

論文 ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムの防錆性向上に関する検討

尾形 雅人*1・Sanjay PAREEK*2

要旨: 本研究は、ネットワーク及び補修剤を用いたひび割れの自己修復システムによる鉄筋コンクリートの耐久性の向上の確認を目的とする。そこで、鉄筋腐食に対する抵抗性の検討として促進中性化試験後、塩水による乾湿繰り返し試験を行った。その結果、当自己修復システムによって補修剤が十分に充填された場合、水密性の低下を防ぎ、劣化要因の侵入を防ぐことで、鉄筋の腐食に対する耐久性が向上することを確認できた。

キーワード: 自己修復, ひび割れ, ネットワーク, 補修剤, 中性化, 鉄筋腐食

1. はじめに

日本ではスクラップアンドビルドが繰り返され、取り壊しの際にコンクリート塊といった建設廃棄物や工事を行うことで発生する CO₂ が大量に排出され続けてきた。これらを背景に近年では、環境への意識が高まり続け、持続可能な社会の構築が求められている。そこで注目されているのが、ひび割れの自己修復コンクリートである。RC 構造物のひび割れは、強度や気密性の低下だけではなく、中性化や塩害といった化学的な劣化を促進させる原因となり、構造物の寿命を短くしてしまう。そこで、ひび割れの自己修復機能を鉄筋コンクリート構造物に付与することで、早期劣化を引き起こす劣化要因の侵入を防ぐことが可能となり、耐久性向上または維持が期待できる。また、構造物自身がひび割れを修復し制御することで、補修作業の必要性を低下させ、経済的・時間的・人的な補修コストを大幅に削減することが可能であると考えられる。

研究事例としては、強アルカリ環境下でも生存することができるバクテリアをコンクリートに混ぜることで、ひび割れが発生した際にバクテリアが炭酸カルシウムを析出し、ひび割れを修復させる方法¹⁾や超弾性合金を鉄筋コンクリート(RC)梁の主筋に用いることで、除荷後の残留変形がほぼゼロに戻り、ひび割れの閉塞を行う方法²⁾などが挙げられる。また、自動的な補修作業を行うデバイス類をコンクリート内に埋設し、ひび割れを自己修復させる研究もあり、発熱デバイスによる連結ユニットを利用した修復方法³⁾が挙げられる。このように様々な方法が提案され、自己修復機能を RC 構造物に付与することで、構造物の高耐久性化に期待されている。

既往の研究^{4),5)}より、コンクリート部材において、ひび割れの発生が予測される箇所には、ひび割れ補修剤の注入孔(以下、ネットワーク)を設けることで、ひび割れが発生した際に、ひび割れ内部で補修剤が硬化、強度の回復が行

われることを確認している。しかし、当自己修復システムにおける鉄筋の腐食に対する耐久性に関して、未だ十分なデータを得られていない。そこで、当自己修復システムによる鉄筋コンクリートの耐久性の向上を確認するため、鉄筋腐食に対する抵抗性の検討として促進中性化試験後、塩水による乾湿繰り返し試験を行った。

当自己修復システムの詳細を Fig.1 に示す。ネットワークに補修剤を注入し、圧力を加えた状態のまま補修剤を内包する。そして、ひび割れが発生すると同時にネットワークにも亀裂が生じることで補修剤が放出し、充填され硬化することで、ひび割れが修復される。

