

光ファイバーケーブルによるシールド近接交差計測 と既設トンネルの断面力解析

Analysis and measurements of the effect of shield advance in close proximity to
and transverse to a tunnel based on fiber optic measurements

奥 要治¹・堀地紀行²・小泉 淳³・平岡慎雄⁴
Yoji Oku・Noriyuki Horichi・Atsushi Koizumi and Shizuo Hiroka

1 正会員 アイレック技建㈱ 社長 (〒111-0041 台東区元浅草3-18-10)

2 正会員 博 (工) 国士舘大学教授 工学部都市システム工学科 (〒154-8515 世田谷区
世田谷4-28-1)

3 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 新宿区大久保
3-4-1)

4 正会員 (独) 鉄道・運輸機構 本社 審議役 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1
横浜アイランドタワー)

An analysis was made of the effect of the advance of tunnel boring machine (TBM) for constructing double railway tracks under an existing another shield driven tunnel of NTT (Nippon Telegraph and Telephone Corporation) with a clearance of approximately 3 m. The convergence of the NTT tunnel and displacement of the ground transverse to the tunnel were measured using the reflection of laser beam from the target in the fiber optic cable laid in the tunnel. To determine the effect of tunneling in the vicinity of the NTT tunnel by advancing a shield across the NTT tunnel, changes in resultant stress in the NTT tunnel were calculated.

Key Words: B-OTDR, measurement, shield driven tunnel, tunnel analysis

1. はじめに

I T社会の目覚ましい発展に伴い、伝送路として重要な役割を担う光ファイバーケーブルは、近年、飛躍的にその敷設延長を伸ばしてきた。この光ファイバーケーブルの周辺技術の一つとして光ファイバーケーブル自体をセンサーとして用いた各種の計測方式が開発されている¹⁾。代表的なものを以下に挙げる。

- ① センサー部分に3本より線を用い、光として赤外線を入射し、センサー部分を往復して戻ってきた赤外線の減衰をひずみに換算する技術で、OSMOS (Optical Strand Monitoring system) と呼ばれる方法である。
- ② 光ファイバーケーブルのコアの一部に、屈折率の高い格子が等間隔で配置されたケーブルを用い、レーザー光を入射すると、特定の

波長 (Bragg 波長) の光のみが反射する。一方ケーブルにひずみが発生すると、格子の設置間隔と屈折率の変化が生じ、これに伴い反射光の Bragg 波長もひずみに比例しその波長をシフトする。この性質を利用した方法が、FGB ひずみ計測 (Fiber Bragg Grating) と呼ばれる方法である。

- ③ 光ファイバーケーブル自身の断線、劣化等に対する保守技術として発達してきた方法に OTDR 法 (Optical Time Domain Reflectometry: 光学的時差反射法) がある。この技術ではレーザー光におけるレーリー (Rayleigh) 散乱光の特性を用いている。また、この OTDR 法はラマン (Raman) 散乱光に着目すれば、温度測定も可能である。
- ④ 同じ OTDR 法にあって、ブリルアン (Brillouin) 散乱光は光ファイバーケーブル

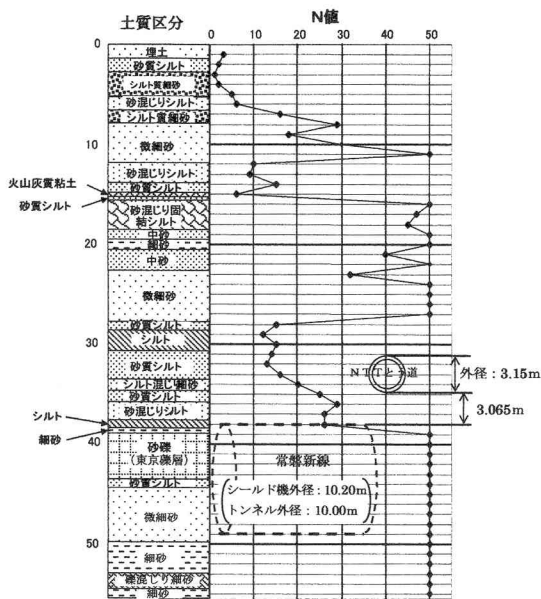


図-1 近接交差区間の地質状況

自身のひずみに対し波長をシフトして応答する。この原理を適用し、構造物に固定ジグなどを用いて、光ファイバケーブルを緊張させて敷設すれば、固定ジグ間の構造物のひずみを、光ファイバケーブルのひずみとして 100μ の精度で測定することが出来る¹⁾。

