

付着割裂破壊に着目した RC はりの斜め引張破壊有限要素解析

清水建設技術研究所 正会員 長谷川 俊昭

1. はじめに

鉄筋とコンクリートの付着作用は鉄筋コンクリートはりの斜め引張破壊において様々な影響を及ぼすことが知られている。特に付着割裂破壊は引張鉄筋に沿った軸方向ひび割れが斜めひび割れの不安定伝播と連動し崩壊機構へ発展するものと考えられる。本研究では付着割裂破壊を考慮した RC はりの斜め引張破壊解析を実施し、斜め引張破壊機構における付着割裂破壊の影響について検討した。

2. 解析の概要および結果

付着割裂ひび割れは、鉄筋が引っ張られた場合鉄筋の節から周囲のコンクリートに伝達される力によってコンクリート内に鉄筋円周方向の引張応力が発生するために生じるものであり、これを合理的にシミュレートするには鉄筋コンクリートの3次元応力解析が不可欠である。しか

しながらそのような鉄筋の節のインターロック応力伝達機構を3次元的に表現するにはメソレベルのより詳細なモデル化が必要であり、それらを実験的に同定するのも容易ではない。そこで本研究では、この付着割裂破壊機構を2次元平面応力場において便宜的に模擬する手法を探索した。すなわち、図-1と図-2に示したようにコンクリート要素、鉄筋要素、付着界面要素を連結して、付着要素が付着すべりにともない付着すべりの直角方向へ膨張しこの膨張変位（膨張力）がコンクリート要素に引張応力を生じさせ付着割裂ひび割れ（鉄筋軸方向ひび割れ）が発生するという現象論的なモデル化を考えることとした。ここではその現象論モデルとして式(1)、(2)で表現される Coulomb 摩擦弾塑性モデルすなわち塑性ダイレイタンスーモデルを用いる。RC の有限要素解析で多用される付着界面要素の付着応力 τ -すべり S 構成モデルでは式(1)の非対角項がゼロであり、このダイレイタンスー（交差効果）を考慮していない。

$$d\mathbf{t} = \mathbf{D} d\mathbf{u} = \begin{bmatrix} D_{nn} & D_{nt} \\ D_{tn} & D_{tt} \end{bmatrix} d\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}^e - \frac{\mathbf{D}^e \frac{\partial g}{\partial \mathbf{t}} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{t}}}{h + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{t}} \mathbf{D}^e \frac{\partial g}{\partial \mathbf{t}}} \mathbf{D}^e \\ \frac{\partial f}{\partial \mathbf{t}} \mathbf{D}^e \frac{\partial g}{\partial \mathbf{t}} \end{bmatrix} d\mathbf{u} \quad (1)$$

$$f = \sqrt{t_t^2 + t_n^2} \tan \phi - c(\kappa) = 0 ; \quad g = \sqrt{t_t^2 + t_n^2} \tan \psi \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{t}$ ：垂直応力 t_n と付着応力 t_t ； $\mathbf{u}$ ：垂直変位とすべり； $\mathbf{D}^e$ ：弾性マトリックス； f ：降伏関数； g ：塑性ポテンシャル関数； ϕ ：摩擦角度； ψ ：ダイレイタンスー角度； $c(\kappa)$ ：粘着力； κ ：内部状態変数（等価塑性ひずみ）； h ：塑性硬化係数。

関連流れ則を用いたが塑性ダイレイタンスーの大きさが付着割裂ひび割れの発生を支配すると考え、 g のダイレイタンスー角度 ψ を表-1に示された範囲で変化させて解析を行なった。付着応力 τ -すべり S -鉄筋ひずみ ε_s 関係をを用いた両引き試験体の付着微分積分方程式の数値解法より決定した τ - S 関係式（付着モデル b-3）¹⁾ から塑性硬化則（ $c(\kappa)$ - κ 関係）を同定した。図-4は本 Coulomb 摩擦弾塑性モデル

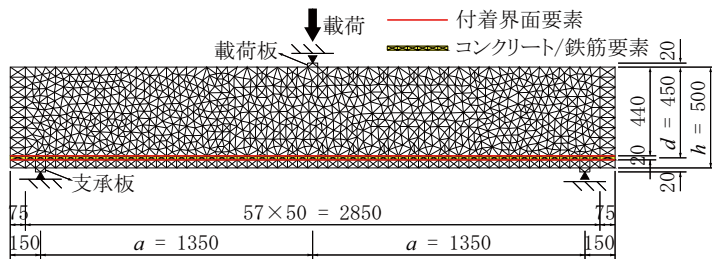


図-1 有限要素メッシュ

表-1 解析ケース

解析ケース	付着界面要素の構成モデル	$\tan \phi = \tan \psi$
I01	付着せん断-すべり関係のみ	—
I02	Coulomb摩擦弾塑性モデル	0.5
I03	Coulomb摩擦弾塑性モデル	1.0
I04	Coulomb摩擦弾塑性モデル	1.5
I05	Coulomb摩擦弾塑性モデル	2.0

