

可とう樹脂管を用いたパイプクーリング技術の開発と現場適用

(株)大林組 正会員 ○堀田 繁 正会員 上垣 義明
正会員 田中 将希 正会員 野島 省吾

1. はじめに

部材断面の大きい土木構造物は、コンクリート硬化時に発生する水和熱により、部材内部の最高温度が高くなる。このため、温度応力に伴うひび割れ（以下、温度ひび割れ）が発生するリスクが高く、設計時から温度ひび割れ対策を検討する必要がある（表-1）。温度ひび割れ対策は、セメント種類の変更等、使用材料による対策が基本となるが、使用材料は地域によって供給の制限を受ける。したがって、地域を問わず採用可能な施工時の対策と、その生産性が重要となる。

施工時の対策の一つであるパイプクーリングは、部材内部に設置したパイプにコンクリート打設直後から冷水を循環させることで部材内部の最高温度を低減し、温度ひび割れを抑制する方法である。一般的にパイプとして用いられる炭素鋼鋼管は、

表-1 温度ひび割れ対策例（ひび割れ制御指針¹⁾に基づき作成）

大項目	中項目	具体的な方法例	区分
温度上昇を抑制する方法	水和発熱の小さいセメント	中庸熱・低熱セメントの使用	材料
	混和材料	フライアッシュ等の置換	材料
	単位セメント量の低減	高性能 AE 減水剤等の使用	材料
	材料温度の低減	プレクーリング	材料・施工
	コンクリート打込み時期・時間	施工計画の見直し	施工
	養生による最高温度の低減	パイプクーリング	施工
収縮を抑制する方法	熱膨張係数の小さい材料の選択	石灰石骨材等の使用	材料
	自己収縮の小さい材料の選択	ポルトランド系セメント使用	材料
	収縮を打ち消す材料の使用	膨張材の添加	材料
生じる応力を低減する方法	ひび割れの位置を制御	ひび割れ誘発目地	施工
	外部拘束の低減	縁切り材や超遅延剤の使用	材料・施工
ひび割れ幅を低減する方法	鉄筋量の増量	鉄筋径・間隔の見直し	施工

その重さ、硬さ、短尺であることが原因で、品質面、施工面において課題がある。品質面においては、定尺ものが 5.5m と短いことに加え、直管と曲り管との組み合わせのため、部材内部に接続部が多数発生し、漏水リスクが増加することが課題である。施工面の課題としては、前述の漏水対策に加え、1m 当たり約 2.4kg と重いため、運搬や配置時に労力を要することや、曲げ加工や切断時には、専用の機械を使用する必要があるため、配置時に炭素鋼鋼管と鉄筋が干渉した場合の調整が難しいことが挙げられる。そこで、炭素鋼鋼管の代わりに軽量で、定尺が長く、加工しやすい可とう性のある材料を通水用パイプとして適用できないかの検討を行った。本稿では、通水用パイプの選定、選定したパイプの施工確認試験、実大規模試験とその結果、および現場での適用事例を報告する。

2. パイプの選定

クーリングパイプとして、炭素鋼鋼管の代わりにグラウトホースなどを使用した事例²⁾が報告されているが、グラウトホースは可とう性はあるが、炭素鋼鋼管に比べ冷却効果が劣ると言われている。本開発では、コンクリート部材内部に埋設される電線ケーブル等の保護を目的として使用される可とう電線管に着目した。可とう電線管は軽量で定尺が長く、加工しやすいことが特徴で、合成樹脂を主材とする可とう電線管（Combined Duct:以下 CD 管）と、亜鉛めっき鋼板、鋼板、耐水紙の 3 層で構成されている金属製可とう電線管があり、その 2 種類を候補として選定した（表-2）。

CD 管と金属製可とう電線管はパイプクーリングへの適用事例がないので、通水試験を実施し、コンクリートを冷却する効果が十分にあるか、漏水などの異常が生じないか確認し、適用候補を 1 種類に絞った。

