

マスコンクリートの温度ひびわれ発生条件とひびわれ発生の危険性評価方法

桑 原 隆 司

森 永 繁

§ 1. はじめに

建造物の大型化や原子力関連施設の増加などによって建築の分野におけるマスコンクリートの使用頻度が増えており、これに伴い施工される部材に対する信頼性の向上が要請されている。

マスコンクリートを施工する際の主要な注意点の一つは、水和熱に起因する温度ひびわれの防止である。しかし、マスコンクリートのひびわれ発生条件に不明確な部分が多いため、温度ひびわれ発生の危険性やひびわれ防止策の効果度などを明確に判断できない場合がしばしばある。その主要な原因は、若材令コンクリートの引張弾性係数・線膨脹係数・ポアソン比などの物性値や、クリープ係数・応力緩和率などによって表現される流動による影響量などに不明な点が多く、それらの要因を基に応力やひずみの大きさを求めようとした場合、各要因に与える数値の設定次第で算定結果が大きく相異し、精度の良い予測が困難なためと考えられる。

これらのことから、若材令なコンクリートの温度ひびわれ発生条件を明らかにしてゆくことを目的として、モデル実験に基づき試験体コンクリートに強制的に熱応力を発生させ、ひびわれ発生の瞬間などの測定結果を基に検討を進めた。

なお、本報は日本建築学会論文報告集における2編の報告と、J.C.I.主催のコロキウムでの報告等^{1)~6)}をまとめて要約したものである。

§ 2. 温度変化速度が大きい場合の温度ひびわれ

本節では、流動による経時的な影響が小さい場合、すなわち温度変化速度が大きく、温度変化開始後1~2時間程度の短時間で温度ひびわれ発生に至る場合のひびわれ発生条件の究明を目的として実験、検討を進めた。

実験では、円盤状試験体の中心部を加熱することにより試験体に温度変化を与え、ひびわれ発生時の温度条件や、温度変化に起因するコンクリートの引張強度低下の状態などを計測した。試験体形状を円形でモデル化したのは、円形とすることにより円周方向に閉じた連続体となり端部の影響が容易に除去できることや、温度ひびわれが発生しない試験体に割裂荷重を重畳させて強制的に破壊条件を求めることが可能になるなどの理由による。

2.1 実験計画

A. 試験体の形状寸法

試験体は円盤状の無筋コンクリートで、高さ H が100mm、直径 R が350mmを基準とし、寸法による影響の有無を確認するため直径 R が200mmと700mmのものも使用した。

試験体には、図-1に図示した位置に熱電対をセットし、3体1組を原則とした。

B. コンクリートの調査

試験体コンクリートの調査を表-1に示す。

使用する調査は、建築の分野におけるマスコンクリート建造物で一般的に用いられる調査範囲を中心として、

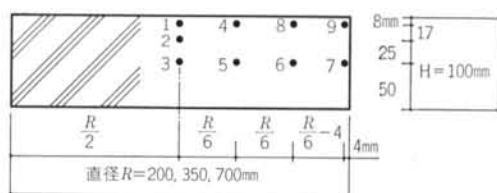


図-1 試験体断面と温度計測位置

記号	水セメント比 (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	重 量 (kg/m ³)		
						C	S	G
R	40	15	4	37.1	171	428	622	1,069
S	50	15	4	39.4	165	330	699	1,087
P	65	15	4	44.2	161	248	877	1,045

表-1 調合表

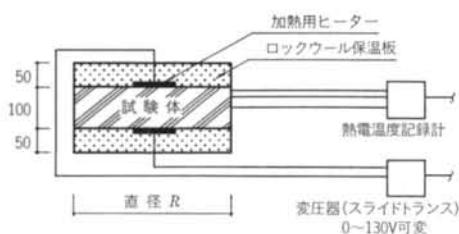


図-2 試験装置概念図

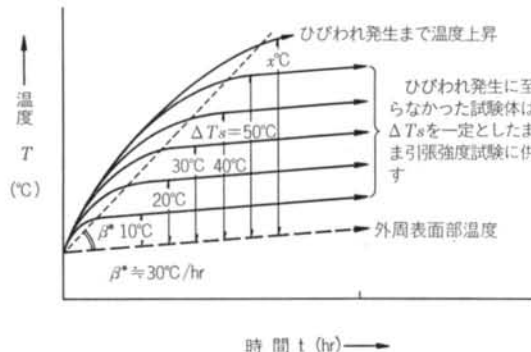


図-3 試験体中心部に与える温度履歴

水セメント比や単位セメント量が大きく異なる3種類を用いた。なお、使用した材料は以下のとおりである。

- i) セメント：普通ポルトランドセメント
- ii) 細骨材：川砂，最大寸法 5 mm
- iii) 粗骨材：川砂利，最大寸法 25 mm
- iv) 混和剤：AE 剤

C. 試験体の養生と試験開始材令

試験体は材令 1 D までは気温 $21 \pm 2^\circ\text{C}$ ，湿度 $70 \pm 5\%$ の室内で気中養生を行ない，以後 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の水中養生を行なうことを原則とした。

試験開始材令は，コンクリート練り混ぜ後 6 hr，1 D，3 D，7 D，28 D，160 D の 6 材令とした。ただし，引張強度低下率を求める試験のみ 3 D 以降の材令を対象とした。

D. 実験方法

円盤状試験体の中心部を円形ヒーターで加熱することによって，円盤中心部と外周面との間に強制的に温度差 ΔT_s をつけ，熱応力による温度ひびわれの観察を行なった。

試験装置概念図を図-2 に，試験体中心部に与える経時的な温度変化を図-3 に示す。なお，試験体中心部に与える温度変化は流動による経時的な影響をできるだけ除去するために，温度制御が十分可能な範囲で大きくすることとし， ΔT_s の増加速度は図-3 に示すように $30^\circ\text{C}/\text{hr}$ を目安とした。この値は，マスコンクリートの一般的な温度変化速度が，およそ $0.1 \sim 1^\circ\text{C}/\text{hr}$ 程度である

のに比べて著しく大きなものである。

また，ひびわれ発生に至らなかった試験体は，発生している熱応力の大きさを間接的に評価することを目的として， ΔT_s を一定に保ちながら JIS A 1113 に準じて引張強度 $f_t'(\text{kg}/\text{cm}^2)$ を求め，これと加熱していない同一形状寸法の試験体の引張強度 $f_t(\text{kg}/\text{cm}^2)$ とから式(1)によって引張強度低下率(%)を求めた。

$$\text{引張強度低下率}(\%) = \frac{f_t - f_t'}{f_t} \times 100 \quad \dots\dots(1)$$

$(f_t - f_t')$ は加熱試験体に生じている熱応力によってコンクリートの引張強度がどれだけ低下したかを示す一つの指標であり，発生している熱応力の大きさを間接的に示す一つの指標と考えられることから，これを f_t で除して百分率表示した値を引張強度低下率と定義した。

2.2 実験・検討結果

実験結果に基づき，まず各学協会等でマスコンクリートの定義や温度管理の指標に用いられることがある内部最高温度，最高温度と外気温の差や温度上昇量などと温度ひびわれの関係を検討した。

しかし，これらの指標はひびわれ発生時にさまざまな値を示し，また引張強度低下率との間にも明瞭な関係を認めることはできず，本実験の範囲からはこれらの指標の大きさによって温度ひびわれが生じるか否かを定量的に評価することは困難と判断された¹²⁻¹⁴⁾。

