

論文

[2039] 高温下で動的荷重を受けるRCはり部材の曲げ性能

正会員 ○金津 努 (電力中央研究所)
 正会員 石田博彰 (電力中央研究所)
 正会員 松村卓郎 (電力中央研究所)
 正会員 西内達雄 (電力中央研究所)

1. はじめに

原子力発電所原子炉格納容器および放射性廃棄物貯蔵施設などをコンクリート構造とする場合には、高温条件下に曝されることを想定して設計が行われ、これらの施設の通常運転時には65℃というコンクリートに許容される温度の制限値¹⁾が設定されている。これまでに著者らが行った研究の結果、高温条件下(200℃程度まで)においては、コンクリートや鉄筋の物理的性質が温度とともに変化することに加えて、常温下では無視し得た鉄筋とコンクリートとの間の熱膨張係数の差に起因する内部応力(鉄筋; 圧縮、コンクリート; 引張)が鉄筋コンクリート構造の変形に影響し、この内部応力の大きさは鉄筋とコンクリート間の相対的な量比と密接に関係していることが明らかとなった。^{2) 3)}

本研究は、熱膨張係数の差に起因する内部応力および昇温にともなう物性の劣化がRC部材の挙動に与える影響を、より広い条件の基で把握することを目的として、動的荷重条件および重ね継手の存在が高温下のRC部材の曲げ性能に与える影響について実験的に検討したものである。

2. 実験の概要

2.1 実験要因

実験要因は、温度、重ね継手長さ、鉄筋比および動的荷重とした。各試験体を表-1に示す。

(1) 温度; 温度条件は常温、65℃、100℃および200℃の4種類とした。

(2) 重ね継手長さ; 重ね継手長さは30d、40dおよび50d(dは鉄筋径で、使用した鉄筋はD16異形鉄筋)とした。

(3) 鉄筋比; 鉄筋比は0.85%を基本とし、0.57%も一部取り入れた。

(4) 動的荷重; 動的荷重は片ぶり、周波数5Hzで6秒間作用させるのを1回とし、鉄筋が弾性域の各荷重段階でそれぞれ3回、鉄筋降伏後周波数0.5Hzで60秒間を1回として3回載荷した。振幅は各荷重段階で表-2に示すよう

表-1 供試体諸元

供試体	温度	鉄筋比	継手
NT8500 NT8540	常温	0.85%	なし 40d
HL8500 HL8530 HL8540 HL8550	65℃	0.85%	なし 30d 40d 50d
HM5700 HM5730 HM5740 HM5750	100℃	0.57%	なし 30d 40d 50d
HM8500 HM8530 HM8540 HM8550	100℃	0.85%	なし 30d 40d 50d
HH8500 HH8530 HH8540 HH8550	200℃	0.85%	なし 30d 40d 50d

表-2 繰返し載荷時の応力レベル (fs, n)

鉄筋比	上・下限	1段階	2段階	3段階
0.85%	上限	2000	3000	降伏直前
	下限	200	1200	1800
0.57%	上限	2000	3000	降伏直前
	下限	0	900	1600

fs, n; ひびわれ断面鉄筋応力度の計算値(kgf/cm²)

に設定した。表-2から分かるように、動的繰返し载荷は、ひびわれ断面の鉄筋応力度計算値で2000kgf/cm²、3000kgf/cm²、降伏直前の荷重段階および降伏時変形の2倍の変形時点で行った。

2. 2 試験体の作製

(1)試験体形状・寸法；試験体は断面20cm×40cm、全長400cm、試験区間長150cmの鉄筋コンクリートはり部材である。

(2)コンクリート；使用したコンクリートは、呼び強度 255kgf/cm² のレデーミクストコンクリートで、全試験体の強度試験結果は、圧縮強度349kgf/cm² (σ :14.5kgf/cm²)、引張強度26.4kgf/cm² (σ :1.78kgf/cm²)、弾性係数 2.73×10^5 kgf/cm² (σ :0.076 $\times 10^6$ kgf/cm²)であった。

