

コンクリート構造物のひびわれおよび破壊挙動への二次元有限要素法解析の適用性

九州大学 学生員 ○斉藤成彦
九州大学 学生員 劉 玉撃

九州大学 正 員 彦坂 熙
九州大学 学生員 韓 相昊

1. 緒言

コンクリート構造物を安全性を考慮した上で合理的かつ経済的に設計するためには、構造物の変形および応力状態を正しく把握することが必要であり、コンクリートのひびわれおよび最終的な破壊挙動を精度よくシミュレートできる解析法の開発が望まれる。本研究は、鉄筋コンクリート梁の初期ひびわれ発生から最終破壊に至る非線形挙動を単純な材料モデルに基づく二次元非線形有限要素法により解析し、実測結果と比較することによりその適用性を検証したものである。

2. コンクリートの材料モデル

圧縮応力下のコンクリートは、初期降伏まで線形弾性材料と仮定し、その後は弾塑性理論を用いる。材料は限界曲面まで等方的に硬化し、そこで等方的に軟化を開始して、ひずみで定義される破壊曲面を越えると耐力を失うものと仮定する。平面応力状態の主応力を σ_1, σ_2 で表わし、Kupfer ら¹⁾の試験データに基づき図-1の限界曲面を定めた。

引張応力下のコンクリートに関しては、応力が図-1の限界曲面の引張切断線を越えると、最大主応力に直交するひびわれが発生した後、ひびわれと直角方向の要素剛性を低下させることにより、その要素を直交異方性連続体として扱う分散ひびわれモデルを採用した。応力-ひずみ関係は図-2を仮定し、損傷度パラメータ ω ($\omega=0$ (無損傷) から $\omega=1$ (完全損傷)) により引張ひずみ軟化特性をモデル化する。ひびわれ後のコンクリートのせん断剛性は図-3のせん断剛性低減係数 β ($\beta=1$ (無損傷) から $\beta=0$ (完全損傷)) により低下させる。引張ひずみ軟化域におけるコンクリートのひびわれ局所座標系に関する応力-ひずみ則は上の ω と β を用いて次式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E(1-\omega)} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\beta G} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

ここに、 E はヤング係数、 G はせん断弾性係数、 ν はポアソン比である。

3. 解析対象構造物の概要

井畔ら²⁾が満載等分布荷重による曲げ試験を行った鉄筋コンクリート梁を対象にひびわれ挙動の二次元有限要素法解析を行った。実験に使われた供試体はせん断破壊を曲げ破壊に先行させるために、支点から $1.5d$ ～中央部で鉄筋の曲げ補強がされており、せん断補強筋は用いられていない。

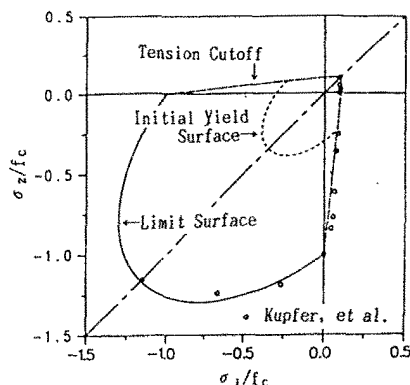
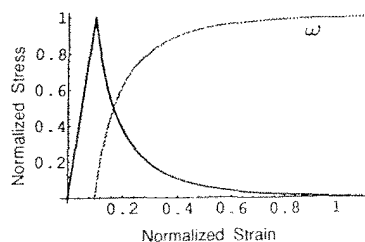
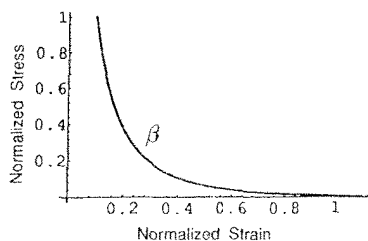


