

# 論文 X線撮影により得られる鉄筋腐食減量とコンクリートの表面ひび割れとの関係について

橋高 義典<sup>\*1</sup>・小安 健太<sup>\*2</sup>・松沢 晃一<sup>\*3</sup>・刈田祥彦<sup>\*2</sup>

**要旨**：本研究は、鉄筋コンクリートを模した鉄筋を埋込んだモルタル小型試験体について腐食促進試験を行ない、鉄筋腐食の進行程度をX線デジタル画像により非破壊により把握するとともに、コンクリートの表面に生じるひび割れ幅との関係を明らかにしたものである。試験体の鉄筋のかぶり厚さは2種類、鉄筋の腐食試験は中性化促進試験、屋外暴露試験の2種類とした。X線撮影装置により経時的に計測した鉄筋腐食減量及び、ひび割れ幅の経時的な計測値から、鉄筋腐食減量とひび割れ幅との関係を考察した。

**キーワード**：耐久性, X線, 鉄筋腐食, 鉄筋腐食減量, ひび割れ

## 1. はじめに

鉄筋コンクリートの重要な劣化現象には内部鉄筋の腐食とそれに伴うコンクリート表面のひび割れがある。鉄筋コンクリートの耐久性予測のためには、例えばコンクリートの表面ひび割れ幅から鉄筋腐食量が推定できると構造性能の低下の評価に結びつけることができる。

鉄筋コンクリート内部の鉄筋腐食量とコンクリート表面のひび割れとの関係についての研究はいくつか見られるが<sup>1)</sup>、多くはある鉄筋腐食状態での鉄筋腐食量とひび割れ幅との関係を把握したものがほとんどである。またひび割れの進展と鉄筋腐食の進展との関係を電食による促進試験で経時的に把握した例<sup>2)</sup>も見られるが、実際の腐食条件に近い条件で、経時的に鉄筋の腐食量を把握し、表面ひび割れとの関係を検討した例は少ない。

鉄筋の腐食を非破壊で計測する手法としては、自然電位法などの間接的な評価方法があるが実際の鉄筋腐食量の評価という点では課題がある。近年、コンクリート内部を非破壊で把握する手法として、X線を用いる方法が用いられている。この方法によれば部材を破壊せずに構造物の鉄筋あるいは欠陥部などを検知することが出来る。X線画像により鉄筋表面腐食量を評価している研究も幾つか見られ<sup>3)4)</sup>、鉄筋腐食を評価する非破壊試験方法として有効な手法と考えられる。しかしながら、電食による腐食での評価がほとんどで、実際の腐食条件に近い条件で、長期的な表面ひび割れ幅の進展変化と共に、鉄筋腐食の経時変化を検討した例は見られない。

本研究は、鉄筋を埋込んだモルタル供試体について腐食促進試験を行ない、鉄筋腐食減量をX線デジタル画像により把握するとともに、モルタル表面のひび割れとの関係を明らかにすることを目的として行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図-1に本研究で用いた試験体の概要を示す。本研究で用いるX線撮影装置で試験体のX線撮影を行なうとともにセメント硬化体中の鉄筋部の解像度を上げるためには、試験体の厚さ及び大きさに制約が生じる。本研究での試験体は40mm立方のモルタルにSD295, D10の鉄筋を埋め込んだものとし、かぶり面(図-1のとおり定義)以外すべての表面はウレタン塗料を塗装した。鉄筋のかぶり及びモルタルの調合は施工不良が生じた部分を想定し、かぶり厚は5mm, 10mm, W/Cは80%とした。また、腐食促進のためにモルタル中に塩化物含有の条件も加えた。例えば飛沫帯での表面塩化物イオン濃度の標準値<sup>5)</sup>13 kg/m<sup>3</sup>に対して特に表層部で塩分が凝縮し極端に厳しい条件を想定し、塩化物イオン濃度50kg/m<sup>3</sup>とした。

鉄筋腐食を促進するためまず鉄筋位置まで促進中性化を行ない、その後室内環境を想定した中性化促進試験機による促進中性化と、屋外条件を想定した屋外暴露の2種類を行った。試験期間は2年間である。

