

論文 コンクリートの比抵抗の相違を考慮した鋼材腐食解析手法による進展期末の推定

鈴木 三馨*1・石田 哲也*2

要旨: W/C, 結合材の種類およびコンクリートの含水状態がコンクリートの比抵抗に及ぼす影響を四電極法による測定によって検討し, W/C が小さいほど, 相対含水率が低いほどおよび高炉スラグ微粉末の混和により比抵抗が大きくなることを確認した。また, コンクリートの比抵抗を考慮した鋼材腐食解析手法により, W/C, 結合材の種類およびコンクリートの含水状態といった条件を考慮して, 塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食の照査について, 進展期末を限界状態とした検討を実施した。

キーワード: 塩害, 耐久性照査, 潜伏期, 進展期, ミクロセル腐食, マクロセル腐食, 比抵抗

1. はじめに

2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕(以下, コ示)¹⁾では, 塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物(以下, RC 構造物)の耐久性照査は鋼材の腐食開始を限界状態としているが, 設計の更なる高度化・合理化のためには, 腐食ひび割れ発生を限界状態とする検討が必要である。

鋼材に生じる腐食の内, 局所的に腐食が進行するマクロセル腐食は, 全体にわたって一様に腐食が進行するミクロセル腐食よりも腐食速度が大きい²⁾。マクロセル腐食の腐食速度は, コンクリートの比抵抗によりカソード部とアノード部の面積比に応じて変化する。また, コンクリートの W/C, 結合材の種類およびコンクリートの含水状態は比抵抗に大きく影響を与える^{3), 4)}。しかし, これらを考慮した塩害に対する鋼材腐食の照査段階を進展期末とした解析検討はこれまでにほとんどなされていない^{5), 6)}。

そこで本論文では, W/C, 結合材の種類およびコンクリートの含水状態がコンクリートの比抵抗に及ぼす影響を実験によって検討した。さらに, コンクリートの比抵抗を考慮した鋼材腐食解析手法により, W/C, 結合材の種類およびコンクリートの含水状態が進展期末までの期間に与える影響について検討した。

2. W/C, 結合材の種類およびコンクリートの相対含水率と比抵抗との関係

2.1 比抵抗測定方法・測定ケース

比抵抗の測定を土木学会規準「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)(JSCE-K 562-2008)」⁷⁾に準拠して行った。交流電圧は 5V とし, 周波数は 100Hz とした。供試体寸法は, コンクリート試験体では, B100mm×H100mm×L400mm, モルタル試験体では,

B40mm×H40mm×L160mm とし, 試験体電位差電極間の距離はコンクリート試験体で 100mm, モルタル試験体で 80mm とした。試験体の配合表を表-1 に示す。結合材は表-2 に示す普通ポルトランドセメント(OPC: 密度 3.16g/cm³, 比表面積 3330cm²/g) と高炉スラグ微粉末(BFS: 密度 2.89g/cm³, 比表面積 4360cm²/g) を用いた。コンクリート試験体の単位水量は極力変えずに W/C を変化させ, モルタル試験体では, 普通ポルトランドセメントのみの配合(M45)と高炉スラグ微粉末を体積で 50% 置換した配合(BS45)により比較した。

試験体は, 水和反応が比抵抗に与える影響を低減させるために 20°C, 99%RH の環境に密封養生した状態で 56 日間以上養生したのち, 表-3 に示す曝露条件で曝露し定期的に比抵抗を測定した。曝露条件 A は, 絶乾状態の質量を測定した。また, 試験体の質量を測定し, 式(1)により相対含水率を算出した。ここで, 比抵抗測定後 105°C で炉乾燥し質量が一定となった状態を絶乾状態とし, 密封養生終了時(材齢 56 日)の状態を飽水状態とした。試験体名は, 配合名-曝露条件名(例: C35-B)とする。

