止水性能の自己修復機能を有する高耐久性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

FUNDAMENTAL STUDY ON DEVELOPMENT OF INTELLIGENT CONCRETE WITH SELF-HEALING CAPABILITY FOR PREVENTION OF WATER LEAKAGE

三橋博三 — *1

金子佳生 — *2

Hirozo MIHASHI — *1

Yoshio KANEKO — *2

キーワード：
インテリジェントコンクリート, 自己修復機能, 止水性能, 高耐久性, 補修剤

Keywords:
Intelligent concrete, Self-healing capability, Prevention of water leakage, High durability, Repair agent

In this paper, a fundamental study is carried out to develop intelligent concrete with self-healing capability for prevention of water leakage. Conceptual methodology consisting of three functions of sensing, processing and executing is proposed. In the method, crack repairing agents are installed as core materials in shell bodies embedded in concrete structures. The feasibility of the proposed approach is clarified experimentally by making use of glass pipes as shell bodies containing crack repairing agents.

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化の可能性が顕在化して以降、その高耐久性化への社会的要請が大きくなってきている。しかし、コンクリートの性質上、種々の要因により発生するひび割れによる劣化の促進は避けられないものとして受けとめられてきた。これらの劣化を修復することはおろか検査することもできない場合も考えられ、大きな社会問題となる可能性を含んでいる¹⁾。

一方、環境条件の変化に応じて材料自体に自己制御機能や自己修復機能を持たせたインテリジェント材料の開発が最近各分野で取り上げられている。これは、情報の概念を取り入れ、ある状態量をセンサ機能によって検知し、その情報をプロセッサ機能によって処理してあるレベルで判断し、それに基づきアクチュエータ機能によって能動的に行動を実行できるような機能を材料自身に組み込んだものである。このインテリジェント材料の概念を導入した高機能性コンクリートに関する研究は、これまでも幾つか報告されており、CFGFRP補強コンクリート^{2),3)}、光ファイバセンサを埋設した自己検知コンクリート⁴⁾、強度の自己修復コンクリート^{5),6),7)}、さらに自己腐食防止機能^{8),9)}や自己強硬化機能¹⁰⁾をコンクリートに付与させた高耐久性コンクリートなどがある。

これらは1つの機能に特化し、そのインテリジェント化を図ったものであり、対象とする機能は様々存在する。言い換えると、全ての機能を一括に実現するのは困難であることを示している。本研究では、これまで強度の自己修復機能に関するインテリジェント化の基礎研究を行ってきた¹¹⁾。本論では、これまでの研究を発展させ、セメント系材料と反応し、ガラス析出物を生成させて空隙を充

填することにより、止水機能を向上させることが既に確認されている補修剤を用いて、ひび割れ部分からの漏水を自動的に防ぐ機能を付与させたコンクリート、即ち高耐久性インテリジェントコンクリートの可能性について検討した基礎的研究の結果を報告する。

2. インテリジェント化の手法

本研究で提案するインテリジェント化手法を、平成元年に出された科学技術庁航空・電子等技術審議会第13号答申で表された構造物材料のインテリジェント化の姿¹²⁾に基づいて、図1に示す。

図は、「殻」により保護されている「コア」としての補修剤が、母材であるコンクリートの破壊に反応した「殻」の破壊によってその破壊箇所へ放出されて補修を行うシステムを示している。即ち、ひび割れがコンクリート中に発生すると、その中に配置された「殻」も破壊（破壊の発生を検知）し、内包していた「コア」である補修剤を放出（補修を行う必要性を判断）、破壊箇所へその補修剤を浸透させてひび割れを塞ぐ（補修を実行する）ものである。この機構が働くことで、材料自体の判断の下に、能動的に自己修復を行うことが可能になるものと考えられる。

ここではガラス管と補修剤を用いてコンクリートのインテリジェント化を図る。即ち、コンクリートにひび割れが生じるとガラス管が破断し（センサ機能）、ガラス管に内包されている補修剤が破断部から流出し（プロセッサ機能）、ひび割れに補修剤を浸透させて塞ぐ（アクチュエータ機能）というプロセスである。ガラス管を使用することの利点は、ひび割れという損傷に対し敏感に反応すること、補修剤を未反応のまま比較的多量に保存できることにある。

*1 東北大学大学院工学研究科 教授・工博
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

*2 東北大学大学院工学研究科 助教授・Ph.D.

