

論文 流動性および材料分離抵抗性の評価に関する基礎的検討

西村 和朗*1・加藤 佳孝*2

要旨: 本研究では、フレッシュコンクリートの流動性を L 型ボックス試験によって、材料分離をブリーディング試験によって評価可能であると仮定し、両者の測定結果と、簡易な試験であるスランブ試験結果やタンピング試験結果、および材料の物理的な指標との関係について実験的に検討した。その結果、スランブおよびモルタル中の自由水量やセメントと細骨材の総表面積を用いた指標は、材料・配合の特性の影響が大きいと考えられる 3.0~4.0cm/s および 6.5~8.0cm/s の 5 秒平均流動速度および初期ブリーディング速度と関係性があることが確認された。

キーワード: 流動性, 材料分離抵抗性, スランブ, 自由水, 総表面積

1. はじめに

フレッシュコンクリートの品質は、スランブや単位粉体量を指標として評価されるのが一般的であるが、実施工を想定すれば、振動を受けて鉄筋間を通過化し型枠の隅々に充填される挙動を把握する必要がある。このような実施工で想定される挙動は、スランブ試験に伴うフレッシュコンクリートの挙動とは異なっていることが指摘されている¹⁾。また、近年、良質な骨材資源の枯渇や使用材料の多様化により、様々な材料がコンクリート材料として活用されているが、この場合、スランブ値が同じであっても、施工性能が異なることが報告されている²⁾。このため、充填性や締固め性能に関するワーカビリティを適切に評価するためには、振動条件下での挙動を定量的に評価する方法が必要とされている²⁾。

これまでもフレッシュ性状に関する研究は盛んに行われており、例えば、コンクリートの流動性を予測するために、余剰ペースト膜厚理論³⁾や水膜モデルによる手法⁴⁾、相対フロー面積比と水粉体容積比の直線関係を用いる手法⁵⁾等が提案されている。一方、流動性や材料分離抵抗性を把握するために、L フロー試験⁶⁾や加振 BAR フロー試験⁷⁾等を用いて検討されている。このように様々な視点から検討されているものの、使用材料や配合とフレッシュ性状の関係については、必ずしも十分に理解できていないのが現状である。

本研究では、配合要因がフレッシュ性状に及ぼす影響を整理するとともに、簡易な試験結果や材料の物理的な指標等とフレッシュ性状の関係性について検討した。

2. セメントペースト・モルタル試験

2.1 使用材料・配合

セメントには普通ポルトランドセメント（密度

3.15g/cm³, 比表面積 3410cm²/g), 細骨材には山梨県富士川産川砂（表乾密度 2.65 g/cm³, 絶乾密度 2.62 g/cm³, F.M.2.73）を用いた。セメントペーストの水セメント比（以降 W/C と称する）は 30, 50, 70% の 3 水準とした。モルタルの W/C は 40~60% とし、細骨材容積比は 0.4~0.6 とした。

2.2 拘束水比の算出

(1) セメントの拘束水比の算出

枝松ら⁵⁾の研究より、フロー試験結果を用いて式(1)より算出されるセメントペーストの相対フロー面積比（以降、 Γ_p と称する）と、水セメント容積比（以降、 V_w/V_p と称する）は線形関係になることが報告されている。同様な手順で Γ_p と V_w/V_p の関係を検討した。また、施工時の状況を踏まえると、フレッシュコンクリートには振動締固め等の外力の影響が加えられると考えられる。そこで、本研究では、フロー試験を JIS R 5201 に準拠し、0 打に加え、5, 15 打の場合も同様の手順で Γ_p と V_w/V_p の関係を検討した。各打数の Γ_p と V_w/V_p の関係を図-1 に示す。 Γ_p と V_w/V_p の関係式である式(2)を用いて、セメントの拘束水比を算出した。各打数のセメントの拘束水比を表-1 に示す。打数の増加に伴いセメントの拘束水比が減少することが確認された。以上より、外力の影響に伴い拘束水比が変化することが考えられる。

$$\Gamma_p = \left(\frac{F_p}{100} \right)^2 - 1 \quad (1)$$

$$\frac{V_w}{V_p} = E_p \cdot \Gamma_p + \beta_p \quad (2)$$

ここに、 F_p : セメントペーストのフロー値(mm), V_w : セメントペースト中に占める水容積比, V_p : セメントペースト中に占める粉体容積比, E_p : 粉体の変形係数, β_p : セメントの拘束水比