(3)配筋；主鉄筋はSD35D16で、降伏強度は4083kgf/cm²、弾性係数は 1.93×10^6 kgf/cm²であった。断面配筋を図-1に示す。

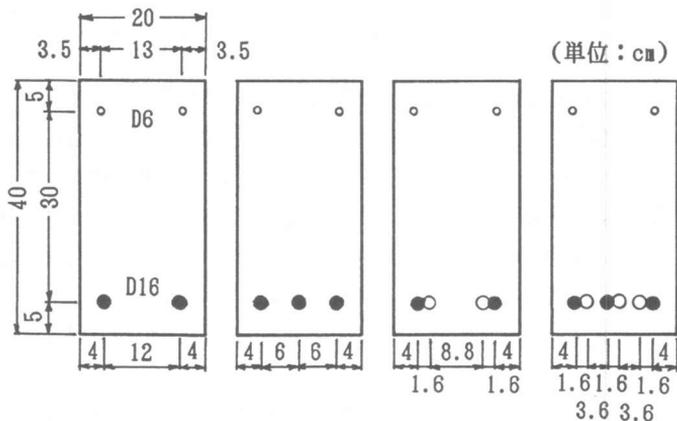


図-1 断面配筋図

(4)試験時材令；载荷試験時の試験体の材令は、6ヶ月～10ヶ月であった。

2. 3 実験方法

(1)加熱方法；試験体の試験区間を挟む 220cm 両側面にそれぞれ7枚ずつのパネルヒーターを設置し、それ以外の部分を断熱材で覆った。相向かい合うヒーターを1組として7組独立に温度コントロールを行い、約10℃/hrで昇温し、試験開始までに約2日間所定温度を保持した。

(2)载荷方法；図-2に载荷状態の模式図を示す。試験体上に150cmの間隔で载荷点を設定し、H型鋼により試験区間に等モーメントを与えた。静的载荷では変形制御により、動荷重载荷時は上下限の荷重制御により载荷した。载荷パターンを図-3に示す。

(3)測定方法；各項目の測定は次の通り。

①温度；試験区間内に1断面9点で

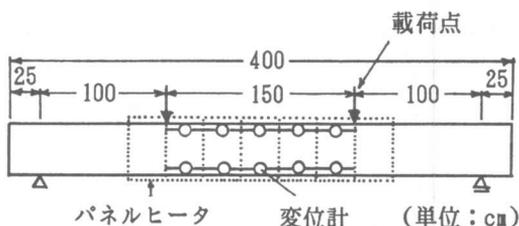


図-2 実験方法

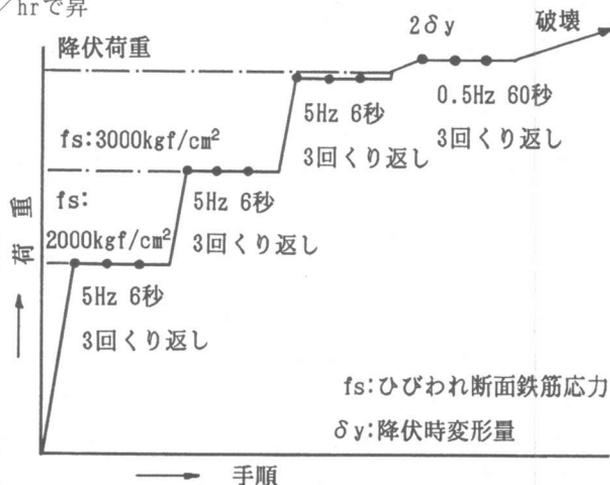


図-3 载荷手順

5断面に熱電対を配置し、これらの全平均を試験体温度とした。

②荷重；载荷点にロードセルを設置し、この読み値を曲げモーメントに変換した。

③変形；試験体の圧縮縁および引張縁からそれぞれ3cmおよび3.5cmの位置に32cm間隔に標点を設定し、ここに変位計を設置してひずみを計測した。圧縮縁および引張縁のそれぞれのひずみ値から曲率を計算した。

