

論文

[1022] 高流動コンクリートの分離抵抗性に関する研究

堂園昭人*¹, 遠藤秀紀*¹, 藤原浩巳*², 下山善秀*³

1. はじめに

高流動コンクリートは、フレッシュ時の充填性が高く、打込み時の締固め作業を不要とするコンクリートとして広く研究されるようになり、その実施工例も多く報告されるようになってきた[1]。しかし、この種のコンクリートの性能上重要と考えられる、流動時の粗骨材とモルタルの分離現象に関する研究例は少ない。コンクリートの流動時における粗骨材とモルタルの分離現象は、粗骨材の沈降現象と、鉄筋等の障害物が粗骨材の流動を妨げることによって起こるモルタルの先送り現象によるものと考えられる。本研究はその内、モルタルの先送り現象についてモデル型枠を用いて実験を行なうとともに、このような分離現象を、粗骨材とモルタルの相対的な流動速度差によって生じるとしたモデル化を試み、その適用性について検討を行なったものである。

2. 実験概要

2.1 実験計画

実験は図-1に示す鉄筋を配した矩形断面を持った直線チャンネル(以下直線チャンネル)の片側よりコンクリートを流し込み、図中のNo.1, No.3, No.5, No.7の位置でのコンクリートを採取し、その粗骨材体積濃度(単位容積当りのコンクリート中の粗骨材容積の占める割合: X_v)を調べることにより、流動時の粗骨材とモルタルの分離を評価したものである。

実験の因子として断面における配筋数、コンクリートの配合時の X_v およびモルタルのレオロジー特性を選んだ。それぞれの因子の水準を表-1に示す。鉄筋は直径13mmの丸鋼を用いた。モルタルのレオロジー特性は、それぞれの X_v において高流動性が達成できる範囲内(スランプフロー値500~700mm)で表-2に示す降伏値と塑性粘度の組合せになるように調節した。

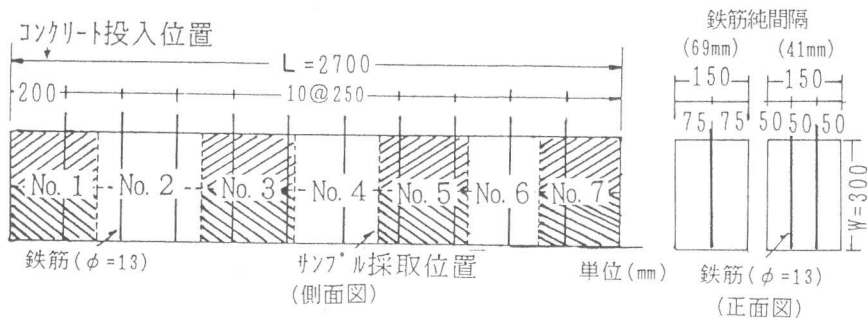


図-1 直線チャンネル概要図

表-1 因子と水準の組合せ

		因子	
		鉄筋本数(本)	X_v
水 準	1	0.27	③⑤*
		0.30	③⑤
	2	0.27	①③④⑤
		0.30	②③④⑤

*○内の数値;表-2参照

2.2 使用材料

実験に使用した材料を以下に示す。表-2に示したモルタルのレオロジー特性値を達成するために、レオロジー特性を変化させることができる混和材料を使用した。これらの材料を用いて予備的な実験を行ない、適切な混和材料およびその添加率を決定した。それらの種類と添加率を表-2に併記した。

*1 日本セメント(株)中央研究所セメント・コンクリート研究部 (正会員)
 *2 日本セメント(株)中央研究所セメント・コンクリート研究部 副主任研究員 (正会員)
 *3 日本セメント(株)開発第2部 開発課長代理 工博 (正会員)

セメント：普通ポルトランドセメント(比重3.15、ブレン比表面積3370cm²/g)

細骨材：瑞穂産砕砂(比重2.61、F.M 2.71)

粗骨材：青梅産砕石(比重2.64、F.M 7.02、最大寸法20mm)

増粘材：ポリカルリミド系増粘剤を主成分とした混和材(以下HF)

混和材：石灰石微粉末(ブレン比表面積5000cm²/g、以下LS)

混和剤：ナリソル系高性能減水剤(以下SP)

7ミソル系高性能AE減水剤(以下FP)

低級アルコール系乾燥収縮低減剤(以下TB)

2.3 配合条件

コンクリートのモルタル部分の基本配合組成は、セメントと水および細骨材を容積率で0.200:0.287:0.513の割合で一定とした。それぞれのモルタルにX_vが0.27および0.30となるように粗骨材を組合せたコンクリートを流動実験に用いた。この時のコンクリートの示方配合を表-3に示す。

