

# 論文 繰返し荷重を受けるRC部材の異形鉄筋周辺のひび割れ性状

林 和彦<sup>\*1</sup>・高梨 大介<sup>\*2</sup>・五十嵐 悠<sup>\*3</sup>・椿 龍哉<sup>\*4</sup>

**要旨**：繰返し荷重により鉄筋コンクリート部材の耐久性が低下することが報告されているものの、詳しいメカニズムは十分に把握されていない。本研究では、100万回までの両引き繰返し荷重を行った供試体に対してインク注入を行い、コンクリート表面に達する主ひび割れ、内部ひび割れ、付着劣化区間を可視化させた。その結果、繰返し数の増加にしたがい、ひび割れ幅、付着劣化区間の長さが増大することが明らかとなった。

**キーワード**：繰返し荷重、内部ひび割れ、付着劣化、インク注入法、異形鉄筋

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）部材のひび割れは塩化物イオンの浸入などの観点で耐久性と深く関わるため、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>ではひび割れ幅の算定式が規定されている。

著者らにより200万回の高サイクル繰返し荷重によってRCはり部材のひび割れ幅が増加することが報告<sup>2)</sup>されているものの、そのメカニズムの詳細は十分に明らかにはされていない。また、低サイクルであるものの異形鉄筋への繰返し荷重によりRC部材のかぶりの透気性が増大することが示される<sup>3)</sup>など、繰返し荷重がコンクリート内部の密実性に悪影響を与えることが示唆されている。

一方、RC部材のひび割れ性状については、異形鉄筋の周辺に発生するコンクリートの内部ひ

び割れの存在が示されており<sup>4)</sup>、また、ひび割れ近傍では鉄筋とコンクリートの付着が劣化するため、ひび割れが生じたコンクリートの内部状況は複雑である。これらのひび割れや付着劣化が塩化物イオン等の浸入や拡散に与える影響は明らかとはなっていないため、RC部材の耐久性の研究において検討を行うことが必要と考えられる。そこで本研究では、繰返し荷重を受けるRC部材の異形鉄筋周辺のひび割れ性状を明らかにするために、繰返し荷重を行ったRC供試体に赤インク注入を行うことによりひび割れ等の損傷を可視化させ、ひび割れ性状を把握した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験供試体

供試体の一覧および概要を表-1、図-1に示す。

表-1 供試体

シリーズ	W/C	上限応力 [MPa]	ゲージ計測	繰返し回数 [回]	圧縮強度 [MPa]	割裂強度 [MPa]	荷重時材齢[日]
I60H	0.6	250	無	1, 10 <sup>2</sup> , 10 <sup>4</sup> , 10 <sup>6</sup>	38.8	-	11~13
I60L	0.6	100	無	1, 10 <sup>2</sup> , 10 <sup>4</sup> , 10 <sup>6</sup>	37.5	-	9~11
I30H	0.3	250	無	1, 10 <sup>2</sup> , 10 <sup>4</sup> , 9×10 <sup>5</sup> ※1	82.4	5.05	12~14
I30L	0.3	100	無	1, 10 <sup>2</sup> , 10 <sup>4</sup> , 10 <sup>6</sup>	87.0	4.62	12~28
I60G	0.6	100	有	10 <sup>6</sup>	32.5	4.87	7~9

※1 荷重装置の都合により10<sup>6</sup>回に達する前に荷重終了

\*1 横浜国立大学大学院 工学研究院 助手 修 (工) (正会員)

\*2 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻 (正会員)

\*3 横浜国立大学 工学部建設学科シビルエンジニアリングコース (正会員)

\*4 横浜国立大学大学院 工学研究院 教授 Ph.D (正会員)

