

P C 桁の温度変形および温度応力*

神 山

—**

1. ま え が き

温度変化に対する P C 桁の応答は R C 桁よりも敏感である。断面内の温度勾配によって変形および応力を生ずることは P C 桁と同じであるが、P C 桁の場合はこの他にコンクリートのクリープ、乾燥収縮の促進、P C 鋼材のリラクセーションの増大といった現象が誘起されるため、その影響は R C 桁よりも顕著である。

断面内の温度差は気温の日変化、季節的变化、施工時の一時的加熱および火災などによって生ずる。火災時のように温度が高く、温度差も大きい場合は、大きな変形および応力を生ずるばかりではなく、水和生成物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 などの分解が起り¹⁾、コンクリートの性質が変化する。常温よりわずかに高い温度から 100°C 以下の程度では断面内の温度差も小さく、変形および応力もまた小さい。この程度の温度では水和生成物の分解は起らない。しかし温度持続期間が長くなるにしたがってコンクリートのクリープ、乾燥収縮および P C 鋼材のリラクセーションが増大し、プレストレスの損失および残留変形を生ずる。すなわち、加熱の影響は最高温度のみではなく継続時間も重要である^{2)~8)}。

P C 桁の使用状態が強制加熱による温度上昇をうけることのないものであっても、施工時その他で一時的に加熱されることはしばしばある。加熱が一時的なものであっても、プレストレスの損失といった面で P C 桁の性状に顕著な影響を与えるとすれば、これを無視することはできない。設計時に考慮するプレストレスの損失量に比較して一時的加熱の影響は決して小さいものではない。したがって一時的加熱であっても無視できないし、もし設計上無視するとすれば加熱を避ける工法あるいは処理方法を考えるべきである。

また、温度変形によって不静定構造物に誘起される 2 次応力も常に無視できるほど小さいものではない。温度

* 本報告の一部はプレレスト コンクリート技術協会第 5 回年次学術講演会（1965 年 2 月 10 日）で発表したものである。

** 工博 早稲田大学教授 理工学部

上昇による 2 次応力についても検討の必要がある。

以上の諸点を検討する目的で T 形断面 P C 桁の突縁上面から加熱した場合のたわみ、温度分布を測定し、これにもとづいて温度応力の分布を検討すると同時に、P C 鋼材引張力の変化、ひびわれ発生の状況もあわせて調べた。

2. 研究の目的

P C 桁が加熱によって変形および応力を生ずることは R C 桁と変りないが、冷却後の変形回復、ひびわれの発生状況には特異なものがある。この現象には加熱によるコンクリートのヤング係数および強度の低下、クリープおよび乾燥収縮量の増大、P C 鋼材のリラクセーションの増大など、材料の性質の変化に関連がある。ここでは加熱による材料の性質の変化に関する実験は行わず、実験結果の検討には従来の研究成果¹⁾を参照した。

実験は、最高温度 100°C 以内の低温加熱によって生ずるコンクリート中の温度分布および変形量の測定に重点をおき、これにもとづいて温度応力の分布を求めた。これと同時に冷却後の変形回復、ひびわれ発生の有無および P C 鋼材緊張力の変化量を調べた。すなわち、比較的低い温度の加熱を行なった場合の P C 桁の挙動を巨視的な立場から定性的に調べることを目的とした。

3. 実験の方法

試験桁の断面形状寸法は 図-1 のとおりである。P C 桁を単純支持し、桁上面に 図-2 のように空気層を形成した。この空気層をヒーターによって加熱して間接にコンクリートを加熱した。コンクリート中の水分が加熱面から蒸発するので、この影響を調べるために無処理、固形パラフィン塗布（溶点 53°C ）、防火塗料塗布（ノセコート）の 3 種について実験した。

コンクリートおよび P C 鋼材の温度はサーモカップルによって測定した。サーモカップルは 図-1 の黒丸印の位置に埋設した。P C 鋼材の温度はサーモカップルを接触させてテープで被覆した状態で測定した。