上記④の方法はブリルアンの頭文字を採って B-OTDR 法と呼ばれ、測定位置も反射光の時差によって検知が可能である。光ケーブルの耐久性や、測定(箇所)延長、コストなど、総合的な評価から、地盤工学分野では、トンネルなどの長大な地中構造物や、斜面の変位計測、防災監視などに対し、最近、新しい土木計測技術として僅かではあるが適用事例^{2) 3)} も見受けられ、実験的研究例^{4) 5)} も報告されている。

ここで、B-OTDR 法による光ファイバケーブルを用いた計測の事例として、既存のシールドトンネル (NTTとう道) の直下を、複線断面の鉄道シールドトンネル (常磐新線) が近接交差する事例を採り上げる。ここでは既設の NTTとう道直下を鉄道シールドが掘進する際に NTTとう道に及ぼす影響を把握し、鉄道シールドを安全に掘進施工する目的で、とう道内に光ファイバケーブルを敷設して、断面の内空変位と、トンネル長手方向の沈下量を測定した。本論文では、こうした現場計測の結果から得られた既設シールドトンネル下方を近接して大断面シールドが通過する際の挙動に対する知見を整理

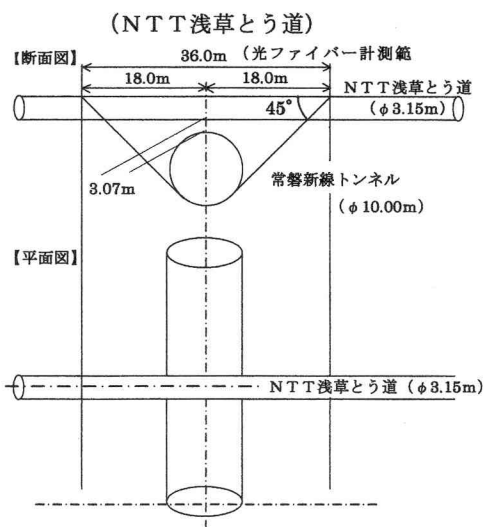


図-2 近接交差の状況

した。次に、とう道内空変位など、得られたデータより、シールド通過前後の掘進の影響を、2リング骨組み解析モデルを用いて既設シールドトンネル (NTTとう道) の断面力の変化として求めたので、その一連の算定手法についても併せて提示した。

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、外径 3150mm の鋼製セグメントを用いてシールド工法により建設された通信用とう道である。図-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過密な交通量の交差点内の直下で、土被り約 31m で N 値 15 程度の洪積シルト層を、浅草通りを進む NTTとう道と、起点の御徒町から南千住方向に土被り約 38m で、天端付近の一部がシルト層、多くは東京礫層を掘進する常磐新線の鉄道シールドトンネルとが、 3.07m のクリアランスで交差する箇所である (図-2 参照)。

