

ケーソン側壁へのパイプクーリングの適用結果について Application of Pipe Cooling Method in Side Wall of Caissons

伊藤 智規* 山下 晋由**
Tomoki Ito Kuniyoshi Yamashita

要 約

近年、コンクリート構造物の高品質化、長寿命化を目的として、温度ひび割れの抑制が注目されている。コンクリートの物性や温度ひび割れの発生メカニズムについては数多くの研究がなされており、温度応力解析によってコンクリートの変状を推定することが標準的な手法となっている。早強コンクリートを適用するケーソンでの温度応力解析結果と実現象との比較に着目した事例は少ないことから、本報文ではオープンケーソン側壁（壁厚 1.5 m）に関する予測解析、熱電対による温度計測結果、逆解析に基づく対策工の見直しについて報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. パイプクーリングの計画と予測解析
- § 3. 温度計測結果と逆解析
- § 4. 対策工の修正検討と事後解析
- § 5. おわりに

析を行うことで、対策工の見直しを図ることとした。

§ 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の高品質化、長寿命化を目的として、温度ひび割れの抑制が注目されている。コンクリートの物性や温度ひび割れの発生メカニズムについては数多くの研究がなされており、温度応力解析によってコンクリートの変状を推定することが標準的な手法となっている。また、温度応力解析結果と実現象との比較に着目した事例はあるものの、早強コンクリートを適用するケーソンでの報告事例は比較的少ない。

報告の対象となる構造物は、治水事業の一環として計画されたシールドトンネル発進立坑のオープンケーソンであり、オープンケーソンの構造図を図-1に示す。オープンケーソンは、外径 15.5 m、内径 12.5 m、壁厚 1.5 m、高さ 33.75 m であり、先行打設ロットに後行打設ロットの下部が拘束される壁状のマスキングコンクリートであること、設計基準強度 $\sigma_{ck}=24 \text{ N/mm}^2$ の早強コンクリートであること等の理由から、外部拘束による温度ひび割れが懸念された。

上記の背景から、オープンケーソン側壁に着目した予測解析を行い、熱電対による温度計測結果に基づく逆解

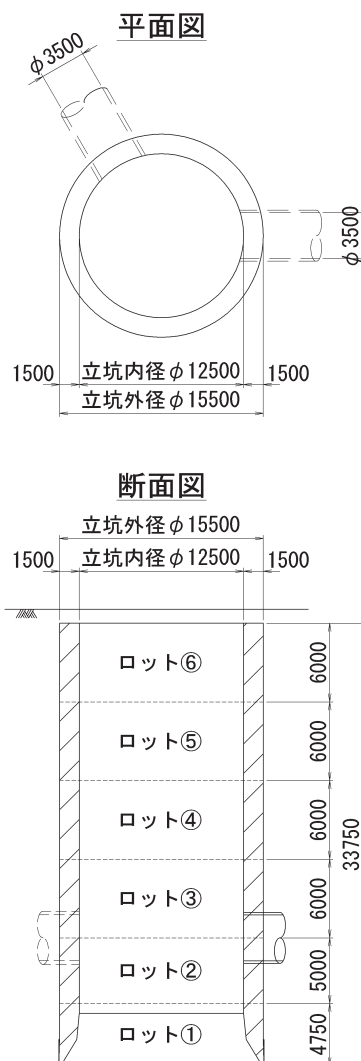


図-1 オープンケーソン構造図

* 土木設計部設計1課

** 西日本(支)洛西(出)(現:庭窪シールド(出))

§ 2. パイプクーリングの計画と予測解析

2-1 パイプクーリングの計画

パイプクーリングは、主に初期材齢におけるコンクリート内部の最高温度を低下させる目的と、部材全体の平均温度を早い時期に、構造物の置かれている平均的な温度、あるいは予想される最終温度にまで低下させる目的で実施されるものである²⁾。

予測解析の結果から、外部拘束の卓越するケーソン側壁の温度ひび割れ抑制対策として、パイプクーリングを適用することとした。最小ひび割れ指数は各ロット下部（先行打設ロット側）において小さい数値となるため、クーリングパイプの配置も各ロット下部に集中させ、温度上昇に伴うコンクリートの体積変化を抑制することにより最小ひび割れ指数の向上を図った。図-2に示すようにクーリングパイプの配置を2種類設定し、各ロットで必要とされる冷却効果の大小に応じて使い分けた。クーリングパイプの配置状況を写真-1に示す。

