

論文

[1006] 水中不分離性コンクリートの流動性評価に関する実験的研究

正会員 児島孝之（立命館大学理工学部）

正会員 角田 忍（明石工業高等専門学校）

正会員○浅野文男（大阪セメント株式会社）

1. はじめに

水中コンクリートは、水中での締固め作業が極めて困難であることから、自重による締固め及び充填性能が要求される。従って、最近使用量が増大しつつある水中不分離性コンクリートには、これらの性質をどのように評価するかということが、施工する際に問題となる。水中不分離性コンクリートは、粘性の高い性質を示すため、従来のコンシステンシー評価試験方法のみでは、コンクリート施工時において十分な品質管理が行われているとは言い難い。「特殊水中コンクリートマニュアル」において、流動性及び充填性評価の指標としては、スランブフロー試験を提唱しており、充填性が問題となる場合にはボックス試験を行うことを推奨している。しかし、これらの試験方法によって十分な品質管理が行えるのかと言えはまだまだ不明な点が多いと考えられる。また、現実問題として基準化された試験方法はまだない。

本研究では、ワーカビリティ判定試験装置の一つである回転翼型レオメーターを用い、水中不分離性コンクリートの流動特性を物理的意味のある数値で表現し定量化することを試み、スランブフロー試験及び本研究で提唱するボックスフロー試験の結果との関連性について検討を行った。

2. 実験概要

(1) 使用材料及び配合

表-1 使用材料

本実験に用いた使用材料を表-1に示す。配合は、水セメント比 $W/C=55\%$ 、細骨材率 $s/a=40\%$ 一定としている。コンシステンシーは、硬練り、中練り、軟練りと変化させる目的で単位水量を3水準に変化させている。一般的に、同系列の水中不分離性混和剤であっても、

セメント	普通ポルトランドセメント	比重 3.16
	三種混合ポルトランドセメント	比重 3.16
細骨材	野州川産砂	比重 2.61 吸水率 1.65% F.M.=2.71
粗骨材	高槻産硬質砂岩碎石	比重 2.67 吸水率 0.82% F.M.=6.54 最大骨材寸法 20mm 重量比 20~10mm : 10~5mm = 1 : 1
水中不分離性混和剤	水溶性高分子セルロースエーテル系	
流動化剤	高縮合トリアジン系化合物	
AE減水剤	リグニンスルホン酸カルシウム	

表-2 水中不分離性コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブフロー (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				混 和 材 料 (kg/m ³)		
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	特殊混和剤	流動化剤	AE減水剤
20	35±5	3±1	55	40	190	345	710	1090	※	6.91	0.86
	45±5				200	364	694	1065		7.27	0.91
	50±5				210	382	678	1040		7.64	0.95

(注) ※: 2.0, 2.2, 2.4 (kg/m³)

銘柄により水中不分離性コンクリートの特性値が異なる場合があるので、2銘柄のセルロースエーテル系混和剤を使用した。水中不分離性混和剤の添加量の影響を調べるために、3水準に変化させた。実験に用いた配合を表-2に示す。

(2) 実験装置

本実験に使用した装置を図-1に示す。回転翼型レオメーターは、コンクリート中で羽根を回転させ、羽根の回転数 N と回転軸に生じるトルク T との関係から流動特性を評価するもので、容器内のコンクリート全体を攪拌するため平均的測定値が得られ易く、測定値の再現性が高い。今回の実験における平均トルクの読み取り時間は10秒とした。また、羽根の回転数は層流状態で測定するため0.05, 0.20, 0.35, 0.50, 0.80, 1.10, 1.40 r.p.s. の7段階とした。測定は、低回転数から上げていき、高回転数から再び下げていく方法により行った。図-2はボックスフロー試験装置を示す。ボックスフロー試験は、小さい函体部(図中の左側)にコンクリートを充填し、設置された仕切り板を鉛直方向に10cm上に上げ、その開口部よりコンクリートを水平に流動させ、5分後のコンクリートの水平部の値をボックスフロー値(cm)とする。

