

2. ポリプロピレン繊維を用いた繊維補強コンクリート RC 梁の 曲げ性状に関する実験研究

Experimental Study on Flexural Performance of RC Beams Made of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete

森 浩二^{*1}

要 旨

ポリプロピレン短繊維はコンクリート用繊維として初めて JIS に登録された合成繊維であり、コンクリートの剥落や収縮ひび割れの防止、火災時の爆裂防止などに用いられている。表面が疎水性であるポリプロピレンは、親水性のビニロンなどに比べて素材としてのコンクリートとの付着性は劣るため、形状の工夫によって機械的にコンクリートとの付着性を向上させる工夫がなされているが、RC 部材の構造性能に与える効果についての研究は少ない。そこで、ポリプロピレンおよびビニロン短繊維によって補強された RC 梁について、4 点曲げ単調載荷実験による曲げ性能の検討を行った。実験の結果、ポリプロピレン、ビニロンいずれの短繊維についても微小変形時における曲げ剛性が向上すること、コンクリートの圧壊による耐力低下を抑制する効果があること、鉄筋の付着割裂ひび割れの発生が減少することが確認された。

キーワード：4 点曲げ載荷／曲げ剛性／圧壊／付着割裂ひび割れ／ビニロン

1. はじめに

ポリプロピレン (PP) 短繊維は合成繊維の一種であり、繊維補強セメント系複合材料¹⁾として、コンクリートの剥落防止や収縮ひび割れの防止、火災時の爆裂防止などに使用されている。PP 短繊維はコンクリート用の繊維として初の日本工業規格が 2015 年に制定され²⁾、使用者および製造者の利便性が向上することとなった。素材としての PP の性質は疎水性であるため、他の親水性の合成繊維と比較するとコンクリートとの付着性には劣っている。そのため、表面にエンボス加工を施すなど、機械的に付着性を高める工夫を行った製品が開発されている。

RC 部材に PP 短繊維を混入した場合の補強効果については、剥落防止や爆裂防止³⁾、耐衝撃性⁴⁾を対象とした研究が存在する。また、無筋コンクリートのひび割れに対する PP 短繊維の架橋効果については、切り欠き梁の 3 点曲げ試験により引張軟化曲線および破壊エネルギーの推定を行った研究がある^{5), 6), 7)}。しかし、PP 短繊維を混入した RC 部材の曲げやせん断に関する研究は少なく、その補強効果や曲げ・せん断性状への影響については明らかとなっていない。

ここでは PP 短繊維による RC 梁の曲げ性能に対する補強効果に着目して行った実験について述べる。なお、比較対象として親水性であるビニロン (PVA) 短繊維⁶⁾についても同様の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した PP 繊維・PVA 繊維を写真-1 に、繊維の諸元を表-1 に示す。PP 繊維は延伸加工により製造されたもので表面がエンボス加工されており、繊維長 30mm、繊維度 3,500dtex のものを用いた。ここで繊維度 dtex とは繊維 10,000m 当たりの重量(g)で表した繊維太さの指標を表し、

表-1 繊維諸元

種別	繊維長 (mm)	密度 (g/cm ³)	繊維径* (mm)	引張強度 (N/mm ²)	断面形状	表面形状
PP	30	0.91	0.7	500	矩形	エンボス
PVA	12	1.3	0.1	1200	円形	平滑

*真円換算の値



(a) PP 繊維 (b) PVA 繊維
写真-1 使用繊維

^{*1} 技術研究所構造研究グループ

表-2 コンクリート調査

記号	繊維		水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤比 SP/C (%)
	種別	混入率 (Vol.%)			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
N	—	—	47	49	185	394	809	869	1.0
P04	PP	0.4	47	49	185	394	809	869	1.0
P12	PP	1.2	47	49	185	394	809	869	1.0
V03	PVA	0.3	47	49	185	394	809	869	1.0
V09	PVA	0.9	47	49	185	394	809	869	1.0

