

地表面に民家のある超近接トンネルの施工

新城 喜弘・川崎 正和・駒谷 恒雄

これまで、用地の制約等で近接した状態で、トンネルを施工する場合、導坑を施工するめがねトンネルが採用されてきた。近年になり、めがねトンネルに対し、導坑を施工しない無導坑方式による施工事例が数例報告されている。これらのトンネルは上半先進工法で施工されている。豊見城トンネルは、坑口付近上部に民家が密集し、また、上下線が非常に近接したトンネルに早期閉合による施工システムを採用し、地表面沈下を抑制した。本稿では、豊見城トンネルにおける施工法と施工結果について報告する。

キーワード：超近接トンネル、パイプルーフ、地表面沈下

1. はじめに

近年、山岳トンネル工法の適用範囲は、トンネルの社会的なニーズの多様化によって、一層の広がりが見られ、都市部等の厳しい条件下での施工事例も増加している。さらに、用地の制約等の問題からめがねトンネルに代表されるように近接した状態でトンネルを施工する事例も多い。めがねトンネルの施工位置は、一般に都市部が多く、特に坑口部付近などは、民家等の構造物がある場合もあり、トンネル施工による地表面への影響について評価する必要がある。また、めがねトンネルの施工法については、従来、導坑先進工法により施工されていたが、最近になり導坑を施工しない無導坑方式によるめがねトンネルの施工が報告されている¹⁻³⁾。これらのトンネルは上半先進工法により施工されている。

従来、脆弱な地山の場合、加背を小さくして切羽の自立性を高めて施工されていたが、最近の補助工法の進歩に伴い、土砂地山や軟岩においても切羽を補強することにより早期に断面を閉合する施工システムが確立されつつある^{4, 5)}。本稿は、坑口付近上部に民家が密集し、また、上下線が非常に近接したトンネルの早期閉合による施工法と計測結果について報告する。

2. 工事概要

豊見城トンネルは、那覇空港自動車道を構成する豊見城東道路(L = 6.2 km)のうち1,074 mの山岳トンネル部分である。豊見城トンネル(その1)工事は、東側坑口から上り線延長L = 331.15 m、下り線延長L =

324.15 mを施工するものである。坑口部は上り線、下り線併設のめがねトンネルの構造である。坑口部より約120 m区間は、民家が密集しており、坑口直上部には県道が通っており、土被りは5 m程度である。

上記のような条件の中、トンネル掘削による地表面沈下を最小限に抑制することが必要とされた。本トンネルでは、超近接トンネルの地表面沈下を抑制するため、早期に断面を閉合する施工システムを採用した。超近接トンネルに早期閉合による補助ベンチ付き全断面工法を採用するのは日本初の試みである。本報告は、トンネルの施工方法と計測結果について述べる。なお、本トンネルの上り、下りの近接距離は坑口部で44 cmである。

