

# 報告 配合要因がフレッシュモルタルの透水係数とブリーディングの関係に及ぼす影響

早矢仕 啓太\*1・藤森 繁\*2・犬飼 利嗣\*3・上原 義己\*4

**要旨**：本報では、フレッシュコンクリートのブリーディングと透水係数の関係に着目し、自由水の挙動を定量的に把握するための前段階として、フレッシュモルタルを用いたブリーディング試験および透水試験を行った。実験要因は配合とし、水セメント比、単位細骨材量および混和剤添加の有無が、フレッシュモルタルの透水係数やブリーディングに及ぼす影響について検討した。その結果、ブリーディング量および透水係数、ならびに配合要因との間には強い相関関係がみられた。また、いずれの配合要因についても、フレッシュモルタルのブリーディング量と透水係数の間には相関関係が確認された。

**キーワード**：配合、フレッシュモルタル、透水係数、ブリーディング、自由水

## 1. はじめに

一般的に用いられるコンクリートでは、施工上の要求から、自由水を含むある一定の水量を必要としている。それは、水セメント比にすると概ね50～60%に相当するが、セメントの水和反応に必要な水量は水セメント比にして25%程度<sup>1)</sup>である。すなわち、自由水は施工上は必要な水ではあるが、ブリーディングによりコンクリート上層部は多孔質となり、水平鉄筋や粗骨材の下部には水隙が形成されるので、施工終了後は構造体に品質や耐久性の低下をもたらす一因となる<sup>2,3)</sup>。したがって、フレッシュコンクリート中の自由水の挙動を定量的に把握することは、鉄筋コンクリート構造体の品質や耐久性を評価する上で極めて重要である。

そこで犬飼らは、フレッシュモルタルやコンクリートの透水試験により、コンクリート中の自由水の挙動を定量的に評価する手法を提案している<sup>4)</sup>。透水係数の品質や耐久性評価指標としての有効性については、配合、使用材料および空気量を要因とした実験的な検討から、簡易透気速度との間に相関関係があると報告<sup>5,6)</sup>しており、文献<sup>7)</sup>では、透水係数とブリーディングの間にも相関があるとの考察をしている。しかし、ブリーディングとの関係をより明確にするためには、配合要因などの影響についてもより詳細に検討する必要がある。

そこで本報では、ブリーディング試験および犬飼らが考案した透水試験を行った。なお、試料はその内部にブリーディング水が滞留することが少なく、材料構成による影響がより顕著に現れるフレッシュモルタルとした。実験要因は、水セメント比、単位細骨材量および混和剤の有無の3つとし、ブリーディングと透水係数に及ぼす

影響について検討した。また、透水係数とブリーディング量との関係についても、併せて考察した。

## 2. 水セメント比と透水係数およびブリーディング量の関係(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%の4水準とした。

### 2.2 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)も一定の範囲内に収まるように単位混和剤量で調整した。

### 2.3 実験方法

#### (1) 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。

#### (2) 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、犬飼らが考案した透水試験方法(図-1参照)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(有孔板)にあらかじめ湿らせたろ紙を敷き、基準の厚さ(20mm)となる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(1)により算出した。

\*1 岐阜工業高等専門学校 建築学科 (学生会員)

\*2 大同大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 岐阜工業高等専門学校 建築学科教授 博士(工学) (正会員)

\*4 岐阜工業高等専門学校 建築学科助教 修士(工学) (正会員)

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)	絶対密度: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	密度:1.05~1.13g/cm <sup>3</sup>	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		B <sub>Sq</sub> (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			目標値	実測値	目標値	実測値		C	W	S	AD
1	35	2.1	8	7.2	190	190	0.00	622	218	1284	5.60
2	45	2.4		8.6		194	0.00	540	243		2.84
3	55	2.7	±2	8.6	±20	197	0.07	479	263	1.56	
4	65	3.0	8.6	191	0.52	428	278	0.75			

