

壁式橋台におけるパイプクーリング制御システムの適用と効果の検証

(株)竹中土木 技術・生産本部 技術開発部 正会員	○原田 透
国土交通省近畿地方整備局浪速国道事務所 建設監督官	森田 誠
(株)竹中土木 大阪本店 清滝生駒道路高山大橋交差点改良工事	向野 泰弘
同上	待木 敏彦
同上	後藤 尚
同上	田村 一樹
(株)竹中土木 技術・生産本部 技術開発部	吉田 邦勝
同上	倉知 星人
(株)竹中土木 技術・生産本部 技術部 正会員	市川 晃央

1. はじめに

マスコンクリート構造物において、温度ひび割れ制御方法の一つであるパイプクーリング工法は、コンクリート打込み後にあらかじめ躯体内部に設置したパイプに通水し、コンクリートの内部温度を下げる工法であり、従来から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いる¹⁾。

パイプクーリングを適用する際は、事前解析により、クーリングパイプの設置間隔、コンクリート初期温度、通水温度、通水期間等の因子に幅を持たせ最適化を図り、目標ひび割れ指数を満足する施工条件を決定する。

パイプクーリングの実施における問題点として、従来工法では①コンクリート温度、通水温度、外気温等の計測データをリアルタイムに把握できないこと②コンクリート温度に応じた通水温度の制御ができないこと③通水トラブルや通水温度の異常等が検知できないことが挙げられる。これらの問題に対し①計測システム②通水温度制御システム③警報システムの機能を有するパイプクーリング制御システムを確立し、解決を図った。

本報では、パイプクーリング制御システムの詳細な説明と適用手順を示すとともに、実適用した結果について詳述する。

2. パイプクーリング制御システム

(1) 計測システムの詳細

コンクリート躯体内部および表面部の温度、通水温度は、熱電対を設置し計測する。また、冷却水の通水量は電磁流量計により計測する。これらの計測データは無線 LAN を介して、リアルタイムにタブレット、PC 端末およびスマートフォン(以降、各種端末)で把握することができる(図-1)。また、事前解析結果におけるコンクリート予測温度履歴を計測システムに登録し、計測情報と解析データを同時に各種端末に表示させ、比較を行うことができる。

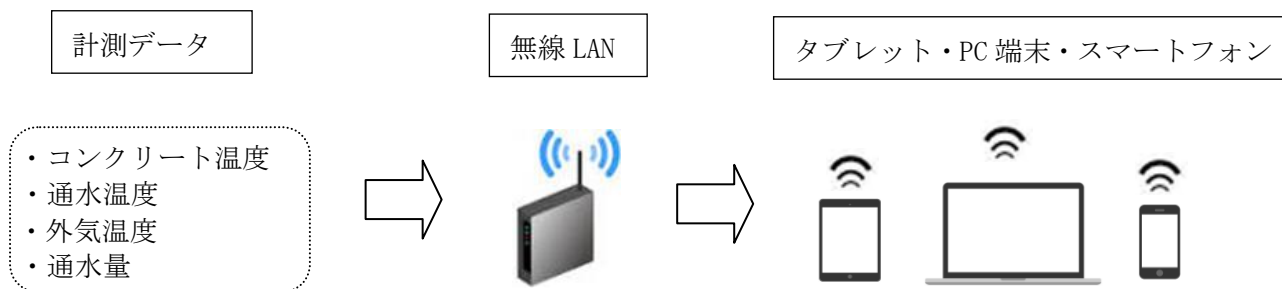


図-1 計測システム

キーワード パイプクーリング, 自動制御, リアルタイム, モニタリング, 省人化・省力化

連絡先 〒136-8570 東京都江東区新砂 1-1-1 株式会社竹中土木 技術・生産本部 技術開発部 TEL 03-6810-6215

(2) 通水温度制御システムの詳細

通水温度の制御は3つのステップで構成した(図-2)。
 ステップ1はコンクリートの最大温度を抑制するために、パイプクーリング実施開始からコンクリート温度が最大になるまでの期間を通水温度 15℃に維持する。
 ステップ2はコンクリート温度が最大になってから35℃になるまでの期間、コンクリート温度と通水温度の差を 20℃に維持する²⁾。ステップ3はコンクリート温度が 35℃を下回ってからパイプクーリング停止期間まで通水温度を 15℃に維持する。なお、ステップ1から2へ移行する際にはコンクリート温度が最大になったことをシステムが判定するとともに、その内容を担当者の各種端末へ送信する。担当者は、事前解析の結果と計測データを照合し最終判定を行う。ステップ2から3への移行の判断も同様である。

