

報告 屋外暴露した欠陥を有する鉄筋コンクリートにおける中性化および鉄筋腐食の状況

辻埜 真人^{*1}・橋田 浩^{*2}・湯浅 竜貴^{*3}

要旨: 水セメント比の異なる 11 年間屋外暴露した各種欠陥を有する鉄筋コンクリートにおける中性化深さと鉄筋腐食の状況を調査した。水セメント比は 45%と 57.5%の 2 水準とし、欠陥は水平打継ぎ、鉛直打継ぎおよびひび割れの 3 種類とした。本調査の結果、処理を施さない鉛直打継ぎに比べて水平打継ぎの中性化は早く、約 5 年で 20mm まで達することがわかった。一方で、各打継ぎ部での鉄筋の腐食面積率については同程度であった。また、ひび割れ幅の違いによる腐食速度の差が認められた。そして、同程度のひび割れ幅での鉄筋の腐食面積率は、水セメント比 57.5%に比べて 45%の方が大きく、腐食速度の違いが認められた。

キーワード: 暴露, 中性化, 鉄筋腐食, 水平打継ぎ, 鉛直打継ぎ, ひび割れ

1. はじめに

JASS5 2009 において、計画供用期間の級が長期および超長期のコンクリートでは、乾燥収縮率を 8×10^{-4} 以下とすることが明記され、コンクリートのひび割れを抑制し、建築物の耐久性を向上させる取り組みが進められている。このような規定は、コンクリートのひび割れ抑制に一定の成果を得ることは間違いないが、コンクリートからひび割れをなくすことは極めて難しいと考えられる。また、鉄筋コンクリート造には、必ずといってもよいほど、コンクリートの打継ぎ部が設けられる。従って、鉄筋コンクリート造における耐久性を評価するためには、ひび割れや打継ぎ部を有する状況下での鉄筋の腐食を評価する必要がある。ひび割れと鉄筋の腐食に関しては、P.Schiessl や A.W.Beeby が鉄筋に直行するひび割れ幅は、初期材齢では腐食に影響するが長期材齢ではなくなり、腐食速度とは無関係であると結論づけている^{1), 2)}。反対に、環境条件によっては、ひび割れ幅は鉄筋の腐食を助長する見解も存在している³⁾。また、ひび割れと鉄筋の腐食に関しては、促進試験でも検討されている⁴⁾。一方、打継ぎ部の中性化と鉄筋腐食の關係に着目した研究も進められているが⁵⁾、長期間の暴露によって得られた知見は十分とはいえない。そこで、本報告では、水セメント比が異なり、水平打継ぎ、鉛直打継ぎおよびひび割れの欠陥を有する鉄筋コンクリートを長期間暴露し、鉄筋コンクリート造の耐久性の向上に資する結果を蓄積するために、中性化深さや欠陥部の鉄筋腐食の状況を調査した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの調合

コンクリートの水準および調合は、表-1 に示す通りで、水セメント比が 45%の中強度域の M と水セメント比が 57.5%の普通強度域の N とした。なお、セメントは、普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm³) を用い、細骨材と粗骨材には、富士川中流産の川砂 (表乾密度:2.61g/cm³) と川砂利 (表乾密度:2.65g/cm³) を用いた。

2.2 欠陥の種類

欠陥の種類は、図-1 に示すように $\phi 100 \times 200$ (mm) の円筒型枠を利用し、中間部に水平打継ぎを設けた暴露供試体 A と、図-2 に示すように、 $100 \times 100 \times 400$ (mm) の型枠を利用し、ひび割れおよび鉛直打継ぎ部を両端側に 2 箇所設けた暴露供試体 B の計 3 つとした。なお、ひび割れ幅は、コンクリートの最外縁において 0.1mm と 0.3mm を目標値とした 2 水準とし、打継ぎ部分に関しては全て無処理とした。

2.3 供試体の作製方法

暴露供試体 A および暴露供試体 B の作製概要を図-3 に示す。また、それぞれの試験体の状況を写真-1 から写真-3 に示す。暴露供試体 A はコンクリートを打込んだ後 (先打ちコンクリートとよぶ) に、所定の位置に鉄筋を挿入し、鉄筋が移動しないように上部を固定した状態で振動を与えて、締め固めた。24 時間後に同調合のコンクリートを打込み (後打ちコンクリートとよぶ)、更に 24 時間後に脱型した。材齢 7 日まで水中養生した後、7 日間の気中養生 (温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ・湿度 $60 \pm 5\%$)

