

[140] 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

正会員 ○生駒哲夫 (清水建設技術研究所)

田中伸幸 (清水建設技術研究所)

1. はじめに

<原子力発電用コンクリート格納容器技術基準(案)>⁽¹⁾は、格納容器に作用する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るとして、設計にあたっては格納容器の的確な曲げ剛性評価の肝要性を説いている。温度荷重が短期間作用する熱応力実験⁽²⁾によると、鉄筋の長期許容応力度レベルでの鉄筋コンクリートの曲げ剛性を弾性剛性で除した比率は1/3~1/2の範囲にあり、同基準(案)も、クリープの影響を考慮するならば剛性の低減率を1/2とすることは十分許容できる、としている。本論文では、上記の実験事実を踏まえ、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みるためにRCの梁—柱架構を用いて熱応力を実際に発生させ、それを長期間測定することによりそれらの低減傾向を実験的に確認したものである。なお、ここではこれらの(拘束)軸力と(拘束)曲げモーメントに及ぼす気温とロードセルの変形の効果は考えないものとする。

2. 実験の概要

実験に用いた試験体の諸元を表-1に示す。なお、コンクリートの種類は普通コンクリート、主筋に用いた鉄筋の種類はSD35、配筋状態は均等、試験期間は60日間。これらの条件は全6体の試験体に共通である。

試験体は梁相当部分と柱相当部分(以下、単に梁、柱と称す)から成るAモデルと柱のみから成るB、C各モデルの3種類とした。試験時のパラメータとしては梁の鉄筋比を採っている。3種類の試験体の形状および寸法は図-2~4に示すとおりである。

同図中、いわゆる試験部はいずれも均等断面を有する3,000mmの部材長区間である。

試験体の拘束方法としては、図-1のようにPC鋼棒を通じて床面と一体化させたコンクリートブロックを利用して、これに試験体を拘束するという方法を採用している。具体的には、Aモデルについてはその梁両端部を、BとCモデルについては共に柱頭部のみを固定している。さらにAとCモデルに関しては、その柱脚部を図-1のように4台のロードセル

表-1 実験に用いた試験体の諸元

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 (kg/cm ²)						
				試験開始時 (常温, 気中)		試験終了時 (常温, 気中)		試験終了時 (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	梁 4D19	0.7	有	241.2	2.33×10 ⁵	243.5	2.27×10 ⁵	244.3	2.24×10 ⁵	
										柱 4D19
	梁 4D13	0.4		159.5	1.86×10 ⁵	152.0	1.72×10 ⁵	151.4	1.27×10 ⁵	
										柱 4D19
梁 4D25	1.2	229.6	1.81×10 ⁵	260.2	2.25×10 ⁵	234.3	1.80×10 ⁵			
								柱 4D19	0.7	
Bモデル	柱	4D19	0.7	無	241.2	2.33×10 ⁵	243.5			2.27×10 ⁵
Cモデル	柱	4D19	0.7	有	159.5	1.86×10 ⁵	152.0	1.72×10 ⁵	151.4	1.27×10 ⁵

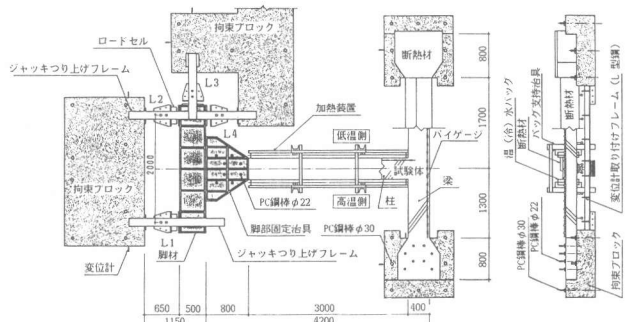


図-1 試験体の拘束方法 (Aモデルの場合)

(L_1, L_2, L_3, L_4 とする) によつて拘束した。以後、これらの示す値を拘束力と呼ぶ。なお、試験開始にあたっては L_1 と (L_2-L_4) との初期値がいずれも 0.5 ton となるように設定している。一方、Bモデルについては熱的変形が自由に生じ得るよう柱脚部の拘束は取り除いている。

次に熱を与える部分は柱のみ限定し、その柱のせい方向の両側面に $80^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}$ の温水、冷水の入ったゴムバックを接触させた。