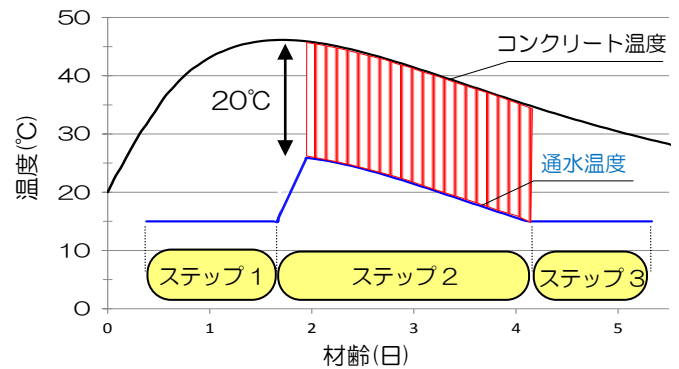


図-2 通水温度制御システム

(3) 警報システムの詳細

警報システムは、予め設定した通水温度および通水量の異常と見なされる上限値・下限値を逸脱した場合、停電した場合および冷却装置が故障した場合に警報メールや回転灯で異常を告知するシステムである(図-3)。

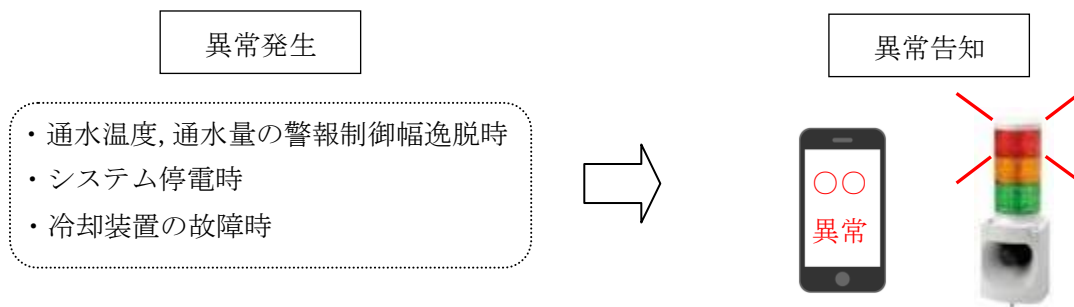


図-3 警報システム

(4) 制御システムの適用手順

制御システムの適用手順を図-4に示す。以下に手順を列記する。

① 事前解析による検討

配筋や目地間隔を考慮した事前解析より、クーリングパイプの設置間隔、通水量、通水温度、通水期間等の最適化を図り、目標ひび割れ指数を満足する施工条件を決定する。

② クーリングパイプ・制御システムの準備

事前解析において決定した条件でクーリングパイプを設置し、パイプクーリングおよび各種システムに関わる設備を設置する。

③ コンクリート打設

④ 外気温・コンクリート温度等計測

⑤ 通水開始・通水温度制御

事前解析で決定した期間、通水を行う。通水温度はコンクリート温度に従い3つのステップで制御する

⑥ 事後解析による効果の検証

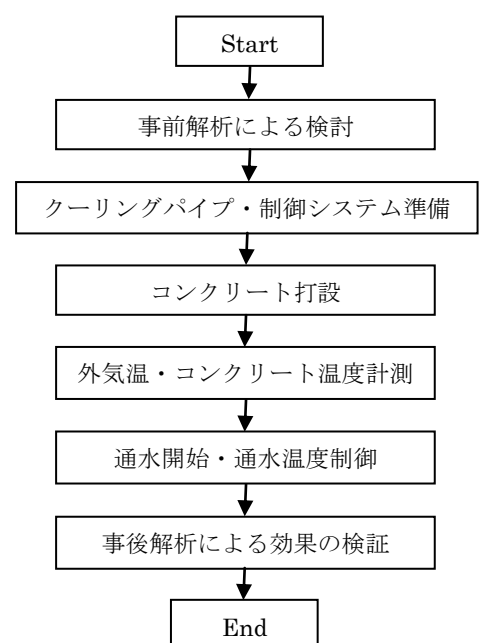


図-4 制御システムの適用手順

3. 実構造物への適用

パイプクーリング制御システムを清滝生駒道路高山大橋交差点改良工事の橋台堅壁部で適用した。以下に工事概要と特徴を述べる。

(1) 清滝生駒道路について

一般国道163号は、平成2年の清滝トンネル開通以来、奈良県域で交通量が増加したことにより、高山大橋交差点等において慢性的な交通混雑が発生している。清滝生駒道路高山大橋交差点改良工事は、清滝生駒道路の交通増加に対処し、交通混雑を緩和させる事で地域間交流の促進と物流の効率化を目的としている。

(2) 工事概要

発注者 : 国土交通省近畿地方整備局浪速国道事務所
 工事名 : 清滝生駒道路高山大橋交差点改良工事
 工事場所 : 奈良県生駒市高山町地先
 主要構造物 : 橋梁下部工 2基

