

論文 連結材ユニットを用いた自己修復コンクリートの RC 構造物への適用に関する実験的検討

西脇 智哉^{*1}・熊田 廣樹^{*2}・大平 旭洋^{*2}・Sanjay PAREEK^{*3}

要旨: 著者らはこれまで、発熱デバイスと補修剤保護パイプからなる連結材ユニットを利用した自己修復コンクリートを提案し、その開発に取り組んできた。本研究では、提案する自己修復機能の RC 構造物への適用を検討することを目的に、自己修復デバイスを RC 供試体の表層へ設置するための手法の提案と、この供試体を用いて曲げ載荷試験を行った。その結果、提案する方法で自己修復デバイスの施工が可能であること、および、自己修復機能の発現と補修材の供給によるひび割れの閉塞、最大荷重などの力学特性の回復が確認された。

キーワード: 自己修復コンクリート, 自己修復層, 曲げひび割れ, 強度回復率, 超音波伝搬時間

1. はじめに

著者らはこれまで、コンクリート中に予め補修剤の供給を可能とするデバイスを埋設することで、コンクリートに対して自己修復機能を付与する手法を提案し、その開発に取り組んできた^{1), 2)}。ここでは、発熱デバイスを利用した自己修復手法を、RC 構造物に対して適用するための基礎的な検討を行う。この手法は、コンクリートのひび割れ発生箇所を選択的に加熱することのできる発熱デバイス（自己診断材料）と、補修剤を内包する熱可塑性の材料で構成されたパイプを、熱伝導率の大きい銅板等により連結し、ユニットとして一体化したものを（以下、連結材ユニットと呼ぶ）をコンクリート中に埋設し、自己修復機能を発現させるものである。図-1 に示す概念図のように、コンクリート構造物にひび割れが生じた場合、その周囲で発熱デバイスの電気抵抗が上昇し、必要に応じてこの発熱デバイスに対して通電するこ

とによって、ひび割れ周囲が選択的に加熱される。この加熱によって並設されたパイプが融解し、補修剤がひび割れ中に放出される。これらの一連の動作により、自己修復機能の発現が可能になるものと考えられる。

これまでの検討により、ひび割れ周囲での抵抗上昇と、それに伴う選択的な発熱や、これを効率的に行う連結材ユニットの開発^{2), 3)}、熱伝導解析による各要素に必要な熱特性や、コンクリート内部での配置計画⁴⁾、水密性や力学特性などの機能回復の確認⁵⁾など、自己修復機能のコンセプトと手法の有効性を確認してきた。

ここでは、RC 構造物への適用を前提とした適用方法についての検討を行う。コンクリートに有害な劣化をもたらす劣化因子は、ひび割れを通して表面から侵入することが最も危惧されるため、表面を保護する形での適用が効果的であるものと考えられる。そのため、図-2 に示すように RC 躯体の表層に自己修復層を配置する形を

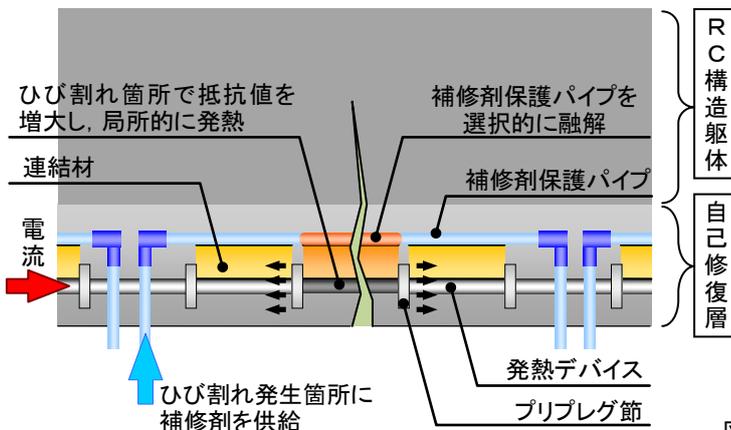


図-1 自己修復機能付与の手法

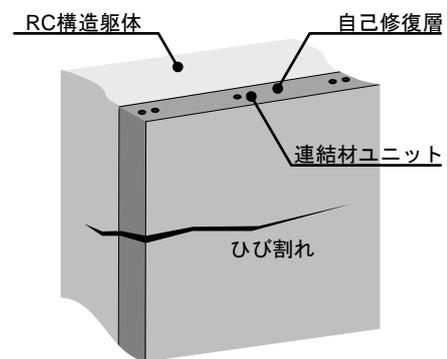


図-2 部材表面に自己修復コンクリートを装着した場合の配置計画

*1 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

*2 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (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)

