

論文 ひび割れへの補修剤浸透に関する実験的検討

西脇 智哉*1・三橋 博三*2・郡司 幸弘*3

要旨: コンクリート内部に埋設される補修剤保護パイプを利用した自己修復コンクリートの開発を目的として、ひび割れ中に放出される補修剤を模した液体の浸透状況を実験により確認した。その結果、液体のひび割れ中の挙動は面積速度によって記述が可能であること、この面積速度は液体の粘度と注入圧力、ひび割れ幅および調合に影響を受けることが分かった。また、これらの知見から、補修剤のひび割れへの浸透状況を予測し、自己修復コンクリートに必要なパイプネットワークの配置計画を行うことが可能となった。

キーワード: 補修剤, 粘度, 注入圧力, ひび割れ幅, 面積速度, 自己修復コンクリート

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、発生したひび割れに対して自動的に補修剤を供給・充填させてこれを塞ぐ、自己修復コンクリートの開発に取り組んできた。このための手段として、図—1に示すように、補修剤を保護するためのパイプをコンクリート内部に予め埋設することを提案してきた。すなわち、ひび割れの発生をトリガーとして、この埋設パイプが破れる等して内包している補修剤をひび割れへと放出させるものである。これまでの基礎的な検討から、この提案コンセプトは有効なものと確認された¹⁾。

この自己修復システムを、実際のコンクリート構造物に適用するためには、例えば人間の体に血管や神経が張り巡らされているように、上述の補修剤保護パイプがコンクリート構造物の表面を網羅する形で、ネットワーク状に組み込まれる必要がある。一方で、中空もしくは未だ固まらない補修剤を内包するパイプネットワークをコンクリート中に埋設することは、力学的な欠点となる可能性がある。また、施工の簡便さやコストの面からも、なるべく疎な配置によって表面を網羅することが望ましい。しかし、発生するひび割れ幅や、使用する補修剤の粘度などによって、補修剤の浸透範囲は大きく異なるものと考えられる。ここでは、対象とするひび割れ幅に応じた最適なパイプネットワークの配置計画を検討することを目的として、セメント系複合材料中に設置された中空パイプから、ひび割れへと放出される液体の挙動を実験により確認する。

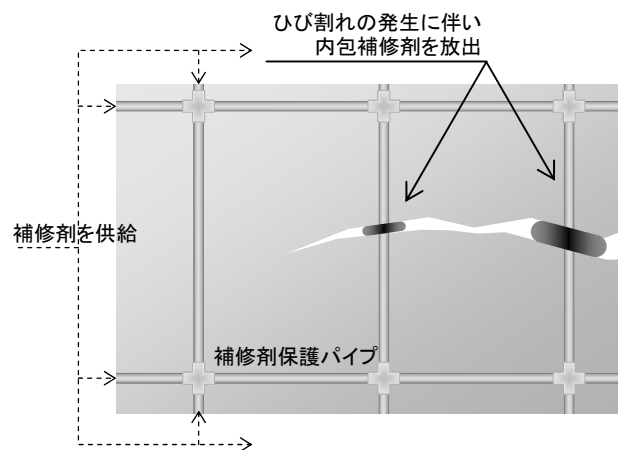
2. ひび割れへの補修剤の浸透

上村らは、ひび割れ補修を目的とした表面からの樹脂注入工法に関する検討として、ひび割れを生じさせた供試体に対して各種注入工法によって注入実験を行い²⁾、

ひび割れ幅、注入樹脂の粘度および注入圧力をパラメータとして、以下の(1)式によって定式化を行っている³⁾。

$$Sr = ah^2P/\mu \quad (1)$$

ここに、 Sr : 面積速度[cm^2/s], a : 材料により異なる特性値, h : ひび割れ幅[mm], P : 注入圧力[kgf/cm^2], μ : 注入樹脂の粘度[p]である。ただし、原著のまま重力単位系で示す。これは、ポワズイユの法則による平板間を移動する粘性流体の速度式と類似したものである。本研究でもこれを援用し、ひび割れ幅と注入圧力、補修剤の粘度をパラメータとして検討を行う。上村らの定式化は、普通コンクリートの表面から注入し、ひび割れ内部で面状に広がる補修剤を観察する実験により行われた。しかし、提案する自己修復コンクリートでは、補修剤はひび割れの内部から放出される。また、コンクリート構造物の全体を網羅するよりも、構造物の表面を覆う形での適用が適切であると考えられる⁴⁾ことから、奥行き方向よりも、構造物の表面を線状に浸透することを考慮する必要がある。更に、ひび割れ幅が過大に進展してしまった場合には、樹脂等の補修剤のみでは十分な修復を行うこ



