

2.2 試験体

試験体の形状を図-1に示す。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。試験体に用いたコンクリートの使用材料を表-2に、同調合を表-3に示す。試験体は、コンクリート打込み後材齢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試験体裏側からの影響がないように非貫通で形成させた。なお、鉄筋にはφ12mmの磨き鋼棒を用いた。

2.3 測定および評価項目

測定および評価項目を表-4に、中性化領域の測定位置を図-2に示す。試験体は測定材齢ごとに1体とした。ここでは、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。「中性化深さ」は、ひび割れを中心に両側2cm、5cmの計4箇所について測定し、その平均値とした。「中性化幅」は、試験体割裂面のひび割れ部中性化域の最大幅とする。鉄筋腐食の評価項目は、腐食面積率および質量減少率とし、前者は式(1)により、後者は式(2)により算出した。なお、鉄筋腐食質量の測定においては、クエン酸二アンモニウム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式(3)により質量減少量を補正した。

$$S = \frac{Ac}{As} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

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

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

ここで、S: 鉄筋腐食面積率(%)

As, Ac: 鉄筋表面積、鉄筋腐食面積 (cm²)

Wd: 鉄筋質量減少率(%)

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)

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

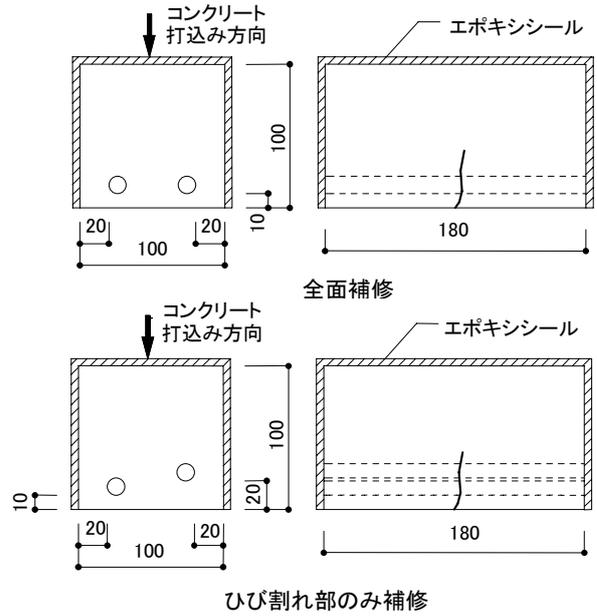


図-1 試験体形状

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

練り上がり時の目標空気量: 4.5±1.5%

表-4 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試験体につき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-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た。
鉄筋腐食質量	鉄筋をクエン酸二アンモニウム10%水溶液に浸漬し、錆を除去した前後の鉄筋質量から算出した。

測定材齢: 補修前、劣化後 4, 13, 26, 52, 104 週

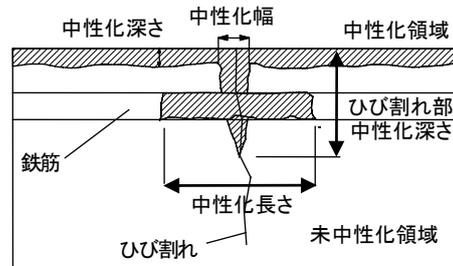


図-2 中性化領域の測定位置

3. 仕上材による中性化抑制効果の比較

3.1 中性化深さ抑制効果の比較

図-3および4は、ひび割れなしとひび割れ幅 0.1 mmのC試験体において、ひび割れ補修を行わない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。

これらより、仕上材なし(B)に比較して仕上塗材全面補修による試験体は、ほとんどの促進期間において中性化深さが小さく、中性化抑制効果が見られる。仕上塗材の種類および促進期間によりその出現傾向が若干異なるものの、中性化抑制効果は単層弾性(SE)、アクリルタイル(AT)の順で大きい傾向にある。

一方、シラン系吸水防止材(CS)とアクリルリシン(AR)については若干の中性化抑制効果が見られるものの、両者とも長期材齢ではその効果が低下する傾向にある。なお、ひび割れなしの試験体で仕上材なし(B)に対しCSおよびARの中性化深さが長期材齢で逆転しているのは、今回の一連の試験では、材齢ごとに試験体が異なっていることがその一因と考えられる。

