

モルタルの欠陥部に生じる 塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度

宮里心一¹・大即信明²・木村勇人³・水流徹⁴

¹正会員 博(工) 金沢工業大学講師 工学部土木工学科 (〒921-8501 石川郡野々市町扇が丘 7-1)

²正会員 工博 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)

³正会員 修(工) 五洋建設株式会社 東北支店 (〒980-8605 仙台市青葉区二日町 16-20)

⁴工博 東京工業大学教授 工学部金属工学科 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)

本研究の目的は、モルタルの欠陥部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態(マクロセル, ミクロセル)と速度を網羅的に明らかにすることである。このため、1)Cl⁻・CO₂の供給位置、2)水分・酸素の供給条件、3)W/Cをパラメータとし、コールドジョイント部やひび割れ部を模擬したモデル欠陥部に生じる腐食の形態と速度を網羅的に整理した。その結果、欠陥が存在する場合、①塩害による腐食では、W/Cが低いほどマクロセルが卓越し、W/Cが高いほどミクロセルが卓越し、低W/Cにおいても腐食速度が速い場合があること、②中性化による腐食では、W/Cに拘わらずマクロセルが卓越し、W/Cが高いほど腐食速度は速いこと、③塩害は中性化より腐食速度を促進させること、が明らかとなった。

Key words: chloride-induced corrosion, carbonation-induced corrosion, cold joint, cracks, macro-cell

1. 序論

(1) 背景

コンクリート内部の鉄筋は高アルカリ環境下にあるため、鉄筋表面には不動態皮膜が形成され、腐食から保護されている。しかしながら、塩化物イオンの浸透による塩害、二酸化炭素の浸透による中性化が発生した場合、コンクリート中鉄筋の腐食が誘発される。特に、コールドジョイントやひび割れ等の欠陥部では、腐食要因物質の塩化物イオンや二酸化炭素、水分や酸素が局所的に多量に侵入する。これに伴い、早期に腐食が発生し、さらに増進することになる。また、その腐食性状は欠陥の種類や外部環境、コンクリートの水セメント比によって変化すると考えられる。したがって、欠陥を有する鉄筋コンクリート部材に生じる塩害による腐食と中性化による腐食が、どのような腐食形態(マクロセル, ミクロセル)で、かつどれだけの腐食速度であるかを詳細に検討し整理する必要がある。

これまで、ひび割れを有する鉄筋コンクリート部材において、塩化物イオンが腐食に及ぼす影響についての検討はなされてきた^{例えは1),2)}。さらに著者らは、欠陥部に生じる塩害による腐食を網羅的に整理した³⁾。また、欠陥を考慮しない塩害と中性化による腐食を検討した例もある⁴⁾。しかしながら、欠陥部に生じる塩害あるいは中性化による腐食をと

考慮し、欠陥の種類・外部環境・コンクリートの水セメント比が腐食形態と腐食速度に及ぼす影響を同一の試験条件でかつ網羅的に検討し比較した研究は、著者らの知る限りない。

(2) 目的

以上の背景から、コールドジョイント部あるいはひび割れ部等の欠陥部に生じる塩害あるいは中性化に伴う腐食の形態と速度に関して、網羅的な検討・比較を行うことを目的とする。なお、本研究では、供試体が多量となるため、試験の容易なモルタルを用いた。

2. 実験概要

(1) 使用材料

セメント、細骨材、混和剤および鉄筋の主な性質を、表-1に示す。細骨材は千葉県小櫃産である。

(2) 供試体作製方法

供試体概要を図-1に示す。鉄筋内部を流れる電流を測定するため9つの要素に分割した鉄筋を用いた。鉄筋を5mm, 10mm, 20mm, 30mmに切断し、紙やすりで黒皮を剥いだ。このうち5mm, 10mm, 30mmの鉄筋要素には両端部、20mmの鉄筋要素には一方の端部に

表-1 使用材料

	種類	主な性質
セメント	普通ポルトランドセメント	密度=3.15g/cm ³ 比表面積=3.27m ² /kg
細骨材	陸砂	密度=2.60 g/cm ³ F.M.=2.59 吸水率=2.20%
混和剤	高性能 AE 減水剤	ナフタレン系
	増粘剤	メチルセルロース系
鉄筋	丸鋼 (SR235)	Fe 含有率=99.21%

表-2 モルタルの配合とフレッシュ性状

w/c	S/C	混和剤(C×wt%)		スランパ [®] 70-	ブリーディング [®] 率(%)
		A	B		
0.3	2.5	2.0	—	170	0.1
0.5	2.5	—	—	200	0.3
0.7	2.5	—	1.2	260	0.4

注) A: 高性能 AE 減水剤, B: 増粘剤

表-3 実験ケース

No	Cl ⁻ の供給位置	H ₂ O, O ₂ の供給条件	w/c	No	CO ₂ の供給位置	H ₂ O, O ₂ の供給条件	w/c
1	欠陥	湿潤	0.3	28	欠陥	湿潤	0.3
2			0.5	29			0.5
3			0.7	30			0.7
4		乾湿繰返し	0.3	31		乾湿繰返し	0.3
5			0.5	32			0.5
6			0.7	33			0.7
7		乾燥	0.3	34		乾燥	0.3
8			0.5	35			0.5
9			0.7	36			0.7
10	欠陥と近傍	湿潤	0.3	37	欠陥と近傍	湿潤	0.3
11			0.5	38			0.5
12			0.7	39			0.7
13		乾湿繰返し	0.3	40		乾湿繰返し	0.3
14			0.5	41			0.5
15			0.7	42			0.7
16		乾燥	0.3	43		乾燥	0.3
17			0.5	44			0.5
18			0.7	45			0.7
19	全体	湿潤	0.3	46	全体	湿潤	0.3
20			0.5	47			0.5
21			0.7	48			0.7
22		乾湿繰返し	0.3	49		乾湿繰返し	0.3
23			0.5	50			0.5
24			0.7	51			0.7
25		乾燥	0.3	52		乾燥	0.3
26			0.5	53			0.5
27			0.7	54			0.7

注)H₂O と O₂ の供給条件に関して、湿潤は H₂O が多く O₂ が少ないことを意味し、乾燥は H₂O が少なく O₂ が多いことを意味し、乾湿繰返しは H₂O および O₂ ともに多いことを意味する。

