

# 論文 フレッシュモルタルの塑性粘度および透水係数と配合要因の関係に関する実験的検討

片桐 彰吾\*1・犬飼 利嗣\*2・澤田 陽\*3

**要旨:** 本研究では、フレッシュモルタルの塑性粘度および透水係数と配合要因の関係を明確にするために、水セメント比、単位細骨材量、および混和剤添加の有無と、塑性粘度および透水係数の関係について検討した。その結果、フロー値が同一であっても水セメント比が異なると塑性粘度は異なる傾向にあること、水セメント比は塑性粘度や透水係数と密接な関係があること、単位水量でフロー値を調整すると、フロー値が大きくなると塑性粘度が小さくなり透水係数は大きくなるが、単位混和剤量でフロー値を調整すると、フロー値が大きくなると塑性粘度は大きくなり透水係数が小さくなる傾向にあることなどが明らかとなった。

**キーワード:** フレッシュモルタル, レオロジー, 塑性粘度, 透水係数, 配合, 羽根沈入式試験器

## 1. はじめに

コンクリートは一見、単一材料に見えるが、密度や粒子形状の異なるセメントや骨材などを混合した非常に複雑な複合材料である。したがって、構成材料がもつ微視的な構造との関係は適用し難く、コンクリートの性質を制御することは極めて困難である。また、コンクリートは他の構造材料とは異なり、構成材料の組織構造が時間の経過とともに変化していく。このようにコンクリートは、複合材料であること、物理および化学的性質が時間の経過とともに変化することから、実験を主体とした経験工学によって発展してきた。しかし、高齢化にともなう生産人口の減少や作業の省力化に対する要請には、建設工事のシステム化やロボット化が必要であり、これを実現するためにはフレッシュコンクリートの挙動を理論的に体系化することが不可欠である。

一方、土質工学の分野では、透水係数が地盤の変形特性に大きな影響を及ぼすことが知られており、そのメカニズムが工学的に明らかにされている<sup>1)</sup>。そこで筆者らは、フレッシュコンクリートのレオロジーモデルを構築する前段階として、フレッシュモルタルやコンクリートの透水係数に着目<sup>2,3)</sup>し、フレッシュモルタルの透水係数

と塑性粘度に関する予備的な実験を試みた。その結果、**図-1**および**2**に示すように、透水係数は水セメント比や塑性粘度と密接な関係にあることを報告した<sup>4)</sup>。しかし、検証した実験データは数少なく、透水係数と塑性粘度や配合などの関係をより明確にするには、実験結果の再現性や配合要因について、詳細に検討する必要がある。

本研究では、フレッシュモルタルの塑性粘度および透水係数と配合要因の関係を明確にするために、まず実験1, 2として、水セメント比および単位細骨材量と塑性粘度および透水係数の関係について検討した。さらに実験3として、混和剤添加の有無と塑性粘度および透水係数の関係について検討した。

## 2. 水セメント比と塑性粘度および透水係数の関係

### (実験1)

#### 2.1 実験要因

実験要因は水セメント比とし、それぞれ、35, 45, 55, 65%とした。

#### 2.2 実験方法

##### (1) モルタルの使用材料および配合

表-1にモルタルの使用材料を、表-2にモルタルの配合

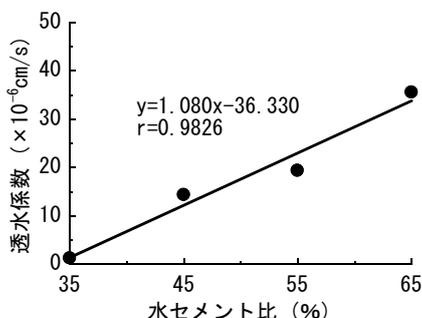


図-1 透水係数と水セメント比の関係<sup>4)</sup>

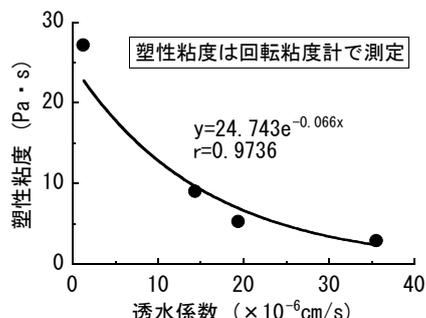


図-2 塑性粘度と透水係数の関係<sup>4)</sup>

\*1 株式会社大林組 (正会員)

