

報告 表面平滑型シート防水工によるトンネル覆工コンクリートのひび割れ抑制効果の検証

白根 勇二^{*1}・賀川 昌純^{*2}・菊地 晃徳^{*3}・小松 敏彦^{*3}

要旨：従来の防水シート工に代わり、覆工コンクリートと同様に移動式型枠を用いて、充填材によって吹付けコンクリートと防水シートを一体化させる表面平滑型シート防水工が実用化されている。本研究では、実際の覆工コンクリートの挙動を計測し、本工法によるひび割れ低減効果について検証した。その結果、従来工法と比較して、余堀りによる発熱温度の上昇を抑制すること、外気温の変動による応力変化が小さく、体積変化が円滑であることがわかった。また、温度変化時の変形率を算出することによって、覆工背面の凹凸の解消による拘束低減効果を定量的に示し、ひび割れ抑制に効果があることを確認した。

キーワード：覆工コンクリート、ひび割れ、収縮、表面平滑型シート防水工、ひずみ計測、線膨張係数

1. はじめに

NATMの覆工コンクリートでは、30年ほど前から覆工と吹付けコンクリートとの間に、縁切り材としてのアイソレーション効果と防水機能を兼ね備えた防水シートが一般的に設置されるようになった。そのため、覆工と吹付けコンクリートを一体化させる工法と比べると、覆工コンクリートに発生するひび割れが大幅に低減するようになった¹⁾。しかしながら、吹付けコンクリート面などの凹凸状況や断面形状によっては、防水シートを設置しても覆工コンクリートのひび割れの発生を完全に回避することは困難であり、側壁や天端にひび割れが発生した事例がしばしば報告されている²⁾。

これらのひび割れの主な原因は温度収縮や乾燥収縮であると考えられており、背面の凹凸やインパートコンクリートなどから受ける拘束によって、最終的に貫通に至ることが多く、防水機能や美観の低下が懸念される。

一般的に、覆工コンクリートのひび割れ抑制対策として、スパン長の短縮、膨張材や収縮低減剤の使用、セメント種類の変更、湿潤養生の実施・延長などの様々な方法が提案され、実施されている。しかし、コンクリートの材料特性やトンネル坑内の環境変化によっては、長期間経過後にひび割れが発生してしまうのが現状である。

一方、これまで手作業で施工していた従来の防水シート工に代わり、覆工コンクリートと同様に移動式型枠を用いて、充填材によって吹付けコンクリートと防水シートを一体化させる工法(以下、表面平滑型シート防水工、または表面平滑工法と呼ぶ)が開発され、これまでに実用化されている³⁾。この工法は、吹付けコンクリート、鋼製支保工およびロックボルトによる覆工背面の凹凸を解消することで、ほぼ均一な厚さの覆工コンクリートの

施工が可能となっており、ひび割れの低減にも寄与する工法として期待される。

本研究では、背面の凹凸が覆工コンクリートの挙動に与える影響を把握し、表面平滑型シート防水工のひび割れ抑制効果を定量的に評価することを目的に、実構造物内に熱電対やひずみ計などの計測器を埋設し、覆工コンクリートの挙動について計測した。本文は、これらの結果と、覆工背面の凹凸を解消することによるひび割れ抑制効果について考察を加えたものである。

2. 表面平滑型シート防水工の概要

図-1に、従来の防水シート工と表面平滑型シート防水工の施工概念図を示す。

従来工法では、一次支保である吹付けコンクリートと鋼製支保工およびロックボルトの表面形状に合わせて防水シートを張り付けるため、凹凸が残された状態となる。また、作業員の手作業により防水シートを展張りするためシートの余裕不足や余裕過多が生じやすく、シートが引っ張られたり、たわみが発生した場合には、防水シートの破損やコンクリートの充填不良が生じる恐れがある。作業員の技量に左右される工種であると言える。

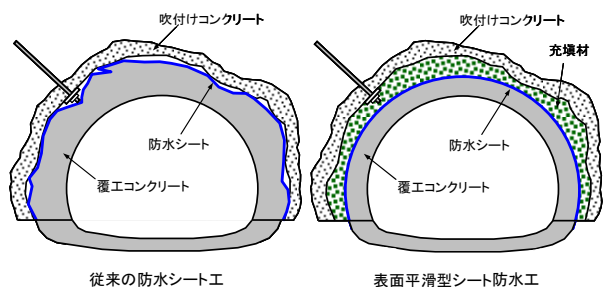


図-1 防水工の施工概念図

*1 前田建設工業(株) 技術研究所 (正会員)

