

新日本技術コンサルティング 正員 ○ 北条 明
 神戸大学 正員 藤井 学
 東洋情報システム 正員 在賀 良介

1. まえがき

R.C.部材の破壊過程を有限要素法を用いてシミュレートする試みは、1967年にNgoとScordelisがR.C.はりに適用した研究を発表して以来、種々の構造物に対して解析が行われてきた。その際、鉄筋コンクリートの力学的性質をどのような数学的モデルに表現し解析するかが重要な問題となる。鉄筋コンクリートにおける最も基本的な力学的性質としては、二次元解析の場合、コンクリートの二軸応力下の応力-ひずみ関係と破壊条件、コンクリートのひびわれ発生と進展、鉄筋とコンクリートの付着が挙げられ、これら3点に関する研究例は比較的多い。しかしながら、既往の研究ではコンクリートの引張側の応力-ひずみ関係は線形と仮定したもの、また付着に関してはボンド・リンクと呼ばれる物理量を持たないバネ要素を用いている研究例がほとんどである。そこで本研究では、コンクリートの応力-ひずみ関係を引張側でも非線形とし、付着機構を表現する要素としてアイソパラメトリック・ジョイント要素を用いることにより解析の精度向上を計り、その効果の比較・検討を行うものである。

2. 解析モデル

R.C.部材は、コンクリート要素、付着要素、鉄筋要素により表わし、二次元材料非線形問題として取り扱う。引張側の降伏曲面が不明なため非線形弾性解析とし、荷重増分法により増分応力、増分変形を求め各ステップ毎に累加する。平衡反復計算は修正Newton-Raphson法を用いる。大変形による幾何学的非線形性は考慮しない。

1) コンクリート

コンクリート要素は8節点までのアイソパラメトリック4辺形要素とし、数値積分はGaussの求積法を用いる。材料特性は、等方性と仮定し、図-1に示すように八面体せん断ひずみ ϕ の関数と仮定した接線体積弾性係数 K_0 と接線せん断弾性係数 G_0 により表わす。この方法の妥当性は、Kupfer等²⁾により示されている。また、除荷の判定は平均応力の履歴により決定し、除荷時の材料特性は初期剛性を用いる。コンクリートの破壊は、積分点の主応力が二軸破壊曲面を越えた場合に起こる。二軸破壊曲面は二次元平面応力問題の場合Kupfer等²⁾の提案式を用いる。すなわち、

$$\text{圧縮-圧縮} \quad \left(\frac{\sigma_1}{f_c} + \frac{\sigma_2}{f_c} \right) - \frac{\sigma_3}{f_c} - 3.65 \frac{\sigma_1}{f_c} = 0 \quad (1)$$

$$\text{引張-圧縮} \quad \frac{\sigma_1}{f_t} - 1 + 0.8 \frac{\sigma_2}{f_c} = 0 \quad (2)$$

$$\text{引張-引張} \quad \sigma_1 = f_t' = 0.64 \sqrt[3]{f_c^2} \quad (3)$$

ここで、 f_c は一軸圧縮強度、 f_t' は一軸引張強度である。破壊モードは、主応力が圧縮-圧縮のとき圧縮破壊とし、その他の場合ひびわれとする。また、ひびわれは最大引張主応力に直角方向に生じるものとし、コンクリート要素の一つの積分点に2個まで生じ、互いに直交する。ひびわれが生じた後の剛性は、一次元を低減して局所座標系で求める。ひびわれ面におけるせん断力は、せん断剛性を βG ($0 \leq \beta \leq 1$) として一部負担する。

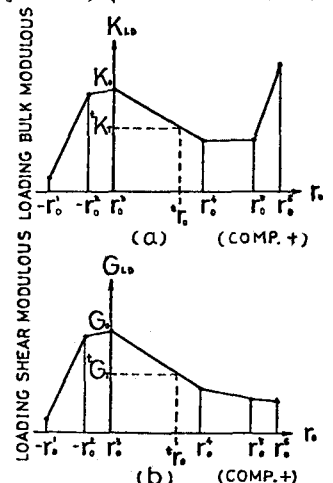


図1 コンクリートの材料特性

2) 付着

付着はコンクリート要素と鉄筋要素の間に挿入するアイソパラメトリック・ジョイント要素により表わす。図・2に示す6節点要素は、 $r-s$ 局所座標系において r 軸方向を滑り面とする。相対変位-変位関係は次のように表わされる。

