

14. 注水併用エアクーリング工法によるコンクリートの温度ひび割れ抑制対策

株式会社熊谷組 土木事業本部 神崎 恵三

1. はじめに

近年コンクリート構造物の品質向上として、施工時の水和熱の上昇による温度ひび割れ対策が取り上げられることが多い。この対策の一つとして、コンクリート中に設置したクーリングパイプに冷媒を流すことによりコンクリートの温度上昇を低減し、有害なひび割れの発生原因となる温度応力を抑制するパイプクーリング工法がある。従来から冷媒としては比熱の大きい水を用い、コンクリートダムや大型橋脚基礎など大規模なコンクリート構造物に適用されてきているが、近年では特別な冷却設備や複雑なクーリングパイプの配管を必要としない簡易な鉛直パイプクーリング工法が、一般的な函渠構造物や橋台等に適用される例も増えている。

また、橋梁等の PC 構造物においてはコンクリート内のシース管などをクーリングパイプとして利用し、冷媒として空気を送風することでコンクリートの温度上昇を抑制するエアクーリング工法が用いられる例もある。

2. 注水併用エアクーリング工法の特長

筆者は、施工スペースの制約がある地下構造物や中規模の構造物における温度ひび割れ対策として、通水によるパイプクーリング工法に代えて、設備が簡易なエアクーリング工法の採用を考えた。これをベースに、送風時に少量の注水を行うことで冷媒となる空気温度が低くなることに着目し、「注水併用エアクーリング工法」を考え、適用した(図-1)。

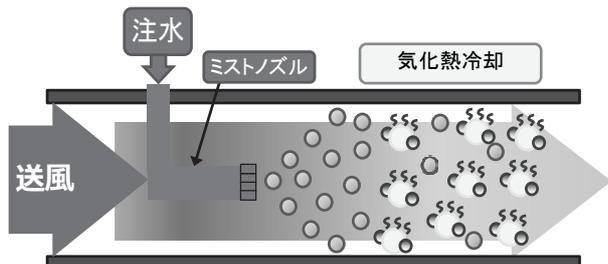


図-1 注水併用エアクーリング模式図

注水併用エアクーリング工法の特長は、従来の通水によるクーリング工法と比較して、大規模な給水設備や排水処理設備が不要で、簡易な設備で実施可能で、コストが抑えられる。また、空気によるクーリング工法は、夏季では冷媒となる空気の温度が高く、水に比べて比熱や熱伝導率が小さいが、注水することにより、これらの欠点を補い、温度抑制効果を高めるものである。

適用にあたり、室内試験による検証を行ったのち、実構造物で施工を行うこととした。

本稿では、このような注水を併用した新しいエアクーリング工法の適用事例として、室内試験および実施工における内容を報告する。

3. 函渠構造物側壁部への適用

3.1 工事概要

工事概要を表-1に示す。本工事は外環自動車道のうち市川市区間における延長 200m の大規模開削工事であり、図-2に示す函渠構造物を地下 15m に構築するものである。

表-1 工事概要

工事名称	田尻地区函渠その5工事
工事場所	千葉県市川市田尻5丁目
発注者	国土交通省関東地方整備局
工期	平成23年12月22日～平成28年3月25日

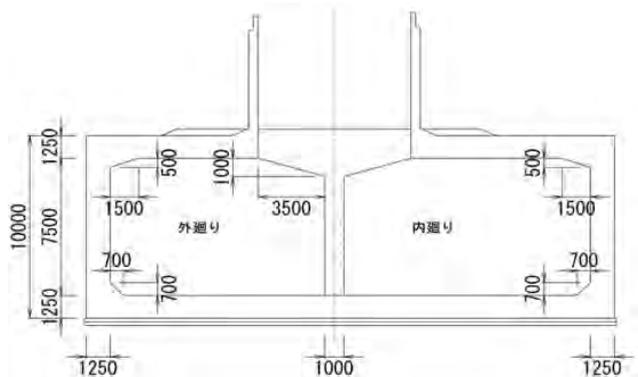


図-2 標準断面図

本工事では、厚さ 1.25m の側壁施工において底版の拘束による温度ひび割れが懸念されたため、当初は鉛直パイプクーリングによる対策が計画されていたが、これに代わり、より簡易な設備で温度ひび割れ対策が可能となる注水併用エアクーリング工法を適用したものである。

