論文 フレッシュモルタルの塑性粘度および透水係数と使用材料および空 気量の関係に関する実験的検討

澤田 陽*1·犬飼 利嗣*2

要旨:本研究では、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 タルの塑性粘度と透水係数の関係をより明確にするために、塑性粘度および透水係数と使用材料および空気 量の関係について実験的に検討した。その結果、塑性粘度や透水係数は、総粉体容積による影響を受けるが 混和材料の粒子形状や粒子表面の性質による影響も受けること、空気量を除いたセメントペースト容積によ る影響を受けることなどを考察した。また、水セメント比、混和材料の混入率、および空気量は塑性粘度や透 水係数と相関関係にあり、塑性粘度と透水係数は密接な関係にあることが分かった。

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、使用材料、空気量、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り,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¹⁾。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^{2,3)}し,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検討した。そ の結果,塑性粘度と透水係数は相関関係にあること,透 水係数は塑性粘度と比較して配合要因による影響をより 明確に表現できることなどを報告した⁴⁾。しかし,塑性粘 度や透水係数と配合要因との関係をより明確にするには, 使用材料や空気量などの要因についても詳細な検討をす 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、使用材料および空気量 の関係を明確にするために、まず実験1、2と して、セメントの種類および混和材料と、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、空気量と塑性粘度 および透水係数の関係について検討した。

*1 岐阜工業高等専門学校 専攻科建設工学専攻 (学生会員)

*2 岐阜工業高等専門学校 建築学科教授 博士(工学) (正会員)

セメントの種類と塑性粘度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 実験方法

(1) 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)も一定値と な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4001/m³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) モルタルの練混ぜおよびフロー試験

モルタルの練混ぜ(11/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

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

表-2 モルタルの使用材料(実験1)

材料名	種類	備考	記号
	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³ ,比表面積:3480cm ² /g	Ν
セメント	早強ポルトランドセメント	密度:3.14g/cm ³ ,比表面積:4600cm ² /g	Н
(C)	高炉セメントB種	密度:3.04g/cm ³ ,比表面積:3950cm ² /g	BB
	フライアッシュセメントB種	密度:2.95g/cm ³ , 比表面積:3300cm ² /g	FB
細骨材	乾燥珪砂(4号,5号)	絶乾密度:2.54g/cm³, 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

No	セメント	W/C	Air(%)		FL		S/C	単位量(kg/m)
NO.	の種類	(%)	目標値	実測値	目標値	実測値	(wt)	С	W	S	AD
1		35		7.2		190	2.1	622	218		5.59
2	N	45		8.6		194	2.4	540	243		2.83
3	N	55		8.6		197	2.7	479	263		1.55
4		65		8.6		191	3.0	428	278		0.75
5		35		8.1		191	2.1	621	217		3.10
6		45		8.2		186	2.4	540	243		1.35
7	п	55	0	9.4	100	203	2.7	477	262		1.19
8		65	°,	7.8	190	199	3.0	428	278	1004	0.64
9		35	T T	9.0	Ŧ	180	2.1	611	214	1284	2.44
10	DD	45	2	9.9	20	194	2.4	533	240		1.33
11	DD	55		7.5		192	2.7	472	260		0.47
12		65		6.8		205	3.0	423	275		0.42
13		35		7.3		185	2.1	600	210		3.00
14	гр	45		6.8		195	2.4	525	236		2.10
15	гВ	55		9.3		203	2.8	465	256]	0.70
16	1	65		8.6		205	3.1	419	272	1	0.04

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空気量試験

フレッシュモルタルの空気量は、JIS A 5002「構造用 軽量コンクリート骨材(5.12.d.モルタルの単位容積質量 の測定)」に準じて単位容積質量を測定し、JIS A 1116 「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び 空気量の質量による試験方法(質量法)(6.2.空気量)」に より算出した。

(4) 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-1参照)⁴⁾を用い, 以下の手順で行った。

試験容器(内径83mm, 高さ138mm)に約700m1の試料を1 層で詰めバイブレータで締固め成形した後,錘(0~420g 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)のシリコー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-2に塑性粘度が200Pa・sのシリコーンオイルによるせ ん断速度とせん断応力度の関係を,図-3に3種類のシリコ ーンオイルを試料として作成した検量線を示す。

$A = A_I + A_2$	(1)
$A_1 = 6 \cdot b \cdot h + 3 \cdot c \cdot h$	(2)
v = d/t	(3)



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

ここに、A: 試料をせん断するせん断面の面積(mm²)

- A₁: 試料をせん断する沈入羽根の面積(mm²)
 - 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
 - A₂:試料をせん断する軸の面積(161mm²)
 - A₂=(d_s·π-3c)·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)
- t:沈入時間(s)

τ: せん断応力度(Pa)
 W₁: 沈入羽根の重量(74.2g)
 W₂: 錘の重量(g)
 g: 単位の換算係数(9.80665)