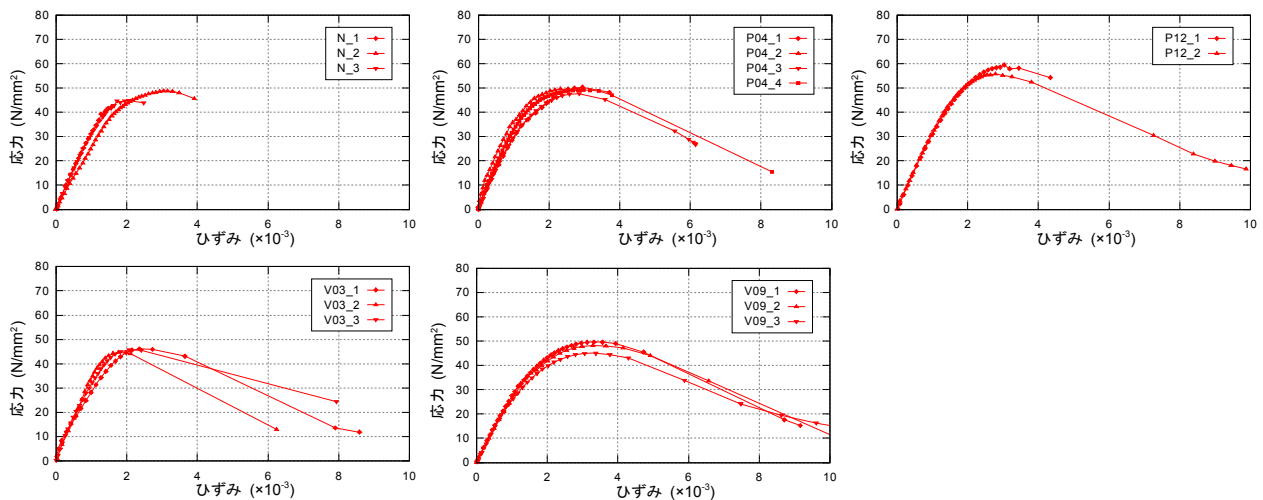


図-1 コンクリート圧縮強度試験結果

繊維と密度から円換算直径が算出される。PVA 繊維の断面形状は円形で表面は平滑、繊維長 12mm、繊維 100dtex のものを用いた。前述したように、疎水性である PP に対し、親水性の PVA はセメントとの付着性が良いという特徴を持っている。

コンクリートの調査を表-2に示す。繊維の種類および混入率をパラメータとし、基準となるコンクリートの調査は同一とした。繊維の混入率（体積混入率）は外割によって定め、繊維メーカーによる標準配合量、およびその3倍を設定した。

練混ぜには 100L 重力式ミキサーを用い、最初にコンクリートを練混ぜた後、繊維を投入してから2分～5分程度混合を行った。

2.2 材料試験結果

コンクリートの圧縮試験結果を図-1および表-3(a)に、鉄筋の引張試験結果を表-3(b)に示す。コンクリートの圧縮強度にばらつきが見られるが、PP1.2% (P12) では繊維なしのもの (N) に比べてやや圧縮強度が高くなっている。また、圧縮強度発現時のひずみは繊維なし (N) や標準配合 (P04, V03) の場合では 0.2%程度、3 倍配合の PP1.2% (P12)、PVA0.9% (V09) では 0.3%程度と、繊維混入率の

表-3 材料試験結果

(a) コンクリート

記号	繊維	混入率 (Vol.%)	圧縮強度*1 (N/mm ²)	ヤング係数*1,*2 (×10 ⁴ N/mm ²)
N	—	—	45.3	3.21
P04	PP	0.4	49.2	3.69
P12	PP	1.2	57.7	3.33
V03	PVA	0.3	45.5	3.50
V09	PVA	0.9	47.6	2.83