2.4 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは100ℓパン型ミキサを用いた。最初にモルタルを2分間練混ぜ、モルタルのレオロジー特性を測定した。次に粗骨材を投入し、さらに1分間練り混ぜた。

2.5 試験項目および方法

(1)モルタルのレオロジー特性；練り混ぜたモルタルを用いて、外円筒回転型粘度計により降伏値τ_r(gf/cm²)および塑性粘度η_{p1}(gf・s/cm²)を測定した。

(2)コンクリートのスランプフロー；JIS A 1101(スラフ試験)によるスランプ時の広がり直径を測定した。

(3)流動速度；図-1に示した直線チャンネルの片側よりコンクリートを投入して流動させた時、先端部が型枠端部まで到達する時間(t;s)から、流動速度(V₀;cm/s)を次式により求めた。この式で求めた速度は実質的にはコンクリート中のモルタル部分の流動速度に相当すると考えられる。

$$V_0 = \frac{L}{t} \quad L; \text{直線チャンネルの長さ(cm)}$$

(4)コンクリートの流動による分離の評価；コンクリートの流動停止後、図-1に示した直線チャンネルのNo.1、No.3、No.5、No.7の上部および下部から7ℓずつコンクリートを採取し、洗い試験により粗骨材を採取して表乾重量を測定した。この値を配合時の粗骨材重量で除して粗骨材濃度比を求め、上下部分の粗骨材濃度比の平均値を流動による分離の程度を示す目安とした。

表-2 レオロジー特性値の組合せおよび使用混和材の種類と添加率

塑性粘度 降伏値	0.06±0.02 (gf・s/cm ²)	0.10±0.02 (gf・s/cm ²)	0.14±0.02 (gf・s/cm ²)
0.10±0.02 (gf/cm ²)	① HF:1.7%/C SP:3.0%/C	④ HF:2.1%/C SP:3.0%/C	
0.20±0.02 (gf/cm ²)	⑤ HF:2.2%/C LS:20%/結晶材 FP:5.0%/C	② HF:2.2%/C SP:3.0%/C	
0.25±0.02 (gf/cm ²)			③ HF:2.2%/C SP:3.0%/C TB:2.0%/C

○印の数値；混和材料の組合せ番号

表-3 コンクリートの示方配合

X _v	W/C (%)	s/a (%)	air (%)	単位量(kg/m ³)			
				セメント	水	細骨材	粗骨材
0.27	45.5	57.4	2	447	204	951	713
0.30	45.5	53.8	2	428	195	910	792

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

実験結果を表-4に示す。この表より、各コンクリートとも粗骨材濃度比は上流側から下流側に向かって小さくなる傾向があり、配筋数が多いほど、またモルタルの降伏値および塑性粘度のいずれも小さくなるほどその傾向が強まることが分かった。

表-4 実験結果一覧

鉄筋 純間隔 (mm)	Xv	混和材 料組合 せ番号	モルタル降伏値		コンクリート状 スラングフロー (mm)	流動 速度 (cm/s)	粗骨材濃度比 (実測量/配合量(%))				最大相対速度差 (cm/s)			実最大 相対速 度差 (*3) (cm/s)
			τ_r (gf/cm ²)	η_{pl} (gf·s/cm ²)			No. 1	No. 3	No. 5	No. 7	R1 (*1)	R7 (*2)	平均	
69	0.27	⑤	0.206	0.082	632	0.96	106.0	105.2	103.3	93.3	0.161	0.172	0.167	0.472
		③	0.244	0.139	638	0.67	103.1	102.3	99.7	99.3	0.058	0.013	0.035	0.100
	0.30	⑤	0.209	0.077	605	0.91	105.6	103.5	101.0	98.2	0.149	0.046	0.098	0.277
		③	0.259	0.142	565	0.65	103.3	101.8	99.3	98.1	0.054	0.030	0.042	0.118
41	0.27	①	0.114	0.076	688	0.92	117.5	108.0	100.4	84.9	0.472	0.360	0.416	0.589
		③	0.240	0.139	630	0.63	112.0	105.2	93.2	90.2	0.217	0.163	0.190	0.269
		④	0.126	0.108	658	0.79	109.7	106.5	103.6	88.2	0.218	0.245	0.231	0.327
		⑤	0.226	0.082	625	0.71	117.1	107.7	101.4	92.8	0.355	0.136	0.246	0.348
	0.30	②	0.210	0.109	620	0.65	108.5	102.4	97.1	93.6	0.164	0.116	0.140	0.198
		③	0.247	0.145	593	0.55	113.2	104.2	102.8	95.4	0.220	0.071	0.145	0.206
		④	0.159	0.095	630	0.75	110.0	103.7	99.6	90.6	0.224	0.194	0.209	0.295
		⑤	0.176	0.079	623	0.70	110.6	106.1	101.9	87.0	0.222	0.246	0.234	0.331