3.2 中性化長さ抑制効果の比較

図-5および6は、ひび割れ幅 0.3 mmと 0.9 mmの試験体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、図-6のN試験体については、かぶり厚さ 20 mmの鉄筋による実験結果を示している。

セメントフィラー(f)によるひび割れ補修の上に仕上塗材を施した試験体C03-fATとC03-fSEは、ほとんどの促進期間において中性化長さが小さく、補修による効果が比較的顕著に見られる。

一方、ひび割れ部の表層をセメントフィラー(f)のみで補修した試験体 N03-fB の中性化長さは、補修なし試験体 N03-bB と同様の傾向を示し、補修による効果は見られなかった。これは、ひび割れ表層のみの補修では、炭酸ガスがひび割れ内部に回り込むため、その部分から中性化が進行したものと考えられる。

また、ポリマーセメント注入(s)によるひび割れ補修を施した試験体 C09-sBとN09-sBは、比較的短期の材齢では中性化長さが小さいが、長期材齢では大きくなっている。これは、コンクリート表面からの中性化の進行によって鉄筋位置全体が中性化領域となるため、中性化長さに対してはひび割れ部だけの補修では十分な抑制効果がないためと考えられる。なお、両者はかぶり厚さが異なるため、かぶり厚さ 10 mmのC09-sBの方が同 20 mmのN09-sBに比較して中性化の促進が若干早い傾向にある。

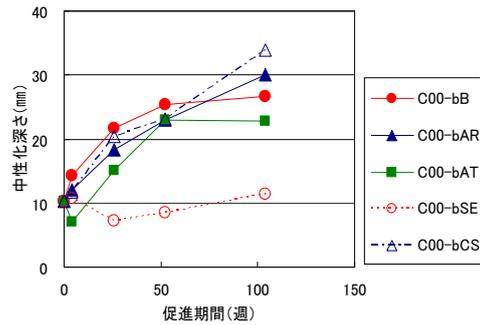


図-3 中性化深さの経時変化
(C試験体:ひび割れなし)

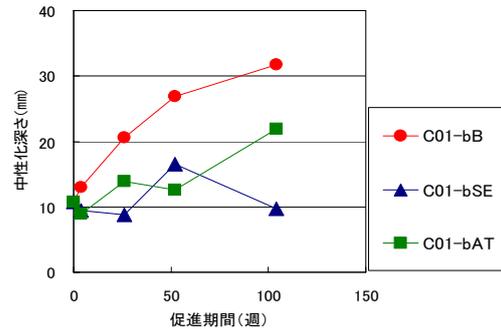


図-4 中性化深さの経時変化
(C試験体:ひび割れ幅0.1 mm)

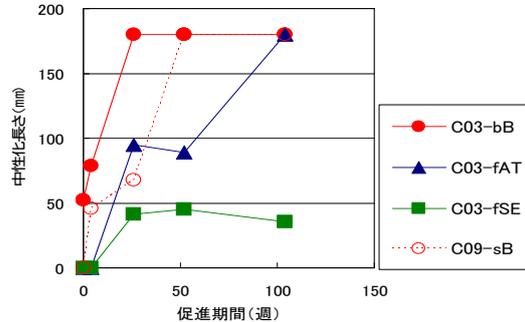


図-5 中性化長さの経時変化
(C試験体:ひび割れ幅0.3 mm/0.9 mm)

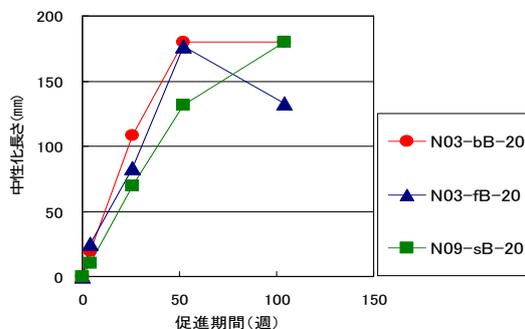


図-6 中性化長さの経時変化
(N試験体:ひび割れ幅0.3 mm/0.9 mm)

3.3 中性化幅抑制効果の比較

図-7および8は、ひび割れ幅0.3mmと0.9mmの試験体について補修方法ごとの中性化幅の経時変化を示している。なお、N試験体については、かぶり厚さ20mmの鉄筋における実験結果を示している。

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(s)によるひび割れ充填により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。

