

軸方向鉄筋のはらみ出しを考慮したRC橋脚の再現解析

宮田 秀太¹・高德 純也²・吉澤 努¹・徳橋 亮治³

¹正会員 修(工) 大日本コンサルタント(株) インフラ技術研究所
(〒102-0075 東京都千代田区三番町6-3 三番町UFビル)

²正会員 大日本コンサルタント(株) インフラ技術研究所 (同上)

³正会員 博(工) 大日本コンサルタント(株) インフラ技術研究所 (同上)

1. はじめに

近年、危機耐性の観点から、構造全体系や橋脚等の部材に対して、設計を超える挙動に着目する事例が増えている^{1),2)}。繰返しを受ける鉄筋コンクリート橋脚（以下、RC橋脚）では、かぶりコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋のはらみ出しが顕著となり、水平力の低下が生じるという損傷プロセスが試験により確認³⁾されている。試験とあわせて、コンクリート及び軸方向鉄筋の応力度ひずみ状態を把握する場合には、ファイバー要素を用いた再現解析を行うことが一般的である。しかし、ファイバー要素を用いた解析では、コンクリート及び軸方向鉄筋を、平面保持の仮定に基づいて分割しているため、軸方向鉄筋のはらみ出しが考慮できず、水平力の低下、RC橋脚の履歴曲線を正しく評価できないという課題が生じる。

白戸らは、かぶりコンクリートの剥落後に生じる軸方向鉄筋の塑性座屈現象を、材料非線形特性としてモデル化し、場所打ち杭試験に対する耐力低下挙動の解析結果⁴⁾を示している。また、堺らは、軸方向鉄筋単体に着目した塑性座屈解析を行い、塑性ヒンジ長及び水平力を保持できる限界状態に対する推定式^{5),6)}を示している。一方、市川らは、軸方向鉄筋のはらみ出しに伴う幾何剛性の変化を直接的に評価したモデル化を提案し、その解析結果⁷⁾を示している。

そこで、本稿は、市川らの方法⁷⁾を参考にし、過去に実施されたRC橋脚の正負交番載荷試験³⁾を対象に、軸方向鉄筋のはらみ出しを直接的に考慮した複合的なファイバー要素による再現解析を行い、その結果について報告する。

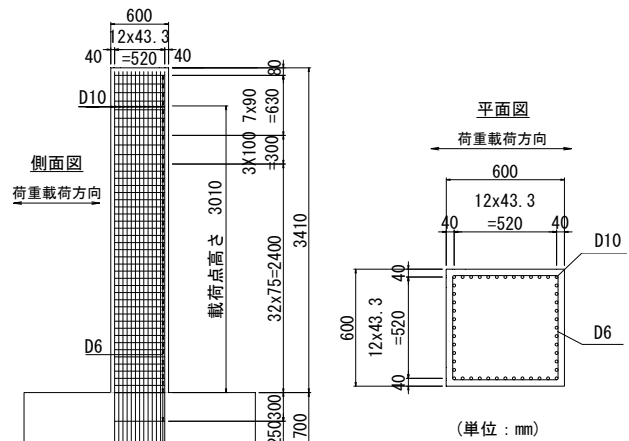


図-1 対象供試体の配筋図³⁾

表-1 対象供試体の諸元³⁾

軸方向鉄筋比 (%)	軸方向鉄筋			帯鉄筋体積比 (%)	帯鉄筋			
	径 (mm)	かぶり (mm)	降伏点 (N/mm ²)		径 (mm)	間隔 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	有効長 (mm)
0.95	D10	40	365.0	0.32	D6	75	399.0	536

