

論文

[1075] マッシブな鉄筋コンクリート部材の最大ひびわれ幅の予測

正会員 ○佐藤良一（宇都宮大学工学部）

正会員 氏家 勳（宇都宮大学工学部）

櫻井 実（宇都宮大学工学部）

1. まえがき

温度ひびわれの制御対策としては、ひびわれ発生の制御と生じたひびわれ幅の制御の2つの考え方がある。ひびわれ発生の予測に必要な温度応力の解析方法は、コンクリートの物性値や境界条件の評価に不明確な点が残されているものの、おおむね確立された段階に達したと思われる。

一方、ひびわれ発生の防止対策を施しても構造物の条件によってはひびわれ発生を完全に防止できない場合や、温度応力に加えて外荷重を受ける鉄筋コンクリート部材のような場合にはひびわれ幅の予測が必要となる。ひびわれ幅の予測に関する研究は、ACI207委員会¹⁾、BS5337²⁾および長滝ら³⁾の実用性を重視した研究等があるが、これまで温度ひびわれ発生防止に対する検討が大勢であったため、温度応力に関する研究に比べ極めて少ないのが実情である。

温度ひびわれ幅の予測は、温度やコンクリートの諸物性値の材令に伴う変化に加えて、ひびわれ発生後では鉄筋応力度やひびわれ間隔が不明であること、ひびわれ間のコンクリートには既設の拘束体からの拘束力のほかに鉄筋の引張力も加わり、さらにその拘束力や鉄筋張力は被拘束体自身の変形に依存することなどのため極めて難しいものとなっている。したがって、ひびわれ幅の予測方法は現在のところ確立された段階には至っていないといえよう。

そこで、本研究は、材令により変化する温度およびコンクリートの諸物性値とともにひびわれ間コンクリートに及ぼす鉄筋張力と拘束体からの拘束力を考慮して導いた方程式に基づき、連続的に拘束を受ける大断面の鉄筋コンクリート部材を対象とした最大ひびわれ幅、最大ひびわれ間隔、鉄筋応力度などの予測方法を示す。

なお、ここでは温度応力の本質を損なわない範囲でできるだけ計算を単純化するため、ひびわれ発生後は直ちに最終安定温度のひびわれ幅等を求めた。

2. 解析方法

本解析方法は、ひびわれ幅算定の対象とする部位（図-1に示す斜線部、以下解析断面という）を取り出し、これを拘束力を受ける引張部材とする考え方に立脚するものであり、最大ひびわれ幅等は以下の手順で求められる。

2.1 仮定

- 1) 解析断面において鉛直方向の温度は一樣で、その温度分布は材軸方向いずれの断面においても等しい。
- 2) コンクリートのひずみと外部拘束による応力はひびわれ発生後有効引張断面においてのみ生じ、断面内で一樣である。
- 3) 有効引張断面は、ひびわれ断面ではCEB-FIPモデルコード⁴⁾に従い、領域Iでは全断面有効であるとし、両者の間の領域IIでは放物線的に変化する。
- 4) ひびわれ間中央断面に対し左右は対称とする。
- 5) 拘束度は材軸方向に対して一樣である。

2.2 コンクリートおよび鉄筋の応力とひずみ

打設後の経過日数 t_i 、ひびわれ間中央断面を原点とする座標 x における任意断面のコンクリートの全ひずみ $\epsilon_{ct,i}$ は応力 $\sigma_{c,i}$ を用い、重ね合わせ法を適用すれば次のようになる。

$$\epsilon_{ct,i} = \epsilon_{e,i} + \epsilon_{cr,i} + \epsilon_{c,\Delta T} \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_{e,i}$ は弾性ひずみ、 $\epsilon_{cr,i}$ はクリープひずみ、 $\epsilon_{c,\Delta T}$ は温度変化ひずみであり、 t_j におけるクリープ係数を ϕ_j 、弾性係数を $E_{c,j}$ とすれば、

$$\epsilon_{e,i} = \sum_{j=2}^i (\sigma_{c,j} - \sigma_{c,j-1}) / \{ (E_{c,j} + E_{c,j-1}) / 2 \}$$

$$\epsilon_{cr,i} = 1/2 \sum_{j=2}^i (\sigma_{c,j} + \sigma_{c,j-1}) f(\Delta t_j - 1)$$

