

京都大学工学部 学生員 松本 利彦 正員 井上 晋 正員 小林 和夫
福山大学工学部 正員 岡田 清

1.はじめに ここでは、使用状態全荷重の組合せ作用時に、ある程度の曲げ引張ひびわれの発生を許容するパーシャルプレストレストコンクリート（以下PPCと略記）構造を対象とするが、これはフルプレストレスト構造における施工や部材特性上の問題、あるいは、RC構造におけるひびわれ制御の問題等を改善するものとして最近とくに注目されている。しかし、我が国のような地震国において、PPC構造を土木構造物に積極的に採用していくには、その塑性変形特性を明確にしておく必要がある。本研究は、種々のプレストレッシング係数を有するPPCはりに対して、静的な一方向載荷試験（Aシリーズ）および正負交番載荷試験（Bシリーズ）を実施して、その耐荷性状、塑性変形特性を検討し、耐震設計上の基礎資料を得ることを目的としたものである。

2. 試驗概要

1) 供試体; 供試はりの形状・寸法を図1に示す。

コンクリートの設計基準強度は 400 kgf/cm^2 とし、プレストレス係
数 $\lambda = (A_p \cdot f_{py}) / (A_s \cdot f_{sy} + A_p \cdot f_{py})$; $Z \phi 6$ の組立筋も考慮)の値として、
0 (RC), 0.44 (PPC1), 0.78 (PPC2), 0.86 (PC) の4種類を選定した。な

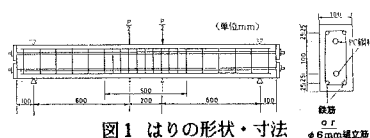


図1 はりの形状・寸法

お、これらの供試体は静的最大曲げ耐力がほぼ等しくなるように設計した。また、Bシリーズでは曲げ拘束筋のじん性改善の効果を検討するため、同一の入値に対してスパン中央50cm区間にφ6mmの閉合矩形帯鉄筋をd/4ピッチで配筋したRタイプと、配置しないNタイプの2種類を表2を作製した。供試体はりはいずれも、土木学会PC標準示方書による算定値よりやや安全側となるよう、φ6mmの矩形スターラップを10cmピッチで配置しせん断補強した。A・Bシリーズの供試体種類と試験結果を表1・2に示す。

供試体	λ	β	断面形状 B ₀ (cm)	A ₀	母材 強度 (N/t ₀)	ひびわれ 発生強度 (N/t ₀)	最大耐力 (N/t ₀) 試験種別: 引張	45° 引張耐力
RC-A-8	0.184	∞	2016	—	2.25	9.74	7.64	0.53
RC-A-9	0.440	0.231	2012	9.9-2	4.4	4.0	9.71	6.84
PPRC-A-8	0.780	0.252	2001	10.13	8.8	6.68	9.47	7.90
RC-A-10	0.376	0.276	2008	10.13	1.3-2	5.52	9.01	2.43

表1 Aシリーズの供試体とその耐荷特性

2) 載荷方法: 図2に示すように、Aシリーズにおいてはスパン中央部のコンクリートが圧潰するまでは、コンクリート上縁ひずみ(ε_c)の制御により、それ以後は、RCはりの降伏たわみ($\delta_y=5\text{mm}$)の整数倍で各1回の完全除荷-再載荷を繰返すたわみ制御下で載荷試験を行った。一オ、Bシリーズでは、スパン中央たわみが降伏たわみ($\delta_y=5\text{mm}$)の整数倍となる変位振幅レベルで各1回ずつの除荷-再載荷を行う漸増変位型の正負交番載荷を実施した。

