

# FEMを用いたマスコンクリートの検討

溝淵 利明\*

## 1. はじめに

コンクリート構造物において、マスコンクリートに分類されるものとしては、ダムが最もよく知られた構造物であり、まさにコンクリートの巨大な塊と言える。一方、土木学会「コンクリート標準示方書」によれば、マスコンクリートの定義としては、「広がりのあるスラブについては厚さ80 cm～100 cm以上、下端が拘束された壁では厚さ50 cm以上」としており、多くの土木構造物は上記の定義に従えばマスコンクリート構造物の範疇にあると言える。さらに、示方書ではプレストレストコンクリート構造物などのように、富配合のコンクリートが用いられる場合には、より薄い部材でも拘束条件によってはマスコンクリートに準じた扱いが必要になるとしており、PC橋梁はまさにマスコンクリート構造物の範疇にあると言える。

マスコンクリートの範疇にある構造物において最も問題となるのは、セメントの水和発熱に起因する温度応力によって生じる温度ひび割れである。温度ひび割れの中には部材を貫通するひび割れがあり、止水性や耐久性上問題となるばかりではなく、ひび割れ発生方向によってはひび割れ近傍の鉄筋に過大な応力が生じ、構造的にも問題となる場合がある。

温度応力によるひび割れをいかにして抑制するかという課題は、半世紀以上にわたってコンクリート研究者の大命題となっている。しかしながら、セメントの水和発熱による温度応力は、構造物の形状、使用する材料・配合、施工時期、環境条件および施工方法など、多くの要因が影響していることから、事前にそれを精度よく予測することは難しいことも事実である。温度応力による事前解析を最初に定量的に評価したのは、1930年代に建設されたフーバーダムであろう<sup>1)</sup>。当然、今のようなコンピュータのない時代であったことから、数値解析が可能な仮定を設け、水和発熱による温度変化に影響があるパラメーターについてノモグラムを作成し、ダム工事での温度評価を行っている。そして、これに呼応するようにいくつかの差分法による解法が

提案され<sup>2)</sup>、つい最近までこれらの手法がダムを中心に用いられてきた。これは、ダムのような熱の移動方向が1次元的なものの場合、これらの方法でも十分対応できることが可能であったためである。

土木分野でマスコンクリート構造物における温度応力解析に有限要素法を本格的に適用したのは、1970年代後半の原子力発電所におけるベースマツト<sup>3)</sup>やLNG地下式貯槽の底版であろう<sup>4)</sup>。この背景には、大容量計算を行うことのできる大型計算機の出現と、これまでのような1次元的な熱応力解析では十分評価することが難しい構造物であったためと思われる。しかしながら、この当時では温度応力に対する認識がダムのようなごく限られた巨大な構造物のみであり、前述したその他の土木構造物ではほとんど適用されていなかったのも事実である。

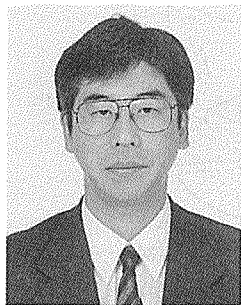
温度応力解析に大きな変革をもたらしたのは、1986年(昭和61)改訂の土木学会「コンクリート標準示方書」と1982年に発足した日本コンクリート工学協会(以後、JCIと称する)のマスコンクリート委員会が1985年に発売を開始した温度応力解析プログラムである<sup>5)</sup>。昭和61年度版の土木学会「コンクリート標準示方書」では、それまで僅かなページしか割かれていなかったマスコンクリートの章に、温度ひび割れ指数・ひび割れ発生確率とCL・CP法の温度応力解析手法の明示とその定量評価方法が記載され、ひび割れ発生の予測とその制御方法が提示されたのである。ここで、温度ひび割れ指数とは、材齢 $t$ 日におけるコンクリート引張強度特性値を同一材齢におけるコンクリートの引張応力で除した値である。さらに、JCIが販売したプログラムによってパソコンで2次元の有限要素法(FEM)の解析が可能となり、これまで大型計算機で膨大な費用と時間がかかった温度応力解析が非常に手軽に行えることができるようになったことである。これ以降、ひび割れ予測解析手法が急速に広まるとともに、その解析精度が著しく向上していったのである。

本稿は、マスコンクリートにおけるFEMによる温度応力解析の現状と、温度応力による解析事例について紹介するものである。

## 2. 温度応力解析

### 2.1 温度応力解析手法

温度応力解析は、部材内の水和発熱と熱伝導、部材表面からの吸放熱を考慮した熱伝導解析と部材内の時間ごとの温度変化から温度ひずみを求め応力を算定する温度応力解析の2つで構成されている。ここでは、温度解析におけるFEMへの解法について述べるものとする。応力解析については、別稿と重複する部分が多いので、ここでは簡単に触