表-1 配合表

	配合名	空気量 (%)	W/(C+BS) (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
					水 W	セメント C	スラグ BS	細骨材 S	粗骨材 G1	粗骨材 G2
コンクリート	C35	4.5	35	42.3	165	471	-	704	392	588
	C45		45	45.1	165	367	-	790	392	588
	C55		55	46.2	170	309	-	825	392	588
モルタル	M45	4.5	45	100	269	598	-	1292	0	0
	BS45		45	100	258	299	273	1320	0	0

表-2 化学成分

	化学成分(%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	NaOeq	Cl
OPC	20.09	5.35	2.96	64.22	1.39	2.13	0.3	0.42	0.58	0.27
BFS	32.88	14.06	0.35	42.35	5.99	2.06	0.17	0.24	-	4E-04

*1 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室, 工修(正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 教授 博士(工学)(正会員)

$$W = \left(\frac{m - m_s}{m_o - m_s} \right) \times 100 \quad (1)$$

ここに、

W : 相対含水率 (%), m : 比抵抗測定時の供試体の質量 (g), m_s : 絶乾状態の質量 (g), m_o : 飽水状態の供試体の質量 (g)

2.2 比抵抗測定結果

(1) 比抵抗の経時変化

曝露条件 D (20°C, 99%RH, 密封養生) における比抵抗の経時変化を図-1 に示す。既往の研究^{3), 4)}で確認されているように、コンクリートの水和反応の進行に伴い、組織が緻密になったため、時間が経つに連れて比抵抗が増大していると考えられる。高炉スラグ微粉末を混和した試験体の比抵抗は混和していないものに比べ2倍以上大きく、経時的な増大量も大きくなっている。これは、既往の研究⁸⁾で確認されているように、高炉スラグ微粉末を混和することで細孔量の減少や細孔構造の緻密化がもたらされ、比抵抗の増大に寄与していると考えられる。

(2) 相対含水率が比抵抗に及ぼす影響

曝露条件 B (40°C, 湿度制御なし) および曝露条件 C (20°C, 27%RH) の場合の曝露日数と相対含水率の関係を図-2 に示す。相対含水率は曝露開始直後から急激に減少し、曝露条件 C では曝露 5 日後には W/C が 0.35 の場合 90%, 0.55 の場合 83%程度となる。

相対含水率と比抵抗の関係を図-3 に示す。図-3 a) に示すコンクリート試験体では、W/C が低くなるほど比抵抗が大きいこと、相対含水率の減少に伴い比抵抗が増大することが確認できた。曝露条件 C の場合、曝露して数日で相対含水率は 90%以下になるが、このときの比抵抗は相対含水率 100%時の 2 倍程度となった。また、同じ相対含水率であっても、曝露条件が異なることで比抵抗は大きく異なる。例えば、W/C が 0.35, 相対含水率 70%程度の場合、曝露条件 B では比抵抗が 40000 Ω・cm 程度であるのに対し、曝露条件 C では比抵抗が 80000 Ω・cm 程度となっている。これらは、曝露条件 B での曝露日数が 20 日であるのに対し、曝露条件 C での曝露日数が 150 日と大幅に長いことからその間にコンクリートの水和反応の進行し、組織が緻密になったためと考えられる。また、曝露条件 B は曝露条件 C に比べて急激に乾燥させたことから、断面内の相対含水率分布が一様でなく、内部の相対含水率が高かったため比抵抗が小さくなったと考えられる。試験体表面が乾燥している場合には、比抵抗の測定は表面で電位差を計測する四電極法よりも二電極法の方が測定誤差が小さい可能性がある。図-3 b) に示すモルタル試験体では相対含水率が 70%~100%

の範囲において、同じ W/(C+BS) に対して高炉スラグ微粉末を混和することで比抵抗は格段に大きくなることが確認された。

今後の課題として、W/C や結合材の種類による細孔構造の粗密の違いやコンクリートの含水状態と比抵抗との関係をモデル化することが挙げられる。

表-3 曝露条件

曝露条件名	曝露条件
A	105°C, 湿度制御なし
B	40°C, 湿度制御なし ^{*1}
C	20°C, 27%RH
D	20°C, 99%RHの環境で密封養生

