

マスコンクリートにおける循環パイプクーリング解析手法に関する基礎的研究

日本高圧コンクリート(株) 修(工) ○荒畑 智志
 日本高圧コンクリート(株) 正会員 斉藤 亮一
 名城大学 正会員 博(工) 石川 靖晃

キーワード：水の循環，熱交換水，任意のパイプレイアウト，パイプ要素分割

1. はじめに

昨今、コンクリート構造物のひび割れへの意識は、耐久性の確保の観点より高まっており、公共構造物などでは、施工完了後の完成検査に備えひび割れ調書の提出が義務づけられている。とくに脚頭部のようなマスコンクリートでは、構造物内部で発生・蓄積したセメントの水和熱が外部に発散するまでに時間を要し高温となるため、外部拘束や内部拘束によりひび割れの発生が懸念される。そのため、マスコンクリートの水和熱を抑制させる有効な手段として冷却されたクーリング水を循環させるパイプクーリングが挙げられる。しかしながら、クーリング水の冷却装置は精密機械のため運搬時には低振動車両が必要であること、冷却装置の使用料が高額であることは、現場に負担をかける問題点となっている。そこで、冷却装置を使用せず、外気中あるいは地面の中にパイプを配置することによってクーリング水を冷却する循環パイプクーリングシステムを実施することも今後選択肢の一つとして浮上する可能性がある。しかし、循環パイプクーリングシステムについての検討は未だ無く、循環パイプクーリングに対する解析的検討すらも行われていないことが現状である。

本研究では、冷却されたクーリング水を使用せず、新コンクリートの内部で温まったパイプ内の水を新コンクリートの表面部や打継目近傍の旧コンクリート側に循環させたパイプクーリング解析を試み、その解析手法の基本的特質を把握することを目的とした。本研究では簡単な解析モデルにより、とくにパイプ要素分割方法が温度解に及ぼす影響について検討を行った。

2. 検討の基になるパイプクーリング解析手法の概要

2. 1 任意のパイプレイアウトを考慮できる温度解析手法の採用

パイプクーリングは、コンクリート打込み時に発生する水和熱を抑制する有効な手段の一つである。

パイプクーリングの効果は、パイプレイアウトやパイプ径、冷却水の温度、通水量などによって変化するため複雑で、パイプクーリングの効果を定量的に判断するためには、パイプクーリングを的確に反映させた温度解析を行う必要がある。

パイプクーリングを考慮した温度解析理論は田辺ら¹⁾によって確立され、そのFEM解析手法は溝渕ら²⁾によって開発された。従来の数値解析においては、

図-1(a)に示すように、パイプ要素は必ずコンクリート要素を構成する稜線上に配置し、かつパイプ要素節点とコンクリート要素節点は完全に一致させる必要があった。すなわち、パイプレイアウトを一旦変更した場合、その都度コンクリート要素を分割しなおす必要があり、このことはパイプレイアウトの配置の検討を行う上で大きな障害となっていた。この問題点は、パイプ要素に沿った数値積分をコンクリ

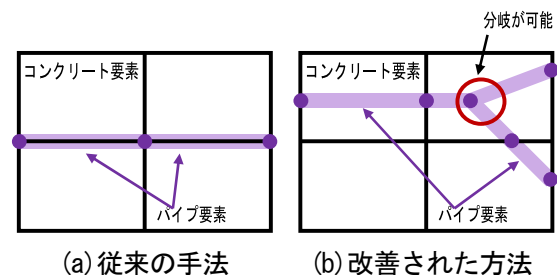


図-1 従来のパイプレイアウトとその改善イメージ

ートの局所座標で表現できなかったことに起因するが、Ishikawaら³⁾によって解決され、図-1(b)のようにコンクリート要素内の任意位置にパイプ要素を配置できるようになった。さらに最近では、池村ら⁴⁾の研究で水理分野ですでに確立された解析理論を、パイプ内水とコンクリート間の熱収支を表す支配方程式に適用することにより、一本続きのパイプレイアウトのみならず、分岐したパイプレイアウトについても解析可能なレベルに達している。

なお、本研究では構造物を対象に任意のパイプレイアウトを複数検討する必要があるため、前述の理論に基づいて従来の解析ソフトを発展させた解析ソフトで、LECOM研究会で開発中の「コンクリート構造物建設工程シミュレータ」⁵⁾の機能の一部を利用した。