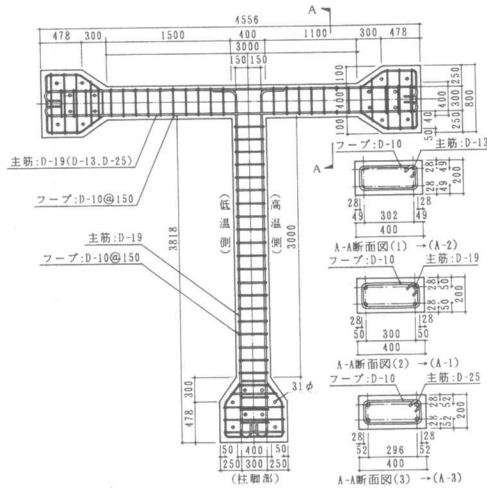


図-2 Aモデル

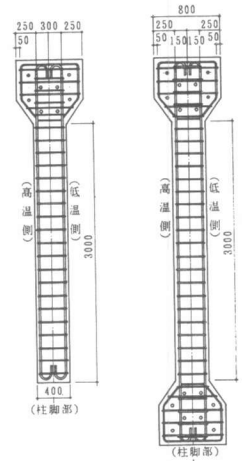


図-3 Bモデル 図-4 Cモデル

但し、全試験体ともその表面はシールしていない。そうした試験体を、加熱面は除いて全表面を断熱材で覆った。

測定項目は先の拘束力他に、梁と柱の変位(材軸に直交方向)、梁と柱の断面内の温度である。変位については各部材の底面の軸線方向中心線に沿って450mm間隔に配置された変位計(床面に固定)により測定し、また断面内の温度は各部材軸方向に、同じく450mm間隔の各断面内の3点(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)について測定している。

3. 実験結果

3.1 温度に関する用語の定義

以後、試験体断面内の温度状態を言及する際の明確さを期すために、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定義する。1つは拘束軸力に関わる量で、平均温度上昇(ΔT_d)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_d と $\Delta T_g/D$ 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時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、次のように定義する。

$$\Delta T_d = (T_h + T_\ell) / 2 - T_0 \quad (1), \quad \Delta T_g/D = (T_h - T_\ell) / D \quad (2)$$

ここに T_0 は、加熱前の無応力状態に対応する温度で、一般に基準温度と呼ばれる。

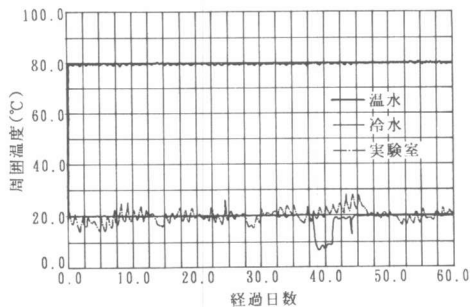


図-5 Bモデルの加熱媒体と実験室の温度

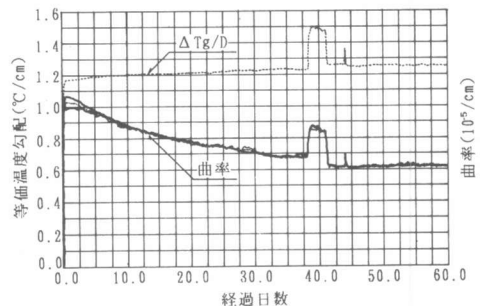


図-6 Bモデルの $\Delta T_g/D$ と曲率と経過日数

3.2 実験の結果

図-5はBモデルに関する加熱媒体(温水と冷水)と実験室内の温度の経時変化を示したものである。

図-6はその時の同モデル内の $\Delta Tg/D$ と自由熱曲げ変形による曲率の変化図である。図中の曲率のグラフで3種の線は任意の変位計から求められたものであることを示す。このことは与えられた $\Delta Tg/D$ の効果によってBモデルのほぼ全長にわたって円弧状に変形が生じていることを意味するものである。

この図から、 $\Delta Tg/D$ がほぼ一定となる時刻に対応して曲率が最大($1.07 \times 10^{-5}/cm$)となり、以後 $\Delta Tg/D$ が一定のままであっても曲率は緩やかに低減し、およそ40日で一定値に漸近することが分る。また、この曲率はその減衰過程にあっても、 $\Delta Tg/D$ が急激に変化すると曲率もそれに敏感に対応することが分る。

図-7は拘束力の代表例として、Aモデル(A-3)の高温側のロードセル L_1 と低温側のロードセル(L_2-L_4)の経時変化を示したものである。この図から ΔTd および $\Delta Tg/D$ の急速な立ち上がりに対して L_1 と(L_2-L_4)とが大きく応答するが、それもその後、日々の昼夜の気温変動に従って微動を繰り返しながら、全体として徐々に低減してゆき、加熱開始後およそ1カ月で、高温側、低温側の拘束力は最大値の約1/5になる。なお、このことは次の図-8のCモデル(C-2)の場合についても同様にあてはまる。

