

プレクーリングによるマスコンクリート 温度ひびわれ制御効果の解析

ANALYSIS OF THERMAL CRACK CONTROL BY MEANS OF PRECOOLING OF CONCRETE

* ** *** ****

木村克彦 ○小野 定 後藤貞雄 江渡正清

By Katsuhiko KIMURA, Sadamu ONO, Sadao GOTO and Masamichi ETO

This paper studies the effect of reduction of concrete placing temperature based on the results of numerical analysis of thermal stresses by FEM (finite element method) and simplified calculation method proposed by the authors.

As a result of this study, thermal stresses can be practically calculated by using the simplified calculation method. And authors found that the maximum temperature and the maximum average temperature were reduced by approximately 100% and 80%, respectively, of the precooling amount. Then, thermal stresses induced due to a temperature drop were reduced by about 30% of those of nonprecooling concrete when the concrete was precooled 10℃. Like this, precooling of concrete is one of usefull measures for the control of thermal cracking.

1. まえがき

本州四国連絡橋に代表される長大橋のアンカレイジや東京湾横断道路で計画されている人工島のようなマスコンクリートを設計、施工する場合の問題点の一つとして、セメントの水和熱による温度ひびわれが挙げられる。温度ひびわれの発生は、構造物の機能性、耐久性などに影響を及ぼすことから、構造物に有害な影響を及ぼさない範囲にひびわれの発生を制御する必要がある。温度ひびわれの制御対策としては、コンクリート温度を下げるために低発熱型セメントを使用したり、ひびわれ幅を分散させるために温度ひびわれ制御鉄筋を配筋したり等の各種の対策がこれまでに研究、実施されている¹⁾。

温度ひびわれ制御対策の中で、工法そのものとしては古くから実施されているが、近年我が国で比較的施工例が多くなっている対策の一つとして「プレクーリング工法」がある。プレクーリング工法は、ポストクーリング工法(一般的には、水を使用したバイプクーリングに代表される)と対をなす工法で、コンクリートの打込み前にコンクリートの練上り温度を低減するものである。図-1 にプレクーリング工法の系統図を示す。このように、プレクーリングは冷却の方法、冷却の時期等によって幾つかの方法に分けられる。プレクーリングは、マスコンクリートの温度ひびわれ制御に対して効果的であることが従来指摘されているが、その効果を定量的に検討したものは比較的少ないようである^{2) 3)}。

*工修 清水建設(株)土木本部技術第一部 (〒108 東京都港区三田3-13-16 三田43森ビル12F)

**工博 清水建設(株)土木本部技術第一部 (〒108 東京都港区三田3-13-16 三田43森ビル12F)

*** 東京ガス(株)生産技術部 (〒108 東京都港区海岸1-5-20)

****工修 清水建設(株)土木本部技術第一部 (〒108 東京都港区三田3-13-16 三田43森ビル12F)

本研究は、マスコンクリートの温度応力解析の方法として比較的多く使用されている「簡易増分解」に関して、解析の際重要な定数の一つになる「外部拘束度」の評価方法について検討し、さらに、有限要素法(FEM) および簡易増分解によりプレクーリングの温度ひびわれ制御効果を解析的に検討、比較したものである。

2. 解析概要

2.1 解析対象構造物⁴⁾

外部拘束度の検討およびプレクーリング効果の解析は、図-2 に示すようなLPG 地下タンクの底版を対象にして実施した。タンクの概要は、内径が50.2m、側壁厚が1.8mおよび底版厚が1.45m である。

2.2 解析方法

コンクリート打込み後のコンクリートの熱伝導解析(温度解析)はFEM により行った。また、熱応力解析(温度応力解析)は、FEM および簡易増分解により行った。

温度応力解析で、タンク底版外周部と内側との境界は、剛結合としたものと打継ぎ部の鉄筋の剛性をコンクリート断面に換算した2 ケースについて解析した。打継目には厚さ1 cmの平面要素を用い、鉄筋剛性の換算については、本構造物の場合は、底版厚が構造物全体の寸法に比べて薄く、曲げの影響より軸剛性の影響が卓越すると考え、等価ヤング係数 $E(E = A_s E_s / A_c$ 、ここに、 A_s : 鉄筋断面積、 A_c : コンクリート断面積、 E_s : 鉄筋のヤング係数)を $3.26 \times 10^5 \text{ t/m}^2$ とした。

