

論文 ポリウレタン樹脂の平行間隙モデルへの注入実験

瀬野康弘^{*1}・渡邊弘子^{*1}・大西 聰^{*2}

要旨:コンクリート構造物のひび割れなどの補修に使用される注入充填材料の一つであるポリウレタン樹脂の注入性状を把握するために、ひび割れをモデル化した平行間隙への注入実験を行った。実験においてはひび割れを模擬するためにモデルの内面には粗面を設ける工夫をした。実験の結果、ポリウレタン樹脂の注入性状（注入速度）は、エポキシ樹脂に関する既往の研究と同様の式で表現できることが判明した。さらに注入速度式の係数は、間隙内面の粗度を表現する平均粗さなどの指標で推定できることを示した。

キーワード:ひび割れ、補修、注入、注入速度、ポリウレタン樹脂、平均粗さ

1.はじめに

コンクリート構造物のひび割れなどの補修に使用される注入充填材料には、エポキシ樹脂、アクリル樹脂、ポリウレタン樹脂などの有機系材料および超微粒子セメントを主体とした無機系材料がある。これらの材料は決して安価な材料ではないため、ひび割れなどの間隙への注入充填時に材料ロスを抑えることは言うまでもなく、注入口の配置、注入時間の管理など適切な施工計画・管理を行うことが重要である。その手段の一つとして注入速度（注入面積）の予測が挙げられる。注入速度の予測に関しては、エポキシ樹脂^{1),2)}、アクリル樹脂¹⁾、超微粒子セメント系³⁾についての研究があり、ひび割れ幅や注入圧力、使用材料の粘度などによって説明可能であることが報告されているが、その数は多くない。またそれらの研究では、注入速度式に含まれる係数について、その実験で得られた値を提示しているのみ^{2),3)}で汎用性のあるものではない。

本研究では、漏水の注入止水材料として実績が多いが、過去に研究報告の少ないポリウレタン樹脂（以下ウレタン樹脂と略称）を取り上げ、その基本的注入性状を把握するとともに、既往の実験式（注入速度式）との比較を行うために、

平行間隙モデルへの注入実験を行った。さらに実験においては、注入される間隙の内側表面の粗度の影響についても考慮を加えた。

2. 実験概要

2.1 実験装置

注入実験装置を図-1および図-2に示す。装置は、鋼製のフレーム内に2枚のアクリル板（t=20mm）を所定の間隙が得られるように金属製のスペーサを挟んで設置出来るようにしたものである。注入面の大きさは500mm×1000mmとし、アクリル板の片側長辺中央に注入口（φ10mm×間隙幅）を設け、空気抜き口は図-1に示すように3箇所設置した。注入材料は別に設けたタンクからコンプレッサーの空気圧をレギュレータで調節して送り込めるようにした。またアクリル板固定枠には注入時の板のはらみを抑えるために補強材を取り付け、所定の間隙幅を確保するためにアクリル板間の外周には板状のスペーサを、また補強材直下などの要所には滴状のスペーサを設置した。さらにアクリル板を設置する際のボルト締め付け時には締め付け順序および締め付けトルクを一律にすることとした。

*1 東急建設（株）技術研究所土木研究部土木材料研究室（正会員）

*2（株）バッサー技術部

2.2 実験材料および実験ケース

実験に使用したウレタン樹脂は、粘度の異なる2液疎水性ポリウレタン樹脂1種類と1液親水性ポリウレタン樹脂2種類である。各ウレタン樹脂の特徴を表-1に示す。なお材料U1は、2液性の材料であるが実験においては主剤のみを使用した。実験時の各材料の粘度 μ (dPa·sec)は、注入の前後、および1日の間での変化はなく、U1が0.5~0.6、U2が3.0、U3が4.1であった。