\* Toshiaki MIZOBUCHI

鹿島建設(株) 技術研究所  
LCEプロジェクトチーム

れるのみとする。

温度解析では、以下に示すようにコンクリート場において非定常熱伝導方程式を用いる<sup>6)</sup>。

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} \right) + Q_c(t) = \rho c \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad \dots(1)$$

ここで、

- λ : 熱伝導率 (W/m℃)
- T<sub>c</sub> : コンクリート温度 (℃)
- Q<sub>c</sub>(t) : コンクリート内部の発熱率
- ρ : コンクリートの密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- c : コンクリートの比熱 (kJ/kg℃)

である。

境界条件は、外気と接する対流境界がある。外気と接する対流境界は一般に以下の式で表される。

$$\lambda \left( \frac{\partial T_c}{\partial x} l + \frac{\partial T_c}{\partial y} m + \frac{\partial T_c}{\partial z} n \right) + \eta (T_c - T_\infty) + q_s = 0 \quad \dots(2)$$

ここで、

- l, m, n : 境界面における方向余弦
- η : コンクリートの表面熱伝達率 (W/m<sup>2</sup>℃)
- T<sub>∞</sub> : 外気温 (℃),
- q<sub>s</sub> : コンクリート表面での熱流束 (W/m<sup>2</sup>)

である。

式(1)を離散化するために、たとえば Galerkin 法<sup>7)</sup>を適用し、式(2)の境界条件式を代入して整理し、マトリックス表示すると以下の式となる。

$$[K_c] \{T_c\} + [C] \frac{\partial T_c}{\partial t} = \{F_c\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$[K_c] = \int_V [B]^T [D] [B] dV + \int_{S_1} \eta [N_c]^T [N_c] dS_1 + \int_{S_1} q_s [N_c]^T dS_1$$

$$[C] = \rho c \int_V [N_c]^T [N_c] dV$$

$$\{F_c\} = Q(t) \int_V [N_c]^T dV - \int_{S_1} T_\infty [N_c]^T dS_1$$

ここで、

- S<sub>1</sub> : 外気との境界面の面積
- [B] : 温度勾配マトリックス
- [D] : 伝導係数マトリックス
- [N<sub>c</sub>] : コンクリート温度に関する形状関数マトリックス

である。

式(3)に対して、時間変化に対する離散化に、たとえば Wilson & Clough によって提案された解法を適用すれば、時刻 t と時刻 t - Δt との漸化式を求めることができる。

$$\left( [K_c] + \frac{2}{\Delta t} [C] \right) \{T_c\}_t = [C] \left( \frac{2}{\Delta t} \{T_c\}_{t-\Delta t} + \left\{ \frac{\partial T_c}{\partial t} \right\}_{t-\Delta t} \right) - \{F\}_t \quad \dots\dots(4)$$

ここで、Δt : 微小時間刻みである。

初期値は、時刻 t = 0 の場合の温度 |T<sub>c</sub>| が分かっているれば式(3)から温度勾配 |∂T<sub>c</sub>/∂t| を求めることができ、これにより次ステップ以降の温度および温度勾配を求めることが可能となる。

応力解析については、前述したコンクリートの各節点での時間変化に伴う温度変化を温度ひずみとして与え、弾性係数およびクリープの時間依存性を考慮した力学的特性値

と温度ひずみからセメントの水和発熱による温度応力を算出するものである。

温度応力解析では、コンクリート打込み直後から硬化過程のコンクリートの熱特性、力学特性が大きく変化する若材齢時を対象とする必要がある。したがって、温度応力解析では、どのようにモデル化するかも重要であるが、時々刻々変化するコンクリートの性状をいかにして解析条件として与えるかが重要となってくる。最近では、セメントの水和生成のレベルから解析を行う方法も提案されている<sup>8)</sup>。

## 2.2 温度応力解析の現状

温度応力解析は、大容量解析が可能なパソコンの普及およびプログラムソフトの普及により、多くの土木構造物で実施されるようになってきている。また、平成11年度版の土木学会「コンクリート標準示方書」では、耐久性照査型の示方書となり、施工段階で発生するひび割れが構造物の水密性や耐久性などを損なう恐れのある場合には、事前に照査する必要があるとしており、今後はさらに多くの土木構造物で温度応力解析が実施されることになるとと思われる。

図-1 は、2年前の当研究所で実施した温度応力解析業務の内訳である。2年前で研究所に解析依頼があった件数が50件程度であり、支店や現場などで担当したものも考慮すれば70件以上であったものと思われる。