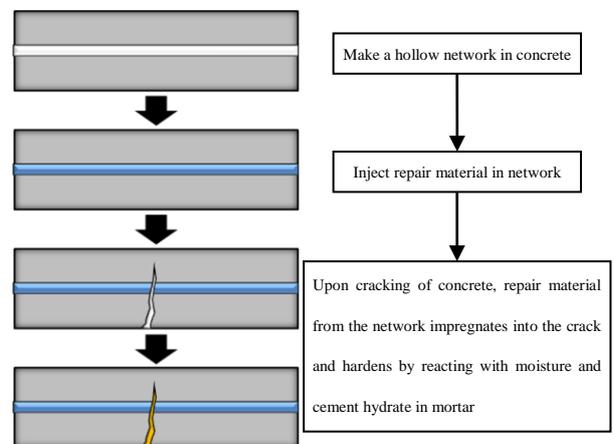


Fig.1 Concrete Self-Repair System

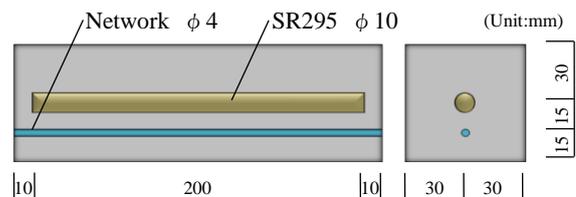


Fig.2 Outline of Mortar Specimen with Rebar and Network

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 日本大学 工学部建築学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

2. 実験概要

本実験では、当自己修復システムによる耐久性の向上を確認するため、鉄筋腐食に対する抵抗性の検討として、促進中性化後、塩水による乾湿繰り返し試験を行う。

3. 試験体概要

3.1 供試体形状

Fig.2 に実験で使用する供試体の詳細を示す。供試体は寸法 60×60×220mm とし、中央に直径 10mm、長さ 200mm の SR295 を埋設したモルタル供試体を使用した。さらに、鉄筋から 15mm 下がった位置に直径 4mm のネットワークを設けた。

3.2 使用材料及びモルタルの配合

モルタル供試体はセメントに普通ポルトランドセメント、細骨材に豊浦産硅砂、混和剤に高性能 AE 減水剤を用いて作製した。モルタルの配合はセメント：細骨材＝1：3(質量比)で混合し、水セメント比を 60%とした。混和剤はセメント質量に対して 1%混入した。モルタル供試体の養生条件として、2 日湿空[20°C, 90%(RH)]養生、5 日水中[20°C]養生、21 日乾燥[20°C]養生を行い、材齢 28 日とした。供試体名の表記として、ひび割れなしを N、ひび割れありを C、ひび割れ修復後を R とし、各 2 体ずつ用いた。

供試体中央に埋設した鉄筋は JIS A 3123(みがき棒鋼)に規定する直径 10mm、長さ 200mm の SR295 を用いた。また、ひび割れ補修剤には 1 液性のエポキシ樹脂を使用した。Table 1 に補修剤の詳細を示す。

4. 実験方法

Fig.3 に曲げ試験の荷重状況を、Fig.4 にシリンダーを用いた注入方法を、Fig.5 に塩化物イオン深さの測定箇所を示す。Fig.3 に示すように曲げ試験を行い、幅 0.08~0.15mm のひび割れを発生させた。次に、Fig.4 に示すようにシリンダーを用いてネットワーク内に補修剤を注入する。なお、自己修復システムは、ひび割れの早期修復を目的とするため、補修剤をあらかじめネットワークに内包させる。しかし本実験では、ひび割れの修復を確認するため、曲げ試験後に超音波試験を行う。そのため、ひび割れ発生後の超音波試験を行った後に補修剤を注入し、修復を行う。なお、超音波試験による修復確認を行ったが、供試体に埋設している鉄筋の影響により、正確な実験結果が得られなかったため、省略する。注入後、1d 乾燥[20°C, 60%(RH)]養生を行い、ネットワーク内に鉄筋を挿入し、補修剤を排出した。排出後、6d 乾燥[20°C, 60%(RH)]養生を行い、補修剤を硬化させた。また、供試体側面からの劣化要因の侵入を防ぐため、シリコン樹脂で供試体側面にコーティングを施した。側面のコーティング後、促進発せい試験及び乾湿繰り返し試験を行った。促進発せい