次に，温度ひびわれ問題を検討してゆくためのもう一つの一般的な方法として，固体力学をベースにした応力場での検討が考えられる。

しかし，§1.でも問題提起したように，コンクリート打込み直後のビンガム・ボディで近似できるような流体の状態^{例え(7)(8)}から，経時的にどんどん硬化してゆく過程のコンクリートの熱的特性値や力学的特性値などに関しては未解決の問題が山積しており，これらを介して適切に評価を進めることは，現状では極めて困難と判断せざるを得ない。

これらのことから，筆者らは温度ひびわれ問題を解決してゆくためには，既往の一般的な評価方法に拘束されことなく，視点を変えてこの問題をとらえてゆく必要があるものと判断した。以下に，こうした立場からの検討過程の要旨と検討結果を示す。

A. 温度分布係数 F

熱力学的観点から例え(9)(10) 温度ひびわれ発生機構をとらえた場合，温度ひびわれとは，温度変化に起因してコンクリートに蓄積される内部エネルギーがその蓄積能力を上回ることによって，内部エネルギーを外へ放出

するためにコンクリートがなす“仕事”であるというところからえ方もできる。

この場合、温度は熱の多少の程度であり、熱はエネルギーの一つのかたちであるという熱力学の原則に基づくと、温度ひびわれ問題を温度場で合理的に扱ってゆける可能性が十分に予想される。

このため筆者らは、温度ひびわれ問題を、既往の熱応力理論^{例えは(11)(12)}を部分的に利用しながら温度場における経時的な1, 2次元問題としてとらえて検討を進めてみることにした。

ここで、弾性熱応力の算定式は一般に線膨脹係数 α 、ポアソン比 ν と弾性係数 E の物性値を変数とする関数部分と、温度 T と位置 r を変数とする関数部分の2つに区分することができる。 T と r を変数とする関数部分を $F(T, r)$ として平面歪状態を考えると、弾性熱応力 σ_θ は一般に式(2)によって与えることができる。ここで、温度変化による影響は主に $F(T, r)$ の関数部で評価されることになるが、本実験で使用中実円盤の円周方向に対する $F(T, r)$ は式(3)で与えられる。

$$\sigma_\theta = \alpha E \frac{1}{1-\nu} F(T, r) \quad \dots\dots(2)$$

$$F(T, r) = \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r) r dr + \frac{1}{r_0^2} \int_0^{r_0} T(r) r dr - T(r) \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 α : 線膨脹係数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 E : 弾性係数 (kg/cm^2)
 ν : ポアソン比
 r : 中心からの距離 (cm)
 r_0 : 半径 (cm)

$T(r)$: r の位置の温度 ($^{\circ}\text{C}$)

最大引張熱応力 $\sigma_{\theta\max}$ がコンクリートの引張強度 f_t と一致したときにひびわれが発生すると考え、 $\sigma_{\theta\max}$ が生じる位置を r_m とすると、式(2)からひびわれ発生時には式(4)が成立する。また、弾性歪 ε が近似的に $\varepsilon = \sigma/E$ によって表わされ、最大引張歪が一定の歪能力 ε_0 と一致したときにひびわれが発生すると考えると、ひびわれ発生時には式(5)が成立する。

ここで、式(4)、(5)に対して $\alpha/(1-\nu) = \text{const.}$ が近似的に成立すると仮定すると、式(4)からひびわれ発生条件式は $F(T, r_m) \cdot E/f_t = a(\text{const.})$ となり、 E と f_t の間に一定の関係が存在するなら $F(T, r_m)$ とひびわれ発生条件との間に一定の関係が成立する可能性がある。また、式(5)に基づくと $F(T, r_m) = b(\text{const.})$ がひびわれ発生条件式となり、 $F(T, r_m)$ の大きさによってひびわれ発生

のために、最大引張熱応力または最大引張歪を示す位置 $r=r_m$ における温度と距離の関数部の値 $F(T, r_m)$ を温度分布係数 F_0 と定義して、 F_0 値の大きさと温度ひびわれの関係を検討した。中実円盤円周方向の温度分布係数 F_0 は式(3)から式(6)によって与えられる。

$$\frac{\sigma_{\theta\max}}{f_t} = \frac{\alpha}{1-\nu} \frac{E}{f_t} \cdot F(T, r=r_m) = 1 \quad \dots\dots(4)$$

$$\frac{\varepsilon_{\theta\max}}{\varepsilon_0} = \frac{\alpha}{1-\nu} \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot F(T, r=r_m) = 1 \quad \dots\dots(5)$$

$$F_0 = F(T, r=r_m) = \frac{1}{r_m^2} \int_0^{r_m} T(r) r dr + \frac{1}{r_0^2} \int_0^{r_0} T(r) r dr - T(r) \quad \dots\dots(6)$$

ここに、 r_m : 最大引張熱応力 (または歪) を生じる位置の中心からの距離 (cm)

B. 温度分布係数 F_0 の算定方法

本実験条件下では、 $\sigma_{\theta\max}$ または $\varepsilon_{\theta\max}$ は $r_m=r_0$ の位置に生じるから、この条件を式(6)に与えることによって温度分布係数 F_0 は式(7)で与えられる。ここで、試験体半径方向の温度分布状態 $T(r)$ を温度実測結果を基に式(8)で近似し、これを式(7)に代入することによって F_0 の大きさを算定した。すなわち、実験結果を式(8)に代入して3元連立方程式を立てて実験常数 A, B, C を求め、これを式(7)に代入することによって温度ひびわれ発生時や引張強度試験時の温度分布係数 F_0 を算定した。

$$F_0 = \frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} T(r) r dr - T(r_0) \quad \dots\dots(7)$$

$$T(r) = T_{\max} \left(Ar^2 - \frac{Br^2}{Cr^2+1} + 1 \right) \quad \dots\dots(8)$$

ここに、 A, B, C : 実験常数

C. 物性の変動がひびわれ発生時の F_0 値に与える影響
 コンクリートの熱応力の大きさは、弾性熱応力理論に基づく、物性面からは一般に弾性係数 E 、線膨脹係数 α 、ポアソン比 ν の影響を受けることになる。このため、温度分布係数 F_0 によって温度ひびわれを評価する場合には、これらの物性値が F_0 におよぼす影響量を評価・把握しておく必要がある。

この場合、 E, α, ν の値を直接測定し、これらの値と F_0 値の関係を検討するのも一つの方法であるが、まだ十分に硬化していない湿潤状態にある若材令なコンクリートの E, α, ν を適切に計測・把握することは極めて困難である。一方、 E, α, ν 等の物性値は調査 (材料組成) や養生期間・方法 (製造方法) などによって決定される材料の特性値と考えられるから、調査や養生期間等を適切に把握し、これらに変動を与えることにより結果的に物性値に変動を与えることは容易である。

このため、ここでは制御・把握が比較的容易で確実な材令、調合、強度を指標として、これらの指標にマスコンクリート建造物で通常問題となる範囲の変動を与え、結果的に E 、 α 、 ν 等の物性値に通常問題となる範囲の変動をできるだけ与え、それらの変動が温度ひびわれ発生条件に与える影響量の大概を確認した。なお、材令・調合・強度に与えた変動の範囲は以下のとおりである。

i) 材令：コンクリート練り混ぜ後 6 hr から 160 D

ii) 調合：水セメント比 40～65%

単位セメント量 248～428 kg/cm³

iii) 強度：引張強度 0.4～38 kg/cm²

(圧縮強度 3～450 kg/cm²)