※1:(6)式参照 ※2:(7)式参照 ※3:(10)式参照

3.2 考察

今回の実験条件の範囲内における粗骨材とモルタルの分離現象について、以下の様なモデル化を行ない、その適用性について考察を行った。

3.2.1 粗骨材とモルタルとの相対的流動速度差の推定

粗骨材とモルタルの分離現象は、鉄筋により粗骨材の流動が阻害されることによって生じるものであり、分離の程度は粗骨材とモルタルとの相対的な流動速度差（以下、相対速度差）によって決まるとした。したがって、表-4の実験結果を用いてどの程度の相対速度差が発生したかを以下の様なモデルを用いて推定した。

まず実験に用いた直線チャンネルを、図-1に示すように7つのブロックに区分した。試料を採取したのはNo.1、No.3、No.5およびNo.7のブロックである。直線チャンネルに投入されたコンクリートの流速は、投入の初期段階で最大となり、その時点でモルタルと粗骨材の相対速度差も最大になると仮定した。実験により、流動速度は投入位置より1~2層の鉄筋を通過した時がほぼ最大となることが観察されたことから、この最大値を基準とした直線チ

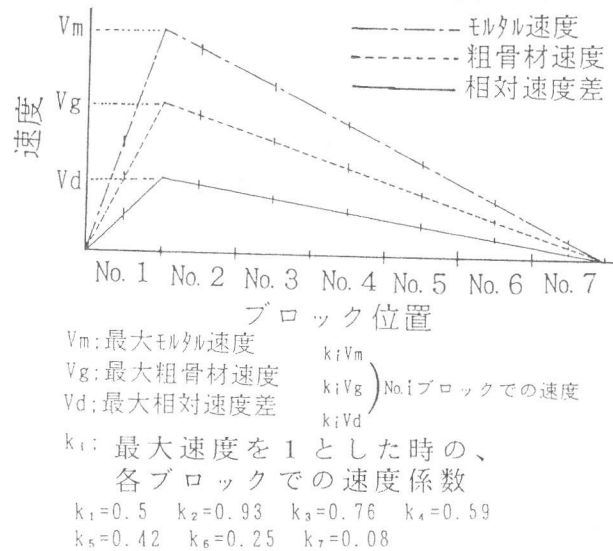
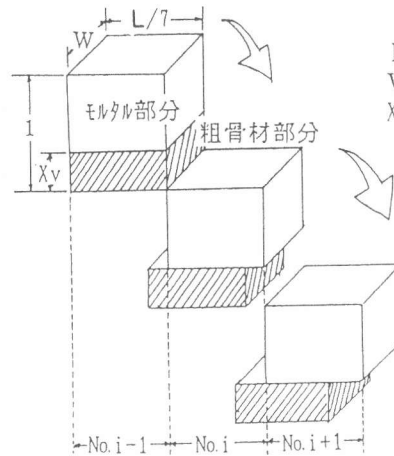


図-2 モルタルおよび粗骨材の相対速度差

チャンネルの各位置におけるモルタルおよび粗骨材の流動速度と相対速度差の分布を、図-2に示すような直線分布と仮定した。

両端部以外のNo. i (i=2~6)のブロックにおける粗骨材量は、モルタルがNo. i-1ブロックより移動した際に連行してきた粗骨材と、No. i+1ブロックのモルタルが置いていった粗骨材との和になると考えた。そこで、図-3に示



L:直線チャンネル長さ
W:直線チャンネル幅
Xv:粗骨材体積濃度

図-3 コンクリートのモデルブロック概念図
すような1ブロック毎に単位厚さのコンクリートを想定して粗骨材量の計算を行なった。

No. i-1よりNo. iへのモルタルの移動に要した時間(t_i)は(1)式で求まるものとした。

$$t_i = L / (7k_{i-1} \cdot V_m) \quad \text{----- (1)} \quad L: \text{直線チャンネル全長}, V_m: \text{最大モルタル流動速度}, k_i: \text{速度係数}$$

