

論文 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

西脇 智哉^{*1}・三橋 博三^{*2}・奥原 芳樹^{*3}

要旨：著者らはこれまで、発熱デバイス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による性能回復を評価することを目的として、水密性と力学特性に着目し、実験による基礎的な検討を行った。その結果、自己修復機能が発現した供試体については、補修が行われなかった供試体と比較して、水密性、最大引張荷重、剛性ともに回復する傾向が見られた。また、ひび割れ幅が過大に進展した場合には、自己修復機能の発現が困難となり、ひび割れ幅の進展を抑制することが機能発現のために有効であることと確認された。

キーワード：自己修復コンクリート、水密性、強度回復率、剛性回復率

1. はじめに

著者らはこれまで、コンクリート構造物の長寿命化を目的として、発熱デバイス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。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、母材であるコンクリートにひび割れが発生した場合、その周囲で発熱デバイスの電気抵抗が上昇する。この抵抗上昇は保持されるため、必要に応じて発熱デバイスに電圧を印加すれば、このひび割れ部分の選択的な加熱が可能となり、これと並行して埋設されたパイプを融解させて、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、人間の手による直接の補修作業を必要としない、自己修復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¹⁾、プリプレグ節を利用したひび割れ幅と発熱増加量の関係の把握²⁾、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³⁾、効率的な熱伝導と速やかな機能発現のための連結材ユニットの開発⁴⁾等、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、自己修復機能による性能回復を評価することを目的として、水密性と力学特性とに着目し、実験による検討を行う。

2. 連結材ユニットを利用した自己修復コンクリート

ここでは、連結材ユニットを利用してコンクリートへ自己修復機能を付与することを提案している。この連結材ユニットとは、図 - 2 に示す概念図のように、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化したものである。これまでの検討³⁾から、コンクリートは必ずしも熱伝導に有利な材料ではなく、コンクリートそのものを媒介と

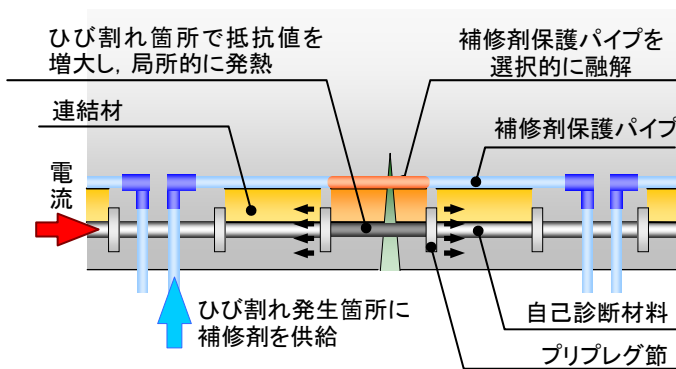


図 - 1 自己修復機能付与の手法

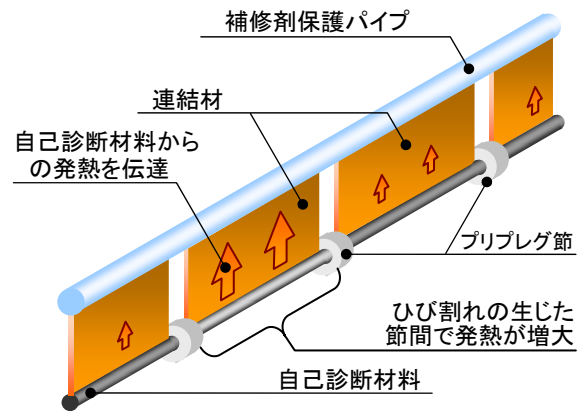


図 - 2 連結材の模式図

*1 山形大学 地域教育文化学部生活総合学科准教授 博士（工学）（正会員）

*2 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻教授 工学博士（正会員）

*3 ファインセラミックスセンター 材料技術研究所 博士（工学）（会員外）

して自己診断材料から補修剤保護パイプへと熱を伝える場合は、保護パイプの融解に十分な温度を確保することが困難となったり、この温度を確保するためには診断材料自体を数百度まで発熱させる必要があるなどの問題が確認されている。ここでは連結材として銅板を利用した連結材ユニットを用いることで、これらの問題点の解決を図っている。

