論文　鉛直パイプクーリング工法におけるクーリングパイプ表面の熱伝達率の検討

新居　秀一[*1]・村上　祐治[*2]・林　俊斉[*3]・白岩　誠史[*4]

要旨：マスコンクリートの温度ひび割れ対策工法として用いられる，鉛直パイプクーリング工法におけるクーリングパイプ表面の熱伝達率の検討を行った。鉛直パイプクーリング工法を実施した現場でコンクリート温度，外気温，クーリング水の温度，クーリング水の通水量を測定した。これらの値を用いて，クーリング水とクーリングパイプ表面の熱交換を表す熱伝達率を再現解析により同定した。同定した熱伝達率は温度上昇期と温度ピーク以降では，温度ピーク以降のほうが大きい。同定した熱伝達率を既往のクーリングパイプ表面の熱伝達率の推定式と比較し，鉛直パイプクーリング工法に用いる熱伝達率の推定式を提案した。

キーワード：マスコンクリート，鉛直パイプクーリング工法，クーリングパイプ表面，熱伝達率，通水量

1. はじめに

マスコンクリート構造物は，セメントの水和反応に起因する温度ひび割れが懸念されるため，温度応力解析により事前に照査が行われる。照査の結果，ひび割れに対する限界値を満足しない場合には，温度応力解析により，材料面および施工面からの対策を検討し，適切な工法を選定しなければならない。

施工面の対策工法の一つにパイプクーリング工法がある。パイプクーリング工法には 2 つの工法がある。ダムコンクリートなどの平面的に大きな構造物には，使用するパイプは内径 25mm 程度の薄肉鋼管を用いる水平パイプクーリング工法が主に適用される。一方，橋脚や柱などのリフト高が高く，狭長な構造物には，使用するパイプは内径 55mm のシース管を用いる鉛直パイプクーリング工法が主に適用される [1)]。

パイプクーリング工法を対策工法として選択した場合には，温度解析によりクーリングパイプの設置位置，間隔，径，クーリング水の温度，通水速度，通水期間をパラメータとして対策効果を確認しながら計画する。精度よく対策効果を求めるためには，クーリング水の温度，通水速度およびクーリング水とクーリングパイプ表面の熱交換を表す熱伝達率を適切に設定する必要がある。

これらの温度応力解析に用いるクーリングパイプ表面の熱伝達率には，田辺らが提案した式(1)により通水速度から推定される値を用いてきた [2)]。しかしながら，田辺らの式(1)はダムコンクリートで適用する水平パイプクーリング工法を想定しており，パイプは内径 25mm の鋼製管，通水速度は 20～60cm/s の条件で提案されている。それに対して，鉛直パイプクーリングの条件は，パイプは内径 55mm のシース管，通水速度は 2～4cm/s と大きく相違している。

以上のことから，本論文は，鉛直パイプクーリング工法に対して，クーリング水の温度，通水速度，環境条件，施工条件等を入力した再現解析を行い，内径 55mm のパイプにおける，通水速度とクーリングパイプ表面の熱伝達率の関係を検討したものである。

2. 鉛直パイプクーリング工法について

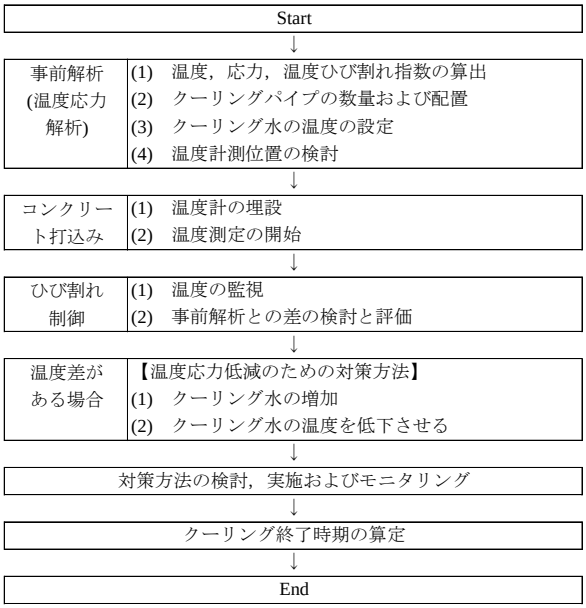
コンクリートの温度ひび割れの対策工法である鉛直パイプクーリング工法は，**図－1** に示すようなフローで検討，実施される。

