

軸方向鉄筋の局部座屈を考慮した RC橋脚の曲げ復元力特性の解析法の開発

東京工業大学 学生会員 ○市川 翔太
東京工業大学 正会員 佐々木智大
東京工業大学 フェロー 川島 一彦

1. はじめに

橋脚の最終崩壊までの地震応答を予測するためには、軸方向鉄筋の局部座屈のモデル化は避けて通れない重要な事項である。本研究では、ファイバー要素で軸方向鉄筋をモデル化し、これを橋脚の局部座屈の解析に適用した結果について示す。

2. 鉄筋座屈を考慮した RC 橋脚のモデル化

以下の方針に基づき塑性ヒンジ区間の軸方向鉄筋、帯鉄筋及びコンクリートをモデル化し、材料非線形及び幾何学的非線形を考慮した解析を行う。

1) 塑性ヒンジ区間内では、コア及びかぶりコンクリートはファイバー要素によってモデル化する。軸方向鉄筋も別途ファイバー要素によってモデル化する。コンクリート及び軸方向鉄筋は平面保持の法則に従うものとし、帯鉄筋高さごとに設ける仮想の剛体はりで結ぶことによって、これを満足させる。塑性ヒンジ区間の上下端では躯体によって拘束されるため、軸方向鉄筋は剛結されているとする。

2) 図-1 に示すような、帯鉄筋による軸方向鉄筋の局部座屈に対する拘束を、軸方向鉄筋の面外変位に比例して抵抗するばね(帯鉄筋抵抗ばね)によってモデル化し、これを帯鉄筋高さごとに設ける。帯鉄筋は降伏せず、軸方向鉄筋に対する拘束効果を持つ(図-1(d)(i))。

3) コアコンクリートの存在のため、軸方向鉄筋は内側には座屈しないことをモデル化するためコアコンクリートによる抵抗を表すばね(コアコンクリート抵抗ばね)を設ける(図-1(d)(ii))。

4) 繰り返し載荷実験や被災橋脚の実例では軸方向鉄筋はコアコンクリート周囲に沿う面内座屈を生じにくい。この効果を軸方向鉄筋の面内座屈を拘束するばね(面内座屈防止ばね)によって表す。

5) かぶりコンクリートは、これが健全なうちは軸方向鉄筋の局部座屈を拘束するために寄与する。この効果を表すために、かぶりコンクリートの拘束を表すばね(かぶりコンクリート抵抗ばね)を設ける。また、かぶりコンクリートは圧壊するか、局部座屈しつつある軸方向鉄筋に押し出されると軸方向鉄筋の局部座屈に対する抵抗を失う(図-1(d)(iii))。

3. 各種抵抗ばねの特性の推定

モデル化では、軸方向鉄筋の局部座屈を拘束するばねの特性を正しく推定することが重要である。また、これを定量的に示せる実験データはそろっていないが、ここでは、以下のように簡易な手法を提案する。まず、帯鉄筋抵抗ばねの定数 k_t は、帯鉄筋を隅角部位置で単純支持された

