

論文

[1019] 高流動コンクリートの鉄筋間通過性に関する基礎研究

藤原浩巳*1 下山善秀*2 クレグ・ハナ*3 堂園昭人*3

1. はじめに

近年流動性を著しく高め、振動による締固めを行わなくても型枠の隅ずみまで行き渡る高流動コンクリートの研究が活発化している。本研究はこのような高流動コンクリートの型枠内への充填メカニズムの解明と、構造物施工条件に適した配合設計の確立を目的としている。本報告は、特にコンクリートの分離の防止にアクリル系増粘材（以下HFと略）を用いた高流動コンクリート（以下HFコンクリートと略）の鉄筋等の障害物を有した型枠内への充填性に大きな影響を及ぼす鉄筋間の通過性について行った実験結果について報告する。

実験はHFコンクリートを粗骨材とモルタルから成る2相系と考え、鉄筋間通過性に影響を及ぼすと考えられる、モルタル部分のレオロジー特性（塑性粘度、降伏値）、コンクリート中に占める粗骨材の容積割合である粗骨材体積濃度、鉄筋純間隔などの因子をとりあげ鉄筋間通過実験を行なった。そしてそれらの因子が及ぼす鉄筋通過性への影響を定量的に評価することを試みた。

2. 実験概要

2-1 実験計画

実験の因子と水準を表-1に示す。HF添加率はモルタル部分のレオロジー特性を変化させる目的でセメント重量に対し0~8.8%とし、鉄筋純間隔は実際の施工条件を考慮して27~47mmの3水準とした。粗骨材体積濃度はHFコンクリートとして実用的と考えられる範囲の中から4水準取り上げた。

表-1 実験の因子と水準

因子	水準
鉄筋純間隔	27,37,47 (mm)
HF添加率	0~8.8% (対セメント重量%)
粗骨材体積濃度	24,28,32,36(%)

表-2 モルタルの材料組成

重量構成比(%)			HF添加率 (対セメント重量%)	SP添加率 (%)
結合材	水	細骨材		
20.0	28.7	51.3	0~8.8%	2.0

2-2 使用材料

セメント：普通ポルトランドセメント（ブレン値3370、比重3.15）

細骨材：瑞穂産砕砂（F.M.値2.90、比重2.61、吸水率1.5%）

粗骨材：青梅産砕石（F.M.値7.02、最大寸法20mm、比重2.64）

高性能減水剤：ナフチルスルホン酸塩系高性能減水剤（以下SPと略）

増粘材：ポリアルキルアミン系増粘材を主成分とした混和材（以下HFと略）

2-3 配合条件

(1)モルタル部分

モルタル部分の材料組成を表-2に示す。この組成のモルタルにHFをセメント重量に対して0~8.8%の範囲で添加した。またSPは結合材重量に対して2%添加した。

*1 日本セメント(株)中央研究所コンクリート建材研究部 副主任研究員

*2 日本セメント(株)中央研究所コンクリート建材研究部 主任研究員,工博

*3 日本セメント(株)中央研究所コンクリート建材研究部

(2)コンクリート配合条件

粗骨材体積濃度を24~36%としたコンクリートの配合組成を表-3に示す。この条件は表-2に示した基本的なモルタル部分の組成（結合材、細骨材、水、SP、HF）は変化させず、モルタルと粗骨材の容積割合のみを変化させたものである。

表-3 コンクリートの配合

粗骨材体積濃度(%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
			結合材	水	細骨材	粗骨材
24	45.5	61.5	481	219	1009	639
28		56.8	454	207	964	739
32		51.6	430	196	902	853
36		47.7	392	180	847	941

2-4 試験項目および方法

以下の項目について測定を行った。

(1)モルタルのレオロジー特性

モルタルは、2ℓホバートタイプミキサで2分間混練を行なった後、降伏値および塑性粘度を外円筒回転型粘度計で測定した。

(2)コンクリートの流動性

コンクリートは100ℓバンタイプミキサで2分間混練を行なった。流動性はJIS A1101のスランブ試験法に準じた方法で、スランブの広がりであるスランブフローを測定し評価した。

