

[2039] 軸圧縮力の影響を考慮した高温下の RC はり部材の変形評価

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 遠藤達巳 (電力中央研究所)

1. まえがき

原子力発電所の原子炉格納容器、炉心支持構造等の鉄筋コンクリート構造施設は、高温に曝されることを想定して設計が行われる。これらの構造物を対象とした設計法では、コンクリートが曝される温度の制限値と温度荷重を考慮することが規定されている。しかし、高温度が鉄筋コンクリート (RC) 部材の挙動に与える影響については、未だ十分に把握されていないので、設計法に採り入れられていない。著者らは、高温下の RC 構造物の挙動に影響する要因として (1) 材料物性の変化 (2) 鉄筋とコンクリート間の熱膨張係数の差 (3) コンクリート中の水分の移動に伴うクリープと乾燥収縮 に着目し、これらが構造部材の挙動に与える影響を把握することを目的として、材料物性試験および RC はり部材の曲げ破壊実験を実施している。^[1] 既報では、軸圧縮力を導入した RC はり部材の実験結果から、昇温過程で生ずるコンクリートのクリープや乾燥収縮がはり部材の挙動に与える影響を、主に現象面から検討して明らかにした。^[2] 本報告は、既報で明らかにした RC はり部材の挙動を定量的に評価する方法について検討した結果を述べたものである。

2. 材料および RC はり部材実験の概要

2.1 材料実験 (1) 目的；軸圧縮力を受けたコンクリートが高温に曝される場合の、圧縮強度、弾性係数の変化、および昇温過程におけるクリープ、乾燥収縮について定量的に明らかにする。

(2) 実験方法；図 1 に示すように、中央に $\phi 22\text{mm}$ の穴をあけた $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ のコンクリート供試体に、クリープ実験用载荷パネを介して軸圧縮力を導入した。この状態の供試体を高温槽に設置して昇・降温を行い、脱緊の後に通常の圧縮強度試験を実施した。なお、昇温速度は、 $30^\circ\text{C}/12\text{時間}$ 、降温は供試体を槽に入れたまま自然冷却させた。所定高温の保持時間は約 2 日であった。

(3) 実験要因；実験で変化させた要因は表 1 に示すとおりで、コンクリート強度 2 種類、軸圧縮応力度レベル 5 段階、温度条件 5 種類である。供試体は 1 ケース 4 本とし、これらの平均値を実験値とした。

(4) 測定項目；供試体の長さ変化は、軸圧縮力導入前後、昇・降温前後および脱緊前後に、コンタクトゲージとマイクロメータを併用して測定した。脱緊後に強度試験を実施し、圧縮強度と弾性係数を測定した。また、加熱中の軸圧縮力の変化は、PC 鋼棒に貼付したひずみゲージにより監視した。

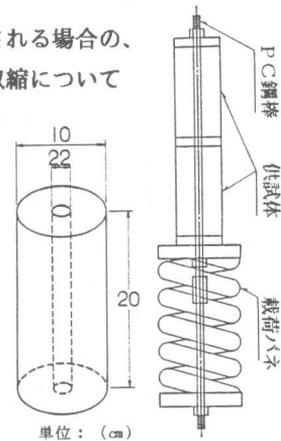


図 1 材料実験方法と供試体寸法

表 1 材料実験の要因と水準

| 要因 | 単位 | 記号 | 水準 |
|----------|---------------------|---------------|--|
| コンクリート強度 | kgf/cm ² | σ_{cu} | 400, 240 |
| 温度 | °C | T | 常温, 80, 100, 200, 280 |
| 軸圧縮応力度 | kgf/cm ² | σ_{pe} | $\sigma_{cu}=400$; 0, 25, 50, 75, 100 |
| | | | =240; 0, 25, 50, 75, 100 |
| | | | $\sigma_{cu}=240$; 0, 15, 35, 50, 75 |

軸圧縮力導入時と脱緊時の軸圧縮力の変化は、最大約10%でほとんどが数%程度であった。

2.2 RCはり部材実験 (1) 目的; 軸圧縮力が導入されたRCはり部材の、昇温時の挙動および高温下の曲げ-変形挙動を明らかにする。

(2) 実験方法; 図2に示す形状・寸法および配筋状態のRCはり部材を高温槽に設置し、軸圧縮力を導入した後に昇温した。高温状態を約2日間保持した後曲げ破壊実験を行った(図3参照)。定荷重保持装置を用いて部材の変形の進行に伴う軸圧縮力の変動を制御した。

