

論文 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

野口貴文*1・友澤史紀*2・呉 相均*3

要旨：高流動コンクリートの実構造物の型枠内での流動解析に資することを目的として、間隙寸法および粗骨材の量・寸法・形状を影響要因とした間隙通過性試験を行い、試験結果を元に、間隙通過時の流動速度低下および閉塞現象を降伏値および塑性粘度の見掛け上の変化として表す手法を提案するとともに、間隙通過性を示す指標値として、間隙の寸法・形状および粗骨材の寸法・量・形状を考慮した「間隙比の逆数」を提案した。

キーワード：降伏値，塑性粘度，鉄筋間隔，開口率，粗骨材の形状，粗骨材量

1. はじめに

昨今、高流動コンクリートの普及に向けて、学協会レベルにおいて基礎研究および設計施工指針の策定作業が進められている。一方、最近のコンピュータ技術の高度化に伴い、フレッシュコンクリートの挙動を予測し、施工性を評価することを目的として、流動解析手法に関する研究が盛んに行われるようになってきた[1]。

高流動コンクリートの特徴は、締固め作業を必要とせず、自己の流動性のみで型枠内に充填されることにあり、鉄筋間あるいは型枠間の間隙を通過する能力（間隙通過性）が高流動コンクリートの流動性能を決定づける最大要因と考えられる。高流動コンクリートにおいては、コンクリートを降伏値と塑性粘度を持つビンガム流体と仮定して流動解析を行うのが一般的であり、スランプ試験時などの挙動などは、比較的精度よく解析されている[2]。しかしながら、高流動コンクリートの実際の型枠内流動を予測する場合には、間隙通過に伴う流動速度の低下現象および閉塞現象などを考慮する必要がある。したがって、本研究では、高流動コンクリートの間隙通過時の閉塞現象および流動速度低下現象を、コンクリートの降伏値および塑性粘度の見掛け上の増加として捉え、その増加に及ばず間隙の寸法・形状および粗骨材の形状・量・最大寸法の影響について定量化することを目的とする。

2. 研究方法

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、図1に示すように、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。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。

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

α および β は、間隙の寸法、粗骨材の寸法・量・形状、モルタルマトリックスの性質などの影響を受けると考えられるが、本研究では、間隙の寸法および粗骨材の最大寸法・量・形状を検討要因として取り上げ、高流動コンクリートの鉄筋間通過性試験を行うとともに、同一の試験器を

*1 東京大学助手 工学部建築学科，博士（工学）（正会員）

*2 東京大学教授 工学部建築学科，工博（正会員）

*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻（正会員）

用いて過去に実施した鉄筋間通過性試験の結果[3]を総合的に検討することにより、 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。

実験に供した高流動コンクリートの調合・使用材料およびスランプフローおよび40cmフロー時間を表1に示す。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。

間隙通過性の評価に用いた鉄筋間通過性試験装置の形状・寸法を図2に示す。開口部には、鉄筋相互のあきが等間隔(25, 30, 38, 46, 60, 130, 270mm)になるように $\phi 10$ mmの丸鋼を配置した。締固めを行わずコンクリート試料を試験装置上面まで一層で打込んだ後、直ちに開口部を開き、コンクリートが上面より10cmおよび20cm流下するのに要した時間を計測し、流下10cmから流下20cmまでの区間の流下速度(V_{10-20})を算出した。また、コンクリートの流下が停止した時点における試料の流出重量を測定し、通過率(通過重量/元の重量)を算出した。

鉄筋間隙通過の際には、図2に示すように、間隙位置のコンクリートに(2)式で示される最大せん断応力 τ_1 が生じる[4]。

$$\tau_1 = p \ell / 2 (D + d) \quad (2)$$

ここで、コンクリートへの作用圧力は、既往の研究[5][6]を元に液圧の80%と仮定し、鉄筋径 D と粗骨材の最大寸法 d の和 $D + d$ の範囲に対して圧力が作用するものと仮定した。また、本装置の特性から、降伏値が0に近いコンクリートでも、試料の流出は93%程度に留まるという実験結果[3]が得られているため、圧力の作用面を装置より28mm上部の位置に設定した。また、圧力の作用面では、(3)式に示すせん断応力 τ_2 が一様に生じていると考えられる[7]。

