

大橋シールドトンネルの掘進管理 EXCAVATION CONTROL OF OHASHI SHIELD TUNNEL

木ノ本 剛¹・高木 攻¹
Takeshi KINOMOTO・Osamu TAKAGI

Ohashi Shield Tunnel constitute underground part of Ohashi Junction that connect MEX Route 3 Shibuya line to MEX Shinjuku Circular Route. Vertically parallel tunnels passed across under the Route 246. Important structures like railway, public utility conduit and pile foundation of MEX Route 3 Shibuya line constructed under Route 246, detail excavation control of shield tunnel was needed and real-time-monitoring for these important structures were conducted. This paper presents the way of excavation control and the real monitoring data.

Key Words: Shield tunnel, excavation control, real-time-monitoring

1. はじめに

首都高速道路株式会社では、東京を取り巻く3つの環状道路の中で最も内側に位置している首都高速中央環状線の建設を推進中である。この道路が完成すると、常態化している東京中心部の交通渋滞が劇的に改善されるほか、ドライバーは様々なルート選択が可能となる。さらに、渋滞緩和によって年間約40万トンの二酸化炭素の排出量削減が見込まれている。中央環状線は既に東側、北側、そして西側の区間の一部、計33kmが完成しており、さらに平成22年3月には西側の区間（首都高3号-4号線間）が約4km南に延伸される予定である。新宿線以南の約9.4kmの中央環状線品川線についても建設が開始され、その大半がトンネル構造となっている。

中央環状線新宿線と高速3号渋谷線を接続する大橋ジャンクションのうち、大橋シールドは松見坂立坑を発進し大橋立坑に到達（上段シールド）後、大橋立坑内でシールドマシンをジャッキダウン、180度回転させた後、再発進し松見坂立坑に到達（下段シールド）する上下併設のシールドトンネルである。

このトンネルは、外径 $\phi 12.65\text{m}$ 、延長430m（上下で860m）、最大土被り43.8mであり、掘進対象地盤はほぼ全線、上総層（土丹層）となっている。なお、上下トンネルの最小離隔が約1.5mと非常に近接している。採用されたシールド機は、径 $\phi 12.94\text{m}$ 、機長11.105mの泥水式シールド機であり、 $R=123.5\text{m}$ という急曲線区間を掘進するために左右3.2度の中折れ機構を有している。また、セグメントには将来の中央環状品川線本線構築のための切り開きに対応した桁高900mm・最大弧長6.5mの鋼殻及び重要構造物下部の重荷重対応ダクタイトセグメントが用いられている。

本シールドトンネルは国道246号を横断・並走するため、国道246号地下部の鉄道及び共同溝一体の躯体、首都高速3号線渋谷線橋脚基礎部等の重要構造物との近接施工であり、施工中は近接重要構造物への影響を各種計測により監視した。本報告は、シールド施工時における掘進管理及び各種計測結果について報告するものである。



