

論文 高強度材料を用いた PPC はりの曲げ挙動

飯島基裕*¹・山口隆裕*²・池田尚治*³

要旨：本研究は、高強度コンクリートと高強度鉄筋を併用した PPC はり部材の曲げ挙動を明らかにするために、I 型断面供試体を用いて実験的検討を行ったものである。その結果、PPC 構造のはり部材に高強度材料を使用した場合、普通強度材料を用いた場合よりも供用限界性能および終局限界性能を著しく改善でき、極めて高性能な部材になり得ることが確認できた。

キーワード：高強度材料、PPC 構造、供用限界、終局限界、許容ひび割れ幅、曲げ

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下：RC）構造物に、高強度コンクリートおよび高強度鉄筋といった高強度材料を用いた場合、一般的な RC 構造物と比較すると、大幅な耐荷性能の向上や部材断面の縮小すなわち自重の軽減が可能となる。[1]しかし、高強度材料を用い終局時に高い材料強度を設定しても、供用限界状態におけるひび割れ幅に制限があるため、高強度材料の RC 構造への適用はある程度の限界が生じてくる。そこで、このような部材にプレストレスを導入してひび割れを制御する、パーシャルプレレストコンクリート（以下：PPC）構造が考えられる。この構造形式を適用することにより、高強度材料の適用範囲が広がり、より供用性、耐久性、安全性および経済性に優れたコンクリート構造物の設計が可能になると考えられる。[2]

本研究は、高強度材料と PPC 構造を組み合わせた構造形式の供用限界性能および終局限界性能を把握することを目的とし、コンクリート強度、引張鉄筋強度および導入プレストレス量をパラメータとしたはり部材の曲げ載荷実験を行ったものである。

表 - 1 供試体諸元一覧

(単位 : kgf/cm²)

供試体名 (記号)	コンクリート 強度	鉄筋降伏 強度	導入応力度		PPC 鋼棒 の種類	スタ-ラップ配置 間隔(cm)
			上縁	下縁		
NH-0	300	7000	—		—	10.0
NN-50		3500	0	50	C種1号	12.5
NH-50		7000			C種1号	7.0
HH-50	600		7000	0	100	C種1号
HH-100		0				
HH-200		50		50	φ23	4.5
HHR100						8.0

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験に使用した供試体の諸元の一覧と寸法を表-1 および図-1 に示す。実験パラメータは、コンクリートの圧縮強度（設計基準強度 : $f'_{ck}=300, 600\text{kgf}$

$/\text{cm}^2$ ）、鉄筋の降伏強度（SD685、SD345）および断面下縁の初期導入応力度（0、50、100、200 kgf/cm^2 ）とし、それぞれの組み合わせで計 7 体の供試体を製作した。表に示す供試体の記号は、

* 1 横浜国立大学大学院 工学研究科計画建設学専攻（正会員）

* 2 横浜国立大学助手 工学部建設学科（正会員）

* 3 横浜国立大学教授 工学部建設学科、工博（正会員）

コンクリート強度、鉄筋強度、初期導入応力度の順に対応しており、高強度材料をH、普通強度材料をN、初期導入応力度を数字により表記している。なお、本論では圧縮強度600kgf/cm²のコンクリートおよびSD685の鉄筋を高強度材料と呼び、圧縮強度300kgf/cm²のコンクリートおよびSD345の鉄筋を普通強度材料と呼ぶことにする。NH-0からHH-200までの6体の供試体は、

断面形状および寸法が同一のI型断面であり、断面にはD19 (SD685およびSD345)の引張鉄筋とD10 (SD345)の圧縮鉄筋をそれぞれ4本ずつ配置し、プレストレスレベルにより適宜PC鋼材を配置した。HHR100の供試体は正負荷荷を考へ矩形断面とし、軸方向鉄筋(D19)およびPC鋼棒(φ23)を上下同様に配置した。なお、図中の各々の断面形状はセンターラインに位置する断面であり、全長320cm、スパン280cm、せん断スパン桁高比3.75は全供試体共通である。また、全供試体において曲げ破壊以前にせん断破壊が生じないように、スパン全長にわたりD10のスターラップを十分に配置した。供試体端部はD6の鉄筋で十分に補強し、引張鉄筋はフックを設けずに部材端部まで伸ばして定着した。プレストレスの導入はコンクリート打込後約4週間で行い、緊張後直ちにグラウトを注入した。グラウトは、セメントに早強ポルトランドセメント、