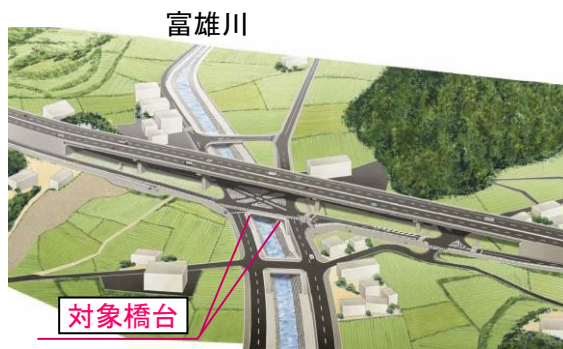


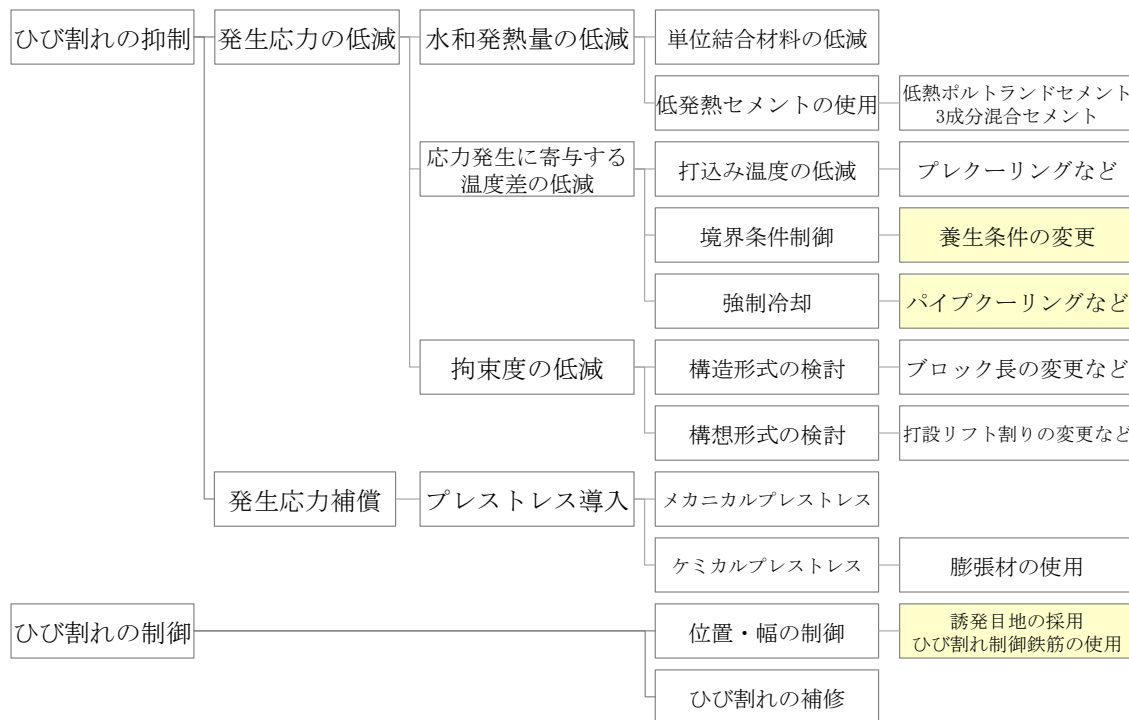
図-5 完成形イメージパース

(3) 工事の特徴

本工事は、清滝生駒道路が富雄川を横断する交差点の上部工、下部工を施工するもので、下部工は富雄川の両岸に2基の橋台を建設する（図-5）。A1橋台は壁厚1.4m・高さ2.8m～3.8m・延長52m、A2橋台は壁厚1.4m・高さ2.9m～3.4m・延長47mのマスコンクリート構造物である。

マスコンクリート構造物に対しては、様々なひび割れ対策がある（表-1）。本工事は各種施工条件より、ひび割れ対策は保温養生、パイプクーリングおよび誘発目地を採用した。橋台工事の施工時期は渇水期のみに限られており、パイプクーリングの通水方法は循環型を採用した。また、橋台の延長が長いことから、躯体内の通水方向は鉛直とした。

表-1 ひび割れ制御対策の種類



4. 事前解析による検討

(1) 解析モデルと諸条件

解析には非定常・非線形三次元温度応力解析プログラム「ASTEA-MACS」を用いた。解析モデルを図-6, 7に示す。モデル化する解析対象構造物は、長手方向に平行な 2/3 モデル、既完成構造物は 1/2 モデルとみなして解析を行った。解析における物性値や境界条件等は土木学会の 2007 年制定コンクリート標準示方書設計編（以降、JSCE 示方書）に準拠した（表-2）。クーリングパイプの設置間隔は、橋台堅壁部を対象に、誘発目地間隔およびパイプ設置の際に妨げとなる配筋を考慮し、パイプ設置間隔を 1.0m 以内に設置した（図-8）。通水温度の設定は、温度応力解析において最もひび割れ指数の小さい箇所のコンクリート温度に着目し、通水温度を設定した（図-9）。

