

長期間加熱された RC 梁—柱架構の拘束軸力と拘束モーメント

生 駒 哲 夫
(技術研究所)

田 中 伸 幸
(技術研究所)

山 田 光 伯
(技術研究所)

§ 1. はじめに

原子炉建屋, とりわけ鉄筋コンクリート (以下, RC と
いう) 格納容器の設計上の曲げモーメントについては,
温度荷重に起因するものが支配的であり, 温度荷重が短
期間作用する熱応力実験によると, 鉄筋の長期許容応力
レベルでの RC 曲げ剛性を弾性剛性で除した比率は,
1/3~1/2 の範囲にあるとされている¹⁾.

ところで, こうした RC も温度荷重が長期になると,
コンクリートの特性としてのクリープの効果が一層顕著
になるものと思われる。これまで, このような効果を狙
った熱応力実験例は極めて少なく, しかもそれは曲げモ
ーメントのみに着目するものであった。

本論文では以上の経緯を踏まえ, 温度荷重による曲げ
モーメントだけでなく軸力の推移をも見るために, 長期
間 (60 日間) 一定の温度荷重を RC の鉄筋比を相互に変
えた梁—柱架構に作用させ, 実際に熱応力を発生させて

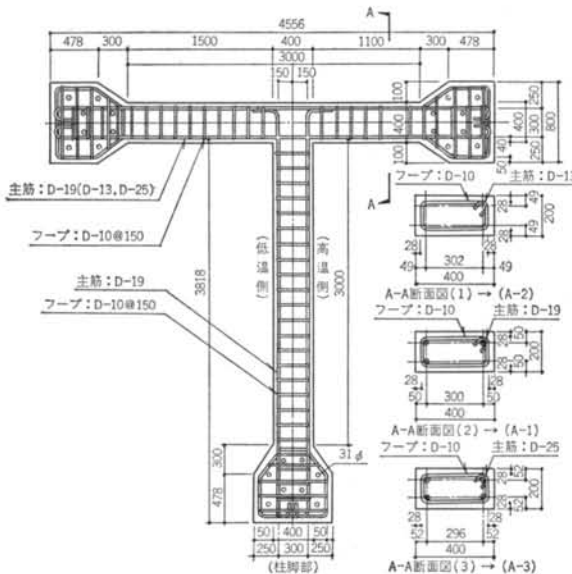
ひびわれとクリープによるそれら曲げモーメントと軸力
の低減傾向を実験的に確認したものである。しかし, 温
度荷重によって生じる内力としての軸力および曲げモ
ーメントについては, その試験方法上から直接取り出すこ
とはできないので, ここではこれらの値に等価な外力と
しての拘束軸力, 拘束曲げモーメントとして検出してい
る。なお, ここではこれらの拘束軸力と拘束モーメント
に及ぼす気温とロードセルの変形の影響は考えないもの
とする。

§ 2. 実験の概要

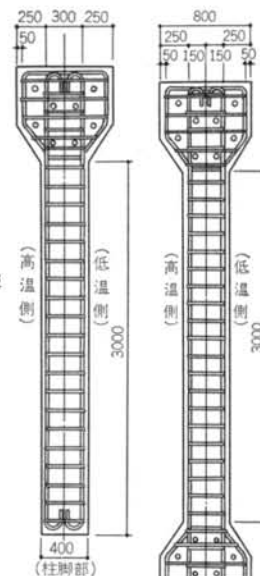
2.1 試験体の形状と寸法

用いた試験体の形状は
3 種類である。一つは梁
と柱とから成る T 字形を
した A モデル, 他の二つ
は共に柱のみから成る I
字形の B モデルおよび C
モデルである。そして,
これらは B モデルを除い
ていずれもその部材両端
に, その試験体を定着さ
せるためと, 熱変形を拘
束するための固定部位を
有している。

これらの試験体の詳細
な形状・寸法は図—1~
3 に示すとおりである。
これらの図中, いわゆる
試験部位はいずれの試
験体についても, 均等断
面を有する 3000 mm の
部長区間である。さらに,



図—1 Aモデル



図—2
Bモデル



図—3
Cモデル

同図中の3種類の断面配筋図は、Aモデルに関する鉄筋比の異なる梁部分に関するものである。

なお、試験時のパラメータとしては、このようなAモデルのみについて考え、その梁と柱の鉄筋比の相対的な違いに注目する。具体的には柱部分の鉄筋比は一定とし

対象試験体 および 打設日	粗骨 材寸法 (mm)	ス ラ ン プ (cm)	空 気 量 (%)	水 セ ト メ ン (%)	細 骨 材 率 (%)	単 位 水 量 (kgf/m ³)	重 量 (kgf/m ³)			混和材 (cc/m ³)
							セ メ ン ト	細 骨 材	粗 骨 材	
A-1, B (1985.3.1)	25	13.0	5.8	55.0	41.9	156	284	777	1100	710 (ボゾリスNo8)
A-2, C-1 (1985.5.21)	25	14.0	5.8	55.0	41.9	156	284	777	1000	710 (ボゾリスNo8)
A-3, C-2 (1985.8.22)	25	14.0	5.1	53.0	41.2	159	300	757	1100	750 (ボゾリスNo70)

(1 kgf=9.8 N)

表一 1 コンクリートの調合

呼び径	規 格	降 伏 点 (kgf/mm ²)	引 張 強 度 (kgf/mm ²)	伸 び (%)	弾 性 係 数 (kgf/cm ²)
D-25	SD 35	46.0	63.0	34.0	1.89×10 ⁶
D-19	SD 35	42.0	58.0	25.0	1.85×10 ⁶
D-13	SD 35	44.0	59.0	27.0	1.85×10 ⁶
D-10	SD 35	46.0	61.0	28.0	—

