

論文 2 径間ラーメンボックスカルバートの温度応力に対する誘発目地間隔と形状の検討

神崎 浩二^{*1}・米澤 朗^{*2}・樋口 晃^{*3}・村上 祐治^{*4}

要旨：新若戸道路（仮称）の陸上トンネル部（若松側）はボックスカルバートの形状をしており、部材の厚さが1,300mm程度のマスコンクリート構造物である。本構造物は、そのほとんどが地下構造物であるが、海上に近接しているため、耐久性からみた場合の補修の要否に関するひび割れ幅の限度を0.2mmと設定し、ひび割れ発生危険度の評価方法として、最小ひび割れ指数が1.2以上となるひび割れ制御方法を検討した。本論文では、温度応力解析結果からL=15.0mピッチの誘発目地材配置と打込み半日後から7日間のパイプクーリング、誘発目地試験により目地材配置部の構造物断面欠損率を62%とする必要性を結論付けた。

キーワード：温度ひび割れ指数，目地間隔，誘発目地，パイプクーリング，断面欠損率

1. はじめに

新若戸道路（仮称）は、響灘大水深コンテナターミナル供用開始に伴い増大する交通の円滑化を図るため、北九州市若松区安瀬～戸畑区川代間約4.2kmに建設中の自動車専用道路である。

本構造物の建設地点は、図-1に示すように洞海湾に近接しているため、コンクリート中への塩化物イオン浸入による鉄筋の不動態皮膜破壊から、鉄筋腐食を起こす可能性がある。また、本構造物は、図-2に示すように底版・側壁・頂版の厚さが1.3m、ボックス外形が幅36.3m、奥行き45.0m、高さ10.9mあり、部材寸法が大きなマスコンクリート構造物である。このような構造物の場合には地盤や既設コンクリートが拘束体となり、温度ひび割れが発生する可能性が高いとされている（例えば、1）。そこで、温度応力解析により、各部位の最小ひび割れ指数が1.2以上となる誘発目地の配置間隔とコンクリート打込み後の養生方法について、誘発目地試験により、目地周辺部にひび割れが発生し易い断面欠損率を有する目地形状について検討した。



図-1 新若戸道路（仮称）計画概要図

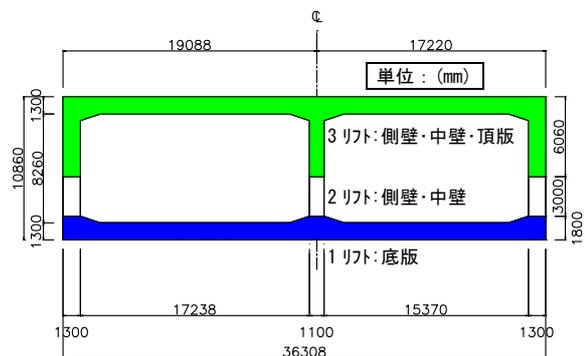


図-2 BOX-3 構造図

*1 (株)間組 九州支店土木部新若戸作業所 主任 (正会員)

*2 国土交通省 九州地方整備局北九州港湾・空港整備事務所 所長

*3 国土交通省 九州地方整備局北九州港湾・空港整備事務所 係長

*4 (株)間組 技術・環境本部技術研究所土木研究室 チームリーダー (正会員)

2. 温度応力解析

底版および側壁、頂版について、地盤を含めてモデル化し、温度については有限要素法、応力についてはCP法によって解析する。なお、温度応力の計算には、非線形構造解析プログラム「ASTEAMACS for Windows Ver. 2」を使用した。また、コンクリートの諸条件は、「新若戸道路陸上トンネル部に使用する低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの配合検討書、平成15年4月」の結果を用い、不明な点は土木学会コンクリート標準示方書 2002年度版施工編に基づいて仮定し、地盤については、トンネル標準示方書開削工法編の値を用いた。

