

鉄筋コンクリート造建築物のひび割れ部における仕上材の劣化抑制効果に関する研究

— 仕上材補修による中性化・鉄筋腐食抑制効果 —

竹内 博幸* 落合 亮太**
山浦 一郎*

要 旨

筆者らは、過年度において仕上材が施されたひび割れ部の鉄筋腐食状態について実験的な検討を行ってきた。しかし、一般的な鉄筋コンクリート(RC)造建築物では、おおよそ 10~15 年ごとに大規模改修としてひび割れ補修を含んだ外装の改修が実施される場合が多い。そこで、本報では、仕上材補修(仕上塗材およびひび割れ補修)を施した場合について中性化および鉄筋腐食状態を確認する実験を行い、ひび割れ部を含むRC造外壁に対する劣化抑制効果について検討した。

実験の結果、中性化および鉄筋腐食(腐食面積・質量減少)のいずれに対しても仕上塗材による補修の方がひび割れ部補修に比較して劣化抑制効果が大きかった。一方、中性化評価対象(深さ・長さ・幅)の内、抑制効果の出現は中性化深さが最も顕著であった。また、中性化深さは、鉄筋腐食面積・質量減少のいずれとも相関が高く、中性化長さも鉄筋腐食面積と高い相関が見られた。

1. はじめに

筆者らは、過年度において、始めに仕上材のない鉄筋コンクリートに生じたひび割れが中性化および鉄筋腐食に及ぼす影響について実験的な検討を行い¹⁾、その後、仕上材が施された一般的な外壁を対象として仕上塗材が施されたひび割れ部の鉄筋腐食状態について実験的に検討した^{2),3)}。

一方で、一般的な建築物では、おおよそ 10~15 年ごとに大規模改修としてひび割れ補修を含んだ外壁の改修が実施される場合が多い。そこで、本報では、仕上材補修(仕上塗材およびひび割れ補修)を施した場合について、中性化および鉄筋腐食状態を確認する実験を行い、ひび割れ部を含むRC造外壁に対する劣化抑制効果について検討した。

2. 実験概要

2.1 実験要因と水準

実験要因と水準を表-1に示す。実験は、仕上材の効果把握するための全面補修とひび割れ部分の補修効果に着目したひび割れ部のみ補修の2種類に大別した。実験要因は、かぶり厚さ、ひび割れ幅および補修方法とした。補修方法は、コンクリート表面を仕上塗材で被覆する全面補修と、ひび割れを被覆あるいは充填するひび割れ補修とに分け、ひび割れ幅により区分した。前者では、ひび割れのない部分で中性化深さが 10 mm になるまで補修前に促進中性化を実施した(C試験体)が、後者では中性化を加えずに補修を施した(N試験体)。補修後は、促進中性化状態で乾燥と湿潤を繰り返す劣化環境下に置いた。

表-1 実験要因と水準

要 因	水 準			
	全面補修	ひび割れ部のみ補修		
かぶり厚さ	10 mm	10、20 mm		
ひび割れ幅	なし、0.1、0.3、0.9 mm (非貫通ひび割れ)	0.3、0.9 mm (非貫通ひび割れ)		
補修方法	ひび割れ補修	0.1 mm 補修なし(b)	—	
		0.3 mm セメントフィラー(f)、補修なし(b)	セメントフィラー(f)、補修なし(b)	
		0.9 mm ポリマーセメント注入(s)	ポリマーセメント注入(s)	
	仕上塗材	ひび割れなし	仕上塗材なし(B)、 アクリルタイル(AT)、 単層弾性(SE)、 アクリルリシン(AR)、 シラン系吸水防止材(CS)	/
		0.1 mm	仕上塗材なし(B)、 アクリルタイル(AT)、 単層弾性(SE)	
		0.3 mm	補修なし: 仕上塗材なし(B) フィラー補修: アクリルタイル(AT)、 単層弾性(SE)	
		0.9 mm	仕上塗材なし(B)	
補修前の劣化促進	促進中性化 中性化深さ 10 mm (C)	— (N)		
補修後の劣化促進	促進中性化(8日間) ⇄ 湿潤(6日間) 促進中性化条件: 20°C、RH60%、CO ₂ 5%			
試験体記号	C 03 - b SE - 20			
	補修前劣化	かぶり厚さ		
	ひび割れ幅	仕上塗材		
		ひび割れ補修		

