

コンクリート構造物の温度ひびわれ予測に関する研究

STUDY ON THE ESTIMATION OF THERMAL CRACKING
IN CONCRETE STRUCTURES

森本博昭*・小柳 洽**

By Hiroaki MORIMOTO and Wataru KOYANAGI

1. 概 説

マシブなコンクリート構造物の設計、施工にあたっては、事前に温度ひびわれ発生の危険性について十分検討を行い、ひびわれ発生の危険性が大きいと判断されたときには、それに対して適切な対策を計画する必要がある。温度ひびわれ発生の有無について検討を行う場合、まず打設後のコンクリートの温度上昇を推定することが基本となる。そして、この温度上昇推定結果に適切な解析手法を用いてコンクリートに発生する温度応力および温度ひずみなどを算出し、これをもとに温度ひびわれ発生の危険性の大小を判断することになるが、この際の判断規準としては従来から2種類のものが提案されている。すなわち1つは〈温度応力とコンクリートの強度の大小関係〉であり、温度応力が引張強度を上回ればひびわれ発生の危険性が大きいと判断するものである。他の1つは、〈温度ひずみとコンクリートのひずみ能力の大小関係〉であり、温度ひずみが引張ひずみ能力¹⁾(Tensile Strain Capacity)を上回ればひびわれ発生の危険性が大きいと判断するものであるが、完全弾性体ではないコンクリートのひびわれ発生条件としては応力と強度に着目するものより合理的であると考えられ、これを温度ひびわれ発生条件と規定する報文も多い²⁾。しかし配合、硬化度および載荷速度などにより変化するコンクリートの引張ひずみ能力を定量化することの困難さのため、実際の構造物についてこの規準によって具体的にひびわれ発生予測を行った例はほとんど見受けることができず、過去における温度ひびわれ発生予測例の大部分はそのひびわれ発生規準として応力と強度に着目するものを採用している³⁾。しかしコンクリート構造物における温度ひ

びわれの発生メカニズムを究明し精度のよい温度ひびわれ発生予測法を確立するためには、応力と強度による規準にあわせてひずみとひずみ能力による規準にも着目し、これらにより実構造物についての温度ひびわれ発生予測実験を数多く実施し、予測結果と観測結果との適合性についての検討を行うことによりこれに関する資料を蓄積してゆく必要があるものと考えられる。

本研究は温度ひびわれ発生予測法の確立を目的とし、特に温度ひびわれ発生規準について検討を行ったものである。すなわち本研究では温度測定あるいはひびわれ観察実験が行われた1, 2のコンクリート構造物について温度ひびわれ発生規準に従来から広く用いられている応力と強度によるもののほかに、ひずみとひずみ能力に着目するものも用いこれら2つのケースについて温度ひびわれ発生予測を実施し、ひびわれ発生規準が異なる2つの予測結果の相違点および観察結果との適合性などについて検討を行う。さらに本研究では温度応力解析を2次元と3次元の有限要素法および簡易解析法などの各手法により実施し、各解析結果の比較および予測結果に与える影響などについても検討を行った。

2. ひびわれ発生規準と引張ひずみ能力

前述のように現在提案されている温度ひびわれ発生規準には、応力と強度に着目するものとひずみとひずみ能力に着目するものの2つがある。ここでは本研究で用いた2つの温度ひびわれ発生規準におけるひびわれ条件式の誘導を行う。

(1) 応力と強度によるひびわれ発生規準

コンクリート構造物において、いま着目している部分の材令 τ における主引張応力とそれに対する引張強度をそれぞれ $\sigma_p(\tau)$, $\sigma_t(\tau)$ とすれば、ひびわれが発生する条

* 正会員 工修 岐阜大学助教授 工業短期大学部

** 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部

件は一般に次式で表わされる。

$$\sigma_p(\tau) \geq \sigma_t(\tau) \dots\dots\dots (1)$$

さて、上式をひびわれ条件式として用いるためには任意材令における構造物各部分のコンクリートの引張強度 $\sigma_t(\tau)$ を算定する必要がある。一般にコンクリートの強度はその材令によって評価されることが多いが、マシンブなコンクリート構造物ではコンクリート打設以後の温度上昇によりコンクリートの硬化が進行し、その結果同一材令であっても各部分の強度など力学的性質に差異が生じるものと考えられる。したがってマスコンクリートの強度を単なる材令で評価するよりも、硬化度すなわちマチュリティーあるいは有効材令を用いた方がその位置的変動も考慮できる点で優れていると考えられる。一般にマチュリティーと有効材令は次のように定義されている^{4),12)}

$$M = \sum (T+10) \cdot \Delta t \dots\dots\dots (2)$$

$$\tau' = \sum (T+10) \cdot \Delta t / 30 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 M : マチュリティー (°C・h)

τ' : 有効材令 (h)

T : コンクリート温度 (°C)

Δt : コンクリート温度が T である時間 (h)

本研究では温度ひびわれ発生の判定に必要なコンクリートの引張強度 $\sigma_t(\tau)$ を有効材令 τ' の関数としてとらえ、ある着目点の材令 τ における有効材令 τ' を用いてその部分の引張強度を算定した。この際の引張強度評価式は岡田らの研究⁹⁾を参考にして誘導した次式を用いた⁵⁾。

$$\sigma_t(\tau) / \sigma_t(28) = 1.29 \log_{10} \tau' + 0.26 \quad (0.7 \leq \tau' \leq 1.4 \text{ の場合}) \dots\dots (4\cdot a)$$

$$\sigma_t(\tau) / \sigma_t(28) = 0.45 \log_{10} \tau' + 0.36 \quad (1.4 \leq \tau' \leq 41 \text{ の場合}) \dots\dots (4\cdot b)$$

ここで、 τ' : 材令 τ における有効材令 (day)

$\sigma_t(28)$: 標準養生下、材令 28 日における引張強度

(2) ひずみとひずみ能力によるひびわれ規準

温度ひずみとコンクリートのひずみ能力によるひびわれ条件式は一般に次式で表わされる。

$$\varepsilon_p(\tau) \geq \varepsilon_t(\tau) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $\varepsilon_p(\tau)$: 着目している部分の材令 τ における引張主ひずみ