*1: 実測値平均20%RH

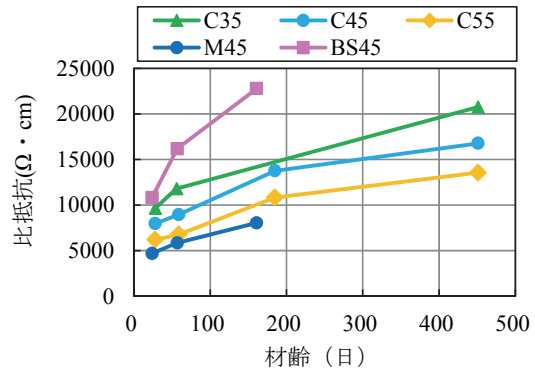
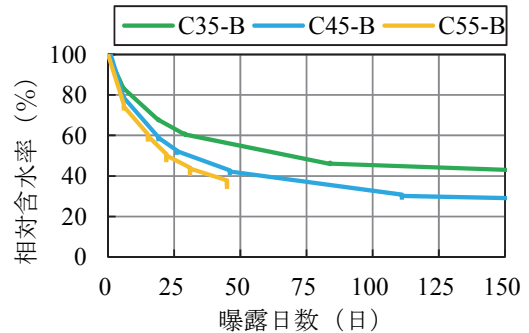
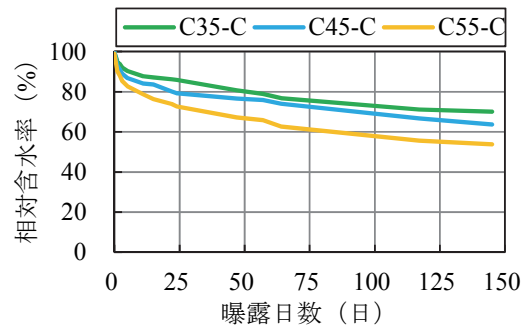


図-1 比抵抗の経時変化 (曝露条件: D)



a) 曝露条件 B (40°C, 湿度制御なし)



b) 曝露条件 C (20°C, 20%RH)

図-2 曝露日数と相対含水率の関係

3. 進展期の腐食速度

進展期の腐食速度は、鋼材腐食解析手法⁹⁾を用いて検討した。本手法は、マクロセル腐食を模擬した塩水による乾湿繰返し実験により、その妥当性を検証している⁹⁾。

3.1 ミクロセル腐食

ミクロセル腐食のモデルを図-4に示す。ミクロセル腐食のモデルの係数などの値は参考文献⁹⁾を用いた。

ミクロセル腐食電流密度は、内部カソード分極曲線と内部アノード分極曲線の交点 (i_{micro}, E_{micro}) で決まる。ミクロセル腐食電流密度は、コンクリート中における溶存酸素による限界電流密度 $i_L^{O_2}$ を超えない。

3.2 マクロセル腐食

面積の等しい2点 (M: カソードとなる点, N: アノードとなる点) 間のマクロセル腐食のモデルを図-5に示す。マクロセル腐食のモデルの係数などの値は参考文献⁹⁾を用いた。マクロセル腐食回路が形成されるときに電流密度 $i_{g,M-N}$ は、要素Mの外部カソード分極曲線 ($i_{app,c,M}, E_c$) と要素Nの外部アノード分極曲線 ($i_{app,a,N}, E_a$) 間の電位差が、式(2)で示される要素M, N間のコンクリートによる抵抗 ($L_{M-N} \cdot \rho_{con}$) による自然電位差 ΔE_{M-N} となる電流密度である。要素Nの腐食電流密度は、 $i_{macro,N}$ となり、マクロセル腐食電流密度だけ $i_{macro,M-N}$ ($= i_{macro,N} - i_{micro,N}$) 増加する。マクロセル腐食電流密度はコンクリートの比抵抗およびM-N間の距離により変化し、その値が