図—1 自己修復機能付与の手法

*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 工博 (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻博士前期課程 (会員外)

とができないものと危惧される。そのため、ひび割れ幅の制御を目的として、普通コンクリートではなく FRCC（繊維補強セメント系複合材料）とすることが望ましい。これらの点を考慮し、以下のように実験を計画した。

3. 実験概要

液体を注入するための孔を設けた供試体を作製し、これに引張载荷試験によってひび割れを与え、外部から供給される液体が、この孔からひび割れへと浸透する様子を観察する。

3.1 供試体

供試体に使用した材料を表—1に示す。調合は、繊維混入量以外を一定とし、 $W/B=44.1\%$ 、 $SP/B=0.9\%$ 、 $SF/B=15\%$ 、 $S/B=45\%$ とした。ただし、W:水、B:C+SF、C:セメント、SF:シリカフューム、SP:混和剤、S:細骨材であり、全て重量比とする。繊維混入率は、表—2に示す実験パラメータにあるように、体積比で0%、0.5%、1.0%、1.5%の4水準とした。図—2に供試体の形状を示す。供試体の中央には内径1.6mmの孔が設けられている。これは、同径のピアノ線を型枠中にセットした上で打設を行い、脱型時にこのピアノ線を引き抜くことで設置した。この孔の両端には内径2mmの金属パイプが、浸透試験の際にゴムチューブを連結するために取り付けられている。