地下構造物への函渠構造物側壁部に、水平エアクーリング工法を採用する利点として以下の事項が考えられる。

- ・地下構造物では排水処理施設も考慮する必要がある。本工法は送風機と少量の水のみで実施可能で大規模な排水処理施設は必要ない。
- ・函渠側壁部のひび割れは、底版との打継ぎ目上部に発生しやすい。従来弊社が実施してきたクーリングは鉛直方向に使用するため、側壁全部位を冷却していたが、打継ぎ目上部を水平方向に集中的にクーリングを行う本工法を採用することで、効率的なひび割れ抑制対策が可能となる。

3.2 室内試験施工の実施

実施前に試験施工を室内にて実施した。室内試験施工の目的は、今回、壁部に使用するため施工中の強度面からパイプの材質を鋼管としたが、この場合の効果について確認するとともに、試験結果より見かけの熱伝達率を求めることである。

試験体の概要を表-2、図-3 に、試験状況を写真-1 に示す。試験ケースとしては、クーリングを行わない場合 (CASE1) に対して、従来のエアクーリング (CASE2)、注水併用エアクーリング (CASE3) の 3 ケースとし、断面 1.0m×1.0m、長さ 2.0m の試験体を 3 体製作した。また、試験体は木製型枠の内側に厚さ 100mm の発泡スチロールを設置し、簡易的な断熱状態とした。図-3 に示すとおり、CASE2 および CASE3 ではファンによって送風を行い、このときの風速は $v=24\text{m/s}$ であった。また、クーリングパイプの鋼管は、外径 76.3mm、肉厚 4.2mm の仕様を用いた。各試験体には計測断面を 1 断面設け、図-3 に丸印で示す計測点においてコンクリート温度を計測した。注水量は、本試験条件において、流出口から水がミスト状に排出するように定め、150ml/min とした。なお、送風期間は打設日を含めた 3 日間、温度計測は 8 日間実施した。

表-2 試験ケース

	エアクーリング	注水	
CASE1	無し	無し	クーリング無し
CASE2	有り(24m/s)	無し	空気
CASE3	有り(24m/s)	有り(150ml/min)	水・空気併用

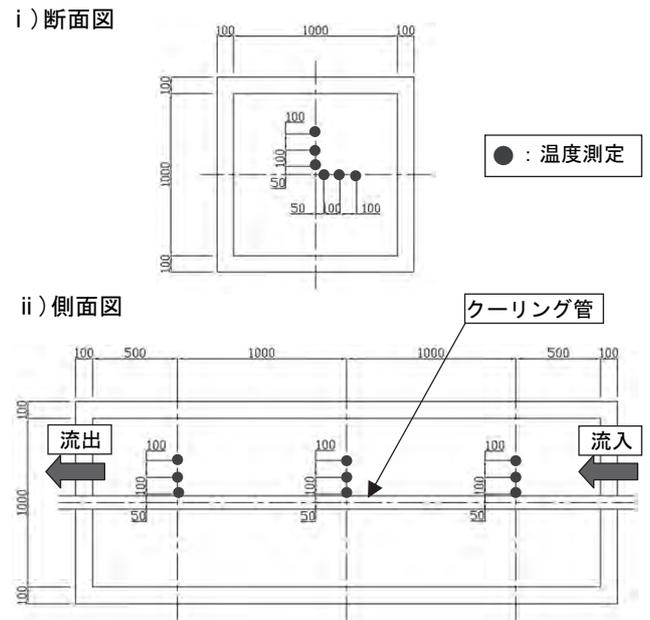


図-3 試験体 (CASE2、CASE3)

i) 養生状況



ii) 移動状況



写真-1 試験状況

3.3 室内試験施工結果

図-4 に各試験体の中央部のコンクリート温度を示す。クーリングを行わなかった CASE1 と比較して、クーリングを行った CASE2、CASE3 ではコンクリート温度の上昇を大きく抑制している。送風を停止すると、コンクリート温度はリバウンドし上昇するが、材齢の初期で温度上昇を抑制しているため、測定期間中を通して CASE1 を上回ることは無かった。また、CASE2 と CASE3 を比較すると、注水を併用している CASE3 では、より大きな温度抑制効果を発揮していることが明らかとなった。次に、送風期間中における外気温 (流入空気温度) と CASE2、CASE3 の流出空気温度を図-5 に示す。CASE2 では外気温に対して 5°C 程度の流出空気温度の上昇がみられるのに対し、CASE3 の流出空気温度は外気温よりは高いものの、CASE2 ほど上昇していないことが分かった。

