

[139] 高温下の鉄筋コンクリート部材の挙動に与える 軸力・鉄筋比の影響

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)

1. まえがき

著者らは、原子力発電所の格納容器、炉心支持構造等、高温に曝される鉄筋コンクリート構造物の設計法の確立を目的として、コンクリート材料および鉄筋コンクリート部材に関する実験研究を進めている。特に、材料物性的に変化が著しいと考えられる 100℃を越える温度領域に着目し、最大 500℃までの温度条件下で実験を行っている。これまでの研究結果から、100℃を越える温度領域では、鉄筋とコンクリート間の熱膨張ひずみの差が相当大きくなり、非拘束状態の鉄筋コンクリート部材では、温度上昇のみによりひびわれが発生すること、および昇温後載荷する場合には熱膨張ひずみの差が初期ひずみとして存在するため、これが載荷に伴う変形に大きく影響すること等を明らかにした。¹⁾²⁾

本報告は、鉄筋コンクリート部材の鉄筋量の多少および軸圧縮力の大小が、部材の高温挙動に与える影響について実験的に明らかにしたものである。鉄筋コンクリート部材の実験は、鉄筋とコンクリート間の熱膨張ひずみ差の影響が顕著に現れる約 200℃に温度条件を固定して実施した。

2. 実験概要

- (i) 供試体：実験に用いた供試体の形状・寸法を図1に示した。
- (ii) 加熱および加力方法：加熱および加力方法は図2に示すとおりで、供試体の試験区間部分を高温槽内に設置し、はり部材両端に取付けた鋼製アームを介してアクチュエータでモーメントを与えた。
- (iii) 軸圧縮力の導入：はり部材両端に鋼プレートを配置し、φ26mm P C 鋼棒4本により軸圧縮力を導入した。油圧ジャッキは定荷重保持装置へ接続し、部材の変形に伴う軸圧縮力の変動を防止した。
- (iv) 計測項目：部材の温度は熱電対により、変形は特別に製作した高温変位計により、載荷荷重はアクチュエータに取付けたロードセルにより、それぞれ測定した。
- (v) 試験パラメータ：鉄筋比を三種類、軸圧縮力を軸力のない場合を含めて四種類に変えた。供試体諸元の一覧を表1に示した。

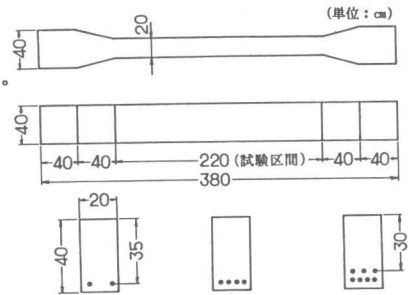


図1 鉄筋コンクリートはり部材の形状・寸法

3. RC部材の高温挙動に与える鉄筋比の影響

3.1 自由変形挙動

(i) 軸方向変形：ひびわれ断面で計算される図心軸位置における伸びひずみの実測値と温度上昇量の関係、および完全定着断面とひびわれ断面の計算上の伸びひずみと温度上昇量の関係を図3に示した。昇温に伴う熱膨張により伸びひずみが増加し、計算上ひびわれの発生が推定される温度

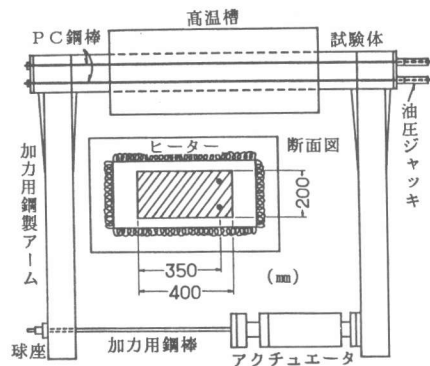


図2 鉄筋コンクリートはり部材の加熱・加力方法

上昇量から、実測伸びひずみは完全定着断面の計算値より大きくなっている。ひびわれ発生時点までの伸び変形は鉄筋比の大小にあまり影響されないが、ひびわれ発生以降は鉄筋比の大きい供試体の方が伸び変形はやや大きい。これは、鉄筋とコンクリート間の熱膨張ひずみ差は鉄筋比の影響を受けないが、部材の変形に大きく影響する鉄筋周囲のコンクリートを考えると、鉄筋比の大きい供試体ほど単位鉄筋断面積当

