

# 論文 ひび割れが鉄筋腐食に及ぼす影響

唐沢 智之<sup>\*1</sup>・榎田 佳寛<sup>\*2</sup>・河野 政典<sup>\*3</sup>・竹内 博幸<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究では、ひび割れが鉄筋腐食に及ぼす影響を明らかにし、ひび割れ部の劣化予測に必要な資料を得ることを目的に、鉄筋を埋め込んだ供試体を用いて促進中性化・腐食促進試験を行った。その結果、ひび割れ部におけるひび割れ幅、中性化およびかぶり厚さと鉄筋腐食の関係について定量的なデータを得ることができた。

**キーワード**：鉄筋コンクリート, ひび割れ, 中性化, かぶり, 鉄筋腐食

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造建築物に生じたひび割れは、建築物の耐久性に大きな影響を与える要因である<sup>1), 2)</sup>。ひび割れによる劣化進行は、ひび割れ形状やかぶり厚さ等の影響を受けるため、建築物の耐久性を評価する上では、それらの要因がひび割れと劣化進行の関係に及ぼす影響を把握する必要がある。ひび割れと鉄筋腐食の関係は比較的古くから研究されているが、必ずしも十分に把握されていないのが実状である。そこで、本研究では、ひび割れのある鉄筋コンクリート造建築物の劣化予測に必要な資料を得るために、ひび割れが中性化および鉄筋腐食に及ぼす影響を実験的に検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験要因と水準

本実験で対象とするひび割れの発生部位、発生原因およびタイプを表-1に示す。本実験では、実際の建築物においてコンクリート剥落の事例が多いバルコニー下や底などに生じるひび割れを実験対象とした。ひび割れは、乾燥収縮による貫通ひび割れと、曲げ応力による非貫通ひび割れの2タイプとした。

実験要因と水準を表-2に示す。要因は、ひび割れ幅、ひび割れタイプ、かぶり厚さおよび

劣化環境とした。

### 2.2 劣化方法

ひび割れ後の劣化進行を把握するために、鉄筋を埋め込んだコンクリート試験体に所定のひび割れを導入後、表-3に示す環境下に置き、劣化を促進させた。劣化促進方法は、促進中性化を加えた乾燥と湿潤を繰り返すSWD、乾燥環境下で促進中性化するSDおよび10mm、20mmの深さまで中性化させた後、乾燥と湿潤を繰り返

表-1 実験対象ひび割れ

想定部位	代表的な要因	タイプ
バルコニー 庇	乾燥収縮	貫通
	曲げ応力	非貫通

表-2 実験要因と水準

要因	水準
ひび割れ幅	0, 0.1~0.2, 0.2~0.4, 0.4~0.8mm
ひび割れタイプ	貫通, 非貫通
かぶり厚さ	10, 20, 30mm
劣化環境	乾燥, 湿潤, 中性化

表-3 劣化促進方法

記号	劣化条件
SD	促進中性化
SWD	促進中性化(8日間)⇔湿潤(6日間)
SC10	深さ10mm 中性化後 ⇒[乾燥(8日間)⇔湿潤(6日間)]
SC20	深さ20mm 中性化後 ⇒[乾燥(8日間)⇔湿潤(6日間)]
促進中性化条件：20℃, RH60%, CO <sub>2</sub> 5%	
湿潤条件：60℃, RH95%	
乾燥条件：20℃, RH60%	

\*1 鉄建建設(株) 技術センター 材料・構造グループ 主任研究員 (正会員)

\*2 宇都宮大学 工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

\*3 (株)奥村組 技術研究所 住環境グループ 主任研究員 (正会員)

\*4 五洋建設(株) 建築エンジニアリング部 課長 (正会員)

返す SC10, SC20 の 4 種類とした。

## 2.3 試験体

### (1) 試験体の形状

試験体の形状を図-1, 2に示す。試験体断面は 100×100mm, 長さは 180 mm とした。貫通ひび割れ試験体は, 2面を試験面としてかぶり厚さは 10, 20, 30mm の 3水準とした。非貫通ひび割れ試験体は, 1面のみを試験面として, かぶり厚さは 10, 30mm の 2水準とした。なお, 試験面以外はエポキシでシールし, 鉄筋はφ12mm の磨き鋼棒を用いた。

