

注水併用エアクーリング工法の概要と適用事例

株式会社熊谷組 正会員 神崎 恵三 正会員 中出 剛
正会員 熊谷 康之 非会員 工藤 守

1. はじめに

近年コンクリート構造物の品質向上として、施工時の水和熱に伴う温度応力によるひび割れ制御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がある。エアクーリング工法は給水設備や排水処理設備が不要なため、通水によるパイプクーリング工法に比較して簡易な設備による対策が可能であるが、夏季では冷媒となる空気の温度が高いことや水に比べて比熱や熱伝導率が小さいことから温度抑制効果の面で劣ると考えられている。

筆者らは、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制御対策として、通水によるパイプクーリング工法に替えて、設備が簡易なエアクーリング工法の採用を考えるとともに、適用にあたり、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、注水併用型エアクーリング工法（図-1）を考え、その適用性について室内試験や実施工による検証を行った。

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。

2. 函渠構造物側壁部への適用

2.1 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。

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。

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25日～平成28年3月

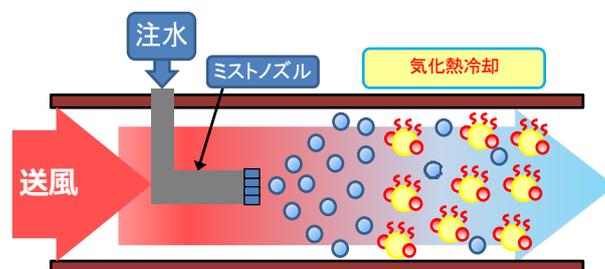


図-1 注水併用エアクーリング模式図

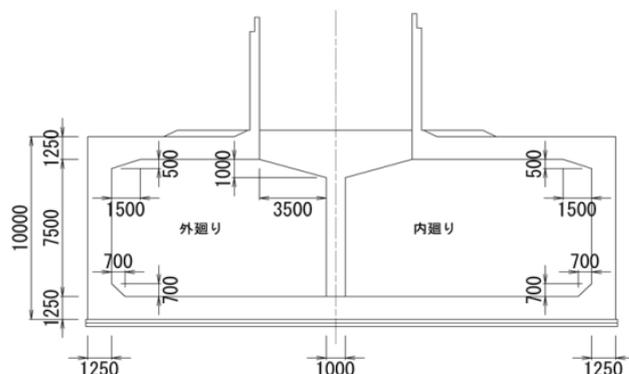


図-2 標準断面図

キーワード 温度ひび割れ、温度応力解析、マスコンクリート、エアクーリング

連絡先 〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1 (株)熊谷組 土木事業本部 プロジェクト技術部 TEL03-3235-8649

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。

- ・水を流してのクーリングは、大規模な施設が必要となる。また、地下構造物では排水処理施設も考慮する必要がある。本工法のエアクーリングは送風機と少量の水のみで実施可能で大規模な施設は必要ない。
- ・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いた鉛直方向のクーリングは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。

2.2 室内試験施工の実施

本現場での使用前に別工事にて本工法を採用し、一定のクーリング効果を確認している。本現場は2事例目となるが、実施工前に試験施工を室内と現地にて実施した。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クーリングパイプとして鋼管を用いることとしたため、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、クーリングパイプには鋼管(外径76.3mm、肉厚4.2mm)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。

2.3 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、注水併用の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が、一方、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。

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

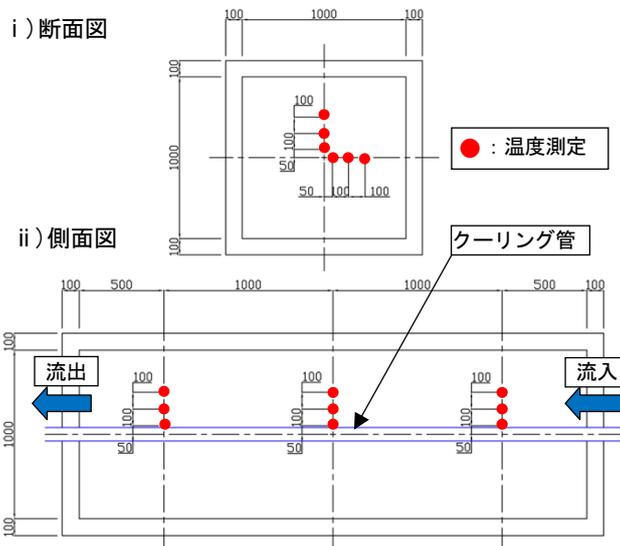


図-3 試験体 (CASE2、CASE3)