りのコンクリートの有効引張面積が小さくなるので、ひびわれは低い温度上昇量で発生し、同じ温度上昇量では、ひびわれが多く発生するためと考えられる。

(ii) 曲率；断面で鉄筋が非対称に配置された本供試体では、温度の上昇とともに曲率が生じた。図4には、温度上昇量と曲率の関係の実測値および完全定着断面

とひびわれ断面における計算値を示した。曲率に関しては鉄筋比の影響が明らかで、鉄筋比の大きい供試体ほど昇温に伴って生じる曲率は大きく、また、ひびわれ発生時の温度上昇量は小さかった。

実測値とひびわれ断面の計算値とを比較すると、(i)で述べた鉄筋周囲のコンクリートの曲率への寄与を把握することができる。すなわち、図4から、鉄筋比の小さいH200-2Dでは、ひびわれ断面の計算値よりかなり小さな変形であるが、鉄筋比の大きいH200-4D, H200-7Dはひびわれ断面計算値に近いほぼ一致した変形性状であった。H200-

2Dではひびわれの発生が少なく、コンクリートが鉄筋の自由膨張ひずみのある程度の量を拘束しているのに対し、H200-4D, H200-7Dでは、ひびわれが多く発生し鉄筋の伸びが拘束される領域が少なくなるため、ひびわれ断面の曲率に近くなったものと考えられる。

3.2 載荷に伴う変形挙動
前報¹⁾において、高温下の鉄筋コンクリート部材では、鉄筋とコンクリートの熱膨張ひずみ差が初期ひずみとして存在し、これが載荷とともに解放され、モーメントと曲率の関係に影響を与えることを述べた。図5には、鉄筋比の異なる供試体のモーメントと曲率の関係の実測値と、材料物性の温度依存性を考慮したひびわれ断面の計算値を示した。H200-2Dでは、載荷初期の剛性はひびわれ断面より大きい

が、部材降伏以前にひびわれ断面の値と同等かそれ以下になるという熱膨張ひずみ解放の影響が現れた挙動を示した。一方、H200-4D, H200-7Dでは、載荷初期からほぼひびわれ断面の計算値に一致した挙動であった。すなわち、昇温時にひびわれ断面に近い挙動を示したH200-4D, H200-7Dでは、載荷

初期の剛性はひびわれ断面より大きい

が、部材降伏以前にひびわれ断面の値と同等かそれ以下になるという熱膨張ひずみ解放の影響が現れた挙動を示した。一方、H200-4D, H200-7Dでは、載荷初期からほぼひびわれ断面の計算値に一致した挙動であった。すなわち、昇温時にひびわれ断面に近い挙動を示したH200-4D, H200-7Dでは、載荷

表1 供試体の諸元 (物性値は常温下の値)

| 供試体 | 諸元 (cm) | 鉄筋比 (%) | 軸圧縮力 (kgf/cm ²) | 初期温度 (°C) | 最高温度 (°C) | 圧縮強度 (kgf/cm ²) | 弾性係数 (kgf/cm ²) | 引張強度 (kgf/cm ²) |
|-----------------------|------------|------------|--------------------------------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| H200-2D | 3,163 | 0.57 | 0 | 30.6 | 202.0 | 492 | 3.67x10 ⁵ | 38.2 |
| H200-4D | 7,944 | 1.13 | 0 | 23.1 | 204.7 | 490 | 3.66x10 ⁵ | 35.4 |
| H200-7D | 13,902 | 1.99 | 0 | 22.3 | 203.6 | 496 | 3.52x10 ⁵ | 32.3 |
| NB-2D-75 | 3,972 | 0.57 | 75 | 常温 | 常温 | 442 | 3.35x10 ⁵ | 29.0 |
| H200-2D-75 (加熱後軸力) | 3,972 | 0.57 | 75 | 20.4 | 204.9 | 455 | 3.12x10 ⁵ | 33.5 |
| H200-2D-75 | 3,972 | 0.57 | 75 | 28.4 | 197.5 | 539 | 3.65x10 ⁵ | 35.4 |
| H200-2D-50 | 3,972 | 0.57 | 50 | 28.0 | 197.3 | 494 | 3.73x10 ⁵ | 32.8 |
| H200-2D-25 | 3,972 | 0.57 | 25 | 21.2 | 203.2 | 514 | 3.80x10 ⁵ | 37.4 |