$$f(\Delta t_j - 1) = (\phi_j - \phi_{j-1}) / \{ (E_{c,j} + E_{c,j-1}) / 2 \}$$

と表される。これから応力は次のようになる。

$$\sigma_{c,i} = g_1(t_i) \{ \epsilon_{ct,i} - F(t_i - 1) \} \quad (2)$$

ここで、

$$F(t_i - 1) = g_2(t_i) \sigma_{c,i-1} + \epsilon_{e,i-1} + \epsilon_{cr,i-1} + \epsilon_{c,\Delta T}$$

$$g_1(t_i) = 1 / \{ 2 / (E_{c,i} + E_{c,i-1}) + f(\Delta t_i - 1) / 2 \}$$

$$g_2(t_i) = -2 / \{ (E_{c,i} + E_{c,i-1}) + f(\Delta t_i - 1) / 2 \}$$

一方、鉄筋の全ひずみ $\epsilon_{st,i}$ は応力ひずみ $\epsilon_{s,i}$ と温度変化ひずみ $\epsilon_{s,\Delta T}$ を用い、また、応力 $\sigma_{s,i}$ 、弾性係数 E_s を用いそれぞれ次のように表される。

$$\epsilon_{st,i} = \epsilon_{s,i} + \epsilon_{s,\Delta T} \quad (3)$$

$$\sigma_{s,i} = E_s \epsilon_{s,i} = E_s (\epsilon_{st,i} - \epsilon_{s,\Delta T}) \quad (4)$$

2.3 基礎方程式の誘導

座標 x における断面A-A'のコンクリートおよび鉄筋の内力 T_c と T_s の和は、図-2に示されているように、鉄筋の張力 P_s と拘束体から受ける拘束力 P_x の和と、次式に示されるように、釣り合う。

$$T_s + T_c = P_s + P_x \quad (5)$$

ここで、

$$P_x = P_f - \int_0^x \tau f B(x) dx \quad (6)$$

であり、 τf は単位面積、単位変位量当りの拘束力であり、 $B(x)$ は τf が作用する面の有効幅である(図-1参照)。 τf はコンクリートの変位量 $u_{ct,i}$ に比例すると仮定し、比例定数を k (以下ばね定数という)とすれば次のように示される。

$$\tau f = -k \cdot u_{ct,i} = -k \int_0^x \epsilon_{ct,i} dx \quad (7)$$

式(2)および式(4)に有効断面積 $A_c(x)$ (領域Iでは $A_c(x) = A_c$)および A_s を掛ければ T_s, T_c が

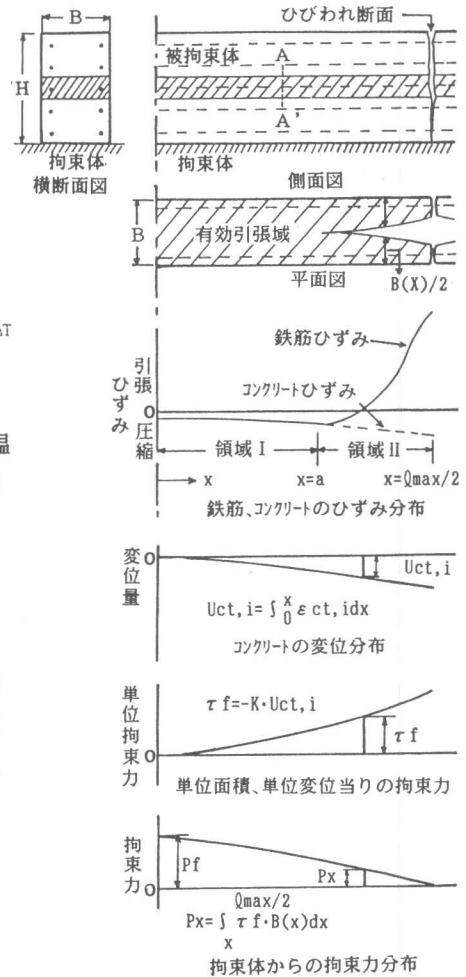


図-1 ひずみ、変位、拘束力等の分布の概念図

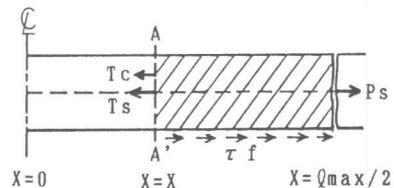


図-2 断面の釣合条件

つまり、これを式(5)に代入すれば領域 I では $\epsilon_{st,i}$ 、 $\epsilon_{ct,i}$ が成り立つから、 $\epsilon_{ct,i}$ が次のように求められる。

