

# スラブ状マスコンクリートの温度ひびわれ 制御対策の効果に関する研究

## A STUDY ON THE EFFECT OF CONTROL METHOD OF THERMAL CRACKING IN MASS CONCRETE SLAB

梅原秀哲\*・吉田弥智\*\*

By Hidetaka UMEHARA and Hirotomo YOSHIDA

There are many methods ranging over design and construction to control thermal cracking in mass concrete structures. However, it is necessary to evaluate the effect of each method quantitatively in order to control thermal cracking effectively.

In this study the equations to express the effect of the methods, for example, concreting temperature, curing method, and lift separation, to control thermal cracking in mass concrete slab are obtained in the result of thermal stress analysis. The most effective method according to the size of the structure and the external restraining level can be selected easily using these equations.

*Keywords*: mass concrete, thermal cracking, concreting temperature, curing method, lift separation

### 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化およびポンプ施工の普及等の施工方法の進歩、発展により、従来はコンクリートダムまたは部材寸法の非常に大きな構造物に特有のものと考えられていた温度ひびわれの問題が、比較的小型の構造物でも生じる場合がしばしばみられる。昭和61年度に改訂されたコンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では、このような現状を踏まえ、マスコンクリートとして取り扱うべき構造物は、橋脚基礎のようなスラブ状構造物では厚さ80~100 cm以上、下端が拘束された壁状構造物では厚さが50 cm以上と規定されている。この規定により、多くの構造物がマスコンクリート構造物に該当し、温度ひびわれの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の制御を検討する必要が生じている。温度ひびわれの制御方法としては、材料および配合の選定、リフト分割、打込み時間間隔、打設温度、養生方法の選定などがあり、施工全般にわたっての検討が必要である。しかし温度ひびわれ制御に関する

研究は、最近までコンピュータによる温度応力解析が容易に行えなかったため、その大部分が制御対策の定性的な研究であり<sup>2),3)</sup>、各対策の有効性を定量的に扱った研究は、小野ら<sup>4)</sup>や吉岡ら<sup>5)</sup>によって行われているにすぎない。前者は統計的方法により検討した場合で、後者はセメント量、セメント種別、打設時期、リフト高さ等の影響を定量的に比較した場合であるが、汎用性を考慮し、各対策の効果を数式を用いて定量的に表わした研究はほとんどないといえよう。

そこで、本研究では、比較的温度応力解析を行いやすいスラブ状構造物を対象として、構造物の形状、岩盤等の外部拘束の程度、コンクリート打設時の外気温等の施工条件に対して、打設温度、養生方法、リフト分割等の対策をパラメータにとり、温度応力解析を行うことによって、それぞれの温度ひびわれ制御対策の効果を定量的に求めることを目的とするものである。

### 2. 解析パラメーター

解析パラメーターとして、表—1に示すような値を選定した。特に形状および外部拘束の程度に関するパラメーターはコンクリート標準示方書<sup>1)</sup>を参考にして定めた。形状としては、スラブ状構造物を対象としているので、高さは $H=0.75, 1.5, 3.0$  mの3水準とし、長さ

\* 正会員 Ph.D. 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

\*\* 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (同上)

表-1 解析パラメーター

| 施 工 条 件    |              |                                       |            |          |          |
|------------|--------------|---------------------------------------|------------|----------|----------|
| 形 状        | 高 さ<br>H (m) | 0.75                                  | 1.5        | 3.0      |          |
|            | L/H          | 5                                     | 10         | 15       |          |
| 外部拘束の程度    | $E_c/E_r$    | $\infty$                              | 26         | 13       | 6.5, 1.0 |
| 外気温        |              | 冬<br>5℃                               | 春・秋<br>15℃ | 夏<br>25℃ |          |
| 温度ひびわれ制御対策 |              |                                       |            |          |          |
| 打設温度       |              | 各季節とも外気温+5℃<br>夏のみ外気温-5℃<br>(プレクーリング) |            |          |          |
| 養生対策       |              | 有 無                                   |            |          |          |
| リフト分割      |              | H=3mを2リフトで打設                          |            |          |          |

表-2 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 <sup>3</sup> ) | 0.00260  | 0.00231  |
| 熱膨張係数 (1/℃)               | 0.00001  | 0.00001  |
| 断熱温度上昇量                   | $Q(t) = Q_c (1 - \text{EXP}(-\gamma t))$                                   |          |
|                           | $Q_c(t)$ : 材令 t 日における断熱温度上昇量 (℃)   |          |
|                           | $Q_c$ : 終局断熱温度上昇量 (℃)  |          |
|                           | $\gamma$ : 温度上昇速度に関する実験定数  |          |
| 打設温度                      | Q (℃)  | $\gamma$ |
| 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 <sup>2</sup> )<br>材令3日まで |          |
|                           | $E_c(t) = 1.5 \times 10^4 \sqrt{f'_c(t)}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )<br>材令3日以降 |          |
|                           | $f'_c(t)$ : 材令 t 日の圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )                             |          |
|                           | $f_t(t)$ : 材令 t 日の引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )                              |          |
|                           | $f'_c(t) = \frac{4.5 + 0.95t}{1.4\sqrt{f'_c(t)}}$ (91)                     |          |

Lは長さ高さの比  $L/H=5, 10, 15$  の3水準とした。なお、温度応力解析は二次元有限要素法を用いて行い、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。解析モデルは左右対称であるので、右側部分のみ解析対象となり、また、スラブ状構造物であるので奥行方向を半無限と仮定している。また、外部拘束の程度としては、材令28日のコンクリートのヤング係数と岩盤のヤング係数の比  $E_c/E_r$  を  $\infty, 26, 13, 6.5, 1.0$  の5水準とした。なお  $E_c/E_r = \infty$  は岩盤のヤング係数が0の場合を表わしている。さらに、コンクリート打設時の外気温としては、夏25℃、春、秋15℃(標準の季節とする)、冬5℃の3水準とし、打設後も一定と仮定した。

