

論文 自己修復システムを付与したモルタルの鉄筋腐食に対する抵抗性の検討

尾形 雅人*1・荒木 慶一*2・Sanjay PAREEK*3

要旨：本研究では、ひび割れの自己修復機能を有するモルタルの耐久性向上を目的として、モルタル内部に設けたネットワークに撥水及び遮塩機能を有するシラン系含浸材を注入し、ネットワーク及び鉄筋の周辺に劣化因子からの保護層を形成させた。さらに、ひび割れを発生させて自己修復を行った後、塩水浸漬による乾湿繰り返し試験を行った。その結果、モルタル表面からの Cl⁻の浸透が抑制されることを確認した。また、自己修復により、ひび割れが閉塞され、鉄筋腐食の抑制と共に曲げ強度の回復を確認した。

キーワード：自己修復, ネットワーク, 鉄筋腐食, シラン, 塩害, 塩化物イオン, 強度回復率

1. はじめに

近年、スクラップアンドビルドに伴い建設物の取壊しの際に建設廃棄物やCO₂が大量に排出され続けていることから、持続可能な社会の構築が求められている。しかし、鉄筋コンクリート(RC)構造物におけるひび割れはCO₂やCl⁻といった劣化因子の侵入を助長することで鉄筋腐食による耐久性の低下を引き起し、RC構造物の寿命を短くする。そのため、中性化や塩害といった鉄筋腐食を助長する原因となるひび割れが有害なものとして顕在化する前に、補修作業などの対策を行う必要がある。しかし、RC構造物はあらゆる用途で使用され、大規模構造物においては補修箇所の特定だけでも長い時間が必要になる。そのため、ひび割れの早期修復は困難な場合があり、ひび割れの自己修復機能をRC構造物に付与することで、早期修復により劣化要因の侵入を防ぐことが可能となり、耐久性の向上が期待できる。

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RC梁部材の主筋に用いることで、除荷後に残留変形を抑制し、ひび割れを閉塞させる方法²⁾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。

既往の研究^{4),5)}より、モルタル供試体において、ひび割れの発生が予測される箇所に、ひび割れ補修剤の注入孔(以下、ネットワーク)を設け、ネットワークに圧力を加えながら補修剤を注入することで、ひび割れが発生した際に、ネットワークを介して補修剤がひび割れ内部へ充填され、ひび割れが修復されることで劣化因子の侵入及び鉄筋腐食の抑制、強度の回復が可能であることを確認している。しかし、劣化因子はひび割れだけでなく、モル

ルやコンクリート表面からも浸透する。そこで本論文では、従来、補修剤の注入に使用してきたネットワークに、シラン系含浸材を注入し、ネットワーク及び鉄筋の周辺に撥水及び遮塩機能を付与することで、Cl⁻に対する耐久性の向上を目的とする。

シラン系含浸材をネットワークに注入する工法は、従来の塗布による工法と比べ、施工が容易かつ下地の状況に左右されず、一定の浸透深さが得られることや、塗布面における外部からの劣化が少ないことが想定できるため、より大幅な耐久性の向上が期待できる。

本論文では、シラン系含浸材の注入を行った供試体やその他、比較用の供試体を用いて塩水浸漬による乾湿繰

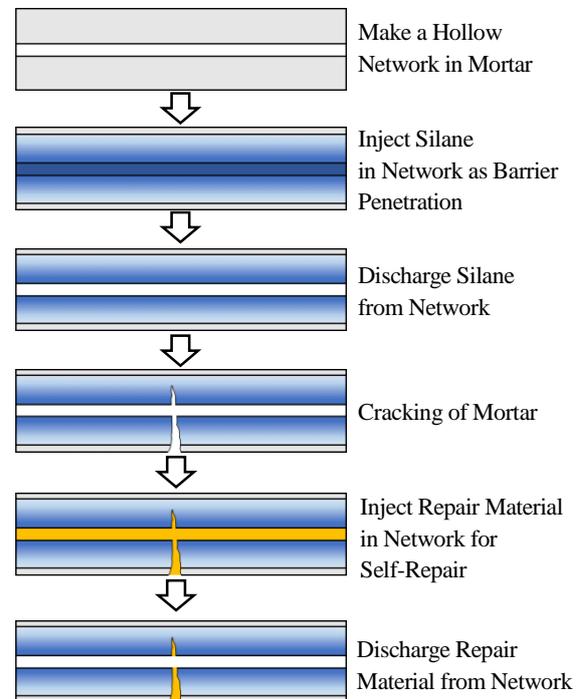


Fig.1 Outline of Barrier Impregnation and Self-Repair System for Mortar Specimen with Network