混和剤に高性能減水剤を用い、水セメント比45%として配合した。表-2に供試体製作に使用した各材料の力学的特性を示す。

2.2 荷重方法および測定方法

荷重方法は、全供試体とも純曲げ区間40cmの2点繰返し荷重とした。I型断面の供試体については一方向荷重とし、曲げ区間上縁コンクリートが圧壊し大幅な耐力の低下が生じるまで荷重を継続して行った。なお

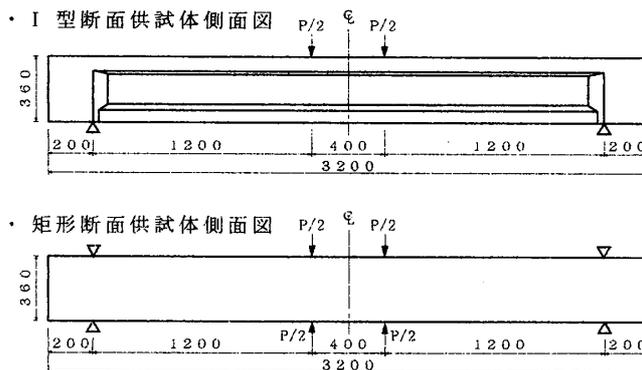
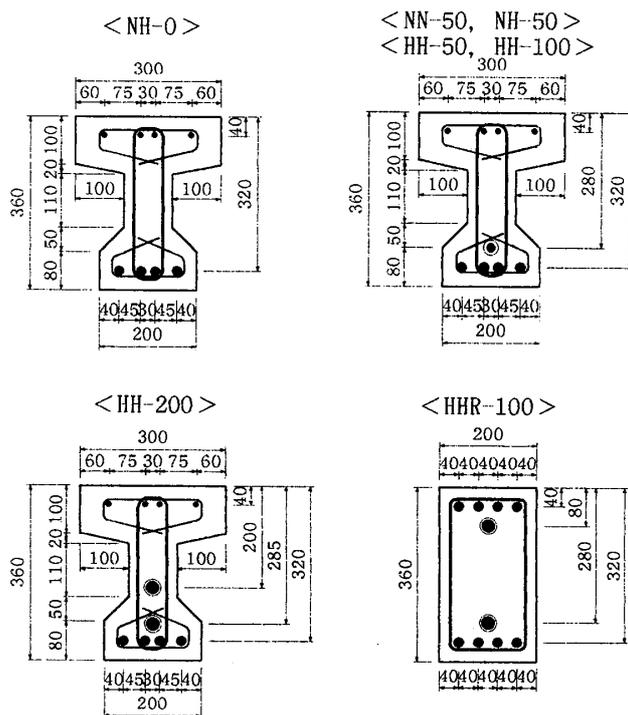


図-1 供試体概要

プレストレスの導入はコンクリート打込後約4週間で行い、緊張後直ちにグラウトを注入した。グラウトは、セメントに早強ポルトランドセメント、

表-2 材料試験結果

(単位: kgf/cm²)

設計基準強度	圧縮強度	引張強度	弾性係数
300	310	24.9	2.45*10 ⁵
600	672	43.7	3.64*10 ⁵
グラウト強度	514	—	—

	規格	降伏強度	引張強度	弾性係数
鉄筋	SD685	7260	9490	1.95*10 ⁶
	SD345	3840	5410	1.85*10 ⁶
PC鋼棒	C種1号φ17	12220	13200	1.92*10 ⁶
	C種1号φ23	12000	12800	1.85*10 ⁶

・PC鋼棒の降伏強度は0.2%オフセット耐力である。

除荷時の特性を見るために、ひび割れ発生および引張鉄筋降伏の2点で除荷を行った。矩形断面供試体については正負繰返し載荷であり、正負における軸方向鉄筋降伏時の中央変位の平均を 1δ とし、 $\pm 1\delta$ を1サイクルとして載荷治具の許容範囲 ($\pm 3\delta$) まで繰返し載荷を行った。各材料のひずみと部材の変位量の計測はストレインゲージおよび変位計を用いて行った。また、ひび割れ幅はクラックスケールを用いて目視で行い、曲げ区間に生じた主要な曲げひび割れについては π 型変位計を取り付けて計測した。