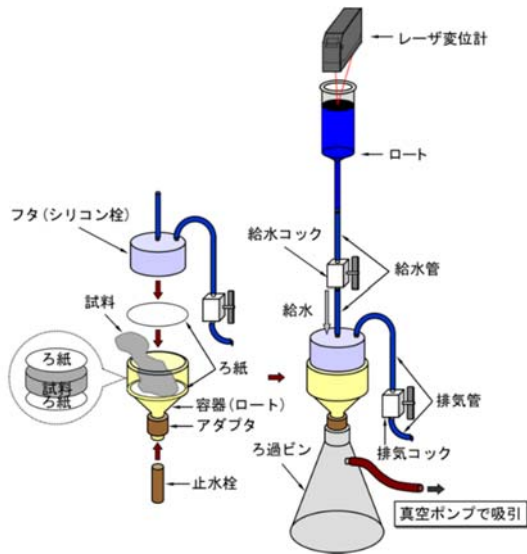


図-1 フレッシュモルタルの透水試験方法(実験1~3)

$$h = (S_w / U_w) / (\pi D^2 / 4) \quad (1)$$

ここに、 $h$  : 試料厚さ (cm)

$S_w$  : 試料の質量 (s)

$U_w$  : 試料の単位容積質量 (g/cm<sup>3</sup>)

$D$  : 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。なお、吸引圧は50kPaにすれば透水係数が一定値に収束すること(図-2参照), 水セメント比が35%では20cm<sup>3</sup>を透水するのに40分以上の時間を要し水和反応の影響を大きく受けること(図-3参照)などを考慮し、既報<sup>4)</sup>の実験結果に基づいて設定した。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変位計で測定した。透水量が10cm<sup>3</sup>から20cm<sup>3</sup>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(2)により、透水係数を式(3)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。

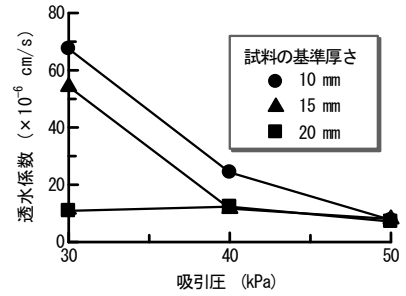


図-2 透水係数と吸引圧の関係(W/C=50%)<sup>4)</sup>

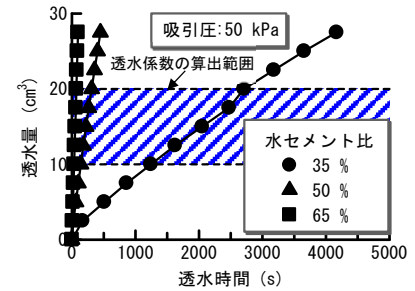


図-3 透水量と透水時間の関係<sup>4)</sup>

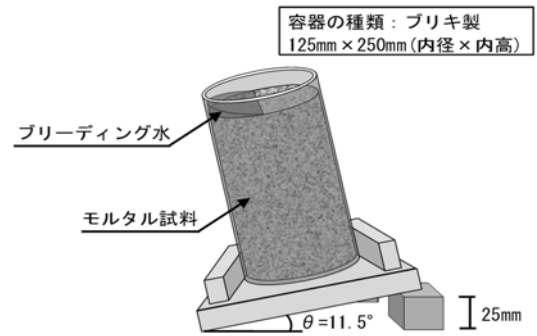


図-4 モルタルの簡易ブリーディング試験方法(実験1~3)

$$Q = 10/t \quad (2)$$

ここに、 $Q$  : 透水量が10cm<sup>3</sup>から20cm<sup>3</sup>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<sup>3</sup>/s)

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

$$k = \rho [h / (P/g)] \cdot (Q/A) \quad (3)$$

ここに、 $k$  : 透水係数 (cm/s)

$\rho$  : 水の密度 (1×10<sup>-3</sup>kg/cm<sup>3</sup>)

$h$  : 試料の厚さ (cm)

$P$  : 吸引圧 (kPa)

$g$  : 単位の換算係数 (9.80665×10<sup>-2</sup>)

$A$  : 試料の断面積 (cm<sup>2</sup>)

### (3) モルタルのブリーディング試験

モルタルのブリーディング試験は、文献<sup>8)</sup>で提案された「コンクリートのブリーディング簡易試験方法(試案)」に準じ、以下の手順で行った。

試験容器(内径 125mm, 内高 250mm)に試料を 2 層で打ち込んだ。試料の表面は、最小の作業で平滑な面となるようにこてなどで均し、その直後から時刻の記録を開始した。試料は容器を振動しないような水平な台の上に置き、水分の逸散を防止するため、フタをした。試験中は、水を吸い取るときを除き、常にフタを被せた。記録した最初の時刻からブリーディングが認められなくなるまで 30 分ごとに、ブリーディング水を吸い取った。水を吸い取るのを容易にするため、その 2 分前に図-4 に示すように、傾斜角度が 11.5° となるようにブロックを容器の底部片側の端部に注意深く挟んで容器を傾け、水を吸い取った後静かに水平の位置に戻した。吸い取った水は質量で 1g まで記録した。ブリーディングが認められなくなったら、直ちに容器と試料の質量を量り、本簡易試験で得たブリーディング量を式(4)により算出した。

$$B_{Sq} = V/A \quad (4)$$

ここに、 $B_{Sq}$ ：ブリーディング量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ )

