

# ひび割れのあるRC造建築物の劣化予測に関する研究 —ひび割れが中性化および鉄筋腐食に及ぼす影響—

中村裕介\* 河野政典\*

## 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关系到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これまでも研究されているが、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、発生要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庇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。

実験因子と水準を表-2に示す。因子は、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、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に示す条件下で劣化を促進させた。劣化促進の種類は、促進中性化を加えた乾燥と湿潤を繰り返すシリーズ(SWD)、乾燥環境下で促進中性化するシリーズ(SD)および所定深さまで中性化させた後、乾燥と湿潤を繰り返すシリーズ(SC10, SC20)の4種類とした。

## 2.3 試験体

### a. 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180mm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。

### b. 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。

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 実験因子と水準

因子	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 劣化促進の種類

シリーズ記号	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°C, RH60%, CO <sub>2</sub> 5%	
湿潤条件: 60°C, RH95%	
乾燥条件: 20°C, RH60%	

\*技術研究所

c. 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荷重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荷重し、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より両側2cmおよび5cm離れた位置の計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、式(2)より未腐食部分の表面積に応じた質量減少量の補正を行った<sup>3)</sup>。未腐食部分の鉄筋の質量減少量と浸漬時間の関係を式(3)に示す。腐食面積率は式(4)より、鉄筋の平均腐食深さは式(5)より求めた。

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

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

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

$$S = \frac{A_c}{A_s} \times 100 \quad (4)$$

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

ここで、Wd：質量減少率(%)、W<sub>0</sub>：試験前の鉄筋質量(g)、ΔW：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)、Wc：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]、A<sub>s</sub>：鉄筋表面積(cm<sup>2</sup>)、A<sub>c</sub>：鉄筋腐食面積(cm<sup>2</sup>)、D：平均腐食深さ(mm)、ρ：鉄筋の密度(7.8g/cm<sup>3</sup>)

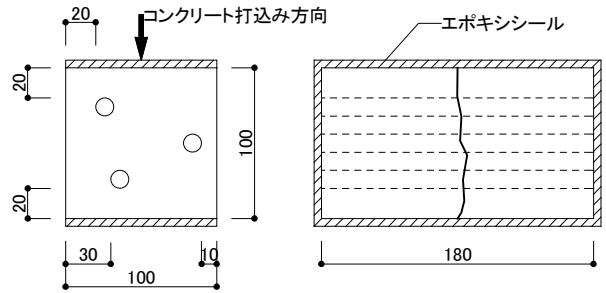


図-1 貫通ひび割れ試験体(試験体タイプA)

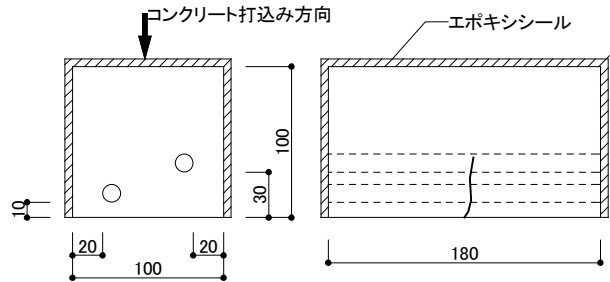


図-2 非貫通ひび割れ試験体(試験体タイプB)

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, 26, 52週	

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 中性化と腐食量

劣化促進の各シリーズにおける中性化残り（かぶり厚さ－中性化深さ）と腐食面積率の関係を図－3に、中性化残りと質量減少率の関係を図－4に示す。

各シリーズとも中性化残りが小さくなるにつれて、腐食面積率は大きくな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たが、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。これは促進劣化において水分を加えたことによるものと推察される。したがって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。

