

# 論文 無機系注入材料の平行間隙モデルへの注入実験

瀬野康弘<sup>\*1</sup>・渡邊弘子<sup>\*1</sup>・井澤哲也<sup>\*2</sup>

**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無機系注入材料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、無機系注入材料の注入性状（注入速度）は、エポキシ樹脂やポリウレタン樹脂と同様の式で表現でき、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、無機系注入材料、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り、補修目的に応じて使い分けられ、数多くの実績を上げている。しかし、これらの材料を用いてひび割れなどに注入補修する場合の管理手法は確立されているとは言い難い。しかもこれらの材料は、安価な材料ではないため、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量（注入面積）や注入速度の予測が挙げられる。

これらの注入材料のうち、ポリウレタン樹脂の注入性状（注入面積速度）については、エポキシ樹脂と同様に間隙幅、注入圧、および材料粘度の関数で表現でき、さらに注入される間隙内面の粗度の影響を受けることを既に報告<sup>1)</sup>した。

ここでは、注入材料としては比較的新しく、使用実績を伸ばしてきている無機系注入材料の基本的な注入性状を把握するために行った平行間隙モデルへの注入実験結果について報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験装置および方法

実験に使用した注入装置は、図-1 および図-2 に示すように鋼製のフレーム内に透明フィ

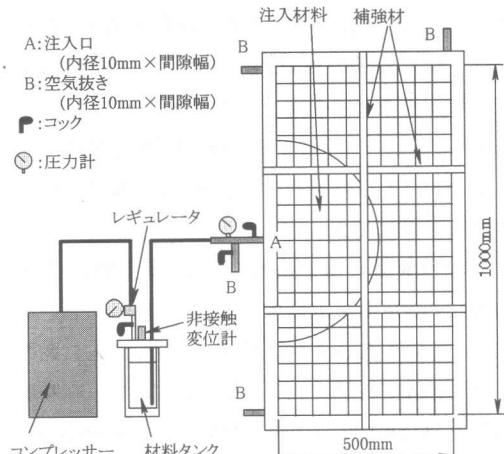


図-1 注入実験装置の概要

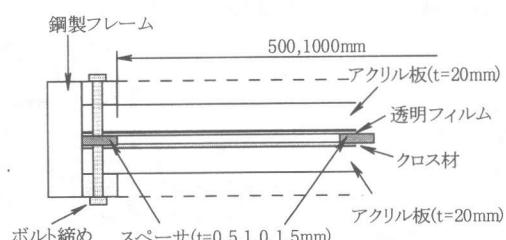


図-2 間隙モデルの詳細(装置断面図)

\*1 東急建設(株)技術研究所土木研究室(正会員)

\*2 日本総合防水(株)東京支店

表-1 使用した無機系注入材料

材料記号	名 称 <sup>(1)</sup>	主成分 <sup>(2)</sup>	配合 <sup>(2)</sup>					練上り量 <sup>(2)</sup> ①
			(W+E)/P(%)	P(kg)	W(kg)	E(l)	Ad.(m)	
C1	無機系注入材 高炉スラグ超微粒子 (平均2.8μm)	60	2.0	1.2	-	40	1.9	
C2	超微粒子無機質系 注入材 超微粒子水硬性組成物+SBR系ラバックス	75	5.0	-	3.75	-	5.8	
C3	超微粒子セメント系 注入材 無機粉末(平均4μm) + SBR系エマルジョン	74	5.0	-	3.7	-	5.8	
C4	超微粒子高性能 無機系注入材 超微粒子セメント+ 高分子エマルジョン	50	3.0	1.1	0.4	-	2.55	

<sup>(1)</sup> メーカカタログによる<sup>(2)</sup> 1セット当り

ルムまたはクロス材を貼り付けた2枚のアクリル板( $t=20\text{mm}$ )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 $500\text{mm} \times 1000\text{mm}$ とし、注入口( $\phi 10\text{mm} \times \text{間隙幅}$ )は、アクリル板の片側長辺中央に設け、空気抜き口を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むようにした。またアクリル板固定枠(鋼製フレーム)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帯状のスペーサを、また補強材直下などの要所には涙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した。

実験は装置を水平横置きとし、温度 $20^\circ\text{C}$ 、湿度60%R.H.の恒温恒湿室内で行った。注入においては、材料を注入口手前まで送り込み、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後、注入口のコックを開放し充填を開始した。

注入時には充填の状況を天井に設置したデジタル

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 $R_a'(\mu\text{m})$	最大高さの平均 $R_y'(\mu\text{m})$
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
中目(M)	透明フィルム+クロス材B	23.2	236
粗目(C)	透明フィルム+クロス材C	29.6	296

