

論文 高流動コンクリートの自己充填性に及ぼす粉体量・粗骨材量の影響

坂本淳*1・横井謙二*1・新藤竹文*2

要旨：高流動コンクリートの体系的な配合設計手法を検討することを目的に、単位粉体量と単位粗骨材量を配合要因とし、自己充填性と配筋間隔の関係について実験的検討を行った。実験の結果、併用系配合（単位粗骨材量 300 l/m^3 ）において良好な自己充填性を得るために必要な単位粉体量は、純間隔 35mm の配筋条件では 550kg/m^3 、純間隔 $60\sim 84\text{mm}$ の場合は 350kg/m^3 以上であった。また、純間隔 35mm の配筋条件に対し、良好な自己充填性を有する併用系配合（モルタル中の細骨材容積比=0.48 一定）の単位粗骨材容積の上限は $300\sim 330 \text{ l/m}^3$ 程度、純間隔 60mm で 360 l/m^3 程度、純間隔 84mm で $360\sim 390 \text{ l/m}^3$ 程度であることが確認された。

キーワード：高流動コンクリート、自己充填性、配筋間隔、単位粉体量、単位粗骨材量

1. はじめに

高流動コンクリートの配合設計は、対象とする構造物の構造条件、施工条件、および施工完了後に構造物がおかれる環境条件等を適切に考慮して行う必要がある。同コンクリートは自己充填性を有していることを最大の特徴とすることから、鉄筋のあき、鉄筋間隔、鋼材量等で表わされる配筋条件とコンクリートに必要とされる自己充填性との関係を定量的に配合設計へ反映させることは特に重要であるが、このような配合設計手法は未だ確立されていない。

著者等は、上記の高流動コンクリートの体系的な配合設計手法を検討することを目的に、自己充填性とモルタルのレオロジー特性との関連性等について報告してきた¹⁾。

本研究は、単位粉体量と単位粗骨材量を配合要因とした高流動コンクリートについて、自己充填性と配筋間隔の関係について検討したものである。

2. 性能評価実験

鉄筋のような障害を高流動コンクリートが通過する際に生じる粗骨材のアーチング現象は、当然のことながら、粗骨材の容積が多くなるにしたがい起こり易くなるだけでなく、粗骨材を取り巻く

モルタルの性状によっても影響を受ける。すなわち、同コンクリートの自己充填性を支配する要因は、大きく以下の2つに集約されるものと考えられる。一つは、粗骨材同士の物理的な噛み合いであるアーチング作用であり、他の一つは、自重だけで変形する性能（流動性）と粗骨材が分離しない性能（分離抵抗性）との複合特性である。

本研究は、自己充填性に影響を及ぼすこれら2つの要因について、粗骨材単体量と単位粉体量を検討要因として、配筋条件と自己充填性の相関を定量的に評価した。

2.1 評価方法

(1) 流動特性の評価

コンクリートの流動特性は、スランプフロー試験²⁾により評価した。

(2) レオロジー特性の評価

コンクリートの流動性の測定と合わせて、フレッシュコンクリートを 5mm メッシュのふるいによりウェットスクリーニングしたモルタルのレオロジー定数（塑性粘度、降伏値）を測定した。

測定は、外筒回転式回転粘度計により、回転数を 0 から 50rpm まで 2 分間で変化させる条件で行ない、レオロジー定数は、角速度と内筒に加わるトルク値とのレオロジー曲線をもとに塑性粘度

*1 大成建設（株）技術研究所 研究員 工修（正会員）

*2 大成建設（株）技術研究所 主任研究員 工博（正会員）

(η) および降伏値 (τ) を算出した¹⁾。

(3) 自己充填性の評価

自己充填性の評価は、U型充填試験²⁾および台形充填試験³⁾の2種類の充填試験により行なった。

両試験の配筋(障害)条件は、表一に示すとおりで、鉄筋の純間隔と鉄筋径を考慮した相対間隔³⁾がほぼ同等となるように配置した。ここで、鉄筋の相対間隔Lは(1)式による。

$$L = L_0^2 / (L_0 + \phi) \quad (1)$$

(L_0 : 鉄筋純間隔, ϕ : 鉄筋径)

