

都市部山岳トンネルにおける 切羽先行変位を用いた計測管理手法 —福岡市地下鉄七隈線博多駅（仮称）工事での事例—

坂井 一雄^{1*}・谷 卓也¹・文村 賢一²・原 靖浩³・後藤 真之助³・原 稔之⁴

¹大成建設株式会社 技術センター（〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1）

²大成建設株式会社 九州支店（〒810-8511 福岡県福岡市中央区大手門1-1-7）

³福岡市交通局 建設部 工事事務所（〒810-0038 福岡市博多区祇園町4-13 博多ゼネラルビル7F）

⁴福岡市交通局 建設部 建設課（〒810-0041 福岡市中央区大名2-5-31）

*E-mail: skikzo01@pub.taisei.co.jp

都市部山岳トンネル工法は小土被り、軟弱な地山という施工条件の下で、近接構造物に対する厳しい制約条件が課されることが多く、通常、山岳トンネルと比べて、高密度かつ高精度な計測管理が求められる。福岡市地下鉄七隈線延伸事業として施工中の博多駅（仮称）工事では、多数の地下インフラ構造物の直下で、本線トンネル、駅舎部の一部および連絡坑を都市部山岳トンネル工法にて掘削中である。本工事では、地表面と周辺構造物に定められた沈下・傾斜許容値を担保すべく、通常の計測A・Bに加え、トンネル全線で切羽先行沈下と切羽押し変位を計測している。本論文では、地下鉄博多駅での切羽先行変位の計測管理手法と本線トンネルに先立ち掘削した連絡坑での計測結果について報告する。

Key Words : NATM in urban area, measurement management, displacement ahead of the face, inclinometer, extensometer

1. はじめに

福岡市交通局では、福岡市西南部から都心部への移動および都心部内での移動の利便性向上と、都市部における交通渋滞や営業中の地下鉄空港線の混雑緩和等を目的として、福岡市営地下鉄七隈線の天神南～博多までの延伸事業を進めている。建設区間は約1.4kmであり、平成32年度の開業予定である¹⁾。図-1に事業概要図を示す。

現在、大成・佐藤・森本・三軌・西光建設工事共同企業体は、博多駅（仮称）工区を施工している。博多駅（仮称）工区は大きく分けてNATM区間（以下、博多駅NATMと称す）とアンダーピニング工法を主体とする開

削区間に分けられる。本論文にて対象とする博多駅NATMでは、都市部山岳トンネル工法により本線トンネル、駅舎部の一部および連絡坑を施工する。図-2に博多駅NATMの平面図および地質縦断面図を示す。

トンネルの上部は幹線道路であり、地中には近接構造物として地下駐車場の出入口部と下水幹線、ガス管路などが複数存在する。維持補修や安全性の観点から各々の沈下量の許容値は表-1のように定められており、いずれもトンネルの土被りや近接度合を考えれば、小さい値であるため、慎重な施工と厳密な計測管理が要求される。

