

[12] マスコンクリートの温度応力に対するパイプクーリング効果の大自由度FEM解析プログラムの開発

正会員○川原場博美（電力計算センター）

鹿子木唯夫（東電設計土木本部）

正会員 田辺 忠頤（名古屋大学工学部）

1. はじめに

マスコンクリートの熱応力制御の手法には、各種の方法があるが、その中でもコンクリート中に冷却水を流す管路を埋設し、コンクリートが硬化する際に発生する水和熱を除去するパイプクーリングは、有効な手段と言える。パイプクーリングを効果的に実施するには、事前に最適なパイプ網のレイアウト、冷却水の流速、初期水温、クーリング期間等を定める必要がある。

これらの問題を解決するために、擬3次元クーリング解析手法により、大自由度、多層構造物、多系列パイプ網の解析が可能なプログラムを開発した。

ここでは、本プログラムによる解析と実測結果とを比較検討するとともに、パイプクーリングによる温度および応力低減効果について実際の構造物により各種の数値実験を行い、検討を行なったので報告する。

2. 解析理論

擬3次元クーリング解析理論の詳細については別稿¹⁾にゆずり、概要を述べる。

図-1に示すクーリングパイプを配置したコンクリートブロックを、クーリングパイプに直交する断面で分割し、分割された断面での熱流は2次元的と考え、2次元熱伝導解析をFEMによって行う。図-2のように、クーリングパイプ位置が分割された断面中の点として表わされているが、その点を必ず節点とする。その場合に、クーリングパイプ位置での熱伝達境界を有する熱伝導方程式の汎関数が次式のようになる。

$$\begin{aligned} II = & \int \int \left\{ \frac{1}{2} K_c \left[\left(\frac{\partial T_c}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_c}{\partial Z} \right)^2 \right] \right. \\ & - (q_{ii} - C\rho \frac{\partial T_c}{\partial t}) T_c \} dx dz + \int_S q_{ii} T_c ds \\ & + \int_S \frac{1}{2} d (T_c - T_w)^2 ds + \sum_p \int_r \frac{1}{2} h (T_c - T_w)^2 dr \end{aligned} \quad \dots \quad (1)$$

但し、 K_c ；熱伝導率 T_c ；コンクリート温度

q_{ii} ；コンクリートの内部発熱

ρ, C ；コンクリートの密度、比熱

q_{ii} ；外表面の熱流束 T_w ；外気温

α ；コンクリートと空気との熱伝達率

h ；クーリングパイプと水との熱伝達率

T_w ；クーリング水の温度

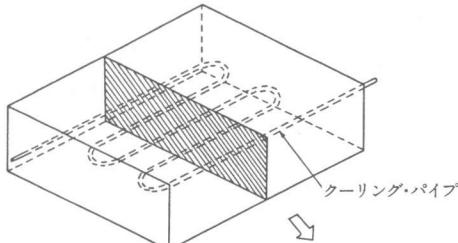


図-1 擬3次元解析によるコンクリート構造物の分割



図-2 分割された2次元断面

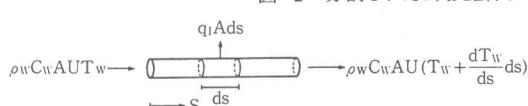


図-3 クーリング・パイプ流れ方向の熱収支

汎関数の最後の項は、クーリング項で、 p はパイプの数だけあることになる、その他はすべて通常の非定常熱伝導解析と異なる。クーリング項のみについて、式を展開すると、

$$\frac{\partial (II)_c}{\partial T_i} = \int_r h (T_i - T_w) dr = \frac{1}{2} r_0 \beta h T_i - \frac{1}{2} r_0 \beta h T_w \quad \dots \quad (2)$$

ここで、 β はその要素のパイプ位置での開角(ラジアン)、 r_0 はパイプの直径である。したがって、 T_i の伝導マトリックス中に $(r_0 \beta h)/2$ 荷重項に $(-r_0 \beta h T_w)/2$ を付け加える。

次に、図-3に示すように、クーリングパイプの微小長さ ds の熱収支を考える。ここで、パイプの同

一断面内の水の流速分布ならびに、温度分布は一定と仮定すると、クーリング水温 T_w は非定常項を加えた次式から求める。

$$\rho_w C_w u \frac{\partial T_w}{\partial S} + q_i = -\rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$\text{但し, } q_1 = \frac{2h}{r_0} (T_w - T_c) \quad C_w; \text{水の比熱} \\ u; \text{水の流速} \quad r_0; \text{パイプ直径}$$

