

ケーソン側壁におけるプレクーリングの部分適用による 温度ひび割れ抑制効果の確認

Verifying the Thermal Crack Control Effect of Precooling Partially Applied to Caisson Sidewall

川里 麻莉子^{*1} 槇島 修^{*1} 高桑 信^{*2}
 Mariko Kawasato Osamu Makishima Shin Takakuwa
 滝戸 慎二^{*2} 澤田 邦博^{*2} 新垣 健児^{*2}
 Shinji Takido Kunihiro Sawada Kenji Arakaki

【キーワード】 マスコンクリート 温度ひび割れ プレクーリング 液体窒素 温度応力解析

1. はじめに

マスコンクリートの施工にあたっては、実際の施工条件に応じて、温度ひび割れの発生リスクを評価し、効果的な温度ひび割れ対策を実施することが求められる。特に、底版等の既設コンクリートの上部に構築される壁状の部材は、ピーク以降の温度降下時に収縮が拘束されるため、部材を貫通する温度ひび割れが生じやすく、耐久性の低下につながる恐れがある。このような水和熱に起因する温度ひび割れの抑制には、温度上昇の抑制や拘束度の低減が有効であり、具体的な対策として、発熱の小さいセメントの使用やクーリング工法の実施、ひび割れ誘発目地の設置等が挙げられる。

今回、底版の外部拘束を受けるケーソン側壁の温度ひび割れ対策として、部分的に適用可能なプレクーリング工法を採用した。本稿では、コンクリートの温度測定結果および温度応力解析結果より、クーリング工法の部分適用による温度ひび割れ対策の有効性について報告する。

2. 工事概要

本報告の対象とした構造物は、江戸川左岸流域下水道事業における江戸川第一終末処理場の整備の一環として、ニューマチックケーソン工法により施工する着水井である。工事概要を表-1に、一般構造図を図-1に示す。ケーソン側壁は、構造および施工性を検討し、8ロット（第2ロット～第9ロット）に分割した。底版の拘束を受ける第2ロットは、壁厚が2.0mであり、かつ、暑中期（9月）の施工となるため、特に外部拘束による温度ひび割れの発生が懸念された。

3. 温度ひび割れ対策の検討

3.1 ひび割れ制御目標

着水井は地下構造物であり、検討の対象とした第2ロットの側壁には高い水圧が作用するため、水密性を確保し漏水のないように施工することが求められた。ここでは、示方書に示される水密性を確保するために必要なひ

表-1 工事概要

工事名	江戸川第一終末処理場着水井土木工事
発注者	千葉県
施工者	飛島・ケイハイ特定建設工事共同企業体
工事場所	千葉県市川市本行徳地先
工期	平成28年3月18日～平成29年6月20日
躯体寸法	矩形：15.5m×27.0m、高さ40.4m
打設時期	平成28年7月～平成29年5月

