

覆工コンクリートの品質向上と急速施工の両立に向けた取り組みについて

北村 義宜¹・手塚 康成²・佐藤 崇洋³・松本 修治⁴

¹正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

E-mail:y-kitamura@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)

E-mail:tezuka-yasunari@kajima.com

³正会員 鹿島建設株式会社 東北支店 (〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町1-27)

E-mail:satot@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:matsushu@kajima.com

国道45号唐丹第3トンネル工事では、2基の型枠（アーチフォーム）と1基の移動台車（ガントリー）を交互に使用して型枠存置時間を延長することで、覆工コンクリートの品質を向上させるツインアーチフォーム（TAF）工法で培った技術を活用し、同工法にアーチフォームを1基追加して覆工コンクリートの施工速度を向上させるトリプルアーチフォーム（TrAF）工法を適用した。同工法により、型枠存置による初期養生をTAF工法と同等となる約3日間（60時間）を確保しながら毎日打設することが可能となり、完全週休2日の施工で最大月進288mを達成した。本稿では、TrAF工法の概要と施工実績を紹介するとともに、室内試験や原位置における各種計測を通じて、覆工コンクリートの品質を検証した結果を報告する。

Key Words : tunnel lining concrete, Triple Arch Form (TrAF) method, rapid construction, lining quality

1. はじめに

三陸沿岸道路（三陸縦貫自動車道、三陸北縦貫道路、八戸・久慈自動車道）は、宮城、岩手、青森各県の太平洋沿岸を結ぶ延長359kmの自動車専用道路で、東日本大震災からの復興に向けたリーディングプロジェクトとなる復興道路である。国道45号唐丹第3トンネル工事は、三陸縦貫自動車道の（仮称）釜石南IC～釜石JCT間に位置する延長L=2,998m、幅員W=12.0m、内空断面積94.9m²の長大トンネル工事である。唐丹第3トンネル工事の工事概要とトンネル諸元を表-1と表-2に示す。

表-1 工事概要

工事名	国道45号 唐丹第3トンネル工事
工事期間	2014. 3. 14～2018. 3. 30
工事場所	岩手県釜石市唐丹町字大曾根～甲子町
発注者	国土交通省 東北地方整備局
受注者	鹿島建設株式会社

表-2 トンネル諸元

工区延長	本坑2,998m 付替トンネル240.6m
掘削断面積	本坑94.9 m ² 付替トンネル75.2m ²
非常駐車帯	6か所
坑門工事	2基

当工事では覆工コンクリートのひび割れ抑制が命題であり、ツインアーチフォーム工法¹⁾（以下、TAF工法と称す）、中流動コンクリート、膨張材等の採用により覆工コンクリートの高耐久化を実現することとしたが、トンネルの工事着手が遅れる見通となったため、工程の回復を図ることも新たに求められた。そこで、掘削機械を大型化・複数化することで工程短縮を図り、2016年7月14日に掘削断面積110m²以上の大断面トンネルとしては国内最高記録となる月進270mを達成した。さらに、TAF工法を発展させたトリプルアーチフォーム工法（以下、TrAF工法と称す）を採用し、型枠存置による初期養生をTAF工法と同等となる約3日間（60時間以上）を確保しながら毎日打設することで、完全週休2日の施工で最大月進288mを達成した。本稿では、覆工コンクリートの品質向上と急速施工を両立するTrAF工法の概要と施工実績について述べ、室内試験や実地試験を通じてTAF工法と同等の品質向上効果が得られることを確認したので、これらの結果を説明する。また、覆工コンクリート打設時の各種挙動計測を通じて、TrAF工法の適用がコンクリートの品質に与える影響を考察した結果についても紹介する。

2. トリプルアーチフォーム(TrAF)工法の概要

(1) TAF工法の概要と高速施工に向けた課題

従来の覆工コンクリートは、打設後18時間程度で脱型することが通例であるが、TAF工法は型枠存置を66時間以上確保し、コンクリートの強度増進や表層の緻密化により長期耐久性を向上させる工法である。図-1にTAF工法のフローを示す。この工法を用いれば、覆工コンクリートの打設サイクルは2日に1回となるため、覆工の工程短縮を図る場合には品質を確保しながら毎日打設を実現する必要があった。