*1 図-1 に示す 2～4 体の平均値を用いた

*2 圧縮強度の 1/3 における割線剛性とした

(b) 鉄筋

記号	降伏点強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)
D10	328	479	1.89
D16	362	538	1.92

高い試験体ではひずみが大きくなっている。また、繊維混入率の高い試験体 (P12, V09) では荷重ピーク後の破壊速度がゆるやかになっている様子が観察され、圧縮靱性が向上していることが確認された。

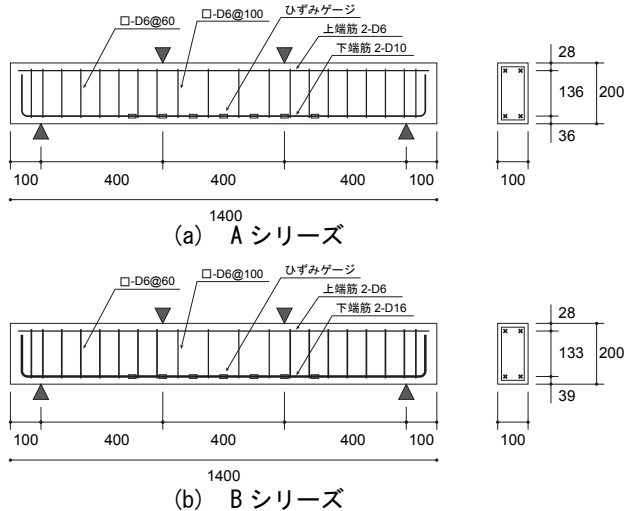


図-2 試験体形状

2.3 梁試験体形状

試験体形状を図-2 に示す。試験体は断面 200mm×100mm、長さ 1400mm の梁試験体で、図中三角印の位置が支持点および荷重点である。主筋量をパラメータとして、図-2(a) の A シリーズでは鉄筋の引張降伏によって破壊するよう 2-D10 を、図-2(b) の B シリーズではコンクリートの圧壊によって破壊するよう 2-D16 を梁下部に配筋し、いずれも曲げ破壊が先行するように十分なせん断補強筋を配置した。

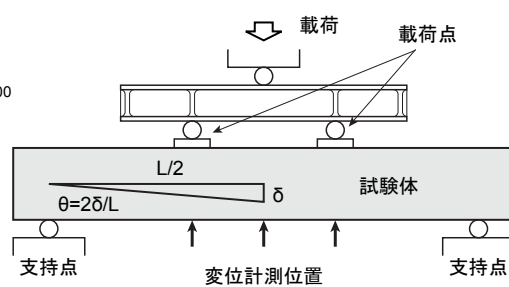


図-3 荷重方法概要

2.4 実験方法

荷重方法の概要を図-3 に示す。試験体中央部長さ 400mm の区間が純曲げとなるように 4 点曲げによる単調荷重を行った。試験体中央と荷重点位置の鉛直変位を計測し、部材変形角 θ ($\theta = 2\delta/L$, δ : 中央変位, L : 支持点間距離) が 0.125%, 0.25%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2%, 3%, 4%, 5% の時点でのひび割れを観測した。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

