

[2009] マット状構造物における温度ひびわれ制御に関する研究

正会員 ○佐竹 照一 (名古屋工業大学大学院)
 正会員 梅原 秀哲 (名古屋工業大学工学部)
 正会員 吉田 弥智 (名古屋工業大学工学部)

1. はじめに

マスコンクリートのひびわれ防止、あるいは、発生する場所やひびわれ幅を制限することを含めたひびわれ制御の方法として材料および配合の選定、ブロック分割、打込み時間間隔、打設温度、養生方法の選定など施工全般にわたっての対策が考えられる。しかしながら、どの対策が最も効果があるのか明確な指標がないのが現状である。そこで、本研究では、マット状構造物を対象として、形状、外部拘束の程度、コンクリート打設時の外気温、養生、打設温度をパラメータにとり、温度応力解析を行うことによって各パラメータの温度ひびわれに対する影響について検討するとともに、ひびわれ対策の基礎データを作成することを目的とする。

2. 解析パラメータ

本研究では、二次元有限要素法を用いて温度応力解析を行った。以下に解析において用いたパラメータについて述べる。形状としては、マット状構造物を対象とし、長さL=10、20m 高さH=0.75、1.5、3.0mを選んだ。なお、解析モデルは、図-1に示すように、各形状に対し、岩盤部分を深さ10m、長さはコンクリート部分の3倍とした。また外部拘束の程度としては、岩盤のヤング係数が0、 5×10^4 、 10^5 kgf/cm^2 の場合を選んだ。コンクリート打設時の外気温としては、夏25℃、春秋15℃、冬5℃を選び外気温一定と仮定した。養生の影響としては、熱伝達率を一般に外気に触れる面に用いられる値 $10 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ とシート養生時に用いられる値 $5 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ を仮定した。また、養生期間は、5日とした。なお、対流境界は、図-1に示される一点鎖線部分とし、養生の影響を受ける対流境界は、コンクリート上面の二点鎖線部分のみとした。コンクリートの打設温度は、プレケーリングを行わない場合には(外気温+5)℃、行った場合には(外気温-5)℃と仮定した。すなわち、打設温度の影響として、打設温度を10℃下げるプレケーリングについて検討を行った。以上のように、各パラメータはできるだけ一般性を持たせるため、広範囲に選んだ。解析に用いた諸定数、断熱温度上昇量、コンクリートのヤング係数は、表-1に示すように文献〔1〕に基

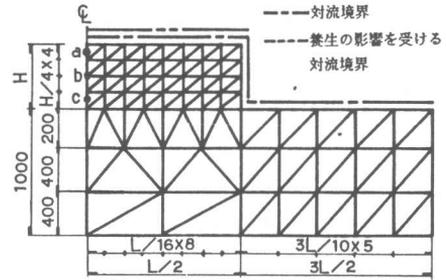


図-1 温度応力解析モデル

表-1 材料定数

	岩	盤	コンクリート
比熱 (kcal/kg℃)	0.25	0.31	
熱伝導率 (kcal/cm h℃)	0.0194	0.0250	
密度 (kg/cm ³)	0.00260	0.00231	
熱膨張係数 (1/℃)		0.00001	
断熱温度上昇量	$Q(t) = Q (1 - \text{EXP}(-r t))$		
	Q(t) : 材令 t 日における断熱温度上昇量(℃)		
	Q : 終局断熱温度上昇量(℃)		
	r : 温度上昇速度に関する実験定数		
打設温度	Q (℃)	r	
	10	42	0.463
	20	40	0.889
	30	37	1.383
コンクリートのヤング係数	$E_c(t) = 1.1 \times 10^4 \sqrt{f'_c(t)}$ (kgf/cm ²)		
	材令 3日まで		
	$E_c(t) = 1.5 \times 10^4 \sqrt{f'_c(t)}$ (kgf/cm ²)		
	材令 3日以降		
	$f'_c(t)$: 材令 t 日の圧縮強度(kgf/cm ²)		
	$f'_c(t) = \frac{t}{4.5 + 0.95 t} f'_c(9)$		