(2) 計測の概要

図-3 の (a) に内空変位計測を、(b) に長手方向の沈下量の計測のイメージ図を示す。光ファイバ

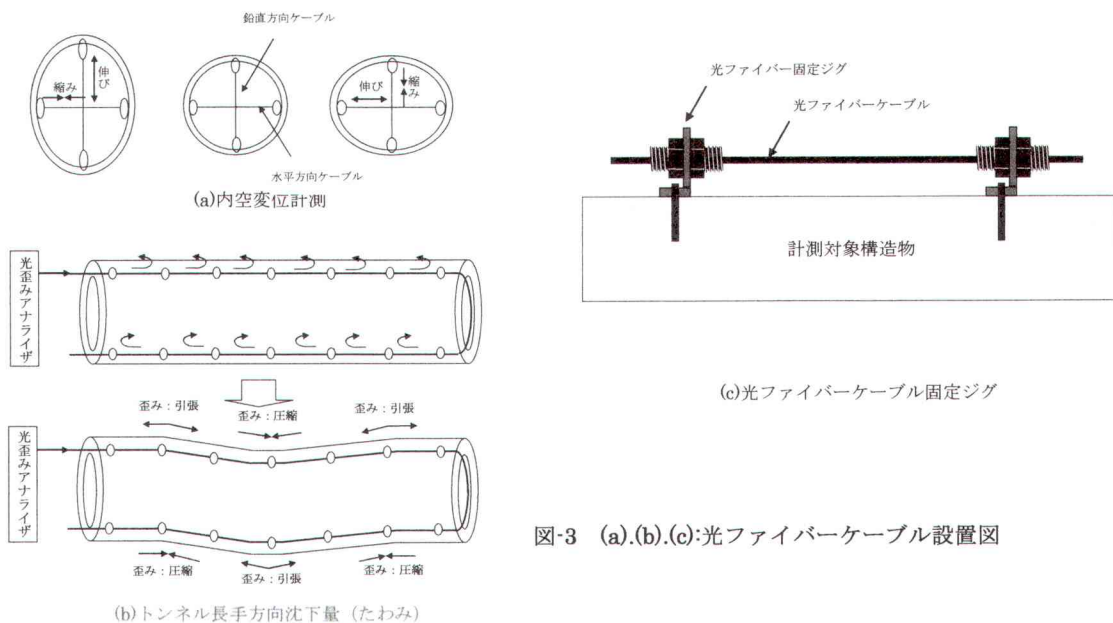


図-3 (a).(b).(c):光ファイバケーブル設置図

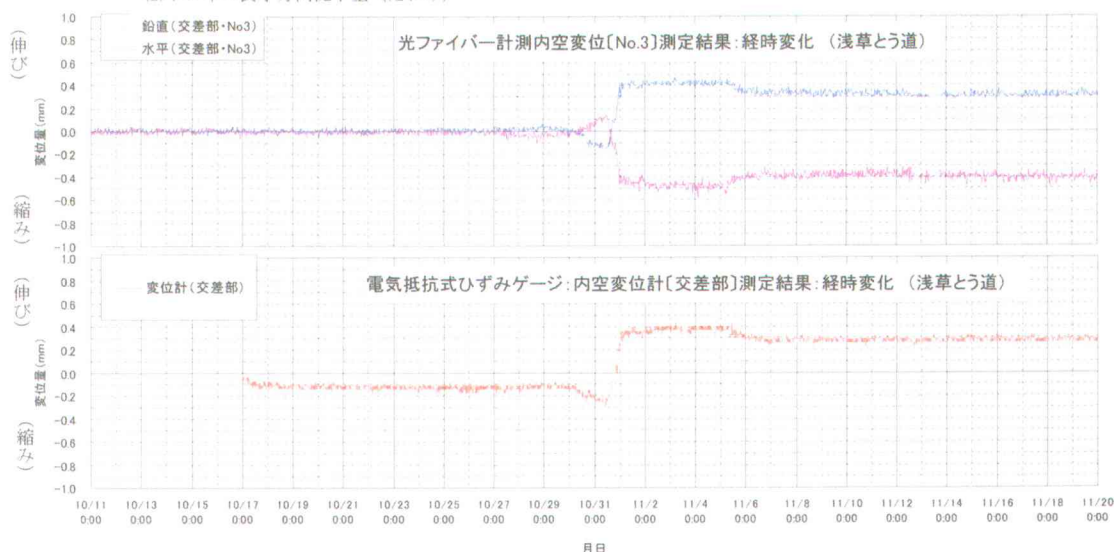


図-4 光ファイバ計測と電気抵抗式ひずみゲージの比較

ケーブルは二次覆工されたコンクリートの内空面にジグを介して固定される(図-3(c)参照)。内空変位計測は計測断面一箇所ごとに水平、鉛直の2方向の線をいわゆる十文字の形に全線一筆書きで光ファイバケーブルを敷設して行われ、計測断面は、通過する鉄道シールドの影響範囲を考慮し、交差中心に1断面、そして左右に9m間隔で各2断面の計5断面設けた。また、トンネル長手方向の沈下量を求める目的で、トンネル天端付近と下端付近にひずみ測定用に、光ファイバケーブルを5m間隔で覆工コンクリートにジグで固定し、交差中心より左右に20mの計40m敷設した。そして上下端の測定さ

れた軸方向ひずみから、トンネル長方向をはりとみなした場合の曲率を求め、はりの微分方程式より沈下量を算定した。尚、トンネル長手方向の沈下量の値を比較検証するために、水盛式の沈下もとう道内に設置され、測定器の水槽は、図-2に示す鉄道シールドの掘削影響範囲の約20m外に設置された。