図-1 PC 桁の断面寸法

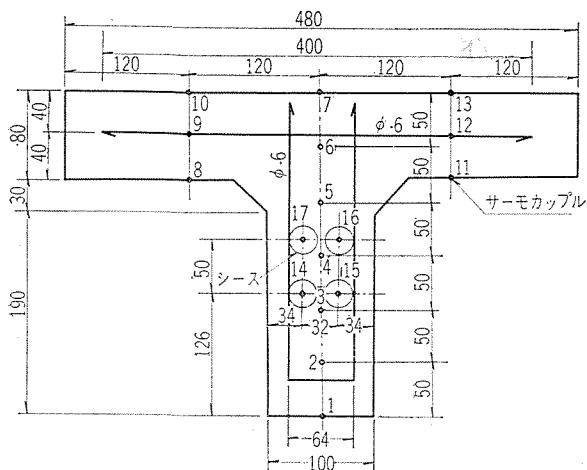


図-2 加熱方法

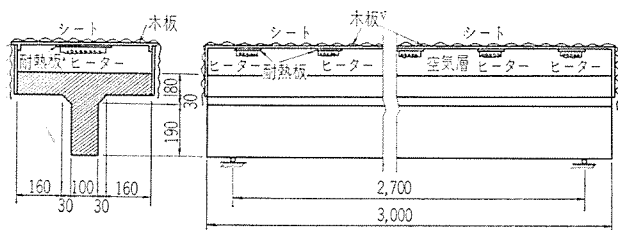


表-1 空気層およびコンクリート上面の温度

記号	加熱	空気層温度 (°C) (気温)	コンクリート上面温度 (°C)	加熱時間 (h)
BT No. 1	第1回			
	第2回			
BT No. 2	第1回	86(13)	72	22
	第2回	92(12)	77	22
	第3回	98(12)	84	144
BT No. 3	第1回	96(13)	70	22
	第2回	(17)	80	144

注：気温は加熱時間中の平均値。

加熱温度はコンクリート上面で 50°C および 70°C を目標としたが、実際は表-1の値になった。

加熱開始から約 20 時間ではほぼ一定温度に到達するので継続時間を 22 時間と 144 時間の 2 種とし、冷却は自然冷却にした。144 時間加熱の結果から長時間加熱の影響を推定することを試みた。また、くり返し加熱の影響を調べるために 2~3 回の加熱冷却を行なった。

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位水量 W(kg)	単位セメント量 C(kg)	絶対細骨材率 S/A(%)	単位細骨材量 S(kg)	単位粗骨材量 G(kg)	単位AE 剤量
25	5.5~6.5	—	178	456	41	707	1036	—

注：1) セメントは小野田早強ポルトランドセメント

2) 骨材は荒川産、比重は粗骨材 2.67、細骨材 2.63、細骨材の粗粒率 2.9

4. 材料および試験桁

PC 桁の製作に用いたコンクリートの配合および強度は、それぞれ表-2 および表-3 のとおりである。

表-3 コンクリートの強度およびヤング係数

材令	10	17	28	91
圧縮強度 (kg/cm ²)	363	362	398	396
引張強度 (kg/cm ²)	—	—	—	34.9
ヤング係数 (kg/cm ²)	3.1×10 ⁵	3.2×10 ⁵	3.2×10 ⁵	3.4×10 ⁵

PC 鋼材は 4 種 φ12 の PC 鋼棒を用いた。その特性は抗張力 $\sigma_{pu}=104 \text{ kg/mm}^2$ 、降伏点 (0.2% 永久ひずみ) $\sigma_{py}=134 \text{ kg/mm}^2$ 、伸び 10%、ヤング係数 $E_p=20700 \text{ kg/mm}^2$ である。PC 鋼棒は直線状配置とし、グラウトは施さなかった。

材令 10 日で桁上面に -3.4 kg/cm^2 、下面に $+171 \text{ kg/cm}^2$ のプレストレスを与え、材令 70~90 日で再緊張して上記プレストレスとなるよう調整した後に加熱を開始した。