試験方法として、供試体を耐圧容器内に設置し、常温 1mmHg 以下で 1h 脱気を行った。脱気後、二酸化炭素を 0.981N/mm² の圧力で 3d 注入し、中性化を行った。その後、乾湿繰り返し試験として、40°C の 2.5%塩化ナトリウム水溶液に 6h 浸漬後、40°C の乾燥室で 18h 乾燥を行った。この工程を 1 サイクルとして 5, 10, 15 及び 20 サイクル行った。乾湿繰り返し試験終了後、第 2 荷重の曲げ試験を行った。また、この曲げ試験では、初期ひび割れ発生時の最大荷重から曲げ強度を算出し、第 1, 2 荷重の曲げ強度から強度回復率を算出した。強度回復率の算出式を式(1)に示す。

$$S_R = \frac{S_B}{S_A} \times 100 [\%] \quad (1)$$

S_A：第 1 荷重の曲げ強度 S_B：第 2 荷重の曲げ強度

S_r：強度回復率

第 2 荷重の曲げ試験後、供試体を割裂し、埋設されていた鉄筋を取り出した。また、取り出した鉄筋表面に透明フィルムを巻きつけて腐食部分を写し取り、腐食面積を測定後、腐食面積率を算出した。評価対象面積は Fig.5 に示すように鉄筋の中央から両端に 50mm とった、計 100mm 間の鉄筋表面積とした。

供試体の割裂面には 0.1N 硝酸銀水溶液を噴霧し、塩化物イオン浸透深さを測定した。測定方法箇所は Fig.5 に示すように供試体中央部及び中央部から左右に 45mm の

Table 1 Properties of Epoxy Resin

Hardening Mechanism	Thixotropic Index	Specific Gravity (g/cm ³ , 23°C)	Viscosity (mPa/23°C)
Moisture Sensitive	1.00	1.17	150

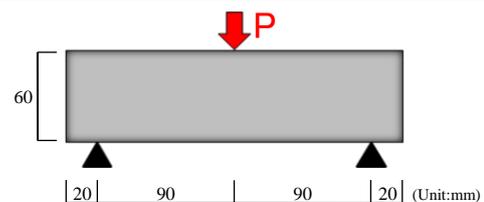


Fig.3 Loading Conditions for Flexural Strength Test

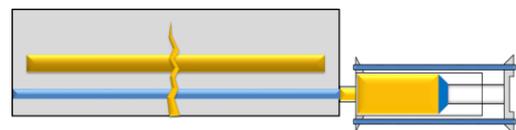


Fig.4 Injection of Repair Material by Cylinder

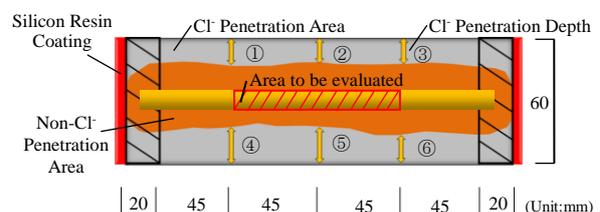


Fig.5 Cl Penetration Depth Measurement Detail

6箇所とし平均値を塩化物イオン浸透深さとした。また、測定面積は両端から20mmの面積を除いた108cm²とし、測定面積から着色部分の面積を引いたものを塩化物イオン浸透面積とした。塩化物イオン浸透面積率及び非中性化面積率の算出式を式(2)に示す。

$$A_p = \frac{A_s}{A_c} \quad (2)$$

As：塩化物イオン浸透面積 Ac：供試体断面積

Ap：塩化物イオン浸透面積率

5. 促進中性化試験結果及び考察

5.1 中性化深さ及び非中性化面積

Photo 1 に3種類の供試体の割裂面にフェノールフタレイン1%アルコール溶液噴霧後の様子を、Table 2 に中性化深さ試験の結果を示す。

Photo 1 より C 供試体はひび割れ部が中性化していることから、ひび割れから二酸化炭素が侵入し、中性化が進行していることが確認できる。一方、R 供試体はネットワーク側には補修剤が充填され、二酸化炭素の侵入を防ぐことができたが、供試体上部に発生したひび割れからの中性化の進行が進んでいることから、補修剤の充填が不十分だったと考えられる。