④鉄筋ひずみ；継手の無い試験体では試験区間内に3点、継手のある試験体は試験区間内の違う鉄筋にそれぞれ3点計6点にひずみゲージを貼付し、鉄筋のひずみを測定した。ゲージ貼付位置の例を図-4に示す。

(4)重ね継手の要件について

高温下のRC構造物の設計の拠り所となる原子力用コンクリート格納容器設計指針案・同解説¹⁾では、重ね継手について表-3のような要件を定めている。本実験では、この要件を考慮して重ね継手長さを設定した。

3. 動的載荷が部材の変形に与える影響

(1)曲げ剛性の観点から；図-5および図-6は、それぞれ動的繰返し載荷を行った時の載荷前後の曲率の増加量及び曲げ剛性の低下割合を示す。全般の傾向として言えることは、次の通りである。

①動的繰返し載荷に伴う曲率の増加量は、繰返しを与える各段階の荷重の増加に比例して大きくなる。また、全般的には、温度条件の高い方がやや大きく曲率が増加し、同じ温度条件では鉄筋比の小さい方が大きい。

②動的繰返し載荷を行わなかった場合に比較しての剛性低下割合は、載荷荷重の増加に比例して大きくなる。また、鉄筋比が小さい方が剛性低下は大きい。同じ鉄筋比では、温度条件が高い方が剛性低下がやや大きいが差はほとんどない。

動的繰返し載荷を行った場合、曲げ剛性の低下は常温下でも約10%程度あり、温度の影響は小さいと判断される。ここで温度の影響とは、高温下における付着性能の劣化、および熱膨張係数差に伴って蓄

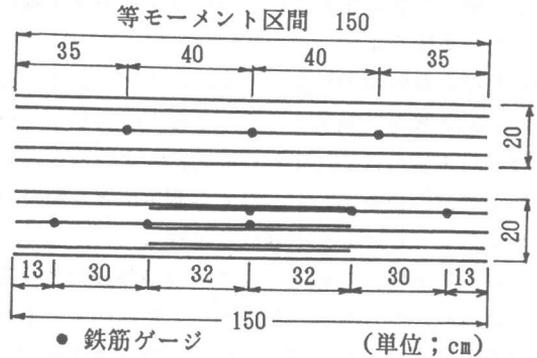


図-4 鉄筋ゲージ位置

表-3 鉄筋の重ね継手の長さ

鉄筋種類	コンクリート強度 (kgf/cm ²)	継手長
SD30	135 ≤ ≤ 210	45d 35d7ヶ
	210 ≤ ≤ 270	40d 30d7ヶ
SD35	270 ≤	35d 25d7ヶ
SD40	210 ≤ ≤ 270	45d 35d7ヶ
	270 ≤	40d 30d7ヶ

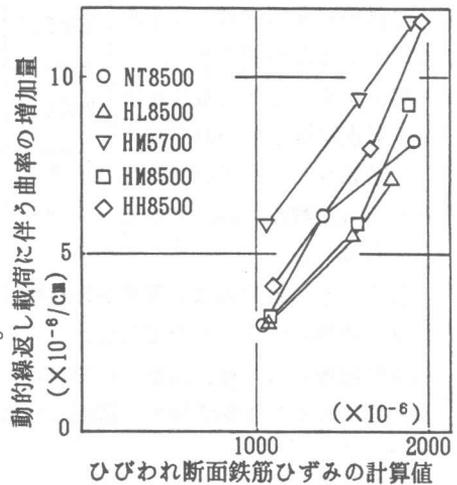


図-5 動的繰返し載荷に伴う曲率の増加量 (重ね継手なし)

積される鉄筋の圧縮ひずみの解放が曲率の進展に与える影響を指す。

(2) ひびわれ断面の鉄筋ひずみの観点から；表-4は、動的繰返し载荷を行ったときの载荷前後のひびわれ位置の鉄筋ひずみの変化、およびひびわれ断面の計算値を示した。ひずみ測定位置3箇所いずれかでひびわれの発生を確認した。