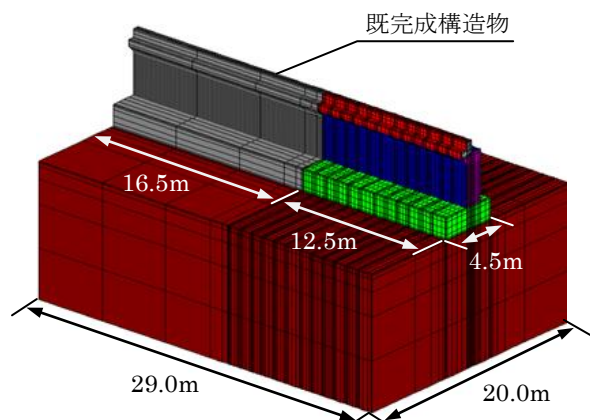


図-6 全体モデル

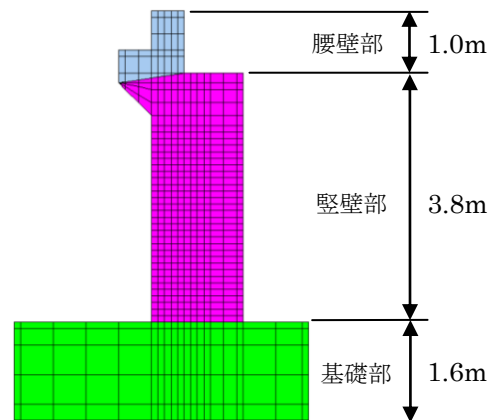


図-7 断面モデル

表-2 解析における物性値・境界条件

項目	単位	堅壁コンクリート	既完成構造物
セメント種類	—	高炉 B 種	
単位セメント量	Kg/m ³	302	
熱伝導率	W/m℃	2.7	
密度	Kg/m ³	2400	
比熱	kJ/kg℃	1.15	
ポアソン比	—	0.2	
線膨張係数	μ /℃	10	
断熱温度上昇特性	℃	$Q(t) = 51.16 * (1 - \exp(-0.6916 * t))$	
圧縮強度	N/mm ²	Fc※	40
引張強度	N/mm ²	Ft※	30
ヤング率	N/mm ²	E※	
コンクリート初期温度	℃	20	—
熱伝達率	W/m ² ℃	λ c※	

※JSCE 示方書による

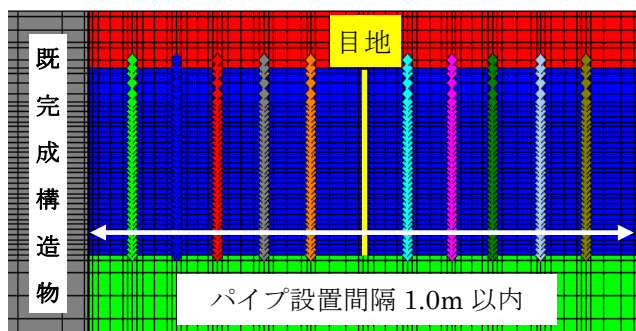


図-8 クーリングパイプの設置間隔

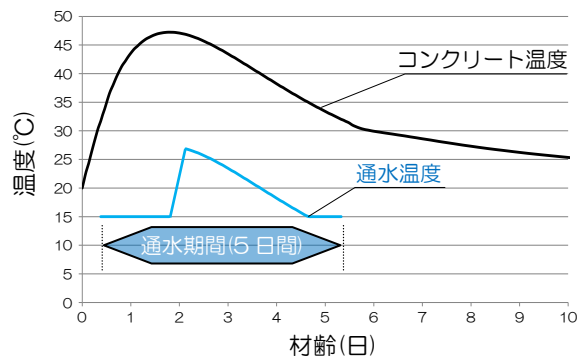


図-9 通水温度の設定

(2) 解析結果

4-(1)で記述した解析条件で事前解析を行った結果、コンクリート最大温度は、パイプクーリング無し（以降、P無し）の場合 51.9℃、パイプクーリング有り（以降、P有り）の場合 48.1℃を示した。最小ひび割れ指数は、P無しの場合 1.12 を示し、P有りの場合、目標ひび割れ指数 1.25 以上の 1.69 を示した。白色部分は 2.0 以上を示す(図-10)。

