

論文 傾斜フロー試験によるコンクリートのフレッシュ性状評価に関する研究

阿部 果林^{*1}・藤原 浩已^{*2}・丸岡 正知^{*3}・笹倉 博行^{*4}

要旨：現在の流動性評価はスランプ値またはスランプフロー値によって行われることが多いが、これらは主に降伏値を反映する指標であるため、同じ値を示していても施工性に大きな違いが生じる可能性がある。そこで本研究では、簡易的な粘性評価試験方法として傾斜フロー試験を提案することを目的とした。実験は高強度コンクリートを対象とし、回転翼型粘度計より得られた降伏値および塑性粘度と傾斜フロー試験より得られた流動先端速度の関係を調べ、傾斜フロー試験が粘性を評価する試験となり得ることを示した。また、傾斜フロー試験を用いて最適な最骨材率を選定する方法について検討した。

キーワード：粘性，回転翼型粘度計，傾斜フロー試験，細骨材率，余剰ペースト膜厚

1. はじめに

現在行われているフレッシュコンクリートの評価試験は、スランプまたはスランプフロー試験が大半である。一般にフレッシュコンクリートの変形性は、降伏値に関係する軟度と塑性粘度に関係する粘度の2性状で評価されるが¹⁾、スランプおよびスランプフロー値はコンクリートの軟度を評価する指標であり、簡便に軟練りコンクリートの塑性粘度を評価する試験方法は確立されていない。

一方、コンクリートのフレッシュ性状評価試験方法は数多く提案されており、特に回転粘度計等を用いたレオロジー試験を行えばより正確なレオロジー特性を測定できる²⁾。しかし、回転粘度計を用いた試験は煩雑であり、装置も大型となるため、一般化していないのが現状である。

そこで本研究では、簡易的な粘性評価試験として傾斜フロー試験を行い、その結果と回転翼型粘度計³⁾より得られた結果を比較することで粘性評価が可能かを検討した。

また、細骨材率 (s/a) の異なるコンクリートについて傾斜フロー試験を行い、得られた流動先端速度と s/a の関係より、最適 s/a を見出すこ

表-1 使用材料

練混水(W)	上水道水	密度:1.00 g/cm ³
セメント(C)	普通ポルトランドセメント	密度:3.15 g/cm ³
細骨材(S)	鬼怒川産川砂	表乾密度:2.54 g/cm ³ , F.M.:2.91
粗骨材(G)	鬼怒川産碎石	表乾密度:2.65 g/cm ³ , F.M.:6.76
混和剤	ポリカルボン酸系 高性能AE減水剤(SP)	密度:1.05 g/cm ³
	アルキルアリルスルホン酸系 界面活性剤(AE)	密度:1.00 g/cm ³

とを試みた。ここで、分離しない範囲で粘性が最小となる条件において、施工性は最良となると考え、最適 s/a とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した材料およびその物性を表-1 に示す。

2.2 配合条件

コンクリートの粘性に影響を及ぼす配合要因として水セメント比 (W/C), 単位水量 (W), 単位セメント量 (C) および s/a を取り上げ、表-2 に示すように変化させた。コンクリートの空気量は 4.5 ± 1.5% となるように AE 剤を用いて調節し、スランプ値 (SL) およびスランプフロー値 (SLF) は表 2 に示す目標値になるように高性能 AE 減水剤を用いて調節した。

*1 株式会社ニューテック 技術部 工修 (正会員)

*2 宇都宮大学助教授 建設学科 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学助手 建設学科 工修 (正会員)

*4 株式会社ニューテック 代表取締役 (正会員)