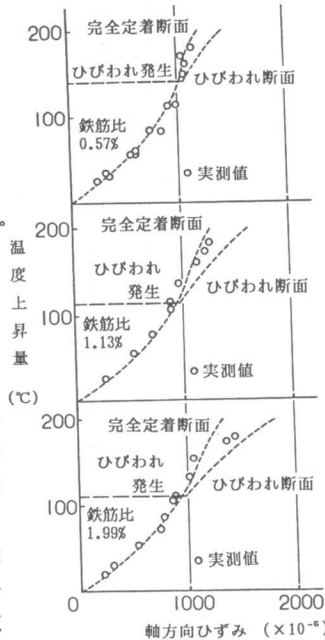


図3 温度上昇量と軸方向ひずみの関係に与える鉄筋比の影響

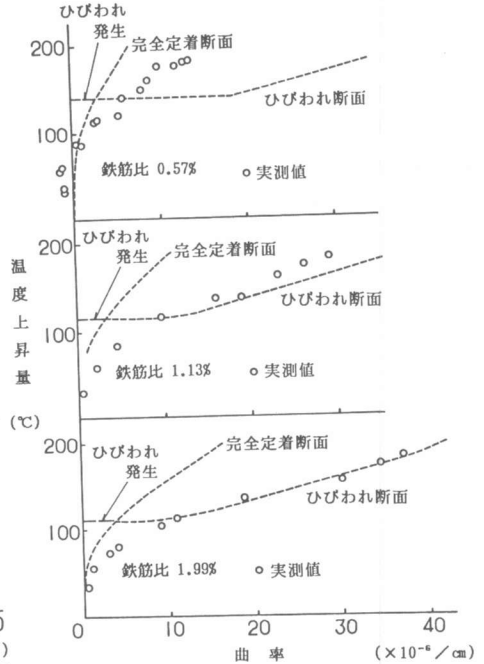


図4 温度上昇量と曲率の関係に与える鉄筋比の影響

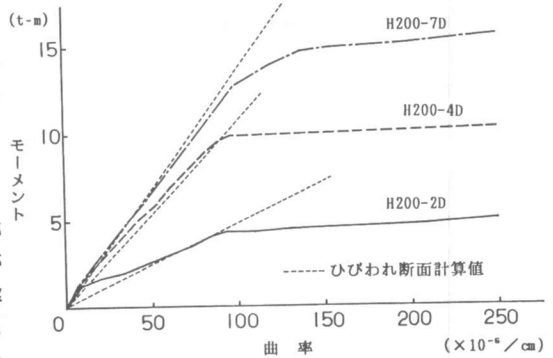


図5 モーメントと曲率の関係に与える鉄筋比の影響

前に熱膨張ひずみのほとんどがひびわれなどにより解放され(℃)るため、初期ひずみあまり残っておらず、従ってその影響がモーメントと曲率の関係に現れなかったものと考えられる

4. RC部材の高温挙動に与える軸圧縮力の影響

4.1 自由変形挙動

(i)軸方向変形；図6には、軸圧縮力の異なる供試体の上縁側および下縁側の伸びひずみの測定値の平均とコンクリートの熱膨張係数に基づく計算値を示した。軸圧縮力を導入した供試体は、本実験における温度上昇量(約180℃)ではひびわれは発生しないことが予測された。

図から判るように、軸圧縮力が大きくなるにしたがって、軸方向への伸びひずみが小さくなる傾向にあった。コンクリートの熱膨張係数に基づく計算値と比較すると、軸圧縮応力度75kgf/cm²の場合は、伸びひずみが約半分となっている。これは、高温・軸圧縮力作用下のコンクリートの収縮挙動の影響によるものと考えられる。本実験では水分の逸散が自由であるので、この影響が顕著に認められた。

(ii)曲率；図7には、軸圧縮力のない場合も含め軸圧縮力の異なる供試体の温度上昇量と曲率の関係を示した。軸圧縮力の大きい供試体では、軸圧縮力のない場合に比較してやや曲率が大きい、鉄筋比の差による影響ほどには大きな影響は認められなかった。また、ひびわれは軸圧縮力のない供試体では発生し、軸圧縮力のある供試体では発生しないことが推定されたが、変形の定性的傾向は同様であった。