测试块	入	σ^2	等效噪声功率 A _{eq} (dBm)	A ₀	入 的归一化 功率谱密度 ($\text{Wg}^{-1}\text{Hz}^{-1}$)	等效噪声功率谱密度 (100g)		中心频率处功率谱密度	
						入	等效噪声功率谱密度	入	中心频率处功率谱密度
PC-0-1	0	0.180	2018	—	—	8.96	8.61	7.87	5.78
PC-0-2	0	0.180	2018	—	—	8.96	8.61	7.87	5.78
PC-1-0	0.149	0.221	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-1-1	0.149	0.221	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-2-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-2-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-3-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-3-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-4-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-4-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-5-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-5-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-6-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-6-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-7-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-7-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-8-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-8-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-9-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-9-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-10-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-10-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-11-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-11-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-12-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-12-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-13-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-13-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-14-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-14-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-15-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-15-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-16-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-16-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-17-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-17-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-18-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-18-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-19-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-19-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-20-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-20-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-21-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-21-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-22-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-22-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-23-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-23-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-24-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-24-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-25-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-25-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-26-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-26-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-27-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-27-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-28-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-28-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-29-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-29-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-30-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-30-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-31-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-31-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-32-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-32-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-33-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-33-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-34-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-34-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-35-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-35-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-36-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-36-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-37-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-37-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-38-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-38-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-39-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-39-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-40-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-40-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-41-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-41-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-42-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-42-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-43-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-43-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-44-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-44-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-45-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-45-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-46-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-46-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-47-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-47-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-48-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-48-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-49-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-49-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-50-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-50-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-51-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-51-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-52-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-52-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-53-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-53-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-54-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-54-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-55-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-55-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-56-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-56-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-57-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-57-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-58-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-58-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-59-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-59-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-60-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-60-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-61-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-61-1	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8.13	7.92
PC-62-0	0.178	0.284	2018	2018	9.1	10.27	9.65	8	

表2 Bシリーズの供試体とその耐荷特性

18) じん状態の >3.33 は、それ以上の値を示すものである。

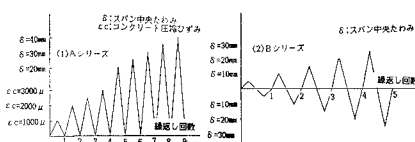


图2 载荷方法

3. 試験結果および考察 1) 曲げひびわれ・最大耐力：表1より曲げひびわれ発生荷重は入りの増加とともに増大し、プレストレス効果が顕著にうかがえる。また、最大耐力の実験値は、いずれも通常の終局曲げ耐力式による計算値を下回ることなく、正負交替荷重下でも安全側に算定できることが示される。他のはりはずべて曲げ破壊したのに対し、BシリーズのR₁はりのみは、N・R両タイプともに著しいX字型せん断ひびわれを伴うせん断破壊を呈し、最大耐力はAシリーズのものに較べて若干小さい。

2) 履歴ループ性状; A・B各シリーズの荷重-たわみ(P- δ)

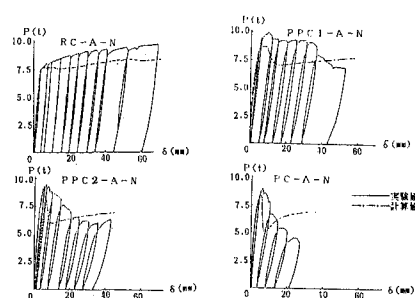


図3 P- δ 履歴ループ (Aシリーズ)

履歴ループを、それぞれ図3、図4に示す。なお、図3にはParkらの研究を参考にした計算値、また、図4にはAシリーズのP- δ 包絡線（実測）および同様の計算値を付記した。A・BシリーズともNタイプの場合、 λ の増加に伴いフォーリングブランチ領域での耐力低下が顕著となり、じん性率が減する。しかし、表3および図4より、PPCおよびPCのじん性は曲げ拘束筋の配置により大幅に改善されることが明瞭にうかがえる。Aシリーズの同一はりの包絡線とBシリーズの結果を比較すると、Bシリーズでは耐力低下がAシリーズよりやや早期に現われ、正負交番荷重履歴の影響が認められる。BシリーズのRCはりでは、 $\delta=30\text{mm}$ 付近でX字型せん断ひびわれの発生によりピンチ効果を示すものの、それ以前の変位レベルでは急激な耐力低下を伴うことなく、紡錘型の安定したループを示している。一方、 λ の増加に伴ないループ形状が逆S字型に移行し、履歴ループの囲む面積、すなわち消散エネルギーの減少していく様子うかがえる。また、図5に曲げモーメント-曲率（M- ϕ ）関係の一例を、Parkらの提案を参考にして求めた計算値と併に示す。本計算では鉄筋のパウジンガー効果を考慮しなかつたが、 $\lambda \geq 0.44$ の場合には、実験値と計算値は比較的良好一致しており、このような方法でM- ϕ 関係を推定することが可能である。

