

山岳トンネルにおける防水シート 平滑化施工について

—一般国道229号梅川トンネルにおける ハイ・イータス工法の適用事例報告—

小樽開発建設部 小樽道路事務所 第1工務課 ○名内 慎助
工藤 嘉彦
前田建設工業株式会社 梶山 孝司

NATM工法によるトンネルでは、吹付コンクリート面の凹凸に配慮し、防水シートをたるませながら施工する必要があり、覆工コンクリート打設時に空隙の発生や防水シートの破損が生じる可能性がある。一般国道229号梅川トンネル工事において、この懸念を解消するため、防水シートを背面に空隙なくトンネル形状に沿って平滑に仕上げる「ハイ・イータス工法」を採用した。

本報告は、梅川トンネルで採用したハイ・イータス工法の施工状況を報告するものである。

キーワード：防水シート

1. はじめに

山岳トンネル工法（以下、NATMと呼ぶ）は、掘削、支保を繰り返し施工しながら、後方より防水シートおよび覆工コンクリートを施工する。しかし、NATMの施工上やむをえない以下の課題が潜んでいると考えられる。

- ① NATMではトンネル形状に沿って地山を平滑に掘削したり吹付けコンクリートを平滑に仕上げることは難しく、吹付け面は凹凸状となり覆工の厚さも不均一となる。
- ② 防水シートは打釘で固定し、かつ、吹付け面の凹凸に追従させるために余裕をもたせ「たるんだ」状態で布設するため、吹付面と密着した状態とならない。
- ③ たるんだ状態では、断熱材を吹付けづらく、厚さ管理も難しい。

上記の課題は、以下の品質に影響を与えている。

- ① 覆工背面が凹凸だと覆工コンクリートの安定した強度発現の妨げとなり、厚さが局部的に薄くなる箇所は弱部となりひび割れが発生しやすい。
- ② 防水シート背面に空隙が生じやすく、それはトンネル構造の弱点となり、また、そこに地下水が滞水して凍結・凍上にもつながる。
- ③ 防水シートの余裕が不足すると、覆工コンクリートの打設時に防水シートが引っ張られ空隙が出来るか、防水シートが破損する。

トンネル完成後に防水シートや断熱材がどのような状態になっているのかは確認できないものの、このような品質に及ぼす悪影響が重複した場合には、年月の経過とともに覆工背面地山の凍結融解が繰り返され、凍上によるひび割れや漏水が発生し、覆工コンクリート耐久性の低下につながるものと考えられる。

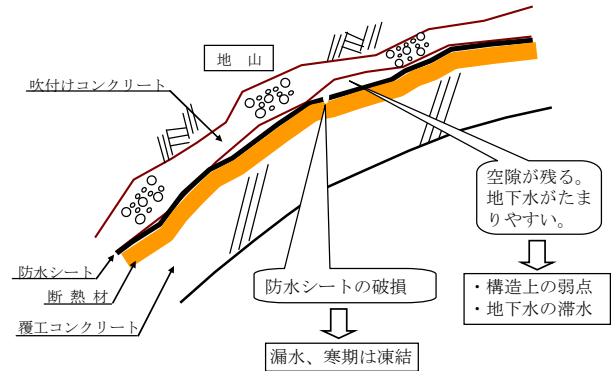


図-1 NATMの施工上の課題（イメージ）

「一般国道229号 余市町 梅川トンネル工事」において、上記、NATMの施工上の課題を回避するため「ハイ・イータス工法」を採用し、トンネル構造物の長期耐久性向上をめざす施工方法を試みた。

