

論文 曲げひび割れを有するコンクリートの中性化に関する実験的研究

松田 紗弥^{*1}・島田 崇博^{*2}・大野 義昭^{*3}・岸本 一蔵^{*4}

要旨：普通ポルトランドセメントコンクリートと中層熟ポルトランドセメントコンクリートにおいて、曲げひび割れが生じた鉄筋コンクリート部材の中性化促進試験を行って、ひび割れのコンクリートの中性化に及ぼす影響を調べた。実験要因はひび割れ幅、水セメント比などである。試験の結果、ひび割れ幅よりもひび割れの有無が中性化に大きく影響を及ぼすこと、ブリーディングとはだ離れが鉄筋周辺のコンクリートの中性化の進行を左右することが認められた。

キーワード：中性化、ひび割れ、水セメント比、中層熟ポルトランドセメント

1. はじめに

コンクリートの中性化は鉄筋の腐食を支配するので中性化に関する研究は数多くなされているが、それらはひび割れのない健全部での中性化を扱ったものである。

一方、鉄筋コンクリートはひび割れの発生を前提としており、曲げひび割れの場合、曲げひび割れが到達した鉄筋周辺では鉄筋とコンクリート間に隙間が生じている¹⁾。そのため、曲げひび割れを通じてCO₂が鉄筋周辺まで侵入し鉄筋周辺のコンクリートの中性化が進行することが予測される²⁾。

本報告では普通ポルトランドセメントコンクリートと中層熟ポルトランドセメントコンクリートにおいて、ひび割れ幅の他に中性化に大きく影響するコンクリートの水セメント比などを実験要因に鉄筋コンクリート梁の中性化促進試験を行い、ひび割れのコンクリートの中性化に及ぼす影響を調べた。

側面でのひび割れ幅は0.1mmと0.2mmの2水準、水セメント比は45%、55%、65%の3水準、鋼材のかぶり厚さは40mm、60mmの2水準である。またブリーディン

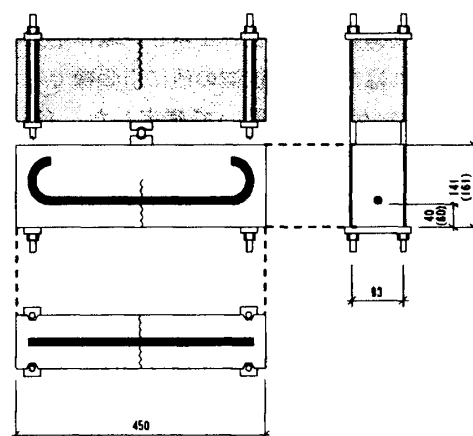


図-1 試験体図

表-1 試験の要因と水準

試験体名	セメント 種類	ひび割れ幅 (mm)	かぶり厚さ (mm)	コンクリート 打込み方向	水セメント比 (%)	促進期間 (週)
55N	普通(N)	0.1	40	順	55	3, 6, 8
55W		0.2				
55H	or	0.1	60	逆	45	
55R						
45N	中麻熟(M)	0.1	40	順	65	
65N						

2. 実験概要

2.1 試験体の形状と種類

試験体は図-1に示すように長さ450mmの鉄筋コンクリート梁にD13の異形鉄筋を埋設したものである。試験体のせいは鋼材のかぶり厚さ40mmと60mmに応じて141mmと161mmである。試験体幅はいずれも93mmである。

実験の要因と水準を表-1に示す。セメントの種類は普通ポルトランドセメント(実験Ⅰ)及び中層熟ポルトランドセメント(実験Ⅱ)の2水準、鉄筋位置

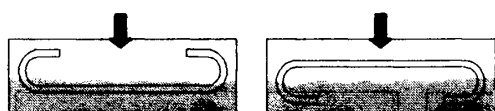


図-2 コンクリートの打ち込み方向

表-2 コンクリートの調合と力学的性質

セメント種類	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				ヤング係数(kN/mm ²)	圧縮強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)
		水	セメント	細骨材	粗骨材			
N	45	175	389	670	1064	27.5	41.7	2.84
	55	175	318	780	1009	24.2	33.4	2.88
	65	175	270	819	1012	20.9	23.3	2.11
M	45	175	389	670	1064	26.8	32.1	2.33
	55	175	318	780	1009	23.3	24.0	1.97
	65	175	270	819	1012	18.7	17.8	1.90