$\varepsilon_t(\tau)$: 着目している部分の材令 τ における引張ひずみ能力

さて、式 (5) を用いて温度ひびわれ発生の有無を予測するためには、材令 τ における構造物各部分のコンクリート引張ひずみ能力を算定することが必要となる。コンクリートの引張ひずみ能力については過去にいくつかの研

究が報告されている⁶⁾⁻¹⁰⁾が、これらによると引張ひずみ能力は約 30~400 μ の範囲にあり、配合、材令、載荷条件により大きく変動する。一方、Houghton¹¹⁾ あるいは Liu¹¹⁾ らはそれぞれ任意の材令における緩速および急速載荷時のコンクリートの引張ひずみ能力の評価式を次のように提案している。すなわち、コンクリートの引張ひずみ能力を弾性ひずみとクリープひずみの 2 成分から成るものと考えて、ひずみ能力を $\varepsilon_t(\tau)$ 、弾性ひずみ成分を $\varepsilon_e(\tau)$ 、クリープひずみ成分を $\varepsilon_c(\tau)$ とすれば次式が成り立つ。

$$\varepsilon_t(\tau) = \varepsilon_e(\tau) + \varepsilon_c(\tau) \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 τ : 材令

さて上式におけるひずみ各成分の評価式として、たとえば Houghton は次式を提案している。

$$\varepsilon_e(\tau) = f(\tau) / E(\tau) \dots\dots\dots (7)$$

$$\varepsilon_c(\tau) = (f(\tau_0) + f(\tau)) \cdot \varepsilon(\tau, \tau_0) / 2 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 τ_0 : 載荷時の材令

$f(\tau)$: 曲げ強度

$E(\tau)$: 圧縮弾性係数

$\varepsilon(\tau, \tau_0)$: 載荷時の材令 τ_0 の材令 τ における単位クリープひずみ

一方、Liu らは $\varepsilon_e(\tau)$ 、 $\varepsilon_c(\tau)$ の評価式としてより簡略化した実験式を提案している。これらに対して本研究では材令 τ におけるコンクリートの引張ひずみ能力の算定式として曲げ強度と引張強度をもととする次に示す 2 つの式を用いることとした。

すなわち

$$\varepsilon_t(\tau) = \sigma_B(\tau') / E(\tau') + \sum_{i=1}^k \Delta \sigma_B(i) / E(28) \cdot \varphi(\tau', \tau'_i) \dots\dots\dots (9\cdot a)$$

および

$$\varepsilon_t(\tau) = \sigma_t(\tau') / E(\tau') + \sum_{i=1}^k \Delta \sigma_t(i) / E(28) \cdot \varphi(\tau', \tau'_i) \dots\dots\dots (9\cdot b)$$

ここで、 $\sigma_B(\tau')$ 、 $\sigma_t(\tau')$: 有効材令 τ' における曲げおよび引張強度

$E(28)$: 材令 28 日における圧縮弾性係数

$\Delta \sigma_B(i)$ 、 $\Delta \sigma_t(i)$: 期間 $\tau_{i-1} \sim \tau_i$ における曲げおよび引張強度の増分

$\varphi(\tau', \tau'_i)$: 載荷時有効材令 τ'_i の有効材令 τ' におけるクリープ係数

式中のクリープ係数 $\varphi(\tau', \tau'_i)$ には CEB-FIP コード¹²⁾ における提案式を用いた。コードによれば、クリープ係数は次式によって与えられる。

$$\varphi(\tau', \tau'_0) = \beta_a(\tau'_0) + \varphi_a \beta_a(\tau' - \tau'_0) + \varphi_f [\beta_f(\tau') - \beta_f(\tau'_0)] \dots\dots\dots (10)$$

式 (10) における各関数と係数はコードでは図表によっ

て与えられているが、本研究では解析に便利のように文献 4) の研究を参考にし、かつコードで与えられている図表の値に最小二乗法を適用して、次に示すような β_a , β_b および β_f の算定式を導き出した⁵⁾。

$$\beta_a(\tau'_0) = 0.8(0.88 - 0.70 \log_{10} \tau'_0) \quad (0.7 \leq \tau'_0 \leq 1.4 \text{ の場合}) \cdots \cdots (11 \cdot a)$$

$$\beta_a(\tau'_0) = 0.8(0.83 - 0.35 \log_{10} \tau'_0) \quad (1.4 \leq \tau'_0 \leq 41 \text{ の場合}) \cdots \cdots (11 \cdot b)$$

$$\beta_a(\tau'_1) = 0.2915 + 0.0680 \log_{10} \tau'_1 + 0.0552(\log_{10} \tau'_1)^2 + 0.0207(\log_{10} \tau'_1)^3 - 0.0070(\log_{10} \tau'_1)^4 \cdots \cdots (12)$$

ただし、 $\tau'_1 = \tau' - \tau'_0$

$$\beta_f(\tau') = 0.0955 - 0.1877(\log_{10} \tau') + 0.7093(\log_{10} \tau')^2 - 0.6435(\log_{10} \tau')^3 + 0.2698(\log_{10} \tau')^4 - 0.0508(\log_{10} \tau')^5 + 0.0035(\log_{10} \tau')^6 \quad (\tau' \geq 3 \text{ の場合}) \cdots \cdots (13 \cdot a)$$

$$\beta_f(\tau') = 0.0368\tau' \quad (\tau' \leq 3 \text{ の場合}) \cdots \cdots (13 \cdot b)$$

ここで、 τ' : 着目する時点における有効材分 (day)

τ'_0 : 載荷時の有効材令 (day)

また、係数 φ_a , φ_f については本研究ではコードを参考にして $\varphi_a = 0.4$, $\varphi_f = 1.12$ に設定した。

さて、式 (8) の Houghton の提案式は引張域に対してクリープひずみに関する線形則、Davis-Granville の法則を破壊応力のレベルまで拡張したものとみられる。一方、本研究における提案式 (9・a, b) も基本的な考え方は同様であるが、材令の進行に伴う強度とクリープ係数の変化をより詳細に考慮できるように、クリープひずみについて重ね合せの原理を適用して Houghton 式に修正を加えたものである。そして両式のうち式 (9・a) は引張ひずみ能力算定の基礎となるコンクリート強度に Houghton 式と同様曲げ強度を、一方式 (9・b) は引張強度を用いたものである。なお各材令における曲げ強度の算定にあたっては圧縮強度から推定する方法をとり、その際の変換式は次の CEB 提案式¹³⁾を用いた。

$$\sigma_B = 0.789\sqrt{\sigma_c} \cdots \cdots (14)$$

ここで、 σ_B : 曲げ強度 (MPa)