また、ひび割れなどの内面の粗さの状態を模擬するために、建築の内装材として使用されているエンボス加工された壁用クロス材をアクリル板に貼り付けた。ただし片側のアクリル板には注入状況を観察するためにクロス材ではなく建築装飾用の透明フィルムを貼り付けた(図-2参照)。クロス材の表面粗さの指標としては平均粗さRaおよび最大高さRyを考え、JIS B 0601に準じて測定した。使用したクロス材は2種類である。表-2に透明フィルムおよびクロス材の平均粗さおよび最大高さを、表-3に実験時の透明フィルムおよびクロス材の組合せを示す。

注入圧pは、0.05, 0.10, 0.29MPa、間隙幅wは、0.5, 1.0, 1.5mmとした。表-4に実験ケースを示す。ケース番号は材料-粗面状態-間隙幅-注入圧の順に割り付けた。間隙幅および注入圧は小数点を除いた2桁で示した。なおケース番号の注入圧はkgf/cm²単位で示している。例えば材料U1を使用し、粗目の幅1.0mmの間隙に3.0kgf/cm²(0.29MPa)の圧力で注入する場合は、U1C1030となる。

2.3 実験方法

実験は温度20°C、湿度60%R.H.の恒温恒湿室内で行った。注入装置は、材料の重力による流下(だれ)の影響を除くため

表-2 透明フィルム、クロス材の粗さ指標

一般名称	平均粗さ Ra(μm)	最大高さ Ry(μm)
透明フィルム	0.39	7.4
クロス材A	34.4	315
クロス材B	58.9	585

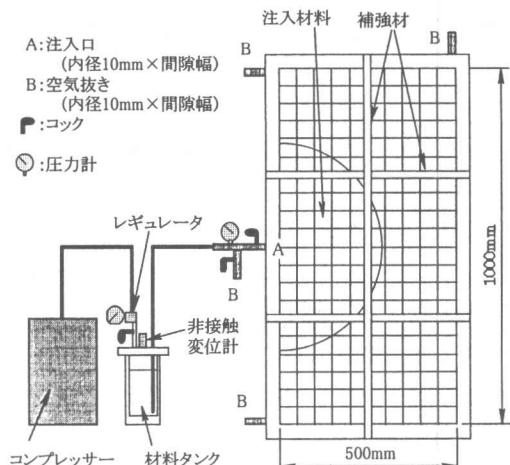


図-1 注入実験装置の概要

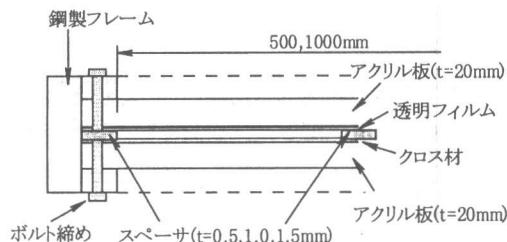


図-2 間隙モデルの詳細(装置断面図)

表-1 ポリウレタン樹脂の特徴

材料記号	一般名称	外観	比重	粘度(cps)	
				メーカー名	実験時
U1	疎水性ポリウレタン樹脂(主剤)	褐色透明液体	1.076~1.096	40~60(25°C)	54~64(20°C)
U2	親水性ポリウレタン樹脂	無色~淡黄色透明液体	1.14	250(20°C)	297(20°C)
U3	親水性ポリウレタン樹脂	無色~淡黄色透明液体	1.13	400(20°C)	405(20°C)

表-3 透明フィルム、クロス材の組合せ

粗面記号	組合せ	平均粗さの平均 Ra'(μm)	最大高さの平均 Ry'(μm)
目無(N)	透明フィルム+透明フィルム	0.4	7
細目(F)	透明フィルム+クロス材A	17.4	161
粗目(C)	透明フィルム+クロス材B	29.7	296

表-4 実験ケース

材料記号	粗面状態	目無(N)			細目(F)			粗目(C)			
		間隙幅(mm)	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
U1	0.05		○			○			○		
	0.10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	0.29		○			○			○		
U2	0.10		○			○			○		
	0.10		○			○			○		
U3											

