

論文 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

山路 徹*1・審良 善和*1・濱田 秀則*2

要旨: コンクリートひび割れ部における鉄筋の腐食挙動には不明な点が多い(ひび割れ幅と腐食の関係、腐食挙動の時間変化等)。海洋環境下における複数の暴露試験結果を基に、ひび割れ部での腐食挙動に関する考察を行った結果、以下の知見が得られた。1)ひび割れ部のマクロセル腐食速度は時間とともに減少する一方で、ひび割れ部のミクロセル腐食速度は時間とともに増加した。2)ひび割れ部のミクロセル腐食速度には塩化物イオン濃度依存性が見られた。かつその傾向は健全部と同様であった。

キーワード: ひび割れ, マクロセル腐食速度, ミクロセル腐食速度, 海洋環境, 塩化物イオン濃度

1. はじめに

コンクリートひび割れ部においては、腐食を引き起こす水や塩化物イオン等が侵入し易いため腐食が生じやすく、場合によっては構造物の早期劣化を引き起こすことになる。一方で、ひび割れ部での腐食挙動に関しては様々な検討が行われているが、不明な点が多い^{1),2)}。例えば、ひび割れ幅と腐食の相関については、腐食を助長するという考えと、相関が無いという考えが存在している²⁾。この原因として、調査時期やコンクリート種類が異なるためと文献²⁾では推測している。また、ひび割れ部における腐食の経時変化についての知見も少ない³⁾。

著者らは、海洋環境下における暴露試験結果を基に、ひび割れ部の腐食挙動に関する研究を行ってきた⁴⁾⁻⁶⁾。その中で、ひび割れ部でのマクロセルおよびミクロセル腐食速度の経時変化⁴⁾、ひび割れ部の腐食に及ぼすセメント種類やひび割れ幅の影響⁵⁾、ひび割れ部周辺での元素濃度分布⁶⁾等について検討を行っている。本論文は、それらの知見を統合し、ひび割れ部での腐食挙動のうち、特にひび割れ部の腐食と塩化物イオン濃度の関係に着目し、検討を行った。

2. 暴露試験概要

本論文では、以下の3種類の暴露試験結果⁴⁾⁻⁶⁾を基に、考察を行った。以下、暴露試験の概略をまとめる。

2.1 室内暴露試験 (20°C高湿度環境・約1年間)⁴⁾

(1)概要

ひび割れ部でのマクロセルおよびミクロセル腐食速度の経時変化について検討した。表-1に一覧を示す。

(2)試験体

図-1に試験体概要を示す。□100*100*600mmの角柱中に2本の鉄筋(φ9mm)をかぶり20mmで埋設した。片方は連続鉄筋、片方は分割鉄筋である。セメントは普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種、W/C

は0.5である。脱型後、曲げひび割れを導入し、さらに図-1のように応力を常時付加させた。

(3)暴露環境

自然海水を暴露後30日までは毎日、その後は定期的(数日~1か月おき)に散布した。

(4)試験項目

a)マクロセル腐食速度

分割鉄筋間(2箇所)に設置した抵抗(100Ω)に流れる電流をデータロガーを用いて連続的に計測した。マクロセル腐食速度 I_{mac} は下式により求めた。

$$I_{mac} = \frac{I_o - I_i}{A} \quad (1)$$

ここで、 I_o : 流出電流, I_i : 流入電流, A : 鉄筋表面積(長

表-1 試験体1一覧(室内)

| | 発生応力 | ひび割れ幅(mm) |
|----------|-------|-----------|
| N-0 | 0 | 0.25 |
| N-0.4fy | 0.4fy | 0.30 |
| N-0.6fy | 0.6fy | 0.60 |
| BB-0 | 0 | 0.20 |
| BB-0.4fy | 0.4fy | 0.30 |
| BB-0.6fy | 0.6fy | 0.55 |

(fy:降伏強度)

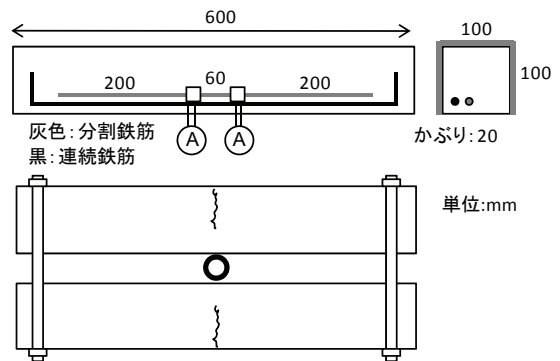


図-1 試験体1の概要

*1 (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造研究領域 材料研究チーム 工博 (正会員)

