

論文 柱供試体に埋設した水平鉄筋の腐食性状に与える酸素透過の影響

河合 慶有*1・氏家 勲*2

要旨：本研究では、柱供試体に埋設された水平鉄筋を対象として、中性化による鉄筋腐食性状に与える酸素透過の影響について検討した。特に、FA コンクリートを対象として、中性化後に相対湿度の上昇が鉄筋腐食の発生・進行に与える影響を検討した。その結果、表層透気性-含水率の関係から均質な細孔構造を有すると考えられる FA コンクリートにおいても、供試体上部に配置された水平鉄筋においては、中性化による鉄筋腐食に対する抵抗性が低下することがわかった。これは、湿気移動に伴い増加した溶存酸素を含む水分の存在に起因する酸素透過性の相違が鉄筋腐食性状に影響を与えると推察される。

キーワード：材料分離、鉄筋腐食、酸素透過、表層透気性、水平鉄筋

1. はじめに

中性化による鉄筋腐食の腐食速度は塩害によるものと比較して小さくなる傾向があるが、水セメント比に関わらずマクロセルによる腐食形態が卓越することが指摘されている¹⁾。中性化による鉄筋腐食に対する照査に水掛かりの影響が考慮され、溶存酸素を含む水分が鉄筋腐食性状に与える影響が考慮されているが、腐食の発生・進行に与える酸素透過の影響は未解明な部分が多い。また、既往の研究によると水平鉄筋周囲の空隙の存在が鉄筋腐食の発生に影響を与えることが定性的に示されている^{2),3)}。特に、境界相の厚さが腐食の発生に影響を及ぼすことが指摘されているが⁴⁾⁻⁶⁾、湿気移動に伴う鉄筋周囲の酸素透過性の変動が鉄筋腐食の発生に与える影響について検討された事例は少ない。

本研究では、普通細骨材と比較して密度の大きい銅スラグ細骨材（以下、CUS と称す）を使用し、骨材質量の増加に伴うブリーディングの影響を軽減するため JIS II 種フライアッシュ（以下、FA と称す）を併用し粉体量を調整した配合を検討対象とした。これらの材料を使用した打設高さ 1.5m の柱供試体を対象として、まず透気試験を用いた表層透気性-含水率の関係から耐久性能を推定する手法⁷⁾を柱供試体の高さ方向の品質の相違を把握するために実施した。この方法は、表層含水率の低下に伴う透気係数の増大を把握することで空隙構造（空隙径、連結性）を評価することが可能であるため、かぶりコンクリートの劣化因子の遮断性を推定することが可能となっている。

また、鉄筋腐食のカソード分極曲線から推定される酸素透過速度⁸⁾はかぶりの密実性、含水状態、また鉄筋周囲の健全性を示す指標⁹⁾であり、鉄筋表面に存在する溶

存酸素を含む水分が酸素透過の変動に与える影響を反映した指標となると考えられる。

以上の背景を踏まえて、本研究では材齢 182 日までに測定されたこれらの指標に基づいて、中性化した鉄筋コンクリート供試体を対象として、水平鉄筋の腐食性状（腐食発生・進行、腐食形態）に与える酸素透過の影響について検討した。特に、促進中性化試験槽に曝露した鉄筋コンクリート供試体を用いて、段階的な相対湿度の上昇に伴う腐食性状の変動に与えるかぶりの不均質さおよび鉄筋周囲の健全性の影響について検討を行った。なお、本研究では高湿度環境下における酸素透過が鉄筋腐食の発生に与える影響を主な検討対象としている。また、既往の研究^{5),10)}を参考にして分割鉄筋を用いた検討手法を採用している。すなわち、鉄筋を打設方向に対して上・下に分割し、エポキシ樹脂系接着剤を用いて絶縁接続した鉄筋を配置することで水平鉄筋の上・下間に生じる酸素透過性および鉄筋腐食性状の相違を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本実験では水結合材比を 60%または 52.5%とし、単位水量は 165 kg/m³ に設定した。混和材として加熱改質フライアッシュ（密度：2.23 g/cm³、ブレーン値：4310 cm²/g、強熱減量：0.9%）を使用した。FA 配合は、材齢 28 日の圧縮強度が FA を混和していない配合（OPC）と同程度となるようにセメント量および細骨材量を調整した。コンクリートの配合を表-1 に示す。また細骨材および粗骨材の物性を表-2 に示す。なお、混和剤として AE 減水剤にはポゾリス 78S を使用し、AE 助剤にはマイクロエア 202 を使用した。

