

論文

[1001] 高流動コンクリートの充填性に関する基礎的研究

正会員○藤原 浩己 (日本セメント中央研究所)
 正会員 下山 善秀 (日本セメント中央研究所)
 正会員 富田 六郎 (日本セメント中央研究所)
 久保田裕康 (日本セメント中央研究所)

1. まえがき

近年、建設現場やコンクリート製品工場においては、現場作業員の不足や高齢化からコンクリート作業の省力化が望まれている。また、コンクリート作業に伴う振動機の使用は騒音をもたらす、作業環境の悪化や近隣に対する配慮からの作業時間の制約などの原因になっている。

このような情勢から、これまでに一般的に用いられていた軟練りコンクリート（スランプ約18～20cm）より、さらに軟らかくして（スランプ25cm以上）流動性を高め、振動を加えなくても型枠の隅々まで詰る、いわゆる自己充填性をもつ高流動コンクリートを実用化しようとする研究開発の動きが活発化している。

高流動コンクリートを得るための1つの基本的なコンセプトは、流動化剤の高添加による高流動化技術と増粘剤等による材料分離抑制技術をバランス良く用いることにある。

本研究は高流動コンクリートが成立するためのフレッシュ状態における基礎的な性状を把握することを目的とした。実験はコンクリートをモルタルと粗骨材の2相系と考え、まずモルタル部分について増粘材量を変化させることによって変るレオロジー的性質（塑性粘度、降伏値）を把握した。次に、これらのモルタルと粗骨材の容積割合を、通常のコンクリートの配合範囲（細骨材率換算で48～60%）で変化させたコンクリートについて、流動性、不分離性および充填性を評価し、モルタルのレオロジー的性質と、粗骨材量の面からの解析を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメント：普通ポルトランドセメント（比重3.15）
 細骨材：瑞穂産砕砂（比重2.60、F.M.2.77）
 粗骨材：青梅産砕石（比重2.64、最大寸法20mm）
 高性能減水剤：776Nスルホン酸塩系高性能減水剤（以下SPと略）
 AE剤：アニオン系界面活性剤
 増粘材：ポリアクリルアミド系増粘剤を主成分とした混和材（以下HFと略）

2.2 配合条件

(1)モルタル部分

モルタルの材料組成を表-1に示す。これは基準としたコンクリート配合（単位結合材(セメント+HF)量450kg/m³、単位水量205kg/m³および細骨材率60%）から、モルタル部分を取り出したときの組成となっている。この組成のモルタルにHF（増粘材）をセメント重量に対して0から3.3%までの6水準（コンクリート配合で0～15kg/m³に相当）で混和した。またSP（高性能減水

剤)は結合材重量に対して3%、AE剤はコンクリートの空気量が4±1%となる0.033%添加した。

表-1 モルタル材料組成

重量構成比(%)			HF混和率 (対セメント重量%)	SP添加率(%)	AE剤添加率(%)
結合材	水	細骨材			
28.0	12.7	59.3	0, 0.88, 1.32, 1.76, 2.20, 3.30	3.0	0.033

(2)コンクリート

表-2 コンクリートの配合条件

表-2に配合条件を示す。この条件は基本的なモルタル組成(結合材、細骨材、水、高性能減水剤およびAE剤の構成割合)は変化させず、モルタルと粗骨材の容積割合を実用的な範囲(コンクリート中に占める粗骨材の体積濃度 X_v が0.245~0.345、 s/a に換算すると48.1~60%に相当)で変化させた。この場合の X_v は配合No. I、II、IIIの順に高い。HF混和率は、モルタルの場合と同様に、0~3.3%の6水準とした。

配合No	粗骨材 体積濃度	単位量(kg/m ³)				HF混和率(対 セメント重量%)	SP添加率	AE剤 添加率	水結合材 比	粗骨材 率(%)
		結合材	水	細骨材	粗骨材					
I	0.245	450	205	955	646	0, 0.88,	3 (%)	0.033 (%)	45.5 (%)	60.0
II	0.295	420	191	892	778	1.32, 1.76				53.8
III	0.345	390	178	829	910	2.20, 3.30				48.1

