論文　鉄筋コンクリート部材の長期ひび割れ幅とかぶりコンクリートの損傷

氏家　勲*1・廣河　和男*2・佐藤　良一*3・安斎　慎介*4

要旨：本研究は約 7～10 年間にわたり一定の持続荷重を作用させた鉄筋コンクリート曲げ部材のひび割れ幅や引張鉄筋ひずみなどの計測結果から，曲げひび割れ間のかぶりコンクリートには部材表面に現れない内部ひび割れが発生し，この内部ひび割れは鉄筋によるかぶりコンクリートの乾燥収縮に対する拘束を緩和し，長期ひび割れ幅の増加に影響することを述べている。また，持続荷重下では内部ひび割れのような損傷に加えて，曲げひび割れ近傍の鉄筋とコンクリートの剥離などの損傷が経時的に進行することを示している。

キーワード：ひび割れ幅，鉄筋ひずみ，かぶりコンクリート，内部ひび割れ，長期挙動

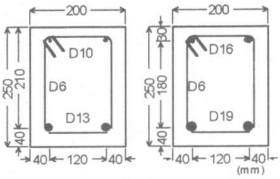
1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化現象の一つである鋼材腐食に影響を及ぼす要因にひび割れがある。かぶりコンクリートにひび割れが存在すると塩化物イオン，酸素，水などの腐食因子を容易に鉄筋まで侵入させ，また，それらの分布の不均一をもたらし，ひび割れ部においてマクロセル腐食を引き起こす。ひび割れ幅と鋼材腐食の関係については十分には解明されていないが，土木学会示方書では鋼材の腐食に対して許容ひび割れ幅を定めており，長期のひび割れ幅を評価することは鉄筋コンクリート構造物の耐久性能を検討する上で重要である。

本研究は持続荷重を与えた鉄筋コンクリート曲げ部材の長期実験において約7～10年間にわたり計測したひび割れ幅や鉄筋ひずみなどの結果を報告するとともに（約３年までの結果については既に報告してある[1),2)]。），その実験結果に基づいて時間経過に伴って増大するひび割れ幅の挙動，および持続荷重下において劣化現象に関係するかぶりコンクリートに発生する損傷について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 供試体



図－１　供試体断面図

供試体は**図－１**に示す断面形状を有する長さ 2400 mm の矩形断面ＲＣはりである。供試体に用いたコンクリートの水セメント比は60%で，供試体は載荷までの 35 日間湿布養生を行い，持続荷重を与えると同時に乾燥を開始した。供試体は恒温恒湿室（温度 20℃，湿度 60%R. H.［載荷日数 700 日以降 70% R. H.］）（シリーズＡ）および実験室内（試験期間中の平均温度約 15℃，平均湿度約 66%R. H.）（シリーズＢ）に静置した。供試体の一覧を**表－１**に示す。

2.2 載荷および計測

載荷はスパン 2100mm，せん断スパン 650mm の２点載荷とした。供試体には**表－１**に示すコンクリートの引張応力負担を無視して求めた引張鉄筋応力度となる曲げモーメントを与えた。等曲げモーメントが作用している部材中央 800 mm を試験区間とし，ひび割れ幅，鉄筋ひずみ，圧縮部コンクリートひずみ，たわみを計測した。

*1 愛媛大学助教授　工学部環境建設工学科　工博（正会員）
*2 広島大学大学院　工学研究科構造工学専攻（正会員）
*3 広島大学教授　工学部第四類（建設系）　工博（正会員）
*4 宇都宮大学大学院　工学研究科建設学専攻　（正会員）

