

論文

[1062] フレッシュコンクリートの流動性評価に関する研究

正会員 西林 新蔵 (鳥取大学土木工学科)

正会員 井上 正一 (鳥取大学土木工学科)

正会員 ○吉野 公 (鳥取大学土木工学科)

高井伸一郎 (村本建設)

1. はじめに

最近、フレッシュコンクリートの性状は極めて多様化してきている。これは流動化剤、高性能 A E 減水剤等の化学混和剤の進歩、高炉スラグやシリカフェームなどの混和材の混入、さらにはポンプに代表される施工の機械化、省力化による新しいコンクリートの製造方法の開発などによるものである。それに伴って、フレッシュコンクリートのワーカビリティ、特に締固め不要コンクリートあるいは水中不分離性コンクリート等の流動性と材料分離抵抗性が重視されたコンクリートのワーカビリティの判定方法の再検討が要望されている。

本研究は、流動性の高いコンクリートのワーカビリティ評価法を確立するための基礎的資料を得ることを目的とし、水結合材比、高炉スラグの粉末度および置換率等を要因に選んだフレッシュコンクリートに対して、3種類のボックスフロー試験をはじめとする各種試験を行い、上述の要因がコンクリートのワーカビリティにおよぼす影響を把握するとともに、各試験の指標に関して検討を行ったものである。

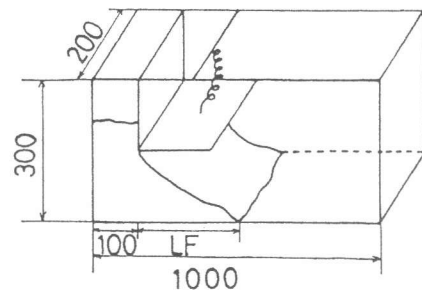
2. ボックスフロー試験

締固め不要コンクリートあるいは高強度コンクリートのワーカビリティ評価試験法として種々のボックスフロー試験が提案されている。これらは概ね

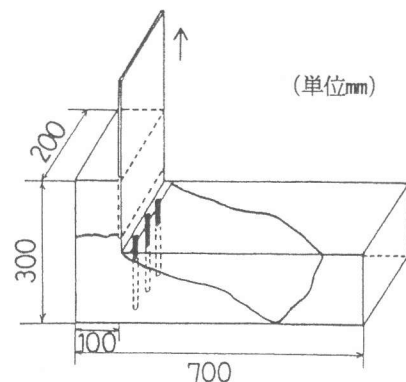
- 1) コンクリートの流動性の評価試験
- 2) コンクリートの材料分離抵抗性の評価試験
- 3) コンクリートの充填性の評価試験

に分類される。

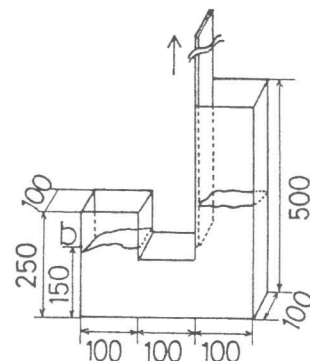
本研究で用いた3種類のボックスフロー試験装置の概略を図-1に示す。a) のL型フロー試験装置はコンクリートの流動性評価試験装置として、流動速度および流動距離を測定するものであり、流動距離はコンクリートの降伏値と関係があり、また、コンクリートの降伏値が同じであれば、流動速度によってコンクリートの塑性粘度が推定できるとされている [1]。



(a) L型フロー試験装置



(b) 分離抵抗性試験装置



(c) U型フロー試験装置

図-1 ボックスフロー試験装置

図-2は本試験装置を用いて、水セメント比を変化させたフロー値 $220 \pm 5 \text{ mm}$ のモルタルの試験結果である。また、球引上げ式粘度計（球の半径：3.17 cm，容器： $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ ）[2]によって測定したレオロジー一定数も示している。図より、モルタルのフロー値一定の条件では水セメント比にかかわらず降伏値はほぼ同じ値を示しており、また、流動距離（LF）と降伏値（ τ_r ）、流動開始から流動が停止するまでの平均フロー速度

