

巻厚 1.0m の覆工コンクリートのひび割れ抑制対策と効果検証

— 永平寺大野道路 大袋トンネル工事 —

Measures to Control Cracking in Lining Concrete with a Thickness of 1.0m and
Verification of their Effectiveness
(Construction of the Ohbukuro Tunnel on the Eihei-Ohno National Highway)

鎌田 松博*
Matsuhiko Kamata

小川 統史*
Toushi Ogawa
曾我 卓史*
Takafumi Soga

上米 良忍*
Shinobu Kamimera
森脇 丈滋*
Takeshi Moriwaki

【要旨】

近年、山岳トンネルでは覆工コンクリートに対するさらなる品質向上が求められ、配合検討や補強材および特別な養生等により、様々なひび割れ抑制対策が実施されている。大袋トンネルでは、巻厚 1.0m となる坑口部の覆工コンクリートに有害なひび割れを防止することを目的に、膨張材を添加した膨張コンクリートを採用し、コンクリートの挙動計測を行った。計測結果から、膨張コンクリートの膨張効果確認と、各部位における拘束の度合いや EPS を用いた養生効果を確認することができたので報告する。

【キーワード】 覆工コンクリート 膨張コンクリート EPS 養生

1. はじめに

大袋トンネル終点側坑口部DⅢa-3区間 (L=117m) の覆工コンクリートは、トンネル直上に道路があり、さらに雪崩が発生しやすい箇所となっていることから、これらの影響を考慮して覆工の設計が行われ、コンクリート厚さが1.0mの複鉄筋構造物となっている。これは、標準的なNATMトンネルの覆工コンクリートと比較して約3倍の厚さとなり、山岳トンネルとしては例の少ない特殊な断面形状となる (図-1)。

施工に先立ち当該断面の温度応力解析を実施して、ひび割れの発生について検証した結果、有害な貫通ひび割れが発生する可能性があると判断された。そこで、外気の影響が特に大きいと思われる坑口から3スパンを対象に、膨張材等によるひび割れ抑制対策を実施した。

膨張材によるひび割れ抑制効果の確認と、今後、都市NATMで増加すると予想されるウォータータイト等の特殊な断面形状となるトンネルに対するひび割れ抑制対策の検討にフィードバックすることを目的に、覆工コンクリートの挙動計測を実施した。

本報告はこれら一連の内容と計測結果をまとめたものである。

2. 工事概要

永平寺大野道路は中部縦貫自動車道のうち、福井県福井市玄正島町から勝山市、永平寺町を經由し大野市中津

川に至る26.4kmの区間であり、供用後は大野市・勝山市から福井市周辺へのアクセス時間の短縮、災害時における交通路の確保等が期待されている。

トンネルルートの地形は標高約400mの尾根を横断し、最大土被り約200mである。地質は、安山岩質溶岩 (玄武岩) および、同質の火山砕屑岩とそれを覆う未固結の堆積物からなる。

- (1) 工事件名：永平寺大野道路 大袋トンネル工事
- (2) 工事場所：福井県勝山市鹿谷町～遅羽町大袋地先
- (3) 発注者：国土交通省近畿地方整備局
- (4) 施工者：飛鳥建設株式会社
- (5) トンネル延長：1,155m
- (6) 内空断面積：78m² (標準部)

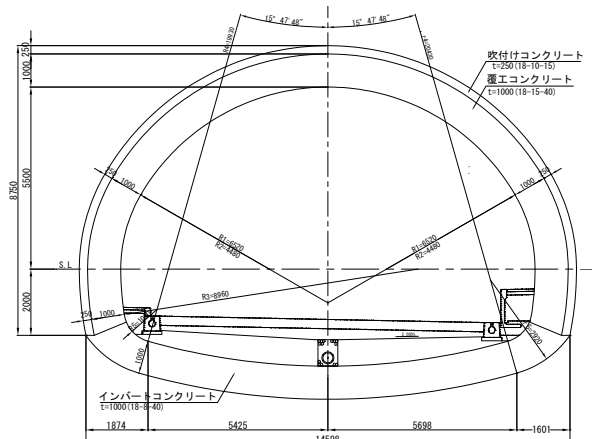


図-1 DⅢa-3 標準断面図 (単位 mm)