*1 愛媛大学大学院 理工学研究科 准教授 Ph.D. (正会員)

*2 愛媛大学大学院 理工学研究科 教授 博(工) (正会員)

表-1 配合

ケース	W/B (%)	単用量 (kg/m ³)							(g/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	FA	細骨材				粗骨材			混和剤			
					S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	G ₁	G ₂	G ₃	Ad1	Ad2		
OPC	60	165	275	-	448	457	-	-	955	-	-	4125	13.75	8.0	4.5
FACUS30	52.5	165	251	63	-	-	604	366	-	469	462	943	22	8.5	3.5

2.2 供試体の作製および養生

供試体寸法は、断面 300×300 mm、高さ 1500 mm とし、埋設した鉄筋は長さ 100 mm の異形鉄筋 D32 を使用した。図-1 のように上・下に分割した鉄筋を相対するコンクリート表面からかぶりを確保し、2 本ずつ各高さ（底面から 250, 750, 1250 mm）に埋設した。なお、以後は供試体下部・中部・上部と呼称する。かぶりは 10mm および 20mm の 2 水準とした。分割鉄筋はリブを境目に切断し、幅 1 mm を確保した鉄筋間にエポキシ樹脂系接着剤を流し込み作製した。供試体は 1 バッチあたり 50L を練り混ぜた後、打設高さ 1.5m から 3 層に分けて打ち込んだ。なお、打設に要した時間は 30 分程度である。また、3 層すべてのコンクリートを打ち込んだ後、供試体上面に発生したブリーディング水は取り除くことなく、仕上げも施していない。打設後、供試体は材齢 3 日目に脱型し材齢 28 日まで 20°C の恒温室内で屋内曝露した。その後、図-1 に示す切出し供試体を乾式により切断し作製した。また、切出し供試体には側面からの腐食因子の侵入を防ぐためダクトテープを用いて、曝露面を残して 5 面にシールを施した。その後、かぶりを確保した型枠に接していた面から中性化を促進させた。本研究では一方の側面から切出した 3 体を用いて中性化による腐食試験を材齢 28 日から開始した。

2.3 透気試験および含水率測定

透気試験は、トレント法を用いて供試体底面から 250, 750, および 1250 mm の高さにおいて実施した。なお、本実験用に鉄筋を埋設していない供試体（断面 300×300 mm、高さ 1500 mm）を別途作製し、20°C に設定された恒温室内に曝露した。トレント法には Proceq 社製の Permea-TORR（ダブルチャンバー式）を用いて透気係数を式(1)により算出した。

$$kT = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left(\frac{\ln \frac{P_a + \Delta P_{ieff}(t_f)}{P_a - \Delta P_{ieff}(t_f)}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}}\right)^2 \quad (1)$$

ここに、 kT : 空気透過度係数 (m²)、 V_c : 内部セルの容積 (m³)、 A : 内部セルの断面積 (m²)、 μ : 空気の粘性係数 (=2.0×10⁻⁵N・sec/m²)、 ε : かぶりの空隙量 (=0.15)、 P_a : 大気圧 (N/m²)、 ΔP_{ieff} : 試験終了時内部セルの有効圧力上昇 (N/m²)、 t_f : 試験終了時間 (s)、 t_0 : 試験開始時間 (=60s)

表-2 骨材の物性

骨材種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
S ₁ 愛媛県東温市山ノ内産砕砂	2.61	1.06	2.92
S ₂ 福岡県北九州市東谷釜山産石灰砂	2.66	0.58	2.47
S ₃ 千葉県君津市法木産山砂	2.62	1.05	2.51
S ₄ 銅スラグ細骨材 CUS2.5	3.55	0.04	2.28
G ₁ 愛媛県東温市山ノ内産砕石	2.63	1.15	-
G ₂ 東京都青梅市成木産砕石5号	2.65	0.49	-
G ₃ 東京都青梅市成木産砕石6号	2.61	0.66	-

