

高軸応力及び正負交番荷重が作用する 高強度RC部材の変形特性評価

服部 匡洋¹・篠原 聖二²・岡田 太賀雄³・大住 道生⁴

- ¹正会員 博士(工学) 一般財団法人阪神高速道路技術センター 企画研究部調査研究第一課
(〒541-0054 大阪府大阪市中央区南本町4-5-7)
- ²正会員 博士(工学) 阪神高速道路株式会社 技術部技術推進室
(〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町4-1-3)
- ³正会員 修(工) 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
- ⁴正会員 修(工) 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

1. はじめに

橋脚高さの高い鉄筋コンクリート橋脚(以下、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^{1)~5)}、その採用にあたっては、変形特性や破壊特性等に着目した実験的検討も行われている^{6)~16)}。しかし、これらは道路橋示方書・同解説V耐震設計編¹⁷⁾(以下、道示V)10.3に規定される、RC橋脚に塑性化を考慮する橋の耐震性能2及び耐震性能3の限界状態に相当する水平変位の評価式(以下、限界状態変位の評価式)の適用上限、例えばコンクリートの設計基準強度21~30N/mm²を超える強度であり、実橋への適用にあたっては、道示V 5.5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。

例えば、曾我部らは685N/mm²相当の高強度鉄筋を軸方向鉄筋、帯鉄筋に使用した中空断面RC橋脚に対する正負交番載荷実験により¹⁵⁾、引張鉄筋比が0.37%と小さいRC橋脚においてかぶりコンクリートの剥落、軸方向鉄筋の座屈、軸方向鉄筋の破断の順に損傷が発生し、高強度鉄筋を使用したRC橋脚でも軸方向鉄筋の破断に比べコンクリートの圧壊が先行するような通常の曲げ破壊を呈すること、また繰返し載荷に対しても高強度帯鉄筋が降伏することではなく、曲げ耐力に対して十分大きなせん断耐力を

有することを確認し、高強度鉄筋の実橋脚への適用性を検証している。

本稿は、表-1に示す高強度材料を使用したRC橋

表-1 高強度材料を使用した RC 部材に対する実験の主な事例

実験	コンクリートの設計基準強度 (N/mm ²)	軸方向鉄筋種類	断面形状	
足立らの実験 ⁶⁾	30	SD345	充実	矩形
	60	USD685		
岡本らの実験 ⁷⁾	24	SD295	充実	矩形
	24	USD685		
	80	USD685		
浅井らの実験 ⁸⁾	40	SD345	充実	矩形
	40	SD490		
	40	USD685		
	30	SD490		
	50	SD490		
西田らの実験 ⁹⁾	60	USD685	充実	矩形
運上らの実験 ¹⁰⁾	27	SD295	充実	矩形
	60	USD685		
佐藤らの実験 ¹¹⁾	60	USD685	充実	矩形・円形
村田らの実験 ^{12), 13)}	30	SD490	充実	矩形
	40	SD490		
	50	USD685	充実	矩形
塩畑らの実験 ¹⁴⁾	30	SD490	充実	矩形
	40	SD490		
	30	SD345		
曾我部らの実験 ¹⁵⁾	40	USD685	中空	矩形
玉越らの実験 ¹⁶⁾	40	USD685	充実	矩形
	40	SD490	充実・中空	
	40	SD345	充実	

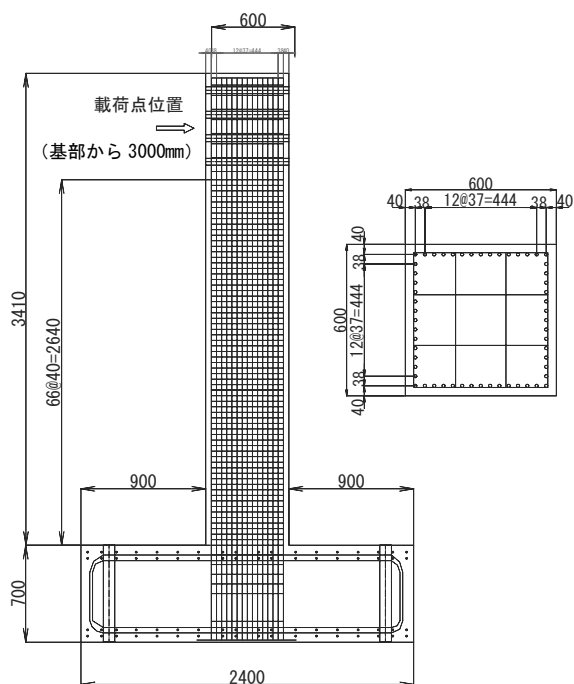


図-1 実験供試体構造諸元及び断面図
(単位：mm)