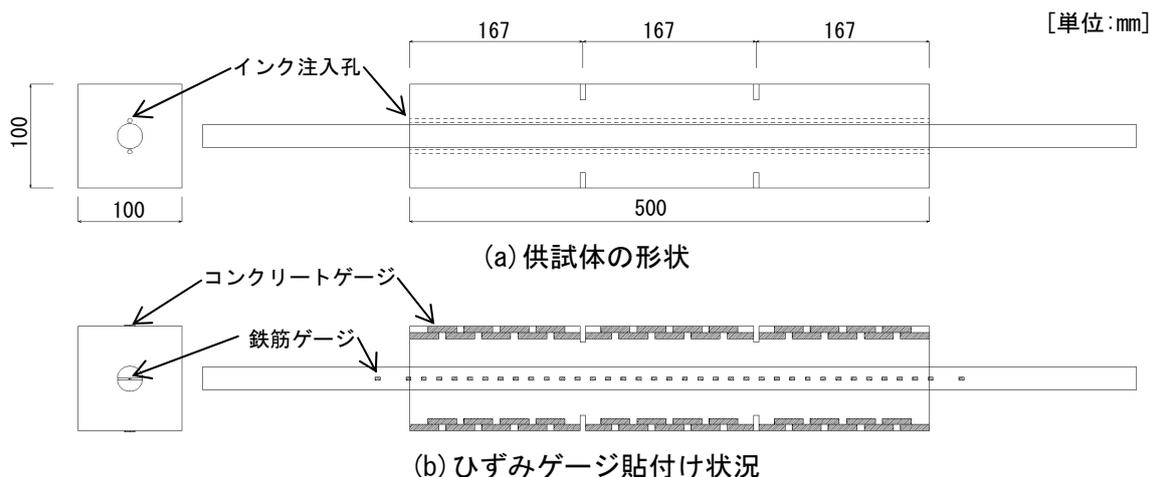


図-1 供試体の形状

表-2 コンクリートの配合

W/C	s/a [%]	Air [%]	スランプ [cm]	単位量[kg/m <sup>3</sup> ]							
				W	C	S	G	AE 減水剤	AE 剤	高性能 AE 減水剤	消泡剤
0.6	43	4.5	8	160	267	803	1077	2.67	0.4	-	-
0.3	41	4.5	76 <sup>※1</sup>	160	533	674	981	-	-	6.40	0.016

※1 スランプフロー

規定の繰返し回数に達した供試体に対してインク注入および切断を行うため、1つの実験シリーズにつき、繰返し数を 1, 10<sup>2</sup>, 10<sup>4</sup>, 10<sup>6</sup> 回と定めた 4 種類の供試体を作製した。

供試体の寸法は、断面が 100×100mm、長さが 500mm の矩形断面とし、中央に D22 の異形鉄筋（規格 SD345）を配置した。コンクリート中の異形鉄筋の近傍には、インク注入用の貫通孔（直径 2.5mm）を 2 本配置した。

予備実験ではこの寸法の供試体に、ひび割れ定常状態においてほぼ等間隔に 2 本のひび割れが発生した。これより、本実験時にはひび割れ位置を特定させるために、供試体を軸方向に 3 等分する位置でダイヤモンドカッターにより幅 3mm 深さ 5mm のノッチを 4 面に作成した。ノッチ位置でのひび割れ幅を計測するため、向かい合う面に 2 個ずつ、供試体で計 4 個のパイ型変位計（区間長 50mm）を貼付した。

また、一部の供試体 I60G においては、あらかじめ異形鉄筋をリブに沿って軸方向に切削分割

し、内部にひずみゲージを連続的に貼付した後、エポキシ樹脂を用いて貼り合せて接着することにより、異形鉄筋の表面形状を乱すことなく異形鉄筋のひずみを測定した。同時に、コンクリート表面にも連続的にひずみゲージを貼付した。繰返し数は 10<sup>6</sup> 回とし、1, 10, 10<sup>2</sup>, 10<sup>3</sup>, 10<sup>4</sup>, 10<sup>5</sup>, 10<sup>6</sup> 回時に計測を行った。

コンクリートは粗骨材の最大寸法を 20mm とし、早強ポルトランドセメントを用いた。水セメント比 W/C は 0.6 と 0.3 の 2 種類とした。コンクリートの配合を表-2 に示す。打設 1 日で脱型し、載荷直前までは室温 20°C の恒温室内に置き、脱型後 2 または 3 日間の封緘養生の後は気中養生とした。載荷時の材齢は 7~28 日の範囲である。養生および載荷実験中の収縮ひずみも測定している。