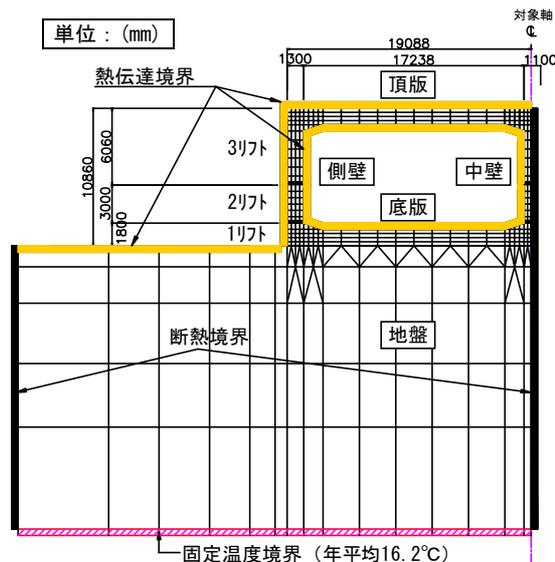


図-3 解析モデル図 (1/2モデル)

2.1 解析条件

(1) 検討ケース

温度応力解析にあたり、予備検討を実施した。検討ケースを下記に示す。

ケース1：目地なし L=45.0m

ケース2：ひび割れ誘発目地 8箇所設置

目地間隔 L=5.0m

(2) 解析モデル

解析モデルは、厳密には対称でないが、非対称性が解析結果に与える影響は小さいことを考慮して、中壁中心までの1/2モデルとして解析する。解析モデル、および温度解析における境界条件を図-3に示す。

(3) 打込みのスケジュール

ボックスカルバートの打込みスケジュールおよびコンクリートの打込み温度を表-1に示す。

表-1 打込みのスケジュール

リフト	部 位	打込み日	打込み温度(°C)
1	底版	7/5	27.5
2	側壁・中壁	9/10	27.2
3	側壁・中壁・頂版	11/25	15.1

(4) 外気温

2002年度版理科年表下関の気象観測データをもとに、1971年～2000年における下関の月別平均気温を式(1)に近似し解析時の外気温とした。解析時外気温として図-4に示す。

$$T(t) = 16.2 + 9.6 \cdot \sin(2\pi(t/24 - 106)/365) \quad (1)$$

(5) 熱的物性値・力学的物性値

コンクリートは低熱ポルトランドセメントを使用し、セメント量および水セメント比はそれ

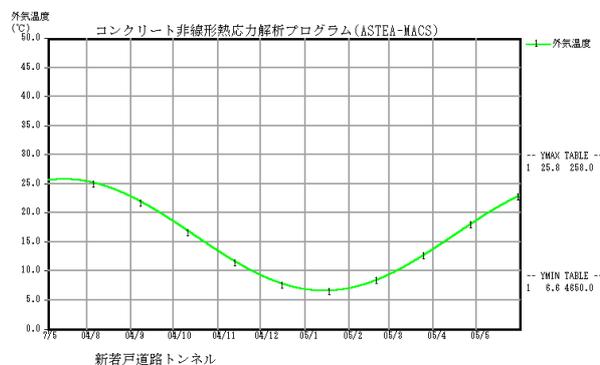


図-4 解析時外気温

ぞれ、285kg/m³、55.0%である。コンクリートと地盤の熱的・力学的物性値を表-2に示す。

(6) 構造物の養生方法

コンクリートの養生方法の相違により、気相と固体の熱のやり取りを表す熱伝達率の値が変わってくる。各熱伝達境界の熱伝達率の値を設定し、以下の養生方法を選定した。

- ・型枠面：打込みから7日間までは鋼製型枠を設置した状態で、その後脱枠 (14W/m²°C)
- ・コンクリート上面：打込みから7日間までは散水養生、その後撤去 (14W/m²°C)

2.2 温度ひび割れ指数の目標値²⁾

ひび割れ発生危険度の評価は、温度ひび割れ指数によって行う。標準的な温度ひび割れ指数を参考値として以下に示す。

- a) ひび割れを防止したい場合：1.5 以上
- b) ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合：1.2 以上
- c) ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合：0.7 以上

本構造物は、そのほとんどが地中構造物であるため、施工後のひび割れ発生によるメンテナンスが困難であると考えられる。よって、温度ひび割れ指数は、b)のひび割れの発生をできるだけ制限したい場合の1.2 以上を目標とした。