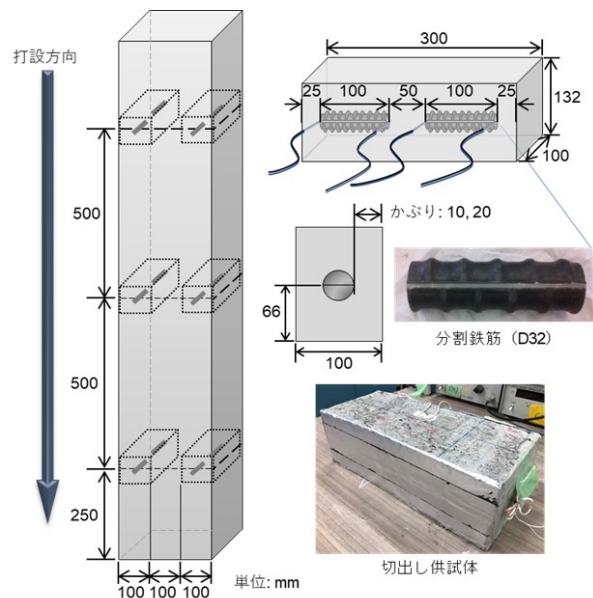


図-1 供試体概要

である。

測定は、各供試体の測定位置において 1 回ずつ行い、材齢 180 日まで実施した。また同時に高周波容量式の含水率計を用いてコンクリート表層の含水率を測定した。測定は、透気試験実施直前に供試体底面から 250, 750, および 1250 mm の位置において実施した。なお、供試体表面の状態によって測定値が異なるため、各位置において 3 回測定を行い、平均値を測定値とした。

2.4 腐食試験および電気化学的測定

中性化試験槽内の設定は JIS1153:2012 を参考にして、温度 20°C、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5.0%とした。また、促進環境に静置した供試体は、1 週間ごとに自然電位および分極抵抗を測定した。分極抵抗の測定には AC インピーダンス法を用いた。測定条件は周波数を 10

kHz～1mHz, 印加電圧を 50 mV とした。また, 対極には分割鉄筋の投影面積と同じ寸法のステンレス板を用い, 測定中には鉄筋要素間のリード線を切断した。マイクロセル電流密度は測定された分極抵抗値から Stern-Geary 式の K 値を 0.0209 として算出した。なお, いずれの測定においても参照電極には Ag/AgCl を使用した。また, 得られた自然電位は測定値から 130.1 mV を減ずることにより CSE 値に換算した。

カソード分極試験ではコンクリートに埋設した分割鉄筋, 参照電極および対極にポテンショスタットを接続し, 鉄筋を陰極, 対極を陽極として 860 mV の電位差を設けた。そして, 定常状態における電流密度 (限界電流密度) を測定し, コンクリート内部を透過し鉄筋表面でのカソード反応によって消費される酸素量を既往の研究⁸⁾を参考にして次式を用いて算出した。

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{i_{lim}}{nF} \quad (2)$$

ここに, dQ/dt : 酸素透過速度 (mol/cm²/sec), i_{lim} : 限界電流密度 (A/cm²), n : 原子価 ($n=4$), F : ファラデー定数 (=96500 C/mol) である。

3. 表層透気性を用いた不均質さの評価

3.1 ブリーディング試験結果

図-2 に, JIS A 1123 に準じて実施したブリーディング試験の結果を示す。なお, グラフには 2 回行った測定結果をそれぞれ示している。一般に, 密度の大きい CUS の使用により骨材質量が重くなるため材料分離性が高まるが, FA を混和し粉体量を調整したコンクリート (FACUS30) においては, 試験終了時のブリーディング量は 0.3 cm³/cm² 程度であった (図-2)。したがって, 基準とした OPC と FACUS30 の配合で測定されたブリーディング量は同程度であることから, 両者の材料分離性については大きな差はないと考えられる。材料分離により生じる表層品質の相違については, 3.3 で表層透気性を用いて検討する。