$V$ ：最終時まで累計したブリーディングによる水の容積 ( $\text{cm}^3$ ) 又は質量 (g)

$A$ ：試料上面の面積 ( $\text{cm}^2$ )

## 2.4 実験結果および考察

### (1) 水セメント比とブリーディング量の関係

図-5 に、水セメント比ごとのブリーディング量の経時変化を示す。図から分かるように、水セメント比 55、65%では、経過時間 210 分までブリーディング量の増加がみられる。一方、水セメント比 35、45%では、ブリーディングが認められなかった。

図-6 に、ブリーディング量  $B_{Sq}$  と水セメント比の関係を示す。図中には、指数近似した相関係数  $r$  も示した(以後、図中で示す  $r$  も同様とする)。図から分かるように、水セメント比が大きくなるとブリーディング量も大きくなる傾向にあり、水セメント比とブリーディング量の間には、強い相関関係がみられる。

### (2) 水セメント比と透水係数の関係

図-7 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>9)</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>9)</sup>と同程度の値を示している。

### (3) ブリーディング量と透水係数の関係

図-8 に、透水係数とブリーディング量の関係を示す。図から分かるように、ブリーディング量が大きくなると透水係数は大きくなる傾向にあり、ブリーディング量と透水係数の間には相関関係がみられる。また、ブリーディング量が僅かであっても、透水係数は定量的な値を示している。このことから、ブリーディングがほとんど発

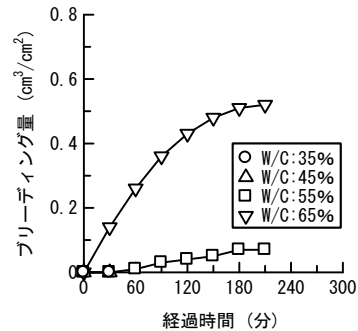


図-5 ブリーディング量と経過時間の関係(実験1)

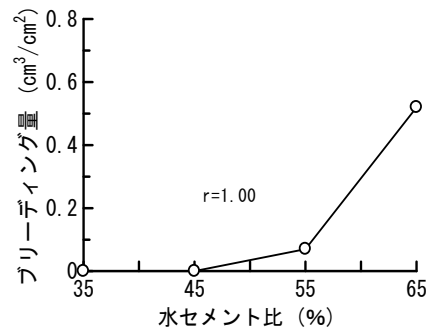


図-6 ブリーディングと水セメント比の関係(実験1)

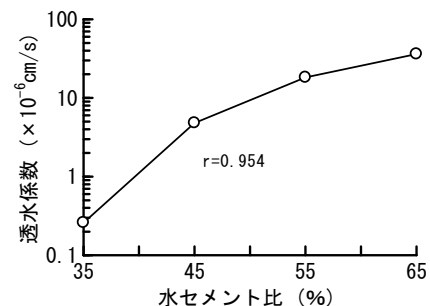


図-7 透水係数と水セメント比の関係(実験1)

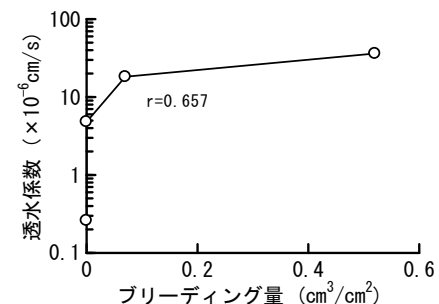


図-8 透水係数とブリーディング量の関係(実験1)

生しない配合においても、透水係数によって自由水の移動のしやすさを評価できることがわかる。

## 3. 単位細骨材量とブリーディング量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、実験1で示した配合(表-2参照)の単位細骨材量 $1284\text{kg}/\text{m}^3$ を基準とし、1244、1204、1164 $\text{kg}/\text{m}^3$ を追加した。

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(kg/m <sup>3</sup> )	1164, 1204, 1244, 1284

表-4 モルタルの配合(実験2)