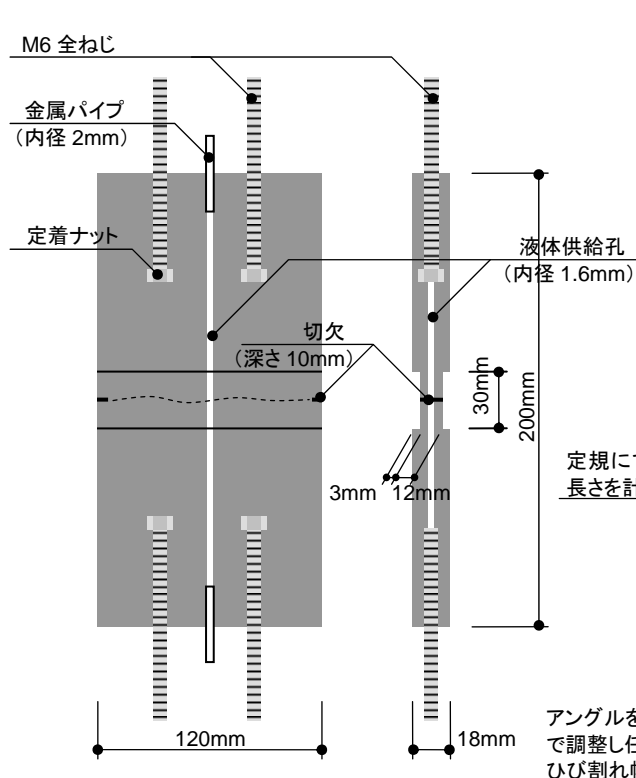
3.2 引張载荷試験

浸透試験に先立って、引張载荷試験を行って供試体に

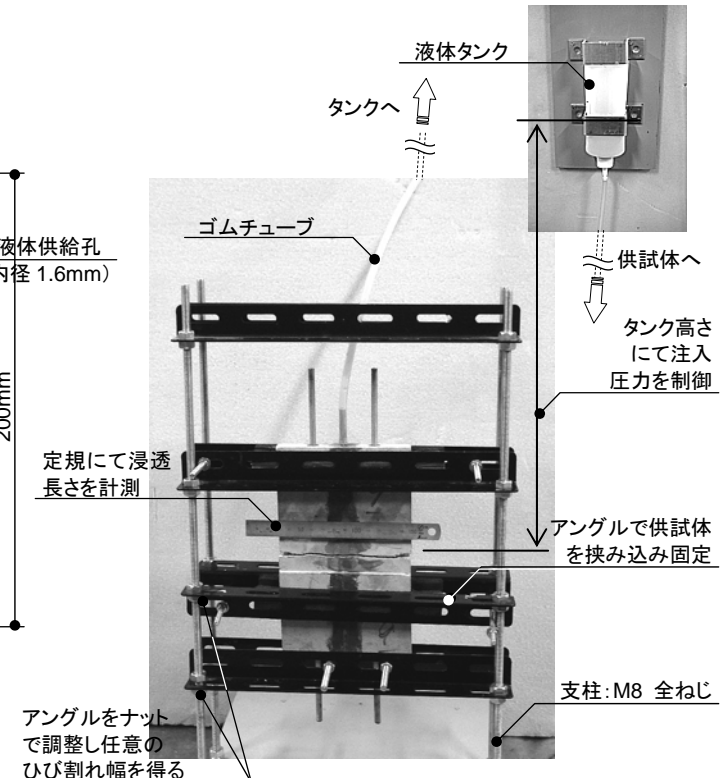
ひび割れを生じさせた。载荷にはねじ式の万能試験機を用い、供試体両端の全ねじを通じて引張载荷試験を行う。このときに生じるひび割れの位置を供試体中央部に限定するために、供試体の中央部の両側に溝を設けて薄い形状とした上で、両側に深さ10mmの切欠を設けた。载荷中は荷重と切欠部分での開口変位を計測し、所定のひび割れ幅が得られた時点で除荷した。

3.3 浸透試験

ひび割れを生じさせた供試体は、引張载荷試験後に十分に乾燥させた後、図—3に示す架台に固定して補修剤を投入した。供試体中の孔には、投入する液体のタンクがゴムチューブを通じて連結されている。結果、この液体が、自重によって供試体内部の孔を通してひび割れへと供給される。液体の注入圧力は、ひび割れ位置からこのタンク内の水面高さによって制御した。また、ここでは補修剤の代わりに粘度調整剤（水性会合型増粘剤）を用いて任意の粘度に設定し、観察を容易にするために蛍光染料で着色した水を使用した。供試体はアングルによって支柱間に固定されており、このアングルを上下させることでひび割れ幅の調整が可能となっている。架台に固定した後、顕微鏡によってひび割れ幅を測定し、所定のひび割れ幅となっていることを確認した。実験パラメータは表—2に示すように、供試体の調合（繊維混入率）とひび割れ幅、補修剤を想定した液体の粘度とこれを注入する圧力となっている。ひび割れ内へ液体が浸透していく様子を、目視で観察すると共にビデオ



図—2 供試体の形状



図—3 浸透試験

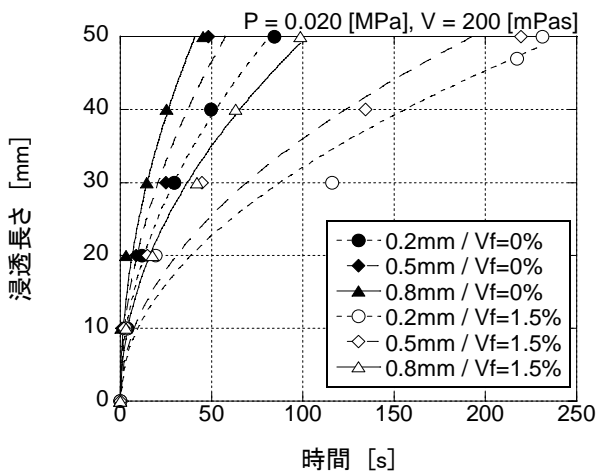
オで撮影し、供試体表面のひび割れに液体が確認された時点からの時間と、液体供給孔を設けた供試体中心からひび割れ通って液体が浸透する長さの関係を、15分間に亘って測定した。この浸透長さは、供試体両側で測定される平均値とした。試験は20℃に管理した実験室内で行い、温度変化による粘性への影響を極力排除した。

表-1 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント, $\rho=3.14$
細骨材	5号ケイ砂, $\rho=2.61$
混和材	シリカフューム, $\rho=2.2$
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤, $\rho=1.07$
繊維	PVA 繊維, $L=6\text{mm}, \sigma=40\mu\text{m}, \rho=1.30$
鉄筋	M6 全ねじ, ユニクロめっき

