論文 コンクリートに対する遮水性能の自己修復機能付与に関する基礎的 研究

西脇 智哉*1·三橋 博三*2·張 炳國*3·三浦 和晃*1

要旨:本研究では、コンクリートにひび割れが発生した場合に、発生箇所に対して選択的な 加熱を行うことにより、自動的に補修剤がひび割れ中に放出されて補修を行う、自己修復機 能をコンクリートに付与するシステムを提案した。ここでは熱伝導解析と基礎的な実験を通 して、提案する自己修復システムが有効に機能することを確認し、さらに透水試験を実施し て、この自己修復機能によって遮水性能の回復が可能であったことを示した。 キーワード:自己修復機能、発熱デバイス、自己診断材料、3次元熱伝導解析、遮水性能

1. はじめに

近年、コンクリートの崩落事故等に見られる ように多くのコンクリート構造物の急速な劣化 が顕在化し社会問題ともなっている¹⁾。すべての コンクリート構造物は半永久的に使用されるも のではないが、設定された要求耐用年数期間内 にもかかわらず要求性能を満たせなくなるよう な有害な劣化が問題となる。劣化が有害なもの へ進展してしまった場合は、補修などを行う必 要があるが、図-1に示す概念図²⁾のように、劣 化は加速度的に進行する場合が多く、劣化の程 度が激しくなるほど、補修の実施が技術的にも 経済的にも困難になる。特にひび割れの発生は, 水などの劣化因子をコンクリート内部に引き込 むことで、鉄筋の腐食などより有害な劣化への 原因となる場合がある。耐久的なコンクリート 構造物とするためには、軽微なひび割れの段階 で適切な処置を施すことが肝要である。

そこで本研究では、コンクリートにひび割れ が発生した場合にコンクリート自身がこれを検 知し、補修の実行までを行う自己修復機能を付 与することを提案する。この手法として、発熱 デバイスとしての自己診断材料と補修剤を予め コンクリート中に埋設し、ひび割れ発生箇所に 対して選択的に加熱を行うことを提案する。こ の自己修復機能により,発生した劣化への事後 対策である補修を,事前対策としてコンクリー トに内包させることで,より計画的な耐久設計 が可能になるものと期待される。ここでは熱伝 導解析と通電による発熱並びにひび割れ補修に よる遮水性能の回復実験を行い,提案するシス テムが想定どおりに機能し,発生したひび割れ を自動的に補修することと,遮水性能の回復が 可能であることの確認を目的としている。

2. 自己修復機能

建築物の性能

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



*1 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 (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・工博 (正会員) *3 (財)ファインセラミックスセンター 材料技術研究所 (会員外) 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、本研究で提案するコンク リートへの自己修復機能付与のための手法の概 念図を図-2に示す。この図のように、ひび割 れ箇所において選択的に発熱するデバイスと、 通常時には内包補修剤を保護しながら、選択的 な加熱を受けた場合には部分的に融解し、ひび 割れ中に内包する補修剤を放出する補修剤保護 パイプをコンクリート中に併設する。ここでは、 この発熱デバイスとして自己診断材料を、また 補修剤保護パイプとしてエチレン酢酸ビニルコ ポリマーフィルム(融点: 93℃、以下 EVA フィル ム)を成形して作製したパイプを使用し、この中 に未反応の状態を保持したままのエポキシ補修 剤を封入する。

ここで発熱デバイスとして使用する自己診断 材料とは、アルミナ長繊維を核として、導電性 酸化物を含むガラスマトリックスを含浸させて 成形したものである³⁾。局所的なひずみなどの変 形を受けた場合、その変形箇所で導電パスが部 分的に切れ、局所的に抵抗値が増大する特徴が ある。この状態で通電すると、ひずみ部分にお いて抵抗が上昇しているために発熱が集中し、 選択的な加熱を行うことができる。