(2) トリプルアーチフォーム(TrAF)工法の概要

覆工コンクリートの品質を確保しつつ高速施工による更なる工程短縮を実現するために、型枠存置時間の延長による品質向上効果を維持しながら、3つのフォームと1つのガントリーにより覆工コンクリート打設を毎日行うTrAF工法(写真-1参照)により施工した。図-2にTrAF工

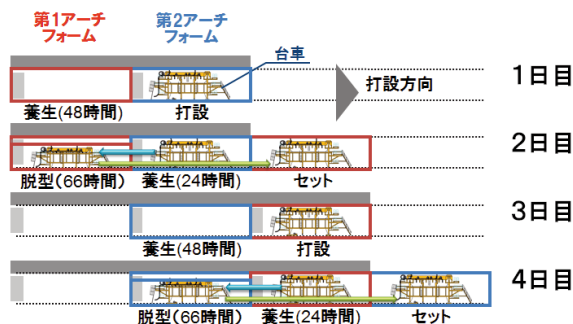


図-1 TAF工法の施工フロー



写真-1 TrAF工法の施工状況

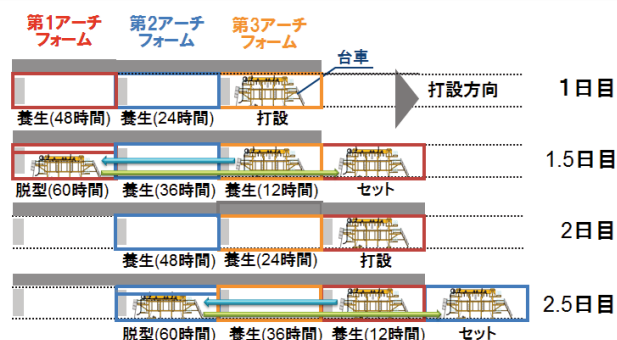


図-2 TrAF工法の施工フロー

法のフローを示す。TrAF工法は、前々日に打設した第1フォームを型枠存置60時間で脱型したのち、養生中の第2、第3フォームの下をくぐり、前方へ送り出す施工サイクルとなっており、TAF工法と比較して覆工コンクリートの施工速度を2倍に高めることができる。

3. 覆工コンクリートのひび割れ抑制と高速施工の両立方策

当工事では覆工コンクリートの目標ひび割れ安全係数を $\gamma_{cr} \geq 1.4$ とすることが求められた。覆工コンクリートは巻厚が400mm程度であり、トンネル横断方向に長い構造であることから、乾燥収縮がひび割れ発生 of 主な要因になると考えられた。このため、ひび割れ発生 of 抑制策としてa)収縮低減剤の使用とb)膨張材の使用について、現地の実情を考慮して両案の適否を比較検討した。

a) 収縮低減剤の使用

水和阻害に伴う凝結遅延や初期強度不足、凍結融解抵抗性の低下が懸念された。現場が寒冷地であることを勘案し、収縮低減剤の採用は不適であると判断した。

b) 膨張材の使用

膨張材は硬化初期段階で膨張するため、長期にわたって収縮を低減できること、膨張材は材齢初期における湿潤養生が重要であるが、今回はTAF工法を採用するため初期の湿潤養生が可能となることから、現地での採用に適していると判断した。

上述した比較検討の結果を勘案し、覆工コンクリートに膨張材を添加することによるひび割れ抑制効果を温度応力解析により検証した。なお同解析では、覆工コンクリートの打設延長を10.5mとする場合と工程短縮を目的として打設延長を12.5mとする場合についても比較を行った。最小ひび割れ安全係数の計算結果を表-3に示す。

膨張材を添加しない場合は、最小ひび割れ安全係数はインバート有パターンで0.85、インバート無パターンで1.15となり、目標ひび割れ安全係数1.4を下回る結果となった。膨張材を添加する場合は最小ひび割れ指数が目標値を上回る結果となり、スパン長10.5mと12.5mで最小ひび割れ指数に大差がないことが分かった。このため、覆工コンクリートに膨張材を添加するとともに、打設延長を12.5mに設定し、覆工コンクリートのひび割れ抑制と高速施工を同時に実現することとした。

表-3 ひび割れ安全係数の算出結果

打設延長	膨張材	最小ひび割れ安全係数 γ_{cr}	
		インバート有	インバート無
10.5m	無	0.85	1.15
10.5m	有	3.30	6.13
12.5m	有	3.09	6.01

