

論文

[1028] 高流動コンクリートの流動性評価

角田 忍*1

1. はじめに

従来のコンクリートに比べ、超流動コンクリートとか締固め不要コンクリートや高流動コンクリートと呼ばれるコンクリートは、フレッシュコンクリートのワーカビリティを評価するのがむずかしいといわれている。それは、これらのコンクリートが従来のコンクリートに比べて高性能減水剤が多量に使用されており、さらに増粘剤やそれに代わる微粉が混入されているため、流動特性が異なっておりそれに対応するワーカビリティ・テスターが開発されていないところにあると考える。現在のところスランプフローが便利さ故に用いられているが真に流動性を表すものではなく、さらに実験室スケールの方法は確かにいくつかの提案があるが、実施工において対応できるものはほとんどないといって過言ではない。このようなコンクリートは、レオロジー的に評価すべきであって、測定された値がレオロジー定数に換算できるか、またはこれと相似的に評価できる方法が望ましい。

本研究では、これらのコンクリートを回転粘度計によってレオロジー定数を求め、ミキサーと回転粘度計が相似的に関係すると考え、回転粘度計により求めた流動曲線とミキサーの回転数と使用電力との関係図からレオロジー的評価をする方法の検討を行った。実験結果からは、両方法から求めた流動図には相似的關係があることが明らかとなった。

2. 実験概要

2.1 試験方法

(1) モルタルのレオロジー試験

高流動コンクリートに要求されるフレッシュ時の特性は、従来のコンクリートに比べて著しく流動性が高いことと、材料不分離性である。高流動コンクリートの流動特性を明らかにするために、その性能に直接関係するマトリックス部分のモルタルのレオロジー特性を明らかにすることが必要である。モルタルのレオロジー特性を調べるためにB型粘度計(Brookfield type rheo-meter)を用い、その流動特性を測定した。モルタルは、JIS R 5201に準じて製造され、1000mlのビーカーに流し込み、B型粘度計のローターを所定位置まで挿入した後2, 4, 10, 20 r.p.m. 回転させその各々上昇下降時のトルクを測定し流動図を求めた。

(2) コンクリートのレオロジー試験

本研究で用いた締固め不要となるようなコンクリートは、材料分離に抵抗させるため従来のコ

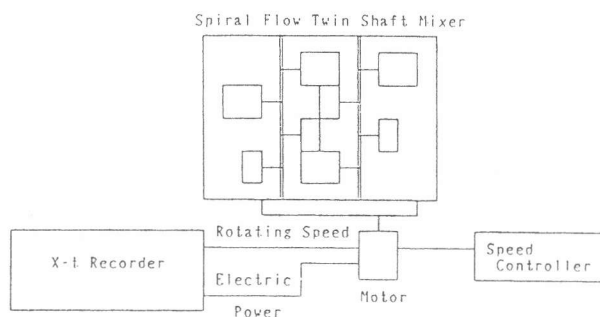


図1 改良型2軸水平ミキサー

*1 明石工業高等専門学校教授 土木工学科、工博(正会員)

表1 高炉スラグ微粉末の物理化学試験結果

ンクリートより保水性が高い。そのため、適度に配合された高流動コンクリートではコンクリート面と回転円筒間での滑りがなく、2重円筒回転粘度計が利用できるものとする。本実験

Specific gravity	Specific surface (cm ² /g)	Chemical Composition (%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃
2.88	6190	31.6	12.8	0.3	43.4	6.3	2.1

に用いたコンクリート用回転粘度計は、内円筒回転型であり、内円筒の寸法は半径10cm、高さ24cm、外円筒の寸法は半径18cm、高さ32cmである。

実験手順として、この種のコンクリートに、一般的に用いられているスランプフロー試験を、レオロジー試験の前に行った。次に、コンクリートを回転粘度計の容器に深さ7~10cmまで注入し、容器を内円筒の底面に接触するまで上昇させ、20, 40, 60, 80 r.p.m.での底面トルクを測定した後、内円筒の試料深さが約10cmになるよう試料を加え、試料厚さを正確に測った後、20, 40, 60, 80 r.p.m.で内円筒の回転を上昇・下降させ、トルクを測定し回転数およびトルクをX-tレコーダーに記録し、流動図を得る。計算に用いたトルクは、底面トルクを差し引いた。