表-2 粗さ指標

一般名称	平均粗さ $R_a'(\mu\text{m})$	最大高さ $R_y'(\mu\text{m})$
透明フィルム	0.39	7.4
クロス材A	34.4	315
クロス材B	46.0	465
クロス材C	58.9	585

ルビデオカメラで記録するとともに、材料タンク内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で記録した。注入は、材料の先端が40cmを超えた時点で停止した。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。

## 2.2 実験材料および実験ケース

実験に使用した注入材料は、表-1に示すセメント系の注入材料1種類(C1)とポリマーセメント系の注入材料3種類(C2~C4)である。注入材料の流動性状を把握するために実験に先立ち実施した各材料のJロート流下時間および粘度 $\mu$ の経時変化を図-3、図-4に、Jロート流下時間と粘度の関係を図-5に示す。なお、Jロート流下時間はJSCE-F531を準用して測定し、粘度はJIS-K7117およびJIS-K5400を準用してB型粘度計(BM型)により測定した。

間隙内面の粗さの状態を模擬するために使用した壁用クロス材は3種類である。JIS B 0601に準じて測定した透明フィルムおよびクロス材の平均

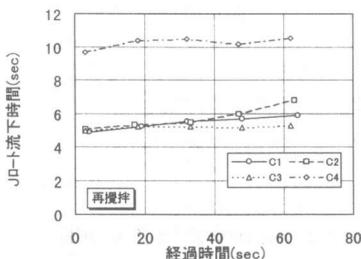


図-3 Jロート流下時間の経時変化(測定前に攪拌)

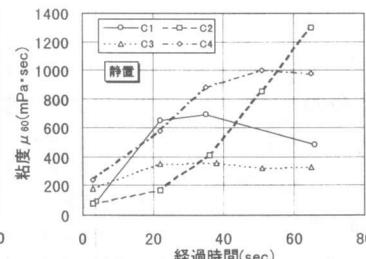


図-4 粘度の経時変化(静置)

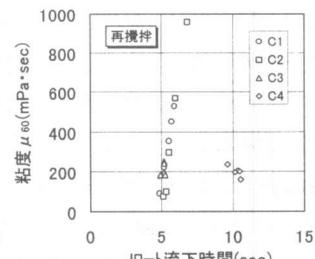


図-5 Jロート流下時間と粘度の関係

表-4 実験ケース

材料記号	粗面状態 間隙幅(mm)	目無(N)		細目(F)		中目(M)		粗目(C)	
		0.5	1.0	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C1	0.05							○	
	0.10	○	○	○	○	○	○	○	
	0.29							○	
C2	0.05						○		
	0.10	○	○	○	○	○	○	○	
	0.29						○		
C3	0.05				○				
	0.10	○	○	○	○	○	○	○	
	0.29				○				
C4	0.05		○						
	0.10	○	○	○	○	○	○	○	
	0.29		○						

粗さ Ra および最大高さ Ry を表-2 に、実験時の透明フィルムおよびクロス材の組合せを表-3 に示す。

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。なおケース番号の注入圧は kgf/cm<sup>2</sup> 単位で示し、間隙幅および注入圧は小数点を除いた2桁で示している。例えば材料C2を使用し、中目の幅1.0mm の間隙に3.0kgf/cm<sup>2</sup> ( 0.29MPa ) の圧力で注入する場合は、C2M1030となる。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 材料の粘度特性

実験時の各材料の練混ぜ直後の粘度は、事前の測定結果とほぼ合致していた。実験時の材料の粘度特性の測定結果を表-5 に示す。

図-3～図-5 および表-5 より材料C1, C2およびC3は、練混ぜ直後のJロート流下時間が5秒程度で、チクソ性（懸濁性）を有しているが、材料C4は、Jロート流下時間が10秒程度、チクソトロピックインデックス ( $TI = \mu_{60pm} / \mu_{60rpm}$  : JIS K5400に準じて測定) がほぼ1.0と他の材料と比べ、粘度性状がかなり異なっていることがわかる。また、材料C1は他の材料に比べて粘度の経時変化が著しく、静置した場合、練混ぜ直後から粘性が低下する速度が速い。

#### 3.2 注入速度

実験の結果、無機系材料もウレタン樹脂やエボ

キシ樹脂と同様<sup>1),3)</sup> 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-6 は、材料C4を目無(N)の間隙に設定注入圧0.1MPaで注入した時の注入量Qの経時変化の一例を目標間隙幅ごとに示したものであり、図-7 は、材料C1を目標幅1.0mmの間隙に設定注入圧0.1MPaで注入した時の注入量Qの経時変化の一例を模擬粗面ごとに示したものである。