(5) 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²⁾が考案し た透水試験方法(図-4参照)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)に予め湿らしたろ紙を敷き,基準の厚さとなる 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(5)により算出した。

h=(Sw/Uw)/(πD²/4) (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/cm³) 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-5参照)、水セメント比が35%では透水 時間に90分以上を要し水和反応の影響を大きく受けるこ と(図-6参照)などを考慮して既報の実験結果²⁾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10cm³から20cm³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 ている。



$$k = \rho \left[h/(P/g) \right] \cdot (Q/A) \tag{7}$$

 ρ :水の密度(1×10⁻³kg/cm³)







図-5 透水係数と吸引圧の関係 (W/C=50%)²⁾



- h: 試料の厚さ(cm)
- P:吸引圧(kPa)
- g:単位の換算係数(9.80665×10⁻²)
- A: 試料の断面積(cm²)

2.3 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塑性粘度 の関係

図-7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、塑性粘度の値はNとFBモルタルは同様の 傾向にあり最も小さく、Hモルタルはそれらを少し上回る 傾向にある。一方、BBモルタルの塑性粘度は極端に大き く、NやFBモルタルと比較すると、いずれの水セメント比 においても10Pa・sほど大きな値を示している。これは、 既往の研究⁵と同様の傾向であり、高炉スラグ微粉末を



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								

混入すると塑性粘度の値が大きくな ることに起因していると考えられ る。なお、このような傾向はFBモル タルにも考察されると考えられる が、FBモルタルでは、フライアッシ ュの混入により総粉体容積は増加す るものの、その一方で粉体中に占め る球状粒子の容積も増加する。した がって、レオロジー試験では試料中

のせん断抵抗が小さくなり,塑性粘度はNやHモルタルと 同様の傾向を示したと考えられる。また,いずれのセメ ントにおいても,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,塑性粘度と水セメント比 の間には既報⁴の実験結果(相関係数:0.9710)と同様の 強い相関関係がみられる。

(2) セメントの種類および水セメント比と透水係数のの関係

図-8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、塑性粘度の値が大きくなると小さくなる傾 向にあると考えられるが、図から分かるように、N、BB、 H、FBモルタルの順で大きくなる傾向にあった。また、FB モルタルの透水係数は、N、H、およびBBモルタルと比較 して極端に大きくなっており、水セメント比が55%以上 になると約2倍にあたる大きな値を示している。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 影響が考えられ、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 に起因するものと考えられる。しかし、いずれのセメン トにおいても、水セメント比が大きくなると透水係数の 値は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⁴の実験結果(相関係数:0.9702)と同様の強



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 ³ ,比表面積:3480cm ² /g	С
細骨材	乾燥珪砂(4号,5号)	絶乾密度:2.54g/cm³,混合比率 1:1	S
)日 4 日 ++ 小小	高炉スラグ微粉末(せっこう添加あり)	密度:2.91g/cm ³ ,比表面積:4250cm ² /g	BFS
/82 111 171 171	フライアッシュ Ⅱ 種	密度:2.28g/cm ³ ,比表面積:3480cm ² /g	FA
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-6 モルタルの配合(実験2)													
No	混和材料	混入率	W/B	Air	(%)	F	L	S/B		È	単位量	(kg/m ³)	
NO.	の種類	(%)	(%)	目標値	実測値	目標値	実測値	(wt)	C	W	BFS	FA	S	AD
1		0			8.6		194	2.38	540	243				2.83
2		20			9.8		182	2.41	429	242	103	-		1.34
3	BFS	45		8	9.8	190	194	2.45	293	240	232	-		1.33
4		70	45	±	9.7	±	173	2.50	158	237	356		1284	0.79
5		10		2	9.0	20	191	2.41	480	240	-	53		2.40
6	FA	20			6.8		195	2.45	420	236		105		2.10
7		30			9.5		194	2.48	362	233	-	155		1.29

い相関関係がみられる。

(3) 塑性粘度と透水係数の関係

図-9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、いずれのセメントも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 水係数の間にも強い相関関係がみられる。したがって、 塑性粘度と透水係数は、密接な関係にあるといえる。

混和材料と塑性粘度および透水係数の関係(実験2) 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(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。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) 塑性粘度と混和材料の混入率の関係

図-10に、塑性粘度と混和材料の混入率の関係を示す。



図から分かるように、いずれの混和材料を用いたモルタ ルにおいても、塑性粘度と混和材料の混入率の間には強 い相関関係がみられ、混和材料の混入率が大きくなると 塑性粘度の値は大きくなる傾向を示している。このよう な傾向には、混和材料の混入率と密度が影響していると 考えられ、セメントより密度の小さい混和材料の混入率 が大きくなるとモルタル中に占める総粉体容積が増大 し、試料のせん断抵抗が大きくなることが起因している と考えられる。なお、FAモルタルの塑性粘度にはFAの混 入率による影響はほとんどみられないが、これにはFAの 粒子形状が主に影響していると考えられ、混入率が大き くなると試料中の総粉体量は増大するが球状粒子の容積 も増大するので、その相乗効果によるものと推察される。