2.3 解析結果

温度ひび割れ解析結果を温度・温度応力・履歴図とし、評価としてひび割れ指数を表-3にまとめた。解析の結果より、

- a) ケース1：低熱ポルトランドセメントを用いた場合、底版および3リフト側壁部2・中壁2・頂版においては、ひび割れの発生をできるだけ制限したい温度ひび割れ指数 $I_{cr}=1.2$ 以上となり、ひび割れが発生したとしても軽微なひび割れが予測される。2リフト側壁部1・中壁1においては、ひび割れ発生の可能性が非常に高いことが予測される。
- b) ケース2：ひび割れ誘発目地を8箇所設置した場合においても、2リフト側壁部1・中壁1

は、ひび割れ発生をできるだけ制限するにまで至らないという結果であった。

表-2 コンクリートの熱的・力学的物性値

物性値	単位	底版・側壁・頂版	地盤
		低熱ポルトランドセメント 30-12-20-L	
熱伝導率	W/m°C	2.7	3.45
比熱	kJ/kg°C	1.16	0.8
単位体積重量	kg/m ³	2,317	1,640
断熱温度 上昇式 (打込み 20°Cの 例)	(基本式)	$Q(t)=Q_{\infty}(1-e^{-\alpha t})$	
	単位セメント量 (kg/m ³)	285	
	(Q_{∞}) °C	36.6	
	(α)	0.289	
熱膨張係数	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	10	10
ポアソン比	-	0.135	0.45
圧縮強度	$f'c(28)$ (N/mm ²)	35.1	-
	$f'c(91)$ (N/mm ²)	49.0	
有効ヤング係数	N/mm ²	$E_e = \phi(t) \times 5800(f'c(t))^{0.5}$ $\phi(t < 3\text{日}) = 0.73$ $\phi(3\text{日} \leq t < 5\text{日}) = 0.73 \sim 1.0$ $\phi(t \geq 5\text{日}) = 1.0$	
引張強度	N/mm ²	$f_t(t) = 0.26 \times (f'c(t))^{0.7}$	

表-3 解析結果比較表

検討ケース		ケース1 L=45.0m							ケース2 L=5.0m						
リフト	部位	最大温度(°C)	材齢(日)	最大応力(N/mm2)	材齢(日)	最小ひび割れ指数	ひび割れ発生確率	材齢(日)	最大温度(°C)	材齢(日)	最大応力(N/mm2)	材齢(日)	最小ひび割れ指数	ひび割れ発生確率	材齢(日)
1	底版 内部	45.7	3.7	2.6	146.3	1.71	1(%)	146.3	45.7	3.7	0.8	69.7	4.94	0(%)	69.7
	底版 表面	33.1	3.0	1.9	146.3	2.32	0(%)	146.3	33.1	3.0	0.3	5.3	3.09	0(%)	3.7
2	側壁部1 内部	41.6	2.7	4.5	78.7	0.77	80(%)	14.7	41.6	2.7	3.1	78.7	0.97	51(%)	14.7
	側壁部1 表面	29.0	2.0	3.6	79.0	1.06	42(%)	78.7	29.0	2.0	2.2	79.0	1.58	3(%)	13.3
2	中壁 内部	39.1	2.3	4.1	79.0	0.86	70(%)	13.3	39.1	2.3	2.6	79.0	1.12	48(%)	12.0
	中壁 表面	28.8	2.0	3.4	79.0	1.14	47(%)	79.0	28.8	2.0	1.9	79.0	1.76	1(%)	12.0
3	側壁部2 内部	27.2	3.0	1.4	29.3	1.66	2(%)	16.0	27.2	3.0	1.2	29.3	1.94	0(%)	16.0
	側壁部2 表面	22.7	187.0	0.6	21.3	3.70	0(%)	14.7	22.7	187.0	0.4	18.7	5.32	0(%)	12.0
3	中壁 内部	24.8	2.3	1.0	18.7	1.98	0(%)	13.3	24.8	2.3	0.8	16.0	2.31	0(%)	12.0
	中壁 表面	22.8	187.0	0.4	13.3	3.90	0(%)	10.7	22.8	187.0	0.3	9.3	4.54	0(%)	8.0
3	頂版 内部	27.2	3.0	1.0	26.7	2.32	0(%)	18.7	27.2	3.0	0.6	187.0	6.50	0(%)	14.7
	頂版 表面	22.7	187.0	0.2	16.0	8.44	0(%)	13.3	22.7	187.0	0.1	4.7	14.53	0(%)	4.0