表-1に使用材料、表-2に実験の要因と水準、表-3にモルタルの調合、図-2に腐食促進試験のフローを示す。

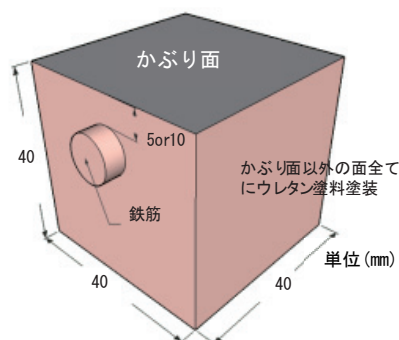


図-1 試験体の概要

\*1 首都大学東京 都市環境科学研究科建築学域 教授 工博 (正会員)

\*2 首都大学東京 都市環境科学研究科建築学域 大学院生

\*3 首都大学東京 都市環境科学研究科建築学域 助教・修士(工学)(正会員)

表-1 使用材料

材料	種類及び物性
セメント	普通ポルトランドセメント：密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	硬質砂岩砕砂，表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup> ，絶乾密度 2.56g/cm <sup>3</sup>
鉄筋	SD295，D10

表-2 実験の要因と水準

要因	水準
W/C(%)	80
かぶり厚さ(mm)	5, 10
試験期間(月)	24ヶ月
腐食促進試験	促進中性化，促進中性化後に屋外暴露
塩化物イオン含有量(kg/m <sup>3</sup> )	0, 50
同一条件試験体個数	3

表-3 モルタルの調合

W/C (%)	S/C (-)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		水	セメント	砕砂	NaCl
80	4.3	289	362	1556	0
					86.7

り込まれ，さらにコンピュータソフト上で最大明度 255 で255階調のL値に変換する。本装置で使用するFPDは，X線が蛍光体に照射され電子を生成し直接読み取り回路に導かれるため，解像度の高い画像を得ることが可能となっている。被写体によるX線の散乱を最小にするために，縦方向と横方向にスリットが設置されている。X線照射装置の最大X線管電圧は160kV，最大出力は200W，X線源サイズは0.2mmである。得られるX線画像が鮮明になる条件を検討し，試験体へのX線照射は，今回は電圧160kVで電流200μA，照射時間3秒とした。

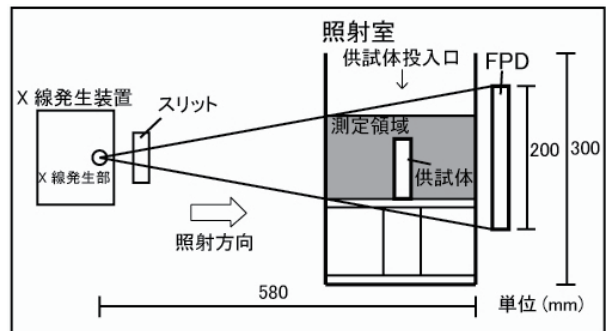


図-3 X線撮影装置概要

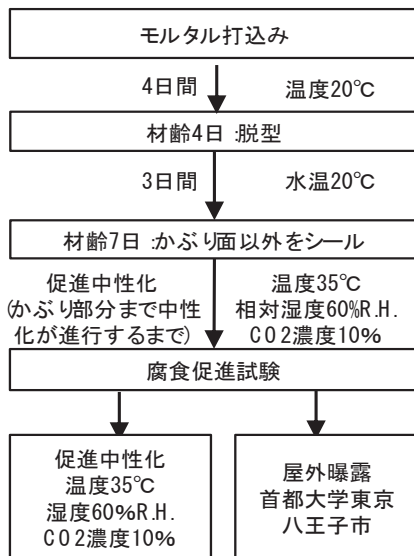


図-2 腐食促進試験のフロー



写真-1 X線撮影装置外観

## 2.2 X線撮影装置の概要

本研究で用いたX線撮影装置の概要を図-3に，外観を写真-1に示す。X線発生装置からコーンビーム状のX線が試験体に向けて照射され，試験体を透過するX線を8×10インチサイズの平面X線検出器（以下，FPD）により電気信号に変換する。FPDに入力された電気信号はコンピュータに255階調の2次元画像データとして取