*2 九州大学大学院工学研究院 教授 工博 (正会員)

表-2 試験体 2 一覧 (干満部・約 15 年間)

| セメント | W/C | 単位量(kg/m ³) | | | | 初期ひび割れ幅(mm) | |
|------|------|-------------------------|-----|-----|-----|-------------|------------------|
| | | W | C | S | G | | |
| N | 0.45 | 水道水 | 162 | 360 | 738 | 1110 | 0.20, 0.10, 0.10 |
| | 0.55 | | 166 | 302 | 826 | 1056 | 0.10, 0.20, 0.08 |
| | 0.45 | 海水 | 165 | 367 | 732 | 1102 | 1.50 |
| | 0.55 | | 168 | 305 | 823 | 1051 | - |
| BA | 0.45 | 水道水 | 158 | 351 | 758 | 1094 | 0.10, 0.30, 0.25 |
| | 0.55 | | 158 | 287 | 820 | 1092 | - |
| | 0.45 | 海水 | 160 | 356 | 756 | 1091 | - |
| | 0.55 | | 162 | 295 | 812 | 1081 | - |
| BB | 0.45 | 水道水 | 160 | 355 | 736 | 1108 | 0.50, 0.20, 4.00 |
| | 0.55 | | 162 | 295 | 793 | 1099 | - |
| | 0.45 | 海水 | 162 | 360 | 733 | 1103 | - |
| | 0.55 | | 164 | 298 | 789 | 1094 | - |
| BC | 0.45 | 水道水 | 162 | 360 | 714 | 1120 | 1.70, 0.15, 2.70 |
| | 0.55 | | 164 | 298 | 770 | 1112 | - |
| | 0.45 | 海水 | 164 | 364 | 710 | 1114 | - |
| | 0.55 | | 166 | 302 | 767 | 1107 | - |
| FB | 0.45 | 水道水 | 158 | 351 | 738 | 1110 | 0.10, 0.20, 1.50 |
| | 0.55 | | 160 | 291 | 792 | 1097 | - |
| | 0.45 | 海水 | 160 | 356 | 733 | 1103 | - |
| | 0.55 | | 162 | 295 | 790 | 1096 | - |

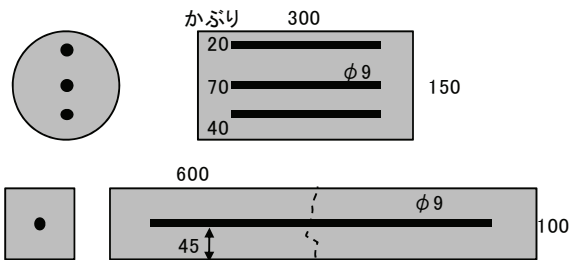


図-2 試験体 2 の概要

さ 60mm) である。

b) ミクロセル腐食速度 (分極抵抗より算出)

試験体上に 2 重対極センサを設置し、交流インピーダンス法により計測した。印加電圧は 10mV、周波数は 10Hz および 20mHz とした⁷⁾。こうして測定されたミクロセル腐食速度は、2 重対極センサの特性上、長さ 40mm の範囲内での平均的な腐食速度を示している。連続鉄筋の場合は暴露直前、暴露後 143 および 218 日の 3 回、分割鉄筋の場合は暴露後 238 日の 1 回のみ測定を行った。

c) 可溶性塩化物イオン濃度

鉄筋位置近傍から試料を採取し、JCI-SC4 に準拠して測定した。試料はひび割れから 0-25, 25-75, 75-125, 125-175mm の範囲から採取した。