断面諸係数およびプレストレスは表-4 のとおりである。

表-4 断面諸係数

$A_c(\text{cm}^2)$	583	$y_c(\text{cm})$	20.6	$P_i(4\phi 12)(\text{t})$	30.0 t
$h(\text{cm})$	30	$y_c'(\text{cm})$	9.4	プレストレス (kg/cm ²)	
$b(\text{cm})$	48	$z_c(\text{cm}^3)$	1621	上 縁 σ_{ct}'	-3.4
$b_0(\text{cm})$	10	$z_c'(\text{cm}^3)$	3552	下 縁 σ_{ct}	+171
$t(\text{cm})$	8	$I_{c\phi}(\text{cm}^4)$	33392		

5. 実験結果

実験結果の代表例を図-3 (a), (b), (c) に示す。図-3 (a), (b), (c) は加熱によるコンクリートの温度変化および変形の状態を示したものである。

6. 温度変形

桁上下面の温度差によって生ずる“そり”は加熱開始後間もなくはじまり、約 18~22 時間で最大値に到達する。その後この“そり”は漸次減少する傾向が見られる。“そり”が最大になる時間は断面内の温度差が最大になる時間とほぼ一致するが、その量は加熱温度、加熱

図-3 (a)

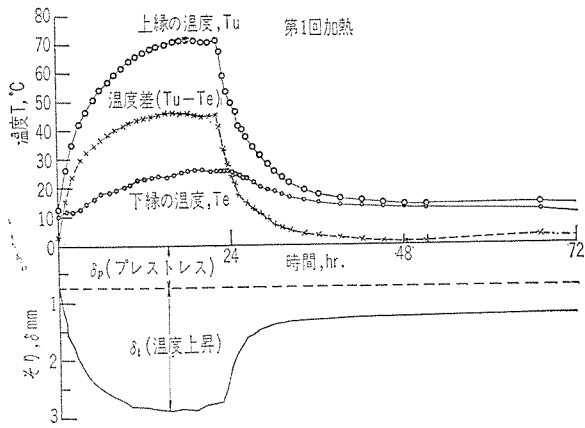


図-3 (b)

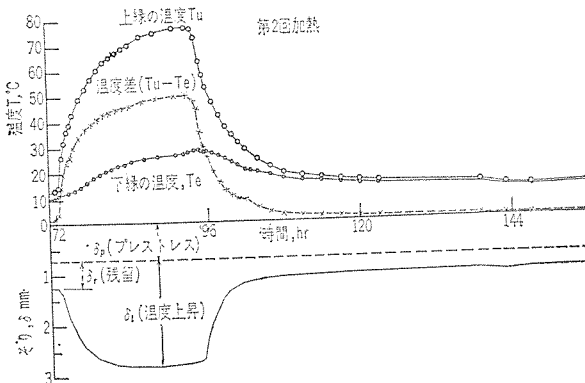


図-3 (c)