(1) 強度が温度ひびわれ発生時の F_0 に与える影響

温度ひびわれ発生時の温度分布係数 F_0 とコンクリートの引張強度 f_t の関係を図-4 に示す。

図-4 によると、引張強度が大きくなるとひびわれ発生時の F_0 値は若干大きくなる傾向が認められるが、その増加の割合は引張強度の増加の割合に比べて極めて小さい。引張強度 0.4～38 kg/cm² (圧縮強度 3～443 kg/cm²) の範囲を対象としており、通常のマスコングリート建造物で温度ひびわれが問題となる強度範囲をほぼ満足しているものと考えられるが、この範囲の F_0 の平均値が 10.34℃ であるのに対して標準偏差 0.63℃、変動率 6.1% であり、工学的にはひびわれ発生時の F_0 値は近似的に一定とみなすことが可能と判断される。

また、参考までに弾性的性質を示す一つの指標として割線弾性係数 E_c を考え、A. C. I. や日本建築学会などで広く採用されている Pauw の E_c とコンクリート強度の関係式によって算定した E_c と、ひびわれ発生時の F_0 との関係を図-5 に示す。 E_c の値は大概の傾向を知るための推定値であり正確なものではないが、いずれにしても流動による影響が比較的小さい条件下では、弾性係数の大きさによってひびわれ発生時の F_0 値は顕著な影響を受けないものと判断される。

(2) 材令が温度ひびわれ発生時の F_0 に与える影響

温度ひびわれ発生時の F_0 と温度変化開始時のコンクリートの材令との関係を図-6 に示す。

図-6 によると、材令が大きくなるとひびわれ発生時の F_0 が若干大きくなる傾向が認められそうであるが、その増加の割合は材令の増加に比べて極めて小さい。また、実験で対象とした材令は 6 hr～160 D であり通常のマスコンクリート建造物で温度ひびわれが一般に問題となる範囲をほぼ満足していると考えられるが、この範囲における F_0 値のばらつきを見ると、(1)と同様 F_0 の平均値が 10.34℃ であるのに対して標準偏差 0.63℃、変

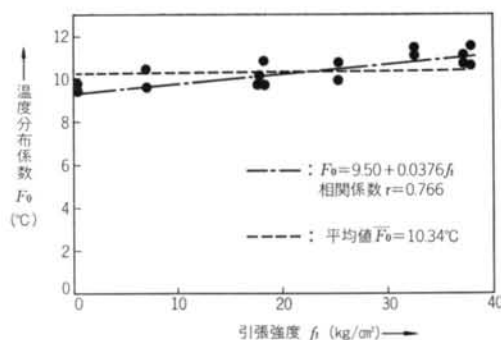


図-4 コンクリートの引張強度とひびわれ発生時の F_0 値の関係

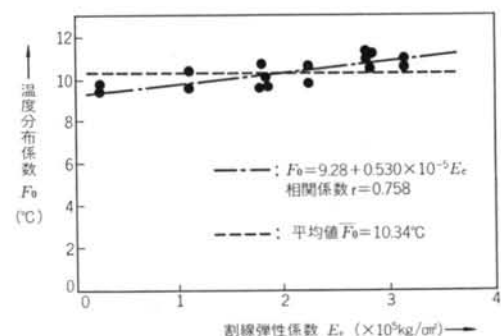


図-5 割線弾性係数（推定値）とひびわれ発生時の F_0 値の関係

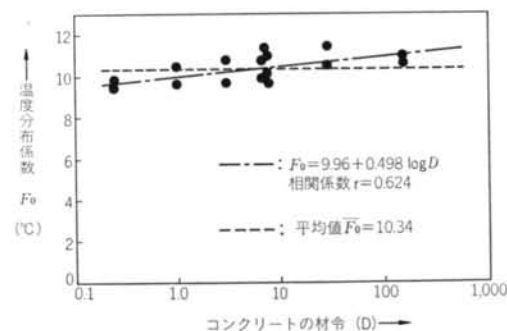


図-6 コンクリートの材令とひびわれ発生時の F_0 値の関係
変動率 6.1% であり、工学的にはひびわれ発生時の F_0 値は材令の大きさにかかわらず近似的に一定とみなすことが可能と判断される。

(3) 調合が温度ひびわれ発生時の F_0 に与える影響

マスコンクリートの調合決定に際しては、水和熱や強度、耐久性などとの関係から特に単位セメント量と水セメント比が問題となるので、実験においては特にそれらの値に大きな変動を与え、温度ひびわれ発生条件に与える影響を確認した。

単位セメント量の変動の幅は 248～428 kg/cm³ で、水

セメント比は 40~65% としたが、実験結果によると単位セメント量が大きく、水セメント比が小さくなるとひびわれ発生時の F_0 は若干大きくなるが、その増加の割合は単位セメント量の増加や水セメント比の減少に比べて極めて小さく、温度ひびわれ発生時の F_0 は単位セメント量や水セメント比の大きさによって顕著な影響を受けないものと判断された。なお、上記の範囲の単位セメント量、水セメント比の変動に対して、材令 7 D におけるひびわれ発生時の F_0 の平均値は 10.45℃、標準偏差 0.62℃、変動率 6.0% であった。

(4)まとめ

強度・材令・調合を指標として、これらの指標にマスコンクリート建造物で通常問題となる範囲の変動を与えることにより結果的に E , α , ν などの物性値に変動を与え、その影響量の大概を把握しようとした。

実験結果および上記(1)~(3)の検討結果によると、ひびわれ発生時の F_0 値の大きさは物性の相異によって若干の影響を受ける可能性はあるが、その影響量は小さくなく、本実験の範囲からは温度ひびわれ発生時の F_0 値は近似的に一定と見なすことが可能であると判断された。

2.3 考察

A. 温度変化速度が大きい場合のコンクリートの温度ひびわれ発生条件

本節の実験結果から得られた引張強度試験結果と温度ひびわれ発生時の F_0 値を図-7 にまとめて示す。

図-7 によると、温度分布係数 F_0 の大きさと引張強度低下率の間に比較的明瞭な関係を認めることができる。すなわち、 $F_0=0 \sim 6^\circ\text{C}$ の間では引張強度の低下は近似的に F_0 の増加と比例関係で進み、その後塑性的な挙動を示した後にひびわれ発生に至るものと判断される。また、ひびわれ発生時の F_0 値は全て 9~12℃ の範囲内にあり、 F_0 値の大きさによってかなり明瞭にひびわれ発生条件をとらえることができる。

図-7 とこれまでの検討結果から、温度変化速度が大きく、流動による影響が比較的小さい場合のコンクリートの温度ひびわれ発生条件は、温度分布係数 F_0 の大きさによってかなり明瞭に評価できるものと判断される。

B. 温度ひびわれ発生の危険性評価方法

本節の実験から得られたひびわれ発生時の F_0 値のヒストグラムと正規分布曲線の関係を図-8 に示す。

図-8 は試験体寸法、調合、強度、材令などが異なる試験体によって得られた結果であるが、ヒストグラムは正規分布によって近似できる同質の度数分布を示し、ひびわれ発生時の F_0 値は寸法、調合、諸物性値などの相