このため、山岳トンネルで標準的に実施する坑内変位計測やトンネル支保部材の応力測定に加えて、地表面沈

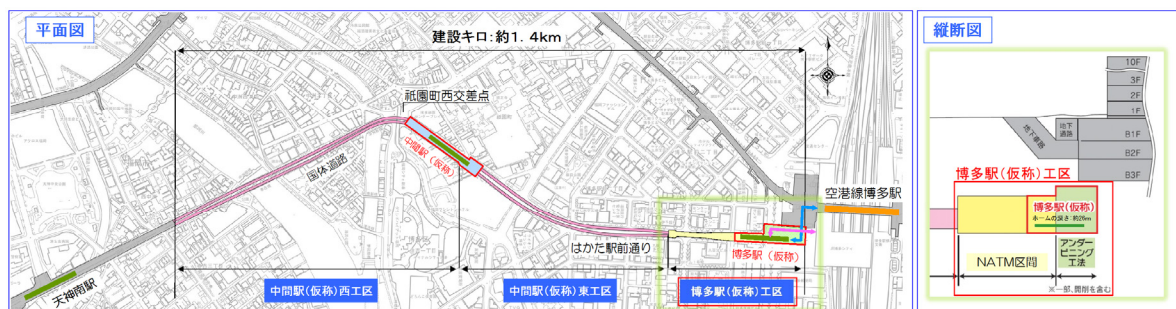


図-1 福岡市営地下鉄七隈線延伸事業の工事概要図¹⁾

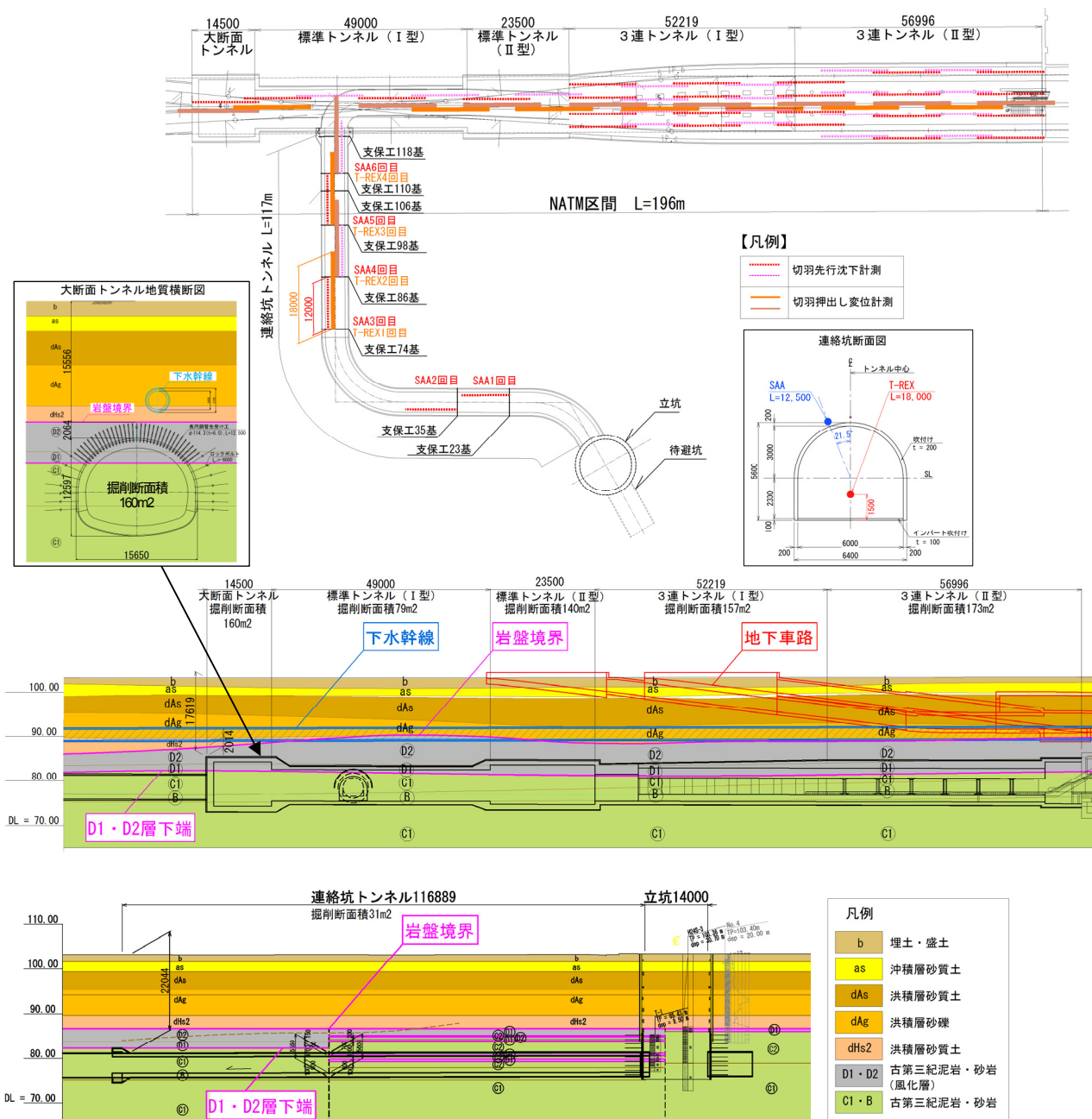


図-2 博多駅 NATM の平面図と地質縦断図

表-1 近接構造物等の許容値

	許容値	備考
地表面沈下	30mm	車両の通行性・舗装の維持管理の容易性より設定
地表面傾斜	1.5/1000rad	
下水幹線	8.5mm	下水管上端・下端の鉛直変位の相対値
地下車路	5mm	横断面内の相対沈下量
ガス管路	45mm	

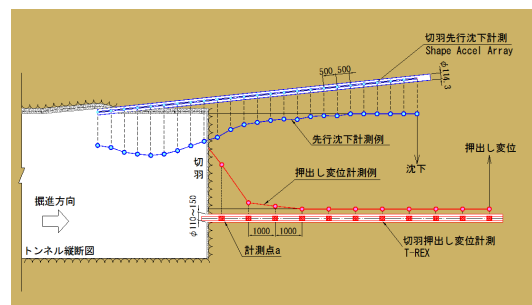


図-3 切羽先行変位計測の概念図

下の常時監視や近接構造物の変位計測を行っている。

さらに、切羽前方で生じるトンネル周辺の沈下と緩み範囲を監視し、必要に応じて、できる限り早期に効果的

な補助対策工を検討・実施して構造物への影響低減と切羽の崩落リスク低減を図るものとした。具体的には概念的に図-3に示すような切羽先行沈下と切羽押し変位計