$$\epsilon_{ct,i} = \{Acg_1(t_i)F(t_i-1) + AsEs \epsilon_{s, \Delta T} + Ps + Pf + k \int_0^x B \int_0^x \epsilon_{ct,i} dx dx\} / \{AE\}e \quad (8)$$

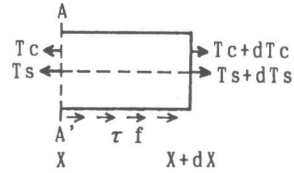


図-3 微小要素の釣合条件

ただし、 B は領域 I の有効幅(図-1参照)であり、また、 $\{AE\}e = Acg_1(t_i) + AsEs$ である。

一方、領域 II では鉄筋とコンクリートがすべっており、 $\epsilon_{ct,i}$ と $\epsilon_{st,i}$ の関係式が次のように求められる。

$$\epsilon_{st,i} = \frac{Ac(x)g_1(t_i)}{AsEs} \{ \epsilon_{ct,i} - F(t_i-1) \} + \frac{1}{AsEs} \{ Ac(x)F(t_i-1) + Ps + Pf + k \int_0^x B(x) \int_0^x \epsilon_{ct,i} dx dx \} + \epsilon_{s, \Delta T} \quad (9)$$

また、鉄筋とコンクリートとのすべり量の勾配は $d\delta x/dx = \epsilon_{st,i} - \epsilon_{ct,i}$ の関係があるから、これに式(9)を代入すれば次式が得られる。

$$\frac{d\delta x}{dx} = - \left\{ 1 + \frac{Ac(x)g_1(t_i)}{AsEs} \right\} \epsilon_{ct,i} + \frac{1}{AsEs} \{ Ac(x)g_1(t_i)F(t_i-1) + Ps + Pf + k \int_0^x B(x) \int_0^x \epsilon_{ct,i} dx dx \} + \epsilon_{s, \Delta T} \quad (10)$$

次に、座標 x における微小要素に関する釣り合い条件は、図-3に示すように、次式を満足する。

$$dT_s + dT_c + \tau f B(x) dx = 0 \quad (11)$$

上式に T_s および T_c を代入すれば、領域 I では $d\epsilon_{st,i}/dx = d\epsilon_{ct,i}/dx$ 、 $dAc(x)/dx = 0$ 、 $B(x) = B$ が成り立つので、次の $\epsilon_{ct,i}$ に関する基礎方程式が得られる。

$$\frac{d^2 \epsilon_{ct,i}}{dx^2} = \frac{kB}{\{AE\}e} \epsilon_{ct,i} \quad (12)$$

領域 II では $d^2 \delta x/dx^2 = d\epsilon_{st,i}/dx - d\epsilon_{ct,i}/dx$ が成立し、また $d\epsilon_{st,i}/dx = (Us/AsEs) \tau x$ の関係があるので、式(11)より $d\epsilon_{st,i}/dx$ と $d\epsilon_{ct,i}/dx$ の関係がわかれば、

$$\frac{d^2 \delta x}{dx^2} = \left\{ 1 + \frac{AsEs}{Ac(x)g_1(t_i)} \right\} \frac{Us}{AsEs} \tau x + \frac{1}{Ac(x)g_1(t_i)} \left[\frac{dAc(x)}{dx} g_1(t_i) \{ \epsilon_{ct,i} - F(t_i-1) \} - k \cdot B(x) \int_0^x \epsilon_{ct,i} dx \right] \quad (13)$$