想定して、RC 梁を模した供試体を採用した。この供試体を用いて曲げ荷重試験を行い、生じた曲げひび割れに対して自己修復が可能であることを、ひび割れへの補修剤の充填状況の確認と、力学特性の回復などを実験によって確認する。

2. 実験概要

実験に当たり、図-3 に示すように RC 梁の表層に連結材ユニットを埋設した自己修復層を配置した供試体を作製する。ここで、連結材ユニットとは、発熱デバイスとなる自己診断材料と補修剤保護パイプを、熱伝導率の大きい連結材で接続して一体としたものであり、外部電源に接続する発熱デバイスと、樹脂製パイプを基材としてこの表面に EVA フィルム（融点 86°C）を巻きつけ

た補修剤保護パイプ、およびこのそれぞれの連結材（銅板・厚さ 1mm）からなる。この供試体に対して 3 点曲げ荷重試験によって曲げひび割れを生じさせ、提案手法によって修復可能であることを確認する。RC 部分には D6 鉄筋が埋設されており、自己修復層のマトリクスにはひび割れ幅の極端な増加を抑制するために FRCC を採用している。コンクリート部分、FRCC 部分の調合をそれぞれ表-1 および表-2 に示す。ここでは、自己修復層と RC 部分が一体となるように、予め連結材ユニットと鉄筋を配置した型枠（図-4）に対して厚さ 30mm まで FRCC を投入し、その後直ちにコンクリートを打設して一体化させた。供試体は 9 体作製し、打設の 2 日後に脱型を行い、5 日間散水養生を行った後、荷重試験まで乾燥養生[20°C, 60%(RH)]を行った。この供試体に対して、

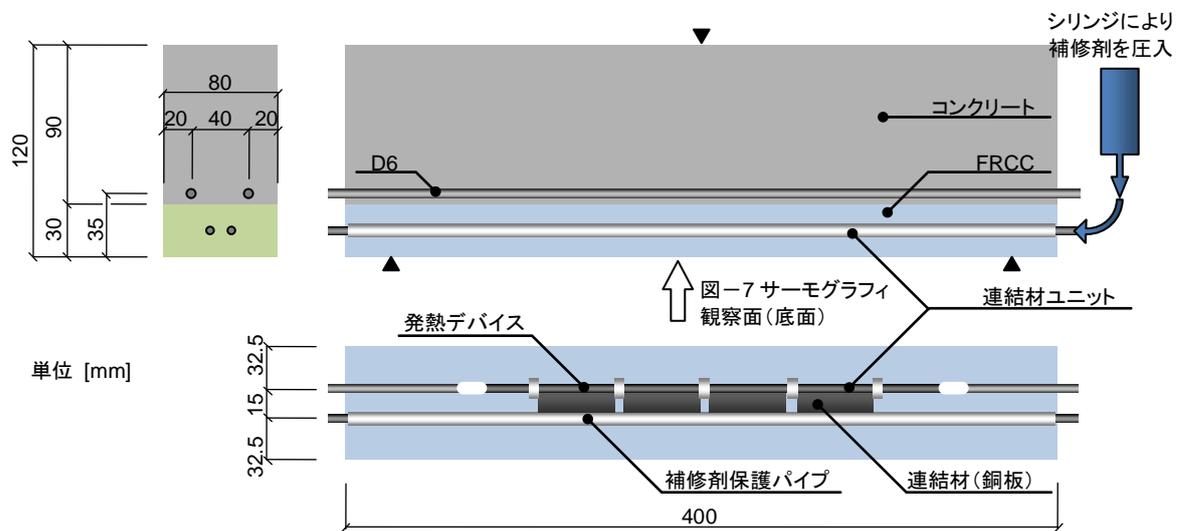


図-3 供試体の形状

表-1 コンクリート調合

スランブ	空気量	水セメント比	最大粗骨材の寸法	細骨材率	単位水量	質量[kg/m ³]		
						セメント	細骨材	粗骨材
[cm]	[%]	[%]	[mm]	[%]	[kg/m ³]			
24	4.5	57.9	20	48.8	184	318	433	936