2. 2 循環パイプクーリングシステムの概要

本研究で提案する循環パイプクーリングシステムは、「熱交換水」と称するパイプ内の水を循環させることで、マスコンクリート内部で発熱した水和熱の吸熱と、表面部や旧コンクリートへ放熱を繰り返し、水和熱を緩やかな温度分布となるように分散させ、内部拘束や外部拘束によるひび割れを抑制する方法である。

そのため解析上の手法の特徴としては、(1)冷却したクーリング水を使用する従来の解析では、クーリング実施期間内においてコンクリート要素へのパイプ入口を温度固定境界に設定することに対し、熱交換水を使用するこの解析では、循環を開始したその瞬間だけパイプの入口を温度固定境界に設定し、それ以降は温度固定境界を設定しないこと。(2)旧コンクリートから排出された熱交換水を再び新コンクリートに循環させるために配置した外気中のパイプ要素の周囲には、空気の要素を仮定し表現していることが挙げられる。

3. クーリング解析の検証

3. 1 解析モデル

今回検証した解析モデルは簡易的な直方体モデル(2m×2m×3m)で、1リフト目は1次コン(旧コンクリート)を高さ1m打設し、その10日後に2リフト目の2次コン(新コンクリート)を高さ2m打設する脚頭部を想定した。パイプレイアウトは、2次コン上部から2次コン中心部を通過したのち1次コンを経て、別途仮定した空気の要素を通過し、再び2次コン上部から循環させるモデルとした。(図-2)

また、1次コンおよび2次コンのコンクリート要素とパイプが通過する周辺の空気要素の境界部分は、二重節点で接続することで要素どうしを分離させ、お互いの影響を受けないように工夫した。

3. 2 解析条件

本解析における諸元を表-1、表-2に示す。

表-1 解析諸元値 (その1)

		コンクリート (発熱体)	空気 (非発熱体)	熱交換水初期温度 20 °C	
伝熱物性	熱伝導率	2.7 W/m°C	0.0257 W/m°C	430 W/m°C (水とコンクリート)	14 W/m°C (水と空気)
	比熱	1150 J/kg°C	1006 J/kg°C	1000 kg/m ³	
	密度	2350 kg/m ³	1.166 kg/m ³	4180 kg/m ³	
	打込み温度	25°C	---	0.0125 m	
	セメント種類	早強	---	0.4828 m/s (流量=14L/minとして)	
	単位セメント量	467 kg/m ³	---		
	終局断熱温度上昇量	71.71 °C	---		

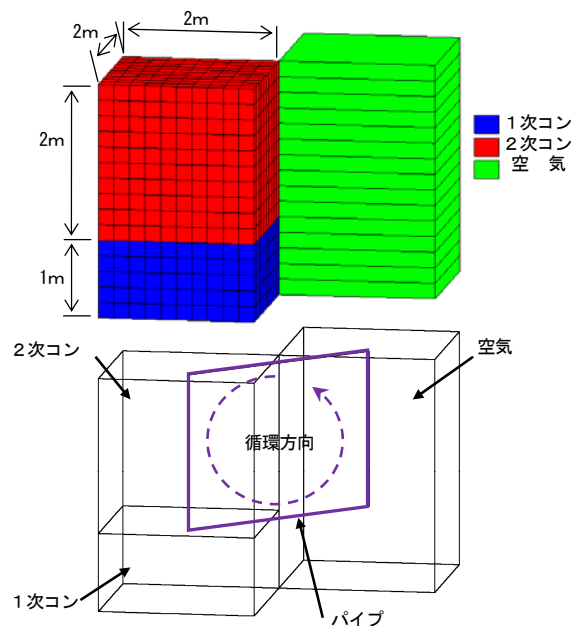


図-2 解析モデルとパイプレイアウト

表-2 解析諸元値 (その2)

拘束条件	X, Y 方向: コンクリート要素と空気要素は, 1 箇所ずつ拘束	外気温	20 °C一定	境界条件	
	Z 方向: 最下面を拘束	熱伝達率	型枠存在時 8 W/m ² C 養生マット存在時 5 W/m ² C コンクリート露出面 14 W/m ² C 空気の周り 14 W/m ² C		
そのほか: コンクリート要素と空気要素は, 二重節点で接続					

