

論文 低プレストレスを導入したRC橋脚モデルの静的および動的挙動に関する実験的研究

岡本 恒和^{*1}・秋山 芳幸^{*2}・平澤 征夫^{*3}

要旨：本研究は、低プレストレスを導入した鉄筋コンクリート橋脚の小型モデルについて静的正負交番繰返し載荷実験および動的水平加振実験を行い、耐震性能向上の効果について検証することを目的とした実験的研究である。実験の結果、低いプレストレスを導入した（以下PCと略称）供試体は鉄筋コンクリート（以下RCと略称）供試体に比べて最大耐力が大きくなること、残留変位を抑えるとともに残留変位の発生を遅らせることができること等から、耐震性能を向上させる効果があること、さらに少量のプレストレスを導入することによって横拘束鉄筋量を少なくできることを明らかにした。

キーワード：橋脚柱、低プレストレス、静的耐力、動的耐力、横拘束鉄筋

1. はじめに

PC橋脚は優れた構造特性を有しているが、その多くは高橋脚を対象として施工されてきた。しかし、高橋脚が採用される橋梁は大規模で全体的にコストが高く、社会資本整備コストの縮減が課題である昨今、小規模な橋梁形式へと転換しつつある。一方、橋脚柱は地震時におけるエネルギー吸収能を確保するため横拘束鉄筋が密に配置されている。この結果、施工現場では鉄筋間隔が狭い中での鉄筋組立てとなり、施工性の低下が大きな問題となっている。

このような社会的要請から本研究は、実用性に優れた橋脚構造の提案を目指し、低プレストレスを導入したRC橋脚モデルを用いて静的および動的載荷試験を行い、プレストレス量および横拘束鉄筋量が柱の耐力、変形性能に及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的とした。実験は、RC橋脚モデルを作成し、油圧アクチュエータ試験装置による正負交番繰返し載荷による静的実験、また兵庫県南部地震加速度の波形を入力波とした振動台を用いた水平一軸加振および水平・鉛直二軸加振の二方法による動的実験を行っている。

2. 実験概要

2.1 供試体の形状・寸法および種類

供試体の形状・寸法および配筋を図-1に示す。試験区間は柱基部から錘の重心位置までの距離627.5mm（細長比36）とした。軸方向鉄筋はD10(SD345)を4本、帯鉄筋は4(SR495)を用い、PC供試体は部材断面中央にスパイラルシース14を用いてPC鋼棒(A種2号 9.2mm:アンボンド)を配した。(RC供試体はシースの設置なし)

供試体は、拘束鉄筋間隔が84mm(拘束鉄筋比1.2%)と

126mm(同0.8%)の2種類。また、コンクリート断面にプレストレスを1MPaまたは2MPa導入した供試体、プレストレスを導入せずPC鋼棒を配置した供試体、およびRC供試体の計4種類の合計8種類について実験を行った。表-1に実験種類、供試体名称および供試体コンクリートの圧縮強度、等を示す。供試体名称は最初の2文字が載荷方法、次の2文字はRC,PCの区別、次の2文字はプレストレス量、最後の2文字は拘束鉄筋比を示している。なお、表-1中、コンクリートの平均圧縮強度で最大10MPa、平均引張強度で最大0.6MPaの差があるが、予備試験の結果より曲げ破壊型であることを確認しており、耐力は鉄筋の強度に依存することから、コンクリートの強度補正は行わなかった。また拘束鉄筋比は、仮想橋脚の設計結果に基づいて拘束鉄筋量を設定した。

供試体へのプレストレスの導入は、コンクリートの乾燥収縮、クリープの影響を避けるため、各実験の直前に行った。

導入方法は鋼棒の両端のナットをレンチで締め付け、PC鋼棒のひずみ量および供試体側面に貼付したコンクリートゲージにより、プレストレスの導入量を確認した。

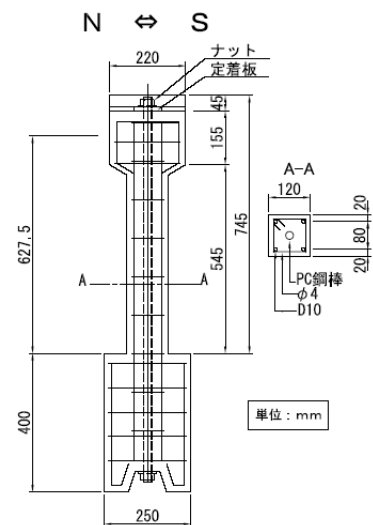


図-1 供試体の形状寸法

*1 匠技術(株) 技師長 (正会員)