と粗骨材の容積割合を実用的な範囲(コンクリート中に占める粗骨材の体積濃度 X_v が0.245~0.345、 s/a に換算すると48.1~60%に相当)で変化させた。この場合の X_v は配合No. I、II、IIIの順に高い。HF混和率は、モルタルの場合と同様に、0~3.3%の6水準とした。

2.3 試験項目および方法

(1)モルタルのレオロジー特性の測定

HF混和量の増加に伴うモルタルの降伏値および塑性粘度の変化を、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評価試験

コンクリートの流動性はJIS A1101のスランプ試験法に準じて、そのコンクリートの広がりであるスランプフロー値を測定し評価した。

(3)コンクリートの不分離性評価試験

2リットルの容器に入れたコンクリートを、5mmふるいの上に静かにあけて5分間静置後にふるい通過モルタルの重量を測定し、次式で定義される分離指標値(SI)を算出して不分離性を評価した[1]。

$$SI = \frac{\text{ふるいから落下したモルタル重量}}{\text{2リットルのコンクリート中のモルタル重量}} \times 100(\%) \quad SI: \text{分離指標値(Segregation Index)}$$

(4)充填性評価試験

図-1に示す容器の左側いっぱいコンクリートを流し込み、ゲートを開いてコンクリートがゲート前の鉄筋の間をすり抜け、容器の右側に流れ込む動きが止った状態での容器右側と左側の高さの差より、圧力差を算出して充填性を評価した。

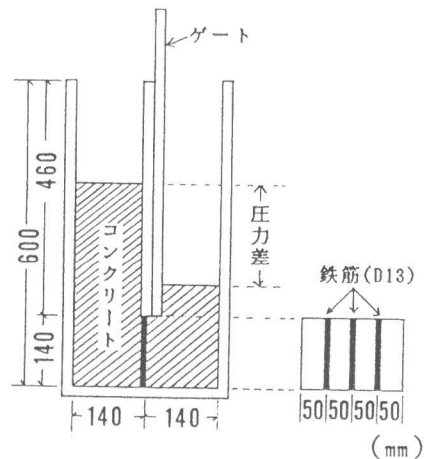


図-1 充填性試験方法

3. 実験結果および考察

3.1 モルタルのレオロジー特性の測定結果

図-2にHF混和率(P)とモルタルの塑性粘度 η_{p1} および降伏値 τ_f の関係を示す。この結果、HF混和率の増大に伴ってモルタルの η_{p1} 、 τ_f とも直線的に大きくなり、 τ_f は約0~0.6gf/cm²、 η_{p1} は約0.02~0.12gf·s/cm²の範囲で変化した。