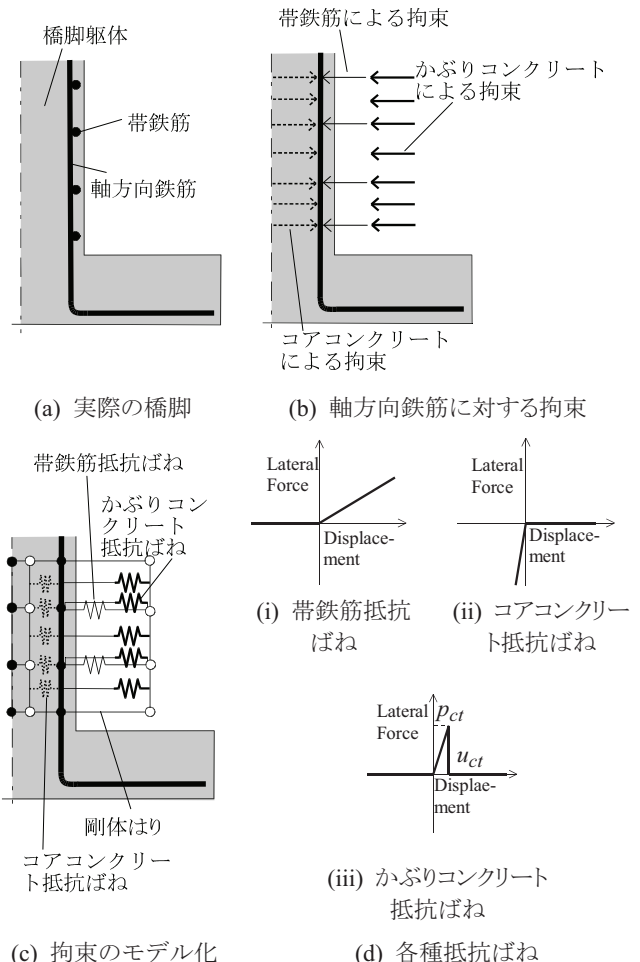


図-1 帯鉄筋、コアコンクリート及びかぶりコンクリートによる拘束のモデル化

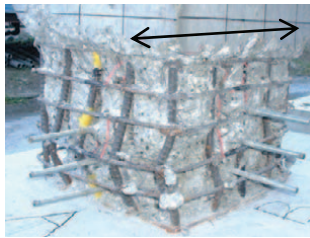
曲げばりとしてモデル化し、次式により評価する。

$$k_t = \frac{3nEI_t d_t}{\sum_{i=1}^n x_i^2 (d_t - x_i)^2} \quad (1)$$

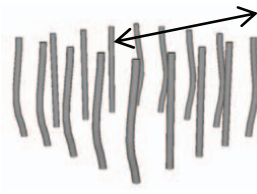
ここで、 n は当該断面に配置された軸方向鉄筋本数、 EI_t は帯鉄筋の曲げ剛性、 d_t は当該断面の両端に位置する帯鉄筋間隔、 x_i は曲げばりの端部から i 番目の軸方向鉄筋までの距離である。また、かぶりコンクリート抵抗ばねの定数 k_c は、かぶりコンクリートを隅角部位置で支持された曲げばりとしてモデル化し、式(2)で求める。かぶりコンクリート最外縁の平均引張応力が曲げ引張強度 σ_{bt} を超えると、かぶりコンクリートは剥落すると仮定し、かぶりコンクリート

キーワード RC 橋脚 軸方向鉄筋 局部座屈 ファイバー要素解析 幾何学的非線形 繰り返し載荷実験

連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-10 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 TEL 03-5734-2922



(1) 実験



(2) 解析

図-2 ドリフト5.0%載荷終了後の軸方向鉄筋の面外座屈
(矢印は載荷方向)

トによる軸方向鉄筋の局部座屈に対する拘束効果を失う際の水平変位(剥落水平変位) u_{bt} を式(3)で評価する。ただし、最外縁応力が曲げ引張強度に達してもすぐにかぶりコンクリートが剥落するわけではないため、この効果を補正係数 α によって表す。

$$k_c = \frac{nE_c d_c h_c t^3}{4 \sum_{i=1}^n x_i^2 (d_c - x_i)^2} \quad (2)$$

$$u_{bt} = \alpha \frac{2\sigma_{bt} \sum_{i=1}^n x_i^2 (d_c - x_i)^2}{3E_c t \sum_{i=1}^n x_i (d_c - x_i)} \quad (3)$$

ここで、 t はかぶりコンクリートの厚さ、 h_c はかぶりコンクリート抵抗ばねが分担するかぶりコンクリートの高さ、 d_c は断面の両側に位置する軸方向鉄筋の中心間距離である。