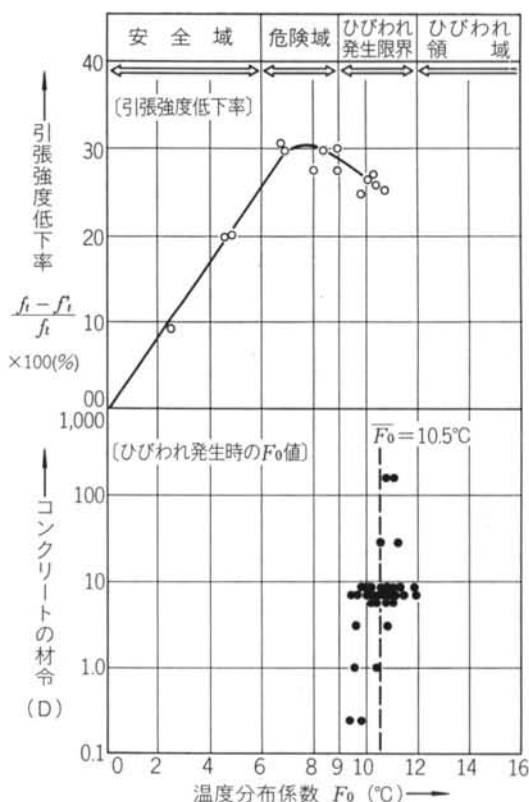


図-7 温度分布係数 F_0 と引張強度低下率の関係および温度ひびわれ発生時の F_0 値

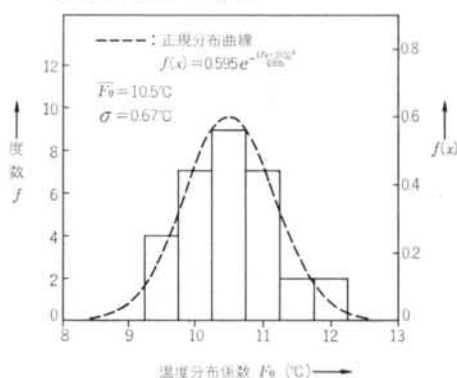


図-8 温度ひびわれ発生時の F_0 値のヒストグラムと正規分布曲線の関係

異によって支配的な影響を受けない特性値と判断される。また、ひびわれ発生時の温度分布係数 F_0 は発生数の約 95% が $10.5 \pm 1.34^\circ\text{C}$ の範囲内にあり、温度変化速度が大きい場合のひびわれ発生時の F_0 値は近似的に一定とみなすことが可能である。

ここで、温度変化速度が大きい場合の温度ひびわれ発生条件が寸法、調合、諸物性値などの影響を顕著には受

けず、 F_0 値の大きさによって評価できた理由を弾性熱応力式と実験結果を利用して以下に簡単に考察する。

最大引張熱応力 $\sigma_{\theta\max}$ と温度分布係数 F_0 との間には平面歪状態を想定すると、前出式(2)と式(6)から式(9)の関係が成立する。 F_0 の算定式はコンクリートの形状や問題となる方向によって異なるが、 F_0 と $\sigma_{\theta\max}$ の関係は形状や問題となる方向にかかわらず式(9)によって与えられる。また、 $\sigma_{\theta\max}$ がコンクリートの引張強度と一致したときにひびわれが発生すると考えると、前出式(4)と式(6)よりひびわれ発生時には式(10)が成立する。ここで、実験結果に基づきひびわれ発生時には近似的に $F_0 \approx \text{const.}$ が成立するという条件を式(10)に代入すると式(11)、(12)が誘導される。

式(12)に基づくと、 $\sigma_{\theta\max}$ と f_t の比によって温度ひびわれ発生の危険評価を行なうことと、 F_0 値の大きさによって危険性評価を行なうことは近似的に等しい関係にあるものと判断される。また、 F_0 値が $\sigma_{\theta\max}$ と f_t の比率の大小を間接的に示す指標であるなら、 $\sigma_{\theta\max}/f_t$ 値とひびわれ発生の危険性の関係はコンクリートの調合、材令や諸物性値などの相異によって支配的な影響は受けないと考えられるから、ひびわれ発生時の F_0 値が近似的に一定とみなせる実験・検討結果が得られた理由が理解できる。

$$\sigma_{\theta\max} = \frac{\alpha}{1-\nu} E F_0 \quad \dots\dots(9)$$

$$\frac{\sigma_{\theta\max}}{f_t} = \frac{\alpha}{1-\nu} \frac{E}{f_t} F_0 = 1 \quad \dots\dots(10)$$

$$\frac{\alpha}{1-\nu} \frac{E}{f_t} = \frac{1}{F_0} \approx A(\text{const.}) \quad \dots\dots(11)$$

$$\frac{\sigma_{\theta\max}}{f_t} \approx A(\text{const.}) \times F_0 \quad \dots\dots(12)$$

§ 3. 温度変化速度が小さい場合の温度ひびわれ

前節における実験・検討結果によると、温度変化速度が大きく、短時間で温度ひびわれ発生に至る場合のコンクリートのひびわれ発生条件は、温度分布係数 F_0 を指標としてコンクリートに与えられた温度条件を評価することによって、かなり明瞭にとらえられることが分かった。しかし、温度変化速度が小さく応力や歪がゆるやかに進行する場合、特に若材令コンクリートでは経時的に進行する流動によって顕著な影響を受け、このため温度ひびわれ発生条件が温度変化速度によって大きく相異なる可能性がある。

水セメント比 (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	重 量 (kg/m ³)		
					C	S	G
50	15	4	39.4	165	330	699	1087

表—2 調査表

このため本節では、流動による経時的な影響を把握し温度変化速度が小さい場合のひびわれ発生条件を明らかにしてゆくことを目的として実験、検討を進めた²⁾⁵⁾⁶⁾。

3.1 実験計画

実験方法は前節に準じるので、以下に前節と異なる事項のみを記す。

A. 試験体の形状寸法

試験体は直径 350 mm、高さ 100 mm の円盤状で、同一条件での繰返し数は原則として 2 回とした。

B. コンクリートの調査

試験体コンクリートの調査を表—2に示す。

C. 試験開始材令

試験開始材令は、若材令時を中心として、コンクリート練り混ぜ後 6 hr、12 hr、3 D、7 D の 4 材令とした。なお、試験開始材令は温度変化開始材令に一致する。

D. 温度変化の与え方

円盤状試験体外周部の温度分布係数 F_0 の大きさを経時的に一定の割合で変化させ、 F_0 の変化速度 F_0/t がコンクリートの温度ひびわれ発生条件に与える影響をとらえようとした。試験体に与える F_0/t の大きさは、1.5、3、5、7.5、10 °C/hr を中心に 0.5~25 °C/hr の範囲で与えるように意図した。

また、試験体の温度変化速度は変圧器（スライドランス）によって制御した。

3.2 実験・検討結果

温度分布係数の変化速度 F_0/t と温度ひびわれ発生時の F_0 値の関係を図—9に示す。また、温度変化開始材令ごとの回帰直線式もあわせて図—9に示す。なお、各回帰直線式の相関係数は -0.91~ -0.99 の範囲にあった。