このことは、CASE3 では注水の気化効果によって流れる空気の温度自体が冷却されていることを示しており、注水併用エアクーリング工法は、

従来のエアクーリング工法と比較して、温度抑制効果に大きく寄与しているものと考えられる。

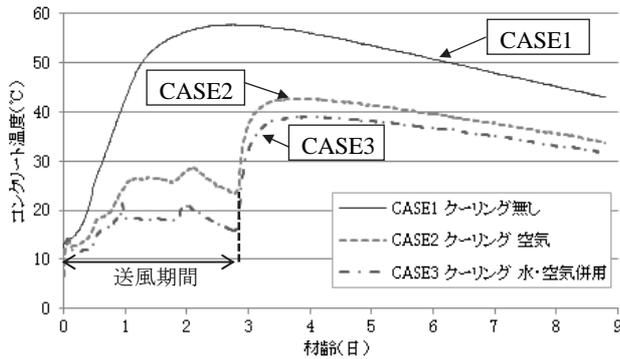


図-4 コンクリート温度比較

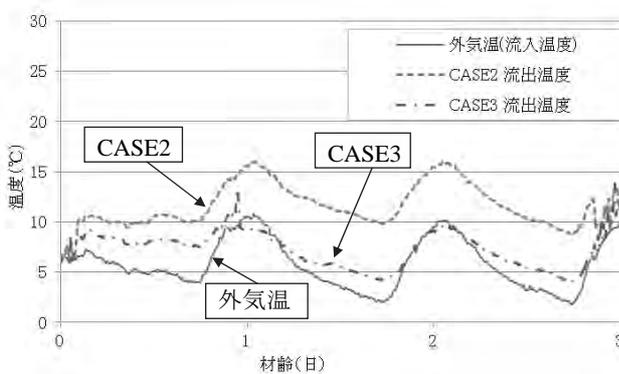


図-5 流入・流出空気温度比較

3.4 見かけの熱伝達率の決定

温度解析においてエアクーリングの効果を反映させる場合、一般にコンクリートとクーリングパイプの境界条件（見かけの熱伝達率とパイプ内温度）を与えることで考慮されており、見かけの熱伝達率はクーリングパイプ内の風速によって変化することが知られている。コンクリート標準示方書¹⁾によると、通常のコンクリートの露出面では、風速 2~3m/s の場合、熱伝達率は 12~14W/m²°C であり、風速 1m/s 当り 2.3~4.6W/m²°C 程度上昇するとされていることから、風速を v (m/s) とすると、熱伝達率 η (w/m²°C) は式(1)で表される。

$$\eta = 12 + 3.45(v - 2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

本試験での計測結果をもとに、同定解析により CASE2, CASE3 における見かけの熱伝達率の同定を試みた。解析モデルは、断面方向に左右・上下対称、奥行方向に対称の 1/8 モデルとし、外気温およびコンクリートの打込み温度は実測値を用いた。コンクリートの温度上昇量を表現する断熱温度上昇特性（式(2)）は、CASE1 における実測値を再現できるような値を同定した(表-3)。

$$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-\gamma(t - t_0)\}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量(°C)

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量(°C)

γ : 温度上昇速度に関する定数

t : 材齢(日)

t_0 : 温度上昇の原点に関するパラメータ

表-3 温度上昇特性係数同定値

Q_{∞} (°C)	50.0
γ	1.5
t_0 (日)	0.3

コンクリート温度の実測値と同定解析による値の比較を図-6 に示す。注水併用エアクーリング工法(CASE3)の場合は、見かけの熱伝達率を試験時の風速 24m/s より $\eta=88\text{W/m}^2\text{°C}$ と設定（式(1)から推定）することで、実測値を概ね再現することができた。一方、従来のエアクーリング工法(CASE2)の場合は、実測値を再現する見かけの熱伝達率が式(1)からの推定値の半分である $\eta=44\text{W/m}^2\text{°C}$ となった。

このことから、注水併用エアクーリングの効果の評価する場合に、見かけの熱伝達率として式(1)による推定値を一つの目安とすることが考えられる。ただし、見かけの熱伝達率には風速以外に送風空気温度の影響も含まれていることから、湿度や外気温等の環境条件により送風空気の気化熱冷却効果が異なる場合は、見かけの熱伝達率も変化することが考えられる。このため、注水併用エアクーリング工法を実際の構造物に適用する際には、事前に試験施工を行うことにより、適用条件における効果を把握することが望ましいと思われる。