3. 下部通過シールド掘進の影響等

(1) 通過シールドの施工状況

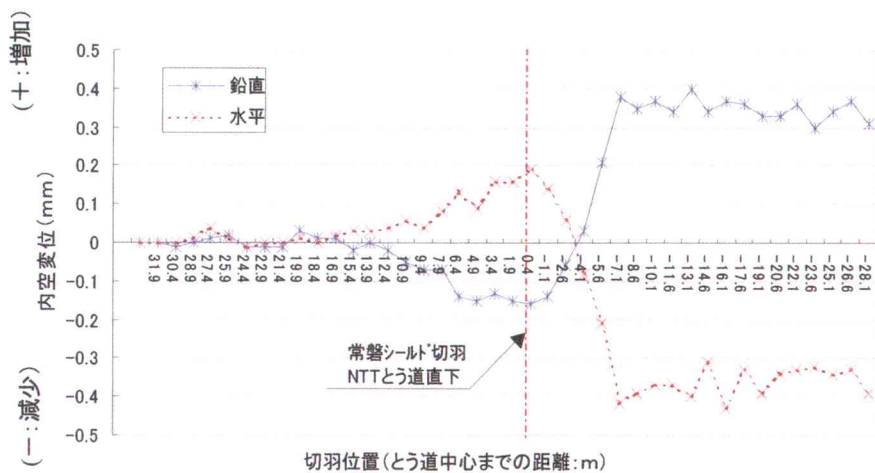


図-5 NTT とう道の内空変位

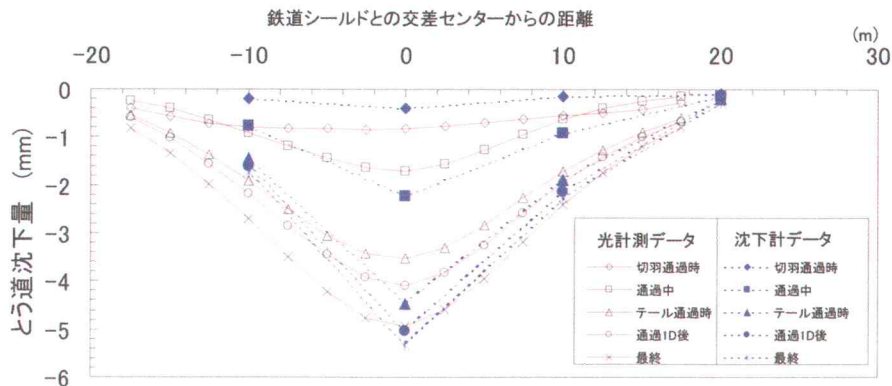


図-6 とう道長手方向の沈下量

鉄道シールドはNTTとう道直下を通過中に切羽水圧は299～305 kPaで、また裏込注入圧は460～470 kPaと、この工区の平均値である480 kPaよりやや低く施工された。この付近の土被りは38 m程度で、地下水圧も300 kPaに近い。トンネル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

図-4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変位のみを測定し、グラフは40分間隔で測定された値を繋いだ形で示されている。両者を比較すると、鉄道シールドがかなり手前の位置

においても電気抵抗式では0.1 mmほどの鉛直方向に縮んだ形で変位が検出されている。しかし、鉄道シールドがさらに接近し、直下を通過してゆく過程では、両者のデータはデータ全体が示す内空変位の現れ方、および個々の値についても、大変よい一致を示していると言える。なお、図-5に示した内空変位は、各40分間隔の値のうち各セグメント設置後の直近の値を1セグメントに一個採用している。

(3) とう道断面の変化

図-5に単体で100 μの精度を有する光ファイバーにより計測された内空変位を示す。鉄道シールド切羽接近に伴い、最大0.2 mm程度の水平変位の増加と鉛直変位の減少が読みとれる。この動きは、図-4も併せて見ると、10月30日午後より始ま