表-2 配合条件および実験結果

W/C (%)	W (kg/m ³)	s/a (%)	目標SLF (cm)	目標SL (cm)	SLF (mm)	SL (cm)	空気量 (%)	V (cm/sec)	h (N・m・min)	g (N・m)	pl (Pa・s)	f (Pa)
50	180	42	-	18±2.5	300	18.0	4.2	-	-	-	-	-
		44			380	20.0	4.2	17.1	3.0	123.6	1.782	40.4
		46			325	20.5	6.0	18.2	3.2	107.4	1.788	39.0
		48			410	20.0	3.6	35.1	1.9	110.8	1.752	39.3
		50			290	20.0	5.5	22.5	3.3	111.4	1.790	39.4
		52			275	19.5	5.1	16.7	2.4	148.0	1.766	42.5
40	180	40	450±50	-	450	-	4.5	18.7	3.8	105.1	1.804	38.8
		42			455	-	4.0	19.3	3.5	107.1	1.812	41.0
		44			455	-	4.8	19.3	3.8	70.5	1.804	35.9
		46			448	-	4.8	19.7	4.1	54.2	1.812	34.5
		48			450	-	4.6	30.3	2.7	50.9	1.774	34.2
		50			420	-	4.7	20.9	5.2	91.7	1.843	37.7
35	175	44	550±50	-	535	-	5.8	22.8	4.1	72.0	1.812	36.0
		46			520	-	4.7	27.0	3.7	62.2	1.801	35.2
		48			555	-	4.2	17.4	5.8	45.9	1.859	33.8
		44			605	-	3.0	14.0	6.7	26.4	1.884	32.1
35	175	46	600±50	-	620	-	5.5	16.4	6.4	52.5	1.875	34.4
		48			605	-	4.3	10.3	7.5	35.6	1.906	32.9

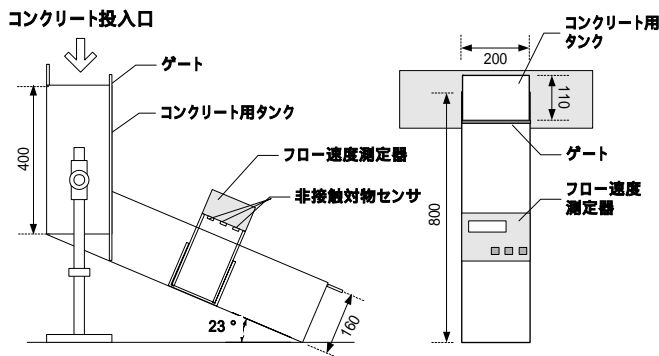


図-1 傾斜フロー試験器

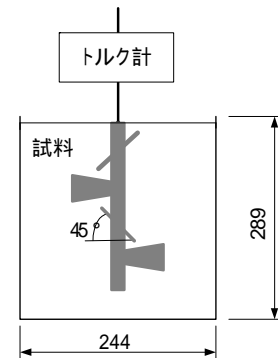


図-2 回転翼型粘度計

2.3 試験項目

コンクリートのフレッシュ試験として、スランプ試験，スランプフロー試験，空気量試験，傾斜フロー試験，回転翼型粘度計を用いたレオロジー測定を行った。

スランプ試験は「JIS A 1101 コンクリートのスランプ試験方法」，スランプフロー試験は「JIS A 1150 コンクリートのスランプフロー試験」に準拠して行った。空気量試験は「JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」に準拠して行った。

傾斜フロー試験器を図-1 に示す。これは L 型フロー試験を参考とし，水平流動部を傾斜させたもので，コンクリート粘性を評価する試験である。所定の位置に速度測定器を設置し，タンク内にコンクリートを 3 層 10 回突きで詰めた。

上面をならした後ゲートを開き，コンクリートの流動先端がセンサー間を通過する時の流入速度および流出速度を読み取り，2 つの平均値を流動先端速度 V とした。また，傾斜角度はこれまでの研究により 23° とした⁴⁾。

尚，コンクリートの分離は目視により確認し，分離していないもののみを試験の対象とした。

2.4 回転翼型粘度計によるレオロジー定数の測定

回転翼型粘度計の概略図を図-2 に示す。これはコンクリート用内円筒回転型粘度計を利用したものであり，回転翼の回転数とトルクを測定することで見掛けの降伏値 (g) および塑性粘度 (h) を求める試験である。回転翼は既往の研究より，和美らの提案する形状³⁾を使用した。試験装置に試料を入れ，回転数の上昇および下降時のトルクを測定した。回転数およびトルクがほぼ