$$\{w\} = [B]\{u\} \quad (4)$$

$$\text{ここで, } \{w\} = \{w_u \ w_v\}^T \quad (5)$$

$$[B] = 2 \cdot \begin{bmatrix} h_1 & 0 & h_2 & 0 & -h_3 & 0 & -h_4 & 0 & h_5 & 0 & h_6 & 0 \\ 0 & h_1 & 0 & h_2 & 0 & -h_3 & 0 & -h_4 & 0 & h_5 & 0 & h_6 \end{bmatrix}_{(s=0)} \quad (6)$$

$$\{u\} = \{u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3 \ u_4 \ v_4 \ u_5 \ v_5 \ u_6 \ v_6\}^T \quad (7)$$

h_i : 2次元要素の補間関数

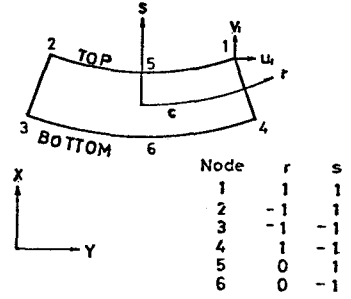


図-2 6節点アイソパラメトリック・ジョイント要素模式図

また、鉄筋の材軸方向には付着せん断応力と相対変位の関係を multi-linear として与え、材軸に垂直な方向に対しては一定の剛性を与える。

3) 鉄筋

鉄筋は線要素で軸方向力のみを負担すると仮定し、コンクリート要素の節点間に付着要素を介して配置される。応力-ひずみ関係は bi-linear として入力する。

3. 解析例

本解析法の妥当性を検討するための一例として、図・3に示す複鉄筋コンクリートはりについての解析例を示す。解析は表・1に示す3caseについて行った。解析モデルの対称性を考慮して軸方向の1/2を解析した。コンクリートの一軸圧縮強度は 290 kg/cm^2 、一軸引張強度は 28 kg/cm^2 である。付着特性については表・2に示す。また、 $\beta = 0.5$ とした。

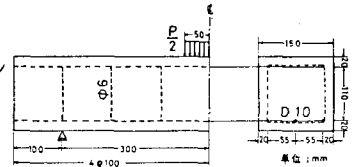


図-3 供試体寸法

解析結果については、荷重3t時のひびわれ発生パターンを図・4(a)~(c)に、また6tまでの実験結果を図・4(d)に示す。Case 1では、鉄筋周辺から上下に向ってひびわれが発生する傾向がある。Case 2では、実験のひびわれ発生パターンに近いが、ひびわれの発生段階は約1~2t低い。Case 3は最も実験に近いひびわれ発生パターンといえる。

以上のように、コンクリートの引張側も応力-ひずみ関係を非線形とすること、および付着機構をより正確に表現する要素を導入することにより、R.C.部材の有限要素解析により高い精度を期待できることがわかった。

なお、その他の解析結果および他の計算例については当日発表の予定である。

(参考文献)

表・1 解析の種類

Case	付着要素	コンクリートの引張側の応力-ひずみ関係
1	なし	線形
2	あり	線形
3	あり	非線形

表・2 付着特性

種類	付着せん断応力 $\tau_{cs} (\text{kg/cm}^2)$	相対変位 $w_x (\times 10^{-2} \text{ cm})$
異形鉄筋	18.67	20.
	46.48	80.
	65.35	600.
スター	14.56	25.
	18.72	50.
ラップ	27.04	200.

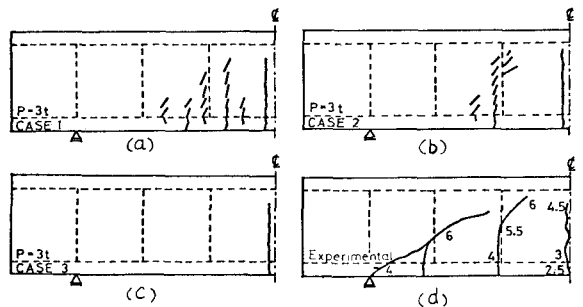


図-4 ひびわれ発生パターン

- 1) Kupfer, H.B., and Gerstle, K.H., "Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses", Journal of the Engineering Mechanics Div., Proc. of ASCE, Vol. 99, No. EM4, August, 1973