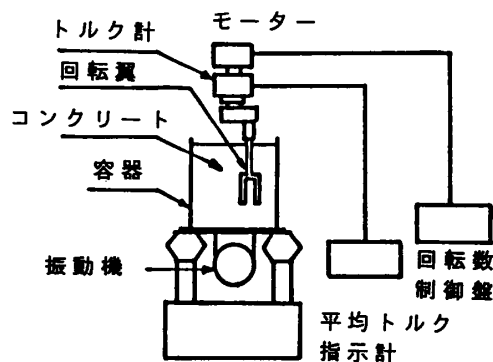


図-1 実験装置

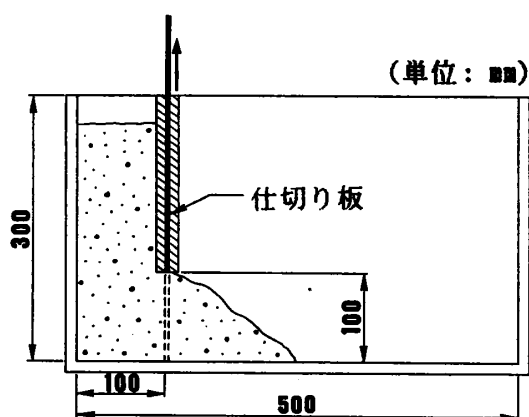


図-2 ボックスフロー試験装置

3. 実験結果及び考察

(1) ヒステリシスループ

図-3は、回転翼型レオメーターにより得られた水中不分離性コンクリートの流動曲線のヒステリシスループを示した一例である。この図から、コンクリートはせん断チクソトロピーの傾向を示していると言える。低回転数から回転数を上げていくと、見掛けの粘度が減少する傾向を示し、フレッシュコンクリート内に構造破壊が生じ、図示するように上昇曲線は曲線を描く。逆に、高回転数から回転数を下げていくと、それ以上の破壊が生じずまた破壊された構造の回復も起こらないため、上昇曲線と下降曲線の両者の間にループができる。下降曲線は、プレーンコンクリートのように直線¹⁾とはならず曲線となる。これは、水中不分離性コンクリート特有のものであり、セルロースエーテル系の水溶液が擬塑性流体の挙動を示すことに起因する