5.2 中性化に対する抵抗性について

R 供試体について、修復箇所からの二酸化炭素の侵入を防いだことから、当自己修復システムによってひび割れが修復されることで、ひび割れの発生による気密性の低下を抑制することが可能であると考えられる。また、補修剤が十分に充填されることで、二酸化炭素の侵入を

防ぎ、中性化に対する耐久性を向上させることが可能であることを示唆した。しかし、C 供試体のネットワーク付近が中性化していたことから、ひび割れが発生することによりネットワーク内に二酸化炭素が侵入し中性化を促進させたと考えられる。そのため、ネットワークからの

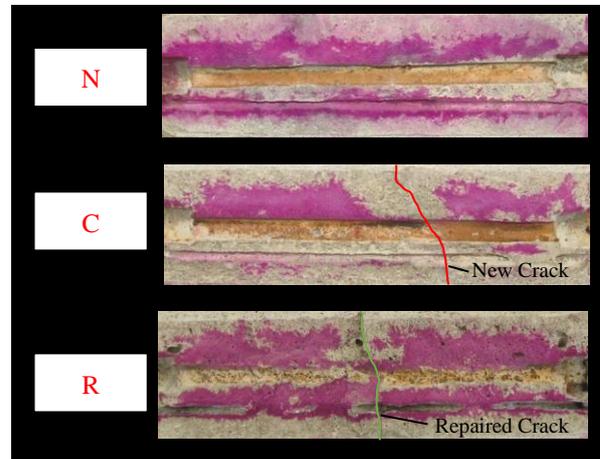


Photo 1 Carbonation Depth Test Results of 3 Types of Specimens (UnCracked, Cracked and Repaired Crack)

Table 2 Carbonation Depth Test Results

No. of Specimen	Type of Specimen	Carbonation	Non-	Non-
		Depth (mm)	Carbonated Area(cm ²)	Carbonated Rate(%)
N	Non-Crack	10.6	39.7	36.8
C	Cracked	18.9	21.8	20.1
R	Repaired Crack	11.2	51.9	48.1

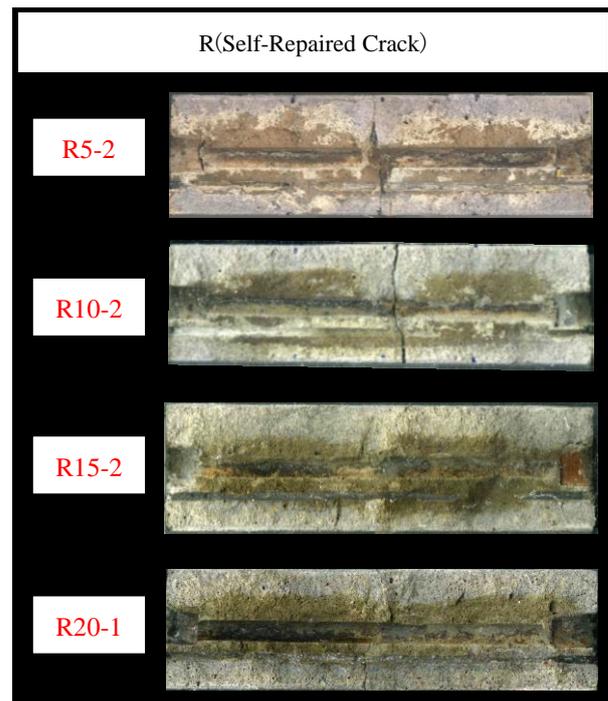
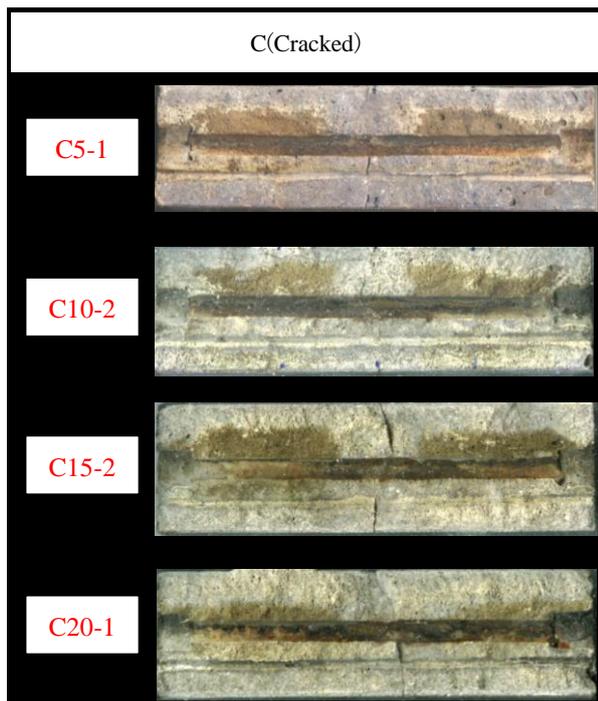