i) 養生状況

ii) 稼働状況

写真-1 試験状況

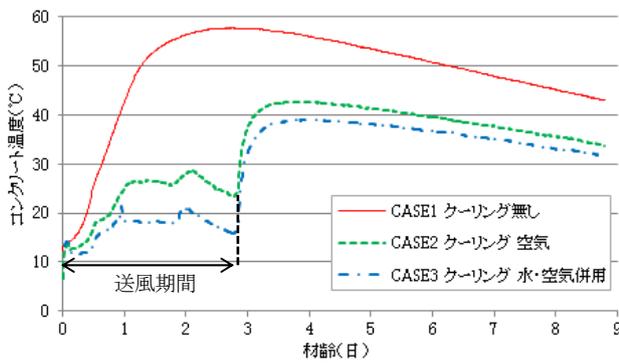


図-4 コンクリート温度比較

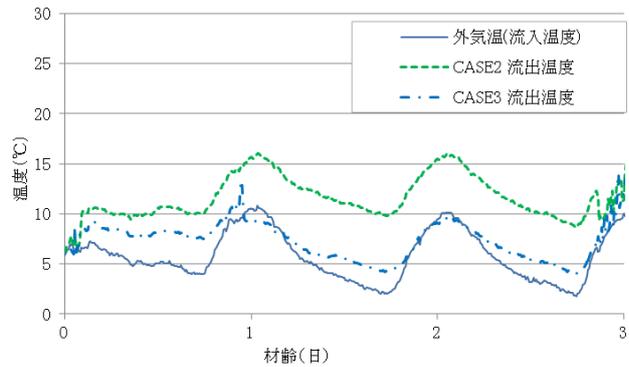


図-5 流入・流出空気温度比較

2.4 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¹⁾。コンクリート標準示方書²⁾によると、通常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。

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

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)。

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

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

- $Q(t)$: 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

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より式(1)から推定される $\eta = 88\text{W/m}^2\text{°C}$ とすることで、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を評価する場合に、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。

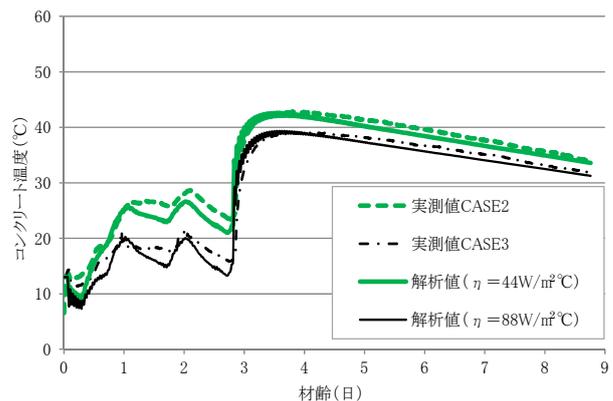


図-6 コンクリート温度(実測値・解析値)

2.5 事前の試験施工

実際の構造物への注水併用エアクーリング工法の適用に先立って、現地で同じ施工条件による試験施工を行っ

た. 試験体は実際の対象構造物である壁と同じ厚さ 1.25m の底板を用い, クーリングパイプ (鋼管: 外径 76.3mm, 肉厚 4.2mm) に注水量 150ml/min の注水併用エアクーリングを行った. 図-7 に示すようにクーリングパイプの延長方向に 3 断面の計測位置を設け, コンクリート温度および流入・流出空気温度, 風速について計測した. クーリングを行わない箇所 (計測断面 4) でも計測を行いクーリング効果の確認を行うとともに, 実際の壁部施工時と同じ延長 10m 間での効果の違いについて把握することを目的としている. なお, コンクリート中の温度計測位置は底板厚の中心とし, 断面 1~3 についてクーリングパイプ表面とした. 注水併用エアクーリングは打設直後から 2 日間稼働させた (写真-2).

