

# 光学式計測技術を駆使した住宅密集地下における NATM の情報化施工

## Monitoring Management of Urban tunneling by NATM under An Residential Area by Using Various Optical Measuring Techniques

小林 薫<sup>\*1</sup> 松元 和伸<sup>\*1</sup> 熊谷 幸樹<sup>\*1</sup>  
Kaoru Kobayashi Kazunobu Matsumoto Koki Kumagai  
飯塚 光正<sup>\*2</sup> 加藤 勉<sup>\*3</sup> 中辻 尚<sup>\*3</sup> 金子 伸<sup>\*4</sup>  
Mitsumasa Iizuka Tsutomu Katou Hisashi Nakatsuji Shin Kaneko

### 【要旨】

つつじヶ丘トンネル(仮称)は、既設ボックスカルバート 55.4m を含む全長 345m の対面式 2 車線大断面トンネル(掘削断面積 110m<sup>2</sup>)である。本トンネルは全線が低土被りで、しかも住宅密集地内を貫いて計画されている都市 NATM であるため、地表面沈下による周辺地盤への影響に対する安全性などに十分な配慮が要求された。このため、施工段階では光学式計測技術を駆使した計測管理に基づく情報化施工を行った結果、最大地表面沈下量 10mm 以内で沈下は収束し、トンネル掘削を安全に完了することができた。本稿では、住宅密集地下における低土被りトンネルでの設計・施工上の課題とその対策、および計測結果について報告する。

【キーワード】 都市 NATM, 近接施工, 計測管理, 精密写真測量, 光学式地盤変位計, 光ファイバセンシング

### 1. はじめに

東京都八王子市の西部地域には、都市計画道路として 4 路線が計画されている。この内 2 路線は陣馬街道と高尾街道の道路拡幅であり、残り路線の内の一つが図-1 に示す八王子市都市計画道路 3・4・57 号線である。本路線は、全長約 2,080m の都市計画道路であり、つつじヶ丘トンネル(仮称)は既設ボックスカルバート 55.4m を含む全長 345m の対面式 2 車線、両側歩道付き、掘削断面積 110m<sup>2</sup>の大断面トンネルである。

本トンネルは、0~18m の低土被りで住宅密集地内を貫く都市 NATM(写真-1 参照)であり、トンネル掘削に伴う影響範囲内に 40 軒の家屋が位置し、起点側坑口部では最も近接する家屋までの離隔が 10m 以内である。また、トンネル中央宅地部では生活道路が 2 箇所横断(土被り 9m)し、その直上には自治会館がある。そのため、掘削に際しては、地表面沈下や騒音振動に関して近接する周辺環境への十分な配慮が要求され、着工前段階での当初設計の詳細な見直しと光学式計測技術を駆使した計測管理に基づく情報化施工を行い、トンネル施工と周辺

環境への安全と安心の確保を図ることとした。

本稿では、これらの設計、施工上の課題と対策工、および計測結果に基づくそれら対策工の効果について報告する。

### 2. 工事概要

- 1) 工事名：八都計道 3・4・57 号線街路築造(トンネル本体工)工事
  - 2) 発注者：八王子市
  - 3) 施工者：飛鳥・南王建設共同企業体
  - 4) 工期：平成 14 年 9 月 30 日~平成 17 年 3 月 15 日
  - 5) 工事場所：東京都八王子市横川町 617 番地先
  - 6) トンネル工事内容：トンネル延長 345m(既設ボックスカルバート L=55.4m含む)、掘削断面積：110m<sup>2</sup>(山岳トンネル部、図-2、図-3参照)、NATM 機械掘削タイヤ方式、上半ショートベンチカット工法
- 本トンネルの地質は、軟弱なロームおよび脆弱な泥岩が主体である。なお、トンネル施工は、周辺住宅環境に配慮して昼間作業のみで計画されている。



### 3. 設計, 施工上の問題点

本トンネルは、全線が土被り 2D(D:トンネル掘削幅=約 14m)以下の低土被りであり、さらに、トンネル路線上に家屋が近接することから、周辺地山の安定化のための支保パターンを選定するだけでなく、これら近接する家屋などへの影響（地表面沈下や家屋地基礎の不等沈下など）を最小限に抑制するための補助工法を含めた施工方法を適切に設計、施工することが要求された。特に、**図-3**に示す家屋に近接する起点側坑口部およびトンネル中央宅地部区間では、以下に示す設計および施工上の問題点があった。