*1 東京理科大学 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 理工学部 土木工学科 准教授 博(工) (正会員)

表-1 セメントの拘束水比

	打数(回)		
	0	5	15
セメントの拘束水比	0.92	0.63	0.39

(2) モルタルの拘束水比の算出

モルタル中の細骨材容積比を一定にした場合、モルタルも同様に、式(3)で算出されるモルタルの相対フロー面積比（以降、 Γ_m と称する）と V_w/V_p の関係は線形関係となることが報告されている⁵⁾。本研究で算出した0打の Γ_m と V_w/V_p の関係を図-2に示す。 Γ_m と V_w/V_p の関係式である式(4)を用いて、モルタルの拘束水比を算出した。各打数のモルタルの拘束水比を表-2に示す。セメントペースト同様に、外力の影響によりモルタルの拘束水比の変化が確認された。本研究では、施工時の状況を踏まえるために、以降の検討は、外力の影響のある15打の拘束水比を用いて検討した。

$$\Gamma_m = \left(\frac{F_m}{100}\right)^2 - 1 \quad (3)$$

$$\frac{V_w}{V_p} = E_m \cdot \Gamma_m + \beta_m \quad (4)$$

ここに、 F_m ：モルタルのフロー値(mm)， V_w ：モルタル中に占める水容積比， V_p ：モルタル中に占める粉体容積比， E_m ：モルタルの変形係数， β_m ：モルタルの拘束水比

(3) コンクリートの自由水量の算出

モルタルの拘束水比の状態の配合を算出し、水固体粒子容積比 ($V_w/(V_s+V_p)$) と細骨材固体容積比 ($V_s/(V_s+V_p)$) を求めた結果を図-3に示す。なお、細骨材固体容積比が0の時はセメントペーストの配合を、細骨材固体容積比が1の時は細骨材と水の配合を意味している。図に示すように両者には直線関係が認められることから、この直線関係を用いて任意の細骨材容積比についてモルタルの拘束水比を求めることができる。ここで、拘束水はセメントや骨材の表面積に影響されると考え、セメントや細骨材と比較して、 $1m^3$ あたりの総表面積が微小である粗骨材には拘束水が存在しないと仮定した。このため、コンクリートの拘束水は、コンクリート中のモルタルの拘束水のみと考え、コンクリート中の細骨材固体容積比を算出し、図中の式を用いてモルタルの拘束水比を算出した。また、式(5)よりコンクリート中の自由水量を算出した。

$$W_f = W - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{S}{\rho_s}\right) \cdot \beta_m \quad (5)$$