補修剤保護パイプには、コンクリート中にあ って補修剤が未反応の状態を維持するための密 閉性と、自己診断材料からの選択的な発熱によ って融解し、通常の使用環境下では融解しない 適切な融点が要求される。これを満たす材料と して、EVAフィルムをパイプ状に加工したもの を使用する。これに内包される補修剤には、密 封状態での保存性と、保護パイプから放出され た後はひび割れ中に浸透し、発熱デバイスから の熱によって速やかに硬化することが要求され る。このような補修剤として、低粘度一液型エ ポキシ樹脂を使用する。これは非常に粘度が低 く、ひび割れ幅が 0.2mm 程度の微細なひび割れ に対しても、外部からの圧力などを必要とせず に浸透することが可能である。また通常は空気 中の水分と反応することにより緩やかに硬化す るが,熱によって硬化が促進される特徴があり, 温度環境が 60℃では 100 分間程度で硬化する。

これらの組み合わせによって,ひび割れ等の 損傷が発生した場合に,損傷部分の発熱デバイ スからの選択的な加熱による埋設パイプの融解 と,それに伴う補修剤の放出および硬化により 自己補修が可能となることが期待される。

3. 3次元熱伝導解析

ここでは、3次元熱伝導解析を行って、以下 の3点を確認する。

- ひび割れのない状態では、発熱デバイスの加熱による補修剤保護パイプの融解がないこと
- ひび割れの発生により選択的な加熱が行われる場合には、補修剤保護パイプが融点に達して、内包する補修剤を放出すること
- 新修剤放出後に更に加熱を行うことで、補修 剤の硬化に十分な温度とできること

3.1 解析方法および解析条件

非線形有限要素解析プログラム(MSC. Marc)を 用いて解析を行う。解析モデルは,実験による 確認を行うことを前提として,長さ250mm,幅 80mm,厚さ10mmの薄片状とした。このモデル およびモデル内部での各要素の配置状態を図-3に,使用した物性値を表-1に示す。ただし 補修剤保護パイプの物性値には,表面のEVAフ ィルムではなく,内部に充填されるエポキシ樹 脂補修剤の物性値を採用している。

表-2には各条件下で使用する境界条件を示



す。発熱量は、表中に発熱条件として示す電圧 および抵抗値から計算される全体の発熱量を、 発熱デバイス要素の体積で除して求めている。 また、ひび割れによる自己診断材料の抵抗の上 昇は、ひび割れ位置でのみ局所的に生じると考 えられる。このことをモデル化するために、増 分をひび割れ想定位置での自己診断材料要素の 体積(4mm²×2mm)で除した値としている。初期 条件として室温である 20℃を全要素に対して与 え、1分ごとの温度分布の変化について、条件1 を用いた場合は通電開始から20分までの解析お よび定常解析を行う。また、条件2を用いた場 合は 30 分間に亘って解析を行う。

3.2 解析結果

ひび割れの発生していない場合について,解 析によって得られた通電開始から20分後のモデ ル表面の温度分布を図-5(a)に,自己診断材料 を含むモデル中央切断面での温度分布を図-5 (b)に示す。また図-5(d)はひび割れ想定位置で ある A-A'断面における定常状態での温度分布で ある。これらの温度分布からは,ここでの発熱, 時間および配置条件では,補修剤保護パイプは 融解せず,補修剤を保持するものと考えられる。

また,ひび割れの発生を想定し,この箇所に 選択的な発熱がある場合の,通電開始から20分





後の=	モデル	~表面	の温	度分布	「を図]—6	6 (a)	ζ,	自	己
診断棒	才料を	合む	モデ	ル中チ	央切隊	「面~	での泪	昰度	分	布
を 図-	-6(b) に示	す。	また,	叉-	- 6 (c) 黒ラ	丸で	示	L
た補修	多剤係	禄渡パ	イプ	位置	での,	時間	引と注	且度	変	化
の関係	系を 図] – 6	(d)に	示す。	叉-	- 6 (0	」) かり	ò通	電	L
てから	5115	う後に	保護	パイラ	プの鬲	東京で	である	5 93	°C	に
到達了	するこ	ことが	確認	される	る。す	ーなオ	っち,	Ś	$\mathcal{O}_{\mathbb{F}}$	条
件下-	で保護	養パイ	プを	融解る	혼번,	ひて	バ割オ	ルに	補	修
剤をカ	夜出さ	らせる	こと	が可能	もであ	538	考	えら	n	る