$$\tau_2 = p / \sqrt{3} \quad (3)$$

コンクリートの間隙位置における閉塞は、コンクリートの降伏値 τ_y が τ_1 または τ_2 を上回った場合に生じると仮定した。その場合、流動停止時に算出される τ_{1BL} および τ_{2BL} を用いて、力の釣合条件より、コンクリートの見掛け上の降伏値 τ_{yAP} は(4)式のように示される。ここで、見掛け上の降伏値 τ_{yAP} は、コンクリート本来の降伏値 τ_{ySP} を超えることはないと仮定した。

$$\tau_{yAP} = \text{Max} [\tau_{ySP}, \text{Min} (\tau_1, \tau_2)] \quad (4)$$

一方、流下速度の低下は降伏値・塑性粘度の見掛け上の増大に伴って生じるものと解釈し、図3に示すように、各鉄筋間隔ごとに、測定された流下速度(V_{10-20})および15cm降下時の τ (τ_1 と τ_2 の小さい方)で示される点と各鉄筋間隔に応じた見掛け上の降伏値 τ_{yAP} とを結び、そ

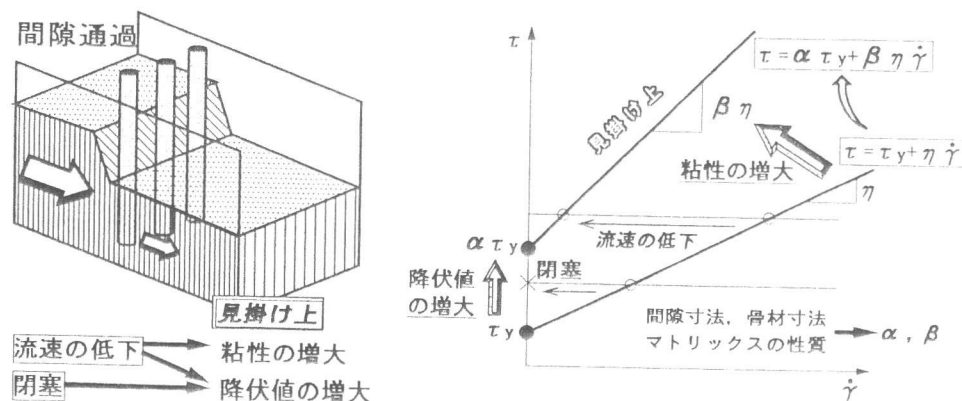


図1. 鉄筋間通過時の流動性(レオロジー定数)の変化

表1. コンクリートの使用材料および調合

種類	粗骨材の種類	粗骨材最大寸法 (mm)	水粉体比 (%)	容積 (ℓ / m³)					分離低減剤 (kg / m³)	スランプフロ (cm)	40cmフロ 時間*11 (s)
				水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材			
NK	砕石*1	20	46	175	120	—	355	300	0.5*9	61.5	2.6
TK	砕石*1	20	32	170	175*5	—	314	300	—	60.5	1.5
MK	砕石*1	20	34	170	71	95*6	327	296	—	55.5	2.0
TS	砕石*2	20	34	170	76	99*7	295	320	1.0*10	56.5	1.4
CS30	砕石*3	15	30	170	90	98*8	297	300	—	66.5	1.1
CS25	砕石*3	15	25	170	108	117*8	260	300	—	64.0	3.4
CS30'	砕石*3	15	30	163	86	93*8	283	330	—	71.5	2.0
RG30	川砂利*4	15	30	170	90	98*8	297	300	—	65.5	1.9
RG25	川砂利*4	15	25	170	108	117*8	260	300	—	66.0	2.5
RG30'	川砂利*4	15	30	163	86	93*8	283	330	—	67.0	2.1

*1 実積率 61%, *2 実積率 60%, *3 実積率 59%, *4 実積率 64%
 *5 高炉セメントB種, *6 高炉スラグ微粉末 (6000cm³/g)
 *7 高炉スラグ微粉末 (55ℓ / m³, 4450cm³/g) + フライアッシュ (44ℓ / m³, 3010cm³/g), *8 高炉スラグ微粉末 (4450cm³/g)
 *9 セルロース系, *10 多糖類系, *11 スランプフローの広がり40cmに到達する時間

