

論文

[1061] 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

正会員 ○角田 忍 (明石工業高等専門学校)

岸本 敏 (日本電子計算)

正会員 明石外世樹 (立命館大学理工学部)

1. まえがき

フレッシュコンクリートのワーカビリティを定量的に評価する方法の確立は、コンクリート施工の合理化、省力化を推進する上で重要かつ急がれる課題である。ワーカビリティは、一般的にはコンシステンシーを評価することで推定する方法がとられている。コンシステンシーは、変形あるいは流動に対する抵抗性で示されるため比較的定量的な評価がしやすいと考えられ、各種の測定方法が提案されている。しかし、各種の測定方法が工業化学の分野で開発されたものをコンクリート用に改良を加えたものがほとんどであるため、コンクリート独特の性質に関係した問題点も多く含んでいる。

本研究は、Tattersallらの提案する「Two Point Workability Test」<sup>1)</sup>の原理を応用した回転翼型レオメータを試作し、従来のコンシステンシー試験では評価が難しいとされてきたAEコンクリート、高性能減水剤添加コンクリート、特殊水中コンクリート用混和剤添加コンクリートにこれを適用してその有用性を確認した。また同時に、振動下のこれらのコンクリートの流動特性を測定し、その特性を明らかにすることができた。

2. 回転翼型レオメータの理論及び実験装置

回転翼型レオメータは、コンクリート中で羽状の物体を回転させるときの羽の回転数と回転軸に生じるトルクの関係からフレッシュコンクリートのコンシステンシーを評価する方法で、内円筒回転型の回転粘度計あるいは、B型粘度計に類似しておりコンクリート用強制練りミキサーにも類似しているといえる。回転翼型レオメータの測定原理は、Tattersallらの方法と同様に、羽に生ずるトルク  $T$  と回転数  $N$  の間に直線関係 ( $T = g + hN$ ) があることを利用したものである。流動特性が既知の液体をレオメータに適用して、次元解析を行うことでコンクリートのビンガム特性 ( $\tau = \tau_y + \mu D$ ) を求めることが可能である。降伏トルク値  $g$  から降伏値  $\tau_y$ 、塑性粘度係数  $h$  から塑性粘度  $\mu$  への較正係数を求めるキャリブレーションの方法は、Bloomer<sup>2)</sup>の方法によった。試作した回転翼型レオメータを図1に示す。