り、鉄道シールド切羽がとう道中心に到達する約12m手前から内空変位の変化が認められ、最大値は鉄道シールド切羽がとう道中心位置に到達した時点に発生している。主な理由の一つとして、泥水圧やカッター圧⁶⁾などの鉄道シールドの切羽前面圧が、NTTとう道にとって、鉄道シールドが接近する側の下半周辺の地盤に、施工時の付加的な応力として伝播したと考えられる。その結果、NTTとう道を、側方下部より力が作用し、僅かではあるが、とう道断面を横長、つまり偏平に変形させたと考えられる。この横長変形は、鉄道シールドが接近し、とう道直下を鉄道シールドの切羽が到達するまで増加傾向を示す。このことは、式(1)が示すように、泥水圧が切羽面の水平方向土水圧にバランスしていて、シールド機のカッター圧が過圧成分として働くことから容易に理解できる。さらに、鉄道シールド切羽が到達し横長変形モードの横方向最大内空変位0.2mmを計測後、鉄道シールドの掘進に伴い、水平方向は減少し、鉛直方向は増加して、切羽通過約4mの位置で内空変位は初期値ゼロに戻る。しかし、この傾向は継続し、鉄道シールドの切羽進行に伴い、水平方向の変位は減少を続け、鉛直方向の変位は増加して、切羽通過約8mのテール手前付近で、初期値をベースとして0.4mm程度の鉛直方向変位が増加し、同じく0.4mm程度の水平方向変位が減少するという、縦長の変形モードを測定した。つまり鉄道シールド切羽到達直前までの変形モードとは逆の縦長の変形モードを、とう道直下を鉄道シールドが通過中に確認した。なお、常磐新線トンネルに使われた鉄道シールドの機長は、9.75mである。ここで、NTTとう道の直下の位置に対して鉄道シールド切羽の到達からテール通過付近までの挙動については、鉄道シールドに採用された泥水シールドの切羽安定機構の主体をなす泥水圧の設定の考え方を検証することにより理解が可能となる。泥水圧一般に、次のように表される。

$$(\text{泥水圧}) = (\text{土圧}) + (\text{地下水圧}) + (\text{予備圧}) \quad (1)$$

ここで、土圧は、上限値として静止土圧、下限値として主動土圧とされ、予備圧は通常20kPa程度である。つまり水平方向の土圧を考慮して設定されており、この範囲に入るように、泥水圧が管理される。こうした条件とシールド機のカッター圧の影響を考慮すれば、排泥、切削時の減圧の影響を無視しえる切羽面から若干入った前方地山の水平方向に対しては、切羽前面圧はその地山の初期応力に付加

的な応力を与えると考えて差しつかえない。一方NTTとう道通過の際、鉄道シールドの泥水圧はスプリングラインで300kPa程度である。また、シールド切羽直上の、天端付近の鉛直土水圧は約600kPaであり、泥水圧の設定の考え方が示すように、シールド機本体の支保機能抜きには鉛直方向については、300kPaの泥水圧のみでは抵抗しきれない。さらに、シールド機と地山との間には円滑なシールド掘進などのため、僅かな間隙が作られ、ここにも切羽の泥水の存在が認められている。このため、シールド機の手端付近の地山の鉛直方向応力と地下水圧は設定された泥水圧と比較すれば、応力解放状態にあったと理解できる。このため、鉄道シールド切羽通過後は、NTTとう道の下部周辺地山が応力解放により緩められ、とう道の鉛直方向内空変位が増加し、円形断面であるために水平方向内空変位が減少したと考えられる。また、テールボイドの状況については、約460～470kPaで同時裏込注入が施工され、鉛直、水平の内空変位を0.4mm程度に収束させたと理解される。図-5を見ると、鉄道シールド切羽がNTTとう道直下位置は破線で示され、次の目盛りが1.1m、以降通過シールドのセグメント幅の1.5m刻みで目盛りされており、シールド切羽通過7.5m付近でピーク値を示す。以降の内空変位の微動が読み取れるが、データ・サンプリングの関係によるバラツキの関係とも考えられる。またシールド機の長さ9.75mを考えると、鉄道シールドテール付近の応力解放や同時裏込注入の影響による内空変位の影響とも考えられる。

(4) とう道長手方向の変化

図-6に100μ精度の光ファイバー計測から得られたNTTとう道長手方向の沈下量を示す。鉄道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20mの範囲で、弾性床上のはり理論にほぼ合致するかたちで滑らかな沈下曲線が確認された。その値は、鉄道シールド切羽がNTTとう道直下に到達したあたりから変位が発生し始め、鉄道シールド中胸部通過中、テール通過、テール通過後さらに約10m通過した通過1Dの状態、切羽到達後10日経過した切羽通過30mの最終状態まで、NTTとう道の長手方向の沈下量は漸増し、とう道の交差中心断面の位置で最大値約5mmを示して収束した。