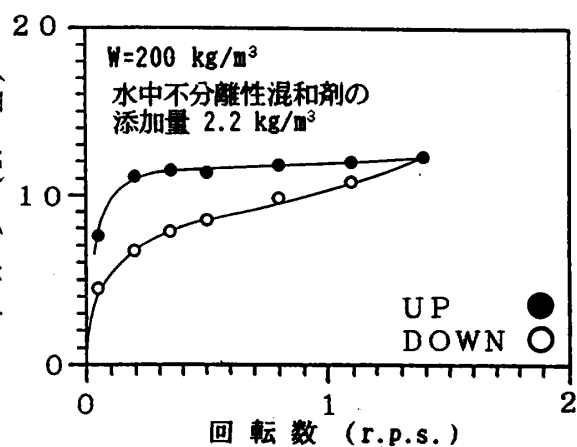


図-3 水中不分離性混和剤Aを用いたコンクリートのヒステリシスループ

と考えられる。このことから、上昇曲線は、練混ぜの程度や容器の詰め込み条件などの攪拌履歴に影響を受けるものと考えれ、下降曲線は、試料が均質な状態での流動曲線を表していると言える。普通コンクリートについても、これらの理由からTattersallらは、下降曲線のみで評価することの妥当性を強調しており²⁾、今回の実験においても水中不分離性コンクリートの特徴を表している下降曲線で比較を行うのが賢明であると思われる。また、上昇及び下降曲線の両者の間に生じるループの面積を測定することは、コンクリートを均質にするため攪拌に要したエネルギーを表す。つまり、求めた面積が、大きいほどせん断チクソトロピーが大きいと言える。各配合のヒステリシスループにおける面積を測定した結果を表-3に示す。練混ぜ条件が一定であれば、単位水量が減少するにつれて、攪拌に要したエネルギーが約2～5倍必要となる。また、水中不分離性混和剤の種類が異なると、同配合であっても攪拌に要するエネルギーは異なる。これは同一のセルロースエーテル系を主成分とするものでも各メーカーごとで化学構造上若干の違いがあること、また今回の実験では、水中不分離性混和剤の種類ごとにセメントの種類も変化させたことも原因の一つと考えられる。水中不分離性コンクリートが優れた流動性を示すためには、固体粒子が均質に分散されていなければならない。従って、予め攪拌に要するエネルギーを考慮にいれ、プラントにおける練混ぜ時間やミキサー容量に対する練混ぜ量などを考慮する必要があると言える。

表-3 配合要因による攪拌エネルギー

水中不分離性 混和剤の 添加量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	攪拌エネルギー (N・m・r.p.s)	
		水中不分離性 混和剤A	水中不分離性 混和剤B
2.0	190	72.0	76.0
	200	34.9	47.9
	210	23.4	16.2
2.2	190	56.5	70.9
	200	44.6	49.7
	210	27.7	27.7
2.4	190	56.5	86.4
	200	44.3	58.3
	210	23.4	33.1

(2) 流動曲線

図-4、図-5に回転翼型レオメーターにより得られた水中不分離性コンクリートの流動曲線の一例を示す。先ほど述べた理由により、下降曲線によって検討を行っている。水中不分離性コンクリートの流動は、擬塑性流体の挙動を示す。よって、降伏値がほぼ存在しないと考えられるため、自重のみで流動するというのもこの図から明かである。この挙動は、ブレン、AE、高性能減水剤添加コンクリートの振動下における挙動と類似している¹⁾。すなわち、振動下にお

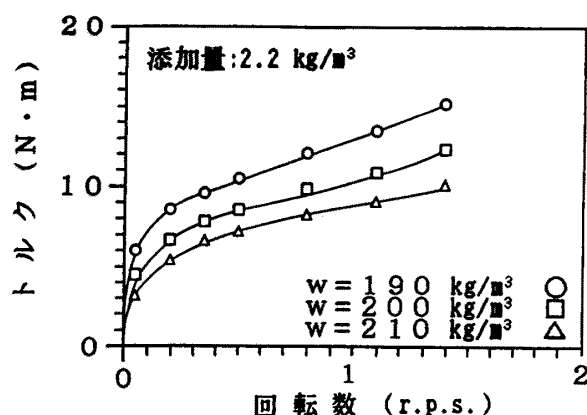


図-4 水中不分離性混和剤Aを用いたコンクリートの流動曲線

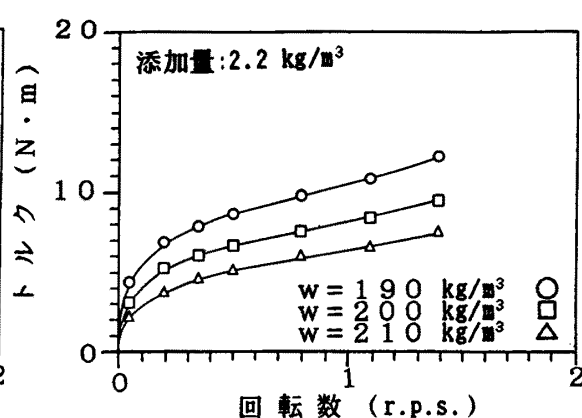


図-5 水中不分離性混和剤Bを用いたコンクリートの流動曲線

表-4 見かけ非ニュートン係数 p
及び見かけ非ニュートン指数 q (但し、 r は相関係数)

