

論文 一定持続引張荷重下の RC の時間依存変形に及ぼす水セメント比の影響に関する実験的検討

泉 創太*1・井向 日向*2・犬飼 利嗣*3

要旨：本論では、鉄筋コンクリート（RC）中のコンクリートの時間依存変形に及ぼす水セメント比の影響を明らかにすることを目的とし、水セメント比が 30%、45%、60% の RC 一軸引張供試体を用いた持続載荷試験を実施した。その結果、水セメント比が高いほど、時間依存ひずみの構成要素の一つである付着クリープが大きくなることが明らかとなった。この傾向は付着クリープの発生機構に内部ひび割れの発生・進展などの破壊現象が関わっている可能性を支持する結果である。

キーワード：一軸引張試験、クリープ、ひび割れ幅、付着、水セメント比

1. はじめに

鉄筋コンクリート（RC）曲げ部材の引張部において、コンクリートはひび割れ後であってもテンションステイフニング効果によって引張力の一部を負担することが知られている。このような RC 部材中の引張部コンクリートの力学挙動は、一般に RC 部材の終局耐力の算定にとって重要ではないものの、部材のひび割れ幅やたわみを精密に評価する上では重要といえる。

RC 中のコンクリートの引張応力およびひずみは、コンクリート単体の引張クリープおよび収縮のみならず、持続荷重下における鉄筋とコンクリートの付着の経時的な損失（付着クリープ）によっても経時変化することが明らかにされている¹⁾。著者らも一定持続荷重下の RC 一軸引張供試体を対象として、持続載荷中の乾燥条件や、鉄筋径を含む供試体断面寸法などを実験変数とした検討を過去に行っている^{2,3)}。一方、RC 中のコンクリートの引張応力およびひずみは、各影響因子が複雑に影響した結果として測定されるものである⁴⁾ので、その性質を解明するには未だに実験的検討が不十分といえる。

RC 中のコンクリートの引張特性に影響を及ぼす因子として、水セメント比は代表的なものであると考える。コンクリート単体のクリープおよび収縮においては、水セメント比が小さくなる、すなわち圧縮強度が大きくなると一般に（圧縮）クリープも収縮も小さくなる。また、鉄筋とコンクリートの付着特性にとっては、圧縮強度が大きくなるほど付着強度が大きくなることが知られている⁴⁾。したがって、持続荷重下の RC 中のコンクリートの引張応力およびひずみに対し、水セメント比が及ぼす影響は無視し得ないと推察される。

そこで本研究では、RC 中のコンクリートの引張応力およびひずみの時間依存性に及ぼす水セメント比の影響

を検証することを目的として、水セメント比を実験変数とした RC 一軸引張供試体の持続載荷試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験に用いた RC 供試体、無筋コンクリート供試体の形状・寸法を図-1 に示す。RC 供試体の寸法は 100×100×1000 mm であり、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。無筋コンクリート供試体は、断面を RC 供試体の断面と同じ寸法・形状とし、自由収縮ひずみを測定する目的で作製した。

使用材料を表-1 に、コンクリートの配合を表-2 に示す。鉄筋は D19、SD345 の規格のものを用いた。供試体は打設から約 1 日後に脱型した。その後、直ち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℃、相対湿度 60% の恒温恒湿室内に静置した。試験には、水

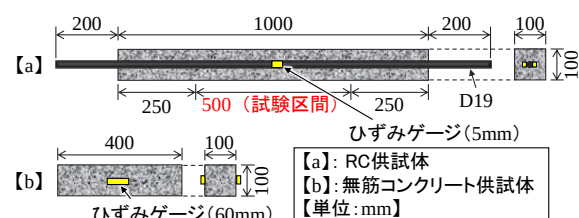


図-1 供試体概要

表-1 使用材料

記号	材料、物性
W	水道水
C	普通ポルトランドセメント、密度 3.16 g/cm ³
S	川砂、表乾密度 2.62 g/cm ³ 、吸水率 1.42 %
G	碎石、表乾密度 2.62 g/cm ³ 、吸水率 1.83 %、最大寸法 15 mm
Ad.1	AE剤 I 種 (C×0.02 %使用)
Ad.2	高性能減水剤 (C×0.05 %使用)

*1 岐阜工業高等専門学校 専攻科先端融合開発専攻 (学生会員)