ここに、 W_f ：自由水量(kg/m^3)， W ：単位水量(kg/m^3)，

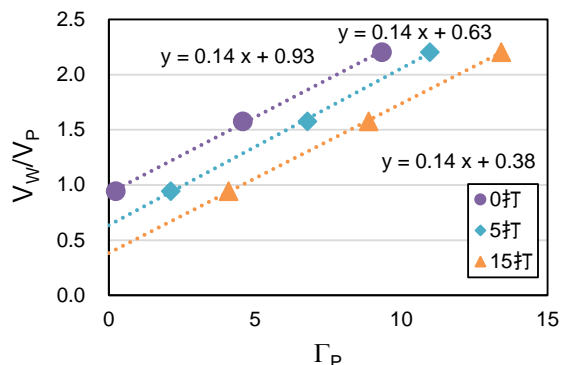


図-1 ペーストフローの Γ_P と V_w/V_p の関係

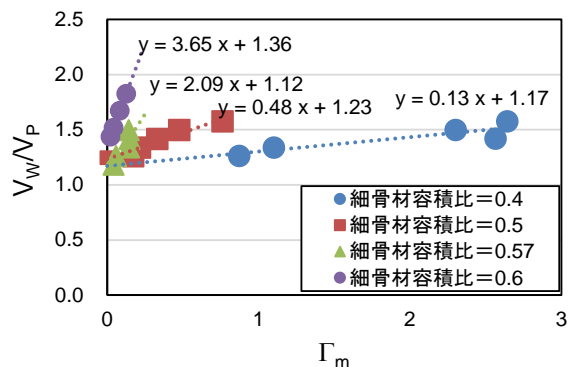


図-2 0打のモルタルの Γ_m と V_w/V_p の関係

表-2 モルタルの拘束水比

	細骨材容積比	打数(回)		
		0	5	15
モルタルの拘束水比	0.4	1.17	0.84	0.64
	0.5	1.22	0.92	0.80
	0.57	1.12	1.31	1.34
	0.6	1.36	1.20	1.12

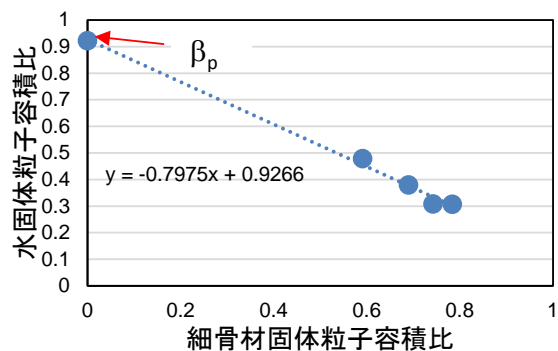


図-3 水固体粒子容積比と細骨材固体容積比の関係

表-3 基本配合

Gmax (mm)	Air (%)	W/C (%)	単位数(kg/m^3)				単位数 ($C \times \%$)	
			W	C	S	G	A ₁	A ₂
20	4.5	50	165	330	827	1034	0.003	0.2

表-4 コンクリートの配合および試験結果, 物性値

No	配合						指標			要因					
	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				V _{f5} (cm./s)	V _{f5} (cm./s)	V _b (%/min)	SL (cm)	Γ (mm/回)	W _f (kg/m ³)	A _c (m ² /m ³)	A _s (m ² /m ³)	W _f /(A _c +A _s) ×100 (kg/m ²)
			W	C	S	G									
1	40	45	155	388	807	1009	4.0	1.2	0.001	0.5	/	53.3	63869	4230	0.08
2	40	45	160	400	797	996	4.0	1.2	0.002	1.5	2.1	57.4	65844	4177	0.08
3	40	40	165	413	698	1071	6.0	0.8	0.012	8.5	3.6	67.1	67984	3658	0.09
4	40	42.5	165	413	742	1027	6.5	1.5	0.013	7.0	2.1	64.3	67984	3889	0.09
5	40	45	165	413	786	982	3.0	2.0	0.007	2.0	0.7	61.4	67984	4119	0.09
6	40	47.5	165	413	829	937	5.0	2.0	0.008	4.5	3.3	58.7	67984	4345	0.08
7	40	50	165	413	873	893	3.5	1.0	0.007	1.5	0.7	55.8	67984	4575	0.08
8	40	45	170	425	775	969	7.0	1.0	0.006	12.0	6.7	65.6	69959	4062	0.09
9	40	45	175	438	764	955	6.0	1.4	0.013	9.5	2.4	69.7	72099	4004	0.09
10	50	45	155	310	837	1046	4.0	2.0	0.018	3.5	1.0	61.3	51029	4387	0.11
11	50	45	160	320	827	1034	4.0	1.5	0.020	6.0	1.2	65.7	52675	4334	0.12
12	50	40	165	330	726	1114	5.0	1.5	0.024	14.0	3.6	75.9	54321	3805	0.13
13	50	42.5	165	330	772	1068	7.0	1.5	0.024	11.0	3.6	72.9	54321	4046	0.12
14	50	45	165	330	817	1021	5.0	1.0	0.019	7.5	2.1	70.0	54321	4282	0.12
15	50	47.5	165	330	863	975	6.0	1.0	0.029	8.0	3.4	67.0	54321	4523	0.11
16	50	45	170	340	807	1009	7.0	2.0	/	6.5	5.4	74.4	55967	4230	0.12
17	50	45	175	350	798	997	6.5	1.0	/	10.5	5.7	78.7	57614	4182	0.13
18	60	45	155	258	856	1070	5.0	1.0	0.025	4.5	3.7	66.7	42469	4486	0.14
19	60	40	165	275	745	1143	8.0	1.5	0.028	13.0	2.6	81.7	45268	3905	0.17
20	60	42.5	165	275	791	1095	7.5	1.0	0.033	13.0	6.7	78.7	45268	4146	0.16
21	60	45	165	275	838	1047	6.0	1.0	/	7.5	5.2	75.7	45268	4392	0.15
22	60	47.5	165	275	885	1000	6.5	0.5	0.034	11.0	2.5	72.6	45268	4638	0.15
23	60	45	170	283	829	1036	8.5	1.0	0.048	15.0	6.3	80.2	46585	4345	0.16