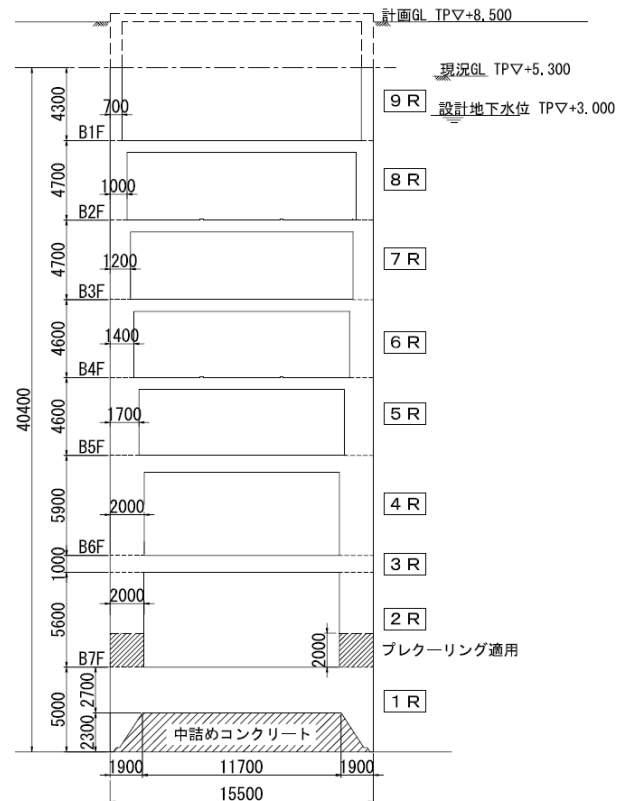


図-1 一般構造図（断面図）

び割れ幅の設計限界値の目安¹⁾を参考に、ひび割れ制御の目標値を「最大ひび割れ幅0.1mm以下」と設定した。なお、ひび割れ幅の予測値は、鉄筋比と経験最小ひび割れ指数から求めるひび割れ幅の算定式²⁾により求めた。

1. 技術研究所 研究開発G 第三研究室 2. 首都圏土木支店 江戸一作業所

3.2 温度ひび割れ対策の選定

側壁はロット毎に壁厚と打込み時期が異なることから、施工性および経済性を勘案して効果的な温度ひび割れ対策を選定した。選定にあたっては3次元FEM温度応力解析を行い、温度ひび割れ対策の効果を評価した。

温度ひび割れ対策の基本方針は、当初計画されたセメント種類（早強ポルトランドセメント）の変更とひび割れ誘発目地の設置とした。まず、全ロットを対象に、ロット毎にセメント種類の変更（低熱ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント等）を検討した。ひび割れ幅の目標値を満足する結果が得られない場合は、ひび割れ誘発目地の設置を追加で検討した。ただし、第2ロットについては、ひび割れ誘発目地を設置しない方針としプレクーリング工法の適用を検討した。

3.3 プレクーリング工法の適用計画

プレクーリング工法には、練混ぜ前の材料または練混ぜ中や練混ぜ後のコンクリートを冷却する方法があり、冷却手段として、冷水や氷、液体窒素などが使われている³⁾。本件では、冷却効果が高く、コンクリートダムや液化天然ガス（LNG）地上タンクなどにおける適用実績が多数報告⁴⁾⁵⁾されている液体窒素を用いたプレクーリング工法を採用した。

プレクーリング工法による効果的な温度ひび割れ対策を実施するあたり、対象の側壁の鉄筋比は0.321%であり、ひび割れ幅の目標値0.10mmを満足するひび割れ指数は1.5と算定された。したがって、ひび割れ指数1.5以上を満足するコンクリートの温度降下量とクーリングの適用範囲について、温度応力解析を行い、検討した。

クーリングの適用範囲の検討結果を図-2に示す。クーリングを適用しない場合、高さ5.6mのうち、ひび割れ指数1.5を下回る範囲は下端から約3mであることが確認された。そこで、クーリングの適用範囲を側壁の下端に限定し、目標値を満足するコンクリートの温度降下量と適用範囲を検討した。その結果、コンクリートの温度降下量を5℃、クーリングの適用範囲を側壁の下端から2.0mとすることで目標値を満足することを確認した。

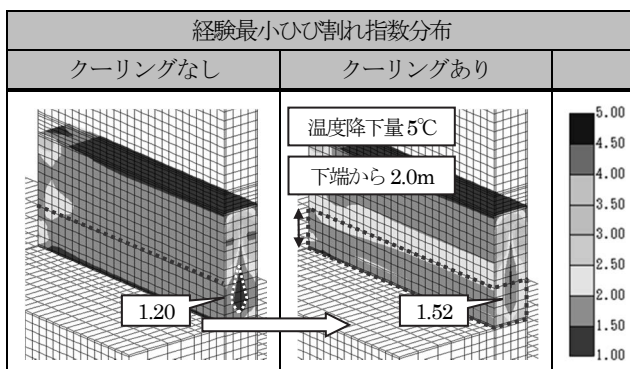


図-2 クーリング適用範囲検討結果

4. プレクーリング工法の実施

4.1 液体窒素を用いたプレクーリング実施状況

本工事で採用した液体窒素を用いたプレクーリング工法は、-196℃の液体窒素をホッパー部からアジテータ車内に直接投入して練混ぜ後のコンクリートを急速冷却するものである。液体窒素の投入量の調整によりコンクリートの温度降下量を管理する。プレクーリングの実施状況を写真-1に、液体窒素の投入状況を写真-2に示す。なお、コンクリート温度を1℃降下させるのに必要な液体窒素の投入量は約12kg/m³であり、冷却したコンクリートは第2ロットの下端から2.0mの357m³に適用した。



