

# 論文 付着クリープに及ぼす RC 内部鉄筋の表面形状および寸法の影響に関する実験的研究

泉 創太\*1・高山 希望\*2・井向 日向\*3・犬飼 利嗣\*4

**要旨:** 本研究は RC 部材に生じるひび割れ幅・たわみの経時変化が生じる原因の一つである、持続荷重下での鉄筋の経時的な抜け出し（付着クリープ）に着目している。本論では特に乾燥環境下で持続荷重に供した一軸引張 RC 供試体を対象として、付着クリープに及ぼす鉄筋の表面形状および寸法の影響を検討した。その結果、丸棒鋼を使用するよりも異形棒鋼を使用する方が付着クリープは大きいなどの知見を得た。また供試体のひび割れ幅の経時変化を付着クリープと自由収縮の和にひび割れ間隔を乗じることで算定できることを示し、載荷期間 14 日間では算定値のうち付着クリープによる変化量が大部分を占めることを明らかにした。

**キーワード:** 一軸引張試験, クリープ, 付着, ひび割れ幅

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）曲げ部材に生じるひび割れ幅およびたわみは、構造物の使用性・耐久性を評価する上で重要な照査項目であり、精密に算定することが望ましい。ひび割れ幅およびたわみは、コンクリートのクリープ、乾燥収縮、そして持続荷重の作用下で鉄筋とコンクリートの付着が徐々に損失することに伴う経時的な鉄筋の抜け出し（付着クリープ）などによって経時変化することが知られている<sup>1)</sup>。

コンクリートのクリープおよび収縮に比べ、付着クリープに関する研究は一般に少ない。著者ら<sup>2)</sup>は、一定持続荷重を受ける RC 一軸引張供試体を対象に、付着クリープがどの程度生じるのかを検討したとともに、乾燥環境下において付着クリープが増加することを明らかにした。しかし、付着クリープの発生機構および乾燥環境下で付着クリープが増加する機構については現時点でまだ検討が十分でない。氏家ら<sup>3)</sup>は付着クリープの発生機構について、RC 部材表面に現れない、鉄筋近傍に生じるひび割れ（内部ひび割れ）が持続荷重下で新たに発生したり、進展したりすることを考察している。著者ら<sup>4)</sup>も検討段階ではあるが、付着クリープの発生機構に内部ひび割れが関与している可能性があることを明らかにした。

そこで本研究では付着性状に影響を及ぼす因子として鉄筋径と鉄筋の表面形状を取り上げ、付着クリープに及ぼす鉄筋径と鉄筋の表面形状の影響について検討する。付着クリープに及ぼす鉄筋径の影響に関する検討は過去に一部を実施済みである<sup>4)</sup>が、本論では新たに鉄筋とコンクリートの断面積比（鉄筋比）を統一した同様の載荷試験を行い、付着クリープに及ぼす鉄筋径の影響につい

てさらなる検討を加える。また、鉄筋の表面形状が異なる丸棒鋼と異形棒鋼の付着クリープを比較し、付着クリープの発生機構について検討する。さらに、一定持続荷重した RC 一軸引張供試体のひび割れ幅について、付着クリープを考慮した算定を行い、ひび割れ幅の経時変化量に占める付着クリープの割合について検討する。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体及び実験シリーズ

#### (1) 供試体概要

実験に用いる RC 供試体、自由収縮供試体の形状・寸法を図-1 に示す。RC 供試体は 100 × 100 × 1000 mm と 150 × 150 × 1000 mm である。供試体断面中央に配した鉄筋は供試体両端部から 200 mm ずつ張り出している。使用材料を表-1 に、コンクリートの配合を表-2 にそれぞれ示す。コンクリートは表に示す目標スランプ値、目標空気量内となったものを用いた。鉄筋の規格は、異形棒鋼が SD345、丸棒鋼が SR235 とした。

供試体は打設から約 1 日後に脱型した。その後、直ちに供試体にラップフィルムと気密防水テープを順に巻き付けることで封緘した。封緘処理後、試験開始時まで供試体を温度 20 °C、相対湿度 60 % の恒温室内に静置した。試験には材齢 28 日以上となった供試体を使用した。

