

ファイバー要素を用いた RC 橋脚の解析的検討

宇都宮大学 学生員 ○白井祐太 忍田祥汰 正会員 藤倉修一
正会員 Nguyen Minh Hai フェロー会員 中島章典

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震以降、従来の耐震設計法であった震度法に代わり、塑性域における変形性能およびエネルギー吸収性能等を考慮した地震時保有水平耐力法による設計が主となった。これを機に、部材の構成則に基づき地震応答を求めることができ、単純であるという点から、非線形領域を考慮した解析手法としてファイバー要素による解析が多く用いられるようになった。ファイバー要素を用いた解析では、実現象を正しく再現するために、部材ごとの構成則を適切にモデル化することが重要である。

そこで本研究では、RC 橋脚模型を作成し、静的載荷実験を行い、ファイバー要素解析による実験の再現を試みた。これにより得られる荷重-変位関係、応力-ひずみ関係に関して実験結果との比較を行い、ファイバー要素解析の適用性および本解析で使用するモデルの妥当性について検証する。

2. 正負交番載荷実験

(1) 実験供試体

本実験では、図-1に示すような RC 橋脚模型を道路橋示方書¹⁾に基づき作製した。供試体は250mm×250mmの正方形断面を有し、供試体高さは1400mm、有効高さは875mm、せん断スパン比は3.5である。

軸方向鉄筋はD13(SD295)を60mm間隔で12本配置し、帯鉄筋はD6(SD295)を用いて70mm間隔とした。帯鉄筋の定着長は70mmとし、軸方向鉄筋比は2.4%、帯鉄筋比は1.0%である。引張試験より求めた軸方向鉄筋の降伏強度は346N/mm²、引張強度は482N/mm²であり、帯鉄筋の降伏強度は360N/mm²、引張強度は561N/mm²である。

コンクリートには普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材の最大寸法は25mmである。実験当日のコンクリートの圧縮強度は28.9N/mm²であった。

(2) 実験概要

フーチングをPC鋼棒で反力床に固定し、22.8kNの重り鋼板およびH鋼を躯体上部に上載することにより0.37N/mm²の初期軸応力を作用させた。この状態で、油圧ジャッキにより水平力を変位制御で与えることで正負交番載荷実験を行った。載荷方向は図-1に示すEW方向であり、W面側が圧縮となる場合を正載荷、E面側が圧縮となる場合を負載荷とした。また、同一振幅における繰り返し回数は3回である。ここで、降伏変位 δ_y は、橋脚基部付近における最外縁軸方向鉄筋のひずみがおおよそ降伏ひずみに達した時の載荷点における水平変位と定義し、 $1\delta_y$ を4mmとした。本実験では、 $1\delta_y \sim 6\delta_y$ 、 $8\delta_y$ 、 $11\delta_y$ の変位振幅を与えた。

水平荷重は油圧ジャッキの先端に取り付けたロードセルで測定し、水平変位は載荷位置の変位を巻き込み型変位計で測定した。また、鉄筋の伸び出しによる橋脚の変形を求めるため、橋脚基部から100mmの位置にL字型のプレートを取り付け、この点とフーチング間の相対変位を測定した。軸方向鉄筋のひずみは、橋脚基部から80mm、130mm、240mmの位置でE面およびW面において中央に位置する2本の軸方向鉄筋に、帯鉄筋のひずみは、橋脚基部から100mm、170mm、240mm、310mmの位置に配置されたものにひずみゲージを貼付し測定した。

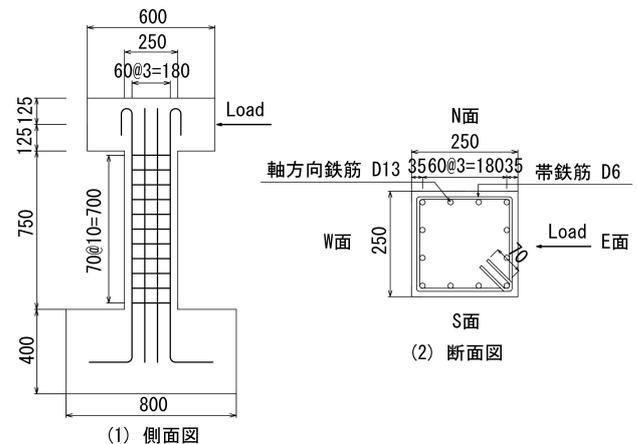


図-1 実験供試体

(3) 実験結果

正負交番載荷実験により得られた履歴曲線を図-2に赤線で示す。この図から、 $3\delta_y$ の正載荷時に最大耐力61.0kNに達した後、徐々に耐力の低下が見られる。

