ひび割れ幅と腐食速度が鉄さび生成に与える影響に関する研究

京都大学　学生会員　○宇野　祐司　住友大阪セメント（株）正会員　中村　士郎
京都大学　正会員　高谷　哲　正会員　山本　貴士　フェロー会員　宮川　豊章

1．研究目的

腐食ひび割れの発生はコンクリート構造物の維持管理における一種の寿命と考えることができる．そのため，腐食ひび割れ発生腐食量に関する研究が数多く行われてきているが，研究者によって閾値は大きく異なっている．これは，様々な環境で使用されている構造物中の鉄筋に生成するさびの種類や性質について考慮されていなかったことが原因のひとつと考えられる．そこで本研究では，コンクリート中の鋼材について，電食速度，ひび割れ幅をパラメータとして電食試験を実施し，生成するさび成分の分析や腐食減量，腐食層の厚さの測定を行うことで，各パラメータがこれらの測定項目に与える影響を検討した．

2．実験概要

供試体概要を**図 1** に示す．実験に用いる鉄筋は長さ 350mm の D19 異形棒鋼とし，グラインダーで黒皮を剥がした後に端部にリード線を巻き，中央 300mm の腐食区間以外はブチルゴムテープで被覆した．電食試験は，陽極を埋設鉄筋に，陰極を銅板につなぎ，供試体と銅板を 3% NaCl 水溶液に浸漬して行った．実験要因として，電食速度 2 種類とひび割れ幅 5 種類を設定した．高速電食の 1.68mA/cm^2 と低速電食の 0.168mA/cm^2 の電流密度を通電し，ひび割れ幅が 0，0.05，0.1，0.3，0.5mm に到達した時点で実験終了とした．

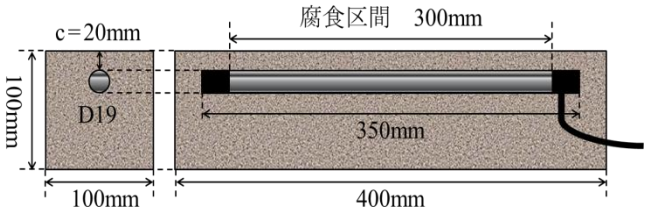

図 1　コンクリート供試体の概要

測定項目は鉄筋質量減少量とさび層厚さ，さび成分分析とした．鉄筋質量減少量は，60℃，10%のクエン酸水素二アンモニウム水溶液に 24 時間浸せきしてさびを除去した後の鉄筋の質量から，実験前の鉄筋の質量を差し引くことで計算した．平均さび層厚さの測定は，長さ 400mm の供試体の 5 箇所をコンクリートカッターで輪切りにした後，マイクロスコープを用いて断面に見られる鉄筋周りの腐食層の厚さを測定した．

3．実験結果および考察

各供試体に対して目標ひび割れ幅に到達するまで電食試験を行った結果，さび層厚さと腐食減量は**表 1** に示すようになった。そこから、断面半径減少量，腐食膨張倍率を算出した．

表 1　電食試験結果

	ひび割れ幅 (mm)	さび層厚さ (mm)	腐食減量 (mg/mm^2)	断面半径減少量 (mm)	腐食膨張倍率
L0	0	—	12.8	—	—
L5	0.05	0.087	29.7	0.017	5.12
L10	0.1	0.14	49.9	0.021	6.81
L30	0.3	0.28	87.0	0.048	5.85
L50	0.5	0.27	104	0.062	4.27
H0	0	—	33.6	—	—
H5	0.05	0.050	43.5	0.021	2.38
H10	0.1	0.064	71.4	0.037	1.73
H30	0.3	0.11	105	0.076	1.43
H50	0.5	0.13	133	0.105	1.27

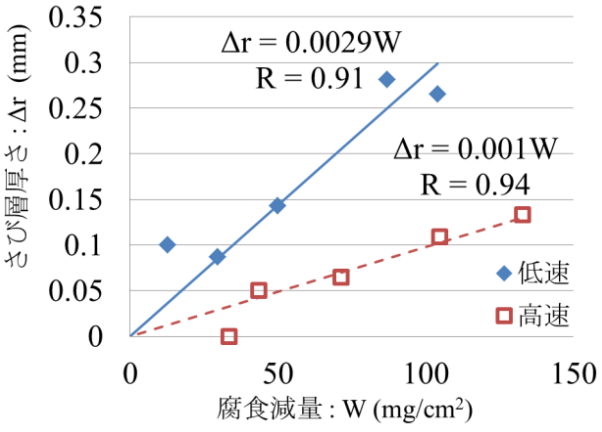

図 2　腐食減量とさび層厚さの関係

表の腐食減量とさび層厚さの関係を低速電食と高速電食についてまとめたものを**図 2** に示す．図をみると低速電食と高速電食のいずれも比例関係にあり，腐食減量の増加とともにさび層厚さも増加する傾向があるといえる．しかし，

キーワード：鉄筋腐食，ひび割れ，膨張倍率，腐食生成物，XRD
連絡先：〒615-8540　京都市西京区京都大学桂　TEL：075-383-3173　FAX：075-383-3177

