

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関する研究

唐沢 智之^{*1}本間 博行^{*1}藤原 達夫^{*2}

概 要

「品確法」が制定されて以来、鉄筋コンクリート造建築物に発生するひび割れ問題は、顧客の注目を集めるようになってきている。また、性能規定化の流れの中で建物の耐久性については、今後性能明示が要求され、建物の劣化進行を予測する技術が必要になると考えられる。本研究では、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し、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ことを目的とした。その結果、ひび割れ部の劣化進行過程を予測する上で有効な資料となる、中性化、ひび割れ、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

A STUDY ON FORECASTING DETERIORATION OF CRACKED
REINFORCED CONCRETE STRUCTURESToshiyuki KARASAWA^{*1}Hiroyuki HONMA^{*1}Tatsuo FUJIWARA^{*2}

Abstract

Since the enactment of the law for securing housing quality, the problem of cracking in reinforced concrete structures has attracted the attention of owners. In the trend towards performance specifications, an explicit performance indication will be required in terms of the durability of buildings, and there will be an ever increasing need for techniques for estimating the progress of building deterioration. This study is intended to clarify the impact of cracks on carbonation and corrosion of reinforcements and to collect necessary information for predicting degradation of cracked reinforced concrete structures. Through the research, we obtained data on quantitative relationships between carbonation, cracking and cover thickness and corrosion of reinforcements. This data is useful for estimating the deterioration process of cracked zones.

Keywords: reinforced concrete, cracking, carbonation, concrete cover, corrosion of reinforcement

* 1 Architectural Technology Development Group, Institute of Technology, Engineering Division

* 2 Manager, Planning Business Group, Engineering Division

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関する研究

唐沢 智之^{*1}・本間 博行^{*1}・藤原 達夫^{*2}

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¹⁾。ひび割れによる建物の劣化進行は、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。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および所定深さまで中性化させた後、乾燥と湿潤を繰り返す

表-1 実験対象ひび割れ

想定部位	代表的な要因	タイプ
バルコニー底	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
SWD	促進中性化(8日間)⇔湿潤(6日間)
SD	促進中性化
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 ₂ 5%	
湿潤条件: 60℃, RH95%	
乾燥条件: 20℃, RH60%	

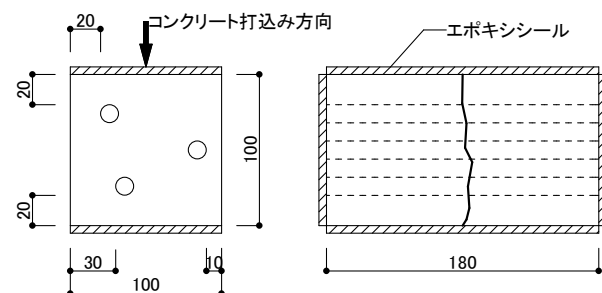


図-1 貫通ひび割れ試験体(試験体タイプ A)

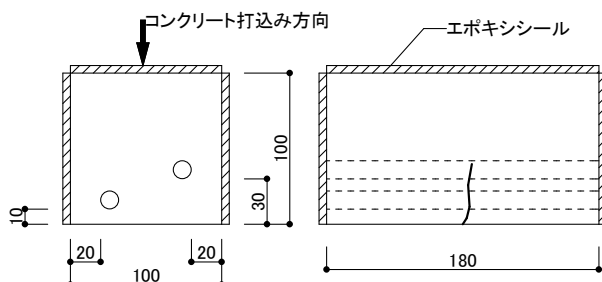


図-2 非貫通ひび割れ試験体(試験体タイプ B)