この後に補修剤を硬化させることを想定して, 更に 30 分後まで解析を行った結果について,図 -7(a)にモデル表面での温度分布を示す。また この図-7(c)中に黒丸で示されている,ひび割 れ面の中で最も熱源から離れている箇所での時 間と温度変化の関係を図-7(d)に示す。これら の図から,ひび割れ面全体が通電開始から 30 分 後に 62℃に到達することが確認される。以上の 解析結果より,本研究で用いる自己診断材料に よる温度環境は,保護パイプの融解と補修剤の 硬化に必要な条件を満たすものと考えられ,こ こで提案する自己修復機能が有効に機能するも のと期待される。

4. 実験

ここまでの解析の結果に加えて,実験を通し て想定する自己修復機能が有効に働くことを確 認する。ここでは,解析モデルと同様の供試体 を作製し,ひび割れを発生させる。このひび割 れを自己修復機能によって補修し,遮水性能の 回復を行うことが可能であることを確認する。

弦 「 夜市した10110110						
要素	熱伝導率 [W/mK]	比熱 [J/kgK]	密度 [kg/m ³]			
モルタル	1.8	921	2200			
自己診断材料	1.2	750	2020			
エポキシ補修剤	0.19	1670	1600			
鉄筋	803	440	7800			
リード線	398	380	8960			

表一1 使用した物性値

発熱条件	発熱量(一般部)	発熱量(ひび割れ)	熱伝達(上面)	熱伝達(下面)	熱伝達(側面)			
1:載荷試験前(健全) 69.6Ω, 33.6V	0.025W/mm ³	0.025W/mm ³	14.0×10 ⁻⁶	8.90×10 ⁻⁶	12.1×10⁻ ⁶			
2:載荷試験後(ひび割れ) 76.7Ω(10%上昇), 43.7V	0.035W/mm ³	0.323W/mm ³	W/mm ² K	W/mm ² K	W/mm ² K			

4.1 実験概要

供試体には水セメント比を 45%, 砂:セメン トの比を 2:1 とした調合のモルタルを用いる。ま たセメントには早強ポルトランドセメント(密 度 3140kg/m³)を, 細骨材には川砂(密度 2470kg/m³)を用いた。この供試体に自己診断材 料と補修剤保護パイプを併せて埋設する。

供試体の形状と載荷方法を図-4に示す。解 析モデルに倣って幅 80mm,長さ 250mm,厚さ 10mmの直方体とし、中央に深さ 5mmの切欠き を設けて、割裂載荷によるひび割れの発生箇所 を限定した。載荷はインストロン型万能試験機 を用いて変位制御にて行い、自己診断材料に想 定する抵抗上昇が確認されるまで載荷の後に除 荷して、通電と透水試験を行う。この透水試験 には JIS A6909 建築用仕上げ塗材に準じて、供試 体表面に設置する漏斗を通じて失われる水分量 を計測する方法を採用する。

4.2 健全な自己診断材料による発熱と温度分布

載荷試験に先立ち、供試体にひび割れが発生 していない状態で通電を行い、サーモグラフィ を用いて供試体表面の温度分布を観察した。通 電は解析条件に沿って 69.6Ωの抵抗を持つ自己 診断材料に対して 33.6V の交流電流(単位体積 当たりの電力換算: 0.025W/mm³)を 20 分間に渡 って印加した。通電開始から20分後の温度分布 を図-5(c)に示す。現時点では自己診断材料が 試作の段階であるために、作製段階において不 可避的に生じる抵抗のばらつきのために、一様 な発熱となっていないが、この図からは図-5 (a)に示される解析結果と、最高温度や温度の分 布範囲など概ね一致しており、ひび割れの発生 しない状態では、ここで与えた条件での通電に よっては、補修剤保護パイプは融解しないもの と考えられる。

4.3 ひび割れの発生による局所発熱

この供試体に割裂載荷試験を行った結果,ひ び割れ幅は完全に除荷の完了した時点において 約 2.5mm まで進展し,抵抗値は 76.7Ω(初期抵 抗値の約 110%)まで増大した。この供試体に対

