

# 論文 外気温の日変動を考慮したマスコンクリートの3次元温度応力解析

吉武 勇<sup>\*1</sup>・中村秀明<sup>\*2</sup>・浜田純夫<sup>\*3</sup>・宮本文穂<sup>\*4</sup>

**要旨:** マスコンクリートの温度解析では、解析条件として外気温が必要であるが、一般的には、平均外気温が用いられる場合が多い。地域、季節によっては、外気温の日変動が、ひび割れ発生を左右する場合も考えられ、特に熱伝達面の多い3次元的な構造物では、外気温の日変動の影響が大きいものと思われる。

そこで、本研究では外気温の日変動がマスコンクリートの温度応力解析の結果に及ぼす影響について考察した。その結果、壁状構造物では外気温の日変動の影響は表面のみならず内部の要素応力にも影響を与えることが分かった。

**キーワード:** マスコンクリート、温度応力、非定常熱伝導解析、外気温、日変動

## 1. はじめに

コンクリート構造物の大型化、高強度化、急速施工化にともない、セメントの水和熱による温度ひび割れの発生が従来から問題となっている。コンクリート構造物の温度ひび割れ発生の危険性を評価するためには、あらかじめ対象とする構造物について、種々の施工条件を想定した温度応力解析を行う必要がある。温度応力を解析的に精度良く求めるためには、その前提としてコンクリート構造物内の温度分布が正確に求まつていなければならない。マスコンクリートの温度解析では、解析条件として外気温が必要であるが、全国各地の外気温を簡便に表すモデルがないため、外気温は一般に平均気温で与えられることが多い。しかしながら、熱伝達面の多い3次元的な構造物では、外気温の日変動がひび割れ発生を左右する場合も考えられる。

そこで本研究は、3次元FEM解析を行い、外気温の日変動が温度応力解析に及ぼす影響を明らかにした。

## 2. 外気温の日変動 [1]

### 2. 1 外気温の日変動パターン

外気温は1日を周期として変動している。そこでまず初めに外気温の日変動のモデル化を行う。本研究では、外気温の日変動モデルを式(1)に示すように設定する。(図-1 参照)

$$T(t_d) = T_d + A_d \theta_d(t_d) \quad (1)$$

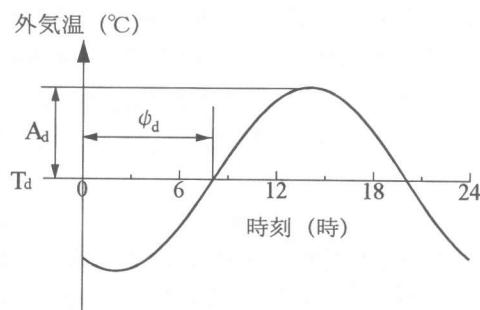


図-1 日変動のモデル化

\*1 山口大学大学院 工学研究科博士前期課程社会建設工学専攻（正会員）

\*2 山口大学助手 工学部知能情報システム工学科、博士(工学)（正会員）

\*3 山口大学教授 工学部社会建設工学科、Ph. D.（正会員）

\*4 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科、工博（正会員）

ここに、 $T(t_d)$ は外気温の日変動 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $T_d$ は日平均気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $\theta_d(t_d)$ は外気温の無次元日変動、 $t_d$ は時刻 (時)、 $A_d$ は無次元日変動の振幅 ( $^{\circ}\text{C}$ ) である。

## 2. 2 日変動のパターン

図-2 および図-3 に、それぞれ全国8都市（札幌、仙台、新潟、東京、大阪、福岡、鹿児島、那覇）の夏期と冬期の無次元した外気温の日変動パターン[2]を平均したものを示す。無次元日変動パターンとは日平均気温を0とし、変動幅が-1から1の範囲に収まるように、最高あるいは最低気温のうち、日平均気温からの差が大きい方を1または-1に無次元化したものである。無次元日変動パターンは夏期、冬期ともに、明け方5時ごろに気温が最も低くなり、午後2時ごろ最も高くなる傾向がみられる。本研究では、これらの変動パターンを、①sin関数および②フーリエ級数の4項まで、で近似する。