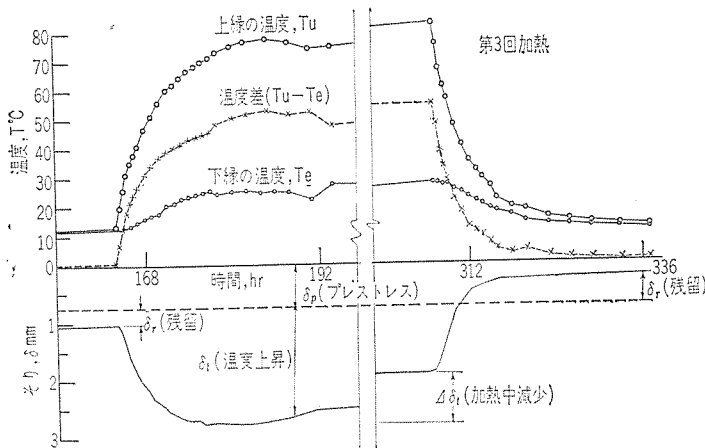


図-4 (a) 変 形

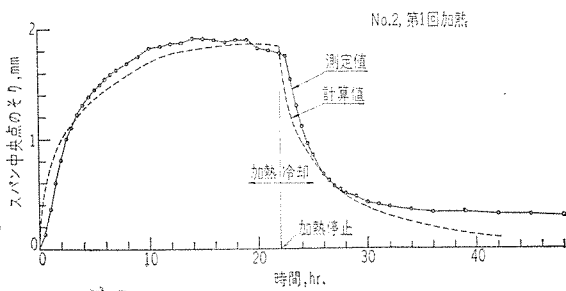
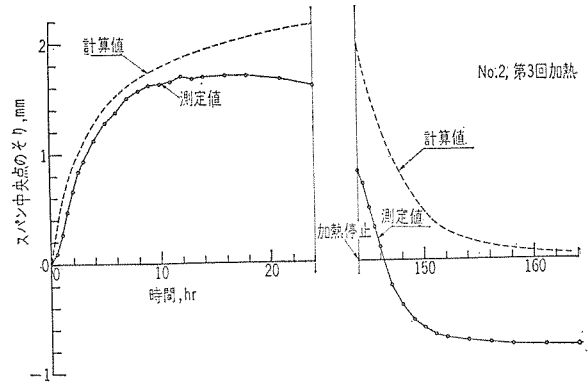


図-4 (b) 変 形



経歴によって差異がある。この傾向は 図-4 (a), (b) から推察できる。この“そり”の量はプレストレスによる“そり”に比較してかなり大きい。

加熱時間が長くなると 図-4 のように“そり”が減少するのは断面内温度の均等化のみによるものではなく、コンクリートの乾燥収縮、クリープの増大、ヤング係数の低下およびPC鋼材のリラクゼーションの増大などの影響によるものと考えられる。

図-4 (a), (b) は、スパン中央点のたわみの変化を示したもので、実線は測定値、破線は計算値である。計算値は温度変化のみを考えたもので、コンクリートの乾燥収縮、クリープその他の影響を無視したものである。最初の短時間加熱では 図-4 (a) に示したように測定値は計算値とよく一致する。第2回加熱または長時間加熱の場合は、図-4 (b) に示すように両者は一致しない。特に冷却時の変化にいちじるしい差異を生じ、プレストレスによる“そり”が失われる傾向がある。これは加熱中に起るコンクリートおよびPC鋼材の諸性質の変化によるものと考えられ、プレストレスの減少量も大きい。

加熱中に起る“そり”の変化はつぎのように表わせる。

$$\delta = \delta_t - \delta_s + \delta_c - \delta_r \dots \dots \dots (1)$$

ここに

δ : 合成“たわみ”または“そり”(上向きを+とする)

δ_t : 断面内の温度勾配によるそり

δ_s : コンクリートの乾燥収縮によるたわみ

δ_c : コンクリートのクリープまたはヤング係数 E_c の低下によるそり

δ_r : PC鋼材のリラクゼーションに基因するたわみ

加熱中に測定した変形量は上式の合成値であって、加熱停止後に冷却された場合は $\delta_t \rightarrow 0$ となり、 $(-\delta_s + \delta_c - \delta_r)$ が残る。加熱時間が短かければ δ_s, δ_r は小さいから $(-\delta_s + \delta_c - \delta_r) \geq 0$ となるが、長時間加熱の場合は δ_s, δ_r

が大きくなるために $(-\delta_s + \delta_c - \delta_r) < 0$ となり、プレストレスによって生じた“そり”が減少するものと推察する。

なお 図-4 (a), (b) に示したそりの計算にはつぎの式を用いた¹⁾。

$$\delta_t = \frac{l^2}{8 E_c I_c} \left\{ \Delta P_t \cdot e_p + \alpha_c E_c \int_{-y_c}^{y_c} (T_y - T_0) b_y \cdot y \cdot dy \right\}$$

$$\doteq \frac{l^2}{72 E_c I_c (n-6)n} \alpha_c E_c \int_{-y_c}^{y_c} (T_y - T_0) b_y \cdot y \cdot dy \quad \dots\dots\dots(2)$$

