

鉄筋とコンクリートの熱膨張係数差に起因する内部応力の評価

金津 努

正会員 工修 (財)電力中央研究所 構造部 上席研究員 (〒270-11 我孫子市我孫子 1646)

鉄筋コンクリート部材が100°Cを越える高温に曝される場合、鉄筋とコンクリートの熱膨張係数の差により、コンクリートには引張ひずみ、鉄筋には圧縮ひずみが発生する。機構的にはコンクリートの乾燥収縮を鉄筋が拘束する場合の拘束応力と同様のものであるが、高温下では温度変化に伴って物性が変化するので、常温下では見られない高温下特有の現象である。本研究は、このような現象を実験的に把握し、その挙動特性を明らかにするとともに、CEB マニュアルの平均鉄筋ひずみの評価の考え方を拡張し、熱膨張係数の差による内部ひずみ評価式を提案し、その妥当性を実験結果との比較により検証したものである。

Key Words: high temperature, reinforced concrete, thermal expansion strain, internal stress, nuclear facility

1. はじめに

原子力発電所の原子炉格納容器、原子炉・冷却水配管の支持構造、放射性廃棄物・使用済み燃料等の高レベル廃棄物貯蔵施設などのコンクリート構造物は、高温下に曝されることを想定して設計が行われる。構造物に想定される温度、要求される機能等設計条件は異なるが、これらの施設の設計は、現在、通産省資源エネルギー庁「原子力発電用コンクリート格納容器技術基準」¹⁾および日本建築学会「原子力用コンクリート格納容器設計指針案・同解説」²⁾に基づいている。これらの技術指針には、表-1に示すコンクリートが曝される温度制限値が設定され、構造物の各荷重状態³⁾(正常時、臨時、終局時)に応じて、組合せ荷重の一つとして温度荷重を考慮する必要のあることが記述されており、温度荷重の評価に関する基本方針も示されている。

通常の設計では、供用状態においてコンクリートが65°Cを越えないことを基本条件とし、物性は常温と同等とする考え方で、温度依存性は考慮していない。このため、従来100°Cを越える温度条件で、鉄筋コンクリートを対象として力学特性を検討した例は少ない³⁾。しかし、高温下という特殊な環境の構造物の設計を合理化するには、鉄筋コンクリートの高温下の力学特性を明らかにする事が必要である。

鉄筋コンクリートが高温下に曝される場合、昇温に伴ってコンクリートおよび鉄筋の物性は変化する。

表-1 コンクリートの温度制限値

状 態	コンクリート温度 (°C)	
	一般部	局 部
通常運転時	65	90 *1
事 故 時	175	350 *2

*1) 配管貫通部など

*2) 事故時の配管破断による高温ジェットを受ける部分など

これらの変化が、複合材料である鉄筋コンクリートの耐荷性能、変形性能に影響することは容易に推測できる。特に、昇温に伴い鉄筋の熱膨張係数がやや増加する⁴⁾のに対して、コンクリートでは乾燥に伴う収縮が生じて熱膨張係数が小さくなるため、常温からの温度変化量が大きい高温下では、鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差は大きくなる。このため、外的な荷重が作用する前に、鉄筋およびコンクリート双方に温度変化量に対応する応力が発生し、場合によってはひび割れが発生する事が予測される。従来、高温領域への温度変化がある場合は、温度応力を考慮する事が設計上の重要事項であったが、100°Cを越えるような高温領域では、加えて鉄筋とコンクリートの熱膨張ひずみの差に起因する応力、ひび割れが、その後の荷重作用に伴う鉄筋コンクリートの力学性状に与える影響を考慮する事が重要となる。

本論文では、高温下のコンクリートと鉄筋の物性の変化と膨張ひずみの差に起因して発生する応力が、ひび割れ状況およびその後の引張荷重-変形関係に与える影響を、小型鉄筋コンクリート棒部材を用い

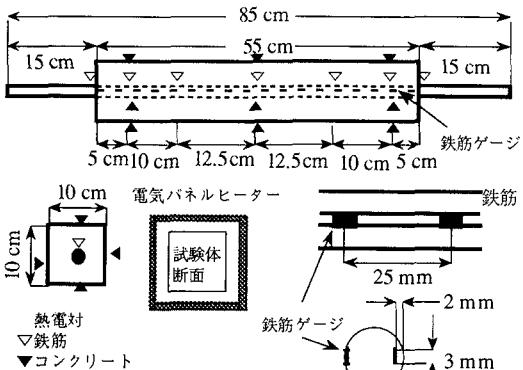


図-1 試験体と加熱方法 図-2 鉄筋ゲージの貼付

た実験から明らかにするとともに、これらの評価方法を提案し、その適用性を検討した。

2. 実験概要

(1) 試験体

図-1に示すように、試験体は鉄筋全長が85cm、鉄筋コンクリート部の断面が10cm×10cm、長さが55cmの棒部材である。図-2に示すように、鉄筋の両側の縦リブの部分を削って幅3mm、深さ2mmの溝を削り、両側の溝の底に25mmの間隔で鉄筋ひずみゲージをそれぞれ23枚ずつ貼付した。

(2) 試験方法

試験体を引張試験装置に設置した後、試験体の4面を開むようにパネルヒーターを配置し、加熱した。試験体の温度分布が均一となるように、各面の電熱ヒーターは独立制御とし、熱効率をよくするように、各面のヒーター周囲に断熱材を配置した。

昇温中は熱電対により鉄筋およびコンクリートの温度を、高温用ゲージにより鉄筋ひずみを測定した。所定温度に到達後、この温度を約2日間保持し、その後鉄筋が降伏するまで単調載荷で引張試験を行った。載荷荷重は、試験体と引張試験機の接合部にロードセルを配置し、測定した。

(3) 試験条件

試験パラメータは温度(4種類)と鉄筋比(2種類)である。試験条件の一覧を表-2に示す。

(4) 昇温速度

昇温速度は10°C/hr.以下である。

表-2 試験条件とコンクリートの物性値

試験体	温度 (°C)	鉄筋 径 (mm)	鉄筋 比 (%)	圧縮強度 (N/mm²)		引張強度 (N/mm²)	弾性係数 (N/mm²)	$\times 10^4$
				(N/mm²)	(N/mm²)			
NT16-1	16	16	1.71	43.6	3.38	3.08		
NT16-2	常温	16	1.71	43.6	3.38	3.08		
NT19-1	19	19	2.48	46.0	3.29	3.45		
NT19-2	19	19	2.48	46.0	3.29	3.45		
HL16-1	16	16	1.71	46.8	3.31	3.19		
HL16-2	65	16	1.71	45.1	3.19	3.37		
HL19-1	19	19	2.48	47.6	3.30	3.19		
HL19-2	19	19	2.48	47.6	3.30	3.19		
HM16-1	16	16	1.71	47.6	3.30	3.19		
HM16-2	100	16	1.71	41.9	3.06	3.34		
HM19-1	19	19	2.48	41.9	3.06	3.34		
HM19-2	19	19	2.48	41.9	3.06	3.34		
HH16-1	16	16	1.71	43.5	3.06	3.23		
HH16-2	200	16	1.71	43.5	3.06	3.23		
HH19-1	19	19	2.48	46.7	2.80	3.23		
HH19-2	19	19	2.48	46.7	2.80	3.23		
鉄筋とコンクリートの熱膨張係数の推定値 ($\times 10^6 / ^\circ C$)								
NT シリーズ	NT シリーズ	HM シリーズ	HH シリーズ					
鉄筋	10.6	10.9	11.1	11.7				
コンクリート	11.7	10.3	9.1	5.8				