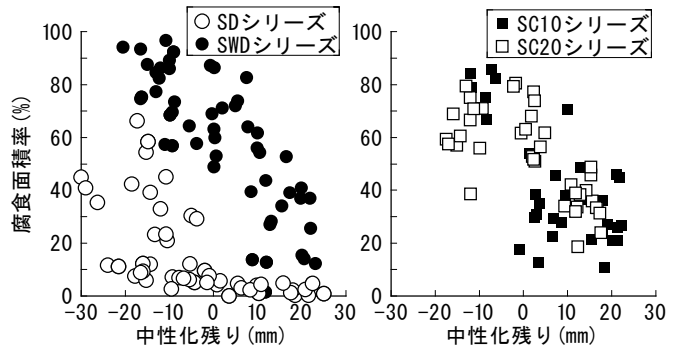
質量減少率はSWDシリーズが最も大きく、材齢52週を過ぎ腐食がほぼ鉄筋全面に達した試験体では0.8%を超えたが、概ね0.8%未満の値となった。また、SC10・20シリーズにおいても概ね0.8%以下の値となり、SWDシリーズと同様の傾向を示した。SDシリーズでは中性化が進行しても低い値を示した。SWDシリーズでは中性化残りが小さくなるにつれて質量減少率が大きくなる傾向が認められるが、他シリーズでは中性化が進行しても質量減少率の変化が小さい。

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との相関性が高いことが認められるため、中性化残りから腐食面積率を推定できると考えられる。

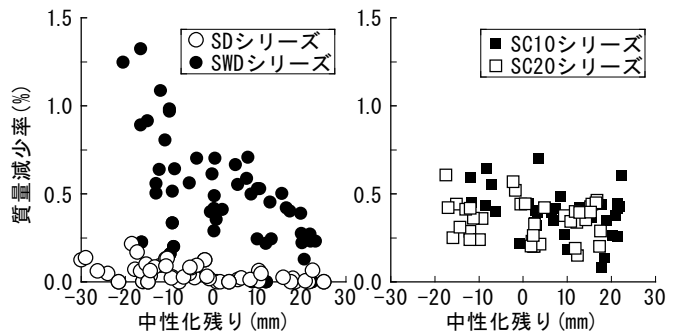
#### 3.2 ひび割れ幅と腐食量

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－5に、ひび割れ幅と質量減少率の関係を図－6に示す。なお、図中Aは貫通ひび割れを、Bは非貫通ひび割れを示す。

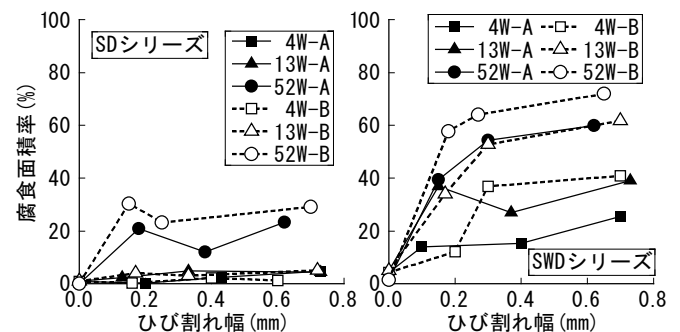
腐食面積率、質量減少率は、両シリーズとも、ひび割れ幅が大きくなるにつれて概ね増加する傾向が認められる。しかし、ひび割れ幅0から0.2mm（ひび割れ幅0.1～0.2mm試験体）までの腐食面積率、質量減少率の増加と比較して、ひび割れ幅0.2mm以降（ひび割れ幅0.2～0.4mm、0.4～0.8mm試験体）の増加は小さい。したがって、ひび割れ幅が大きくなるにつれて腐食量がわずかながら増加するが、腐食量はひび割れの有無が大きな要因であり、ひび割れ幅の影響は小さいことが分かる。



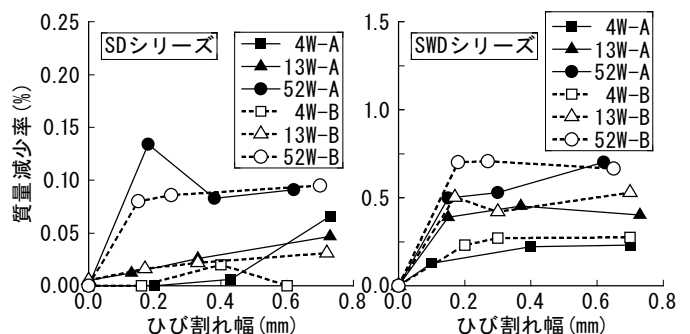
図－3 中性化残りと腐食面積率



図－4 中性化残りと質量減少率



図－5 ひび割れ幅と腐食面積率（かぶり厚さ30mm）



図－6 ひび割れ幅と質量減少率（かぶり厚さ30mm）

### 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-7に、かぶり厚さと質量減少率の関係を図-8に示す。

各シリーズともかぶり厚さが大きくなるにつれて腐食面積率が小さくな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つれて概ね小さくな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の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それと比較して、より相関性が高いと見えることから、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 腐食量の変化