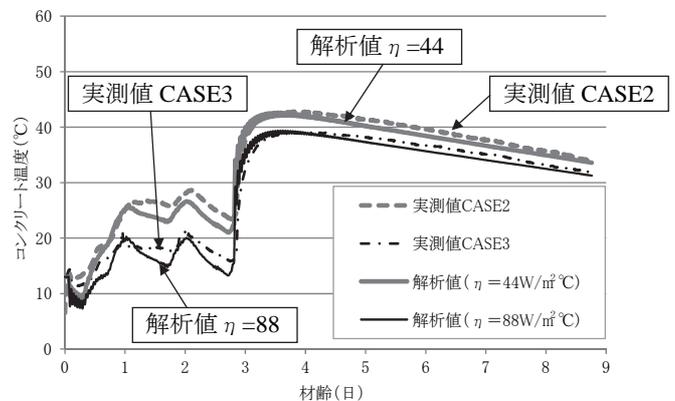


図-6 コンクリート温度（実測値・解析値）

3.5 実構造物への適用

実施工における配管位置図，計測位置図を図-7に，施工状況を写真-2に示す。実施工においては，側壁の鉛直方向に2段のクーリングパイプを配置した。また，延長方向の中央に計測断面を設定し，管表面，2段の管の中央部，クーリングの影響を受けない側壁中央部の3箇所においてコンクリート温度の計測を行った。

側壁部は打設高さが5m程度となるため，コンクリート打設時にクーリング管の変形が生じないように，シース管に比べて剛性の高い鋼管（SGP管）を用いた，施工中に変形・脱落等の不具合は特に生じなかった。また，クーリング管については脱枠後に躯体表面位置において切断した後，躯体コンクリートと同等以上の強度を有する無収縮モルタルでグラウト充填した。計測結果を図-8に示す。クーリングを行わない側壁中央のコンクリート温度と比較すると，管近傍では送風期間中24.5℃の温度抑制を確認した。図-8の計測結果から見かけの熱伝達率について同定解析を行い，得られた値により無対策時と注水併用エアクーリング工法の2ケースについて最小ひび割れ指数の推定を行った。

図-9に同定解析結果をもとに推定された最小ひび割れ指数の分布図を示す。無対策時と比較すると，実施工時に注水併用エアクーリング工法を用いた場合は，側壁部の最小ひび割れ指数が1.03から1.14へ向上することがわかった。