表-1 コンクリートの水準および調合

水準名	水セメント比 (%)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	細骨材率 (%)	質量 (kg/m ³)				化学混和剤
					水	セメント	細骨材	粗骨材	
M	45	18±2.5	4.5±1.5	48.2	158	352	864	941	C×0.8% (高性能AE減水剤)
N	57.5			47.1	170	299	849	970	250ml/C=100kg (AE減水剤)

*1 清水建設 (株) 技術研究所 構造・生産技術センター 博士(工学) (正会員)

*2 清水建設 (株) 技術研究所 企画部 博士(工学) (正会員)

*3 清水建設 (株) 技術研究所 構造・生産技術センター

を行い、暴露した。一方、暴露供試体Bは、木製の仕切り板によって鉄筋を固定した状態で先打ちコンクリートを打込み、24時間後に脱型して仕切り板をはずし、型枠を再度組み直した後に、後打ちコンクリートを打込んだ。暴露供試体Aと同様の養生後に、鉄筋を埋め込んだ供試体側面の中央をひび割れ導入部として、曲げ載荷によって発生させた。なお、ひび割れが2本発生した供試体もあったが、1本のひび割れが目標値に達するように制御した。また、目標値に達したひび割れは中央の鉄筋まで達していた。暴露は、写真-3に示すように、供試体2本をセットにして、ひび割れ幅をネジ棒の張力によって制御し、ボルトで固定した状態で実施した。

2.4 暴露場所

暴露場所は、北緯 35 度 39 分・東経 139 度 47 分の東京湾沿岸地域に位置する 6 階建てビルの屋上部分とした。暴露状況を写真-4に示す。

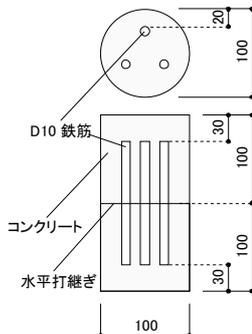


図-1 暴露供試体Aの概要（円柱供試体）

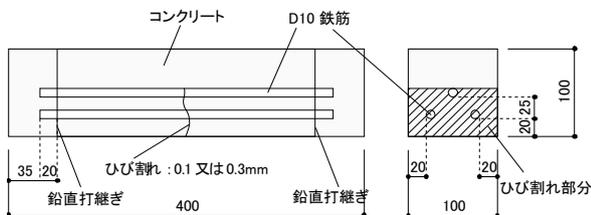


図-2 暴露供試体Bの概要（角柱供試体）

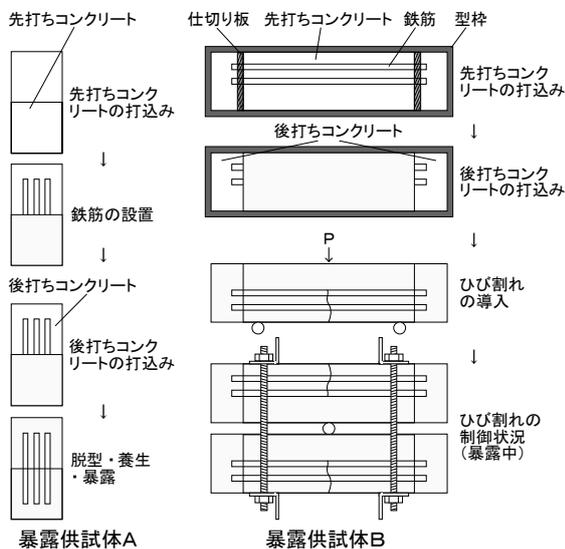


図-3 各供試体の作製方法

3. 実験結果

3.1 コンクリートのフレッシュ性状

各コンクリートのフレッシュ性状を表-2に示す。後打ちコンクリートについては、暴露供試体Aおよび暴露供試体Bともに共通とした。全ての水準で、目標値を満足するものであった。

