

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による耐久性向上に関する実験的検討

大平 旭洋*1・三浦 裕騎*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耐久性の向上について検討を行うために、鉄筋を埋設したモルタル供試体を用いて促進中性化試験及び腐食促進試験を行った。その結果、ひび割れが完全に修復されることで、劣化要因の侵入を防ぐことができた。これにより、中性化や鉄筋腐食に対する抵抗性が上昇し、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

近年、ひび割れの自己修復コンクリートの研究が盛んに行われ、International Conference Self-Healing Materialsなどの自己修復材料に関する国際会議が開催されている。世界中から研究者が集まり研究成果を報告していることから、自己修復材料への関心が高いことが分かる。

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。

本研究では、ネットワーク及び補修剤を用いた自己修復システムを提案し、RC構造物の耐久性向上の可能性について追求する。なお、本論文では、補修剤を注入するために供試体内部に設けた、空洞で円管状の孔(つきぬけた穴)の事をネットワークと定義する。

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共にネットワークにも亀裂が発生する。そして、ネットワークから補修剤が放出し、充填され硬化することで、ひび割れが修復される。筆者らは、このような手法を提案し、ひび割れの修復結果に関して報告を行っている^{4),5)}。

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

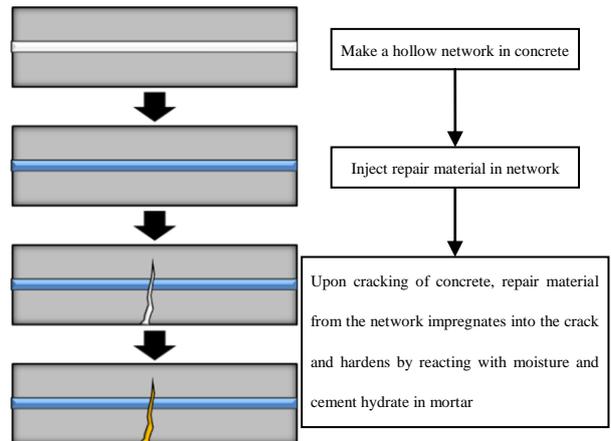


Fig.1 Concrete Self-Repair System

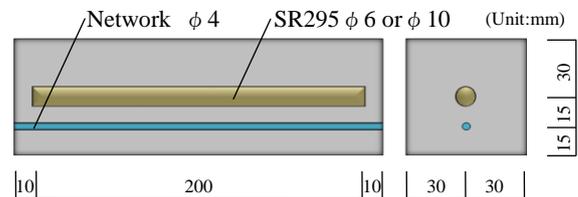


Fig.2 Outline of Mortar Specimen with Rebar and Network

について検討を行う。検討方法として、1)中性化に対する抵抗性の検討として中性化促進試験機による促進中性化試験、2)鉄筋腐食に対する抵抗性の検討として乾湿繰り返し試験による腐食試験を行う。

3. 供試体概要

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。1)及び2)の実験では、寸法60×60×220mmの中央に鉄筋を埋設したモルタル供試体を使用した。また、鉄筋から15mm下がった位置にネットワークを作製した。

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

*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 / (現) デルフト工科大 客員教授 工博 (正会員)

ント、細骨材に豊浦産珪砂、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℃, 90%(RH)]養生、5 日水中[20℃]養生、21 日乾燥[20℃]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 とする。

供試体中央に埋設した鉄筋は直径 6mm、長さ 200mm の SR295(実験 1)に使用)及び JIS A 3123(みがき棒鋼)に規定する直径 10mm、長さ 200mm の SR295(実験 2)に使用)の 2 種類を用いた。

補修剤には粘性の異なる 2 種類の 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。この補修剤の粘性はひび割れ幅と関係があり、粘性の低い補修剤(L)は 0.1mm 程度の小さなひび割れに対して充填されやすい。それに対し、補修剤(M)は補修剤(L)より粘性が高いため、0.1mm より比較的大きなひび割れ幅に対して適している。

