

論文 高流動コンクリートの間隙通過時のレオロジー定数評価

呉 相均¹・友澤史紀²・野口貴文³・姜 丙熙⁴

要旨：コンクリートの実際の型枠内の流動を予測する場合、間隙通過に伴う流動速度低下現象および閉塞現象などを考慮する必要があり、それらの現象はコンクリートのレオロジー定数の見掛けの増大として解釈できる。本研究では、高流動コンクリートの間隙通過時のレオロジー定数を定量化するため、間隙寸法、粗骨材の最大寸法および量、マトリックスモルタルのレオロジー特性などを実験因子として取り上げ、その影響を新たに開発した実験装置を用いて検討した。

キーワード：間隙通過性、高流動コンクリート、レオロジー定数、骨材間隙比

1. 研究目的

レオロジー定数に基づいて高流動コンクリートの流動性に関する調合設計法を確立するためには、高流動コンクリートのレオロジー定数に及ぼす材料特性および調合の影響に関して研究を行う必要があると考えられ、これまで段階的にそれらを把握してきた[1]～[3]。高流動コンクリートの流動性に関する研究の最終的な目的は、流動性を定量的に評価し、実験によらず施工性を予測することである。高流動コンクリートの流動性能の中でも自己の流動性のみで充填されることを評価するためには、鉄筋あるいは型枠間を通過する能力(間隙通過性)を検討することが最も有効である。

コンクリートの実際の型枠内の流動を予測する場合には、間隙通過に伴う流動速度低下現象および閉塞現象などを考慮する必要があり、それらの現象はコンクリートの塑性粘度および降伏値の見掛けの増大として解釈することができる。また、その増大は、間隙の寸法、粗骨材の特性、マトリックスモルタルの性質などの影響を受けると考えられる。従って、コンクリートの間隙通過性に及ぼす影響因子について、レオロジー的な立場から研究を行う必要がある。

本研究は、コンクリートレベルでの間隙通過時のレオロジー特性を検討することを目的とし、コンクリート間隙通過試験装置を開発して実験的な検討を行った。コンクリートの間隙通過性に及ぼす影響因子として、間隙寸法、モルタルのレオロジー特性、および粗骨材の寸法・形状・容積割合などを取り上げ、間隙通過性の指標値「骨材間隙比(ψ)」を適用して骨材間隙比(ψ)の増大に伴う高流動コンクリートの見掛けの降伏値および塑性粘度について考察した。

2. 研究方法

2.1 間隙通過時のレオロジー評価方法の基礎的な考察

高流動コンクリートが間隙を通過する際の流動速度低下および閉塞は、コンクリートの塑性粘度および降伏値が、見掛け上、増大したものとして解釈することができる[4]。すなわち、(1)式に示すように降伏値 τ_y を $\alpha\tau_y$ に、塑性粘度 η を $\beta\eta$ にすることで表現できるものと仮定する[4]。

$$\tau = \tau_y + \eta\dot{\gamma} \quad \Rightarrow \quad \tau = \alpha\tau_y + \beta\eta\dot{\gamma} \quad (1)$$

α および β は、間隙寸法、骨材の寸法・量・形状、ペーストおよびマトリックスモルタルの性質などの影響を受けると考えられ、本研究で検討要因として取り上げ、高流動コンクリートの間隙通過試験を行うとともに、 α および β に及ぼす上記要因の影響を定量的に評価した。

¹東京大学大学院工学系研究科(正会員)

²東京大学大学院工学系研究科教授、工博(正会員)

³東京大学大学院工学系研究科助手、博士(工学)(正会員)

⁴韓国東亜大学建築工学科教授、工博(正会員)