この基本的考え方を大自由度、多層構造物、多系列パイプ網の解析に反映させる為には、次のようなプログラム上の新たな考慮が必要となる。大自由度、多層構造物を取り扱う為には、まず層が幾層にも順次打継がれていく事を考慮するため、

- (1) そのたびごとの新たな境界条件の設定、
また全体構造系の更新
 - (2) 新たな全体構造系に対するそのたびご
との初期条件の更新

多系列パイプ網を取り扱うために、

- (1) 系列ごとの初期温度の設定、出口位置の判定
 - (2) 系列ごとの冷却水の流れる方向の判別
 - (3) 系列ごとの冷却水の流れる方向の変更の数学的モデル化

などが必要となる。これらを全て取り扱いうるプログラムを開発して、以下に示すいくつかの数値実験を行った。

3. 実測値との比較検討

実測値は著者らの実験¹⁾による結果を用いた。図-4(a)に実験装置の概観を示し、図-4(b)、図-4(c)に解析構造物の分割と要素分割を示す。実験の詳細については別稿¹⁾を参照していただきたい。

3. 1 冷却水の温度

図-5に、流速40cm/secについて求めた冷却水のパイプ位置での温度変化の実測値と解析値を比較して示した。冷却水の入口温度は20°Cである。この図から、解析値はかなり忠実にその変化を追跡していることがわかる。

3. 2コンクリート温度

図-6に、流速40cm/secについて求めたパイプのごく近傍でのコンクリート温度の実測値と解析解とを比較して示した。この図から、解析の結果とほぼ一致する。

4. 実規模構造物に対する数値実験

本解析プログラムにより、冷却水の流速、冷却水温度、冷却期間、パイプ系列の変化の4ケースについて実規模モデルを用いてパイプクーリングによる温度および応力低減効果について解析を行なった。

4.1 解析条件

解析対象は、図-7に示すようにクーリングパイプを埋設した幅15m×高さ3m×長さ30mのコンクリートブロックを岩盤上に打設されたものとし、温度の境界条件としては、岩盤およびコンクリートブロックの露出面はすべて熱伝達境界、岩盤底面は固定温度境界とし、それ以外は断熱境界とした。

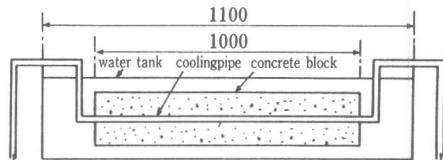


図-4(a) 実験装置の概観

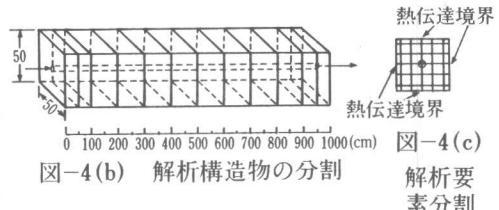


図-4(b) 解析構造物の分割

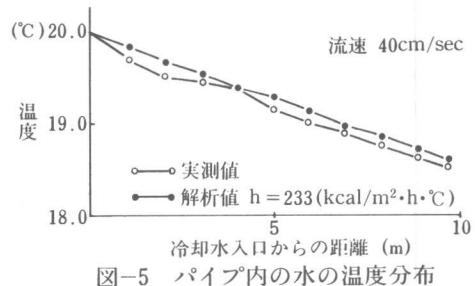


図-5 パイプ内の水の温度分布

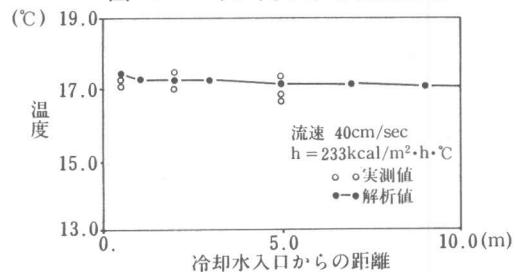


図-6 パイプ周囲のコンクリート温度

解析に使用したコンクリートの単位セメント量として、 300 kg/m^3 を考え、諸定数と要素分割をそれぞれ図-8と表-1に示す。クーリングに関しては、表-2に示し、図-9にパイプレイアウトを示す。