図 - 3 に使用した連結材ユニットを示す。連結材ユニットに使用される発熱デバイスには、モルタルとの付着を切るために表面にフィルム巻きの処理を施している。連結材には厚さ 1mm の銅板を使用した。補修剤保護パイプには、発熱デバイスや連結材との意図しない導電パスを形成しないよう、樹脂製パイプを基材としてこの表面に EVA フィルム（融点 89 ）を巻きつけたものを使用した。

3. 実験概要

上述の連結材ユニットを埋設した供試体の形状を図 - 4 に示す。この供試体のマトリクスには、脆性的な破壊を抑止し、ひび割れ幅の制御を可能とするために、表 - 1 に示す調合の繊維補強モルタルを採用した。また、引張載荷試験を行うため、両端にはねじ鉄筋を埋設しており、この際にひび割れの生じる位置を限定できるように、中央には切り欠きを設けている。載荷試験時には、この切り欠きの両端部にクリップゲージを取り付け、ひび割れ開口部におけるひび割れ幅（Crack Mouth Opening



図 - 3 連結材ユニット

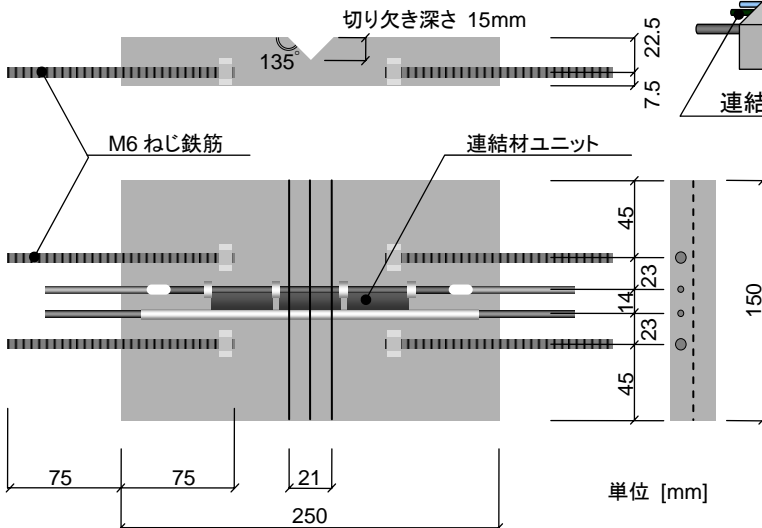


図 - 4 供試体の形状

Displacement, 以下 CMOD) を計測した。

図 - 5 に実験の手順を示す。このように、作製した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様に発熱していることを確認し、供試体に対してひび割れを導入、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の引張載荷試験を行い、その後、再度に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、ひび割れへの浸透を確認する。載荷試験後の通電を終えた供試体は、実験室内に静置して補修剤の養生期間とし、図 - 6 に示す方法

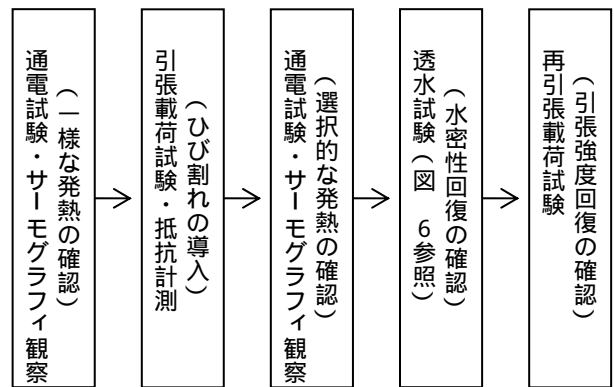


図 - 5 実験の手順

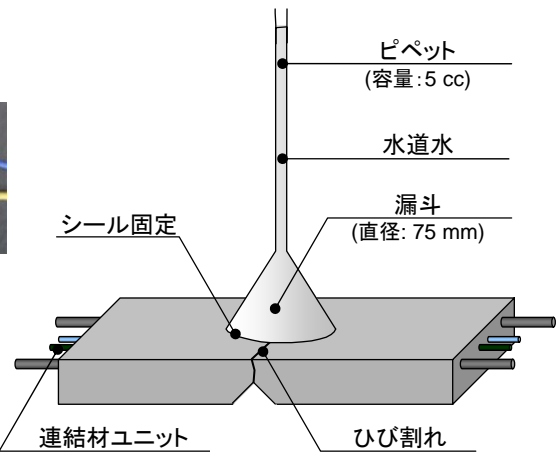


図 - 6 透水試験

表 - 1 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

により透水試験を行い、単位時間当たりの透過水量を測定し、水密性の回復を確認し、更にその後、再び引張載荷試験を行い、引張強度の回復を確認した。また、実験条件に準拠する形で3次元熱伝導解析を行い、ひび割れ前後の発熱が、補修剤保護パイプの選択的な融解となっていることを確認した。この3次元熱伝導解析にはMSC. Marc を用い、1分間を1ステップとして通電開始から30分までの解析を行った。