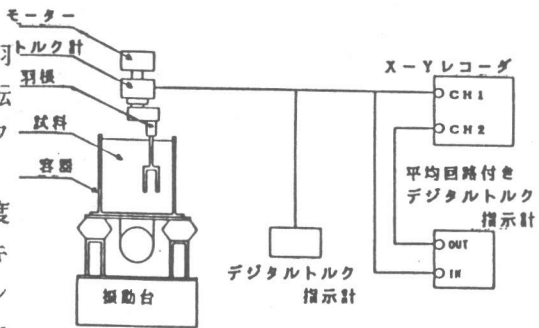


図1 回転翼型レオメータ

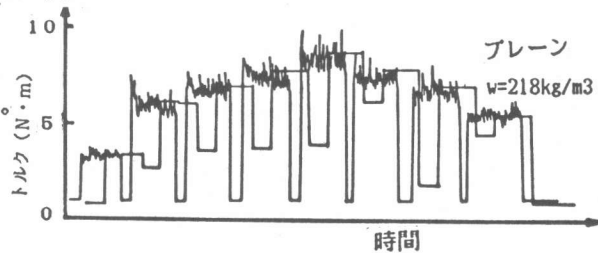


図2 レオメータによる測定例

回転翼のトルクは図2のように、回転翼が骨材と衝突したり擦れ合ったり、場合によっては取り付け金具の遊びなどが原因で、トルクが変動する。このため、直接トルク計から数値を読み取ると個人誤差が生じ易くなるので、試作したレオメータではこれを避けるためのトルク値を平均化してデジタル表示する装置を組み込んでいる。また、振動下におけるフレッシュコンクリートの流動特性を得るため、加振装置を容器底面に取り付け4種類の振動を加えることも可能にしている。回転翼の形状は、コンクリートのコンシステンシーによって多少の工夫がある。図3は、実験に用いた各種の回転翼である。A型の翼は、1軸回転用に、B型の翼は、遊星運動回転用に製作したものである。A型は、コンシステンシーが柔らかいコンクリートに適しており、翼のブレードに角度をつけることで上下の材料分離の影響を少なくする配慮がされている。B型は、攪拌による上下の材料分離が少なく、コンシステンシーの硬いコンクリートに適した翼である。また水平方向の材料分離の影響も考慮できるし、また材料を均等に攪拌できる特徴を有している。回転翼のキャリブレーションには、ニュートン液体としてはグリセリン、擬塑性液体にはCarboxymethyl Cellulose を使用した。各回転翼の校正係数 ( $\tau y = a \cdot g, \mu = b \cdot h$ ) を求めた結果を表1に表す。本実験では各種コンクリートのコンシステンシーとトルク計の感度、容量の関係からB-2の回転翼を使用した。なお、A-1による実験結果と比較したがほとんど差はみられなかった。

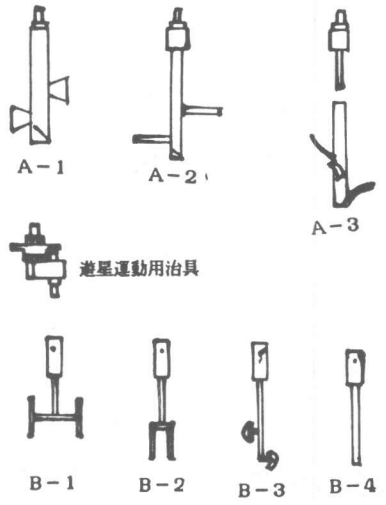


図3 各種回転翼

回転翼のキャリブレーションには、ニュートン液体としてはグリセリン、擬塑性液体にはCarboxymethyl Cellulose を使用した。各回転翼の校正係数 ( $\tau y = a \cdot g, \mu = b \cdot h$ ) を求めた結果を表1に表す。本実験では各種コンクリートのコンシステンシーとトルク計の感度、容量の関係からB-2の回転翼を使用した。なお、A-1による実験結果と比較したがほとんど差はみられなかった。

番号	a	b
A-1	343	6.80
A-2	358	4.57
A-3	788	8.77
B-1	294	0.977
B-2	695	6.49
B-3	622	3.40
B-4	1116	10.5

表2 使用材料表

3. 実験方法

3.1 材料及び配合

セメントは市販の普通ポルトランドセメントを用いた。骨材は、細骨材に野州川産川砂 (比重; 2.58、吸水率; 1.7%、F.M; 2.41)、粗骨材に高槻

セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	野州川産川砂 比重2.58 吸水率1.7% F.M.=2.41
粗骨材	高槻産硬質砂岩砕石 比重2.69 吸水率0.6% F.M.=6.91
A E 剤	樹脂 (アニオン系)
高性能減水剤	ナフタリン系
水中不分離剤	高分子セルロース系
A E 減水剤	リグニンスルホン酸カルシウム

産硬質砂岩砕石 (比重; 2.69、吸水率; 0.7%、20mm-10mm : 10mm-5mm = 1 : 1重量比) を用いた。実験に使用した材料を表2に示す。

表3 各種コンクリートの配合表

普通コンクリートの配合は、細骨材率をs/a=48.0%、水セメント比をW/C=50% と一定にして単位水量を4種類にし、スランブを4cmから18cmまで変化させた。各種コンクリートとして、一般的に用いられるA Eコンクリート、特徴的な性質を示す高性能減水剤添加

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				A E 剤	高性能減水剤	水中不分離剤		A E 減水剤
		W	C	S	G			主 剤	助 剤	
50	48	190	380	835	935					
50	48	200	400	815	912					
50	48	210	420	795	889					
50	48	218	436	778	871					
50	48	180	360	856	957	216g				
50	48	190	380	835	935	228				
50	48	180	360	856	935		2160g			
50	48	190	380	835	935		2280			
50	48	210	420	795	889			3150g	400g	1050g
50	48	218	436	778	871			3270	720	1090