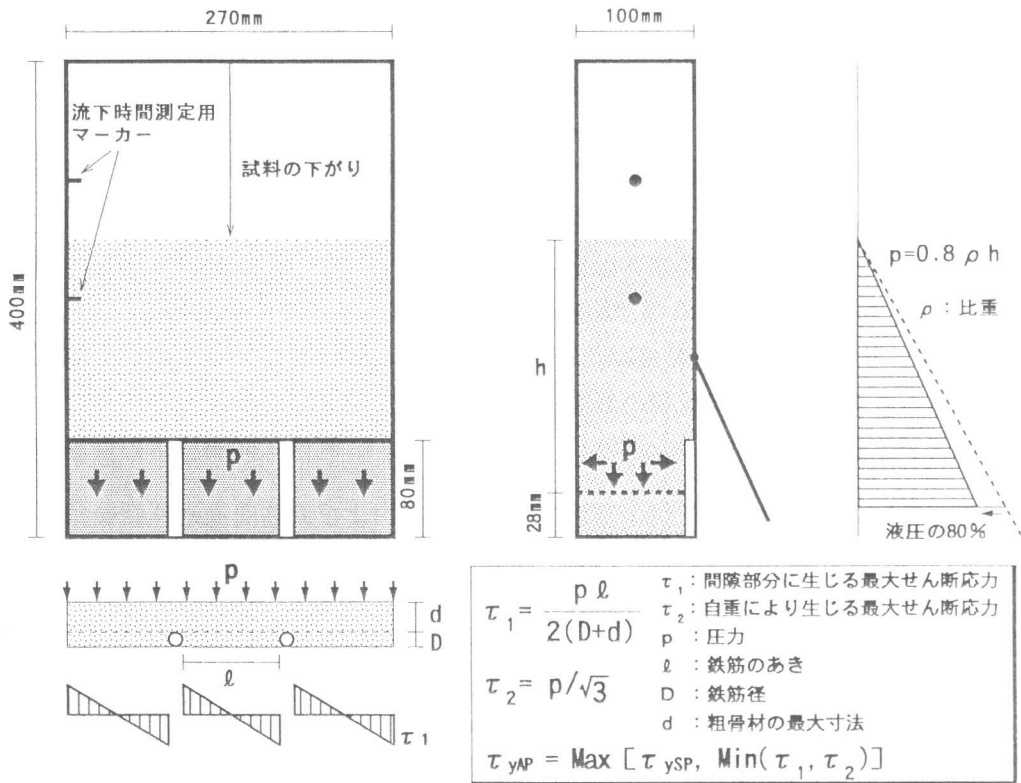


図2. 鉄筋間通過性試験装置およびコンクリートに生じる最大せん断応力

の傾きを見掛け上の塑性粘度として算出した。ただし、鉄筋間隔が270mmの場合には、間隙の開口径率は100%であり、粗骨材の最大寸法に対して鉄筋相互のあきは十分に確保されているため、(5)式に示すように流下速度に対して間隙の影響は全くないものと仮定した。

$$\eta_{270} = \eta_{SP} \quad (5)$$

η_{270} : 間隙通過時 (鉄筋間隔270mm) の見掛け上の塑性粘度
 η_{SP} : コンクリート本来の塑性粘度

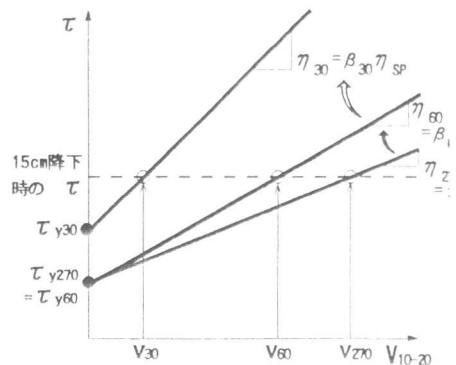


図3. 塑性粘度の算出方法

3. 研究結果および考察

3.1 実験結果およびコンクリート本来の降伏値・塑性粘度

高流動コンクリートの間隙通過時の降伏値・塑性粘度の見掛け上の増大を算出するためには、コンクリート本来の降伏値・塑性粘度を求める必要がある。ここでは、既往の研究[7]に従い、スランプフローおよびスランプフロー時間を元に、コンクリート本来の降伏値・塑性粘度を算出した。コンクリート本来の降伏値・塑性粘度および鉄筋間通過性試験結果を表2に示す。