- ① 起点側坑口部：土留め方式による開削アーチカルバートの施工に伴う急傾斜斜面の不安定化とその斜面上に位置する家屋への影響
- ② 地点側坑口部およびトンネル中央宅地部：軟弱な地山での大断面トンネル掘削に伴う地表面沈下に起因した近接家屋への影響

①については、当初設計のアーチカルバート構造の開削トンネル工法から山岳トンネル工法に施工方法を変更するとともに、トンネル掘削に伴う応力解放や地下水位低下に対して、**a)**薬液注入工による連続壁背面部の地盤改良、**b)**発泡モルタルを用いた人工地山築造による偏圧防止、**c)**パイプルーフ工(φ318.5mm, L=30m, N=26本)によるトンネル周辺地山の緩みと地表面沈下防止、**d)**遮断壁工(削孔径φ500mm, 削孔延長L=446m, 芯材H-300×300)による超近接側斜面上家屋(離隔距離7m)への影響抑止、などの対策工を実施し、トンネルおよび近接家屋の安全と安心を確保する計画とした<sup>1)</sup>。

②については、以下で詳述するように、光学式計測技術を駆使した計測管理に基づき、掘削に伴う周辺地山への影響を監視しながら情報化施工を行い、周辺環境への影響を最小限に抑制するものとした。

### 4. 光学式計測技術を駆使した計測管理計画

#### 4.1 計測管理計画の概要

##### (1) 計測管理の目的

本トンネルでは土被りが全線で2D未満であるため、支保パターンはすべてDⅢaで計画されているが、地山状況や計測結果などに基づき周辺地盤の変位抑制と周辺環境への影響を抑制するためには、先受け工などの補助

工法を含めて適切に当初設計を修正しながら施工することが必要であった。そこで、施工に際しては、発注者、施工者およびコンサルタントで構成される補助工法判定委員会を組織し、以下の事項に留意して事前に判定手順を作成し、迅速に的確な対策工を選定するものとした。

- ① 対象地山が軟弱地山であることから、一旦切羽作業を中断すると緩み域が拡大し、地山の変形が増大する可能性がある。
- ② 切羽作業が昼間のみであるため、施工に際しては緩み域や地山変形の発生抑制を図る必要がある。

補助工法を選定するための判定資料としては、判定時点までの施工実績を整理し、地山状況と周辺地山の変位計測に基づいて周辺環境への影響度合いを分析し、判定時点で最終掘削段階での管理レベルを評価する。そして、管理レベルに応じて設定した対策工を迅速に選定、実施するものとする。対策工は、現地への資材の確保や対策工実施の即時性などを考慮して、総合的に選定するものとした。

補助工法判定の調書の内容は、以下の通りである。

**a)**切羽観察調書：坑内切羽観察から、地山強度、切羽の安定性、脚部支持力の安定性および湧水による地山劣化状況などを分析する。

**b)**坑内および坑外変位計測調書：最新の地表面沈下および坑内変位の計測結果から、切羽進行に伴うトンネル掘削完了時点の最終変位量を予測し(**図-4**参照)、掘削完了時点での管理基準値に対する管理レベルを判定する。

**c)**各種補助工法選定フロー：地山条件や周辺環境を考慮して、判定された管理レベルに応じた地表面沈下対策工などの各種対策工を選定、実施するためのフロー(**図-5**参照)である。

##### (2) 管理基準値の設定と対応策の考え方

一般に NATM の計測管理<sup>2)</sup>における管理項目には、

- ① 地山の状態(鏡面, 素掘面の状態)
- ② 坑内計測結果(天端沈下, 内空変位)
- ③ 支保変状の状態(坑内観察による支保部材の変状状態)
- ④ 坑外計測結果(坑口斜面の変位, 地中変位, 家屋基礎部の沈下など)

などがある。本トンネルの補助工法判定に際しては、特

に表-1に示す計測項目を選定して補助工法選定時の判断資料とした。なお、計測項目ごとの管理値は、施工時に得られる地山状況や計測結果から、管理上、実状に適合するように適宜変更するものとした。