ひび割れ補修については、N試験体の実験結果よりセメントフィラー補修(N03-fB)に比較してポリマーセメント注入補修(N09-sB)の方が長期にわたり顕著な抑制効果が見られた。これは、中性化幅は、同深さ・長さに比較すると局所的な評価対象であるため、ひび割れ部の補修効果がかえって顕著に現れたものと考えられる。

なお、C03-fSEとN09-sB-20の中性化幅が促進期間の途中で減少に転じているのは、今回の一連の試験では、材齢ごとに試験体が異なっていることがその一因と考えられる。

4. 仕上材による鉄筋腐食抑制効果の比較

4.1 仕上塗材補修による鉄筋腐食抑制効果

図-9および10は、C試験体のひび割れのないものについて仕上材ごとの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。

これらより、鉄筋腐食面積率と同質量減少率のいずれにおいても仕上塗材補修SEによる鉄筋腐食抑制効果が見られた。また、同ATは一部の材齢を除き鉄筋腐食面積について抑制効果が認められたが、ARとCSはいずれにおいても目立った効果は見られなかった。なお、両測定値とも測定方法が煩雑なことから誤差の要因が多いため、材齢間で一貫した傾向が得られない場合が多かった。

4.2 ひび割れ補修による鉄筋腐食抑制効果

図-11および12は、N試験体のかぶり厚さ20mmの鉄筋について、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。

これらより、ひび割れ補修のみによる効果(N03-bBとN03-fB・N09-sBの比較)は、一部の材齢を除き、ひび割れ部の表面のみの補修であるセメントフィラー補修(N03-fB)に比較してポリマーセメント注入補修(N09-sB)は、鉄筋腐食面積・質量減少の両方について抑制効果を認めることができた。

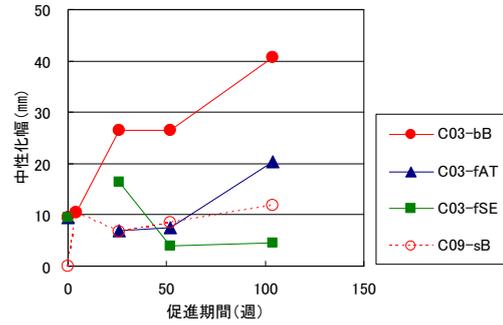


図-7 中性化幅の経時変化
(C試験体:ひび割れ幅0.3mm/0.9mm)

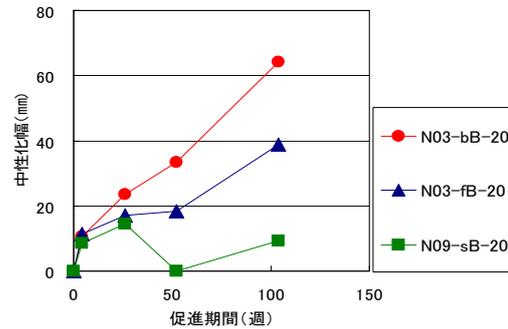


図-8 中性化長さの経時変化
(N試験体:ひび割れ幅0.3mm/0.9mm)

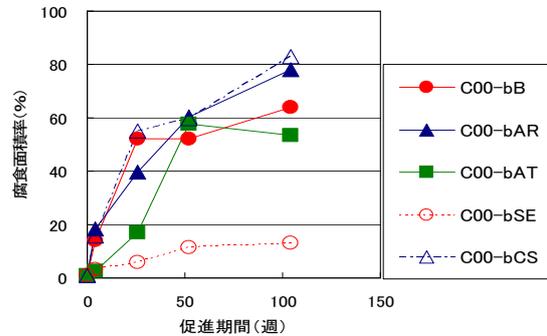


図-9 仕上塗材補修による効果
[鉄筋腐食面積率:ひび割れなし]

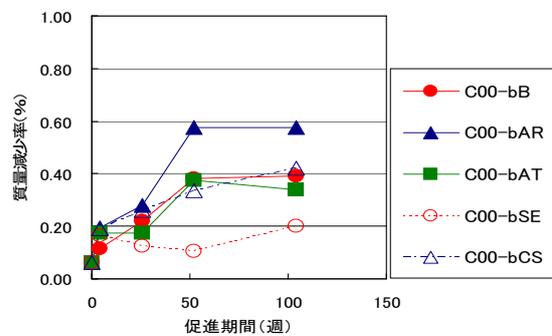


図-10 仕上塗材補修による効果
(鉄筋質量減少率:ひび割れなし)

