

RCはりの斜め引張破壊解析における有限要素メッシュ依存性

清水建設技術研究所 正会員 長谷川 俊昭

1. はじめに

鉄筋コンクリートはりの斜め引張破壊に関する有限要素解析ではメッシュ依存性が解の精度を大きく支配する．本研究では，著者のRCはりの解析結果^{1) 2)}におけるメッシュ依存性を軽減することによって合理的な斜め引張破壊機構の再現を試みた．

2. 解析の概要および結果

斜め引張破壊を合理的に精度良く再現するためには円弧状の斜めひび割れと引張鉄筋に沿って発生する軸方向ひび割れの幾何形状を正確にシミュレートする必要があると考えられる．図 - 1, 2 では，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 (Delaunayメッシュ) を用いた解析ケースA01およびA05¹⁾において得られたひび割れひずみ分布が対応する

実験結果と比較されている．この比較結果をもとに斜めひび割れの不安定伝播を誘起させるような図 - 3, 4, 5 の修正要素分割メッシュを作成した．これらの要素分割メッシュは4個の定ひずみ

三角形要素を組み合わせたCDメッシュユニットではひび割れが要素辺方向に伝播しやすいというメッシュ依存性を利用し，CDメッシュユニットから構成されるひび割れ伝播誘導領域を基本となるCDメッシュモデル (図 - 1) およびDelaunayメッシュモデル (図 - 2) に挿入し斜めひび割れ破壊を生じやすいようにしたものである．表 - 1 に本解析シリーズで実施した解析ケースD01～D04を示す．図 - 6 は修正CDメッシュAまたはBを用いた解析ケースD01，D02，D03のせん断応答を基本CDメッシュの解析ケースA01と比較したものである．図 - 7～10 は解析ケースD01とD02の最大耐力時におけるひび割れひずみおよび増分変形を示したものである．解析ケースD01では挿入した円弧状CDメッシュ帯には主たる斜めひび割れが伝播せず，基本CDメッシュのみの解析ケースA01とほぼ同様な斜めひび割れ形状となったが，斜めひび割れの局所化した要素帯が載荷板の左側方に向かって整列している

ため，その斜めひび割れがはり上縁へ貫通し斜め引張崩壊に至った．しかし斜めひび割れの傾斜角が大きいので骨材のかみ合い抵抗が増大したため解析ケースD01のせん断耐力は解析ケースA01と同様に過大評価されている．解析ケースD02では挿入した円弧状CDメッシュ帯内の斜めひび割れのみならず円弧状CDメッシュ帯外の斜めひび割れもはり上縁へ貫通するほど進展しないため，引張鉄筋が降伏し曲げ引張破壊となった．鉄筋はり要素を用いてdowel作用を増大させ斜めひび割れの伝播を助長させることを意図した解析ケースD03も

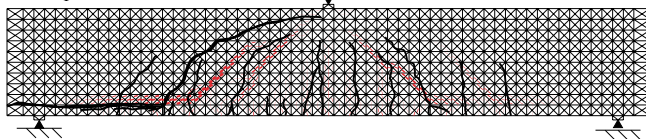
- : $\varepsilon_1 = 0.02$ 

図 - 1 解析ケースA01 (基本CDメッシュ) と実験のひび割れ状況の比較

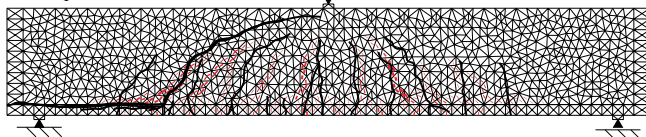
- : $\varepsilon_1 = 0.02$ 

図 - 2 解析ケースA05 (基本Delaunayメッシュ) と実験のひび割れ状況の比較

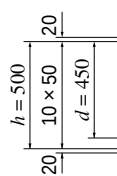


図 - 3 修正要素分割タイプ e-1A (修正CDメッシュA)

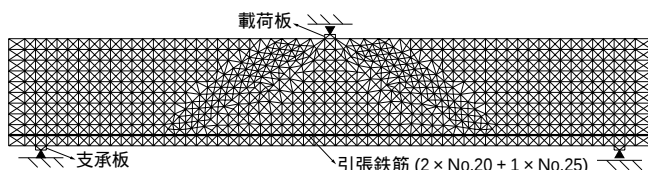


図 - 4 修正要素分割タイプ e-1B (修正CDメッシュB)

