

高強度材料を用いたRC部材の耐荷力特性評価

阪神高速道路(株) 正会員 ○西海 能史 阪神高速道路(株) 正会員 小坂 崇
(一財) 阪神高速道路技術センター 正会員 服部 匡洋

1. はじめに

橋脚高さの高いRC橋脚では、高強度材料の使用により、断面縮小による自重の低減や建設コストの縮減を図ることができる。しかし、これらは道路橋示方書・同解説V耐震設計編(以下、道示V)8.5に規定される、RC橋脚に塑性化を考慮する橋の限界状態2及び3に相当する水平変位の評価式(以下、道示評価式)の適用上限、例えばコンクリートの設計基準強度 $21 \sim 30 \text{ N/mm}^2$ を超える強度であり、実橋への適用にあたっては、地震時の損傷過程を把握し、損傷過程に応じて破壊に対して適切な安全性を確保できるように限界状態を設定する必要がある。本検討は、高強度材料を使用したRC橋脚に対する過去の実験のうち、未実施の組み合わせであるコンクリート強度 60 N/mm^2 、軸方向鉄筋SD490を使用した曲げ破壊型RC橋脚に対する正負交番載荷実験を行い、道示評価式との比較を行った。

2. 実験概要

(1) 実験概要

本実験では図-1に示す構造諸元の供試体を作製し、高強度材料の使用により断面が縮小されたRC橋脚の軸応力を想定した、道示適用上限を超える 3.5 N/mm^2 の軸応力を作用させた。

正負交番載荷実験における水平力の載荷パターンは変位制御による載荷とし、基準変位 δ_0 の整数倍で各載荷振幅3回の載荷を行った。基準変位は、事前に実施したファイバー要素を用いたブッシュオーバー解析より得られた降伏変位及び予備載荷における引張側最外縁鉄筋の降伏ひずみより $1\delta_0 = 30 \text{ mm}$ と設定した。

(2) 実験結果

本実験の水平力-水平変位関係を整理すると図-2となり、 $2\delta_0$ で最大水平力となったが、最大水平力直後から水平力が低下し始めた。

また、損傷過程を整理すると、 $2\delta_0$ で基部から 2000 mm 程度の高さまで水平ひび割れが発生、続いて $3\delta_0$ では縦方向ひび割れが発生、基部のかぶりコンクリートの軽微な剥離が生じた。さらに、 $4\delta_0$ では基部のかぶりコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋がはらみ出し始めた。 $6\delta_0$ では軸方向鉄筋は15本の破断が生じ、かぶりコンクリートが基部から 240 mm 程度の高さまで剥落し最終状態に至った(図-3(b))。これは道示V8.2に解説される一般的なRC橋脚の損傷過程と同様の損傷過程であった。

3. 道示評価式との比較

(1) 道路橋示方書における橋の限界状態2および3の考え方

道示V8.3では、RC橋脚に塑性化を考慮する橋の限界状態2では水平力の低下がほとんどなく、エネルギー吸収が安定して期待できる限界の状態、限界状態3は地震時保有水平耐力を保持できる限界の状態とみなすことが解説されている。また、道示Vに係る参考資料では、限界状態2に相当する変位においては、1回目の載荷における水平力の最大値に対する3回目の載荷における水平力の最大値の低下度は最大でも15%程度、2回目と3回目の載荷におけるエネルギー吸収量の低下度は概ね10%程度であることが示されている。本実験で繰返し載荷における水平力とエネルギー吸収量の低下を整理した結果、 $5\delta_0$ が水平耐力比0.72、吸収エネルギー比0.77となることから、直前の $4\delta_0$ が限界状態2に相当すると考えられる。

また、同一振幅における3回の繰返し載荷に対する履歴曲線の変化を整理した結果、 $4\delta_0$ まで安定した履歴曲線を示すが、 $5\delta_0$ より繰返し回数が増えるにつれて水平変位の最大となる付近で水平力が低下し、エネルギー吸収能が小さくなった。道示Vに係る参考資料では、限界状態3は塑性ヒンジ領域において軸方向鉄筋のはらみ出しが生じている段階であり、この段階において載荷を繰返すと、繰返し回数の増加に伴い、水平変位が最大となる付近での水平力が低下し、エネルギー吸収能も低下することが示されていることから、 $4\delta_0$ が限界状態3であっても相当すると考えられる。