* 1 エンジニアリング本部 技術研究所 建築技術開発グループ

* 2 エンジニアリング本部 建築技術部 建築技術グループリーダー

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180mmとした。図-1の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。図-2の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, 打込み鉄筋には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。標準水中養生材齢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, 図-3に示すように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。ひび割れ導入状況を写真-1に示す。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 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, 相対湿度 $60 \pm 5\%$ 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, 中性化の測定位置を図-4に示す。図-4に示すように, 測定位置に応じて“中性化深さ”, “ひび割れ部中性化深さ”, “中性化幅”, “中性化長さ”と定義した。なお, “中性化深さ”はひび割れを中心に, ひび割れより左右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と腐食面積率を算出した。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。補正式を式

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 ³
細骨材	鬼怒川産川砂 表乾密度:2.61g/cm ³ , 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 ³ , 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 ³)				材齢 28 日 圧縮強度 (N/mm ²)
		水	セメント	細骨材	粗骨材	
65	48	177	272	872	951	24.3

練り上がり時の空気量目標値: $4.5 \pm 1.5\%$

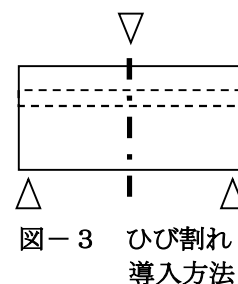


図-3 ひび割れ導入方法

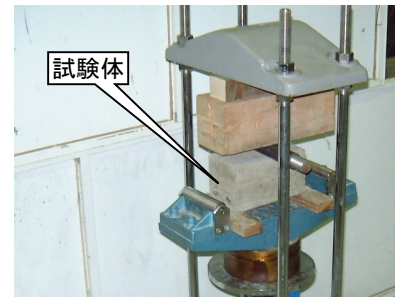


写真-1 ひび割れ導入状況

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 ひび割れ部中性化深さ 中性化幅 中性化長さ	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(図-4)
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: 劣化後 4, 13, 26, 52 週 (52 週は SC10 を除く)	

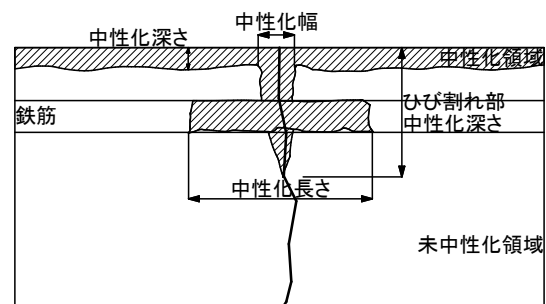


図-4 中性化の測定位置

(2)に示す。腐食面積率は式(4)より求めた。

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

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

$$Wc = \frac{0.347t^2 - 0.265t + 0.363}{1000} \times L \quad (3)$$

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

ただし、 Wd ：質量減少率(%), W_0 ：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)[$t < 7.5$], L ：鉄筋長(mm), Ac ：鉄筋腐食面積(cm^2), As ：鉄筋表面積(cm^2)

3. ひび割れ幅と中性化

SD・SWD シリーズの非貫通ひび割れにおけるひび割れ幅とひび割れ部中性化深さの関係を図-6に、中性化幅との関係を図-7に、中性化長さとの関係を図-8にそれぞれ示す。ひび割れ部中性化深さはかぶり厚さ10mmと30mmの平均値、中性化幅はかぶり厚さ10mmの値、中性化長さはかぶり厚さ30mmの値、ひび割れ幅は各観察材齢時の実測値とした。

ひび割れ幅とひび割れ部中性化深さの関係は、SD・SWD シリーズともに、ひび割れ幅 0(ひび割れなし試験体)に対し、ひび割れ幅が大きくなるにつれてひび割れ部中性化深さも増加する傾向を示した。また、ひび割れ部中性化深さは、材齢の進行にともない大きくなり、SD シリーズでは、材齢52週にて全断面に達した。なお、貫通ひび割れ試験体は、材齢4週までは、同様の傾向を示したが、材齢13