\*2 岐阜工業高等専門学校 建築学科教授 博士(工学) (正会員)

\*3 岐阜工業高等専門学校 専攻科建設工学専攻

を示す。単位細骨材量は、水セメント比による影響を明確にするためにいずれも同一とし、空気量(8±2%)とフロー値(190±20)も一定値となるよう単位混和剤量で調整した。

### (2) モルタルの練混ぜおよびフロー試験

モルタルの練混ぜおよびフロー試験は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法(10.4.3. 練混ぜ方法および11. フロー試験)」に準じて行った。

### (3) フレッシュモルタルのレオロジー試験

フレッシュモルタルのレオロジー試験は、測定方法が簡便である室賀ら<sup>5)</sup>が考案した羽根沈入式試験器をもとにして作製した小型羽根沈入式試験器(図-3参照)を用い、以下の手順で行った。

試験容器(内径83mm、高さ138mm)に約700mlの試料を1層で詰めパイプレータで締固め成形した後、錘(70~300g)を試験状況に応じて段階的に使用を載せた沈入羽根(幅15または20mm、厚さ1mm)を所定の位置に設置した。錘を載せた沈入羽根を自重によって試料中に沈入させ、沈入羽根がモルタル中に全面沈入し試料のせん断面積が一定の状態になってから、0.1秒間ごとの沈入距離をレーザ変位計で測定した。試料をせん断するせん断面の面積を式(1)、(2)により、せん断速度を式(3)により、せん断応力度を式(4)により算出した。せん断速度とせん断応力度の関係から見掛けの塑性粘度を求め、検量線を用いて試料の塑性粘度を得た。なお、検量線は、粘度が既知(50, 100, 200Pa・s)のシリコンオイルを試料とし、小型羽根沈入式試験器によるレオロジー試験で得た見掛けの塑性粘度と既知の塑性粘度の関係から作成した。一例として、図-4に塑性粘度が200Pa・sのシリコンオイルによるせん断速度とせん断応力度の関係を、図-5に3種類のシリコンオイルを試料として作成した検量線を示す。

$$A = A_1 + A_2 \quad (1)$$

$$A_1 = 6 \cdot b \cdot h + 3 \cdot c \cdot h \quad (2)$$

$$v = d / t \quad (3)$$

$$\tau = [(W_1 + W_2) \cdot g / (1 \times 10^3)] / [A / (1 \times 10^6)] \quad (4)$$

ここに、 $A$  : 試料をせん断するせん断面の面積(mm<sup>2</sup>)

$A_1$  : 試料をせん断する沈入羽根の面積(mm<sup>2</sup>)

$b$  : 沈入羽根の幅(15または20mm)

$h$  : 沈入羽根の高さ(25mm)

$c$  : 沈入羽根の厚さ(1mm)

$A_2$  : 試料をせん断する軸の面積(161mm<sup>2</sup>)

$$A_2 = (d_s \cdot \pi - 3c) \cdot h$$

ただし、 $d_s$  : 軸の直径(3mm)

$v$  : せん断速度(cm/s)

$d$  : 沈入距離(cm)

表-1 モルタルの使用材料(実験1~3)

材料名	種類	備考	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3480cm <sup>2</sup> /g	C
細骨材	乾燥珪砂(4号, 5号)	絶乾密度:2.54g/cm <sup>3</sup> , 混合比率 1:1	S
混和剤	高性能AE減水剤標準形I種	ポリカルボン酸基含有多元ポリマー	AD
水	上水道水	-	W

表-2 モルタルの配合(実験1)

No.	W/C (%)	S/C (wt)	Air (%)	FL	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
					C	W	S	AD
1	35	2.1	8 ± 2	190 ± 20	622	218	1284	適量
2	45	2.4			540	243		
3	55	2.7	479	263				
4	65	3.0	428	278				

