

論文 コンクリートの流動性評価指標に関する研究

塙本 順也^{*1}・堺 孝司^{*2}

要旨: 本研究は、結合材量、混和材および高性能AE減水剤の種類を変えた様々な配合のコンクリートの流動性を、スランプフロー、余剰ペースト膜厚およびレオロジー一定数を用いて評価したものである。その結果、コンクリートの流動性は各種要因によって異なるが、これらを評価する指標として、レオロジー一定数が有効であること、降伏値と余剰ペースト膜厚の間には相関があり余剰ペーストの特性とその膜厚に依存して骨材の噛み合せの影響が降伏値に現れることなどが明らかとなった。

キーワード: 流動性、スランプフロー、余剰ペースト膜厚、レオロジー一定数

1. はじめに

近年、高流動コンクリートの研究が盛んに行われ、少なくとも高流動コンクリートの製造は技術的には可能となった。高流動コンクリートの流動性を表す指標として一般的に用いられているスランプフローは、必ずしもコンクリートの多様な性能を一義的に表し得るものではなく、より根本的な流動性支配パラメータの抽出が必要である。この意味においてこれまで、コンクリートの鉄筋通過性とレオロジー特性に関する研究[1,2,3,4,5]、モルタルおよびペーストのレオロジー特性に及ぼす使用材料の影響に関する研究[6,7,8]、モルタルおよびコンクリートの塑性粘度をそれぞれ余剰ペーストおよびモルタル膜厚を用いて予測する研究[9,10]、余剰ペースト膜厚とモルタルの流動性に関する研究[11,12]などが行われているものの、まだ十分とは言い難い。

これらのことと背景に、本研究では、種々のコンクリートに対して有効な流動性指標を明らかにするために、スランプフロー、レオロジー一定数および余剰ペースト膜厚ならびにそれらの相関について広範な検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（以下、NPと略）、中庸熱ポルトランドセメント（以下、MPと略）、低熱ポルトランドセメント（以下、LPと略）および粗粉タイプの中庸熱ポルトランドセメント（以下、粗粉と略）を用いた。混和材はフライアッシュ（以下、FAと略）と粉末度が4040、5880および7570cm²/gの高炉スラグ微粉末（以下、S4、S6、S8と略）を用いた。

表-1 セメントの物理特性

種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性	圧縮強さ (N/mm ²)			水和熱 (cal/g)	
			水量 (%)	始発 (h-min)	終結 (h-min)		3d	7d	28d	7d	28d
NP	3.16	3,330	28	2-20	3-23	良	16.7	25.4	42	78.4	90.3
MP	3.21	3,310	27.5	2-50	4-10	良	12.1	15.9	35	66.7	76.8
LP	3.22	3,290	28	2-35	5-10	良	6.6	9.9	31.9	48.9	64.8
粗粉	3.24	690	-	-	-	-	2	3.5	7.7	-	-

*1 北海道開発局開発土木研究所構造部材料研究室室員（正会員）

*2 北海道開発局開発土木研究所構造部材料研究室室長、工博（正会員）

セメントおよび混和材の物理特性を表-1および表-2に示す。高性能AE減水剤は主成分がポリカルボン酸エーテル系のもの(S P 1)と末端スルホン基を有するポリカルボン酸基含有多元ポリマーのもの(S P 2)の2種類を用いた。なお、S P 2は、S P 1より

結合材の分散性能が高いものである。増粘材としてセルロース(水分3.7%、粘度50,500cP)を用いた。細骨材は苫小牧樽前産の海砂を、粗骨材は小樽見晴産の碎石粗骨材を用い、その最大寸法は20mmである。骨材の品質を表-3に示す。

表-2 混和材の物理特性

記号	混和材	比重	粉末度 (cm ² /g)
S 4		2.91	4,040
S 6	高炉スラグ微粉末	2.91	5,880
S 8		2.91	7,570
F A	フライアッシュ	2.31	3,340

表-3 骨材の品質

	粗粒率	洗い損失量(%)	単位容積重量 (kg/l)	実績率 (%)	比重	吸水率
細骨材	2.79	0.5	1,870	70.8	2.67	1.28
粗骨材(5~15mm)	6.57	-	1,510	-	2.68	1.36
粗骨材(15~20mm)	7.01	-	1,540	-	2.68	1.09
混合粗骨材	6.78	0.9	1,590	60.1	2.68	1.23