温度応力解析業務としては、橋梁が最も多く全体の約4割を占めていた。その他の構造物としては、マスコンクリートの代表であるダムや、止水性および耐久性が課題となる浄水場関連の施設の検討が多い結果となった。

図-1 の中で橋梁における部位ごとの検討では、主塔、柱頭部などの上部工でマッシュな部位での検討が多いのが分かる。ただし、最近では橋脚における検討も増加する傾向を示している。解析業務自体の内容で見ると、事前解析が圧倒的に多く全体の70%を超えているが、最近では事後解析を実施して抑制対策効果の評価や、次工事に向けてのデータ収集を行う事例も増えてきており、単にひび割れ予測だけの解析に留まらず、実際の構造物に対しての予測技術の向上を目指している傾向にあるのではないかとと思われる。

一方、FEMによる温度解析では図-2 に示すように2年

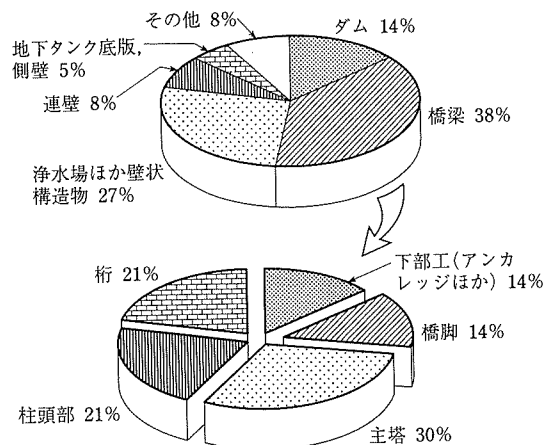


図-1 温度応力解析業務内訳

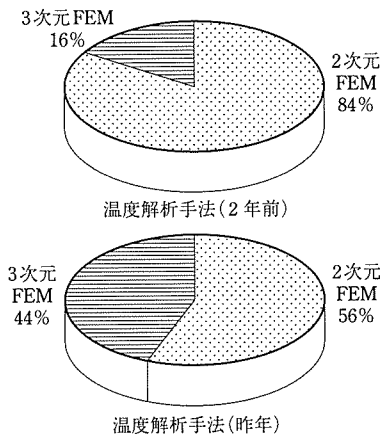


図-2 温度応力解析手法の内訳

前の段階で2次元解析が全体の80%以上を占めていたが、昨年では3次元解析が半分近い割合を示すまでに至っている。これは、橋梁などの形状が複雑になってきたことや、これまでそれほど温度応力解析の対象となっていなかった橋梁の桁などでの解析業務が増加しているが、桁など場合には熱の移動方向や拘束条件に対して2次元でモデル化することが難しいことが挙げられる。

### 3. FEMによる温度応力解析事例

FEMによる温度応力解析の事例として、橋梁主塔部での材料選定のための解析事例と橋梁橋脚部でひび割れ抑制対策としてパイプクーリングを実施した場合の抑制効果に関する解析事例を以下に示す。

#### 3.1 橋梁主塔部温度応力解析事例

木曾三川を横断する高速道路工事の一環として木曾川・揖斐川橋(PC・鋼複合連続エクストラード橋)の上部工工事では<sup>9)</sup>、主塔部が比較的マッシブな部位となること、設計基準強度が50 N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートであり、単位セメント量が増加すること、および当初計画では早強ポルトランドセメントの使用が予定されていたことから、セ

メントの水和発熱に起因する温度ひび割れの発生が懸念された。そこで、上記の部位を対象に温度ひび割れ発生の可能性についてFEMによる温度応力解析検討を行うとともに、低熱ポルトランドセメントを含むセメント種類を要因とした温度応力低減効果に関する検討を行い、材料選定を行った。

#### (1) 検討概要

対象とした主塔コンクリート部は、図-3に示すように高さ20.5 m×幅1.75 m×長さ3.5 m~10 mのマスコンクリート構造物であり、景観を重視した形状となっている。この主塔部に対する温度応力解析では、どこまでモデル化すべきかが課題となったが、検査用のマンホールの断面欠損部におけるひび割れ発生の可能性が高いことが予想されることから、マンホールの形状を考慮することとした。また、両側に帆のように張り出している部位では、主塔中央部の柱部分の拘束を受けて、付け根付近からの水平ひび割れ発生が懸念されたことから、この部位についてもモデル化に際し考慮することとした。以上のことから、2次元では主塔部をモデル化することが難しいと判断し、極力実構造物に近い3次元モデルによる解析を行うこととした。また、モデルは橋軸方向に対して点対称となることから図-4に示すように実構造物の1/2をモデル化し、柱頭部まで解析対象範囲とした。要素分割に際しては、外気と接する表面付近で要素分割の間隔を細かくとるよう配慮した。

