

[109] 高温下における鉄筋コンクリート部材の力学的性状

正会員 ○ 金津 努 (電力中央研究所)
 正会員 青柳 征夫 (電力中央研究所)
 正会員 遠藤 達巳 (電力中央研究所)
 正会員 大嶋 匡博 (大成建設土木設計部)

1 ま え が き

原子力発電所のコンクリート製格納容器等、高温に曝されるコンクリート構造物の設計法では、コンクリートの温度制限値として、一般部で通常時65℃、事故時 175℃、局部(配管貫通部、配管破断によりジェットを受ける部分)で通常時90℃、事故時 350℃という値が設定されている。¹⁾ これらの制限値は、冷却材として300℃～500℃で循環する液体ナトリウムを使用する高速増殖炉においては、炉の周辺コンクリート構造物の冷却設備にとって相当に厳しい値である。また、このような高温下におけるコンクリート・鉄筋コンクリート(RC)の力学性状を扱った実験データも少ないため、現行設計法の合理化および高温下におけるコンクリート構造物の安全性の向上の面から、高温条件下での実験データの収集が急がれている。

本研究は上記の観点から、500℃ までの高温に曝されるRC部材の曲げ破壊実験を行ったもので、RC部材の耐力・変形性状に及ぼす温度の影響を、常温の場合と比較することにより明らかにしたものである。

2 実験概要

2.1 試験体の作製

実験に供したRC部材は図1に示すもので、全長380cm、試験区間180cm、加熱区間 220cm、試験区間断面20×40cmで、引張鉄筋としてD16を2本(P=0.57%)使用している。コンクリートの配合は表1に示す通りで、設計基準強度400kg/cm²として選定したものである。試験体は、コンクリート打設後3日目で脱型、材令28日まで湿潤養生した後気乾養生を行い、材令 70～100日で載荷試験を行った。

2.2 試験方法

試験体の加熱および載荷方法は図2に示す通りである。加熱槽の温度制御は、試験体が均一な温度分布となるように、ヒーターを12分割して行った。載荷装置は、荷重および変形制御ができるようにサーボバルブ制御のアクチュエータを用いた。

試験体は、一体が複鉄筋断面のもので、他はすべて同一配筋の単鉄筋断面のはり部材である。昇温速度は100℃/日で、所定温度を1～2日保持した後載荷試験を行った。試験体は、常温1体、熱間条件で試験を行ったもの6体、加熱後常温に戻して試験を行ったもの2体の計9体である。試験体の一覧を表2に示した。

2.3 計測項目

試験体の温度分布を測定するため、図3に示す位置に熱電対を取り付けた。これらの測定値に重みを付けて平均し試験体の温度とした。弾性範囲の試験体の変形およびひびわれ幅は、特別に作製した差動トランスを用いた高温用変位計により測定した(写真1)。また塑性域では、モーメント載荷用鋼製アームの加力点間の距離変化を測定しこれを曲率に換算した。載荷モーメントは、アクチュエータに取り付けたロードセルにより検出した。

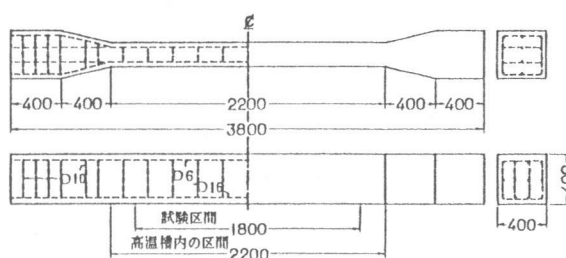


図1 試験体の形状・寸法

表1 コンクリートの配合

スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/A (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	減水材
8±2.5	3±1	43.2	43.1	160	370	789	1103	0.925