表-4 コンクリートの配合

セメント種類	高炉スラグ 粉末度 (cm ² /g)	高炉スラグ 置換率 (B×%)	フライアッシュ 置換率 (B×%)	粗粉セメント 置換率 (C×%)	単位量(kg/m ³)			S P 1 添加量 (B×%)	S P 2 添加量 (B×%)	セルロース 添加量 (g/m ³)	スランプ フロ-値 (cm)	
					B	W	S					
普通 セメント ポルトランド セメント	S 4	0	0	350	140	865	1040	1.2			44.5	
					130	857	1030	0.9			45.0	
		60	0		145	838	1008	1.0	400	56.0		
					135	865	1040	0.8		41.0		
					130	871	1046	1.1		41.0		
	S 6	0	30	450	130	871	1046	1.0		44.0		
					135	808	970	0.85		47.5		
		60	0		145	794	954	1.0	300	55.5		
					150	745	896	0.8		55.0		
					130	921	992	0.8		43.0		
中庸 セメント ポルトランド セメント	S 6	40	20	300	130	929	1006	0.9		40.0		
					130	930	921	0.8		36.0		
		60	20		130	929	1006	0.8		37.0		
					140	868	1040	0.8		38.0		
					140	884	962		0.7	51.0		
		40	0		125	828	1006	0.7		47.0		
					125	838	1022	0.8		46.0		
					140	873	952		0.6	51.5		
	S 8	60	0	400	134	884	960		0.6	52.0		
					134	884	960		0.6	50.5		
		40	20		140	820	1000	0.6		40.0		
					125	838	1022	0.8		42.0		
					143	868	946		0.6	54.0		
		60	0		143	868	946		0.7	53.5		
					146	865	940		0.8	52.5		
					140	135	808	0.85		43.0		
低熱 セメント ポルトランド セメント	S 8	0	30	50	500	153	812	884	1.7	64.0		
					140	759	912	0.7		56.5		
		40	20		140	743	904	0.7		54.0		
					150	748	912	0.7		51.0		
					160	161	761	826	1.9	63.0		
	S 8	60	0	50	350	135	874	1050	1.0		40.0	
					450	125	822	986	0.75	49.0		
		0	30		550	140	759	912	0.8	62.5		

2. 2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-4に示す。高炉スラグ置換率は0、40、60%の3水準、フライアッシュ置換率は0、20、30%の3水準、また、粗粉セメント置換率は0、50、100%の3水準とした。なお、混和材は結合材に対して、粗粉セメントはセメント量に対して置換した。結合材量は300、350、400、450、500、550、600kg/m³の7水準を考慮した。高性能AE減水剤は、単位水量との組み合わせにおいてコンクリートが分離しない範囲でスランプフローが最大となるように添加した。なお、材料分離の判断は目視で行った。コンクリートの目標空気量は4.5±1%とした。

2. 3 試験方法

流動性評価試験として、スランプフロー試験を行った。また、コンクリートのレオロジー特性を評価するためにツーポイント法による試験を行った。ツーポイント法は、回転翼型粘度計から得られる回転数(N)とトルク(T)の直線関係からレオロジー定数である塑性粘度と降伏値を求め、コンクリートのコンシステンシーを評価するものである。試験では、コンクリートの入った容器(Φ25×30cm)の中で回転翼を回転させ、回転数10～80r.p.mの8段階においてトルクを測定した。なお、ここで示すレオロジー定数は機械定数を考慮した値である。

3. 実験結果および考察

3. 1 スランプフローに及ぼす各種変数の影響

図-1に、単位結合材量とスランプフローの関係を示す。単位結合材量の増加に伴ないスランプフローが増大する傾向がみられ、明らかに単位結合材量が550kg/m³の場合スランプフローの値は著しく増大している。この結果から、スランプフローを例えば60cmとするには少なくともこの程度の単位結合材量が必要となることを意味している。また、SP2を用いた場合の方がSP1を用いた場合に比べて大きなスランプフローが得られている。このことから、用いる高性能AE減水剤によってコンクリートの流動性が異なることがわかる。増粘材を用いた場合もスランプフローが増大しているが、これは単位水量を増加させることができた効果である。また、SP1を用いた場合、単位結合材量が同じでもスランプフローに差が生じているが、一般にL.P.を用いた場合にスランプフローが大きくなり、M.P.に高炉スラグS8を置換した場合にスランプフローが小さくなる傾向にあった。しかし、高炉スラグS8