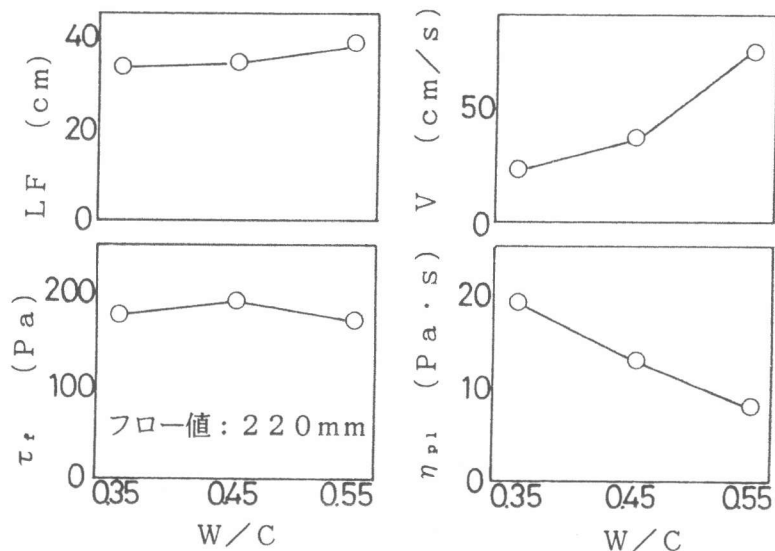


図-2 W/C と L 型フロー試験値，レオロジー一定数の関係

（V）と塑性粘度（ η_{pl} ）はそれぞれ対応した傾向を示しており、上述のことが確認できる。

b) の分離抵抗性試験装置は L 型フロー試験装置の開口部に 13mm の異形鉄筋を純間隔 35mm で配置したものであり、流動距離および流動速度を測定するとともに、鉄筋の前後の試料を 1 リットル採取し、洗い試験を行い粗骨材量の違いを測定した。

c) の U 型フロー装置は、コンクリートの充填性評価装置として、装置右部分にコンクリートを充填した後、スライド板を抜き取り、流動開始から b 点までの充填時間および最終的な充填高さを測定するとともに、左右の高低差を測定した。

3. 実験概要

3.1 使用材料

本研究で使用した結合材は普通ポルトランドセメントおよび 2 種類の高炉スラグである。これらの比重および粉末度を表-1 に示す。化学混和剤としては変性リグニン、アルキルスルホン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。骨材は、粗骨材として碎石（最大寸法：20 mm，比重：2.69，吸水率：0.89，F.M.：6.78）を、細骨材として砕砂と陸砂を混合したもの（比重：2.67，吸水率：1.40，F.M.：2.72）を用いた。

3.2 実験条件

本研究の試験要因と水準を表-2 に示す。コンクリートの練混ぜは、パン型強制式ミキサーを用い、まず、結合材と細骨材を 30 秒間空練りした後、高性能 AE 減水剤および練り混ぜ水を加え 60 秒間練り混ぜた。その後、粗骨材を加え、さらに 90 秒間練り混ぜた。また、コンクリートの配合は、単位水量を 170 kg/m^3 と一定とし、所定のスランブフローとなるように高性能 AE 減水剤の添加量を調整した。

表-1 セメントおよびスラグの性質

種類	比重	粉末度 (cm^2/g)
セメント	3.15	3220
スラグ I	2.91	4320
スラグ II	2.89	6020

表-2 実験要因および水準

スランブフロー	60 ± 5 cm		
空気量	4.5 ± 0.5 %		
水結合材比	0.32,	0.34,	0.36
スラグ置換率	0, 50, 70%		
細骨材率	46,	49,	52%

試験項目は、上述の3種類のボックスフロー試験、スランプフロー試験、空気量試験および一部のコンクリートに対しそのモルタル部分のレオロジー定数の測定を球引上げ式粘度計によって行った。なお、L型フロー試験および分離抵抗性試験においては、本研究で対象としたコンクリートの流動停止の判定が困難なことから、ビデオ撮影した映像を用いて0cm から 20cm 間の平均速度を算定し、それを流動性の指標として用いた。

4. 結果および考察

4. 1 流動性の評価

本研究で対象としたコンクリートのような高流動コンクリートの配合設計における細骨材率の選定は、流動性および材料分離抵抗性を総合的に判断して行う必要がある。既往の研究[3]によれば、スランプフロー試験および充填性試験結果から最適とされる細骨材率は、骨材の空隙率が最小となる細骨材とほぼ一致することが報告されている。しかし、粉体量が多いコンクリートでは、ある範囲内の細骨材率の変化は、流動性にはほとんど影響しないことも予想される。

図-3はL型フロー試験によって得られた流動距離(LF)および流動速度(V_L)と細骨材率(s/a)の関係を示したものである。なお、スラグ置換率をパラメータとしている。本研究においては、コンクリートの条件としてスランプフロー値を 60 ± 5 cm としていることもあり、各コンクリートの流動距離には差がほとんどみられなかった。一方、本研究の結果では、スラグ置換率ごとに最も流動速度が速くなる細骨材率が存在し、しかもスラグ置換率が増加するに伴って最も流動速度が速くなる細骨材率は小さくなる傾向を示しており、流動速度は細骨材率の影響を受けることが明かとなった。