3.2 コンクリートの圧縮強度

材齢 28 日標準養生と暴露供試体Aを利用した各材齢における圧縮強度の結果を表-3に示す。暴露された材



写真-1 暴露供試体Aの概要（円柱供試体）

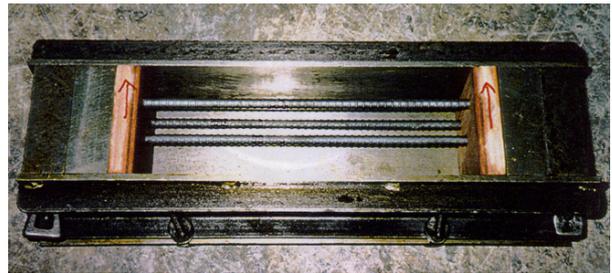


写真-2 暴露供試体Bの概要（角柱供試体）



写真-3 暴露供試体Bのひび割れ制御状況



写真-4 供試体の暴露状況

齢 28 日における圧縮強度は、標準養生の供試体よりも約 7N/mm² 高くなっている。これは、暴露供試体 A には、埋め込み鉄筋によって連結された打継ぎが中央にあり、高さ 1/2 の供試体が 2 体直列に圧縮された場合の強度と類似の結果が得られたためと考えられる。また、暴露材齢 11 年における圧縮強度は、材齢 28 日に対して 20% 程度増加しており、長期間の暴露によって水和反応が進行した結果と考えられる。

3.3 水平打継ぎ

(1) 中性化深さ

暴露材齢 14 日、2 年、5 年および 11 年で中性化試験を各 3 本ずつ実施した。暴露材齢 14 日においては、水準 M および水準 N 共に中性化していないことを確認した。各材齢における打継ぎ部を除いた（健全部とよぶ）平均中性化深さおよび最大中性化深さを図-4 に示す。暴露材齢 11 年までの水準 N の平均中性化深さの中性化速度係数は 1.18mm/√year で、水準 M の 0.266mm/√year の約 4.4 倍である。一方、最大中性化深さの中性化速度係数は、水準 N が 4.63mm/√year に対して水準 M は 1.84mm/√year で、その比は平均中性化深さの中性化速度係数より小さくなっている。なお、水準 M における平均中性化の中性化速度係数に、材齢 200 年を代入した場合、計算上では 3.76mm となり、JASS5 2009 に示されている計画供用期間の級の超長期仕様を十分に満足する。

次に、同一の材料および調合で、JIS A 1153 に準拠した促進中性化試験を実施した結果を図-5 に示す。水準 N における中性化速度係数は 3.27mm/√week で、水準 M の 0.468mm/√week の約 7.0 倍であった。これは、暴露試験での平均中性化深さの中性化速度係数の比（約 4.4 倍）に対して大きい。一定の湿度条件で実施される促進試験に比べて、雨など水分の影響がある環境条件の方が、水セメント比の影響が小さくなる既往の研究⁶⁾と同様の傾向が認められた。

打継ぎ部の平均中性化深さおよび最大中性化深さを図-6 に示す。また、暴露材齢 5 年および 11 年のそれぞれの暴露供試体 A の状況を写真-5 に示す。暴露材齢 11 年における水準 N の水平打継ぎ部の平均中性化深さは 29.1mm で、鉄筋の内側まで達しており、鉄筋の周辺部でも中性化していることが確認された。一方、水準 M の水平打継ぎ部の平均中性化深さは 7.2mm で、最大中性化深さでも 8.7mm で、割裂面では鉄筋まで達していることが確認できなかった。しかし、暴露材齢 5 年でも鉄筋近傍で中性化している部分が確認できる水準もあることから、割裂面以外の打継ぎ部から鉄筋まで中性化が進行している可能性がある。よって、水平打継ぎ部を適切に処理しない場合には、水セメント比が 45% でも、約 5 年で 20mm まで中性化が達することがわかった。

表-2 各コンクリートのフレッシュ性状

打込み順	種類	水準	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
先打ち コンクリート	供試体A	M	45.0	17.5	4.6	23
		N	57.5	18.5	4.5	23
	供試体B	M	45.0	17.5	4.3	23
		N	57.5	19.5	4.5	22
後打ち コンクリート	供試体A	M	45.0	20.0	3.8	23
	およびB	N	57.5	20.5	5.0	23

表-3 コンクリートの圧縮強度

水準	W/C (%)	材齢28日 (N/mm ²)	材齢11年 (N/mm ²)
M(標準養生)	45.0	50.7	-
N(標準養生)	57.5	33.9	-
M(暴露)	45.0	57.6 ^{*1,2}	69.5 ^{*2}
N(暴露)	57.5	40.6 ^{*1,2}	47.1 ^{*2}