4. TrAF工法の高速施工実績

TrAF工法を昼夜勤務体制で施工する場合と昼のみの勤務体制で施工する場合の施工サイクルと必要人員に関する比較検討を行った。昼夜勤務体制で施工する場合は作業員が12名必要であったのに対して、昼のみの勤務体制で施工する場合は10名の作業員数で実施できることを確認した。また図-3に示すように、ガントリーダウンまでの静置時間(養生時間)は昼夜勤務体制で10時間であったのに対し、昼のみの勤務体制では12.5時間を確保することも分かったため、昼のみの勤務体制でTrAF工法による覆工コンクリートの打設を継続した。

当初計画の覆工コンクリートの打設工程は105m/月であったが、TrAF工法による打設では完全週休2日を維持した状況で最大288.19m(12.53m×23日)/月、平均250m/月を達成した。当該工事で別途実施した掘削の高速施工による切羽進行270m/月と同等の施工速度となり、高い品質を維持しながら、トンネル工事全体の工程短縮を実現できた。

5. 透気係数と脱型時間の関係に関する室内試験

TAF工法の型枠存置時間の標準は66時間であるが、

TrAF工法の場合、ガントリー離脱～脱型・移動・セットまでを半方で行う必要があるため、サイクル上の型枠存置時間は60時間が標準となる。そのため、脱型時間が表層品質に及ぼす影響として透気係数に着目し、室内試験により脱型時間と透気係数の関係性について事前に確認した。

室内試験で使用した試験体の形状及び寸法を図-4に示す。試験体の寸法は、縦300mm、横300mm、高さ300mmとして、コンクリートを打ち込む際に側面となる1面のみを鋼製型枠とし、その他の5面については、厚さ500mm以上の発砲スチロールで覆った。この試験体は、連続する覆工コンクリートの一部を再現したものであり、評価対象面(300mm×300mm)に対する奥行方向の寸法300mmは、覆工コンクリートの覆工厚さを再現している。

温度 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、60%RHの室内において、上述の6体の試験体に中流動コンクリートを打ち込んだ後、それぞれ打込み完了から、18時間、54時間、60時間、66時間、72時間、96時間が経過した時点で脱型し、その後材齢7日と28日において、それぞれの試験体の評価対象面における透気係数をTORRENT法により測定した。コンクリートの打込み完了から脱型までの時間と透気係数の関係を図-5に示す。同図より、18時間脱型では透気係数が「劣」であるのに対し、54時間脱型では「良」に近い「一般」となり、54時間脱型から96時間脱型にかけては