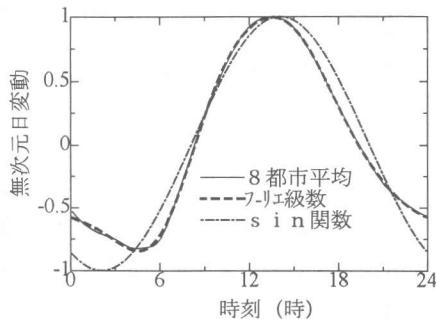


図-2 外気温の無次元日変動（夏期）

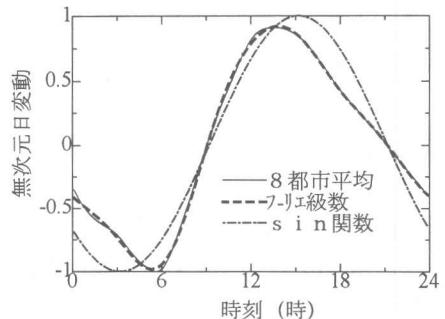


図-3 外気温の無次元日変動（冬期）

### ①sin関数による近似

無次元日変動パターンのsin関数による近似は式(2)のようになる。

$$\theta_d(t_d) = \sin\left(\frac{2\pi}{24}(t_d + \psi_d)\right) \quad (2)$$

ここに、 $\theta_d(t_d)$ は無次元日変動、 $\psi_d$ は日変動の位相時間、 $\pi$ は円周率、 $t_d$ は時刻 (時) である。8都市平均の変動パターンをsin関数により近似し、最小自乗法を用いて $\psi_d$ を決定した結果を図-2 および図-3 に示す。決定された $\psi_d$ は、夏期では、 $\psi_d = -8.1$ 、冬期では、 $\psi_d = -9.2$ となった。

### ②フーリエ級数による近似

関数 $\theta_d(t_d)$ が周期 $2\pi$ の周期関数であるとき、関数 $\theta_d(t_d)$ は式(3)のようにフーリエ級数展開される。

表-1 フーリエ係数

夏期		冬期	
$a_1 = -0.759$	$b_1 = -0.459$	$a_1 = -0.572$	$b_1 = -0.635$
$a_2 = 0.188$	$b_2 = 0.053$	$a_2 = 0.224$	$b_2 = 0.032$
$a_3 = 0.016$	$b_3 = 0.050$	$a_3 = -0.024$	$b_3 = 0.050$
$a_4 = -0.021$	$b_4 = 0.001$	$a_4 = -0.033$	$b_4 = 0.000$

$$\theta_d(t_d) = \sum_{k=1}^{\infty} \left( a_k \cos \frac{2\pi}{24} kt_d + b_k \sin \frac{2\pi}{24} kt_d \right) \quad (3)$$

$$\text{ただし、 } a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t_d) \cos \frac{2\pi}{24} kt_d dt_d, \quad b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t_d) \sin \frac{2\pi}{24} kt_d dt_d \quad (k = 1, 2, \dots)$$

24 時間を周期として展開し、級数の  $k = 4$  の項まで求めたものを表-1 に示す。なお、秋期と春期は、夏期と冬期のフーリエ係数の平均をとることにより求められる。近似された無次元日変動パターンを図-2, 3 中に示す。フーリエ級数による近似では、級数の 4 項まででほぼ完全に近似できる。しかしながら、後の解析例で示されるように応力解析では、変動パターンよりもむしろ振幅の大きさが問題となり、近似は  $\sin$  関数でも十分と考えられる。

### 2. 3 外気温の日平均気温

日平均気温は、理科年表気候表[3]や気象庁年報[4]などにより求められるが、ここでは、著者らの提案した手法[1]により求める。著者らの手法は、気象観測記録を緯度、標高、季節（月）を基にデータ整理し、これらの 3 つのパラメータにより日平均気温を求めるものである。提案式を以下に示す。

$$T_d = a_d(N - 35) + P_d - 0.006H \quad (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} a_d = 0.212k - 1.864 \quad (N \leq 35) \\ a_d = 0.076k - 1.355 \quad (N \geq 35) \end{array} \right\} \quad (5)$$

$$P_d = 4.35k - 6.007 \quad (6)$$

ここで、 $T_d$  は日平均気温、 $N$  は日平均気温を求めるべき地点の緯度（°）、 $H$  は標高（m）、 $a_d$  は回帰直線の傾き（式(5)により求める。）であり、また、 $P_d$  は回帰直線の交点の温度（式(6)により求める。）である。

ただし、 $k$  は日平均気温を求めるべき月で、 $k$  の範囲は 2(月)～8(月)となる。つまり、回帰直線は、8 月を中心とした左右対称であるため、例えば 10 月の時は  $k = 6$ 、1 月の時は  $k = 3$ 、9 月中旬の時は  $k = 6.5$  をそれぞれ式(5)、(6)に代入することにより求められる。また、季節ごとの変動を考慮する場合には、 $k$  の値を逐次変えることにより、その季節に合った日平均気温を求めることができる。

