

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○平井 悠貴
 京都大学大学院工学研究科 正会員 植村 佳大
 構造計画研究所 正会員 市川 大颯
 京都大学大学院工学研究科 正会員 高橋 良和

1. 背景・目的

平成 24 年度の道路橋示方書において、中空 RC 橋脚の設計に関する改定が行われており、塑性変形能を確実に発揮させるため、塑性ヒンジとその影響を受ける領域においては中実断面とするよう規定されている¹⁾。一方で、基部を含め全体が中空断面の既存橋脚が多数存在し、その耐震性能評価と補強が急務となっている。コンクリート充填による曲げ性能向上は報告されているが、せん断抵抗性に関する知見は限られる。せん断破壊対策として、コンクリート充填と炭素繊維巻立補強の併用が有効とされ、その効果も実験的に検証されている。一方で、巻立により内部 RC 柱の損傷把握が困難になる課題もある²⁾。そこで本研究では、X-FEM により、無補強および充填・巻立補強を施した中空 RC 橋脚の耐震性能と内部ひび割れ挙動を数値解析で評価する。

2. 解析概要

(1) 解析対象とする柱構造

本解析では、野村ら²⁾が正負交番荷重実験を行った無補強中空 RC 橋脚（無補強 RC 橋脚）、コンクリート充填および炭素繊維巻立補強を施した中空 RC 橋脚（充填＋巻立 RC 橋脚）を対象として、片押し荷重を模擬したプッシュオーバー解析を行う。

(2) 解析モデル

本解析では、著者らの過去の検討³⁾と同様に、X-FEM を用いて無補強および充填＋巻立 RC 橋脚のモデル化を行った。コンクリートは平面応力状態を仮定した線形ソリッド要素とし、密度 2.5g/cm³、ポアソン比 0.2、ヤング率は実験値を用いた。鉄筋は非線形トラス要素で表現した。断面構造は、コンクリート要素の奥行きをフランジ部では 800mm、ウェブ部では 300mm とすることにより中空断面を再現した。

コンクリート充填補強は、奥行き 500mm のコンクリ

ート要素を用いた充填コンクリートをジョイント要素を介して中空断面部と結合することで再現した。要素間での剥離や接触はペナルティ法によりモデル化した。そのため、コンクリート充填部では奥行き 300mm のコンクリート要素と奥行き 500mm のコンクリート要素が重なっていることに注意されたい。また、一般的に柱の下端では、柱とフーチングの界面にひび割れが発生することが知られている。そのため、RC 柱と充填部の柱下端では、モード I ひび割れが水平方向のみに生じるよう制御した。

炭素繊維巻立補強は今回新たに導入したモデルであり、線形ソリッド要素でモデル化した奥行き 0.50mm のシート要素をコンクリートに重ねて配置した。実験で確認された繊維方向の亀裂発生に対応し、炭素繊維には 2 つの引張破壊基準を設定した。

$$\begin{cases} \sigma_v > f_t^{resin} & (1) \\ \sigma_{max} > f_t^{CFRP} & (2) \end{cases}$$

ここに、 σ_v は鉛直応力、 σ_{max} は最大主応力、 f_t^{resin} はエポキシ樹脂の引張強度、 f_t^{CFRP} は炭素繊維の引張強度である。式(1)は、エポキシ樹脂破断による繊維方向亀裂進展、式(2)は、CFRP シート要素自体の破壊を表す。式(1)による亀裂は水平方向、式(2)による亀裂は最大主応力に垂直な方向に発生・進展するようモデル化した。本解析では、CFRP シートの引張強度 f_t^{CFRP} は 2400MPa、エポキシ樹脂の引張強度 f_t^{resin} は最小規定値 30MPa を考慮し、50MPa とした。

また、モデル化の簡略化のため、ひび割れが生じた炭素繊維シート内の凝着力やひび割れ発生後の圧縮抵抗、ひび割れ面における動的摩擦は考慮しないこととした。また、炭素繊維シート要素ではモード II のひび割れの発生もモデル化しなかった。

(3) 解析手法および荷重条件

荷重条件に関しては、軸力荷重を荷重制御とし、解析

モデル上端の節点に合計が1190kNとなる下向きの鉛直力を常に作用させた上で、水平荷荷を変位制御として治具先端に100mmの変位を与えた。

3. 解析結果

(1) 荷重-変位関係

図-1 に、各供試体の荷重-変位関係を示す。図-1 には実験結果と基準振幅時の点、および回転変形成分を差し引いた補正值を示し、数値解析結果と比較した。

無補強・充填+巻立RC橋脚ともに、骨格曲線は概ね再現され、後者では再現性がやや低下したものの、誤差8%以内で推定できており、モードIIひび割れに伴う荷重低下も確認された。