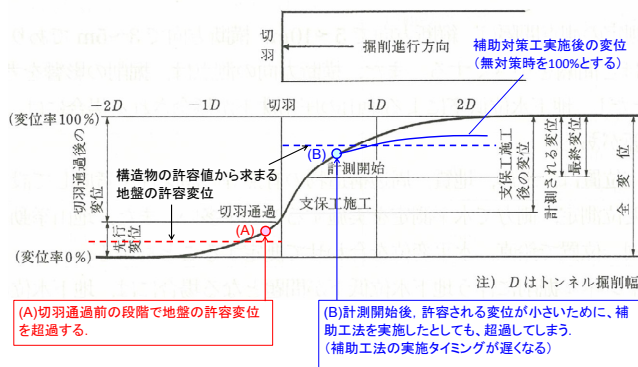


図-4 変位の特性曲線と許容値の関係²⁾

測を計画した。本論文では博多駅NATMで計画した切羽先行変位（切羽先行沈下と切羽押し出し変位）の計測手法と連絡坑での計測結果について説明する。

2. 博多駅NATMの地質概要と施工上の課題

博多駅NATMで掘削対象となる地山は古第三紀泥岩・砂岩の互層である。事前調査の結果では、健岩部（図-2中でC1・B層）は比較的硬質であるが、GL-13m～22mに分布する土砂・岩盤部の境界（D1・D2層）は、岩盤の剛性および強度は小さく、変形係数は32MPa～130MPa、岩石の一軸圧縮強さは0.1MPa～0.6MPaである。また、同層は風化変質作用を強く受けており、固結度が低く、切羽に出現すると天端や鏡面の崩落が懸念される。

土被りは本線トンネルで約17m～20m（1.0D～1.8D、D：トンネル幅）、連絡坑は約22m（3.5D）である。特に大断面トンネル部は岩被りが約2.0m（0.1D）と小さいため、トンネルの安定性確保や掘削時の地表面や下水幹線に対する影響を可能な限り抑制することが課題である。このため、計測結果を反映した適切な時期かつ効果的な補助対策工を活用した施工が重要である。