小さくなるとともに、N点は内部アノード分極曲線 (A_N) 上を分極し、マクロセル腐食電流密度は大きくなる。

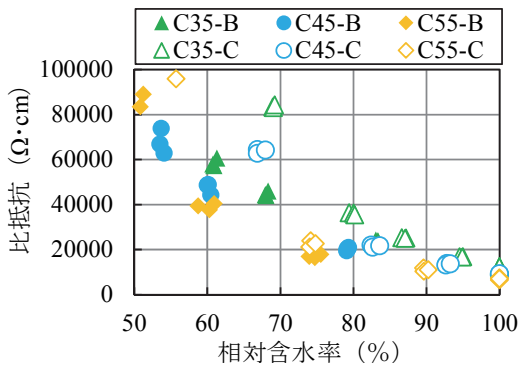
$$\Delta E_{M-N} = E_{macro,M} - E_{macro,N} = (L_{M-N} \cdot \rho_{con}) \cdot i_{g,M-N} \quad (2)$$

ここに、

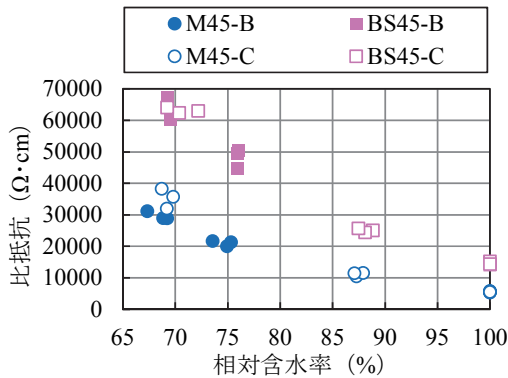
L_{M-N} : 要素M-N間の距離 (cm), ρ_{con} : コンクリートの見かけの比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$), $i_{g,M-N}$: マクロセル腐食回路形成時の要素M-N間の電流密度 (A/cm^2)

3.3 RC部材中における鋼材腐食のモデル化

RC部材中の鉄筋を複数の分割要素によりモデル化した。1つのカソード要素 (M) に対して n 個のアノード要素 ($N_i, i=1 \sim n$) がある状態において、その中のある1つのアノード要素 (N_i) のマクロセル腐食電流密度 $i_{cor,M-N_i}$ を式(3)で表す。式(3)中の分配率 β_{M-N_i} は、カソード要素とアノード要素群の面積比と、同一面積条件下での算定される一対のカソード要素とアノード要素間におけるマクロセル腐食電流密度 $i_{macro,M-N_i}$ の関数とした式(4)で表した。RC部材中の鋼材の要素Kにおける全腐食電



