

開削トンネルの温度ひび割れに関する設計法

仁平 達也* 田所 敏弥** 岡本 大* 藤岡 慶祐***

The Design Method of Temperature Cracking of Cut and Cover Tunnel

Tatsuya NIHEI Toshiya TADOKORO Masaru OKAMOTO Keisuke FUJIOKA

In the performance verification design method, it is assumed that there is no occurrence of initial cracks that affect the required performance of the structure. However, cut and cover tunnels have sometimes thermal cracks. These cracks are caused by temperature stress due to hydration of cement during construction work and large and wide cracks derived from them may cause leakage at such cracked place. So, they may cause problems for maintenance of cutting tunnel. Therefore, in this paper, by comparing the site data with the analysis data, we confirmed the validity of thermal stress analysis, and also by the parameter analysis, we showed the occurrence tendency of thermal cracks in the cutting tunnel.

キーワード：開削トンネル，温度ひび割れ，温度応力解析

1. はじめに

開削トンネルに性能照査型設計を取り入れることとなった。性能照査型設計では、構造物の所要の性能に影響するような初期ひび割れが発生しないことを前提としている。しかしながら、開削トンネルやボックスカルバート等では、施工時において、図1に示すような、セメントの水和熱に起因する温度応力によりひび割れ（以下、温度ひび割れ）が発生する事例がみられる。このひび割れは、部材を貫通するひび割れとなることが多く、図2に示すような漏水を伴う等、供用上問題となる場合がある。そのため、実施工においては、温度ひび割れの発生を抑制するために、打込み高さ、ひび割れ誘発目地配置間隔、材料等を変更する、または、発生するひび割れ幅を抑制するために鉄筋量を増加する等の対策が施される場合がある。

さて、土木学会「コンクリート標準示方書」¹⁾や、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制御指針」²⁾においては、コンクリート硬化時に発生する応力を用いたひび割れ解析、いわゆる温度応力解析の方法が提案されている。近年の地震力の増加等に伴い、開削トンネルのコンクリート厚さは増加する傾向にあることから、これらを用いて、有効な温度ひび割れ対策を施すことは有益であると考ええる。しかしながら、一般的に、マスコンクリートであるダム等とは異なる鉄道構造物に対して温度応力解析を適用する場合には、その妥当性を踏まえた上で適用する必要があると考える。

* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室
 ** 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室
 *** 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室
 (現 西日本旅客鉄道株式会社)

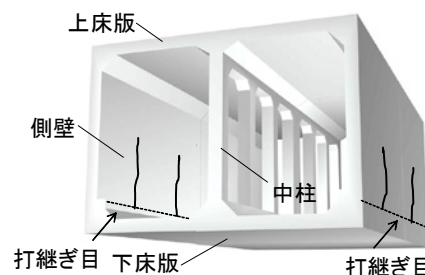


図1 側壁に発生するひび割れの模式図



図2 側壁のひび割れから発生する漏水の例

本論文では、学協会が提案する温度応力解析の概要（2章）を示すとともに、実鉄道構造物の現地計測と施工条件に基づいた温度応力解析を実施し、その妥当性について検討した（3章）。次に、構造物の形状や施工条件等を想定したパラメータスタディにより、各条件が温度ひび割れ発生に及ぼす影響について検討した（4章）。また、温度ひび割れが発生した場合の補強鉄筋によるひび割れ幅抑制効果を検証するため、鉄筋量および配置をパラメータとした温度ひび割れの誘発試験（5章）を行った。

