

L型ボックスフロー試験による フレッシュコンクリートの流動特性評価

Evaluation of Flow Properties of Fresh Concrete by L-shape Box Flow Test

内藤 勲* 堺 孝司**

Isao NAITO and Koji SAKAI

フレッシュコンクリートの流動特性の評価は、従来、そのほとんどがスランプ試験によって行われてきた。しかしながら、最近では、用途に応じてさまざまな性能のコンクリートが要求されている。例えば、施工性の改善を目的とした流動性の高いコンクリートである。このようなコンクリートは、スランプ試験の適用範囲を越えており、スランプ試験に変わる新しい評価法が必要となる。

本研究では、主に高流動コンクリートを対象に、L型ボックスフロー試験およびツープイント法によりさまざまな配合のコンクリートの流動特性を総合的に検討・評価した。その結果、L型ボックスフロー試験が、スランプフロー試験の適用範囲を越えるようなコンクリートの流動特性評価に有効であることが明らかとなった。

《フレッシュコンクリート；流動特性；L型ボックスフロー試験；スランプフロー；ツープイント法》

In the past the flow properties of fresh concrete have been evaluated mostly by the slump test. Recently, however, concrete with various properties has been required for a number of purposes. For example, a high flow concrete for improving the work performance. As the slump test cannot be applied to such concrete, it was necessary to develop a new method to replace the slump test.

In this study we investigated and evaluated comprehensively the flow properties of concrete mixed in various proportions, mainly of high-flow concrete, using the L-shape box flow test and the two point method. The results showed that the L-shape box flow test is effective for evaluating the flow properties of the concrete for which the slump flow test cannot be applied.

Keywords: fresh concrete, flow properties, L-shape box flow test, slump flow, two point method.

1. まえがき

近年、フレッシュコンクリートの施工性の改善を目的として、コンクリートの高性能化が図

*材料研究室員 **同室長

られている。例えば、水中不分離性コンクリート¹⁾あるいは締固め不要超流動コンクリート^{2),3)}などといった高流動あるいは高粘性なコンクリートが開発され、実用化されつつある。

これらのコンクリートには、さまざまな混和材料が用いられており、フレッシュコンクリートの流動特性もそれぞれ異なったものとなっている。従来、コンクリートのコンシステンシーを評価する場合、スランプ試験およびスランプフロー試験などが用いられてきた。しかし、多様なフレッシュコンクリートの特性を、自重による最終的な変形の程度だけで適切に評価することはむずかしい。このようなことから、現在、ツーポイント法^{4),5),6)}、ボックス試験^{7),8)}および分離抵抗性試験⁹⁾といったさまざまな評価方法の検討がなされている。

本研究は、種々の混和材料を用いたコンクリートのさまざまな流動特性を、ツーポイント法によるレオロジー的視点も踏まえて、L型ボックスフロー試験によって総合的に検討・評価したものである。

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を用いた。混和材は高炉スラグ微粉末（以下、スラグ）、フライアッシュ、シリカフュームおよび石灰石微粉末（以下、石粉）を用いた。増粘材として、セルロース（水分；3.7%，粘度；50,500cP）を用いた。また、特殊混和剤として水中不分離性混和剤を用いた。表-1に、混和材の物理特性を示す。混和剤の種類と主成分を、表-2に示す。粗骨材は小樽見晴産の碎石

表-1 混和材の物理特性

種類	記号	粉末度 (cm ² /g)	比重
高炉スラグ微粉末	S4	4,000	2.91
	S6	6,000	2.91
	S8	8,000	2.91
フライアッシュ	F	3,340	2.13
シリカフューム	SF	200,000	2.10
石灰石微粉末	石粉	4,890	2.73

表-2 混和剤の種類

品目	記号	主成分
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系複合物
水中不分離性混和剤	UW	セルロース系高分子化合物

を、細骨材は苫小牧樽前産の海砂を使用した。粗骨材の最大寸法は20mmである。

2.2 試験方法

2.2.1 ツーポイント法

ツーポイント法は、図-1に示すような回転翼型粘度計から得られる回転数(N)とトルク(T)の関係から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。NとTは、一般的に $T=hN+g$ の直線関係で表わすことができる。hおよびgは、それぞれ見かけの塑性粘度および見かけの降伏値である。ここで、hおよびgは、それぞれビンガム体の塑性粘度(μ_{p1})、降伏値(τ_0)と比例関係にあり、 $\mu_{p1}=(1/G)h$ 、 $\tau_0=(K/G)g$ であることが知られている。ここで、GおよびKは機械定数である。

試験では、回転翼をコンクリートの入った容器($\phi 25 \times 30$)の中で回転させ、各回転数におけるトルクを測定した。回転数は10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80r.p.m.の8段階に変化させた。

