

# 報告 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使用材料と空気量の影響

岩田 匡平\*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、使用材料および空気量とし、セメントの種類、混和材料の混入率および空気量が、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。実験結果より、ブリーディング量および透水係数と、使用材料および空気量との間には、強い相関関係がみられた。また、いずれの実験要因についても、フレッシュモルタルのブリーディング量と透水係数との間には強い相関関係がみられた。

**キーワード:** 使用材料, 空気量, モルタル, ブリーディング, 透水係数, 自由水

## 1. はじめに

近年、構造物の長寿命化への取り組みが推進されており、日本建築学会では、使用するコンクリートに要求される圧縮強度と鉄筋のかぶり厚さを確保することで、長期(100年)や超長期(200年)の供用期間を実現し得るとしている<sup>1)</sup>。しかし、その一方で圧縮強度と耐久性は、必ずしも等価ではないことも報告<sup>2)</sup>されている。また、配合や使用材料等によっては、ブリーディングなど自由水の挙動は異なり、かぶりコンクリートの品質に影響を及ぼすと考えられる。したがって、自由水の挙動を定量的に把握することは、かぶりコンクリートの品質や耐久性を評価する上で極めて重要である。

これらの課題に対し、犬飼らは、フレッシュモルタルやコンクリートの透水係数を把握することで、硬化コンクリートの品質や耐久性を、定量的に評価する手法を提案している<sup>3)</sup>。透水係数の品質・耐久性評価指標としての有効性については、既に、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ことを報告している<sup>4), 5)</sup>。また、別の報告<sup>6)</sup>において、ブリーディングと透水係数の間にも相関があると指摘されているが、ブリーディングとの関係をより明確にするためには、使用材料や空気量さらには配合要因の影響についてより詳細に検討する必要がある。

そこで本報では、自由水の挙動を定量的に把握する基礎的な実験として、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、使用材料や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、セメントの種類、混和材料の混

入率および空気量の3つとし、各要因が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。さらに、それぞれの実験において透水係数とブリーディング量の関係についても検討した。

## 2. セメント種類および水セメント比とブリーディング量および透水係数の関係(実験1)

### 2.1 実験要因

表-1に、実験要因を示す。実験要因は、セメントの種類と水セメント比とした。

### 2.2 モルタルの使用材料および配合

表-2にモルタルの使用材料を、表-3にモルタルの配合を示す。単位細骨材量は、セメントの種類や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、目標空気量(8±2%)と目標フロー値(190±20)も一定の範囲に収まるよう単位混和剤量で調整した。なお、目標空気量は、コンクリート中の空気量を4.5±1.5%、粗骨材の絶対容積を約400L/m<sup>3</sup>と仮定し、モルタル中に占める容積換算から8±2%とした。

### 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(1L/バッチ)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。

表-1 実験要因(実験1)

因子	水準
セメントの種類	普通ポルトランドセメント(N)
	早強ポルトランドセメント(H)
	高炉セメントB種(BB)
	フライアッシュセメントB種(FB)
水セメント比(%)	35, 45, 55, 65

\*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-2 モルタルの使用材料(実験1)

材料名	種類	備考	記号
セメント (C)	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	N
	早強ポルトランドセメント	密度:3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:4600cm <sup>2</sup> /g	H
	高炉セメントB種	密度:3.04g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3950cm <sup>2</sup> /g	BB
	フライアッシュセメントB種	密度:2.95g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3300cm <sup>2</sup> /g	FB
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-3 モルタルの配合(実験1)

No.	セメントの種類	W/C (%)	Air (%)		FL		BSq (cm <sup>2</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	N	35	7.2	190	0.00	2.1	622	218	1284	5.59		
2		45	8.6	194	0.00	2.4	540	243			2.83	
3		55	8.6	197	0.07	2.7	479	263			1.55	
4		65	8.6	191	0.52	3.0	428	278			0.75	
5	H	35	8.1	191	0.00	0.0	621	217	1284	3.10		
6		45	8.2	186	0.02	2.4	540	243			1.35	
7		55	9.4	203	0.08	2.7	477	262			1.19	
8		65	7.8	199	0.22	3.0	428	278			0.64	
9	BB	35	9.0	180	0.00	2.0	638	224	1284	2.44		
10		45	9.9	194	0.08	2.3	556	250			1.33	
11		55	7.5	192	0.34	2.6	493	271			0.47	
12		65	6.8	205	0.75	2.9	443	288			0.42	
13	FB	35	7.3	185	0.00	2.0	629	220	1284	3.00		
14		45	6.8	195	0.03	2.3	549	247			2.10	
15		55	9.3	203	0.28	2.6	487	268			0.70	
16		65	8.6	205	0.51	2.9	438	288			0.04	

