論文 発熱デバイスを用いた自己補修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

國井 僚^{*1}·三橋 博三^{*2}·西脇 智哉^{*3}·三浦 和晃^{*4}

要旨:本研究は、ひび割れ発生箇所で選択的に発熱が可能なデバイスを用い、コンクリート に自己修復機能を付与するシステムを提案する。この発熱デバイスのひび割れ発生箇所での 発熱挙動を実験により確認した。また、コンクリート中での熱伝達を計算して実験との比較 を行い、このシステムに必要なコンクリート中の発熱計画について検討した。 キーワード:セラミック系診断材料、インテリジェントコンクリート、自己補修

1. はじめに

1995年に発生した阪神大震災では、被害を受けたコンクリート構造物に対する損傷診断の難しさが露呈し、震災後の早期復興を図るためにはその健全性診断が重要とされた。現在、この構造物の変状を診断する技術ならびに構造物の 補修技術に関する研究が国内外において盛んに 行われている。一方で使用期間中に補修が必要 であるとの診断が下されても、構造物の形状や 用途によっては人間が近づけないために補修が 困難となる場合がある。また、物理的には検査 補修が可能な場合であっても、構造物が大規模 であるほどコストや時間の面からも包括的な実 施は困難である。そこで、診断のプロセスで修 復の必要性が認められると自動的に修復を行う 事が出来れば、その構造物には高い信頼性を得

る事が出来る。本研究ではひび割れ 検知機能を併せ持つ発熱デバイス であるセラミック系複合材料を用 いて、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、実 験を通してその可能性を確認する 事を目的としている。

2. 自己補修機能

本研究では自己修復機能の定義を,「ひび割れ 等の劣化が発生した場合に,その部分に直接人 間の手による補修作業を行わずとも,予めコン クリート中に導入された補修機構(補修剤搬送 システムや発熱デバイス等の組み合わせ)の遠 隔操作等も含めて,材料自身が保有する機能に より修復が可能であること」としている。この 定義を踏まえ,ここでは本研究において提案す るコンクリートへの自己修復機能付与のための 手法を述べる。

2.1 インテリジェント化の手法

コンクリート中に保護材によって未反応の状 態を保持したまま補修剤を埋設することで,ひ び割れ等が発生した場合にはこの保護材が破れ、 ひび割れ中に補修剤が放出される。補修剤がコ



図-1 未反応補修剤の先行埋設による受動的システム¹⁾

*1 東北大学大学院 工学研究科 博士課程前期 (正会員)
*2 東北大学大学院 工学研究科 教授・工博 (正会員)
*3 東北大学大学院 工学研究科 博士課程後期 (非会員)
*4 東北大学 工学部 建築学科 (非会員)

ンクリートや空気と接することで硬化すれば, 硬化箇所で補修を行うことが可能である。概念 図を図-1に示す。本研究ではこの手法を更に 進めて,構造体に埋設される事により,この構 造体の変化に応じて自身の電気的な性質を変化 させて健全性の評価を行う自己診断材料を利用 した損傷箇所に対する選択的な促進補修を提案 する。

2.2 自己診断システムの複合利用

上記の自己診断材料により得られた劣化の情報に基づき補修箇所をある程度の範囲で限定できれば、補修の必要な範囲にのみ予め埋設されたパイプ中に補修剤を供給することで、その範囲での網羅的な自己補修を行う事が可能である。 更にパイプに熱可塑性材料を使用すれば、補修の必要な箇所に対して局所的な加熱を行う事により選択的に劣化箇所に補修剤を放出することが期待される。

本研究における自己修復要素は,設置される 自己診断材料をこの発熱デバイスとして利用す る事で,より高度な機能を発揮することを目的 としている。自己診断材料はひび割れ等の発生 により,その部分での抵抗が局所的に上昇する ため,劣化箇所では健全な部位と比較して抵抗 値が上昇している。そのため自己診断材料に発 熱を目的とした大きさの通電を行うことで,局 所的に抵抗値の上昇している劣化部位に選択的 な発熱が起こることが期待される。この発熱を 用いて埋設パイプの融解と,補修剤の放出およ び硬化により自己補修が可能となる。(図-2)

3. 使用デバイス

3.1 既往のデバイス

著者らは発熱デバイスとして使用する自己診 断材料として,炭素粒子分散系複合材料(以下 炭素系診断材料)を候補にその発熱特性を調べ た。²⁾その結果,コンクリート中で補修剤の硬化 や,その保護材の融解を引き起こす程度まで周 囲の温度を上昇させることは,発熱量が不足し ており困難であることが確認された。このこと の原因として,自己診断材料自体の抵抗値が大 きいために通電電流量が不足し,その結果発熱 量が不十分になるためであると考えられる。