(1) 工事内容

工事名：豊見城トンネル(その1)工事

発注者：内閣府沖縄総合事務局南部国道事務所

施工場所：沖縄県豊見城市字平良

工期：平成17年3月29日～平成19年1月19日

施工者：熊谷組・大米建設特定建設工事共同企業体

工事内容：トンネル延長 上り線 L = 331.15 m

下り線 L = 324.15 m

内空断面 上り線 A = 76.6 m²

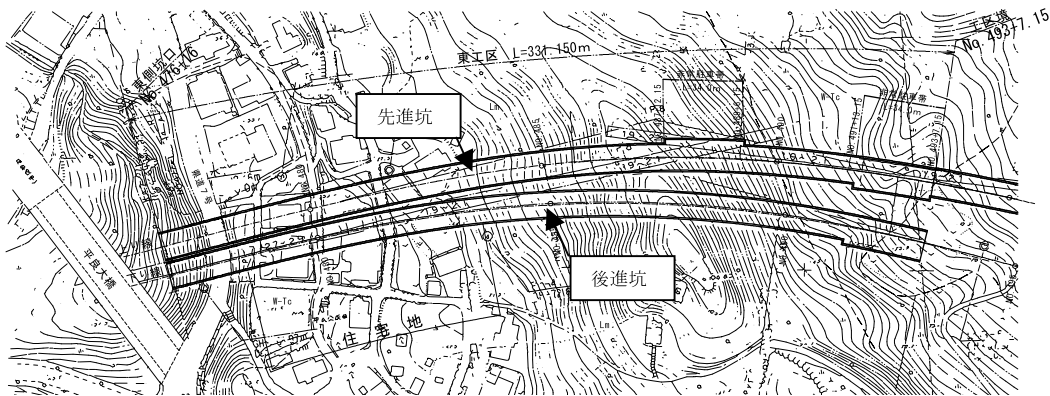
下り線 A = 66.1 m²

掘削工法 補助ベンチ付全断面工法

補助工法 パイプルーフ工、注入式長尺先受工、注入式長尺鏡補強工、注入式ロックボルト工



図一 位置図



図二 当工区の平面図

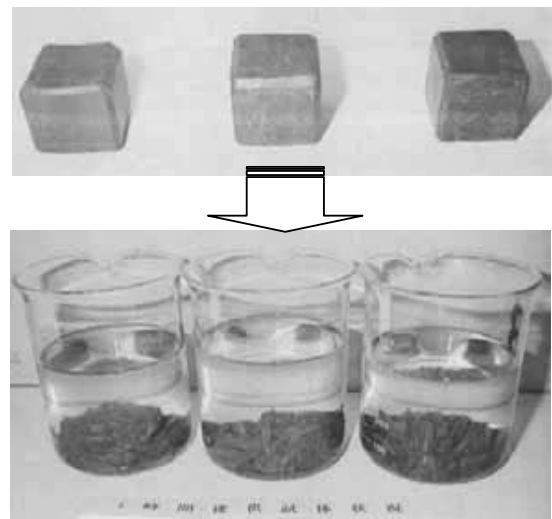
(2) 地形地質

(a) 地形概要

当工区の平面図を図一 2 に示す。坑口付近に平良大橋があり計画路線はその橋の下の谷部をくぐり、トンネル区間となる。トンネルは斜面をやや斜交する形で入り、坑口から 10 m 進んだ直上部には県道 7 号線が走る。この道路とトンネルの被りは約 5 m 程度 (0.4D : D はトンネル掘削径) で、道路下 1.5 m には通信ケーブルが埋設されている。さらに TD20 ~ 130 m 区間は住宅地で、この区間もまだ小土被り区間であり土被りは 10 ~ 20 m (1 ~ 2D) 程度である。TD130 ~ 331 m (工事終点) 区間の地表部には特に構造物は無く、TD210 m 付近で最大土被り (55 m) それ以降は土被りは小さくなり、TD300 m 付近で 20 m (2D) 以下となる。

(b) 地質概要

当工区の地質縦断図を図一 3 に示す。地質は島尻泥岩が主体であり、その上部に琉球石灰岩が分布して



写真一 1 浸水崩壊度試験 (1 時間)