*2 協和設計(株) 名古屋支店設計部構造G (正会員)

*3 中部大学 工学部都市建設工学科教授 工博 (正会員)

表-1 実験種類・供試体名称・供試体コンクリート強度

プレストレス導入量 (Mpa)	PC鋼棒	拘束鉄筋比 (%)	静的実験			動的実験								
			正負交番繰返し載荷			水平一軸加振			水平・鉛直二軸加振					
			供試体名称	コンクリート平均強度(MPa)		供試体数	供試体名称	コンクリート平均強度(MPa)		供試体数	供試体名称	コンクリート平均強度(MPa)		供試体数
	圧縮	引張	(体)		圧縮	引張	(体)		圧縮	引張	(体)			
0	-	0.8	SR-RC0008	33.7	3.0	2	DH-RC0008	37.2	3.0	2	DHV-RC0008	40.1	3.2	2
0	-	1.2	SR-RC0012	33.7	3.0	2	DH-RC0012	37.2	3.0	2	DHV-RC0012	40.1	3.2	2
0	○	0.8	SR-PC0008	42.2	3.3	2	DH-PC0008	32.8	2.8	2	DHV-PC0008	35.3	3.3	2
0	○	1.2	SR-PC0012	42.2	3.3	2	DH-PC0012	32.8	2.8	2	DHV-PC0012	35.3	3.3	2
1	○	0.8	SR-PC0108	39.5	3.4	2	DH-PC0108	38.8	2.8	2	DHV-PC0108	39.1	3.1	2
1	○	1.2	SR-PC0112	39.5	3.4	2	DH-PC0112	38.8	2.8	2	DHV-PC0112	39.1	3.1	2
2	○	0.8	SR-PC0208	44.5	3.4	2	DH-PC0208	31.5	2.7	2	DHV-PC0208	39.2	3.4	2
2	○	1.2	SR-PC0212	44.5	3.4	2	DH-PC0212	31.5	2.7	2	DHV-PC0212	39.2	3.4	2

注) 拘束鉄筋比: $s = 4A_h / s_d^{(1)}$

PC 鋼棒のプレストレス導入時の導入ひずみは、1MPa の場合 1116 μ 、2MPa の場合で 2232 μ である。

なお、供試体の大きさによる寸法効果については、本実験では曲げ破壊型の破壊であることから、圧縮強度、鉄筋比、ヤング係数等の力学的性質の影響は小さいと推測されるが、骨材の粒径、鉄筋の径・配置、PC鋼材等の影響は考慮できていないため、供試体の終局変位が大きく現れている可能性が考えられる²⁾。

2.2 実験方法

(1) 静的実験方法

静的実験に用いた油圧アクチュエータ装置、供試体および機器の設置状況を図-2 に示す。供試体の頂部には仮想上部工として錘を取り付けた。正負交番繰返し載荷実験は大変位計より変位を求めて、その変位が (0, ± 2.5 , ± 5.0 , ± 7.5 , ± 10 , ± 20 , ± 30 , ± 40 , ± 50 mm) の各段階で変位制御を行い静的耐力、変位等を測定した。

(2) 動的実験方法

実験は動的水平一軸加振実験および動的水平・鉛直二軸加振実験とし、加振方法は兵庫県南部地震の神戸海洋気象台で観測された加速度波形の時間軸を 1/4 に圧縮し、その地震加速度を 1/10, 2/10, 3/10...20/10 倍した加速度を加振倍率として段階的に上昇させ、供試体が破壊するまで試験を行った。図-3 に振動台への入力加速度波形 (N-S 方向: 最大-818gal および U-D 方向: 最大 332gal) を示す。図-4 に振動台試験装置と供試体および計測機器の設置状況を示す。なお、モデル実験を行うに際し、「防災科学技術研究所・橋梁耐震実験研究報告書 (H19.3)」を参考に表-2 に示す実験縮尺率を適用した³⁾。