鉛直パイプクーリング工法は，事前の温度応力解析によりクーリングパイプの設置位置，間隔，径，クーリング水の温度，通水速度，通水期間を検討して決定する。その鉛直パイプクーリング工法が実施できるようにポンプ，機械などを検討し，そのシステムを構築する。システムの構築例を**図－2** に示す。

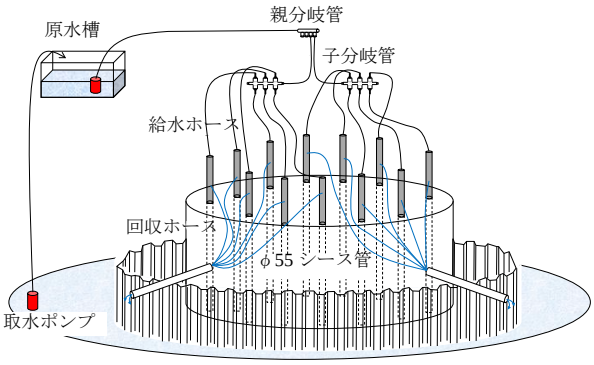
鉛直パイプクーリング工法では，**図－3** に示すようにコンクリート打込み前に予め，シース管などを埋設する。コンクリート打込み終了後，シース管中にフレキブルなビニールホースなどをシース管の下端まで挿入する。そのフレキブルホースに水を流水させて，シース管周囲のコンクリートの温度を低下させる。シース管から排出される水はコンクリート仕上がり表面の養生水としても使用することができる。

構造物の温度の監視，事前解析との差の検討の評価を行うために，外気温，コンクリート内部温度，クーリング水の温度を測定する。コンクリート内部温度は，事前

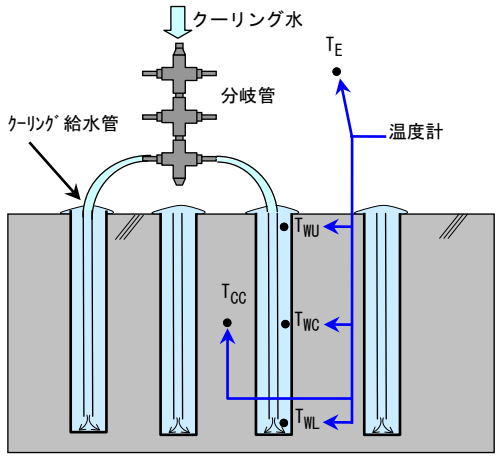
*1 (株)安藤･間　土木事業本部土木設計部　工修　(正会員)
*2 (株)安藤･間　技術研究所土木研究部　工博　(正会員)
*3 (株)安藤･間　土木事業本部土木設計部　工修　(正会員)
*4 (株)安藤･間　土木事業本部土木設計部　工修　(正会員)



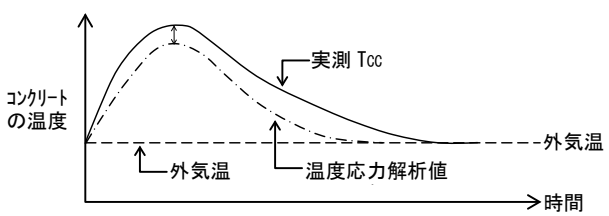
図－1　鉛直パイプクーリング工法の検討，実施フロー



図－2　鉛直パイプクーリング工法のシステム構築例



図－3　鉛直パイプクーリング（断面図）の１例



図－4　クーリング水の調整が必要な温度履歴例

解析における最高温度検出位置で計測する。そのコンクリート内部温度などの測定を継続的に行い，事前解析で求めたコンクリートの温度履歴と比較検討を行う。

コンクリートの内部温度と事前解析の温度が相違する場合，クーリング水の調整を行う。例えば，**図－4** の様に事前解析結果の温度よりも実測温度の方が高い場合には，クーリング水量の増加，クーリング水の冷却などが考えられる。その後，コンクリートの温度など監視を継続実施し，クーリング終了時期を検討する。

