

## [2126] 鉄筋コンクリートはり部材の温度応力挙動

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 小室真一 (東電設計(株))

## 1. まえがき

原子力発電所の原子炉格納容器および熱交換媒体を通す配管系の支持構造部材等、高温に曝される鉄筋コンクリート (RC) 構造物の設計においては、温度荷重が重要な設計荷重となる。従来、温度荷重は、RC部材の剛性を全断面剛性に比較して  $2/3$ 、 $1/2$  に低下させることでひびわれの発生の影響を考慮し評価されており、この低下率の妥当な数値を求めるためRC部材の剛性評価の研究が多く行われている。<sup>1)~3)</sup> しかし、実際に温度条件が賦与されクリープや乾燥収縮による温度応力の緩和が著しくなるような場合について、温度荷重そのものあるいは部材剛性を実験的に把握したような報告はほとんど見受けられない。

本報告は、制御系がクローズした装置を用い、温度荷重のみ作用する場合を対象として、温度荷重による断面力 (曲げモーメント) を直接測定する実験を行い、その挙動について検討を行った結果をとりまとめたものである。

## 2. 温度応力実験概要

## 1) 実験装置

温度応力実験に用いた装置は図1に示すようなもので、制御系を模式的に示せば図2の通りである。初期状態の変形 (曲率) を零として、部材断面に生ずる温度勾配に伴う曲率を測定し、この曲率が零を保持するように荷重を制御するものである。

## 2) 供試体

供試体はRCはり部材で図3に示すものである。鉄筋比を0.57% (2D16 : D16鉄筋2本)、1.14% (4D16 : D16鉄筋4本)、の2種類、それぞれについて加熱面および両側面を銅板で被覆したもの (シール条件) と全面からの水分逸散を自由にしたもの (アンシール条件) の合計4体を実験に供した。各供試体の強度実験結果を表1に示す。

## 3) 実験方法

実験は、昇温過程のみ変形を拘束し、処女加熱過程および2回目加熱過程の2回行った。それぞれの加熱過程で、供試体の圧縮側温度が  $100^{\circ}\text{C}$  および  $200^{\circ}\text{C}$  の時点で1~2日同一温度状態を保持した。2回目加熱過程では圧縮側温度が  $200^{\circ}\text{C}$  の時点で約1週間同一温度を保持した。供試体は軸方向には拘束していない。

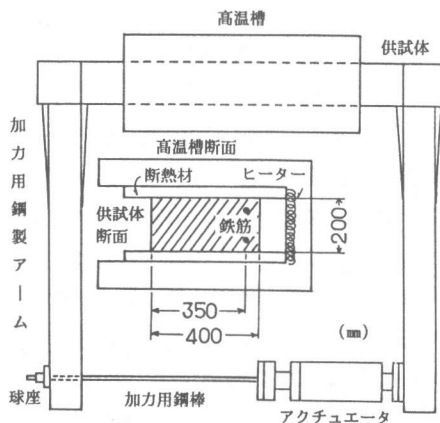


図 1 温度応力実験装置

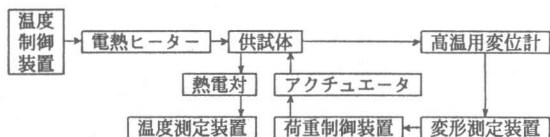


図 2 制御系の模式図

#### 4) 測定項目

熱電対を3断面で各11点供試体に埋込み、測定される温度から等価線形温度勾配(断面各位置の温度上昇量の分布において、その面積と重心位置とを等しくするように計算した線形の温度上昇量分布)を算出した。供試体の変形は、差動トランスを用いた高温用変位計を用い、圧縮縁から2cmおよび鉄筋位置の側面にそれぞれ6カ所の軸方向変形測定点を設置し測定した。推移する温度荷重は、アクチュエータ先端のロードセルにより測定し、これを拘束モーメントに換算した。