粗骨材の最大寸法: 20mm

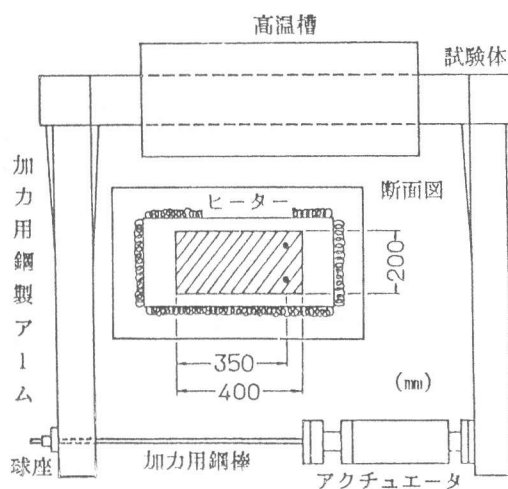


図2 加熱槽および載荷装置の概要

3 自由変形状

3.1 コンクリートと鉄筋の熱膨張係数

加熱時の水分の逸散が自由な状態でのコンクリートの熱膨張性状を把握するため、2章で述べたRC部材とは別に、15×15×200cmのコンクリート部材を作製し自由変形試験を行った。温度と熱膨張係数の関係の実験結果を示せば図4の通りである。また、RC部材においても昇温時の変形を測定しており、この結果から完全定着断面における平面保持を仮定して計算したコンクリートの熱膨張係数を図4に併記した。

これらの実験結果から、熱膨張係数は200℃程度までは徐々に低下し、その後上昇する傾向を示すことが確かめられた。これは、主としてコンクリート中の水分の逸散およびペースト部分と骨材部分との間に発生する微細ひびわれの影響と考えられる。実験結果から、短期的なコンクリートの熱膨張係数の温度依存性は、次に示す二直線で表現できる。

$$\begin{aligned}\alpha_c &= (-0.03337 T + 13.03) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \\ &\quad \text{常温} \leq T < 212^\circ\text{C} \\ &= (0.00956 T + 3.91) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \\ &\quad 212^\circ\text{C} \leq T\end{aligned}$$

また、当所の実験結果から鉄筋の熱膨張係数は次式で表わすことができた。²⁾

$$\alpha_s = (0.00606 T + 10.88) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

3.2 ひびわれの発生

昇温過程におけるRC部材の温度と曲率の関係を示せば図5の通りである。H-400D以外の各試験体は、温度の上昇とともに曲率が生じ始め、150℃付近から急激に曲率が大きくなる。一方、H-400Dは、400℃までの各温度においても曲率は生じないで軸方向への伸び変形が増加しただけであった。これは、鉄筋とコンクリート間の熱膨張係数の差に起因する内部応力によるもので、温度上昇に伴い鉄筋がコンクリートよりも伸び変形が大きくなるため、単鉄筋配筋のRC部材では曲率が生じたものである。熱膨張係数差により鉄筋には圧縮応力、コンクリートには引張応力が生ずるが、150℃付近ではコンクリートの引張応力が引張強度を超えて初ひびわれが発生するため、曲率が大きく増加するものである。その後も順次ひびわれが増加しているものと考えられる。

3.3 昇温に伴う自由変形

図5において完全定着断面およびひびわれ断面値として示したものは、それぞれ平面保持を仮定して全断面有効時およびひびわれ断面での内部応力と内部モーメントのつり合いから算定したものである。ひびわれ断面では、引張部コンクリートがある程度抵抗するものと考え、引張抵抗ひずみを 50×10^{-6} 、 100×10^{-6} および 200×10^{-6} と仮定した。

表 2 試験体一覧

試験体	主鉄筋量 (cm ²)	試験時温度	履歴温度
N-B	3.972	常温	常温
NH-200	3.972	常温	200℃
NH-500	3.972	常温	500℃
H-100	3.097	100℃	100℃
H-200	3.163	200℃	200℃
H-300	3.972	300℃	300℃
H-400	3.972	400℃	400℃
H-400D	3.972	400℃	400℃
H-500	3.972	500℃	500℃

