

論文 混合セメントを用いた RC 部材の持続荷重下の曲げひび割れ進展に対する養生日数、乾湿繰り返しの影響

浅本 晋吾*1・横井 太一*2・平林 雅也*3・小林 薫*4

要旨：本研究では、高炉セメント、フライアッシュセメントといった混合セメントを用いたときの RC 部材の曲げひび割れ進展に対する養生日数、乾湿繰り返しの影響を検討した。異なる養生日数で、乾燥もしくは乾湿繰り返し環境のもと、持続荷重を与えた RC 部材の圧縮部コンクリートのひずみは、配合に関わらず養生日数が長いほど小さくなり、乾湿繰り返し環境では乾燥環境に比べ半分程度小さくなった。最大曲げひび割れ幅の実測値では、配合、養生日数、乾湿の影響は明確に表れなかったが、初期のひび割れ幅に対する曲げひび割れの進展率で比較すると、いずれの配合、養生条件でも、乾湿繰り返しを施した方が小さくなった。

キーワード：混合セメント、RC 部材、曲げひび割れ進展、養生日数、乾湿繰り返し

1. はじめに

セメント製造時の CO₂削減、産業副産物の有効利用の観点から、高炉スラグ微粉末、フライアッシュを混和した混合セメントの利用が近年拡大している。特に、高炉セメントは、経済産業省の推進もあって、各種構造物への普及が広がっている。フライアッシュセメントは、水和熱低減を目的としたマスコンクリートへの適用が主であったが、アルカリ骨材反応抑制に効果があると期待され、一般土木構造物への適用も進みつつある。こうした混合セメントは、水和反応が緩慢で若材齢での強度が低いため、死荷重などによる若材齢でのひび割れ発生の懸念があり、土木学会コンクリート標準示方書では、普通ポルトランドセメントより長い湿潤養生期間を設けることを推奨している¹⁾。一方で、混和材を用いた場合、養生後も未水和物が残る、外部から降雨などによる水分の供給があれば再水和し、潜在水硬性、ポズラン反応などによる長期の強度増進によって初期に発生したひび割れの進展を抑制する可能性もある。

以上のことから、本研究では、混合セメントを用いた RC 部材に異なる養生期間を施し、乾燥、乾湿繰り返しと異なる環境下で持続荷重を与え、それぞれを比較することで、曲げひび割れの進展に対する養生日数、水分供給の影響について検討した。持続荷重を与えた RC 曲げ部材の長期変形、ひび割れについては、佐藤らが実験・解析の両面からクリープ、乾燥収縮、付着クリープの影響を考慮した系統的な検討を行っている^{2), 3)}。本研究では、混和材を用いたときの、養生日数に依存する初期強度の影響、降雨を想定した水分浸透による再水和の影響

の観点から、持続荷重下での RC 部材の曲げひび割れ進展性状について検討を行うこととした。

2. 実験概要

2.1 配合

本実験に用いたコンクリート供試体の示方配合と材齢 7 日と 14 日の圧縮強度（試験は JIS A1108 に準じた）を表-1 に示す。圧縮強度は、後述の RC 部材と同様に、φ10cm×20cm の円柱供試体を打込み 1 日後に脱型し、恒温恒湿室（温度：20.5±0.5℃、湿度：45±5%）で材齢 7、14 日まで湿潤養生を施したときの強度である。配合は 3 種類であり、普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³、比表面積：3250cm²/g）を用いたコンクリート（以下、OPC）、高炉セメント B 種（密度：3.04g/cm³、比表面積：3750cm²/g）を用いたコンクリート（以下、BB）、フライアッシュ II 種（密度：2.30g/cm³、比表面積：4470cm²/g）を 20% 普通ポルトランドセメントと置換したコンクリート（以下、FA）である。細骨材は市販の川砂（密度：2.60g/cm³）を用い、粗骨材は市販の碎石（5-13mm 碎石密度：2.64g/cm³、13-20mm 碎石密度：2.67g/cm³）を用いた。水結合材比（48.6%）、細骨材率（41.4%）は、各配合で同じとし、OPC の単位水量を 175kg/m³ として配合設計し、BB と FA については、OPC のセメントペースト体積、骨材体積と等しくなるように配合した。打込みは、OPC、FA、BB の順に行い、それぞれ 2013 年 8 月下旬、9 月上旬、下旬に行った。なお、AE 剤、AE 減水剤は JIS 基準を満たす一般的なもので、各配合で同種のものを用い、特に材料分離などは見受けられなかった。