#### (2) 実験シリーズ

実験シリーズを表-3 に示す。供試体はすべて 1 体ずつである。同表には JISA 1108、JISA 1113、JISA 1149 に準拠して測定したコンクリートの割裂引張強度、圧縮強度、静弾性係数を示した。これらの測定には RC 供試体と同環境にて封緘養生した直径 100 mm 高さ 200 mm の

\*1 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科 (学生会員)

\*2 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科

\*3 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科助教 博士 (工学) (正会員)

\*4 岐阜工業高等専門学校 建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

円柱供試体を用いた。鉄筋のヤング係数は2.2節に示す載荷試験装置を用いて鉄筋を引張載荷して求めた。

本研究の実験シリーズは以下の2つに大別される。すべてのシリーズにおいて供試体は載荷試験まで封緘状態を保ち、載荷試験開始と同時に乾燥させた。供試体名は左から順に鉄筋の種類、鉄筋径、載荷方法、断面寸法を示している。

シリーズIは鉄筋の表面形状が一軸引張RC供試体の時間依存変形に及ぼす影響を検討することを目的としている。鉄筋の表面形状として丸棒鋼と異形棒鋼の2種類を用意した。鉄筋径は直径13mmに該当するものを使用した。供試体断面は100×100mmに統一した。

シリーズIIは、鉄筋比および鉄筋径が付着クリープに及ぼす影響を検討することを目的としている。鉄筋は異形棒鋼を用いた。おおよそ同じ鉄筋比となるように、鉄筋径13mmに対して断面100×100mmの供試体（基準シリーズ）と、鉄筋径19mmに対して断面150×150mmの供試体を準備した。

## 2.2 載荷方法

実験で用いた載荷試験装置を図-2に示す。RC供試体は自重による曲げの影響を排除するために垂直に設置した。供試体の鉄筋端部に取り付けたくさびグリップを介して引張力を加えるように荷重を伝達させた。供試体に作用する荷重は、載荷中の鉄筋単体のひずみを供試体の

端部から露出した鉄筋に貼付したひずみゲージ（ゲージ長5mm）によって測定し、鉄筋断面積と同載荷装置で測定した鉄筋のヤング係数を乗じることで求めた。

載荷試験では、供試体にひび割れが発生する荷重（鉄筋応力にして約200N/mm<sup>2</sup>）まで荷重を単調増加させた。静的載荷試験ではひび割れが生じた後に除荷を行い試験終了とした。持続載荷試験ではひび割れが生じた後、その荷重を14日間一定に保持した。荷重は設定荷重の誤差±1%以内になるように定期的に調整した。載荷試験はすべて恒温室内で行った。

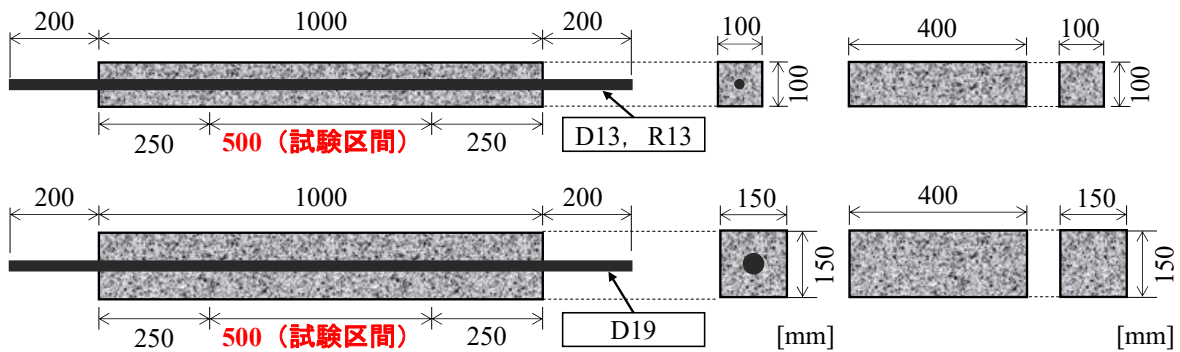
供試体の軸方向変位は、アルミ製の測定治具により測定した。この治具は著者らの既往研究<sup>4)</sup>で用いたものと同じであり、ひび割れ発生後は試験区間内におけるひび割