a) コンクリート試験体



b) モルタル試験体

図-3 相対含水率と比抵抗の関係

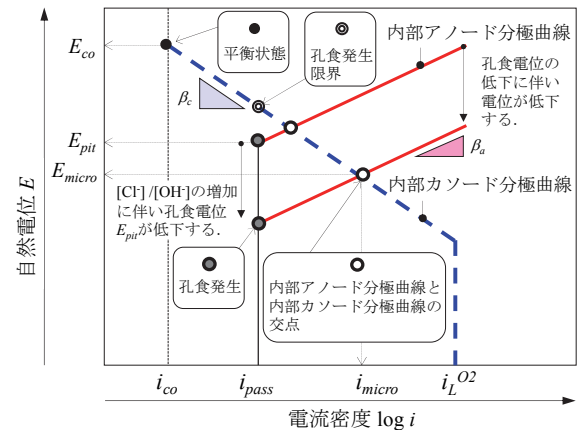


図-4 ミクロセル腐食モデル⁹⁾

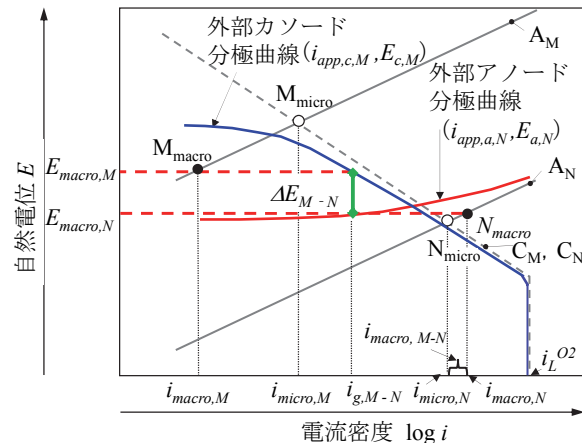


図-5 マクロセル腐食モデル⁹⁾

流密度は、要素 K のマイクロセル腐食電流密度 $i_{micro,K}$ に、要素 K がアノード要素となる場合の要素 K 以外の全ての要素との間のマクロセル腐食電流密度を加え、着目要素 K がカソード要素となる場合の要素 K 以外の全ての要素との間のマクロセル腐食電流密度を引いたものとし、式(5)で表される⁹⁾。

$$i_{cor,M-N_i} = \beta_{M-N_i} \cdot i_{macro,M-N_i} \quad (3)$$

$$\beta_{M-N_i} = \frac{S_{N_i} \cdot i_{macro,M-N_i}}{\sum_{j=1}^n S_{N_j} \cdot i_{macro,M-N_j}} \cdot \frac{S_M}{S_{N_i}} = \frac{S_M \cdot i_{macro,M-N_i}}{\sum_{j=1}^n S_{N_j} \cdot i_{macro,M-N_j}} \quad (4)$$

$$i_{cor,K} = i_{micro,K} + \sum_{j=1}^n i_{cor,M_j-K} - \sum_{j=1}^n i_{cor,K-N_j} \quad (i_{cor,K} \geq 0) \quad (5)$$

ここに、

$i_{cor,M-N_i}$: RC 部材中の鋼材の要素 M-N_i 間のマクロセル腐食電流密度 (A/cm²)、 β_{M-N_i} : 要素 M-N_i 間のマクロセル腐食電流密度の分配率、 S_M : 要素 M (カソード部) の表面積 (cm²)、 S_{N_i} : 要素 N_i (アノード部) の表面積 (cm²)、 $i_{cor,K}$: 要素 K の全腐食電流密度 (A/cm²)

4. 腐食ひび割れ発生を限界状態とした試算

コンクリートの比抵抗を考慮した鋼材腐食解析手法を用いて、進展期末を限界状態とした場合を算出し、W/C、コンクリートの含水状態および高炉スラグ微粉末の混和が腐食速度に与える影響を検討した。

4.1 計算条件

解析モデルを図-6 に、計算条件を表-4 に、解析ケースを表-5 に示す。解析モデルは 1/4 モデルとし、試験体長さは腐食ひび割れ判定箇所の腐食量に影響しない

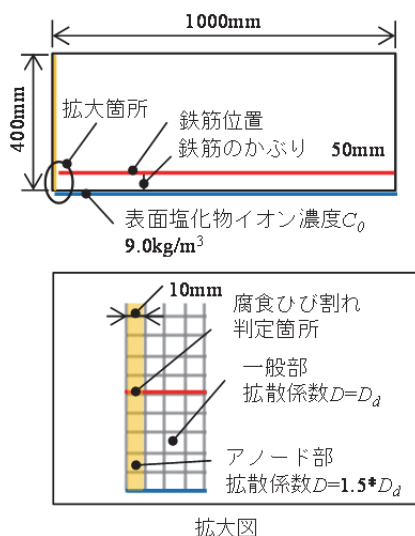


図-6 解析モデル概略図

程度十分に長くし 1000mm とした。試験体高さはかぶり位置の塩化物イオン濃度に影響しない程度の高さとし 400mm とした。

鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} は式(6)とし、コンクリートの拡散係数 D_d は式(7)とした¹⁾。アノード部の拡散係数を一般部の 1.5 倍とすることで塩化物イオン濃度差によってマクロセル腐食回路が形成するように設定した。鉄筋径は 16mm、かぶりは 50mm、表面塩化物イオン濃度は 9.0kg/m³ とした。なお、塩化物イオンの拡散解析は Fick の法則に基づく非定常有限要素解析による。腐食ひび割れ発生限界腐食量は、式(8)で示す簡易式⁶⁾とした。

$$C_{lim} = -3.0(W/C) + 3.4 \quad (6)$$

$$\log_{10} D_d = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (7)$$

$$m_{cr} = 10 \cdot \frac{C}{D} \quad (8)$$

ここに、

m_{cr} : 腐食ひび割れ発生限界腐食量 (mg/cm²)、C : かぶり (cm)、D : 鉄筋径 (cm)