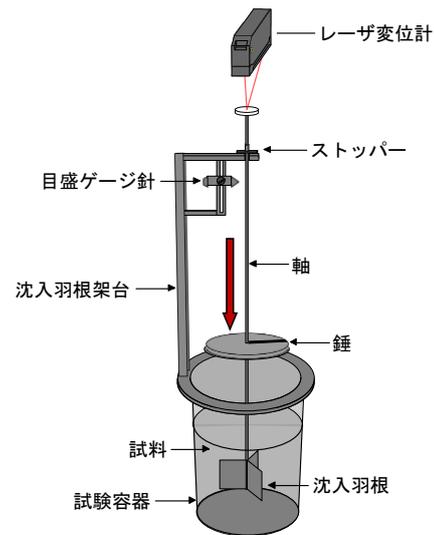


図-3 小型羽根沈入式試験器<sup>5)</sup>

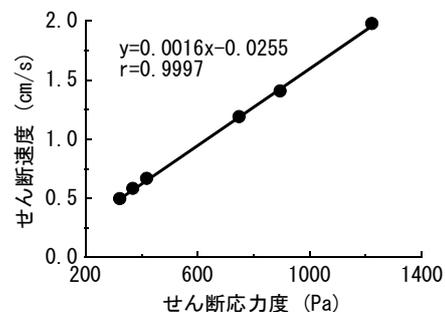


図-4 シリコンオイル(200Pa・s)のせん断速度とせん断応力度の関係

$t$  : 沈入時間(s)

$\tau$  : せん断応力度(Pa)

$W_1$  : 沈入羽根の重量(74.2g)

$W_2$  : 錘の重量(g)

$g$  : 単位の換算係数(9.80665)

### (4) フレッシュモルタルの透水試験

フレッシュモルタルの透水試験は、犬飼ら<sup>2)</sup>が考案した透水試験方法(図-6参照)に準じ、以下の手順で行った。容器(下部内径60mm、上部内径63mmのロート)の底面(目皿)にあらかじめ湿らしたろ紙を敷き、基準の厚さとなる

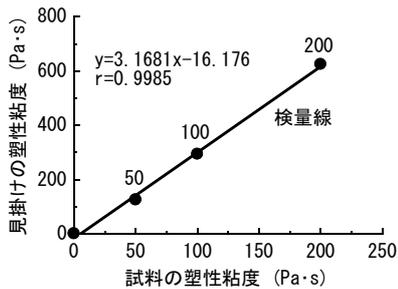


図-5 見掛けの塑性粘度と試料の塑性粘度の関係

ようモルタルを一層で詰めた。突き棒で25回均等に突いた後、容器側面を木づちで軽く叩き、上面をコテで平滑に仕上げて試料とした。また、試料厚さは、試料の質量と単位容積質量との関係から式(5)により算出した。

$$h = (Sw / Uw) / (\pi D^2 / 4) \quad (5)$$

ここに、 $h$ ：試料厚さ (cm)

$Sw$ ：試料の質量 (g)

$Uw$ ：試料の単位容積質量 ( $g/cm^3$ )

$D$ ：容器の直径 (cm)

試料を詰めた容器を所定の位置に配置し、レギュレータで一定に調整した吸引圧(水セメント比35%のモルタルは75kPa,それ以外は50kPa)のもとで透水試験を開始した。試験開始後、水セメント比35%のモルタルでは1秒間、それ以外は0.1秒間ごとの透水位をレーザー変位計で測定した。透水量が $10cm^3$ から $20cm^3$ に達するまでに要した時間をもとにして、透水位から変換した透水量を式(6)により、透水係数を式(7)により算出した。なお、透水量や透水係数の算出にあたっては、試料に吸引圧やブリーディングによる圧密作用が生じないものと仮定した。

$$Q = 10 / t \quad (6)$$

ここに、 $Q$ ：透水量が $10cm^3$ から $20cm^3$ に達するまでに要した時間をもとにして算出した単位時間あたりの透水量 ( $cm^3/s$ )