(2) 塑性ヒンジ長および鉄筋ひずみの評価式の適用性の検証

道示評価式の適用性の検証に先立ち、道示評価式のパラメータである塑性ヒンジ長、限界状態変位における鉄筋ひずみを文献^{1),2)}の検証方法に則り、これらパラメータの評価式の適用性についても検証した。

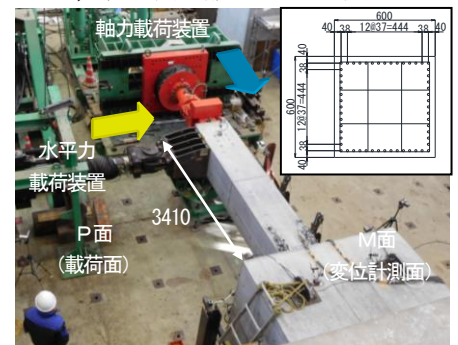


図-1 実験供試体設置状況及び断面図(mm)

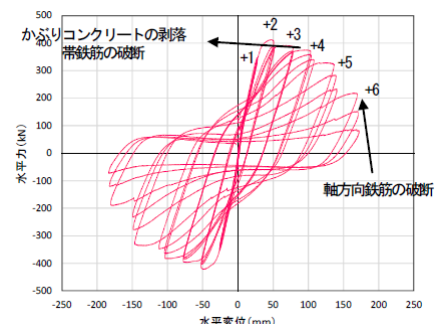


図-2 水平力-水平変位関係

塑性ヒンジ長の評価式の検証は、軸方向鉄筋の塑性座屈解析を実施した。解析モデルは文献¹⁾を参考に軸方向鉄筋はファイバー要素、帯鉄筋およびかぶりコンクリート、コアコンクリートによる拘束はバナ要素として前者は帯鉄筋位置に設定、後者は軸方向鉄筋の各節点に設定した。

塑性座屈解析により求められるはらみ出し長と実験結果を比較すると(図-3(a), (b)), はらみ出し長の解析値 $2z$ が144mmに対し、実験値は240mmであり、解析値が実験値より小さくなり、解析値と実験値の比率は、0.60となった。実験値と解析値の誤差が有意なものか確認するため、既往検討結果に対して本検討結果をプロットしたものを図-3(c)に示す。本実験条件における実験値と解析値の誤差は既往検討結果と同程度であり、定性的には、有意な差でないと考えられる。

次に、限界状態変位における鉄筋ひずみに係る評価式の適用性についても検証した。実験における限界状態2及び3に相当する水平変位での軸方向鉄筋の引張鉄筋ひずみを推定するため、ファイバー要素を用いた実験の再現解析を行った。実験における水平力-水平変位関係及び限界状態に該当する点、H24道示の骨格曲線、再現解析結果を図-4に示す。再現解析結果は実験結果を概ね包絡しており、実験を概ね再現できていると言える。再現解析から求めた実験における限界状態時の引張鉄筋ひずみを既往実験結果と比較した結果、誤差の範囲に比較的収まっており、限界状態における鉄筋ひずみの評価式についても定性的ではあるが、その適用性が確認できた。

(3) 水平変位の評価結果と本実験結果

道示V8.5では、各限界状態における水平変位は、最外縁の軸方向鉄筋位置において軸方向鉄筋の引張ひずみが限界状態に応じたひずみに達するとき又は最外縁の軸方向圧縮鉄筋位置におけるコンクリートの圧縮ひずみが限界圧縮ひずみに達するときのいずれか小さい方の変位と定義されている。各物理指標に達するときの変位を算出した結果、限界状態2及び3どちらもコンクリート圧縮ひずみが限界圧縮ひずみに達するときの変位(76.2mm)は、軸方向鉄筋の引張ひずみが限界状態に達するときの変位(限界状態2は78.6mm, 限界状態3は101.7mm)より小さく、コンクリートの圧縮ひずみに対する限界状態が限界状態2及び3に相当すると評価した。また、実験より得られた水平力-水平変位関係及び材料試験結果より得られたコンクリート強度を用い、道示V8.5規定に基づき計算した骨格曲線の比較を図-5に示すと、高軸応力Caseでの限界状態2及び限界状態3の限界状態に相当する水平変位は、実験結果が道示V評価結果を27.2mm上回る結果となった。

