

PC 鋼材で橋脚付け根を巻き締めする高じん性化技術

技術本部	技術研究所	久保明英
技術本部	土木技術第一部	鈴木宣政
東京土木支店	PC 事業部	村井伸康

概要:高じん性鉄筋コンクリート構造の配筋合理化技術に関する共同研究に参加し、PC 鋼材で橋脚付け根を巻き締めする高じん性化技術の研究を行っている。土木研究所の30MN 載荷試験機を用いて、高さ1500mm、断面寸法500mmの柱状供試体の一軸圧縮強度試験を行った。また、大型アクチュエータージャッキ 2 軸載荷試験装置を用いて、総高6400mm、断面寸法1200mmの橋脚模型の正負交番載荷試験を行った。実験の概要を紹介する。

Key Words: 橋脚、高じん性化、配筋合理化、PC 鋼材、橋脚付け根部、巻き締める

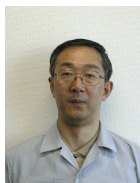
1. はじめに

鉄筋コンクリート橋脚、柱の耐震安全性を高めるためには変形性能を向上させること、すなわち高じん性化することが重要となる。しかし、現行基準が示す、帯鉄筋量、中間帯鉄筋量を配置すると、作業が煩雑となるだけでなく、コンクリートの充填性や構造物の品質が懸念されるような配筋過密状況となっている。このため、新設鉄筋コンクリート橋脚や柱の配筋合理化が可能となる、高じん性化技術が望まれている。当社は、高じん性鉄筋コンクリート構造の配筋合理化技術に関する共同研究(共同研究期間:平成13年9月~平成16年3月)に参加している。参加機関は独立行政法人土木研究所、土木研究センター、前田建設工業、戸田建設、三井住友建設、ピーエス三菱、東急建設の7機関である。その中で当社は、三井住友建設と共に、PC 鋼材で橋脚付け根を巻き締めする、高じん性化技術及びプレキャスト部材を用いた技術を行っている。

PC 鋼材で鉄筋コンクリート柱状体を巻き締めすることで、高じん性化が可能なのは、PC 鋼材の導入応力を降伏強度の1/3以下とした場合について、既往の研究で確認されている^{1) 2)}。本研究では、PC 鋼材の導入応力、配置間隔、断面積をパラメータとした一連の試験を実施して、高じん性化のメカニズムを解明し、より効果的な高じん性化技術を開発しようとするものである。PC 鋼材で橋脚付け根を巻き締めする高じん性化技術は、新設橋脚に適用することを主に開発しているが、既設橋脚の補強にも適用可能である。そして、橋脚の付け根の部分だけを巻き締めする方法については、当社のプレキャスト化技術、機械化技術を活かすことができると期待している。PC 鋼材を用いた方法の優位性を示すには、より高い緊張力で巻き締めることが、より大きい高じん性化効果を生むことを示す必要がある。一軸圧縮強度試験の供試体及び正負交番載荷試験の橋脚模型に巻く PC 鋼材の選定では、できるだけ高い緊張力を導入できるように配慮した。



写真-1 正負交番載荷試験試験の装置



久保明英



鈴木宣政



村井伸康

2. 一軸圧縮強度試験

(1) 供試体の概要

供試体の概要を図-1に、諸元を表-3に示す。角柱供試体(LSシリーズ)は、500×500の正方形断面で、高さ1500mmである。軸方向鉄筋は、D16mm鉄筋が純かぶり16mmで各辺に4本配置されている。供試体の上下端200mmは、補強区間としD16mmの帯鉄筋を5本配置している。拘束筋としてのPC鋼材は、異形PC鋼棒(7.1mm, 9.0mm, 10.7mm)を使用し、150mm間隔(全角柱供試体共通)で供試体外側にコーナー部定着体を介して配置されている。PC鋼材と角柱供試体の隙間には、緊張後に無収縮モルタルを埋めている。これは、載荷に伴う供試体の膨張を速やかにPC鋼材で拘束するためである。

円柱供試体(LCシリーズ)は、500mmの円形断面で、高さ1500mmである。軸方向鉄筋は、D16mm鉄筋が純かぶり16mmで10本配置されている。上下端250mmを補強区間とし、D16mmの帯鉄筋を6本配置している。拘束筋としてのPC鋼材は、PC鋼より線(2.9mm×3本より、全円柱供試体共通)を用い、50mm, 70mm, 100mm間隔で配置している。

角柱供試体はPC鋼材の断面積と導入緊張力を、円柱供試体はPC鋼材の配置間隔と導入緊張力をパラメータとしている。円柱供試体にPC鋼より線を巻くと、各素線に曲げひずみが生じる。LC1, LC2, LC3のPC鋼より線の最大合成ひずみは、ほぼ弾性限界ひずみとなっている。供試体に使用したコンクリートの配合を表-1に、PC鋼材の材料試験結果を表-2に示す。なお、供試体のコンクリートは同一の生コン車から採取したものである。