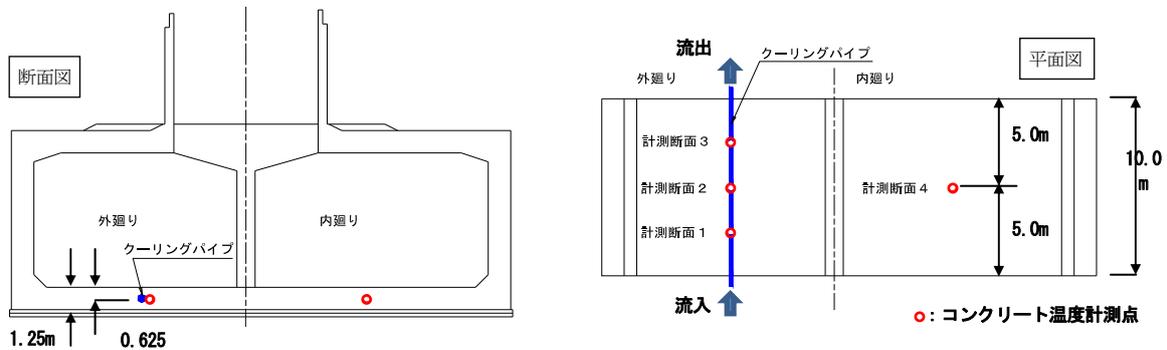


図-7 現場断面図・平面図

各計測断面におけるコンクリート温度の計測結果を図-8 に示す. クーリングを行わない断面 4 では最高温度は 50.5℃となったが, 水・空気併用型パイプクーリングを行うことでコンクリート温度のピークカットができていることを確認した. 断面 1~3 と断面 4 について比較すると, クーリングを行った断面 1~3 では, 送風期間中, コンクリートの温度上昇が抑制され, 断面 1 は 30.5℃, 断面 2 および 3 では 25.5℃の温度抑制効果がみられた. 送風を停止すると温度はリバウンドして上昇するが, 材齢の初期で温度を抑制していたのでピーク温度はクーリングを行わなかった断面 4 と比較して低くなっている.

また, 送風距離による冷却効果の相違を比較すると, 流入直後の断面 1 では最も大きな冷却効果を発揮しており, 送風距離の長い断面 2 と断面 3 についてはやや冷却効果が低下する傾向がみられたが, 事前想定していた低減量(25℃程度)は満足する結果となった.

以上の試験施工の結果より, 注水併用エアクーリング工法の十分な効果を確認したことから, 実際の壁での施工に際しても, 試験と同様の資機材, 配管により本工法を適用することとした.

2.6 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-9 に, 施工状況を写真-3 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・黒) 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,



写真-2 底板打設状況

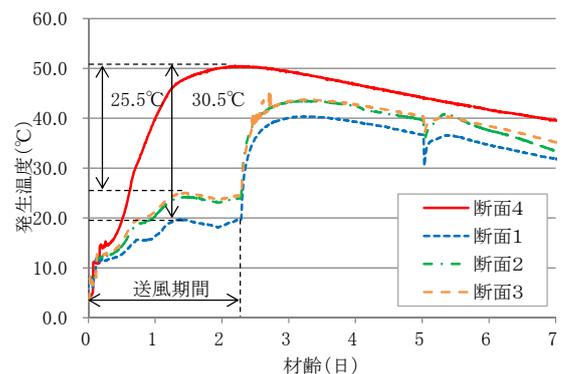


図-8 現場試験 温度計測結果

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-10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-10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、得られた値により以下の2ケースについて最小ひび割れ指数の推定を行った。

- i) 無対策時
- ii) 注水併用エアクーリング工法

図-11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、実施工時の注水併用エアクーリング工法を用いた場合は、打継ぎ部近傍のひび割れ指数が大幅に改善するとともに、側壁全体の最小ひび割れ指数についても1.03から1.14へ向上する。