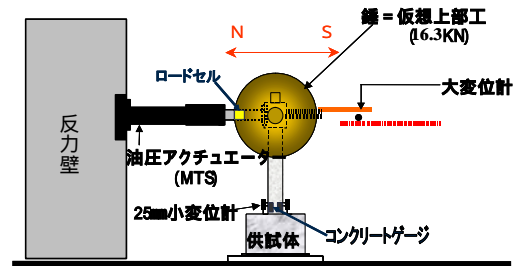


図-2 油圧アクチュエータ試験装置

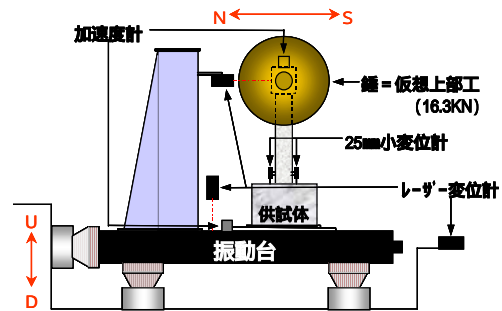


図-4 振動台試験装置

表-2 実験縮尺率

物理量	スケールファクター	目標縮尺率
長さ (柱幅) (L)	S	16
時間 (T)	\sqrt{S}	4
質量 (M)	S^2	256
加速度 (LT^{-2})	1	1
速度 (LT^{-1})	\sqrt{S}	4
変位 (L)	S	16
弾性係数・応力 ($ML^{-1}T^{-2}$)	1	1
ひずみ (ϵ)	1	1
荷重 (MLT^{-2})	S^2	256

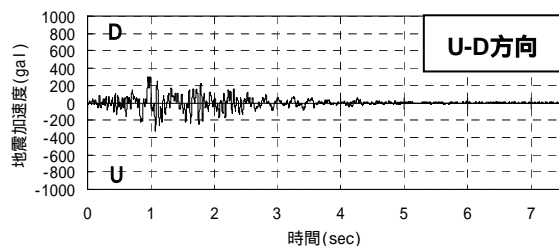
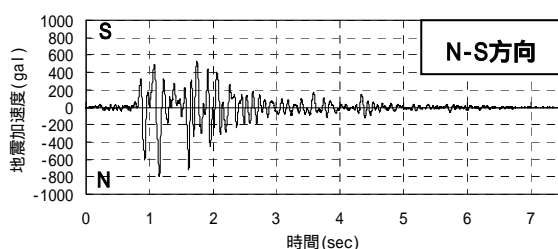


図-3 入力地震波形

3. 静的実験結果および考察

静的実験により得られた各供試体の荷重～変位履歴曲線を図-5に示し、荷重～変位履歴曲線の荷重と変位の最大値と最小値の絶対値を平均して表示した平均荷重～平均変位曲線を図-6(a),(b)に示す。また、各供試体の鉄筋降伏時および最大荷重時の荷重、変位、PC鋼棒の引張ひずみ量を表-3に示す。

図-5から、プレストレスを2MPa導入した供試体は各供試体に比べて最も最大荷重が大きくなり、特に、プレストレスを導入した供試体は少ない変位段階での荷重が大きく、残留変位もプレストレスを導入した供試体はRC供試体に比べて小さくなった。なお、一部の供試体において、履歴曲線の各頂点で荷重の低下と変位の増加が生じているが、これは実験時の装置の操作ミスと推測される。

図-6より、拘束鉄筋比が0.8%でプレストレス導入量2MPaのPC02供試体は、1.2%の拘束鉄筋比のRC供試体よりも最大荷重は大きく、同一変位に対する荷重も大きくなっている。このことより、拘束鉄筋比が0.8%の供試体に2MPa程度のプレストレスを導入することによって、拘束鉄筋比が1.2%の場合と同等以上の静的耐力を確保することができることが明らかとなった。

表-3より、鉄筋降伏時、最大荷重時においては、拘束鉄筋比が0.8%と1.2%のグループともに2MPaのプレストレスを導入したPC02供試体の最大荷重が大きくなっている。なお、各供試体とも破壊時ではPC鋼棒は降伏に至っていないため、耐力はコンクリートの