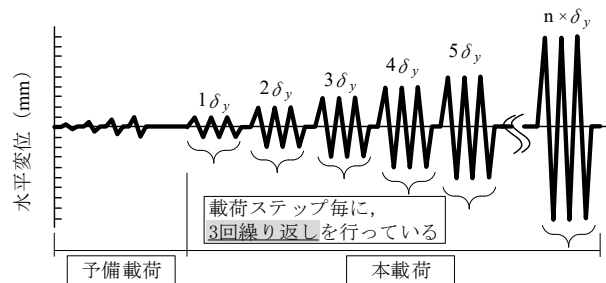


図-2 対象供試体の載荷ステップ

2. 対象供試体の概要

図-1及び表-1に対象供試体³⁾の概要を示す。対象供試体は、600 mm×600 mmの矩形断面、載荷高さ

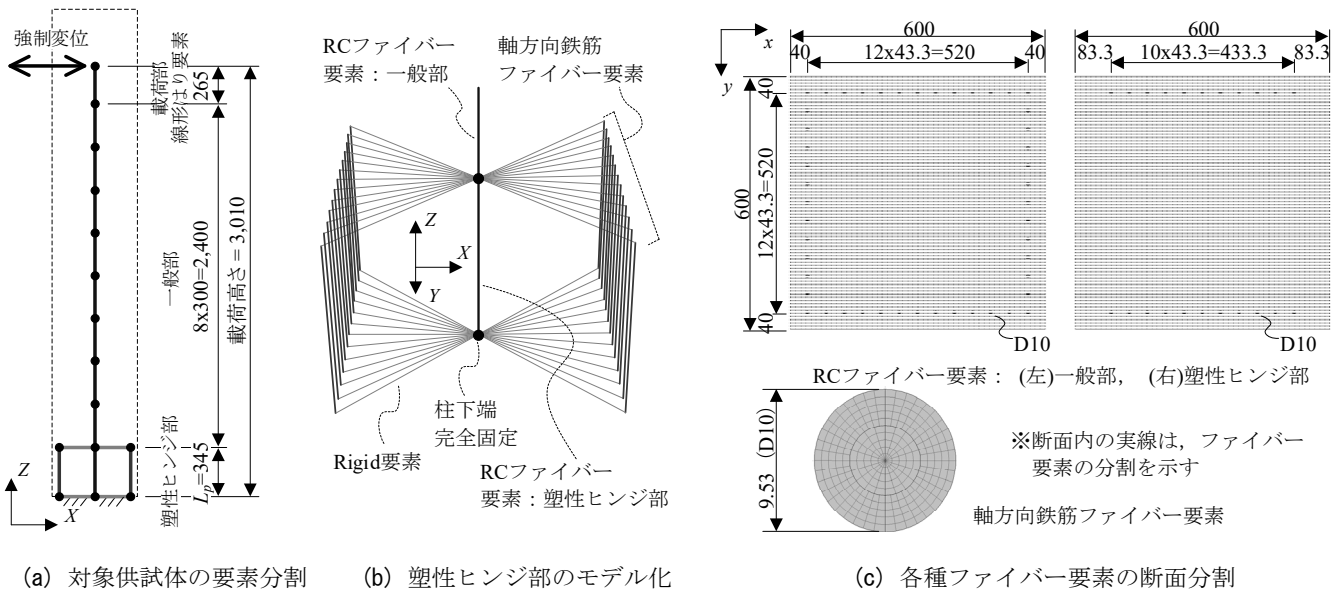


図-3 解析モデルの概要図 (単位: mm)

3010 mm, せん断支間比5.02となっている。破壊形態は、柱基部に塑性ヒンジが形成される曲げ破壊型となっている。

配筋条件は、軸方向鉄筋にD10(SD345)が使用されており、軸方向鉄筋比が0.95%, 鉄筋降伏点が365 N/mm²となっている。横拘束鉄筋は、D6(SD345)が間隔75mmで配置されており、体積比が0.32%, 鉄筋降伏点が399N/mm²となっている。使用されたコンクリートの圧縮強度は、30.1 N/mm²となっている。

試験条件は、軸応力1.0 N/mm²が作用した状態で、図-2に示す3回繰り返しによる正負交番荷重が行われている。なお、降伏変位 δ_y は約11 mmであり、11 δ_y まで荷重されている。

3. 軸方向鉄筋のはらみ出しを考慮したRC橋脚の解析方法

(1) 対象供試体のモデル化

図-3に対象供試体のモデルの概念図を示す。本検討では、市川らのモデル化⁷⁾を参考に、対象供試体のモデル化を行った。

図-3(a)及び同図(c)に示す柱部材の一般部は、コンクリートと軸方向鉄筋を一体としてファイバー要素で分割した(以下、一体要素)。高さ方向に対する要素の長さは、断面高さの半分とした。

同図(b)示す塑性ヒンジ部は、コンクリート部と軸方向鉄筋部に独立させ、これらをRigid要素により接続した(以下、二重要素)。なお、同図(c)に示す塑性ヒンジ部のRCファイバー要素は、はらみ出しへの影響が少ないため、側面鉄筋も含めて分割し