(注) 式18, 式19から計算した表中の温度の時の値

(5) コンクリートの種類

圧縮強度が約40N/mm²となるようにコンクリートの配合を選定した。材料は普通に得られる物を使用し、高温であることに対して特別な配慮はしていない。各試験体コンクリートの常温下の強度、弾性係数の実験値、熱膨張係数の推定値を表-2に示す。

3. 乾燥収縮ひずみの推定

(1) ひび割れにより解放される鉄筋ひずみの挙動

昇温時の鉄筋ひずみの挙動を実験的に正しく把握するためには、昇温前の鉄筋ひずみの状態を把握する必要がある。通常は乾燥収縮が生じているので、乾燥収縮ひずみを推定し、これに起因する鉄筋ひずみを評価する必要がある。鉄筋にはコンクリートの乾燥収縮ひずみ量に応じて圧縮ひずみが導入されるので、ひび割れ後に解放された鉄筋ひずみを測定することで、乾燥収縮ひずみを推定できる。

a) NTおよびHLシリーズの場合

図-3(a)には、NT16-1試験体のひび割れ箇所に最も近い位置のゲージと試験体端部のゲージによる鉄筋ひずみの測定値から、載荷荷重から計算される鉄

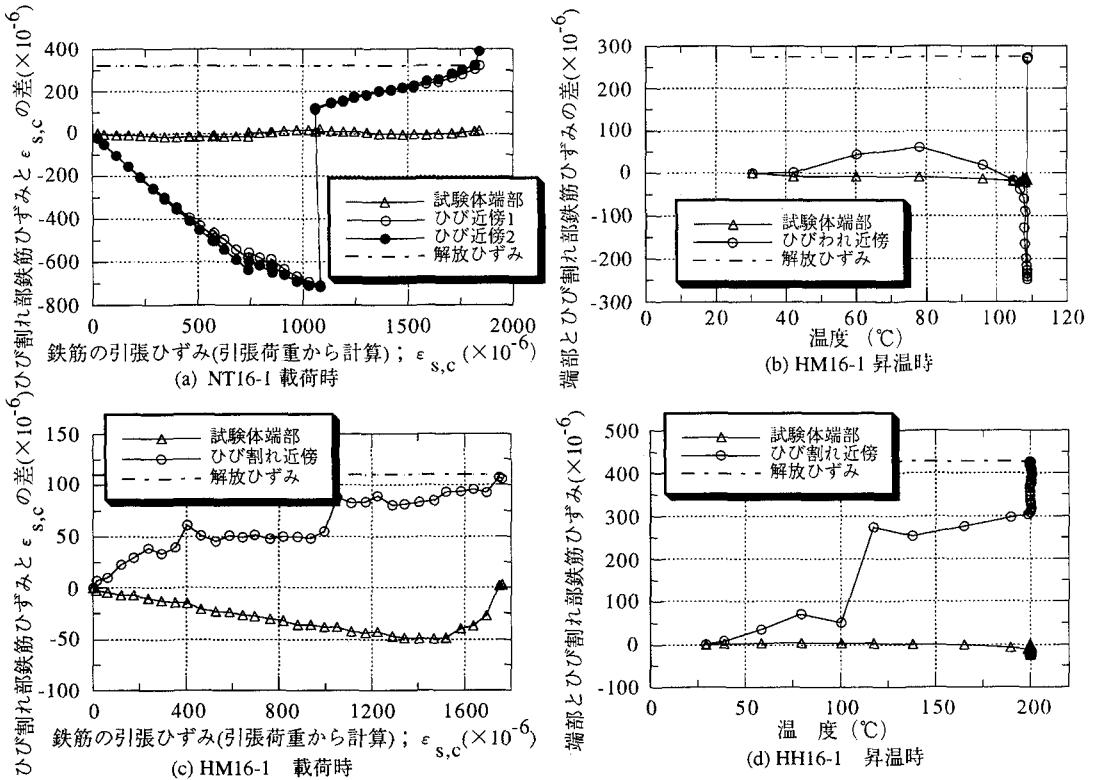


図-3 ひび割れの発生により解放される乾燥収縮に起因する鉄筋ひずみ

筋の伸びひずみ($\epsilon_{s,c}$)を差し引いたものを、載荷荷重レベル(ひずみ表示)との関係で示した。端部では当然のことながら、荷重増加に対してひずみ差はほぼ零となる。一方ひび割れ近傍のひずみは、ひび割れ発生前はコンクリートの抵抗があるので負の方向に、ひび割れ発生以降はある正の値を持って推移する。この正の値がひび割れの発生によって解放された乾燥収縮に起因する鉄筋ひずみである。ひび割れ箇所と鉄筋ゲージ貼付位置とが必ずしも一致していないので、ひび割れ発生後もひずみが漸増する。このようにして得られた鉄筋降伏時点のひずみ値が、乾燥収縮によって載荷以前に導入された鉄筋ひずみであると推定できる。この例では、約 320×10^{-6} が乾燥収縮に起因する鉄筋ひずみとなる。

NT および HL のシリーズの各試験体では、乾燥収縮によって導入された鉄筋のひずみをこのようにして推定できる。

b) HM シリーズの場合

HM シリーズの場合には、昇温段階でひび割れが発生した。しかし、ひび割れ近傍のゲージによるひずみ測定値は、発生したひび割れによって完全には解放されていない。したがって、HM シリーズの乾

燥収縮は、昇温時のひび割れにより解放されるひずみと、a) で説明した載荷に伴って解放されるひずみ量との合計から推定した。例えば、HM16-1 試験体の昇温時および載荷時に解放される鉄筋ひずみを、図-3(b)および図-3(c)に示す。これらの図から、昇温時のひび割れにより解放された量は約 270×10^{-6} 、引張荷重により解放された量は約 110×10^{-6} 、合計約 380×10^{-6} と推定される。

表-3 には、昇温中に発生したひび割れ本数を示した。各試験体で 1~3 本発生し、太経鉄筋の方がひび割れが多く発生している。

c) HH シリーズの場合

HH シリーズの場合にも、昇温段階でひび割れが発生した。200°Cまでの昇温であるので鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差が大きく、ひび割れ近傍のゲージによるひずみ測定値は、昇温時のひび割れの発生によってほぼ完全に解放されたと推定された。例えば、HH16-1 試験体の昇温時に解放される鉄筋ひずみを図-3(d)に示す。乾燥収縮に起因する鉄筋ひずみは約 430×10^{-6} である。

表-3 から分かるように、200°Cまでの昇温で 2~3 本のひび割れが発生している。

表-3 乾燥収縮ひずみの推定値 ($\times 10^{-6}$)

試験体	鉄筋ひずみの測定値			乾燥収縮量	ひび割れ本数			
	昇温時	載荷時	合計		の推定値	n_T	n_L	n
NT16-1	-----	320	320	360	---	2	2	
NT16-2	-----	350	350	390	---	1	1	
NT19-1	-----	350	350	400	---	2	2	
NT19-2	-----	270	270	310	---	3	3	
HL16-1	昇温時は測定せ	380	420	0	3	3		
HL16-2	ず、載荷時に昇	345	380	0	2	2		
HL19-1	温時の影響を含	330	380	0	2	2		
HL19-2	めて測定	390	450	0	2	2		
HM16-1	274	110	380	420	1	2	3	
HM16-2	263	120	380	420	2	1	3	
HM19-1	240	100	340	390	3	0	3	
HM19-2	197	170	370	430	3	0	3	
HH16-1	427	0	430	480	3	0	3	
HH16-2	442	0	440	490	3	0	3	
HH19-1	417	0	420	490	2	1	3	
HH19-2	390	0	390	450	3	0	3	