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科 准教授 博士（工学）（正会員）

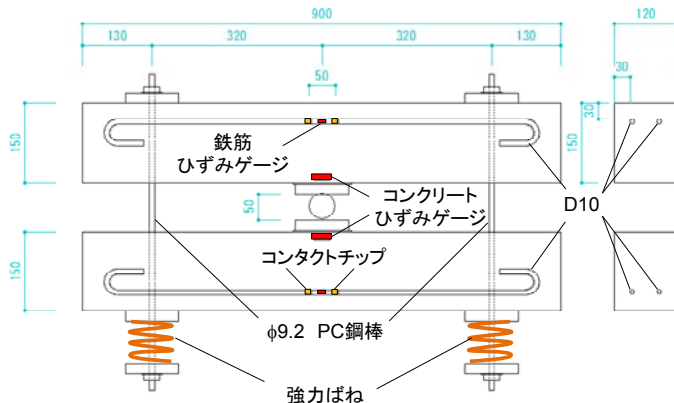
*2 埼玉大学 工学部建設工学科（非会員）

*3 東日本旅客鉄道（株） JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 修士（工学）（正会員）

*4 東日本旅客鉄道（株） JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 博士（工学）（正会員）

表－1 各配合の示方配合 (kg/m³)

配合名	水	セメント	フライ アッシュ	細骨材	粗骨材		AE 剤	減水剤 (ml)	材齢 7 日の 圧縮強度 (MPa)	材齢 14 日 の圧縮強度 (MPa)
					5-13 mm	13-20 mm				
OPC	175	360	-	706	609	411	0.018	901	27.6	30.8
BB	172	355	-						21.8	30.3
FA	170	281	70						28.0	32.3



図－1 持続曲げモーメントを与える鉄筋コンクリート供試体の概要 (単位: mm)



写真－1 他方の供試体を湿潤にした状態

材齢 7 日での圧縮強度は、反応が最も遅いはずの FA が最も大きくなった。空気量は、同量の混和剤を加えたにもかかわらず、OPC が 6.8%, FA が 2.2%, BB が 5.6% と FA の空気量が最も小さく、これにより強度が大きくなったと思われる。また、既往の研究⁴⁾で示されているように、このフライアッシュは二酸化ケイ素が多く (58.8%), 比表面積も若干大きいので強度が大きくなり得ること、打込み日がそれぞれ異なるため FA の練り上がり温度が他の配合より高く (ただし、計測してないため不明)、水和反応が促進されたことなども理由に考えられる。BB については、材齢 7 日では最も強度が小さいものの、材齢 14 日まで湿潤養生を施すと、OPC と概ね同じ圧縮強度になった。

2.2 鉄筋コンクリート供試体

持続荷重下での曲げひび割れの進展の検討は、120mm × 150mm × 900mm の鉄筋コンクリート供試体を用いた (図－1)。引張鉄筋には、異形鉄筋 D10 (降伏強度: 383MPa, ヤング率: 190GPa) を用い、引張鉄筋比は 0.99% である。曲げひび割れを供試体中央に確実に 1 本発生させるため、供試体中央の引張縁に長さ 10mm、幅 3mm のノッチを入れた。

図－1 に示すように、同配合の供試体を対とし、2 体の両端の PC 鋼棒を緊張し、3 点曲げ载荷となるように持続荷重を与えた。荷重は、2 本の PC 鋼棒中央部のひずみを計測しながらそれぞれの PC 鋼棒のボルトを同時に手動で締め、調整し、試験期間中、一定荷重 (平均ひずみ: 600μ, 荷重: 7.8kN) を保つように適宜締め直しをして