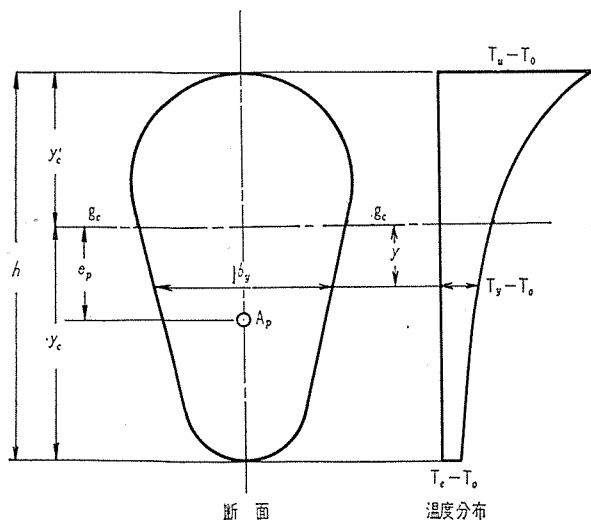
- ここに E_c : コンクリートのヤング係数
- α_c : コンクリートの線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
- I_c : 断面2次モーメント
- b_y : 断面の幅
- y : 断面図心軸からの距離
- l : 支間長
- T_y : 鉛直方向の温度分布
- T_0 : 平均気温
- ΔP_t : 温度変化によるPC鋼材引張力の変化量
- e_p : PC鋼材の偏心距離

7. 温度応力

桁の上面を加熱した場合、温度勾配によって上面に圧縮応力を、下面に引張応力を生ずる。このような応力は上面と下面との含水量の差によっても生ずる。温度測定値から温度応力の分布を求める計算式は、材料が弾性体でひずみ分布が平面を保持するものと仮定すれば、PC鋼材が材軸と平行に配置され、しかも付着がない場合、式(3)のようになる^{1), 2), 3)}。

PC鋼材に付加される引張力 ΔP_t は 図-5 の記号を用いれば、

図-5



$$\Delta P_t = - \frac{A_p E_p E_c}{A_c I_c E_c + A_p E_p (I_c + A_c e_p^2)} \left\{ -A_c I_c \alpha_p (T_e - T_0) + I_c \alpha_c \int_{-y_c}^{y_c} (T_y - T_0) b_y dy + A_c e_p \alpha_c \int_{-y_c}^{y_c} (T_y - T_0) b_y \cdot y \cdot dy \right\} \dots\dots(3)$$

温度応力 σ_{ty} は

$$\sigma_{ty} = + \frac{\Delta P_t}{A_c} + \frac{\Delta P_t e_p y}{I_c} - \alpha_c E_c (T_y - T_0) + \frac{\alpha_c E_c}{A_c} \int_{-y_c}^{y_c} (T_y - T_0) b_y \cdot dy - \frac{\alpha_c E_c}{I_c} y \int_{-y_c}^{y_c} (T_y - T_0) b_y \cdot y \cdot dy \dots\dots(4)$$

- ここに E_p : PC鋼材のヤング係数
- α_p : PC鋼材の線膨張係数
- A_p : PC鋼材の断面積
- T_e : PC鋼材の温度

加熱温度 100°C 以下の本試験桁の場合は、 ΔP_t は非常に小さいので、これを無視してきつつかえない。

実際の温度分布は3次曲線に近いけれども、突縁と腹部との結合部近傍で折れ曲がる。そこで温度応力の計算には近似的につぎの方法をとった。すなわち式(2)および式(4)の積分項をつぎのように計算する。

$$\int_{-y_c}^{y_c} (T_y - T_0) b_y \cdot dy \doteq \sum_{r=0}^{r=i} (T_{yr} - T_0) b_{yr} \cdot \Delta y_r$$

$$\int_{-y_c}^{y_c} (T_y - T_0) b_y \cdot y \cdot dy \doteq \sum_{r=0}^{r=i} (T_{yr} - T_0) b_{yr} \cdot y_r \cdot \Delta y_r \quad \dots\dots\dots(5)$$