コンクリート（ナフタリン系）、水中コンクリート用特殊混和剤添加コンクリート（セルロース系）を取り上げた。実験に用いた配合を表3に示す。

### 3.2 実験方法

#### (1) 回転翼型レオメータ

トルク計の容量は、20 N・mである。また、トルクの平均化装置の読み取りタイムインターバルは10秒に設定した。試料を層流状態で攪拌するために、回転数を0.005, 0.35, 0.80, 1.10, 1.40 r.p.s.の5段階のせん断速度で上昇させ、次に下降させた。混和剤を添加したコンクリートについては、低せん断速度域における流動曲線の形状がブレンコンクリートと違う可能性があるため、上記の回転数に更に0.20, 0.50 r.p.s.を加えて7段階のせん断速度とした。

(2) 振動装置 加振装置としては、テーブル振動機や型枠振動機に一般的に使用されている偏心モーター型の振動機で、振動数は1750Hzのものである。偏心錘の角度を操作することによって加速度を変化させる簡易な装置を用いた。試料を容器に入れた状態での4種類の振動に対する各点の加速度を図4、表4に示す。

### 4. 実験結果及び考察

#### 4.1 静的試験

(1) 流動曲線 流動図に描かれる下降させることによって得られるヒ

表4 振動装置の加速度 (g)

方向\振動番号	1	2	3	4
A	4.33	4.50	4.00	5.33
B	0.67	1.67	1.33	1.00
C	2.00	2.50	2.67	3.17
D	7.50	9.67	10.2	11.5
E	0.67	1.67	1.50	2.17

