

1. 研究の目的

鉄筋とコンクリートとの付着に関しては多くの研究成果が報告されており、鉄筋とコンクリートとの相対的な滑りに着目した解析、あるいは鉄筋とコンクリートとの接触面にリンク要素を用いた解析法などがある。一方現象面では鉄筋周辺に発生する内部ひびわれをシミュレーションの圧入による、詳細に観察した研究結果も報告されている。本研究は、内部ひびわれの影響を考慮した比較的単純なモデルを用いて鉄筋の引張および付着応力の分布並びに断面における鉄筋とコンクリートとの面外変形量等について解析し、内部ひびわれがそれらに与える影響を及ぼすのかについて検討したものである。

また、鉄筋がある程度以上の引張りを受ける場合、その近傍に発生するコンクリートの内部ひびわれの発達の過程を観察するために平板形の両引き供試体を作成して実験を行った。

2. モデル化による解析

良好なデフォーメーションを持つ異形鉄筋を用いる場合には普通丸鉄筋などの場合と異なり異形のフシによる拘束による鉄筋とコンクリートとの接触面での滑りはすなわめ小さいものである。しかしながら鉄筋からある程度隔った位置でのコンクリートと鉄筋とは明らかに相対変位が認められる。これは、コンクリートのせん断変形および内部ひびわれによる生じにくく歯状部分の曲げ変形が主要な要因として考えることができる。図-1に両引状態における内部ひびわれと断面の変形状態を示す。

コンクリートの内部ひびわれは、その部分の鉄筋のひずみがコンクリートの伸び能力以上になると発生し、ひびわれ深さは鉄筋のひずみの増加に比例して増大するものと仮定すれば、鉄筋とコンクリートとの間の応力の伝達は、コンクリートの内部の挙動を考慮した非線形モデルとして解析することが出来る。

解析モデルとしては図-2のようなバネ系有限要素モデルを考えた。すなわち、軸方向に鉄筋およびコンクリートの要素を考え、両者を結合したものとして、コンクリートのせん断変形および内部ひびわれ発生後の曲げ変位とを考慮し結合バネを考えた。

各要素の剛性マトリックスは次の通りである。

- i) 鉄筋:
$$\begin{bmatrix} k_s \\ \end{bmatrix} = \frac{E_s \cdot A_s}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$
- ii) コンクリート:
$$\begin{bmatrix} k_c \\ \end{bmatrix} = \frac{E_c \cdot A_c}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$
- iii) 結合バネ:
$$\begin{bmatrix} k_b \\ \end{bmatrix} = \frac{8 \cdot G \cdot t}{B} \cdot l \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$
- iv) ひびわれ発生後の結合バネ:
$$\begin{bmatrix} k_b \\ \end{bmatrix} = \frac{K_1 \cdot K_2}{K_1 + K_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

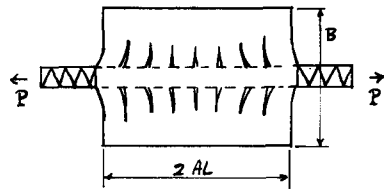


図-1 内部ひびわれと断面の変形状態

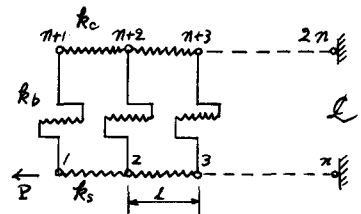


図-2 バネ系有限要素モデル

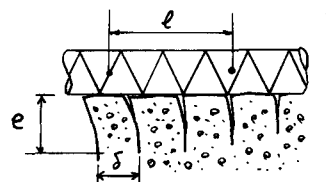


図-3 くし歯状部分の曲げ変形

$$\text{ここ} \sigma_c = K_1 \cdot (G \cdot t / B) \times l, \quad K_2 = (3 \cdot E_c I / e^3) \times (l / s) \times 2$$

E_s, E_c : 鉄筋およびコンクリートのヤング係数, A_s, A_c : 鉄筋およびコンクリートの断面積,
 G : コンクリートの剛性率, l : 要素の長さ, t : コンクリートの厚さ, B : 幅, AL : 全長,
 DIA : 鉄筋径, e : 内部ひびわれ深さ, s : 内部ひびわれ間隔 (図-1~3参照)

