

令和 6 年 4 月 25 日現在

機関番号：53701

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20450

研究課題名（和文）鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅の算定精度向上のための付着クリープモデルの開発

研究課題名（英文）A bond creep model for precise evaluation of crack width in reinforced concrete members

研究代表者

井向 日向（Imukai, Hyuga）

岐阜工業高等専門学校・その他部局等・助教

研究者番号：50964821

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では鉄筋コンクリート部材において、持続荷重が作用した場合およびコンクリートの乾燥収縮が生じた場合の、ひび割れ幅の経時変化を理論的に計算できる付着クリープモデルを開発を目指した。鉄筋コンクリート部材に生じるひび割れの幅が経時変化する原因の一つである、鉄筋とコンクリートの付着のクリープに着目し、付着クリープがどの程度生じるのか、なぜ生じるのかを実験的に明らかにした。付着クリープに及ぼす鉄筋径・供試体断面積の影響について検討した結果、鉄筋比を同一としながら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るなどの知見を得るとともにそれらのメカニズムに関する示唆的な結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリート構造物に生じるひび割れの幅は、構造物が所要の性能を満足するかどうかの重要な指標である。本研究が遂行されたことで、鉄筋とコンクリートの付着のクリープを現象から解明し、より精密に評価できる可能性が開かれた。実構造物のひび割れ幅算定に関する過去の多くの研究成果に加え、本研究で検討した付着のクリープをひび割れ幅の経時変化の評価に新たに取り入れられる基礎的なデータを取得することができた。また、これまで過去の実構造物の実測例に基づいて求められてきたひび割れ幅算定式に対し、理論的背景を追加する基礎となるデータを取得することができた。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to develop a bond creep model that can theoretically calculate the time-dependent change in crack width in reinforced concrete members under sustained loads and drying conditions.

It was focused on the creep of bond between reinforcing bar and concrete causes of changes in crack width over time. As a result of examining the effects of reinforcing bar diameter and specimen cross-sectional area on bond creep, it was found that bond creep decreases when the reinforcing bar diameter and concrete cross-sectional area are increased while the reinforcement ratios are the same. In addition, the suggestive data were provided for the mechanism of bond creep.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：持続荷重 付着クリープ ひび割れ幅 一軸引張載荷試験 乾燥収縮 鉄筋コンクリート

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物は、橋梁やダムなどといった社会基盤構造物を形成している。構造物が長期的に安全に使われるように設計・維持管理することが重要である。構造物に生じるひび割れの幅は、構造物が所要の性能を満足するかどうかの重要な指標である。

構造物が乾燥と持続的な荷重を受けるとき、ひび割れ幅は時間の経過とともに開いていく。これはコンクリートが、乾燥環境下で水分逸散に伴って体積変化したり（乾燥収縮）持続荷重の作用によって経時的に変形したり（クリープ）するからである。また、構造物の引張部では、鉄筋とコンクリートが付着により引張力を分担し合う。この持続的に作用する引張力により鉄筋が経時的にすべる現象（付着クリープ）が生じる。

構造物に生じるひび割れ幅は、構造物が長期的に所要性能を満足するかどうかを確認するための重要な指標となっている。そのため、国内外でこれまで多くの研究が行われており、構造物に荷重が作用した時の瞬間的なひび割れ幅は精度よく算定できるようになってきた（例えば、趙唯堅ほか：土木学会論文集、No.490/V-23、pp.147-156、1994）。

一方、構造物中のコンクリートが持続荷重を受けてクリープが生じる場合およびコンクリートが乾燥収縮する場合、ひび割れ幅は経時変化する。日本の現行の設計基準では、このひび割れ幅の経時変化を過去の実構造物の実測結果に基づいて、経験的に時間経過によらず一定値を与えることで考慮している（例えば、石橋忠良ほか：土木学会論文集、No.484/V-2、pp.33-40、1994）。しかし、現象の機構に着目した本質的な問題の解決のためには、ひび割れ幅を理論的かつ逐次的に計算できる手法を構築する必要がある。

この問題に対し、ひび割れ幅に及ぼす乾燥収縮の影響については、室内実験と有限要素解析によって検討されている（例えば、須田晶彦ほか：コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.577-582、2013）。一方、ひび割れ幅に及ぼすクリープ（特に付着クリープ）の影響については、研究事例が少なく、現象に即したモデルの開発はまだ着手されていない。