づいて定めた。なお、使用セメントは普通ポルトランドセメント、単位セメント量 300 kg/m^3 、水セメント比50%とした。また、温度ひびわれの検討に当っては、最も応力が大きく発生すると考えられる中央断面（図-1に示す a：上層、b：中層、c：下層）を対象とし、材令は2ヶ月までを検討の範囲とした。

3. 解析結果

温度応力の発生メカニズムは、従来より、内部拘束作用と外部拘束作用の2つの要因が論じられている。そこで、本研究では、解析より得られた温度応力を内部拘束応力と外部拘束応力に分け、以下に示す指数を定義することによって、各パラメータの各応力に対する影響および効果について検討を行った。

$$\begin{aligned} \text{温度応力指数} &= \sigma / f_t = \sigma_I / f_t + \sigma_R / f_t \\ \text{内部拘束応力指数} &= \sigma_I / f_t \quad \dots (1) \\ \text{外部拘束応力指数} &= \sigma_R / f_t \end{aligned}$$

ただし、 σ ：水和熱に起因して生じた部材内の温度応力の最大値(kgf/cm²)

σ_I ： σ を算定した時刻における内部拘束応力(kgf/cm²)

σ_R ： σ を算定した時刻における外部拘束応力(kgf/cm²)

f_t ： σ を算定した時刻におけるコンクリートの引張強度(kgf/cm²)

ここで定義した温度応力指数は温度ひびわれ指数の逆数である。ところで、温度応力の履歴は、一般にマット形状(H、L)およびコンクリートと岩盤のヤング係数の比(E_c/E_r)に大きく支配されていると考えられている。そこで、H、L、 E_c/E_r をパラメータとして表-2に示すような15の解析ケースに分け、各ケース毎に外気温15℃一定で、養生およびプレクーリングを行わなかった場合を基準として、外気温、養生、プレクーリングの影響を先に述べた指数を用いて比較することにした。なお、内部拘束応力に与える影響と外部拘束応力に与える影響ではその程度が異なるため、次式に示すように内部拘束応力指数および外部拘束応力指数にそれぞれの影響を表した係数A、Bを乗じることによって検討を行った。

$$\frac{\sigma}{f_t} = A \frac{\sigma_I}{f_t} + B \frac{\sigma_R}{f_t} \quad \dots (2)$$

ところで、各パラメータの影響として示す値は構造物内部において、中層部分に最も大きな引張応力が生じるため、そのほとんどが中層における値となっている。

3.1 外気温の影響

図-2に、外気温15℃に対する25℃および5℃の時の内部拘束応力指数および外部拘束応力指数の比率(百分率)を示す。この図より、外気温の影響としては、内部

表-2 解析ケース

CASE No.	H (m)	L (m)	$\frac{E_c}{E_r}$
1	3.0	20	∞
2	3.0	20	∞
3	1.5	10	∞
4	1.5	20	∞
5	0.75	10	∞
6	0.75	20	∞
7	3.0	10	6
8	3.0	10	3
9	3.0	20	3
10	1.5	10	6
11	1.5	10	3
12	1.5	20	3
13	0.75	10	6
14	0.75	10	3
15	0.75	20	3

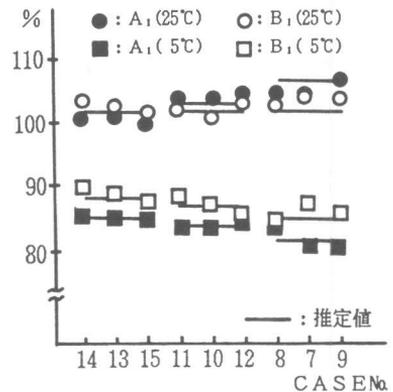


図-2 外気温の影響

拘束応力指数および外部拘束応力指数は、外気温が高いほど増加する傾向があり、また、この影響はHに大きく支配されていることがわかる。したがって、この影響は、次式に示すHの一次関数で表現できるものと考えられる。