σ_c : 圧縮強度 (MPa)

また、式 (9) 中における弾性係数 $E(\tau')$ および式 (14) 中の圧縮強度 σ_c の評価は式 (4) の引張強度算定式と同様にして導いたものを用いた^{4), 5)}。

すなわち

$$E(\tau')/E(28) = 1.55 \log_{10} \tau' + 0.48 \quad (0.7 < \tau' \leq 1.4 \text{ の場合}) \cdots \cdots (15 \cdot a)$$

$$E(\tau')/E(28) = 0.21 \log_{10} \tau' + 0.68 \quad (1.4 \leq \tau' \leq 41 \text{ の場合}) \cdots \cdots (15 \cdot b)$$

および

$$\sigma_c(\tau')/\sigma_c(28) = 1.01 \log_{10} \tau' + 0.17 \quad (0.7 < \tau' \leq 1.4 \text{ の場合}) \cdots \cdots (16 \cdot a)$$

$$\sigma_c(\tau')/\sigma_c(28) = 0.51 \log_{10} \tau' + 0.24 \quad (1.4 \leq \tau' \leq 41 \text{ の場合}) \cdots \cdots (16 \cdot b)$$

ここで、 τ' : 材令 τ における有効材令 (day)

$\sigma_c(28)$: 標準養生下、材令 28 日における圧縮強度

3. 温度応力解析手法

本研究ではコンクリート構造物の熱伝導解析には 3 次元有限要素法を適用し、一方クリープ解析を含む温度応力解析に対しては 3 次元と 2 次元の有限要素法および 1 次元簡易解析法の計 3 種類の手法を用いた。熱伝導問題と温度応力問題に対する有限要素法の適用方法は他の文献¹⁴⁾を参照されたい。温度応力解析におけるクリープ解析には、各要素のクリープひずみを初期ひずみとみなしクリープによる各要素の応力およびひずみの補正量を算出してゆく、いわゆる初期ひずみ法を用いた。一方、温度応力に対する簡易解析法には、コンクリートの温度分布が一次的に変化する場合の内部拘束による温度応力の算定式を用いた¹⁵⁾。すなわち

$$(\sigma_x)_{\tau, \max} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha_c E_c(\tau)}{(1-\nu)} \cdot \Delta T_{\tau, \max} \cdots \cdots (17)$$

ここで、 $(\sigma_x)_{\tau, \max}$: 材令 τ における表面部温度応力

α_c : 線膨張係数

$E_c(\tau)$: 材令 τ における有効弾性係数

ν : ポアソン比

$\Delta T_{\tau, \max}$: 材令 τ における内部最大温度と表面温度との差

本研究では式 (17) により温度応力を算定するにあたりコンクリートの有効弾性係数を弾性係数の 0.63 倍³⁾と考え、また各タイムステップにおける $\Delta T_{\tau, \max}$ と $E_c(\tau)$ とからその期間における温度応力の増分 $\Delta(\sigma_x)_{\tau, \max}$ を算出しそれらを累積してゆく、いわゆる増分解法を用いている。さて熱伝導および温度応力問題に対する 3 次元の有限要素解析で用いる要素として本研究では図-1 に示すような 8 節点 6 面体複合要素を用いた。8 節点 6 面体複合要素は図に示すように単純な 4 節点 4 面体要素を組み合わせ得られるもので、その特性が 4 面体要素の特性を用いて容易に求められる点で非常に実用的価値が高い。本研究では相異なる 2 種類の 6 面体分割法から得られる計 10

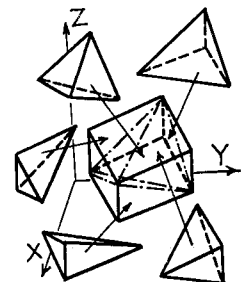


図-1 6面体複合要素

個の4面体要素の特性を平均化して6面体要素の特性を評価している。また2次元有限要素解析においても、2次元要素の中で最も基本的な3節点3角形要素を合成して得られる4節点4角形複合要素を用いた。

4. 温度ひびわれ発生予測

(1) 解析対象構造物

本研究で解析対象としたコンクリート構造物は実際に

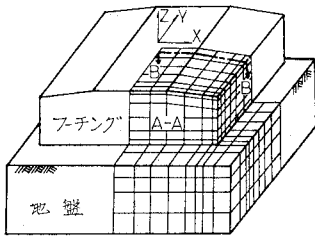


図-2 橋脚フーチング

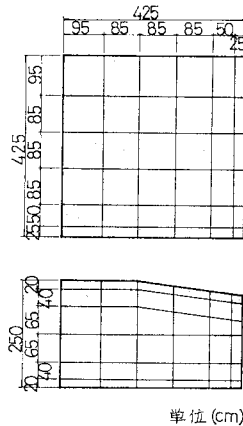


図-3 フーチング寸法

表-1 コンクリート示方配合

スランパ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
8	58	45	162	280	813	1 027

表-2 コンクリートの力学的性質 (材令 28 日)

圧 縮 強 度	kg/cm ² (MPa)	242 (23.7)
引 張 強 度	kg/cm ² (MPa)	20.7 (2.02)
弾 性 係 数	kg/cm ² (GPa)	2.52×10 ⁵ (24.7)

時の温度は夏施工の場合が 29°C、冬施工では 11°C であった。また型枠の材質は 12mm 厚のベニヤ合板であり、型枠の脱型時期は夏施工のものが材令 6 日、冬施工