リード線をはんだ付けした。その後、中央に 5mm の鉄筋要素を 3 本配置し、その両端に 10mm、その両端に 30mm、最端部に 20mm の鉄筋要素が連結するように、各鉄筋要素間をエポキシ系樹脂で絶縁接続した。その後、隣接するリード線を接続して電氣的に一本の鉄筋とみなせるようにした。なお、欠陥に近い位置の腐食速度を詳細に検討するために、9つの鉄筋

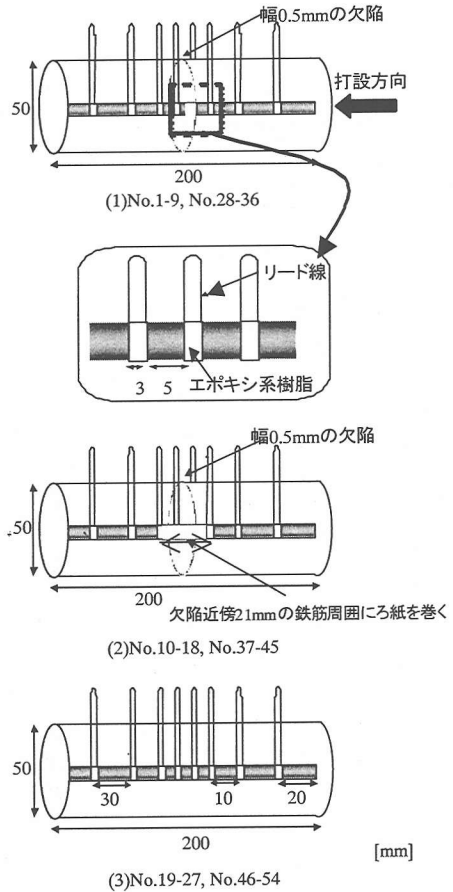


図-1 モルタル供試体概要図

要素のうち中央の鉄筋要素を特に細かく分割した。

打設方法を次に示す。前処理された鉄筋を型枠中央に配置した。供試体中心に欠陥を生じさせるため、モルタルは 2 層に分けて打設した。はじめに、直径 50mm、高さ 200mm の型枠半分まで打設した。24 時間後表面のレイタンスを十分に除去し、2 層目を打設した。また、打設の際に No. 1~9 供試体(供試体番号は、後述する表-3 を参照)および No. 28~36 供試体においては、打継面に厚さが 0.5mm のろ紙を挟んだ。これは、コールドジョイントや乾燥収縮ひび割れ等を模擬したものである。No. 10~18 供試体および No. 37~45 供試体においては、打継面および打継目を中心に 21mm の範囲の鉄筋周囲にろ紙を巻いた。ここで鉄筋周囲のろ紙は、曲げひび割れ近傍の鉄筋とコンクリートの剥離を模擬したものである。

モルタルの配合を表-2 に示す。砂セメント比は 2.5 とした。また、材料分離を防止するため、水セメント比が 0.3 のモルタルには、高性能 AE 減水剤をセメントに対して 2.0wt% 添加した。一方、水セメ

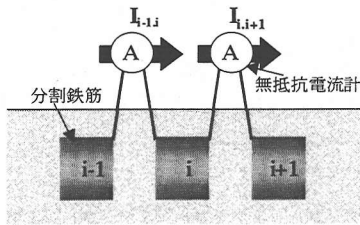


図-2 マクロセル電流の測定概要

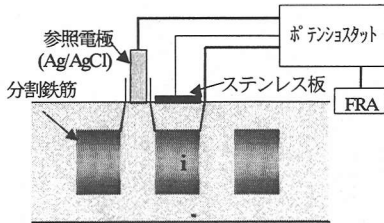


図-3 分極抵抗の測定概要

ント比が0.7のモルタルには、増粘剤をセメントに対して1.2wt%添加した。

(3) 実験ケース

実験ケースを表-3に示す。

塩害による腐食 (No. 1~27) について、水セメント比は0.3, 0.5, 0.7の3水準とした。塩化物イオンの鉄筋表面への供給位置を欠陥、欠陥と近傍、全体の3水準とした。水分・酸素の供給条件は、一般の外部環境を考慮し、水分が多く酸素が少ない湿潤環境、水分および酸素がともに多い乾湿繰返し環境、水分が少なく酸素が多い乾燥環境の3水準とした。湿潤環境は湿度90%室温20℃とし、乾燥環境は湿度50%室温20℃とした。また乾湿繰返し環境は、24時間の湿潤状態と、60時間の乾燥状態が繰り返される環境とした。そしてそれぞれを組み合わせた27水準について、各2本の供試体を作製した。

中性化による腐食 (No. 28~54) について、水セメント比、水分・酸素の供給条件は塩害による腐食の場合と同様である。また、二酸化炭素の供給は、中性化促進環境下 (二酸化炭素濃度10%, 温度40℃, 湿度70%) にて暴露することにより行った。その供給位置は欠陥、欠陥と近傍、全体の3水準とした。それぞれを組み合わせた27水準について、各2本の供試体を作製した。

(4) 暴露方法

脱型後全ての供試体は湿潤環境中にて4週間の初期養生を行った。その後、塩害による腐食を評価するケース (No. 1~27) については、本試験暴露を開始

した。ここで本試験暴露とは、表-3に示す水分および酸素の供給を行うために実施した湿潤環境、乾湿繰返し環境、乾燥環境への暴露のことである。その際、欠陥またはその近傍へ塩化物イオンを供給するケース (No. 1~18) に対しては、3.5wt%のNaCl水溶液6mlを3.5日に1回欠陥より注入した。また、全体へ塩化物イオンを供給するケース (No. 19~27) に対しては、予め練混ぜ水にNaClを含有して供試体を作製した。なお、その含有量はモルタルに対して15.0kg/m³の塩化物イオンが含まれる量とした。一方、中性化による腐食を評価するケース (No. 28~54) については、初期養生後中性化促進環境下に暴露した。その際、表-3に示す各二酸化炭素の供給位置において、鉄筋近傍のモルタルが中性化したことを確認した後、本試験暴露を開始した。なお、全ての供試体において本試験暴露期間は56日間である。