表-2 実験供試体構造諸元及び道示V適用上限

パラメータ	標準 Case	高軸応力 Case	道示V 適用上限
柱基部応力度 (N/mm^2)	1.0	3.5	3.0
載荷軸力 (kN)	360	1260	
柱寸法 (mm)	600		
コンクリート強度 (N/mm^2)	62.7	63.9	30
軸方向鉄筋降伏強度 (N/mm^2)	554.4 (SD490)		SD490
軸方向鉄筋配置	D13@37-56本		
軸方向鉄筋比 (%)	2.0		2.5
横拘束鉄筋降伏強度 (N/mm^2)	402.6 (SD345)		SD345
横拘束鉄筋配置	D6@40		
横拘束鉄筋比 (%)	1.7		1.8

脚に対する実験の主な事例のうち、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 $60\text{N}/\text{mm}^2$ 、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V10.3に規定される限界状態変位の評価式との比較を行ったものである。

2. 実験ケース

実験供試体の構造諸元を図-1に、道示VにおけるRC橋脚の限界状態変位の評価式の適用範囲の上限を表-2に示す。本実験は土木研究所実験施設において実施したものであり、過去に同一施設で実施された運上らの実験¹⁰⁾や玉越らの実験¹⁶⁾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



図-2 実験供試体設置状況 (単位:mm)

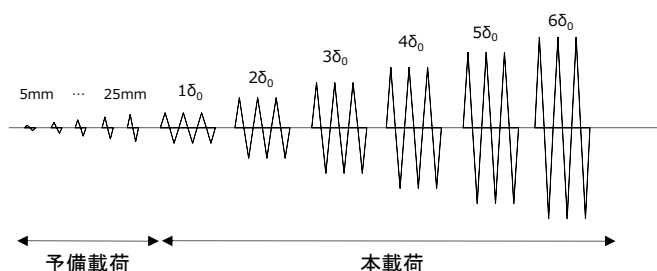


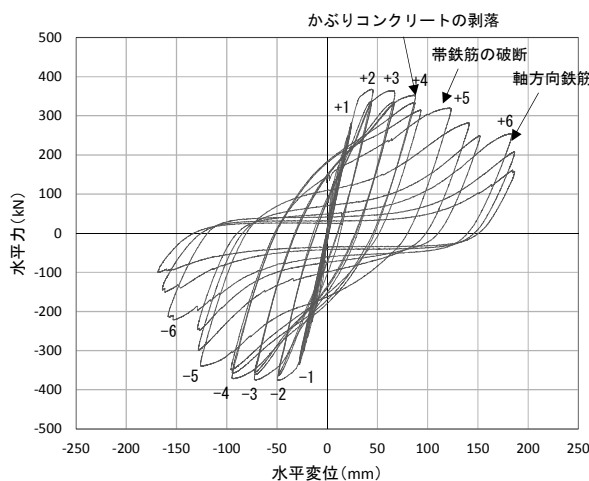
図-3 正負交番載荷実験における載荷パターン

V10.3に規定される限界状態変位の評価式の適用範囲の上限を超える $60\text{N}/\text{mm}^2$ とした。また、軸方向鉄筋はSD490、横拘束鉄筋はSD345とした。

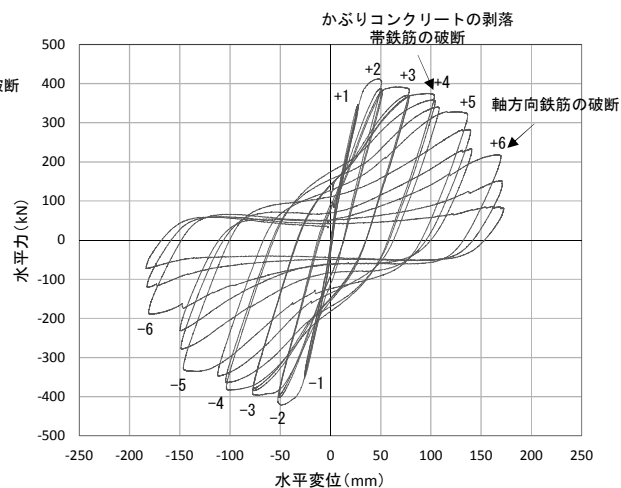
本実験では同一構造諸元の供試体を2体作製し、作用軸応力をパラメータとした実験を行った。一般的なRC橋脚と同等の軸応力を想定した標準Caseでは $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 、高強度材料の使用により断面が縮小されたRC橋脚の軸応力を想定した高軸応力Caseでは道示V10.3の規定の適用上限を超える $3.5\text{N}/\text{mm}^2$ の軸応力を作用させた。