表-2には、三段階の管理値をしきい値として4つの注意レベルに状態を定義し、各注意レベルで実施する一般的な対応策を示す。同表に示すように、注意レベル3の状態から対策工を実施するが、当トンネルが宅地部に近接した都市NATMである特殊性から、注意レベル1あるいは2の状態であっても、図-4に示す事前に設定したトンネル中央における地表面沈下曲線に基づく最終地表面沈下量が管理値IIを越えて、注意レベル3以上になると予測される場合には、図-5に示すフロー(宅地部区間における地表面沈下対策フローの例)に従って順次対策工を実施することとした。

#### 4.2 計測項目の概要

トンネル掘削時におけるトンネル本体および近接する家屋の安全確保のため、図-6～図-7に示すように各種計測機器を配置して計測を実施した。写真-2には、起点側坑口部における計測工の設置状況を示す。

起点側坑口斜面では、トンネル両側に家屋が近接しており、掘削により大きな地盤変形が生じると家屋へ直接影響を与えるため、地山変位の挙動をリアルタイムに把

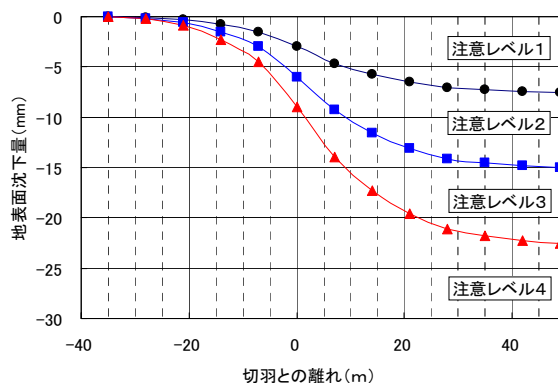


図-4 トンネル中央での地表面沈下曲線と注意レベル

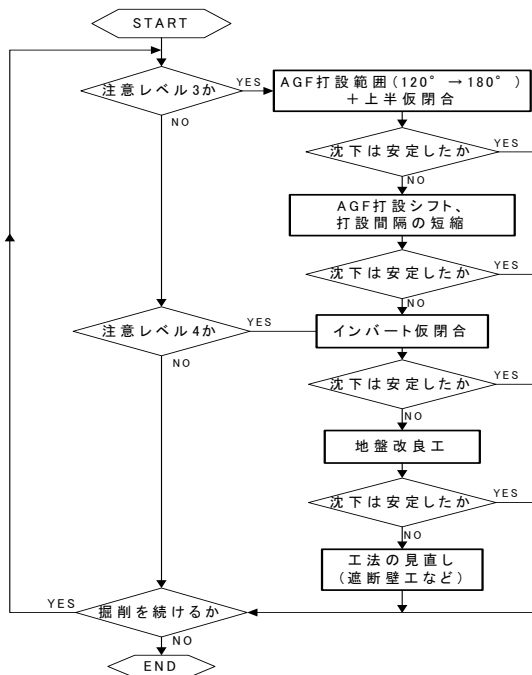


図-5 宅地部区間における地表面沈下対策フロー

表-1 計測項目ごとの管理基準値

項目	単位	管理値 I	管理値 II	管理値 III	備考	
坑内計測	天端・脚部沈下	mm	5.0	10.0	15.0	地表面沈下の管理値と同じ
	内空変位	mm	5.0	10.0	15.0	同上
坑外計測	地表面沈下	mm	5.0	10.0	15.0	トンネル側家屋基礎部、建築基礎構造設計指針(日本建築学会)を準拠
	家屋基礎部	$\times 10^{-3}$ rad (秒)	0.6 (124)	1.1 (227秒)	1.7 (350秒)	家屋基礎の相対沈下量から算定
	地中沈下(最大)	mm	5.0	10.0	15.0	地表面沈下の管理値と同じ
	地中傾斜(区間最大)	$\times 10^{-3}$ rad	0.194	0.571	1.681	地山の軸圧縮強度 $q_u=3N/mm^2$ から限界せん断ひずみより設定

