

立命館大学理工学部

正会員 児島孝之

立命館大学理工学部

正会員 高木宣章

立命館大学大学院理工学研究科 学生員 日比野憲太

立命館大学理工学部

学生員 中島忠男

1. はじめに

本研究は、無筋コンクリートの曲げ破壊特性に大きな影響を与えるひび割れの進展に関する有限要素法解析を行った。ひび割れ要素は、アイソパラメトリック線要素を用いて表現し、ひび割れ幅に対する伝達応力関係を定義し、無筋コンクリート梁の引張軟化および寸法効果に代表される非線形挙動を表現した。

2. ひび割れのモデル化

(1) コンクリートの引張軟化特性

コンクリートの引張軟化挙動は、ひび割れ要素の非線形性のみで表現した。ひび割れ要素は、図1に示すひび割れ幅—伝達応力関係から成り立っている。①のコンクリートの応力が引張強度に到達した段階では、実際のコンクリート中にはひび割れが発生しているわけではないが、引張強度の低下を表現するためひび割れ要素を挿入する。この時、ひび割れ要素の挿入によって多少のひずみエネルギーの解放を表現するため、引張強度低下係数 A_{rr} を定義して、破壊進行領域で使用する引張強度の値を $f_u = A_{rr} \times f_t$ とした。また、破壊進行領域が終了するひび割れ幅 w_0 を定義した。次に②の引張強度軟化域に示す引張強度到達以降の曲線は引張軟化曲線と呼ばれ、引張軟化曲線下の面積がコンクリートの破壊エネルギー G_F となる。本解析では、引張軟化曲線に3乗モデルを適用した。最後に③の除荷・再載荷パスでは、一度あるひび割れ幅 w_d に達した後、除荷によってひび割れ幅が $w_d > w$ となった場合、一度到達した w_d に達するまでは、除荷パスを通らなければならない。このため w_d に達するまでは、 w_d でのコンクリートの引張伝達応力 σ_d を最大値とする凹型をした2次曲線でモデル化した。

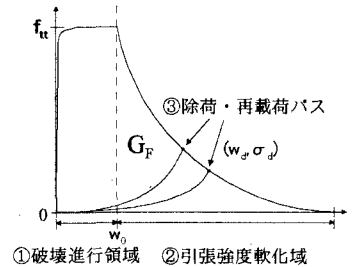


図1 ひび割れ幅—伝達応力関係

(2) ひび割れ要素

図2に示すようにひび割れ幅を δ_n 、ひび割れ面に沿うズレを δ_t 、ひび割れ面に対して垂直に伝達される応力を σ_n 、ひび割れ面に対して平行に伝達されるせん断応力を τ_t とすると式(1)の関係が得られる。

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{nn} & C_{nt} \\ C_{tn} & C_{tt} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_t \end{Bmatrix} = C \delta \quad (1)$$

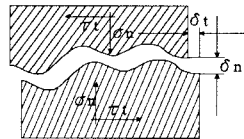


図2 ひび割れ面の応力伝達

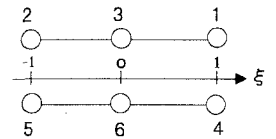


図3 ひび割れ要素

ひび割れは、図3に示す2次の重なったアイソパラメトリック線要素として表現し、ひび割れ発生位置に順次挿入した。ひび割れ要素の節点は、コンクリート要素と共有し

ているものとした。曲げひび割れの場合、ひび割れ間での応力伝達は、両ひび割れ面での δ_n 方向の変位により発生する σ_n に大きく依存すると考えられる。その挙動を直接支配する応力—変位関係である式(1)の C_{nn} の値を、図1のコンクリートの引張軟化曲線モデルから求めることによって、ひび割れ要素にコンクリートの引張軟化特性を導入した。また、解析の単純化のため、 $C_{nt} = C_{tn} = 0$ 、 $C_{tt} = 1.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ の一定値を用いた。

ひび割れ要素の要素剛性マトリックス K_e は、次式で表される。

$$K_e = \int_{-1}^1 B^T C B t ds = \int_{-1}^1 B^T C B t \sqrt{\left(\frac{dx}{d\xi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\xi}\right)^2} d\xi \quad (2)$$

ここで、 t はひび割れ発生位置でのコンクリート厚である。

3. 解析モデル

図4に示すように、供試体の対称性を考慮して左側1/2のみについて解析を行った。境界条件として、支点でY

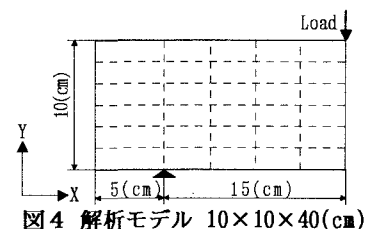


図4 解析モデル 10×10×40 (cm)