*2 前田建設工業(株) 北陸支店

*3 前田建設工業(株) 土木部トンネルグループ



写真-1 従来工法による仕上がり状態



写真-2 表面平滑工法による仕上がり状態

表面平滑工法は、移動式型枠に設置した防水シートと吹付けコンクリートとの隙間に充填材を打ち込んで両者を一体化させる工法である。充填材は吹付けコンクリートと同等以上の強度（18N/mm²以上）を有したセメント系充填材であり、充填材による不陸調整によって防水シートを滑らかな形状に仕上げる事が可能となる。

3. 覆工コンクリートの計測概要

3.1 計測対象断面

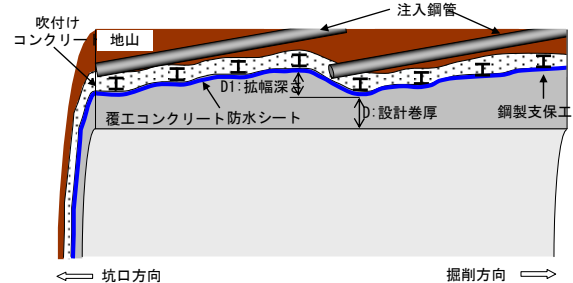
覆工コンクリートの挙動計測を実施した工事は、道路トンネルの構築工事であり、内空断面が 51.6m²である。計測位置として、全長 1,200m のトンネル坑口から約 600m に位置した区間を選定し、従来の防水シート工を施工した区間（57BL）と表面平滑型シート防水工を施工した区間（58BL）は隣接ブロックとした。両ブロックの設計断面は同一となっており、インバートコンクリートも有している。設計厚さは覆工コンクリートが 300mm、インバートコンクリートが 500mm である。

両区間とも、一般的なコンクリートの施工方法と同様に、コンクリートの打込み完了の翌日に型枠を取り外した。その後、コンクリートの水和反応促進と初期乾燥の防止を目的に、レール移動式の養生設備を設置して、ミストノズルによる噴霧養生を間欠的に 7 日間実施した。

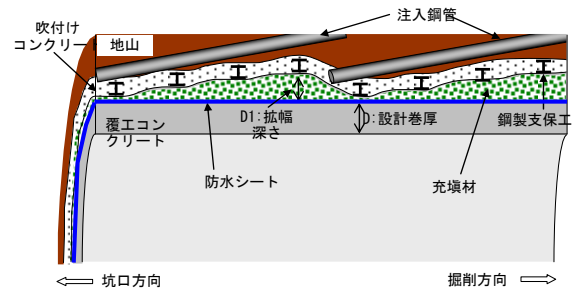
なお、当該区間は掘削補助工として、鋼管と注入材による注入式長尺先受け工法（9m／1 シフト）を採用しており、1 シフト内で掘削断面が最大 450mm 拡幅され、通

表-1 計測対象区間

区間	施工延長	施工方法	施工日
57BL	10.5m	従来工法	2011/2/4
58BL	10.5m	表面平滑工法	2011/2/8



(a) 従来の防水シート工



(b) 表面平滑型シート防水工

図-2 拡幅区間における覆工形状の概念図

常の施工よりも大きな凹凸が生じている。したがって、覆工コンクリートのトンネル進行方向に対する断面形状は、図-2 に示す概要図のように凹凸形状となっている。従来工法では、凹凸面にそのまま覆工コンクリートが施工されることになるが、表面平滑工法では防水シートが平滑に設置された面に施工される。

3.2 計測項目および位置、方法

表-2 および図-3 に計測項目と位置、計測点数を示す。各断面の計測位置は側壁、肩部、天端の 3 箇所とし、温度とひずみは 1 箇所につき 3 点（断面の深さ方向で表面側、中間、背面側）を計測した。計測項目は、熱電対によるコンクリート温度と外気温、埋込み型ひずみ計に

表-2 計測項目、位置および計測点数

計測項目	57BL (従来工法)			58BL (表面平滑工法)		
	側壁 350mm ^{*1}	肩部 450mm ^{*1}	天端 410mm ^{*1}	側壁 310mm ^{*1}	肩部 320mm ^{*1}	天端 320mm ^{*1}
コンクリート						
温度	3	3	3	3	3	3
実ひずみ ^{*2}	3	3	3	3	3	3
有効応力 ^{*2}	1	—	1	1	—	1
自由収縮ひずみ	1	—	—	—	—	—
坑内温度・相対湿度	1 (型枠セトル内)			1 (型枠セトル内)		