なお、台形充填試験では流動方向が鉄筋に対して縦横2方向から流動することから、鉄筋径 ϕ は鉄筋のリップを含めた径を用いた。U型充填試験では流動方向が一方方向で、かつ、鉄筋のリップを流動方向に対して平行に設置していることから有効径をそのまま用いた。

① U型充填試験

本試験は、図一に示す試験装置を用いて、コンクリートが流動障害を通過しながらA室から反対側のB室に流動し、流動が停止した時のB室の充填高さ U_h を測定するものである。この充填高さが大きいほど良好な自己充填性を有すると評価でき、充填高さの差によって自己充填性の良否を定量的に評価できる。本研究では、各ケース毎に充填高さが最も良好となる配合を選定した。

② 台形充填試験³⁾

本試験装置は、図二に示す異形棒鋼を水平に多段配筋した流動障害を有する構造である。

試験では、コンクリート試料を一定速度 (20 l/min.) で流し込み、流動勾配を一定の時間間隔で計測した。本研究では、この流動勾配を基に充填性ランクを以下のように分類した。

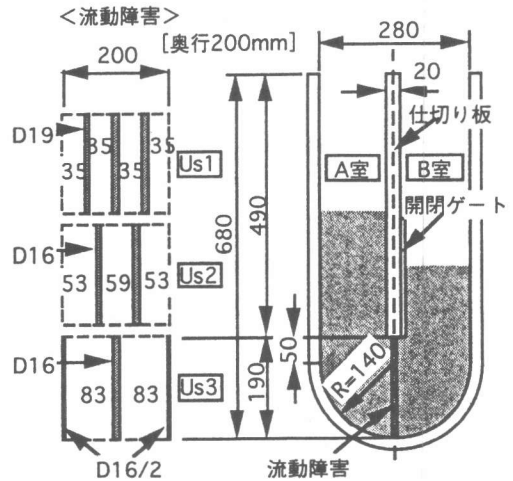
Aランク: 流動障害の影響をほとんど受けることなく流動する状態 (流動勾配=5/10以下)

Bランク: 流動障害部の間隙を通過するが、大きな流動勾配で流動する状態 (流動勾配=5/10~15/10)

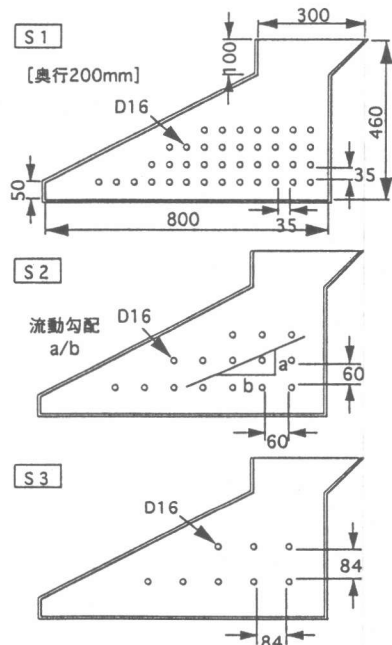
Cランク: 流動障害部の間隙通過性が低く、流動障害をオーバーフローする状態 (流動勾配=20/10以上), もしくは、未充填部が残存する場合

表一 充填試験における配筋条件 (単位:mm)

試験装置	配筋条件			
	S1,Us1	S2,Us2	S3,Us3	
台形	純間隔 L_0	35	60	84
	鉄筋径 ϕ (公称)	18(D16)	18(D16)	18(D16)
	相対間隔L	23	46	69
U型	純間隔 L_0	35	59,53	83
	鉄筋径 ϕ (公称)	20(D19), 10(D19/2)	17(D16), 8(D16/2)	17(D16)
	平均相対間隔L	25	46	69