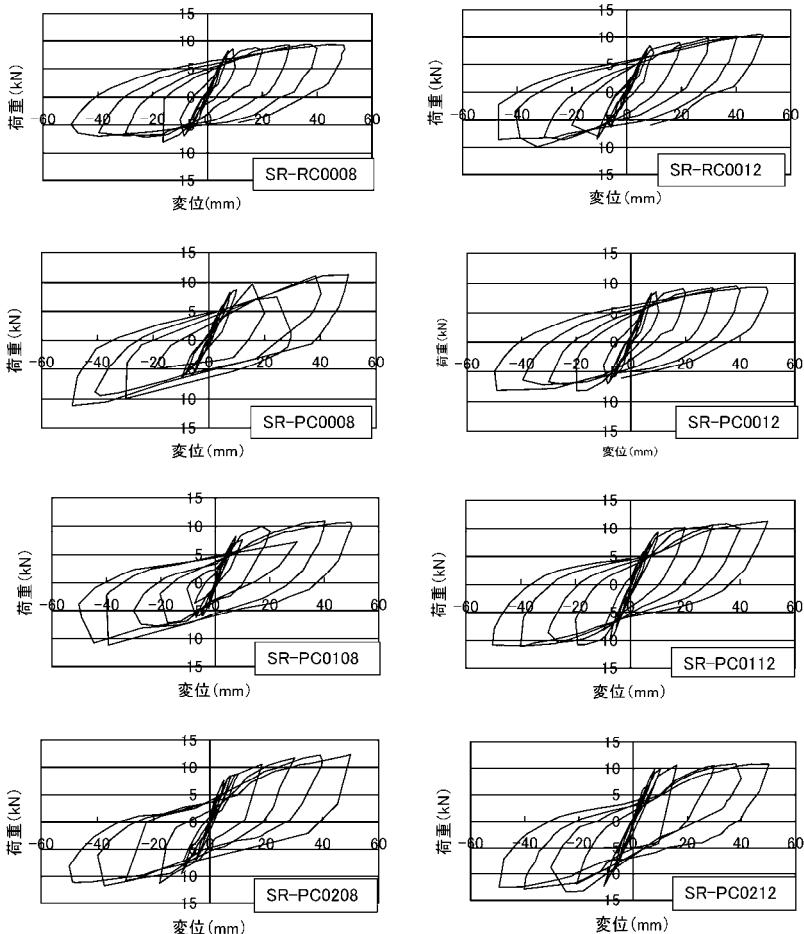
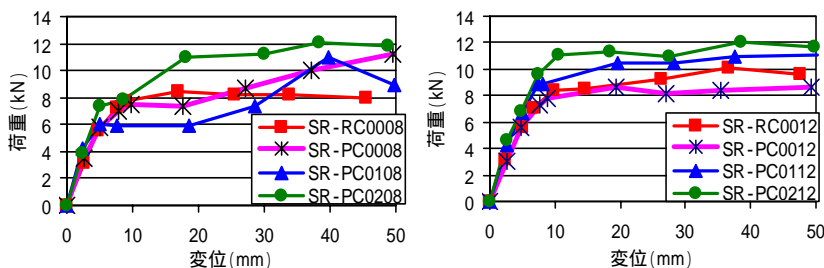


図-5 荷重～変位履歴曲線



(a) 横拘束鉄筋比0.8%

(b) 横拘束鉄筋比1.2%

図-6 平均荷重～平均変位曲線

表-3 静的実験結果

設計	水平耐力 (kN)	鉄筋降伏時			最大荷重時		
		荷重 (kN)	変位 (mm)	PC鋼棒ひずみ(μ)	荷重 (kN)	変位 (mm)	PC鋼棒ひずみ(μ)
RC0008	7.27	7.27	7.6	—	7.82	29.9	—
PC0008	7.27	7.78	10.3	77	9.57	49.8	1866
PC0108	8.03	6.23	10.1	1513	8.02	30.0	2476
PC0208	8.71	8.73	10.0	2442	11.89	30.2	3361
RC0012	7.27	6.66	5.2	—	8.23	46.7	—
PC0012	7.27	7.50	9.8	86	10.83	50.8	1966
PC0112	8.03	8.23	10.0	1922	10.58	40.1	2769
PC0212	8.71	11.10	10.5	2601	11.67	49.8	4047

注)PC鋼棒のプレストレス導入時のひずみは、1MPa:1116μ、2MPa:2232μ

圧縮強度の影響を受けるが、コンクリートの圧縮強度はRC供試体で33.7MPa、PC供試体は39.5MPaであり、その差5.8MPaであることから、終局時耐力に与える影響は小さい。

また、PC鋼棒の引張ひずみについては、各供試体とも最大荷重時にはプレストレス導入時に比べて大きく増加しており、PC鋼棒が引張材として寄与していることを示している。ただし、プレストレスを導入していないPC00供試体は、鉄筋降伏時におけるPC鋼棒の引張ひずみがほとんど生じておらず、PC鋼棒が鉄筋降伏までは部材剛性に影響していないことが分かる。

4. 動的実験結果および考察

4.1 応答荷重～応答変位関係

動的実験によって得られた各供試体の最大応答荷重～最大応答変位のプラス方向(N側)とマイナス方向(S側)の荷重と変位の絶対値を平均した平均荷重～平均変位曲線について、水平一軸加振実験で得られた結果を図-7(a),(b)に示し、水平・鉛直二軸加振実験で得られた結果を図-8(a),(b)に示す。また、各実験で得られた各供試体の鉄筋降伏時および最大荷重時の荷重、変位、PC鋼棒の引張りひずみ量を表-4に示す。