の基礎方程式が最終的に導かれる。

ここで、 τx は鉄筋とコンクリートとの間の付着応力であり、一般にはすべり量とひびわれ断面からの距離により決まるとされている。また、 Us は鉄筋の周長である。

式(13)は $\epsilon_{ct,i}$ を含んでいるため、式(10)と連立すれば解くことが可能となる。

2.4 境界条件

温度ひびわれの場合、ひびわれ間隔が広く全断面有効領域が存在すること、ひびわれ間中央断面に対し左右対称であること(仮定4)、および領域 II の付着作用領域の長さ $Q_{max}/2 - a$ が未知であることなどから次のように仮定される。

$$\begin{aligned} x=0 & : \epsilon_{ct,i} = \{ \epsilon_{ct,i} \}_{x=0}, \quad d\epsilon_{ct,i}/dx = 0 \\ x=a & : \delta x = 0, \quad d\delta x/dx = 0 \end{aligned}$$

$$x=Q_{max}/2: d\delta x/dx=Ps/AsEs+\epsilon s, \Delta T-\{\epsilon ct, i\}_{x=Q_{max}/2}$$

この境界条件において、 $\{\epsilon ct, i\}_{x=0}$ は式(8)より Ps, Pf が仮定されれば定められる。また $\{\epsilon ct, i\}_{x=Q_{max}/2}$ は応力履歴とひびわれに伴う弾性回復ひずみを考慮して求めた。

2.5 変形の適合条件

鉄筋の平均ひずみ $\{\epsilon st, i\}_{av}$ は、拘束度 K_R と温度変化ひずみ $\epsilon c, \Delta T$ から求まる拘束ひずみに等しいとした。

2.6 数値解析の手順

図-4は本数値解析の手順を示したものである。最大ひびわれ間隔を求めるまでには4つの仮定が設けられたが、この図に示すように、所定の境界条件やひびわれ発生条件等を用いることにより求められた。

なお、式(10)と(13)を解けば、 δx と $\epsilon ct, i$ が得られるので、式(9)、式(2)、(3)などから任意断面の応力、ひずみ状態がわかることになる。

また、ひびわれ発生前のコンクリート応力は外部拘束応力と内部拘束応力の和とし、外部拘束応力は、拘束ひずみと実ひずみが等しい条件 $(1-K_R)\epsilon c, \Delta T = \epsilon ct, i$ を使い、これに式(2)を代入して得られる次式により求めた。

$$\{\sigma c, i\} = -g_1(t_i)[k_R \epsilon c, \Delta T + g_2(t_i)\sigma c, i-1 + \epsilon e, i-1 + \epsilon cr, i-1] \quad (14)$$

一方、内部拘束応力は、部材厚方向の温度分布を放物線と仮定し、平均温度、表面温度、中心温度を用いて、これから求めた温度変化ひずみを式(2)に代入して求めた。

3. 材料特性

材令とともに変化するコンクリートの引張強度、弾性係数およびクリープ係数は、有効材令を用いて評価した^{5)・6)}。

付着応力-すべり量曲線の形は六車・森田らの式⁷⁾を用い、付着強度は $\tau_{max}(x)=140\text{kgf/cm}^2$ 、付着強度の時のすべり量は $\delta_{max}(t_i)=0.4\text{mm}$ とした。付着クリープは、 $\delta_{max}(t_i)$ がひびわれ発生後時間経過とともに増加するとして考慮した。ひびわれ近傍では、付着強度の低下を考慮した。これらの材料特性の取扱いの詳細は文献^{8)・9)}を参照されたい。拘束力に関するばね定数は $k=110\text{kgf/cm}^2/\text{cm}$ とした。いわゆる L/H (L : 部材長さ、 H : 部材高さ) が2のとき、この値を用いて計算した高さ中央の拘束度は0.28になりACIの値と一致した。