コンクリートの弾性係数の低下、軸圧縮力の部材断面図心に対する偏心、および完全定着断面における熱膨張ひずみの差に起因する曲率を考慮して計算した、昇温に伴うはり部材の曲率の変化を図7に併記した。軸圧縮力の大きい供試体の方が偏心による影響が大きく曲率はやや大きくなるが、実測値とはかなり差が認められた。これが高温・軸圧縮力作用下のコンクリートの収縮挙動による影響である。計算から得られる部材上下縁の圧縮応力度は、部材に導入される軸圧縮力の相違により相当の差がある。軸圧縮力のない場合を基準にして、計算値および伸びひずみの実測値から求めたそれぞれ上縁と下縁の測定位置における収縮ひずみと圧縮応力度の関係を図8に示した。おおよその計算ではあるが、曲率変形の挙動からも高温・軸圧縮力作用下の収縮ひずみが圧縮応力度に依存することが確かめられた。

4.2 載荷に伴う変形挙動

図9には、軸圧縮力の異なる供試体のモーメントと曲率の関係を示した。また、図10には軸圧縮力が75kgf/cm²と同じで、常温下で試験した場合、200℃まで加熱した後に軸圧縮力を与えて試験した場合、および加熱前に軸圧縮力を与えて試験した場合のモーメントと曲率の関係を示した。両図の一点鎖線は、コンクリートと鉄筋の弾性係数の温度依存性を考慮して計算した図9

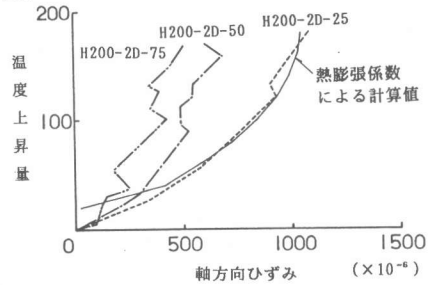


図6 軸方向変形に与える軸圧縮力の影響

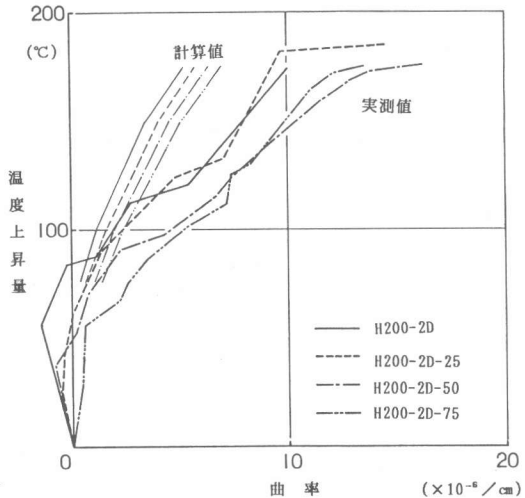


図7 温度上昇量と曲率の関係に与える軸圧縮力の影響

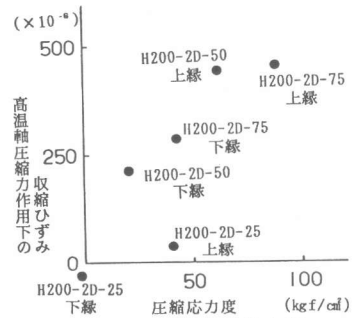


図8 軸圧縮応力度と収縮ひずみ

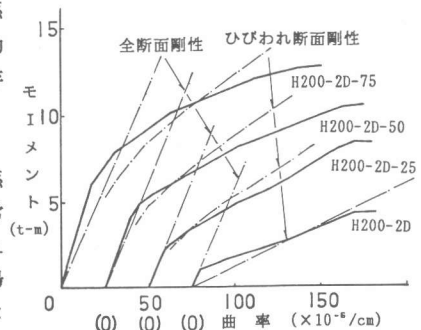


図9 モーメントと曲率の関係に与える軸圧縮力の影響

全断面およびひびわれ断面における曲率を示している。

図9から判るように、軸圧縮力のある場合にも、曲率の実測値は部材降伏以前にひびわれ断面の値よりも大きくなり、鉄筋の熱膨張ひずみが載荷に伴って解放される影響が認められた。コンクリートの収縮挙動により、鉄筋に蓄積される圧縮ひずみは軸圧縮力のない場合よりも大きいので、その解放に伴う変形への寄与も大きくなることが推察できる。図10に示される常温下の場合では、降伏時の曲率の実測値とひびわれ断面における計算値とはほぼ一致している。

