

V-115 面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の鉄筋降伏後の鉄筋モデル

東京大学 大学院 学生員 ○申 鉉穆
 関東学院大学 工学部 正会員 出雲 淳一

1. はじめに

ひび割れ分散モデル(smeared crack)を用いて解析を行う場合、鉄筋の構成則（ここでは、平均応力-平均ひずみ関係を指す）として単体鉄筋の構成則を用いるとひび割れ面での鉄筋降伏を正しく評価できないために、降伏後の鉄筋コンクリート部材の引張剛性を高く評価することになる。玉井らはひび割れ間の鉄筋の応力分布に正弦関数を仮定することにより、降伏後の鉄筋コンクリートにおける鉄筋の剛性を表すことができることを報告しているが⁽¹⁾、有限要素解析に適用する場合に鉄筋の構成則が陽な形で表現できないために各荷重ステップ毎に繰り返し計算が必要となり、計算が複雑になってしまう。本研究は、鉄筋コンクリート板要素のパラメータ解析を行い、数値解析のためのより簡単な鉄筋モデルの開発を行ったものである。

2. 解析概要

鉄筋コンクリートの板要素において、降伏後の鉄筋の構成則に影響を及ぼすと考えられるパラメータを設定し、それぞれの影響度を把握するためその値を変えて約200例に対して解析を行った。（表1。参照）解析には当研究室で開発したプログラムを用いており、本プログラムは鉄筋コンクリート板要素の挙動をかなりの精度で追跡できることを著者らは確認している。また本プログラムは降伏後の鉄筋剛性を鉄筋の応力分布に正弦関数を仮定することにより求めている。

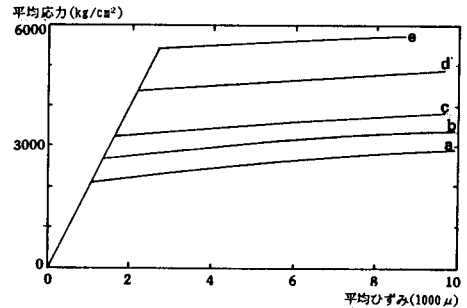
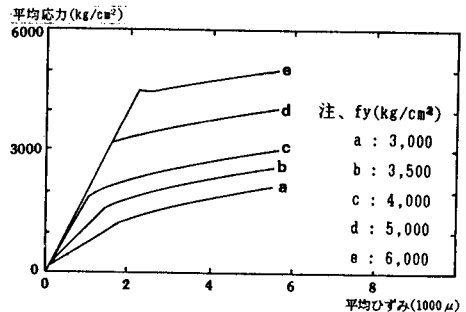
3. 解析結果及び考察

鉄筋コンクリート板要素の解析から得られた鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係の代表的な例を図1に示す。図1.aから降伏後の鉄筋のひずみ硬化率はほぼ一定の傾向が認められる。但し、鉄筋比が非常に低くてコンクリートのひび割れが発生してすぐ鉄筋が降伏する場合（図1.b参照）のひずみ硬化率は安定するまでは一定ではない。その原因は、コンクリートが持つ引張応力はひび割れが発生してから急減して、その後安定するのであると考えられる。また、鉄筋の平均応力は鉄筋の平均ひずみ約10,000 μ で鉄筋降伏強度の90-100%に達している。鉄筋のひずみ硬化率は1)鉄筋比が低いほど、2)鉄筋とひび割れ直角方向との角度が大きいほど、3)鉄筋の降伏強度が低いほど、4)コンクリートの圧縮強度が低いほど、5)溶接された金網鉄筋よりは異形鉄筋の方が大きくなっていることが理解できる。それぞれの原因としてはコンクリートの平均引張応力が鉄筋の平均応力に及ぼす影響の大小、鉄筋の降伏強度と引張強度との差の大小等が考えられる。

4. 降伏後の鉄筋モデルの提案

表1. 解析規模

要因	係数
鉄筋の種類	異形、溶接金網
鉄筋比 p_x (%) ただし、 $p_x \leq p_y$	0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0
鉄筋比の比 p_y/p_x	1.0, 2.0, 3.0
鉄筋の降伏強度 f_y (kg/cm ²)	3000, 3500, 4000, 5000, 6000
鉄筋とひび割れ直角方向との角度 θ (°)	0, 15, 30, 45
コンクリートの圧縮強度 f_c' (kg/cm ²)	200, 250, 300, 400

(a) $p_x = p_y = 1.0\%$ (b) $p_x = 0.5\%$, $p_y = 1.5\%$ 図1. 鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係曲線
 （異形鉄筋、 $\theta = 45^\circ$ 、 $f_c' = 300 \text{ kg/cm}^2$ ）

解析結果から鉄筋の平均ひずみに対する平均応力の式はバイリニアの型で表現できることは認められる。但し、鉄筋比が非常に低い場合はひずみ硬化率が変わる区間に対して適切な措置をしなければならない。その措置案としては鉄筋モデルをトリリニアの型にする案や鉄筋モデルはバイリニアの型をそのまま用いてひずみ硬化開始点を修正する案などが考えられる。ここでは鉄筋モデルの簡単化のため後者のひずみ硬化開始点を修正する案を採用することにした。