鉄筋ひずみを測定するひずみゲージは引張鉄筋の縦リブの位置に幅 4mm，深さ 3mm の溝を切削し，溝の中に貼付した。ひずみゲージは片側 40mm 間隔で左右互い違いに 20mm 間隔で，中央断面から両側各 200mm の 400mm 区間に貼付した（B-D13-10 は中央断面から片側 6mm ともう片側 380mm の 440mm 区間である）。ひずみゲージを貼付する際にはポリエステル樹脂系接着剤を用い加圧接着し，約 80℃で 12 時間養生を行った。さらに，貼付したひずみゲージをパラフィンとブチルゴムで防水処理し，エポキシ樹脂で溝を埋めてコーティングした。

表－1　供試体一覧

供試体	使用鉄筋 引張-圧縮	引張鉄筋 断面積 (cm^2)	圧縮鉄筋 断面積 (cm^2)	引張鉄筋 応力度 (MPa)	載荷時 圧縮強度 (MPa)	ひび割れ間隔 (mm)
A-D19-16-1	D19-D16	4.86	3.97	222.4	39.0	166
A-D19-16-2	D19-D16	4.86	3.97	166.7	39.0	131
A-D19-16-3	D19-D16	4.86	3.97	111.2	39.0	148
B-D19-16	D19-D16	4.79	3.97	224.2	39.8	164
B-D13-10	D13-10	1.83	1.43	257.9	39.8	166

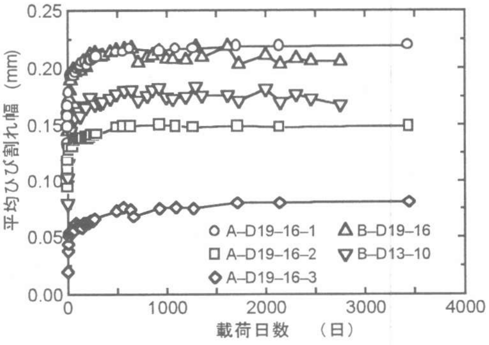
ひび割れ幅はシリーズＡでは試験区間を含む供試体中央部 850mm 区間両側面の鉄筋位置に標点距離 50mm でコンタクトチップを取り付け，静的載荷開始時から一定持続載荷期間までコンタクトゲージ（精度 1/1000mm）で標点の増加量を計測し，その値をひび割れ幅とした。シリーズＢでは静的載荷時に試験区間を含む供試体中央部 1100mm 区間両側面の鉄筋位置に標点距離 100mm のパイ型変位計（感度 2000×10^{-6}/mm）を取り付け，静的載荷開始から設定荷重までの標点間の変位を計測した。その後直ちにパイ型変位計を取り外し，発生したひび割れを挟むように標点距離 20mm でコンタクトチップを取り付け，コンタクトゲージにより計測し，その増加量をパイ型変位計で得られた値に加えて一定持続載荷期間のひび割れ幅とした。

たわみは試験区間の中央断面の位置で，シリーズＡではダイヤルゲージ（精度 1/100mm）を，シリーズＢでは高感度型変位計（感度 1000 $\times10^{-6}$/mm）を用いて計測し，その値から試験区間の平均曲率を求めた。圧縮部のコンクリートひずみは圧縮縁より 10mm の位置で，シリーズＡでは試験区間 800mm を含む 900mm の区間を標点距離 100mm としてコンタクトゲージで，シリーズＢではひび割れ幅と同様にパイ型変位計（測定区間長 1000mm，標点距離 200mm）とコンタクトゲージ（測定区間長 80cm，標点距離 10cm）組み合わせて計測した。

