

間組 技術研究所 正会員 吉 川 弘 道
 間組 技術研究所 正会員 草 深 守 人
 名古屋大学工学部 正会員 田 辺 忠 顕

1. まえがき コンクリート部材におけるひびわれ発生・進展に伴う力学的挙動を追跡する場合、コンクリートの応力解放や剛性低下のほかに、tension stiffening (引張剛性)、Interlock作用、dowel効果、dilatancyなどのモデル化が主な論点となっている。これらのひびわれ挙動は、いずれも鉄筋が存在することによって成立し得るもので、“ひびわれ”とは、負荷の増大に伴いコンクリートの応力が鉄筋に移行する応力遷移(stress transfer)であると考えられる。

著者らは、このようなひびわれ特有のメカニズムを合理的にしかも容易に表現できるような新しい有限要素を提案し、本文にその概要と単純モデルでのシミュレーション結果について報告するものである。

2. 剛性方程式 模式的に描いた図-1のような、ひびわれを含むRC部材を想定する。コンクリートの全ひずみ $\{\epsilon\}$ を、健全なsolid部のひずみ $\{\epsilon_{sc}\}$ とひびわれによるひずみ $\{\epsilon_{cr}\}$ の和と考える。すなわち、

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_{sc}\} + \{\epsilon_{cr}\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

上式で $\{\epsilon_{cr}\}$ は、ひびわれ界面での不連続量を、要素内または積分点近傍に一樣(smeared out)な非弾性ひずみとして表わしたもので、これをクラックひずみと呼ぶ。従って、コンクリートと鉄筋の応力は次のように示される。

$$\begin{aligned} \{\sigma_c\} &= [D_c] \{\epsilon_{sc}\} = [D_c] (\{\epsilon\} - \{\epsilon_{cr}\}) \quad \dots\dots\dots (\text{コンクリート}) \\ \{\sigma_s\} &= [D_s] \{\epsilon\} \quad \dots\dots\dots (\text{鉄筋}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

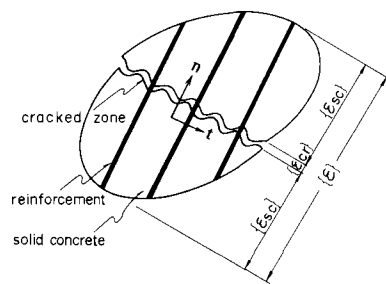


図-1 ひびわれを有するRC部材

ここで、 $[D_c]$ はひびわれを含まない(intact)コンクリート部分の材料マトリックス、 $[D_s]$ は鉄筋の材料マトリックスで、非線形弾性(例えば、〈その1〉で示した直交異方性)または弾塑性マトリックスを用いて表示される。次に、仮想仕事則を用いると、最終的に次式に示す要素剛性方程式が得られる。

$$\{\Delta F\} = \int_V [B]^T ([D_c] + [D_s]) [B] \{\Delta u\} dv - \int_V [B]^T [D_c] \{\epsilon_{cr}\} dv \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(3)は増分形で示したもので、 $\{\Delta F\}$ は荷重増分ベクトル、 $\{\Delta u\}$ は変位増分ベクトルを表わす。上式右辺は、第1項がsolidコンクリートと鉄筋によるもの、第2項はクラックひずみによる解放等価節点力と理解される。これは、接線係数法と初期ひずみ法を組合わせたもので、式(3)を荷重増分に従って順次解くことにより、合理的なひびわれ解析が可能となる。

3. クラックひずみ増分の算定 上述で定義したクラックひずみ増分を具体的に算出するには、ひびわれ界面での応力伝達メカニズムを勘案して、精緻な力学モデルを考える必要があるが、本文では便宜的にコンクリートsolid部の応力またはひずみの関数として表わせるものと仮定する。すなわち、

$$\{\Delta \epsilon_{cr}\} = [M] [D_c]^{-1} \{\sigma_c\} = [M] \{\epsilon_{sc}\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

これは、図-1に示す様に、ひびわれ方向での局所座標n-t方向で示したものである。係数 $[M]$ は、ひびわれの進展に伴う応力遷移の程度を表わし、従来のひびわれ挙動に関する実験結果や提案式を盛込むことができ、有用な手法となろう。通常は、ひびわれ直交方向n(開口量)とせん断方向t(すべり)の2成分につ

いて考え、単純な場合として次式で表わせる（一般には、非対角項は0とらない）。

$$\begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_{cr}^n \\ \Delta \varepsilon_{cr}^t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_n & 0 \\ 0 & M_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{sc}^n \\ \varepsilon_{sc}^t \end{Bmatrix}$$

