

論文

[1076] マスコンクリートの温度ひびわれ幅算定方法に関する研究

正会員 ○賀茂 友裕 (名古屋大学大学院)

正会員 田辺 忠顕 (名古屋大学工学部)

1. はじめに

近年、構造物の大型化、多様化に伴って、鉄筋コンクリート(RC)あるいはプレストレストコンクリート(PC)であっても、温度応力によるひびわれが問題となるケースが著しく増加しており、温度ひびわれに対する関心が高まっている。また「マスコンクリートのひびわれ制御指針」により温度ひびわれを目地や配筋により積極的に制御していこうとする考え方が示されたこともあって、ひびわれ制御対策の定量化が重要な課題となっている。

これまで温度ひびわれに関する研究は数多く行われてきたが、それらはひびわれ制御の定性的な側面について論じたものが多く、その効果を定量的に把握するための研究、特にひびわれ制御には不可欠である、ひびわれ幅の予測方法に関する研究は、その重要性にもかかわらず非常に少ない。

代表的な研究として諸外国においては、ACI 207委員会の方法<sup>(1)</sup>、BS 5337<sup>(2)</sup>の方法が、またわが国においては、長滝らの方法<sup>(3)(4)</sup>、小野らの方法<sup>(5)</sup>が挙げられるが、いずれの方法もその精度またはモデル化への仮定に問題を含んでおり、確立された方法がないのが現状である。

そこで本研究では、温度応力簡易算定法の一つである Compensation Plane 法<sup>(6)</sup>の基本仮定である平面保持則を、ひびわれ断面の鉄筋ひずみおよび周辺部のコンクリートひずみに対して仮定することによって得られた温度ひびわれ幅算定方法を提案する。またその妥当性を有限要素解析結果及び実測結果との比較により検証する。即ち、本提案方法はCP法、CL法による温度応力算定法の拡張と言える。しかし本手法の適用範囲は、必ずしも壁状のものに限らない。

2 温度ひびわれ幅算定方法

対象とする構造物は、代表的に図1に示すような基礎コンクリート上に新しく打設された壁状構造物とする。この構造物のほぼ中央に温度応力による貫通ひびわれが生じた場合を考え、次のような4つの仮定をする。

- <1> ひびわれ断面の鉄筋ひずみ  $\Delta \epsilon_s(x, y)$  および、ひびわれ周辺のコンクリートひずみ  $\Delta \epsilon_s(x, y)$  は高さ方向に直線分布をしている。
- <2> ひびわれ断面を中心にある区間では鉄筋とコンクリートの付着は無い。しかしそれ以降の区間では両者は完全に付着している。この付着のない部分の長さを  $l_s$  とする。
- <3> ひびわれ断面を中心に、新コンクリートと基礎コンクリートの打継面が一部剥離している。

- <4> コンクリート応力の減少はある領域(図-1の  部分、以下この部分をひびわれ

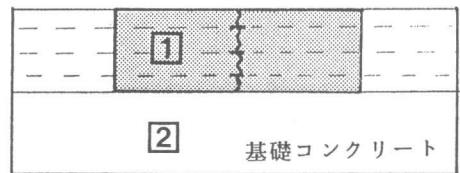


図-1 対象とする壁体構造物

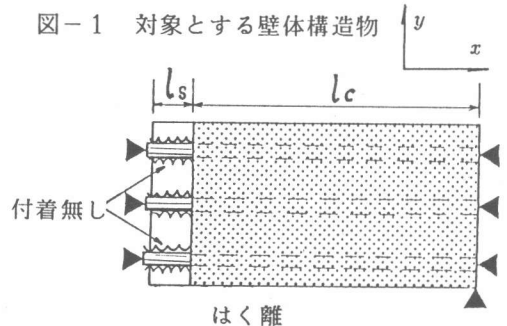


図-2 ひびわれ影響領域のモデル化

影響領域と呼ぶ)において平均的に生じ、その他の領域では生じない。この領域の長さを  $l_c$  とする。

以上の仮定のもとにひびわれ断面の鉄筋ひずみおよびひびわれ幅を算定するわけであるが、その手順は以下の通りである。

[ I ] ひびわれ発生時のひびわれ幅の算定

①まずひびわれ影響領域のみに着目し、それ以外の部分は固定されているものとして、ひびわれ断面のコンクリート応力の解放によるひずみ増分を求める。ここでは図-2のように、ひびわれ影響領域の両端が固定端となっている状態を考えているわけである。