いる。トンネル掘削部の島尻泥岩は、一軸圧縮強度が約 2 N/mm² であり、水による強度低下、空気に接触することによる劣化が著しい地山 (写真一 1) で、薄

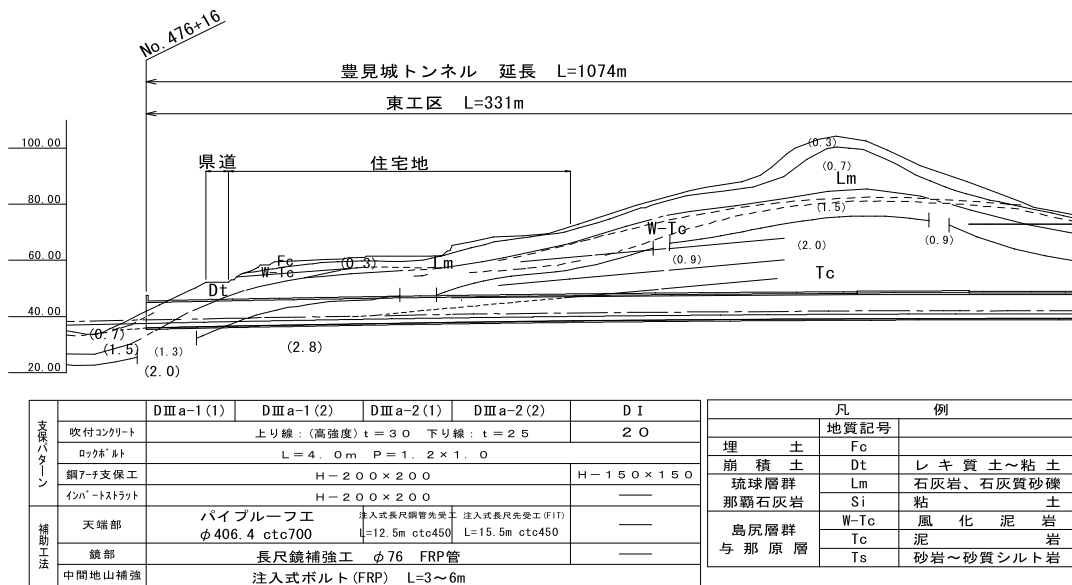


図-3 当工区の地質縦断面図

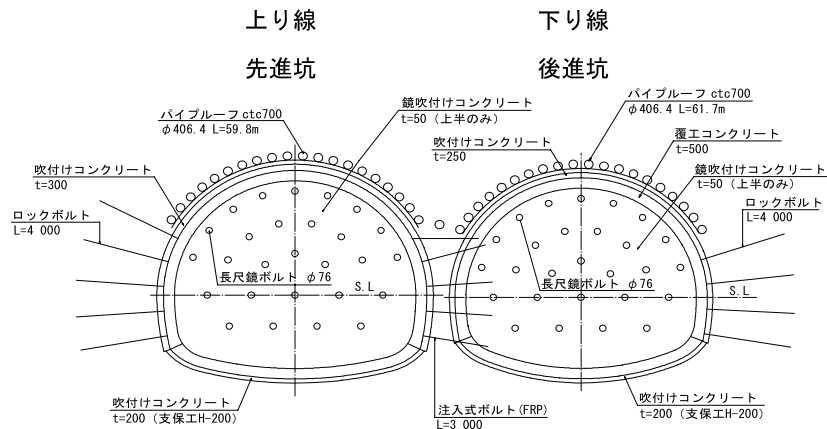


図-4 支保工断面図 DⅢa-1(1)

層の砂岩層が挟在する。泥岩は亀裂があり、随所に鏡肌が認められる。また、琉球石灰岩は、透水性が高く、地下水が存在しているため、トンネル掘削によりその地下水が泥岩に何らかの悪い影響を及ぼすことが懸念された。

3. 施工方法

(1) 施工方法の検討

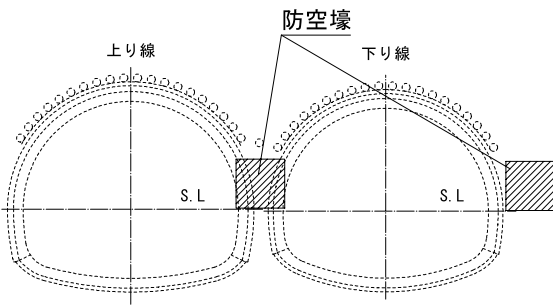
工事概要で述べた条件を踏まえ、当初設計を照査し数値解析により施工法の検討を行った。その結果、地山の緩み、地表面沈下の抑制効果を期待し、掘削工法を上半先進ベンチカット工法から補助ベンチ付全断面工法に変更し、トンネル断面の早期閉合のため、吹付けコンクリートによるインバートストラットを採用した。また、全断面工法により加背が大きくなるため切

羽の安定対策工として長尺鏡補強工 (FIT) を併用した。図-4 にパターン図を示す。

(2) 施工手順

(a) 坑口切土

トンネルの施工にあたり坑口の切土工を行った。切土部の地質は崩積土とビーチコーラルによる埋土であったため、法面崩壊対策工としてロックボルト工 (1本/2m²) とモルタル吹付け (t=5cm) を施工した。また、掘削前の伐採時に不発弾が発見されたことから、磁気探査による不発弾の有無を確認しながらの作業であった。磁気探査機は1mの範囲しか感知しないため、掘削深度が2m毎のステップ掘削となった。不発弾の確認も無く施工を進めていたが、掘削が残3mのところセンターピラー部に防空壕が発見された。中には短刀、手榴弾等が発見され沖縄での先の大戦が