なお内部拘束応力に与える影響を表す係数をA₁、外部拘束応力に与える影響を表す係数をB₁とする。

$$\begin{aligned} A_1 &= H/45 + 1.00 && (25^\circ\text{C一定時}) \\ A_1 &= -H/75 + 0.86 && (5^\circ\text{C一定時}) \\ B_1 &= 1.02 && (25^\circ\text{C一定時}) \\ B_1 &= -H/75 + 0.89 && (5^\circ\text{C一定時}) \end{aligned} \quad \dots \dots (3)$$

図に示す実線は、上式より求めた値A₁、B₁であり、ほぼ応力解析より求めた値に一致している。上式よりH=0.75~3.0mの間では、外気温15℃に対し、25℃に変化することによって内部拘束応力指数には、約2~7%、外部拘束応力指数には、約2%の増加が見られ、5℃に変化した場合には、内部拘束応力指数には約15~18%、外部拘束応力指数には、約12~15%の減少が見られる。

3.2 養生の影響

図-3に養生を行わなかった場合に対するシート養生を5日間行った場合の内部拘束応力指数および外部拘束応力指数の比率を示す。この図より養生の影響としては、内部拘束応力指数においては減少、外部拘束応力指数においては増加させる働きがあり、養生は、外部拘束作用が卓越するような構造物においては、温度ひびわれに対し危険となる場合がある。また、これらの影響はHに大きく支配され、外気温の影響は比較的小さいものと考えられるため、養生の影響は次式に示すHの一次関数で表現できるものと考えられる。なお、養生の影響は、構造物の表面付近において顕著に現れると考えられるが、今回行った解析では、すべてのケースで中層部分において応力が最大となったため、その影響は、中層部分の値を用いて検討を行った。

なお内部拘束応力に与える影響を表す係数をA₂、外部拘束応力に与える影響を表す係数をB₂とする。

$$\begin{aligned} A_2 &= -2H/75 + 0.97 && \dots \dots (4) \\ B_2 &= -2H/45 + 1.18 \end{aligned}$$

図に示す実線は、上式より求めた値A₂、B₂であり、ほぼ応力解析より求めた値に一致している。上式より、H=0.75~3.0mの間では、5日間のシート養生を行うことによって、内部拘束応力指数には約5~11%の低減が

