

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

西松建設（株） 土木設計部 正会員 ○伊藤 智規 正会員 土屋 光弘
西松建設（株） 庭窪シールド出張所 山下 晋由

1. はじめに

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は、外径 15.5m、内径 12.5m、壁厚 1.5m、高さ 33.75m である。オープンケーソンの構造図を図-1 に、側壁コンクリートの配合を表-1 に示す。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。

本報文ではオープンケーソン側壁（壁厚 1.5m）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修正検討について報告する。

2. パイプクーリングの計画

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ったため、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。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（図-2）。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 150 /min、通水期間を打設開始から 2 日間とした。

3. 予測解析結果

温度ひび割れ抑制対策を適用しないケース（以下、標準案と称す）および適用するケース（以下、対策案と称す）の最小ひび割れ指数分布図を図-3 に示す。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（図-2(b)）、ロット③～⑤は冷却管 2 本配置（図-2(a)）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。

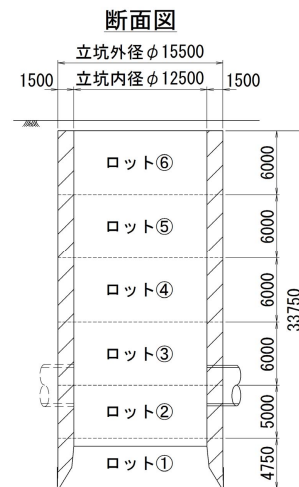


図-1 オープンケーソン構造図

表-1 コンクリートの配合

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 %

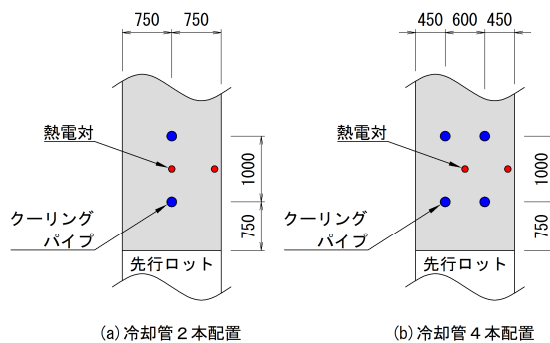


図-2 クーリングパイプの配置パターン

キーワード 温度応力解析, ケーソン, パイプクーリング, 逆解析

連絡先 〒105-6310 東京都港区虎ノ門1-23-1 虎ノ門ヒルズ森タワー10階 西松建設株式会社 土木設計部 TEL 03-3502-7635

4. 温度計測結果と逆解析

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。

ロット②のコンクリート内部温度について、計測値・予測解析値・逆解析値の経時変化を図-4に示す。実施工程や外気温計測値等の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ところ、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。

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、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と考えたためである。また、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通水時間に着目した。

外気温・コンクリートの打込み温度・パイプクーリングの通水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）を行ったところ、型枠材（合板）の熱伝達率を $\eta=5\text{W/m}^2\text{℃}$ 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。

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している。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している。

5. 対策工の修正検討と事後解析結果

ロット②での評価結果を踏まえ、ロット③以降の未施工ロットについても型枠材（合板）の熱伝達率に $\eta=5\text{W/m}^2\text{℃}$ を適用した修正予測解析を行い、対策工の修正検討を行った。対策工の修正検討の結果、ロット③およびロット④は、当初計画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。

対策工の修正検討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して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-5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あると考えられる。

6. まとめ

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。

参考文献

1) 社団法人 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，2012。2) 社団法人 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 2008，2008。

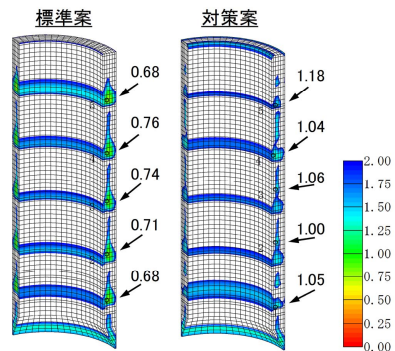


図-3 予測解析結果(ひび割れ指数)

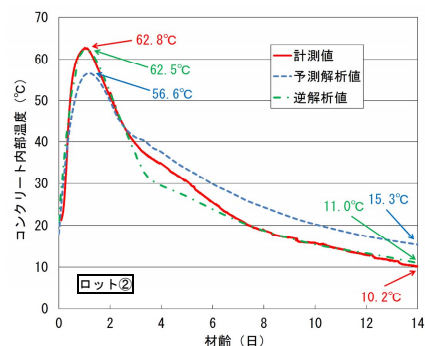


図-4 コンクリート内部温度の経時変化

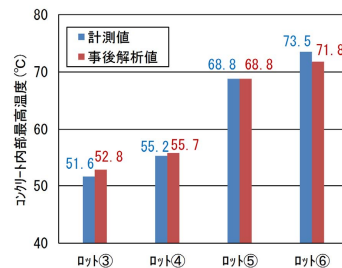


図-5 計測値と事後解析値の比較