週で中性化が試験体断面を貫通する結果となった。

ひび割れ幅と中性化幅との関係は、中性化深

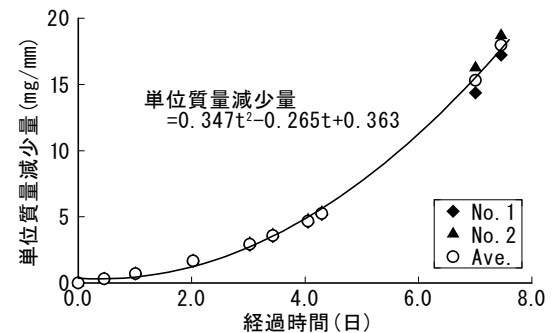


図-5 未腐食の鉄筋の質量減少量と浸漬時間の関係

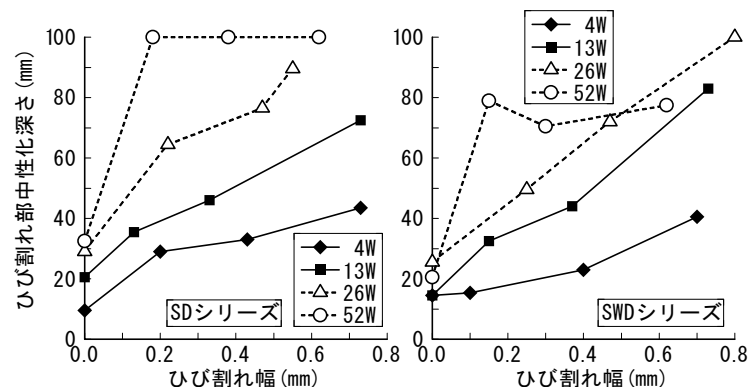


図-6 ひび割れ幅とひび割れ部中性化深さの関係

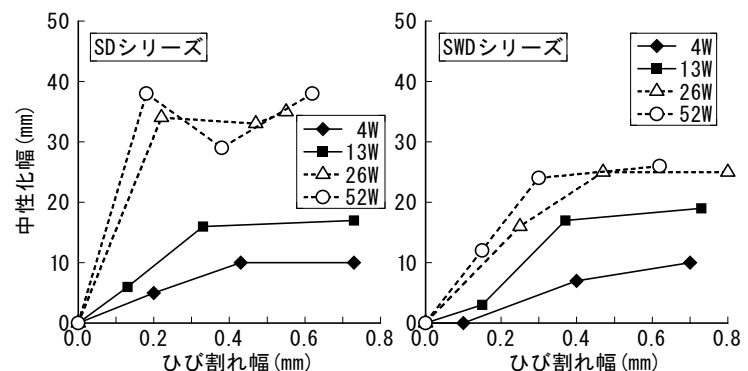


図-7 ひび割れ幅と中性化幅の関係

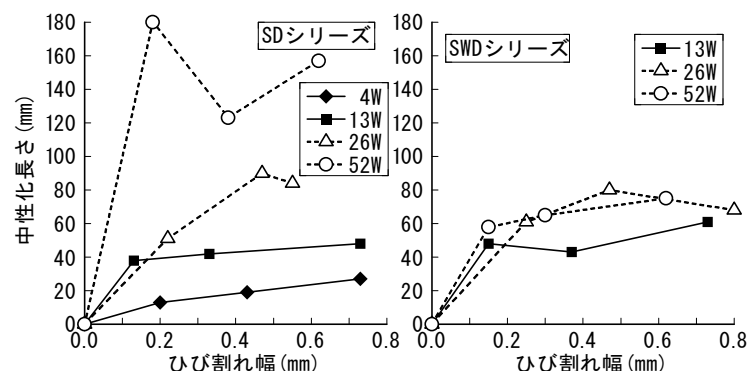


図-8 ひび割れ幅と中性化長さの関係

さと同様に、ひび割れ幅が大きくなるにつれて中性化幅も増加し、また、材齢とともにその値が大きくなる傾向が認められた。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)までの増加と比較して、SD シリーズの材齢 26, 52 週ではひび割れ幅 0.2mm 以降(ひび割れ幅 0.2~0.4mm, 0.4~0.8mm 試験体)の増加が、その他では 0.4mm 以降(ひび割れ幅 0.4~0.8mm 試験体)の増加が小さい結果となった。