表-2 実験のパラメータ

繊維混入率 Vf [vol.%]	0, 0.5, 1.0, 1.5
ひび割れ幅 W [mm]	0.2, 0.5, 0.8
粘度 μ [mPa·s]	200, 400, 700
圧力 P [MPa]	0.010, 0.015, 0.020



(a) 時間と浸透長さの関係

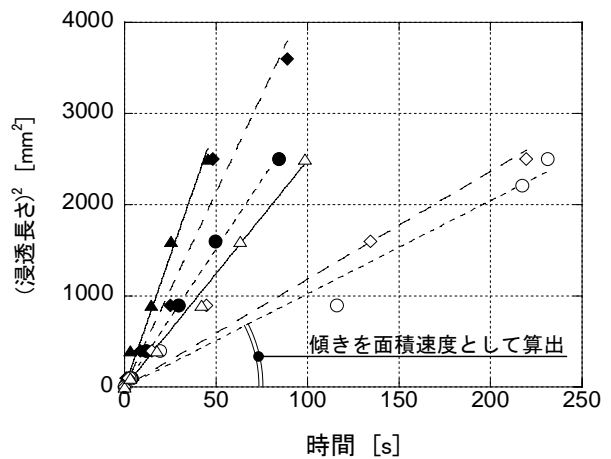
4. 実験結果

4.1 面積速度

本実験では、ひび割れへの浸透状況を示す指標として、ひび割れへの浸透長さの2乗の、時間による変化率を採用する。これは、既往の研究でも取り扱われている面積速度と同様の指標となるため、ここでは便宜上、面積速度と呼ぶこととする。図-4(a)に示されるように、直接計測される浸透距離は、時間の平方根に比例する。このため、図-4(b)のように、それぞれの試験条件ごとに浸透長さの2乗が時間に概ね比例していることが確認できる。このときのグラフの傾きが、本実験で採用する面積速度となり、この値が大きいほどひび割れ中に速く浸透する。

4.2 調合と面積速度の関係

図-5に、繊維混入率と面積速度の関係を示す。この図から、繊維混入率が高くなるにつれ、ひび割れへと浸透する速度が小さくなることを確認できる。このことは、図-6の写真からも確認できるように、ひび割れ自体の形状やひび割れ表面での繊維の存在もしくは面の粗さ



