

論文 静的載荷および一定持続載荷されたRPC補強RC梁部材の変形挙動に関する実験的検討

山口 哲也*1・氏家 勲*2・岡崎 慎一郎*3・川本 聖二*4・

要旨: 本研究は鉄筋コンクリート梁部材の引張部を反応性粉体材料(RPC)で補強した使用状態においてひび割れが発生しないRPC補強RC梁部材の変形挙動について実験的に検討した。本研究では補強タイプの異なる2種類のRPC補強RC梁部材を作製し、静的載荷試験および一定持続載荷試験を行った。静的載荷試験における曲率は、一般のRC部材と同様に、弾性解析により計算でき、ひび割れ発生後も有効換算断面2次モーメントを用いて評価できた。一定持続載荷試験において、RPC補強RC部材にひび割れの発生は確認されなかったが、曲率の増加量はRC部材とほぼ同じかそれ以上となった。

キーワード: 鉄筋コンクリート, ひび割れ, 反応性粉体材料, 曲率

1. はじめに

これまでの繊維補強コンクリートのひび割れ分散性や破壊靱性などの性能をはるかに上回る高靱性セメント複合材料が注目を集めている¹⁾。高靱性セメント複合材料は引張応力条件化における靱性向上にその特徴があるが、この高靱性はセメント系材料を繊維で補強することによりもたらされるが、高靱性セメント複合材料の一つである反応性粉体コンクリート(Reactive Powder Composite, 以下RPCと呼ぶ)は、反応性粉体の利用、骨材の細粒化、粉体の最密充てん化によりペースト自身も高強度化したものである。これによりRPCでは引張応力下で弾性変形後、最初にひび割れが発生する応力である初期ひび割れ強度も著しく高くなっている。

著者らはこのRPCの高い初期ひび割れ強度に着目して、RC部材の引張部の一部を適切にRPCで補強することにより、使用状態で考慮する荷重が作用した場合にひび割れが発生しないRPC補強RC部材を開発した。本研究ではRPCの補強方法を変化させた2種類のRPC補強RC梁部材を作製した。そして、静的載荷試験および一定持続載荷試験を実施し、RPC補強RC梁部材の変形挙動について実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用したRPCは粒度調整がなされたセメント、シリカフェームおよび微粉珪砂があらかじめ配合されたプレミックス粉体および鋼繊維から成り、粗骨材は使用していない。

一方、通常のコンクリートに関しては、セメントには

早強ポルトランドセメント(密度 3.14g/cm^3)を、細骨材については砕砂(表乾密度 2.57g/cm^3 , 吸水率 1.33%)を、粗骨材については砕石(表乾密度 2.62g/cm^3 , 吸水率 0.88%)を使用した。

2.2 供試体

本研究で作製した供試体は図-1に示す幅 150mm ×高さ 200mm 、長さ 1800mm の長方形断面梁である。図中の灰色の部分にはRPCによる補強部であり、RPCの補強の方法は2通りに変化させた。引張鉄筋にはD16(SD295A)を2本使用し、RPCDについては梁断面の上縁から 170mm 、RPCUについては梁断面の上縁から 160mm の位置に配筋した。スターラップについてはRPCDではD6を使用し、コンクリートとの一体性の確保のために 100mm 間隔で全ての範囲に配置した。RPCUでは 100mm 間隔で曲げ区間以外に配置したが、コンクリートとの一体性の確保のために、RPCとコンクリートとの接合面に凹凸(高さ 10mm ×幅 20mm)を設けた。

供試体に用いたコンクリートおよびRPCの示方配合を表-1および表-2にそれぞれ示す。RPC補強RC梁部材は以下の手順で作製した。まず鉄筋を組み上げ、これを型枠内に設置し、RPCを打設する。打設後は2日間湿布養生を施し、その後 98°C で2日間蒸気養生を施した。さ