2. 研究の目的

以上の背景より、実構造物のひび割れ幅の算定精度を向上させるには、付着クリープがどの程度生じるのか、なぜ生じるのかを明らかにし、それに即した力学モデルを用いて、ひび割れ幅の経時変化を理論的に予測する必要がある。そこで本研究は、鉄筋コンクリート部材において、持続荷重が作用した場合およびコンクリートの乾燥収縮が生じた場合の、変形と応力を表現可能な付着クリープモデルを開発することを目的とする。さらに、開発したモデルに基づき、ひび割れ幅に及ぼす付着クリープの影響を従来の設計式に新たに組み込み、理論的かつ逐次的にひび割れ幅の経時変化を計算できるようにし、実構造物のひび割れ幅の算定精度向上を目指す。

3. 研究の方法

図-1 に示す供試体を計 14 体作製し、一軸引張載荷試験に供した。鉄筋には異形鉄筋と丸鋼を用いた。異形鉄筋は直径が 10、13、19、22mm の規格のものを用いた。供試体は断面を 100mm 角または 150mm 角とし、長さ 1m とした。供試体はすべて打設から約 1 日後に脱型し、速やかに防水気密テープ等により封緘養生し、材齢 28 日以上となってから載荷試験に供した。

載荷試験状況を図-2 に示す。荷重の伝達は供試体の鉄筋端部に取り付けたくさびグリッパを介して行った。

載荷試験では、供試体にひび割れが生じる荷重（鉄筋応力にして約 200 N/mm²）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。

軸方向変位は図-2 の左部分に示すような測定治具によって測定した。これは、試験区間両端部においてエポキシ樹脂系接着剤によって取り付けられたアルミ製治具を介して、変位計（感度 1/500 mm）によって試験区間の相対変

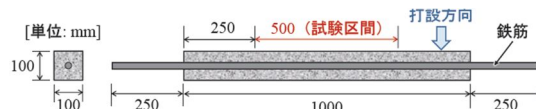


図-1 供試体の形状・寸法

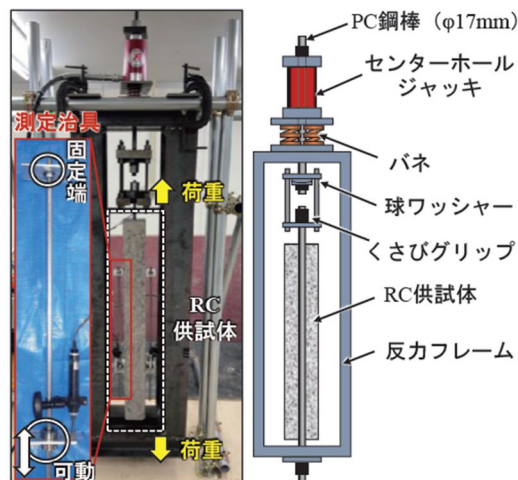


図-2 載荷試験装置

位置を測定するものである。測定した変位を試験区間長で除することで供試体に生じた部材軸方向の平均ひずみを求めた。

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さらに、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。

4. 研究成果

(1) 荷重試験結果

図-3 に荷重試験結果のうち、代表的な結果を示す。持続荷重した供試体（凡例中に M と付した供試体）は、持続荷重した供試体と同じ形状・寸法で静的荷重した供試体（凡例中に S と付した供試体）に比べ、持続荷重開始後にひずみが生じていることがわかる。これは持続荷重による付着の損失に伴うひずみ（付着クリープによるひずみ）とコンクリートのクリープおよび乾燥収縮が同時に生じた結果である。

