

高強度鉄筋を用いた道路橋橋脚の耐震性能評価に関する研究

北村 岳伸¹・吉川 卓¹・玉越 隆史¹

¹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 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

近年、断面の縮小による建設コスト削減の観点から、高強度鉄筋を用いた鉄筋コンクリート橋脚の適用への期待が高まっている。しかし、地震時の破壊過程等について未解明な点が多く、個別に実験を行い、耐震性能等を検証することが必要とされていた。

そこで本研究では、高強度鉄筋の道路橋への適用性を明らかにするため、高強度鉄筋を用いた鉄筋コンクリート橋脚の模型実験等を通して損傷が進展するメカニズム等の評価を行うとともに降伏変位や終局耐力の評価法を検証した。検証結果は、道路橋示方書¹⁾(以下、道示)における高強度鉄筋を用いる際の道路橋脚の耐震設計法に反映された。

キーワード 高強度鉄筋, 模型実験, 橋脚, 耐震性能, 道路橋示方書

1. はじめに

道路橋の橋脚に従来用いられてきた鉄筋に比べて高強度の鉄筋を用いることで、過密配筋の解消による施工性の向上、部材断面の縮小による死荷重の軽減、基礎断面の縮小等のメリットやコスト縮減が期待されており、山間部の高橋脚等に採用された事例がある。

地震時の鉄筋コンクリート橋脚の変形性能は軸方向鉄筋強度、軸方向鉄筋比、横拘束鉄筋量やその構造等によって変化することが知られている^{2,3,4)}。さらに高強度鉄筋を道路橋に適用する場合の地震時の破壊特性や耐力、変形性能、鉄筋とコンクリートの付着特性、鉄筋の変形や繰返し曲げに対する脆化特性等、その挙動について実験データが十分ではなく未解明な点が多い。そこで、高強度鉄筋の道路橋脚への採用にあたっては、個別の橋脚ごとに実験等による検証を行うなど慎重な照査が必要とされている。高強度鉄筋は建築などで既に使われているが、本研究では主として、現場での入手がしやすいと考えられる高強度鉄筋SD490を対象とし、高強度鉄筋の道路橋への適用性を明らかにするため、鉄筋とコンクリートの付着特性及び材料特性解明のための鉄筋引抜き試験及び鉄筋低サイクル疲労試験及び鉄筋コンクリート橋脚の縮小模型による交番載荷実験を通して、鉄筋コンクリート橋脚としての損傷が進展するメカニズム等の評価を行う。

2. 鉄筋の低サイクル疲労試験

図-1に示すように鉄筋の両端を固定し、引張ひずみ ϵ_x を与えた後、ひずみ0まで変位量に戻すサイクルを鉄筋破断まで繰返した⁵⁾。また、予め折曲げた鉄筋の引張一座屈の繰返し載荷を行った(写真-1)。載荷は交番載荷試験と同様に3サイクル載荷し、漸増させる方法とした。図-2、図-3に結果を示す。SD490は従来強度の鉄筋(SD345)に比べて、破断に至るまでの繰返し載荷回数及びひずみが小さく、初期変形や繰返し曲げに対する脆化特性が顕著である傾向が示された。

3. 鉄筋引抜き試験

道路橋の橋脚では大規模な地震に対して条件によっては橋脚基部に塑性化を許容しており、塑性化領域にある

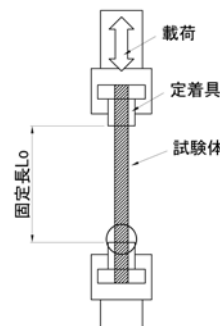


図-1 装置模式図



写真-1 試験状況
(折り曲げ鉄筋)

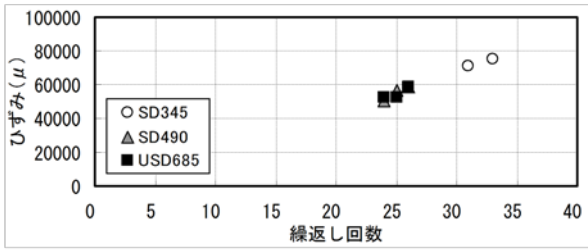


図-2 繰返し回数と破断ひずみ(初期変形なし)