3. 切羽先行変位の計測目的と計測手法

(1) 切羽先行沈下の計測目的

一般的な山岳トンネルで実施する坑内変位計測ではトンネル壁面変位を計測し、支保および周辺地山の安定性を確認する。すなわち、計測対象は切羽通過後の変位である。しかし、博多駅 NATM のように近接構造物の沈下許容値が非常に小さい場合には、切羽通過後の変位だけを評価の対象とすると、構造物の安全性を担保できないと想定される。具体的には、図-4に示すように、切羽通過前に地盤の許容変位を超過する場合や、変位を抑制

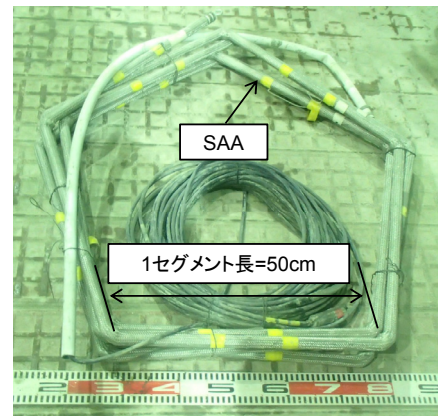


写真-1 地中変位計 Shape Accel Array

するための補助対策工を実施するタイミングが遅れて許容値を超過する事が想定される。これらを回避するためには、切羽通過前の段階で生じる沈下、すなわち切羽先行沈下を計測し、想定以上の場合には、切羽前方の地山の挙動に合わせた適切な補助対策工を施工する必要がある。また、切羽先行沈下計測は、長尺鋼管先受け工を実施した場合において、その切羽先行変位抑制効果を定量的に把握できる利点もある。

切羽先行沈下を計測する場合、地表面からの鉛直ボーリングの孔内に層別沈下計等を設置する方法が一般的である。しかし、博多駅NATMでは埋設管の敷設状況からボーリングの施工箇所が限定された。また、地下インフラ構造物が本線トンネルの直上にトンネルと平行しているため、連続的な切羽先行沈下の把握が必要とされた。そこで、坑内より計測器を切羽前方に向かって縦断的に設置し、切羽先行沈下を測定する手法を採用した。

(2) 切羽先行沈下の計測手法

切羽先行沈下計測には、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術を用いた加速度センサを内蔵する地中変位計Shape Accel Array（略称SAA、Measurand社製）を使用した（写真-1を参照）。加速度センサは重力方向（鉛直方向）からの傾きによる重力加速度の変化を静電容量の変化として捉えることができる。SAAは加速度センサを有する剛なセグメントを複数個だけ柔な「節」を介して直列に接続したケーブル状（φ25mm）の傾斜計である。このため、SAAを水平に設置した場合、セグメント毎の傾斜角度とセグメント長を掛け合わせた区間鉛直変位を累積することにより、計測器先端からの相対沈下量を知ることができる。ここで、トンネルの切羽前方の掘削影響範囲外まで計測器先端を挿入することにより、切羽先行沈下の計測が可能となる。