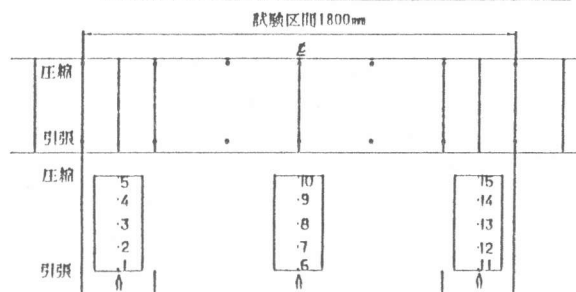


図 3 熱電対の位置

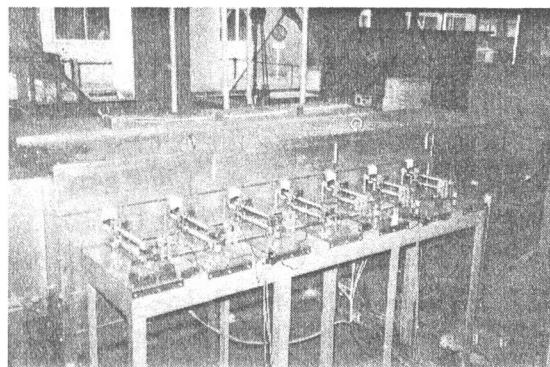


写真 1 高温用変位計

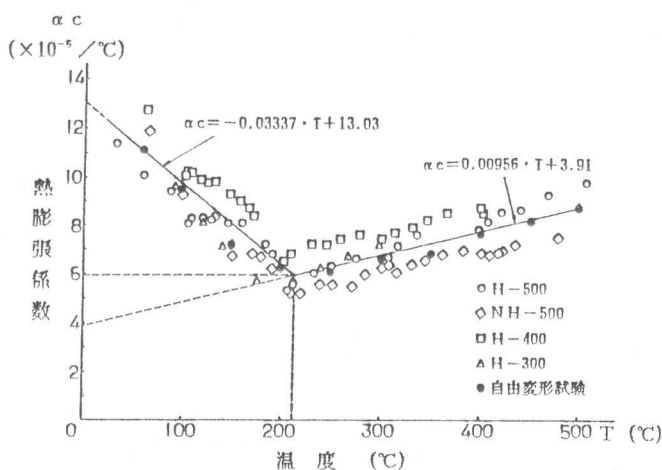


図 4 コンクリートの熱膨張係数

実験結果は、両計算値の中間に位置し、温度上昇とともにひびわれ断面計算値に近づいていく傾向が認められた。この挙動は、RC部材におけるモーメント-曲率の関係と類似しており、内部応力が増加するに従いひびわれが発生し、付着が劣化してゆくことが推測される。実験値とひびわれ断面計算値の差は、鉄筋に蓄積されている圧縮ひずみが完全に解放された場合の曲率の増加量を示すものである。これは、通常の载荷に伴う変形に加算して変形を増大させうる可能性のある潜在量と考えることができる。

温度上昇に伴う曲率を評価するため、ACI基準の有効断面二次モーメントと同様の考え方を適用すれば、曲率評価式として次式が得られる。

$$\phi_{ave} = \phi_g \left(\frac{T_{cr}}{T} \right)^m + \phi_{cr} \left(1 - \left(\frac{T_{cr}}{T} \right)^m \right)$$

ここで、 ϕ_{ave} ；温度上昇に伴う変形曲率

ϕ_g ；全断面有効時の変形曲率の計算値

ϕ_{cr} ；ひびわれ断面の変形曲率の計算値

T_{cr} ；ひびわれ発生時温度 T ；考慮している温度
本実験はすべて同一配筋の試験体であるため一般的に m の値は決められないが、本実験範囲では、 $m=1.3$ であることが確かめられた。図中計算値の曲線は $m=1.3$ の場合の ϕ_{ave} を示したものである。

4 曲げ変形状

4.1 弾性範囲内の曲げ性状

载荷開始時の変形曲率を零とした時のモーメント-曲率の関係を図6、図7に示した。図中には、それぞれの温度での物性値を用いて計算した全断面およびひびわれ断面剛性に基づく直線も併せて示した。全般的に見て、常温の場合に比較し高温下のRC部材は相当に剛性が低下していることが認められる。剛性を低下させる主な原因の1つは、温度上昇に伴うコンクリートの弾性係数の低下と考えられる。

図7から、モーメント-曲率の関係は载荷初期ではひびわれ断面の値と同等かやや大き目であるが、部材降伏以前にひびわれ断面値よりも小さな値を示すことが確認された。既往の付着強度実験データから、300℃では付着はまだ比較的健全で、400℃以上で急激に低下し500℃で常温下の40～50%の値となることを考慮すれば、³⁾ 理論的に矛盾した挙動と考えられる。しかし、これは3章で示した鉄筋に蓄積されている圧縮ひずみの解放を考慮すれば説明されうる。