*1 大阪大学 工学研究科 地球総合工学専攻 (正会員)

*2 電源開発株式会社 工修

*3 大阪大学 工学研究科 地球総合工学専攻 教授 工博 (正会員)

*4 大阪大学 工学研究科 地球総合工学専攻 准教授 工博 (正会員)

グの影響を把握するため、打ち込み方向も考慮した(図-2)。実験Ⅰは試験体全面から中性化を進行させたが、実験Ⅱでは試験体4面をアルミ粘着テープで被覆し、側面からの中性化の影響をなくした。表-2 にコンクリートの調合と力学的性質を示す。

2.2 実験方法

実験Ⅰは材齢4日で脱型し、屋内にて気中養生させ、材齢3週にひび割れを導入して材齢4週より実験を開始した。実験Ⅱは実験Ⅰと同様の処置をし、ひび割れ導入後アルミ粘着テープで試験体側面を被覆してから実験に供した。

ひび割れの導入は同種2体の試験体を一組とした曲げ载荷によって行い(図-1)、ひび割れ幅を維持した状態で中性化促進試験に供した。曲げ载荷では試験体中央の引張側の両側にノッチを設け、試験体側面の鉄筋位置で所定の幅に制御したひび割れ1本を試験体中央に生じさせ、ひび割れ幅を上述の位置の他に引張縁でもコンタクトストレインゲージを用いて測定した。ひび割れ幅0.1mm、0.2mmに対応する鉄筋応力はそれぞれ150、250N/mm²である。また引張縁でのひび割れ幅はかぶり厚さが40mmではそれぞれ0.22mm、0.32mmであり、かぶり厚さが60mmではひび割れ幅0.1mmに対して0.23mmであった。

中性化促進試験は設定条件を温度20℃、湿度60%、二酸化炭素濃度10%として3週、6週、8週間行った。所定の期間の中性化促進後、長さ方向に割裂し、フェノールフタレイン1%アルコール溶液を噴霧して赤紫色に呈色しなかった部分を測定した。

図-3に測定項目を示す。「健全部中性化深さ」はひび割れの影響を受けない位置でコンクリート表面からの

二酸化炭素の侵入によって中性化した深さを、未着色部分の面積を計測して長さ方向の距離で除することで算出した。フェノールフタレインによる呈色は徐々に色が変化していくのではなく、はっきりと中性化領域と未中性化領域を区別することができたが、中性化があまり進行していない試験体に見られた呈色が弱い部分については中性化領域とした。また、「ひび割れ部中性化深さ」はひび割れによって導かれた二酸化炭素による中性化深さを測定したものであり、「鉄筋位置中性化長さ」は鉄筋に沿って中性化した長さを測定し、「ひび割れ区間中性化面積」はひび割れから左右45mmの区間の内部の中性化した領域の面積である。著者の一人らは、曲げひ