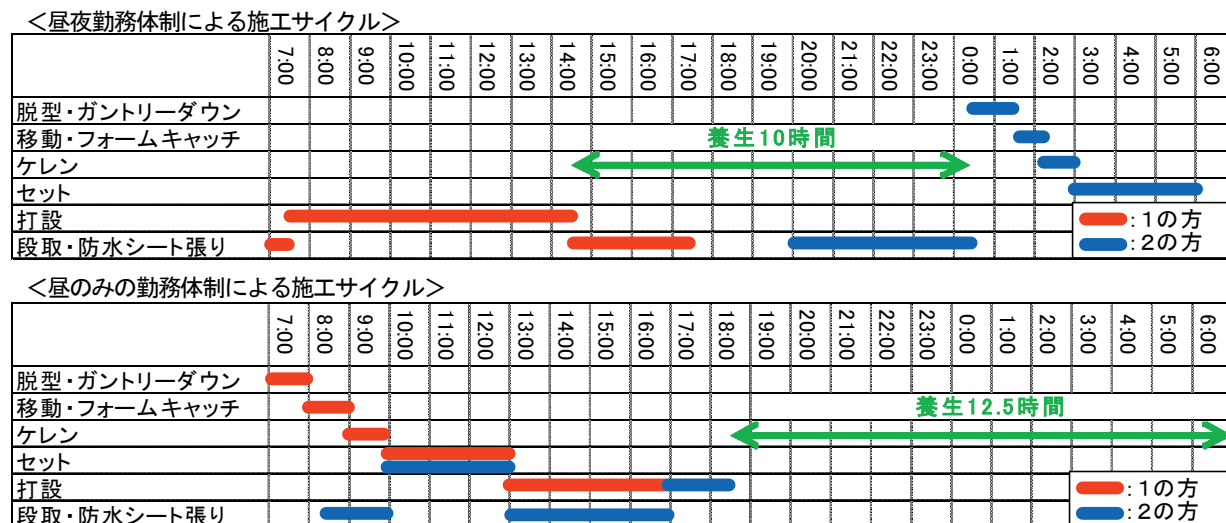


図-3 TrAF工法の施工サイクル

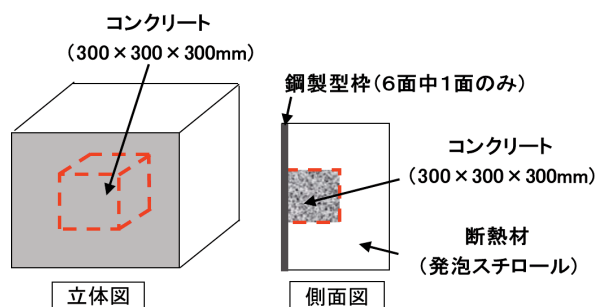


図-4 試験体の形状及び寸法

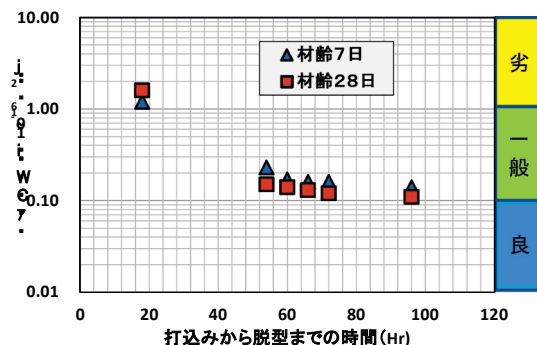


図-5 室内試験における透気係数の測定結果

透気係数が緩やかに低下する傾向となった。以上より、コンクリートの打込み完了から脱型までの時間を54時間以上とすれば、それより長時間型枠を存置した場合と同等の表層品質の改善効果が得られたため、TrAF工法はTAF工法と同等の表層品質が確保できると判断した。

6. 覆工コンクリート打設工法と透気係数の関係

覆工コンクリートの表層品質を検証すべく、従来工法(18時間脱型)とTAF工法およびTrAF工法により覆工コンクリートを打設する区間を試験的に設け、それぞれの工法を用いた際の透気係数をTORRENT法により測定した。測定位置はトンネル横断方向がアーチ天端部とスプリングライン（以下、S.L.と称す。）の2カ所、トンネル縦断方向は、既設部、中間部、棲部の3カ所の計6カ所とした（図-6参照）。

各区間における透気係数の測定結果を図-7に示す。従来工法とTAF工法、TrAF工法の透気係数を比較した結果、従来工法の透気係数はほとんどが「一般」ランクであるのに対して、TAF工法とTrAF工法の透気係数はほぼ等しく「良」～「優」ランクとなる結果が得られた。両工法とも目標値（「良」ランク）以上となったため、TAF工法とTrAF工法は、同等の品質向上効果を発揮することが確認できた。