通水試験は、図-1、写真-1 に示すように、発泡スチロール（EPS）で型枠を作成し、パイプと熱電対を所

キーワード マスコンクリート、パイプクーリング、CD 管、生産性向上

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 TEL03-5769-1322

定の位置に設置後、30-12-20N配合（単位セメント量：340kg/m³）のコンクリートを打設した。打設後、上面にEPSを載せて封緘し、パイプ内に平均水温 24℃の水を 20L/min の通水量で 6 日間通水した。実験ケースは①パイプなし、②炭素鋼鋼管、③CD 管、④金属製可とう電線管の計 4 ケースとして温度測定結果を比較した。

表-2 炭素鋼鋼管と CD 管、金属製可とう電線管の比較

種類	炭素鋼鋼管	CD 管	金属製可とう電線管
外観			
主材	炭素鋼	合成樹脂 (PE・PP)	亜鉛めっき鋼板 鋼板・耐水紙
1 1/2 管重量	2.43kg/m	0.12kg/m	0.65kg/m
可とう性	なし	あり	あり
定尺	5.5m/本	30・50m/巻	25m/巻
価格	1,200 円/m	45 円/m	600 円/m

図-2 に通水試験結果として、パイプ中心部から下方 250mm 離れた点の熱電対で計測された温度の経時変化を示す。金属製可とう電線管は、CD 管に比べ、熱伝達率が高いので、冷却効果が高いと予想したが、実際は、材質の違いが冷却効果に及ぼす影響はほとんどなかった。これは、各パイプの肉厚が薄く、素材の熱伝達率の差よりも水温とコンクリートの温度差や流速が冷却効果に及ぼす影響の方が大きかったためだと考えられる。また、金属製可とう電線管では、長時間の通水により一部漏水が確認された。以上の結果を踏まえて、適用候補を CD 管にのみ絞り、施工確認試験を実施した。