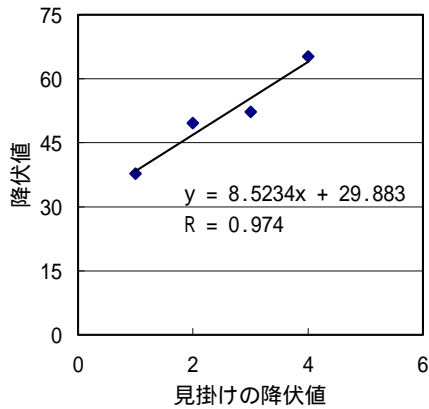


図-3 降伏値と見掛けの降伏値定数の関係

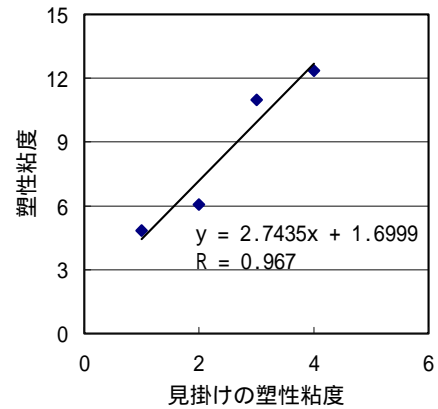


図-4 塑性粘度と見掛けの塑性粘度の関係

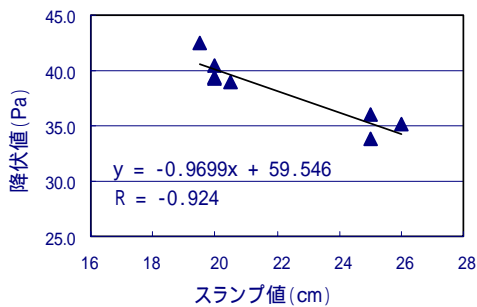


図-5 降伏値とスランプ値の関係

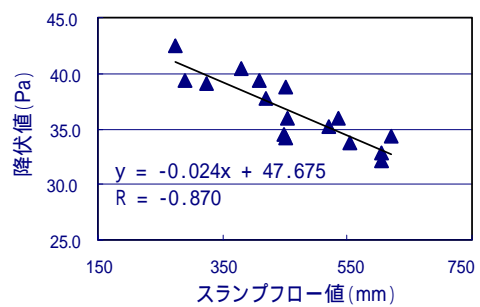


図-6 降伏値とスランプフロー値の関係

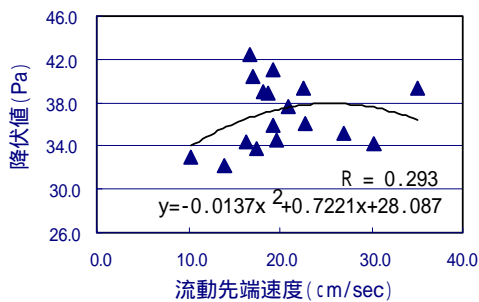


図-7 降伏値と流動先端速度の関係

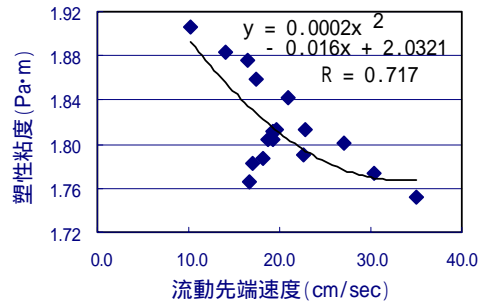


図-8 塑性粘度と流動先端速度の関係

直線関係を示す部分を最小 2 乗法により、式(1)を用いて回帰し、 g および h を求めた。

$$T = g + hN \quad (1)$$

ここで、 T ：トルク ($N \cdot cm$)、 N ：回転数 (r.p.m)

レオロジー定数である降伏値 (τ_f) および塑性粘度 (η_{pl}) は、それらに機械定数 K/G , $1/G$ 、 τ_0 、 η_0 を用いて算出した。

機械定数である K/G , $1/G$ 、 τ_0 および η_0 は、レオロジー定数の異なるモデルモルタルを用いて、内円板型回転粘度計を用いて測定したレオロジー定数と回転翼型粘度計を用いて測定した見掛けのレオロジー定数の直線関係を確認し、式(2)

および式(3)より得られる勾配および切片から決定した。

$$\tau_f = K/G \cdot g + \tau_0 \quad (2)$$

$$\eta_{pl} = 1/G \cdot h + \eta_0 \quad (3)$$

試料に用いたモデルモルタルは、水と高吸水性高分子樹脂を 225 : 1 で練り混ぜたものに増粘剤を添加して作成し、増粘剤添加率を 1.5 ~ 2.4% に変化させることでレオロジー定数を 4 水準変化させた。レオロジー定数と見掛けのレオロジー定数の関係を図-3, 4 に示す。降伏値と見掛けの降伏値の関係より、 $K/G = 8.5234$ 、 $\tau_0 = 29.883$ 、塑性粘度と見掛けの塑性粘度の関係より、 $1/G = 2.7435$ 、 $\eta_0 = 1.6999$ を用い、 g および h をそれぞれ

