

V-376 鉄筋のダボ変形と軸変形の連成作用に関する非線形FEM解析

正会員 前田建設工業 技術研究所 三島 徹也
 正会員 前田建設工業 技術研究所 原 夏生
 正会員 東京大学 土木工学科 前川 宏一

1. はじめに

著者らは鉄筋のダボ変形と軸変形(抜け出し)の連成作用が鉄筋軸剛性を低下させることを実験的に明らかにし、鉄筋のダボ効果がひびわれ面のせん断伝達耐力を低下させる可能性を示唆した¹⁾。この現象はひびわれ面近傍での極めて局所的な非弾性挙動によって支配されるため、実験的検討には限界があり、解析的アプローチとの併用が望まれる。しかも、本現象はコンクリートのせん断伝達、鉄筋の塑性挙動、付着作用等が複雑に絡み合った結果として生じるため、簡略化した解析は現象の本質を見誤る恐れがある。本報告では、鉄筋コンクリート部材の一面せん断試験を対象に、できるだけ実際の挙動に忠実にモデル化した非線形FEM解析によって鉄筋のダボと抜け出しの連成作用を求め、本報告のFEM解析が解析的アプローチに有用であることを確認する。

2. 解析モデル

(1) 解析対象 解析対象は一本の直交補強鉄筋を有するコンクリートひびわれ面であり、ひびわれ面にせん断ズレ変位を与える変位制御によって解析を実施した。解析に使用したモデルは図-1に示す通りである。コンクリート、鉄筋部分とも、基本的には4節点アイソパラメトリック平面要素でモデル化した。比較のため、鉄筋部にトラス要素(線材)を用いた解析を併せて実施した。なお、鉄筋をトラス要素でモデル化することは、ダボ効果を無視することと等価である。ひびわれ面ならびに鉄筋とコンクリートの境界面には、界面の相対変位を考慮するために4節点接合要素を用いた。解析結果は鉄筋径、鉄筋比の影響を受けるが、本報告では鉄筋比1.0%、鉄筋径D16の解析について述べる。

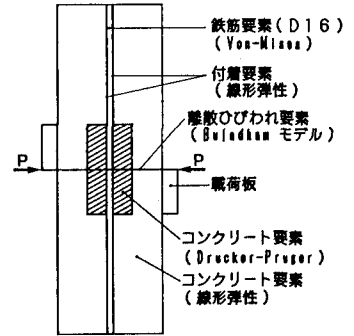


図-1 解析モデル図

(2) 材料モデル コンクリートは、求解時の収束性向上を考慮して、簡便に弾塑性材料でモデル化した。降伏条件には Drucker - Prager式 ($f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2}$) を用い、相当塑性ひずみ γ と相当せん断応力 τ の関係はバイリニア型を用いた。なお、載荷点近傍の局部破壊を防ぐために、斜線部以外は弾性モデルを用いた。鉄筋も弾塑性材料とし、平面要素の場合は Von Misesの降伏条件を用い、トラス要素の場合はバイリニア型の応力-ひずみ関係を用いた。鉄筋とコンクリート間の付着特性は弾性バネでモデル化することとし、鉄筋降伏時のひびわれ面での抜け出し量がモデル²⁾とほぼ同等になるようにバネ定数を設定した。なお、ひびわれ面近傍の付着劣化を考慮するために、ひびわれ面から4D区間の付着はゼロとした。ひびわれ面には、せん断ズレに伴うダイレタンシ効果を考慮できるように、著者らの一般化離散ひびわれモデル³⁾を用いた。解析に用いた材料定数は表-1に示す通りである。

表-1 材料定数一覧表

コン	弾性係数	2.0×10^4	kgf/cm ²
ク	ポアソン比	0.17	
リ	圧縮強度	240	kgf/cm ²
ト	α	0.1	
	τ_y	150	kgf/cm ²
	ひずみ硬化率	0.01	
鉄	弾性係数	2.0×10^6	kgf/cm ²
筋	ポアソン比	0.25	
	降伏強度	4000	kgf/cm ²
	ひずみ硬化率	0.01	
付	軸剛性	2.0×10^8	kgf/cm ² /cm
着	せん断剛性	7.7×10^8	kgf/cm ² /cm

3. 解析結果

(1) せん断ズレ-せん断応力関係 図-2は、鉄筋を実際の挙動に忠実に平面要素でモデル化した場合と、鉄筋のダボ作用を無視してトラス要素(線材)でモデル化した場合の、ひびわれ面のせん断ズレ-せん断応力関係を比較したものである。従来、線材を用いた解析は鉄筋のせん断伝達を無視しているため、せん断耐力を低く

算定すると考えられてきたが、ダボ効果を見逃したためにかえって耐力的に強くなる場合もあることが分かる。これは、「ダボ変形に起因する鉄筋軸剛性低下現象」によるものであり、著者らによって実験的に明らかにされている¹⁾。本報告の解析モデルを用いれば、解析的にも同様の現象が生じることが確認できる。図-3 に、最終解析ステップでの変形図を示す。