検討ケースは、セメントの種類を早強および低熱ポルトランドセメントとした2ケースとした。表-1に各ケースの配合の概要および入力条件を示す。表-1において、早強ポルトランドセメントの入力条件は土木学会「コンクリート標準示方書」に準拠し、低熱ポルトランドセメントについては、既存技術資料に基づくデータを用いた。また、外気温は当該地域における旬別平均気温を用いた。

境界条件としては、温度解析において外気と接する部分(主塔側面および上面)に対して対流境界条件とした。また、主塔側面に設置する型枠の存置期間は、早強ポルトランドセメントの場合2日間と計画されているが、低熱ポル

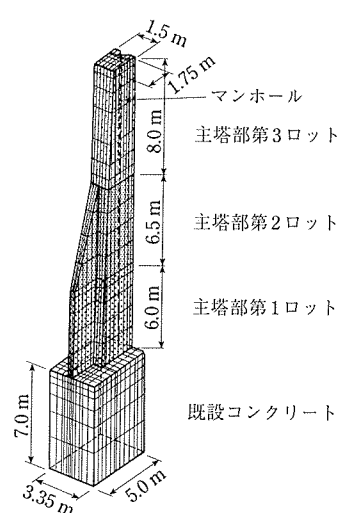
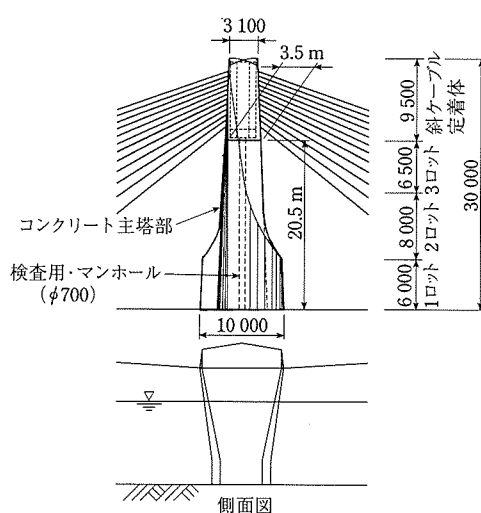
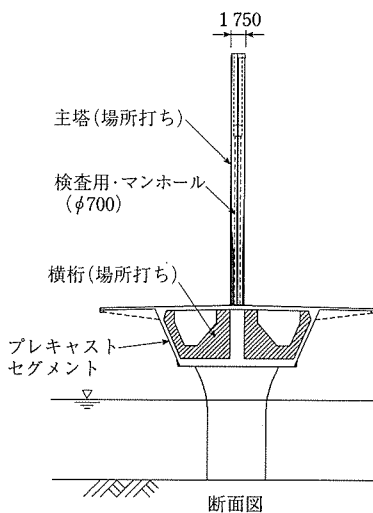


図-3 橋梁主塔部の概要

図-4 解析モデル

表-1 解析条件

項目		入力データ		
セメントの種類		早強ポルトランドセメント	低熱ポルトランドセメント	
水セメント比 (%)		38.7	40.7	
単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )		377	359	
熱伝導率 (W/m°C)		2.7		
比熱 (kJ/kg°C)		1.16		
密度 (kg/m <sup>3</sup> )		2 300		
断熱温度上昇式 $Q(t)=Q_{\infty}(1-e^{-\gamma \cdot t})$	第1ロット	$Q_{\infty}$	62.8	43.6
		$\gamma$	1.29	0.235
	第2ロット	$Q_{\infty}$	63.6	43.7
		$\gamma$	1.07	0.218
	第3ロット	$Q_{\infty}$	63.8	43.8
		$\gamma$	1.06	0.2
表面熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> °C)	型枠面	脱型前	8 (材齢2日まで)	8 (材齢7日まで)
		脱型後	14 (材齢2日以降)	14 (材齢7日以降)
	上面	材齢3日まで	8	8
		材齢3日以降	14	14
外気温		四日市での旬別平均気温		
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		$f_c(t)=64.4 \times t / (2.9 + 0.97 \cdot t)$	$f_c(t)=0.0314 \times (\text{積算温度})^{0.683}$	
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )		$f_t(t)=0.35 \times f_c(t)^{0.5}$		
弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )		$E_c(t)=4 700 \times f_c(t)^{0.5}$		
クリープによる 弾性係数低減率 $\psi$	材齢3日まで	0.5		
	材齢3日以降	0.65		
線膨張係数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )		10		
ポアソン比		0.2		

t : 材齢 (日)