C: 単位セメント量(kg/m³), S: 単位細骨材量(kg/m³), ρ_c: セメントの密度(g/cm³), ρ_s: 細骨材の密度(g/cm³)

3. コンクリート試験

3.1 使用材料・配合

セメント, 細骨材はモルタルと同様の材料を用いた。粗骨材には埼玉県秩父産砕石(表乾密度 2.72g/cm³, 絶乾密度 2.67 g/cm³, F.M.6.74), 化学混和剤にはアルキルエーテル系 AE 剤(以降 A₁ と称する) およびポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤(以降 A₂ と称する)を用いた。基本配合を表-3 に示す。本研究では, 基本配合を基に, 水セメント比を 40~60% で 3 水準, s/a を 40~50% で 5 水準, 単位水量を 155~175kg/m³ で 5 水準の範囲で変化させた。

3.2 試験概要

(1) スランプ試験

スランプ試験は JIS A 1101 に準拠した。

(2) タンピング試験

本研究では, 藤代ら⁸⁾の研究を参考に改良コーンを用いた。スランプ板の隅 4 箇所の高さ 5cm から突棒(約 815g の金属棒)を自由落下させ, フロー値を測定した。なお, 衝撃は, 対角線上の 2 箇所を同時に与え, もう一方の対角線上に再び衝撃を与えた。この動作を 1 回とし, 5, 10, 15 回の衝撃を与えた際に測定した。衝撃を与えた回数とフロー値の傾きをフローの変形係数とした。

(3) L 型ボックスフロー試験

L 型ボックス試験概要を図-4 に示す。コンクリートを高さ 30cm まで打設し, 内部振動機をコンクリート中央にセットし, 仕切り板を抜くのと同時に内部振動機を JIS A 8612 に準じて 10 秒間締固めた。0~5 秒間, 5~10 秒

間の平均流動速度（以降、それぞれ V_{15} 、 V_{110} と称する）を算出し、流動性の指標として用いた。

(4) ブリーディング試験

ブリーディング試験は、JIS A 1123 に準拠し、ブリーディング率の経時変化を算出した。0～60 分までのブリーディング率の傾きを初期ブリーディング速度（以降 V_B と称する）とし、材料分離抵抗性の指標として用いた。なお、ブリーディング率は式(6)、(7)を用いて算出した。

$$B_r = \frac{V \times \rho_w}{W_s} \times 100 \quad (6)$$

$$W_s = \frac{W}{C'} \times S' \times 1000 \quad (7)$$

ここで、 B_r ：ブリーディング率(%), V ：累計したブリーディングによる水の容積(cm^3), ρ_w :水の密度(g/cm^3), W_s ：試料中の水の質量(g), C' ：コンクリートの単位容積重量(kg/m^3), S' ：試料の質量(kg)である。