図一 U型充填試験装置



図二 台形充填試験装置

Dランク：流動障害部で閉塞し、それ以上流動しない状態

2.2 検討ケース

対象とした高流動コンクリートの配合および使用材料の品質をそれぞれ表—2、表—3に示す。なお、空気量の設計値は4.5%とした。

(1) シリーズI

シリーズIは、普通ポルトランドセメントと石灰石微粉末の混合粉体を用いた併用系高流動コンクリートを対象とし、単位粉体量の違いが自己充填性に及ぼす影響を評価した。

各々の配合は単位水量、単位粗骨材量を一定として、単位粉体量の増加(350~550kg/m³)に合わせて単位細骨材量を減じた配合であり、充填高さが最大となるように高性能AE減水剤の添加量を調整して選定した。なお、単位粗骨材容積は既往の知見⁴⁾から過密な配筋においても良好な自己充填性が得られると考えられる300ℓ/m³とした。

(2) シリーズII

シリーズIIでは、普通ポルトランドセメント、

高炉スラグ微粉末、フライアッシュをブレミックスした3成分系混合セメントを用いた併用系高流動コンクリートを対象とし、単位粗骨材容積の違いが自己充填性に及ぼす影響を評価した。

各ケースの配合は、モルタル中の細骨材容積の比率(s/m)を一定(0.48)として、単位粗骨材容積の増加に合わせてモルタル量を減じた配合である。各々の配合は、充填高さが最大となるように高性能AE減水剤の添加量を調整して選定した。

3. 自己充填性の評価

3.1 自己充填性に及ぼす単位粉体量の影響(シリーズI)

(1) フレッシュコンクリートの性状

C-1~C-3におけるコンクリートのスランプフロー、レオロジー定数、充填高さを図—3に示す。なお、U型充填試験には配筋間隔35mmの配筋条件(Us1)を用いた。

単位粉体量の減少に伴い、充填高さが最大となる時のスランプフロー値は小さくなり、C-1(P=

表—2 配合表

シリーズ*	配合ケース	W/P (%)	単位粗骨材容積 (ℓ/m ³)	単体量 (kg/m ³)						SP (P*%)	BP (W*%)
				W	P			S	G		
					O	OB	LS				
I	C-1	47.0	300	165	350	-	0	982	793	2.30	0.303
	C-2	37.0					100	884		2.00	
	C-3	30.0					200	788		1.80	
II	C-4	32.0	300	160	-	-	500	822	797	1.70	0.625
	C-5	33.1	330	155			470	786	876	1.65	
	C-6	33.7	360	149			445	746	956	1.60	
	C-7	34.3	390	143			417	710	1035	1.55	

表—3 使用材料

種別	記号	名称	比重	特性・主成分	使用シリーズ*
粉体(P)	O	普通	3.15	比表面積=3270cm ² /g	I
	OB	三成分系混合セメント	2.78	普通ポルトランドセメント(35%),高炉スラグ微粉末(45%) フライアッシュ(20%),比表面積=3980cm ² /g	II
	LS	石灰石微粉末	2.70	比表面積=3000cm ² /g	I
細骨材	S	木更津・大井川産混合砂	2.59	粗粒率=2.64	I
			2.61	粗粒率=2.62	II
粗骨材	G	青梅産砕石	2.65	粗粒率=6.70,実積率=60.3%	I, II
混和材料	Sp	高性能AE減水剤	1.05	*リカルボン酸エーテル系と架橋*リマーの複合体	I, II
	Bp	分離低減剤	-	水不溶性多糖類*リマー(β-1,3*ルカン)	I, II

350kg/m³)では55cm程度であった。また、単位粉体量が少ない配合ほどモルタルの塑性粘度は減少した。

なお、本シリーズにおいては、モルタルの降伏値が増加するにつれ、コンクリートのスランプフロー値は増加する傾向にあったが、これは、以下の理由に因るものと思われる。本実験では単位粉体量の少ない配合ほど水粉体比が高くなっているため、モルタルの降伏値は低くなる傾向にある。一方、骨材量が多くなることから、骨材の相対間隔が狭くなり、骨材相互の摩擦抵抗が大きくなるため、コンクリートの変形性を低下させているものと考えられる。

充填高さ U_h は C-3 ($P=550\text{kg/m}^3$) が 36cm と最も高く、粉体量の減少とともに充填高さは低くなり、C-1 では $U_h=30\text{cm}$ であった。このように、単位粉体量が少ない配合ほど、同一配筋条件での自己充填性は低下する傾向にあった。