比抵抗は、2 章の測定結果を参照して、相対含水率が 100% のときを Wet、相対含水率が 90% のときを Cycle、相対含水率が 50% 以上のときを Dry とした。Cycle の条件は、試験体を 20℃、20%RH で曝露した場合、曝露 5 日程度で相対含水率が 90% 以下となることから乾湿繰返し環境を仮に想定して決定した。今後の課題として、実際の RC 構造物では曝露環境や部材寸法などの条件が異なるため、条件に応じたコンクリートの含水状態やコンクリートの細孔構造から比抵抗を算出する必要がある。Dry の条件も実際には、相対含水率が等しいときの比抵抗は W/C により異なるが、同じ比抵抗の値の場合の腐食速度への影響の度合いを確認する目的で、W/C によらず一定値とした。

表-4 計算条件

鉄筋径	16mm
かぶり	50mm
表面塩化物イオン濃度	9.0kg/m ³
腐食ひび割れ発生限界腐食量	簡易式 (式(8))

表-5 ケース名

	ケース名	W/C		
		0.35	0.45	0.55
比抵抗 (Ω・cm)	Wet	12000	8000	6000
	Cycle	24000	16000	12000
	Dry	50000	50000	50000

4.2 計算結果と考察

W/C=0.45, 比抵抗 8000 Ω・cm の解析条件での鉄筋位置における塩化物イオン濃度分布を図-7 に示す。アノード部の拡散係数を一般部より大きくしているため、アノード部付近の塩化物イオン濃度が他の箇所よりわずかに高くなり、アノード部の腐食開始時期は一般部より若干早くなっている。

比抵抗をパラメータとし、W/C が 0.45, 24 年経過時の腐食速度の分布を図-8 に、図-6 に示す腐食ひび割れ判定箇所の腐食速度の経時変化を図-9 に示す。24 年経過時のカソードの範囲を図-8 中に示す。マイクロセル腐食の腐食速度よりも小さい範囲がマクロセル腐食におけるカソード範囲となる。比抵抗が大きいくほどカソード範囲が狭くなり、Dry のケースでは、明確なカソード範囲は見られずマイクロセル腐食卓越となった。腐食開始初期の腐食速度は、比抵抗が小さいほど急激に大きくなるが、これはカソード範囲が広いためである。また、比抵抗が小さい場合、腐食開始初期に腐食速度が大きくなりその後小さくなる。腐食開始初期には、一般部の塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度に達していないため、一般部がカソード部となりアノード部に対するカソード部の面積比が大きくなるためである。海洋環境下の曝露実験では、時間が経過するとひび割れ部のマクロセル腐食の腐食速度が低減する¹⁰⁾が、その理由のひとつは鋼材周りの塩化物イオン濃度によりカソード部に対するアノード部の面積比が大きくなるためであると考えられている¹⁰⁾。マイクロセル腐食卓越と考えられる Dry の場合の腐食速度の経時増加は、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が時間とともに増大するためである。

図-6 に示す腐食ひび割れ判定箇所の腐食量の経時変化を図-10 に示す。腐食ひび割れ発生時期は、腐食量が式(8)で計算した腐食ひび割れ発生腐食量に達した時点とした。Wet, Cycle および Dry のときの腐食ひび割れ発生時期は、34 年, 37 年および 40 年後となる。