*本社建築エンジニアリング部 **東京支店

2.2 試験体

試験体の形状を図-1に示す。試験体断面は100×100mm、長さは180mmとした。試験体は1面のみを試験面とし、試験面以外はエポキシ樹脂でシールした。かぶり厚さは、全面補修を施した試験体については10mmとし、ひび割れ部のみに補修を施した試験体については10mm、20mmの2水準とした。

試験体に用いたコンクリートの使用材料を表-2に、また同調合と材齢28日の標準養生強度を表-3に示す。なお、水セメント比は65%とした。

試験体は、コンクリートの打込み後材齢3日で脱型し、ひび割れを導入した。ひび割れ導入後、試験面以外をエポキシ樹脂でシールし、補修前に中性化させる試験体は、その後促進中性化させ、各仕上材により補修を行った。仕上材を養生した後、試験体を所定の劣化環境下に置いた。なお、ひび割れの導入は、一点集中荷重により試験体に曲げ応力を与えることにより行い所定のひび割れ幅を形成させた。ひび割れ幅はクラックスケールを用いて測定した。

2.1で示された実験要因と水準に基づいて作製した試験体の一覧を表-4に示す。なお、試験体記号は、表-1に示された記述例に基づいている。

2.3 測定および評価項目

測定および評価項目を表-5に、また中性化の測定位置を図-2に示す。図に示すように、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両側各2cm、5cmの位置の計4箇所について測定し、その平均値とした。

評価項目としては、鉄筋腐食面積率および質量減少率を算出した。鉄筋腐食面積率は式(1)により、また、質量減少率は式(2)により算出した。鉄筋腐食質量の測定においては、クエン酸ニアンモニウム10%溶液による錆の除去により未腐食部分についても質量が減少するため、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(3)に示す。

$$S = \frac{A_c}{A_s} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

$$Wd = \frac{\Delta W}{W_0} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

$$\Delta W = (W_0 - W) - W_c \times \frac{100 - S}{100} \quad \text{式(3)}$$

ここで、S:鉄筋腐食面積率(%)

As:鉄筋表面積(cm²)、Ac:鉄筋腐食面積(cm²)

Wd:質量減少率(%)

W0: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)

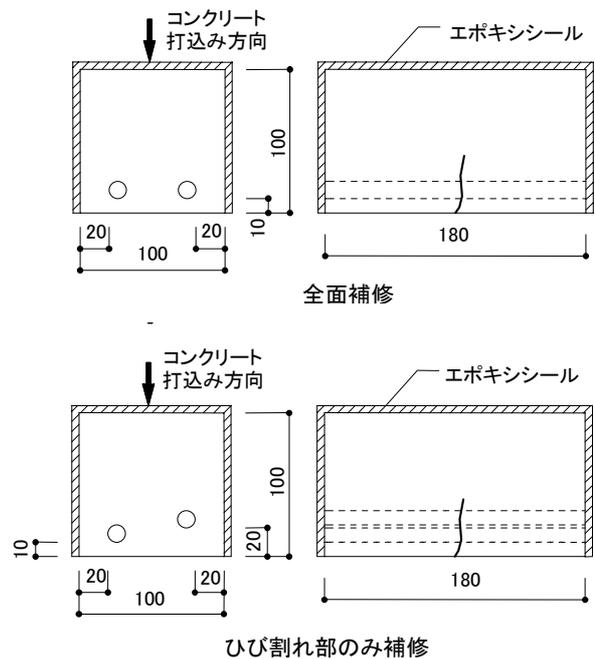


図-1 試験体形状

表-2 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-3 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
		水	セメント	細骨材	粗骨材	
65	48	177	272	872	951	25.6N/mm ²

練り上がり時の空気量目標値:4.5±1.5%

3. 中性化評価による仕上材の中性化抑制効果の比較

3.1 中性化深さによる仕上材の中性化抑制効果の比較

図-3および4は、C試験体におけるひび割れなしおよびひび割れ幅 0.1 mmの場合について、仕上材ごとの中性化深さの経時変化を示している。また、図-5および6は、同じ試験体について促進期間0週の中性化深さを初期値 = 1.0 としてそれに対する各期間ごとの中性化深さの比率を示している。