温度ひびわれ制御対策として、ここでは、施工方法を変えることを目的とし、特に打設温度、養生方法、リフト分割を対象とした。したがって、材料および配合に対しては、セメントは普通ポルトランドセメントを用い、単位セメント量  $300 \text{ kg/m}^3$ 、28日の圧縮強度を  $300 \text{ kgf/cm}^2$  と仮定した。コンクリートの打設温度は、各季節とも外気温+5℃とし、夏期のみプレクーリングを行うこととした。プレクーリングを行う場合は、打設温度を10℃下げ、外気温-5℃と仮定した。養生方法として、熱伝達率を散水養生時に用いられる値  $10 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  とシート養生時に用いられる値  $5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  を仮定し、養生対策を行わない場合と行う場合の2種類とした。な

お養生期間は10日とした。また、解析モデルにおいて、対流境界は図-1に示す一点鎖線部分とし、養生の影響を受ける対流境界はコンクリート上面および側面の二点鎖線部分のみとした。なお、岩盤の表面に対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  $10 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  と仮定した。また、リフト分割については、標準の季節での打設を対象として  $H=3\text{m}$  の場合を1.8mと1.2mの2リフトに分割し、第1リフト打設後5日に第2リフトを打設すると仮定した。

以上のように、各パラメーターはできるだけ一般性をもたせるため、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-2に示す値<sup>1)</sup>を用いた。解析は  $H$  が3水準、 $L/H$  が3水準、 $E_c/E_r$  が5水準、養生が2水準、打設温度が4水準の360ケースと、 $H=3\text{m}$  の場合のリフト分割1水準30ケースの合計390ケースについて行った。温度ひびわれの検討にあたっては、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か月までを検討の範囲とした。

### 3. 解析結果

温度ひびわれ発生<sup>1)</sup>の検討は、次式に示すコンクリートの引張強度を温度応力の最大値で除した値で表わされる温度ひびわれ指数を用いるのが一般的である<sup>1)</sup>。

$$\text{温度ひびわれ指数} = f_t / \sigma_T \dots \dots \dots (1)$$

$\sigma_T$  : 水和熱に起因して生じた部材内の温度応力の最大値

$f_t$  :  $\sigma_T$ を算定した時刻におけるコンクリートの引張

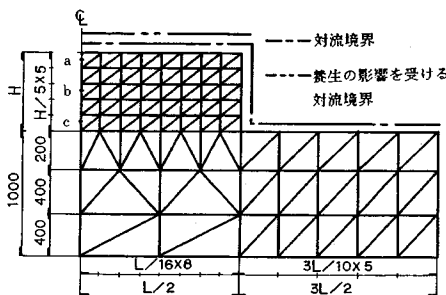


図-1 解析モデル

強度

そこで、各ひびわれ制御対策の効果を標準季節に打設し、養生等の対策を全く行わない場合の指数を基準として、対策を講じる場合の指数との比率を求めることによって表わすことにした。しかし、温度応力は、コンクリート部材内の不均一な温度差に起因する内部拘束作用によって生じる応力（内部拘束応力）と、岩盤あるいは旧コンクリートなどの隣接構造物からの外部拘束作用により生じる応力（外部拘束応力）の和で表わされる。この内部拘束応力と外部拘束応力は、その応力発生メカニズムが異なるため、各対策によってその効果が異なるものと考えられる。また、内部拘束応力および外部拘束応力に分けて各対策ごとに効果を検討し、その傾向を把握したうえで温度応力に対する対策の効果を検討する方が、直接求めるよりも全体の傾向を把握しやすい。そこで、本研究では解析に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て取り扱うことにした。

ところで、温度応力の最大値  $\sigma_T$  を内部拘束応力と外部拘束応力に分ける場合、温度ひびわれ指数をそれぞれの和として表わすと、温度応力が分母となり式が複雑になる。そこで、ここでは温度ひびわれ指数の逆数である温度応力指数を次式のように定義し、内部拘束応力指数と外部拘束応力指数の和とした。

$$\text{温度応力指数} = \sigma_T / f_t = \sigma_I / f_t + \sigma_R / f_t \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{内部拘束応力指数} = \sigma_I / f_t$$

$$\text{外部拘束応力指数} = \sigma_R / f_t$$

$\sigma_I$  :  $\sigma_T$  を算定した時刻における内部拘束応力

$\sigma_R$  :  $\sigma_T$  を算定した時刻における外部拘束応力

そして、岩盤のヤング係数を 0 としたとき（計算では 0 とすると剛性マトリックスが Singular になり解けなくなるため  $E_r = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$  とした）の温度応力指数が、内部拘束応力指数に一致するので、岩盤のヤング係数が他の 4 水準 ( $E_c/E_r = 26, 13, 6.5, 1.0$ ) の場合の外部拘束応力指数は、それぞれの温度応力指数からこの内部拘束応力指数を差し引いたものとした。なお、温度応力の履歴は、各パラメーターによって異なるが、 $\sigma_T$  はほとんどが中層部分で生じている。また、岩盤のヤング係数が 0 の場合の最大応力の生じる材令と、他の 4 水準の場合の最大応力の生じる材令はすべてのケースにおいて一致した。このようにして、温度応力指数を内部拘束作用と外部拘束作用に分け、図-2 に示すようなフローに沿って各対策の効果を求めることにした。

まず、内部拘束作用について、標準季節に打設し対策を全く行わない場合の  $L/H = 5, 10, 15, H = 0.75, 1.5, 3.0 \text{ m}, E_c/E_r = \infty$  における内部拘束応力指数を基準として各対策ごとにその比率  $A_i$  を求める。なお対策  $i$  は、