*1: 計測部位の下の数字は、設置位置の巻厚を示す。

*2: 実ひずみと有効応力の計測方向は、側壁部がトンネル進行方向、肩部と天端は横断方向である。

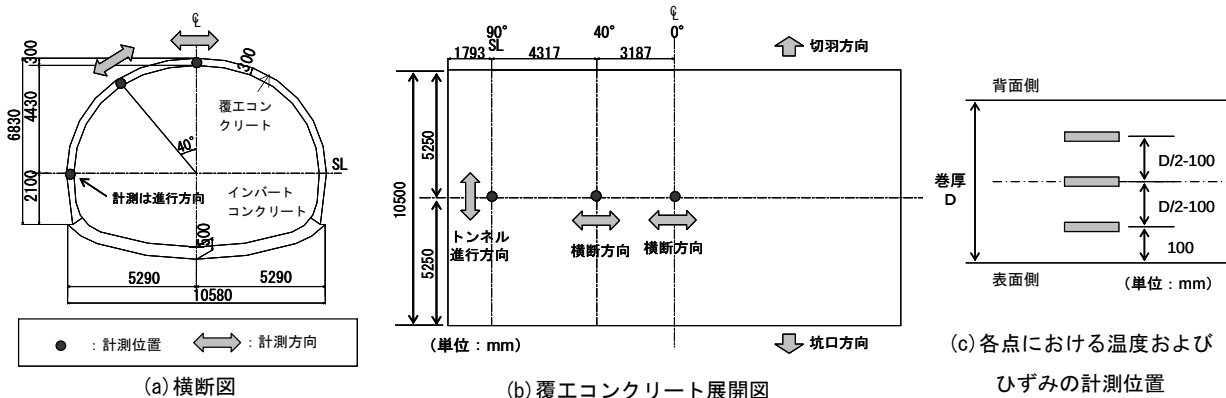


図-3 計測位置および計測方向

よるコンクリートの実ひずみ、小型ロードセルによる有効応力、周囲との付着を遮断した容器と埋込み型ひずみ計による自由収縮ひずみである。実ひずみと有効応力の測定方向は、一般的に知られている覆工コンクリートのひび割れ方向に対して直角方向とし、側壁はトンネル進行方向、天端は横断方向とした。

計測データは、30 分間隔でデータロガーへ自動収録し、竣工を迎える 2011 年 8 月中旬までの約半年間計測した。

3.3 コンクリートの物性

コンクリートの配合を表-3 に、使用材料を表-4 に示す。また、コンクリートの硬化特性を表-5 に示す。

表-3 コンクリートの配合

呼び強度	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)						
					W	C	S1	S2	G1	G2	Ad
24	57.1	15	4.5	40	159	279	539	230	748	317	0.7

表-4 コンクリートの使用材料

種類	産地・仕様
セメント C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
細骨材1 S1	手取産 陸砂 表乾密度 2.58g/cm ³ 、粗粒率 3.11
細骨材2 S2	内灘産 陸砂 表乾密度 2.58g/cm ³ 、粗粒率 1.41
粗骨材 G1	手取産 陸砂利 (最大寸法25mm) 表乾密度 2.60g/cm ³ 、実積率 64.0%
粗骨材 G2	手取産 陸砂利 (最大寸法40mm) 表乾密度 2.60g/cm ³ 、実積率 64.0%
AE減水剤 Ad	高変性ポリオール複合体

表-5 コンクリートの硬化特性

施工箇所	施工日	打込み温度 (°C)	項目	材齢7日	材齢28日
57BL (従来工法)	2011/2/4	8.0°C	圧縮強度 (N/mm ²)	19.0	28.0
			弾性係数 (kN/mm ²)	22.1	26.6
58BL (表面平滑工法)	2011/2/8	8.0°C	圧縮強度 (N/mm ²)	23.2	29.9
			弾性係数 (kN/mm ²)	24.0	28.2

4. 計測結果

4.1 ひび割れ発生状況

当該ブロックの施工が完了してから定期的にひび割れ調査を実施したが、施工後 10 ヶ月が経過した時点においてもひび割れは認められない。

4.2 坑内温度および相対湿度

図-4 に計測ブロック地点における坑内湿度と温度の変化を示す。施工後約 1 ヶ月半の 3/25 にトンネルが貫通しており、外気の流入によって坑内温度は 5°C 程度、相対湿度は 20% 程度低下している。