3.3 試験結果

本研究で検討した配合、試験結果、材料の物理的な指標の結果を表-4 に示す（表中の斜線は試験未実施を示している）。ここで、 A_c ：セメント総表面積(m^2/m^3), A_s ：細骨材総表面積(m^2/m^3)である。セメント総表面積は比表面積と単位セメント量を用いて、細骨材表面積は細骨材のふるいわけ試験結果と単位細骨材量を用いて算出した。また、 $W_f/(A_c+A_s)$ は流動性を支配すると考えられる自由水量と、粘性に影響すると考えられるセメント粒子と細骨材の表面積を比にしたものである。

s/a と V_{15} の関係を図-5 に示す。全体的に見ると、 s/a の増加に伴い V_{15} は減少傾向を示すが、 W/C 毎に両者の関係を見ると、必ずしも明確な関係性は見られない。

各 W/C の s/a と V_{110} の関係を図-6 に示す。いずれの配合でも、 V_{15} と比較して V_{110} は低下した。これは、10 秒時と比較して 5 秒時の流動しているコンクリートの先端は、パイプレータとの距離が近いことや、試験開始時のコンクリートの位置エネルギーが運動エネルギーに変換されたことによる速度増加の影響が考えられる。また、 s/a の増加に伴い $W/C=50\%$ と 60% の平均流動速度は低下した。一方、 $W/C=40\%$ では、 $s/a=40\%$ と 50% では平均流動速度が低く、 $42.5\% \sim 47.5\%$ は概ね一定となった。これは、セメントペーストの粘性によって s/a の影響が異なることが考えられる。細谷⁹⁾の研究では、 W/C の増加に伴い粘性が低下することが確認されている。このため、 $W/C=40\%$ のセメントペーストの粘性は比較的高く、分離抵抗性が高いため、 s/a による影響が大きいことが考えられる。 s/a が流動性に与える影響の概念を図-7 に示す。 $s/a=40\%$ では、密度の高い粗骨材が多く、これらを分

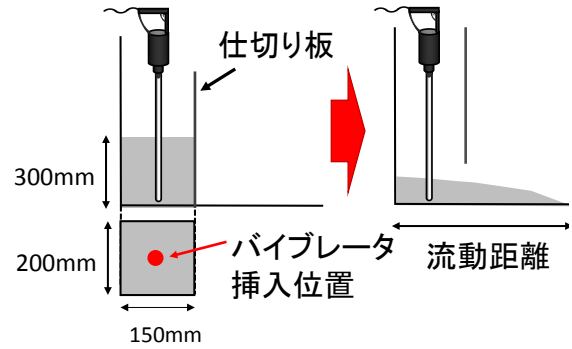


図-4 L型ボックスフロー試験概要

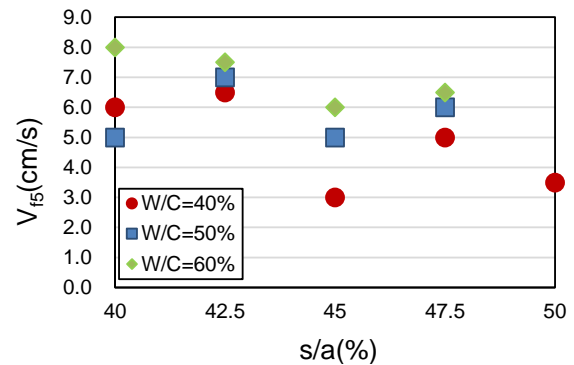


図-5 s/a と V_{15} の関係 (No.3～7, No.12～15, No.19～22)