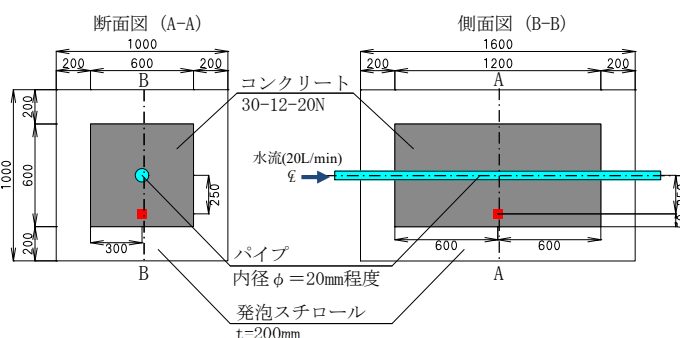


図-1 試験体と温度計測位置

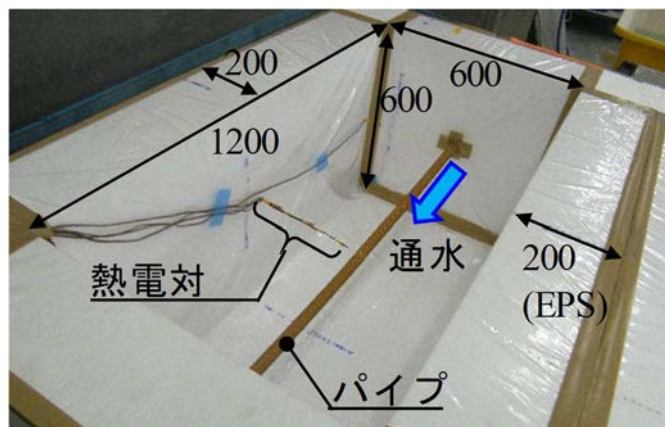


写真-1 通水試験体（コンクリート打設前）

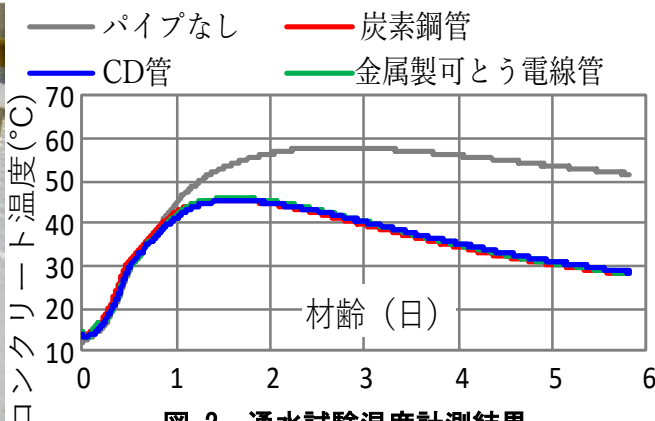


図-2 通水試験温度計測結果

3. 施工確認試験

CD 管は、炭素鋼鋼管と比較して軽量・低剛性であるため、パイプクーリングに適用する場合、施工時の衝撃によって CD 管が損傷して漏水することや、固定が外れ、パイプが所定の場所から動いてしまい、冷却効果が不均一になることで品質面に影響を与える恐れがあり、検証の必要があった。そこで、施工時を模擬した衝撃を

表-3 施工確認試験結果(抜粋)

圧縮強度	せん断強度	打設時の衝撃
		
639kN/m ² コンクリート 液圧 28m 相当でも損傷なし	3 重の結束線による締上げ であっても損傷・漏水なし	打設中に破損・移動しない 固定方法・間隔を確認

になることで品質面に影響を与える恐れがあり、検証の必要があった。そこで、施工時を模擬した衝撃を

与え、CD 管が損傷や移動しないような固定方法や接続方法の確立を目的に、施工方法確認試験を実施した。施工時の衝撃として、CD 管固定用結束線の締付け、コンクリート落下による衝撃、締固め用バイブレータとの接触、冷却水送り出し用ポンプの脈動が考えられる。これらの衝撃を模擬し、実施した試験結果より、CD 管の固定方法や固定間隔、接続方法を確立し、その試験結果の一部を表-3 に示す。後述する実大規模試験や、現場適用時においても、この確認試験に基づいて施工し、CD 管の損傷や移動による品質の低下がないことを確認している。

4. 実大規模試験

以下の（１）～（３）を目的とし、実大規模試験を実施した。

- （１）打設時の衝撃による CD 管の固定・接続状況の確認
- （２）温度計測結果と解析値の比較
- （３）コア供試体試験として CD 管内外の充填状況の観察と CD 管を含んだコア供試体の圧縮強度の確認

図-3 に試験体概要を示す。幅 1000mm×長さ 2700mm×高さ 1200mm の壁を模した試験体を作製し、試験体内に CD 管と熱電対を設置し、27-8-20N 配合(単位セメント量：301kg/m³)のコンクリートを打設した。コンクリート打設終了後は、CD 管内に平均水温 29℃の水を 10L/min で 6 日間通水した。通水後は、コンクリート材齢 7 日の時点で CD 管内部へモルタルポンプを使って、無収縮モルタルを充填した。CD 管内には、冷却水が残留している

ため、排出口から注入時のモルタルと同品質のモルタルが出てくるまで注入を継続し、残存している冷却水がないよう充填した。材齢 14 日には、鉄筋を避けた位置（図-3）の 3 箇所では φ100mm のコア供試体を採取した。採取した 3 箇所のコア供試体のうち、2 本は水平方向または鉛直方向の CD 管が貫通しており、残り 1 箇所は、CD 管を貫通しないコア供試体である。この 3 つのコア供試体は、材齢 28 日まで水中養生した後、圧縮強度試験を行った。

（１）打設時の衝撃による CD 管の固定・接続状況の確認

CD 管を施工方法確認試験結果に基づいて固定し、コンクリート打設前に通水試験を実施した。その結果、CD 管に脈動がなく安定に固定されている事、及び CD 管の損傷による漏水がない事を確認した。また、投入したコンクリートの衝撃やバイブレータによる衝撃によって CD 管の固定が外れ、移動が生じていないことを目視とコア供試体を採取することで確認した（写真-2）。