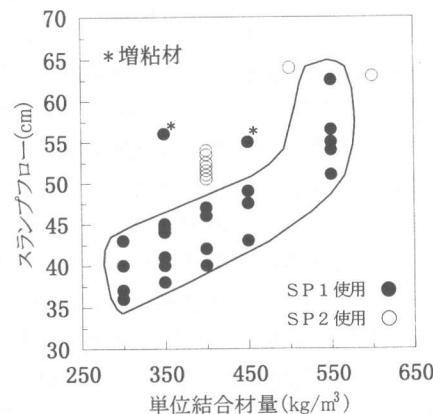


図-1 単位結合材量とスランプフローの関係

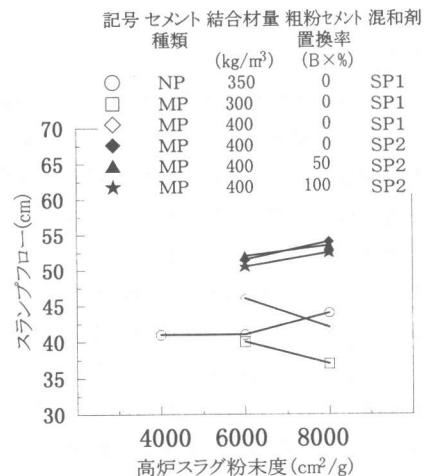


図-2 スラグ粉末度とスランプフローの関係

を置換した場合でも、SP 2 を用いることによって SP 1 を用いた場合より、スランプフローで 10~15cm 程度増加させることができた。

図-2 に、高炉スラグ粉末度とスランプフローの関係をセメントの種類、単位結合材量、粗粉セメント置換率および混和剤を変数として示す。SP 2 を用い、セメントに MP を使用した場合、スラグ粉末度が大きくなるとスランプフローは増大する傾向にある。しかしながら、SP 1 を用いた場合には、スラグ粉末度が大きくなるとスランプフローは減少する傾向にある。このことは、SP 2 は高微粉に対して良好な分散性能を示すが、SP 1 は高微粉に対して分散性能が劣ることを意味する。なお、SP 1 を用い、セメントに NP を使用した場合、スラグ粉末度が大きくなてもスランプフローは増大しているが、この理由については不明である。

3. 2 余剰ペースト膜厚とスランプフローの関係

図-3 に、余剰ペースト膜厚とスランプフローの関係を単位結合材量を変数として示す。一般に、単位結合材量が大きくなると余剰ペースト膜厚も大きくなり、それに伴ないスランプフローも増大する傾向がみられる。また、SP 2 を用いた場合、余剰ペースト膜厚は比較的小さいが、大きなスランプフローが得られている。これは前述したように、高性能 AE 減水剤の分散性能の影響である。また、スランプフローには、余剰ペースト膜厚に加えて、用いたセメントの種類が影響し、一般に低熱ポルトランドセメントを用いた場合が大きなスランプフローとなっている。また、増粘材を使用した場合、余剰ペースト膜厚が大きくなっているが、前述した様に、これは単位水量が増加したことによるものであり、結果としてスランプフローを増大させることができたと言える。

3. 3 レオロジ一定数とスランプフローの関係

図-4 に、塑性粘度とスランプフローの関係を単位結合材量を変数として示す。一般に、SP 1 を用いた場合、塑性粘度の増大に伴ないスランプフローは増大する傾向にある。このことは、スランプフローを増大させるためには単位結合材量を大きくする必要があり結果として塑性粘度が大きくなることを意味している。増粘材を用い、単位結合材量が少ない場合、これらの関係が若干ずれる傾向にあった。SP 2 を用いた場合は一般に SP 1 を用いた場合より塑性粘度が小さくなっているが、これは SP 2 が高微粉に対して良好な分散性能を有していることを示すものと考えられる。このように、コンクリートの塑性粘度は、流動性支配パラメータと考えることができるが、その値は条件によって大きく異なる。このことは、文献 [2] で、スランプフローと塑性粘度の間に相関関係がないとされていることと同義である。