2. 梅川トンネル工事概要

積丹防災事業の一環として計画された一般国道229

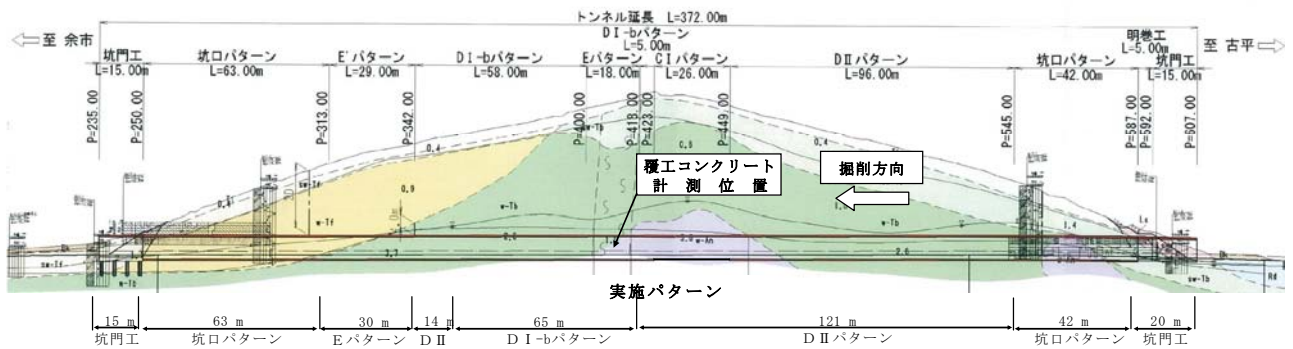


図-2 梅川トンネル地質縦断図

表-1 梅川トンネル工事概要

工事名	一般国道229号 余市町 梅川トンネル工事
工期	2010年11月25日～2012年03月29日
現場所在地	北海道余市郡余市町梅川
施工者	前田建設工業株式会社 北海道支店
トンネル延長	L=372m (NATM区間337m、坑門工35m)
掘削工法	機械掘削、タイヤ方式
トンネル断面	仕上がり内空断面積 70.5m ²
トンネル地質	風化凝灰角礫岩、風化凝灰岩

号梅川トンネル工事は、昭和33年に完成した現在の梅川トンネルの老朽化が著しく、幅員が路肩を含め6mと非常に狭小なトンネルであることから、幅員10.25mのトンネルを新築するものである。トンネル延長は372mで、NATM区間は337mである。表-1に工事概要、図-2に地質縦断図および支保パターンを示す。

トンネルの掘削は、2011年2月中旬から坑口付けを開始し、同年6月末に貫通した。中間部の中硬岩である安山岩および隣接する断層は出現せず、支保パターンはD I、D II主体で掘削した。余市側（貫通側）の100mは、脆弱な粘土状の強風化凝灰岩で坑口部においてAGF工を採用した。

3. ハイ・イータス工法概要

(1) ハイ・イータス工法について

ハイ・イータス工法は、ウォータータイトトンネルの防水性を確保する目的で前田建設(株)が開発したものであるが、断熱吹付けを施す寒冷地のトンネルにおける耐凍結性に対しても十分効果が期待できると考え、採用した。

図-3にハイ・イータス工法の施工方法概略を示す。

- ① ロール状のロングスパン防水シートを配置する。
- ② 専用の鋼製型枠を移動し、防水シート端部に巻き取りロープを接続し、ウィンチによりロープを巻き取りながら型枠上に防水シートを布設する。
- ③ 専用鋼製型枠を所定の位置にセットし、妻枠を設置

