

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760367
 研究課題名（和文）コンクリート構造物の長寿命化を目的とした自己修復コンクリートの実用化検討
 研究課題名（英文）Application of self-repairing concrete for sustainable RC structures

研究代表者
 西脇 智哉（NISHIWAKI TOMOYA）
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：60400529

研究成果の概要（和文）：

コンクリート構造物の長寿命化を目的に、自己修復コンクリートの開発を行う。提案する自己修復システムの根幹となる、自己診断材料と補修剤搬送デバイス（補修剤保護パイプ）を併せた埋設自己修復デバイスについて、想定した機能を有するものの作製が可能となり、自己修復システムの発現を確認することができた。その効果の定量的な評価、ならびに RC 構造物への適用方法について検討を行い、実用化に向けて基礎的な知見を蓄積することができた。

研究成果の概要（英文）：

A fundamental study has been carried out to develop a smart concrete that incorporates a self-repairing system for sustainable RC structures. A particular self-repairing device that comprises a self-diagnosis composite and a heat-plasticity pipe has been developed. We confirmed that the proposed system would perform effectively. Moreover, a quantitative assessment method of self-repairing effect and a practical application of the proposed system are confirmed through some experiments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

キーワード：建築構造・材料、構造・機能材料、長寿命化、コンクリート、自己修復

1. 研究開始当初の背景

コンクリートは最も重要な建設材料の一つだが、近年の早期劣化の顕在化は大きな社会問題ともなっている。また、環境意識の高まりからも、コンクリート構造物の長寿命化に対する社会的要請は大きく、従来のスクラップ・アンド・ビルドによらない、持続可能なコンクリート構造物が強く求められている。そのため、維持管理に必要な技術は今後ますます重要性が増大するものと考えられ

るが、一方でコンクリート構造物の規模や用途の制約から、網羅的な検査や改修が困難となる場合も少なくない。このようなコンクリート構造物に生じる劣化は、その結果としてひび割れが生じさせる一方で、そのひび割れを起点として更なる劣化が促進されてしまう。このような連鎖を回避するためには、なるべく早期かつ網羅的に適切な処置を行うことが肝要であり、そのためには「人海戦術」に頼らない、検査から補修までの一連の作業

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。ここでは、ひび割れを透過する水量はひび割れ幅の4乗に比例するとされる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。

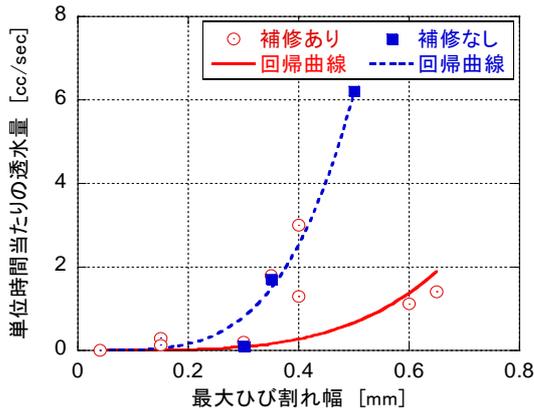


図4 最大ひび割れ幅と単位時間当たりの透水量の関係

透水試験を終えた後、再び引張荷重試験を行って力学特性の回復について評価した。ここでは、回復率の定量評価のために、このときに得られた最大荷重を、1回目の荷重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した。また、供試体の剛性を図5に示すような荷重試験の際の荷重と荷重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5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6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荷重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ではない。

図7および図8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。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