*2 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)

*3 岐阜工業高等専門学校 建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

和の影響が無視し得ると考えられる材齢 28 日以上の供試体を使用した。

2.2 実験シリーズ

実験シリーズの一覧を表-3 に示す。供試体はすべて 1 体ずつである。同表には JIS A 1108, JIS A 1113, JIS A 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 の円柱供試体を用いた。本研究では水セメント比を実験変数とし、30%, 45%, 60% の 3 水準で比較した。供試体名は左から順に荷重方法、鉄筋の有無、水セメント比を示している。

2.3 荷重方法

実験で用いた荷重試験装置を図-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、荷重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 5 mm）によって測定し、鉄筋断面積と同荷重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。

静的荷重試験では、鉄筋が降伏するまで荷重を単調荷重した後、直ちに除荷を行い試験終了とした。

持続荷重試験では、RC 供試体中のコンクリートの引張応力が、円柱供試体の割裂引張強度となるまで荷重を単調増加させ、その荷重を 14 日間一定に保持した。このように持続荷重を設定したのは、持続荷重開始時の付着の程度（RC 中のコンクリートの平均応力と引張強度の比：以下、応力強度比と称する）が各供試体で同じとなるように意図したためである。本実験では荷重は設定荷重の誤差 $\pm 1\%$ 以内になるように定期的に調整した。荷重試験はすべて恒温恒湿室（温度 20 ℃、相対湿度 60 %）内で行った。

供試体の軸方向変位は、アルミ製の測定治具²⁾により

測定した。この治具は、ひび割れ発生後は試験区間内におけるひび割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。

2.4 供試体の乾燥に伴うひずみの測定方法

無荷重状態のコンクリートまたは RC について以下の 3 種類のひずみを測定した。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ひずみである（以下、自由収縮と称する）。2 つ目は鉄筋による拘束を受ける RC 供試体のひずみである（以下、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 供試体のひずみである（ひび割れた RC の収縮と称する）。自由収縮は、供試体中央の表面に貼付したひずみゲージ（ゲージ長 60 mm）によって測定した。拘束収縮は、供試体中央において内部鉄筋に貼付したひずみゲ

表-2 コンクリートの配合

air (%)	slump (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				Ad.1 C×(%)	Ad.2 C×(%)
				W	C	S	G		
7.2	9.5	30	40	170	567	630	944	0.02	0.05
5.1	5.0	45			378	692	1038		
5.5	8.5	60			283	723	1085		

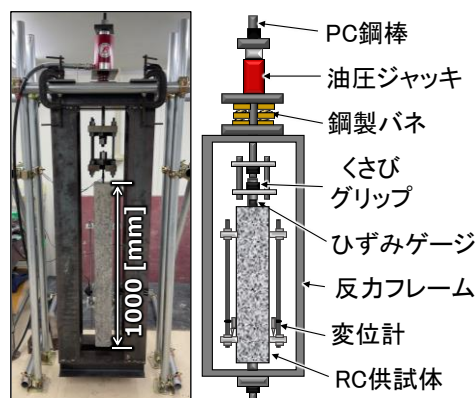


図-2 荷重装置

表-3 実験シリーズ

供試体名	載荷方法	W/C (%)	載荷材齡 (day)	乾燥開始 材齡 (day)	コンクリート 割裂引張強度 f_t (N/mm ²)	コンクリート 圧縮強度 f_c (N/mm ²)	コンクリート 弾性係数 E_c (kN/mm ²)	鉄筋 ヤング係数 E_s (kN/mm ²)
MD30	単調載荷	30	52	52	4.97 (材齡52日)	57.8 (材齡52日)	37 (材齡52日)	178
SD30	持続載荷		38	38				
ND30	無載荷			38				
N30				38				
MD45	単調載荷	45	76	76	4.17 (材齡76日)	49.2 (材齡76日)	30.5 (材齡76日)	178
SD45	持続載荷		81	81				
ND45	無載荷			81				
N45				81				
MD60	単調載荷	60	69	69	2.68 (材齡50日)	29.8 (材齡50日)	27.3 (材齡50日)	178
SD60	持続載荷		38	38				
ND60	無載荷			38				
N60				38				