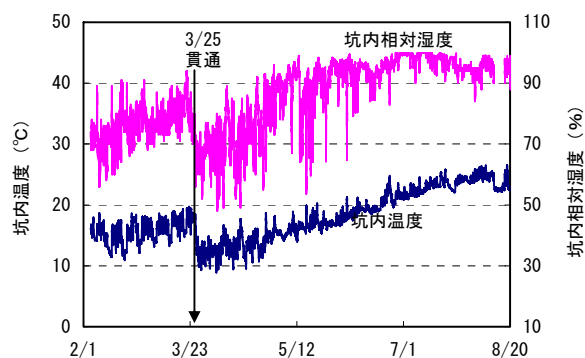
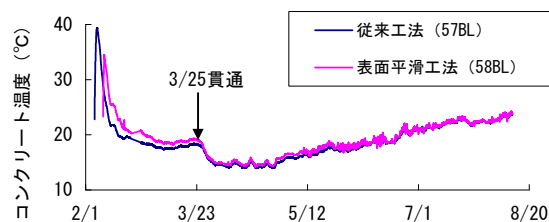


図-4 トンネル坑内の温度および湿度の変化

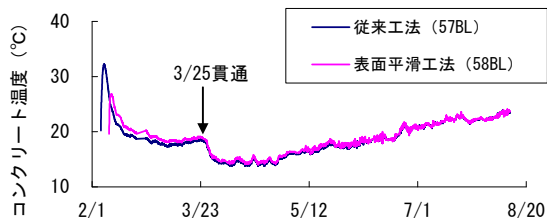
4.3 コンクリート温度

図-5 に、各計測位置の断面中心部におけるコンクリート温度の変化を示す。また、表-6 に、水和発熱時におけるコンクリート温度の最大値を示す。

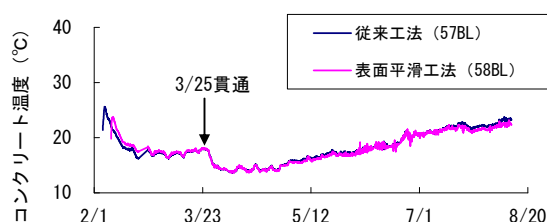
コンクリート温度は施工日の翌朝には最高温度に達し、型枠の脱型後から低下する傾向にある。部位別に水和発熱時の上昇温度を比較すると、高い位置（天端）ほど温度上昇量大きい。これは発熱によって温められた空気がセントル上部に滞留したためと思われる。また、施工方法で比較すると、いずれの部位も従来工法による 57BL の温度上昇量大きい。これは、表-6 に示すように従来工法の覆工巻厚が大きいためと考えられる。したがって、表面平滑工法は過大な巻厚を排除することができる。



(a)天端の断面中心部

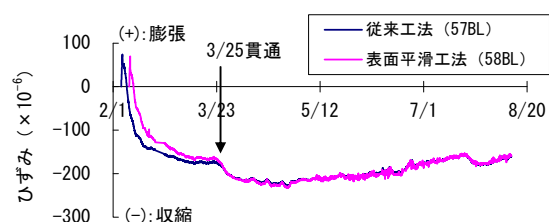


(b)肩部の断面中心部

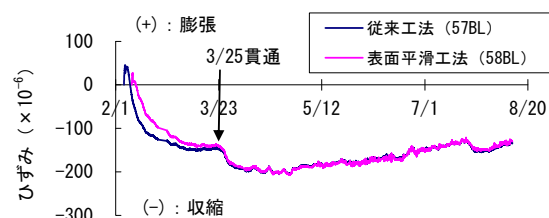


(c)側壁の断面中心部

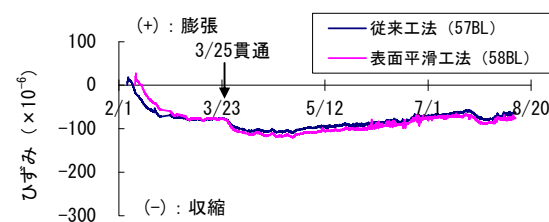
図-5 コンクリート温度の変化（断面中心部）



(a)天端の断面中心部



(b)肩部の断面中心部



(c)側壁の断面中心部

図-6 コンクリートひずみの変化（断面中心部）

表-6 コンクリート最高温度の比較

計測 ブロック	コンクリート最高温度 (°C)		
	天端	肩部	側壁
57BL 従来工法	39.4 (410)	32.2 (450)	25.6 (350)
58BL 表面平滑工法	34.5 (320)	26.8 (320)	23.7 (310)