なお、内部ひびわれは鉄筋のフシの部分で発生するので、内部ひびわれの間隔は鉄筋直径に比例するものと考えられる。内部ひびわれはその部分の鉄筋の応力が 500 kg/cm^2 のとき発生し鉄筋応力が 3000 kg/cm^2 のときに、その深さが鉄筋径に等しくなると仮定して次式を用いてくり返して計算を行った。

$$\text{すなわち } e = (\sigma_s - 500) \times DIA / 2500$$

図-4, 5に付着応力の分布の計算例を示した。また図-6に端断面における鉄筋とコンクリートとの相対変形を示す。これらの結果から、鉄筋とコンクリートとの付着の挙動は、両者の間の滑動を考慮してもその非線形性を説明することが出来るのであり、また、内部ひびわれが付着応力の分布に大きな影響をもつことが示された。実際の内部ひびわれはある程度不規則に発生、発達するものであり、精密な実験を行っても付着応力が必ずしもなめらかな分布とならないことの一因と考えられる。

図-7に平板形供試体による断面の面外変形の計算値および実験値を示す。規定はコンタクトゲージによる。この結果、鉄筋のごく近傍のコンクリートはほぼ鉄筋と一体となって変形していることが認められ、内部ひびわれの発達による、鉄筋の大きな伸び変形に追従していることが示された。

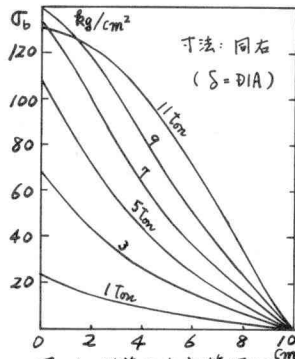


図-4 付着分布計算値(1)
(V.V.間隔 $s = DIA$)

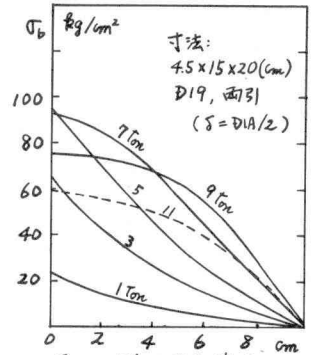


図-5 付着分布計算値(2)
(V.V.間隔 $s = DIA/2$)

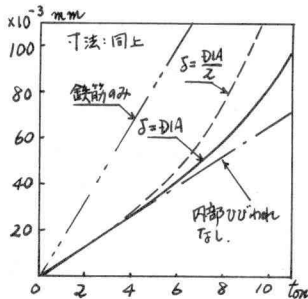


図-6 鉄筋の変位計算値

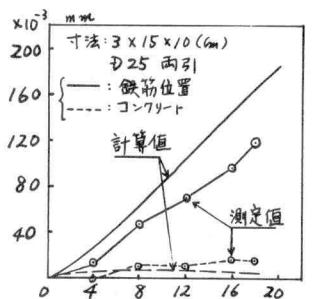


図-7 面外変形の値

3. 内部ひびわれ発生、発達の観察

両引き試験により、鉄筋周辺に生ずる内部ひびわれを図-8に示すような鋼製の拘束具を用いて鉄筋にそうたまひびわれを防止し、連続的に観察した。供試体は鉄筋径よりごくわずかの厚い平板とし、拘束具によるあらかじめ横方向に圧縮力を導入しておくために、応力状態は必ずしも通常の状態とは異なるが鉄筋の応力の増加に従って発生および発達する内部ひびわれを容易に観察することができた。写真-1, 2にこれらの1例を示す。鉄筋径が大きいためひびわれの発生は上記の理論を明確に裏付けることは困難であったが内部ひびわれの間隔、深さは鉄筋径および鉄筋応力に関連することが認められた。

4. おわりに、本研究に当り終始御懇に御指導を賜った東大園分教授、ならびに都立大村田教授に謝意を表します。都立大コンクリート実験室の諸氏の御協力に感謝します。

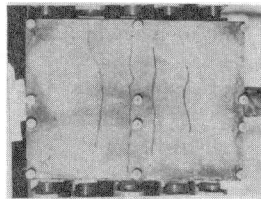


写真-1 内部V.V.われ(1)
 $\sigma_s = 800 \text{ kg/cm}^2$

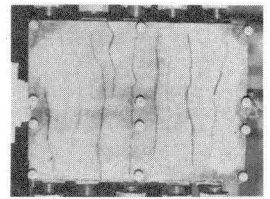


写真-2 内部ひびわれ(2)
 $\sigma_s = 3500 \text{ kg/cm}^2$

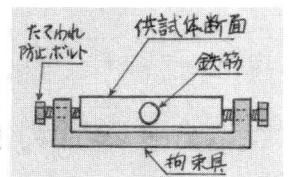


図-8 鋼製拘束具