### 2. 4 外気温の日振幅

外気温の日振幅については、緯度で整理することが難しいため、日本地図の図上に各地の日振幅を年間を通して日振幅の大きい春期（4 月下旬）について図-4 に示す。日振幅は緯度や季節に関係なく 2 ℃～8 ℃の範囲でばらついている。この図より日振幅の概略値を求めることができる。

### 3. 有限要素法による 3 次元温度応力解析

外気温の日変動がマスコンクリートの温度応力の解析結果に及ぼす影響を検討するため、ここでは、外気温の影響が最も大きく現われると考えられる壁状構造物の 3 次元温度応力解析を行う。

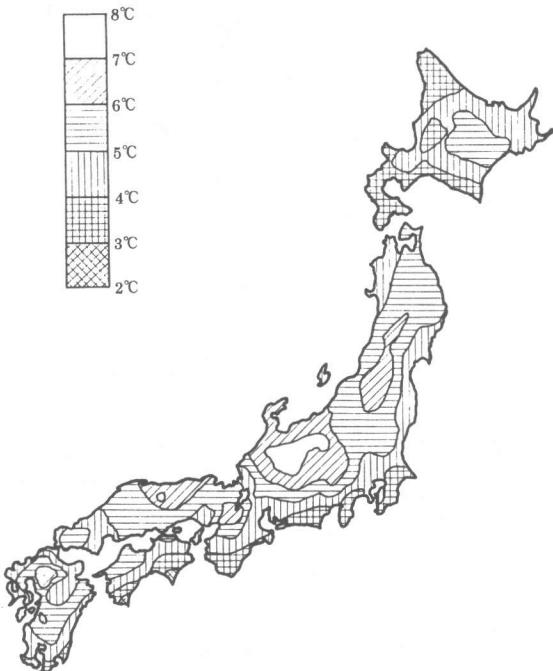


図-4 日振幅の分布

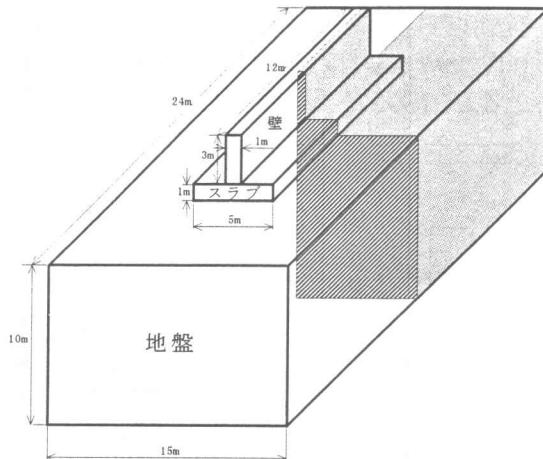


図-5 解析対象領域

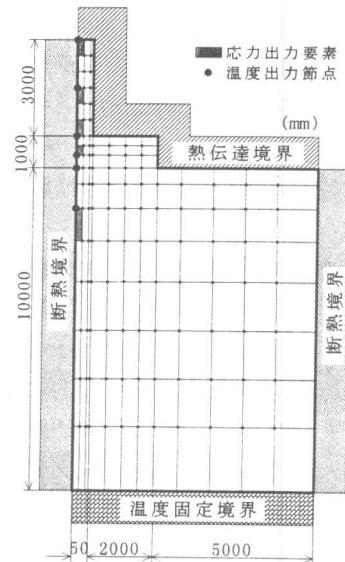


図-6 有限要素メッシュ

表-2 コンクリートおよび岩盤の物性値

	コンクリート	岩盤
熱伝導率 $\lambda(W/mK)$	2.67	3.49
比熱 $C(kJ/kgK)$	1.15	0.80
密度 $\rho(kg/m^3)$	2350	2650
断熱温度上昇式 $Q(t) = Q_\infty(1 - e^{-\gamma t})$ (°C)	$Q_\infty = 46.0, \gamma = 1.104$	—
熱伝達率 $\eta(W/m^2K)$	14.0	14.0
初期温度 (°C)	20.0	15.0
有効ヤング係数 $E_e(t) (N/mm^2)$	示方書に準拠	4903
クリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数	示方書に準拠	—
圧縮強度 $f_c(t) (N/mm^2)$	$\frac{30.3t}{4.5 + 0.95t}$	—
引張強度 $f_t(t) (N/mm^2)$	$0.44\sqrt{f_c(t)}$	—
ポアソン比 $\nu$	0.2	0.2
熱膨張係数 $\alpha (1/°C)$	$10 \times 10^{-6}$	$10 \times 10^{-6}$