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 工学部建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

り返し試験を行い、Cl⁻の浸透及び鉄筋の腐食状況から耐久性の向上を検討する。

Fig.1 に本研究において開発を行ったシラン系含浸材の注入及び自己修復システムの概要を示す。自己修復システムの概要として、モルタル内部にネットワークを設け、シラン系含浸材を注入し、浸透させる。その後、ひび割れを発生させ、補修剤をひび割れに充填させることで、ひび割れが閉塞される^{2),4),5)}。これにより、劣化要因の侵入抑制と同時に、曲げ強度の回復を図る。当自己修復システムを RC 構造物へ適用させることで、構造物自身がひび割れを修復し制御することから、補修作業が不要になるため、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。

2. 供試体概要

Fig.2 に供試体形状を示す。供試体は寸法 60×60×220mm とし、中央に直径 10mm、長さ 200mm の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 下がった位置に直径 4mm のネットワークを設けた。

3. 使用材料

3.1 供試体

モルタル供試体の使用材料として、セメントに普通ポルトランドセメント、細骨材に福島県須賀川産砕砂、混和剤に高性能 AE 減水剤を用いた。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 50%とした。混和剤はセメント質量に対して 1%混入した。養生は 2日(以下、d) 湿空[20℃, 90%(RH)]養生, 5d 水中(20℃)養生, 21d 乾燥[20℃, 60%(RH)] 養生を行い、材齢 28d とした。供試体中央に埋設した鉄筋は JIS A3123(みがき棒鋼)に規定する鉄筋を使用した。

3.2 含浸材

Table 1 に含浸材の性質を示す。含浸材としてシラン・シロキサン系含浸材を使用した。特徴として、シラン系含浸材の高い浸透性とシロキサン系含浸材の揮発しにくい効果を併せ持つ。コンクリート表面に塗布することで撥水性を付与し、外部からの水分及び Cl⁻の侵入を抑制することで、鉄筋の腐食抑制が可能である。

3.3 補修剤

Table 2 に補修剤の性質を示す。ひび割れ補修剤には 1 液性のエポキシ樹脂を使用した。既往の研究³⁾では、ひび割れ幅に応じて粘性の高い補修剤と低い補修剤を用いていたが、本実験では 0.08～0.20mm 程度の微細なひび割れ幅を対象としているため、粘性の低い補修剤を使用した。

3.4 表面被覆材

Table 3 に防水加工で用いた材料の詳細を示す。本実験で対象とする鉄筋腐食は、梁部材における曲げひび割れ

箇所からの Cl⁻の侵入によるものである。そこで養生終了後、供試体側面に防水加工を施した。側面の防水加工は強度回復率の算出に影響のないよう、柔軟性がありひび割れに追従する性質を有し、かつ遮塩性を有する防水材料を選定した。防水加工は 3 層塗りで行い、プライマー、防水材料、仕上げ材の順に塗布を行った。

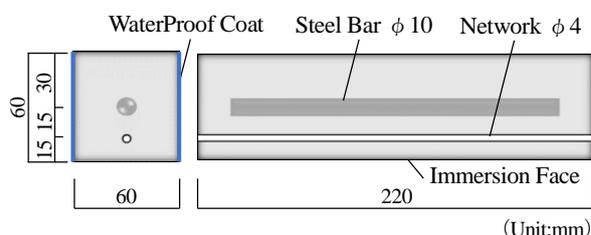


Fig.2 Detail of Mortars Specimen

Table 1 Properties of Silane

Main Component	Active Component (%)	Viscosity (Pa·s/25°C)
Alkoxy Silane	90≤	500
Polyalkoxy Siloxane		

Table 2 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

Table 3 Detail of Waterproof Coat

Coating Material	Coverage	
	Rate (kg/m ²)	Composition
Primer Coat	0.2	Two Component Epoxy Resin
Waterproof Material	2.0	Acrylic Rubber Emulsion
Finishing Material	0.3	Two Component Acrylic Urethane