表-2 FRCC 調合

W/B	45%
SP/B	0.9%
SF/B	15%
S/B	45%
Vf	0.5vol%

※ ここで、B：結合材（C+SF）、C：普通ポルトランドセメント、SF：シリカフェューム、SP：高性能減水剤、S：5号珪砂、Vf：ポリエチレン短繊維（長さ6mm）の混入体積比

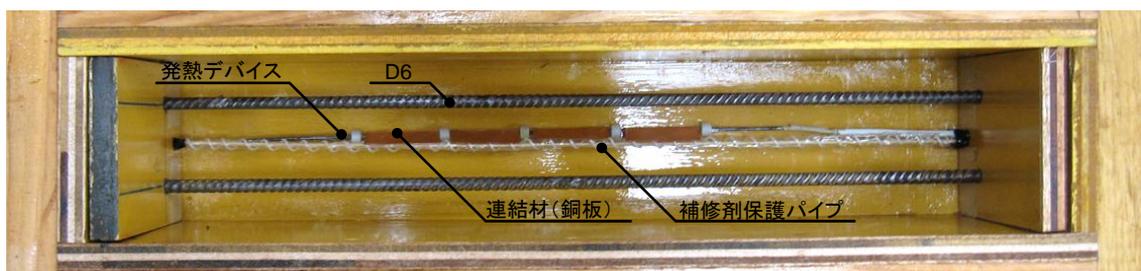


図-4 使用型枠

ひび割れは図-3中の三角で示すように3点曲げ載荷試験によって導入し、ひび割れが生じた後の通電加熱の際に、シリンジによる圧入によって補修剤保護パイプに補修剤を供給する。

図-5に実験の手順を示す。このように、[a]作製した供試体に埋設された発熱デバイスの抵抗値や超音波伝搬時間（計測長さ200mm）などの諸元を測定した後、[b]供試体に対して通電試験を行い、サーモグラフィ観察によって自己診断材料が一樣に発熱していることを確認する。[c]この供試体にひび割れを導入、その周囲で自己診断材料の抵抗を選択的に上昇させるために、アムスラー型万能試験機を用いて3点曲げ載荷試験を行う。この際には荷重および載荷点変位に加えて、発熱デバイスの抵抗値を計測する。[d]ひび割れの生じた供試体では、載荷前と同様の方法で超音波伝搬時間を計測し、その後、[e]再び自己診断材料に対して通電、ひび割れの発生によって選択的な抵抗上昇が生じることを確認する。このとき、補修剤保護パイプには低粘度1液型エポキシ接着剤を供給し、ひび割れへの浸透を確認する。[f]載荷試験後

の通電を終えた供試体は、恒温室内に静置して補修剤の養生期間として7日間を設定し、[g]超音波伝搬時間を再び計測してひび割れ閉塞状況の確認を行う。[h]更にその後、再び3点曲げ載荷試験を行って、曲げ載荷試験時における最大荷重の回復を確認した。

3. 実験結果

3.1 選択加熱によるひび割れへの補修剤の供給

図-6に示したサーモグラフィ画像は、図-3に示した供試体底面で得られたものである。これは、曲げ載荷試験に先立って、発熱デバイス（抵抗449Ω）に対して通電（90V、20分間）状況を示している。この図からは、発熱デバイスに沿っての概ね一樣な発熱が確認され、その最高温度は約40℃と、補修剤保護パイプを融解させる温度には到達していないことが確認できる。

図-7に曲げ載荷試験時の載荷点変位と荷重および発熱デバイスの抵抗変化率の一例を示す。この載荷試験では、ひび割れが生じる節間（発熱デバイス全体の長さの約1/5区間）において抵抗値を3倍程度に上昇させるた