図-9~10はAモデル(A-3)とCモデル(C-2)の熱的最大の变形時の変位モードである。

以上の得られた実験結果を全試験体についてまとめると表-2のとおりとなる。

同表中の定常時の等価温度勾配 $\Delta Tg/D$ の値の変動範囲からは、 $45.6 \leq \Delta Tg \leq 54.0$ (°C)となることが分る(2式参照)。このことは加熱媒体としての温水、冷水の温度80°C、20°Cに対して、実際に各試験体の柱部分の断面内に実現された温度は、力学的に等価となるように直線置換された温度にして、その高低差が平均して約50.0(°C)となっていることを表わしている。なお、表中の拘束モーメント(Mr)とは、全断面有効とみなした各柱断面中心軸に関する高温側と低温側の拘束力のなす曲げモーメントとして定義している。また、拘束軸力(Fr)とは上記2つの拘束力の和として定義している。

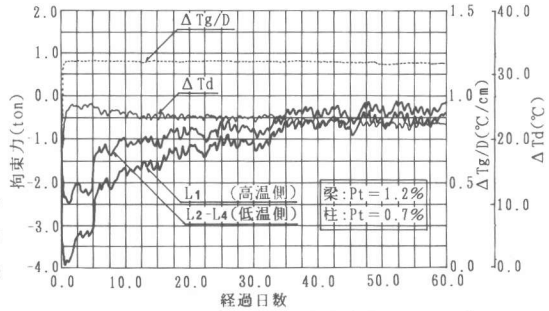


図-7 Aモデルの柱軸方向拘束力と経過日数

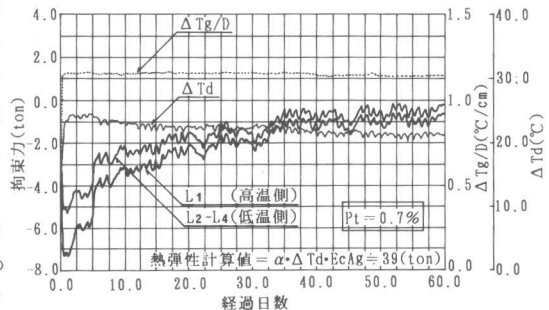


図-8 Cモデルの材軸方向拘束力と経過日数

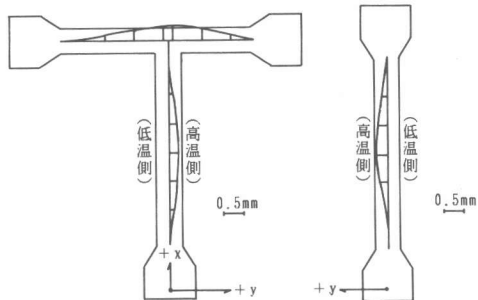


図-9 Aモデルの変形モード 図-10 Cモデルの変形モード

表-2 実験結果

試験体	鉄筋比 Pt (%)	定常時の ΔTd (°C)	定常時の $\Delta Tg/D$ (°C/cm)	最大変位	最大拘束軸力 (Fr)max (ton)	最大拘束モーメント (Mr)max (ton-m)	(Fr)maxの8割減衰日数 (日)	最大ひびわれ幅 (mm)max
				向き [mm]				
Aモデル	A-1 梁 0.7	/	/	+x 0.62	6.1	2.3	/	0.10
	A-1 柱 0.7	24.8	1.33	+y 0.60	6.1	2.3	20	0.06
	A-2 梁 0.4	/	/	+x 0.64	/	/	/	0.20
	A-2 柱 0.7	23.2	1.29	+y 0.47	3.9	1.2	15	0.10
A-3	梁 1.2	/	/	+x 0.41	/	/	/	0.06
	柱 0.7	23.4	1.18	+y 0.23	6.4	2.3	33	0.10
Bモデル	B	0.7	24.7	1.23	+y 4.21	/	/	/
Cモデル	(*) C-1 柱 0.7	22.9	1.35	+y 0.36	8.9	2.3	28	0.06
	C-2 柱 0.7	22.5	1.14	+y 0.28	12.9	2.6	33	0.06
(注) 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。				(注) 図-9 図-10を参照	(注) (Fr) = (Fr)max (L1+L2+L3+L4) / 2	(注) (Mr) = (Mr)max (L1+L2+L3+L4) / 2		

