

論文

[1154] コンクリートの流下速度試験による打込みやすさの一評価

正会員○近松竜一 (大林組技術研究所)

正会員 竹田宣典 (大林組技術研究所)

正会員 平田隆祥 (大林組技術研究所)

正会員 十河茂幸 (大林組技術研究所)

1. 序

構造材としてのコンクリートの品質は、施工の良否によって大きく左右される。このため、コンクリートの配合設計においては、力学的特性や耐久性に関する要求性能だけでなく、ワーカビリティについても十分な配慮が必要であり、近年においては、施工性向上を目的としたコンクリートの研究も活発に行われている。

コンクリートのワーカビリティは、対象とする構造物の種類や部材形状・寸法、配筋、打設方法等の施工条件より総合的に評価される。したがって、所要となるコンクリートの流動性は、これらの諸条件の影響を考慮しなければならない。例えば、締固めのできない水中コンクリートの場合には、高流動性（セルフレベリング性）に加えてコンクリート構成材料が水中で分散しないための分離抵抗性が要求されることから、水溶性高分子を用いた極めて粘性の高いコンクリートが用いられる[1]。超高強度化を図るために水セメント比を極端に小さくした配合では、粘性の過度の増大が逆に施工上の支障となる場合もある。また、施工の合理化の一策として提案されている締固め不要コンクリート[2]に関しても、対象とする部材の形状や配筋状態などによって充填性が異なることは容易に推察される。

ワーカビリティの重要な因子であるコンシステンシーの評価指標には、スランプあるいはスランプフローが一般的に用いられている。しかしながら、上述したような変形度の大きいコンクリートの打込みやすさは、自重による最終的な変形の程度を表わすこれらの指標だけで十分に評価できるとはいえない。特に、水セメント比が極端に小さい高強度コンクリートの充填性やポンプ圧送性に関しては、コンクリートの粘性を適切に評価する必要性が指摘されており[3][4]、新たな評価指標を含めて現場における品質管理手法が必要となるものと考えられる。そこで、本研究では、コンシステンシーの指標としてスランプフローが用いられるような変形度の大きいコンクリート（以下、高流動コンクリートと呼称）を対象として、施工時の打込みやすさを評価するためのコンクリートの特性要因について整理するとともに、それらを定量的に示す試験方法について実験的検討を行った。

表-1 各実験シリーズの概要

シリーズ	検討項目	実験内容
I	打込みやすさの構成要因	ボックス装置を用いた充填性試験（図-1参照） 5配合（SCA: 0~3kg/m ³ , スランプ: 55cm程度）
II	流動性と分離抵抗性の関係	傾斜フロー試験, ふるい分離試験（図-7参照） 15配合（単位結合材量, 結合材種類, SCA）
III	流動速度の評価方法	大型ロートによる流下速度試験（図-11 参照） 3配合（水結合材比, SCA, スランプ: 60cm程度）

2. 実験概要

実験は、3シリーズに分けて実施した。各実験シリーズの概要を表-1に示す。また、実験に用いた各材料の物性を表-2に示す。コンクリートの製造には、バグミル型二軸強制練りミ

投入して60秒間空練りした後、練りませ水を加えて120秒間練りませた。コンクリートの練上り温度は 20 ± 1 ℃とし、各種試験は20℃の恒温室内において実施した。スランプフローおよび空気量の測定は、水中不分離性コンクリートマニュアルおよびJIS A 1128に準じて行った。

3. 実験結果および考察

3.1 打込みやすさを示す構成要因

本論文では、打込み・締固め作業における打設の容易さを左右するフレッシュコンクリートの諸性質を総括して“打込みやすさ”と定義することにする。まず、この打込みやすさの構成要因について検討するために、有筋ボックス装置（図-1参照）により充填性試験を行った。実験に用いたコンクリートの配合を表-3に示した。ボックス装置のA室にコンクリートを充填し、仕切り板を上げて自然に流動させた場合のB室におけるコンクリートの充填高さおよび流動に要した時間を、それぞれ図-2および図-3に示す。自重による流動が停止した後、振動台により外部から振動を与えた場合の充填高さの経時変化を図-4に示す。また、流動後のA・B両室内のコンクリート中の粗骨材の割合の差を図-5に示す。