表-1 使用材料

記号	説明
W	水
C	普通ポルトランドセメント、密度3.16 g/cm <sup>3</sup>
S	川砂、表乾密度2.62 g/cm <sup>3</sup> 、吸水率1.42%
G	碎石、表乾密度2.62 g/cm <sup>3</sup> 、吸水率1.83%、最大寸法15mm
Ad.	AE剤I種 (C×0.02%)

表-2 コンクリートの配合

目標スランブ [cm]	目標空気量 [%]	W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
				W	C	S	G	Ad.
8±2	5±1	60	40	170	283	723	1085	0.06



(a) RC 供試体

(b) 自由収縮供試体

図-1 供試体概要

表-3 実験シリーズ

シリーズ	供試体名	鉄筋種	鉄筋径	載荷方法	断面寸法 (mm)	鉄筋比 (%)	材齢 (day)	コンクリート割裂引張強度 $f_{ct}$ (N/mm <sup>2</sup> )	コンクリート圧縮強度 $f_{cc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	コンクリート弾性係数 $E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	鉄筋ヤング係数 $E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )	
基準	D13M100	異形棒鋼	D13	静的載荷	100×100	1.27	28	3.28	31.3	27.6	183	
	D13S100											持続載荷
	D13N100			無載荷			37	3.28	26.5	27.6		
	N100(1)											
I	R13M100	丸棒鋼	R13	静的載荷		100×100	1.33	72	2.92	30.2	28.8	178
	R13S100											
	R13N100			無載荷				96	2.97	35.0	31.6	
	N100(2)											
II	D19S150	異形棒鋼	D19	持続載荷	150×150		1.28	58	3.06	35.8	28.8	178
	D19N150			無載荷								
	N150											

れの開口を含めて試験区間の変位量を測定できるものである。軸方向変位に及ぼす供試体端部の鉄筋の局所的な抜け出しの影響が含まれないように、試験区間は供試体中央部 500 mm とした。変位計には精度 1/500 mm のものを用いた。

持続荷重試験ではひび割れ幅の経時変化量を測定した。所定の荷重まで単調荷重した後ただちに、単調荷重によって発生したひび割れを挟むようにして、供試体軸に沿って標点距離 20 mm 以内となるように計測チップを貼付した。チップ間の距離を内側マイクロメータ（精度 1/1000 mm）で定期的に測定した。このようにして計測したチップ間の距離の変化量を、一定持続荷重期間のひび割れ幅の経時変化量とした。

### 2.3 長さ変化率の測定方法

本研究では3種類の長さ変化率を測定した。それぞれの計測方法を図-3に示す。1つ目はRC供試体と同断面を有する無筋コンクリートの長さ変化率である（図-3(a)参照、以後、自由収縮と称する）。2つ目は鉄筋による拘束を受けるRC供試体の長さ変化率である（図-3(b)参照、以後、拘束収縮と称する）。3つ目は静的荷重試験を経てひび割れを生じさせた後、静置したRC供試体の長さ変化率である（図-3(c)参照、以後、ひび割れたRCの収縮供試体と称する）。ひび割れたRCの収縮については、静的荷重試験に使用した測定治具を取り外さずにそのまま使用して供試体試験区間部の軸方向変位を測定し、測定した変位を試験区間長で除することでひずみとした。い