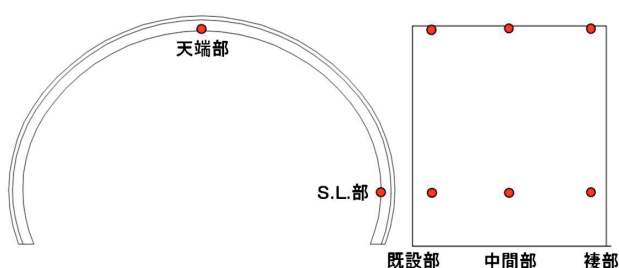


図-6 透気係数の測定位置

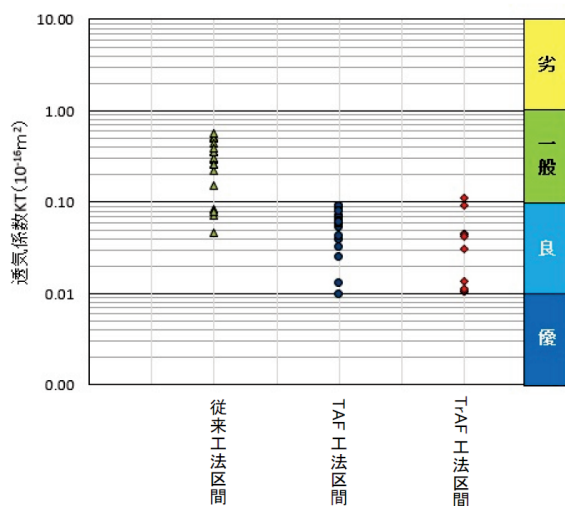


図-7 透気係数の測定結果

7. 覆工コンクリート施工時の挙動計測を通じたひび割れ発生の可能性に関する考察

(1) 挙動計測の目的

TAF工法やTrAF工法は通常のセントルと異なり、型枠となるアーチフォームとアーチフォームを支持するガントリーとで構成されている。TrAF工法では覆工コンクリートの打設を開始してから概ね24時間後にアーチフォームとガントリーを分離し、60時間後にアーチフォームを脱型するまでは、アーチフォームが独立して覆工コンクリートを支持する機構となっている。

アーチフォームとガントリーを分離する際に覆工コンクリートに作用する荷重が変化することで、覆工コンクリートにひび割れ等の不具合が発生することが考えられるため、覆工コンクリートやアーチフォーム、ガントリーを対象とした挙動計測を覆工コンクリートの打設開始からガントリー分離までの期間で実施し、計測結果の検証を通じてひび割れが発生する可能性を考察した。

(2) 計測ケース

覆工コンクリートのひび割れは、コンクリートの打ち継目付近で発生することが多く、これを抑制するために打ち継目に縁切り材を設置するのが効果的とされている。またコンクリートに膨張材を添加することでひび割れを抑制することも知られている。本検証では覆工コンクリート施工時の挙動計測に加えて、縁切り材と膨張材によるひび割れ抑制効果についても考察することを企図し、表-4に示す計測ケースを設定した。

(3) 施工時挙動の確認目的と計測機器配置

覆工コンクリート打設時の覆工コンクリートおよびアーチフォームの挙動を確認するため、挙動の確認目的に応じて表-5に示す計測項目を設定した。

表-4 計測ケース

ケース番号	膨張材	縁切り材
ケース1	×	○
ケース2	×	×
ケース3	○	○
ケース4	○	×

表-5 覆工コンクリート打設時の挙動確認項目と計測項目

挙動確認目的	計測項目	計測機器
アーチフォームの変形モード	① 上半フォーム変位	レーザー距離計 ダイヤルゲージ
	② 脚部フォーム変位	
アーチフォームの応力状態	③ フォーム応力	ひずみゲージ
	④ ジャッキ軸力	
コンクリート内部圧力の上昇	⑤ 面盤圧	土圧計
打ち継目のコンクリート変位	⑥ 継目変位	継目計

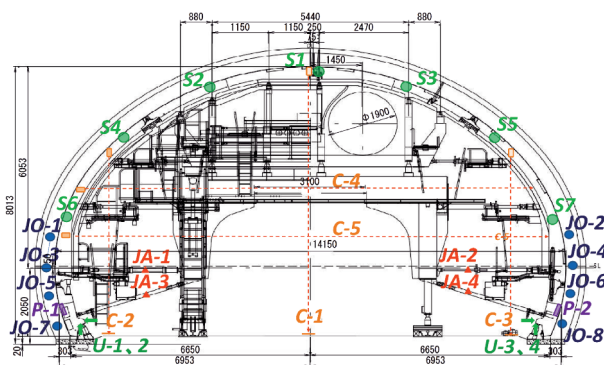
アーチフォームやガントリーの構造および現地の施工状況を勘案し、図-8に示す位置に計測機器を配置した。表-5に示した計測機器の多くは3つのアーチフォームのうちの1つのみに設置した。このためケース1とケース4はすべての項目を計測したが、ケース2とケース3では④ジャッキ軸力と⑥継目変位以外の計測が行えなかった。ケース番号に応じた計測項目は表-6に示すとおりである。

(4) コンクリート打設中のアーチフォーム挙動

覆工コンクリートをSL付近まで打設した時点と打設を完了した時点の2時点におけるアーチフォームの挙動比較することで、覆工コンクリート打設中におけるアーチフォームの挙動を確認した。なお、ケース1とケース4でアーチフォームの挙動は概ね同じであったため、ここではケース1の計測結果を記載する。

a) アーチフォームの変形挙動

覆工コンクリートの打設を開始してから完了するまでの2時点におけるアーチフォームの変形量を図-9に比較した。アーチフォームとガントリーが分離する構造となっているため、覆工コンクリートの打設中はアーチフォームに側圧が作用し、上方に突きあがるような変形が生じたが、打設完了時には天端にて発生した変位が概ねキャンセルされ、側壁位置にて内空側に発生した変位が残留することが分かった。