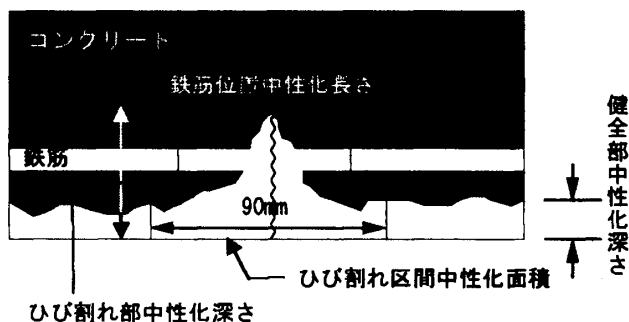


図-3 測定項目

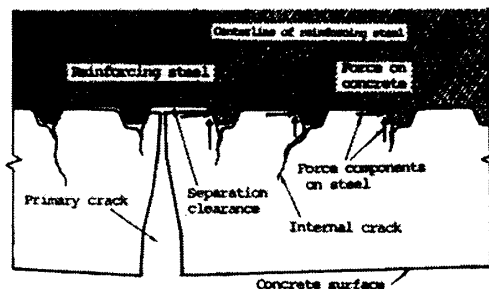


図-4 はだ離れ

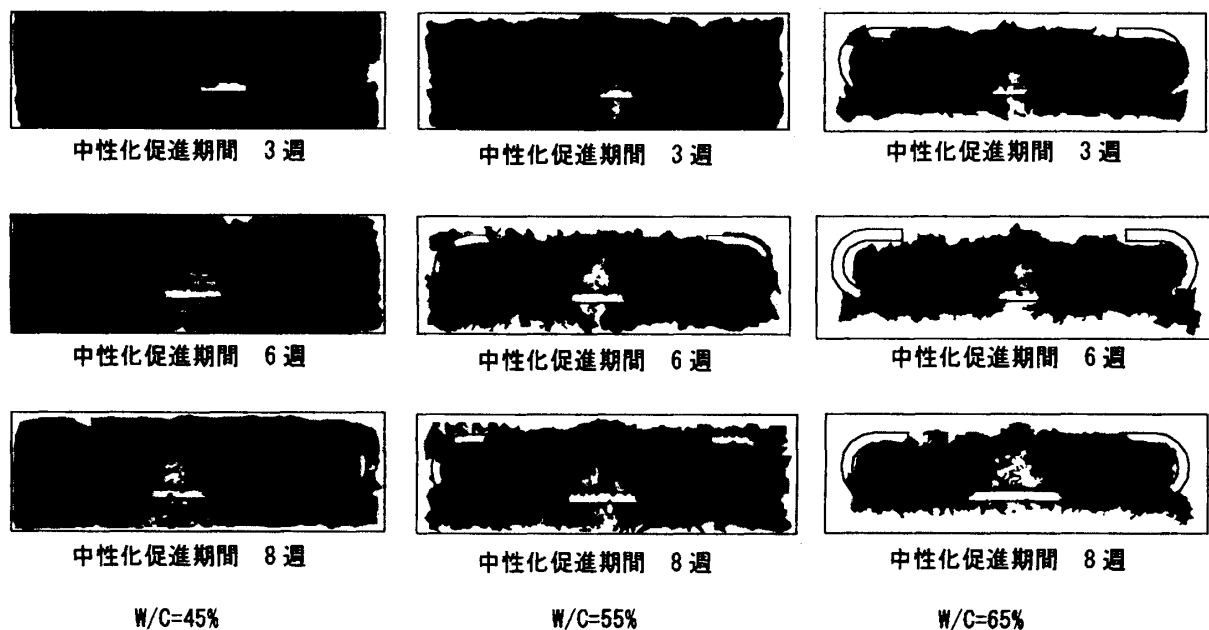


図-5 中性化の状況 (白抜き領域が中性化領域)

ひび割れを発生させた鉄筋コンクリート梁にインクと樹脂を注入して内部ひび割れ状況を調べ、異形鉄筋のふしのまわりには内部ひび割れが生じ、異形鉄筋とコンクリートの間に「はだ離れ(Separation clearance)」と呼ばれる隙間ができ(図-4)、その長さは鉄筋径の3倍程度であることを報告している¹⁾。そこで本報告では、ひび割れ区間中性化面積を測定する際にひび割れから左右45mmの区間を用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 普通ポルトランドセメント

(1) 中性化の状況

図-5 に中性化が進行していく様子を示す。左から水セメント比 45%, 55%, 65%, 上から中性化促進期間 3 週, 6 週, 8 週である。水セメント比が大きい試験体の方が中性化の進行が早いこと、ひび割れから中性化が進