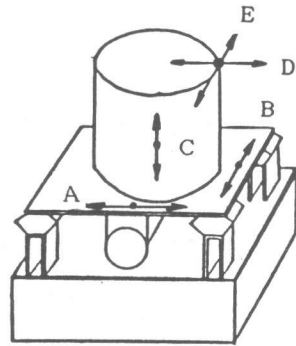


図4 振動装置図

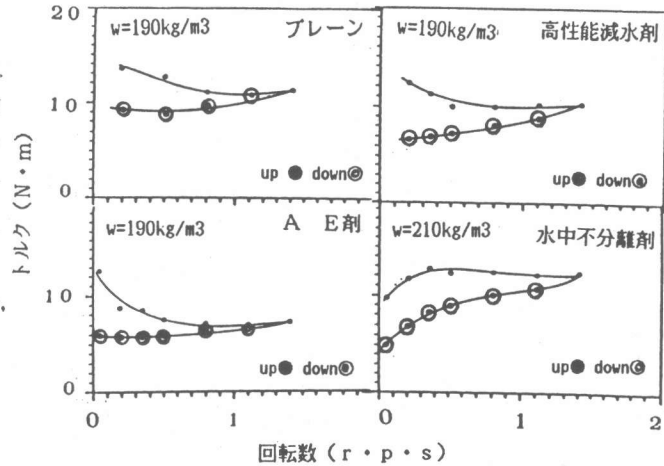


図5 各種コンクリートの流動曲線図

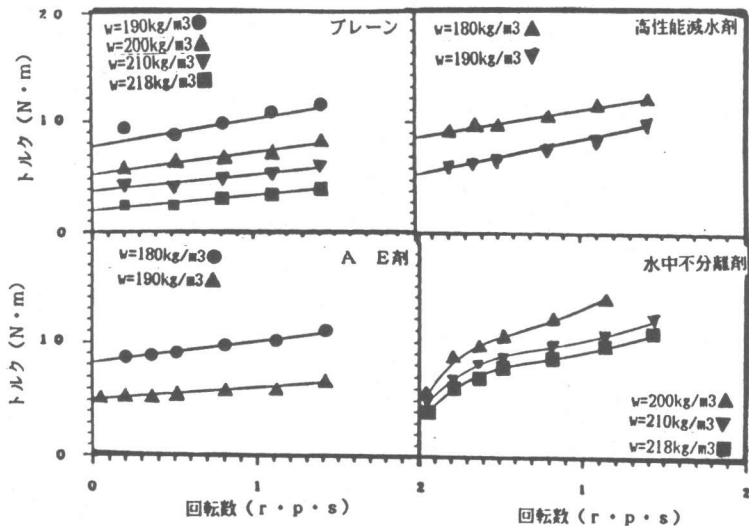


図6 流動曲線に及ぼす単位水量の影響

ステリシスループは、フレッシュコンクリートの攪拌による構造の破壊・再生能力を表現している。図5は、各種コンクリートの流動曲線である。水中コンクリートの単位水量が $210 \text{ kg/m}^3$  である以外は、 $190 \text{ kg/m}^3$  である。各種コンクリートとも特徴あるヒステリシスループを描いている。普通コンクリートに比べ、高性能減水剤添加コンクリートはヒステリシスの面積が大きく構造破壊の程度が大きく、高性能減水剤の分散能力が大きいことを示すものと思われる。AEコンクリートは、急激なせん断抵抗の低下があるが、せん断速度を上昇・下降させても変化が少ないことを表している。これは、コンクリート中のエントレインドエアが流線上に並ぶことによりボールベアリング作用がせん断抵抗を低下させることを示したものである。水中コンクリートは、他のコンクリートのように速度チクソトロピー挙動をせず、水中不分離剤添加溶液が擬塑性流動を示す影響で、コンクリートも擬塑性流動を示している。水中コンクリート以外のコンクリートは、攪拌が十分に進んだと考えられる下降曲線がほぼ直線で近似することができ<sup>1)</sup>工学的にはフレッシュコンクリートの性質をビンガム体として扱ってもよいと考える。流動曲線のヒステリシスの面積が大きいコンクリートは、フレッシュコンクリートの性質がせん断履歴により影響されることを表している。このことは、フレッシュコンクリートの性質を比較する場合には、ミキサーなどによる攪拌の程度、即ちせん断履歴に付いて明らかにしておくことも必要な場合があることを示している。

(2) 配合とレオロジー特性 各種コンクリートの配合とレオロジー特性の関係を、単位水量の変化がどの程度影響するのか調べてみた。図6は、各種コンクリートの下降曲線である。単位水量の違いがトルク軸との交点 $g$ や勾配 $h$ に影響しているのが明らかに解る。水中コンクリート以外のコンクリートは、ほぼビンガム流体と考えてよく、直線の相関係数は0.98以上であった。

各種コンクリートの単位水量と $g$ および $h$ の関係を表したのが図7である。図中の水中コンクリートは、高せん断速度域の直線部分に付いて直線回帰したものである。普通コンクリートは、単位水量の増加にともない $g$ 、 $h$ ともに減少傾向にある。高性能減水剤添加コンクリートとAEコンクリートは、単位水量の増加にともない $g$ は減少するが、 $h$ は若干の増加傾向がある。水中コンクリートは $g$ 、 $h$ とも単位水量の増加により減少する傾向にある。図8は、スランブと $g$ 、 $h$ の関係を表したものである。スランブと $g$ の相関が高いことが図より解る。以上の結果より、単位水量の増加は降伏値の減少を導き、スランブが増加する。しかし、粘性に対してはコンクリ