Photo 2 Cl⁻ Penetration Depth Test Results of Specimens with Cracks and Self-Repaired Cracks

中性化の進行を防ぐ必要がある。また、N 供試体の鉄筋とネットワークの間に中性化が見られる原因として、CO₂ がコーティングを施した供試体側面から侵入し、鉄筋とモルタルの付着間から浸透したことが考えられる。

6. 乾湿繰り返し試験結果および考察

6.1 塩化物イオン浸透深さ及び非塩化物イオン浸透面積

Photo 2 には、割裂面に 0.1N 硝酸銀水溶液噴霧後の供試体の様子を、Photo 3 にエポキシ樹脂が付着した供試体の様子を示す。なお、試験結果が顕著に現れた供試体のみを示す。また、Table 3 には塩化物イオン浸透深さ試験の結果を示す。

Photo 2 より C15-2 は、供試体中央のひび割れ箇所から塩化物イオンが侵入していることが確認できる。これに対し、R15-2 供試体は、ひび割れ部から塩化物イオンが侵入していないことが確認できる。同様に、各サイクルにおいて C 供試体に比べ R 供試体の方が塩化物イオン浸透面積率及び塩化物イオン浸透深さは低い値となった。このことから、ひび割れあり供試体は、ひび割れが発生することで水密性が低下し、塩化物イオンの侵入が容易になったと言える。一方、修復あり供試体は、ひび割れが修復されることにより、ひび割れからの塩化物イオンの侵入を防いだと考えられる。また、サイクル数の増加に伴う、塩化物イオン浸透面積の増減といった一定の関係性が得られなかったことに関して、塩化ナトリウム水溶液の濃度に対してサイクル数が少なかったため供試体ごとの塩化物イオンの浸透面積に差が出なかったこと。さらに、特に塩化物イオンの浸透が少ない結果となった R15-1 供試体に関しては、Photo 3 に示すように底面のひび割れ周辺に、補修剤が付着していたことから、塩化物イオンの浸透が