4. 実験方法

4.1 中性化に対する抵抗性の実験

Fig.3 に超音波試験機を用いた非破壊試験の測定箇所、Fig.4 に曲げ試験の載荷状況を示す。超音波試験機を用いてひび割れの修復状況を確認するため、載荷前・後及び修復後の供試体に Fig.3 に示す測定箇所の伝搬時間の測定を行う。そして、伝搬時間の変化率を算出する。算出式を式(1)に示す⁴⁾。測定後、ひび割れを発生させるために曲げ試験を行う。

$$T_c = \frac{T_b}{T_a} \quad (1)$$

T_a：載荷前の伝搬時間 T_b：修復後の伝搬時間

T_c：伝搬時間の変化率

次に、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、ひび割れ幅により補修剤の選定を行うものとする⁵⁾。注入の際に、ゴムを取り付け一定の圧力を加えることで、ひび割れに補修剤を自動的に充填させた。そして、1 日乾燥養生[20℃,60%(RH)]を行い、ネットワーク内の補修剤を排出した。排出後、6 日乾燥養生[20℃,60%(RH)]を行い、補修剤を硬化させた。

供試体側面からの中性化を防ぐため、ひび割れなし N、ひび割れあり C、ひび割れ修復後 R の 3 種類の供試体に Fig.5 に示すように、シリコン樹脂で側面をコーティングした。そして、供試体を促進中性化試験機に設置した。中性化の促進条件は、温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%の環境で行った。促進期間は 20 日とした。

促進期間終了後、供試体を割裂し、割裂面にフェノー

ルフタレイン 1%アルコール溶液を噴霧し、供試体端部から着色部までの距離を測定した。測定箇所は Fig.5 に示すように供試体中央から両端に 60mm の 4 箇所とし、平均値を中性化深さとした。また、着色部分の面積を求め、非中性化面積率を算出した。算出の際、側面からの中性化を考慮して、Fig.5 に示すように側面両端部から 20mm の面積は除いたので、供試体断面積は 108cm²とした。非中性化面積率の算出式を式(2)に示す。

$$C = \frac{A}{B} \quad (2)$$

A：非中性化面積 B：供試体断面積 C：非中性化面積率

4.2 鉄筋腐食に対する抵抗性の実験

モルタル供試体のひび割れ発生から修復までの作業及び 2 種類の供試体の側面をコーティングするまでの作業は 4.1 と同様の作業を行った。また、ひび割れの修復確認として、超音波試験機を用いた非破壊試験及び曲げ試験を行った。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、乾湿繰り返し試験終了後、第 2 載荷の曲げ試験を行い、強度回復率を算出した。強度回復率の算出式を式(3)に示す⁴⁾。

$$S_R = \frac{S_B}{S_A} \times 100[\%] \quad (3)$$

S_A：第 1 載荷の曲げ強度 S_B：第 2 載荷の曲げ強度

S_R：強度回復率

Table 1 Properties of Epoxy Resin

Type of Epoxy Resin	Hardening Mechanism	Thixotropic Index	Specific Gravity (g/cm ³ ,23°C)	Viscosity (mPa・23°C)
M	Moisture	2.20	1.07	1900
L	Sensitive	1.00	1.15	150

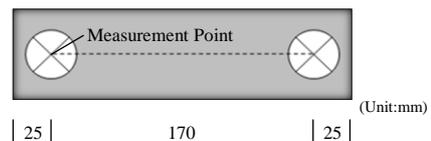


Fig.3 Measurement Points by Non-Destructive Testing

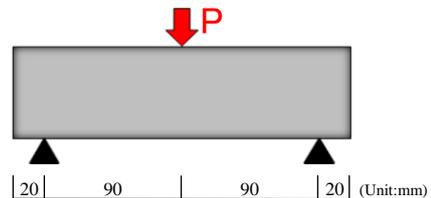


Fig.4 Loading Conditions for Flexural Strength Test

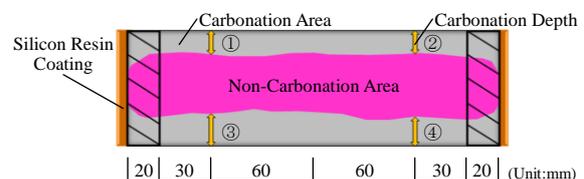


Fig.5 Carbonation Depth Measurement Detail

促進劣化方法は乾湿繰り返し試験により行った。促進劣化条件としては、40℃の10%塩化ナトリウム水溶液に6時間浸漬後、40℃の乾燥室で18時間乾燥を行った。この行程を1サイクルとして5、10、及び15サイクル行った。供試体名称として、5サイクルをC5、R5、10サイクルをC10、R10、15サイクルをC15、R15と表記する。

