

弧長増分制御法と分岐固有値解析による RC はりの斜め引張破壊の分岐誘導

清水建設技術研究所 正会員 長谷川 俊昭

1. はじめに

著者の研究^{1), 2)}では分岐固有値解析に基づいた分岐誘導によって鉄筋コンクリートはりのせん断耐力近傍の斜め引張破壊機構を良好に再現できることが示されたが、斜めひび割れが曲げ圧縮部へ突き抜ける最大耐力後の崩壊過程までをもとらえることはできなかった。斜め引張崩壊過程は不安定なスナックバック挙動をとる可能性もあり、この分岐誘導解析において用いた直接変位増分制御法では安定な求解が困難であることも考えられる。そこで本研究では直接変位増分制御法の代わりに弧長増分制御法を用いて同様な分岐誘導解析を行なうこととした。

2. 解析手法の概要および解析結果

本解析は、先の研究における载荷増分制御手法としての直接変位増分制御法を弧長増分制御法に置き換えたものであるが、間接変位増分制御として载荷点の鉛直方向変位成分のみを超球面型拘束条件に考慮した。収束計算手法としては Newton-Raphson 法を用い、コンクリート構成モデルとして多等価直列相モデルを採用した。基本経路上で最初に出現した分岐点 A から分岐経路誘導解析を開始し、その後の分岐後経路を追跡し、順次分岐点 B ~ E における分岐誘導をくりかえした。解析ケースの一覧を表-1に、得られたせん断応答を考慮した分岐点とともに図-1に示す。接線剛性マトリックスの行列式 $\det \mathbf{K}$ が負値に変化し、固有値解析から得られる1次固有モードに関して図-2に例示したような疑似的運動モード(変位倍率 200)が発生していないステップを分岐点と判定した。なお λ_i は i 次固有値である。分岐現象において1次固有モードは分岐モードに近似している場合が多く、分岐解析では1次固有モードを摂動や分岐解とするのが一般的である。本研究においてもスケーリングした1次固有モードベクトル $\mathbf{v}_1$ を増分変位予測子ベクトル $\Delta \mathbf{u}_p$ として前研究¹⁾の式(5)が分岐点 C を除くすべての分岐点で摂動として用いられた。しかし直接変位増分制御法で確認された斜めひび割れや軸方向ひび割れの卓越する固有モードが、弧長増分制御法を用いた本解析においては

表-1 解析ケース

解析ケース	解析	分岐点
L01	基本経路追跡	—
L02	分岐経路追跡	A
		B
L03	分岐経路追跡	A
		B
		C
L04	分岐経路追跡	A
		D
		E