記号	計測項目	計測数量
△	JA ジャッキ軸力	4か所(上半)
●	S フォーム応力	7か所(上半)
→	C 上半フォーム変位	9測線(上半)
●	JO 継目変位	8か所(左右下半)
■	P 面盤圧	2か所(左右脚部)
■	U 脚部フォーム変位	2か所(左右脚部)

図-8 計測機器配置図

表-6 計測ケースと計測項目の対応

ケース番号	計測項目
ケース1 ケース4	①上半フォーム変位 ②脚部フォーム変位 ③フォーム応力 ④ジャッキ軸力 ⑤面盤圧 ⑥継目変位
ケース2 ケース3	④ジャッキ軸力 ⑥継目変位

b) アーチフォームの発生応力

覆工コンクリートの打設を開始してから完了するまでの2時点におけるアーチフォームの発生応力を図-10に比較した。覆工コンクリートの打設中はアーチフォームに側圧が作用したことにより、SL付近に引張応力が発生し、肩部から天端にかけては概ね圧縮応力が卓越した。また打設完了時には全周にわたって圧縮応力が付加され、肩部付近における圧縮応力が最も大きくなった。

(5) ガントリーダウン時のアーチフォーム挙動

ガントリーをアーチフォームから分離する前後の2時点におけるアーチフォームの挙動を比較することで、ガントリーの分離により覆工コンクリートにひび割れを生じさせる過大な荷重が作用するかどうかを検証した。

ガントリー分離前は図-11に示すようにガントリーからジャッキを介してアーチフォームに押付け力が作用し

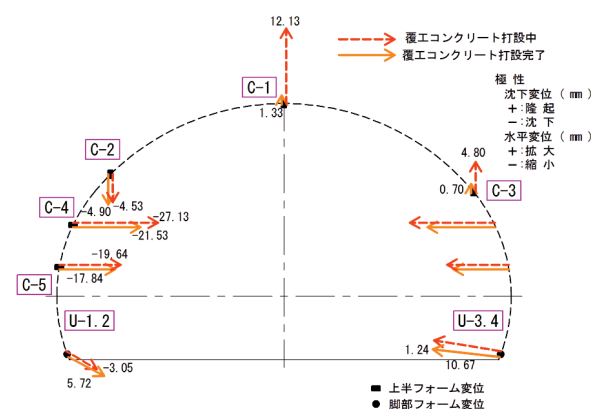


図-9 覆工コンクリート打設時のアーチフォーム変形挙動

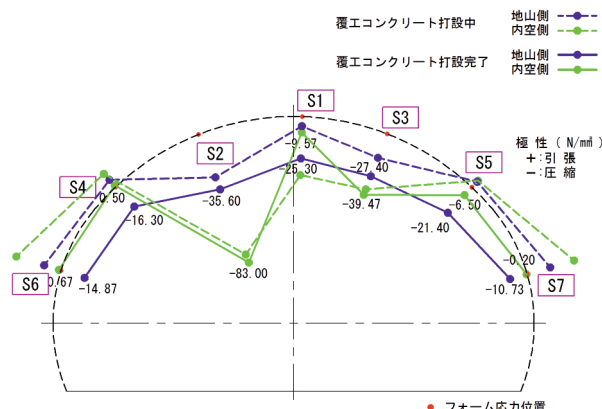


図-10 覆工コンクリート打設時のアーチフォーム発生応力

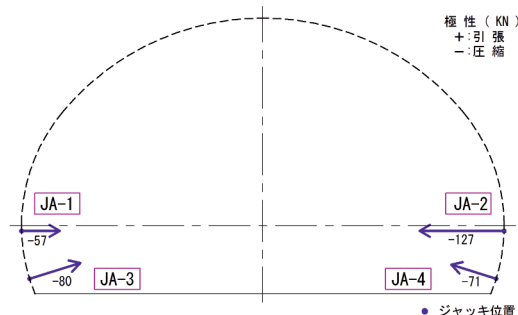


図-11 ガントリーダウン前におけるジャッキ軸力

ているが、ガントリーをダウンさせることで押し付け力がなくなる。図-12から図-13に示すように、アーチフォームの変形や応力状態はガントリーダウンの前後で概ね変化がないことから、アーチフォーム単体で覆工コンクリートの荷重が保持されており、覆工コンクリートにひび割れを生じさせるような荷重は作用していないと推察される。