表-2 注意レベルと注意レベルに応じた対応策

注意レベル	状態	計測管理値	周辺地山・支保部材の状態および対応策
レベル1	安定	管理値 I (注意)	周辺地盤、支保部材や構造物としての安全性に問題がないレベル。通常の計測や観察を続ける。
レベル2	注意	管理値 II (異常)	安全性に問題はないが、計測結果や現場の状況から変状等の異常が何か主因となっているかを検討する。この間、計測の頻度を増して地山の安定状態の確認を行う。
レベル3	異常	管理値 III (限界)	周辺地盤や構造物に異常が発生し、限界管理値に近づきつつあるレベル。異常の原因追求を行い、主因に対する対策工を実施する。この場合、施工的に簡単な変更で済む対策工を採用する。
レベル4	限界		周辺地盤、支保部材および近接構造物は限界状態のレベルである。至急大規模な対策を実施するとともに、ここに至ることとなった設計および施工方法を全体的にわたって見直す。

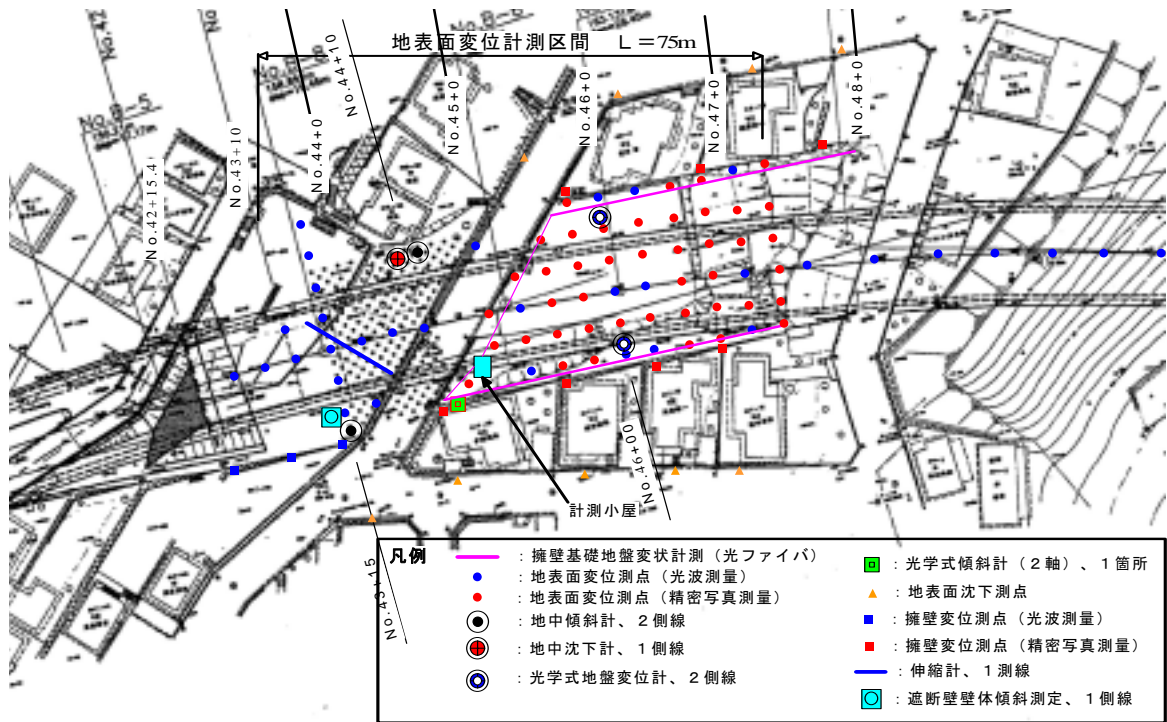


図-6 計測工の配置平面図

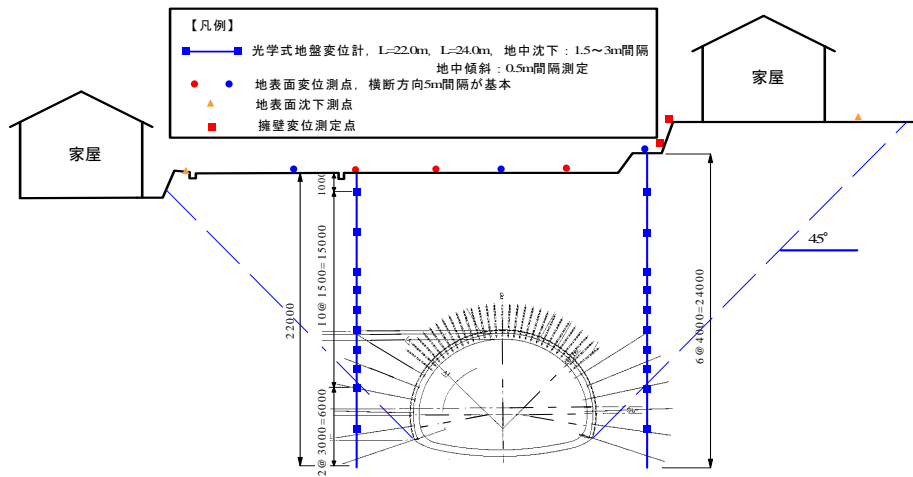


図-7 計測工の配置断面図 (No. 46+00)



写真-2 起点側坑口部における計測工の配置状況

握して効果的に対策を実施する必要があるため、地中沈下計、地中傾斜計および伸縮計などを設置して(写真-2参照)、自動計測により夜間に変位が発生しても直ちに対処できるように監視した。さらに、No.44+10 から No.47+05 間のトンネル中央宅地部区間では、詳細な計測データが可能な当社開発の光学式計測技術を積極的に活用して、地盤内変位や地表面沈下などを監視した。

以下では、本トンネルで採用した光学式計測技術を中心にその概要を示す。

#### (1) 光学式傾斜計による家屋擁壁の傾斜計測

パイプルーフ施工区間以奥で最も早い時期にトンネル掘削の影響が発生する位置(No.44+10)において、近接する家屋の擁壁(写真-2参照)に図-8に示す光学式傾斜計を設置してその傾斜を計測した。