特集：開削トンネルの設計技術

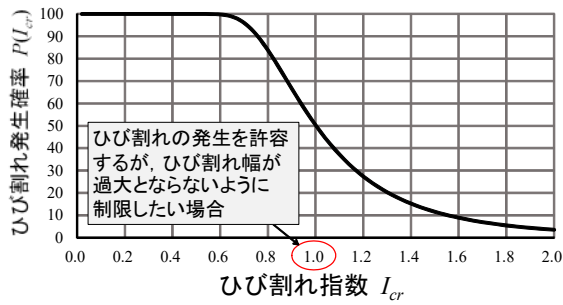


図3 ひび割れ指数とひび割れ発生確率

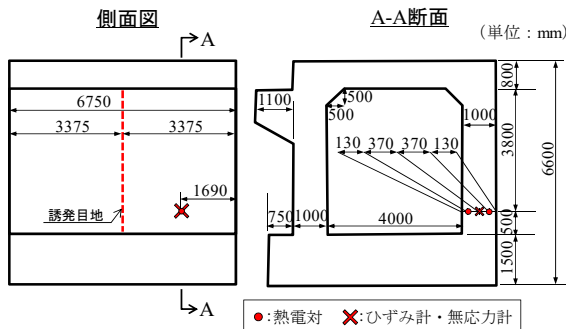


図4 対象構造物の形状 (橋台 A, 橋台 B 共通)

2. 温度応力解析の温度ひび割れ発生の評価

文献1)や文献2)に示された温度応力解析は、コンクリートの硬化に伴って変化する、コンクリート引張強度と発生応力を比較し、ひび割れ発生リスクをひび割れ指数で評価する。ひび割れ指数 (I_{cr}) の定義を式(1)に、ひび割れ発生確率 ($P(I_{cr})$) の定義を式(2)および図3に示す²⁾。

$$I_{cr} = f(t_e) / \sigma(t_e) \quad (1)$$

$$P(I_{cr}) = [1 - \exp\{- (I_{cr} / 0.92)^{4.29}\}] \times 100 \quad (2)$$

ここで、

I_{cr} : ひび割れ指数

$f(t_e)$: 有効材齢 t_e 日における引張強度 (N/mm²)

$\sigma(t_e)$: 有効材齢 t_e 日における温度応力 (N/mm²)

$P(I_{cr})$: ひび割れ発生確率

ひび割れ発生確率 ($P(I_{cr})$) はひび割れの発生率を示すもので、図3において、例えば、 $I_{cr}=1.0$ のときは $P(I_{cr})$ が 50% となる。これは、ひび割れの発生を許容するが、ひび割れが過大とならないように制限した場合と評価される。これを踏まえて、打込み高さ (リフト割)、セメント種別の変更やひび割れ防止鉄筋量等を変更することとなる。

3. 温度応力解析を用いた実構造物の検討

3.1 検討概要

実鉄道構造物の温度や引張応力の現地計測と施工条件に基づいた温度応力解析を実施した³⁾。現地計測と解析結果の比較や、当該構造物の温度ひび割れ発生の有無等の確認を行い、温度応力解析の妥当性について検討した。

表1 施工概要

		橋台 A (側壁・上床版)	橋台 B (側壁・上床版)
コンクリート 諸元	種別	30-8-20BB	30-8-20BB
	セメント量 (kg/m ³)	331	311
	膨張材 (kg/m ³)	0	20
	水 (kg/m ³)	162	162
	水結合材比 (%)	49.0	49.0
養生条件	型枠面	合板型枠 8日	合板型枠 14日
	打込み面	散水・マット養生 7日	散水・マット養生 7日
施工日程	底版 打込み	2014/4/7	2014/3/14
	底版 脱型	2014/4/13	2014/3/21
	側壁・上床版 打込み	2014/5/1	2014/4/3
	側壁・上床版 脱型	2014/5/9	2014/4/17

表2 計測項目および計測方法

計測項目	計測方法
外気温	熱電対
コンクリート温度	熱電対
実ひずみ	埋込み型ひずみ計
自由ひずみ	無応力計 (埋込み型ひずみ計, 無応力容器)
コンクリート圧縮強度	圧縮強度試験 (JIS A 1108) による
静弾性係数	圧縮強度試験 (JIS A 1149) による

3.2 対象構造物

対象構造物は、ボックスカルバート構造の2RC橋台である。以下、橋台A、橋台Bと呼ぶ。図4に一般図を、表1に施工概要を示す。橋台Aは、側壁基部に補強鉄筋を追加しており、橋台Bは膨張材 20kg/m³ をセメント内割りで添加している。図4に計測位置を、表2に計測項目および計測頻度を示す。なお、ひずみ計測位置は、後述する温度応力解析を事前に実施し、最も温度ひび割れが発生しやすいと想定される箇所、すなわち、側壁部材において、ひび割れ指数 I_{cr} が最小となる箇所を事前の温度応力解析により選定した。