$t$ ：透水量が $10cm^3$ から $20cm^3$ に達するまでに要した時間 (s)

$$k = \rho [h / (P/g)] \cdot (Q/A) \quad (7)$$

ここに、 $k$ ：透水係数 ( $cm/s$ )

$\rho$ ：水の密度 ( $1 \times 10^{-3} kg/cm^3$ )

$h$ ：試料の厚さ (cm)

$P$ ：吸引圧 (kPa)

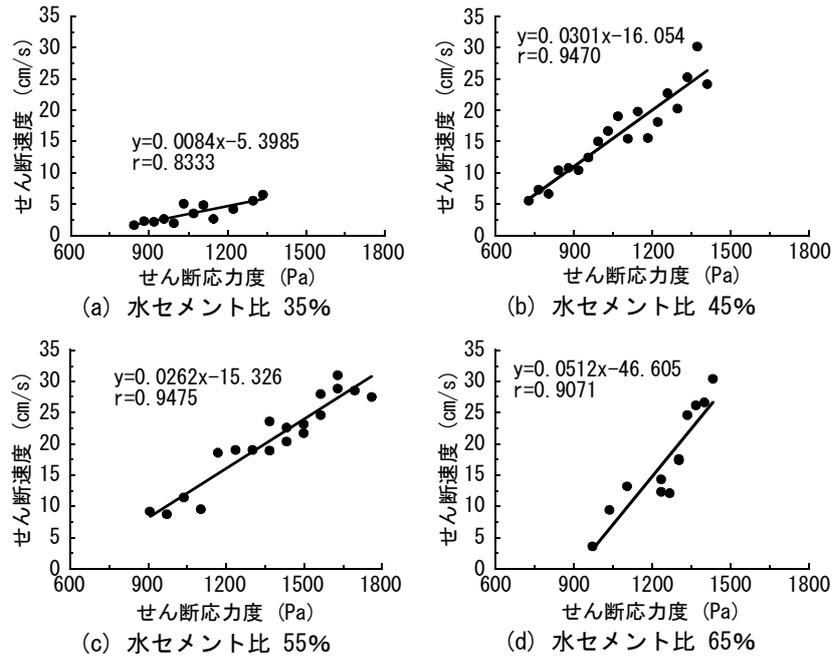


図-7 せん断速度とせん断応力度の関係(実験1)

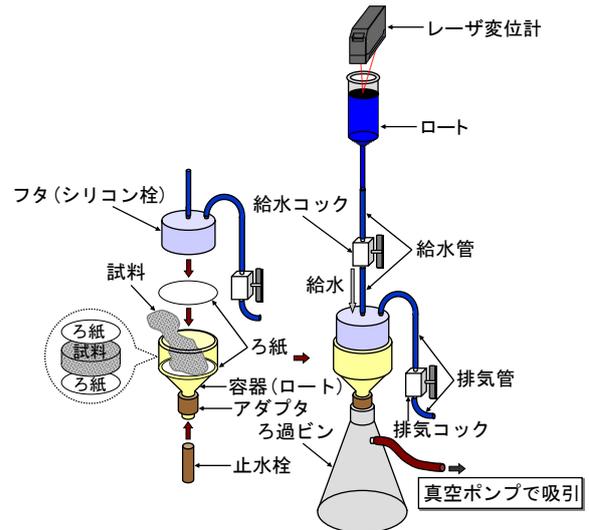


図-6 フレッシュモルタルの透水試験方法<sup>2)</sup>

$g$ ：単位の換算係数 ( $9.80665 \times 10^{-2}$ )

$A$ ：試料の断面積 ( $cm^2$ )

## 2.3 実験結果および考察

### (1) せん断速度とせん断応力度の関係

図-7に、せん断速度とせん断応力度の関係を示す。図から分かるように、せん断速度とせん断応力度の間には、いずれも強い相関関係がみられる。また、水セメント比が大きくなるとグラフの勾配は大きくなる傾向にあるので、塑性粘度の値は水セメント比が大きくなると小さくなる傾向にある。これは、モルタルのフロー値が同一であっても水セメント比が異なると塑性粘度の値が異なることを示しており、水セメント比、すなわち単位セメン