光学式傾斜計の測定原理は、底面を支点として長さ約240mmの糸に固定された浮き標点の画像を CCD カメラで撮影し、取得したデジタル画像をもとに初期値からの移動量を画像処理によって測定し、2方向の傾斜角を計測するものである。本傾斜計の計測可能な範囲と計測精度は、それぞれ±480分と±25秒である。

写真-3には、光学式傾斜計の取得した画像例を示す。

#### (2) 光ファイバセンサによる擁壁基礎地盤の挙動計測<sup>1)</sup>

トンネル中央宅地部区間では、掘削に伴う家屋擁壁基礎地盤への影響をリアルタイムに監視するため、先行変位を含めたトンネル縦断方向に渡る地表面沈下の挙動を常時計測する必要がある。そこで、家屋擁壁基礎に沿って地表面沈下に追従する長さ5mの中折れ式沈下検知板(図-9参照)を深度約30cmでトンネル両側(左側:40m, 右側:45m)に埋設し、中折れ部にセットしたFBG光ファイバセンサのひずみ増減を計測することによって、基礎地盤の沈下挙動を監視する。

#### (3) 光学式地盤変位計<sup>2)</sup>による地盤内変位の挙動計測

CCD カメラを搭載した光学式傾斜計によって撮影されたガイド管内などのデジタル画像を撮影処理することにより、ガイド管の傾きや継ぎ手部の伸縮量を算出し、地盤内の変位挙動を3次的に計測する。

#### (4) 精密写真測量による地表面沈下の面的計測

起点側坑口部およびトンネル中央宅地部区間の地表面沈下計測では、トンネルセンタでの縦断方向のみならず横断方向の沈下分布を把握し、近接する家屋への影響を

監視する必要がある。そのため、No.45+10~No.47+05の宅地部区間では、図-3に示すように地表面沈下の計測点が約50点以上と多くなることから、精密写真測量システム<sup>4)</sup>を導入して計測業務の省力化を図るとともに、地表面沈下を面的に計測した。写真-4に地表面沈下の計測点配置状況を示す。また、写真中に地表面沈下の計測に使用した標点を示す。