2.2 実環境暴露試験 (干満部・約 15 年間)⁵⁾

(1) 概要

ひび割れ部の鉄筋腐食に及ぼすセメント種類やひび割れ幅の影響について検討した。表-2 に一覧を示す。

(2) 試験体

図-2 に試験体概要を示す。□100*100*600mm の角柱

表-3 試験体 3 一覧 (海水噴霧環境・約 5 年間)

| | かぶり (mm) | かぶり位置のひび割れ幅(mm)* | | |
|--------|----------|------------------|------|------|
| | | 1年 | 2.5年 | 3.8年 |
| 炭素鋼 | 20 | 0.20 | 0.20 | 0.25 |
| | 43.5 | 0.10 | 0.10 | 0.15 |
| SUS430 | 20 | / | / | 0.65 |
| | 43.5 | / | / | 0.55 |
| SUS304 | 20 | / | / | 0.75 |
| | 43.5 | / | / | 0.75 |

*暴露前

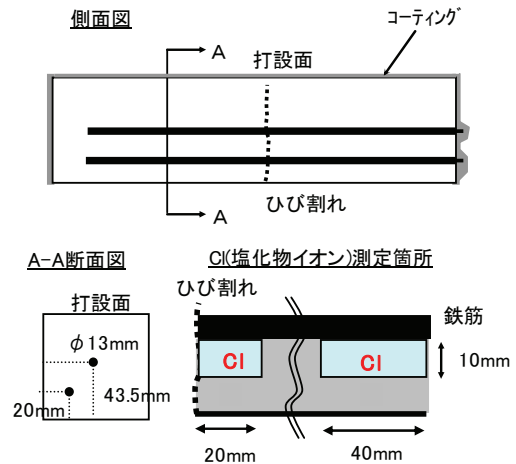


図-3 試験体 3 の概要

中には 1 本の鉄筋 (φ9mm) を埋設した。脱型後、曲げひび割れを導入した。φ150*300mm の円柱中には 3 本の鉄筋 (φ9mm) を埋設した。セメント種類は普通ポルトランドセメント(N)、高炉セメント A・B・C 種 (BA, BB, BC)、フライアッシュセメント B 種 (FB) の 5 種類、W/C は 0.45, 0.55 の 2 種類、練り混ぜ水は水道水および自然海水、かぶりは 20, 40, 70mm (ひび割れなし), 45mm (ひび割れあり) である。

(3) 暴露環境

(独) 港湾空港技術研究所の干満帯を再現した水槽に暴露した。1 日 2 回干満が繰り返される環境である。

(4) 試験項目

a) ミクロセル腐食速度 (分極抵抗より算出)

2.1 (4) b) と同様の交流インピーダンス法により測定を行った。なお、円柱 (ひび割れなし)・角柱 (ひび割れあり) で計測手法が異なる。円柱の場合は対極(ステンレス板)を円柱試験体の外周に設置して測定した。この場合のミクロセル腐食速度は鉄筋全表面積での平均的な腐食速度を示している。角柱の場合は 2.1 (4) b) と同様に、2 重対極センサを試験体上に設置して測定した。

b) 全塩化物イオンおよび可溶性塩化物イオン濃度

鉄筋位置近傍から試料を採取し、JCI-SC4 に準拠して測定した。角柱のひび割れ部ではひび割れ近傍±25mm

の範囲から採取し、可溶性塩化物イオン濃度を測定した。円柱の場合は全塩化物イオン濃度を測定した。

c)鉄筋腐食

鉄筋腐食面積率および最大腐食深さを測定した。前者は腐食部分を透明フィルムに写し取るにより行った。なお、腐食面積率を算出する際の単位長さは円柱の場合は鉄筋全長、角柱の場合は約50mmとした。後者はノギスを用いて測定した。

2.3 実環境暴露試験（海水噴霧・約5年間）⁶⁾

(1)概要

ひび割れ部での鉄筋腐食、ひび割れ部の各種元素濃度分布について検討した。表-3に一覧を示す。

(2)試験体

図-3に試験体概要を示す。□100*100*400mmの角柱（普通ポルトランドセメント，W/C=0.60）中に鉄筋(φ13mm)をかぶり20および43.5mmで埋設した。鉄筋種類は炭素鋼およびステンレス鉄筋(SUS430，SUS304)である。中央部にスリットを設け、曲げひび割れを導入した。

(3)暴露環境

(独) 港湾空港技術研究所の海水シャワー暴露場に暴露した。1日2回海水噴霧が繰り返される環境である。

(4)試験項目

a) ミクロセル腐食速度（分極抵抗より算出）

鉄筋が炭素鋼の場合について、2.1(4) b)と同様の交流インピーダンス法により測定を行った。2重対極センサ

を試験体上に設置して測定した。

b)全塩化物イオン濃度

鉄筋位置近傍から試料を採取し、JCI-SC4に準拠して測定した。ひび割れ部の採取箇所はひび割れから20mmの範囲である。

c) EPMA (Electron probe micro analyzer)