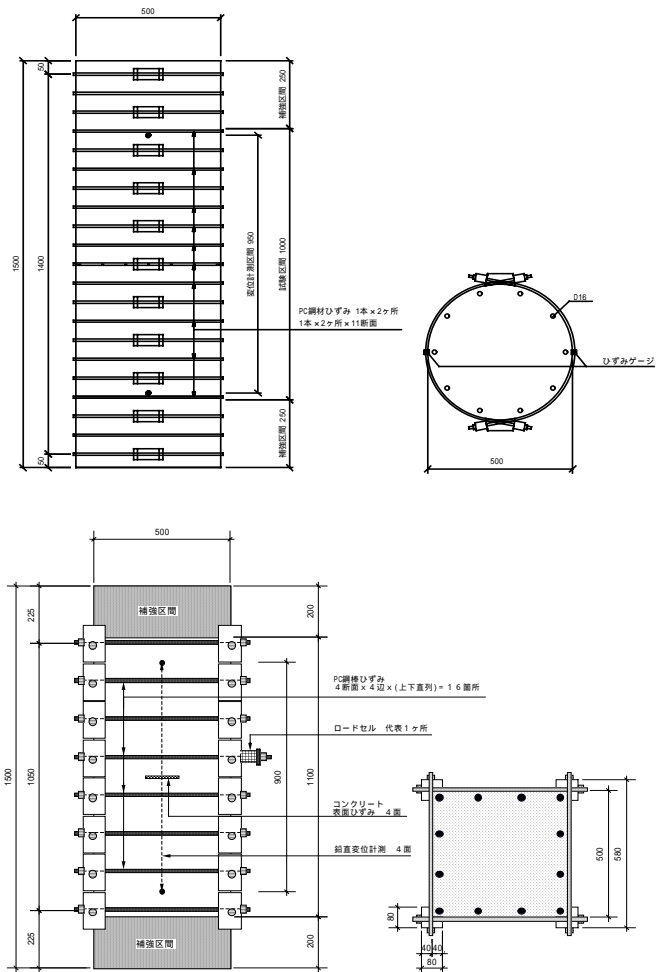


図-1 供試体概要

表-1 コンクリートの配合

設計強度 N/mm ²	スランブ cm	Gmax mm	空気量 %	W/C %	s/a %	単位水量 kg/m ³
25.5	18	20	4.5	57	52.1	175

表-2 鋼材の機械的性質

名称 (規格)	断面積 mm ²	引張荷重 kN	伸び %	降伏荷重 kN	弾性係数 N/mm ²
異形PC鋼棒 7.1mm SBPDL	40	59.3	9	57.4	201100
異形PC鋼棒 9.0mm SBPDL	64	95.1	9.5	91.4	199400
異形PC鋼棒 10.7mm SBPDL	90	136	11	130.6	202700
PC鋼より線 2.9mm×3本より SWPR7N	19.82	39.8	8	37.6	201800
異形鉄筋 D16	198.6	114.1	22.9	77.3	216000

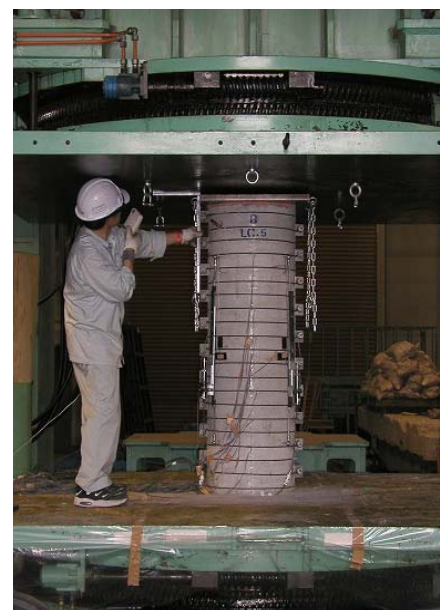


写真-2 供試体の設置状況

表-3 供試体の諸元

供試体		PC鋼材		断面積 A_{pc} mm ²	配置間隔 s mm	体積比 ρ_{pc} %	導入緊張力 P_i kN/本	導入緊張力 / 降伏荷重
角柱	LS0	SBPDL 異形PC鋼棒	-	-	-	-	-	-
	LS1		7.1mm	40	150	0.21	49.1	0.86
	LS2		9.0mm	64		0.34	73.5	0.80
	LS3		10.7mm	90		0.48	101.1	0.77
	LS4		9.0mm	64		0.34	0.0	0.00
	LS5		9.0mm	64		0.34	39.0	0.43
円柱	LC0	SWPR3N PC鋼より線	-	-		-	-	-
	LC1		2.9mm × 3本	19.82	100	0.16	12.0	0.32
	LC2				70	0.23	12.0	0.32
	LC3				50	0.32	12.0	0.32
	LC4				70	0.23	0.0	0.00
	LC5				70	0.23	6.0	0.16

(2) PC 鋼材の緊張力管理

角柱供試体では、4台のジャッキと4台のロードセルを用いて、1段毎に、4本のPC鋼棒を同時に緊張した。ロードセル読み値が所定の緊張力を示した状態で定着した。円柱供試体では、2台のジャッキと2台のロードセルを用いて、1段毎に、PC鋼より線を円柱供試体の周りを1周(360°)巻いて緊張した。ロードセル読み値が所定の緊張力を示した状態で定着した。PC鋼より線の定着具には、ロードセルで確認した緊張力で定着できるように特殊なものを用いた。載荷試験の約2週間前に、緊張力の再緊張を行い、載荷試験までに減少する緊張力の調整を行った。なお、写真-2には写っていないが、載荷中は、PC鋼材の撥ね飛び防護のための柵で供試体を囲っている。