*1 所定の養生を経て、暴露後14日目にあたる。
*2 暴露供試体Aを利用して、圧縮試験を行った。

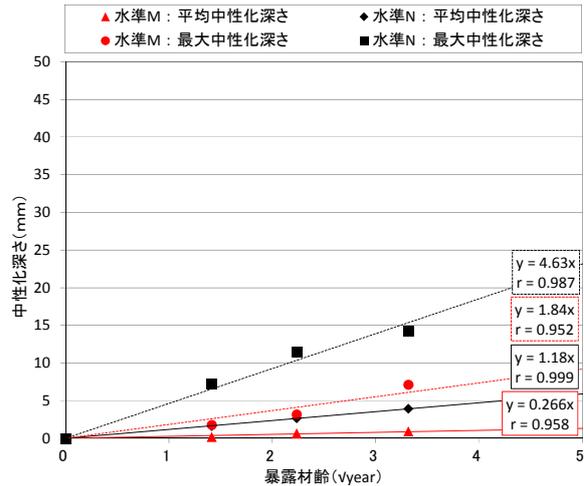


図-4 中性化深さの試験結果（健全部）

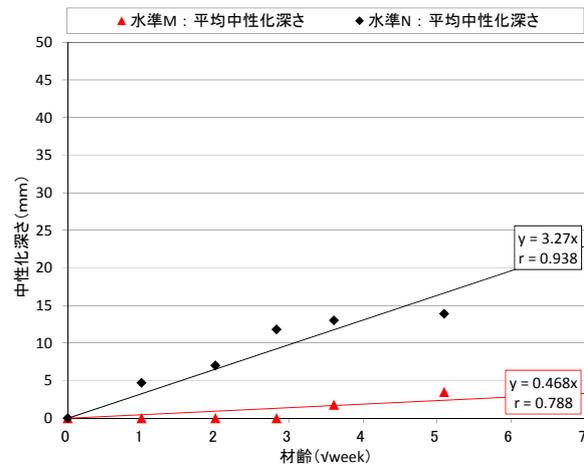


図-5 促進中性化深さの試験結果

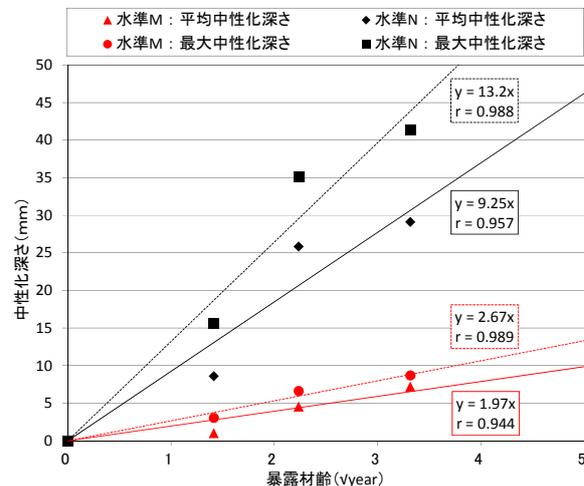


図-6 中性化深さの試験結果（水平打継ぎ部）

(2) 鉄筋腐食の状況

中性化深さの測定後に、埋め込み鉄筋を取り出し、腐食している部分の面積を測定した。測定は、透明なセロファンを用いて、腐食部分を正確に写し取り、展開後に二値化処理の画像解析によって、腐食面積を得た。なお、腐食面積率は、打継ぎ部を中心として長さ 30mm 部分と異形鉄筋の呼び径から求めた円周長さの積を分母にし、分子は腐食部分の面積として求めた。暴露材齢 5 年および 11 年のそれぞれの鉄筋の状況を写真-6 に示す。また、平均腐食面積率に近い水準における腐食状況の例を図-7 に示す。さらに、暴露材齢 5 年および 11 年の腐食面積率の結果を図-8 に示す (図-7 中の点線で挟まれた領域に該当する)。外観からもわかるように、水準 M については、ほとんど錆は見られない。確認された場合においても、ほぼ表面腐食にとどまっている。一方、水準 N については、明確な腐食が認められる。平均腐食面積率は、暴露材齢 11 年で 3 倍程度の差が生じている。