ずれも供試体が設置面からの拘束を受けないように設置面との間に丸棒を置くなどして測定を行った。

### 3. 荷重試験結果

本研究の結果の整理においては、引張（伸長）方向を正、圧縮（収縮）方向を負として結果を整理した。

#### 3.1 荷重—ひずみ関係

各供試体の荷重—ひずみ関係を図-4に示す。載荷試

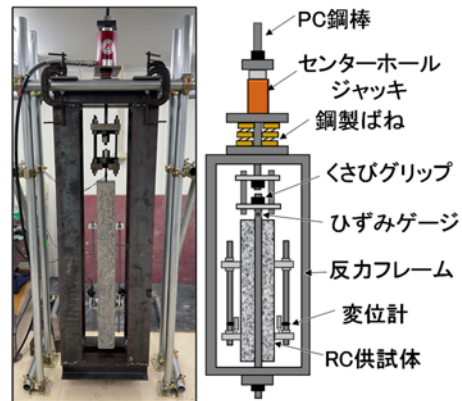


図-2 載荷装置

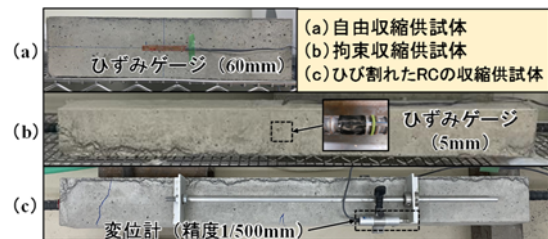


図-3 乾燥収縮の測定方法

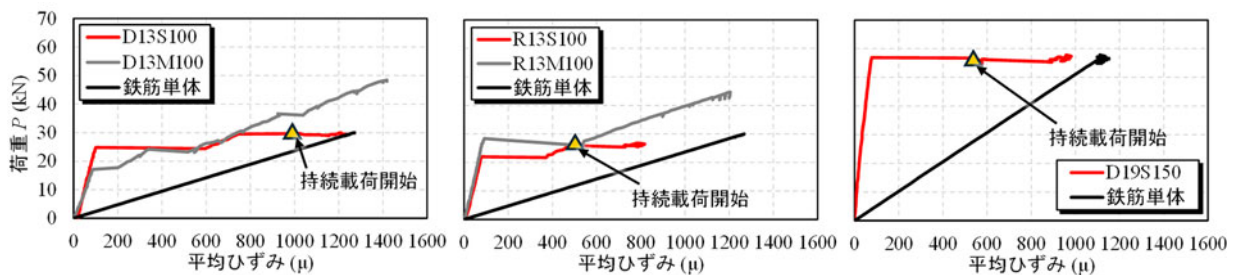


図-4 各供試体の荷重—ひずみ関係

D13S100			R13S100			D19S150		
打設面	176	264	286			打設面	312	
	185	238	605				626	
底面	464		282			底面	314	
	171	249	260				339	
	250 500 (試験区間) 250		250 500 (試験区間) 250			250 500 (試験区間) 250		
D13M100			R13M100					
打設面	201	201	204					
		181	254					
底面	210	183	225					
	205	185	210					
	250 500 (試験区間) 250		250 500 (試験区間) 250					

供試体中紺字：ひび割れ間隔  
 赤線：ひび割れ  
 尺度 100mm [単位:mm]