(3) 載荷方法および計測項目

載荷は、独立行政法人土木研究所所有の30MN載荷試験機を用いて行った。載荷方法は、変位制御による単軸圧縮載荷とし、載荷速度は毎分1mmとした。本載荷に先立ち、変位1mm程度の予備載荷を行い、供試体の設置と計測器の点検を行った。供試体の設置状況を写真-2に示す。

計測項目は、鉛直荷重、軸方向変位、PC鋼材ひずみとした。軸方向ひずみは、角柱供試体では4面の中央900mm区間における変位、円柱供試体では4面中央950mm区間における変位を計測し、これを区間長で除して求めた。参考のために、コンクリート表面ゲージにて軸方向ひずみと横方向ひずみも計測した。計測のサンプリング間隔は0.5Hzである。



写真-3 円柱供試体の定着具



写真-4 円柱供試体と角柱供試体

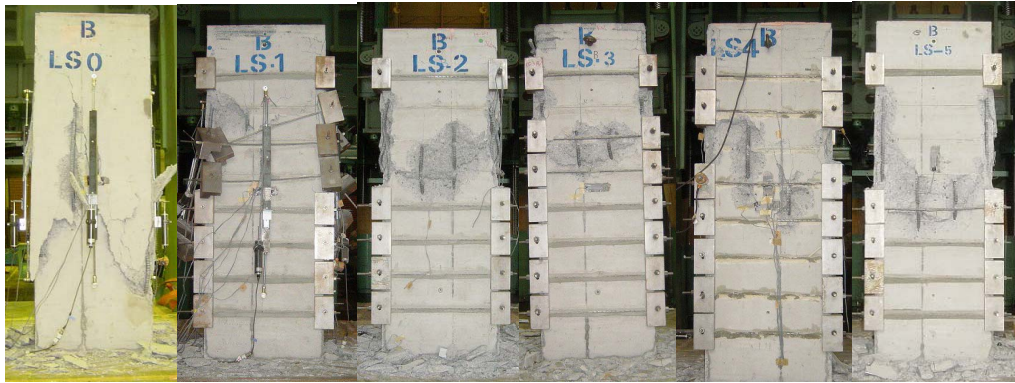


写真-5 最終損傷状況(角柱供試体:左から LS0 ~ LS5)



写真-6 最終損傷状況(円柱供試体:左から LC0 ~ LC5)

(4) 試験結果の概要

角柱供試体及び円柱供試体の応力 - ひずみ関係を図-2, 図-3 に示す. 角柱供試体では, 最大圧縮応力を過ぎた直後に, 急傾斜で応力が下降する応力下降域と, 次の傾斜の緩やかな応力収束域の 2 段階の挙動を示す. 応力下降域から応力収束域へ移行する段階でコンクリートの剥落や破壊面が明確になり, 数本の軸方向鉄筋が座屈し, その後座屈した軸方向鉄筋を抑えていた PC 鋼材が破断して終局に至る. 応力下降域から応力収束域へ移行する境界点は, 最大圧縮応力の 60% ~ 80%程度に位置しており, 体積比あるいは緊張力が大きい角柱供試体ほど, 増加割合が大きい. 円柱供試体では, 明確な応力下降域は見られず, 緩やかな応力低下を示す. 破壊は, 最大圧縮応力以降に次第にひび割れ幅が拡大し, やがてコンクリート小片の剥落が生じ始め, 軸方向鉄筋が座屈し, その後座屈した軸方向鉄筋を抑えていた PC 鋼材が破断して終局に至る.



写真-7 円柱供試体のセット

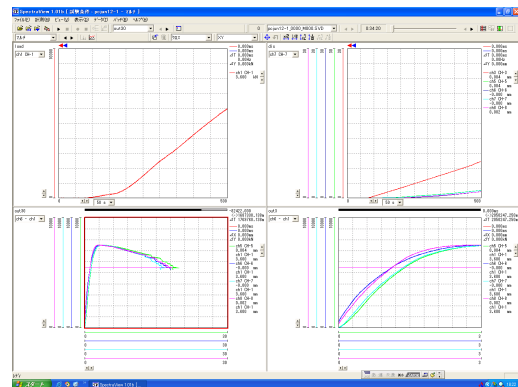


写真-8 当社のリアルタイムモニタリング装置を使用した.(モニタリング画面)