### (2) コンクリートの使用材料と調合

コンクリートの使用材料と調合を表-4, 5に示す。水セメント比は 65%とした。標準養生材齢 28 日強度を表-5に併せて示す。

### (3) ひび割れ試験体の製作

試験体へのひび割れ導入は, コンクリート打込み後, 材齢 3 日で行った。ひび割れは, 一点集中載荷により試験体に曲げ応力を与え, 所定のひび割れ幅を形成した。貫通ひび割れは上下面を反転して載荷し, ひび割れを形成した。ひび割れ幅の測定は, クラックスケールを用いた。ひび割れ導入後, 所定面をエポキシでシールし, 材齢 28 日まで温度 20±2℃, 相対湿度 60±5% の環境下に静置した。材齢 28 日以降, 所定の劣化環境下に置いた。

## 2.4 測定項目と評価項目

測定項目と測定方法を表-6に示す。なお, 中性化深さはひび割れを中心に, ひび割れより両側 2, 5cm の部分の計 4 箇所を測定し, その平均値とした。

評価項目として質量減少率, 腐食面積率および腐食深さを算出した。質量減少率は式(1)から算出した。鉄筋腐食質量の測定におけるクエン酸二アンモニウム 10%溶液による錆の除去では, 未腐食部分についても質量が減少するため, 図-5に示す未腐食の鉄筋の質量減少量と浸漬時間の関係より求めた式(3)を用いて, 未腐食部分の表面積に応じて質量減少量を補正した<sup>3)</sup>。補正式を式(2)に示す。腐食面積率は式(4)より, 鉄筋

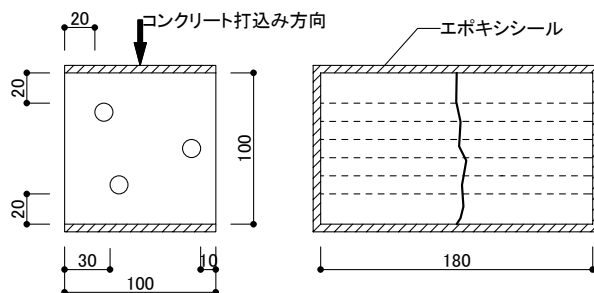


図-1 貫通ひび割れ試験体(試験体タイプ A)

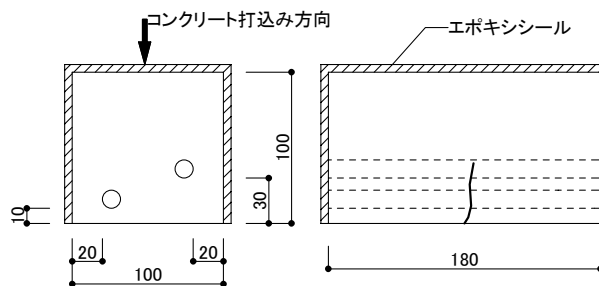


図-2 非貫通ひび割れ試験体(試験体タイプ B)

表-4 コンクリートの使用材料

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	鬼怒川産川砂 表乾密度:2.61g/cm <sup>3</sup> ,吸水率:1.72%
粗骨材	岩瀬産硬質砂岩砕石(最大骨材寸法 20mm) 表乾密度:2.66g/cm <sup>3</sup> ,吸水率:0.75%,実積率:60.1%
混和剤	AE 剤

表-5 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				材齢 28 日 圧縮強度
		水	セメント	細骨材	粗骨材	
65	48	177	272	872	951	24.3N/mm <sup>2</sup>

練り上がり時の空気量目標値: 4.5±1.5%

表-6 測定項目と測定方法

測定項目	測定方法
ひび割れ幅	クラックスケールを用いて 1 面につき 3 箇所測定し, その平均値とした
中性化深さ	鉄筋配置部の割裂面に 1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧し, 表面から赤色部分までの距離を測定した
鉄筋腐食(発錆)面積	鉄筋表面をスキャナーで読み込み, 画像処理により発錆面積を求めた
鉄筋腐食質量	鉄筋をクエン酸二アンモニウム 10%溶液に浸漬し, 錆を除去した後の鉄筋質量を記録した

測定材齢: 劣化促進開始後 4,13,52 週(一部 26 週)