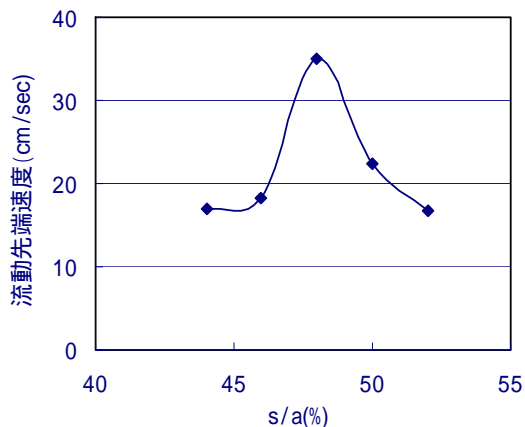


図-9 流動先端速度と s/a の関係
(W/C=50%, W=180kg/m³, 目標 SL=18±2.5cm)

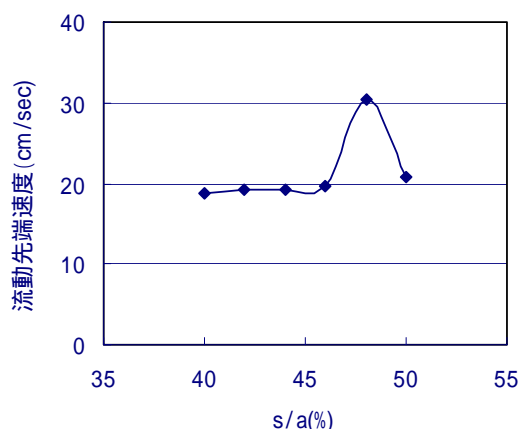


図-10 流動先端速度と s/a の関係
(W/C=40%, W=180kg/m³, 目標 SLF=450±50mm)

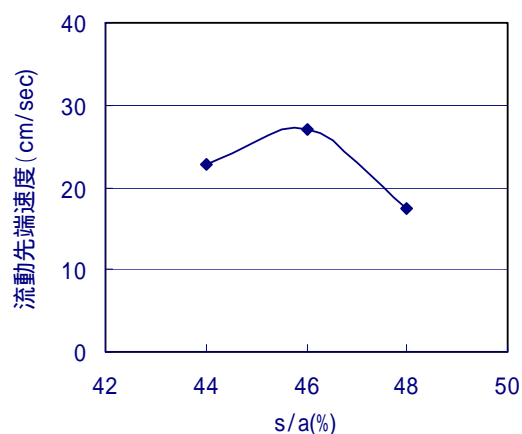


図-11 流動先端速度と s/a の関係
(W/C=40%, W=175kg/m³, 目標 SLF=550±50mm)

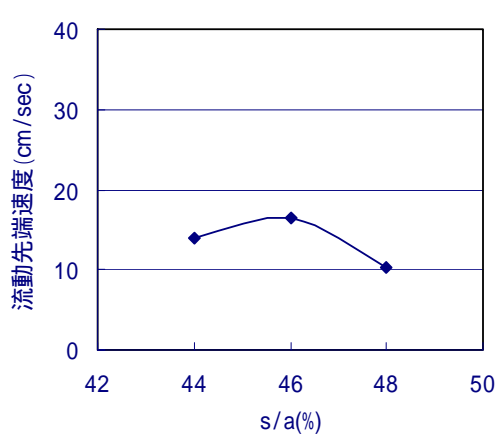


図-12 流動先端速度と s/a の関係
(W/C=35%, W=175kg/m³, 目標 SLF=600±50mm)

れ降伏値，塑性粘度に換算した。

3. 実験結果および考察

3.1 レオロジー定数と各試験結果の関係

すべての結果を表-2 に示す。

スランプ値と降伏値の関係を図-5 に，スランプフロー値と降伏値の関係を図-6 に，流動先端速度と降伏値の関係を図-7 に，流動先端速度と塑性粘度の関係を図-8 に示す。図中にそれぞれの近似式と相関係数を示す。スランプおよびスランプフロー値が大きくなるに従い降伏値は減少傾向を示し，高い相関関係がみられた。これは，一般に知られている知見と同じ傾向であり，これはスランプ値およびスランプフロー値が降伏値を反映する指標であるためであると考えられる。

傾斜フロー試験より得られた流動先端速度と降伏値には明確な傾向がみられないが，流動先端速度が大きくなるに従い塑性粘度は減少傾向を示し，高い相関関係がみられた。このことから，傾斜フロー試験を行うことでコンクリートの粘性が十分評価可能であると考えられる。また，図-8 で近似曲線の下部に集中した値は W/C の最も大きいスランプ配合の結果であり，このことから，傾斜フロー試験はある程度以上の粘性を有するコンクリートについて，より敏感に評価すると考えられる。