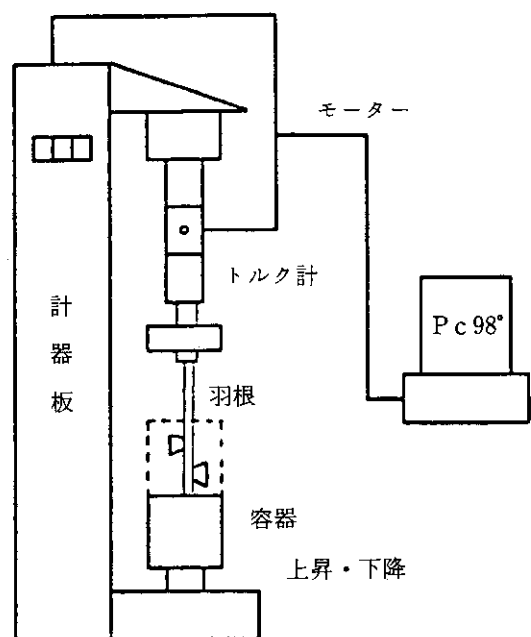


図-1 回転翼型粘度計試験装置

2.2.2 L型ボックスフロー試験

図-2に示すようなL型ボックスフロー試験装置を用いて、流動時間、流動距離、所定の位置におけるコンクリートの重量および粗骨材重量を測定した。これらに基づいて、粗骨材率

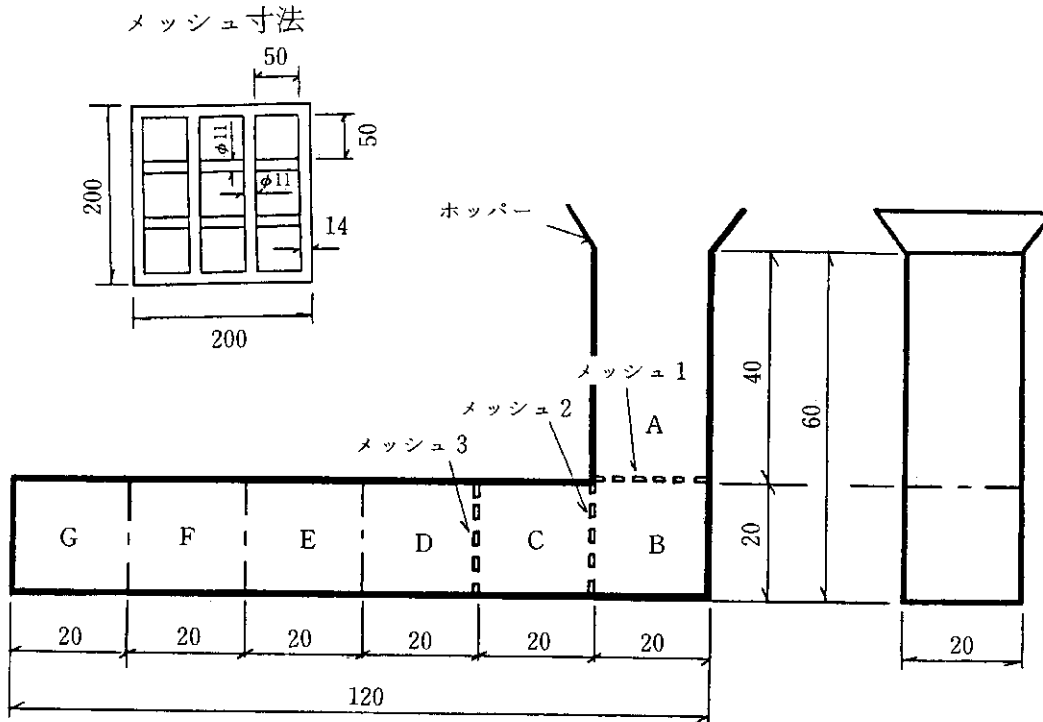


図-2 L型ボックスフロー試験装置 メッシュ寸法

表-3 コンクリートの配合

配合 番号	W/C (%)	s/a (%)	単 位 表 (kg/m ³)										ml/m ³	添 加 材 混 和 量			混和材置換率		
			Ce	Ca					W	S	G	SP		石 粉 C×(%)	セルローズ (g/m ³)	UW W×(%)	Sg	F	SF
				S4	S6	S8	F	SF											
R-1	45.0	45.0	105	195					135	868	1063	2,100				65			
R-2	45.0	48.0	105	135			60		135	917	994	2,400				45	20		
R-3	36.5	47.0	129.5	166.5			74		135	865	978	2,200				45	20		
R-4	36.5	50.0	129.5	166.5			74		135	976	867	2,590				45	20		
R-5	36.5	50.0	129.5	166.5			74		135	921	922	3,700	30			45	20		
R-6	36.5	50.0	129.5		166.5		74		135	921	922	3,700	30			45	20		
R-7	36.5	50.0	129.5			166.5	74		135	921	922	3,700	30			45	20		
R-8	36.5	50.0	129.5	166.5			74		135	921	922	3,700	20	150		45	20		
R-9	36.5	50.0	129.5	166.5			74		135	921	922	3,700	20	200		45	20		
R-10	39.2	50.0	129.5	220			18.5	145	917	918	3,700					60		5	
R-11	41.9	50.0	129.5	166.5			74		155	894	896	4,070			0.75	45	20		
R-12	30.1	45.7	158		158		212		159	757	901	2,640		50		30	40		

