

# 論文 超高強度材料を使用した RC 柱部材の耐力および変形性能確認実験

崔 準祐\*1・牟田 諒平\*2・野澤 忠明\*3・大塚 久哲\*4

**要旨：**近年、部材断面の縮小による死荷重の低減，施工の省力化，建設コストの削減を目的として高強度材料を使用した事例が増え，RC 柱部材への適用に対する関心も高くなりつつある。本研究では，超高強度繊維補強コンクリート（PVA-UFC）と超高強度鉄筋（USD685）を使用した RC 柱部材の耐震性能を明らかにすることを目的とし，正負交番載荷実験を実施した。コンクリートと鉄筋の材料をパラメータとした 4 つの柱部材に対して交番載荷実験を実施し，水平耐力，骨格曲線と損傷イベント，履歴吸収エネルギー，損傷進展状況について比較検討を行った。

**キーワード：**超高強度繊維補強コンクリート，超高強度鉄筋，RC 柱部材，変形性能，交番載荷実験

## 1. はじめに

近年、部材断面の縮小による死荷重の低減，施工の省力化，建設コストの削減を目的として高強度材料を使用した事例が増えつつある。高強度部材の耐力や変形性能など，その諸特性を明らかにする必要があるが，これまで土木構造物においては圧縮強度 60N/mm<sup>2</sup> 以上の高強度材料を使用した RC 柱部材に対する性能検証実験事例は少ない。既往の実験事例を調べてみると，梁部材についてはせん断耐力に関する研究<sup>1)</sup>，柱部材については鉄道橋橋脚に関する研究<sup>2), 3)</sup>，高強度材料を用いた RC 柱部材に対する正負交番載荷実験<sup>4)</sup>など，いくつかの研究事例があるに過ぎない。したがって，高強度材料をより一般的に使用するためには，より多くの性能検証実験を実施し，高強度材料を使用した部材の評価式や照査法を構築する必要がある。

そこで本研究では，高強度材料を使用した RC 柱部材の耐力変形性能を把握することを目的とし，普通コンクリート，超高強度繊維補強コンクリートの一種である PVA-UFC（以後，PVA-UFC），普通鉄筋の SD345，超高

強度鉄筋の USD685 を組み合わせた 4 体の RC 柱部材に対して正負交番載荷実験を実施した。実験により得られた水平耐力や履歴吸収エネルギー，損傷状況を比較し，超高強度材料を用いた RC 柱部材の特性を分析した。

## 2. PVA-UFC の特徴

本実験では，補強材として PVA 繊維を配合した超高強度繊維補強コンクリート（PVA-UFC）を使用した。PVA 繊維の優れた付着性と伸び性能を期待したコンクリートである。結合材にはビーライト含有量が約 50%である低熱ポルトランドセメントをベースとして，シリカフェームを添加したプレミックスセメントを使用している。骨材は最大粒径 2mm，表乾密度 2.60g/cm<sup>3</sup> の珪砂を使用し，粗骨材は使用していない。また，ポリカルボン酸系の高性能減水剤を主剤とした混和剤を使用することで，水結合材比を 15%とした。補強繊維は，親水性の高いポリビニルアルコール系の PVA 繊維（引張強度 1.2×10<sup>3</sup>N/mm<sup>2</sup>，繊維長：12mm，直径：0.1mm）を 1.7vol%内割添加した。表-1 に本実験で使用した PVA-UFC の標準配合を示す。

