

論文 コンクリートのひび割れ自己修復システムが有する耐久性の検討

田中 寛人*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3

要旨: 本研究は、補修剤を注入したガラス管を事前に鉄筋近傍に埋設し、コンクリートに生じたひび割れがガラス管に到達した際、補修剤が自動的に放出されることで、ひび割れ部からの水の浸透による鉄筋腐食抑制を目的とする「自己修復システム」の開発に向けたものである。本自己修復システムを付与したコンクリート供試体にひび割れを発生させ、中性化促進試験および乾湿繰り返し試験を実施することで、本システムが有する耐久性の検討を行った。その結果、極低粘度の補修剤を用いた供試体において中性化抑制効果および鉄筋腐食抑制効果が示され、本システムが有する耐久性を確認できた。

キーワード: ひび割れ, 自己修復システム, 中性化, 超音波, 鉄筋腐食

1. はじめに

近年、RC 構造物の長寿命化および維持管理工程の負荷低減に大きく寄与するとして、ひび割れの自己修復機能を付与した自己修復コンクリートの研究が多くなされている¹⁾。自己修復機能としては、コンクリート内部にマイクロカプセルを埋設したタイプ²⁾や、パイプなどの脆性材料を用いたタイプ³⁾などが報告されており、ひび割れを修復することによる強度や水密性などの向上や回復を目的としている。本研究では、コンクリートのひび割れ部からの水の浸透による鉄筋の局所的な腐食を抑制することを目的とし、**図-1**に示すような、補修剤を注入したガラス管を利用する「自己修復システム（以下、システム）」を提案した。先行研究⁴⁾において、本システムを付与したコンクリート供試体が有する漏水抑制効果の確認を主な目的として実験を行った。その結果、補修剤として一液型エポキシ樹脂およびアルギン酸ナトリウム水溶液を用いた際に概ね漏水抑制効果を確認した。

本論では、本システムを付与したコンクリート供試体に上記の補修剤を用いた際の中性化抑制効果および鉄筋腐食抑制効果について検討を重ねる。上記のシステムを

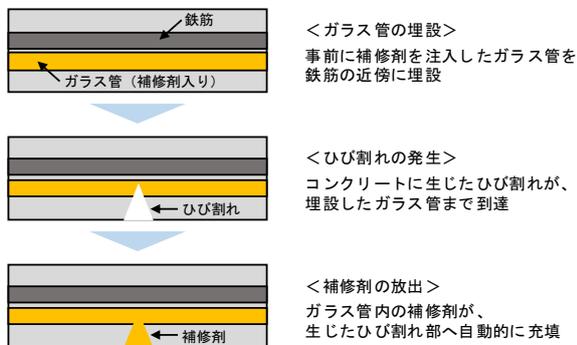


図-1 提案する自己修復システム

付与した供試体にひび割れを発生させ、内部のひび割れ部に対する各補修剤の充填状況の確認として超音波試験を実施した。その後、各補修剤を本システムに利用した際の中性化抑制効果の確認として中性化促進試験を、鉄筋腐食抑制効果の確認として乾湿繰り返し試験を実施することで、各種の耐久性について検討した。

2. シリーズ I

2.1 実験概要

2.1.1 供試体概要

本実験で使用したコンクリートの計画調合を**表-1**に、供試体形状を**図-2**に示す。なお、供試体の中央に設けたM12のボルト（以下、鉄筋）は中央50mmの範囲（端部から275~325mmの範囲）を直径8mmの丸鋼に加工をしたものである。また、供試体中央部の両側に切欠きを設けることで、ひび割れ発生位置を限定した。ひび割れは万能試験機を用いて**図-2**に示す供試体の鉄筋両端部に引張力を加えることで切欠き部に発生させた。なお、予備実験において鉄筋を直接引張る方法では、ガラス管の影響により偏心が生じ、上下面のひび割れ幅に差が生じたため、本実験では鉄筋端部の一方に特殊な器具を、もう一方にユニバーサルジョイントを用いることで、ガラス管による偏心の影響を最小限に抑えた。切欠き部に

表-1 計画調合

W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	AE
55	51	176	320	889	880	1.92