これらの図によれば、SCAの添加による粘性の増大に伴って、狭い鉄筋間を重力の作用下で流動する程度や流動に伴う骨材分離に対する抵抗性が大きくなる傾向が認められ、充填に要する時間は顕著に増大することがわかる。これらの結果は、スランプフローがほぼ同一であっても、SCA量や単位粗骨材量などの配合要因が相違する場合には、流動の速さや流動後のコンクリートの均質性が相当に異なることを示すものであり、コンシステンシーの一評価指標としてのスランプフローだけでは、コンクリートの打込みやすさを適切に評価できないことを示すものである。

以上の結果をもとにすると、コンクリートの打込みやすさは、定性的には均質な状態での流動性に関する広がり能力「変形ポテンシャル」および時間的依存性を表す「変形速度」と流動によるコンクリート構成材料間の「分離抵抗性」を併せて評価すべきであると考えられる（図-6参照）。そして、一般に用いられているスランプフローは、自重による最終的な広がり程度を表わすことから、主に変形ポテンシャルの一指標であると考えられる。

表-2 使用材料および物性

区 分	略号	種 類	比重	物性・主成分等
結合材	C	普通ポルトランドセメント	3.15	比表面積: $3460 \text{ cm}^2/\text{g}$
	Sg	高炉スラグ微粉末	2.90	比表面積: $6240 \text{ cm}^2/\text{g}$
	Fa	フライアッシュ	2.27	比表面積: $3760 \text{ cm}^2/\text{g}$
	Sf	シリカフューム	2.20	平均粒径: $0.15 \mu\text{m}$
細骨材 粗骨材	S	陸砂（木更津産）	2.62	F.M: 2.58
	G	碎石（青梅産）	2.65	G_{max} : 20mm, F.M: 6.82
混和剤	SCA	分離低減剤	—	セロースーテル系
	WR	A E減水剤	1.14	リグニルスルホン酸・ポリオール系
	SP	流動化剤	1.13	高縮合トリアジン系
	SPA	高性能A E減水剤	1.15	ナフタリン系

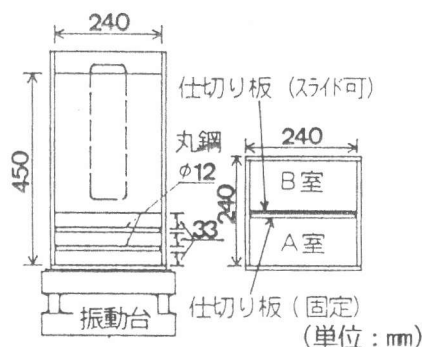


図-1 有筋ボックス試験装置

表-3 充填性試験に用いたコンクリートの配合

No.	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
			W	C	S	G	SCA	WR	SP
1	50	40	185	370	684	1046	—	925	5.5
2			185	370	684	1046	0.5	925	5.5
3			195	390	667	1020	1.0	975	5.9
4			215	430	633	968	2.0	1075	8.6
5			235	470	599	916	3.0	1175	9.4