図一五 防空壕位置

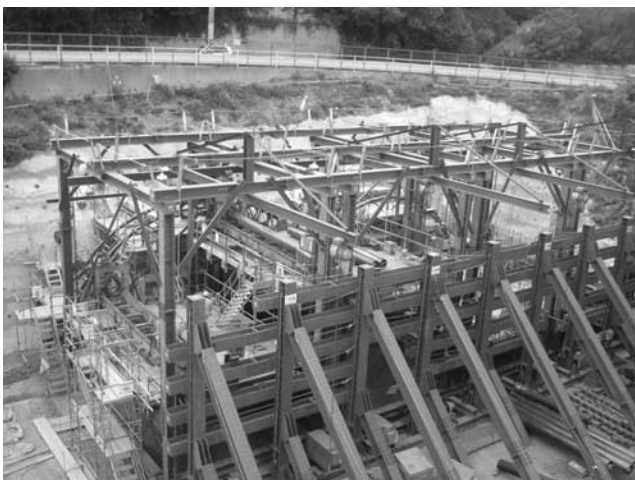


写真一 防空壕と短剣

認識させられた。防空壕は豊見城市による調査・確認の後、エアモルタルにて充填した（下り線右土平部（SL 付近）にも防空壕が確認された）。（図一五、写真一）

(b) パイプルーフ工

パイプルーフ工の準備工として、基礎工、仮設構台（220 ton）を築造した。パイプルーフの削孔は全 41 本（ $L = 60\text{ m}$ ）を 4 班体制で行った。各班毎に 3 本



写真一三 パイプルーフ施工状況

削孔鋼管セット→セメントベントナイトによる管内充填というサイクルで作業を進め、削孔はトンネル断面を侵さないようトランシットにより方向を確認しながら行った。偏芯誤差は最大で 100 mm（許容値 150 mm）であった。構台設置・削孔・撤去搬出まで要した期間は 3.2 ヶ月であった。



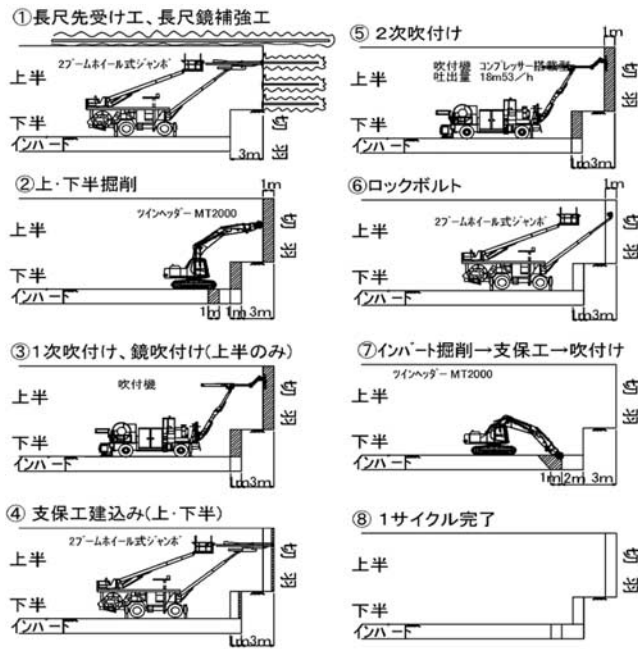
写真一四 坑口部施工状況

(c) 坑口付け

坑口付けは、先に上り・下り線の上半の 10 基を建て込んだ。その後、上り線の下半掘削（ベンチ長 3 m）・鏡補強ボルト（FIT 工法）・一次インバートを施工し、下り線の方も同様に下半掘削～一次インバートまで施工をした。上下線とも、坑口付け部を一次インバートの施工と、鏡補強工まで完了し、坑口部の安定を確認してから、上り線の本掘削の施工を開始した。

