

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

中村秀明¹・緒方香奈恵²・谷本俊夫³・浜田純夫⁴

¹正会員 博士(工学) 山口大学助手 工学部知能情報システム工学科 (〒755山口県宇部市常盤台2557)

²正会員 修士(工学) 西日本技術開発株式会社 (〒810 福岡市中央区渡辺通1丁目1番1号)
(元 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)

³正会員 (株) エイトコンサルタント 技術副本部長 (〒700 岡山県津島京町3丁目1-21)

⁴正会員 Ph.D. 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

マスコンクリートの温度応力を求めるためには、まず始めに温度解析を行い、コンクリート構造物内の温度分布を正確に求めておく必要がある。温度解析に必要な解析条件として外気温があるが、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。地域、季節によっては気温の日変動がひび割れ発生を左右する場合も多く、特に熱伝達の多い壁状構造物などでは外気温の影響は大きいものと思われる。

そこで、本研究では、外気温の日変動が温度応力に及ぼす影響を明らかにするとともに、全国各地の外気温の日変動を的確に表し得るモデルの提案を行う。

Key Words : mass concrete, thermal stress, transient heat conduction analysis, FEM, ambient temperature

1. まえがき

温度ひび割れの発生が予想されるコンクリート構造物については、機能性および耐久性の確保から事前に温度ひび割れに対する検討が行われる。温度応力推定の最初のステップは、温度分布を精度良く求めることである。温度解析では有限要素法が広く用いられている。しかしながらコンクリートの温度解析に有限要素法などの高度な解析手法を用いても、これらの解析結果は入力される熱特性値によって大きく影響されるものであり、熱特性値が正確に求まっていなければ正確な解析結果は得られない。温度解析に必要な解析条件として外気温があるが、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。地域、季節によっては気温の日変動がひび割れ発生を左右する場合も多く、特に熱伝達の多い壁状構造物などでは外気温の影響は大きいものと思われる。

そこで、本研究は、外気温の日変動がコンクリート構造物に発生する温度応力に及ぼす影響を明らかにするとともに、全国各地の外気温の日変動を的確に表し得るモデルの提案を行う。

2. 外気温の日変動モデル

(1) 外気温の日変動モデル

外気温は1日を周期として変動している。そこでまず始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)。

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

ここに、 $T(t_d)$: 外気温(°C)、 T_d : 日平均気温(°C)

$\theta_d(t_d)$: 外気温の無次元日変動、 t_d : 時刻(時)

A_d : 無次元日変動の振幅(°C)

(2) 外気温の日変動パターン

図-2と図-3には、全国8都市(札幌, 仙台, 新潟, 東京, 大阪, 福岡, 鹿児島, 那覇)の夏(8月)と冬(2月)の無次元日変動パターンを示す¹⁾。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

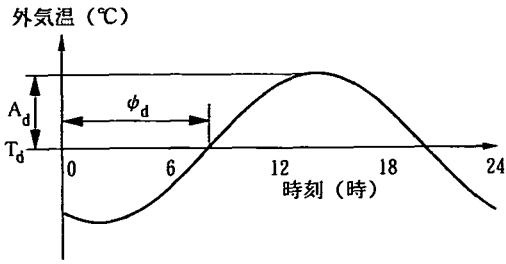


図-1 日変動のモデル化

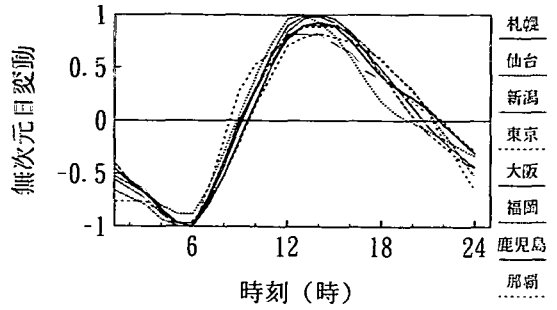


図-3 外気温の無次元日変動 (冬)