（２）温度計測結果と解析値の比較

実大規模試験を実施する前に温度解析を行い、コンクリート温度の計測位置を決定した。通水試験により、CD 管を用いたパイプクーリングは炭素鋼鋼管と同等の冷却効果が得られたことを踏まえ、事前解析における冷却効果は、炭素鋼鋼管を用いたパイプクーリングに一般的に用いられる田辺ら³⁾の式を用いて評価した。田辺らの式では、パイプクーリングの冷却効果は、パイプ壁面とコンクリート面間の熱伝達率 $h(\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C})$ と、冷却水とコンクリートとの温度差で表現され、熱伝達率は流速 $u(\text{cm/s})$ の関数として、式（１）により算出される。

$$h = 4.75u + 43.0$$

式（１）

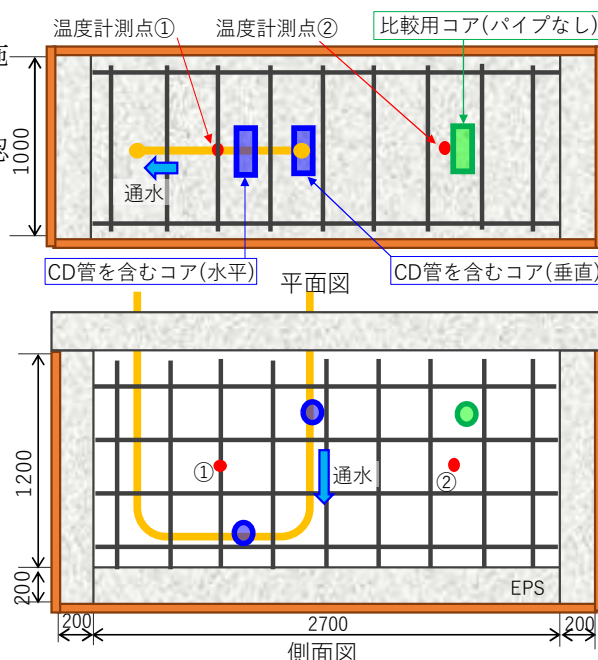


図-3 実大規模試験 試験体概要



写真-2 コンクリート投入状況

なお、流速は冷却水の流量をパイプの断面積（公称径から算出）で除すことで求めた。得られた温度解析結果（図-4）から、通水による冷却効果が及ぶ点として、水平および鉛直方法のパイプから500mm離れたパイプ間中央部（図-4中①）と、鉛直パイプから1000mm離れた位置（図-4中②）を選定した。比較用の計測点②は、通水の有無に関わらず、温度履歴が一致しており、パイプクーリングの冷却効果が及ばない位置であることを確認している。