※() 内は、計測位置での覆工巻厚 (mm) を示す。

ため、温度ひび割れ抑制の効果を有していると言える。

また、3/25にトンネル坑内が貫通した際には、坑内温度と同様に、急激な温度低下が認められる。

4.4 コンクリートひずみ

図-6に、各計測位置の断面中心部におけるコンクリートひずみの変化を示す。コンクリートひずみは、施工直後の発熱時にひずみが大きくなり膨張する傾向を示しているが、温度低下とともに収縮側に転じている。施工後1ヶ月程度は、従来工法（57BL）の収縮ひずみが大きい傾向を示しているが、この主な要因は水和発熱後の温度降下量が大きかったためと考えられる。

3/25の貫通時には、コンクリート温度の変化に応じてひずみも変化する傾向が認められ、収縮ひずみが急激に増大している。

なお、コンクリートひずみの挙動は履歴だけでは評価が難しいため、5.において考察を加えることにする。

4.5 有効応力

図-7に、天端の断面中心部における横断方向の応力履歴を示す。天端の横断方向の応力は、施工直後から圧縮応力となっており、表面平滑工法よりも従来工法の方が大きい値を示している。これは、水和発熱による温度膨張や、型枠脱枠後の自重作用によるアーチ効果が働いたためと考えられる。その後の両者の応力挙動は、同様の傾向を示し、長期的に緩やかな応力変動をしている。また、3/25の貫通時にはいずれも大きな応力変動は生じておらず、外気の日変動による応力変化もそれほど見られない。

図-8に、側壁の断面中心部におけるトンネル進行方向の応力履歴を示す。側壁に発生している応力は、外気温の日変動による影響が現れており、拘束作用が生じていると考えられる。特に従来工法の場合、表面平滑工法に

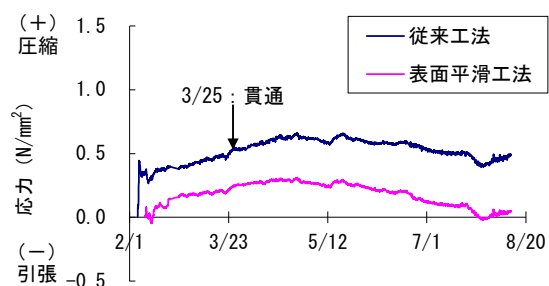
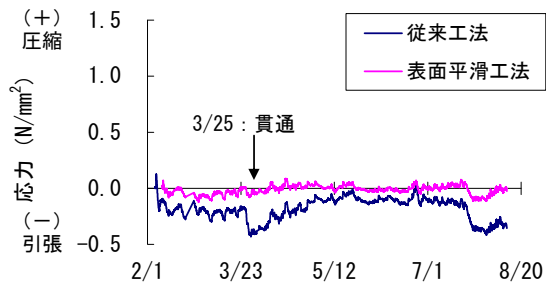


図-7 天端断面中心部（横断方向）の応力履歴

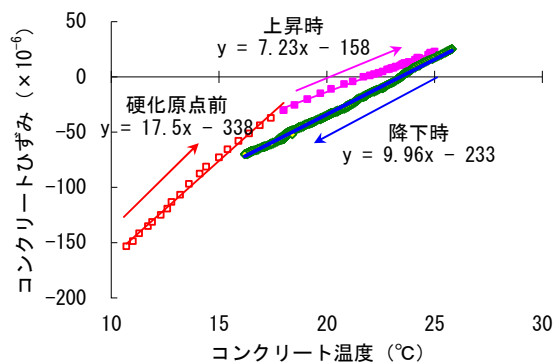


図－8 側壁断面中心部（進行方向）の応力履歴

比べて、応力変動幅がやや大きく、施工直後には引張応力側へ推移している。これは発熱温度が低下した際に覆工背面やインバートコンクリートから拘束を受けたためと考えられる。また、トンネルが貫通した際にも従来工法のブロックは引張応力が增大する傾向が認められるが、表面平滑工法のブロックには顕著な応力の発生が認められない。この要因として、表面平滑工法による背面拘束の抑制が考えられる。