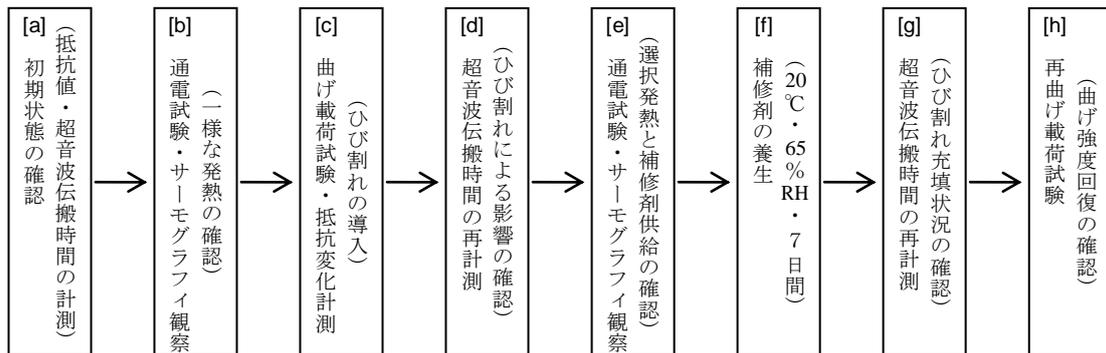


図-5 実験の手順

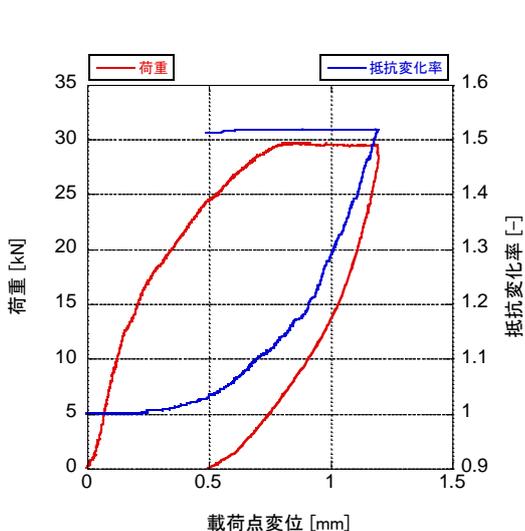


図-7 CMODと荷重および抵抗上昇率の関係

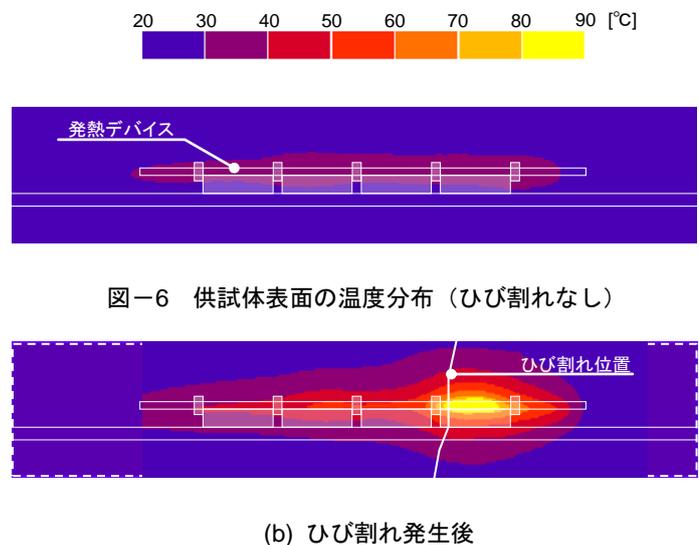


図-6 供試体表面の温度分布（ひび割れなし）

(b) ひび割れ発生後

図-8 供試体表面の温度分布（ひび割れあり）

めに、発熱デバイス全体での抵抗値が40~50%程度増大させることを目安に载荷の制御を行った。

図-8は、同じ供試体に対して曲げ载荷試験を行った後に再び通電(137V, 20分間)を行った際の、サーモグラフィ観察によって得られた供試体表面における温度分布である。ここでは、抵抗上昇分に応じて印加する電圧も増大させ、電流が一定となるように調整をしている。このサーモグラフィ画像から明らかなように、ひび割れの生じている節間において、選択的に発熱量が増大していることが確認できる。载荷に先立って、各供試体には図-3に示したように補修剤保護パイプにはシリンジを通して補修剤を圧入したが、通電を開始する前の段階ではひび割れへの補修剤の供給は確認できなかった。図に示した供試体の場合、通電開始から約10分を経過したところで、パイプ内部に供給された補修剤のひび割れへの流出が確認された。

このようなひび割れの発生に伴う抵抗の上昇と発熱量の増大は、作製した9体全ての供試体で確認された。この一方で、ひび割れに対して補修剤が供給することができない供試体が6体確認された。このことは、連結材ユニットの作製および打設時に、連結材と自己診断材料および補修剤保護パイプとの一体化が損なわれた点が考えられる。これらが互いに密着できなくなることによって、自己診断材料で生じた発熱を補修剤パイプまで効率的に伝えられなくなり、パイプ表面のフィルム融点まで加熱することが困難となったものと考えられる。ここでは、補修を実行できなかった供試体の数が実行可能であったものを上回っており、施工面に関する改善が非常に重要であると考えられる。

