

立命館大学工学部 正会員 児島孝之
東京工業大学工学部 正会員 松尾真紀

立命館大学工学部 正会員 高木宣章
立命館大学大学院 学生員 〇日比野憲太

1. はじめに

本研究では、ねじりひび割れ発生後の鉄筋コンクリート（以後RC）はりの解析法を確立することを目的とし、ねじりを受けるRCはりの3次元有限要素解析を試みた。また、コンクリートに発生するひび割れを面要素で表現するアイソパラメトリックひび割れ面要素を提案する。

2. 解析概要

(1) アイソパラメトリックひび割れ面要素

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凸凹を介して行われる。そこで、このひび割れ発生後の応力伝達のメカニズムを表現するため、図1-(a)に示すX-Y-Z座標系内の2枚の重なった面で表される2次のアイソパラメトリックひび割れ面要素を提案する。ひび割れ要素2面間には図1-(b)に示すように、s,t方向のせん断応力 τ_s, τ_t 、面法線方向の応力 σ_n が作用し、それぞれの方向の変位を $\delta_s, \delta_t, \delta_n$ とすると、次式のような関係で定義される。

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \tau_s \\ \tau_t \\ \sigma_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{ss} & 0 & C_{sn} \\ 0 & C_{tt} & C_{tn} \\ C_{ns} & C_{nt} & C_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_s \\ \delta_t \\ \delta_n \end{Bmatrix} = \tau \delta \quad \text{--- (1)}$$

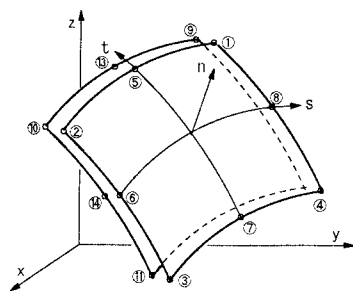
また、ひび割れ要素の剛性マトリックス $[K_e]$ は、次式(2)で表される。

$$K_e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T C B \left(\frac{ds}{d\xi} \right) \left(\frac{dt}{d\eta} \right) d\xi d\eta \quad \text{--- (2)}$$

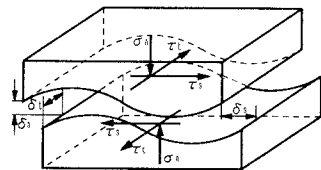
本解析では、 $C_{nn}, C_{tt} = 1.5 \times 10^5$ 、 $C_{nt}, C_{tn} = 0$ とした。

(2) 要素分割

本解析では、ねじりを受けたRCはりに発生する、らせんひび割れが軸方向に1周入ったRCはりモデルの作成を試みた。今回は、コンクリート要素、及びひび割れ面要素にアイソパラメトリック2次要素、軸方向鉄筋、及びスターラップにアイソパラメトリック1次要素を使用している。ひび割れ面要素を節点の座標変換によってらせん状にRCはりモデル中に組み入れるため、RCはりモデルは円形中空断面としている。具体的には、RCはりモデルをモデル断面(Y-Z平面)方向に2分割、部材軸(X軸)方向に任意の分割数でメッシュ分割し内節点を与えた後に、部材軸を中心としたモデル断面を下面からの距離に従って45°ずつ座標変換を行い、軸方向のコンクリート要素間にひび割れ面要素を軸方向に対して45°に挿入した。要素分割、ひび割れ面要素の挿入図、及び配筋図を図2に示す。



(a) 全体座標系及び局所座標系



(b) ひび割れ面での応力伝達機構

図1 ひび割れ面要素

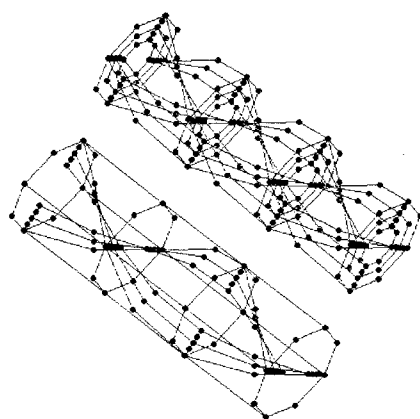


図2 RCはりモデル ひび割れ面要素2本の場合
(要素分割・ひび割れ面要素の挿入・配筋図)