4.6 線膨張係数

図－9 に、57BL で測定した自由収縮ひずみの結果を示す。この測定結果から算出したコンクリートの線膨張係数は、硬化原点後の温度上昇時で $7.23 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ 、温度降下時で $9.96 (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$ であった。



図－9 線膨張係数の算定結果（57BL）

5. ひび割れ抑制効果の検証

5.1 検証方法

コンクリートは温度変化によって一定の割合（線膨張係数）で変形する。しかし、この変形が何らかの原因で拘束されるとコンクリートに拘束ひずみが生じて、引張応力が引張強度を上回るとひび割れが発生する。外部拘束が作用した場合の拘束度は、式(1)で表される。

$$K = 1 - \frac{\varepsilon_1}{\alpha \cdot \Delta T} \quad (1)$$

ここに、 K : 拘束度、 ε_1 : 実ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 α : 線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、 ΔT : 温度変化 ($^{\circ}\text{C}$) である。

拘束度 K は、拘束を全く受けていない場合には自由に体積が変化して 0 となり、完全拘束を受けた場合には 1 となる。また、式(1)は式(2)のように表され、図－10 のような関係で示される。

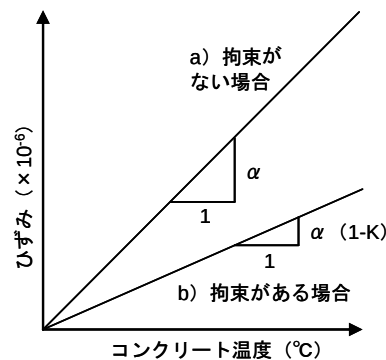
$$\frac{\varepsilon_1}{\Delta T} = \alpha(1-K) \quad (2)$$

なお本論では、自由な状態でのひずみ変化率である線膨張係数と区別するため、 $\alpha(1-K)$ を変形率と呼ぶことにする。

ここで、表面平滑工法の覆工背面の拘束低減効果を定量的に評価することを目的に、コンクリート温度変化時の変形率を求める。コンクリートが受ける拘束が大きい場合には、拘束が小さい場合と比較すると変形率も小さくなるため、コンクリート温度とひずみの勾配を比較することで拘束低減効果を評価できる。

変形率の算定期間は、温度変化が比較的一定である以下の 3 つの時期とした。

- ① 水和発熱の降下時期（材齢 2 ～ 9 日）
- ② 貫通後の温度降下時（3/25 ～ 3/28）
- ③ 季節変化による外気温上昇期（5/1 ～ 7/15）



図－10 拘束時の温度変化と変形率の関係

5.2 検証結果

図－11 から図－13 に、各時期における側壁、肩部、天端の温度変化とひずみの関係を示す。ひずみの方向は側壁がトンネル進行方向、肩部と天端が横断方向である。また、表－7 にそれぞれの温度変化時の変形率を示す。

貫通時の肩部を除き、温度変化時期や部位に依らず表面平滑工法の変形率（図中の温度とひずみの傾き）が大きく、コンクリートの変形に対する拘束が小さいことがわかる。特に、水和発熱低下時の変形率は従来工法の 1.5 ～ 1.6 倍となっており、背面の拘束低減効果が大きい。したがって、表面平滑工法は従来工法よりも覆工コンクリートの体積変化が円滑で、部材内の応力が発生しにく

いため、ひび割れ抑制に有効であると考えられる。

なお、図-11 に示される水和発熱降下時の変形率は、図-12 および図-13 に示される変形率よりも大きく、また、4.6 で測定された線膨張係数よりも大きな値のものもある。この理由は、降下初期に発生するひずみがクリープなどの影響を受けたためと考えられる。

また、いずれの段階においても側壁の変形率は、肩部や天端の変形率よりも小さくなっており、拘束が大きいことがわかる。これは、インバートコンクリートが側壁の変形を拘束している影響と考えられる。