図-1 コンクリートの限界曲面

図-2 損傷度関数 ω と引張軟化曲線図-3 せん断剛性低減係数 β

供試体の解析に用いた有限要素メッシュを図-4に示す。対称性より片側半分のみの解析とし、ひびわれパターンの解析結果が要素分割の方向に依存するのを避けるため、コンクリートには正方形（または長方形）を対角線で4分した定ひずみ三角形要素を用いた。供試体の主鉄筋は3段に配置されているが、解析では鉄筋重心位置に集中させた1次元棒要素によりモデル化し、その全節点に付着リンク要素を挿入した。鉄筋およびコンクリートの各材料定数は表-1に示す。

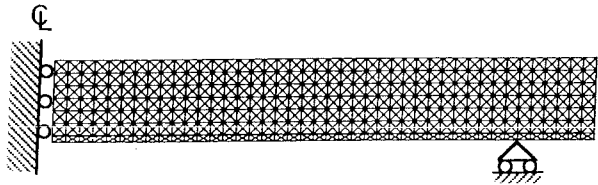
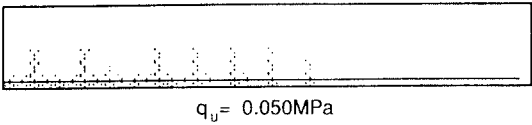
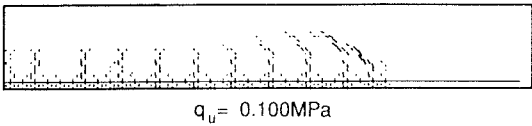


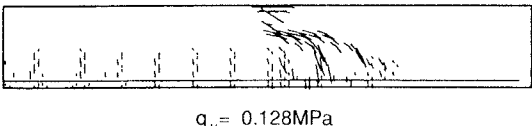
図-4 要素メッシュ



$q_u = 0.050\text{MPa}$



$q_u = 0.100\text{MPa}$



$q_u = 0.128\text{MPa}$

図-5 ひびわれパターン

表-1 材料定数

$f_c(\text{MPa})$	21.1
$f_t(\text{MPa})$	1.81
$E_c(\text{GPa})$	23.8
$G_r(\text{N/mm}^2)$	70
$E_s(\text{GPa})$	210
$f_{sy}(\text{MPa})$	440

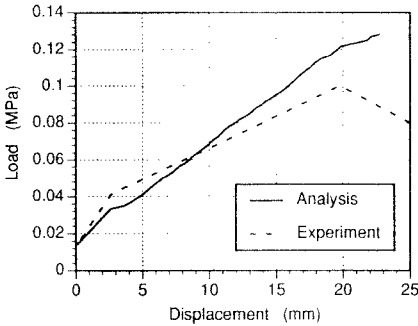


図-6 荷重-変位曲線

4. 解析結果および考察

図-5は、荷重強度 q の増加に伴うひびわれ進展状況であり、図-6は解析により得られたスパン中央点の荷重-変位曲線である。実験では荷重が増加すると、支点から $1.5d$ (d は有効高さ) 付近から発生した斜めひびわれが中央部での曲げひびわれよりも優勢となり、最後に極めて急激な破壊に至ったことが報告されている²⁾。解析でも斜めひびわれの発生と進展がシミュレートされており、櫛歯の付け根が曲げ破壊すると最終破壊に至るといったせん断破壊の性状がうかがわれる。解析の最大荷重が実験値に比べると幾分大きな値を示しているのは、実験の載荷方法が繰り返し載荷なのに対し解析では単調増加で行っているためであると考えられる。

5. 結語

本研究により、せん断破壊のシミュレートが難しいと考えられている満載等分布荷重を受ける鉄筋コンクリート梁に対する二次元有限要素法解析の適用性が確認された。

6. 参考文献

- 1) H.R. Kupfer et al : Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses, ACI Journal, Vol.66, No.8, Aug.1969.
- 2) 井畔瑞人他：等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第348号/ V-1, 1984年8月.