表-5 実験時の材料の粘度特性

材料記号	混練直後の粘度 <sup>(注1)</sup> (mPa·sec)	注入中の平均粘度 <sup>(注2)</sup> (mPa·sec)	混練直後の $TI^{(注3)}$	混練直後の材料温度 <sup>(注4)</sup> (°C)
C1	80～118 (94)	175～333 (248)	3.2～4.8 (3.9)	20.5～21.5 (21.0)
C2	68～95 (84)	70～110 (93)	2.7～3.1 (2.8)	21.5～24.0 (22.9)
C3	108～155 (135)	152～196 (171)	3.7～4.8 (4.2)	19.5～25.0 (22.8)
C4	250～300 (272)	288～463 (358)	0.9～1.5 (1.1)	19.5～24.0 (22.5)

(注1)  $\mu_{60pm}$ (60rpm, 30sec後のBM型粘度計の読み値)

(注2) 注入直前と直後の粘度( $\mu_{60pm}$ )の平均値

(注3)  $TI = \mu_{60pm} / \mu_{60rpm}$  (JIS K5400)

(注4) 括弧内は今回の実験時の平均値

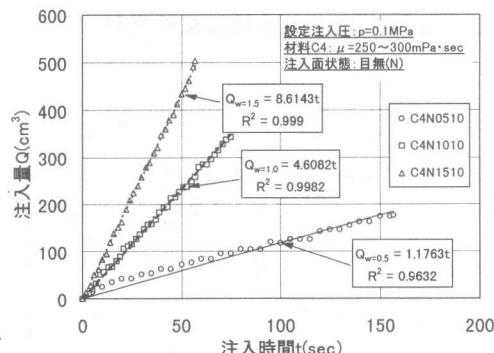


図-6 間隙幅が異なる場合の注入量の経時変化の一例

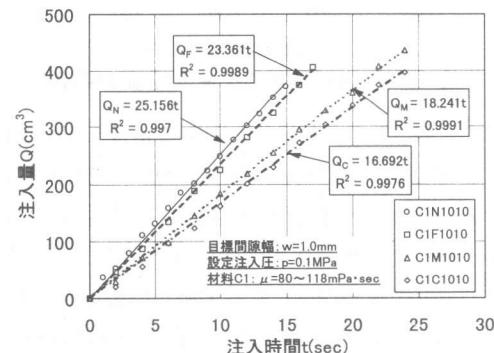


図-7 粗面状態が異なる場合の注入量の経時変化の一例

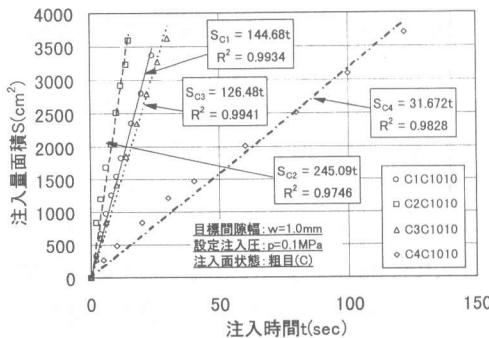


図-8 粗面状態が異なる場合の注入面積の経時変化の一例

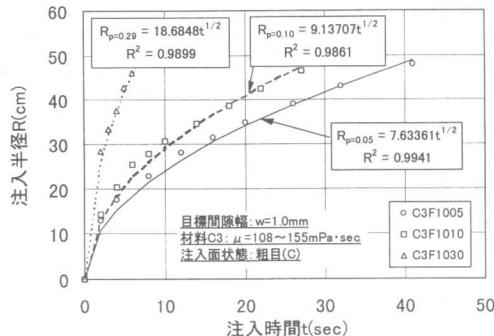


図-9 平均注入半径の経時変化の一例

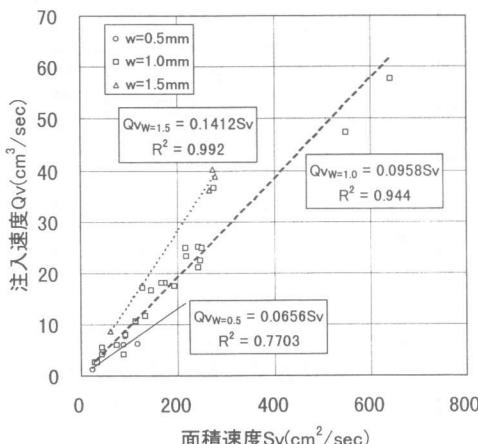


図-10 面積速度と注入速度の関係

また、図-8は、目標幅1.0mmの粗目(C)の間隙に設定注入圧0.1MPaで注入した時の注入面積Sの経時変化の一例を材料ごとに示したものである。図-6～図-8の図中には各条件ごとに最小自乗法で直線回帰した結果を合わせて示した。これらの図より、注入量および注入面積は時間に比例して増加しており、本実験の範囲内では粘性の経時変化の影響が見られないことがわかる。