(2) 開口変位-鉄筋応力関係 図-4 はひびわれ面の開口変位 (=鉄筋抜け出し量×2) とひびわれ位置での鉄筋の平均軸応力の関係を示したものである。鉄筋を線材としてモデル化した場合、鉄筋の抜け出しとズレ変形は連成しないため、申モデルと良く一致している。一方、平面モデルは、ズレ変位の影響で鉄筋の一部が降伏すると同時に大きく剛性が低下し、見かけ上軸方向耐力が低下している。鉄筋比が1.0%の場合、図-2 に示すようにダボ作用によって15%程度のせん断力を負担できるが、それ以上に鉛直方向の拘束力低下に伴うせん断耐力低下が生じているのである。

(3) 鉄筋のせん断変形の影響 鉄筋軸剛性低下現象は鉄筋に導入された鉄筋曲率と関連づけることができる。ところが、Von Mises の降伏条件を考慮すると、せん断ひずみが存在すると降伏時の鉄筋軸応力は一軸降伏強度よりさらに低下するため、せん断変形の効果も併せて検討する必要がある。通常のはり部材の場合、ズレ変形 δ と鉄筋曲率 ϕ の間には変形の適合条件として $\delta/2 = \int \phi dx$ が成立する。図-5 は、このようにして鉄筋の曲率を2重積分することによって得られたズレ変形 δ_b とひびわれ面のズレ変形 δ の関係を示したものである。変形が小さい時には両ズレ変形はほぼ一致しているが、変形が進むにつれてズレ変形 δ の方が大きくなっている。このことは、鉄筋の降伏後はせん断変形が支配的であり、せん断塑性ひずみの影響を見逃し得ないことを示唆している。今後のモデル化においては、鉄筋の曲率の影響とせん断降伏の影響を同時に考慮することが重要であろう。

4. おわりに

一面せん断試験の非線形FEM解析を実施し、本解析が鉄筋のダボと抜け出し連成作用のメカニズム解明に有用であることを示した。今後は、鉄筋径、鉄筋比、ひびわれ面に作用する鉛直応力等をパラメータとした解析を実施し、さらに検討を行う予定である。

【参考文献】

- 1) 三島他：ひびわれ面で軸変形とズレ変形を同時に受ける軸方向鉄筋の非弾性挙動に関する研究、第14回コンクリート工学年次学術講演会論文集（投稿中）
- 2) 申 鈺鏞：繰り返し面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の有限要素解析、東京大学博士論文、1988年6月、
- 3) 三島他：正負交番載荷に適用可能なRC離散ひびわれモデルの開発とその適用範囲、土木学会論文集No. 442、pp. 181-190、1992年2月

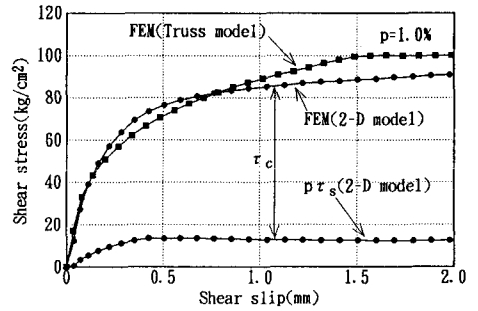


図-2 せん断ズレ-せん断応力関係

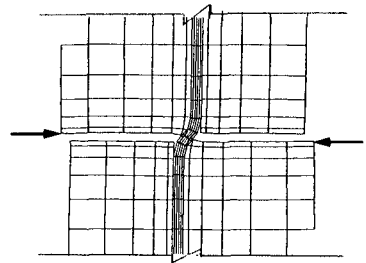


図-3 最終変形図

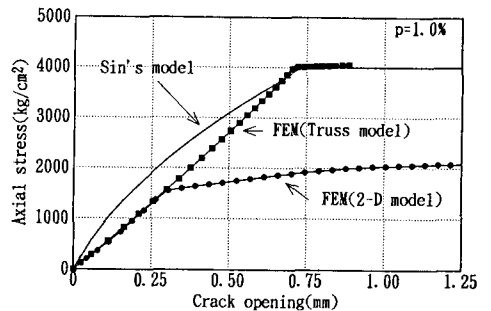


図-4 開口変位-鉄筋応力関係

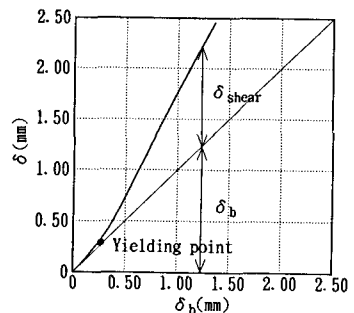


図-5 δb-δ関係