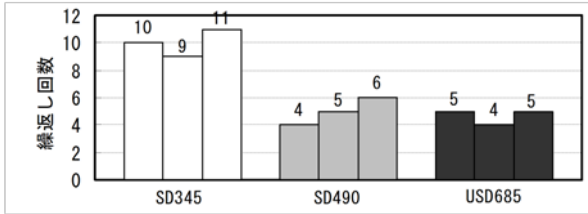


図-3 破断までの繰返し回数(初期変形あり)

柱基部の軸方向鉄筋には大きな引張力が作用する。鉄筋を高強度化した場合、鉄筋の弾性係数はほぼ同じである一方で、降伏に達するまでの伸び量が大きく異なることから、コンクリートと鉄筋の付着特性が異なる可能性が推察される⁶⁾。そこで、SD490以上の高強度鉄筋を用いて、鉄筋降伏後の付着力発揮メカニズムについて検討を行った。

(1) 試験方法

高強度鉄筋SD490及びUSD685 について引抜き試験を実施した。直径500mmの円柱コンクリートの中心に、一定間隔でひずみゲージを貼り付けた鉄筋を埋め込み、センターホールジャッキにより単調荷重で鉄筋を引き抜いた(図-4)⁶⁾。

ひずみゲージより計測されるひずみ値を軸力に換算し、隣接2計測点の軸力差 ΔN を付着区間面積(鉄筋周長 $L_s \times$ 計測点間距離 L)で除すことで、その区間に発揮される付着応力度 τ を算出した。また、鉄筋が降伏し鉄筋とコンクリートのひずみ差が大きくなった時点で鉄筋とコンクリートの付着は切れたと見なせることから、付着発揮範囲の軸力の合計 ΣN とその時点で鉄筋に作用している引張荷重 P との差分を付着劣化区間面積(周長 $L_s \times$ 付着劣化区間長 l')で除すことで、付着劣化区間における抵抗応力度 τ' を算出した。付着特性に依存すると考えられる鉄筋径、鉄筋強度、定着長に着目し、表-1に示す4ケースについて付着応力度分布を比較した。

(2) 付着メカニズムと付着性能

引抜き荷重を連続的に増加させた場合の付着応力度分布の推移について、試験ケース4(USD685, D35, 定着長55φ)の結果を代表例として図-5(a)及び(b)に示す。コンクリートに埋め込んだ鉄筋の付着メカニズムは、引抜き当初より引抜き側の上端部より付着力が発揮され、引抜き荷重の増加につれて、付着応力度の発現範囲は下方へ

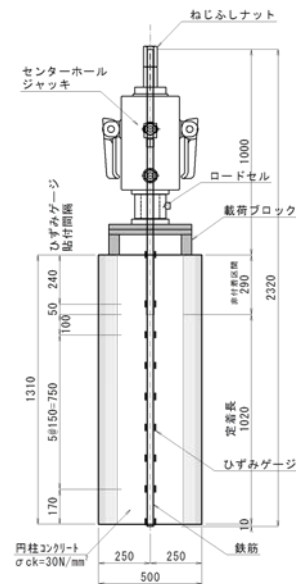


図-4 载荷概要

表-1 試験ケース

試験ケース	鉄筋強度	鉄筋径	定着長
1	SD490	D29	35φ
2	USD685	D29	35φ
3	USD685	D35	35φ
4	USD685	D35	55φ

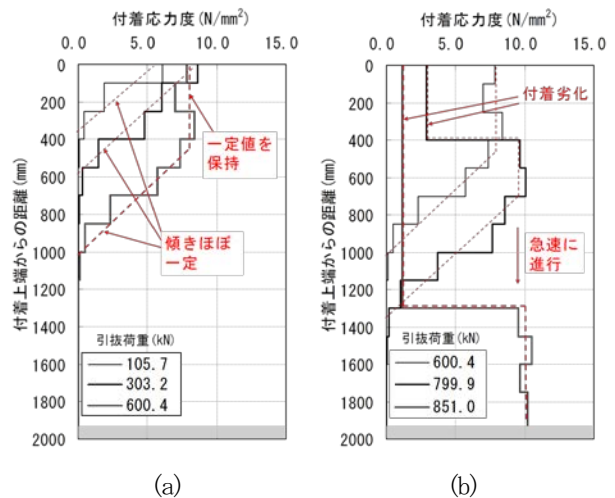
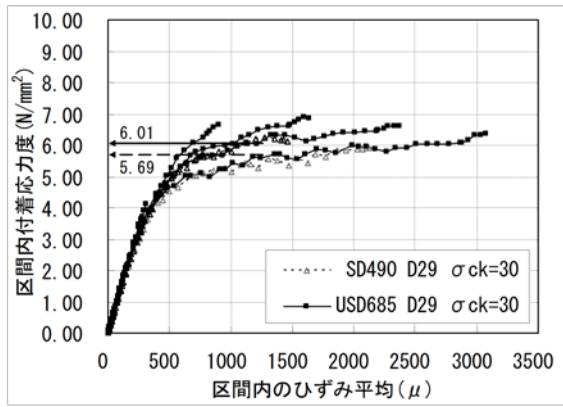


