設計基準強度 60N/mm²のコンクリートを用いた RC 部材の正負交番載荷実験

(一財)阪神高速道路技術センター	正会員 〇服部 匡洋	阪神高速道路(株)	正会員 篠原 聖二
(国研)土木研究所	正会員 岡田太賀雄	(国研)土木研究所	正会員 大住 道生

1. 検討の背景・目的

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、 その採用にあたっては、変形特性や破壊特性に着目した実験的検討も行われている¹⁾。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) 10.3 に規定される許容ひずみの適用範囲の上限を超える強度であり²⁾、実橋への適用にあた っては、道示V5.5 に規定されるように、地震時の損傷過程や破壊形態を把握すること、破壊形態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ことが必要である。本稿は、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/mm²、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V10.3 に規 定される耐震性能 2 及び 3 の限界状態に相当する変位の評価式との比較を行ったものである。なお、本検討は曲げ破壊型 RC 橋脚に対する正負交番繰返し載荷実験により水平力-水平変位関係について検証したものであり、実橋への適用にあたっては、 せん断やねじりに対する抵抗特性についても、別途実験等による検討が必要である。

2. 実験ケース

実験供試体の構造諸元及び道示Vにおける RC 橋脚の限界状態の評価式の適用範囲の上限を表-1 に示す。本実験では、過去の実験を参考に構造諸元を決定した。コンクリートの設計基準強度は道示V10.3 に規定される許容ひずみの適用範囲の上限を 超える 60N/mm²とした。また、軸方向鉄筋は SD490、横拘束鉄筋は SD345 とした。

本実験では同一構造諸元の供試体を2体作製し、作用軸応力をパラメータとした実験を行った。一般的なRC橋脚と同等の 軸応力を想定した標準Caseでは1.0N/mm²、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高軸応力 Caseでは道示V10.3の規定の適用上限を超える3.5N/mm²の軸応力を作用させた。

3. 実験概要

供試体セットアップ状況及び供試体断面図を図-1 に示す。水平力は変位制御による載荷とし、基準変位 δ₀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プ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 1δ₀=30mm と設定した。

4. 実験結果

(1) 水平力-水平変位関係

水平力-水平変位関係の比較を図-2 に示す。なお、図-2 の水平力-水平変位関係は、実験において計測した軸方向鉄筋の伸び出し量による水平変位分を差し引く補正を行ったものである。また、材料試験 **表-1** 実験供試体構造諸元及び道示V適用上限

結果より得られたコンクリート強度を用い、道示V10.3 規定に基づき計算した骨格曲線を併せて示す。標準 Case では 280 で最大水平力となり、280 以降水平力を保持するが、480 より水平力が低下し始めた。また、高軸応力 Case では、標準 Case 同様に 280 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。

(2) 損傷進展状況

標準 Case では、2 δ_0 で基部から 2200mm 程度の高さまで水平ひび割れが発生した。 $3\delta_0$ 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。 $4\delta_0$ 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。 $5\delta_0$ では P 面側で 3 本、M 面側で 3 本の帯鉄筋が破断し、 $6\delta_0$ では P 面側でさらに 1 本の帯鉄筋が破断し、軸方向鉄筋は 15 本の破断が生じた。標準 Case における基部の損傷状況の一例を図-3 に示す。 $6\delta_0$ では、かぶりコンクリートは基部から 240mm 程度の高さまで剥落した。

また、高軸応力 Case は標準 Case と概ね同様の損傷過程を示した。 $4\delta_0$ では、P 面側の1本の帯鉄筋が破断した。 $5\delta_0$ では、帯鉄筋が P 面側で3本、M 面側で3 本破断し、 $6\delta_0$ では帯鉄筋が1本、軸方向鉄筋が15本破断した。かぶりコンクリ ートは標準 Case と同様に基部から 240mm 程度の高さまで剥落した。

道示V適用範囲内の一般的なRC橋脚では、軸方向鉄筋の降伏後、水平力が水 平耐力において安定して保持されたのち、かぶりコンクリートの剥離、軸方向鉄筋のはらみ出し等により水平力が低下し始め、横拘束鉄筋で拘束された内部のコ

キーワード 高強度コンクリート、高軸応力、水平力・水平変位関係

連絡先 〒541-0054 大阪市中央区南本町4丁目5番7号 TEL 06-6244-6028

標準 高軸応力 道示 Ⅴ 適用上限 パラメータ 柱基部応力度(N/m 1.0 3.5 3.0 1260 載荷軸力(kN) 360 柱寸法(mm) 600 --ト強度(N/r 62.7 63.9 30 554.4 (SD490) SD490 軸方向鉄筋降伏強度(N/n D13@37-56本 軸方向鉄筋配置 軸方向鉄筋比(%) 2.0 2.5 402.6 (SD345) 横拘束鉄筋降伏強度(N/m SD345 横拘束鉄筋配置 D6@40 構拘束鉄筋比(%) 1.7 1.8