3. ひび割れ抑制対策

3.1 事前の温度応力解析

覆工コンクリートに発生する初期ひび割れの原因は、主に水和熱や外気温の変化による温度収縮や乾燥収縮である。とくに、インバートを有する場合は、覆工コンクリートがインバートコンクリートに拘束されるため、外部拘束による貫通ひび割れが発生しやすくなると考えられている²⁾。

ここで、大袋トンネルでは巻厚1.0mとなるDIII a-3区間において温度ひび割れの発生が懸念されることから、事前に三次元温度応力解析による検討を行った。なお、吹付けコンクリートと覆工コンクリートの間には、背面の拘束を低減する目的で防水シートが設けられているが、一次支保の凹凸等によって背面拘束が生じる可能性があるため、解析モデルには防水シートのアイソレーション効果は反映していない。

解析結果から、普通ポルトランドセメントで、最小ひび割れ指数が1.0以下になると予想されたが、膨張材を添加してケミカルプレストレスを導入²⁾した解析結果より、ひび割れ指数が1.5程度に改善されることが確認できた。

3.2 ひび割れ抑制対策の検討

本トンネルは寒冷地にあることから、外気の影響と凍結防止材等の影響を受けやすい。このことから、坑口から3スパン(延長31.5m)を対象に、ひび割れ抑制対策を実施して、有害なひび割れの発生を抑制した。

坑口から2スパン(1BL, 2BL:延長21.0m)においては「低添加型石灰系膨張材」を使用した膨張コンクリートを採用し、3スパン目(3BL:延長10.5m)にはインバートの拘束により有害な貫通ひび割れが発生しやすい



写真-1 耐アルカリ性ガラス繊維ネット設置状況

脚部付近に限定した対策として「耐アルカリ性ガラス繊維ネット」を用いてひび割れ抑制対策を実施した(写真-1)。

膨張コンクリートの配合を表-1に示す。

4. コンクリートの挙動計測

4.1 測定位置

計測対象ブロックは、2BL(膨張コンクリートを使用)と6BL(ノーマルコンクリートを使用)で挙動を比較して、ひび割れ抑制対策の効果を確認した。

1断面当りの計測位置は、縦断方向はスパン中央とし、周方向の計測位置は温度応力解析でひび割れ指数の低下が見られた天端部と、インバートによる拘束度が大きい脚部付近とその中間部の肩部とした(図-2、図-3)。

部材位置はコンクリート部材の中心(表面から50cm)とした。

計測方向は温度応力解析の主応力図より、スプリングライン(以下、SLと記す)から上部は周方向の引張応力が発生しているため、肩部と天端部は周方向に計器を設置した。脚部付近は軸方向の引張応力が発生することが確認できたため、軸方向に設置した。

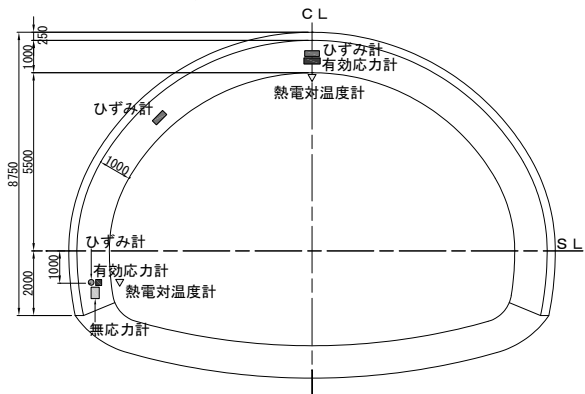


図-2 計測位置断面図

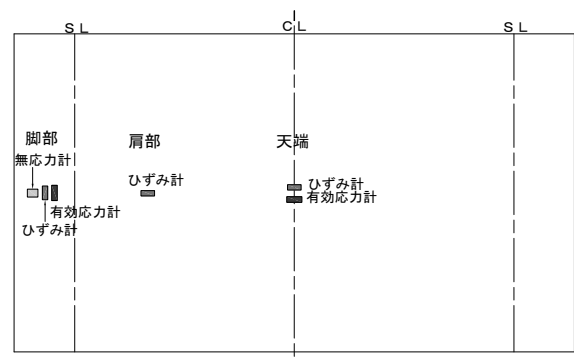


図-3 計測位置展開図

表-1: 膨張コンクリート(24-15-25N)配合表

種別	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	混和剤 (%)	単位量 (kg/m ³)					
					C	W	膨張材	S	G	混和剤
24-15-25N	普通	54.8	46.3	AE減水剤 1.0	290	170	20*	832	964	3.10