3.2 圧縮強度試験結果

本実験で検討した各配合を用いて JIS A 1108 に準じて圧縮試験を実施した。材齢 28 日における OPC および FACUS30 の圧縮強度は, それぞれ 33.4 および 30.2 N/mm² であった。FA を混和した配合の材齢 28 日の強度レベルは基準とした OPC と同程度となっていることを確認した。また, FA 配合の材齢 91 日の圧縮強度 (41.3 N/mm²) においては, ポズラン反応による強度増進が確認されている。

3.3 透気係数-含水率の関係

図-3 に各供試体において材齢 180 日までに測定された透気係数-含水率の関係を示す。図より, 透気係数は含水率の低下に伴い増大する傾向がいずれの供試体においても明確に認められる。特にこの傾向は OPC 供試体上部ほど顕著となっており, ブリーディングにより多孔質化する供試体上部では, 乾燥に伴い連続したより粗大な空隙を空気が透過したため透気量が増大したものと推察される。既往の研究⁷⁾を参考にしてこれらの線形近似直線から得られる傾きの絶対値を耐久性指標と見なせば, 供試体上部ほど物質移動に対する抵抗性が低下しているといえる。したがって, 湿気移動, 二酸化炭素および酸素などの気体の移動などの腐食要因物質の侵入に対する抵抗性の低下が懸念される。それぞれの部位における酸

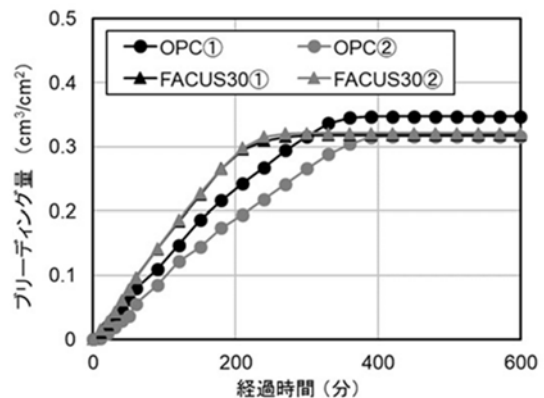


図-2 ブリーディング試験結果

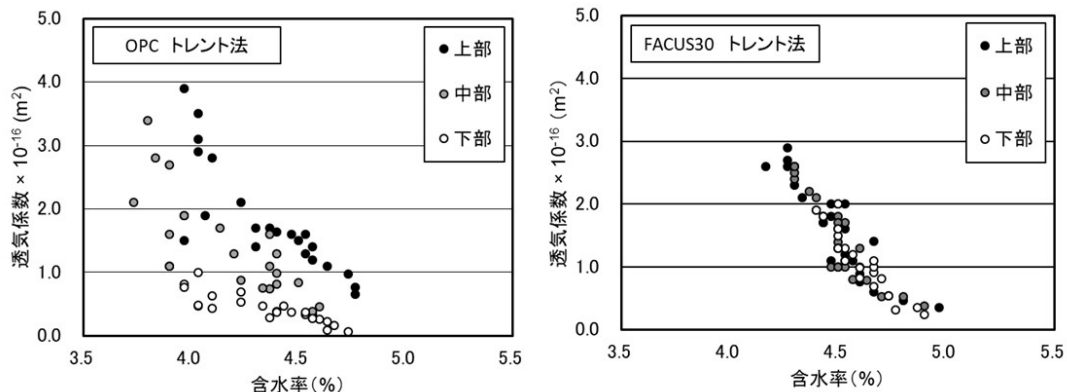


図-3 透気係数-含水率の関係 (トレント法 材齢 180 日まで)

素透過性の違いについては、4.3 で詳述することとする。一方、FACUS30 においては含水率の低下に伴う透気係数の増加傾向は認められるものの、柱供試体の上部・中部・下部における傾向は同程度となっている。したがって、FA の混和は高さ方向の品質（水結合材比）の変動を抑制し、OPC と比較してより均質な細孔構造の形成に効果が高いことがわかる。