目標空気量 4.5%, 目標スランプ値 18cm

セメント(C): 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³)

細骨材(S): 大井川陸砂 (密度 2.58g/cm³, 吸水率 2.07%)

粗骨材(G): 青海産砕石 (密度 2.65g/cm³, 吸水率 0.50%, 最大寸法 20mm)

混和剤(AE): リグニンスルホン酸系 AE 減水剤

*1 東京理科大学 工学部建築学科 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科嘱託助教 (正会員)

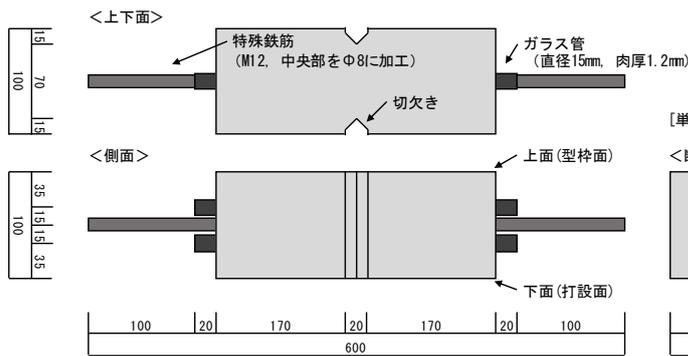


図-2 供試体形状

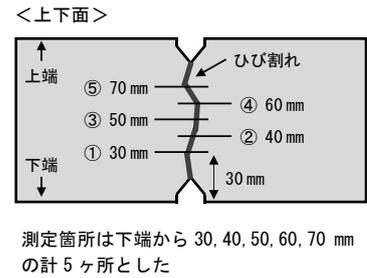


図-3 ひび割れ幅測定位置

貫通ひび割れを発生させた後、除荷し、残留ひび割れ幅が後述する目標ひび割れ幅になるよう努めた。なお、実験の都合上、材齢7日においてひび割れを発生させた。また、ひび割れ幅はクラックスケールを用いて目視にて測定した。ひび割れ幅の測定位置は上面・下面それぞれ5ヶ所(図-3)とし、その平均値を各供試体の上面および下面におけるひび割れ幅とした。

2.1.2 実験水準

供試体に用いる補修剤の種類、ひび割れの有無によって、各供試体を4つのシリーズに分類した。内訳を表-2に示す。本実験では2種類の補修剤を用いた。1つ目は常温で空気中の水分と反応して硬化する「一液型エポキシ樹脂」である。浸透性に優れる粘度約150mPa・sのものを使用し、表記をEPとした。2つ目はカルシウムとの反応によって不溶性のアルギン酸カルシウムゲルを生成する「アルギン酸ナトリウム水溶液」である。攪拌機を用いてアルギン酸ナトリウムの粉末から作製し、表記をAW(粘度約60mPa・s、質量パーセント濃度1.0%)とした。各シリーズの表記は、ひび割れなしをN、ひび割れありで補修剤なしをC、ひび割れありで補修剤EP、AWを注入したシリーズを順にREP、RAWとする。なお、供試体名は「シリーズ-促進期間-脱型した順番」とする。

2.1.3 実験方法

(1) 超音波試験

ひび割れ部に対する補修剤の充填状況の確認を目的とし、超音波試験を実施した。端子直径50mmの送信子および受信子を同一面上に配置し、上面および下面の測定位置間(150mm, 250mm)における超音波の伝播時間をそれぞれ測定した(図-4)。その後、式(1)を用いて見かけ上の超音波伝播速度(以下、パルス速度)を算出し、式(2)を用いてひび割れ発生前後のパルス速度の変化率(以下、パルス変化率)を算出した。

$$v = l \div t \quad (1)$$

ここに、 v :パルス速度(m/s)、 l :測定間距離(m)、 t :伝播時間(s)

$$v_c = v_a \div v_b \quad (2)$$

表-2 実験水準(シリーズI)

シリーズ	供試体数	補修剤	目標ひび割れ幅	促進期間
N	6	なし	なし	1, 3, 5 週間
C	6	なし	0.2±0.1mm	1, 3, 5 週間
REP	6	EP	0.2±0.1mm	1, 3, 5 週間
RAW	6	AW	0.2±0.1mm	1, 3, 5 週間

