

論文

[1012] フレッシュコンクリートの可視化実験手法に関する相似則の検討

正会員 橋本親典 (群馬大学建設工学科)

正会員○吉田正宏 (群馬大学大学院)

安積淳一 (日本道路公団)

正会員 辻 幸和 (群馬大学建設工学科)

1. はじめに

フレッシュコンクリートの管内およびアジテータ内での複雑な流動機構を実験的に解明する一手法として、著者らは、流れの現象を理解するのに最適な可視化実験手法の適用を提案している[1]。この実験手法は、フレッシュコンクリートを可視化可能な別の材料で置換したモデルを使用する一種のシミュレーション実験である。可視化実験手法は物性および構成材料が異なるモデルを使用するため、得られた情報が実際のフレッシュコンクリートの挙動に適用するか否かの検討、つまり相似則に関する検討が必要となる。これまでの相似則の検討としては、モルタル相と粗骨材粒子群の材料分離に対する抵抗性の程度に着目した検討であった[1]。

コンクリートの流動現象に対する可視化実験手法の適用例としては、ポンプ圧送時の配管内の流動現象[1]とアジテータ内の流動現象[2]を取り扱ってきた。直管・テーパ管およびベント管内を流動するコンクリートの可視化実験では、乱れ特性や材料分離が観察されたが、実際の配管内での再現性とその定量的評価が必要となる。また、1/5スケールのモデルアジテータを使用した可視化実験において、排出時にドラムの内壁やブレードに付着して巻上がる現象が観察された。この現象はアジテータの排出効率の低下に影響をおよぼすと考えられ、実機での現象との比較評価が必要となる。

本研究では、可視化実験で得られた情報を実機での現象に対応させる相似則の手法として、以下に示す2項目を取り挙げ、可視化によるシミュレーション実験の妥当性を検討した。

- (1) コンクリートのレオロジー定数(塑性粘度・降伏値)に基づく相似則の検討。
- (2) コンクリートの摩擦特性に基づく相似則の検討。

2. 実験概要

2.1 塑性粘度・降伏値の測定に関する実験

水理構造物の模型実験では、実機と模型で同一の水を使用するので、フルード数もしくはレイノルズ数の無次元量で相似則を満足させている。これに対して、実際のフレッシュコンクリート(以後、実コンクリートと称する)の流動現象を支配する無次元量の指標は見い出されていないと考えられる。本研究では、実コンクリートとモデルコンクリートの流動現象を支配する無次元量として、ビンガム流体の変形を規定するビンガム数[3]およびヘドストレーム数[3]を取り挙げることにした。

ビンガム流体のせん断応力 τ は降伏値 τ_f と粘性による応力 $\eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$ の2項に分けられる。ビンガム数Biは τ_f と $\eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$ の比として与えられる。

$$Bi = \tau_f / \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

ここに、 τ_f : 降伏値 (gf/cm²) η_{pl} : 塑性粘度 (Poise) γ : 速度勾配 (1/sec)

また、ビンガム数 Bi に慣性力を加えた無次元量であるヘドストレーム数 He を式 (2) に示す。

$$He = \rho \cdot \tau_f \cdot l^2 / \eta_{pl}^2 \quad (2)$$

ここに、 ρ : 密度 (gf·sec²/cm⁴) l : 長さ (cm)

自由表面を有しない実コンクリートの流動現象である管内流動に対しては、ビンガム数 Bi を相似則の指標とする。これに対して、自由表面を有し材料の比重と慣性力が関連するアジテータ内の流動現象に対しては、ヘドストレーム数 He を相似則の指標とする。

可視化モデルコンクリート（以後、モデルコンクリートと称する）のビンガム数・ヘドストレーム数を算出するため、塑性粘度・降伏値を内円筒回転式二重円筒型回転粘度計（以後、回転粘度計と称する）を使用し、ビデオ画像より一点法によって測定した。実験概要を図-1 に示す。また、回転粘度計による測定とは別に、モデルコンクリートの降伏値をテーブルフロー試験での1回毎の衝撃に対する広がり計測することによって推定した[4]。