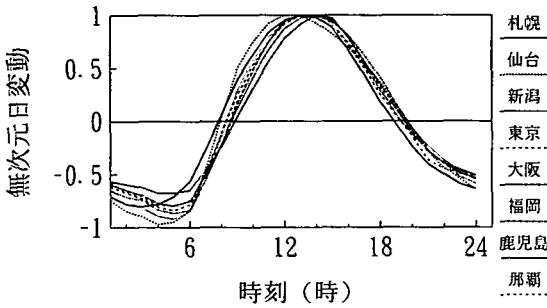


図-2 外気温の無次元日変動 (夏)

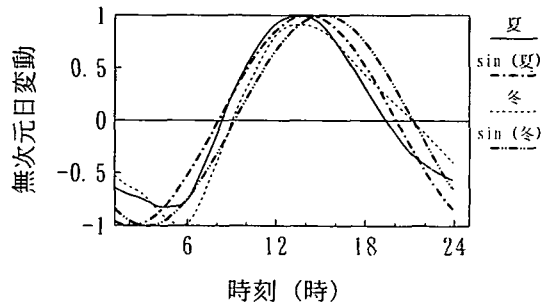


図-4 外気温の無次元日変動

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都市による差はあまり大きくなく、夏、冬ともに、明け方5時ごろに気温が最も低くなり、午後2時ごろに最も高くなる。夏と冬では、変動パターンは若干異なっており、位相が冬では40分程度遅くなっている。図-4は、8都市の平均値を取った変動パターンを夏と冬について示している。これらの日変動パターンはフーリエ級数の4項までの近似でほぼ完全に近似できるが、後の数値解析例で示されるように、温度応力解析では、変動パターンよりもむしろ振幅の大きさが問題となり、本研究では、できるだけ簡単なモデル化を行うため、これらの変動パターンをsin関数で近似する。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、 ψ_d は日変動の位相時間、 π は円周率、 t_d は時刻(時)である。

図-4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 ψ_d を決定する。決定された ψ_d は夏(8月)では $\psi_d = -8.1$ 、冬(2月)では $\psi_d = -9.2$ となる。他の季節(月)の ψ_d は夏と冬の値を補間することにより求められる。近似されたsin関数を

図-4中に太線で示す。近似には多少のずれが生じているものの、後の解析例で示すように、温度応力解析には変動パターンそのものは、それほど影響しないため、問題はないと考えられる。

(3) 外気温の日平均気温

日平均気温は1983年から1992年までの10年間の気象観測記録²⁾を基に求めた。気象観測記録には、全国154地点の日平均気温、日最高気温、日最低気温が1ヵ月を上旬、中旬、下旬に分けて記載されている。解析では、観測地点の標高より各観測記録を気温減率 $0.006^\circ\text{C}/\text{m}$ とし海面温度に更正している。

図-5、6は気温と緯度の関係を夏(8月上旬)と冬(2月下旬)について示している。これらの図を見ると、気温と緯度とは比較的高い相関を示している。ただし、緯度 35° 付近で変曲点が見られるため、本研究では、緯度 35° で交わる2本の回帰直線を用いて回帰を行った。

図-5(8月上旬)および図-6(2月下旬)に示されるように日平均気温と緯度との関係を示した回帰直線は、季節により変わるため、図-7、8に回帰直線の傾きと月の関係を緯度 35° 以下の地点と 35° 以上の地点について示す。傾きは8月に一番小さくなり、8月を境にほぼ左右対称とみなすことができる。図-9は緯度 35° 以上と 35° 以下の2本の回帰

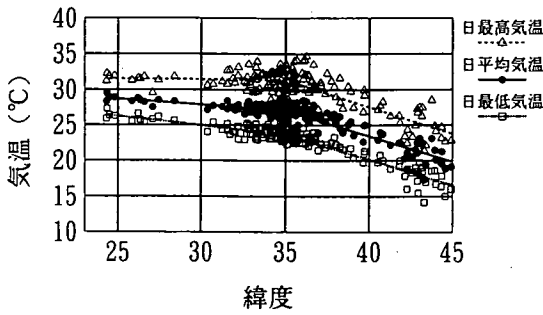


図-5 緯度と気温の関係 (8月上旬)