また、この時間内に連行した粗骨材量(G_t)は(2)式で求まるものとした。

$$G_t = k_{i-1} (V_m - V_d) t_i \cdot X_v \cdot W \quad V_d: \text{最大相対速度差}, X_v: \text{粗骨材体積濃度}$$

$$= X_v \cdot W \cdot L \cdot (V_m - V_d) / 7V_m \quad \text{----- (2)} \quad W: \text{直線チャンネル幅}$$

同様な計算でNo. i+1ブロックのモルタルが置いていった粗骨材量(G_r)は(3)式で求まるものとした。

$$G_r = X_v \cdot W \cdot L / 7 - k_i (V_m - V_d) \cdot X_v \cdot W (L / 7 \cdot k_i \cdot V_m) = X_v \cdot W \cdot L \cdot V_d / 7V_m \quad \text{----- (3)}$$

したがってNo. iブロックの粗骨材量は(4)式で求まる。

$$G_t + G_r = X_v \cdot W \cdot L / 7 \quad \text{----- (4)}$$

これは配合条件の粗骨材量と同一である。このことは端部以外の直線チャンネルのどの部分でも見掛け上分離は観察されないことを意味したものである。実際には初期値を与えるNo.1ブロックにおいて X_v は徐々に大きくなるため、中間部のブロックにおける X_v は上流から下流にかけてなだらかな減少傾向を示すと考えられるが、今回は単純化したために前記の様な結果となった。よってモルタルと粗骨材の相対速度差は端部のNo.1とNo.7ブロックにのみ影響を与えるものとした。

No.1ブロックにおける粗骨材量(G_1)は配合時の粗骨材量とNo.2ブロックが置いて行った粗骨材量の和となり、(5)式で求められる。

$$G_1 = X_v \cdot W \cdot L / 7 + X_v \cdot W \cdot L \cdot V_d / 7V_m \quad \text{----- (5)}$$

モルタル量(M_1)は $(1 - X_v)W \cdot L / 7$ であるので、No.1ブロックでの粗骨材体積濃度の、配合時の理論値(X_v)に対する比(R_1)は(6)式で求められる。

$$R_1 = \frac{G_1 / (G_1 + M_1)}{X_v} = \frac{V_m + V_d}{V_m + X_v \cdot V_d} \quad \text{----- (6)}$$

また、No.7ブロックにおける粗骨材量は、このブロックが連行してきたもののみであり同様の

計算によりNo. 7ブロックでの粗骨材体積濃度の、配合時の理論値(X_v)に対する比(R7)は(7)式で求められる。

$$R7 = (V_m - V_d) / (V_m - X_v \cdot V_d) \quad \text{----- (7)}$$

この(6)、(7)式と、それぞれの条件下での実験で求めたNo. 1とNo. 7のブロックの粗骨材体積濃度比より V_d を求め、その平均値を粗骨材とモルタルの最大相対速度差と推定した。この場合、 V_m は図-2のような流速分布をしている場合、実験で求めた流動速度(V_0)の2倍となると考えた。推定結果を表-4に併記した。

3.2.2 最大相対速度差の解析

(1) 解析の基本

谷川らの研究によると、鉄筋との接触による摩擦のために粗骨材の運動が停止した状況の力学モデルは、図-4に示されるようになる。このときのモルタルマトリックスの慣性力により粗骨材に加わる進行力 F は(8)式で与えられる[2]。

$$F = \frac{A \cdot \eta_{pl}}{h} \left(v_s + \frac{\tau_r \cdot h}{\eta_{pl}} \right) \quad \text{----- (8)}$$

A : 変形層の断面積 h : 変形層の厚さ η_{pl} : モルタル塑性粘度
 τ_r : モルタル降伏値 v_s : 粗骨材が停止した瞬間のモルタル速度

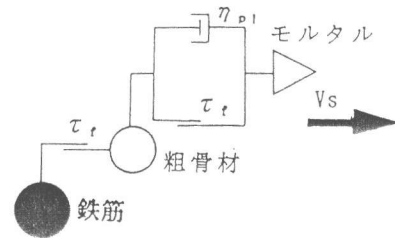


図-4 力学モデル[2]

この式を v_s の式に変形すると(9)式になる

$$v_s = \frac{F \cdot h}{A \cdot \eta_{pl}} - \frac{\tau_r \cdot h}{\eta_{pl}} \quad \text{----- (9)}$$

