕司, 松井徹哉, 純曲げの作用する閉円断面円筒シェルの円環を基準とする 3 次元有限変形解析, 日本建築学会構造系論文集第 498 号, pp. 83-90, 1998 年 8 月
- 12) トンネル標準仕方書「シールド工法編」・同解説, 土木学会, pp. 41-44, 2000 年.
- 13) 矢萩秀一, 入江健二, 大門信之, 中村兵次, 鈴木久尚, 施工過程を考慮したシールドトンネル覆工の応力計算法, 土木学会論文集 F Vol. 65 No. 2 pp. 128-147, 2009, 4
- 14) 大門信之, 円形シールドトンネルに用いる覆工の設計荷重に関する研究, 筑波大学博士論文 4 章 (論文審査概要) 平成 14 年 3 月
- 15) 佐藤 豊, 小西真治, 杉本光隆, A. Sramoon, 変位境界を用いた有限要素法によるシールド通過時における硬質地盤の挙動評価. 土木学会論文集 pp. 49-58 No. 722, 2002. 12,

The three dimensional monitoring an existing tunnel by use of optical fiber technology to measure and analyse the effect of a new shield TBM advance during tunneling

Yohji Oku, Noriyuki Horichi, Atushi Koizumi, Laurence.F. Boswell and Isamu Ono

The three-dimensional displacement of an existing NTT cable tunnel was measured by BOTDR, a displacement measurement system using the characteristics of fiber optics. As a result, characteristics of behavior during the construction of railway shield tunnel passing directly beneath and transverse to the existing tunnel were identified and new knowledge was obtained. This paper discusses the specific measurement method using fiber optics and proposes a segmental lining ring analysis considered on measured displacement. We also refer construction work control and maintenance method of using fiber optics technologies.