(3) ミキサー試験

ミキサーのシャフトの回転数と回転トルクに関係するモーターの使用電力との間に関係が見つかれば、回転翼型レオメータによる流動曲線に類似するとの考えから、60 l練り2軸水平ミキサーを図1のように改良した。シャフトの回転速度は20~80 r.p.m.で回転速度を上昇・下降させた。各使用電力は電力計で測定されX-tレコーダーに記録した。各回転数の空転時の使用電力を測定し、練りませ時の使用電力から差し引くことにした。実験に用いたコンクリートの容量は50 l一定とした。測定の時間は50.1 r.p.m.で空練り1分30秒間、本練り3分間の後停止し、1分間休止した後所定の回転数の使用電力を測定した。

(4) 圧縮強度試験

締固め不要となるコンクリートの強度特性を確認するために、圧縮強度試験をおよび単位容積質量の測定を行った。コンクリート供試体は、φ10×20cmの型枠に締固めを行わずに流し込み、材齢2日で脱型し水中養生、材齢28日で強度試験および単位容積質量を測定した。

表2 高流動化剤の種類

SP	Type
A	Aromatic aminosulfonic acid based AE superplasticizer
B	Naphthalene based superplasticizer
C	Acrylic polycarboxylate based AE superplasticizer

2.2 使用材料および配合

実験に用いたセメントは、市販の普通ポルトランドセメント、細骨材は河川産(比重2.53, 吸水率2.3%, F.M.=2.81)粗骨材はJIS碎石2005(比重2.61, 吸水率0.9%)を用いた。また高炉スラグ微粉末は6000ブレンを用いた。物理試験および化学試験の結果を表1に示す。高流動化剤の

表3 高流動コンクリートの配合

Concrete Mixes	W/(C+B) (%)	Unit Contents (kg/m ³)					
		W	OPC	BFS	S	G	AESP
Normal Concrete	55.0	201	364	-	904	890	-
CFF Concrete	31.6	179	179	387	807	794	9.6

種類がこの種のコンクリートのレオロジー定数にどのような影響を及ぼすのかを3種類の高流動化剤について実験を行った。実験に用いた高流動化剤の種類を表2に示す。

配合は、高炉スラグ系高流動コンクリート（CFFコンクリート）の参考文献¹⁾を参考に決定した。モルタル実験の水結合材比は0.43と一定にし、砂結合材比は0~1.5に変化させた。コンクリートの配合表を表3に示す。

2.3 レオロジー定数の測定

2重円筒内の締固め不要となる高流動コンクリートの流動挙動は、コンクリート表面に発泡スチロール小片を線上に半径方向に置き、内円筒を回転させた結果、外円筒付近では流動挙動が及ばないことが分かった。そのため、レオロジー定数の測定には、回転粘度計の外円筒の半径を無限大とする Brookfield 型粘度計のビンガム定数測定方法²⁾を用いた。レオロジー定数は次式により計算した。

$$d\omega/dM = 1 / (4\pi R^2 h \mu) - \tau_y / (2\mu M) \quad (1)$$

ここに ω は角速度、 M は内円筒のトルク、 R は内円筒の半径、 h は試料深さ、 μ は塑性粘度、 τ_y は降伏値である。

3. 結果および考察

3.1 高流動モルタルのレオロジー定数

締固め不要となるコンクリートのモルタルは、降伏値が小さく、粘度がある程度確保されている必要がある。図2は、締固め不要となる高流動ペーストに細骨材を徐々に増加させた場合の流動モルタルの流動図である。また、表4はビンガム定数の計算結果である。図から砂結合材比が1.25を越すと粘性も高く降伏値も大きくなることが分かる。したがって、砂結合材比は1~1.25付近が材料分離が、少なく締固め不要となる範囲ではないかと思われる。このように、締固め不要コンクリートの開発にはレオロジー試験が有効な手段であることが分かる。

3.2 高流動コンクリートのレオロジー測定

締固め不要となる高流動コンクリートの代表的流動図を図3に示す。この種のコンクリートの流動図の上昇曲線は、非ニュートン粘性曲線となる下に凸の曲線となり、下降曲線はニュートン粘性もしくはビンガム