*低添加型石灰系膨張材をノーマルコンクリートのセメント量に内割置換した。

表-2 計測項目一覧表 (1断面当り)

項目	仕様	数量	計測の目的・備考
ひずみ計	KM-100B	3ヶ	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートに発生する全てのひずみ(実ひずみ)を測定する。 ・コンクリートの膨張および収縮ひずみ量を対策ありと無しで比較する。 ・天端, 肩および脚部の拘束度の相違を比較する。
コンクリート内部温度	熱電対	3ヶ	<ul style="list-style-type: none"> ・温度分布, 温度変化の把握と表面温度との差を確認する。 ・初期値からの温度差より, ひずみ計の補正を行い実ひずみを算出する。
有効応力計	GK-30N-505E 若材齢適用型	2ヶ	<ul style="list-style-type: none"> ・若材齢対応型の特種有効応力計を設置して, 打設直後から生じる発生応力を直接測定し, 対策ありと無しで比較する。
無応力計	KM-100B, 熱電対温度計, 無応力容器	1式	<ul style="list-style-type: none"> ・周囲から絶縁した容器(φ114mm)の内部にひずみ計を設置して自由ひずみを測定し, 膨張材の効果および拘束度を求める。 ・熱膨張係数を求め温度ひずみをキャンセルし, 収縮ひずみを確認する。
坑内温度	熱電対	2ヶ	<ul style="list-style-type: none"> ・養生環境の相違を把握する。 ・コンクリート内部と表面の温度差を把握する。

4.2 計測項目と目的および計測頻度

計測項目と数量および, 計測の目的を表-2に示す。

計測はコンクリート打設にともない, 直ちに初期値を測定し計測を開始した。測定頻度は自動計測専用データロガーを用いて, 計測開始から1ヶ月間, 30分間隔で自動計測とした。

写真-2は脚部に設置した無応力計と有効応力計, および, ひずみ計の設置状況である。



写真-2 計測器設置状況 (脚部)

5. 計測結果

5.1 コンクリート打設および養生状況

計測を実施した2BLと6BLのコンクリート品質管理試験結果を表-3に示す。

2BLを5月に打設し, 途中, 坑門工の施工を行い, 6BLを7月に打設した。そのため, 打設時期の相違によりコンクリート温度および外気温に差が生じている。

圧縮強度試験は, 供試体を用いた室内試験となるが, 若材齢強度試験結果において良好な強度発現が得られている。

写真-3はセントル脱枠後の初期養生として, 保温・保湿効果に優れたEPSパネルをコンクリート表面に密着させて養生している状況である。EPS養生は, 標準部も

含めた覆工コンクリート全区間において実施した。

EPSパネルは3スパン分(延長31.5m)とし, 施工サイクルにあわせて7日間以上の養生期間を確保した。

EPSパネルの設置はセントル足場を利用して, セントルの移動にともない設置し, 塩ビパイプとジャッキを用いて覆工コンクリート表面に密着させた。

表-3 コンクリート打設管理実績表

項目	2BL 膨張材	6BL ノーマル
打設日	5月18日	7月12日
打設量	計 286 m ³	計 276 m ³
コンクリート温度/ 外気温 (測定時間)	20°C/13°C (6:30)	29°C/27°C (6:45)
	26°C/25°C (13:30)	30°C/30°C (13:30)
スランプ /空気量	14.0 cm/5.2%	15.0 cm/5.0%
	16.5 cm/5.3%	15.0 cm/4.8%
圧縮強度 試験	σ_1 : 6.6N/mm ²	σ_7 : 21.5N/mm ² σ_{28} : 28.0N/mm ²
	σ_3 : 16.2N/mm ²	
	σ_7 : 21.6N/mm ²	
	σ_{28} : 27.0N/mm ²	