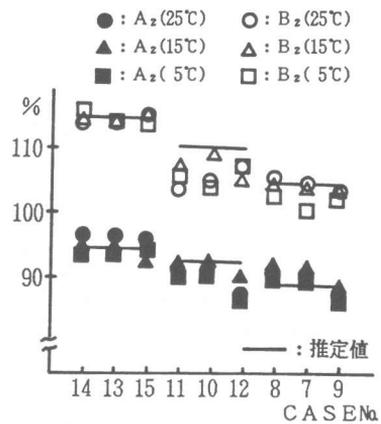


図-3 養生の影響

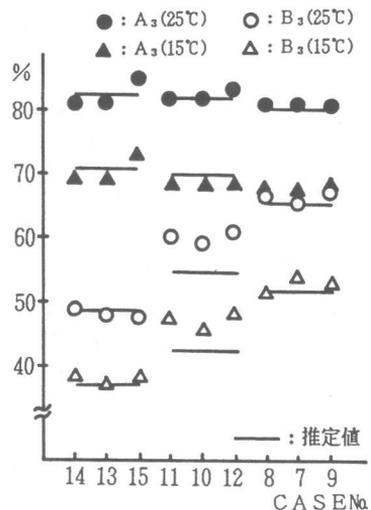


図-4 プレクーリングの影響

外部拘束応力指数には、約6～15%の増加が見られる。

3.3 プレクーリングの影響

図-4にプレクーリングを行わなかった場合と、打設温度を10℃下げるプレクーリングを行った場合の内部拘束応力指数および外部拘束応力指数の比率を示す。この図よりプレクーリングは内部拘束応力指数、外部拘束応力指数の両方を減少させる働きがあり、この影響は、内部拘束応力指数に対してはHが大きいほど、外部拘束応力指数に対してはHが小さいほど顕著となっている。また外気温25℃と15℃で比較すると、このプレクーリングの影響は外気温15℃において大きく現れている。そこで外気温別にプレクーリングの影響をHの一次関数で示すと次式のようになる。

なお、内部拘束応力に与える影響を表す係数を A_3 、外部拘束応力に与える影響を表す係数を B_3 とする。

$$\begin{aligned} A_3 &= -H/75 + 0.84 && (25^\circ\text{C一定時}) \\ A_3 &= -H/45 + 0.73 && (15^\circ\text{C一定時}) \\ B_3 &= 2H/25 + 0.42 && (25^\circ\text{C一定時}) \\ B_3 &= H/15 + 0.32 && (15^\circ\text{C一定時}) \end{aligned} \quad \dots \dots (5)$$

図に示す実線は、上式より求めた値 A_3, B_3 であり、ほぼ応力解析より求めた値に一致している。上式より、外気温15℃と25℃において $H=0.75\sim 3.0\text{m}$ のマット状構造物に対し、打設温度を10℃下げるプレクーリングは内部拘束応力指数に対して約17～34%、また外部拘束応力指数に対して約34～63%低減させる働きがあると考えられる。

3.4 養生+プレクーリングの影響

図-5に養生およびプレクーリングを行った場合の影響として、この両方を行わなかった場合に対する行った場合の内部拘束応力指数および外部拘束応力指数の比率を示す。この図に先に述べた養生の影響を表す係数 A_2 、 B_2 、プレクーリングの影響を表す係数 A_3 、 B_3 を式(4)、式(5)より求め、これらに乗じた値($A_2 A_3$ 、 $B_2 B_3$)を実線で書き加えると、ほぼ一致していることがわかる。すなわち養生およびプレクーリングの両方を行った場合には、その個々の影響を知ることによって推測することが可能と考えられる。

なお、これまでに示した式(3)～式(5)の適用範囲は、 $H \leq 3.0\text{m}$ 、 $L \leq 20\text{m}$ 、 $E_c/E_r \geq 3$ であることに注意する必要がある。

4. 対策の効果

これまで、本研究では、各パラメータの影響を内部拘束作用と外部拘束作用に分けて検討を行ったが、実構造物においてひびわれ制御を行う場合には、この両者を重ね合せ、温度応力全体で検討を行う必要があると考えられる。そこで、次に対策の効果を表す値(K)を外気温15℃一定で養生およびプレクーリングを行わなかった場合を基準として定義した。なお、温度ひびわれ指数を用いた場合は各形状における外気温、養生、プレクーリングの効果は $1/K$ で表されるので

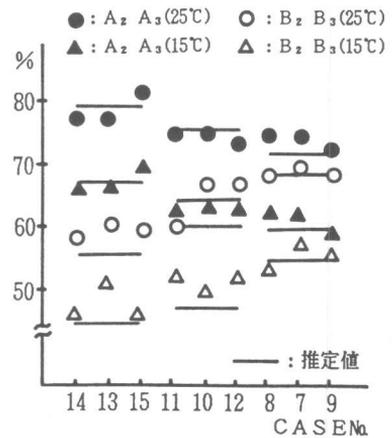


図-5 養生+プレクーリングの影響

、この値を用いて検討を行った。

$$\begin{aligned}
 K &= \text{各対策を行った場合の温度応力指数} / \text{外気温}15^\circ\text{C一定における温度応力指数} \\
 &= \text{外気温}15^\circ\text{C一定における温度ひびわれ指数} / \text{各対策を行った場合の温度ひびわれ指数} \\
 &= \frac{(A\sigma_I + B\sigma_R) / f_t}{(\sigma_I + \sigma_R) / f_t} \dots\dots\dots (6)
 \end{aligned}$$