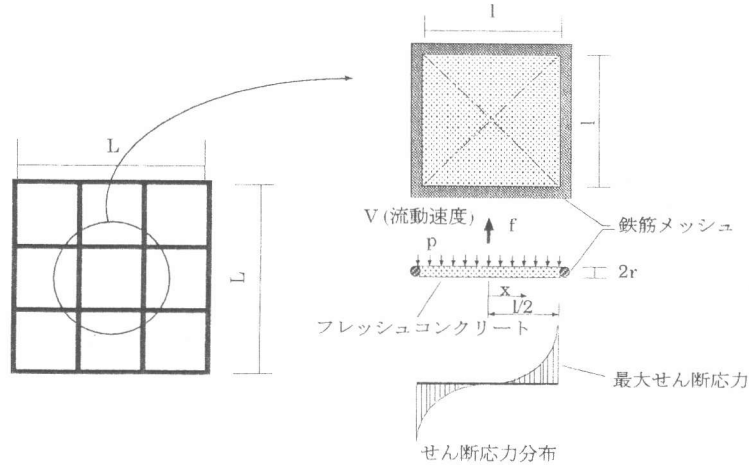


図1 フレッシュコンクリートの鉄筋間通過時のモデル

高流動コンクリート間隙通過時の挙動のレオロジー的意味を検討するため、鉄筋の間をフレッシュコンクリートが流体として通過する際の状態の逆のコンクリート中を鉄筋がある速度で移動する場合を考える。その状態を図1に示すようにモデル化する。すなわち、メッシュ要素を引く力を f とし、その反力として直径 $2r$ の鉄筋間に存在するコンクリートに一樣な圧力 p が作用する状態を考える。一つの鉄筋メッシュを長さ $l+2r$ の正方形であるとした時、鉄筋の内側のコンクリートに生じるせん断応力は、中心より x の位置では式(2)で表されるものとする。最大せん断応力 τ_{max} は、 $x=\frac{l}{2}$ の位置で生じ、式(3)で表すことができる。降伏値が最大せん断応力よりも小さい場合は閉塞が生じる。

$$\tau = \frac{px}{4r} = \frac{fx}{4r(l+2r)^2} \quad (2)$$

$$\tau_{max} = \frac{pl}{8r} = \frac{fl}{8r(l+2r)^2} \quad (3)$$

次に、鉄筋間通過状態を、半径が鉄筋の断面半径 (r) と等しい n 個の球による球引上げ試験に近似して考える [5]。本研究では、 n 個球の総表面積と鉄筋の総表面積が等しいと仮定した。せん断応力 (τ) およびひずみ速度 ($\dot{\gamma}$) は、鉄筋 (総長さ L) を移動させる際に受ける総荷重 (F) および鉄筋が移動する速度 (V) を用いて、Ansley の理論により、式(4)および(5)のように導くことができる。

$$\tau = \frac{F}{12\pi r^2} \frac{1}{n} = \frac{F}{12\pi r^2} \left(4\pi r^2 \frac{1}{2\pi r L} \right) = \frac{F}{6\pi r L} \quad (4)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{2r} \quad (5)$$

上述の式(4)、(5)から得られたせん断応力 (τ) およびひずみ速度 ($\dot{\gamma}$) をコンシステンシー座標上にプロットして、レオロジー定数、即ち、塑性粘度と降伏値を求めることが可能となる。鉄筋に関する条件および間隙寸法などを変えて見掛けのレオロジー定数の増加率 α 、 β を求めることにより、間隙通過時の状況を予測することが可能となる。ただし、閉塞現象が生じた場合は、式(4)および(5)の適用は不可能であり、式(3)を用いることとなる。式(3)からは、コンクリートに生じる最大せん断応力が算出され、コンクリートの見掛けの降伏値はその値以上であると推測できる。

表 1: 実験因子および水準

実験因子	水 準	記 号
粗骨材の最大寸法 (mm)	10	S
	20	L
粗骨材の容積 (%)	29	F
	32	M
粗骨材の形状	角 (碎石)	A
	丸 (砂利)	R
間隙寸法 (mm)	なし	A
	60	B
	42.5	C
	32	D

表 2: コンクリートの調合および性質

記号	水粉体比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	容積 (l/m ³)			スランブフロー値 (cm)	50 cm フロー速度 (cm/s)
			セメント	細骨材	粗骨材		
28LFA	28	177	201	312	290	72.5	2.7
28LFR	28	177	201	312	290	66.5	2.6
28LMA	28	170	192	298	320	74.5	1.7
28SFA	28	177	201	312	290	74.0	1.8
35LFA	35	199	179	312	290	64.5	4.5