4. 実験値³⁾と計算値の比較

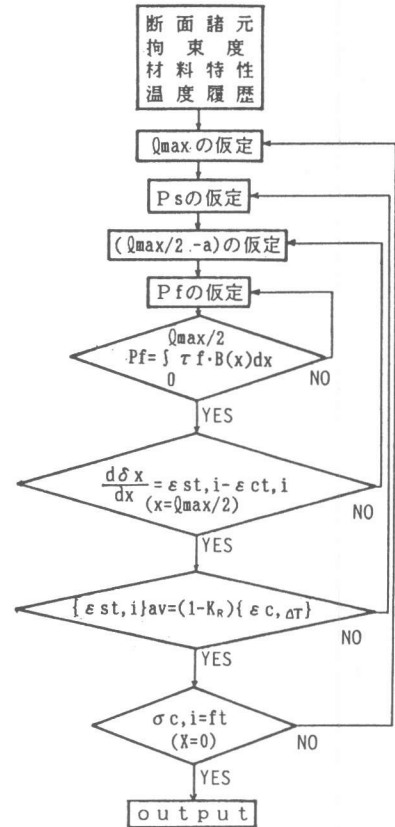


図-4 解析フローの概略図

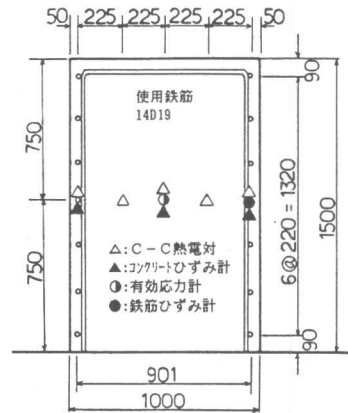


図-5 供試体の断面諸元と計測器の配置(mm)

図-5は供試体の断面諸元と計測器の配置を示したものであり、その長さは15mである。この供試体は、幅 5m、高さ1.5m、長さ15.3mの基礎コンクリートの上に打設された。ここでは、この供試体を連続拘束を受ける大断面の鉄筋コンクリート部材と想定した。解析は、高さ方向の各部位を対象とすべきであるが、本文では高さの中央部分のみを対象とした。

図-6は、高さ中央部の実測温度に基づき、厚さ方向の温度分布を放物線として求めた平均温度、中心部の温度、表面温度を示したものであり、解析ではこれらの値を用いた。

次に、図-7は、前述の温度履歴を用いて計算した表面部、中心部の応力を実測値と比較して示したものである。なお、拘束度は実測値0.73を用いた。この図によれば、中心部の応力については計算値と実測値は比較的よく一致している。また、ひびわれ発生時期も計算値の場合6.2日、実測値の場合6.8日とほぼ等しい。しかし、表面部の計算した応力は材令2日後急激に増大し、引張強度を越えた値を示している。これは表面部と中心部の温度差(材令2.7日で17.9℃)が急速に大きくなったことによるが、実際にはひびわれは発生しなかった。

図-8は材令6.2日にひびわれが発生するとして、ほぼ最終安定温度に達したと思われる材令10.7日における鉄筋のひずみ分布を最大ひびわれ間隔時と最小ひびわれ間隔時の計算値と実測値を比較したものである。ここで、最大ひびわれ間隔はひびわれ間中央断面で内部拘束が完全に発揮されるときとの応力と外部拘束応力の和が引張強度に達した時のひびわれ間隔である。鉄筋ひずみは圧縮ひずみの状態からひびわれ断面に向かって急激に増加し、かつその範囲は50cm程度であ