壁は図-5 に示すように、地盤上のスラブに打設されており、解析は、対称性を考慮して 1/4 モデルで行う。壁直角方向中央断面の有限要素メッシュを図-6 に示し、解析条件を表-2 示す。また、解析は、一例として、長野県松本市を想定しており、図-5 に示す壁状構造物が、4月上旬午前10時に打設される場合を取り上げ、外気温に日平均気温を用いた場合と、式(2)で示される sin 関数による日変動モデルを用いた場合の 2通りの比較を行う。なお、式(4)で求めた4月上旬の松本市の日平均気温は 6.4°C であり、これは、松本市の4月上旬の 30 年間の日別平滑年値[5]である 6.6°C と良く一致している。また、日変動モデルの日振幅は、図-4 の日本地図より 7°C を用いた。解析は 8 節点アイソパラメトリック要素[6]を用いて時間刻み 3 時間で行った。解析は、スラブと壁が順次打設される場合を考えており、まず初めに地盤とスラブの解析を行い、壁はスラブが打設されてから 30 日後に打設されるものとして解析を行った。

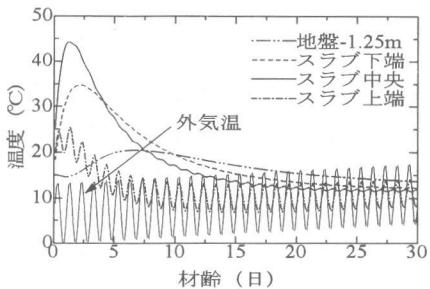


図-7 温度解析結果（地盤+スラブ）

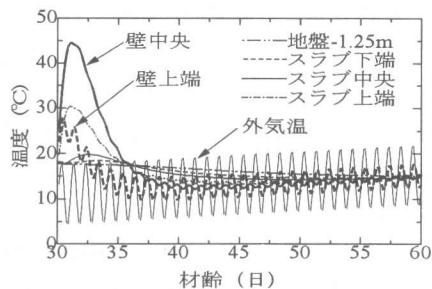


図-8 温度解析結果（地盤+スラブ+壁）

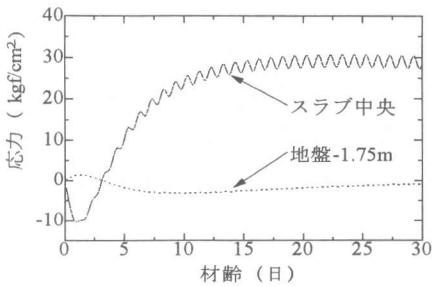


図-9 応力解析結果（地盤+スラブ）

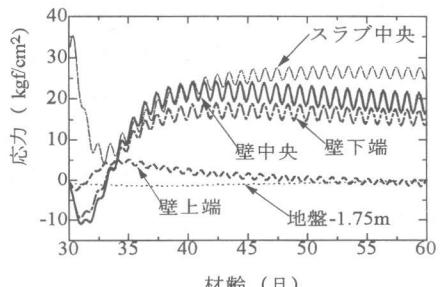


図-10 応力解析結果（地盤+スラブ+壁）

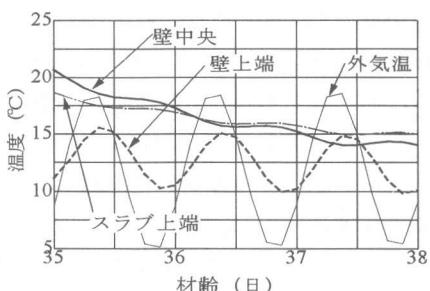


図-11 温度解析位相差

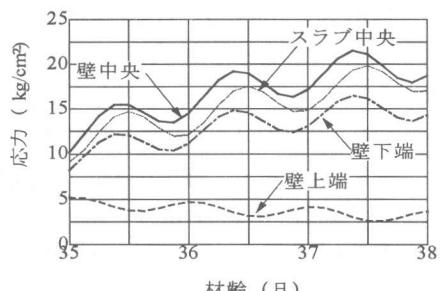


図-12 応力解析位相差

図-7, 8には、外気温に日変動モデル（日振幅7°C）を用いた場合の温度解析結果を示す。なお、外気温に日平均気温を用いた場合の解析結果は、それぞれの変動している曲線の中心を通る曲線になるため、ここでは、日変動モデルの解析結果のみ示す。外気温は日振幅7°Cで変動しており、年変動の影響により僅かずつ日平均気温が上昇している。スラブが打設された時には、スラブ中央部の温度は最高で44°Cまで上昇し、外気温に日平均気温を用いた場合とほとんど変わらない。外気に接しているスラブ上端の温度は日変動の影響が現れており、振幅3°C程度で変動しており、最高で26°Cまで上昇している。同様にスラブ上に壁が打設された時も、壁中央部の最高温度は、日平均気温を用いた場合と僅かしか変わらず最高で45°Cまで上昇している。外気に接する壁上端では、日変動の影響が現れており、振幅2.5°C程度で変動し、最高で28°Cまで上昇している。温度解析では、日変動の影響は外気に接する節点に現れ、内部の節点にはそれほど日変動の影響は、現れていない。