## 2.2 載荷方法およびインク注入

油圧サーボ式疲労試験機を用い、両引きにより供試体に繰返し荷重を与えた。波形は正弦波、周波数は 8Hz とした。最大荷重の設定において

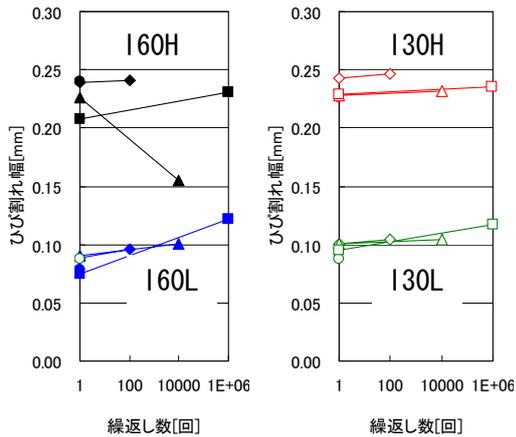


図-2 ひび割れ幅の推移

は、コンクリートを無視した鉄筋の応力  $\sigma_s$  が 100MPa, 250MPa となるような 2 種類とした。応力振幅はそれぞれ 40MPa, 100MPa である。ただし鉄筋を切削切断した供試体においては鉄筋の断面積比が 0.871 となったため、載荷荷重は同じ比率で低下させた。

規定の繰返し数の載荷が終了した供試体に対し、最大荷重を保持したまま表面に達したひび割れをコンクリート表面において速硬性のエポキシ樹脂で塞いだ後、30kPa に加圧した水性の赤インクを貫通孔内に注入し、5 分間圧力を保持した。インク注入後は、コンクリートカッターにより鉄筋に沿ってコンクリートを切断後、ディスクグラインダーにより切断面を研磨し、内部ひび割れや付着劣化区間の観察を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 ひび割れ状況

1 回目の最大荷重に達するまでの静的単調載荷において、W/C が 0.6 では、荷重が概ね 30kN においてコンクリート表面に達するひび割れ（以下、主ひび割れ）が発生した。 $\sigma_s$  が 250MPa の供試体では概ねノッチ部分でひび割れが発生し、最大荷重近傍では供試体端部において鉄筋に沿った縦ひび割れも発生した。 $\sigma_s$  が 100MPa 時では、ノッチの一部にひび割れは発生しているものの、全周に渡りひび割れていない箇所もあった。

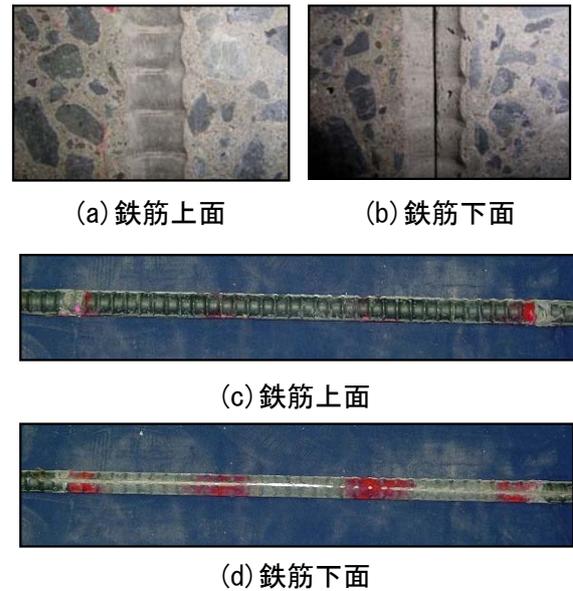


図-3 鉄筋とコンクリートの界面の状況 (W/C 0.6)

W/C が 0.3 においては、アセトンを塗ると可視化できる程度の微細な亀甲状の収縮ひび割れが表面に無数に発生しており、それが誘発したためひび割れ発生荷重は 20kN 程度と W/C が 0.6 のものに比べてやや低かった。

#### 3.2 表面ひび割れ幅の増加

ノッチ部分に設置したパイ型変位計により計測された変位をひび割れ幅とみなし、上限荷重時のひび割れ幅を図-2 に示す。値は、4 箇所の平均値を示す。 $\sigma_s$  が 100MPa では繰返し数が増えるにつれ、ひび割れ幅が増加している。 $\sigma_s$  が 250MPa においては、W/C が 0.3 と 0.6 の両方において、ひび割れ幅は微増している。10<sup>4</sup> 回において値が減少しているのは、供試体にひび割れが偏ったためである。

#### 3.3 鉄筋の上下面の性状

コンクリートを切断して鉄筋を除去した結果、異形鉄筋の跡が観察できるが、W/C が 0.6 の場合には鉄筋の上面と下面においてコンクリートの性状が大きく異なった。図-3 に W/C が 0.6 の鉄筋とコンクリートの界面の状況を示す。鉄筋の上面においては、鉄筋に接していたコンクリート面は平滑であり、気泡は無く、異形鉄筋の節形状がそのまま転写されており、取り出された鉄筋自体も打設前と変わらない状態であった。