(5) 腐食電流密度の定義および測定方法

本研究では、鉄筋要素間を流れる腐食電流をマクロセル電流、鉄筋要素内のみを流れる腐食電流をマイクロセル電流と定義した。

はじめに、マクロセル電流密度の測定方法を示す。測定は図-2に示す方法で行った。隣接する鉄筋要素間に無抵抗電流計を接続し電流 (マクロセル電流) を求めた。次に、対象とする鉄筋要素の両端から出入する電流を合計した。この電流を鉄筋要素の表面積で除することにより、鉄筋要素表面でのマクロセル電流密度を算定した。鉄筋要素*i*のマクロセル電流密度 I_{macro} は次式で表わせる。

$$I_{macro} = \frac{I_{i-1,i} - I_{i,i+1}}{S_i} \quad (1)$$

ここで、 I_{macro} は鉄筋要素*i*のマクロセル電流密度 (A/cm²)、 $I_{j,k}$ は鉄筋要素*j*から鉄筋要素*k*へ流れる電流 (A)、 S_i は鉄筋要素*i*の表面積 (cm²) を示す。

そして、対象とする鉄筋要素がアノードの場合、電流密度は正として表わした。一方、対象とする鉄筋要素がカソードの場合、電流密度は負として表わした。なお、腐食電流密度が100μA/cm²は、腐食速度が1.2mm/年に相当する。

次に、マイクロセル電流密度の測定方法を示す。鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断した。この時、異なる鉄筋要素間では電流の出入がない。この状態で、各鉄筋要素毎に鉄筋表面の分極抵抗を FRA (Frequency Response Analyzer) を用いた交流インピ

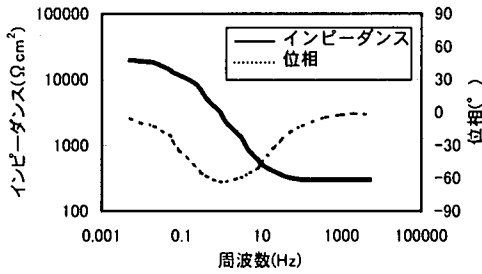


図-4 ポード線図の測定例

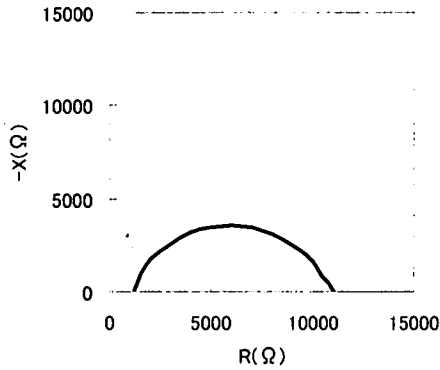


図-5 コールコールプロットの測定例

ーダンス法により求めた。測定概要を図-3 に示す。測定は、5000Hz から 0.005Hz の範囲において、振幅 50mV の電圧を与えることにより行った。また、分極抵抗は、ポード線図およびコールコールプロットを用いて算定した。測定結果の一例を図-4 および図-5 に示す。マイクロセル電流密度 I_{micro} は文献 6) を参考にして次式により算定した。

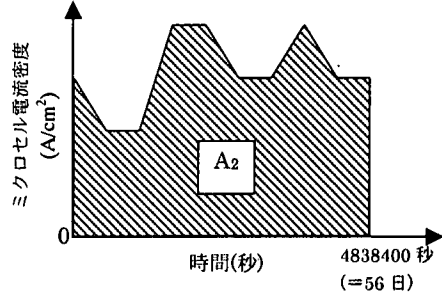
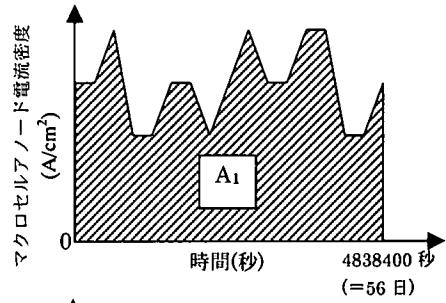
$$I_{micro} = \frac{K}{R_{Pi}} \quad (2)$$

ここで、 I_{micro} は鉄筋要素 i におけるマイクロセル電流密度 (A/cm^2)、 R_{Pi} は鉄筋要素 i における分極抵抗 ($\Omega \cdot cm^2$)、 K は定数 (文献 6) を参考にし、0.0209 (V) を示す。

3. 腐食形態および腐食速度の評価法

(1) 総腐食電気量密度の定義

56 日間の本試験暴露期間中に流れたマクロセル電流密度とマイクロセル電流密度を時間積分し、マク



総腐食電気量密度 (C/cm^2) = $A_1 + A_2$

$$A_1 = \int_0^{4838400} \text{マクロセルアノード電流密度 (A/cm}^2\text{) dt}$$

$$A_2 = \int_0^{4838400} \text{マイクロセル電流密度 (A/cm}^2\text{) dt}$$

ここで、 A_1 はマクロセル電気量密度、 A_2 はマイクロセル電気量密度を示す。

図-6 腐食電気量密度の定義

ロセル電気量密度とマイクロセル電気量密度を求めた。さらに、それぞれを合計し総腐食電気量密度を算定した。すなわち、総腐食電気量密度とは、図-6 に示す面積の和である。

(2) 腐食形態の評価

腐食形態に関する評価では①腐食位置の判定②マクロセル卓越型腐食とマイクロセル卓越型腐食の区別を行った。判定基準は①に関しては内部鉄筋の観察(電流密度測定が終了した供試体を割裂し、内部鉄筋の腐食状態を観察)、および測定された総腐食電気量密度が相対的に大きい場所を限定し、アノード部と判定した。②に関しては、マクロセル電気量密度とマイクロセル電気量密度の最大値を比較し、腐食形態を判定した。ここでは明らかに両者に差がみられる場合を卓越型として基準を設けた。すなわち、「 $2/3(0.67) \geq (\text{マクロセル電気量密度}/\text{マイクロセル電気量密度})$ 」の時をマイクロセル卓越型腐食とした。一方、「 $3/2(1.50) \leq (\text{マクロセル電気量密度}/\text{マイクロセル電気量密度})$ 」の時をマクロセル卓越型腐食とした。また、「 $2/3 < (\text{マクロセル電気量密度}/\text{マイクロセル電気$