促進劣化終了後、供試体を割裂し、埋設されていた鉄筋を取り出し、鉄筋表面に透明フィルムを巻きつけて、腐食部分を写し取った。そして、腐食面積を測定し、評価対象面積で除して腐食面積率を算出した。評価対象面積は供試体中央に発生するひび割れからの腐食を考慮して、鉄筋の中央から両端に50mmとった、長さ100mm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。測定方法は4.1の中性化深さの測定と同様に行った。また、着色部分の面積を求め、塩化物イオンが浸透していない部分の割合(以下、非塩化物イオン浸透面積率)を算出した。その際、側面からの浸透を考慮して、Fig.6に示すように側面端部から20mmの面積は除いた。非塩化物イオン浸透面積率は、式(2)と同様に算出した。

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及びTable 2に各試験体の中性化深さ試験の結果を示す。なお、Photo 1では中性化が顕著に現れたN-1、C-2及びR-2のみを示す。

Photo 1より、C-2は中央部分のひび割れ箇所から底面にかけて中性化が進行しており、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。これに対し、R-2は、供試体中央部分のひび割れ修復箇所から中性化が進行していないことが確認できる。また、Table 2に示す非中性化面積率では、N供試体が71.3~74.4%、C供試体が53.0~54.4%、R供試体が67.0~68.4%となった。C供試体はひび割れの発生に伴い気密性が低下したことで、二酸化炭素の侵入が容易になり、他の2種類の供試体に比べ非中性化面積率が低かったと言える。一方、R供試体は、N供試体と同様の非中性化面積率及び中性化進行状況を示していた。

5.2 ひび割れ修復状況の確認

Table 3に超音波試験の結果、Photo 2に既往の研究結果である伝搬時間の変化率と補修剤充填性の関係を示す。Photo 2は、蛍光塗料を混ぜた補修剤にブラックライトを照射して充填状況を確認したもので、変化率が大きくなるにつれて充填性が低下していく。

Table 3より、R供試体はすべて変化率が1.00付近を

示していた。この結果をPhoto 2と比較すると、ひび割れに補修剤が十分に充填され、ひび割れが完全に修復されていると言える。これにより、R供試体はN供試体と

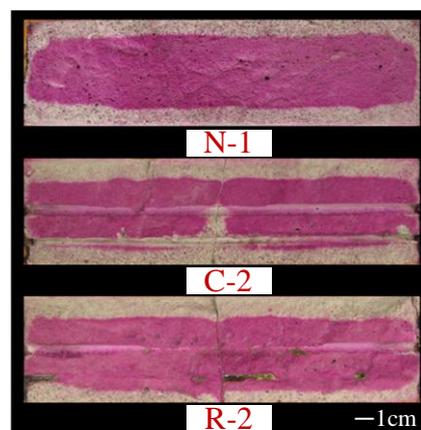


Photo 1 Carbonation Depth Test Results of 3 Types of Specimens(UnCracked, Cracked and Repaired Crack)

Table 2 Carbonation Depth Test Results

No. of Specimen	Type of Specimen	Crack Width (mm)	Crack Carbonation Depth (mm)	Non-Carbonated Area(cm ²)	Non-Carbonated Rate(%)
N-1	Non-Crack	—	10.2	78.4	72.6
N-2		—	10.4	80.4	74.4
N-3		—	9.8	77.0	71.3
C-1	Cracked	0.15	10.3	58.2	53.9
C-2		0.21	10.8	58.7	54.4
C-3		0.28	10.7	57.3	53.0
R-1	Repaired Crack	0.12	10.7	73.9	68.4
R-2		0.17	10.3	73.8	68.4
R-3		0.21	10.6	72.4	67.0