荷重試験で生じた各供試体の表面のひび割れ発生状況を図-4 に示す。各試験体の試験区間内に概ね 2～3 本のひび割れが生じた。

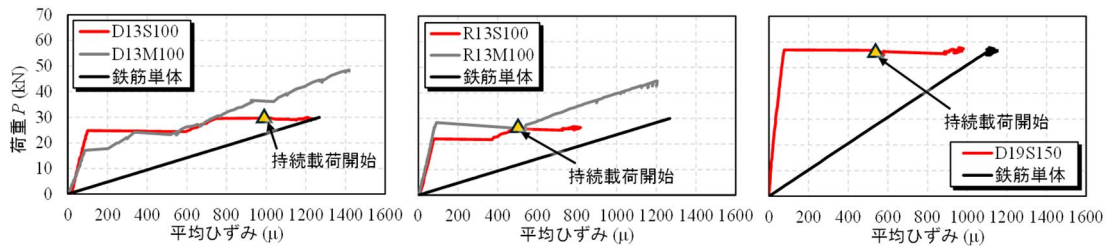


図 - 3 荷重供試体の荷重 - ひずみ関係

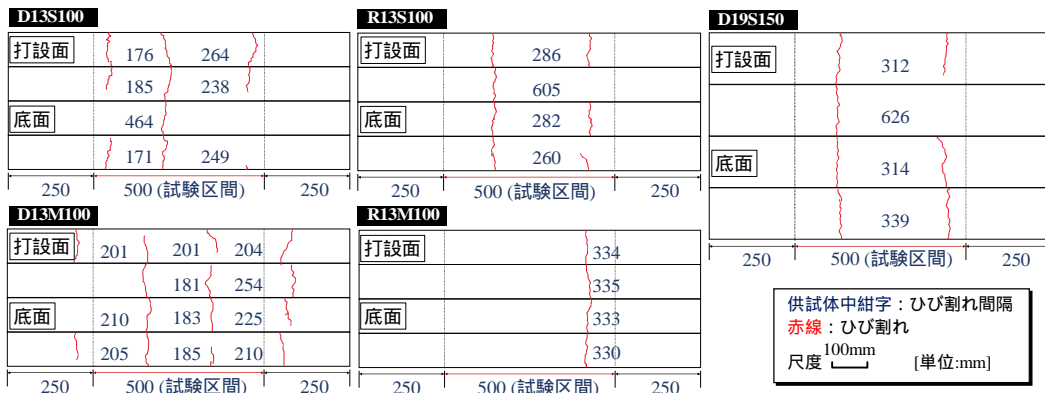


図 - 4 供試体表面のひび割れ発生状況（荷重試験終了時点）

(2) 時間依存ひずみに関する検討

図-5 に持続荷重中における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た。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 μ となっているのに対して、異形棒鋼を用いた D13S100 は約 120 μ 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り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。

図-5 に示した時間依存ひずみ ϵ_t は以下の式(1)に示すように、ひび割れた RC の収縮 ϵ_{cs1} 、コン

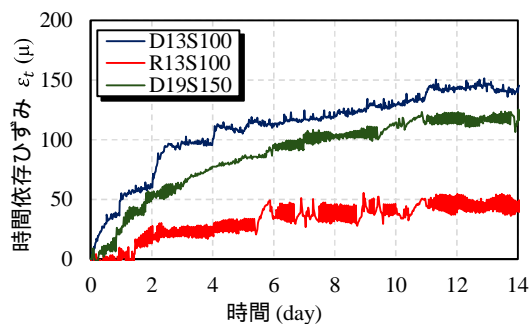


図-5 時間依存ひずみの経時変化

クリート単体の引張クリープ ε_{cc} 、付着クリープ ε_b の和からなると考えることができる。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{cs1} + \varepsilon_{cc} + \varepsilon_b \quad (1)$$

付着クリープ以外のひずみは、載荷供試体と同じバッチで作製した無筋コンクリートと鉄筋コンクリートの長さ変化率の測定試験により抽出することができる。すなわち式(1)より、時間依存ひずみから収縮 ε_{cs1} と引張クリープ ε_{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した。図-6 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した。

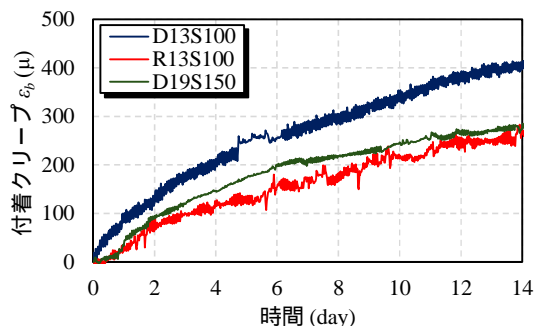


図-6 付着クリープの抽出結果

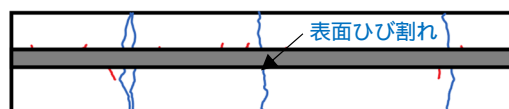
鉄筋の表面形状に関する検討

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、供試体中に赤インクを注入しながら同様の載荷試験を行った別の実験により確認された(図-7)。