図-1 首都高速道路中央環状新宿線

キーワード：シールドトンネル、掘進管理、リアルタイムモニタリング

¹正会員 首都高速道路株式会社 東京建設局 大橋建設事務所

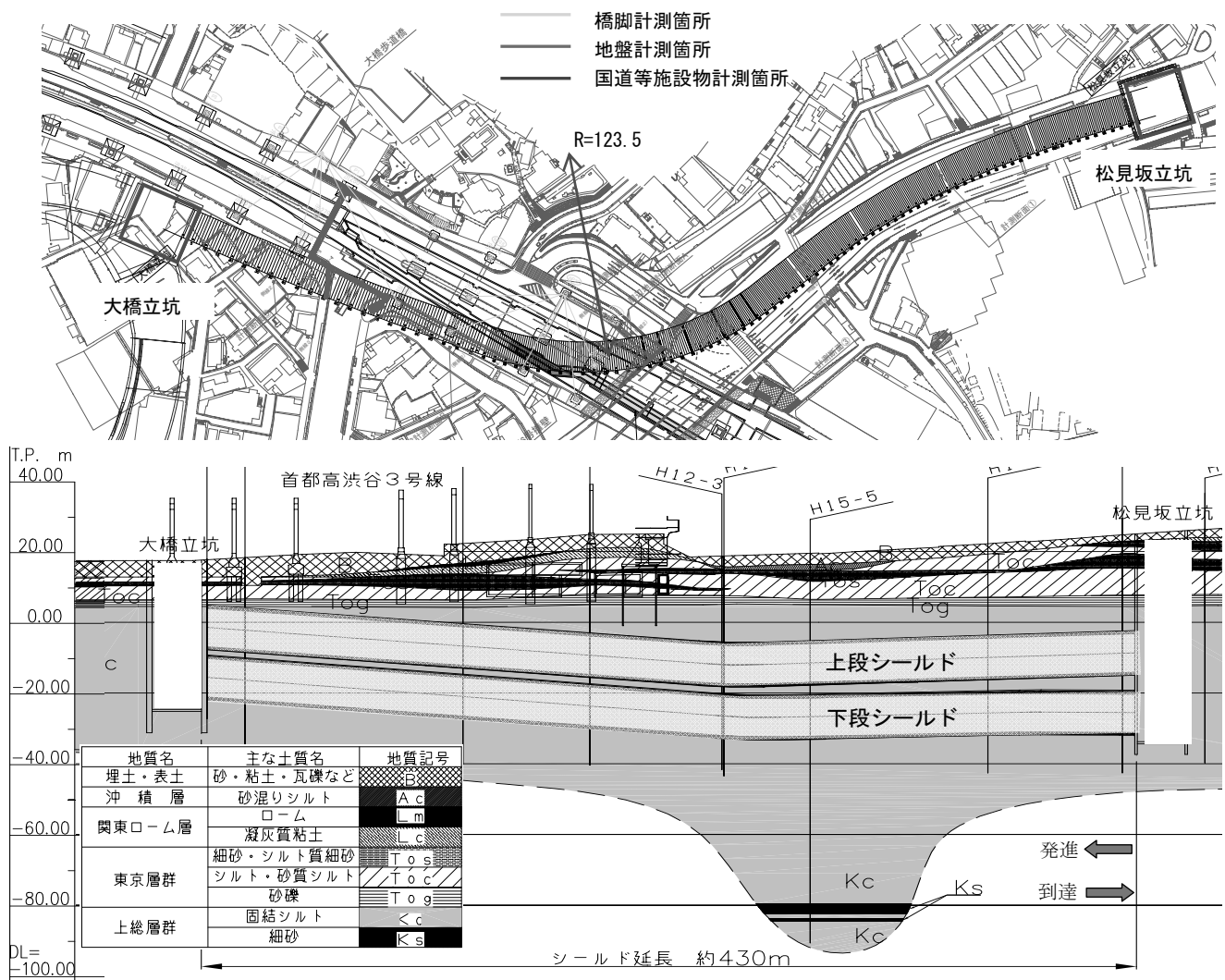


図-2 大橋シールド平面図・側面図

2. 掘進管理

(1) 掘進管理の目的

シールド掘進管理の目的は切羽の安定を図りながら早期にテールボイドの処理を行い、地盤変状を最小限に抑えて、迅速にシールド掘進を行うことにある。掘進管理としては、切羽の安定に関して①切羽管理、②掘削土量管理、③シールド機管理を、テールボイドの処理に関しては、④注入量・注入圧管理、⑤材料管理が挙げられる。掘進時はリアルタイムにこれらのデータについてコントロール室（写真-1）にて監視すると共に、1リング毎にデータを確認し、異常発生等の検知を行った。以下に各管理項目の概要と計測結果について示す。



写真-1 シールド機コントロール室

(2) 切羽泥水圧管理

切羽泥水圧は、土圧（主働土圧等）、地山間隙水圧（シールド機位置）に圧の変動や逸水量などから設定した変動圧（ α ）を加えた値を設定泥水圧とし、近接のボーリングデータ、対象掘削地盤、土被り等を考慮して区間毎に設定する。基本となる泥水圧の式としては、式(1)で与えられる。

$$\text{泥水圧} = \text{土圧(主働土圧等)} + \text{地山間隙水圧} + \alpha(\text{変動圧}20\sim30\text{kPa})\dots(1)$$