3.3 解析概要および妥当性の検討

3.3.1 解析概要

現地計測対象構造物を三次元でモデル化し、施工時の条件をパラメータに反映した温度応力解析を実施した。温度応力解析には、三次元有限要素法による解析ソフト「ASTEAMACS Ver.8.0」を用い、評価点は現地計測におけるひずみ計測位置とした。図5に解析モデル形状を、表3に解析に用いる各種定数²⁾を示す。なお、応力解析の精度を向上するため、型枠養生期間の熱伝達率の調整により、コンクリート内部温度について、温度解析結果が計測結果に漸近するよう同定した。

3.3.2 コンクリート引張強度の算定

算定式は文献4)に示されているが、文献1)と文献2)に準じ、本研究においては表4に示す算定式²⁾を用いた。

表4 コンクリート引張強度および発生応力の算定式

計算項目	算定式	本件における採用値
コンクリート引張強度	$f(t_e) = 0.13 \times f'_c(t_e) \cdot 0.85$ $f(t_e)$: コンクリート引張強度 (N/mm ²) $f'_c(t_e)$: コンクリート圧縮強度 (N/mm ²) $f'_c(t_e) = (t_e - S_f) / (a + b(t_e - S_f)) \times f'_c(t_{28})$ $t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i / T_0)}\right]$ t_e : 有効材齢 (日) Δt_i : ある一定のコンクリート温度が継続する時間 $T(\Delta t_i)$: Δt_i の間継続するコンクリート温度 (°C) T_0 : 1°C a, b : セメントの種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発現を表す定数 $a = 14.4 - 3.86 (C/W)$, $b = 0.477 - 0.140 (C/W)$ ※高炉セメント B 種の場合 S_f : セメントの種類に応じた硬化原点に対応する有効材齢 (日) $f'_c(t_{28})$: 管理材齢 t_{28} における圧縮強度 (N/mm ²) $f'_c(t_{28}) = -10.2 + 24.3 (C/W)$ ※高炉セメント B 種の場合	C/W=2.04 より $a=0.52$, $b=0.763$ $S_f=0$ $f'_c(t_{28})=39.4$
発生応力	$\sigma = \sum_{i=1}^n (\Delta \epsilon_i \cdot E_e(t_e)_i)$ σ : 発生応力 (N/mm ²) $\Delta \epsilon_i$: 単位材齢 $i \Delta t$ あたりの拘束ひずみの変化量 $\Delta \epsilon_i = \Delta S_{(t_e=i \Delta t)} - \Delta S_{(t_e=(i-1) \Delta t)}$ $E_e(t_e)$: 材齢 $i \Delta t$ に対応する有効材齢 t_e における有効ヤング係数 (N/mm ²) $E_e(t_e) = \varphi(t_e) \times E_c(t_e)$ $E_c(t_e)$: 有効材齢 t_e における有効ヤング係数 (N/mm ²) $E_c(t_e)$: ヤング係数 (N/mm ²) $E_c(t_e) = 6300 \times f'_c(t_e) \cdot 0.45$ $\varphi(t_e)$: 有効ヤング係数の補正係数 (温度上昇期のクリープの影響を考慮) 最高温度に達するまでの有効材齢: $\varphi(t_e) = 0.42$ 最高温度に達する有効材齢 + 1 有効材齢: $\varphi(t_e) = 0.65$ 最高温度に達するまでの有効材齢後の 1 有効材齢までは直線補間する。	

※ C/W: セメント水比 (単位セメント量 / 単位水量)

表3 解析に用いる各種定数

項目	解析に用いる値または数式
比熱 (kJ/kg°C)	1.15
熱伝導率 (W/m°C)	2.7
密度 (kg/m ³)	2400
ポアソン比	0.2
圧縮強度 (N/mm ²)	$f'_c(t_e) = (t_e - S_f) / (a + b \cdot (t_e - S_f)) \times f'_c(t_{28})$ S_f : 硬化原点に対応する有効材齢 (日) a, b : セメント種類, 管理材齢に応じた係数 $f'_c(t_{28})$: 材齢 28 日における圧縮強度 (N/mm ²)
引張強度 (N/mm ²)	$0.13 \times f'_c(t_e) \cdot 0.85$
ヤング係数 (N/mm ²)	$6300 \times f'_c(t_e) \cdot 0.45$
ヤング係数の補正係数	最高温度に達するまでの有効材齢: 0.42 最高温度に達する有効材齢 + 1 有効材齢以降: 0.65
膨張ひずみ	$\epsilon_{cs}(t_e) = 145 \times [1 - \exp\{-0.27(t_e - 0.30)^{1.53}\}]$

