

鉛直パイプクーリングの模擬供試体実験と実施工への適用

Simulated Specimen Experiments of Vertical Pipe Cooling and Application to Actual Construction

佐藤 友厚^{*1} 鈴木 孝之^{*2} 後藤 弘成^{*2} 寺澤 正人^{*1}
Tomohiro Satou Takayuki Suzuki Hironari Gotou Masato Terazawa
槇島 修^{*1} 田畑 美紀^{*1} 川里 麻莉子^{*1}
Osamu Makishima Miki Tabata Mariko Kawasato

【キーワード】 鉛直パイプクーリング マスコンクリート 温度ひび割れ対策 温度応力解析

1. はじめに

マスコンクリートの温度ひび割れ対策のひとつである鉛直パイプクーリングは、躯体内に複数本のクーリングパイプを鉛直に設置し、クーリング水（以降「冷却水」と称す）を送水して水和発熱による温度上昇を抑制することで、ひび割れの軽減を図るものである。本工法は、比較的管理が容易なため、主に壁状構造物の温度ひび割れ対策法として近年その適用事例が増えている。¹⁾

しかし、クーリングを効果的に行うには事前に温度応力解析を実施してクーリングパイプの配置仕様等を検討する必要があるが、クーリングの作用を解析において考慮する方法に関する調査研究事例は少ない。筆者らは模擬供試体実験で得られた温度計測結果をもとにして、クーリングの作用を解析において考慮する方法を検討した。また、温度応力解析によってクーリング仕様を決定した上で実施工に適用し、現場温度計測結果およびひび割れ観察結果により、鉛直パイプクーリングの温度ひび割れ抑制効果を確認したので結果を報告する。

2. 模擬供試体実験の概要

クーリングの冷却作用を温度解析において考慮する方法を検討するために模擬供試体を用いて温度計測を

実施した。供試体には、幅 1000mm×奥行 1000mm×高さ 880mm のコンクリート中央にクーリングパイプ（金属製内径 60mm）を鉛直に設置した模擬供試体と、パイプを設置しない模擬供試体を用いた。実験に用いた供試体の概要を図-1 に示す。供試体作製には普通ポルトランドセメントを用いた $C=350\text{kg/m}^3$, $W/C=50.8\%$ のコンクリートを使用した。

コンクリート温度の計測を打設直後から、材齢 14 日まで供試体奥行半断面上の図-1 に示す点において、実施し、同時に冷却水温と外気温を計測した。

クーリング方法は、鉛直に設置したクーリングパイプに水道用ホースをパイプ下方まで挿入し、冷却水には水道水を使用した。冷却水は3リットル/分で循環使用した。なお、クーリング実施期間は、コンクリート上面の表面仕上げ後（材齢5時間）から材齢7日までとした。

3. クーリング作用の温度解析における考慮方法

クーリングの作用は、クーリングパイプ表面位置に設置する熱伝達境界要素の熱伝達率で考慮するものとし、コンクリート温度の計測値と解析結果が一致するように、熱伝達率を同定することとした。

温度解析は、3次元FEM非定常熱伝導解析によるものとし、解析上のクーリングパイプ形状は図-2 に示すように、実際のクーリングパイプ径60mmと同じ辺長60mmの正方形とした。コンクリートの断熱温度上昇曲線は、「マスコンクリートのひび割れ制御指針」²⁾（以降「JCI指針」と称す）に示される曲線式を基本として、パイプクーリングを実施しない供試体での温度計測値と解析値が一致するように終局断熱温度上昇値を定めた。なお、解析に使用したその他の熱定数にはJCI指針に示される一般値を採用した。

図-3 に温度計測結果と同定したクーリングパイプの熱伝達率を用いて行った解析結果を示し、図-4 に同定した熱伝達率を示す。計測結果と解析結果は良好に一致しており、同定した熱伝達率を用いれば、鉛直パイプク

