

RCはりの斜め引張破壊経路の分岐誘導解析

清水建設技術研究所 正会員 長谷川 俊昭

1. はじめに

鉄筋コンクリートはりの斜め引張破壊は釣合経路上に存在する特異点（分岐点、極限点）からの分岐挙動に支配されており、それを数値解析的に精度よく評価するためには、斜め引張破壊の分岐経路へ解を誘導することが重要であると考えられる。本研究では、著者のRCはりの解析結果¹⁾をもとに斜め引張破壊経路の分岐誘導解析を行なった。

2. 解析の概要および結果

図-1, 9には、著者の解析¹⁾の解析ケースA01およびA05のせん断応答ならびに接線剛性マトリックス $\mathbf{K}$ に負固有値が発生したステップが示されている。負固有値が発生した前後においては特異点（ $\det(\mathbf{K})=0$ ）が存在しており、厳密な分岐誘導解析では、この特異点を探索しその固有値解析から得られる零固有値の固有モードを摂動として分岐経路または極限点以降の経路（ポストピーク経路）へと解を誘導する必要がある。しかし本解析結果のように多数の特異点が存在する経路に対してそのように厳密な分岐誘導解析を実施するのはかなり困難である。そこで本解析では、極限点を乗り越えるのに適した弧長増分制御法を用いるが特異点の存在を意識しない解析ケースB01, B02を行ない、解析ケースA01と比較することとした。一方、斜めひび割れの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の不安定伝播が一時的な耐力低下すなわち極限点をもたらしたという解析ケースA05の結果に基づき、解析ケースC01ではその極限点（ステップ374）からScaled Corrector分岐誘導手法²⁾を応用した解析を実施した。また解析ケースC02では同極限点から微小変位増分を用いた分岐誘導解析を行なった。卓越する破壊変位を超球面型拘束条件に考慮した弧長増分制御法（間接変位増分制御法）は局所化破壊の解析に適しているといわれているが、図-1に示したように解析ケースB02は斜め引張破壊の分岐経路へ誘導されることがなく除荷経路に入ってしまった。解析ケースB01では

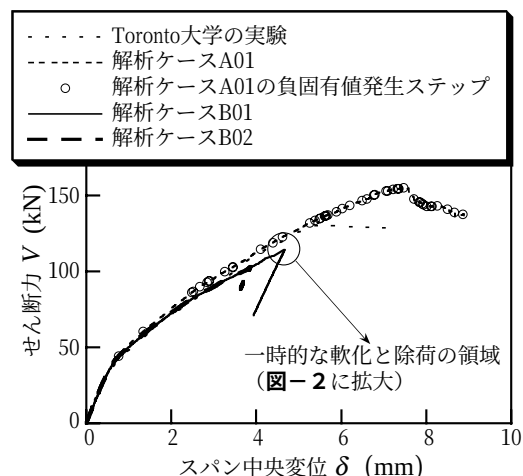


図-1 解析ケースAとBのせん断応答

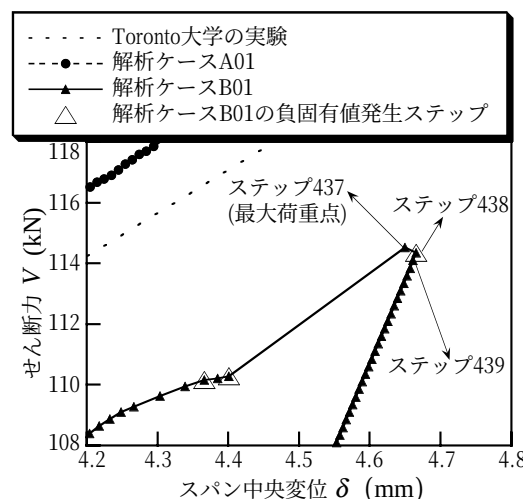


図-2 解析ケースB01のせん断応答 (拡大)

