

報告 注水併用エアクーリング工法による温度ひび割れ抑制対策

神崎 恵三*1・山口 哲司*2・神田 裕史*2

要旨：マスコンクリートの温度ひび割れ対策として、躯体内に設置した管に通水や送風を行うクーリング工法が広く用いられている。通水の場合、コンクリート温度上昇抑制効果は高いが、通水のための施工設備スペースなどに対する制約により、適用が困難な場合がある。一方、送風の場合、施工設備は簡易だが、コンクリート温度上昇抑制効果が通水に比べて小さい。筆者らは、送風時の空気に少量の水を加えることで大きな冷却効果が得られる新しいクーリング工法を開発し、室内試験施工で温度上昇抑制効果を確認したのち、複数の現場で温度ひび割れ対策として活用した実例について報告する。

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

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や、橋梁などの PC 構造物のコンクリート内部に配置するシーブ管を利用し、冷媒を流すことによりコンクリート打設後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。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対しては、冷媒として比熱の大きい水を用い、一方、函渠構造物や橋台、及び橋脚などの中規模のコンクリート構造物に対しては、送風による冷却で効果を発揮する。

「注水併用エアクーリング工法」は、中規模構造物を対象とし、送風によるクーリングと同規模の設備で、水によるクーリングと同程度の温度抑制効果（3次元 FEM 温度応力解析結果より）を発揮する工法である。以下に、室内試験による本工法の効果を確認したのち、現場で適用した事例について記述する。

2. 注水併用エアクーリング工法の概要

本工法は、施工スペースの制約がある地下構造物や中規模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替えて、設備が簡易なエアクーリング工法をベースとし、送風時に少量の水を加えることによる気化熱冷却効果で、冷媒となる空気温度が低くなることに着目し、開発したものである（図-1 参照）。

本工法での管理項目は、送風時の風速と、クーリング管内で注水（噴霧）する時の注水量とミスト粒径である。本工法の効果確認と効率的に管内の空気が冷却されるためのこれらの仕様を、2回の室内試験により決定した。

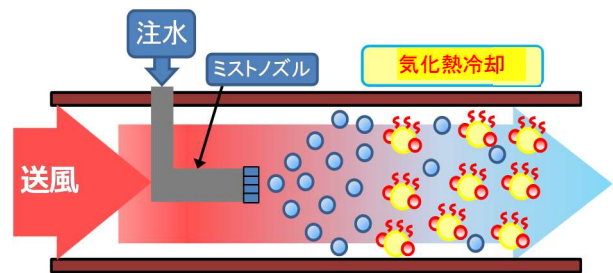


図-1 注水併用エアクーリング工法概念図

3. 室内試験の実施

3.1 注水併用エアクーリング工法の効果の確認

(1) 室内試験施工概要

本室内試験の目的は、無対策とエアクーリング、及び注水併用エアクーリング工法を同条件で実施し、温度抑制効果を比較することと、試験結果より見かけの熱伝達率（クーリング管の材質：鋼管）を求めることである。

試験の概要を表-1、図-2 に、試験状況を写真-1 に示す。試験ケースは、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。コンクリートは、セメント量 320kg/m³、水セメント比 54%の普通セメントとした。また、試験体は木製型枠の外側に厚さ 100mm の発泡スチロールで保温した。CASE2 および CASE3 では送風機によって送風を行い、風速は $v=24\text{m/s}$ (送風機の最大風速)であった。クーリングパイプの鋼管は、外径 76.3mm、肉厚 4.2mm の仕様で、各試験体には計測断面を3断面設け、図-2 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。注水口から水を注水し、注水量は 150ml/min (通水)とした。送風は打設日を含めて3日間行い、温度計測は打設日を含めて8日間実施した。

*1 株式会社熊谷組 土木事業本部プロジェクト技術部 (正会員)