図-5 付着応力度分布の推移(試験ケース4)

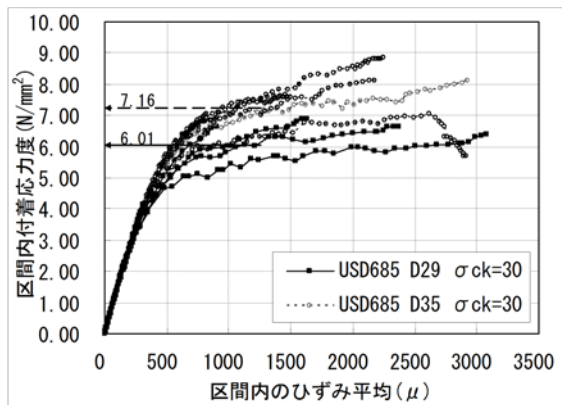
拡大する。このとき上側(引抜き側)ほど付着応力度は大きくなっており、付着発揮範囲が拡大する過程において、付着応力度の深さ方向の傾きはほぼ一定に保たれている。また、付着応力度はある一定値で頭打ち(最大付着応力度)となり、その値は深さ方向に関係なくほぼ同じであった。

(3) 発揮される付着性能

任意のひずみ計測区間における隣接2計測点のひずみ平均値 μ と計測区間内の付着応力度 τ の関係について、



(a) 鉄筋強度の比較



(b) 鉄筋径の比較

図-6 ひずみと付着応力度の関係

鉄筋強度及び鉄筋径に着目した比較結果を図-6(a)及び(b)に示す。両図に共通し、付着応力度はひずみ平均が300 μ あたりまでほぼ直線的に増加した後、ある付着応力度にて頭打ちになるバイリニアの関係を示した。

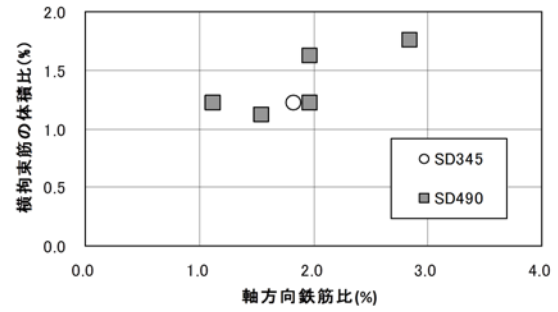
鉄筋強度の比較である(a)より、ひずみと付着応力度の関係は鉄筋強度の違いに依らずほぼ同等となった。これは、鉄筋とコンクリートとの付着は鉄筋の弾性域内で発揮されるため、弾性係数が同等であれば鉄筋強度が異なっても付着応力度発揮傾向に差は生じないことを示すものであると考えられる。

鉄筋径の比較である(b)より、D29に対するD35の発揮付着応力度の比率は1.19となり、鉄筋径が大きいほど発揮付着応力度も大きくなる傾向を示した。付着応力度が鉄筋径においても異なる可能性が示された。

