

# 論文 アフターボンド工法を用いた PRC 大梁の耐震特性に関する 実験的研究

新具誠次<sup>1</sup>・松崎育弘<sup>2</sup>・中野克彦<sup>3</sup>・蔵谷幸憲<sup>4</sup>

**要旨:** 本論文は、梁主筋の強度及び配置、プレストレス力を変動要因とした RC 梁部材、PRC 梁部材の曲げせん断実験を行い、各部材の破壊モード、復元力特性の把握を目的としたものである。尚、PRC 梁部材には、緊張後シーズ内に充填された樹脂が硬化することで付着が確保できるアフターボンド工法を用いた。その結果として、同一断面、同等の曲げ耐力を有する梁部材において、付着性状の差や、初期剛性、降伏時剛性を把握することで復元力特性を把握する一指標を示した。

**キーワード:** 復元力特性、付着、プレストレス、高強度鉄筋、アフターボンド工法

## 1. はじめに

近年、建物の高層化に伴い、高い曲げ耐力が要求されている。この要求を満たすためには、鉄筋量が増え配筋上困難になるといったことが生じる。このために、最近、高強度鉄筋が使用され始めている。しかし、高強度鉄筋を主筋に用いることで、新たな問題が生じてくる。それは、降伏強度が高いために保有水平耐力時の変形が大きくなり地震時には復元力特性の弾性範囲内で挙動しエネルギー吸収量が少なくなること、梁の断面形状を変えずにスパンを広げようとした場合の剛性確保が難しくなること、そしてせん断を受けた時に梁両端部の主筋応力差が大きくなり、付着割裂破壊を起こしやすくなること、などである。これらの解決策の一つとしてプレストレス鉄筋コンクリート(以下、PRC)構造化が挙げられる。プレストレスを導入することで、剛性をコントロールできる、曲げ降伏時の変形を小さくできる、さらに主筋の位置に PC 鋼材を配置し事前にプレストレスを導入することでせん断を受けた時に梁両端部の主筋応力差が少なくなり付着性状の改善ができること、な

どのメリットがある。筆者らは、文献<sup>1)</sup>において、アフターボンド工法を用いた梁は、グラウト工法による梁と同等の構造性能を有していることを明らかにし、報告している。本研究では付着のある PRC 構造の製作に、グラウト工法に比べ施工性の良いアフターボンド工法を用いた。本報は、60N/mm<sup>2</sup>級のコンクリートを用い、構造、主筋配筋、プレストレス力を変動要因とした、梁部材の構造性能把握を目的とした。また文献<sup>2)</sup>の実験結果を含め、工法、主筋配筋、プレストレス、コンクリート強度を変動要因として、PRC 構造や、鉄筋コンクリート(以下 RC)構造の復元力特性の把握を目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

表-1 に試験体一覧、図-1 に試験体形状、表-2 に使用材料特性を示す。試験体総数は 7 体である。共通要因は、断面  $b \times D=21\text{cm} \times 36\text{cm}$ 、せん断スパン  $a=72\text{cm}$  ( $a/D=2.0$ )、補強筋比  $p_w=0.95\%$  (KSS785,@5cm)、コンクリート設計基準強度  $F_c=60\text{N/mm}^2$  である。尚、PRC 試験体

\* 1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

\* 2 東京理科大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

\* 3 東京理科大学助手 工学部建築学科 (正会員)