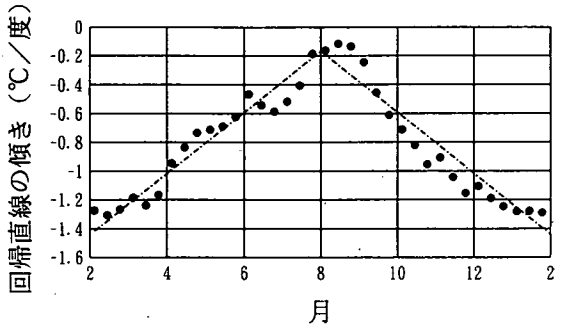


図-7 月と回帰直線の傾きの関係 (緯度35°以下)

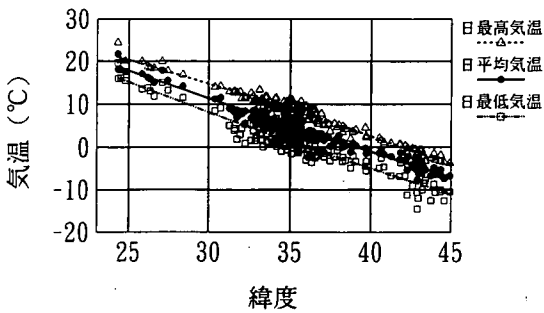


図-6 緯度と気温の関係 (2月上旬)

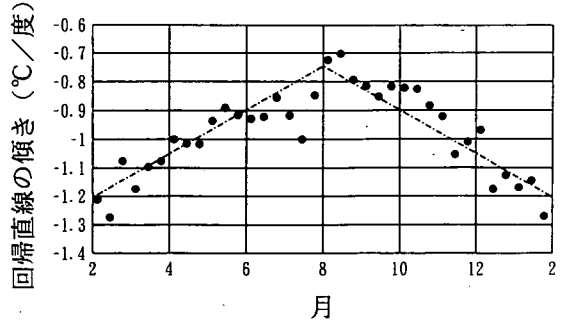


図-8 月と回帰直線の傾きの関係 (緯度35°以上)

表-1 本手法と30年日別年平均平滑値との比較

地点	緯度 (N)	標高 (H)	月 (k)	日平均気温			地点	緯度 (N)	標高 (H)	月 (k)	日平均気温		
				本手法	30年値	偏差					本手法	30年値	偏差
稚内	45.42	2.8	5	5.6	6.8	-1.2	松江	35.45	16.9	12(4)	10.8	8.2	2.6
旭川	43.77	111.9	3	-3.5	-5.7	2.2	萩	34.42	5.5	7	24.7	23.0	1.7
帯広	42.92	38.4	8	22.7	20.8	1.9	京都	35.02	41.4	1(3)	6.8	4.8	2.0
函館	41.82	33.2	6	13.8	13.6	0.2	広島	34.37	29.3	9(7)	24.5	25.7	-1.2
青森	40.82	2.7	10(6)	14.9	14.9	0	神戸	34.68	57.5	3	7.1	5.9	1.2
秋田	39.72	6.3	5	11.1	12.0	-0.9	大阪	34.68	23.1	6	20.2	21.5	-1.3
盛岡	39.70	155.2	2	-3.9	-2.6	-1.3	奈良	34.68	104.4	2	2.5	2.9	-0.4
山形	38.25	152.5	1(3)	2.5	0.1	2.4	山口	34.15	16.7	7	24.7	23.5	1.2
仙台	38.27	38.9	4	7.7	7.1	0.6	福岡	33.58	2.5	4	12.8	12.0	0.8
新潟	37.92	1.9	11(5)	12.9	12.9	0	長崎	32.73	26.9	8	29.0	27.9	1.1
金沢	36.55	26.1	5	14.1	14.8	-0.7	阿蘇山	32.88	1142.8	10(6)	14.5	14.3	0.2
福井	36.05	8.8	2	1.4	1.9	-0.5	宮崎	31.92	6.3	6	21.9	21.2	0.7
松本	36.25	610.0	4	6.4	6.6	-0.2	枕崎	31.27	29.5	8	29.3	27.3	2.0
軽井沢	36.33	999.1	2	-4.9	-4.4	-0.5	屋久島	30.38	36.4	11(5)	19.3	19.5	-0.2
水戸	36.38	29.3	5	14.2	14.5	-0.3	高松	34.32	8.7	2	3.6	4.3	-0.7
名古屋	35.17	51.1	10(6)	19.7	19.9	-0.2	高知	33.55	1.9	9(7)	25.0	26.2	-1.2
甲府	35.67	272.8	1(3)	4.7	2.4	2.3	徳島	34.07	1.6	1(3)	8.2	6.2	2.0
静岡	34.97	14.1	7	24.4	23.3	1.1	名瀬	28.38	2.8	3	15.2	15.3	-0.1
東京	35.68	5.3	9(7)	23.9	25.8	-1.9	西表島	24.38	8.7	6	26.4	25.8	0.6
八丈島	33.10	79.2	8	28.7	26.3	2.4	那覇	26.20	28.0	4	20.2	19.5	0.7

