

論文 高強度コンクリートの粘性に関する一考察

安本礼持*1・枝松良展*2・青木真材*3・長岡誠一*4

要旨：高強度コンクリートおよびモルタルの粘性を Two-Point 法により測定される見掛け粘度で評価し、これら見掛け粘度に及ぼす細骨材の特性や骨材量の影響を検討した。その結果、モルタルの見掛け粘度は、ある細骨材量から急激に増加を始めること、見掛け粘度が増加を開始する細骨材量は、細骨材の実積率や粒子形状に影響されることが明らかとなった。コンクリートの見掛け粘度は、粗骨材量の増加に伴い増加し、細骨材量によりその増分量が異なることが明らかとなった。

キーワード：高強度コンクリート, ポンプ圧送性, Two-Point 法, 見掛け粘度

1. はじめに

高強度コンクリートの配合は、水結合材比が低く富配合となるために、その粘性は通常のコンクリートに比べて著しく高くなる。このため、実施工においては、ポンプ圧送時の圧送負荷が増大するため、コンクリートの打設効率や使用可能なコンクリートポンプの機種が限定される。これまで、高強度コンクリートのポンプ圧送性の評価は実際にコンクリートポンプを用いた圧送実験を実施する必要があった。しかし近年、Two-Point 法¹⁾で測定したコンクリートの見掛け粘度により高強度コンクリートのポンプ圧送性が評価できることが報告されており²⁾、試し練りにより高強度コンクリートのポンプ圧送性を推定することが可能となったと考えられる。

一方、混和材を使用することなく設計基準強度 60~80N/mm² 級までの高強度コンクリートの製造が可能である等の理由から、高ピーライトセメントが設計基準強度 60N/mm² 級の高強度コンクリートに適用されるケースが増加しており³⁾、より高強度のコンクリートへの適用も指向されている。しかしながら、結合材に高ピーライトセメントのみを使用し、より高強度のコンクリ

ートを製造する場合、骨材の品質によってはコンクリートの粘性が急激に増加し、ポンプ圧送性が大幅に低下する場合がある。このため、60N/mm² 超級の高強度コンクリートの粘性に及ぼす骨材特性および骨材量の影響を定量化し、これらを超高強度コンクリートの配合設計方法に反映させることが必要であると考えられる。

本研究は、高ピーライトセメントを用いた設計基準強度 60N/mm² 級を超える高強度コンクリートにおいて、細骨材の特性、細骨材容積および粗骨材容積が Two-Point 法による見掛け粘度に及ぼす影響を把握し、これらの関係を定量的に表すことを目的としたものである。さらに、細・粗骨材容積がコンクリートの間隙通過性に及ぼす影響についても検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは高ピーライトセメントを使用した。細骨材は野洲川産川砂、室木産海砂、高槻産砕砂および鹿島産陸砂をそれぞれ単体で使用し、粗骨材は高槻産砕石を使用した。混和剤はポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤および空気量調整

*1 住友大阪セメント セメント・コンクリート研究所 工修 (正会員)

*2 住友大阪セメント セメント・コンクリート研究所 工博 (正会員)

*3 住友大阪セメント セメント・コンクリート研究所

*4 住友大阪セメント セメント・コンクリート研究所 主任研究員 (正会員)

表-1 高ピーライトセメントの特性

密度 (g/cm ³)	3.20	
比表面積 (cm ² /g)	3850	
鉱物組成 (%)	C ₃ S	33
	C ₂ S	45
	C ₃ A	4
	C ₄ AF	10

表-2 骨材の特性

項目	野洲川川砂	室木産海砂	高槻産砕砂	鹿島産陸砂	高槻産碎石
最大寸法(mm)	—	—	—	—	20
表乾比重	2.59	2.58	2.67	2.64	2.70
粗粒率	3.02	2.88	2.45	2.43	6.73
吸水率 (%)	1.41	1.39	1.04	0.82	0.60
実積率 (%)	64.8	63.9	60.8	68.1	60.4
粒形判定実積率 (%)	61.0	59.3	54.9	60.8	—
洗い損出量 (%)	0.86	1.0	5.9	0.80	—