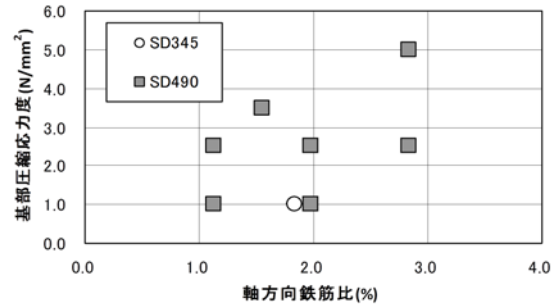
4. 橋脚模型の交番載荷実験

(1) 実験供試体

軸方向鉄筋に高強度鉄筋(SD490)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、変形性能及び塑性化後の破壊過程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-2に、供試体断面図を図-8に示す。実験供試体のパラメータは、鉄筋強度(SD345,



(a) 軸方向鉄筋比と横拘束鉄筋の体積比の関係



(b) 軸方向鉄筋比と基部圧縮応力度の関係

図-7 実験供試体の概要

SD490)、軸方向鉄筋比、鉄筋段数、横拘束鉄筋の体積比、橋脚基部に作用する圧縮応力度等を設定した。なお、全ての供試体のコンクリートの設計基準強度は40N/mm²とし、また、横拘束鉄筋は、従来強度の鉄筋(SD345)を使用し同様に定着等の構造細目もH14道示に従った。パラメータの設定に関しては、以下のような背景の元、供試体を計画した。実験に使用した供試体の軸方向鉄筋比、横拘束鉄筋の体積比、基部圧縮応力度の関係を図-7に示す。

a) 軸方向鉄筋比

従来強度の鉄筋を使用した一般的な中小規模の橋脚では軸方向鉄筋比が0.5~1.0%程度となる。荷重規模が大きくD51-1.5段程度が配置される橋脚では、これが2.0%程度になる。高強度鉄筋を採用する柱部材では、断面を縮小することにより軸方向鉄筋比が高くなる傾向が予測されるため、1.0~3.0%程度の軸方向鉄筋比の範囲において供試体を計画した。

b) 横拘束鉄筋の体積比

高強度鉄筋を採用する橋脚はじん性能が小さくなる傾向にあると考えられる。そこで、実設計においては横拘束鉄筋を多く配置することが想定される。一方、拘束力を過度に高めるとコンクリートの圧壊よりも軸方向鉄筋の破断が先行する恐れがあり、破断ひずみの小さい高強度鉄筋においては問題となることが考えられる。そこで、従来の拘束筋体積比の上限値以下の範囲(1.0~1.8%程度)で比較的体積比の高い領域において供試体を計画した。

表-2 実験供試体諸元

供試体		H20-1	H20-2	H20-3	H20-4	H21-3	H21-4	H22-1	H22-2	H23-1	
断面寸法(mm)		600×600						500×500		600×600	
コンクリート		設計強度(N/mm ²) 40									
軸方向鉄筋(D13)	材質	SD490				SD490	SD345	SD490			
	配置間隔一本数	65mm -56本	65mm -32本	65mm -56本	65mm -56本	65mm -32本	40mm -52本	60mm -56本	60mm -56本	47mm -44本	
	配置段数(段)	2	1	2	2	1	1	2	2	1	
	鉄筋比(%)	2.0	1.1	2.0	2.0	1.1	1.8	2.8	2.8	1.5	
帯鉄筋(D6)	材質	SD345	SD345	SD345	SD345	SD345	SD345	SD345	SD345	SD345	
	配置間隔(mm)	40	40	40	40	40	40	60	60	40	
	有効長(mm)	260	260	195	260	260	260	120	120	284	
	体積比(%)	1.22	1.22	1.62	1.22	1.22	1.22	1.76	1.76	1.12	
柱基部圧縮応力度(N/mm ²)		1.0	1.0	1.0	2.5	2.5	1.0	2.5	5.0	3.5	
せん断スパン比(H/D)		5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	7.0	7.0	5.8	