抑制されたと考えられる。

6.2 鉄筋腐食面積及び腐食状況

Photo 4 に鉄筋の腐食状況及び Table 4 に鉄筋腐食面積を示す。Photo 4 について、U(Upper)を供試体上部とし、

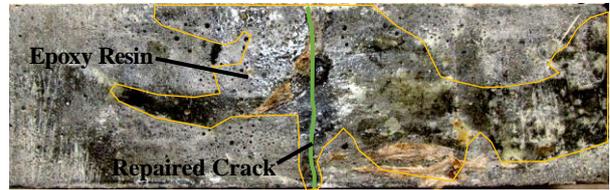


Photo 3 View of Epoxy Resin Bonding

Table 3 Results of Cl⁻ Penetration Depth Test

No. of Specimen	Cl ⁻ Penetration Depth(mm)	Non-Cl ⁻ Penetration Area(cm ²)	Cl ⁻ Penetration Rate(%)	Average (%)
C5-1	17.1	14.07	84.37	85.83
C5-2	17.4	11.44	87.29	
R5-1	13.4	20.43	77.31	73.98
R5-2	11.3	26.42	70.65	
C10-1	19.7	5.60	93.78	89.18
C10-2	20.8	13.89	84.57	
R10-1	13.7	21.70	75.89	74.53
R10-2	12.9	24.15	73.17	
C15-1	21.9	12.79	85.79	83.06
C15-2	20.9	17.70	80.33	
R15-1	13.4	44.24	50.85	59.83
R15-2	14.5	28.08	68.81	
C20-1	22.8	10.82	87.98	88.25
C20-2	21.9	10.34	88.51	
R20-1	14.8	28.58	68.25	70.23
R20-2	16.6	25.01	72.21	

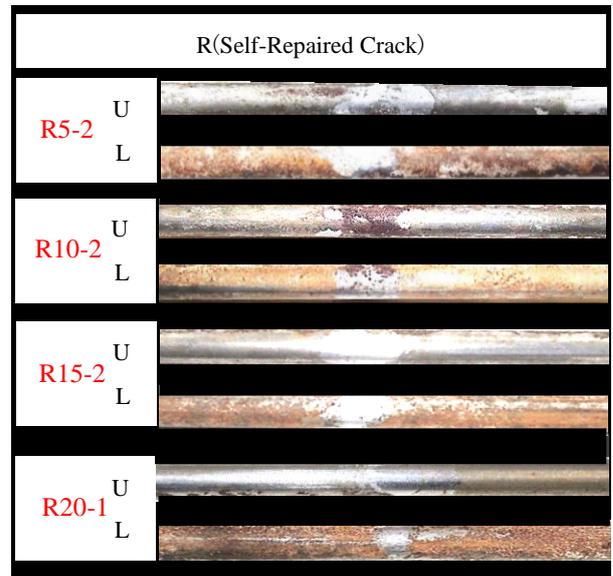
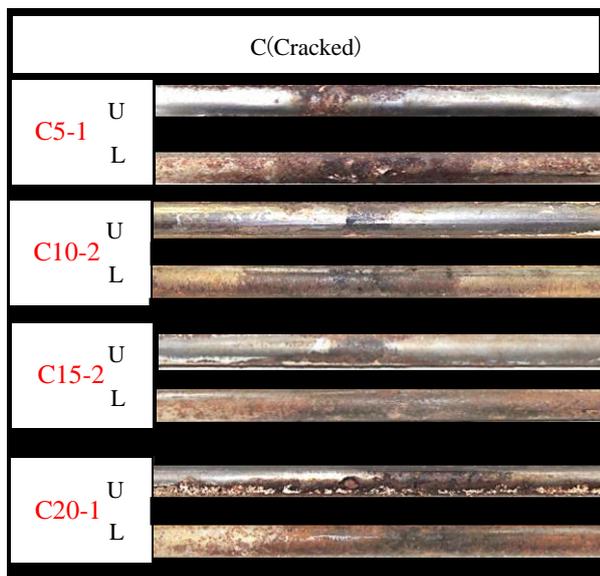


Photo 4 A View of Steel Corrosion in Specimens with Cracks and Self-Repaired Cracks

L(Lower)を供試体下部とする。C 供試体に比べ R 供試体は、どのサイクル数においても腐食面積を抑える結果となった。また、R 供試体の多くは鉄筋中央部に錆の発生が見られなかった。理由として、ひび割れが発生することにより、補修剤として使用したエポキシ樹脂が鉄筋に付着し、鉄筋の腐食要因から不導体被膜の破壊を防いだことが考えられる。しかし、Photo 4 に示す R10-2 はひび割れ部における鉄筋の腐食が確認された。原因として、塩化物イオン浸透面積率が73%と高い値であったことから補修剤の充填が不十分だったことが考えられる。以上のことから、ひび割れ修復を行うことで、補修剤が十分に充填された場合のみ鉄筋腐食を引き起こす要因の侵入を抑えることが可能であると言える。