これらより、仕上げなし(bB)に比較して、仕上塗材全面補修による試験体は、いずれの促進期間においても中性化深さが小さく、中性化抑制効果が見られる。促進期間により出現傾向が若干異なるものの、SE(単層弾性)、AT(アクリルタイル)の順でその効果は大きい。一方、AR(アクリルリジン)については若干の中性化抑制効果が見られるが、CS(シラン系吸水防止材)についてはその効果はほとんど見られない。

3.2 中性化長さによる仕上材の中性化抑制効果の比較

図-7および8は、C試験体およびN試験体のひび割れ幅 0.3 mmと0.9 mmについて補修方法ごとに中性化長さの経時変化を示している。なお、後者は、かぶり厚さ 20 mmの試験体における実験結果について示している。

表-4 試験体一覧

区分	記号	水準	設定ひび割れ幅(mm)	ひび割れ補修	仕上塗材	設定かぶり(mm)	設定中性化深さ(mm)
C試験体	C00-bB	全面	0	b (なし)	B (なし)	10	10
	C00-bAR	全面	0	b	AR (アクリルリジン)	10	10
	C00-bAT	全面	0	b	AT (アクリルタイル)	10	10
	C00-bSE	全面	0	b	SE (単層弾性)	10	10
	C00-bCS	全面	0	b	CS (シラン吸水防止材)	10	10
	C01-bB	全面	0.1	b	B	10	10
	C01-bAT	全面	0.1	b	AR	10	10
	C01-bSE	全面	0.1	b	SE	10	10
	C03-bB	全面	0.3	b	B	10	10
	C03-fAT	全面	0.3	f (セメントファイバー)	AT	10	10
	C03-fSE	全面	0.3	f	SE	10	10
	C09-sB	全面	0.9	s (ポリマーセメント)	B	10	10
N試験体	N03-bB-10	ひび割れ部	0.3	b	B	10	0
	N03-bB-20	ひび割れ部	0.3	b	B	20	
	N03-fB-10	ひび割れ部	0.3	f	B	10	0
	N03-fB-20	ひび割れ部	0.3	f	B	20	
	N09-sB-10	ひび割れ部	0.9	s	B	10	0
	N09-sB-20	ひび割れ部	0.9	s	B	20	

表-5 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、その平均値とする
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する(図-2)
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る
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する
測定材齢: 補修前、劣化後4、13、26、52週	

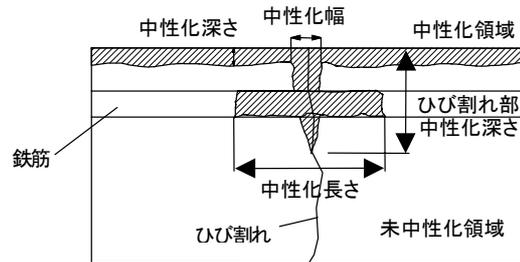


図-2 中性化の測定位置

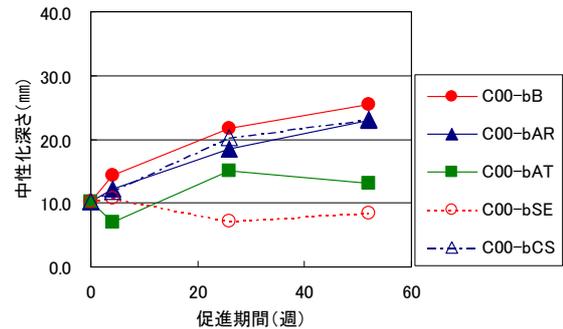


図-3 中性化深さの経時変化
(C試験体: ひび割れなし)

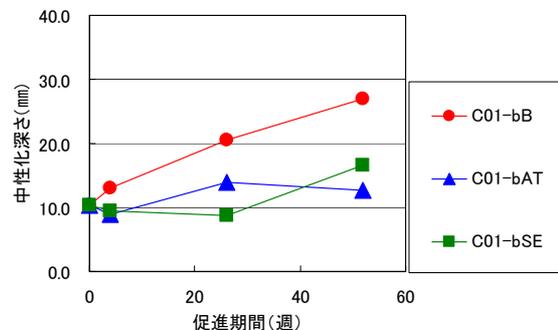


図-4 中性化深さの経時変化
(C試験体: ひび割れ幅 0.1 mm)