(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)に予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。

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

ここに、 $h$  : 試料厚さ(cm)

$S_w$  : 試料の質量(g)

$U_w$  : 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、吸引圧は既報の実験結果<sup>3)</sup>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ー変位計で測定した。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ている。

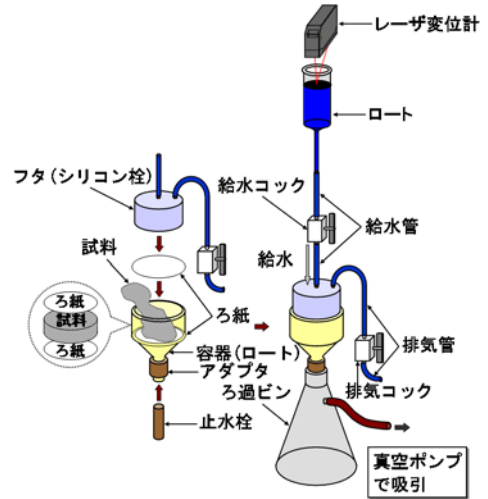


図-1 フレッシュモルタルの吸引式透水試験装置

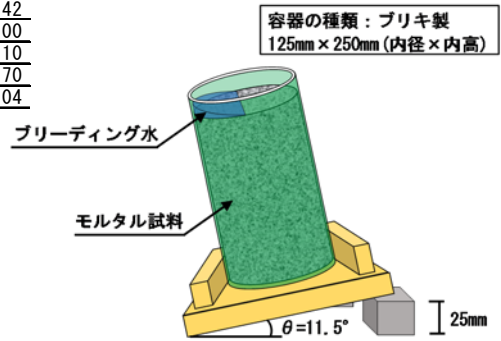


図-2 ブリーディング簡易試験方法

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

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) フレッシュモルタルの簡易ブリーディング試験

ブリーディング試験は、文献<sup>7)</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)」に準じて行った。図-2 に、ブリーディング水吸水直前の様子を示す。容器に詰めた試料の上面をこてでならした直後に時刻を記録した。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

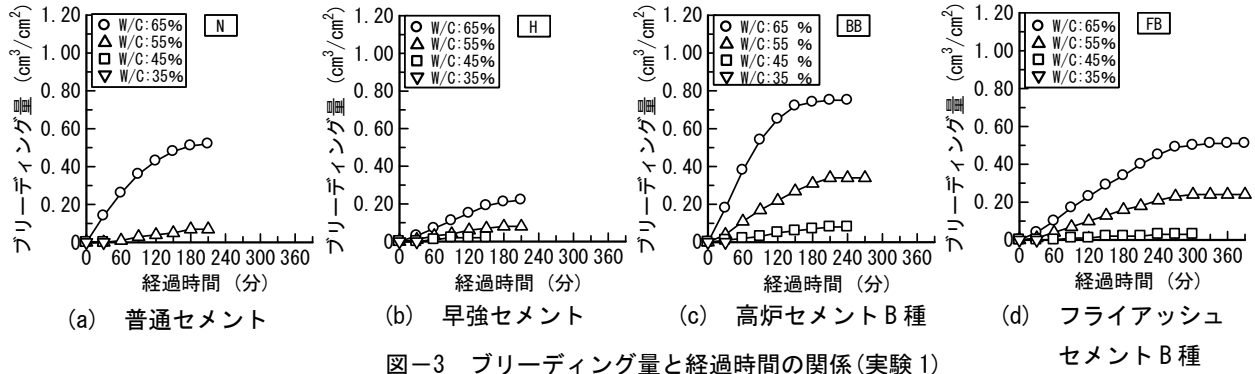


図-3 プリーディング量と経過時間の関係(実験1)

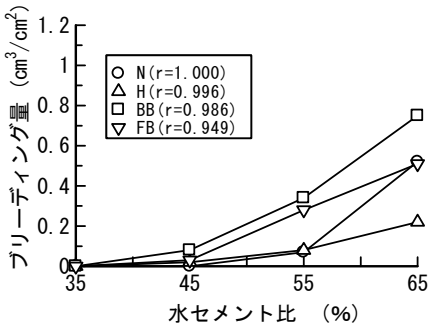


図-4 プリーディング量と水セメント比の関係(実験1)

