

鉄筋コンクリートはりの曲げじん性能評価解析における収束・発散と曲げ崩壊

清水建設技術研究所 正会員 長谷川 俊昭

1. はじめに

RC はりの曲げじん性能評価解析ではコンクリートの曲げ圧縮領域が不安定な軟化破壊に至る以前に曲げ引張部のコンクリート要素がひずみ軟化に起因する疑似的運動モードを生ずるため収束解を得られず解析は発散しじん性能を精度よく評価することができない場合がある^{1) 2)}。

本研究では収束解を得るための反復計算過程において発散に至るメカニズムを固有値解析などをふまえて検討する。

2. 解析の発散過程の検討

本解析ケース O03 は、水町ら³⁾による RC はりの曲げ破壊実験を対象として実施した著者の寸法効果解析¹⁾のうち、はり高さ 490mm の

試験体 A-S49 に関する解析ケース A3 と同様のものであるが、ここでは図-1に示すように要素分割寸法を約 1/3 に縮小し、構造対称性を仮定せずにスパン全体を解析することにした。コンクリートの非局所型構成モデルである多等価直列相モデル

を用いたが、主鉄筋の上一層までの要素は付着領域として一般化マイクロブレースコンクリートモデルを使用した。図-2は本解析ケース O03 の曲げ応答の結果であり実験の降伏耐力や最大耐力ならびに変形性状を良好に再現できたが、解析ケース A3 と比較して小さな塑性変形で解析が発散してしまい実験のじん性能を過小評価している。本解析では図-3に示すように全体剛性マトリックス $\mathbf{K}$ の対角マトリックスに負のピボットが非常に多く発生しており、多数の特異点（分岐点、一時的極限点）を通過していたことが予想される。図-4は最大耐力ステップ 3895 から最終収束ステップ 3907 に至る曲げ応答を詳細に観察したものであり、図-5は発散ステップ 3908 の各反復計算（初期計算から最終の第 23 反復計算）にお