2.2 間隙通過性の指標値

間隙通過性に及ぼす間隙の寸法・形状の影響と骨材の最大寸法・形状・量の影響を総合的に評価する指標として、(6) 式の形式で表される骨材間隙比 (ψ) を定義する。

$$\psi = \frac{d \cdot V_g}{l \cdot O_p} \quad (6)$$

d : 骨材の最大寸法、 V_g : 骨材のかさ容積、 l : 鉄筋相互のあき、 O_p : 開口率

骨材間隙比 (ψ) は、試料の間隙の通過し難しさを示す指標と考えられ、骨材間隙比 (ψ) の増加に伴い、見掛け上の降伏値および塑性粘度の増加率を表す α 、 β も増大することが予測される。

2.3 実験因子および水準

実験因子・水準を表 1 に示す。モルタルのレオロジー特性については 2 水準 (水結合材比 2 種類)、粗骨材については寸法・量・形状をそれぞれ 2 水準に設定した。コンクリート用間隙通過装置の間隙寸法は 3 水準設け、間隙なし (A) の場合は、十字形の丸鋼を用いて試料の本来のレオロジー定数を式 (4) および式 (5) より求めた。

2.4 使用材料および調合

実験に用いた粉体は普通ポルトランドセメントであり、コンクリートの調合および性質を表 2 に示す。本実験では、コンクリートの水粉体比を 28、35 % とし、同一の水粉体比においてはコンクリート中のモルタルの調合が同一となるように配慮した。

2.5 測定項目および測定方法

図 2 にコンクリート用間隙通過試験装置および鉄筋メッシュの寸法と形を示す。間隙通過性試験の測定項目は、鉄筋メッシュの移動量および荷重の経時変化であり、式 (4) および式 (5) を用いてコンクリートの間隙通過時の見掛けの流動曲線を求めた。また、得られた流動曲線を直線回帰して見掛けの塑性粘度と降伏値を求めた。