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。

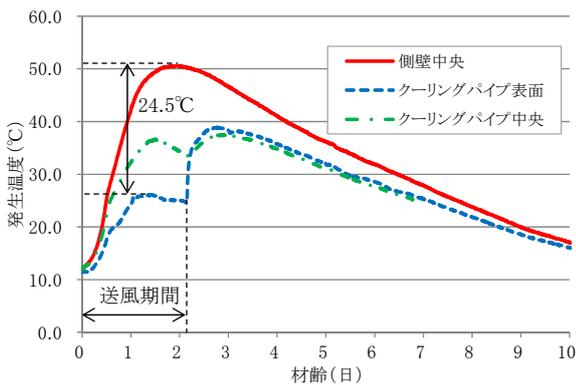


図-10 実施工時温度計測結果

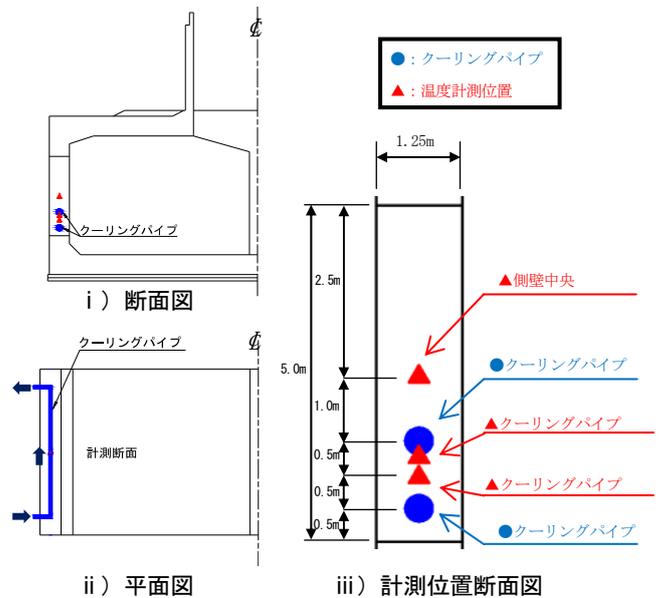


図-9 実施工時平面図、断面図、計測位置図



写真-3 クーリング機材設置状況

3. 注水併用エアクーリング工法の定量的評価

実構造物での適用を行ったのち、さらなる効果的な工法への改善として、定量的評価を室内試験施工にて実施した。クーリングにおける水の気化冷却効果は、粒径や速度、周囲の温湿度による影響を受けることが知られており、あらかじめ水を霧状に噴出させることで気化冷却効果を得る手法も一般に多く用いられている。

3.1 クーリング管送風試験

注水形態として従来の滴下方式に対し、細粒ミストノズル（粒径 300 μ m 以下）、微粒ミストノズル（粒径 100 μ m 以下）を本工法に適用した場合について比較した（写真-4）。試験は図-12に示すように、断熱材で覆ったクーリング管（塩ビパイプ：内径 ϕ 65mm）における注水前後の管内送風温度を測定することとし、注水形態に加え注水量（50ml/min, 150ml/min）や風速（10m/s, 20m/s）を変化させた（表-4）。