また，打設後の側壁には温度ひび割れは確認されておらず，注水併用エアクーリング工法によるひび割れ対策としての有用性を確認することができた。

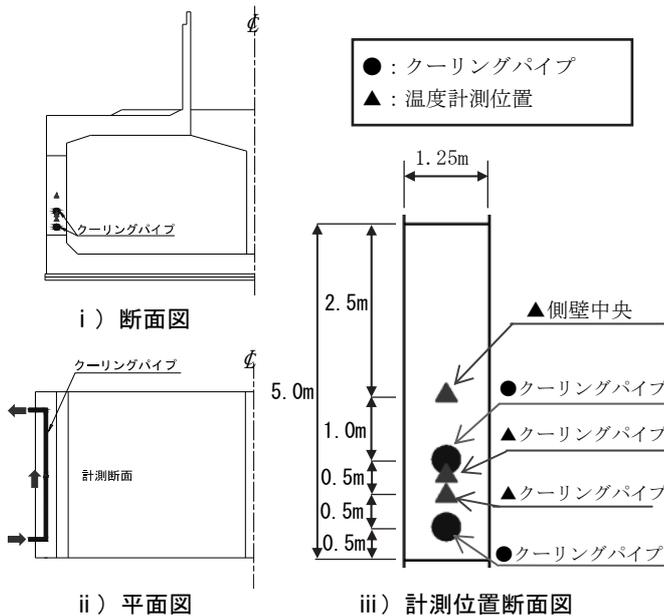


図-7 実施工時平面図，断面図，計測位置図

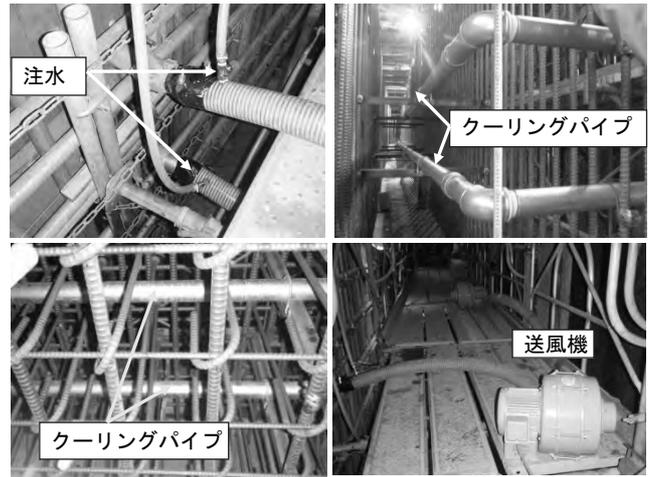


写真-2 クーリング機材設置状況

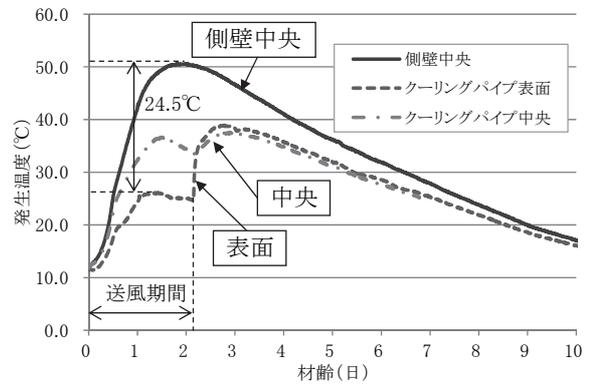


図-8 実施工時温度計測結果

i) 無対策時

ii) 注水併用エアクーリング工法

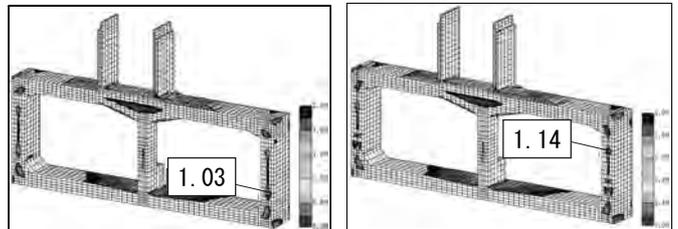


図-9 解析結果比較（最少ひび割れ指数分布）

4. 注水併用エアクーリング工法の定量的評価

注水による送風空気の冷却効果が確認できたことから，注水量と注水形態を変えて，定量的な評価を行うこととし，コンクリート試験体を用いたクーリング効果の室内試験を行った。試験体は幅0.5m×高さ0.5m×延長1.0mであり，コンクリート打設後は周囲を発砲スチロールで覆い断熱状態とした。クーリング管としては鋼管（内径φ65mm，管厚4.7mm）を用い，表-4に示す5ケースを実施した。注水形態として，微粒ミスト（粒径が非常に細かいもので100μm以下）（CASE3,4）と細粒ミスト（粒径が細かいもので300μm以下）（CASE5）とし，比較ケースとして

クーリングを行わない場合 (CASE1) と注水を併用しない従来のエアクーリングの場合 (CASE2) を加えた (表-4)。コンクリート温度はクーリング管表面近傍と 125mm 離れた位置において熱電対により測定した。クーリングはコンクリート打設後 3 日間行い、風速は 20m/s とした。供試体中心のクーリング管の横側表面近傍および 125mm 離れた位置における各ケースのコンクリート温度経時変化を図-10, 11 に示す。いずれの位置においても空気のみでのエアクーリング (CASE2) に対して、注水を併用したエアクーリング (CASE3~5) の場合はコンクリートのピーク温度が 10℃程度小さく、温度抑制効果が発揮されることが確認された。また、風速が 20m/s と大きい場合には、注水形態や注水量により温度抑制効果の顕著な相違はみられないことが確認された。

表-4 試験ケース

ケース	送風	注水形態	注水量
CASE1	—	—	—
CASE2	○	—	—
CASE3	○	微粒ミスト	150ml/min
CASE4	○	微粒ミスト	50ml/min
CASE5	○	細粒ミスト	150ml/min