図-5 供試体表面のひび割れ発生状況（載荷試験終了時点）

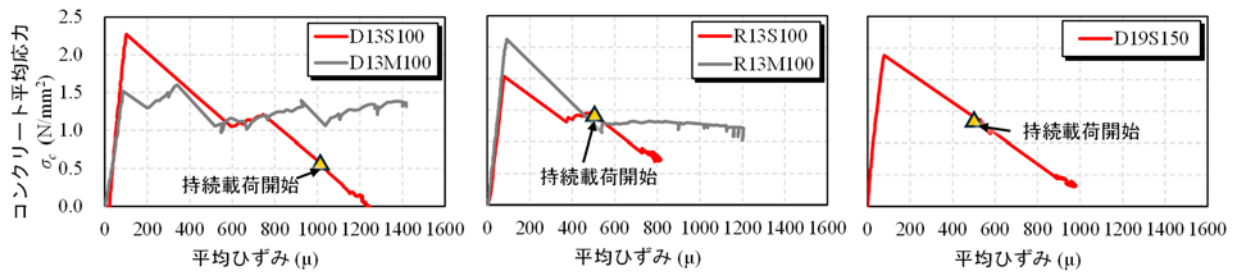


図-6 RC中のコンクリートの応力-ひずみ関係

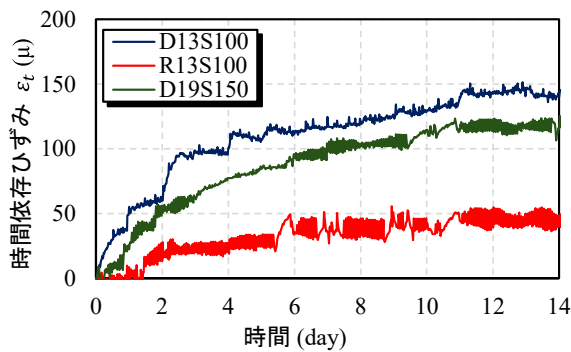


図-7 時間依存ひずみの経時変化

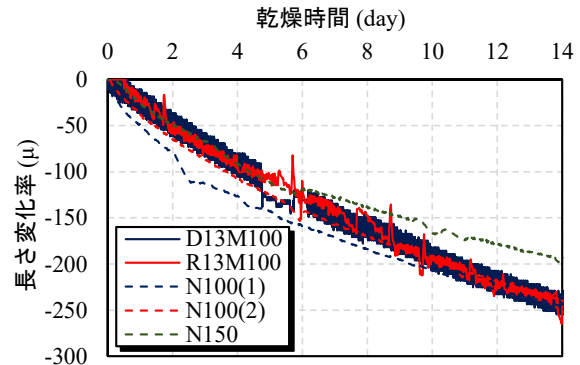


図-8 自由収縮とひび割れたRCの収縮

験で生じた各供試体のひび割れ発生状況を図-5に示す。各試験体の試験区間内に2~3本のひび割れが生じた。各供試体で第一ひび割れが生じた応力は、コンクリート強度のばらつきの範囲内で異なっていると考えられる。

### 3.2 応力-ひずみ関係

RC供試体中のコンクリートの平均応力 $\sigma_c$ と平均ひずみ $\varepsilon$ の関係を図-6に示す。 $\sigma_c$ は試験区間における鉄筋とコンクリートの軸方向の平均ひずみが一致すると仮定して以下の式(1)より求めた。

$$\sigma_c = \frac{P - E_s \varepsilon A_s}{A_c} \quad (1)$$

ここに $P$ : 荷重,  $E_s$ : 鉄筋ヤング係数,  $\varepsilon$ : 部材の平均ひずみ,  $A_s$ : 鉄筋断面積,  $A_c$ : コンクリート断面積である。

図より、持続荷重した供試体は持続荷重の開始まで静的荷重した供試体と同様の $\sigma_c - \varepsilon$ 関係を呈している。また、持続荷重期間中に $\sigma_c$ が低下していることがわかる。

### 3.3 RCに生じた時間依存ひずみ

図-7に持続荷重中におけるRC供試体の時間依存ひずみの経時変化を示す。ここで、時間依存ひずみとは、RC供試体の平均ひずみ(全ひずみ)から瞬間ひずみを差し引いたものである。瞬間ひずみは荷重を保持するまでの単調荷重によるひずみと、ひび割れの発生によるひずみとしている。持続荷重期間中に生じたひび割れの発生は定期的に供試体表面を観察することで確認した。

各供試体の時間依存ひずみは持続荷重後の早期の段階で大きく増加し、荷重後14日時点で一定値に収束する傾向を示した。

鉄筋の表面形状の違いに着目すると、丸棒鋼を用いた

R13S100は持続荷重後14日時点の時間依存ひずみが約 $50\mu$ となっているのに対して、異形棒鋼を用いたD13S100は約 $120\mu$ となっている。異形棒鋼を用いた供試体は同じ鉄筋径の丸棒鋼を用いた供試体よりも、持続荷重時の時間依存の引張ひずみが大きくなることが明らかとなった。

鉄筋比を統一したD13S100とD19S150の時間依存ひずみを比較すると、D13S100のひずみがわずかながら大きいものの、概ね同等となった。

## 4. 時間依存ひずみに関する検討

### 4.1 検討概要

図-7に示した時間依存ひずみ $\varepsilon_t$ は以下の式(2)に示すように、ひび割れたRCの収縮 $\varepsilon_{cs1}$ 、コンクリート単体の引張クリープ $\varepsilon_{cc}$ 、付着クリープ $\varepsilon_b$ の和からなることができる。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{cs1} + \varepsilon_{cc} + \varepsilon_b \quad (2)$$