して 43.7V の交流電流を補修剤の放出が確認さ れるまで印加する。抵抗の上昇は、ひび割れ発 生箇所を中心に2mmの範囲で発生すると仮定す る場合,発熱量は表-2の解析に用いた発熱条 件と同様に、ひび割れ部分で 0.323W/mm³、その 他の自己診断材料の健全な部位で 0.035W/mm³ 程度の単位体積当たりの発熱量に相当すると考 えられる。通電開始から 20 分経過後の温度分布 を図-6(c)に示す。図には発生したひび割れの 位置を黒破線,自己診断材料を黒実線,補修剤 保護パイプを白線で示している。ここで得られ た温度分布は、この条件を想定して解析を行っ た図-6(a)と比較的近い温度分布形状となって いる。しかし、図-6(d)より解析結果はパイプ 保護材料が通電開始から約11分で融点に達する ことを示しているが、実際に補修剤の放出が確 認されたのは 21 分であり、約 10 分の時間差が 生じている。これはパイプ被膜が融点温度に達 しても、実際に融解するまでには時間が必要で あると考えられるが、このことは定量的に評価 できておらず、今後の検討課題である。以上の プロセスを経た供試体に対して、補修剤の硬化 を目的として、更に加熱を継続して補修剤の放 出が確認されてから約 10 分間の通電を行った。 この時の温度分布を図-7(c)に示す。解析結果 である図-7(a)とも比較的一致していることが 分かる。この供試体には補修剤保護パイプ融解 のための加熱開始から通して、約30分間の通電 が行われたことになる。この加熱により、ひび 割れ内部の補修剤が硬化したことが、表面から の目視観察によって確認された。





図-7 ひび割れ発生後通電時(補修剤硬化時)の温度分布

4.4 自己修復による遮水性能の回復

ここまでの実験によって、本研究で提案した 自己修復のシステムが機能することは確認され た。次に、この補修によって遮水性能が回復さ れたことの確認実験を行う。そのため、自己修 復を施した供試体に加えて, 同様の形状とひび 割れを発生させた上で、一切の補修を行わない 供試体を用意し、それぞれについて透水試験を 行い、遮水性能を比較した。この試験によって 得られた、それぞれの試験体に発生しているひ び割れ幅と単位時間当たりの透水量の関係を図 -8に示す。通常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ている⁴⁾が, この図からは、ひび割れ幅が非常に大きいにも かかわらず、自己修復による補修の行われたシ リーズの方が単位時間当たりの透水量が小さく なっていることが確認できる。これは自己修復 機能によって遮水性能が回復されたためと考え られ、この結果からも自己修復機能が有効に機 能するものと確認できる。

5. まとめ

事後対策であるひび割れ補修は通常は発生し てしまったひび割れに対して行う。本研究では, このプロセスを,施工時に予め組み込む事前対 策とすることで,より素早く確実に発生したひ び割れに対応することが可能であるように,コ ンクリートに対して自己修復機能を付与するこ



とを提案した。これを実現する為の手法として, 自己診断材料を利用してひび割れ発生箇所に選 択的な加熱を行うことを提案し,解析と実験を 通してこの機能が有効に働き,ひび割れの補修 が可能であることを確認した。更に自己修復を 経たコンクリートに対して透水試験を行うこと で,自己修復によって遮水性能の回復が可能で あることを確認した。

本研究の段階ではまだまだ改善すべき点も多 く、システムとしてはより有効な発熱デバイス や補修剤の模索やシステム自体の改良などが今 後の検討課題として挙げられる。また、耐久的 なコンクリート構造物とするために、目標とす べき遮水性能を設定し、自己修復による補修効 果の定量的な評価を行うことで、実用に耐えう る形態とする必要があるものと考えられる。

【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,並びに大 崎総合研究所(社長:杉田稔氏)との共同研究とし て実施された。また EVA フィルムは日本ユニ カ・PE 機能材料事業部の長野様よりご提供頂い た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 新エネルギー・産業技術総合開発機構:平成
 15年度成果報告書 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構築」委託業務成果報告書,p7,2004.5
- 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築物の 耐久性設計施工指針(案)・同解説, p.37, 2004.3
- 3) 張炳國ほか: 導電性酸化物を含むアルミナ繊 維/ガラス複合材料の作製と歪-電気抵抗関係, Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol. 112, No. 7, pp.400-404, 2004.7
- Tsukamoto, M. and Woener, J.D. : Permeability of cracked fiber-reinforced concrete, Darmstadt Concrete, 6, pp.123-135, 1991