トランドセメントの場合、強度発現特性を考慮して7日間としたことから、表面熱伝達率はこれらの点を考慮して型枠脱型前後および期間で変化させた。応力解析では、柱頭部下面において鉛直方向固定とし、対称面については橋軸方向固定とした。解析期間は第3ロット打込み後3ヵ月とした。

(2) 検討結果

早強ポルトランドセメントにおける第1ロットでの最大温度分布および最小温度ひび割れ指数分布を図-5に示すとともに、低熱ポルトランドセメントにおける最小温度ひび割れ指数分布も図-5に示す。

図-5から、早強ポルトランドセメントを用いた場合、主塔中央部では60°C近い温度を示しているのが分かる。一方、低熱ポルトランドセメントを用いた場合には、温度上昇量が低減され、早強ポルトランドセメントの半分程度となり、温度上昇量を大幅に抑制する効果があった。

温度ひび割れ指数に関しては、平成8年度の土木学会「コンクリート標準示方書」によれば、温度ひび割れ指数1.5以上が温度ひび割れを防止したい場合を示すものである。一方、温度ひび割れ指数1.0の場合には温度ひび割れ発生確率50%を示すものであり、その値を下回れば、ひび割れ発生の確率の方が高くなることとなる。本検討では、温度ひび割れを極力抑えることを目的としたことから、温度ひび割れ指数1.5以上を目標値とした。

図-5から早強ポルトランドセメントを用いた場合、各ロットの表面部において1.0を下回る部位があり、ひび割れ発生の可能性を示す結果となった。一方、低熱ポルトランドセメントを用いた場合には、本解析での検討位置で温度ひび割れ指数がすべて1.5以上の結果となり、上記のセメン

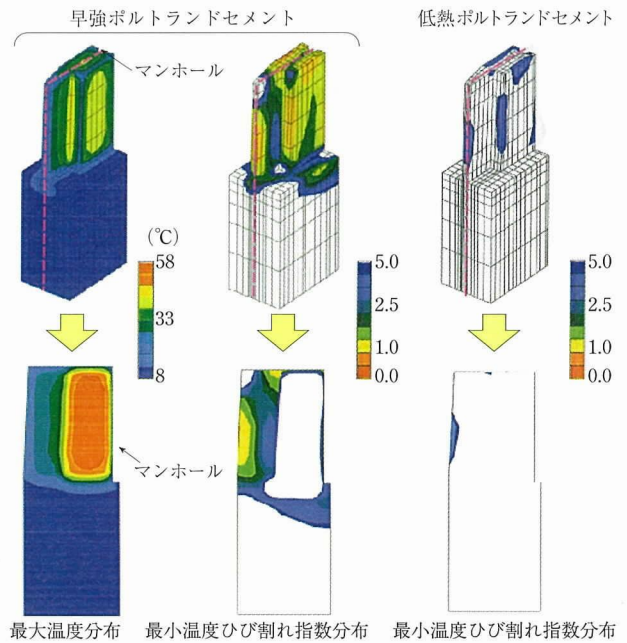


図-5 温度応力解析結果

トに比べてひび割れ発生の可能性は低いものと判断された。

以上の結果から、早強ポルトランドセメントを用いた場合に比べ、低熱ポルトランドセメントを用いた場合には、各部位ともひび割れ発生の可能性は小さい結果が示されたことから、主塔部に用いるセメントとしては温度ひび割れ抑制を目的に当初設計の早強ポルトランドセメントから低熱ポルトランドセメントに変更されることとなった。ま

た、実施工においても主塔部には温度応力に起因すると思われるひび割れはほとんど見られなかったことを確認している。

### 3.2 橋梁橋脚部温度応力解析事例

本検討で対象としたのは、石川県の河北湯放水路を横断するPC斜張橋主塔橋脚部である。橋脚部は、高さ34.0m、幅6.7m~4.0m、長さ18.0m~29.5mの比較的マッシブなコンクリート構造物である<sup>10)</sup>。また、断面は2室の中空断面である。構造物の概要を図-6に示す。本構造物が建設される場所は、海岸に比較的近いことから、耐久性の点から極力温度ひび割れを生じさせないための抑制対策が講じられることとなった。