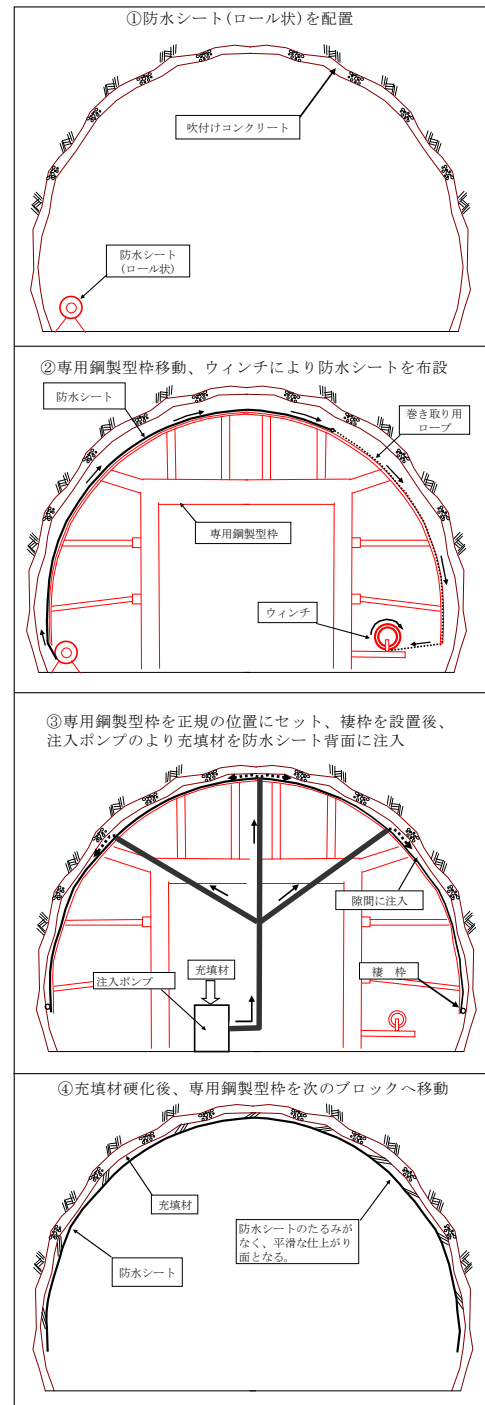


図-3 ハイ・イータス施工方法

する。注入ポンプにより充填材を吹付けコンクリートと防水シートの間隙に注入する。

- ④ 充填材硬化後、専用鋼製型枠を次のブロックへ移動して、終了。

この工法では、吹付け面と防水シートの間隙が発生せず、いかなる吹付け面の形状でも断熱材の下地となる防水シート面は凹凸のない平滑な状態となり、断熱吹付けの施工性が向上、断熱材厚さの均等性が向上する。さらに、覆工コンクリート背面も平滑となり、乾燥収縮による背面拘束は低減するとともに、厚さが均等となるので弱部はできず構造性能も向上する。

(2)梅川トンネルのハイ・イータス工法

梅川トンネル工事のハイ・イータスの仕様は、トンネル延長、工事工程、コストを踏まえ、以下のとおりとした。

- ① NATM区間全線ハイ・イータス工法を採用することにした。ただし、トンネル両端部の 5m を除く。
- ② 標準幅 2m の防水シートを工場で 6m につなぎ合わせ、1 スパン長 6m のロングスパンシートを採用した。これによって、現場で施工するシートの溶着作業が 1/3 に減少する。
- ③ ハイ・イータス工法の専用鋼製型枠は、L=10.5m の覆工コンクリート打設用の鋼製型枠を改造して適用し、ロングスパンシート幅 6m に合わせた型枠とする(写真-1)。ただし、下半部の改造は大幅なコスト増となることや、コンクリート打設時の打設圧によって覆工背面空洞は発生しないことから、上半部だけハイ・イータスを採用した。



写真-1 専用鋼製型枠

- ④ ハイ・イータス工法の充填材はモルタル(セメント:細骨材=1:3)とし、生コンプラント工場から供給した。試験施工により、翌日脱型しても支障ないことを確認し、施工は6m/日とした。

