

RCはりの斜め引張破壊に関する数値解析的検討

清水建設技術研究所 正会員 長谷川 俊昭

1. はじめに

本研究は、せん断補強筋を用いない鉄筋コンクリートはりの斜めひび割れの重要な誘発因子である引張鉄筋に沿って発生する軸方向ひび割れ¹⁾に着目し、斜め引張破壊機構を数値解析的に検討したものである。

2. 解析の概要および結果

本解析では、Toronto大学²⁾のせん断補強筋を用いない鉄筋コンクリートはり試験体BN50（有効高さ $d = 450 \text{ mm}$ ）を解析対象として表-1に示した解析ケースを実施した。斜めひび割れの再現性に影響を及ぼす要素分割法としては、cross-diagonal mesh (CDメッシュ)ならびにDelaunay三角分割法によるメッシュを組み合わせたものを採用し(図-1, 2, 3)、鉄筋のdowel作用および軸方向ひび割れを考慮するため鉄筋周囲の引張部を図-4のようにモデル化した。解析は多等価直列相(MESP)モデル³⁾と一般化マイクロプレーンコンクリート(EMPC)モデルを組み込んだ汎用有限要素解析コードDIANA（コンクリート構造物破壊解析システムFASCOS）を用いた。表-1に各解析ケースの着目点と検討事項ならびに解析結果の概要を示した。解析ケースA01ではCDメッシュのため実験で観察される低傾斜角の斜めひび割れの曲線形状(図-6)を再現できないが、軸方向ひび割れによって誘発される斜めひび割れ破壊の機構を再現できた(図-7, 9)。CDメッシュでは要素の整列した方向に