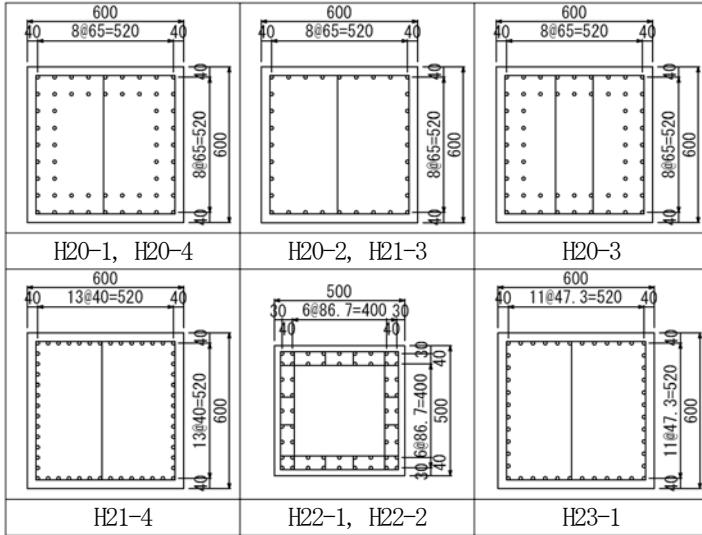


図-8 供試体断面図 (単位:mm)

表-3 試設計と供試体の諸元

	試設計	供試体
断面寸法	3000mm×3000mm	600mm×600mm
柱高さ	15000mm	3000mm
軸方向鉄筋	D51×88本(ctc150)	D13×56本(ctc65)
軸方向鉄筋比	1.98%	2.00%
帯鉄筋 径, 間隔	D25ctc150	D6ctc40
横拘束体積比	1.8%	1.2%
基部軸力	11308kN	360kN
基部応力	1.26N/mm ²	1.00N/mm ²
せん断スパン比	5.0	5.0

c) 軸圧縮応力度

既応実験データでは軸圧縮応力 1.0N/mm²程度が採用されていることが多いが、高強度鉄筋を採用する橋脚では、断面を縮小することにより高軸圧縮応力状態となることが想定される。橋脚高さ 50m程度の中空断面橋脚の試算によると、橋脚基部の軸圧縮応力度が 5.0N/mm²程度となることから、軸圧縮応力度は 1.0~5.0N/mm²の範囲で計画した。以上を踏まえて本研究では、断面寸法 3.0m×3.0m、橋脚高さ 15mの実構造物を想定した橋脚の試設計を行い、その結果を縮尺 1/5 に縮小したモデルを供試体の基本ケース(H20-1)として設定した。試設計を行った橋脚と供試体の諸元は表-3のとおりである。

(2) 材料試験

実験時材齢におけるコンクリートの材料試験値および鉄筋の材料試験値を表-4及び表-5に示す。

(3) 実験方法

実験状況を写真-2に示す。荷重試験は、ガイドライン⁷⁾に則り行った。荷重方法は、鉛直加力装置により軸方向荷重、水平加力装置により繰返し水平変位を与えた。軸方向鉄筋の降伏時の水平変位を基準変位 (δy) とした、荷重変位を $\pm n \delta y$ ($n=1, 2, 3, \dots$) とした変位振

幅を各3サイクルずつ与える正負交番荷重である。そして、各サイクルの荷重終了時点でひび割れの状況の観察を行った。荷重の荷重は、橋脚の水平耐力が大きく低下

表-4 鉄筋の材料試験値

供試体	径	材質	引張強度(N/mm ²)	降伏応力(N/mm ²)	弾性強度(N/mm ²)	伸び(%)
H20-1~4	D6	SD345	542.5	371.5	182.8	16.68
	D13	SD490	698.8	562.8	192.5	18.07
H21-3,4	D6	SD345	577.5	377.3	199.9	21.07
H21-3	D13	SD490	702.2	582.5	192.8	16.66
H21-4		SD345	525.5	356.1	192.3	23.67
H22-1,2	D6	SD345	581.3	396.5	199.4	23.22
	D13	SD490	689.6	562.8	192.3	17.95
H23-1	D6	SD345	574.7	448.4	188.0	14.82
	D13	SD490	761.4	571.2	192.7	14.76

表-5 コンクリート材料試験値 (荷重時材齢)

供試体	圧縮強度(N/mm ²)	弾性係数(N/mm ²)	ポアソン比	引張強度(N/mm ²)
H20-1	41.9	30.6	0.192	3.03
H20-1	42.9	31.0	0.216	2.55
H20-3	43.4	28.2	0.188	3.16
H20-4	44.7	29.8	0.208	3.13
H21-3	49.1	35.5	0.242	3.81
H21-4	47.3	33.9	0.232	3.39
H22-1	47.1	30.8	0.208	3.01
H22-2	48.4	31.5	0.221	3.81
H23-1	51.6	33.5	0.207	3.80