2-2 予測解析の解析条件

コンクリートの配合を表-1に、予測解析において適用したコンクリートの物性値を表-2に示す。断熱温度上昇特性や圧縮・引張強度、境界条件等は、コンクリート標準示方書¹⁾に準拠している。また、外気温は施工箇所近傍の過去3年間の日平均気温（表-3）を採用し、コンクリート打込み温度は線形補完により算出した打設日の日平均気温+5℃²⁾としている。

なお、コンクリート供給能力と工程上の理由から、施工には3つのプラントの利用を計画していた。コンクリートの配合は、単位セメント量で326～336 kg/m³と、プラントに応じてわずかに異なる。水和反応による発熱が最も多く、温度ひび割れに対して最も不利と考えられることから、単位セメント量が最大となるプラントの配合を適用して予測解析を行った。

パイプクーリングの設定条件は、流水温度を外気温と同一とし、流量は15 l/min、通水期間を打設開始から2日間とした。

以降では、温度ひび割れ抑制対策を適用しないケースを標準案、適用するケースを対策案と称す。

2-2 予測解析の結果

標準案および対策案の最小ひび割れ指数分布図を図-3に示す。なお最小ひび割れ指数 I_{cr} は、コンクリートに生じる温度応力 σ_t に対するコンクリート割裂引張強度 f_{tk} の比²⁾を表す指標（ $I_{cr} = f_{tk}/\sigma_t$ ）であり、その値が小さいほど温度ひび割れの生じる可能性が高いことを表す指標である。予測解析においては、最小ひび割れ指数 $I_{cr} = 1.0$ （ひび割れ発生確率 $P = 50\%$ ）を閾値として対策案（パイプクーリング）の検討を行った。

標準案では、各ロット下部のコンクリート内部におい

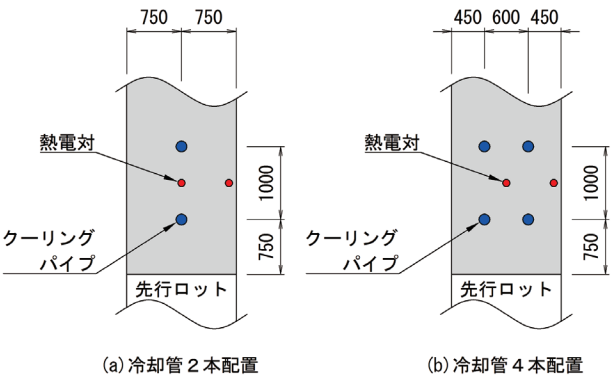


図-2 クーリングパイプの配置パターン（側壁）



写真-1 クーリングパイプ配置状況（側壁）

表-1 コンクリートの配合表

項目	諸元
セメント種類	早強ポルトランドセメント
設計基準強度	24 N/mm ²
単位セメント量	336 kg/m ³
単位水量	168 kg/m ³
水セメント比	50.0 %

表-2 コンクリートの物性値

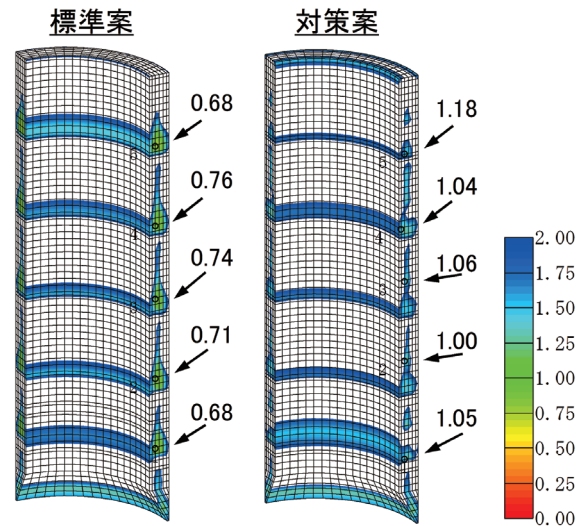
項目	諸元
熱伝達率	2.7 W/m ² ℃
密度	2400 kg/m ³
比熱	1.15 kJ/kg℃
ヤング率	$E(t) = \phi \times 6300 \times f_c(t)^{0.45}$ 最高温度に達するまで $\phi = 0.42$ 最高温度に達した以降 $\phi = 0.65$
ポアソン比	0.2
線膨張係数	$10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

表-3 日平均気温

月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
気温 (℃)	4.1	4.6	9.0	14.0	19.0	23.6
月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
気温 (℃)	27.9	29.0	24.9	18.9	12.1	6.1

て、最小ひび割れ指数 0.68 ～ 0.76 となっており、 $P = 90\%$ 程度の確率で温度ひび割れが発生する結果となった。なお、外部拘束に起因するコンクリート内部でのひび割れ指数の低下は貫通ひび割れとなり易く、水密性および耐久性に影響を与えるため、温度ひび割れ抑制対策が必要となる。