(b) 面積速度の算定

図-4 時間と浸透長さの関係

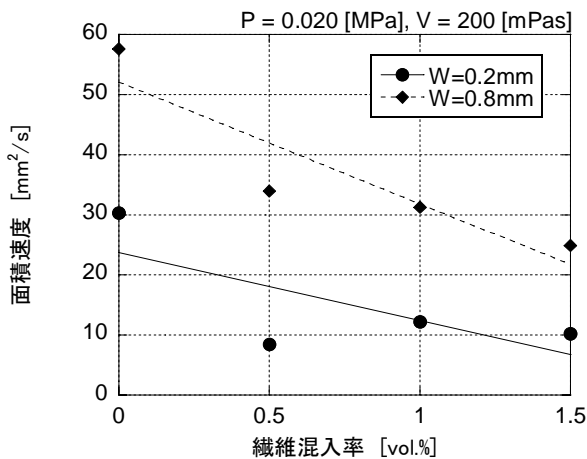


図-5 繊維混入率と面積速度の関係

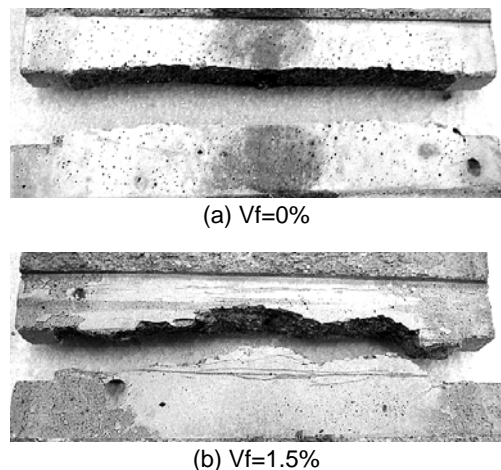


図-6 繊維混入によるひび割れ形状の変化

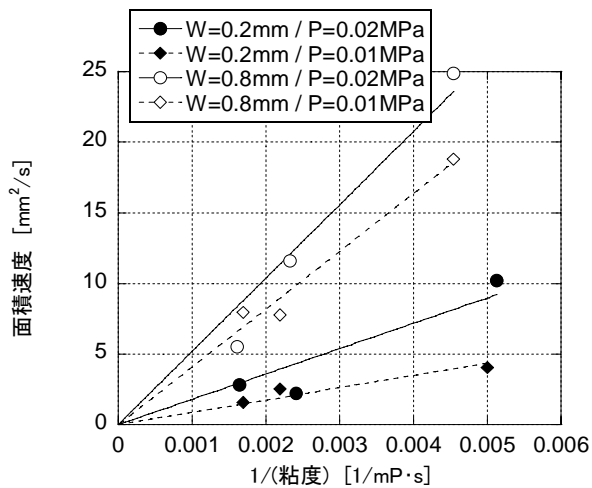


図-7 粘度の逆数と面積速度の関係

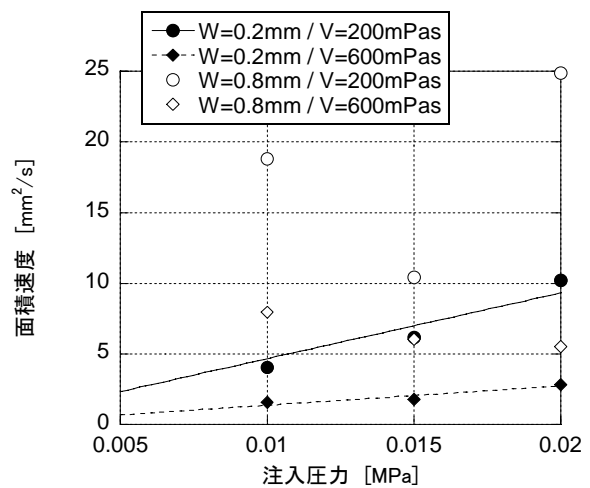
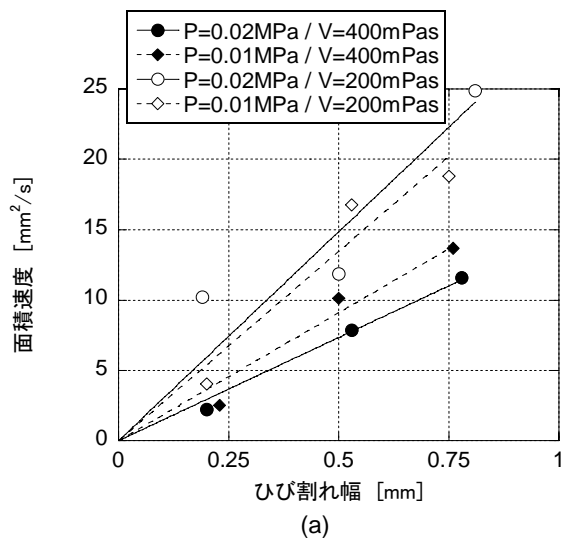
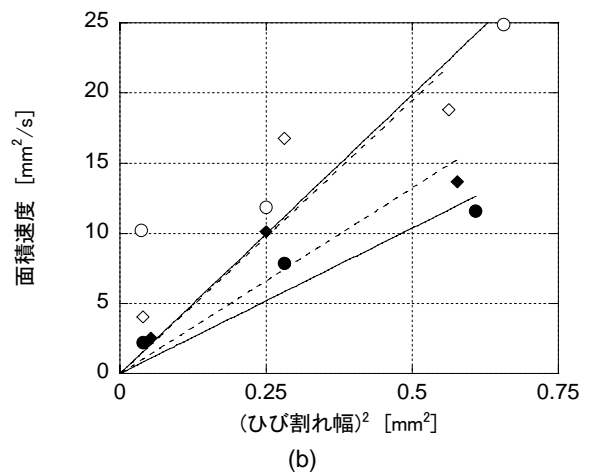


図-8 注入圧力と面積速度の関係



(a)



(b)

図-9 ひび割れ幅およびその2乗と面積速度の関係

等が、繊維の混入によって複雑になったためと考えられる。この影響は、使用材料等の違いも含めた調合全体によって決まると考えられるが、これ以降の実験では、ひび割れ制御に優れた繊維混入率 1.5%の調合について検討を行う。