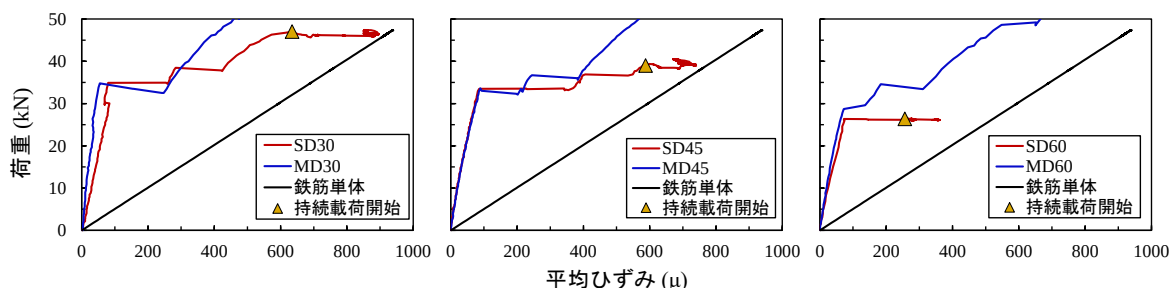


図-3 各供試体の荷重-ひずみ関係

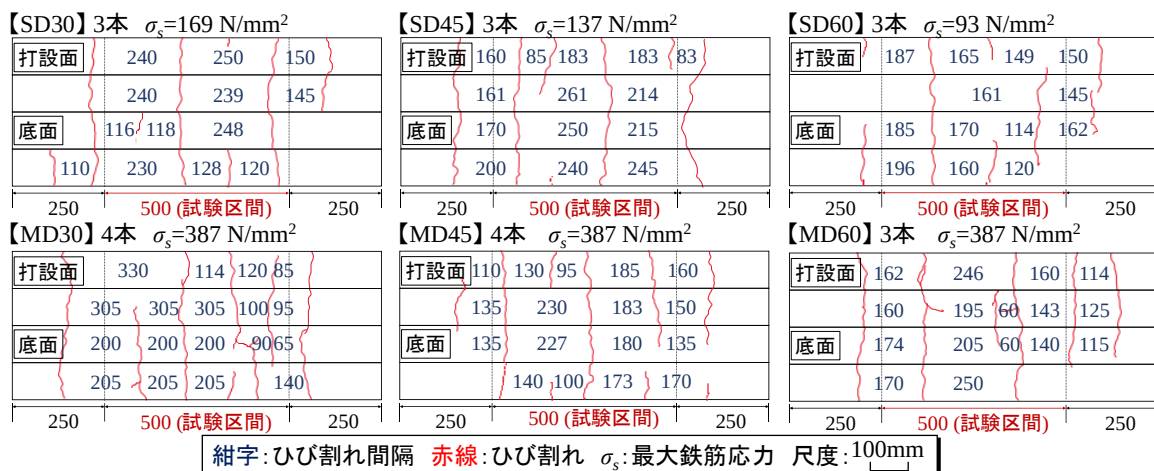


図-4 供試体表面のひび割れ発生状況 (荷重試験終了時点)

ージ (ゲージ長 5 mm) によって測定した。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。いずれも供試体と設置面との間に丸棒を置くなどして測定を行った。

2.5 ひび割れ幅の経時変化量の測定方法

供試体表面に生じたひび割れの幅の経時変化量を持続荷重試験中に測定した。所定の荷重まで単調荷重した後ただちに、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、一定持続荷重期間中のひび割れ幅の経時変化量とした。

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-3 に示す。同図は水セメント比ごとに単調荷重試験を実施した供試体の結果と持続荷重試験に供した供試体の結果を示した。