4. 腐食試験の結果および考察

4.1 自然電位およびマイクロセル電流密度の測定結果

本検討では、促進中性化試験後に図-4 に示すような段階的な湿度上昇を実施し、湿気移動に伴う腐食性状の変動について検討を行った。環境試験槽内の相対湿度を60%程度から70%（130日間）、80%（62日間）、90%（123日）、95%（48日間）まで徐々に上昇させた。その後、各供試体を環境試験槽から取り出し、室内環境でマイクロセル電流密度の測定を実施した。なお、26週までの促進試験の結果を用いて算出した促進中性化速度係数は、それぞれ OPC (22.8 mm/year^{1/2})、FACUS30 (24.3 mm/year^{1/2}) であり、湿度の影響を検討した際には、かぶり20mmを越えて中性化が進行している状況となっている。

図-5 に各供試体で測定されたマイクロセル電流密度および自然電位 (vs. CSE 換算値) の結果を示す。図より、FACUS30 供試体 (かぶり10mm) における腐食電流密度の増加傾向が最も顕著であることが認められる。特に、湿度が高くなるほど、各高さから切出した供試体の腐食傾向の差異は明確になり、供試体上部ほど腐食傾向が高い結果となっている。また、3.3 で示したように透気係数-含水率の関係に基づき、材料分離に伴う不均質さを有しており、供試体の高さ方向に腐食要因物質の移動に対する抵抗性が異なると考えられる OPC 供試体 (かぶり10mm) においても相対湿度を90%まで上昇させた後自然電位の卑化が顕著となり、腐食電流密度の増加が確認

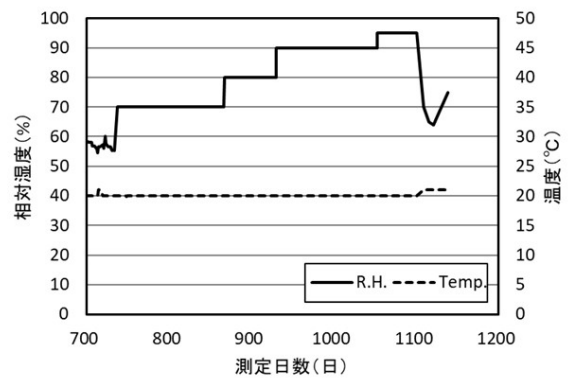


図-4 湿度環境の経時変化

されている。また、OPC 供試体 (かぶり10mm) で見られたこれらの自然電位および腐食電流密度の傾向は、FACUS30 (かぶり20mm) においても同様に確認されている。一方、OPC 供試体 (かぶり20mm) においては、自然電位の卑化は同様に認められるが腐食の発生は明確ではない。以上の検討結果を踏まえると、材齢28日の強度が同等の場合、FAの方がOPC供試体よりも中性化に対する腐食抵抗性は低下すると考えられる。これは、FAのポゾラン反応によりセメント硬化体中の水酸化カルシウム量が減少し、pHの低い細孔溶液が鉄筋に作用したことが一因として考えられる。また、FAコンクリートではカソード反応に対する抵抗性が低下することも指摘されており、これらが腐食電流密度の増加に影響を与えていると考えられる⁹⁾。

図より自然電位の卑化傾向はいずれの供試体においても相対湿度を70%まで上昇させた後に明確になっている。その後、OPC 供試体 (かぶり10, 20mm)、およびFACUS30 (かぶり20mm) の供試体では、相対湿度を上昇させ90%以上に到達すると腐食の判定基準 (-350 mV vs. CSE) より卑な電位を示している。一方、検討した供試体のなかで明確な腐食傾向を示した FACUS30 供試体上部の鉄筋においては、相対湿度を70%まで上昇させた