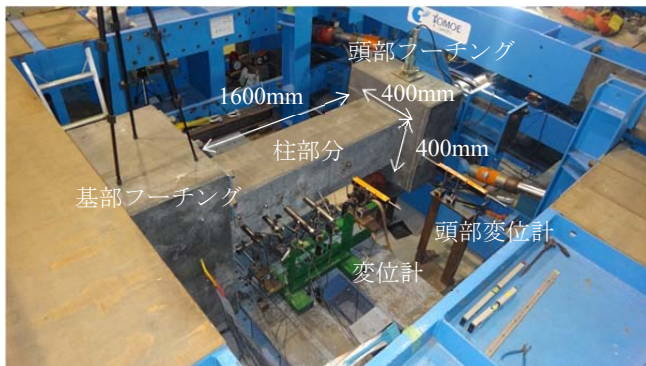


図-1 実験供試体のセットアップ

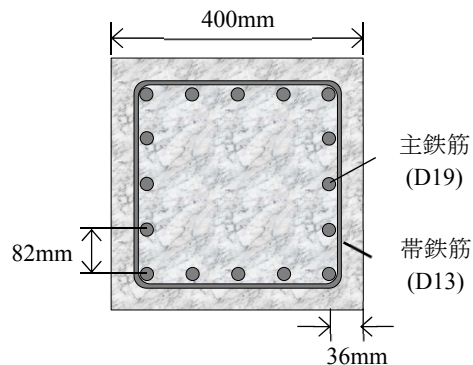


図-2 供試体断面

\*1 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 助教 博(工) (正会員)

\*2 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻

\*3 (株) エスイー 新製品開発部 (正会員)

\*4 (株) 大塚社会基盤総合研究所 (正会員)

これら材料を十分に混練し、蒸気養生を行うことで圧縮強度が約 150N/mm<sup>2</sup>、曲げ引張強度が約 20N/mm<sup>2</sup> という超高強度が発揮される。また、自己収縮量は 800μ 程度であり、他の超高強度繊維補強コンクリートと同程度である。本実験での供試体の養生方法は、供試体寸法が大きく蒸気養生が困難であったため気中養生とし、材齢 28 日をまって載荷試験を行った。

表-1 標準配合

W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	水 W	結合材 B	骨材 S	混和剤 A	PVA 繊維 F
15.0	195	1500	750	30.0	1.7vol%

### 3. 正負交番載荷実験

#### 3.1 実験供試体諸元

実験供試体のセットアップ状況を図-1 に示す。供試

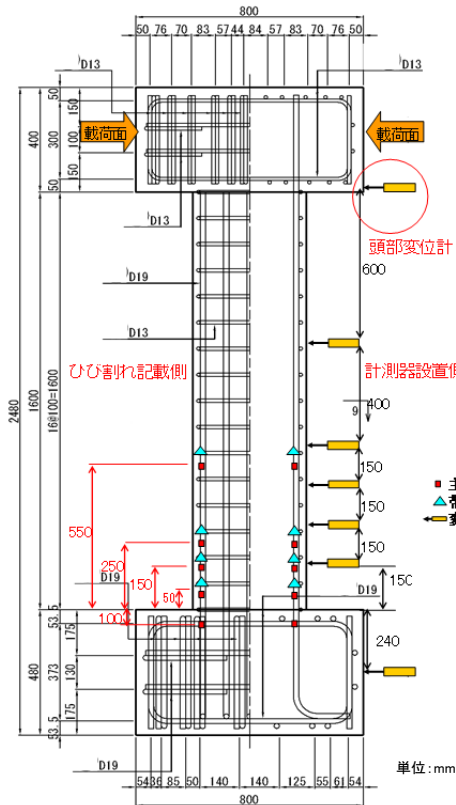


図-3 供試体寸法と計測器測定位置

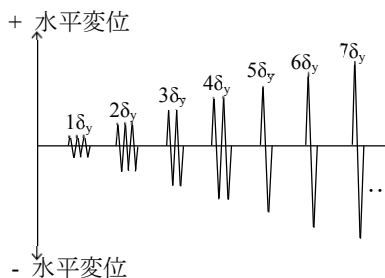


図-5 載荷パターン

体は鉄筋コンクリート (RC) 製であり、基部フーチング、橋脚部分、頭部フーチングより構成される。柱部の長さは 1600mm であり、その断面は図-2 に示す 400mm×400mm の正方形断面とした。主鉄筋は、D19 鉄筋を 16 本均等に配置し、帯鉄筋は、D13 鉄筋を 100mm 間隔で配置した。帯鉄筋はフレア溶接により閉合されている。