2.2.1 FEM 解析

解析モデルは、図-3 に示すとおりであり、また、解析は軸対称回転体として行った。

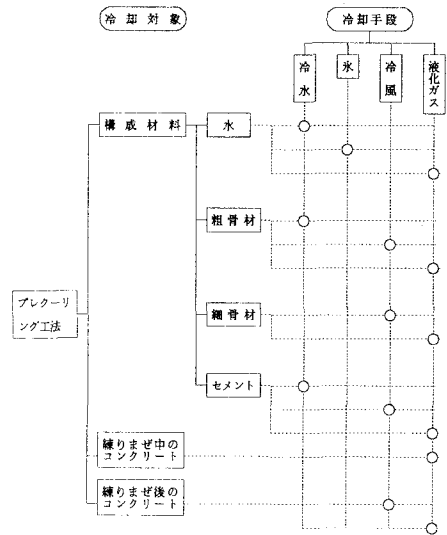


図-1 プレクーリング系統図

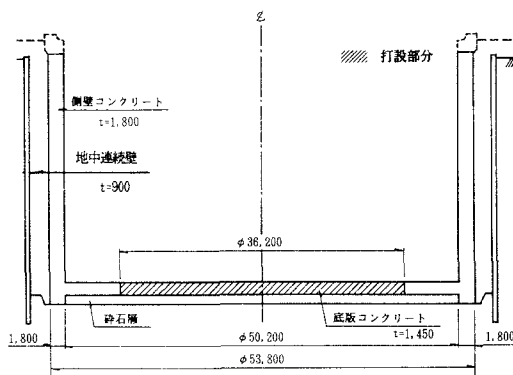


図-2 底版施工時地下タンク状況図

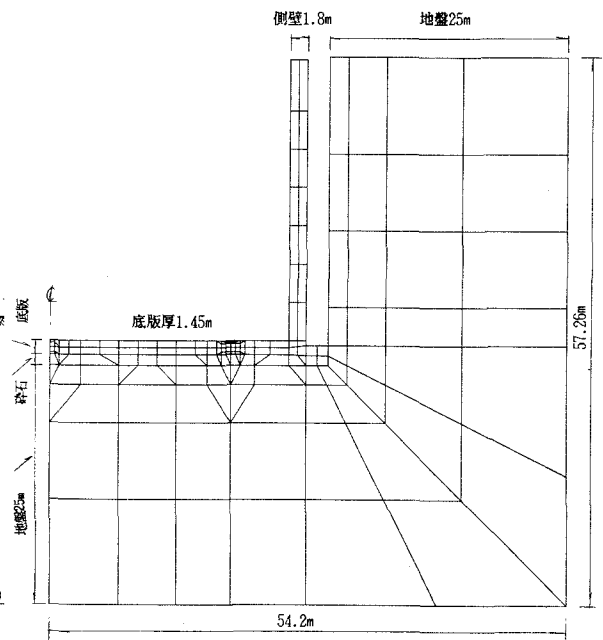


図-3 FEMによる温度応力解析モデル

2.2.2 簡易増分解

(1) 発生応力の算定法

外部拘束により発生する温度応力は式(1)で与えられるとする（以下増分解という）。

$$\sigma_{te}(t) = \sum \Delta \sigma_{te, j}(t') \quad (1)$$

$$\Delta \sigma_{te, j}(t') = B(t') \cdot \Delta \sigma_{t, j} \quad (2)$$

$$\Delta \sigma_{t, j} = R(t'_j) \cdot \alpha_c \cdot E_c(t'_j) \cdot (T_m^{t_j} - T_m^{t_{j-1}}) \quad (3)$$

ここに

$\Delta \sigma_{te, j}(t)$: 応力増分 $\Delta \sigma_{t, j}$ が材令 t で示す応力 (kg f / cm²)