では材令 4 日であった。

(2) 解析方法

a) 座標系および要素分割

熱伝導および温度応力解析を行うにあたり 図-2 に示すような座標系を設定するとともに、3次元有限要素法を適用するため解析対象区域を6面体要素によりモデル化を行った。図-2~3 に要素分割を示す。この場合の総節点数と総要素数は 699 節点の 472 要素となる。

b) 熱伝導解析

有限要素法による熱伝導解析は 図-2 に示すように地盤も含めた部分について実施した。解析にあたりコンクリート、型枠および地表面は自由境界面とした。境界面における熱伝達率は表面の材質、風速などにより大きく変化するが、一般には 5.0~15.0 kcal/m²h°C (5.8~17.4 W/m²°C) 程度の値が用いられるが、本研究では熱伝達率の実測例¹⁹⁾を参考にしてコンクリートと地表面では 10.0 kcal/m²h°C (11.6 W/m²°C)、また型枠表面では型枠の材質と厚さを考慮して¹⁹⁾ 8.7 kcal/m²h°C (10.1 W/m²°C) とした。一方、地盤の底面は固定温度境界面とし、底面における温度は夏の場合は 14°C、冬では 11°C とした。またその他の境界面はすべて断熱境界面と考えた。コンクリートと地盤の初期温度はコンクリート部分については打設温度と同一とし、地盤については地表面の温度をコンクリート打設時の気温に等しいと仮定し、地盤底面と地表面との間の地盤温度は直線的に変化するとして、地盤中各深さの初期温度を求めた。解析に用いるコンクリートおよび地盤の熱的性質のうち熱伝導率と比熱については著者らの研究²⁰⁾により、それぞれ平均的な値を用いればこれらの値の変動に起因する推定誤差は 2°C 以下におさまることが明らかにされている。したがって本研究においてもこのような考えのもとコンクリートと熱伝導率の値を決定した。またコンクリートの断熱温度上昇特性は今までに報告されている研究成果^{21), 22)}をもとに、単位セメント量と打設温度により決定した。熱伝導解析で用いたおもな解析用諸定数を 表-3 に示す。

表-3 解析用諸定数

コンクリート断熱温度上昇 °C	$T = 35.9(1 - e^{-0.078 2t})$ (夏施工 t: h) $T = 38.1(1 - e^{-0.028 8t})$ (冬施工 t: h)
コンクリート熱伝導率 kcal/mh°C (W/m°C)	2.16 (2.51)
コンクリート比熱 kcal/kg°C (J/kg°C)	0.24 (1 000)
表面の熱伝達率 kcal/m ² h°C (W/m ² °C)	10.0 (11.6) <コンクリート面> 8.7 (10.1) <型枠面>
コンクリート打設温度 °C	29 <夏施工> 11 <冬施工>

c) 温度応力解析

フーチングについての温度応力解析は地盤を除いた本体部分のみについて実施した。この際フーチングの底面は無拘束状態を仮定した。2次元解析ではフーチングの中心鉛直面において平面ひずみ状態を仮定し実施した。2次元および3次元解析ではコンクリートの自重を考慮した。その際のコンクリートの単位容積重量は、2300 kg/m³とした。一方、1次元簡易解法では中心部と表面部との温度差の各ステップにおける増分を用いて実施した。有限要素法により温度応力解析を実施するにあたり、解析において用いるコンクリートの弾性係数とクリープ特性は有効材令の関数と考えた。有限材令によるクリープ特性と弾性係数の評価式は前出の式(10~13)および式(15)を用いた。一方、1次元解析で用いる弾性係数も同様の評価式によったが、この場合は単なる材令を用いて弾性係数を算定した。ポアソン比は0.16とし、またクリープ解析におけるクリープポアソン比も弾性ひずみに対するものと同じ値0.16に仮定した。コンクリートの熱膨張係数は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (一定)とした。

5. 実験および解析結果と考察

(1) 現場実験結果

2基のフーチングについて温度測定実験と打設後の温度ひびわれについての観測を実施した^{(6),(7)}。コンクリート打設後の中心部におけるコンクリート打設温度からの温度上昇実測値と中心部および側面部の温度上昇計算値をあわせて、夏施工のものは図-4に、また冬施工の

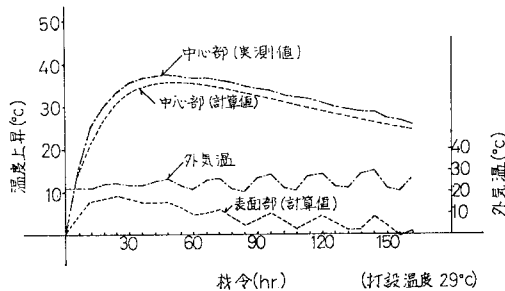


図-4 夏施工フーチング温度上昇

ものは図-5にそれぞれ示す。これらの図から、夏施工フーチングの中心部の温度上昇実測値は材令2日で38°Cとなり最大値を示す。一方、冬施工の中心部温度上昇は材令4日で最大となりその値は36°Cであった。このことよりフーチング中心部の温度上昇のピーク値は冬施工の場合、夏施工に比べて2°C低く、時間的に2日程度遅れることがわかる。しかし中心部と側面部との

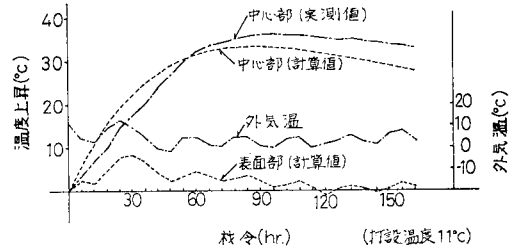


図-5 冬施工フーチング温度上昇

最大温度差は計算によれば冬施工が32°C、一方夏施工が30°C程度となり約2°C冬施工の方が大きくなる。また夏施工の場合、温度差の増加率が早期材令において特に大きい。

次にフーチング2基についての温度ひびわれ観測の結果、夏施工のものには温度ひびわれの発生は認められなかった。しかし冬施工のフーチングには型枠脱型時(材令6日)に上面と側面の中央部においてひびわれの発生が認められ、発見時のひびわれ幅は最大0.2mm程度であった。その後約1か月間の調査によれば、ひびわれの進展および幅の拡大は認められなかった。

(2) 温度応力解析結果

フーチングの温度応力解析結果を示すにあたり本研究では特に2つの断面に注目した。その1つはフーチング側面でありこれをA-A面とし、他の一つは中心鉛直断面でこれをB-B断面とよぶ。これらの位置を図-2に示す。さて温度ひびわれの発生した冬施工フーチングについての解析結果のうち、表面上の引張応力が最大となる材令4.5日におけるA-A面およびB-B断面上の3次元解析による応力分布を図-6~7に示す。また図-7には2次元解析結果もあわせて示す。図-6より側面には水平方向と鉛直方向に引張応力 σ_x , σ_z が発生するが、水平方向引張応力 σ_x が支配的であり、 σ_x はフーチングの高さ方向にほぼ均一に発生することがわかる。図-7より中心鉛直断面においても水平方向の直応