No.	W/C (%)	Air (%)		FL		B <sub>sq</sub> (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )	S/C (wt)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
		目標値	実測値	目標値	実測値			C	W	S	AD	
1	35	±2	8	190	±20	196	0.00	1.68	693	243	1164	2.77
2						187	0.00	1.80	669	234	1204	4.01
3						183	0.00	1.93	646	226	1244	5.81
4						190	0.00	2.06	622	218	1284	5.60
5	45	8	190	±20	203	0.18	1.93	603	271	1164	0.60	
6					201	0.00	2.07	582	262	1204	2.79	
7					200	0.00	2.22	561	252	1244	3.23	
8					194	0.00	2.38	540	243	1284	2.84	
9	55	8	190	±20	210	0.59	2.18	533	293	1164	0.53	
10					198	0.13	2.34	515	283	1204	1.55	
11					181	0.11	2.50	497	273	1244	1.64	
12					197	0.07	2.68	479	263	1284	1.56	
13	65	8	190	±20	207	1.05	2.44	477	310	1164	0.00	
14					209	0.82	2.61	461	300	1204	0.00	
15					201	0.70	2.79	446	290	1244	0.71	
16					191	0.52	3.00	428	278	1284	0.75	

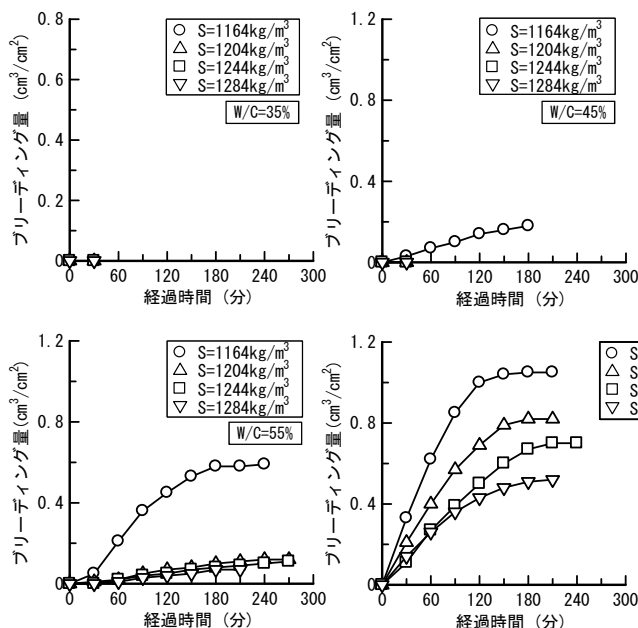


図-9 ブリーディング量と経過時間の関係(実験2)

### 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) 単位細骨材量とブリーディング量の関係

図-9に、水セメント比別、単位細骨材量ごとのブリーディング量の経時変化を示す。図から分かるように、水セメント比が35%、および水セメント比が45%の単位細骨材量1204kg/m<sup>3</sup>以上の試料では、ブリーディングが認められない。また、水セメント比が55%では、単位細骨材

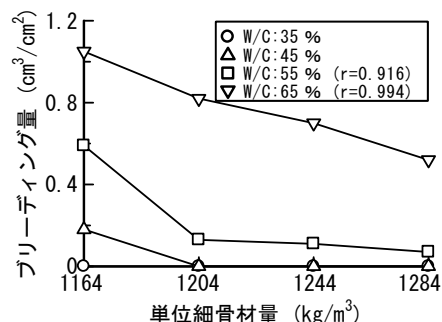


図-10 ブリーディング量と単位細骨材量の関係(実験2)

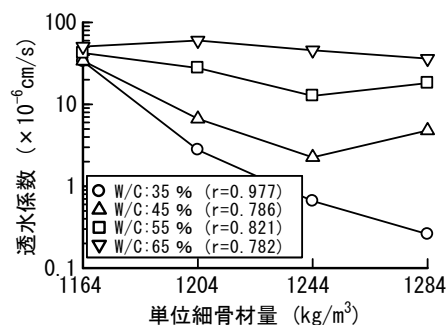


図-11 透水係数と単位細骨材量の関係(実験2)

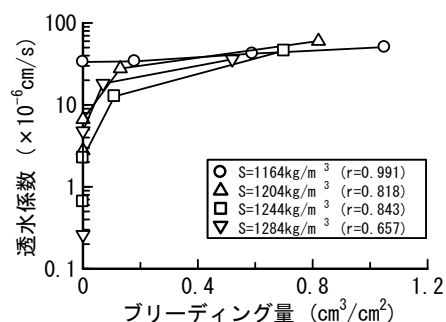


図-12 透水係数とブリーディング量の関係(実験2)