(1 kgf=9.8 N)

表一 2 鉄筋の機械的性質

試 験 体	使用鉄筋 (本数・径)	鉄筋比 (片側) (%)	拘束の 有 無	コンクリート強度 (kgf/cm ²)							
				試 験 開 始 時 (常温, 気中)		試 験 終 了 時					
						(常温, 気中)		(80℃, 気中)			
				圧縮強度	ヤング係数	圧縮強度	ヤング係数	圧縮強度	ヤング係数		
A モ デ ル	A-1	梁	4 D19	0.7	有	241.2	2.33×10 ⁵	243.5	2.27×10 ⁵	244.3	2.24×10 ⁵
		柱	4 D19	0.7							
	A-2	梁	4 D13	0.4		159.5	1.86×10 ⁵	152.0	1.72×10 ⁵	151.4	1.27×10 ⁵
		柱	4 D19	0.7		229.6	1.81×10 ⁵	260.2	2.25×10 ⁵	234.3	1.80×10 ⁵
A-3	梁	4 D25	1.2								
	柱	4 D19	1.7								
B モ デ ル	B				無	241.2	2.33×10 ⁵	243.5	2.27×10 ⁵	244.3	2.24×10 ⁵
C モ デ ル	C-1	柱	4 D19	0.7	有	159.5	1.86×10 ⁵	152.0	1.72×10 ⁵	151.4	1.27×10 ⁵
						229.6	1.81×10 ⁵	260.2	2.25×10 ⁵	234.3	1.80×10 ⁵

(1 kgf=9.8 N)

表一 3 実験に用いた試験体の諸元

て、梁部分の鉄筋比を柱のそれに比べて大きい値、同じ値、小さい値というように3種類(具体的には $P_t=1.2\%$, 0.7% , 0.4%)を採用した。

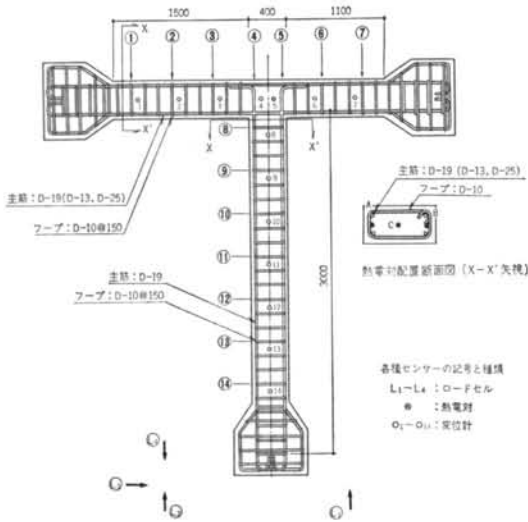
2.2 用いたコンクリートと鉄筋

試験体作製には普通コンクリートを使用した。表一1にその調合を示す。打設後の試験体は約2週間、木製の型枠に入れたままぬれむしろで覆い、また脱型後もそのまま養生を続け、打設しておよそ50日経過してから実験を開始した。なお、A-2, C-1試験体については、後述するようにコンクリート拘束ブロックにこれらをセットする際にひびわれが入ってしまった(とりわけA-2試験体は柱脚付近の断面を貫通するひびわれが生じた)。このことから、この表の当該欄の調合数値に関しては実際には若干の差異があったものと思われる。

表一2に、用いた鉄筋の機械的性質を示す。なお、C-2試験体については表中のD-19鉄筋を実際には用いておらず、使用した鉄筋の機械的性質については規格はSD35、弾性係数が 1.84×10^6 kgf/cm² (18.03×10^6 N/cm²)の他は不明である。

2.3 試験体の諸元

表一3に、実験に用いた試験体の諸元を示す。コンクリートの調合のところで述べたように、A-2, C-1試験体に用いたコンクリートの強度(試験開始時、終了時ともに)が際立って低いことが見受けられる。



図一五 各種センサの配置方法

を拘束しながら、さらには拘束軸力と拘束モーメントとが検出できるように配置し、固定した(図一四参照)。また、このロードセルの出力値は圧縮力を負、引張力を正で表わしている。なお、 L_1 と($L_2 \sim L_4$)についてはロードセルの固定の都合上、ともに -0.5 tonの初期拘束力を導入した。

(2)の断面内の温度については、各部材軸方向に 450 mm間隔の各断面内(その断面の水平中心線上の両主筋相当位置と断面中心位置)の3点について測定を行なった。

(3)については、各部材の軸線方向中心線に沿って温度計測の場合と同じく 450 mm間隔に測定点(梁・柱各部材当たり7点)を設け、変位計を配置した。

これらの各種センサの配置方法を図一五に示す。

また、上記の項目の他に次の項目を補助的に測定した。

- (5)加熱媒体(温水・冷水)の温度
- (6)実験棟内の気温

§ 3. 実験結果

3.1 温度に関する用語の定義

以後、実験結果を検討・評価するに当たり、試験体断面内の温度状態に言及する際の明確さを期するために、力学的にその効果が異なると思われる2種類の用語について、予めここで定義しておく。一つは拘束軸力に関わる量で、平均温度上昇(ΔT_a)と呼ばれるものであり、他方は拘束曲げモーメントに関わる量で、等価温度勾配