4. RC橋脚模型の解析モデル化

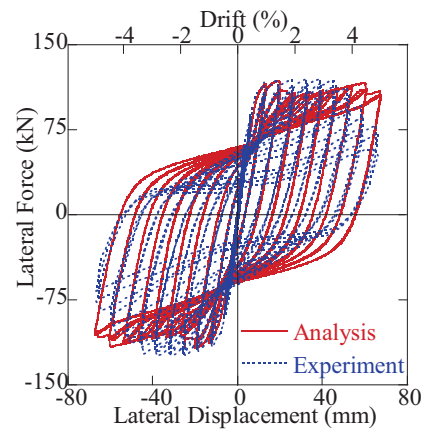
解析対象としたのは400mm×400mmの正方形断面を有する有効高さ1350mm、帯鉄筋間隔50mmのRC橋脚である¹⁾。これは2方向地震力の影響を検討するための基本ケースとして実施された1方向載荷実験である。死荷重に相当する軸力として荷重制御により160kNが橋脚上端に作用されている。繰り返し載荷はドリフト0.5%(=6.75mm)間隔で各3回実施されており、最終的にドリフト5.0%まで載荷された。軸方向鉄筋の局部座屈はドリフト4.0%載荷において発生した。

橋脚基部から橋脚幅 D の1/2 (200mm)の区間を塑性ヒンジ区間と見なし、この区間に2章に示した解析モデルを適用し、塑性ヒンジ区間以外の橋脚躯体部分は降伏剛性を有する弾性はり要素によってモデル化した。

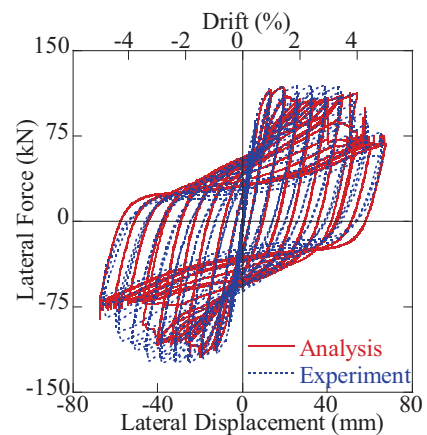
塑性ヒンジ区間では、50mm間隔で帯鉄筋が配置されているため、コンクリート部分はこれに合わせて高さ方向に4段のファイバー要素に分割した。これに対し軸方向鉄筋では、軸方向鉄筋の局部座屈をモデル化するために、塑性ヒンジ区間を高さ方向に25mm間隔で8分割した。なお、ここでは式(3)の α を3.0とした場合の解析を行うこととした。

5. RC橋脚模型に対する解析結果

図-2はドリフト5.0%載荷終了時の軸方向鉄筋の座屈モードである。実験での模型橋脚の損傷状況は基部から概ね250mmの区間(基部から5段目の帯鉄筋位置)までのかぶりコンクリートをはつり取った状態を示しており、解析での座屈モードは基部から200mmの区間を示している。実験で



(a) 座屈を無視した場合



(b) 座屈を考慮した場合

図-3 復元力～水平変位の履歴

は載荷方向に直交する面において座屈が生じている。解析により求めた軸方向鉄筋の座屈モードは、実験での軸方向鉄筋の座屈モードをよく再現できている。

図-3に載荷点高さ位置における座屈を考慮した場合の復元力～水平変位の履歴を実験結果と比較して示す。ここでは、座屈を無視した場合の解析結果もあわせて示している。軸方向鉄筋の局部座屈を無視した場合には、軸方向鉄筋の局部座屈発生以後の復元力が過大に評価され、除荷、再載荷履歴も一致していない。これに対して、局部座屈を考慮することにより、軸方向鉄筋が局部座屈したドリフト4.0%以後の復元力の低下及び除荷、再載荷履歴を適切に評価できる。

6. 結論

提案した解析モデルを用いることにより繰り返し載荷実験により模型橋脚に生じた軸方向鉄筋の座屈モードをよく表すことができると同時に、軸方向鉄筋が局部座屈した後の模型橋脚の復元力の低下や除荷、再載荷履歴を良く再現することができる。ただし、軸方向鉄筋に対する帯鉄筋及びかぶりコンクリートの拘束効果のメカニズムやばね特性の評価は、今後さらに検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 早川涼二, 川島一彦, 渡邊学歩: 水平 2 方向地震力を受ける単柱式 RC 橋脚の耐震性, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.79-98, 2004.