2.4 ひび割れ制御対策の検討

以上のように、低熱ポルトランドセメントの使用および誘発目地設置間隔 $L=5.0\text{m}$ のみの対応では、目標としている温度ひび割れ指数 1.2 以上をクリアすることが不可能であったため、本構造物においてはひび割れの発生を許容するものの、有害なものにならないよう他の制御対策を実施することが妥当であると判断された。

温度ひび割れ制御対策の検討は、最小ひび割れ指数を示している 2 リフト側壁部を対象に行った。対策としては、

- a) プレクーリング
- b) 2 リフトのみのパイプクーリング
- c) 目地間隔

の a)～c) 項目を組み合わせ、温度応力解析を実施した。b) パイプクーリングについては、2 リフトの各壁に 2 本ずつ 2 段（上下間隔 1m）水平に配置し、単位体積あたりのクーリング本数を合わせ解析する。追加検討ケースを表 4 に示す。なお、冷却管の径および流量は、直径 1 インチの鋼管を用いることとし、毎分 15 リットルと設定する。また、通水期間は最大温度到達時間の 3 日間と設定した。パイプへの吸熱度は、節点と固定温度との熱伝達率として田辺ら³⁾の研究式である式(2)を用いて、パイプ壁面とコンクリート面間の熱伝達率として与えた。

$$\text{熱伝達率} : h(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{C}) = 552 \times u + 50 \quad (2)$$

2.5 ひび割れ制御対策の決定

図 5 に示すように、目標値である温度ひび割れ指数 1.2 以上となるのは、パイプクーリング (24.5°C) の目地間隔 $L=17.6\text{m}$ 以下となるケース 5, 6, およびパイプクーリング (19.5°C) の目地間隔 35.4m 以下となるケース 8, プレクーリングを実施するケース 9, 10 であった。これらについて検討すると、プレクーリングの施工は可能であるが、コスト的に高価なものとなり、これも高価なものとなる。よって、2 リフトの打込み時期 9 月の北九州市水道水温 24.5°C

表 4 追加検討ケース項目

ケース	対 策				
	セメント	目地 (m)	パイプクーリング水温 (°C)	プレクーリング	打込み温度 (°C)
ケース3	低熱	45.0	24.5	—	27.2
ケース4	低熱	20.0	24.5	—	27.2
ケース5	低熱	10.0	24.5	—	27.2
ケース6	低熱	5.0	24.5	—	27.2
ケース7	低熱	45.0	19.5	—	27.2
ケース8	低熱	5.0	19.5	—	27.2
ケース9	低熱	45.0	—	○	15.0
ケース10	低熱	5.0	—	○	15.0

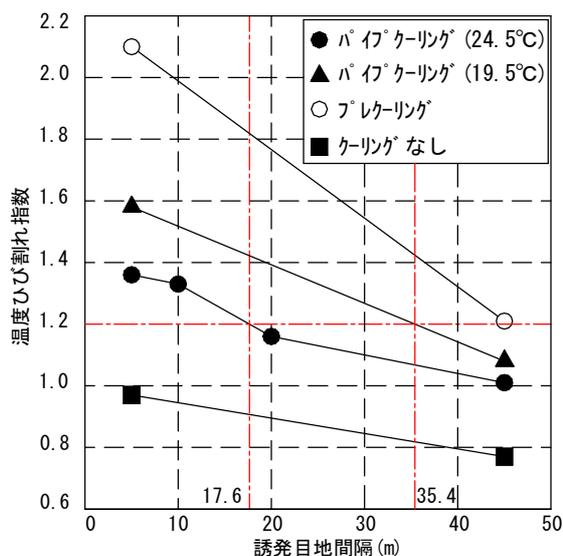


図 5 目地間隔と温度ひび割れ指数の関係

で直接冷却するパイプクーリングと施工上安全側である $L=15.0\text{m}$ 間隔の誘発目地設置を採用した。なお、給水方法としては、施工時の型枠解体材齢に合わせ打設半日後より 7 日間の 1 次クーリングのみを流速 $v=15\text{cm}/\text{sec}$ にて実施する。

3. 誘発目地試験

森本ら⁴⁾によると、誘発目地の断面欠損率を 50%程度に増加させると、誘発目地以外でのひび割れは減少させることが可能である。また、誘発目地の間隔と誘発目地以外で生じたひび割れの幅とは密接な関係があり、誘発目地の間隔が小さくなるにしたがい、ひび割れ幅は減少する。