全ひずみの直線分布の仮定から

$$\Delta \epsilon_s(x, y) = \Delta \bar{\epsilon}_s + \Delta \phi_s(y - y_g) \quad (1)$$

$$\Delta \epsilon_c(x, y) = \Delta \bar{\epsilon}_c + \Delta \phi_c(y - y_g) \quad (2)$$

ここに  $y_g$  ; 新しく打設されたコンクリートの重心

$\Delta \epsilon_s, \Delta \epsilon_c$  ; 鉄筋およびコンクリートの重心位置でのひずみ増分

$\Delta \phi_s, \Delta \phi_c$  ; 鉄筋およびコンクリートひずみ分布の傾きの増分

ひびわれ後の力の釣合を考えることにより次式を得る。

$$\int_{A_c} \sigma_c^{(0)}(x, y) dA + E_c \int_{A_c} \Delta \epsilon_c(x, y) dA = \int_{A_s} \sigma_s^{(0)}(x, y) dA + E_s \int_{A_s} \Delta \epsilon_s(x, y) dA \quad (3)$$

$$\int_{A_c} \sigma_c^{(0)}(x, y)(y - y_g) dA + E_c \int_{A_c} \Delta \epsilon_c(y - y_g) dA = \int_{A_s} \sigma_s^{(0)}(y - y_g) dA + E_s \int_{A_s} \Delta \epsilon_s(y - y_g) dA \quad (4)$$

ここに  $\sigma_s^{(0)}, \sigma_c^{(0)}$  ; ひびわれ直前の鉄筋およびコンクリート応力

$E_s, E_c$  ; 鉄筋およびコンクリートのヤング率

$A_s, A_c$  ; 鉄筋およびコンクリート断面積

また鉄筋を含む任意の高さ  $y$  における変位の適合条件から

$$l_c \Delta \epsilon_c(x, y) + l_s \Delta \epsilon_s(x, y) = 0 \quad (5)$$

式 (1) (2) を式 (5) に代入し、 $y$  が任意であることを考えると

$$l_c \Delta \bar{\epsilon}_c + l_s \Delta \bar{\epsilon}_s = 0 \quad (6)$$

$$l_c \Delta \phi_c + l_s \Delta \phi_s = 0 \quad (7)$$

式 (1) を式 (3) (4) に代入し、式 (6) を用いて  $\Delta \bar{\epsilon}_c, \Delta \phi_c$  を消去すると次式を得る。

$$\begin{Bmatrix} \Delta \bar{\epsilon}_s \\ \Delta \phi_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N_0 \\ M_0 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{ここに } a_1 = \frac{l_s}{l_c} E_c A_c + E_s A_s, \quad a_2 = E_c \frac{l_s}{l_c} \int_{A_c} (y - y_g) dA + E_s \int_{A_s} (y - y_g) dA$$

$$a_3 = E_c \frac{l_s}{l_c} \int_{A_c} (y - y_g)^2 dA + E_s \int_{A_s} (y - y_g)^2 dA$$

$$N_0 = \int_{A_c} \sigma_c^{(0)}(x, y) dA - \int_{A_s} \sigma_s^{(0)}(x, y) dA \quad M_0 = \int_{A_c} \sigma_c^{(0)}(x, y)(y - y_g) dA - \int_{A_s} \sigma_s^{(0)}(y - y_g) dA$$