実験時の観察では、かぶりコンクリートの最外縁は $6\delta_y$ 載荷後に圧壊し剥落が生じていた。 $11\delta_y$ 載荷後にはコアコンクリートにまで損傷が進展し、一部の軸方向鉄筋では面外方向への座屈が見られた。また、E面における軸方向鉄筋のひずみゲージの値は、 $1\delta_y$ 載荷時に 1500×10^{-6} 程度示し、 $3\delta_y$ 載荷時には急激にひずみが増加し、 10000×10^{-6} にまで達していた。

3. ファイバー要素解析

(1) 解析モデル

橋脚の履歴特性をファイバー要素を用いて解析するために、橋脚模型を10節点11要素でモデル化を行った。橋脚躯体部を全区間ファイバー要素で、躯体上部のコンクリートブロックを線形はり要素でモデル化した。また、フーチング内の軸方向鉄筋の伸び出しが水平変位に与える影響を、躯体基部に線形回転ばねを設けることにより考慮した。ここで塑性ヒンジ長は、既往研究²⁾に基づいて橋脚幅の0.5倍とし、1つのファイバー要素の長さがこれと等しくなるよう設定した。

ファイバー要素の断面はコアコンクリート、かぶりコンクリート、軸方向鉄筋に分け、コアコンクリートを81分割、かぶりコンクリートを96分割した。

本研究におけるコアコンクリートの応力-ひずみ関係の骨格曲線は、Hoshikumaらの提案式³⁾に基づき、最大圧縮応力 σ_{cc} 、そのときのひずみ ε_{cc} 、下降域勾配 E_{des} を与えた。かぶりコンクリートの骨格曲線については、Hoshikumaらの提案式を参考に、材料試験の結果を考慮して与えた。また、コンクリートの除荷、再載荷履歴には堺らのモデル⁴⁾を用いた。

一方、軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係は、Bauschinger効果を考慮できるMenegotto-Pintoモデルに堺らが修正を加えたモデル⁵⁾を用いた。Bauschinger効果とは、1度塑性変形を受けた金属がそれと逆方向の応力を受けると、降伏応力が大きく低下する性質のことであり、これを表すパラメータは次式で表される。