(3)コンクリートの鉄筋間通過性

図-1に示す鉄筋間通過性試験機の上端までコンクリートを充填し、試験機底部のゲートを開いてコンクリートの通過が停止するまでの状況を観察した。途中で通過が停止した場合にはその時の鉄筋部からのコンクリート高さを測定して圧力を算出した。また通過の判断基準は、予備的な実験により通過開始時における慣性等の影響を検討した結果、打込み面の沈下が10cm以上となった場合を通過とした。

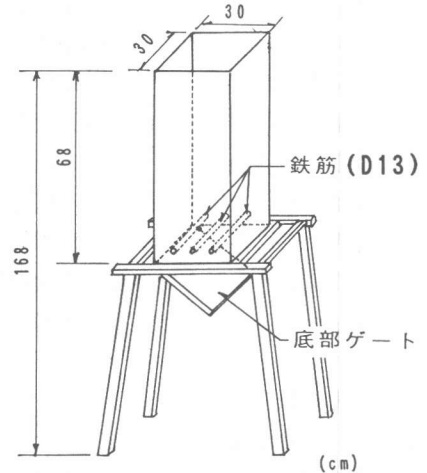


図-1 鉄筋間通過性試験機概要図

3. 実験結果および考察

3-1 モルタルのレオロジー特性

図-2にHFの添加率とモルタルの塑性粘度および降伏値の関係を示す。図よりHFの添加率とモルタルの塑性粘度および降伏値の間にはほぼ直線的な関係が認められ、比較的精度の良い単回帰式が得られた（図-2参照）。

3-2 コンクリートの流動性

図-3にモルタル部分の降伏値とコンクリートのスランブフローの関係を示す。図より粗骨材体積濃度およびモルタル降伏値が大きくなるほどスランブフローは小さくなる傾向が認められ、従来の知見[1][2]と一致した。また、スランブフローは概ねモルタル部分の降伏値が0.4gf/cm²以下、粗骨材体積濃度が32%以下の範囲で高流動といえる500mm以上を達成できる事がわかった。

3-3 コンクリートの鉄筋間通過性

(1)試験結果

表-4にコンクリートの鉄筋間通過性試験結果を示す。また、図-4~6にモルタルの降伏値を横軸、粗骨材体積濃度を縦軸にとり、鉄筋純間隔条件別に通過状況および流動停止時の圧力を

記入し、おおよその等圧力線を示した。この線により、種々のレオロジー特性を有するコンクリートが通過するのに必要な圧力を推定することが出来ると考えられる。また図中には分離限界線を併記した。これは分離現象を粗骨材とモルタルの遊離としてとらえ、コンクリート中のモルタルが全て粗骨材に付着拘束された場合に分離が起こらなくなると考えて、その時のモルタルの降伏値 τ_{r0} (gf/cm²) を(1)式で求めて線で結んだものである。