剤を使用した。セメントおよび骨材の特性を表-1および表-2に示す。なお、砕砂は洗い試験によって失われる量が5.9%と多いため、砕砂中の0.075mm以下の粒子を粉体とみなした⁴⁾。

2. 2 配合

セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの水セメント比は27% (水セメント容積比=0.864)とした。ただし、細骨材に砕砂を使用する場合には砕砂中に含まれる0.075mm以下の粒子を粉体として取り扱ったため、水と粉体(セメントと砕砂中の微粉末)の容積比が0.864となるよう調整した。

コンクリートのスランプフロー(目標値650±50mm)および空気量(目標値2±1%)は目標値となるように、混和剤により調整した。

モルタルおよびセメントペーストの混和剤添加率はすべて一定とした。

2. 3 粘性および間隙通過性の評価方法

粘性の評価には、回転翼型粘度計⁵⁾を用いたTwo-Point法により測定される見掛け粘度を用いた。見掛け粘度は回転数とトルクの関係がほぼ直線を示す、回転数の下降時(50-10r.p.m)におけるトルクを10r.p.mごとに測定し、回転数とトルクの関係の直線回帰することにより求めた。

フレッシュコンクリートの間隙通過性は、土木学会「自己充填型の高流動コンクリートの試験方法(案)」⁶⁾に従い、障害鉄筋数を3本とした場合におけるコンクリートの充填高さにより評価した。

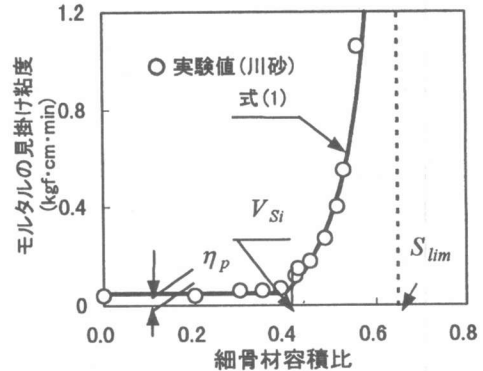


図-1 細骨材容積比とモルタルの見掛け粘度の関係

2. 4 練混ぜ方法

コンクリートおよびモルタルの練混ぜは水平二軸強制ミキサ(容量55l, 練混ぜ量45l/バッチ)を用い、以下に示す方法により行なった。まず、セメントと細骨材をミキサに投入し、30秒間の空練りを行なう。次に一次水を入れ、50秒間練り混ぜる。最後に残りの材料を入れ150秒間練り混ぜる。なお、一次水と細骨材の表面水を合わせた水量は、単位水量の85%とした。セメントペーストの練混ぜは、大型のホバートミキサ(容量10l, 練混ぜ量6l/バッチ)を用い、一度にすべての材料を投入し、180秒間練り混ぜた。これを3バッチ練り混ぜたものを合わせて一回の試料とした。

3. 実験結果および考察

3. 1 モルタルの見掛け粘度

図-1は細骨材に川砂を用い、水セメント比を27%、高性能AE減水剤の添加率を1.2%としたモルタルの細骨材容積比と見掛け粘度の関係を示

したものである。なお、細骨材容積比とはモルタルに対する細骨材の容積割合である。

モルタルの見掛け粘度は、細骨材容積比が 0.4 より小さい範囲では、ペーストの見掛け粘度と同等であるが、細骨材容積比がある値より大きくなると急激に増加した。これは細骨材容積比がある値以上になると細骨材同士の噛み合いが無視できない程度に大きくなり、これによって見掛け粘度が増加したためと考えられる。この結果を基にモルタルの見掛け粘度を式(1)により表現した。なお、モルタルの見掛け粘度に式(1)を適用するにあたり以下の仮定を行なった。