ひび割れ幅 0.2~0.4mm の試験体における材齢に伴う腐食面積率の変化を図-9に示す。なお、図中の数字はかぶり厚さ示す。

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大きくな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大きくな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大きくなっており、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週の腐食面積率がそれほど大きくないが、材齢4週以降の腐食面積率の変化がほとんどない。

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は 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。

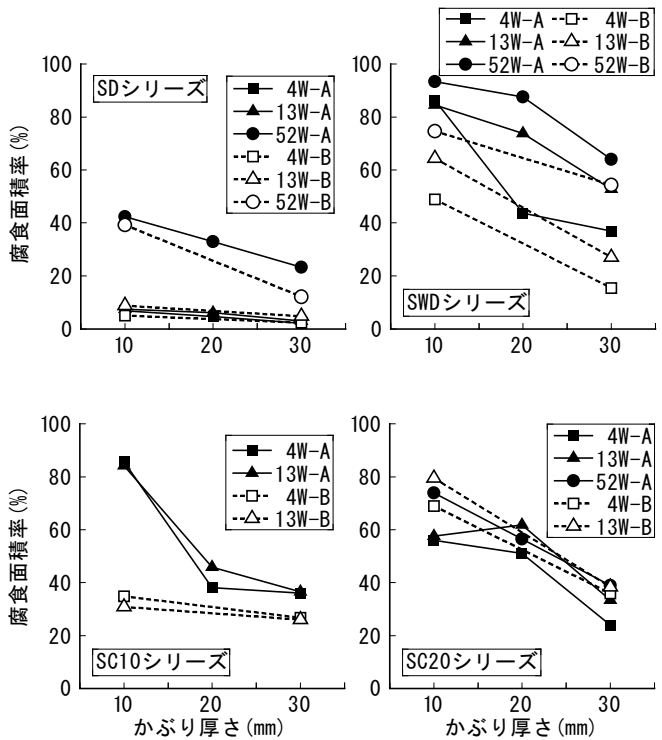


図-7 かぶりと腐食面積率(ひび割れ幅 0.2~0.4mm)

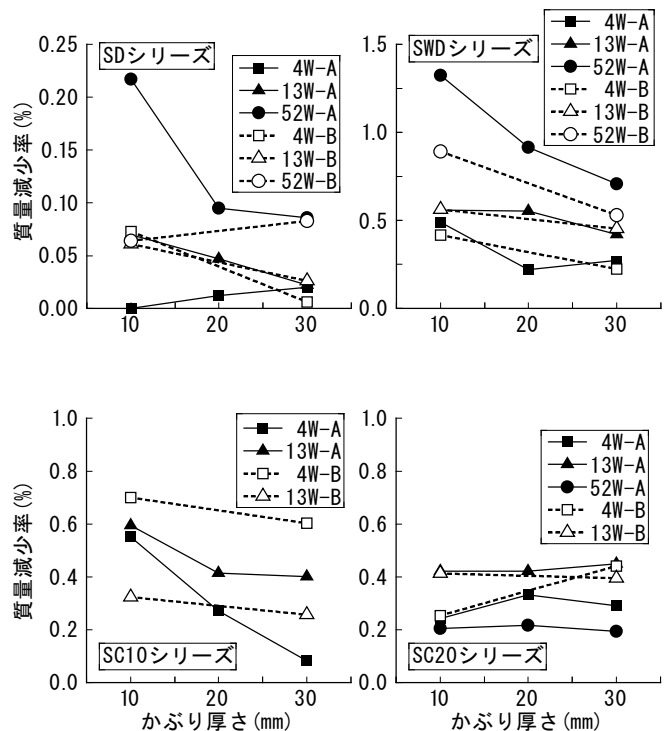


図-8 かぶりと質量減少率(ひび割れ幅 0.2~0.4mm)