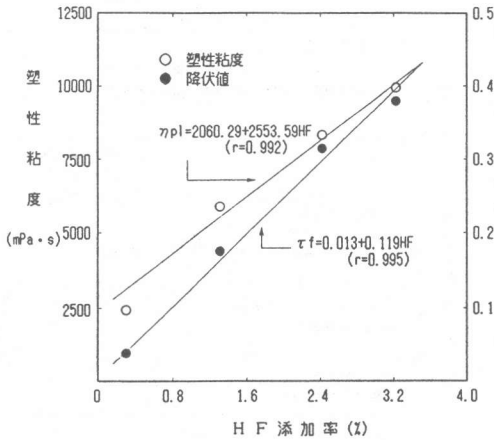


図-2 HF添加率と塑性粘度および降伏値の関係

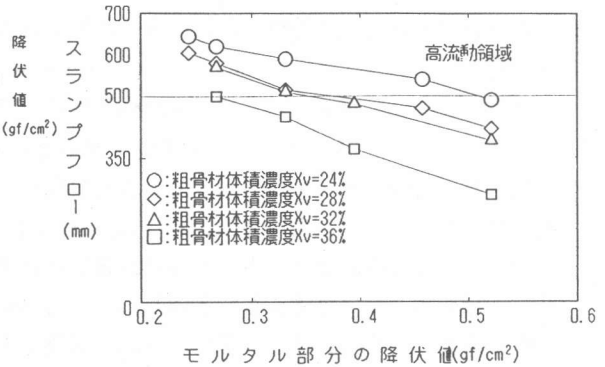


図-3 モルタル部分の降伏値とスランプフローの関係

表-4 鉄筋間通過性試験結果

鉄筋間隔	断面欠損率 *1	粗骨材体積濃度(%)	粗骨材単位面積 *2 (cm ²)	HF添加率(%)	スランプフロー V-(mm)	沈み量*3 (cm)	モルタル部分降伏値 *4 (gf/cm ²)	推定コンクリート降伏値 *5 (gf/cm ²)	圧力(gf/cm ²)	通過判定 *6	
27mm	0.325	24	0.84	1.7	645	20	0.164	0.274	115.2	○	
				2.1	620	15	0.202	0.337	127.2	○	
				3.1	590	11	0.297	0.495	136.8	○	
		5.2	540	5	0.487	0.812	151.2	×			
		28	1.03	1.8	605	11	0.164	0.407	136.8	○	
				2.2	580	0	0.202	0.501	163.2	×	
3.3	515			0	0.297	0.737	163.2	×			
37mm	0.26	24	0.84	3.1	615	68	0.297	0.495	0	○	
				5.2	540	68	0.487	0.812	0	○	
				6.2	490	68	0.582	0.971	0	○	
				8.3	400	55	0.772	1.288	31.2	○	
				2.2	580	68	0.202	0.501	0	○	
				3.3	515	55	0.297	0.737	31.2	○	
		28	1.03	1.03	5.5	470	37	0.487	1.209	74.4	○
					6.6	420	15	0.582	1.445	127.2	○
					8.8	390	9	0.772	1.920	141.6	×
					2.3	560	6	0.202	0.666	148.8	×
					3.5	510	5	0.297	0.979	151.2	×
					4.6	485	5	0.392	1.292	151.2	×
47mm	0.217	28	1.03	5.5	460	65	0.487	1.209	19.2	○	
				2.3	570	62	0.202	0.666	14.4	○	
				3.5	510	60	0.297	0.979	19.2	○	
				4.6	480	59	0.392	1.292	21.6	○	
				7.0	390	55	0.582	1.919	31.2	○	
				2.6	500	47	0.202	0.831	26.4	○	
		36	1.49	1.49	3.8	450	22	0.297	1.221	110.4	○
					5.1	370	12	0.392	1.612	134.4	○
					6.4	310	6	0.487	2.000	148.8	×
					7.7	260	3	0.582	2.393	156.0	×
					2.6	500	47	0.202	0.831	26.4	○
					3.8	450	22	0.297	1.221	110.4	○

*1: 図-9中(4)式、*2: (5)式参照、*3: ゲート開放後の打込み面の沈み量、*4: 図-2中の回歸式参照、*5: (3)式参照、*6: 沈み量10cm以上を○

$$\tau_{f_0} = \frac{3Wmf}{1.85 \times 1.97 \times 10 \pi \sum \{n(r) \cdot r^2\}} \quad (1)$$