※ Ce:セメント, Ca:混和材, Sg:高炉スラグ微粉末

(粗骨材重量/コンクリート重量×100)を計算し、コンクリートの分離抵抗性をも評価した。

試験はメッシュ(鉄筋障害)がない場合、メッシュ1を用いた場合およびメッシュ2と3を用

いた場合の3パターンについて行った。なお、メッシュを用いた場合は、パイプレーターを60秒間かけてから測定を行った。

2.3 コンクリートの配合

表-3に、コンクリートの配合を示す。

単位結合材量は、配合 R-1 および R-2 で 300kg/m^3 、配合 R-3 ~ R-11 で 370kg/m^3 、配合 R-12 で 528kg/m^3 とした。混和材全体の置換率は65%とした。フライアッシュの置換率は20%とした。

配合 R-3 および R-4 では細骨材率 (s/a) の影響を、また、配合 R-4 および R-5 では石粉の影響を検討した。配合 R-5, 6 および R-7 では、スラグの粉末度をそれぞれ $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ および $8000\text{cm}^2/\text{g}$ と変化させた場合についての影響を検討した。配合 R-8 および R-9 では、石粉とセルロースを混合させた場合について検討した。配合 R-10 はシリカフェームを5%置換した配合であり、配合 R-11 は水中不分離性混和剤(以下, UW) を添加した配合である。また、配合 R-12 は超流動コンクリートの配合である。

3. 実験結果

3.1 スランプフローとレオロジー定数

図-3に、スランプフローと見かけの塑性粘度の関係を示す。図から、スランプフローが大きくなるに従って見かけの塑性粘度は大きくなる傾向があることおよび同じスランプフローのコンクリートであっても石粉の混入がコンクリートの粘性を増加させることがわかる。超流動コンクリートである配合 R-12 では、スラン

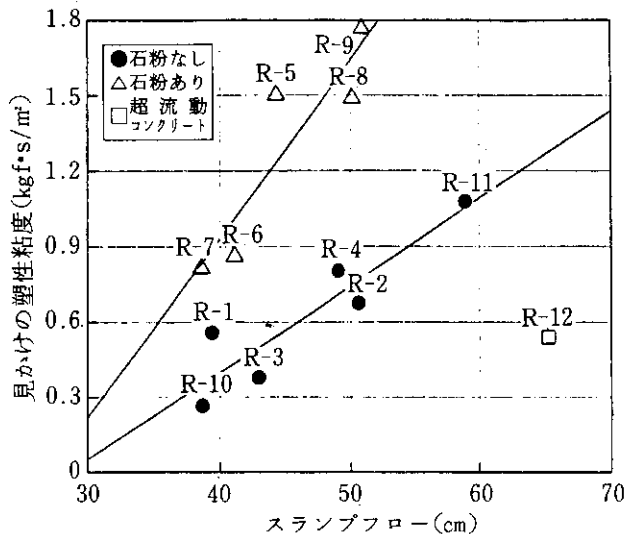


図-3 スランプフローと見かけの塑性粘度の関係

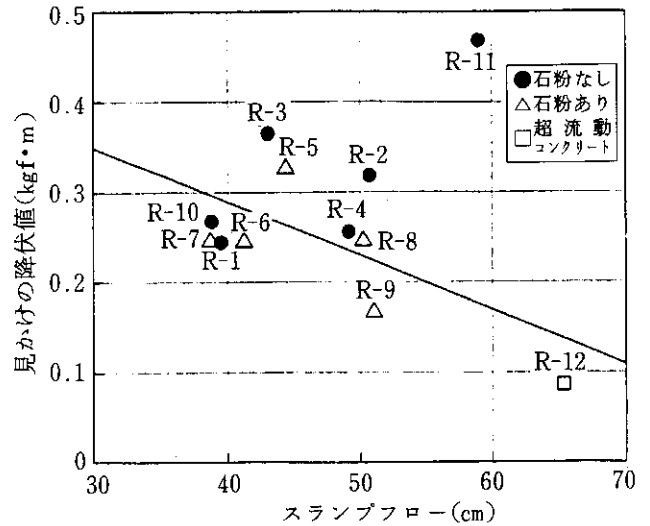


図-4 スランプフローと見かけの降伏値の関係

プフローが他の配合より大きく、見かけの塑性粘度も小さくなった。

図-4に、スランプフローと見かけの降伏値の関係を示す。全体的にスランプフローが大きくなると見かけの降伏値は小さくなる傾向がある。配合 R-12 では、スランプフローが他の配合より大きく、見かけの降伏値も小さくなった。UWを用いた配合 R-11 は、スランプフローが大きいにも係わらず見かけの降伏値が大きくなった。これは、この配合ではコンクリートがゆっくり変形していくことを意味する。

これらの結果から、R-12の配合は、レオロジー的に他の配合のコンクリートとはかなり異なる特性となることが明らかになった。

3.2 L型ボックスフロー試験における粗骨材率の変化

図-5~7および8は、メッシュ1を用いたL型ボックスフロー試験におけるコンクリート採取位置別の粗骨材率をスランプフロー別にしたものである。図-5に示すスランプフローが40cm程度の配合では、粗骨材率はAとBの間にメッシュがあるため、AからBにかけて急激に減少している。これは、コンクリート中の粗骨材がメッシュに引っかかりアーチングを起こしてしまったために、モルタル分が多く流れでてしまったことを意味する。図-6および図-7に示すスランプフローが45cmおよび50cm程度の配合も、AからBにかけて粗骨材率