4. 2 クーリング効果の検討

(1) 冷却水の流速について

表-2のCASE 1に示すように、クーリングの実施期間は、打設開始から材令3日までの3日間とし、冷却水の流速を 10 cm/sec 、 50 cm/sec 、および 100 cm/sec について解析し、図-10(a)、図-10(b)にクーリングパイプ節点を含む構造中央部の1要素($75 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$)の温度および応力の経時変化図を示す。これらの図より温度について、クーリングを行なわない場合最高温度となる材令3日で 56°C を示す。これと比べ、流速 10 cm/sec で約 2°C 、5倍の 50 cm/sec で約 5°C 、10倍の 100 cm/sec では約 7°C の温度低減が生じている。各流速での水平方向での応力について、材令60日でクーリングを行なわない場合で約 22 kg/cm^2 の引張応力が生じ、流速 10 cm/sec で約 4 kg/cm^2 、流速 50 cm/sec で約 12 kg/cm^2 、流速 100 cm/sec では約 15 kg/cm^2 の応力低減が生じた。

(2) 冷却水の初期温度について

表-2のCASE 2に示すように、クーリングの実施期間は、CASE 1同様打設開始から材令3日までの3日間とし、冷却水温度を 10°C 、 15°C 、 20°C について解析した。図-11(a)、図-11(b)にCASE 1同様の部位における温度および応力の経時変化図を示す。温度については、クーリングを行なわない場合と比べ材令3日で、各冷却水温度 10°C 、 15°C および 20°C において 5°C から 7°C 程度の温度低減が示された。また、応力は材令60日でクーリングを行なわない場合と比べ、 10 kg/cm^2 から 12 kg/cm^2 程度低減されている。冷却水の初期温度の影響としては、冷却水温度差 10°C が、同部位(パイプ長 88.5 m)では 2°C の差となり、冷却水温度による差は顕著に示さなかった。

(3) 冷却期間について

冷却の実施期間については、表-2のCASE 3に示すように 15°C の冷却水を流速 50 cm/sec で流し、打設開始から60日間、打設開始から3日間および材令1日から3日までの2日間の3ケースについて解析し、図-12(a)、図-12(b)に上記同様の部位における温度、応力の経時変化図を示す。温度については、クーリングを行なわない場合と比べ、最高温度を示す材令3日で、 4°C から 5°C の低減が見られる。材令3日以降さらにクーリング続行すると、当然温度は低下し、材令60日で 30°C の温度差が生じる。これはクーリング実施期間が長すぎるため、逆に引張応力を増大させる顕著な例と言える。また、材令3日間で、クーリング期間が2日間と3日間とでは、温度、応力ともあまり差は見られ

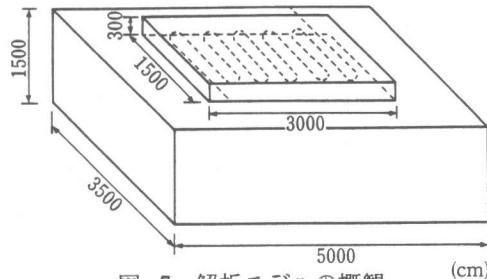


図-7 解析モデルの概観

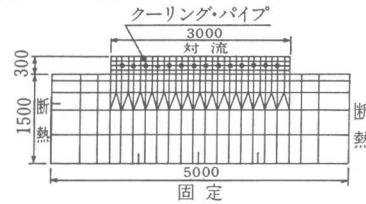


図-8 要素分割図

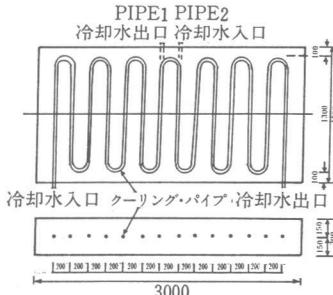


図-9 パイプレイアウト

表-1 解析に用いた諸定数

項目	単位	岩盤	コンクリート
熱伝導率 K	Kcal/m·hr·°C	1.94	2.5
比熱 C	Kcal/kg·°C	0.25	0.314
単位体積重量 ρ	kg/m ³	2600	2310
熱伝達率 H	Kcal/m ² ·hr·°C	10	10
熱膨張率 α	$10^{-6}/^\circ\text{C}$	10	10
初期温度 T_0	°C	上層 20°C 下層 15°C	20
外気温 T_H	°C	20	20
断熱温度上昇			$T = 41.8(1 - e^{-0.98t})$
ボアソン比		0.2	0.167
弾性係数	kg/cm ²	5×10^4	$E = \frac{t}{A + B \cdot t} \times 10^4$ t : 材令 A : 0.0761738 B : 0.0241211