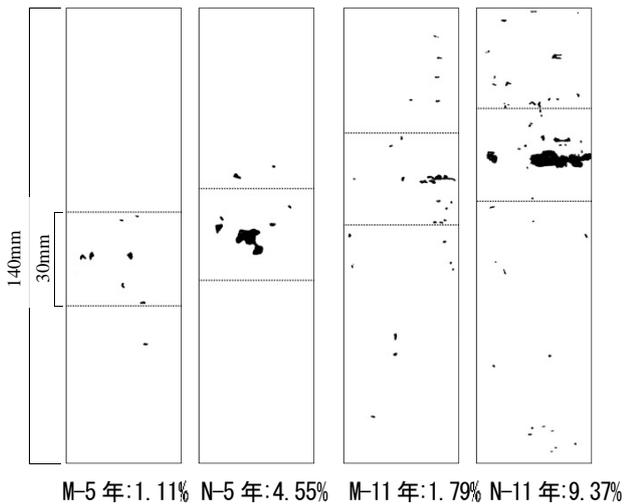


図-7 鉄筋腐食の状況の例

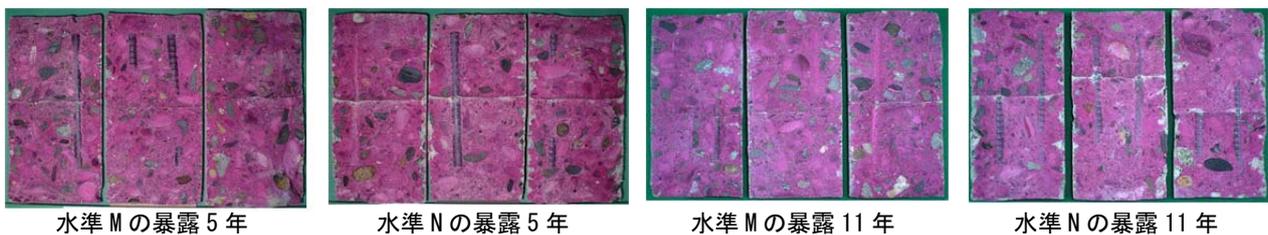


写真-5 各水準における中性化の状況

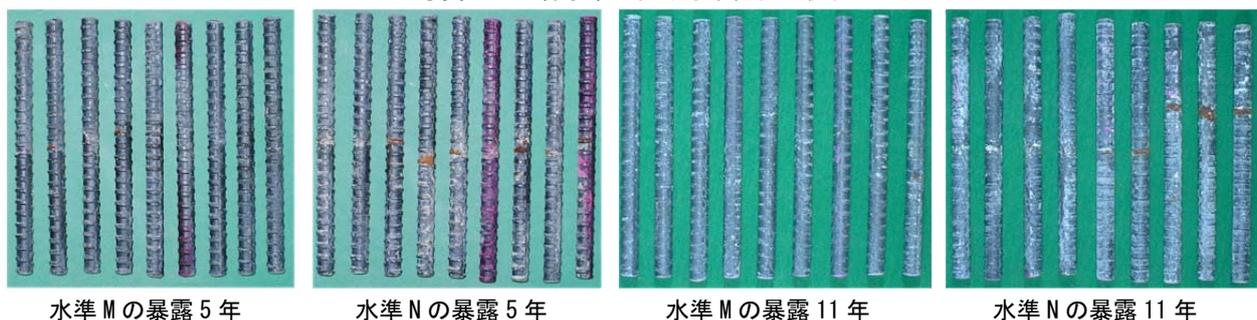


写真-6 各水準における鉄筋の状況

3.4 鉛直打継ぎ

(1) 中性化深さ

暴露供試体 B における鉛直打継ぎ部の中性化深さの結果を暴露供試体 A の健全部の平均中性化深さと合わせて図-9 に示す。暴露材齢 11 年において、鉛直打継ぎ部の平均中性化深さは健全部に比べると大きいですが、その