3. 3 解析結果

(1) 解析モデルA

解析モデルAのパイプレイアウトの詳細を図-3に示す。2次コンへ熱交換水が入る箇所(i点)付近のパイプ要素長は a (=283mm)および $5a$ (=1415mm)である。このパイプ要素長は、パイプ要素の変曲点と、パイプ要素がコンクリートあるいは空気の要素を通過する点を基に構築されている。2次コンへ熱交換水が入る箇所(i点)に着目し、解析ステップを10秒ごととした循環開始直後からの熱交換水の温度履歴を図-4の破線で示す。温度履歴は振動をしている結果となった。

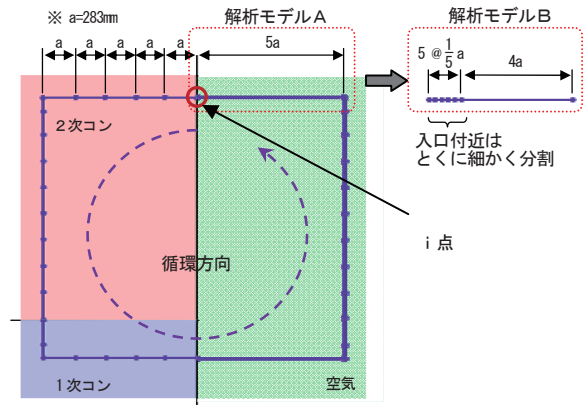


図-3 解析モデルのパイプレイアウト詳細図

(2) 解析モデルB: パイプ要素を再分割

解析モデルAの温度履歴が振動した原因としては2次コンへ入る箇所(i点)で熱交換水の温度が急変するためであると考えられた。そこで解析モデルBとして、2次コンへ熱交換水が入る手前の全長 $5a$ のパイプ要素を、i点に近い方をより細かく図-3右上に示すように再分割した。そして、同様にi点に着目した熱交換水の温度履歴を図-4の実線で示す。温度履歴は振動していない結果が得られた。

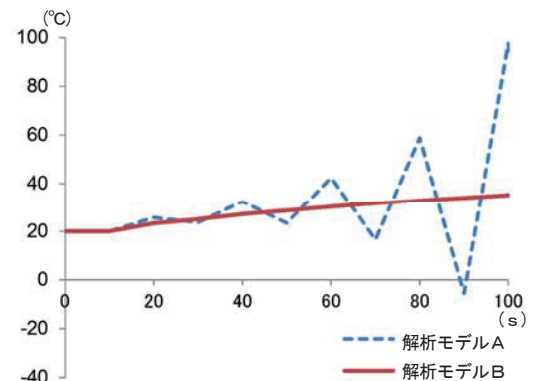


図-4 着目箇所(i点)の熱交換水の温度履歴

次に解析ステップを表-3として、2次コン打設直後から循環を開始した温度履歴(図-5)、温度分布(図-6)を示す。コンクリート中心部で上昇している温度は、熱交換水的作用により減じられていることや熱交換水の循環方向に温度が分散されていることが確認され、妥当な温度解が得られている。

表-3 解析ステップ

解析ステップ	範囲	間隔
	2次コン打設直後	~0.25 d
	0.25~0.5 d	2 h
	0.5 ~1.0 d	3 h
	1.0 ~3.0 d	6 h
	3.0 ~7.0 d	12 h
	7.0 ~	1 d

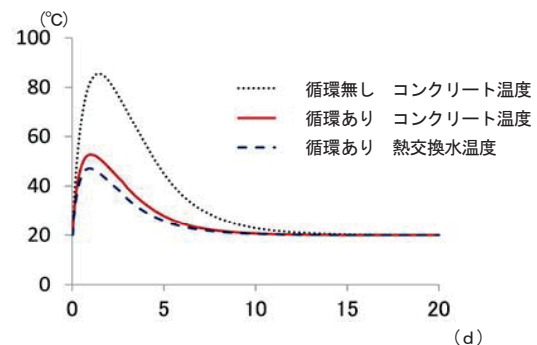
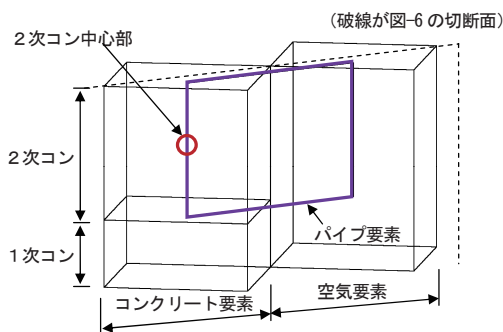