促進期間と供試体の割合は、1wに2体、3wに2体、5wに2体とする

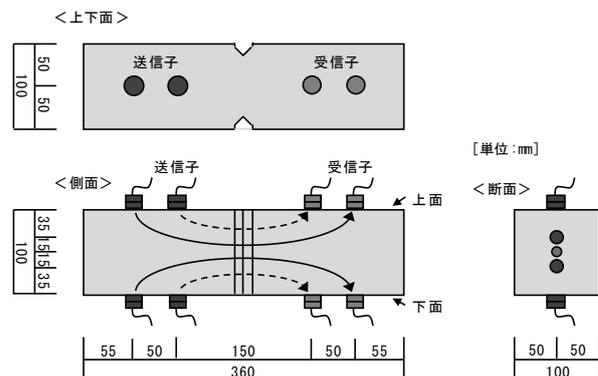


図-4 超音波測定位置

ここに、 v_c :パルス変化率(-)、 v_a :ひび割れ発生後のパルス速度(m/s)、 v_b :ひび割れ発生前のパルス速度(m/s)

(2) 中性化促進試験

超音波試験後、本システムが有する中性化抑制効果および補修剤の充填状況の確認を目的に、中性化促進試験を実施した。促進期間は1,3,5週とし、各促進期間に対して各シリーズ2体ずつ使用した。促進条件は温度20℃、相対湿度60%、二酸化炭素濃度5%の環境とした。なお、実験の都合上、超音波試験後に供試体を100mm×100mm×200mmにカットし、未反応の補修剤をガラス管から回収した(後述する乾湿繰り返し試験においても同様の処理を行った)。その後、上下面以外からの中性化の進行を防ぐため、供試体上下面以外をエポキシ樹脂でシールした。促進期間後に割裂試験し、各供試体の割裂面にフェノールフタレイン1%アルコール溶液を噴霧して中性化状況を確認した。その後、式(3)を用いて非中性化面積率を算出した。なお、本実験における非中性化面積率は供試体端部からの中性化の進行を考慮し⁵⁾、中央部60mm

(60mm×100mm) の範囲とした。

$$r = n \div a \quad (3)$$

ここで、 r : 非中性化面積率(%), n : 非中性化部の面積(mm²),
 a : 非中性化部と中性化部の面積(mm²)

2.2 実験結果および考察

2.2.1 超音波試験

ひび割れ幅とパルス変化率の関係を図-5 に示す。なお、後述するシリーズIIの実験結果も含める。

測定間距離 150mm に注目する。C シリーズの全供試体において、上下面ともひび割れ発生後にパルス速度の減少を確認した。これは、ひび割れの発生に伴い、超音波がひび割れ部を迂回したためと考える。さらに、ひび割れ幅の増加に伴いパルス変化率が若干低下する傾向を示した。これは、供試体内部のひび割れ面の状況が影響していると考えられる。一般的にひび割れは骨材界面に沿って複雑に形成されるため、供試体表面のひび割れ幅が狭い場合、内部のひび割れ面が互いに接して超音波が伝播している可能性が高く、ひび割れ幅が広い場合、内部のひび割れ面が接触する可能性が低くなると考える⁶⁾。

