

V-37 温度勾配を与えたプレストレストコンクリートはりの性状

電力中央研究所 正員 ○青柳征夫
正員 大沼博志
川崎道夫

1. まえがき

原子炉用プレストレストコンクリート（PC）圧力容器あるいは格納容器においては、通常運転時あるいは事故時に内面が 100°C にも達する高温にさらされるため、温度勾配による応力と変形ならびにこれらのクリープによる緩和を算定する必要がある。本研究は、温度勾配を与えたりに曲げ拘束を与えた場合の諸性状を実験的に把握し、step-by-stepによるクリープ数値解析結果と比較し、温度応力の合理的な算定方法について検討を加えたものである。

2. 試験方法

試験装置は、図-1に示すとおりであつて、2本のはり（全長 380cm ）を端部でPC鋼棒によつて緊結し、曲げに対してのみ拘束を与え、軸方向の変形が自由にできるようにしてある。温度勾配を与える部分の断面は図-2のとおりであり、この部分の長さは 220cm である。はりの間にできる空間に温水（最高 90°C ）を循環させ、はりの内面を加熱するとともに、外面を冷水によつて冷却し、長さ 20cm の間に最大 75°C の温度勾配を与えた。コンクリートの加熱面および冷却面は直接水に触れさせ、上下面を防水被覆するとともに断熱し、コンクリートが常に湿潤状態を保つようにした。

実験には2種類のコンクリートを用いたが、これらの示方配合、強度、弾性係数および熱特性値は表-1に示すとおりである。

はりに温度勾配を与える方法としては、約3時間ごとに温水温度を 5°C ずつ上昇させる緩速加熱方式と約1分間以内に温水温度を急激に 80°C まで上昇させる急速加熱方式を用いた（図-3）。