\* 4 東京理科大学 工学部建築学科

表-1 試験体一覧

No	試験体名	構造	主筋配筋及び材質	プレストレス導入量				コンクリート			計算値			
				計画 Pe/Py %	有効プレストレス P <sub>11</sub> N/本	σ <sub>g</sub> N/mm <sup>2</sup>	η=P <sub>11</sub> /P	圧縮強度 σ <sub>B</sub> N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 E <sub>c</sub> ×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup>	割裂強度 σ <sub>t</sub> N/mm <sup>2</sup>	曲げ耐力 Q <sub>u</sub> kN	せん断耐力 Q <sub>su</sub> kN	付着応力度 τ <sub>f</sub> N/mm <sup>2</sup>	付着強度 τ <sub>bu</sub> N/mm <sup>2</sup>
1	RC-H1A-0	RC	4-D16(SD785)	---	---	---	---	51	3.21	2.2	244.3	478.3 (1.96)	5.40	4.23 (0.78)
2	RC-H2B-0		2+2-D16(SD785)	---	---	---	---	52	3.36	2.3	225.5	398.7 (1.77)	5.28	10.36 (1.96)
3	RC-L2C-0		4+4-D16(SD345)	---	---	---	---	53	3.51	2.5	241.0	401.4 (1.67)	2.82	4.31 (1.53)
4	PRC-L2D-0	PRC	2+2-D16(SD345) +1-15.2φ(SWPR7B)	0.0	9.3	0.25	1.06	56	3.60	2.8	215.0	410.2 (1.91)	2.82	10.79 (1.81)
5	PRC-L2D-4			0.4	91.2	2.41	0.98	58	3.61	2.8		412.5 (1.92)	2.82	10.89 (1.82)
6	PRC-L2D-8			0.8	180.3	4.77	0.97	58	3.61	2.8		412.5 (1.92)	2.82	10.89 (1.82)
7	PRC-H1E-8			0.8	179.7	4.75	0.96	59	3.62	2.8		224.5	500.9 (2.23)	5.40

Pe:計画プレストレス力(tf)  
Py:PC鋼材の降伏強度(tf)  
Pn:有効プレストレス(tf)  
P:導入プレストレス(tf)

σ<sub>g</sub>=n·Pn/(b·D)  
n:PC鋼材の本数  
b:梁幅(=21cm)  
D:梁せい(=36cm)

Q<sub>u</sub>:RC規準曲げ略算式で計算  
Q<sub>su</sub>:終局せん断耐力式A法で計算(弱性R=1/50radの時)(RC造の終局強度型設計指針)  
τ<sub>f</sub>:RC造の終局強度型設計指針より計算  
τ<sub>bu</sub>:梁上端筋として計算(RC造の終局強度型設計指針)

( )内は余裕度  
せん断耐力を曲げ耐力で除したものの  
付着強度を付着応力度で除したものの

は、PC 鋼材のプレストレスング後、エポキシ樹脂の硬化を促進するため約 60 度で 17 日間蒸気養生を行った。

変動要因は、以下の 3 要因設定した。

①構造：構造性能の違いを把握するために 2 水準設定した [RC 構造, PRC 構造]

②主筋配筋：高強度鉄筋を 1 列配筋した試験体, 2 段に分けて配筋した試験体, また主筋を普通強度の鉄筋に変え鉄筋量を増やした試験体, RC 試験体の内側の主筋を PC 鋼材に変えた試験体など, 主筋配筋を変動することが, 復元力特性や付着性能にどのような影響を与えるのかを確認するため 5 水準設定した。尚, 試験体の主筋は, 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(以下 RC 規準)に示されている曲げ略算式で同じ曲げ耐力となるように設定した。[H1A, H2B, L2C, L2D, H1E]

③プレストレス力:プレストレス量を変動させることで, 剛性のコントロールが可能か, また PC 鋼材にプレストレス力を導入することによって, 付着性状の改善が可能かなどを把握するために 3 水準設定した。[Pe(プレストレス力)/Py(PC 鋼材の降伏強度)=0,40,80%]

## 2.2 加力方法

加力は大野式逆対称モーメント形式による正負交番繰り返し載荷とし, 部材角 R=1/200rad を 1 回, R=1/100rad を 2 回, R=1/50rad を 2 回, R=1/33rad を 2 回, R=1/25rad を 1 回繰り返した