グラフの傾きは低速電食が 0.0029 であるのに対し高速電食は 0.001 と，低速電食が高速電食の約 3 倍の傾きをもつ．この原因は，低速電食の方が長期間にわたって徐々に腐食が進むためにひび割れにさびが定着しやすく，腐食減量に対するさび層厚さも大きくなるためと考えられる．一方，高速電食ではさび汁の流出量が多いため，さびの生成量が多くてもさび層として定着した量は少なく，腐食減量に対するさび層厚さが小さくなったものと考えられる．また，さび層厚さと断面平均減少量から求めた腐食膨張倍率を見ると，低速電食シリーズの平均値が 5.6 倍で高速電食シリーズの平均値が 1.7 倍であった．高速電食の膨張倍率が全体的に低かったのは，低速電食に比べてさび汁の流出が著しいためにさび層に定着する量が少なく，さび層厚さの測定値が小さくなってしまったためであると考えられる．

鉄さび試料の X 線回折分析を行った結果，**表 2** に示す結晶質成分の推定結果を得た．$CaFeO_2Cl$ の密度は 3.4g/cm^3 のため，分子量から体積膨張倍率を算出すると 6.9 倍となる．これは他の腐食生成物の膨張倍率 1.7~3.7 倍に比べて 2 倍以上大きく、電食試験において生成するさびの膨張倍率を大きくしている原因であると考えられる。電食試験により得られる腐食生成物の体積膨張倍率を，本実験で得られたひび割れ発生時の体積膨張倍率である 5.1 倍とし，促進・暴露試験で得られる腐食生成物の体積膨張倍率を，生成する可能性が高いと考えられる Goethite および Magnetite の体積膨張倍率の平均値である 2.5 倍とすると，ひび割れ発生腐食量は，促進・暴露試験により得られる値の方が，電食試験により得られる値に比べて約 2.7 倍大きくなることになる．これは、**図 3** に見られる約 3.0 倍という違いに近い値であり，電食試験を行った場合と促進・暴露試験を行った場合でひび割れ発生腐食量が異なる原因は，腐食生成物の体積膨張倍率の違いにより生じたと考えられる．

表 2　結晶質成分の推定結果

電流密度(mA/cm^2)	0.168（低速電食）					1.68（高速電食）				
ひび割れ幅(mm)	0	0.05	0.1	0.3	0.5	0	0.05	0.1	0.3	0.5
試料名 / 鉱物名	L0	L5	L10	L30	L50	H0	H5	H10	H30	H50
Fe (鉄)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
α-FeOOH (Goethite)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Fe_3O_4 (Magnetite)										
FeO (Wustite)	○	○				○	○			
$CaFeO_2Cl$	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
$Fe_6Cl_{2-x}(OH)_{12+x}$	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

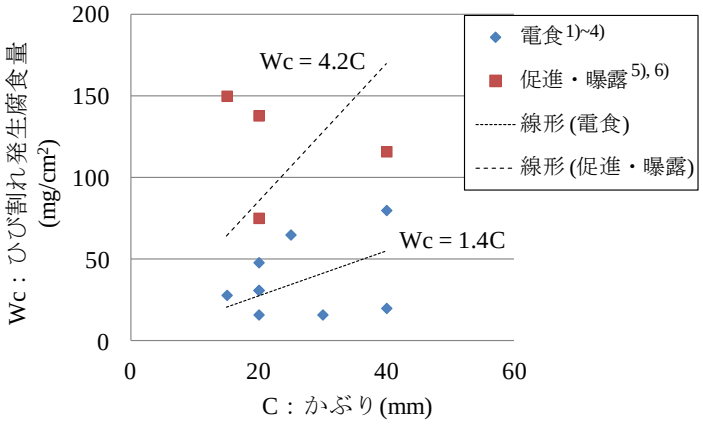

図 3　ひび割れ発生腐食量とかぶりの関係における電食試験と促進・曝露試験の違い

4．結論

1) 腐食速度が遅い場合，長期間にわたって徐々にさびが生成されることでさびがひび割れに定着する量が多くなるためにさび層厚さが大きくなり，その結果ひび割れ発生腐食量が小さくなる．
2) 電食試験で生成される $CaFeO_2Cl$ は一般的なさびに比べて 2 倍以上大きな腐食膨張倍率をもっており，ひび割れ発生腐食量が、実環境よりも電食試験の方が小さくなっている原因の一つであると考えられる．

参考文献

1) C.ANDRADE et.al：Cover cracking as a function of bar corrosion, Materials and Structures 26, 1993　2)武若耕ら：コンクリート中の鉄筋腐食が RC 部材の力学性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.6，No.2，pp.177-180，1984　3)宇野祐司ら：ひび割れ発生腐食量に与える鉄筋径の影響に関する研究，土木学会関西支部年次学術講演会概要集,2009　4)松島学ら：鉄筋の腐食膨張によるひび割れ時腐食減量，土木学会第 58 回年次学術講演会，V-077，2003　5)中川裕之ら：塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量，土木学会論文集 E，Vol.64，pp.744-757，2008　6)松村卓郎ら：海岸での曝露実験によるひび割れ発生後の鉄筋腐食評価，土木学会第 61 回年次学術講演会第 5 部，pp.583-584，2006