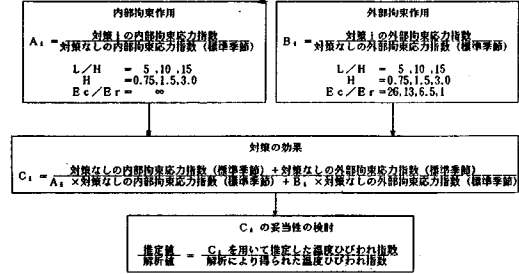


図-2 対策の効果の検討フロー

1. 打設季節, 2. プレクーリング, 3. 養生, 4. リフト分割に分類される。次に、外部拘束作用について、標準季節に打設し対策を全く行わない場合の  $L/H = 5, 10, 15, H = 0.75, 1.5, 3.0 \text{ m}, E_c/E_r = 26, 13, 6.5, 1.0$  における外部拘束応力指数を基準として各対策ごとにその比率  $B_i$  を求める。そして、これらの結果をもとにして温度応力全体で検討を行う。すなわち、各対策を行う場合の温度応力指数は、次式に示すように、 $A_i, B_i$  および標準季節に打設し対策を全く行わない場合の内部拘束応力指数と外部拘束応力指数を用いて表わすことができる。

$$\sigma_{Ti} / f_t = A_i \sigma_{BI} / f_t + B_i \sigma_{BR} / f_t \quad \dots\dots\dots (3)$$

$\sigma_{Ti} / f_t$  : 対策  $i$  を講じることによって求められる温度応力指数

$\sigma_{BI} / f_t$  : 標準季節に打設し、全く対策を行わない場合の内部拘束応力指数

$\sigma_{BR} / f_t$  : 標準季節に打設し、全く対策を行わない場合の外部拘束応力指数

したがって、各対策の効果も次式に示すように、標準季節に打設し対策を全く行わない場合の内部拘束応力指数と外部拘束応力指数だけを用いて表わすことができる。

なお、温度応力指数を用いる場合の対策  $i$  の効果を表わす値を  $1/C_i$  と定義すると、一般に用いられる温度ひびわれ指数の場合は  $1/C_i$  の逆数の  $C_i$  で表わされることになる。ここでは、 $C_i$  を用いることによって、温度ひびわれ指数で各対策の効果を表わすことにする。

$$C_i = \frac{\text{対策}(i) \text{を行う場合の温度ひびわれ指数}}{\text{対策を全く行わない場合の温度ひびわれ指数}} = \frac{f_t / (A_i \sigma_{BI} + B_i \sigma_{BR})}{f_t / (\sigma_{BI} + \sigma_{BR})} = \frac{\text{対策を全く行わない場合の温度応力指数}}{\text{対策}(i) \text{を行う場合の温度応力指数}} = \frac{(\sigma_{BI} + \sigma_{BR}) / f_t}{(A_i \sigma_{BI} + B_i \sigma_{BR}) / f_t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

このようにして  $C_i$  を求めることは、 $A_i, B_i$  に影響するパラメーターが既知であるので、 $C_i$  に影響するパラメーターを求めやすい利点がある。なお、 $A_i, B_i, C_i$  は、

各データに対して回帰分析を行うことにより求めた。そして、最後に  $C_i$  を用いてすべての場合の温度ひびわれ指数を推定し、解析により得られた温度ひびわれ指数と比較することによって、 $C_i$  の妥当性を検討した。

(1) 内部拘束作用

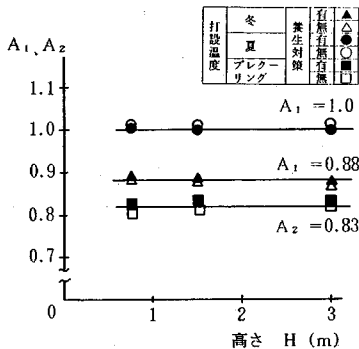
表一3に各対策ごとのそれぞれの高さに対する内部拘束応力指数の値を示す。なお、内部拘束応力指数は高さ  $H$  が同じであれば、 $L/H=5, 10, 15$  の場合でほとんど同じ値を示す。これは、スラブ状構造物においては、最大応力が生じる中央部分では、温度分布は高さ方向に変化するが、長さ方向および奥行き方向はほとんど変化しない。したがって、内部の温度分布によってのみ生じる内部拘束応力は、 $L$  には影響されないためと考えられる。そこで、表では  $L/H=5$  の場合の値を示すことにした。

a) 打設温度

養生対策を行わない場合、行う場合それぞれについて、標準季節に打設する場合の内部拘束応力指数を基準として、各季節ごとの指数をこれらの指数で除することにより、打設温度による効果  $A_1$  を求めた。なお、プレクーリングの場合は、夏季の場合を基準として比率  $A_2$  を求めた。その比率と高さとの関係を図一3に示す。いずれ

表一3 内部拘束応力指数

| 対策     |         | H(m)  |       |  |
|--------|---------|-------|-------|--|
|        |         | 0.75  | 1.5   | 3.0  |
| 養生対策なし | 冬       | 0.122 | 0.273 | 0.349                                      |
|        | 春・秋     | 0.138 | 0.311 | 0.408                                      |
|        | 夏       | 0.139 | 0.312 | 0.411                                      |
|        | プレクーリング | 0.110 | 0.253 | 0.336                                      |
|        | リフト分割   |       |       | L/H=5: 0.36, L/H=10: 0.382, L/H=15: 0.403  |
| 養生対策あり | 冬       | 0.106 | 0.237 | 0.304                                      |
|        | 春・秋     | 0.119 | 0.269 | 0.352                                      |
|        | 夏       | 0.120 | 0.269 | 0.355                                      |
|        | プレクーリング | 0.099 | 0.226 | 0.297                                      |
|        | リフト分割   |       |       | L/H=5: 0.320, L/H=10: 0.339, L/H=15: 0.344 |