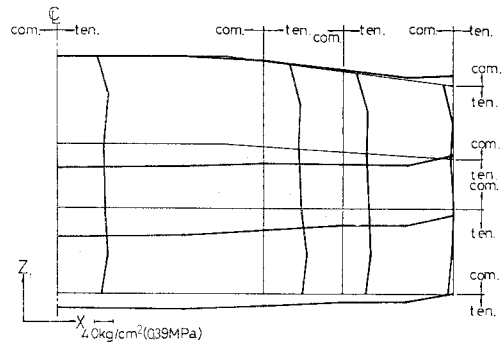


図-6 側面(A-A面)応力分布

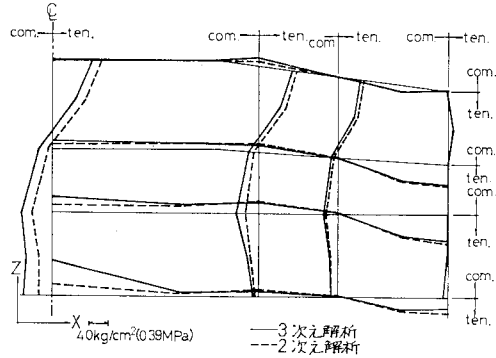


図-7 中心鉛直断面 (B-B 断面) 応力分布

力 σ_x が支配的であり表面部では引張応力となり中心部では圧縮応力に変化する。また 図-7 において 3 次元解析結果と 2 次元解析結果を比較すると、両者は傾向的にはほぼ合致するが全般的に 2 次元解析の方が 3 次元解析よりやや大きな応力算定結果を与え、たとえば上面の引張応力 σ_x は 2 次元解析によるものの方が 2 kg/cm^2 (0.2 MPa) 程度大きい。図-8, 9 に冬施工フーチングの

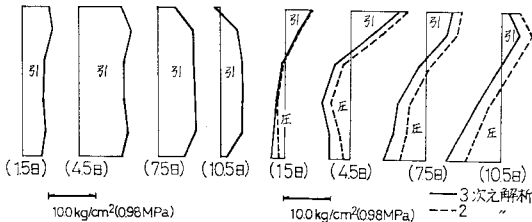


図-8 側面直応力 (σ_z) 経時変化

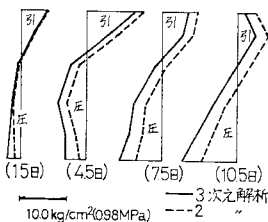


図-9 中心鉛直断面直応力 (σ_x) 経時変化

A-A 面および B-B 断面の中央鉛直軸における直応力 σ_x の経時変化を示す。まず 図-8 より側面部の引張応力は高さ方向にほぼ一様に発生するが底面および上面からやや中央部よりの位置に最大引張応力が発生する。また材令 4.5 日前後で引張応力は最大となり、以後材令の進行に伴い徐々に減少してゆくが中央部に比べて底面および上面において引張応力の減少割合が大きく、材令 10.5 日になると上面では圧縮応力に変化する。

次に 図-9 から中心鉛直断面における直応力 σ_x は上面では引張応力、底面では圧縮応力となり、上面の引張応力は材令 4.5 日前後で最大となり以後徐々に減少してゆくが、一方底面の圧縮応力は材令の進行に伴い徐々に増大してゆく。また 図-9 において 3 次元解析結果と 2 次元解析結果を比較すると 2 次元解析の方が 3 次元解析に比べやや大きな応力算定結果を与えるが全期間を通じて傾向的にはほぼ合致している。

一方、夏施工のフーチングについての温度応力については上で述べたような冬施工フーチングにおけるものと

傾向的にはほぼ合致した。また 2 基のフーチングにおける温度応力のうち、せん断応力は直応力に比べてかなり小さく大部分が 1 kg/cm^2 (0.1 MPa) 以下である。表面付近での主応力と主ひずみは大きき、方向ともそれぞれ直応力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ および縦ひずみ $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ とほぼ等しくなる。図-10 に冬施工フーチングの材令 4.5 日に

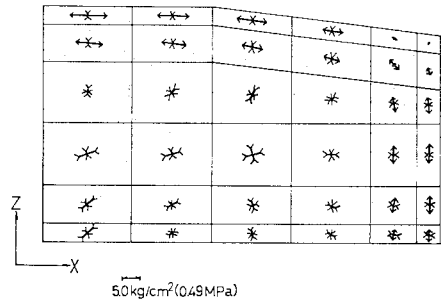


図-10 中心鉛直断面 (B-B 断面) 主応力分布

における、B-B 断面上の主応力についての 2 次元解析結果を示す。図より中心鉛直断面では上面において水平方向に 10.8 kg/cm^2 (1.06 MPa) 程度の最大主応力が生じるが、中心部に向かうに伴いそれらは急激に減少することがわかる。なお 3 次元解析による主応力分布も 2 次元解析によるものと傾向的には合致する。3 次元解析による冬施工フーチング上面の材令 4.5 日における水平方向の最大主応力は 9.0 kg/cm^2 (0.88 MPa) 程度である。また各断面における最大主ひずみの方向は傾向的に最大主応力と合致しており、冬施工フーチングの材令 4.5 日における B-B 断面の上面での水平方向の最大主ひずみは 2 次元解析の場合 195×10^{-6} 、一方 3 次元解析では 143×10^{-6} である。なお本研究では主ひずみの算定にあたって、弾性拘束ひずみにクリープひずみを加えたひずみ量について計算を行っている。図-11 に冬施工フーチングについての 1 次元簡易解法による表面引張応力と 2 次元解析による上面の最大主応力および 3 次元解析による B-B 断面上面と A-A 面上部の最大主応力の各経時変化を示す。また 図-12 に各解法による同じ位置における最大主ひずみの経時変化を示す。同様に 図-13, 14