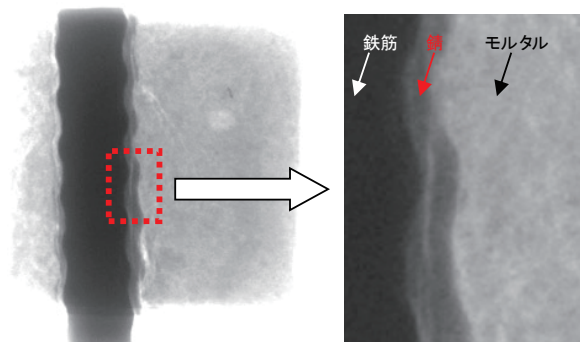


図-4 X線画像の例

### 2.3 鉄筋の腐食減量の計測

図-4に腐食促進を行なった試験体のX線画像の例を示す。鉄筋部分はX線の透過度が低く低明度となり、モルタル部は透過度が大きいために高明度となる。鉄筋表面層の中間の明度の部分が錆部分と推定される。

鉄筋の錆部分は、錆の生成時に生じるモルタルからの拘束力により圧縮されていることが想定され、またその拘束力は錆の生成量およびモルタルの強度さらにはモルタルにひび割れが生じている場合にはひび割れ幅などに依存すると考えられるため、X線画像により得られる錆部分の面積からの錆の重量の直接の推定は難しい。本研究ではX線画像で得られる鉄筋の未腐食部分の投影面積を計測し、腐食試験前の同一鉄筋のX線画像による投影面積との比較から、腐食により減少した量を評価することとした。具体的には、腐食促進試験前のX線画像と、試験後のX線画像で、モルタルより外側のウレタン塗装により防食処理が施された未腐食の鉄筋部分が画面上で合致するように画像を重ね合わせ、鉄筋の断面積の減少量を計測した。実際の断面積への換算は、予め計測しておいた鉄筋の長さXとX線画像上の鉄筋長さのドット数との関係から換算し求めた。

X線画像での投影面積の計測結果から、下式により鉄筋腐食による平均的な断面減少率 $m$ (%)を算出した。

$$m = \left\{ 1 - \left( \frac{S_t}{S_0} \right)^2 \right\} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $S_0$ ：腐食前のモルタル中の鉄筋の投影面積( $\text{mm}^2$ )、 $S_t$ ：腐食後のモルタル中の鉄筋健全部の投影面積( $\text{mm}^2$ )である。

また、下式により、鉄筋単位表面積当たりの腐食による減少量を腐食減量 $D$ ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )として求めた。

$$D = \frac{mdp}{4} \quad (2)$$

ただし、 $d$ ：鉄筋の直径(mm)、 $\rho$ ：鉄筋の比重=7.85(-)である。

また、参考までに、錆部分については、画像での鉄筋直行方向の厚さを、錆厚さ $T$ (mm)と定義し計測した。

以上の測定手順を図-5ならびに図-6に示す。

### 2.4 ひび割れ幅の計測

試験体表面のひび割れ幅は、最小目盛り 0.02mm マイクロスコープにより目視により計測した。図-7に示すようにひび割れ長さ方向に6mm間隔で6点計測し、それらを平均した。