図—9によると、温度分布係数の変化速度 F_0/t が比較的急激で 8 °C/hr を越える場合、ひびわれ発生時の F_0 値の大部分は 9~12 °C の範囲内にある。しかし、温度変化がゆるやかで F_0/t が小さくなるに従い、ひびわれ発生時の温度分布係数 F_0 は大きくなる。この傾向はコンクリートが若材令であるほど顕著である。

マスコンクリートの水和熱に起因する熱挙動においては、 F_0/t はあまり大きくなく（一般に 2 °C/hr 以下）、

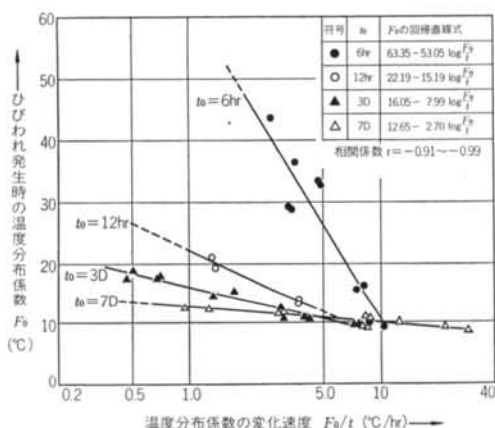


図-9 温度分布係数の変化速度がひびわれ発生条件に与える影響

またコンクリート打込み直後からの熱挙動が問題となることから、マスコンクリートの温度ひびわれに対して流動による影響は支配的な要因の一つとして作用するものと判断される。

3.3 考察

A. 流動による影響の評価方法

流動による影響が無視できる場合の最大引張熱応力 $\sigma'_{\theta \max}$ と温度分布係数 F_0 の関係は、前出式(2)と式(6)とから式(3)で与えられる。ここで、流動による影響が無視できない場合を考え、温度変化開始材令が t_0 で、温度変化開始後の経過時間が t のときの弾性係数 E' を、流動による影響補正のための係数 R を用いて式(4)で与えると、このとき最大引張熱応力 $\sigma'_{\theta \max}$ は式(4)で与えられる。また、 $t=1$ hr を基準として $t>1$ hr における流動による影響を評価、把握してゆくことにすると、前節における実験・検討結果から、 t が 1~2 hr のときに t_0 の大小にかかわらず近似的に式(4)が成立するものと考えられるから、この条件を式(4)に代入すると式(4)が得られる。

すなわち、「最大引張熱応力 $\sigma'_{\theta \max}$ と引張強度 f_t の比」と式(4)によって定義される「流動による影響を補正した温度分布係数 F_{00} 」との間に近似的に比例関係が成立するものと判断され、 $\sigma'_{\theta \max}$ と f_t の大小関係によって温度ひびわれ発生の有無が決定するのであれば、 F_{00} の大きさを指標とすることによって温度ひびわれ発生条件やひびわれ発生の危険性を評価できる可能性があるものと考えられる。

$$\sigma'_{\theta \max} = \frac{\alpha}{1-\nu} E F_0 \quad \dots\dots(4)$$

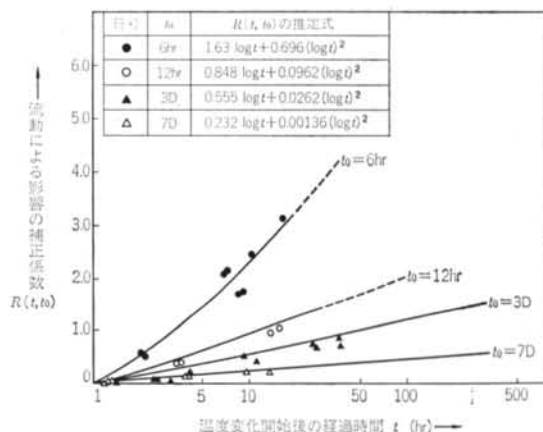


図-10 流動による影響の補正係数 R と経過時間 t の関係

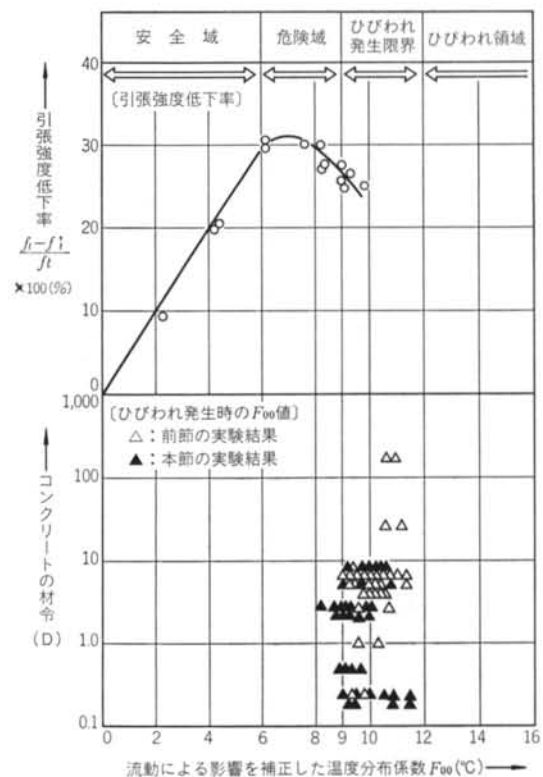


図-11 流動による影響を補正した温度分布係数 F_{00} と引張強度低下率の関係およびひびわれ発生時の F_{00} 値

$$E'(t, t_0) = \frac{E}{1 + R(t, t_0)} \quad \dots\dots(4)$$

$$\sigma'_{\theta \max} = \frac{\alpha}{1-\nu} E \times \frac{F_0}{1 + R(t, t_0)} \quad \dots\dots(5)$$

$$\frac{\sigma'_{\theta \max}}{f_t} \div A(\text{const.}) \times \frac{F_0}{1 + R(t, t_0)} \quad \dots\dots(6)$$

$$F_{00} = \frac{F_0}{1 + R(t, t_0)} \quad (t > 1 \text{ hr}) \quad \dots\dots(17)$$

B. 流動による影響を考慮した場合の温度ひびわれ発生条件

実験結果と図-9の回帰直線式に基づき、流動による影響の補正係数 R と温度変化開始後の経過時間 t との関係を求めた結果を図-10に示す。また、実験で得られたひびわれ発生時の F_0 と t を基に、図-10から R 値を求め、式(17)に基づき F_{00} 値を算定した結果を図-11に示す。なお、前節における実験結果を前記に準じて補正した結果を図-11に併せて示す。

図-11によると、 F_{00} を指標とすることによって、温度変化速度の大小にかかわらずひびわれ発生の危険性評価が定量的に行なえるものと判断される。また、温度ひびわれ発生の危険性は、 F_{00} 値を指標として下記(1)~(4)に区分して評価できるものと推定される。

(1)安全域 ($0^\circ\text{C} \leq F_{00} \leq 6^\circ\text{C}$)

コンクリートが弾性的な挙動を比較的強く示す領域と判断され、温度ひびわれ発生の危険性は極めて少ない。このため、この領域のコンクリートに対して温度ひびわれ防止策を検討・実施する必要は特にないものと考えられる。

(2)危険域 ($6^\circ\text{C} < F_{00} \leq 9^\circ\text{C}$)