—○— Kθ:回転パネ (セグメント継手)

≡ Ksh:せん断 (リング継手)

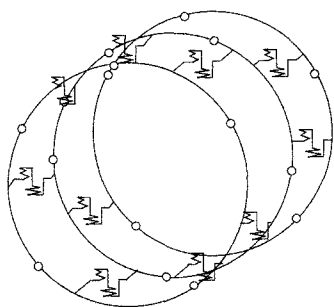


図-7 2リング骨組解析モデル (全周地盤パネ付き)

4. シールド通過に伴うNTTとう道の断面力

(1) 作用荷重

NTTとう道直下を鉄道シールドが通過することに依る、作用荷重の変化としては、通過シールドの施工状況から2ケースが考えられる(図-8参照)。第一のケースは、鉄道シールド接近中に見られるNTTとう道を横長に変形させる働きの、側方下部から押し上げるような力が作用していると想定される場合である。この場合、NTTとう道の底部土圧に、鉄道シールドによる施工時荷重として、簡単のため付加的な一様荷重を作用させ、とう道鉛直方向の変位と一致させることなどにより、NTTとう道の断面力の変化を概ね把握することができる。しかし今回の事例のように、土被りが大きく、地下水位も高いケースでは、図-9に示すように、初期の状態において天端、底部に正曲げモーメント、スプリングライン位置に負曲げモーメントが発生している縦長の変形モードを示す。このような場合、下から押し上げるような力は、NTTとう道を縦長変形のモードから真円のモードに向かわせるため、安全側の働きをすると考えられ、こうした場合は、断面力の検討を省略できると考える。しかし、初期の状態では、既設のシールドトンネルが横長変形している場合においては、通過シールド切羽前面圧が、押し上げるような施工時荷重を既設シールドに与える場合は、横長変形モードについても、断面力の検討を行う必要がある。つまり、既設シールドトンネルの初期の変形モードや断面力に対して、危険側へと助長する働きについては検討することとなる。次のケースは、シールドがさらに進行し、シールド通過中

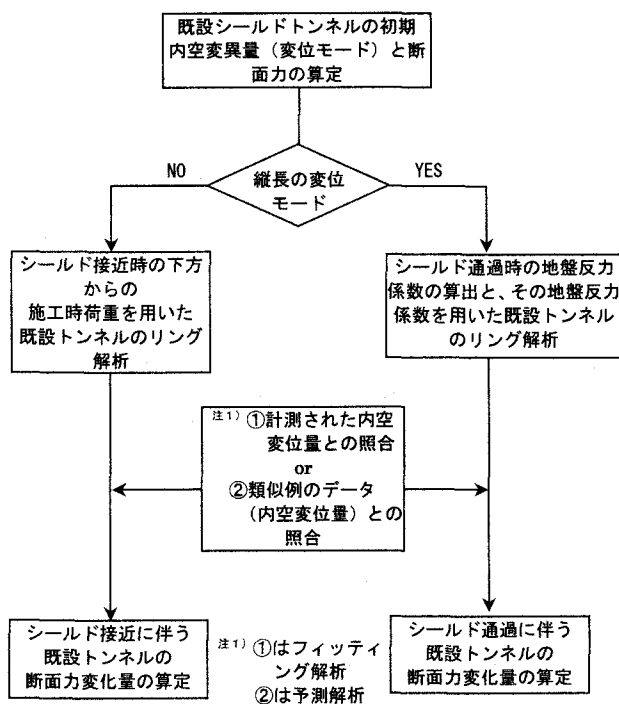


図-8 解析フローチャート図

に既設シールドトンネルが下部周辺地山の応力解放を受け、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)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、長手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ものは、地盤反力⁷⁾の変化であると評価した。その理由として、鉄道シールド通過中に、鉄道シールドの切羽泥水圧の設定の考え方から、上方に位置するNTTとう道の下部周辺地山が応力解放されと考えられ、初期の地山が緩められると想定されることなどに依る。一方これとは別の考え方として、NTTとう道に作用する底部や、側方などの土圧の変化と評価する場合、掘進中の鉄道シールド周辺の地中応力の変化を計測、または解析し、施工時の荷重の、特に緩められる際の荷重の大きさや形状、作用方向などを把握する必要が生じ、大規模な計測等が必要となる。今回の計測ではこうした土圧の変化等は計測されていない。こうした理由から、解析的にも比較的扱いの容易な地盤反力に着目し、その値の変化として捕らえることにした。計算の手順は、まず地質図から当初のNTTとう道に作用していたと考えられる地盤