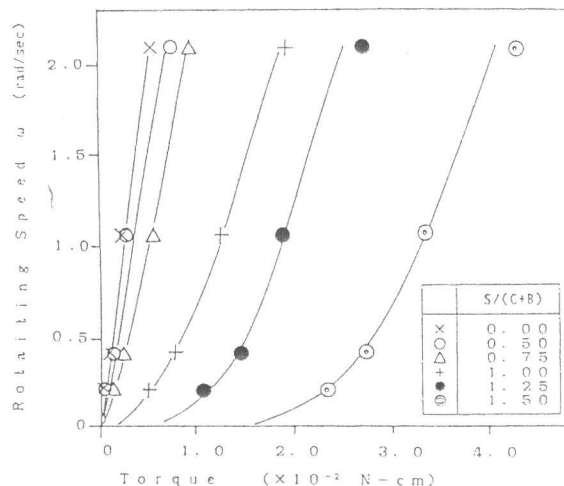


図2 高流動モルタルの流動図

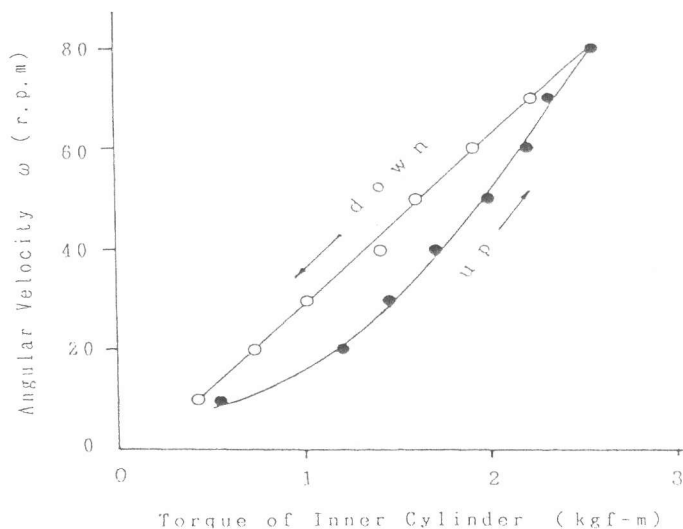


図3 高流動コンクリートの代表的流動図

流動を示す直線となっている。上昇曲線はコンクリートに与えられるせん断エネルギーによって構造破壊を起こす。したがって、攪拌時間により曲線の形状は変動する。しかし、下降曲線は攪拌により構造破壊-再生により分散-再生が進んだ状態であるため、ほぼ安定した直線となる。

このため、本研究ではコンクリートのワーカビリティと関連させる指標として、工学的には高流動コンクリートをビンガム定数で評価してもある程度の精度で評価できるとの判断で、下降曲線を解析に用いることにした。図4は、配合一定で流動化剤の種類のみを変化させた場合の流動図をまとめたものである。表5は、各コンクリートの最終スランプフロー値および計算したビンガム定数である。高流動コンクリートは、普通コンクリートに比べて、降伏値が著しく小さく自重程度の荷重によって流動すること、また、粘性（直線の勾配）も高いことが明らかとなった。また、粘性は流動化剤の種類によっても効果が違うことが分かる。このように、高流動コンクリートの流動特性がスランプフローだけでは、十分に表現できないことは明らかである。

表4 高流動モルタルのレオロジー定数

Sand/ Binder ratio	0	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5
Plastic Viscosity (Pa · sec)	0.085	0.231	0.328	0.598	0.680	0.731
Yield Value (Pa)	0.05	0.133	0.520	1.508	2.450	5.470

表5 高流動コンクリートのレオロジー定数

Type of SP	Normal	A	B	C
Slumping Flow (cm)	29.6	78.0	80.7	66.0
Plastic Viscosity (Pa · sec)	0.006	0.346	0.250	0.158
Yield Value (Pa)	0.501	0.331	0.090	0.058