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、水分が供給されてなおかつ鉄筋部分の中性化が進行する場合に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、腐食面積率も大きくならないものと推察される。

### 3.5 腐食速度

SD シリーズ、SWD シリーズのひび割れのある試験体における材齢に伴う質量減少率の変化を図-10 に示す。質量減少率は図-6 よりひび割れ幅の影響が小さいと判断されたため、各ひび割れ幅試験体の測定値の平均とした。

質量減少率はばらつきがあるものの、材齢に対してほぼ直線的に大きくなっていることが認められる。そこで材齢と質量減少率の関係を直線で近似し、その傾きを鉄筋の腐食速度  $q$  (%/週) とすることとした。

なおSWD シリーズについては、原点を通る直線を想定した場合、材齢4週の質量減少率が大きな値となる。これは、ひび割れ部からの水分の供給により4週以前の初期材齢に腐食が発生しているためと考えられる。そこで、4週以前の初期材齢での腐食による質量減少率  $b$  (%) を切片とし、鉄筋の質量減少率  $Wd$  (%) と材齢  $t$  (週) との関係を式(6)で近似した。なお、ひび割れ部からの水分供給による初期質量減少率  $b$  については、材齢4週から52週までのデータにより直線近似した時に得られた切片の平均値とした。

$$Wd = qt + b \quad (6)$$

ここで、 $Wd$  : 質量減少率(%),  $q$  : 腐食速度(%/週),  $t$  : 材齢(週, 4週以降),  $b$  : ひび割れ部からの水分供給による初期質量減少率(%)

式(6)による近似の結果から得られた腐食速度とかぶり厚さの関係を図-11 に示す。

腐食速度は、各シリーズともかぶり厚さが大きくなるにつれて、小さくなる傾向が認められる。また、SD シリーズは貫通ひび割れと非貫通ひび割れとに差がな

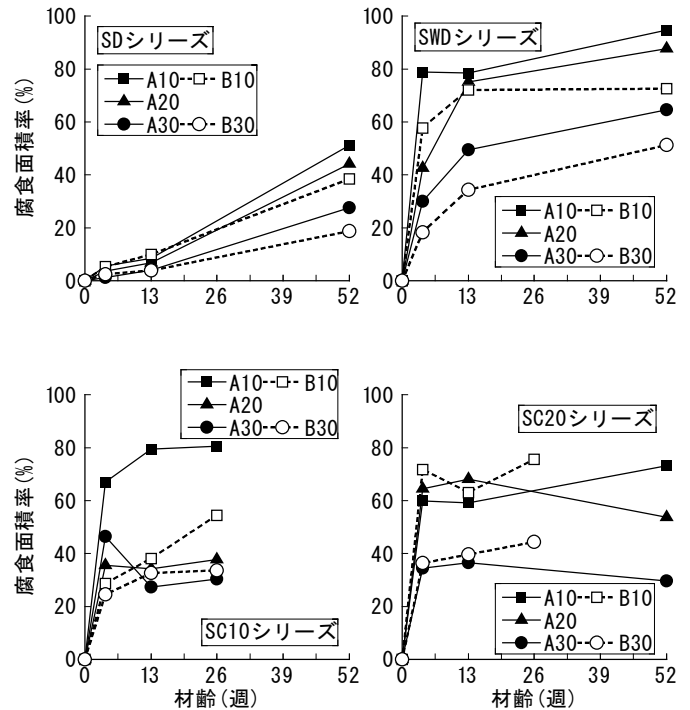


図-9 腐食面積率の経時変化(ひび割れ幅 0.2~0.4mm)