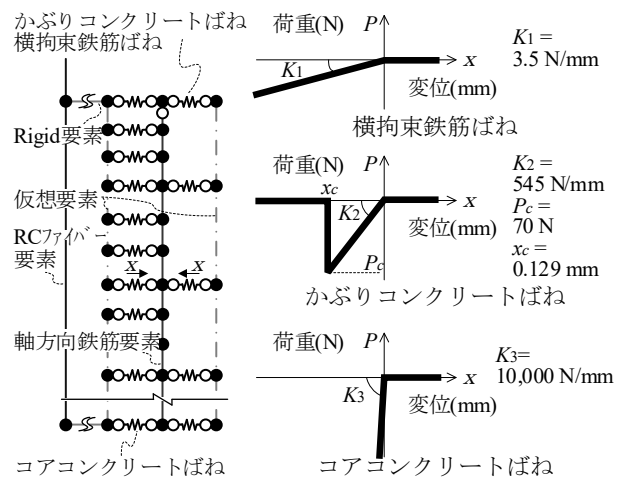


図-4 はらみ出しを拘束するばねのモデル化

た。塑性ヒンジ部における高さ方向に対する要素の長さは、文献³⁾に示される塑性ヒンジ長 L_p (=345 mm)とした。

コンクリートの材料構成則は、コアコンクリート及びかぶりコンクリートの断面内全てに拘束効果を考慮した応力度ひずみ関係を用いた。軸方向鉄筋の材料構成則は、Menegotto-Pintoモデルを用いた。

図-4に軸方向鉄筋のはらみ出しを拘束するばね(以下、拘束ばね)のモデル化を示す。塑性ヒンジ部の軸方向鉄筋は、高さ方向に15分割した。軸方向鉄筋とRigid要素の接続は、下端側で完全固定、上端側でピン結合とした。これは、塚ら^{5),6)}による軸方向鉄筋の塑性座屈解析のモデル化を参考に、軸力のみ伝達する機構として、本解析に取り入れたものである。

表-2 検討 Case

Case	要素断面の構成		材料 非線形	幾何学的 非線形
	一般部	塑性ヒンジ部		
Case1	一体要素	二重要素	○	○
Case2	一体要素	一体要素	○	×

拘束ばねは、仮想部材と軸方向鉄筋を圧縮力のみ抵抗するトラス要素により接続した。同図に示すばね値は、堺らの検討^{5,6)}を参考にした。かぶりコンクリートばねは、コンクリートが剥落するまでは、かぶりコンクリートと横拘束鉄筋が協働して抵抗する機構 (K1+K2) として設定した。コアコンクリートのばねは、内部へのはらみ出しを拘束するために、十分に硬いばねとして設定した。

(2) 解析方法

本検討は、材料非線形性、幾何学的非線形性を考慮した解析を行った。幾何学的非線形性は、有限変位、有限ひずみ及び有限回転を考慮し、その計算方法はUpdate Lagrange法を用いた。解析ソフトには、SeanFEM ver1.2.2⁸⁾を用いた。

荷重の載荷方法は、図-2に示す正負交番載荷の載荷と同様に、降伏変位 δ_y を基本とした変位漸増解析により行った。解析上の載荷変位は、水平力の低下が確認できる $8\delta_y$ までとし、漸増解析における増分量(1step)は、降伏変位 δ_y の500分の1とした。

試験では、360kNの鉛直荷重(=1.0 N/mm²)を載荷した状態で水平変位を与えている。このため、本解析においても鉛直荷重の載荷状態を初期条件として、その後、水平変位の載荷を行った。

(3) 検討Case

表-2に検討Caseを示す。Case1は、塑性ヒンジ部を二重要素によりモデル化し、表中に示す解析条件にて、軸方向鉄筋のはらみ出しを考慮できるCaseとした。Case2は、塑性ヒンジ部も一般部と同様の一体要素にて、ファイバー要素の分割を行った。これにより、軸方向鉄筋がはらみ出すことによる幾何剛性の低下は考慮されない。また、Case2は、幾何学的非線形性を考慮していない。