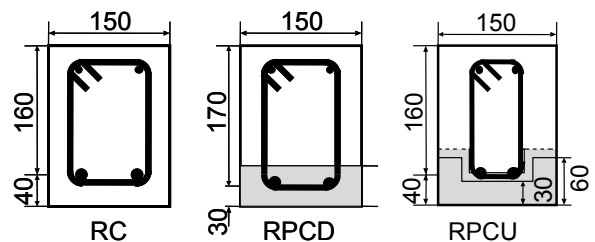


図-1 供試体断面図

*1 愛媛大学大学院 理工学研究科 (正会員)
 *2 愛媛大学大学院 理工学研究科教授 博士(工学) (正会員)
 *3 愛媛大学大学院 理工学研究科助教 博士(工学) (正会員)
 *4 愛媛大学 工学部環境建設工学科

表-1 コンクリート配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
45.0	34.6	165	367	645	1219	2.940

表-2 RPCの配合

単位量(kg/m ³)			
水	反応性粉体	鋼繊維	専用減水剤
165	2254	157	25

表-3 力学的性質

		圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
RPC	静的載荷	RPCD	170.3	9.6
		RPCU	164.3	9.8
	持続荷重載荷	RPCD	177.1	11.1
		RPCU	169.9	10.1
コンクリート		38.2	2.3	28.7

らに RPC 打設後から 7 日後にコンクリート部を打設し、同時に RC 梁部材を作製した。

表-3 は梁供試体の静的載荷試験時および一定持続載荷試験時のコンクリートおよび RPC の力学的性質を示す。なお、RPC の引張強度は割裂試験において供試体にひび割れが発生した時点の荷重から求めた初期ひび割れ強度である。

2.3 載荷試験

静的載荷試験および一定持続載荷はコンクリートの打設から 7 日後および 10 日後に開始した。荷重は図-2 に示すように、スパンの 3 等分点に載荷する 2 点載荷方式で載荷した。載荷は所定の荷重毎に段階的に増加させ、静的載荷試験では破壊に至るまで、持続載荷では曲げモーメント 5kN・m に相当する荷重を作用させた。測定は項目はスパン中央の 500mm の等曲げ区間において図-3 に示すように、引張鉄筋ひずみ、コンクリートの上縁ひずみ、RPC の下縁ひずみをひずみゲージで測定した。引張鉄筋ひずみの測定に関して、RPCU および RC では異形鉄筋の縦リブ位置に幅 4mm 深さ 3mm の溝を切削し、互い違いに 25mm 間隔で溝内にひずみゲージを貼付した。RPCD では溝を切削した鉄筋を使用した。引張鉄筋ひずみの測定は部材の中央 1 箇所とした。部材上縁の圧縮コンクリートひずみは部材中央 1 箇所計測した。部材下縁の引張 RPC ひずみの計測はひび割れの発生の有無