（1）鉄筋のひずみ硬化開始点

鉄筋のひずみ硬化開始点はひび割れ面での鉄筋が降伏する点である。ただし、鉄筋比が非常に低い場合はその開始点を次のように修正する。

$$\sigma_{sy} = \sigma_{syo} \quad \text{-----} \quad (1)$$

ただし、 $\sigma_{sy} \geq 0.5 \cdot K_{ya} \cdot K_{ka} \cdot f_y$

ここに、 σ_{sy} = 鉄筋のひずみ硬化開始点 (kg/cm²)

σ_{syo} = ひび割れ面での鉄筋降伏時の
鉄筋の平均応力 (kg/cm²)

$K_{ya} = (0.1 \cdot p_x \cdot f_y / f_c')^{0.5}$, 但し $K_{ya} \leq 1$

$K_{ka} = 1$ (異形鉄筋) または

0.2 (溶接された金網鉄筋)

（2）鉄筋のひずみ硬化率

鉄筋のひずみ硬化率に及ぼす各々要因に対してパラメーター解析を行った結果により次の式を提案する。

$$E_{sh} = 100 \cdot (f_y - \sigma_{sy}) \cdot K_p \cdot K_y \cdot K_h \cdot K_a \cdot K_c \cdot K_k \quad \text{-----} \quad (2)$$

ここに、 E_{sh} = コンクリート中における鉄筋のひずみ硬化率 (kg/cm²) , $K_p = p_x \cdot (0.5 + p_x)$

$K_h = (p_y / p_x)^{0.887}$, $K_y = (4000 / f_y)^{0.1} \cdot p_y / p_x \cdot \cos(\theta)$, $0 \leq \theta < 90$

$K_a = |1 / \cos(\theta)|^{0.2}$, $K_c = |300 / f_c'|^{0.25}$

$K_k = 1$ (異形鉄筋) または 0.72 (溶接された金網鉄筋)

約200例の解析結果から得られたひずみ硬化率に対する提案式によるひずみ硬化率の比の平均は、1.01、及び変動係数は、9.6%であった。また本提案式を用いてCollins・Vecchia及び青柳・山田の実験から鉄筋の降伏が認められる供試体を選んで解析を行った解析結果を図2,3に示す。図中の実線は提案モデルによる解析結果であり、破線は元のモデルによる解析結果である。図でわかるように提案モデルが鉄筋コンクリートの降伏後の挙動をよく表していると判断される。

5. まとめ

本文は有限要素解析の簡単化のため、より簡単な鉄筋降伏後の鉄筋モデルを提案したものである。提案モデルは一定なひずみ硬化率とひずみ開始点を持つバイリニア型でしかも鉄筋のひび割れ間の応力分布を考えた元のモデルとほぼ等しく使われると言える。

謝辞 本研究をご指導頂いた岡村 甫教授に対してここに謝意を表します。また、貴重な実験データを頂いた山田博士に対しても紙面を借りて厚くお礼を申し上げます。本研究は、文部省科学研究費補助金（一般研究A・課題番号61420035）を受けて行ったものである。

参考文献 1)玉井・島・出雲・岡村：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力－平均ひずみ関係，土木学会論文集，No.378/V-6,2,1987

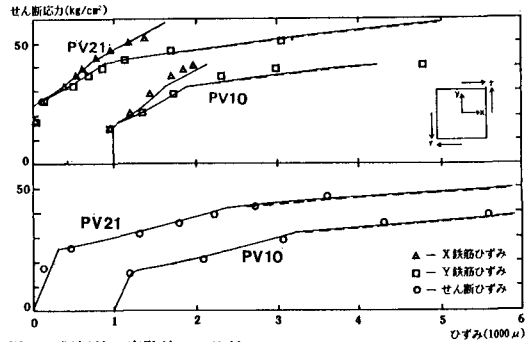


図2. 解析値と実験値との比較－ Collins・Vecchiaの実験

・PV10 ; $p_x = 1.79\%$, $p_y = 1.00\%$, $f_c' = 148 \text{ kg/cm}^2$

・PV21 ; $p_x = 1.78\%$, $p_y = 1.31\%$, $f_c' = 199 \text{ kg/cm}^2$

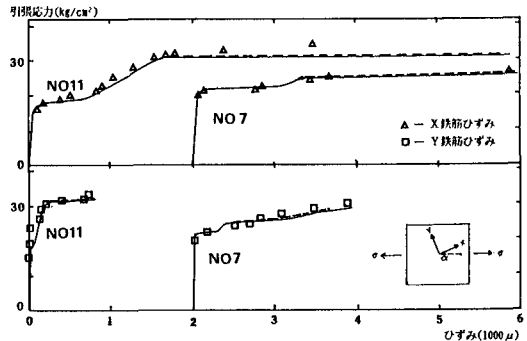


図3. 解析値と実験値との比較－ 青柳・山田の実験

・NO7 ; $p_x = p_y = 0.71\%$, $\alpha = 22.5^\circ$, $f_c' = 239 \text{ kg/cm}^2$

・NO11 ; $p_x = p_y = 0.71\%$, $\alpha = 12.5^\circ$, $f_c' = 207 \text{ kg/cm}^2$