直線の交点の温度と月の関係を示す。交点の温度は8月に一番高くなり、8月を境にほぼ左右対称である。以上図-5～9により日平均気温は求めたい地

点の緯度(N)と標高(H)そして月(k)が分かれば式(3)により求めることができる。

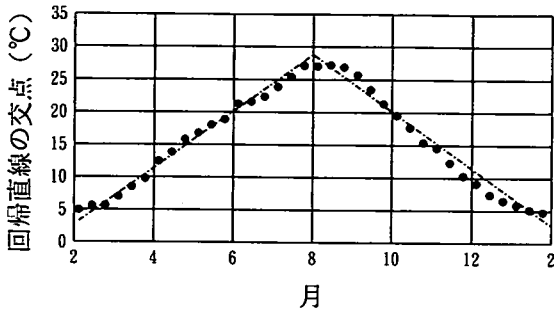


図-9 月と回帰直線の交点の関係

$$T_d = a_d(N - 35) + P_d - 0.006H \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} a_d &= 0.212k - 1.864 & (N \leq 35) \\ a_d &= 0.076k - 1.355 & (N \geq 35) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$P_d = 4.354k - 6.007 \quad (5)$$

ここで、 T_d は日平均気温、 N は日平均気温を求めたい地点の緯度(°)、 H は標高(m)、 a_d は回帰直線の傾き(式(4)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(5)により求める。)である。ただし、 k は日平均気温を求めたい月で、 k の範囲は2(月)~8(月)となる。つまり、図-7、8、9で8月を中心に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(4)、(5)に代入することにより求められる。

本手法の妥当性を検討するため、表-1に示す全国40カ所の日平均気温を本手法で求めたものと1961年から1990年までの30年間の日別平滑年値³⁾(30年間の日別年値の15日間の移動平均)との比較を行う。表-1によると1月、8月の推定精度が若干悪いものの、本手法で予測された日平均気温は概ね30年間の日別平滑年値と一致しており、緯度と標高と月よりその地点の日平均気温が簡易的に求められる。なお、図-7、8、9から式(4)、(5)を近似する際に、sin関数など他の回帰も行ったが、精度の向上は望めなかったため、本研究では直線回帰を行った。

(4) 外気温の日振幅

図-10に全国154地点の日振幅と緯度の関係を年間を通じて日振幅の大きい春(4月下旬)について示す。図中には1983年から1992年までの10年間の日振幅の期待値とばらつきの程度を示す3σ限界が示

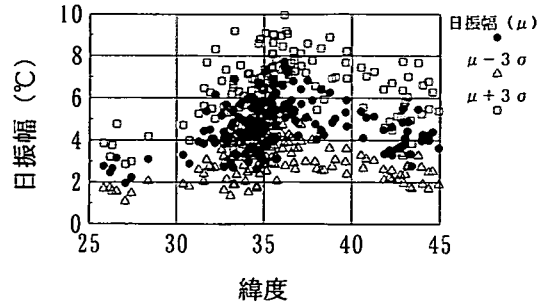


図-10 日振幅と緯度の関係(4月下旬)