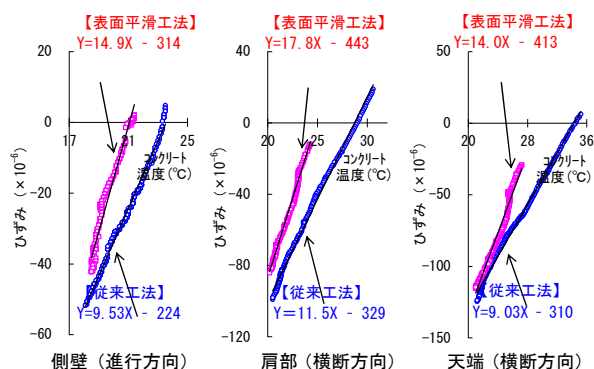


図-11 水和発熱降下時の変形率

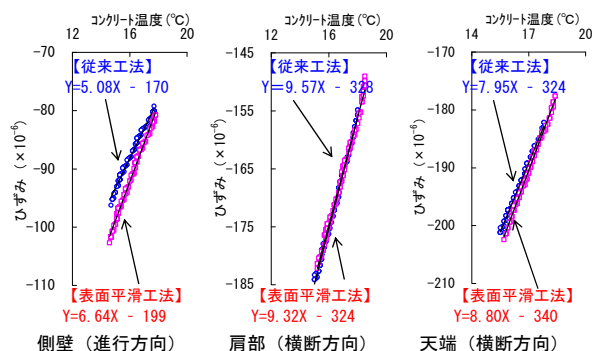


図-12 トンネル坑内貫通時の変形率

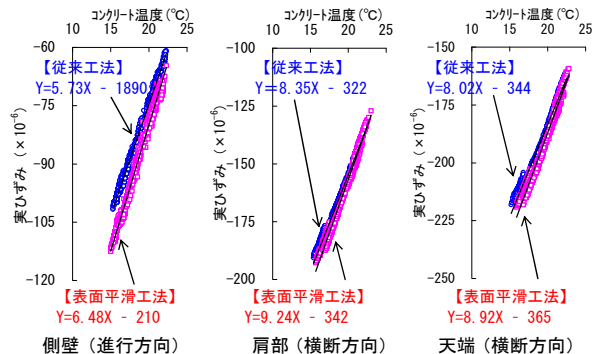


図-13 季節変化時の変形率

表-7 各段階における温度変化時の変形率

時期	防水工の 施工方法	温度変化時の変形率 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
		側壁 (進行方向)	肩部 (横断方向)	天端 (横断方向)
水和発熱降下時 (材齢2日～9日)	従来工法	9.53	11.5	9.03
	表面平滑工法	14.9 (1.56)	17.8 (1.55)	14.0 (1.55)
坑内貫通時 (3/25～3/28)	従来工法	5.08	9.57	7.95
	表面平滑工法	6.64 (1.31)	9.32 (0.97)	8.80 (1.11)
季節変化時 (5/1～7/15)	従来工法	5.73	8.35	8.02
	表面平滑工法	6.48 (1.13)	9.24 (1.11)	8.92 (1.11)

※ () 内は、従来工法に対する表面平滑工法の変形率の比を表す。

6. まとめ

以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 表面平滑型シート防水工を実施した区間の覆工コンクリートの上昇温度は、従来工法で施工された区間よりも低くなった。余掘り分の巻厚をほぼ設計値どおりに補正することができたため、温度ひび割れ発生の抑制に効果があることが示された。
- (2) 表面平滑型シート防水工を実施した区間の発生応力は、従来工法で施工された区間よりも小さくなり、温度応力の低減効果が確認された。
- (3) 表面平滑型シート防水工を実施した区間の変形率は、従来工法に比べて、初期の水和発熱降下時には 1.5 ～ 1.6 倍、長期材齢時には 1.1 倍大きく、拘束が低減されていることがわかった。覆工背面の凹凸を整形することで、覆工コンクリートの体積変化が円滑になったためと考えられる。
- (4) 以上より、表面平滑型シート防水工のひび割れ低減効果を定量的に評価することができた。

現在のところ、対象断面にはひび割れが確認されていないが、乾燥収縮によるひび割れが長期的に発生・進展する可能性もある。したがって、今後も観察を続け、長期的な視点から表面平滑型シート防水工の効果を確認する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：山岳トンネル覆工の現状と対策，トンネルライブラリー第 12 号，2002. 9
- 2) 出頭圭三ほか：NATM 二次覆工コンクリートのひび割れ発生原因とその防止対策—温度，ひずみの測定結果とその検討—，前田建設技術研究所報，Vol. 23，pp. 91～102，1982
- 3) 木村宏，本堂亮，小松敏彦，櫻井孝臣：地下水位下の成田層での止水壁併用 NATM と新防水工法，トンネルと地下，426 号，Vol. 37，No. 2，2006. 2