また、荷重試験で生じたひび割れ発生状況を図-4 に示す。図中の供試体名の右側には各供試体の試験区間内

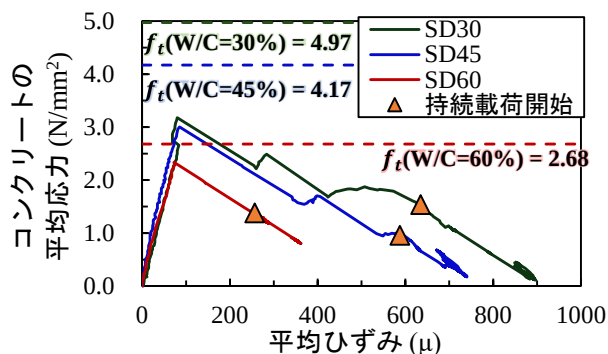


図-5 RC 中のコンクリートの応力-ひずみ関係

に生じたひび割れ本数を示した。持続荷重供試体では 3 本、単調荷重供試体では 4 本のひび割れが生じた。最大鉄筋応力によるひび割れ本数の差が確認された。

3.2 RC 中のコンクリートの応力-ひずみ関係

持続荷重した供試体について、RC 中のコンクリートの平均応力 σ_c と平均ひずみ ε の関係を図-5 に示す。同図には RC 供試体と同バッチで作製した円柱供試体の割裂引張強度を示した。 σ_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、 ε : 部材平均ひずみ、 A_s : 鉄筋断面積、 A_c : コンクリート断面積である。

図-5 より最大応力は水セメント比が低いほど大きく

表－4 載荷試験時に生じたひずみ

供試体	持続載荷開始時の鉄筋単体のひずみ ε_{sub}	全ひずみ ε	単調載荷ひずみ ε_l	時間依存ひずみ ε_t	ひび割れひずみ ε_{cra}	$\varepsilon_l/\varepsilon$	$\varepsilon_t/\varepsilon$	$\varepsilon_{cra}/\varepsilon$
SD30	635	854	260	46	548	0.30	0.05	0.64
SD45	587	732	166	78	488	0.23	0.11	0.67
SD60	256	354	103	38	213	0.29	0.11	0.60

なることが確認される。しかし、これらの最大応力は割裂引張強度よりも小さい。水セメント比が 60% では引張強度との差が小さいことも踏まえると、自己収縮が鉄筋に拘束されることで載荷以前から引張力が導入され、RC 中のコンクリートの最大応力が見かけ上低下したためと考えられる。また、RC 供試体の付着の程度を表す比である持続載荷開始時の RC 中のコンクリートの応力と最大応力の比は 0.32～0.59 となっており、時間依存ひずみは持続載荷開始時の付着の程度がこの比と同等の範囲で異なる可能性があることに留意しなければならない。

4. 持続載荷に供した RC のひずみ成分に関する検討

4.1 検討概要

本章では載荷試験により得られた RC のひずみを以下のように分類し、RC 中のコンクリートの時間依存挙動について検討する。

RC の平均ひずみ（全ひずみ） ε は、瞬間ひずみ ε_i と時間依存ひずみ ε_t から成る。

$$\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_t \quad (2)$$

また、瞬間ひずみ ε_i は荷重の単調増加に伴うひずみ ε_l と、ひび割れの発生に伴うひずみ ε_{cra} から成る。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_l + \varepsilon_{cra} \quad (3)$$

さらに、時間依存ひずみ ε_t は RC の引張クリープ ε_{cre} と収縮 ε_{sh} の和として表現できる。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{cre} + \varepsilon_{sh} \quad (4)$$

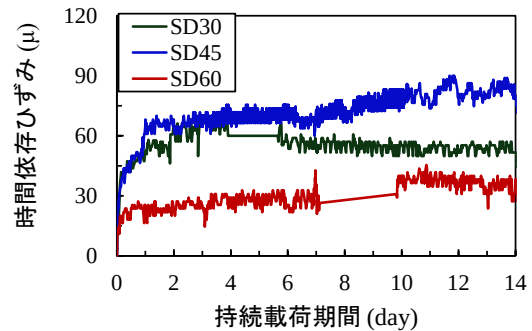
持続載荷開始時の RC 供試体はひび割れており、ひび割れ後の RC の引張クリープ ε_{cre} はコンクリート単体の引張クリープ ε_{cc} と付着クリープ ε_b の和とみなせる。

$$\varepsilon_{cre} = \varepsilon_{cc} + \varepsilon_b \quad (5)$$

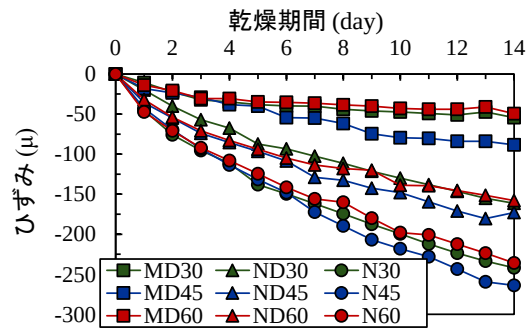
4.2 瞬間ひずみと時間依存ひずみに関する検討

載荷試験に供した RC 供試体の瞬間ひずみおよび時間依存ひずみの一覧を表－4 に示す。RC 中のコンクリートの応力強度比を統一しようとしたため、持続載荷開始時の鉄筋単体のひずみは水セメント比が低いほど大きい。