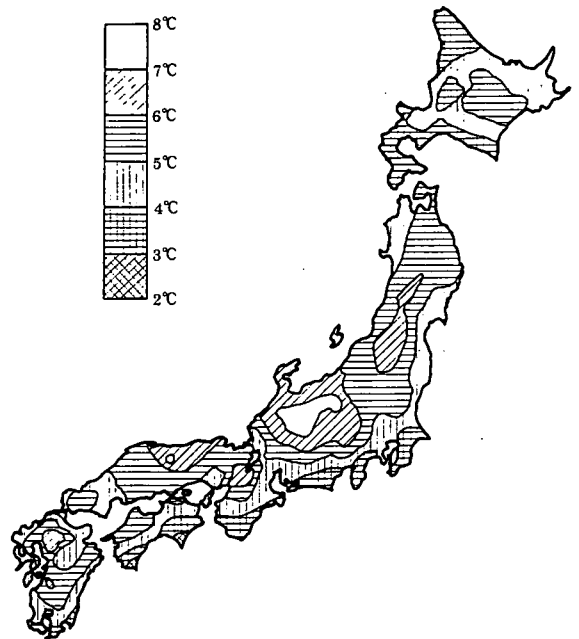


図-11 日振幅の分布

してある。日振幅は緯度や季節に関係なく2°C~8°Cの範囲でばらついている。日振幅が大きい地点は内陸部となっている。また、緯度が30°以下では、観測地点が島部であるため、日振幅は一般に小さい。この図に示すように日振幅は緯度との関係で表すことが難しいため、日本地図の図上に示す方が適切と思われる。図-11に全国における日振幅の分布を日振幅が比較的大きい春について示す。この図より日振幅の概略値を求めることができる。

3. 外気温の日変動の影響

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するため、解析例として、長野県松本市に図

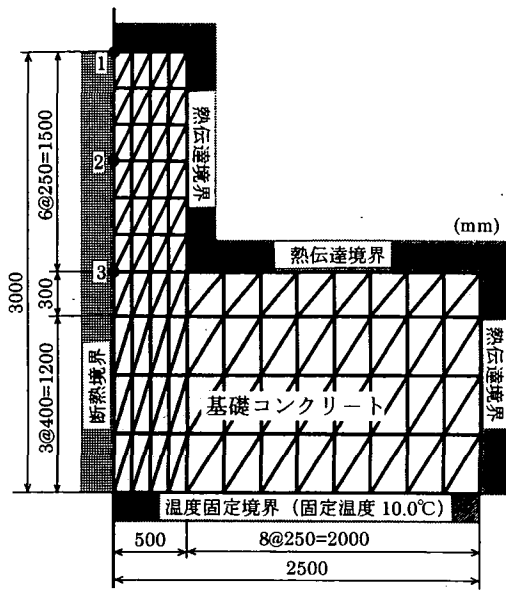


図-12 温度解析有限要素モデル

表-2 解析条件

熱伝導率 kcal/mh°C (W/mK)	2.3 (2.67)
比熱 kcal/kg°C (kJ/kgK)	0.28 (1.17)
密度 kg/m³	2550
熱伝達率 kcal/m²h°C (W/m²K)	10.0 (11.6)
断熱温度上昇量 °C	$46.5(1 - e^{-0.84t})$
打設温度 °C	15.0
基礎コンクリート初期温度	10.0
熱膨張係数 1/°C	0.0001
圧縮強度 kgf/cm² (N/mm²)	$300t / (4.5 + 0.95t)$ $(29.4t / (4.5 + 0.95t))$
引張強度 kgf/cm² (N/mm²)	$1.4 \sqrt{f'_c(t)}$ $(0.44 \sqrt{f'_c(t)})$
弾性係数 kgf/cm² (N/mm²)	$\Phi(t) \times 1.5 \times 10^4 \sqrt{f'_c(t)}$ $(\Phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)})$
外部拘束係数 R_N	0.1
外部拘束係数 R_{M1}	0.8
外部拘束係数 R_{M2}	1.2