に水平横置きとした。

所定の厚さ（間隙幅）のスペーサを挟んで透明フィルムまたはクロス材を貼り付けたアクリル板を装置に設置した後、注入口手前まで材料を送り込み、注入口側の圧力が所定の圧力になるようにレギュレータを調節した。次いで注入口のコックを開放し充填の状況を天井に設置したデジタルビデオカメラで記録した。注入時には材料タンクの液面の下がり量および注入圧力を所定のインターバル（1～15秒）で記録した。材料の粘度は注入前後にB型粘度計により測定した。

注入は、注入材料の充填の先端が40cmを超えた時点での停止した。実験終了後、ビデオカメラに記録した画像を出力しプラニメータにより面積を測定するとともに、同時刻の材料タンクの液面下がり量にタンクの断面積を乗じて注入量を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 注入速度

注入状況の一例を写真-1に示す。写真でもわかるように、ウレタン樹脂はエポキシ樹脂と同様²⁾にほぼ同心半円状に充填されていくことが認められた。

図-3は、材料U1を粗目(C)の間隙に設定注入圧0.1MPaで注入した時の材料タンクの液面

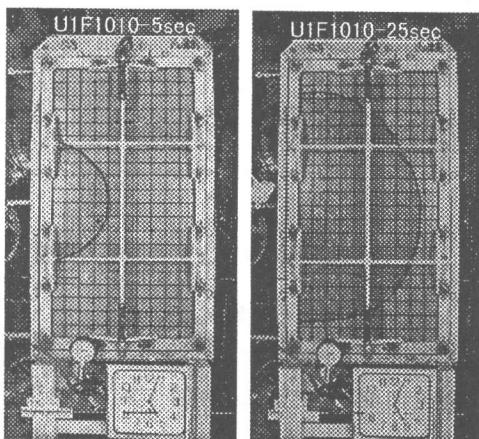


写真-1 注入状況の一例

下がり量から求めた注入量Qの経時変化を目標間隙幅ごとに示したものであり、図-4は、材料U1を目標幅1.0mmの目無(N)の間隙に注入した時の注入面積Sの経時変化を設定注入圧ごと