粗骨材とモルタルの鉄筋近傍での相対速度差は、粗骨材が停止した時点で最大になると仮定し、この式を基本式として解析を行なう。

(2) 解析の仮定

① 実最大相対速度差

実測データより得られた最大相対速度差は、実際に速度差が発生している部分と発生していない部分を平均化したものである。そこで、実際に速度差が発生しているのは図-5に示すように鉄筋周囲最大粗骨材寸法の範囲内と仮定した。この場合の速度差を実最大相対速度差(V_r)とし、(10)式で求めた。

$$V_r = \frac{W \cdot V_d}{n(dr + 2da)} \quad \text{----- (10)}$$

W : 流路幅 V_d : 最大相対速度差 n : 断面当りの配筋数
 dr : 鉄筋直径 da : 粗骨材最大寸法

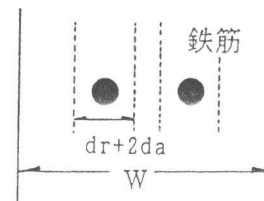


図-5 速度差発生部分

② 変形層の断面積および厚さ

モルタルは降伏値を持つビンガム流体であり、その流れは栓流となるため、変形層の厚さは降伏値の影響を受けるものと考えられるが、高流動コンクリートにおけるモルタル降伏値は非常に小さく、したがって栓流半径も小さいため降伏値の違いが変形層の厚さに与える影響は少ないと

考えられる。よって今回の実験条件においては変形層の断面積および厚さは一定と仮定した。

③連行力

モルタルマトリックスの慣性力により粗骨材に加わる連行力Fは(11)式に示すように単位容積のモルタルの力積に比例すると仮定した。

$$F \propto \rho_m V_0 \quad (11) \quad \rho_m : \text{モルタル比重} \quad V_0 : \text{流動速度}$$

④粗骨材体積濃度(Xv)

Xvはコンクリートの流動速度や粗骨材に付着拘束されるモルタル量に影響を与えることより、Xvは実最大相対速度差に影響を与えると仮定する。

(3)解析式

以上の仮定により、実最大相対速度差を(12)式で表した。

$$v_r = \frac{W \cdot V_d}{n(dr + 2da)} = \alpha \frac{\rho_m \cdot V_0}{\eta_{pl}} + \beta \frac{\tau_r}{\eta_{pl}} + \gamma X_v + C \quad (12)$$

α 、 β 、 γ : 係数 C : 定数

この式にデータを代入し、重回帰分析によりそれぞれの係数および定数を求めた。その結果、以下の数値が得られた。

$\alpha = 0.018$ 、 $\beta = -0.077$ 、 $\gamma = -1.955$ 、 $C = 0.700$ 重相関係数 $R = 0.893$

この時の推定値と実験から求めた実最大相対速度差の関係を図-6に示す。この結果、粗骨材とモルタルとの間に生じる相対速度差を、このようなモデルで説明できる可能性が見出された。

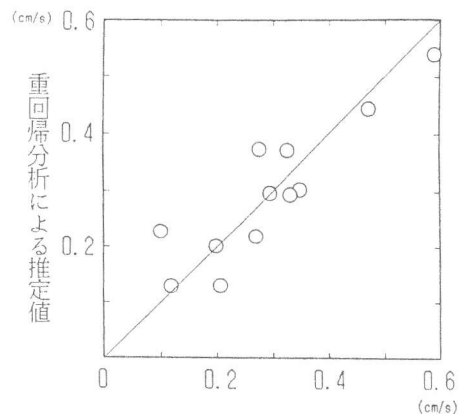
しかし、今回の検討の中では鉄筋間隔が配筋数で一義的に決まったため、配筋数を扱ったが、実際には鉄筋間隔の影響は非常に大きいと考えられ、今後の検討課題として残される。また、多くの仮定の下に解析を行ったので、今後は仮定した項目の一つ一つを検証して行くと共に、分離に関係する各要因と分離現象のより一般的な関係の解明について研究を行っていく予定である。

4. 結論

高流動コンクリートが型枠内を流動する際に生じるモルタルの先送りによる粗骨材とモルタルの分離現象について検討した。その結果、今回の実験の範囲内であれば、このような分離現象は粗骨材とモルタルの流動速度の違いにより発生し、この速度差は粗骨材が鉄筋により流動が阻害されるために起こるとしたモデルである程度説明できることが分かった。

【参考文献】

- [1]久保田裕康、下山善秀、藤原浩巳；高流動コンクリートの施工性・充填性に関する実験的研究；第46回セメント技術大会講演集 pp. 400～405, 1992
- [2]谷川恭雄、森博嗣、黒川善幸；超流動コンクリートにおける粗骨材連行性に関するメカニシ-的考察；超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集, pp. 79～84, 1993, 5



実験結果より推定した実最大速度差
図-6 重回帰分析による推定値と
実験から求めた実最大相対速度差との関係