また各サイクルにおいて鉄筋に腐食が確認された原因として、ひび割れ部からの塩化物イオンの侵入が確認されず、また、鉄筋のネットワーク側に錆が多く発生していたことから、供試体側面とネットワークからの塩化物イオンや CO₂ の侵入が考えられる。

Table 3 及び Table 4 について塩化物イオン浸透面積率と鉄筋腐食面積率とでサイクルごとに数値のばらつきが見られる。例として、R15-1 と R20-2 では、R20-2 の方が塩化物イオンが浸透しているが、鉄筋腐食面積は小さい値となっている。これについて、前述と同様に塩化物イオン以外の CO₂ などの劣化因子が側面から侵入したことにより、腐食が促進されたため、塩化物イオンの浸透面積と鉄筋の腐食面積に関係性が確認されなかったと考えられる。

6.3 ひび割れ修復状況の確認

Table 5 に曲げ試験の結果を示す。また、Photo 5 に R20-2 から取り出した鉄筋の様子を示す。

既往の研究結果⁹⁾では、ひび割れに補修剤が十分に充填されることにより高い強度回復率を示すことを確認している。そのため、強度回復率が100%以上を示した R20-2 は補修剤が十分に充填されことで、ひび割れ発生部からの塩化物イオン、二酸化炭素、酸素及び水などの鉄筋腐食を引き起こす物質の侵入を防ぎ Table 4 と Photo 5 に示すように鉄筋腐食面積が低い値となったと考えられる。

6.4 当自己修復システムによる利点

Photo 6 に補修剤及びモルタルが鉄筋表面に付着した様子と付着物の剥離後の様子を、Photo 7 に R20-1 供試体の割裂後の様子を、Fig.6 に当自己修復システムの利点を示す。

Photo 6 に示す R15-1 は、鉄筋表面にモルタルが付着していた。さらに、R15-1 は塩化物イオン浸透面積率が R 供試体のなかで最も低く、鉄筋の腐食面積率に関しても、他の供試体と比べ低い値であった。また、強度回復率が90%以上と高い値となったことから補修剤が十分に充填さ

れたことが裏付けられる。さらに、Photo 7 より R20-1 には錆が発生しているがひび割れ修復部には錆が発生していないことが分かる。そのため、補修剤によりひび割れが完全に閉塞することで劣化要因の侵入を防ぎ、鉄筋の腐食抑制が可能であると言える。以上のことから、Fig.7 に示すように自己修復によりひび割れが閉塞されたことで、劣化要因の侵入を防ぐだけでなく、鉄筋表面が補修剤でコーティングされることによりひび割れ修復部の錆の発生を抑制することができると考えられる。

6.5 鉄筋腐食に対する抵抗性について

当自己修復システムにより修復を行うことで、腐食面積を抑えられたことから、鉄筋腐食に対する耐久性向上の可能性を示唆した。また、ひび割れが修復されることで、塩化物イオン、二酸化炭素、酸素、水といった鉄筋の腐食

Table 4 Results of Corroded Area of Steel

No. of Specimen	Crack Width (mm)	Corroded Area of Steel (mm ²)	Corrosion Rate of Steel (%)	Average (%)
C5-1	0.10	2262	72.0	71.4
C5-2	0.10	2223	70.8	
R5-1	0.15	1523	48.5	47.7
R5-2	0.10	1475	47.0	
C10-1	0.10	2625	83.6	77.9
C10-2	0.10	2270	72.3	
R10-1	0.10	2105	67.0	58.1
R10-2	0.10	1543	49.1	
C15-1	0.15	2512	80.0	77.7
C15-2	0.15	2367	75.4	
R15-1	0.10	1444	46.0	47.2
R15-2	0.10	1517	48.3	
C20-1	0.10	2904	92.5	87.9
C20-2	0.08	2614	83.2	
R20-1	0.15	1388	44.2	35.2
R20-2	0.10	822	26.2	