3. 実験結果および考察

3. 1 供用限界性能

表-3に各供試体のひび割れ発生荷重と供用限界荷重を、図-2に各々をNH-0の値で除して無次元化した値を示す。表中のひび割れ発生荷重の実験値は曲げ区間に初めてひび割れが目視で確認できたときの荷重であり、供用限界荷重の実験値は主要な曲げひび割れの鉄筋位置におけるひび割れ幅が、土木学会コンクリート標準示方書で規定される許容ひび割れ幅 (かぶり $\times 0.005$) に達したときの荷重である。P P C構造の供試体のひび割れ発生荷重および供用限界荷重はR C構造であるNH-0の約2~6倍となっており、導入プレストレス力が大きい程供用限界性能が大幅に向上していることがわかる。また、表に示すそれぞれの算定値は土木学会コンクリート標準示方書に従って求めた値で

あり、供用限界荷重の算定値においては、ひび割れ幅算定式(3)から得られる鉄筋応力度の増加量から逆算して荷重を求めた。これらの算定値は若干安全側ではあるものの実験値を妥当に評価していることがわかる。以上の結果から、コンクリート構造物に高強度材料を用いて高い部材耐力を設定した場合においても、P P C構造とし導入プレストレスを大きくすることで部材の供用限界を大幅に改善できることが確認できた。従って、P P C構造は高強度材料の実構造物への適用範囲を大きく広げることができる構造形式と言える。

表-3 実験結果

(単位: tf)

供試体名 (記号)	ひび割れ発生荷重		供用限界荷重	
	実験値	算定値	実験値	算定値
NH-0	3.6	2.3	10.3	10.0
NN-50	7.2	7.1	20.4	18.5
NH-50	8.1	7.2	20.3	18.5
HH-50	8.1	8.1	24.3	19.2
HH-100	13.2	13.3	28.3	25.6
HH-200	21.0	20.5	43.0	37.1
HHR100	7.7	7.7	19.6	18.2

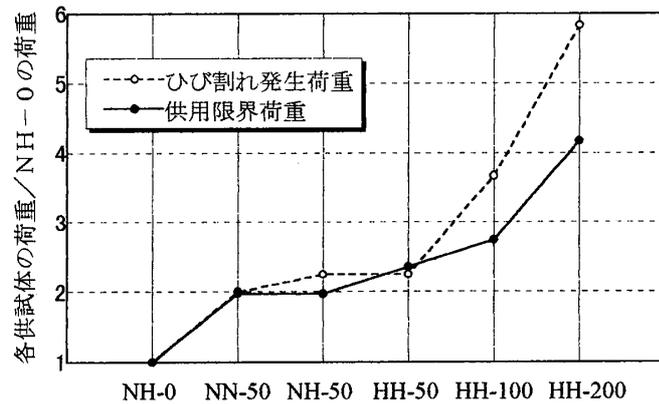


図-2 ひび割れ発生荷重および供用限界荷重の比較

表-4 各供試体の実験結果一覧

供試体名 (記号)	降伏荷重 (tf)	最大荷重 (tf)	引張鋼材比 ρ (%)	釣合鋼材比 ρ_b (%)	ρ / ρ_b
NH-0	37.3	38.5	1.19	1.40	0.85
NN-50	26.5	30.5	2.07	3.66	0.57
NH-50	37.8	37.8	1.63	1.40	1.16
HH-50	50.0	51.0	1.63	3.04	0.54
HH-100	57.0	58.2	1.97	3.04	0.65
HH-200	67.0	67.8	2.93	3.04	0.96
HHR100	55.1	—	2.95	3.04	0.97

3. 2 終局限界性能

表-4に各供試体の曲げ載荷試験結果を示す。表中の降伏荷重は、引張鉄筋のひずみが材料試験によって得られた降伏ひずみに達した時の荷重である。NH-50を除くI型断面供試体の破壊形態はほぼ似通っており、荷重の増加に伴い鉄筋、PC鋼棒の順で降伏し、最終的には曲げ区間の上フランジコンクリートが圧壊し、圧縮鉄筋の座屈と同時に耐力が大きく低下する挙動を示した。また、NH-50は過鉄筋設計となったためコンクリートの圧壊が先行した。