(3) 実験要因; 実験で変化させた要因は、軸圧縮応力度レベル3段階のみで、はり部材の鉄筋比は0.57%、温度条件は200℃で一定とした。供試体の一覧表を表2に示す。

(4) 計測項目; 熱電対により部材温度を、高温用変位計により変形曲率を、アクチュエータ先端に取り付けたロードセルにより荷重をそれぞれ測定した。

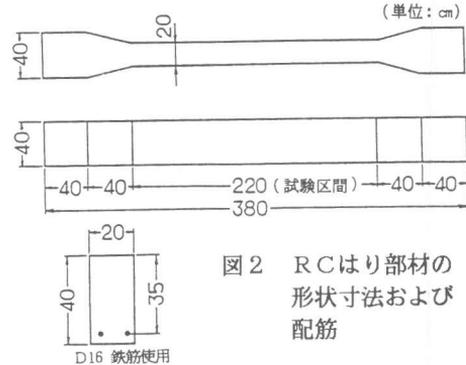


図2 RCはり部材の形状寸法および配筋

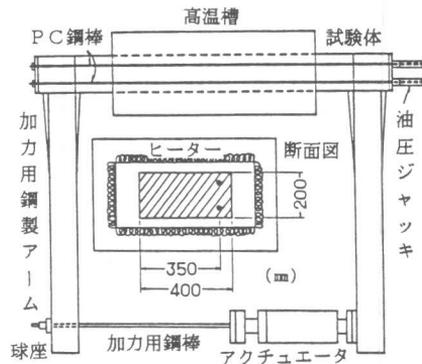


図3 RCはり部材の実験装置

3. 材料実験結果の検討

3.1 圧縮強度 図4には、軸圧縮応力度/圧縮強度の比(応力強度比)と加熱前後の圧縮強度比の関係を示した。加熱前後の圧縮強度比は、温度条件が高いほど小さくなる傾向が認められる。しかし、本実験での応力強度比の範囲では、軸圧縮応力度は圧縮強度には影響を与えないことが確認された。

3.2 弾性係数 図5には、所定温度条件での

軸圧縮応力度0 kgf/cm²の場合の供試体の弾性係数に対する種々の応力強度比の場合の弾性係数の比と応力強度比との関係を示した。図中記号は実験データであり、各曲線は、応力強度比が0.25で頂点を持つ放物線により実験データを回帰したもので、一般的に次式で表わされる。

$$y = -\alpha (\sigma_{pe} / \sigma_{cu})^2 + \frac{1}{2} \alpha (\sigma_{pe} / \sigma_{cu}) + 1.0 \quad (1)$$

ここで、 y : 弾性係数の増加倍率(同温度での軸圧縮応力度0 kgf/cm²を基準)

σ_{pe} : 軸圧縮応力度(kgf/cm²) σ_{cu} : 圧縮強度(kgf/cm²) α : 係数

図から判るように高温条件下では、弾性係数は導入軸圧縮応力度が大きくなるに従って大きくなり、応力強度比が0.25近傍で頭打ちとなる挙動を示す。また、弾性係数の増加は、温度条件の高い場合程大きくなる傾向が認められる。これは、通常は昇温過程において、骨材とペースト間の熱膨張ひずみの相違が両者界面に微細なひびわれを引き起こすが、軸圧縮力の存在により微細ひびわれの発生が抑制されたためと考えられる。実験値は、式(1)に示す放物線により良好に近似できるこ

表2 RCはり部材の実験条件一覧

| 供試体 | p | Ti/Tmax | σ_{pe} | 材料物性 | | |
|----------|------|------------|---------------|---------------|-------|---------------|
| | | | | σ_{cu} | E_c | σ_{tu} |
| N-B-75 | 0.57 | 常温 | 75 | 442 | 3.35 | 29.0 |
| H-200-25 | 0.57 | 21.2/203.2 | 25 | 514 | 3.80 | 37.4 |
| H-200-50 | 0.57 | 28.0/197.3 | 50 | 494 | 3.73 | 32.8 |
| H-200-75 | 0.57 | 28.4/197.5 | 75 | 539 | 3.65 | 35.4 |

p: 鉄筋比(%), Ti: 初期温度(°C), Tmax: 試験温度(°C)
 σ_{tu} : 引張強度(kgf/cm²), E_c : 弾性係数($\times 10^5$ kgf/cm²)