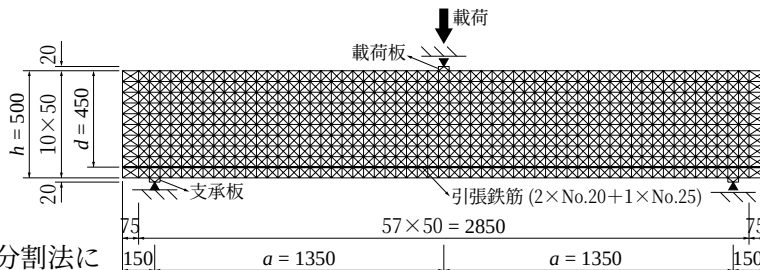


図-1 要素分割タイプ e-1

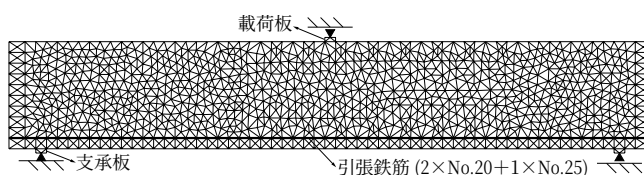


図-2 要素分割タイプ e-2

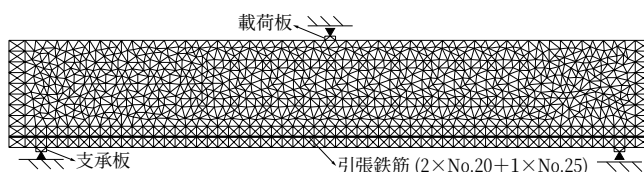


図-3 要素分割タイプ e-3

表-1 解析ケース

解析ケース	要素分割タイプ	引張部モデル	解析上の主な着目点と検討事項	解析結果の概要
A01	e-1	t-1	基本解析ケース	軸方向ひび割れの安定伝播後に斜めひび割れ破壊。CDメッシュのため斜めひび割れ形状にメッシュ依存性が生じ耐力を過大評価
A02	e-1	t-2	引張硬化構成モデルの使用の妥当性検討	引張硬化構成モデルのためせん断ひび割れの開口に対する拘束効果が増大してせん断耐力が上昇し曲げ引張破壊
A03	e-1	t-4	鉄筋トラス要素と付着すべり界面要素の妥当性検討	鉄筋の付着すべりのため斜めひび割れが発達せず曲げ引張破壊
A04	e-2	t-1	Delaunay三角分割法によるメッシュ依存性の除去	軸方向ひび割れと斜めひび割れが発達せず曲げ引張破壊
A05	e-2	t-3	鉄筋はり要素によるdowel作用の検討	軸方向ひび割れと斜めひび割れが発達せず曲げ引張破壊
A06	e-2	t-5	鉄筋はり要素と付着すべり界面要素の妥当性検討	鉄筋の付着すべりのため斜めひび割れが発達せず曲げ引張破壊
A07	e-2	*1) t-6	鉄筋はり要素のdowel作用による分離ひび割れの発生	分離ひび割れ界面要素における軸方向ひび割れの発生とともに発散
A08	e-2	*2) t-6	鉄筋はり要素のdowel作用による分離ひび割れの発生	反復収束計算過程では分離ひび割れ界面要素で軸方向ひび割れが発生するが収束達成時には発生せず耐力が上昇し曲げ引張破壊
A09	e-2	*1) t-7	分離ひび割れに及ぼす鉄筋付着すべりの影響	鉄筋の付着すべりのため軸方向ひび割れが発生しない
A10	e-2	*1) t-8	鉄筋の上側と下側において分離ひび割れ界面を仮定した場合	鉄筋の上側と下側の分離ひび割れ界面要素で同時に軸方向ひび割れが発生し発散
A11	e-2	*2) t-8	鉄筋の上側と下側において分離ひび割れ界面を仮定した場合	反復収束計算過程では分離ひび割れ界面要素で軸方向ひび割れが発生するが収束達成時には発生せず耐力が上昇し曲げ引張破壊
A12	e-3	t-3	軸方向ひび割れの発生と進展に及ぼすCDメッシュの影響	軸方向ひび割れと斜めひび割れが拡大したステップで擬似的運動モードが発生し発散
A13	e-3	*3) t-3	鉄筋はり要素のdowel作用を強化するため回転自由度を拘束した場合の影響	鉄筋はり要素の回転自由度を拘束したため軸方向ひび割れが鉄筋から離れた位置において発生
A14	e-1	t-1	寸法効果の検討 (有効高さ $d = 225 \text{ mm}$)	軸方向ひび割れの安定伝播後に斜めひび割れ破壊。CDメッシュのため斜めひび割れ形状にメッシュ依存性が生じ耐力を過大評価

*1) 分離ひび割れ発生後のせん断低減法：せん断剛性ゼロ，せん断応力解放

*3) 鉄筋はり要素の回転自由度を拘束

*2) 分離ひび割れ発生後のせん断低減法：せん断剛性ゼロ，せん断応力保持

キーワード： 鉄筋コンクリート，斜め引張破壊，軸方向ひび割れ，多等価直列相モデル，有限要素破壊解析
〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL 03-3820-5515 FAX 03-3820-5955