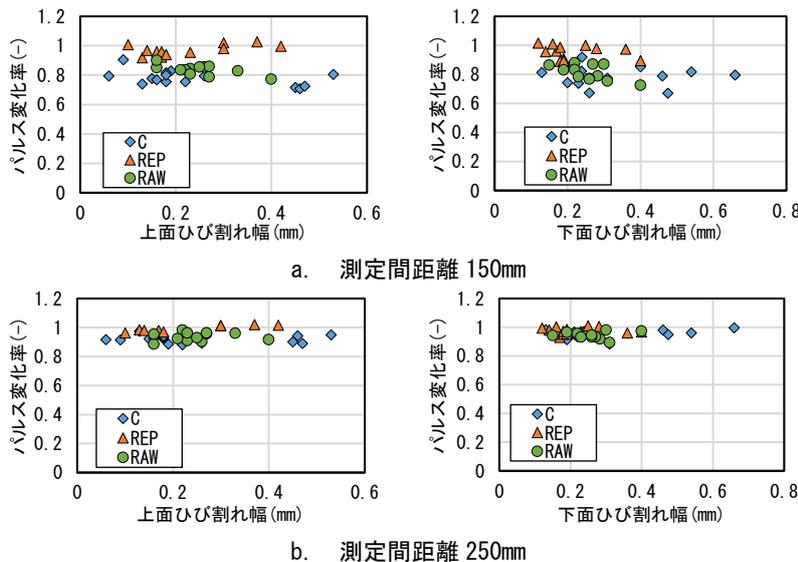
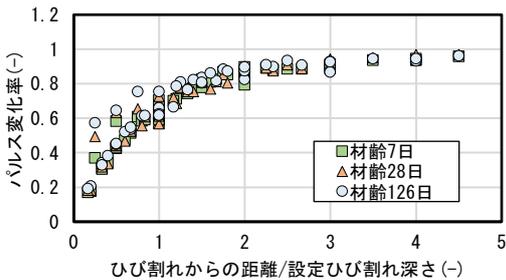


図-5 ひび割れ幅とパルス変化率の関係



文献⁷⁾の測定結果を基に作成・ひび割れ部に補修剤なし

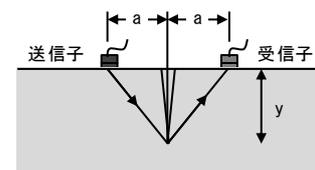
図-7 ひび割れ深さに対するひび割れからの距離とパルス変化率の関係⁴⁾

方、REP シリーズの全供試体において、ひび割れ幅の大小にかかわらずパルス変化率は上下面ともCシリーズに比べ高い値を示し、ひび割れ発生前と同程度のパルス速度になった。これは、上下面のひび割れ部に EP が充填されたことによって、超音波がひび割れ部を迂回しなくなったためと考える(図-6)。また、RAW シリーズにおいて、上下面ともCシリーズと同程度の値を示した。これは、AW がガラス管から放出された際、ガラス管付近でのみゲルを生成したため、ひび割れ部に十分充填するのが困難だったためと考える。なお、RAW シリーズの内部状況の確認は今後の検討課題とする。

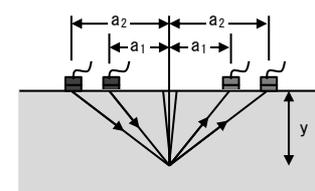
次に測定間距離 250mm に注目する。全シリーズにおいて、パルス変化率の差があまり見られなかった。これ



図-6 補修剤 EP の外部放出の一例

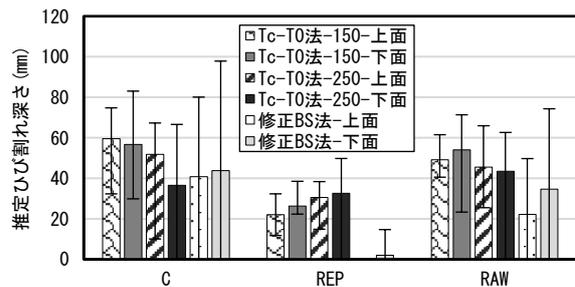


a. Tc-T0 法



b. 修正 BS 法

図-8 超音波によるひび割れ深さの測定方法



$T_0 \geq T_c$ および $(T_0/T_c) \geq (a_2/a_1)$ のとき、推定ひび割れ深さは 0mm とする

図-9 各超音波法による推定ひび割れ深さ

は、ひび割れ深さに対して測定間距離が長く、ひび割れ部を迂回した際の伝播時間と健全時の伝播時間の差が生じにくかったためと考える。ここで、文献⁷⁾より得られたひび割れ深さに対するひび割れからの距離（以下、 hL/D ）とパルス変化率の関係を図-7に示す。本実験では切欠き部に貫通ひび割れを発生させるため、設定ひび割れ深さは供試体表面から鉄筋表面までの距離（46mm）であり、測定間距離 250mm における hL/D は約 2.7 となる。図-7より、 hL/D が約 2.7 のときパルス変化率は 1 に近い値を取り、本実験結果と同程度の値を示した。