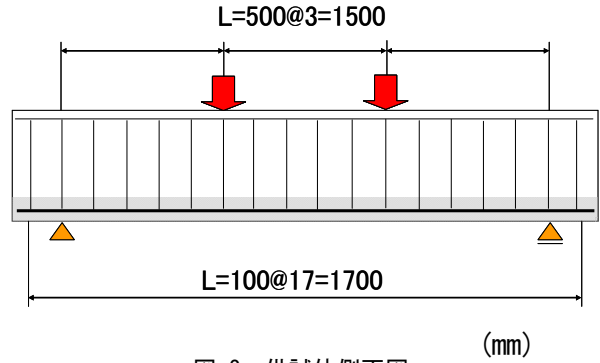


図-2 供試体側面図

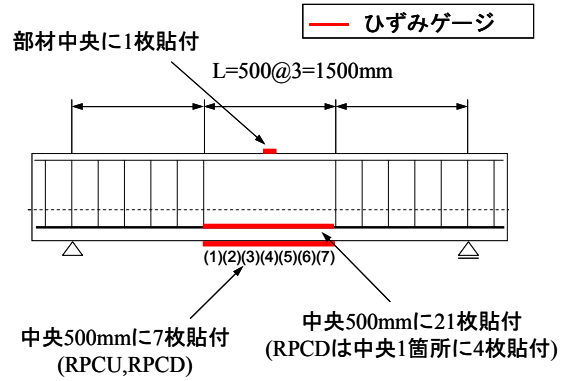


図-3 ひずみゲージ貼付箇所

を調べるためであり、ゲージ長 60mm のひずみゲージをスパン中央(ゲージ番号(4))とその両側に各 3 枚、計 7 枚を等曲げ区間の 500mm の範囲に貼付した。また、たわみは変位計で、RC のひび割れ幅はパイ型変位形で両側面の鉄筋位置において計測した。荷重の測定にはロードセルを用い、一定持続の荷重は 20±1kN 以内になるよう制御した。一定持続載荷試験は一般の実験室内で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 静的載荷試験

図-4 は RPCU の曲げ区間底面に貼付したひずみゲ

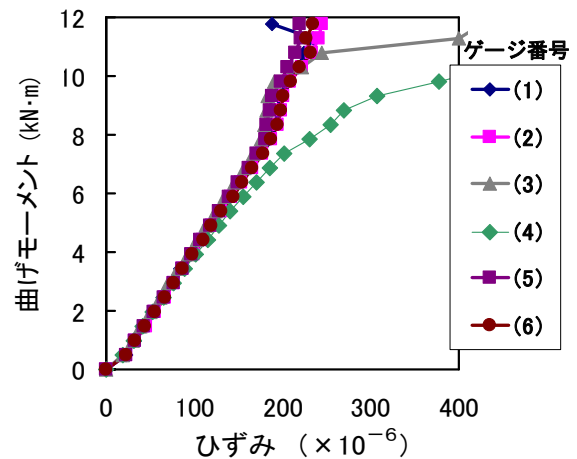


図-4 静的載荷時の底面ひずみ (RPCU)

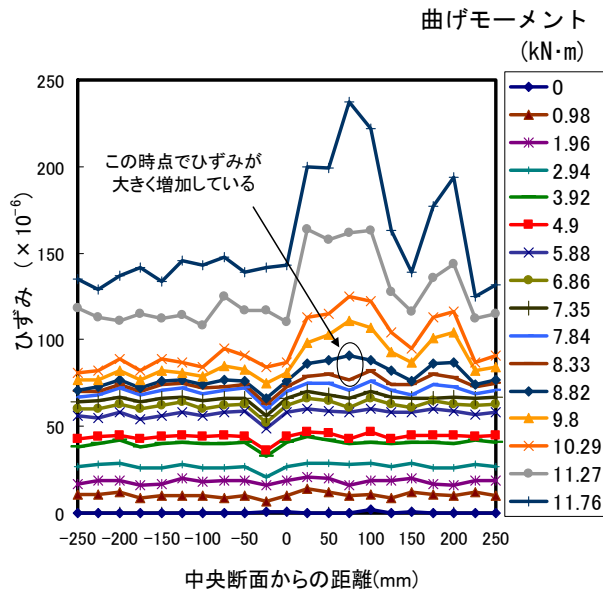


図-5 静的載荷時の鉄筋ひずみ (RPCU)

ジで計測した曲げモーメントの増加に伴う底面ひずみの増加を示す。凡例の番号は上述した曲げ区間に貼付したひずみゲージを表すが、番号(7)のひずみゲージは断線のため測定できなかった。底面ひずみは曲げモーメント 7.5kN・m までは直線的に増加している。しかしながら、曲げモーメント 7.5kN・m 以上において、ひずみゲージ(4)のひずみの増加割合は増加し、その他は減少している。よってこの時点でひび割れが発生し底面ひずみの増加を引き起こしたと考えられる。なお、載荷中の梁供試体の表面観察ではこの荷重段階でのひび割れの発生は非常に微細であるため確認できなかった。したがって、本研究では部材底面のひずみの変化からひび割れ発生モーメントを決定した。その結果、RPCU のひび割れ発生モーメントは 7.5kN・m、RPCD は 6.5kN・m であった。