4. 解析結果

図-5に橋脚下端の水平反力と橋脚天端水平変位による荷重変位関係図を示す。図中には、対象供試体の試験結果³⁾、解析結果(Case1, Case2)を重ねて示し

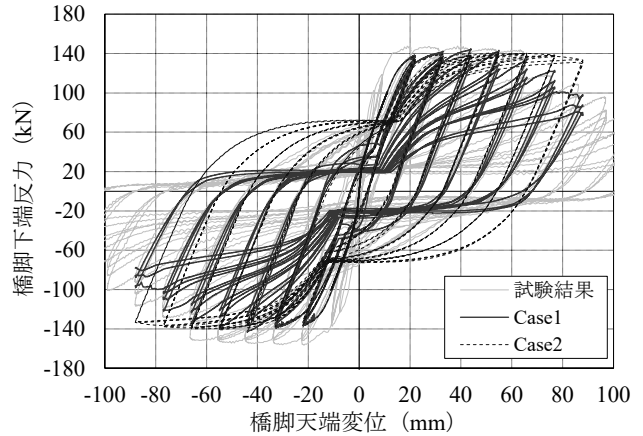


図-5 荷重変位関係図

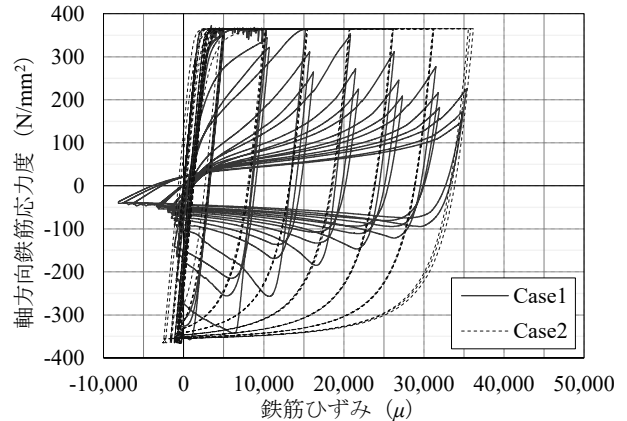


図-6 軸方向鉄筋の応力度ひずみ関係

ている。同図より、Case1のはらみ出しを考慮することで、解析においても $6\delta_y$ 以降に水平力の低下が確認できる。また、履歴曲線も除荷後、再載荷に至るスリップ型の挙動を再現できている。

図-6に軸方向鉄筋の応力度ひずみ関係を示す。ひずみは、軸方向鉄筋要素の天端変位を塑性ヒンジ長 L_p (=345mm)で除し、応力度は、要素下端軸力を断面積で除して求めた。Case2では、Menegotto-Pintoモデルの材料非線形特性どおり、ひずみの増加に伴う剛性低下が確認できる。一方で、圧縮引張に応じた履歴を描き、はらみ出しによる応力度の低下は見られていない。Case1では、鉄筋座屈の影響により、圧縮応力の低下、再載荷時の剛性低下が確認できる。この挙動により、図-5における水平力の低下や除荷時の圧縮抵抗力を適切に評価でき、履歴挙動の再現性を向上させている。ただし、軸方向鉄筋のはらみ出しが試験よりも顕著に生じている。

図-7に軸方向鉄筋の座屈モード図を示す。座屈モード図は、はらみ出しが顕著となる $8\delta_y$ 時の3サイクル目にて、軸方向鉄筋に作用する引張・圧縮軸力が最大となる状態として、正側・負側載荷時にて作図した。同図(a)に負側載荷時の状態を示す。このと

