

V-176 等価クーリング要素によるパイプクーリングのモデル化

榎間組 技術研究所 大橋 吉川

榎間組 土木設計部 小島 長沢 小林

1. はじめに

パイプクーリングは、熱応力制御の有効な手段として重要なマスコンクリート工事に使われている。パイプクーリングを効果的に実施するためには、その配置、冷却水の温度、通水時間等を適切に定めることが必要である。その際、例えばコンクリートダムの全体モデルのように大規模な数値解析の場合、その精度と共に工学的手法としての効率性が要求される。

筆者らは、パイプクーリングの吸熱効果を効率よく解析できる有限要素モデルとして、等価クーリング要素による解析手法の基本的な数値実験を実施し、その精度、妥当性、効率性を評価したので、以下にその概要を報告する。

2. 等価クーリング要素

パイプクーリングによる吸熱効果は、コンクリートとパイプ内冷却水での熱伝達によってなされることがえられる。したがって、有限要素法でこの挙動をモデル化する場合、パイプの位置で円孔状にメッシュを配置し、熱伝達境界として扱えばよいことになる。しかし、この方法では、数十本のクーリングパイプを有する大規模な解析には到底適用できない。等価クーリング要素は、パイプでの熱伝達による吸熱効果をそれと等価な単軸の熱伝導による吸熱としてモデル化することにより、解析のパフォーマンスを高めたモデルである。図-1にこの要素の概念と形状を示す。この要素の熱伝導率は、実際の熱伝達と等価にするため、次のように算定する必要がある。冷却水は、十分流速が早く、温度が一定であると仮定すると、実際の現象である熱伝達によって冷却水に吸熱される熱量 q_1 は、

$$q_1 = \int_S H(T_1 - T_2) dS = SH(T_1 - T_2) \quad (1)$$

と表される。ここで、 S : パイプの周長、 H : 熱伝達係数、 A : クーリング要素の断面積、 T_1 : 周辺コンクリート温度、 T_2 : 冷却水の温度である。一方、単軸2節点の等価クーリング要素では、これと同じ熱量がコンクリートの要素内より熱伝導により排熱される。

$$q_2 = AK \frac{\partial T}{\partial L} = \frac{AK(T_1 - T_2)}{L} \quad (2)$$

ここで、 K : クーリング要素の熱伝導率、 L : クーリング要素の長さである。したがって、 $q_1 = q_2$ となるためには、等価クーリング要素の熱伝導率 K は、次式のように得られる。

$$K = \frac{SHL}{A} \quad (3)$$

3. 数値実験による検証

等価クーリング要素の精度および妥当性を検討するために、簡単な例題に対して、等価クーリング要素によるモデルとパイプを熱伝達境界として円孔状にモデルしたもの（以下、実クーリングモデルと称する）の2つのモデルを用いて2次元非定常熱伝導解析を実施し、両者の解を比較対照した。解析は、問題の対称性から1/4領域を考え、汎用構造解析プログラムABAQUS¹⁾を用いて計算した。図-2(a),(b)に両モデルのメッシュ図を示す。図-3は、両モデルの等温線及び平面分布を比較したものである。両モデルの温度差は勾配が急峻なパイプ近傍で約1℃程度であり、ほぼ一致していると認められる。

図-4は、解析領域内の3点(a,b,c)の温度履歴を比較したものである。先の空間的な比較と同様に時間軸上でも両モデルの解は、ほぼ一致していることがわかる。以上の解析結果より、等価クーリング要

素の精度、妥当性が検証されたと言える。

4. 解析効率の検討

3. の検証では、かなり細かいメッシュ分割を用いたが、大規模な解析に等価クーリング要素を用いる場合、解析効率、言い換えれば所要解析時間と解の精度の関係の検討が必要である。そこで、コンクリートの要素の次数（4 節点、8 節点）とメッシュ分割数を変化させたパラメトリックな数値実験を実施した。

表-1 に、各解析ケースの内容と、最高温度の絶対値および3. の検証の結果で正規化した精度指標を示す。また所要CPU時間を併記する。また図-5 は、各ケースの温度履歴図である。

ケース0の結果を真値とすれば、ケース番号（1～3）が増すにつれて、精度が悪くなると同時に計算時間は減少することがわかる。これらの結果より、大規模なモデルで等価クーリング要素を用いる場合は、表-1 中のケース1あるいはケース2程度にモデル化すれば、かなり効率の良い解析ができるとの感触を得た。

＜参考文献＞ 1) H.K.S Inc. (1984) : ABAQUS User's Manual

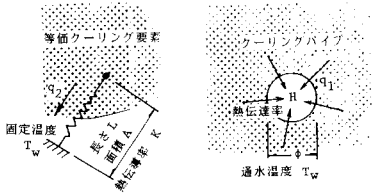


図-1 等価クーリング要素の形状と概念

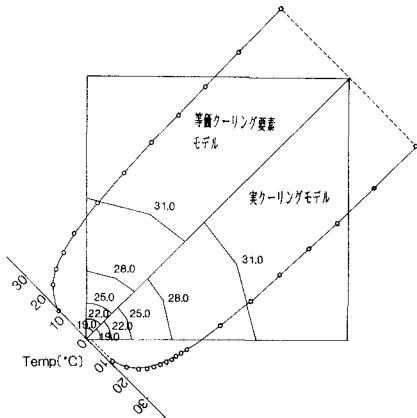
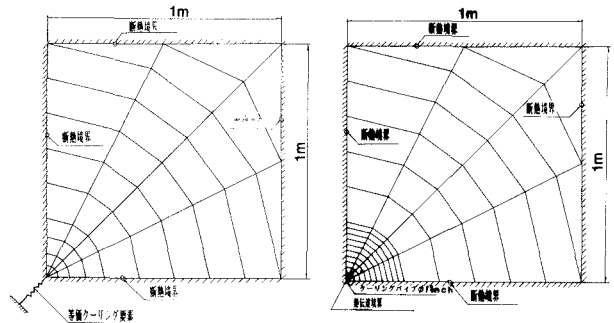


図-3 等温線および温度の平面分布図

表-1 解析ケース

Case	要素分割方法	最高温度 (°C)	CPU Time (s)
0	4 節点 4 角形要素 4 2 要素	33.33 (1.00)	249
1	8 節点 4 角形要素 1 要素	33.11 (0.99)	146
2	4 節点 4 角形要素 4 要素	30.78 (0.92)	130
3	4 節点 4 角形要素 1 要素	27.38 (0.82)	120

図-5 温度履歴図



(a) 等価クーリングモデル (b) 実クーリングモデル

図-2 解析メッシュ

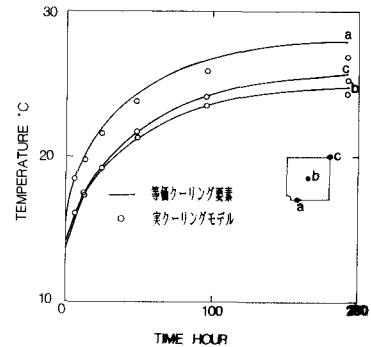


図-4 温度履歴図