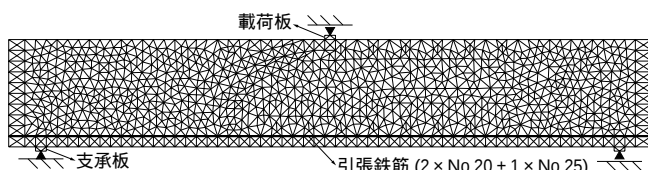


図 - 5 修正要素分割タイプ e-2A (修正DelaunayメッシュA)

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
A01	e-1	t-1
A05	e-2	t-3
D01	e-1A	t-1
D02	e-1B	t-1
D03	e-1B	t-3
D04	e-2A	t-3

t-1: 埋込み鉄筋要素

t-3: 鉄筋はり要素

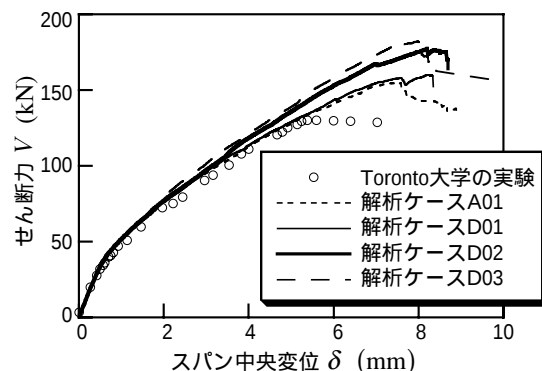


図 - 6 CDメッシュによるせん断応答

キーワード: 鉄筋コンクリート, 斜め引張破壊, メッシュ依存性, 有限要素破壊解析, 多等価直列相モデル

〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL 03-3820-6960 FAX 03-3820-5959

解析ケースD02とほぼ同様の結果であった．以上のように，RCはりの斜め引張破壊の有限要素解析では，ある特定のメッシュを用いたひび割れ予測子解析から得られるひび割れ発生状況の結果に基づいてそのメッシュを改良し再度解析実行するひび割れ修正子解析手法は，必ずしも有効であるとは言えない．図 - 1 1 は修正DelaunayメッシュAを用いた解析ケースD04のせん断応答を基本Delaunayメッシュの解析ケースA05と比較したものである．図 - 1 2 は実験の最大耐力に対応する解析ケースD04のステップにおけるひび割れひずみであり，図 - 1 3，1 4 は解析ケースD04の最大耐力時におけるひび割れひずみおよび増分変形を示したものである．解析ケースA05ならびにScaled Corrector分岐誘導手法を用いた解析ケースC01では，主たる斜めひび割れの初期伝播状況をほぼ正確に再現できたが，stress-lockingや斜めひび割れ（先端）領域の拡幅・鈍化などのメッシュ依存性のため，その後の斜めひび割れの局所化およびはり上縁への不安定伝播を再現できなかった^{1) 2)}．修正

DelaunayメッシュAではそのような斜めひび割れの不安定伝播を誘起させる目的で円弧状CDメッシュ帯を解析ケースA05で発生した斜めひび割れの先端領域に挿入した．図 - 1 2 より明かなように解析ケースD04では斜めひび割れが挿入した円弧状CDメッシュ帯内に理想的に局所化しはり上縁に向かって大きく伝播し，この目的は達成したかに思えた．しかしその後斜めひび割れは非常に安定に伝播し斜めひび割れがはり上縁に達する前に引張鉄筋が降伏し曲げ引張破壊に至ってしまった（図 - 1 3，1 4）．斜めひび割れの不安定伝播およびはり上縁への貫通または載荷板直下への進展が再現できない限り，斜め引張崩壊機構を合理的にとらえることはできないが，この点に関連して以下の検討課題が重要と考えられる：1) 軸方向（割裂）ひび割れの不安定伝播；2) 斜めひび割れと軸方向ひび割れの交点部位における引張鉄筋のdowel作用と付着すべりに関係する局部的破壊；3) 斜めひび割れ面の骨材のかみ合い抵抗；4) 斜めひび割れの要素帯が形成するアーチ的耐荷機構．

3．まとめ

RCはりの斜め引張破壊解析における斜めひび割れのメッシュ依存性を軽減することによって合理的な斜め引張破壊機構の再現を試みた．予測子解析のDelaunayメッシュに円弧状CDメッシュ帯を挿入した修正子解析を実施した結果，CDメッシュ帯内に斜めひび割れを局所化させメッシュ依存性を排除することに成功したがその後の斜めひび割れの不安定伝播は再現できなかった．

[参考文献]