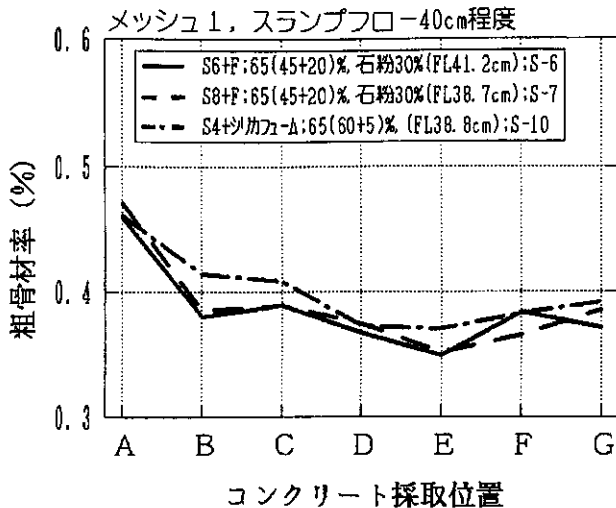


図-5 メッシュ1の場合の粗骨材率
(スランプフロー40cm程度)

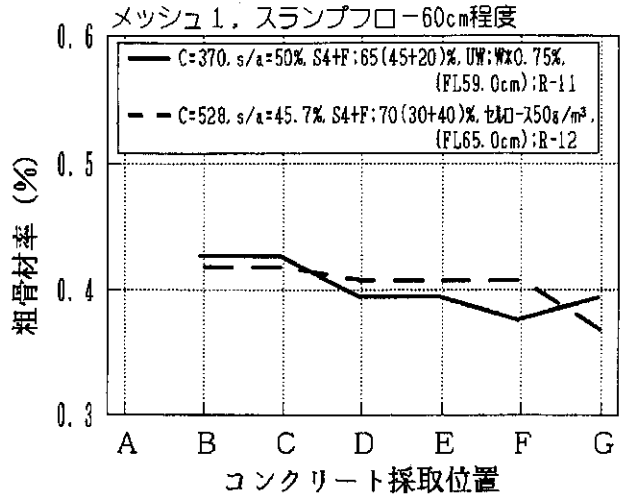


図-8 メッシュ1の場合の粗骨材率
(スランプフロー60cm程度)

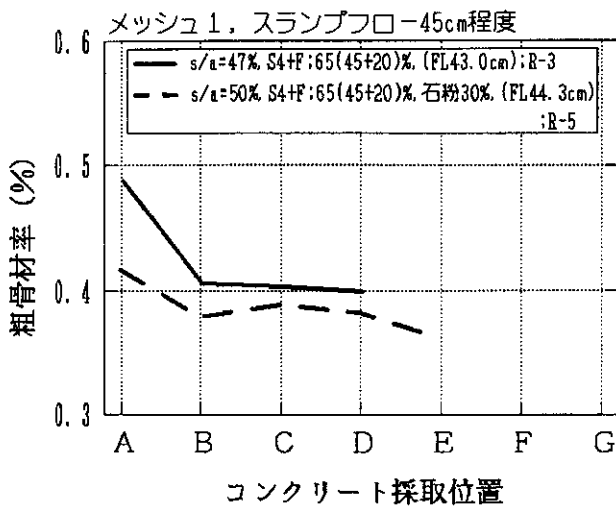


図-6 メッシュ1の場合の粗骨材率
(スランプフロー45cm程度)

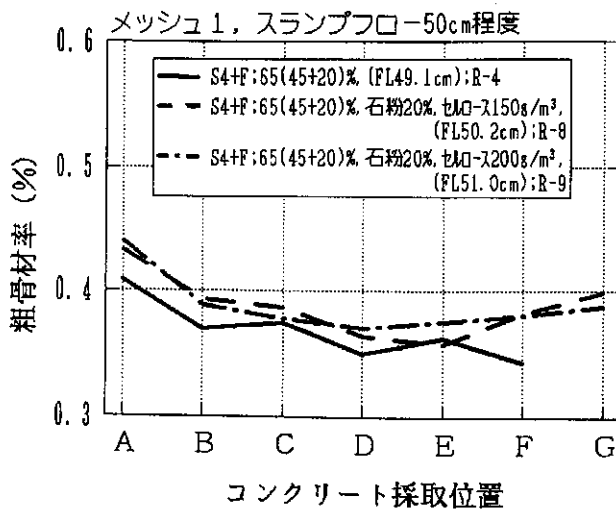


図-7 メッシュ1の場合の粗骨材率
(スランプフロー50cm程度)

