

1.はじめに

本研究は、せん断破壊や付着割裂破壊等のひび割れに大きく依存する破壊の解析法を確立することを目的としている。コンクリートに発生するひび割れを接触要素のような線要素で表現するためのアイソパラメトリックひび割れ要素と、ひび割れ近傍の付着すべりを考慮するためにアイソパラメトリック付着要素を提案し、単鉄筋コンクリートはりのひび割れ解析を試みた。

2.各要素特性

(1)ひび割れ要素

コンクリートにひび割れが発生すると、その後の応力伝達はひび割れの凹凸を介して行われる。図-1 に示すような 6 点からなる要素を考える。ひび割れ要素は 2 次のアイソパラメトリック線要素で、それぞれの節点をコンクリート要素と共有している。ここでひび割れ幅を δ_n 、ひび割れに沿うズレを δ_t 、ひび割れと垂直に伝達される応力を σ_n 、ひび割れと平行に伝達されるせん断力を τ_t とすると次式のような関係が得られる。

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_m & C_n \\ C_n & C_u \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_t \end{Bmatrix} = C \delta \quad (1)$$

また、ひび割れ要素の剛性マトリックス K_c は次式で表される。

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

ここで t はひび割れ位置でのコンクリート厚である。また、解析では $[C]$ マトリックスの係数をそれぞれ $C_m = C_n = 0 \text{ kgf/cm}^2$, $C_u = C_u = 2.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ とし、定数として扱った。

(2)付着要素

鉄筋コンクリートにひび割れが発生するとひび割れ近傍で付着すべりが生じることが多い。したがって、コンクリートと鉄筋の間には相対的な変形があるとして考える。図-2 に示す付着要素を考える。節点①,③,②は鉄筋要素と、節点④,⑥,⑤はコンクリート要素とそれぞれ節点を共有している。ここで要素の中心線に対して法線方向の相対変位を δ_n 、法線応力を σ_n 、接線方向の相対変形(ズレ)を δ_t 、付着応力を τ_t とすると次式のような関係が得られる。

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B_m & B_n \\ B_n & B_u \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_t \end{Bmatrix} = B \delta \quad (3)$$

また、付着要素の剛性マトリックス K_b はひび割れ要素と同様にして、次式で表される。

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

ここで u_b は鉄筋の周長である。また、解析では $[B]$ マトリックスの係数をそれぞれ $B_m = B_n = 0 \text{ kgf/cm}^2$, $B_u = B_u = 1.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とし、定数として扱った。

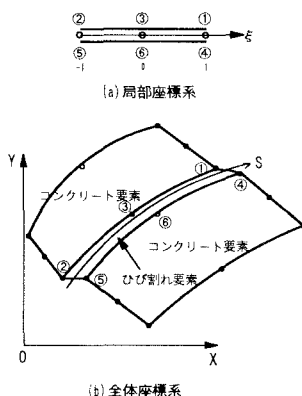


図-1 ひび割れ要素

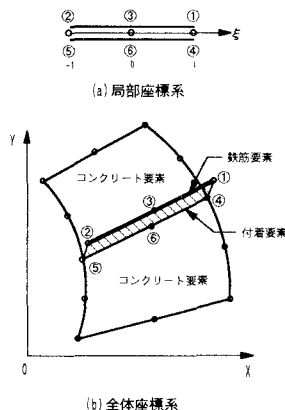


図-2 付着要素

3.有限要素解析結果

(1)図-3 にひび割れ発生前の応力分布を示す。引張縁のコンクリートおよび鉄筋の応力は、はり軸方向に同様の傾向を示し、曲げスパンで一定、せん断スパンでは支点に向かって線形的に低下している。付着応力はほぼ 0kgf/cm^2 であり、コンクリートと鉄筋との完全な付着によりはりは一体となって挙動している。