4.3 注入圧力および粘度と面積速度の関係

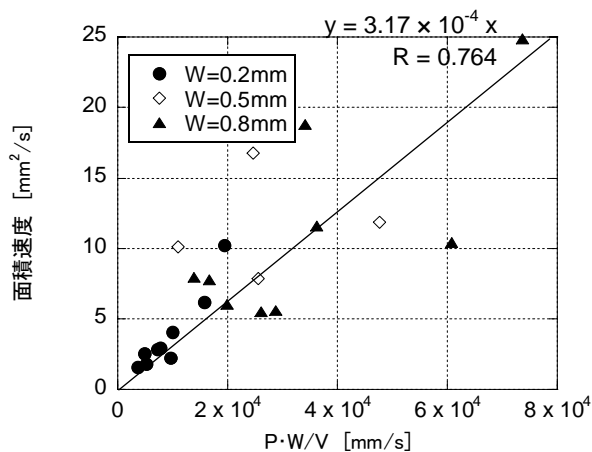
図-7および図-8は、それぞれ粘度の逆数と面積速度および、注入圧力と面積速度の関係である。図-7からは、各試験条件において、粘度の逆数と面積速度の間に正の相関があることが確認される。また、同じひび割れ幅では注入圧力が大きい方が、注入圧力が同じならばひび割れ幅が大きい方が面積速度は大きくなり、前述の(1)式と同様の傾向が見られる。

一方で図-8からは、ひび割れ幅が0.2mmの場合に注入圧力と面積速度の間に正の相関が見られるが、ひび割れ幅が0.8mmの場合には、このような相関が見られない。特に、注入される液体の粘度が小さい場合にこの傾向が顕著である。これは、ひび割れ外部への「だれ」の影響

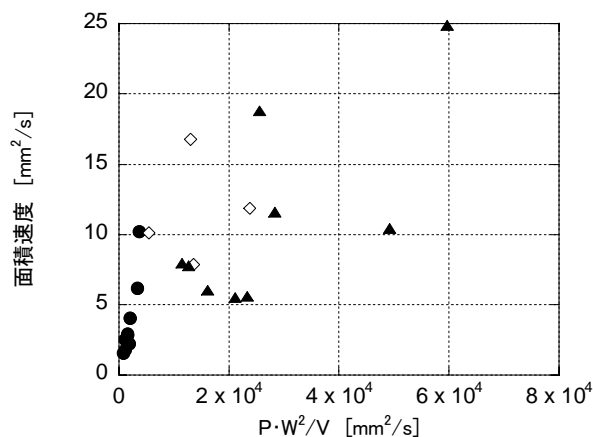
が大きいためと考えられる。本実験で使用した供試体の形状は、コンクリート構造物の表面を、自己修復機能を持つレイヤーで覆うものと想定したため、形状を薄片状とした。そのため、液体はひび割れ外へと失われるが、ひび割れ幅が大きい場合にはこの量が多くなる。このことから、補修対象とするひび割れ幅によって、最適な粘度と注入圧力が存在するものと示唆される。

4.4 ひび割れ幅と面積速度の関係

図-9に、(a)ひび割れ幅および(b)その2乗と面積速度の関係を示す。前述のポワズイユの法則から導かれる式(1)では、ひび割れ幅を2乗したものが面積速度と比例するとされている。しかし、これらの図からは、面積速度はひび割れ幅そのものと比例関係にあるものと考えられる。この傾向は、ひび割れ幅が大きい場合に面積速度が小さめに出るという形で現れており、液体の粘度が小さい場合(図中の白抜きプロット)に強い。そのため、これも、前述と同様に液体の「だれ」により、供試体外部へ液体が失われてしまった影響と考えられる。