3. 実験概要

供試体セットアップ状況を図-2に、正負交番載荷実験における載荷パターンを図-3に示す。図-3に示すように、水平力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 $1\delta_0=30\text{mm}$ と設定した。

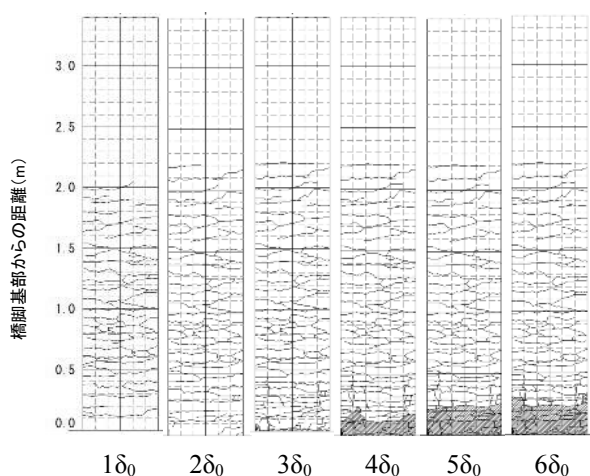


(a) 標準 Case

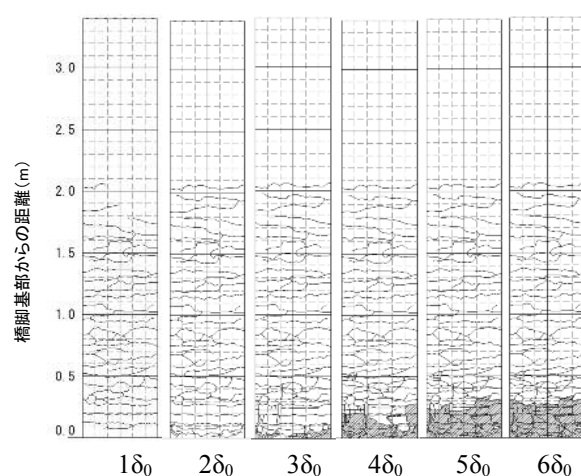


(b) 高軸応力 Case

図-4 水平力-水平変位関係の比較



(a) 標準 Case



(b) 高軸応力 Case

図-5 ひび割れ進展状況 (M 面側)

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-4に示す。なお、図-4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。

標準Caseでは2δ₀で最大水平力となり、2δ₀以降水平力を保持するが、4δ₀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2δ₀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。

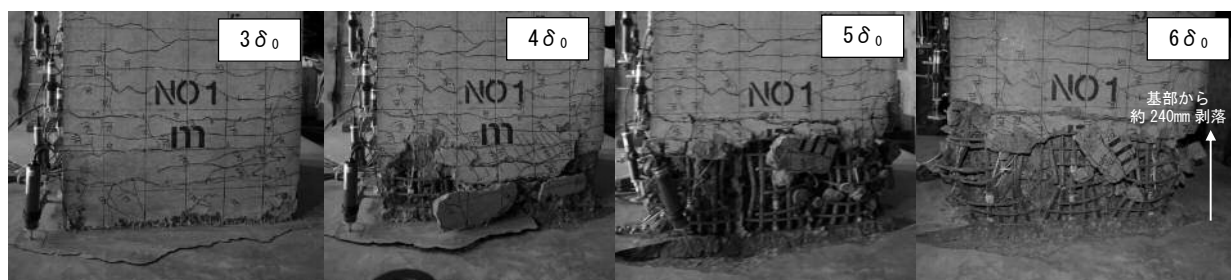
(2) ひび割れ進展及び基部損傷進展状況

標準Case及び高軸応力Caseにおけるひび割れ進展状況の比較を図-5に、基部の損傷状況の比較を図-6に示す。なお、本稿では、図-2に示した変位計測側 (M面側) のひび割れ進展状況及び基部損傷状況について記載した。