4. 実験結果

4.1 選択加熱によるひび割れへの補修剤の供給

図 - 7 (a)には、引張載荷試験に先立って、発熱デバイス（抵抗 418 Ω）に対して通電（50V、20分間）を行った際の温度分布の一例を示す。この図は、通電開始から20分後の温度分布であり、概ね一様な発熱が確認される。また、これと同じ条件による熱伝導解析の結果を図 - 7 (b)に示す。この解析結果からは、モデル表面での最高温度は 35 °C、パイプ位置での最高温度は 38 °C であった。実験と解析の両者の結果を比較して、最高温度や温度の分布範囲などは概ね一致していると考えられることから、この通電の段階では、補修剤保護パイプの温度上昇は約 40 °C 程度と考えられ、表面フィルムは融解していないものと判断できる。

いものと判断できる。

図 - 8 に引張載荷試験時の CMOD と荷重および発熱デバイスの抵抗変化率の一例を示す。これらの図からは、荷重によって生じたひび割れ幅が増大するのに伴って、発熱デバイスの抵抗値が上昇していることが確認できる。この載荷試験では、ひび割れが生じる節間において抵抗値を2倍に上昇させるために、全体での抵抗が25%程度増大させることを目安にひび割れ幅の制御を行っ

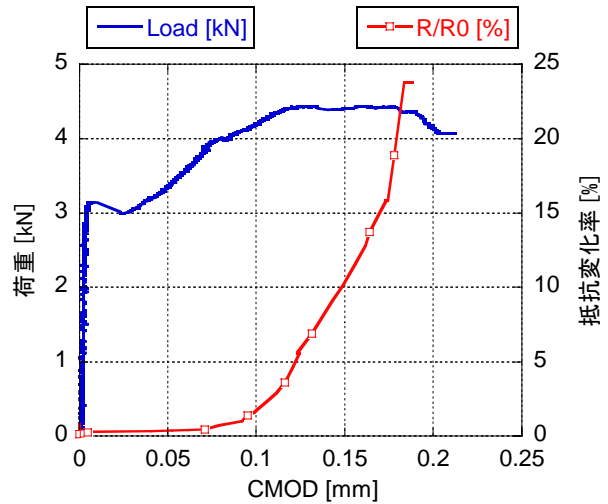


図 - 8 CMOD と荷重および抵抗上昇率の関係

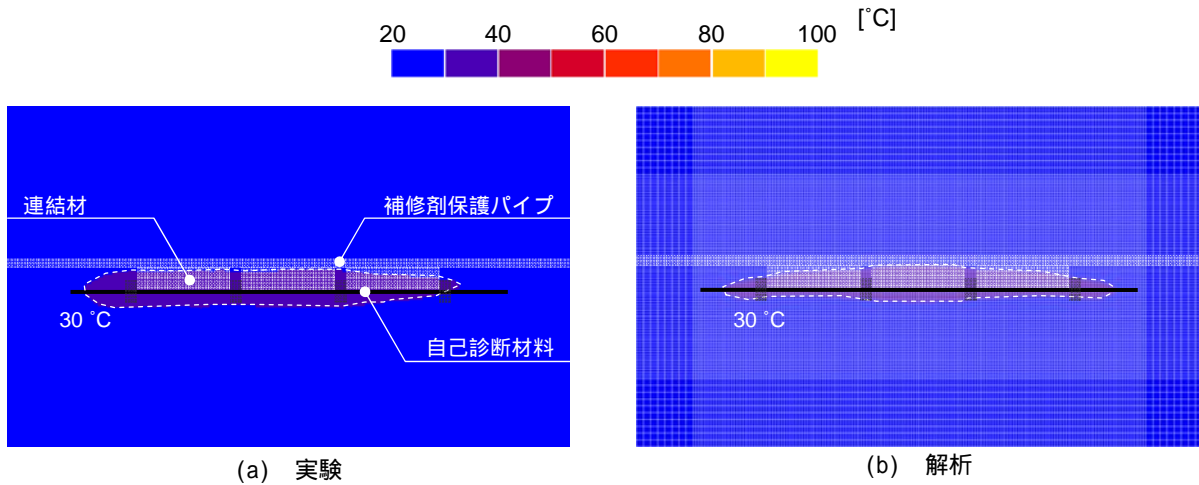


図 - 7 ひび割れ発生前の供試体表面の温度分布

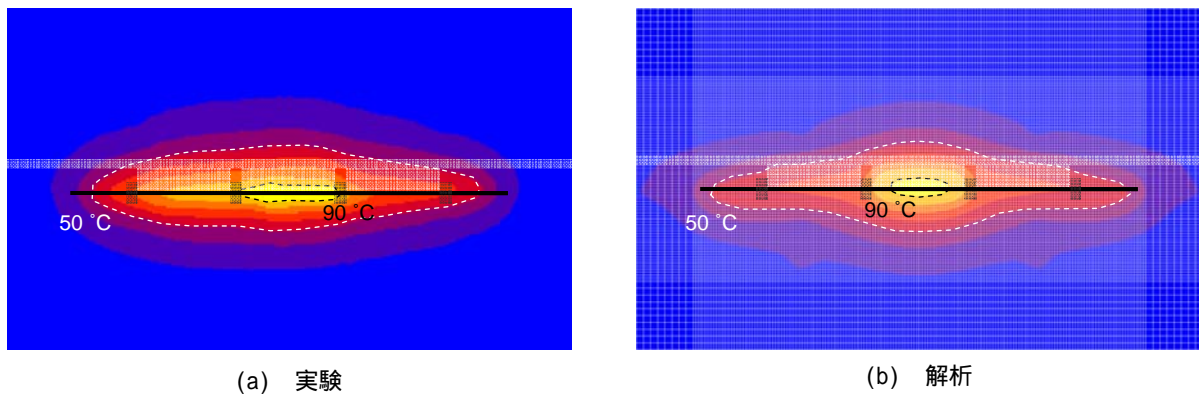


図 - 9 ひび割れ発生後の供試体表面の温度分布

た。また、載荷試験後は、ひび割れ幅を一定に保つために、供試体の周囲を鋼製のアングルで固定した。

図 - 9 (a)は、同じ供試体に対して引張載荷試験を行った後に通電(120V, 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ている。この図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。