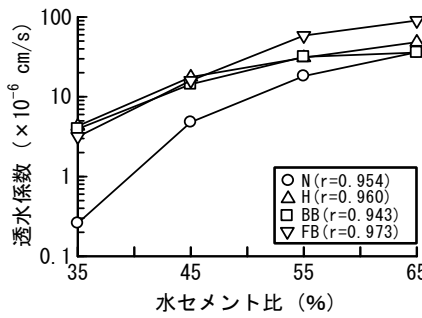


図-5 透水係数と水セメント比の関係(実験1)

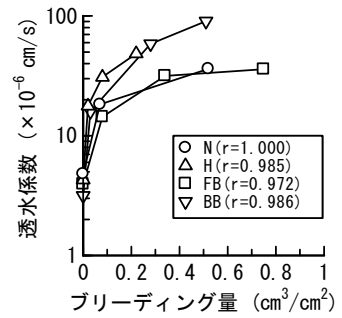


図-6 透水係数とプリーディング量の関係(実験1)

グ水をピペットで吸取り重量(g)を記録した。吸水時には、その2分前に傾斜角度 11.5°となるよう傾け、吸水後は静かに水平に戻した。簡易なプリーディング量  $B_{Sq}$  は以下の式(4)により求めた。

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

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

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

$A$  : 試料上面の面積( $\text{cm}^2$ )

## 2.4 実験結果および考察

### (1) セメントの種類および水セメント比とプリーディング量の関係

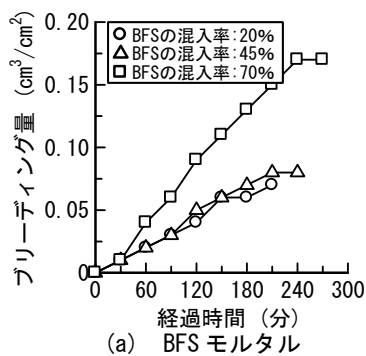
図-3 に、各セメントのプリーディング量と経時変化を示す。図から分かるように、セメント種類によらず、水セメント比の増加に伴い、プリーディング量の増加傾向は顕著になる。また、水セメント比が 55%の測定結果に着目すると、N、H、BB モルタルは経過時間 210~270 分でプリーディングが認められなくなるが、FB モルタルでは 390 分まで継続している。

図-4 に、プリーディング量と水セメント比の関係を示す。また、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、セメント種類によらず、水セメント比の増加とともにプリーディング量は増加し、プリーディング量と水セメント比の間には強い相関関係がみられる。水セメント比の増加にともなうプリーディング量の増加傾向は、

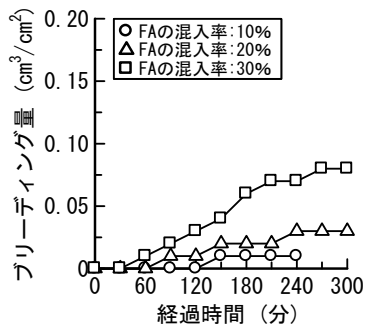
セメントの種類で異なり、BB、FB、N、H モルタルの順で増加傾向が著しくなっている。また、H モルタルと N モルタルのプリーディング量を比べると、水セメント比が 55%までは、ともに小さいプリーディング量を示しているが、65%では N モルタルは H モルタルのおよそ約 2 倍となっている。一方、BB モルタルと FB モルタルは、水セメント比が 45%を超えるとプリーディング量が大きく増加する傾向がみられる。

### (2) セメントの種類および水セメント比と透水係数の関係

図-5 に、透水係数と水セメント比の関係を示す。透水係数の値は、比表面積や総粉体容積が大きくなる早強セメントや混合セメントで小さくすると推察されたが、図から分かるように、N、BB、H、FB モルタルの順で大きくなった。また、FB、H および BB モルタルの透水係数の値は、N モルタルよりも大きくなっており、水セメント比が 45%を超えると N モルタルに漸近していくのに対し、FB モルタルはさらに増大している。このような傾向には、フライアッシュに含まれる球状粒子による自由水の拘束能力が影響していると考えられ、水セメント比が大きくなるほどその影響が顕著となり、浸透水が試料中を移動し易くなることに起因していると考えられる。しかし、いずれのセメントを用いても、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既報<sup>5)</sup>と同様の強い相関関係がみられる。