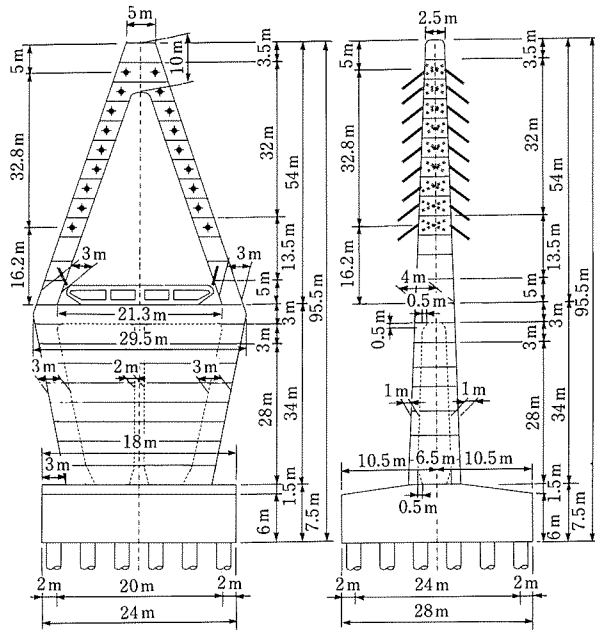


図-6 斜長橋主塔の概要

#### (1) 材料・配合による温度ひび割れ抑制対策

対象とした橋脚部は、施工に際して材料・配合および施工法について温度ひび割れ抑制対策を選定するための事前検討を行った。事前検討では、橋脚部全リフトを対象に行った。解析には、橋脚部が中空断面であることから、各リフトで断面が変化していることから、3次元モデルを用い、温度・応力解析ともFEMを適用して行った。メッシュレイアウトを図-7に示す。

検討の結果、材料・配合は高炉セメントB種を用い、単位セメント量276 kg/m<sup>3</sup>とした。ただし、材料・配合によるひび割れ抑制対策を実施しても、図-8に示す橋脚部第3リフト外壁部(部材厚3m)において温度ひび割れ発生の可能性が高い結果となった。

#### (2) 施工法による温度ひび割れ抑制対策

前項の検討結果から、橋脚第3リフト外壁部を対象に施工法によるひび割れ抑制対策を講じることとした。抑制対策としては、パイプクーリングを用いることとした。本構造物でパイプクーリングを温度ひび割れ抑制対策として選定したのは、温度ひび割れ発生の可能性が高い部位が暑中

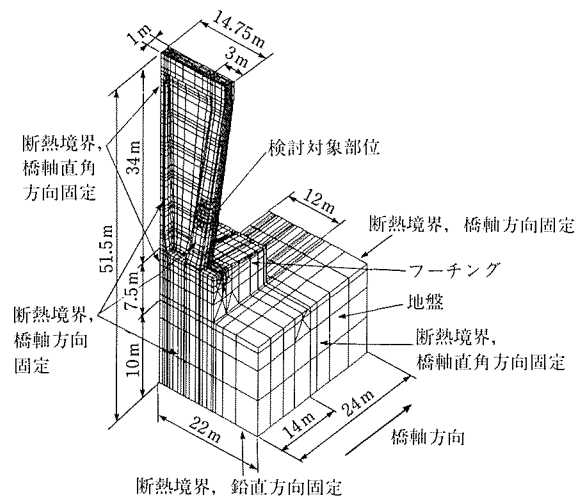


図-7 橋脚部解析モデル

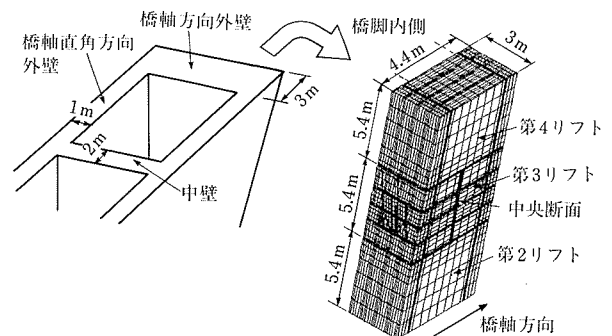


図-8 温度ひび割れ抑制対策解析モデル

に施工する第3~4リフトであること、1回の打設量が300 m<sup>3</sup>前後と比較的少なくプレクーリングを対策として選定した場合、経済性の点で適切でないと判断したこと、夏場でも20℃以下の地下水が得られることからである。解析条件を表-2に示す。熱特性値は、土木学会「コンクリート標準示方書 施工編」に示された標準的な値の範囲の平均値を用いた。ただし、断熱温度上昇式および圧縮強度に関しては、実施工で用いるセメントメーカーの技術資料をもとに算定した。

パイプクーリングを実施する部位は、第3リフトの中でも外壁部に相当する部材のみであることから、その部分のみを切り出してモデル化することとした。ただし、当該部位に対して、温度、応力解析で影響を受ける第2リフトおよび第4リフトの外壁部も併せてモデル化することとした。解析モデルを図-8に示す。