ひび割れ近傍の物質濃度分布を把握するためにEPMAを実施した。鉄筋がSUS430，SUS304の暴露3.8年時の試験体に対して実施した。測定対象とした元素のうち、Ca(CaO)，S(SO₃)，Clの3元素の結果を今回用いた。この際、鉄筋表面から5mmの範囲の測定値の平均値を採用した。

3.試験結果

3.1 マクロセルおよびミクロセル腐食速度の時間変化

図-4にマクロセルおよびミクロセル腐食速度（連続鉄筋のひび割れ部で計測）の時間変化を示す。なお、本論文でのミクロセル腐食速度とは、2.で述べたように、ある範囲内での平均的な腐食速度を意味する。ひび割れ部のマクロセル腐食速度は時間とともに減少した。文献4)ではこの原因として、腐食生成物や自己治癒による生成物がひび割れ部に充填され、腐食を抑制したと推測している。なお、自己治癒は、海水が供給される環境で顕著であると考えられるため、マクロセル腐食速度は時間とともに減少する現象は、周囲の環境の影響を受ける

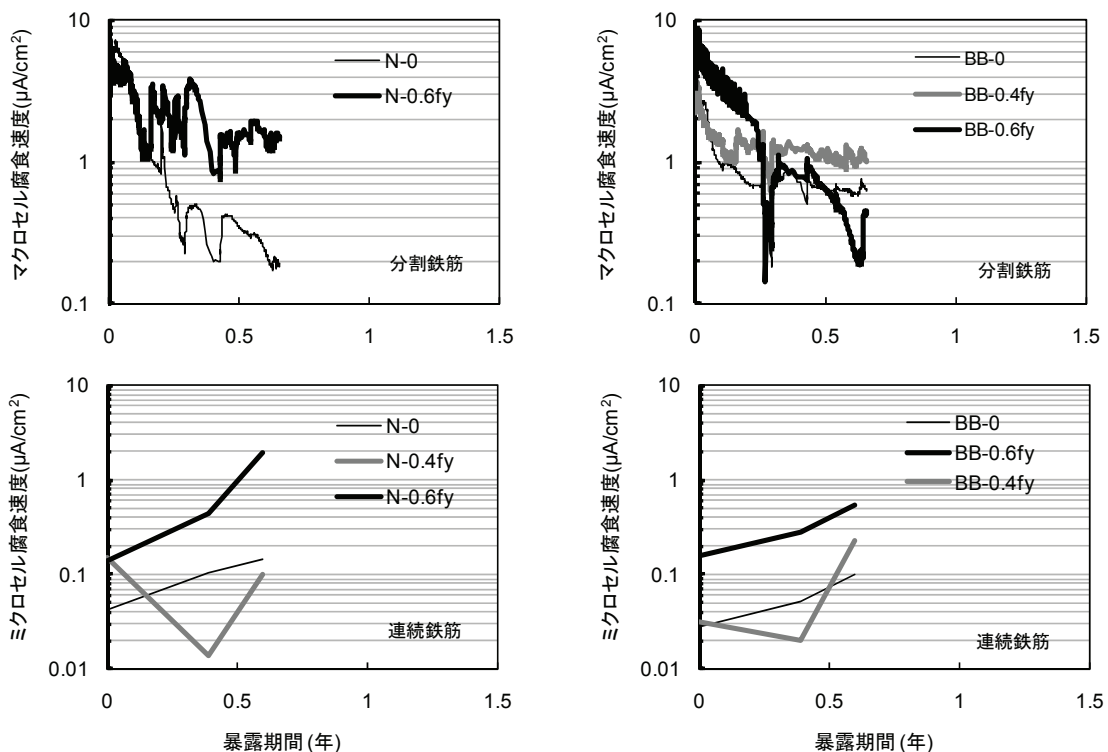


図-4 マクロセルおよびミクロセル腐食速度の時間変化（試験体1）

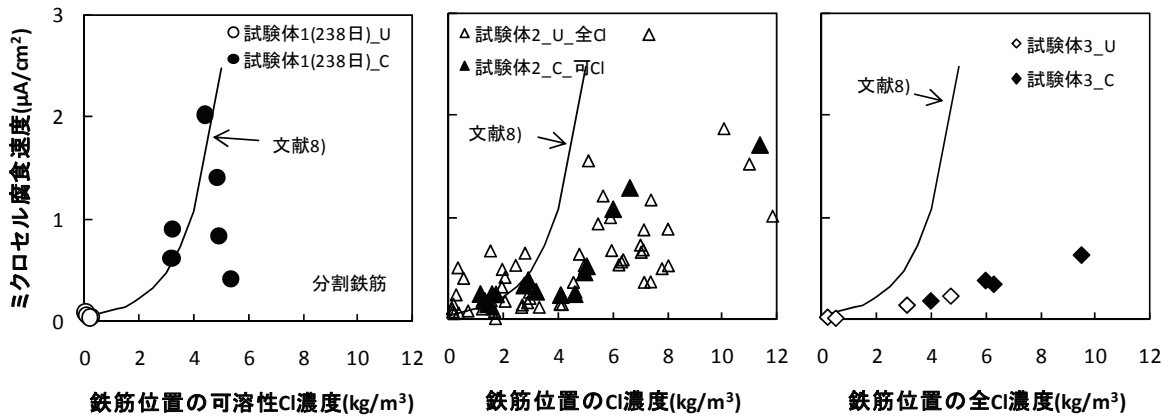


図-5 ミクロセル腐食速度のCl濃度依存性 (U: 健全部, C: ひび割れ部)

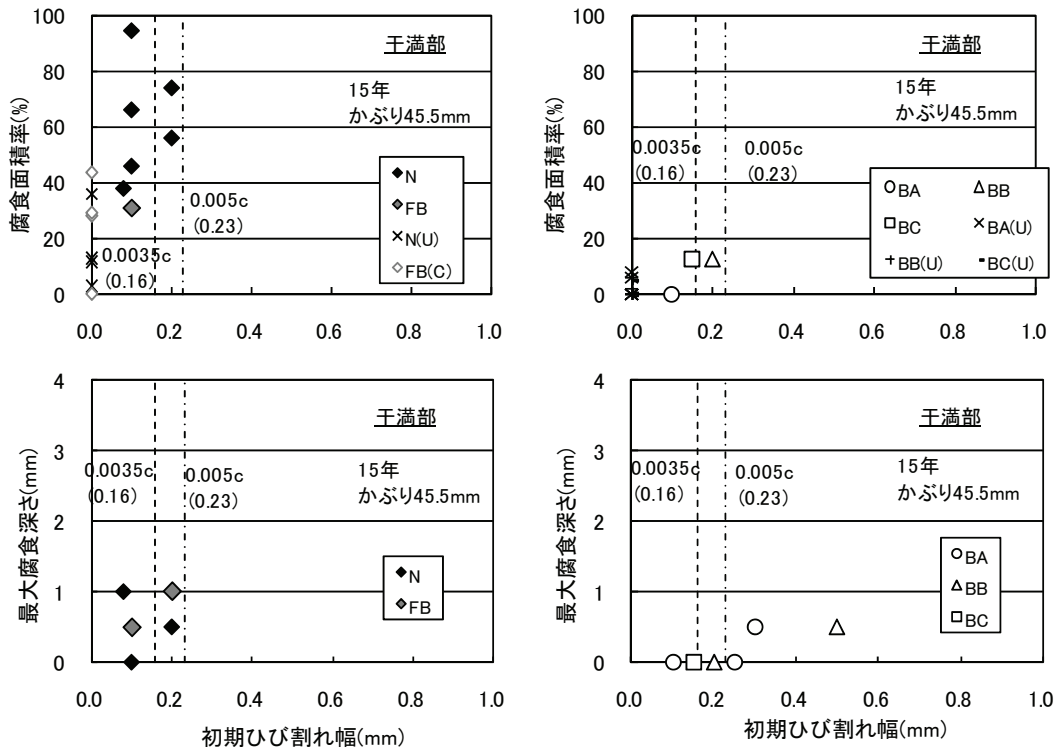


図-6 ひび割れ幅と腐食の関係 (試験体2)

(左: NおよびFB, 右: BA, BB, BC), U: 健全部 (円柱・かぶり40mm)