量1204kg/m<sup>3</sup>以上の試料ではほぼ同様の傾向がみられた。水セメント比65%では、単位細骨材量の増加とともにブリーディング量が小さくなること分かる。

図-10に、水セメント比ごとの、ブリーディング量と単位細骨材量の関係を示す。図から分かるように、水セメント比が45~65%の範囲では、ブリーディング量は、単位細骨材量が増加すると小さくなる傾向にある。

#### (2) 単位細骨材量と透水係数の関係

図-11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、単位細骨材量が増加すると、透水係数は概ね小さくなる傾向にある。これは、本実験の配合では、単位細骨材量が増加すると、セメントペーストが減少し、単位水量も減少するので(表-4参照)、それにともない間隙水(浸透水)の移動時間が増加したことに起因していると考えられる。

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 (%)		FL		B <sub>sa</sub> (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			目標値	実測値	目標値	実測値		C	W	S	AD
1	45	なし	8 ± 2	6.3	190	203	0.21	644	290	1082	-
2				9.9	230	243	0.29	729	328	916	-
3				6.6	270	256	0.30	792	356	794	-
4		あり		7.8	190	187	0.19	603	271	1164	0.30
5				9.5	230	221	0.04				1.99
6				9.4	270	271	0.03				3.62

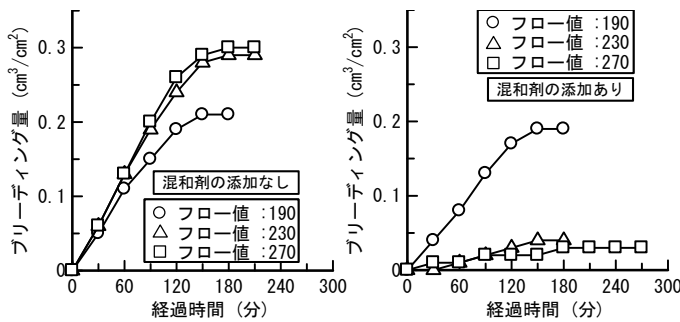


図-13 ブリーディング量と経過時間の関係(実験3)

### (3) ブリーディング量と透水係数の関係

図-12に、透水係数とブリーディング量の関係を示す。図から分かるように、ブリーディング量が大きくなると透水係数は大きくなる傾向にあり、ブリーディング量と透水係数の間には相関関係がみられる。また、単位細骨材量によらず、ブリーディング量が僅かであっても、透水係数は定量的な値を示しているが、2.4(3)で述べたのと同様に、単位細骨材量が変化した場合にもブリーディングが発生しない試料の水の移動を透水係数の値で評価できるものと考えられる。

## 4. 混和剤添加の有無とブリーディング量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と配合

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。

### 4.4 実験結果および考察

#### (1) ブリーディング量とフロー値の関係

図-13に、混和剤の添加の有無の違いによる、目標フ

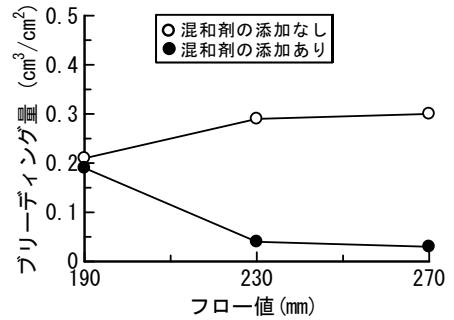


図-14 ブリーディング量とフロー値の関係(実験3)

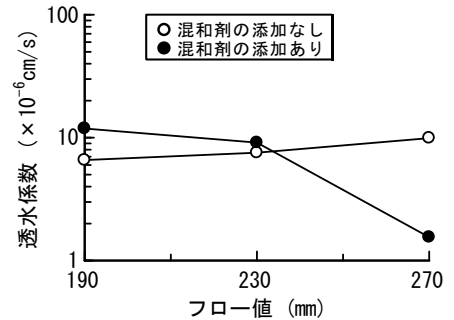


図-15 透水係数とフロー値の関係(実験3)

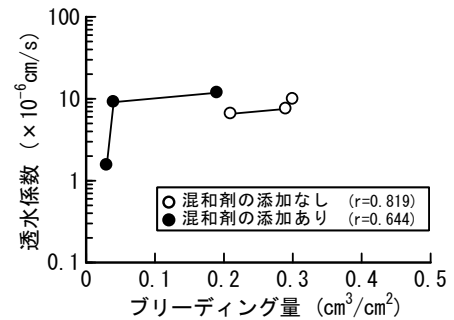


図-16 透水係数とブリーディング量の関係(実験3)