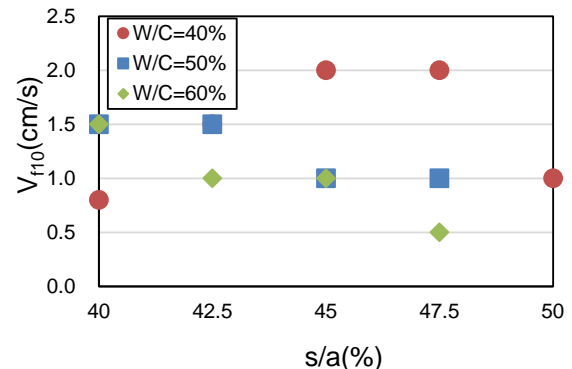


図-6 s/a と V_{110} の関係 (No.3～7, 12～15, 19～22)

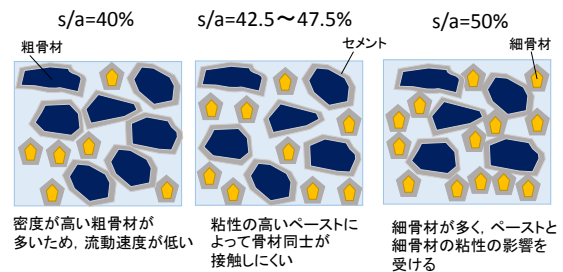


図-7 s/a の違いが流動性に及ぼす影響の概念図

離せずに流動するため、平均流動速度が低下したことが考えられる。一方、 $s/a=50\%$ では、細骨材が多いため、接触面積や拘束水による粘性の増加によって平均流動速

度が低下したと考えられる。s/a=42.5~47.5%では、細骨材や粗骨材が過剰ではないため、これらの影響が少なく、セメントペースト粘性が流動性の支配要因となったことで平均流動速度が概ね一定となったことが考えられる。一方、W/C=50%と60%では、セメントペーストの粘性が低いため、粗骨材と分離し、流動している先端部に単位モルタル量が多くなることが考えられる。このため、前述した細骨材の影響を強く受け、s/aの増加に伴い平均流動速度が低下したと考えられる。

各W/Cの単位水量と V_B の関係を図-8に示す。W/Cが40%と60%の場合(50%ではデータが無いため判断できない)、単位水量が165kg/m³付近を超えると V_B の増加が確認された。これは、単位水量の増加に伴う自由水量の増加が原因と考えられる。

4. 流動性と材料分離抵抗性の評価

4.1 データの整理

表-4に記載されている試験結果や材料の物理的な指標を用いて、流動性や材料分離抵抗性を評価する。以降の考察は、流動性や材料分離抵抗性の指標と簡易な試験結果であるSLや Γ 、および材料の物理的な指標である

$W_f/(Ac+As)$ の関係について検討した。なお、流動性の指標である V_{f10} はいずれの指標とも明確な関係性が確認されなかったため、以降の検討では V_{f5} を用いて検討した。

4.2 流動性の評価

流動性の違いによって平均流動速度と簡易な試験結果や材料の物理的な指標の関係が異なる可能性が考えられる。このため、平均流動速度の最大から最小の範囲を約1/3に分類して検討した(3.0~4.5, 5.0~6.0, 6.5~8.0 cm/s)。なお、4.1~4.5 cm/sの範囲の結果が確認されなかったため、3.0~4.0 cm/sと表記する。

SLと V_{f5} の関係を図-9に、 Γ と V_{f5} の関係を図-10に、 $W_f/(Ac+As)$ と V_{f5} の関係を図-11に示す。簡易な試験結果であるSLや Γ 、材料の物理的な指標である $W_f/(Ac+As)$ の増加に伴い V_{f5} は上昇した。

SLと $W_f/(Ac+As)$ は、 $V_{f5}=5.0\sim6.0$ cm/sの範囲でばらつきが最も大きかった。ここで、 V_{f5} で評価される流動性に与える影響を考えると、材料・配合の特性と外力作用の影響が考えられる。流動性が高い場合($V_{f5}=6.5\sim8.0$ cm/s)と低い場合($V_{f5}=3.0\sim4.0$ cm/s)は、外力の影響を評価していないSLおよび外力の影響を評価している $W_f/(Ac+As)$ と、 V_{f5} に一定の関係が見られたことから、