可能性がある。また、時間が経過することでアノード部とカソード部の面積比が変化し、マクロセル腐食速度が低減している可能性も考えられる。

一方、ミクロセル腐食速度は時間とともに増加傾向が見られた。時間とともに、腐食全体におけるマクロセル腐食速度の寄与度に比べ、ミクロセル腐食速度の寄与度の方が高まる傾向にあると推測される。

3.2 ミクロセル腐食速度と塩化物イオン濃度の関係

図-5にひび割れ部および健全部の鉄筋位置の塩化物イオン濃度とミクロセル腐食速度の関係を示す。なお比較として、文献8)中の腐食速度の算定式の一例(かぶり40mm, $W/C=0.55$ の場合)を図中(実線)に示した。ひび割れ部におけるミクロセル腐食速度には塩化物イ

オン濃度依存性が見られた。また、その傾向は健全部の場合と同様なのである。

なお、ひび割れ部でのミクロセル腐食速度(分極抵抗)測定時において、ひび割れなしの場合と測定対象の鉄筋長さ(表面積)が異なる可能性もある。ただし、そうであったとしても、鉄筋位置の塩化物イオン濃度とミクロセル腐食速度の間に相関がある可能性は高いと考える。

このように健全部だけでなく、ひび割れ部のミクロセル腐食速度においても塩化物イオン濃度依存性が見られる理由は以下のように考える。腐食生成物などがひび割れを充填すると、それが保護膜となり、ひび割れ直上部の腐食は抑制される。その一方で、ひび割れ周辺のコンクリート部に徐々に塩化物イオンが浸透してくると、

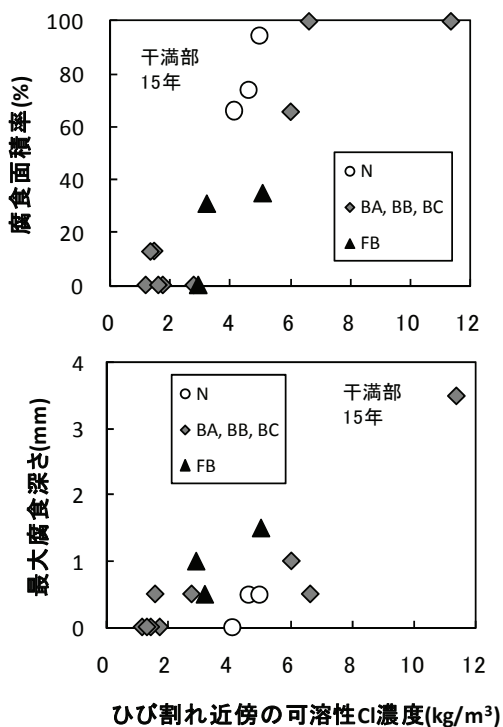


図-7 鉄筋位置のCl濃度と腐食の関係

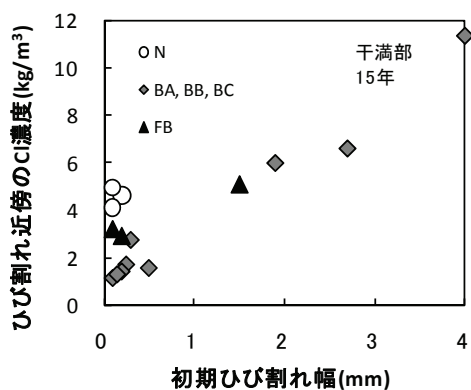


図-8 ひび割れ幅と鉄筋位置のCl濃度の関係

その箇所でも腐食が開始・進行する。結果として、鉄筋周囲のコンクリート中の塩化物イオン濃度との相関が高まる。

3.3 ひび割れ部の腐食量と塩化物イオン濃度の関係

図-6にひび割れ幅と鉄筋腐食面積率および最大腐食深さの関係を示した。なお腐食面積率の場合は健全部の結果も示した。また、土木学会「コンクリート標準示方書[設計編]」におけるひび割れ幅の限界値(一般の環境: 0.005c, 特に厳しい腐食性環境: 0.0035c, c: かぶり)の値も示した。高炉セメントの場合に腐食が少ない傾向が見られる。特に腐食深さについては非常に少ないものが多い。このような傾向は既往の研究でも報告されている(例えば⁹⁾)。この理由として、高炉セメントの場合はコンクリート中において塩化物イオンが拡散しにくく、鉄筋位置の濃度が低かったことが影響していると考えられる。