制御した。コンクリートの時間依存変形、ひび割れ進展などによる PC 鋼棒の緊張緩和で荷重が大幅に低下することを防ぐため、図－1 に示すように、PC 鋼棒の定着板の間には強力なばね (ばね定数: 1.1kN/mm) をはさみ、供試体の変形をできるだけばねで吸収させるようにした。持続荷重は、中心部に導入するひび割れを目視ではつきり確認でき、限られた実験時間のもと、できるだけ違いが明確になるように、死荷重での鉄筋の許容応力である 100MPa の 1.5 倍である 150MPa 程度の応力が材齢 7 日の時点で供試体に作用する荷重とした。

曲げひび割れ進展に対する養生日数の影響を検討するため、打込み後 1 日で脱型したのち、恒温恒湿室 (温度: 20.5±0.5℃, 湿度: 45±5%) で湿潤養生を材齢 7 日と 14 日まで施した供試体に、それぞれ上記の持続荷重を与えた。また、曲げひび割れ進展における降雨などの液状水浸透の影響を検討するため、約 7 日毎に 1 日間、水を含んだウェスを片側の供試体に巻きその上をビニールで覆い湿潤状態とし、他方は水を与えず上記恒温恒湿室内で乾燥を続けた (写真－1)。

図－1 に示すように、供試体中央で、打込み面でない引張縁を基準に高さ 14cm (圧縮縁から 1cm) のところでのコンクリートの圧縮ひずみ、また、引張鉄筋の引張ひずみを、それぞれひずみゲージを用いて左右両面で 1 時間ごと計測した。また、供試体中央で発生したひび割れ幅を、鉄筋位置で、標点距離 5cm で、計測精度 0.001mm のコンタクトゲージを用いて定期的に (载荷後 1, 3, 7~9 日後、その後は 1~2 週間に 1 回程度の頻度) 計測した。

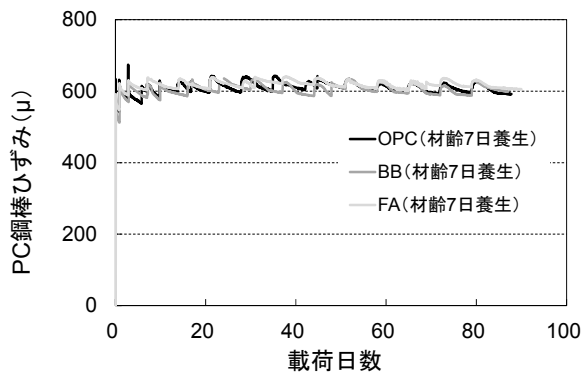


図-2 材齢 7 日養生後荷重した各供試体の PC 鋼棒の平均ひずみの経時変化

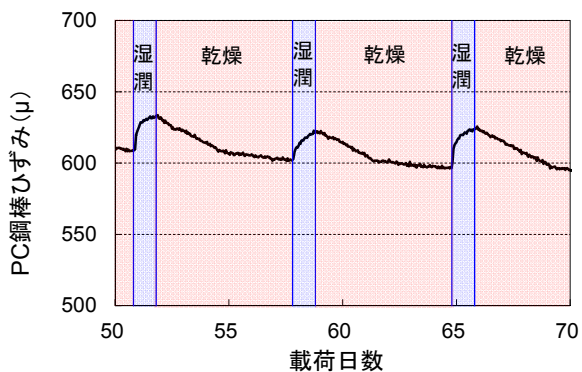
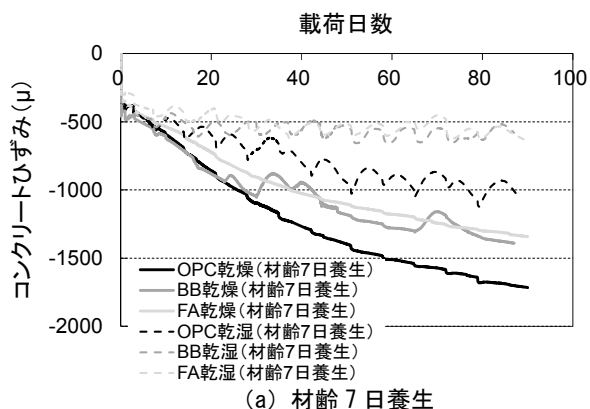
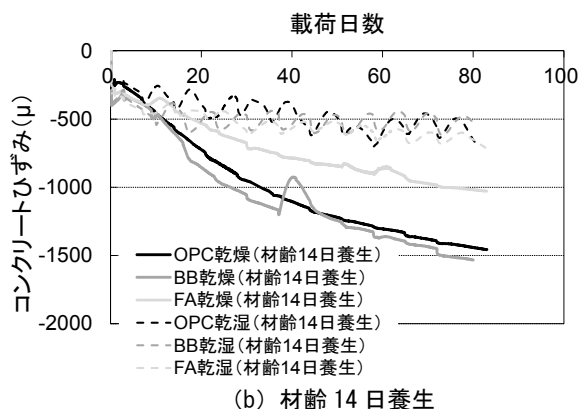