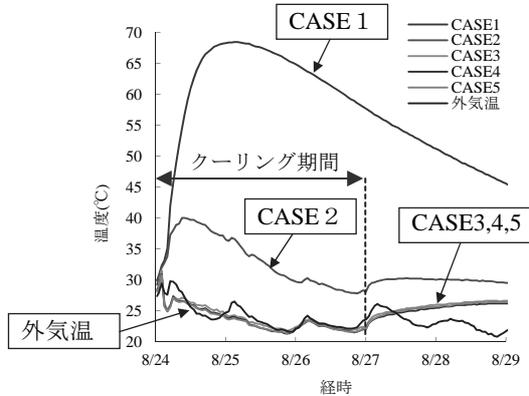


図-10 温度経時変化図 (クーリング管表面近傍)

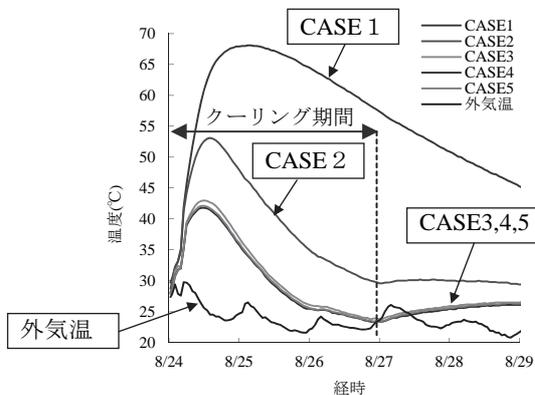


図-11 温度経時変化図 (クーリング管表面から 125mm)

5. 壁式橋脚への適用

5.1 工事概要

施工中の高松自動車道南唱谷トンネル工事内の古田橋 P1 橋脚は、部材厚 2.0m、幅 5.5m、高さ 16.1m、1 リフト当りの打設高さ 3~5m のマスコンクリートである。本橋脚は、温度応力解析による事前検討において、打ち継ぎ目上部に下部拘束体による有害なひび割れの発生が懸念された。ひび割れ発生が懸念される範囲が限定されること、設備が簡易であることから、本工法にて対策を行うこととした。コンクリート配合を表-5、構造物側面・断面図を図-12 に示す。

表-5 コンクリート配合

配合区分	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
BB30-8-20	45.5%	374	170	743	959	4.68

i) 側面図

ii) 断面図

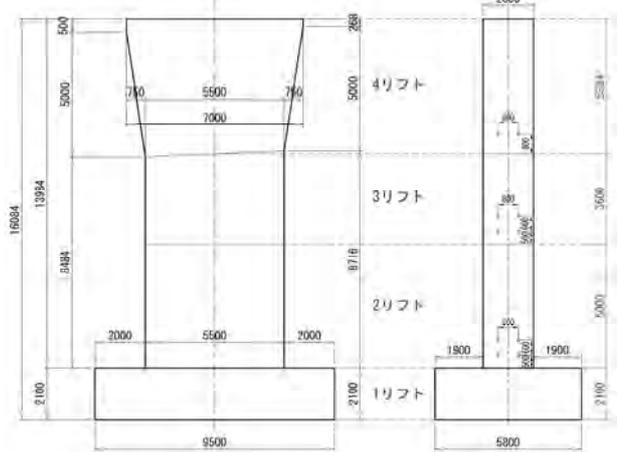


図-12 P1 橋脚側面図・断面図

5.2 実構造物への適用

橋脚への注水併用エアクーリングの施工状況を示す。事前解析により決定した位置にクーリングパイプをあらかじめ設置し、送風機を各々接続し、送風時には、現場に設置した水タンクからポンプによりミストノズルへ注水 (150ml/min) を行った (写真-3)。



写真-3 送風設備設置状況

構造物中心に計測断面を設け、熱電対を4測点(図-13)設置し、コンクリート温度を計測した。また、同時に外気温、パイプへの送風温度の計測も行った。打設開始と同時に送風・注水を開始し、無対策箇所(測点1)の温度がピークに達した時点で双方を停止させた。温度計測は打設開始時より6日間実施した。

5.3 温度計測の結果

図-14に、コンクリート内部4測点の温度、流入温度および外気温の変化を示す。クーリングの影響が小さいと考えられる箇所(測点1)のコンクリート温度は材齢2.5日でピークに到達し、79.1℃であった。これに対し、測点2~4の最高温度は各々55.3℃、60.3℃、66.8℃であり、対象範囲のピーク温度を10℃以上抑制できたことが確認された。