C試験体のひび割れ補修において仕上塗材を施した場合、中性化の進行が小さく補修による効果大きい。ひび割れ幅 0.1 mm の補修においても、同様に仕上塗材を施した場合、中性化の進行は大きく抑制されていた。N試験体のひび割れ部の表層部のみをセメントフィラーで補修した試験体 N03-fB の中性化長さは、補修なし試験体 N09-bB と同じように補修による効果は見られなかった。ひび割れ部表層部みの補修では、炭酸ガスがひび割れ部に回り込むため中性化が進行したものと考えられる。また、試験体 C09-sB および N09-sB の実験結果よりポリマーセメント注入によるひび割れ補修を施した場合、ひび割れからの中性化を抑制することができるものと考えられる。しかしながら、かぶり厚さが小さい場合やコンクリート自体の中性化の進行が速い場合は、ひび割れ部だけの補修では十分な効果は期待できないものと考えられる。そのような場合には仕上塗材を同時に施すことが有効と考えられる。

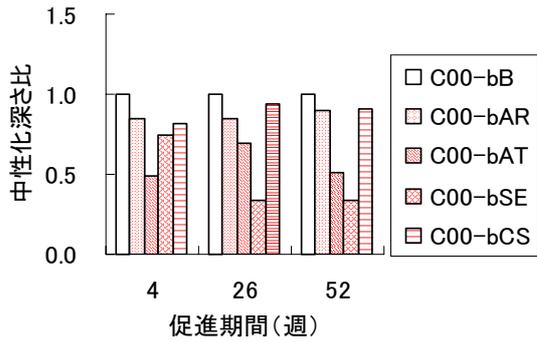


図-5 仕上塗材が中性化深さに及ぼす影響 (C試験体:ひび割れなし)

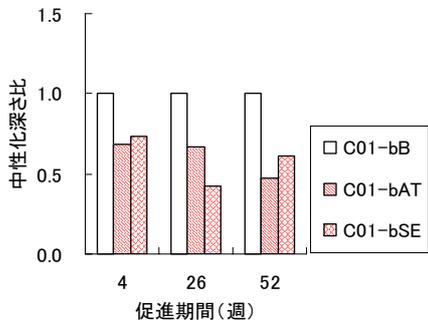


図-6 仕上塗材が中性化深さに及ぼす影響 (C試験体:ひび割れ幅 0.1 mm)

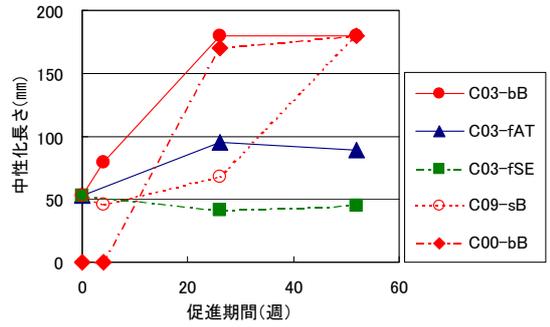


図-7 中性化長さの経時変化 (C試験体:ひび割れ幅 0.3・0.9 mm)

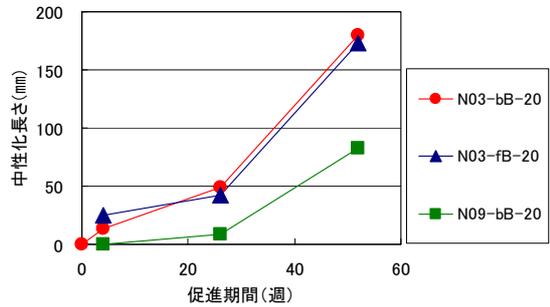


図-8 中性化長さの経時変化 (N試験体:ひび割れ幅 0.3・0.9 mm)

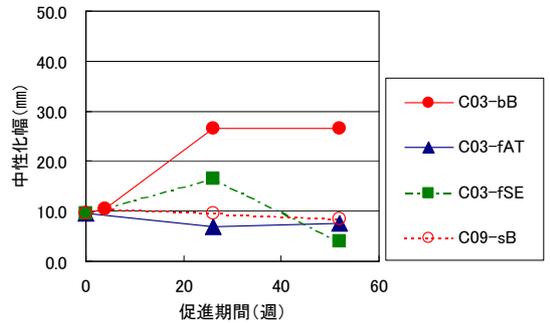


図-9 中性化幅の経時変化 (C試験体:ひび割れ幅 0.3・0.9 mm)