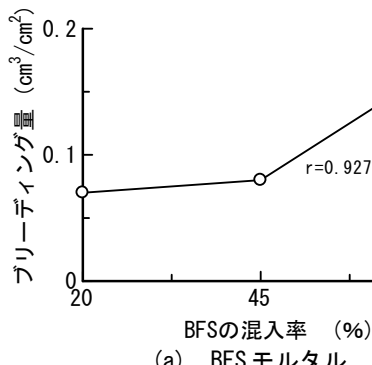


(a) BFS モルタル

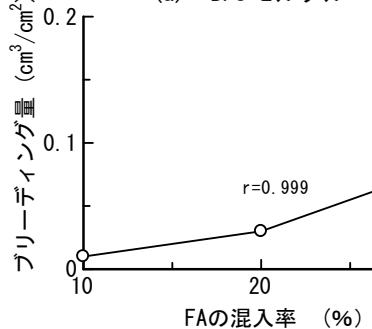


(b) FA モルタル

図-7 ブリーディング量と経過時間の関係(実験2)

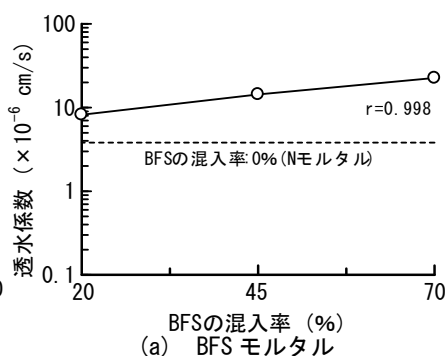


(a) BFS モルタル

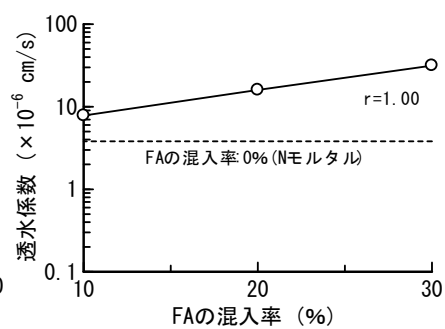


(b) FA モルタル

図-8 ブリーディング量と混和材料の混入率の関係(実験2)



(a) BFS モルタル



(b) FA モルタル

図-9 透水係数と混和材料の混入率の関係(実験2)

表-4 実験要因(実験2)

因子	水準
混和材料	BFS, FA
BFSの混入率(%)	0, 20, 45, 70
FAの混入率(%)	0, 10, 20, 30

表-5 モルタルの使用材料(実験2, 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	N
細骨材	乾燥珪砂(4号, 5号)	絶対乾密度:2.54g/cm <sup>3</sup> , 混合比率 1:1	S
混和材料	高炉スラグ微粉末(せっこう添加あり)	密度:2.91g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:4250cm <sup>2</sup> /g	BFS
混和剤	フライアッシュII種	密度:2.28g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3480cm <sup>2</sup> /g	FA
水	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-6 モルタルの配合(実験2)

No.	混和材料の種類	混入率(%)	W/B(%)	Air(%)	FL		S/B(wt)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
					目標値	実測値		C	W	BFS	FA	S	AD	
1	-	0	45	8 ± 2	190 ± 20	8.6	194	2.38	540	243	-	-	1284	2.83
2	BFS	20				9.8	182	2.41	429	242	103	-	-	1.34
3		45				9.8	194	2.45	293	240	232	-	-	1.33
4		70				9.7	173	2.50	158	237	356	-	-	0.79
5	FA	10				9.0	191	2.41	480	240	-	53	-	2.40
6		20				6.8	195	2.45	420	236	-	105	-	2.10
7		30				9.5	194	2.48	362	233	-	155	-	1.29

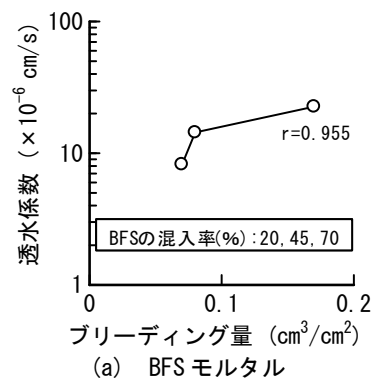
### (3) ブリーディング量と透水係数の関係

図-6に、ブリーディング量と透水係数の関係を示す。図から分かるように、セメントの種類によらず、ブリーディング量の増加に伴い透水係数の値も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強い相関関係がみられる。