図-5 は RPCU の鉄筋ひずみの分布を示す。曲げモーメントの増加とともに、鉄筋ひずみ分布はほぼ様な分布で増加している。しかしながら、梁中央から右へ 75mm の位置のひずみにおいて、曲げモーメントが 8.82kN・m の時に他の位置の鉄筋ひずみよりやや大きく増加している。この増加はひび割れ発生によるものであるが、底面ひずみによるものとの差は部材底面にひび割れが発生しても鋼繊維の効果により急激なひび割れの進展を抑制したためである。

図-6、図-7 は曲げモーメントと曲率の関係の実測値と計算値を比較したものである。計算値に関して、 I_e は曲げ剛性を部材全長にわたって一定とする場合の有効換算断面 2 次モーメントであり、次式で表される。

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 I_g + \left\{ 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right\} I_{cr} \quad (1)$$

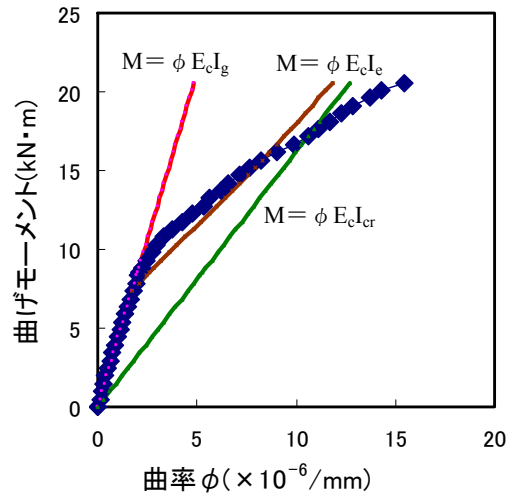


図-6 曲げモーメントと曲率の関係 (RPCU)

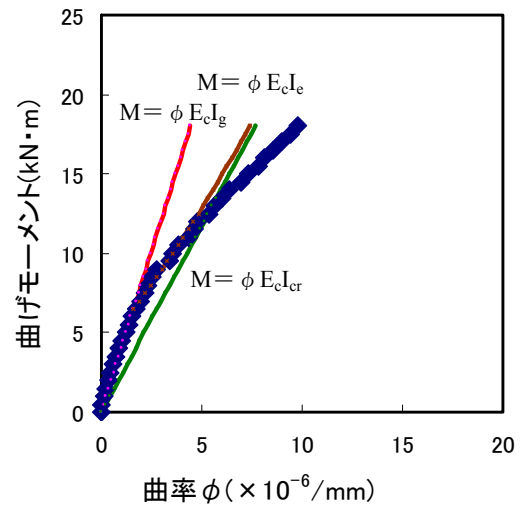


図-7 曲げモーメントと曲率の関係 (RPCD)

I_g は全断面有効とし、鉄筋と RPC のコンクリートに対するヤング係数比を用いた換算断面における図心軸に関する換算断面 2 次モーメントである。 I_{cr} はひび割れ断面の中立軸に関する換算断面 2 次モーメントであり、コンクリートおよび PRC どちらも引張応力を負担しないとして求めた。 M_{cr} はひび割れ発生モーメントであり、上述の底面ひずみが大きく増加した時点の曲げモーメントの値を用いている。

RPCU および RPCD どちらもひび割れ発生前までは I_g を用いた計算値と良く一致している。また、ひび割れ発生後は、RPCU では約 16kN・m あたりまで、RPCD では約 12kN・m あたりまでの破壊近傍を除く範囲で、RC 部材と同様に有効換算断面 2 次モーメントを用いて RPC 補強 RC 梁部材の曲げモーメントと曲率の関係を評価できている。RPC では鋼繊維によりひび割れ発生後も引張応力を負担するが、引張応力を負担しない I_{cr} を用いた有効断面 2 次モーメント I_e によって RPC 補強 RC 梁部材の曲率の評価ができており、曲率に及ぼす鋼繊維の引張応力