SAAは撤去・再設置が可能となるように、連絡坑では長尺鋼管を用いて図-5のように設置した。

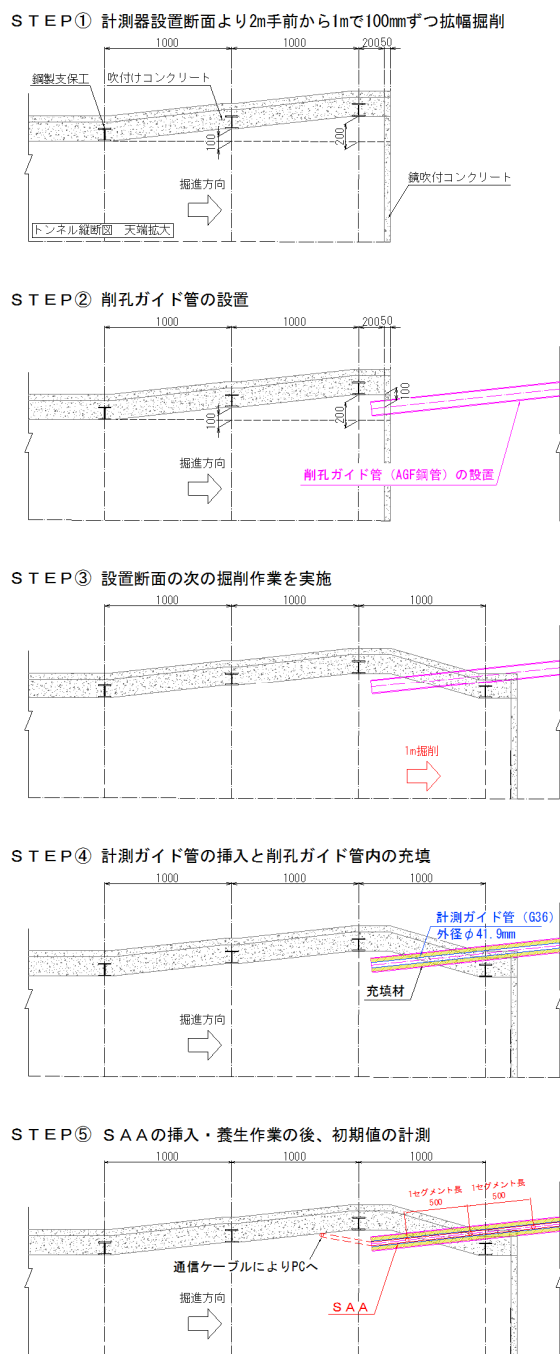


図-5 SAAの設置手順（トンネル縦断面図）

(3) 切羽押出し変位の計測目的

トンネルを掘削すると地山の応力が解放されるため、切羽の鏡面および切羽前方の地山はトンネル坑内に押出すように変形する。このうち、押出し変位量が卓越する範囲（例えば、図-3では切羽に最も近い計測点 a）は緩みを生じていると考えられる。切羽前方の地山が軟弱な場合、押出し変位量は増大し、緩み範囲や変位を生じる影響範囲も拡大する。これらが過剰に拡大すると切羽の崩落につながる可能性がある。博多駅 NATM のように土被りが小さい場合には、切羽の崩落は近接構造物や地表面に対して甚大な影響を与える。そこで、切羽前方の

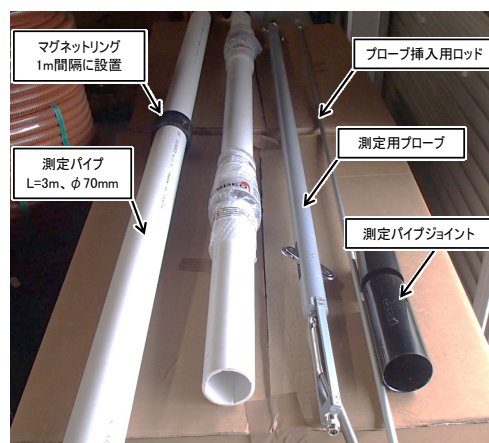


写真-2 挿入式多点変位計 T-REX

地山の緩み範囲を日々監視し、切羽の自立性と前方地山の安定性を確認しながら施工することを目的に切羽押出し変位の計測を計画した。また、この計測により緩み範囲が同定できるため、鏡面安定対策の鏡ボルトの効果的な1シフトあたりの施工延長を判断することができる。

(4) 切羽押出し変位の計測手法

切羽押出し変位の計測には挿入式多点変位測定器（T-REX, SISGEO 社製）を利用した（写真-2）。T-REX では予め削孔した計測孔内で、測定パイプの外周に設置したマグネットリングの位置をプローブの挿入により探索する。T-REX のプローブはマグネットリング 2 点間（1.0m）の相対変位を測定するように 2つの磁場を検知するセンサを内蔵する。このため、計測可能レンジは±100mm に制限されるが、精度・分解能ともに高い計測が可能である（精度±0.2mm、分解能0.01mm）。なお、マグネットリングは測定パイプと地山間に充填されたセメントモルタル等を介して、地山に固定されており、地山に追従して挙動する。