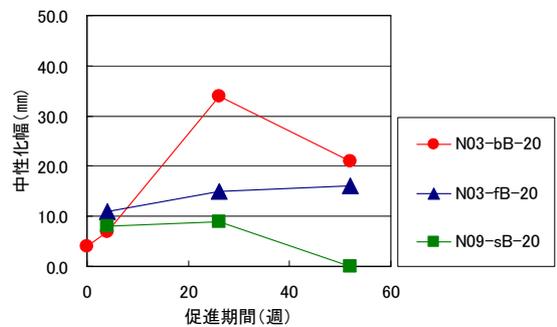


図-10 中性化幅の経時変化 (N試験体:ひび割れ幅 0.3・0.9 mm)

3.3 中性化幅による仕上材の中性化抑制効果の比較

図-9および10は、C試験体およびN試験体のひび割れ幅 0.3 mmと 0.9 mmについて補修方法ごとに中性化幅の経時変化を示している。なお、後者は、かぶり厚さ 20 mmの試験体における実験結果について示している。

C試験体の実験結果から、仕上塗材やポリマーセメント注入によるひび割れ充填によって中性化幅の進行が抑制される状態が見られ補修効果が顕著であった。ひび割れ補修による効果の差については、N試験体の結果からセメントフィラー補修(N03-f○○)に比較してポリマーセメント注入補修(N09-s○○)に抑制効果が見られた。また、その効果は長期にわたり継続する傾向が見られた。

4. 鉄筋腐食評価による仕上材の鉄筋腐食抑制効果

4.1 仕上塗材補修による鉄筋腐食抑制効果

図-11 および 12 は、促進中性化を先行させたC試験体のひび割れなしとひび割れ幅 0.1 mmについて仕上材ごとの鉄筋腐食面積率の経時変化を示している。また、図-13 および 14 は、C試験体のひび割れなしについて、促進期間0週における鉄筋腐食面積率と同質量減少率を初期値=1.0 としてそれに対する各期間ごとの中性化の比率として示している。

これらより、鉄筋腐食面積率および同質量減少率のいずれにおいても仕上塗材補修AT、SEによる鉄筋腐食抑制効果が顕著に見られる。促進期間により出現状況が若干異なるが、SE、ATの順でその効果が大きかった。また、ひび割れなしの試験体(C00-○○)に用いたARとCSについては、特に目立った効果は見られなかった。

4.2 ひび割れ補修による鉄筋腐食抑制効果

図-15 および 16 は、中性化なしでひび割れ補修を施したN試験体について、鉄筋腐食面積率と同質量減少率の経時変化を示している。なお、いずれもかぶり厚さ 20 mmの試験体における実験結果について示している。

これらより、ひび割れ補修による効果(N03-bBとN03-sB・N09-sBの比較)は、評価対象や促進期間により若干出現状況が異なるが、ひび割れ部表面のみの補修であるセメントフィラー(N03-fB)に比較してポリマーセメント注入(N09-sB)による効果は、鉄筋腐食面積・質量減少の両方でより顕著に認めることができた。

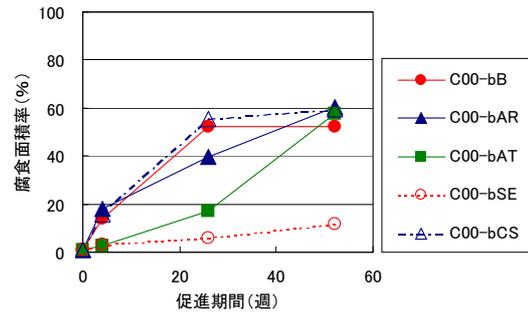


図-11 仕上塗材補修による効果
[鉄筋腐食面積率: ひび割れなし]

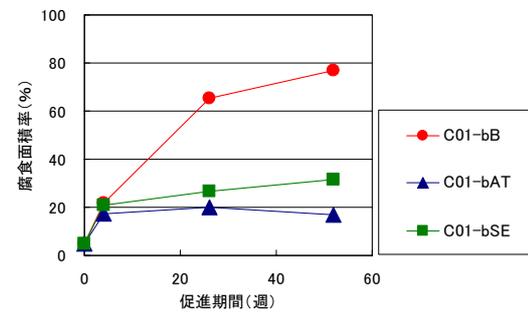


図-12 仕上塗材補修による効果
[鉄筋腐食面積率: ひび割れ幅 0.1 mm]