図-3 材齢 7 日養生の OPC 供試体の PC 鋼棒の平均ひずみの乾湿による変化



(a) 材齢 7 日養生



(b) 材齢 14 日養生

図-4 圧縮部コンクリートのひずみの経時変化

ひび割れ幅の計測は、基本的に PC 鋼棒の締め直しを行った直後の同一荷重下で行った。

また、上記鉄筋コンクリート供試体と同一の断面を持ち、長手方向の両面をアルミテープで封緘した長さ 200mm の無筋コンクリートで、各配合の乾燥収縮ひずみも同時に計測した。ひずみは、供試体中心で埋め込みゲージを用いて測定した。鉄筋コンクリート供試体と同様に、各配合で、材齢 7 日と 14 日までそれぞれ湿潤養生を施し、その後、乾燥、もしくは乾湿繰り返しを上記恒温恒湿室で行った。測定数は各配合、条件で 1 体である。

3. 実験結果

3.1 PC 鋼棒のひずみ変化

図-2 に、材齢 7 日養生ののち、各鉄筋コンクリート供試体に持続荷重を与えた PC 鋼棒の平均ひずみの経時変化を示す。材齢 14 日養生ののち持続荷重を与えた場合もほぼ同様の傾向を示した。荷重始めはコンクリートのクリープ、曲げひび割れの進展などによりひずみの低下が大きい、継続的に締め直しを行うことで、いずれの配合も概ね一定荷重 7.8kN (ひずみ：600μ) で制御できていることが分かる。図-3 に、材齢 7 日養生の OPC で、荷重 50 日から 70 日の間で、週に 1 日間だけ片側の供試体に濡れたウェスを巻き乾湿繰り返しを施したときの PC 鋼棒の平均ひずみの変化を示す。この間、PC 鋼棒の

再緊張をしていないにもかかわらず、湿潤時に、PC 鋼棒のひずみは徐々に増加している。後述するように、乾燥したコンクリートは水分を吸収すると膨潤するため、湿潤にした片側の供試体で圧縮縁付近のコンクリートが大きく膨張し、曲率が回復したため、PC 鋼棒のひずみが増加したと考えられる。佐藤ら³⁾によれば、圧縮鉄筋がない場合、圧縮部コンクリートのひずみが平均曲率に大きく影響を及ぼすとあり、本実験においても片側の供試体の圧縮部コンクリートの湿潤による膨張が、PC 鋼棒を再緊張させるほどの大きな曲率回復をもたらしたと言える。

3.2 圧縮部コンクリートのひずみ変化

図-4 に、各供試体の圧縮部コンクリートのひずみの経時変化を示す。いずれの配合、養生日数も乾湿を繰り返した供試体の圧縮部コンクリートのひずみは、乾燥環境下の供試体に比べ半分程度小さくなった。

まず、乾燥環境で、各配合の影響について検討する。図-4(a)と(b)で比較すると、養生日数の違いに関わらず、乾燥を続けた場合、圧縮部コンクリートのひずみは、OPC と BB が同程度、FA が最も小さくなった。BB は途中ひずみが回復しているところがあるが、これは乾湿繰り返しの供試体の水分供給の際、水掛りがあったなどが理由に考えられる。再度の検討を行う必要があることは認識しているが、ひずみの回復前は、概ね OPC と同等のひずみ変化を示しており、乾燥環境で、圧縮部コンクリ