泥水圧の下限値は掘進対象地盤が自立性の高いKc層のため、主働土圧を0とし泥水圧の下限としては式(2)で算出した。

$$\text{下限泥水圧} = \text{地山間隙水圧} + (\text{変動圧}20\sim30\text{kPa})\dots(2)$$

泥水圧の上限値は、通常採用される静止土圧を用いて式(1)より泥水圧を求めると、泥水圧が大きくなり泥水が噴発し、地盤を緩めるおそれがある。このため泥水の噴発を生じさせない泥水圧の上限値として、各区間の土被り厚相当の泥水水頭を採用し、式(3)で算出する。

$$\text{上限泥水圧} = \text{土被り厚相当の泥水水頭}\dots(3)$$

上述により、掘進各区間毎に下限及び上限泥水圧を設定し掘進管理を行った。

泥水圧の設定値と掘進時データ及びジャッキ総推力の掘進時データを図-3に示す。掘進時の泥水圧は概ね設定値の範囲内となっており計画通りの掘進が行われたといえる。また、切羽水圧とジャッキ総推力の間には相関がみられ、切羽の安定を保ちながら掘進が行われたことが確認できる。なお、下段シールド掘進時の200m付近で泥水圧が100kPa程低下しているが、これは重要構造物直下通過後にシールド機カッターフェース部に装備された水圧計により計測される地山間隙水圧により設定値を見直した結果である。

(3) 掘削土量管理

掘削土量は次式により求められる。

$$V = \sum (Q_{out} - Q_{in}) \times dt \dots(4)$$

ここに、 Q_{out} ：排泥流量、 Q_{in} ：送泥流量

流量の測定誤差、掘進速度・送排泥流量の変化、流体バイパス運転時間の相違等により10%程度の誤差が生じるため、掘進リング前10リングの平均値より基準値を設定し、 $\pm 2\sigma$ (σ ：標準偏差)の範囲で管理を行った。図-4に掘削土量の実績値と管理値を併せて示す。ばらつきはあるものの、掘削土量はほぼ 2σ の範囲内にあり、顕著な逸泥や取り込み過多を起こすことなく掘進が行われたといえる。

(4) シールド機管理

掘進に伴うシールド機の数値、カッタートルク、総推力のデータは、掘削状況や排土状況を示し、一定の速度で掘進し、推力、トルクの変動が少ない状態であれば良好な掘削と判断できる。