鉛直パイプクーリング工法を水平パイプクーリング工法と比較すると，**表－1** に示すとおりである。**表－1** にあるようにパイプクーリングに用いる材料，排水，穴埋め，適用可能な構造物などの相違があり，特にクーリングパイプの径，通水速度が大きく異なる。そこで,鉛直パイプクーリング工法の実施時に測定した外気温，コンクリート内部温度，クーリング水の温度を用いて，クーリングパイプ表面の熱伝達率の検討を行った。

表－1　パイプクーリング工法比較

項目		鉛直 パイプクーリング工法	水平 パイプクーリング工法
パイプ	配置	鉛直配置	水平配置
	間隔	1m程度	50cm程度
	形状 種類	埋設管：亜鉛メッキ鋼板 シース管（直管） 内径φ55mm 給水管：フレキシブル ホース	埋設管：規格品の金属管 内径φ25mm
通水速度 （通水量）		2～4cm/s (3～6ℓ/min)	20～67㎝/s (6～25ℓ/min)
排水		コンクリート表面の養生水排水する場合には，水処理が必要 コンクリートにクーリング水が接触しない場合は，水処理は不要	排水する場合には，水処理が必要
穴埋め		材料：モルタル 穴埋め確認： 目視確認可能	材料：モルタル 穴埋め確認： 目視確認可能
リフト厚さ		影響を受けない	リフト厚さ1m程度
適用可能な 構造物		狭長，高構造物， 壁構造物など	平面的な構造物，ダムなど

3. クーリングパイプと冷却水の境界の熱伝達率の同定

3.1 既往のクーリングパイプ表面の熱伝達率

クーリング水とクーリングパイプ表面の熱交換を表す熱伝達率を表す式として，田辺らの式(1)と，日本機械学会の式(2)がある [3]。

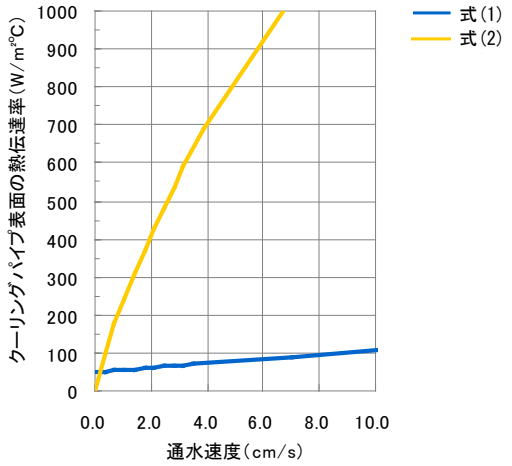
$$h = 5.52 \times u + 50.0 \qquad (1)$$

ここに，h は熱伝達率(W/m²℃)，u はクーリング水の通水速度(cm/s)

$$h = K1\times(2.20+0.03Tw)\times10^{4}(\rho u/g)^{0.8}/d^{0.2} \qquad (2)$$

ここに，h は熱伝達率（W/m²℃），K1 は係数（kcal 単位系から SI 単位系への変換）K1＝1.16279，Tw：水の温度（℃），u はクーリング水の通水速度（m/h），ρ は水の密度（t/m³），g は重力加速度（m/s²），d はクーリングパイプの内径（m）

鉛直パイプクーリング工法のクーリング通水量は，3～6ℓ/分程度である。この通水量を 55mm のシース管に通水すると，通水速度は 2.1～4.0cm/s となる。水の温度 20℃における，通水速度 0～10cm/s の範囲に関する通水速度とクーリングパイプ表面の熱伝達率の関係を**図－5** に示す。田辺らの式(1)では，熱伝達率は低く，通水速度に対する変化も小さい。日本機械学会の式（2）では，熱伝達率はかなり大きい。



図－5　通水速度と熱伝達率の関係

3.2 事前解析と事後解析

本論文では，2007 年制定コンクリート標準示方書設計編に準じて，解析に必要なコンクリートの断熱温度上昇特性や熱物性を設定することにより，パイプクーリングをしない条件において，精度のよい解析を行えることを前提に検討を行っている。

(1) 解析条件

温度解析は 3 次元有限要素法で行い，解析には非線形構造解析プログラムを使用した。事前解析は，パイプクーリング検討時に外気温などを予測値として入力した解析を行った。事後解析は，実測の温度履歴との比較から，クーリングパイプ表面の熱伝達率を同定するために，計測した外気温，コンクリート打込み温度，クーリング水の温度を入力して温度解析を行った。