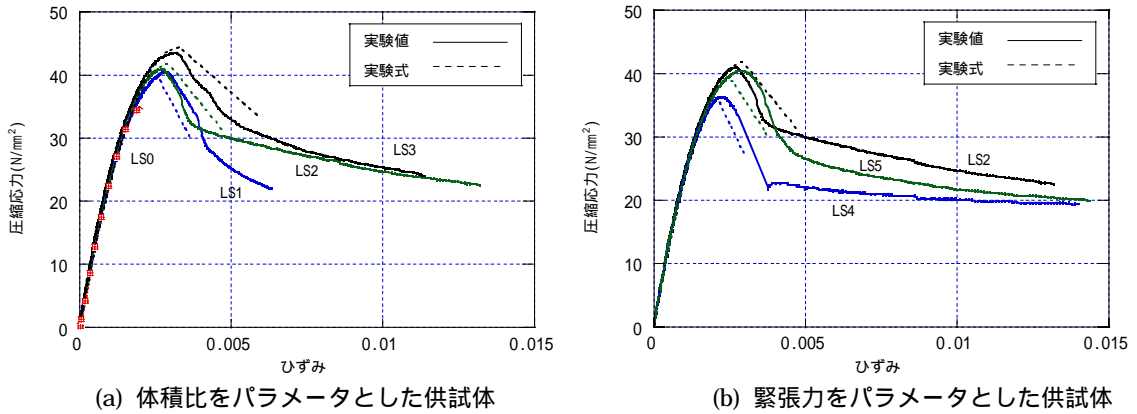


図-2 角柱供試体の応力 - ひずみ関係

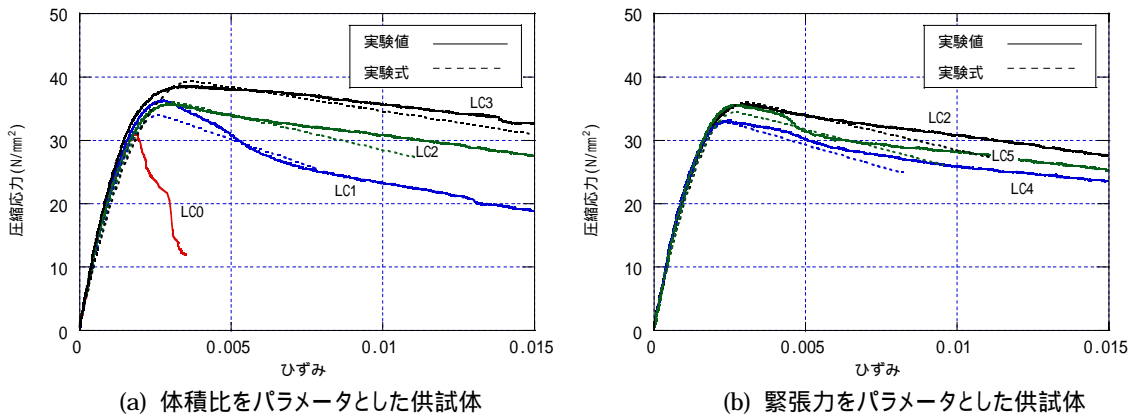


図-3 円柱供試体の応力 - ひずみ関係

(5) 試験結果の評価

PC 鋼材で鉄筋コンクリート柱状体を巻く方法による最大圧縮応力を高める効果については、無拘束供試体 (LS0, LC0) と、PC 鋼材を巻くが緊張力は導入していない供試体 (LS4, LC4) とを比較して、後者の最大圧縮応力が増加していることから確認できる。PC 鋼材に緊張力を導入することで、さらに最大圧縮応力を高められることについては、PC 鋼材に緊張力を導入していない供試体 (LS4, LC4) と、緊張力を導入した供試体 (LS5, LC5) を比較して、後者の最大圧縮応力が増加していることから確認できる。なお、緊張力を導入した供試体 (LS5, LC5) とその 2 倍の緊張力を導入した供試体 (LS2, LC2) とを比較して、角柱供試体、円柱供試体共に最大圧縮応力が同程度であり、導入緊張力による差異がなかった。この理由については、円柱供試体では、最大圧縮応力となったときの、曲率による PC 鋼材の曲げ応力と引張り応力との合成応力が、降伏応力を超えているため、PC 鋼材の緊張力による拘束力は、LC5 と LC2 両供試体共に同じであったと考えられる。なお、円柱供試体に PC 鋼より線 (2.9mm × 3 本) を巻くと、その素線には、降伏応力の約 60% に相当する曲げ応力 (曲げひずみ = 素線径 / 曲げ半径 = 2.9 / 500 = 0.0058) が生じることになる。角柱供試体についても、載荷時の供試体の膨張により PC 鋼材に大きい曲げ応力が生じると推察されるが、これについては計測していないし理論的に評価することも難しいため、PC 鋼材の曲げ応力と引張り応力との合成応力が、降伏応力を超えているかどうか判断できない。しかしながら、星隈らの異形鉄筋を用いた同様の試験⁴⁾において、応力下降域から応力収束域へ移行する境界点が、鉄筋の降伏点に一致することが知られており、PC 鋼材を用いた本試験においても、この境界点付近で PC 鋼材が降伏相当ひずみとなっていることが確認されている⁵⁾。

PC 鋼材で鉄筋コンクリート柱状体を巻き締めする方法が、最大圧縮応力以降の急激な耐力低下を抑制する効果を有していることについては、特に円柱供試体の試験結果で明確に確認できる。角柱供試体については、星隈らの異形鉄筋を用いた同様の試験⁴⁾の、応力下降域から応力収束域へ移行する境界点が、最大圧縮応力の 50% 以下で生じているのに対して、その境界点が 60% ~ 80% 程度であり、その効果を確認できる。写真-5 および写真-6 に最終損傷状況を示す。