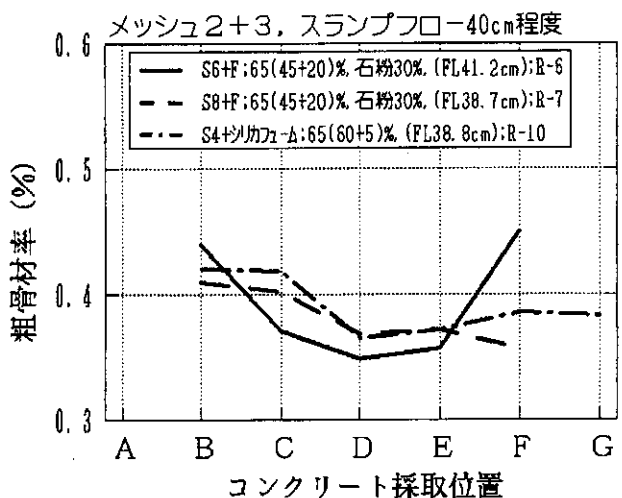


図-9 メッシュ2+3の場合の粗骨材率
(スランプフロー40cm程度)

が減少していることがわかる。図-8に示すスランプフローが60cm程度の配合では、コンクリートがメッシュをほぼ完全に通過した。この場合、メッシュが大きな障害にならなかったといえる。

図-9~11および12は、同様にメッシュ2および3を用いたL型ボックスフロー試験におけるコンクリート採取位置別の粗骨材率をスランプフロー別に示したものである。スランプフローが60cm程度の場合は若干異なるが、いずれも粗骨材率はBから急激に減少している。これは、メッシュ1のみを用いた場合と同様に、コンクリート中の粗骨材がBとCおよびCとDの間にあるメッシュに引っかかったためである。また、Dを境に粗骨材率が増加する傾向が

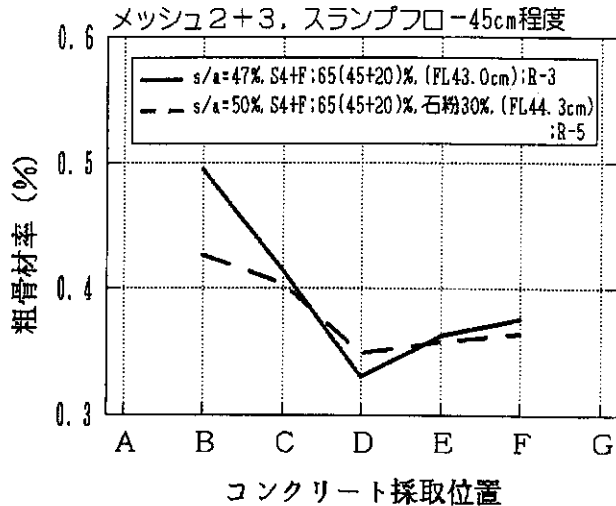


図-10 メッシュ2+3の場合の粗骨材率 (スランブフロー45cm程度)

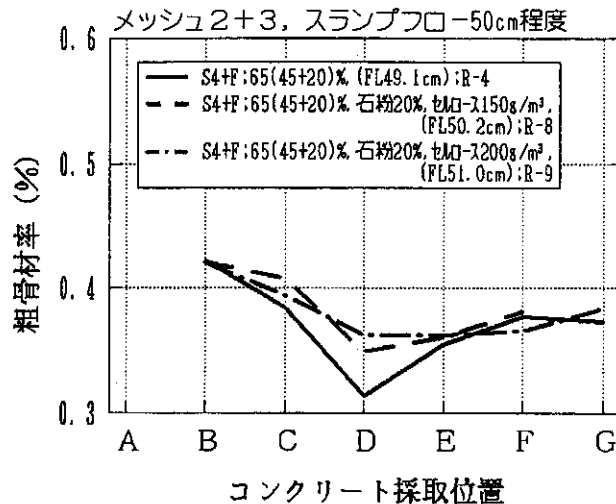


図-11 メッシュ2+3の場合の粗骨材率 (スランブフロー50cm程度)

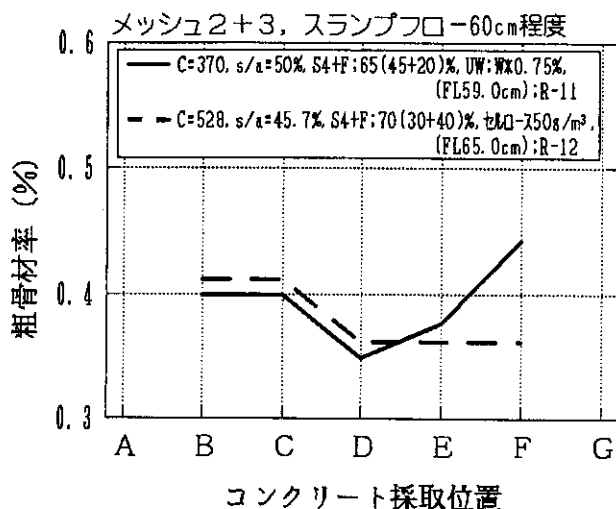


図-12 メッシュ2+3の場合の粗骨材率 (スランブフロー60cm程度)