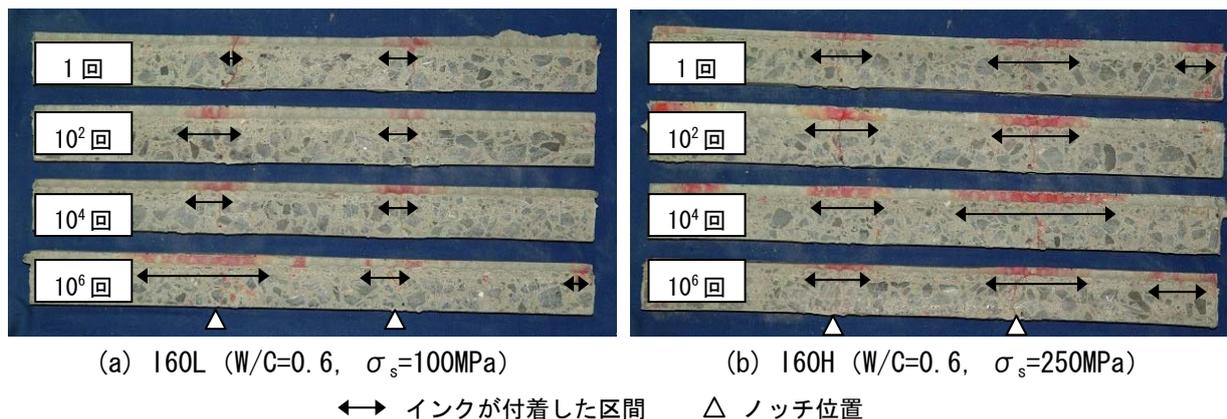


図-4 インクが付着した鉄筋とコンクリートとの界面

一方、下面においては、コンクリート表面はざらざらしており気泡も存在し、取り出した鉄筋にはモルタル分が付着していた。W/Cが0.3のコンクリートにおいては、上面はW/Cが0.6の鉄筋と同様であり、下面は多少の空隙がみられたがその程度は0.6に比較して小さい。

以上の結果は、ブリージングの程度の差によるものと考えられる。W/Cが0.6では、ブリージングにより鉄筋下面に脆弱な部分ができ、0.3においてはブリージングが認められなかったため、このような脆弱な部分はほとんど生じなかったと推測される。

### 3.4 付着劣化区間

主ひび割れが発生すると、ひび割れ位置とその近傍は鉄筋とコンクリートとの付着応力が徐々に低下すると考えられている。本供試体においては、付着が切れて鉄筋とコンクリートの肌離れが起きた区間に赤インクが浸入することにより、コンクリートおよび鉄筋の界面がそれぞれ赤色に染まった。その状況を図-4に示す。主ひび割れ近傍では色が濃く、主ひび割れ位置から離れるにしたがい色が薄くなる傾向があった。色の濃さは、供試体内部での鉄筋とコンクリートとの隙間の大きさに相当すると考えることができ、鉄筋とコンクリートが徐々に応力を伝達する様子と対応している。また、赤インクに染まる箇所は鉄筋の節の片側において連続していないものもあり、その部分において鉄筋とコンクリートが接していることを表しており、