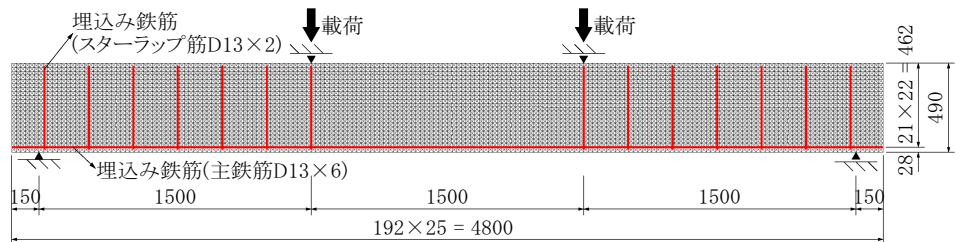


図-1 有限要素メッシュ

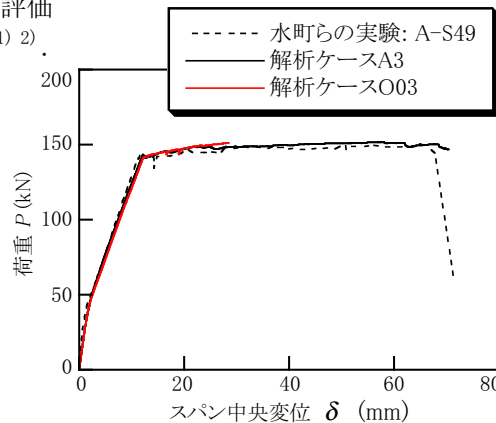


図-2 曲げ応答

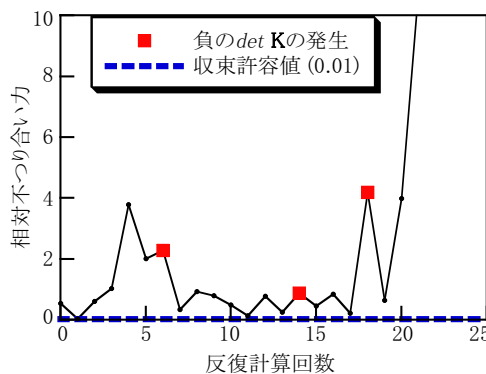


図-5 発散ステップの反復計算過程

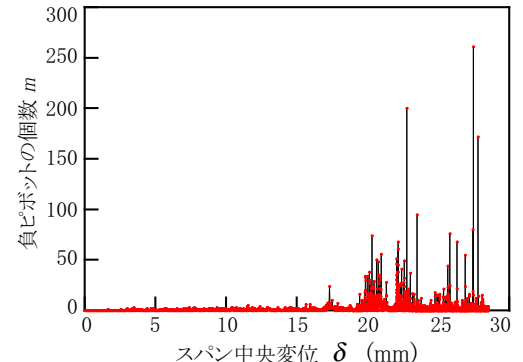


図-3 負ピボットの発生個数

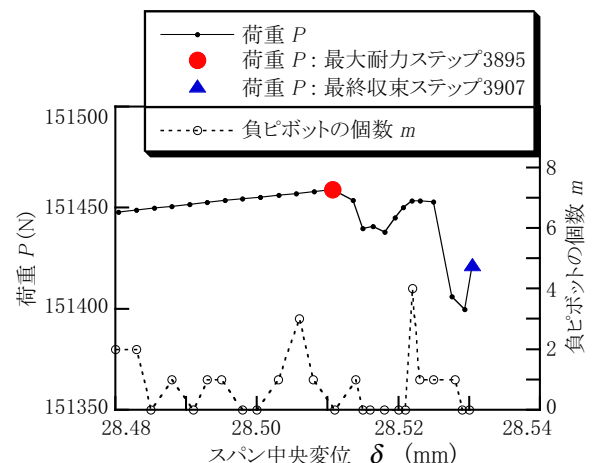


図-4 最大耐力近傍の曲げ応答

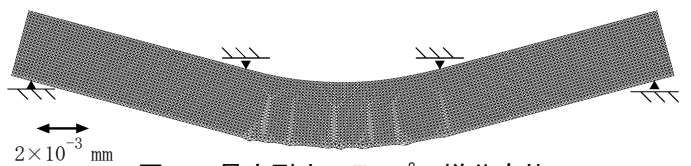


図-6 最大耐力ステップの増分変位

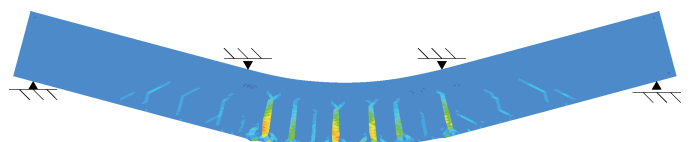


図-7 最大耐力ステップのひび割れひずみ

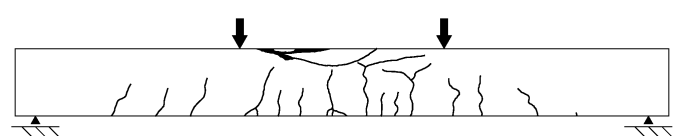


図-8 実験における試験体 A-S49 の最終破壊状況

キーワード：鉄筋コンクリート、曲げじん性能、有限要素解析、疑似的運動モード、発散、反復計算
〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL 03-3820-6960 FAX 03-3820-5955

る相対不釣り合い力を示している。図-6と図-7は最大耐力ステップにおける増分変位とひび割れひずみを示しているが、図-8の実験における最終破壊状況を良好に再現しているといえる。最終収束ステップ 3907 から発散ステップ 3908 の最終的な第 23 反復計算までの間にいかに発散が生じたかを調査するためこの過程で負の $\det \mathbf{K}$ が発生した反復計算を中心に各反復計算（初期、第 1, 5, 6, 13, 14, 17, 18 反復計算）における増分変位を図-9から図-17に示したが、図-9の最終収束ステップにおいてスパン中央付近の引張縁で発生した疑似的運動モードの小さな領域が反復計算の進行とともに拡大と縮小をくりかえしながら発散に至ったということがわかる。図-18, 19, 20は負の $\det \mathbf{K}$ が発生した計算において注目すべき固有モード（各々の固有値： $\lambda_9 = 1.7723 \times 10^3$, $\lambda_2 = -1.7060 \times 10^1$, $\lambda_1 = 4.3316 \times 10^1$ ）を示したものである。図-18の発散ステップの初期計算時の9次固有モードは典型的な疑似的運動モードを呈しているが、最終収束ステップと初期計算における増分変位モードと非常によく類似しており、この疑似的運動モードが発散を引き起こしたものと考えられる。本解析の発散は圧縮縁コンクリートの不安定な軟化破壊によって本来もたらされる力学的に意味のある曲げ崩壊を表現するものではなく、疑似的運動モードの問題つまりひずみ軟化材料の数値計算における根本的な問題に起因するものであるといえる。

3. まとめ

RC はりの曲げじん性能評価解析では曲げ引張部のコンクリートがひずみ軟化に起因する疑似的運動モードを生ずるため発散が生じて力学的に意味のある曲げ崩壊のメカニズムを再現できない場合があることを示した。

[参考文献]

- 1) 長谷川俊昭：多等価直列相モデルによるRC 曲げはりの寸法効果解析，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集，V-314，pp.628-629，2000 年。
- 2) Hasegawa, T.: Enhanced microplane concrete model and Multi equivalent series phase model in DIANA for fracture analysis of concrete structures, Finite Elements in Civil Engineering Applications, Proceedings of the Third DIANA World Conference, pp.3-16, 2002.
- 3) 水町実，岩瀬裕之，六郷恵哲，小柳洽：RC はりの曲げ破壊における変形の局所化と寸法効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15, No. 2, pp.329-334, 1993.