表-2 クーリング解析ケース

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
流速(cm/sec)U	10, 50, 100	50	50	50
冷却水温度(°C)	15	10, 15, 20	15	15
冷却期間(日)	0~3	0~3	0~60, 0~3, 1~3	0~3
パイプ本数	1	1	1	1, 2
パイプ内径(cm)	2.5	2.5	2.5	2.5
パイプと水の熱伝達率(kcal/m ² ·hr·°C)	$4.75U+43$	$4.75U+43$	$4.75U+43$	$4.75U+43$

なかった。

(4) クーリングパイプ系列について

図-9の破線に示すようにクーリングパイプを2系列埋設し、各パイプとも表-2に示すクーリング条件により解析した。図-13に2本目のクーリングパイプ位置近傍での温度の経時変化を示す。パイプ1本の場合と比べ、材令3日で約3°Cの差が生じた。また、応力については、図に示さないが材令60日で1.5kg/cm²程度減少したが、ほとんど差を示さなかった。

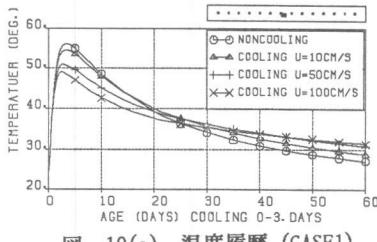


図-10(a) 温度履歴 (CASE1)

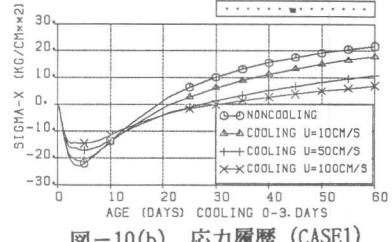


図-10(b) 応力履歴 (CASE1)

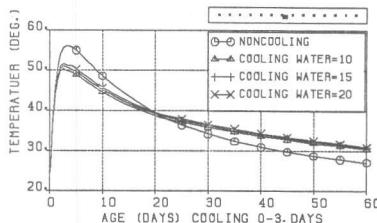


図-11(a) 温度履歴 (CASE2)

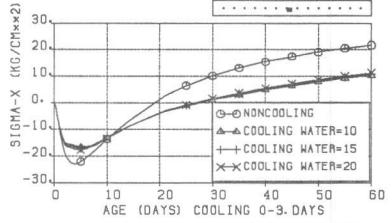


図-11(b) 応力履歴 (CASE2)

5. 結論

パイプクーリングによる温度および応力低減効果解析について擬3次元手法により大自由度FEM解析プログラムを開発した。

本プログラムにより解析した温度は、実測値とよく一致し、クーリング効果の解析が可能であるとわかった。

さらに、実際の構造物を想定し、冷却水の流速、初期水温、冷却期間、パイプ系列等について、数値実験を行い、クーリング効果の検討を行なった。

その結果、パイプクーリングにより応力を低減させる要因として顕著であったのは、冷却期間と流速であった。冷却期間の効果は、本数値計算の範囲ではコンクリートの上昇温度が最高に達するまでの2~3日間の効果が大きく、それ以上継続すると引張応力を増大させる傾向を示した。しかし、長期的な温度応力については、未だ数値実験を行なってないので、今後検討したい。流速については、流速50cm/secで、クーリングしない場合と比べ、引張応力を約半分に低減でき、100cm/secでは1/3に低減されている。しかし、パイプのごく近傍では、クラックが発生することも考えられ、今後の課題としたい。

参考文献 1) 田辺、山川、渡辺 著;「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年3月

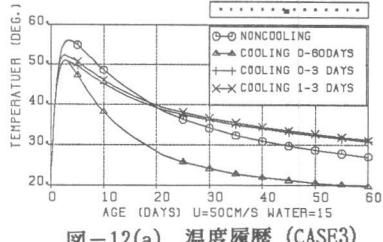


図-12(a) 温度履歴 (CASE3)

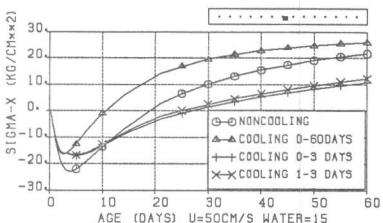


図-12(b) 応力履歴 (CASE3)

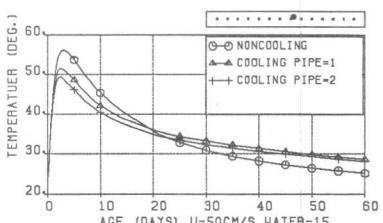


図-13 温度履歴 (CASE4)