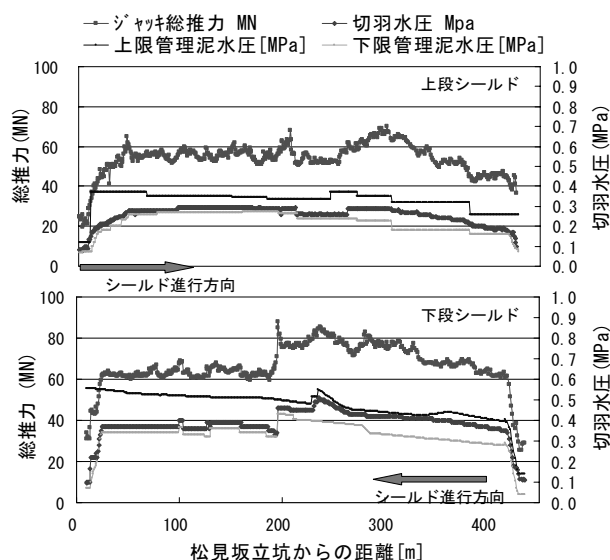


図-3 掘進時の切羽水圧・総推力

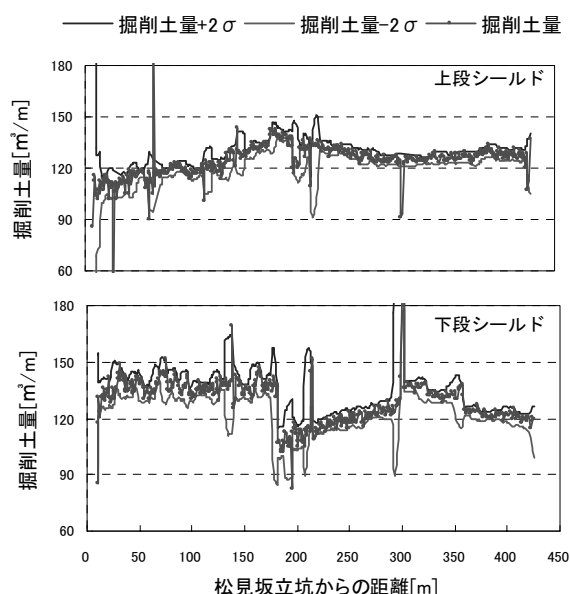


図-4 掘進時の掘削土量

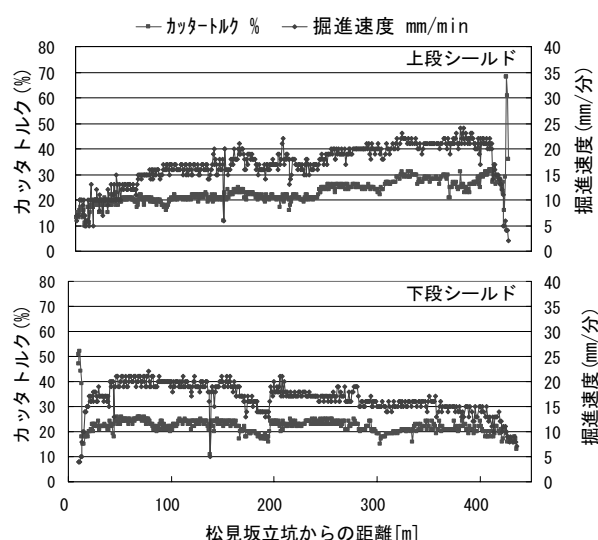


図-5 カッタートルクおよび推進速度

a) 掘進速度

掘進区間の大部分を占める固結シルト層における掘進速度は泥水処理設備能力により掘進速度を20mm/分として設定した。掘進速度15mm/分で初期掘進を行い、特に異常がみられなかったことから、本掘進では掘進速度を15～20mm/分に設定し管理を行った。

b) カッタートルク

カッタートルクについては初期掘進における実績を参考に本掘進における上限値を設定し管理を行った。本工事においては初期掘進時には概ね装備トルクの20%程度となったため、同様な地質での掘進時の過去データを参考に上段シールドでは45%，下段シールドでは50%とした。

c) 総推力

本シールド機の装備推力は160MNであり、推進諸抵抗に対して余裕を持っている。掘進時の管理としては、急曲線部において曲線外側のみのジャッキを最大能力にて使用した場合を想定し、装備推力の50%を目安に管理を行った。

総推力は図-3に示した通りである。推進速度とカッタートルクのデータを併せて図-5に示す。若干のばらつきはあるものの、いずれの項目もほぼ管理値内の変動であり、良好な掘進が行われたといえる。

(4) 裏込注入管理

裏込注入は、シールド機の同時注入管より掘進と同時にテールボイドに裏込を注入する同時裏込注入方式により実施した。注入材料は、テールボイドに確実に充填され、速やかに地山相当の強度が得られる二液型可塑状タイプのものとし、次の強度があるものを設定した。

1時間強度 $\sigma_{1H} = 0.05\text{N/mm}^2$ 以上

28日強度 $\sigma_{28D} = 2.0\text{N/mm}^2$ 以上

注入管理は、注入量および注入圧を併用して行った。すなわち、注入量はテールボイドの120%を目安とし、注入圧は、切羽水圧+200Kpaを上限値として、注入圧が上限値を超えると一時注入を休止し、圧がさがると注入を再開した。下段シールド掘進時のリング毎の裏込注入率を図-6に示す。概ね目標以上の裏込注入がなされたことがわかる。

3. 近接構造物計測結果

(1) 計測の目的

近接構造物計測の目的はシールド掘進による影響をリアルタイムに把握し、変状に応じた掘進管理の見直し、迅速対策の実施を行うことである。以下に各計測の概要、計測結果を示す。

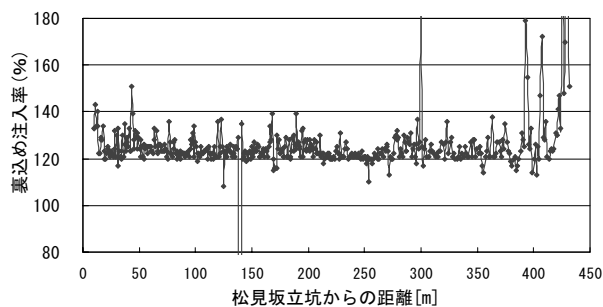


図-6 裏込注入率(下段シールド)