T-REX の測定パイプは図-6のように設置した。図中のSTEP③に示す位置確認計測は、測定パイプ挿入時にマグネットリングが孔壁に接触して、計測可能レンジ以上動いていないか確認する目的の計測である。計測は、初期値取得後、2回/1日の頻度で実施した。

4. 連絡坑での計測結果

連絡坑の切羽先行沈下計測では削孔ガイド管が D1・D2 層上部の遮水層を貫通するリスクを避けるために、天端 21.5° の位置に SAA を設置した。切羽押出し変位計測では、計測の作業性を考慮して、底盤より 1500mm の高さに T-REX の測定パイプを設置した（図-2を参照）。

本章では、支保工 110 基目にて SAA を設置した切羽

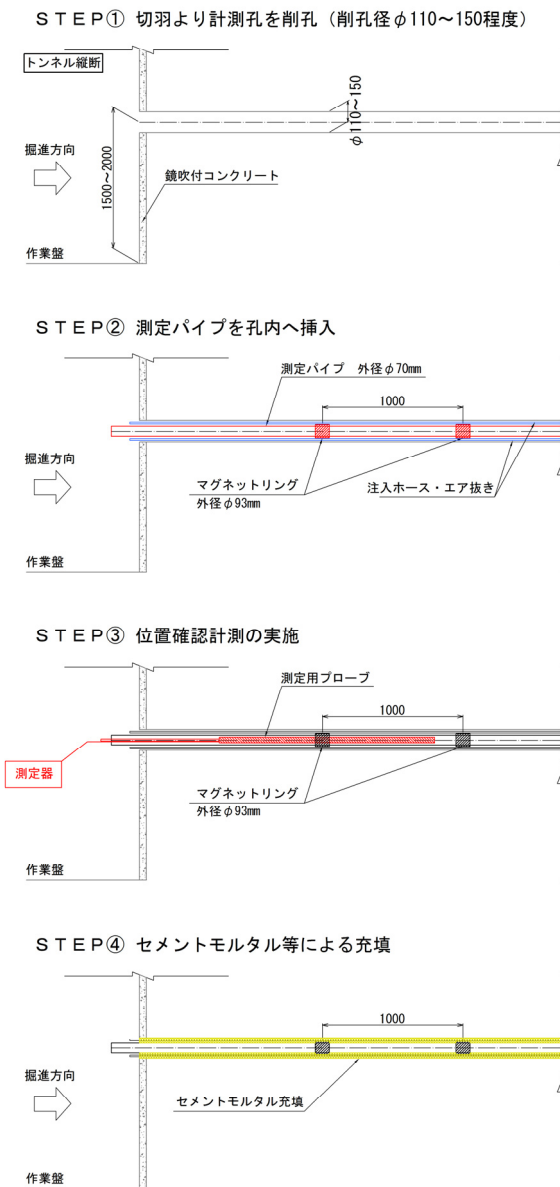


図-6 T-REXの設置手順（トンネル縦断図）

先行沈下の計測結果と、98基目・110基目でT-REX測定パイプを設置した切羽押出し変位の計測結果を示す。なお、これら計測区間での支保工間隔は1mである。

(1) 切羽先行沈下の計測結果

図-7に切羽が115基目に到達した際の沈下分布図を示す。また、図-8に118基目の沈下量の経距変化図を示す。なお、両図に示す緑線は三次元解析により算出した予測値である。これらにより、切羽先行沈下計測の精度および連絡坑周辺の地山の挙動について次のように考察した。

切羽が115基目に達した際の管口部の光波測距儀による測量結果は-0.7mmである。一方、同位置のSAAによる計測結果は-0.2mmであり、測量結果と概ね一致する。また、近接するA計測断面（119基）での天端沈下は、切羽通過後1mを初期値として-3.2mmであった。一方、図-