n_T, n_L, n ; 昇温時、引張荷重載荷時および総合のひび割れ本数

(2) 乾燥収縮ひずみの推定

乾燥収縮に起因する鉄筋ひずみを、ひび割れによって解放される鉄筋ひずみの測定値から推定する方法を(1)に示した。この推定値から、乾燥収縮ひずみ量は以下の式によって評価される。この式は、鉄筋とコンクリートの軸方向の力の釣り合いと、弹性ひずみと膨張ひずみ差との適合条件から導かれる。

$$\epsilon_{sh} = (1+np) \epsilon_{sd} \quad (1)$$

ここで、 ϵ_{sh} ; 乾燥収縮ひずみ（正の値）

ϵ_{sd} ; 解放された鉄筋ひずみ p ; 鉄筋比

n ; 弹性係数比（本論文では常温で計算）

全試験体の解放された鉄筋ひずみおよび式(1)による乾燥収縮ひずみの計算値を表-3に示す。乾燥収縮ひずみは 310×10^{-6} ~ 490×10^{-6} 程度であることが推定された。同時に試験体を作製したが、HHシリーズの試験実施が最後であったので、この試験体の乾燥収縮ひずみの値がやや大きい。全般的には、試験体の断面が $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ と小さいこと、試験開始までに気乾状態で数カ月放置したこと等を考えると、ほぼ妥当な値である⁵⁾。

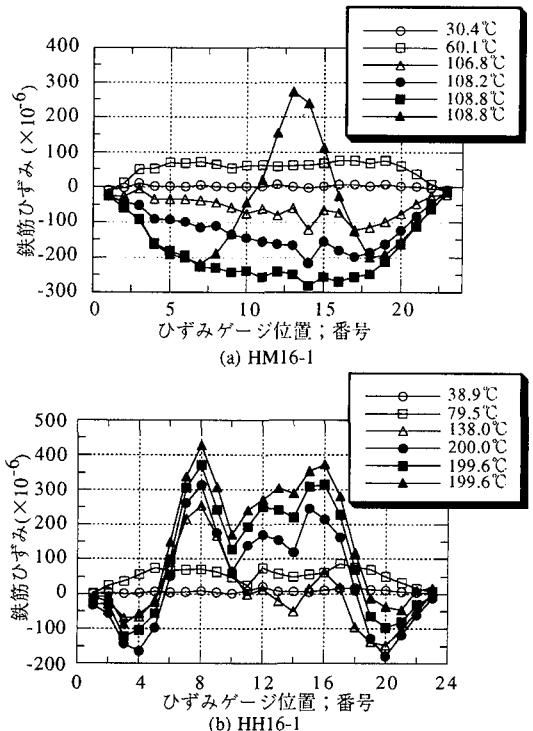


図-4 昇温時の鉄筋のひずみ分布

4. 膨張ひずみの差に起因する鉄筋ひずみの挙動

(1) 鉄筋のひずみ分布

理論的に考察すれば、外的な拘束が無い条件では、昇温時には、熱膨張による鉄筋の伸び変形をコンクリートが拘束するため、鉄筋には圧縮ひずみが、コンクリートには引張ひずみが発生する。引張ひずみが限界値を越えればコンクリートにはひび割れが発生する。この検討では、鉄筋とコンクリートの昇温に伴う膨張ひずみの差と、乾燥収縮ひずみの両方が作用している状態を考慮している。

実験により昇温時の鉄筋のひずみ分布を測定し、理論的に予測される挙動と比較した。図-4には、HM16-1 および HH16-1 試験体の鉄筋ひずみ測定結果（伸び方向+）を示した。他の試験体の結果は、これら 2 体の結果とほぼ同様である。

HM16-1 および HH16-1 のひずみ分布は、理論的に予測される通りの挙動を示している。両試験体とも、昇温開始後しばらくの間、ひずみ値が伸び方向の値を示している。これは、昇温時の試験体断面の温度勾配の影響と考えられ、表面部のコンクリートの膨張により、内部の鉄筋が引張られていることを示す

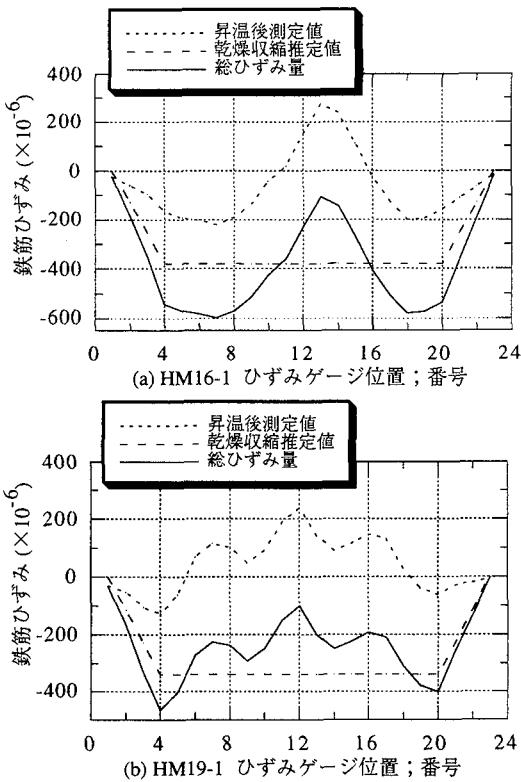


図-5 昇温後の鉄筋のひずみ分布；HM シリーズ

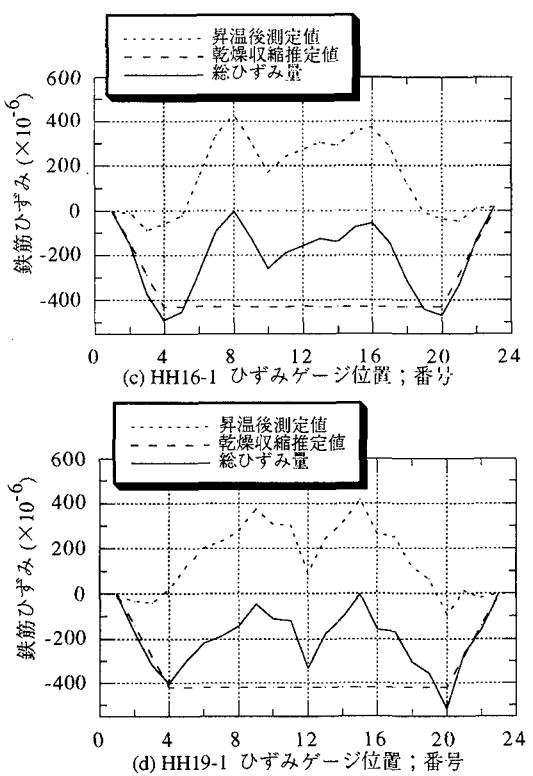


図-6 昇温後の鉄筋のひずみ分布；HH シリーズ

ものである。時間経過に伴い温度が定常になると、鉄筋とコンクリートの膨張ひずみ差に起因する圧縮ひずみが卓越するので、伸びひずみは消滅している。

また、ひび割れ発生後の鉄筋ひずみの縮み方向から伸び方向への急激な変化は、昇温前に乾燥収縮によって鉄筋に導入された圧縮ひずみが、ひび割れの発生とともに解放されたものである。乾燥収縮がなければ、鉄筋ひずみは零に戻るはずである。

以上のように、鉄筋コンクリートが昇温される場合、鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの相違により、鉄筋には圧縮ひずみが導入され、 100°C を越えるような温度条件ではこれが約 200×10^{-6} となり、コンクリートにひび割れを発生させることが実験的に確認された。

ここで HM, HH シリーズの各試験体の、所定温度まで昇温した後の鉄筋の圧縮ひずみ分布を、図-5 および図-6 に示した。先に推定した乾燥収縮ひずみも考慮しており、図中の実線が、所定温度に昇温した後に鉄筋に導入されている圧縮ひずみ（総ひずみ量として表示）を示す。