図一3 内部拘束作用における打設温度の効果

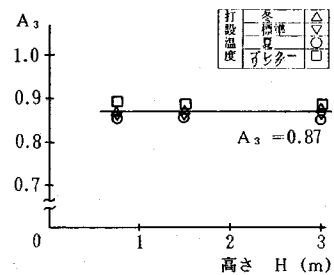
の場合も、比率は高さの影響をほとんど受けず一定の値を表わし、また養生対策の有無にかかわらず同じ値を示す。すなわち、冬季に打設する場合は、春、秋の標準季節に比べ、12%ほど内部応力が低減され、 $A_1=0.88$  となるが、夏季に打設する場合は、ほとんど同じ値を示し  $A_1=1.0$  となる。しかし、夏季に打設温度を  $10^{\circ}\text{C}$  下げるプレクーリングを行うことにより、夏季に対して17%ほど内部拘束応力が低減され  $A_2=0.83$  となり、効果があることが認められる。

b) 養生対策

打設温度ごとに養生対策を行わない場合の内部拘束応力指数を基準として、養生対策を行う場合の指数との比率  $A_3$  を求めることにより、養生対策の効果を検討した。その比率と高さとの関係を図一4に示す。いずれの場合も高さの影響をほとんど受けず一定の値を示し、また、各打設温度ともほとんど同じ比率を示している。すなわち、養生を行うことにより、高さや打設温度にかかわらず、13%ほど内部拘束応力が低減され、 $A_3=0.87$  となる。しかし、ここでの養生対策はコンクリート打設後10日間シート養生を行った場合であり、養生方法や養生期間を変えると異なる傾向を示す可能性がある。

c) リフト分割

リフト分割は、標準季節において高さ3mのスラブを1.8mと1.2mの2リフトに分割し、第1リフト打設後5日に第2リフトを打設すると仮定した。したがって、養生対策を行わない場合行う場合それぞれについて、標準季節に高さ3mを1回で打設する場合の内部拘束応力指数を基準として、リフト分割を行う場合の指数をこれらの指数で除することにより、その比率  $A_4$  を求めた。ところで、この場合の内部拘束応力指数は表一3に示すように、 $L/H$  の値によって異なっている。内部拘束応力指数は  $H$  が同じならば  $L/H$  の影響をほとんど受けないと述べたが、リフト分割により材令5日までは  $H=1.8\text{m}$ 、材令5日以降は  $H=3\text{m}$  となり、高さに変化する。したがって、 $L/H$  が変化し、この変化が内部拘束応力指数に影響するものと考えられる。そこで、図一5に示すように、 $A_4$  と  $L/H$  との関係を求めた。なお、

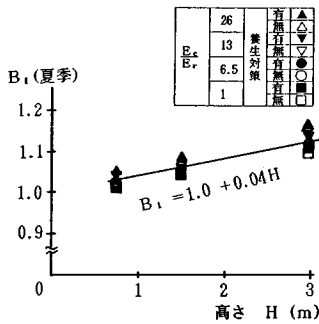


図一4 内部拘束作用における養生対策の効果

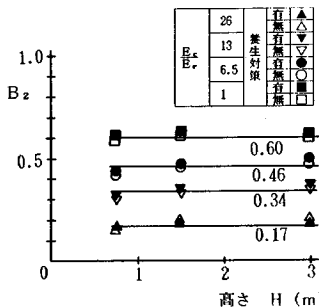


の場合は23%ほど減少している。したがって、冬季は標準季節に比べ外部拘束応力が減少し、その比率は  $B_1 = 0.9 - 0.04 H$  と高さの一次関数で表わすことができる。

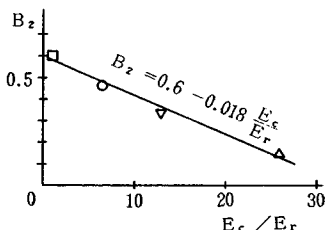
次に、図一7に夏季に打設する場合を示す。冬季の場合と同じく、養生の影響はほとんどないといえよう。その傾向は、外部拘束の程度にかかわらず高さが高くなるほど外部拘束応力が増加する。0.75 mの高さの場合は、外部拘束応力は3%ほど増加し、3 mの高さの場合は、12%ほど増加している。したがって夏季は標準季節に比べ外部拘束応力が増加し、その比率は  $B_1 = 1.0 + 0.04 H$  と高さの関数で表わすことができる。さらに、図一8にプレクーリングを行う場合を示す。冬季、夏季の場合と同じく養生の影響はほとんどないといえよう。また、



図一7 外部拘束作用における夏季打設の影響



図一8 外部拘束作用におけるプレクーリングの効果 (高さによる影響)



図一9 外部拘束作用におけるプレクーリングの効果 (外部拘束の影響)

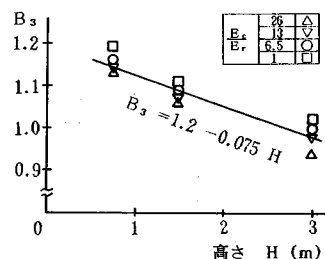
外部拘束の程度ごとに各比率が高さにかかわらずほとんど一定の値を示している。すなわち、プレクーリングを行うことにより、 $E_c/E_r = 26, 13, 6.5, 1.0$  でそれぞれ、83%, 66%, 54%, 40% も外部拘束応力が減少し、外部拘束の程度が小さいほど対策としての効果が大いことが認められる。さらに、図一9に示すように、その比率  $B_2$  と  $E_c/E_r$  との関係の求めると、 $B_2 = 0.6 - 0.018 E_c/E_r$  となり、 $E_c/E_r$  の一次関数で表わすことができる。