とが判る。図6には、式(1)の係数 α と温度との関係を示した。ややばらつきはあるが、本実験条件の範囲では、放物線の係数 α はコンクリート強度に拘らず温度との間に直線的な関係があると認められる。直線回帰した式を次に示す。

$$\alpha(T) = 0.0363 T + 1.12 \quad (2)$$

ただし $80^{\circ}\text{C} \leq T < 300^{\circ}\text{C}$

以上より、高温下で軸圧縮力を受けるコンクリートの弾性係数の増加量は、定量的に評価することができる。

3.3 クリープひずみと乾燥収縮ひずみ

高温下のコンクリートのひずみ挙動を検討するため、供試体に生じるひずみを (1)乾燥収縮ひずみ(ϵ_{sh})、(2)クリープひずみ(ϵ_c)、(3)熱膨張ひずみ(ϵ_{exp})、(4)骨材とペースト間の微細ひびわれに伴うひずみ(ϵ_f)、(5)弾性ひずみ(ϵ_e)に分けて考えることにする。各ひずみは温度に依存することは明らかで、 ϵ_c 、 ϵ_e および ϵ_f は軸圧縮応力度にも依存することが推測される。実験時のひずみ状態を示せば次の通りである。

$$\text{軸圧縮応力導入時 } \epsilon = \epsilon_e \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{高温時 } \epsilon = & \epsilon_{sh} + \epsilon_{exp} + \epsilon_e \\ & + \epsilon_c + \epsilon_f \quad (4) \end{aligned}$$

$$\text{降温時 } \epsilon = \epsilon_{sh} + \epsilon_e + \epsilon_c + \epsilon_f \quad (5)$$

$$\text{軸圧縮応力除荷時 } \epsilon = \epsilon_{sh} + \epsilon_c + \epsilon_f \quad (6)$$

$\epsilon_f(T, \sigma_{pe}/\sigma_{cu})$ は、3.2 で示した軸圧縮応力度による弾性係数の変化と関連付け、次式により得られるものと仮定した。

$$\epsilon_f(T, \sigma_{pe}/\sigma_{cu}) = \epsilon_f(T, 0) - \sigma_{pe} \left\{ \frac{1}{E_c(T, 0)} - \frac{1}{E_c(T, \sigma_{pe}/\sigma_{cu})} \right\} \quad (7)$$

$$\epsilon_f(T, 0) = 0.25 \sigma_{cu} \left\{ \frac{1}{E_c(T, 0)} - \frac{1}{E_c(T, 0.25)} \right\} \quad (8)$$

また、圧縮強度($\sigma_{cu}(T)$) および軸圧縮応力度が零の場合の弾性係数($E_c(T, 0)$)は、著者らのこれまでの実験結果から次式により評価した。

$$\sigma_{cu}(T) = (-7.692 \times 10^{-4} T + 1.015) \cdot \sigma_{cu, n} \quad (9)$$