図-7にひび割れ近傍の可溶性塩化物イオン濃度と腐食面積率および最大腐食深さの関係を示す。図-5と同様に、塩化物イオン濃度依存性が見られ、塩化物イオン濃度が低い場合は腐食が少なくなる傾向にある。

ひび割れが無い箇所での腐食発生限界塩化物イオン濃度は、土木学会「コンクリート標準示方書[設計編]」においては1.2 kg/m³が示されている。これは全塩化物イオン濃度(以下C_t)に対応する。この値を可溶性塩化物イオン濃度(以下C_f)に換算する。文献10)ではセメントがNの場合にC_t/C_f=1.16, BBの場合にC_t/C_f=1.11, FBの場合にC_t/C_f=1.22という関係が得られている。この各比を用いて換算すると、1.2はそれぞれ1.03, 1.08, 0.98 kg/m³となる。図-7において1~2kg/m³付近の濃度の場合には腐食が少ない傾向にある。この結果は、ひび割れ箇所においても、塩化物イオンの侵入が少なければ腐食が開始・進行しにくいことを示すものである。ここで、図-8にひび割れ幅と鉄筋位置の塩化物イオン濃度の関係を示す。ひび割れ幅と鉄筋位置の塩化物イオン濃度には正の相関がみられた。よって、図-7でのひび割れ部の塩化物イオン濃度と腐食との相関性はひび割れ幅の影響を含んだもの(ひび割れ幅によらない)といえる。

ここで、時間が経過したことで塩化物イオン濃度が増加し、結果としてひび割れ位置の塩化物イオン濃度と腐食の間に相関が強まっている可能性もある。ただ、ひび割れ幅が同程度で高炉セメントの場合に鉄筋腐食が少なくなったのは、コンクリートの塩化物イオン拡散性状がひび割れ部の腐食に大きく影響を及ぼしているためと推測される。よって、ひび割れ部の腐食には、ひび割れ周辺の塩化物イオン濃度が大きく影響している可能性が高いと考える。このことは、ひび割れ部における鉄筋腐食速度は、ひび割れ部の塩化物イオンの拡散性状を考慮することで評価可能なことを示唆するものである。言いかえると、ひび割れ部の鉄筋腐食を抑制するためには、ひび割れ幅を抑制するだけでなく、周囲のコンクリート品質、かぶりも考慮する必要があるといえる。

3.4 ひび割れ近傍の元素濃度分布

図-9にひび割れ近傍の元素濃度分布を示す。Clの濃度はひび割れ部で減少している。これは既往の知見¹¹⁾と同様である。表層部でCl濃度が減少する原因は一般的に中性化による影響とされているが、海水が多く供給される環境においては、中性化の影響よりもSの侵入の影響の方が大きい¹²⁾。今回中性化深さを測定していないが、図-9より、Sが侵入している箇所でもCl濃度が減少しており、文献12)と同様の現象が生じているようである。

ひび割れ部の腐食が時間とともに収束するといった報告はいくつか見られる(例えば²⁾)。この原因として、前述のようにひび割れ部が閉塞されることに加えて、図-9

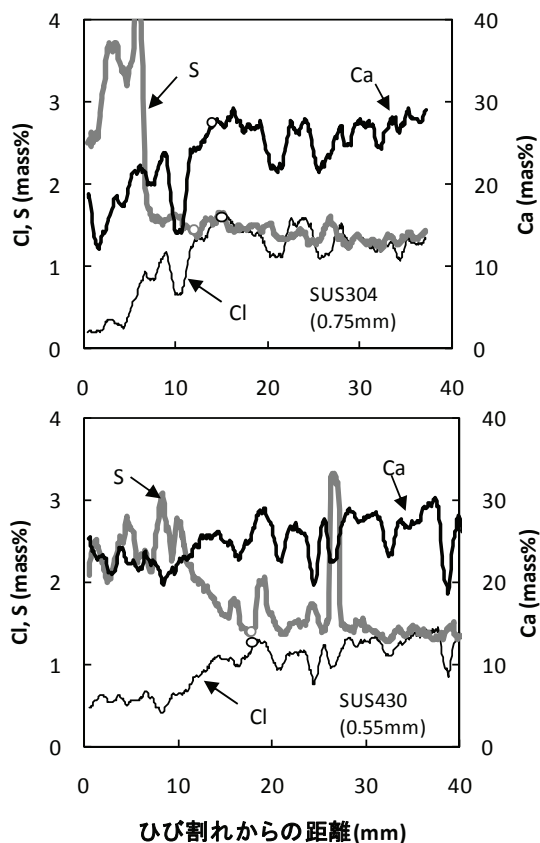


図-9 ひび割れ部周辺の元素分布
(試験体 3, かぶり 43.5mm, 暴露 3.8 年後)