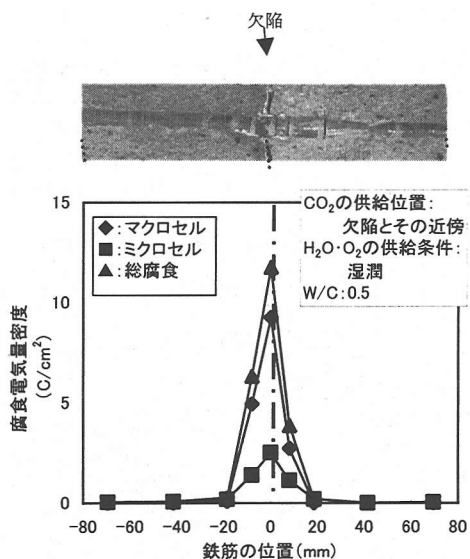


図-7 腐食電流量密度の測定例と鉄筋腐食の観察例

量密度) $\times 3/2$ 」の時をマクロセル・マイクロセル併存型腐食とした。

(3) 腐食速度の評価

腐食速度に関する評価は、最大総腐食電流量密度の値により判定した。本研究では、56 日間の総腐食電流量密度の最大値が $20\text{C}/\text{cm}^2$ ($0.05\text{mm}/\text{年}$ に相当) よりも小さい場合を腐食速度が遅い、 $50\text{C}/\text{cm}^2$ ($0.12\text{mm}/\text{年}$ に相当) よりも大きい場合を腐食速度が速いと判定した。

(4) 腐食形態と腐食速度の測定例

図-7 に測定例を示す。これは、二酸化炭素が欠陥と近傍に供給され、外部環境は湿潤、水セメント比は 0.5 の場合における鉄筋の腐食状態と腐食電流量密度分布である。

鉄筋の観察結果によれば、欠陥およびその近傍において錆びていることが認められる。また、総腐食電流量密度は欠陥とその近傍で大きいことが認められる。(マクロセル電流量密度/マイクロセル電流量密度)は 3.7 である。以上のことから、欠陥とその近傍がアノードとなるマクロセル卓越型腐食が進行していると判断できる。

また、最大総腐食電流量密度は $11.79\text{C}/\text{cm}^2$ である。したがって、腐食速度は遅いと判断できる。

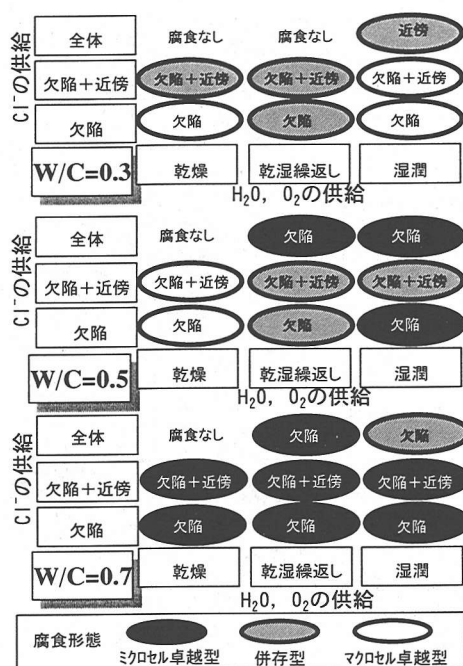


図-8 塩害による腐食の形態

4. 塩害による腐食の形態および速度の整理

(1) 腐食形態

図-8 に塩害による腐食の形態をまとめる。上段・中段・下段はそれぞれ水セメント比が 0.3・0.5・0.7 の結果である。各段の横軸は、外部環境すなわち水分および酸素の供給条件を示す。縦軸は、塩化物イオンの供給位置を示す。また、楕円内はアノード位置を示す。塗りつぶしはマイクロセル卓越型腐食、斜線付きはマクロセル・マイクロセル併存型腐食、白抜きはマクロセル卓越型腐食を示す。

これによると腐食位置に関して、塩化物イオンが欠陥またはその近傍に浸透した場合はその浸透箇所が腐食し、全体に浸透した場合はアノード部の定まった傾向は見られないことが認められる。これは、塩化物イオンが欠陥またはその近傍に浸透した場合、その部分での不動態皮膜の破壊が促進され、局所的にアノードになるためと考えられる。一方、塩化物イオンが全体に供給された場合は、鉄筋全体の不動態が破壊される可能性はある。ただし、酸素と水分の供給条件によってアノードの位置は変化するため、アノード部の定まった傾向は認められなかったと考えられる。