図-4は、スラグの種類をパラメータとして、スラグ置換率とL型フロー試験による流動距離および流動速度の関係を示したものである。図より、粉末度が $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度のスラグII

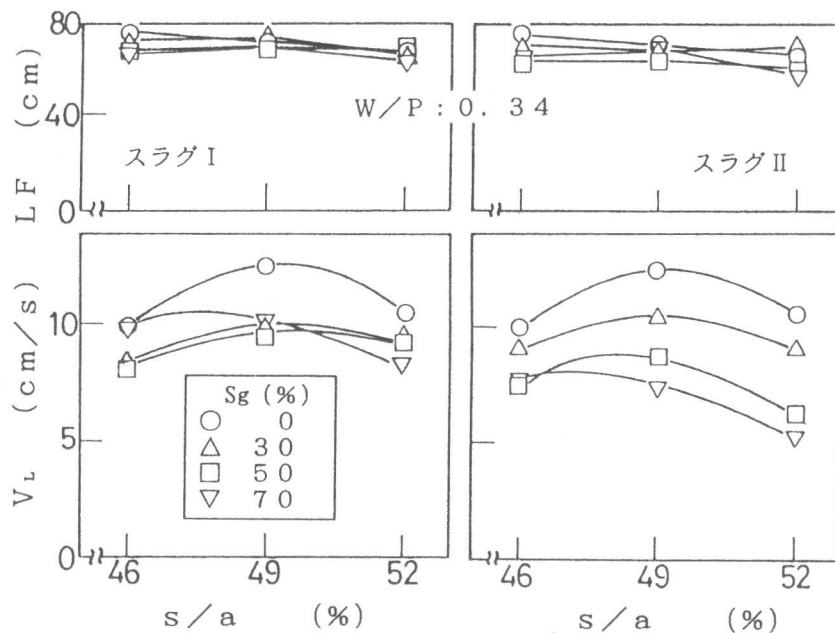


図-3 L型フロー試験結果 (細骨材率の影響)

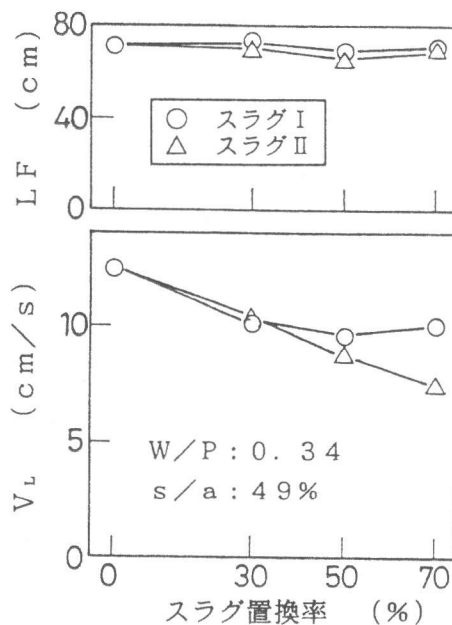


図-4 L型フロー試験結果 (スラグ置換率の影響)

で置換を行った場合には、スラグ置換率が増加するにしたがって直線的に流動速度が遅くなるが、粉末度が 4000 cm²/g 程度のスラグ I で置換を行った場合には、スラグ置換率 50 % まではスラグ置換率の増加に伴って流動速度が遅くなるが、スラグ置換率 50 ~ 70% 間では流動速度の変化は見られなかった。また、スラグの粉末度が流動速度に及ぼす影響はスラグ置換率 50% まではあまりみられず、スラグ置換率 50 % 以降において顕著に現われた。スラグの粉末度が流動性に及ぼす影響に関しては、粉末度 4000~6000cm²/g では、その影響の度合いに大きな差はないが、粉末度 6000 から 7000 cm²/g に変化すると流動性の低下が著しいという報告もある [4]。

図-5 はスラグ置換率をパラメータとして、水結合材比と L 型フロー試験による流動距離および流動速度の関係を示したものである。図より、スラグ置換率にかかわらず、水結合材比の減少とともに流動速度は遅くなる傾向があるが、水結合材比の影響の程度はスラグ置換率によって異なり、スラグ置換率 0, 30% では、水結合材比 0.34~0.36 間の流動速度の変化はわずかであった。

以上の結果より、流動距離 L_F が同程度の場合すなわちコンクリートの降伏値が同程度の場合には、L 型フロー試験による流動速度で、使用材料あるいは配合要因がコンクリートの粘度に及ぼす影響を敏感にとらえることができるものと考えられる。