#### 3.2 測定項目と測定方法

水平荷重は、水平荷重載荷用ジャッキに設置したロードセルの値を出力した。また、水平荷重-水平変位関係における水平変位は、図-3 に示す変位計のうち、頭部フーチング端部に設置した変位計より得られた値を使用した。

#### 3.3 載荷方法

載荷装置図を図-4 に示す。基部フーチングは PC 鋼棒により載荷装置に固定し、頭部フーチングはボルトにより載荷板に固定した。初期軸力は、一般的な道路橋橋脚に作用している軸力相当として、軸応力が 1.0N/mm<sup>2</sup>

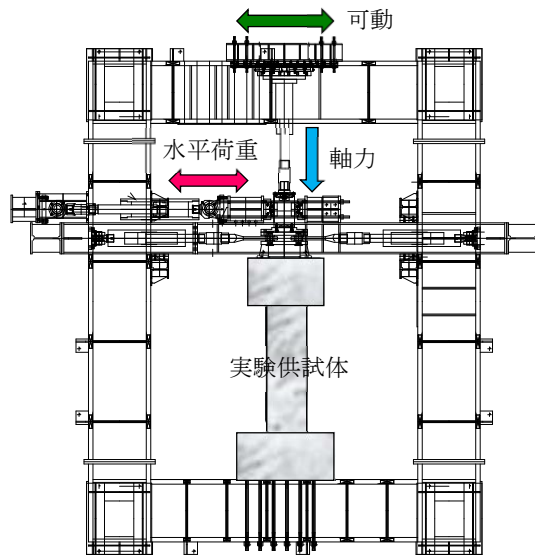


図-4 載荷装置

表-2 実験検討ケース

実験ケース	コンクリートの種類	主鉄筋の種類	帯鉄筋の種類
No.1	普通コンクリート	SD345	SD345
No.2	PVA-UFC	SD345	
No.3	普通コンクリート	USD685	
No.4	PVA-UFC	USD685	

表-3 材料試験結果の比較

実験ケース	(a) コンクリート			(b) 鉄筋			
	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング率 N/mm <sup>2</sup>	主鉄筋		帯鉄筋	
				降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング率 N/mm <sup>2</sup>	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング率 N/mm <sup>2</sup>
No.1	41.2	2.7	32100	392.0	200000	399.0	200000
No.2	143.9	6.3	48000	405.0	198000	395.0	195000
No.3	36.3	2.5	33000	716.0	200000	395.0	195000
No.4	154.0	6.6	49500	760.5	216000	399.0	200000