検討に用いたコンクリートの配合を**表－2** に示す。温度解析に用いた入力値一覧を**表－3** に示す。

表－2　コンクリートの配合

構造物	設計基準強度	粗骨材の最大寸法	スランプ	水結合材比	細骨材率
	N/mm²	mm	cm	%	%
A橋脚	45	25	15	39.2	45.2
B橋脚	45	25	15	39.2	45.2
C橋脚	24	25	8	51.0	42.5
D橋脚	30	20	8	52.1	44.7
E橋台	24	25	8	51.0	42.2
F橋台	24	25	8	51.0	42.2
G倉庫	28	25	8	47.5	41.9
H倉庫	28	25	8	47.5	41.9

構造物	セメントの種類	単位量(kg/m³)					
		水 W	セメント C	膨張材 EX	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 Ad
A橋脚	普通	153	371	20	793	971	6.647*
B橋脚	普通	153	371	20	793	971	6.647*
C橋脚	高炉B種	156	306	—	773	1047	0.956
D橋脚	高炉B種	167	321	—	802	1003	3.210
E橋台	高炉B種	150	294	—	774	1055	2.352
F橋台	高炉B種	150	294	—	774	1055	2.352
G倉庫	高炉B種	161	339	—	729	1040	3.390
H倉庫	高炉B種	161	339	—	729	1040	3.390

*高性能AE減水剤(遅延形)

鉛直パイプクーリング工法実施期間中のクーリングパイプ表面の熱伝達率は通水速度から田辺らの式(1)により推定し与えている。なお，クーリングを実施しない場合でも，解析プログラム上でクーリングパイプ表面の熱伝達率の入力が必要なため，便宜上 0.1W/m²℃という小さな値を入力している。

クーリングパイプへの通水量は 3～5.5ℓ/min と標準的なケースである。また，クーリングパイプの内径は 55mm，クーリング水の温度は原水の温度を与えており，クーリングパイプ内での温度上昇は考慮していない。

A 橋脚と E 橋台を例に解析手順を説明する。A 橋脚と E 橋台の解析モデルおよびクーリングパイプ，温度計の配置を**図－6**，**図－7** に示す。温度計は，クーリング実施部のリフト高の中心に配置し，温度の監視および構造物の温度管理を行った。

(2) 温度履歴

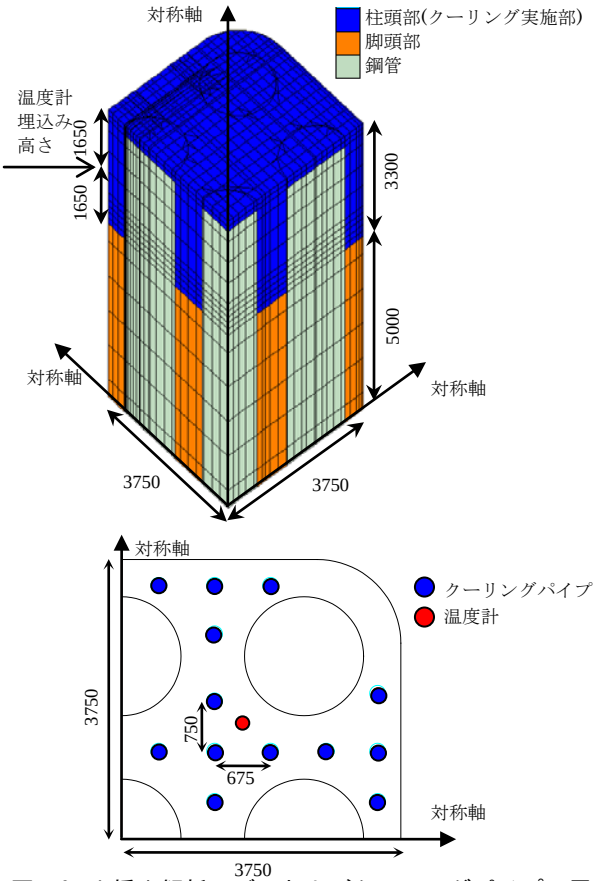
事前解析，実測，事後解析の温度履歴を**図－8**，**図－9** に示す。

A 橋脚では，コンクリートのピーク温度はよく合致している。打設時から温度上昇期にかけて，事前，事後解析の温度は実測よりも高い。これは，解析では打設時間を考慮していたために実測よりも発熱が早いためと考えられる。また，温度降下期では，事前，事後解析の温度は実測よりも高い。