4.3 仕上塗材・ひび割れ補修による効果の比較

図-13および14は、鉄筋腐食面積率と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)の各補修ごとに示している。なお、初期状態の中性化深さはC試験体は10mm、N試験体は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の比較による)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の比較による)が一部の材齢を除き比較的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。

なお、図-13のC03-fATは材齢104週でC03-bBと近似しているが、他と明らかに傾向が異なることから、試験体作製を含めた試験方法など何らかの実験因子によるものと考えられる。

5. 中性化測定対象の比較・検討

図-15・16および17は、C試験体における中性化領域の測定対象(中性化深さ・長さおよび幅)と鉄筋腐食面積率の関係を示している。なお、図中には、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、中性化深さと同長さについては、いずれも鉄筋腐食面積率との相関がかなり高くなっている。

一方、中性化幅は、それらに比較して鉄筋腐食面積率と一般的に相関が低く、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、他の測定対象に比較して中性化幅自体の測定値が全体的に小さい範囲に偏っているため、鉄筋全体の腐食環境を十分に評価できていないことがその要因の一つとして考えられる。

また、図-18に、C試験体における中性化深さと鉄筋質量減少率の関係を示す。中性化領域の他の測定対象と鉄筋質量減少率についてもほぼ同様の傾向が見られたが、同腐食面積率との関係に比較して一般的に相関が低い傾向にあった。

6. まとめ

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について検討した結果、以下の事項が明らかになった。

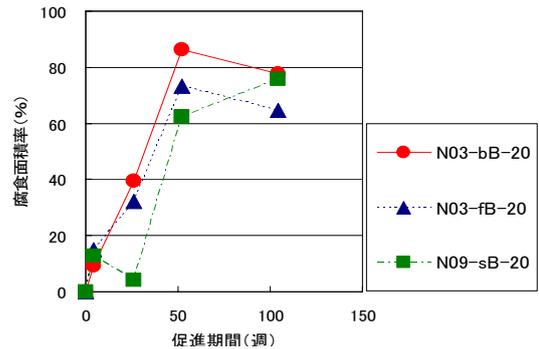


図-11 ひび割れ補修による効果
[鉄筋腐食面積率]

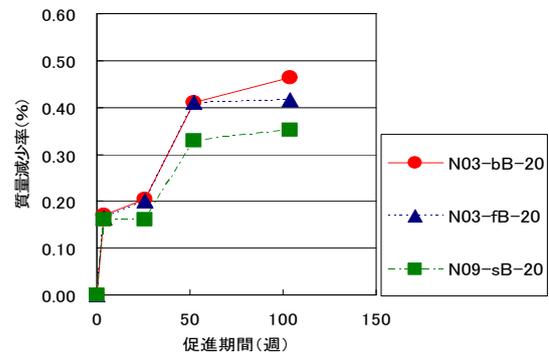


図-12 ひび割れ補修による効果
[鉄筋質量減少率]

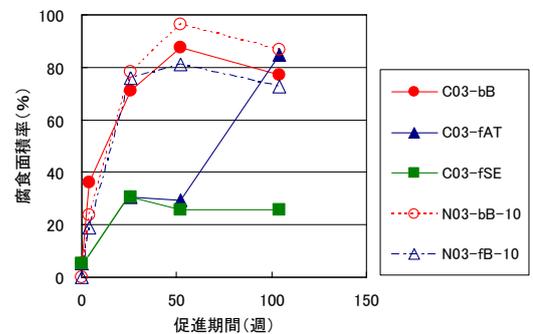


図-13 仕上塗材・ひび割れ補修による効果
[鉄筋腐食面積率]

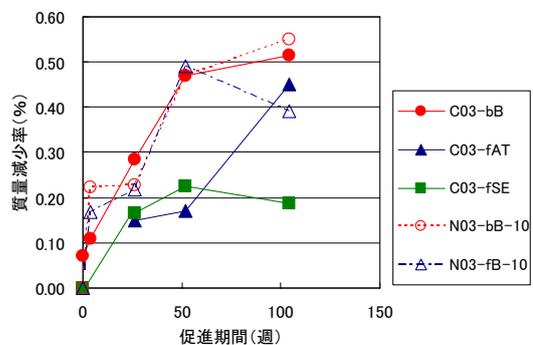


図-14 仕上塗材・ひび割れ補修による効果
[鉄筋質量減少率]