b) 養生対策

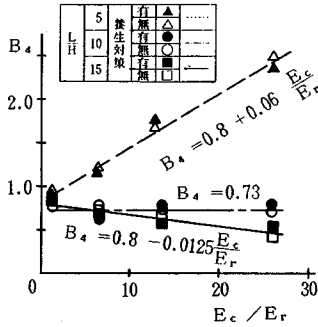
養生対策を行わない場合の内部拘束応力指数を基準として、養生対策を行う場合の指数との比率  $B_3$  を求めることにより、養生対策の効果を検討した。その結果、 $L/H = 5, 10, 15$  における比率は、 $H$  が同じであればほとんど同じ値を示した。また、各打設温度における比率も  $H$  が同じであればほとんど同じ値を示した。したがって、図一10に示すように外部拘束の程度ごとに、高さとの関係を求めた。高さが高くなるにつれて外部拘束応力が減少し、この傾向は外部拘束の程度に無関係であることが認められる。高さが0.75 mの場合は、養生を行うことによって外部拘束応力が15%ほど増加し、対策として逆効果になる可能性を示している。一方、高さが3 mの場合は、外部拘束応力が3%ほど減少し、対策として有効であることが認められる。そしてその関係を求めると、 $B_3 = 1.2 - 0.075 H$  となり高さの一次関数で表わすことができる。なお、ここでの養生対策はコンクリート打設後10日間シート養生を行った場合だけを対象としたものである。

c) リフト分割

リフト分割は、標準季節において、高さ3 mのスラブを1.8 mと1.2 mの2リフトに分割し、第1リフト打設後5日に第2リフトを打設すると仮定した。したがって、養生対策を行わない場合行う場合それぞれについて、標準季節に高さ3 mを1回で打設する場合の外部拘束応力指数を基準として、リフト分割を行う場合の指数をこれらの指数で除することにより、その比率  $B_4$  を求めた。なお、リフト分割を行う場合の最大応力は、行わない場合と同様に中層で、いずれも材令2か月近く



図一10 外部拘束作用における養生対策の効果



図一11 外部拘束作用におけるリフト分割の効果

で生じている。図一11に、養生対策の有無および  $L/H$  ごとに求めた外部拘束の程度と  $B_4$  との関係を示す。養生対策を行う場合と行わない場合はいずれも、外部拘束の程度および  $L/H$  ごとにほとんど同じ値を示しており、 $B_4$  は養生対策には影響されないことを示している。 $L/H=5$  の場合は、リフト分割を行うことによって逆に外部拘束応力が増加し、外部拘束の程度がコンクリートと同程度すなわち  $E_c/E_r=1$  の場合は、リフト分割を行わない場合と同程度の外部拘束応力を生じ、外部拘束の程度が小さくなるにつれて、2~3倍にもなる。一方、 $L/H=10$  の場合はリフト分割を行うことによって、外部拘束の程度にかかわらず外部拘束応力が27%減少し、 $L/H=15$  の場合は、外部拘束の程度がコンクリートと同程度で約20%、そして外部拘束の程度が小さくなるにつれて60%近くまで減少する。言い換えれば、リフト分割は  $L/H$  が10~15の場合は対策としての効果が期待できるが、 $L/H$  が5の場合は対策として逆効果となる可能性があるといえよう。比率  $B_4$  と  $E_c/E_r$  との関係の求めると、 $L/H=5$  の場合は  $B_4=0.8+0.06 E_c/E_r$ 、 $L/H=10$  の場合は  $B_4=0.73$ 、 $L/H=15$  の場合は  $B_4=0.8-0.0125 E_c/E_r$  と  $E_c/E_r$  の一次関数で表わされる。

以上、外部拘束応力に関しては、表一6に示すように、春、秋の標準季節に比べ、冬季に打設する場合は、13~23%減少し、夏季に打設する場合は、3~12%増加する。いずれの場合もその割合は高さの一次関数で表わされる。次に、夏季にプレクーリングを行うことにより、外部拘束応力は  $E_c/E_r=26$  で83%、 $E_c/E_r=1$  で40%も

プレクーリングを行わない場合よりも減少し、プレクーリングの効果が認められる。その割合は高さによらず  $E_c/E_r$  の一次関数で表わされる。また、養生対策を行うことによって、行わない場合に比べ、高さが0.75mの場合は外部拘束応力が15%ほど増加するが、3.0mの場合は3%ほど減少し、対策として養生を行うことが逆効果となる可能性を示している。なおその割合は高さの一次関数で表わされる。次に、リフト分割を行うことにより外部拘束応力が  $L/H=15$  の場合で20~60%、 $L/H=10$  の場合で27%低減され、対策として効果があるといえよう。しかし、 $L/H=5$  の場合は、リフト分割を行うことにより2~3倍の外部拘束応力が生じる可能性があり、リフト分割が必ずしもすべての場合で効果があるとはいえないことを示している。効果の割合は、各  $L/H$  ごとに  $E_c/E_r$  の一次関数で表わされる。また、係数  $B_4$  も  $A_1$  と同様1つの対策ごとに別々に求められる。たとえば、リフト高さが1.5mで冬季に養生対策を行う場合は、標準季節で養生対策を行わない場合に比べ、打設温度の影響  $B_1=0.84$  と養生対策の効果  $B_3=1.09$  を乗じた  $B=B_1 \times B_3=0.92$  すなわち、8%外部拘束応力が低減されることになる。これは表一5に示す  $H=1.5$  mの外部拘束応力指数の冬季打設の養生対策ありの値を標準打設の養生対策なしの値で除した結果に等しい。このようにいくつかの対策を組み合わせる場合その結果は、それぞれの対策の係数を乗じることにより求められる。