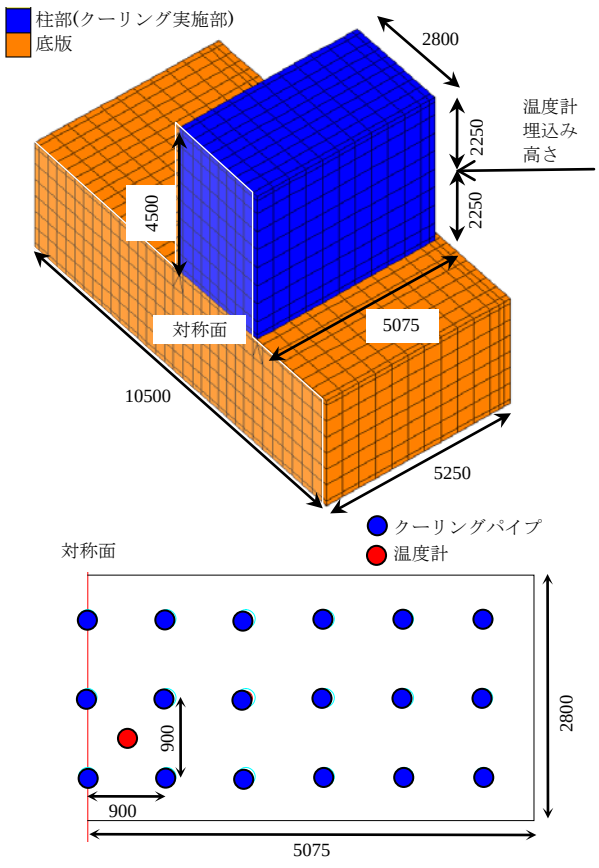
同様に，E 橋台では，打設時から温度上昇期にかけて，事前，事後解析の温度は実測よりも高い。事前解析のピーク温度は，実測のクーリング水の温度が事前解析時よりも高いため，実測のピーク温度よりも低いが，クーリング停止時のコンクリート温度は一致している。事後解析では，ピーク温度はよく一致しているが，温度降下期