(d) 本坑掘削

補助ベンチ付全断面工法によるトンネル掘削は、ベンチ長を 3 m とし、インバートストラットは、SL～インバート下端が $h = 4.2\text{ m}$ と掘削高が高いため下半支保工より一週間遅れの施工とした。また、切羽の崩落対策として、FIT 工法による注入式長尺鏡補強工と鏡吹付けを行ったが、これらの対策工を施した区間では大きな切羽の崩壊は無く、比較的安心して掘削作業を進められた。切羽は、薄層の砂岩層が挟在しており、割れ目には所々に油目が見られた。鏡吹付けは全区間の切羽で実施したが、注入式長尺鏡補強工が無い区間では、切羽の崩落がたびたび見られたことから、注入式長尺鏡補強工の効果は十分にあったと考える。先受け工は、坑口から TD66 m はパイプルーフ工、TD66～93 m（ $L = 27\text{ m}$ ）は AGF-Woo 工法による長尺鋼管先受け工、TD93～129 m（ $L = 36\text{ m}$ ）は FIT 工法による長尺先受け工を施工した。また、先進坑掘削時に後進坑側の側壁部（センターピラー個所）に注入



図一六 施工サイクル図



写真一七 全断面の早期閉合状況

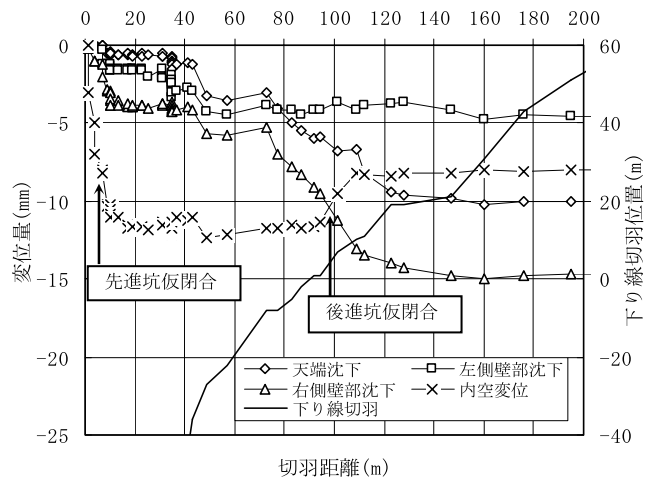
式ロックボルトを打設した。注入材はシリカレジンであったが、後進坑掘削時には、地山の割目沿いにそのシリカレジンの注入跡が見られた。

4. 計測

(1) A計測

(a) 先進坑

先進坑である上り線の変位は、上り線のみを掘削した際には一次インバート施工後、5m程度進行すると収束傾向を示しているが、後進坑(下り線)掘削時は計測点から下線の切羽が10m程度進行した時点で収束傾向を示している。また、変位量は、天端沈下、内空変位とも15mm以内で収まり小さな変位量で収束している。



図一七 内空変位経時変化図(先進坑)

(b) 後進坑

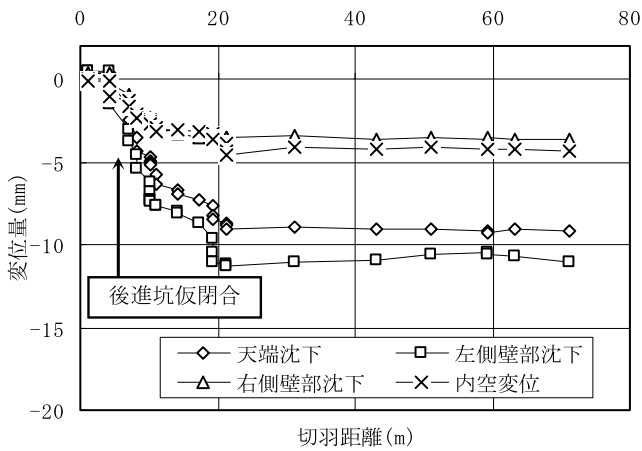
後進坑である下り線の変位は、下り線の一次インバート施工後、5m程度進行すると収束傾向を示している。管理目標値は内空変位 = 60 mm, 天端沈下 =