図-7(a),(b),図-8(a),(b)および表-4より、水平一軸加振実験および水平・鉛直二軸加振実験は、横拘束鉄筋比

0.8%、1.2%の供試体ともにプレストレス量が2MPaの供試体の平均応答荷重が特に大きくなっており、その他の供試体の平均応答荷重はほとんど変わらない結果となった。このことから、2MPaのプレストレスの導入によって、拘束鉄筋比に拘わらず動的耐力が向上することが明らかとなった。

表-4より鉄筋降伏時におけるPC供試体のPC鋼棒のひずみは、動的一軸実験、動的二軸実験ともに引張りひずみの増加は小さく、鉄筋降伏時までは、PC鋼棒が部材剛性に影響していないことが分かる。また、各供試体とも最大荷重時におけるPC鋼棒のひずみは、動的一軸実験では初期値から若干の増加が見られるが、動的二軸実験では大きく増加している。これは、鉛直振動によって部材のひび割れ進行が遅れたため、PC鋼棒の引張りひずみが増加したものと考えられる⁴⁾。

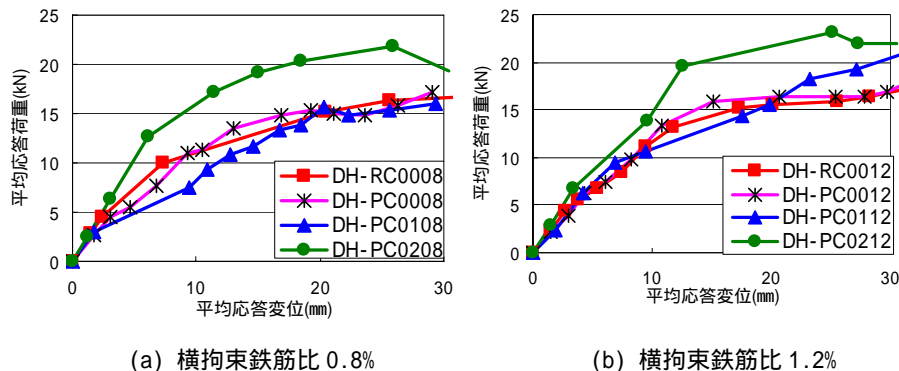


図-7 平均荷重～平均応答変位曲線（水平一軸加振実験）

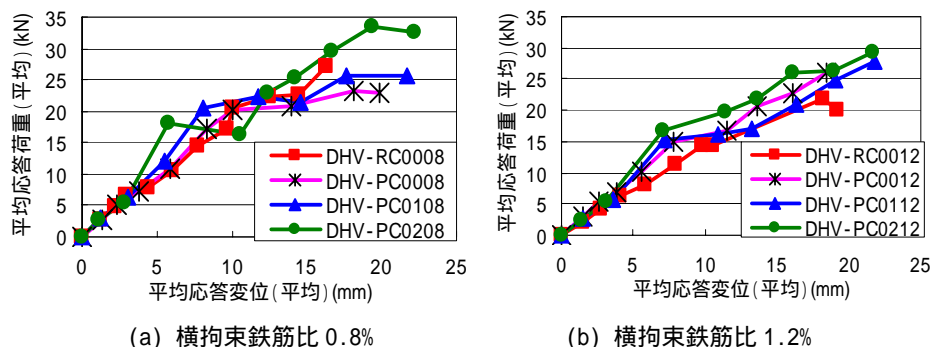


図-8 平均荷重～平均応答変位曲線（水平・鉛直二軸加振実験）

4.2 PC鋼棒の残留ひずみ～加振倍率関係

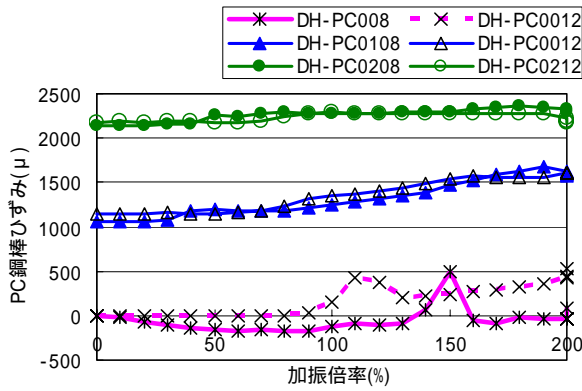
水平一軸加振実験および水平・鉛直二軸加振実験で得られたPC供試体のPC鋼棒の残留ひずみ～加振倍率曲線を、それぞれ図-9(a),(b)に示す。