($\Delta T_g/D$, D : 柱の全せい)と呼ばれるものである。これら2つの ΔT_a , $\Delta T_g/D$ は、任意の時刻における柱断面内の実温度分布によって生じると考えられる熱ひずみが、拘束されたときに誘発される内力としての軸力と曲げモーメントに等価な力系となるように、仮想的に直線置換された温度分布(最高温度を T_h , 最低温度を T_l とする)によって次のように定義される。

$$\Delta T_a \equiv (T_h + T_l)/2 - T_0 \quad \dots\dots(1)$$

$$\Delta T_g/D \equiv (T_h - T_l)/D \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 T_0 は加熱前の無応力状態に対応する温度で、一般に基準温度(stress free temperature)と呼ばれる。

3.2 加熱媒体の温度と実験棟内の気温

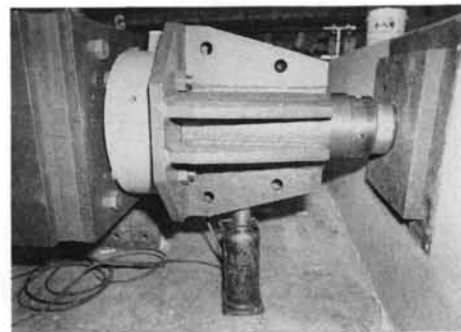
図一六、七に、BモデルとA-3、C-2モデルの場合の加熱媒体としての温水・冷水の温度と実験棟内の気温変化を示す。特に、図一七中の冷水の温度が設定温度からはずれている箇所は、温度制御に問題のあった時期に対応するものである。

3.3 拘束力の推移

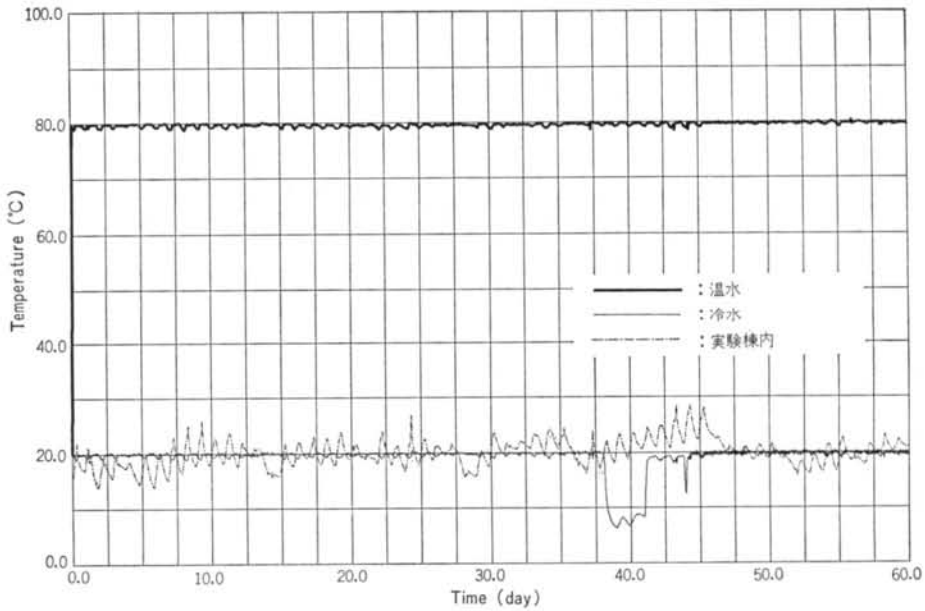
ここでは、先に4台のロードセルの指示値として定義した拘束力について、特にそのうちの L_3 を除いた結果を示す。なお、 L_3 については、この場合のフルスケール 2 ton、精度 $1/5000$ のロードセルでもほとんど計測にかからなかった。それは、写真一1に見るようにロードセルを固定したネジジャッキ先端を受けるプレートの凹面部(この部分は、焼き入れとクロームメッキがほどこされている)の摩擦によって、 L_3 が受けるべき柱材に直交方向の力が食われているためと思われる。

図一八、九に、全6試験体のうちのA-3、C-2のみについて、代表的にその拘束力(高温側ロードセル(L_1)および低温側ロードセル($L_2 \sim L_4$))の経時変化を ΔT_a , $\Delta T_g/D$ の経時変化とともに示す。

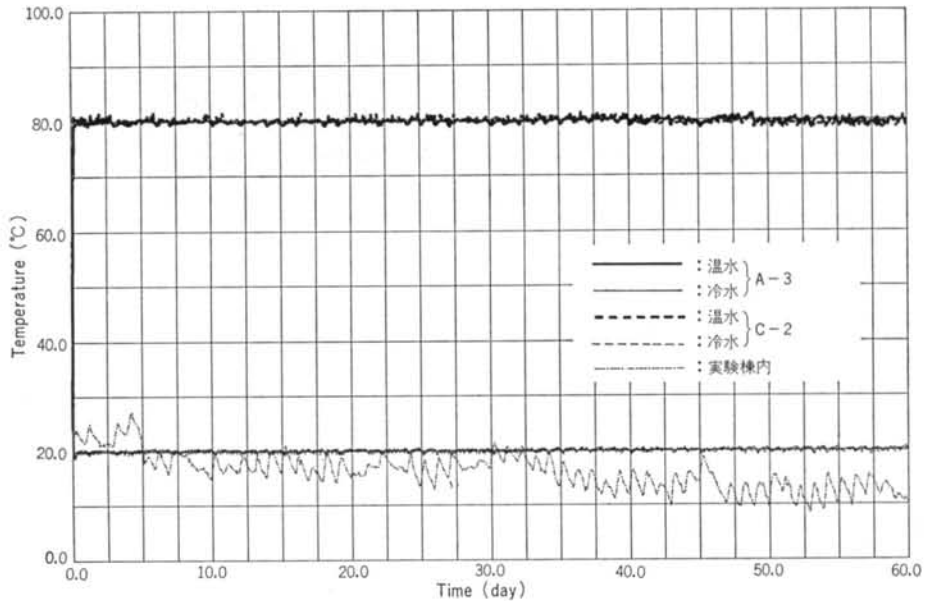
これらのグラフに共通していることは、 ΔT_a , $\Delta T_g/D$