ひびわれ断面計算上は、その段階の最大载荷荷重に変化がなければ、動的繰返し载荷前後でもひずみの変化はないと考えられる。実測値は各試験体とも载荷前後でわずかにひずみが増加している。これは、ひびわれ断面における引張部コンクリートの抵抗の損失と考えることができる。

ここで注目すべきことは、各試験体の各荷重段階におけるひびわれ断面ひずみの計算値と実測値の対応がそれぞれ異なることである。すなわち、

常温下の試験体の計算値と実測値はほぼ等しいが、65℃、100℃ となるにしたがって差が大きくなり、200℃ でその差が小さくなる。鉄筋ゲージは载荷試験前に初期値零としているため、この差は昇温により鉄筋に蓄積されたひずみであることが推定される。

200℃ で差が小さくなったのは、昇温時にひびわれが発生し、蓄積されるべきひずみの

M；作用モーメント(t-m) $\epsilon_{s,b}$ ；繰返し载荷前鉄筋ひずみある部分が解放されたものと $\epsilon_{s,a}$ ；繰返し载荷後鉄筋ひずみ ($\times 10^{-6}$)

考えられる。

以上より、動的繰返し荷重が部材剛性に与える影響を見た場合、高温条件であることが特に大きな影響を与えるものではない。しかし、RC部材の降伏までの過程における変形に与える温度の影響としては、高温下におけるコンクリートの弾性係数の低下による剛性の低下と、温度上昇により熱膨張係数差に起因して蓄積される鉄筋の圧縮ひずみの解放が存在していることが分かる。

4. 重ね継手の性能について

以下では、動的繰返し荷重が剛性低下に与える影響、破壊形式、終局強度および靱性率の観点

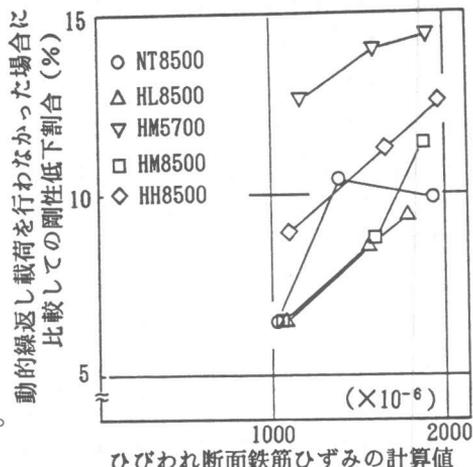


図-6 ひびわれ断面鉄筋ひずみの計算値 動的繰返し载荷に伴う剛性低下割合の変化 (重ね継手なし)

表-4 鉄筋ひずみの測定値

供試体	モーメント 歪	第1段階		第2段階		第3段階	
		Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
NT8500	M	3.74	--	5.01	--	6.73	--
	$\epsilon_{s,b}$	1093	1028	1363	1377	1935	1850
	$\epsilon_{s,a}$	1102	--	1441	--	--	--
HL8500	M	3.78	--	5.51	--	6.02	--
	$\epsilon_{s,b}$	1175	1065	1760	1552	1930	1696
	$\epsilon_{s,a}$	1249	--	1801	--	--	--
HM5700	M	2.49	--	3.75	--	4.25	--
	$\epsilon_{s,b}$	1430	1054	1998	1587	2254	1798
	$\epsilon_{s,a}$	1518	--	2028	--	--	--
HM8500	M	3.76	--	5.50	--	6.27	--
	$\epsilon_{s,b}$	1233	1080	1939	1580	2216	1801
	$\epsilon_{s,a}$	1312	--	2024	--	--	--
HH8500	M	3.66	--	5.51	--	6.25	--
	$\epsilon_{s,b}$	1111	1101	1776	1657	2109	1879
	$\epsilon_{s,a}$	1209	--	1889	--	--	--