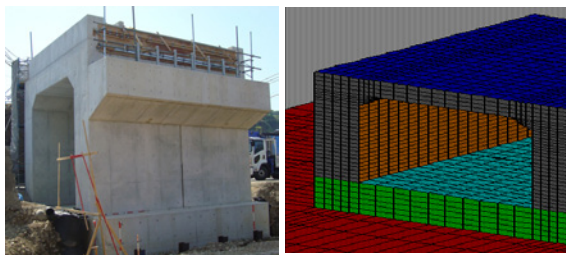


図5 解析モデル形状

3.3.3 発生応力の算定

実ひずみから自由ひずみを差し引いた値 (以下, 拘束ひずみ) は, 鉄筋等による拘束効果により発現できなかったひずみである。本研究においては, 無応力計の計測値より得られた自由ひずみと温度の関係における曲線の勾配 (=線膨張係数) の変化点をコンクリートの硬化開始点 (以下, 「硬化原点」とする) とし, それ以降に生じた拘束ひずみが応力の発生に寄与するものとした。

本論文において, 表4に示すように, 単位材齢 Δt 毎の拘束ひずみの変化量に, 各単位材齢内における平均の有効ヤング係数 $E_e(t_e)$ を乗じて求めた単位時間当たりの応力変化量の累積として算出した。

3.3.4 温度応力解析の妥当性の検討

図6に, コンクリート内部温度について, 現地計測データと温度解析結果の比較を示す。最高温度到達材齢および, 最高温度については概ね一致した。図7に, 発生応力およびコンクリート引張強度について, 現地計測データから算出した値と応力解析結果の比較を示す。水和熱による膨張および膨張材の効果により材齢初期に導入される圧縮側の発生応力について, 最大値および発現時期は現地計測と解析の結果が概ね一致したことから, 解析