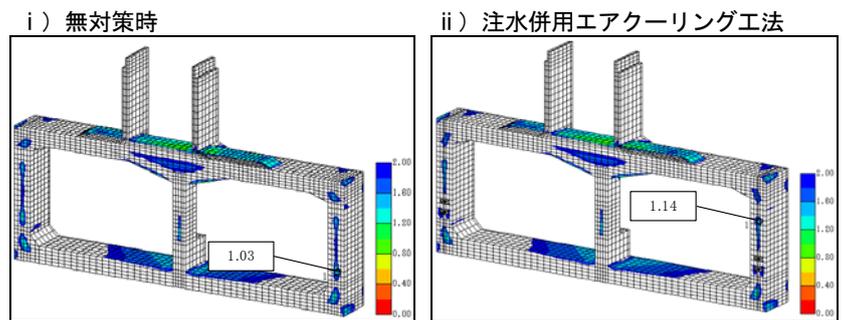


図-11 解析結果比較（最少ひび割れ指数分布）

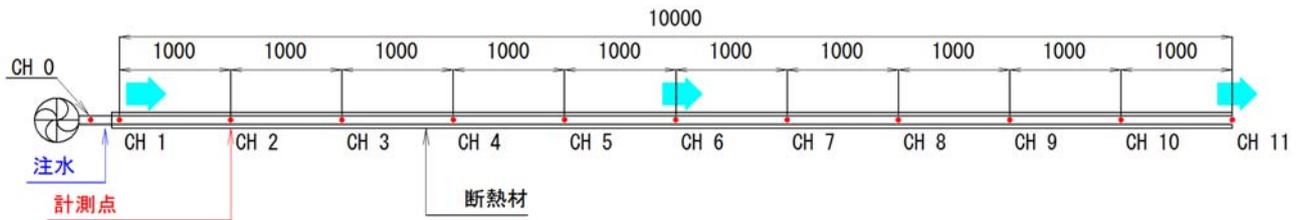


図-12 試験体と計測位置

送風直後の空気温度から注水により低下した温度について各測点における計測結果を図-13 に示す。風速が 20m/s の場合は、従来の滴下注水に対してミスト注水の方が 1.5~2°C 程度低下温度が大きく、微粒ミスト (150ml/min) が最も冷却効果が高い。また、管内温度は注水後 1m からほぼ全長にわたり変化していない。



写真-4 細粒ミスト 微粒ミスト 注水形態

一方、風速 10m/s の場合は注水直後から送風距離に伴う温度上昇がみられ、特に滴下注水や細粒ミスト注水において顕著である。管末端での低下温度は風速 20m/s の場合 (8~10°C) に比べて、風速 10m/s の場合は 3~7°C 程度と小さく、風速による注水冷却効果の相違が確認された。また、風速が小さい場合は注水形態による相違が顕著であり、注水粒径が小さいほどより冷却効果が高い。

表-4 注水形態

	滴下		細粒ミスト		微粒ミスト	
	50ml/min	150ml/min	50ml/min	150ml/min	50ml/min	150ml/min
風速10m/s	○	—	—	○	—	○
風速20m/s	○	○	○	○	○	○

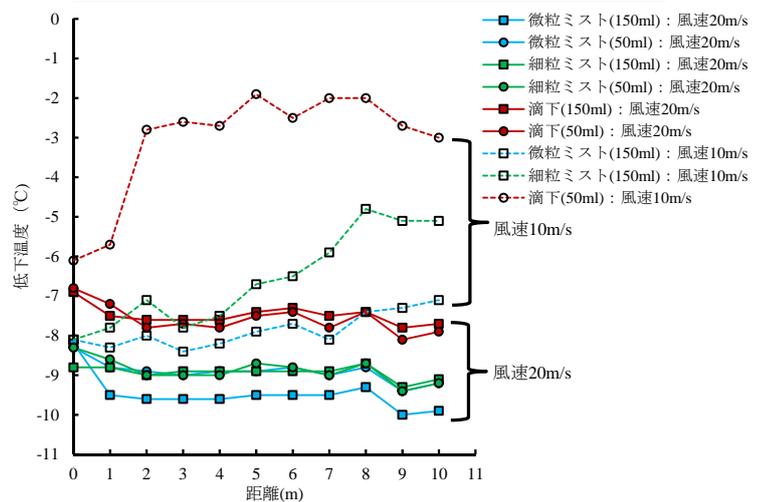


図-13 注水による低下温度

3.2 コンクリート試験体送風試験

ミスト注水による送風空気の冷却効果が確認できたことから、コンクリート試験体を用いたクーリング効果の確認試験を行った。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)を用いた。注水形態としては微粒ミスト (CASE3, 4) と細粒ミスト (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-5)。図-14 に注水併用エアクーリングの場合の試験体の構造と計測位置を示す。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、併せて外気温、流入・流出空気温度、相対湿度および風速を測定している。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-15, 16 に示す。いずれの位置においても空気のみエアクーリング (CASE2) に対して、注水を併用

表-5 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

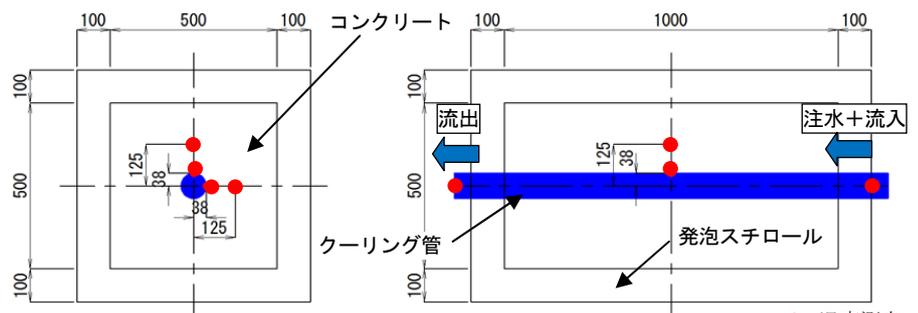


図-14 試験体構造と計測位置 (CASE3~5)