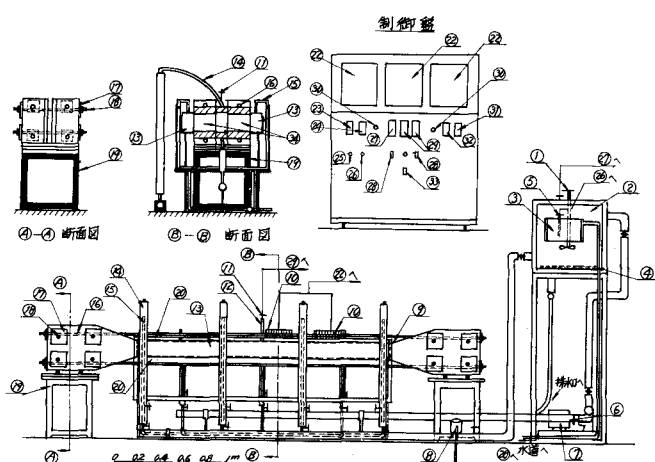


図-1 温度勾配を与える実験装置

材料名	規格・標準
① 鋼材	① 炭素鋼
② 鋼材	② 炭素鋼
③ 鋼材	③ 炭素鋼
④ 鋼材	④ 炭素鋼
⑤ 鋼材	⑤ 炭素鋼
⑥ 鋼材	⑥ 炭素鋼
⑦ 鋼材	⑦ 炭素鋼
⑧ 鋼材	⑧ 炭素鋼
⑨ 鋼材	⑨ 炭素鋼
⑩ 鋼材	⑩ 炭素鋼
⑪ 鋼材	⑪ 炭素鋼
⑫ 鋼材	⑫ 炭素鋼
⑬ 鋼材	⑬ 炭素鋼
⑭ 鋼材	⑭ 炭素鋼
⑮ 鋼材	⑮ 炭素鋼
⑯ 鋼材	⑯ 炭素鋼
⑰ 鋼材	⑰ 炭素鋼
⑱ 鋼材	⑱ 炭素鋼
⑲ 鋼材	⑲ 炭素鋼
⑳ 鋼材	⑳ 炭素鋼
㉑ 鋼材	㉑ 炭素鋼
㉒ 鋼材	㉒ 炭素鋼
㉓ 鋼材	㉓ 炭素鋼
㉔ 鋼材	㉔ 炭素鋼
㉕ 鋼材	㉕ 炭素鋼
㉖ 鋼材	㉖ 炭素鋼
㉗ 鋼材	㉗ 炭素鋼
㉘ 鋼材	㉘ 炭素鋼
㉙ 鋼材	㉙ 炭素鋼
㉚ 鋼材	㉚ 炭素鋼
㉛ 鋼材	㉛ 炭素鋼
㉜ 鋼材	㉜ 炭素鋼
㉝ 鋼材	㉝ 炭素鋼
㉞ 鋼材	㉞ 炭素鋼
㉟ 鋼材	㉟ 炭素鋼
㊱ 鋼材	㊱ 炭素鋼
㊲ 鋼材	㊲ 炭素鋼
㊳ 鋼材	㊳ 炭素鋼
㊴ 鋼材	㊴ 炭素鋼
㊵ 鋼材	㊵ 炭素鋼
㊶ 鋼材	㊶ 炭素鋼
㊷ 鋼材	㊷ 炭素鋼
㊸ 鋼材	㊸ 炭素鋼
㊹ 鋼材	㊹ 炭素鋼
㊺ 鋼材	㊺ 炭素鋼
㊻ 鋼材	㊻ 炭素鋼
㊼ 鋼材	㊼ 炭素鋼
㊽ 鋼材	㊽ 炭素鋼
㊾ 鋼材	㊾ 炭素鋼
㊿ 鋼材	㊿ 炭素鋼

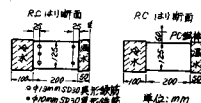


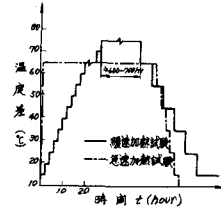
図-2 温度勾配を与えた部分のはりの断面

表－１ 実験に用いたコンクリートの配合と諸性質

配合 種別	示 方 配 合							空 気 量 (%)	ス ラ ン プ (cm)	圧 縮 強 度 $\times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ σ_{bc}	材令56日の弾性係数 $\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$				熱 伝 導 率 kcal/cm°C				熱膨張率 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	
	セメント (kg/m³)	水 (kg/m³)	細骨材 (kg/m³)	粗骨材 (kg/m³)	ポリス テリス 5L (kg/m³)	W/C (倍)	S/A (倍)				20℃	40℃	60℃	80℃	20℃	60℃	90℃	平均	無 筋	鉄筋コン クリートはり
L.S.C	800	160	798	1226	30.0	55.1	43.0	35~40	12~14	334	2.82	2.81	2.75	2.61	—	—	—	—	7.8	9.2
H.S.C	480	170	621	1094	48.0	35.4	37.8	25~30	9~10	472	3.03	2.98	2.87	2.70	1.96	2.82	2.05	2.20	8.0	—

表－２ 供 試 体 一 覧

供試体番号	PC or RC	有効プレストレス (kg/cm²)	配合種別	加熱方法
底 8	PC	66	L.S.C	緩 速
底 10	PC	66	L.S.C	急 速
底 15	PC	123	H.S.C	緩 速
底 11	RC	0	L.S.C	緩 速



表－２に示す４組の供試体について実験を行なつた。このうち底１１は鉄筋コンクリートはりであつて、その断面は

図－２に示すとおりである。はりの変形およびひずみの測定 図－３ 温度上昇、下降方法にはコンタクトゲージを、温度の計測には銅コンスタンタン熱電対を用いた。

3. 実験結果

各種温度におけるコンクリートのクリープについて検討した結果、単位温度クリープ比(ρ_c)を次式で定義すれば、各配合のコンクリートについて載荷後の時間と ρ_c の関係を近似的に一つの曲線であらわすことができた(図－４)。

$$\rho_c = \frac{\epsilon_c}{\sigma \phi(T)} \quad (1)$$

ρ_c ; 単位温度クリープ比 ($1/\text{kg/cm}^2/^\circ\text{C}$), ϵ_c ; クリープひずみ ($\times 10^{-6}$)
 σ ; 載荷応力度 (kg/cm^2), T ; 温度 ($^\circ\text{C}$), $\phi(T)$; 温度関数