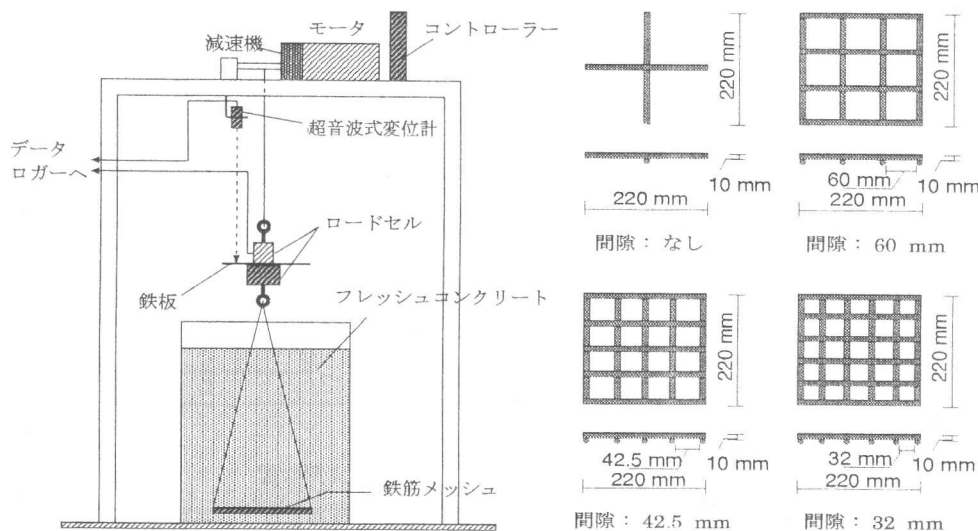


図2 コンクリート用間隙通過試験装置および鉄筋メッシュ

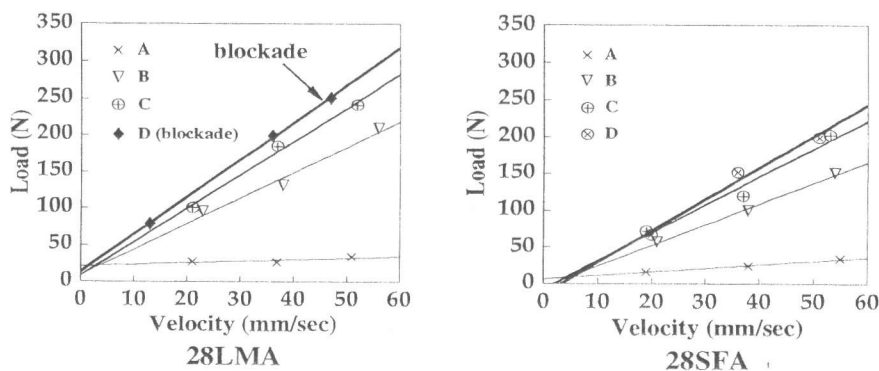


図3 間隙通過速度と荷重との関係

3. 実験結果および考察

3.1 間隙通過速度と荷重の関係

実験の結果、いずれの高流動コンクリートも目視による材料分離現象は認められなかった。しかし、コンクリートの閉塞現象は、調合 28SFA を除いてすべてのコンクリートが間隙 32mm(D) を通過する際に観察された。その場合、間隙通過速度と荷重の関係 (図 3) からの流動曲線の算出は行わなかった。閉塞が生じた場合コンクリートは鉄筋メッシュを通過しないので粘性抵抗は生じず、コンクリートの見掛けの降伏値はコンクリートに生じている最大せん断応力よりも著しく大きいと考えられる。本実験で閉塞した場合、式 (3) による略算から得られる最大せん断応力値は、28LFA が 2983Pa (メッシュ無しの試験から求めた本来の降伏値の 6 倍)、28LFR が 883Pa (2.3 倍)、28LMA が 3402Pa (6.6 倍)、35LFA が 728Pa (2.4 倍) であるが、見掛けの降伏値はそれよりもさらに大きな値であると考えられる。

3.2 見掛けのレオロジー定数

図 4 に上記の方法より求めたコンクリートの間隙通過時の流動曲線を示す。間隙通過性試験において計測された荷重中には浮力が含まれているため、せん断応力の計算においては、コンクリートの調合と鉄筋メッシュ容積から求められる浮力を考慮した [6]。既往の研究 [7] と同様に、本実験においても降伏値が 0 以下となる場合があり、それは、Ansley 式を発展させた式 (4) および式