試験体の荷重-変位関係を図-4 に示す。荷重は左右の荷重点における荷重の合計、変位は荷重点間中央の鉛直変位である。

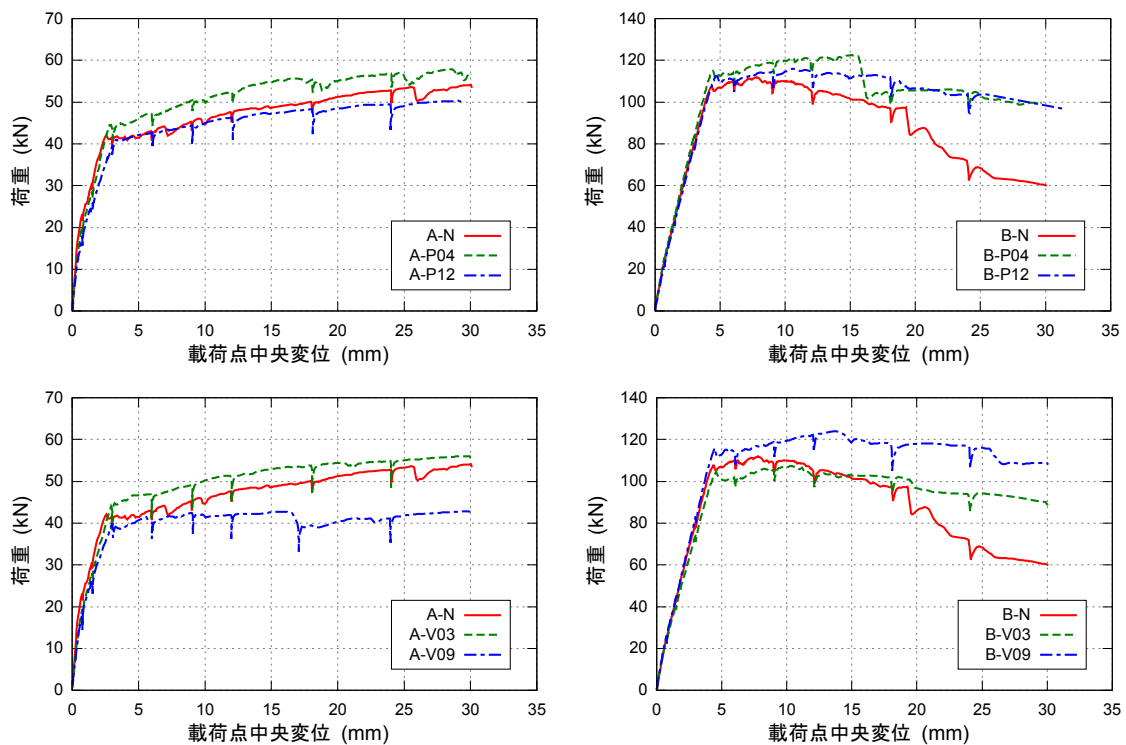


図-4 荷重-変位関係

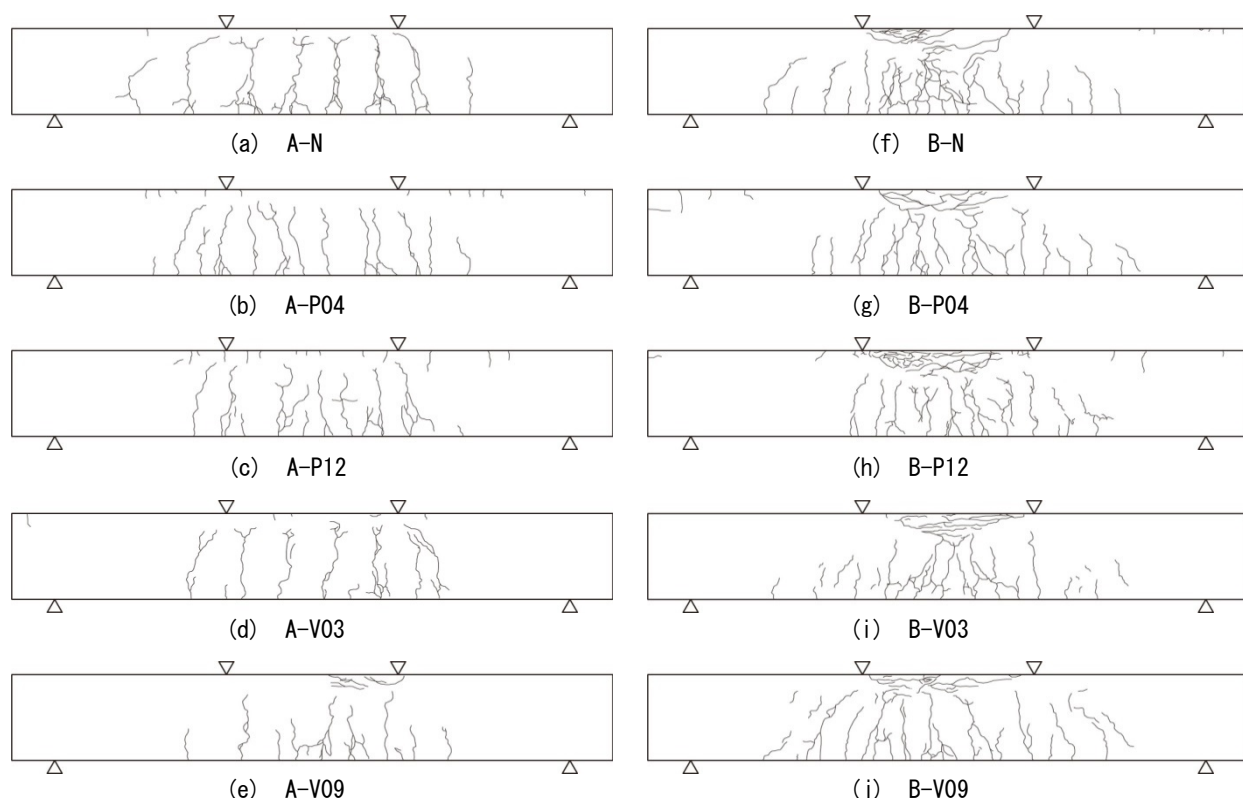


図-5 最終ひび割れ状況

(1) A シリーズ

A シリーズの試験体は引張側鉄筋が降伏した後、鉄筋のひずみ硬化によって耐力が緩やかに上昇した。鉄筋降伏時の荷重は 40～50kN、降伏時の変位は 3mm 前後で試験体間の差異は小さいが、繊維の混入量を標準量とした A-P04, A-V03 の荷重は A-N の荷重をやや上回っており、繊維補強により降伏時曲げ耐力が上昇したと考えられる。一方、繊維の混入量を標準の 3 倍とした A-P12, A-V09 では A-N の荷重を下回っている。特に A-V09 試験体打設時の欠陥によって梁上面の載荷点の付近で支圧破壊が生じており、鉄筋降伏後の耐力増加が見られない。

(2) B シリーズ

