

立命館大学大学院

学生員

松尾 真紀

立命館大学理工学部

フェロ-会員

児島 孝之

立命館大学理工学部

正会員

高木 宣章

## 1. はじめに

現在、RC 構造物の有限要素解析プログラムのほとんどがコンクリートに発生するひびわれを要素特性として表現している。しかし、RC 構造物に発生する少数本の大きなひびわれが構造物の変形や終局耐力に対して支配的な要因となる場合もあり、ひびわれを離散化したモデルとして扱う方が適しているといえる。本研究ではコンクリートのひびわれ要素、および鉄筋とコンクリートの間の付着要素を接触要素のような線要素として表現し、単鉄筋コンクリートはりの有限要素解析を行った。

## 2. 解析手法と要素特性

RC はりの要素分割はコンクリートを 8 点 4 辺形要素、鉄筋を 3 点線要素で表現し、ひびわれおよびコンクリートと鉄筋との付着は以下に述べる 6 点からなる線要素として表現した。まずひびわれのない状態で解析を行う。最大主引張応力発生点で主応力直角方向にひびわれが発生すると考え、ひびわれ要素を 1 個導入し、メッシュ分割を修正する。この方法を逐次繰り返し、解析を進めた。図-1 に 2 次のアイソパラメトリックひびわれ要素を示す。節点はそれぞれコンクリート要素と共有している。ここでひびわれ幅を  $\delta_n$ 、ひびわれに沿うズレを  $\delta_t$ 、ひびわれに対して垂直に伝達される応力を  $\sigma_n$ 、ひびわれに対して平行に伝達されるせん断力を  $\tau_t$  とすると次式の関係式が得られる。

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{nn} & C_{nt} \\ C_{tn} & C_{tt} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_t \end{Bmatrix} = C \delta \quad (1)$$

ひびわれが閉じているとき、節点①と④、②と⑤、③と⑥は同じ空間を占めている。節点 i のひびわれ方向の変位を  $\delta_{ti}$ 、ひびわれに対して垂直方向の変位を  $\delta_{ni}$  とすると、ひびわれ幅  $\delta_n$  とひびわれに沿うズレ  $\delta_t$  は次式のように表現することができる。

$$\delta = \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{Bmatrix} \{ \delta_{n1} \ \delta_{t1} \ \delta_{n2} \ \delta_{t2} \ \delta_{n3} \ \delta_{t3} \}^T \quad (2)$$

ここで、 $N_i$  は形状関数である。また、ひびわれ要素の剛性マトリックス  $K_c$  は次式で表される。

$$K_c = \int_{-1}^1 B^T C B t d\xi = \int_{-1}^1 B^T C B t \sqrt{\left(\frac{dx}{d\xi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\xi}\right)^2} d\xi \quad (3)$$

ここで、 $t$  はひびわれ位置でのコンクリート厚である。

コンクリートと鉄筋の間には相対的な変形があることを考慮するため、ひびわれ要素と同様の考え方で付着要素を表現した。この場合、図-1 の節点①、②、③はコンクリート要素、節点④、⑤、⑥は鉄筋要素の節点と考えると付着要素の剛性マトリックス  $K_b$  は次式のようになる。

$$K_b = \int_{-1}^1 B^T B_b B_u d\xi = \int_{-1}^1 B^T B_b B_u \sqrt{\left(\frac{dx}{d\xi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\xi}\right)^2} d\xi \quad (4)$$

ここで、 $u_s$  は鉄筋の周長である。また、 $[B_b]$  マトリックスの係数をそれぞれ  $B_{nt} = B_{tn} = 0 \text{ kgf/cm}^3$ 、 $B_{nn} = B_{tt} = 1.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^3$  とし解析を行った。

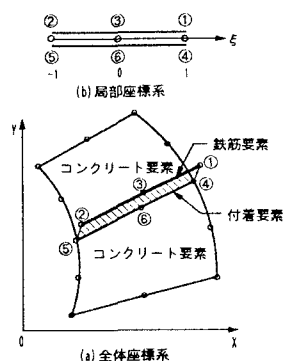


図-1 ひびわれ要素

キーワード：有限要素法、ひびわれ要素、付着要素、アイソパラメトリック要素

〒525-77 滋賀県草津市野路東 1-1-1(立命館大学理工学部土木工学科) TEL 0775-61-2805 FAX 0775-61-2667

### 3. 解析結果

ひびわれ要素の[C]マトリックスの係数を変化させ、引張縁のコンクリート応力、鉄筋応力、付着応力に与える影響について検討を行った。図-2 に(a)ひびわれ発生直後、(b)ひびわれ進展時の応力分布を示す。[C]マトリックスの係数はそれぞれ  $C_{nt}=C_{tn}=0\text{kgf/cm}^2$ 、 $C_{nn}=C_{tt}=1.0\times 10^4\text{kgf/cm}^2$ 、 $3.0\times 10^4\text{kgf/cm}^2$  である。

