

道路橋橋脚への高強度鉄筋の適用に関する調査

玉越隆史* 北村岳伸** 横井芳輝*** 吉川 卓****

1. はじめに

道路橋の橋脚に従来一般的に用いられてきた鉄筋に比べてより高強度の鉄筋を用いることで、鉄筋量の削減及び断面の縮小によるコストの削減、過密配筋の解消による施工性の向上などが期待されている。現行道路橋示方書の規定に従うと、普通鉄筋を用いた従来の道路橋の橋脚は、地震による損傷が限定的なものにとどまり、塑性化後の安定したじん性挙動が確保される。一方、高強度の鉄筋を用いた橋脚の道路橋への適用性に関しては、塑性化後の耐荷力機構など未解明な部分もあり、現行道路橋示方書の規定への適用性を判断するためには課題が残っている。

国土技術政策総合研究所では、高強度の鉄筋を用いた道路橋の橋脚の耐震性能を明らかにするための研究を行っている。ここでは縮小橋脚模型による交番載荷実験の結果を報告するとともに、数値解析による橋脚の損傷過程の評価手法に関する検討結果を報告する。

2. 交番載荷実験方法

高強度の軸方向鉄筋（SD490、USD685）を用いた単柱式鉄筋コンクリート橋脚を対象とし、曲

げ耐力、変形性能及び破壊特性を確認するための交番載荷実験を実施した。実験ケースを表-1に、供試体一般図を図-1に示す。なお、コンクリートの設計基準強度は40N/mm²とした。

実験供試体No.1～3は矩形断面のケースであり、断面寸法0.6m×0.6m、橋脚基部から水平力作用位置までの高さ3.0m、せん断スパン比5.0の縮小モデルとした。これらの供試体は、軸方向鉄筋強度を着目パラメータとし、各供試体の曲げ耐力が同等となるよう軸方向鉄筋比を調整した。

実験供試体No.4及びNo.5は、中空断面橋脚の配筋状態を想定した鉄筋配置（軸方向鉄筋、帯鉄筋及び中間帯鉄筋）を有する供試体であるが、断面は中実断面とした。供試体寸法は、断面寸法0.5m×0.5m、橋脚基部から水平力作用位置までの高さ3.5m、せん断スパン比7.0とした。これらの供試体は、高強度鉄筋を用いることで、断面寸法の縮小などによるコスト削減の観点から優位性が発揮できると考えられる高橋脚を想定したものである。供試体に作用させる圧縮応力度は、橋脚高さ30～50m程度のPCラーメン橋の中空断面橋脚基部に作用する圧縮応力度を基に2.5N/mm²及び5.0N/mm²に設定した。

載荷方法は、軸方向鉄筋の降伏時の水平変位を

表-1 交番載荷実験ケース

実験ケース	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
コンクリート強度 σ_{ck} N/mm ²	40	40	40	40	40
軸方向鉄筋強度	USD685	SD490	SD345	SD490	SD490
帯鉄筋強度	SD345	SD345	SD345	SD345	SD345
軸方向鉄筋配置	D13 @87-24本	D13 @65-32本	D13 @40-52本	D13 @56-56本(2段)	D13 @56-56本(2段)
軸方向鉄筋比 %	0.80	1.10	1.80	2.84	2.84
横拘束筋体積比 ρ_s	0.012	0.012	0.012	0.018	0.018
柱基部圧縮応力度 σ N/mm ²	1.00	1.00	1.00	2.50	5.00
柱断面図					
備考	同等の曲げ耐力を保有			中空断面の配筋を想定した中実断面 No.4に対して基部圧縮応力を2.0倍に設定	