(a) ひび割れ幅と比例



(b) ひび割れ幅の2乗と比例

図—10 全てのパラメータを考慮しての面積速度との関係

4.5 各パラメータと面積速度の関係

図—10は、式(1)に倣って液体の粘性，注入圧力およびひび割れ幅のそれぞれを考慮に入れての面積速度との関係である。ただし，(a)図ではひび割れ幅をそのまま，(b)図ではひび割れ幅を2乗して，面積速度との比例関係を確認した。(a)図では，ある程度のばらつきが見られるものの，概ね良好な相関が得られている。すなわち，面積速度は，補修剤の注入圧力およびひび割れ幅に比例し，粘度とは反比例の関係にあると考えられる。また，このばらつきに関しても，特に大きく外れているプロットはひび割れ幅が大きいものであり，更に具体的には，粘性が小さいものである。すなわち，「だれ」の影響が最も大きい場合と考えられる。逆に，コンクリート表面からの補修剤の流出を抑えることのできる，修復の対象とするひび割れ幅に応じた粘度や注入圧力の設定が肝要であると考えられる。

その一方で，式(1)では，ひび割れ幅を2乗したものが面積速度と比例するとされている。しかし，前節のひび割れ幅と面積速度との関係でも見られたように，本実験の範囲内では，ひび割れ幅ごとに異なった傾きとなり，面積速度はひび割れ幅の2乗と比例関係にあるものとは言い難い。ひび割れ表面から流出する補修剤は美観性能を著しく低下させる恐れがあることから，この「だれ」も考慮に入れた定式化が今後の検討課題となる。

5. 配置計画

5.1 システム配置計画概要

前章の検討により，補修剤の粘性と注入圧力およびひび割れ幅をパラメータとして，ひび割れ内部から放出される補修剤の浸透面積速度を推定することが可能となった。ここでは，この結果を元に，効率的な自己修復システムを構築するための配置計画の検討を行う。実際に

ひび割れに放出される補修剤は，時間の経過と共に粘度が増大し，やがて硬化してひび割れを閉塞する。このときの時間を任意に設定すれば，面積速度に乗じて平方根を取ることで，それぞれの条件下におけるひび割れ中の浸透距離が求められるものと考えられる。そうして求められた浸透距離が，ひとつのパイプによって補修できる限界の範囲となるため，配置はそれ以下の間隔で行わなければならないものと考えられる。

5.2 網羅的な補修のための配置間隔の算定

コンクリート構造物の表面に，網羅的な補修剤供給が可能となるパイプの配置間隔を求める。はじめに，ひび割れ幅等の各パラメータを設定する。著者らの既往の研究では，提案する自己修復手法によって修復可能なひび割れ幅の範囲を，0.1mm~0.35mm程度と想定している⁵⁾。補修剤浸透距離は，ひび割れ幅が小さくなるほど短くなると考えられるため，ここではひび割れ幅を下限の0.1mmと仮定する。注入圧力については，現在一般的に用いられている注入工法の一つである自動式低圧注入工法で広く用いられている0.4 MPa以下とする。この工法は，低圧で補修剤をひび割れ部に注入していくもので，ひび割れ幅0.05mm程度の細かなひび割れでも補修剤を注入することができるという長所がある⁶⁾。上記の圧力値は，通常の加圧ゴム等による圧入の際の設定値であるが，ここでは実験条件と同様に，補修剤の自重のみによる圧力である0.02MPaと仮定する。また，文献6)によれば，ひび割れ幅0.5mm以下のものを補修する際には，低粘度型エポキシ樹脂を用いることが望ましいとされる。低粘度型エポキシ樹脂の粘度は，100~1000mPa・s程度であり，温度によってこの値は変化する。今回は，温度を常温(20℃前後)と仮定し，粘度は低粘度型エポキシ樹脂での標準的な値であり，実験でも用いた400mPa・sと仮定する。

ここまで、各パラメータについての値を仮定した。これらの値と、図—10(a)のグラフの傾きから求められる、材料固有の特性値(式(1)における a に当たる)を用いて面積速度を算出する。特性値 a の値はこの図より 3.17×10^{-4} となる。このとき、浸透する面積速度は以下の式(2)によって算出できる。

$$Sr = aPW/\mu \quad (2)$$

ここに、 Sr : 面積速度[mm²/s], a : 材料により異なる特性値, W : ひび割れ幅[mm], P : 注入圧力[MPa], μ : 注入樹脂の粘度[mPa・s]である。この式(2)を用いて、上述のように粘度を400mPa・s, 圧力を0.02MPa, ひび割れ幅を0.1mmとして計算すると、面積速度 Sr は1.59mm²/sとなる。