し始める状態に達した時点で実験を終了とした。

(4) 実験結果

実験結果の一例として、軸方向鉄筋の強度及び柱基部の軸圧縮応力度に着目した実験ケースを示す。H20-2 は軸方向鉄筋にSD490 を使用した供試体であり、H21-4 は軸方向鉄筋にSD345 を使用してH20-2 と曲げ耐力を同等に設定した供試体である。H21-3 はH20-2 と同一の鉄筋配置とし、柱基部の軸圧縮応力度を変化させた供試体である (H20-2 : 1.0N/mm², H21-3 : 2.5N/mm²) 。

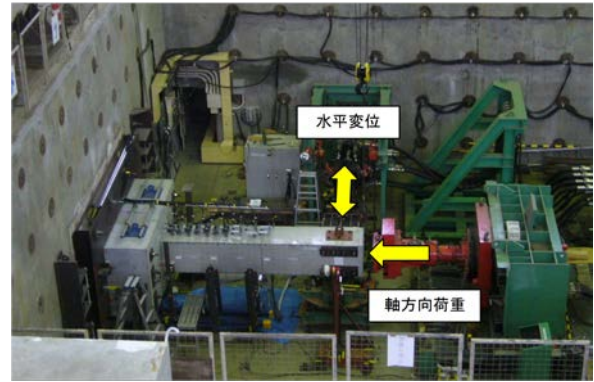


写真-2 実験状況

a) 荷重変位関係

図-9に各供試体の荷重変位履歴曲線を示す。実験終了時の荷重変位は、H20-2は6δy-3サイクル、H21-3は5δy-3サイクル、H21-4は6δy-3サイクルであった。鉄筋強度の異なるH20-2とH21-4を比較すると、水平力が負担できないと判断した終了時点の荷重変位に差が現れた。

b) 損傷状況

図-10 に交番荷重実験における実験終了後の柱基部の損傷状況を示す。軸方向鉄筋の破断は、H20-2 では32本中9本、H21-3 では32本中5本、H21-4 では52本中1本