常温 $\leq T < 280^{\circ}\text{C}$

$$E_c(T, 0) = (-0.403 \times 10^{-2} T + 1.081) \cdot E_{c, n}$$

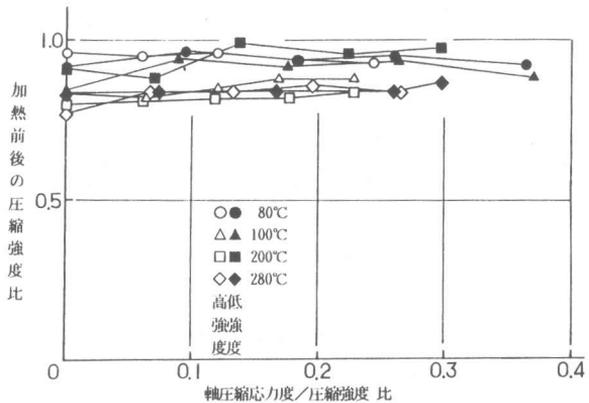


図4 軸圧縮応力度/圧縮強度比と加熱前後の圧縮強度比の関係

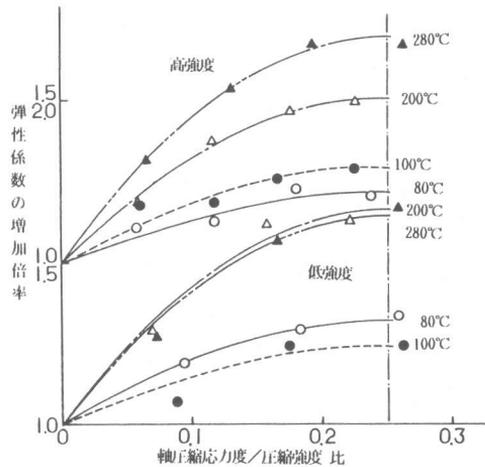


図5 軸圧縮応力度/圧縮強度比と弾性係数の増加倍率との関係

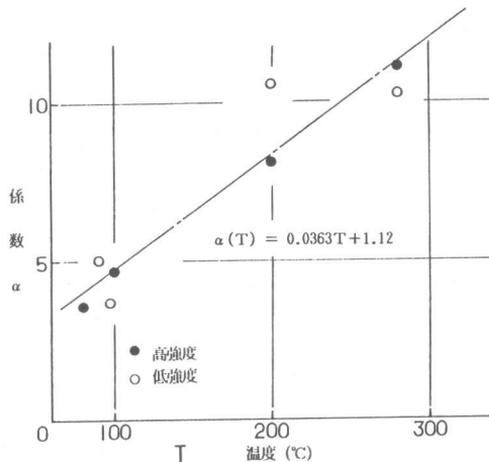


図6 係数 α と温度の関係

$$\begin{aligned} & \text{常温} \leq T < 100^\circ\text{C} \quad (10) \\ & = (-0.124 \times 10^{-2} T + 0.082) \cdot E_{c,n} \end{aligned}$$

$$100^\circ\text{C} \leq T \quad (11)$$

ここで、 $\sigma_{cu,n}$ $E_{c,n}$: それぞれ常温下の圧縮強度と弾性係数以上より、 ϵ が測定されれば ϵ_c および ϵ_{sh} を求めることが可能である。

図7には、実験値から算出したクリープひずみ (ϵ_c) と応力強度比との関係を温度をパラメータとして示した。200°C 以上の温度条件ではコンタクトゲージによる測定が不可能なため、マイクロメータによる測定を行った。高強度の100°C の場合のみ両者による測定結果を得た。コンタクトゲージとマイクロメータによる測定結果では差があるものの、本実験範囲においては、クリープひずみは温度条件に拘らず応力強度比と直線的な関係にある結果が得られた。ただし、ここで言うクリープひずみは、所定高温保持時間が約2日、昇温から降温まで約5日間の実験期間でのデータである。クリープひずみが温度に依存せず応力強度比のみに依存するということについては、今後更に実験的な検討を行っていく必要があるが、ここでは、後述するRCはり部材の変形評価のため、コンタクトゲージの測定値を直線回帰した次式によりクリープひずみを評価した。

$$\epsilon_c(T, \sigma_{pe}/\sigma_{cu}) = 2170 \cdot \sigma_{pe}/\sigma_{cu} \times 10^{-6} \quad (12)$$

同様にして求めた乾燥収縮ひずみと温度との関係を図8に示した。得られたデータ数が少ないので明確なことは言えないが、200°C を越えると乾燥収縮量はほぼ一定値に収束する傾向にある。

4. RCはり部材の変形挙動の評価

前述のように、材料実験の結果、高温、軸圧縮力作用下でのコンクリートの弾性係数およびクリープひずみの定量評価式を得たので、これらを基にRCはり部材の変形挙動の評価を行った。

4.1 自由変形曲率 200°C まで昇温してこの温度を約2日間保持した後にRCはり部材に生じた自由変形曲率の評価を行った。昇温速度が昇温途中の変形挙動に大きく影響するため、現時点では変形を経時的に追跡することは困難であるが、今回の実験条件である所定温度に到達して約2日後という1時点については、3. で示した材料実験結果に基づいて評価することができる。 図9