図8にはH-200およびNH-200の試験体のモーメント-曲率関係を示した。NH-200はほぼ常温下の場合と同じ挙動を示すのに対し、H-200はNH-200に比較すれば相当に剛性が低い。物性的には、200℃熱間と200℃加熱後の常温下では、コンクリートではそれ程変わらず、鉄筋の降伏点と弾性係数でやや熱間の方が低い程度であり^{4) 5)}、またH-200では、鉄筋ひずみ測定のために溝削り鉄筋を用いた分鉄筋量が小さいが、これらの影響はNH-200とH-200の実験結果が示す程の差を与えるものではないと思われる。

载荷開始時点でひびわれ間の断面に蓄積されている鉄筋の圧縮ひずみは、载荷に伴って徐々に伸び方向

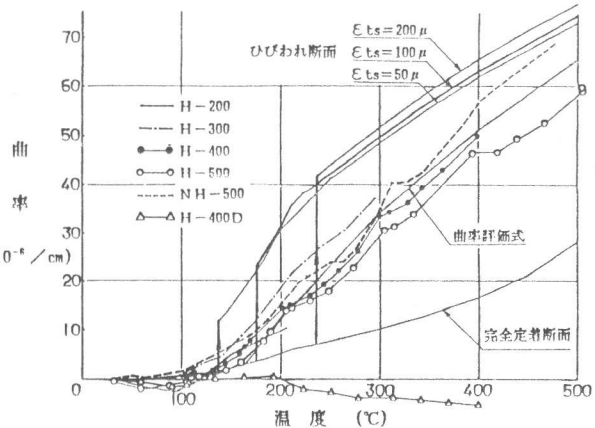


図5 温度と自由変形曲率の関係

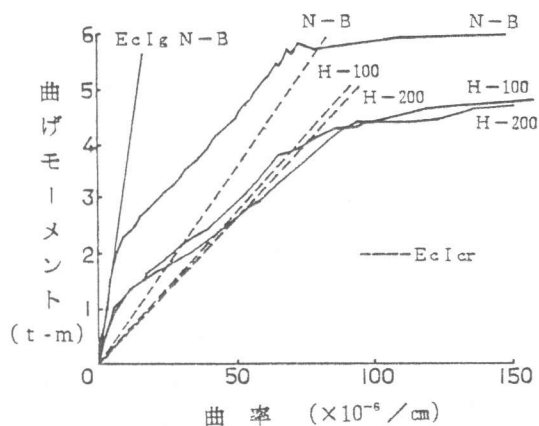


図6 弾性領域の曲げモーメントと曲率の関係

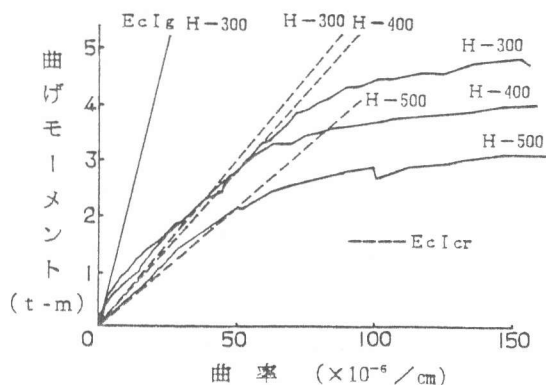


図7 弾性領域の曲げモーメントと曲率の関係

に変化し、ひびわれが発生するごとにひびわれ断面の値まで一挙に解放される。この時、ひびわれ近傍の潜在ひずみも解放される。200℃程度では、温度上昇によってひびわれは発生していると思われるがせいぜい数本程度であり、かつ鉄筋とコンクリート間の付着強度も健全であるため、ひびわれの発生に伴う圧縮ひずみの解放が変形曲率に寄与する程度は相当に大きいと考えられる。

以上から、高温熱間条件下におけるRC部材では、温度上昇に伴い鉄筋とコンクリート間の熱膨張係数差に起因して生ずる鉄筋の圧縮ひずみが、載荷モーメント-曲率関係に大きく影響することが結論される。