3.2 s/a と流動先端速度の関係

硬練りコンクリートにおいては，最適 s/a はスランプ試験や VB 試験等でピークとなって現れるが，軟練り以上の比較的高い流動性を有するコンクリートにおいては，スランプおよびスラ

表-3 余剰ペースト膜厚算出結果

W/C (%)	W (kg/m ³)	s/a (%)	目標SLF (cm)	目標SL (cm)	全ペースト量 (L)	実績率 (%)	総表面積 (mm ²)	空げき量 (L)	Fp (mm)
50	180	42	-	18±2.5	0.26	57	799335.0	0.27	-0.02
		44				62	830681.9	0.23	0.04
		46				64	862028.8	0.21	0.06
		48				67	893375.8	0.19	0.08
		50				64	924716.0	0.21	0.05
		52				62	956063.0	0.24	0.02
40	180	40	450±50	-	0.29	-	-	-	-
		42				57	799334.96	0.27	0.02
		44				62	830681.89	0.23	0.08
		46				64	862028.82	0.21	0.09
		48				67	893375.75	0.19	0.11
		50				64	924716.04	0.21	0.08
35	175	44	550±50	-	0.28	62	830681.89	0.23	0.06
		46				64	862028.82	0.21	0.08
		48				67	893375.75	0.19	0.10
		44				62	830681.89	0.23	0.09
		46				64	862028.82	0.21	0.10
		48				67	893375.75	0.19	0.13

ンプフロー試験ではピークが現れず、s/a は経験的に決められてきた。ここでは傾斜フロー試験の結果より最適 s/a を見出すことを試みた。

傾斜フロー試験より得られた流動先端速度と s/a の関係を図-9, 10, 11, 12 に示す。

すべての条件について、スランプおよびスランプフロー一定にも関わらず、s/a の変化に伴い流動先端速度はピークを有していた。前述したように、流動先端速度と塑性粘度の関係から、流動先端速度が大きいほど塑性粘度は低いことが分かっている。したがって、流動先端速度が大きいほどコンクリートの粘性は低く、施工性が良好となると考えられる。

実験の結果、W/C=50%、W=180kg/m³ および W/C=40%、W=180kg/m³ の条件では s/a=48%、W/C=40%、W=175 kg/m³ および W/C=35%、W=175kg/m³ の条件では s/a=46%で流動先端速度は最も大きくなった。各配合において、これらの s/a が最適 s/a となり、良好な施工性を有する配合となったと考えられる。

4. 余剰膜厚理論による検討

4.1 基本設定

コンクリートの粘性に関する研究は、余剰水膜厚、ペースト膜厚およびモルタル膜厚等を用いて説明する研究が数多くされている^{5) 6) 7) 8)}。これらの研究によると、コンクリート材料の最

密充てん状態において余剰ペースト膜厚が最も厚くなり、コンクリートの粘性が最小になるとされている。余剰ペースト膜厚は総ペースト容積、空げき容積および総表面積により以下の式で求められる。

$$\text{余剰ペースト膜厚} = \frac{\text{ペースト容積} - \text{空げき容積}}{\text{総表面積}}$$

ペースト量一定条件においては、s/a の変化に伴い空げき容積および総表面積も増減する。また、それぞれの増減の過程で余剰ペースト膜厚が最大となり、粘性が低下する値が存在するものと考えられる。したがって、骨材の粒度分布上、最も望ましい s/a が存在し、そこでコンクリートの粘性は最小となり、施工性が向上すると仮定した。ただし、分離はしない範囲とした。

4.2 余剰ペースト膜厚の算定

余剰ペースト膜厚 (Fp) は、前述したようにペースト容積、空げき容積、骨材の総表面積より算出できると考えられる。空げき容積は、粗骨材および細骨材の混合骨材の実績率試験を行うことで求め、骨材の比表面積はスキャナを用いて画像処理を行うことで求めた⁸⁾。

実績率の測定結果、骨材の比表面積、空げき量および余剰ペースト膜厚の算定結果を表-3 に示す。また、図-13 に W/C=50%、W=180kg/m³ の条件、図-14 に W/C=40%、W=180kg/m³ の条件における s/a と余剰ペースト膜厚の関係を示す。