4. ハイ・イータス工法の施工状況

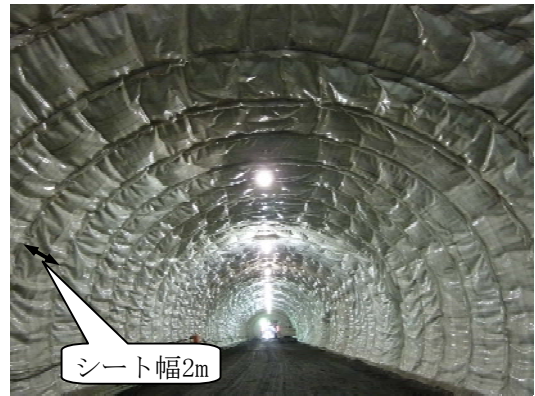


写真-2 標準的な防水シート布設状況



写真-3 標準的な防水シート布設状況
(断熱吹付け区間)



写真-4 ハイ・イータス工法布設状況

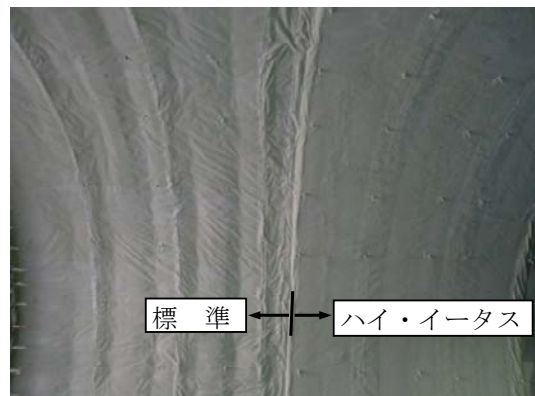


写真-5 断熱吹付完了後の比較

写真-2 は、標準的な防水シートの布設状況である。標準幅 2m の防水シートを吹付け面の凹凸に追従させるため、防水シートをたるませて布設している。

写真-3 は、当現場で施工した断熱吹付け区間での標準的な防水シート（シート幅 2m）の布設状況である。

断熱材を吹付けるため、できる限りたるませないよう裏面緩衝材だけ先に吹付け面の凹凸に合わせ布設し、その後防水シートを布設する。写真-2 の標準的な防水シートに対して倍以上の手間をかけて施工するが、吹付け面とは密着した状態とはならず、空隙が残り、表面は凹凸状となっている。

写真-4 は、当現場で施工したハイ・イータス工法の状況である。採用した上半部は、円滑なトンネルの形状を呈し吹付け面と密着し空隙のない状態となっている。

写真-5 は、写真-3 の断熱吹付け区間での標準的な防水シートと写真-4 のハイ・イータス工法区間での断熱吹付け状況の比較である。ハイ・イータス工法の方は、シワ状とならずに平滑に均等な厚さで仕上がっている。

表-2 に、上記の防水シートに関してまとめる。

表-2 各防水シートの比較

	標準	標準(断熱区間)	ハイ・イータス工法
材質	防水シート (EVA) $t=0.8\text{mm}$ と裏面緩衝材 (不織布) $t=3\text{mm}$		
防水シート幅有効長	2 m		6 m
防水シートの構成	防水シートと裏面緩衝材は、部分的に接着されていない。	防水シートと緩衝材は一体化されている。	防水シートと裏面緩衝材は、 全面接着 され一体化している。
布設方法	人力 。防水シートと裏面緩衝材を同時に布設する。	人力 。裏面緩衝材と防水シートは別々に布設	専用鋼製型枠を利用して、 機械 (ウインチ)による布設
防水シートの固定方法	緩衝材をコンクリート釘にて打錠	緩衝材をコンクリート釘にて打錠固定後、緩衝材に防水シートを部分的に接着させる。	充填材により吹付け面と裏面緩衝材を 全面接着 。
布設状況	たるんだ状態	左記よりたるみはないが、空隙があり、表面は凹凸	平滑で空隙がなく、密着した構造
施工コスト	優	劣	トンネル延長等の諸条件による ¹⁾