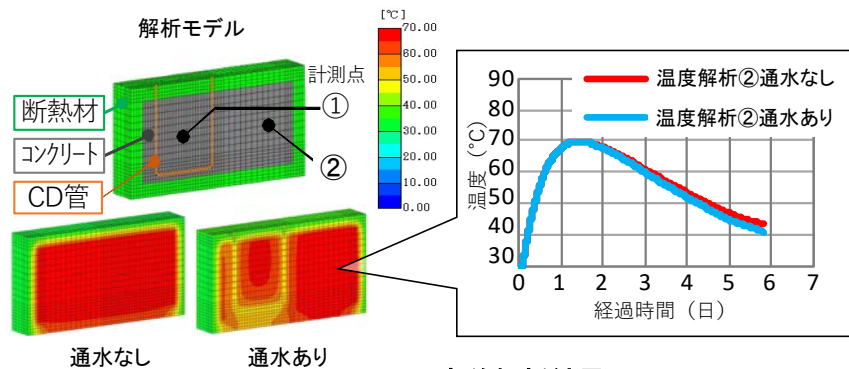


図-4 事前解析結果

得られた計測結果に基づき、温度解析でCD管の冷却効果の評価に使用した式（1）の適用妥当性を以下の手順で検討した。

まず、パイプクーリングの冷却効果が及ばないと判断した計測点②の計測結果を用いて、当日打設したコンクリートの発熱特性と実大規模試験体周りの断熱材の実際の熱伝達率を把握した。図-5に計測点②での計測結果と解析結果を示す。コンクリートの断熱温度上昇特性は、コンクリート標準示方書【設計編】⁴⁾によると、式（2）で与えられる。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t}) \quad \text{式（2）}$$

ここで、 $Q(t)$ は材齢 t 日における断熱温度上昇量、 Q_{∞} は終局断熱温度上昇量、 γ は温度上昇速度に関する定数で、いずれも実験により定まる定数である。図-5中の破線：②解析（示方書式）は、セメントの種類、単位セメント量、打設温度から回帰式によって推定された Q_{∞} 、 γ 、及び解析上で与えた断熱材の熱伝達率を用いて描いた履歴図である。この履歴図が計測値に一致するよう逆解析を行い、発熱特性と実際の断熱材の熱伝達率を特定した。

次に、当日打設したコンクリートの断熱温度上昇特性と、断熱材の熱伝達率を反映した解析を、計測点①での温度履歴と比較した（図-6）。その結果、計測結果と解析結果は、精度よく一致しており、当初の予想通りCD管を用いたパイプクーリングであっても、炭素鋼鋼管と同様に田辺らの式で冷却効果が評価できることが確認できた。

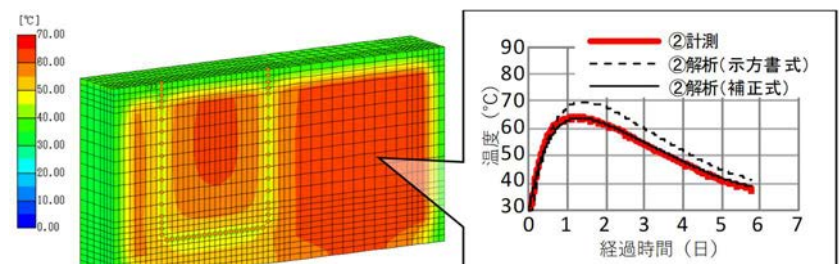


図-5 計測点②での計測と解析結果

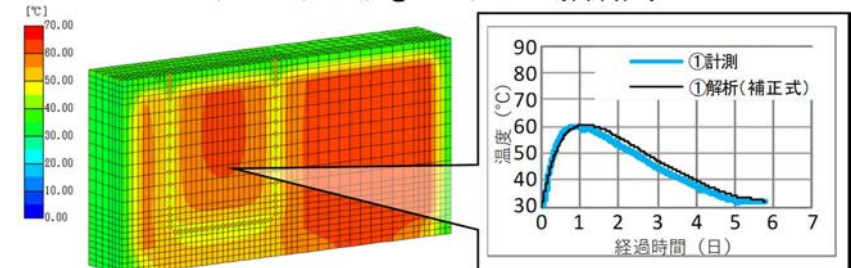


図-6 計測点①での計測と解析結果

（3）コア供試体による観察および圧縮強度試験

CD管は、波型の表面形状であるため、CD管内外の充填不良が懸念された。また、充填不良やCD管とコンクリートの付着不足が原因でコンクリートの圧縮強度の低下も懸念された。このため、CD管を貫通するコア供試体を採取し、CD管内外の充填状況を確認し、圧縮強度試験を実施した。表-4にCD管内外の充填状況とCD管を貫通するコア供試体の圧縮強度試験結果を示す。各切断面において、CD管内はモルタルが、CD管周りは、スランプ8cmのコンクリートがCD管の溝に隙間なく充填されていることを確認した。圧縮強度試験では、CD管を貫通するコアであっても、CD管を貫通しないコアと同等の圧縮強度を有し、CD管周りが圧縮強度低下の原因とならないことも確認した。