3.2 見掛け上の降伏値・塑性粘度

間隙通過性の流動解析においては、①間隙の寸法・形状をそのまま境界条件として考慮し、間隙近傍のコンクリートの降伏値・塑性粘度を増大させる手法、②間隙の寸法・形状の影響をコンクリートの降伏値・塑性粘度の増大量に加味する手法とが考えられる。手法①に基づき、間隙近傍に存在するコンクリートの見掛け上の降伏値を(4)式により算出した結果を図4.1および図4.2に示す。また、手法②に基づき、開口部の鉄筋の有無にかかわらず開口部に鉄筋は存在しないものと仮定(鉄筋相互のあき270mm)して、(4)式により見掛け上の降伏値を算出した結果を図5.1および図5.2に示す。いずれの場合においても、鉄筋相互のあきが60mm以上の範囲では、見掛け上の降伏値はコンクリート本来の降伏値と大差ない。しかしながら、鉄筋相互のあきが60mmを下回ると、見掛け上の降伏値は急激に増大する傾向が認められる。また、図4.2および図5.2より、粗骨材の実積率が小さい、粗骨材量が多い、マトリックスモルタルの水粉体比が大きいコンクリートの方が、鉄筋間隔の減少に伴う見掛け上の降伏値の増大率は大きく、特に鉄筋相互のあきが小さい場合には粗骨材の実積率(形状)の影響が大きい。

上記手法②に基づき、見掛け上の塑性粘度の増大を図3に示す方法で算出した結果を図6.1および図6.2に示す。見掛け上の塑性粘度は、開口面積の減少により、130mmの鉄筋間隔においても増大傾向が認められる。また、降伏値の場合と同様に、鉄筋間隔が60mm以下の範囲において見掛け上の塑性粘度が急激に増大するコンクリートが存在する。これは、60mm以下の鉄筋間隔の範囲

表2. コンクリートの降伏値・塑性粘度の推定値および鉄筋間通過性試験結果

記号	降伏値*1 (Pa)	塑性粘度*2 (Pa·s)	鉄筋間隔 (mm)	通過率 (%)	10-20cm流下 速度 (cm/s)	記号	降伏値*1 (Pa)	塑性粘度*2 (Pa·s)	鉄筋間隔 (mm)	通過率 (%)	10-20cm流下 速度 (cm/s)
NK	239	291	25	8	-	MK	298	185	25	3	-
			30	9	-				30	4	-
			38	31	-				38	15	-
			46	80	-				46	74	1.0
			60	90	5.1				60	90	17.5
			130	93	9.6				130	90	32.3
270	93	13.9	270	90	25.6						
TK	251	167	25	29	-	TS	284	133	25	6	-
			30	70	3.0				30	10	-
			38	89	7.4				38	15	-
			46	88	-				46	80	6.9
			60	91	11.0				60	90	14.1
			130	93	27.8				130	90	29.4
270	93	50.0	270	90	128.1						
CS30	207	141	38	33	-	RG30	214	239	38	76	0.8
			46	76	1.0				46	85	2.3
			60	85	2.3				60	88	9.1
CS25	225	415	38	39	-	RG25	212	320	38	82	0.8
			46	78	0.5				46	85	1.2
			60	82	0.8				60	90	2.0
CS30'	180	280	38	33	-	RG30'	206	273	38	72	0.3
			46	82	0.1				46	80	0.9
			60	87	0.9				60	89	4.0

*1 スランプフローよりの降伏値(τ_{YSP})の算出は下式[7]によった。

$$\tau_{YSP} = 4 \cdot \rho \cdot G \cdot Vol. / (\sqrt{3} \cdot \pi \cdot Sf. ^2)$$