コンクリート単体の引張クリープは、鉄筋による拘束を受けるRC供試体の乾燥収縮(拘束収縮)から求められる(詳細は4.3にて記述)。式(2)より、時間依存ひずみから収縮 $\varepsilon_{cs1}$ と引張クリープ $\varepsilon_{cc}$ を差し引くことで付着クリープを求めることができる。このようにして抽出した付着クリープに基づき、付着クリープに及ぼす鉄筋の表面形状および鉄筋径の影響を検討する。

### 4.2 長さ変化率の測定結果

図-8に各供試体の自由収縮とひび割れたRCの収縮の経時変化を示す。なお、D19S150に対応するひび割れたRCの収縮は未測定のため同図に示していない。

自由収縮は断面寸法が大きい供試体以外でほぼ同様

の曲線形状を示した。また、自由収縮とひび割れた RC の収縮は、ほぼ同様の形状となった。今回の条件では荷重を経てひび割れた RC は鉄筋によって収縮が拘束されなかったと考えられる。この結果に基づき D13N100 と鉄筋比が同じ D19N150 の収縮量は自由収縮と同じと仮定し、D19S150 の付着クリープの抽出の際には 150mm 角断面の自由収縮を用いた。

### 4.3 拘束収縮から算定した引張クリープ

図-9 に拘束収縮の経時変化を示す。コンクリートと鉄筋の部材軸ひずみが一致すると仮定すると、図に示したひずみの経時変化は以下のように表現できる。

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{ce} + \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{cs2} \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_c$  : コンクリートのひずみ、 $\varepsilon_{ce}$  : 弾性ひずみ、 $\varepsilon_{cc}$  : クリープひずみ、 $\varepsilon_{cs2}$  : 自由収縮ひずみである。このうち弾性ひずみとクリープひずみの和を有効ひずみ  $\varepsilon_{cef}$  と称する。式(3)に基づき、有効ひずみ、ひいてはクリープひずみ(コンクリート単体の引張クリープ)を求めることができる。

図-10 に無荷重で恒温室に静置した RC 中のコンクリートの応力とひずみの経時変化、ならびに引張クリープの抽出結果を示す。応力は式(1)により求めた。引張クリープは、有効ひずみから瞬間ひずみを差し引くことで求めた。瞬間ひずみは、収縮を拘束することによる応力を円柱供試体の圧縮試験から得た静弾性係数(表-3 参照、時間によらず一定値)で除することで求めた。

乾燥が鉄筋により拘束されるときコンクリート単体の引張クリープは、乾燥初期にはほとんど生じておらず、乾燥開始 14 日後においても最大で 30 $\mu$ 程度となった。一般に、コンクリート単体の引張クリープは非常に小さいと考えられているが、このことが再確認された。

### 4.4 付着クリープの抽出結果と考察

図-11 に抽出した付着クリープの経時変化を示す。以下では、D13S100 を基準として、付着クリープに及ぼす鉄筋の表面形状および寸法の影響について考察する。

#### (1) 鉄筋の表面形状に関する検討(シリーズ I)

丸棒鋼を用いた R13S100 よりも異形棒鋼を用いた D13S100 の方が、付着クリープが大きくなった。付着クリープ発生機構について、持続荷重下で鉄筋の節から新たな内部ひび割れが発生したり、既存の内部ひび割れが進展したりすることが指摘されている<sup>3),4)</sup>。丸棒鋼は摩擦作用、異形棒鋼は機械的作用と、それぞれ異なる付着機構により外力に抵抗する。よって、既往研究で示めされた付着クリープ機構は異形棒鋼特有の現象であると考えられる。今回、表面が滑らかな丸棒鋼でも付着クリープが発生したことから、内部ひび割れだけでなく、鉄筋表面の摩擦作用の時間依存性も付着クリープの発生に寄与している可能性が示唆された。

#### (2) 鉄筋径と断面寸法に関する検討(シリーズ II)

D13S100 よりも D19S150 の方が、付着クリープが大きくなった。この違いが鉄筋径の違いによるものか、鉄筋径とコンクリートの断面積が大きくなったことによるものかは現時点で明らかでない。コンクリートの断面積が大きくなる、すなわち乾燥に関する体積表面積比が小さくなるという観点から考察すると、付着クリープは乾燥環境下で大きくなる<sup>2)</sup>ため、断面積が大きい R19S150 の方が乾燥収縮の進行速度が遅く、付着クリープに及ぼす