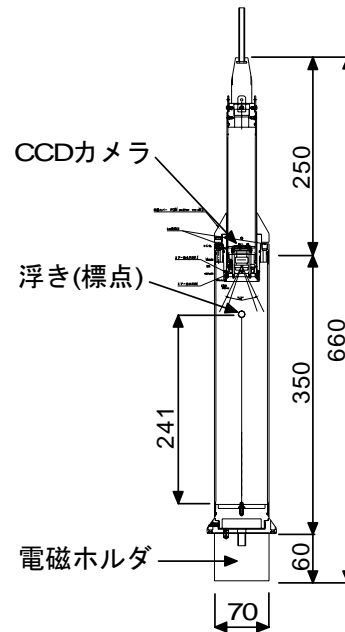


図-8 光学式傾斜計の概要

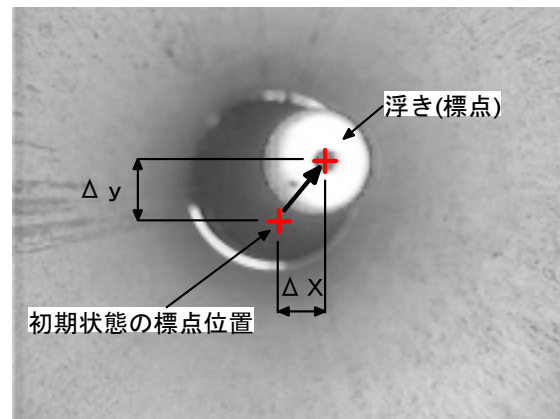


写真-3 光学式傾斜計の所得画像の例

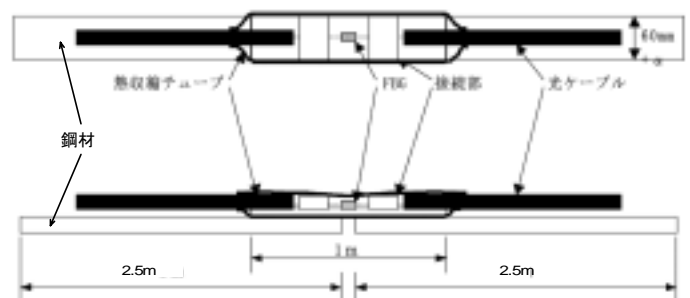


図-9 光ファイバ沈下検知板の概略図

写真撮影は対象領域を2ブロックに分けて、それぞれのブロックで3方向より画像を計3枚撮影した。使用したカメラは有効画素数600万の一眼レフデジタルカメラである。なお、各ブロックの四隅の4点はトータルステーションで三次元座標を計測し、解析上の入力値とした。

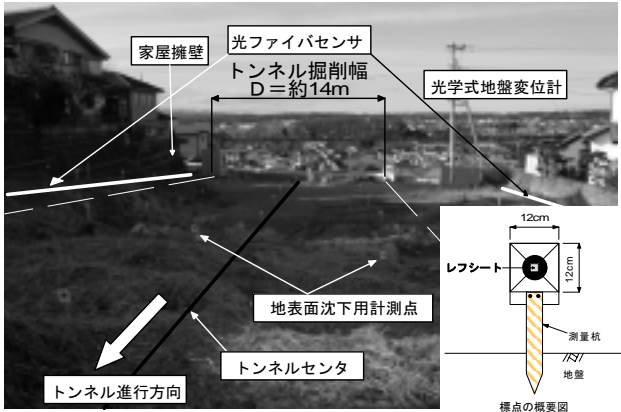


写真-4 地表面沈下の計測点設置状況

## 5. 計測結果とその考察

トンネル掘削前にパイプルーフを施工した坑口斜面部区間(No.42+15.4~No.44+1.2)の粘性土層、砂礫層および風化泥岩層での掘削において、上半掘削時に最大30mm(No.43+15断面)の地表面沈下が発生した。そこで、パイプルーフ工や遮断壁がなくなる中央宅地部区間では、無対策の場合管理値Ⅲ(地表面沈下で15mm)を越える地山変位が発生すると予測されたため、補助工法判定手順に基づき、以下に示す沈下抑止対策を順次実施した。

対策 a. 上半仮閉合

対策 b. AGF180°打設

(通常 26.5 本/断面→36.5 本/断面)