Table 4 Experimental Process of Each Type of Specimen

Type of Specimen	Experiment Process			
RSE	Inject Silane	1st	Self	2nd
RE		Flexural	-Repair	Flexural Test
N		Test		
NS	Inject Silane			
P				

Table 5 Type of Specimen and Test Items

Type of Specimen	Barrier Penetrant Impregnation	Crack	Self-Repair
RSE	○	○	○
RE	×	○	○
N	×	○	×
NS	○	×	×
P	×	×	×

4. 実験概要

Table 4 に供試体ごとの試験概要を、Table 5 に供試体の分類を示す。供試体として、事前にモルタル内部のネットワークにシランを注入し、ひび割れ発生後に自己修復させた RSE と自己修復のみ行った RE、ひび割れの自己修復させていない N、シランを注入し、ひび割れを発生させていない NS 及び比較用として処理を行っていない P を用いた。また、試験体の数は同じ条件につき 3 体使用した。なお、試験体名称は試験体の分類 (RSE, RE, N, NS, P)-乾湿繰り返しサイクル数 (20, 30, 50)-番号 (1, 2, 3) の順に表記する。番号を表記していない場合は、同じ条件で試験を行った供試体全てを表すものとする。

Fig.3 に曲げ試験の概要を、Fig.4 に補修剤及び含浸材注入の方法を示す。実験手順として、はじめに RSE 及び NS について、ネットワーク内へ含浸材を 2d かけて注入させた。その後含浸材を排出し、1d 乾燥 [20°C, 60% (RH)] 養生を行った。次に RSE, RE 及び N に関して、第 1 載荷の曲げ試験を行い、ひび割れを発生させる。その後、RSE 及び RE について、補修剤を注入し 1d 乾燥 [20°C, 60% (RH)] 養生を行い、ネットワーク内の補修剤を排出した。次に 6d 乾燥 [20°C, 60% (RH)] 養生を行い、補修剤を硬化させた。その後、全ての供試体に関して、促進劣化として塩水浸漬による乾湿繰り返し試験を行った。促進劣化条件として、40°C の 2.5% 塩化ナトリウム水溶液に 6 時間浸漬後、40°C 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、20 及び 30, 50 サイクル行った。なお、浸漬水の水位は供試体底面から 4cm とした。乾湿繰り返し試験終了後、RSE 及び RE について第 2 載荷の曲げ試験を行った。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 載荷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_R: 強度回復率

S_A: 第 1 載荷の曲げ強度 S_B: 第 2 載荷の曲げ強度

Fig.5 に Cl 及び鉄筋腐食の測定箇所を示す。第 2 載荷の曲げ試験後、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 15mm を対象にし、計 30mm 間の鉄筋表面積とした。次に、割裂面に 0.1N 硝酸銀水溶液を噴霧し、供試体端部から着色部までの距離を測定し、塩化物イオン浸透深さとした。測定箇所は供試体中央及び両端に 45mm の 3 箇所とし、平均値を塩化物イオン浸透深さとした。また、着色部分の面積を求め、非塩化物イオン浸透面積及び塩化物イオン浸透面積率を算出した。算出の