1) 専用鋼製型枠の設備が必要のためトンネル延長が短いほど割高となる。また、覆工コンクリートおよび充填材の単価でコスト差が生じる。

写真-6 は、覆工コンクリート打設後の端部の状況であるが、上半部のハイ・イータス部は覆工コンクリートの厚さが均等になっているのがわかる。図-4 は、覆工コンクリート各ブロックの厚さの分布で、ハイ・イータス部に対して下半の標準部はバラツキが非常に大きくなっている。

5. 覆工コンクリートのひずみ計測

ハイ・イータス工法によって覆工コンクリート背面が空隙のない平滑な場合と標準工法の凹凸した場合には、覆工コンクリートにどのような影響差がでるのかを定量的に把握するため、覆工コンクリート内部に計器を設置



写真-6 覆工コンクリート厚さ状況

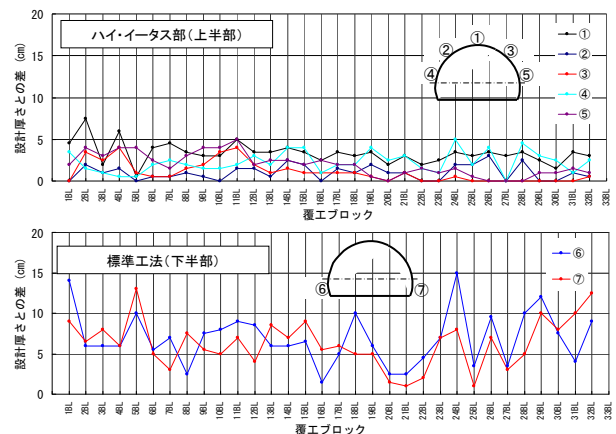


図-4 覆工コンクリート厚さ分布

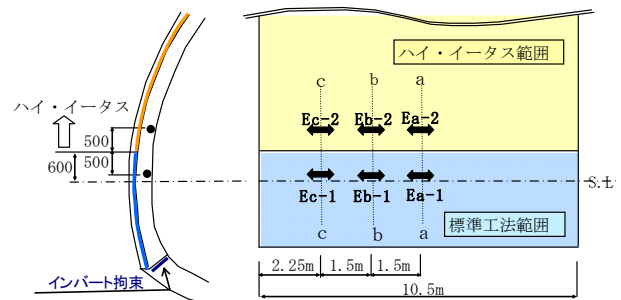


図-5 覆工ひずみ計設置位置

し計測を試みた。梅川トンネルにおいて、上半部はハイ・イータス工法、下半部は標準工法で施工していることから、極力同条件下で比較できるように図-5 の計器配置（3断面）で、トンネル軸方向のひずみを比較する。トンネル軸方向のひずみは、インバート境界面の拘束を受けるが、測定位置はインバート境界面から 2m 程度は離れており、面積が大きな覆工背面の拘束に比べてインバート境界面は小さく、計器からも離れているので、インバートの拘束による測定値の影響は小さいと考えられる。計測位置は急激な温度変化、外力、補強鉄筋等の諸条件に影響を受けにくいトンネル中間部の D I パターンのブロック（図-1 参照）を選定した。このブロックの覆工コンクリート打設日は 2011 年 10 月 25 日で 14 時 30 分に打設完了、翌日 10 時に脱枠をした。