*1 Prof., Tohoku University, Graduate School of Engineering, Dr. Eng.

*2 Assoc. Prof., Tohoku University, Graduate School of Engineering, Ph.D.

図1 インテリジェント化手法の概念図

3. インテリジェント化手法のX線による確認

図1で示したインテリジェント化手法の可能性を確認するために、X線造影剤をガラス管に内包させ、X線撮影により破壊試験中の試験体内部の様子を観察する。

3.1 試験体及び実験方法

図2に示す深さ2.5cmのノッチを付けた試験体を用いて、3点曲げ試験を行う。使用材料は、早強ポルトランドセメント(比重 $\rho=3.13$)、混和材にシリカフェウム($\rho=2.20$)、混和剤にナフタリンスルホン酸塩系高性能減水剤(空気非連行性/ $\rho=1.20$)、細骨材に宮城県阿武隈川産川砂($\rho=2.54$; 表乾)、補強繊維にポリプロピレン繊維($\rho=0.91$ /直径0.018mm ϕ ×長さ12mm)を用いた。調合はW/B=40(38(水)+2(高性能減水剤))%、SF/B=10%、Va(骨材体積):Vm(マトリクス体積)=1:1、Vf=0.5%とする。但し、Wは水、Bは結合材、SFはシリカフェウム、Vfは繊維混入率(体積表示)を示す。その他、ガラス管(外径2mm、内径0.8mm)及びX線造影剤(主成分は炭酸セシウム)を用い、ガラス管を試験体内部に埋設しており、図2に示すように外部からX線造影剤を供給する。

練り混ぜには強制練りミキサを使用し、空練りを1分間、水及び減水剤を加えて3分間、繊維を加えて1分間、骨材を加えて2分間とした。打設から24時間後に脱型し、養生室(20℃/相対湿度100%)にて材令7日まで湿空養生を行った。その後、コンクリートカッターで試験体中央に深さ2.5mmのノッチを設けた。載荷は、ひび割れ開口変位(CMOD: Crack Mouth Opening Displacement)により制御し、漸増載荷と共に連続的にX線透過撮影を行い、載荷中はリアルタイムで画像処理した映像をTVモニターで観察した。

図2 試験体の形状

3.2 実験結果及び考察

曲げ試験結果及びX線により観察されたノッチ先端(写真上部の白色部)近傍の試験体内部の写真を図3に示す。荷重—CMOD曲線におけるプロット数字は写真中の数字に対応している。写真より、母材の破壊に反応してガラス管も破壊し、内包するX線造影剤のひび割れ中への放出が確認できる。この結果、X線造影剤と補修剤を入れ換えれば、ガラス管の埋設により同様な挙動が再現できると判断する。

図3 荷重—CMOD曲線と内部X線観察写真

4. 止水性能の自己修復機能の確認

4.1 補修剤

ここで用いる補修剤は珪酸アルカリを主成分とする水溶液で、コンクリートやモルタルへの浸透性無機質反応型改質剤である。有機高分子系の防水剤や改質剤とは異なり、コンクリートやモルタルなどの多孔質材料に塗布し、浸透させることにより、アンモニウムイオンとハロゲンイオン存在下で珪酸カルシウムとコロイド珪酸を生成させ、材料の孔を完全に充填し無孔化する。即ち、コンクリート内部のカルシウムイオン、マグネシウムイオン、アルミニウムイオンと置換反応を起こし、コンクリートの浸透部及び表面に不溶性の結晶体（ガラス物質）を形成する。