3.2 ひび割れへの補修剤充填状況の確認

ひび割れへの補修剤の充填は、図-9に見られるように、ひび割れに対しての補修剤の浸透という形で目視観察によって確認できる。ここでは併せて、充填状況を定

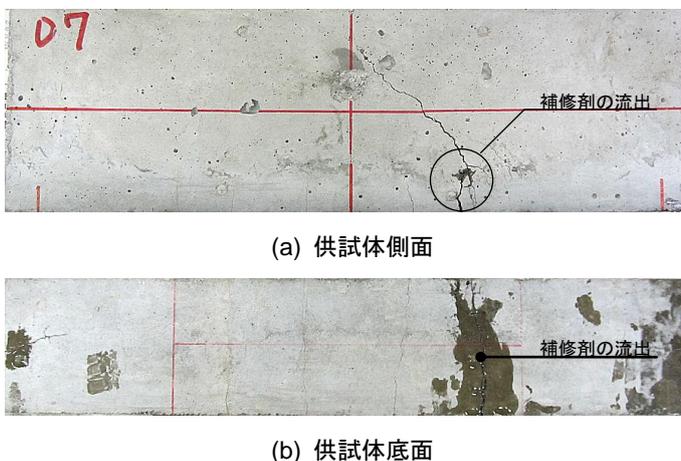


図-9 ひび割れへの補修剤の充填状況

量的に評価することを目的に超音波伝搬時間を計測した。測定は、供試体の底面中央部にて200mmの間隔で行った。図-10は、修復が認められた3体の供試体について、ひび割れ導入前とひび割れ導入後、およびこれを修復した後の伝搬時間の変化の割合を示したものである。この図から分かるように、ひび割れの導入によって超音波の伝搬経路が迂回され、一旦は伝搬時間が大きくなるが、自己修復によってひび割れが充填・補修されることで、再び伝搬時間が短縮されることが確認できる。その一方で、完全な回復(変化率が1.0)にまでは至っていない。この理由としては、今回の実験では、補修剤の充填が確認されたひび割れの他にも、ひび割れ幅が0.05mmに満たない微細なひび割れが複数生じており、これらのひび割れの存在によって伝搬時間の遅延が生じたものと考えられる。

3.3 自己修復による強度の回復状況の確認

上述の実験を終えた後、再び3点曲げ载荷試験を行った。ここでは、このときに得られた最大荷重を、1回目の载荷試験時に得られた最大荷重で除して比を求め、この比を強度回復率と定義する⁵⁾。図-11および図-12は提案する自己修復機能によってひび割れに対して補修剤が供給された供試体の、図-13は自己修復層を設置しておらず、そのためひび割れに対する補修を実行できなかった供試体についての荷重と载荷点変位の関係の例である。この図-13に示されるように、初回载荷において鉄筋降伏まで载荷が行われる場合、ひび割れに対して補修剤が供給されないまま、再度载荷を行うと、その最大荷重が初回载荷時の値を下回り、6体すべての供試体について強度回復率が100%を上回ることはなかった。

この一方で、図-11に示されるように、ひび割れに対して補修剤の供給が行われた供試体については、強度回復率が100%を超えるものが確認された。また、図-12に示すように、ひび割れへの補修剤の放出が見られなが