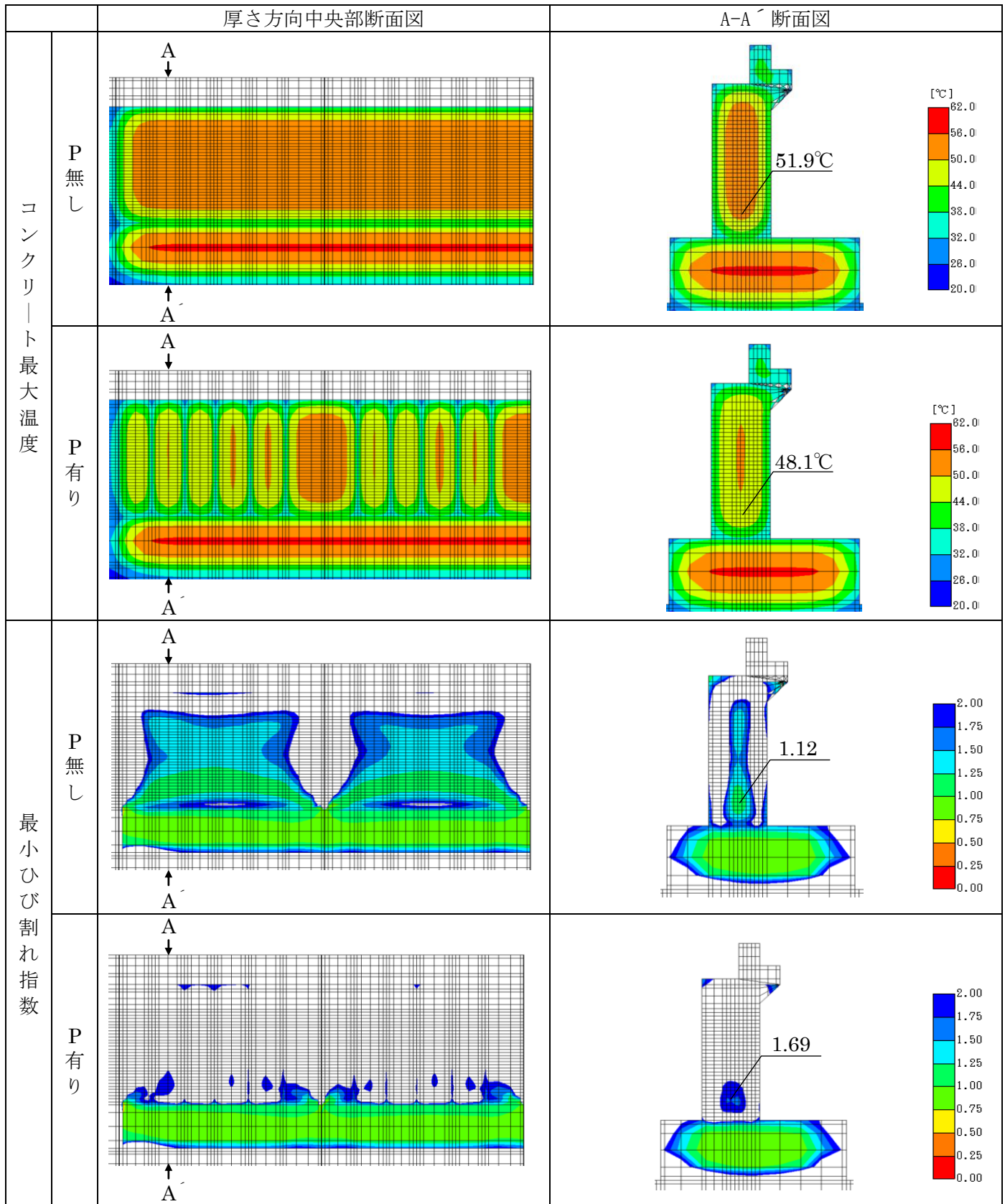


図-10 コンクリート最大温度および最小ひび割れ指数分布図

5. 設備

(1) 通水系統図

通水系統図を図-11 に示す。使用する設備を写真 1～3 に示す。

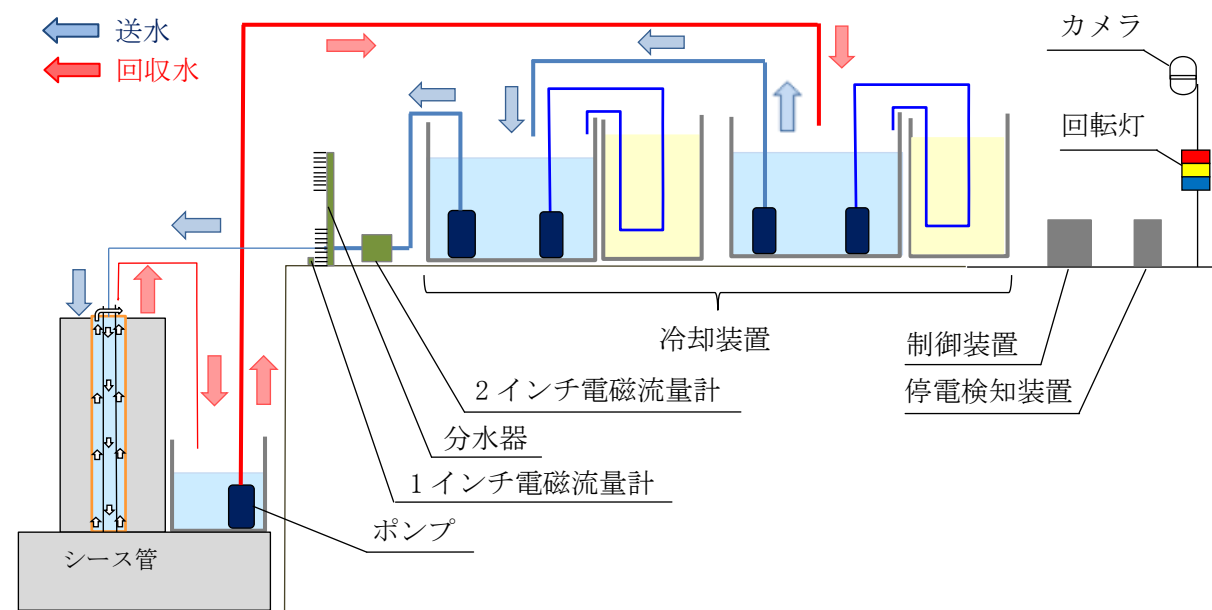


図-11 通水系統図



写真-1 パイプクーリング実施状況



写真-2 分水器



写真-3 1 インチ電磁流量計

(2) 熱電対設置箇所

コンクリート温度計測用の熱電対設置箇所を図-12 に示す。なお、通水温度計測用の熱電対は、冷却装置水槽付近の送水側ホース内に設置した。外気温度は、温湿度計を打設箇所近傍に設置し計測した。