写真一五 長尺鏡補強工



写真一六 インバートストラット

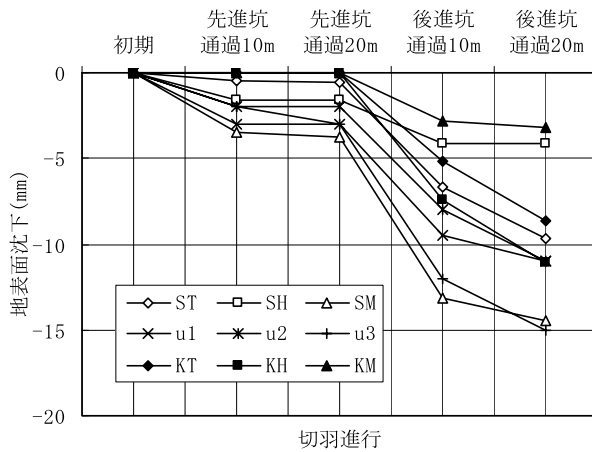


図一8 内空変位経時変化図（後進坑）

30 mm 計測値は、いずれも 15 mm の小さな変位量で収束している。

(2) 地表面沈下

地表面沈下測定の結果を図一9に示す。先進坑掘削時の地表面沈下量は切羽が2D程度進行すると最大8mmで収束している。後進坑の掘削が始まると再び沈下し始め、切羽が2D程度進行すると、ほとんどの測点で収束する。2測点だけが4D程度進行したところで収束したが、最大沈下量は22mmであった。地表面沈下の横断分布によると、沈下量が大きい測点は、先進坑である上り線の中心から右側の後進坑側のセンターピラー部に発生する傾向にあったが、全ての測点で管理目標値 = 30 mm 以内で地表面沈下量を抑える



図一9 地表面沈下量（横断分布）

ことができた。

(3) B計測

(a) トンネル支保応力

B計測にて各種支保工に作用した応力を表一1に示す。鋼アーチ支保工応力、吹付けコンクリート応力、ロックボルト軸力いずれも管理目標値以下であったことから、トンネルの安定性は確保されていると判断される。

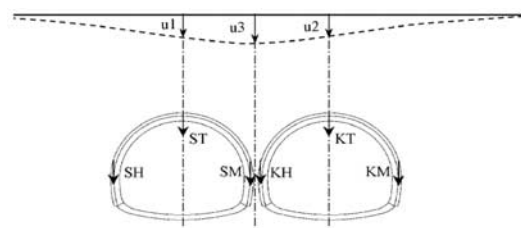
5. 数値解析

(1) 解析モデル

解析モデル（トンネル周辺）は、土被りは約14m、トンネル間の離隔距離は約0.85mである。解析領域は、トンネル側方領域を5D、下部領域を1Dとした。境界条件は、下部解析領域がX、Y軸方向固定、側部解析領域がX方向固定、Y方向ローラとした。地山の物性値は、地山試料試験の結果を参考に決定し、非線形弾性解析とした。長尺鋼管先受け工は、施工箇所地山の变形係数を増加させることでモデル化した。また、応力開放率は長尺鋼管先受け工、長尺鏡補強工を施工することを加味して20 - 80%とした。

(2) 解析結果

表一2に先進坑完了時および後進坑完了時におけるトンネル沈下の解析値と実測値の比較を、また表一



表一1 B計測結果

	上り線	下り線	管理目標値	応力極性
鋼アーチ支保工応力 (N/mm ²)	- 150.2	- 78.5	210	+ : 引張, - : 圧縮
吹付けコンクリート応力 (N/mm ²)	+4.2	+4.7	上り線 : 18, 下り線 : 9	- : 引張, + : 圧縮
ロックボルト軸力 (kN)	+25.7	+15.0	180	+ : 引張, - : 圧縮

表一 2 実測値と解析値との比較 (トンネル沈下)