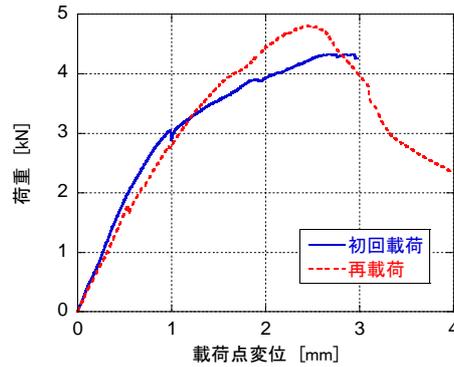


図5 補修の行われた供試体の荷重点変位と荷重の関係の一例

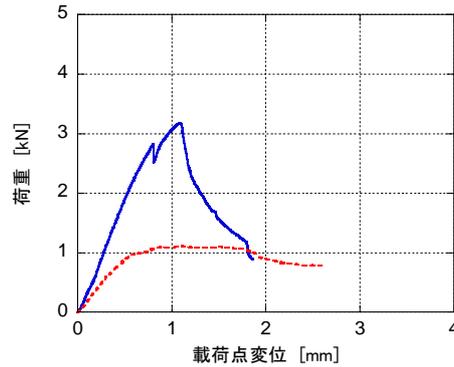


図6 補修の行われなかった供試体の荷重点変位と荷重の関係の一例

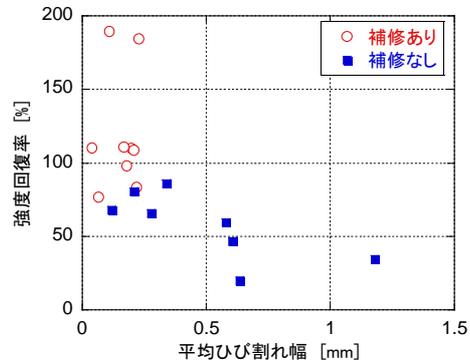


図7 平均ひび割れ幅と強度回復率の関係

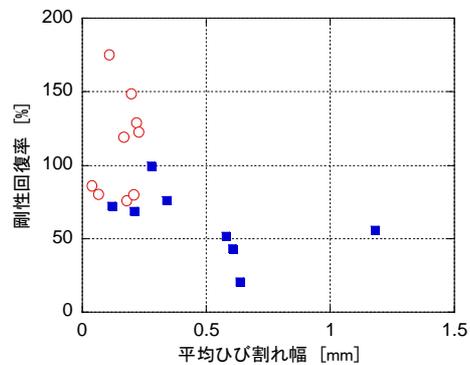


図8 平均ひび割れ幅と剛性回復率の関係

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の強度回復率は約 75~190%となり、2 回目の載荷試験時に得られた最大荷重が、1 回目の最大荷重よりも大きいものが見られた。また、剛性回復率についても同様の傾向が見られ、再載荷時の剛性が初回載荷時の剛性を上回るものが確認された。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%と再載荷時の剛性が初回載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。

また、供試体の表面に生じたひび割れの形状の観察からも、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 回目の載荷試験時には、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た。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。

ひび割れへの補修剤の充填は、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。これと併せて、充填状況を定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 9 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。

これらの結果から、水密性、力学特性ならびにひび割れの充填状況について、自己修復機能による回復を定量的に評価することが可能になったものと考えられる。

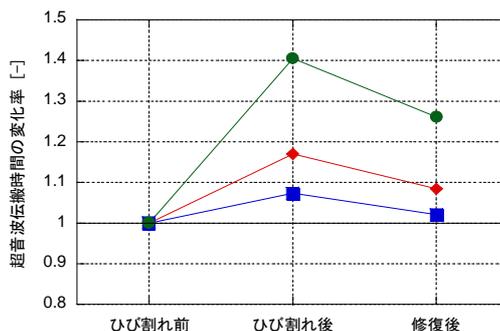


図 9 超音波伝搬時間の変化

(3)RC 梁供試体への適用

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し、実験を行った。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に対して、連結材ユニットが十分に埋設される深さまで 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。この供試体に対して複数回の 3 点曲げ載荷試験を行い、上述の強度回復率などによって自己修復の硬化を確認した。初回載荷において鉄筋降伏まで載荷が行われる場合、ひび割れに対して補修剤が供給されないまま再度載荷を行うと、モルタル供試体の結果と同様に、再載荷時の最大荷重が初回載荷時の値を下回り、強度回復率が 100% を上回ることではない。

この一方で、図 10 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 11 に示すように、ひび割れへの補修剤の放出が見られながら、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 12(a)および図 13(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 12(b)および図 13(b)に示す。