写真-3 EPSパネルを用いた覆工コンクリートの養生状況

5.2 打設後のコンクリート温度履歴

膨張コンクリートとノーマルコンクリートの各部位のコンクリート内部温度とコンクリート表面温度の履歴(材齢28日迄)を図-4、図-5に示す。

- ① 部材中心部の内部温度は、脚部よりも肩部、天端でやや最高温度が高くなる傾向にある。
- ② 膨張コンクリートとノーマルコンクリートの最高温度は、材齢48h時点で約60℃となり、ほぼ同等の値を示すが、打設時のコンクリート温度が4~9℃程度ノーマルコンクリートのほうが高い(表-3)ことから、温度上昇は膨張コンクリートの方が大きいと考えられる。
- ③ 最高温度に達した時点で内部温度と表面温度の差は、それぞれ脚部および天端ともに、約20℃の温度差が生じるが、脱枠後のEPSパネル養生による保温効果により、コンクリート表面と内部の温度差が養生直後に解消される。
- ④ 材齢2日以降における内部温度の温度降下時の傾きから、セントル養生中の傾き(8℃/日程度の低下)に対し、脱枠後のEPSパネル養生を行った直後から温度降下が2℃/日程度と緩やかになる。

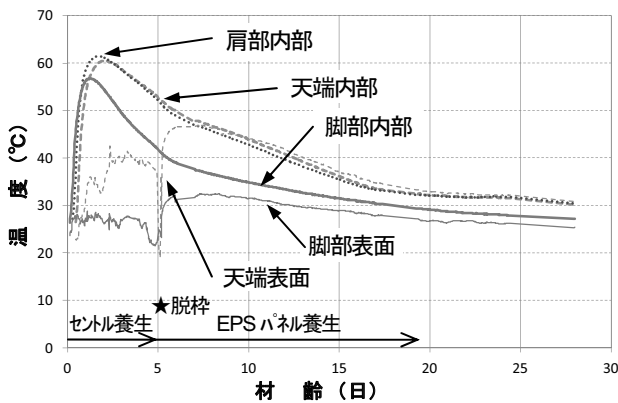


図-4 2BL(膨張コンクリート)温度履歴

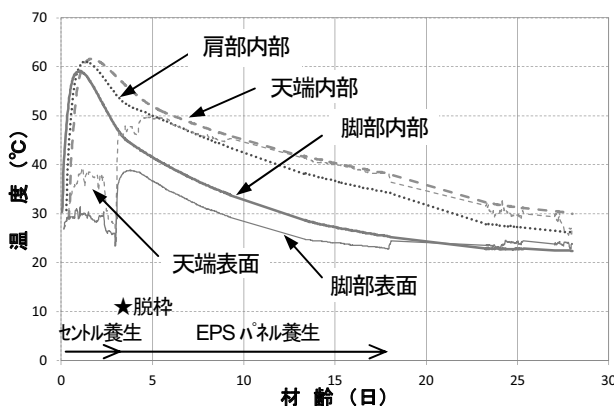


図-5 6BL(ノーマルコンクリート)温度履歴

5.3 コンクリート実ひずみ

膨張コンクリートとノーマルコンクリートの各部位のひずみ計測結果を図-6、図-7に示す。

ここで、ひずみ計によって計測される「実ひずみ」は、

構造物に発生する全てのひずみで、拘束状態における「応力ひずみ(周囲からうける荷重, 自己収縮ひずみ, 温度ひずみ)および膨張コンクリートの「膨張ひずみ」を含んでいる。

初期値は、各位置で(+)側となる挙動が開始する時期に設定した。概ねコンクリートに覆われてから3時間程度で(+)側に挙動し、凝結が生じはじめていと予想される³⁾。

- ① 膨張コンクリート、ノーマルコンクリートともに、天端、肩部と比較して脚部の実ひずみが小さくなっていることから、インバートによる拘束度が大きいと考えられる。
- ② 図-6に示すように、膨張コンクリートの実ひずみのピーク時の値は、天端で約470 μ となり、ノーマルコンクリートは天端で約190 μ となる(図-7)。ノーマルコンクリートは脚部と肩部で約10日以降、天端で約15日以降に収縮域(-)側に移行する。