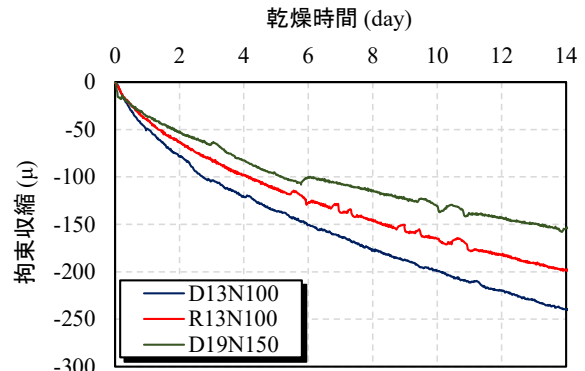


図-9 拘束収縮の経時変化

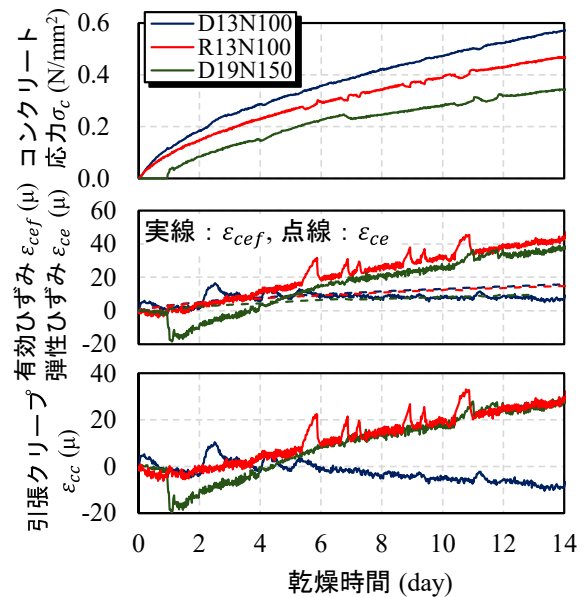


図-10 拘束収縮供試体中のコンクリートの応力とひずみ

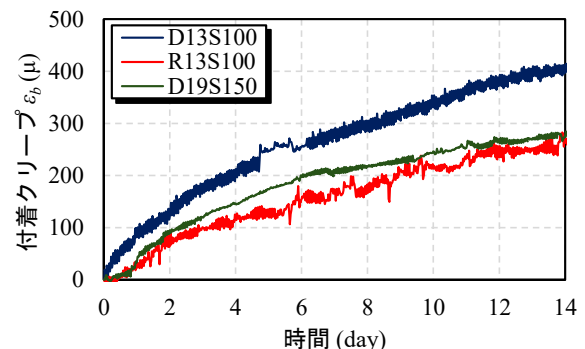


図-11 付着クリープの抽出結果

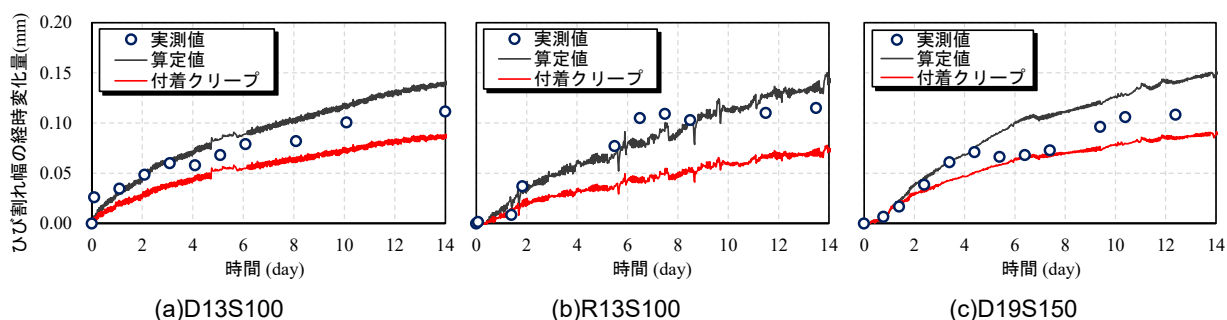


図-12 一定持続荷重試験に供した RC 一軸引張供試体のひび割れ幅の経時変化の実測値および算定値

乾燥の影響が小さくなった可能性が考えられる。付着クリープに及ぼす鉄筋径の影響を検討するうえでは、乾燥に関する条件も含めた検討が必要といえる。

## 5. 付着クリープの抽出方法の妥当性に関する検討

### 5.1 検討概要

本章の目的は4章での付着クリープの抽出方法の妥当性を確認することである。付着クリープの検討に用いたのと同じ RC 供試体において実測したひび割れ幅の経時変化を、4章で抽出した付着クリープを用いて再現する。

### 5.2 ひび割れ幅の経時変化の算定方法

ひび割れ幅の経時変化は式(4)に示すように自由収縮と付着クリープの和にひび割れ間隔を乗じて表現できる。

$$w_{avt} = L_{av}(\epsilon_b + \epsilon'_{cs}) \quad (4)$$

ここに、 $w_{avt}$ : 平均ひび割れ幅の経時変化量、 $L_{av}$ : 平均ひび割れ間隔、 $\epsilon'_{cs}$ : 自由収縮ひずみ (圧縮正)、 $\epsilon_b$ : 付着クリープ (引張正) である。平均ひび割れ間隔は、図-5 に示す各供試体の試験区間のひび割れ間隔を平均して求めた。また、自由収縮には図-8 の結果を、付着クリープには図-11 の結果を用いた。

### 5.3 ひび割れ幅の実測値と算定結果

ひび割れ幅の経時変化の実測値および算定値を図-12 に示す。同図には算定値中に占める付着クリープによるひび割れ幅の変化量も示した。鉄筋の表面形状の違いによるひび割れ幅の経時変化量の明確な違いは本研究では確認されなかった。これは検討対象であるひび割れ幅の経時変化が 0.15mm 以下と微小であるためと考えている。算定値は実測値と概ね同等となった。このことは本研究の実験結果ならびに付着クリープの抽出方法が妥当であることを示している。