写真-1 プレクーリング実施状況



写真-2 液体窒素投入状況

4.2 コンクリート温度降下量の管理

液体窒素の投入量は、液体窒素の投入時間とローリーの吐出圧力により調整した。コンクリート温度の測定はT型熱電対を装着した長尺の棒をホッパー部からアジテータ車内のコンクリートに直接挿し込み、コンクリートの温度降下量を確認した。

液体窒素の投入時間とコンクリートの温度降下量の関係を図-3に示す。投入時間が長いほど、吐出圧力が高いほど、液体窒素の投入量が増加し温度降下量が大きくなることを確認した。これにより、液体窒素の投入時間と吐出圧力の調整を行うことで、所定のコンクリートの温度降下量を管理することができた。

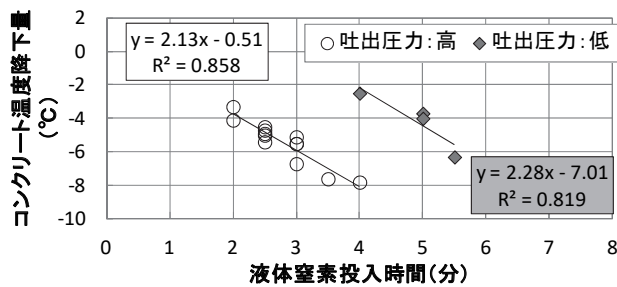


図-3 液体窒素の投入時間とコンクリートの温度降下量の関係

4.3 フレッシュコンクリート試験結果

フレッシュコンクリート試験結果を表-2に示す。今回の試験結果では、フレッシュコンクリートの品質管理値(スランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$, 空気量 $4.5 \pm 1.5\%$)を満足した。なお、クーリングの実施により、スランプは $1.5 \sim 2.0\text{cm}$ 低下し、空気量は $1.0 \sim 1.5\%$ 増加することを確認した。この傾向は既往の研究でも確認されており⁹⁾、この性状変化の要因として、経過時間に伴うスランプの低下と高速攪拌による巻き込み空気増加が考えられる。

表-2 フレッシュコンクリート試験結果

	試験実施	スランプ	空気量	温度
1	現着時	13.5cm	4.5%	26°C
	冷却後	12.0cm	6.0%	22°C
2	現着時	14.5cm	5.7%	26°C
	冷却後	12.5cm	5.7%	19°C
3	現着時	13.5cm	4.8%	26°C
	冷却後	12.0cm	5.8%	21°C

4.4 躯体コンクリートの温度測定結果

躯体コンクリートにおいて、クーリングによる温度上昇抑制効果を確認するために、側壁の代表断面で温度測定を行った。温度測定位置を図-4に示す。冷却したコンクリートと冷却しない標準コンクリートの各中心部と境界面を含む6点にT型熱電対を設置し、10分間隔で測定した。温度測定結果を図-5に示す。躯体中心部の最高温度は標準コンクリートが 56.7°C であるのに対し、冷却コンクリートが 49.8°C であり、また、打込み後から材齢15日にかけて打込み時の温度差 5°C 以上を維持していることを確認した。

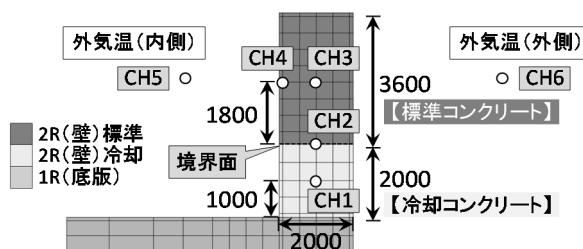


図-4 温度測定位置(断面図)