4. 実験結果の検討

実験結果を検討するにあたり、予め次のような各種の定義を置くものとする。

$$F_{T1} = (\alpha \cdot \Delta T_d) E_c A_g \quad (3)$$

$$F_{T2} = (\alpha \cdot \Delta T_d) E_s A_s \quad (4)$$

$$M_{T1} = (\alpha \cdot \Delta T_g / D) E_c I_g \quad (5)$$

$$M_{T2} = (\alpha \cdot \Delta T_g / D) E_s I_s \quad (6)$$

ここに α は B モデルの自由熱変形曲率の最大値に対応する RC 試験体としての線膨張係数。E, A, I はそれぞれ試験体の試験開始前のヤング係数、断面積、全断面有効としての断面 2 次モーメントである。右下添字の C, S はその量がコンクリートのみの場合、鉄筋のみの場合を意味する。さらに次のように定義する。

$$A_g = A_c + n \cdot A_s \quad (7)$$

$$I_g = I_c + n \cdot I_s \quad (8)$$

ここに n はヤング係数比で 15 とする。

4.1 拘束軸力と拘束モーメント

表-3 に F_r と M_r の最大値（加熱開始後約 0.5 日目の値）を示す。

また図-11 には先の図-7~8 の A, C モデルに対応する F_r と M_r の経時変化を代表例として示す。

4.2 F_r と M_r と鉄筋比 (Pt)

図-12~13 は P_t の相異に基づく梁と柱の弾性剛比の違いによる F_r と M_r とを加熱開始後の日数をパラメータとして表わしたものである。

5. 結論

以上、検討した図、表より次のことを結論づけることができる。

- 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の小さい程低下幅は大きく、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と言える。
- 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、拘束軸力は軸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] 通商産業省資源エネルギー庁：“原子力発電用コンクリート格納容器技術基準(案)” 昭和56年11月
- [2] 入野, 生駒, 他：“熱荷重を受ける RC 部材の熱応力評価実験” 日本建築学会論文梗概集, 昭和56年9月

表-3 拘束軸力と拘束モーメントの低下率 (絶対値のみ)

試験体	鉄筋比 Pt(%)	弾性熱軸力 (ton)		最大拘束軸力比		弾性熱曲げモーメント(ton-m)		最大拘束モーメント比	
		F_{T1}	F_{T2}	$(F_r)_{max}/F_{T1}$	$0.2(F_r)_{max}/F_{T2}$	M_{T1}	M_{T2}	$(M_r)_{max}/M_{T1}$	$0.2(M_r)_{max}/M_{T2}$
Aモデル	梁 0.7	/	/	/	/	/	/	/	/
	柱 0.7	51.4	4.6	0.12	0.27	3.93	0.529	0.59	0.87
	(*)A-2 梁 0.4 柱 0.7	36.9	4.1	0.11	0.20	3.16	0.533	0.38	0.45
Cモデル	(*)A-3 梁 1.2 柱 0.7	40.6	4.8	0.16	0.27	2.82	0.504	0.78	0.91
	(*)C-1 柱 0.7	35.8	4.3	0.25	0.42	3.24	0.579	0.71	0.79
C-2	0.7	38.7	4.6	0.33	0.55	2.82	0.504	0.92	1.03

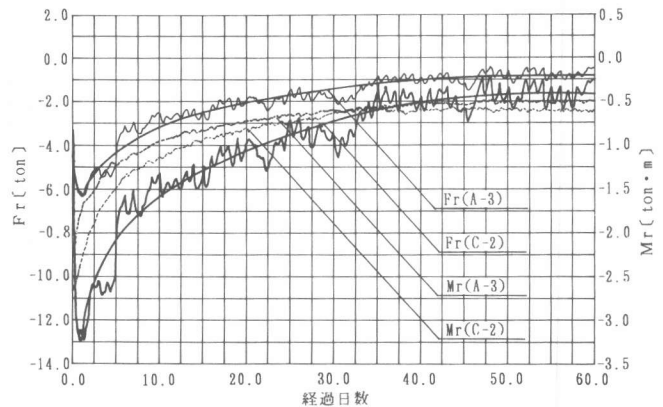


図-11 拘束軸力(F_r)と拘束モーメント(M_r)の経時変化

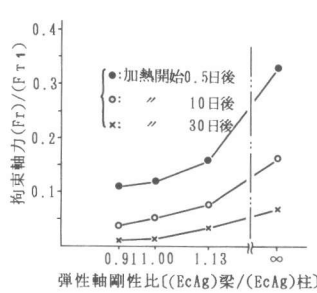


図-12 軸剛比と拘束軸力

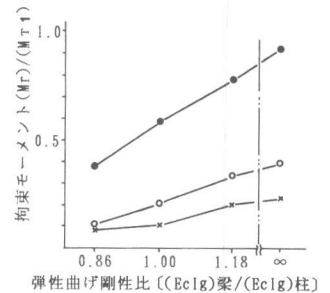


図-13 曲げ剛比と拘束モーメント