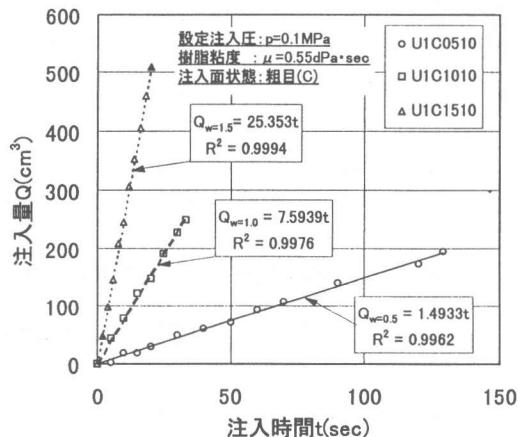


図-3 注入量の経時変化

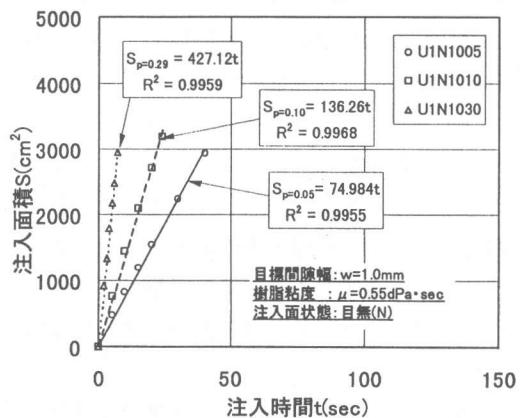


図-4 注入面積の経時変化

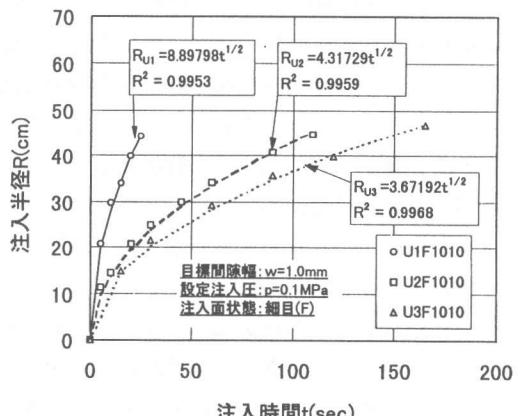


図-5 注入半径の経時変化

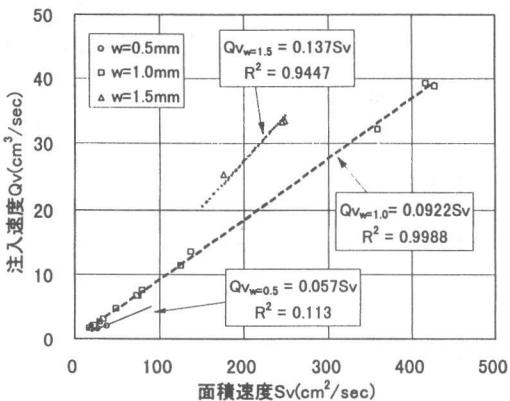


図-6 面積速度と注入速度の関係

に示したものである。また、図-5は目標幅1.0mmの細目(F)の間隙に設定注入圧0.1MPaで注入した時の注入面積から求めた注入半径Rの経時変化の一例を材料(粘度)ごとに示したものである。図中には各条件ごとに最小自乗法で回帰した結果を合わせて示した。これらの図から注入量および注入面積は時間に比例して増加することが、また注入半径は時間の平方根に比例して増加することがわかる。したがって各条件での注入速度 Q_v および注入面積速度(以下面積速度) S_v は、回帰直線の係数(勾配)として求めることができる。以降の考察では、このようにして求めた注入速度および面積速度を用いた。

図-6は、面積速度と注入速度の関係を目標間隙幅ごとに示したものである。それぞれの原点を通る直線回帰結果は良い相関を示している。面積速度、注入速度とも一定であることから回帰直線の傾きが今回の実験における平均的な間隙幅(勾配の単位:cm)に相当する。この図よりほぼ目標とする間隙幅で実験が実施できたことが確かめられる。よってデータ整理においては各条件ごとに注入速度を面積速度で除して求めた間隙幅wを用いた。