ひび割れ幅と中性化長さの関係についても、ひび割れ幅が大きくなるにつれて中性化長さも増加する傾向が認められた。また、材齢初期において中性化幅よりも中性化長さの方が大きい値を示したのは、本実験の場合、鉄筋部に沿って中性化が進行したためと考えられる。

以上より、ひび割れ部における中性化は、ひび割れ幅が大きくなるにつれて、中性化深さ、中性化幅、鉄筋部の中性化長さともに進行するものと考えられる。中性化幅、中性化長さのいずれも、ひび割れ幅 0.2~0.4mm 以降ではその増加が小さいことから、ひび割れ部における中性化の影響は、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ものと考えられる。

4. 中性化と腐食量

4. 1 中性化と腐食面積率

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-9に、SD・SWD シリーズおよび SC10・20 シリーズにおける中性化長さと腐食面積率の関係をそれぞれ図-10、11に示す。

中性化残りと腐食面積率の関係は、各シリーズともに中性化残りが小さくなるにつれて、腐食面積率が大きくな

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。

中性化長さと腐食面積率の関係は、中性化残りがない場合、試験体表面からの中性化の進行により、中性化長さが鉄筋部全面に達している

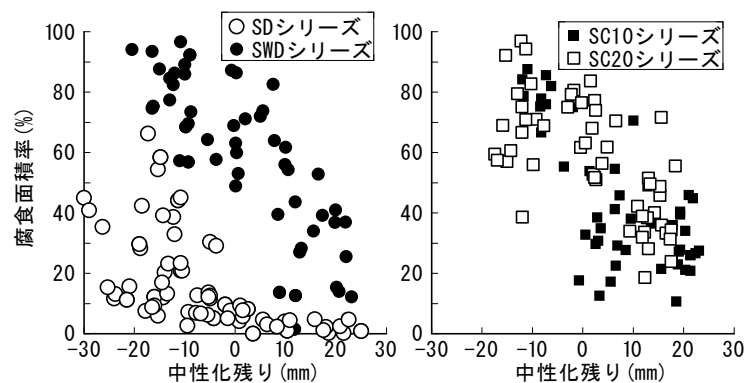


図-9 中性化残りと腐食面積率の関係

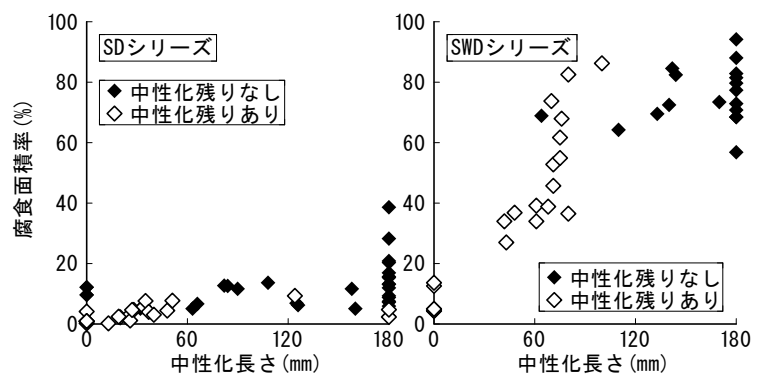


図-10 中性化長さと腐食面積率の関係(SD・SWD)