*2 株式会社熊谷組 土木事業本部土木設計部

表-1 試験ケース

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

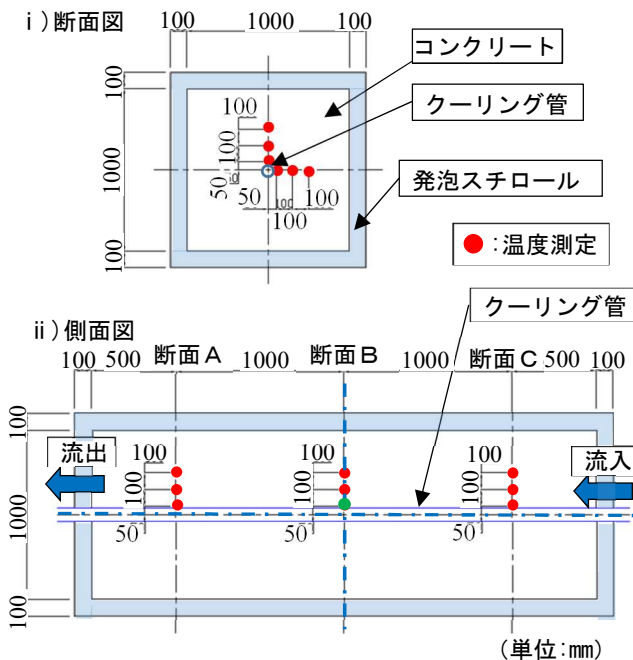


図-2 試験体 (CASE2, CASE3)



i) 養生状況 ii) 稼働状況

写真-1 試験施工状況

(2) 室内試験施工結果

図-3 に各試験体の中央部 (断面B) のクーリング管中心から 50mm の位置 (緑○部) における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 を上回ることがなかった。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-4 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 では注水の気化熱冷却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。

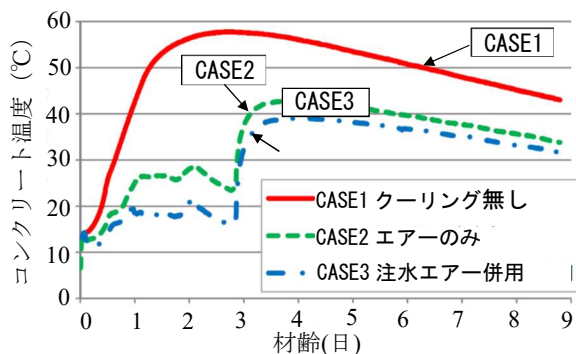


図-3 コンクリート温度比較 (断面Bの●部)

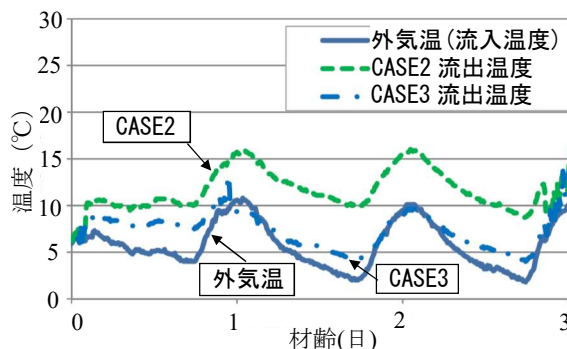


図-4 流入・流出空気温度比較

(3) 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しており、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/m²C であり、風速 1m/s 当り 2.3~4.6W/m²C 程度上昇するとされていることから、平均の 3.45W/m²C 上昇するとし、風速を v(m/s) とすると、熱伝達率 η(w/m²C) は、式(1)で表される。

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

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、一方向に空気を流しているものの、中心部 (断面B) が流入と流出の空気温度の平均値であると想定し、断面Bに対し、左右・上下対称、奥行方向に対称の 1/8 モ

デルとした。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、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-2参照)。

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

- 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)
 t₀ : 温度上昇の原点に関するパラメータ

表-2 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-5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 η=88W/m²°Cと設定(式(1)から算出)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 η=44W/m²°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。