ただし、最大荷重時では引張鉄筋のひずみはほぼ降伏ひずみに達していた。破壊時の挙動は、プレストレス導入量が大きなHH-200において爆裂音と共にコンクリート片が飛び散ったが、他の供試体ではほとんど衝撃音はなくコンクリートも崩れ落ちる程度であった。また、すべての供試体において、鉄筋降伏前に明確な斜めひび割れが観察されたが、せん断破壊には至らなかった。図-3に、プレストレスを50kgf/cm²導入した供試体の荷重と中央変位の関係を示す。これらの最大荷重を普通強度材料を使用したNN-50を基準として比較すると、NH-50で1.3倍程度、HH-50で1.7倍程度耐力が向上しており、高強度材料の有効性が確認できる。

また、供試体の耐力が大きく低下する直前の変位を終局変位とした場合、NN-50で35.1mm、NH-50で27.3mm、HH-50で42.0mmとなっており、 ρ/ρ_b (ρ :引張鋼材比、 ρ_b :釣り合い鋼材比)が小さい程増加していることがわかる。次に、図-4に高強度材料を使用した供試体であるHH-50、HH-100およびHH-200の荷重と中央変位の関係を示す。最大荷重はPC鋼材を含めた引張鋼材比が大きくなるほど増加

しており、最も降伏荷重が小さいNN-50と高強度材料を用いた供試体の降伏荷重を比較すると約2.5倍まで向上している。ただし、引張鋼材比が大きいNH-50とHH-200は靱性に劣り脆性的な破壊形態を示したので、設計においては適