ト量や単位水量によってモルタル中のセメント粒子や骨材粒子のせん断抵抗が異なることを示している。なお、モルタルがせん断変形をする際には一般的に降伏値を有するが、同図からは水セメント比にともなう一定した傾向はみられない。これには、混和剤によるセメント粒子の分散作用が影響していると考えられ、水セメント比と単位混和剤量の要素によってモルタルの変形特性が異なることが考えられる。

(2) 塑性粘度と水セメント比の関係

図-8に、塑性粘度と水セメント比の関係を示す。図から分かるように、水セメント比が大きくなると塑性粘度の値は小さくなる傾向にあり、塑性粘度と水セメント比の間には既報<sup>4)</sup>の実験結果(相関係数: 0.9852)を再現する強い相関関係がみられる。

(3) 透水係数と水セメント比の関係

図-9に、透水係数と水セメント比の関係を示す。図から分かるように、水セメント比が大きくなると透水係数の値も大きくなる傾向にあり、透水係数と水セメント比の間には強い相関関係がみられる。これは、既報<sup>4)</sup>の実験結果(相関係数: 0.9826)を再現する傾向にあり、いずれの試験値も既報<sup>4)</sup>と同程度の値を示している。

(4) 塑性粘度と透水係数の関係

図-10に、塑性粘度と透水係数の関係を示す。図から分かるように、透水係数が大きくなると塑性粘度の値は小さくなる傾向にあり、塑性粘度と透水係数との間には既報<sup>4)</sup>の実験結果(相関係数: 0.9736)を再現するような強い相関関係がみられる。

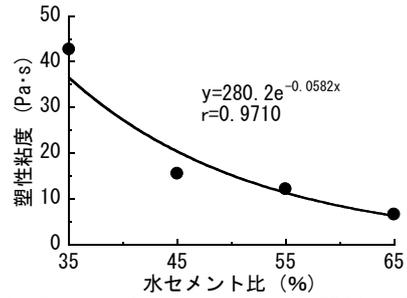


図-8 塑性粘度と水セメント比の関係(実験1)

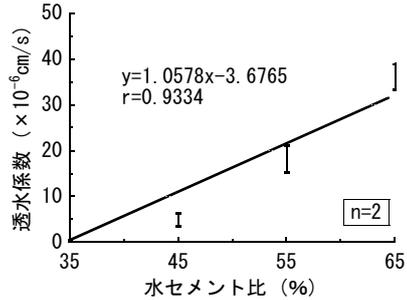


図-9 透水係数と水セメント比の関係(実験1)

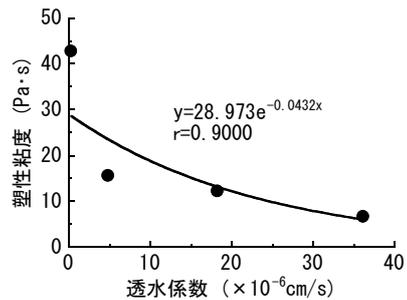


図-10 塑性粘度と透水係数の関係(実験1)

3. 単位細骨材量と塑性粘度および透水係数の関係 (実験2)

3.1 実験要因

表-3に、実験要因を示す。なお、単位細骨材量は、単位水量や単位混和剤量の増減により目標フロー値が得られる範囲とし、実験1に示した配合(表-2参照)の単位細骨材量1284kg/m<sup>3</sup>から-120kg/m<sup>3</sup>の値とした1164kg/m<sup>3</sup>までの4水準とした。

3.2 モルタルの使用材料および配合

モルタルの使用材料は、実験1と同様とした。表-4に、モルタルの配合を示す。

3.3 実験方法

実験方法は、実験1と同様とした。

3.4 実験結果および考察

(1) 塑性粘度と単位細骨材量の関係

図-11に、塑性粘度と単位細骨材量の関係を示す。図から分かるように、塑性粘度の値は水セメント比が45~65%の範囲では、単位細骨材量の増加にともなう変化はあまりみられない。しかし、水セメント比が35%になる