$l_s/l_c$  は本算定法のパラメータであって、特にひびわれ発生時のこの値を  $(l_s/l_c)_{cr}$  とかく。

②次に固定していた部分の力を解放し、その作用によるひずみ増分を求める。

C P 法では地盤の拘束効果は、外部拘束軸力  $N_R$ 、外部拘束曲げモーメント  $M_R$  として評価される。新コンクリートのヤング率が時間と共に変化するので軸力増分  $\Delta N_R$ 、曲げモーメント増分  $\Delta M_R$  の作用点もそれに伴って変化するわけであるが、近似的にひびわれ直前の重心位置に  $N_R, M_R$  が作用するものとする。外部拘束力を含めれば断面力は常に釣合っていなければならないからこの時のひずみ増分を  $\Delta \epsilon(x, y)$  とすれば次式が成り立つ。

$$\int_{A_s} \sigma_s(x, y) dA + E_s \int_{A_s} \Delta \epsilon(x, y) dA + \int_{A_f} \sigma_c^{(0)}(x, y) dA + E_f \int_{A_f} \Delta \epsilon(x, y) dA = N_R \quad (9)$$

$$\int_{A_s} \sigma_s(x, y)(y - y_g) dA + E_s \int_{A_s} \Delta \epsilon(y - y_g) dA + \int_{A_f} \sigma_c^{(0)}(y - y_g) dA + E_f \int_{A_f} \Delta \epsilon(y - y_g) dA = M_R \quad (10)$$

このひずみ増分に対しても平面保持則を仮定しているから、

$$\Delta \epsilon(x, y) = \Delta \bar{\epsilon} + \Delta \phi(y - y_g) \quad (11)$$

式 (9) (10) および (11) から、

$$\Delta \bar{\epsilon} = \frac{N_R - (\int_{A_f} \sigma_c^{(0)}(x, y) dA + \int_{A_s} \sigma_s^{(0)}(x, y) dA)}{E_s A_s + E_f A_f} \quad (12)$$

$$\Delta \phi = \frac{M_R - (\int_{A_f} \sigma_c^{(0)}(x, y)(y - y_g) dA + \int_{A_s} \sigma_s^{(0)}(x, y)(y - y_g) dA)}{E_f \int_{A_f} (y - Y_G)^2 dA + E_c \int_{A_c} (y - Y_G)^2 dA} \quad (13)$$

$$y_g = \frac{E_s A_s y_{gs} + E_f A_f y_{gf}}{E_s A_s + E_f A_f} \quad (14)$$

ここに、 $y_{gr}$  ; 基礎コンクリートの重心 ;  $E_f, A_f$  ; 基礎コンクリートのヤング率及び断面積  
 ①+②により、ひびわれ直後の鉄筋ひずみ増分が計算される。するとひびわれ幅は次式で計算できる。

$$w = 2l_s \epsilon_s \quad (15)$$

〔Ⅱ〕 ひびわれ発生後の温度変化に対応するひびわれ幅の変動の算定

①' 温度変化 $\Delta T$ が生じた場合も同様に、ひびわれ影響領域部分のみを考え、ひずみ増分を求める。この時の鉄筋及びコンクリートのひずみ増分を $\Delta \epsilon_s(x, y)$   $\Delta \epsilon_c(x, y)$ とすれば、温度変化後の軸力及び重心 $y_g$ におけるモーメントの釣合から次式が成り立つ。

$$E_c \int_{A_c} \{\alpha \Delta T(x, y) - \Delta \epsilon_c(x, y)\} dA = E_s \int_{A_s} \{\alpha \Delta T(x, y) - \Delta \epsilon_s(x, y)\} dA \quad (16)$$

$$E_c \int_{A_c} \{\alpha \Delta T(x, y) - \Delta \epsilon_c(x, y)\} (y - y_g) dA = E_s \int_{A_s} \{\alpha \Delta T(x, y) - \Delta \epsilon_s(x, y)\} (y - y_g) dA \quad (17)$$