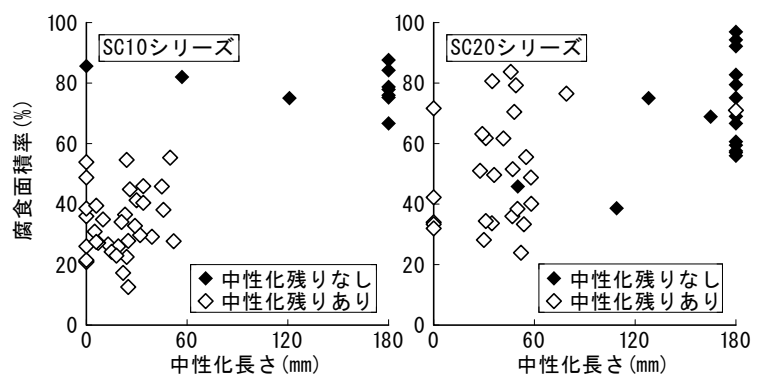


図-11 中性化長さと腐食面積率の関係(SC10・SC20)

ために腐食面積率が大きな値となる。一方、中性化残りがある場合、試験体表面からの中性化が鉄筋部に達していないにも係わらず、腐食面積率が大きい値となった。これは、中性化長さの影響によるものと考えられ、鉄筋がひび割れに直交している場合、ひび割れ部における中性化により局所的な腐食が先行していくものと推察される。

4. 2 中性化と質量減少率

各シリーズにおける中性化残りと質量減少率の関係を図-12に示す。

SWD シリーズでは中性化残りが小さくなる傾向があるが、この傾向は質量減少率よりも腐食面積率の方がより密接な関係であることから、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。質量減少率は、SWD シリーズが最も大きく、材齢 52 週を過ぎ腐食面積がほぼ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。

5. ひび割れ幅と腐食量

SD シリーズと SWD シリーズの非貫通ひび割れ試験体でかぶり厚さ 30mm の鉄筋におけるひび割れ幅と腐食面積率の関係を図-13に、ひび割れ幅と質量減少率の関係を図-14に示す。

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 からひび割れ幅 0.2mm 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 以降の増加は小さい。従って、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。これは、ひび割れ幅と中性化長さの関係とほぼ一致しており、鉄筋部分における中性化が腐食量に大きな影響を与えていることが分かる。