また、温度応力の履歴は形状および外部拘束の程度に大きく支配されると考えられ、各対策は、温度応力が最大となる材令にはほとんど影響しないと考えられる。すなわち、式(6)において分母および分子に示される f_t （コンクリートの引張強度）は等しいと考えられ、次式のように書きかえることができる。

$$K = \frac{A\sigma_I + B\sigma_R}{\sigma_I + \sigma_R} \dots (7)$$

次に、この式(7)および外気温、養生、プレケーリングの影響を表す式(3)～式(5)を用いることによって、各ケースに対する効果について検討を行った。その結果を図-6～図-9に示す。なお、対象とする構造物の温度応力を外気温 15°C 一定で養生、プレケーリングを行わない場合について計算しておくことによって、これらの式を用いて各対策に対する効果を応力解析を行うことなく求めることが可能となる。外気温の影響としては、図-6に示すようにコンクリート打設時の外気温が 15°C と 25°C で比較すると、外気温の高い 25°C の方が温度ひびわれ指数は小さくなり、外気温 15°C に対し約0.93～1.00倍となっている。一方、外気温 15°C と 5°C で比較すると、外気温が 5°C となることによって温度ひびわれ指数は約1.15～1.18倍となっている。また、これらの影響はHが大きくかつ外部拘束の程度が小さいほど顕著に現れている。すなわち、コンクリート