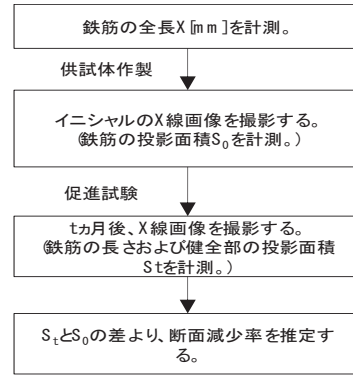


図-5 断面減少率計測のフロー

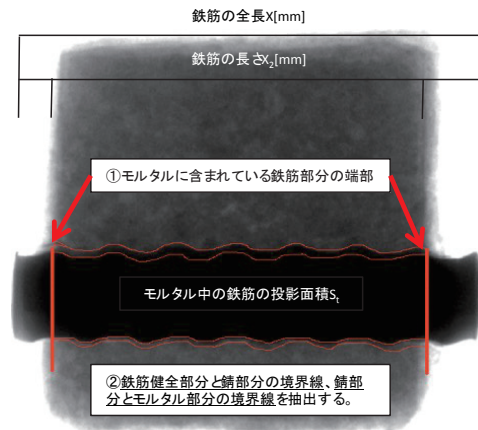


図-6 鉄筋の断面減少率の計測

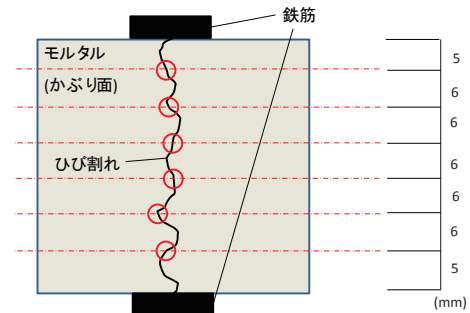


図-7 ひび割れ幅の計測

## 3. 測定結果と考察

### 3.1 平均断面減少率および腐食減量の経時変化

図-8に各試験体の平均断面減少率の経時変化を示す。計測値は試験体表面にひび割れが生じてから行っており、18ヶ月以降のデータとなっている。試験体の記号は、(かぶり厚さ)-(塩化物イオン量)-(同一条件での供試体番号)である。各試験体において、腐食促進期間の増加とともに平均断面減少率は大きくなっており、腐食が進んでいることがわかる。また、促進期間の増加とともに増加の割合は小さくなる傾向がある。なお、中性化促進では、途中4試験体が破損したためデータから除いた。