この領域では、コンクリートは塑性的な挙動を比較的強く示しているものと判断され、温度変化に起因する熱応力のみが原因でひびわれ発生に至る可能性は大きくないが、乾燥収縮や外力などの要因が重畳することによって比較的簡単にひびわれ発生に至る可能性がある。このため、部材の要求性能や設計・施工条件を考慮して、必要に応じてひびわれ防止策の検討や実施を行うべきと考えられる。

(3)ひびわれ発生限界 ($9^\circ\text{C} < F_{00} \leq 12^\circ\text{C}$)

この領域内でコンクリートが温度ひびわれ発生に至る可能性は極めて大きい。このため、この領域のコンクリートに対しては原則としてひびわれ防止策の検討や実施を行なうべきと考えられる。なお、図-8の正規分布曲線に基づく、この領域内で温度ひびわれ発生に至る確率は約97%である。

(4)ひびわれ領域 ($F_{00} > 12^\circ\text{C}$)

この領域のコンクリートは、すでにひびわれが発生している可能性が極めて大きい。また、ひびわれの防止が容易でないケースも多いものと考えられる。このため、この領域のコンクリートに対しては原則としてひびわれ防止策の検討や実施を行なうとともに、必要に応じて設計・施工条件の変更も考慮すべきと考えられる。

§ 4. 温度分布係数 F_{00} による温度ひびわれ評価の妥当性の検証

本節では、流動による影響を補正した温度分布係数 F_{00} による温度ひびわれ評価の妥当性の確認を目的として、それぞれ特徴のある3例の実験に対して検討を加えた。検討対象としたのは、筆者が実施した矩形板コンクリートのモデル実験⁽¹³⁾、山崎が実施した外部拘束条件下におけるマスコンクリートのシミュレーション実験⁽¹⁴⁾、および T. C. Hansen が実施した実大マスコンクリートブロックの屋外施工実験⁽¹⁵⁾の3例である。

4.1 矩形板コンクリートのモデル実験

前節における実験・検討結果によると、コンクリートが若材令であるほど流動性は著しく大きくなり、マスコンクリート打込み直後からの温度上昇に起因して発生する温度応力の極めて大きな部分が経時的に消失（クリープあるいは応力緩和）するものと予想される。このためモデル試験体に対してコンクリート打込み直後から、まだ十分には硬化が進行していないと思われる材令1D未満の間に、大きな温度上昇量 T_u や内部最高温度と外気温の差 ΔT などを与えて温度ひびわれ発生の有無を調査した。試験体に与える T_u や ΔT 等の大きさは、種々の実施マスコンクリートの温度計測結果を参考にしてひびわれが発生しやすいと思われる条件を組合わせた。

試験体断面の状態を図-12に示す。なお、試験体は4体であり、試験体長 L はA-1, A-2, Cの3体が1,200mm, B試験体が3,600mmである。また、各試験体に与えた温度条件の要約を表-3に示す。なお、 $T_{\max}$ は内部最高温度、 ΔT_s は内部最高温度と表面温度の差である。

ここで、本実験条件下では図-12における y 方向の温度変化に伴う長辺方向(x 方向)の温度応力によるひびわれが問題となるが、この場合の弾性温度応力算定式は平面歪状態を想定すると式(18)によって与えられ、この場合の F_0 の算定式は式(13)と式(18)から式(19)で与えられる。また、 F_{00} 値は式(17)と式(19)に基づき算定される。

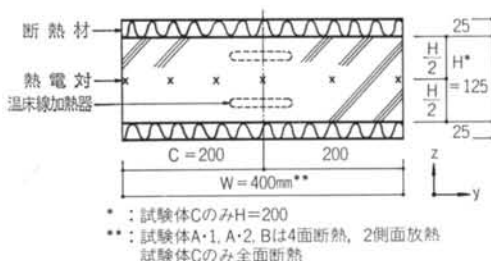
$$\sigma_{t\max} = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{2C} \int_{-c}^c T(y) dy + \frac{3y}{2C^3} \int_{-c}^c T(y) y dy - T'(y) \right\} \quad \dots\dots(18)$$

$$F_0(^\circ\text{C}) = \frac{1}{2C} \int_{-c}^c T(y) dy + \frac{3y}{2C^3} \int_{-c}^c T(y) y dy - T'(y) \quad \dots\dots(19)$$

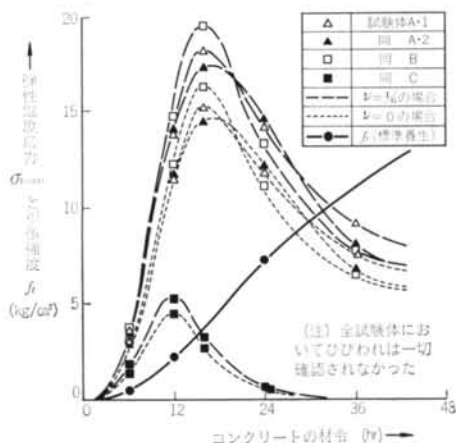
実験結果によると、全試験体において温度ひびわれは

試験体 記号	練上り 温度(℃)	T_{max} (℃)	T_u (℃)	ΔT (℃)	ΔT_s (℃)	最大の F_0 値 F_0 (℃) 材令 (hr)	最大の F_{00} 値 F_{00} (℃) 材令 (hr)
A-1	24.0	80.0	56.0	57.0	32.0	18.0 16	5.0 8
A-2	24.0	79.0	55.0	54.5	33.2	17.7 12	5.0 12
B	24.0	80.0	56.0	57.0	35.0	19.4 16	5.3 8
C	24.0	78.3	54.3	53.8	12.5	7.0 8	2.3 8

表—3 各試験体に与えた温度条件



図—12 矩形板試験体断面の状態



図—13 各試験体の弾性温度応力(推算値)と引張強度の関係
一切確認されなかった。

参考のために、図—13に σ_{tmax} の推算値と引張強度試験結果の関係を示す。若材令コンクリートの熱的特性値を適切に計測把握することは極めて困難であるから、推算は一般的にしばしば行なわれる方法によることとし、日本建築学会 RC 構造計算基準に準拠して α は $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 、 E は Pauw の推定式に基づいた。また、 ν は $1/6$ の場合と平面応力状態を想定し 0 とした場合の 2 例を試算した。

図—13は仮定に基づくものであり、大略の傾向のみを示すものであるが、図では全面保温とした C 以外の全試験体が材令 $0.5D$ 前後で強度の数倍の著しく大きな弾性温度応力を示している。

F_{00} 値と温度ひびわれ発生の危険性との関係は、他の 2 例の検討結果と併せて図—16に一括して示すこととす

No	拘束度	最高温度 (℃)	試験体の温度履歴 T_e (℃)				ひびわれ発 生の有無
			0 D	0.5 D*	2~4 D	7 D	
1	0.72	39	20	25	39	20	発生なし
2	0.72	46	20	28	46	20	発生なし
3	0.72	56	20	33	56	20	発生あり
4	0.72	57	20	33	57	20	発生あり
5	0.72	62	20	35	62	20	発生あり
6	0.72	71	20	39	71	20	発生あり
7	0.47	73	20	39	73	20	発生あり
8	0.35	73	20	39	73	20	発生あり
9	0.18	73	20	39	73	20	発生なし

* : 温度履歴 $14)$ から筆者が読み取った値

表—4 実験結果 $14)$

るが、表—3の各試験体の最大の F_0 値と F_{00} 値を比較すると、 F_0 値の約 70% 前後の極めて大きな部分が流動によって経時的に消失し、結果的に全試験体の F_{00} 値は安全域に位置している。