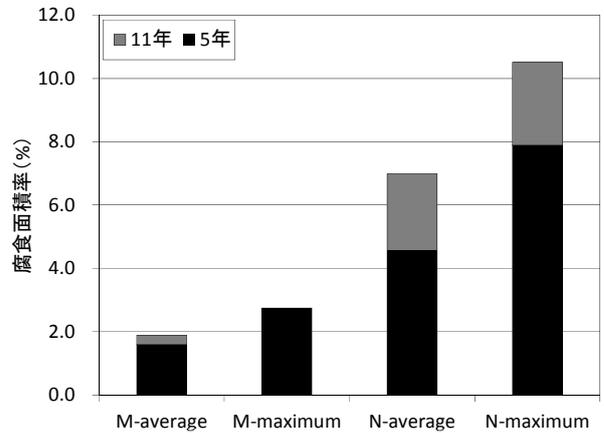


図-8 鉄筋の腐食面積率 (水平打継ぎ)

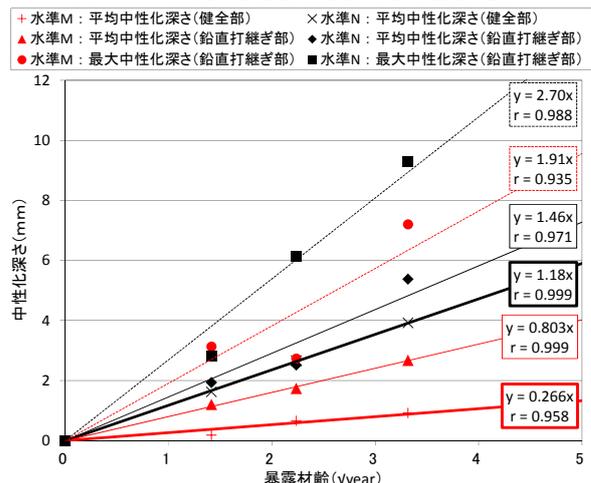


図-9 中性化深さの試験結果 (鉛直打継ぎ部)

程度は水平打継ぎに比べるとかなり小さく、割裂面では鉄筋まで達していることは確認できない。水平打継ぎ部では、ブリージングによりレイタンスが生じ、脆弱層が存在している一方で、鉛直打継ぎ部にはブリージングの影響が小さいことが主な原因と考えられる。

(2) 鉄筋腐食の状況

暴露材齢5年および11年の腐食面積率の結果を図-10に示す。なお、鉛直打継ぎ部における腐食面積率の算出は、ひび割れの影響を除くために、打継ぎ部を中心として長さ30mm部分と異形鉄筋の呼び径から求めた円周長さの積を分母にし、分子は腐食部分の面積として求めた。暴露材齢11年の水準Nにおける腐食面積率は、水準Mの約2倍であった。また、水準Nについては、5年から11年にかけて腐食面積率が大きく増加している傾向にある。前節で示した暴露材齢11年での水平打継ぎ部の平均腐食面積率（M-average:1.89%およびN-average:6.99%）と同様のかぶり厚さである20mmの結果（Mかぶり20

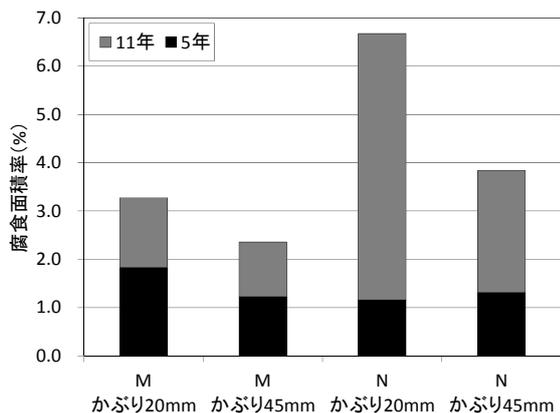


図-10 鉄筋の平均腐食面積率 (鉛直打継ぎ)