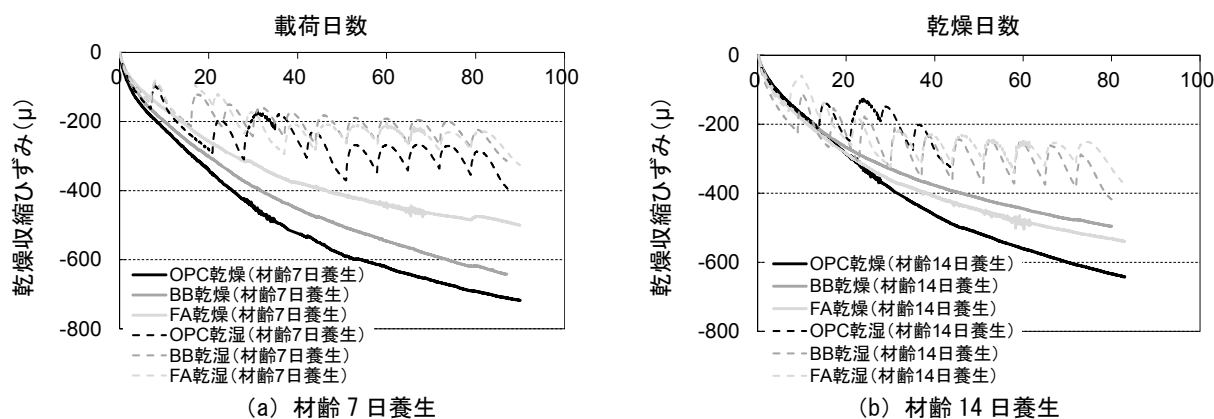


図-5 各配合の無筋コンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化

ートのひずみは OPC と BB が同程度で、FA が最も小さいという上記の傾向は大きく変わることはないと思われる。

図-5 に、鉄筋コンクリート供試体と同一断面をもつ無筋のコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。材齢 14 日養生の OPC の乾湿繰り返し環境の乾燥収縮は、途中ひずみゲージの不具合によりデータを正確に計測できなかったため、乾燥 44 日以降のデータは掲載していない。持続荷重を受ける鉄筋コンクリート供試体の圧縮部コンクリートのひずみの大きさは、乾燥収縮ひずみと弾性ひずみに比例する圧縮クリープの影響を受けるため、乾燥収縮ひずみの大きさの順とは必ずしも整合しない。FA の圧縮部コンクリートのひずみは他の配合と比べて 500μ程度も小さく、初期の弾性ひずみ、図-5 に示す乾燥収縮ひずみの違いのみでは説明が難しい。FA の圧縮強度は、いずれの養生日数も OPC、BB より大きく空隙が緻密化していると考えられ、本実験条件では、FA の圧縮クリープは他の配合に比べて小さいため、圧縮部コンクリートのひずみが小さくなったと推察される。本仮説の検証のため、各配合の無筋の圧縮クリープの検討が今後必要と言える。

また、乾燥環境の圧縮部コンクリートのひずみを養生日数で比較すると、OPC、FA は、材齢 14 日養生の方が小さい。上述のように、BB も水掛りがなければ、同様の傾向を示したと思われる。これは、収縮も材齢 14 日養生で小さくなることと (図-5(b))、載荷材齢が遅くなるほどクリープが小さくなる⁹⁾ためだと思われる。材齢 7 日から 14 日にかけて強度の漸増が大きい FA の方が OPC に比べひずみの低減は若干大きいとその差は小さく、養生日数を長くしたことによる圧縮部コンクリートのひずみ低減はセメントの種類でさほど違いはないと思われる。

乾湿を繰り返した場合は、乾湿繰り返しで無筋コンクリートの収縮ひずみが小さくなるように (図-5)、乾燥したコンクリートが水分を吸収し膨張するため、圧縮部

コンクリートのひずみは、乾燥を続けたコンクリートに比べ小さくなったと言える。各配合、養生日数で考えると、OPC の材齢 7 日養生を除けば、乾湿繰り返しの場合は、配合、養生日数で圧縮部コンクリートのひずみに相違はない。養生日数が短くても、乾湿を繰り返すことで水分の供給がなされ水和の遅い混合セメントでも水和が十分進行するため、養生日数の影響、配合の影響が小さくなったと推察される。材齢 7 日養生の OPC については、計測誤差も含めて再度検証する必要があると思われる。