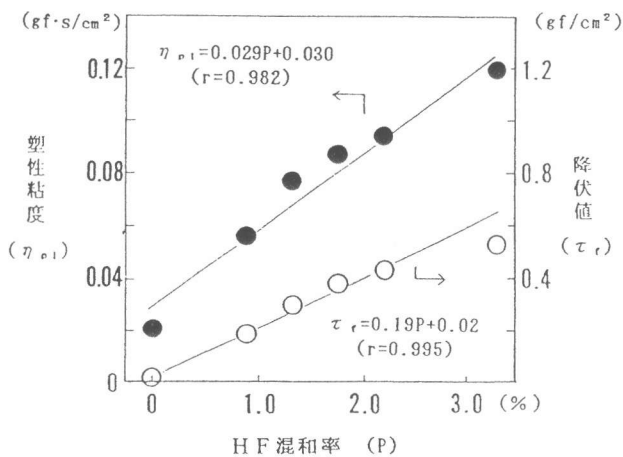


図-2 HF混和率とモルタルの塑性粘度および降伏値の関係

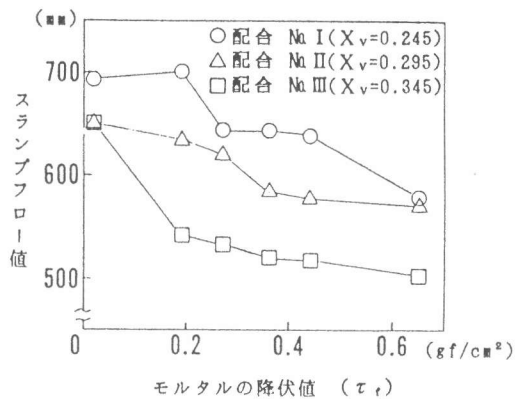


図-3 モルタルの降伏値とコンクリートのスランプフロー値の関係

3.2 流動性評価試験結果

図-3にモルタル部分の τ_f とコンクリートのスランプフロー値の関係を示す。これらの結果、コンクリートのスランプフロー値は全て高流動といえる500mm以上になっているが、モルタル τ_f の増大に伴って、また粗骨材体積濃度 X_v が大きくなるにつれてコンクリートのスランプフロー値が小さくなり流動性が低下しているが、これは一般にスランプフロー値はコンクリートの降伏値の影響を大きく受ける特性値であり、コンクリートの降伏値はモルタル部分の降伏値が大きい程、また粗骨材体積濃度が大きくなる程大きくなることが知られており[2][3]、今回の結果も従来傾向と一致している。

3.3 不分離性評価試験結果

図-4にモルタル部分の降伏値 τ_f と、コンクリートの分離指標値(SI)の関係を示す。各配合ともSIは τ_f が増大するに従い急激に減少し(図中実線部)、ある程度以上 τ_f が大きくなると0に近い値を推移する(図中点線部)。これは τ_f の増大に伴い粗骨材に付着拘束されるモルタルが多くなるためSIが減少するもので、 τ_f がある値(モルタルの全量が拘束される値)以上では試験動作に伴う若干のモルタルの落下以外モルタルは分離しない事を示すものと考えられる。

木村らは、不分離性試験において粗骨材に付着拘束されるモルタルの量を、そのモルタルのレオロジー特性等から算出することを試みている。すなわち粗骨材を半径 r の球と仮定し、コンクリート 1m^3 の単位粗骨材量 $G(\text{kg}/\text{m}^3)$ 中に半径 r の粗骨材が $a(r)\%$ 含まれている時、 $G(\text{kg}/\text{m}^3)$ 全体の球形の粒子に付着するモルタル重量 W_s は次式で表されるとしている[1]。

$$W_s = \sum_r \left\{ \frac{a(r)}{100} \cdot \frac{1000G}{4/3\pi r^3 \rho_g} \cdot \frac{10\pi r^2 \tau_f}{3} \right\} \quad \rho_g: \text{粗骨材の比重} \quad (1)$$

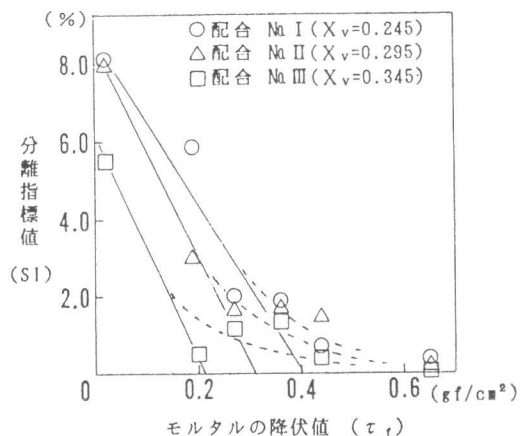


図-4 モルタルの降伏値とコンクリートの分離指標値の関係

この付着モルタル量が、コンクリート1m³中のモルタル量以上となった場合に分離が起こらなくなると考えられるが、実際には粗骨材は球ではなく、またその面も粗いため(1)式で理論計算された付着量よりも多くなる。そのため粗骨材形状および面の粗度に関しての補正が必要となる