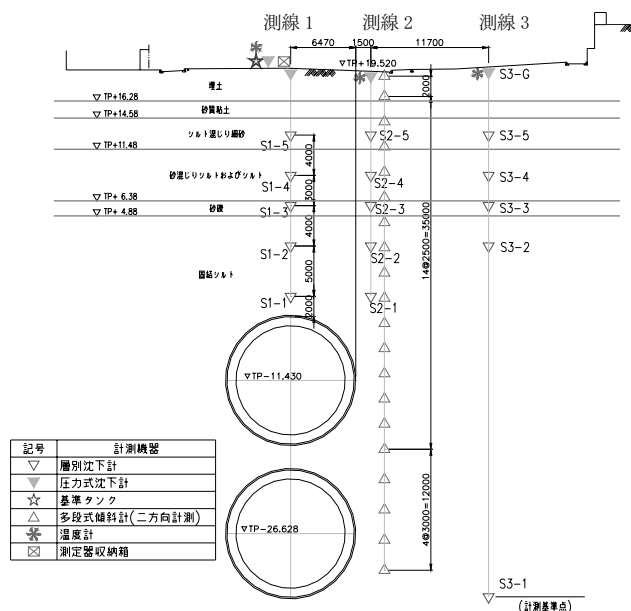


図-7 地盤計測器配置例

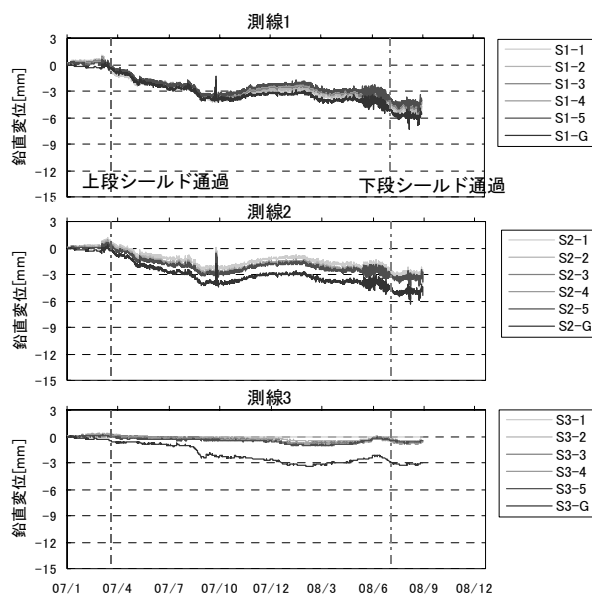


図-8 地盤計測結果例

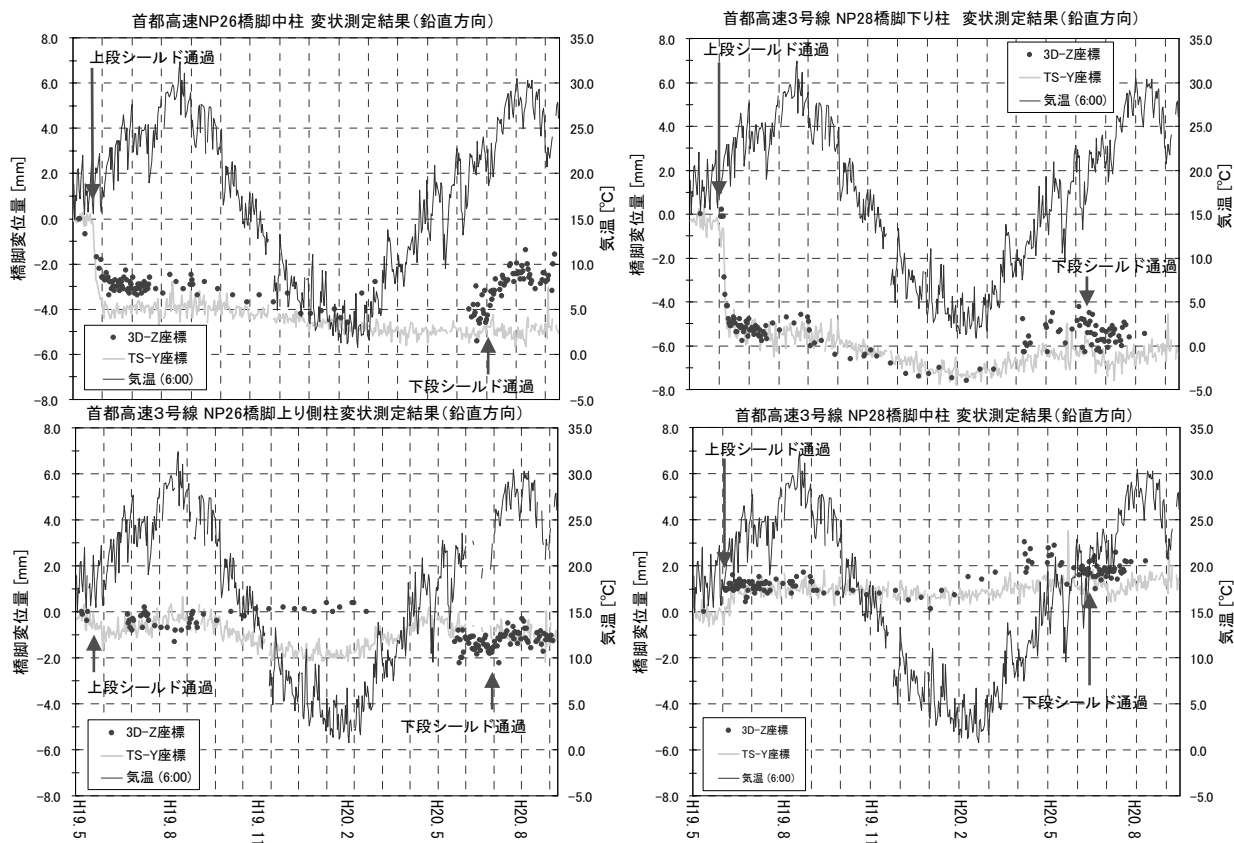


図-9 橋脚計測結果例

(2) 周辺地盤計測

シールド掘進による地盤変位の把握を目的として層別沈下計，圧力式沈下計，多段式傾斜計などによる計測を実施した。断面における計測位置としてはシールド直上（測線1），直近（1.5m～2m，測線2），1D離れ（D：直径，測線3）位置であり，計測機器の配置例を図-7に示す。電話回線を利用したデータ転送により計測データを事務所内にてリアルタイムに監視した。図-8に計測例として鉛直方向変位の経時変化を示す。シールド機直上の測線1および測線2においてシールド通過後から概ね1ヶ月間で2mm程度の沈下が観測された。その後もゆるやかな勾配で沈下が観測されたが，沈下後に隆起が観測されていることから，地下水位などの季節変動が原因となる変位が観測されているものと考えられる。一方，下段シールド通過直後については1～2mmの沈下が観測されたが，半月程度で収束する結果となった。これは，下段シールド掘進時には直上に存在する上段シールドの存在により周辺地盤へ与える影響が軽減されていることが一因として考えられる。

(3) 既設橋脚変位

シールド掘進による既設橋脚変位の計測であり，通過および併走する区間の既設橋脚柱基部付近での変位計測をトータルステーションによる自動計測で行った。また，シールド掘進時は光波による計測を実施し，自動計測の際に生じる異常値確認及び精度確認を行った。

シールド通過直上の柱及び，通過側方の柱の変位について代表箇所の計測結果を図-9に示す。シールド直上に橋脚柱が位置する場合，上段シールド通過直後に沈下が観測され，最大で約5.5mmの沈下が生じた。これに対して，直上以外の橋脚柱に関しては顕著な沈下は観測されなかった。また，下段シールド通過時には直上の橋脚に関してもほとんど沈下が見られず，温度変化との相関が高い変動が観測されたことから，シールド掘進が引き起こした変位は，気温の季節変動が引き起こす変位以下であり，非常に小さなものであったと考えられる。

