

[109] 温度勾配を受ける鉄筋コンクリート部材の鉄筋応力度とひびわれ幅の評価

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 佐 藤 良 一 (防衛大学校)

1 まえがき

コンクリート製原子炉格納容器では、原子炉発電所通常運転時および事故時に容器壁内外面間に生ずる温度差が、設計上鉄筋量を決定する1つの大きな要因となっている。また、原子炉格納容器は機能上厳しい気密性が要求される構造物であることから、従来の鉄筋応力度を制限する応力設計ばかりでなく、使用性能の面から発生するひびわれの幅や壁断面への貫入深さについても制限を与えるような合理的な設計法を採用する必要がある。以上のような観点に立って、原子炉格納容器の温度荷重の合理的な評価方法について検討することを目的として、円筒部分をモデル化した鉄筋コンクリートはり部材(以下RC部材)に温度勾配を賦与し、曲げ変形拘束試験を実施した。本報告では温度差と鉄筋応力度ならびにひびわれ幅の関係について検討し、さらに既往のRC部材の剛性評価式およびひびわれ幅算定式に基づいて温度拘束モーメント(以下温度荷重)ならびにひびわれ幅を計算した結果と実験結果を比較し、これら既往の式の適用性について考察を加えた。

2 実験概要

曲げ変形拘束試験に用いた試験体は、断面20×40cm長さ380cm試験区間210cmのものである。試験パラメータは鉄筋比(0.57%と1.13%)軸圧縮応力(0kg/cm²と50kg/cm²)温度差(0℃~100℃)で合計4体である。表1に各試験体の諸元を示した。温度勾配および拘束曲げモーメントの賦与方法は図1に示すとおりである。また、各試験体に負荷した温度差および外力モーメントのサイクルは図2に示すとおりである。試験体はすべての試験サイクル終了後最大温度勾配を賦与した状態で曲げ破壊させた。

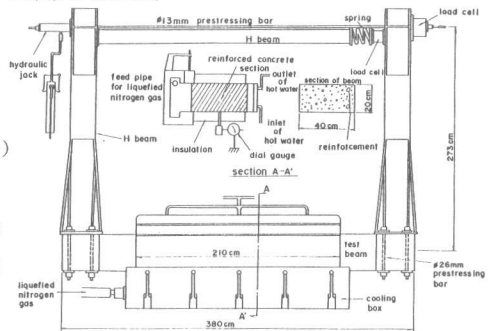


図-1 温度勾配賦与試験装置

3 温度荷重の評価方法¹⁾

温度荷重は全荷重が作用している状態でのRC部材の平均剛性に支配され、また平均剛性は作用している全荷重の大きさに依存するという相互依存的な性質のある荷重である。したがって、温度荷重と外力モーメントの作用下での平均剛性を評価するには、くり返して計算を行なう必要がある。本研究では賦与温度が-10℃~90℃であるため、RC部材の物性変化を無視して実験結果を整理した。

外力モーメントが作用している状態で温度荷重が負荷される場合を考えると、温度荷重の増加に伴って部材の有する平均剛性が徐々に低下してゆくと、先行して作用している外力モーメントによる変形曲率が進行してゆく。したがってある温度勾配状態に到達した時には、みかけ上の変形曲率は最初の変形曲率に温度荷重の増加に伴う変形増分が加えられたものとなる。この時の平均剛性は次のように与えられる。(図3)

$$(EI)_{ave} = (M_{ext} + M_{\Delta T}) / (\phi_{ext} + \Delta\phi_{ext} + \phi_{\Delta T})$$

ここに、 M_{ext} : 外力モーメント、 $M_{\Delta T}$: 温度拘束モーメント、 ϕ_{ext}

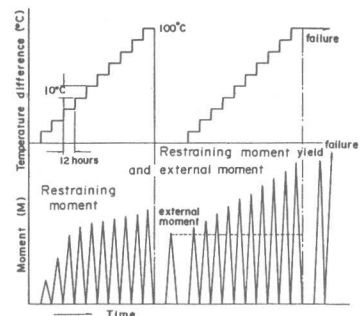


図2 温度差とモーメント載荷サイクル

表-1 試験体の諸元

Specimens	Percentage of steel (%)	Axial compressive stress (kg/cm ²)	Compressive strength of concrete (kg/cm ²)	Modulus of elasticity (x10 ⁸ kg/cm ²)
H-1	0.57	0	557	3.75
H-2	1.13	0	508	3.24
H-3	0.57	50	550	3.72
H-4	1.13	50	567	3.45