日本コンクリート工学協会、フレッシュコンクリートの挙動研究委員会報告書によると、平滑な面に比べ、粗骨材表面程度の粗さを持った面の付着量は約1.97倍になることが報告されている[4]。また太田らによると同一体積の場合、碎石粗骨材の表面積は球の大略1.85倍になるとしている[5]。これらを考慮して(1)式から分離が起こらなくなるモルタルの降伏値 τ_{r0} を求めると(2)式が得られる。

$$\tau_{r0} = \frac{3Wmf}{1.85 \times 1.97 \times 10 \pi \sum_r \{n(r) \cdot r^2\}} \quad \begin{array}{l} Wmf: 1\text{ m}^3\text{中のモルタル重量} \\ n(r): \text{半径 } r \text{の粗骨材個数} \end{array} \quad (2)$$

本実験で使用した粗骨材の粒度分布より、5~10mm(全粗骨材の35%)を7.5mm、10~15mm(30%)を12.5mm、15~20mm(35%)を17.5mmの球に代表させ、コンクリート1m³中のそれぞれの個数およびモルタル重量を各配合条件毎に算出し、(2)式よりそれぞれの τ_{r0} を求めた値と、図-4から読み取れる分離指標値が0となる降伏値(τ_{rr} とする)の関係を図-5に示す。

これらの結果、計算値と実験値が比較的良好に一致しており、この方法によって、使用する粗骨材の粒度や配合からそのコンクリートが分離を起こさないためのモルタル降伏値がある程度推定できるものと考えられる。

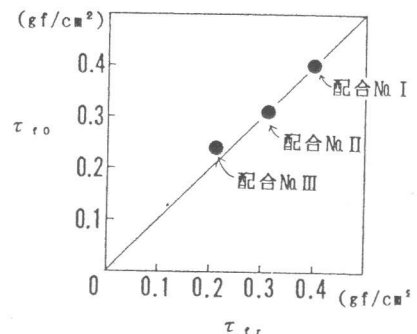


図-5 τ_{r0} と τ_{rr} の関係

3.4 充填性評価試験結果

モルタル部分の降伏値 τ_r と圧力差の関係を図-6に示す。この試験結果は圧力差20gf/cm²以下のほぼ鉄筋部を通過したものと、70gf/cm²以上の鉄筋部で閉塞した結果の2つに大別された。

すなわち、粗骨材体積濃度 X_v が0.245の配合No IにおいてはHF無混和の τ_r が最も小さい条件で閉塞した以外はコンクリートのほとんどが鉄筋部を通過し、 X_v が0.345の配合No IIIにおいては全ての条件で閉塞した。また、その中間の X_v が0.295である配合No IIにおいては τ_r が約0.4~0.6gf/cm²の条件においてのみ鉄筋部を通過し、その他の条件においては閉塞した。これらの閉塞現象については、 τ_r の小さい条件での閉塞と、大きい条件での閉塞ではその機構が異なるものと考えられる。すなわち、コンクリート中に粗骨材に付着拘束されないモルタルが存在する場合には、コンクリートをモルタルと粗骨材の2相系材料として扱い、全てのモルタルが付着拘束される場合には1相系の材料として扱う必要がある。以下にそれぞれの場合についての若干の考察を行う。