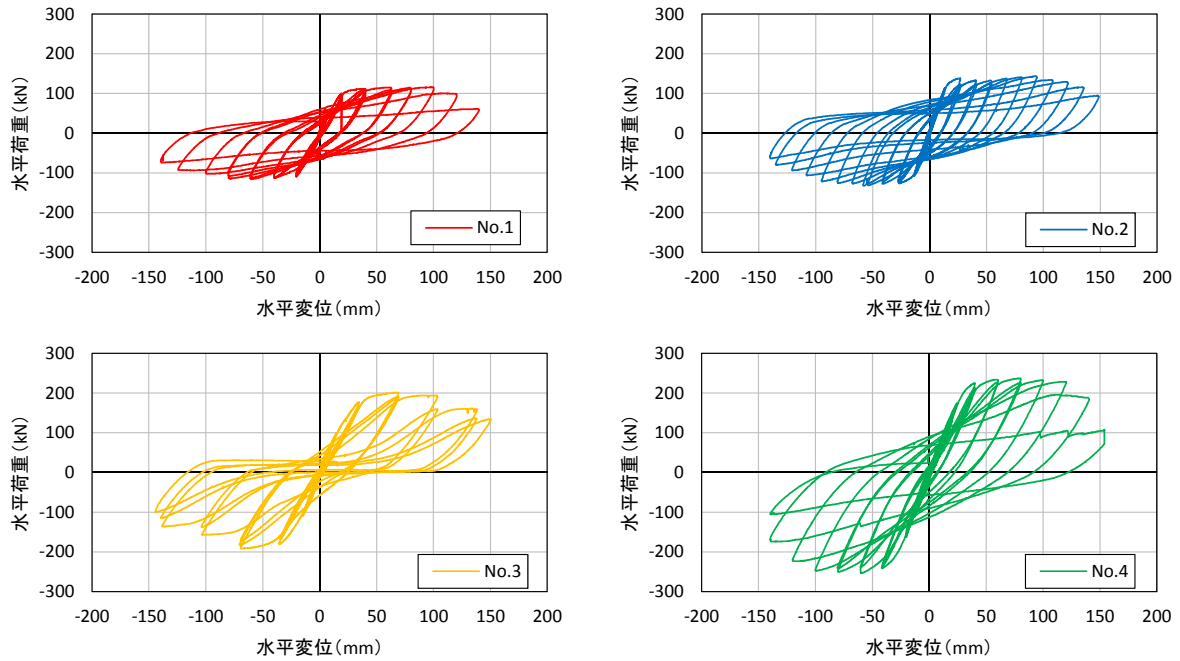


図-6 水平荷重-水平変位履歴の比較

表-4 ひび割れ点剛性,  $\delta y$ , 降伏耐力, 降伏点剛性, 最大耐力, 終局変位の比較

実験ケース	No.1	No.2	No.3	No.4
ひび割れ点剛性(kN/mm)	7.5	17.1	11.6	20.0
$\delta y$ (mm)	20.0	13.5	34.5	20.0
降伏耐力(kN)	100.4	113.3	175.4	150.5
降伏点剛性(kN/mm)	5.2	8.4	5.1	7.5
最大耐力(kN)	115.9	143.8	201.8	236.9
終局変位(mm)	139.8	135.6	138.5	140.4

となるように、160kNを作用させた。なお、軸力は頭部が水平に変位しても常に軸方向に作用させることができるようにスライドする構造となっており、水平荷重、軸力は独立して作用させることができる。

また、荷重パターンを図-5に示す。本実験では、文献5)のガイドラインに則り、図-5に示す荷重パターンに従って正負交番荷重実験を実施することとし、1 $\delta y$ 及び2 $\delta y$ は3回、3 $\delta y$ 及び4 $\delta y$ は2回、5 $\delta y$ 以降は1回ずつの交番荷重を行った。なお、本実験では、荷重時に鉄筋ひずみをモニターし、主鉄筋ひずみが初めて降伏ひずみを超えたときの変位を1 $\delta y$ とした。

### 3.4 実験検討ケース

実験検討ケースを表-2に示す。本検討では、コンクリートと鉄筋に対し、普通材料及び超高強度材料のそれぞれ2種類を用意し、計4ケースに対して正負交番荷重実験を実施した。ここで、普通コンクリートの設計基準強度は30N/mm<sup>2</sup>、PVA-UFCは150N/mm<sup>2</sup>を目標圧縮強度とした。また、普通鉄筋はSD345を、超高強度鉄筋はUSD685を使用した。表-3に各実験に際して実施した材料試験結果をケースごとに示す。

## 4. 実験結果

### 4.1 水平荷重-水平変位関係

図-6にNo.1~No.4の水平荷重-水平変位履歴を示す。また、表-4にはNo.1~No.4のひび割れ点剛性、 $\delta y$ 、降伏耐力、降伏点剛性、最大耐力、終局変位の比較を示す。ここでは、文献5)を参考に、1サイクル目の荷重で水平荷重が初めて最大荷重の80%以下に低下したときの荷重を終局荷重、そのときの変位を終局変位と定義した。降伏点剛性は、主鉄筋が降伏した点と原点を結んだ線の勾配とした。まず、PVA-UFCの影響を確認するため、No.1(普通コンクリート+SD345)とNo.2(PVA-UFC+SD345)を比較した。表-4よりNo.2ではNo.1に比べ降伏点剛性、降伏耐力、最大耐力が大きいことが分かる。降伏点剛性が大きくなったのは、表-3に示すようにNo.2のPVA-UFCのヤング率がNo.1の普通コンクリートのヤング率に比べ1.5倍程度大きいためと考えられる。降伏耐力が大きくなったのは、No.2の鉄筋降伏応力がNo.1のそれより13N/mm<sup>2</sup>高いこと、また最大耐力が大きくなったのは、No.2の圧縮強度がNo.1のそれより3.5倍ほど大きいことが理由と考えられる。終局変位についてはNo.2の方がNo.1に比べ5mm程度小さいがそれほど