Takayuki KOJIMA, Nobuaki TAKAGI, Kenta HIBINO, Tadao NAKAJIMA

方向に固定し、供試体中央部をX方向に固定した。また、荷重は中央一点载荷とした。

寸法効果が的確にモデル化されていることを確認するために、供試体モデル $10 \times 10 \times 40(\text{cm})$ 、また寸法を等倍にした $100 \times 100 \times 400(\text{cm})$ を用いた。梁の曲げ強度 f_b に影響を与えるパラメータとして、コンクリートの破壊エネルギー G_F が挙げられ、 $G_F=0.05, 0.1, 0.2(\text{kgf/cm})$ と3ケースに変化させて解析を行った。また、 $W_0=5.0 \times 10^{-4}(\text{cm})$, $Arr=0.9$ の一定値とし、メッシュ分割に関しては、 5×6 分割を用いた。

4. 解析結果と考察

(1) G_F の変化が供試体の寸法効果に与える影響

供試体モデル $10 \times 10 \times 40(\text{cm})$ は、すべての G_F の値において、モデル中央部にひび割れが発生した後も、図5に示す荷重-载荷点変位曲線の荷重は上昇し、2本目、3本目と支点方向に曲げひび割れが発生した。また、 G_F の値が大きくなると、2本目、3本目の曲げひび割れが载荷点方向に進展した。一方、図6に示す供試体モデル $100 \times 100 \times 400(\text{cm})$ の荷重-载荷点変位曲線からは、スナップバックの発生が確認できた。この原因は、供試体モデルの寸法が大きくなると、初期ひび割れ幅が等倍に大きくなり、モデル中央部に発生した曲げひび割れが図1に示す引張強度軟化域に到達しているため、過大な応力の解放が生じていると考えられる。また、 G_F の値が小さくなると、図1に示す伝達応力が小さくなり解放されるひずみエネルギーが大きくなるため、スナップバックが顕著に現れた。

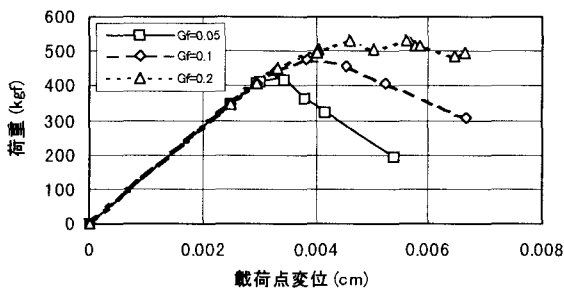


図5 荷重-载荷点変位 $10 \times 10 \times 40(\text{cm})$

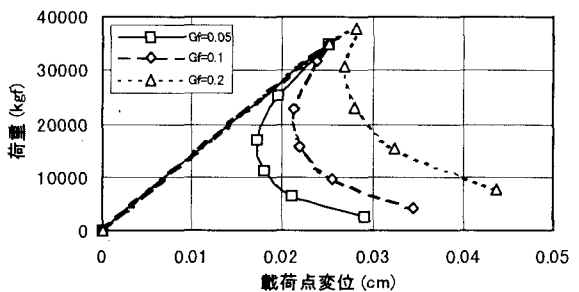


図6 荷重-载荷点変位 $100 \times 100 \times 400(\text{cm})$

(2) G_F の変化が供試体の曲げ強度に与える影響

図7にコンクリートの破壊エネルギーの変化が供試体の曲げ強度の寸法効果に与える影響を示す。また、CEB-FIP MC90の曲げ強度の寸法効果式、式(3)も含めた。

$$\frac{f_b}{f_t} = \frac{1 + 2 \cdot (h/h_0)^{0.7}}{2 \cdot (h/h_0)^{0.7}} \quad (3)$$

ただし、 $h_f=10(\text{cm})$, $h \leq 100(\text{cm})$

$G_F=0.2(\text{kgf/cm})$ を適用した解析結果では、寸法に依存せず式

(3)の計算値よりも大きい曲げ強度となる。しかし、 $G_F=0.05, 0.1(\text{kgf/cm})$ を適用した解析結果では、式(3)の計算値よりも小さい曲げ強度となる。本解析では、 $Arr=0.9$ と実際の引張強度より小さな値を使用しているため、曲げ強度が多少小さくなるものの、 G_F の変化が顕著に曲げ強度に現れるため、寸法効果式には部材寸法のみならず、コンクリートの持つエネルギー的な項をもうける必要があると考えられる。

5. 結論

- (1) コンクリートに発生する曲げひび割れに、アイソパラメトリックひび割れ線要素を挿入することにより、コンクリートの引張軟化現象をある程度表現できるものと考えられる。
- (2) ひび割れ要素の適用により、部材寸法の違いが解析結果に忠実に反映していることが確認できた。
- (3) 曲げ強度には G_F の変化が顕著に現れるため、本研究で比較した寸法効果式には部材寸法の項のみならず、コンクリートの持つエネルギー的な項をもうける必要があると考えられる。

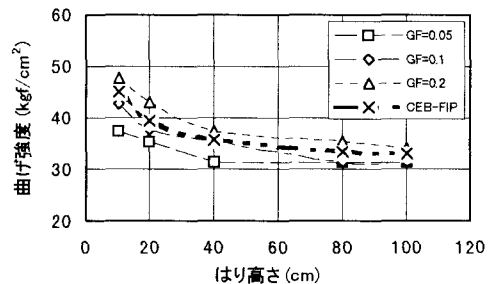


図7 G_F の変化による曲げ強度の変化