Table 3 Non-Destructive Test Results

No. of Specimen	Repair Materil	Transit Time (μs)			Change of Transit Time
		Before Crack	After Crack	After Repair	
R-1	L	41.9	48.5	39.5	0.94
R-2	L	41.5	49.1	41.2	0.99
R-3	M	42.0	48.7	42.1	1.00

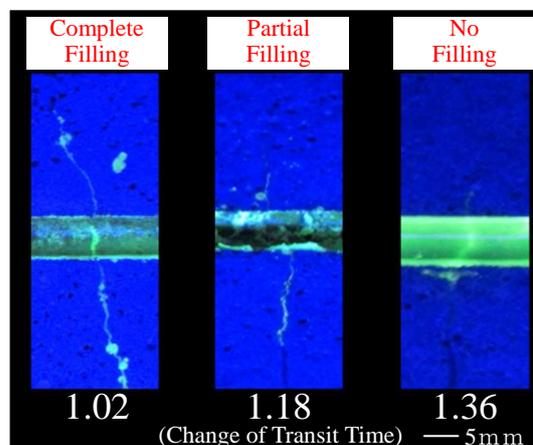


Photo 2 Relationship between Change of Transit Time and Filling Property of Repair Material

同様の中性化進行状況となった事が裏付けられる。

5.3 中性化に対する抵抗性について

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、気密性の低下を防ぐことが可能となり、ひび割れが存在しない健全な状態と同じ状態を維持することができると考えられる。また、ひび割れが修復され二酸化炭素の侵入を抑制することで、中性化に対する耐久性向上の可能性を示唆した。しかし、C 供試体の場合、中性化の進行にネットワークが影響していたと考えられる。そのため、ネットワークからの中性化の進行を防ぐために、何らかの対処が必要である。これについては、今後の検討課題である。

6. 乾湿繰り返し試験結果及び考察

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 3, 4 には、割裂面に 0.1N 硝酸銀水溶液噴霧後の様子を示す。なお、Photo 3 では、試験結果が顕著に現れた C5-1, R5-3 及び R5-4 供試体のみを示す。Table 4 には塩化物イオン浸透深さ試験の結果を示す。なお、Table 4 では Photo 4 の結果より、供試体内部全体に塩化物イオンが浸透していたため、10, 15 サイクルの非塩化物イオン浸透面積率は算出できなかった。

Photo 3 より、C5-1 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のが確認できる。これに対し、R5-4 は供試体中央部分のひび割れ修復箇所から侵入していないことが確認できる。しかし、R5-3 は修復後であっても C5-1 と同様にひび割れ箇所から塩化物イオンが侵入していた。また、Table 4 に示す非塩化物イオン浸透面積率では、C5 が 37.6~41.3%，補修剤 M を用いて修復された R5-1~3 が 40.8~46.2%，補修剤 L を用いて修復された R5-4~6 が 62.3~68.5% となった。C5 供試体はひび割れの発生に伴い水密性が低下したことで、塩化物イオンの侵入が容易になり、R5-4~6 に比べ非塩化物イオン浸透面積率が低かったと言える。R5-1~3 はひび割れから塩化物イオンが侵入していたため、C5 供試体と同様の結果となった。一方、R5-4~6 供試体は、ひび割れからの塩化物イオンの侵入を防いだことで、最も非塩化物イオン浸透面積率の値が高かったと言える。

6.2 鉄筋腐食面積及び腐食状況

Table 6 に腐食面積、Photo5, 6 に鉄筋の周囲の腐食状況及び Fig.7 に各サイクルの試験結果を平均したものを示す。なお、R15-2 は鉄筋両端部に錆が生じているが、評価対象面積外のため、腐食面積率は算出できなかった。

Table 6 及び Photo 5 より、5 サイクル後の腐食面積率は C5-1~3 が 5.0~5.8%，R5-1~3 は 1.8~8.8% となり、Photo 3 でひび割れから塩化物イオンの侵入が確認された供試体は鉄筋が腐食していた。それに対し、塩化物イオンの侵入を防いでいた、R5-4~6 は鉄筋に腐食が確認