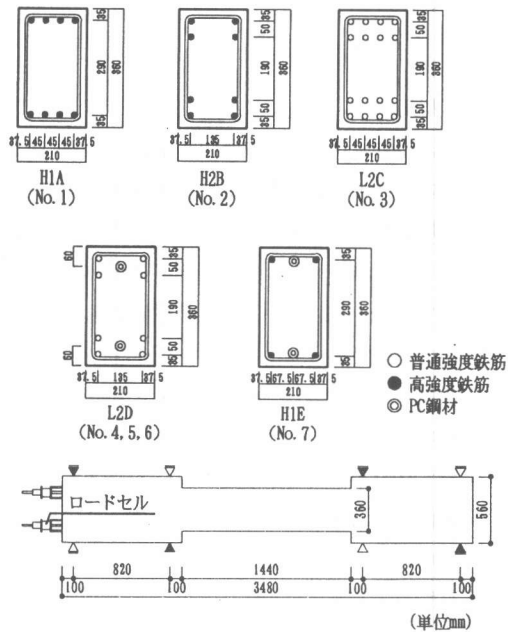


図-1 試験体形状

表-2 使用材料特性

鉄筋の径及び材質	使用箇所	降伏応力度 σ <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	降伏歪 ε <sub>y</sub> (μ)	引張強度 σ <sub>u</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 E <sub>s</sub> (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )
D16(SD345)	主筋	404	2174	570	1.86
D16(SD785)	主筋	756	3976	1031	1.90
S8(KSS785)	補強筋	873	4304	1058	2.03
15.2φ(SWPR7B)	主筋	1817	---	1933	1.91

後, R=1/20rad の正載荷で終了した。尚, 試験体 No.1 は R=1/50rad のサイクルが測定できなかったため, 部材角 R=1/25rad のサイクルを一回増やして全 8 サイクルとした。また, PC 鋼材の緊張力は図-1 に示すように試験体左端でロードセルにより測定した。

表-3 実験結果一覧

No	試験体	曲げひび発生時			鉄筋降伏時 <sup>*1</sup>			部材降伏 <sup>*2</sup>			付着ひび発生時			最大耐力時		破壊モード		
		e <sub>Qmc</sub> kN	e <sub>δ mc</sub> mm	Kc N/mm	CYCLE	e <sub>Qy</sub> kN	e <sub>δ y</sub> mm	CYCLE	e <sub>Qy</sub> kN	e <sub>δ y</sub> mm	Ky N/mm	CYCLE	Q kN	δ mm	CYCLE		e <sub>Qmax</sub> kN	e <sub>δ max</sub> mm
1	RC-H1A-0	25.8	0.46	56.66	+2	218.5	14.47	+4	264.6	20.29	13.04	+3	177.4	12.60	+4	285.2	49.59	曲げ降伏後付着割裂破壊
2	RC-H2B-0	25.6	0.49	52.82	+2	186.2	11.78	+4	234.2	17.10	13.70	-	-	-	+2	263.6	44.07	曲げ降伏
3	RC-L2C-0	28.8	0.40	72.45	+2	219.5	8.09	+2	257.7	10.41	24.76	-	-	-	+2	268.5	28.36	曲げ降伏
4	PRC-L2D-0	33.4	0.52	64.79	+1	134.3	6.77	+2	161.7	10.44	15.49	-	-	-	+9	241.1	71.44	曲げ降伏
5	PRC-L2D-4	63.9	0.93	69.06	+1	151.9	5.61	+2	205.8	12.36	16.65	-	-	-	+9	241.1	66.63	曲げ降伏
6	PRC-L2D-8	79.6	1.14	70.16	+3	119.6	2.69	+2	223.4	10.48	21.32	-	-	-	+6	243.0	43.68	曲げ降伏
7	PRC-H1E-8	78.4	1.11	70.63	+2	207.8	11.39	+4	241.1	18.10	13.32	+6	247.0	35.18	+6	254.8	43.72	曲げ降伏 <sup>*3</sup>

\*1:普通鉄筋が最初に降伏歪に達した点 \*2:Q-δ グラフから剛性が変化し点とした

\*3:付着ひび割れが生じたが、付着割裂で最終破壊が決まっていない

### 3 実験結果及び検討

ロードセルで緊張力を測定(ロードセルの位置は図-1 参照)した結果、文献<sup>1)</sup>のグラウト工法と比較して低い値を示したことから、今回の実験で使用したアフターボンド PC 鋼材とコンクリートの間の付着が確実に確保されていたことが確認された。