(4) 限界状態2及び3に相当する水平変位の既往実験と本実験結果の比較

図-6は、文献¹⁾に示される既往実験における軸方向鉄筋の引張ひずみが限界状態2及び3の許容引張ひずみに達するときの変位の評価値と実験値の比較に対し、本実験値及び限界状態2及び3に達するときの変位の評価値をプロットしたものである。図のとおり、本実験の限界状態変位は既往実験と概ねばらつきの範囲内にあるといえることから、本実験条件においても道示Vに規定される限界状態変位の評価式が適用できる可能性を示した。

4. おわりに

本検討では、過去実施されていない組み合わせであるコンクリートの強度 60N/mm^2 、軸方向鉄筋SD490を使用した曲げ破壊型RC橋脚に対する正負交番載荷試験を行い、RC橋脚に塑性化を考慮する橋の限界状態2及び3の限界状態の評価式との比較を行うことで、評価式適用の可能性を示した。

参考文献

- 1) 星隈順一, 堀淳一, 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。土木研究所資料第4257号, 2013。
- 2) 星隈順一, 堀淳一, 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。土木研究所資料第4262号, 2013。

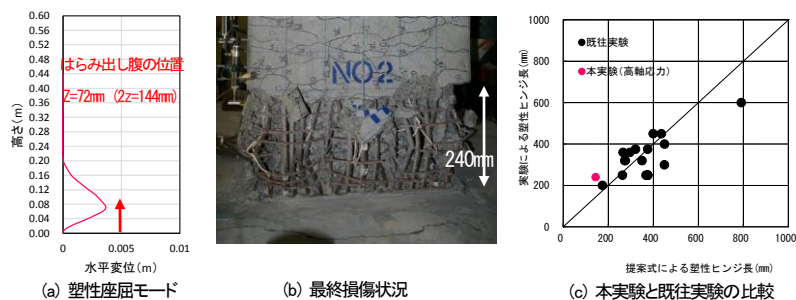


図-3 はらみ出し長の解析値と実験結果

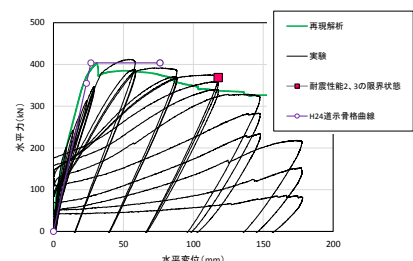


図-4 水平力-水平変位関係の実験値と解析値の比較

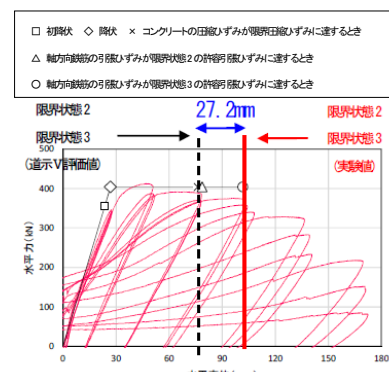
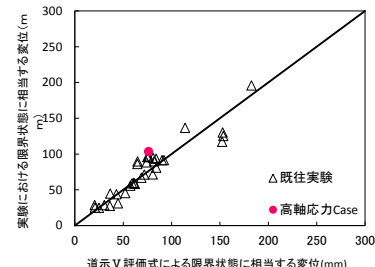
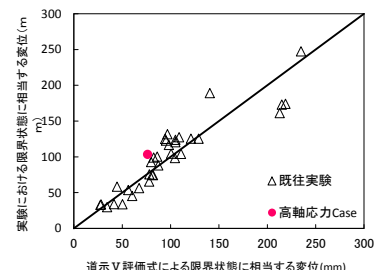


図-5 実験より得られた水平力-水平変位関係と道示評価式より算出した骨格曲線の比較



(a) 限界状態2



(b) 限界状態3

図-6 引張ひずみが限界状態2及び3の許容引張ひずみに達するときの変位の評価値と実験値の比較(既往実験と本実験の比較)