4.2 山崎の外部拘束条件下におけるマスコンクリートのシミュレーション実験

F_{00} 値を指標とする評価方法は、理論的には内、外拘束のいずれに対しても適用可能と推定されるが、筆者の実施した実験自体は内部拘束応力を利用したものである。

このため、外部拘束に起因する温度ひびわれに対する評価方法の妥当性の確認を目的として、鹿島建設技研山崎が実施した外部拘束条件下におけるマスコンクリートのシミュレーション実験 $14)$ を引用して検討を進めた。

実験結果の要約を表—4に示す。

筆者の提案する評価方法によると、外部拘束に起因する F_{00} 値算定の基本式は式(20)によって与えられる。なお、 K は外部拘束度 $14)$ 、 T_e は試験体温度、 T_0 は温度変化開始時の試験体温度である。

ここで、当実験においては試験体打込み直後からの温度上昇と、特にその後の降下が問題となるから、試験体が任意の材令 $(i-1)$ から (i) に増加したときの材令 (i) における F_{00} 値を式(21)で与えることによって、試

No	① 欄			② 欄			③ 欄		
	温度分布係数 F_0 (°C)			補正係数 R (t, t_0)			F_{00} (°C) $({}_tF_{00} = \frac{({}_tF_0 - i - 1F_0) + i - 1F_{00}}{1 + R(t, t_0)})$		
	$0.5D F_0$	$4D F_0$	$7D F_0$	$R(0.5D, 0)$	$R(3.5D, 0.5D)$	$R(3D, 4D)$	$0.5D F_{00}$	$4D F_{00}$	$7D F_{00}$
1	-3.6	-13.7	0	2.57	1.99	0.924	-1.01	-3.72	+5.19
2	-5.8	-18.7	0				-1.62	-4.86	+7.19
3	-9.4	-25.9	0				-2.63	-6.40	+10.14
4	-9.4	-26.6	0				-2.63	-6.63	+10.38
5	-10.8	-30.2	0				-3.03	-7.50	+11.80
6	-13.7	-36.7	0				-3.84	-8.98	+14.41
7	-8.9	-24.9	0				-2.49	-6.18	+9.73
8	-6.7	-18.6	0				-1.88	-4.61	+7.27
9	-3.5	-9.5	0				-0.98	-2.33	+3.72

表—5 流動による影響を補正した温度分布係数 F_{00} の算定結果

験体打込み直後からの F_{00} 値の変化をステップ・バイ・ステップで算定する。

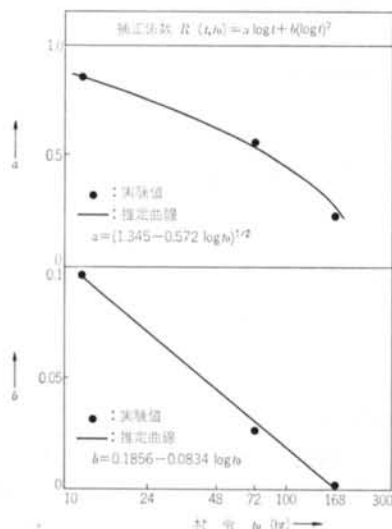
$$F_{00} = \frac{F_0}{1 + R(t, t_0)} = \frac{K(T_c - T_0)}{1 + R(t, t_0)} \quad \dots\dots(2)$$

$${}_tF_{00} = \frac{({}_tF_0 - i - 1F_0) + i - 1F_{00}}{1 + R(t, t_0)} \quad \dots\dots(2)$$

なお、流動による影響は図—10を利用して、以下 i)～ii)に基づき補正した。

i) コンクリート打込み後 12 hr までの極めて流動的な領域における補正係数 R は $R(t, t_0 = 6 \text{ hr})$ 式を利用して推定する。なお、 $t = 12 \text{ hr}$ 。

ii) コンクリート打込み後 12 hr から、温度降下が始まる直前の 4 D(96 hr) までの間は、 $R(t, t_0 = 12 \text{ hr})$ 式



図—14 補正係数 R 算定式の定数 a , b と材令 t_0 の関係

に基づき推定を行なう。なお、 $t = 84 \text{ hr}$ 。

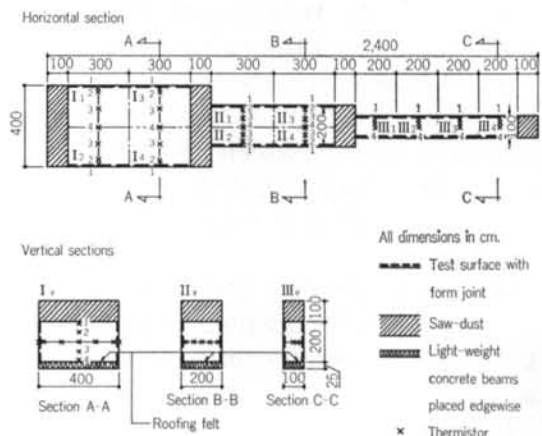
ii) 材令 4 D から温度降下が完了する 7 D(168 hr) までの間は、図—14によって $R(t, t_0 = 4 D)$ の算定式を求めて推定を行なう。なお、 $t = 72 \text{ hr}$ 。

F_{00} 値の算定結果を表—5に示す。また、 F_{00} 値と温度ひびわれ発生の有無の関係を、他の検討結果と併せて図—16に一括して示す。

図—16によると、 F_{00} 値を指標として内部拘束と共に外部拘束による温度ひびわれの評価が可能と推察される。

4.3 Hansen の実大マスコンクリートブロックの施工実験

これまでの実験、検討は、いずれもモデル化によって縮小された試験体を対象として進められたものであるから、 F_{00} を指標とする評価方法を実施工マスコンクリー



図—15 試験体の形状寸法¹⁵⁾

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Test section	Age of concrete at form removal (days)	Difference between surface temperature and average temperature immediately before removal of forms (°C)	Increase in temperature difference after removal of forms (°C)	Total temperature difference at the moment of cracking (°C)	Strain of concrete at cracking ($\times 10^{-3}$)	Maximum temperature difference for uncracked sections (°C)	Age of concrete at maximum difference between surface temperature and average temperature of uncracked sections (days)	Extent of cracking
I ₁	15	15	19.5	34.5	34.5	—	—	some
I ₂	8	3.5	13.0	16.5	16.5	—	—	extensive
I ₃	28	5.5	7.5	13.0	13.0	—	—	slight
I ₄	90	—	—	—	—	14.5	13	none
II ₁	2	16.0	16.5	32.5	32.5	—	—	extensive
II ₂	2	7.5	21.0	28.5	28.5	—	—	extensive
II ₃	20	1.5	12.0	—	—	13.5	20	none
II ₄	90	—	—	—	—	9.0	2	none
III ₁	2	8.0	6.0	—	—	14.0	2	none
III ₂	2	4.0	13.0	—	—	17.0	2	none
III ₃	11	4.5	6.0	—	—	10.0	11	none
III ₄	90	—	—	—	—	4.0	1	none