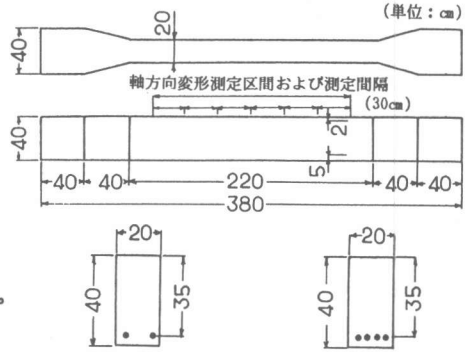


図3 供試体の形状、寸法

表1 コンクリートの物性値(常温)

| 項目      | $\sigma_{cu}$       | $\sigma_{bu}$       | $\sigma_{tu}$       | $E_c$                                |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|
| 供試体     | kgf/cm <sup>2</sup> | kgf/cm <sup>2</sup> | kgf/cm <sup>2</sup> | $\times 10^5$<br>kgf/cm <sup>2</sup> |
| US-2D16 | 486                 | 53.6                | 41.0                | 3.60                                 |
| US-4D16 | 539                 | 50.1                | 35.2                | 3.49                                 |
| S-2D16  | 539                 | 49.8                | 38.5                | 3.59                                 |
| S-4D16  | 464                 | 50.7                | 36.4                | 3.39                                 |

US; アンシール条件  $\sigma_{bu}$ ; 曲げ強度  
S; シール条件  $\sigma_{tu}$ ; 引張強度  
 $\sigma_{cu}$ ; 圧縮強度  $E_c$ ; 弾性係数

#### 5) コンクリートの熱膨張係数試験

温度応力実験の試験条件に合わせて、シール条件、アンシール条件、および処女加熱時と再加熱時の場合について、15cm×15cm×200cmのコンクリート棒状部材4体(1体(アンシール(2))のみ20cm×40cm×200cm)を用いて別途実験を行った。昇降温速度は、温度応力実験と同じように、20~30℃/3時間とした。

### 3. コンクリートの熱膨張性状

#### 3.1 熱膨張性状

図4に、処女加熱時の供試体の伸びひずみと温度との関係を示した。この図から判ることは、①常温から120~130℃までは温度上昇とともに伸びひずみは直線的に増加するが、それ以降200℃までは伸びひずみの増加は鈍くなり、200℃を越えると再び大きく増加する ②降温時は、200℃以上の温度で昇温時に示した伸びとほぼ同一ルートでひずみが戻り、200℃以下では、昇温時のルートからはずれてそれまでの延長上で戻る ③上述の傾向は、シール条件、アンシール条件に拘らず同様である 等である。

図5には、再加熱時(シール(2))のみ3回目まで加熱、他は2回)の供試体の伸びひずみと温度との関係を示した。また、処女加熱時の降温時データを常温時を零として計算したものも併せて示した。

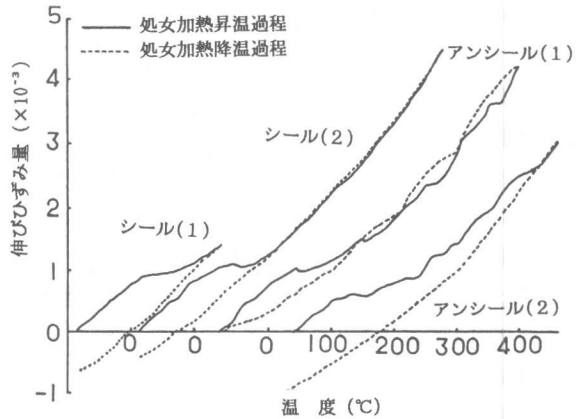


図4 伸びひずみと温度の関係(処女加熱時)

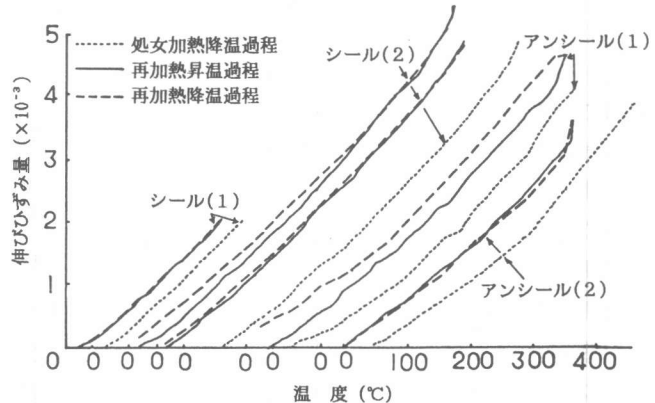


図5 伸びひずみと温度の関係(再加熱時)