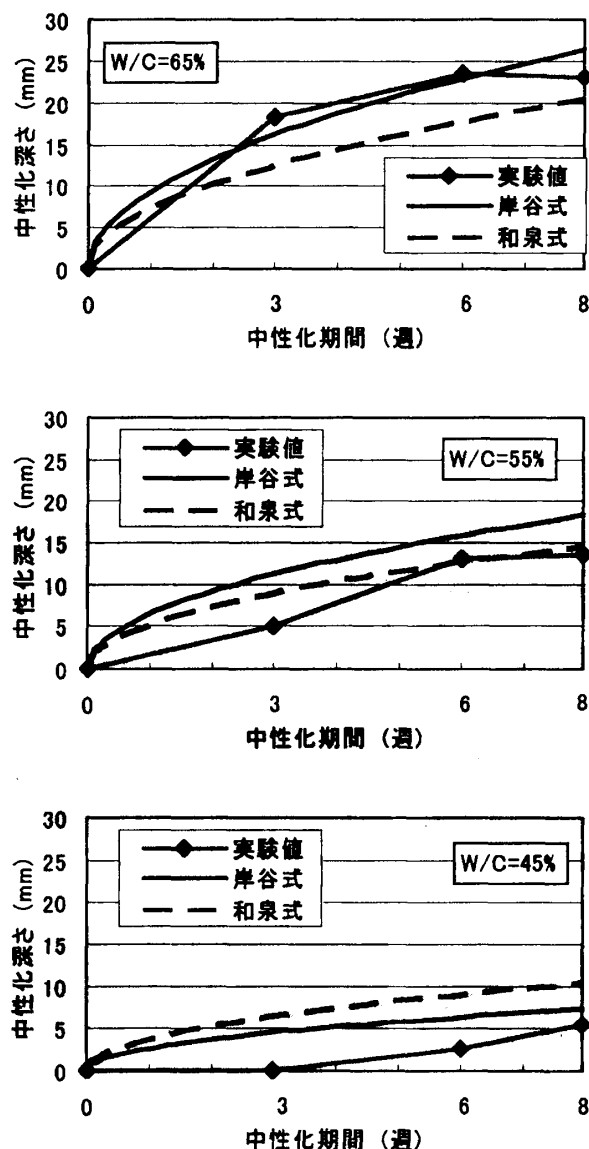


図-6 健全部での中性化促進期間と中性化深さの関係

み、次第に鉄筋周辺の中性化領域が広がっていることが分かる。これははだ離れによって鉄筋周辺では早い段階から中性化したためと考えられる。

(2) ひび割れ幅の影響

図-6 にひび割れの影響のない健全部の中性化について、中性化速度式として広く汎用されている岸谷式³⁾、和泉式³⁾による推定値との比較を示す。岸谷式は自然暴露状態での中性化深さについての式であるが、中性化深さは二酸化炭素濃度の平方根に比例するので、 $(10/0.037)^{1/2}$ を乗じて算出した。和泉式は温度、湿度、二酸化炭素濃度、セメントの種類をパラメータとしており、所定の条件を適用した。実験結果と式から導き出された図には多少の相違はあるものの、概ね同じ経過をたどっており、実験値が妥当であることを示している。

図-7 にひび割れ幅の違いによる中性化促進期間と中性化深さの関係を示す。同図より、ひび割れ近傍の中性化深さはひび割れ幅に関わらずひび割れが生じていない健全部よりも中性化が進んでいることが分かる。また中性化促進期間が長くなるにつれて中性化深さは大きくなっているが、その増加量は次第に減少している。また健全部に比べて、ひび割れ幅が 0.1mm と 0.2mm では