提案されているモデルコンクリートは、高い透明度を有するモルタルモデル相と人工軽量骨材の粗骨材粒子群で構成される固液2相系モデルである。このため、実験パラメータを粗骨材の体積濃度（以後、体積濃度と称する）およびモルタル相の粘性とした。モルタルモデルには吸水性高分子樹脂溶液を使用し、添加量によって粘性を制御した。モデルコンクリートの粗骨材モデルには人工軽量骨材（粒径 5~10mm、比重 1.502）を用いた。モデルコンクリートの配合要因を表-1 に示す。

表-1 モデルコンクリートの配合要因

高分子樹脂の添加量 (g/試料)	フロー値* (mm)	粗骨材モデルの体積濃度
3.1	180	0.375
		0.444
2.9	194	0.500

* : モルタルモデルのテーブルフロー値

2. 2 摩擦特性の測定に関する実験[5]

モデルアジテータの可視化実験で観察されたドラムの内壁やブレードに付着して巻上がる現象（以後、付着巻上げと称する）の概要を図-2 に示す。モデルコンクリートの粘性によって、付着巻上げ量が異なる[6]。この現象の実機との対応性を評価するため、材料とブレードの摩擦特性に着目した。15×15×5cm の型枠内に試料を詰めて斜面を滑らせ、滑り速度を基に摩擦に関する定量化を行って比較検討した[5]。モデルアジテータは、アクリル樹脂で作製されているのでアクリル板の斜面

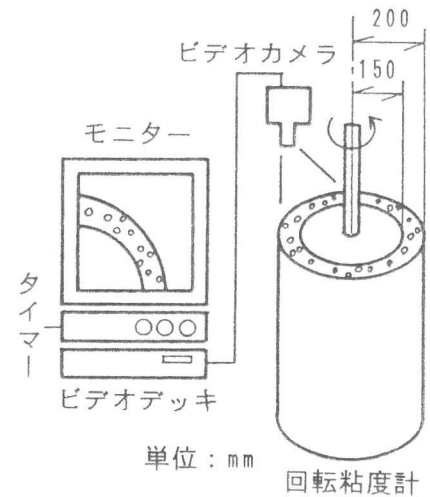


図-1 実験概要

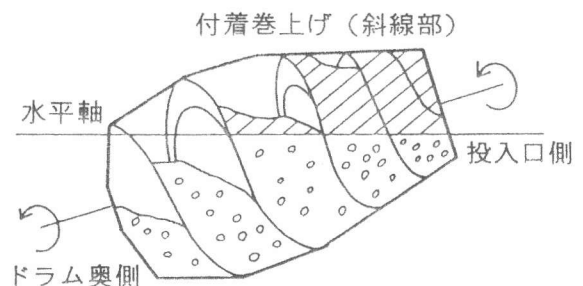


図-2 付着巻上げの概要

上にモデルコンクリートを、また実機のアジテータに使用されている鋼板の斜面上に実コンクリートをそれぞれ初速度=0で滑らせ、滑り状況をビデオに収録した。なお、斜面の角度は30°とした。実験後、ビデオ画像より滑り出す位置から15・25・35・45・55・65cmでの速度を測定した。摩擦に関する相比例として、滑り落ちた距離

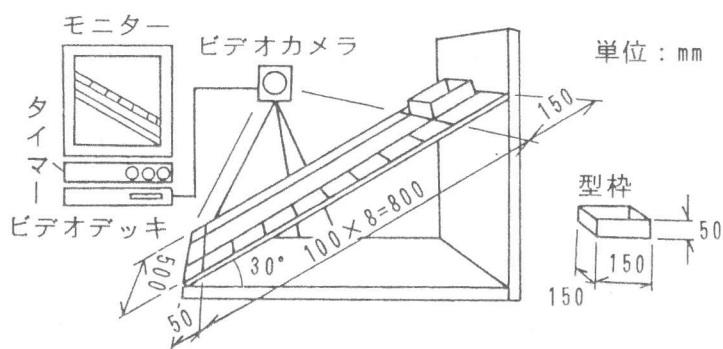


図-3 実験概要

S (cm) とその距離に対するエネルギー損失 E_{loss} の比を指標とした。

$$(\text{摩擦}) = E_{loss} / S \quad (3)$$

実験概要を図-3に示す。また、実験に使用した実コンクリートは手練りで作製した。実コンクリートの配合要因を表-2に、モデルコンクリートの配合要因を表-3に示す。なお、実コンクリ