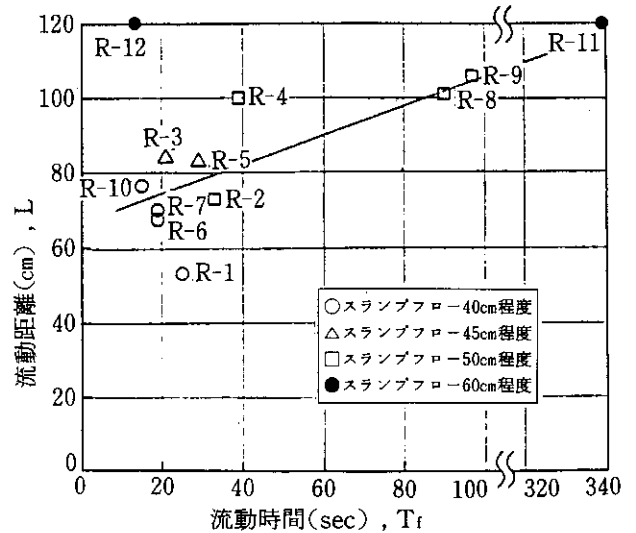


図-13 L型ボックスフロー試験におけるコンクリートの流動距離と流動時間

あるが、これは、アーチング前に通過したコンクリートが、アーチング後に流れでたモルタル分と混ざり合いながら流れたためと考えられる。メッシュを通過していないコンクリートの最大粗骨材率よりも、メッシュを通過したコンクリートの最大粗骨材率が大きくなる結果があるが、これらの原因は不明である。また、メッシュ2および3を用いた場合の方が、メッシュ1のみを用いた場合よりも粗骨材率の変化が大きなものとなっている。

3.3 L型ボックスフロー試験における各種特性値とレオロジー定数

図-13に、L型ボックスフロー試験におけるコンクリート流動時間 (T_f) と流動距離 (L) との関係を示す。配合全体に関していえば、コンクリートの流動距離が長くなると流動時間も長くなる傾向があり、セルローズを添加した配合 R-8 および 9 は、コンクリートの流動時間が大きくなっている。また、UWを用いた配合 R-11 は、極端に流動時間が長い。これに対して、超流動コンクリートの配合 R-12 は、極端に流動時間が短い。

図-14および15に、L型ボックスフロー試験におけるコンクリートの流動時間と流動距離から求められる平均流動速度 ($v=L/T_f$) と、回転粘度計から得られる見かけの塑性粘度および見かけの降伏値との関係を示す。

図-14から、コンクリートの平均流動速度が

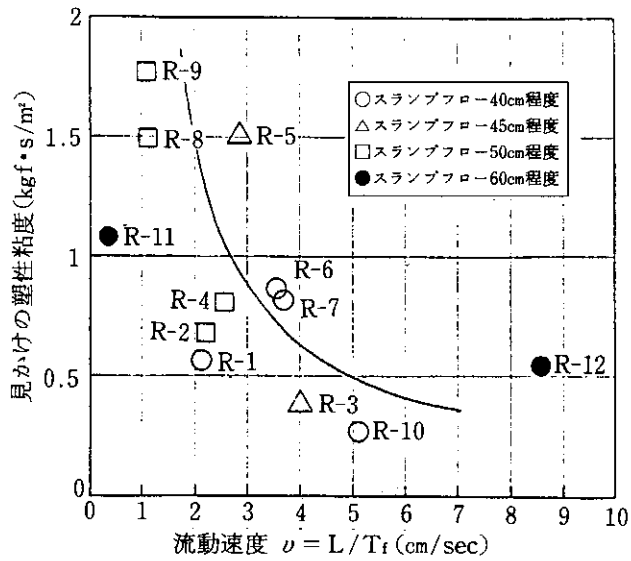


図-14 コンクリートの平均流動速度と見かけの塑性粘度

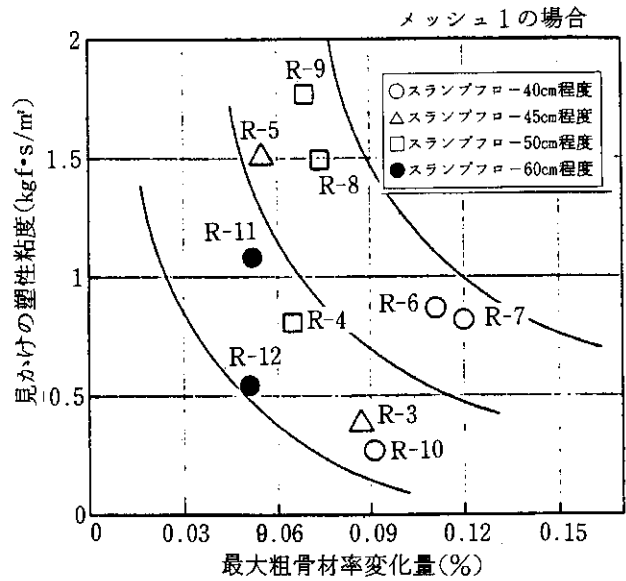


図-16 L型ボックスフロー試験における最大粗骨材率変化量と見かけの塑性粘度 (メッシュ1の場合)