図-9, 10 には、外気温に日変動モデル（日振幅 7°C）を用いた場合の応力解析結果を示す。スラブを打設した時には、スラブ中央部での応力は最大で  $31\text{kgf/cm}^2$  となり、また、応力の振幅は  $1.5\text{kgf/cm}^2$  程度である。壁を打設した時には、壁中央部の応力は、最大で  $24\text{kgf/cm}^2$  であり、応力の振幅は  $2.5\text{kgf/cm}^2$  程度である。また壁下端やスラブ中央も振幅  $2.0\text{kgf/cm}^2$  程度で変動している。日変動の影響は、外気に接する要素だけでなく、スラブ中央部や、壁中央部の要素にも現れている。要素分割や解析条件によっても異なるが、本解析例で示した厚さ 1m 程度の壁で日振幅が 7°C の場合には、応力の振幅は、壁中央部の要素で約  $2.5\text{kgf/cm}^2$  程度であった。

図-11, 12 に材齢が 35 日から 38 日までの間の温度および応力の位相を示す。外気温に比べ壁上端の温度は、位相が 2.5 時間程遅れている。また、壁中央やスラブ上端では、外気温とは逆の位相になっている。このことは、被拘束体である壁上端と拘束体である壁中央やスラブ上端の温度差が大きくなることを意味しており、応力的には不利になる。また、応力の位相を見ると壁中央や壁下端、スラブ中央は、壁上端とほぼ逆位相になっており、作用・反作用の関係より応力発生の位相が正反対になっているものと思われ、位相差により拘束の程度をある程度知ることができるものと思われる。最後に同じ場所について温度の位相と応力の位相を比べてみると、温度と応力とはほぼ逆位相の関係にある。

#### 4. まとめ

本研究は、地盤上にスラブと壁が 2 層打ちされる構造物の 3 次元 FEM 温度応力解析を行い、外気温の日変動が温度応力解析に及ぼす影響について検討を行ったものである。

温度解析では、外気温の日変動の影響は、外気に接する節点で大きく現れており、内部の節点には、それほど影響を与えていない。また、外気温の変動はすぐには構造物内の温度に現れず外気に接する節点でもタイムラグを生じる。壁中央やスラブ上端では、むしろ外気温の変動とは逆位相となる。応力解析では、日変動の影響は、外気に接する要素の応力だけでなく、内部の要素の応力にも影響を与えており、影響の程度は、要素分割や解析例によっても異なるが、本解析例に示した 1 m 壁厚の構造物では、日振幅 7°C に対しスラブ部分で約  $1.5\text{kgf/cm}^2$ 、壁部分で約  $2.5\text{kgf/cm}^2$  程度の応力振幅があった。また、応力の位相を見ると拘束体である壁中央や壁下端、スラブ中央は、被拘束体である壁上端とほぼ逆位相になっており、作用・反作用の関係より応力発生の位相が正反対になっているものと思われる。

#### 参考文献

- [1] 中村秀明、緒方香奈恵、谷本俊夫、浜田純夫：マスコンクリートの温度応力解析のための外気温モデルの提案、土木学会論文集 V 査読後修正投稿中
- [2] 石野久彌、郡公子：日本全国の設計用気象データの分類法に関する基礎的研究、空気調和・衛生学会学術論文集、1985.
- [3] 国立天文台：理科年表、丸善、1996.
- [4] 日本気象協会：気象庁年報、日本気象協会
- [5] 気象庁：日本気候表その 2、旬別平年値、半旬別平年平滑値、日別平滑平年値、1991.8
- [6] 矢川元基：流れと熱伝導の有限要素法入門、培風館、pp. 223–301、1983.