$B(t')$: 材令 t におけるクリープによる応力緩和率

$$B(t') = 1 / (1 + \phi(t, t_{j-1}))$$

$\phi(t, t_{j-1})$: 材令 t_{j-1} 日に载荷されたコンクリートの材令 t におけるクリープ係数

$\Delta \sigma_{t, j}$: 材令 t_{j-1} から t_j の間に発生する応力度増分 (kg f / cm²)

$R(t'_j)$: 材令 t'_j における外部拘束度

E_c : コンクリート被拘束体のヤング係数 (kg f / cm²)

α_c : コンクリートの熱膨張率 ($=10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)

$T_m^{t_j}$: 材令 t_j での部材平均温度 ($^\circ\text{C}$)

$$t'_j = \frac{1}{2} (t_{j-1} + t_j), \quad t' = t - t_{j-1}$$

なお、式(1)で与えられる応力は断面の平均応力を意味する。

図-4 に平均温度と温度応力の関係を模式的に示した。

(2) 外部拘束度の評価

a. 外部拘束度の定義

底版中央部コンクリートのように既設の円筒状の構造物で拘束される場合の拘束度を次のように考え設定した。まず拘束度 R を式(4)で定義した。

$$R = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \sigma_R} \quad (4)$$

$$\Delta \sigma_R = -\alpha_c \cdot \Delta T \cdot E_c \quad (5)$$

ここに

$\Delta \sigma$: 底版中央部が ΔT 温度変化した場合、底版に発生する応力 (kg f / cm²)

$\Delta \sigma_R$: 底版中央部の ΔT の温度変化による変形が完全拘束された場合、底版に発生する応力 (kg f / cm²)

なお、既設部との相対変形はなく、地盤との摩擦はない、底版中央部は中実円版であると仮定している。

b. 算定モデル

底版中央部の拘束度は、図-5 に示す考え方でモデル化して算定する。

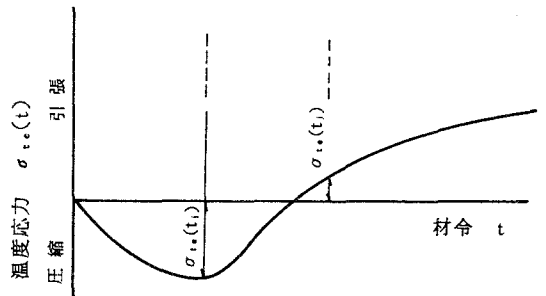
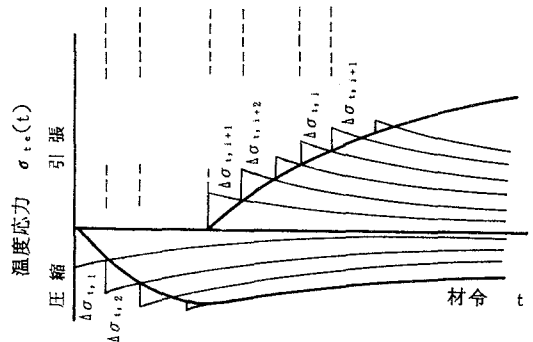
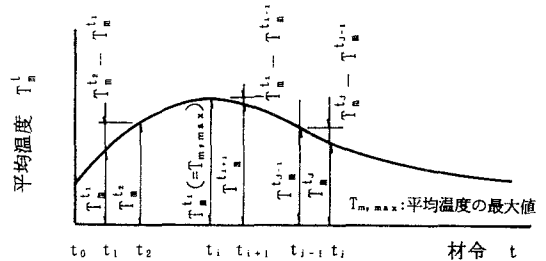


図-4 平均温度と温度応力との関係の模式図

図-5に示すように後打部の ΔT の温度変化によって既設部と後打部の境界に断面力 X が作用し、この断面力によって既設部は δ_m 変位し、後打部は δ_R 変位が拘束される。これら変位の間には先の仮定から式(6)、(7)の関係が成り立つ。

$$\delta_m = \delta_f + \delta_R \quad (6)$$

$$\delta_f = \alpha \cdot \Delta T \cdot r_i \quad (7)$$

ここに

δ_m : ΔT の温度変化による既設部の半径方向変位 (m)

δ_R : ΔT の温度変化による底版中央部の拘束変位 (m)

δ_f : ΔT の温度変化による底版中央部の自由変位 (m)

r_i : 底版中央部の外周半径 (図-5参照) (m)