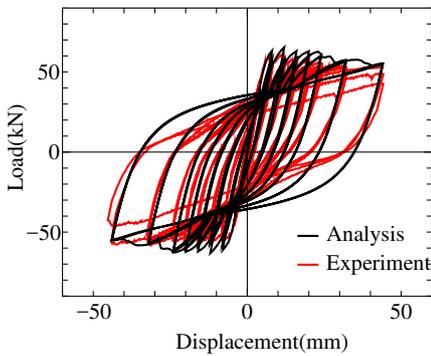


図-2 履歴曲線

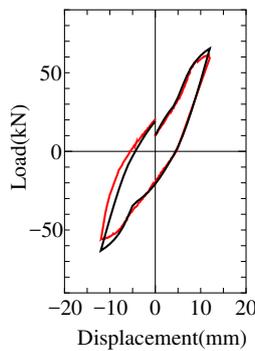


図-3 3δ_y の履歴

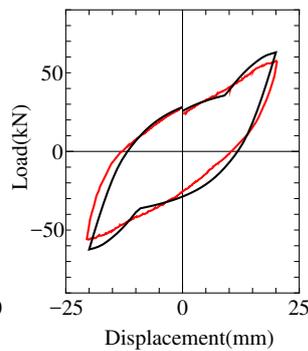


図-4 5δ_y の履歴

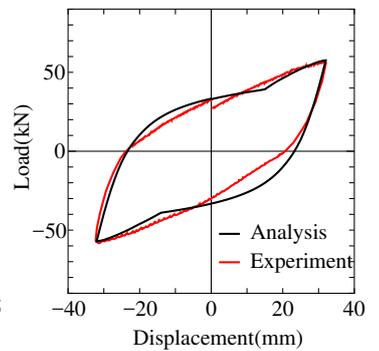


図-5 8δ_y の履歴

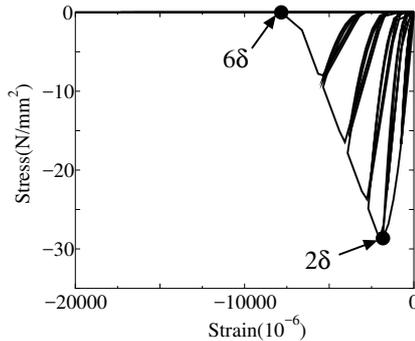


図-6 かぶりコンクリートの応力-ひずみ関係

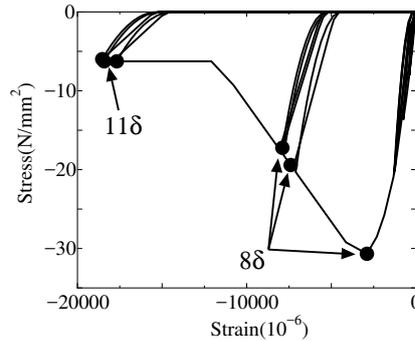


図-7 コアコンクリートの応力-ひずみ関係

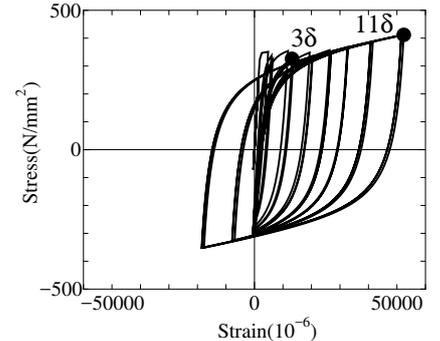


図-8 軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係

$$R_b = R_{b0} - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi} \quad (1)$$

ここで、 R_{b0} 、 a_1 、 a_2 は材料定数として一般に 20、18.5、0.15 とされる場合が多い。しかし、本研究では、軸方向鉄筋の座屈による鉄筋応力の低下を間接的にある程度考慮するために、 $R_{b0}=19.5$ と設定した。

(2) 解析結果

正負交番载荷実験における RC 橋脚の履歴曲線をファイバー要素解析により求めた。得られた荷重-変位関係を図-2 に黒線で示す。また、このうち $3\delta_y$ 、 $5\delta_y$ 、 $8\delta_y$ 载荷時における第 1 サイクル目の履歴曲線を取り出して実験と比較したものをそれぞれ図-3~図-5 に示す。これらによれば、実験値の最大耐力が 61.0kN であるのに対し、解析では 65.4kN とやや高めに評価されているものの、履歴曲線はよく似た形状を示しており、比較的精度よく再現できているといえる。しかし、载荷が進むにつれ、実験と解析による履歴曲線のずれが大きくなっていく。これは、軸方向鉄筋の座屈やコアコンクリートの損傷の進展を、部材における平面保持を仮定した各ファイバーモデルが再現できなくなったためと考えられる。

次に、塑性ヒンジ区間中央におけるコアコンクリートおよびかぶりコンクリートの最外縁(W面中央)、軸方向鉄筋(E面中央)の応力-ひずみ関係の履歴をそれぞれ図-6~図-8 に示す。これを見ると、かぶりコンクリートは帯鉄筋による横拘束効果が考慮されていないため、 $2\delta_y$ の段階で応力が σ_{cc} に達している。 $6\delta_y$ の载荷時には応力が 0 になっているため、かぶりコンクリート最外縁は著しく剥落することが予想される。実験では、 $6\delta_y$ 载荷後にかぶりコンクリートの最外縁は圧壊し剥落しており、図-6 はこの様子を説明できている。

一方、コアコンクリート最外縁は、かぶりコンクリートが剥落した後、 $8\delta_y$ で応力が σ_{cc} に達し、 $11\delta_y$ 载荷時には σ_{cc} の 20% にまで低下している。このようになるとコアコン

クリート最外縁にも大きな損傷が生じることが考えられる。実験では、 $11\delta_y$ 载荷後にコアコンクリートにまで損傷が進展しており、図-7 はこの様子を概ね説明できている。

さらに、軸方向鉄筋の応力-ひずみ関係を見ると、 $3\delta_y$ 载荷時に 10000×10^{-6} 、 $11\delta_y$ 载荷時に 50000×10^{-6} 程度のひずみが生じている。このような状態では軸方向鉄筋の座屈は生じるものの、繰り返し回数が少ないことから、破断は起こらないと考えられる。実験では、軸方向鉄筋に面外方向の座屈が見られ、ひずみゲージは $3\delta_y$ 载荷時に 10000×10^{-6} 程度の値を示している。図-8 と比較しても大きな矛盾は見られない。

4. まとめ

本研究では、RC 橋脚を対象にファイバー要素解析を行い、実験結果との比較を行うことで以下の結論を得た。

1. ファイバー要素解析により、正負交番载荷実験から得られる履歴曲線を精度よく再現することができる。しかし、さらに精度の向上を図るためには、軸方向鉄筋の座屈やコンクリートの損傷が進んだ領域についてもモデル化を行う必要がある。
2. 本研究で用いたコンクリートおよび軸方向鉄筋における応力-ひずみ関係のモデルは、実験より得られる損傷状況を概ね矛盾なく説明することができる。

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説, 2012.3.
- 2) 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.79-89, 2004.4
- 3) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K., and Taylor, A.W.: Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers, J.Struct.Engng, Vol.123, No.5, pp.624-633, 1997.
- 4) 堺淳一, 川島一彦, 庄司学: 横拘束されたコンクリートの除荷および再载荷過程における応力度~ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.297-316, 2000.7.
- 5) 堺淳一, 川島一彦: 部分的な除荷・再载荷を含む履歴を表す修正 Menegotto-Pinto モデルの提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.159-169, 2003.7.