3. 正負交番載荷試験

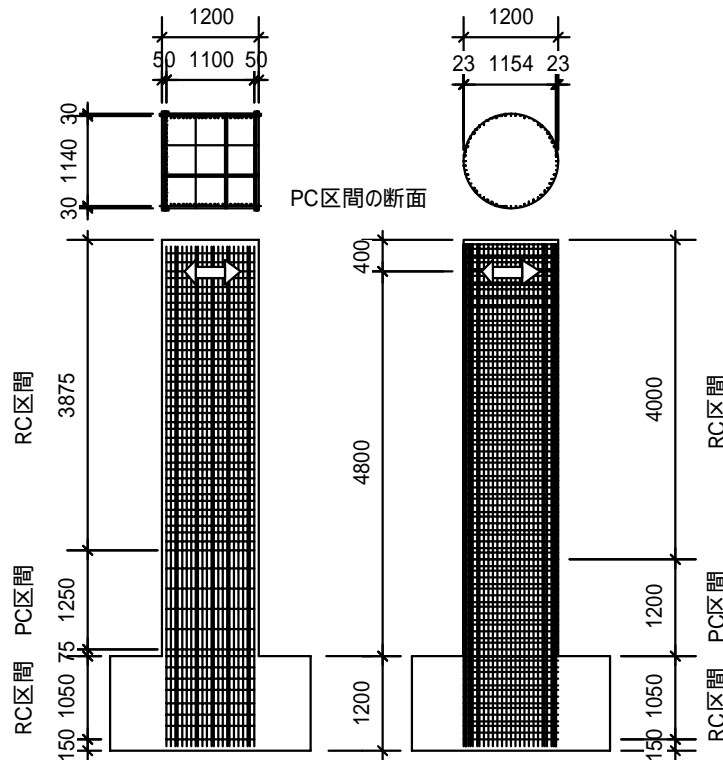
(1) 円形断面橋脚模型の製作

円形断面橋脚模型 2 体は、神町工場で、木製型枠を使用して、寝かせ打ちで製作した。円柱部上側の仕上がり、コンクリートの充填性及び断面の形状確保に注意して施工した。失敗談であるが、橋脚模型のフーチング底部の型枠に木版を使用したため平坦性が不十分となり、模型を載荷壁に取り付けるとき、緊張するとアクチュエータ取り付け位置が外れてしまい、調整に手間取った。



写真-9 付け根部配筋(C1, C2 模型)

(2) 橋脚模型の概要



正方形断面 S1 模型 円形断面 C1, C2 模型

図-4 交番載荷試験用の橋脚模型

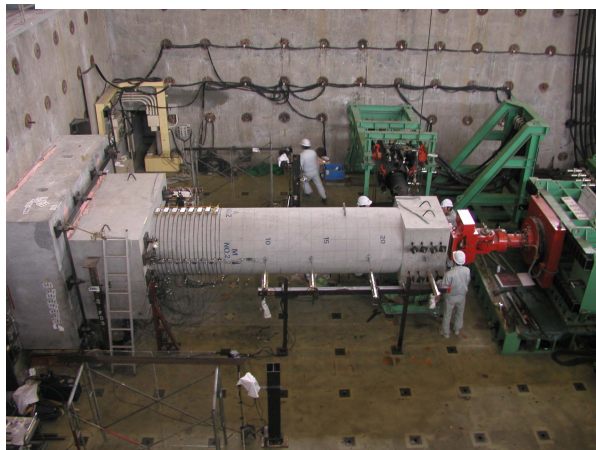


写真-10 円形断面橋脚模型

表-4 供試体の補強筋の配置

	供試体No.	S1	C1	C2
軸方向	鉄筋径	D19	D16	D16
	本数	88 本	60 本	60 本
	鉄筋比	1.75	1.05	1.05
PC 区間	PC鋼材	11	1S9.5	1S9.5
	断面積	90.00	54.84	54.84
	緊張応力	0.45f _y	0.28f _y	0.57f _y
	間隔(mm)	250	75	75
	中間帯鉄筋	D10	N.A.	N.A.
	有効長	375	1200	1200
	体積比(%)	0.41*	0.24	0.24
RC 区間	鉄筋径	D10	D10	D10
	間隔(mm)	100	75	75
	有効長	375	1180	1180

*PC鋼棒の断面積で計算

表-5 コンクリートの特性値

供試体No.	S1	C1	C2
圧縮強度(MPa)	35.2	33.6	41.3
ヤング率(GPa)	28.3	23.5	25.4

表-6 補強筋の特性値

	供試体No.	S1	C1, C2
主鉄筋	降伏強度(MPa)	342	367
	引張強度(MPa)	510	531
	ヤング率(GPa)	190	181
PC鋼材	降伏強度(MPa)	1241	1914
	引張強度(MPa)	1283	1732
	ヤング率(GPa)	200	192
帯鉄筋	降伏強度(MPa)	388	366
	引張強度(MPa)	549	524
	ヤング率(GPa)	201	176