図-12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(1)式で表される日変動モデル(日振幅7°C)を用いた場合の比較を行う。温度解析は2次元の有限要素法で行い、応力解析はCP法で行った。CP法による応力解析では、基礎コンクリートと壁

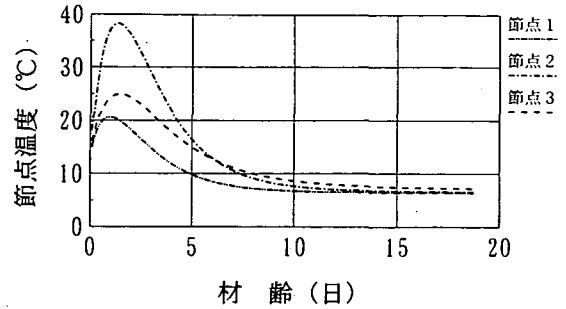


図-13 温度解析結果(日振幅0°C)

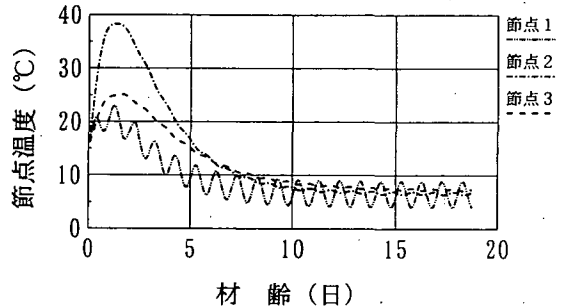


図-14 温度解析結果(日振幅7°C)

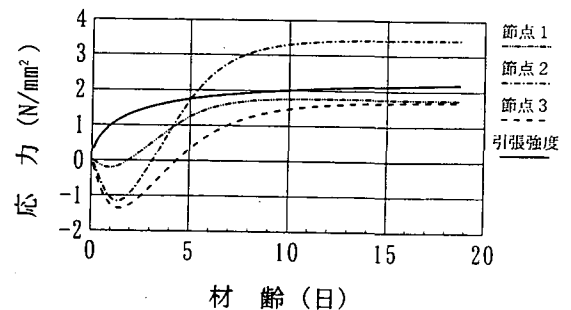


図-15 応力解析結果(日振幅0°C)

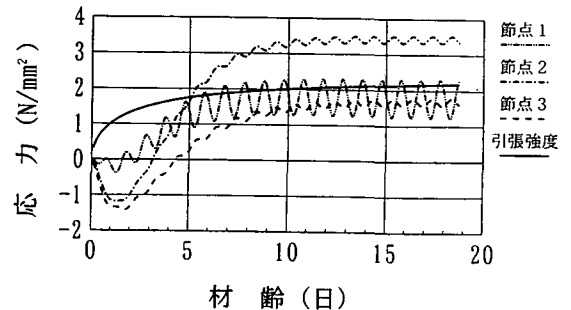


図-16 応力解析結果(日振幅7°C)

を被拘束体、地盤を拘束体とした。また、基礎コンクリート周辺は土が埋め戻されており、軸方向の拘束は、ほとんどないものとし、自重による曲げ拘束を考えた。解析条件の詳細を表-2に示す。図-13, 14に温度解析の結果を示す。日平均気温を用いた場合と日変動モデルを用いた場合とで最高温度にあまり差はない。外気温の変動の影響は外気に接す

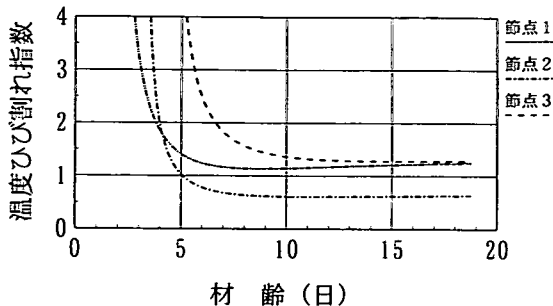


図-17 温度ひび割れ指数 (日振幅0℃)