ロー値ごとのブリーディング量の経時変化を示す。図から分かるように、混和剤の添加なしのフロー値230と270のグラフを見ると、経過時間ごとのブリーディング量は、ほぼ同じ増加傾向を示している。また、混和剤の添加ありでも、フロー値230と270のグラフは、ほぼ同じ増加傾向を示している。

図-14に、混和材の添加の有無の違いによる、ブリーディング量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ブリーディング量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ブリーディング量は小さくなる傾向を示しており、これは単位水量やセメント粒子の分散作用によるものと考えられる。

#### (2) フロー値と透水係数の関係

図-15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が僅かに大きくな

る傾向を示している。これは、単位水量が大きくなると試料中の間隙水の移動時間が減少することに起因していると考えられる。一方、単位混和剤量でフロー値を調整したモルタルは、フロー値が大きくなると透水係数は小さくなる傾向を示している。これは、混和剤の添加量の増加にともなうセメント粒子の分散作用により粒子間の間隙が小さくなり、試料中の間隙水の移動に対する抵抗が大きくなることに起因していると考えられる。

### (3) ブリーディング量と透水係数の関係

図-16に、透水係数とブリーディング量の関係を示す。図から分かるように、混和剤の添加なしのモルタルは、ブリーディング量が増加すると、透水係数は若干増加する程度である。しかし、混和剤の添加ありのモルタルでは、ブリーディング量が僅かであっても、透水係数は定量的な値を示している。このことから、2.4(3)と同様に、ブリーディングが発生しないような場合にも透水係数を用いて水の移動しやすさを評価できるものといえる。

## 5. まとめ

- 1) 水セメント比を実験要因とし、透水試験とブリーディング試験を行った結果、水セメント比と透水係数、および水セメント比とブリーディング量には、強い相関関係がみられた。
- 2) 単位細骨材量を実験要因とし、透水試験とブリーディング試験を行った結果、ブリーディング量および透水係数は、単位細骨材量が増加するほど小さくなる傾向となった。これは、本実験の配合では、単位細骨材量が増加すると、セメントペーストが減少し、単位水量も減少するので、間隙水が移動し難くなったことによるものと考えられる。
- 3) 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ブリーディング量および透水係数が僅かに大きくなる傾向を示した。これは、単位水量が大きくなると試料中の間隙水が移動し易くなることに起因していると考えられる。一方、単位混和剤量でフロー値を調整したモルタルは、フロー値が大きくなると透水係数およびブリーディング量は小さくなる傾向を示している。これは、単位混和剤量の増加にともなうセメント粒子の分散作用により粒子間の間隙が小さくなり、試料中の間隙水の移動に対する抵抗が大きくなることに起因していると考えられる。
- 4) いずれの実験要因においても、ブリーディング量と透水係数は相関関係にある。

- 5) ブリーディング量が僅か(0~0.1cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>)であっても、透水係数は定量的な値を示している。

## 謝辞

本実験に際し、土本康平君、村松庄和君(いずれも大同大学学生)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) Copeland, L.E. and Hayes, J.C., The Determination of Non-evaporable Water in Hardened Portland Cement Paste, ASTM Bulletin, No.194, pp.70-79, 1953.12
- 2) 平田隆祥, 竹田宣典, 十河茂幸: 石灰石粉を用いたコンクリートのブリーディング水の移動機構と強度分布について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.501-506, 1993
- 3) 三田勝也, 加藤佳孝: ブリーディング水がコンクリート表層部の品質に与える影響に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1385-1390, 2011
- 4) 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
- 5) 澤田 陽, 田中愛美, 片桐彰吾, 犬飼利嗣: フレッシュモルタルの透水係数と硬化モルタルの透気性の関係に及ぼす配合要因の影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第16巻, pp.251-256, 2016.10
- 6) 関谷有紗加, Batsuuri Ashidmaa, 澤田 陽, 犬飼利嗣: フレッシュモルタルの透水係数と硬化モルタル表層の透気性の関係に及ぼす使用材料と空気量による影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第17巻, pp.429-434, 2017.10
- 7) 犬飼利嗣: 吸引式透水試験装置を用いたフレッシュコンクリートの透水係数に関する実験的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第15巻, pp.307-312, 2015.10
- 8) 日本コンクリート工学会: 構造物の耐久性向上のためのブリーディング制御に関する研究委員会報告書, 2017.6
- 9) 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