表-1 解析ケース

解析ケース	要素分割タイプ	増分制御法, 収束計算法, 分岐誘導手法
A01	e-1	1) 荷点y方向変位の直接変位増分制御法 2) Newton-Raphson収束計算法
A05	e-2	1) 荷点y方向変位の直接変位増分制御法 2) Newton-Raphson収束計算法
B01	e-1	1) 間接変位増分制御法 2) 荷点y方向変位のみを超球面型拘束条件に考慮した弧長増分制御法 3) Newton-Raphson収束計算法
B02	e-1	1) 間接変位増分制御法 2) 軸方向ひび割れのCMODのみを超球面型拘束条件に考慮した弧長増分制御法 3) Newton-Raphson収束計算法
C01	e-2	1) Scaled Corrector分岐誘導手法を応用した解析 2) 荷点y方向変位の直接変位増分制御法 3) Newton-Raphson収束計算法と一定剛性収束計算法の組合せ
C02	e-2	1) 微小変位増分による分岐誘導解析 2) 荷点y方向変位の直接変位増分制御法 3) Newton-Raphson収束計算法

e-1: cross-diagonal mesh (CDメッシュ), 埋込み鉄筋要素を使用

e-2: Delaunayメッシュ, 鉄筋はり要素を使用

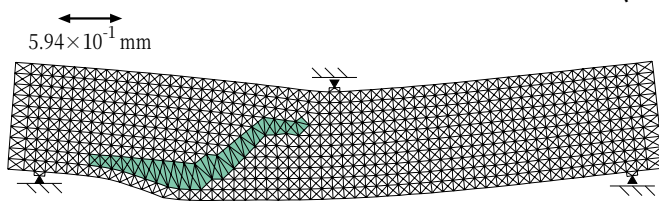


図-3 ステップ437の増分変形 (解析ケースB01)

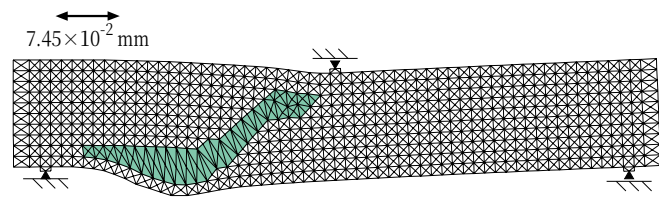


図-4 ステップ438 (軟化)の増分変形 (解析ケースB01)

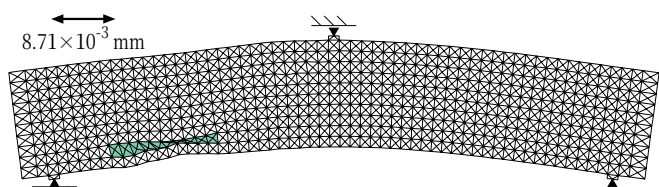


図-5 ステップ439 (除荷)の増分変形 (解析ケースB01)

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, 有限要素分岐誘導解析, 多等価直列相モデル
〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL 03-3820-5514 FAX 03-3820-5959

図-2に示したように最大荷重点（ステップ437）の直前と直後に負固有値が発生しており，最大荷重点とその直後において軸方向ひび割れの不安定伝播と斜めひび割れ破壊が卓越する分岐経路へ誘導された状況が図-3，4よりわかる．しかし図-4ではより圧縮縁に向かって伝播しようとする斜めひび割れがメッシュの方向性（メッシュ依存性）によって阻害されてひび割れ先端領域が鈍化している．そのため，その次のステップ439では分岐固有モードがもたらした軟化挙動が維持できず除荷経路に進んでしまった（図-5）．このような分岐経路へ誘導されることのなかった解析ケースA01はさらに耐力荷を増し図-6，7のようにより大きな破壊エネルギーを消散する斜めひび割れ形態で崩壊したものと考えられる．

図-10は解析ケースCにおける極限点（ステップ374）からの分岐誘導の状況を示すせん断応答であり，図-11，12，13は解析ケースC01における分岐誘導時の増分変形である．極限点からのステップ375では軸方向ひび割れと斜めひび割れの分岐固有モードが卓越し耐力低下を引き起こしており，次のステップ376ではScaled Corrector分岐誘導手法の考え方に基づき，この分岐固有モードをもたらしステップ375のKを更新せずに用いることによって軸方向ひび割れと斜めひび割れの不安定伝播の経路を誘導した．図-12では本手法によって斜めひび割れが圧縮縁に向かって大きく伝播する破壊モードを再現できたかに見えたが，次のステップ377ではこのモードが減衰してしまい，その後解の発散に至った．これは，本解析がScaled Corrector分岐誘導手法を厳密に実行していないためではなく，stress-lockingやひび割れ領域の拡幅（図-12）など有限要素破壊解析に特有なメッシュ依存性の問題に起因するためであると考えられる．

3. まとめ

RCはりの斜め引張破壊を特異点からの分岐挙動と考え，斜め引張破壊経路の分岐誘導解析を実施した．斜め引張破壊の分岐固有モードを励起させることには成功したが，メッシュ依存性の影響でその後の斜めひび割れの不安定伝播を再現することが不可能であった．