次に、補修剤の硬化までにかかる時間を想定し、浸透距離を求める。エポキシ樹脂の硬化速度は温度によって異なり、高温であるほど硬化は速く、5℃~30℃での可使時間は40~100分程度である。ここでは、可使時間を60分と設定し、計算の簡便のために、注入開始から60分までは一定の粘度を保ち、その後硬化し、浸透が止まるものと仮定する。この場合、60分経過後の浸透距離は、式(2)により求めた速度 $Sr=1.59\text{mm}^2/\text{s}$ に、硬化までにかかる60分(=3600s)を乗じ、平方根をとって76mmとなる。通常の自動式低圧樹脂注入工法における注入器具の設置間隔は200~300mmとされている⁶⁾が、本実験で用いた自重のみによる注入圧力では、より密なパイプの配置が必要になる。提案する自己修復コンクリートでも、加圧装置の併用等により注入圧力を増大させて、パイプの間隔を疎にすることが望ましいと考えられる。

5.3 配置計画の考察

上述の各パラメータの値の制限範囲から、配置間隔の限界値を求める。粘度については最小値である100mPa・sを、圧力には加圧装置の併用を前提として最大値となる0.4MPaを、可使時間についても最大値である100分を用いた場合、浸透距離を最も大きくできる状態と考えられる。自己修復すべきひび割れ幅を0.1mmと想定する場合、式(2)によって算定される浸透距離は872mmとなる。すなわち、0.1mm以上のひび割れを対象とする場合には、少なくとも872mm以下の間隔でパイプを配置する必要がある。一方で、季節ごとの温度変化や、経時変化に伴う粘性の低下を考慮に入れると更に小さな間隔での配置が必要になると考えられる。例えば、夏の高温時では可使時間が40分であるとすると、浸透距離は552mmとなる。また、可使時間を40分、対象とするひび割れ幅を0.2mmとした場合では、浸透距離は最大で780mmとなる。実際に適用する際には、対象とすべきひび割れ幅や使用環境などを見極めた上で配置計画を立てていくことが重要となる。

6. まとめ

本実験の範囲内で、以下のことが確認できた。

- (1) FRCC(繊維補強セメント系複合材料)供試体に生じたひび割れに対して、線状に補修剤を浸透させる際にも、浸透速度はその注入圧力に比例し、粘度の逆数に比例する。また、ひび割れ幅に関しては、既往の研究にある2乗に比例せず、そのまま浸透速度に比例する結果となった。これは試験片の薄さやひび割れ幅と粘性の関係に起因する「だれ」が原因であると考えられるが、その詳細については今後の課題である。
- (2) ひび割れ幅、補修剤の粘性およびその注入圧力の逆数の積と、面積速度の間に比例関係が確認された。このとき、ひび割れ表面の粗さなどに起因する材料固有の特性値が比例係数となる。このことから、各パラメータに応じた面積速度の算出が可能となった。
- (3) 算出した面積速度を元に、補修剤の浸透距離を算出することができた。さらにその浸透距離から、想定するひび割れ幅ごとに、提案する自己修復システムの配置計画が可能となった。

謝辞

本研究は平成18年度科学研究費助成金(若手研究(B): 課題番号18760412)の一部として実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 西脇智哉, 三橋博三: 高靱性繊維補強セメント複合材料の自己修復機能付与に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.57/2003, pp.493-500, 2004.2
- 2) 上村克郎, 小西敏正, 橋高義典: 鉄筋コンクリート造のひび割れ補修における樹脂注入工法に関する研究, セメント技術年報, Vol.41, pp.154-157, 1987
- 3) 上村克郎, 小西敏正, 橋高義典: 鉄筋コンクリート造のひび割れ補修における樹脂の充填程度の数式化, セメント技術年報, Vol.42, pp.491-494, 1988
- 4) 國井僚, 三橋博三, 西脇智哉, 三浦和晃: 発熱デバイスを用い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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp1413-1418, 2004.6
- 5) 郡司幸弘, 三橋博三, 西脇智哉, 三浦和晃: コンクリートへの自己修復付与を目的としたシステム配置計画の解析的検討, 第60回セメント技術大会講演要旨, pp326-327, 2006
- 6) 低圧樹脂注入工法協議会: 自動式低圧樹脂注入工法ガイドブック, 2003