(2) 透水係数と混和材料の混入率の関係

図-11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、いずれの混和材料を用いたモルタ ルにおいても、塑性粘度と混和材料の混入率の間には強 い相関関係がみられるが、混和材料の混入率が大きくな ると透水係数の値も大きくなる傾向を示している。 2.3 (2)にも述べたが、透水係数の値は塑性粘度の値が大きく なると小さくなる傾向にあると考えられるが、本実験結 果は相反する傾向を示している。これには、混和材料の 粒子形状や粒子表面の性質と混入率が影響していると考 えられ、混入率が大きくなると、試料中の総粉体容積が 増大しせん断抵抗は大きくなり塑性粘度の値は大きくな るが、FAは多くの球状粒子を含むこと、BFSは表面が平滑 で緻密⁶⁰であることから、浸透水が試料中を移動し易く なり透水係数の値が大きくなったと考えられる。

表-7 モルタルの配合(実験3)

N.	W/C Air(%)		F	Ľ	S/C	単位量(kg/m ³)				
NO.	(%)	目標値	実測値	目標値	実測値	(wt)	С	W	S	AD
1		2	2.1	100	180	2.10	619	279		1.24
2	45	4	4.0	190	182	2.20	593	267	1004	1.78
3	40	6	5.8	± 20	185	2.30	568	256	1204	2.27
4		8	7.8	20	183	2.38	540	243]	2.83

(3) 塑性粘度と透水係数の関係

図-12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も大きくなる傾向にあり、塑性粘度と透水係数の間には強い相関関係がみられる。これには、前述したように、 混和材料の粒子形状や粒子表面の性質と混入率が影響していると考えられる。したがって、実験1(図-9参照)とは相反する傾向にはあるが、塑性粘度と透水係数は密接な関係にあるといえる。

4. 空気量と塑性粘度および透水係数の関係(実験3)

4.1 実験要因

実験要因は、フレッシュ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,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,すべて一 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) 塑性粘度と空気量の関係

図-13に、塑性粘度と空気量の関係を示す。図から分か るように、空気量が増加すると塑性粘度の値は小さくな る傾向にある。このような傾向には、エントレインドエ アによるボールベアリング効果と、空気量を除いたセメ ントペーストの容積が影響していると考えられ、空気量 が大きくなるとボールベアリング効果は大きくなり、か つセメントペーストの容積が減少するので、試料のせん 断抵抗が小さくなることに起因していると考えられる。

(2) 透水係数と空気量の関係

図-14に、透水係数と空気量の関係を示す。図から分か るように、透水係数と空気量の間には強い相関関係がみ られ、空気量が増加すると透水係数の値は僅かに減少す る傾向にある。これは実験2(図-12参照)と同様の傾向で あり、塑性粘度が小さくなると透水係数の値も小さくな る傾向にある。しかし、このような傾向にはセメントペ ーストの容積による影響が考えられ、空気量が大きくな るとセメントペーストの容積は減少し試料中の間隙水の 移動時間が増加すること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-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も大きくなる傾向にあり、塑性粘度と透水係数の間には強い相関関係がみられる。このような傾向には、前述したように、ボールベアリング効果とセメントペーストの容積が影響していると考えられる。したがって、実験1(図-9参照)とは相反する傾向にはあるが、塑性粘度と透水係数は密接な関係にあるといえる。

5. まとめ

本実験結果から、以下の知見を得た。

- 1)NとFBモルタルの塑性粘度は最も小さく,Hモルタルは それらを少し上回る傾向にある。一方,BBモルタルの 塑性粘度は,極端に大きくなる傾向にある。
- 2) 水セメント比は、セメントの種類によって異なるもの の塑性粘度や透水係数と強い相関関係にあり、水セメ

ント比が大きくなると塑性粘度は小さく透水係数は 大きくなる傾向にある。

- 3)BFSやFAの混入率は,塑性粘度や透水係数と強い相関関 係にあり,その混入率が大きくなると塑性粘度と透水 係数は大きくなる傾向にある。
- 4)空気量は、塑性粘度や透水係数と強い相関関係にあり、 空気量が増加すると塑性粘度は小さくなり、透水係数 も僅かではあるが小さくなる傾向にある。
- 5) 塑性粘度は、使用材料や空気量に関わらず透水係数と 密接な関係にある。

謝辞

本実験に際し、今村早玖さん、久保田祐馬君、田中愛 美さん(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

- 加中宗憲,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: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
- 4) 片桐彰吾, 犬飼利嗣, 澤田 陽: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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, pp. 1075-1080, 2015
- 5) 吉野 公, 西林新蔵, 湯谷政博:高性能AE減水剤を添 加した高炉スラグ系コンクリートのレオロジー特性 について, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要 集, 第5部, Vol.45, V-91, pp.208-209, 1990.9
- 6) 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