(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、その効果は単層弾性(SE)、アクリルタイル(AT)の順で大きい傾向にある。一方、アクリルリシン(AR)およびシラン系吸水防止材(CS)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、仕上塗材による中性化抑制効果がひび割れ補修に比較して大きく現れた。ひび割れ部のみの補修では、炭酸ガスがひび割れ内部に回り込むため、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、仕上塗材およびひび割れ充填補修による中性化抑制効果が大きく現れ、長期にわたり継続する傾向が見られる。これは、中性化幅は、局所的な評価対象であるため、ひび割れ部の補修効果がかえって顕著に現れたためと考えられる。

(4) 仕上塗材による鉄筋腐食抑制効果は、鉄筋腐食面積および同質量減少のいずれにおいても見られ、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鉄筋腐食抑制効果は、ポリマーセメント注入による充填補修の方がセメントフィラーによる表面補修よりも顕著であった。

(6) 仕上塗材とひび割れ補修の両者あるいは単独による抑制効果の出現状況より、仕上塗材 AT と SE による補修効果が相対的に顕著であった。

(7) 中性化幅は、中性化深さ・長さと比較して鉄筋腐食面積との相関が低い。これは、中性化幅自体の測定値が全体的に小さい範囲に偏っているため、鉄筋全体の腐食環境を十分に評価していないことがその一因と考えられる。

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) 本間他: 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 その1・2、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、A、pp.997~1,000、2004.8

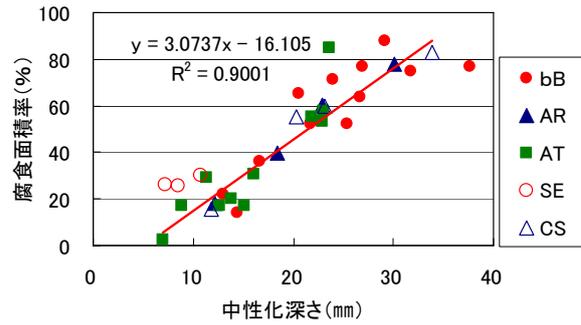


図-15 中性化深さと鉄筋腐食面積率の関係

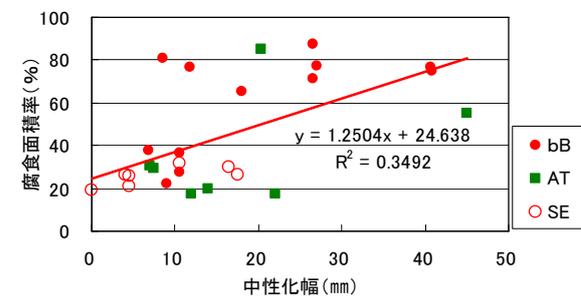


図-16 中性化長さとは鉄筋腐食面積率の関係

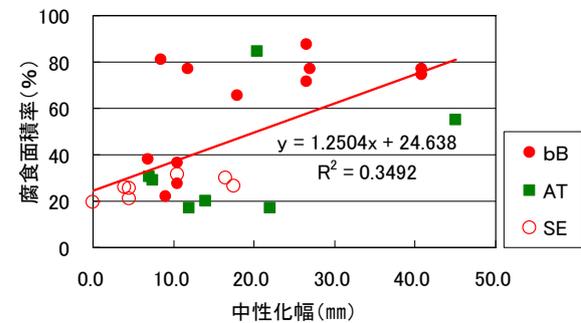


図-17 中性化幅とは鉄筋腐食面積率の関係

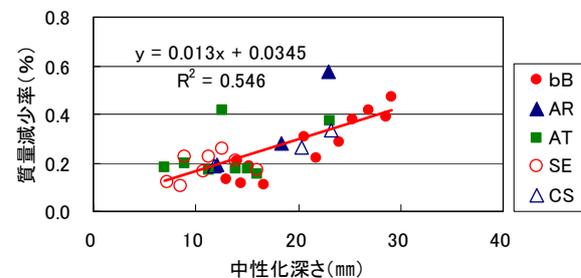


図-18 中性化深さと鉄筋質量減少率の関係