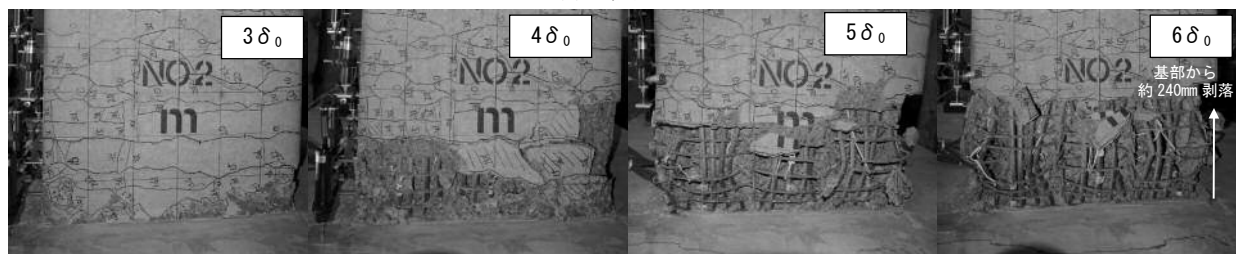
標準Caseでは、図-5(a)に示すように、2δ₀で基部から2200mm程度の高さまで水平ひび割れが発生した。3δ₀では縦方向ひび割れが発生、基部のかぶりコンクリートの軽微な剥離が生じた。4δ₀では基部のかぶりコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋がはみ出し始めた。5δ₀ではP面側で3本、M面側で3本の帯鉄筋が破断し、6δ₀ではP面側でさらに1本の帯鉄筋が破断し、軸方向鉄筋は15本の破断が生じた。6δ₀では、図-6(a)に示すように、かぶりコンクリートが基部から240mm程度の高さまで剥落した。

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。4δ₀では、P面側の1本の帯鉄筋が破断した。5δ₀では、帯鉄筋がP面側で3本、M面側で3本破断し、6δ₀では帯鉄筋が1本、軸方向鉄筋が15本破断した。図-6(b)に示すように、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



(a) 標準 Case



(b) 高軸応力 Case

図-6 基部損傷状況 (M 面側)