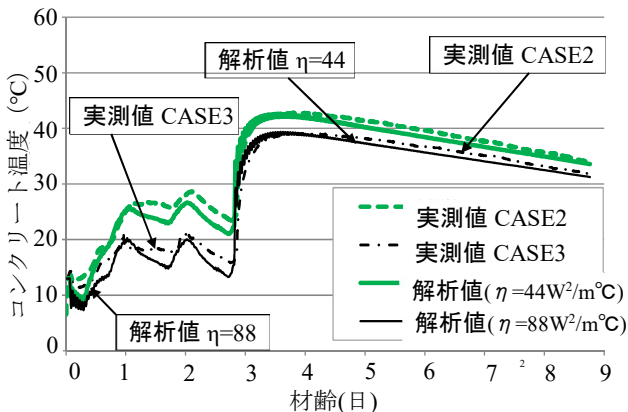


図-5 コンクリート温度(実測値・解析値)

3.2 注水併用エアクーリング工法の定量的評価

(1) 室内試験施工概要

注水による送風空気の冷却効果が確認できたことから、次に、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定量的評価の室内試験を行った。試験体は幅 0.5m×高さ 0.5m×長さ 1.0m であり、コンクリート打込み後は前回と同様、周囲を発泡スチロールで覆い保温した(図-6参照)。クーリング管である鋼管は、外径 76.3mm、肉厚 4.2mm の仕様を用い、注水形態として、微粒ミスト(粒径が 100μm 以下)(CASE3,4)と細粒ミスト(粒径が 300μm 以下)(CASE5)とし(写真-2参照)、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-3参照)。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(図-6参照)、送風期間は打込み日を含めて3日間行い、風速は 24m/s とした。

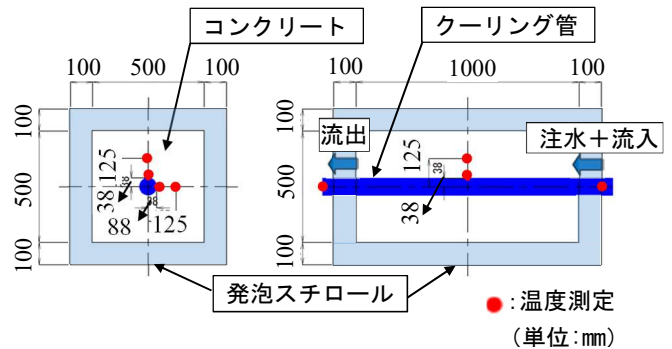


図-6 試験体構造と計測位置(CASE3~5)

表-3 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 (粒径100μm)	150ml/min
CASE4	○	微粒ミスト (粒径100μm)	50ml/min
CASE5	○	細粒ミスト (粒径300μm)	150ml/min



写真-2 注水形態

(2) 室内試験施工結果

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-7,8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°C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。風速が 24m/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あまりみられないことが確認された。

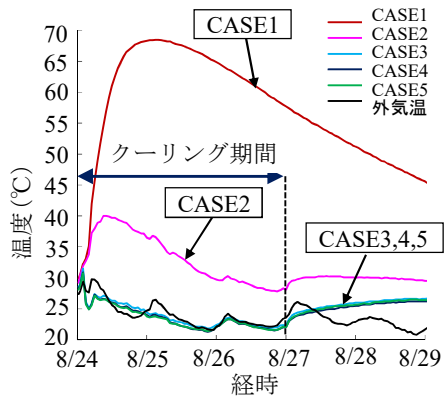


図-7 温度経時変化図
(クーリング管表面近傍)

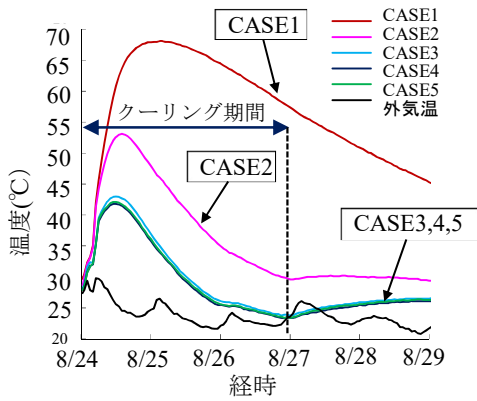


図-8 温度経時変化図
(クーリング管表面から 125mm)

(3) 注水併用エアクーリング工法の仕様決定

室内試験結果より、風速 24m/sec (送風機の最大風速)、注水量 (50~150ml/min)、ミスト粒径 (100~300 μ m) を本工法の仕様とし、実施工に適用することとした。