の平均腐食深さは式(5)より求めた。

$$Wd = \frac{\Delta W}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

$$\Delta W = (W_0 - W) - W_c \times \frac{100 - S}{100} \quad (2)$$

$$W_c = \frac{0.912t^2 - 0.704t + 0.962}{1000} \times A_s \quad (3)$$

$$S = \frac{Ac}{As} \times 100 \quad (4)$$

$$D = \frac{\Delta W}{Ac \times \rho} \quad (5)$$

ここで、 $W_d$ ：質量減少率(%),  $W_0$ ：試験前の鉄筋質量(g),  $\Delta W$ ：補正後の質量減少量(g),  $W$ ：腐食生成物除去後の鉄筋質量(g),  $W_c$ ：未腐食部分の質量減少量(g),  $S$ ：腐食面積率(%),  $t$ ：クエン酸二アンモニウム 10% 溶液浸漬時間(日)[ $t < 7.5$ ],  $As$ ：鉄筋表面積( $\text{cm}^2$ ),  $Ac$ ：鉄筋腐食面積( $\text{cm}^2$ ),  $D$ ：平均腐食深さ(mm),  $\rho$ ：鉄筋の密度( $7.8\text{g}/\text{cm}^3$ )

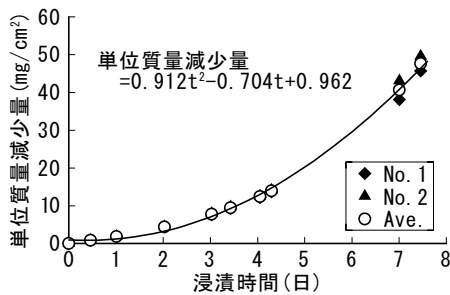


図-5 未腐食の鉄筋の質量減少量と浸漬時間の関係

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 中性化と腐食量

各シリーズにおける中性化残りと腐食面積率の関係を図-6に、中性化残りと質量減少率の関係を図-7に示す。

腐食面積率は、各シリーズとも中性化残りが小さくなるに伴い増加する傾向が認められる。SDシリーズの腐食面積率は中性化残りが0付近になっても低い値を示しているが、SWDシリーズではほぼ鉄筋全面に腐食が起こる結果となった。これは、SWDシリーズが促進劣化試験において水分を与えていることから、水分が鉄筋腐食に及ぼす影響が大きいと考えられる。また、SCシリーズにおいても、先行中性化と水分の影響により、腐食面積率が増加したものと考えられる。

質量減少率は、SWDシリーズが最も大きく、材齢52週を過ぎ腐食がほぼ鉄筋全面に達した試験体では0.8%を超えたが、概ね0.8%未満の値となった。また、SC10・20シリーズにおいても概ね0.8%以下の値となっ

た。SDシリーズでは中性化が進行しても低い値を示した。SWDシリーズでは中性化残りが小さくなるに伴い質量減少率が大きくなる傾向が認められるが、他のシリーズでは中性化が進行しても質量減少率の変化が小さい。全体的には、質量減少率よりも腐食面積率の方が中性化残りにより密接な関係が認められることから、腐食初期には、中性化残りから腐食面積率を推定できると考えられる。

#### 3.2 ひび割れ幅と腐食量

SDシリーズとSWDシリーズのかぶり厚さ30mmの鉄筋におけるひび割れ幅と腐食面積率の関係を図-8に、ひび割れ幅と質量減少率の関係を図-9に示す。なお、図中Aは貫通ひび