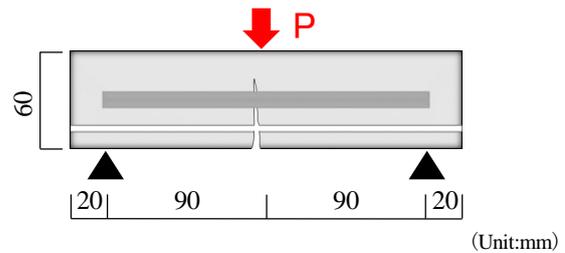


Fig.3 Loading Conditions for Flexural Strength Test

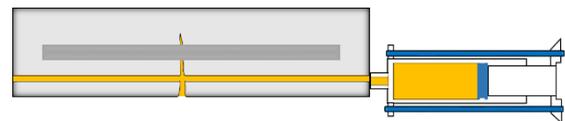


Fig.4 Injection of Repair Material by Cylinder

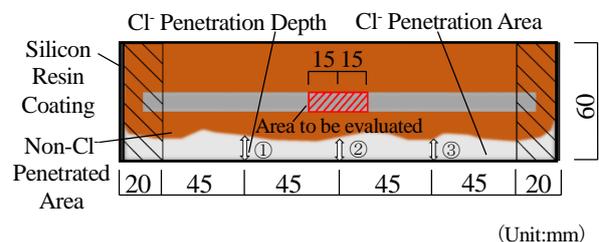


Fig.5 Cl- Penetration Depth Measurement

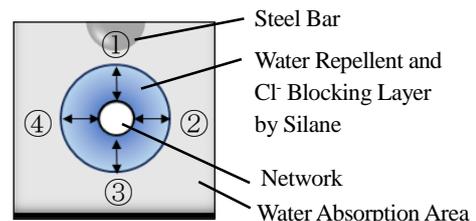


Fig.6 Silane Impregnation Depth Measurement

際、側面からの塩化物イオンの浸透を考慮して側面両端部から 20mm の面積は除き、対象とする断面積を 108cm² とした。塩化物イオン浸透面積率の算出式を式 (2) に示す。

$$A_P = \frac{A_S}{A_C} \times 100 [\%] \quad (2)$$

A_P: 塩化物イオン浸透面積率

A_S: 塩化物イオン浸透面積 A_C: 供試体断面積

シラン系含浸材の浸透を確認するため NS を用いて含浸深さ試験を行った。試験方法として乾湿繰り返し後に供試体を割裂させ、JSCE-K 571-2010 (表面含浸材の試験方法) に従い、割裂面を上水道水に 1 分間浸漬し、割裂した面の撥水している部分の厚さを含浸深さとして測定した。測定箇所は Fig.6 に示すように、ネットワークからの含浸深さを 4 箇所についてノギスで 0.1mm の単位で測定を行った。

5. 試験結果及び考察

Photo 1 に乾湿繰り返し後の N 及び RSE 供試体の様子を、Table 6 及び Fig.7 に各供試体における Cl- 浸透深さ及び面積率を、Table 7 に鉄筋の腐食面積率を示す。また、

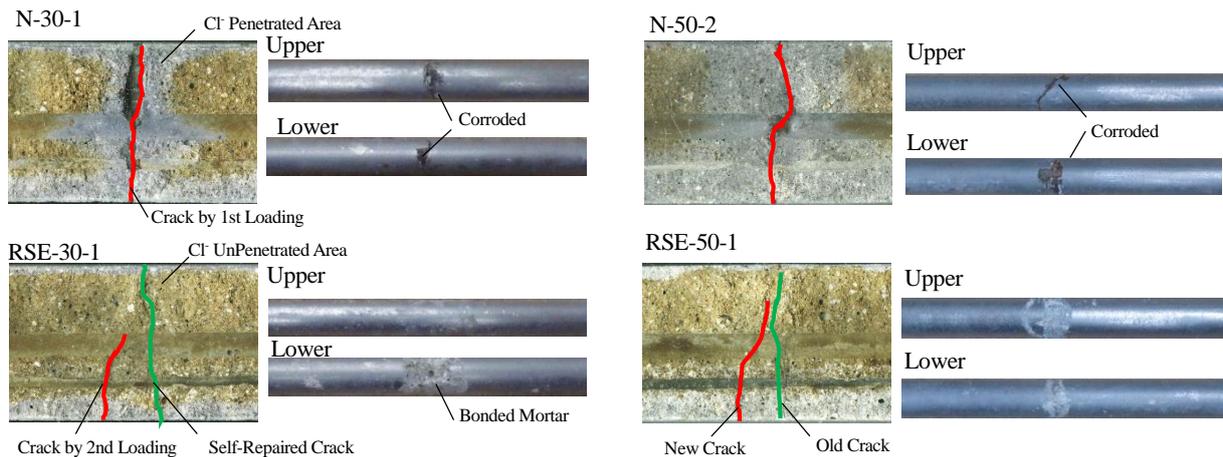


Photo 1 A View of Steel Corrosion and Cl⁻ Penetration Depth Test Results of N and RSE Specimens

Table 7 では、明確な腐食が確認された N 供試体の 30 及び 50 サイクルについて示す。なお、腐食面積はひび割れ幅やブリーディングの影響等により異なると考えられるため平均値は用いず、必要な結果を選定し、考察を行う。