3.2 セラミック粒子分散型複合材料

本研究で発熱デバイスとして使用している自 己診断材料は,累積損傷メモリ機能を目的とし て開発された導電性セラミック粒子分散型複合 材料(以下セラミック系診断材料)である。導 電性酸化物として RuO₂粉末が使用されており, 上記の炭素系診断材料と比較して抵抗率が 1.1x10⁻³~1.3x10⁻³[Ωm]と非常に小さいために高 い電圧を印加する事が可能であり,発熱に適し ている。表-1にセラミック系診断材料の各物 性値、図-3に構造の概念図をそれぞれ示す。 3.3 発熱状況の観察

これらの自己診断材料に対して通電を行い, その発熱状況をサーモグラフィの観察により確 認した。得られたサーモグラフィの写真を図-4に示す。またこの時の印可電圧とサーモグラ

衣一 セフミック糸診断材料の物性(系診断材料の物性値
--------------------	-----------

弾性係数	破断歪み	破断強度
13.3 GPa	2.1 %	310 MPa



フィにより測定された平均温度の関係を図-5 に示す。この図のように、印加電圧と自己診断 材料の平均温度は比例関係にあり、比熱の大き いコンクリートに対して十分な発熱量を持つ事 が確認された。

4. 温度分布予测

補修剤を封入したパイプを自己診断材料から の発熱により融解させるためには,自己診断材 料から発生した熱が母材コンクリートのどの範 囲まで拡がるかを把握した上で配置計画を行う 必要がある。

本節では、コンクリートを無限平面、自己診 断材料をその中に埋設される点熱源と仮定して 熱伝導計算を行い、コンクリート中の温度分布 を予測した。また、予測との適合性を検証する ため、実際にモルタル試験体を作製して通電す る実験を行った。

4.1 熱伝導計算

熱伝導計算に用いた式を以下に示す。3)

$$T(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_0^t \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{r^2}{4kt}\right] dt \qquad (1)$$

ここに,T:上昇温度[K],r:熱源からの距 離[m], λ :コンクリートの熱伝導率[W/m·K],



(a)セラミック系診断材料

q:発熱量[J/m・s], $k = \lambda/c\rho$, c:比熱[J/g・K], ρ :比重[g/m³] である。

T(r,t)は熱源からr離れた箇所におけるt秒後の上昇温度を示している。(1)式からt秒後の各地点の距離と温度の関係を導出した。

4.2 検証実験

(1)式による熱伝導計算の妥当性を実験により 確認する。試験体の形状は図-6に示すような 40x40x115mmの角柱状の繊維補強モルタル試験 体であり、セラミック系診断材料を長辺方向と 平行になるように埋設した。打設後に7日間の 水中養生を行った後、室温を20℃とした恒温室 にて通電試験を行った。電源は100Vの交流電源 を用い、変圧器によって0~50Vの範囲を段階的 に10V ずつ、5分間隔で電圧を変化させて通電 を行った。温度の測定にはサーモグラフィを用 い、各電圧を5分間印加した時点で温度分布を 記録した。

4.3 実験結果・考察

計測した試験体の温度分布を図-7に示す。

高温領域は試験体下部の診断材料埋設箇所に 沿って拡がり、50V、5分の段階では最高で70℃ 付近まで上昇した。またb)およびc)で試験体内 部の温度分布にばらつきが見られるのは、a)に 示すように埋設したセラミック系診断材料の材



(b) 炭素系診断材料



料内部での抵抗のばらつきによるものと考えら れる。また,図-8に各測定点の実測温度,お よび温度予測式から得られた距離と温度の関係 を示す。この図より(1)式による熱伝導計算は概 ね妥当であると考えられる。ただし(1)式ではセ ラミックス系診断材料とマトリクスの熱伝達係 数や表面からの熱放出等の境界条件を考慮して いないため,それを含めた有限要素解析を現在 行っている。

5. ひび割れ箇所の局所発熱

前節の実験によりモルタル中に健全なセラミ ック系診断材料を埋設した場合,これに電圧を 印加する事でモルタル中での発熱が確認された。 本節では提案する自己修復機能発現のトリガー となる,ひび割れ箇所での局所的な発熱が生じ る事を実験により確認する。

5.1 実験概要

本実験では試験体に三点曲げ載荷を行ってひ び割れを発生させ、セラミック系診断材料に局 所的な損傷を与えた状態で通電し

た場合,その部分に局所的な抵抗 値の上昇,即ち発熱の集中が見ら れるかどうかを確認した。試験体 には前節と同様に繊維補強モルタ ル中にセラミック系診断材料を埋 設した 40x40x115mm の角柱試験 体を使用した。

5.2 実験結果・考察

三点曲げを行う前の試験体中の 健全なセラミック系診断材料に通 電した際に得られたサーモグラフ ィ写真を図-10a)に,三点曲げ試 験によるひび割れの発生状況を図 -9に示す。

また,曲げ試験によりひび割れ が発生した状態で通電した場合の 発熱状況を図-10b)に,曲げ試験 の際の載荷点変位と荷重および抵 抗値の関係を図-11に示す。印加 電圧および通電時間は a), b)ともに 20V, 10 分 である。図-10a)に見られるようにひび割れの 発生していない健全な状態であれば,埋設され たセラミック系診断材料に沿って全体に発熱が 確認される。