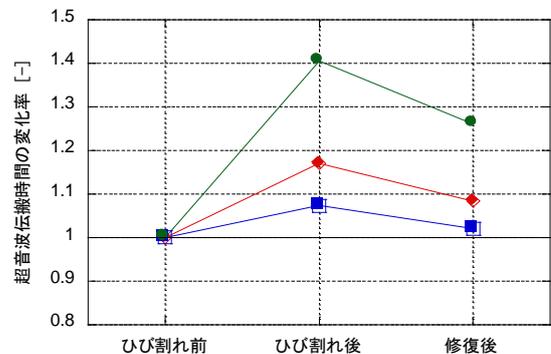


図-10 超音波伝搬時間の変化

ら、補修が行われない場合と同様に強度の回復がみられない供試体も確認された。それぞれの供試体で観察された、初回載荷終了後のひび割れ形状を図-14(a)および図

-15(a)に、この後これらの供試体に通電を行い、ひび割れに対する補修剤の供給が確認された後に実施された2回目の載荷終了後のひび割れ形状を図-14(b)および

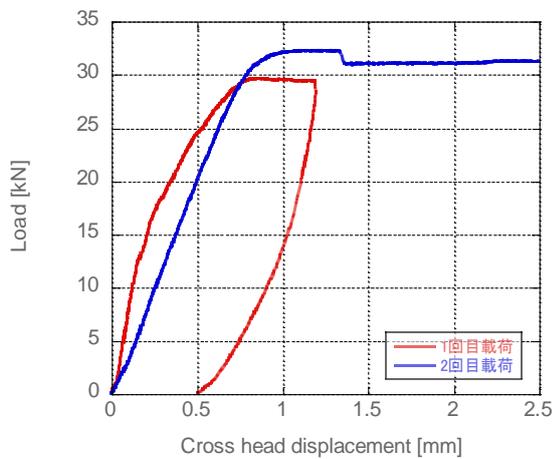


図-11 曲げひび割れに対して補修が行われた供試体の載荷点変位と荷重の関係の一例

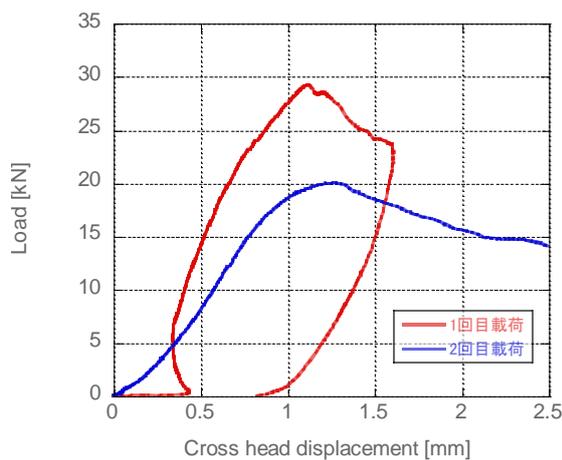


図-12 せん断ひび割れに対して補修が行われた供試体の載荷点変位と荷重の関係

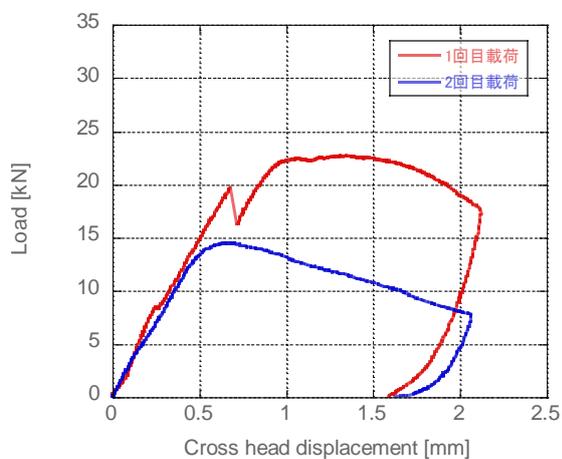
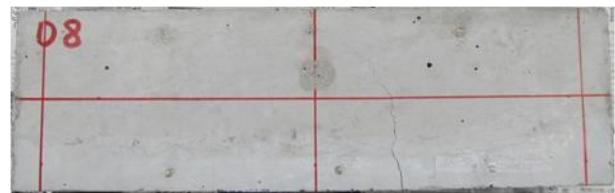