(2) 台形充填試験による自己充填性の評価

台形充填試験の各配筋条件毎の充填状況を打込み開始から 20 秒毎の充填位置として図-4 に示す。また、同図から 20 秒～100 秒時点の各流動勾配を平均して求めた平均流動勾配と単位粉体量の関係を図-5 に示す。

最も過密な配筋条件 S1 の場合、C-3 の流動勾配は 5/10 以下と緩やかであり円滑に充填したが、単位粉体量の減少とともに流動勾配は大きくなり、

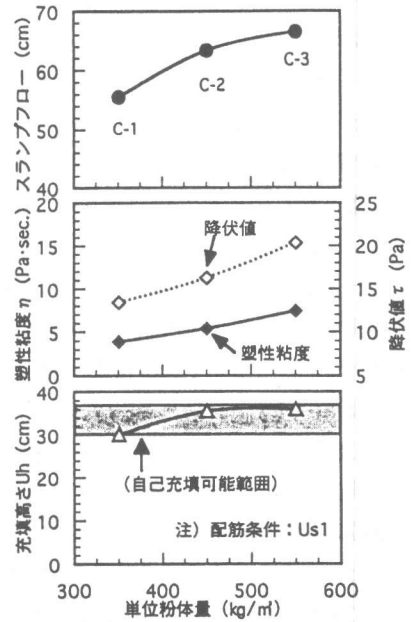


図-3 フルッシュコンクリートの試験結果(シリーズ I)

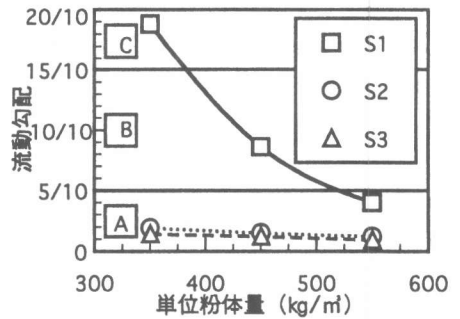


図-5 単位粉体量と流動勾配の関係

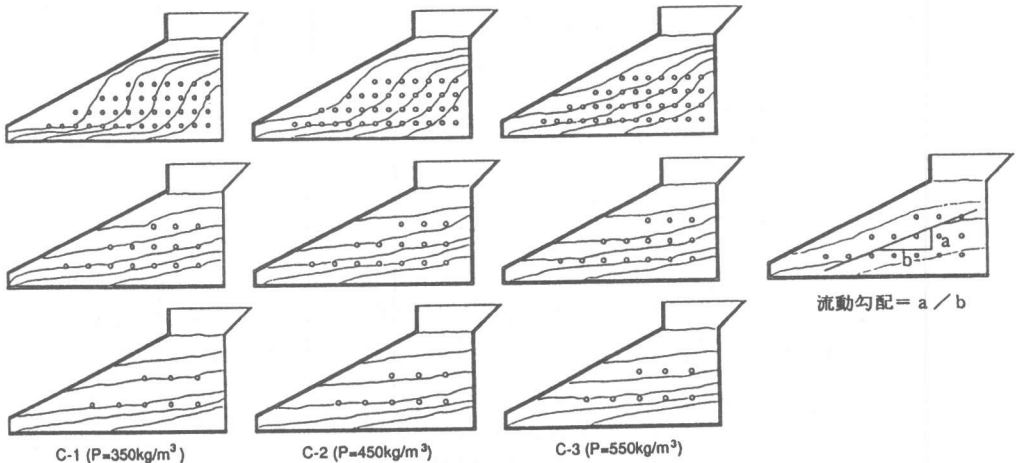


図-4 シリーズ I における台形充填試験状況

充填性ランクは順に低下した。

一方、配筋条件 S2 ならびに S3 の場合、単位粉体量にかかわらず流動勾配は 1/10~2/10 であり、いずれも良好な自己充填性を示した。

これらの結果は、以下の理由によるものと考えられる。単位粉体量の減少に伴って、モルタル中の細骨材の噛み合いは大きくなる。このため、流動障害部での骨材の噛み合いが著しくなり、配筋間隔が狭い条件ほど間隙の通過速度が遅くなり、流動勾配が大きくなるものと考えられる。