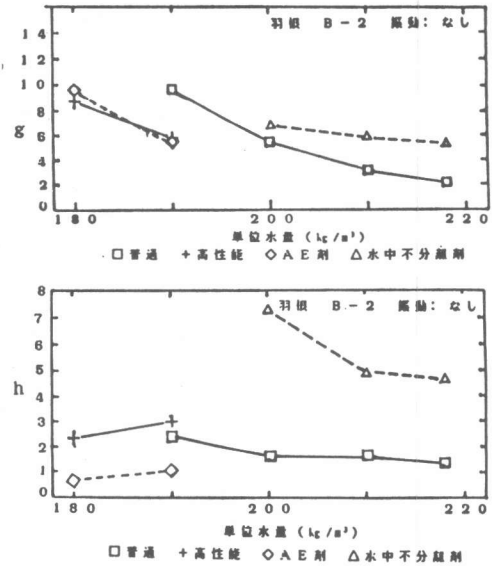


図7  $g$ 、 $h$ に及ぼす単位水量の影響

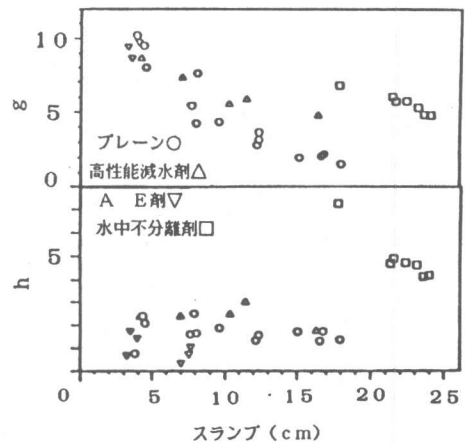


図8  $g$ 、 $h$ とスランブの関係

ートの種類により特徴的な傾向を表しており、スランプのみによるワーカビリティの評価に問題があることを示したものと思われる。

#### 4.2 振動試験

(1) 流動曲線 コンクリートに振動を加えることで、コンクリートは液状化し振動機の影響範囲内では見かけ上液体のような挙動をする。このように液状化したコンクリートのレオロジー特性を知

ることは、モルタル中に粗骨材や気泡を保持させる能力など、材料分離に対する抵抗性や締固め性を推測する上で重要である。図9は各種コンクリートの振動を加えない場合の流動曲線と、振動中のコンクリートの流動曲線である。振動時においては、振動により構造破壊が起こり、上昇曲線と下降曲線がほとんど一致したので図には下降曲線のみが示してある。水中コンクリート以外のコンクリートでは、振動を加えない状態では流動曲線がビンガム的に直線であったのに対し振動が加わると低せん断速度域でのトルクが低下し、擬塑性流またはニュートン流のような挙動を示す。振動によりすぐはコンクリートが液状化して流動を開始することであり、自立しにくくなるということがいえる。振動を加えることの有効性がこれらの図より解る。また、流動性は振動の種類によっても変化することが解る。水中コンクリートは、今回の実験範囲内ではその差が小さいといえる。図10は、単位水量190kg/m<sup>3</sup>の各種コンクリートに振動を加えた場合の流動

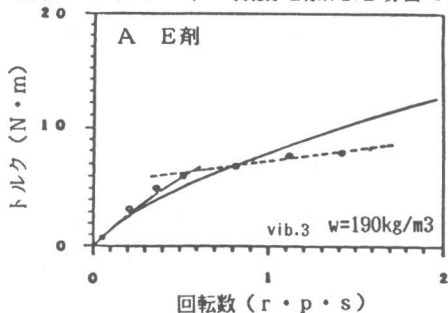


図11 流動曲線の解析

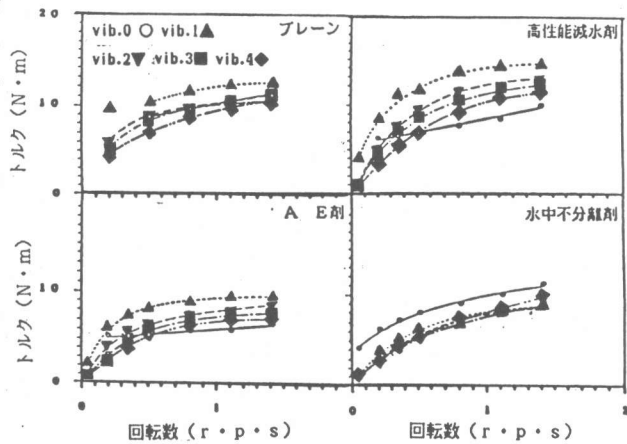


図9 振動下に置ける各種コンクリートの流動曲線

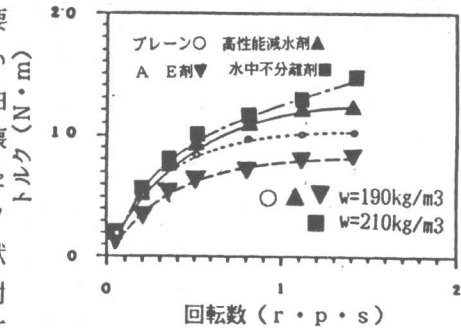


図10 振動の影響の比較 (vib.3, B-2)