* WR : cc/m³

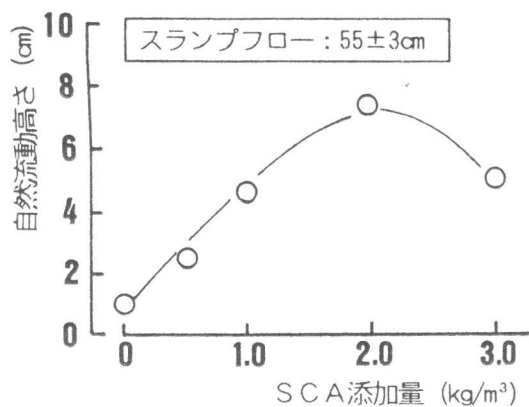


図-2 SCA 添加量と自然流動高さの関係

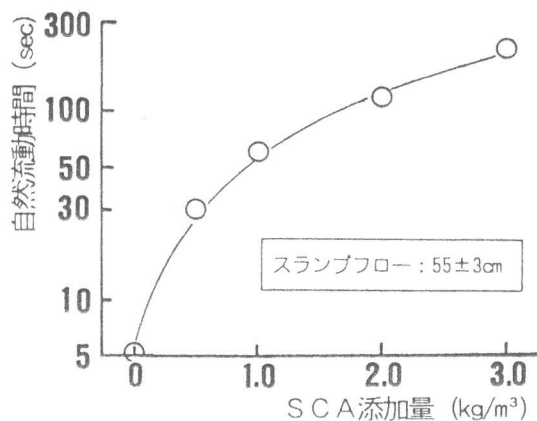


図-3 SCA 添加量と所要流動時間の関係

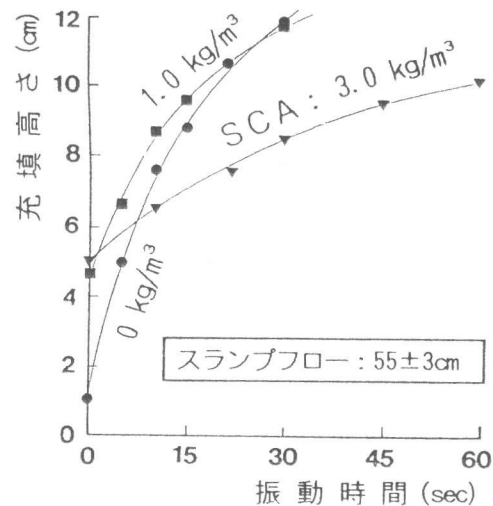


図-4 振動による充填高さの経時変化

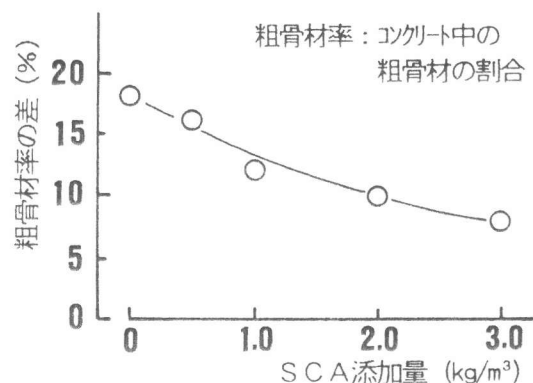


図-5 SCA 添加量と粗骨材率の差

3.2 変形ポテンシャルと骨材分離抵抗性

打込みやすさの要因のうち、変形ポテンシャルと骨材分離抵抗性の関係について調べた。変形ポテンシャルの指標にはスランプフローを用い、骨材分離抵抗性を調べる試験として傾斜フロー試験およびふるい分離試験を行った（図-7および表-4参照）。実験に用いたコンクリートの配合を表-5に示す。

スランプフローと傾斜フロー試験における傾斜流動距離の関係を図-8に示し、傾斜流動距離と鉄筋間を通過した試料の割合の関係を図-9に示す。これらの図によれば、傾斜フロー試験結果とスランプフローの間には相関があり、スランプフローが大きいものほど傾斜流動距離および鉄筋間を通過した試料の割合ともに増大する傾向が認められる。また、スランプフローとふるい分離試験でのふるいを通過する試料の



図-6 打込みやすさの構成要因

表-4 骨材分離抵抗性試験方法の詳細

試験名	試験方法
傾斜フロー試験	図-7に示す装置を用いてコンクリートを流動させ、流動距離と鉄筋間を落下した試料の割合を調べる。
ふるい分離試験	10mmふるい上にコンクリート（約7ℓ）を広げ、ふるい目から落下した試料の割合を調べる。

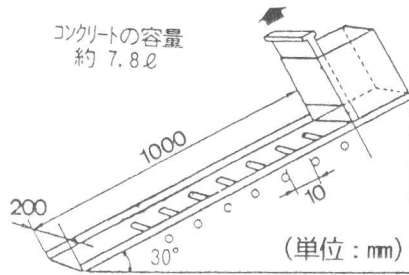


図-7 傾斜フロー試験装置

割合との関係を示した図-10においても、両者の間には相関関係が認められ、特にスランプフローが60cm以上の場合にはふるいを通過する試料の割合が急激に増大する結果が得られた。