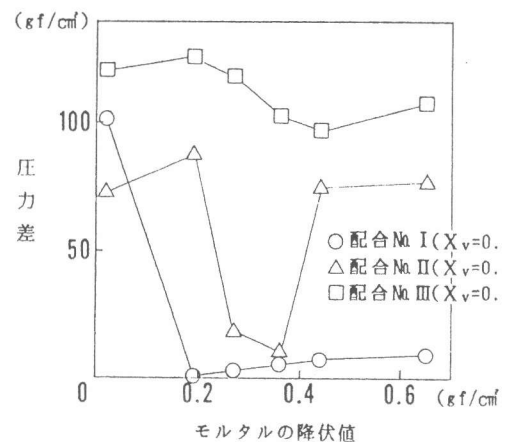


図-6 モルタルの降伏値と圧力差の関係

(1)モルタルの τ_f が小さい ($\tau_f < \tau_{f0}$) 条件

この場合、粗骨材はコンクリート中で分離沈降して粗骨材がたまるため鉄筋部で粗骨材の架橋現象が生じて閉塞するものと考えられる。この現象は粉体工学における粒状体の閉塞現象の考え方を導入して説明する事ができると考えられる。すなわち図-7に示すような底面に開口部を有する容器に、栓をした状態で粒状体を充填させた後に栓を抜いた場合、充填高さが低い場合(図中a)には閉塞せず、

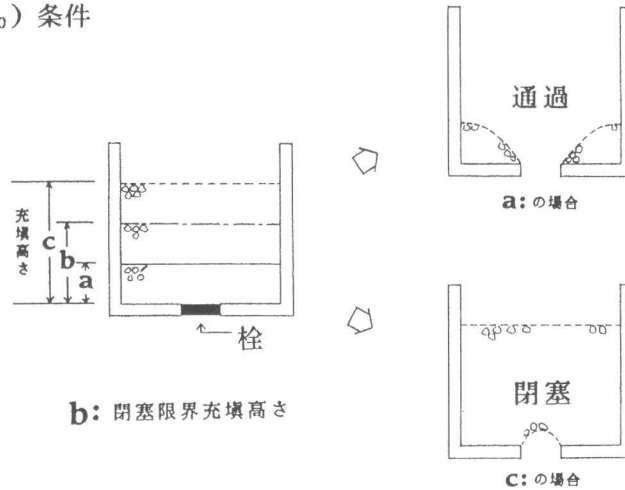


図-7 粉粒体の充填高さとの閉塞現象

高い場合(図中c)には粒体が架橋して閉塞を起こす。この様な場合には閉塞を起こす限界の高さ(図中b)が存在し、この高さを閉塞限界充填高さという[6]。したがってコンクリート中の分離沈降した粗骨材の高さが閉塞限界充填高さ以上になると鉄筋部で閉塞を起こすものと考えられる。

また、この閉塞現象に影響を与える要因としてはその他にモルタル部の τ_f が考えられ、 τ_f が大きい場合には分離が少なくなる事と、付着モルタル厚さの増大により骨材の噛み合いを緩和すること等により、閉塞限界充填高さは高くなると考えられる。

粗骨材の充填高さとして、コンクリート中の粗骨材が密充填した場合(立方配列充填:実績率=0.52[3])のコンクリートに対する粗骨材の充填高さの比($h = Xv/0.52$)を用い、各配合条件での粗骨材体積濃度 (Xv) より算出した h とモルタル τ_f および閉塞の有無の関係を図-8に示す。図中には3.3の(2)式で求めた各配合における τ_{f0} を結んだ分離の境界線を示した。この架橋による閉塞の有無は τ_f の小さい領域(分離境界線の左側)での現象であり、閉塞と通過の境界線がその時の τ_f における閉塞限界充填高さと考えられる。この結果、 τ_f が大きくなるに従い閉塞限界充填高さが高くなる事が認められた。今後これらの要因の他に、鉄筋純間隔、通過断面積の欠損率等の詳細な検討が必要とされる。