仮定 1：見掛け粘度が急激に増加し始める細骨材容積比を細骨材相互作用開始容積比と定義し、細骨材容積比が細骨材相互作用開始容積比以下の範囲におけるモルタルの見掛け粘度はペーストの見掛け粘度に等しいものとした。これは、種類の異なる細骨材を使用した各モルタルにおいて、細骨材容積比を次第に減少させた場合、ある細骨材容積比以下のモルタルの見掛け粘度が、すべてペーストの見掛け粘度に等しくなることが確認されたからである。

仮定 2：細骨材容積比の上限値を細骨材限界容積比と定義した。モルタルの見掛け粘度は細骨材限界容積比において無限大となり、細骨材限界容積比は細骨材の実積率に等しいものとする。

$$\eta_m = \eta_p + B_m \left(\frac{1}{S_{lim} - V_s} - \frac{1}{S_{lim} - V_{si}} \right) \quad (1)$$

ここに、 η_m ：モルタルの見掛け粘度 (kgf·cm·min)、 η_p ：ペーストの見掛け粘度 (kgf·cm·min)、 V_s ：細骨材容積比、 S_{lim} ：細骨材限界容積比、 V_{si} ：細骨材相互作用開始容積比、 B_m ：見掛け粘度の増分を表す係数

3. 2 モルタルの見掛け粘度に及ぼす細骨材特性の影響

細骨材の特性が式(1)の細骨材相互作用開始容積比、細骨材相互作用開始容積比未満の見掛け粘度、見掛け粘度の増分を示す係数に及

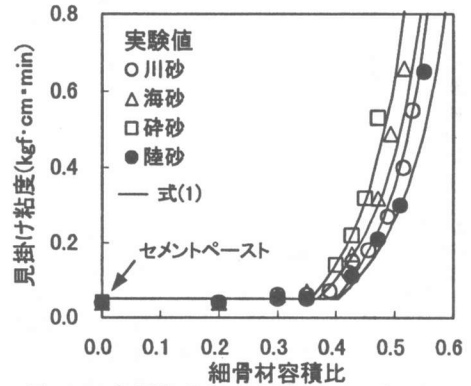


図-2 各種細骨材を用いたモルタルの細骨材容積比と見掛け粘度の関係

ぼす影響を検討するため、細骨材の種類を変えてモルタルの見掛け粘度を測定した。

図-2は各細骨材(川砂、海砂、砕砂、陸砂)を使用したモルタルの細骨材容積比と見掛け粘度の関係を示したものである。なお、図中の実線は式(1)により求めた各モルタルの見掛け粘度を示している。また、実験に使用した全モルタルの空気量は3.2~4.6%であった。細骨材の種類が異なる場合においても、モルタルの見掛け粘度は細骨材容積比がある値までは一定となり、その後、急激な増加を示すことから、式(1)により表現できることが確認された。また、細骨材の種類ごとに細骨材相互作用開始容積比が異なることが明らかである。一方、細骨材相互作用開始容積比以降の見掛け粘度の増分、すなわち見掛け粘度の増分を示す係数は、細骨材の種類に関係なくほぼ一定で約0.11となった。

しかし、水粉体容積比や粉体の特性が異なる場合には、条件ごとに見掛け粘度の増分を示す係数が変化することが予測されることから、これらの影響について今後、検討を行う必要がある。また、細骨材容積比の低下に伴い、それぞれ異なる細骨材を使用したモルタルの見掛け粘度は、ほぼペーストの見掛け粘度(0.05kgf·cm·min)に集束した。そこで、見掛け粘度の増分を示す係数を0.11、ペーストの見掛け粘度を0.05kgf·cm·minとして各細骨材の細骨材相互作用開始容積比を最小二乗法によって求めた。その結果を

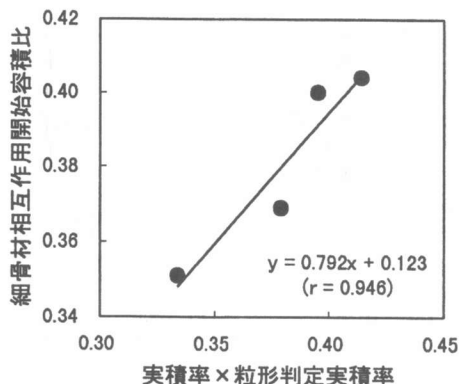


図-3 実積率と粒形判定実積率の積と細骨材相互作用開始容積比との関係

表-3 モルタルの見掛け粘度式(式(1))にかかる各細骨材の係数

	V_{si}	B_m	n_p ($\text{kgf}\cdot\text{cm}\cdot\text{min}$)
川砂	0.40	0.11	0.05
海砂	0.37		
砕砂	0.35		
陸砂	0.40		