表－3　温度解析に用いた入力値一覧表

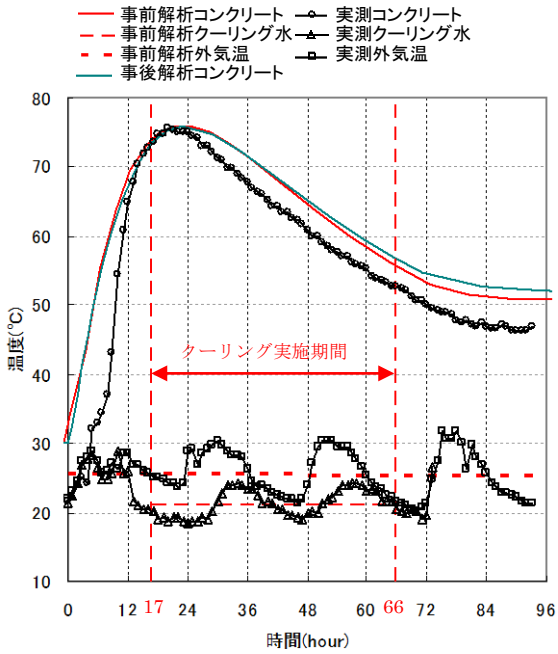
項目		構造物	A橋脚	B橋脚	C橋脚	D橋脚	E橋台	F橋台	G倉庫	H倉庫
共通条件	対象部位		柱頭部	柱頭部	脚頭部	柱部	柱部	柱部	柱部	柱部
	リフト高	m	3.3	3.3	7.575	5.4	4.5	3.548	4.88	4.88
	熱伝導率	W/m℃	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
	密度	kg/m³	2277	2277	2282	2291	2273	2273	2269	2269
	比熱	kJ/kg℃	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
	断熱温度上昇式(打込み温度20℃)	基本式	$Q(t)=Q_\infty(1-e^{-r(t-t0)^s})$				$Q(t)=Q_\infty(1-e^{-rt})$			
		セメント種類	普通	普通	高炉B種	高炉B種	高炉B種	高炉B種	高炉B種	高炉B種
		C(kg/m³)	371	371	306	321	294	294	339	339
		Q_∞(℃)	58.8	58.8	52.0	53.9	50.1	50.1	56.0	56.0
		r	1.423	1.423	0.823	0.858	0.677	0.677	0.758	0.758
		t_0	0.146	0.146	0.075	0.075	—	—	—	—
		S	1	1	1	1	—	—	—	—
	型枠	材料(W/m²℃)	木製(8)	木製(8)	木製(8)	木製(8)	木製(8)	木製(8)	木製(8)	木製(8)
		脱枠材齢(日)	3	3	2	3	14	14	13	13
	養生	上面(W/m²℃)	保温(5)	保温(5)	保温(5)	なし(14)	保温(0.969)	保温(0.969)	なし(14)	なし(14)
		期間(日)	14	14	5	—	28	28	—	—
		側面(W/m²℃)	保温(2.5)	保温(2.5)	保温(3.1)	保温(5)	保温(2.79)	保温(2.79)	保温(5.7)	保温(5.7)
		期間(日)	50	50	14	14	28	28	14	14
	パイプクーリング	クーリングパイプ経(mm)	55	55	55	55	55	55	55	55
		実施期間(日)	3	3	3	3	4	4	3	3
		通水量(l/min)	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	5.5	5.5
		クーリングパイプ設置間隔(m)	0.70～0.75	0.70～0.75	0.70	1.00	0.90	0.9	0.64～0.70	0.64～0.70
		クーリングパイプ表面の熱伝達率(W/m²℃)	65.5	65.5	62.0	62.0	65.5	65.5	71.0	71.0
事前解析	打込み温度	℃	30.1	30.1	27.1	29.2	11.6	9.1	12.7	10.9
	外気温	℃	25.1	25.1	22.1	22.2	6.6	4.1	7.7	5.9
	クーリング水温度	℃	21.0	20.0	22.0	24.2	10.0	10.0	6.7	4.9
事後解析	打込み温度	℃	30.1	26.5	28.0	24.1	11.1	18.1	13.0	14.2
	外気温	℃	21.4～31.0	16.6～23.5	14.0～27.0	12.5～19.3	2.9 ～14.9	1.2～14.9	－0.2～8.4	－4.6～17.5
	クーリング水温度	℃	18.1～29.2	15.8～24.3	18.5～23.0	18.5～30.6	7.0～22.7	11.5～22.8	10.1～15.9	2.2～26.2



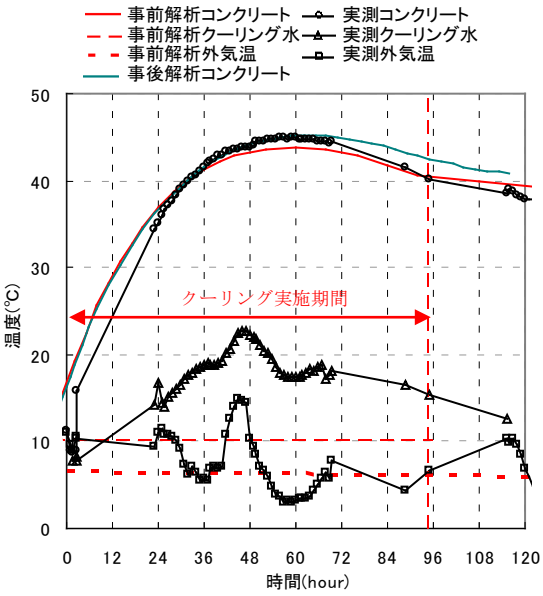
図－6　A 橋脚解析モデルおよびクーリングパイプ配置
(1/4 モデル)