この図から次のことが判断される。①再加熱時では、昇温・降温時の温度と伸びひずみの関係はほぼ可逆的である。②処女加熱時の降温過程の温度と伸びの関係は、再加熱時とほぼ同様である。③3回目以降の加熱時の温度と伸びひずみの関係は、2回目加熱時の関係とほぼ同様であることが推測される。④以上述べた傾向は、シール条件・アンシール条件に拘らず同様である。

以上の結果から、コンクリートの熱膨張係数は、処女加熱時の昇温過程と2回目以降の昇降温過程とで分けて考えるのが妥当と判断される。

### 3.2 熱膨張係数

図6および図7は、処女加熱時および再加熱時の温度と熱膨張係数の関係を示している。図6中の実線は、著者らがこれまでの実験結果に基づいて評価したアンシール条件での熱膨張係数の温度依存性を示している。<sup>4)</sup> 処女加熱時の実験結果は、シールの有無に拘らず熱膨張係数をこれまで用いている式で評価してよいことを示している。再加熱時には、熱膨張係数は温度上昇とともに単調に増加し、その勾配は処女加熱時の200℃以降の増加勾配に近い。しかし、シール条件とアンシール条件とは相違が認められる。すなわち、両条件では昇温開始時および500℃時点での熱膨張係数はほぼ等しいが、その経路が少し異なる。アンシール条件では昇温開始から直線的にゆるやかな勾配で増加するのに対し、シール条件では100℃までは比較的急速に、100℃以上ではアンシール条件よりもゆるやかな直線的な増加を示している。

以上の結果から、以降の計算で用いる熱膨張係数は次式により評価するものとした。

処女加熱時（シール条件、アンシール条件とも同じ）

$$\alpha_c(T) = (12.4 - 0.0330T) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_c(T) = (3.73 + 0.00895T) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\text{常温} \leq T < 207^\circ\text{C} \quad (1(a))$$