対策 c. AGF 注入量の増量

その結果、中央宅地部区間のトンネル掘削では、地表面沈下は最大7mmと注意レベル2(注意)の状態で見事収束し、周辺家屋への沈下に伴う影響を最小限に抑止しながら、無事通過することができた。以下では、光学式計測技術による計測結果について述べる。

### (1) 光学式傾斜計による擁壁傾斜の計測結果

図-10には、光学式傾斜計による擁壁の傾斜角の経時変化を示す。同図より、トンネル進行方向の傾斜は切羽の進行とともに発生しておらず、横断方向の傾斜が上半切羽通過直後から発生し、上半切羽が1.0D通過した時点でほぼ収束したことがわかる。トンネル横断方向の

傾斜角は最大 $0.14 \times 10^{-3} \text{rad}$ であり、注意レベル1(安定)と家屋擁壁への影響はなかったものと判断できる。

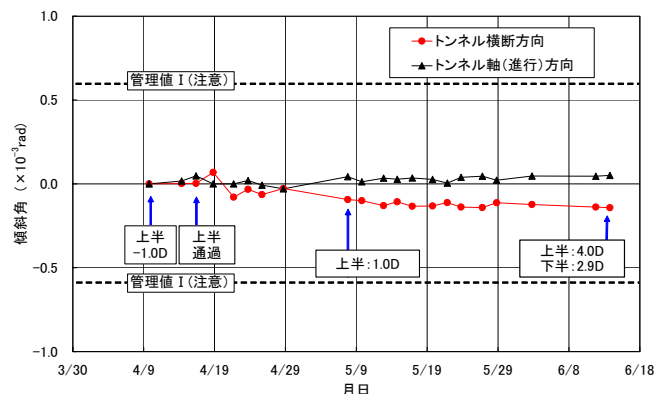


図-10 家屋擁壁における傾斜角の経時変化

### (2) 光ファイバセンサによる擁壁基礎地盤の計測結果

図-11には、光ファイバセンサによる左測線の擁壁基礎地盤の相対沈下量の経時変化(5月19日~26日)を示す。同図より、家屋基礎地盤の相対沈下は日射などによる地盤の温度変動に伴った周期的な変動のみみられるものの、その変動量はいずれの区間でも0.5mm程度と小さいことから、家屋基礎地盤ではトンネル掘削による大きな地表面沈下が発生していなかったことがわかる。

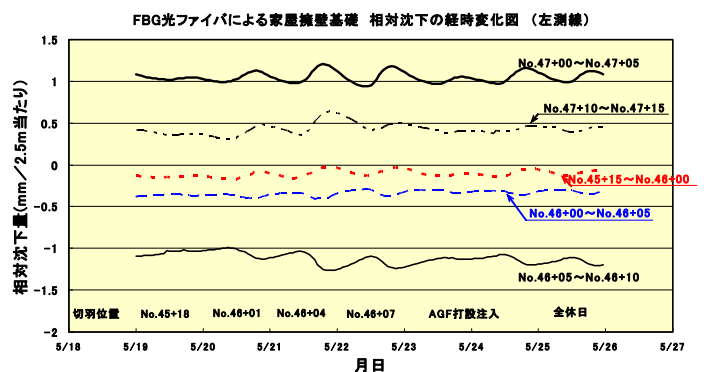


図-11 擁壁基礎地盤の相対沈下量の経時変化

### (3) 光学式地盤変位計による地盤内変位の計測結果

図-12には、No.46+00断面での光学式地盤変位計による地盤内累積沈下量の分布を示す。同図より、地盤内沈下は上半切羽の到達前から発生するが、上半通過時における大きな地盤内沈下の増加はなく、下半掘削が完了した時点で最大2mmの沈下量となった。これらのことから、本区間で実施した対策工により上半切羽通過後の地山変位が効果的に抑制されたものと判断できる。

### (4) 精密写真測量による地表面沈下の面的な計測結果

図-13には、上半切羽が通過した時点(6月11日)で

の光波測量を併用した精密写真測量による地表面沈下のコンターを示す。同図より、中央宅地部区間では、上半掘削完了時に最大沈下量が 10mm 以内に収まっていることがわかる。その後、下半掘削時でも大きな沈下は発生せず、注意レベル 2(注意)で収束した。このことから、本区間で実施した対策工により上半および下半掘削時の地山変位が効果的に抑制されたものと判断できる。