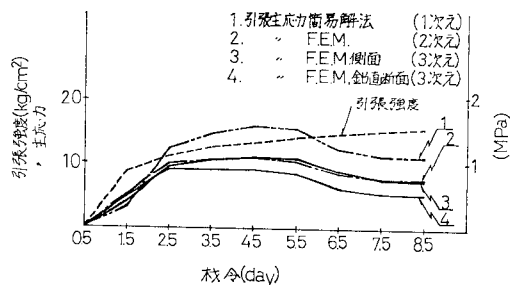


図-11 最大主応力と引張強度 (冬施工)

に夏施工フーチングについての各解法による最大主応力と主ひずみの各経時変化を示す。各図には温度ひびわれ発生予測を行う際に必要となるコンクリートの引張強度と引張ひずみ能力もあわせて示してあるが、これらについては次節において述べる。なお簡易解法による引張ひずみの算定にあたっては次のように考えた。簡易解法では引張応力の算定にあたり式(17)に示すようにクリープの影響を考慮しコンクリートの有効弾性係数を用い、その値を前述のように弾性係数 E の0.63倍と考えている。いま材令 τ における弾性ひずみに対するクリープ係数を ϕ_τ とすれば次式が成立する。

$$E_e = 0.63 \cdot E = E / (1 + \phi_\tau) \dots\dots\dots(18)$$

したがって $\phi_\tau = 0.59$ (一定) となり、材令 τ におけるク

リーブひずみを含めたコンクリートの引張ひずみ ϵ は、弾性ひずみを ϵ_e 、クリープひずみを ϵ_c として次式より算出できる。

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_c = \epsilon_e + 0.59 \cdot \epsilon_e = 1.59 \cdot \epsilon_e \dots\dots\dots(19)$$

さて各図においてまず3次元解析結果に注目すると、図-11 から冬施工フーチングの中心鉛直断面上面と側面上部の最大主応力は材令4~5日、すなわち中心部の温度上昇が最大となる時期に最も大きくなりその値はそれぞれ 9.0 kg/cm^2 (0.88 MPa) および 11.0 kg/cm^2 (1.08 MPa) 程度である。図-12 より最大主ひずみの経時変化も主応力とほぼ同様の傾向を示し、中心鉛直断面上面および側面上部でそれぞれ 143×10^{-6} および 195×10^{-6} となり最大値を示す。一方、図-13, 14 から夏施工フーチングにおいても最大主応力と最大主ひずみは中心部の温度上昇が最大となる、材令2~3日においてともに最大値を示しその値は中心鉛直断面上面で 5.9 kg/cm^2 (0.58 MPa) および 97×10^{-6} 、また側面上部では 6.3 kg/cm^2 (0.62 MPa) および 143×10^{-6} である。図-11~14 において2基のフーチングにおける温度応力を比較すると図から明らかなように応力、ひずみとも全般的に冬施工の方が大きな値を示し、たとえば最大主応力の最大値は冬施工が夏施工の1.7倍程度となる。すなわち冬施工の方が夏施工のものより温度ひびわれの危険性が大きくなる。冬施工フーチングにおいて、より大きな温度応力が発生する原因として、フーチングに発生する温度応力は内部拘束によるものが支配的となるが、この内部拘束による温度応力の発生原因となるフーチング内部と表面部との温度差の増加率が、夏施工フーチングではコンクリートの弾性係数が小さくかつクリープ量の大きい早期材令期間中に大きいことが考えられる。

次に3次元解析結果のうち中心鉛直断面上面と側面上部における最大主応力および最大主ひずみを比較すると、図-11~14 から明らかなように主応力および主ひずみとも、側面上部の方が大きく、たとえば冬施工フーチングでは材令4.5日において最大主応力で 2 kg/cm^2 (0.2 MPa)、また最大主ひずみでは 50×10^{-6} 程度それぞれ側面上部の方が大きくなる。したがってフーチングの中心鉛直断面上面より側面上部の方が温度ひびわれの危険性が高いと考えられる。このように3次元解析では構造物全体の応力およびひずみの状態を把握することが可能であり、ある特定の断面についてのみ解析を行う1次元あるいは2次元解析に比べて、より詳細に温度応力の発生機構および温度ひびわれの発生について検討を行うことができる。次に3次元解析、2次元解析および1次元簡易解法の各解法による最大主応力と主ひずみを比較すると、図-11~14 から3解法によるこれらの値はその大きさにおいて差異は認められるが傾向的にはほぼ合

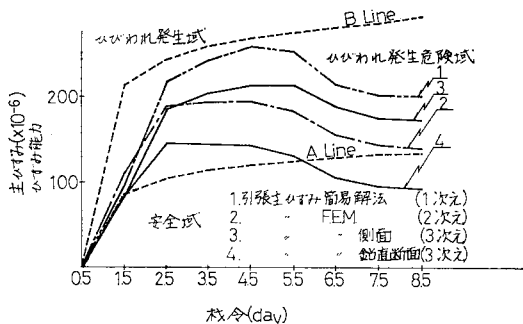


図-12 最大主ひずみと引張ひずみ能力 (冬施工)

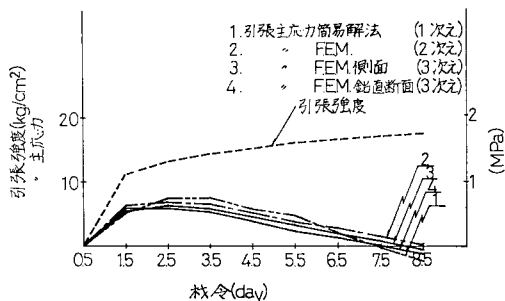


図-13 最大主応力と引張強度 (夏施工)

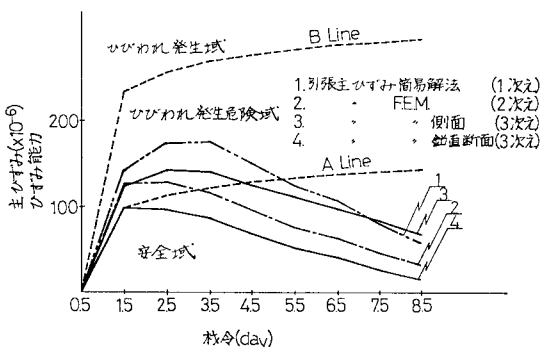


図-14 最大主ひずみと引張ひずみ能力 (夏施工)