境界条件に関しては、温度解析において第2リフト下端、橋軸直角方向の外壁が接する部位および第4リフト上面で第5リフト打設予定日以降断熱境界とした。また、本検討では、日射などの部材内部への影響が小さい要因については考慮しなかった。応力解析では、第2リフト下端および橋軸直角方向外壁が接する部位をローラー支持とした。また、解析時間刻みは解析開始直後から10ステップまで10分刻みとし、その後は1時間刻みとした。解析期間は、第3リフト打込み後1ヵ月とした。

解析では、パイプクーリングを実施する橋脚部第3リフ



表-2 温度応力解析入力条件

項目		入力データ	
熱伝導率 (W/m°C)		2.7	
比熱 (kJ/kg°C)		1.2	
密度 (kg/m <sup>3</sup> )		2300	
断熱温度上昇式 $Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma \cdot t})$	第2リフト	$Q_{\infty}$	48
		$\gamma$	0.94
	第3リフト	$Q_{\infty}$	47.7
		$\gamma$	1.08
表面熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> °C)	外側面	材齢3日まで	8
		材齢3日以降	14
	内側面	材齢3日まで	8
		材齢3日以降	14
流量 (l/分)	パイプ壁面での熱伝達係数 (W/m <sup>2</sup> °C)	外気温	30
			日変動を考慮した外気温
			624
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c(t) = 22.69 \times \log(\text{積算温度}) = 29.33$		
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	$f_t(t) = 0.35 \times f_c(t)^{0.5}$		
弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c(t) = 4700 \times f_c(t)^{0.5}$		
クリープによる弾性係数低減率 $\mu$	線膨張係数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	材齢3日まで	0.5
		材齢3日以降	0.65
ポアソン比		10	
		0.167	

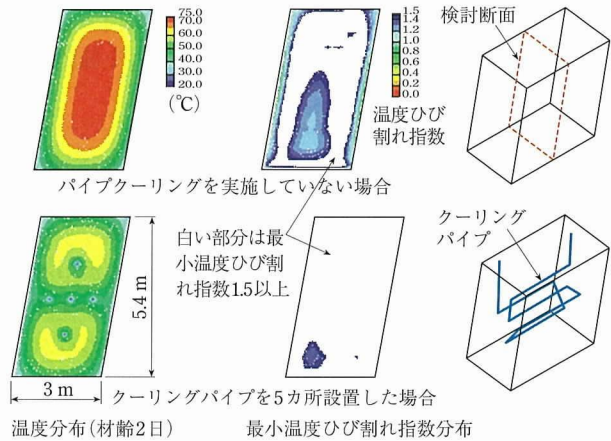


図-9 最適なクーリングパイプ配置選定結果

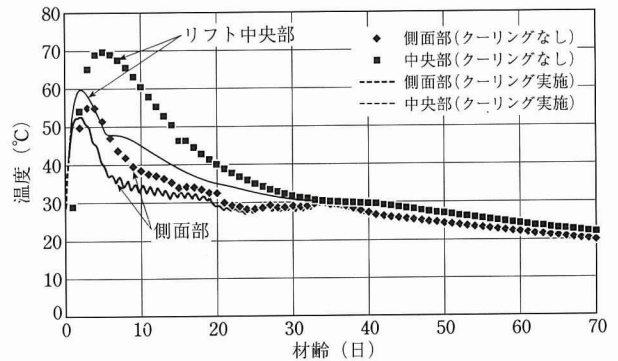


図-10 温度履歴 (パイプクーリングの効果比較)

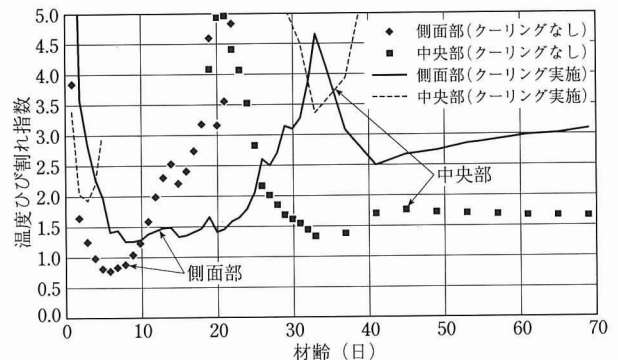


図-11 温度ひび割れ指数履歴 (パイプクーリングの比較)