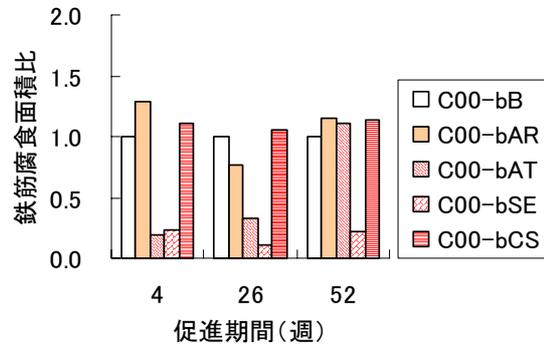


図-13 仕上塗材補修による効果
[鉄筋腐食面積比: ひび割れなし]

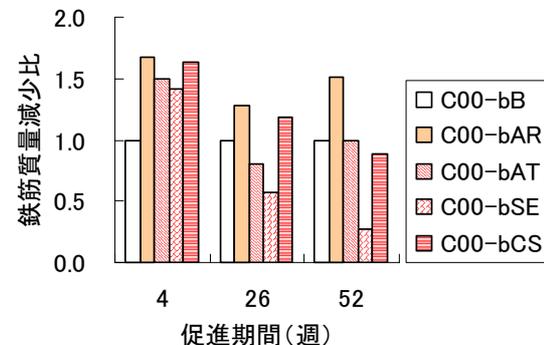


図-14 仕上塗材補修による効果
[鉄筋質量減少比: ひび割れなし]

4.3 仕上塗材・ひび割れ補修による効果の比較

図-17 および 18 は、鉄筋腐食面積率および同質量減少率について、補修なし(C03-bB、N03-bB)、仕上・ひび割れ補修(C03-fAT・C03-fSE)、ひび割れ補修(N03-fB)による発現状態を各期間ごとに示している。なお、C試験体は初期状態における中性化深さの設定を10mm、N試験体は同0mmとしている。

これらより、ひび割れ補修による効果(N03-bB と N03-fB の比較)がほとんど見られないのに対して、仕上塗材・ひび割れ補修の両者による効果(C03-bB と C03-fAT・SE の比較)がいずれの期間においても顕著に見られることから、仕上塗材ATとSEによる補修効果が相対的に大きいことが分かる。

5. 中性化評価対象の比較・検討

5.1 中性化深さと鉄筋腐食の関係

図-19 は、C試験体における中性化深さと鉄筋腐食面積率の関係を、また図-20 は、同じく中性化深さと鉄筋質量減少率の関係を示している。なお、図中には、それぞれ全データに対する回帰直線を挿入し回帰式と決定係数を示している。

これらより、全データにわたり中性化深さは鉄筋腐食面積率と同質量減少率のいずれとも相関が高いことが分かる。特に腐食面積率については、データ全域にわたり決定係数が高い。一方、質量減少率との関係では、ARとATのデータが他から大きく乖離するなど偏差が大きく、中性化深さに対する変化割合も小さい。

5.2 中性化長ささと鉄筋腐食の関係

図-21 は、C試験体における中性化長ささと鉄筋腐食面積率の関係を、また図-22 は、同じく中性化長ささと鉄筋質量減少率の関係を示している。なお、図中には、それぞれ全データに対する回帰直線を挿入し回帰式と決定係数を示している。

これらより、全データにわたり中性化長さは鉄筋腐食面積率と同質量減少率のいずれとも相関が高いことが分かる。特に腐食面積率については決定係数が高くなっているが、これは、データが中性化長さが100mm以下と150mm以上の領域に偏在していることも影響しているものと考えられる。また、同質量減少率についても同様であるが、腐食面積率に比較して全般的に偏差が大きく、仕上材の種類ごとにデータが分散している。

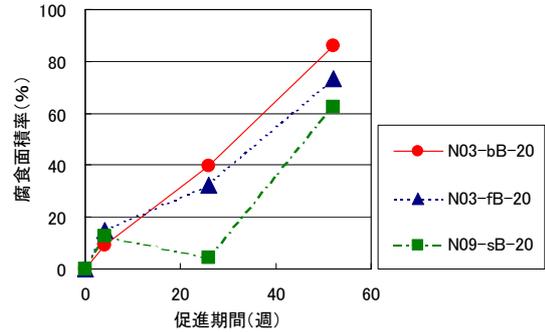


図-15 仕上塗材・ひび割れ補修による効果
[鉄筋腐食面積率]