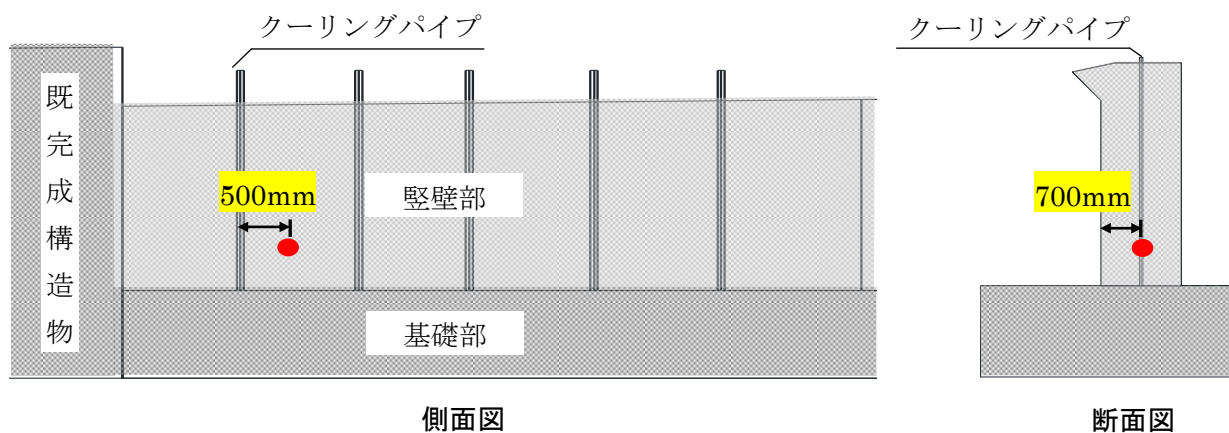


図-12 熱電対設置箇所

6. 制御システムの適用効果と検証

(1) 通水温度制御結果

コンクリート温度と通水温度, および外気温度の経時変化を図-13 に示す. 通水温度の指示値に対する制御幅は ± 0.1 とした. 通水期間中, 通水温度の指示値に対し, $-0.3 \sim +0.5^{\circ}\text{C}$ の範囲内で自動制御することができた. また, 通水期間終了後において, コンクリート温度のリバウンドは見られなかった. コンクリート最大温度を判定した際の表示画面を示す.

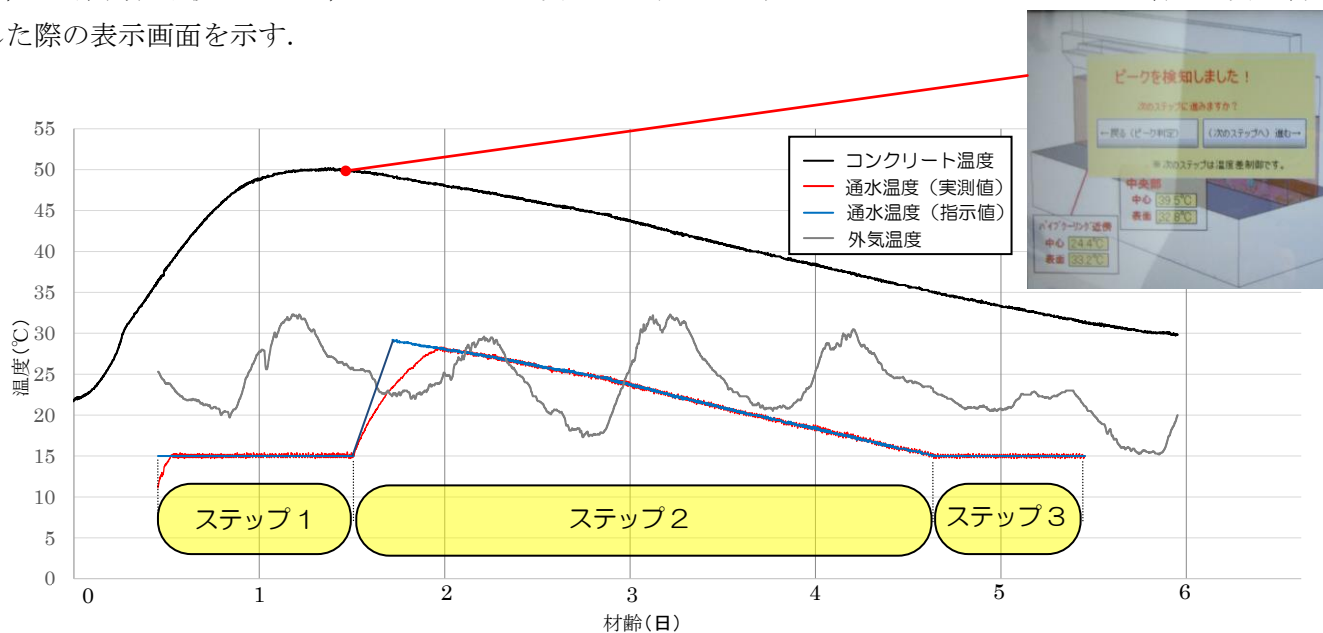


図-13 コンクリート温度, 通水温度および外気温度の経時変化

(2) 事後解析結果

計測システムから得られたデータを基に事後解析を行い, パイプクーリング制御システムの適用効果を検証した. P 無しの場合, コンクリート温度は 55.4°C であり, P 有りの場合 48.1°C を示した. 最小ひび割れ指数は, P 無しの場合 0.89 を示し, P 有りの場合, 目標ひび割れ指数 1.25 以上の 1.69 を示した. なお, 白色部分は 2.0 以上を示す(図-14).