写真一 柱脚部での熱変形拘束機構の実際



図一六 Bモデルの加熱媒体と実験棟内の温度の経時変化



図一七 A-3, C-2 試験体の加熱媒体と実験棟内の温度の経時変化

がほぼ定常な状態に達しても L_1 , ($L_2 \sim L_4$) は日々の昼夜の気温変動の影響を受けて微動を繰り返しながらも全体として徐々に減少し、試験体加熱開始後約30日で加熱開始直後の最大値の約20~25%にまで減衰していることである。なお、図中に採用した ΔT_a および $\Delta T_q/D$ の値は、加熱領域(柱部分)の7つの温度測定断面の平均値である。

3.4 自由熱変形時の曲率

図一10に、Bモデルに関する $\Delta T_q/D$ と自由熱変形曲率の経時変化を示す。図中、曲率を表す3種類の線(太い実線、細い実線および1点鎖線)は、任意の2点の変位量から求めた曲率とその平均値(1点鎖線で表示)である。同図から、 $\Delta T_q/D$ の増加に伴い急激に曲率も増大し、最大値が $1.07 \times 10^{-3}/\text{cm}$ に達していること

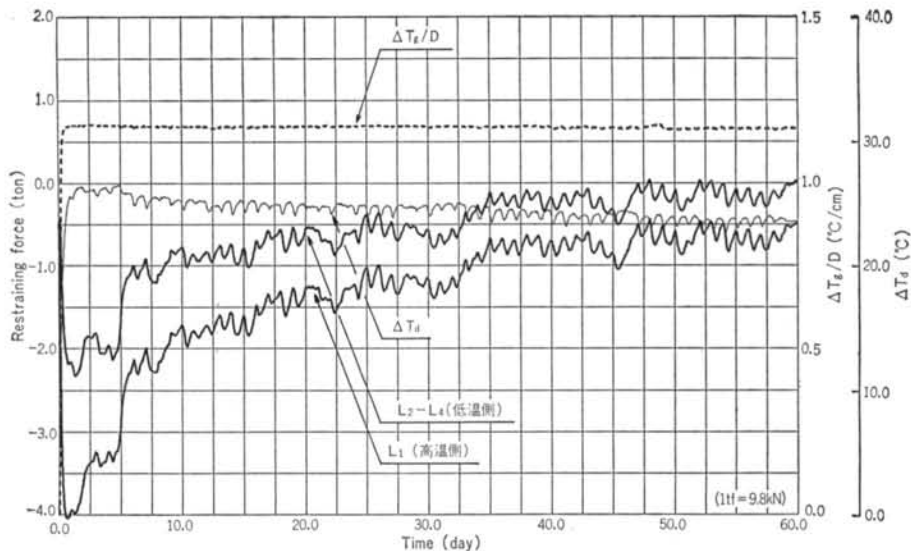


図-8 拘束力, ΔT_g , $\Delta T_g/D$ の経時変化 (A-3 試験体)

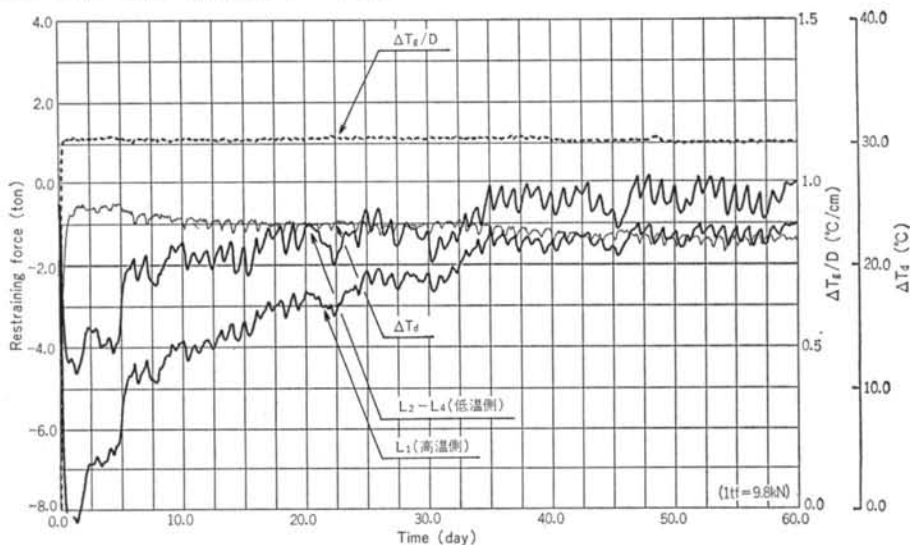


図-9 拘束力, ΔT_g , $\Delta T_g/D$ の経時変化 (C-2 試験体)