対策案では、標準案における各ロットでの最小ひび割れ指数に応じて、ロット②およびロット⑥は冷却管 4 本配置、ロット③～⑤は冷却管 2 本配置として解析を行った。またロット⑥について、パイプクーリング工法のみでは最小ひび割れ指数の目標値 ($I_{cr} = 1.0$, $P = 50\%$) を満足できなかったため、膨張材（「ハイパーエクспан」, NETIS: QS-020033-V）を添加する計画とした。上記の温度ひび割れ抑制対策を実施することにより、各ロットとも最小ひび割れ指数は 1.00 ～ 1.18、ひび割れ発生確率は 28 ～ 50% となり、目標値を達成する結果となった。



図－3 予測解析結果
(最小ひび割れ指数分布図)

2-4 パイプクーリングの施工

パイプクーリングの適用にあたっては、クーリングパイプ内の流水温度の管理が重要となる。「水温コントロールユニット」(NETIS: CB-110045-A, 写真－2) を使用し流水温度を管理した結果、冷却能力が低かったため、循環水の温度上昇が見られた。そのため、温度の上昇した冷却水を一部廃棄し、水道水を加えながら流水温度の管理を行った。

クーリングパイプ周囲を均一に冷却するため、上下・左右の隣り合うクーリングパイプの流水方向が逆になるように設定した(図－4)。



写真－2 水温コントロールユニット

§3. 温度計測結果と逆解析

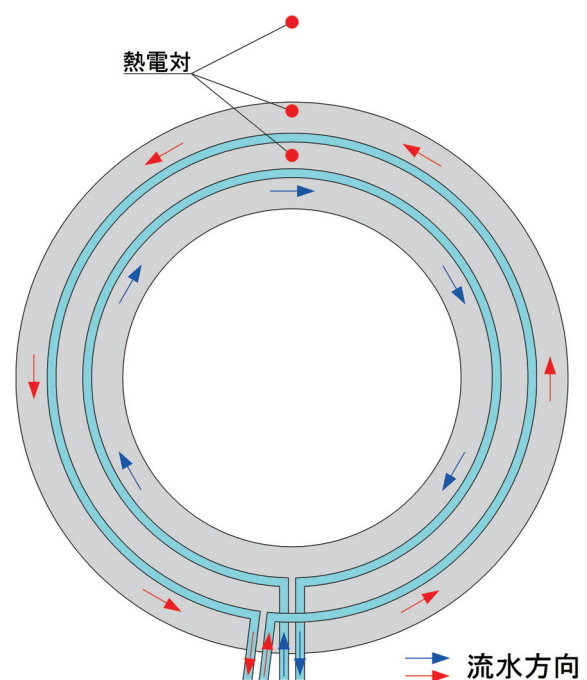
3-1 計測工の概要

側壁温度および外気温の計測工には、モバイル式コンクリート養生温度管理システム「おんどロイド」(NETIS: HK-100021-V, 写真－3, 4) を用いた。「おんどロイド」の特徴は 24 時間体制での遠隔地からの温度管理が可能などであり、異常発生時に迅速な対応が出来るという利点を有する。

温度計測位置の選定については、コンクリート中における温度履歴を把握してパイプクーリングの通水期間を管理するとともに、コンクリート断面方向の温度勾配を確認するため、各ロット下部のコンクリート内部温度、コンクリート表面近傍温度、および外気温の 3 点について計測を行った。

3-2 計測値と予測解析値の比較

実施工業や「おんどロイド」により計測した外気温といった施工時データを温度応力解析に反映し、ロット②について計測値と予測解析値の比較を行った。コンク



図－4 流水方向（ケーソン平面図）

リート内部温度に関して、計測値と予測解析値の経時変化を図－５に示す。比較の結果、コンクリート内部の最高温度は、計測値が予測解析値に比べて6.2℃高く、また材齢14日の降下後温度は、計測値が予測解析値に比べて5.1℃低い結果となった。

3-3 パラメータの同定と逆解析結果

図－５のコンクリート温度の乖離に対しては、以下の要因が想定される。

①コンクリートの材料特性

コンクリートの熱物性として熱伝達率・比熱・線膨張係数・断熱温度上昇特性等が、コンクリートの強度特性として圧縮・引張強度が、乖離の要因として挙げられる。また、骨材の種類・品質により変動するコンクリートの収縮量も近年着目されており、それぞれ適切な試験を行い詳細な材料特性を把握することで、解析精度の向上を図る事例がある。