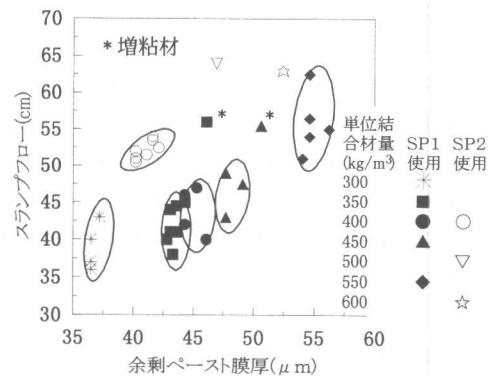


図-3 余剰ペースト膜厚とスランプフローの関係

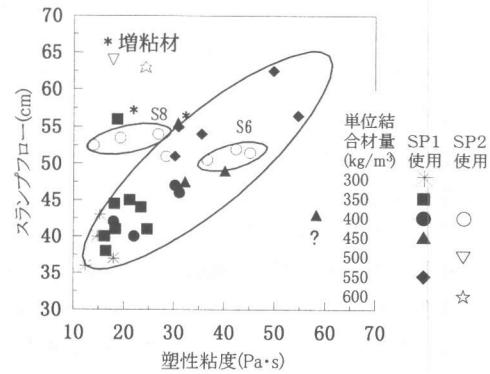


図-4 塑性粘度とスランプフローの関係

図-5に、降伏値とスランプフローの関係を単位結合材量を変数として示す。明らかに降伏値が小さくなるとスランプフローが増大している。このことは、文献[2]でも示されている。SP2を用いた場合の降伏値は、SP1を用いた場合より小さくなっている。また、降伏値が同程度でも、増粘材を使用した場合、セメントにLPを使用した場合、単位結合材量が 500kg/m^3 以上でSP2を用いた場合はスランプフローが大きくなっている。このように、配合条件によってその値は大きく変わると、降伏値はコンクリートの流動性を評価するのに有効なパラメータとなり得ることが示された。

3.4 余剰ペースト膜厚とレオロジー定数の関係

コンクリートの流動性を支配する指標の一つに余剰ペースト膜厚が考えられる。ここで、余剰ペースト[13]膜厚とは、コンクリートを骨材とペーストの2相材料と考え、骨材間の空隙をペーストで満たし、それ以外の余剰ペーストが骨材表面に形成する平均膜厚のことをいう。なお、余剰ペースト膜厚は文献[13]を参考に算定した。

図-6に、余剰ペースト膜厚と塑性粘度の関係を単位結合材量を変数として示す。これらの間に、特別な相関をみつけることは困難である。なお、文献[9]では、塑性粘度と余剰ペースト膜厚の間には高い相関関係見られるが、これはレオロジー定数の適用範囲がモルタルであり、粗骨材の影響が無いことが考えられる。

図-7に、余剰ペースト膜厚と降伏値の関係を単位結合材量を変数として示す。また、同図に、SP1を用いた配合で単位結合材量の範囲が $300\sim400\text{kg/m}^3$ および $400\sim550\text{kg/m}^3$ の場合についての回帰直線（AおよびB）およびSP2を用いた配合の回帰直線（C）を示す。SP1を用いた配合で余剰ペースト量が多い領域では、余剰ペースト膜厚の増大と共に降伏値は小さくなる傾向がみられる。したがって、この領域では十分な余剰