たがって各条件での注入速度Qvおよび注入面積速度(以下面積速度)Svは、回帰直線の係数(勾配)として求めた。

参考として、注入面積から求めた平均注入半径Rの経時変化の一例を図-9に示す。図より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。

一方、図-10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おり、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、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1～3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。

### 3.3 各種要因と面積速度

目無(N)の間隙に設定注入圧0.1MPaで注入した時の実測間隙幅と面積速度の関係を図-11に示す。図よりいずれの材料も、間隙幅が大きくなると面積速度が大きくなる傾向は認められるが、その傾向に規則性は認められない。

図-12は、目標間隙幅が1.0mmの時の実測注

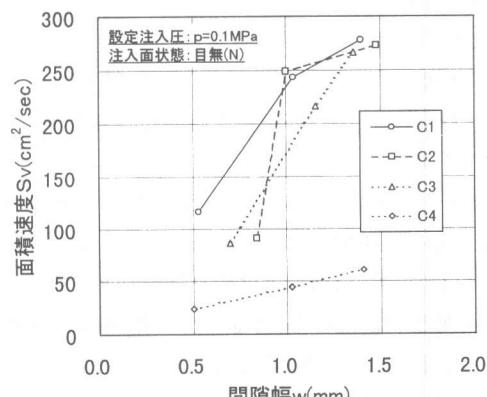


図-11 間隙幅と面積速度の関係

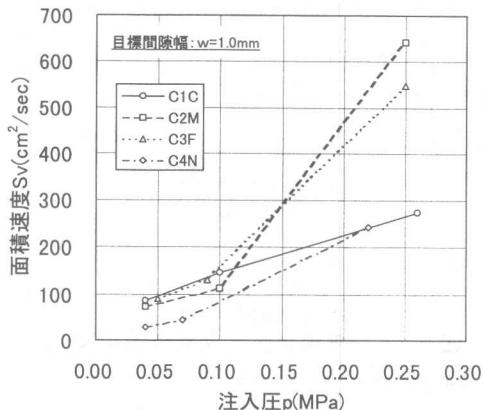


図-12 注入圧と面積速度の関係

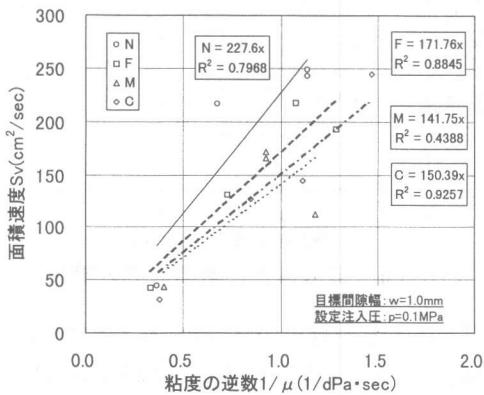


図-13 粘度の逆数と面積速度の関係

入圧と面積速度の関係を示したものである。図よりポリマーセメント系の材料C2およびC3は、設定注入圧が0.29MPa(実測値は、C2およびC3とも約0.25MPa)になると、設定注入圧が0.1MPaの時に比べて面積速度が急に速くなっていることがわかる。これは、チクソ性を有する両材料の特徴が現れたものと思われる。一方、セメント系の材料C1は、チクソ性を有するにも関わらず、今回の設定注入圧の範囲内ではそのような傾向が現れなかった。チクソ性のない材料C4の面積速度は注入圧に比例していることがわかる。

図-13は目標間隙幅が1.0mm、設定注入圧が0.1MPa時の練混ぜ直後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。図中には実現象を考え原点を通る直線で回帰した結果を示した。図より材料粘度の逆数と面積速度の間には比較的良い相関があることがわかる。

図-11、図-12では、規則性のある傾向は

見出せなかった。これは、それぞれの図に用いたデータが同一の間隙幅、注入圧、粘度で行われたものではないこと、ケースごとのバッチ間の粘度が大きく異なることや、チクソ性の影響などが現れているためと思われる。そこでそれらの違いの影響を除くために、間隙幅、注入圧、粘度を同時に表現できる式(1)の右辺(係数を除く)により求まる値と、実測された面積速度の関係を図-14にまとめた。ただし、実験で得られたデータのうちチクソ性の影響が現れた設定注入圧0.29MPaのデータは除外した。また、図中には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。