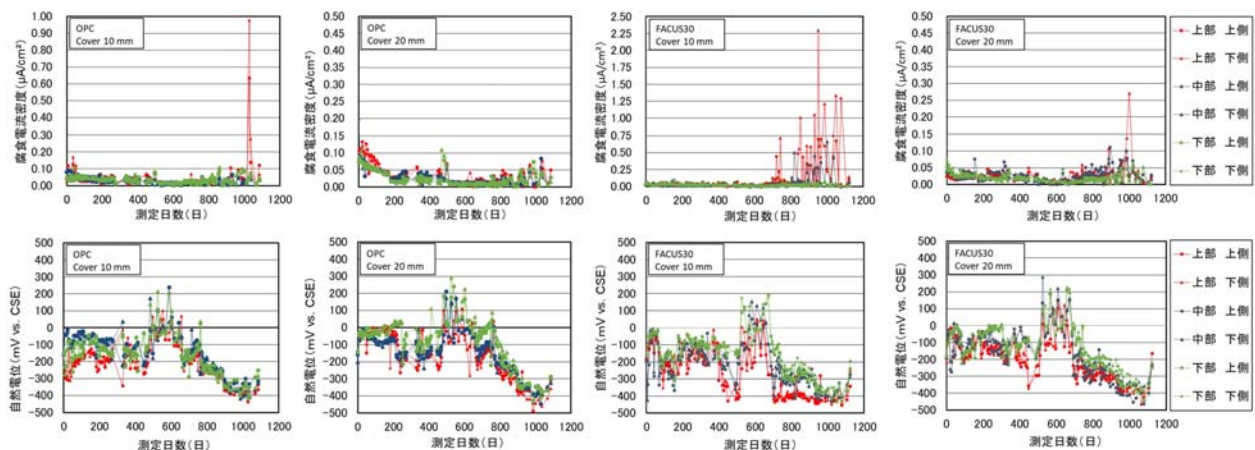


図-5 ミクロセル電流密度および自然電位 (各供試体上部・中部・下部の鉄筋上・下側)

時点で上記の基準より卑な電位を示し、他の供試体とは異なる傾向を示した。本検討では、相対湿度の上昇によりかぶりコンクリート中への細孔を通じた湿気移動が進むことを想定している。したがって、自然電位の卑化傾向からは、いずれのかぶりに配置された鉄筋においても湿気移動に伴い、若干のずれはあるものの水分が鉄筋まで到達したと考えられる。特に、かぶりを10mmとした供試体では早い段階で低 pH かつ溶存酸素を含む細孔溶液が作用することとなる。その後、腐食の発生限界を超えると鉄筋腐食は発生・進行する。3.3 で示したように FACUS30 供試体の透気係数-含水率の関係は各高さで同程度であり、湿気移動は同様に進むと仮定すると腐食電流密度で見られた供試体間、および高さ方向の腐食性状の違いは、鉄筋周囲の不均質さに起因するものと推察される。したがって、材料分離およびブリーディング水により水平鉄筋に生じる耐久性低下の要因を把握することが重要であると考えられる。本研究では、これらの腐食傾向の違いは湿気移動に伴い変動するカソード反応における酸素透過性の違いに起因すると推察し、4.3 では酸素透過速度と腐食性状について考察することとする。

4.2 マクロセル電流密度の測定結果

次に、各供試体に埋設された上・下に分割された鉄筋に生じたマクロセル腐食性状について検討する。図-6 に無抵抗電流計により測定されたマクロセル電流密度の結果を示す。なお、測定は相対湿度を95%まで上昇させた後、供試体を室内環境に静置し実施した(図-4 参照)。

図より、マイクロセル電流密度の結果と同様に FACUS30 供試体の上部においてはマクロセル電流密度の増大傾向が明確に認められる。また、かぶりを20mmとした供試体では、いずれの結果も最終値が $0.01\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下となり、かぶり大きいほどマクロセル腐食は抑制されるといえる。また、OPC 供試体(かぶり10mm)においては、

FACUS30 供試体上部と比較してマクロセル電流密度は小さい値を示している。マクロセル電流密度の測定直前に供試体上部に埋設された鉄筋間で生じた自然電位差は、それぞれ OPC 供試体上部(かぶり10および20mm, 30mV程度)、FACUS30 上部(かぶり20mm, 6mV)、FACUS30 上部(かぶり10mm, 91mV)であった。以上の結果より、FACUS30 上部においては明確な自然電位差(マクロセル腐食の起電力)が生じており、マクロセル電流密度の増加傾向と符合している。したがって、溶存酸素含む湿気の影響を受けやすいかぶりが小さい供試体では、マクロセル腐食が生じやすいと推察される。特にこの傾向は、FA を混和した供試体上部で顕著にみられることから、4.3 では FA 供試体における鉄筋腐食抵抗性の低下について湿気移動に伴い変動するカソード反応性状の観点から考察を進めることとする。