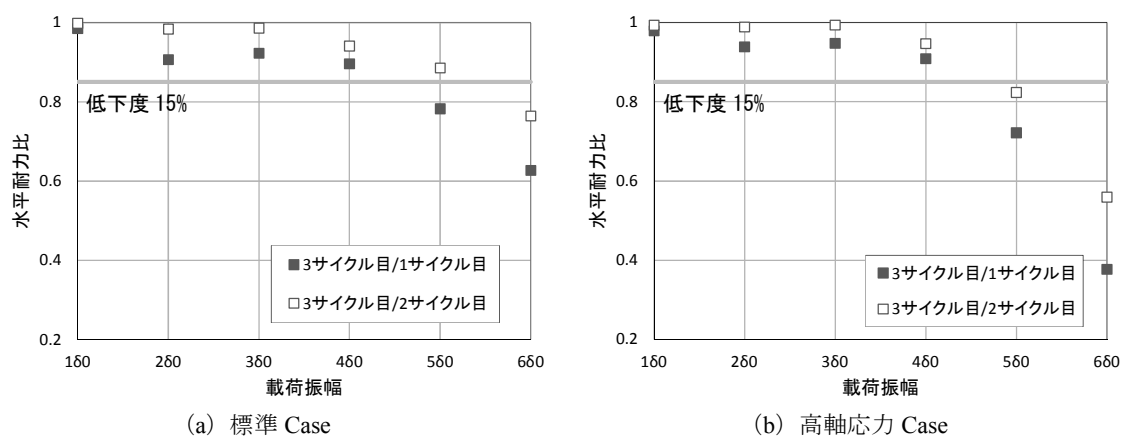


図-7 繰返し载荷における水平力の低下度合い

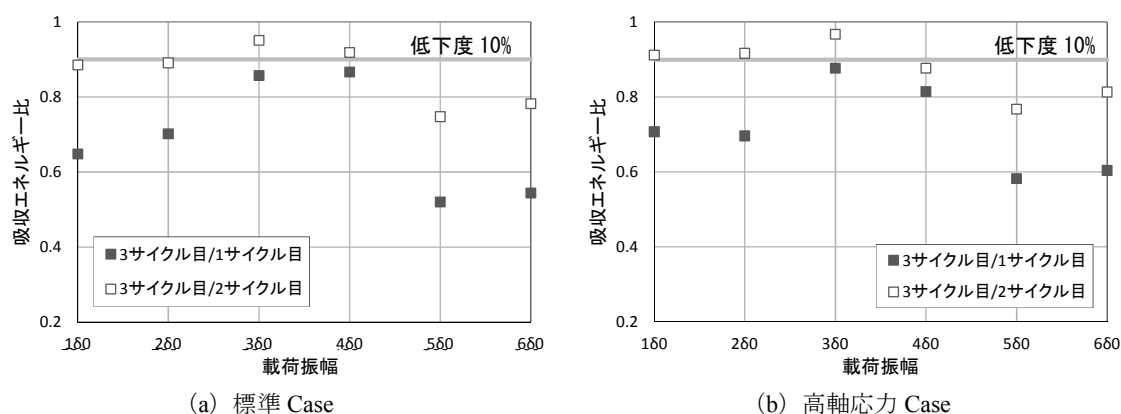


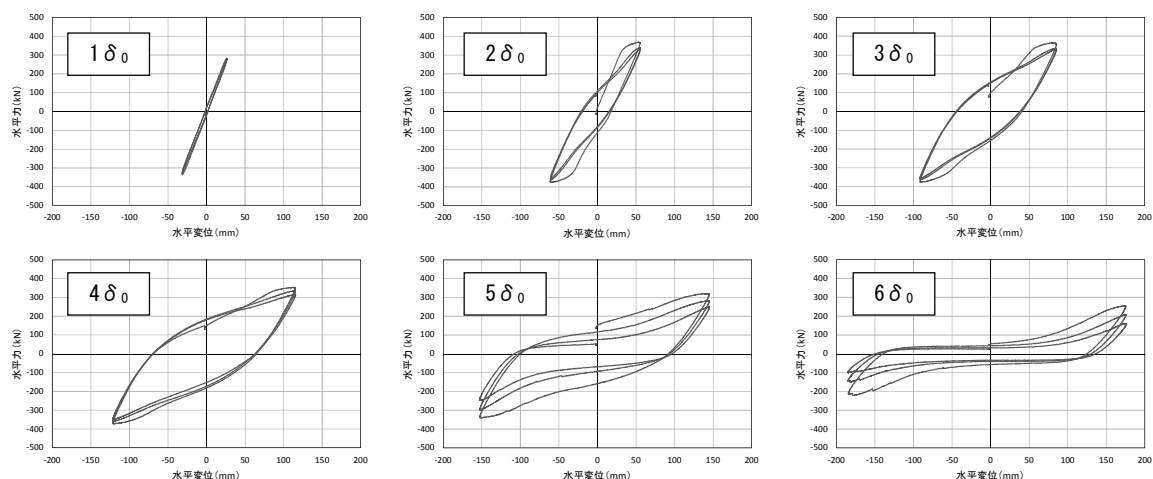
図-8 繰返し载荷におけるエネルギー吸収量の低下度合い

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

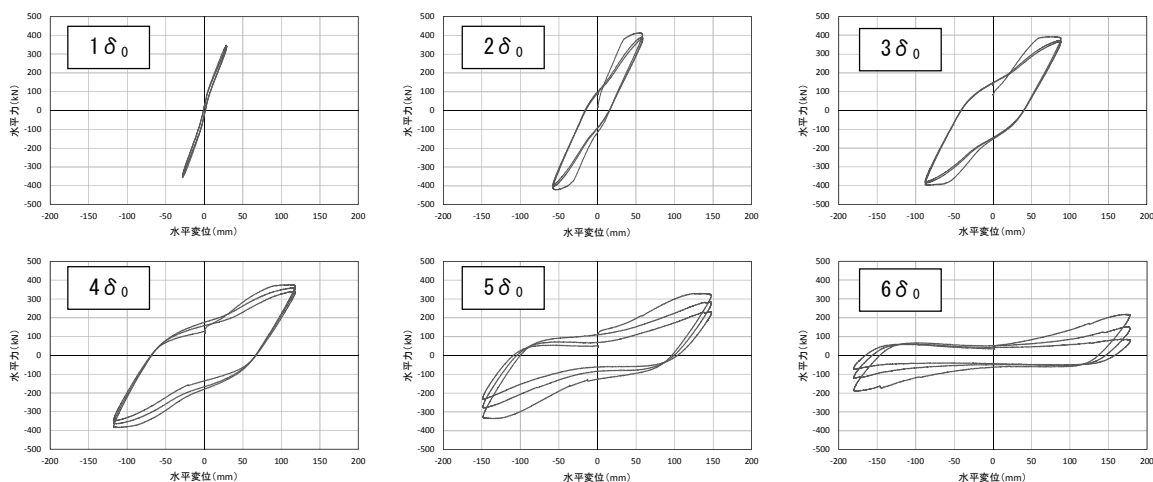
のような一般的なRC橋脚の損傷過程と同様の損傷過程であった。

5. 道路橋示方書評価式との比較

(1) 実験における橋の耐震性能2及び耐震性能3の限



(a) 標準 Case



(b) 高軸応力 Case

図-9 同一振幅における3回の繰返し荷重に対する履歴曲線の変化

界状態に相当する水平変位

道示 V 10.2 では、RC 橋脚に塑性化を考慮する橋の耐震性能 2 の限界状態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、耐震性能 3 の限界状態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 18) では、この観点を踏まえ、既往の実験結果を整理した結果、耐震性能 2 の限界状態に相当する変位においては、1 回目の荷重における水平力の最大値に対する 3 回目の荷重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 回目の荷重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。

本実験での繰返し荷重における水平力の低下度合いを図-7 に、エネルギー吸収量の低下度合いを図-8 に示す。本実験も同様に整理した結果、標準 Case の $5\delta_0$ 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 $5\delta_0$ 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 とともに、直前の $4\delta_0$ が耐震性能 2 に相当すると考えられる。