一定持続引張荷重下の RC の各ひずみに及ぼす水セメント比の影響を確認する。全ひずみ ε に占める各ひずみの内訳をみると、全供試体でひび割れにより生じたひずみの割合 ($\varepsilon_{cra}/\varepsilon$) が最も大きく、時間依存ひずみは全ひずみのうち 1 割程度を占めるという結果になった。特に、SD30 は $\varepsilon_t/\varepsilon$ が他 2 つの半以下になり、水セメント比が



図－6 時間依存ひずみの経時変化



図－7 乾燥に伴うひずみの経時変化

高い方が時間依存変形は大きくなる傾向が確認された。また、SD45、SD60 で同等の $\varepsilon_t/\varepsilon$ を生じたことから、RC の時間依存変形に及ぼす水セメント比の影響は、水セメント比 45 % 以上では収束する可能性がある。

図－6 に持続載荷中における RC 供試体の時間依存ひずみの経時変化を示す。各供試体のひずみは、持続載荷試験開始後 4 日以内に増大し、それ以降は収束する傾向にある。また、SD60 は他 2 つの供試体に比べてひずみが小さくなった。以降の節では、時間依存ひずみを構成するひずみについて検討する。

4.3 乾燥に伴うひずみに関する検討

図－7 に各供試体の自由収縮、拘束収縮、ひび割れた RC の収縮のひずみの経時変化を示す。乾燥に伴うひずみは自由収縮が最も大きく、次いで拘束収縮が大きく、ひび割れた RC の収縮が最も小さい。また、測定方法ごとにひずみを比較すると、水セメント比によらず概ね同等のひずみを示している。一般に、水セメント比が高い方が乾燥に伴うひずみは大きくなるが、本研究のように 14 日間という短期間では水セメント比の違いに応じたひずみの差が確認されなかったものと推察される。

持続載荷した供試体に生じた乾燥に伴うひずみは、ひび割れた RC の収縮と同程度または少なくとも同じ傾向を示すと推察される。したがって、持続載荷した供試体に生じた乾燥に伴うひずみは、本研究のように 14 日間の載荷期間では、水セメント比によらず同程度であると考えられる。ただし、ひび割れた RC の収縮は鉄筋の降伏まで単調載荷した後の乾燥に伴うひずみであり、持続載荷した供試体と荷重履歴が異なるのでその影響については詳細な検討が今後必要であると考えている。

4.4 コンクリート単体の引張クリープに関する検討

(1) コンクリート単体の引張クリープの抽出方法

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、拘束収縮は以下のように表現できる。

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{ce} + \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{cs} \quad (4)$$

ここに、 ε_s ：鉄筋ひずみ（今、拘束収縮に等しい）、 ε_{ce} ：コンクリートの弾性ひずみ、 ε_{cc} ：コンクリートのクリープひずみ、 ε_{cs} ：コンクリートの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 ε_{cef} と称する。式(1)に基づき収縮を拘束することによってコンクリートに作用する引張応力を求め、それをコンクリートの弾性係数で除することで弾性ひずみ ε_{ce} が求められる。弾性係数には円柱供試体の圧縮試験から得た弾性係数（表-3 参照、時間によらず一定であることを仮定）を用いる。式(4)に基づき、このようにして求めた弾性ひずみ ε_{ce} を有効ひずみ ε_{cef} から差し引くことでクリープひずみ ε_{cc} （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。

(2) コンクリート単体の引張クリープの抽出結果

図-8 に無載荷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。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、本実験の範囲では水セメント比によらず概ね同等となった。コンクリートに作用した応力も各水セメント比で同等であるので、この引張クリープの傾向は単位応力あたりの値に正規化しても同様である。ただし、この結果は乾燥以前に生じた RC 中のコンクリートの自己収縮を含んでいないため、その点について別途検討が必要であると考えている。