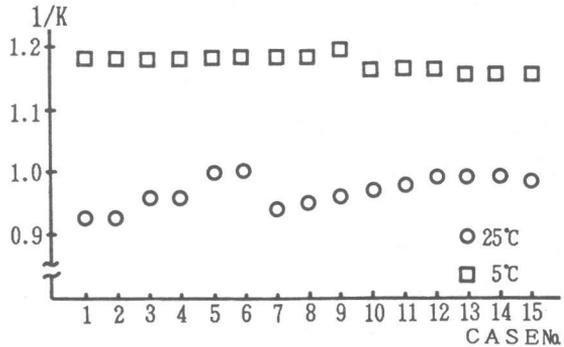


図-6 外気温の温度ひびわれ指数に与える影響

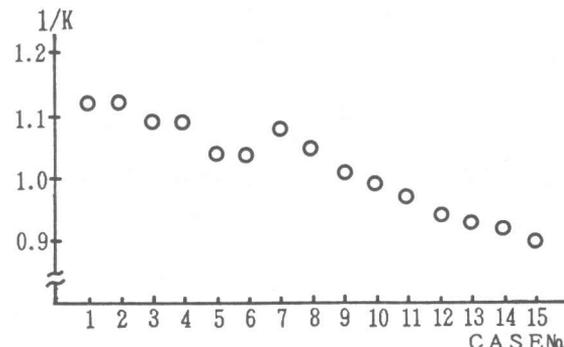


図-7 養生の温度ひびわれ指数に与える効果

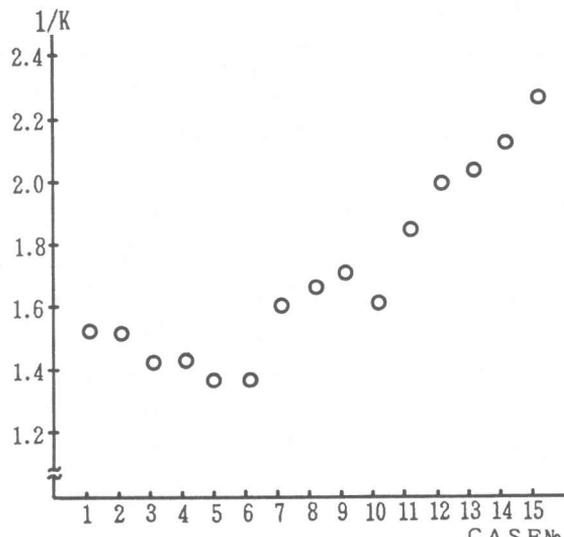


図-8 プレケーリングの温度ひびわれ指数に与える効果

打設時の外気温は高いほど温度ひびわれに対して危険となり、この影響は、 H が大きいかつ外部拘束作用が小さいほど顕著となる。養生の影響として、ここでは一例として、外気温 15°C において養生を行った場合を図-7に示す。この図より養生は、内部拘束応力の卓越する構造物において温度ひびわれ指数を約 $1.04\sim 1.12$ 倍に増加させる働きがある。しかし、外部拘束の程度が大きくなるにしたがって、その影響は小さくなり外部拘束応力の卓越する構造物に対しては、温度ひびわれ指数を約 0.9 倍に減少させる傾向がある。プ

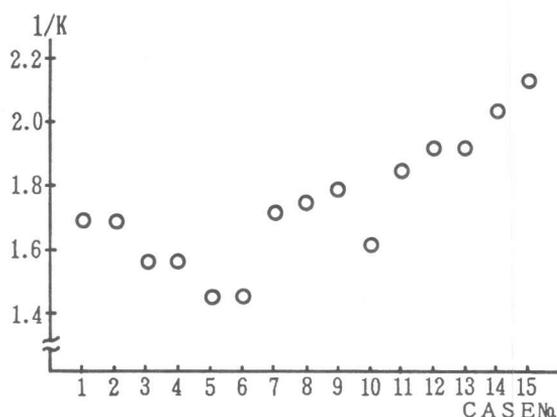


図-9 養生+プレクーリングの温度ひびわれ指数に与える効果

レクーリングの影響として、ここでは、一例として、外気温 15°C においてプレクーリングを行った場合を図-8に示す。この図より、プレクーリングは温度ひびわれ指数を約 $1.37\sim 2.27$ 倍に増加させる働きがあり、この影響は、外部拘束の程度が大きくなるにしたがって顕著となっている。また、図-9に示す外気温 15°C において、養生とプレクーリングの両方を行った場合の影響としては、先に述べたように、個々の対策の影響をかけ合わせることによって推測できると考えられる。しかし、ここではプレクーリングの影響が大きく、プレクーリングのみを行った場合と同様の傾向を示している。

5. 結論

この研究で明らかになったことをまとめると以下の通りである。

- (1) 各パラメータのマット状構造物の温度応力に及ぼす影響は、温度応力を内部拘束応力と外部拘束応力に分けることによって、高さ H に大きく支配されていることが明らかとなった。
- (2) コンクリート打設時の外気温は、高いほど温度ひびわれに対し危険となり、この影響は、 H が大きいかつ外部拘束作用が小さいほど顕著となる。
- (3) 養生は内部拘束応力の卓越する構造物においてはひびわれ防止に有効な対策となるが、外部拘束応力が卓越する場合には、ひびわれを生じさせる恐れがある。一方、プレクーリングは外部拘束応力の有無にかかわらずひびわれ防止に役立つ。また養生およびプレクーリングの両方を行った場合には、それらの個々の影響をかけ合わせることによってその影響を推測できる。
- (4) 対象となるマット状構造物の外気温 15°C で養生およびプレクーリングを行わない場合の温度応力を計算することによって、ここで提案した式により外気温、養生、プレクーリングが温度ひびわれ制御にどの程度有効であるかを、簡便に計算することができる。

なお、本研究の一部は、昭和61年度文部省科学研究費・奨励研究(A)によったものである。

参考文献

- (1) 土木学会：コンクリート標準示方書、施工編、1986年
- (2) コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書、1985年