図に示した供試体の場合、通電開始から約 26 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。これと同じ条件による熱伝導解析の結果を図 - 9 (b)に示す。この解析結果における、モデル表面での最高温度は 100 であり、温度分布の形状や広がり方も含めて概ね実験結果と対応しているものと考えられる。通電開始から 10 分後にはパイプ位置において 90 に到達し、補修剤保護パイプを融解させるものと考えられる。このことは約 26 分後にひび割れからの補修剤の流出が確認された実験結果とは対応しないが、使用した補修剤の粘度と注入圧力、ひび割れ幅と時間との関係によって補修剤の浸透範囲が決定されることから、パイプの融解と供試体表面での流出の確認に時間差が生じたものと考えられる。また、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、作製した全ての供試体 16 体で確認された。

4.2 自己修復による水密性の回復

引張載荷試験によりひび割れを生じさせた供試体は、補修剤が硬化するまで実験室内に静置した後、図 - 6 に示す方法で透水試験を行った。図 - 10 は、供試体が生じた最大ひび割れ幅と単位時間当たりの透水量の関係である。ひび割れを透過する水量はひび割れ幅の 4 乗に比例する⁵⁾とされているため、後述する平均ひび割れ幅ではなく、透水量に影響の大きい最大ひび割れ幅を採用している。また、この図中には最大ひび割れ幅の 4 乗に比例する回帰曲線を示している。この図からは、自己修復による補修の行われた供試体(図中の「補修あり」)では、最大ひび割れ幅が 0.4mm 以下の場合には補修が行われなかった供試体(図中の「補修なし」)との明確な差は確認できないものの、最大ひび割れ幅が 0.6mm 以上の供試体では、単位時間当たりの透水量を小さくできることが確認できる。

これは、使用した補修剤の種類その他、ひび割れへの浸透状況によるものと考えられる。すなわち、補修剤のひび割れへ内部への浸透は、補修剤の粘度、注入圧力の逆数、ひび割れ幅に比例する⁶⁾ため、比較的ひび割れ幅が大きくなった供試体では補修剤によってひび割れ内部を充填することが容易になったためだと考えられる。こ