また、本実験での同一振幅における 3 回の繰返し荷重に対する履歴曲線の変化を図-9 に示す。文献 18) では、耐震性能 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、この段階において同一振幅で荷重を繰返すと、繰返し回数が増えるにつれて、水平変位が最大となる付近での水平力が低下し、これに伴いエネルギー吸収能も低下することが示されている。図-9(a) より、標準 Case では、 $4\delta_0$ 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、またエネルギー吸収能が小さくなることから、 $4\delta_0$ が耐震性能 3 に相当すると考えられる。また、図-9(b) より、高軸応力 Case も標準 Case と同様に、 $5\delta_0$ より水平変位の最大となる付近での水平力の低下、エネルギー吸収能の低下が見られることから、 $4\delta_0$ が耐震性能 3 に相当すると考えられる。

表-3 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 (○)	95.4	101.7

表-4 耐震性能2及び3の限界状態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
	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
	実験	87.8	103.3

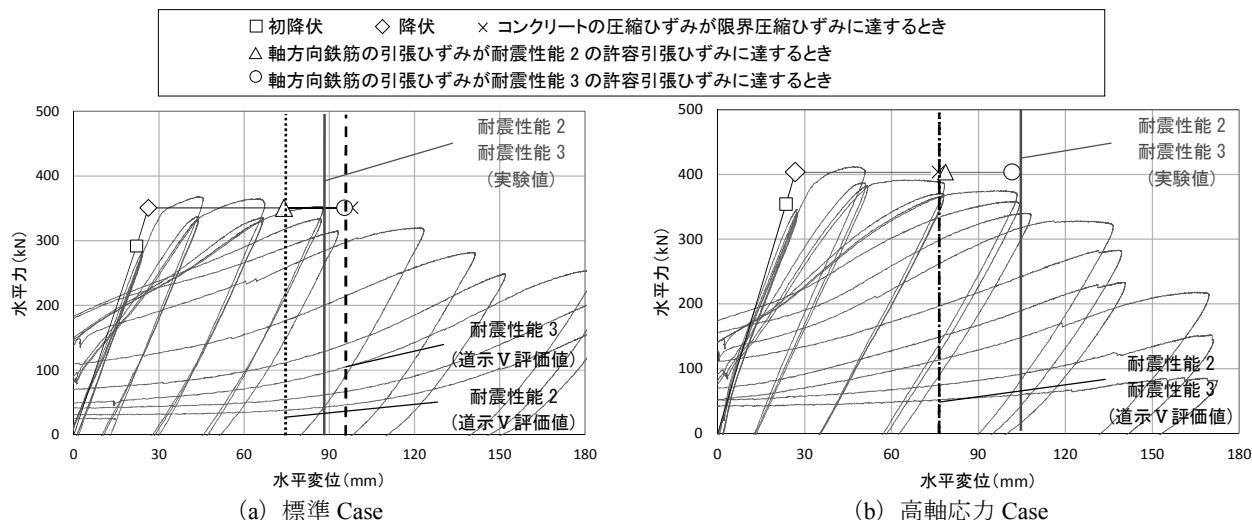


図-10 実験より得られた水平力-水平変位関係(正側)と道示V評価式より算出した骨格曲線の比較

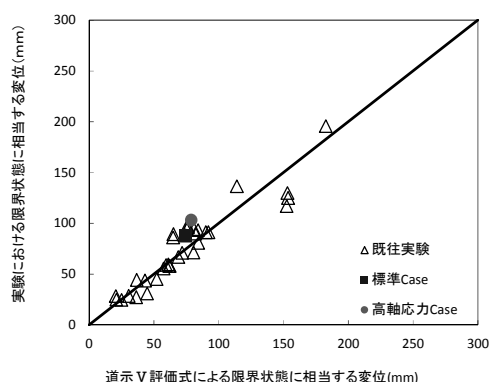
(2) 水平変位の評価結果と実験結果

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-3に示す。ここで、本検討は、道示V10.3評価式の適用上限を超える高強度材料を使用したRC橋脚に対する道示V評価式の適用性の検証を目的とするため、各限界状態における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及び耐震性能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は、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及び耐震性能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及び耐震性能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は、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及び耐震性能3の限界状態に相当すると評価した。