されなかった。R10 及び R15 供試体は Photo 4 に示すように、塩化物イオンが供試体内部全体に侵入したことで鉄筋表面の不動態皮膜が破壊され、腐食が進行していたと考えられる。また、Photo 6 に示すように、R15-1 は腐食面積率が 30.8% なのに対し、R15-2 は 0% であった。この R15-2 の腐食面積率が 0% となった要因として、Fig.7 に示すように、R15-2 に埋設していた鉄筋表面に補修剤が広範囲にわたって付着したことで、鉄筋腐食を引き起こす物質との接触を防ぐことができ、腐食の発生を抑制していたことが挙げられる。

Fig.6 より、C 供試体はサイクル試験回数の増加に伴って、腐食面積率が増加していく。R 供試体も同様に、腐食面積率が増加していくが、C 供試体と比較すると、腐

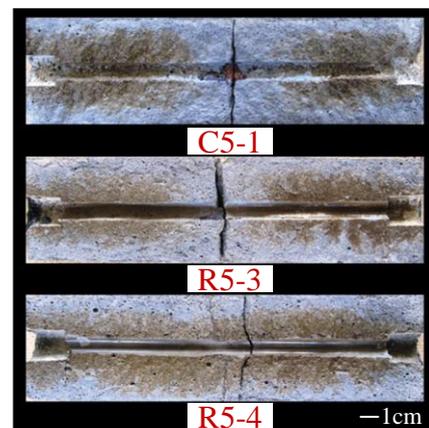


Photo 3 CI Penetration Depth Test Results of Specimens After 5cycles

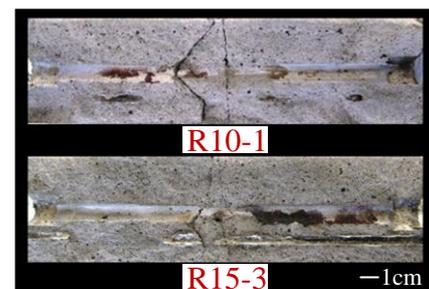


Photo 4 CI Penetration Depth Test Results of Specimens After 10 and 15cycles

Table 4 CI Penetration Depth Test Results

No. of Specimen	No. of Cycles	Cl ⁻ Penetration Depth(mm)	Non-Cl ⁻ Penetration Area(cm ²)	Non-Cl ⁻ Penetration Rate(%)
C5-1		9.1	44.55	41.25
C5-2		11.6	41.11	38.06
C5-3		12.2	40.64	37.63
R5-1	5cycles	9.6	49.94	46.24
R5-2		9.5	45.83	42.44
R5-3		10.4	44.03	40.77
R5-4		7.2	73.95	68.47
R5-5		11.1	67.32	62.33
R5-6		11.0	70.55	65.32

食の発生を抑制していることが確認できる。そのため、C 供試体に比べ、R 供試体は鉄筋腐食を引き起こす水及び酸素の供給を抑えられたことで、腐食の発生を抑制し、腐食面積率が低かったと考えられる。

6.3 ひび割れ修復状況の確認

Table7 に曲げ試験の結果を示す。既往の研究結果⁵⁾ではひび割れに補修剤が十分に充填していることで高い強度回復率を示すことが確認されている。なお、超音波試験機を用いて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、正確な試験結果が得られなかったため、超音波試験の結果は省略した。

Table7 より、R5-1～3 は強度回復率が約 60%以下を示し、他の供試体に比べ低い値となった。この結果から、ひび割れに補修剤があまり充填されていないことで、修復が不十分であったと考えられる。そのため、閉塞されていない箇所からの塩化物イオン、酸素及び水などの鉄筋腐食を引き起こす物質が容易に侵入しやすい状態となったことで鉄筋に錆が発生し、鉄筋腐食が進行していたと言える。