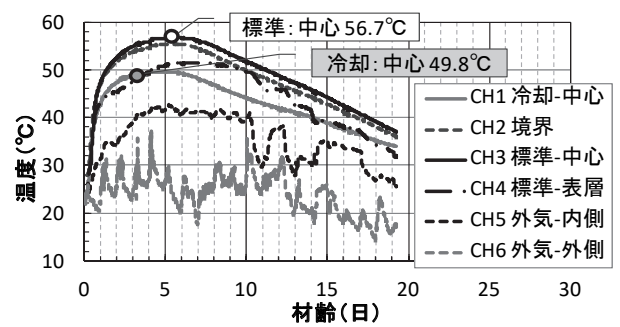


図-5 温度測定結果

5. ひび割れ抑制効果の確認

5.1 パラメータの同定

コンクリート温度の解析値と実測値の比較を図-6に示す。標準コンクリート、冷却コンクリートともに、中心部の最高温度の解析値と実測値は概ね一致したが、最高温度に到達する材齢に3日程度の差異が生じた。また、表層温度は、全期間を通して解析値に比べて実測値の方が大きくなることが確認された。差異が生じた要因として、解析に用いたコンクリートの発熱特性を表す断熱温度上昇曲線と壁側面の熱伝達率が実態と合致していない可能性が考えられた。そこで、実態の応力状態を推定するため、躯体の温度測定結果を基に断熱温度上昇曲線の係数と熱伝達率の同定を試みた。各パラメータの同定には格子探索法を用い、解析値と実測値の差が小さくなるようにフィッティング解析を行った。

同定後の解析値と実測値の比較を図-7に示す。同定

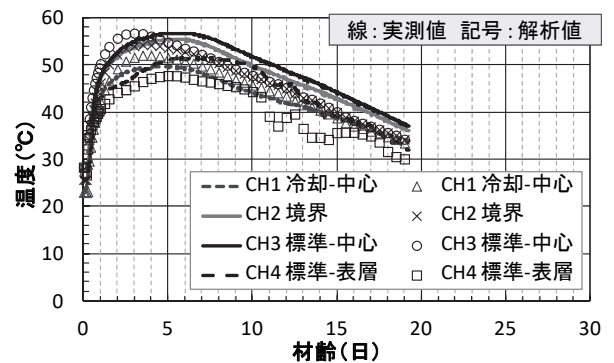


図-6 解析値と実測値の比較(同定前)

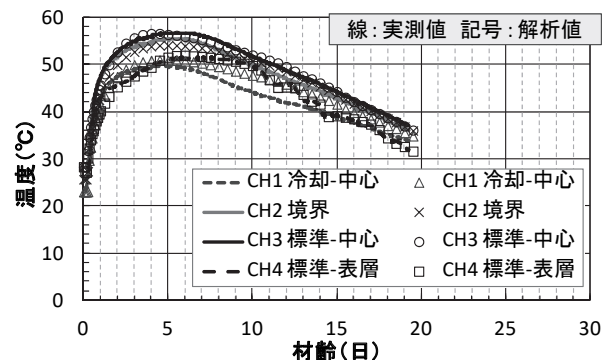


図-7 解析値と実測値の比較(同定後)

値を用いた解析値は実測値に概ね一致した。ここで、熱伝達率の同定結果を表-3に示す。壁側面の熱伝達率は一般値に比べて小さく、側壁の内側と外側で異なる結果となった。一般に、熱伝達率は表面の風速や乾湿の状態の影響を受けることが知られており⁷⁾、側壁の内側については壁とスラブに囲まれた密閉空間であることが熱伝達率を小さくした要因と推察される。断熱温度上昇曲線の同定結果を図-8に示す。同定値は一般値に比べて同等かそれ以下であり、冷却コンクリートは標準コンクリートよりも温度上昇量が小さいことを確認した。

表-3 同定結果 (熱伝達率)

熱伝達率 (W/m ² ・℃)	一般値		同定値	
	内側	外側	内側	外側
型枠面	8	8	3~5	5
露出面	14	14	8	14

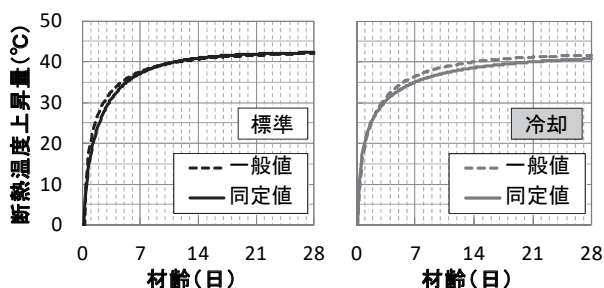


図-8 同定結果 (断熱温度上昇曲線)