式 (11) が同様に成り立つので、式 (16) (17) とから結局式 (8) と同じマトリクス を用いて  $\Delta \epsilon_s(x, y)$  が次式により求められる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta \bar{\epsilon}_s \\ \Delta \phi_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N_{\Delta T} \\ M_{\Delta T} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

$$\text{ここに } N_{\Delta T} = E_s \int_{A_s} \alpha \Delta T(x, y) dA - E_c \int_{A_c} \alpha \Delta T(x, y) dA$$

$$M_{\Delta T} = E_s \int_{A_s} \alpha \Delta T(x, y)(y - y_g) dA - E_c \int_{A_c} \alpha \Delta T(x, y)(y - y_g) dA$$

この時の  $1s/1c$  を  $(1s/1c)_T$  と書き、ひびわれ発生時のそれと区別する。

②' 固定していた部分の力を解放する。

基礎コンクリートと鉄筋で構成される断面に対し CP が成り立つから、基礎コンクリート及び鉄筋の温度変化に対して次式によるひずみ増分が得られる。

$$\Delta \bar{\epsilon} = \frac{E_f \int_{A_f} \alpha \Delta T(x, y) dA + E_c \int_{A_c} \alpha \Delta T(x, y) dA}{E_f A_f + E_c A_c} \quad (19)$$

$$\Delta \phi = \frac{E_f \int_{A_f} \alpha \Delta T(x, y)(y - Y_G) dA + E_c \int_{A_c} \alpha \Delta T(x, y)(y - Y_G) dA}{E_f \int_{A_f} (y - Y_G)^2 dA + E_c \int_{A_c} (y - Y_G)^2 dA} \quad (20)$$

$$Y_G = \frac{E_f A_f y_{gf} + E_c A_c y_{gc}}{E_f A_f + E_c A_c} \quad (21)$$

ひびわれ後の拘束度は、それ以前の拘束度に比べ当然減少しているわけだが、近似的に両者を等

しいとすれば、実際に生じているひずみ増分  $\Delta \epsilon$ 、 $\Delta \phi$  は次式となる。

$$\Delta \epsilon' = (1 - R_N) \Delta \epsilon \quad \Delta \phi' = (1 - R_M) \Delta \phi \quad (22)$$

①' と ②' の手順を繰り返すことにより任意の材令の鉄筋ひずみを計算することができ、式 (15) によってひびわれ幅が計算できる。CP法の適用に当たっては、地盤を拘束体、新コンクリートと基礎コンクリートを被拘束体と考えている。

以上の計算方法に必要なパラメータは、2つの外部拘束係数  $R_N$ 、 $R_M$  と、 $1s/1c$  のみである。 $R_N$ 、 $R_M$  は、土木学会 RC 示方書の値を用いることができ、 $1s/1c$  としては次に述べるように割と狭い範囲におさまっているようである。

### 3. 数値解析モデルへの適用

#### 3. 1 有限要素法による温度ひびわれ解析

本解析は、4 角形アイソパラメトリック要素を用いた 2 次元 FEM 解析であり、応力解析においては平面応力状態を仮定している。

図-3 に示すように、ひびわれ発生とともにひびわれに直交する方向の剛性は鉄筋のみによるものとし、ひびわれに平行な方向ではそれまでの剛性を維持するとした。

また図中  $\Delta \sigma$  はひびわれによる解放応力に相当し、厳密にはひびわれ直後にこの解放応力による節点力（解放節点力）が構造系に加わるが、本解析ではひびわれ直後ではなく、次の Time Step での初期ひずみによる等価節点力に解放節点力を加えて計算を続けている。

#### 3. 2 解析モデル及び条件

解析の対象としたモデルは、4. で述べる実験の供試体と同一とし、長さ 15m、高さ 1.5m、幅 5m の基礎コンクリート上に、長さ 15m、高さ 1.5m、幅 1m の鉄筋コンクリートを打設する場合を想定した。なお地盤の影響を考慮するために、基礎コンクリートの下には長さ 21m 深さ 2.2m、幅 15m の地盤を付け加えた。要素分割及び境界条件は図-4 に示す。断熱温度上昇曲線は、単位セメント量  $300(\text{kg}/\text{cm}^3)$  に相当する  $T=33.94(1-e^{-0.8t})$  を、また新コンクリートのヤング率は  $E_c = (t \times 10^6) / (7.61 + 2.41t)$ 、基礎コンクリートおよび地盤のヤング率はそれぞれ  $300,000(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 、 $5,000(\text{kg}/\text{cm}^2)$  とした。その他の温度及び応力解析に使用した諸定数は文献(6)を参考に最も一般的な値を用いた。