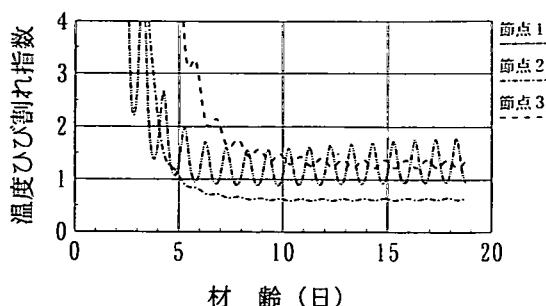


図-18 温度ひび割れ指数 (日振幅7℃)

る節点1で大きく、7℃程度で変動している。図-15, 16にCP法による応力の解析結果を示す。外気温の変動の影響は外気に接する節点で最も大きく、内部の節点にも多少影響を与えている。図-17, 18に温度ひび割れ指数の時刻歴を示す。節点2の温度ひび割れ指数にはそれほどの変動はみられないが、外気に接する節点1ではかなり変動している。温度ひび割れ指数は、引張強度を温度応力で除した値なので、温度応力が小さいと指数は大きくなり、したがって、温度応力が同程度でばらついた場合には、温度ひび割れ指数が小さいほどばらつきは小さくなる。本解析は長野県松本市における4月の日振幅を7℃と仮定した解析である。内陸部では季節によっては7℃の日振幅は十分考えられ、また、壁厚が薄い壁状構造物や、熱伝達面が多く3次的な扱いの必要な構造物では、外気に接する表面付近で、外気温の日変動の影響は大きいものと考えられる。

4. まとめ

本研究は、全国各地の外気温の日変動を簡便に表現し得るモデルの提案を行ったものである。外気温の日変動はsin関数を用いて近似することが可能で

あり、本研究ではその近似式や係数の提案を行った。

日平均気温については、求めたい地点の緯度と標高そして時期(月)の3つのパラメータを与えることにより日平均気温が求まる計算式を示した。また、日振幅については、日振幅設定の目安として全国の日振幅の分布を示した。

解析例として長野県松本市に打設された壁状構造物を取り上げ解析を行った。内陸部では季節によっては7℃の日振幅は十分考えられ、また、壁厚が薄い壁状構造物や、熱伝達面が多く3次的な扱いの必要な構造物では、外気に接する表面付近で、外気温の日変動の影響は大きいものと考えられる。

参考文献

- 1) 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研究, 空気調和・衛生工学会学術論文集, 1985.
- 2) 日本気象協会: 気象庁年報, 1983-1992, 日本気象協会.
- 3) 気象庁: 日本気候表その2, 旬別平年値, 半旬別平滑平年値, 日別平滑平年, 1991. 8.
- 4) 国立天文台: 理科年表, 丸善, 1993.
- 5) 日本気象協会: 気象年鑑1993年版, 大蔵省印刷局, 1993.
- 6) 島貫 隆, 浦野 弘: パソコンで見る気象入門, 講談社, 1993.
- 7) 浅井富雄, 内田英治, 河村 武: 気象の事典, 平凡社, 1993.

(1996. 5. 22受付)

PROPOSAL OF AMBIENT TEMPERATURE MODEL FOR THERMAL STRESS ANALYSIS OF MASS CONCRETE STRUCTURE

Hideaki NAKAMURA, Kanae OGATA, Toshio TANIMOTO
and Sumio HAMADA

A thermal analysis needs to be carried out first of all, to request a thermal stress of mass concrete. There is an ambient temperature, as an analysis condition needed for a thermal analysis. The model that shows an ambient temperature of the whole country simply is nonexistent. Therefore there are many cases an ambient temperature is given with the average temperature generally. It is many even in the case that day fluctuation of an ambient temperature influences cracking, it depends in an area, a season.

This study announces the influence that day fluctuation of an ambient temperature exerts to a thermal stress.