特集：開削トンネルの設計技術

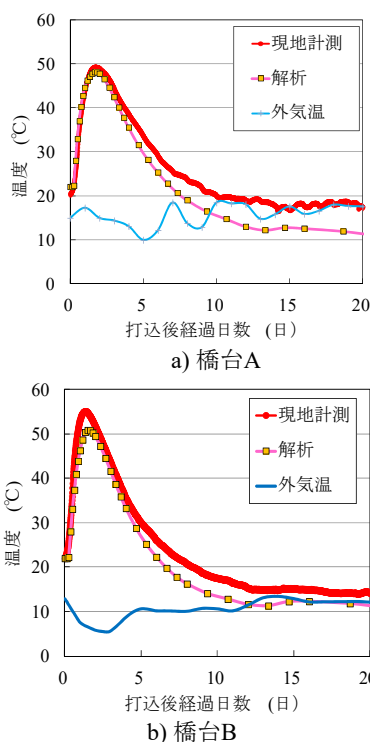


図6 現地計測と解析結果（部材中央の温度履歴）

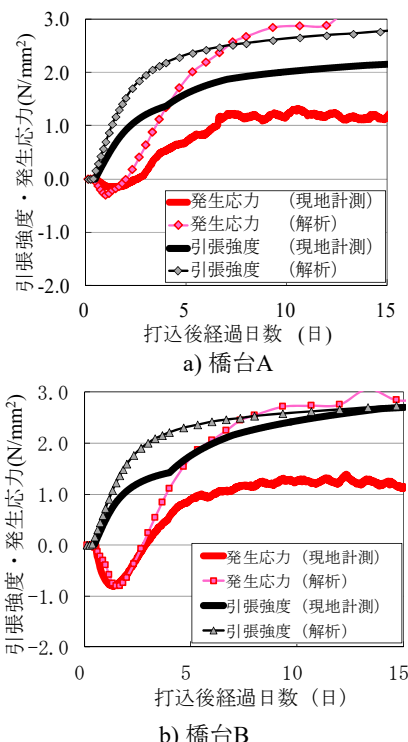


図7 現地計測と解析結果（発生応力と引張強度）

が実現を概ね再現できていると考えられる。なお、材齢約3日目以降については解析結果に対して、現地計測データから算定した発生応力が乖離する結果となった。この原因としては、クリープによる応力緩和に関する実験式と実現の乖離や、埋込型ひずみ計による直ひずみと解析が想定する主ひずみ方向の差異、温湿度や風速等の周辺環境の変動が考えられる。また、解析においては打込み後約7～8日で発生応力がコンクリート引張強度を上回るという評価であったが、現地においては、ひび割れは発生していなかったことから、検討した解析手法は概ね安全側に評価していることを確認した。

4. 各条件が温度ひび割れに及ぼす影響の検討

4.1 検討概要

前章において、温度応力解析は橋台の温度ひび割れを概ね安全側に評価することを確認した。本章では開削トンネルやボックスカルバートの形状や施工条件等を想定したパラメータスタディを実施し、壁状部材の打継部付近を起点とした温度ひび割れ発生に対する、各種要因の影響評価を行った³⁾。図8に解析モデルの概要を示す。表5に試算の範囲と基本条件を示す。なお、解析に用いた各種定数は3.3.1項における表3と同一とした。

4.2 部材厚、誘発目地間隔の影響

図9に検討結果を示す。部材厚が大きいほど、ひび割れが発生しやすいが、その感度は小さくなる傾向であっ

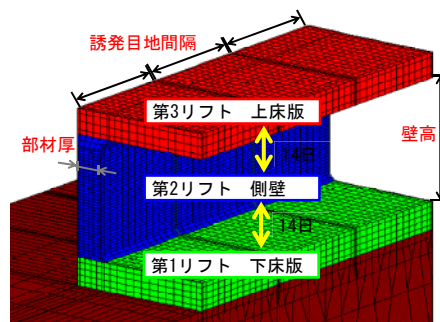


図8 解析モデル形状

表5 試算の範囲と基本条件

パラメータ	試算の範囲（適用条件）	基本条件	
構造	部材厚	500 ～ 1500mm	800mm
	壁高	3000 ～ 10000mm	5000mm
	誘発目地間隔 または構造物延長	3500 ～ 10000mm	5000mm
材料	セメント種別 膨張材の有無	普通 (N), 高炉セメント B 種 (BB), 中庸熱 (M), 早強 (H), 普通+膨張材 (N-EX), 高炉セメント B 種+膨張材 (BB-EX)	普通
	単位セメント量	285 ～ 330 kg/m ³	315 kg/m ³
	水セメント比	46.0 ～ 54.0 %	54.0 %
	施工時期	1 ～ 12 月	3 月
施工	打込み間隔	底版～側壁 : 中 14 日 側壁～上床版 : 中 14 日	3月1日:底版 3月15日:側壁 3月29日:上床版
	外気温	気象庁 2011 ～ 2013 月平均気温 (大阪)	
	コンクリート初期温度	打込み時外気温 +5°C	
	型枠の熱伝達率	2.0 ～ 8.0 W/m ² °C	8.0 W/m ² °C
養生期間	3 ～ 14 日	7 日	