## 6. おわりに

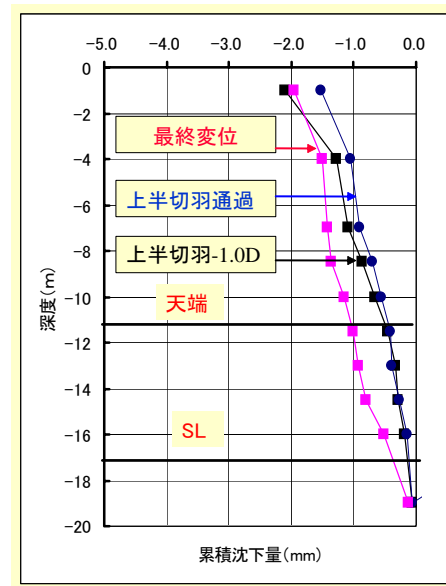
本工事は住宅密集地内を低土被りで通過するため、「地表面沈下による家屋への影響防止」および「周辺環境への騒音振動防止」を第一として施工を行った。そして、光学式計測技術を活用した情報化施工により対策工を適宜実施することにより住宅密集地区間を無事に通過することができた。本工事で実施した計測管理方法が同種の都市 NATM の施工に際して参考になれば幸いである。

最後に、本工事の設計、施工における多くの課題に対し、八王子市並びに関係各位には適切なご指導を頂いた。紙面を借りて御礼申し上げる次第である。

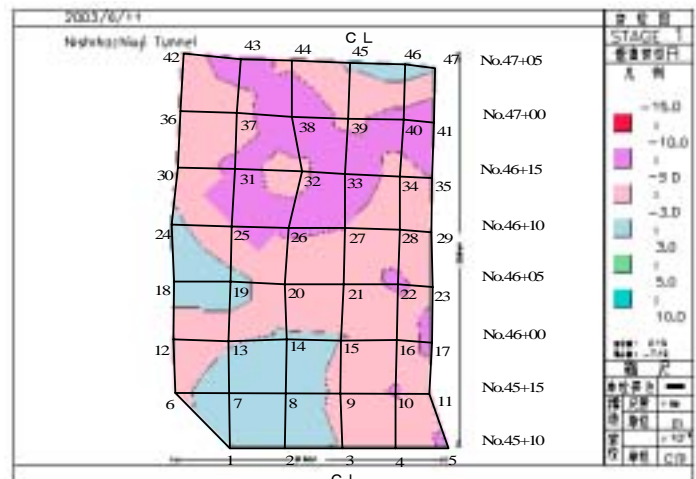
### 【参考文献】

- 1) 飯塚光正ら：周辺環境に配慮した住宅密集地内の低土被り NATM の施工，日本トンネル技術協会，第 52 回施工体験発表会(山岳)，pp.25-32，2003.
- 2) 山縣素一郎ら：トンネル計測管理システムの開発，とびしま技報／土木，No.40，pp.103-117，1989.
- 3) 松元和伸ら：画像処理技術を取り入れた地盤変位計による室内傾斜実験について，土木学会，第 55 回年次学術講演会講演概要集Ⅲ，pp.622-623，2000.

- 4) 近久博志ら：市販されているデジタルカメラを用いた長大法面の挙動監視システム“TPhotoS”，電力土木，No.294，pp.116-117，2001.



図一 1 2 地盤内累積沈下量の分布



図一 1 3 トンネル上部の中央宅地部区間における地表面沈下コンター

**Summary** Tsutsujigaoka Tunnel (a tentative name) is a road tunnel spanning 345 m with a large section of 110 m<sup>2</sup> (excavation area). Since this tunnel was planned to run under a residential area with a shallow overburden depth, measures were required to avoid large surface settlement, which would produce a harmful influence on the surrounding ground. For this reason, the authors monitored the ground displacement by optical measuring technologies during excavation and safely completed the work with a marginal surface settlement of 10 mm at the maximum. This paper describes problems related to the design and execution of urban tunneling by NATM and measures against these problems based on field measurement data, as well as the effects of such measures.

**【Keyword】** urban NATM, neighboring construction, monitoring management, precise photogrammetry, optical measurement system for ground displacement, optical fibre sensing