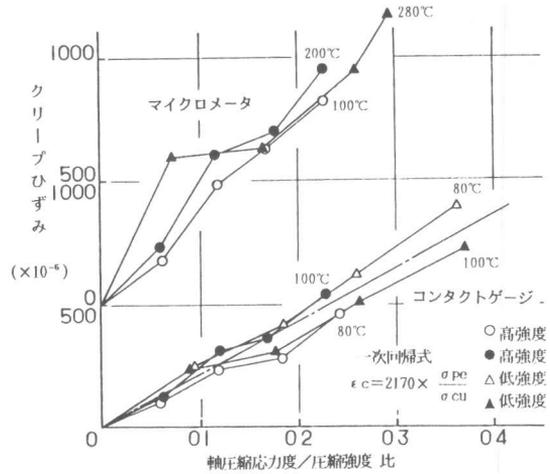


図7 軸圧縮応力度/圧縮強度比とクリープひずみの関係

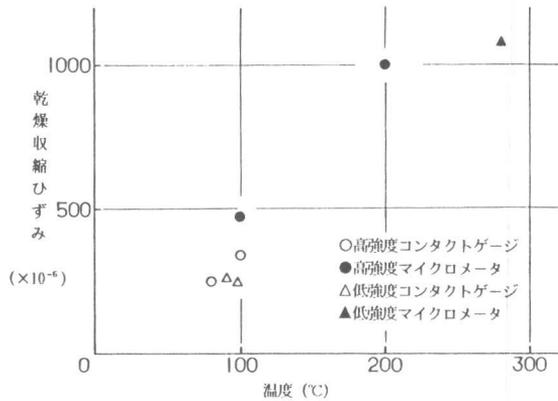


図8 温度と乾燥収縮ひずみの関係

(a) は、評価のために仮定したRCはり部材全断面のひずみ分布を示している。上縁、下縁における ϵ_0 および ϵ_1 は、コンクリートのクリープ (ϵ_c)と骨材とペースト間の微細ひびわれに伴うひずみ (ϵ_f)を合計したものである。図10に実験値と計算値の比較結果を示した。図中ひずみの基準線寄りの実線は、 ϵ_0 および ϵ_1 の計算結果で、その左側の実線が応力ひずみを加算した結果である。ひずみ量の絶対値は実験値とやや差が認められるが、曲率については、実験値と計算値は良好に一致していることが確認された。このことは、3. で示した軸圧縮力の存在による弾性係数変化の評価、クリープひずみの評価が、概ね妥当であることを示している。

4.2 初期曲げ剛性の評価 前報において、軸圧縮力導入後200℃ まで加熱したRCはり部材では、導入軸圧縮力が大きくなる程初期曲げ剛性が大きくなり、材料物性の温度依存性を考慮しただけではこれを評価できないことを述べた。表3には、材料物性の温度依存性に加えて、軸圧縮応力度の存在で弾性係数が増加することを考慮して計算した初期曲げ剛性を実験値と比較して示した。表から判るように、軸圧縮応力度による弾性係数の増加を考慮した場合、実験値と計算結果は比較的良好に一致することが確認された。

4.3 モーメントー曲率関係の評価 高温下のRCはり部材のモーメントー曲率の関係を、材料物性の温度依存性、軸圧縮力の存在による弾性係数の変化およびクリープを考慮して、はり部材の全断面(図9 (a)) とひびわれ断面(図9 (b)) における曲げ剛性とひびわれ発生荷重を計算し、次に示す土木学会コンクリート標準示方書の平均曲げ剛性評価式を用いて評価した⁽³⁾。

$$M = E_c \cdot I_e \cdot \phi \quad (12)$$

$$I_e = I_g \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 + I_{cr} \left\{ 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^3 \right\} \quad (13)$$

ここで、M： 荷重モーメント

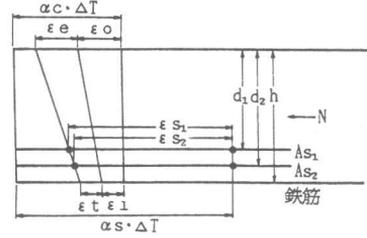
ϕ ： 曲率 E_c ：コンクリートの弾性係数

M_{cr} ： ひびわれ発生モーメント

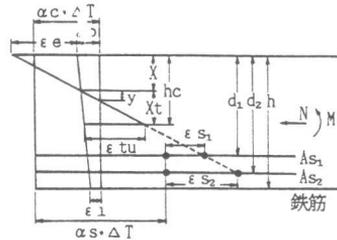
I_g ： 全断面の断面二次モーメント

I_{cr} ： ひびわれ断面の断面二次モーメント

図11には、各RCはり部材のモーメントー曲率関係の上述の全断面とひびわれ断面における計算値、材料物性の温度依存性のみ考慮したひびわれ断面計算値、実験値および本計算値を示した。図から、以下の3点が認めら