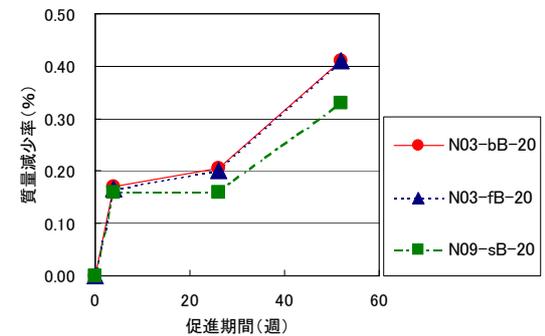


図-16 仕上塗材・ひび割れ補修による効果
[鉄筋質量減少率]

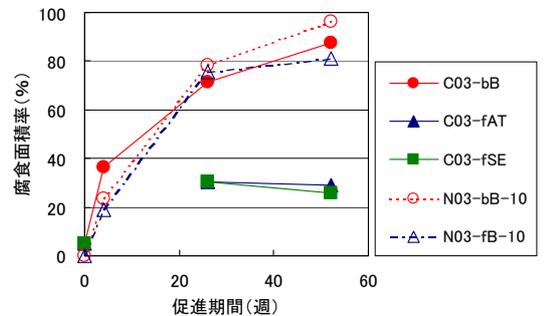


図-17 仕上塗材・ひび割れ補修による効果
[鉄筋腐食面積率]

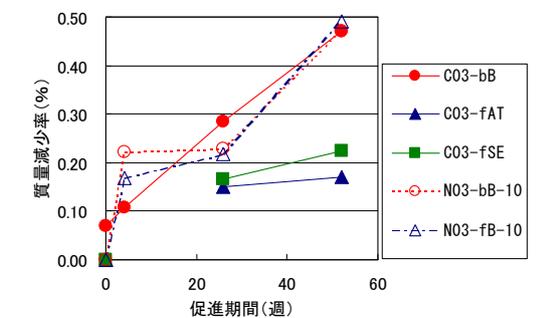


図-18 仕上塗材・ひび割れ補修による効果
[鉄筋腐食面積率]

5.3 中性化幅と鉄筋腐食の関係

図-23 は、C試験体における中性化幅と鉄筋腐食面積率の関係を、また図-24 は、同じく中性化幅と鉄筋質量減少率の関係を示している。なお、図中には、それぞれ全データに対する回帰直線を挿入し回帰式と決定係数を示している。

これらより、中性化幅は、中性化深さ・長さと比較して鉄筋腐食面積率・同質量減少率のいずれとも全般的に相関が低く、仕上材の種類ごとにデータが分散する傾向にある。これは、通常は中性化幅自体が小さいこともあり、測定する場合、これを特定することが難しく、また、測定者・条件により測定値にばらつきが多くなることも要因の1つと考えられる。

6. まとめ

かぶり厚さ、ひび割れ幅、補修方法を実験要因とする劣化促進試験結果に基づき、中性化および鉄筋腐食の各種評価について仕上塗材・ひび割れ補修による中性化・鉄筋腐食抑制効果および補修効果を検討したところ以下の事項が明らかになった。

- (1) 中性化深さについては、仕上塗材補修による中性化抑制効果が顕著に見られ、その効果はSE(単層弾性)、AT(アクリルタイル)の順で大きい。一方、AR(アクリルリシン)およびCS(シラン系吸水防止材)の中性化抑制効果は小さかった。
- (2) 中性化長さについては、仕上塗材補修による抑制効果が比較的大きく現れた。ひび割れ部のセメントフィラーのみの補修では中性化に対する抑制効果は期待できない。
- (3) 中性化幅については、仕上塗材補修およびひび割れ充填補修による効果が大きく現れ、その効果は長期にわたり継続する傾向にある。
- (4) 鉄筋腐食面積率および同質量減少率のいずれにおいても、仕上塗材補修による鉄筋腐食抑制効果が見られ、SE、ATの順でその効果は大きかった。ARとCSについては特に抑制効果は見られなかった。
- (5) ひび割れ補修による効果は、評価対象により若干出現状況が異なり、今回の実験の範囲ではその傾向・程度は明らかではなかった。
- (6) 鉄筋腐食面積および同質量減少のいずれにおいてもひび割れ補修による効果に比較して仕上塗材ATとSEによる効果の方が大きい。
- (7) 中性化深さは、鉄筋腐食面積率および同質量減少率のいずれとも相関が見られ、特に腐食面積との決定係数は高い。