数値計算の結果を 図-6 に示した。また加熱時間と温度応力との関係を表わす計算例を表-5 に掲げた。図-6 は加熱時と冷却時の温度応力の履歴を示したものである。

本試験桁では、桁上下面の温度差約 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ の範囲で桁下面に $35 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$ の引張応力度を生ずる。加熱時と冷却時とを比較すると、引張応力は加熱時が大きく、

図-6 (a) 温度応力の分布

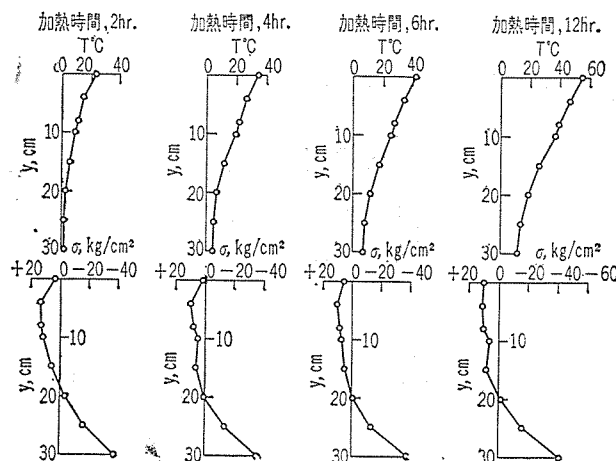
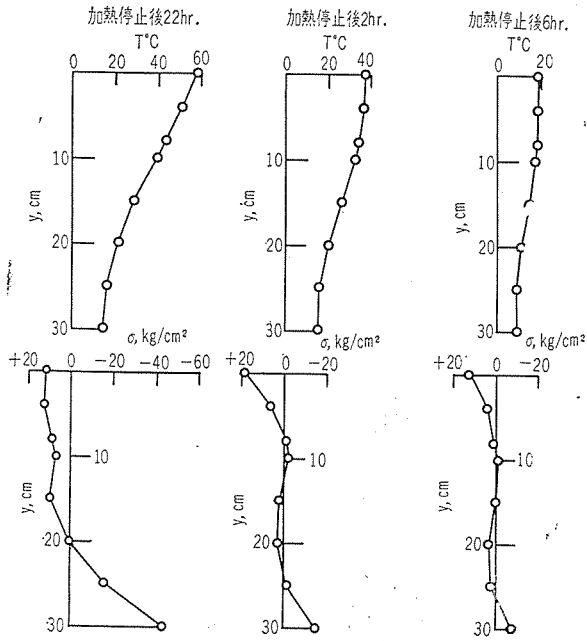


図-6 (b) 温度応力の分布



圧縮応力は冷却時が大きい。プレストレスと温度応力との合成応力は図-7の分布になる。すなわち桁上面に引張応力を生じても、単純支持桁の場合は危険な応力は生じない。しかし、例えば連続桁の反曲点近傍などでは合成応力が引張応力となる部分もあるので、ひびわれ発生の可能性もある。適切な例ではないが、図-7のプレストレスを上下入れかえた場合の合成応力度の分布を図-8に示した。

温度応力の略算法として突縁部のみの温度変化を図-9のように仮定することがある。日光直射による温度上昇の場合は突縁部のみが高くなり、腹部の影響が小さいので図-9のような温度分布を仮定できるが、本実験のような加熱の場合は傾向が一致しない。表-6の計算例によると上縁応力度はほぼ一致するが、下縁の引張応力度にはかなりの差異を生ずることが理解できる。この差異は腹部の温度分布を無視したために生ずるものであるから、強制加熱の場合は図-9の分布は適切でない。

表-5 加熱時間と温度応力 (No. 2 桁)