B シリーズの試験体では鉄筋降伏後に圧縮側のコンクリートが圧壊し、耐力が低下する現象が観察された。繊維を混入した試験体においても圧壊が観察されたが、圧壊にともなう耐力低下の勾配には差が見られた。

3.2 最終ひび割れ状況

試験体の最終ひび割れ状況（部材変形角 5%時）を図-5 に示す。

(1) A シリーズ

繊維なしの試験体 A-N では試験区間にはほぼ 100mm 間隔で材軸に直交する方向に曲げひび割れが生じている。また、主筋の近傍に付着割裂と考えられる複数の細かいひび割

れが材軸方向に発生している。PP 繊維の試験体 A-P04, A-P12 ではひび割れの発生間隔が A-N よりやや狭くなっており、個々のひび割れ幅も狭くなっている。また付着割裂ひび割れは生じていない。PVA 試験体 A-V03, A-V09 についても付着割裂ひび割れは生じなかったが、曲げひび割れの本数が少ないという違いが見られた。

(2) B シリーズ

すべての試験体で試験体上部に圧縮によるひび割れが生じている。ひび割れによる損傷は繊維なしの試験体 B-N で最も顕著であり、コンクリートの圧壊により上部の鉄筋が露出する程度であるが、繊維補強試験体では圧壊には達していない。また、B-N のみ主筋近傍の付着割裂ひび割れが生じていた。