図-5 2次コン中心部の温度履歴

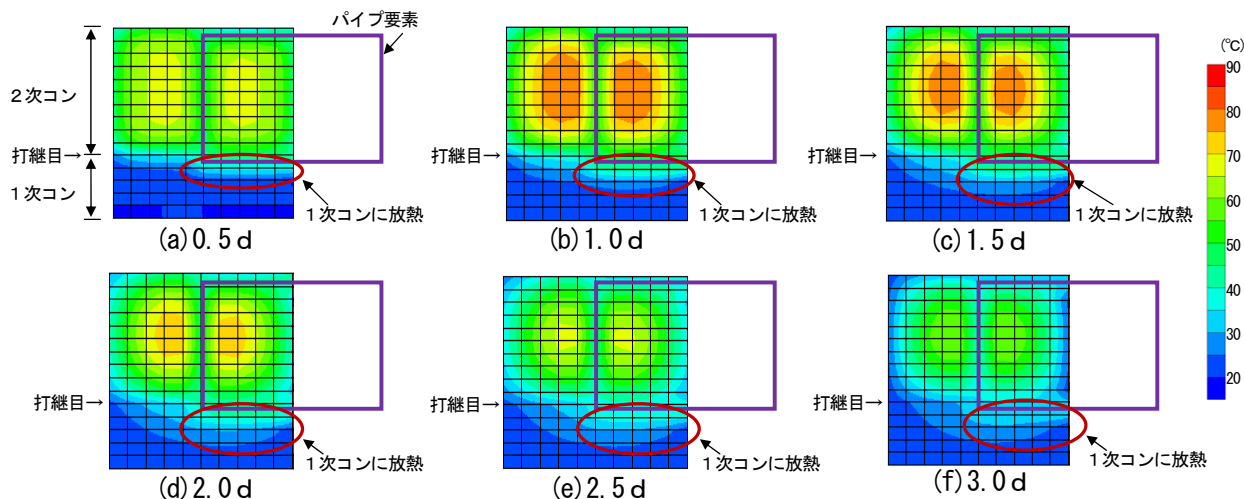


図-6 切断面の温度分布

4. まとめ

本研究では、循環パイプクーリング解析手法の提案を行い、簡単な解析モデルを基にパイプ要素分割方法が温度解に及ぼす影響について検討を行った。

その結果、本研究の範囲においては循環パイプクーリング解析が可能であることが示された。ただし、コンクリート要素への入口箇所のパイプ要素は再度細かく分割する必要があることが確認された。

今後、パイプクーリング解析理論の骨子である熱伝導と移流問題の支配方程式に対して固有値解析を実施したのち、固有値と解の精度との関係を明らかにするなど、理論的な検討をさらに進める必要がある。さらには、さまざまな冷却パターンを模索し、温度履歴のほかにはひび割れ指数の算出も行い検証を重ねることに加え、提案した本手法が実構造物においてどの程度有効な冷却効果があるのかを確認するために測定結果と解析結果の比較検証をしていきたいと考えている。

謝辞

本報告は、LECOM研究会（会長：田辺忠顕・名古屋大学名誉教授）にて研究されているものであり、田辺教授をはじめとする研究会メンバーには多大で貴重なご意見を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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導率決定ならびに冷却効果の解析, 土木学会論文集, 第343号, pp.171-179, 1984.3
- 2) 溝渕利明, 成田総一郎, 都築慶剛, 平戸裕之, 田辺忠顕: マスコンクリートにおけるパイプクーリングによる熱除去効果に関する研究, 土木学会論文集, No.665, V-49, pp147-163, 2000.12
- 3) Ishikawa, Y., Mizobuchi, T. and Tanabe, T. : Development of FEM Thermal Analysis for Concrete Structures with Pipe Cooling System, Proc. Of Concreep9, pp.491-498, 2013
- 4) 池村穰, 石川靖晃: 管網配管レイアウトを考慮できるパイプクーリング解析手法の構築, 第23回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.119-124, 2014.10
- 5) 石川靖晃, 伊藤睦, 荒畑智志, 河合真樹, 原健悟: コンクリート構造物建設工程シミュレータの開発—各種初期応力影響下の保有耐荷力解析プラットフォーム—, コンクリート工学, Vol.53, No.2, pp.172-180, 2015.2