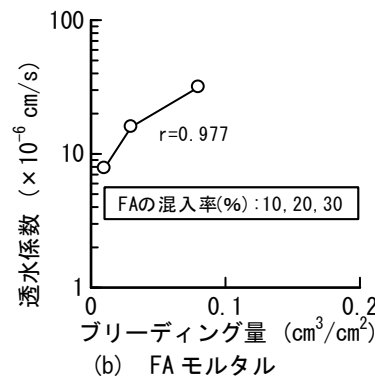
### 3. 混和材料の種類および混入率とブリーディング量および透水係数の関係(実験2)

#### 3.1 実験要因

表-4に、実験要因を示す。実験要因は、混和材料の



(a) BFS モルタル



(b) FA モルタル

図-10 ブリーディング量と透水係数の関係(実験2)

種類と混入率(セメントの内割で質量置換)とした。

#### 3.2 モルタルの使用材料および配合

表-5にモルタルの使用材料を、表-6にモルタルの配合を示す。単位細骨材量は、混和材料の混入率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

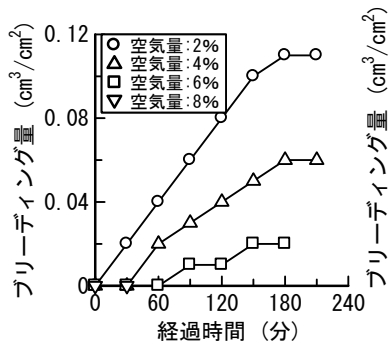


図-11 ブリーディング量と経過時間の関係(実験3)

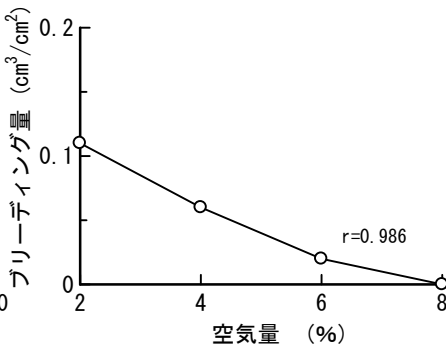


図-12 ブリーディング量と空気量の関係(実験3)

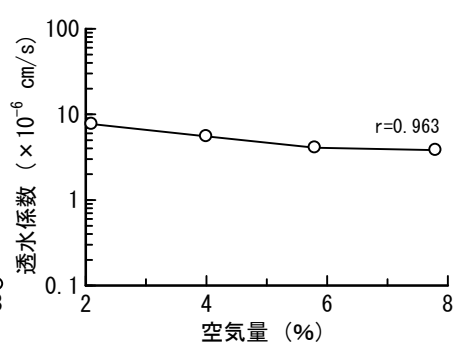


図-13 透水係数と空気量の関係(実験3)

表-7 モルタルの配合(実験3)

No.	W/C (%)	Air (%)		FL		BSq (cm³/cm²)	S/C (wt)	単位量 (kg/m³)			
		目標値	実測値	目標値	実測値			C	W	S	AD
1	45	2	2.1	190 ± 20	180	0.11	2.10	619	279	1284	1.24
2		4	4.0		182	0.06	2.20	593	267		1.78
3		6	5.8		185	0.02	2.30	568	256		2.27
4		8	7.8		183	0.00	2.38	540	243		2.83

(8±2%)とフロー値(190±20)も一定の範囲に収まるよう単位混和剤量で調整した。また、水結合材比は一律に45%とした。

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) 混和材料の混入率とブリーディング量の関係

図-7にBFSモルタルおよびFAモルタルのブリーディング量の経時変化を、図-8にブリーディング量と混和材料の混入率の関係を示す。これらの図から分かるように、BFSおよびFAの混入率の増大とともにブリーディング量は増加し、その増加傾向も顕著になる。また、BFSモルタルのブリーディング量は、混入率が45%を超えると著しく増加する一方、FAモルタルでは、混入率の増加の影響は緩やかである。しかし、混和材料によらず、ブリーディング量と混和材料の混入率には強い相関関係がみられる。

(2) 混和材料の混入率と透水係数の関係

図-9に、透水係数と混和材料の混入率の関係を示す。図から分かるように、混和材料によらず、混入率の増大とともに透水係数も増大する傾向がみられる。

2.4(2)でも述べたとおり、総粉体容積が大きくなると透水係数は小さくなるものと推察されたが、本実験では相反する結果を示した。これには、混和材料の粒子形状や粒子表面の性質が影響しており、混入率が大きくなると試料中の総粉体容積が増大するものの、FAは多くの球体粒子を含むこと、BFSは表面が平滑で緻密<sup>8)</sup>であることから、浸透水が試料中を移動し易くなったことが一因と考えられる。しかし、混入率と透水係数は強い相関関係にある。