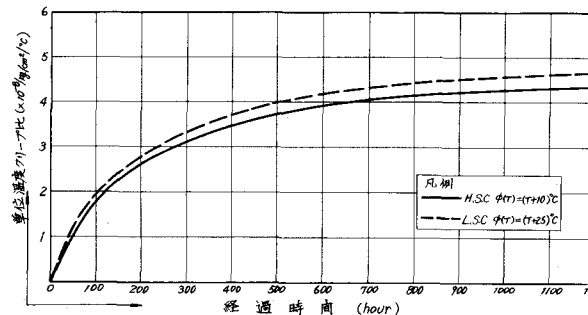
L.S.C配合の場合、 $\phi(T) = T + 25^\circ\text{C}$, HSC 配合の場合、 $\phi(T) = T + 10^\circ\text{C}$

弾性係数は、温度の上昇とともに低下し、80℃における値は、20℃のときの値に比べ約10%小さくなつていた(表－１)。

熱膨張係数は、鉄筋比が大きい程、その値が増大し、無筋コンクリートでは、 $7.8 \sim 8.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ であつたが、鉄筋比が3%のときには $9.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ であつて、鉄筋比の大きい部材では、鉄筋が熱膨張係数に及ぼす影響を考慮する必要があると思われる。

熱伝導率は、60℃付近で極大値をとり、このときの値は常温および90℃付近の値に比べ約15%大きくなつていた(表－１)。

緩速温度上昇試験におけるはりの相対変形(一方のはりの変形量の2倍)をPCはりりとRCはりについて図－５に示した。PCはりでは、温度上昇時ならびに温度勾配持続時におけるクリープによる変形の緩和現象が顕著に認められる。したが



図－４ 載荷時間と単位温度クリープ比の関係

つて残留変形もPCはりの方がきわめて大きくなっている。
しかし、クリープの影響が顕著なのは、最初のサイクルのときだけであつて、クリープを十分に進行させた後に行なつた第二回サイクルでは、クリープが変形緩和に及ぼす影響が非常に少なくなつていた。

はりの軸方向のひずみ分布の測定の結果、急速載荷試験において温度を上昇させた直後を除き、断面の平面保持の仮定が成立することを確かめることができた。

急速加熱試験における温度上昇後の各時間における温度分布の実験結果と計算結果を図-6に示す。熱伝導率が変化しないものとして計算を行なつたが、実験値と計算値が比較的よく一致しており、常温から100℃までの温度範囲では、コンクリートの乾燥等によつて熱伝導率が大きく変化しない場合には、温度による熱伝導率の変化を考慮しなくても非定常時温度分布を実用的には推定し得るものと思われる。

4. 実験結果と解析結果の比較

次の基本的仮定に基づいて温度勾配を与えたはりのstep-by-stepによる数値解析を行なつた。

- (1) すべての段階で平面保持の仮定が成立する。
- (2) ひずみは弾性ひずみ、熱膨張ひずみおよびクリープひずみから構成され、各々のひずみ成分を分離して考慮できるものとする。
- (3) クリープは図-4の単位温度クリープ比曲線にしたがつて変化するものとする。弾性係数は温度によつて変化する。
- (4) 応力の減少によるクリープ回復の影響は無視する。