また、超音波を用いてひび割れ深さを検討した。超音波を用いてひび割れ深さを推定する方法としては T_c-T_0 法や修正 BS 法などがある⁷⁾。 T_c-T_0 法は式(4)を、修正 BS 法は式(5)を用いてひび割れ深さを算出する（図-8）。

$$y = a\sqrt{(T_c/T_0)^2 - 1} \quad (4)$$

ここに、 y ：推定ひび割れ深さ(mm)、 a ：ひび割れからの距離(mm)、 T_0 ：健全時の伝播時間(μs)、 T_c ：ひび割れ発生後の伝播時間(μs)

$$y = \sqrt{(a_2^2 T_1^2 - a_1^2 T_2^2) / (T_2^2 - T_1^2)} \quad (5)$$

ここに、 y ：推定ひび割れ深さ(mm)、 a_1 ：1点目のひび割れからの距離(mm)、 a_2 ：2点目のひび割れからの距離(mm)、 T_1 ：1点目の伝播時間(μs)、 T_2 ：2点目の伝播時間(μs)

各供試体の推定ひび割れ深さの算出結果を図-9に示す。なお、各シリーズの平均値、最大値、最小値を示す。各供試体において、算出方法および測定間距離によって推定ひび割れ深さに大きなバラつきが確認された。原因として、早期材齢時におけるヤング係数の増大や含水率が影響していること⁸⁾やひび割れ幅の進展に伴う供試体断面におけるひび割れ深さの部分的なバラつき⁹⁾などが考えられる。なお、REPシリーズに注目すると、修正BS法のみ平均推定ひび割れ深さが 0mm 近くの値を示しており、ひび割れ部に EP が十分に充填されている状態といえる。これは、目視での評価と一致する。これより、本実験の範囲においては、修正BS法がひび割れ深さを推定するのに適する可能性が示唆されたが、有効範囲および推定精度の向上においては今後の課題とする。

2.2.2 中性化促進試験

各供試体の割裂面にフェノールフタレイン溶液噴霧後の様子の一例を図-10に、非中性化面積率を図-11に示す。Cシリーズの全供試体において、ひび割れ部から中性化が進行しており、促進期間の増加に伴い中性化面積率の増加していた。一方、REPシリーズの全供試体において、Cシリーズと比較すると中性化が進行しておらず、Nシリーズと同程度の進行であった。これは、EPが供試体内部に生じたひび割れに対して充填され、ひび割れ部からの中性化の進行を防止したためと考える。加えて、実際にひび割れ部への充填状況を目視にて確認でき

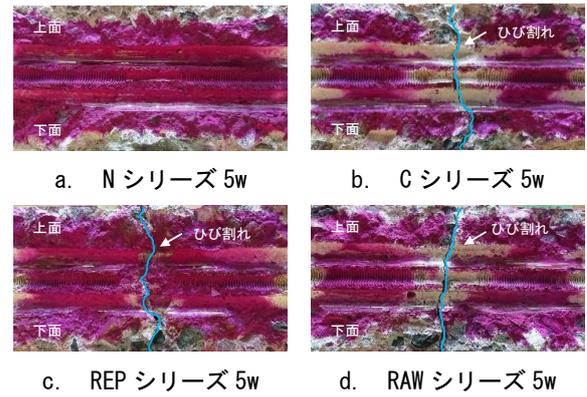
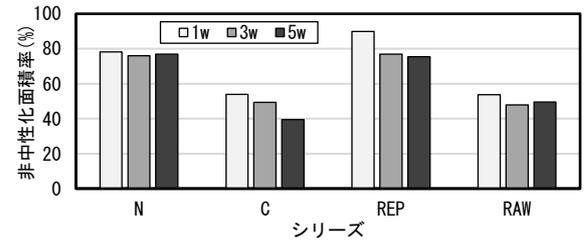
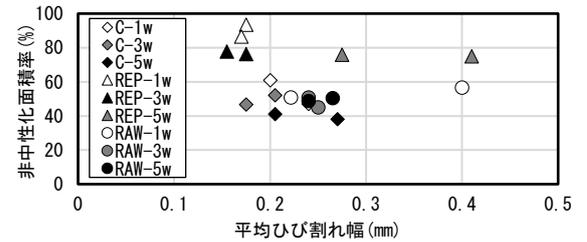