②境界条件

境界条件として、型枠材（合板）・養生マット、露出面等の熱伝達率が要因として挙げられる。

③施工条件

施工時の外気温・気象条件等の環境要因や、コンクリート打込み温度・パイプクーリングの開始／終了時間・冷却水の温度等の施工要因が挙げられる。

コンクリート内部の最高温度が計測値と予測解析値で異なる要因として、上記３種のうち本事例ではまず型枠材（合板）の熱伝達率に着目した。型枠材（合板）の標準的な熱伝達率は $\eta = 8 \text{ W/m}^2\text{℃}$ と示されている¹⁾が、風や日射などの気象条件や型枠材の湿潤度合いなどの施工要因により、型枠材（合板）の熱伝達率は変動するものと考えたためである。

次に、材齢14日の降下後温度が計測値と予測解析値で異なる要因として、パイプクーリングの開始／終了時間に着目した。標準的なパイプクーリングの通水期間は、コンクリート内部が最高温度に達してから数時間～半日程度後まで²⁾とされている。本事例では、コンクリート内部が最高温度に到達する材齢が打設後1.5日前後であったことから、2日間に設定することとした。なお、必要以上に通水を行った場合、過冷却によって温度ひび割れが誘発されることに注意が必要である。

コンクリートの材料特性に関しては、追加の試験が必要となること、使用予定のプラントが複数であること等の観点から、要因の対象からは除外することとした。

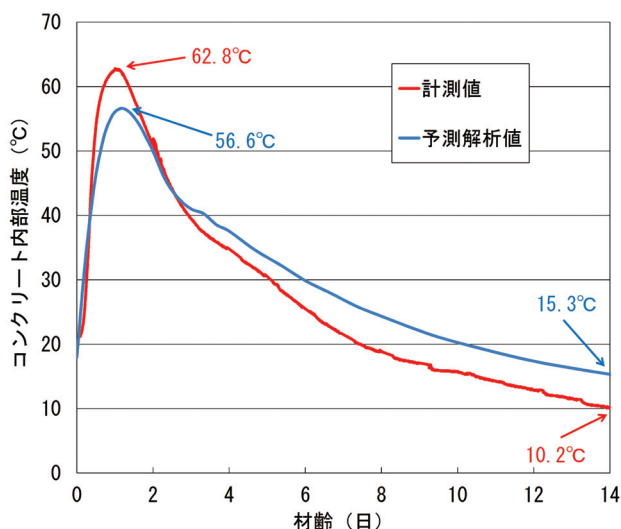
施工時の外気温・コンクリートの打込み温度・パイプクーリングの開始／終了時間については計測値を温度応力解析に反映し、型枠材（合板）の熱伝達率をパラメータとして、計測値と逆解析値の差異が小さくなるよう、パラメータの同定（逆解析）を行った（表－４）。逆解析の結果、型枠材（合板）の熱伝達率を $\eta = 5 \text{ W/m}^2\text{℃}$



写真－３ 「おんどロイド」設置状況



写真－４ 「おんどロイド」データロガー部



図－５ 計測値と予測解析値の比較（ロット②）

とすることで、コンクリート内部の最高温度および材齢14日の降下後温度について、計測値と逆解析値はほぼ同程度となった（図－６）。

逆解析結果より、躯体に近接する足場や仮囲いの影響で風の通り抜けが少なく、またケーソン内側は空気が滞

表－４ 予測解析と逆解析における解析条件の変更点

項目	予測解析	逆解析
外気温	過去３年間の 日平均気温	計測値の 日平均気温
コンクリート 打込み温度	外気温+5℃	計測値
パイプクーリングの 通水期間	打設直後から ２日間	施工実績
型枠材（合板）の 熱伝達率	8W/m ² ℃	5W/m ² ℃

留しやすいために、型枠材（合板）を設置した躯体側面からの熱放出量が少なかったことから、コンクリート内部の最高温度について計測値が予測解析値よりも高くなったものと想定される。また、実施したパイプクーリングの通水時間が予測解析にて設定した期間よりも長かったため、コンクリート内部が最高温度に到達してからの温度降下が促進され、材齢 14 日の降下後温度は計測値が予測解析値よりも低くなったものと想定される。

§ 4. 対策工の修正検討と事後解析

4－１ 対策工の修正検討

§ 2, § 3 のロット②での評価結果を踏まえ、型枠材（合板）の熱伝達率に同定した値（ $\eta = 5 \text{ W/m}^2\text{℃}$ ）を用いることにより、精度の高い予測解析が可能となることから、ロット③以降の未施工ロットについても修正予測解析を行い、対策工の修正検討を行った。