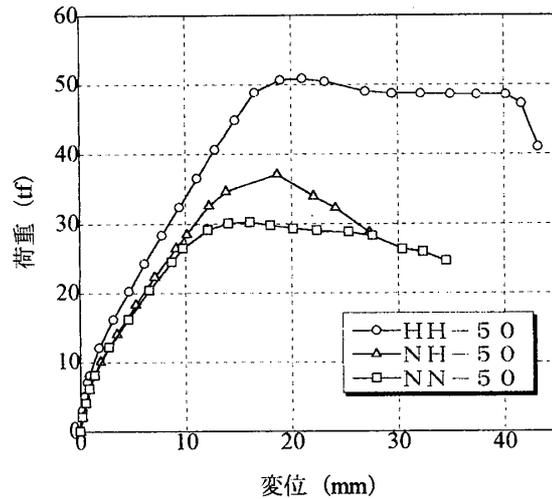


図-3 荷重-中央変位関係

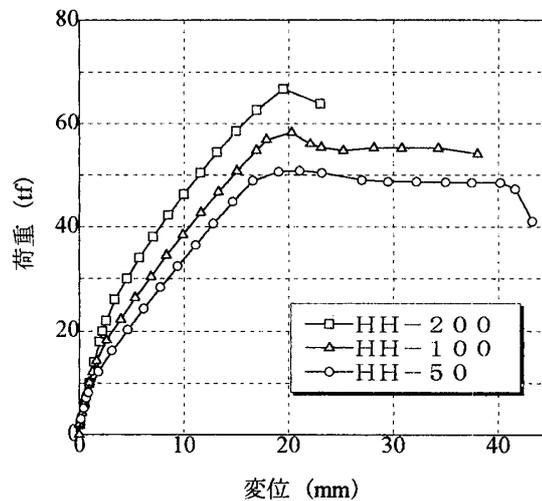


図-4 荷重-中央変位関係

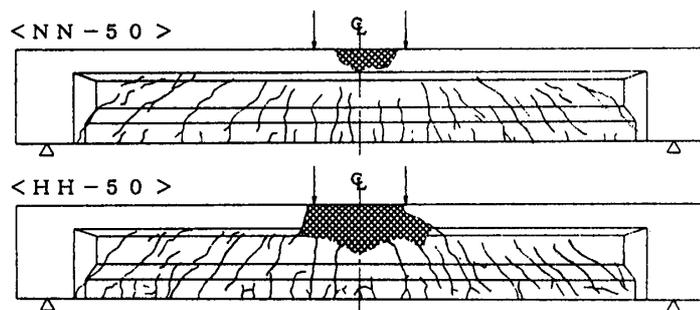


図-5 破壊時のひび割れ状況

切なP C鋼材量を検討し、耐力向上と靱性確保のバランスを考えて設計することが重要であると考えられる。

図-5にI型断面供試体の破壊時のひび割れ図を示す。破壊に至るまでのひび割れ挙動は、プレストレス導入量の相違による斜めひび割れ発生角度やスターラップの配置間隔に起因するひび割れ間隔に若干の差異はあったものの、材料強度の影響はほとんどなかった。また、今回の実験では高強度鉄筋を用いたため、高い応力レベルでのコンクリートと鉄筋の付着や定着部の破壊などが懸念されたが、終局時においても付着ひび割れの成長によるかぶりコンクリートの剥離や定着部のひび割れは観察されなかった。以上のことから、高強度コンクリートと高強度鉄筋を併用したはり部材にプレストレスを導入しP P C構造とすることは、極めて有効的で且つ合理的であることが確認できた。

3-3 正負繰返し荷重実験

本研究では、地震時における柱部材を想定し、供試体HHR100を用いて正負繰返し荷重実験を行った。図-6にHHR100の荷重-中央変位関係と、初期導入応力度が等しいHH-50、NN-50および下縁の鋼材量が等しいHH-100の荷重-中央変位関係を示す。ひび割れ性状は、一方向荷重を行ったI型断面供試体と大差はなく繰返し荷重による影響はみられなかった。HHR100の降伏変位 δ_y は16.4mmであり、荷重治具の許容範囲である $3\delta_y$ まで荷重実験を行ったが、耐力の低下はみられなかった。これは、圧縮側軸方向鉄筋が他の供試体と異なりD19の高強度鉄筋であり、大変形下においても座屈しなかったためと思われる。また、鉄筋降伏後の挙動は正負繰返し荷重のもとで十分な靱性を有しており、高強度材料を用いたP P C構造は地震力を受ける柱部材にも十分適用できるものと思われる。

4. 計算手法および計算結果

本研究では、断面を層状に分割し各材料のひずみ分布を用いてモーメントを求め、モーメントと曲率の関係から変位量を計算する簡便な計算手法により曲げ変形解析を行った。図-7に計算に使用した各材料のモデル化を示す。モデル化では各材料とも材料試験で得られた結果に従い、それぞれの特性値を決定した。普通強度コンクリートおよび鉄筋は、土木学会コンクリー