(6) 膨張材と縁切り材によるひび割れ抑制効果の検証

コンクリートに膨張材を添加する場合や打ち継目に縁切り材を設置する場合のひび割れ抑制効果を打ち継目に設置したコンクリートの継目変位から考察した。なお、ここではコンクリート打設開始から24時間後における継目変位の計測結果を示す。

a) 膨張材の有無とひび割れ抑制効果

膨張材の有無が継目変位の進展に与える影響を考察するため、縁切り材が有るケース（ケース1とケース3）と縁切り材が無いケース（ケース2とケース4）に分けて各ケースの継目変位を比較した。

図-14は左右の側壁における継目変位の平均値をグラフ化したものである。同図より縁切り材の有無にかかわらず、膨張材を添加する場合は膨張材を添加しない場合と比較して継目における圧縮方向の変位が大きくなる結果が得られた。膨張材はコンクリートに対する圧縮応力

の付与に寄与しており、引張応力に起因するコンクリートのひび割れを抑制する効果があると判断できる。

b) 縁切り材の有無とひび割れ抑制効果

縁切り材の有無が継目変位の進展に与える影響を考察するため、膨張材が無いケース（ケース1とケース2）と膨張材が有るケース（ケース3とケース4）に分けて継目変位を比較した。

図-15に左右の側壁における継目変位の平均値をグラフ化した。縁切り材の有無と継目変位の間に相関は確認されない。

縁切り材はコンクリートが収縮する際にひび割れの発生位置を制御するために用いられるため、打ち継目に引張応力が作用しなければ、この効果が発揮されない。図-15はコンクリート打設開始から24時間後の継目変位を示しており、この時点では水和発熱に伴う温度膨張により打ち継目には圧縮応力が作用しているため、縁切り材が継目変位の進展に影響を及ぼさなかったと考えられる。同図のうち膨張材が有る場合は、縁切り材が無いほうが圧縮応力が大きくなっている。これは膨張材による体積膨張により既打設側に押し付けられているため、縁切り材が無い場合の方が既打設側の付着拘束が大きくなっている可能性を示唆しているため、以降のデータを分析中である。