(2) ひび割れ性状

図-2 に無補強 RC 橋脚、図-3 に充填+巻立 RC 橋脚の5δ_{y0}時のひび割れ性状を示す。無補強橋脚では、柱全体に斜めひび割れが分布し、モードIIのひび割れの発生も解析で確認され、せん断損傷が支配的であることを示唆された。

一方、充填+巻立 RC 橋脚では、柱内部のひび割れが実験で直接観察できないため、DIC の最大主ひずみ分布と数値解析結果を比較して評価した。柱下部に水平ひび割れ、上部に短い斜めひび割れが分布し、解析でも良好に再現された。また、CFRP 表面にも幅 0.15mm 以上のひび割れが同様の位置に確認され、補強によるひび割れ抑制効果が一部に及んでいることが示された。

4. まとめ

本研究では、中空 RC 橋脚への炭素繊維巻立補強の効果を X-FEM で評価し、荷重-変位関係やひび割れ性状において実験と整合する傾向を再現した。特に、補強材とコンクリートの相互作用や剥離挙動を適切に表現したシートのモデル化が、構造応答の再現性向上に寄与した。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(B)25K01316 の助成を受けて実施した。謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編， pp. 211, 2012.
- 2) 野村一貴, 植村佳大, 高橋良和：コンクリート充填と炭素繊維巻立補強を併用した中空断面 RC 橋脚の大型正負交番載荷実験，第 16 回日本地震工学シンポジウム
- 3) Uemura, K. Kasahara, Z. Ichikawa, D. Goto, H. Takahashi, Y. : Evaluation of retrofitting effect of concrete filling in hollow RC columns using XFEM, Engineering Structures, Volume 321, 2024, 118920

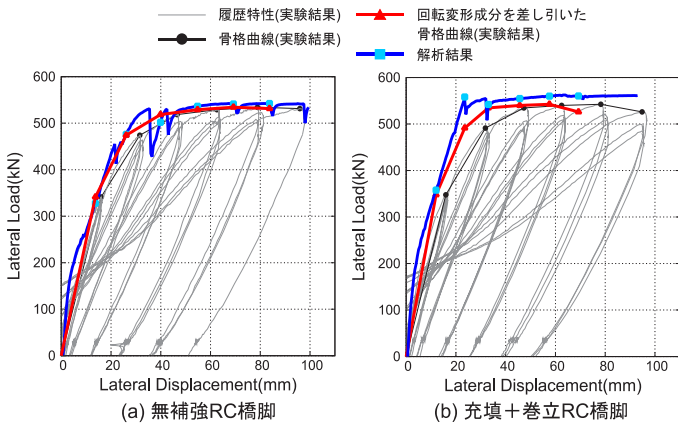


図-1 荷重-変位関係

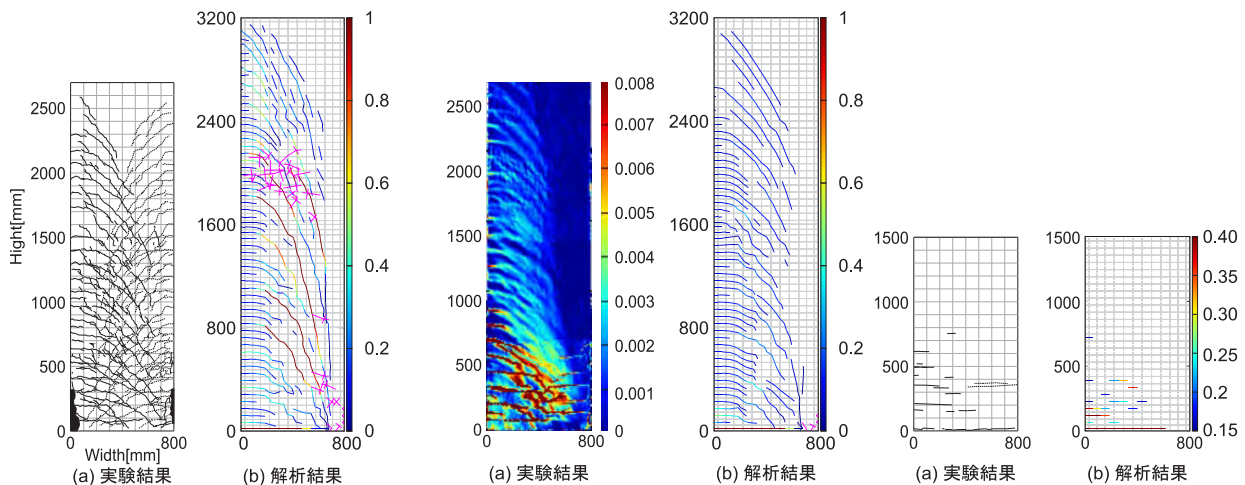


図-2 無補強 RC 橋脚のひび割れ図

図-3 充填+巻立 RC 橋脚におけるひび割れ図