●: 温度測定

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、前述のクーリング管送風試験と同様に、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。図-17 はCASE2 とCASE3 における外気温とクーリング管内への流入箇所における空気温度との

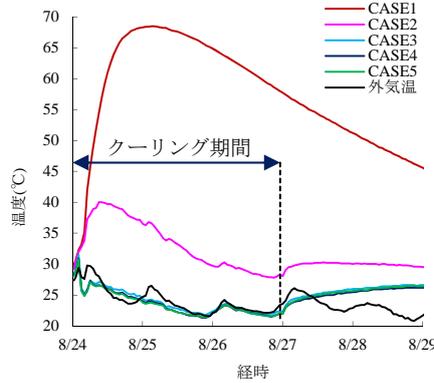


図-15 温度経時変化図
(クーリング管表面近傍)

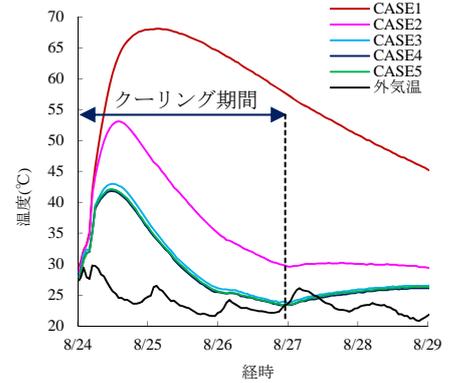


図-16 温度経時変化図
(クーリング管表面から125mm)

差分を示す。CASE2 の場合は送風機の熱により3℃程度空気温度が上昇するが、CASE3 の場合は注水により最大5℃程度冷却されていることがわかる。また、水による空気冷却効果は相対湿度と明確な相関があることが確認できた (図-18)。

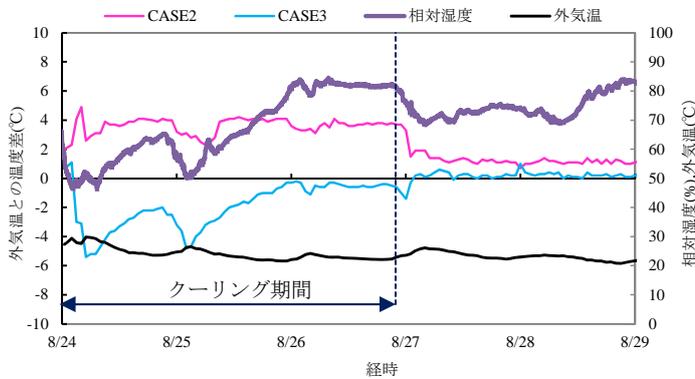


図-17 送風温度の経時変化

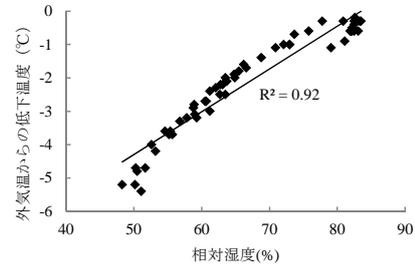


図-18 送風温度の低下量と
相対湿度の関係 (CASE3)

4. 壁式橋脚への適用

4.1 工事概要

弊社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、注水併用エアクーリングにて対策を行うこととした。コンクリート配合を表-6、構造物側面・断面図を図-19 に示す。

4.2 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、送風機を各々接続する (写真-5)。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) を行う。

構造物中心に計測断面を設け、熱電対を 4 測点 (図-20) 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。