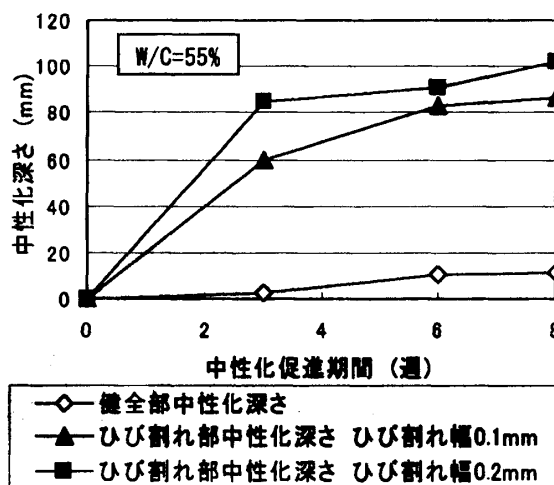


図-7 中性化促進期間と中性化深さの関係

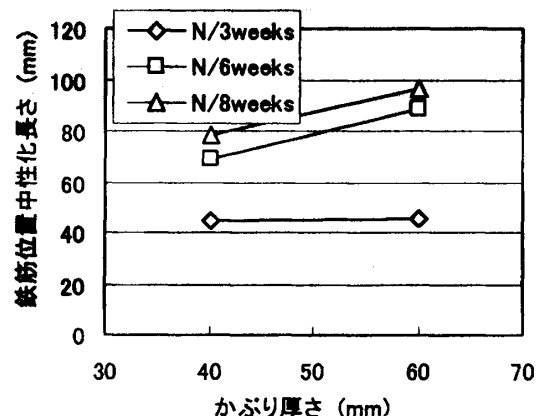


図-8 かぶり厚さと鉄筋位置中性化長さとの関係

中性化深さに大きな違いは見られないため、中性化深さに関してはひび割れの有無が大きな要因であり、ひび割れ幅の影響は小さいと言える。

(3) かぶり厚さの影響

図-8にかぶり厚さと鉄筋位置中性化長さとの関係を示す。概ねかぶり厚さの大きい試験体は小さい試験体に比べ、鉄筋位置中性化長さが長くなっていることが分かる。これは鉄筋下部で生じるブリーディングがかぶり厚さの大きい試験体でより顕著に生じることに起因されると思われる。

(4) 打ち込み方向の影響

図-9に打ち込み方向と鉄筋位置中性化長さとの関係を示す。打ち込み方向を逆方向とした試験体が、順方向とした試験体を常に卓越していることが分かる。これは鉄筋位置でのコンクリートのブリーディング量が逆方向の方が大きいため、その影響によりひび割れ近傍で局部的に水セメント比が大きくなるためであると考えられる。さらに、順方向の試験体では鉄筋の引張側ではだ