ρ : コンクリートの密度 (kg/m³)
 G : 重力加速度 (=9.8067m/s²)
 $Vol.$: スランプコーンの容積 (m³)
 $Sf.$: スランプフロー (mm)

*2 スランプフロー時間よりの塑性粘度(η_{SP})の算出は下式[7]によった。

$$\eta_{SP} = \frac{7 \cdot \rho \cdot G \cdot D^2 \cdot H \cdot (Sf. ^2 - D^2) \cdot (Sf. ^2 - Sf. ^2)}{7200 \cdot Sf. ^4 \cdot (Sf. ^2 - D^2)} \cdot tsf.$$

D : スランプコーンの底面の直径(mm)
 H : 初めの高さ(cm)
 $Sf.$: スランプフロー値(mm)
 $tsf.$: スランプフローが $Sf.$ に到達する時間(s)

で間隙通過時の粗骨材の相互干渉が急増することを示している。

3.3 間隙通過性の指標値

高流動コンクリートの間隙通過性に及ぼす間隙の寸法・形状の影響と粗骨材の寸法・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間隙比を定義する。

$$\text{間隙比} = O_p \cdot l / (d \cdot V_G) \quad (6)$$

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

間隙比の逆数は、コンクリート試料の間隙の通過し難さを示す指標と考えられ、図7および図8に示すように、間隙比の逆数の増加に伴い、見掛け上の降伏値および塑性粘度の増加率を表す α 、 β も増大する傾向を示している。特に、降伏値に関しては、間隙比の逆数が0.25近傍において、ほとんどのコンクリートで見掛け上の降伏値が急激に増大しており、このことは閉塞の生じる間隙比の閾値が存在することを示していると考えられる。ただし、図7および図8に示されるように、間隙比の逆数と α 、 β との関係は、コンクリートの種類に関わらず一定ではなく、 α 、 β の増大傾向にはマトリックスモルタルの性能が影響していると考えられ、間隙比の小さな範囲においても α 、 β の小さな高流動コンクリートほど間隙通過性が優れているといえる。

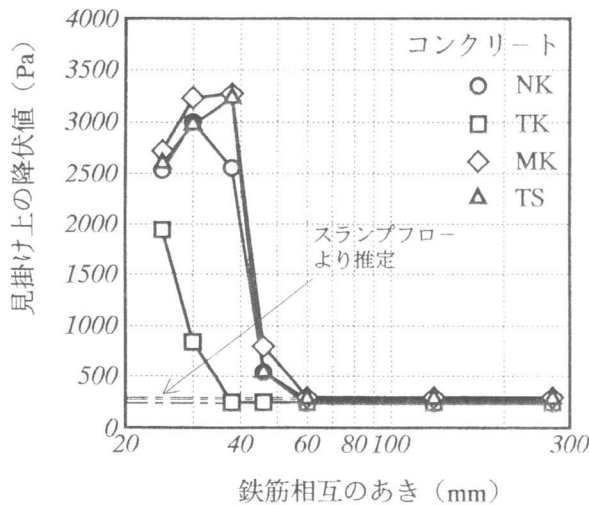


図 4.1 見掛け上の降伏値 (手法①)

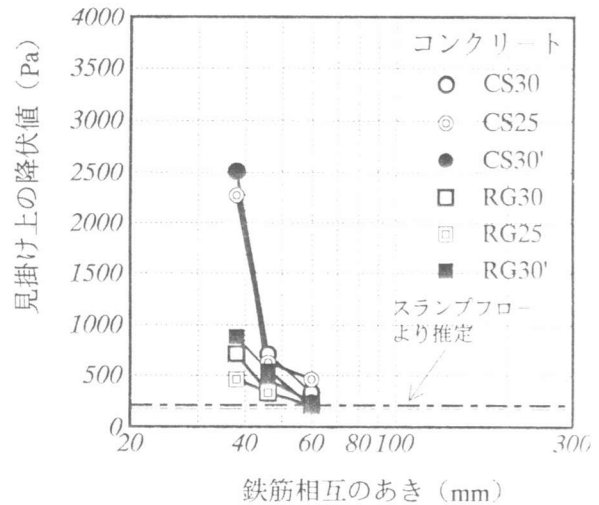


図 4.2 見掛け上の降伏値 (手法①)