- 1) 長谷川俊昭：RCはりの斜め引張破壊に関する数値解析的検討，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，V-141，pp.281-282，2002年．
- 2) 長谷川俊昭：RCはりの斜め引張破壊経路の分岐誘導解析，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，V-276，pp.551-552，2003年．

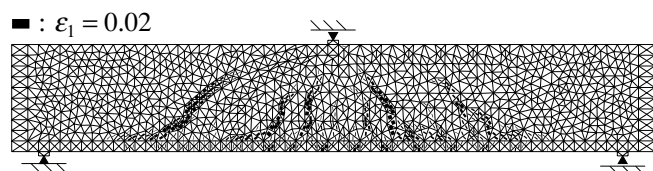


図 - 1 2 実験耐力時のひび割れひずみ (解析ケースD04)

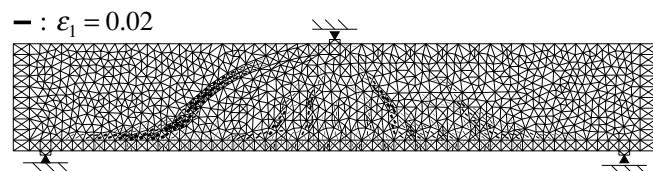


図 - 1 3 最大耐力時のひび割れひずみ (解析ケースD04)

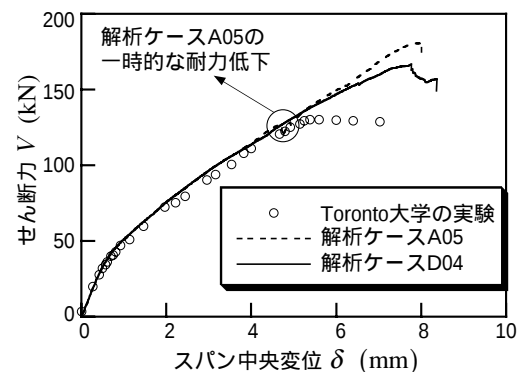


図 - 1 1 Delaunayメッシュによるせん断応答

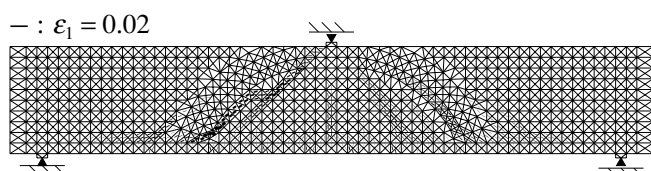


図 - 7 最大耐力時のひび割れひずみ (解析ケースD01)

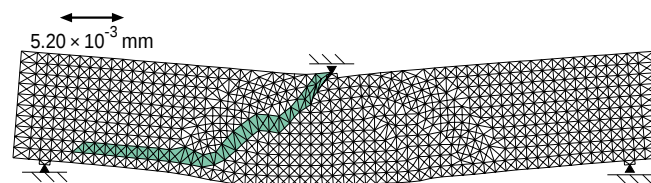


図 - 8 最大耐力時の増分変形 (解析ケースD01)

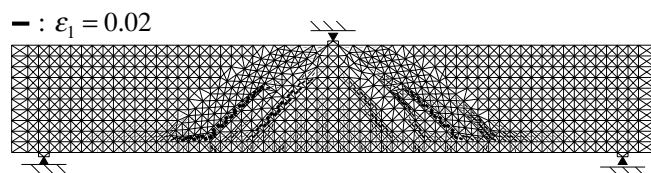


図 - 9 最大耐力時のひび割れひずみ (解析ケースD02)

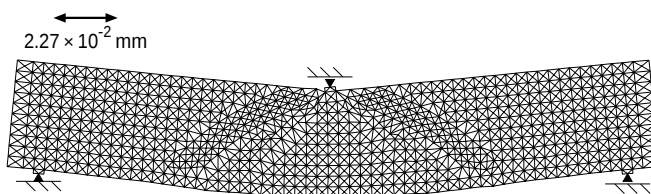


図 - 1 0 最大耐力時の増分変形 (解析ケースD02)

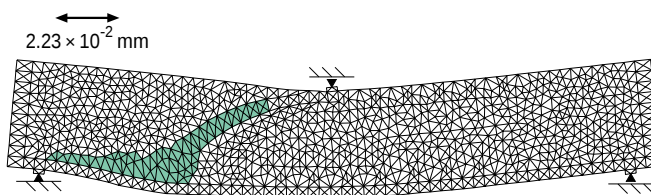


図 - 1 4 最大耐力時の増分変形 (解析ケースD04)