Wmf: 1 m³中のモルタル重量(g)

n(r): 半径 r の粗骨材個数

なお(1)式は粗骨材を半径r(cm)の球と仮定し、形状および表面粗度の補正を行なったものである[3]。

本実験で使用した粗骨材は、粒度分布曲線より寸法範囲5~10mm(代表値7.5mm)が35%、10~15mm(代表値12.5mm)が30%および15~20mm(代表値17.5mm)が35%であった。そこで、粗骨材をそれぞれの代表値を直径とする球からなっていると仮定し、粗骨材比重および配合条件より、n(r)を求めたものである。この直線よりも右の部分ではHFコンクリートは分離しないと考えられる[3]。よって、分離限界線より右側で、等圧力線で示される値以上の圧力が作用した場合、HFコンクリートは分離や閉塞することなく鉄筋間を通過すると考えられる。

(2) 考察

コンクリートの鉄筋間の通過は、配筋条件等の外的な条件とコンクリートのレオロジー特性等の内的な条件により決まる通過に必要な圧力(通過限界圧力とする)とコンクリートに作用している圧力の大小関係によって決まるものと考えられる。したがって、これらの内的条件と外的条件より通過限界圧力を推定する方法についての検討が必要である。

森らによれば、不分離性を有するコンクリートを一相系の単純ビンガム流体と仮定した場合、図-7に示すように鉄筋とコンクリートの間に生じるせん断力は(2)式で求められることが示されている[4]。

$$\tau_{max} = \frac{PW}{2R} \quad (2)$$

τ_{max} : 鉄筋部分に作用するせん断力(gf/cm²)

P: コンクリートに作用する圧力(gf/cm²)

W: 鉄筋純間隔(cm)

R: 鉄筋直径(cm)