表-3 に示す。

次に式(1)の細骨材相互作用開始容積比について、細骨材の特性による影響を検討した。図-3は細骨材の実積率および粒形判定実積率の積と細骨材相互作用開始容積比の関係を示したものである。両者の間には直線関係があることが認められた。細骨材の充填率、粒度分布および粒子形状は細骨材相互の噛み合いに深く関連しているものと考えられることから、両者の間に直線関係が認められたものと考えられる。

3.3 コンクリートの見掛け粘度

図-4は細骨材に川砂を使用したコンクリートの細骨材容積比と見掛け粘度の関係を粗骨材かさ容積ごとに示したものである。コンクリートの見掛け粘度は粗骨材かさ容積と細骨材容積比の減少に伴い低下する傾向が認められた。しかしながら、粗骨材かさ容積が $0.564 \text{ m}^3/\text{m}^3$ と $0.588 \text{ m}^3/\text{m}^3$ では、細骨材容積比が 0.4 未満になると細骨材容積比の減少に伴い見掛け粘度は逆に増加した。これらのコンクリートはスランプフロー試験の際に粗骨材がフロ

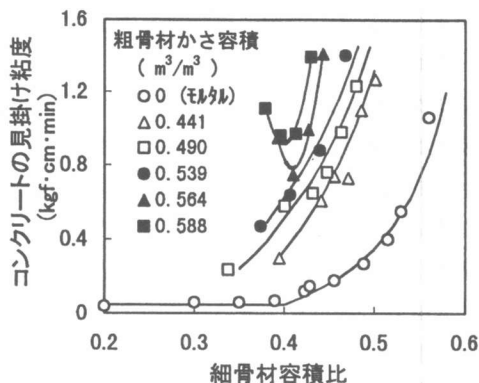


図-4 細骨材容積比とコンクリートの見掛け粘度の関係

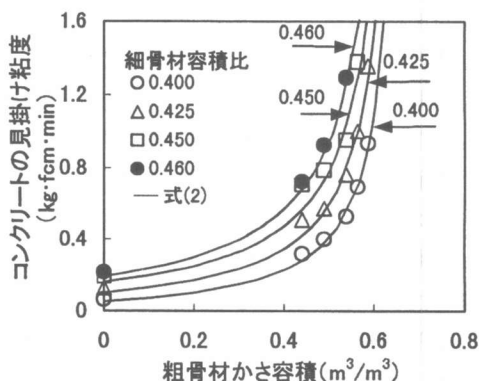


図-5 コンクリートの見掛け粘度と粗骨材かさ容積の関係

ーの中心付近に固まりモルタルのみが広がっていたことから、材料分離が生じていたものと考えられる。このため、Two-Point 法試験においても材料分離により、粗骨材が均一に分散されずに粗骨材同士の噛み合いにより回転翼の回転が妨げられ、見掛け粘度が増加したものと考えられる。粗骨材かさ容積が $0.564 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 未満のコンクリートにおいても、細骨材容積比をさらに低下させた場合には、程度は異なるものの材料分離により再び見掛け粘度が増加するものと推測される。このように、コンクリートの見掛け粘度は、モルタルの見掛け粘度のように細骨材相互作用開始容積比未満の見掛け粘度が一定とならない。