なお，橋脚柱に生じた沈下が橋脚に及ぼす影響を解析で検討した結果，構造上問題とならない範囲での沈下量であることを確認している。

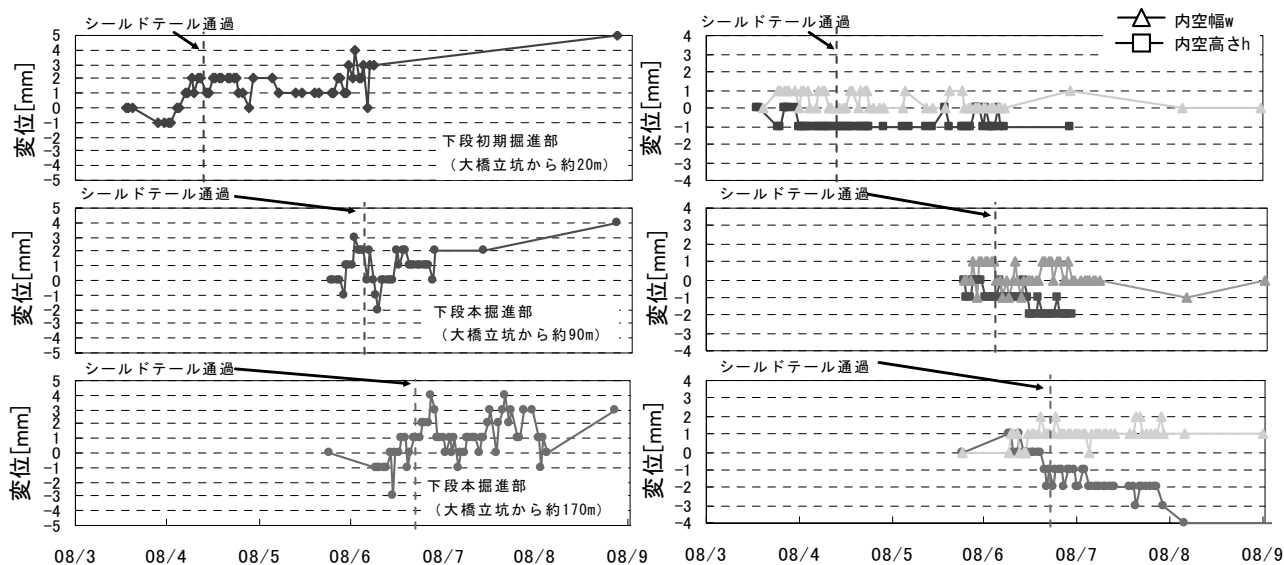


図-10 下段シールド掘進時の上段シールド内空変位計測

(4) 上段シールド内空変位

上下段シールドの最小離隔が約1.5mであり、下段シールド掘進時に生じる周辺地盤変状の影響が最も顕著に現れるのは上段シールドと考えられる。そこで、下段シールド掘進時にはシールド機前後位置の上段シールド内空を計測し変状をモニタリングした。計測は上端シールドの鉛直位置の変動及び内空（高さ、幅）の計測である。図-10は代表3リングにおける鉛直変位と内空変位の経時変化であるが、シールド機通過前に鉛直変位が増えており上段シールドが押し上げられている傾向にある。シールドテール通過後には多少沈下がみられる場合もあるが、鉛直変位は残留しているといえる。急曲線部については高さ方向の内空が減少しており、トンネル全体が上方に押し上げられるのではなく、下から押されて楕円形に変形しているといえる。他の2断面の内空変位は1mm程度の変動であり、測定による誤差の範囲内と考えると上段シールドがそのまま上方に押し上げられたといえる。

以上の掘進時の計測結果をまとめると、

- ・ 上下2層のシールドトンネルであり、上段シールドを先行したため、シールド掘進による周辺地盤への影響は先行する上段シールド施工時が支配的であることがわかった。
- ・ 長期の計測により、シールド掘進に関わらず気温や地下水位の季節変動などが原因で1～3mm程度の変位が生じることがわかった。

4. おわりに

急曲線部を有しかつ重要構造物との近接施工となる大橋シールドでは、詳細な掘進管理を行うとともに、各種の計測により構造物の変状を監視した。その結果、掘進は設定した管理値内で良好に行うことができた。

大橋シールドは平成20年9月22日に松見坂立坑に下段シールドが到達し、現在は平成22年3月の開通に向けて内装工や設備工を鋭意進めているところである。最後に、当工事に対して御指導、御協力をいただいた関係各位に深く感謝します。また、本稿が今後の類似工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説，平成18年