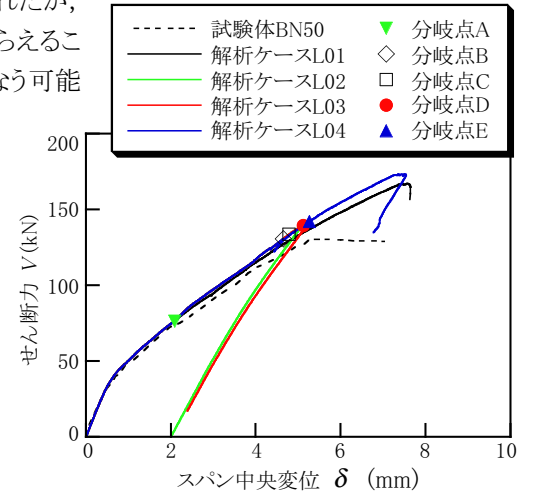


図-1 せん断応答

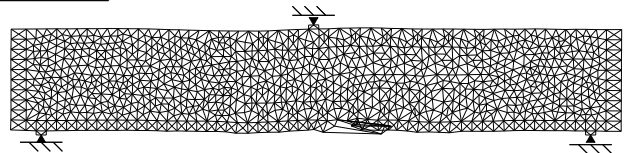


図-2 疑似的運動モード: $\lambda_1 = -2.377 \times 10^1$

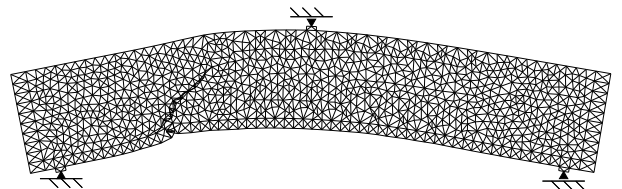


図-3 除荷の1次固有モード: $\lambda_1 = 5.041 \times 10^1$

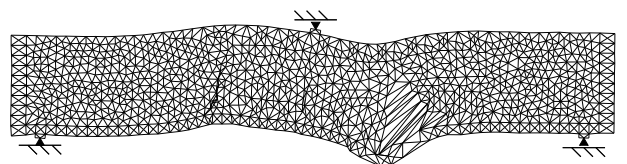


図-4 分岐点 A の1次固有モード: $\lambda_1 = 1.632 \times 10^1$

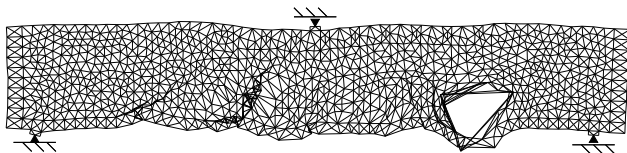


図-5 分岐点 B の1次固有モード: $\lambda_1 = 1.242 \times 10^1$

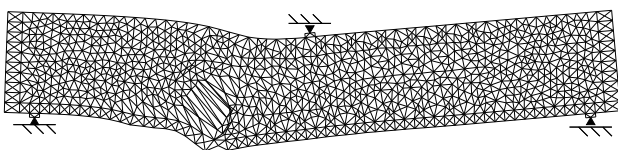


図-7 分岐点 D の1次固有モード: $\lambda_1 = -3.892 \times 10^{-2}$

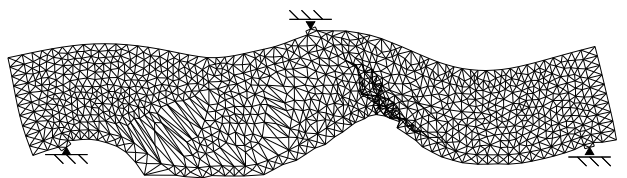


図-6 分岐点 C の5次固有モード: $\lambda_5 = 7.089 \times 10^3$

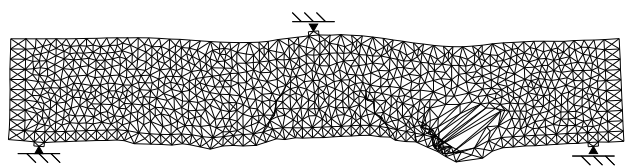


図-8 分岐点 E の1次固有モード: $\lambda_1 = 1.407 \times 10^1$

キーワード: 鉄筋コンクリート, 斜め引張破壊, 斜めひび割れ, 分岐固有値解析, 分岐経路誘導, 弧長増分制御法
〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL 03-3820-6960 FAX 03-3820-5955

1次固有モードとして出現することがほとんどなかった。むしろ1次固有モードとしては図-3に例示したようにひび割れが閉口する除荷モード（変位倍率 200）が非常に多く発生し、このような除荷モードを摂動として与えると破壊進行が阻害される結果となった。そのため、このような除荷の1次固有モードが発生した場合は分岐点と判定しなかった。図-4～8は各分岐点で考慮した固有モード（変位倍率 200）であり、図-9～13は分岐経路誘導後（分岐点直後）の増分変位図に最大主ひずみ分布を重ね描きしたものである。いずれの分岐点における分岐誘導によっても斜めひび割れや軸方向ひび割れの破壊モードが励起されることはなく、逆に分岐点 E においては除荷が発生した。図-14～17は最大耐力時の増分変位図であるが、解析ケース L01 は極限点の後、解が発散したのに対して解析ケース L04 では崩壊時のスナップバック挙動を良好に追跡できた。一方、解析ケース L02 と L03 は除荷経路へ分岐してしまい破壊の極限点に至っていない。鉄筋コンクリート構造の破壊問題では分岐点近傍において可能なつり合い経路（破壊モード）が多数存在するが、弧長増分制御法は設定された拘束条件、適応型载荷増分法、载荷除荷基準、間接変位増分制御手法などに基づいて、反復収束計算の過程においてこれらの経路から単一の経路を自動的に探索し選択するため、分岐誘導解析で摂動として負荷された1次固有モードの破壊形式が励起されるとは限らず、斜め引張破壊の分岐経路へ解を誘導することが難しかったものと考えられる。また過去の研究³⁾においても弧長増分制御法を用いると除荷応答が発生しやすい問題点を指摘したが、これは前述したように除荷の1次固有モードが多く発生することもその原因のひとつであると考えられる。このように直接変位増分制御法と比較して弧長増分制御法は崩壊時のスナップバックなどの不安定破壊を追跡できる反面、摂動を用いた分岐誘導解析への適用に関してはいくつかの課題があり注意が必要であると考えられる。