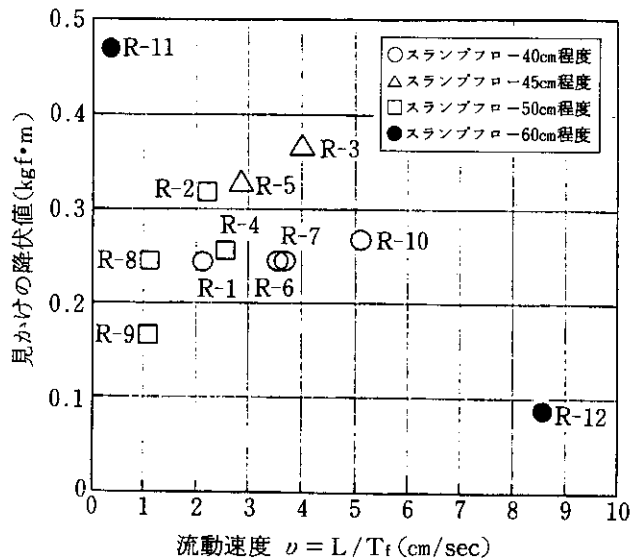


図-15 コンクリートの平均流動速度と見かけの降伏値

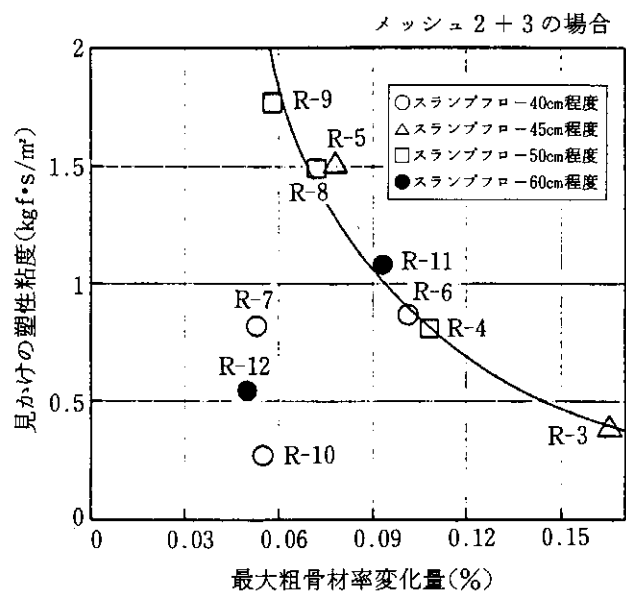


図-17 L型ボックスフロー試験における最大粗骨材率変化量と見かけの塑性粘度 (メッシュ2+3の場合)

速くなるに従って、見かけの塑性粘度が小さくなる傾向のあることがわかる。また、コンクリートの平均流動速度が極端に遅い配合 R-11 および極端に速い配合 R-12 も全体の傾向と一致しているといえよう。

図-15から、コンクリートの平均流動速度が速くなるに従って見かけの降伏値も小さくなる傾向がみられる。しかしながら、その特性がはっきりしている配合 R-11 と R-12 を除く配合では、その違いが明確ではない。

図-16は、メッシュ1を用いたL型ボックスフロー試験における最大粗骨材率と最小粗骨材

率との差 (以下、最大粗骨材率変化量) と見かけの塑性粘度との関係を示したものである。見かけの塑性粘度が小さくなるに従って、最大粗骨材率変化量は大きくなる傾向がみられる。これは、コンクリートの粘度が大きいほどコンクリートの材料分離が少ないことを意味する。

図-17に、メッシュ2および3を用いたL型ボックスフロー試験における最大粗骨材率変化量と見かけの塑性粘度との関係を示したものである。メッシュ1のみを用いた場合と同様に、

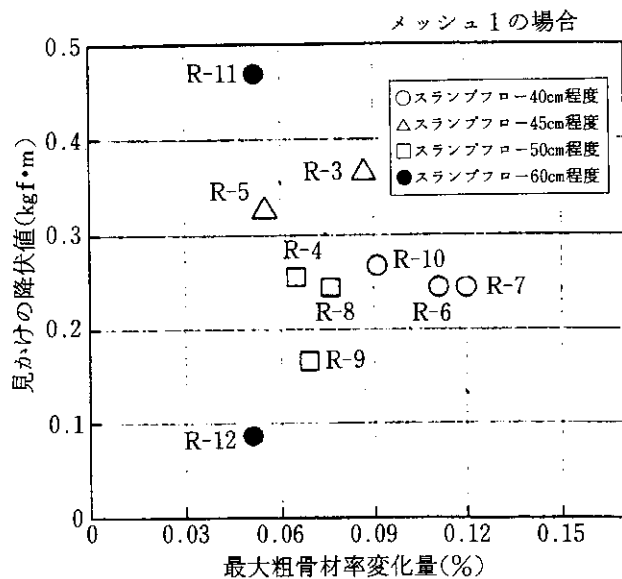


図-18 L型ボックスフロー試験における最大粗骨材率変化量と見かけの降伏値 (メッシュ1の場合)