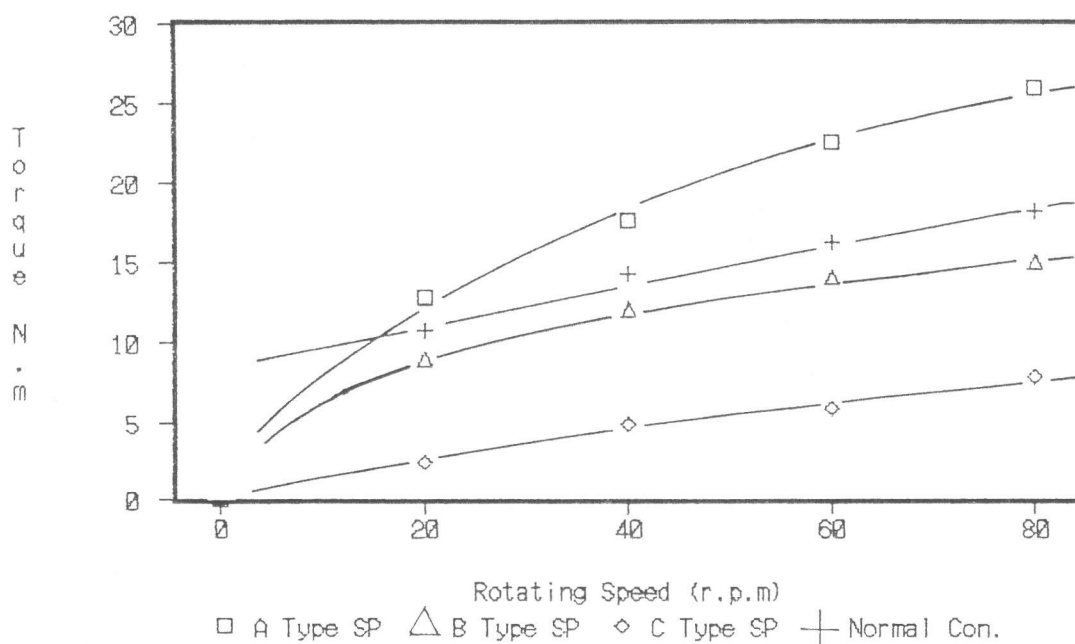


図4 流動化剤の種類が高流動コンクリートの流動図に及ぼす影響

3.3 ミキサーによる高流動コンクリートの流動特性

2軸水平ミキサーのコンクリート中における、羽の回転数と使用電力との関係図は、Two-point Workability Tester³⁾に類似していると考えられる。図5は、回転粘度計でレオロジー試験を行ったものと同配合のコンクリートについて行った実験結果である。図4における関係と非常に類似した関係が得られている。直線の勾配と粘性、20 r.p.m. における使用電力とコンクリートの降伏値との関係(20 r.p.m. 以下では、ミキサーの使用電力が安定しなかったのでこの値を比較することにした)を示したのが図6, 7である。図から明らかなように、ミキサー試験から得られる結果から、多少精度的に問題が残されているものの、ビンガム定数が推定できる。高流動コンクリートのワーカビリティ・テスターとして有効な方法であると考えられる。