表-2 実コンクリートの配合要因

W/C (%)	S/C	粗骨材の体積濃度	スランプ (cm)		
			W/C=55%	W/C=60%	W/C=65%
55	2.52	0	179*	212*	234*
		0.286	15.0	22.0	23.0
60		0.375	9.0	16.0	19.5
		0.444	3.0	8.0	12.5
65		0.500	1.0	2.5	3.0

*: テーブルフロー値 (mm)

ートの骨材は、群馬県渡良瀬川産の川砂 (粒径5mm以下、比重2.58)、川砂利 (粒径5~20mm、比重2.64) を使用した。モデルコンクリートは塑性粘度・降伏値の測定に使用した材料と同一である。

表-3 モデルコンクリートの配合要因

高分子樹脂の添加量 (g/混)	フロー値* (mm)	粗骨材モデルの体積濃度
3.5	160	0
		0.286
3.3	174	0.375
		0.444
3.1	180	0.500

*: モルタルモデルのテーブルフロー値

3. 実験結果および考察

3.1 塑性粘度・降伏値

塑性粘度・降伏値の実コンクリートとの比較は参考文献[7]に詳細に記述しているので、ここでは省略する。菊川の測定[8]によると、川砂利を使用したスランプ10~15cmの実コンクリートの塑性粘度は2500~4000 (Poise)、降伏値は1.40~1.90 (gf/cm²)である。一方、モデルコンクリートの塑性粘度は約100~200 (Poise)、降伏値は約0.70~1.50 (gf/cm²)である[8]。従って、モデルコンクリートの塑性粘度の相似比 (モデル/実物) は概ね1/20、降伏値の相似比は概ね1/1とみなすことができる。

3.2 摩擦損失

設定した各位置の滑り速度から式(4)に示す単位重量当りの力学的エネルギーを算出した。一例を図-4に示す。

$$E = h + v^2 / 2g$$

単位：cm

(4)

力学的エネルギーの損失を主として摩擦損失と考え、回帰分析より単位長さ当りの力学的エネルギーの摩擦損失(図-4の直線の傾き)を求めた、結果を図-5に示す。両者の摩擦損失は同程度の値を有することが認められる。なお、図-5の結果は式(3)と対応している。よって、両者が同程度の値を有することは、モデルコンクリートは実コンクリートの摩擦損失に関する相似則を満足しているということである。

摩擦損失にはモルタル相の粘性および体積濃度が影響を及ぼす傾向が両者に認められる。また、低粘性モルタル相(W/C=65%および3.1g/リットル)であると、体積濃度の影響が顕著である。固体と斜面の間に粘性流体が介在する滑りでは流体の粘性が摩擦抵抗となり、層厚が影響する。なお、体積濃度が0.375以上では減少の傾向を示しているが、この現象はモルタルが少ないためコンクリートと斜面の接触面積が小さくなったのが原因であると考えられる。一方、モデルコンクリートに同様な傾向は認められなかった。

固体と斜面の間に粘性流体が介在する滑りでは、流体の粘性が摩擦抵抗となり層厚が影響する。粘性および層厚によって、介在する粘性流体の速度勾配が異なり、滑り速度に影響する。コンクリートの斜面上の滑りは粗骨材と斜面の間にモルタルの高粘性流体が介在する滑りと考えられる。体積濃度を増加することにより、斜面と接するモルタルの層厚が薄くなる。その結果、速度勾配が小さくなり滑り速度は減少する。

4. 相似則の検討

地球上の同一の重力場で実験を行う制限上、すべての加速度の相似比は1/1という前提条件が存在する[3]。この条件より長さの相似比は時間の相似比の2乗に等しくなければならない。設