：外力モーメントにより生ずる曲率， $\Delta\phi_{ext}$ ：温度拘束モーメント $M_{\Delta T}$ により生ずる曲率， $\phi_{\Delta T}$ ：温度差 ΔT に相当する拘束変形曲率。

実験ではある温度勾配状態における全モーメント荷重(M)－曲率(ϕ)関係に基づいて、上述した操作で図3のように作図し温度荷重と平均剛性を求めている。

既往の剛性評価式よりM－ ϕ 曲線が与えられる場合においても同様な考え方に基づき、ある温度勾配状態での温度荷重と平均剛性を算出している。この時、収束精度は外力モーメントで制御し0.5%以内に抑えている。(図3)

4 実験結果の検討

i) 鉄筋応力度 図4は温度差と鉄筋応力度の関係を、温度荷重のみが作用した場合と外力モーメントと温度荷重の両方が作用した場合について示したものである。温度荷重のみが作用した場合、軸力のないH-1, H-2では約40℃の温度差、軸力のあるH-3, H-4では60～70℃の温度差でひびわれが発生した。これは、部材引張線コンクリートの引張ひずみに換算すると約 200×10^{-6} のひずみ量に相当するものである。ひびわれ発生直後に生じている鉄筋応力度は、それ以降の温度勾配の増加に対してもほぼ一定の値を保っており、ひびわれの発生および進展が拘束変形を吸収し、温度荷重を緩和している様子が認められる。このことは、温度荷重が支配的なRC部材では温度拘束によるモーメントをひびわれ発生時のモーメントとし、作用する温度差にかかわらず一定であると考えて実用上差支えないことを示唆している。²⁾

各試験体の鉄筋応力度は、軸力のない場合には鉄筋比の相違により大きく異なっているが、軸力のある場合にはほとんど差がない。これは、100℃程度の温度差による温度荷重に対しては 50 kg/cm^2 の軸圧縮応力による抵抗モーメントの占める割合が大きく、鉄筋による抵抗モーメント成分が小さいため、鉄筋比の相違が鉄筋応力度に顕著に影響しないことが原因である。

外力モーメントと温度荷重が作用した状態においては、100℃までの温度差の増加に伴う鉄筋応力度の増加はH-3, H-1, H-4, H-2の順にそれぞれ 2100 kg/cm^2 , 1700 kg/cm^2 , 1400 kg/cm^2 , 1200 kg/cm^2 である。一般に、鉄筋量の多い試験体の方がひびわれ発生後も剛性は大きいので生ずる温度荷重も大きくなる。しかし鉄筋量の差ほど温度荷重には差が生じないので、鉄筋応力度は鉄筋量の少ない試験体の方が大きい。また、軸力のない場合に比べて軸力のある場合の鉄筋応力度の増加割合が大きいのは、軸力のある場合には全モーメントが増加するにしたがってひびわれ断面の中立軸位置が圧縮縁側へ移動するため、同一外力モーメントに対する鉄筋応力度は温度荷重の増加とともに増大してゆくことによるものである。このことを考慮して100℃の温度差で温度荷重のみを負担している鉄筋応力度を示せば、H-1, H-2, H-3, H-4でそれぞれ 1700 kg/cm^2 , 1200 kg/cm^2 , 1200 kg/cm^2 , 850 kg/cm^2 である。この結果は、温度荷重のみが作用する場合と同様に外力モーメントと温度荷重が作用する場合にも、軸圧縮応力は温度荷重により発生する鉄筋応力度を抑制する効果のあることを示している。