から検討する。

(1)剛性低下; 図-7は、重ね継手を有するはり部材の動的繰返し荷重の載荷に伴う曲率の増加、および曲げ剛性の動的荷重を与えなかった場合に比較しての低下割合を示す。全般的な傾向および曲率増加量、剛性低下率の数値自体もほぼ重ね継手のない場合と同様で、両者とも載荷荷重の増加に比例して大きくなり、鉄筋比の小さい試験体の方が大きい。しかし、動的繰返し荷重が変形性能に与える影響は、温度条件によって左右されることはほとんど無い。

(2)破壊形式; 全18体の試験体について、破壊形式を分類すると表-5に示すようになる。重ね継手のないものは温度条件に拘らずすべて曲げ破壊となるが、重ね継手を有する試験体では、温度条件と重ね継手長さにより破壊形式が異なっている。即ち、温度が100℃以上ではすべて付着割裂破壊を生じているが、65℃の条件では、重ね継手長さ30dでは付着割裂破壊、40d、50dでは曲げ破壊となっている。

また、部材降伏時の2倍の曲率の変形で繰返し載荷を行った場合の曲率の進展を表-6に示す。重ね継手長さが30dの場合で温度条件が65℃以上の試験体、および40dで100℃0.85%の試験体と40d 200℃の試験体は、繰返し載荷途中で付着割裂破壊を起こした。特に、40dで100℃0.85%の試験体は、降伏時の2倍の変形に至る前に付着割裂破壊を起こした。その他の試験体では、温度条件の高い場合に変形の進展が大きい傾向が認められる。この時点で破壊していない試験体では、重ね継手の影響は明確ではなく、温度条件の影響の方が卓越している。

(3)終局耐力; 図-8は、重ね継手を有しない部材の終局耐力に対する各継手有の試験体の終局耐力比を示す。図から明らかなように、温度条件、重ね継手長さによって、終局耐力比が相違する傾向が見られる。終局耐力比を0.95で分けてみると、高温条件の重ね継手長さ30dのすべてと200℃の40dが0.95以下となる。終局耐力比から継手部性能を評価すれば、200℃では50

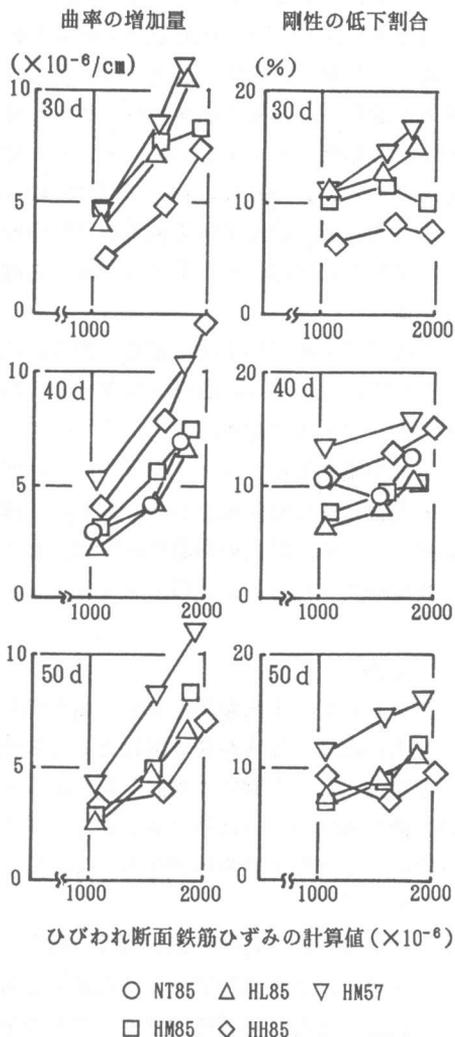


図-7 動的繰返し載荷に伴う曲率の増加および剛性低下割合 (重ね継手を有する場合)