新旧コンクリート境界面のはく離挙動は、今枝らの提案したバネ要素<sup>(7)</sup>によりシュミレートした。バネ定数は材令により変化することが指摘されているが、今回の解析においては一定値  $K_v = 1.0 \times 10^4(\text{kg}/\text{cm}^3)$ 、 $K_h = 1.0 \times 10^3(\text{kg}/\text{cm}^3)$  としている。

温度ひびわれは、中央の 4 要素がすべて引張応力となった材令で 4 要素全てに生じさせた。また打継面のはく離は、バネ要素下部の鉛直方向応力が  $2.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$  を越えたときはく離するとした。新旧コンクリートの打継ぎ部分の引張強度は、打継ぎ部分の表面処理の程度によって大幅に変化する。本計算に於ては、一体コンクリートの引張強度の  $1/10 \sim 1/15$  程度の打継方法で、 $2.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$  であると定めた。

#### 3. 3 解析結果

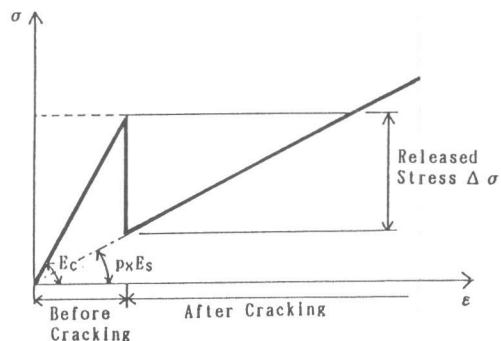


図-3 ひびわれ要素の応力-ひずみ関係

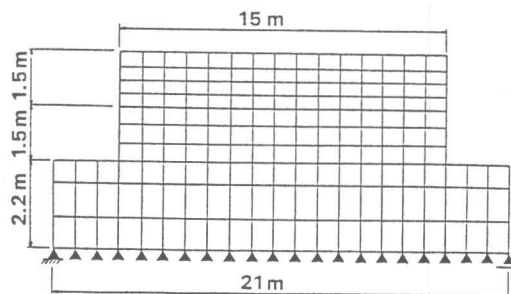


図-4 有限要素モデル

材令5日で中央の4要素がすべて引張状態となったのでこの材令で強制的にひびわれを発生させた。この時中央要素の両隣りの2つの要素(計4要素)ではく離が生じた。図-5はひびわれ断面鉄筋ひずみの高さ方向分布を示している。この図からひびわれ発生以前のひずみの直線性はもちろんのこと、ひびわれ直後および材令が経過した後も鉄筋ひずみの直線性が相当程度成り立っていることがわかる。図-6はひびわれ断面周辺のコンクリートひずみ増分の高さ方向及び長手方向の分布形状を示している。便宜上コンクリートひずみの減少を正の方向にとっている。この図から長手方向にはひびわれ断面に近いほどひずみの減少量が大きく、ひびわれ断面から離れるにつれひずみの減少量が小さくなっていくこと、およびひびわれ断面から5~6m以上離れたところではその減少量はごく小さいことが分かる。高さ方向についてみると、供試体上部から下部に向かってほぼ直線分布していることが分かる。