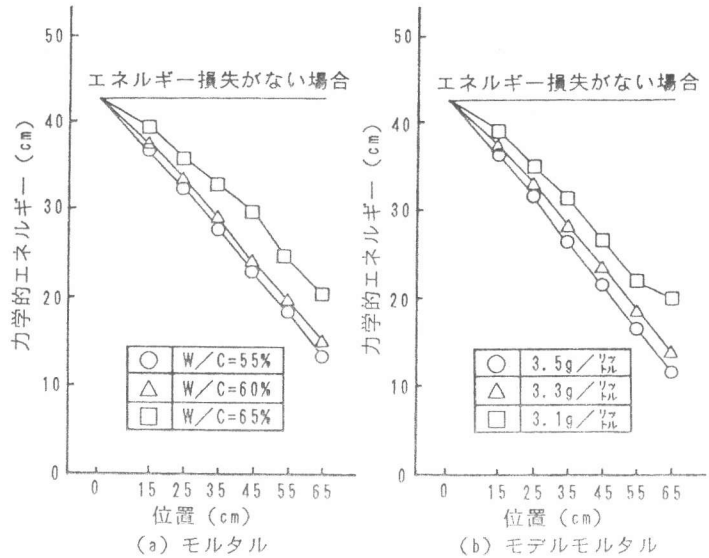


図-4 各位置における力学的エネルギーの一例

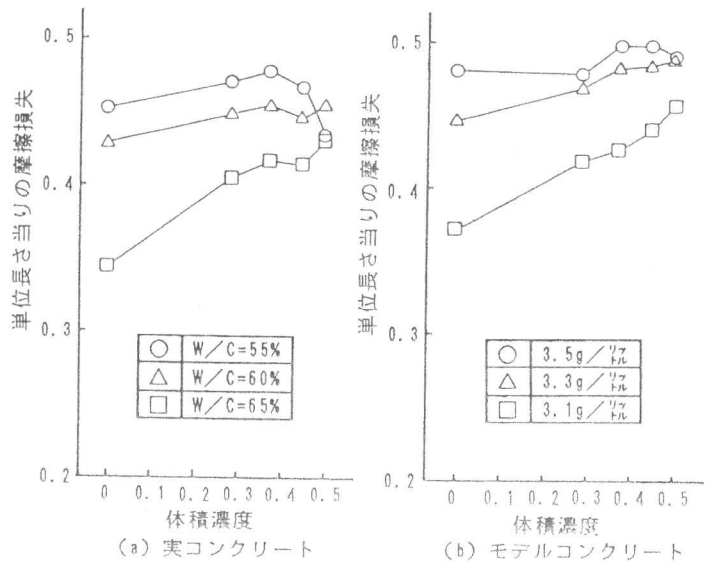


図-5 単位長さ当りの摩擦損失

定した相似比を表-4に示す。

次に、ビンガム数・ヘドストレーム数に基づく実コンクリートとモデルコンクリートの相似則を考慮する場合、両者の間には以下に示す関係が成立しなくてはならない。

ビンガム数 Bi :

$$(\tau_f)_p / (\eta_{pl})_p \cdot (\gamma)_p = (\tau_f)_m / (\eta_{pl})_m \cdot (\gamma)_m \quad (5)$$

ヘドストレーム数 He :

$$(\rho)_p \cdot (\tau_f)_p \cdot (1^2)_p / (\eta_{pl}^2)_p = (\rho)_m \cdot (\tau_f)_m \cdot (1^2)_m / (\eta_{pl}^2)_m \quad (6)$$

ここに、添字の p は実物での値、 m は模型での値をそれぞれ示す。

式(5)および式(6)を満足する長さと同時間の相似比を算出した。長さの相似比は主に模型の縮尺であり、時間の相似比は模型実験での測定時間である。結果を表-5に示す。支配する現象によって長さと同時間の相似比が異なる。本モデルコンクリートを使用し、管内流動の可視化実験を行う場合、模型の縮尺はビンガム数より算出した $1/400$ が適当と考えられる。一方、アジテータ内の流動現象には材料の慣性力が関連すると考えられ、ヘドストレーム数より算出した $1/14$ スケール模型が適当と考えられる。

ところで、骨材寸法や管径を $1/400$ スケールの模型にすることは現実的に不可能であり、実コンクリートとモデルコンクリートの長さの相似比を、ビンガム数に基づく相似則で満足させることは困難である。これに対して、実験対象とする実コンクリートの塑性粘度・降伏値を適当に選べば、モデルアジテータの $1/5$ という長さの相似比は、ヘドストレーム数に基づく相似則を満足させることは可能である。