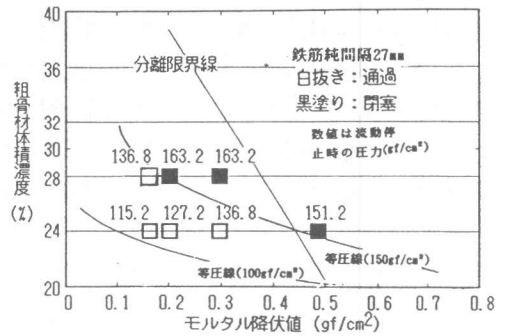


図-4 通過の判断とモルタル降伏値, 粗骨材体積濃度の関係

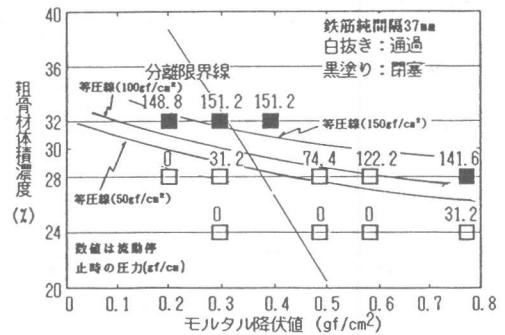


図-5 通過の判断とモルタル降伏値, 粗骨材体積濃度の関係

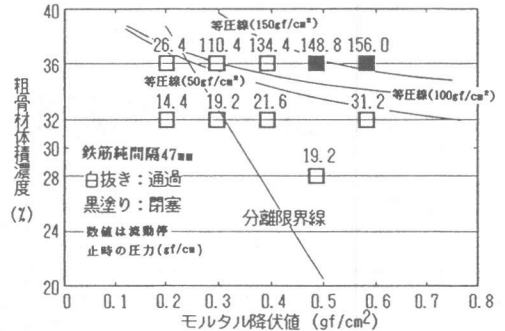


図-6 通過の判断とモルタル降伏値, 粗骨材体積濃度の関係

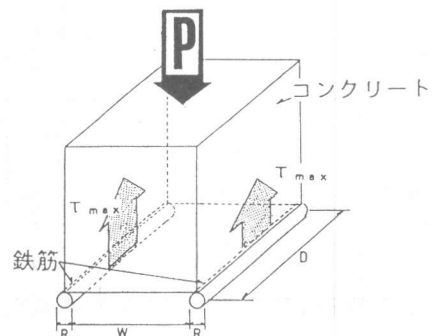


図-7 鉄筋部分に作用する剪断力概要図

このせん断力よりコンクリートの降伏値が小さい場合にコンクリートは鉄筋間を通過すると考える。したがって、(2)式を変形してコンクリートの降伏値を τ_{rc} とすると $P = 2R\tau_{rc}/W$ 以上の圧力が作用すれば鉄筋間を通過する事になる。和美らの研究によれば、コンクリートの降伏値は粗骨材体積濃度(Xv)とモルタルの降伏値より推定が可能であり、その場合のコンクリートとモルタルの降伏値の比(y)は(3)式で求まるとしている[2]。

$$y = -3.22 + 20.366X_v \quad (3)$$

この式をもとにコンクリートの降伏値を推定した結果を表-4に示した。この値と鉄筋間隔および通過判断結果の関係を図-8に示す。今回の実験では鉄筋径(R)と初期圧力(P)は一定($R = 1.3\text{cm}$ 、 $P = 163.2\text{gf/cm}^2$)であるから、(2)式より鉄筋純間隔Wが大きくなることにより τ_{max} も直線的に増加し、したがって通過と閉塞の境界となるコンクリートの降伏値も同様の傾向を示さなければならないと考えられる。しかし、図より鉄筋純間隔の拡大により通過、閉塞の境界となる降伏値はある程度直線的に増加する傾向は認められるが、通過の判断結果にばらつきが認められる。また、(2)式により得られる τ_{max} は、コンクリートの推定降伏値よりもはるかに大きい(例えば $W = 2.7\text{cm}$ において $\tau_{max} = 169.5\text{gf/cm}^2$)ことなどから、この仮定だけで鉄筋間の通過性を説明することはできない。

そこで、その他の鉄筋間通過性に影響を与えると予想される要因として、更に以下のことを検討する必要がある。

a) 断面欠損率

鉄筋の存在は、その位置においてコンクリートが通過する断面に欠損を生じさせる(図-9参照)。この断面欠損率は鉄筋間隔および鉄筋径により図-9中(4)式で求められるものであり、今回の実験条件における断面欠損率を表-4に併記した。

b) 粗骨材によるモルタルの拘束

図-10にコンクリートが鉄筋間を通過する時の、鉄筋付近の状態をモデル的に表した。すなわち鉄筋間通過時には粗骨材AとBを結合していたモルタルは、鉄筋により分断される。と考え、鉄筋がモルタルを分断できるかどうかは、粗骨材によるモルタルの拘束の程度の影響を強く受けると推察される。