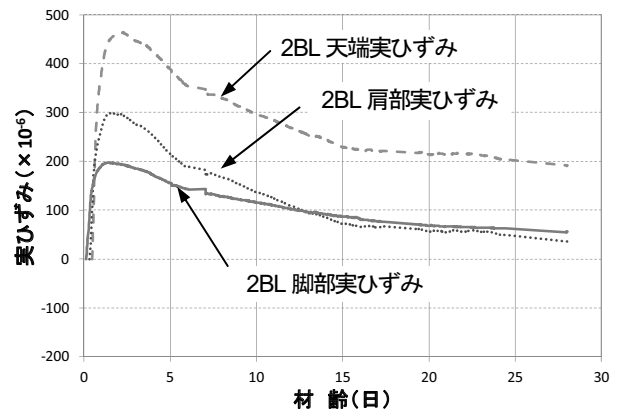


図-6 2BL(膨張コンクリート)実ひずみ

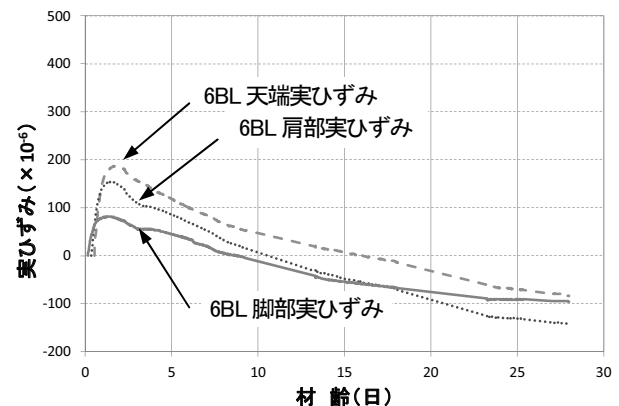


図-7 6BL(ノーマルコンクリート)実ひずみ

5.4 コンクリート自由ひずみ(線膨張係数)

無応力計から得られた自由ひずみとコンクリート温度の関係を図-8、図-9に示す。

無応力計内のひずみ計は、拘束の影響を受けない「自由ひずみ」となり、コンクリート温度と自由ひずみの回帰直線の傾きを線膨張係数($\mu/^\circ\text{C}$)とした。ここで、勾配が一定で自己収縮やクリープの影響の少ない温度降下

時の温度と自由ひずみの傾きから算出した値を線膨張係数として用いることとする。

- ① 膨張コンクリートの温度低下時の線膨張係数は $8.70 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (図-8), ノーマルコンクリートの温度低下時の線膨張係数は $9.16 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (図-9) となった。事前解析における普通ポルトランドセメント使用時の線膨張係数は、標準値 $\alpha = 10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を採用している⁴⁾が、実測値より得られた値は、10%程度小さい値となった。
- ② 膨張材の添加により約5%線膨張係数が小さくなることから、温度低下時においても膨張材の膨張効果が発揮されていると推察できる。