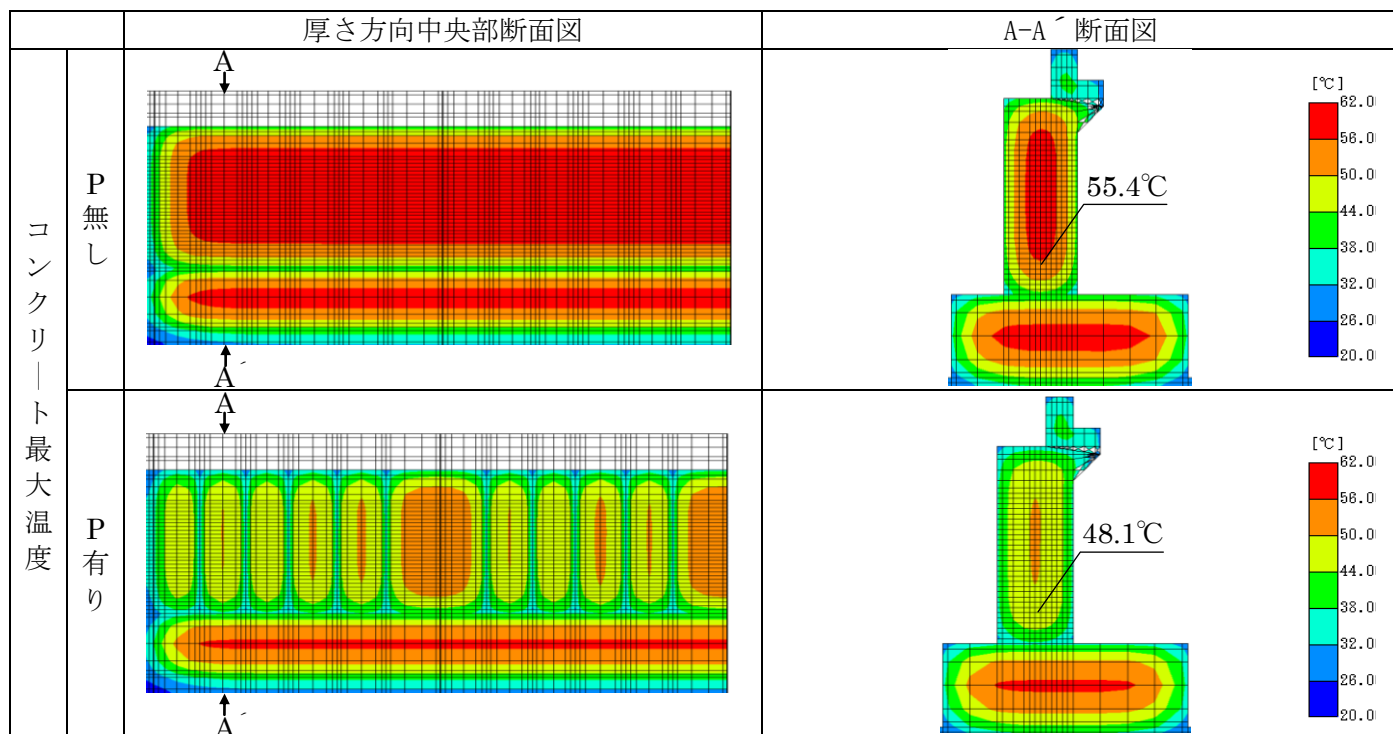


図-14 コンクリート最大温度および最小ひび割れ指数分布

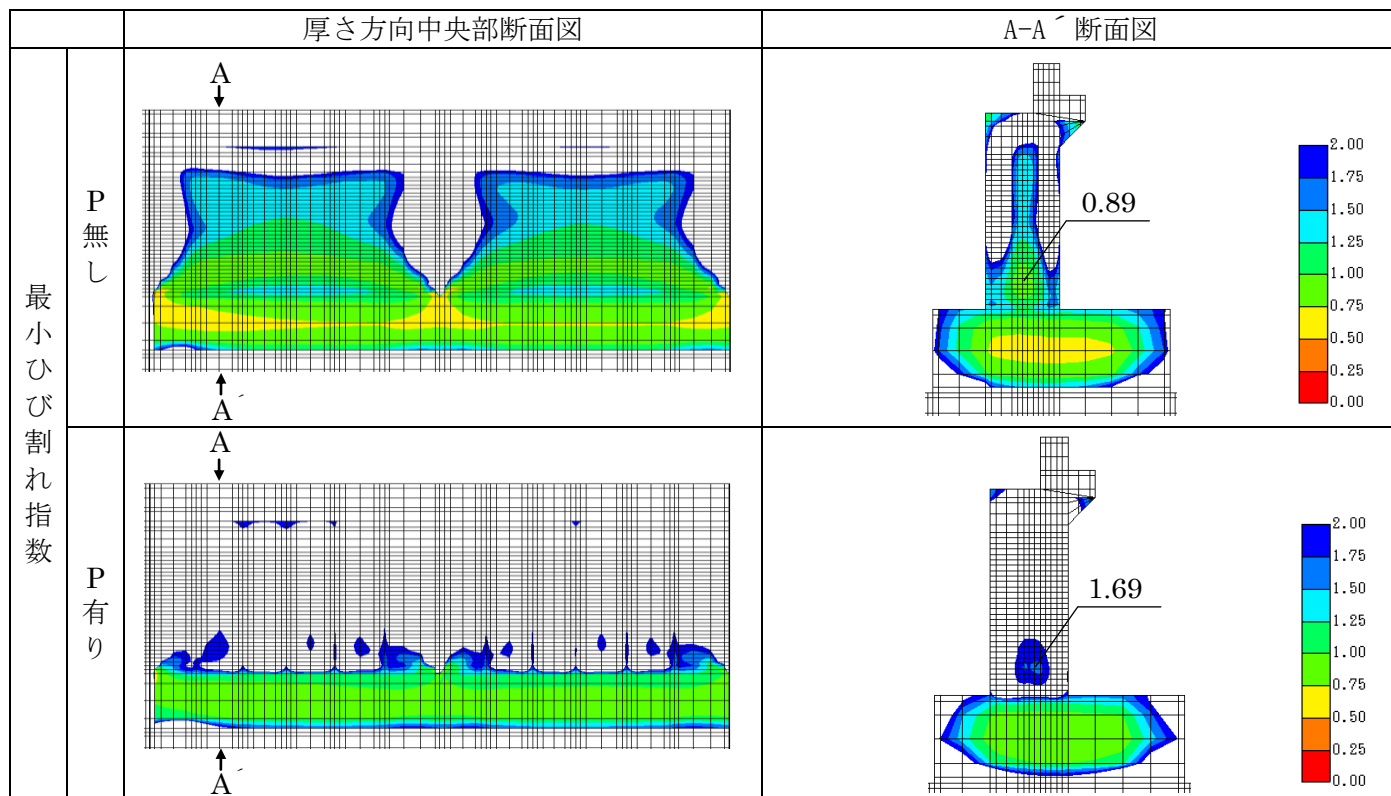


図-14 コンクリート最大温度および最小ひび割れ指数分布

(3) クラック調査結果

材齢 28 日にクラック調査を行った。その結果、ひび割れは誘発目地に発生している他は皆無であった。

(写真-10, 11)

7. まとめ

パイプクーリング制御システムを清滝生駒道路高山大橋交差点改良工事に実適用した成果を以下にまとめる。

① 計測システム

無線 LAN を介して、各種端末で計測データをリアルタイムに把握できた。

② 通水温度制御システム

通水温度はコンクリート内部温度に従い、3 つのステップで制御した。通水期間中、通水温度は指示値に対し、 $-0.3 \sim +0.5^{\circ}\text{C}$ の範囲内で自動制御できた。通水終了後、コンクリート温度のリバウンドは見られなかった。