5.4 事後解析による評価

施工時におけるコンクリートの打設温度・温度上昇、特性、外気温、クーリングパイプへの流入温度の実測値を用いた再現解析結果を図-15に示す。実測値と再現解析値は概ね一致しており、事前解析手法の妥当性を確認することができた。また、同条件にて温度ひび割れの事後解析を実施した結果、無対策時における最小ひび割れ指数0.92が、注水併用エアクーリングにより1.22まで改善する結果となり(図-16)、対策により所定の効果が得られたと考えられる。

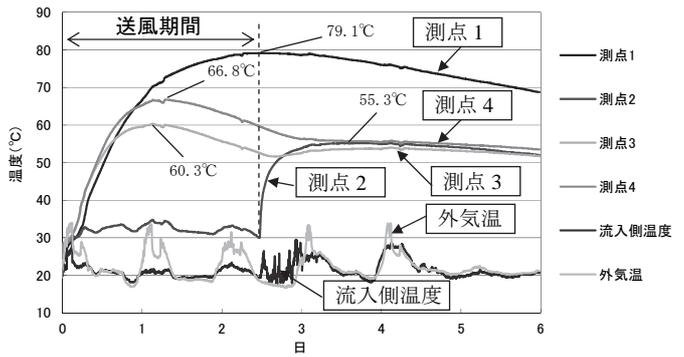


図-14 コンクリート温度の測定値

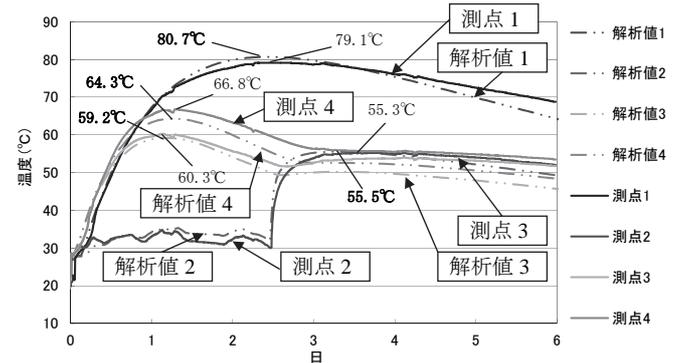


図-15 実測値と再現解析値の比較

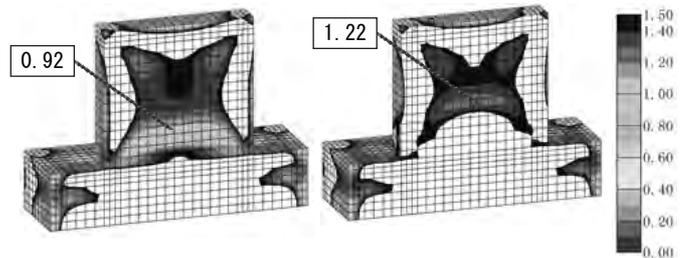


図-16 事後解析結果(最小ひび割れ指数分布図)

i) 断面図

ii) 側面図

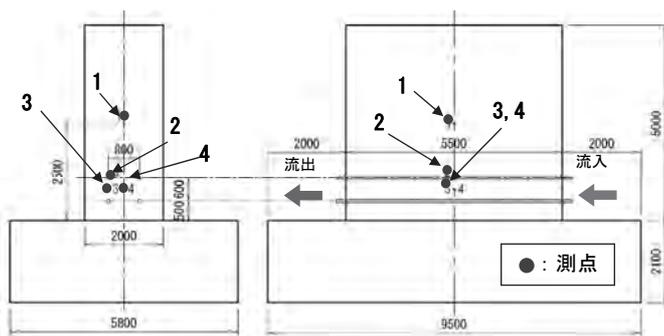


図-13 クーリング設備設置箇所

6. まとめ

- 空気に少量の水を加え、送風することで、より大きな温度制御抑制効果があることを確認した。
- 注水形態や注水量、風速を変えて比較を行い、空気冷却効果のより高いミスト注水について定量的に確認した。
- 函渠構造物の側壁、および壁式橋脚において本工法を適用し、温度抑制効果を確認した。
- 今後も多様な構造物へ適用を図ることでデータを蓄積・反映し、より有用性の高い工法に改良していきたいと考える。

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】，2012