これらの試験では、SCAを添加した極めて粘性の高い場合も含め種々の配合のコンクリートを用いたが、配合要因による有意な差は認められなかった。以上の結果は、時間の影響を無視すれば、変形ポテンシャル（スランプフロー）が大きくなるほど材料間の分離が生じやすくなることを示すものであるといえる。なお、上記の試験では、鉄筋やふるい目の間隔等の違いにより抵抗性の評価が相違することも予想され、分離の度合いを表す指標やその試験方法については今後さらに検討する必要があると思われる。

表-5 骨材分離抵抗性試験に用いたコンクリートの配合

NO.	W/C* (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						備考
			W	C	Sg	Fa	S	G	
1	42.9	54.2	140	190	—	136	1022	871	注1)
2~5	34.5	50.7	150	253		182	891		
6, 7	29.5	46.8	160	316		227	760		
8, 9	26.1	42.1	170	379		272	629		
10	34.0	50	160	379	—	91	865	871	
11	37.1			63	232	136			
12	36.8			253	—	182			
13	37.7			126	116	182			
14	38.1			63	175	182			
15	50.0	40	230	460	—	—	612	924	

$$C^* = (C + Sg + Fa)$$

注1) SPA: $C^* \times 2 \sim 3\%$ 注2) WR: $C^* \times 0.25\%$, SP: $C^* \times 3.0\%$, SCA: 2.5 kg/m^3