断面を図-7に示すように10個の要素に分割し、温度上昇時にはクリープ率法を、温度勾配持続時にはレラクセーション法⁽²⁾をクリープ解析の基本法則として適用し、単位温度クリープ比の変化が $0.25 \times 10^{-5} / \text{kg/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 以下となるように時間区分を設定し、step-by-stepによつて数値解析を行なつた。各stepにおける断面の回転角の変化 $\Delta\theta$ を(2)式、応力変化 $\Delta\sigma_r$ を(3)式によつて計算し、レラクセーション法におけるクリープによる応力減少量 $\Delta\sigma_{rc}$ を(4)式によつて求めた。なお、温度低下時の計算は、弾性理論によつた。

$$\Delta\theta = \frac{6n^2}{h(n^2-1)} \left(\frac{1}{n^2} \sum_{r=1}^n (2r-1) \Delta\epsilon_{r,f} - \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \Delta\epsilon_{r,f} \right) - \frac{24M}{Ebh^2} \dots\dots\dots(2)$$

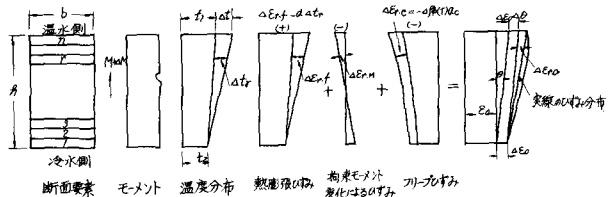


図-7 クリープ率法に基づくひずみ変化の概念

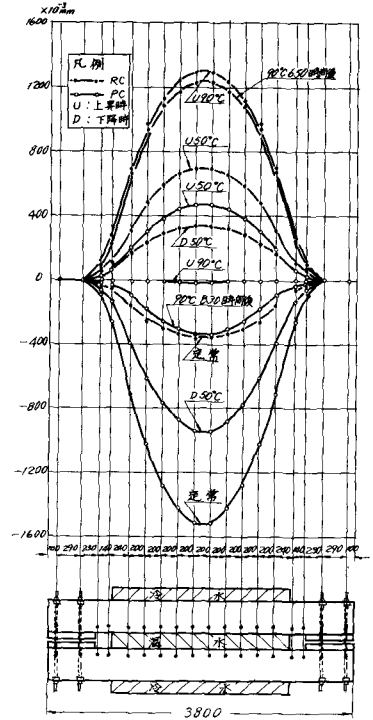


図-5 PCはり(№15)およびRCはりにおけるはりの相対変形曲線

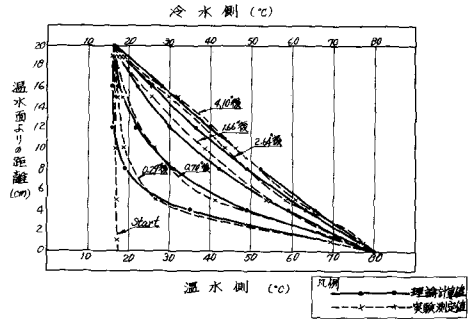


図-6 急速加熱試験、温度上昇時温度分布(PCはり、№10)

$$\Delta \sigma_r = \{ \Delta \varepsilon_{r.f} - [\Delta \varepsilon_0 + \Delta \theta \frac{2r-1}{2n}] \} E_r \dots\dots(4)$$

$$\Delta \sigma_{r.c} = \sigma_{r.i} (1 - e^{-E_r \phi(t) \Delta \rho_c}) \dots\dots(5)$$

ここに、 $\Delta \varepsilon_{r.f}$ = (温度変化によるひずみ変化) - (クリープひずみの変化)

ΔM = 温度勾配の変化による断面の冷却面に関するモーメント変化、 E = コンクリートの弾性係数の平均値、 E_r = r 番目の要素のコンクリートの弾性係数、 $\Delta \varepsilon_0$ = 冷却面のひずみ変化、 $\sigma_{r.i}$ = r 番目の要素の初期応力、 $\Delta \rho_c$ = 単位温度クリープ比の変化。