致している。まず図—11, 13 から最大主応力については簡易解法によるものが最も大きく、次いで2次元解析, 3次元解析の順となっている。各解法による差異は夏施工より冬施工フーチングにおける方が大きく、材令4~5日における簡易解法による表面の最大主応力は 15.8 kg/cm^2 (1.54 MPa)、2次元解析による中心鉛直断面上面の最大主応力は 10.9 kg/cm^2 (1.07 MPa) であるのに対し3次元解析による中心鉛直断面上面の最大主応力は 9.0 kg/cm^2 (1.08 MPa)、また側面上部では 11.0 kg/cm^2 (1.08 MPa) となる。すなわち1次元あるいは2次元解析を行った断面（中心鉛直断面）についての3次元解析結果は簡易解法および2次元解析に比べ最大主応力がそれぞれ 7 kg/cm^2 (0.7 MPa) および 2 kg/cm^2 (0.2 MPa) 程度小さくなる。

次に図—12, 14 において各解法による最大主ひずみを比較すると各解法による差異は主応力の場合と同様な傾向を示し、夏施工より冬施工のフーチングにおいて各解法による主ひずみの差異が顕著であり、中心鉛直断面上面では3次元解析に比べ簡易解法では 116×10^{-6} 、また2次元解析では 50×10^{-6} 程度それぞれ大きな値となる。しかし3次元解析による側面上部の主ひずみは2次元解析による中心鉛直断面上面の主ひずみより大きな値となっている。以上のように本研究で2基のフーチングについての温度応力解析を行った結果、1次元簡易解法および2次元解析は同一断面における3次元解析に比べると、最大主応力および最大主ひずみにおいて簡易解法では 7 kg/cm^2 (0.7 MPa) および 116×10^{-6} 、また2次元解析では 2 kg/cm^2 (0.2 MPa) および 50×10^{-6} 程度大きな値を与えるが傾向的にはほぼ合致したものが得られる。しかし3次元解析により、簡易解法および2次元解析では解析することが困難な位置、すなわち側面上部において、より大きな温度応力の発生することが明らかとなった。

(3) 温度ひびわれ予測結果

図—13, 14 に示す夏施工フーチングに対する各解法の解析結果のうち、3次元解析による側面上部における最大主応力および最大主ひずみと図中に示したコンクリートの引張強度および引張ひずみ能力をそれぞれ比較すると、図—13 よりコンクリートの引張強度は常に引張主応力を上回っており、両者が最も接近する材令2~3日においても最大主応力は 6 kg/cm^2 (0.6 MPa) 程度であり引張強度の1/2以下にすぎない。したがって最大主応力と引張強度との大小関係からひびわれ発生の有無を判断すれば、その危険性は低いと判定される。次に図—14 において、まずコンクリートの引張ひずみ能力に注目すると曲げ強度を用い式(9・a)から算出した値は、引

張強度を用い式(9・b)から算出した値の2倍近くになることがわかる。本研究では式(9・a)をB Line, 式(9・b)をA Line とよぶことにしA Line とB Line に囲まれた領域をひびわれ発生危険域, B Line 以上をひびわれ発生域, またA Line 以下を安全域と定義しひびわれ発生の検討を行った。さて図よりコンクリートの最大主ひずみは材令0.5~4.5日においてひびわれ発生危険域にあるものの、そのかなり下方に位置しA Line との差は 30×10^{-6} 程度にすぎない。したがって図をもとに最大主ひずみと引張ひずみ能力の大小関係からひびわれ発生の有無を判断すれば、ひびわれ発生の危険性は低いと判定される。なお前述のようにひびわれ観察の結果、夏施工のフーチングには温度ひびわれの発生は認められなかった。次に冬施工フーチングについても3次元解析による側面上部の応力とひずみに注目すると、図—11 から最大主応力は引張強度を上回ることはないが材令2~5日において両者はかなり接近し、その差は 2 kg/cm^2 (0.2 MPa) 程度となる。したがってこの場合は温度ひびわれの危険性は高いと判断される。さらに図—12 において最大主ひずみと引張ひずみ能力を比較すると、引張主ひずみは材令1~8日の期間中常にひびわれ発生危険域にあり、特に材令2~5日においてB Line との差は 60×10^{-6} 程度となりひびわれ危険域の上方に位置する。したがってこれに着目すれば温度ひびわれの危険性は高いと判断される。一方実際に施工された構造物には前述のように、材令6日の型枠脱型時に温度ひびわれの発生が認められた。さて以上の温度ひびわれ予測は3次元解析結果を用いて行ったものであるが、図—11~14 から明らかなように1次元簡易解法および2次元解析による予測は3次元解析に比べて着目点と最大主応力および最大主ひずみの計算結果に差異はあるものの、3次元解析とほぼ同様の結果が得られる。しかし簡易解法および2次元解析による温度ひびわれ予測の着目点は、構造物の種類によっては本研究のように構造物全体の中で温度応力およびひずみが最も大きくなる箇所とは必ずしも一致しなくなるという点に注意が必要である。以上のように本研究で対象とした2基のフーチングについては、引張強度による予測と引張ひずみ能力による予測の両方ともひびわれ観察結果と合致する結果を与えることが明らかとなった。特にひずみ能力による予測において、コンクリートの引張ひずみ能力を式(9・a, b)で算定し、これらを用いてひびわれ発生域, ひびわれ発生危険域および安全域などを定義しひびわれ予測を行った結果、本研究の範囲内ではその妥当性がほぼ確認された。また2つの予測結果を比較すると引張ひずみ能力による予測の方が引張強度によるものより温度ひびわれの危険性が大きくなるような評価をする傾向にあった。引張ひずみ能力に

よる温度ひびわれ発生予測手法を確立するためにはさらに多くの実測資料と解析例の蓄積が必要であるものの、本研究の結果からコンクリート構造物の温度ひびわれ発生予測の精度あるいは信頼度を高めるためには引張強度のみならず引張ひずみ能力にも着目し、この両者から温度ひびわれ発生の危険性に対して検討を行うことが有用であると考えられる。