3. まとめ

弧長増分制御法を用いるとともに分岐固有値解析を行ない、RC はりの斜め引張破壊経路への分岐誘導を試みた結果、直接変位増分制御法に比較して弧長増分制御法は除荷の1次固有モードが卓越するため、また斜めひび割れや軸方向ひび割れの固有モードが発生しにくいため斜め引張破壊経路へ分岐誘導することができなかった。

[参考文献]

- 1) 長谷川俊昭：分岐固有値解析に基づく RC はりの斜め引張破壊経路への分岐誘導，土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集，V-095，pp.189-190，2011 年．
- 2) 長谷川俊昭：RC はりの斜め引張破壊分岐経路誘導解析におけるひび割れ進展，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，V-254，pp.507-508，2012 年．
- 3) 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．

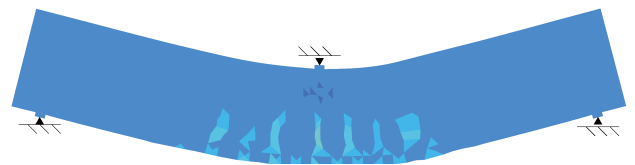


図-9 分岐点 A 直後の増分変位
(解析ケース L02, L03, L04)

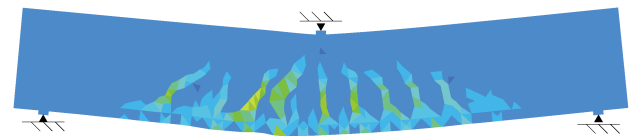


図-10 分岐点 B 直後の増分変位
(解析ケース L02, L03)

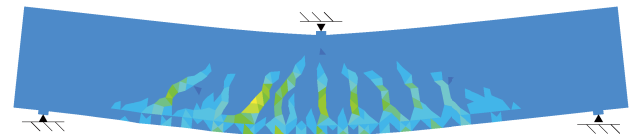


図-11 分岐点 C 直後の増分変位 (解析ケース L03)

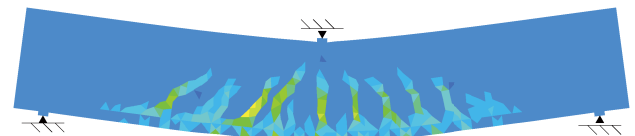


図-12 分岐点 D 直後の増分変位 (解析ケース L04)

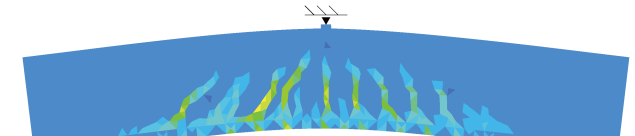


図-13 分岐点 E 直後の増分変位 (解析ケース L04)

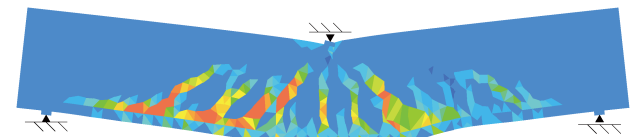


図-14 最大耐力時の増分変位 (解析ケース L01)

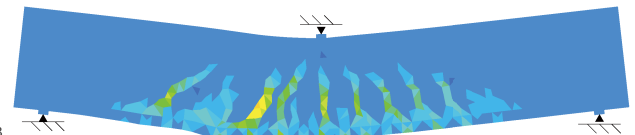


図-15 最大耐力時の増分変位 (解析ケース L02)

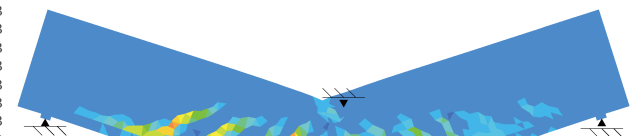


図-16 最大耐力時の増分変位 (解析ケース L03)



図-17 最大耐力時の増分変位 (解析ケース L04)