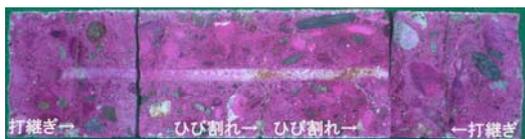


写真-7 M-0.3mmにおける11年暴露試験体の状況

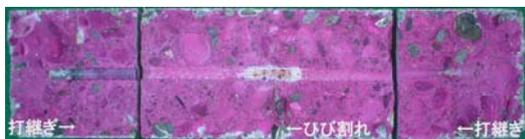


写真-8 N-0.3mmにおける11年暴露試験体の状況

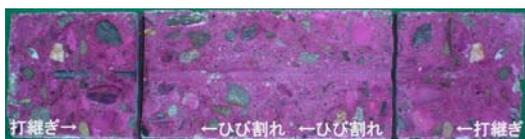


写真-9 M-0.1mmにおける11年暴露試験体の状況



写真-10 N-0.1mmにおける11年暴露試験体の状況

mm:3.27%およびNかぶり20mm:6.68%)を比較すると、中性化深さで得られた差より明確に小さい。よって、中性化以外の影響を受けたものと推察される。

3.5 ひび割れ部

(1) 中性化深さ

各水準において割裂した後の試験体の状況を写真-7から写真-10に示す。ひび割れ部においては、材齢5年で、中央に設置した鉄筋まで、全ての水準で中性化していることが確認できた。

(2) 鉄筋腐食の状況

取り出した鉄筋の状況を写真-11から写真-14に示し、暴露材齢5年および11年の腐食面積率の結果を図-11に示す。また、各材齢におけるかぶり厚さ20mmでの腐食状況を図-12から図-15に示す。なお、ひび割れ幅を目標値に制御したひび割れを対象に評価し、ひび割れ部における腐食面積率の算出は、ひび割れ部を中心として長さ60mm部分と異形鉄筋の呼び径から求めた円周長さの積を分母にし、分子は腐食部分の面積として求めた(図-12から図-15中の点線で挟まれた領域に該当する)。暴露材齢11年におけるひび割れ幅0.3mmと0.1mmの腐食面積率を比較した場合、かぶり厚さに関係なく0.3mmの方が大きく、腐食速度の差が認められた。また、低水セメント比である水準Mの方が、腐食している部分が多い傾向にある。水準Nより強度の高い水準Mは、ひび割れ導入時に鉄筋とコンクリートの付着切れが大きくなることが考えられる。その場合、ひび割れ周辺部の鉄筋に沿って中性化は進行するが、写真-9からはその状況は確認できない。よって、付着切れによらず、

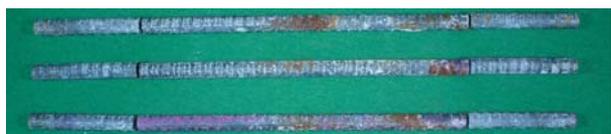


写真-11 M-0.3mmにおける11年暴露試験体内の鉄筋



写真-12 N-0.3mmにおける11年暴露試験体内の鉄筋

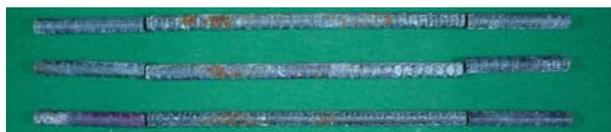


写真-13 M-0.1mmにおける11年暴露試験体内の鉄筋

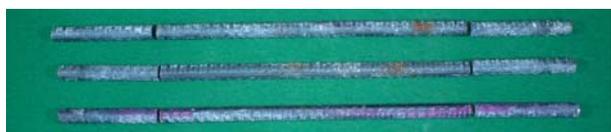


写真-14 N-0.1mmにおける11年暴露試験体内の鉄筋

同程度のひび割れ幅を有する水セメント比の異なる鉄筋コンクリートにおいて、鉄筋の腐食は低水セメント比の方が、腐食しやすくなる可能性を示唆している。以上の結果から、ひび割れが生じた鉄筋コンクリートにおける鉄筋の腐食についてはさらに調査していく必要があると考えられる。