#### 3.1 破壊性状

表-3 に実験結果一覧、図-2 に最終破壊性状を示す。RC 構造で高強度鉄筋を 1 段に配筋した試験体 No.1 は、曲げ降伏前に細かな付着ひび割れが発生し、その後上端主筋に沿ったひび割れが進展し、最終的に曲げ降伏後付着割裂破壊に至った。それに対し No.1 の内側 2 本の主筋を PC 鋼材に変えプレストレス量を 80%導入した PRC 構造の試験体 No.7 は、曲げ降伏後に細かな付着ひび割れが発生するものの、その後変形が進んでもそれ以上は進展せず、最終的に曲げ降伏した。また試験体 No.7 の外側の主筋を普通強度に変え鉄筋量を増やしプレストレス量を 80%導入した PRC 構造の試験体 No.6 は、材端部から 1D 区間にせん断ひびが集中したが、付着ひび割れの発生はなく、最終的に曲げ降伏した。試験体 No.6 の PC 鋼材を普通鉄筋 4 本に変えた RC 構造の試験体 No.3 は、材端部から 1D 区間に生じたせん断ひびや材端隅角部での圧壊の影響で、材端部から 1D 区間のコンクリートが剥離した。しかし、付着ひび割れは見られず、最終的に曲げ降伏した。高強度鉄筋を 2 段に分けて配筋した、すなわち試験体 No.1 の主筋を配置だけを変えた RC 試験体 No.2 は、

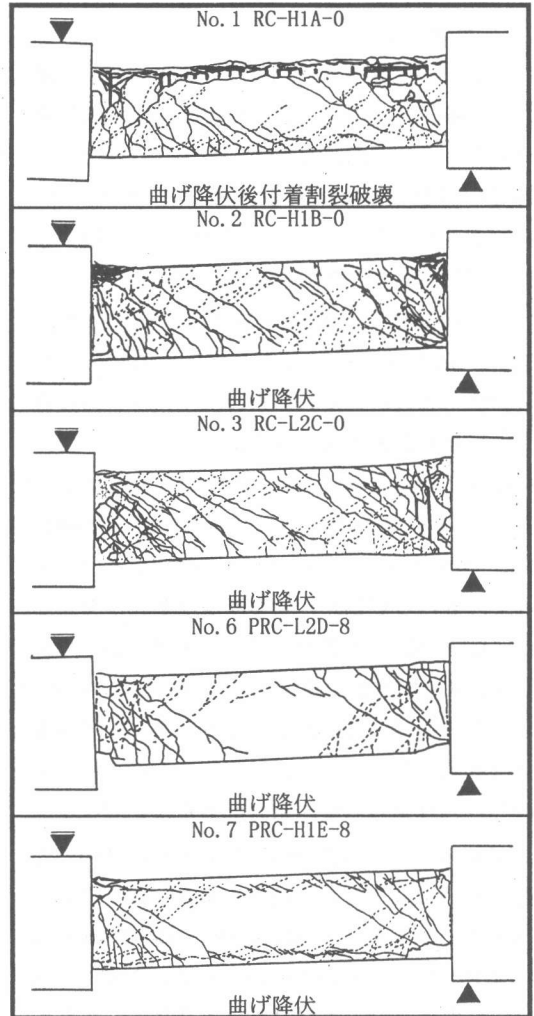


図-2 最終破壊状況

試験体 No.3 と同様の破壊性状を示し、付着ひび割れは発生せず最終的に曲げ降伏した。したがって、同一断面、曲げ耐力が同等となるように設定した試験体でも、主筋配筋を変えること

で、破壊モードをコントロールできることが明らかとなった。また RC 構造と PRC 構造を比べてみると、RC 試験体は試験区間全体にひび割れが生じるのに対し、PRC 試験体は材端部にひび割れが集中し、試験区間中央にはひび割れが生じなかったという違いがあった。尚、プレストレス力を変えても破壊性状の差異は見られなかった。