表-1 とう道セグメントの緒元

外径(mm)	3150
内径	2842
厚さ(mm)	154
幅(mm)	1000
分割数	6
組み方	2リング千鳥組み
二次覆工	コンクリート化粧巻
セグメントの断面二次モーメント(cm ⁴)	2375.4
セグメントの断性係数(GPa)	206

表-2 リング解析に用いた荷重等

	(B)通過前	(A)通過後
注2) *地盤反力(kN/m ³)	10000	7100
鉛直土水圧(kN/m ²)	480.4(kPa)	
頂部側方土水圧(kN/m ²)	392.0(kPa)	
底部側方土水圧(kN/m ²)	431.2(kPa)	
セグメント継手回転バネ定数(kN・m/rad)	30000	
リング継手せん断バネ定数(kN/m)	10000	

注2) *長手方向1m当たりの値

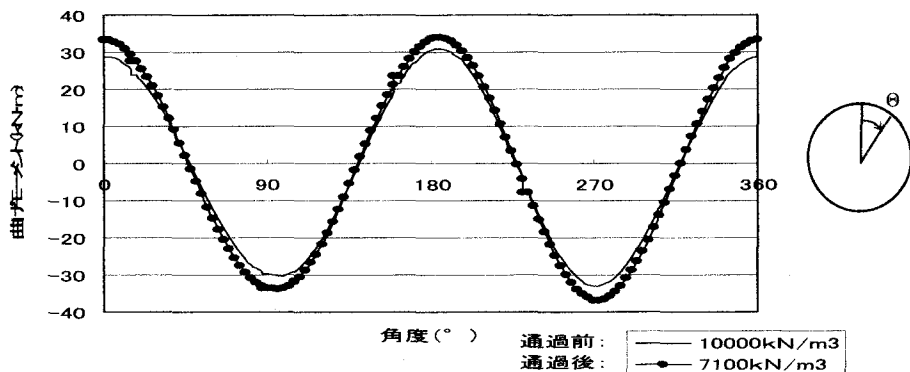


図-9 NTT とう道交差箇所の周方向曲げモーメントの変化

反力を含めた全荷重を想定し、鉄道シールドの掘進の影響を受ける以前の状態、つまり初期の状態の断面力を2リング骨組み解析モデルより求める(図-7参照)。次に計測で得られた鉛直方向の内空断面の増加変位量0.4mmと一致するように、鉄道シールド掘進後の緩められた状態の地盤反力を求める。なお、鉛直方向の変位量を主として一致させるため、水平方向の変位量は、リング解析の中で、リングの形状や荷重、曲げ剛性などによって定まり、従属的となる。次に、初期の荷重状態に対して、鉄道シールド通過の影響を評価した地盤反力を入力してリング解析を行い、断面力を算出する。なお、鉄道シールド掘進後の地盤反力の算定については、リング解析モデルの構成が荷重を入力して、変位が出力される形をとっている関係から、直接求めることは困難で、荷重である地盤反力を相当数変化させた反復計算を行い、解析結果として、それぞれの地盤反力に対応した内空変位を求め、地盤反力と内空変位の関係から1次回帰式を定めて、内空変位量、ここでは0.4mmから間接的に地盤反力を求めている。解

析の結果、鉄道シールドとの交差部付近のNTTとう道周辺の地盤はでは、N値などボーリングデータより想定した当初の地盤反力10000kN/m³が、直下を鉄道シールドが通過することに依り、7100kN/m³程度に減少したと算定した。

(2) セグメントリングの解析

シールド通過前と通過後に対して、地盤反力のみが変化するとして、既設とう道の断面力の変化量を求めた。

断面力の算定については図-7の2リング梁ばねモデル(全周地盤ばね)を用いた。表-1にNTTとう道のセグメントリングの諸元を示す。また、表-2には解析に用いた荷重を示す。