このひずみ分布から、発生しているひび割れの特徴を観察できる。ひび割れと推定される箇所の鉄筋

ひずみは必ずしも零になっておらず、コンクリートが抵抗していることが理解できる。これは、鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差に起因する応力が、自己制限的な性質を有するものであるためと考えられる。ひび割れの発生により内部応力が緩和されるため、引張荷重のように断面を貫通するひび割れには進展しにくい。

昇温時の鉄筋の圧縮ひずみを平均的に見て考察を加える。完全定着断面を仮定すれば、計算上、乾燥収縮ひずみと鉄筋とコンクリートの熱膨張ひずみの差により、HM シリーズで $500 \sim 600 \mu$ 、HH シリーズで $1300 \sim 1400 \mu$ のひずみが鉄筋に導入される。しかし、ひび割れが発生し、それに伴って付着性能が低下するため、導入される鉄筋ひずみは完全定着断面を仮定して計算される値よりかなり小さい。平均的にみれば、計算値に比較して HM シリーズで約 50%、HH シリーズで 20% の残存率である。ひび割れの発生、付着性能の低下により、導入されたひずみのそれぞれ 50%, 80% 程度が解放されたことを意味している。残存しているひずみは、その後の載荷荷重の増加とともに解放され、荷重-変形関係に影響することが推測される。

なお、試験体両端部に7.5cmの付着-すべり領域を設定した。これは、既往の研究により、ひび割れ端部における付着-すべり領域は3.5~4d(dは鉄筋径)程度と言わわれていること⁶⁾、および本実験におけるひずみゲージの間隔が25mmであることを考慮したものである。

(2) 平均鉄筋ひずみの挙動

ここでは、HM, HHシリーズの各試験体の平均鉄筋ひずみの昇温に伴う挙動について、ひずみ解放率(式(3))という指標を用いて考察する。平均鉄筋ひずみ(応力関与ひずみ)の実測値は、部材両端の付着-すべり領域(7.5cm)の影響を除外した、中央40cm区間の各ひずみ測定値の平均値を示し、鉄筋の弾性係数を乗ることで鉄筋応力を換算できる。

図-11および図-12の実測値は、HMおよびHHシリーズの強制ひずみとひずみ解放率の関係を示す(図中点線の左側が昇温時の値)。強制ひずみ(ϵ_{f2})は、鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差、乾燥収縮ひずみおよび引張荷重による鉄筋ひずみを合計したひずみを示し、式(2)で定義した。点線の左側では、引張荷重による鉄筋ひずみは零である。

また、ひずみ解放率とは式(3)に示すように、考慮時点での強制ひずみに対する、平均鉄筋ひずみ(応力関与ひずみ($\epsilon_{s,ave}$);図-13参照)、乾燥収縮ひずみおよび鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差による合計ひずみの比として定義した。これは、通常の鉄筋コンクリート引張部材におけるひび割れ断面の鉄筋ひずみに対する、平均鉄筋ひずみの比に相当するものである。つまり、乾燥収縮や熱膨張現象によってひび割れが発生し、鉄筋とコンクリート間の付着性能が低下した結果、完全に付着が切れた状態(ひび割れ断面に相当)に対して、鉄筋の平均的なひずみがどの程度の状態にあるかを表す指標である。コンクリートの引張抵抗の寄与分がどの程度残っているかを示す指標である。

$$\epsilon_{f2} = -\epsilon_{sh} + \{\alpha_s(T) - \alpha_c(T)\} \Delta T + \epsilon_{s2} \quad (2)$$

$$\gamma_d = \frac{-\epsilon_{sh} + \{\alpha_s(T) - \alpha_c(T)\} \Delta T + \epsilon_{s,ave}}{\epsilon_{f2}} \quad (3)$$

ここで、 γ_d ; ひずみ解放率 ϵ_{f2} ; 強制ひずみ ϵ_{sh} ; 乾燥収縮ひずみ(伸び方向; +)
 $\epsilon_{s,ave}$; 平均鉄筋ひずみ(引張方向; +)
 ϵ_{s2} ; 載荷荷重によるひび割れ断面の鉄筋ひずみ
 $\alpha_s(T)$, $\alpha_c(T)$; 鉄筋、コンクリートの熱膨張係数
 ΔT ; 温度上昇量

理論的には、ひび割れ発生以前のひずみ解放率という概念は存在しないが、式(3)はひび割れが発生する以前も計算することができる。この時の $\epsilon_{s,ave}$ を完全定着断面で弾性拘束状態にある鉄筋ひずみと考えると、 γ_d は鉄筋比と弾性係数比で表される値;
 $\{np/(1+np)\}$ となる。

図から判るように、ひずみ解放率は、100°C(強制ひずみ; 約 600 μ)までは比較的急速に、100°C~200°Cの領域では緩やかに、温度の上昇とともに増加する。鉄筋ひずみの分析から、主ひび割れ(断面を貫通する様なひび割れを言う)の発生は100°C近傍であることが確認されているので、ひび割れ発生までの γ_d の動きは、昇温時のコンクリート断面内の温度勾配に起因するものと考えられる。断面内に温度勾配がある場合には内部拘束状態となり、鉄筋および近傍のコンクリートには引張ひずみが生じるので、見かけ上 γ_d は大きくなる。

ひび割れの発生が確認された100°C近傍での γ_d は0.4~0.6, 200°Cでの γ_d は約0.8である。乾燥収縮と温度が作用しているだけであるが、鉄筋ひずみの解放率はかなり大きい。ひび割れの発生によるひずみの解放に加えて、鉄筋とコンクリートの境界部で微細なひび割れが発生し、付着性能が低下していることが推察される。

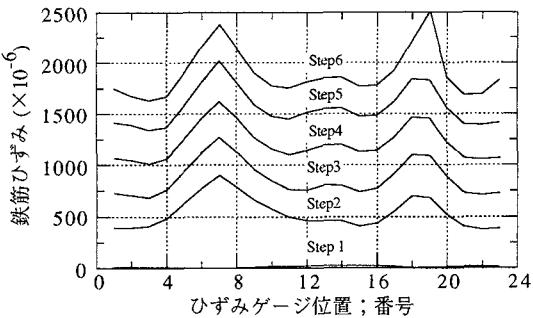
鉄筋コンクリート部材の剛性の変化を考えると、初ひび割れ発生からひび割れ安定領域までは剛性が急速に低下し、ひび割れ安定領域以降は比較的緩やかに低下する。前者が主にひび割れの発生に起因するのに対して、後者は主に付着性能の低下によるものである。鉄筋とコンクリートの膨張ひずみ差に起因する内部応力が原因となるひずみ解放率の変化は、荷重による鉄筋コンクリート部材の引張剛性の低下性状と符合するものである。

以上から、乾燥収縮や鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差は、外的な引張荷重と同じように、ひび割れを発生させ、付着性能を低下させる荷重要因と考えられる。

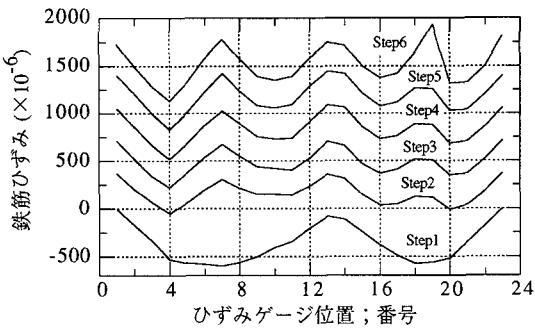
5. 引張荷重の載荷による鉄筋ひずみの挙動

(1) 鉄筋のひずみ分布

所定温度に昇温後、さらに引張荷重が加わった場合の鉄筋ひずみの分布について考察する。例えば図-7および図-8には、それぞれHM16-1およびHH16-1試験体の載荷に伴う鉄筋ひずみ分布を示した。(a) 図は引張荷重を載荷する前を原点として計測したひずみ分布であり、(b) 図は(a) 図の値に乾燥収