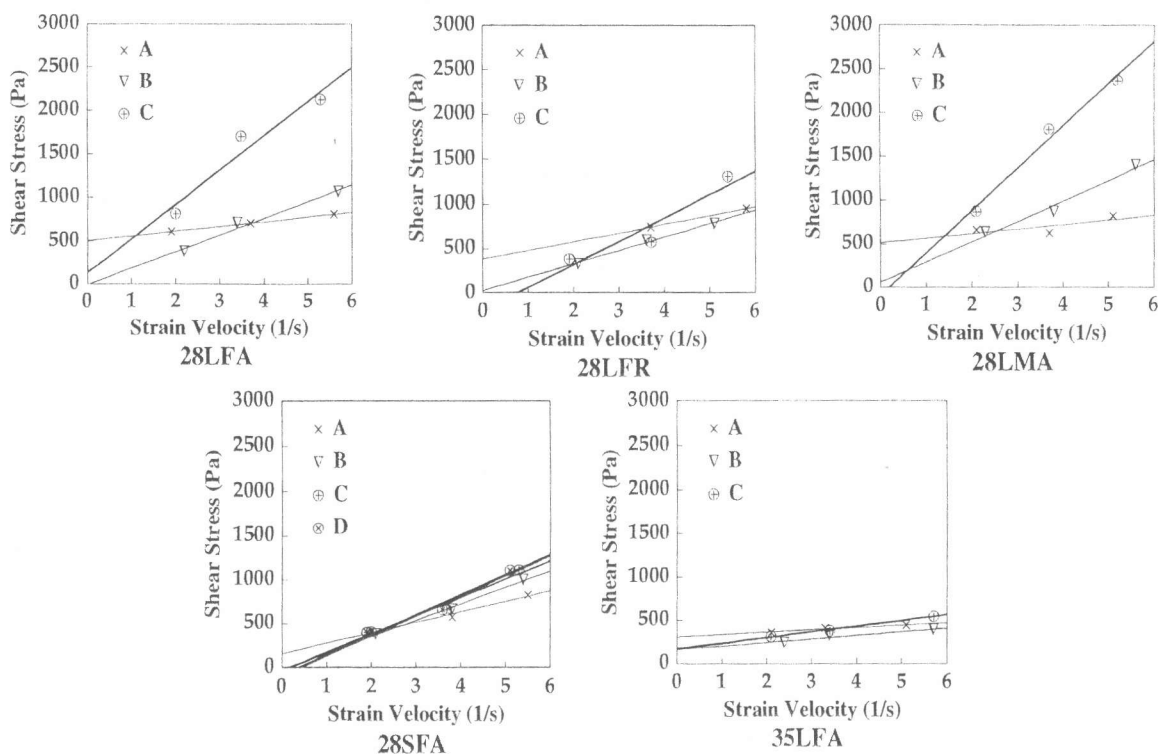


図4 コンクリートの流動曲線

(5) の適用に限界があることを示している。従って、本研究では降伏値に関する考察は行わないこととする。

粗骨材の形状が異なる 28LFA と 28LFR のグラフから、粗骨材の形が丸い砂利を用いた場合の方が碎石の場合より見掛けの塑性粘度の変化が小さく、間隙を通過しやすいと予測される。

3.2 見掛けの塑性粘度と骨材間隙比

図5に間隙寸法と見掛けの塑性粘度との関係を示す。粗骨材の最大寸法が小さい 28SFA の場合は、間隙寸法の減少に伴う見掛けの塑性粘度の増加は少なく、狭い間隙までコンクリートは通過した。マトリックスモルタルのレオロジー定数が異なる 35LFA は、42.5mm の間隙までは見掛けの塑性粘度はそれほど増加しなかったが、間隙 32mm で急に閉塞した。それはモルタルマトリックスの塑性粘度が低いため、骨材連行性が悪くなって、マトリックスモルタルと粗骨材とが分離しやすく、間隙が狭くなると、閉塞する確率が高くなるためであると考えられる。高い間隙通過性を有する高流動コンクリートを製造するためには、降伏値は低く塑性粘度はある値以上であることが望ましい。塑性粘度が高すぎても閉塞することが指摘されており [7]、その時の閉塞は塑性粘度が低い場合の閉塞とは異なるメカニズムから生じており、間隙通過時の速度がある値以上では閉塞してしまうコンクリートも非常に低速では通過することができると考えられる。間隙条件とレオロジー定数の見掛けの増加率の関係については、閉塞のメカニズムに立脚して検討する必要があると考えられる。同一モルタルでも粗骨材の条件が変わることによって見掛けの塑性粘度の増加程度が異なる。粗骨材の条件が同一でもマトリックスモルタルのレオロジー特性が異なると見掛けの塑性粘度の増加程度が異なる。粗骨材の最大寸法が 10mm である 28SFA は塑性粘度の変化が比較的小さく閉塞は生じなかった。

間隙寸法に限らず、間隙の開口率および粗骨材の条件を入れた骨材間隙比 (ψ) と見掛けの塑性粘度の増加率 β との関係を図6に示す。いずれのコンクリートも ψ が 0.25 近傍において、見掛けの塑性粘度が急に増大することがわかる。また、図7により、閉塞の生じる骨材間隙比の値が存