誘発目地の形状によっても目地周辺部に発生する応力度が相違し、有利な誘発目地の形状があるとされている。そこで、表 5 に示すような誘発目地に関する項目を検討することとした。

3.1 試験方法

(1) 誘発目地試験の形状寸法

誘発目地試験には、低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートを使用する。配合を表-6に示す。試験体は、図-6に示すドーナツ型のコンクリート試験体とする。図中の番号は、誘発目地ライン上のコンクリートひび割れを重点的に観察する点として印している。

試験体は、内径 900mm, 外径 1,900mm, 高さ 200mm とし、コンクリートの断面は長さ 500mm × 高さ 200mm とする。1 体の試験体と同じ断面欠損率となる A~D シリーズの 4 種類の誘発目地を設置し、断面欠損率別に 5 種類の試験体を製作した。ドーナツ型コンクリート試験体を選定したのは以下のような理由である。

ドーナツ型のコンクリート試験体が収縮すると、内径の鋼製リングにより収縮が拘束され、試験体円周方向に引張応力が生じる。このため、半径方向に目地板を配置すれば、引張応力による目地板の形状、目地板の断面欠損率などの検討を行うことができるためである⁴⁾。

(2) 試験内容

コンクリート打込み後、施工工程に合わせ 7 日間濡れスポンジを表面にかけ養生する。湿潤養生完了後、乾燥を開始する。

乾燥を開始しても内側型枠、外側型枠を脱型せず、一面乾燥状態を作る。ドーナツ型コンクリート試験体は、乾燥直後から 1 日 2 回程度観察を行い、ひび割れの発生状況を確認する。

3.2 試験結果

7 日間のスポンジ養生完了後、コンクリートを一面乾燥状態にし、表面のひび割れ発生状況を観測した。結果を図-7に示す。一面乾燥開始直後となる 1 日目には、断面欠損率 62% の B シリーズ(1, 2), D シリーズ(1), 72% の B シリ

表-5 誘発目地試験の検討項目

項目	種類
断面欠損率	32%, 42%, 52%, 62%, 72%
形状	4 種類 (A~D シリーズ)
ひび割れ	発生状況, 発生期日, 発生数

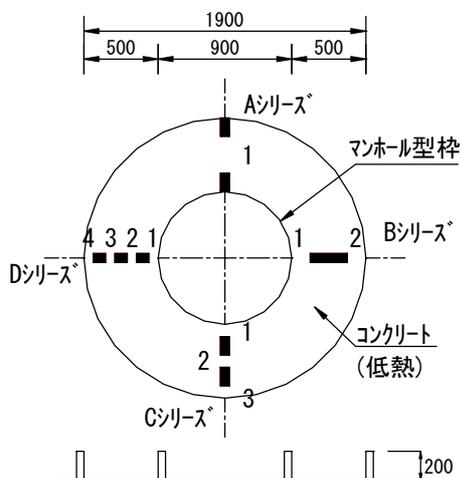


図-6 誘発目地の検討に使用する試験体

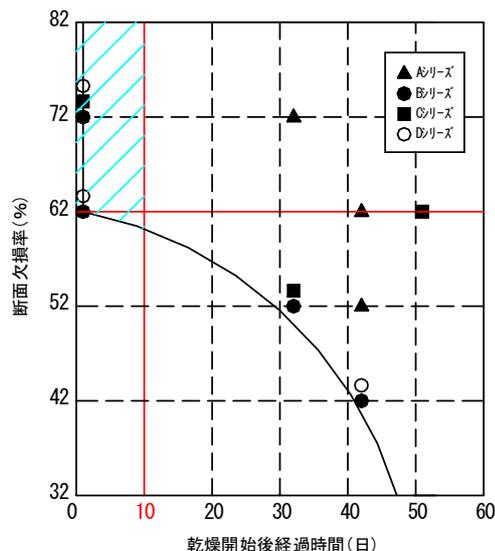


図-7 ひび割れ発生時系列図

ズ (1, 2), C シリーズ(1~3), D シリーズ(1, 4) の誘発目地ライン上に、それぞれへアクラックが発生したが、明瞭なひび割れであると判断可能なものになるまでに 23 日間の期間を要した。断面欠損率 62% の B, D シリーズ, 72% の B, C, D