また注入時の設定圧力は、コックを開放すると同時に1~2割の間で低下することが確認され、データの整理においてはそれぞれの注入口の実測圧力pを用いた。

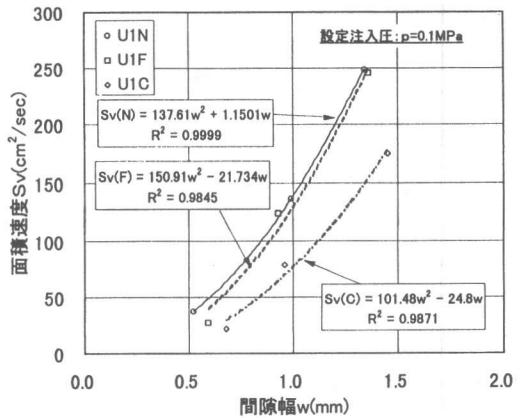


図-7 間隙幅と面積速度の関係

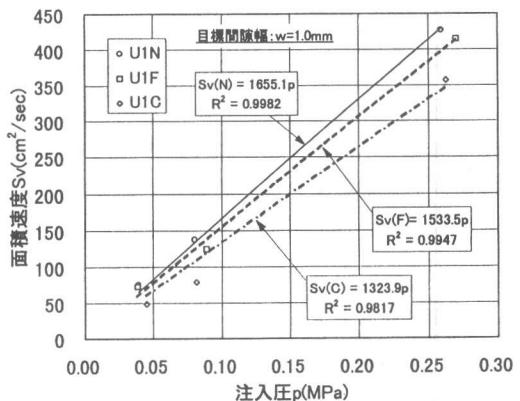


図-8 注入圧と面積速度の関係

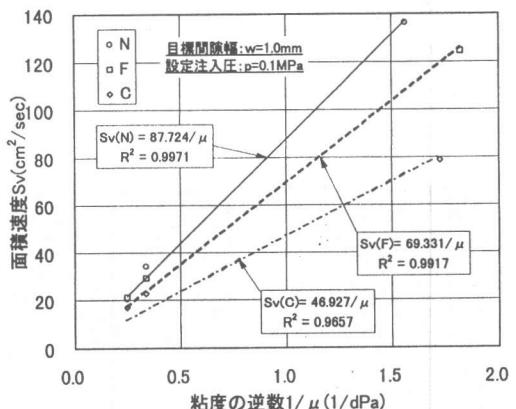


図-9 粘度の逆数と面積速度の関係

3.2 各種要因と面積速度

図-7は設定注入圧が0.1MPaの時の実測間隙幅と面積速度の関係を、図-8は目標間隙幅が1.0mmの時の実測注入圧と面積速度の関係を、図-9は目標間隙幅が1.0mm、設定注入圧

が0.1MPaの時の材料粘度の逆数と面積速度の関係を示したものである。各図には実現象に合致させるように原点を通る曲線または直線で回帰した結果を示した。

これらの図より面積速度は間隙幅の二乗に比例することが、また注入圧および材料粘度の逆数に比例することがわかる。

図-7～図-9で示された傾向は既往のエポキシ樹脂に関する研究²⁾と同様である。しかし、いずれの図においても実測間隙幅、実測注入圧が少しづつ異なるため粗面の影響が不明確である。そこで上村らが提示した式(1)の係数を除く右辺により求まる値と実測された面積速度の関係を図-10にまとめた。図中には上村らの式²⁾とともに粗面の状況別に原点を通る直線で回帰した結果を示した。また表-5に図-10で求められた回帰係数 α （以後便宜上、粗面係数と称す）をまとめて示した。

$$Sv = \alpha w^2 p / \mu \quad (1)$$

ここに

Sv: 注入面積速度 (cm²/sec)

w: ひび割れ幅 (cm)

p: 注入圧 (MPa)

μ : 材料の粘度 (dPa·sec)

α : 回帰係数 (粗面係数)

図-10からウレタン樹脂の面積速度は、エポキシ樹脂と同様²⁾に間隙幅の二乗、注入圧、および材料粘度の関数で表現できることがわかる。また粗面係数は、目無(N)、細目(F)、粗目(C)の順に大きくなっている。材料の面積速度（注入速度）は間隙幅、注入圧、材料の粘度以外にも間隙内面の粗度の影響を受け、内面の状態が粗いほど注入速度は遅くなることが明らかとなった。

なお、最も平滑な面である目無の場合の粗面係数の値でも、上村らの実験で求められた粗面係数より小さくなっている。その理由としては、注入材料の違い（エポキシ樹脂とウレタン樹脂）

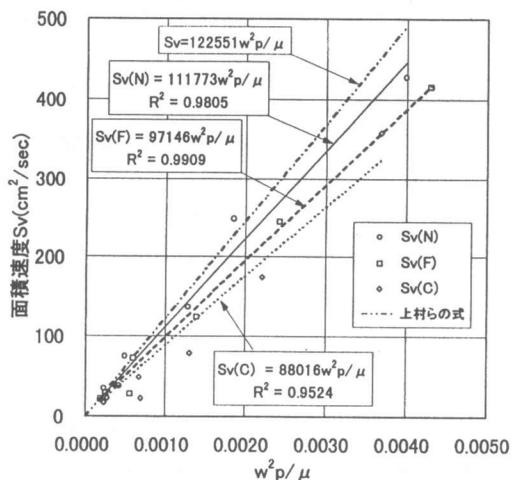


図-10 間隙幅、注入圧、粘度
と面積速度の関係

表-5 粗面係数の回帰結果

条件	粗面係数 α	相関係数R
目無(N)	1.118E+05	0.990
細目(F)	9.715E+04	0.995
粗目(C)	8.802E+04	0.976
上村式 ²⁾	1.226E+05	—