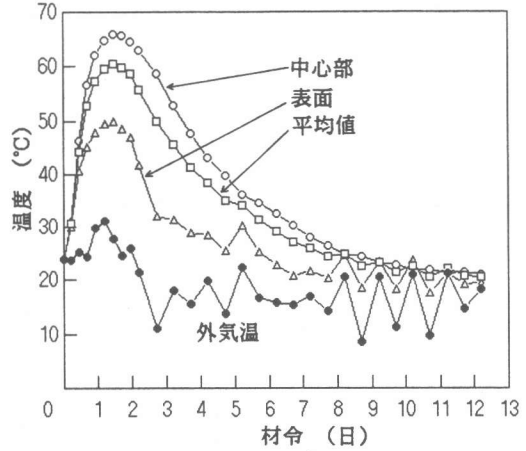


図-6 温度の経時変化

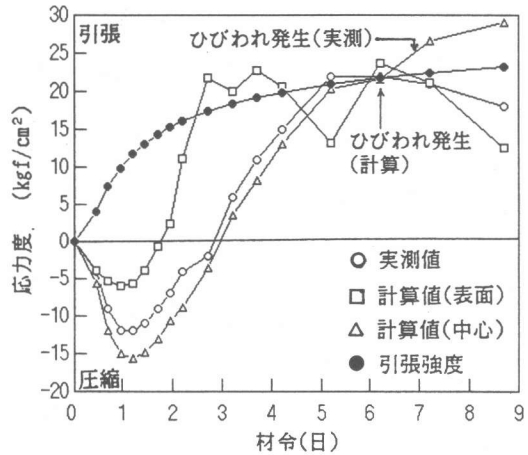


図-7 応力履歴の実測値と計算値の比較

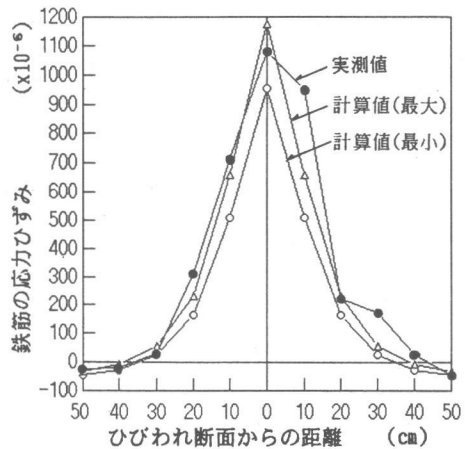


図-8 鉄筋の応力ひずみの実測値と計算値の比較

るが、計算値はこれらの現象をよく表しているといえよう。

最後に、表-1はひびわれ間隔、ひびわれ幅、鉄筋応力度について計算値と実測

表-1 実測値と計算値の比較

鉄筋比 (%)		ひびわれ間隔(cm)		ひびわれ幅(mm)		鉄筋応力度(kgf/cm ²)	
		最大	最小	最大	最小	最大	最小
0.26	計算値	721	361	0.36	0.29	2433	1964
	実測値	380	240	0.40		2266	
0.67	計算値	600	300	0.25	0.20	1745	1396

値を比較して示したものである。実測値が、最大ひびわれ間隔時に求めた値と最小ひびわれ間隔時に求めた値の間であれば、計算値の妥当性を裏付けることを意味する。ひびわれ間隔の場合は、実測ひびわれ間隔の最小値が240cmと計算値の予測範囲を下回っており、計算値はひびわれ間隔を大きく評価しているといえる。これは連続拘束を線形ばねとモデル化し、L/H=2の時の拘束度からのみ設定されたばね定数を用いていることなどにその原因があると思われる。ひびわれ幅はこれと異なり、計算値と実測値は比較的近い値を示してはいるが、計算値は実測値を小さめに評価する傾向がある。一方、鉄筋応力度は計算値の最大値と最小値の間にあり、ほぼ妥当な評価がなされているといえる。表-1には鉄筋比以外は同一条件で鉄筋比が0.67%の場合の計算値も示してあるが、鉄筋比の増大により、ひびわれ間隔、ひびわれ幅、鉄筋応力度がいずれも小さくなる傾向は示されている。しかし、これまでの実験結果等をみればその効果は小さくでていると思われる。これについては今後さらに検討が必要である。

5. まとめ

連続拘束を受ける大断面の鉄筋コンクリート部材の最大ひびわれ間隔と幅および鉄筋応力度の予測方法を提示した。実験値との比較は一例のみで極めて少ないが、ひびわれ間隔の場合計算値は実測値より大きく、しかしひびわれ幅および鉄筋応力度の場合は比較的よく一致することが明らかとなった。

今後多くの実験値と比較してその適用性、問題点等を明かにし、本方法の改善を計りたい。

<参考文献>

- 1)ACI Committee 207:Effect of Restraint, Volume change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, Jour. of ACI, 1973
- 2)BSI:Code of Practice for the Structural Use of Concrete for Retaining Aqueous Liquid, London, BS5337, 1976
- 3)長滝重義他：水和熱に起因する温度ひびわれ幅の実用算定法、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、1985
- 4)CEB-FIP:Model Code for Concrete Structures, 1978
- 5)岩城良他：セメントの水和熱に起因する温度応力解析手法に関する研究、鹿島建設技研年報第28号、1980
- 6)長滝重義、佐藤良一：水和熱に起因する温度ひびわれ幅の予測について、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986
- 7)六車照他：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集、1967
- 8)宮口竹彦他：マスコンクリートのひびわれ幅の予測に関する検討、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集第5部、1986
- 9)首都高速道路公団：マスコンクリートのひびわれ制御実験報告書、1985