また、付着クリープによるひび割れ幅の変化量は、一定持続荷重期間 14 日間にわたって、算定値の 50% 以上を占めている。このことから、持続荷重開始から早期、すなわち実構造物では供用開始から数日間という時間内では、付着クリープがひび割れ幅の経時変化に及ぼす影響は大きいといえる。

## 6. まとめ

- 1) 異形棒鋼と付着機構が異なる丸棒鋼でも付着クリープが発生した。付着クリープの発生機構には内部ひび割れだけでなく、摩擦作用の時間依存性も関与している可能性が示唆された。
- 2) 鉄筋比を変えずに鉄筋径とコンクリート断面積を大きくすると付着クリープが小さくなった。この点については乾燥に対する体積表面積比の影響を含めた詳細な検討が別途必要である。
- 3) ひび割れ幅の経時変化について、算定値と実測値が概ね一致したことから付着クリープの抽出方法の妥当性が確かめられた。また、ひび割れ幅の算定値に占める付着クリープの割合は、一定持続荷重期間 14 日間にわたり、算定値の 50% 以上となった。このことから、ひび割れ幅を正確に算定するには付着クリープも精密に考慮する必要があることを示した。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 (課題番号: 22K20450) と高専一長岡技科大共同研究助成 (研究代表者: 井向日向) の助成を受けて行いました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 角田与史雄: 鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.9, pp.1-10, 1970.
- 2) 井向日向, 下村匠: 鉄筋コンクリート部材の引張剛性に及ぼす持続荷重と乾燥の影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 77, No. 4, pp. 196-209, 2021.
- 3) 氏家勲, 廣河和男, 佐藤良一, 安斎慎介: 鉄筋コンクリート部材の長期ひび割れ幅とコンクリートの損傷, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp. 463-468, 2000.
- 4) 井向日向ほか: RC 一軸引張供試体の持続荷重試験および除荷後の直接観察に基づく付着クリープ機構の検討. コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol. 23, pp. 251-256, 2023.