図-10 各供試体の中性化状況の一例



※「1w, 3w, 5w」は各促進期間2体分の平均値

図-11 非中性化面積率



平均ひび割れ幅は上下面のひび割れ幅の平均値とする

図-12 非中性化面積率とひび割れ幅の関係

た。これより、促進試験ではあるが、本システムの補修剤に EP を用いた際、本システムが有する中性化抑制効果を確認できたと言える。一方、RAWシリーズはCシリーズと同程度の非中性化面積率を示した。しかしながら、促進期間の増加に伴う非中性化面積率の減少は確認されなかったことから、微量ながら補修剤 AW がひび割れ部に注入され、ひび割れ部からの中性化の進行を防止する可能性が考えられる。なお、RAWシリーズに関しては今後も検討が必要である。

また、非中性化面積率とひび割れ幅の関係を図-12に示す。全シリーズにおいてひび割れ幅の大小によらず同程度の非中性化面積率となる傾向を示した。ひび割れ部の中性化深さにはひび割れ幅の大きさよりもひび割れの有無の方が大きな影響を与えることが報告されており¹⁰⁾、本研究も同様の結果を示した可能性が考えられる。

3. シリーズ II

3.1 実験概要

3.1.1 供試体概要

シリーズ I と同じである。

3.1.2 実験水準

供試体に用いる補修剤の種類、ひび割れの有無によって、各供試体を4つのシリーズに分類した。内訳を表-3に示す。補修剤および各シリーズの表記はシリーズ I と同じである。なお、供試体名は「シリーズ-サイクル数-脱型した順番」とする。

3.1.3 実験方法

超音波試験終了後、本システムが有する鉄筋腐食抑制効果および補修剤の充填状況の確認を目的に、乾湿繰り返し試験を行った。温度約 20°C、相対湿度約 60%の室内において、3.5%の塩化ナトリウム水溶液に1日浸漬後、同室内にて3日乾燥する。この工程を1サイクルとし、各供試体のサイクル数は表-3の通りとする。なお、供試体上下面以外をエポキシ樹脂でシールし、上下面以外からの塩分浸透を防いだ。各サイクル終了後、割裂して鉄筋を取り出した。その後、割裂面に付着するコンクリートの小片および粉などを除去した後、0.1mol/l 硝酸銀溶液を割裂面に噴霧し、白色と褐色の変色境界を油性インクペンでマークした。本実験ではこの変色境界を塩化物イオンの浸透境界面と定義した。その後、各供試体の塩分浸透状況を比較するため、式(6)を用いて非塩分浸透面積率を求めた。

$$R_c = N_c \div A_c \quad (6)$$

ここに、 R_c ：非塩分浸透面積率(%), N_c ：非塩分浸透部の面積(mm²), A_c ：非塩分浸透部と塩分浸透部の面積(mm²)
 なお、本実験における非塩分浸透面積率は供試体端部からの塩分の浸透を考慮し、非中性化面積率と同様に中央部 60mm (60mm×100mm) の範囲とした。

3.3 実験結果および考察

各供試体の割裂面に硝酸銀水溶液噴霧後の様子の一例を図-13に、非塩分浸透面積率を図-14に示す。Cシリーズの全供試体において、ひび割れ部から塩分が供試体内部に浸透していた。一方、REPシリーズの全供試体において、Cシリーズと比較すると塩分が進行しておらず、Nシリーズと同程度の進行であった。これは、中性化促進試験と同様に EP が供試体内部のひび割れ部に充填され、ひび割れ部からの塩分の浸透を防止したためと考える。一方、実際にひび割れ部への充填状況を目視にて確認できた。また、RAWシリーズはCシリーズより低い値を示した。このことから、RAWは塩分の浸透を抑制しにくいと考える。