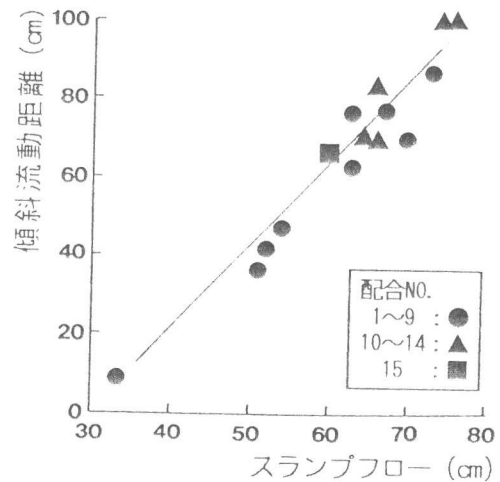


図-8 スランプフローと傾斜流動距離

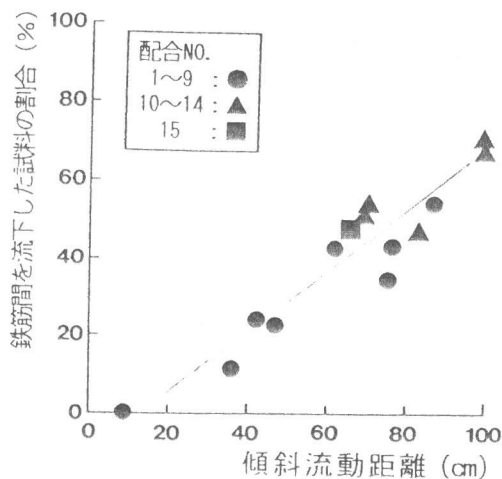


図-9 傾斜流動距離と鉄筋間を流下した試料の割合

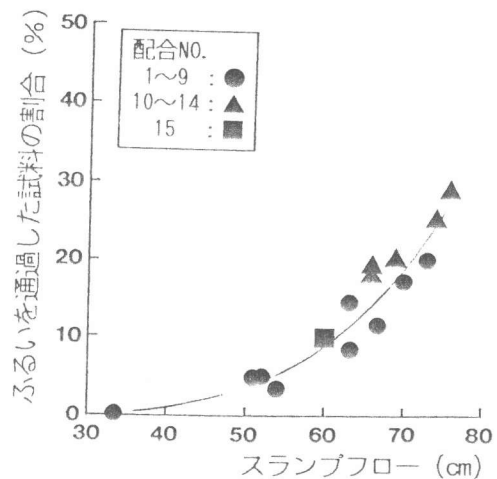


図-10 スランプフローとふるいを通過した試料の割合

PCグラウトや注入モルタルの流動性を評価するためのコンシステンシー試験としては、下端に流出口を有するロート状の装置に一定量の試料を入れて流出させた場合の所要流下時間を測定する方法が一般に用いられている[5]。コンクリートをポンプやトレミーなどを用いて大量に打設する場合には、配管内でのコンクリートの变形速度が施工性を左右する重要な要因となることから、この变形速度を評価する方法として上記の流下試験のコンクリートへの適用性について検討した[6]。実験に用いたロートの形状を図-11に示す。コンクリートの配合は、粘性が極端に異なる3種類とし、スランプフローが一定(60cm程度)となるように調整した(表-6参照)。

図-12および図-13は、ロート吐出部の管径や試料の容量を変化させた場合の各配合における流下試験結果を示したものである。図中の平均流下速度(V)は、所要流下時間(t)を(1)式によりロート吐出部での平均流速に換算したものである。

$$v \text{ (cm/sec)} = (\text{試料の容量} / \text{吐出部の断面積}) / t \quad (1)$$

これらの図によると、各配合間の相対的な関係は、全般的にはロート寸法や試料の容量によらず、粘性が大きい配合ほど流下速度が減少する結果が得られている。例えば、ロート吐出部の管径が75mm以上での配合A、BおよびCに対する平均流下速度は、それぞれ約2-3cm/sec

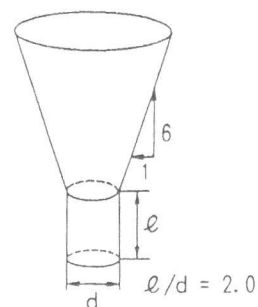


図-11 流下試験器

表-6 流下速度試験に用いたコンクリートの配合

配合 区別	G_{max} (mm)	W/C*	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)										
				W	C	Sg	Fa	Sf	S	G	SCA	SPA	WR	SP
A	20	41.5	51.5	160	88	203	89	6	917	875	—	8.8	—	—
B		32.0	43.0	160	150	150	200	—	713	956	0.02	10.0	—	—
C		55.0	40.0	220	400	—	—	—	642	975	2.3	—	1000	8.0