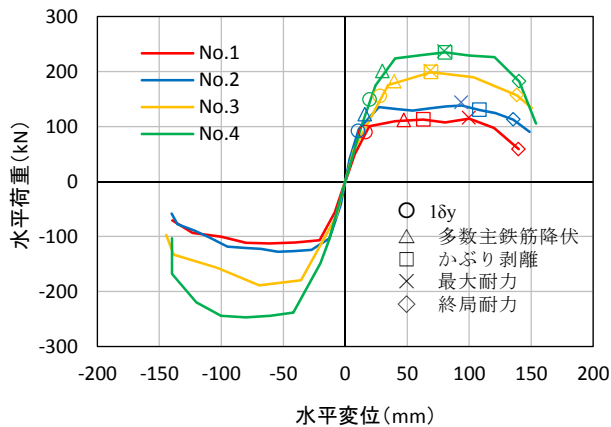


図-7 骨格曲線と各イベント

変化していない。

次に、超高強度鉄筋の影響を確認するため、No.1（普通コンクリート+SD345）と No.3（普通コンクリート+USD685）を比較した。表-4 より No.3 は No.1 に比べ、降伏点剛性は 0.1kN/mm 程度小さく、降伏耐力は 75kN 程度、最大耐力は 86kN 程度大きいことが分かる。終局変位については、No.3 の方が No.1 に比べ 2mm 程度小さいが、それほど変化していない。

また、PVA-UFC と超高強度鉄筋の両方の影響を確認するため、No.1（普通コンクリート+SD345）と No.4（PVA-UFC+USD685）を比較した。表-4 より No.4 では No.1 に比べ、降伏点剛性は 1.9kN/mm 程度、降伏耐力は 50kN 程度、最大耐力は 120kN 程度大きいことが分かる。終局変位について No.4 と No.1 はそれほど変化していない。一方、No.4 の降伏点剛性が No.2 のそれより小さくなっているが、これは鉄筋ひずみによる降伏点判定において誤差が生じたことが原因と考えられる。また、No.4 の降伏耐力が No.3 のそれより小さくなっているが、これも降伏点判定時の誤差が原因として考えられる。ただし、図-7 をみると  $1\delta y$  点を超えても弾性挙動を行っており、部材の降伏耐力としては No.4 が No.3 よりやや大きい。

#### 4.2 骨格曲線と各イベント

図-7 は、図-6 の水平荷重-水平変位履歴を基に骨格曲線を描き、さらに各イベントをプロットしたものである。まず、図-7 において No.1 と No.2 を比較した。多数の主鉄筋が降伏する点とかぶりコンクリートの剥離した点の関係において違いが見られ、No.1 では多数の主鉄筋が降伏した後すぐにかぶりコンクリートが剥離したのに対して、No.2 では多数の主鉄筋が降伏してもすぐには剥離せず 100mm を超えてから剥離し始めた。これは PVA-UFC に含まれている合成繊維によって剥離が抑制されているためと考えられる。