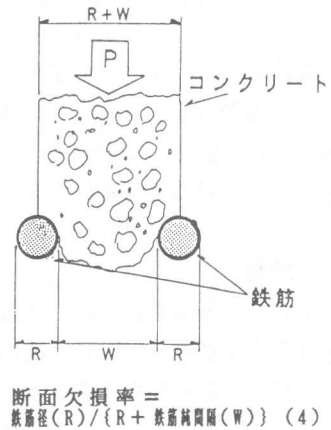


図-9 鉄筋による断面欠損

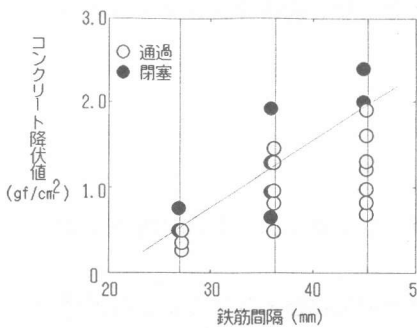


図-8 通過の判断とコンクリートの降伏値および鉄筋間隔の関係

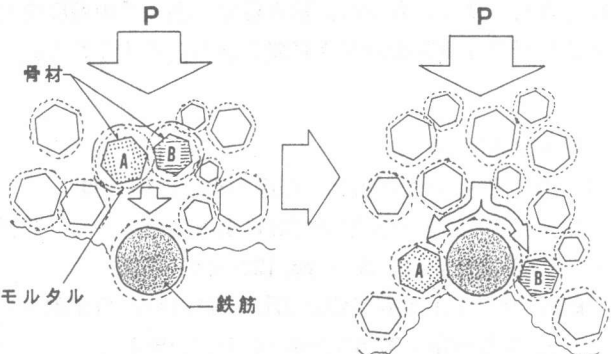


図-10 コンクリートの鉄筋間通過モデル

また、この拘束の程度はモルタルのレオロジー的性質とモルタルと粗骨材の量的な関係で決まるものと考えられる。このモルタルと粗骨材の量的な関係を、単位モルタル容積当たりの粗骨材の表面積（ A_a 、以下粗骨材単位面積と略）でとらえると粗骨材単位面積は(5)式で求まる。

$$A_a = \frac{\sum n(r) \cdot 4\pi r^2}{V_{mf}} \quad (5) \quad V_{mf}: 1\text{ m}^3\text{あたりのモルタル容積}$$

今回の実験における A_a の計算結果を表-4に併記した。この値が大きいほど、またモルタルの降伏値が大きいほど鉄筋によるモルタルの分断は起こりにくいと考えられる。

以上より、鉄筋間を通過するのに必要な圧力と鉄筋間通過性に影響すると推察される上記の要因との関係を把握することを目的に以下のような統計手法（重回帰分析）を用いて解析した。すなわち上記の条件（断面欠損率： X_1 、粗骨材単位面積(cm^2): X_2 、モルタル部分の降伏値(gf/cm^2): X_3)と鉄筋間隔（： X_4 ）を説明変数とし、通過限界圧力(gf/cm^2 : P_c)を目的変数とした重回帰分析を行なった結果を(6)式に示す。この通過限界圧力は、通過停止時におけるコンクリート圧力を用い、全く通過しなかったものと全量通過したものはデータより除外した。

$$P_c = -519.87 + 1347.94 X_1 + 370.14 X_2 + 170.56 X_3 - 5.73 X_4 \quad (6)$$

この回帰による重相関係数は0.922と比較的良好な相関が得られ、この式を用いることにより種々の配合条件および配筋条件からコンクリートが鉄筋間を通過するために必要な圧力のある程度推定することが可能と考えられる。また、表-5に各説明変数の影響の大きさを標準回帰係数で示した。表より、粗骨材単位面積の影響が最も大きいことがわかった。

表-5 標準回帰係数

説明変数	標準回帰係数
断面欠損率	0.957
粗骨材単位面積	1.472
モルタル降伏値	0.534
鉄筋間隔	-0.767

4. 結論

アクリル系増粘材を用いた高流動コンクリートの鉄筋間通過性について、レオロジー特性（塑性粘度および降伏値）、単位粗骨材量、配筋条件（鉄筋間隔）等を変えて実験を行い検討した。その結果、鉄筋間の通過性はコンクリートを一相系の単純ビンガム流体とした仮定では説明できないことがわかった。また、鉄筋間隔、断面欠損率、単位モルタル容積当たりの粗骨材表面積、モルタル部分の降伏値より、鉄筋間の通過に必要な圧力を推定する式を重回帰によって得ることができた。今後、さらに実験を行ない回帰式の精度を上げるとともに、通過のメカニズムについてより詳細な研究を行なう必要があると考えられる。

<参考文献>

- 1)村田二郎:コンクリート技術100講,山海堂,pp.93,1990
- 2)和美広喜 他:回転翼型粘度計による高強度コンクリートの流動特性測定方法に関する実験的研究,コンクリート工学論文集Vol.1, No.1, pp.133~141,1990
- 3)藤原浩巳,下山善秀,富田六郎,久保田裕康:高流動コンクリートの充填性に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文報告集Vol.14, No.1,1992
- 4)森博嗣:超流動コンクリートにおける粗骨材連行性に関する基礎的研究,