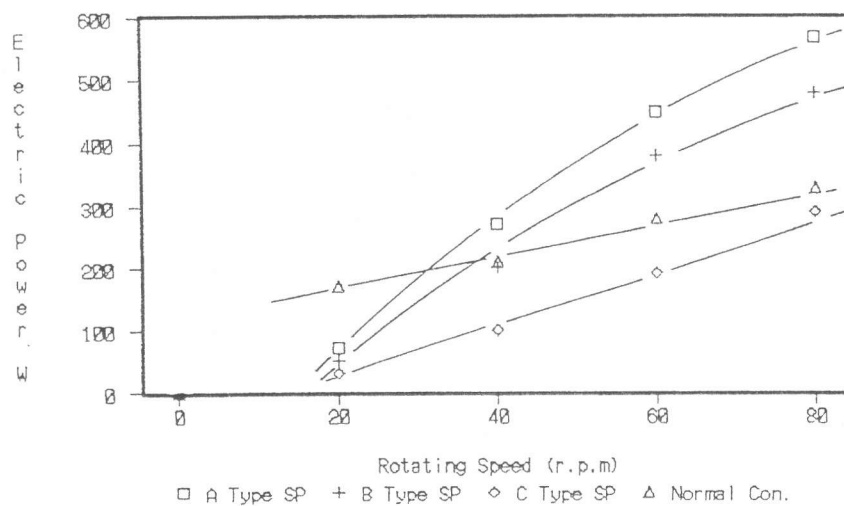


図5 高流動コンクリートのミキサーの回転数と使用電力の関係

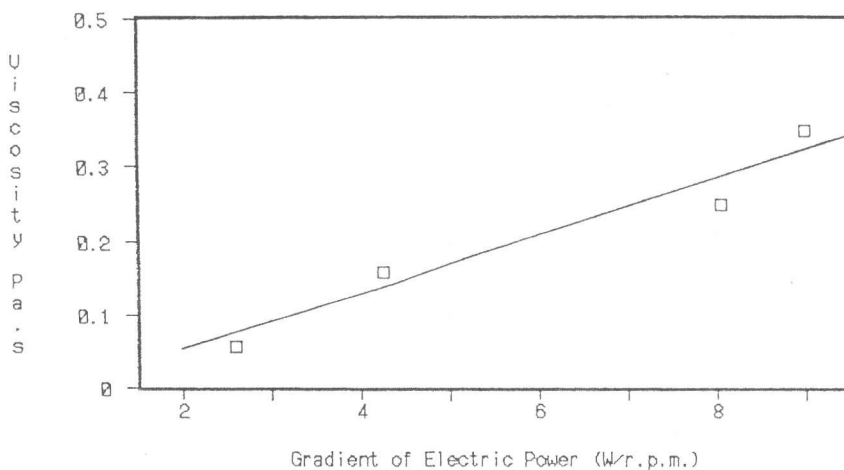


図6 ミキサーの回転数と使用電力関係式の勾配と塑性粘度との関係

3.4 高流動コンクリートの強度特性

締固め不要となる高流動コンクリートの強度試験は、単に型枠に流し込むだけで作製されるべきである。表6は、締固めせず、流し込みのみで作製された後、材齢2日で脱型し、水中養生し材齢14日、材齢28日における圧縮強度および単位体積質量を測定した結果である。今回実験したコンクリートが十分に構造用コンクリートとしての性能を有していた。

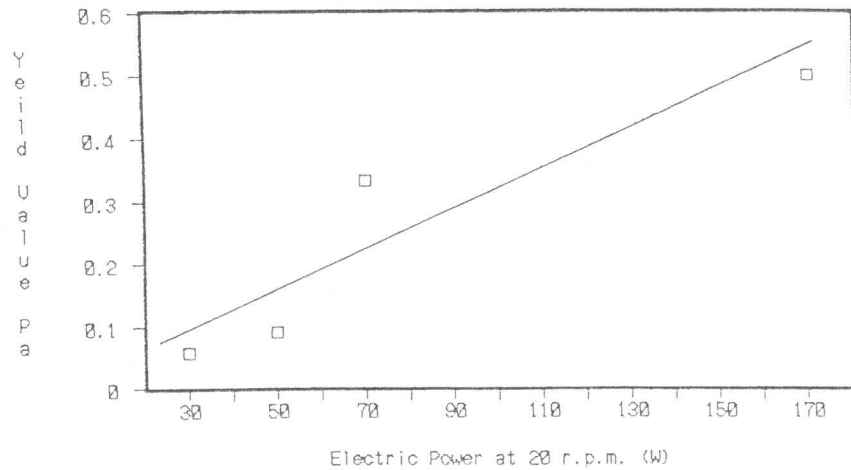


図7 ミキサーの回転数 20 r. p. m. での使用電力と降伏値との関係

表6 高流動コンクリートの強度特性

Concrete Mixes	Compressive strength (MPa)		Unit weight (kg/m ³)	
	14	28	14	28
Normal concrete	365	406	2360	2360
Type A CFF Con.	340	444	2380	2380
Type B CFF Con.	384	462	2350	2350
Type C CFF Con.	322	436	2360	2360

4. まとめ

締固め不要となるような高流動コンクリートのワーカビリティを評価するのは、一般に用いられているスランプフローテストや充填性試験では十分ではない。本研究で用いた、コンクリート用回転粘度計は流動性を評価するには有効であるが、装置が高価であるし、現場での使用は当然不可能である。本研究で提案する、ミキサーの回転数を3~4段階に変化させ、各使用電力が計測できれば Two-point Workability Tester に類似したワーカビリティ・テスターとしての利用ができるものとする。ただし、実用上ブレードの摩耗や水和物の付着なども考えられるので今後、実験の回数を増やし精度の向上を図る予定である。

本研究の遂行に当たり新日本製鐵(株)、(株)日工の協力を得たことを付記し、深謝します。

参考文献

- 1) 小門武、三宅正人：スラグ系締固め不要コンクリートの基礎特性と充填性実験、コンクリート工学年次論文報告集、No.13-1, pp.875-80, 1991.6.
- 2) 川田裕郎著：改訂粘度、コロナ社刊、pp.99-120, 1976.
- 3) 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集、10-2, pp.343-348, 1988.6.