R5-4～6 は強度回復率が約 100%以上の高い値を示していることから、補修剤が十分に充填され、ひび割れが完全に修復されていると考えられる。これにより、R5-4～6 は Photo 3 に示すように、塩化物イオン及び鉄筋腐食を引き起こす物質の侵入を防ぐことが可能であると言える。また、R10 及び R15 のすべての供試体も同様に、強度回復率が約 100%以上を示していることから、ひび割れは完全に修復されいると言える。

補修剤の充填状況に差があった要因としては補修剤の粘性が考えられる。補修剤 L は粘性が低いことから 0.1mm 程度のひび割れなどの僅かな隙間でも充填することができる。そのため、底面から上面にかけて徐々に小さくなっていくひび割れに対しても充填されていた。

これに対し、補修剤 M は L に比べ粘性が高く 0.1mm 程度のひび割れ幅には充填されにくい。そのため、供試体底面の 0.2mm 程度のひび割れには補修剤が充填されたが、底面から上面にかけて徐々に小さくなっていくひび割れに対しては充填されなかったと考えられる。また、補修剤 L は粘性が低いことから毛細管現象の力が働きやすかったことも充填状況に違いがみられた要因であると考えられる。

6.4 当自己修復システムによる利点

Photo 7 に補修剤が鉄筋表面に付着した様子、Fig.6 に当自己修復システムの利点、Photo 8 に R15-1 の供試体から取り出した鉄筋の様子を示す。

R5-4～6, R15-1, 2 などのひび割れに補修剤が十分に充填された供試体は Photo 7 に示すように、鉄筋表面に補修剤が付着していた。このことから、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、鉄筋表面が補修剤によってコーティングされることで錆の発生を抑制でき、腐食

Table 6 Cl Penetration Depth Test Results

No. of Specimen	Type of Specimen	Crack Width (mm)	Corroded Area of Steel (mm ²)	Corroded Rate of Steel (%)
C5-1	Cracked	0.25	182	5.8
C5-2		0.19	157	5.0
C5-3		0.13	159	5.1
R5-1	Repaired Crack	0.23	275	8.8
R5-2		0.17	258	8.2
R5-3		0.24	58	1.8
R5-4		0.29	0	0.0
R5-5		0.15	0	0.0
R5-6		0.19	0	0.0
C10-1	Cracked	0.13	1226	39.0
C10-2		0.08	1254	39.9
C10-3		0.24	1136	36.2
R10-1	Repaired Crack	0.12	263	8.4
R10-2		0.24	582	18.5
R10-3		0.21	413	13.1
C15-1	Cracked	0.12	2707	86.2
C15-2		0.13	2695	85.8
C15-3		0.23	2493	79.4
R15-1	Repaired Crack	0.13	968	30.8
R15-2		0.21	0	0.0
R15-3		0.08	882	28.1

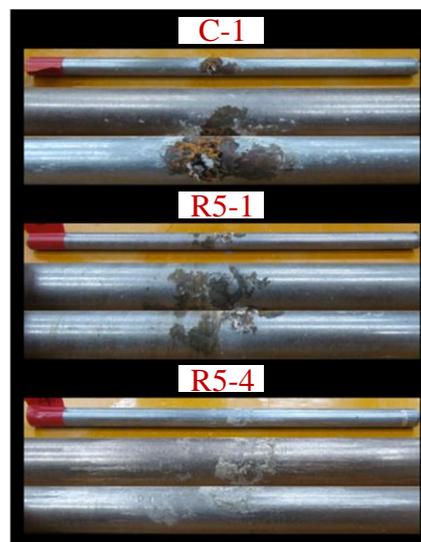


Photo 5 A View of Steel Corrosion After 5cycles

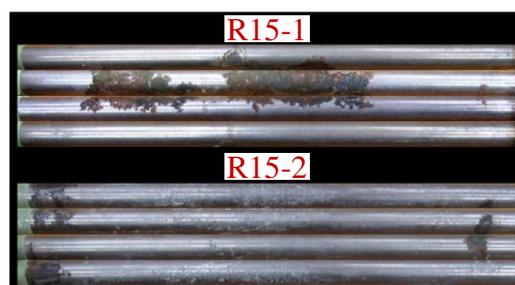


Photo 6 A View of Steel Corrosion After 15cycles

に対して更に抵抗性が向上すると考えられる。また、**Photo 8** より、R15-1 の鉄筋には錆が発生しているが、ひび割れ修復部分からは錆が発生していないことが確認できる。