母材繊維補強モルタルにひび割れが発生した 状態では,埋設したセラミック系診断材料にも この部分で局所的な損傷(すなわち抵抗上昇) が発生し,図-10b)のように局所的な発熱が見 られることが確認できる。このことは、図-11 に示すグラフにおいて,載荷点変位の上昇に伴 ってセラミック系診断材料の抵抗値が上昇して いることからも確認できる。例えば、図-9に 見られる 0.3mm 程度のひび割れが発生した際に は、図-11 に示すように 33%程度の抵抗値上昇 が見られた。

6. 発熱計画

自己修復機能の発現のためには損傷箇所の発 熱により、補修剤を保護しているカプセル材料 の融解、およびひび割れ中に浸透した補修剤の



硬化のそれぞれを誘発する必要がある。ここで はそのために必要な温度と熱源からの距離を仮 定して、4節で用いた熱伝導式により、必要にな る発熱量を予測する。

診断材料より発生するジュール熱で補修剤チ ューブの融解を目的とする場合,熱源は可能な 限りチューブの近傍に配置した方が有効である。 また補修剤チューブの材料を融点 80℃前後と仮 定する。これらのことより初期温度を 20℃,熱 源からの距離を 2cm, 到達目標温度を 80℃, 連 続して通電する時間を3600secと設定すれば、目 標温度まで加熱するには,図-12より約 320J/ms の熱量が必要である。ここで、健全な自己診断 材料を使用してこの熱量を得ると考えた場合, 発熱量qは次式で与えられる。

$$q = \frac{V^2/R}{l} \tag{2}$$

ここに, q [J/ms]: 単位長さ当りの発熱量,



図-10 発熱状況(20V、10min 通電)

 $V[V]:印加電圧, R[\Omega]:抵抗, l[m]:長さ で$ ある。従って(2)式より印加電圧は

$$V = \sqrt{320 \times 25 \times 0.2} = 40$$
 (3)

となり、40V 通電した場合と同程度の発熱があ れば可能であると考えられる。ここで、図-5 に示すように健全なサンプルに電圧をかけた場 合、電圧と温度は線形の関係となるので、40V では約400℃に達すると考えられる。このため, 損傷箇所では 400℃程度の発熱が必要になると 予想される。

また,図-13a)に示すように構造体の表面に セラミック系診断材料と補修剤パイプを一定間 隔で交互に配置した自己修復を想定した場合, 間隔を 20mm, 診断材料からの発熱量を 160J/ms とすれば、図-13b)に示される温度分布となる。 補修剤パイプの位置では両隣の診断材料から熱



が到達するため、このパイプを溶融するために 必要な約80℃まで上昇すると考えられる。(2)式 より, 160J/msの発熱量は28V 通電した場合と同 等であり, その場合, セラミック系診断材料は 図5より約280℃に達すると考えられる。よって、 セラミック系診断材料と補修剤パイプを交互に 配置した場合は、損傷箇所において 280℃程度の 発熱量が必要になると考えられる。なお、設定 した 80℃という温度には、暑中コンクリートと なる環境での施工や大断面を有する場合は水和 熱の影響等で到達してしまう事が危惧されるが、 図-13 で提案したように層として用いることで 断面積を抑える事や、この部分をプレキャスト 製品として工場の適切な温度管理下で作製する 事で回避できると考えられる。但し真夏の直射 日光を受ける場合など、部位や用途によっては ある程度利用が限定されると考えられるため、 温度設定については更なる検討が必要である。

7. まとめ

本論文では強度の自己補修が可能なシステム として、補修剤パイプと診断材料を先行して埋 設する手法を提案した。また、発熱体としての セラミックス系診断材料が引き起こす熱により、 マトリクスの各点では温度がどの程度上昇する かを予測し、実測値との比較評価を行った。更 に、セラミックス系診断材料をモルタル試験体 中に埋設し、載荷前後の通電結果を比較する事 で、劣化部位の局所的な発熱を確認し、自己修 復発現のための目標温度を仮定した場合に必要 な発熱量を計算する手法を示した。これにより, センサ配置計画における数量・間隔等を決定す る上での足掛かりを得た。

【謝辞】

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機 構「基盤技術研究促進事業(社会基盤構造物の 安全維持管理のための自己診断材料・修復材料 の開発とそのシステム開発)」の一部として実施 されたものである。また使用したサンプルは(財) ファインセラミクスセンターよりご提供頂いた。 ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 三橋博三:「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」
 H.7~H.9 科学研究費補助金研究成果報告書, pp.9-10, 1998.3
- 2) 國井僚,三橋博三,西脇智哉,杉田稔:自己 補修機能を有するインテリジェントコンク リートの発熱デバイスの開発に関する基礎 的研究,日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.681-682, 2003
- 3) 座古勝,高野直樹,藤岡英典:CFRP 貼付補 強コンクリートのインテリジェント化のた めのセンサ・アクチュエータに関する研究, 材料, Vol.47, No.11, pp.1178-1182, 1998.11



a) 自己補修壁としての利用法 図-13 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