また、水セメント比が 0.3 の時にマクロセル腐食が卓越し、水セメント比の増加に伴い、マイクロセル

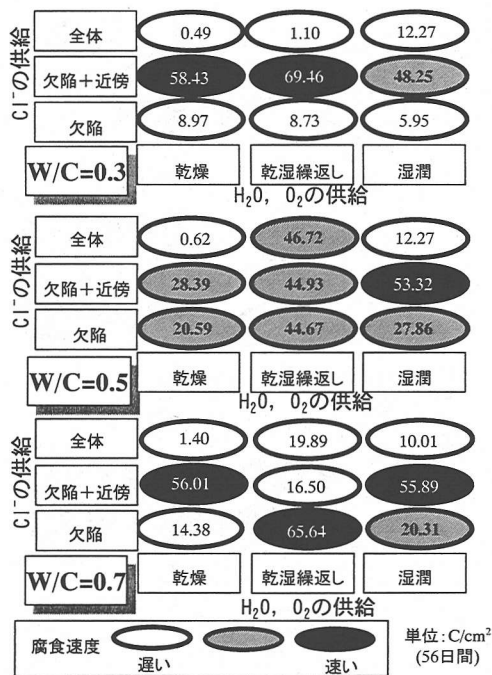


図-9 塩害による腐食の速度

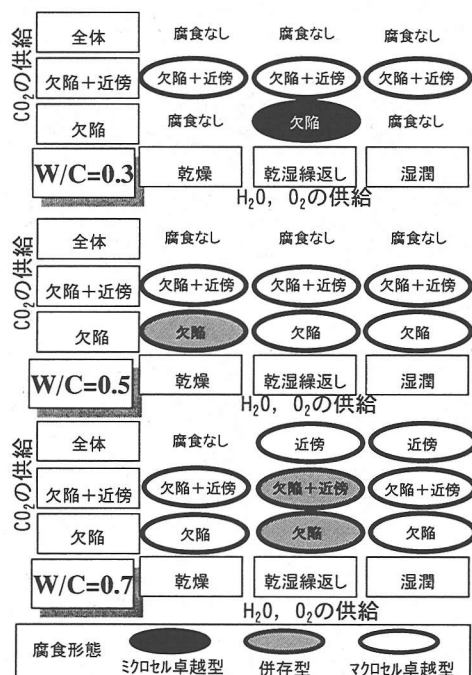


図-10 中性化による腐食の形態

腐食が卓越する傾向が認められる。このことについて考察する。水セメント比が低い時は、モルタル内部における腐食要因となる物質の透過量は少ない。したがって、塩化物イオン、水分、酸素の浸透量は、健全なモルタル中と欠陥箇所と著しく異なる。その結果、両者内部に位置する鉄筋への物質供給量に偏りが生じるため、マクロセルが形成されやすいと考えられる。一方、水セメント比が高い場合は、モルタル中においても物質透過量が多い。すなわち、欠陥箇所とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への物質供給量の偏りが、水セメント比が低い場合と比較して低減する。したがって、マイクロセルが形成されやすいと考えられる。

(2) 腐食速度

図-9に腐食速度の判定結果をまとめる。各段の横軸、縦軸は図-8と同様である。また、楕円内の値は最大総腐食電気量密度を示す。

これによれば、全体的には水セメント比が低いほど腐食速度は遅いことが認められる。しかしながら、塩化物イオンが欠陥とその近傍に浸透した場合は腐食速度が速く、特に水セメント比が0.3の時、マクロセルも形成された腐食の場合において、水セメント比が0.5もしくは0.7の時と比較して、腐食速度が速くなる場合があることが認められる。これは、

水セメント比が低いほど、欠陥とその近傍の限られた範囲内で、腐食要因となる塩化物イオン、酸素、水分が多量に供給され、局所的には腐食速度が速くなるためと考えられる。

(3) まとめ

本章では、塩害による腐食の形態と速度を整理した。得られた結論を以下にまとめる。

- 腐食形態を整理した結果、次のことが明らかとなった。水セメント比が0.3の時にマクロセル卓越型の腐食が発生しやすかった。一方、水セメント比が高くなるに伴いマイクロセル卓越型の腐食が発生しやすくなった。
- 腐食速度を整理した結果、次のことが明らかとなった。マクロセルが形成した場合には、水セメント比が0.3の時に、水セメント比が0.5もしくは0.7の時と比較して、腐食速度が速くなる場合があった。

5. 中性化による腐食の形態および速度の整理

(1) 腐食形態

図-10に中性化による腐食の形態をまとめる。横軸ならびに凡例は図-8と同様である。縦軸は、二酸

表-5 欠陥箇所とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への酸素供給量

腐食要因	(湿潤環境)						
	なし	塩化物イオン		二酸化炭素			
W/C	0.5	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7
欠陥箇所に位置する鉄筋への 単位表面積当りの酸素供給量	4.6	5.9	3.3	2.6	65.6	23.6	6.0
モルタル内部に位置する鉄筋への 単位表面積当りの酸素供給量	3.35	3.24	3.40	7.60	0.09	0.30	0.50
モルタル内部に位置する鉄筋への 単位表面積当りの酸素供給量(10^{-11} mol/cm ² /sec)							

表-4 モルタルの総細孔量

腐食要因	(W/C:0.5, 湿潤環境)		
	なし	塩化物イオン	二酸化炭素
総細孔量 ($\times 10^{-2}$ cc/g)	9.25	9.38	3.25

注)塩化物イオンあるいは二酸化炭素が全体に供給された
φ5×10cmのモルタル供試体を用い測定した。

化炭素の供給位置を示す。

これによると、二酸化炭素が欠陥またはその近傍に浸透した場合には、その浸透箇所が腐食することが認められる。ただし、水セメント比が0.3、欠陥のみに二酸化炭素が浸透した場合には、外部環境が乾燥あるいは湿潤の時に腐食の発生が認められなかった。これは、欠陥箇所に二酸化炭素が浸透した場合、その部分においては不動態皮膜の破壊が促進される。しかしながら、水セメント比が低い場合、モルタル内部における物質透過量は少なく、乾燥環境では水分の供給が、湿潤環境では酸素の供給が不足する。このため、腐食の進行は困難であったと考えられる。

また、二酸化炭素が全体に浸透した場合、水セメント比が0.7の時には、アノード位置に関する定まった傾向は見られないことが認められる。これは、二酸化炭素が全体に浸透した場合には鉄筋全体の不動態が破壊される可能性はある。ただし、酸素と水分の供給条件によってカソード部の位置は変化するため、アノード部の定まった傾向は認められなかったと考えられる。なお、水セメント比が0.3や0.5の場合には、水分、酸素が十分に供給されないため、腐食は進行しなかったといえる。

また、全体的にマクロセル腐食が卓越する傾向が認められる。これは、表-4に示すように、中性化したモルタルではセメントペーストが緻密化され、細孔量が減少する⁷⁾。このため中性化の進行に伴い、欠陥箇所以外(欠陥の影響を受けないモルタル内部)では腐食要因である物質の浸透が困難になる。その結果、欠陥箇所とそれ以外のモルタル部分において、内部鉄筋への酸素供給量の差が大きくなる。表-5に、