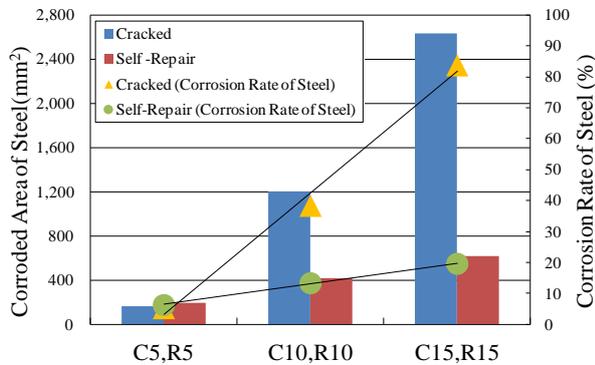


Fig.6 Average of Results of Corrosion Tests of Specimens With and Without Self-Repair

Table7 Flexural Strength Test Results

No. of Specimen	Repair Material	Flexural Strength Test		Regain of Flexural Strength(%)
		1st (N/mm ²)	2nd (N/mm ²)	
R5-1	M	3.76	1.75	46.5
R5-2	M	3.54	1.48	41.8
R5-3	M	3.43	2.11	61.5
R5-4	L	3.4	3.69	108.5
R5-5	L	3.23	3.07	95.0
R5-6	L	3.03	3.76	124.1
R10-1	L	3.08	3.04	98.7
R10-2	L	3.33	3.5	105.1
R10-3	L	3.29	3.29	100.0
R15-1	L	3.46	3.93	113.6
R15-2	L	3.54	3.65	103.1
R15-3	L	3.24	3.78	116.7



Photo 7 Repair Material Bonded to Surface of Steel

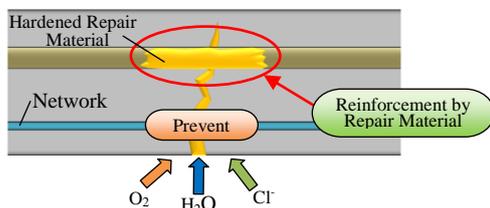


Fig.7 Corrosion Prevention Mechanism by Concrete having Self-Repair System

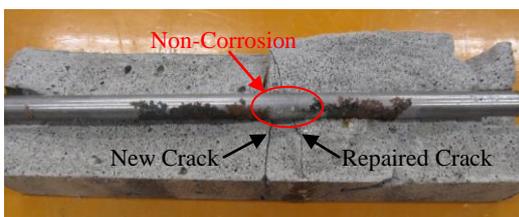


Photo 8 Fractured Section of R15-1 Specimen

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ってひび割れが修復されることで、塩化物イオン、酸素、水などの鉄筋腐食を引き起こす物質の侵入を防ぐことが可能となるため、不動態皮膜の破壊の抑制及び鉄筋腐食の進行を遅らせることが可能であり、ひび割れが存在しない健全な状態と同じ状態を維持することができると考えられる。そのため、ひび割れが修復されることで鉄筋腐食に対する耐久性向上の可能性を示唆した。しかし、鉄筋腐食に対する耐久性向上の可能性としては、ひび割れに補修剤が十分に充填され、完全に修復された場合に限るため、ひび割れ幅に適した補修剤の選定など、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ってひび割れが修復されることで、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可能となる。そのため、ひび割れが存在しない健全な状態と同じ状態を維持することができるため、当自己修復システムをRC構造物に付与することで、耐久性を向上させることが可能である。

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) Kshitij 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, 2012
- 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, 2006
- 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, 2012
- 5) 熊田 廣樹, 大平 旭洋, Sanjay PAREEK : ネットワーク及び補修材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, *コンクリート工学論文集*第33巻, 第1号, pp.1445-1450, 2011