表5 流動曲線の解析結果

コンクリートの種類	解析方法	T = pN <sup>a</sup>			T = g + hN		
		p	q	r	g	h	r
プレーン	全測点	9.826	0.367	0.999	---	---	---
	分ける	11.077	0.473	1.000	9.007	0.906	1.000
高性能減水剤	全測点	12.595	0.708	0.999	---	---	---
	分ける	15.887	0.831	0.999	9.176	2.412	1.000
A E 剤	全測点	8.426	0.427	0.998	---	---	---
	分ける	10.340	0.736	0.998	5.793	1.933	1.000
水中不分離剤	全測点	9.556	0.608	0.999	---	---	---
	分ける	10.826	0.674	1.000	5.998	3.114	1.000

曲線である。但し水中コンクリートに付いては $210\text{kg}/\text{m}^3$ である。普通コンクリートを基準に考えて、AEコンクリートは振動下において最も流動性に優れ、締め固めのエネルギーが少なくすむ反面振動のかけすぎによる材料分離に注意する必要がある。これに対して、水中コンクリートはAEコンクリートより多少流動性は劣るものの振動下における粘性は高く材料分離しにくいコンクリートであると考えられる。高性能減水剤添加コンクリートは、水中コンクリートと同様の傾向を示しているが静的試験の流動曲線より高せん断速度域において大きなトルク値を示しており材料分離による影響が加わったものとする。

(2) 振動下のコンクリートのレオロジー的評価 流動曲線から得られた振動下における各種コンクリートの性質を数量的に評価することができれば振動締め固め方法の効率化を図る上で有用である。図11は単位水量 $190\text{kg}/\text{m}^3$ のAEコンクリートを振動させたときの流動曲線の一例である。全体の測点を擬塑性流と考える場合と低せん断速度域の4点をとって擬塑性流とする場合と高せん断速度域の4点をとってビンガム流とする場合に付いて検討した。単位水量 $190\text{kg}/\text{m}^3$ の各種コンクリートに付いて解析した結果を表5に示す。ここで $p$ は見かけ非ニュートン粘性係数、 $q$ は見かけ非ニュートン粘性指数である。水中コンクリートに付いては単位水量 $210\text{kg}/\text{m}^3$ を載せている。擬塑性流体と仮定すると、全測点を対象にした場合も低せん断速度域の4点を対象にした場合も相関係数は非常に高い。しかし、実際の問題として振動によって流動化しているコンクリートに加わる外力は骨材の自重ないしはコンクリートの自重や表面振動機のような圧力程度である。従って、特殊な施工方法を用いる以外は振動下のコンクリートの数量的評価は低せん断速度域の4点でよいと判断される。また、相関係数も僅かであるがこの方がよい。振動により流動化しているコンクリートに高せん断速度を加えるような特殊な工法を用いる場合にはビンガム流体に仮定した方が相関が良いことも明らかになった。

## 5. 結 論

試作した回転翼型レオメータにより普通コンクリート、AEコンクリート、高性能減水剤添加コンクリート、水中コンクリートの静的及び振動下の性質の数量化を試み、以下の結論を得た。

(1) フレッシュコンクリートの性質は、ビンガム流体や、擬塑性流体としてレオロジー的評価が可能であるが、フレッシュコンクリートの性質がせん断履歴によって影響されるのでフレッシュコンクリートの性質を比較する場合にはせん断履歴に付いて明らかにしておく必要がある。

(2) 水中コンクリート以外のコンクリートのワーカビリティは、降伏トルク値 $g$ および塑性粘度係数 $h$ によって評価できる。スランプは降伏トルク値 $g$ のみに相関が高く、スランプのみによるワーカビリティの評価には問題がある。

(3) 各種のコンクリートは、振動が加わると直ちに流動化し擬塑性流もしくはニュートン流のような挙動を示す。振動下のコンクリートの流動曲線を描くことで各種のコンクリートの振動に対する特性を明らかにすることができる。

(4) 振動下の各種コンクリートの性質の数量化は、コンクリートを擬塑性流体と仮定し、見かけ非ニュートン粘性係数 $p$ 、見かけ非ニュートン粘性指数 $q$ によって行える。

## 参考文献

- 1) Tattersall, G.H. and P.F.G. Banfill: The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Advanced Publishing Program, London, 1983,
- 2) Bloomer, S.J.: Further Development of Two-point Test for the Measurement of the Workability of Concrete, PhD thesis, University of Sheffield, 1979