4. 壁式構造物への適用事例

4.1 構造物概要

高速道路の下部工である P1 橋脚において本工法を適用した。構造は、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、施工スペースの制約が大きいため、本工法にて温度ひび割れ対策を行うこととした。コンクリート配合を表-4、構造物側面・断面図を図-9 に示す。

表-4 コンクリート配合

配合区分	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	W/C (%)
30-8-20BB	170	374	45.5

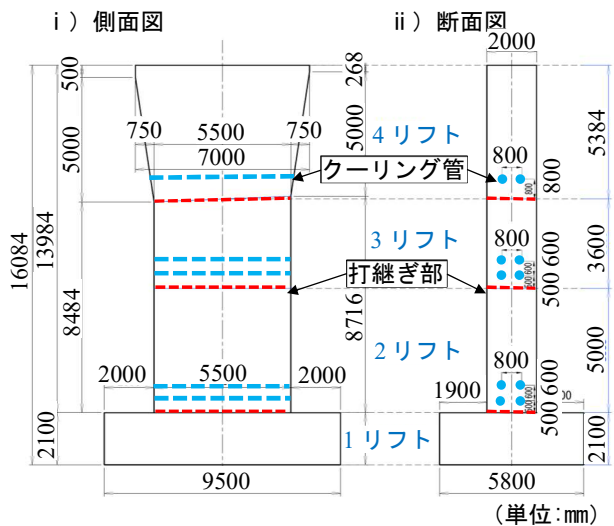


図-9 P1 橋脚側面図・断面図

4.2 注水併用エアクーリングの実施

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て送風機を各々接続し、送風時 (24m/sec) 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)し、クーリング管内に噴霧(ミスト粒径 100 μ m) を行った (写真-3 参照)。



写真-3 設備設置状況

4.3 温度計測の実施

構造物中心に計測断面を設け、熱電対を 4 測点 (図-10 参照) 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。打込み開始と同時に送風・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。温度計測は打込み開始時より 6 日間実施した。

図-11 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 $^{\circ}$ Cであった。これに対し、測点 2~4 の最高温度は各々 55.3 $^{\circ}$ C、60.3 $^{\circ}$ C、66.8 $^{\circ}$ Cであ

り、対象範囲のピーク温度を 10°C以上抑制できたことが確認された。

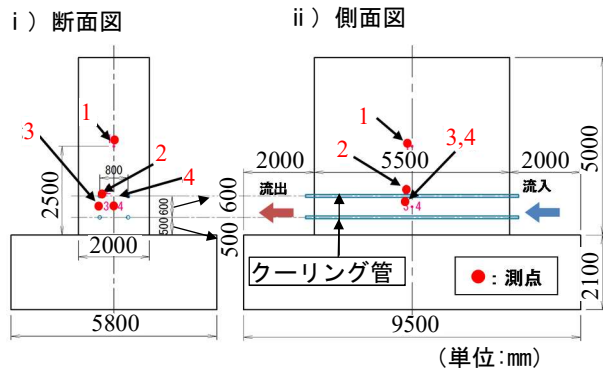


図-10 クーリング管及び熱電対設置位置図

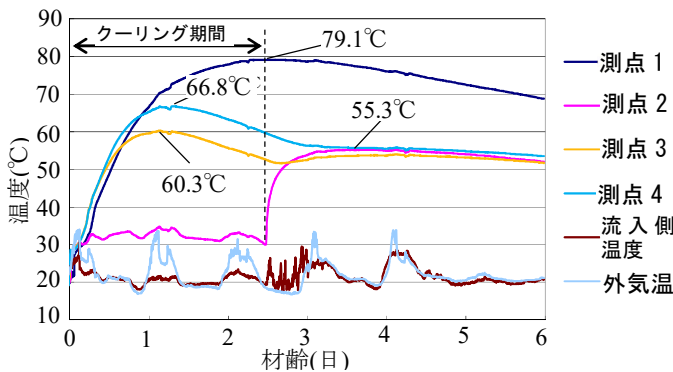


図-11 コンクリート温度測定値

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-12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-13 参照)、対策により所定の効果が得られたと考えられる。