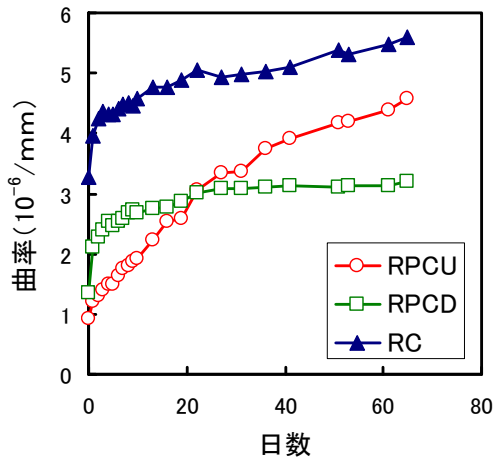


図-8 曲率の経時変化

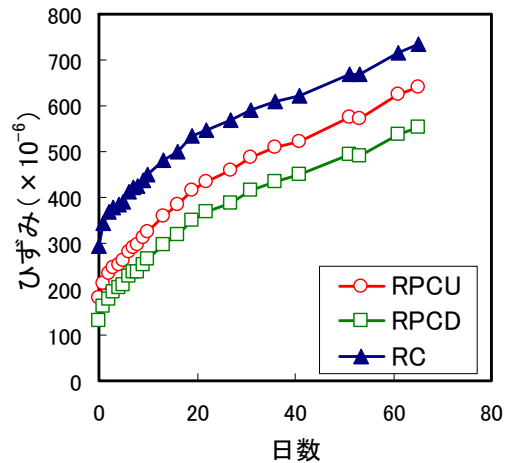


図-9 部材上縁の圧縮部コンクリートひずみの経時変化

表-4 静的載荷時のひび割れ発生曲げモーメントと破壊モーメント

供試体	ひび割れ発生曲げモーメント (kN・m)		破壊モーメント (kN・m)	破壊形式
	実測値	理論値		
RPCU	7.35	7.98	20.58	曲げ引張破壊
RPCD	6.50	8.75	18.00	曲げ引張破壊

負担の影響が小さいためと考えられる。

表-4はRPC補強RC梁部材のひび割れ発生モーメントおよび曲げ耐力を示す。ひび割れ発生モーメントの計算値は全断面有効として梁下縁の応力が表-3に示すRPCの引張強度に達した時にひび割れるとして計算した値である。RPCUはRPCDに比べてPRCによる補強面積が小さいにもかかわらず、PRCUのひび割れ発生モーメントと曲げ耐力はRPCDより大きくなっている。これは既往の研究でも報告しているように²⁾、RPCは蒸気養生中に大きな自己収縮が生じるが、RPCDではPRC内の鉄筋がその収縮を拘束し、初期応力として引張の拘束応力がRPC部に生じるためである。RPCUではRPC部に鉄筋を配置していないため、拘束応力が発生せず、ひび割れ発生曲げモーメントの計算値は実測値に近い値となっている。また、RPCUおよびRPCDどちらも通常のRC部材の計算方法による釣合い鉄筋比以下の引張鉄筋量を配置しており、鉄筋が先に降伏する曲げ引張破壊をした。

3.2 一定持続載荷試験

土木学会示方書の曲げひび割れの照査において、「一般の環境」であり、かつ通常考えられている部材であれば、永久荷重による断面力によって生じる鉄筋の応力度の増加量が、異形鉄筋を使用した場合には 120N/mm^2 より小さいことを確認することによりひび割れ幅の検討

を省略できるとある³⁾。本研究ではこれを参考にして、RC供試体の鉄筋応力度が計算により 100N/mm^2 となる曲げモーメントを持続載荷試験で与える曲げモーメントとした。

図-8はRC、RPCUおよびRPCDの曲率の経時変化を示す。持続載荷試験直後のRPC補強RC梁部材の曲率は全断面有効であるのでRCに比べて小さくなっている。しかしながら、RPCUの曲率の増加量はRCに比べて大きく、試験開始直後のRPCUの曲率はRCの約28%程度であったものが、経過日数65日において約80%となっている。一方、RPCDは経過日数20日までは大きく増加しているが、その後の増加量は小さくなっている。