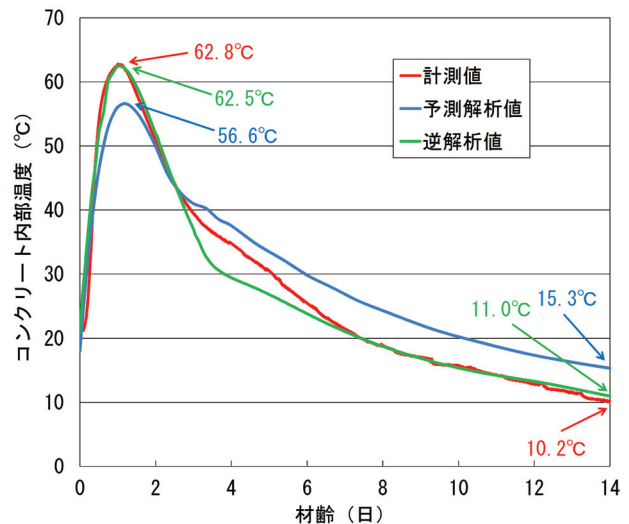
ロット③以降の修正予測解析では、ロット③およびロット④は、見直し前と同じ温度ひび割れ抑制対策を採用することとした。また、コンクリートの打設が 4 月下旬となるロット⑤において、クーリングパイプの本数を 2 本から 4 本に増やし、かつ膨張材を添加することとした。

実施工において、パイプクーリングに用いる水は、水道水をタンクに貯水し、温度管理しながら循環利用していたが、6 月中旬の施工であるロット⑥において、より高い冷却効果を得るために、水道水よりも水温の低い井戸水に変更し、かつ循環利用しないこととした。

4－２ 事後解析結果

対策工の見直しに伴う温度応力解析の精度を確認するため、ロット③～⑥に対し、コンクリート内部の最高温度に関する計測値と事後解析値の比較を行った。

計測値と事後解析値の比較結果を図－７に示す。計測値と事後解析値の差異は± 2% 程度であり、温度応力解析の精度は良好で、逆解析において同定した型枠材（合板）の熱伝達率も妥当であると考えられる。



図－６ 計測値と逆解析値の比較（ロット②）



写真－５ コンクリート打設状況



写真－６ 圧入沈設状況

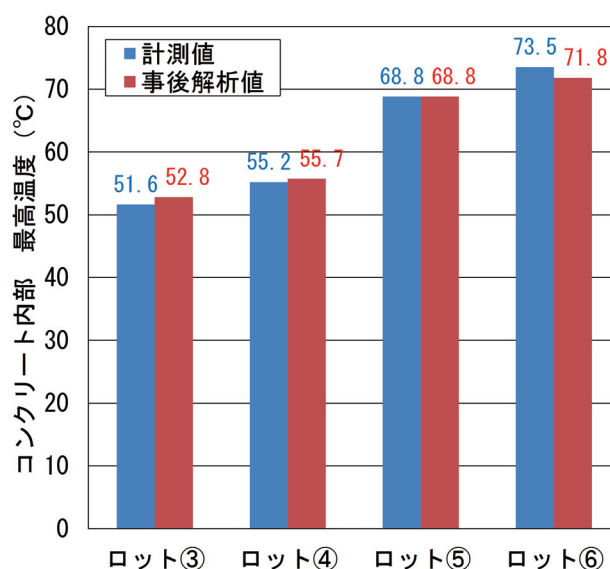
§ 5. おわりに

早強コンクリートを使用したケーソン側壁に関する予測解析、温度計測、逆解析による検証を行った。本事例では、型枠（合板）の熱伝達率を変化させることで、現地計測結果を概ね再現できることを確認した。

本事例では、断熱温度上昇特性等のコンクリートの物性値についてはコンクリート標準示方書に準拠しており、計測値と予測解析値との差異の要因からは除外している。要求性能が異なり高精度な解析が必要となる場合は、コンクリートの材料特性に関する追加試験を実施して、より詳細な材料特性を把握したり、冷却水の水温経時変化や入口温度・出口温度を計測するなど、個別に検討してゆく所存である。

大深度地下利用等のプロジェクトでは、立坑が計画されることが多く、ケーソン形式が採用される場合がある。工程上の理由から早強コンクリートの適用となり、本事例は次工事においても参考となる。技術提案・施工計画等に活用頂ければ幸いである。

最後に、本工事において数多くのご指導、ご協力を頂いた全ての方々に心より御礼と感謝の意を表する次第である。



図ー7 コンクリート内部の最高温度に関する計測値と事後解析値の比較

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 設計編, (社)土木学会, 2012 年.
- 2) マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, (社)日本コンクリート工学協会, 2008 年.