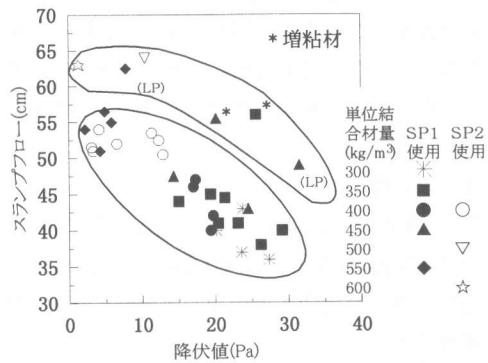


図-5 降伏値とスランプフローの関係

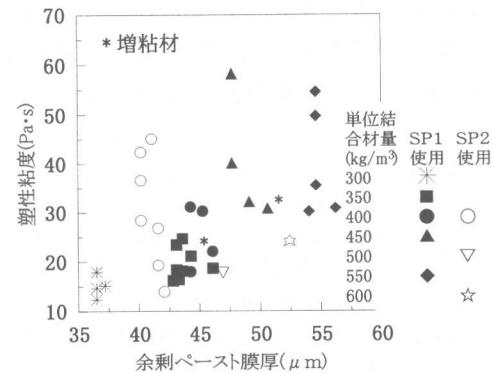


図-6 余剰ペースト膜厚と塑性粘度の関係

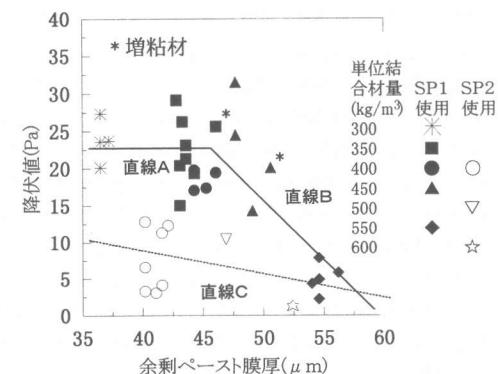


図-7 余剰ペースト膜厚と降伏値の関係

ペースト量が存在することによって、流動時の骨材の噛み合せが少なくなっていると考えられる。これに対して、余剰ペースト膜厚が小さくなると降伏値が一定となる傾向を示す。この結果は、ペース

トの特性に依存して余剰ペースト膜厚がある限度以下になると、骨材の噛み合せが流動性を支配することを意味している。同様に、S P 2 を用いた配合は、余剰ペースト膜厚が小さくなると降伏値が大きくなる傾向がみられるが、S P 1 を使用した場合に比べて骨材の噛み合せの影響は少ないと評価され、このことがこの場合のコンクリートの流動性を増大させたと考えられる。

4.まとめ

以上の結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 高性能AE減水剤の分散性能はコンクリートの流動性に大きく影響する。
- 2) 単位結合材量が大きくなると余剰ペースト膜厚も大きくなり、それに伴ないスランプフローも増大する。
- 3) 塑性粘度が大きくなるとスランプフローが増大する傾向がみられる。しかし、その特性は高性能AE減水剤の分散性能および増粘材使用の有無などによって異なる。
- 4) 降伏値が小さくなるとスランプフローは増大する。
- 5) 余剰ペースト膜厚と塑性粘度の間には、明確な相関はみられない。
- 6) 降伏値と余剰ペースト膜厚の間には相関があり、余剰ペーストの特性とその膜厚に依存して骨材の噛み合せの影響が降伏値に現れる。

参考文献

- [1] 藤原浩巳、下山善秀、ハレッグ・ハナ、堂園昭人：高流動コンクリートの鉄筋通過性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp125-130、1993
- [2] 河井 徹、橋田 浩：高流動コンクリートのレオロジー特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp125-130、1994
- [3] 野口貴文、友澤史紀、吳 相均：高流動コンクリートの間隙通過性に関するレオロジー的考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp.23-28、1995
- [4] 吳 相均、友澤史紀、野口貴文、姜 丙熙：高流動コンクリートの間隙通過性時のレオロジイ定数評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp459-464、1996
- [5] 吉野 公、西林新蔵、井上正一、黒田 保：高流動コンクリートの鉄筋通過性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.93-98、1996
- [6] 泉 達男、山室穂高、村原 伸、水沼達也：高流動コンクリートのレオロジー特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.177-182、1994
- [7] 吳 相均、友澤史紀、野口貴文、姜 丙熙：ペーストのレオロジー特性・付着特性に及ぼす分離低減剤の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp105-110、1995
- [8] 新藤竹文、横田和直、横井謙二：高流動コンクリートの自己充填性とモルタルのレオロジー特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.99-104、1996
- [9] 吉野 公、西林新蔵、井上正一、黒田 保：モルタルのレオロジイ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論文報告集、Vol.16、No.461-466、1994
- [10] 吉野 公、西林新蔵、井上正一、黒田 保：高流動コンクリートの塑性粘度予測に関する研究、フレッシュコンクリートの流動性と施工性に関するシンポジウム論文集、1996、4
- [11] 近田孝夫、前田悦孝、松下博通：モデル骨材を用いたモルタルのコンシスティンシーに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp.587-592、1995
- [12] 近田孝夫、前田悦孝、松下博通：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論文報告集、Vol.18、No.1、pp.441-446、1996
- [13] Powers、T.C. : The Properties of Fresh Concrete、Jone& Sons、Inc. 1968