Photo 1, Table 6 及び Fig.7 より、ひび割れを発生させた N-30 はひび割れから Cl⁻ が侵入し、Cl⁻ 浸透面積率は 36.27% となり、Cl⁻ の侵入に伴い鉄筋に腐食が見られ、N-30-1 において、Table 7 より腐食面積率は 10.43% であった。N-50 では Cl⁻ の浸透及び鉄筋腐食が進行し、Cl⁻ 浸透面積率は 53.53% となり、N-50-2 において、腐食面積率は 19.31% となった。一方、ネットワークヘシランを注入し、ひび割れを自己修復させた RSE-30 は、ひび割れからの Cl⁻ の侵入が確認されず、Cl⁻ 浸透面積率は 15.08% となりひび割れを修復していない N-30 と比べ Cl⁻ の浸透が抑制された。さらに、Photo 1 に示す RSE-30-1 には、ひび割れ発生部に相当する鉄筋箇所には腐食が確認されず、モルタルの付着が見られた。鉄筋にモルタルが付着した理由として、自己修復の際に鉄筋とモルタルの付着間に補修剤が浸透したことが考えられる。RSE-50 についても同様、鉄筋腐食は確認されず、Cl⁻ 浸透面積率は 21.41% となり、ひび割れを修復していない N-50 と比較して 32% 程度 Cl⁻ の浸透が抑制された。以上の結果から、自己修復を行うことで補修剤によりひび割れが閉塞し、ひび割れからの Cl⁻ 及び H₂O の侵入が抑制され、不動態被膜の破壊が防がれたため鉄筋腐食が発生しなかったと考えられる。以上の結果から、自己修復システムの適用によりひび割れからの Cl⁻ に対する侵入の抑制及び鉄筋腐食に対する耐久性を向上させることが可能であると言える。

Fig.7 より、N は Photo 1 に示す様に、ひび割れからの Cl⁻ の浸透により Cl⁻ の浸透面積率がサイクル数を重ねるごとに大幅に増加していることが分かる。一方、RE 及び RSE はサイクル数が増加するごとに浸透面積率は増加する傾向があるものの、自己修復によりひび割れからの Cl⁻ の浸透が抑制され、Cl⁻ の浸透は表面からのみであるため、

Table 6 Results of Cl⁻ Penetration Depth Test (Average)

No. of Specimen	Cl ⁻ Penetration Depth (mm)	Non-Cl ⁻ Penetrated Area (cm ²)	Cl ⁻ Penetration Rate (%)
RSE-20	5.3	96.44	10.70
RE-20	4.9	94.27	12.72
N-20	15.1	84.06	22.17
RSE-30	7.6	91.72	15.08
RE-30	8.5	87.11	19.35
N-30	26.7	68.82	36.27
RSE-50	11.1	84.87	21.41
RE-50	16.8	75.08	30.48
N-50	32.7	50.19	53.53

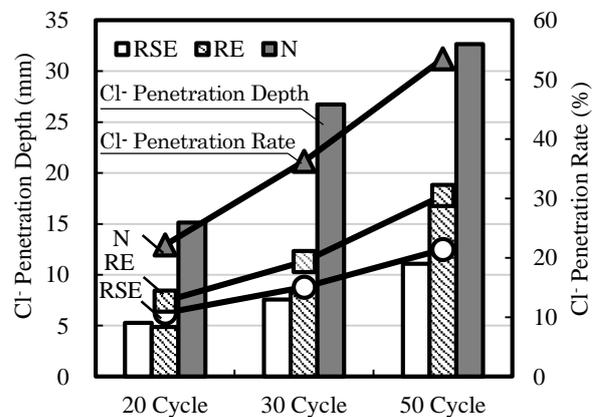


Fig.7 Comparison of Cl⁻ Penetration Depth and Cl⁻ Penetration Rate of RSE, RE and N Specimens

Table 7 Results of Corroded Area of Steel Bars

No. of Specimen	Crack Width (mm)	Corroded Area of Steel (mm ²)	Corroded Rate of Steel (%)
N-30-1	0.21	98	10.43
N-30-2	0.15	16	1.66
N-30-3	0.08	11	1.17
N-50-1	0.13	319	33.84
N-50-2	0.21	182	19.31
N-50-3	0.08	76	8.04