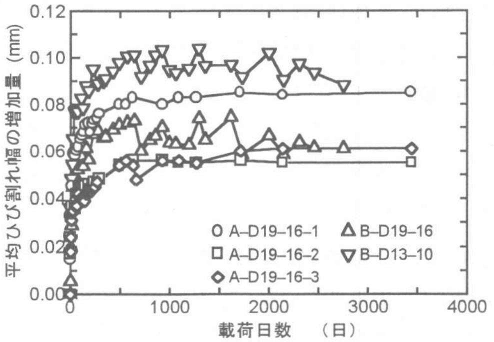
3.　実験結果および考察

3.1　ひび割れ幅

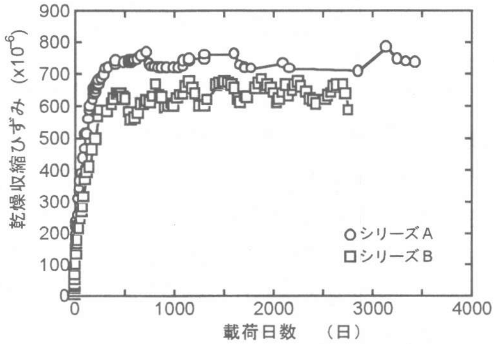
図－2 は平均ひび割れ幅の経時変化を示す。ひび割れ間隔は**表－1** に示す。シリーズＡにおいて，平均ひび割れ幅は当然ではあるが作用曲げモーメントの大きさに対応して大きくなっている。また，どの供試体においてもひび割れ幅は載荷日数約 500 日以降はほぼ一定の値となっている。なお，シリーズＡでは全ての供試体において載荷後５日以降に新たなひび割れの発生は確認されなかった。シリーズＢにおいては，B-D19-16 に載荷後約１年で２本，B-D13-10 に載荷後 13 日で１本，載荷後約１年で２本の新たなひび割れがそれぞれ確認された。なお，載荷後１年でのひび割れは微細であったので**表－1** のひび割れ間隔には含めていない。



図－2　平均ひび割れ幅の経時変化



図－３ 平均ひび割れ幅の増加量

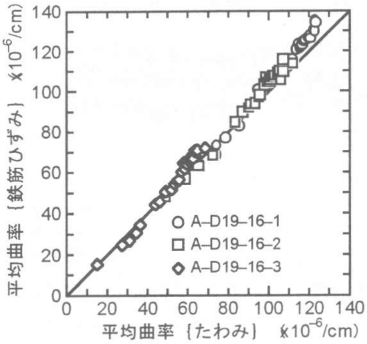


図－４ 乾燥収縮ひずみの経時変化

図－３は持続載荷開始時からの平均ひび割れ幅の増加量の経時変化を示す。ひび割れ間隔および引張鉄筋応力度の大きい B-D13-10 が最も大きい増加量となっている。A-D19-16-1 と B-D19-16 ではひび割れ間隔および引張鉄筋応力度はほぼ同じであるが，B-D19-16 のほうが A-D19-16-1 より平均ひび割れ幅の増加量が小さくなっている。これはコンクリートの乾燥収縮の違いによるものである。**図－４**ははり供試体に用いたコンクリートの乾燥収縮の経時変化を示す。乾燥収縮ひずみははり供試体と同断面で長さ 500mm の供試体に埋込型ひずみ計を埋設して測定している。乾燥収縮供試体ははり供試体の持続載荷開始と同時に乾燥を開始している。**図－３**と**図－４**を比較するとわかるようにひび割れ幅の経時的な増加傾向は乾燥収縮の経時変化の傾向とほぼ対応している。

3.2 引張鉄筋ひずみ

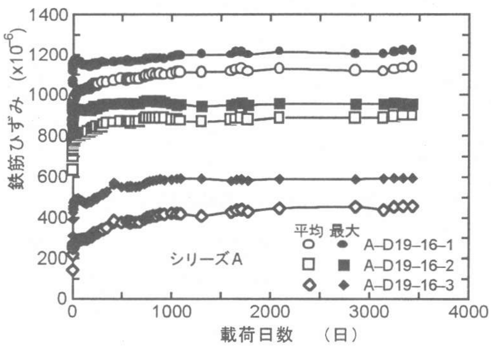
鉄筋ひずみを計測するひずみゲージは長期計測が可能となるような処理を施しているが，