が分かる。その後は $\Delta T_g/D$ が減少することなくほぼ一定しているのに対し、曲率は緩やかに低減し続け、試験体加熱開始後および40日で一定値に漸近する様子を呈している。また、この曲率は温度分布の乱れ(図中、 $\Delta T_g/D$ が急激に変化している箇所)に非常に敏感に反応していることも分かる。なお、同図より複数の測定点の曲率を表わす値が非常に近接しているということから、Bモデルの全長にわたって $\Delta T_g/D$ の効果による変形がほぼ円弧状に生じていることも分かる。

次に、図-11はBモデルのRC部材としての見掛けの線膨張係数 α の経時変化を示したものである。これは、

曲率と等価温度勾配の間の次の関係式に基づいて得られたものである。

$$1/r = \alpha \cdot (\Delta T_g/D) \quad \dots\dots(3)$$

参考までに、この α を関数表示すると以下の式で表わされる。

$$\alpha = a \cdot e^{-k(t-t_0)} + b \quad (t > t_0) \quad \dots\dots(4)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.416 \times 10^{-5} \quad (1/^\circ\text{C}) \\ b &= 0.495 \times 10^{-5} \quad (1/^\circ\text{C}) \\ k &= 0.0597 \quad (1/\text{日}) \\ t_0 &= 0.5 \quad (\text{日}) \end{aligned} \right\} \dots\dots(5)$$

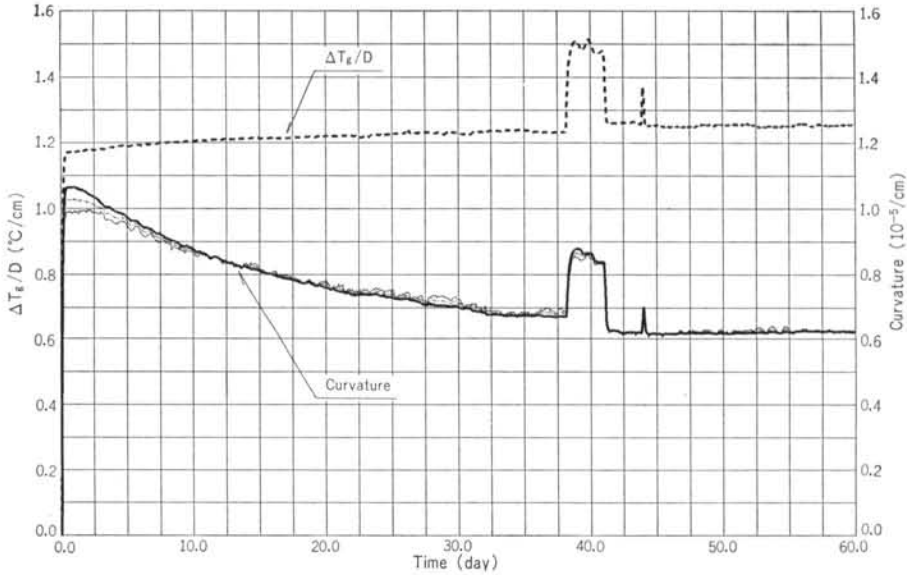


図-10 Bモデルに関する $\Delta T_g/D$ と自由熱変形曲率の経時変化

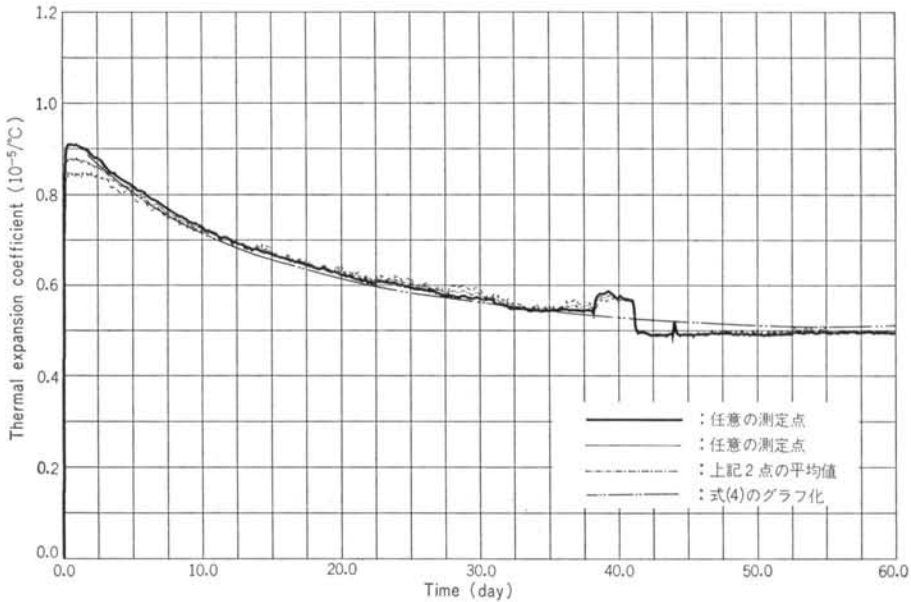


図-11 BモデルのRC部材としての見掛けの熱膨張係数の経時変化

同図中の2点鎖線は、この関数をグラフ化したものである。

3.5 試験体の変位

図-12に、各試験体の最大変位モード図を示す。柱脚が拘束されていないBモデルの自由熱変形量に注目したい。

3.6 試験体ひびわれ図

図-13, 14に、拘束力の推移を見たときと同様に代表的にA-3, C-2モデルのみについて、そのひびわれ図を示す。図中の w はひびわれ幅(単位: mm)、ひびわれ線に添えた数字は試験体加熱開始からひびわれ発生時までの経過日数を表わしている。