Cl⁻浸透面積率は N と比べて抑制される結果となった。また、Cl⁻浸透面積率について RE-50 は 30.48%, RSE-50 は 21.41% となった。さらに、Photo 2 に示す RE-50-2 と RSE-50-2 の Cl⁻の浸透深さについて、RE-50-2 が 17.1mm であるのに対し、RSE-50-2 は 11.0mm となり、RE に比べ RSE の方が比較的 Cl⁻の浸透が少ない結果となった。原因として、RSE は自己修復によるひび割れの閉塞に加え、ネットワーク周辺にシランを浸透させたことにより、モルタル表面からの Cl⁻の浸透を抑制したと考えられる。裏づけとして撥水試験によるシラン浸透の確認を行った。Table 8 に撥水試験によるシランの含浸深さを、Photo 3 に撥水試験後の NS-50-3 の様子を示す。NS-50-3 においては、ネットワーク周辺に平均 6mm 程度の撥水層が確認されたことから、ネットワーク周辺へシランが浸透したことにより Cl⁻の浸透が抑制されたと考えられる。また Table 7 及び Fig.7 から、20 サイクルの時点において、RE と比較して RSE は Cl⁻の浸透面積率を 2% 抑制し、30 サイクルでは 4%、50 サイクルでは、Cl⁻の進行により差が生じ 9% 程度、Cl⁻の浸透面積率を抑える結果となった。このことから、モルタル表面から浸透した Cl⁻はシランの浸透層に達することで浸透が抑制されると言える。

Photo 4 に乾湿繰り返し 50 サイクル後の NS 及び P 供試体の様子を示す。P-50-1 の Cl⁻浸透深さは平均 16.5mm であったのに対し、NS-50-3 はネットワーク下部に Cl⁻の浸透が確認されず、平均 6.0mm となった。このことから、NS は RSE 同様、シランを注入したことにより、ネットワーク周辺に遮塩層が形成され、Cl⁻の浸透が抑制されたと考えられる。また、Table 8 より、NS-20 におけるシランの浸透深さが平均 3.9mm となり、NS-50 では 5.1mm となったことから、サイクル数を重ねるごとにシランの浸透深さが増加していると言える。

Table 9 及び Fig.8 に曲げ試験の結果を示す。今回の実験で対象としたひび割れ幅 0.08~0.20mm の範囲において、RSE の強度回復率は、全サイクルの平均で 105% となった。そのため、モルタル内部にシランを浸透させた場合においても、元の強度まで回復が可能であると言える。

Table 9 Flexural Strength Test Results of Self-Repaired Specimens

No. of Specimen	1st Loading		2nd Loading		Regain of Flexural Strength (%)	Crack Width (mm)
	Max Load (kN)	Flexural Strength (N/mm ²)	Max Load (kN)	Flexural Strength (N/mm ²)		
RSE-20-1	3.790	4.74	5.170	6.46	136.4	0.12
RSE-20-2	5.100	6.38	4.490	5.61	88.0	0.13
RSE-20-3	4.175	5.22	5.735	7.17	137.4	0.08
RSE-30-1	4.250	5.31	6.100	7.63	143.5	0.13
RSE-30-2	5.990	7.49	5.560	6.95	92.8	0.17
RSE-30-3	5.890	7.36	5.285	6.61	89.7	0.15
RSE-50-1	4.315	5.39	3.490	4.36	80.9	0.19
RSE-50-2	5.100	6.38	5.260	6.58	103.1	0.08
RSE-50-3	5.800	7.25	4.300	5.38	74.1	0.13

また、補修剤がひび割れに充填され、ひび割れが閉塞されたことにより、強度が回復したと同時に、ひび割れからの Cl⁻の浸透を抑制したことが裏付けられる。

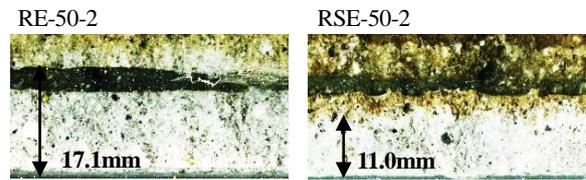


Photo 2 A View of Cl⁻ Penetration Depth Test Results of Specimens After 50 Cycles