表-3 実験要因(実験2)

因子	水準
水セメント比	35, 45, 55, 65
単位細骨材量	1164, 1204, 1244, 1284

表-4 モルタルの配合(実験2)

No.	W/C (%)	Air (%)	FL	S/C (wt)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					C	W	S	AD
1	35	8 ± 2	190 ± 20	1.68	693	243	1164	適量
2				1.80	669	234	1204	
3				1.93	646	226	1244	
4				2.06	622	218	1284	
5	45			1.93	603	271	1164	
6				2.07	582	262	1204	
7				2.22	561	252	1244	
8				2.38	540	243	1284	
9	55			2.18	533	293	1164	
10				2.34	515	283	1204	
11				2.50	497	273	1244	
12				2.68	479	263	1284	
13	65			2.44	477	310	1164	
14				2.61	461	300	1204	
15				2.79	446	290	1244	
16				3.00	428	278	1284	

と、単位細骨材量が増加すると塑性粘度の値も大きくなる傾向がみられる。このような傾向は文献<sup>6)</sup>とは異なる

傾向であり、本実験要因の範囲(S/Cにして0.38~0.56)では、単位細骨材量が塑性粘度に与える影響は、水セメント比すなわち単位セメント量の大小によって異なる傾向を示すと考えられる。

図-12に、塑性粘度と水セメント比の関係を単位細骨材量ごとに示す。図から分かるように、いずれの単位細骨材量においても水セメント比が大きくなると塑性粘度の値は小さくなる傾向にあり、実験1で得られた実験結果と同様の傾向を示している。

### (2) 透水係数と単位細骨材量の関係

図-13に、透水係数と単位細骨材量の関係を示す。図から分かるように、透水係数の値は、単位細骨材量が増加すると小さくなる傾向にある。これには透水係数が塑性粘度と比較して単位細骨材量による影響を明確に示していることが考えられ、透水係数は単位細骨材量の増加にともなう単位水量の減少による間隙水(浸透水)の移動時間の増加現象をより明確に捉えていると考えられる。

図-14に、透水係数と水セメント比の関係を示す。同図からは、水セメント比が大きくなると透水係数の値も大きくなる傾向がみられ、既報<sup>9)</sup>および実験1の実験結果と同様の傾向がみられる。

### (3) 塑性粘度と透水係数の関係

図-15に、塑性粘度と透水係数の関係を示す。図から分かるように、透水係数の値が大きくなると塑性粘度の値は小さくなる傾向にあり、塑性粘度と透水係数の間には相関関係がみられる。しかし、相関係数の値はあまり大きくはなく、これには3.4(1)で考察した塑性粘度と単位細骨材量の関係が大きく影響している。

## 4. 混和剤添加の有無と塑性粘度および透水係数の関係 (実験3)

### 4.1 実験要因

表-5に、実験要因を示す。実験要因は、混和剤添加の有無と3水準のフロー値とした。

### 4.2 モルタルの使用材料および配合

モルタルの使用材料は、実験1と同様とした。表-6に、モルタルの配合を示す。水セメント比は45%とし、フロー値は配合No. 1~3は単位水量で、配合No. 4~6は単位水量を一定として単位混和剤量で調整した。

### 4.3 実験方法

実験方法は、実験1と同様とした。

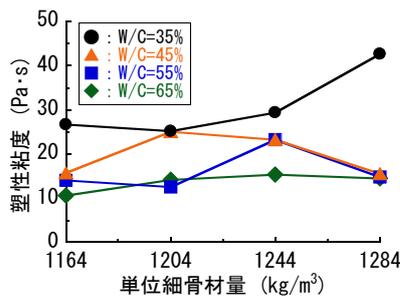


図-11 塑性粘度と単位細骨材量の関係 (実験2)