加熱	加熱時間 (h)	桁上下面の温度差 (°C)	応力度 (kg/cm ²)		備考
			桁上面	桁下面	
1回目	4	32.1	+ 1.7	-35.6	以後加熱停止
	6	36.2	+ 4.9	-37.9	
	12	44.2	+10.4	-41.4	
	22	45.5	+12.0	-43.9	
	停止後 2	23.9	+18.2	-15.5	
	6	11.0	+12.5	- 8.0	
2回目	2	24.5	+ 6.5	-30.6	以後加熱停止
	4	34.7	- 5.6	-37.3	
	6	39.5	+ 1.5	-38.1	
	12	46.4	+ 9.8	-46.5	
	22	48.2	+ 9.2	-49.5	
	停止後 2	25.7	+18.7	-16.0	
"	6	10.6	+ 6.5	- 3.2	
3回目	2	21.8	- 4.3	-30.2	
	4	31.2	+ 0.7	-38.1	
	6	37.4	- 4.4	-41.3	
	12	45.0	+ 8.9	-44.7	
	21	53.1	+ 9.7	-43.9	
	144	55.5	+ 3.7	-49.3	
	停止後 2	29.6	+15.8	-18.9	
"	6	11.2	+ 9.3	- 2.2	

8. PC 鋼材の引張力の変化

加熱開始前に再緊張して所定の引張力を与え、加熱後にジャッキによって緊張力の変化を検査した。測定例を表-7に示した。

最初の加熱による損失が最も大きく約 12%、2回目の長時間加熱で約 8% の損失を生じている。この損失量は常温時のコンクリートのクリープ、乾燥収縮または PC 鋼材のリラクセーションによる損失量にほぼ等しいか、多少大きく、短時間に起こることに注目する必要がある。加熱による PC 鋼材引張力減少の一要因と考えられる PC 鋼材のリラクセーションについては表-8の資料もあるが、さらに広範囲にわたる資料が必要である。

図-7 合成応力度の分布

No. 2 桁, 第 1 回加熱開始後 22 時間
上面温度 71°C, 下面温度 25.5°C, 平均気温 11.7°C

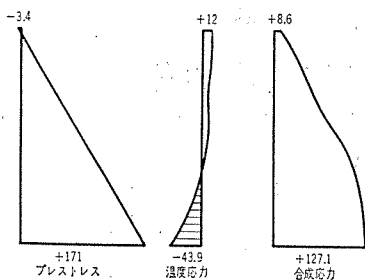


図-8 合成応力度の分布 (反曲点近傍の仮想図)
条件は 図-7 と同じ

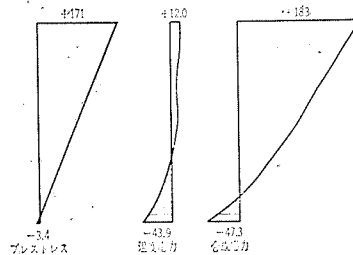


図-9 簡略化した温度分布

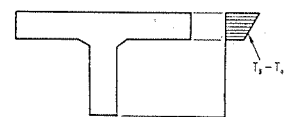


表-6 温度応力の簡易計算値

加 熱	加熱時間 (h)	上縁応力度 (kg/cm ²)		下縁応力度 (kg/cm ²)	
		厳密計算	簡易計算	厳密計算	簡易計算
1 回 目	22	+12.0(+18.2)	+5.1(+11.5)	-43.9(-15.5)	-51.2(-20.7)
2 回 目	22	+ 9.2(+18.7)	+2.1(+11.7)	-49.5(-16.0)	-54.9(-24.1)
3 回 目	144	+ 3.7(+15.8)	+0.3(+ 9.6)	-49.3(-18.9)	-68.1(-31.8)

注：() 内は加熱停止後2時間における値。

表-7 加熱による P C 鋼材引張力の減少 (No. 3 桁)

条 件	加 熱 時 間 (h)	P C 鋼材引張力 (t)	残 留 率 (%)
加 熱 前	0	7.5 × 4	100
第 1 回 目 加 熱	22 時間加熱 72 時間冷却	6.63 × 4	88
第 2 回 目 加 熱	22 時間	6.50 × 4	86
" "	122 "	6.23 × 4	85
" "	144 時間加熱, 冷却 26 時間後	6.03 × 4	80