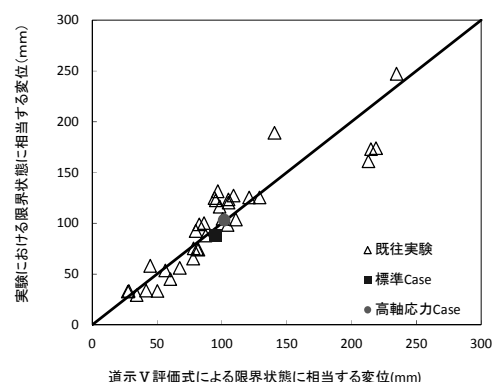
また、耐震性能2及び耐震性能3の限界状態に相当する変位の評価結果と実験値の比較を表-4に、実験より得られた水平力-水平変位関係及び材料試験結果より得られたコンクリート強度を用い、道示V10.3規定に基づき計算した骨格曲線の比較を図-10に示す。本実験に用いたコンクリートの設計基準強度は道示V10.3規定の適用上限を超える強度であるが、限界状態変位の評価式をそのまま適用した場合、標準Caseの耐震性能2の限界状態に相当する水平変位は、実験結果が道示V評価結果を13.8mm上回った。また、耐震性能3の限界状態に相当する水平変位は、実験結果が道示V評価結果を7.6mm下回った。一方、高軸応力Caseでの耐震性能2及び耐震性能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。ただし、設計においては、ばらつき等の影響を考慮し、安全係数1.2が考慮されている。道示V10.3から得られた評価値に同様に安全係数1.2を考慮すると、本実験結果から得られた耐震性能2及び耐震性能3の限界状態に相当する水平変位はいずれもこれを下回っていないことが確認できる。

(3) 耐震性能2及び耐震性能3の限界状態に相当する水平変位の既往実験と本実験結果の比較

図-11は、文献19)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耐震性能2及び耐震性能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



(a) 耐震性能 2



(b) 耐震性能 3

図-11 軸方向鉄筋の引張ひずみが耐震性能 2 及び耐震性能 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）

値の比較に対し、表-4の実験値及び表-3の軸方向鉄筋の引張ひずみが耐震性能2及び耐震性能3の許容引張ひずみに達するときの変位の評価値をプロットした結果を示したものである。既往実験としてプロットされた実験供試体は、曲げ破壊型のRC橋脚に対する既往の正負交番繰返し載荷実験のうち、載荷条件、曲率や軸方向鉄筋の伸び出し変位の測定、破壊性状の記録等が同条件で行われた実験供試体の34体である。

ここで、道示V 10.3に規定される限界状態変位の評価式は、塑性ヒンジ長及び限界状態に達するときの軸方向鉄筋の引張ひずみに基づき設定されている。文献19)では、軸方向鉄筋のはらみ出す挙動を再現した塑性座屈解析を行い、はらみ出し長の評価値を算出したのちに、損傷状況から判読した塑性ヒンジ長の実験値と比較し、塑性ヒンジ長の評価値と実験値が整合することを確認している。また、文献20)では、ファイバー解析による実験の再現解析を行い、実験における耐震性能2及び耐震性能3の限界状態に達するときの鉄筋ひずみを推定したのち、推定した実験における鉄筋ひずみと軸方向鉄筋の抵抗パラメータ、帯鉄筋及びかぶりコンクリートの拘束パラメータを考慮した重回帰分析により得られた回帰式より計算した鉄筋ひずみの評価値を比較し、限界状態に達するときの軸方向鉄筋の引張ひずみの評価値と実験値が整合することを確認している。本実験条件に対しても道示Vに規定される塑性ヒンジ長及び各限界状態に達するときの鉄筋ひずみの評価式を適用できるかどうかについては、文献19)、20)と同様の検討を行い、その破壊メカニズムを踏まえ、その適用範囲にあるといえるかどうかを検証する必要があるが、本稿では、標準Case、高軸応力Caseともに、一般的なRC橋脚と同様の破壊過程を示し、塑性ヒンジ長についても、図-6に示すように一般的なRC橋脚の軸方向鉄筋のはらみ出し挙動と同様と考えら

れることから、本実験条件に対して道示V評価式を用いて適用できると仮定し、検討することとした。

道示V 10.4に規定された各限界状態に達するときの軸方向鉄筋の引張ひずみの評価式についても、本実験条件に対し適用できると仮定し、限界状態変位の実験値及び評価値をプロットした結果、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。図-10では、本実験により得られた限界状態における水平変位の実験値と道示V評価値には差が見られたが、その差は有意ではなく、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。

今後、評価式の適用にあたっては、文献19)、20)と同様に、軸方向鉄筋の塑性座屈解析やファイバー解析による実験の再現解析を行い、本実験条件に対する塑性ヒンジ長、各限界状態に達するときの軸方向鉄筋の鉄筋ひずみについて検証していく予定である。

6. 結論・今後の課題

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実験を行い、RC橋脚に塑性化を考慮する橋の耐震性能2及び耐震性能3の限界状態の評価式との比較を行った。本検討により得られた知見を以下に示す。