(3) 対策の効果

これまででは、各対策の効果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対策を講じる場合、この両者を重ね合わせ温度応力全体で検討を行う必要がある。そこで、標準季節に打設し対策を全く行わない場合の内部拘束応力指数、外部拘束応力指数(表一3、表一5参照)と、これまでに得られた  $A_i$ 、 $B_i$  の各係数(表一4、表一6)を式(4)に代入して、対策の効果を表わす値  $C_i$  を求めた。なお式(4)に示すように  $C_i$  は温度ひびわれ指数による各対策の効果を表わしている。したがって、 $C_i$  が1.0以上の場合は、効果があることを意味する。

a) 打設温度

冬季打設および夏季打設における  $C_1$  を  $A_1$ 、 $B_1$  を用いて求めた。その結果、冬季、夏季とも、 $L/H=5, 10, 15$  のいずれの場合も  $C_1$  は、外部拘束の程度および高さが同じであれば、ほとんど同じ値を示した。また、 $A_1$  は定数で  $B_1$  は高さの関数で表わされる。したがって、冬季の場合は図一12に、夏季の場合は図一13に示すように、外部拘束の程度ごとに  $C_1$  と高さとの関係を求めた。図一12より、冬季では標準季節に比べ、温度ひび

表一6 外部拘束作用における各対策の効果

| 対 策     | 効果を表す係数 $B_i$   |
|---------|---|
| 打設季節    | $B_1$ 冬: $0.9 - 0.04H$<br>夏: $1.0 + 0.04H$  |
| プレクーリング | $B_2$ $0.6 - 0.018 E_c/E_r$   |
| 養生      | $B_3$ $1.2 - 0.075 H$   |
| リフト分割   | $B_4$ $L/H=5$<br>$0.8 + 0.06 E_c/E_r$<br>$L/H=10$<br>$0.73$<br>$L/H=15$<br>$0.8 - 0.0125 E_c/E_r$ |

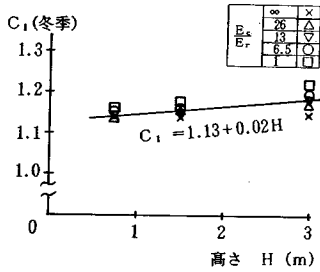


図-12 冬季打設の影響

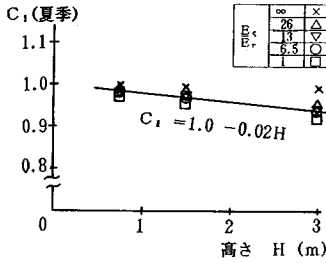


図-13 夏季打設の影響

われ指数は14~20%ほど大きくなり、また、高さが高くなるにつれて増加する傾向が認められる。これは、冬季の方が標準季節よりひびわれの可能性が14~20%少なくなることを表わしている。なお、この傾向は、外部拘束の程度にほとんど影響されないことが認められる。 $C_1$ と高さとの関係を求めると、 $C_1 = 1.13 + 0.02H$ となり、高さの一次関数で表わされる。一方、図-13より、夏季では標準季節に比べ温度ひびわれ指数は1~10%ほど小さくなり、また、高さが高くなるにつれて減少量が大きくなる傾向が認められる。これは、夏季の方が標準季節よりひびわれの可能性が1~10%高くなることを表わしている。なお、この傾向は、外部拘束の程度にほとんど影響されないことが認められる。 $C_1$ と高さとの関係を求めると、 $C_1 = 1.0 - 0.02H$ となり、高さの一次関数で表わされる。

次に、夏季にプレクーリングを行う場合の $C_2$ を $A_2$ 、 $B_2$ を用いて求めた。なお、この場合は夏季打設で養生等の対策を全く行わない場合の内部拘束応力指数および外部拘束応力指数を式(4)に代入して求めた。その結果、 $H = 0.75, 1.5, 3.0$ mのいずれの場合も $C_2$ は外部拘束の程度および $L/H$ が同じであれば、ほとんど同じ値を示した。また、 $A_2$ は定数、 $B_2$ は $E_c/E_r$ の一次関数で表わされる。したがって、図-14に示すように、 $L/H$ ごとに $C_2$ と $E_c/E_r$ との関係を求めた。 $L/H$ ごとにその傾向が異なるが、プレクーリングを行うことによって、温度ひびわれ指数は40~90%ほど大きくなり、ひびわれの可能性がそれだけ少なくなることを表わしている。 $L/H = 5$ の場合は、外部拘束の程度が小さくなる

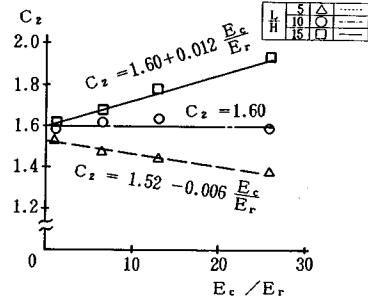


図-14 プレクーリングの効果

につれて、温度ひびわれ指数の増加の割合は小さくなる。また、 $L/H = 10$ の場合は、外部拘束の程度によらず一定値を示し、 $L/H = 15$ の場合は、外部拘束の程度が小さくなるにつれて、温度ひびわれ指数は増加の傾向を示す。なお、 $L/H = 5, 10, 15$ の場合で $C_2$ はそれぞれ1.4~1.5, 1.6, 1.6~1.9となり、 $L/H$ が大きいほど温度ひびわれ指数は増加し、対策の効果が大きくなることを表わしている。 $C_2$ と $E_c/E_r$ との関係を求めると、 $L/H = 5$ の場合は、 $C_2 = 1.52 - 0.006 E_c/E_r$ 、 $L/H = 10$ の場合は、 $C_2 = 1.60$ 、 $L/H = 15$ の場合は、 $C_2 = 1.60 + 0.012 E_c/E_r$ となり、 $E_c/E_r$ の一次関数で表わされる。なお、 $E_c/E_r = \infty$ の場合は、 $C_2 = 1.2$ となり、これらの式で表わすことができない。したがって、プレクーリングの場合は、 $E_c/E_r = 26$ までを適用の範囲とする。