### 3.2 変形性状

#### (1) 履歴性状

図-3、図-4、図-5 にせん断力  $Q$ -相対変位  $\delta$  曲線、図-6 にせん断力  $Q$ -相対変位  $\delta$  関係包絡線を示す。高強度鉄筋を 1 段で配筋している RC 構造の試験体 No.1(図-3 参照)は、 $R=1/200\text{rad}$  に迎かうサイクルで曲げひび割れ、せん断ひび割れが発生した。 $R=1/100\text{rad}$  に迎かうサイクルで主筋が降伏し、付着ひび割れが発生した。 $R=1/50\text{rad}$  に迎かうサイクルで部材降伏した後最大耐力を迎えた。その後サイクルを進めると、付着割裂の影響で耐力低下をした。一方、No.1 の内側 2 本の主筋を PC 鋼材に変えプレストレス量を 80%導入した PRC 構造の試験体 No.7(図-4 参照)は、 $R=1/200\text{rad}$  に迎かうサイクルで、曲げひび割れ、せん断ひび割れが発生した。 $R=1/100\text{rad}$  に迎かうサイクルで主筋が降伏した。 $R=1/50\text{rad}$  に迎かうサイクルで部材降伏し、その後  $R=1/33\text{rad}$  に迎かうサイクルで付着ひび割れが発生した後最大耐力を迎えた。付着ひび割れが生じたが耐力低下がない履歴ループであった。試験体 No.7 の試験体の外側の主筋を普通強度に変え鉄筋量を増やしプレストレス量を 80%導入した PRC 構造の試験体 No.6(図-5 参照)は  $R=1/200\text{rad}$  に迎かうサイクルで、曲げひび割れ、せん断ひび割れが発生し、主筋が降伏した。 $R=1/100\text{rad}$  に迎かうサイクルで部材降伏したのち、 $R=1/33\text{rad}$  に迎かうサイクルで最大耐力を迎えた。試験体 No.1、No.6、No.7 を比べてみると、試験体 No.1 は、最大耐力に対し最終サイクルの折り返し時のせん断力は約 6 割となったのに対し、試験体 No.7 は約 9 割、