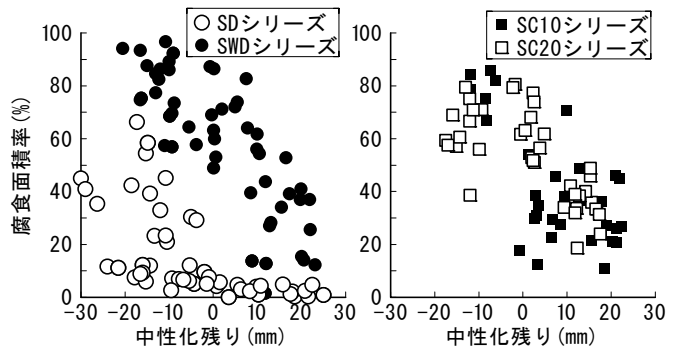


図-6 中性化残りと腐食面積率

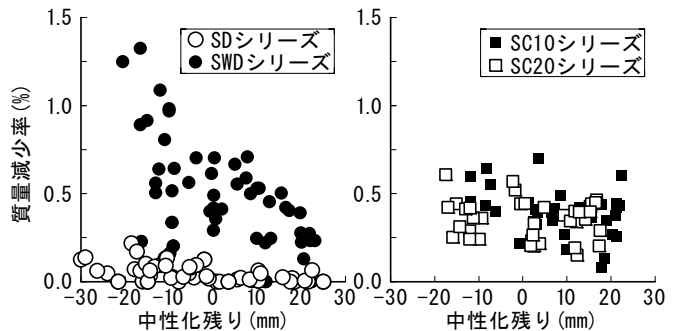


図-7 中性化残りと質量減少率

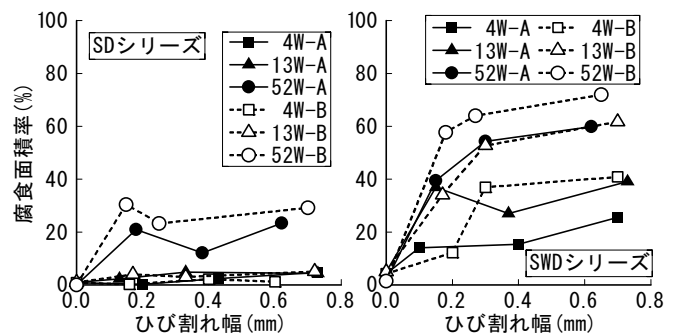


図-8 ひび割れ幅と腐食面積率(かぶり厚さ30mm)

割れを、Bは非貫通ひび割れを示す。

腐食面積率、質量減少率は、両シリーズとも、ひび割れ幅が大きくなるに伴い概ね増加する傾向が認められる。しかし、ひび割れ幅0からひび割れ幅0.2mm(ひび割れ幅0.1~0.2mm試験体)までの腐食面積率、質量減少率の増加と比較して、ひび割れ幅0.2mm以降(ひび割れ幅0.2~0.4mm, 0.4~0.8mm試験体)の増加は小さい。従って、ひび割れ幅が大きくなるに伴い腐食量がわずかずつ増加するが、腐食量はひび割れの有無が大きな要因であり、ひび割れ幅の影響は小さいことが分かる。

### 3.3 かぶり厚さと腐食量

ひび割れ幅 0.2~0.4mm の試験体におけるかぶり厚さと腐食面積率の関係を図-10に、かぶり厚さと質量減少率の関係を図-11に示す。

腐食面積率は、全てのシリーズともかぶり厚さが大きくなるに伴い減少する傾向が認められる。質量減少率も、かぶり厚さが大きくなるに伴い概ね減少する傾向が認められるが、腐食面積率ほどかぶり厚さとの関係が明確でない。これは質量減少率が微小であるためと考えられる。以上より、腐食量はかぶり厚さと密接な関係があることが分かる。これは、中性化残りと腐食量の関係とほぼ一致しており、かぶり部分の中性化が鉄筋の腐食量に大きな影響を与えるためと考えられる。また、かぶり厚さと腐食面積率の関係は、ひび割れ幅と腐食面積率の関係より明確な相関が認められることから、腐食発生後の鉄筋全体における腐食面積の進展は、ひび割れ幅よりもかぶり厚さの影響を大きく受けるものと推察される。

### 3.4 腐食面積率の経時変化

各シリーズの腐食面積率の経時変化を図-12に示す。なお、腐食面積率は、ひび割れ幅0.1~0.2mm, 0.2~0.4mm, 0.4~0.8mm試験体の測定値の平均とした。図中の数字

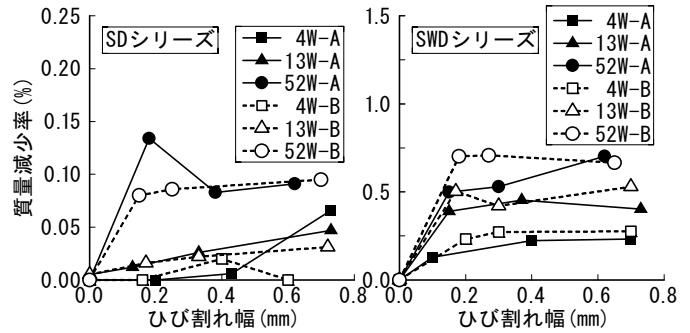


図-9 ひび割れ幅と質量減少率(かぶり厚さ 30mm)