図-5は図-4に示したデータを基に材料分離が発生しない範囲内において、細骨材容積比

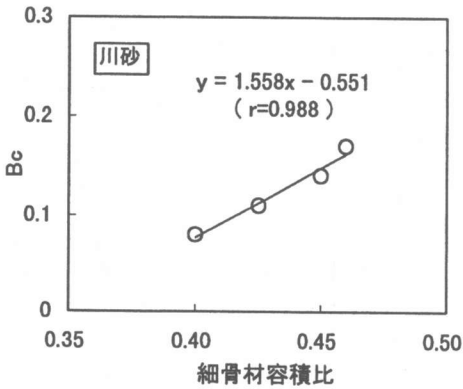


図-6 細骨材容積比と B_c との関係

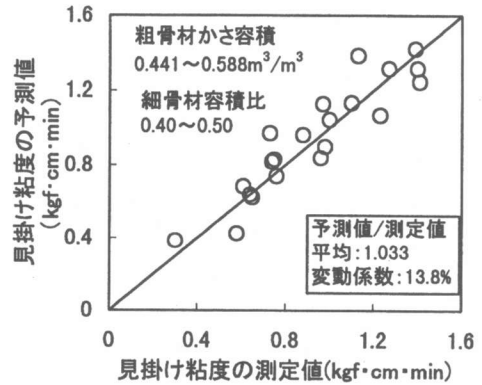


図-7 コンクリートの見掛け粘度の測定値と予測値の比較

ごとに粗骨材かさ容積とコンクリートの見掛け粘度の関係を示したものである。なお、図中の各点は見掛け粘度を各細骨材容積比ごとに整理するため、図-4に示した見掛け粘度の測定値を曲線補完して求めたものである。コンクリートの見掛け粘度は、粗骨材かさ容積が小さい範囲ではモルタルの見掛け粘度から徐々に増加し、粗骨材かさ容積が大きくなると急激に増加した。そこで、この関係を基にコンクリートの見掛け粘度を式(2)により表現した。

$$\eta_c = \eta_m + B_c \left(\frac{1}{A_{lim} - V_{gr}} - \frac{1}{A_{lim}} \right) \quad (2)$$

ここに、 η_c : コンクリートの見掛け粘度 ($\text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{min}$)、 V_{gr} : 粗骨材かさ容積 (m^3/m^3)、 A_{lim} : 粗骨材かさ容積の上限値 (m^3/m^3)、 B_c : 見掛け粘度の増分を表わす係数

粗骨材かさ容積の限界値 A_{lim} は、細骨材容積比に関わらず一定値 ($A_{lim} = 0.67$) とした。なお、式(2)におけるモルタルの見掛け粘度 η_m は、式(1)により算出した。

式(2)における係数 B_c は、図-5に示した各点を用いて最小二乗法により決定した(表-4)。また、係数 B_c は図-6に示すように細骨材容積比と直線関係にあることが明らかとなった。

図-7は、式(2)より算出したコンクリートの見掛け粘度を図-4に示した見掛け粘度の測定値と比較したものである。なお、コンク

表-4 コンクリートの見掛け粘度式(式(2))にかかる係数

細骨材容積比	A_{lim}	B_c	η_m ($\text{kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{min}$)
0.400	0.67	0.08	0.05
0.425		0.11	0.10
0.450		0.14	0.16
0.460		0.17	0.19

リートの見掛け粘度の算出にあたり、各細骨材容積比における B_c は、図-6に示す直線近似式により求めた。コンクリートの見掛け粘度の予測値は、測定値と良く一致しており、式(2)はコンクリートの見掛け粘度の予測に適しているものと考えられる。

図-8は、粗骨材かさ容積 $0.490 \text{ m}^3/\text{m}^3$ において、各種細骨材を用いたコンクリートの見掛け粘度の測定値と式(2)を用いて求めたコンクリートの見掛け粘度の予測値が一致するように求めた B_c と細骨材容積比との関係を示したものである。使用する細骨材の種類によって B_c と細骨材容積比との関係が異なることが認められた。これは細骨材の種類により、モルタルの性状が変化し、粗骨材との干渉の度合いが異なるためと考えられる。なお、 B_c は水粉体容積比や粉体特性にも影響されることが考えられるが、これは今後の課題である。