(a) 乾燥収縮、膨脹ひずみを無視；HM16-1



(b) 乾燥収縮、膨脹ひずみを考慮；HM16-1

図-7 載荷時の鉄筋ひずみの分布；HM シリーズ

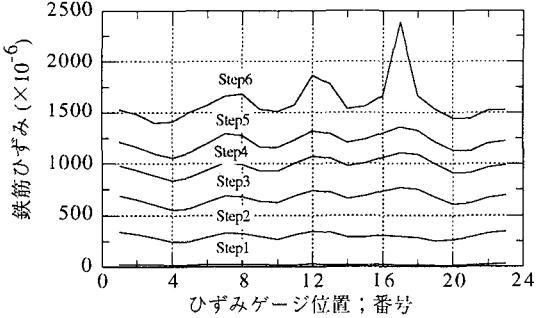
縮ひずみと昇温による膨張ひずみを考慮したひずみ分布である。両図の比較から、高温下の鉄筋ひずみを正確に評価するには、載荷以前の乾燥収縮や昇温時の膨脹ひずみを考慮しなければならないことが理解できる。

表-3 から分かるように、HM16-1, HM16-2 試験体はそれぞれ載荷に伴ってひび割れが2本および1本発生し、計3本のひび割れで安定するのに対して、HH16-1, HH16-2 試験体はともに昇温時に3本のひび割れが発生し、載荷に伴うひび割れの発生はなく、載荷当初からひび割れ安定状態にある。つまり、200°Cまでの昇温は、鉄筋コンクリートの変形をひび割れ安定領域にまで至らせる外的荷重と同等の影響を与えるものであることが分かる。

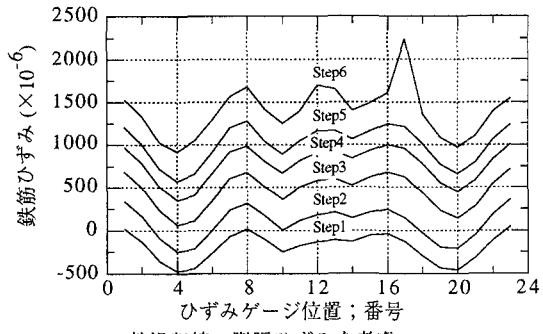
(2) 平均鉄筋ひずみの挙動

式(2)の ϵ_{s2} 、式(3)の $\epsilon_{s,ave}$ に引張荷重を考慮すれば、引張荷重作用時のひずみ解放率を評価できる。

図-9～図-12は、それぞれNT, HL, HM, HHシリーズのひずみ解放率の実測値を示した。HM およびHHシリーズの図中の鉛直方向の点線は、乾燥収縮、昇温過程と載荷過程を区分するものである。



(a) 乾燥収縮、膨脹ひずみを無視；HH16-1



(b) 乾燥収縮、膨脹ひずみを考慮；HH16-1

図-8 載荷時の鉄筋ひずみの分布；HH シリーズ

HM シリーズは、昇温過程ではひび割れ安定領域に達していないので、載荷に伴ってひび割れが発生し、載荷当初のひずみ解放率(0.4.~0.6)は急速に大きくなる。一方 HH シリーズでは、昇温過程でひび割れ安定領域に達しているため、載荷に伴うひずみ解放率の変化は緩やかである。NT は当然、HL シリーズも、ひび割れ不安定領域から安定領域までのひずみ解放は、ほとんどが引張荷重によるものである。

a) 温度条件の影響について

温度条件の相違がひずみ解放率の挙動に与える影響を考察する。常温および温度条件の低い場合には、ひび割れ不安定領域のひずみ解放率の変化が階段状で、ひび割れの発生毎にひずみが急速に解放されていく（ひび割れ断面のひずみ状態に近づく）性状が観察される。しかし、温度条件の高い場合には、ひび割れ不安定領域であってもひずみ解放率の階段状の変化は認められない。鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差に起因する内部応力は自己制限的な性質を有するため、主ひび割れが発生しても急激な変形の進行を伴わないこと、鉄筋とコンクリートの境界部で微細なひび割れが形成され、これが平均ひずみの増加に徐々に寄与すること等がその理由と考えら

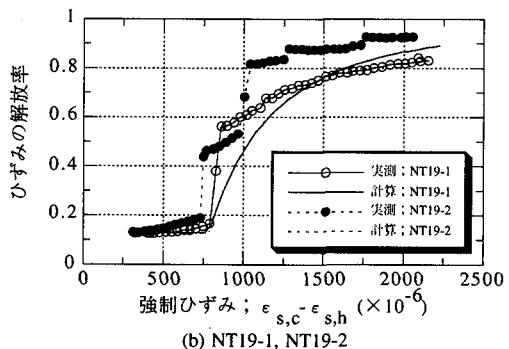
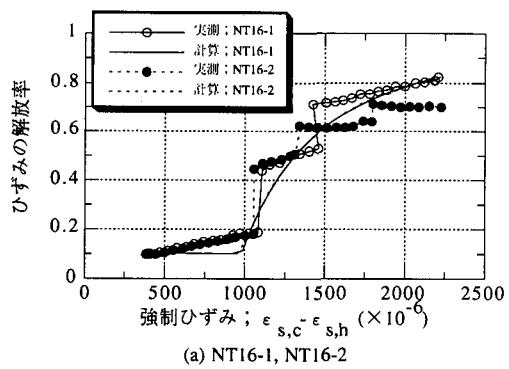


図-9 載荷時のひずみ解放率
実測値と計算値；NT シリーズ

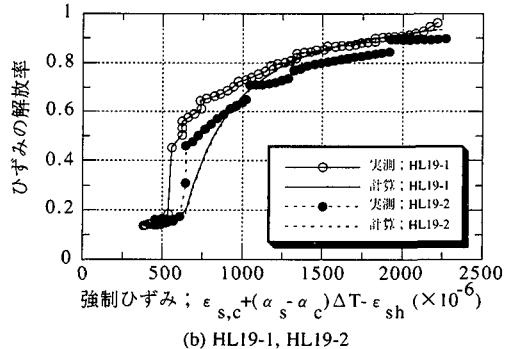
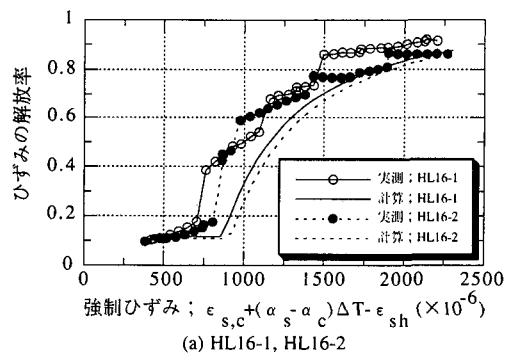


図-10 昇温時, 載荷時のひずみ解放率
実測値と計算値；HL シリーズ

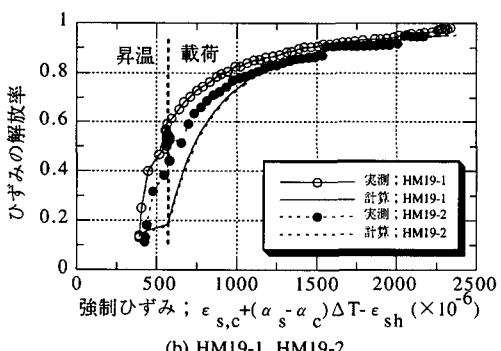
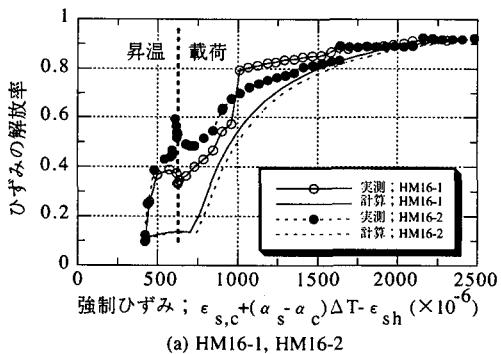