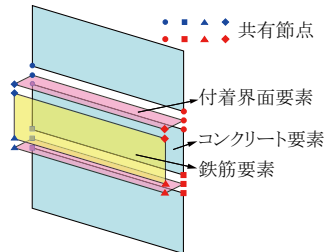


図-2 付着モデル化

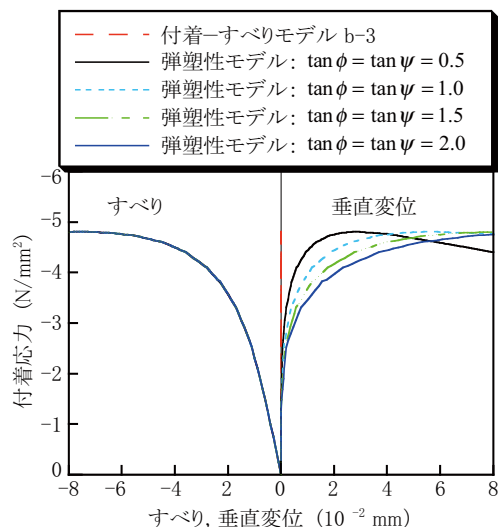


図-3 付着構成モデル

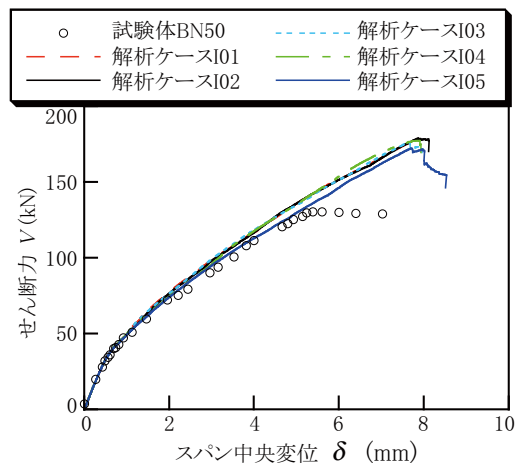


図-4 せん断応答

キーワード：鉄筋コンクリート、斜めひび割れ、付着割裂破壊、Coulomb 摩擦弾塑性モデル、有限要素破壊解析
〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL 03-3820-6960 FAX 03-3820-5955

を用いた一面せん断解析の結果であり、 ψ の大きさによって垂直変位すなわち塑性ダイレイタンスを調整できることがわかる。コンクリートの構成モデルとしては多等価直列相モデルを用い、鉄筋はVon Mises弾塑性モデルを仮定した。図-4は各解析ケースで得られたせん断応答をToronto大学の実験結果と比較したものであるが、Coulomb摩擦を考慮しても実験せん断耐力を精度良く評価することはできなかった。図-6～図-15は、各解析ケースにおける最大耐力時のひび割れ状況ならびに増分変位を示したものであり、増分変位図には最大主ひずみ分布が重ね描きしてある。付着要素が塑性すべりを生じると塑性ダイレイタンスをともない垂直変位が発生しこれによって鉄筋要素の背面に重ねられたコンクリート要素に引張応力が発生し付着割裂ひび割れが再現されるという機構を予期していたが、付着要素上部のコンクリート要素に軸方向ひび割れが多く発生する結果となった。付着すべりにともなう塑性ダイレイタンスが考慮されていない解析ケースI01と $\tan\psi = 1.0$ および1.5として塑性ダイレイタンスを考慮した解析ケースI03およびI04とを比較した場合、後者の方が付着割裂ひび割れとそれに連結した斜めひび割れが大きく発達していることがわかる。塑性ダイレイタンスを考慮した解析ケースでは斜め引張破壊に支配的な斜めひび割れの起点が支点側に寄っており、実験結果(図-5)とよく対応している。また付着割裂ひび割れに連結した斜めひび割れの傾斜角度が小さくなるためひび割れ面での骨材かみ合い作用も減少しせん断耐力が僅かながらも低減している。本検討で対象とした試験体では最終的に斜めひび割れがはり曲げ圧縮領域の下側へ潜り込むことによって斜め引張崩壊機構が完結するが、解析ケースI04の図-12と図-13からは、そのような傾向が再現されていることがわかる。

3. まとめ

鉄筋の付着すべりにともなうコンクリートの鉄筋円周方向応力の発生機構をCoulomb摩擦弾塑性モデルと付着界面要素を用いることによって現象論的に表現し、付着割裂ひび割れと斜めひび割れの相互作用がもたらすRCはりの斜め破壊機構を数値解析的に検討した。

[参考文献]

- 1) 長谷川俊昭：RCはりの斜め引張破壊解析における鉄筋付着の影響，土木学会第62回年次学術講演会講演概要集，V-352, pp.703-704, 2007年。