また、図9から、軸圧縮力の大きい供試体は初期の曲げ剛性が大きくなる傾向が認められた。軸圧縮力を導入した全供試体について、初期の曲げ剛性の実測値およびコンクリートの弾性係数と断面二次モーメントから計算される全断面曲げ剛性を表2に示した。常温下の場合および加熱した後に軸圧縮力を与えた供試体コンクリートの弾性係数が、他の供試体に比較してやや低く計算上の曲げ剛性が小さかったため(表1参照)、初期剛性の傾向にばらつきが認められるが、加熱前に軸圧縮力を与えた供試体は、軸圧縮力の増加に伴って初期の曲げ剛性が大きくなることが判る。これは、軸圧縮力の存在により、昇温に伴う骨材とセメントペースト界面におけるゆるみが生じにくくなるため、軸圧縮力のない場合よりは温度上昇による弾性係数の低下が小さくなったためと考えられる。

図10は、軸圧縮力導入時期の相違、つまりコンクリートの高温・軸圧縮力作用下の収縮ひずみの変形への影響を示している。加熱後に軸圧縮力を導入した供試体は、加熱前に軸圧縮力を導入した供試体に比較して初期の曲げ剛性が低く、ひびわれが開き始めたときと推定されるモーメント以降も変形は大きい。しかし、鉄筋の降伏点が等しいので両部材の降伏モーメントは等しく、加熱後に軸圧縮力を導入した供試体は、鉄筋の蓄積圧縮ひずみが小さいので加熱前軸力の供試体に比較して降伏時の変形はやや小さかった。

5. まとめ

高温下における鉄筋コンクリートはり部材の変形性状に与える鉄筋比および軸圧縮力の影響を実験的に検討した結果、本実験範囲において以下に示す結論が得られた。

(1) 鉄筋比の影響

- i) 非拘束状態にある鉄筋コンクリートはり部材では、昇温に伴う鉄筋とコンクリート間の熱膨張ひずみ差に起因するひびわれは、鉄筋比の大きい部材の方が低い温度上昇量で発生し、同じ温度上昇量では多くの本数が発生する。
- ii) 鉄筋比の大きい鉄筋コンクリートはり部材では、鉄筋とコンクリート間の熱膨張ひずみの差がモーメントと曲率の関係に与える影響は比較的小さい。これは、i)で述べたように、昇温時にひびわれが多く発生し、この時点で鉄筋の圧縮ひずみが解放されるためである。

(2) 軸圧縮力の影響

- i) 軸圧縮力が導入された鉄筋コンクリートはり部材では、昇温に伴ってコンクリートに乾燥収縮とクリープが複合された収縮が生じ変形挙動に大きく影響する。この高温・軸圧縮力作用下の収縮ひずみは、軸圧縮応力度に依存する。
- ii) 加熱前に軸圧縮力が導入された鉄筋コンクリートはり部材では、コンクリートの弾性係数の低下が軸圧縮力のない場合に比較して小さいので、初期曲げ剛性が大きくなる。

【参考文献】

- (1) 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
- (2) 金津他；高温下における鉄筋コンクリートはり部材の耐力・変形性状、電研研究報告 No.384035

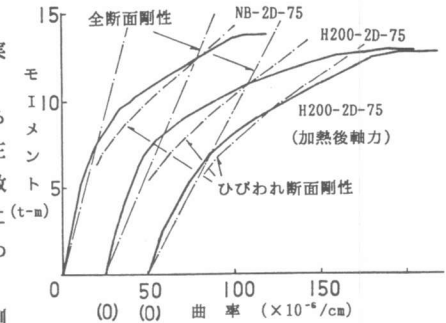


図10 モーメントと曲率の関係に与える軸圧縮力導入時期の影響

表2 初期曲げ剛性の比較

| 供試体 | EIo,exp (kgf·cm ²) | EIo,cal (kgf·cm ²) | EIo,exp EIo,cal |
|------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| NB-2D-75 | 41.7x10 ⁹ | 37.2x10 ⁹ | 1.12 |
| H200-2D-75 | 22.8x10 ⁹ | 18.9x10 ⁹ | 1.20 |
| (加熱後軸力) | | | |
| H200-2D-75 | 35.3x10 ⁹ | 23.1x10 ⁹ | 1.53 |
| H200-2D-50 | 28.1x10 ⁹ | 23.6x10 ⁹ | 1.19 |
| H200-2D-25 | 21.4x10 ⁹ | 24.1x10 ⁹ | 0.89 |
| H200-2D | 22.3x10 ⁹ | 23.2x10 ⁹ | 0.96 |

EIo,exp;実測値 EIo,cal;計算値