* $C^* = (C + Sg + Fa + Sf)$, ** WR:cc/m³

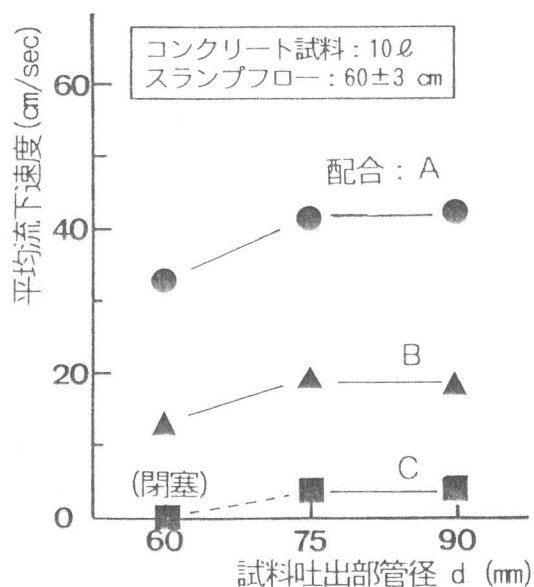


図-12 吐出部管径と平均流下速度の関係

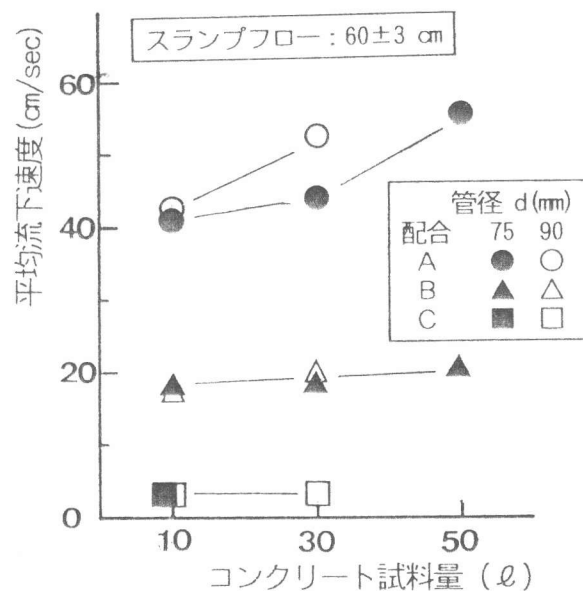


図-13 試料量と平均流下速度の関係

約17~21cm/sec、および約40~50cm/secと配合によって顕著に相違する結果となった。また、本試験における流下時間の測定精度に関しては、同一バッチの試料について3回以上の測定の平均値からの偏差は最大10%程度であった(表-7参照)。

以上の結果、大型ロートを用いた流下試験によれば、水結合材比や SCA添加量などの配合要因によって左右される変形速度の相違を平均流下速度あるいは流下時間を指標として定量的に表せるものといえる。また、ロートの諸元に関しては、吐出部の管径を75mm(粗骨材寸法の3倍以上)、容量を10ℓ程度としたロート(以下、 θ ロートと呼称)を用いれば、変形速度の違いをある程度の精度で評価できることが明らかとなった。すなわち、 θ ロートによるコンクリートの流下試験は、高流動コンクリートの打込みやすさに関して変形速度を評価するための極めて簡便かつ有用な試験方法と考えられる。

表-7 流下時間測定結果の一例(試料10ℓ)
[単位:sec, ()内は平均値]

配合 区別	ロート吐出部の管径 d (mm)		
	60	75	90
A	10.7	5.3 5.8	3.9 3.5
	10.8	5.2 5.6	3.7
	10.5(10.7)	5.4 (5.5)	3.4 (3.6)
B	29.3 30.5	12.5 12.5	9.8 9.4
	30.8(30.2)	12.2(12.4)	9.3 (9.5)
C	閉 塞	77 90	49 54
		75 (81)	54 (52)

4. 結論

本研究において得られた知見を以下に示す。

- 1) コンクリートの打込みやすさは、変形ポテンシャルと変形速度からなる均一な状態としての流動性と流動に伴う材料分離に対する抵抗性を併せて評価する必要がある。
- 2) 流動に伴うコンクリートの骨材分離に対する抵抗性は、変形ポテンシャルの程度によって大きく左右され、変形ポテンシャルが大きくなるほど材料分離が生じやすくなる傾向にある。
- 3) コンクリートの流下試験によれば、水結合材比や SCA添加の有無などの配合要因によって左右される変形速度の相違を定量的に表すことができる。特に、 θ ロートを用いれば、比較的少量(10ℓ程度)の試料でも変形速度を精度良く求められることから、一般に用いられているスランプ試験と同様に極めて簡便かつ有用なコンシステンシー試験方法といえる。

【参考文献】

- 1) 例えば、十河茂幸ほか：特殊水中コンクリートの分離抵抗性について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 9、No.1、pp. 247-252、1987. 6
- 2) 例えば、小沢一雅ほか：ハイパフォーマンスコンクリートの開発、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11、No.1、pp. 699-704、1989. 6
竹下治之ほか：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、Vol. 1、No.1、pp. 143-153、1990. 1
- 3) 三浦律彦ほか：粘性が高いコンクリートのワーカビリティ判定に関する基礎的研究、土木学会第39回年次学術講演会概要集、No. 5、pp. 179-180、1984. 10
- 4) 谷川恭雄ほか：高強度・超高強度コンクリートのコンシステンシー評価試験方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12、No. 1、pp. 275-280、1990. 6
- 5) 樋口芳朗：グラウトのコンシステンシー測定方法、土木学会誌、Vol. 45、No. 6、pp. 39-41、1960
- 6) 近松竜一ほか：高流動コンクリートの流動性を評価する方法、セメントコンクリート、NO. 530 pp. 60-66、1991. 4