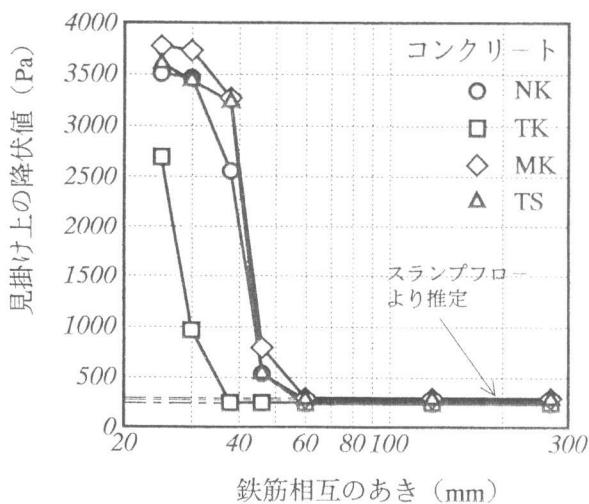


図 5.1 見掛け上の降伏値 (手法②)

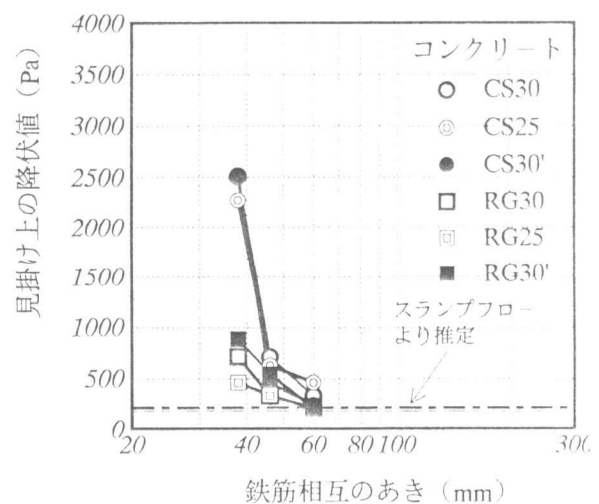


図 5.2 見掛け上の降伏値 (手法②)

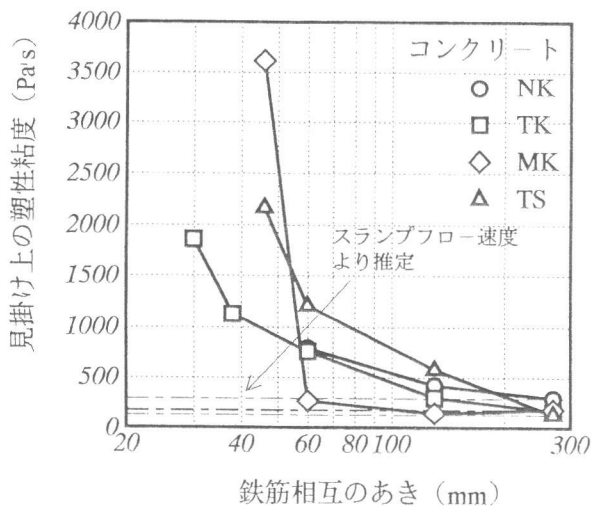


図 6.1 見掛け上の塑性粘度 (手法②)

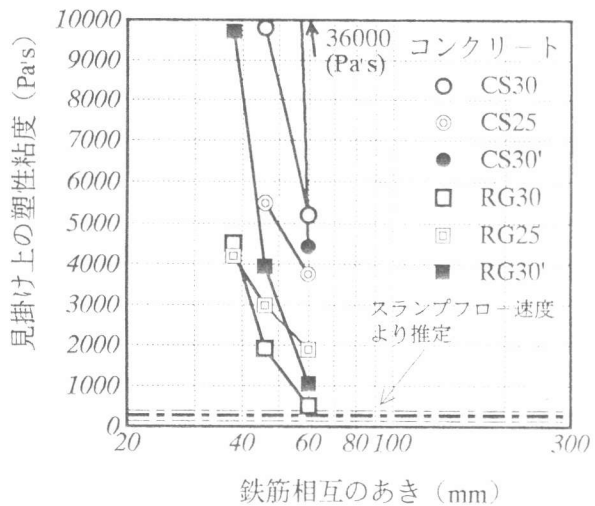


図 6.2 見掛け上の塑性粘度 (手法②)