4.7 塑性変形状

図9には各試験体の塑性変形状を示した。N-200、H-300が大きな終局耐力を示し、H-400、H-500はN-Bより小さな終局耐力であった。この結果には、コンクリートの圧縮ひずみの温度依存性の影響も含まれてはいるが、終局耐力は主として鉄筋の大変形域での応力-ひずみ関係に依存していると考えられる。鉄筋は、温度上昇とともに降伏点は低下するが、5%程度の大変形域では300℃が最も大きな強度を示し、次いで200℃、常温、400℃、100℃、500℃の順に小さくなっている。これは、図9に示したRC部材の終局耐力の結果と類似したものである。

従って、高温下におけるRC部材の終局耐力および塑性変形状を評価するには、常温下の場合以上に鉄筋の大変形域の応力-ひずみ関係を考慮することが重要である。

5 まとめ

本研究で得られた主な結論は次の通りである。

- i) 高温下に曝されるRC部材では、温度上昇に伴って鉄筋とコンクリート間の熱膨張係数差に起因する内部応力が増加し、これによりひびわれが発生し変形が大きく進展する。
- ii) ひびわれ発生後の温度と曲率の関係は、全断面有効時およびひびわれ断面における曲率の計算値に基づいて、おおよそ推定することができる。
- iii) 高温下におけるRC部材では、熱膨張係数差に起因して鉄筋に蓄積される圧縮ひずみが、載荷モーメント-曲率の関係に大きく影響する。
- iv) 高温下における鉄筋コンクリート部材の終局耐力および塑性変形状を評価するには、鉄筋の大変形域における応力-ひずみ関係を考慮することが、常温下の場合以上に重要となる。

参考文献

- 1) 日本建築学会；原子力用コンクリート格納容器設計指針案 同解説 1978年8月
- 2) 金津他；100℃を超える高温下における鉄筋コンクリート部材の耐力・変形状、電力中央研究所報告研究報告、1985年4月
- 3) P.D Morley and R.Royles；Response of the bond in reinforced concrete to high temperatures Magazine of Concrete Research, Vol.35, No.123, June 1983.
- 4) 5) 金津他；100℃を超える高温下におけるコンクリートの強度性状 - 圧縮強度特性と鉄筋の機械的性質、 - その2 - 熱間および加熱後の強度変形状、電力中央研究所報告研究報告、No.383027、1983年2月、1985年2月

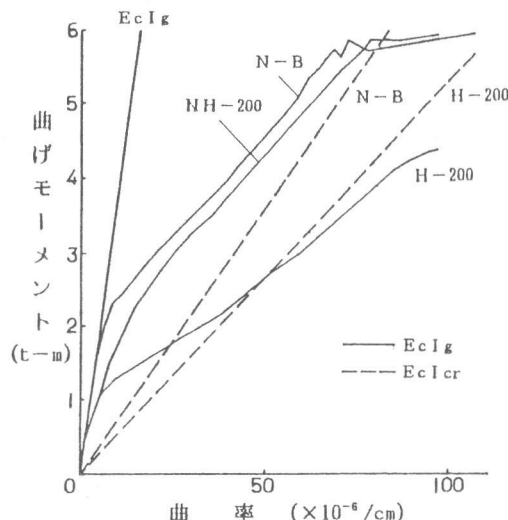


図8 弾性領域の曲げモーメントと曲率の関係

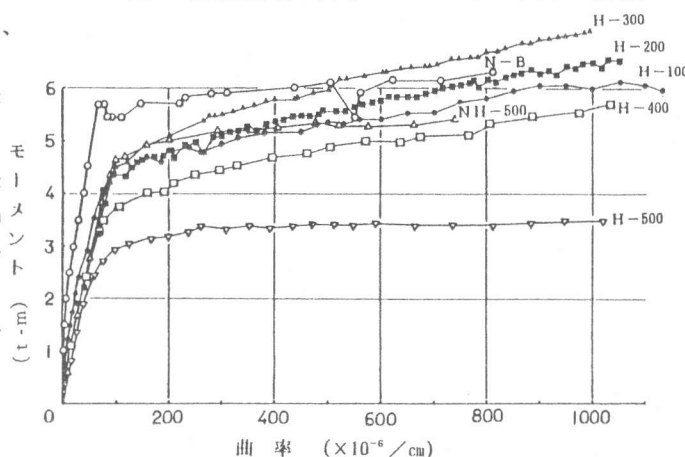


図9 塑性領域の曲げモーメントと曲率の関係