b) 養生対策

養生対策の効果を表わす係数 $C_3$ を $A_3$ 、 $B_3$ を用いて求めた。その結果、 $L/H = 5, 10, 15$ のいずれの場合も $C_3$ は、外部拘束の程度および高さが同じであれば、ほとんど同じ値を示した。また、 $A_3$ は定数で $B_3$ は高さの関数で表わされる。したがって、図-15に示すように外部拘束の程度ごとに $C_3$ と高さとの関係を求めた。高さが約1.5mまでは、 $C_3$ が1.0以下となり養生対策を行うことによって、逆にひびわれの可能性が高くなる傾向にある。しかし、高さが約1.5m以上は、 $C_3$ が1.0以上となり、最大10%ほど温度ひびわれ指数が増加する傾向にある。なお、この傾向は内部拘束作用が卓越する場合を除き、外部拘束の程度にほとんど影響されない

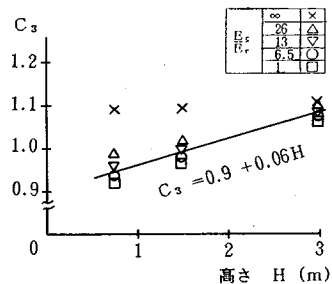


図-15 養生の効果



ことが認められる。しかし、ここでの養生対策はコンクリート打設後10日間シート養生を行った場合だけを対象としたものである。 $C_3$ と高さとの関係を求めると、 $C_3=0.90+0.06H$ となり、高さの一次関数で表わされる。

c) リフト分割

リフト分割の効果を表わす係数  $C_4$  を  $A_4$ ,  $B_4$  を用いて求めた。なお、この場合は、高さ3mを1.8mと1.2mの2リフトに分割する場合を対象としている。 $A_4$  は  $L/H$  の関数で、また  $B_4$  は  $L/H$  ごとに  $E_c/E_r$  の関数で表わされる。したがって、図-16に示すように、 $L/H$  ごとに  $E_c/E_r$  と  $C_4$  との関係を求めた。 $L/H=5, 10, 15$  のいずれの場合も  $E_c/E_r$  にかかわらずほとんど一定値を示した。 $L/H=5$  の場合は、 $C_4=0.97$  でリフト分割を行うことにより、逆にひびわれの可能性が増加することを示している。一方、 $L/H=10, 15$  の場合は、それぞれ  $C_4=1.17, 1.26$  となり、対策として効果があることを示している。なお、 $E_c/E_r=\infty$  の場合は、 $L/H=5, 10, 15$  のいずれの場合も  $C_4=1.06$  となり、図に示すような関係で表わすことができない。したがって、リフト分割の場合は  $E_c/E_r=26$  までを適用の範囲とする。さらに、図-17に示すように、 $L/H$  と  $C_4$  との関係を求めた。その結果、 $L/H$  が大きくなるにつれて、リフト分割の効果が大きくなり、その関係を求めると、 $C_4=0.84+0.03 L/H$  と  $L/H$  の一次関数で表わされる。

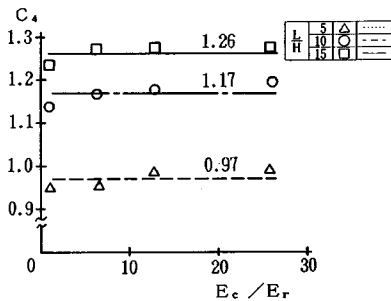


図-16 リフト分割の効果 (外部拘束の影響)

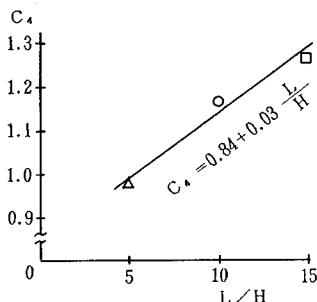


図-17 リフト分割の効果 (L/Hの影響)

以上、標準季節に打設し、対策を全く行わない場合の温度ひびわれ指数を基準として、対策を行う場合の温度ひびわれ指数との比率  $C_i$  を求めることによってその効果を求めた。その結果を表-7に示す。冬季に打設する場合は、春、秋の標準季節に比べ、14~20% ひびわれの可能性が少なくなるが、夏季に打設する場合は、逆に1~10% ひびわれの可能性が増加する。また、夏季にプレクーリングを行うと40~90%も温度ひびわれ指数が増加し、対策として非常に効果がある。次に養生対策は、高さが約1.5mまでは逆効果となり、高さが約1.5m以上は対策として効果はあるが10%程度である。さらに、高さが3mの場合で、1.8mと1.2mの2リフトに分割すると、 $L/H=5$  の場合はリフト分割の効果がほとんどないが、 $L/H=15$  の場合は30%ほど効果がある。

(4) 対策の適用

式(4)において、各係数  $A_i$ ,  $B_i$  は1つの対策ごとに求められ、また温度応力指数は標準季節に打設し対策を全く行わない場合の値を用いている。したがって、係数  $C_i$  も1つの対策ごとに求められ、いくつかの対策を組み合わせる場合はそれぞれの対策を乗じることにより求められる。たとえば夏季に養生対策およびプレクーリングを行う場合は表-8に示すように、 $C_1$  (夏季打設)、 $C_2$  (プレクーリング)、 $C_3$  (養生対策) を乗じることによりその効果を求めることができる。このようにして標

表-7 各対策の効果

| 対策           |         | 効果を表す係数 $C_i$  |
|--------------|---------|--|
| 打設温度         | 季節      | $C_1$ 冬: $1.13+0.02H$<br>夏: $1.0-0.02H$  |
|              | プレクーリング | $C_2$ $L/H=5$ : $1.52-0.006E_c/E_r$<br>$L/H=10$ : $1.60$<br>$L/H=15$ : $1.60+0.012E_c/E_r$ |
| 養生           |         | $C_3$ $0.90+0.06H$   |
| リフト分割 (H=3m) |         | $C_4$ $0.84+0.03 L/H$  |