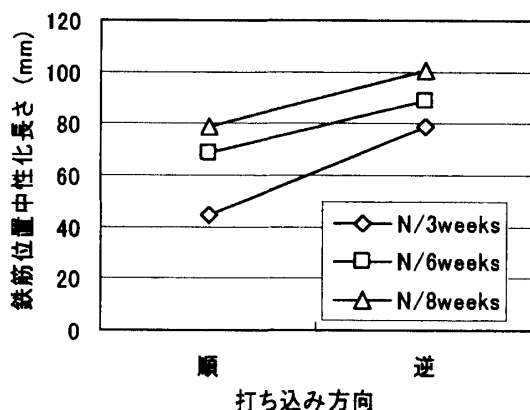


図-9 打ち込み方向と鉄筋位置中性化長さとの関係

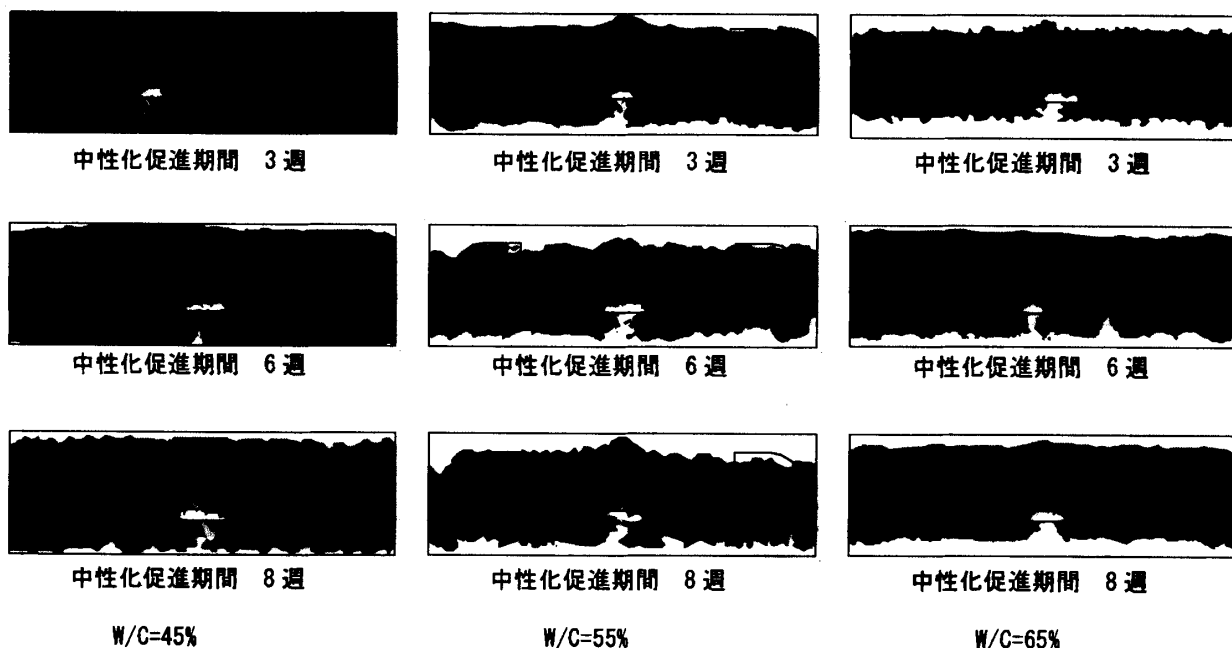


図-11 中性化の状況 (白抜き領域が中性化領域)

離れとブリーディングが同時に起こっているが、逆方向の試験体では鉄筋の引張側ではだ離れを、圧縮側でブリーディングを起こしており、中性化を進行させる2つの要素の効果が低減されていないことも影響していると考えられる。

(5) 水セメント比の影響

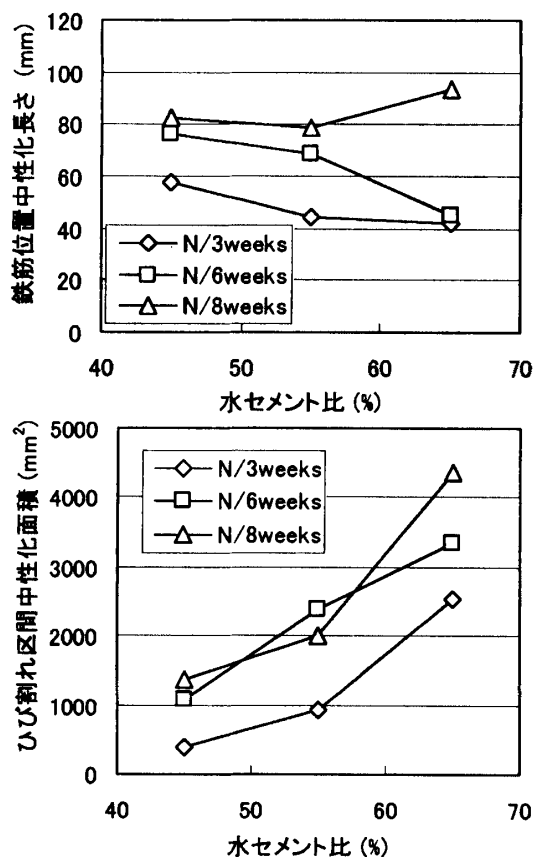


図-10 水セメントと鉄筋位置中性化長さ・ひび割れ区間中性化面積との関係

図-10 に水セメント比と鉄筋位置中性化長さ、ひび割れ区間中性化面積との関係を示す。水セメント比と鉄筋位置中性化長さの関係において、中性化促進期間6週の水セメント比65%の鉄筋位置中性化長さが他の水セメント比の試験体より小さいなどのばらつきはあるが、水セメント比と中性化長さの間に相関関係は見られない。

またひび割れ区間中性化面積は水セメント比が大きくなるにつれて増加している。これは水セメント比が大きくなるほど単位体積あたりの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 濃度が低くなることに合致している。

3.2 中熟ポルトランドセメント

(1) 中性化の状況

図-11 に水セメント比の異なる試験体の中性化が進行していく様子を示す。左から水セメント比45%, 55%, 65%, 上から中性化促進期間3週, 6週, 8週である。中熟ポルトランドセメントを用いた試験体ではひび割れ面とその対面以外をアルミ箔テープで覆っているため、側面からの中性化は見られない。普通ポルトランドセメントを用いた場合と同様の過程で中性化が進行していることが分かり、普通ポルトランドセメントの場合と同様にはだ離れが鉄筋位置での中性化に大きく寄与していることが見てとれる。

(2) ひび割れ幅の影響

図-12 にひび割れの影響のない健全部での中性化について、中性化速度式の和泉式³⁾との比較を示す。実験値は概して予測値より小さく、特に水セメント比45%の場合に顕著である。