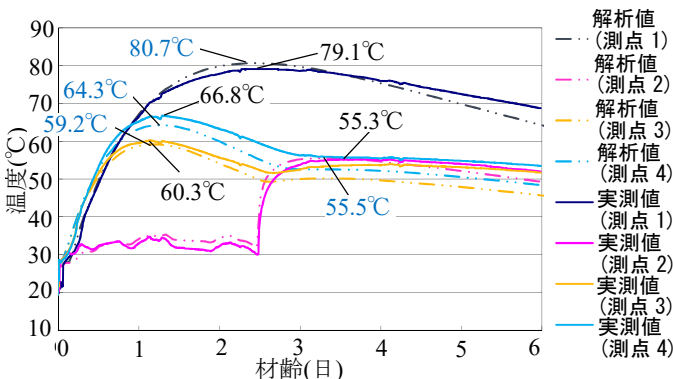


図-12 実測値と再現解析値の比較

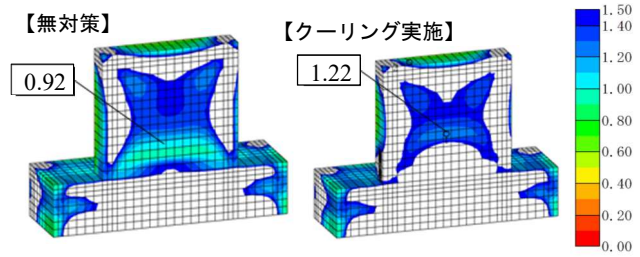


図-13 温度ひび割れ解析結果(最小ひび割れ指数分布)

5. 函渠構造物への適用事例

5.1 構造物概要

街路整備工事における、1層3連のボックスカルバート(幅16.3m、高さ6.9m、長さ15m×13ブロック)(図-14参照)において、事前の温度応力解析で、側壁打設時に底版との打継ぎ目上部に有害な温度ひび割れの発生が懸念された。そのため、ひび割れ発生が懸念される範囲が限定されること、設備が容易であることから本工法を採用することとした。コンクリート配合を表-5に示す。

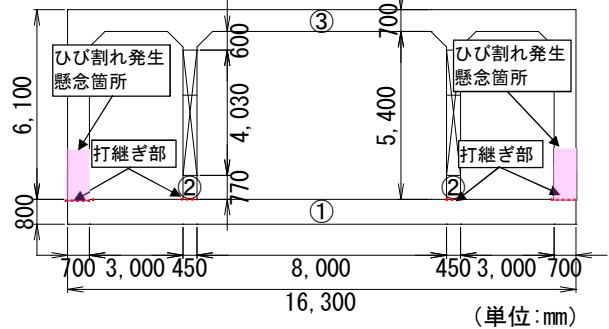


図-14 ボックスカルバート断面図

表-5 コンクリート配合

配合区分	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	W/C (%)
27-12-20BB	170	312	54

5.2 注水併用エアクーリングの実施

注水併用エアクーリングの施工状況を示す。クーリング管として写真-4に示すシース管(φ80、t=0.3mm)を用いた。事前解析により決定した位置にあらかじめシース管を設置し、送風機を接続し、送風時には、ミストノズルへ注水(150ml/min)を行った。注水量は、管理装置(圧力計と流量計)で管理し、管の内部に設置したミストノズルで微粒ミスト(粒径100μm)として噴射した(図-15参照)。



写真-4 ワイディングシース管

5.3 温度計測の実施

計測は熱電対 2 測点（管近傍と管から 1m 離れ）を計 3 断面（断面 A~B）に設置し、コンクリート温度を計測した（図-15、16 参照）。また、同時に外気温、パイプへの送風温度の計測も行った。クーリング管がコンクリートに埋まった時点で送風・注水を開始し、クーリングは 4 日間、温度計測は 6 日間実施した。