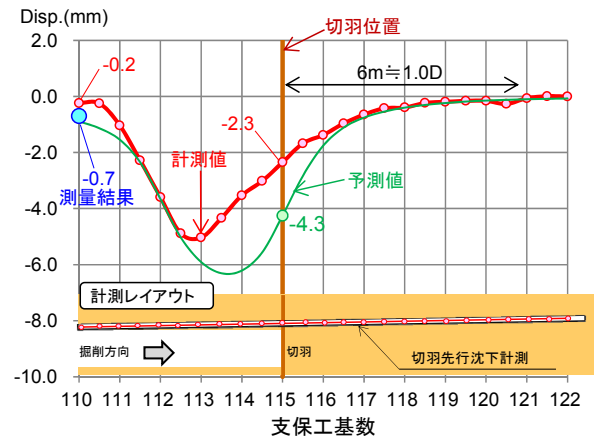


図-7 沈下分布図（切羽が115基に到達時点）

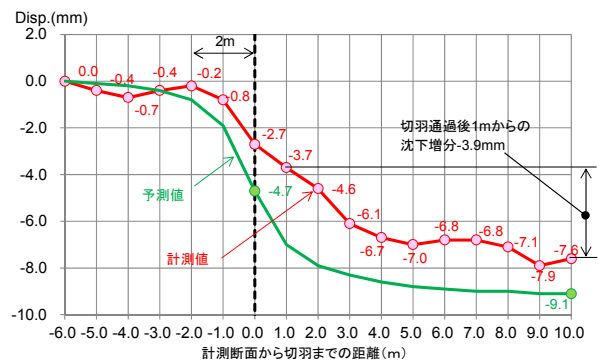


図-8 沈下の経距変化図（118基）

8では切羽通過後1mからの沈下増分は-3.9mmであり、A計測の結果と概ね整合する。このことから、SAAにより妥当な精度で切羽先行沈下を計測できたと考えられる。

図-7より、掘削に伴う沈下は切羽前方約6m（ $\approx 1.0D$ 、 $D = 6.4m$ ）から生じることがわかる。また、図-8より切羽前方2mから、沈下量が大きく増加し始めることがわかる。このような切羽前方の地山挙動は三次元解析による予測値と概ね整合している。三次元解析による予測の妥当性が確認できたため、本線トンネル部でも同様のモデルを用いた予測および計測管理が可能であると考えられる。

なお、連絡坑では切羽先行沈下が予測値よりも大幅に超過することはなかったため、切羽先行変位抑制を目的とした補助工法は採用していない（一部区間で天端防護対策としての長尺先受け工は実施した）。

(2) 切羽押出し変位の計測結果

図-9に切羽が106基および118基に達した際の切羽押出し変位分布図を示す。計測結果は1m間隔で設置したマグネットリングの区間毎の伸縮量を表す。これらの結果から押出し変位と緩み範囲について、次のように考察した。

106基の計測結果では切羽前方0.5m～1.5mの区間で27mmの伸びを観測した。切羽前方1.5m以深の磁性リングは区間変位量（絶対値）が0.4mm以下であり、ほとんど動いていない。このため、掘削に伴う影響で50cm位置にあるマグネット

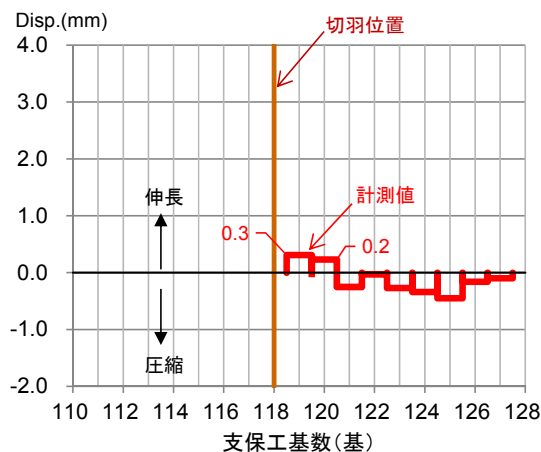
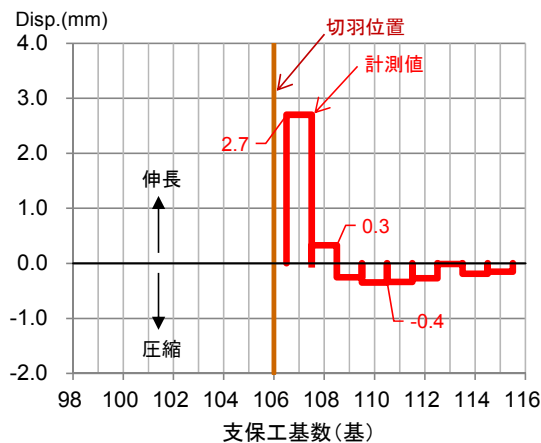