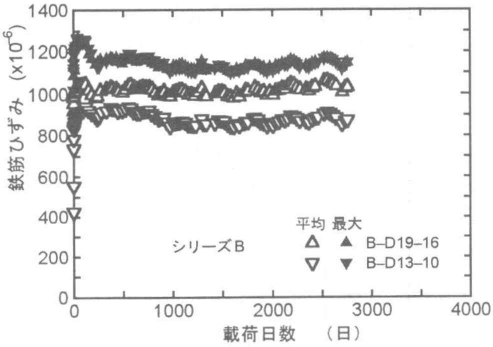
図－５ 鉄筋ひずみとたわみによる平均曲率の比較

一部のひずみゲージにおいてひび割れ断面の値より遙かに大きな値を示す一般的に考えられない変動が見られた。そのような場合にはそれらを挟む健全と考えられるひずみゲージの値を用いて放物線で回帰し，その位置のひずみをを内挿して求めた。また，個々のひずみゲージについてその値の信頼性を検討する方法がないので，計測および内挿されたひずみを用いて平均鉄筋ひずみを求め，その値と圧縮部コンクリートひずみより求めた平均曲率とたわみより求めた平均曲率の比較を行った。**図－５**にシリーズAの場合の結果を示す。平均鉄筋ひずみと圧縮部コンクリートひずみから求めた平均曲率はたわみより求めた平均曲率に比べ載荷日数が長い場合にやや大きな値となっているが，妥当な値を示しており，従って，得られた鉄筋ひずみには信頼性があるものと考える。

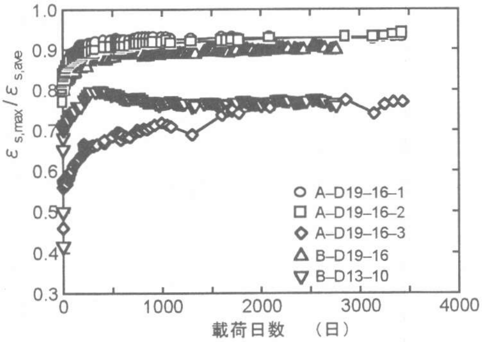
図－６と**図－７**はシリーズＡとＢにおける最大と平均鉄筋ひずみの経時変化を示す。シリーズＡにおいて，A-D19-16-3では最大鉄筋ひず



図－６ 最大と平均鉄筋ひずみの経時変化（シリーズＡ）



図－7　最大と平均鉄筋ひずみの経時変化（シリーズ B）



図－8　最大鉄筋ひずみに対する平均鉄筋ひずみの比

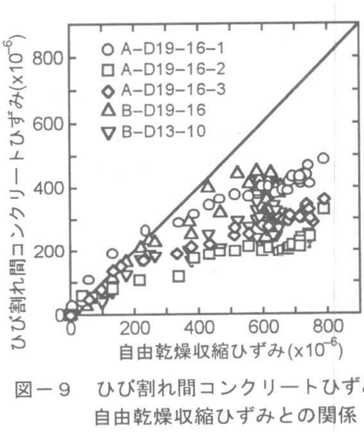
みが載荷日数約500日まで大きな増加を示している。これはすでに報告されているひび割れ断面における引張軟化の喪失の影響によるものである[3)]。シリーズBの最大および平均鉄筋ひずみは載荷後最初の一年での変化が大きくなっているがその後は小さな変動幅でほぼ一定となっている。**図－8**は最大鉄筋ひずみに対する平均鉄筋ひずみの比を示す。載荷日数1000日以降で，A-D1916-1，A-D19-16-2およびB-D19-16は約0.9と大きく，A-D19-16-3と B-D13-10では約0.75となっている。最大鉄筋ひずみに対する平均鉄筋ひずみの比が大きいことは言い換えれば，鉄筋とコンクリートの付着が低下し，ひび割れ間のコンクリートが引張応力の負担に寄与する割合が小さいことを意味する。