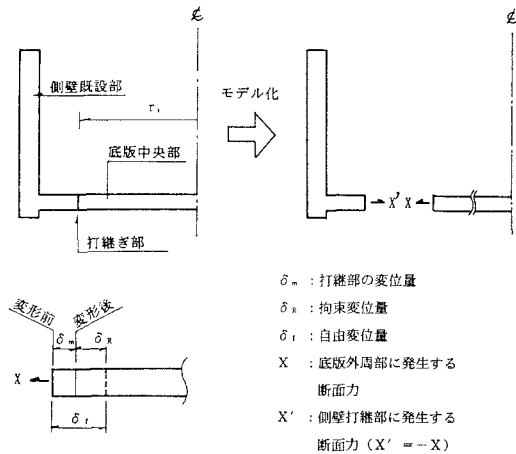


図-5 外周部変位と断面力との関係

c. 既設部の剛性の評価

既設部構造体に図-5のように外力が作用した場合の変位と断面力の関係を式(8)で与えられると

し、解析を三次元円筒シェルモデルにて行った。解析モデルは図-6のとおりであり、荷重は、打継部(節点a)に内向きの線荷重を作用させた。

$$\delta_s = \beta X' \quad (8)$$

ここに

δ_s : 断面力 X' による既設構造体打継部の半径方向変位 (m)

β : 拘束体の剛性 (m^2/tf)

X' : 側壁打継部に作用する断面力 ($X' = -X$) (tf/m)

$X' = -100 \text{ tf/m}$ (内向負)としてFEM解析した結果、 $\delta_s = -0.00081 \text{ m}$ (内方向変位負)となり、これから β を算定すれば、 $\beta = 8.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{tf}$ となる。よって式(8)は、次のとおりとなる。

$$\delta_s = 8.1 \times 10^{-6} X' \quad (9)$$

d. 外部拘束度の算定

まず、底版中央部外周に断面力 X が作用した場合の外周部変位と断面力との関係を求める。底版外周部に X が作用した場合の変位 δ_i とひずみ ε_r との関係は式(10)、(11)で与えられる。

$$\delta_i = \varepsilon_r \cdot r_i \quad (10)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E_c} = \frac{X}{10H \cdot E_c} \quad (11)$$

ここに

$\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$: 底版中央部の半径方向および周方向ひずみ

σ_θ : 底版中央部の周方向応力 (kgf/cm^2)

δ_i : 底版中央部外周に断面力 X が作用した場合の変位 (m)

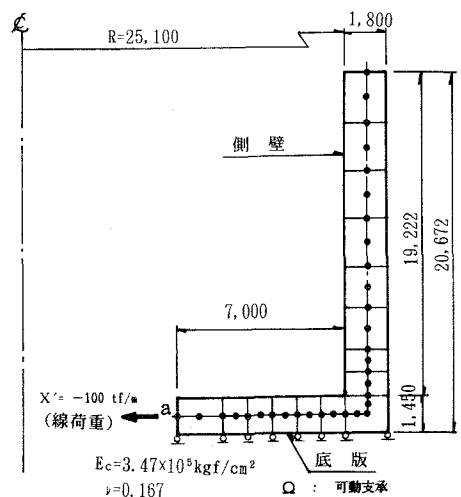


図-6 変位解析モデル

E_c : 底版中央部コンクリートのヤング係数 (kgf/cm²)
 H : 底版中央部の厚さ (m)
 X : 底版外周部に発生する断面力
 式(10)、(11)から X と δ_i との関係を求めると式(12)のとおりである。

$$\delta_i = \frac{X}{10H \cdot E_c} r_i \quad (12)$$

ΔT の温度変化による既設打継部変位および底版中央部外周の拘束変位を求めると式(13)、(14)のとおりである。

$$\delta_m = \delta_s = \beta X' \quad (13)$$

$$\delta_R = \delta_i = \frac{X}{10H \cdot E_c} r_i \quad (14)$$

式(7)、式(13)、式(14)を式(6)に代入し断面力 X を求め、これを式(11)に代入して $\Delta \sigma$ を求める。これを式(4)に代入し、 R と E_c について整理すると式(15)のとおりとなる。