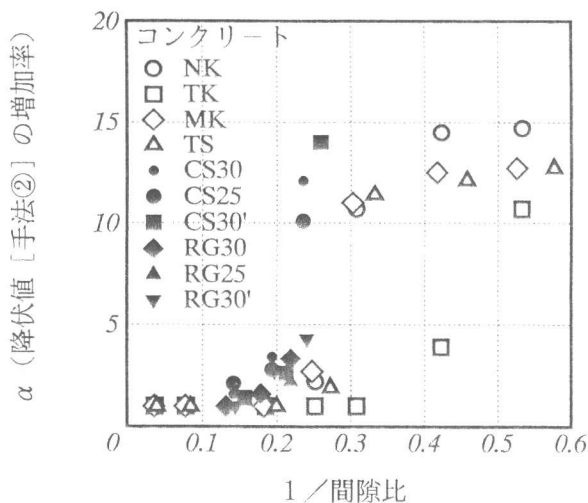


図 7 間隙比と α (降伏値の増加率) との関係

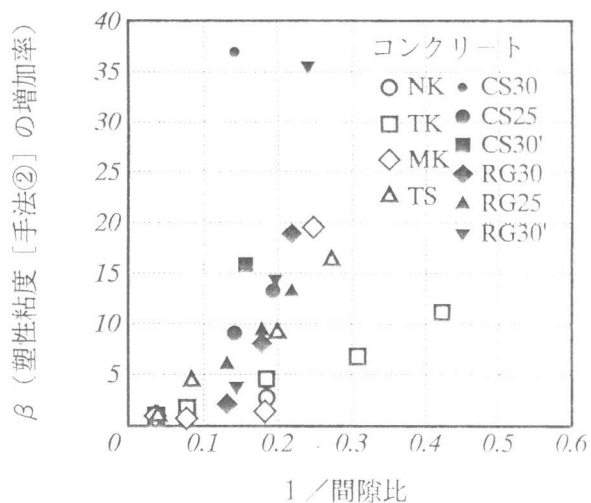


図 8 間隙比と β (塑性粘度の増加率) との関係

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流動速度の低下および閉塞現象を、レオロジー特性の見掛け上の変化として表す手法を提案した。また、間隙通過性を示す指標値として、間隙の寸法・形状および粗骨材の量・寸法・形状を考慮した「間隙比の逆数」を提案し、間隙比の逆数の増大に伴いコンクリートの見掛けの降伏値・塑性粘度が増大することを示した。

参考文献

- [1] 森博嗣, 谷川恭雄:フレッシュコンクリートの流動解析技術の現状, コンクリート工学, Vol.32, No.12, pp.30-40, 1994
- [2] 森博嗣, 谷川恭雄:フレッシュコンクリートの各種コンシステンシー試験方法に関するレオロジー的考察, 日本建築学会構造系論文報告集, No.377, pp.16-26, 1987
- [3] 和泉意図志, 友澤史紀, 清水昭之, 野口貴文, 浜田勝, 小野山貫造, 佐原晴也:各種高流動コンクリートの特性評価及び実大模型打設実験(その5 実大模型打設実験のフレッシュコンクリートの品質), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), A, pp.1153-1154, 1993
- [4] 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レオロジー的考察, 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] 坂本淳, 松岡康訓, 新藤竹文, S.Tangtermsirikul:超流動コンクリートの実構造物への適用に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, pp.881-886, 1991
- [6] 早川光敬, 友澤史紀, 清水昭之, 浜田勝, 小野山貫造, 杉木貢, 下山善秀:各種高流動コンクリートの特性評価及び実大模型打設実験(その6 実大模型打設実験の施工性, 流動性・充填性の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), A, pp.1155-1156, 1993
- [7] 小村理恵, 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸, 蔡 英:フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関する研究(その1:レオロジー定数の推定方法), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), A, pp.519-520, 1994