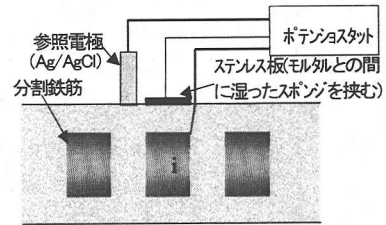


図-11 酸素供給量の測定方法

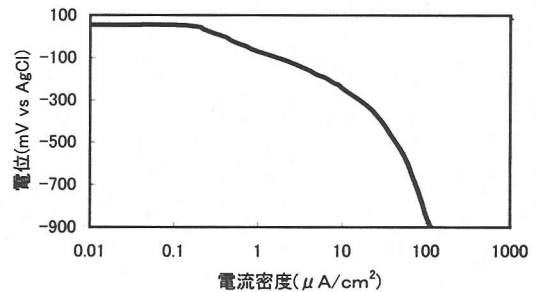


図-12 カソード分極曲線の測定例

二酸化炭素あるいは塩化物イオンが供給された供試体の、欠陥箇所とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への酸素供給量の比を示す。また、モルタル内部に位置する鉄筋への酸素供給量も示す。ここで、図-11を用いて酸素供給量の測定方法を記す。対象とする鉄筋要素とステンレス間にポテンショスタットを接続し、鉄筋を陰極、チタンメッシュを陽極として、860mVの電位差を設けた。この電位差は、文献8)と同様であり、また予め同様の供試体のカソード分極曲線を測定し、限界電流密度となる電位であることを確認した。図-12にカソード分極曲線の測定例を示す。そして、定常状態における電流を測定し、モルタル内部を通過し鉄筋表面でのカソード反応において消費される酸素量を次式から算定した。

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{i_{lim}}{nF} \quad (3)$$

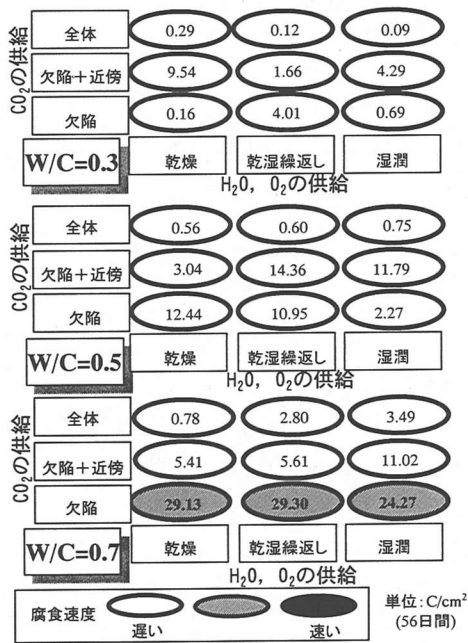


図-13 中性化による腐食の速度

ここで、 dQ/dt は単位時間・単位面積当りの鉄筋への酸素供給量 ($\text{mol}/\text{cm}^2\text{sec}$)、 i_{lim} は限界電流密度 (A/cm^2)、 n はカソード反応において 1mol の酸素分子と反応する電子数 ($=4$)、 F はファラデー定数 ($=96500\text{C}/\text{mol}$) を示す。

以上の測定により求めた値を用い、欠陥箇所とそれ以外のモルタル内部に位置する内部鉄筋への酸素供給量の比を算定した。したがって、この値が大きいほど、欠陥箇所に位置する鉄筋への酸素供給量が、モルタル内部に位置する鉄筋への酸素供給量と比較して、相対的に多量になることを意味する。表-5によると、二酸化炭素が供給された供試体では、塩化物イオンが供給された供試体と比較して、欠陥箇所とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への酸素供給量の比が大きくなることを確認できる。すなわち、二酸化炭素が供給された供試体では、塩化物イオンが供給された供試体と比較して、欠陥箇所とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への腐食要因物質の供給量の偏りが大きくなるため、マクロセルが形成されやすくなったと考えられる。

(2) 腐食速度

図-13 に腐食速度の判定結果をまとめる。横軸および凡例は図-9と同様である。縦軸は、二酸化炭素の供給位置を示す。

これによれば、全体的に水セメント比が低いほど腐食速度が遅いことが認められる。これは、水セメント比が低いほど、モルタル内部の物質透過量が減少するためと考えられる。

(3) まとめ

本章では、中性化による腐食の形態と速度を整理した。得られた結論を以下にまとめる。

1. 腐食形態を整理した結果、いずれの水セメント比においても、マクロセル卓越型の腐食が進行することが明らかとなった。
2. 腐食速度を整理した結果、水セメント比が低いほど腐食速度は遅くなることが確認された。

6. 塩害による腐食と中性化による腐食の比較

(1) 腐食形態

本研究では、腐食形態に関する評価として、①腐食位置の判定②マクロセル卓越型腐食とミクロセル卓越型腐食の区別を行った。腐食位置の判定を行った結果、塩害による腐食および中性化による腐食の何れにおいても、腐食要因物質が欠陥またはその近傍に浸透した場合には、その浸透箇所が腐食することが確認された。一方、マクロセル卓越型腐食とミクロセル卓越型腐食の区別を行った結果、塩害による腐食および中性化による腐食では相違がみられた。すなわち、塩害による腐食では、低水セメント比の時マクロセル腐食が卓越し、高水セメント比の時ミクロセル腐食が卓越する傾向がみられた。一方、中性化による腐食では、水セメント比に拘わらずマクロセル腐食が卓越する傾向がみられた。

ここで、塩害による腐食と中性化による腐食において、腐食セルに関して相違がみられた原因を考察する。これは、前述5.(1)で示した通り、欠陥箇所とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への物質供給量の偏りによるものと考えられる。すなわち、両者への物質供給量の偏りが大きい場合にマクロセルが形成されやすく、一方偏りが小さい場合にミクロセルが形成されやすと考えられる。具体的に検討すると、塩害による腐食では、低水セメント比の場合に欠陥箇所以外のモルタル内部の鉄筋への物質供給量が減少する。一方、高水セメント比の場合には、欠陥箇所以外のモルタル内部に位置する鉄筋への物質供給量が増加する。したがって、欠陥箇所とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への物質供給量の偏りは、水セメント比が低いほど大きく、水セメント比が高いほど小さい。その結果、低水セメント

表-6 モルタル比抵抗

(W/C:0.5, 湿潤環境)

腐食要因	なし	塩化物イオン	二酸化炭素
モルタル比抵抗 (kΩ·cm)	7.0	4.5	40.0

注)塩化物イオンあるいは二酸化炭素が全体に供給されたφ5×10cmのモルタル供試体を用い、交流インピーダンス法により測定した。測定時のモルタル供試体の含水率は約90%であった。

比の時にはマクロセル腐食が卓越し、高水セメント比の時にはマイクロセル腐食が卓越したと考えられる。また、中性化によりモルタルの細孔量は減少する。このため、モルタル内部の鉄筋への物質供給量は減少する。したがって、欠陥箇所とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への物質供給量の偏りは増加する。その結果、中性化による腐食では、マクロセル腐食が卓越したと考えられる。