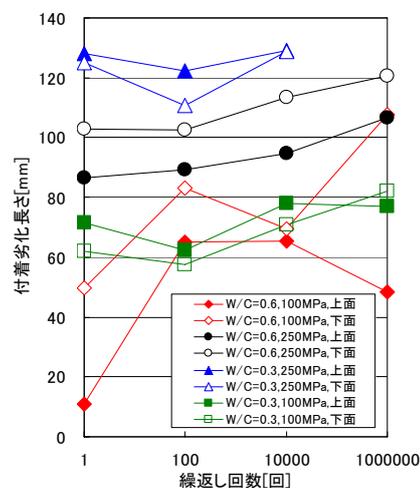
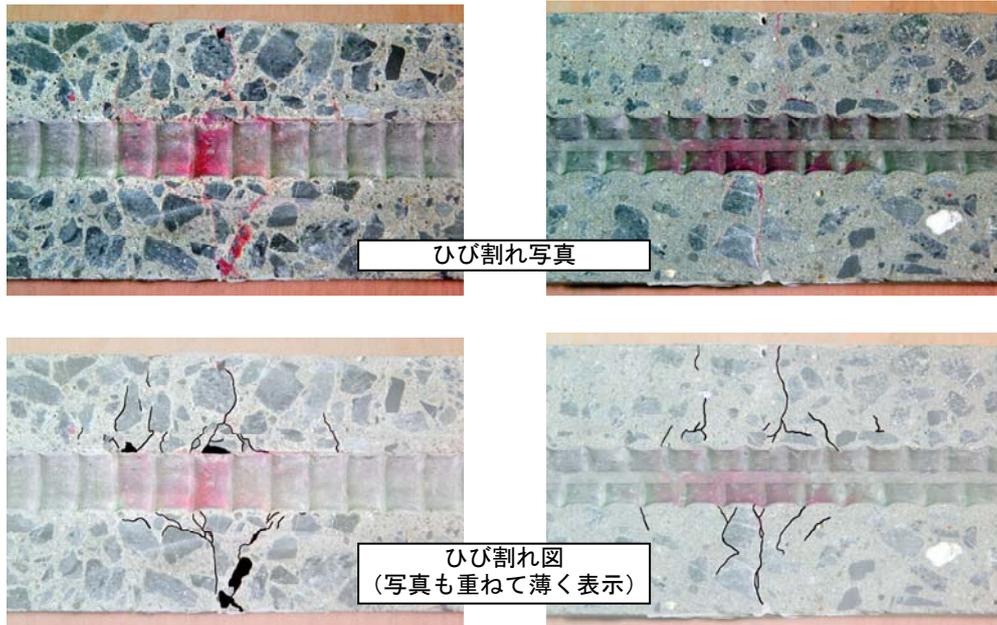


図-5 付着劣化区間の長さの推移

鉄筋の応力が節を通してコンクリートに伝達されることを示している。

同一の供試体においても打設時における鉄筋の上面と下面において、インクに染まる区間の長さが異なる傾向があったため、各供試体で打設時の鉄筋の上面と下面を区別してそれぞれ赤インクに染まった区間の長さを測定し、主ひび割れ1本の平均値を求めたものが図-5である。

図-5を見ると、W/Cが0.6においては、鉄筋の下面のほうが上面よりも付着劣化区間が長い傾向があり、8体平均で1.3倍となった。また、繰返し数が増えるにしたがい付着劣化区間の長さが増加する結果となり、 $10^6$ 回時には1回時と比較して1.2~4.4倍に増大した。これは、繰返し载荷により付着劣化が進行することを示しており、表面ひび割れ幅の増加と対応している。



(a) W/C=0.6 の一例

(b) W/C=0.3 の一例

図-6 主ひび割れ近傍の内部ひび割れ

しかし、W/C が 0.3 の場合、0.6 の場合に比較して付着劣化区間が長く、鉄筋の上下による差は見られず、繰返し数による明確な違いも見られなかった。

### 3.5 主ひび割れ近傍の内部ひび割れ

インク注入によって得られた主ひび割れ近傍の内部ひび割れの様子を図-6 に示す。コンクリート表面においてはノッチ部に主ひび割れが 1 本生じたものの、そのひび割れは、内部で複数の内部ひび割れに派生していることがわかる。その派生したひび割れは、概ね異形鉄筋の節の先端に到達している。

また、派生する内部ひび割れの発生位置は、前述の赤インクに染まった付着劣化区間の長さとはほぼ対応している。このことにより、付着劣化区間においては鉄筋とコンクリートの付着が低下しただけでなく、かぶりコンクリート部分にも複数のひび割れが存在していることが示された。ゆえに、水、空気、塩化物イオンなどの通り道になることは容易に考えられるため、鉄筋腐食に対する耐久性の検討が必要になると思われる。また、既往の研究においてひび割れが生じた RC 部材への塩化物イオンの浸入をモデル化するには、1 本の直線的なひび割れとして

モデル化することが広く行われているが、その妥当性について再検討を行うことも必要である。

なお、この内部ひび割れは骨材を迂回するなど骨材の影響を受けるため供試体による個体差が大きく、内部ひび割れの幅、本数、間隔については、繰返し数による差は明確でなかった。