表-6 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

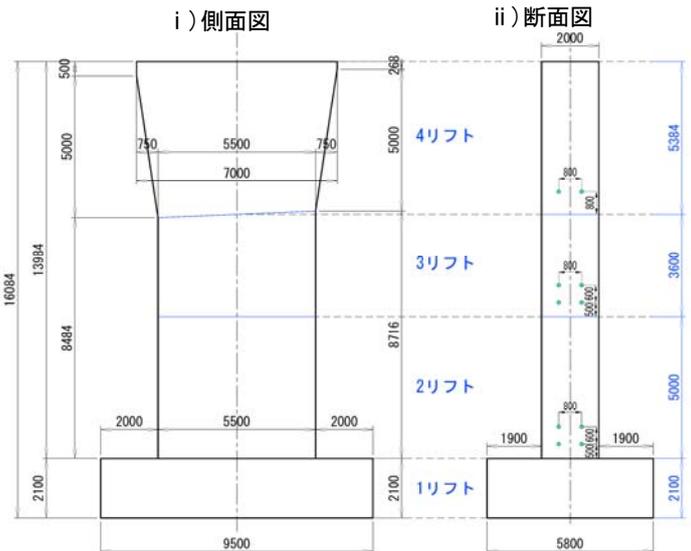


図-19 P1 橋脚側面図・断面図

4.3 温度計測の結果

図-21 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。

4.4 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-22 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-23）、対策により所定の効果が得られたと考えられる。



写真-5 送風設備設置状況

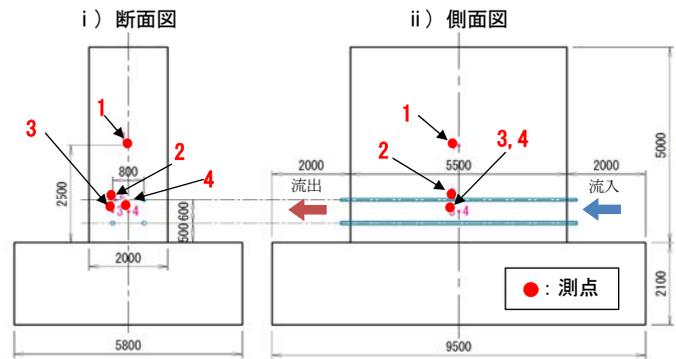


図-20 クーリング設備設置箇所

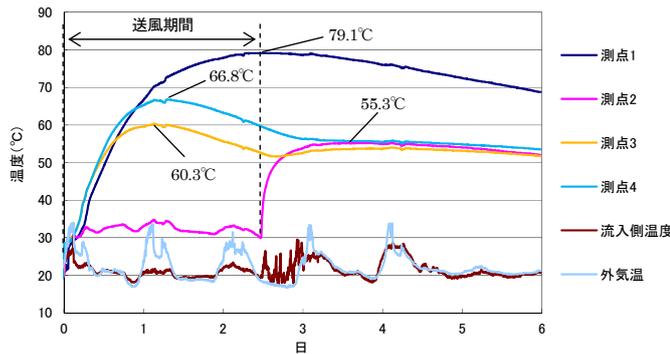


図-21 コンクリート温度の測定値

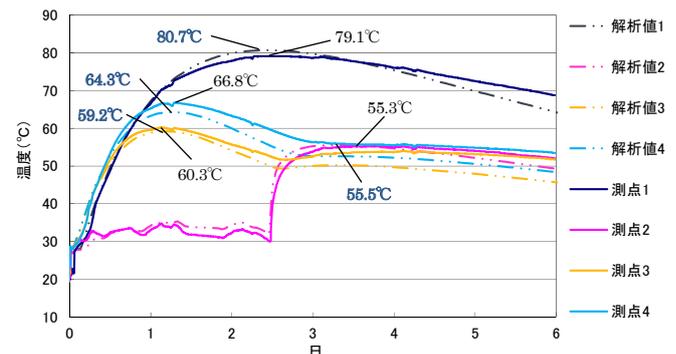


図-22 実測値と再現解析値の比較

5. 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。

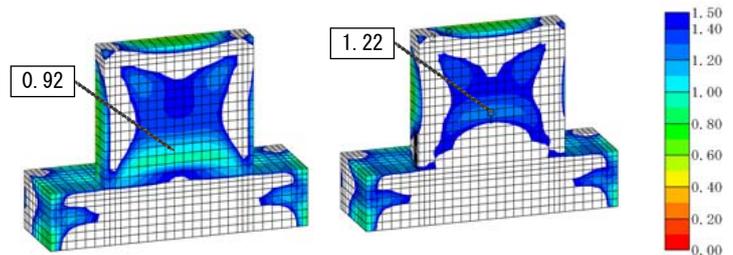


図-23 事後解析結果 (最小ひび割れ指数分布図)

参考文献

- 1) 笹倉 伸晃ほか：エアパイプクーリングによる温度ひび割れ抑制効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24，No. 1，2002
- 2) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，2012