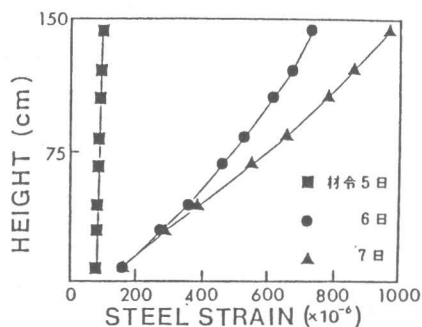


図-5 鉄筋ひずみの高さ方向分布

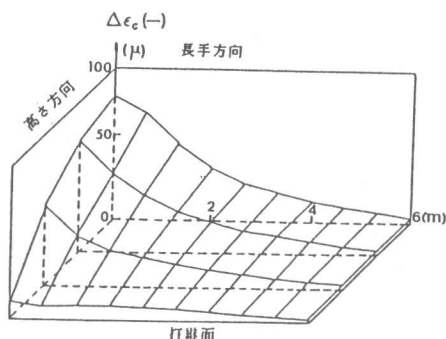


図-6 ひびわれ周辺のコンクリートひずみ増分

#### 4. 実測値と計算値の比較

計算値を比較するために参照した実験供試体は、首都高速道路公団が行ったマスコンクリート実験供試体<sup>(8)</sup>で、図-7に示す断面諸元を有し、長さは15mである。これらが、幅1m 高さ1.5m 長さ15mの基礎コンクリート上に1体ずつ打設された。比較した供試体は計4体で、鉄筋量 $p=0.27\%$ のものが2体(No. 1、No. 2)、 $p=0.28\%$ (No. 3)、 $p=0.65\%$ (No. 4)が1体ずつである。

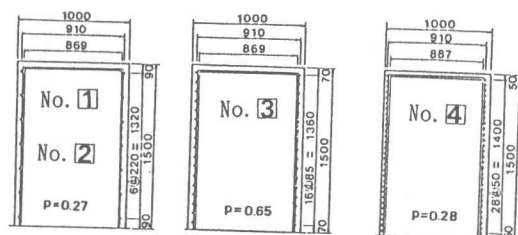


図-7 供試体諸元

温度履歴、ヤング率、ひびわれ発生材令は実測値を用い、外部拘束係数は、実測応力との比較から、 $R_N=0.03$ ,  $R_{M1}=0.6$ ,  $R_{M2}=0.6$ とした。本算定法のパラメータ $(1s/lc)_{cr}$ は有限要素解析結果から1/10、その後の温度変化に対して $(1s/lc)_T$ は、実測値に最も適合する値として1/2とした。この他にも6体の実験供試体に対し検討を行っているが $(1s/lc)_{cr}$ および $(1s/lc)_T$ は、ここで述べてある値で妥当なひびわれ幅が推定できることが判明している。

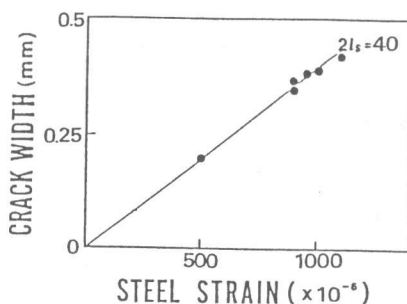


図-8 実測鉄筋ひずみと実測ひび割れ幅

式(15)から明らかなように、本算定法では鉄筋ひずみとひびわれ幅は正比例し、その比例定数が $21s$ である。ひびわれ幅を算定するためには $1s$ の値が必要であるが、図-8に示す実測鉄