図-13 補修の行われなかった供試体の載荷点変位と荷重の関係の一例



(a) 1回目載荷後



(b) 2回目載荷後

図-14 曲げひび割れに対して補修が行われた供試体のひび割れ状況

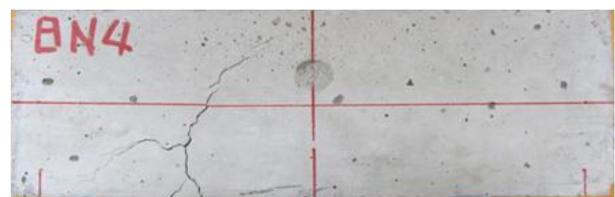


(a) 1回目載荷後



(b) 2回目載荷後

図-15 せん断ひび割れが卓越した供試体に対して補修が行われた場合のひび割れ状況



(a) 1回目載荷後



(b) 2回目載荷後

図-16 補修の行われなかった供試体のひび割れ状況

図-15(b)に示す。同様に、図-16(a)(b)についても、補修が行われなかった供試体表面の初回載荷および2回目載荷終了後のひび割れ形状を示している。

図-14(a)のように、初回載荷で曲げひび割れが生じた供試体が2体見られた。いずれの場合も初期剛性は初回載荷と比較して回復は確認できなかったものの、強度回復率は100%を超え、2回目の載荷試験時に得られた最大荷重が、1回目の最大荷重を上回った。初期剛性まで含めた回復を得られなかったが、これは一般的な注入工法と比較して、ひび割れ全体への十分な補修剤供給が困難であったためと考えられる。また、図-14(b)に示されるように、2回目の載荷試験によって新たなひび割れが発生している。すなわち、ひび割れへの補修剤の放出・充填によって、供試体の曲げ強度を回復させることが可能であったものと考えられる。この一方で、図-14(b)に見られるように、せん断ひび割れが卓越した供試体が1体見られたが、この場合は補修を行わないものと同程度の強度回復率にとどまっている。また、せん断ひび割れが卓越したものは、2回目の載荷試験によって初回載荷によって生じたせん断ひび割れが拡大するのみで、新たなひび割れの発生は確認できなかった。図-15に着目すると、(a)初回載荷の時点ではひび割れ幅の比較的大きい(0.2mm)せん断ひび割れと、ひび割れ幅の小さい(0.1mm)の曲げひび割れが確認でき、補修剤の供給は曲げひび割れに対してのみ行われている。このことは、自己修復層の配置方法から避けられず、今回採用した供試体の形状では、このようなせん断ひび割れの補修は不可能である。すなわち、実構造物への適用の際には、生じうるひび割れや、補修すべきひび割れの発生位置や形状を見極めたうえで、自己修復層の配置を慎重に決定すべきであると考えられる。また、自己修復機能の発現が確認できなかった供試体についても、図-16に示されるように、初回載荷で生じたひび割れが拡大するのみであった。このことは、曲げひび割れ、せん断ひび割れのいずれが卓越した場合であっても同様の傾向となった。

4. まとめ

ここでは、連結材ユニットを利用した自己修復コンクリートについて、RC構造物への適用の可能性と、力学特性の回復評価に関する検討を行った。今回の実験の範囲内で、以下のことが確認された。

[1] 自己修復層として連結材ユニットを埋設したFRCCをRC梁供試体の表面に設置する方法により、提案する自己修復機構が発現可能である。

- [2] 供試体に生じるひび割れに対して補修剤の供給が可能であった。
- [3] 補修のプロセスの前後で行った、ひび割れをまたいで超音波伝搬時間の計測により、ひび割れの充填状況を評価できた。
- [4] 曲げひび割れが生じた供試体では、提案する自己修復によって100%を超える強度回復率が確認され、曲げ強度の回復が可能であった。この一方で、せん断ひび割れが生じた供試体、および、修復を行わなかった供試体については、強度回復の効果は見られなかった。

ただし、実構造物レベルでの適用には課題が残り、特に広い面をカバーするために連結材ユニットのネットワーク化を含めた配置方法や、一体打設とできない場合の躯体コンクリートと自己修復層の付着性状などの検討を行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(若手研究(B)、課題番号:20760367、研究代表者:西脇智哉)の一部として実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 熊田廣樹, Sanjay PAREEK: ネットワークを用いた曲げ強度の自己修復機能を有するモルタルに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1871-1876, 2010.7
- 2) 西脇智哉, 三橋博三, 張炳國, 杉田稔: 発熱デバイスを利用した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. 16, No. 2, pp.81-88, 2005.5
- 3) 西脇智哉, 三橋博三, 郡司幸弘, 奥原芳樹: 自己修復コンクリートの開発を目的とした機能要素の開発に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.2, pp.817-822, 2007.7
- 4) 西脇智哉, 三橋博三, 三浦和晃, 張炳國: コンクリートに対する自己修復機能付与のための解析的検討, セメント・コンクリート論文集, No.59/2005, pp.469-476, 2006.2
- 5) 西脇智哉, 三橋博三, 奥原芳樹: 自己修復コンクリートの性能回復評価に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2167-2172, 2009.7