以上の結果から、併用系配合で単位粗骨材量が 300 l/m³ の場合に良好な自己充填性を得る単位粉体量は配筋条件 Us1, S1 (純間隔 Lo=35mm) で 550kg/m³ (容積にして 180 l/m³程度)、配筋条件 S2 ならびに S3 (Lo=60~84mm) では 350kg/m³ (110 l/m³) 程度でも自己充填性が確保できるといえる。

3.2 自己充填性に及ぼす単位粗骨材量の影響 (シリーズ II)

(1) フレッシュコンクリートの性状

配合 C-4~C-7 におけるフレッシュコンクリートの試験結果を図-6 に示す。

s/m を 0.48 と一定とした場合、同図に示すように単位粗骨材容積の増加に伴い、充填高さが最大となる時のスランプフロー値は 68cm から 58cm へと順に小さくなった。また、モルタルのレオロジー定数にはほとんど変化がみられなかった。このことから、モルタルのレオロジー特性がほぼ等しい場合、単位粗骨材量が多い配合ほど骨材の相対間隔が狭くなり、骨材相互の摩擦抵抗が増大するため変形量が小さくなる傾向にあると考えられる。

(2) U型充填試験による自己充填性の評価

各配筋条件毎の単位粗骨材容積と充填高さの関係を図-7 に示す。

最も過密な配筋条件 Us1 の場合、充填高さは単位粗骨材容積の増加と共に最大の 36.5cm から閉塞 (0cm) へと顕著に低下した。特に、単位粗骨材容積 390 l/m³ では流動障害部で完全に閉塞しており、粗骨材のアーチング作用が顕著となった。また、配筋条件 Us2 ならびに Us3 では、いずれの配合とも Uh=30cm 以上の範囲であったが、Us1

と同様に単位粗骨材容積の増加と共に充填高さは低下しており、流動する際の骨材相互の摩擦抵抗が増大しているものと考えられる。

(3) 台形充填試験による自己充填性の評価

図-5 と同様に、台形充填試験における 20 秒~100 秒の時点の各流動勾配を平均して求めた平均流動勾配と単位粉体容積の関係を図-8 に示す。

配筋条件 S1 の場合、単位粗骨材容積 300 l/m³ では流動勾配は 5/10 以下と緩やかであり円滑な自己充填性を示すが、単位粗骨材容積の増加とともに流動勾配が顕著に大きくなり、充填性ランクは順に低下した。これは、単位粗骨材量が多い配合ほど骨材の相対間隔が狭くなり、流動障害部での

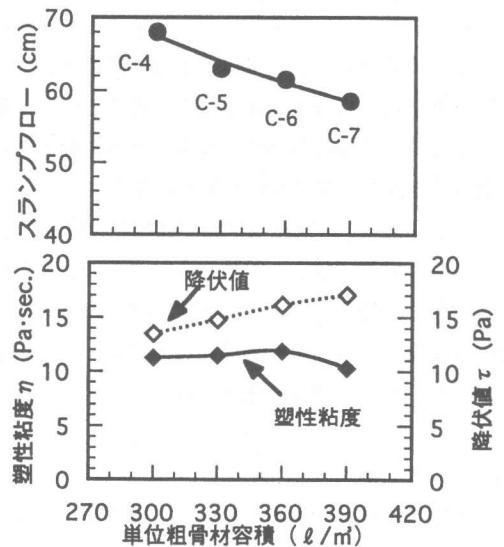


図-6 フレッシュコンクリートの試験結果(シリーズ II)

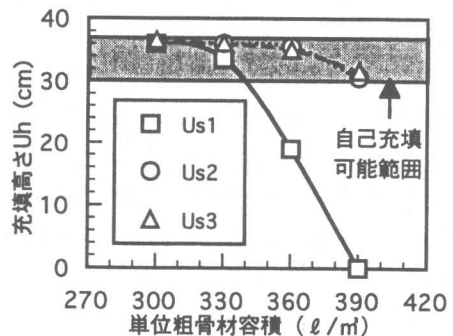


図-7 単位粗骨材容積と充填高さの関係

骨材間の摩擦抵抗が増大することによるものと考えられる。一方、配筋条件 S2, S3 の場合、すべての配合で流動勾配が 1/10~3/10 程度と緩やかであり、良好な自己充填性を示した。ただし、単位粗骨材容積 390 l/m³ では、配筋条件 S2 の打込み完了時に、台形斜面上に未充填部が残存していた。