【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) 野口裕久，久田俊明：Scaled Correctorを用いた有限要素分岐解析手法の開発，日本機械学会論文集 A編，Vol. 58，No. 555，pp.2191-2198，1992年11月．

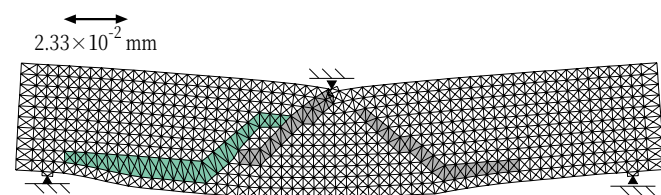


図-6 最大耐力直後の増分変形 (解析ケースA01)

—: $\varepsilon_1 = 0.02$

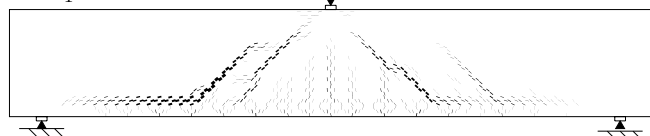


図-7 最大耐力直後のひび割れひずみ (解析ケースA01)



図-8 実験における試験体BN50の最終破壊状況

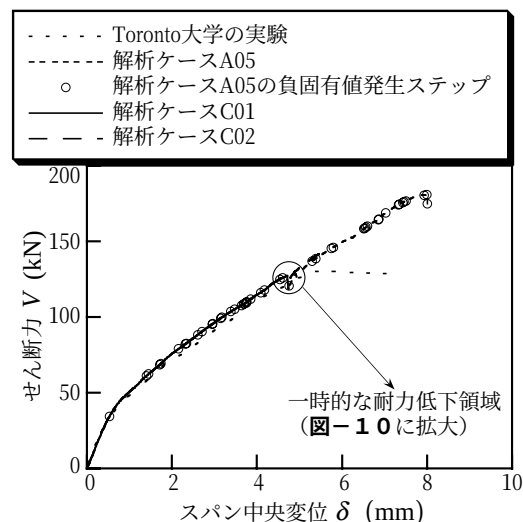


図-9 解析ケースAとCのせん断応答

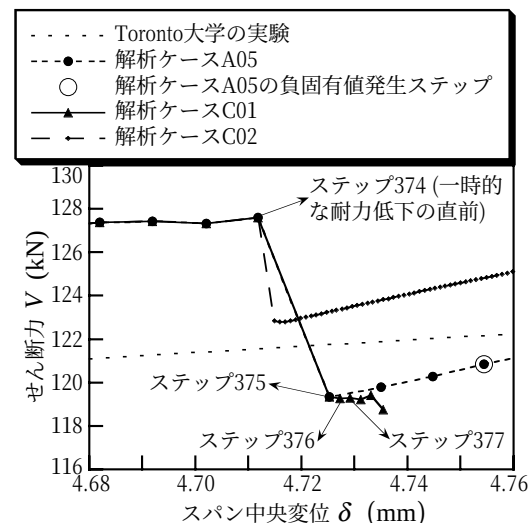


図-10 解析ケースAとCのせん断応答 (拡大)

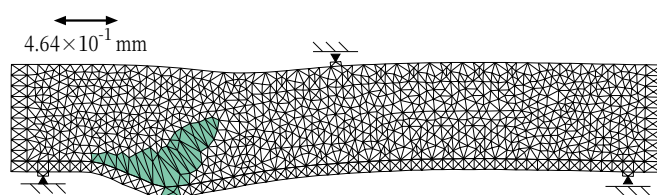


図-11 ステップ375の増分変形 (解析ケースC01)

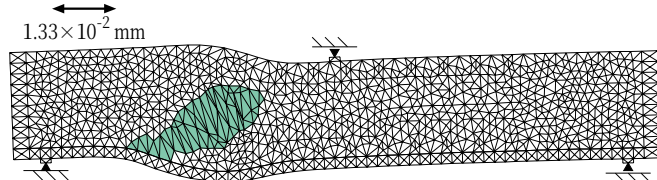


図-12 ステップ376の増分変形 (解析ケースC01)

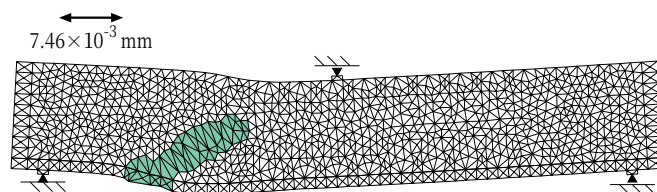


図-13 ステップ377の増分変形 (解析ケースC01)