図-9(a),(b)より、水平一軸加振実験では加振によるPC鋼棒の残留ひずみに大きな増加は見られないが、水平・鉛直二軸加振実験では加振に伴い、残留ひずみが大きく増加している。これは、「4.1 応答荷重～応答変位関係」で述べたように、水平振動に鉛直振動が加わることによって部材のひび割れが内部で斜め方向に分散し、コンクリート表面の見掛けの損傷が少なくなったため、部材の破壊点の近くまでPC鋼棒の引張りひずみを増加させることができたものと考えられる。

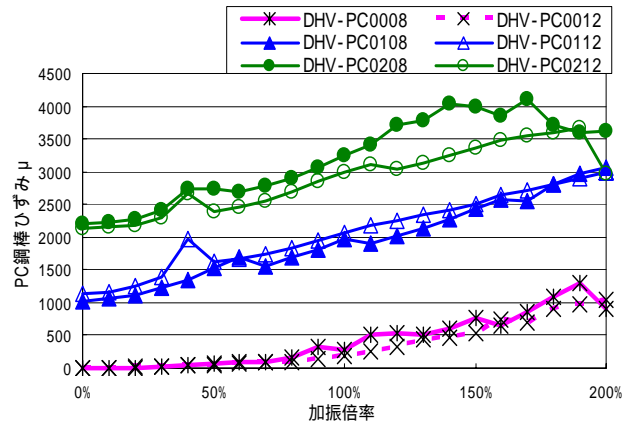
表-4 動的実験結果

設計水平耐力 (kN)	水平一軸加振実験 (DH)							水平・鉛直二軸加振実験 (DHV)					
	鉄筋降伏時			最大荷重時				鉄筋降伏時			最大荷重時		
	荷重 (kN)	変位 (mm)	PC鋼棒ひずみ: μ	荷重 (kN)	変位 (mm)	PC鋼棒ひずみ: μ	荷重 (kN)	変位 (mm)	PC鋼棒ひずみ: μ	荷重 (kN)	変位 (mm)	PC鋼棒ひずみ: μ	
RC0008	7.27	10.1	7.1	—	16.5	25.0	—	15.1	8.9	—	27.5	15.8	—
PC0008	7.27	9.6	8.8	170	15.8	26.0	477	16.5	7.6	99	23.8	17.3	914
PC0108	8.03	6.8	9.1	1190	15.2	20.5	1672	20.4	9.2	1692	25.1	16.9	2810
PC0208	8.71	14.9	10.3	2285	22.0	25.5	2351	16.4	9.8	2736	34.2	18.1	3712
RC0012	7.27	9.2	7.3	—	16.0	25.5	—	12.1	8.2	—	21.4	16.7	—
PC0012	7.27	9.4	8.6	4	16.3	25.2	525	15.1	9.1	67	25.4	17.1	965
PC0112	8.03	9.9	7.7	1152	18.4	23.6	1616	15.1	8.7	2178	27.5	22.3	2898
PC0212	8.71	11.9	8.2	2186	24.1	25.0	2272	17.6	10.0	2544	29.7	22.1	3675

注)PC鋼棒のプレストレス導入時のひずみは、1MPa: 1116 μ 、2MPa: 2232 μ



(a) 水平一軸加振実験



(b) 水平・鉛直二軸加振実験

図-9 PC 鋼棒の残留ひずみ～加振倍率曲線

4.3 柱頂部の残留変位

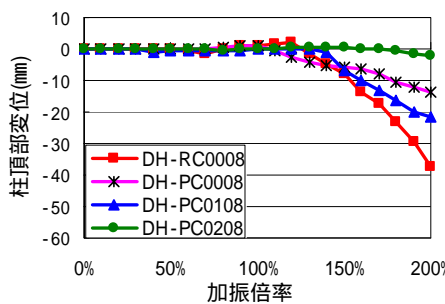
～加振倍率関係

供試体の柱頂部の錘の重心位置(柱基部からの距離 627.5 mm)における残留変位～加振倍率曲線を横拘束鉄筋比 0.8%と 1.2%のグループ別に、水平一軸加振実験で得られた結果を図-10(a), (b)に示し、水平・鉛直二軸加振実験で得られた結果を図-11(a), (b)にそれぞれ示す。