§ 4. 実験結果の検討

4.1 拘束軸力と拘束モーメント

図-15にA-3, C-2モデルについて実測された拘束軸力 (F_r) と拘束モーメント (M_r) の経時変化を示す。

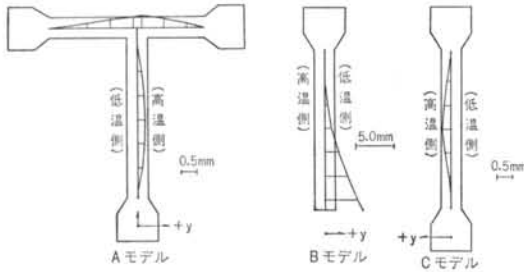


図-12 各試験体の変位(最大値)モード図

ただし, F_r と M_r はそれぞれ次のように定義された量である。

$$F_r \equiv L_1 + (L_2 - L_4) \quad \dots\dots(6)$$

$$M_r \equiv \{L_1 - (L_2 - L_4)\} \cdot l/2 \quad \dots\dots(7)$$

l は, ロードセル L_1 と $(L_2 \sim L_4)$ の支点間の距離である。同図中, 拘束軸力 F_r の値の変動が拘束モーメントのそれに比べて著しいのは, 日々の気温変動による拘束力 L_1 と $(L_2 \sim L_4)$ の変動が, M_r について定義された式(7)からも明らかのように, 互いに相殺し合う結果である。

また, この図より時間経過の中で見た F_r については, およそ30日で最大値の1/5となることが読み取れる。

図-16は, 前図の F_r , M_r を次式で定義される弾性計算値との比の形で求めたものである。

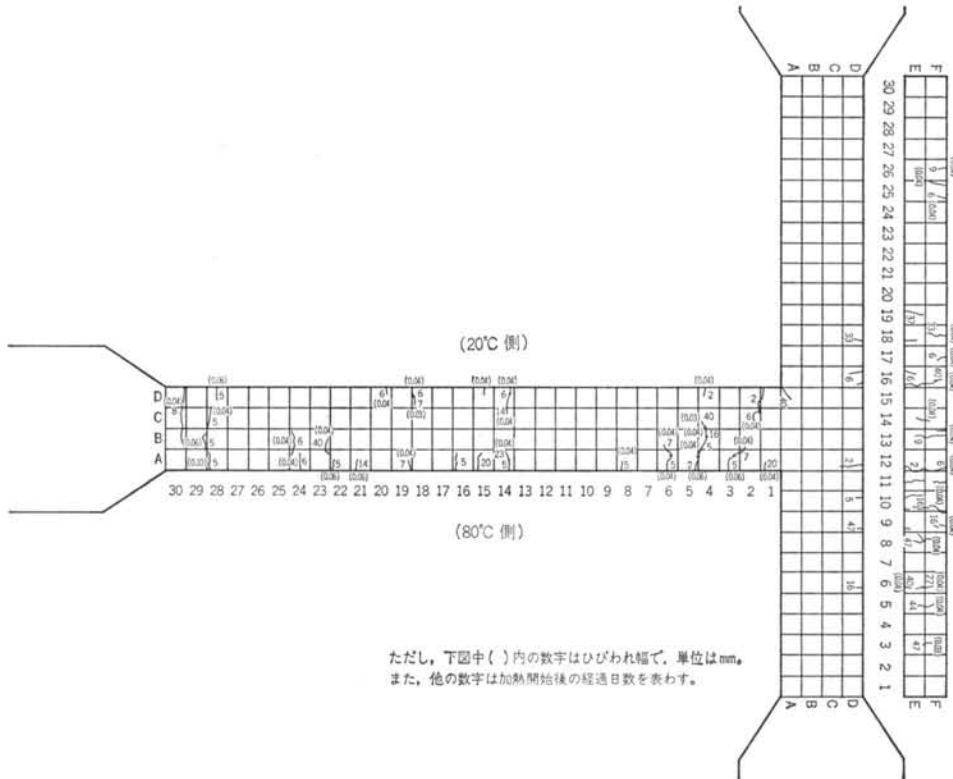


図-13 A-3 試験体のひびわれ図

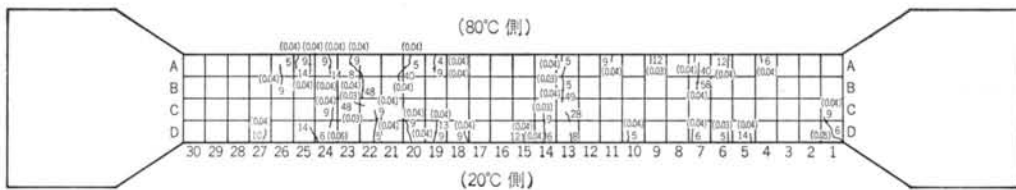


図-14 C-2 試験体のひびわれ図

$$\begin{aligned} \bullet \text{ 弾性熱軸力 } & \begin{cases} F_{T1} \equiv (\alpha \cdot \Delta T_d) \cdot E_c \cdot A_g & \dots\dots(8) \\ F_{T2} \equiv (\alpha \cdot \Delta T_d) \cdot E_s \cdot A_s & \dots\dots(9) \end{cases} \\ \bullet \text{ 弾性熱曲げ } & \begin{cases} M_{T1} \equiv (\alpha \cdot \Delta T_d / D) \cdot E_c \cdot I_g & \dots\dots(10) \\ M_{T2} \equiv (\alpha \cdot \Delta T_d / D) \cdot E_s \cdot I_s & \dots\dots(11) \end{cases} \end{aligned}$$