4.2 試験体及び実験方法

図4に示す上下に5mmのノッチを付けた試験体を用いて、割裂破壊試験を行う。止水機能の自己回復状態を確認するため、試験体は補修剤を用いないもの(c05)、従来の補修剤使用方法として割裂試験により発生したひび割れに対して表面から手作業で塗布することにより補修を行うもの(c05-B)、ガラス管を埋設して外部から補修剤を供給することによりインテリジェント化を図るもの(c05-g)を用いる。

使用材料、及び調合は3.1節で示した試験体と同様である。但し、試験体の補強のために異形鉄筋(D10)を埋設するとともに、X線造影剤にかわってガラス管内には補修剤を内包させる(図4)。

図4 試験体の形状(c05,c05-Bはガラス管が埋設されない)

図5 c05-gの静置方法

図6 透水試験方法

練り混ぜはオムニミキサを用いて3.1節の試験と同様に行った。打設から24時間後に脱型し、蒸気養生(昇温速度10℃/h、80℃にて5時間保持の後自然冷却)を行う。この後に恒温室(20℃/相対湿度50%)にて材令3日まで静置し、破壊試験及び止水処理を行った。

割裂破壊試験は、クリップゲージで測定したCMODが十分に開いた時点で除荷し、載荷を終了する。その後恒温室で3日間、補修剤を供給しながら養生を行った。その間、補修剤の非対称な浸透を防ぐため図5のように静置した。

透水試験は、図6に示すように試験体のノッチ面と直行する面に漏斗を取り付けて行い、一定量の水分が失われる時間を測定した。

4.3 実験結果及び考察

図7に全シリーズの透水時間と透水量の関係を示す。図中、定性的傾向を明確にするため、各シリーズ毎に彩色した分布領域を示している。図は、透水速度(透水量の増分/透水時間増分)が時間とともに多孔質媒体内の毛細管力の減少によりしだいに減少し、定常流れにおける流速に近付いていることを示している。また、c05シリーズとc05-Bシリーズとでは大きな差がないのに対し、c05-gシリーズは他のシリーズと比べ大きく右側にグラフが展開し、同一時間の透水量がより少ないことを示している。即ち、ガラス管を埋設することにより、手作業による表面からの補修に比較して補修効果ははるかに高いことが明らかになったといえる。

一方、割裂破壊試験によって発生した残留CMOD(割裂破壊試験除荷後試験体に残ったCMOD)による透水時間の差を確認するため、各シリーズ毎の残留CMODと5cc透水に要した時間との関係を図8に示す。図中、定性的傾向を明確にするため、各シリーズ毎に線形回帰線を示している。図より、残留CMODの全ての範囲にわたって、c05-gシリーズが図の上方に分布し透水時間が長いことがわかる。さらに、他のシリーズと比べ残留CMODが小さい程透水時間の増加傾向が大きいことより、残留CMODを確実に制御すれば、止水性能の向上がより顕著となることも観察できる。なお、c05-Bシリーズは、残留CMODが大きい程透水時間が増加する傾向を示しているが、これは表面に塗布された止水剤が内部に浸透するためにはある程度のひび割れ幅が必要であること、及び手作業によるばらつきに起因するものと考えられる。

図7 各シリーズの透水時間と透水量の関係

図8 残留CMODと透水時間の関係

次に、インテリジェント化手法として用いたガラス管により、構造物の耐力が低下するかどうかを確認するため、ガラス管を用いた場合（c05-gシリーズ）とガラス管を用いない場合（c05シリーズとc05-Bシリーズ）の割裂破壊試験時の最大荷重の比較を図9に示す。図は最大値と最小値、及び平均値を示している。また、比較を明確にするため平均値を直線で結んでいる。図より、ガラス管の埋設により問題となるような顕著な耐力低下は認められない。

図9 ガラス管を埋設した場合と埋設しない場合との最大強度の比較

5. まとめ

本研究では、止水性能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を目指して、自己修復機能というインテリジェント化を行う手法を提案した。その手法は、補修剤をガラス管に内包して保護し、コンクリート中に埋設することによって、検知・判断・実行の3つの機能を付与するものである。更に、基礎的実験により、その機能の付加が可能なことを明らかにした。以下にその要約を示す。