図-6 は、ひずみの経時変化とコンクリート内部温度

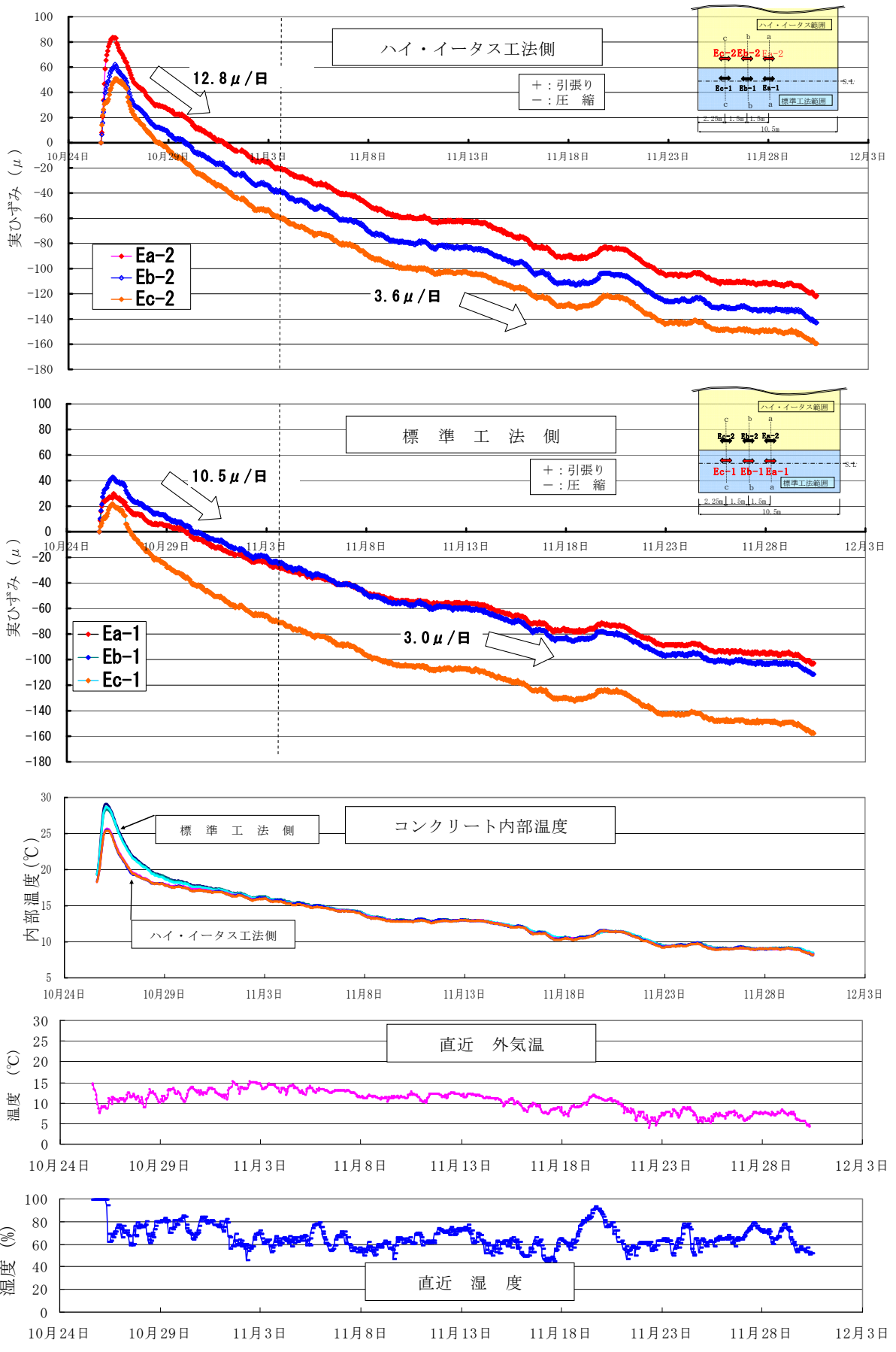


図-6 ひずみの経時変化および温度・湿度変化

(各ひずみ計位置の温度)、直近の外気温度および湿度の変化で、ハイ・イータス側(上半部)と標準側(下半部)に分けて整理してある。2011年11月30日までの測定値で、縦軸のひずみは(1)式により算出した。

$$\begin{aligned} \text{実ひずみ} &= (\text{測定値} - \text{初期値}) \times \text{校正係数} \\ &+ \text{センサー温度補正值} \times \text{温度変化} \quad \text{——— (1)} \\ \text{初期値} &: 2011年10月25日15:00の測定値(打設完了時) \\ \text{温度変化} &: \text{各ひずみ計の温度測定値} - \text{初期値(上記日時)} \end{aligned}$$