ここで、非塩分浸透面積率とひび割れ幅の関係を図-15に示す。REPシリーズにおいて、ひび割れ幅の増加に伴い非塩分浸透面積率の増加が確認された。これは、ひび割れ幅が増加するほど、ガラス管から EP が放出されやすくなり、ひび割れ部により EP が充填されやすくな

ったためと考える。一方、CおよびRAWシリーズにおいて、ひび割れ幅の増加に伴い、非塩分浸透面積率の減少が確認された。特に、Cシリーズの目標ひび割れ幅が0.5±0.1mmの供試体においては、5サイクル数にも関わらず、他のサイクル数の供試体に比べて、塩分が供試体内部にはるかに浸透していた。これは、ひび割れが大きくなるに従い、鉄筋の付着破壊が顕著になり、塩分が鉄筋とコンクリートの境界面に沿って広がりながら浸透したためと考える。

各供試体の鉄筋腐食の状況を表-4に、鉄筋腐食の一

表-3 実験水準 (シリーズ II)

シリーズ	供試体数	補修剤	目標ひび割れ幅	サイクル数
N	6	なし	なし	10, 15, 20cycle
C	6	なし	0.2±0.1mm	10, 15, 20cycle
C	4	なし	0.5±0.1mm	5cycle
REP	6	EP	0.2±0.1mm	10, 15, 20cycle
RAW	6	AW	0.2±0.1mm	10, 15, 20cycle

サイクル数と供試体の割合は、10cycle (以下、10c) に3体、15cycle (以下、15c) に1体、20cycle (以下、20c) に2体とする

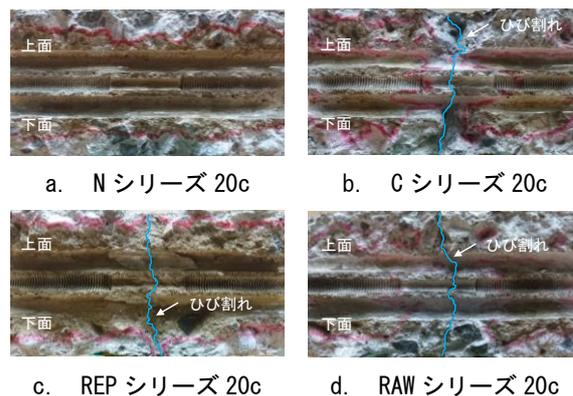
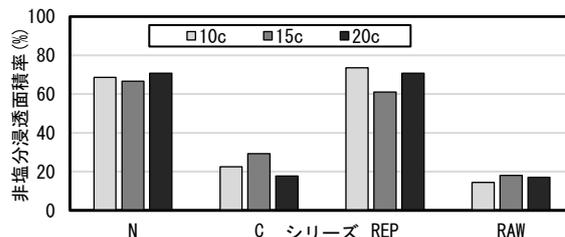
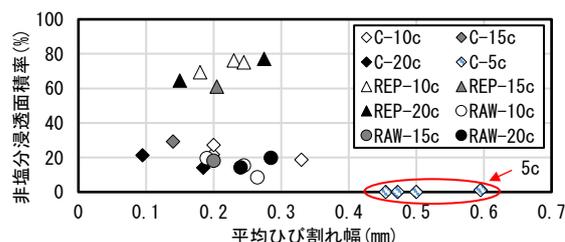


図-13 各供試体の塩分浸透状況の一例



「10c, 15c, 20c」は各供試体の平均値・5cは除外する

図-14 非塩分浸透面積率



平均ひび割れ幅は上下面のひび割れ幅の平均値とする

図-15 非塩分浸透面積率とひび割れ幅の関係

表-4 各供試体の鉄筋の腐食状況

供試体名	腐食の有無	供試体名	腐食の有無	供試体名	腐食の有無
N-10c-1	×	C-10c-1	○	REP-15c-1	×
N-10c-2	×	C-10c-2	○	REP-20c-1	×
N-10c-3	×	C-10c-3	○	REP-20c-2	×
N-15c-1	×	C-15c-1	×	RAW-10c-1	×
N-20c-1	×	C-20c-1	○	RAW-10c-2	×
N-20c-2	×	C-20c-2	○	RAW-10c-3	×
C-5c-1	○	REP-10c-1	×	RAW-15c-1	×
C-5c-2	○	REP-10c-2	×	RAW-20c-1	×
C-5c-3	○	REP-10c-3	×	RAW-20c-2	×
C-5c-4	○				