また、No.1 と No.3 を比較してみると、かぶりコンクリートの剥離した点と耐力が下がる時期について違いが

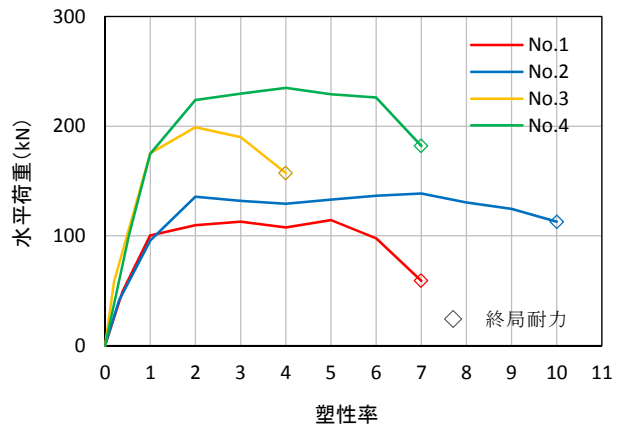


図-8 水平荷重と塑性率の関係（正側の値による）

見られた。No.1 と異なり、No.3 はかぶりコンクリートの剥離した後、耐力の低下が早く生じることが確認された。これは、超高強度鉄筋の降伏ひずみが大きいため、主鉄筋降伏以降のかぶりコンクリートの剥離が激しくなったことが原因と考えられる。

また、No.1 と No.4 を比較してみると、最大耐力を迎えた後の挙動において違いが見られた。No.1 は最大耐力後に荷重が低下し始めたのに対し、No.4 では最大耐力を迎えても No.1 より大きな変位までほぼ荷重を保ち続けていた。2次勾配を図-7 から読み取ると、No.1 から No.4 まで徐々に増加しており、超高強度繊維補強コンクリートと超高強度鉄筋の影響がここにも現れていることがわかる。

#### 4.3 水平荷重と塑性率との関係

図-8 は、図-7 の骨格曲線を水平荷重と塑性率との関係で現したものである。ここで示す塑性率は、主鉄筋ひずみが初めて降伏ひずみを超えたときの変位 ( $\delta y$ ) を降伏変位とし、各ケースの水平変位を  $\delta y$  で除して求めている。

No.1 では、塑性率 5 の付近で水平耐力が低下し始め、塑性率 6 付近で終局耐力を迎えたのに対し、PVA-UFC と普通鉄筋を使用した No.2 では、塑性率 7 付近で水平耐力が低下し始め、塑性率 10 付近で終局耐力を迎えた。No.2 では、コンクリートのヤング率大きく、 $\delta y$  が 11mm 程度と小さいこともあるが、塑性率の観点からみると普通コンクリートより PVA-UFC の方が耐力を保持できる（靱性が大きい）ことが分かる。

一方、No.3 では、塑性率 2 付近で最大耐力を示した後水平耐力が低下、塑性率 4 付近で終局を迎えた。超高強度鉄筋を使用した場合は、 $\delta y$  が 34mm と他のケースに比べ大きいため、塑性率の観点からみると普通鉄筋より超高強度鉄筋を使用した方が靱性が小さいことが分かる。No.4 では、塑性率 6 の付近で水平耐力が低下し始め、塑性率 7 付近で終局耐力を迎えており、No.1 および No.3

よりも耐力を保持できることが分かる。

#### 4.4 履歴吸収エネルギー

図-9に各サイクルで1波目の荷重による履歴吸収エネルギーと水平変位の関係を示す。ここで示す履歴吸収エネルギーは、各履歴ループの面積として評価している。

まず、No.1とNo.2を比較してみると、No.1に比べNo.2の履歴吸収エネルギーが全体的に大きくなっていることがわかる。これは、図-6と表-4に示すようにNo.1に比べNo.2の降伏点剛性や降伏耐力が大きくなっていることから推察でき、ループごとの履歴吸収エネルギーは、普通コンクリートを使用した部材より大きくなるのがわかった。No.3では、靱性に乏しいため水平変位100mm以降からエネルギー吸収が大きくなる傾向を示した。また、No.4では、他のケースに比べ、No.1とNo.2に比べ履歴ループ形状が中心部において膨らんでいる紡錘形となっており、全般的に履歴吸収エネルギーが大きい。

#### 4.5 損傷進展状況

ここでは、各供試体における損傷進展状況について述べる。図-10は、各実験ケースの最終荷重時において、基部の損傷状況を示したものである。

##### (1) ひび割れ発生状況

ひび割れは、全てのケースにおいて、概ね帯鉄筋と同じ間隔で発生しており、ひび割れ本数は全ケースでほとんど変わらなかった。しかし、No.2とNo.4では、No.1に比べ、基部の特定のひび割れが拡大・卓越していく傾向を示した。また、No.2とNo.4のヤング率が大きいいため、供試体が水平変形していた際の中立軸が普通コンク