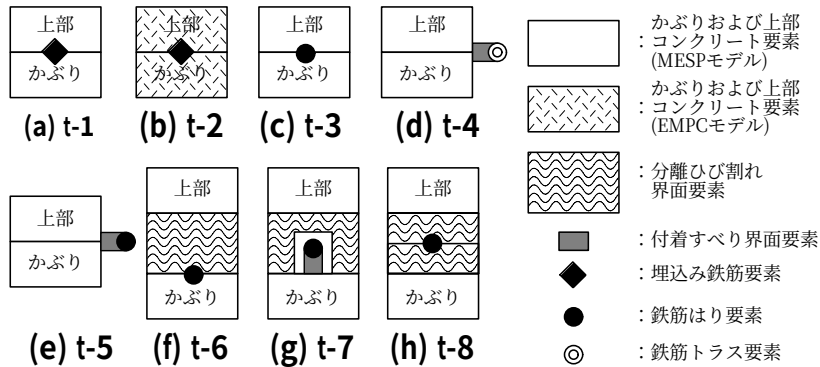


図-4 引張部モデル

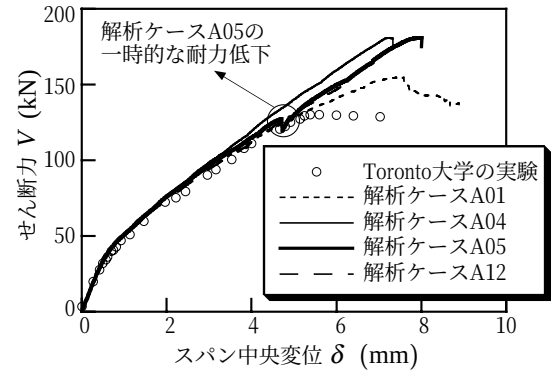


図-5 せん断応答の比較

沿ってひび割れが容易に進展する反面、ひび割れの傾斜角が大きいため骨材のかみ合い抵抗が増大し、軸方向ひび割れが不安定伝播しにくくなるためせん断耐力を過大評価している(図-5)。寸法効果を検討した解析ケースA14においても解析ケースA01と同様な結果が得られたが斜めひび割れの発生位置と形状ならびに軸方向ひび割れの開口状態に微妙な変化が現れた(図-10)。一方、Delaunayメッシュを用いた解析ケースでは図-8、11に示した解析ケースA05のように実験の斜めひび割れや軸方向ひび割れを比較的良好に再現することができている。特に鉄筋はり要素のみによってdowel作用を考慮した解析ケースA05では、実験せん断耐力のレベルにおいて軸方向ひび割れが急激に伝播し斜めひび割れを大きく開口させたため一時的な耐力低下が生じている(図-5、11)。しかしその後軸方向ひび割れが不安定伝播しないため斜めひび割れも発達せず曲げ引張破壊が生じてしまった。軸方向ひび割れを分離ひび割れ界面要素として考慮した引張部モデルt-6～t-8を採用したいくつかの解析ケースでは実験せん断耐力のレベルにおいて軸方向ひび割れの不安定伝播が生じて収束計算が発散したが、それが斜めひび割れの不安定伝播につながっていたかを確認することはできなかった。本解析結果ならびにChanaの研究¹⁾より明らかなように斜めひび割れ破壊を予測するためには鉄筋のdowel作用と付着すべりがもたらす複雑な局所的破壊現象およびそれにもなう軸方向ひび割れの不安定伝播を精度よく評価する必要があると考えられる。斜め引張破壊に関する既往の多くの解析では軸方向ひび割れを再現しておらず斜め引張破壊の真の機構をとらえているとはいえない。

3. まとめ

鉄筋に沿った軸方向ひび割れに着目してせん断補強筋を用いない鉄筋コンクリートはりの斜め引張破壊を数値解析的に検討した結果、軸方向ひび割れを精度よく再現することが斜め引張破壊の合理的な予測に重要であるということが明らかになった。

[参考文献]

- 1) Chana, P. S.: Investigation of the mechanism of shear failure of reinforced concrete beams, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 39, No. 141, pp.196-204, 1987.
- 2) Podgorniak-Stanik, B. A.: The influence of concrete strength, distribution of longitudinal reinforcement, amount of transverse reinforcement and member size on shear strength of reinforced concrete members, University of Toronto, 1998.
- 3) Hasegawa, T.: Multi equivalent series phase model for nonlocal constitutive relations of concrete, *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, AEDIFICATIO Publishers, Germany, pp.1043-1054, 1998.

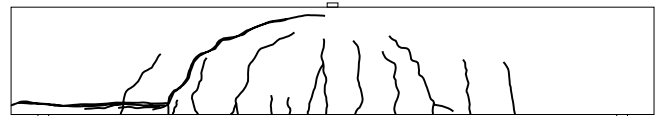


図-6 実験における試験体BN50の最終破壊状況

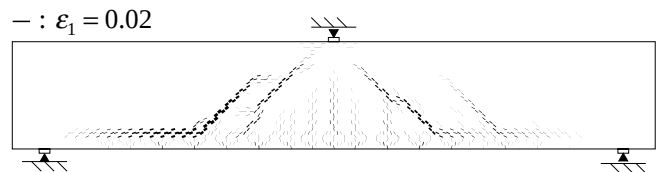


図-7 最大耐力時のひび割れひずみ (解析ケースA01)

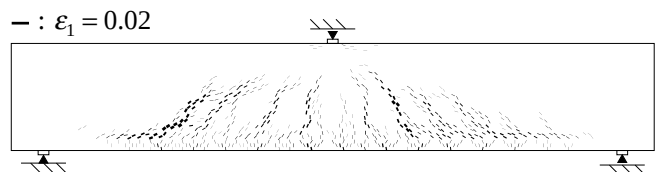


図-8 最大耐力時のひび割れひずみ (解析ケースA05)

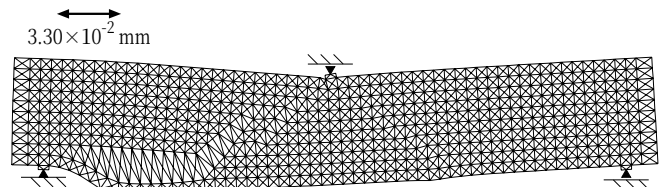


図-9 最大耐力時の増分変形 (解析ケースA01)

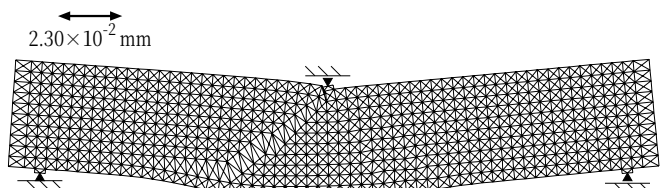


図-10 最大耐力時の増分変形 (解析ケースA14)

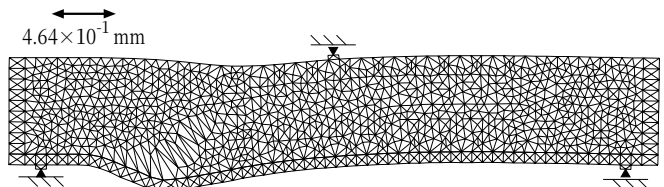


図-11 一時的な耐力低下時の増分変形 (解析ケースA05)