(a) 全断面



(b) ひびわれ断面

図9 RCはり部材の断面ひずみ分布

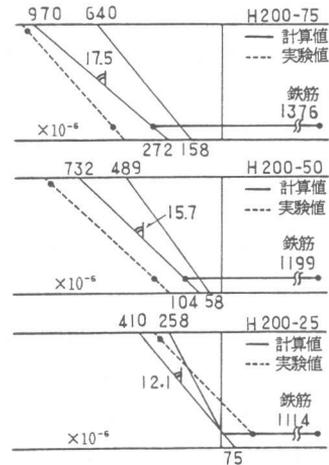


図10 ひずみ分布の計算値と実験値の比較

表3 初期曲げ剛性の計算値と実験値の比較

| 供試体 | EIo,exp A | EIo,cal(1) B | EIo,cal(2) C | A/B | A/C |
|----------|--------------|-----------------|-----------------|------|------|
| N- B-75 | 4.17 | 3.72 | ---- | 1.12 | ---- |
| H-200-25 | 2.14 | 2.41 | 2.77 | 0.89 | 0.77 |
| H-200-50 | 2.81 | 2.36 | 2.99 | 1.19 | 0.94 |
| H-200-75 | 3.53 | 2.31 | 3.11 | 1.53 | 1.14 |

EIo,exp : 実験値 (単位; $\times 10^{10}$ kgf \cdot cm²)

EIo,cal(1): 鉄筋・コンクリートの弾性係数の温度依存性のみ考慮した計算値

EIo,cal(2): 上記に加えて、軸圧縮力の存在による弾性係数の変化を考慮した計算値

れる。(1) 材料物性の温度依存性のみを考慮しただけでは正しいひびわれ断面のモーメント-曲率関係を評価できない (2) 本計算法による評価結果は、ひびわれ発生後荷重レベルが小さい間は曲げ剛性をやや小さめに、荷重レベルが大きくなるとやや大きめに評価する傾向にある (3) 本計算法は、全般的には概ね実験値を良好に評価できる。

式(13)によるモーメント-曲率関係の評価精度に影響する要因と

しては、 I_g , I_{cr} の評価精度は当然であるが、 M_{cr} の評価精度も重要である。本計算では、図9(a)において、曲げモーメント載荷後引張縁ひずみが 200×10^{-6} でひびわれが発生するものとして、ひびわれ発生モーメントを計算した (図11中の点線)。軸圧縮力が大きいはり部材では、ひびわれ発生モーメントをやや小さく評価している。荷重レベルの小さい所での曲げ剛性の過小評価は、高温条件下のはり部材のひびわれ発生モーメントを精度良く評価する方法を、また、荷重レベルの大きい所での曲げ剛性の過大評価は、式(13)におけるべき乗数 (ここでは3) を見直すことにより、本計算法の評価精度は更に向上するものと思われる。

5. まとめ

高温下で軸圧縮力を受けるRCはり部材の変形挙動の評価方法について検討した。本研究の範囲で明らかとなった事を要約すれば、以下の通りである。

- (1) 高温下でコンクリートが軸圧縮力を受ける場合、弾性係数は軸圧縮応力度レベルに依存して変化する。一方、圧縮強度は軸圧縮力の影響を受けない。
- (2) 高温下におけるコンクリートの短期的なクリープひずみは、温度条件に拘らず、コンクリートに作用している軸圧縮応力度/圧縮強度の比とほぼ直線的な関係にある。
- (3) 高温下で軸圧縮力を受けるRCはり部材の変形挙動は、材料物性の温度依存性、コンクリートの弾性係数の変化および短期的なクリープひずみを考慮することにより、土木学会コンクリート標準示方書の変形量評価式を用いて概ね良好に評価することができる。

参考文献

- [1] 金津, 青柳, 大沼, 中野, 遠藤他; 100°C を越える高温下におけるコンクリート・鉄筋コンクリートの力学的性質, 電力土木 No.202, p71~p81, 1986年 5月
- [2] 金津, 青柳, 遠藤; 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, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, p553~p556, 1986年
- [3] 土木学会「コンクリート標準示方書」設計編, p83, 1986年

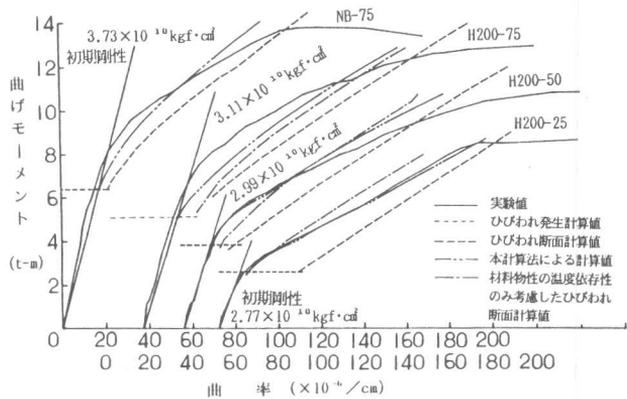


図11 RCはり部材のモーメント-曲率の関係