[C]マトリックスの係数を変化させても、応力分布のグラフは同様の傾向を示した。ひびわれ発生直後(図-2(a))はひびわれ部分のコンクリートの引張応力が低下し、鉄筋の引張応力が増加した。ひびわれ以外の部分ではひびわれ発生前と差異はなく、ひびわれが局所的に影響を及ぼす様子が見られた。鉄筋位置より上方にひびわれが進展する(図-2(b))とひびわれ近傍の付着応力が急激に増加し、ひびわれ要素の導入によって、ひびわれの両側の付着応力が不連続になることが表現できた。[C]マトリックスの係数を増加させると、ひびわれを介してコンクリートに伝達される応力が大きくなり、鉄筋の引張応力と付着応力が小さくなった。[C]マトリックスの相違によりひびわれの発生パターンが変化することが明らかとなった。

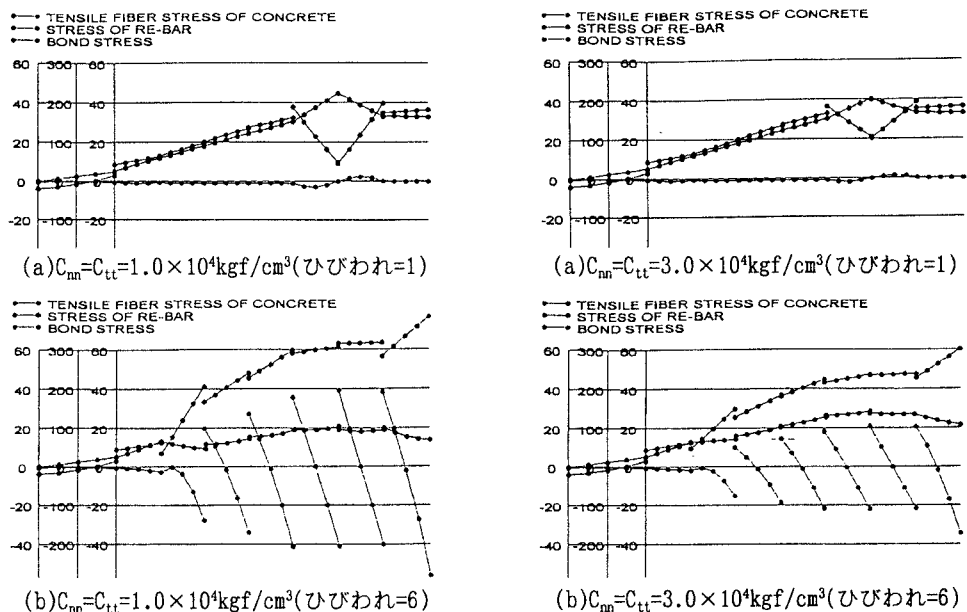


図-2 応力分布

[C]マトリックスの係数を変化させたときの荷重とたわみの関係を図-3 に示す。[C]マトリックスの係数が大きいほど、ひびわれ発生後のグラフの傾きが急になっている。 $C_{nn}=C_{tt}=3.0\times 10^4\text{kgf/cm}^2$  のとき、はりほぼ弾性的な挙動を示し、[C]マトリックスの係数がはりの変形性状に影響を及ぼしていると考えられる。

### 4. 結論

(1) ひびわれ要素を導入すると、ひびわれを介してコンクリートに応力が伝達される様子を表現することができる。また、付着要素によって、ひびわれの両側の付着応力が不連続になる様子を表すことができる。

(2) [C]マトリックスははり内部に生じる応力やはりの変形性状に影響を及ぼす。今後の解析では、ひびわれ幅や付着すべりの増加に伴って、[C]および[B<sub>0</sub>]マトリックスを変化させて行う必要がある。

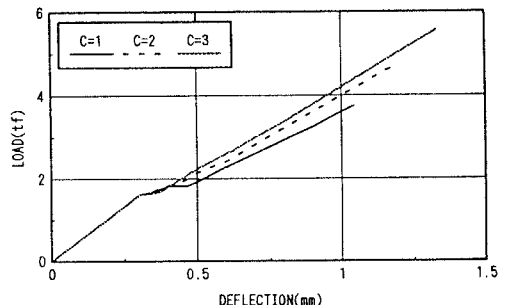


図-3 荷重－たわみの関係