3) 変形回復率：Aシリーズの変形回復率 α と部材角 θ の関係を図6に示す。これより、PPC1 ($\lambda=0.44$)でも最大耐力到達以前は90%近くの変形回復率を示し、プレストレスによる復元効果が明瞭に認められる。しかし、フォーリングブランチ領域に達すると、PCとPPCのいずれにおいても α 値が急激に低下し始め、 λ による差異は顕著でなくなる。

4) 等価粘性減衰定数：Bシリーズはりから求めた等価粘性減衰定数 h_{eq} と部材角 θ の関係を図7に示す。同図から、部材角 θ の増加に伴ない h_{eq} 値は増加するが、その増加率は比較的初期の段階 ($\theta < 0.15$) において大きいことが認められる。また、同一部材角で比較すると、RCはりの h_{eq} 値はPCおよびPPCに較べてかなり大きく、 λ による差異が顕著に認められる。さらに、Nタイプはりはフォーリングブランチ領域での耐力低下が著しく、 h_{eq} 値はRタイプと較べて比較的早期に増大する傾向が認められる。なお、RCはりではフォーリングブランチ領域でせん断破壊を呈したため、曲げ拘束筋の影響は認められなかった。

4. まとめ 曲げ拘束筋の配置により、

PPCはりのじん性、エネルギー消散能は大幅に改善される。また、本研究で採用した手法によりPPCはりの荷重-たわみ関係および曲げモーメント-曲率関係をほどよく推定することが可能である。

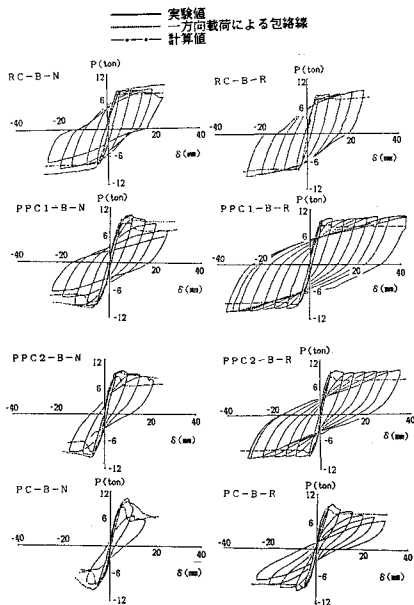


図4 P- δ 履歴ループ（Bシリーズ）

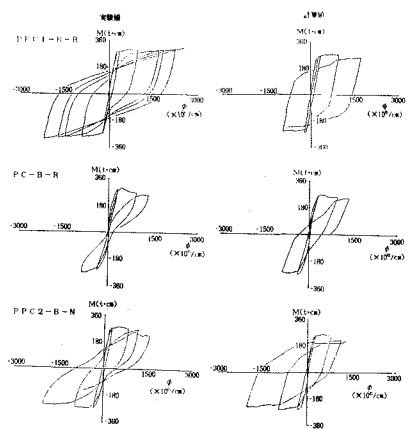


図5 M- ϕ 履歴ループ（Bシリーズ）

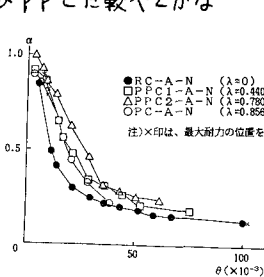


図6 λ が α に及ぼす影響

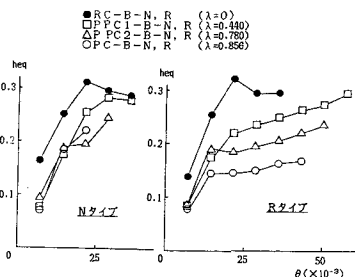


図7 h_{eq} と θ の関係