3.3 曲げひび割れ進展における養生日数、乾湿の影響

図-6 に、材齢 7、14 日養生のうち、持続荷重を加えたときの鉄筋の中央の位置でのひび割れ幅の経時変化を示す。材齢 7 日養生の FA については、コンタクトゲージによる測定に不具合があったため、掲載していない。ひび割れはいずれもノッチ部分から 1 本入ったが、時間の経過とともにせん断スパン内にも数本ひび割れが生じた。この影響については後述するが、図-6 で比較しているひび割れ幅は、曲げモーメントが最も大きい位置のものであり、周辺にひび割れがなかったことから、最大ひび割れ幅ということになる。

養生日数で比較すると、図-6 (a) にあるように材齢 7 日養生では概ね 0.06~0.08mm 程度、材齢 14 日養生では、図-6 (b) に示されるように 0.05~0.07mm 程度の幅を持つひび割れが載荷時に導入され、強度の大きい材齢 14 日養生後に載荷した方が初期のひび割れ幅は若干小さくなる傾向があるが、その差は小さい。また、配合間で比較しても、初期ひび割れ幅に大きな差はない。コンクリート標準示方書⁹⁾の曲げひび割れ幅の設計応答式で、ひび割れ幅に比例する「コンクリートの品質 (= 圧縮強度) の影響を表す係数 k_2 」(式(1))からも示されるように、配合、材齢などによる数 MPa 程度のコンクリートの圧縮強度の違いの影響は、初期の曲げひび割れ幅に対してさほど大きくないと言える。

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7 \quad (1)$$

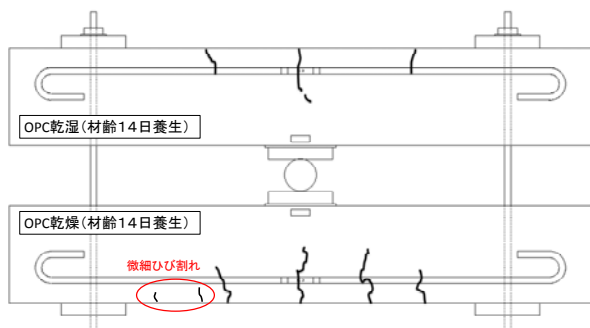
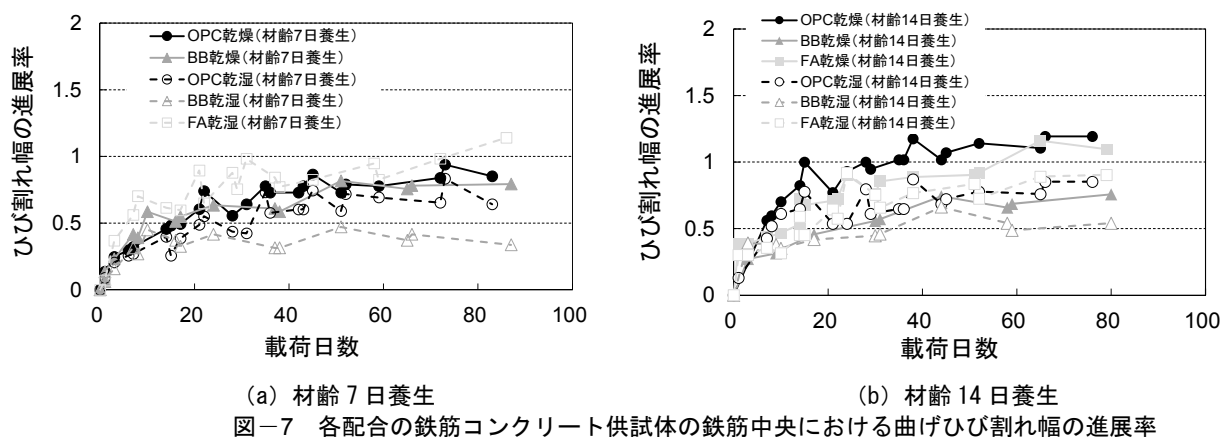
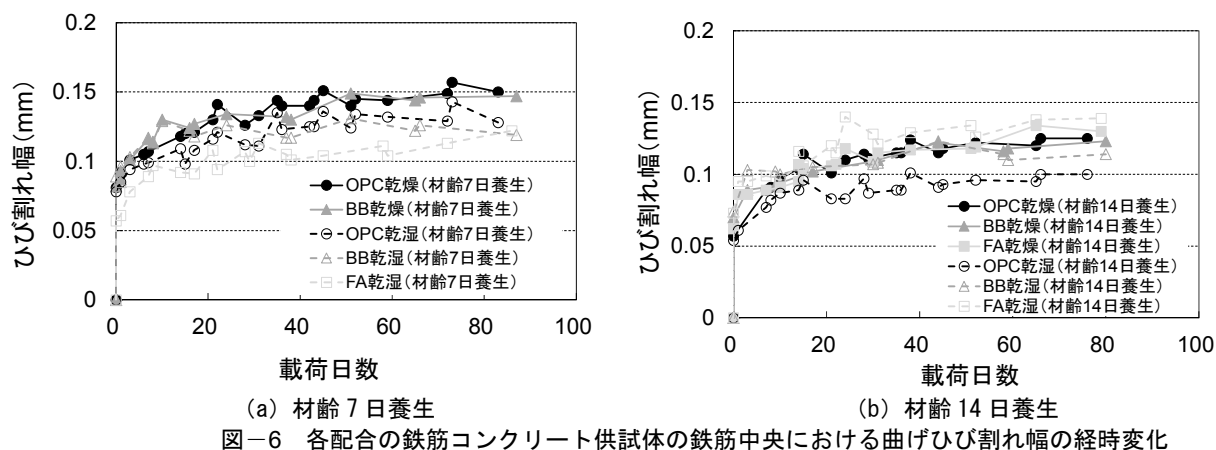