筋ひずみと実測ひびわれ幅の関係から  $2ls=40(\text{cm})$  とした。

図-9 に実測値と計算値の比較を示す。これらの図から本算定法は、簡易法としてはかなりよい精度でひびわれ幅の予測を行えることが分かる。

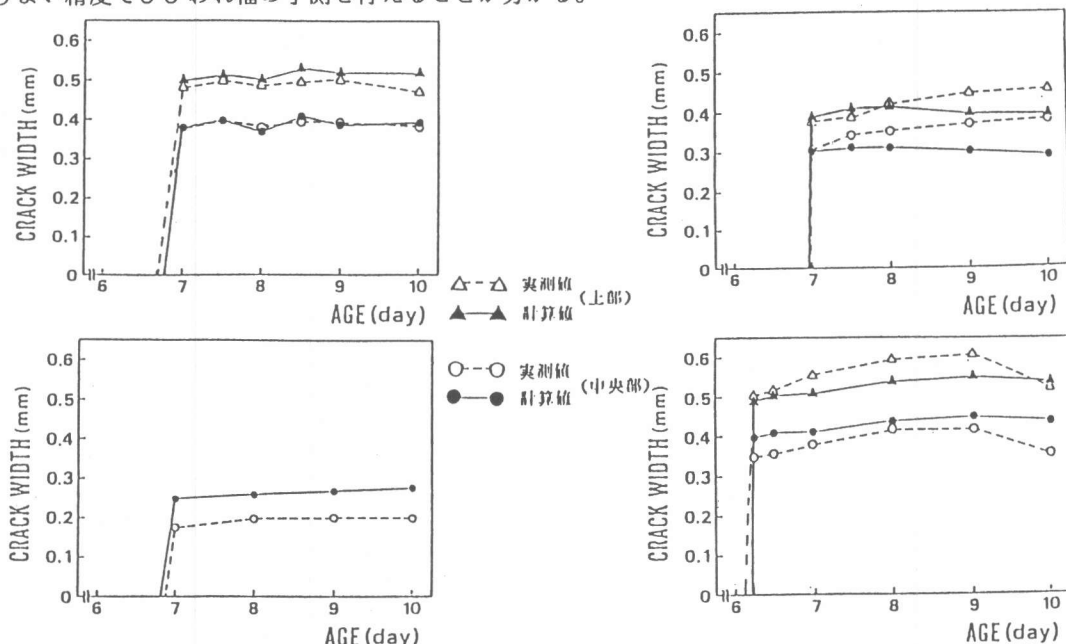


図-9 実測値と計算値の比較

## 5. まとめ

本研究では、RC構造物の温度ひびわれ幅制御方法の確立を目指し、温度ひびわれ幅の簡易算定方法を提案した。その際、CP法の基本仮定である平面保持則を、ひびわれ断面の鉄筋ひずみおよびその周辺のコンクリートひずみに仮定した。次に、ひびわれの発生および打継面のはく離挙動を考慮した有限要素解析により仮定の妥当性を確認し、大型壁体実験による実測値と提案法による計算値とを比較した。その結果、両者は良好な一致を示し、本提案法の有効性が確認された。提案する計算手法の基本的な立場は、

1) ひびわれ発生後においても鉄筋ひずみ及びコンクリートひずみの直線性がある程度成り立っている。(仮定1)

2) ひびわれ発生後の鉄筋とコンクリートの付着破壊及び打継面のはく離挙動を考慮することによって、ひび割れ現象を簡単なモデルに置き換えることができる。(仮定2)

という事である。実験値との適合性は相当いいものの、さらに現象のモデル化に工夫を重ね、より精度良いものに改良していきたいと考えている。

### <参考文献>

- 1) ACI Committee 207 : Effect of restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI Journal Vol.70, 1973
- 2) BSI : Code of Practice for the Structural Use of Concrete for Retaining Aqueous Liquid, London, BS5337, 1976
- 3) 長滝、佐藤、小島：水和熱による温度ひびわれ幅の実用算定法、コンクリート工学年次講演会論文集、1985, pp.1-4.
- 4) 長滝、佐藤：水和熱に起因する温度ひびわれ幅の予測について、コンクリート工学年次講演会論文集、1986, pp.5-8.
- 5) Ono, S., Kimura, K., Okada, T. and Ota, T.: Evaluation of external Restraining Effect and Prediction Method for Thermal Cracks in High Strength Lightweight Concrete, 土木学会論文第354/V-2, 1985.2
- 6) 日本コンクリート工学協会、マスコンクリートの温度応力研究委員会：外部拘束係数の同定とそれに基づく温度応力計算方法の提案、JCI, 1985
- 7) 今枝、石川、西岡、田辺：温度応力によるマスコンクリートの力学的挙動、コンクリート工学年次講演会論文集、1988, pp.17 5-180
- 8) 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