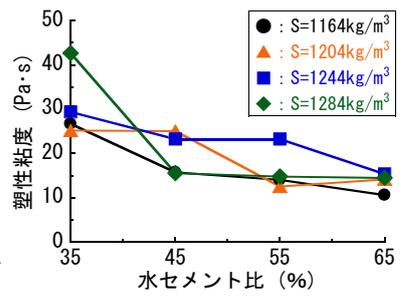


図-12 塑性粘度と水セメント比の関係 (実験2)

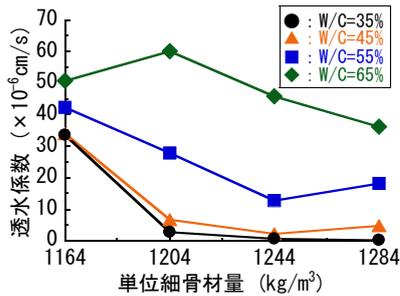


図-13 透水係数と単位細骨材量の関係 (実験2)

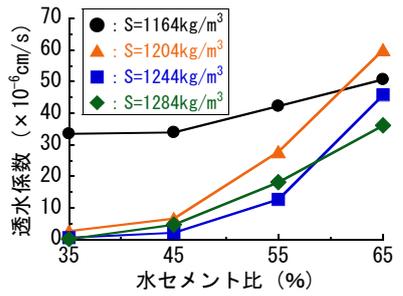


図-14 透水係数と水セメント比の関係 (実験2)

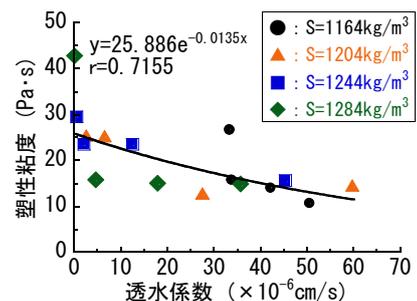


図-15 塑性粘度と透水係数の関係 (実験2)

表-5 実験要因 (実験3)

因子	水準
混和剤の添加	あり, なし
フロー値 (±20)	190, 230, 270

表-6 モルタルの配合 (実験3)

No.	W/C (%)	混和剤	Air (%)	目標FL	実測FL	単位量 (kg/m³)		
						C	W	S
1	45	なし	8 ± 2	190	203	644	290	1082
2				230	243	729	328	916
3				270	256	792	356	794
4		あり		190	187	603	271	1164
5				230	221			
6				270	271			

### 4.4 実験結果および考察

#### (1) 塑性粘度とフロー値の関係

図-16に、塑性粘度とフロー値の関係を示す。図から分かるように、単位水量でフロー値を調整したモルタルは、フロー値が大きくなると塑性粘度の値が小さくなる傾向を示している。これは、単位水量による影響と考えられ、単位水量が大きくなるとセメント粒子および細骨材粒子間のせん断抵抗が小さくなることに起因するものと考えられる。一方、単位混和剤量でフロー値を調整したモル

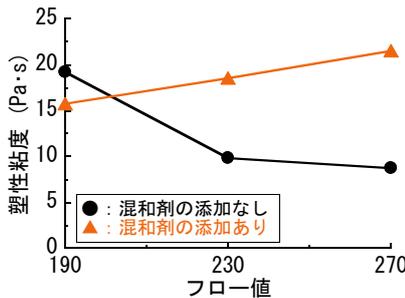


図-16 塑性粘度とフロー値の関係(実験3)

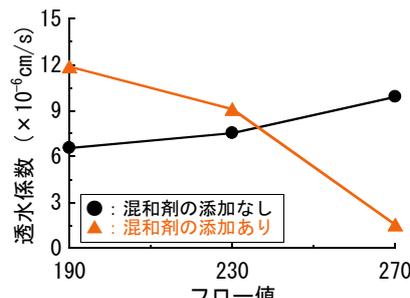


図-17 透水係数とフロー値の関係(実験3)