表-8  $C_i$ の妥当性の検討

|        | 係数      | データ数            | 推定値/解析値 |        |      |
|--------|---------|-----------------|---------|--------|------|
|        |         |                 | 平均値     | 変動係数 % |      |
| 養生対策なし | 冬       | $C_1$           | 45      | 1.00   | 1.98 |
|        | 標準      |                 |         |        |      |
|        | 夏       | $C_1$           | 45      | 0.99   | 1.59 |
|        | プレクーリング | $C_1, C_2$      | 36      | 0.98   | 6.63 |
| 養生対策あり | リフト分割   | $C_4$           | 12      | 1.00   | 6.43 |
|        | 冬       | $C_1, C_3$      | 45      | 1.00   | 5.56 |
|        | 標準      | $C_1$           | 45      | 0.99   | 5.78 |
|        | 夏       | $C_1, C_3$      | 45      | 0.99   | 6.19 |
|        | プレクーリング | $C_1, C_2, C_3$ | 36      | 0.98   | 7.50 |
|        | リフト分割   | $C_3, C_4$      | 12      | 0.99   | 6.22 |
|        |         |                 | 321     | 0.99   | 5.40 |

準季節に打設し対策を全く行わない場合の温度ひびわれ指数と  $C_i$  を用いて、各対策を行う場合の温度ひびわれ指数を推定した。さらに、解析によって得られた温度ひびわれ指数（表—3、表—5参照）と比較を行うことにより、 $C_i$  の妥当性を検討した。その結果、表—8に示すように各対策ごとに推定値と解析値との比率の平均値および変動係数を求めると、平均値は約 1.0、変動係数は最大で 7.5%、全データで 5.4% となり、 $C_i$  は各対策ごとの傾向を十分表わしていると判断できよう。なお、高さは 0.75~3 m、長さ高さの比は 5~15、外部拘束の程度は  $E_c/E_r$  で 1~ $\infty$  までであるが、養生対策、プレケーリングおよびリフト分割では  $E_c/E_r=26$  までが適用の範囲である。

そして、この方法は特に、スラブ状構造物を施工する際の温度ひびわれ発生の検討で、温度ひびわれ発生の可能性があり、施工条件の変更により対策をたてる必要がある場合に有効である。すなわち、同一構造物に対して、対策の効果を表わす係数  $C_i$  を用いて相対的な評価を行うことにより、その構造物の形状および外部拘束の程度に応じた最も有効な対策を簡便に求めることができる。

#### 4. 結 論

スラブ状構造物を対象として、構造物の形状、岩盤等の外部拘束の程度、コンクリート打設時の外気温等の施工条件に対して、打設温度、養生方法、リフト分割等の温度ひびわれ制御対策の効果を簡易的にかつ定量的に求めることを目的として、温度応力解析を行い、以下のような結論を得た。

(1) 温度ひびわれ制御対策の効果を内部拘束作用と外部拘束作用に分けて検討し、その傾向を把握したうえで、全体の傾向を捉えることにより、かなりの精度でその効果を予測する簡便な式を提案することができた。

(2) 冬季に打設する場合は、春・秋の標準季節に比べ 14~20% ひびわれの可能性が少なくなるが、夏季に打設する場合は逆に 1~10% ひびわれの可能性が増加する。そしてその割合はリフト高さの一次関数で表わすことができる。

(3) 夏季にプレケーリングを行うことにより、行わない場合に比べ 40~90% もひびわれの可能性が減少する。プレケーリングは対策として非常に効果があり、そ

の効果の割合は、外部拘束の程度およびリフト高さとの長さの比に影響される。

(4) 養生対策として、コンクリート打設後 10 日間シート養生を行う場合だけを対象としたが、この対策を行うと内部拘束作用が卓越する場合を除いて、リフト高さが約 1.5 m 以上は対策として効果があるが、約 1.5 m 以下は逆効果となる。効果の割合は、高さの一次関数で表わされ、最大でも 10% 程度である。

(5) 高さ 3 m のスラブを 2 リフトに分割する場合、効果の割合は、長さ高さの比の一次関数で表わされ、その比が大きい場合は、30% ほど効果がある。

(6) いくつかの対策を組み合わせる場合には、各対策の効果を表わす係数を乗じることにより、その効果を求めることができる。特に、この方法は同一構造物で施工条件の変更により温度ひびわれ制御対策をたてる場合に有効であり、その構造物の形状および外部拘束の程度に応じた最も有効な対策を簡便に求めることができる。

本研究では、各対策の効果についてできるだけ汎用性を考慮して求めることにした。しかし、打設温度、養生対策、リフト分割等の対策においても、その対策を行う日数、外気温などいくつかの条件を仮定して計算を行っており、またここでは施工方法のみを対象として論じたが、より一般的な結果を得るにはさらに多くの解析を行い、種々の対策における効果を検討する必要があると思われる。

#### 参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，施工編，昭和 61 年制定，1986。
- 2) 久富康夫・藤木洋一：マッシュな鉄筋コンクリート構造物に発生する温度ひびわれの防止方法に関する研究，中国電力技研時報，pp.125~164，1975。
- 3) 田沢栄一・松岡康訓：マスコンクリートの施工法，コンクリート工学，Vol.15，No.10，pp.1~7，1977。
- 4) 小野 定・榊田泰仁・名倉健二・金森洋史・江渡正満：マスコンクリートの温度ひびわれ制御対策の研究，第 2 回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，pp.21~28，1984。
- 5) 吉岡保彦・両角昌公・渡部真次：マスコンクリートのひびわれ予測システムの開発とその適用例，第 2 回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，pp.29~34，1984。

(1987.8.6・受付)