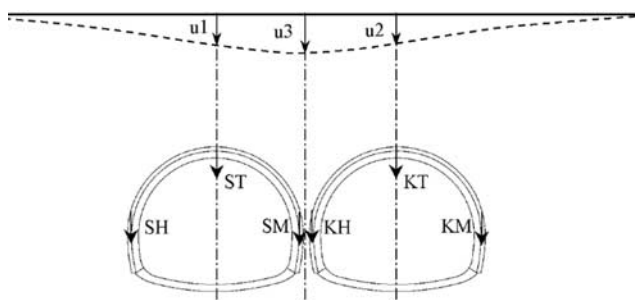
	ST	SH	SM	KT	KH	KM
先進坑完了時	- 0.6 (- 6.6)	- 1.6 (- 2.0)	- 3.8 (- 1.6)	—	—	—
後進坑完了時	- 9.7 (- 9.6)	- 4.1 (- 3.2)	- 14.5 (- 5.4)	- 8.6 (- 7.4)	- 11.1 (- 2.4)	- 3.2 (- 1.5)

※上段：実測値 下段：解析値 (mm)

表一 3 実測値と解析値との比較

	u1	u2	u3
先進坑完了時	- 3.0 (- 6.4)	- 2.0 (- 3.2)	- 3.0 (- 5.2)
後進坑完了時	- 11.0 (- 10.0)	- 11.0 (- 9.7)	- 15.0 (- 10.8)

※上段：実測値 下段：解析値 (mm)



図一 10 表中の沈下量の位置

3に地表面沈下の解析値と実測値の比較を示す。表中の沈下の位置は、図一10の位置である。先進坑完了時については、トンネル沈下、地表面沈下ともトンネルの天端沈下に差異が見られるものの概ね今回行った数値解析による沈下挙動の予想値と同様の結果であった。後進坑完了時については、概ね沈下挙動の説明は可能と考えられるが、トンネル沈下のSMとKHの値、すなわち両トンネルの中心側の沈下について実測値と解析値に差異が見られる、また、地表面沈下についても、u3すなわち両トンネルの中心部の地表面沈下に同様の差異が見られる。同様工種において数値解析による地表面予測の精度を向上させるために両トンネル中心部下部の地山の評価、支保の閉合距離による影響等について検討が必要と考えられる。

6. おわりに

豊見城トンネルは、先進坑である上り線は平成18年2月に掘削を開始し平成18年8月に貫通した。後進坑の下り線は平成18年4月に掘削を開始し、平成18年10月に工事終点に到達した。今回は、超近接めがねトンネルを補助ベンチ付全断面工法で掘削したが、トンネル内空、地表部の変状を小さく抑制し無事掘削することができた。今回の報告が、今後のめがねトンネルの計画に一事例として参考になれば幸いである。

最後に、本工事に対して豊見城トンネル技術検討委員会委員 (委員長 今田徹 東京都立大学 名誉教授) および各関係機関、協力会社の皆様から貴重なご指導・ご意見を頂いた。本紙面をお借りして感謝の意を表す。

J[C]M[A]

《参考文献》

- 1) 石川靖治・上村正人・米田裕樹・中川浩二：斬新な設計・施工のめがねトンネルで市街地に挑む、トンネルと地下, 34 [5], pp.35-44 (2003)
- 2) 古川幸則・黒田二郎・前原弘光・鈴木雅行：無導坑めがねトンネルの設計と施工, 第52回施工体験発表会 (山岳), pp.49-56 (2003)
- 3) 高橋明生・木村文憲・本藤 敦・櫻井孝臣：導坑も先進坑覆工もなしでめがねトンネルを施工, トンネルと地下, 36 [2], pp.17-26 (2005)
- 4) 武友憲重・久保田英雄・西村誠一・安田 亨：未固結地山における超大断面トンネルの施工, トンネルと地下, 36 [5], pp.7-15 (2005)
- 5) 河村洋治・吉光康夫・尾畑 洋・中川浩二：脆弱化地盤の地下水を制して変電所直下を突破, トンネルと地下, 37 [9], pp.7-15 (2006)

【筆者紹介】

新城 喜弘 (しんじょう よしひろ)
 沖縄総合事務局
 那覇空港自動車道出張所 所長



川崎 正和 (かわさき まさかず)
 沖縄総合事務局
 那覇空港自動車道出張所 技術第一係長



駒谷 恒雄 (こまや つねお)
 熊谷組・大米建設共同企業体
 豊見城トンネル作業所 所長