$$R = \frac{r_i}{10HE_c \cdot \beta + r_i} \quad (15)$$

式(15)に r_i 、 H 、 β を代入し外部拘束度と底版中央部のヤング係数との関係を求めると式(16)のようになる。

$$R = \frac{18.1}{1.17E_c \times 10^{-4} + 18.1} \quad (16)$$

式(16)を用いて拘束度とヤング係数との関係を求め図-7に示した。任意材令の拘束度はその材令に対応するヤング係数を求め、図-7から求めることができる。

2.3 解析条件

温度解析条件および解析に使用したコンクリート

表-3 温度応力解析条件

Case	打込み 温度	コンクリート 圧縮強度	コンクリート ヤング係数	クランプ 係数	打継目要素のヤング係数	
					温度ピーク前	温度ピーク後
1-1	20				1.0×10^4 kgf/cm ²	1.0×10^4 kgf/cm ²
1-2	31	t $= \frac{0.035 + 0.025t}{0.035 + 0.025t}$	E $= 33,000 \sigma^{0.4}$ $10,000 t$	CEBの方法 で求めた $\phi = t$	1.0×10^4 kgf/cm ²	1.0×10^4 kgf/cm ²
					ピーク材令2日	
2-1	20		$0.107 + 0.028t$	$7.338 + 0.839t$	1.0×10^4 kgf/cm ²	3.26×10^4 kgf/cm ²
2-2	31				縦目応力圧縮 $t \leq 35$	縦目応力圧縮 $t > 35$
					1.0×10^4 kgf/cm ²	3.26×10^4 kgf/cm ²
					縦目応力引張 $t \leq 10$	縦目応力引張 $t > 10$

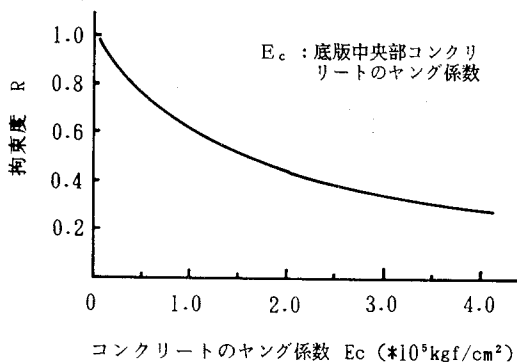


図-7 コンクリートのヤング係数と拘束度との関係

表-1 温度解析条件

項	目	数	値	備	考
温 度 解 析	コン ク リ ー ト	熱伝導率 λ_c	2.42 kcal/mh ² ℃		
		熱容量 $C_c \rho_c$	725 kcal/m ³ ℃		
		終局断熱 温度上昇量	20℃ 31℃	34.1℃ 32.6℃	冷却しない場合の打込み温度は外気温+5℃(31℃)とする。
		温度上昇速度に 関する実験定数	20℃ 31℃	0.499 0.998	
	解 析	熱伝導率	20℃ 31℃	5 kcal/mh ² ℃ 12 kcal/mh ² ℃	材令30日以降は 12kcal/mh ² ℃
		外気温 T_a	東京地方旬別平均気温	$T_a = 15 + 11.5 \sin \{ (t + 76) \times 2\pi / 365 \}$	
	砕 石 地 盤	熱伝導率 λ_c	1.0 kcal/mh ² ℃		
		熱容量 ρ_c	320 kcal/m ³ ℃		
		熱伝導率 λ_c	1.52 kcal/mh ² ℃		
		熱容量 ρ_c	780 kcal/m ³ ℃		

表-2 コンクリートの配合

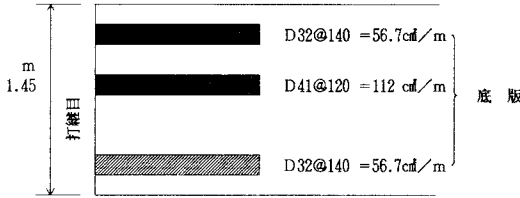
粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad.
25	12±2.5	5±1	50	41.2	142	284	757	1108	0.71%