緩速加熱試験におけるはりの最大相対変形量の実験値と計算値を図-7に示した。この図には常温のときの弾性係数を用いて計算した弾性解の結果も併記したが、PCはり、RCはりとも step-by-step 解析の結果が弾性解に比すれば実験結果をきわめて精度よく追跡している。とくにPCはりではたとえ弾性係数を低減させたとしても弾性理論の適用が実用上不可能であることが予想される。

急速加熱試験におけるはりの最大相対変形量についても上記の解析法によつて計算を行なつた。その結果、加熱直後において計算値が実験値を約20%上回ることを除外すれば、その後は両者がこの差を保つたまま変化した。

緩速ならびに急速加熱試験における応力分布の計算結果は、図-9と図-10に示した。温度勾配持続時のクリープによる応力緩和現象ならびに常温回復後に大きな応力が残留している。また、急速加熱の直後において特異な応力分布性状を示している。

以上の結果、温度勾配を受けるコンクリート部材のクリープ数値解析の基本法則としてクリープ率法およびレラクセーション法が有力な手段であることが確かめることができた。

文献 (1) CONDUCTION of HEAT IN SOLIDS, Oxford University Press 1959.
(2) Numerical Creep Analyses Applied to Concrete Structures, G. E. England, ACIJournal/June 1967.

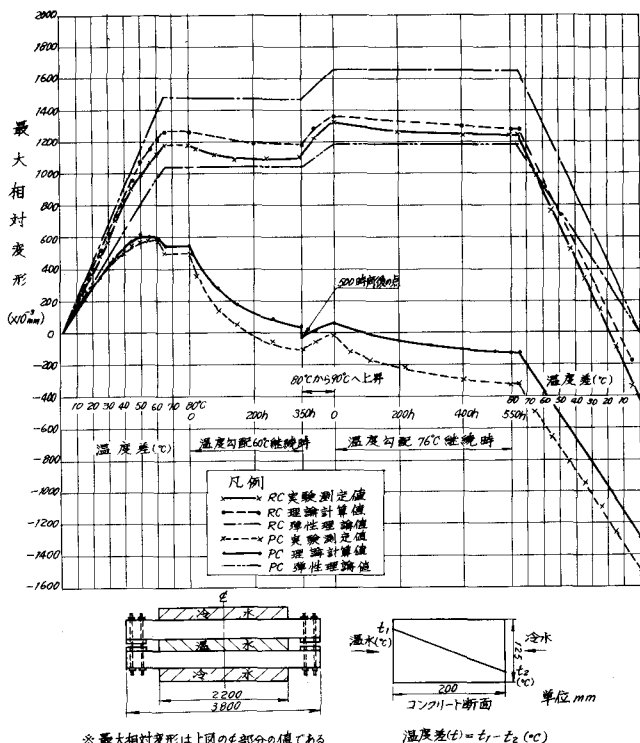


図-8 最大相対変形量の実験値と計算値の比較

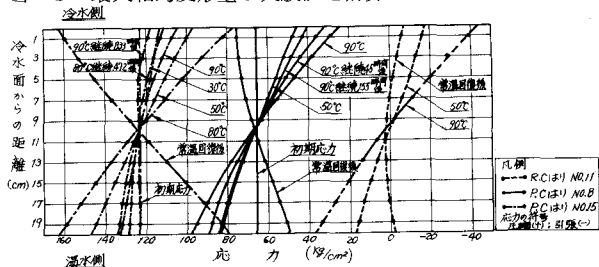


図-9 PCはりRCはりの応力分布の計算結果 (緩速加熱試験第1回サイクル)

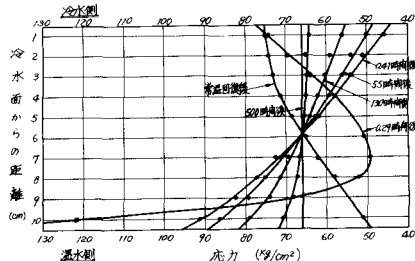


図-10 PCはり、NO.10の応力分布の計算結果 (急速加熱試験第1回サイクル)