$$207^\circ\text{C} \leq T \quad (1(b))$$

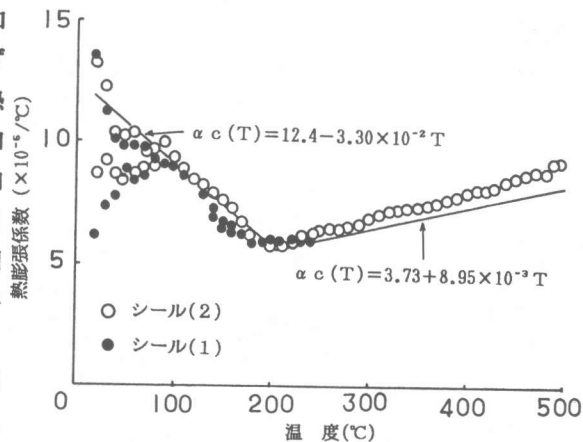


図6 温度と熱膨張係数の関係（処女加熱時）

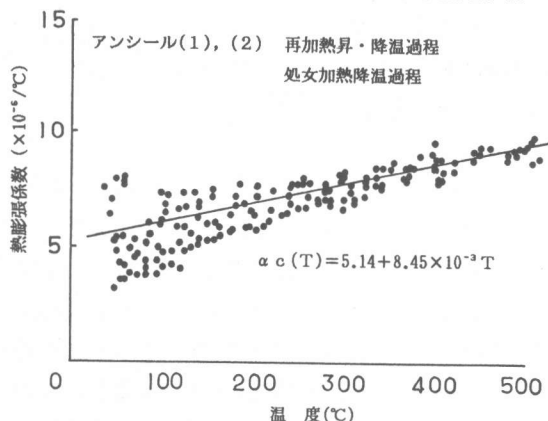


図7(a) 温度と熱膨張係数の関係  
（再加熱時、アンシール条件）

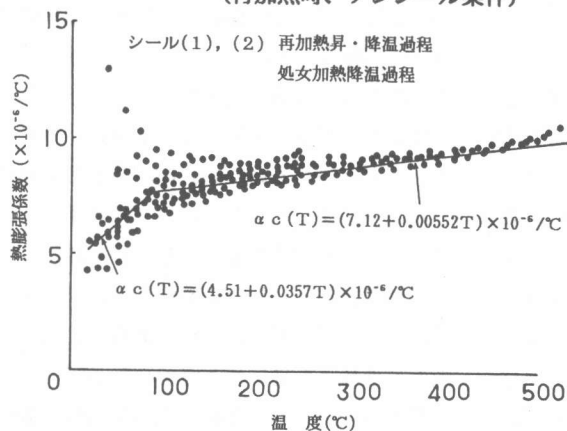


図7(b) 温度と熱膨張係数の関係  
（再加熱時、シール条件）

再加熱時

アンシール条件  $\alpha_c(T) = (5.14 + 0.00845T) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

(2)

シール条件  $\alpha_c(T) = (4.51 + 0.0357T) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

常温  $\leq T < 86^\circ\text{C}$  (3(a))

$(7.12 + 0.00552T) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

$86^\circ\text{C} \leq T$  (3(b))

#### 4. 温度応力挙動

##### 4.1 拘束モーメントの推移

##### 1) 処女加熱時

図8には、処女加熱時の拘束モーメントと等価線形温度分布で考えた時の温度差（以降単に温度差という）の関係を示した。拘束モーメントは、温度差の増加とともに増加する。

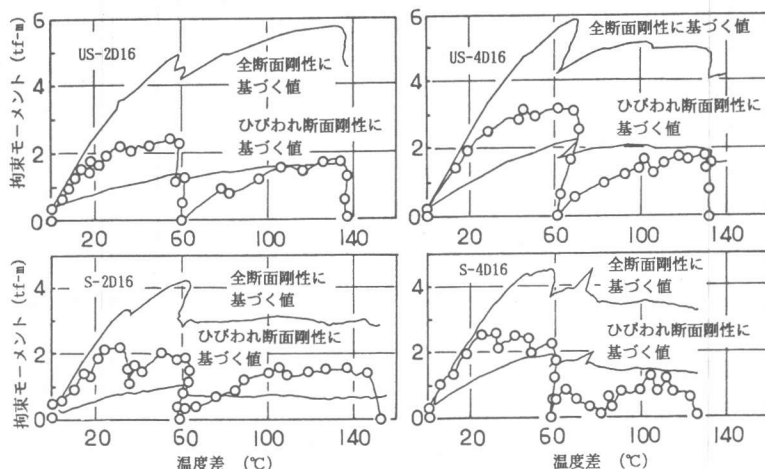


図8 温度差と拘束モーメントの関係（処女加熱時）

シール条件の供試体では、引張縁にパラフィンでコーティングしてあるためひびわれ発生の確認はできなかったが、アンシール条件の供試体では、圧縮側温度が100℃、温度差約60℃で数本のひびわれが確認された。ただし、これらのひびわれは断面高さ方向へはあまり進展していないものであった。拘束モーメントは、温度差30℃程度から圧縮側温度を100℃に保持した段階まではほとんど増加しておらず、また、温度差約60℃では温度差の変化がないままで拘束モーメントが零まで低下している。これらのことは、処女加熱時には高温側コンクリートのクリープや乾燥収縮が拘束モーメントの緩和に大きく寄与していることを示すものである。

図9は、圧縮側温度を100℃に保持したまま約2日間放置した時の温度拘束モーメントの経時変化と、別途常温で同程度の曲げモーメントを賦与し、その時の曲率を保持したままモーメントの変化を測定する実験を行った結果を比較したものである。温度応力実験の供試体では、放置後1～2日で拘束モーメントが零まで低下しているのに対して、常温下の供試体は、時間経過に対してもモーメントはほとんど低下していない。両試験とも放置状態でのひびわれの発生はないことから、これらの挙動の差はコンクリートのクリープや乾燥収縮によるものであることが判断され、ひびわれの影響は少ないものと思われる。シール条件とアンシール条件の供試体の挙動の相違は、シール条件ではコンクリート表面を被覆した銅板の影響で、同じ温度差であってもアンシール条件に比較して温度条件が20～30℃高くなっているためと思われる。