6. 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-15に、

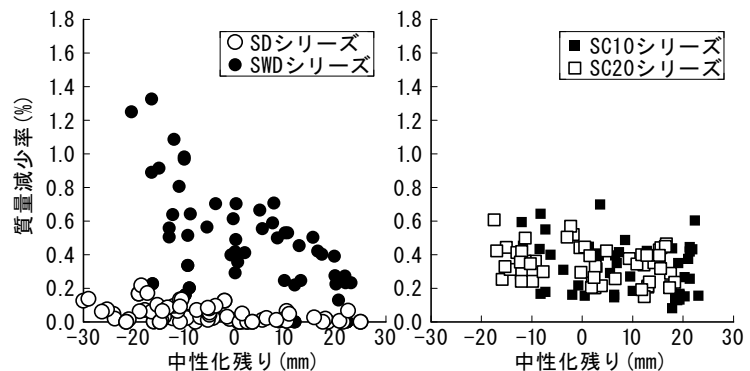


図-12 中性化残りと質量減少率の関係

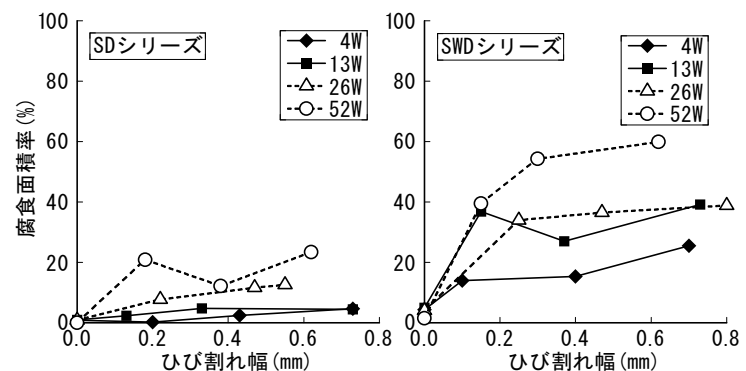


図-13 ひび割れ幅と腐食面積率の関係

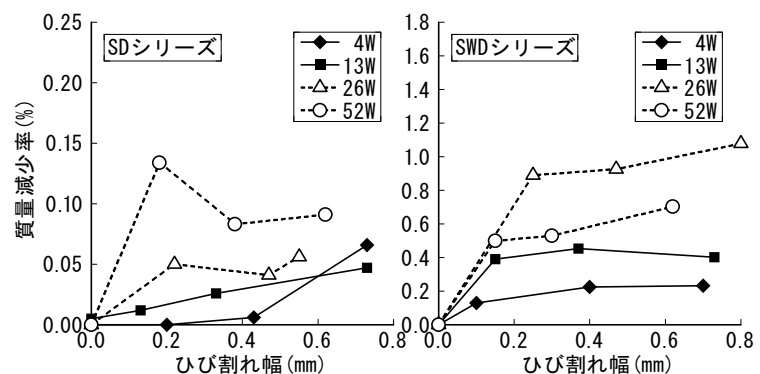


図-14 ひび割れ幅と質量減少率の関係

かぶり厚さと質量減少率の関係を図-16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。

腐食面積率は、全てのシリーズ、貫通ひび割れ、非貫通ひび割れとも、かぶり厚さが大きくなるにつれて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つれて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少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。

7. 腐食量の経時変化

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経時変化を図-17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、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