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

ここに

$Sv$ : 注入面積速度 (cm²/sec)

$w$ : ひび割れ幅 (cm)

$p$ : 注入圧 (MPa)

$\mu$ : 材料の粘度 (dPa·sec)

$\alpha$ : 回帰係数 (粗面係数)

なお、式(1)は、ナビエ・ストークスの非圧縮性流体の運動方程式を円筒座標形に変換して導かれたものであり<sup>2), 3)</sup>、今回の実験の範囲内では無機系注入材料が、非圧縮のニュートン流体とみなせるという仮定が成り立っているものとした。

図-14から①無機系注入材料の面積速度は、

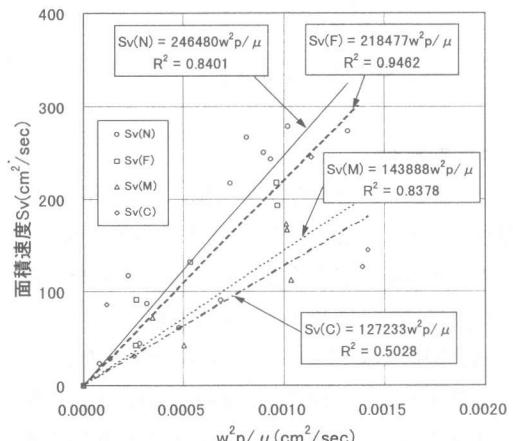


図-14 間隙幅、注入圧、粘度と面積速度の関係 ( $p \leq 0.1$  MPa)

有機系注入材料と同様<sup>1), 3)</sup>に間隙幅の二乗, 注入圧, および材料粘度の関数でほぼ表現できること。

条件	粗面係数 $\alpha$	相関係数 R
目無(N)	2.465E+05	0.917
細目(F)	2.185E+05	0.973
中目(M)	1.439E+05	0.915
粗目(C)	1.272E+05	0.709

こと、②粗面係数は、目無(N), 細目(F), 中目(M), 粗目(C)の順に大きくなり、面積速度は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つた。

### 3.4 粗面係数

表-6に図-14で得られた回帰係数  $\alpha$  (粗面係数)をまとめて示す。

図-15, 図-16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。ただし、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(表-3参照)を用いている。これらの図より無機系注入材料の粗面係数はポリウレタン樹脂と同様に<sup>2)</sup>式(2)および式(3)に示すような表面の粗さを表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。

$$\alpha = 266047e^{-0.023Ra} \quad (R=0.905) \quad (2)$$

$$\alpha = 268812e^{-0.0024Ry} \quad (R=0.929) \quad (3)$$

ここに

$\alpha$ : 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無機系注入材料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。

本実験の結果、以下のことが確認された。

①無機系注入材料の注入面積速度は、注入圧が0.1MPa以下の範囲であれば、エポキシ樹脂やポリウレタン樹脂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。

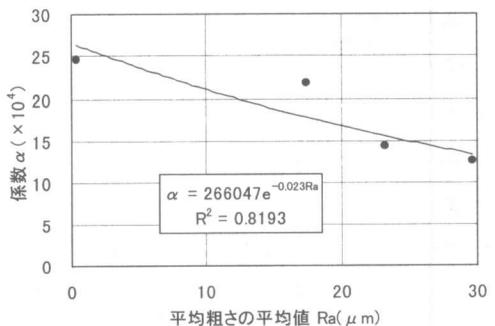


図-15 平均粗さと粗面係数の関係

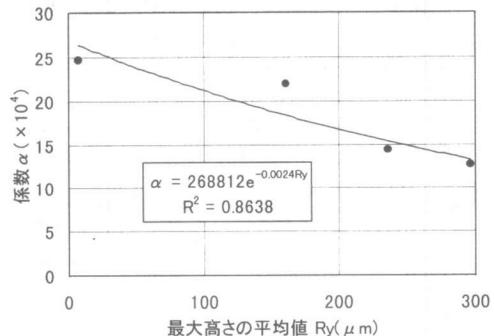


図-16 最大高さと粗面係数の関係

②無機系注入材料の注入性状(注入面積速度)はポリウレタン樹脂と同様に、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。

今後は、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うとともに、チクソ性の影響を確認して行く必要があると思われる。

### 参考文献

- 瀬野康弘・渡邊弘子・大西聰：ポリウレタン樹脂の平行間隙への注入実験、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20-1, pp.359-364, 1998.6
- 上村克郎ほか：鉄筋コンクリート造のひびわれ補修に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.395-396, 1987
- 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