図-8 材齢 14 日養生の OPC 供試体の載荷約 90 日後の曲げひび割れ分布

ここで、 f'_c : コンクリートの圧縮強度 (MPa)。

載荷後のひび割れ進展においても、各配合、養生日数の影響は小さい。乾湿繰り返しの影響を考えると、材齢 7 日養生では、乾湿繰り返しを受けた供試体のひび割れ幅の方が乾燥環境の供試体に比べ小さいようにも見受けられるが (図-6 (a)), 14 日養生ではその傾向が明確に見られない (図-6 (b))。初期ひび割れ幅の違いもあるため、ひび割れ幅の実測値で進展を議論するのではなく、ひび割れ幅の増加量を載荷時のひび割れ幅で除したひび割れ幅の進展率で比較した結果を図-7 に示す。初期のひび割れ幅に対する進展率で考えると、いずれの配合、養生条件でも、乾湿繰り返しを施した方が小さくなって

いる。これは、乾湿によってコンクリートの収縮、クリープが小さくなったためと推察される。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は、北篠ら⁷⁾、阿部ら⁸⁾が屋外と屋内環境でひび割れ進展を比較し、検討を行っている。これらによれば、D19 鉄筋を引張鉄筋に配筋した場合 (鉄筋比 : 1.14%) は、乾湿繰り返しを受ける屋外環境の方が降雨によるコンクリートの収縮の低減でひび割れ幅は小さくなるが、D13 鉄筋を用いた場合 (鉄筋比 : 0.43%) は、鉄筋の拘束が小さく、ひび割れ幅の低減は小さいと説明している。本実験でも鉄筋比が 1%程度で、阿部らの D19 鉄筋を用いた供試体と同程度の鉄筋拘束があり、同様の傾向を示したのかもしれないが、屋外環境ではひび割れ増大を促進する日射の影響^{9), 10)}や気温変動なども複雑に関連するため、鉄筋拘束の影響も含め、ひび割れ幅における水分吸収の影響を実験室内で今後詳細に検討する必要があると思われる。

図-4 に示したように、圧縮部コンクリートのひずみは、乾燥環境に比べ、乾湿繰り返しの環境下では、最終的に半分程度小さくなるのに対して、図-6 に示すように、最大ひび割れ幅に環境で大きな相違はない。せん断スパン内のひび割れも含めて、乾燥環境と乾湿環境でひび割れの数を比較したが、相違はさほど見られなかった。そこで、約 90 日の乾燥、乾湿繰り返しの持続載荷試験ののち約 1 か月乾燥のまま静置しておいた供試体で微細ひ