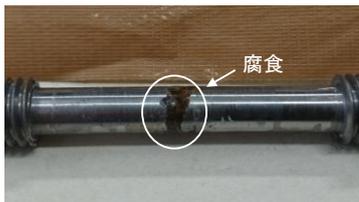


図-16 鉄筋腐食の一例

例を図-16に示す。表-4より、Cシリーズにおいては、10体中9体に鉄筋腐食が確認されたが、REPシリーズおよびRAWシリーズは全供試体において腐食が確認されなかった。REPシリーズにおいては、前述までの結果の通り、ひび割れ部への補修剤充填によって物質移動抵抗性が担保されたためと考えられ、本実験の範囲においては、本自己修復システムを用いることで鉄筋腐食を抑制する可能性が示唆された。一方、RAWシリーズにおいては、前述のように、ガラス管付近でのAWの放出が考えられ、鉄筋近傍の塩化物イオン量がCシリーズに比べて少なかったことが推察されるが、AWによる鉄筋腐食抑制効果のメカニズムについては今後も検討を進めていく。

4. まとめ

本研究では、補修剤入りのガラス管を利用した自己修復システムが有する中性化抑制効果および鉄筋腐食抑制効果の確認を主な目的とし、本システムを付与したコンクリート供試体に超音波試験、中性化促進試験および乾湿繰り返し試験を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 本超音波試験において、ひび割れ発生前後の超音波伝播速度の比率が測定間距離によって変わることを確認できた。さらに、補修剤に一液型エポキシ樹脂を用いた際はひび割れ発生前後の超音波伝播速度の比率は1に近い値を示し、ひび割れ発生前と同程度の超音波伝播速度になった。
- (2) 本中性化促進試験によって、補修剤に一液型エポキシ樹脂を用いた際、本自己修復システムが有する中性化抑制効果を確認できた。

- (3) 本乾湿繰り返し試験によって、補修剤に一液型エポキシ樹脂を用いた際、ひび割れ部から塩分の浸透を防止でき、本自己修復システムが有する鉄筋腐食抑制効果を確認できた。

今後は、本システムを適用した場合の構造的な影響についても検討していく予定である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会 セメント系材料の自己治癒技術の体系化研究専門委員会：セメント系材料の自己治癒に関するシンポジウム，2011.6
- 2) 例えば，沼尾達弥，福沢公夫，三橋博三：補修剤封入による自己修復機能付加に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.1，pp.97-102，1999
- 3) 例えば，三橋博三，金子佳生，西脇智哉，大塚浩司：強度の自己修復機能を有するインテリジェントコンクリートの開発に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，Vol.11，No.2，pp.21-28，2005.5
- 4) 田中寛人，今本啓一，清原千鶴：自己修復システムを付与したコンクリートの止水性および補修剤の充填性評価に関する実験的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.18，pp.711-716，2018.10
- 5) 太平旭洋，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.1444-1449，2013
- 6) 内田昌勝，岡本亭久，柴田辰正，大津政康：超音波方を用いたコンクリート構造物中の欠陥評価技術，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.1，pp.1273-1278，1997
- 7) 村上祐治，斎藤淳，橋本竜也：超音波法によるコンクリートのひび割れ深さの測定およびひび割れ透過性，ハザマ研究年報，2011.12
- 8) 野崎喜嗣：コンクリートの内部条件が超音波伝播に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文報告集，No.425，pp.9-17，1991.7
- 9) 若槻晃右，鎌田敏郎，国枝稔，六郷恵哲：曲げひび割れ先端部分の超音波伝播特性に注目したコンクリートのひび割れ評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.559-564，2001
- 10) 大竹淳一郎，橋本真幸，早野博幸，榎木隆：コンクリートのひび割れ部における中性化と鉄筋腐食に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.649-654，2005