(3) 解析結果

図-9にシールド通過前と通過後のとう道の周方向曲げモーメントの状況を示す。

最大（正）曲げモーメント6%，最小（負）曲げモーメント8%，通過前と比べ、増加した。また、応力は負曲げの引張応力域で8%程度、正曲げの圧縮応力域で6%程度増加し、危険サイドにシフトした。なお、応力計算において、軸圧縮力についてのみ二次覆工コンクリートを考慮している。

5. まとめ

（1）光ファイバー計測は、シールド近接施工時における既設トンネルの内空変位やトンネル長手方向の沈下などの影響把握において、従来の電気抵抗式ひずみゲージや、水盛り式沈下計と比較すると、ほぼ同等の機能を有することが確認された。また長期計測については、光ファイバーの材質自身が有する固有の長期安定性を考慮すれば、光ファイバーによる計測方式の優位性が期待される。

（2）土被り30m以深の条件で、既設のシールドトンネルの直下を新設の泥水シールドトンネルが3m程度（通過新設シールド外径で、約10m）の接近した離隔で交差通過した事例において、既設シールドトンネルの内空変位とトンネル長手方向の沈下量などの測定値や、通過シールドの泥水圧の設定の考え方などから、既設トンネル下部周辺地山はシールド通過中において応力解放状態になることが間接的に把握された。

（3）シールド通過に伴う既設シールドトンネルの断面力の変化量算定については、まず初期状態の既設シールドトンネルの断面力と変形モード、内空変位量を把握し、次に通過シールドによる内空変位の変化から判定を行い、既設トンネルの初期状態が横長変形の時は、その変形を助長するシールド接近による底部からの一様な施工時荷重を載荷させるなどして評価できる。また、初期状態が縦長変形の場合は、シールド通過中の応力解放を考慮し、地盤反力を低下させることにより、セグメントリングの断面力を求める一連の方法を提示した。

謝辞：地域地盤環境研究所の小山幸則氏、東京地下鉄㈱の矢萩秀一氏には光ファイバーの計測技術等について、貴重なご意見を頂きました。また、論文中の図表の整理などについては、国士舘大学の小野勇氏に協力を得ました。ここに、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) たとえば、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、社団法人電気通信協会発行、pp.192-217,2000.
- 2) 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.
- 3) 藤木育夫・桑原和美・市川一好・和内雅弘：光ファイバーセンサー（B-O TDR）を用いた近接施工管理、第58回土木学会年次学術講演会、第Ⅲ部門、pp.955-956
- 4) 小島謙一・栗原健一・朝倉俊弘・伊藤裕昌：トンネルと地下第36巻2号、pp.143-150, 2005.2.
- 5) 小島謙一・伊藤裕昌・村田修・秋山洋・山浦剛俊・棚村史郎：土構造物の計測管理に用いる光ファイバーセンサーの基本特性、土木学会論文集、No.750/Ⅲ-65, pp.51-67, 2003.11.
- 6) 細川勝己・赤木寛一・他：泥水式シールドのスリット開口率が砂地盤の間隙水圧とカッター圧に及ぼす影響、土木学会第55回年次学術講演会（平成12年9月）Ⅲ-B162.
- 7) トンネル標準示方書「シールド工法編」・同解説 土木学会編、pp.41-56, pp.173-174, 200.7.

補遺

とう道長手方向の沈下量は、弾性支承を考慮せず、単にはりと見なした際、はりの上端、下端のひずみを、各々 ε_1 、 ε_2 とし、上下端の距離を h とすれば、曲率 $1/\rho = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) / h$ の関係から、はりのたわみの微分方程式として表すことができ、曲げ剛性を与えれば、容易に曲げモーメントが求められる。ここで、 ρ は曲率半径。はりの微分方程式を2回積分し、沈下量として表し、不動点からの距離を入力することにより、その位置での沈下量が求められる。光ファイバーケーブルは5m間隔で固定されているため、沈下量は、ジグで固定された光ファイバーケーブル5m間の中央点と、不動点から各区间で最遠の固定ジグ点までの距離を、不動点を基準に与え、求めている。尚、不動点の固定ジグは本文（図-2）に示すように、交差中心から左右18mの鉄道シールドの掘削影響範囲から外に存在し、交差中心より左右20m間に光ファイバーケーブルが上下に一筆書きで敷設されている。