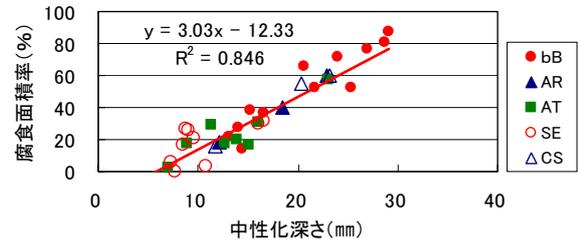


図-19 中性化深さと鉄筋腐食面積率の関係

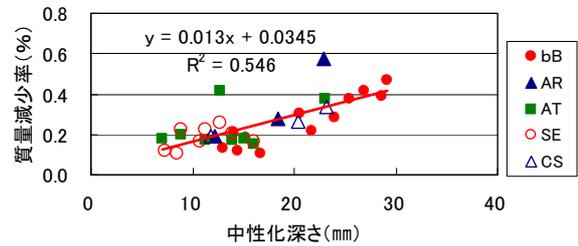


図-20 中性化深さと鉄筋質量減少率の関係

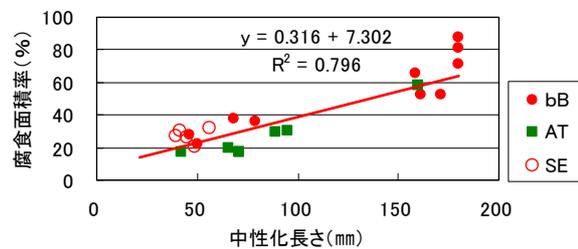


図-21 中性化長さと鉄筋腐食面積率の関係

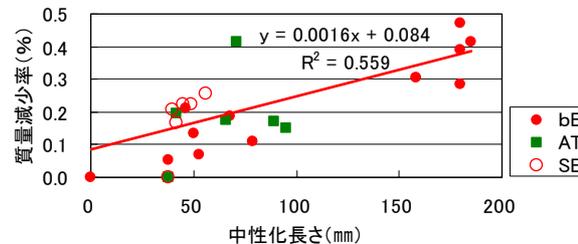


図-22 中性化長さと鉄筋質量減少率の関係

(8) 中性化長さは、鉄筋腐食面積との相関は高いが、データが偏在していることなどが影響しているものと考えられる。一方、同質量減少との相関は低く、データごとの偏差が全般的に見られる。

(9) 中性化幅は、中性化深さ・長さと比較して鉄筋腐食面積率・同質量減少率のいずれとも全般的に相関が低く、また、仕上材の種類ごとにデータが分散する傾向にある。

なお、本研究は、(株)奥村組、五洋建設(株)、鉄建建設(株)の3社共同研究「RC造建築物の耐久設計手法の開発」により実施した。

参考文献

- 1) 河野他：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 その1～3、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、A、pp. 567～572、2003. 9
- 2) 例えば、日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説、2004
- 3) 福島他：コンクリートの中性化に伴う鉄筋腐食進行に対する表面仕上材の抑制効果の定量的評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12、No. 1、pp. 477～482、1990

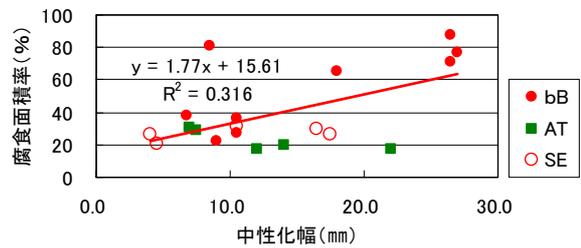


図-23 中性化幅と鉄筋腐食面積率の関係

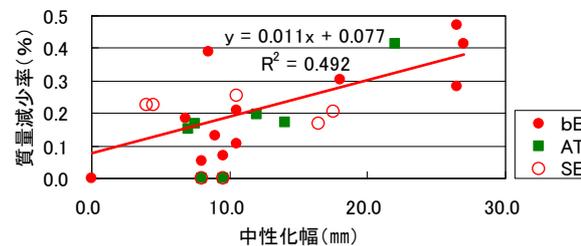


図-24 中性化幅と鉄筋質量減少率の関係