(2)図-4 に曲げスパンに初ひび割れが発生したときの応力分布を示す。ひび割れ発生部分の応力分布が大きく変化している。鉄筋の応力は増加し、引張縁のコンクリート応力は急激に減少した。また、ひび割れを介して引張と圧縮の付着応力があらわれた。しかし、アイソパラメトリックひび割れ要素の導入により、ひび割れ部分のコンクリートにもいくらかの引張応力が伝達された。ひび割れ以外の部分の応力分布はひび割れ発生前と大きな違いはなく、ひび割れが局所的に影響を及ぼす様子が見られた。

(3)図-5 にせん断スパンにもひび割れが発生し、計 6 本のひび割れが発生したときの応力分布、図-6 にひび割れ状況図をそれぞれ示す。ひび割れ部分のコンクリートと鉄筋の間の付着応力はいずれも約 30 kgf/cm^2 となり、コンクリートと鉄筋の間の付着が劣化し、付着すべりが生じていると考えられる。このため、ひび割れが局所的な影響を与えるひび割れ発生直後の段階とは異なり、ひび割れ間の応力分布が一様になった。鉄筋の応力分布はスパン中央に向かってなだらかに上昇する曲線となった。引張縁のコンクリートに作用する応力はわずかに低下したが、ひび割れ部分の応力に大きな変化は見られなかった。本解析ではひび割れ要素の [C]マトリックスの係数を定数として扱っている。このように多数のひび割れが発生し、付着が劣化している状況においてもコンクリートに伝達される応力が減少しなかったのは、[C]マトリックスの係数が大きく影響したものと考えられる。

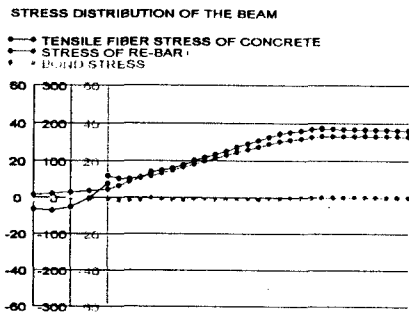


図-3 応力分布(ひび割れ本数=0)

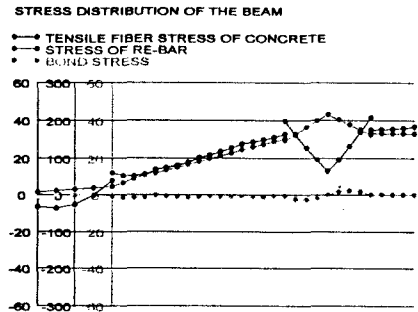


図-4 応力分布(ひび割れ本数=1)

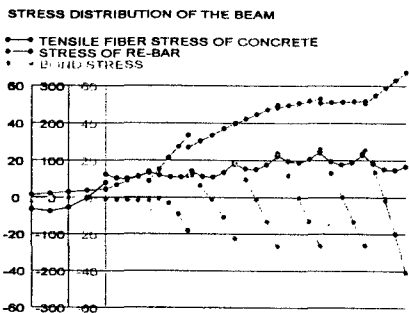


図-5 応力分布(ひび割れ本数=6)

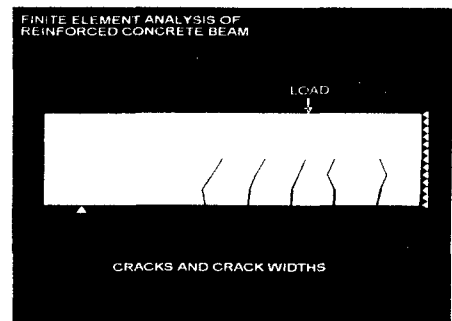


図-6 ひび割れ状況図(ひび割れ本数=6)

4.まとめ

(1)アイソパラメトリックひび割れ要素を導入することにより、ひび割れを介して応力が伝達される様子をあらわすことができると考えられる。(2)今回の解析はひび割れおよび付着要素の[C],[B]マトリックスをそれぞれ一定とした線形解析であるが、ひび割れ幅、付着すべりの増加に伴って、剛性を低下させる必要がある。