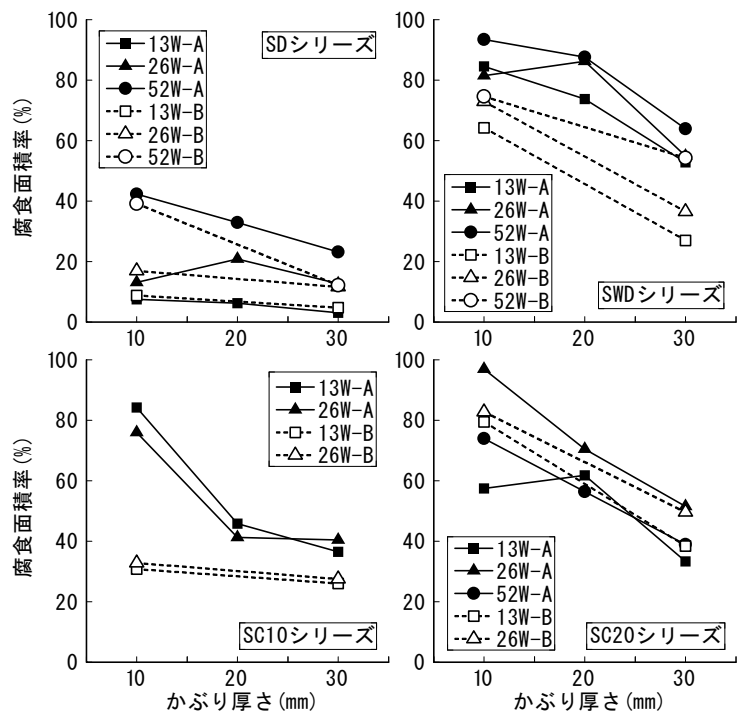


図-15 かぶり厚さと腐食面積率の関係

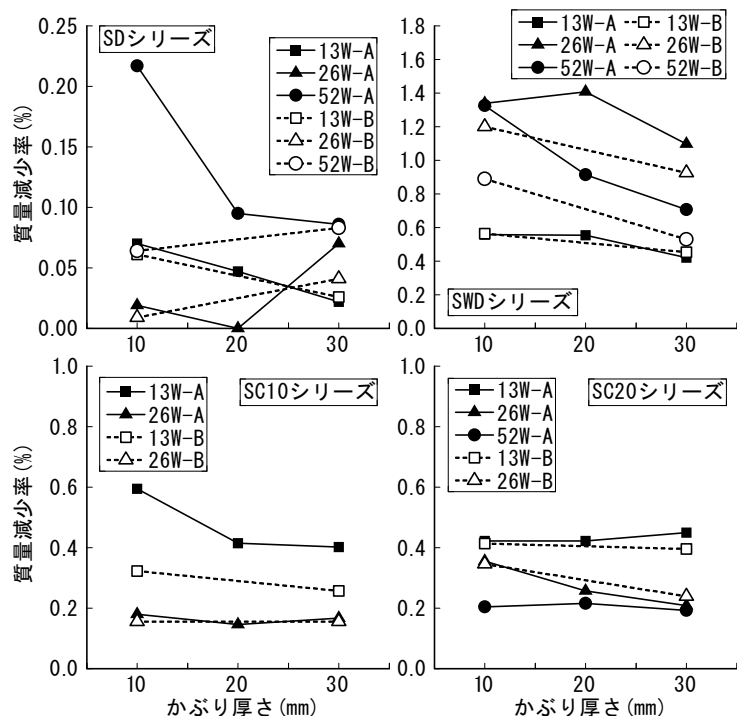


図-16 かぶり厚さと質量減少率の関係

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。

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、なお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。

8. まとめ

- ① ひび割れ幅が大きくなるにつれ、ひび割れ部分の中性化の進行が大きくなる。また、ひび割れ部における中性化が進行すると、局所的に腐食が先行する。
- ② 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。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。
- ③ かぶり厚さが小さくなると腐食量が増加する。
- ④ 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。
- ⑤ 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。

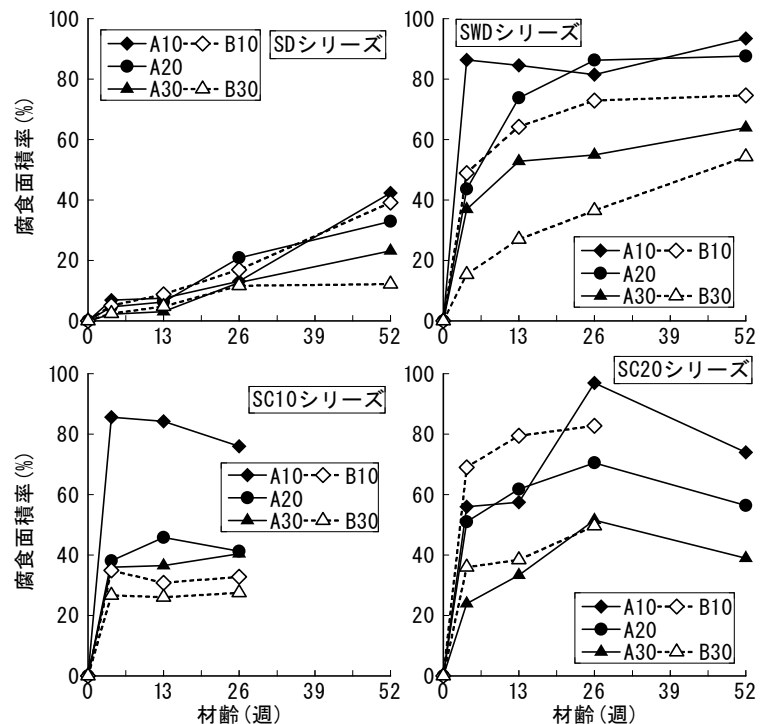


図-17 腐食面積率の経時変化

- ⑥ 水分が鉄筋腐食に及ぼす影響が大きい。水分が供給され、なお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。

なお、本研究は平成 12 年度より、(株)奥村組、五洋建設(株)とともに進めている共同研究の成果であり、本報告は平成 15 年度日本建築学会大会において投稿を行ったものに、加筆したものである。

【謝辞】

本研究を行うに当たり、ご指導頂きました宇都宮大学工学部建設学科教授榊田佳寛博士に深く感謝致します。

【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」, pp.124~132, 2002.12
- 2) 桶田伸祐, 大野義照, 柳済峻: コンクリート中の鉄筋腐食に及ぼすひび割れ幅と中性化の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)A-1, pp.483~484, 2001.9