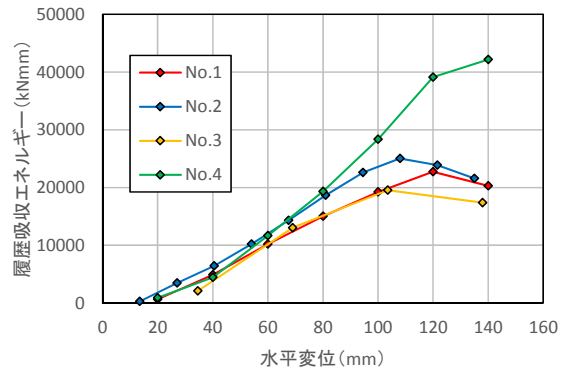
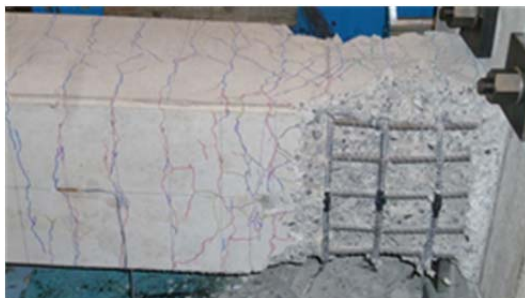


図-9 履歴吸収エネルギー(各ステップ1波目荷重)

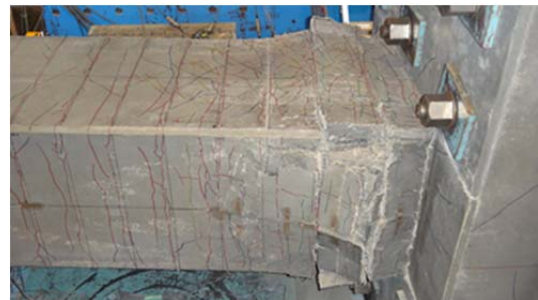
リートと比較して、圧縮側に位置することが考えられる。これにより、普通コンクリートに比べNo.2とNo.4の引張領域が広くなり、引張側の表面に生じるひび割れ幅が大きくなったと考えられる。

##### (2) かぶりコンクリートの剥離

No.1では、60.0mm荷重で圧縮縁の隅角部においてかぶりコンクリートの剥離が確認され、120.0mm荷重時には基部から300mm~400mm程度までのかぶりコンクリートの剥落が見られた。No.2では、かぶりコンクリートの剥離は108.0mm荷重まで発生せず、かぶりコンクリートの浮き上がりが生じたものの、剥落はしなかった。損傷区間は基部から200mmまでの間であった。No.3では、69.0mm荷重でかぶりコンクリートの剥離が見られ、103.5mm荷重でかぶりコンクリートの剥落が始まっていた。No.3のP- $\delta$ 関係において69.0mm荷重以降耐力が大



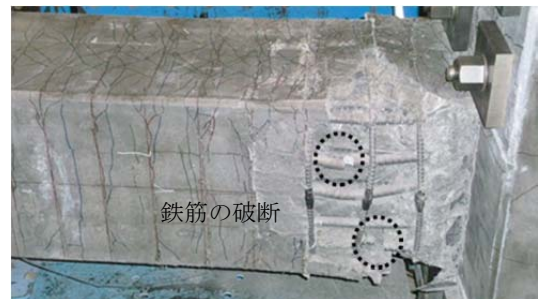
(a) No. 1 (最大変位 139.8mm)



(b) No. 2 (最大変位 148.8mm)



(c) No. 3 (最大変位 150.6mm)



(d) No. 4 (最大変位 153.9mm)