6. ま と め

本研究はコンクリート構造物における温度ひびわれ発生予測法の確立を目的とし、温度ひびわれの発生規準に現在多く用いられている引張強度に着目するもののほかに引張ひずみ能力に着目したひびわれ条件式を誘導し、これら2つのひびわれ発生規準を用いて施工時期の異なる2基のフーチングについて温度ひびわれ予測を実施し、これらとひびわれ観察結果との適合性などについて検討を行ったものである。さらに本研究では温度応力の解析を3種類の手法により実施し、各解析結果の比較および予測結果に与える影響についても検討した。本研究で得られた結論は次のとおりである。

(1) コンクリートの引張ひずみ能力を式(9・a)および式(9・b)で算定することによりひびわれ発生域、ひびわれ発生危険域および安全域などを定義し、これと各材令におけるクリープひずみを含めた温度による引張主ひずみを比較することにより、温度ひびわれ発生予測を行うことが可能である。

(2) 施工時期の異なる2基のフーチングについての引張強度による予測と引張ひずみ能力による予測は両方ともひびわれ観察結果と合致したものとなった。

(3) 引張強度と引張ひずみ能力の両面からひびわれ発生の危険性を判断することにより、温度ひびわれ予測の精度あるいは信頼性を向上させることが可能となる。

(4) 3次元解析によるフーチング全体についての温度応力解析の結果、1次元簡易解法および2次元解析において一般に対象とされる中心鉛直断面よりむしろ側面に最大の温度応力の発生することが明らかとなった。このように3次元解析では構造物全体の応力およびひずみの状態を把握することが可能であり、これにより構造物全体の中で最もひびわれ発生の危険性が高い区域を知ることができる。ただし1次元簡易解法および2次元解析による温度ひびわれ予測は3次元解析に比べ予測を行う際の着目点は異なるものの、温度ひびわれ発生の危険性については3次元解析とほぼ同様の結果が得られた。

(5) フーチング中心鉛直断面上面の引張主応力および主ひずみについての1次元簡易解法と2次元解析による結果は、同一箇所における3次元解析結果に比べ引張主

応力ではそれぞれ 7 kg/cm^2 (0.7 MPa) および 2 kg/cm^2 (0.2 MPa) 程度、また引張主ひずみでは 116×10^{-6} および 50×10^{-6} 程度大きな値となった。

(6) 内部拘束による温度応力が支配的となるフーチングのような構造物では、夏施工より冬施工の方が大きな温度応力が発生し温度ひびわれの危険性が大きくなる。

謝 辞： 本研究における現場実験は(株)鴻池組 飼鳥誠一氏のご協力を得て実施したものであり、記して感謝の意を表す。また数値計算および資料整理にご援助いただいた本学の近藤照子職員に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Houghton, D. L.: Determining Tensile Strain Capacity of Mass Concrete, ACI Journal, Vol. 73, No. 12, pp. 691~699, 1976.
- 2) Commission 42-CEA: Properties of set concrete at early ages—state of the art report, RILEM, Vol. 14, No. 84, pp. 399~444, 1981.
- 3) たとえば 塚山隆一: マッシュな鉄筋コンクリート構造物の温度ひびわれ条件, セメント技術年報 XXXI, pp. 433~436, 昭和52年.
- 4) 岡田 清・村本吉弘・宮川豊章: マスコンクリートに関する基礎的研究, 土木学会第35回年次学術講演会概要集, pp. 161~162, 1980.
- 5) 森本博昭・小柳 治: コンクリート構造物の温度応力解析における二, 三の問題点, 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論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 69~74, 1982.
- 6) 児島孝之・矢村 潔: 引張応力下におけるコンクリートの力学的特性について, セメント技術年報 XXIV, pp. 290~295, 昭和45年.
- 7) 畑野 正: 衝撃引張荷重によるコンクリートの挙動, 土木学会論文報告集, 第73号, pp. 28~34, 昭和36年.
- 8) 笠井芳夫・横山 清・松井 勇・飛内圭之: コンクリートの初期引張ひずみについて—破壊に至るまでの時間を変えた場合—, セメント技術年報 XXVIII, pp. 234~243, 昭和49年.
- 9) 大野和男: モルタル及びコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究, 北大工学研究報告9号, 昭和28年.
- 10) Houk, I. E., J. A. Paxton and D. L. Houghton: Prediction of Thermal Stress and Strain Capacity of Concrete by Tests on Small Beams, ACI Journal, Vol. 67, No. 3, pp. 253~261, 1970.
- 11) Liu, T. C. and J. E. McDonald: Prediction of Tensile Strain Capacity of Mass Concrete, ACI Journal, Vol. 75, No. 5, pp. 192~197, 1978.
- 12) CEB-FIP: Model Code for Concrete Structure, 1978.
- 13) Neville, A. M. (後藤幸正・尾坂芳夫 監訳): コンクリートの特性, 技報堂, 1979.
- 14) Zienkiewicz, O. C. (吉識雅夫・山田嘉昭 監訳): マトリックス有限要素法, 培風館, 1975.
- 15) 小野 定・櫛田泰仁: 温度応力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, 日本コンクリート工学協会, pp. 75~82, 1982.
- 16) 森本博昭・飼鳥誠一: 橋脚フーチングの温度測定実験と温度解析に関する二, 三の考察, 土木学会第35回年次学術

- 講演会概要集, pp. 171~172, 1980.
- 17) 森本博昭・小柳 洽：コンクリート構造物の温度解析と簡易ひびわれ予測法，土木学会第36回年次学術講演会概要集, pp. 49~50, 1981.
- 18) 山川秀次・田辺忠顕・笠原 清：熱伝達率の試験ならびに実測例，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，日本コンクリート工学協会, pp. 19~26, 1982.
- 19) 野尻陽一：コンクリート打設後の温度計算方法について，コンクリートジャーナル, Vol. 5, No. 8, pp. 33~40, 1967.
- 20) 小柳 洽・森本博昭：コンクリート構造物の熱伝導解析についての二，三の考察，岐阜大学工学部研究報告第31号, pp. 135~144, 1981.
- 21) 塚山隆一：コンクリートの断熱温度上昇推定，セメント技術年報 XXX, pp. 408~410, 昭和51年.
- 22) 田沢栄一・松岡康訓：マスコンクリートの施工法，大成建設技術報告238号, 1976.

(1982.12.11・受付)