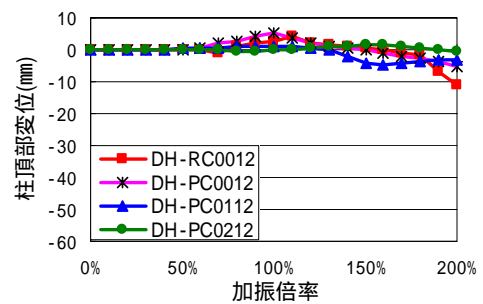
図-10, 図-11 より、水平一軸加振実験、水平・鉛直二軸加振実験とも、プレストレスを導入した供試体(PC01, PC02)はプレストレスを導入して

いない供試体(RC00, PC00)に比べ、柱頂部の残留変位が抑えられ、柱頂部の残留変位の発生を遅らせていることが分かる。

また、水平一軸加振実験および水平・鉛直二軸加振実験とも、拘束鉄筋比を 1.2%とした供試体について、プレストレス導入の有無による残留変位に与える効果を比較すると、プレストレスを導入した供試体は柱頂部の残留変位の発生は遅らせているものの、柱頂部の残留変位量にはわずかの違いしか認められないことが明らかとなった。このことから、拘束鉄筋比が大きい場合、プレストレスの導入量が 1～2MPa 程度では残留変位に与える影響は少ないが、拘束鉄筋比が小さい場合(0.8%)は、プレストレスの導入量が 1～2MPa 程度でも残留変位の低減に大きく寄与しており、特に 2MPa の場合には残留

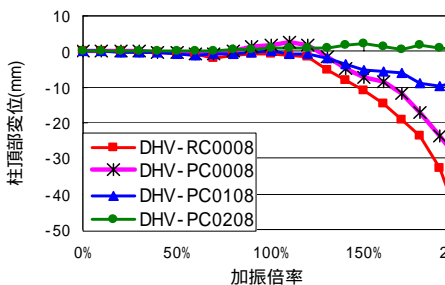


(a) 横拘束鉄筋比 0.8%

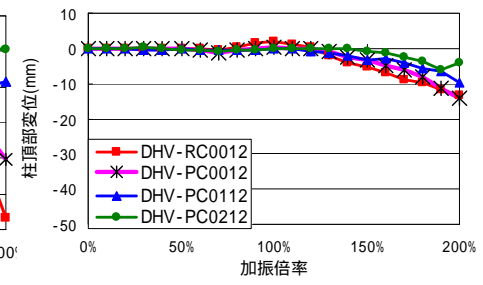


(b) 横拘束鉄筋比 1.2%

図-10 柱頂部の残留変位～加振倍率曲線(水平一軸加振実験)



(a) 横拘束鉄筋比 0.8%

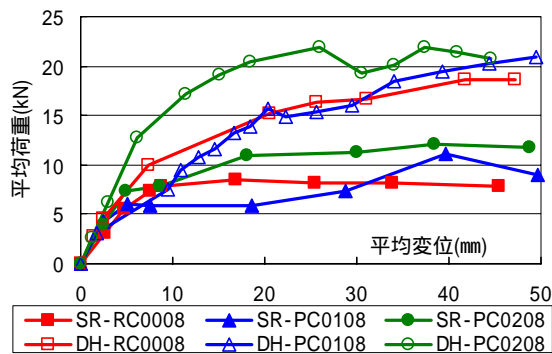


(b) 横拘束鉄筋比 1.2%

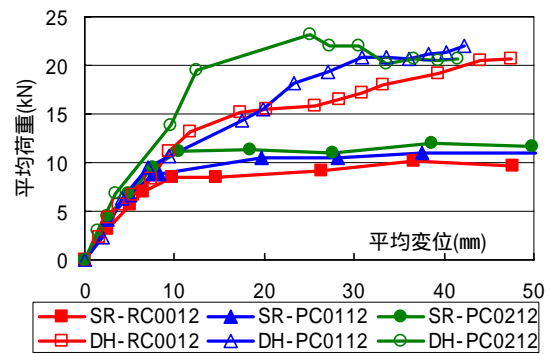
図-11 柱頂部の残留変位～加振倍率曲線(水平・鉛直二軸加振実験)