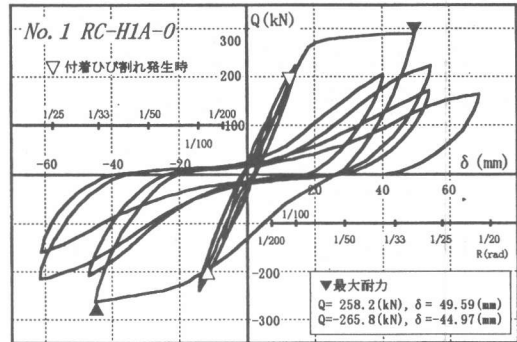


図-3 せん断力(Q)-相対変位( $\delta$ )関係

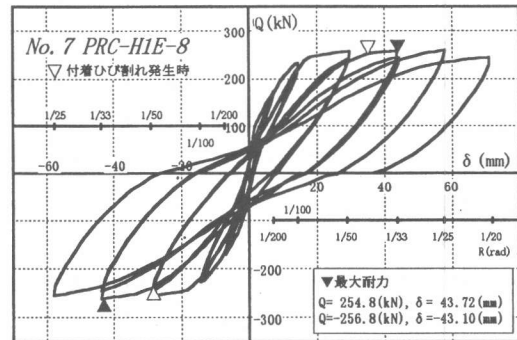


図-4 せん断力(Q)-相対変位( $\delta$ )関係

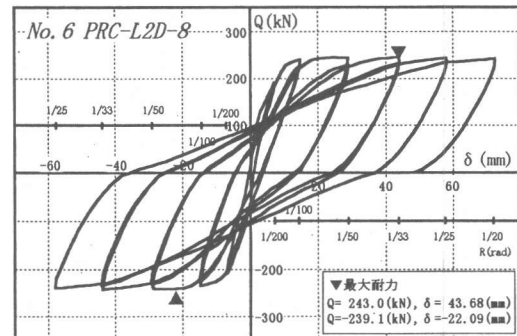


図-5 せん断力(Q)-相対変位( $\delta$ )関係

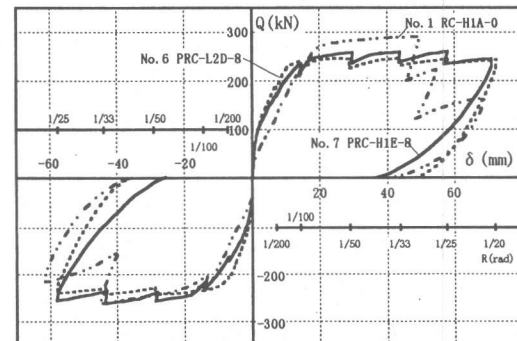


図-6 せん断力(Q)-相対変位( $\delta$ )関係包絡線

No.6 はほとんど耐力低下が見られなかった。また、降伏時剛性は鉄筋量の多い No.3 が一番高く、No.1, No.7 はほぼ同じ値を示した。しかし、降伏までの履歴性状は異なり、No.1 は、低変形時に剛性が低下するのに対し、No.7 は、曲げひび割れ発生荷重が高くそれに伴い剛性が低下した点も高くなった。また No.6 は、No.7 に比べエネルギー吸収量の多い履歴ループを描いた。従って、同一断面かつ曲げ耐力が同等となるように設定した試験体でも、主筋配筋を変えることで、剛性や破壊モードが変化した。また RC 試験体と PRC 試験体の履歴ループを比較すると、RC 試験体の逆 S 字のループを描くのに対し、PRC 試験体は紡錘形のループを描くという差異があった。

## (2) 包絡線比較

図-7, 図-8 にせん断力(Q)-相対変位( $\delta$ )関係の包絡線を示す。図-7 はプレストレス力を変動要因とした試験体を比較したものである。プレストレス力を大きくしていくと、曲げひび割れ、せん断ひび割れ発生荷重が高くなり、主筋降伏時のせん断力も上昇した。これに伴い降伏時剛性が高くなった。プレストレス力を大きくしても、最大耐力の差はなかった。このことにより、プレストレス力を変化することで剛性をコントロールでき、加力初期のエネルギー吸収能力が迎上することが明らかとなった。図-8 は、RC 構造で主筋配筋を変動要因とした試験体を比較したものである。試験体 No.1, No.2, No.3 を比べてみると曲げひび割れ発生荷重はあまり変わらないものの、その後の剛性は、鉄筋量が他に比べて 2 倍の No.3 が高かった。鉄筋量が同じで配置が 1 段と 2 段の違いの No.1 と No.2 は剛性は変わらなかった。しかし、No.1 は変形が進むにつれ耐力低下したのに対し、No.2 は耐力低下はしなかった。以上より、同じ材質、同じ量の鉄筋を使いながらも配置を変えることで破壊モードを変えられることが明らかとなった。