ii) ひびわれ幅 ひびわれ幅は、実験で得られた各温度差でのモーメント

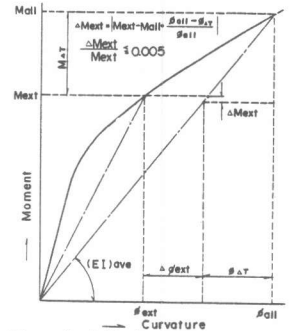


図3 温度拘束モーメントの基本的な考え方

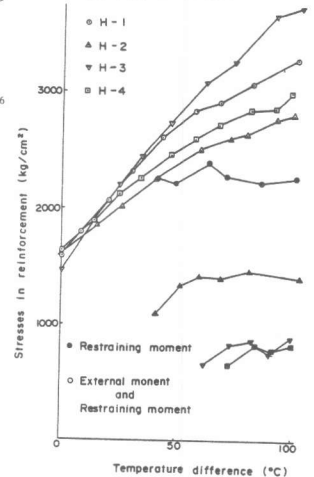


図4 温度差と鉄筋応力度の関係

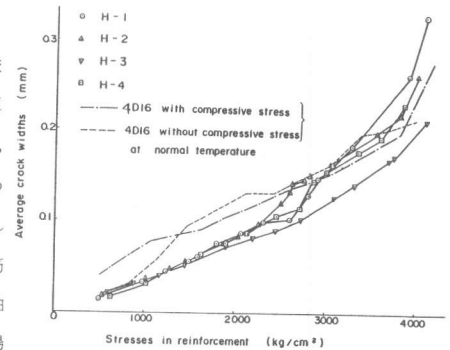


図5 鉄筋応力度と平均ひびわれ幅の関係

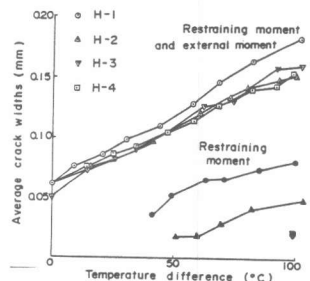


図6 温度差と平均ひびわれ幅の関係

とひびわれ幅の曲線上に温度荷重と外力モーメントの全モーメントをとり、この荷重に対応する点の値を読みとって求めている。図5、6はそれぞれ鉄筋応力度と平均ひびわれ幅および温度差と平均ひびわれ幅の関係を示したものである。図5からわかるように、H-3のひびわれ幅はやや小さめであるが、軸力の有無、鉄筋比の大小に拘らず鉄筋応力度と平均ひびわれ幅の関係は同じである。また、常温での結果も併せて示したが、ひびわれ幅は温度勾配下における試験体とほぼ同じであることがわかる。これは、100℃までの温度領域で温度荷重が作用するRC部材では、鉄筋応力度と平均ひびわれ幅の関係は外力モーメントと温度荷重の相互の大小関係に拘らず、常温の場合と同じであると考えるよいことを示している。

図6において、温度荷重のみが作用した場合約100℃の温度差ではひびわれの発生が過渡的な段階にあるため、ひびわれ幅はそれほど大きな値にはならず、軸力のないH-1、H-2でそれぞれ0.08mm、0.05mm、軸力のある試験体では0.02mmと非常に小さな値であった。したがって、温度荷重が支配的である場合にはひびわれ幅に対する特別な配慮の必要はないと考えられる。

一方、外力モーメントが組み合わされてひびわれが安定状態に達するような荷重段階では、温度差の増加とともにひびわれ幅は直線的に増加してゆく。外力モーメントが温度差0℃で1600 kg/cm²の鉄筋応力度に相当する本実験の場合、100℃の温度差の増加により外力モーメントのみが作用している時の平均ひびわれ幅の2.5～3.0倍の0.15mm～0.18mmとなっている。これは図4に示した鉄筋応力度の温度変化に伴う挙動に対応した変化である。したがって先に述べたように、外力モーメントと温度荷重の相互の大小の関係に拘らず、適切に温度荷重を評価して鉄筋応力度を算定すれば、ひびわれ幅は常温下の場合と全く同じに扱うことができると考えられる。