(2) 腐食速度

図-9 および図-13 をもとに、塩害あるいは中性化による腐食の速度を比較する。その結果、塩害による腐食の速度は、中性化による腐食の速度と比較して、速いことが認められる。

これは、酸素供給量の相違によると考えられる。すなわち、表-5 に示した通り、二酸化炭素が供給された場合は、塩化物イオンが供給された場合と比較して、モルタル中鉄筋への酸素供給量が減少する。このため、カソード反応が抑制され、腐食速度は減少すると考えられる。

また、モルタル比抵抗の相違にもよると考えられる。すなわち、表-4 に示した通り、中性化の影響を受けた場合は、細孔量が減少し、モルタルが緻密化する。一方、塩害の影響を受けた場合、モルタル中の細孔溶液中に導電性の高い塩化物イオンが含有されることとなる。その結果、表-6 に示す通り、中性化の影響を受けた場合は、塩害の影響を受けた場合と比較して、モルタル比抵抗が増加する。このため、電気回路の形成が困難となる。したがって、中性化の影響を受けた場合は、鉄筋箇所とそれ以外のモルタル内部に位置する鉄筋への酸素供給量の偏りが大きいことによりマクロセルが形成されるものの、アノードとカソード間の距離が広い大きなセルの形成は困難となる。これにより、カソード面積が減少し、腐食速度は遅くなると考えられる。図-14 に、塩化物イオンあるいは二酸化炭素が欠陥に供給され、外部環境が乾湿繰返し、水セメント比が0.3、本試験暴露期間が56日における、マクロセル電流密度を示す。これによっても、中性化の影響を受けた場合に

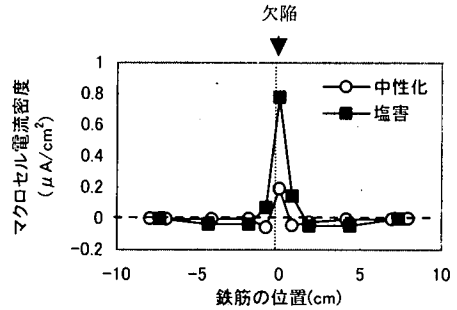


図-14 塩化物イオンあるいは二酸化炭素が供給された場合のマクロセル形成機構の相違
(Cl⁻・CO₂の供給:欠陥, 外部環境:乾湿繰返し, W/C:0.3)

は、カソード電流密度(負の電流密度)は、欠陥近傍においてのみ認められる。一方、塩害の影響を受けた場合には、カソード電流密度は、欠陥近傍のみならず全体において認められ、上記の考察が確認できる。

(3) 鉄筋の分極特性

ここでは、塩害あるいは中性化によるモルタル中鉄筋の腐食速度を評価するための基礎検討として、鉄筋自身の分極特性に着目して考察を加えた。すなわち、塩化物イオンの有無と pH の相違が水溶液中での鉄筋の分極特性に及ぼす影響を検討した。はじめに、実験概要を説明する。モルタル供試体に埋設された鉄筋と同種の鉄筋を、長さ1cmの要素に切断する。端部にリード線をはんだ付けし、接合部をエポキシ系樹脂で被覆した。この鉄筋要素を、pHが12.4、10.5 および 8.5 に調整された Ca(OH)₂ 水溶液に、28日間浸漬した。同時に、各 pH の Ca(OH)₂ 水溶液に対して、3.1wt%濃度になる様に調整し NaCl を添加した溶液も作製し、鉄筋要素を浸漬した。なお、温度は20℃とした。浸漬が終了した後、鉄筋要素のアノード分極曲線および分極抵抗を測定した。図-15 にアノード分極曲線を、表-7 に分極抵抗を示す。これらによれば、pHが減少するほど、また塩化物イオンを含む場合、腐食が促進される傾向にあることが認められる。ここで、pHが12.4で塩化物イオンを含む場合と、pHが10.5あるいは8.5で塩化物イオンを含まない場合を比較する。図-15によれば、前者は後者と比較して、アノード電流密度は大きいことが認められる。また、表-7によれば、前者は後者と比較して、分極抵抗が小さいことが認められる。以上のことから、①pHが12.4で塩化物イオンを含む場合は、pHが10.5あるいは8.5で塩化物イオンを含まない場合と比較して、腐食速度が促進される傾向にある

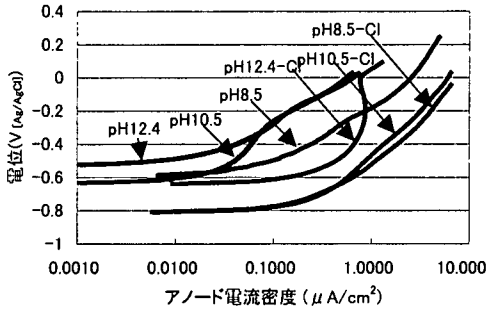


図-15 塩化物イオンの有無と pH の相違がアノード分極曲線に及ぼす影響

ことが認められる。次に、塩化物イオンあるいは二酸化炭素が供給されたコンクリート中に位置する鉄筋の環境を考える。②pH が 12.4 で塩化物イオンを含む場合は、塩化物イオンが供給されたモルタル中に位置する鉄筋の環境に対応する。一方、③pH が 10.5 あるいは 8.5 で塩化物イオンを含まない場合は、二酸化炭素が供給されたモルタル中に位置する鉄筋の環境に対応する。以上のことから①②③を踏まえると、塩化物イオンが供給されたモルタル中に位置する鉄筋が、二酸化炭素が供給されたモルタル中に位置する鉄筋と比較して、腐食が促進される環境にあると考えられる。このために、塩害による腐食の速度が、中性化による腐食の速度と比較して、速かったと思われる。