W/C と耐用年数の関係を図-11 に示す。図-7 に示したとおり、アノード部の拡散係数が一般部より大きいいため鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高くなり、アノード部の腐食開始時期は一般部より早くなる。特に、W/C が小さく潜伏期の期間が長い場合、一般部とアノード部の潜伏期末までの期間の差が大きい。耐久性照査に対して、拡散係数の適切な設定が今後の課題である。マクロセル腐食を考慮した鋼材腐食解析手法により限界状態を進展期末として評価した結果、かぶり 5cm, 表面塩化物イオン濃度 9kg/m³ の場合、比抵抗の値が大きくなるに従い腐食ひび割れ発生までの期間が長くなる傾向を示した。マクロセル腐食回路が形成されないマイクロセル腐食での進展期末での耐用年数を図-11 に別途示す。アノード部と

一般部の潜伏期末の時期がほぼ同じである W/C0.55 の場合、Dry のケースの進展期末はマイクロセル腐食の進展期末とほぼ同じでありマクロセル腐食回路は形成していないと考えられる。また、本計算では低含水状態によるコンクリートの拡散係数の低下を考慮していないため、実際の耐用年数は本計算結果よりもさらに長いと考えられる。

本検討では、高炉スラグ微粉末を混和したケースの解析結果は示してはいない。しかし、高炉スラグ微粉末の

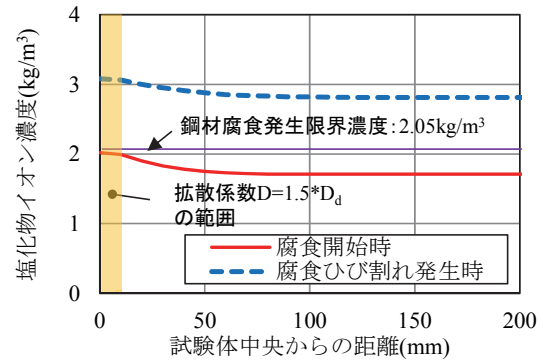


図-7 塩化物イオン濃度分布

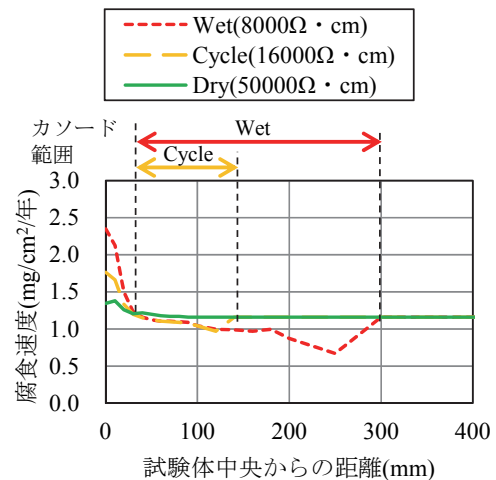


図-8 腐食速度の分布 (W/C=0.45, 24 年)

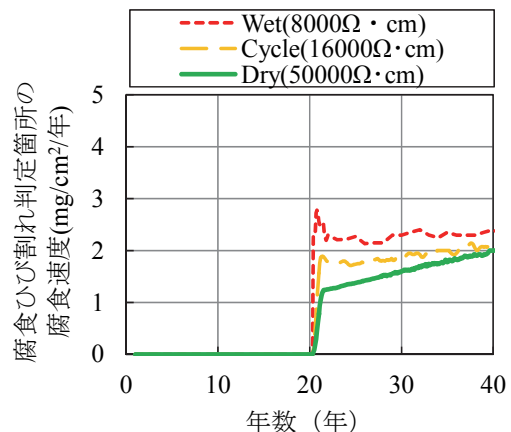


図-9 腐食速度の経時変化 (W/C=0.45)

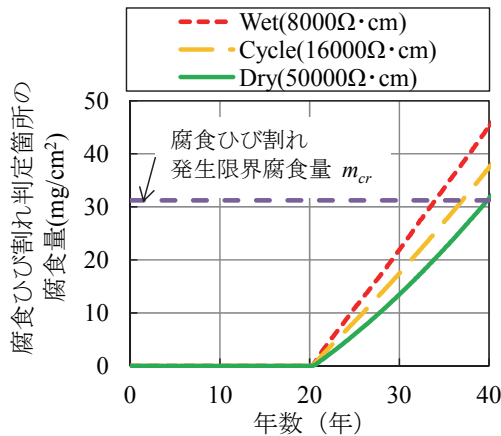


図-10 腐食量の経時変化 (W/C=0.45)