既往の研究において持続荷重下の鉄筋コンクリート部材の曲率の経時変化にはクリープと乾燥収縮により圧縮部コンクリートのひずみの増加と付着応力の緩和による引張鉄筋ひずみの増加が寄与すると報告されている⁴⁾。

図-9は部材上縁に貼付したひずみゲージによるコンクリートの圧縮ひずみの経時変化を示す。図からわかるように、圧縮コンクリートひずみの増加量は梁の種類の違いによらず顕著な差は見られない。

図-10はRPCUおよびRPCDの底面に貼付したひずみゲージによるRPC部の平均引張ひずみの経時変化を示す。RPCDのひずみのほうがRPCUよりも多く増加しており、曲率の増加量の傾向とは反対になっている。しかしながら、引張ひずみの増加量そのものは圧縮部コンクリートのひずみの増加量に比べると小さいので、曲率の挙動とは対応しなかったと思われる。

また、図-11はRC、RPCUおよびRPCDの鉄筋ひずみの経時変化を示す。RCの鉄筋ひずみは載荷後早期に増加しているが、これは引張部のコンクリートの応力負担

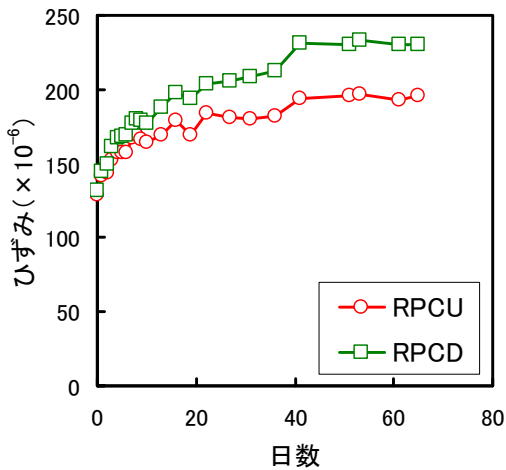


図-10 部材下縁のRPC引張ひずみの経時変化

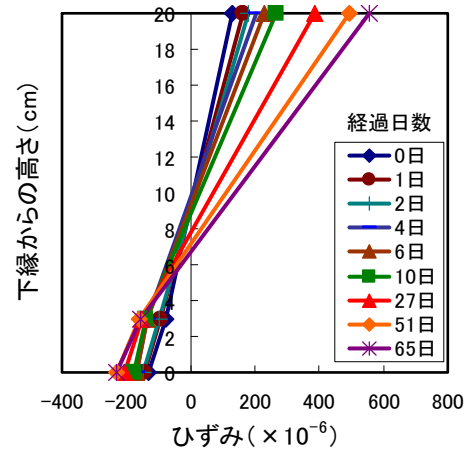


図-12 断面内のひずみ分布の経時変化 (RPCD)

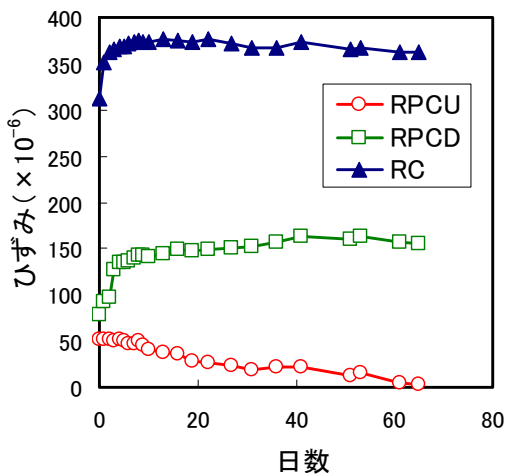


図-11 引張鉄筋ひずみの経時変化

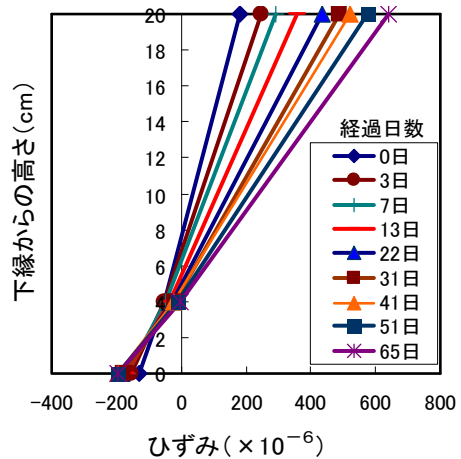


図-13 断面内のひずみ分布の経時変化 (RPCU)