5 既往の剛性評価式による鉄筋応力度の評価

100℃程度までの温度領域では、コンクリートの物性が温度変化に対してあまり変化しないことを考えると、常温下でRC部材の剛性を評価するのに優れた適用性を示す既往の剛性評価式を、この温度領域での温度荷重を評価するために用いることができる。ここではACI基準式³⁾、CEB規準式⁴⁾およびRao-Aoyagi式⁵⁾を用いて、温度差と鉄筋応力度の関係について計算した値と実験値およびひびわれ断面の剛性を用いた場合の計算値を図7、8、9、10に示した。図からわかるようにH-1のACI基準式による計算値以外は各式とも非常によく実験値を評価している。ACI基準式は降伏荷重に対するひびわれ発生荷重の比が比較的大きい場合、つまり軸力がなく鉄筋比の小さい場合には式の性質上温度荷重を大きく、したがってこれにより生ずる鉄筋応力度を過大に評価するものである。

実際の設計という観点にたてば、温度荷重を評価するために計算の

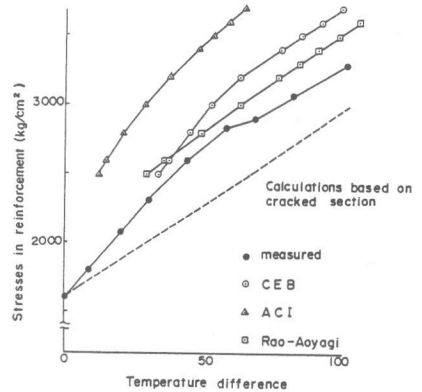


図7 温度差と鉄筋応力度の関係：H-1

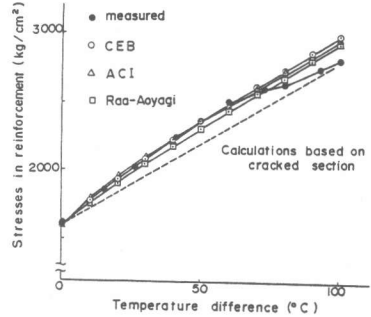


図8 温度差と鉄筋応力度の関係：H-2

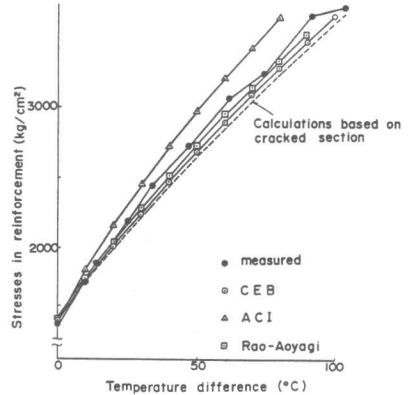


図9 温度差と鉄筋応力度の関係：H-3

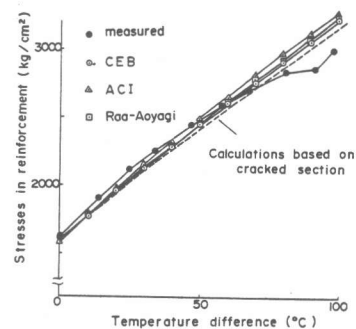


図10 温度差と鉄筋応力度の関係：H-4

簡単なひびわれ断面の剛性を適用することが考えられる。本実験結果から判断すれば、ひびわれ断面の剛性の適用は軸力があり比較的鉄筋比の大きい場合には問題はないと考えられるが、それ以外の場合には温度荷重を小さく危険側に見積ることになる。したがって、平均剛性に基づいて温度荷重を評価することが必要であろう。

以上より、100℃程度までの温度領域における温度荷重を評価するには、CEB規準式あるいはRao-Aoyagi式を適用することができると考えられる。

6 既往の提案式によるひびわれ幅の評価

図11, 12, 13, 14は、温度荷重の計算に5)で適用性が良好であることが示されたCEB規準の平均剛性評価式を用い、ひびわれ幅の計算には森田の提案式およびCEB規準式を用いた場合の、温度差の増加に伴うひびわれ幅の変化を実測値と比較して示したものである。