表-8 P C 鋼材のレラクセーションに対する温度の影響

σ_{pi}/σ_{py}	レラクセーション (%)			
	0.70	0.81	0.92	
温 度 (°C)	22	4	8	14
	35	7	12	18
	50	10	15	31
	100	12	17	32
	150	13	—	—

9. 加熱によるひびわれ

加熱試験完了後にひびわれの有無を調べたところ 図-10 のようなひびわれが発生していた。このひびわれが発生した時期は不明である。ひびわれは突縁と腹部との結合部に桁軸に平行に発生した。その特徴は乾燥収縮によるひびわれに類似しており、ひびわれ幅は桁端部で大きく桁中央部で小さい。ひびわれの程度は加熱温度の低い No. 1 桁では桁端部のみに発生したが、加熱温度の高い No. 2 および No. 3 桁では桁全長にわたって発生した。原因はコンクリートの温度上昇による水分の発散にともなう乾燥収縮と考えられる。

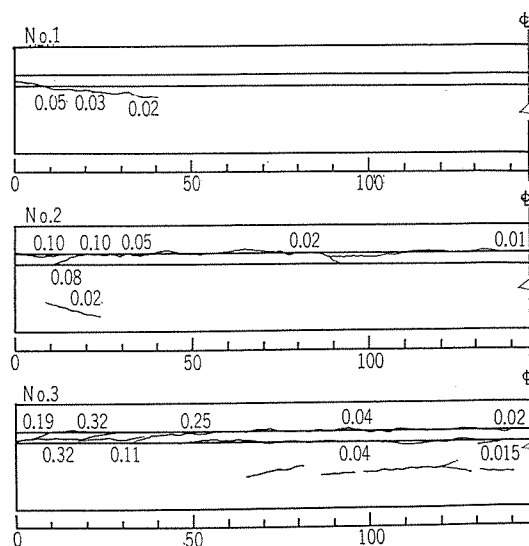
10. む す び

以上 P C 桁の低温加熱試験結果の概要を述べたが、これからつぎの傾向がうかがわれる。

1) P C 桁は低温加熱に対して、かなり鋭敏に応答する。その結果、温度変形、温度応力を生ずるが、これよりも温度上昇によって誘起されるコンクリートの乾燥収縮、クリープおよび P C 鋼材のレラクセーションの増大などの 2 次的影響が問題である。

2) コンクリート中の温度分布は日光直射などのような場合と強制加熱の場合とではかなり差異があるから、温度応力の簡易計算にはこれを考慮して温度分布を仮定

図-10 ひびわれ状況 (数字はひびわれ幅 mm, 長さ cm)



すべきである。

3) 常温よりわずかに高い温度条件での P C 鋼材のレラクセーション、コンクリートの乾燥収縮およびクリープについての基礎的資料が少ないので、これの研究が望まれる。

4) 低温であっても強制加熱によってひびわれ発生の可能性がある。

5) 一時的加熱によるプレストレスの損失はかなり大きいから、温度変形あるいは温度応力と同時にこの損失についても考慮する必要がある。

なお、道路橋面にアスファルト舗装を加熱混合方式によって施工する場合の影響および、その対策の基礎的な研究については機会を得て報告する。

参 考 文 献

- 1) Yuan-Ning Lin, William Zuk : Journal of the PCI Vol. 8, No. 3, June (1963)
- 2) D.W. Allan : Concrete and Constructional Eng. Vol. LVII, No. 9, September (1962)
- 3) R. Gartner : Concrete and Constructional Eng. Vol. LVII, No. 3, March (1963)
- 4) 近藤・坂編：「コンクリートハンドブック」, pp 316~320, 朝倉書店
- 5) 木村恵雄：建築学会研究報告, No. 23, 昭 28-8
- 6) 竹山謙三郎外：「鉄筋コンクリート建築の診断」 コンクリートパンフレット, No. 41, 昭 30
- 7) 岡田 清：「コンクリートのクリープ」 コンクリートパンフレット
- 8) Donald D. Magura, Mete A. Sozen and Chester P. Siess : Journal of the PCI, Vol. 9, No 2, April(1964)