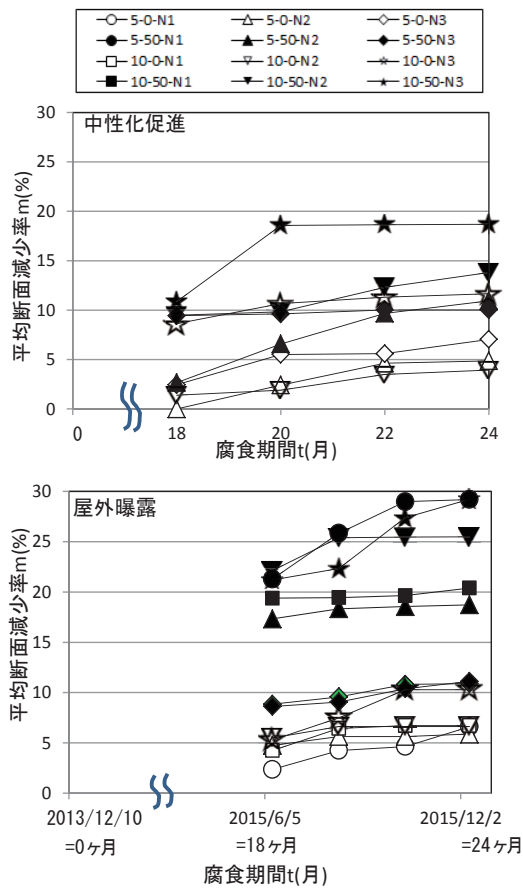


図-8 平均断面減少率の経時変化

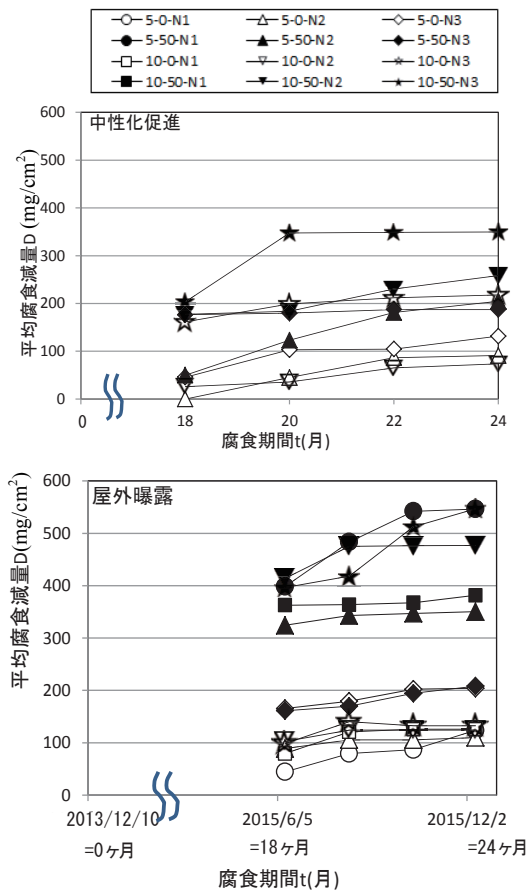


図-9 平均腐食減量の経時変化

促進中性化，屋外暴露試験とも，塩化物を含んだものは平均断面減少率の増加が大きく，塩化物の存在で鉄筋腐食が促進されている。かぶり厚さによる腐食の差異は見られないが，これは今回の腐食促進試験ではあらかじめ鉄筋位置まで中性化を促進させたためと考えられる。

図-9に各試験体の平均腐食減量の経時変化を示すが今回は鉄筋径が1種類であったので，図-8の各試験体の平均断面減少率の経年変化と傾向は同じである。

図-10に各試験体の平均ひび割れ幅の経時変化を示す。腐食促進期間の増加とともに平均ひび割れ幅は大きくなっており，鉄筋の腐食の進行とともに表面のひび割れ幅が大きくなっていることが分かる。ひび割れが観察されたのは，促進中性化，屋外暴露試験とも，塩化物を含んだ試験体であり，塩化物を含まない試験体では，鉄筋の腐食は進んでいるが本試験期間の範囲では，表面ひび割れは生じない結果となった。これらは，今後促進試験を継続してひび割れ発生との関係を把握する必要がある。

かぶりの影響に関しては，促進中性化，屋外暴露試験とも，かぶり厚が5mmよりも10mmと大きい方が，ひび割れ幅は大きくなる傾向があった。特に屋外暴露試験ではその傾向が明確である。

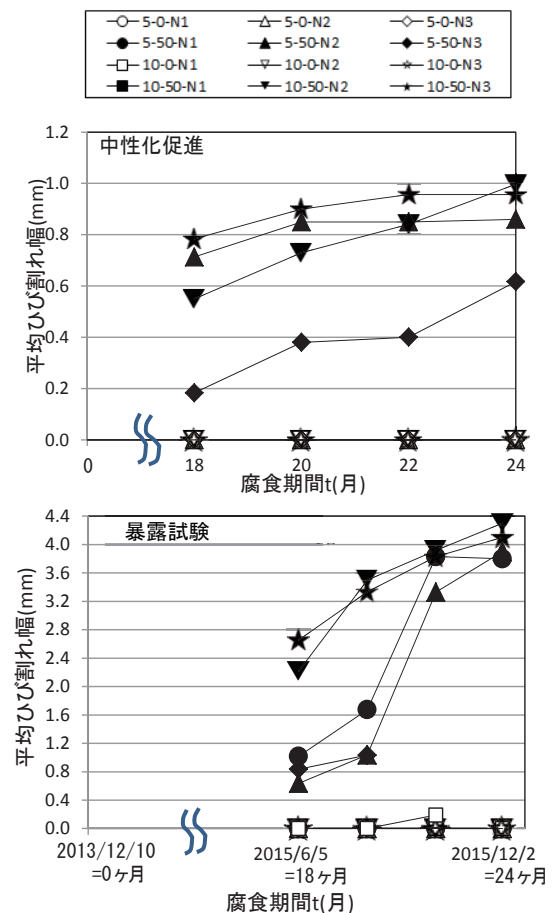


図-10 平均ひび割れ幅の経時変化

### 3.2 鉄筋の腐食減量とひび割れ幅との関係

図-11 に腐食促進試験で得られた各試験体の平均腐食減量と平均ひび割れ幅との関係を示す。ひび割れが見られない試験体についてもプロットしておりそれらは平均ひび割れ幅0の軸上にプロットしている。ひび割れが見られる試験体について、平均腐食減量と平均ひび割れ幅との間にはあまり明確な相関は見られないが、促進中性化においてはかぶり厚さ5mmに比較し10mmでは両者には相関関係が見られる。また、屋外暴露においてもかぶり厚さ5mmではばらつきが大きいがかぶり厚さ10mmでは両者には相関関係が見られ、かぶり厚さが大きいほど、平均腐食減量と平均ひび割れ幅との関係は明確になる傾向がある。この理由として、かぶり厚さが5mmと薄い場合には、表面の乾燥収縮、欠陥などに影響されひび割れが不安定に生じ、かぶり厚さが大きいほど安定してひび割れが生じるためではないかと考えられる。