5.2 温度応力解析結果

クーリングによる温度ひび割れ抑制効果を検証するために、5.1で同定したパラメータを用いて、クーリングあり・なしの2ケースについて、温度応力解析を実施した。温度応力解析結果を図-9に、ひび割れ幅の予測値を表-4に示す。逆解析により求めたひび割れ幅の予測値は0.05mmとなり、目標値を満足する結果であった。

6. おわりに

外部拘束ひび割れの発生が懸念された第2ロットの側壁を対象に、温度ひび割れ対策の一つとして、液体窒素を用いたプレクーリング工法を部分的に適用した。ひび割れ幅の目標値を満足するコンクリートの温度降下量とクーリングの適用範囲を解析的に決定し、温度測定と温度応力解析により温度ひび割れ抑制効果を確認した。また、平成29年4月に実施したひび割れ調査において、第2ロットはひび割れの発生は見られず、全ロットを通じて最大ひび割れ幅が0.15mm以下であることを確認した。

以上より、液体窒素を用いたプレクーリング工法の部分適用の有効性について確認できた。今後は効果的な温度ひび割れ対策の一つとして展開し、施工品質の向上につなげたい。

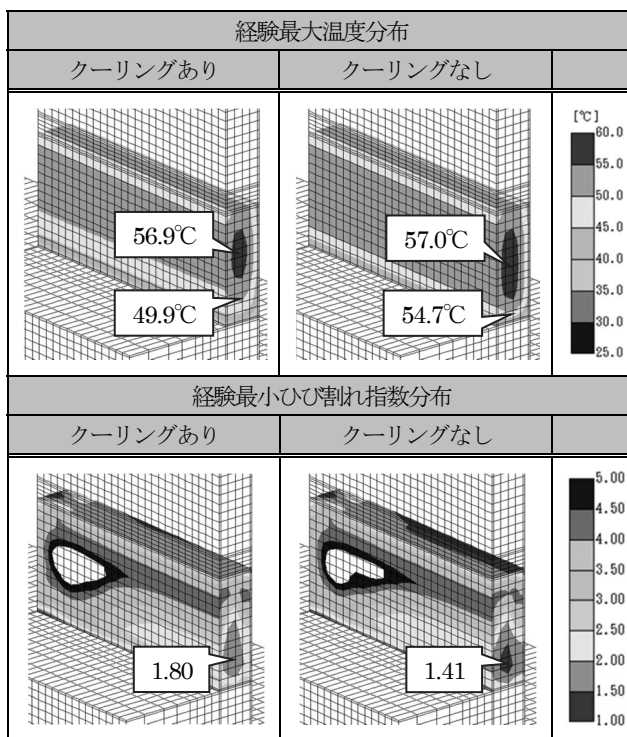


図-9 温度応力解析結果 (第2ロット)

表-4 ひび割れ幅の予測値 (第2ロット)

	クーリングあり	クーリングなし
ひび割れ指数	1.80	1.41
ひび割れ幅	0.05mm	0.14mm
設計配力筋	D29@200mm×2段	
鉄筋比	0.321%	

【参考文献】

- 1) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，pp.240-241，2013.3
- 2) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，pp.305-306，2013.3
- 3) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2016，pp.100-101，2016.11
- 4) 浅井邦茂・直井彰秀・中根淳・芳賀孝成・佐藤哲司：液体窒素によるプレクーリング工法を用いたPC防液堤の施工，コンクリート工学，Vol.26，No.5，pp.30-38，1988.5
- 5) 大澤賢修・福田信幸・森敏昭・小野定・江渡正満：液体窒素を用いたダムコンクリートのプレクーリング施工，Vol.26，No.5，pp.21-29，1988.5
- 6) 西脇敬一・川又篤・唐沢智之：液体窒素によるプレクーリング方法に関する基礎的研究，第65回土木学会年次学術講演会概要集，V-667，pp.1333-1334，2010.9
- 7) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2016，pp.46，2016.11