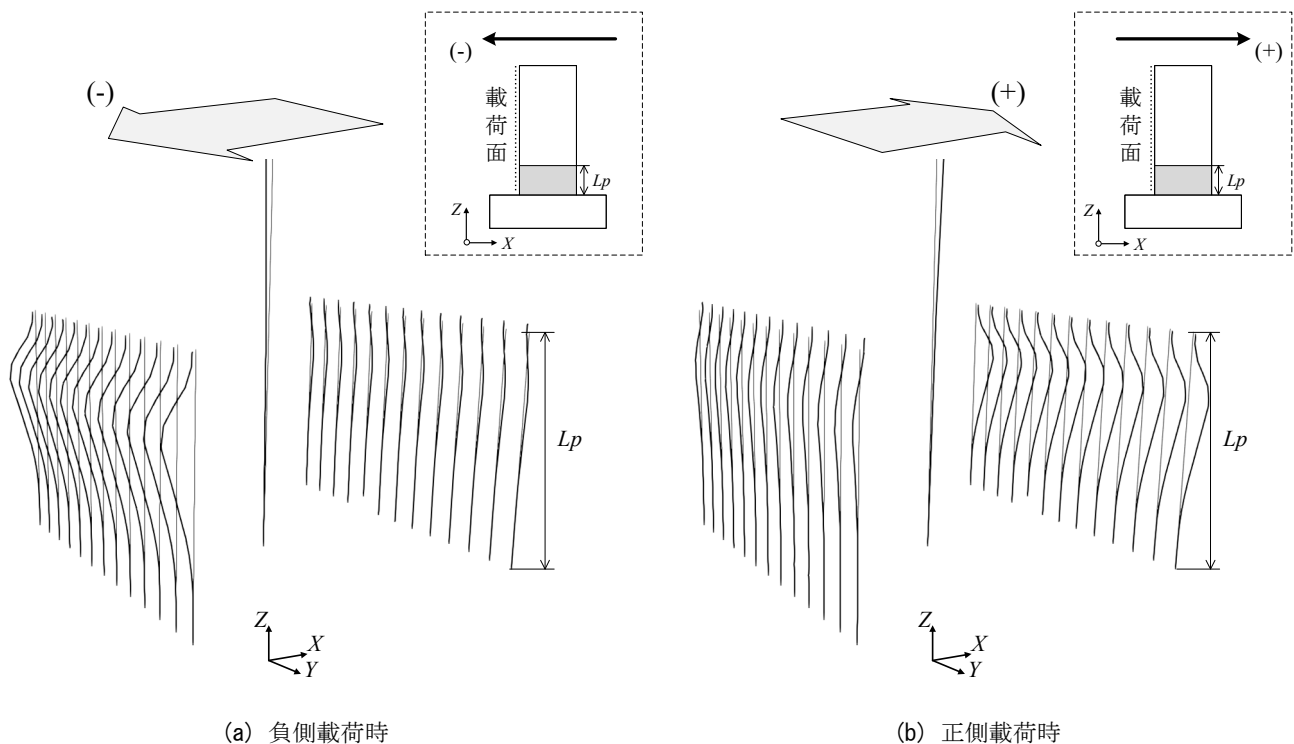


図-7 軸方向鉄筋の座屈モード

き、軸方向鉄筋に圧縮力が作用し、鉄筋のはらみ出しが生じていることが確認できる。同図(b)に正側載荷時の状態を示す。圧縮側ではらみ出した鉄筋が再び伸びている状態が確認できる。ただし、軸方向鉄筋は、はらみ出しによる大変形を相殺するほど伸びてはいない。このことから、RC橋脚の曲げ耐力は、軸方向鉄筋による引張抵抗が減少しており、曲げ耐力の低下に伴う、橋脚天端における水平力の低下を解析上再現できている(図-5)。

5. まとめ

本稿では、軸方向鉄筋のはらみ出しを直接考慮したファイバー要素で正負交番載荷試験の再現解析を行った。解析の結果、軸方向鉄筋のはらみ出しが生じることにより、水平力の低下、除荷時の挙動の変化を捉えることができた。軸方向鉄筋のはらみ出し現象を再現するには、RC橋脚の諸元を踏まえて適切にモデル化を行うことが必要である。

本検討では、一つの供試体に対して検討した結果を示した。今後、モデル化の改良を行うとともに、異なる諸元による供試体を対象とした解析を行い、精度向上を図っていく予定である。

参考文献

1) 大住道生, 中尾尚史, 石崎覚史, 庄司学: 破壊尤度の制御による道路橋の崩壊シナリオデザイン設計法

の提案, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.77, No.4 (地震工学論文集第40巻), pp.1_360-I_372, 2021.

- 2) 徳橋亮治, 野中哲也, 藤田健留, 海老澤健正, 後藤芳顕: 設計地震動を超える状況を想定した制御部材付き円形断面鋼製橋脚による高架橋の性能向上策, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.78, No.1, pp.61-77, 2022.
- 3) 星隈順一, 堺淳一, 小森暢行, 坂柳皓文: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時限界状態の評価手法に関する研究, 土木研究所資料, No.4262, 2013.
- 4) 白戸真大, 木村嘉富, 福井次郎: 鉄筋のはらみ出しを考慮した場所打ち杭のモデルと地盤振動が杭基礎に与える影響評価への適用, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.153-172, 2001.
- 5) 星隈順一, 堺淳一, 小森暢行: 軸方向鉄筋のはらみ出し現象に着目した鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長の推定手法に関する研究, 土木研究所資料, No.4257, 2013.
- 6) 堺淳一, 星隈順一: 軸方向鉄筋のはらみ出し現象に着目した鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長の評価, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.782-795, 2014.
- 7) 市川翔太, 佐々木智大, 川島一彦: 軸方向鉄筋の座屈を考慮したRC橋脚の解析, 第13回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.65-72, 2010.
- 8) (株)耐震解析研究所: SeanFEM User's Manual, 2009.