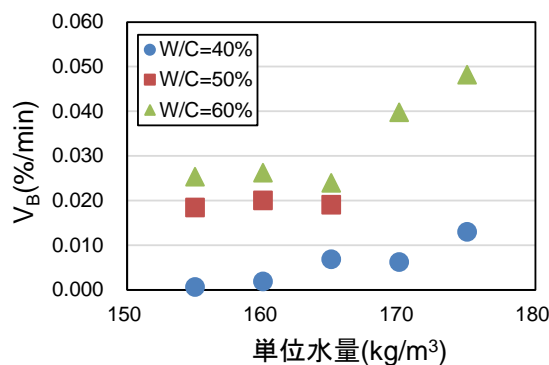


図-8 単位水量と V_B の関係 (No.1, 2, 5, 8~11, 15, 16~18, 21, 23)

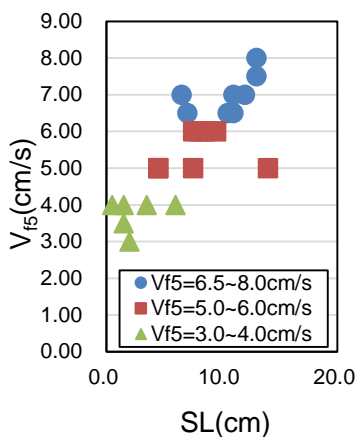


図-9 SLと V_{f5} の関係

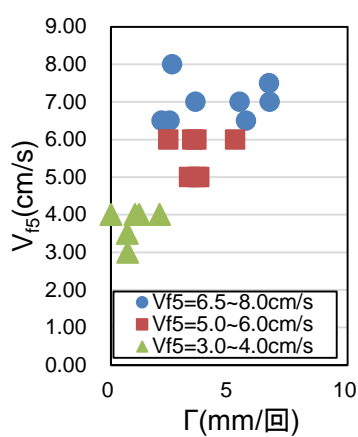


図-10 Γ と V_{f5} の関係

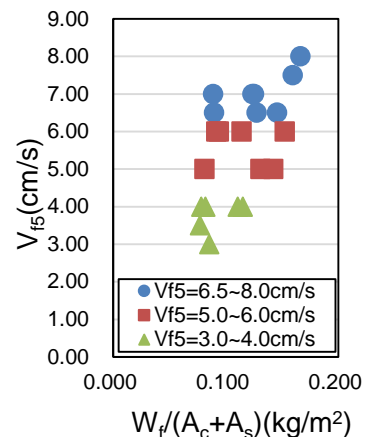


図-11 $W_f/(Ac+As)$ と V_{f5} の関係

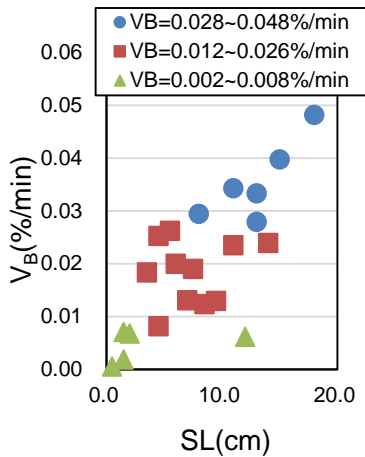


図-12 SLと V_B の関係

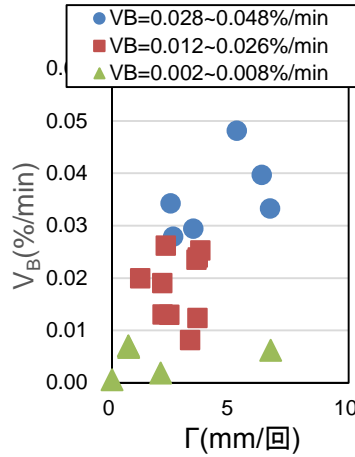


図-13 Γ と V_B の関係

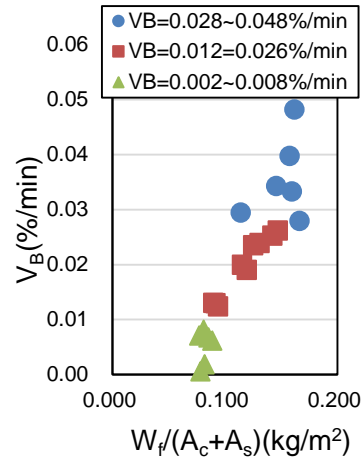


図-14 $W_f/(Ac+As)$ と V_B の関係

V_B に与える影響としては、材料・配合の特性の影響>外力作用であると考えられる。一方で、SL、 $W_f/(Ac+As)$ と V_B の関係でばらつきの大きかった $V_B=5.0\sim 6.0\text{cm/s}$ の範囲では、 V_B に与える影響としては、外力作用>材料・配合特性であると考えられる。

Γ は $V_B=6.5\sim 8.0\text{cm/s}$ の範囲でばらつきが最も大きく生じている。 Γ は V_B と同様に外力作用を評価していると考えられるが、特に、 $V_B=6.5\sim 8.0\text{cm/s}$ の範囲でばらつきが大きかったことから、 Γ では流動性の高い材料・配合のコンクリートの評価は難しいと考えられる。

4.3 材料分離抵抗性の評価

SLと V_B の関係を図-12に、 Γ と V_B の関係を図-13に、 $W_f/(Ac+As)$ と V_B の関係を図-14に示す。SLと $W_f/(Ac+As)$ の増加に伴い V_B は上昇し、特に $W_f/(Ac+As)$ と V_B の関係は、概ね線形関係になっていることが分かる。このことから、外力作用のないブリーディング試験で評価される材料分離抵抗性の場合、自由水量と粘性に関連すると考えられるセメントおよび細骨材の総表面積で評価可能であると考えられる。一方、 Γ と V_B には明確な関係が確認されなかった。これは、ブリーディング試験は外力の影響が少ないが、タンピング試験は外力を与えることで評価しているためと考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲で得られた知見をまとめると次のようになる。