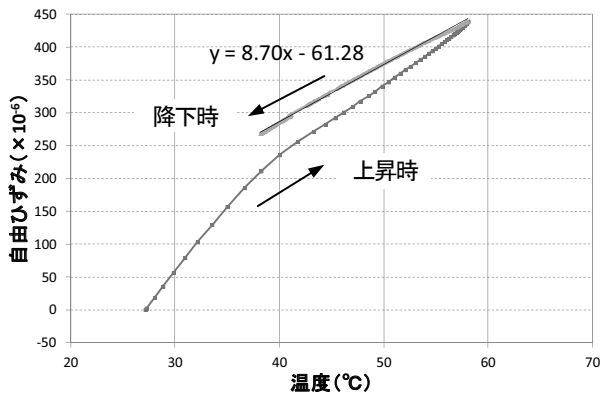


図-8 2BL(膨張コンクリート)線膨張係数

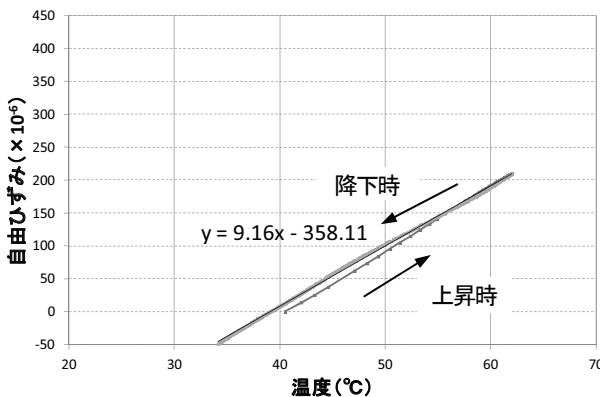


図-9 6BL(ノーマルコンクリート)線膨張係数

5.5 コンクリート収縮ひずみ

無応力計により得られた「自由ひずみ」から「温度ひずみ(線膨張係数と温度変化の積)」を除去したものを「収縮ひずみ」とし、膨張コンクリートとノーマルコンクリートの自由ひずみと収縮ひずみの経時変化を図-10, 図-11に示す。

- ① 図-10に示す膨張コンクリートの収縮ひずみは、打設直後に約 100×10^{-6} 膨張し、材齢2日で約 180×10^{-6} に達し、材齢28日でもほぼ維持されている。
- ② 図-11に示すノーマルコンクリートの収縮ひずみは、打設直後から材齢28日まで、約 10×10^{-6} で推移している。
- ③ 図-10に示す膨張コンクリートの収縮ひずみと、

ノーマルコンクリートの収縮ひずみの差が無拘束状態での膨張効果(収縮補償)と考えられ、その値は約 170×10^{-6} となる。

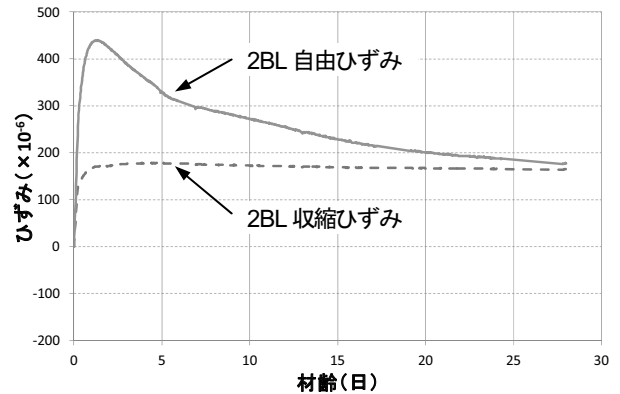


図-10 2BL(膨張コンクリート)収縮ひずみ

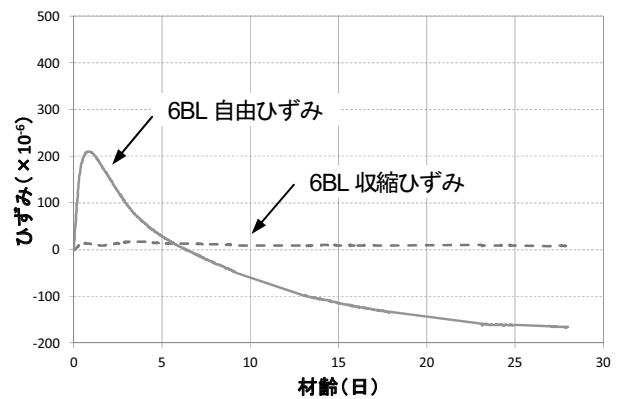


図-11 6BL(ノーマルコンクリート)収縮ひずみ

5.6 拘束度

計測結果より部材中心部の拘束度(自由ひずみに対する実ひずみの比)を比較する。

ここで、図-8および図-9を比較すると、膨張コンクリートは温度上昇時と下降時の勾配が大きく異なることから、ノーマルコンクリートの線膨張係数を用いるものとする。図-12に計測結果から得られたノーマルコンクリートの温度低下時の自由ひずみ(α)と各部位の実ひずみの勾配(β)を示す。

この結果をもとに下記の式(1a)を用いて拘束度を算出した。その結果を表-4に示す。

$$R = (\alpha - \beta) / \alpha \quad (1a)$$

ここで、

R: 拘束度

α : 拘束をうけない無応力計による自由ひずみと温度の勾配 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