3.3 鉄筋ひずみ分布

鉄筋ひずみ分布の推移を図-6 に示す。

(1) A シリーズ

試験体 A-N, A-P04, A-V03 では変形角 0.5% (3mm) の時点で鉄筋の一部が降伏し、1% (6mm) の時点では試験区間の全域が降伏ひずみに達した。一方、A-P12 では変形角 1%時の鉄筋降伏範囲は図中-300～0mm、A-V09 では-200～0mm の区間で、終局まで降伏しない箇所が見られた。A-P12, A-V09 はひび割れが発生した範囲が狭く（図-5 (c), (e)）、変形が局所的であったと考えられる。

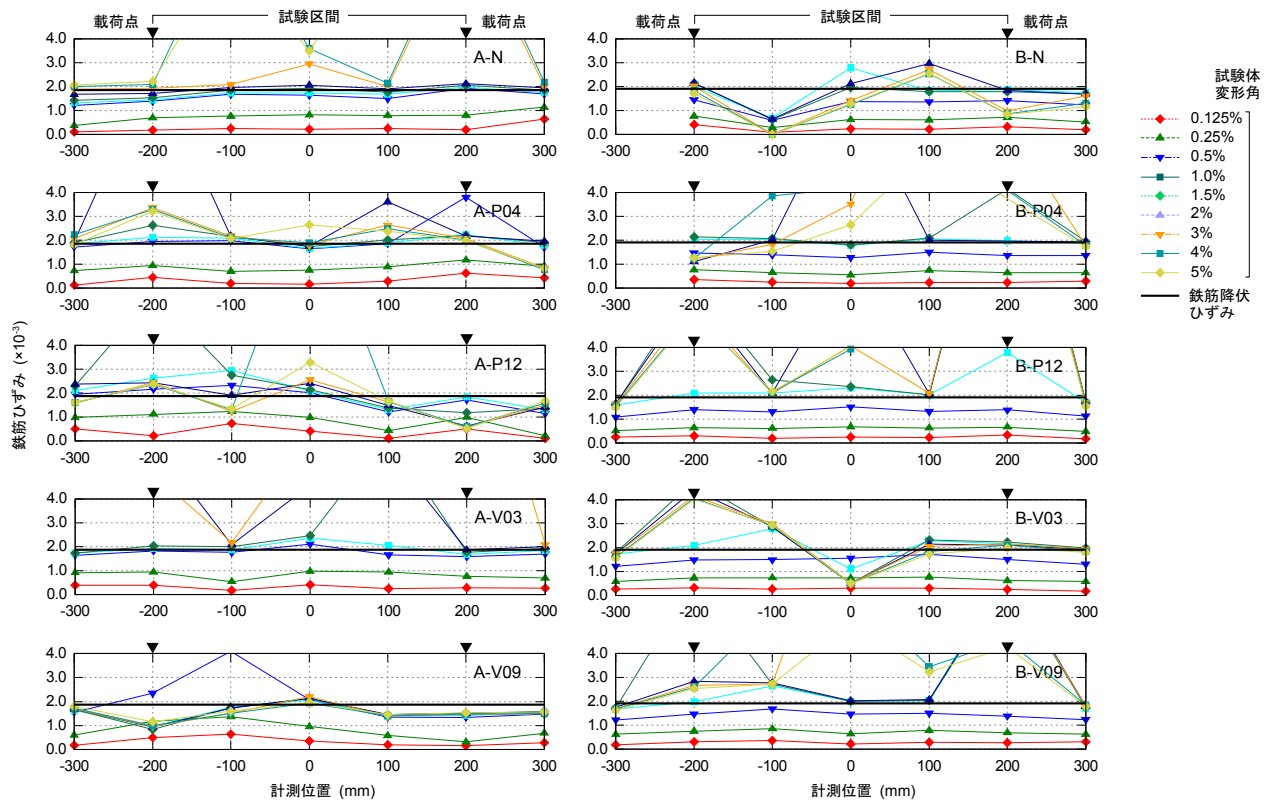


図-6 鉄筋ひずみ分布

(2) B シリーズ

試験体 B-N は A-N と比較して鉄筋のひずみは小さい。特に降伏ひずみに達した範囲は限定的であり、中央から -100mm の位置の鉄筋ひずみが小さい。この箇所は梁上部コンクリートの圧壊が著しく、圧壊により中立軸が下方に移動し、鉄筋ひずみが増加しなかったと考えられる。