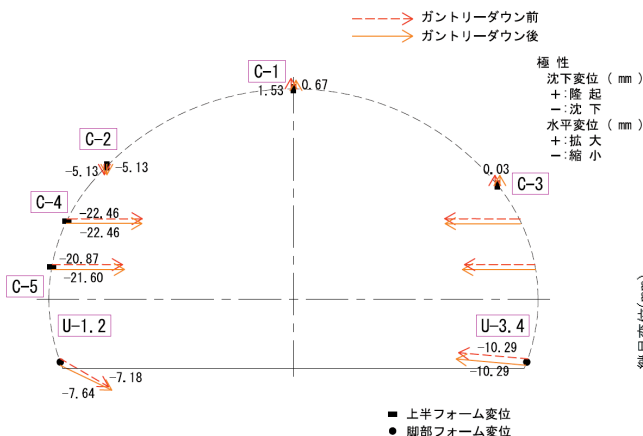


図-12 ガントリーダウン前後のアーチフォーム変形挙動

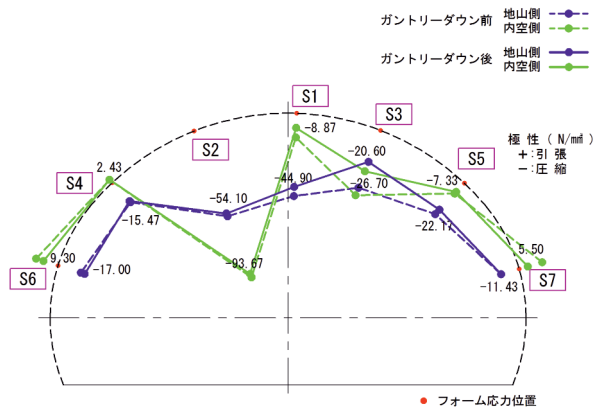


図-13 ガントリーダウン前後のアーチフォーム発生応力

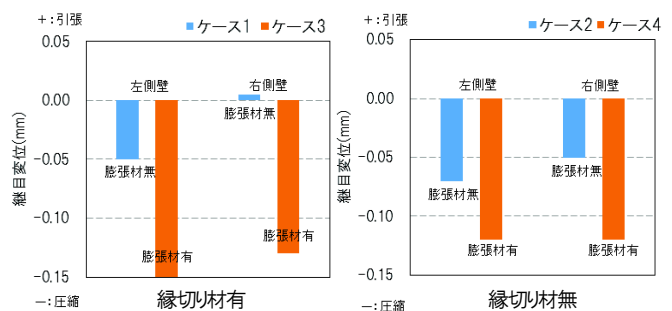


図-14 膨張材の有無による継目変位の比較

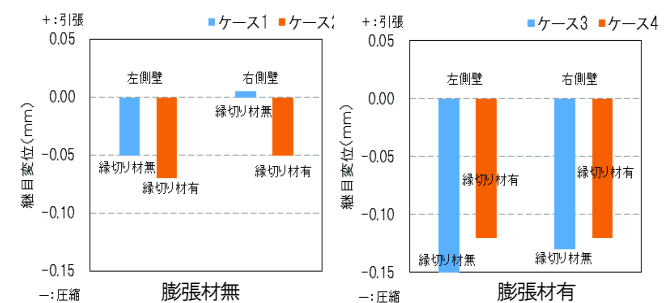


図-15 縁切り材の有無による継目変位の比較

8. おわりに

国道45号唐丹第3トンネル工事では、覆工コンクリートの品質向上と急速施工を同時に実現することを目的として、高品質な覆工コンクリートを施工できるツインアーチフォーム(TAF)工法を発展させたトリプルアーチフォーム(TrAF)工法を採用し、完全週休2日の施工で最大月進288mを達成することができた。

本報告では、TrAF工法を採用した際の覆工コンクリートの品質に着目し、各種の検証を実施した結果について述べた。検証結果を要約すると次のようになる。

(1) 覆工コンクリートの型枠残置期間と透気係数

覆工コンクリートの脱型時間と透気係数の関係を室内試験で調査した結果、コンクリートの打込み完了から脱型までの時間を54時間以上とすれば、それより長時間型枠を存置した場合と同等の透気係数が得られることが分かった。TrAF工法は型枠存置時間を60時間確保できるため、同工法により型枠存置時間が66時間となるTAF工法と同等の表層品質が確保できることを確認した。

(2) 覆工コンクリート打設工法と透気係数

従来工法(18時間脱型)とTAF工法およびTrAF工法によ

り覆工コンクリートを打設する区間を試験的に設け、それぞれの工法を用いた際の透気係数を測定した。従来工法の透気係数は「一般」ランクであるのに対して、TAF工法とTrAF工法の透気係数はほぼ等しく「良」～「優」ランクとなる結果が得られ、TAF工法とTrAF工法は同等の品質向上効果を発することが確認できた。

(3) 覆工コンクリート施工時の挙動計測を通じたひび割れ発生要因に関する検証

ガントリーダウン前後におけるアーチフォームの挙動を計測した結果、アーチフォームの変形や応力状態に概ね変化がないことから、ガントリーダウン前後にて覆工コンクリートにひび割れを生じさせるような荷重は作用していないと推察された。また、膨張材や縁切り材によるコンクリートのひび割れ抑制効果を打ち継目に設置した継目計から考察した結果、膨張材がひび割れ抑制に効果的であることを確認した。

(2017.8.11受付)

参考文献

- 1) 近藤啓二, 西岡和則, 坂井吾郎, 安齋勝: 66 時間型枠存置可能な「ツインアーチフォーム (TAF) 工法」の開発, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, VI-424, 2013.

COMPATIBLE MEASURES OF QUALITY IMPROVEMENT AND RAPID CONSTRUCTION FOR TUNNEL LINING CONCRETE

Yoshinori KITAMURA, Yasunari TEZUKA, Takahiro SATO and Syuji MATSUMOTO

Twin Arch Form (TAF) method, which mutually uses two arch forms and one gantry to extend stripping time, had been adopted to improve the quality of tunnel lining concrete since 2011. Triple Arch Form (TrAF) method, which uses three arch form and one gantry, was newly developed to speed up concrete lining construction by the use of sophisticated TAF method. TrAF method is efficiently performed to achieve rapid construction of tunnel lining at Tohni tunnel No.3.

This article explains the outline of TrAF method and introduces the performance of construction at this site. Verification results of lining quality are also reported through laboratory tests and in situ measurements.