3.3　長期ひび割れ幅の増加量の検討

鉄筋コンクリートのひび割れ幅は持続荷重下において，コンクリートの乾燥収縮，クリープおよび鉄筋とコンクリート間の付着のクリープにより，時間の経過とともに増大する。特に乾燥収縮がひび割れ幅の増大に及ぼす影響は大きい。そこで，試験区間で測定されたひび割れ中で最も大きいひび割れ幅（以下，最大ひび割れ幅と呼ぶ）を用いて，乾燥収縮ひずみがどの程度ひび割れ幅の増加に寄与しているかを検討する。ひび割れ幅の増加量にはひび割れ間隔の違いによる影響と鉄筋ひずみによるひび割れ幅の増加が含まれている。これらの影響をなくすために，次式によってひび割れ幅の増加量からひび割れ間コンクリートのひずみ $\varepsilon_{c,l}$を求めた。

$$\varepsilon_{c,l}=\frac{\Delta w_{max}-\Delta\varepsilon_{s,ave}(\ell_r+\ell_l)/2}{(\ell_r+\ell_l)/2} \qquad (1)$$

ここで，Δw_{max}：最大ひび割れ幅の増加量，$\Delta\varepsilon_{s,ave}$：平均鉄筋ひずみの増加量，$\ell_r$，$\ell_l$：最大ひび割れ位置の両側のひび割れ間隔である。上式によって得られたひび割れ間コンクリートひずみと乾燥収縮の関係を**図－9**に示す。著者らはシリーズBの載荷日数1000日までの結果において，乾燥収縮ひずみが約300×10^{-6}まではひび割れ間コンクリートひずみが自由乾燥収縮ひずみとほぼ同じとなり，自由乾燥収縮収縮ひずみが約300×10^{-6}以上では鉄筋からの拘束が高くなり，それまでの範囲より小さな勾配で増加することをすでに報告している[2)]。シリーズAにおいても同様な関係が得られている。また，シリーズAでは引張鉄筋応力度の最も大きいA-D19-16-1の場合に，シリーズBではB-D19-16の場合に自由乾燥収縮収縮ひずみ約300×10^{-6}以上での勾配の低下が小さく鉄筋による拘束の



図－9　ひび割れ間コンクリートひずみと自由乾燥収縮ひずみとの関係

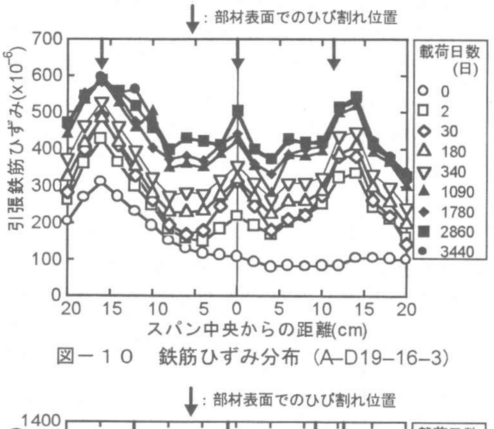
程度が小さくなっている。この鉄筋の拘束の程度の違いは**図－８**に示したひび割れ間コンクリートの引張応力の負担の寄与の程度と A-D19-16-2を除いて対応したものとなっている。

3.4 かぶりコンクリートの損傷

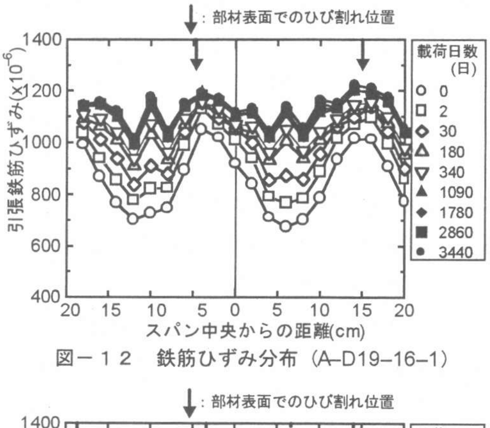
鉄筋の自由乾燥収縮に対する拘束の程度が小さい A-D19-16-1 と B-D19-16 では持続載荷初期にそれぞれのシリーズの中で最も大きな平均付着応力が生じている。付着応力の低下は主として鉄筋とコンクリートの付着クリープにより生じるが，付着クリープだけでは，**図－８**の結果を説明することはできない。