β : 拘束をうけた実ひずみと温度の勾配 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

- ① 拘束度は脚部がインバートの拘束をうけるため最も大きく、肩部、天端の拘束度は小さい値となる。よって覆工コンクリート脚部付近では肩部や天端部と比較して温度低下時のコンクリートの自由変形（収縮変形）が拘束されることにより生じる、「外部拘束ひび割れ」が発生しやすいと考えられる。
- ② 拘束度の大きい脚部付近では、膨張材によるケミカルプレストレス効果が期待できると判断でき、鉄筋の無い、インバートを有する区間においても膨張材の効果が期待できる。

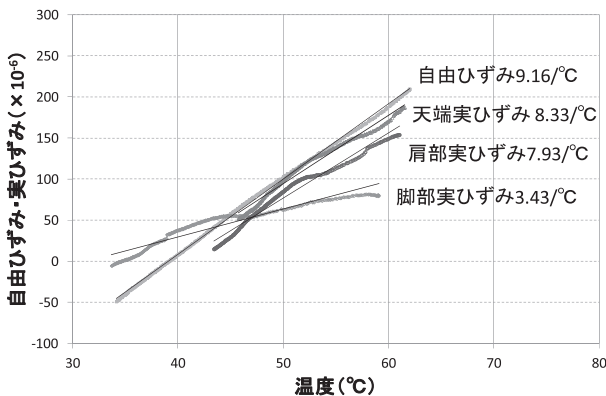


図-1 2 6BL（ノーマルコンクリート）温度低下時の自由ひずみと実ひずみ

表-4 6BL 各部位の拘束度

部 位	α	β	拘束度
脚部	9.16	3.43	0.63
肩部	9.16	7.93	0.13
天端	9.16	8.33	0.09

5.7 有効応力

脚部と天端に設置した若材齢適用型の有効応力計の測定結果を図-1 3, 図-1 4に示す。

- ① 両図より、膨張コンクリート、ノーマルコンクリートともにインバートの拘束をうける脚部において打設直後に圧縮応力が発生し、その圧縮応力の値は膨張コンクリートで最大 0.96N/mm^2 、ノーマルコンクリートで最大 0.79N/mm^2 となる。
- ② その後、コンクリートの硬化と温度変化に伴い材齢 2~3 日程度で引張り応力に転じる。その引張り応力の値は膨張コンクリートで最大 0.40N/mm^2 、ノーマルコンクリートで 0.52N/mm^2 となり、膨張材の添加による圧縮応力の導入により、約 23%引張り応力が低減される。
- ③ 膨張コンクリートの圧縮強度試験結果（表-3）より材齢 3 日で 16.2N/mm^2 となり、圧縮強度から推定される引張り強度特性値は式(2a)より、材齢 3 日で 1.39N/mm^2 となることから、発生引張り応力と比較し