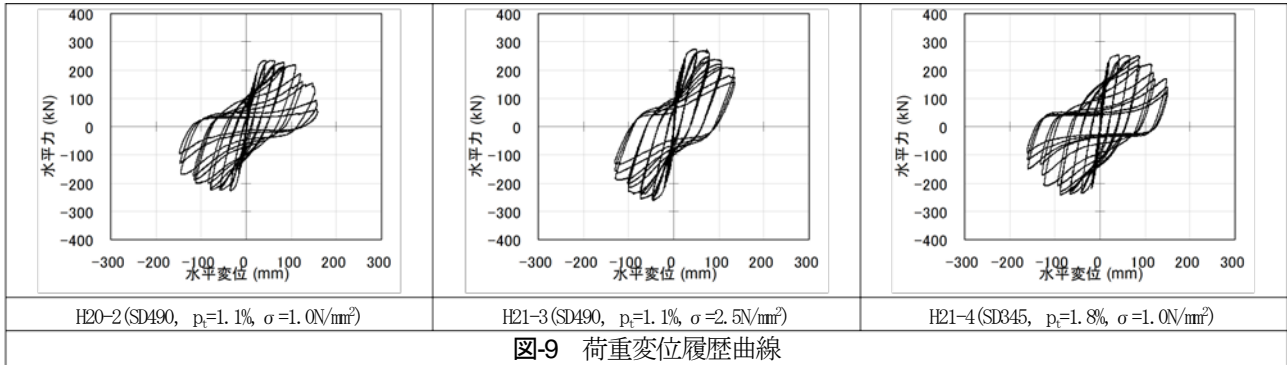


図-9 荷重変位履歴曲線

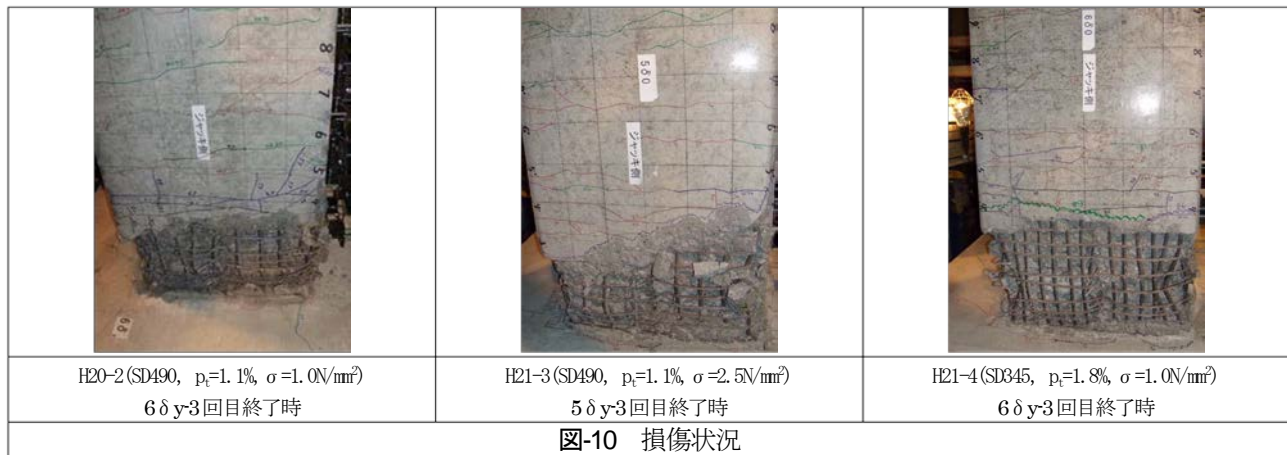


図-10 損傷状況

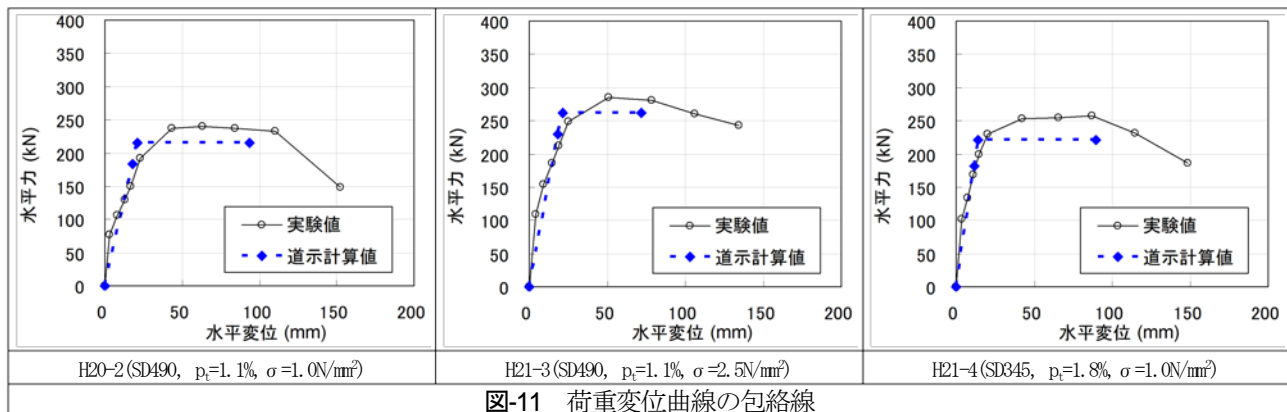


図-11 荷重変位曲線の包絡線

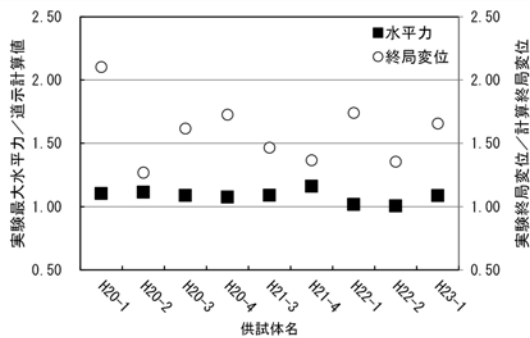


図-12 水平耐力・終局変位の比較

であった。SD345を用いたH21-4に比べると、SD490を用いたH20-2とH21-3では、実験終了時の軸方向鉄筋の破断本数が多かった。これは、2で示した軸方向鉄筋の低サイクル疲労実験結果で見られるように、SD345に比べてSD490の方が破断に至るまでの繰返し載荷回数及びひずみ量が小さく、初期変形や繰返し曲げに対して脆化傾向を有することに対応しているものと考えられる。また、高強度化による付着の影響については、柱本体の軸方向鉄筋に沿ったひび割れ（付着割れつ破壊）や基部の過度な鉄筋抜け出しによる割裂等は確認されなかった。