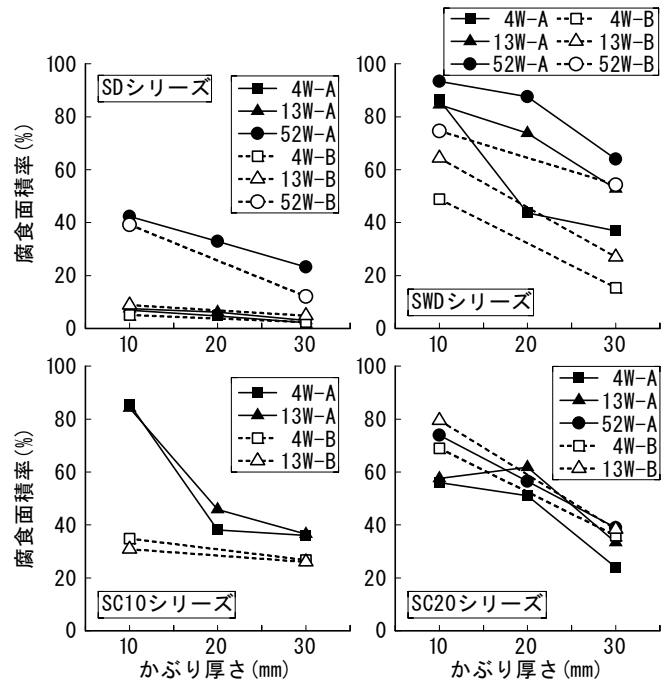


図-10 かぶりと腐食面積率(ひび割れ幅 0.2~0.4mm)

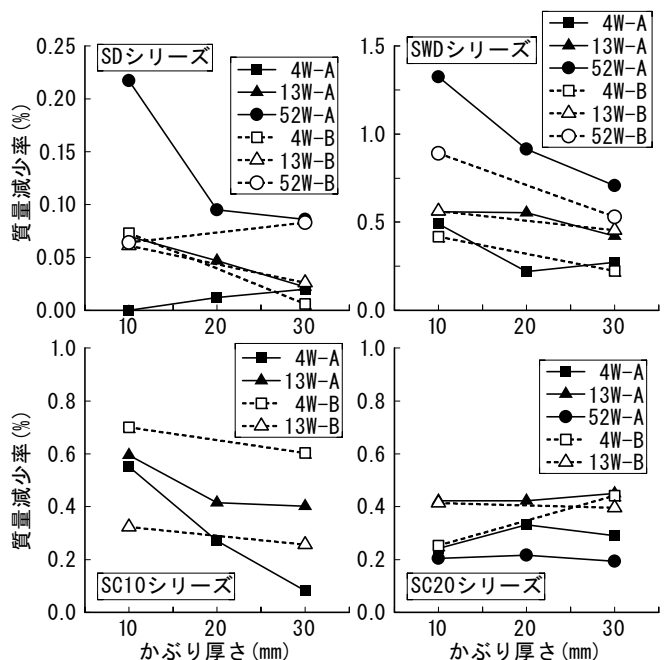


図-11 かぶりと質量減少率(ひび割れ幅 0.2~0.4mm)

はかぶり厚さ示す。

SD シリーズについては、腐食面積率が全体的に小さく、全ての鉄筋において材齢とともに徐々に腐食面積率が増加する傾向が認められる。

SWD シリーズについては、全ての鉄筋において材齢とともに腐食面積率が増加する傾向が認められるが、その中でも腐食面積率の大きい貫通ひび割れのかぶり厚さ 10mm の鉄筋については、材齢 4 週で腐食面積率が頭打ちになり、その後の変化は小さい。一方、腐食面積率が小さい非貫通ひび割れのかぶり厚さ 30mm の鉄筋については、材齢とともに徐々に腐食面積率が増加しており、SD シリーズとほぼ同様の傾向が認められる。

SC10 シリーズについては、貫通ひび割れのかぶり厚さ 10mm の鉄筋を除き、材齢 4 週の腐食面積率がさほど大きくないが、材齢 4 週以降の腐食面積率の変化が小さい。

SC20 シリーズについては、材齢 4 週以降の腐食面積率の変化が SC10 シリーズより大きいものの、材齢 13 週以降の変化は小さく SC10 シリーズと同様の傾向が認められる。