た。誘発目地については配置が密であるほど、ひび割れ指数が大きく、ひび割れが発生しにくいことが分かった。

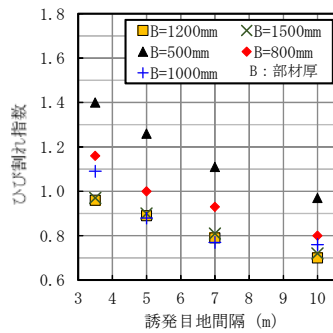


図9 部材厚と誘発目地間隔の影響

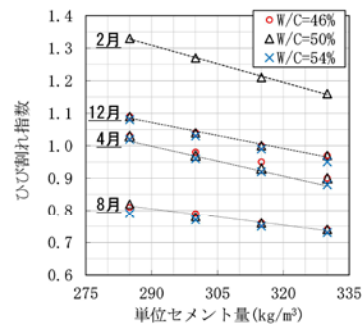


図11 単位セメント量の影響

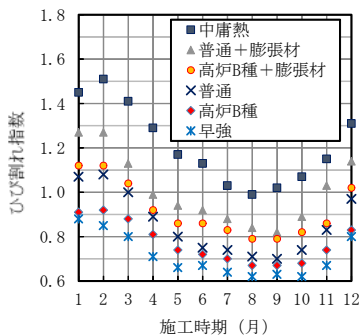


図10 施工時期・セメント種別・膨張材の影響

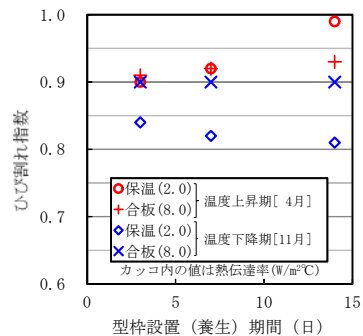


図12 養生条件および期間の影響

4.3 施工時期，セメント種別，膨張材の影響

図10に検討結果を示す。1年のうち、2月が最もひび割れが発生しにくく、8月が最も発生しやすいことが分かった。これは、2月は気温が低く、温度上昇期であり、コンクリート内部の最大温度差が最も小さい時期であること、8月は気温が高く、温度下降期であることから、最大温度差が最も大きくなる時期であることに起因すると考えられる。セメント種別については、普通ポルトランドセメントと比較して、中庸熟ポルトランドセメントはひび割れ発生が抑制され、高炉セメントB種や、早強ポルトランドセメントはひび割れが発生しやすいことが分かった。膨張材を使用すると、ひび割れ指数が増加し、ひび割れが抑制されることが分かった。

4.4 単位セメント量の影響

図11に検討結果を示す。単位セメント量の増加に伴いひび割れ指数が減少した。なお、同一単位セメント量においては、水セメント比の影響はみられなかった。

4.5 養生条件および期間の影響

図12に検討結果を示す。通常の場合型枠使用時(8.0 W/m²°C)においては、養生期間による影響は小さかった。また、断熱性の高い養生は、温度上昇期においては有効であるものの、養生期間が短い場合には効果が小さかった。なお、温度下降期においては、保温による温度上昇

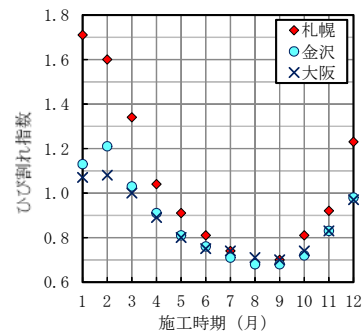


図13 地域による影響

により温度ひび割れが発生しやすくなることから、脱型時に急冷されないように配慮するのがよいと考えられる。

4.6 地域による影響

図13に検討結果を示す。大阪、金沢、および札幌とひび割れ指数の比較を行った。厳冬地域である札幌における冬期のひび割れ指数は大きかった。

5. 補強鉄筋によるひび割れ対策の効果の検証

ひび割れ幅は、ひび割れと交差する鉄筋量を増加させることで抑制することが可能であるとされている。しかしながら、実験的に検討した事例は少ない。そこで、補強鉄筋によるひび割れ幅抑制効果を検証するため、鉄筋量および配置をパラメータとした温度ひび割れの誘発