主剤の 添加量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	水中不分離性コンクリート $T = p N^q$					
		水中不分離性混和剤A			水中不分離性混和剤B		
		p	q	r	p	q	r
2.0	190	13.064	0.319	1.000	10.150	0.308	1.000
	200	9.291	0.352	1.000	8.154	0.354	1.000
	210	8.637	0.355	1.000	6.722	0.369	1.000
2.2	190	13.100	0.268	1.000	10.736	0.299	1.000
	200	10.694	0.299	1.000	8.343	0.330	1.000
	210	8.995	0.345	1.000	6.561	0.363	1.000
2.4	190	13.683	0.280	1.000	14.264	0.246	1.000
	200	11.520	0.301	1.000	9.157	0.306	1.000
	210	8.915	0.324	1.000	7.254	0.354	1.000

けるコンクリートは、間隙水圧の上昇による有効応力の消失や振動エネルギーによる骨材粒子間の接触摩擦抵抗の消失により液状化し、降伏値が消失してニュートンまたは非ニュートン流体に近い流動挙動を示すようになる³⁾。十分に練混ぜられた水中不分離性コンクリートはマトリックスの粘度が大きいので、セメント粒子や固体粒子の沈降が妨げられ、固体粒子が液体中に浮かんた状態で保持される。このため、水中不分離性コンクリートは、振動下のコンクリートと同様に降伏値のないニュートンまたは非ニュートン流体の挙動を示すものと考えられる。

トルク T と回転数 N の関係は、 $T = p N^q$ なる式により近似できる。表-4は、各配合のコンクリートについて見かけ非ニュートン粘性係数 p 及び見かけ非ニュートン粘性指数 q を計算した結果である。また上式は、擬塑性流体の構成式 $\tau = r \dot{\gamma}^s$ と相似関係にある。本研究ではBloomerの方法により⁴⁾、非ニュートン粘性係数 r 及び非ニュートン粘性指数 s を求めることもできる。各水中不分離性コンクリートとも、単位水量の増加に伴い、各回転数における見掛けの粘度が減少し、流動性が良くなる傾向がみられる。また、水中不分離性混和剤の相違による比較を行うと、同一単位水量でも見掛けの粘度は、それぞれ異なった粘性を持つと考えられる。今回の実験の範囲では、水中不分離性混和剤Aを用いたコンクリートは、Bを用いたコンクリートより粘稠性に富んでいると言える。粘稠性が高いほどセメント粒子の沈降、水溶性ポリマーの保水性によって自由水の上昇は抑えられ、ブリージング現象は起こりにくくなる。従って、均質なコンクリートが得られ易く、圧縮強度特性への影響が少なくなると考えられる。

以上のことから、水中不分離性コンクリートは、配合要因の違いにより流動特性がそれぞれ特徴を有しているので、今後使用に当たっては、その流動特性を把握しておく必要がある。

(3) スランプフロー値及びボックスフロー値と得られた物性値との関係

トルク T と回転数 N との関係式より得られた p 及び q とスランプフロー値との関係を図-6、図-7に、ボックスフロー試験値との関係を図-8、図-9に示す。これらの図から分かるようにスランプフロー値及びボックスフロー値が増加すれば、 p は減少する傾向にあるといえ、また逆に q は、増加する傾向にある。両者の間には、それぞれ相関関係があり、スランプフロー値及びボックスフロー値によってレオロジー定数と関係付けることが可能であることがわかった。