低発熱型高炉セメントB種、フライアッシュを20%内割混入

の配合は、それぞれ表－１、表－２に示すとおりである。コンクリート打設は夏場を想定し、打込み温度は、プレクーリングの有無に対し、それぞれ20℃、および31℃とした。ここでプレクーリング有りの場合は、内部拘束および外部拘束による温度ひびわれの発生確率をそれぞれ10%以下とするようなプレクーリング量と表面保温養生を考えた。プレクーリング無しは、比較のためのケースで、対策を講じない場合を考えた。温度応力解析に使用した定数は、表－３および表－４に示すとおりである。なお、温度ピーク前などは、打継部に圧縮応力が作用している考え、高い剛性を想定し、 $1.0 \times 1.0^6 \text{ kg f / cm}^2$ とした。

表－４ 温度応力解析条件(2)

	ヤング係数 (kgf/cm ²)	クリープ係数	ポアソン比
土 丹	2760	—	0.3
側 壁	347000	—	0.167
砕石層	300	—	0.3



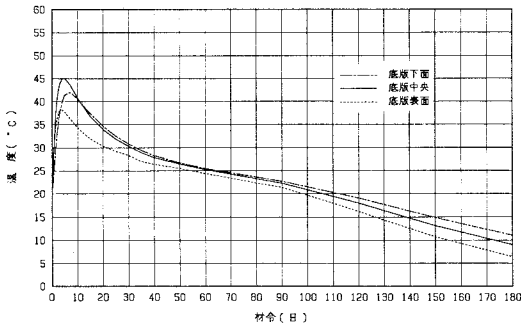
$$\begin{aligned}
 \text{等価ヤング係数} &= \frac{A_s}{A_c} E_s \\
 &= \frac{(56.7 + 112 + 56.7) \times 10^{-4}}{1.45 \times 1.0} \times 2.1 \times 10^7 \\
 &= 3.26 \times 10^5 \text{ t f / m}^2
 \end{aligned}$$

3. 解析結果および考察

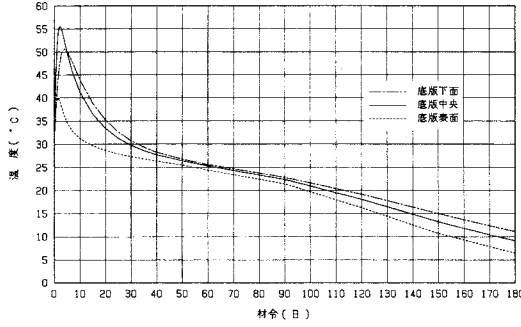
3.1 FEM 解

コンクリート打込み後の底版中央箇所の断面中央、表面および下面の温度解析結果は、図－８および図－９に示すとおりである。

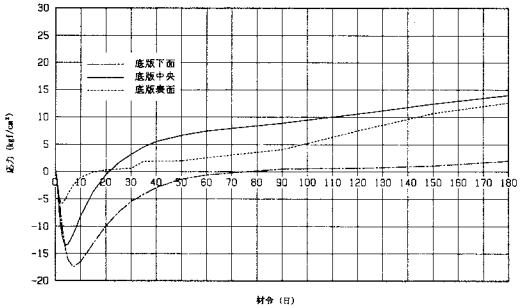
コンクリート温度の最大値 ($T_{\max}$) は、打込み温度 $T_p = 20^\circ\text{C}$ および 31°C の場合で、それぞれ約 45°C 、約 56°C であり、プレクーリングにより打込み温度を低減した分に相当する量だけ $T_{\max}$ が低くなっている。こ



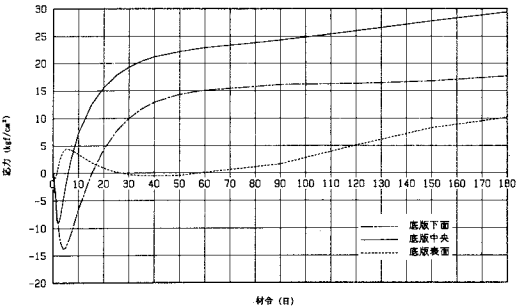
図－８ コンクリート温度の経時変化 ($T_p = 20^\circ\text{C}$ の場合)



図－９ コンクリート温度の経時変化 ($T_p = 31^\circ\text{C}$ の場合)