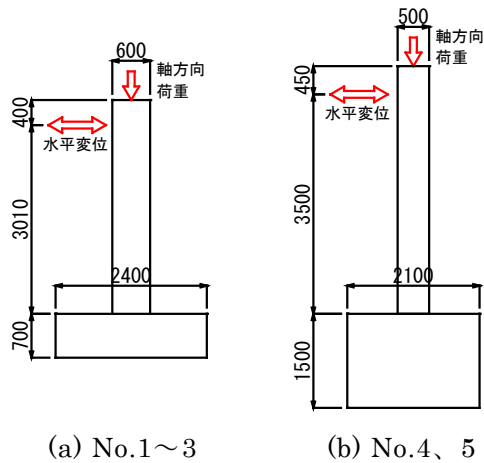


図-1 供試体一般図

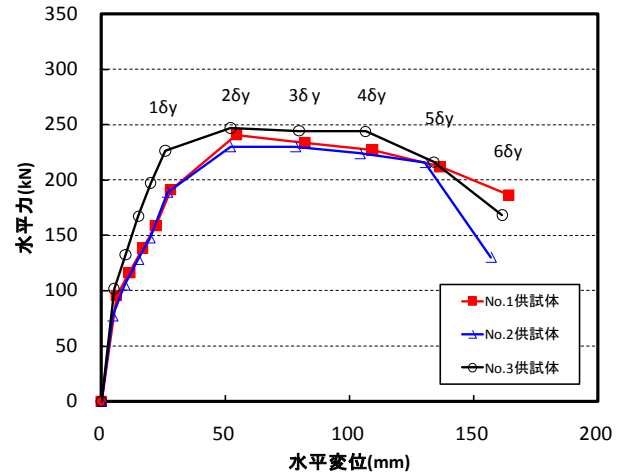


図-2 水平力-水平変位関係 (No.1~3)

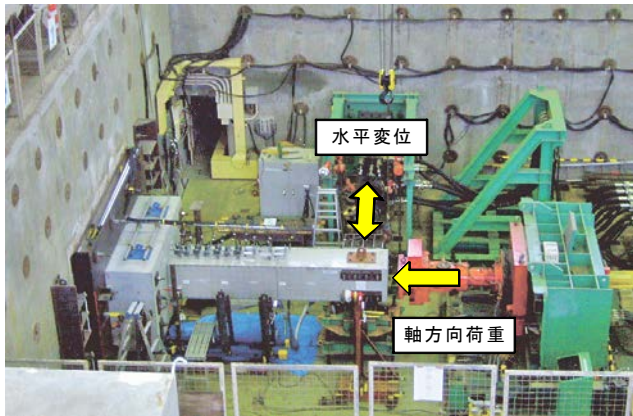


写真-1 実験状況

基準変位 (δy) として、載荷変位を $\pm n \delta y$ ($n=1, 2, 3, \dots$) とした変位振幅を各3サイクルずつ与える正負交番載荷とした。実験状況を写真-1に示す。

3. 交番載荷実験結果

3.1 軸方向鉄筋強度の影響

図-2にNo.1~3供試体の水平荷重に対する変位応答（水平力-水平変位関係）の各載荷変位における1サイクル目の包絡線を示す。実験値において水平力がピークを迎えた後（ $5 \delta y \sim 6 \delta y$ 間）の水平変位の増加に伴う水平力の低下量は、No.2供試体が85kN程度、No.3供試体が50kN程度、No.1供試体が25kN程度と供試体により差が生じる結果となっている。

表-2に、各供試体の実験における終局変位を示す。終局変位は、供試体の損傷状態（鉄筋の座屈が顕著となり、コアコンクリートに損傷が生じる点）及び、実験での水平力-水平変位関係にお

表-2 終局変位の比較

終局変位	No.1 供試体	No.2 供試体	No.3 供試体
実験値	5δ	5δ	$4 \sim 5 \delta$
終局点換算値(mm)	136.3	130.3	123.8

る降伏荷重を維持する変位から判断した。

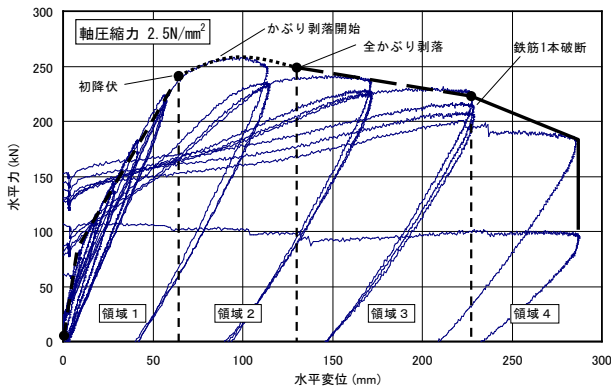
さらに、 $6 \delta y$ の3サイクル目の載荷終了後に確認した軸方向鉄筋の破断は、No.3供試体(SD345)では28本中1本（3.6%）のみであったが、No.2供試体(SD490)では18本中11本（61.1%）、No.1供試体(USD685)では14本中13本（92.9%）であった。破断する鉄筋本数の割合は、供試体によって差が生じており、破壊形態に違いが生じる結果となった。橋脚の耐震設計において、橋脚の破壊形態の違いと担保すべき安全性の関係について、今後検討を進めていく予定である。