5. 現場適用事例

以上の試験結果を踏まえ、北陸新幹線福井開発高架橋工事で CD 管を用いたパイプクリーニングを適用した事例を紹介する。北陸新幹線福井開発高架橋工事は、福井駅の北側に位置する高崎起点 418km361m から 420km583m の総延長 2,222m 間にラーメン高架橋を構築するものである。橋脚基礎は場所打ち杭とオープンケーソンで構成されている。このうち、オープンケーソン基礎 3 基の頂版コンクリートは直径 7.0m 部材厚 5.0m のマスコンクリートであるため、温度ひび割れの発生が懸念された。そこで、温度ひび割れ解析を実施し、パイプクリーニングによる温度ひび割れ対策効果と CD 管の設置間隔を検討した。解析で用いたコンクリートの配合と熱物性を表-5 にまとめる。

表-4 CD 管が貫通するコアの充填状況と圧縮強度

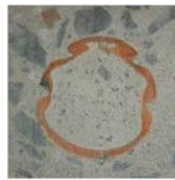
コア	CD 管を貫通するコア（水平箇所）	CD 管を貫通するコア（垂直箇所）	CD 管を貫通しないコア
パイプ縦断面			—
パイプ横断面			—
圧縮強度 N/mm ²	27.4	28.8	28.7

表-5 コンクリートの配合と熱物性

呼び方	セメント種類	強度保証材齢(日)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)		断熱温度上昇特性 (打設温度20℃)	
				W	C	Q _∞	γ
24-8-40-N	普通セメント	28	51	150	295	49.73	1.238

事前解析の結果より、CD 管の設置間隔は、ひび割れ指数（コンクリート引張強度と引張応力の比）が 1.0 以上を確保できる 750mm 間隔とした。750mm 間隔で CD 管を設置した場合、無対策の時に比べ、最小ひび割れ指数が 0.23 改善した。

実施工時には、既往の知見¹⁾より水温管理と水圧抑制の観点から、1 系統あたりの配管長さを 150m 以下となるように配置した。また、CD 管接続部からの漏水リスクを解決するために、CD 管の長尺である特長を活かし、接続部は躯体外部に配置した。躯体中心部には、通水管理と事後検証を目的とし、熱電対を設置した（写真-3）。通水は 100V の水中ポンプと 30m³ の水槽を用いて水を循環利用する方式を採用した。コンクリート打設前には、通水試験を実施し、配置された CD 管（写真-4）が脈動せずに十分固定されていること、結束線の締付けによって損傷していないこと、躯体外部に設けた接続箇所での漏水がないこと、水圧により CD 管に変形が生じていないことを確認した。コンクリート打設中は、施工確認試験で、問題ない事を確認しているが、更なるリスク回避のために、できる限り CD 管上に直接コンクリートを落下させないように指示した。また、締固め班には、事前に CD 管の位置を周知し、可能な限りバイブレータと CD 管の接触を避けるよう指示した。打設完了後は、温度計測結果を確認しながら、通水期間を決定した。通水は、平均水温 13.2℃の水を 10L/min で、ピーク温度到達時から 1 日後までの計 3 日間実施した。また、



写真-3 温度計測管理



写真-4 CD 管設置状況



写真-5 排出口充填状況

通水終了後に温度の再上昇が生じないように配慮した。通水後は、従来の炭素鋼鋼管の場合と同様に、モルタルポンプにて無収縮モルタルを充填し、排出口から注入時のモルタルと同品質のモルタルが出てくるまで注入した（写真-5）。