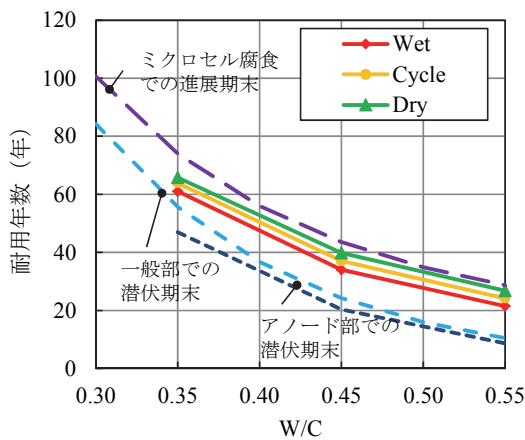


図-11 W/C と耐用年数の関係

混和により比抵抗が増大することから、同じ $W/(C+BS)$ での配合の場合、腐食ひび割れ発生までの期間が長くなると予測される。

また、本検討では材齢とともにコンクリートが緻密化することで比抵抗が増大することを考慮していない。今後の課題として、コンクリートの細孔構造の粗密の違いやコンクリートの含水状態を考慮した比抵抗をモデル化した鋼材腐食解析手法を構築し、W/C、結合材の種類やコンクリートの含水状態による腐食速度を定量的に計算することが挙げられる。

5. まとめ

W/C、結合材の種類およびコンクリートの含水状態がコンクリートの比抵抗に及ぼす影響を四電極法による測定によって検討し、コンクリートの比抵抗を考慮した鋼材腐食解析手法により、W/C、結合材の種類およびコンクリートの含水状態といった条件を考慮して、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食の照査について、進展期末を限界状態とした検討を実施した。

本論で得られた知見を以下に示す。

(1) 四電極法による測定により、W/C が小さいほど、相

対含水率が低いほどおよび高炉スラグ微粉末の混和により比抵抗が大きくなることが確認された。

- (2) コンクリートの比抵抗を考慮した鋼材腐食解析手法を塩害に対する耐久性設計に用いることで、W/C、結合材の種類およびコンクリートの含水状態といった条件を考慮し、進展期末を限界状態とした耐用年数の算出が可能となる。
- (3) 今後の課題として、W/C や結合材の種類による細孔構造の粗密の違いやコンクリートの含水状態と比抵抗との関係をモデル化し鋼材腐食解析手法に組み込むことが挙げられる。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2013.3.
- 2) 渡辺博志，木村嘉富，古賀裕久，中村英佑：塩害環境下にあるコンクリート中鉄筋のマクロセル腐食形成機構，土木研究所資料，第4131号，pp.1-38，2009.1.
- 3) 関博，宮田克二，北峯博司，金子雄一：比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実験の一考察，土木学会論文集，No.451，V-17，pp.49-57，1992.8.
- 4) 鹿島孝之，河野広隆，渡辺博志，田中良樹：コンクリートの電気抵抗による耐久性評価の基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.895-900，1999.
- 5) 土木学会：コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会（338委員会）成果報告書，コンクリート技術シリーズ86，2009.10.
- 6) 土木学会：コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会（338委員会）成果報告書（その2）およびシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ99，2012.10.
- 7) コンクリート委員会 規準関連小委員会：四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法（案）（JSCE-K 562-2008），土木学会論文集 E，Vol.64，No.3，pp.427-434，2008.7.
- 8) 中村士郎，小林孝一，服部篤史，宮川豊章：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート中の鉄筋腐食に関する電気化学的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.305-310，1998.
- 9) 鈴木三馨，福浦尚之，丸屋剛：塩害による腐食劣化予測に対する構造・鋼材腐食連成解析手法の構築，土木学会論文集 E2，vol.70，No.3，pp.301~319，2014.7.
- 10) 山路徹，審良善和，濱田秀則：海洋環境下におけるコンクリートひび割れ部での腐食挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.857-862，2011.7.