3.2 基部圧縮応力度の影響

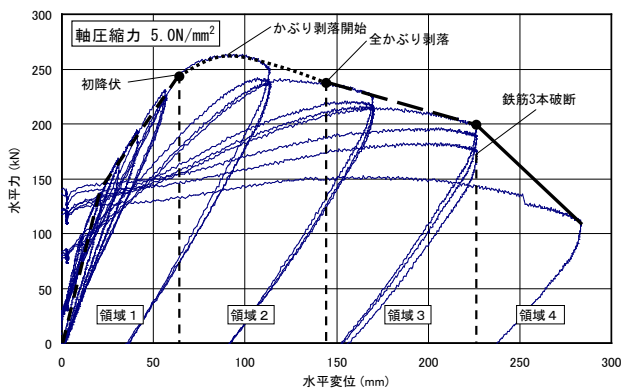
図-3にNo.4及びNo.5供試体における水平力-水平変位関係を示す。図には、実験で観察された主な損傷発生点を付記している。No.4とNo.5供試体の水平力-水平変位関係に着目すると、作用軸圧縮力を大きく設定したNo.5供試体がNo.4供試体と比較して最大水平力以降の水平力の低下傾向が顕著となっている。

4. 解析による検討

ファイバーモデルを用いた非線形解析によりNo.4及びNo.5供試体の正負交番載荷実験を再現し、変位の増加に伴う断面の損傷状態、コンクリート及び鉄筋断面の軸圧縮力の負担状況の推移を整理した。



(a) No.4供試体



(b) No.5供試体

図-3 水平力-水平変位関係 (No.4, No.5)

領域1：荷重載荷初期から最外縁引張鉄筋が降伏するまでの水平力と水平変位の関係が概ね線形関係を保つ領域

領域2：鉄筋降伏後、かぶりコンクリートの剥落開始によって水平力-水平変位関係が変局点を迎え、全かぶりコンクリートが剥落するまでの領域

領域3：全かぶりコンクリート剥落后、コアコンクリートが外側から順次軸圧縮応力度のピークを超過することで損傷が進展し、水平力が漸減する領域

領域4：軸方向鉄筋の破断によって耐荷力が急激に減少する領域

表-3 破壊過程の分類

	かぶりコンクリート	コアコンクリート	鉄筋
領域1 (擬似線形)	圧縮抵抗力保持	圧縮抵抗力保持	弾性挙動
領域2 (変位急変)	有効断面徐々に減少	圧縮抵抗力保持	降伏
領域3 (変位進展)	有効断面消失	有効断面徐々に減少	塑性変形
領域4 (不安定)	有効断面消失	有効断面徐々に減少	破断

図-3の水平力-水平変位関係に、上記に示した各領域を付記している。

表-4に、ファイバーモデルを用いた解析により算出した橋脚基部断面の損傷状態を実験時の損傷状態と比較して示す。解析結果から、水平変位の増加に伴いコンクリートの有効断面が徐々に消失する過程が示されており、その程度は作用軸圧縮力が大きいNo.5供試体の方がNo.4供試体よりも顕著となっている。また、解析により評価した損傷状態は、実験時の損傷状態とほぼ整合する結果となっている。

図-5に、解析により算出した水平変位の増加に伴う橋脚基部断面の軸圧縮耐力の低下の程度（残存軸耐力-水平変位関係）の推移を示す。ここで、残存軸耐力は、かぶりコンクリート、コアコンクリート、軸方向鉄筋がそれぞれ保有する最大軸圧縮耐力の合計によって算出した。図には、交番載荷実験で観察された主な損傷発生時の変位を示している。図より、例えばコアコンクリートの軸耐力の低下により、残存軸耐力合計が急激に低下す