図-11 昇温時, 載荷時のひずみ解放率
実測値と計算値；HM シリーズ

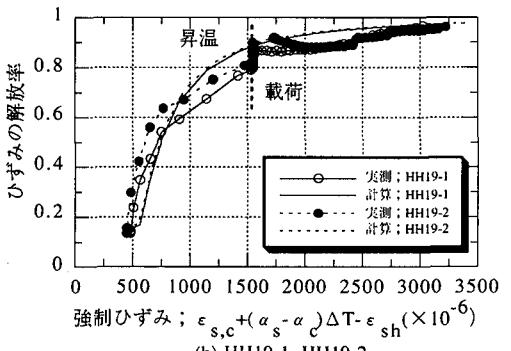
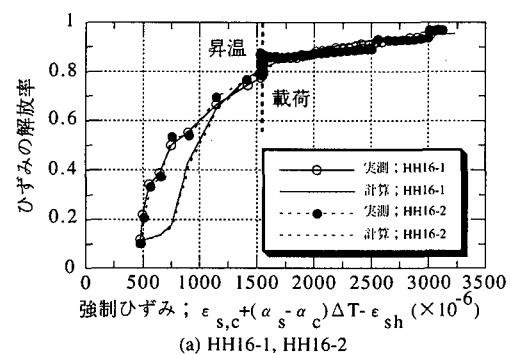


図-12 昇温時, 載荷時のひずみ解放率
実測値と計算値；HH シリーズ

れる。このように高温下における内部ひずみ、これに起因するひび割れの特性が、平均鉄筋ひずみの挙動に反映されている。

また、微細ひび割れなどによる付着性能の低下を反映して、温度条件の高い方が鉄筋降伏時のひずみ解放率は高くなる傾向がある。

b) 鉄筋比の影響について

鉄筋比の相違がひずみ解放率の挙動に与える影響を考察する。乾燥収縮ひずみと鉄筋とコンクリート間の膨張ひずみの差を合計した強制ひずみを対象としているので、同じ強制ひずみであれば、鉄筋比の大きい部材の方が鉄筋応力およびコンクリート応力のレベルが高くなる。このため、鉄筋比の大きい方が小さな強制ひずみでひび割れが発生する（表-4 参照）。また、鉄筋の径と付着性能の観点から見ると、比較的太径の鉄筋の方が付着性能が低いので、ひずみ解放率は大きい傾向がある。

本実験では、D16, D19 を使用している。ひび割れは、D19 試験体の方が低い温度で発生しており、100°Cでは、D19 の方がひび割れ本数は多かった。また、ひずみ解放率も D19 試験体の方が同一強制ひずみに対してやや高くなっている。ただし、HH シリーズでは、昇温過程でひずみ解放率に与える鉄筋径の影響が認められたが、200°Cでは鉄筋径の影響はほとんど認められなかった。つまり、200°Cでは、付着性能がかなり低下しているので、鉄筋径の影響が相対的に小さくなったものと考えられる。

6. 内部応力の評価

以上述べたように平均鉄筋ひずみは、乾燥収縮ひずみ、鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差に起因する内部応力および外力に対する鉄筋コンクリートの変形性状を評価するには有効な指標である。以下に、高温下における鉄筋コンクリートの平均鉄筋ひずみの評価方法を示す。

(1) 平均鉄筋ひずみの評価方法

従来、常温下の軸引張部材においては、式(4) に示す CEB マニュアルの平均鉄筋ひずみ評価式の適用性が良好で、適用実績も多い。この式は、ひび割れ発生後の平均鉄筋ひずみは全断面ひずみとひび割れ断面ひずみの中間の値であって、作用外力の増加に伴い、放物線式にしたがってひび割れ断面の鉄筋ひずみに漸近していくことを示している⁷⁾。

$$\epsilon_{s,ave} = (1 - \zeta) \epsilon_{s1} + \zeta \epsilon_{s2} \quad (4)$$

$$\zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{s2,c}}{\sigma_{s2}} \right)^2 \quad (5a)$$

$$\zeta = 0 \quad \sigma_{s2,c} > \sigma_{s2} \quad (5b)$$

$$\epsilon_{s1} = \frac{P}{(1+np)A_c E_c} \quad (6) \quad \epsilon_{s2} = \frac{P}{A_s E_s} \quad (7)$$

ここで、P；荷重 p；鉄筋比(A_s/A_c)

A_c, A_s ；コンクリート、鉄筋の断面積

E_c, E_s ；コンクリート、鉄筋の弹性係数

n；弹性係数比(E_s/E_c)

$\sigma_{s2,c}$ ；ひび割れ発生時ひび割れ断面鉄筋応力

$\epsilon_{s2}, \sigma_{s2}$ ；ひび割れ断面での鉄筋ひずみ、応力

ϵ_{s1} ；全断面での鉄筋ひずみ

β_1 ；鉄筋の付着特性を示す係数

異形鉄筋 1.0 丸鋼 0.5

β_2 ；荷重の作用状態を示す係数

短期荷重 1.0 長期、繰り返し 0.5

先に示したように、乾燥収縮ひずみや鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差は、鉄筋コンクリートのひび割れ発生、付着性能の低下に関して、引張荷重が作用する場合と同じ影響を与える。図-13には、通常の引張荷重作用時の平均鉄筋ひずみの概念と、乾燥収縮ひずみ、鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差が作用する時の平均鉄筋ひずみの概念の類似を示した。式(4), 式(5) を乾燥収縮ひずみと膨張ひずみの差が作用する場合に適用できるよう拡張すると式(8), 式(9)となる。平均鉄筋ひずみ ($\epsilon_{s,ave}$) は引張りが正の値である。 $\beta_1 \cdot \beta_2$ については 1.0 とする。

$$\epsilon_{s,ave} = (1 - \zeta_1) \epsilon_{f1} + \zeta_1 \epsilon_{f2} - [\epsilon_{sh} + \{ \alpha_s(T) - \alpha_c(T) \} \Delta T] \quad (8)$$

$$\zeta_1 = 1 - \left(\frac{\epsilon_{f2,i}}{\epsilon_{f2}} \right)^2 \quad (9a)$$

$$\zeta_1 = 0 \quad \epsilon_{f2,i} > \epsilon_{f2} \quad (9b)$$

・昇温時；乾燥収縮ひずみと膨張ひずみ差の場合

$$\epsilon_{f1} = \frac{np[\{ \alpha_s(T) - \alpha_c(T) \} \Delta T - \epsilon_{sh}]}{1+np} \quad (10a)$$

$$\epsilon_{f2} = \{ \alpha_s(T) - \alpha_c(T) \} \Delta T - \epsilon_{sh} \quad (11a)$$

・引張荷重載荷時；乾燥収縮ひずみ、膨張ひずみ差および引張荷重の場合

$$\epsilon_{f1} = \frac{np[\{ \alpha_s(T) - \alpha_c(T) \} \Delta T - \epsilon_{sh}]}{1+np} + \epsilon_{s1} \quad (10b)$$

$$\epsilon_{f2} = \{ \alpha_s(T) - \alpha_c(T) \} \Delta T - \epsilon_{sh} + \epsilon_{s2} \quad (11b)$$