図－10 温度応力の経時変化 (打継目部を剛結として評価、 $T_p = 20^\circ\text{C}$ の場合)



図－11 温度応力の経時変化 ($T_p = 31^\circ\text{C}$ の場合)

のように、内部温度上昇の低減にブレーキングの効果が顕著に認められる。

図-8および図-9に対応する温度応力の解析結果は、図-10および図-11に示すとおりである。 $T_p = 20^\circ\text{C}$ および 31°C の結果を比較すると、材令初期においては、表面部の応力の傾向が大きく異なっている。これは、ブレーキングおよび表面の保温養生により、中心部と表面部の温度差が小さくなり、表面部応力が、緩和されるためであると思われる。

次に、図-10および図-12からわかるように底版中央部の温度応力は、両者とも発生応力の差はほとんどなく底版打継部の解析モデル化の影響はないようである。このことから、軸対称回転体構造物の内部の直径とリフト高との比が20程度以上のコンクリートを打込んだ場合、温度収縮時の打継部の結合条件が、剛結あるいは、鉄筋剛性程度では、底版中央部の発生応力にほとんど影響しないことがわかる。

3.2 簡易増分解

増分解により求めた温度応力の経時変化を図-13に示した。打込み温度 $T_p = 20^\circ\text{C}$ および 31°C の場合の温度上昇時の発生応力はそれぞれ -8.6kg f/cm^2 (23.3°C)、 -5.7kg f/cm^2 (20.5°C)であった。なお、()内は各々のケースにおける平均温度上昇量 ΔT_m である。 ΔT_m の差は約10%と小さいが、発生応力は $T_p = 20^\circ\text{C}$ の方が約30%大きい。この原因には、 $T_p = 31^\circ\text{C}$ の場合には、 20°C の場合に比べて発熱速度が大きく、若材令で最高温度に達しており、その結果ヤング係数が小さく、かつクリープが大きくなったこと、また、わずかではあるが温度上昇量が小さいことなどから、 ΔT_m の差以上に発生応力が小さくなったものと考えられる。

次に温度降下時の発生応力について、コンクリート温度がほぼ一定となっている材令40日で比較した。平均温度降下量は $T_p = 20^\circ\text{C}$ および 31°C の場合、それぞれ 15.9°C 、 24.0°C であり、この温度降下に伴い発生した応力は 14.1kg f/cm^2 、 17.6kg f/cm^2 である。温度上昇時の場合と同様に $T_p = 31^\circ\text{C}$ の場合、比較的若材令での温度降下量の割合が大きいため、温度降下量が多い割には、発生応力は小さくなっている。

温度上昇時・降下時に発生した温度応力を材令40日で比較してみれば $T_p = 20^\circ\text{C}$ の場合約 5.5kg f/cm^2 、 $T_p = 31^\circ\text{C}$ では 11.9kg f/cm^2 であり、発生応力は $T_p = 20^\circ\text{C}$ に比べて 31°C の場合には約 6kg f/cm^2 大きく約2倍となっている。

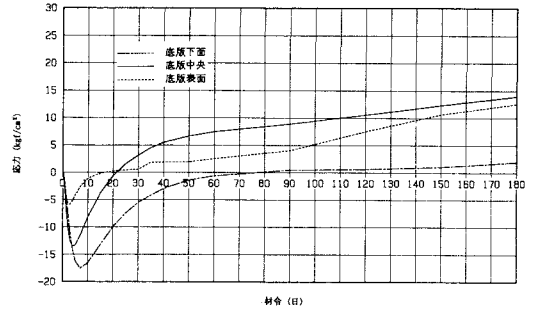


図-12 温度応力の経時変化 (打継目部と等価ヤング係数で評価、 $T_p = 20^\circ\text{C}$ の場合)