のようにひび割れ部での塩化物イオン濃度が減少することが影響している可能性も考えられる。

4. 結論

複数の暴露試験結果を基に、海洋環境下におけるひび割れ部の腐食挙動に関する考察を行い、得られた結論を以下に示す。

- 1) ひび割れ部のマクロセル腐食速度は時間とともに減少した。一方、ミクロセル腐食速度は時間とともに増加する傾向が見られた。今回の試験条件において、時間とともに、腐食全体におけるマクロセル腐食速度の寄与度に比べ、ミクロセル腐食速度の寄与度の方が高まる傾向にあったものと推測される。
- 2) ひび割れ部のミクロセル腐食速度と鉄筋位置の塩化物イオン濃度の間には相関が見られた。また、その傾向は健全部の場合と同様であった。このことは、ひび割れ部における鉄筋腐食速度は、ひび割れ部の塩化物イオンの拡散性状を考慮することで評価可能であることを示唆するものである。

謝辞：長期暴露試験に関わられた材料研究室（当時）在籍者の皆様に感謝申し上げます。また、2.1および2.2の実験については、Dr. T. U. Mohammed 氏（現アジア太平

洋大学教授，元港湾空港技術研究所）が主となって計画・実施されたものである。また、ひび割れ部の腐食速度の整理については、土木学会 338 委員会での議論を参考にさせていただいた。ここに記してお礼申し上げる。

参考文献：

- 1) 土木研究所：コンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鋼材腐食に関する暴露試験，土木研究所資料第 4130 号，2009.
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2009-，pp.82-84，2009.
- 3) Schiessl, P. and Raupach, M.: Laboratory studies and calculations on the influence of crack width on chloride-induced corrosion of steel in concrete, *ACI Material Journal*, Vol.94, No.1, pp.56-62, 1997.
- 4) Mohammed, T. U. and Hamada, H. : Corrosion of steel bars in cracked concrete at the early age of exposure, *Proc. of the International Workshop on Life Cycle Management of Coastal Concrete Structures*, pp.115-126, 2006.11.
- 5) Mohammed, T. U., Yamaji, T., Aoyama, T. and Hamada, H.: Marine Durability of 15-year Old Uncracked Concrete and Pre-cracked Concrete Made with Different Cements, *土木学会論文集*, Vol.697 / V-54, pp.201-214, 2002.2.
- 6) 山路徹，濱田秀則，水間誠治，山本俊彦：海洋環境下におけるステンレス鉄筋の耐食性に関する研究，*土木学会論文集 E*, Vol.66, No.2, pp.207-220, 66 巻, 2 号, 207-220, 2010.6.
- 7) 横田優：交流インピーダンス法に基づくコンクリート中の鉄筋腐食評価に関する研究，徳島大学博士論文，1995.3
- 8) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の長期シミュレーションプログラム (LECCA2) 理論解説書，p.34，2010.
- 9) Otieno, M.B., Alexander, M.G. and Beushausen, H.D.: Corrosion in cracked and uncracked concrete – influence of crack width, concrete quality and crack reopening, *Magazine of concrete research*, Vol.62, No.6, pp.393-404, 2010.
- 10) Mohammed, T.U. and Hamada, H. : Relationship between free chloride and total chloride contents in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.33, pp.1487-1490, 2003.
- 11) 田中 良樹，河野 広隆，渡辺 博志：実構造物コンクリートのひび割れ部における塩分浸透，*土木学会論文集 E*, Vol.62, No.1, pp.38-51, 2006.
- 12) 山路徹，審良善和，濱田秀則，山田一夫：海洋環境におけるコンクリートの劣化性状および劣化指標に関する検討，*土木学会論文集 E*, Vol.66, No.1, pp.21~37, 2010.2.