トに対して、高いクーリング効果が得られるように、温度応力解析を実施してパイプレイアウトの選定を行った。検討方法は、パイプクーリングを実施しない場合を基本として、その部材内で最も温度の高い位置にパイプを1本敷設する。次に、クーリングパイプを1本敷設した場合の解析を実施し、最小温度ひび割れ指数分布および最高温度分布を求め、次に敷設すべき位置を定める。これを繰り返して実施し、部材全体が最小温度ひび割れ指数1.5以上を極力満足できるようにクーリングパイプのレイアウトを選定した。パイプクーリングを実施しない場合と最適なパイプレイアウトを施した場合のリフト中央断面での解析結果(最高温度分布、最小温度ひび割れ指数分布)を図-9に示す。解析の結果から、クーリングパイプを発熱の大きな部位に設置することで、10°C以上最高温度を低減し、部材全体がほぼ所定の温度ひび割れ指数以上を満足した。

次に、パイプクーリング実施による温度ひび割れ抑制対策効果を比較検討するための温度応力解析を行った。図-10に温度解析結果を示すとともに、図-11に温度ひび割れ指数の算定結果を示す。

図-10から、パイプクーリングによる熱除去効果は、リフト中央部で約10°Cであった。各部位での主応力を比較した結果では、材齢初期での表面部の引張応力がパイプクーリングを実施することで約0.4 N/mm<sup>2</sup>低減される結果となった。また、リフト中央部では最大引張応力がパイプクーリングを実施することにより半分以下まで低減される結果となった。

温度ひび割れ指数に関しては、図-11に示すように側面部の最小温度ひび割れ指数が1.0未満となったのに対して、

パイプクーリングを実施した場合には最小温度ひび割れ指数1.3となった。このことは、パイプクーリングが内部拘束応力による側面部の温度ひび割れ抑制に対して効果があったことを示すものである。リフト中央部では、最小温度ひび割れ指数が1.5を下回っているのに対して、パイプクーリングを実施した場合には3.0以上となり、温度ひび割れ抑制対策として高い効果が得られる結果となった。

橋脚第3リフトは、コンクリート打込み後1年以上経過した段階でも部材表面部に温度応力によるひび割れの発生は確認されておらず、パイプクーリングによる温度ひび割れ抑制対策の効果があったことを示していると言える。

#### 4. おわりに

本稿では、マスコンクリートにおけるFEMによる温度応

力解析の現状と、温度応力による解析事例について紹介したが、最近の高流動コンクリートや高強度コンクリートなどコンクリートの高機能化により、セメントの水和発熱による温度応力が問題となる構造物が増えてきており、さらに構造形状が複雑化してきていることから、FEMによる温度応力解析はますます重要となってくるものと考えられる。一方で、解析技術が高度化しても入力すべき熱特性値や力学的特性値が十分な精度を有していなければ、予測技術の向上は望めないことから、今後は、コンクリートの性状把握がさらに重要となってくると思われる。また、若材齢時におけるコンクリートの挙動の把握も温度応力解析にとって重要な課題と言える。さらに、自己収縮、乾燥収縮などの挙動と連成させた解析技術も今後望まれるものと言えるであろう。

#### 参 考 文 献

- 1) U.S. Bureau of Reclamation : Cooling of Concrete Dams, Boulder Canyon Project Final Reports, Part VII-Cement and Concrete Investigations, 1949
- 2) 長田, 小野 : 温度解析方法に関する既往の研究成果について, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム, pp.35~44, 1982.9
- 3) 原口, 山川, 阿部 : 原子力・火力発電所の基礎マツトコンクリートの温度・ひずみ・応力の実測ならびに解析, 電力土木, No.175, 1981.11
- 4) 樋田, 宮永 : LNG地下式貯槽のための潜熱を考慮したFEMによる熱伝導解析, 清水建設研究所報, Vol.32, 1980.4
- 5) マスコンクリートの温度応力研究委員会 : マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム, 日本コンクリート工学協会, 1985
- 6) 溝淵, 成田, 都築, 平戸, 田邊 : マスコンクリートの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.655/V-48, pp.119~132, 2000.8
- 7) Gallagher.R.H : Finite Element Analysis Fundamentals, pp.117~124, Maruzen Co., Ltd., 1976
- 8) 石田, 前川 : 物質・エネルギーの生成・移動と変形・応力場に関する連成解析システム, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.13~25, 1999.8
- 9) 岩井, 藤田, 久保, 溝淵 : プレストレストコンクリート橋主塔部の温度応力低減検討, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集第5部, pp.283~284, 1999.9
- 10) 溝淵, 二塚, 村尾 : パイプクーリングによるひび割れ抑制対策効果に関する研究, 土木学会論文集, No.655/VI-49, pp.147~163, 2000.12

【2001年1月12日受付】