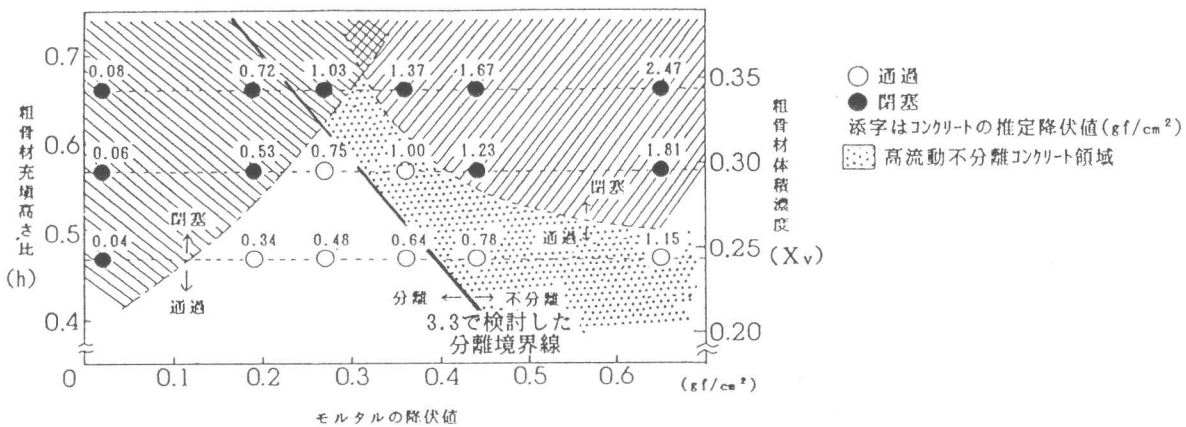


図-8 閉塞現象の有無とモルタル降伏値、粗骨材充填高さ比および粗骨材体積濃度の関係

(2)モルタル τ_r が大きい ($\tau_r > \tau_{r0}$) 条件

この場合、コンクリート中の全てのモルタルは粗骨材に付着拘束されるため、1相系として取り扱うことができる。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 (X_v) 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)は以下の式で求まるとしている[3]。

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

図-8に粗骨材体積濃度 (X_v)、モルタル降伏値 τ_r および閉塞の有無の関係を示し、それぞれの点において(3)式より推定したコンクリートの降伏値を添字で示した。この場合の閉塞の有無は τ_r の大きい領域(分離境界線の右側)での現象であり、この図よりコンクリートの降伏値が約1.2gf/cm²程度以上となると閉塞することがわかった。このような閉塞現象においても(1)と同様に鉄筋純間隔、通過断面積の欠損率等の詳細な検討が必要である。

以上の検討により、今回の実験条件の範囲において高い充填性と不分離性を有する高流動コンクリートが成立するモルタル部分の τ_r および粗骨材体積濃度 X_v の範囲は図-8中に示すハッチ領域(■)にあることがわかった。今後、使用材料、モルタル配合条件等が変わった場合におけるこの範囲の適用性についても検討が必要である。

4. まとめ

振動による締固めを行わなくても型枠内に充填する高流動コンクリートの基礎的な性状を把握することを目的に、コンクリートをモルタルと粗骨材の2相系と考え、モルタル部分のレオロジ的性質と粗骨材体積濃度を変えて流動性、不分離性および充填性の評価を行った。その結果、今回の実験の範囲内ではあるが、不分離でかつ高充填性を有する高流動コンクリートが成立するためのモルタル部分の降伏値と粗骨材体積濃度の範囲をある程度明らかとすることができた。今後さらにコンクリート打設高さ、配筋条件が及ぼす充填性への影響やコンクリート流動時における不分離性等について検討を行い、より広範な条件下における不分離性、充填性に優れる高流動コンクリートが成立するコンクリート組成の範囲等を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1)木村昌博ほか:コンクリートの材料分離の定量化に関する研究、セメント・コンクリート論文集No.44、pp.306~311、1990
- 2)村田二郎:コンクリート技術100講、山海堂、pp.93、1990
- 3)和美広喜ほか:回転翼型粘度計による高強度コンクリートの流動特性値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
- 4)フレッシュコンクリートの挙動研究委員会報告書(委員長 村田二郎)、日本コンクリート工学協会、pp.43~50、1990
- 5)太田誠一郎:骨材の表面積と新面積法による構築混合物の検討とその応用に関する研究、土木学会論文集第61号別刷3-3、1959
- 6)岩田博行ほか:石炭ハンカにおける閉塞現象、粉体工学研究会誌Vol.4、No.1、pp.643~650、1967