繊維補強試験体では B-P04, B-P12, B-V09 の鉄筋ひずみが B-N と比較して大きくなっている。これらの試験体では梁上部コンクリートに圧縮によるひび割れが生じた後も急激な耐力低下は生じておらず、圧縮力の負担能力を保持していた。試験体 B-V03 で他の繊維補強試験体と比べてやや鉄筋ひずみが小さい。特に中央のひずみは小さく降伏ひずみに達しなかった。B-V03 では中央部の圧縮ひび割れの程度がやや大きく (図-5(i))、B-N と同様に中立軸が下方に移動したと考えられる。

4. 考察

4.1 曲げモーメント-曲率関係

試験体中央部の曲げモーメントと曲率の関係を図-7 に示す。曲率は左右の荷重点間で一定と仮定し、荷重点に対する中央の相対変位から算定した。

図中には、実験値として鉄筋降伏および終局時の点を、計算値としてひび割れ荷重、鉄筋降伏、終局時の点を示し

た。終局は圧縮縁のコンクリートひずみが 0.3% に達した時点とし、実験値のコンクリートひずみは曲率と鉄筋ひずみから求めた。強度の算定に際し、ひび割れ後のコンクリートの引張応力は 0 と仮定し、圧縮側鉄筋は無視、終局時におけるコンクリートの応力分布は ACI ストレスブロック法によった。また、材料の強度・ヤング係数は表-3 の材料試験値を用いた。ただし、コンクリートの引張強度は圧縮強度より算定した値を用いた。

(1) A シリーズ

繊維を混入していない試験体 A-N では、鉄筋降伏以前の剛性はひび割れ後剛性とほぼ一致している。繊維を混入した試験体の初期剛性は計算値とほぼ等しく、ひび割れ荷重後はゆるやかに剛性が低下している。剛性低下の程度は A-P12, A-V09 では小さく、A-P04, A-V03 でやや大きいものの、繊維混入量による傾向が明確であるとはいえない。鉄筋降伏時では、鉄筋による応力伝達の割合が大きいので、繊維による傾向が現れにくいと考えられるが、定量的な検討が必要である。実験時曲げモーメント-曲率関係の折れ点の曲げモーメントは、鉄筋降伏時曲げモーメントの計算値に対して 15~30% 程度大きくになっているが、圧縮側鉄筋の影響と考えられる。