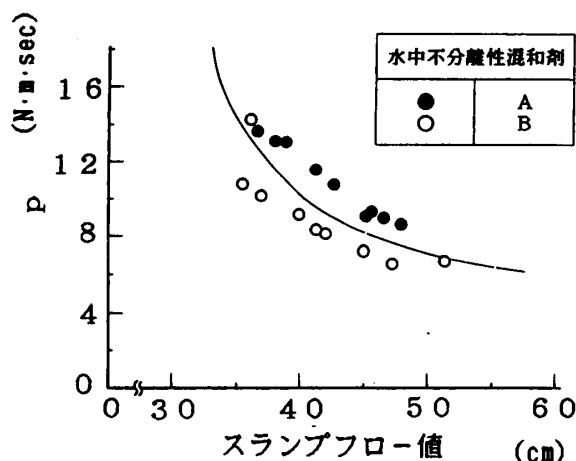


図-6 スランプフロー値とpの関係

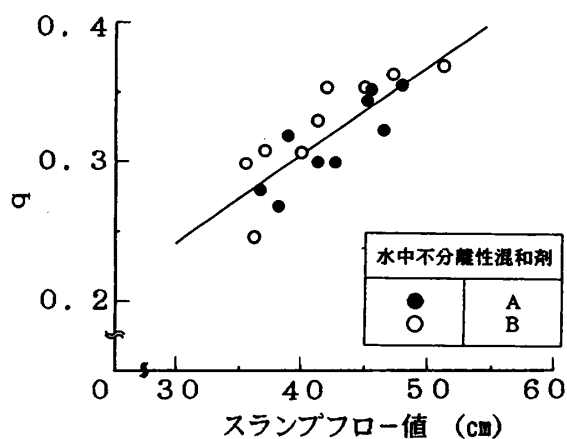


図-7 スランプフロー値とqの関係

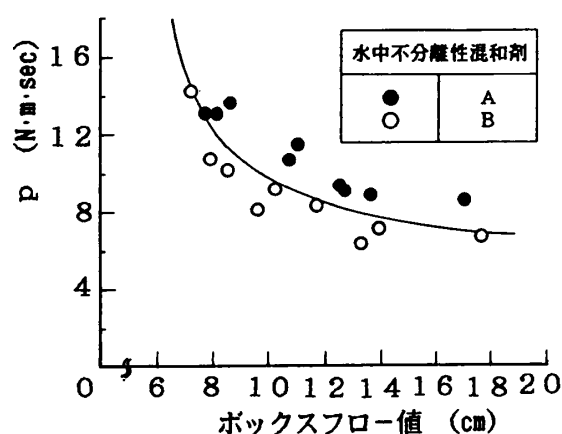


図-8 ボックスフロー値とpの関係

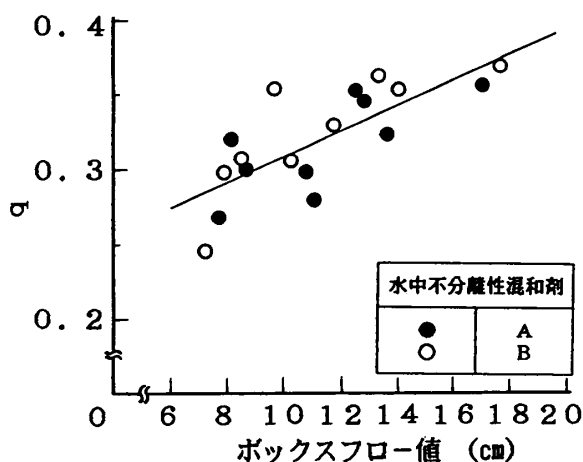


図-9 ボックスフロー値とqの関係

(4) 平均ボックスフロー速度

図-10に平均ボックスフロー速度と流動時間との関係を示す。流動開始後1分までは10秒間隔、その後5分までは30秒間隔で各時間のボックスフロー値(cm)を測定する。平均ボックスフロー速度 V_{BF} (cm/s)は、各時間におけるボックスフロー値を測定時間で除した値で表す。この図における速度変化を表した式は、

$$V_{BF} = a \times T^b$$

ここで、T：流動時間(sec)

として示される。1分までは自重による変形速度が顕著にみられるが、その後は、変形速度が遅くなる傾向にあると言える。以下、各配合における係数a、b及び相関係数の値を表-5に示す。この表からも分かるように相関係数rは、非常に良いと言える。係数a、bとも全体的