(4) まとめ

本章では、塩害あるいは中性化に伴う腐食の形態と速度の比較を行った。得られた結論を以下にまとめる。

1. 塩害あるいは中性化による腐食の形態を比較した結果、次のことが確認された。共通点としては、腐食要因物質が欠陥またはその近傍に浸透した場合には、その浸透箇所が腐食すること、が挙げられる。一方、相違点としては、塩害による腐食では水セメント比の相違により腐食形態が異なり、中性化による腐食では水セメント比の相違に拘わらずマクロセル卓越型の腐食が進行すること、が挙げられる。
2. 上記 1 の結果を踏まえ腐食セル形成機構に関して、次のことが判明した。欠陥箇所と欠陥の影響を受けない健全なモルタル内部に位置する鉄筋への腐食要因物質の供給量の偏りが大きい場合、マクロセル卓越型の腐食が進行する。一方、両者への腐食要因物質の偏りが小さい場合、マイクロセル卓越型の腐食が進行する。

表-7 塩化物イオンの有無と pH の相違が分極抵抗に及ぼす影響

	(kΩ・cm ²)		
pH	12.4	10.5	8.5
Cl ⁻ あり	1.55	1.35	1.09
Cl ⁻ なし	3.38	2.48	2.25

3. 塩害あるいは中性化による腐食の速度を比較した結果、塩害による腐食の速度は、中性化による腐食の速度より速いことが明らかとなった。

7. 結論

本研究では、欠陥を有するモルタル部材に生じる塩害あるいは中性化に伴う腐食の形態と速度に関して検討し、整理ならびに比較を行った。以下に、本研究で得られた結論を示す。

1. 塩化物イオンあるいは二酸化炭素の供給位置、水分および酸素の供給条件、モルタルの水セメント比に相違を設け、全 54 ケースの腐食形態と腐食速度を、網羅的に整理・比較できた。
2. 塩害による腐食では、水セメント比が 0.3 の時にマクロセル卓越型の腐食が進行した。一方、水セメント比が高くなるに伴いマイクロセル卓越型の腐食が進行した。これに伴い、水セメント比が 0.3 の時に水セメント比が 0.7 の時と比較して、腐食速度が速くなる場合があった。
3. 中性化による腐食は、水セメント比に拘わらずマクロセル卓越型の腐食が進行した。また、水セメント比が低いほど、腐食速度は遅くなった。
4. 塩害による腐食の速度は、中性化による腐食の速度と比較して速かった。
5. 以上の結果を踏まえると、塩害による腐食では、欠陥がある場合において、水セメント比が低いとマクロセルが形成されやすく、腐食速度が増進する可能性があることが明らかとなった。すなわち、欠陥があり、塩化物イオンが鉄筋に供給される場合においては、水セメント比が低いことが必ずしも塩害による腐食に対する耐久性に優れているとは言えない。一方、中性化による腐食では、欠陥がある場合においても、水セメント比が低いことが腐食に対する耐久性に優れていると言える。

塩害あるいは中性化によるコンクリート中鉄筋の腐食に関する研究は多い。ただし現行のコンクリート標準示方書（施工編）を含めてその多くは、欠陥の存在を適切に考慮していない。しかしながら、実在するコンクリート部材の多くは、ひび割れや打継

目等の欠陥を有する。これらの欠陥が存在する鉄筋コンクリート部材に生じる腐食は、その進行速度が速いにも拘わらず、定量的な検討が不足しているのが現状である。このため、本研究では、欠陥を有する鉄筋コンクリート部材に生じる腐食、主としてマクロセル腐食について正面から取り組み、基礎的な検討を行った。その結果、今まで不明確であった腐食形態および腐食速度が明らかになった。さらに今後は、コンクリート供試体を用いた検討を行い、モルタル供試体を用いて得られた本研究成果を検証する必要がある。また、コールドジョイントやひび割れのみならず、コンクリートの材料分離、かぶり不足、豆板などの具体的な欠陥を対象とする検討を行う必要がある。その際に、本研究成果が考察の一助となれば幸いである。

謝辞：本研究をまとめるに当たり、東京工業大学大学院土木工学専攻二羽淳一郎先生、市川篤司先生ならびに千代田化工建設株式会社松川圭輔博士のご指導を賜った。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 岡田清, 小柳治, 宮川豊章: コンクリート部材のひび割れと鉄筋腐食に関する研究、土木学会論文報告集, 第 281 号, pp.75-87, 1979.
- 2) 関博, 河原忠弘, 山本英夫, 川俣雅彦: ひびわれによる高強度コンクリート中鋼材の腐食, 第 5 回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.49-52, 1983.
- 3) 大即信明, 久田真, 木村勇人, 宮里心一: 欠陥部がモルタル中鉄筋の塩化物によるマクロセル腐食の形態に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.698-703, 1998.
- 4) 森永繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学学位論文, 1986.
- 5) 神山一: コンクリートのひび割れと鉄筋の腐食, セメント技術年報, No.26, pp.491-493, 1972.
- 6) 水流徹, 前田龍, 春山志郎: 交流法腐食モニターの局部腐食への適用: 防食技術, No.28, pp.638-644, 1979.
- 7) 佐伯竜彦, 米山紘一, 長滝重義: 中性化によるモルタルの強度変化, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.69-78, 1992.
- 8) 木内芳夫, 宮川豊章, 岡田清: コンクリートの電気抵抗および酸素浸透について, 第 38 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 V 部, pp.265-266, 1983.

(2000.11.17 受付)

CELL FORMATION PATTERN AND RATE OF STEEL CORROSION INDUCED BY CHLORIDE OR CARBONATION IN MORTAR WITH DEFECTS

Shin-ichi MIYAZATO, Nobuaki OTSUKI, Hayato KIMURA and Tooru TSURU

The objective was to clear comprehensively the corrosion cell formation pattern (macro-cell and micro-cell) and the rate induced by chloride or carbonation in mortar with defects. Therefore, the corrosion cell formation pattern and the rate were analyzed using the model defects simulated cold joints and cracks. Herein three parameters were set: 1) supply of Cl^- or CO_2 , 2) supply of H_2O and O_2 , 3) W/C. As a results; with presence of defects, A) in the case of chloride-induced corrosion, the decreasing W/C increased the activity of macro-cell corrosion, while the increasing W/C prevailed the micro-cell corrosion, and there was the case in which the corrosion rate became high at the low W/C, B) in the case of carbonation-induced corrosion, macro-cell corrosion was formed regardless of W/C, also the corrosion rate decreased at the low W/C, C) the chloride induced corrosion rate was higher than that induced by carbonation.