高い値を示している。ひび割れ指数は、約 3.5 ($1.39/0.4=3.5$) である。

$$Ftk(t) = 0.13 \times Fck(t)^{0.85} \quad (2a)^4$$

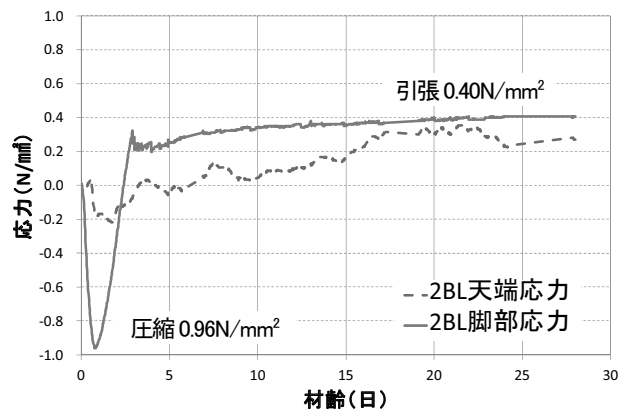


図-1 3 2BL（膨張コンクリート）有効応力 +引張り -圧縮

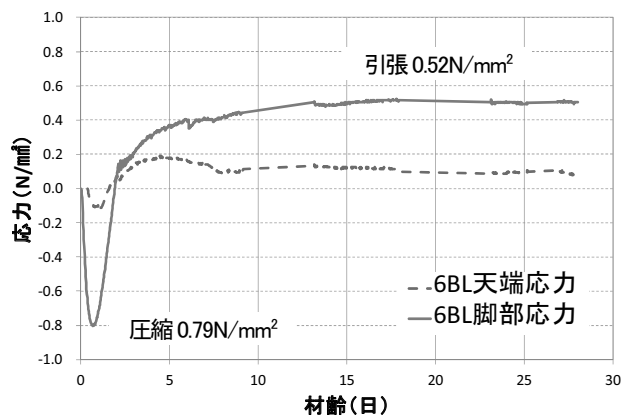


図-1 4 : 6BL（ノーマルコンクリート）有効応力 +引張り -圧縮

6. 目視によるひび割れ調査

材齢28日および8ヶ月以上経過した現在において、膨張材を添加した1BLと2BL、ガラス繊維ネットによる対策を行った3BL、無対策の4BL~12BLのいずれのD IIIa-3区間のコンクリート表面にひび割れは発生していない。



写真-4 覆工コンクリート打設完了（坑口部）

7. まとめ

計測結果より得られた知見は以下となる。

- ① コンクリート温度は膨張材を添加した場合、ノーマルコンクリートと比較して温度上昇は高くなるが、温度降下速度はやや緩やかになる。温度降下時の線膨張係数を比較すると約5%小さくなり、初期ひび割れの抑制効果が確認できた。
- ② セントル脱枠後のコンクリート表面に、EPSパネルを密着させて養生することで、脱枠後の急激な温度低下の抑制と、表面と内部の温度差が解消されることが確認できた。寒冷地や貫通後の覆工コンクリート施工や、若材齢で早期に脱枠するトンネル施工では特に効果が発揮されると考える。
- ③ 膨張コンクリート、ノーマルコンクリートともに、天端部および肩部では拘束度が小さいことから、防水シートによるアイソレーション効果が確認できた。脚部付近はインバートの拘束によって拘束度が大きくなることが確認できた。
- ④ 膨張効果（収縮補償）は、約 170×10^{-6} であることが確認ができた。脚部の発生応力は、膨張コンクリートの膨張効果により、約23%の引張り応力が低減できた。

8. 今後の課題

覆工コンクリート内の各種計測結果から、膨張材とEPS養生の効果を確認できた。ただし、本工事に使用したコンクリートは、室内試験において良好な初期強度発

現を示し、収縮ひずみも小さいなど、コンクリート自体が良好な品質であったこと。加えて、実施工ではEPS養生やアイソレーション効果等により、ひび割れ指数も事前解析と比較して良好となったことからひび割れは発生せず、「ひび割れの発生の有無」による評価はできていない。

巻厚の厚い類似条件となる覆工コンクリートの計画では、吹付け面の凹凸により拘束度の差があると考えられるが、事前温度解析において防水シートによるアイソレーション効果を反映させたモデルを設定する必要がある。

また、コンクリート内部と表面の温度差が大きくなることから、脱枠後の養生に加え、脱枠前のセントル養生も確実にを行う必要がある。

今後、経済性を考慮したひび割れ抑制対策が必要と考えるが、外部拘束が原因による有害なひび割れが発生しやすい脚部付近に限定した繊維ネット等による安価な対策や、膨張コンクリートを脚部に限定して打設するなどの方策が有効と考えられる。

【参考文献】

- 1) 土木学会：山岳トンネル覆工の現状と対策, pp.66-69, 2002.
- 2) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ抑制指針, pp.54-55, 2008.
- 3) 土木学会：膨張コンクリート設計施工指針, p.89,1993
- 4) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ抑制指針, p.47, 2008

Summary Improvement has recently been required in the quality of lining concrete in mountain tunnels.

Various measures have been taken to control cracking through the examination of mix proportions and reinforcing members and special curing. In the Ohbukuro Tunnel, expansive concrete with expansive admixtures was adopted to prevent cracking detrimental to 1.0-m-thick lining concrete at portals. The behavior of concrete was monitored. As a result, the effectiveness of expansive concrete, degree of restraint in each member and the effectiveness of EPS for curing were verified.

Key Words : concrete lining , expansive concrete , EPS cure