以上の結果から、s/m=0.48 とした併用系配合において配筋条件 Us1,S1 (純間隔 Lo=35mm) で良好な自己充填性を有する単位粗骨材容積の上限は、300~330 l/m³ 程度と評価できる。同様に、配筋条件 Us2,S2 では 360 l/m³ 程度、Us3,S3 (Lo=60~84mm) では 360~390 l/m³ 程度と評価できる。

(4) 両充填試験の比較

U型充填試験における充填高さと同形充填試験における流動勾配との関係を図-9 に示す。ここでは、シリーズ I の結果についても併せて示した。

U型充填試験においては、どの配筋条件においても充填高さに有意な差がみられることから、粉体量や粗骨材量の相違に伴う自己充填性能への影響の度合が、明確に評価されていると考えられる。

これに対し、台形充填試験では配筋条件 S2, S3 での評価結果にほとんど差がみられないことから、両試験を比較すると、U型充填試験を用いた方が配筋間隔が比較的広い場合においても、より定量的に自己充填性能を評価できるものと思われる。

4. まとめ

本研究では、配筋条件に応じた高流動コンクリートの合理的な配合設計を行なうため、2つの配合要因について自己充填性と配筋間隔の関係を検討した。その結果、本研究の範囲内において以下の知見が得られた。

(1) 単位粗骨材量 300 l/m³ の併用系配合において、良好な自己充填性を得るために必要な単位粉体量は、配筋条件 Us1,S1 (純間隔 Lo=35mm) で 550kg/m³ (容積=180 l/m³ 程度)、配筋条件 S2 ならびに S3 (Lo=60~84mm) で 350kg/m³ (110 l/m³) 以上である。

(2) s/m=0.48 の併用系配合において、配筋条件

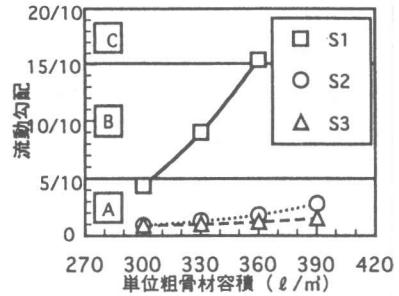


図-8 単位粗骨材容積と流動勾配の関係

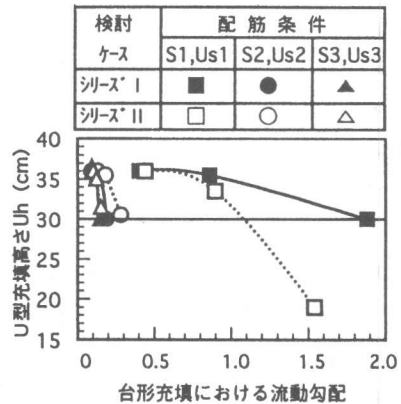


図-9 流動勾配とU型充填高さの関係

Us1,S1 で良好な自己充填性を有する単位粗骨材容積の上限は 300~330 l/m³ 程度、配筋条件 Us2,S2 (純間隔 60mm) で 360 l/m³ 程度、Us3,S3 (純間隔 84mm) で 360~390 l/m³ 程度である。

参考文献

- 1) 新藤竹文ほか：高流動コンクリートの自己充填性とモルタルのレオリジ-特性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.1, pp.99-104, 1996.6
- 2) 土木学会：高流動コンクリートに関する技術の現状と課題，コンクリート技術シリーズ No.15, pp.2-3,10-12, 1996.12
- 3) 岡村甫ほか：ハイパフォーマンスコンクリート，技報堂出版，1993.9
- 4) T.Shindoh, et.al.: Effect of Mix Constituents on Rheological Properties of Super Workable Concrete, International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete, p.263-270, 1996.