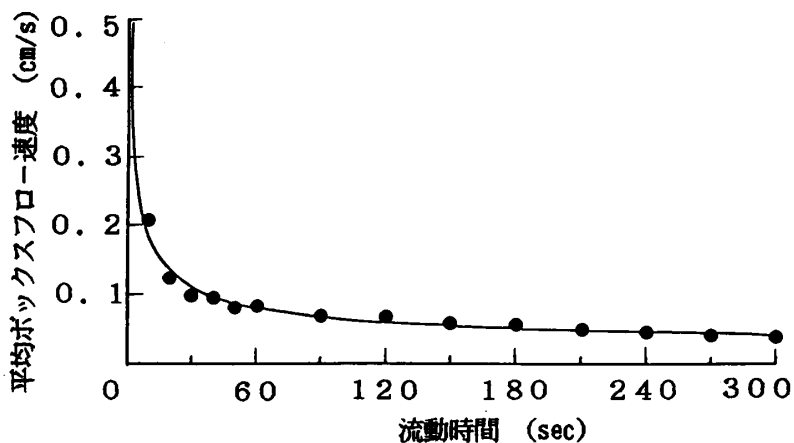


図-10 平均ボックスフロー速度と流動時間

に水中不分離性混和剤Bを用いたコンクリートの方が大きいと言える。

しかしながら、指数部bに比べaの方が、 v_{BF} におよぼす影響が大きいので、aの値が大きくなるBを用いたコンクリートは、 v_{BF} の値が大きくなることから流動特性に優れていると言える。

以上のことより、流動時間に伴う平均ボックスフロー速度を求め測定しておくことは、流動特性を評価することに対して簡易であり、重要な測定項目の一つとなると言える。

4. 結論

水中不分離性コンクリートの流動特性について行った実験及び解析の結果をまとめると以下の結論を得た。

- (1) 水中不分離性コンクリートの流動特性は、擬塑性流体の挙動を示す。従って、水中不分離性コンクリートの流動性評価は、非ニュートン係数及び非ニュートン指数によって定量化することができる。
- (2) 水中不分離性コンクリートの流動特性は、単位水量、水中不分離性混和剤の種類及び添加量などの配合要因により流動特性がそれぞれ異なるので、使用に当たっては各配合における流動特性を把握しておく必要がある。
- (3) スランプフロー値及びボックスフロー値と非ニュートン係数及び非ニュートン指数の間には、相関関係がみられた。また、ボックスフロー試験を行う際に平均ボックスフロー速度を同時に測定することで、流動性を効果的に評価できる。
- (4) 攪拌履歴を明らかにしておくことは、水中不分離性コンクリートの均一な流動性を得るための一つの指標となる。

参考文献

- 1) 角田, 岸本, 明石; "回転翼型レオメーター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, vol 10-2, 1988; (pp343-348)
- 2) Tattersall, G.H. and P.F.G. Banfill: The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Advanced Publishing Program, London, 1983; (pp.261-271)
- 3) 角田; "フレッシュコンクリートの振動時における性質", フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集, JCI, 1989; (pp13-18)
- 4) Tattersall, G.H. and P.F.G. Banfill: The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Advanced Publishing Program, London, 1983; (pp.93-135)

表-5 平均ボックスフロー速度における係数a及びb

水中不分離性混和剤		単位水量 (kg/m ³)	$v_{BF} = a \cdot T^b$		
種類	添加量 (kg/m ³)		a	b	相関係数 r
A	2.0	190	0.608	-0.566	0.987
		200	0.675	-0.472	0.996
		210	0.840	-0.457	0.998
	2.2	190	0.677	-0.600	0.994
		200	0.507	-0.469	0.992
		210	0.499	-0.439	0.984
	2.4	190	0.576	-0.570	0.987
		200	0.524	-0.433	0.997
		210	0.748	-0.492	0.994
B	2.0	190	0.894	-0.619	0.990
		200	0.810	-0.571	0.987
		210	1.934	-0.611	0.996
	2.2	190	1.022	-0.638	0.992
		200	0.909	-0.526	0.996
		210	1.006	-0.536	0.989
	2.4	190	0.572	-0.482	0.994
		200	0.489	-0.442	0.987
		210	0.999	-0.532	0.970