図－10，11 は最大鉄筋ひずみに対する平均鉄筋ひずみの比が小さかった A-D19-16-3 と B-D13-10 の鉄筋ひずみ分布を示す。図中の矢印は部材表面で観察されたひび割れの位置を示す。どちらの供試体においても部材表面で観察されたひび割れの位置と各載荷日数におけるひずみのピークの位置はほぼ一致しており，経時的なひずみ分布の大きな変化は見られない。一方，最大鉄筋ひずみに対する平均鉄筋ひずみの比が大きかった A-D19-16-1 と B-D19-16 の鉄筋ひずみ分布を**図－12，13** に示す。これらの場合には，載荷時初期はひび割れ位置に対応する分布となっているが，徐々にひび割れ間に位置するひずみゲージの値が増加し，ひび割れ断面のひずみと近い値となっている。これは部材表面まで達しない新たなひび割れの発生と進展によるものと考えられる（以下，このひび割れを内部ひび割れと呼ぶ)。A-D19-16-1 では観察されていないが，B-D19-16 では破線の矢印で示す位置に載荷から約２年後に部材表面でひび割れが確認された。このひび割れは内部ひび割れが部材表面まで達したものと考えられる。

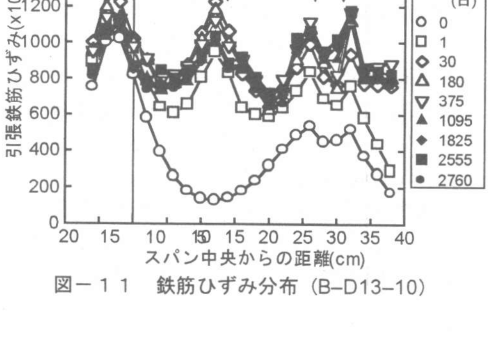
図－14 は A-D19-16-2 の鉄筋ひずみ分布を示すが，鉄筋ひずみは内部ひび割れの発生を示す分布とはなっていない。**図－15** は**図－14** に示すひび割れ間のひずみ分布より求めた付着応力分布の経時変化を示す。付着応力は時間とともに小さくなるとともに，付着応力の最大値がひび割れ間の中央に移動している。この移動はひび割れ近傍の付着強度劣化域の範囲が経時的に