(2) B シリーズ

繊維なしの試験体 B-N では、ひび割れ荷重後から最大荷

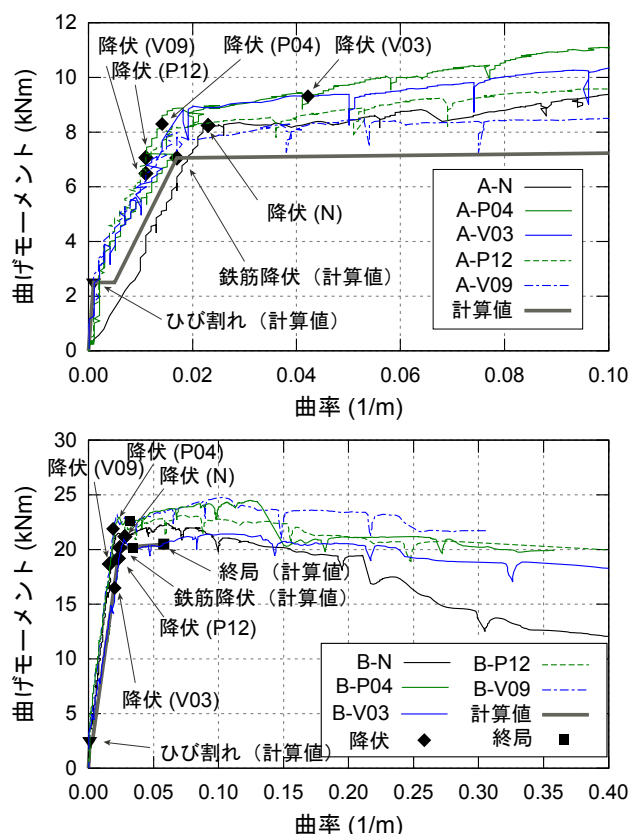


図-7 曲げモーメント-曲率関係

重までの曲げモーメント-曲率関係はおおむね計算値と一致した。繊維を混入した試験体ではB-P12を除いてひび割れ荷重付近の剛性はB-Nと比較して高いものの、その後の剛性低下は大きく、ピーク時の割線剛性や曲げモーメントに大きな差は見られなかった。B-Nの耐力は曲率0.08(1/m)以降50%まで大きく低下するが、繊維補強の試験体の耐力低下は80%程度までに抑えられ、圧壊による耐力低下を抑制する効果が確認された。実験値の終局時曲率はいずれも計算値を下回っているが、最大耐力時の曲率は計算値の終局曲率に対して、B-N、B-P12ではほぼ同等、B-P04、B-V03、B-V09で2倍程度となっており、B-P12以外では繊維により靱性が向上したと考えられる。

5. まとめ

疎水性のPP短繊維を混入したRC梁の曲げ補強効果について、通常コンクリートおよび親水性のPVA短繊維を混入したコンクリートとの比較実験を行った。実験の結果、以下の事項を確認した。

- (1) 鉄筋量の少ない試験体では、PP、PVAいずれの繊維の混入によっても曲げひび割れ発生後の剛性低下を抑制することができた。

- (2) 鉄筋量の多い試験体では、繊維の混入により、圧壊時の耐力低下を抑制することができた。

- (3) 繊維を混入した試験体では付着割れひび割れが減少した。

今後の課題として、PP繊維補強コンクリートの材料モデル、PP繊維補強RC部材の解析モデルに関する検討を行っていく。

[謝辞]

本研究は京都大学工学研究科建築学専攻環境材料研究室にて金子佳生教授および佐藤裕一助教の指導の下に行われたものである。実験の実施にあたっては研究室の学生各位に協力をいただいた。また、本実験に使用したPP繊維は萩原工業株式会社より、PVA繊維は株式会社クラレより、高性能AE減水剤は株式会社フローリックより提供いただいた。関係各所に感謝の意を表する。

[参考文献]

- 1) 日本コンクリート工学会：繊維補強セメント系複合材料の新しい利用に関するシンポジウム，委員会報告書，2012
- 2) 十河茂幸，早川光敬，室賀陽一郎：コンクリート用ポリプロピレン短繊維のJIS概要，コンクリート工学，Vol.53，No.10，pp.861-866，2015.10
- 3) 藤中英生，三井健郎，米沢敏男，古平章夫：ポリプロピレン繊維を混入した高強度RC柱の耐火性能，日本火災学会論文集，Vol.54，No.1，2004
- 4) 森田武，別府万寿博，鈴木誠：高速衝突を受けるポリプロピレン短繊維補強コンクリートの耐衝撃性能，日本建築学会構造系論文集，第78巻，第684号，pp.319-327，2013.2
- 5) 山本基由，六郷恵哲：曲げおよび引張試験によるポリプロピレン繊維補強モルタルの繊維補強効果の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.359-364，2006
- 6) 川又篤，高橋貴藏，堀越哲郎，松岡茂：繊維補強セメント系複合材料の基礎性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.389-394，2006
- 7) 薫賀祥，西村正，関博：合成短繊維の付着特性が補強コンクリートの曲げ特性に与える影響に関する研究，コンクリート工学論文集，第20巻，第1号，pp.1-13，2009