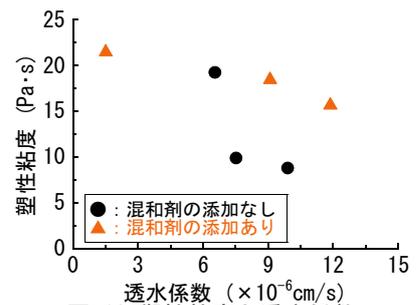


図-18 塑性粘度と透水係数の関係(実験3)

タルは、単位水量でフロー値を調整したモルタルとは異なる傾向にあり、フロー値が大きくなると塑性粘度の値が大きくなる傾向を示している。これには、単位混和剤量による影響が考えられ、単位混和剤量の増加にともないセメント粒子が分散して粒子間の間隙が小さくなり、せん断変形による間隙水や粒子の移動に対する抵抗が大きくなることが起因していると考えられる。

### (2) 透水係数とフロー値の関係

図-17に、透水係数とフロー値の関係を示す。図から分かるように、単位水量でフロー値を調整したモルタルは、フロー値が大きくなると透水係数の値が大きくなる傾向を示している。一方、単位混和剤量でフロー値を調整したモルタルは、フロー値が大きくなると透水係数の値は小さくなる傾向を示しており、このような傾向には前述した考察と同様に単位水量やセメント粒子の分散作用による影響が起因していると考えられる。

### (3) 塑性粘度と透水係数の関係

図-18に、塑性粘度と透水係数の関係を示す。図から分かるように、塑性粘度と透水係数の間には相関関係がほとんどみられない。これには、単位水量でフロー値を調整したモルタルの塑性粘度と透水係数の値が大きく影響している。

## 5. まとめ

本報では、フレッシュモルタルの塑性粘度および透水係数と配合要因の関係について実験的な検討を行った。実験結果から、以下の知見を得た。

- 1) フロー値が同一であっても水セメント比が異なると、塑性粘度は異なる傾向にある。
- 2) 水セメント比は、透水係数や塑性粘度と密接な関係にある。
- 3) 透水係数は、塑性粘度と比較して単位細骨材量による影響をより明確に示している。
- 4) 単位水量でフロー値を調整すると、フロー値が大きくなると塑性粘度の値は小さくなるが、単位混和剤量でフロー値を調整すると、フロー値が大きくなると塑性粘度の値も大きくなる。

- 5) 単位水量でフロー値を調整すると、フロー値が大きくなると透水係数の値も大きくなるが、単位混和剤量でフロー値を調整すると、フロー値が大きくなると透水係数の値は小さくなる。

今後は、フレッシュモルタルの塑性粘度および透水係数と配合要因の関係をより詳細に検討するとともに、透水係数を考慮したレオロジーモデルの構築に向けた研究に取り組みたいと考えている。

## 6. 謝辞

小型羽根沈入式試験器を製作するにあたり、伊達重之先生(東海大学)には丁寧なご指導をいただいた。また、本実験に際し、遠藤史崇君、後藤紘希君(いずれも岐阜工業高等専門学校学生)のご助力を得た。ここに記して謝意を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 畑中宗憲, 加倉井正昭: 建築基礎構造[第3版], 東洋書店, 2009. 5
- 2) 犬飼利嗣, 三島直生, 坂本英輔, 畑中重光: フレッシュモルタルの透水係数に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 1109-1114, 2006
- 3) 犬飼利嗣, 三島直生, 畑中重光: フレッシュコンクリートの透水係数に関する実験的研究, 日本建築学会大会(東北)学術講演梗概集, A-1, pp. 579-580, 2009. 8
- 4) 片桐彰吾, 犬飼利嗣: フレッシュモルタルの透水係数と塑性粘度に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp. 249-250, 2013. 8
- 5) 室賀陽一郎, 伊達重之, 大須賀哲夫: モルタルの粘性評価試験装置の開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), 第5部, Vol. 55, V-406, pp. 814-815, 2000. 9
- 6) 室賀陽一郎, 越智 修, 小山 昭, 末永充弘, 伊達重之: 新しい粘性試験器によるモルタルの塑性粘度の評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第5部, Vol. 58, V-406, pp. 1051-1052, 2003. 9