(単位:mm)

ンクリートの破壊や軸方向鉄筋の破断等により最終状態に至ることが道示V10.1 に解 説されている。本実験の結果は、このような一般的な RC 橋脚の損傷過程と同様の損 傷過程であった。

5. 道路橋示方書評価式との対応

(1)実験における耐震性能2及び3の限界状態に相当する水平変位

道示V10.2 では、RC 橋脚の耐震性能2の限界状態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、耐震性能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、文献3)では、この観 点を踏まえ、既往の実験結果を整理した結果、橋の耐震性能2の限界状態に相当する 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。本実験での繰返し 載荷における水平力とエネルギー吸収量の低下度合いを図-4 に示す。本実験も同様に 整理した結果、標準 Case の 5% では水平耐力比が0.78、吸収エネルギー比が0.75、高 軸応力 Case の 5% では水平耐力比が0.72、吸収エネルギー比が0.77 となり、耐震性能 2 における水平力及びエネルギー吸収量の低下度の目安を下回ることから、標準 Case、 高軸応力 Case ともに、直前の4%が耐震性能2及び3に相当すると考えられる。

(2) 水平変位の評価結果と実験結果の比較

道示V10.3 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耐震性能の限界状態に応じ 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。各限界状態に相当する変位を算出するに あたって、用いる物理指標に達するときの変位の評価結果を表-2 に示 す。ここで、各限界状態における水平変位の算出にあたり、安全係数は 考慮していない。各物理指標に達するときの変位を算出した結果、標準 Case では、耐震性能2及び3どちらも軸方向鉄筋の引張ひずみが許容 引張ひずみに達するときの変位が、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変位より小さく、軸方向鉄筋の引張ひずみに対 する限界状態が標準 Case の耐震性能 2 及び 3 の限界状態に相当すると 評価した。また、高軸応力 Case では、耐震性能 2 及び 3 どちらもコン 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変位が、軸方向 鉄筋の引張ひずみが許容引張ひずみに達するときの変位より小さく、コ ンクリートの圧縮ひずみに対する限界状態が高軸応力 Case の耐震性能 2及び3の限界状態に相当すると評価した。

また、耐震性能2及び3に相当する変位の評価結果と実験値の比較を表 -3 に示す。本実験に用いたコンクリートの設計基準強度は道示V10.3 規 定の適用上限を超える強度であるが、限界状態の評価式をそのまま適用し た場合、標準 Case では、耐震性能2における水平変位は実験結果より小 さく、また、耐震性能3の水平変位は実験結果より大きく評価した。一方、 高軸応力 Case での耐震性能2及び3どちらの水平変位も、実験結果より 小さく評価した。

6. 結論・今後の課題

コンクリートの設計基準強度 60N/mm²、軸方向鉄筋 SD490 を組み合わ

せた RC 橋脚においても、道示V適用範囲内の一般的な RC 橋脚と同様の損傷過程を示した。また、評価式の適用にあたって、 評価式から算出される各限界状態に相当する水平変位と実験結果から得られた各限界状態に相当する水平変位を比較した結 果、標準 Case での耐震性能 2 における水平変位は実験結果より小さく、また、耐震性能 3 の水平変位は実験結果より大きく 評価した。一方、高軸応力 Case での耐震性能 2 及び 3 どちらの水平変位も、実験結果より小さく評価した。今後、評価式の 適用にあたっては、塑性ヒンジ長、許容限界ひずみについて検証して行く予定である。

参考文献 1) 曽我部ら: RC 橋脚における軸方向鉄筋,帯鉄筋への高強度鉄筋の適用に関する実験的研究,土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol. 67, No. 1, pp131-149. 2010. 5. 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編に関する参考資料, 2015. 3.



図-2 水平力・水平変位関係の比較



図−3 基部損傷状況(標準 Case)



表-2 限界状態に相当する変位を算出するにあたって 用いる物理指標に達するときの変位の評価結果

物理指標	標準Case (mm)	高軸応 力 Case (mm)
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(×)	98.1	76.2
軸方向鉄筋の引張ひずみが耐震性能2の許容引張 ひずみに達するとき(△)	74.0	78.6
軸方向鉄筋の引張ひずみが耐震性能3の許容引張 ひずみに達するとき(〇)	95.4	101.7

表-3 耐震性能2及び3に相当する変位の比較

損傷状態	標準Case (mm)	高軸応力Case (mm)
耐震性能2の限界状態に相当する変位(道示Ⅴ)	74.0	76.2
耐震性能2の限界状態に相当する変位(実験)	87.8	103.3
耐震性能3の限界状態に相当する変位(道示Ⅴ)	95.4	76.2
耐震性能3の限界状態に相当する変位(実験)	87.8	103.3