持続載荷に供した RC 供試体は、持続載荷開始時ににおいて RC 中のコンクリートの引張応力が 1.0~1.5 N/mm² 程度であり、その応力は持続載荷中、低下していく（図-5 参照）。一方、図-8 に示す応力は乾燥期間 14 日時点で 1.0 N/mm² 程度となっており持続載荷に供した RC 供試体中のコンクリートの引張応力と程度が類似している。したがって、持続載荷に供した RC 供試体の引張クリープ ε_{cre} に含まれるコンクリート単体の引張クリープ ε_{cc} は図-8 に示す値と同程度以下であると考えられる。

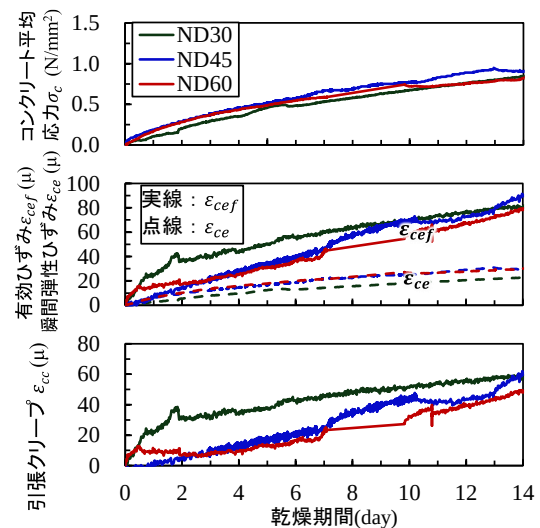


図-8 拘束収縮供試体中のコンクリートの応力とひずみ

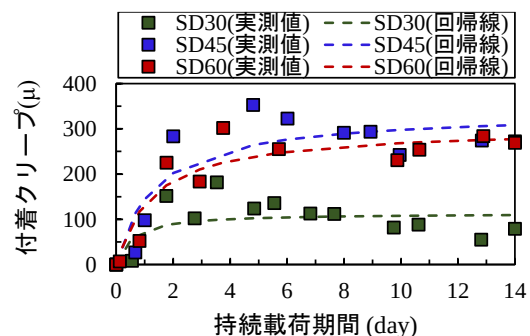


図-9 付着クリープの経時変化

4.5 付着クリープに関する検討

(1) 付着クリープの抽出方法

ひび割れ幅の経時変化はコンクリートの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。

$$w_{avt} = L_{av}(\varepsilon_b + \varepsilon'_{cs}) \quad (6)$$

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、 ε'_{cs} ：自由収縮（圧縮正）、 ε_b ：付着クリープ（引張正）である。式(6)に基づき、RC 供試体の試験区間に生じたひび割れ幅の実測値の平均から、供試体に生じた付着クリープを求めた。平均ひび割れ間隔は、図-4 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。自由収縮は図-7 に示すものを用いた。

(2) 付着クリープの抽出結果

図-9 にひび割れ幅の経時変化から求めた付着クリープの経時変化を示す。各試験結果の傾向を捉えるため、同図中には各試験結果を回帰した結果も併記した。本実験では持続荷重の値が異なる。既報³⁾では、荷重を単調増加させた後に一定の持続荷重を載荷した RC 一軸引張供試体では、持続荷重が大きいほど持続載荷開始時の付着が小さいので、付着クリープが小さくなることが確認された。よって、これらの結果には持続荷重が異なる影響が含まれるので水セメント比の影響を考察するにはそ

の影響を取り除く必要がある。持続荷重下の RC 一軸引張部材のひび割れ間における鉄筋ひずみ分布とひび割れ近傍の付着損失区間は図-10 に示すようにモデル化できる³⁾。ここに、 L ：ひび割れ間隔、 L_{ub} ：付着損失区間長、 ε_s ：部材軸方向の平均鉄筋ひずみ、 ε_{sub} ：付着損失区間における鉄筋ひずみ、 α ：ひび割れ間における付着損失区間の割合（ $=L_{ub}/L$ ）である。 $\Delta\alpha$ は一定持続荷重作用下における α の経時的な増加量である。 $\Delta\alpha \cdot \varepsilon_{sub}$ は付着クリープによる鉄筋の抜け出しを表す。図-9 で求めた付着クリープは $\Delta\alpha \cdot \varepsilon_{sub}$ に相当するので、図-9 に含まれる持続荷重が異なる影響は、持続載荷開始時の鉄筋単体のひずみ ε_{sub} で除することで取り除くことができる。