図-13 にひび割れ幅の違いによる中性化促進期間と中性化深さの関係を示す。ひび割れ幅の大きさの影響は小さく、ひび割れの有無が大きく影響することが認められる。

(3) かぶり厚さの影響

図-14 にかぶり厚さと鉄筋位置中性化長さとの関係

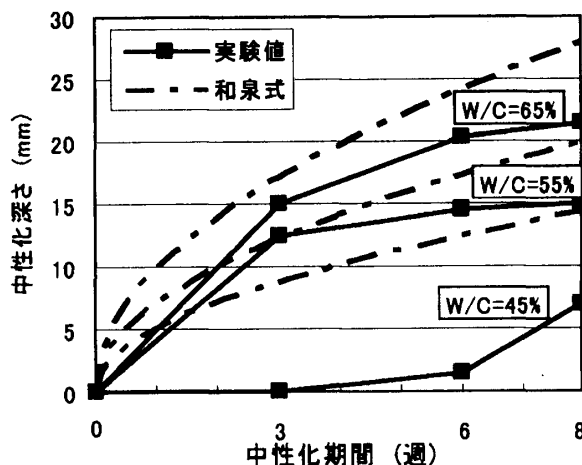


図-12 健全部での中性化促進期間と中性化深さの関係

を示す。普通ポルトランドセメントを用いた場合と違い、かぶり厚さが大きい試験体の方が小さい値となっている。これは試験体側面では相当のひび割れ幅が測定されたが、かぶり厚さが大きい試験体の方が表面から鉄筋までが長いので、鉄筋コンクリート内部でのひび割れが複雑になりやすく、連続して鉄筋まで到達していなかった可能性が考えられる。