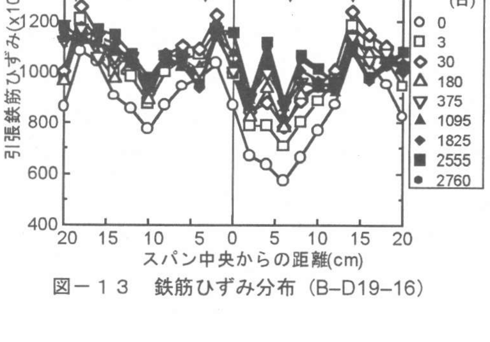
図－１０　鉄筋ひずみ分布（A-D19-16-3）



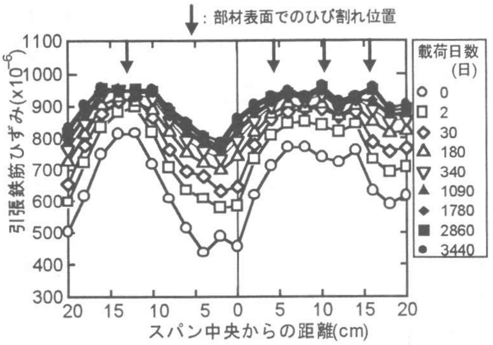
図－１２　鉄筋ひずみ分布（A-D19-16-1）



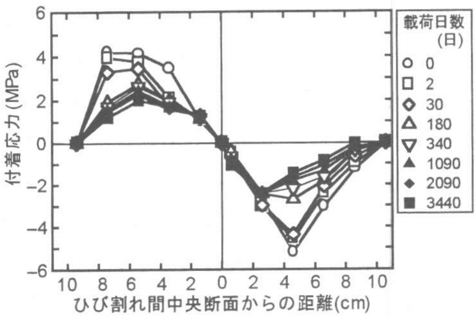
図－１１　鉄筋ひずみ分布（B-D13-10）



図－１３　鉄筋ひずみ分布（B-D19-16）



図－１４　鉄筋ひずみ分布（A–D19–16–2）



図－１５　付着応力分布（A–D19–16–2）

広がったためであり，このことが A-D19-16-2 において最大鉄筋ひずみに対する平均鉄筋ひずみの比を大きくした原因の１つと考えられる。なお，A-D19-16-3 や B-D13-10 ではこの付着強度劣化域の顕著な増加は見られなかった。

このように内部ひび割れの発生は乾燥収縮の進行に伴うひび割れ幅の増加を大きくするという点から劣化現象に影響すると考えられるが，内部ひび割れ自身も劣化現象に影響を及ぼすと考えられる。著者らは本実験のようにひび割れ間中央部ではないが，主ひび割れ近傍の内部ひび割れの発生により，透気性を用いてかぶりコンクリートの密実性が低下し，有効に働くかぶりが減少することを報告している[4)]。また，大即らはかぶりコンクリートの水セメント比が大きい場合にひび割れの位置に関係なく腐食が発生し，酸素透過量も大きいことから腐食速度も速いことを報告している[5)]。本研究で指摘した内部ひび割れも密実性に関してかぶりコンクリートに品質の悪いコンクリートを用いた場合と同様な影響を持つと考えられる。さらに，曲げひび割れ近傍に生じる鉄筋とコンクリートとの剥離（肌離れ）によりひび割れ部だけでなくひび割れ近傍においても腐食が生じる[5)]。**図－15** で述べた付着強度劣化域は曲げひび割れ近傍の剥離や内部ひび割れが生じている部分であり，鈴木らも報告しているが[6)]，付着強度劣化域が増加することはかぶりコンクリートに上述の内部ひび割れとともに腐食を促進する損傷が経時的に広がることを表している。

4.　まとめ

本研究では持続荷重下の鉄筋コンクリート曲げ部材において，内部ひび割れが生じることにより鉄筋とコンクリートとの付着を低下させ，乾燥収縮の主ひび割れ幅の増加に及ぼす影響度が大きくなることを示した。また，本研究で得られた鉄筋ひずみの長期挙動は内部ひび割れの発生やひび割れ近傍での鉄筋とコンクリートとの剥離の進展などのかぶりコンクリートの密実性を低下させる損傷が経時的に進行することを示唆するものと考えられる。

[参考文献]

1) 佐藤良一, 氏家勲, 湊英一，北條泰秀：長期のＲＣ曲げ部材における変形と付着に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集, No. 14, Vol. 2, pp. 63-68, 1992. 6
2) 阿部司, 佐藤良一, 氏家勲, 鳥取誠一：乾湿繰り返しを受ける RC 部材の長期曲げひび割れ幅について，コンクリート工学年次論文報告集, No. 17, Vol. 2, pp. 1025-1030, 1995. 6
3) 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, No. 20, Vol. 3, pp. 133-138, 1998. 6
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, pp. 163-172, 1996. 11
5) 大即信明ほか：鉄筋コンクリートの曲げひび割れ部に生じる腐食の形成機構に及ぼす水セメント比の影響，土木学会論文集, No. 606/V-41, pp. 63-73, 1998. 11
6) 鈴木計夫ほか：持続あるいは繰り返し荷重を受けたＰＲＣはり内部のひび割れ状況，セメント技術年報, 39, pp. 416-419, 1985. 12