..... (5)

4. 単軸引張を受けるRC部材（シミュレーション） 上記の手法を用いて、単軸引張 σ_0 を受ける鉄筋コンクリート部材についてひびわれ解析を行った。クラックひずみ増分は、式(5)を用い、 $M_n=m$ （一定）、 $M_t=0$ として算出した。ひびわれ性状以外はすべて線形弾性とし、係数 m 、鉄筋比 p をパラメーターとするシミュレーションを行ない、その結果を図-2～4に示した。共通する力学定数は、図-2(b)に示すとおりである。計算は、4節点アイソパラメトリックの一要素モデルを用いて行ない、応力制御によって負荷した。

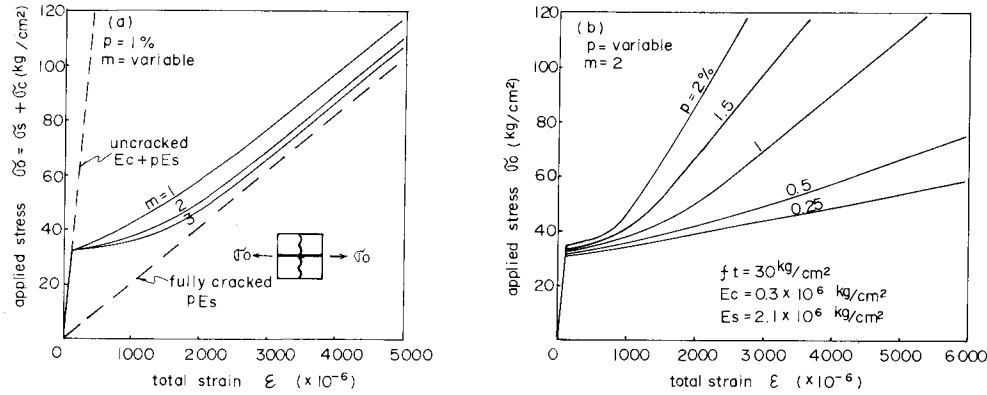


図-2 単軸引張を受けるRC部材の荷重～変形曲線

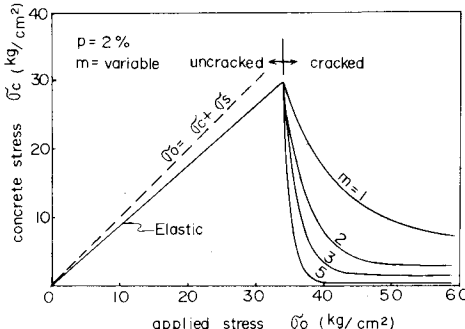


図-3 載荷荷重とコンクリート応力の関係

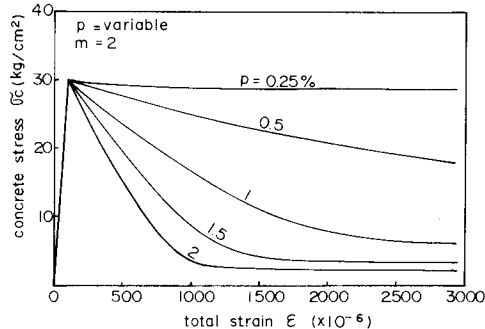


図-4 コンクリートのひずみと応力の関係

図-2は、載荷応力 σ_0 と全ひずみ ε との関係を示したもので、鉄筋コンクリート部材としての荷重～変形曲線と等価である。これによると、弾性時の剛性 $E_c + pE_s$ から、鉄筋のみの剛性 E_s に漸近する過程がよくシミュレートされ、 m によって剛性低下の程度を制御できることがわかる。図-3は載荷応力 σ_0 とコンクリート応力 σ_c との関係、図-4はコンクリート応力 σ_c と全ひずみ ε との関係を示したもので、ひびわれ発生後の応力低下と鉄筋への応力移行が示されている。特に、ひびわれ発生後、コンクリート応力が徐々に解放される様子は、いわゆる tension stiffening を模擬していると考えられる。

5. 本モデルの応用性 このような手法を用いることにより、鉄筋とコンクリートの非線形構成則やひびわれモデルが各々独立したものとして解析に反映され、ひびわれを有するRC平板を1個の有限要素で表現することができる。この結果、RC大型構造物のせん断挙動を有限要素法により解析する場合、要素数（総自由度数）を制限することができ、実用的な適用が可能になると考えられる。

○最後に、本研究は昭和57年度吉田研究奨励金を授与されたもので、ここに感謝の意を表します。