表-6 に 3 断面のコンクリートの発生最高温度を示。クーリング管近傍は無対策部に比べ、ピーク温度を 16°C 以上抑制できたことが確認された。

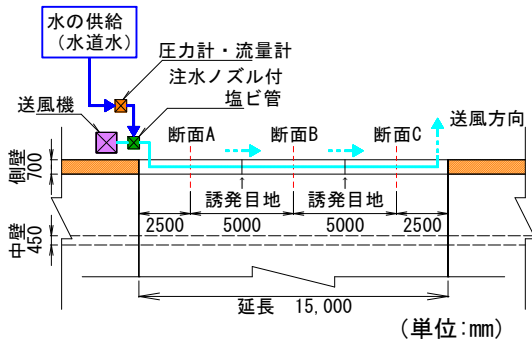


図-15 クーリング機器配置

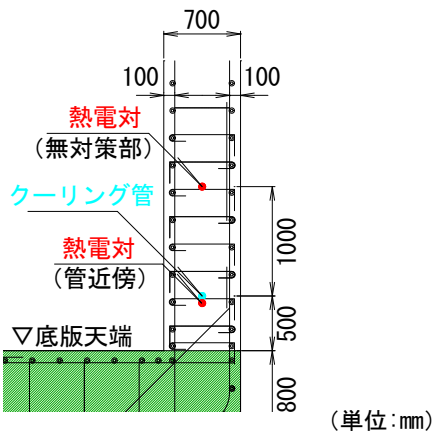


図-16 計測断面図

表-6 コンクリート発生最高温度（実測値）

	発生最高温度(°C)		
	断面A	断面B	断面C
無対策 (クーリングなし)	59.0	60.2	58.4
管近傍 (クーリングあり)	42.5	40.9	40.6
クーリング有無 による温度差	16.5	19.3	17.8

5.4 事後解析による評価

断面 A における施工時におけるコンクリートの打設温度、外気温、クーリング管への流入温度の実測値を用いた再現解析結果を図-17 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、クーリング管の熱伝達率は、シース管において

も従来の鋼管と同様に評価できることが確認できた。

同条件にて温度応力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 1.00 が注水併用エアクーリングにより 1.23 まで改善する結果となり（図-18 参照）、対策により所定の効果が得られたといえる。

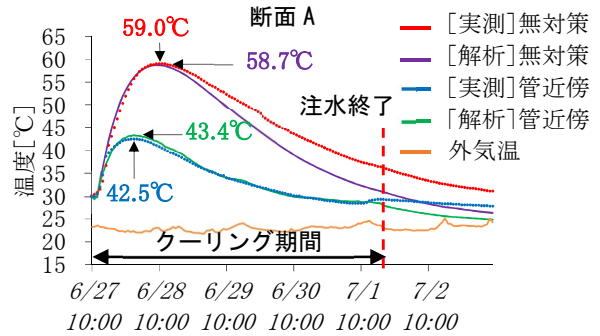
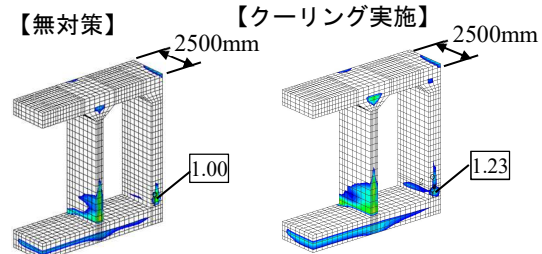


図-17 解析値と実測値の比較（断面 A）



（モデル化は、ひび割れ誘発目地が 5m ピッチで設置しているため、1/2 モデルの 2.5m の長さとした）
図-18 温度応力解析結果（最小ひび割れ指数分布）

6. おわりに

今回、従来のエアクーリング工法を基に、少量の水を加え、送風する「注水併用エアクーリング工法」を開発し、注水形態や風速などを変えて室内比較を行った結果、コンクリート温度上昇の抑制効果があることを確認した。

さらに、壁式構造物や函渠構造物への温度ひび割れ制御対策として、本工法を適用し、所定の温度抑制効果が得られることを確認した。また、施工時の環境条件を用いた再現解析結果はコンクリート温度と良い一致が見られ、当工法を適用する場合の解析手法の妥当性が確認できたとともに、施工後の構造物に有害なひび割れは生じておらず、当工法の有用性が示された。

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，pp.981～986，2002
- 2) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，2012，pp.325～327，2017