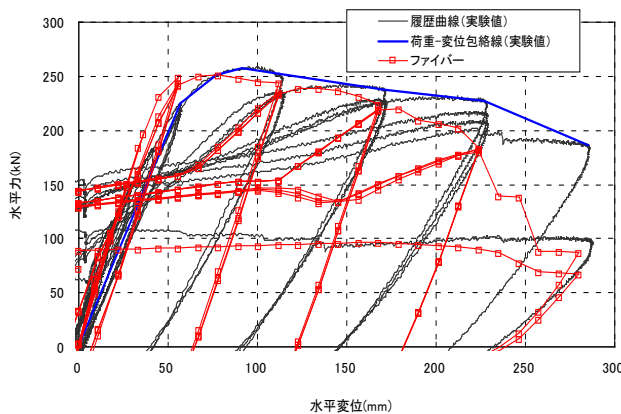


図-4 実験結果と解析結果の比較 (No.4)

図-4に、解析により算出した水平力-水平変位関係の一例を実験結果と対比して示す。解析値は、実験値に対して橋脚破壊時付近の水平力が低い値を示す結果となった。

ファイバーモデルを用いた解析結果の分析により、水平変位の増加に伴う橋脚の損傷状態をコンクリート及び鉄筋の状態に着目して、下記及び表-3のように整理を行った。

表-4 解析による柱基部の損傷過程の評価

	解析 No.4供試体	解析 No.5供試体	実験 No.4供試体
1δ _y			
2δ _y			
3δ _y			
4δ _y			
5δ _y			

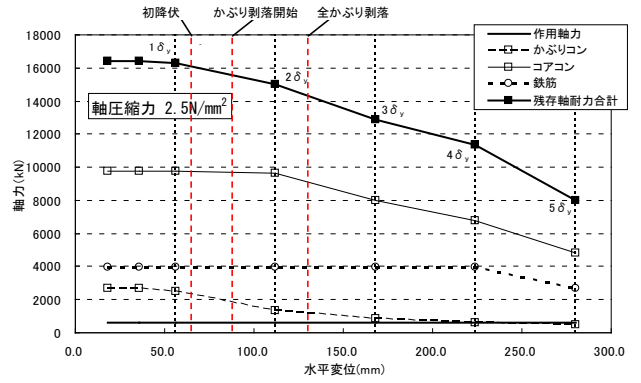
【コンクリートの状態】

圧縮域	応力低下域	破壊
圧縮抵抗力保持	有効断面徐々に減少	有効断面消失

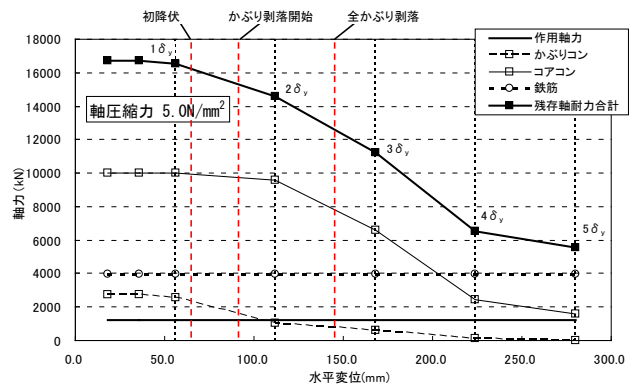
る過程が示されている。5δ_y 載荷時のコアコンクリートの軸耐力に着目すると、断面に作用する軸圧縮力が大きいNo.5供試体がNo.4供試体の1/3程度となっている。

5. まとめ

本研究では、高強度鉄筋の道路橋の橋脚への適用性について縮小模型を用いた交番載荷実験により検討を行った。実験の結果、軸方向鉄筋の強度



(a) No.4供試体



(b) No.5供試体

図-5 残存軸耐力-変位関係

の違いにより橋脚破壊時に鉄筋が破断する割合に違いが生じること、橋脚基部に作用する軸圧縮応力度が大きいほど、橋脚破壊時の耐荷力の低下傾向が顕著となることが確認された。また、本検討で分類した橋脚の損傷状態の領域によって、実験供試体の挙動を説明できることが示唆された。

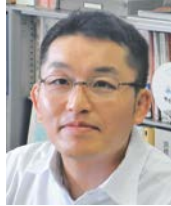
本研究は、(独) 土木研究所との共同研究で実施された。研究を実施するにあたり、ご助言、ご協力を戴きました関係各位に感謝の意を表します。

玉越隆史*



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路構造物管理研究室長
Takashi TAMAKOSHI

北村岳伸**



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路構造物管理研究室 研究官
Takenobu KITAMURA

横井芳輝***



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路構造物管理研究室 研究官
Yoshiteru YOKOI

吉川 卓****



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路構造物管理研究室 交流研究員
Taku YOSHIKAWA