c) 荷重-変位関係の包絡線

図-11は、荷重-変位曲線において各 δy にける1サイクル目載荷時の応答値に対する包絡線を示している。図中、水平ジャッキの荷重および軸圧縮力によって橋脚基部に作用する付加モーメントを補正した水平力を示している。軸方向鉄筋にSD490を用いたH20-2とH21-3を比べると、軸圧縮応力度が大きいH21-3ではピーク荷重が明瞭に現れる傾向が見られる。さらに軸圧縮力応力度の大きい、H20-4、H23-1でも同様の傾向が見られた。これは、圧縮応力を負担するコンクリートの応力ひずみ関係の形状が、荷重変位曲線にも強く反映されたものと考えられる。図中には、H14道示に規定されている手法によって算出した、荷重-変位曲線を併記している。本研究では、実験結果の包絡線が計算での最大荷重を維持できる最大の変位を終局変位と定義した。

実験結果とH14道示に基づき計算される荷重変位曲線を比較すると、初降伏時の変位及び荷重は良く一致する。図-12に示すとおり、計算終局水平耐力に対する実験最大水平耐力の比率は全て1を上回り、ある程度の精度で単柱式の鉄筋コンクリート橋脚の水平耐力及び水平変位の算出方法が安全側に評価できているように考えられる。一方、終局変位に関しては実験値に対して道示の計算値の比率は27%~110%とバラつきが大きく、実験値を下回り安全側となっているものの、必ずしも一定の安全率が担保されていないように考えられる。なおH24道示では変位の評価の見直しが行われている。詳細については割愛する。

5. まとめ

本検討で考慮した軸方向鉄筋量、横拘束鉄筋の体積比、軸圧縮応力度の範囲においては、軸方向鉄筋としてSD490を用いた場合であっても、橋脚の変形性能の評価については設計計算上同様に扱ってよいと考えられるのであった。一定の条件下においては、高強度材料の道路橋橋脚への適用が可能と考えられる。一方で更なる高強度の鉄筋を用いる場合には高強度材料の曲げ加工部における変形追随性や疲労耐久性の更なる検証、鉄筋脆化の影響に対する安全確保策の確立が必要と考えられる。

H14道示の計算法で水平荷重・水平変位関係を推定した結果は、計算法の改善の必要性を示した。一方で高強度材料が用いられたり、断面を縮小して軸圧縮力応力度の高い橋脚が用いられりする可能性が高く、最大水平耐力と終局水平耐力をそれぞれ算定できるようにする、終局水平変位の推定精度を向上させるなどの計算法の改善が必要と考えられる。今後は、更なる鉄筋の高強度化が橋脚の変形性能や耐力特性にどのような影響を及ぼすのかについて検討を行い、従来の技術基準と同程度の信頼性が見込める設計技術の確立を目指す予定である。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンスセンターの星隈順一氏、塚淳一氏のご助言とご協力に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説V耐震設計編（平成14年3月（社）日本道路協会）
- 2) 星隈 順一，長屋 和宏，運上 茂樹：鉄筋コンクリート橋脚の塑性曲率分布と塑性ヒンジ長，土木学会構造工学論文集，Vol. 46A，pp. 1461-1468，2000. 3
- 3) 浅津 直樹，運上 茂樹，星隈 順一，近藤 益央：軸方向鉄筋の座屈解析による鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長に関する研究，土木学会論文集，No. 682/I-56，pp. 177-194，2001. 7.
- 4) 星隈 順一，川島 一彦，長屋 和宏：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係，土木学会論文集，No. 520/V-28，pp. 1-11，1995. 8
- 5) 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-63，91-108，2004. 5
- 6) 島弘，周礼良，岡村甫：マシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係土木学会論文集 No. 378/V-6，pp. 165-174，1987. 2
- 7) (独)土木研究所 耐震研究グループ耐震チーム：橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン(案)(橋脚の正負交番載荷実験方法及び振動台実験方法)，土木研究所資料 第4023号，2006. 8