Table 8 Results of Silane Impregnation Depth

No. of Specimen	Penetration Depth of Silane (mm)				Average (mm)	
	1	2	3	4		
NS-20-1	3.9	4.0	4.0	3.2	3.8	3.9
NS-20-2	4.3	3.5	4.2	4.0	4.0	
NS-20-3	3.1	3.3	4.4	4.3	3.8	
NS-30-1	3.6	5.7	5.1	5.2	4.9	4.2
NS-30-2	3.5	4.1	3.7	3.9	3.8	
NS-30-3	2.4	4.2	5.4	3.9	4.0	
NS-50-1	5.7	4.4	4.4	4.3	4.7	5.1
NS-50-2	5.5	4.1	5.0	3.9	4.7	
NS-50-3	6.8	5.2	6.4	5.7	6.0	

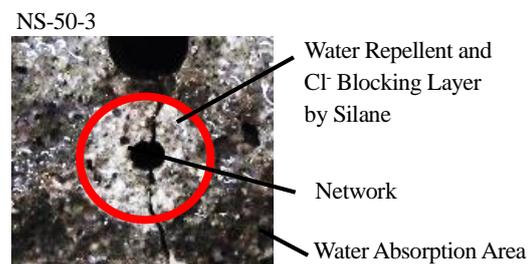


Photo 3 A View of Water Repellency by Silane Impregnation

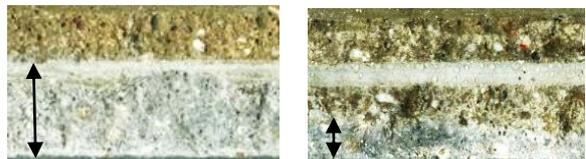


Photo 4 A View of Cl⁻ Penetration Depth Test Results of Specimens After 50 Cycles

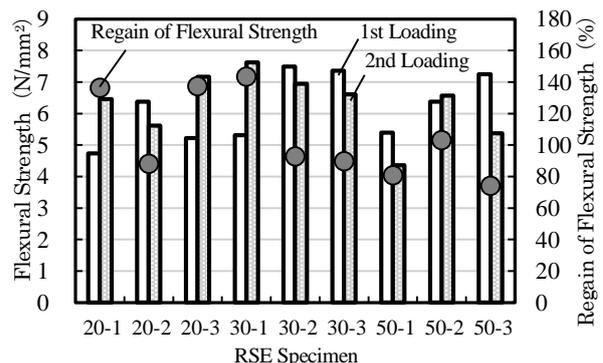


Fig.8 Regain of Flexural Strength by Self-Repair of Cracks

6. まとめ

実験を通して、以下の項目を確認した。

- (1) ひび割れ発生前に、ネットワークにシラン系含浸材を注入することで、ネットワーク及び鉄筋の周辺に撥水及び遮塩層が形成され、モルタル表面からの Cl⁻に対する浸透が抑制される。
- (2) ひび割れ発生後に、自己修復システムによる、ひび割れの修復を行うことで、ひび割れが閉塞され、ひび割れからの Cl⁻の侵入を抑制し、鉄筋の腐食が抑制される。また、元の強度まで回復が可能である。

以上の結果から、実構造物に当自己修復システムを適用させ、施工後、ネットワークにシランを注入することで、Cl⁻及び H₂O に対する浸透の予防が可能となり、耐久性の維持による長寿命化が期待できる。

今後の検討課題として、Cl⁻の浸透による鉄筋腐食に対する耐久性を更に向上させるため、シラン系含浸材の浸透深さの増加が挙げられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、日本学術振興会の科学研究費(B)No. 24360226 の助成を受けた。付記して謝意を表す。

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, 2011.8
- 2) Sanjay PAREEK, 三浦裕騎, 荒木慶一, Kshitij SHRESTHA : 超弾性合金及び自己修復ネットワークシステムを用いた RC 梁部材の付着性及びす曲げ性状, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.36, No.1, pp.1642-1647, 2014.7
- 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, 2006.7
- 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, 2013.7
- 5) 尾形雅人, 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防錆性向上に関する検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.36, No.1, pp.1654-1659, 2014.7