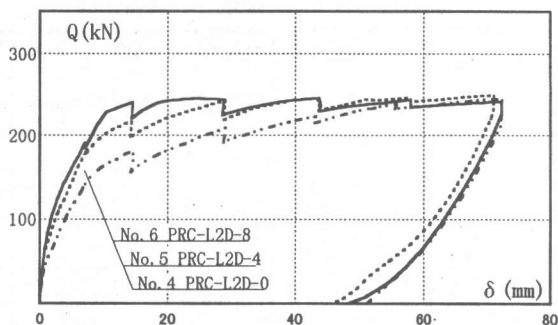


図-7 せん断力(Q)-相対変位( $\delta$ )関係包絡線

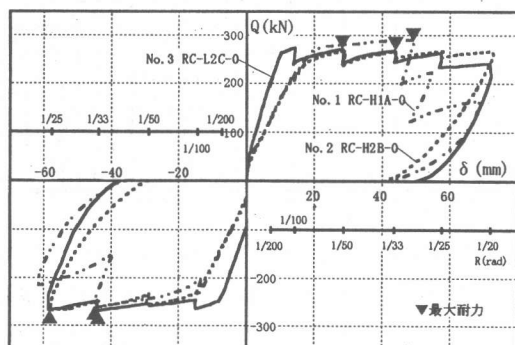


図-8 せん断力(Q)-相対変位( $\delta$ )関係包絡線

## 4 復元力特性の検討

表-4 に各特異点の実験値と計算値比較を示す。復元力特性を明らかにするためには、各特異点を把握しなければならない。本報では、復元力特性を決める特異点のうち曲げひび割れ発生荷重、初期剛性、降伏時剛性、曲げ終局強度に限定することとした。尚、文献<sup>1)</sup>の試験体 10 体を含めて試験体総数 17 体で検討を進める。主要因は、コンクリート強度 $[31 \leq \sigma_B \leq 59 \text{ (N/mm}^2\text{)}]$ 、プレストレス力 $[0 \leq P_n \leq 691 \text{ (kN)}]$ 、主筋配筋などである。

### 4-1 曲げひび割れ発生荷重

図-9 に曲げひび割れ発生荷重の実験値と計算値比較を示す。曲げひび割れ発生荷重の計算値を、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」(以下 RC 規準)で求めた場合、プレストレス力が大きくなると、計算値に対する実験値の比較値が大きくなっていった。又、「プレストレスコンクリート設計施工規準・同解説」(以下 PC 規準)で求めた場合、RC 試験体、特にコンクリート強度が  $60 \text{ kN/mm}^2$  級の試験体

表-4 実験値と計算値比較

実験年度	No	試験体	曲げひび割れ発生荷重 <sup>a)</sup>				初期剛性 <sup>a)</sup>		降伏剛性 <sup>a)</sup>		曲げ終局強度 <sup>a)</sup>	
			$\sigma_B$	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	
			$N/mm^2$	kN	kN	kN/mm	kN/mm	kN/mm	kN/mm	kN	kN	
95	1	RC-A-0	36	29.9	28.53 (1.05)	40.49	65.37 (0.62)	15.73	21.43 (0.73)	147.0	146.72 (1.00)	
	2	AB-B-0	32	29.5	25.60 (1.15)	54.19	55.29 (0.98)	-	14.05	-	165.14	
	3	AB-B-4	32	49.4	44.40 (1.11)	50.45	55.29 (0.91)	-	15.65	-	165.14	
	4	AB-B-8	32	73.7	62.66 (1.18)	48.55	55.29 (0.88)	10.28	17.21 (0.60)	166.8	165.14 (1.01)	
	5	GB-B-0	33	29.5	24.67 (1.20)	39.78	54.93 (0.72)	-	13.89	-	166.64	
	6	GB-B-4	33	54.4	43.94 (1.24)	54.42	54.93 (0.99)	-	15.44	-	166.64	
	7	GB-B-8	33	73.8	62.18 (1.19)	51.31	54.93 (0.95)	13.93	16.90 (0.82)	168.4	166.64 (1.01)	
	8	AB-C-0	37	25.8	28.62 (0.90)	42.79	55.61 (0.77)	-	13.16	-	183.18	
	9	AB-C-8	37	83.9	75.71 (1.11)	50.07	55.61 (0.90)	11.98	16.71 (0.72)	172.1	183.18 (0.94)	
	10	UB-C-8	37	88.4	73.15 (1.21)	41.28	55.61 (0.74)	-	16.52	-	183.18	
97	1	RC-H1A-0	51	25.8	30.48 (0.85)	56.66	76.33 (0.74)	13.05	19.78 (0.66)	264.7	244.34 (1.08)	
	2	RC-H2B-0	52	25.6	23.09 (0.88)	52.82	76.09 (0.69)	13.72	16.50 (0.83)	234.6	225.54 (1.04)	
	3	RC-L2C-0	53	28.8	32.35 (0.89)	72.45	86.33 (0.84)	24.76	25.74 (0.96)	257.6	241.04 (1.07)	
	4	PRC-L2D-0	56	33.4	32.29 (1.03)	64.79	81.89 (0.79)	15.52	18.51 (0.84)	162.0	215.02 (0.75)	
	5	PRC-L2D-4	58	63.9	48.18 (1.33)	69.06	82.08 (0.84)	16.66	19.50 (0.85)	205.9	215.02 (0.96)	
	6	PRC-L2D-6	58	79.6	65.19 (1.22)	70.63	82.08 (0.85)	21.33	20.56 (1.04)	223.5	215.02 (1.04)	
	7	PRC-H1B-8	59	78.4	63.93 (1.23)	70.16	80.76 (0.87)	13.34	19.71 (0.68)	241.4	224.55 (1.08)	

a):  $cQ_{mc} = (1.8 \cdot \sqrt{\sigma_B} + P_e / (A_c)) \cdot Z_e / a$   
 b): 比較値