図より，余剰ペースト膜厚は本研究における全配合において $s/a=48\%$ 付近で最も厚くなった。

4.3 余剰ペースト膜厚と流動先端速度の比較

余剰ペースト膜厚と傾斜フロー試験における流動先端速度を比較すると， $W/C=50\%$ ， $W=180\text{kg/m}^3$ および $W/C=40\%$ ， $W=180\text{kg/m}^3$ の条件においては，両者とも $s/a=48\%$ でピークをとり，一致した。また， $W/C=40\%$ ， $W=175\text{kg/m}^3$ および $W/C=35\%$ ， $W=175\text{kg/m}^3$ の条件では，余剰ペースト膜厚が $s/a=48\%$ ，流動先端速度が $s/a=46\%$ でピークをとり，ほぼ近い結果となった。

このことから，傾斜フロー試験における流動先端速度はコンクリートの粘性を適切に評価することが可能であり，最適 s/a を見出すことに有用であると考えられる。

5. 結論

傾斜フロー試験を行い，得られた流動先端速度と回転翼型粘度計による塑性粘度の比較を行った結果，傾斜フロー試験が簡易的粘性評価試験方法として有用であることが分かった。また，この試験により，最も施工性の向上する最適 s/a を見出すことが可能であることが分かった。

【謝辞】

本研究に際して，鹿島建設株式会社の桜本文敏氏，宇都宮大学工学部の中田睦実氏，三浦啓幸氏の協力を得ました。

付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡田清：最新コンクリート工学，オーム社，pp.2-9，1986
- 2) 谷川恭雄ほか：フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価法，コンクリート工学，Vol.25，No.5，pp.4-15，1987
- 3) 和美広善ほか：回転翼型粘度計による高強度コンクリートの流動特性値測定方法に関する実験的研究，第12回コンクリート工学論文集，pp.133-141，1990

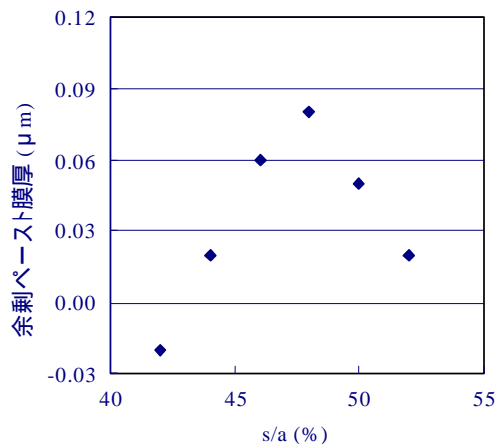


図-13 余剰ペースト膜厚と s/a の関係
($W/C=50\%$ ， $W=180\text{kg/m}^3$ ，目標 $SL=18 \pm 2.5\text{cm}$)

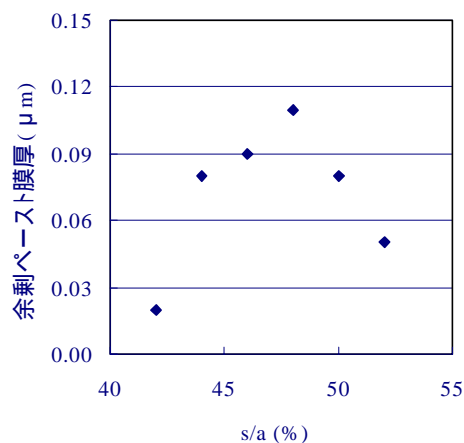


図-14 余剰ペースト膜厚と s/a の関係
($W/C=40\%$ ， $W=180\text{kg/m}^3$ ，目標 $SLF=450 \pm 50\text{mm}$)

- 4) 藤原浩己ほか：準高流動コンクリートのワーカビリティ評価試験方法に関する研究，セメントコンクリート論文集 No.56，pp.590-595，2002
- 5) 吉野公ほか：モルタルのレオロジー定数に及ぼす使用材料の性質の影響，コンクリート工学年次報告集，pp.461-466，Vol.16，No.1，1994
- 6) 近田孝夫ほか：余剰ペースト膜厚理論における骨材の形状評価とモルタルの流動性に関する研究，コンクリート工学年次報告集，Vol.18，No.1，1996
- 7) 吉野公ほか：高流動コンクリートのレオロジー定数に及ぼす配合要因の影響，コンクリート工学年次報告集，Vol.20，No.2，1998
- 8) 宮野和樹ほか：高流動コンクリートの流動性に及ぼす粗骨材の影響に関する研究，日本建築学会構造系論文集，pp.1-6，第575号，2004