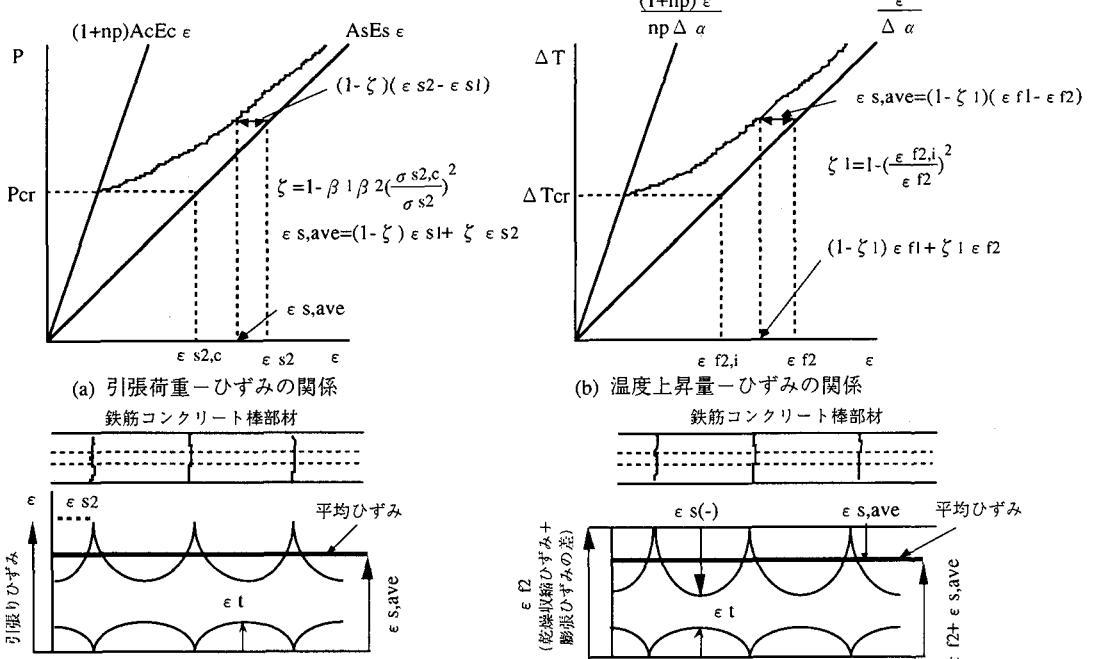


図-1-3 平均鉄筋ひずみの考え方：引張荷重のみの場合と乾燥収縮+温度膨張ひずみの場合

・昇温時にひび割れが発生する場合；

$$\epsilon_{f2,i} = -\epsilon_{sh} + \{\alpha_s(T_{cr}) - \alpha_c(T_{cr})\} \Delta T_{cr} \quad (12a)$$

・昇温後の引張荷重でひび割れが発生する場合；

$$\epsilon_{f2,i} = -\epsilon_{sh} + \{\alpha_s(T) - \alpha_c(T)\} \Delta T + \epsilon_{s2,i} \quad (12b)$$

$$\epsilon_{s2,i} = \frac{P_{cr}}{A_s E_s(T)} \quad (13)$$

ここで、 $\epsilon_{f2,i}$; ひび割れ発生時のひび割れ断面の強制ひずみ

P_a ; ひび割れ発生時引張荷重

ΔT_a ; ひび割れ発生時温度上昇量

式(8)のように平均鉄筋ひずみが得られるので、式(3)を用いてひずみ解放率を評価することができる。

(2) ひび割れ発生の評価

ひび割れの発生は、乾燥収縮ひずみと膨張ひずみの差によるコンクリートの引張ひずみ、あるいはこれらと引張荷重によるコンクリートの引張ひずみを加算したひずみが、コンクリートの限界引張ひずみを越えた時点とする。乾燥収縮および熱膨張ひずみの差による引張ひずみは式(14)、引張荷重による引張ひずみは式(15)により評価できる。

a) 昇温過程でひび割れ発生

$$\epsilon_{c,t} = \frac{np}{1+np} [-\epsilon_{sh} + \{\alpha_s(T_{cr}) - \alpha_c(T_{cr})\} \Delta T_{cr}] \quad (14)$$

b) 昇温後の引張荷重でひび割れ発生

$$\epsilon_{c,t} = \frac{np}{1+np} [-\epsilon_{sh} + \{\alpha_s(T) - \alpha_c(T)\} \Delta T] + \frac{P_{cr}}{(1+np) A_c E_c} \quad (15)$$

表-4には、コンクリートの限界引張ひずみを 100×10^{-6} (表-2参照) として計算した、各試験体のひび割れ発生時の温度と荷重を示す。ひび割れの発生は、鉄筋のひずみ分布から判断したものである。

計算結果と測定値はおおむね良好に対応していることが分かる。乾燥収縮ひずみ、膨張ひずみ差および軸引張荷重載荷条件でのひび割れ発生は、限界引張ひずみとして 100×10^{-6} の値を用い、上記の式により判定できることを示している。

(3) 鉄筋とコンクリートの物性の温度依存性

鉄筋とコンクリートの弾性係数、熱膨張係数の温度依存性は、著者の既往の研究から以下の式を用いた^{4), 8)}。

a) 弹性係数

・コンクリート

$$\frac{E_c(T)}{E_{c,n}} = -4.03 \times 10^{-3} T + 1.08$$

常温 $\leq T < 100^\circ\text{C}$ (16a)

表-4 ひび割れ発生時の温度と荷重

試験体	ϵ_{sh} $\times 10^6$	実測値		計算値		
		T ₀ °C	T _σ °C	P _σ KN	△ε _T $\times 10^6$	T _σ °C
NT16-1	360	---	---	25.5	---	21.5
NT16-2	390	---	---	23.5	---	20.3
NT19-1	400	---	---	21.7	---	18.8
NT19-2	310	---	---	22.5	---	23.3
HL16-1	420	23.2 *61.7	9.9	25	---	14.2
HL16-2	380	21.0 *61.7	13.6	23	---	17.2
HL19-1	380	23.5 *62.7	9.1	28	---	10.6
HL19-2	450	29.4 *61.7	9.8	29	---	7.3
HM16-1	420	30.4 108.8	0	218	---	2.7
HM16-2	420	26.4 102.3	0	180	---	5.3
HM19-1	390	25.0 100.0	0	167	100	0
HM19-2	430	25.9 97.7	0	148	96	0
HH16-1	480	29.3 117.6	0	249	114	0
HH16-2	490	30.7 117.3	0	244	113	0
HH19-1	490	29.4 100.2	0	97	87	0
HH19-2	450	27.8 105.9	0	121	90	0

*:引張荷重載荷中の温度（昇温時にひび割れ発生せず）

ϵ_{sh} :乾燥収縮ひずみ T₀:基準温度 T_σ:ひび割れ時温度
P_σ:ひび割れ時荷重 △ε_T:ひび割れ時の膨脹ひずみの差

$$\frac{E_c(T)}{E_{c,n}} = -1.24 \times 10^{-3} T + 0.802 \quad 100^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C} \quad (16b)$$

・鉄筋

$$\frac{E_s(T)}{E_{s,n}} = -3.30 \times 10^{-4} (T-20) + 1.00 \quad \text{常温} \leq T \leq 200^\circ\text{C} \quad (17)$$

b) 热膨張係数($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)

・コンクリート

$$\alpha_c(T) = 12.4 - 0.0330T \quad \text{常温} \leq T \leq 200^\circ\text{C} \quad (18)$$

・鉄筋

$$\alpha_s(T) = \alpha_{s,T_0} + 6.25 \times 10^{-3} (T-T_0) \quad \text{常温} \leq T \leq 200^\circ\text{C} \quad (19)$$