既往の研究<sup>6)</sup>では、鉄筋の腐食減量と表面ひび割れ幅P(mm)との関係は下式で表している。

$$P = 0.1 \times \frac{D}{D_u} \quad (3)$$

ここで、D：鉄筋の腐食減量 (mg/cm<sup>2</sup>)。：D<sub>u</sub>：試験体表面に0.1mmのひび割れが生じるときの鉄筋の腐食減量 (mg/cm<sup>2</sup>) で、D<sub>u</sub>は、以下の実験式で表している<sup>7)</sup>。

$$D_u = -(0.19d + 0.06x + 2.0)\ln(Fc) + 0.1d + 47 \quad (4)$$

ここで、d：鉄筋径(mm)、x：かぶり厚さ(mm)、Fcは試験体の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)である。

(3)式は、ひび割れ解析結果<sup>8)</sup>に基づいたもので、基本式は原点を通る線形式でその有効範囲は初期ひび割れ発生以降である。(3)式の計算値を図-11中に実験結果とともに示した。初期ひび割れ幅を0.1mmと設定しておりそれ以下は点線で示した。式(4)中の試験体の圧縮強度は、シュミットハンマーにより求めた。その際は、同一形状の試験体による校正曲線をより求めた。

促進中性化においては、計算結果は測定結果と傾向が似ており、特にかぶり厚さ10mmではよい一致を見せている。屋外暴露においては、計算結果よりも測定結果が大きくなる傾向がある。すなわち、平均腐食減量の増加に対する平均ひび割れ幅の増加の割合は、促進中性化よりも屋外暴露試験の方が大きい傾向がある。この理由としては、屋外暴露では、一定温湿度条件の促進試験条件に比べて、雨水の作用、乾湿の繰返し作用などの劣化の影響により、ひび割れが分散進展し、腐食膨張圧に対する拘束力が小さくなり、ひび割れ開口が大きくなっている