図-6より以下のことがわかる。

- 全体的な傾向は、打設完了直後からコンクリート硬化熱により急激に膨張ひずみが発生し、その約1日後から硬化熱の減少とともに収縮ひずみとなり、その後、緩慢な収縮ひずみの増加傾向にある。
- 初期の膨張ひずみのピークは、ハイ・イータス側では $51\mu \sim 83\mu$ で中央a断面から端部c断面に向かって順序よく小さくなっている。標準側のピークは $22\mu \sim 43\mu$ とハイ・イータス側に対して半分程度のひずみしか発生しておらず、b断面が最も大きな値となり規則性がみられない。
- 膨張ひずみのピーク後から8日間(2011年11月3日10:00まで)の収縮ひずみ速度の平均値は、ハイ・イータス側で $12.8\mu/\text{日}$ 、標準側で $10.5\mu/\text{日}$ となっており、ハイ・イータス側の方が18%ひずみ速度が大きい。
- また、2011年11月3日10:00から2011年11月30日10:00までのひずみ速度平均値は、ハイ・イータス側で $3.7\mu/\text{日}$ 、標準側で $3.0\mu/\text{日}$ となっており、ハイ・イータス側の方が19%ひずみ速度が大きい。
- 図-7は、膨張ひずみのピーク時から2011年11月30日10:00までのひずみ差をまとめたもので、ハイ・イータス側は $204\mu \sim 210\mu$ の収縮ひずみでバラツキが約3%と小さいのに対して、標準側は $133\mu \sim 180\mu$ と30%程度のバラツキがみられ収縮ひずみは15~40%小さくなっている。

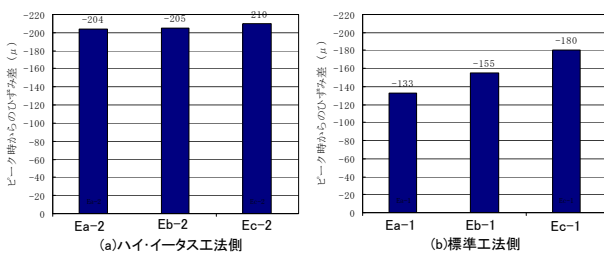


図-7 膨張ひずみピーク時からのひずみ差

6. まとめ

ハイ・イータス工法を採用した上半部においては、防水シートは平滑で吹付け面と密着した構造で施工でき、覆工コンクリートも均等な厚さに施工できているのが確認できた。

覆工コンクリートのひずみ計測では、ハイ・イータス

側の方が膨張ひずみおよび収縮ひずみの速度は大きく、また、各測定点における収縮ひずみのバラツキは小さくなっており、一様な収縮ひずみが発生していると推察される。一方、標準工法側では、ピーク時の温度が若干、大きいにも関わらず、膨張ひずみは小さくまた、収縮ひずみの速度も小さい。これは覆工背面の凹凸が起因して、コンクリートのひずみを拘束しているためと考えられる。また、図-6において、標準側は測定値が重なったり、3つの測点に規則性がない。これは局所的な背面拘束の影響と考えられ、このような挙動は随所で発生しているのではないかと推察される。

7. おわりに

NA TM工法における潜在的な課題である防水シート施工面の凹凸の解消及び均一な覆工コンクリートの打設を目指して、ハイ・イータス工法を採用したが、施工状況及びひずみ計測結果からハイ・イータス工法の効果が確認できた。

また、覆工コンクリートの打設時に天端引抜きパイプレータ、吹上げ口の増設等を行うことにより縞模様のない良質なコンクリートが打設できており、現段階では乾燥収縮による初期ひび割れも確認されていない。



写真-7 覆工コンクリート打設完了

耐久性の向上を確認できるのは、数年から数十年先になると考えられるが、こういった技術の採用により、トンネルの経年劣化の低下に寄与するものと考えられる。