び割れを含んだひび割れ発生状況を、デジタルマイクロスコープで 175 倍に拡大して詳細に観察した。図-8 に材齢 14 日養生の OPC 供試体の例を示す。他の供試体も同様の傾向にあった。乾燥環境下の供試体はいずれの配合も、せん断スパンに目視での確認が難しい微細なひび割れが 2~3 本短く発生しており、これにより引張部での変形が増加し、圧縮部コンクリートの大きな圧縮ひずみとつり合いがとれていると言える。乾湿繰り返しでは、目視で確認できる主要なひび割れが 3~4 本入った程度で、微細なひび割れはさほど見られなかった。よって、乾湿繰り返し環境下では、微細な曲げひび割れの発生は少なくなると考えられる。

4. 結論

本研究では、高炉セメント、フライアッシュセメントといった混合セメントを用いたときの RC 部材の曲げひび割れ進展に対する養生日数、乾湿繰り返しの影響について検討を行った。本研究の成果をまとめると、以下のようになる。

- ・ 持続荷重を受ける RC 曲げ部材が、乾燥ののち湿潤状態になると、既往の研究で報告されているように、圧縮部コンクリートの膨潤によって、持続的に増加した平均曲率が回復することが示された。
- ・ 本実験条件では、圧縮部コンクリートのひずみは、養生日数の違いに関わらず、乾燥を続けた場合、OPC と BB が同程度、FA が最も小さくなった。これは、FA が最も圧縮強度が高く、空隙が緻密化し圧縮クリープも小さくなったためだと推察された。
- ・ 養生日数の違いで圧縮部コンクリートの乾燥下でのひずみを比較すると、養生の長い材齢 14 日養生の方がいずれの配合もひずみが小さくなった。
- ・ 乾湿を繰り返した場合は、コンクリートが水分を吸収し膨張するため、圧縮部コンクリートのひずみは、乾燥を続けた場合に比べ、半分程度小さくなった。
- ・ 乾湿繰り返しの場合は、配合、養生日数で圧縮部コンクリートのひずみに相違はなく、養生日数が短くても、乾湿を繰り返すことで水分の供給がなされ水和の遅い混合セメントでも水和が進行するため、養生日数の影響、配合の影響が小さくなったと推察された。
- ・ 最大曲げひび割れ幅を実測値と比較すると、初期ひび割れ幅、ひび割れ進展において配合、養生日数の影響は小さかった。
- ・ 初期のひび割れ幅に対する曲げひび割れの進展率

で考えると、いずれの配合、養生条件でも、乾湿繰り返しを施した方が小さくなった。

- ・ 乾燥環境で持続荷重を与えると、引張側に微細なひび割れが短く発生し、これにより曲率が大きくなるものと考えられた。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究(S)，課題番号：23226011，研究代表者：前川宏一）の補助を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書施工編，施工標準 8 章，2013
- 2) 佐藤良一，氏家 勲，手塚政男，吉本 徹：持続荷重を受ける RC 曲げ部材の変形・ひび割れ，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.2，pp.217-222，1987
- 3) 佐藤良一，氏家 勲，鈴木雅博，北条泰秀：鉄筋コンクリート曲げ部材の長期変動およびその解析法に関する研究，土木学会論文集，vol.45，No.634，pp.27-41，1999.11
- 4) 本田 悟，椎葉大和：各種フライアッシュがコンクリートの諸特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.351-356，1996
- 5) A. M. Neville: Properties of concrete Fourth edition, Wiley, 1996
- 6) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書設計編，標準 4 編，2013
- 7) 北条泰秀，佐藤良一，氏家 勲：RC 部材の長期変形・ひびわれ幅に及ぼす環境条件の影響の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，pp.359-364，1993
- 8) 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 部材の長期ひび割れ幅について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，pp.1025-1030，1995
- 9) 尾坂芳夫，大塚浩司，松本英信：乾燥の影響を受ける引張 RC 供試体のひびわれ性状，コンクリート工学，Vol.23，No.3，pp.11-21，1985.3
- 10) 浅本晋吾，大塚 歩，三浦千佳子，桑原勇太：実環境下におけるコンクリートの収縮・収縮ひび割れ挙動に関する検討，Vol.21，No.2，pp.35-43，2010