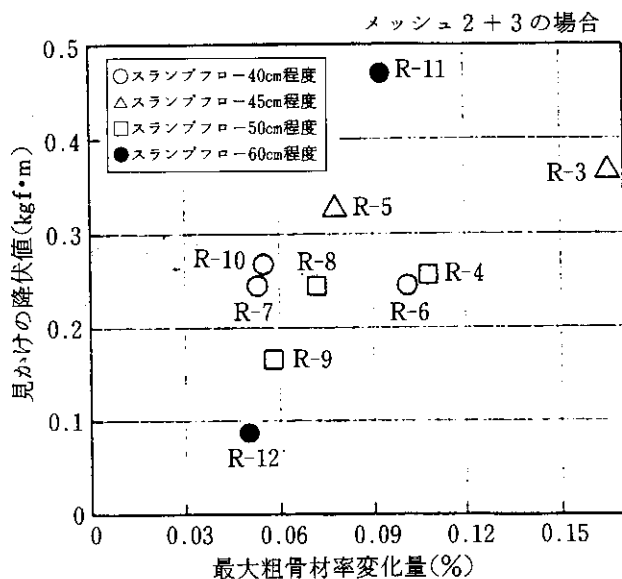


図-19 L型ボックスフロー試験における最大粗骨材率変化量と見かけの降伏値 (メッシュ2+3の場合)

見かけの塑性粘度が小さくなるに従って最大粗骨材率変化量は大きくなる傾向がある。しかしながら、配合 R-7, 10 および 12 は、見かけの塑性粘度が小さいが、最大粗骨材率変化量も小さい。メッシュ 2 および 3 を用いた場合の方がメッシュ 1 のみを用いた場合よりもコンクリートの流動条件が厳しい。したがって、これらは粘性が低く、すなわち流動性がよく、材料分離

も少ない配合のコンクリートであるといえる。配合 R-7 は粉末度 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ のスラグと石粉を用いた配合であり、配合 R-10 はシリカフェームを用いた配合であるが、これらの有効性についてはより詳細な検討を要する。

図-18 に、メッシュ 1 を用いた L 型ボックスフロー試験における最大粗骨材率変化量と見かけの降伏値との関係を示す。同様に、図-19 に、メッシュ 2 および 3 を用いた L 型ボックスフロー試験における最大骨材率変化量と見かけ降伏値との関係を示す。全体的にばらついており、明確な関係はみられない。

4. まとめ

試験結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) スランブフローが大きくなるに従って、見かけの塑性粘度は大きくなり、見かけの降伏値は小さくなる傾向がある。
- 2) 石粉の混入は、コンクリートの粘性を増加させる。
- 3) L型ボックスフロー試験において、最大粗骨材率変化量が小さいコンクリートは、コンクリートの材料分離が少ない。
- 4) L型ボックスフロー試験において、平均流動速度が速くなるコンクリートは、見かけの塑性粘度および見かけの降伏値は小さくなる傾向がある。
- 5) L型ボックスフロー試験において、最大粗骨材率変化量が大きくなるコンクリートは、見かけの塑性粘度が小さくなる傾向がある。最大粗骨材率変化量と見かけの降伏値との間には、明確な相関は見られない。

以上の結果から、L型ボックスフロー試験は、ツーポイント法から得られるレオロジー定数との間にある程度相関が見られ、この試験法によってコンクリートの流動特性を評価することが可能であることが明らかになった。L型ボックスフロー試験は、コンクリートの流動状況なども目視で観察できるため、コンクリートの流動特性を評価する方法として有力な方法になり得ると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：水中不分離性コンクリート設計施工指針（案），コンクリートライブラリー第67号，1991.
- 2) 岡村 甫，國島正彦，前川宏一，小沢一雅：ハイパフォーマンスコンクリート—超流動性を持つ締固め不要のコンクリート，第250回コンクリート講演会，pp.91～100，1991. 2.
- 3) 竹下治之，佐原春也，横田季彦：締固め不要な高流動コンクリートに関する基礎的研究，コンクリート工学論文集 1990.1.
- 4) Tattersall. G. H: The Rheology of Fresh Concrete, PITMAN, 1983.
- 5) 角田 忍，岸本 敏，明石外世樹：回転翼型レオメータによる各種コンクリートのワーカビリティ評価，コンクリート工学年次論文報告集 10-2，pp.343～348，1988.
- 6) 内藤 勲，堺 孝司：ツーポイント法によるフレッシュコンクリートの流動特性の評価，開発土木研究所月報No.474，pp.27～32，1992. 11.
- 7) 米澤敏男，和泉意登志，三井健郎，奥野亨：高強度コンクリートのワーカビリティに関するL型フロー試験による研究，コンクリート工学年次論文報告集 11-1，pp.171～176，1989.
- 8) 藤原浩巳，下山善秀，富田六郎，久保田裕康：高流動コンクリートの充填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 14-1，pp.27～32，1992.
- 9) 坂本 淳，松岡康訓，新藤竹文，S. Tangtomsirikul：超流動コンクリートのワーカビリティ評価手法に関する研究，コンクリートの製造システムに関するシンポジウム論文集，pp.55～60，1992.5.

*

*

*