(3) 境界条件

境界条件を図3に示す。部材の横断面の中心点をねじり回転軸とし、一方の部材端面の全ての節点を y, z 方向に固定した。ねじりモーメントとして、部材のもう一方の端面の全ての節点に面が回転するような強制変位を、 Y, Z 方向の変位の組み合わせとして与えた。 θ をねじり回転軸方向単位長さ当たりのねじれ角とし、 y_i, z_i をそれぞれ Y, Z 方向のねじり回転軸からの距離とすると、 Y, Z 方向の変位 u, v は次式 (3) で示す。

$$u = -\theta z_i x \quad v = \theta y_i x \quad \text{--- (3)}$$

本解析では、 $\theta = 15 \times 10^{-6}$ とした。また、ねじりモーメントは、強制変位点の反力からモーメントに換算することにより求めた。

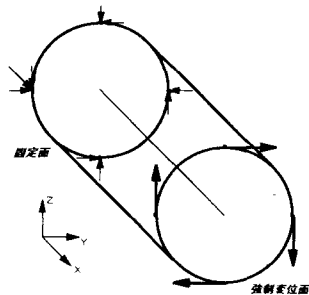
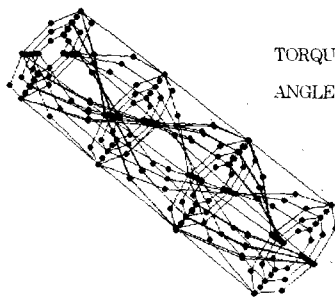


図3 境界条件

3. 解析結果、および考察

本解析では、らせんひび割れが発生したRCはりのモデル化を試みた。本解析により求められたRCはりモデルの変形性状を図4に示す。実際にねじりを受けたRCはりと同様にひび割れ要素を軸方向に対して 45° のらせん状に挿入した。表1にひび割れ発生前の軸方向に対するコンクリート要素の分割角度による断面最大合せん断応力の値と、弾性理論計算値を示す。これより、軸方向に対して垂直方向に要素を分割した場合の断面最大合せん断応力はほぼ弾性理論値と等しいが、コンクリート要素の軸方向に対する分割角度を大きくすると徐々に解析値の精度が低下した。



TORQUE: .1880E+05

ANGLE: .9000E-03

図4 RCはりモデルの変形性状 ひび割れ面要素2本の場合

表1 モデル断面内での最大・最小合せん断応力

	弾性理論計算値	軸方向に対して 0°	軸方向に対して 15°	軸方向に対して 30°	軸方向に対して 45°
最大合せん断応力 (kgf/cm^2)	19.28	19.30	19.99	21.68	23.61
最小合せん断応力 (kgf/cm^2)	8.68	8.68	8.96	9.50	10.01

これより、ねじりを受けるRCはりを有限要素解析する場合、要素の分割方法がいかに関与する精度に影響を及ぼすのかが確認できた。更に表2に軸方向に対して 45° に要素分割した場合での、断面中央部での合せん断応力の分布を示す。この表2から、側面部で最大合せん断応力が確認でき、断面の半径 r の値が小さくなるにつれて合せん断応力の値が小さくなっており、断面内での合せん断応力の値には弾性理論計算とのズレがあるものの、全体的な応力分布に関しては、弾性理論通りにモデル化出来ることが確認できた。

表2 モデル断面内での半径 r による合せん断応力の分布

半径 r (cm)	10.0	8.63	7.25	5.87	4.50
合せん断応力 (kgf/cm^2)	23.61	23.45	16.82	15.3	10.1

表3 らせんひび割れ挿入数によるねじりモーメントの変化

	らせんひび割れ 0本	らせんひび割れ 2本	らせんひび割れ 4本
ねじりモーメント ($\text{kgf} \cdot \text{cm}$)	0.2976×10^5	0.1880×10^5	0.1390×10^5

次に、軸方向に対して 45° の要素分割で、らせんひび割れの挿入数を変えた場合での、ねじりモーメントに与える影響を表3に示す。RCはりモデルに挿入する、らせんひび割れを0, 2, 4本とした。表3から、ひび割れ挿入数を変えることにより、RCはりモデルのねじり剛性が低下していることが確認できる。これより、ねじりを受ける場合での境界条件において、ひび割れ面要素がRCはりモデルに、実際にRCはりに発生するひび割れと同様の影響を与えることが確認できた。

4. まとめ

- (1) 実際のらせんひび割れのモデル化において、軸方向に対して 45° にひび割れ要素を挿入するため、特にRCはりモデルの断面方向に、より精度の高い要素の使用、及び分割方法の開発が必要である。
- (2) 断面内での合せん断力、一つ一つの値には弾性理論計算とのズレはあるものの、断面内での全体的な応力分布に関しては、ほぼ弾性理論通り、モデル化できていることが確認できた。
- (3) 本解析で提案したひび割れ要素が、ねじりを受ける場合での境界条件において、RCはりモデルのねじり剛性の低下をモデル化できていることが確認できた。