図-10 各ケースの最終荷重時における基部の損傷状況

大きく低下していたが、この早い段階でのかぶりコンクリートの剥落が原因と考えられる。損傷が生じた区間は基部から 200mm までの間であった。No.4 では、80.0mm 載荷でかぶりコンクリートの剥離が確認された。しかし、かぶりコンクリートは剥落せず、卓越したひび割れ間のコンクリートが浮き上がるような状態で終局を迎えた。こうした結果は、PVA-UFC 内の合成繊維によってかぶりコンクリートの剥落が抑制されたためと考えられる。かぶりコンクリートの浮き上がりが見られたのは、基部から 400mm 程度までであった。

### (3) 主鉄筋の座屈および破断

No.1, No.4 では基部から 300mm 程度まで、No.2 では基部から 200mm 程度までの主鉄筋の座屈が確認されたが、No.3 では主鉄筋の座屈は確認されなかった。No.3 のみ主鉄筋の座屈が生じなかったのは、 $\delta y$  が大きいことから、主鉄筋に大きな圧縮ひずみが生じる前に、かぶりコンクリートが著しく剥落したためと考えられる。

また、No.1～No.3 では、主鉄筋の破断は生じなかったが、No.4 では、図-3 に示すひび割れ記載側の基部から 100mm～200mm, 200mm～300mm の箇所では 1 本ずつ、計測器設置側の 200mm～300mm の箇所では 1 本の計 3 本の破断が確認された。No.4 で主鉄筋の破断が生じたのは、超高強度鉄筋が普通鉄筋に比べて脆性挙動を示すこと、かぶりコンクリートの剥落後に主鉄筋が負担する水平荷重が大きかったことが原因と考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、超高強度繊維補強コンクリートの一種である PVA-UFC と超高強度鉄筋 USD685 を使用した RC 柱部材の耐震性能を確認するため、コンクリートと鉄筋の材料をパラメータとした交番載荷実験を行った。本研究により得られた知見を以下に示す。

水平荷重-水平変位関係の比較より、PVA-UFC および USD685 を使用することで、RC 柱部材の降伏点剛性、降伏耐力、最大耐力を向上させることが可能であることが分かった。一方、終局変位については、全てのケースにおいて大きな変化はみられなかった。

骨格曲線とイベントの比較より、超高強度材料を使用することで 2 次勾配がわずかに上昇していくこと、また PVA-UFC の使用により最大耐力またはかぶりコンクリートの剥離が生じた後にも水平耐力を保持し続けることが可能であることが確認された。また、普通コンクリートと USD685 の組み合わせでは、超高強度鉄筋の降伏ひずみが大きいこと、主鉄筋降伏以降のかぶりコンクリートの剥離が激しくなり、耐力の低下が早く生じていた。

主鉄筋降伏を基準とした塑性率の観点からみると、普通コンクリートに比べ PVA-UFC を使用することにより水平耐力を長く保持することが可能であることがわかった。

損傷状況の比較では、PVA-UFC を使用すると、PVA-UFC 内の合成繊維によってかぶりコンクリートは剥落せず、卓越したひび割れ間のコンクリートが浮き上がるような状態で終局を迎える傾向にあることが分かった。

## 参考文献

- 1) 下野一行, 柏原茂, 佐藤勉, 松岡茂: 高強度材料を用いた RC 梁部材のせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.3, pp.175-180, 1999
- 2) 仲谷邦博, 木村祐司, 上田喜史, 山脇正史: 高強度鉄筋 SD490 を使用した七色高架橋の計画と設計(上), 橋梁と基礎, pp.11-16, 1999.11
- 3) 岡本大, 奥西淳一, 堀慎一: 高強度材料を用いた鉄骨鉄筋コンクリート柱の曲げ耐力と変形性能の評価, 鉄道総研報告, Vol.28, No.1, 2014.1
- 4) (独) 土木研究所: 高強度材料を用いた鉄筋コンクリート橋脚の耐力・変形性能の評価に関する研究(その 1: 正方形断面を有する橋脚), 土木研究所資料, 第 4007 号, 2006.2
- 5) (独) 土木研究所 耐震グループ耐震チーム: 橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン(案)(橋脚の正負交番載荷実験方法及び振動台実験方法), 土木研究所資料, 第 4023 号, 2006