表-6 低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの配合表

配合種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				高性能 AE 減水剤 Ad (%)
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
低熱	20	12	55	4.5	46.5	157	285	846	1,025	0.75

シリーズの誘発目地は、測定終了日である 60 日地点で、誘発目地以外のひび割れが確認されず、最初に確認されたヘアクラックに沿ってひび割れが発展しているため、ヘアクラックの発生をひび割れ確認と位置づけた。

乾燥開始後 32 日目には、断面欠損率 72%の A シリーズ(1)、52%の B シリーズ(2)、C シリーズ(1, 3)にも誘発目地ライン上に微細なひび割れが発生した。

以降、ひび割れ発生状況確認を実施したが、断面欠損率 62%のドーナツ型コンクリート試験体全ての目地シリーズにひび割れが発生するまで乾燥開始後 51 日間、52%の A シリーズ(1)、42%の B シリーズ(1)、D シリーズ(2, 3)においては、42 日間の時間を要する結果となった。また、断面欠損率 32%については、試験終了とした 60 日目に至ってもひび割れは確認されなかった。

図-7により、目地シリーズ別のひび割れ発生状況として、B シリーズが最もひび割れの入り易いものであると読み取れる。また、本施工において脱枠後に塗膜処理を実施するため、ひび割れ発生の早期確認(脱枠後 10 日以内)をする必要性があり、断面欠損率は 62%を採用することが望ましいと考える。断面欠損率 62%の B シリーズのひび割れ発生形状は、写真-1に見られる通り、誘発目地ライン上にひび割れが発生しており、そこでの応力集中を認めることができた。

4. まとめ

本工事で使用する低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートを使用して、温度応力解析、誘発目地試験を実施し、以下の結果を得た。

- 1) 本構造物の 2 リフトの各壁に 2 本ずつ 2 段(上下間隔 1m) 水平にスパイラルシースを施し、打込み半日後から 7 日間のパイプクーリング(24.5℃)の実施と誘発目地を L=17.6m 間隔で設けることにより、目標値である温度ひび割れ指数 1.2 以上の確保が可能であることを確認した。

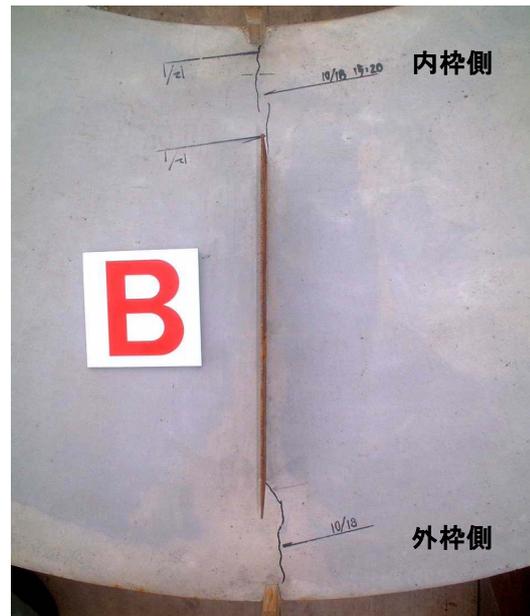


写真-1 62% B シリーズひび割れ発生状況

- 2) 誘発目地試験の結果として、コンクリートの断面欠損率を 62%以上とすれば、乾燥開始後 10 日以内にはひび割れを確認することができた。目地の形状としては、断面の中心部に 1 枚配置する B シリーズが最もひび割れの発生し易いものであると確認した。本論文の結論は、解析と試験を主体としたものであり、本施工においてこの有効性を確認していく予定である。

参考文献

- 1) 北野祐介ほか：低熱ポルトランドセメントを用いたマスコンクリートの施工，土木学会第 55 回年次学術講演会，Vol. 300，pp. 600-601，2000. 9
- 2) コンクリート標準示方書平成 8 年版施工編，土木学会，pp. 182-183，1996. 3
- 3) 田辺忠顕：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定ならびに冷却効果の解析，土木学会論文報告集，第 343 号，pp. 171-179，1984. 3
- 4) 森本博昭，児嶋保明，小柳洽：ひび割れ誘発目地の構造に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20，No. 2，pp. 1069-1074，1998. 6