Table 5 Flexural Strength Test Results

No. of Specimen	1st Loading (N/mm ²)	2nd Loading (N/mm ²)	Regain of Flexural Strength (%)
R5-1	7.22	6.16	85.4
R5-2	5.91	4.31	73.0
R10-1	3.75	3.63	96.7
R10-2	5.50	2.98	54.1
R15-1	4.81	4.55	94.5
R15-2	5.88	6.31	107.4
R20-1	4.88	5.00	102.6
R20-2	3.66	5.29	144.4



Photo 5 A View of Steel Corrosion After 20cycles

を引き起こす要因の侵入を防ぎ、腐食の進行を遅らせることが可能であると考えられる。しかし、鉄筋腐食に対する耐久性を向上させるためには、ひび割れに補修剤が十分に充填される必要があるため、ひび割れ幅に適した粘性をもつ補修剤の選定や新たなネットワークの利用方法が今後の検討課題である。

7. まとめ

本実験では、ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムを付与した供試体に中性化促進試験及び腐食促進試験を行い、耐久性の向上について検討を行った。その結果、当自己修復システムにより、ひび割れに補修剤が十分に充填された場合に限り、ひび割れが発生した際に起こる気密性及び水密性の低下を抑制し、劣化要因の侵入を防ぐことができる。そのため、補修剤の充填方法の改善を行うことで、当自己修復システムによる RC 構造物の耐久性向上が可能である。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)24360226 の助成の下で実施した。

参考文献

- 1) Virginie Wiktor, Henk M, Jonkers, Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete, *Cement & Concrete Composites*, Vol.33, pp.763-770, 2011
- 2) Kshitiij C. SHRESTHA, Sanjay PAREEK, Toshihiro OMORI, Yoshikazu ARAKI : FEASIBILITY OF SELF-REPAIR NETWORK SYSTEM IN CONCRETE BEAMS WITH Cu-Al-Mn SUPERELASTIC ALLOY BARS, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.34, No.1, pp.1438-1443, 20127
- 3) 西脇智哉, 三浦和晃, 三橋博三, 奥原芳樹 : 自己修復コンクリートの開発を目的とした発熱デバイスに関する検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.28, No.1, pp.2111-2116, 20067
- 4) 大平 旭洋, 三浦 裕騎, Sanjay PAREEK : ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムの非破壊試験によるコンクリートひび割れの自己修復性の評価, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.33, No.1, pp.1445-1450, 20127
- 5) 熊田 廣樹, 大平 旭洋, Sanjay PAREEK : ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムにおけるひび割れの自己修復性能に関する検討, *コンクリート工学年次論文集*第33巻, 第1号, pp.1445-1450, 2011
- 6) 大平 旭洋, 三浦 裕騎, Sanjay PAREEK : ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムによる耐久性向上に関する実験的検討, *コンクリート工学年次論文集* Vol.35, No.1, pp.1399-1404, 2013



Photo 6 A View of Steel Corrosion After 15cycles

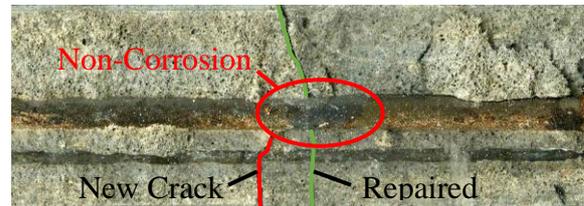


Photo 7 Fractured Section of R20-1 Specimen

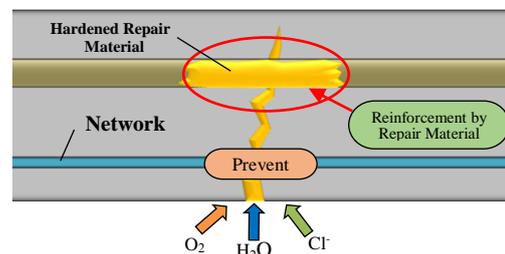


Fig.6 Corrosion Prevention Mechanism by Concrete having Self-Repair System