図-9 切羽押し変位計測結果
(上：切羽 106 基，下：切羽 118 基)

リングがトンネル内空側に移動したと想定される。すなわち、掘削に伴って生じた切羽前方への緩み範囲は切羽前方 0.5m～1.5m の範囲であると考えられる。

一方、118 基の計測では切羽前方 0.5m～1.5m であっても 0.3mm の伸びであり、有意な変位は発生しなかった。このため、118 基では最浅部のマグネットリング位置、すなわち切羽前方 0.5m 以内に緩み範囲は限定されていたと考えられる。これらの結果から、連絡坑では緩み範囲は概ね切羽前方

1.5m 以内であると判断した。なお、連絡坑では切羽観察の結果等から、鏡面全体の安定性は確保できていたため、鏡ボルト等の大規模な鏡面安定対策工は実施しなかった（落石対策としての鏡吹付けコンクリートは実施した）。

5. まとめ

本論文では、博多駅 NAIM の連絡坑で実施した切羽先行変位の計測手法と計測結果について説明した。切羽先行沈下の計測結果では、妥当な精度で事前の予測と概ね整合的な沈下挙動を示したことがわかった。このため、今後施工を開始する本線トンネルでも予測値を基に切羽先行沈下も含めた計測管理を行い、切羽到達前から迅速な対応を実施する計画である。切羽押し変位計測では切羽前方の緩み範囲を確認することができた。そのため、本線トンネルでも同様の計測を引き続き実施することにより、緩み範囲の監視と適切な鏡面安定対策工の選択に寄与する。

2015 年 9 月末現在、博多駅 NAIM は連絡坑の掘削を完了し、本線トンネルの施工に着手した。今後とも厳密な計測管理の下、慎重かつ安全な施工を実施する所存である。

謝辞：福岡市地下鉄七隈線延伸事業では、建設技術専門委員会（委員長：樗木九州大学名誉教授）を随時開催し、委員各位から貴重なご指導、ご支援をいただいております。この場を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 福岡市交通局：地下鉄七隈線延伸事業（天神南～博多）リーフレット、2014。
- 2) 土木学会 トンネル工学会：トンネル標準示方書〔山岳工法〕同解説、社団法人土木学会、p.254、2006。

METHODOLOGY FOR MONITORING FORWARD DISPLACEMENT AHEAD OF THE FACE IN AN URBAN TUNNEL CONSTRUCTION BY MEANS OF NATM ～ CASE STUDY OF THE HAKATA STATION CONSTRUCTION PROJECT IN THE NANAKUMA LINE OF FUKUOKA CITY SUBWAY ～

Kazuo SAKAI, Takuya TANI, Kenichi FUMIMURA, Yasuhiro HARA,
Shinnosuke GOTO and Toshiyuki HARA

We are now constructing by using NATM the HAKATA station (tentative name) in Nanakuma Line of Fukuoka City Subway. The station lies under the underground car park and a number of lifelines. Therefore, in addition to the conventional items measured in a mountain tunnel excavation procedure: the convergence of a tunnel etc., the forward settlement and longitudinal displacement ahead of the face is also monitored in order to guarantee the stability of the face and the preliminary given acceptable values for ground surface and surrounding structures. This paper describes the methodology for monitoring forward ground behaviors and the measurement results of the connection tunnel in the HAKATA station.