ここで、上式中の α はBモデルの自由熱変形曲率(図-10参照)の最大値に対応するRC部材としての線膨張係数($0.91 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)である。 E 、 A 、 I はそれぞれ試験体加熱開始前のヤング係数(試験部位)、断面積、断

面2次モーメントである。添字の c 、 s はその量がコンクリート、鉄筋のみの場合を意味し、さらに添字 g の付く量については次のように定義されているものである。

$$A_g \equiv A_c + n \cdot A_s \quad \dots\dots(12)$$

$$I_g \equiv I_c + n \cdot I_s \quad \dots\dots(13)$$

また、 n はヤング係数比(E_s/E_c)で、ここでは設計常用値としての15を用いている。

この図より、無次元化された拘束モーメント(M_r)

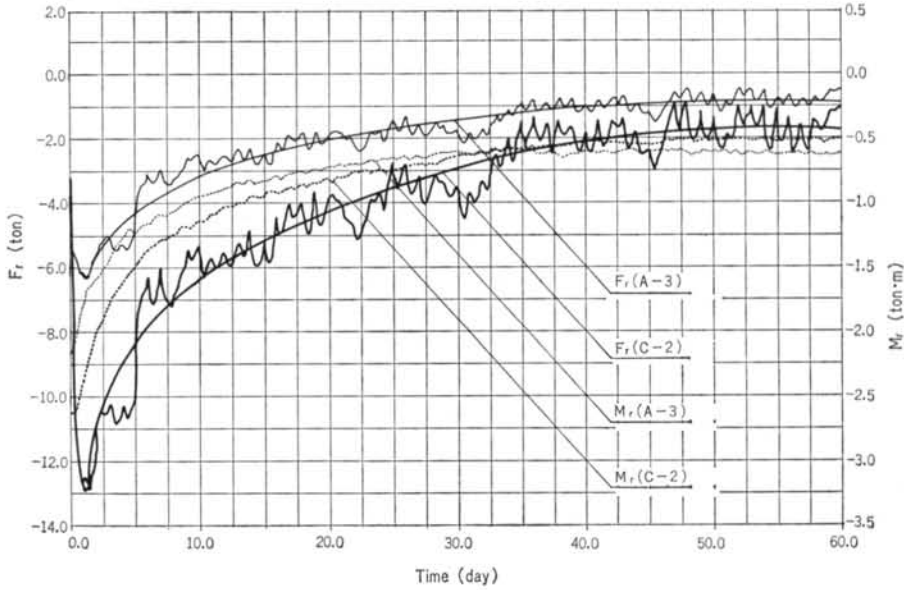


図-15 F_r 、 M_r の経時変化

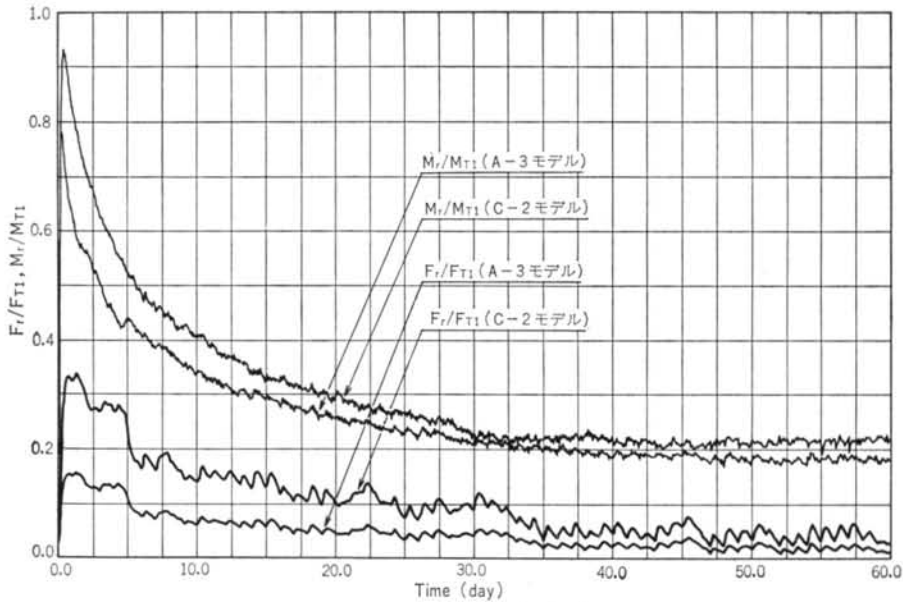


図-16 A-3、C-2モデルの拘束軸力(F_r)と拘束モーメント(M_r)の経時変化

(絶対値のみ)

試験体	鉄筋比 (%) P_i	弾性熱軸力 (tf)		最大拘束軸力比		弾性熱曲げモーメント (tf・m)		最大拘束モーメント比			
		F_{T1}	F_{T2}	$(F_r)_{max}/F_{T1}$	$0.12(F_r)_{max}/F_{T2}$	M_{T1}	M_{T2}	$(M_r)_{max}/M_{T1}$	$0.18(M_r)_{max}/M_{T2}$		
A モデル	A-1	梁	0.7	—	—	—	—	—	—	—	
		柱	0.7	51.4	4.6	0.12	0.16	3.93	0.529	0.59	0.79
	A-2*	梁	0.4	—	—	—	—	—	—	—	—
		柱	0.7	36.9	4.1	0.11	0.12	3.16	0.533	0.38	0.40
	A-3	梁	1.2	—	—	—	—	—	—	—	—
		柱	0.7	40.6	4.8	0.16	0.16	2.82	0.504	0.78	0.79
C モデル	C-1*	柱	0.7	35.8	4.3	0.25	0.25	3.24	0.579	0.71	0.71
	C-2	柱	0.7	38.7	4.6	0.33	0.33	2.82	0.504	0.92	0.93