SD シリーズの劣化環境は中性化のみであるのに対し、SWD シリーズの劣化環境は中性化の他に乾湿の繰り返しにより水分を与えている。また、SC シリーズは先行して中性化させ、劣化促進では乾湿の繰り返ししか行っていないので、劣化促進において中性化が進行しない。かぶり部分の中性化が鉄筋の腐食量に大きな影響を与えることを考慮すると、水分が供給され、かつ鉄筋部分の中性化が進行する場合、鉄筋の腐食は進行するものと考えられる。SC シリーズは、水分を与えているが中性化が進行しないため、腐食面積率も増加しないものと推察される。

### 3.5 質量減少率の経時変化

各シリーズの質量減少率の経時変化を図-13 に示す。なお、質量減少率は、各ひび割れ幅試験体の測定値の平均とした。

SD シリーズについては、材齢とともに直線的に質量減少率が増加する傾向が認められる。

SWD シリーズについては、材齢 4 週の質量減少率が大きな値となっているが、材齢 4 週以降は SD シリーズと同様の傾向が認められる。材齢 4 週の質量減少率が大きな値となっているのは、ひび割れ部からの水分の供給により、4 週以前の初期材齢での質量減少率が大きいためと推察さ

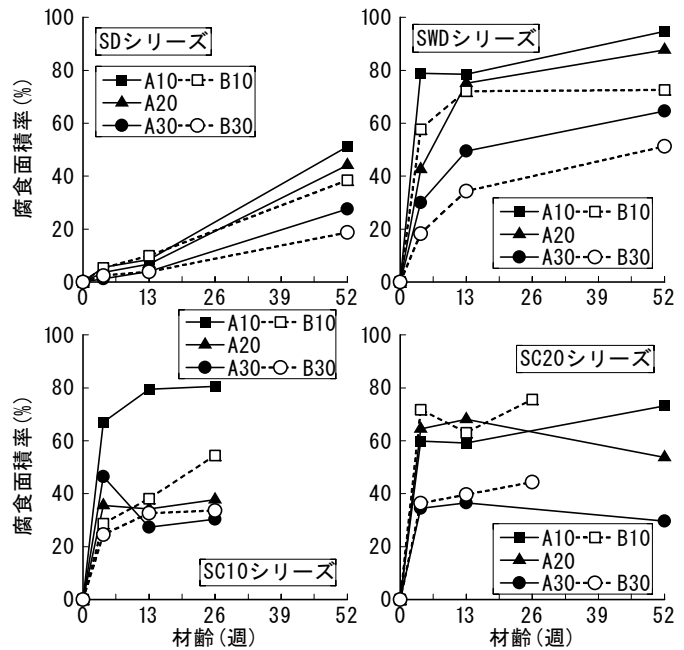


図-12 腐食面積率の経時変化  
(各ひび割れ幅試験体の測定値の平均)

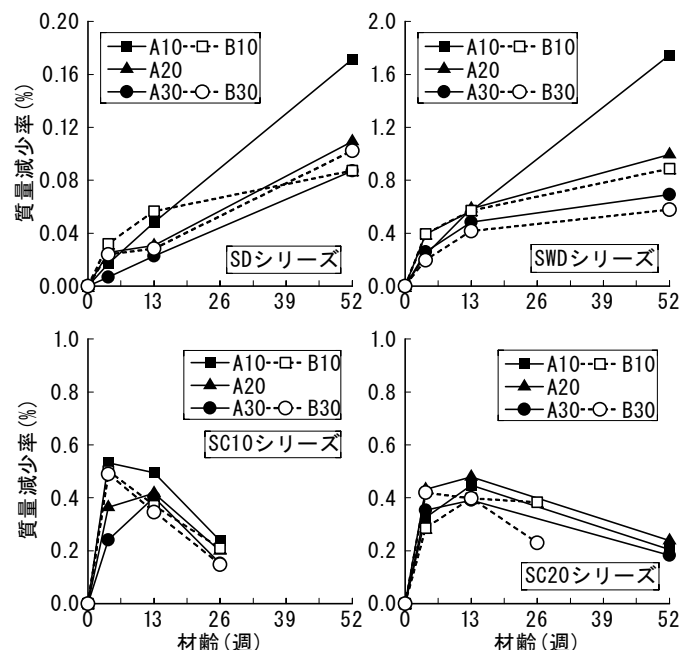


図-13 質量減少率の経時変化  
(各ひび割れ幅試験体の測定値の平均)