(1) コンクリートの設計基準強度 60N/mm^2 、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。

(2) 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、実験結果が道示V評価結果に比べ大きく、また、耐震性能3の水平変位では、実験結果が道示V評価結果より小さくなった。一方、高軸応力Caseでの耐震性能2及び耐震性能3どちらの水平変位も、実験結果が道示V評価結果に比べ大きくなった。ただし、道示V10.3から得られた評価値に安全係数1.2を考慮すると、本実験結果から得られた耐震性能2及び耐震性能3の限界状態に相当する水平変位はいずれもこれを下回っていないことが確認できる。

(3) 道示Vに規定された限界状態変位の評価式が本実験条件に対して適用できると仮定し、限界状態変位の評価結果と実験結果と比較した結果、標準Case、高軸応力Caseともに、既往実験結果のばらつきの範囲内にあり、本実験条件に対しても道示V評価式を適用できる可能性を示した。

今後、評価式の適用にあたっては、軸方向鉄筋の塑性座屈解析やファイバー解析による実験の再現解析を行い、本実験条件に対する塑性ヒンジ長、各限界状態に達するときの鉄筋ひずみ評価式の適用性の検証していく予定である。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。

参考文献

- 石橋忠良, 藤森伸一, 大庭光商, 津吉毅: PC斜張橋上部工の設計と施工ー青森ベイブリッジー, コンクリート工学, pp33-42, Vol.29, No.12, 1991.
- 仲谷邦博, 木村祐司, 上田喜史, 山脇正史: 高強度鉄筋SD490を使用した七色高架橋の計画と設計(上), 橋梁と基礎, pp.11-16, 1999.
- 芦塚憲一郎, 高橋章, 森拓也, 橋野哲郎: 第二名神高速道路 近江大鳥橋(栗東橋)の設計施工, コンクリート工学, Vol.45, No.6, 2007.
- 大塚俊次, 栢木宏彰, 中山雅雄, 松尾保明, 秋山博, 有角明: 辻堂バイパス夢翔大橋の設計と施工ー高強度コンクリートを用いたエクストラドーズドPC橋, 橋梁と基礎, pp.5-10, 2010.
- 仲谷邦博, 木村祐司, 上田喜史, 山脇正史: 高強度鉄筋SD490を使用した七色高架橋の計画と設計(下), 橋梁と基礎, pp.41-49, 1999.
- 足立幸郎, 運上茂樹, 長屋和宏, 林昌弘: 高軸力下における高強度RC部材の変形性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.3, 1999.
- 岡本大, 佐藤勉, 吉田幸司, 黒岩俊之: 高強度材料を用いたRC部材の変形性能について, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, 2001.
- 浅井洋, 春日昭夫, 飯田字朗, 梅原秀哲: SD490鉄筋を軸方向鉄筋に用いたRC橋脚の実用化に関する研究, 土木学会論文集No.760/V-63, pp91-108, 2004.
- 西田秀明, 運上茂樹: 高強度材料を用いた鉄筋コンクリート橋脚の耐力・変形性能に関する実験的研究, 土木技術資料, 47-2, 2005.
- 運上茂樹, 西田秀明: 高強度材料を用いた鉄筋コンクリート橋脚の耐力・変形性能の評価に関する研究(その1: 正方形断面を有する橋脚), 土木研究所資料, 第4007号, 2006.
- 佐藤大, 西田秀明, 運上茂樹: 高強度材料を使用した鉄筋コンクリート柱の変形性能に関する考察, 第9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, 2006.
- 村田裕志, 福浦尚之, 渡辺典男: SD490を用いた高鉄筋比のRC橋脚の耐震性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, 2010.
- 村田裕志, 内田悟史, 本谷幸康, 福浦尚之, 細谷学, 長屋賢二: 高強度材料を用いた円形RC橋脚の正負交番載荷実験, 大成建設技術センター報, 第44号, 2011.
- 塩畑英俊, 村田裕一, 福浦尚之: 軸方向鉄筋にSD490を用いたRC橋脚の耐力および変形性能に関する実験的研究, 構造工学論文集Vol.57A, 2011.
- 曾我部直樹, 木次克彦, 伊吹数行, 森山陽一, 石山一幸, 山野辺慎一, 須田久美子, 渡辺義光: 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.
- 玉越隆史, 北村岳伸, 横井芳輝, 吉川卓: 道路橋橋脚への高強度鉄筋の適用に関する調査, 土木技術資料53-9, 2011.
- 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2012.
- 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.
- 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, 土木研究所資料第4257号, 2013.
- 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, 土木研究所資料第4262号, 2013.