*) 試験体のセット時にひびわれ (特にA-2 は断面貫通) が入ってしまった

(1tf=9.8kN)

表-4 拘束軸力と拘束モーメントの低下率

M_{T1} については、その最大値はそれぞれ0.92(C-2モデル), 0.78(A-3モデル)となるが、その後時間の経過に伴って低減して、加熱開始約1ヵ月後には両者ともほぼ0.2に近い低減値に漸近していることが分かる。一方、無次元化された拘束軸力 (F_r/F_{T1}) については拘束モーメントの場合より最大値は小さく、0.33(C-2モデル), 0.16(A-3モデル)となり、またその後も連続的に低減し、次第に0に近づいていく様子がうかがえる。

なお、Bモデルを除く全試験体について、こうした拘束軸力と拘束モーメントの低下率を一括して示したものが表-4である。

4.2 部材剛性の相異に対する F_r と M_r

試験時のパラメータとしては、ここではAモデルの柱部材と梁部材のそれぞれの鉄筋比の相対的な大小関係に着目し、柱部材の鉄筋比に比べて大, 同, 小に相当する鉄筋比を梁部材の鉄筋比として採用した。このことは、換言すれば柱部材と梁部材の初期弾性剛性の相異に着目することと同様であるといえる。さらには、柱部材のみが加熱されて熱的変形が生じようとするとき、その部材に対する拘束効果の相異に着目していることと同義であるということもできる。以下では、こうした観点から梁と柱のそれぞれの部材剛性の相異によって生じる柱材への拘束軸力、あるいは拘束モーメントの差異について考える。なお、ここでは梁と柱の各剛性を無次元化するために先の式(8), (10)のように定義される、いわゆる全断面有効と仮定しての弾性計算値との比の形で考察する。

図-17は、弾性軸剛性の比に対する拘束軸力 (F_r) を、また図-18は弾性曲げ剛性の比に対する拘束モーメント

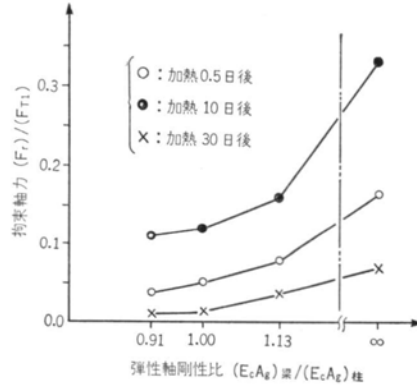


図-17 軸剛性比と拘束軸力

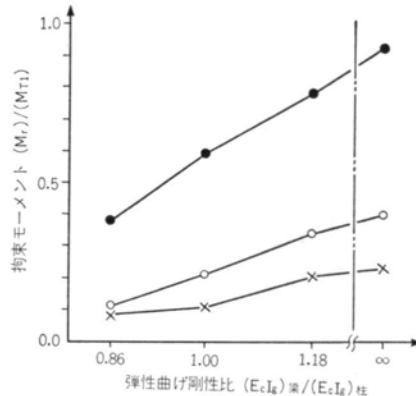


図-18 曲げ剛性比と拘束モーメント

(M_r) を示す。両図中では、ともに試験体加熱開始後の経過日数 (0.5日, 10日, 30日) をパラメータとしている。また、特に横軸の無限大 (∞) とは、柱の剛性に比べて事実上梁の剛性が無限大と見なせるCモデル (とり

わけ、試験体セット時にひびわれが生じることのなかったC-2モデル)に関するものである。

これらの図より、無次元の形で表わされた拘束軸力および拘束モーメントについては、それらの値がほぼ最大に達する約0.5日後において拘束モーメントは拘束軸力のおよそ3～5倍となり、その後加熱時間が経過してもこの傾向はほぼ不変のまま推移していくことがうかがえる。このことは、同じ度合の外部拘束に対して試験体の柱部分に誘発される熱応力としての内部軸力の値が、熱応力としての内部曲げモーメントの値に比べて加熱されているほぼ全期間を通じて1/5～1/3になることを意味するものといえる。さらに当然のことながら、これらの図より柱の弾性剛性に比べて梁の弾性剛性が低ければ低いほど、柱部材の熱的変形に対する拘束効果が低下するために、結果として拘束に要する軸力および曲げモーメントも低減することも分かる。

§ 5. 結論

以上の検討図表により、次のように結論付けられる。

1)弾性熱軸力および弾性熱曲げモーメントとの比をとると、拘束軸力の方が拘束モーメントよりもその低下率は大きく、特に加熱開始直後の低下の度合いは拘束軸力の方が拘束モーメントよりも3～5倍大きい。

2)梁と柱の鉄筋比の相異による弾性剛性比に対しては拘束軸力、拘束モーメントともその弾性剛性比が小さいほど低下幅は大きく、またその傾向については加熱開始後の経過日数が変化しても同様のことがいえる。

3)拘束軸力も拘束モーメントも加熱開始後の時間経過につれて漸次低減し、ある一定値に近づく。なお、拘束軸力は拘束の度合いに依存しながら、およそ15～33日間で最大値の1/5に低減した。

<参考文献>

- 1) 入野, 生駒他: "熱荷重を受ける RC 部材の熱応力評価実験" 日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭和56年9月)