の実験結果の範囲では、水密性を自己修復機能により回復させるためには、対象とすべきひび割れ幅毎に、適切な補修剤の選択や供給方法等の条件を設定する必要があるものと考えられる。

4.3 自己修復による強度の回復

透水試験を終えた後、再び引張載荷試験を行った。ここでは、このときに得られた最大荷重を、1 回目の載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。また、供試体の剛性を図 - 11 に示すような載荷試験の際の荷重と載荷点変位のグラフの傾きとして定義し、強度回復率と同様に再載荷の際の剛性を初回載荷時の剛性で除して得られる比を、剛性回復率として定義する。図 - 11 は提案する自己修復機能によってひび割れへ補修剤が供給された供試体の、図 - 12 はひび割れへの補修剤の供給が見られなかった供試体についての荷重と載荷点変位の関係である。通常、ひび割れに対して補修剤が供給されない場合には、再載荷時の最大荷重、剛性ともに、初回載荷時の値を上回ることはない。

図 - 13 および図 - 14 は、供試体表面で観察された平均ひび割れ幅と、強度回復率および剛性回復率の関係を示したグラフである。ここで、平均ひび割れ幅とは供試体の切り欠き位置に生じたひび割れについて複数個所でひび割れ幅を計測し、その平均を取ったものである。そのため、前述の最大ひび割れ幅とは異なる値となっており、供試体全体に生じた変位に近いものと考えられる。これらの図からは、強度と剛性いずれの場合も平均ひび割れ幅の増大に伴って回復率が減少する傾向が見られる。また、平均ひび割れ幅が 0.3mm を超えて進展した場合には、提案する自己修復が機能しないことが確認できる。この原因としては、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挙げられる。これらが互いに密着できなくなることによって、自

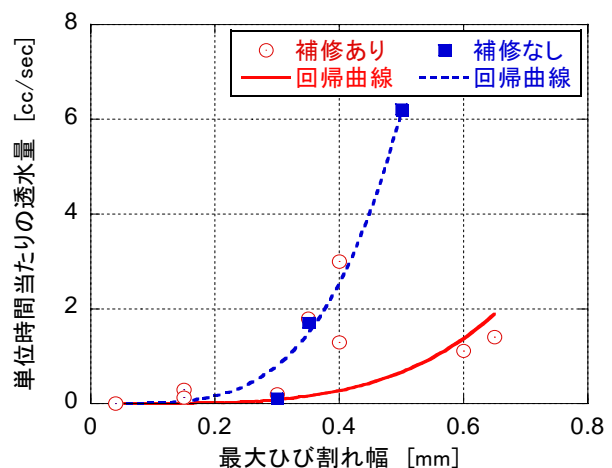


図 - 10 最大ひび割れ幅と単位時間当たりの透水量の関係

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。このことから、提案する自己修復機能を有効に活用するためにはひび割れ幅の制御が必要であり、ここで母材に採用した繊維補強モルタルのように、過大なひび割れ幅の進展を抑制する処置が必要なものと考えられる。

ひび割れへの補修剤の放出が見られた供試体 9 体の強度回復率は約 75～190%となり、2 回目の载荷試験時に得られた最大荷重が、1 回目の最大荷重よりも大きい場合が 9 体中 6 体で見られた。また、剛性回復率についても同様の傾向が見られ、9 体中 5 体で再载荷時の剛性が初回载荷時の剛性を上回った。ただし、回復率と平均ひび割れ幅との相関は確認できなかった。この一方で、補修剤の放出が見られなかった供試体については、強度回復率が約 60～85%と、2 回目の最大荷重が 1 回目の最大荷重を上回ることにはなかった。また、剛性回復率につ

いても同様の傾向であり、約 20～100%と再载荷時の剛性が初回载荷時の剛性よりも小さくなり、この傾向は平均ひび割れ幅の増大に伴ってより顕著となった。

図 - 15 は供試体の表面に生じたひび割れの写真である。図 - 15(a)および(b)は、ひび割れへの補修剤の放出が確認された供試体、図 - 15(c)および(d)は連結材ユニットを埋設せず、従ってひび割れへの補修剤の供給が行われていない供試体である。また、図 - 15(a)および(c)は初回载荷試験終了後、図 - 15(b)および(d)は 2 回目の载荷試験を終えた後のひび割れの状態である。これらのひび割れ形状を比較すると、ひび割れへの補修剤の放出が見られた供試体については、2 回目の载荷試験時には、初回試験時に生じたひび割れとは別の、新たなひび割れが生じていることが確認できる。すなわち、ひび割れへの補修剤の放出・充填によって、供試体の引張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。その一方で自己修復の行われなかった供試体については、初回