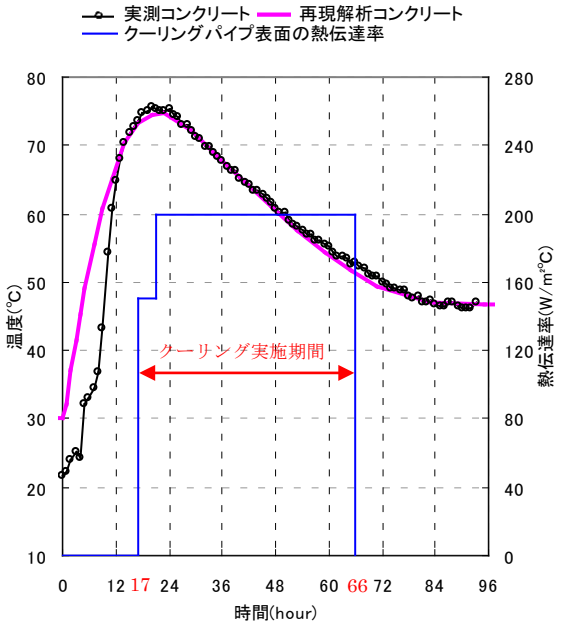
図－7　E 橋台解析モデルおよびクーリングパイプ配置
(1/2 モデル)



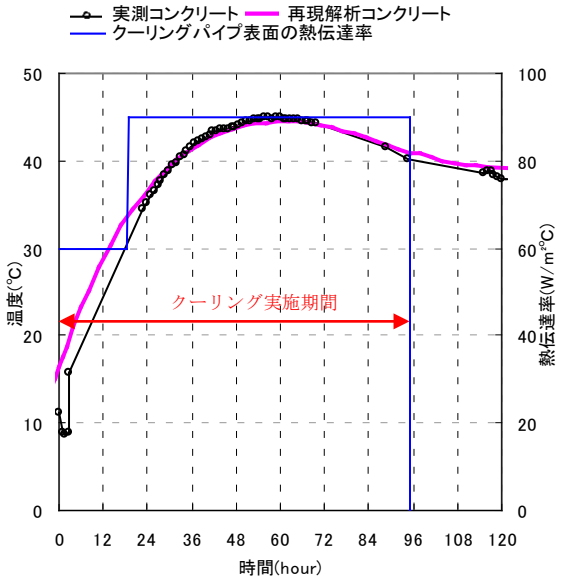
図－8　解析と実測の温度履歴(A 橋脚)



図－9　解析と実測の温度履歴(E 橋台)



図－10　熱伝達率同定結果(A 橋脚)



図－11　熱伝達率同定結果(E 橋台)

では，事後解析の温度は実測よりも高い。

このように，実測のピーク温度は，田辺らの式(1)を用いることにより再現できているが，温度上昇期と温度降下期の温度は実測よりも高い結果となる。

温度下降期の温度予測は，クーリング期間，追加対策の検討を行ううえで重要である。

3.3 クーリングパイプ表面の熱伝達率の同定

クーリングパイプ表面の熱伝達率は，事後解析の温度が実測よりも温度降下期で高いことを踏まえ，クーリングパイプ表面の熱伝達率を変化させて，実測の温度履歴を再現する再現解析により同定した。

再現解析では，事後解析温度が実測よりも高い場合、クーリングパイプ表面の熱伝達率を温度が一致するまで大きくした。しかし，打設から温度降下期まで一様に熱伝達率を大きくしたのでは，ピーク温度が実測より低くなる。そのため，熱伝達率を温度ピークの温度上昇過程までの期間，ピーク温度から温度降下過程の期間に分けて熱伝達率設定して再現解析を行った。

A 橋脚，E 橋台の事例における，再現解析結果と同定した熱伝達率を**図－10**，**図－11** に示す。A 橋脚では，温度ピークから熱伝達率を大きくすることにより温度履歴を再現できた。E 橋台については，ピーク温度以前に熱伝達率を大きくすることにより，温度履歴を再現できた。

打設時から温度上昇期にかけての温度は充分に再現できていないものの，温度ピークから温度下降期の温度履歴は再現できていることから，クーリングパイプ表面

の熱伝達率を同定できていると考えられる。

以上のように再現解析を行い，同定したクーリングパイプ表面の熱伝達率を**表－4** に示す。温度降下期の熱伝達率は，上昇期の熱伝達率よりも大きい傾向となっている。これは，コンクリートの硬化に伴ってコンクリート中の水がセメントとの水和反応により水和生成物に変化するため，コンクリートの熱伝導率などの熱物性が変化しているためと考えられる。

温度降上昇期の熱伝達率は 62W/m²℃程度であるが，ピークから温度降下期の熱伝達率は，62～1000W/m²℃の範囲にありかなりのバラツキがある。G 倉庫のピーク温度から温度降下期にかけては熱伝達率が非常に大きい値となった。