が持続荷重下において減少するためである⁵⁾。また、RPCDの鉄筋ひずみもRCと同様に載荷後早期に増加し、その後はわずかな増加となっている。RPCDではRPC部にはひび割れは発生していないので、RPCDにおける載荷後早期の増加のメカニズムに関しては今後検討する必要がある。一方、RPCUの鉄筋ひずみは載荷後から、徐々に小さくなっている。

そこで、図-12、13はRPC補強RC梁部材の上縁コンクリートひずみ、鉄筋ひずみおよび下縁RPCひずみを用いて描いた部材断面内のひずみ分布の経時変化を示す。RPCDでは載荷後早期では圧縮部のコンクリートひずみとRPC部の引張ひずみも増加しているが、その後は圧縮ひずみの増加のほうはやや大きくなっている。一方、RPCUもRPCDと同じひずみ分布の変化を示しているが、有効高さがRPCDより小さいため、鉄筋位置と中立軸位置が近くなっており、結果的に鉄筋が外力に対して抵抗していないと考えられる。このこともRPCUの曲率の増加が他の供試体に比べて大きくなったことの原因の1

つと考えられる。

また、RPC補強RC梁部材の引張ひずみを含めたひずみ分布は経過日数65日においてもほぼ直線分布しており、部材下縁のRPC部の引張ひずみには図-4で示したようなひずみの急激な増加は見られない。従って、この時点までは底面にひび割れは発生していないものと考えられるが、今後載荷日数が増加しても使用状態でひび割れが発生しないことを確認する必要がある。

4. まとめ

本研究ではRPCの補強方法を変化させた2種類のRPC補強RC梁部材の静的載荷実験および一定持続載荷実験における変形挙動について実験的検討を行った。本実験の範囲で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

1. 静的載荷試験において、RPC補強RC梁部材のひび割れ発生モーメント以下での変形挙動は弾性解析を用いて評価でき、ひび割れ発生後の曲率においては有効換算断面2次モーメントを用いて、破壊近傍を除いて評価する

ことができる。

2. 一定持続荷重試験において、RPC 部に鉄筋を配置した RPC 補強 RC 部材の曲率の経時変化は RC 部材のものより小さくなった。一方、RPC 部の外に鉄筋を配置した RPC 補強 RC 部材では、曲率の値は RC より小さいが、曲率の増加量は RC より大きくなった。

3. RPC 補強 RC 梁部材では本実験での期間において、使用状態で考慮する荷重が持続的に作用してもひび割れは発生しなかった。

参考文献

1) 例えば、丸田誠，閑田徹志，永井寛，山本幸正：プレキャスト ECC 連結梁を用いた高層 RC 新架構，コンクリート工学，Vol.43，No.11，pp.18-26，2005.11

2) 氏家勲，加藤和教，小西吉満，沼田正人：引張部を RPC 補強した鉄筋コンクリートの部材の使用状態でのひび割れ防止に関する研究，材料，Vol.54，No.8，pp.855-860，2005.8

3) 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書[設計編]，p.115，2008.3

4) 佐藤良一，氏家勲，鈴木雅博，北條泰秀：鉄筋コンクリート曲げ部材の長期変形挙動およびその解析方法に関する研究，土木学会論文集，No.634/V-45，pp.27-41，1999.11

5) 氏家勲，佐藤良一，許明，安斎慎介：引張軟化を考慮した RC 部材のクリープ解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.133-138，1998.7