- (1) セメントペーストの粘性の程度によって、s/aが流動性に与える影響が異なる可能性が考えられる。
- (2) 材料・配合の特性の影響が大きいとされる流動性の範囲（本研究では、 $V_B=3.0\sim 4.0\text{cm/s}$ 、 $V_B=6.5\sim 8.0\text{cm/s}$ ）では、SLや $W_f/(Ac+As)$ で流動性を評価

できる可能性がある。

- (3) 材料分離抵抗性の試験として用いたブリーディング試験は、外力の作用がないため、SLや $W_f/(Ac+As)$ を用いることで評価できる可能性がある。

参考文献

- 1) 社団法人 日本コンクリート工学協会：施工の確実性を判定するためのコンクリートの試験方法とその適用性に関する研究報告書，pp.23-47，2009.7
- 2) 坂田昇，新藤竹文，前川宏一：コンクリート施工性の問題とそれらを解決する施工性評価システム，橋梁と基礎，pp.41-46，2005.10
- 3) 三宅淳一：コンクリートの配合設計と品質管理，セメントジャーナル社，pp.115-146，2013.2
- 4) 緑川猛彦，丸山久一，下村匠，桃井清至：粉体特性の定量化手法に基づくペーストの流動性評価理論，土木学会論文集，No.578/V-37，pp.99-110，1997.11
- 5) 枝松良展，山口昇三，岡村甫：モルタルの変形性を表す細骨材の材料特性の定量化，土木学会論文集，No.538/V-31，pp.37-46，1996.5
- 6) 日本建築学会編：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説，pp.136-137，1994
- 7) コンクリートの施工性能評価委員会：施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー126号，2007.
- 8) 藤代勝，坂井吾郎，坂田昇，新藤竹文：フレッシュコンクリートの粘性評価手法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006
- 9) 細谷繁好：コンクリートのセメントペースト部分の粘性について，材料試験・日本材料試験境界[編]，7巻，52号，pp.44-49，1958