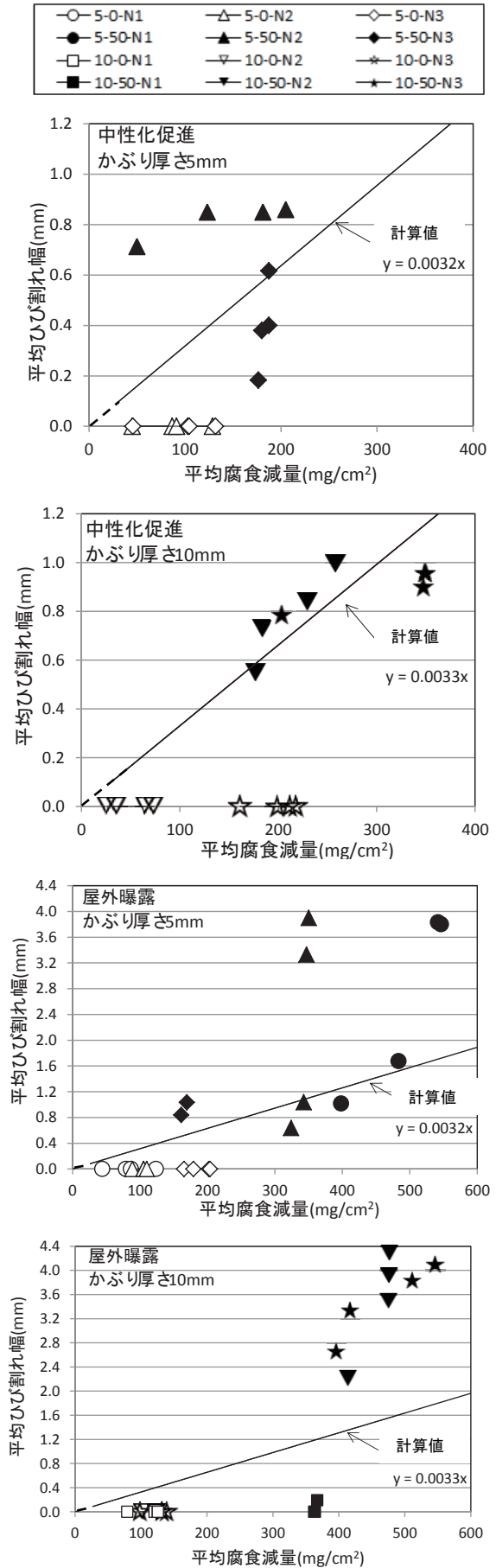


図-11 平均腐食減量と平均ひび割れ幅の関係

ものと考えられる。したがって、屋外暴露試験でのひび割れ幅の推定では、促進試験で得られた結果より割り増す必要がある。今回の実験結果では、約2倍程度の割増しが必要であるが、正確な推定に関しては今後の課題である。

#### 4. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 今回の腐食促進試験により、腐食促進期間の増加とともに腐食減量、表面に生じる平均ひび割れ幅は大きくなっており鉄筋の腐食の増加とともにひび割れ幅も大きくなる。
- 2) 促進中性化、屋外暴露試験とも、塩化物を含んだ試験体は腐食減量の増加が大きく塩化物の存在で鉄筋腐食が促進される。
- 3) 塩化物を含まない試験体では、促進中性化、屋外暴露とも、鉄筋の腐食は進んでいるが本試験期間の範囲では、表面ひび割れは生じない結果となった。
- 4) 平均腐食減量と平均ひび割れ幅との間にはあまり明確な相関は見られないが、促進中性化、屋外暴露ともかぶり厚さ10mmの場合に両者には相関関係が見られる傾向があった。
- 5) 促進中性化においては、計算結果は測定結果と傾向類似しており、特にかぶり厚さ10mmではよい一致が見られた。
- 6) かぶり厚さが薄い場合には、表面の乾燥収縮、欠陥などに影響されひび割れが不安定に生じていると考えられる。
- 7) 屋外暴露においては計算結果よりも測定結果が大きくなる傾向がある。この理由として一定温湿度条件の促進試験条件に比べて、雨水の作用、乾湿の繰返し作用などの劣化の影響により、ひび割れが分散進展し腐食膨張圧に対する拘束力が小さくなり、ひび割れ開口が大きくなっているものと考えられる。

- 8) 今回用いたX線測定処方では、鉄筋腐食の継時変化を非破壊で測定でき、鉄筋腐食によるひび割れ進展などに有効な評価方法となりうる。

#### 参考文献

- 1) 本間 大輔, 米澤 敏男, 押田文雄, 山口 善弘, 岡本 博史, 中尾 正純: 鉄筋の腐食ひび割れ発生限界腐食量に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 79(701), pp. 867-876, 2014. 7
- 2) 河村圭亮, Tran Khoa Kim, 中村 光, 国枝 稔: 鉄筋腐食に伴うコンクリートの表面および内部ひび割れ進展挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 1007-1012, 2010
- 3) 秋山 充良, 中嶋 啓太, 小森谷 隆: X線撮影を用いたRC部材内の鉄筋腐食成長過程の可視化に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol. 22 号 No. 3 pp. 35-45, 2011
- 4) Vu Hiep Dang, Raoul Francois, Valérie L'Hostis, Dietmar Meinel: Propagation of Corrosion in Pre-cracked Carbonated Reinforced Mortar, Materials and Structures, 48, pp. 2575-2595, 2015
- 5) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書「維持管理編」, 2013
- 6) 橋高義典, 塚越雅幸: 塩害による鉄筋腐食に伴うコンクリート表面のひび割れ発生予測について, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp. 581-582, 2011
- 7) 橋高義典, LE PHONG NGUYEN, 塚越雅幸, 松沢晃一: 鉄筋コンクリート表面のひび割れ発生時の鉄筋腐食量に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 1145-1150, 2011
- 8) 橋高義典: 表面ひび割れ幅からの鉄筋腐食減量の推定に関する破壊力学的検討, 日本コンクリート工学協会, コンクリート構造物のリハビリテーションに関するシンポジウム・論文集, pp. 21-28, 1998