の比較値が小さくなっている。そこで、RC 規準と PRC 規準を組み合わせた式を用いて検討してみる。この式で求めた場合、比較値は、0.9 ~ 1.3 の範囲に入り、コンクリート強度、プレストレスを変化しても曲げひび割れ発生荷重を概ね推定できると考えられる。

#### 4-2 初期剛性

初期剛性の計算値は、梁の弾性理論により導かれた式を用いて計算した値である。計算した結果、全ての試験体で実験値に対して計算値が大きくなった。そこで剛域を考慮した部材スパン  $L$  を代入したところ、実験値を計算値で除した値は、0.6 ~ 1.0 となり概ね評価できるのではないかと考えられる。

#### 4-3 降伏時剛性

RC 規準に示されている式を用いた場合、高強度鉄筋を用いた試験体では、計算値が高めにでており今後さらなる検討が必要である。

#### 4-3 曲げ終局強度

図-10 に最大耐力と曲げ終局強度の計算値を示す。尚、試験体は、曲げ降伏する前に付着割裂破壊を除き、曲げ降伏した試験体だけに限定している。RC 規準の曲げ略算式で求めた比較値は、1.1 ~ 1.2 の範囲にあり、PC 鋼材が曲げに寄与できる主筋の位置にある場合、PRC 試

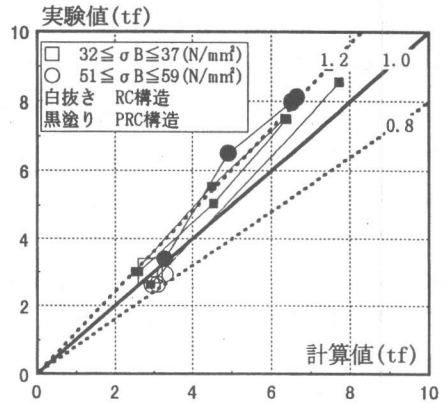


図-9 曲げひび割れ発生荷重の実験値と計算値比較

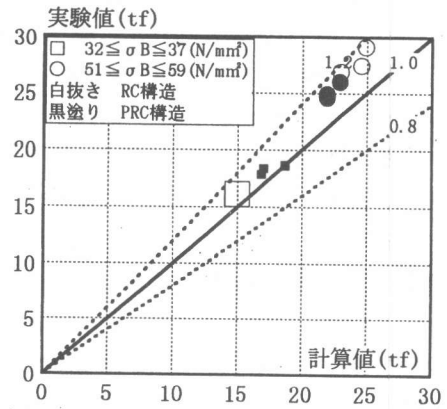


図-10 曲げ終局耐力の実験値と計算値比較

験体も、RC 規準曲げ略算式で概ね評価できることが明らかとなった。

#### 5 まとめ

- ①同一断面かつ曲げ耐力が同等となるように設定した試験体は、主筋配筋を変えることで、破壊モードや復元力特性を変えられることが明らかとなった。
- ②プレストレスを変動することで、剛性が制御でき、また加力初期での構造性能の向上が図れる。
- ③ RC 構造と PRC 構造の復元力特性を把握する一指標を示した。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、神鋼鋼線工業(株)、住友電気工業(株)には、多大な助力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] 松崎育弘他：硬化を制御した樹脂で被覆した PC 鋼材より線を用いた PRC 大梁の耐震特性に関する実験研究、コンクリート工学年次論文報告集、第 18 巻、第 2 号、pp1145 ~ 1150、1996
- [2] 材寄勉他：アフターボンド PC 鋼材の諸特性について、プレストレストコンクリート、vol32 No.4 Jul、pp91 ~ 98、1990