- ①本研究で用いたインテリジェント化の手法により、コンクリートのひび割れに対し、センサ及びプロセッサとしてのガラス管と、アクチュエータとしての補修剤供給システムが有効に働き、止水性能の自己回復が可能となる。
- ②自己修復による止水性能の回復は、手作業による表面補修の場

合よりはるかに大きく、また止水性能の自己修復機能の発現は、ひび割れ開口変位を小さくする程顕著となる。

- ③本研究に用いる程度のガラス管埋設により問題となるような顕著な耐力低下は認められない。

本研究は緒についたばかりであり、現段階では現象論にとどまっている。そのため本研究で示した実験的検証に加え、補修剤や透水試験時の水の挙動を理論的に定量化することにより、確実なインテリジェント機能の制御を可能にすることが今後の課題と考える。また、本研究ではガラス管を殻として各種実験を行ってきたが、実用化のための施工性を視野に入れたカプセル化などの材料選択も必要である。さらに、耐久性を視野に入れた経時変化に対しても、定量化していく必要があると考える。

謝辞

本研究は、東北大学大学院工学研究科西脇智哉氏（現（株）大林組）、及び同乾弘泰氏（現日本鋼管（株））の大学院前期課程の研究として実施したものである。ここに記し、謝意を表する。また、本研究の遂行にあたり、X線を用いた実験にご助力を頂いた東北学院大学工学部大塚浩司教授、並びに止水剤の御提供を頂いた（株）スリーボンドユニコンの関係者各位に、深謝する。なお、本研究は平成7年度～平成9年度の科学研究費補助金（基盤研究(A)(1)）（代表者：三橋博三、研究課題番号07555466）による「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研究」の一部である。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 大濱嘉彦、三橋博三：建設のニューフロンティア構想と先端材料、技報堂出版、1995
- 2) 中辻照幸、杉田穂、柳田博明、武藤範雄：インテリジェント建設構造材料、機械の研究、vol.44, pp.408-411、1993
- 3) 柳田博明：知能をもった材料をつくる、化学、vol.49, No.1, pp.3-4、1994
- 4) Dry,C.M.: Smart Multiphase Composite Materials which Repair Themselves by a Release of Liquid which become Solids, Proceedings of the Society of Photo-optical instrumentation Engineers (SPIE), vol.2444, pp.410-413、1995
- 5) Dry,C.M.: Time Release of Chemicals into Hardened Cementitious Matrices for Crack Repair, Fiber Rebond, and Increase in Flexural Toughening, Fractural Mechanics 25th Volume, pp.268-282、1995
- 6) Dry,C.M.: Smart bridge and building materials in which cyclic motion is controlled by internally released adhesive, SPIE, vol.2719, pp.247-254、1996
- 7) Dry,C.M.: Building Materials That Self Repair, Architectural Science Review, vol.40, pp.49-52、1997
- 8) Dry,C.M.: Smart Materials which Sense, Activate and Repair Damage: Hollow Porous Fibers in Composites Release Chemicals from Fibers for Self-Healing, Damage Prevention, and/or Dynamic Control, SPIE, vol.1777, pp.367-371、1992a
- 9) Dry,C.M.: Smart Building Materials which Prevent Damage or Repair Themselves, Materials Research Society Symposium Proceeding, vol.276, pp.311-314、1992
- 10) Dry,C.M.: Matrix Cracking Repair and Filling Using Active and Passive Modes for Smart Timed Release of Chemicals from Fibers into Matrices, Journal of Smart Materials and Structures, vol.3, No.2, pp.118-123、1994
- 11) 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、第11巻第2号掲載予定、2000
- 12) 松岡三郎：金属材料のインテリジェント化、セラミックス、vol.28, No.6, pp.581-584、1993

[1999年8月13日原稿受理 2000年2月2日採用決定]