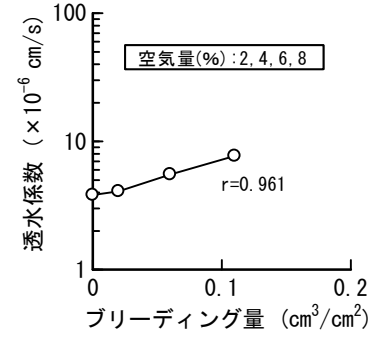


図-14 ブリーディング量と透水係数の関係(実験3)

(3) ブリーディング量と透水係数の関係

図-10に、ブリーディング量と透水係数の関係を示す。BFSやFAのブリーディング量が増加すると、透水係数の値も増加する傾向にあり、透水係数とブリーディング量の間には強い相関関係がみられる。

4. 空気量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

実験要因はモルタルの空気量とし、2, 4, 6, 8%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2と同様とした。表-7にモルタルの配合を示す。単位細骨材量は、空気量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(実験3では、2±0.5~8±0.5%)とフロー値(190±20で全て一定)は目標値となるよう単位混和剤量で調整した。また、結合材には普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比は一律に45%とした。

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) 空気量とブリーディング量の関係

図-11に、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、空気量8%ではブリーディングが認められず、それより空気量が小さくなるほど、ブリーディング量の増加傾向は大きくなっている。

図-12 に、ブリーディング量と空気量の関係を示す。図から分かるように、空気量の増加とともにブリーディング量は減少する傾向にある。

### (2) 空気量と透水係数の関係

図-13 に、透水係数と空気量の関係を示す。図から分かるように、透水係数と空気量は強い相関関係にあり、空気量が増加すると透水係数は僅かに減少する傾向にある。これは、空気量が大きくなるとセメントペーストの容積が減少し、試料中の間隙水の移動時間が増加することが原因と考えられる。

### (3) ブリーディング量と透水係数の関係

図-14 に、ブリーディング量と透水係数の関係を示す。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の値も増加する傾向にあり、透水係数とブリーディング量の間には強い相関関係がみられる。また、セメントの種類や混和材料の混入率を要因とした実験結果から分かるように(図-6、図-10 参照)、ブリーディング量が僅かであっても、透水係数は自由水の挙動を定量的に捉えている。

## 5. まとめ

本報では、使用材料および空気量を実験要因とし、フレッシュモルタルの透水試験およびブリーディング試験の結果から、水セメント比、単位細骨材量および混和剤の有無が、フレッシュモルタルの透水係数とブリーディング量に及ぼす影響について検討した。以下に、本実験で得られた知見を示す。

- 1)セメント種類と水セメント比を実験要因として、透水試験とブリーディング試験を行った結果、セメントの種類によらず、水セメント比が大きくなるとブリーディング量、透水係数は大きくなる傾向にある。また、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の間には、強い相関関係がみられる。
- 2)BFS および FA の混入率を実験要因として、透水試験とブリーディング試験を行った結果、BFS, FA ともに混入率が大きくなると、ブリーディング量、透水係数も大きくなる傾向にある。また、BFS, FA の混入率と透水係数、および BFS, FA の混入率とブリーディング量の間には、強い相関関係がみられる。
- 3)空気量を実験要因として、透水試験とブリーディング試験を行った結果、空気量が大きくなると、ブリーディング量や透水係数は小さくなる傾向にある。また、

空気量と透水係数、および空気量とブリーディング量の間には、強い相関関係がみられる。

- 4)使用材料と空気量を実験要因とした場合は、ブリーディング量と透水係数の間には、強い相関関係がみられる。
- 5)ブリーディング量が僅かであっても、透水係数は自由水の挙動を定量的にとらえている。

## 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)日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5、鉄筋コンクリート工事、pp.154-161, 2015.7
- 2)岡崎慎一郎、八木 翼、岸 利治、矢島哲司：養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究、セメント・コンクリート論文集、Vol.60, pp.227-234, 2007
- 3)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
- 4)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
- 5)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
- 6)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
- 7)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
- 8)土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針(案)資料編、p.60, 1988.1