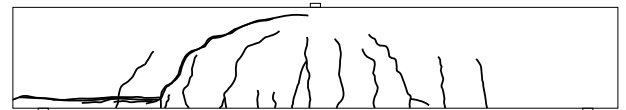


図-5 実験における試験体 BN50 の最終破壊状況

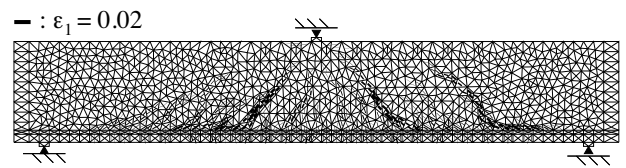


図-6 解析ケース I01 のひび割れ状況

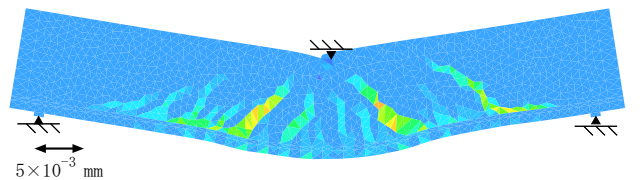


図-7 最大耐力時の増分変位 (解析ケース I01)

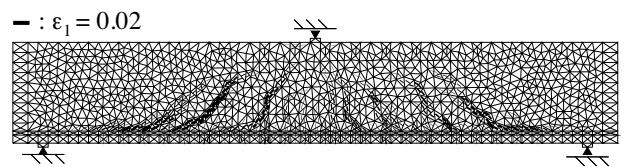


図-8 解析ケース I02 のひび割れ状況

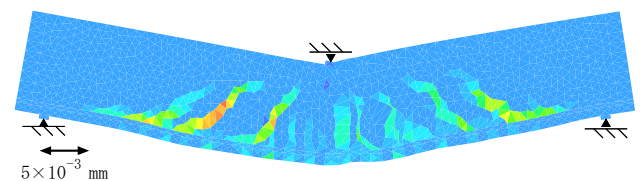


図-9 最大耐力時の増分変位 (解析ケース I02)

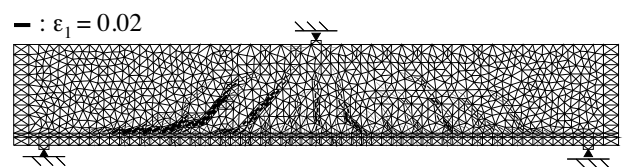


図-10 解析ケース I03 のひび割れ状況

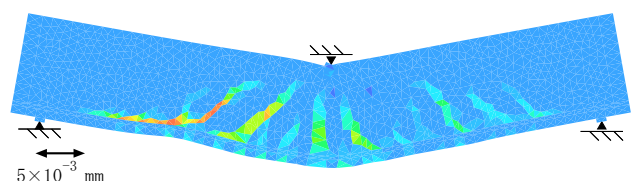


図-11 最大耐力時の増分変位 (解析ケース I03)

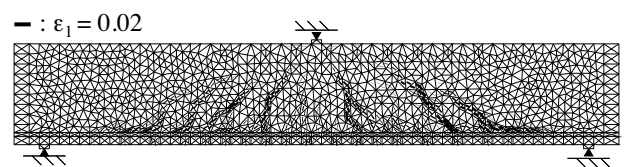


図-14 解析ケース I05 のひび割れ状況

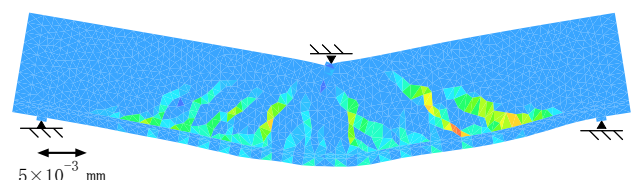


図-15 最大耐力時の増分変位 (解析ケース I05)

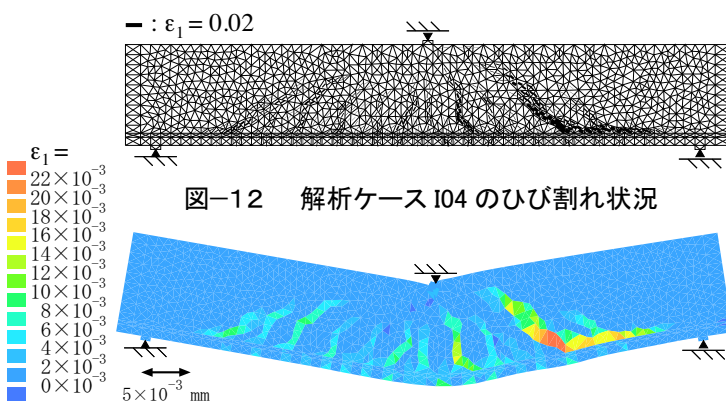


図-12 解析ケース I04 のひび割れ状況

図-13 最大耐力時の増分変位 (解析ケース I04)