施工後の検証では、事前解析と計測結果、事後解析を比較し、最高温度低減量とひび割れ指数抑制効果の検証を行った。ここでの事後解析は、当日の打設温度、冷却水の温度、現地での外気温を解析に反映させたものである。温度の経時変化を図-7 に示す。躯体中央での温度計測結果は、同じ点の解析結果と精度よく一致し、パイプクーリングなしの事前解析に比べ、温度上昇量を 21℃抑制した。また、ひび割れ指数の分布図（表-6）より、事前解析と事後解析で同様のひび割れ抑制効果が得られた。解析上のひび割れ抑制効果の確認だけでなく、打設 2 か月後にパイプクーリング適用箇所のひび割れ調査を実施し、有害なひび割れが生じていないことも確認している。

CD 管使用による経済性改善効果を表-7 に示す。これは、炭素鋼鋼管を用いたパイプクーリングで施工した同種構造物での実績と比較したものである。改善効果は、炭素鋼鋼管と同等の品質を確保しながら、全体で約 40%改善した。その内訳として、材料・加工で約 40%、管配置時は、CD 管を巻いた状態でルートに沿って順次移動・固定を繰り返すことで、配筋内でもスムーズに配置でき、約 70%の改善効果があった。以上より、CD 管の軽量で定尺が長く、可とう性があるという特徴により、当初目標通り生産性向上効果が得られたと言える。

6. おわりに

パイプクーリングに、可とう性を有し、軽量かつ長尺な CD 管を用いることで、炭素鋼鋼管と同等の冷却効果を確保しながら、施工面、品質面の課題を解決した「フレックスクーリング工法」の開発経緯と実用化例を紹介した。当社では、今後も労働力不足の課題解決と高品質な構造物の建設に貢献可能な生産性向上技術の開発を進める所存である。

参考文献

- 1) 公益財団法人日本コンクリート工学会 マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016
- 2) 寺門直之,吉野正道,濱本泰弘,斉藤萌子：グラウトホースを用いたパイプクーリングの効果と検証, 第 73 回年次学術講演会
- 3) 田辺忠顕,山川秀次,渡辺朗：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定並びに冷却効果の解析, 土木学会論文報告書集, 第 343 号, pp.171-179, 1984
- 4) 土木学会 2017 年制定コンクリート標準示方書【設計編】
- 5) 安漢儒,光森章,野島省吾,上垣義明,和田一範,山根則秀：コンクリート埋設用合成樹脂可とう電線管を用いたパイプクーリングの実施, 第 74 回年次学術講演会, VI-501

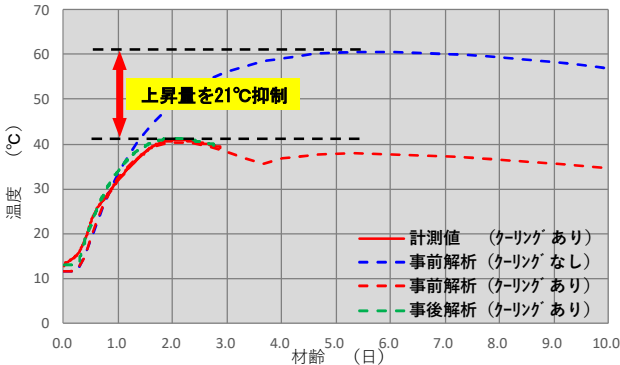


図-7 解析結果比較（温度履歴）

表-6 解析結果一覧

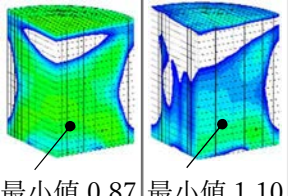
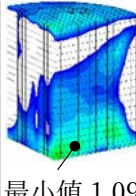
	事前 解析		現場 計測	事後解析 クーリング あり
	クーリング なし	クーリング あり		
初期温度	11.7	11.7	12.8	12.8
温度上昇	49.0	28.6	28.1	28.5
指数分布				

表-7 CD 管使用による経済性改善効果

項目	炭素鋼鋼管からの改善効果	パイプクーリング全体に占める改善効果割合
材料・加工	曲げ加工なし	約 -40%
管配置	配管が容易	約 -70%
通水管理	炭素鋼鋼管と同等	±0%
事後処理	炭素鋼鋼管と同等	±0%
全体		約 -40%