モーメントが零まで低下する挙動は、圧縮側温度を200℃に保持した場合も同様で、約1日で拘束モーメントは零まで低下している。この結果から、

100℃を越える高温領域での拘束モーメントは、設

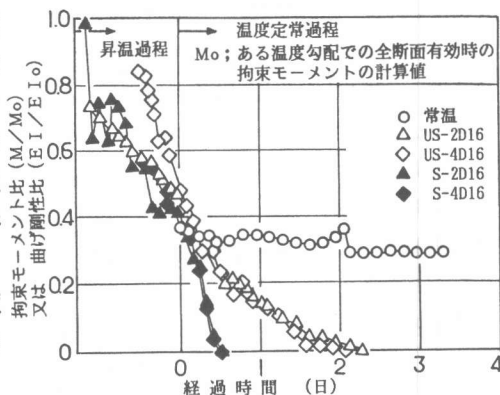


図9 拘束モーメントの経時変化（処女加熱時）

計上長期的には考慮しなくてよいことを示すものと考えられる。

## 2) 2回目加熱時

図10の●印は、2回目加熱時の拘束モーメントと温度差の関係の実験値を示した。処女加熱時と同様に、温度差の増加とともに拘束モーメントは増加する。しかし、増加傾向は温度差の増加に対してほぼ直線的で、処女加熱時の場合とは異なる。これは、3.でも示したように、コンクリートの熱膨張

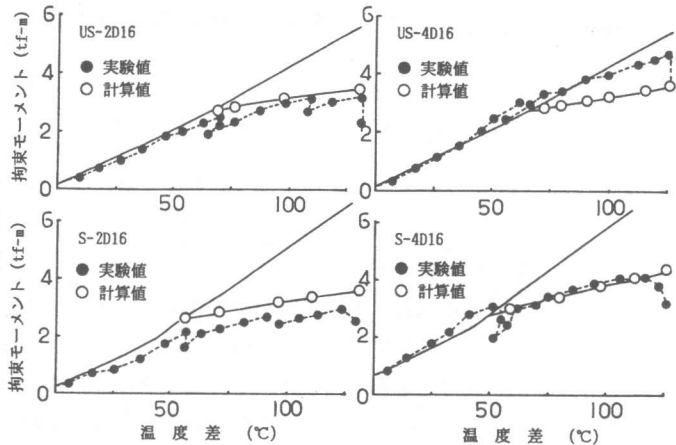


図 10 温度差と拘束モーメントの関係 (再加熱時)

係数が、処女加熱時と2回目加熱時とで異なるためである。また、処女加熱時と同様に圧縮側温度100℃および200℃で温度保持期間を設けたが、2回目加熱時には拘束モーメントの大きな低下は認められなかった。これは、処女加熱時の試験日数は約1週間であったが、この時の温度条件下でコンクリートのクリープや乾燥収縮が大きく生じたため、2回目加熱時には、拘束モーメントを緩和するこれらの現象がそれ程生じなかったことによるものと考えられる。

## 4.2 温度拘束モーメントの評価

### 1) 処女加熱時

処女加熱時の拘束モーメントの緩和要因は、クリープや乾燥収縮が支配的であるので、拘束モーメントの評価は昇温過程で生ずるクリープと乾燥収縮を精度よく把握する事が重要となる。本研究では、昇温時の各温度変化に対応するクリープおよび乾燥収縮のデータを得ていないので、各温度分布状態に対応する拘束モーメントを評価できない。しかし、部材剛性があまり低下せずに拘束モーメントが推移していること、および100℃を越える温度領域では、拘束モーメントは1～2日でほとんど零まで低下することを考えれば、設計的には、拘束モーメントの最大値は、部材としてのひびわれ発生モーメントを越えないと考えてよいと思われる。

表2は、温度応力実験で各供試体に発生した拘束モーメントの最大値とひびわれ発生モーメントの計算値を比較して示した。ここでは、断面内温度分布に依存するコンクリートの弾性係数および熱膨張係数を考慮し、全断面有効を仮定して拘束モーメントを計算した時に、引張応力度が引張強度の0.8～1.0倍に達した時の値をひびわれ発生モーメントとした。表から判るように、拘束モーメントの実験値の最大値は、ほぼひびわれ発生モーメントの計算値に対応している。