特集：開削トンネルの設計技術

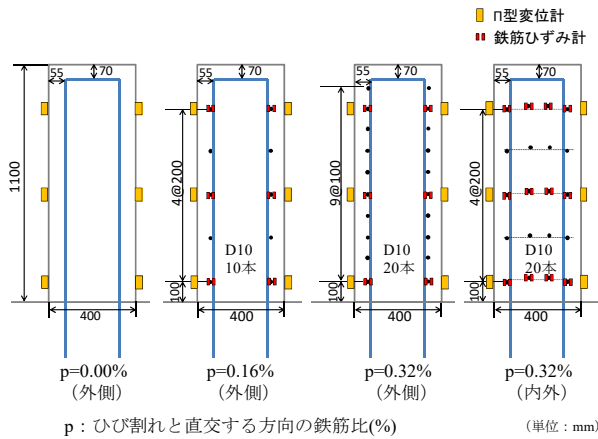


図 14 試験体形状および計測位置

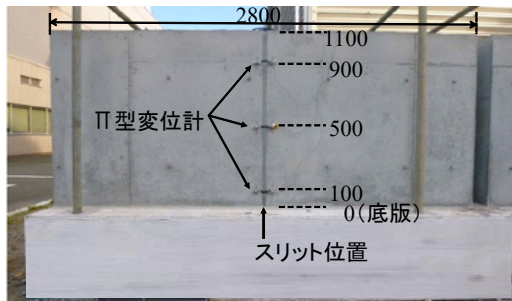


図 15 スリット位置とπ型変位計位置 (単位 mm)

試験を行った。図 14 に試験体形状および計測位置を示す。先行して構築した厚さ 480mm の RC スラブ上に、幅 400mm、長手方向が 2800mm の試験体 4 体を打ち継いだ。また、図 15 に示すように、ひび割れ幅は、スリット部で底版から高さ方向に 100mm、500mm、および 900mm の試験体中央の位置に、π型変位計を脱型後速やかに設置することにより計測した。なお、当該箇所は温度ひび割れを特定の箇所に誘発させるため、厚さ 4.5mm × 幅 200mm の銅板を埋設した。

図 16 に、打込み後 32 日経過時点における、ひび割れ幅の分布を示す。補強鉄筋量が多いほど、補強鉄筋を表面に密に配置するほど、ひび割れ幅抑制効果が大きいことがわかった。図 17 に、同時点における鉄筋ひずみの分布を示す。全てのケースで天端付近の鉄筋ひずみは圧縮側であったことから、補強鉄筋は打継ぎ部近傍を中心に配置した方が有効であると考えられる。

6. おわりに

本論文において得られた知見を以下に示す。

- 1) 検討した温度応力解析手法は、RC ボックスカルバート構造物の温度ひび割れの発生の有無に関して概ね安全側の評価となった。
- 2) 形状や施工条件をパラメータとした検討により、開

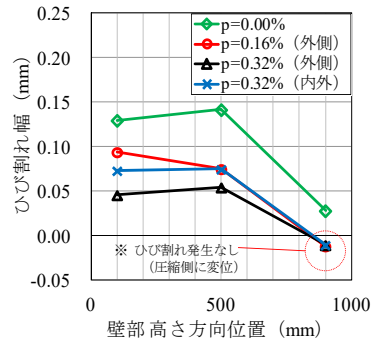


図 16 ひび割れ幅分布

(p: ひび割れと直行する方向の鉄筋比 (%))

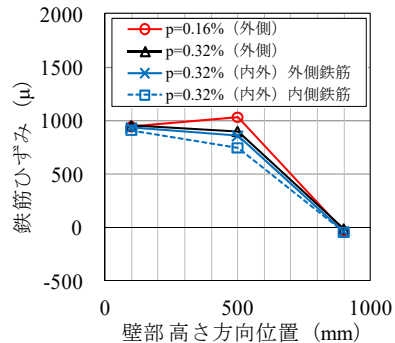


図 17 鉄筋ひずみ分布

(p: ひび割れと直行する方向の鉄筋比 (%))

- 削トンネルの温度ひび割れの発生傾向を把握した。
- 3) 補強鉄筋はコンクリート表面に密に配置するほど、ひび割れ幅抑制効果が大きい。
- 開削トンネルに発生する貫通ひび割れは、漏水を伴う等、併用上問題となる場合がある。この主な原因となる温度応力ひび割れを抑制することは、維持管理上有効であるといえる。そのため、実務において温度応力解析を実施し効果的な対策を行うことで、より高品質な鉄道コンクリート構造物の構築が可能になるといえる。

文 献

- 1) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書 設計編
- 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制御指針 2008
- 3) 藤岡慶祐，笠裕一郎，岡本大：鉄道 RC 構造物の初期ひび割れに関する一考察，第 23 回鉄道工学シンポジウム論文集，pp.69-76，2016
- 4) 財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物)，2004