(4) 打ち込み方向の影響

図-15 に打ち込み方向と鉄筋位置中性化長さとの関係を示す。普通ポルトランドセメントを用いた場合と違

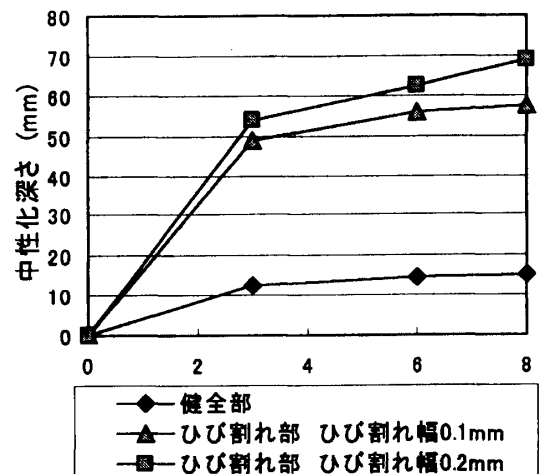


図-13 中性化促進期間と中性化深さの関係

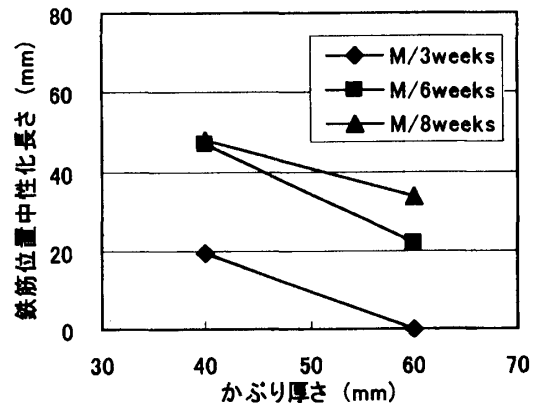


図-14 かぶり厚さと鉄筋位置中性化長さとの関係

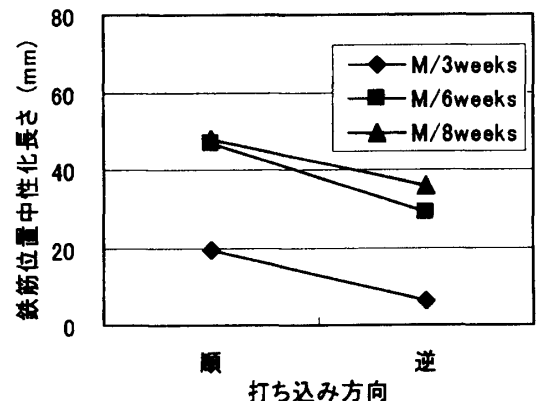


図-15 打ち込み方向と鉄筋位置中性化長さとの関係

い、打ち込み方向が逆方向の試験体の方が小さい値となっている。ブリーディングによって鉄筋位置での中性化の進行が早められることは前述したが、打ち込み方が順方向の試験体の場合に鉄筋の引張側にブリーディングが生じるのとは対照に、打ち込み方向が逆方向の試験体では鉄筋の圧縮側にブリーディングが生じる。本報告においては、打ち込み方向が逆方向の試験体では中性化が鉄筋の圧縮側にまで及ばなかったため、ブリーディングの影響が発現するのに至らなかったが、順方向の試験体ではひび割れの影響だけでなくブリーディングの影響によっても中性化が進行したため、このような結果になったものと考えられる。

(5) 水セメント比の影響

図-16 に水セメント比と鉄筋位置中性化長さ、ひび割れ区間中性化面積との関係を示す。同図によると普通ポルトランドセメントで考察した結果と概ね同様の傾向

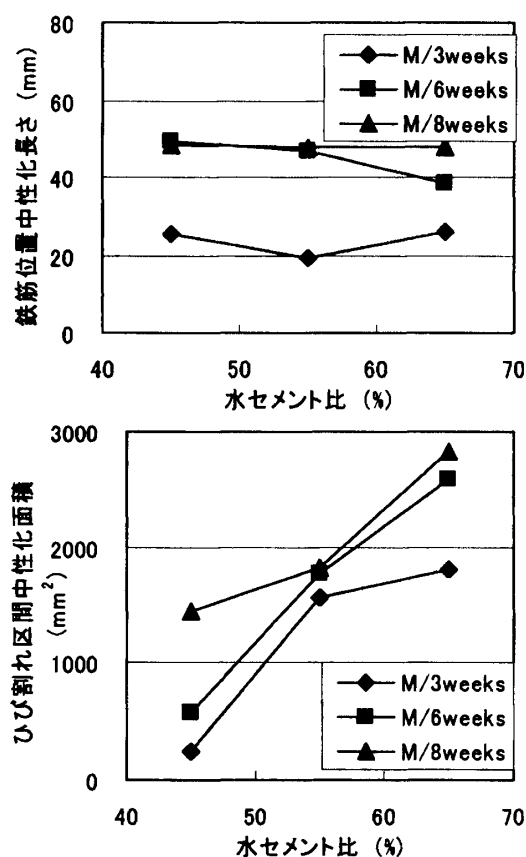


図-16 水セメントと鉄筋位置中性化長さ・ひび割れ区間中性化面積との関係

が見られた。すなわち、鉄筋位置中性化長さでは水セメント比における明確な違いは見られないが、ひび割れ割れ区間中性化面積は水セメント比が大きくなるほど増加している。

4. まとめ

普通ポルトランドセメントコンクリートと中熱ポルトランドセメントコンクリートにおける中性化に及ぼすひび割れの影響を調べた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) コンクリートの中性化にはひび割れの有無が大きく影響し、ひび割れ幅による差はあまり見られなかった。
- (2) ひび割れ位置の鉄筋周辺のコンクリートでは、ブリーディング及びはだ離れによって中性化が広範囲にわたって進行した。
- (3) かぶり厚さの大きい試験体の方が、鉄筋周辺コンクリートの中性化が広範囲にわたって進行している場合もあった。
- (4) 打ち込み方向が逆方向の場合、中性化が鉄筋の圧縮側にまで達すると中性化領域は順方向よりも大きくなった。
- (5) 水セメント比と鉄筋位置中性化長さの間には関係が見られなかったが、ひび割れ区間中性化面積では水セメント比が大きい方が大きくなることが確認できた。

参考文献

- 1) 鈴木計夫, 大野義照, ソムチャイ・スリーソンポン: プレストレスト鉄筋コンクリート曲げ部材内部のひび割れ状況に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第365号, pp.9-19, 1986.7
- 2) 大野義照, 柳清峻: 中性化したコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼすひび割れと水セメント比の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 第559号, pp15-21, 2002, 9
- 3) 谷川恭雄: 硬化コンクリートの性質, セメントジャーナル社, pp.99-111, 2004