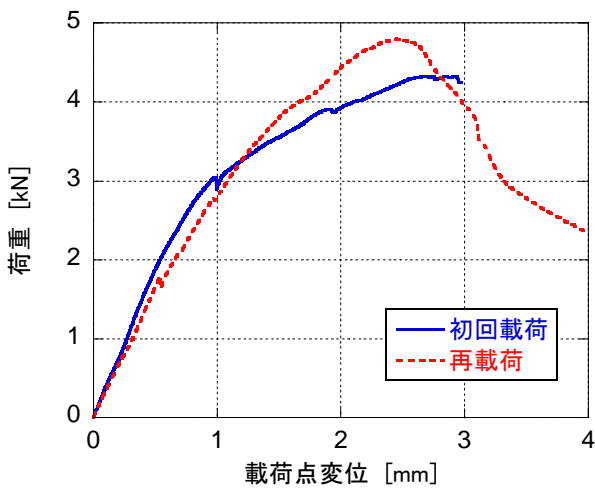


図 - 11 補修の行われた供試体の载荷点変位と荷重の関係の一例

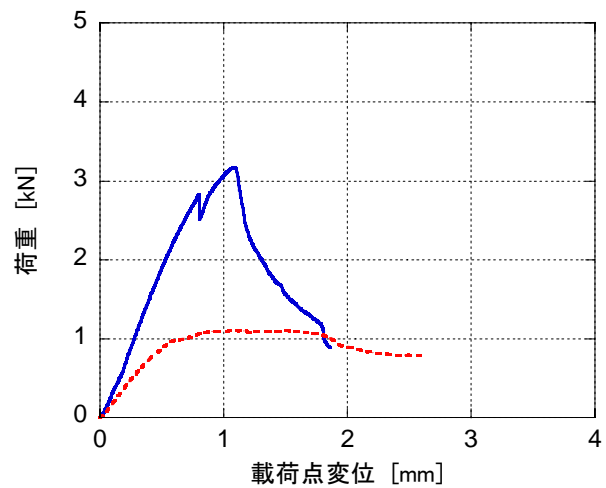


図 - 12 補修の行われなかった供試体の载荷点変位と荷重の関係の一例

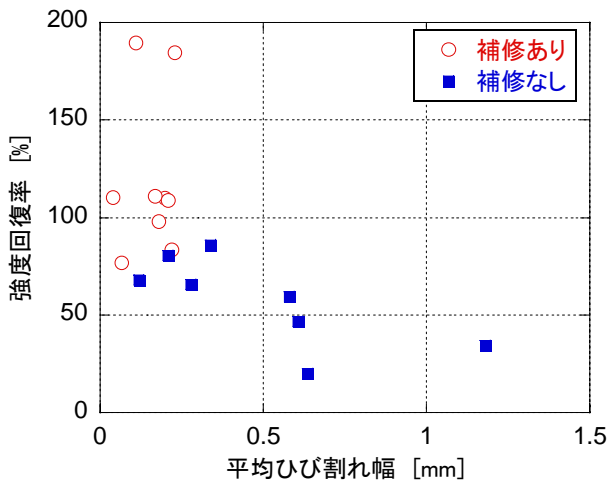


図 - 13 平均ひび割れ幅と強度回復率の関係

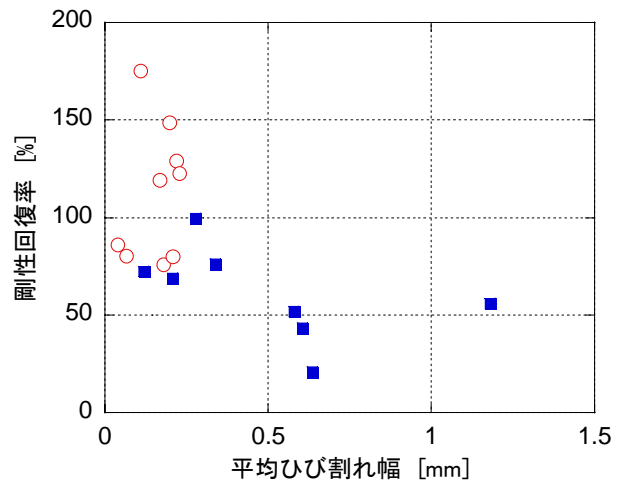


図 - 14 平均ひび割れ幅と剛性回復率の関係

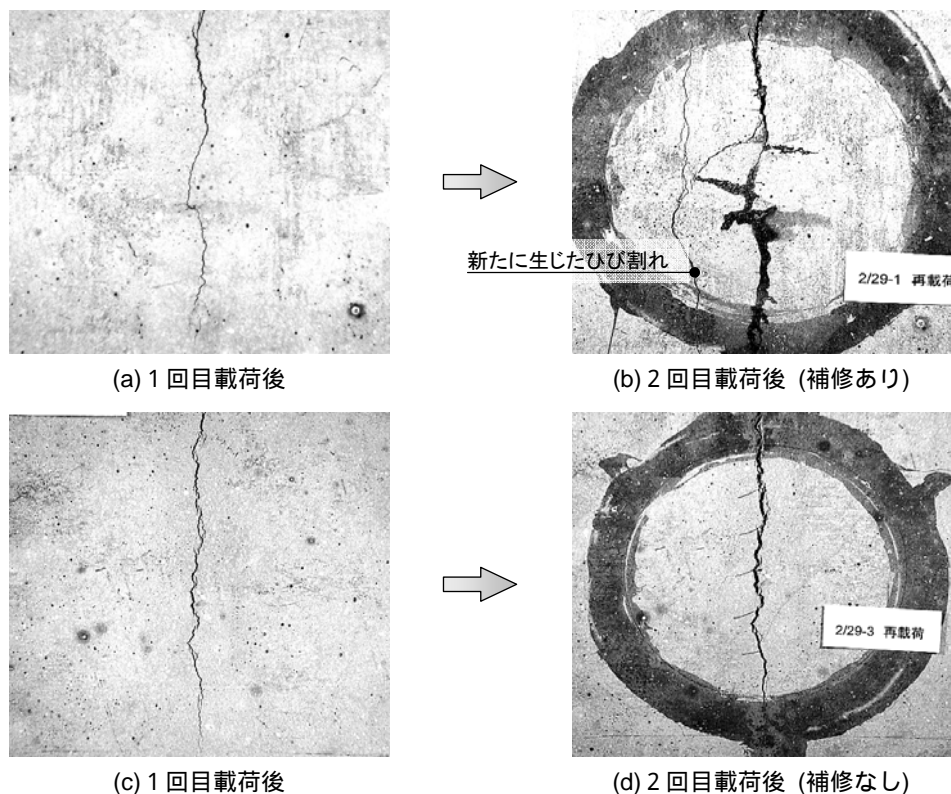


図 - 15 供試体表面のひび割れ

載荷時に生じたひび割れが2回目載荷試験時に拡大するのみで、新たなひび割れの発生を確認することはできなかった。

5. 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、水密性と力学特性の回復評価に関する検討を行った。連結材ユニットによるひび割れ周囲への選択的な加熱により、16体中9体の供試体でひび割れへの補修剤の放出が確認された。このとき、ひび割れ幅が過大に進展した場合に自己修復機能の発現が困難となるため、ひび割れ幅の進展を抑制することが有効であるものと確認された。補修完了後の透水試験の結果からは、ひび割れ幅が大きい場合に水密性の回復が確認できた。また、初回と2回目の載荷試験結果の比較からは、ひび割れに補修剤が充填された供試体で最大引張強度および載荷試験時の剛性の回復が可能であることが確認された。今後は、発熱に伴う温度ひずみや温度応力が及ぼす影響や、連結材ユニットのネットワーク化を含めた配置方法などの検討を行い、自己修復機能をより確実に発現させるための検討を行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究は、平成20年度科学研究費補助金(若手研究(B)、課題番号:20760367)の一部として実施された。また、山形大学卒業生の大塚裕絵氏、寺嶋英明氏には実験に際

し多大な尽力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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報告集, Vol.28, No.1, pp.2111-2116, 2006.7
- 3) 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
- 4) 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
- 5) Tsukamoto, M. and Woener, J. D. : Permeability of cracked fiber-reinforced concrete, Darmstadt Concrete, 6, pp.123-135, 1991
- 6) 西脇智哉, 三橋博三, 郡司幸弘: ひび割れへの補修剤浸透に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.637-642, 2008.7