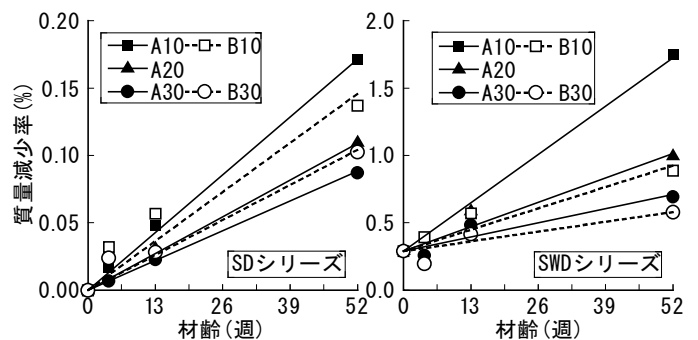


図-10 質量減少率の経時変化  
(各ひび割れ幅試験体の測定値の平均)

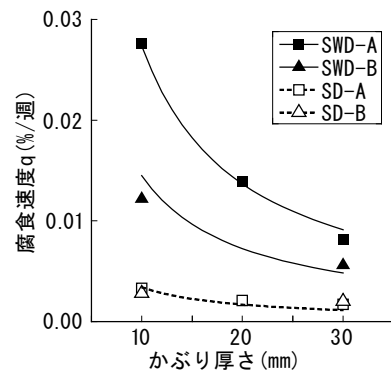


図-11 質量減少率の変化

いが、SWD シリーズについては貫通ひび割れの方が腐食速度が大きくなった。これは、SWD シリーズの場合、水分の供給により腐食が促進されるためと推察される。ところで、外部から鉄筋表面への酸素や水分の供給量が Fick の法則に従う拡散によって定まるとすれば、コンクリート中の鉄筋の腐食速度は、かぶり厚さに反比例することになる。そこで、かぶり厚さと腐食速度の関係を式(7)で近似した。

$$q=a(1/C) \quad (7)$$

ここで、a：環境条件の違いによる定数、C：かぶり厚さ(mm)

式(6)、式(7)の近似結果より、ひび割れ部における4週以降における任意の材齢での質量減少率は式(8)で表され、式(8)の定数 a、b は表一七となる。

$$Wd=a(1/C)t+b \quad (8)$$

ここで、Wd：質量減少率(%)、a：環境条件の違いによる定数、C：かぶり厚さ(mm)、t：材齢(週、4週以降)、b：ひび割れ部からの水分供給による初期質量減少率(%)

#### 4. まとめ

ひび割れが中性化および鉄筋腐食に及ぼす影響を明らかにするため、供試体を用いて促進劣化試験を行った。その結果、鉄筋腐食と中性化、ひび割れ、およびかぶり厚さとの関係について以下のことが明らかになった。

また、試験結果に基づき、ひび割れの影響を考慮した鉄筋の腐食速度を導き、任意の材齢における質量減少率の予測式を示すことができた。

- i. ひび割れが有る場合、ひび割れがない場合よりも腐食量が増加するが、ひび割れ幅が大きくなっても腐食量の増加はわずかである
- ii. 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
- iii. 中性化残り(かぶり厚さ-中性化深さ)と腐食面積率の相関性が高い

表一七 式(8)の実験定数

環境	ひび割れタイプ	環境条件の違いによる定数 a	ひび割れ部からの水分供給による初期質量減少率 b
SD シリーズ (屋内)	貫通 (乾燥収縮) 非貫通 (曲げ応力)	0.034	0
SWD シリーズ (屋外)	貫通 (乾燥収縮)	0.274	0.29
	非貫通 (曲げ応力)	0.145	

- iv. 水分が鉄筋腐食に及ぼす影響が大きいですが、水分が供給されてなおかつ鉄筋部分の中性化が進行する場合に鉄筋の腐食が促進する

#### 5. あとがき

本実験で行った促進劣化試験と実際の建築物との関係を確認するために、曝露試験を並行して行っている。曝露試験のデータが蓄積できた時点で、相関関係を求め、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役立てたい。

なお本研究は、五洋建設、鉄建建設とともに平成12年度より行った共同研究の成果である。また、研究の遂行にあたり、ご指導頂いた宇都宮大学榊田佳寛教授に深く謝意を表す。

#### 【参考文献】

- 1) 例えば、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」、pp124～132、2002.12
- 2) 秋山泰輔ほか、「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、pp31～39、1989.2
- 3) 柳済峻ほか、「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、pp15～21、2002.9