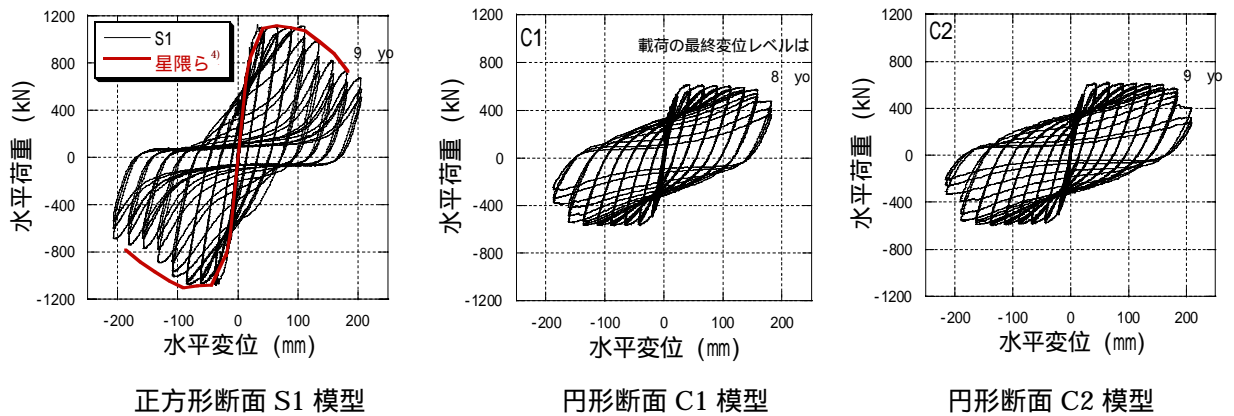


図-5 水平荷重 水平変位の履歴曲線

正負交番載荷試験に用いた橋脚模型の寸法を図-4に示す。S1模型は1200×1200mmの正方形断面、C1、C2模型は1200mmの円形断面、脚基部から載荷点までの高さは4800mm(せん断スパン比4.0)である。軸方向鉄筋は、S1模型ではD19を50mm間隔で88本、C1、C2模型ではD16を60mm間隔で60本配置しており、軸方向鉄筋比はS1で1.75%、C1、C2で1.05%である。なお、S1模型は、星隈らが行った正負交番載荷試験⁴⁾と対比できるように模型と寸法および軸方向鉄筋の配置を一致させている。

塑性ヒンジ領域に相当する、脚基部から約1200mm(1D)の区間を試験対象区間とし、この区間内では帯鉄筋は全く無く、緊張力を導入したPC鋼材のみで構拘束した状態となっている。試験対象区間以外の部分である脚基部から1D以上の区間及びフーチング部分については、各模型とも道路橋示方書耐震編が示す帯鉄筋量を配置している。

正方形断面S1模型の試験対象区間では、PC鋼棒11mmを、250mm間隔で、躯体の内部に芯がぶり30mmで配置し、降伏強度の45%の有効緊張応力(50kN/本)で緊張している。中間帯鉄筋としてD10を有効長375mmで配置している。

円形断面C1、C2模型の試験対象区間では、PC鋼より線1S9.5-SWPR7BLを、75mm間隔で、躯体の表面に配置し、C1模型で降伏強度の28%(13.8kN/本)、C2模型で降伏強度(f_{py})の57%(27.5kN/本)で緊張している。なお、PC鋼より線1S9.5の各素線には、模型脚部に巻くことで、 $\pm 0.3f_{py}$ の曲げ応力が生じるため、その合成引張応力はC2模型で $0.87f_{py}$ となり、ほぼ弾性限界応力となっている。

(3) 試験方法

正負交番載荷試験は、独立行政法人土木研究所所有の動的アクチュエータージャッキ2軸載荷試験装置を用いて行った。橋脚を横に寝かせた状態で、橋脚模型のフーチングを反力壁に固定する。部材軸方向のアクチュエータージャッキで死荷重反力に相当する軸力荷重を負荷しながら、部材軸直角方向の動的アクチュエータージャッキで交番水平変位を与える。死荷重反力相当荷重は、応力で0.98Mpa、軸力で1413kNとした。載荷ステップは、降伏までの弾性域では1サイクルの交番水平変位の載荷を行い、各載荷ステップ毎に強制水平変位量を増加させ、部材が降伏する変位 y_0 を測定した。降伏以降は、降伏変位 y_0 の整数倍で強制水平変位量を増加させ、各載荷ステップで3サイクルの正負交番載荷を行った。

正方形断面S1模型の部材降伏は、軸方向鉄筋のひずみが降伏ひずみに達した時とした。円形断面C1、C2模型の部材降伏は、道路橋示方書に示されるように、円形鉄筋コンクリート断面を断面積が等しい正方形鉄筋コンクリート断面に換算して部材降伏曲げモーメントを求める。このときの1辺の鉄筋量は、円形断面の中心から90°の範囲内にある鉄筋量と同じとし、鉄筋の位置は、円形断面の中心から90°の範囲内にある鉄筋の重心位置と等しいとする。換算したこの正方形鉄筋コンクリート断面の降伏曲げモーメントを求め、これが生じるように水平荷重を円形断面C1、C2模型に作用させ、このときの変位を、部材が降伏する変位とした。なお、この降伏曲げモーメントを円形断面C1、C2模型に作用させたときの最外縁鉄筋のひずみは $y_0=2120\mu$ となる。