変位を十分小さく抑えることが可能であることが明らかとなった。ただし、拘束鉄筋比に着目して比較すると、水平一軸加振実験、水平・鉛直二軸加振実験ともに拘束鉄筋比 1.2%の供試体が 0.8%の供試体に比べて残留変位が小さくなっている。これは、拘束鉄筋比が大きいほど圧縮破壊域の範囲の進展が遅れることが原因と考えられる。さらに、水平一軸実験では、拘束鉄筋比 0.8%の各供試体はプレストレスを 2MPa 導入した PC02 供試体を除いて加振倍率が 130%で圧縮破壊を生じており、1MPa のプレストレスの導入の効果よりも拘束鉄筋比の影響が強く現れている。これらのことから、拘束鉄筋比が 0.8%でもプレストレスを 2MPa 程度導入することによって、1.2%の拘束鉄筋比を持つ RC 供試体と同等以上の残留変位の低減に効果があることが明らかとなった。

5. 静的実験と動的实验の比較



(a) 横拘束鉄筋比 0.8%



(b) 横拘束鉄筋比 1.2%

図-12 平均荷重～平均変位曲線（静的および動的の一軸加振実験）

図-12(a), (b)に静的正負交番繰返し荷重実験および動的水平一軸加振実験による平均荷重～平均変位曲線を横拘束鉄筋比 0.8%と 1.2%のグループ別に示す。

一般に動的实验と静的实验を比較した場合、動的实验による供試体は最大荷重が大きくなるのが明らかとなっている⁵⁾。本実験においても、図-13(a), (b)に示したように、動的实验の方が大きく現れた。したがって、プレストレス導入による耐力上昇に与える効果は荷重方法の違いにも現れていることが分かる。

6. まとめ

本研究では、低プレストレスが RC 橋脚モデルの耐力および頂部残留変位に与える影響を明らかにすることを目的として、静的および動的实验を行った。

本実験の範囲内で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 静的実験による静的耐力と動的实验による動的实验の耐力に関して、RC 柱断面コンクリートに対して 1MPa または 2MPa の低いプレストレスを導入し、ともに横拘束鉄筋比 0.8%、1.2%を有する 2 種類の柱について、それぞれ実験を行った。その結果、横拘束鉄筋比の違いが耐力向上に及ぼす影響は少ないが、プレストレスによる柱部材の耐力向上が認められた。
- (2) 静的実験および動的实验結果より、それぞれ最大耐力の大きさは異なるが、横拘束鉄筋比 1.2%の RC 柱と横拘束鉄筋比 0.8%でプレストレスを 2MPa 導入した PC 柱を比較した結果、2MPa の低い導入プレストレス量でも同等以上の静的および動的实验の耐力を確保できることが明らかとなった。この結果より、本研究の目的の一つに挙げたように、施工性向上を目指す上で、「横拘束鉄筋比 1.2%を有する RC 柱部材の拘束鉄筋比を 0.8%に抑えたい場合には横拘束鉄筋量を減じる代替として、軸方向プレストレスをコンクリート断面に 2MPa 程度導入することにより、ほぼ同程度の最大耐

力を確保することが可能である」ことが確かめられた。

(3) 水平一軸加振実験および水平・鉛直二軸加振実験より、柱頂部の残留変位～加振倍率曲線を比較すると、いずれの加振方法でも横拘束鉄筋比が 1.2%の場合は RC 柱、PC 柱とも残留変位を抑える効果大きい。一方、拘束鉄筋比が 0.8%の場合、RC 柱は残留変位が大きくなるが、プレストレスの導入により横拘束鉄筋比に関係なく柱頂部の残留変位が抑えられていることが分かる。つまり、横拘束鉄筋比を増やす代わりにプレストレスを 2MPa 程度導入することによって残留変位が十分小さく抑えられることが明らかとなった。

(4) 上記の結果を踏まえ、低プレストレスを導入した RC 柱について実用性を考慮した場合、横拘束鉄筋比を増やす代わりに柱断面に対して 2MPa 程度の低いプレストレスを導入することにより、最大耐力を確保しつつ柱頂部の残留変位を抑える効果があり、横拘束鉄筋の組立てやコンクリート打設の際の施工性の改善に寄与することができると思われる。

参考文献

- 1) 「道路橋示方書・同解説 耐震設計編」(社)日本道路協会, 2002.3
- 2) 「コンクリート構造物の構造実験評価研究委員会報告書」(社)日本コンクリート工学協会, 2005
- 3) 「平成 18 年度 実大三次元震動破壊実験施設を活用した耐震工学研究・橋梁耐震実験研究報告書」防災科学技術研究所, 2007.3
- 4) 河井康孝, 平澤征夫, 他: 水平および上下動地震波形を用いた RC 橋脚モデルの動的降伏・破壊実験, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, pp.736-737, 2001.10
- 5) 平澤征夫, 水野英二, 他: 内部欠陥を有する RC 柱部材の終局挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.271-276, 2005