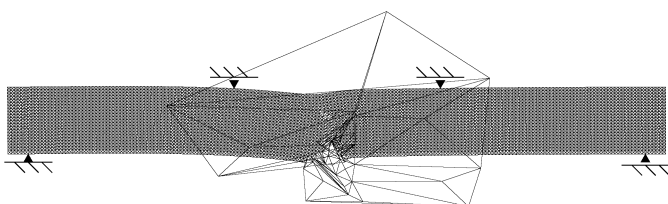


図-15 発散ステップの第 14 反復計算時の増分変位

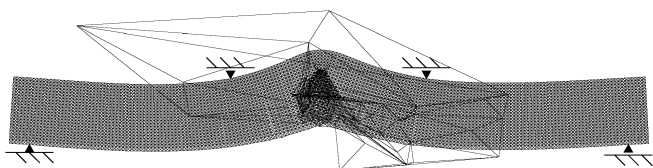


図-17 発散ステップの第 18 反復計算時の増分変位

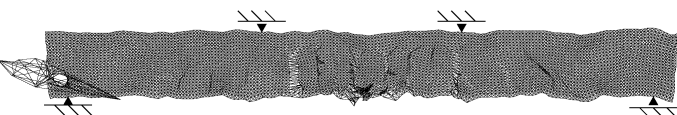


図-19 発散ステップの第 14 反復計算時の2次固有モード

図-9～17の変位スケール： $4 \times 10^{-2} \text{ mm}$

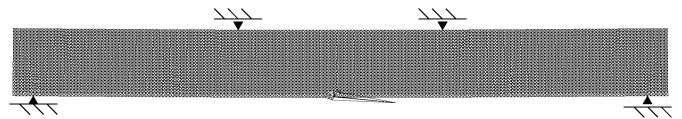


図-9 最終収束ステップの増分変位

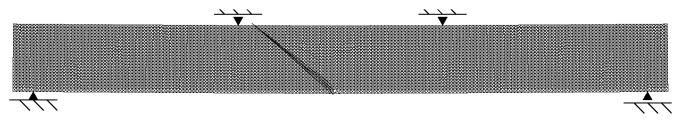


図-10 発散ステップの初期計算時の増分変位

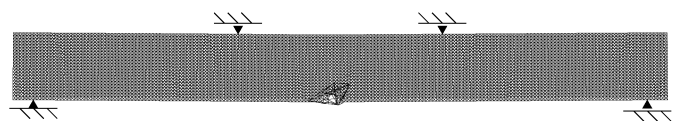


図-11 発散ステップの第 1 反復計算時の増分変位

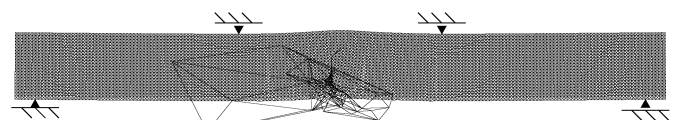


図-12 発散ステップの第 5 反復計算時の増分変位

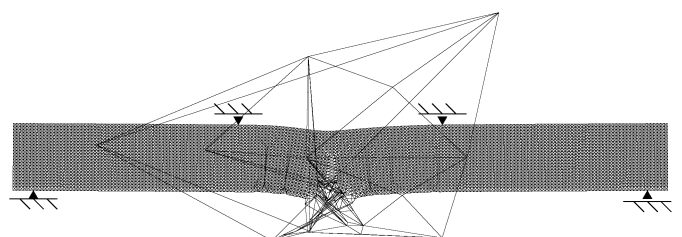


図-13 発散ステップの第 6 反復計算時の増分変位

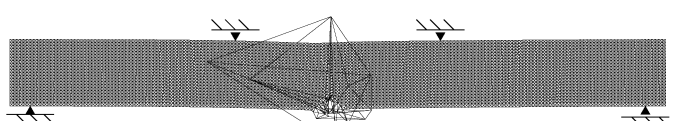


図-14 発散ステップの第 13 反復計算時の増分変位

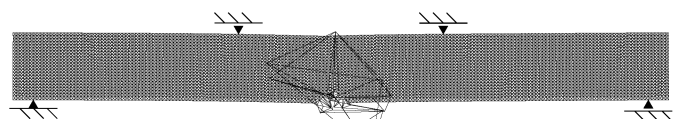


図-16 発散ステップの第 17 反復計算時の増分変位

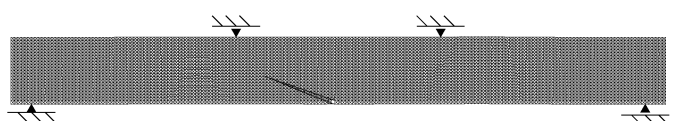


図-18 発散ステップの初期計算時の9次固有モード

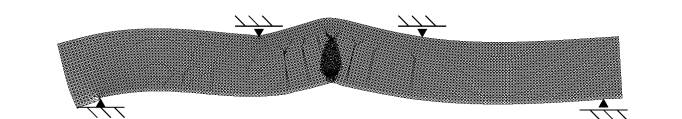


図-20 発散ステップの第 18 反復計算時の1次固有モード