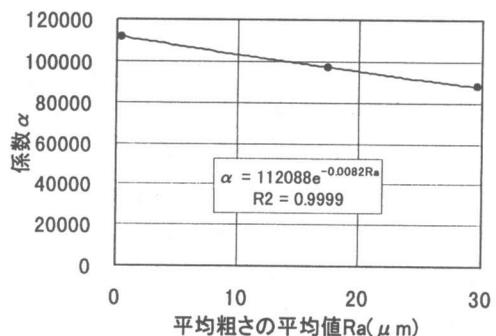


図-11 平均粗さと粗面係数の関係

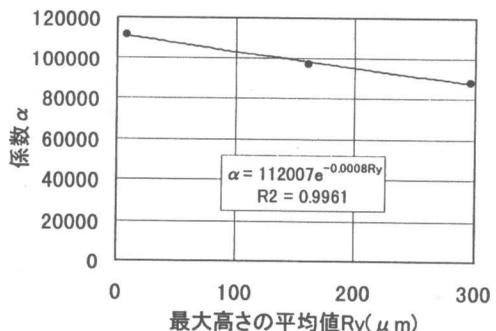


図-12 最大高さと粗面係数の関係

や注入対象とした材料の違い（クロス材とコンクリート）の影響などが考えられるが、今後の検討課題である。

図-11、図-12は平均粗さ Ra と 粗面係数との関係、最大高さ Ry と 粗面係数との関係をそれぞれ示したものである。間隙モデル内側の粗面は、透明フィルムおよびクロス材を組み合わせて間隙内面を模擬していることから、各粗さの指標は使用したクロス材と透明フィルムの平均値を用いた。これらの図より式(1)における粗面係数は式(2)および式(3)に示すように表面の粗さを現す平均粗さ や 最大高さなどの指標の指数で推定できることがわかる。

$$\alpha = 112088 e^{-0.0082Ra} \quad (2)$$

$$\alpha = 112007 e^{-0.0008Ry} \quad (3)$$

ここに

α : 粗面係数（式(1)における回帰係数）

Ra: 平均粗さ（ μm ）

Ry: 最大高さ（ μm ）

4.まとめ

コンクリート構造物のひび割れなどの補修に使用される注入充填材料の一つであるポリウレタン樹脂の注入性状を把握するために、ひび割れを模擬した平行間隙への注入実験を行った。実験においてはひび割れを模擬するためにモデルの内面にはエンボス加工された壁用クロス材を用いて粗面を設ける工夫をした。

本実験の結果、以下のことが確認された。

①ポリウレタン樹脂の注入性状（注入面積速度）は、エポキシ樹脂に関する既往の研究と同様に間隙幅の二乗、注入圧、および材料粘度の逆数の関数で表現できる。

②ポリウレタン樹脂の注入性状（注入面積速度）は、間隙幅、注入圧、材料粘度以外に、間隙内面の粗度の影響を受け、間隙内面の表面状態が粗いほど注入速度は遅くなる。

③面積速度式の係数は、粗面を表現する平均粗さ や 最大高さ の指數関数で推定できる。

今後は、同一条件で他の注入材料の注入性状を比較検討するとともに、コンクリート板などを用い、現実に近い条件での注入性状の解明を行って行く必要があると思われる。

参考文献

- 1) C.CARON : PRODUITS SPÉCIAUX POUR L'INJECTION DES BETONS FISSURES OU MICROPORÉUX , Proceedings of an International Symposium Organized by RILEM Technical Committee 52 Aix-en-Provence, pp.398-402, 1986
- 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わ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42, pp.491-494, 1988
- 3) 菊地憲司・梅原秀哲・野沢文明・吉田彌智：コンクリートのひびわれ注入材料の基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集Vol.14-1, pp.981-986, 1992