4.3 酸素透過速度と鉄筋腐食抵抗性

4.3 では材齢28日(OPC)、材齢91日(FACUS30)および材齢182日にカソード分極試験により測定された酸素透過速度とマイクロセル・マクロセル腐食性状の関連について検討する。図-7 に各供試体の上部・中部・下部に埋設された分割鉄筋の上・下で測定された酸素透過速度を示す。図より、供試体上部ほど酸素透過速度が大きいことがわかる。特にこの傾向は、材齢28日(OPC)、材齢91日(FACUS30・かぶり10mm)において明確に認められる。また、材齢182日に測定された結果は、促進中性化試験槽の環境下で測定されたカソード分極特性に基づいており、かぶりおよび鉄筋周囲に存在していた水分が逸散することで溶存酸素を含む水分量が減少し、酸素透過が抑制されたため 1.0×10^{-11} (mol/cm²/sec)以下と極めて低い値を示している。なお、この閾値以下では塩害による鉄筋腐食はマイクロセル腐食およびマクロセル腐食ともに抑制されることが指摘されている¹¹⁾。前者の結

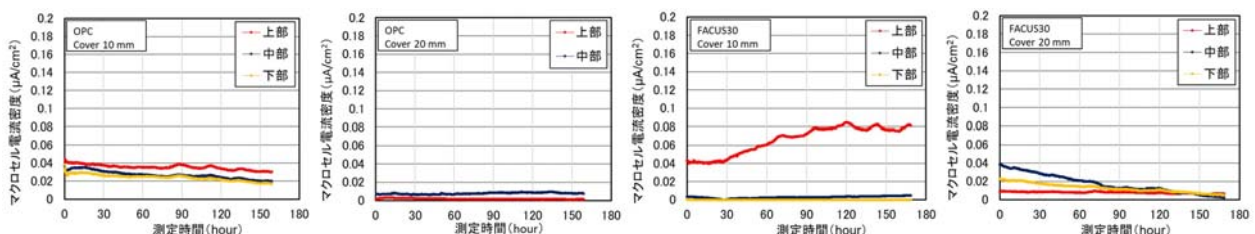


図-6 マクロセル電流密度(鉄筋上・下間の電流密度)

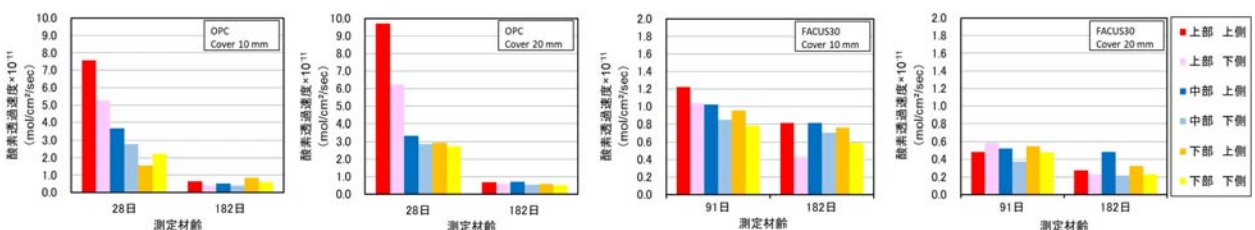


図-7 酸素透過速度

果は、材齢初期の鉄筋周囲の不均質さを酸素透過性の違いに基づき定量的に示す指標であり、中性化後に相対湿度の上昇に伴い進行する湿気移動により生じた腐食性状の変動を説明する要因の一つであると推察される。すなわち、3.3で示したように透気係数-含水率の関係は高さ方向で同程度であった FACUS30 供試体では、鉄筋周囲の健全性の違いに起因しカソード反応性状が変動し、酸素透過性に違いが生じるといえる。さらに、鉄筋下側よりも上側の方が酸素透過速度が速くなる傾向が認められ、供試体上部ほどその傾向は顕著であることがわかる。このように供試体の高さ方向および鉄筋上・下間には酸素透過性に違いが生じており、これらが中性化したコンクリートにおいて湿度上昇下に発生した腐食性状に影響を与えると考えられる。すなわち、酸素透過速度が増加する供試体上部ほどミクロセル腐食は生じやすく、また鉄筋上・下間に差が大きいほどマクロセル腐食は生じやすいと考えられる。なお、相対湿度の上昇に伴い進行する湿気移動により酸素透過速度は増加するため、材齢初期に見られた鉄筋上・下間の酸素透過速度の差は、マクロセル電流密度が測定された時点においても一定程度存在するものと推察される。