以上の考えに基づき、図-9 で求めた付着クリープを持続載荷開始時の鉄筋単体のひずみ ε_{sub} で除した結果を図-11 に示す。図より、付着クリープは水セメント比が高くなるほど大きくなる傾向にある。また、付着クリープは載荷後早期段階で急激に増加し、持続載荷後4日目で降収束する傾向にある。

(3) 付着クリープ機構に関する考察

4.4(2)に示した引張クリープが各水セメント比で同等に生じていたことと、図-11 の傾向を総合的に考察すると、付着クリープはコンクリート単体のクリープ現象とは異なる現象に由来すると考えられる。付着クリープの発生機構に関する有力な説として、表面に現れない鉄筋近傍に生じる内部ひび割れの発生・進展が考えられている⁵⁾。ひび割れの発生・進展を破壊力学の観点から考えると、単位面積あたりのひび割れを形成するのに消費されるエネルギーであるコンクリートの破壊エネルギーは、一般にコンクリートの圧縮強度が大きいほど大きくなる。よって、水セメント比が大きい（圧縮強度が小さい）方が、単位面積あたりのひび割れを形成するのに消費されるエネルギーが小さいので、内部ひび割れも発生・進展しやすく付着クリープが大きく生じたものと推察される。

5. まとめ

- (1) 一定持続荷重を載荷した RC 一軸引張部材の瞬間ひずみ、乾燥に伴うひずみ、コンクリートの引張クリープについて、本研究の範囲では水セメント比による明確な違いは確認されなかった。
- (2) 付着クリープは持続載荷開始4日以内に急激に増加し、その後収束する傾向が確認された。
- (3) 付着クリープは水セメント比が高くなるほど大きくなった。これは本研究の範囲で確認されたコンクリートの引張クリープとは異なる傾向である。
- (4) 上記(2)(3)より、付着クリープがコンクリートのクリープと異なる機構により生じることが示唆された。付着クリープは内部ひび割れの発生・進展により生

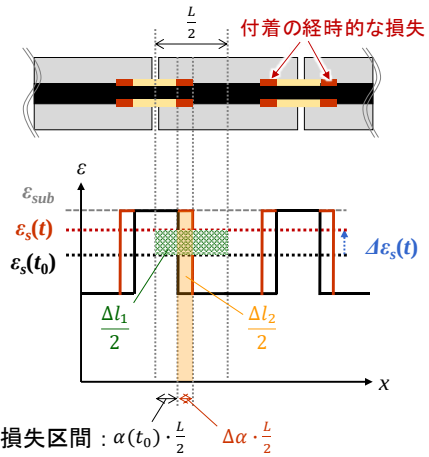


図-10 持続荷重下における鉄筋ひずみの分布のモデル化

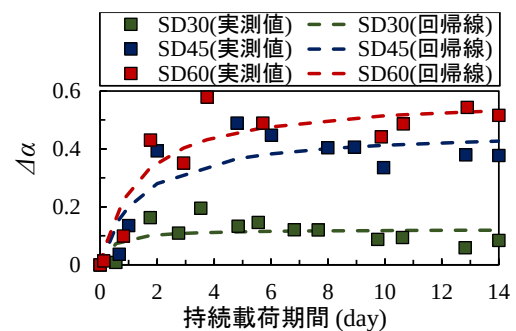


図-11 $\Delta\alpha$ の抽出結果

じるといふ説は、上記(3)の結果に整合している。

謝辞

本研究はJSPS 科研費（課題番号 24K17332）の助成を受けて実施しました。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) 泉創太, 高山希望, 井向日向, 犬飼利嗣：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、コンクリート工学会年次論文集、Vol.46, No. 1, pp.313-318, 2024.6.
- 3) 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.
- 4) 村田二郎, 河合紘菰：引抜き試験による異形鉄筋の付着強度に関する研究、土木学会論文集、No.348, pp.113-122, 1984.
- 5) 李振宝, 大野義照, 馬華：鉄筋コンクリート部材の長期曲げひび割れ幅算定法、日本建築学会構造系論文集、Vol. 68, No. 565, pp. 103-110, 2003.