3.4 見掛け粘度と間隙通過性の関係

ベント管やテーパ管内でのコンクリートの流動を考慮した場合、コンクリートのポンプ圧送

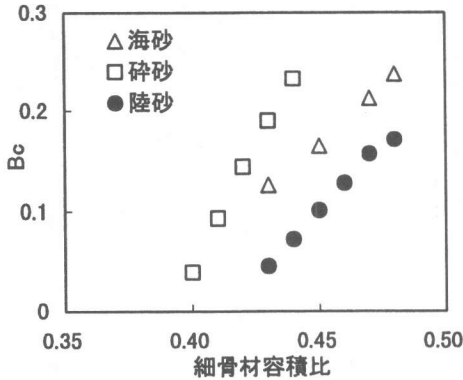


図-8 細骨材容積比と Bc の関係

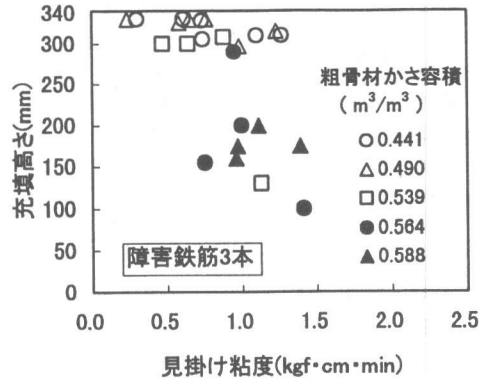


図-9 見掛け粘度と充填高さの関係

性は粘性のみでなく、間隙通過性によって表現されるコンクリートの変形能力も影響するものと考えられる。そこで、コンクリートの間隙通過性をボックス形容器によって評価した。

図-9はコンクリートの見掛け粘度と充填高さの関係を示したものである。同一の見掛け粘度の場合でも、粗骨材かさ容積が異なると充填高さ、すなわち変形性が異なることが認められた。現在、充填高さとベント管、テーパ管でのコンクリートの変形性との対応については明確でないものの、ポンプ圧送性を考慮する場合には、粗骨材量と変形性の関連についても今後、検討する必要があるものと考えられる。

4. まとめ

高ピーライトセメントを使用した高強度コンクリートおよびモルタルにおいて、細骨材容積比、細骨材の種類および粗骨材かさ容積が Two-Point 法による見掛け粘度に及ぼす影響を検討した結果を以下にまとめる。

- (1)モルタルの見掛け粘度は、細骨材容積比が小さい範囲では、ペーストの見掛け粘度にほぼ等しくなるが、細骨材容積比が大きくなると、その容積比の増加とともに急激に増加する。この関係に基づいて、モルタルの見掛け粘度を細骨材容積比の関数として定式化した。
- (2)モルタルの見掛け粘度が増加を開始する細骨材容積比は、細骨材の実積率と粒子形状に影響される。

響される。

- (3) コンクリートの見掛け粘度は、粗骨材かさ容積が小さい範囲では、その容積の増加とともにモルタルの見掛け粘度から徐々に増加し、粗骨材かさ容積が大きくなると急激に増加する。また、細骨材容積比によりコンクリートの見掛け粘度の増分量が異なる。この関係に基づいて、コンクリートの見掛け粘度を粗骨材かさ容積の関数として定式化した。
- (4) コンクリートの見掛け粘度の増分量は、細骨材容積比が大きい範囲では、その容積比の増加とともに増大する。

参考文献

- 1)Tattersal G.H., et al: The Rheology of Fresh Concrete, PITMAN, 1983
- 2)和美広喜:進歩するコンクリート施工技術, コンクリート工業新聞, 1997. 8. 7
- 3)セメント新聞社:普及進む高性能コンクリート, セメント新聞, 1996. 11. 11
- 4)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, pp. 35-47, 1993. 9
- 5)日本建築学会:コンクリートポンプ工法施工指針・同解説, 日本建築学会, p. 247, 1994. 1
- 6)土木学会コンクリート委員会高流動コンクリート研究小委員会:コンクリート技術シリーズ 15 高流動コンクリートに関する技術の現状と課題, 土木学会, pp. 2-20, 1996