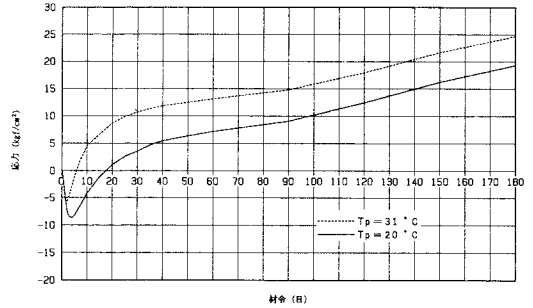


図-13 簡易増分法による温度応力の解析結果

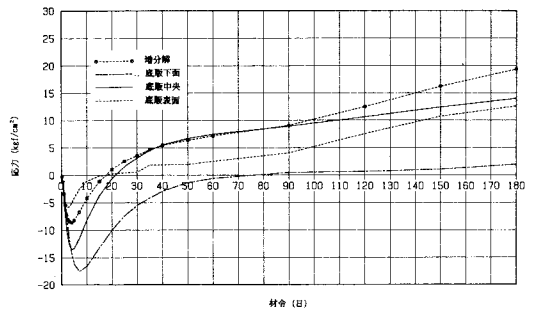


図-14 FEM解と増分解との比較 ($T_p = 20^\circ\text{C}$ の場合)

3.3 FEM解と簡易増分解との比較

FEM解と増分解の比較結果は、図-14に示すとおりである。増分解は、平均温度で解析したものである。増分解と、FEM解の単純平均値と比較すると、増分解は材令初期（60日位まで）で3～4 kgf/cm²、後半で8～10 kgf/cm²程度FEM解より大きくなっているが、簡易性を考慮すると応力およびその傾向は比較的良く一致しており、実用上有効な方法であると考えられる。

3.4 プレクーリングの効果

本論文では、プレクーリング量11℃の場合について解析検討したが、プレクーリング量11℃にほぼ相当する分 T_{max} が低くなっており、また、平均温度の最大値は約8℃小さくなっている。このように、プレクーリングにより、 T_{max} および部材内の平均温度上昇を大きく低減することができることがわかる。

温度応力の面では図-10、11に示すように、11℃のプレクーリングにより温度降下時に発生する底版中央部の引張応力の最大値は、材令180日における平均値と比較すると約10 kgf/cm²小さくなっており、その低減率は約30%とプレクーリングの効果が発生応力低減の点で大きいことが認められる。さらに、プレクーリングを行った場合、打込み後の材令が比較的経過してから引張応力が発生しているのに対して、プレクーリングを行わない場合には材令初期に引張応力が発生している。これは、コンクリートの引張強度の発現過程を考えると大きな効果であり、温度ひびわれ制御の面でプレクーリングが効果的である理由の一つと推察される。

4. まとめ

本研究は、簡易増分解に関して、その外部拘束度の評価方法について検討し、軸対称回転体構造物を対象にしたマスコンクリートの温度応力をFEMおよび簡易増分解を用いて比較検討し、また、これらの方法によりプレクーリングの温度ひびわれ制御効果について解析的に検討した。本研究の結果、得られた主な成果を列挙すれば次のとおりである。

- (1) 本研究で提案した外部拘束度を用いた簡易増分解はFEM解と比較的よく一致しており、本論文で検討したような構造物の応力推定方法としては実用上有効な方法である。
- (2) 内部温度の最大値は、ほぼプレクーリング量相当が、また平均温度の最大値はその約80%に相当する量だけ低減でき、この結果、温度降下時に発生する底版中央部の引張応力は、約30%低減できる。
- (3) 軸対称回転体構造物内部に直径とリフト高の比が20程度以上のコンクリートを打込んだ場合、温度収縮時の打継部の結合条件が、剛結あるいは、鉄筋剛性程度では、底版中央部の発生応力にほとんど影響しない。
- (4) プレクーリングを行った場合、表面部に引張応力が発生する材令が遅くなり、またその最大値も低減でき、本工法は、ひびわれ制御の面で、効果的な対策の一つである。

参考文献

- 1) 小野定、櫛田泰仁、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、日本コンクリート工学協会第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、1984.3
- 2) 藤田博愛：ダムコンクリートの温度管理に関する研究—小河内ダムを中心として—、1961年
- 3) 北村八郎、若松岳、佐藤哲司：各種クーリング法による温度ひびわれ対策の効果、土木学会第43回年次学術講演会、昭和63年10月
- 4) 木村克彦、小野定、後藤貞雄、大下研一：液化窒素を用いたプレクーリングシステムの開発、土木学会論文集投稿中

(1989年10月12日受付)