れる。

SC シリーズについては、ばらつきが大きいですが、全体的には材齢 4 週以降の変化が小さい。SC シリーズについては、腐食面積率、質量減少率とも材齢 4 週以降の変化が小さく、ほとんど腐食が進行していない。

腐食面積率と質量減少率の経時変化より、水分の供給と鉄筋部分の中性化の進行の双方が作用する場合、鉄筋の腐食は進行すると考えられる。また、中性化が進行し水分が供給されない場合、腐食はわずかずつ進行し、中性化が進行せず水分が供給される場合、腐食はほとんど進行しないと考えられる。

### 3.6 腐食深さの経時変化

各シリーズの腐食深さの経時変化を図-14 に示す。なお、腐食深さは、各ひび割れ幅試験体の測定値の平均とした。

SD シリーズや SC20 シリーズについては、材齢とともに腐食深さが大きくなる傾向が認められるが、全体的には、材齢 4 週以降の腐食深さの増加は小さい。腐食深さは全シリーズとも概ね 0.06mm 以下であり、シリーズの違いによる差は認められなかった。SD シリーズ、SWD シリーズについては、腐食面積率や質量減少率が増加しているが、腐食深さの増加は小さい。従って、腐食はひび割れ部から鉄筋に沿って広がっており、局所的な腐食とはなっていないものと推察される。

## 4. まとめ

- (1) ひび割れがある場合、ひび割れがない場合よりも腐食量が増加する。また、ひび割れ幅が大きくなると腐食量が増加する傾向があるが、増加量はわずかである。
- (2) かぶり厚さが小さくなると腐食量が増加する。
- (3) 最初にひび割れ部で腐食が発生するが、その後の鉄筋全体における腐食面積の進展は、ひび割れ幅よりもかぶり厚さの影響を大きく受ける。

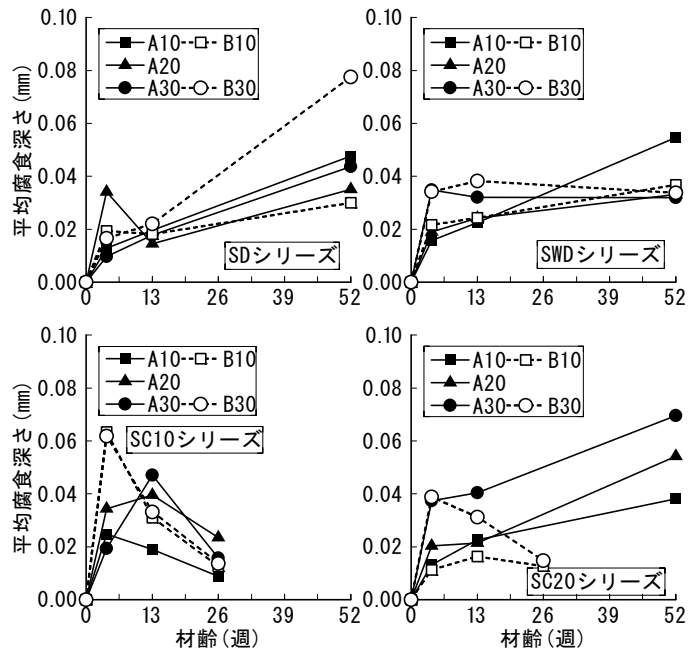


図-14 腐食深さの経時変化  
(各ひび割れ幅試験体の測定値の平均)

- (4) 腐食初期には、中性化残りから腐食面積率を推定できると考えられる。
- (5) 水分が供給されかつ鉄筋部分の中性化が進行する場合、鉄筋の腐食は進行する。水分が供給されず鉄筋部分の中性化が進行する場合、鉄筋の腐食は緩やかに進行する。中性化が進行しない場合、腐食はほとんど進行しない。
- (6) 本実験条件の場合、腐食はひび割れ部から鉄筋に沿って広がり、局所的な腐食とはならない。また、環境条件の違いによる腐食深さへの影響は小さい。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会, 「鉄筋コンクリート造のひび割れ対策(設計・施工)指針・同解説」, pp.124~132, 2002.12
- 2) 秋山泰輔, 小坂寛己, 山内博司: ひび割れの生じている鉄筋コンクリート部材の耐久性に関する研究, コンクリート工学, Vol.27, No.2, pp.31~39, 1989.2
- 3) 柳濟峻, 大野義照: 中性化したコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼすひび割れ幅と水セメント比の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第559号, pp.15~21, 2002.9