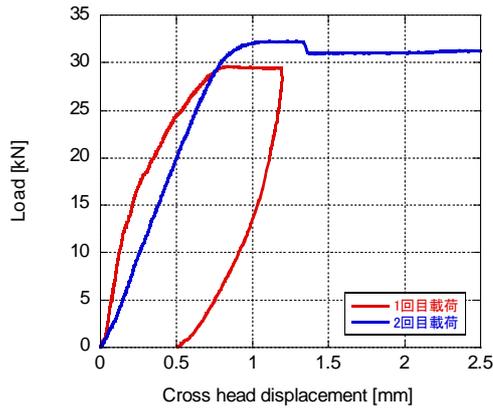


図 10 曲げひび割れに対して補修が行われた供試体の荷重点変位と荷重の関係

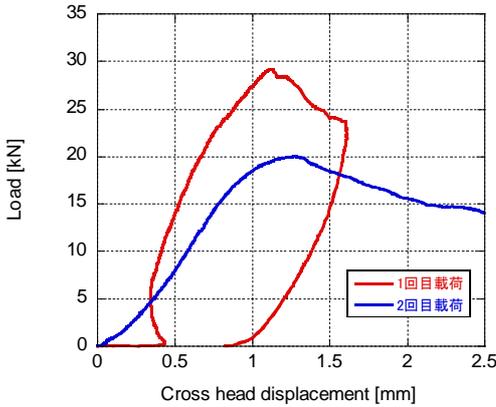
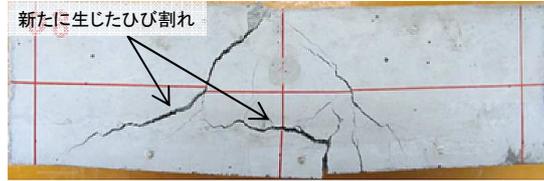


図 11 せん断ひび割れに対して補修が行われた供試体の荷重点変位と荷重の関係

図 12(a)のように、初回荷重で曲げひび割れが生じた供試体では、強度回復率が 100%を超える値が得られ、2 回目の荷重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見られた。また、図 12(b)に示されるように、2 回目の荷重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。この一方で、図 13(b)に見られるように、せん断ひび割れが卓越した供試体で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 回目の荷重試験によって初回荷重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 13(a)に着目すると、初回荷重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



(a) 1 回目荷重後



(b) 2 回目荷重後

図 12 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 回目荷重後



(b) 2 回目荷重後

図 13 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

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。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

1. 西脇智哉、熊田廣樹、大平旭洋、Sanjay PAREEK、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、査読あり、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、掲載決定、2011 年発行予定
2. T. Nishiwaki, H. Mihashi, Y. Okuhara, Fundamental study on self-repairing concrete using a selective heating device, 査読あり, Proceedings of the 5th International Conference on Concrete under Severe Conditions: Environment & Loading; CONSEC'10, Vol. 2, pp. 665-926, 2010.6
3. 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、査読あり、コンクリート工学年次
論文集、Vol.31、No.1、pp.2167-2172、
2009.7

〔学会発表〕（計4件）

1. 西脇智哉、三橋博三、連結材ユニットを利用した自動修復コンクリートの力学特性の回復効果に関する実験的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、東北学院大学、2009.8.28
2. S. Igarashi, M. Kunieda, T. Nishiwaki, Research activity of JCI technical committee TC-075B: Autogenous healing in cementitious materials, the 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, ConMat'09 (Nagoya, Japan), 2009.8.24
3. T. Nishiwaki, H. Mihashi, Y. Okuhara, H. Terashima, Development of self-repairing concrete system using selective heating devices, the 2nd International Conference on Self-Healing Materials 2009 (Chicago, USA), 2009.6.29
4. 西脇智哉、三橋博三、連結材ユニットを利用した自己修復コンクリートの補修効果に関する実験的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、広島大学、2008.9.20

〔図書〕（計1件）

1. 五十嵐心一、国枝稔、西脇智哉ほか、日本コンクリート工学協会、セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究専門委員会報告書、2009.7、pp. 74-98

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西脇 智哉 (NISHIWAKI TOMOYA)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60400529

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：