次に、ビンガム数による相似則を満足するモデルコンクリートを作製するために、任意の模型のスケールに対する塑性粘度と降伏値の関係を求めると、以下の関係が必要となる。

$$(\text{塑性粘度の相似比}) = (\text{スケール})^{1/2} \cdot (\text{降伏値の相似比}) \quad (7)$$

相似則の指標に用いたビンガム数は、塑性粘度と降伏値の両方が関連する流動に対しての無次元量である。しかし、コンクリートの流動現象の中には、降伏値が卓越し、塑性粘度を無視できうる直管の固体栓流れのように、どちらか一方を無視できうる流動が存在する。つまり、塑性粘度・降伏値の両方を常に相似則の物理量と考える必要はない場合もある。

したがって、現象の本質を理解し、卓越する物理量を見いだすことができれば、相似則を満足させるモデルコンクリートの条件が簡単となる。また、レイノルズ数・フルード数に相当し、現象を支配する物理量の比をコンクリートの流動現象の中に見いだす必要がある。この検討によ

表-4 設定した相似比

	(模型) / (実機)
加 速 度 [L] [T ⁻²]	1 / 1
密 度 [M] [L ⁻³]	1 / 2
塑性粘度 [M] [L ⁻¹] [T ⁻¹]	1 / 20
降 伏 値 [M] [L ⁻¹] [T ⁻²]	1 / 1

表-5 算出した相似比

	(模型) / (実機)	
	ビンガム数 より算出	ヘドストレーム数 より算出
長 さ [L]	1 / 400	1 / 14.1
時 間 [T]	1 / 2	1 / 3.76

って、可視化実験の適用性を高めることが可能となる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に記す。

- 1) ビンガム流体の変形を規定するビンガム数・ヘドストレーム数より、フレッシュコンクリートと可視化モデルコンクリートの相似則を検討した結果、ビンガム数に基づく相似則を満足させるのは困難であると考えられる。ビンガム数で相似則を満足させるには、式(7)の関係を有するモデルコンクリートが必要である。これに対して、ヘドストレーム数で相似則を満足させることは可能であり、慣性力が関連する流動現象に対して適用性は高いことが認められる。
- 2) 可視化モデルコンクリートは、本研究の実験方法で定量化した摩擦損失に関する相似則を満足する。
- 3) 実機のコンクリートの流動現象に対応した可視化実験を行うためには、フレッシュコンクリートの流動現象を支配する物理量を独自に見いだす必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、御協力を頂いた名城大学理工学部の菊川浩治教授に対し深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1]橋本親典・丸山久一・清水敬二 : フレッシュコンクリートの管内流動における閉塞過程の可視化実験手法、コンクリート工学、Vol.17、No.2、pp.119-127、1988.2
- [2]安本礼持・丸山久一・橋本親典・林 善弘 : 可視化実験手法によるアジテーター内部のコンクリートの流動解析、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、V-342、pp.710-711、1990.9
- [3]江守一郎・Dieterich J.Schuring著 : 模型実験の理論と応用、技報堂、1974
- [4]村田二郎・岡田 清著 : 最新コンクリート技術選書1、フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ、山海堂、pp.77-78、1981
- [5]平井秀幸・吉田正宏・橋本親典・林 善弘 : 滑り特性から見たフレッシュコンクリートと可視化モデルコンクリートの比較検討、第18回関東支部技術研究発表会講演概要集、V-17、pp.280-281、1991.3
- [6]石田知子・安本礼持・橋本親典・林 善弘 : 可視化実験手法によるアジテーター内のコンクリートの排出機構に関する実験的研究、第18回関東支部技術研究発表会講演概要集、V-15、pp.276-277、1991.3
- [7]吉田正宏・安本礼持・橋本親典 : フレッシュコンクリートの可視化モデル化におけるレオロジー特性の適用限界に関する一考察、第18回関東支部技術研究発表会講演概要集、V-18、pp.282-283、1991.3
- [8]菊川浩治 : フレッシュコンクリートの粘度式とその適用に関する研究、東京都立大学学位論文、1987.11