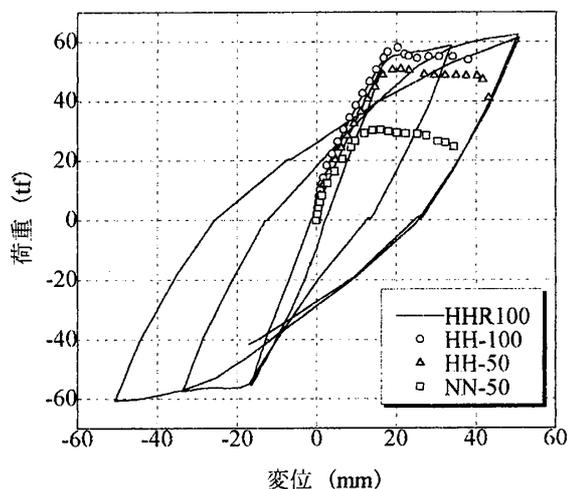


図-6 HHR100の荷重-変位関係

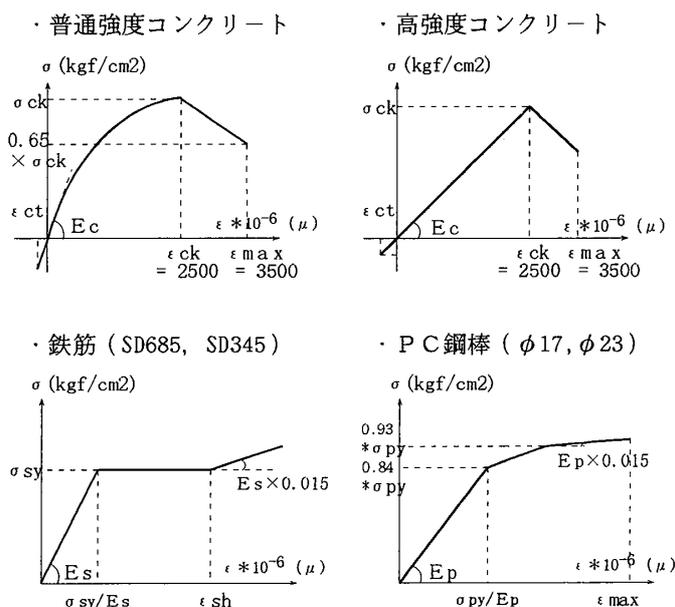


図-7 各材料のモデル化

ト示方書のモデル化を適用し、高強度コンクリートは破壊時までの応力-ひずみ関係を2本の直線で表した。両コンクリートとも、圧縮縁のひずみが 3500μ に達した点を破壊と定義した。また、P C鋼棒は降伏点が明確でないことを考慮して、応力-ひずみ関係をトリリニアで定義した。図-8にNN-50、HH-50およびHH-100の荷重-中央変位関係の実験値と計算値の比較を示す。各供試体の計算値は実験値とよく対応しており、高強度コンクリートの応力-ひずみ関係を直線でモデル化したことの妥当性が確認できた。また、鉄筋については従来のモデル化が適用でき、材料強度の影響はないことがわかった。以上の結果より、高強度材料を用いたP P C構造はり部材の曲げ変形挙動は、平面保持の仮定を利用した簡便な計算手法により精度よく評価できることが示された。

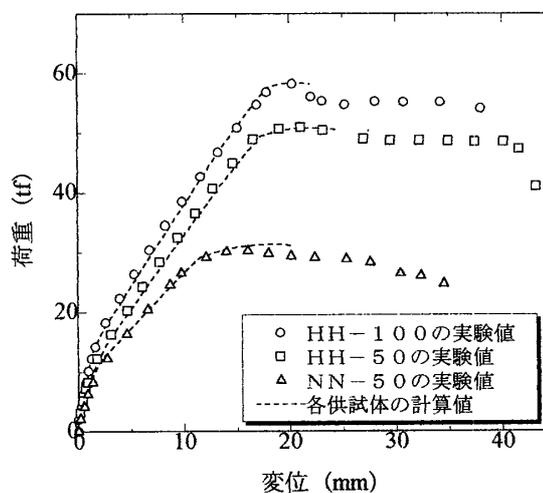


図-8 各供試体の計算結果

5. 結論

本研究により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 高強度コンクリートと高強度鉄筋を併用したP P C構造のはり部材は、曲げひび割れ発生の制御、供用限界性能の改善および終局耐力の大幅な向上等の面から、合理的で高性能な部材であることが確認できた。
- (2) 十分にせん断補強したP P Cはり部材は、大きな荷重レベル下においても引張鉄筋に起因する付着ひび割れや定着部のひび割れは見られず、安定した力学的特性を示した。
- (3) 現行のコンクリート標準示方書に示されるひび割れ幅算定式は、高強度材料を用いたP P Cはり部材にも適用可能であることが確認できた。
- (4) 高強度材料を用いたP P Cはり部材の曲げ変形挙動は、平面保持の仮定を利用した従来の計算手法で精度よく評価できることが示された。
- (5) 高強度材料を用いたP P C構造は柱部材にも適用可能であり、地震時において高い耐荷性能が期待できるものと思われる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、(社)鋼材倶楽部より御支援頂いた。供試体の製作においては(株)ピー・エスの関係各位に、高強度鉄筋の使用に際しては(株)新日本製鉄の木邑氏に多大な御尽力を賜った。また、実験においては横浜国立大学の森下豊技官、大学院生の白浜寛君および4年生の諸沢正毅君に多大な御協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 猪俣俊司：パーシャリープレストレストコンクリートの歴史的背景，コンクリート工学，Vol. 25, No. 7, pp6-12, 1987
- [2] 池田尚治：P P C構造概論，プレストレストコンクリート，Vol. 34, No. 6, pp8-11, 1983
- [3] 土木学会：コンクリート標準示方書設計編（平成8年制定）、pp86-92, 1996