本研究では、材料分離に起因する不均質さによる腐食性状の違いについて、中性化後の供試体を対象として相対湿度の上昇に伴う湿気移動により生じたミクロセル・マクロセル腐食形態ごとの腐食性状に影響を与える酸素透過の観点から考察した。今後は、相対湿度の上昇に伴う酸素透過性の変動、鉄筋周囲の性状（pH、水酸化カルシウム量）や腐食の発生状況について検討を進める予定である。

5. 結論

本研究では、柱供試体に埋設した水平鉄筋の腐食性状に与える酸素透過の影響について検討を行った。以下に本研究で得られた知見を記す。

- 1) 材齢初期に生じる鉄筋周囲の酸素透過性の増加により、中性化による鉄筋腐食抵抗性は低下する。
- 2) 湿気移動に伴い増加する鉄筋周囲の溶存酸素を含む水分の存在により FA 供試体では相対湿度 70%以上、OPC 供試体では相対湿度 90%以上で中性化後の鉄筋腐食は発生する。
- 3) 酸素透過速度が速いほど中性化後のミクロセル腐食が大きくなり、また鉄筋内の酸素透過速度の差が大きいほどマクロセル腐食が生じる傾向が特に FA コンクリートで認められた。
- 4) ミクロセル・マクロセル腐食および材齢初期 (OPC: 28 日, FACUS30: 91 日) の酸素透過速度の結果に基づき、中性化後に湿度上昇により生じる鉄筋腐食

に対する抵抗性は FA コンクリートの方が低下する。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金若手研究 (B) 課題番号: 15K18100 の助成を受けて実施したものである。ここに記して、深い謝意を表します。

参考文献

- 1) S. Miyazato and N. Otsuki: Steel Corrosion Induced by Chloride or Carbonation in Mortar with Bending Cracks or Joints, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 8, No. 2, pp. 133-144, 2010.
- 2) A. Bentur, S. Diamond, and N.S. Berke: *Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice*, London, E & FN Spon, 1997.
- 3) T. Yonezawa et al.: Pore Solution Composition and Chloride Effects on the Corrosion of Steel in Concrete, *CORROSION*, 44(7), pp. 489-499, 1988.
- 4) T.U. Mohammed et al.: Chloride-Induced Corrosion of Steel Bars in Concrete with Presence of Gap at Steel-Concrete Interface, *ACI Materials Journal*, 99(2), pp. 149-156, 2002.
- 5) 浮島文香ほか: RC 部材中の塩化物イオンと水平鉄筋周りの境界相がコンクリート中鉄筋の腐食に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 6 巻, pp. 299-304, 2006.
- 6) 濱田秀則ほか: 鉄筋周囲に発生する空隙と鉄筋腐食の関係に関する実験的考察, セメント・コンクリート論文集, No.63, pp.428-434, 2009.
- 7) 河合慶有, 國方翔太, 氏家勲: 現場透気試験によるかぶりコンクリートの耐久性能評価手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2140-2145, 2014.
- 8) 長滝重義, 大即信明, 守分敦郎, 宮里心一: 鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.544, V-32, pp.109-119, 1996.
- 9) 河合慶有, 氏家勲: 初期養生がフライアッシュコンクリート中の腐食因子の侵入と鉄筋腐食抵抗性に与える影響, *材料*, Vol. 66, No. 8, pp.608-614, 2017.
- 10) 宮里心一ほか: 分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理論的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.547-552, 2001.
- 11) 河合慶有, 氏家勲: 材料分離に起因する不均質さが水平鉄筋の腐食性状に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.697-702, 2017.