表-5 各供試体の破壊形式

温度 (°C)	鉄筋比 (%)	継手長さ			
		1本物	50 d	40 d	30 d
常温	0.85	○	--	○	--
65	0.85	○	○	○	●
	0.57	○	●	●	●
100	0.85	○	●	●	●
	0.57	○	●	●	●
200	0.85	○	●	●	●

○; 曲げ破壊 ●; 付着割裂破壊

d以上を確保することが必要となる。

(4) 靱性率；図-9は、試験試体の曲率の靱性率（終局変形量／降伏変形量）を示す。温度条件と重ね継手長さによって靱性率は異なり、ある傾向が認められる。RC部材として確保すべき靱性率を4として区分すると、30dの供試体すべて、および100℃ 0.85%の40d、200℃の40dの靱性率は不十分なものとなる。靱性率から継手部の性能を評価すれば、これらの条件のものは50d以上の継手長さを確保することが必要である。

(5) 高温下での重ね継手部の要件；破壊形式、終局耐力比および靱性率の三点から、高温下における重ね継手の要件を検討すると次のようになる。

- ① 65℃の温度条件では、コンクリート強度が300kgf/cm²以上の場合、重ね継手長さが40dあれば性能的には問題はない。
- ② 同じく100℃以上の高温条件では、RC部材としての性能を確保するには、50d以上を確保する必要がある。

5. 結論

65℃から200℃の高温条件下で、動的繰返し荷重および重ね継手の存在がRC部材としての性能に与える影響について実験的に検討した。本実験の結果、附着性能の劣化および鉄筋とコンクリートの熱膨張係数差による内部応力の影響について、以下の結論が得られた。

- (1) 動的繰返し荷重が部材剛性の低下に与える影響は、高温条件であることが常温の場合に比較して特に影響を大きくするものではない。
- (2) 高温条件下の重ね継手に必要な継手長さについて、温度条件との関係で確保すべき条件の目安が得られた。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会；原子力発電用コンクリート格納容器設計指針案、1978年
- 2) 金津他；高温下における鉄筋コンクリート部材の力学性状、第7回JCI年次講演会論文集、1985年6月
- 3) 金津他；高温下における鉄筋コンクリート部材の曲率評価方法、第40回土木学会年次講演会概要集、1985年9月

表-6

塑性域における繰返し荷重の載荷による曲率の進展

供試体	載荷前	載荷後
NT8500 NT8540	182 120	187 142
HL8500 HL8530 HL8540 HL8550	176 143 132 137	188 --- 155 157
HM5700 HM5730 HM5740 HM5750	161 140 155 141	167 --- 166 185
HM8500 HM8530 HM8540 HM8550	201 --- 145 140	246 --- --- 149
HH8500 HH8530 HH8540 HH8550	197 157 166 158	242 --- --- 177

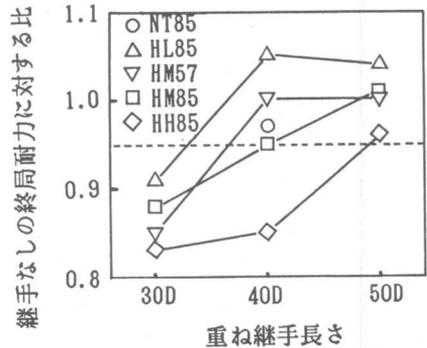


図-8 終局耐力比（重ね継手の有/無）

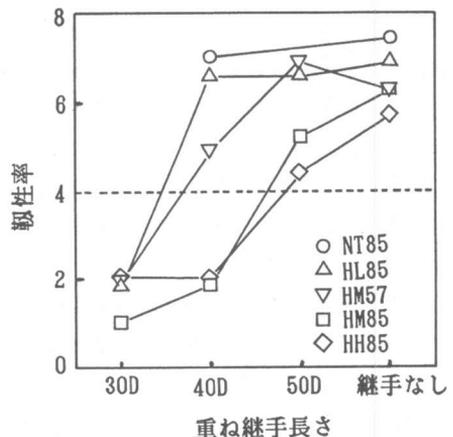


図-9 各供試体の靱性率