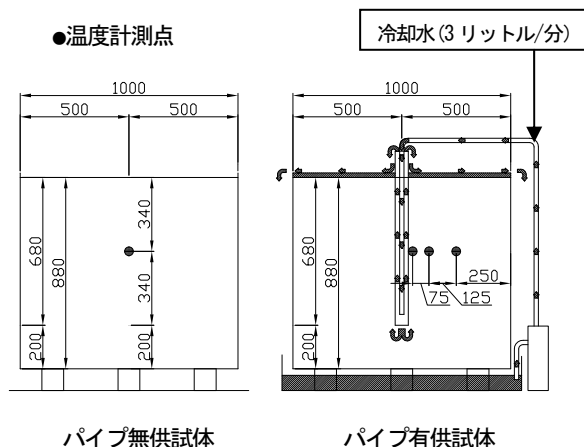


図-1 模擬供試体側面図

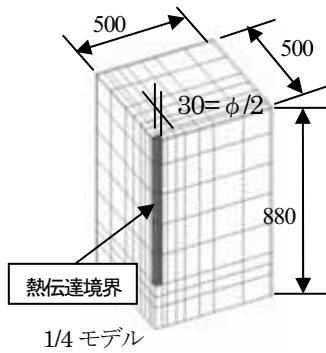


図-2 解析モデル図

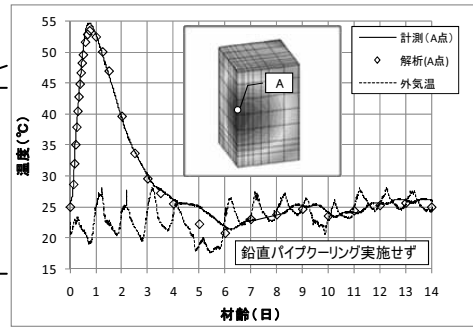
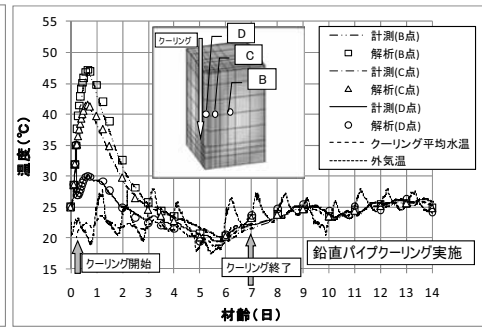


図-3 温度計測結果と同等した熱伝達率を使用した解析結果の比較図



ーリングを実施した場合のコンクリートの発熱挙動を精度良く予測することが可能であると判断された。

4. 実施工における適用と効果の確認

検討したクーリング作用の温度解析における考慮方法を適用して温度応力解析を実施して、クーリング方法を決定した上で、鉛直パイプクーリングを実施工に適用した。施工に際し実施した温度計測の結果および施工後のひび割れ観察結果からその効果を確認した。

適用した構造物は、初秋に施工された厚さ1.0mリフト高さ1.6mの水処理施設の外壁であり、打設には高炉B種セメントを用いた $C=314\text{kg/m}^3$ 、 $W/C=53.6\%$ のコンクリートを使用した。クーリングパイプ（ $\phi 60\text{mm}$ ）は壁軸線上に1.0m間隔で配置し、冷却水には地下水を使用した。冷却水は3リットル分の送水量にて循環使用した。なおひび割れ抑制策として誘発目地（設置間隔5m）を併用した。コンクリート温度の計測値と予測解析値の比較を図-5に示す。解析値は実際の発熱挙動と概ね一致していることが確認できた。また、解析によって予測した最小ひび割れ指数（外部拘束）は1.48となり、クーリングを実施しない場合の値0.81に比較して大幅に改善することが確認された。さらに、解析上最もひび割れ指数が厳しくなる厳冬期にひび割れ観察を行ったところ、誘発目地には明確なひび割れが生じているものの、その他の部位においては、ひび割れは認められず、鉛直パイプクーリングの温度ひび割れ抑制効果の有効性が確認された。

また、誘発目地における高いひび割れ誘発効果が認められた。鉛直パイプクーリングの適用によって、図-6に示すとおり、断面内温度に大きな温度差が生じ、クーリングパイプ間的高温な領域（温度ひずみ大きく、ひび割れが生じやすい領域）が局所化されるが、その位置に誘発目地を設置したことが、ひび割れ誘発効果を向上させたと考えられる。

5. まとめ

実施工への適用を通じて、鉛直パイプクーリングの温度抑制効果、ひび割れ抑制効果の確認と解析手法の検証

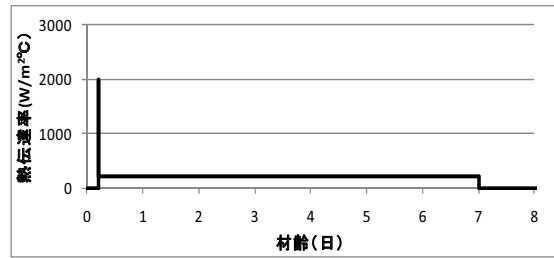


図-4 同定したクーリングパイプの熱伝達率

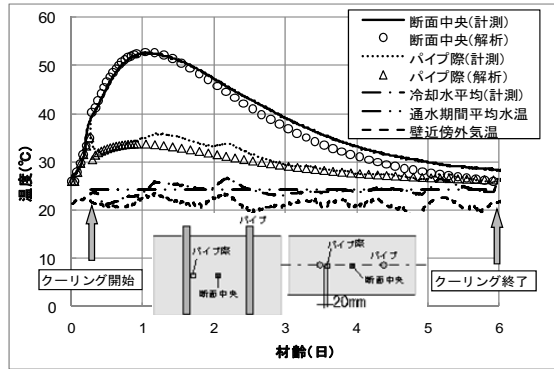


図-5 構造物の温度計測結果と解析値の比較図

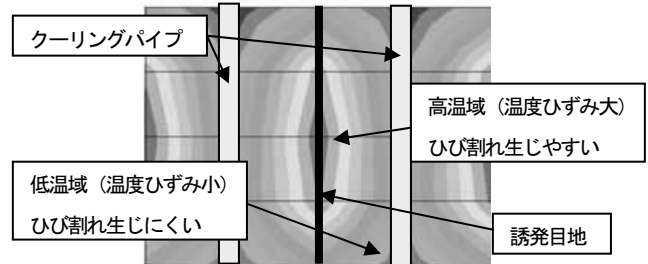


図-6 鉛直パイプクーリングの温度コンター図

を行い、鉛直パイプクーリングの有効性が確認された。今後は、解析手法とあわせて、鉛直パイプクーリングを効果的な温度ひび割れ対策として活用していきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 西井康雄:パイプクーリングによるひび割れ抑制の取り組みについて、北陸地方整備局平成 21 年度管内事業研究会, 2009.
- 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, 2008.11.