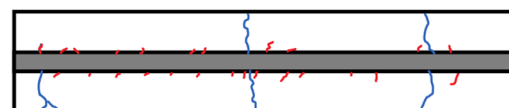
丸鋼は摩擦作用、異形棒鋼は機械的作用と、それぞれ異なる付着機構により外力に抵抗する。よって、可視化実験で確認された付着クリープ機構は異形棒鋼特有の現象であると考えられる。今回、表面が滑らかな丸棒鋼でも付着クリープが発生したことから、内部ひび割れだけでなく、鉄筋表面の摩擦作用の時間依存性も付着クリープの発生に寄与している可能性が示唆された。



(a)供試体切断面のインク含浸状況例



(b)内部ひび割れ状況(静的載荷供試体)



(c)内部ひび割れ状況(持続載荷供試体)

図-7 赤インクの含浸による載荷供試体の内部ひび割れの可視化実験結果

鉄筋径と断面寸法に関する検討

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。

(3) 付着クリープを考慮したひび割れ幅算定手法に関する検討

検討概要

本検討の目的は付着クリープの抽出方法の妥当性を確認することと、本研究成果の応用例の一つとして、付着クリープを考慮したひび割れ幅算定手法について検討することである。付着クリープの検討に用いたのと同じ供試体において実測したひび割れ幅の経時変化を、抽出した付着クリープを用いて再現する。

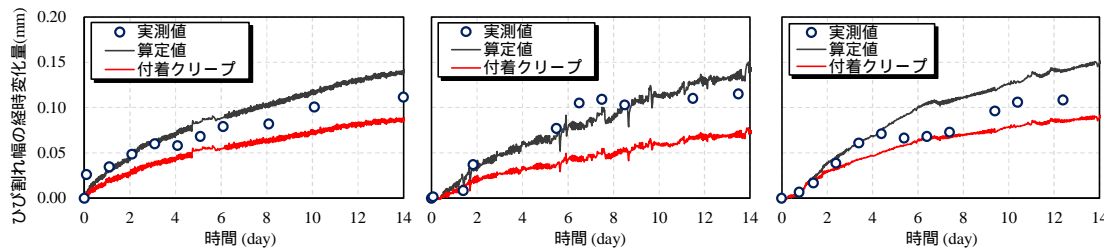
ひび割れ幅の経時変化は式(2)に示すように自由収縮と付着クリープの和にひび割れ間隔を乗じて表現できる。

$$w_{avt} = L_{av}(\varepsilon_b + \varepsilon'_{cs}) \quad (2)$$

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} : 自由収縮ひずみ(圧縮正)、 ε_b : 付着クリープ(引張正)である。

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-8 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十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。



(a)D13S100 供試体

(b)R13S100 供試体

(c)D19S150 供試体

図-8 荷重供試体のひび割れ幅の経時変化の実測値および算定値

(4) まとめ

本研究では以下の知見が得られた。

- 異形鉄筋と付着機構が異なる丸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。
- 荷重供試体に赤インクを注入した内部ひび割れ可視化実験において、持続荷重供試体は静的荷重供試体と比較して内部ひび割れの本数が多いとともに総長さも大きくなった。また、各供試体の内部ひび割れの平均長さは荷重方法によらずほぼ同等となった。これらの結果から持続荷重供試体に生じた時間依存変形が生じたメカニズムには荷重中の新たな内部ひび割れの発生に起因することが示唆された。
- 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。
- 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。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 井向 日向, 赤地 翔夢, 中神 光汰, 岩瀬 裕之, 犬飼 利嗣	4. 巻 23
2. 論文標題 RC-軸引張供試体の持続載荷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	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 251-256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 泉創太, 高山希望, 井向日向, 犬飼利嗣	4. 巻 46
2. 論文標題 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	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 赤地翔夢, 中神光汰, 井向日向
2. 発表標題 鉄筋コンクリート部材の付着クリープに及ぼす鉄筋径の影響に関する研究
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 講演番号V-22
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中神光汰, 赤地翔夢, 井向日向
2. 発表標題 載荷後のRC部材内部の直接観察に基づく付着クリープ機構の検討
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 講演番号V-23
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高山希望, 泉創太, 井向日向
2. 発表標題 持続荷重下に供したRC一軸引張部材内部のひび割れ性状の可視化に関する実験的研究
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会講演概要集
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 泉創太, 高山希望, 井向日向
2. 発表標題 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
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会講演概要集
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Izumi Arata, Imukai Hyuga, Inukai Toshitsugu, Shimomura Takumi
2. 発表標題 Experimental study on the influence of surface shape of reinforcing bar on bond creep in RC
3. 学会等名 The 8th International Conference on "Science of Technology Innovation" 2023(8th STI-Gigaku 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------