CEB規準式は鉄筋比の小さい場合には適用性に欠けるが、鉄筋比の大きい場合には良好にひびわれ幅を評価することができる。一方、森田の提案式は、CEB規準式と同様鉄筋比の大きい場合には非常によく実測値と一致し、また鉄筋比の小さい場合に対してもやや大きめの値を与え適度に安全側の評価をしていることがわかる。さらに、森田の提案式を用いて計算した平均ひびわれ間隔も、実測値と非常に一致していることが認められた。以上より、温度荷重により発現するひびわれ幅は、従来RC部材のひびわれ幅計算式として提案されている式により、良好に評価されることが明らかとなった。

7 まとめ

本実験研究より得られた結論は次のとおりである。

- 1) 温度荷重が支配的な荷重であるRC部材では、温度拘束により生ずるモーメントをひびわれ発生時のモーメントとして、作用する温度差に拘らず一定であると考えて実用上差支えない。またこの時のひびわれ幅は通常の鉄筋比の範囲内であれば相当に小さいものと考えてよい。
- 2) 温度荷重を適切に評価して鉄筋応力度を算定すれば、ひびわれ幅は常温の場合と全く同じに取り扱ってよい。
- 3) 100℃までの温度領域における温度荷重ならびにこれによって生ずるひびわれ幅は、既往の剛性評価式およびひびわれ幅算定式により良好に評価することができる。

参考文献

- 1)金津, 青柳: 低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380018, 1980.11,
- 2)P.Noakowski: Die Bewehrung von Stahlbetonbauteilen bei Zwangsbeanspruchung infolge Temperatur, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 296 1978, 3)ACI Building Code 318-77, 4)CEB/FIP Model Code For Concrete Structures, 1978, 5)青柳, 大沼: 温度勾配による鉄筋コンクリート中空円筒のひびわれ性状, セメ技XXX, 1976, 6)森田: コンクリートのひびわれ幅制限で決まる鉄筋の許容応力度, セメ技XXIII, 1969.

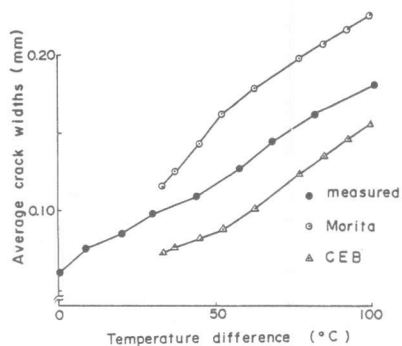


図11 温度差と平均ひびわれ幅の関係:H-1

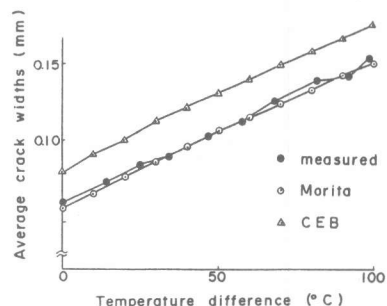


図12 温度差と平均ひびわれ幅の関係:H-2

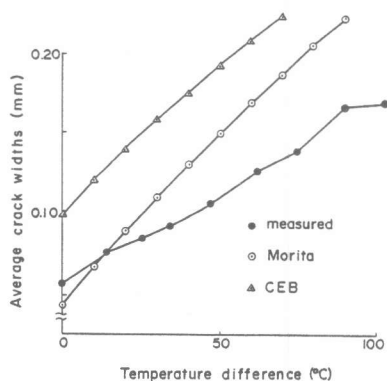


図13 温度差と平均ひびわれ幅の関係:H-3

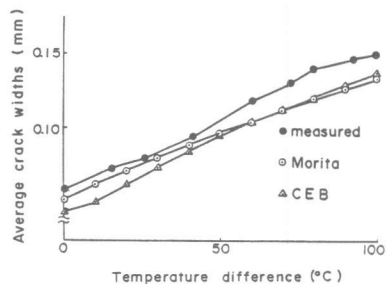


図14 温度差と平均ひびわれ幅の関係:H-4