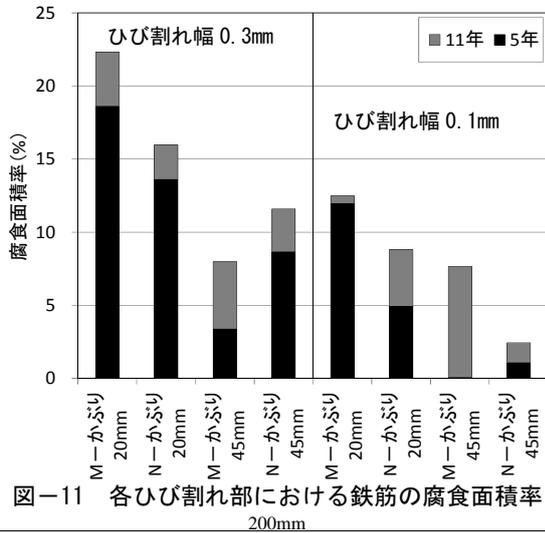


図-11 各ひび割れ部における鉄筋の腐食面積率

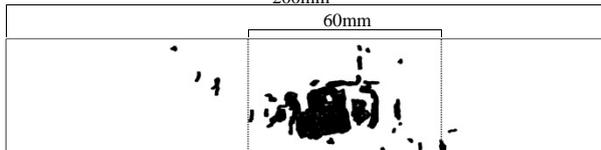


図-12 M-0.3mm(かぶり 20mm)における5年の鉄筋腐食状況

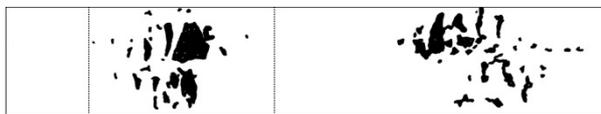


図-13 N-0.3mm(かぶり 20mm)における5年の鉄筋腐食状況



図-14 M-0.3mm(かぶり 20mm)における11年の鉄筋腐食状況



図-15 N-0.3mm(かぶり 20mm)における11年の鉄筋腐食状況

4. まとめ

本報告では、水セメント比の異なる11年間暴露した各種欠陥を有する鉄筋コンクリートにおける中性化深さと鉄筋腐食の状況を調査した。本実験結果の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) 11年間暴露した供試体の健全部の中性化速度係数の結果から水セメント比が45%で、普通ポルトランドセメントを使用した場合には、JASS5 2009に示されている計画供用期間の超長期仕様を満足する。
- 2) 中性化速度係数は、一定の湿度条件で実施される促

進試験に比べて、雨など水分の影響がある環境条件の方が、水セメント比の影響が小さくなる。

- 3) 水平打継ぎを適切に処理しない場合には、水セメント比45%でも、約5年で20mmまで中性化が達する。
- 4) 水セメント比45%と57.5%の水平打継ぎ部における腐食面積率を比較すると、暴露材齢11年で3倍程度の差が生じる。
- 5) 鉛直打継ぎは水平打継ぎに比べて、ブリージングの影響が小さく、中性化深さはかなり小さくなる。
- 6) 水セメント比45%と57.5%の鉛直打継ぎ部における鉄筋の腐食面積率を比較すると、暴露材齢11年で2倍程度の差が生じる。
- 7) 水平打継ぎと鉛直打継ぎの平均腐食面積率を比較すると、大きな差は生じておらず、中性化深さで明確な差が生じた結果と整合性がとれないことから中性化以外の影響を受けたものと推察される。
- 8) ひび割れ部においては、材齢5年で、中央に設置した鉄筋位置まで、中性化が進行する。
- 9) 暴露材齢11年におけるひび割れ幅0.3mmと0.1mmの腐食面積率を比較した場合、かぶり厚さに関わらず0.3mmの方が大きく、腐食速度に差が認められた。
- 10) 水セメント比45%と57.5%において、同程度のひび割れが存在している場合の鉄筋腐食面積率は、水セメント比45%の方が大きく、腐食速度の違いが認められた。

参考文献

- 1) P.Schiessl : Zusammenhang zwischen Rissbreite und Korrosionsabtragung an der Bewehrung, BETONWERK + FERTIGTEIL-TECHNIK, pp.594-598, 1975
- 2) A.W.Beeby : Corrosion of reinforcing steel in concrete and its relation to cracking, The Structural Engineer, pp.77-81, Vol. 56A, No.3, March, 1978
- 3) Shalon, R. : Corrosion of Reinforcing Steel in Hot Countries, RILEM Bulletin, No.24, pp.29-46, 1964.9
- 4) 鈴木 計夫, 大野 義照, ソムヌク パパントナトーン, 二宮 一, 田村 博: コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼすひび割れ幅の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第397号, pp.1-11, 1989.3
- 5) 西田 孝弘, 大即 信明, 小長井 彰祐: 打継ぎ部におけるコンクリートの中性化現象が鉄筋腐食の速度に及ぼす影響とその対策, 材料, Vol.52, No.9, pp.1067-1074, 2003.9
- 6) 佐伯 竜彦, 長滝 重義, 大賀 宏行, 高見 浩之: 降雨により水分の供給を受けるコンクリートの中性化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.609-614, 1991