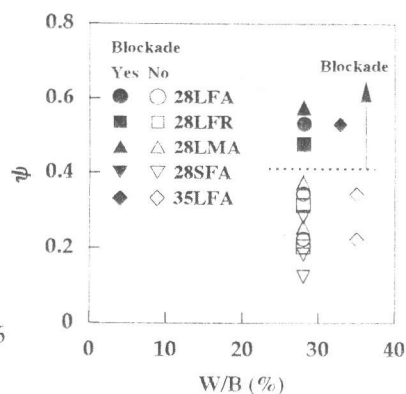
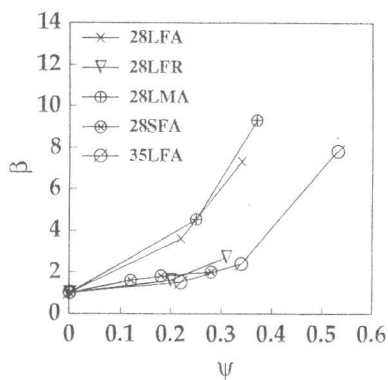
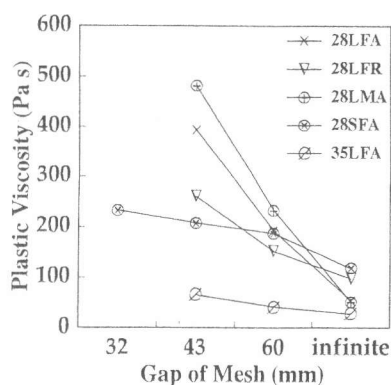


図5 鉄筋あきと塑性粘度の関係 図6 ψ と β (塑性粘度の増加率) の関係 図7 閉塞の生じる骨材間隙比

在すると考えられる。図に示すように、閉塞の生じる骨材間隙比は、0.4 以上であることが認められる。

間隙通過時の見掛けの塑性粘度の増大を抑えるためには、粗骨材として形状は丸く、最大寸法が小さいものを用いることが必要であり、粗骨材量は少ない方、骨材間隙比は 0.4 以下の値がよいといえる。

4. まとめ

本研究では、高流動コンクリートの間隙通過時のレオロジー特性について明らかにするために、コンクリートの間隙通過性に及ぼす要因として間隙寸法、マトリックスモルタルのレオロジー特性、粗骨材の最大寸法・量・形状を取り上げ、新たに考案した試験装置を用いてそれらの影響を検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 本研究で考案した間隙通過性試験装置は、コンクリートの間隙通過時の挙動をレオロジー的に捉えることが可能であり、高流動コンクリートの間隙通過性の評価手法として非常に有効であると考えられる。ただし、棒状体の流動現象への Ansley 式などの適用については再考を要する。
- (2) 実験結果から高流動コンクリートの間隙通過性は間隙寸法、マトリックスモルタルのレオロジー特性、粗骨材の形状・最大寸法・量などと高い相関関係があることが認められた。すなわち、粗骨材の形状が丸く、最大寸法が小さく、量が少ないほど実績率が高くなり、結果的に骨材間隙比が小さくなるため間隙通過性が高くなる。
- (3) 間隙通過時のコンクリートの見掛けの塑性粘度は、骨材間隙比が 0.25 近傍になると急激に増大が生じる。閉塞の生じる骨材間隙比は、0.4 以上であることが実験結果から認められる。

【参考文献】

- [1] 陳庭ほか：ペーストのレオロジー特性に及ぼす高性能 AE 減水剤の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.455-460、1994
- [2] 呉 相均、野口貴文、友澤史紀、姜 丙熙：ペーストのレオロジー特性・付着特性に及ぼす分離低減剤の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp.105-110、1995
- [3] 呉 相均、野口貴文、友澤史紀、姜 丙熙：モルタルのレオロジー特性・付着特性に及ぼす細骨材の影響、第 49 回セメント技術大会講演集、Vol.17、No.1、pp.105-110、1995
- [4] 野口貴文、友澤史紀、呉 相均：高流動コンクリートの間隙通過性に関するレオロジー的考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp.23-28、1995
- [5] 寺西浩司、渡辺健治、黒川善幸、森 博嗣、谷川恭雄：リング貫入試験による高流動コンクリートの間隙通過性評価、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.1-8、1994
- [6] 寺西浩司、岸谷孝一、江口 清、中込 昭：超流動コンクリートの調合に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp.463-468、1992
- [7] 寺西浩司、谷川恭雄、森 博嗣、黒川善幸：高流動コンクリートの間隙通過性の評価方法に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 467 号、pp.19-26、1995