### 2) 2回目加熱時

2回目加熱時では、拘束モーメントはRCはり部材の剛性に支配されると考えてよい。また、コンクリートの弾性係数は、処女加熱時に受けた最高温度を越えない限りにおいては、2回目加熱時の温度上昇に対しては変化しないと考えられ、熱膨張係数についても、2回目加熱時には高温側と低温側の値ではそれ程の差はない。以上の事から、2回目加熱時の拘束モーメントは、断面内温

表 2 処女加熱時の拘束モーメントの最大値とひびわれ発生モーメントの計算値の比較

| 項目<br>供試体 | 拘束モーメント<br>の実験値<br>tf-m | ひびわれ発生<br>モーメントの計算値<br>tf-m |
|-----------|-------------------------|-----------------------------|
| US-2D16   | 2.40                    | 2.67～3.23                   |
| US-4D16   | 3.16                    | 2.68～3.37                   |
| S-2D16    | 2.19                    | 2.54～2.98                   |
| S-4D16    | 2.64                    | 2.72～3.16                   |

度を等価線形化した分布を基に平均温度および断面内温度差を求め、次式により評価した。

$$M(T) = E_{c,ave} \cdot I_{eff} \cdot \frac{\alpha_{c,ave} \cdot \Delta T_{eq}}{h} \quad (4)$$

ここで、 $E_{c,ave}$ ：温度分布を考慮して計算した弾性係数の平均値

$\alpha_{c,ave}$ ：平均温度を用いて式(2)あるいは(3)で計算した熱膨張係数

$\Delta T_{eq}$ ：温度差

$I_{eff}$ ：ACI基準式による有効断面二次モーメントで、ひびわれ発生モーメントとして表2の計算値(0.8倍の値)を用いている。

図10には、2回目加熱時の拘束モーメントと温度差の関係の実験値と計算値を示した。図中の実線は、式(4)の $E_{c,ave} \cdot I_{eff}$ として全断面剛性を代入した値を示している。処女加熱時には、剛性がそれ程低下していないことから、ひびわれ進展が生ずる応力レベル(ひびわれ発生モーメント相当)までは拘束モーメントは全断面剛性とほぼ一致する挙動を示している。しかし、ひびわれが進展する応力レベル以降は、RCはり部材の剛性の低下に対応して拘束モーメントの増加傾向がなだらかになっている。ここでの計算値は簡易的な方法によるものではあるが、概ね実験値と良好に一致している。

以上のことから、鉄筋コンクリート部材が再加熱を受けるような場合には、このような条件での弾性係数と熱膨張係数の変化を考慮の上で、部材剛性のみに着目し、これを適切に評価することで拘束モーメントを算出できるものと思われる。

## 5. まとめ

以上、本研究の範囲で得られた結果を以下に要約する。

- (1) コンクリートの熱膨張性状は、処女加熱時と再加熱時とは異なる。しかし、2回目以降の昇降温に対しては、ほぼ可逆的な伸びひずみ挙動を示す。
- (2) 鉄筋コンクリートはり部材に生ずる処女加熱時の拘束モーメントは、高温側温度条件が100℃以上であればコンクリートのクリープや乾燥収縮のためごく短期間に零まで低下する。
- (3) 再加熱時に生ずる拘束モーメントは、コンクリートのクリープや乾燥収縮による低下はほとんど生じず、ひびわれの進展に伴う部材の剛性低下に支配される。
- (4) 再加熱時に鉄筋コンクリートはり部材に発生する拘束モーメントを評価する簡易的な方法を示し、概ね良好な拘束モーメントの値を算定できることを検証した。

## 参考文献

- 1) 青柳、大沼、岡沢；コンクリート製中空円筒体の温度勾配によるひびわれ性状と鉄筋コンクリート部材の曲げ剛性評価に関する研究、電力中央研究所報告No.376002、1976年10月
- 2) Branson D. F.; Deflections of Reinforced Concrete Flexural Members, ACI Journal, Vol. 63, June 1966
- 3) 金津、青柳；高温領域で温度勾配を受ける鉄筋コンクリート部材の曲げ剛性とひびわれ性状、電力中央研究所報告No.382044、1983年5月
- 4) 金津、青柳、大沼、中野、遠藤；100℃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、1986年5月