表—6 屋外施工実験結果¹⁵⁾

試験体 No.	温度分布係数 F_0 (°C)			F_{00} (°C)				ひびわれ発生の有無
	材令 0.5D	型脱直前*	型脱直後**	材令 0.5D	型脱直前*	型脱直後**	型脱直後**	
I ₁	6.5	15.0	34.5	+1.82	+4.38	+13.32		発生
I ₂	4.5	3.5	16.5	+1.26	+0.08	+10.45		発生
I ₃	4.0	5.5	13.0	+1.12	+1.34	+ 8.82		発生(軽微)
I ₄	4.0	14.5	0	+1.12	+3.15	- 9.32		なし
II ₁	6.5	16.0	32.5	+1.82	+4.43	+12.16		発生
II ₂	4.5	7.5	28.5	+1.26	+1.67	+13.17		発生
II ₃	4.0	1.5	13.5	+1.12	-1.42	+10.55		なし
II ₄	4.0	9.0	0	+1.12	+2.40	- 2.14		なし
III ₁	3.5	8.0	14.0	+0.98	+2.15	+ 4.74		なし
III ₂	2.5	4.0	17.0	+0.70	+0.86	+ 8.05		なし
III ₃	2.0	4.5	10.0	+0.56	+0.56	+ 5.99		なし
III ₄	2.0	4.5	0	+0.56	+1.26	- 3.53		なし

*: 試験体 I₄, II₄, III₄のみ春まで脱型を行なわなかったため、最大の F_0 値を示す材令を対象とする

** : 同上により、I₄, II₄, III₄のみ、部材内温度が外気温と平衡状態になった材令を対象とする

表—7 F_{00} 値の算定結果

トに適用してゆくためには、実大のマスコンクリートに対する評価方法の妥当性の確認を行なっておく必要があるものと思われる。

このため、ここでは T. C. Hansen がスウェーデン北部において厳寒の冬期に実施した、著名な実大マスコンクリートブロックの屋外施工実験¹⁵⁾を引用して検討を進めた。試験体の形状寸法などを図—15に、実験結果の要約を表—6に示す。

ここで当実験においては、部材厚さ方向の温度変化に伴う長辺方向の温度応力によるひびわれが問題となるので、前式(17)、(18)と式(21)に基づき F_{00} 値を算定した。

F_{00} 値算定結果の要約を表—7に示す。また、各試験体の最大の F_{00} 値と温度ひびわれ発生の有無との関係を他の検討結果と併せて図—16に示す。

表—7および図—16によると、実大マスコンクリートブロックにおいても、 F_{00} 値を指標として、温度ひびわれ発生の危険性が評価できるものと推察される。

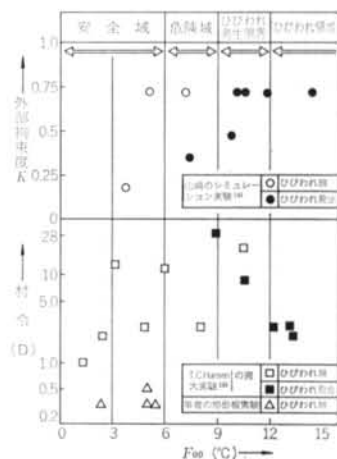
4.4 まとめ

本節では、 F_{00} 値を指標とする温度ひびわれ評価の妥当性の確認を目的として、特徴のある3例の実験に対して検討を加えた。3例の実験における全試験体の最大の

F_{00} 値と温度ひびわれ発生の有無の関係を図—16にまとめて示す。

図—16の評価区分は、円盤状でモデル化した約200体の試験体の温度ひびわれ発生の瞬間や引張強度低下率等をとらえることによって求めたものであるが、図—16によると実大を含む種々の形状寸法、拘束条件下の各試験体の温度ひびわれ発生の危険性が、 F_{00} を指標とすることによって円盤状の場合と同様比較的明瞭に評価できるものと判断される。

これらは、前式(17)が近似的に成立し、温度ひびわれ発生の危険性がコンクリートの温度応力と引張強度の大小関係に支配されると考えた場合には当然の結論であり、本検討の範囲からは F_{00} を指標としてマスコンクリートの温度ひびわれ発生の危険性評価が定量的に行なえるものと推察される。



図—16 流動による影響を補正した温度分布係数 F_{00} と種々の条件下のコンクリートの温度ひびわれ発生の有無

§ 5. 結論

マスコンクリートの温度ひびわれ発生条件をとらえ、温度ひびわれ発生危険性評価方法を求めることを目的として、モデル実験に基づき検討、考察を進めた。

本実験、検討で得られた主要な結論は以下のとおりである。

i) 温度変化速度が大きく、温度変化開始後短時間でひびわれ発生に至る場合、すなわち流動による経時的な影響が小さい場合の温度ひびわれ発生条件を温度分布係数 F_0 (°C) を指標としてかなり明瞭にとらえることができた。また、ひびわれ発生時の F_0 値はコンクリートの材令、調合や諸物性値によって顕著な影響は受けないものと判断され、その理由として「 F_0 値」と「最大引張熱応力と強度の比」の間に近似的に比例関係が成立することが推察された。

ii) 温度変化速度が小さく、長時間経過してからひびわれ発生に至る場合の温度ひびわれ発生条件は、経時的に進行する流動によって支配的な大きさの影響を受ける。このため、流動による経時的な影響を定量的に評価、把

握することを目的として補正係数 R を定義し、実験結果に基づき R 値を求めた。

iii) 本実験、検討の範囲からは、マスコンクリートの温度ひびわれ発生条件やひびわれ発生危険性は、補正係数 R を利用して流動による影響を補正した温度分布係数 F_{00} を求めることによって、定量的に評価できるものと推察された。

なお、種々の施工条件下における実施工マスコンクリートに対する評価方法の妥当性の確認は、今後の検討課題である。

謝辞 本研究遂行の機会を与えて下さった故石動専務取締役、久保建築営業本部長付、和田北海道支店長をはじめとする多くの方々に深く感謝いたします。

本実験・検討の遂行に際しては、成田一徳氏、福原美代子嬢をはじめとする材料研究部の諸氏から多くのご支援、ご協力を頂いた。また、電気設備室や実験課の方々にも種々の便宜を計って頂いた。実験の遂行に際しては、旧斉藤工務店の米山清治氏（現斉藤組）をはじめ高橋、田島の各氏のご協力を得た。ここに改めて謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 森永 繁、桑原隆司：日本建築学会論文報告集（1982年5月）
- 2) 森永、桑原：日本建築学会論文報告集（1982年12月）
- 3) 森永、桑原：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、J. C. I.（1982年9月）
- 4) 森永、桑原：日本建築学会大会梗概集（1978年）
- 5) 森永、桑原：同上（1981年）
- 6) 森永、桑原：同上（1982年）
- 7) Markus Reiner: "Deformation, Strain, and Flow" H. K. Lewis (1960)
- 8) 桑原隆司：修士論文（1972年）
- 9) 一瀬正己："物理学概要" 培風館（1961年）
- 10) W. Gurney (山本常信訳)："Introduction to Statistical Mechanics" 吉岡書店（1974年）
- 11) 竹内洋一郎："熱応力" 日新出版（1977年）
- 12) 平 修二："熱応力と熱疲労" 日刊工業新聞社（1974年）
- 13) 桑原、森永：清水建設研究所研究報告書 LR-82-4600（1982年）
- 14) 山崎敏敏：日本建築学会大会梗概集、同関東支部研究報告集（1976年）
- 15) T. C. Hansen: Bulletin RILEM (Sept. 1965)