### 3.6 軸方向のひずみ分布

ひずみゲージを連続的に貼付した加工鉄筋を用いて载荷を行った I60G の結果を図-7、図-8 に示す。鉄筋の最大応力は 100MPa である。

繰返し数 1 回目の上限応力 100MPa に至るまでの単調载荷時の鉄筋のひずみ分布を図-7 に示す。コンクリートのひずみは向かい合う 2 面の平均値である。ひび割れ発生前の鉄筋応力  $\sigma_s=13\text{MPa}$  時においてはコンクリートのひずみ分布はほぼ一様になっているが、ノッチ部分に主ひび割れが発生した ( $\sigma_s=26\text{MPa}$ ) 以後は、主ひび割れ位置の近傍においてひずみが減少しており、 $\sigma_s=52\text{MPa}$  以後では、圧縮ひずみも出ている。これは、ひび割れ部において鉄筋の伸び出しに伴いコンクリートが変形していることを示している。

図-8 に鉄筋のひずみ分布の繰返し数の増加による推移を示す。ひび割れ近傍ではひずみが大

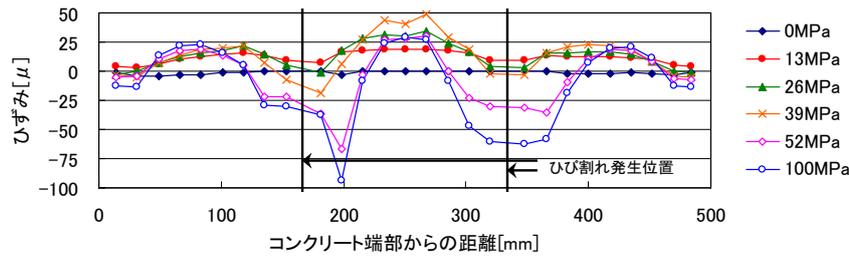


図-7 コンクリートのひずみ分布の推移

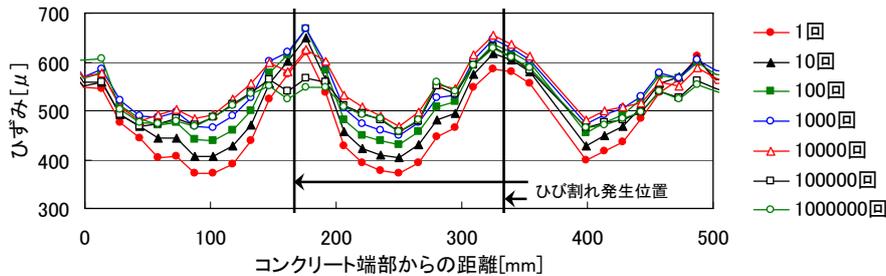


図-8 鉄筋のひずみ分布の推移

きく（鉄筋応力が高く）、主ひび割れ位置から離れるにつれてひずみが減少している。これは既往の知見と一致している。また、繰返し数が増すにつれて、全体的に鉄筋のひずみが増加している。つまり、コンクリートから鉄筋へと応力の分担が推移していることを表している。また、前述の付着劣化区間と関連付けて考察すると、ひずみがある閾値を超えた区間の長さや付着劣化区間の長さに対応しており、繰返し数の増加により付着劣化区間の長さが増加することを表しているともいえる。

#### 4. 結論

100万回までの両引き繰返し荷重を与えた RC 部材へのインク注入および切断によりひび割れを可視化させた結果、本研究の範囲内において以下の結論が得られた。

- (1) コンクリート表面に現れるひび割れは、コンクリート内部では多数の内部ひび割れに派生しており、その内部ひび割れの範囲は付着劣化区間とほぼ一致している。
- (2) 鉄筋の応力度が大きいほど、また荷重の繰返し数が増えるほど、付着劣化区間が増加し、 $10^6$ 回時には1回時に比べ1.2~4.4倍となった。また、水セメント比が高いコンクリート

はブリージングによる悪影響により打設時の鉄筋下面の方が上面よりも付着劣化区間が長く、W/Cが0.6では平均で1.3倍となった。

#### 謝辞

本研究の一部は、平成18、19年度文部科学省科学研究費補助金（若手研究（B）、課題番号18760347、研究代表者：林和彦）に基づき実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造的な性能照査編〕，2002年
- 2) 林和彦，椿龍哉，森竹巧：疲労荷重を受けるRC部材のひび割れ成長，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，2005年6月，pp.877-892
- 3) 後藤幸正，大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第294号，1980年2月，pp.85-100
- 4) 氏家勲，佐藤良一，長瀧重義：内部ひび割れに起因するかぶりコンクリートの密実性低下の透気性による検討，土木学会論文集，No.550，V-33，1996年11月，pp.163-172