③ 警報システム

通水温度および通水量の警報制御幅を逸脱した場合や停電した場合に警報メールや回転灯で異常を検知し、担当者は即座に対応することができ、パイプクーリングを適切に実施できた。また、材齢 28 日でクラック調査を行った結果、ひび割れは、誘発目地に発生している他は皆無であった。

以上より、計測システム・通水温度制御システム・警報システムの機能を有するパイプクーリング制御システムを確立し、施工の省力化およびパイプクーリングの適切な実施を実現した。

参考文献

- 1) 中出 剛:橋台施工における簡易なパイプクーリング工法の適用, 土木学会第 65 回年次学術講演会(平成 22 年 9 月)
- 2) 土木学会: 2007 年制定 コンクリート標準示方書【施工編】

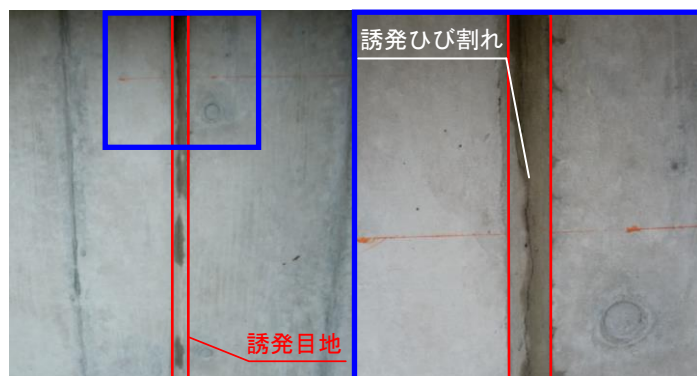


写真-10 クラック調査全景 写真-11 誘発目地部詳細