ここで、添字の n は、常温の値であることを、 T₀ は基準となる温度を示す。また、热膨張係数は、常温（あるいは基準となる温度）からの割線係数である。式(18)は乾燥を許容した状態での温度と膨脹ひずみの実験値を回帰した実験式で、昇温途中の乾燥収縮ひずみを含んでいる。

(4) 評価式の適用性

図-9から図-12には、式(8)および式(9)による平均鉄筋ひずみを用いて計算した強制ひずみとひずみ解放率の関係を示している。全般的には、計算値と実測値は良好に対応しているが、詳細に見ると、ひび割れ発生直後のひずみ解放率は、実測値の方が大

きい。温度条件別に以下で検討する。

a) NT シリーズ

NT シリーズは常温下での載荷であり、CEB マニュアルの式そのものを使用した。ひび割れ発生によるひずみ解放率の階段状の変化は表現できないものの、実測値と計算値は良好に一致している。

b) HL シリーズ

ひずみ解放率の変化は NT シリーズに類似しており、計算値と実測値は良好に一致している。NT シリーズと同様に、初ひび割れ発生直後のひずみ解放率の急激な変化は表現できない。

c) HM シリーズ

ひずみ解放率の増加傾向は計算値と実測値で一致している。ただし実験では、初ひび割れ発生までひずみ解放率が増加したが、計算ではこれを評価できない。このひずみ解放率の増加は、昇温時の断面内の温度勾配の影響と考えられ、本計算においては考慮外の事項である。また HM16 試験体では、実験では引張荷重載荷前にひび割れの発生が確認されたが、計算では昇温後の引張荷重の載荷によりひび割れが発生する結果となった。この理由として、①コンクリートの引張限界ひずみ（ここでは 100×10^{-6} ）の温度依存性 ②引張荷重載荷前に 100°C の定常状態で 2 日間放置したので、この間に乾燥収縮が進行した等が考えられる。他の試験体（例えば HH シリーズ）では引張限界ひずみが 100×10^{-6} で問題のないこと、また、試験体断面が小さいこと等を考慮すると、温度定常時の乾燥収縮ひずみを評価していない事が、昇温時にひび割れが発生しない計算結果となった理由と考えられる。HM16 試験体において、温度定常時の乾燥収縮によりひび割れが発生するには、計算上、概略 110×10^{-6} の乾燥収縮ひずみが生じていることになる。

d) HH シリーズ

ひずみ解放率の全般的な変化の傾向は、計算値と実測値で良好に一致している。しかし、HH シリーズにおいても、初ひび割れが発生するまでにひずみ解放率が増加しており、計算結果はこれを評価できない。ひび割れの発生に関しては、測定値と良好に一致している。

以上から、乾燥収縮ひずみ、鉄筋とコンクリートの膨脹ひずみの差に起因する内部応力（鉄筋ひずみ）の状態を推定することを目的として提案した手法は、実験結果を良好に評価することができる。但し、以下の点に関しては考慮対象外であるので、実験結果と計算結果の一部に不一致が生じた。

①昇温初期の断面の温度勾配の影響；昇温直後か

らの断面の温度勾配に起因する鉄筋の引張ひずみの増加

- ② 100℃の温度定常時に生じる乾燥収縮に起因する主ひび割れの発生；熱膨張係数に含まれる以外の乾燥収縮ひずみの発生

7.まとめ

本論文では、昇温時の鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差に起因する内部応力、およびこれによるひび割れの発生、付着性能の低下等を実験的に把握するとともに、平均鉄筋ひずみの考え方を用いて、昇温過程とこれに引き続いで載荷される引張荷重下での、鉄筋コンクリート棒部材の変形を評価する手法を提案した。本論文で得られた結論を要約すれば以下の通りである。

(1) 昇温前までのコンクリートの乾燥収縮により、鉄筋コンクリート棒部材の鉄筋には圧縮ひずみが導入される。ひび割れの発生に伴って変化する鉄筋ひずみの測定値から、導入された圧縮ひずみ量を評価し、これに基づいて棒部材に生じている乾燥収縮量を推定する方法を示した。この方法により推定した乾燥収縮量は、乾燥材齢、部材断面積等を考慮すれば、ほぼ妥当なものであると判断された。

(2) 乾燥収縮ひずみおよび昇温時の鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差に起因する鉄筋応力を測定した。100℃を越える温度条件では、この内部応力がコンクリートにひび割れを発生させ、付着性能を低下させることを確認した。このことから、乾燥収縮ひずみや昇温時の鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差は、鉄筋コンクリートの変形に対して、引張荷重と同等の影響を与える要因と考えることができる。

(3) これらの要因が鉄筋コンクリートの変形性状に与える影響の程度は、鉄筋比と温度条件に依存する。鉄筋比が大きい程、温度条件が高い程、ひび割れ発生や付着性能の低下に与える影響は大きい。例えば、本研究で用いた鉄筋比1.7～2.5%では、約 400×10^{-6} の乾燥収縮と100℃までの昇温は、鉄筋コンクリート部材に主ひび割れを発生させ、200℃までの昇温は、変形状態をひび割れ安定領域にまで至らせる。

(4) CEB マニュアルで採用されている常温下の平均鉄筋ひずみの評価式を、乾燥収縮ひずみおよび鉄筋とコンクリートの膨張ひずみの差を考慮できるように拡張した。提案した方法の適用性は、概ね良好であった。ただし、以下の2点については別途評価する必要がある。

- ① 昇温時の断面の温度勾配の影響
② 温度定常時の乾燥収縮の進行の影響

謝辞：本研究を実施するに当たり、（財）電力中央研究所構造部コンクリート工学Gr.各位の協力を得た。ここに厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 通産省資源エネルギー庁：原子力発電用コンクリート格納容器技術基準（案），1981.11.
- 2) 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、技報堂，1978.8.
- 3) 例えば、G.N.Freskakis : Behavior of Reinforced Concrete at Elevated Temperatures, Civil Engineering and Nuclear Power, vol.1, ASCE National Convention, 1980.
- 4) 金津努、青柳征夫、大沼博志、中野毅弘、遠藤達巳：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, pp.71-81, 1986.5.
- 5) 土木学会 コンクリート標準示方書 設計編, 1996.3.
- 6) 森本敏幸、林静雄、吉田俊夫、黒正清治：押込みと引抜きを同時に受けるはり主筋の付着性状に関する実験研究、日本建築学会論文集、No.322, pp.52-63, 1982.12.
- 7) Comite Euro-International Du Beton(CEB): CEB Design Manual on Cracking and Deformations, 1985.
- 8) 金津努、中野毅弘、遠藤達巳：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—その2—RC部材の昇温に伴う変形の評価方法、電力中央研究所研究報告、No.385038, 1986.2.

(1997.2.10受付)

A STUDY ON THE ESTIMATION METHOD OF INTERNAL STRESSES
CAUSED BY THE DIFFERENCE OF THERMAL EXPANSION COEFFICIENTS
BETWEEN CONCRETE AND REINFORCEMENT
AT ELEVATED TEMPERATURES

Tsutomu KANAZU

When a reinforced concrete member is exposed to high temperature conditions over 100°C, tensile strain occurs in the concrete and compressive strain occurs in reinforcements due to a difference of thermal expansion coefficients between concrete and reinforcement. Its mechanism is the same as that of restrained stress caused by drying shrinkage of concrete; tensile stress occurs in the concrete because drying shrinkage strain is restrained by reinforcements, but there is a different point that the phenomenon at a high temperature condition includes the change of mechanical properties of concrete and reinforcement.

In the study, the phenomenon is measured in the experiments and is clarified quantitatively. Moreover, the estimation method, which is derived from expanding the equation of average strain of reinforcement in the CEB Design Manual, is suggested and is verified by the comparison with the experimental results.