(4) 損傷の進行状況

各模型の水平荷重と載荷点位置における水平変位の履歴曲線を図-5 に示す。模型は全て曲げ破壊モードで終局に至っている。帯鉄筋の代わりに PC 鋼棒を用いた正方形断面 S1 模型では、3_{y0} 終了時に試験対象区間の中間帯鉄筋が降伏した。4_{y0} の載荷まで水平ひび割れが進展し、基部付近のかぶりコンクリートの浮きを打音により確認した。5_{y0} の1波目の負方向への載荷時に橋脚基部から 500mm までの範囲でかぶりコンクリートが剥落し、ほぼ同じ長さの軸方向鉄筋の座屈が確認され、曲げ耐力が低下した。6_{y0} の載荷で中間帯鉄筋のフックがはずれ PC 鋼棒の定着部が破壊した。7_{y0} で軸方向鉄筋の座屈長が 750mm まで進展した。その後、9_{y0} まで載荷したが軸方向鉄筋の破断は生じなかった。S1 供試体は、試験対象区間における中間帯鉄筋の耐力の不足と、PC 鋼棒の定着部に弱点を有していたため、軸方向鉄筋の破断までに至らなかったと考えられる。

PC 鋼より線を巻き締めした円形断面 C1 模型では、5_{y0} の載荷まで水平ひび割れが進展し、基部の極近くで小規模なかぶりコンクリートの剥離が生じた。6_{y0} の3波目に橋脚基部から 150mm までの範囲でかぶりコンクリートの剥落し、座屈長 150mm の軸方向鉄筋の座屈が生じ、耐力が低下した。7_{y0} の2波目で軸方向鉄筋が数本破断した。

PC 鋼より線を巻き2倍の緊張力で締めた円形断面 C2 模型では、5_{y0} の載荷まで水平ひび割れが進展し、基部の付近で小規模なかぶりコンクリートの剥離が生じた。6_{y0} において基部から 75mm の範囲でかぶりコンクリートの剥落が進行した。7_{y0} で基部から 150mm の範囲でかぶりコンクリートの剥落が生じ、座屈長 150mm の軸方向鉄筋の座屈が確認され、1 段目の PC 鋼より線の素線 1 本が破断した。8_{y0} でかぶりコンクリートの剥落が進行し、数本の軸方向鉄筋が破断した。

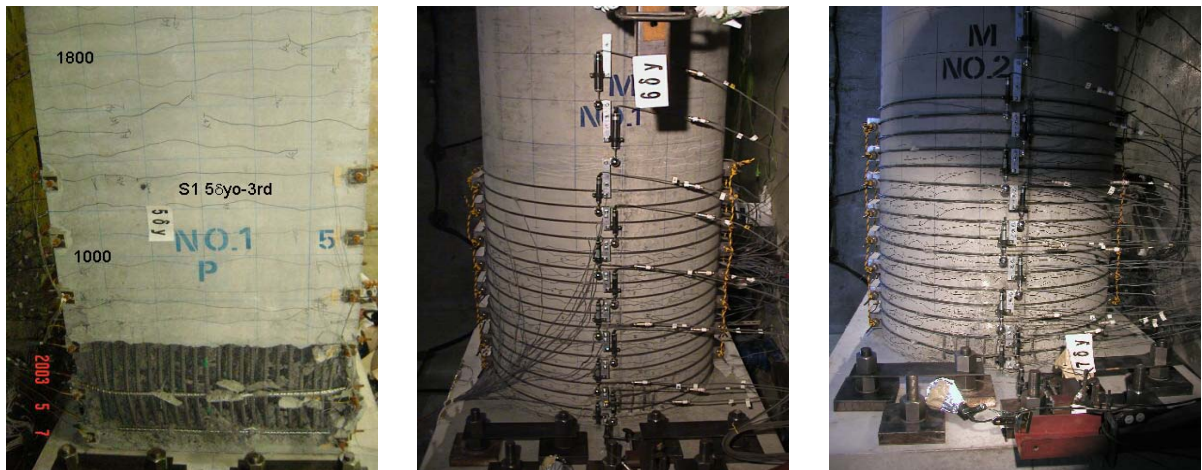


写真-11 軸方向筋の座屈が始まった頃の脚基部の状況

(5) 正負交番載荷試験結果の概要

図-5 の水平荷重 水平変位の履歴曲線を観察する。正方形断面 S1 模型では、4_{y0} の載荷以後、水平耐荷重が低下し始めるのに対し、円形断面模型では、C1 模型で 7_{y0}、C2 模型で 8_{y0} と、軸方向鉄筋の破断が始まるまで、水平耐荷重が低下しないのが特徴的である。

PC 鋼より線を巻き締めした円形断面 C1 模型の終局は 7~8_{y0}、2 倍の緊張力で締めた円形断面 C2 模型、の終局は 8~9_{y0} であり、巻き締めする緊張力を大きくすることで、終局が 1_{y0} 延びている。8_{y0} 9_{y0} の延びは、変形 200mm の 3 回の載荷であり、吸収エネルギーで考えると、大きい差と言える。