表－4　熱伝達率の同定結果

構造物	クーリングパイプ表面の熱伝達率(W/m²℃)				
	打設前	打設～温度上昇期		ピーク温度～温度降下期	通水停止後
A橋脚	0.1	0.1	150	200	0.1
B橋脚	0.1	0.1	100	250	0.1
C橋脚	0.1	62		90	0.1
D橋脚	0.1	62		62	0.1
E橋台	0.1	60	90	90	0.1
F橋台	0.1	0.1	62	120	0.1
G倉庫	0.1	0.1	62	1000	0.1
H倉庫	0.1	0.1	62	240	0.1

：クーリング実施期間

0.1W/m²℃は通水していないことを示す。

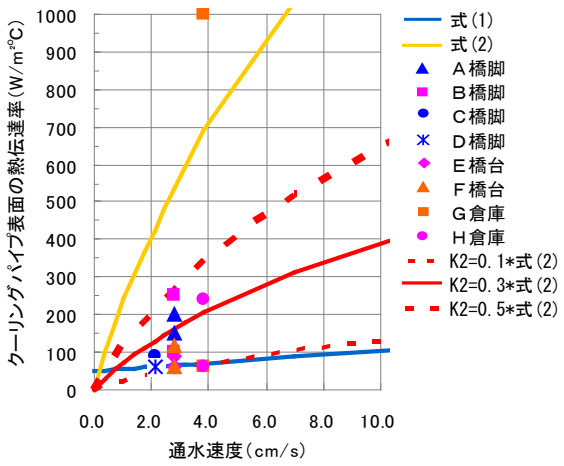
3.4 鉛直パイプクーリング工法におけるクーリングパイプ表面の熱伝達率の提案

各ケースのクーリングパイプ表面の熱伝達率の同定結果と式(1), 式(2)を**図－12** に示す。田辺らの式(1)では，同定結果と比べて熱伝達率は低めであることが分かる。日本機械学会の式(2)に係数 K2 を乗じると，係数 K2＝0.5～0.1 の範囲であり， K2＝0.3 程度とすることで，平均的な熱伝達率を求めることができる。

以上のことから，鉛直パイプクーリングの温度応力解析に使用するクーリングパイプ表面の熱伝達率として以下の式(3)を提案する。

$$h = K1 \times K2\left\{(2.20 + 0.03Tw) \times 10^4 (\rho u / g)^{0.8} / d^{0.2}\right\} \quad (3)$$

ここに，h は熱伝達率（W/m²℃），K1 は係数（kcal 単位系から SI 単位系への変換）K1＝1.16279，K2 は係数＝0.3，Tw は水の温度（℃），u はクーリング水の通水速度(m/h)，ρ は水の密度（t/m³），g は重力加速度（m/s²），d：クーリングパイプの内径（m）



図－12　通水速度と熱伝達率の同定結果の関係

4．まとめ

鉛直パイプクーリング工法に対して，クーリング水の温度，通水速度，環境条件，施工条件等を入力した再現解析を行い，内径 55mm のパイプにおける，通水速度とクーリングパイプ表面の熱伝達率の関係を検討した。

(1) 田辺らの式(1)で熱伝達率を推定した場合，クーリング径が大きく，通水速度が遅い鉛直パイプクーリング工法では，温度降下期の温度に差がある。

(2) 同定した熱伝達率は，温度上昇期よりも温度降下期の方が大きくなった。

(3) 鉛直パイプクーリング工法を用いる場合，温度降下期の温度は，式(3)の K2 を 0.3 にした場合に計算値が実測値に近づくと思われる。

鉛直パイプクーリング工法は，構造条件，実施条件などが適合した場合に適用される。経済的に鉛直クーリングパイプ工法を設計するためには温度応力解析により，クーリングパイプの設置位置，間隔，径，クーリング水の温度，通水速度，通水期間を設計する必要がある。今後，提案したクーリングパイプ表面の熱伝達率の精度を高めていきたい。

参考文献

1) 神崎浩二，吉本靖俊，樋口晃，村上祐治：マスコンクリート構造物の温度ひび割れ制御，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006

2) 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ならびに冷却効果の解析，土木学会論文報告集，第 34 号，1984

3) 日本機械学会：伝熱工学資料，1975