少ない PC 鋼材の体積比で補強した正方形断面 S1 模型の荷重-変位履歴曲線は、中間帯鉄筋の耐力不足および PC 鋼棒の定着部の

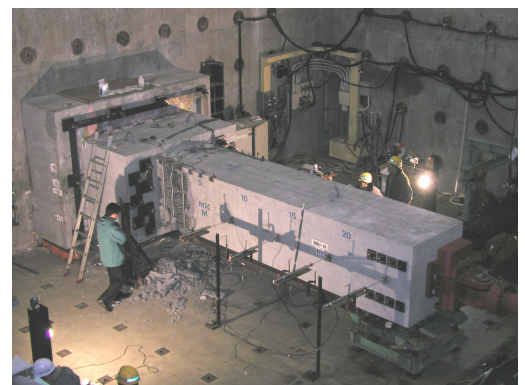


写真-12 試験終了後の観察

弱点にも関わらず、通常に帯鉄筋で拘束された星隈らの試験⁴⁾の履歴曲線と大きな差異はなかった⁶⁾。なお、中間帯鉄筋の耐力を高め、PC鋼棒の定着部を改良した、正方形断面 S1 模型の改良型で追加試験を実施中である。

4. まとめ

- (1) PC 鋼材で鉄筋コンクリート柱状体を巻き締めする方法は、最大圧縮応力以降の急激な耐力低下を抑制する効果を有していることが分かった。特に円柱供試体では最大圧縮応力以降緩やかな下降勾配を示し、角柱供試体についても、応力下降域から応力収束域へ移行する境界点の応力が高くなる。
- (2) PC 鋼材で鉄筋コンクリート柱状体を巻く方法は、最大圧縮応力を高める効果が確認できる。
- (3) PC 鋼材で鉄筋コンクリート柱状体を巻く方法は、PC 鋼材に緊張力を導入することで、さらに最大圧縮応力を高めることができる。ただし、その最大圧縮応力を高める効果には上限値が存在する。
- (4) PC 鋼材の曲げ応力と引張り応力との合成応力が降伏応力に至ることで、PC 鋼材の拘束効果が限界に達し、供試体が最大圧縮応力に至ると推察する。ただし、今回の試験では不明な点が残されており、今後の検討が必要である。
- (5) 円形断面橋脚模型の正負交番載荷試験の結果、より高い緊張力で橋脚付け根部を巻き締めすることで、高じん性が可能なことを確認した。
- (6) 正方形断面橋脚模型の正負交番載荷試験の結果、PC 鋼材で橋脚付け根部を巻き締めすることで、帯鉄筋の配筋合理化が可能になると考えられる。

PC 鋼材を巻き締めする高じん性化技術が、橋脚の柱の塑性ヒンジ領域における配筋の合理化に対し有効な手段であることが分かった。この技術の応用として以下のようなことを提案している。

橋脚の付け根の局部だけを巻き締めすることで、高じん性化が可能であり、この部分を図-6 のようにプレキャスト化してプレストレスを導入する工法。図-6 では、橋脚付け根部を緩いテーパをつけて構築し、筒状のプレキャスト部材で巻き、これを押し下げること、締め付ける仕組みである。

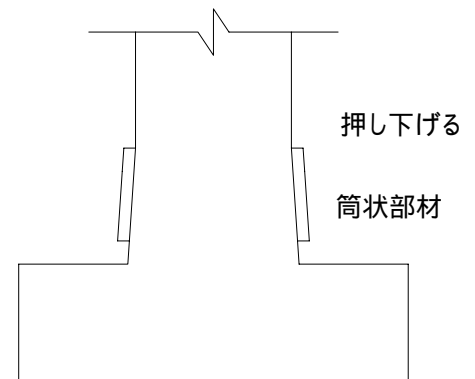


図-6 プレストレス導入方法

謝辞

本稿で紹介した実験は、独立行政法人土木研究所、土木研究センター、前田建設工業、戸田建設、三井住友建設、ピーエス三菱、東急建設が参加した「高じん性コンクリート構造の配筋合理化技術に関する共同研究(平成13年9月～平成16年3月)」の中で実施したものである。特に、三井住友建設と当社は、共に「PC鋼材で橋脚付け根を巻き締めする高じん性化技術の開発」を課題としており、供試体の製作、実験の実施、結果の検討、投稿等を協力して行っている。ここに、関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 張 建東, 森 拓也: PC鋼材を帯鉄筋に用いた円柱コンクリートの応力-ひずみ関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2, 1997
- 2) 張 建東, 森 拓也, 川島一彦: PC鋼材で横拘束した円柱橋脚の耐震補強に関する実験的研究, 第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 1998
- 3) 道路橋示方書・同解説 耐震設計編: (社)日本道路橋会, 平成14年3月
- 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) 鈴木宣政, 久保明英, 中井裕司, 浅井 洋: PC鋼材を拘束筋としたコンクリートの応力-ひずみ関係, 土木学会第7回地震時保有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, pp.87-92, 2004.1
- 6) 中井裕司, 浅井 洋, 久保明英, 鈴木宣政: PC鋼材を拘束筋としたコンクリートの橋脚の変形性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, 2004