4.2 材料分離抵抗性の評価

分離抵抗性試験における配置した鉄筋の前後の粗骨材量の差を次式に示す分離率 G_s(%) で表わした。

$$G_s = \frac{(G_1 - G_2)}{(G_1 + G_2)} \times 100 \quad (1)$$

なお、G₁ は鉄筋を通過していない試料の粗骨材の単位重量 (kg/m³)、G₂ は鉄筋を通過した試料の粗骨材の単位重量 (kg/m³) である。

図-6 は、水結合材比をパラメータとして、スラグ置換率と分離率 (G_s)、流動速度 (V_s) およびモルタル部分の塑性粘度 (η_{p1}) との関係を示したものである。

コンクリートが鉄筋を通過する際の粗骨材の分離は (1) モルタルの粘度、(2) 鉄筋間隔と粗骨材寸法との比率、(3) コンクリートの鉄筋部分通過の障害に寄与する骨材のコンクリート中に占める割合、(4) コンクリートの流動速度等に影響されると考えられる。

図-6 のうち、スラグ置換率と分離率との関係のみ

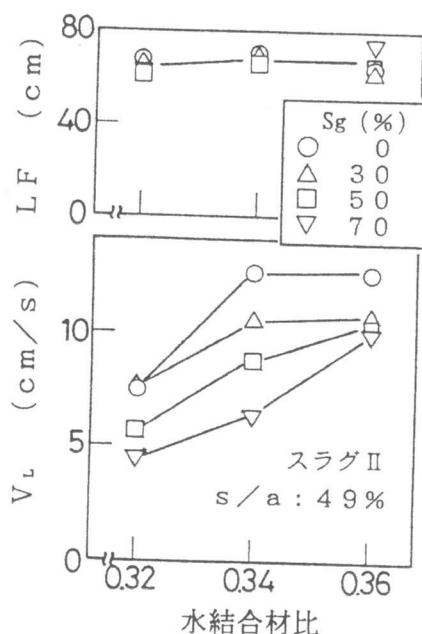


図-5 L型フロー試験結果 (水結合材比の影響)

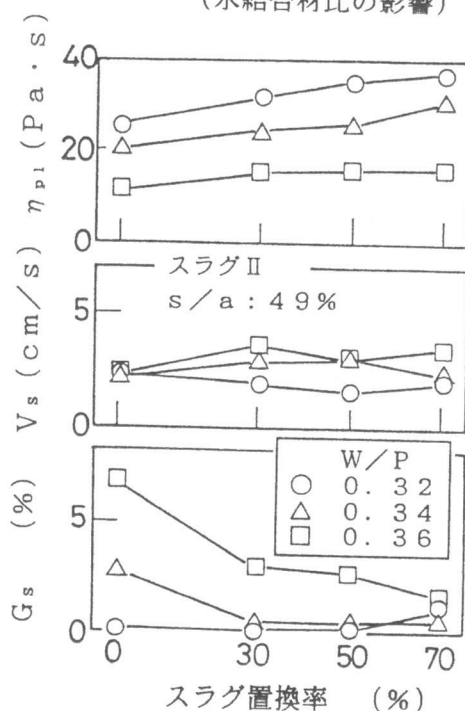


図-6 分離抵抗性試験結果 (スラグ置換率の影響)

ると、水結合材比 0.34, 0.36 ではスラグ置換率の増加とともに分離が小さくなる傾向を示しており、また、水結合材比が小さくなるにしたがって分離が小さくなる傾向を示している。次に、スラグ置換率とコンクリートのモルタル部分の塑性粘度との関係を見ると、スラグ置換率の増加とともに、また水結合材比の減少とともにモルタルの塑性粘度は大きくなる傾向を示している。以上の結果から、コンクリートのモルタル部分の塑性粘度が増加するにしたがって分離が小さくなるといえ、モルタル部分の塑性粘度と鉄筋部分をコンクリートが通過する際の粗骨材の分離とは密接な関係があることがうかがえる。

分離抵抗性試験装置とL型試験装置とは、鉄筋が配置してある以外は、コンクリート充填部の寸法および流出口の寸法とも同じであるが、鉄筋を配置したことによって分離抵抗性試験装置における流動速度はL型フロー試験における流動速度に比べてかなり遅くなった。また、L型フロー試験装置においてみられたスラグ置換率の増加に伴う流動速度の減少傾向が分離抵抗性試験装置ではほとんどみられなかった。これは、L型フロー試験装置で流動速度が速かった試料が、分離率からわかるように、多少分離傾向を示していることから、粗骨材の分離によりコンクリートの流動が阻害され、L型フロー試験装置で流動速度が速かった試料の流動速度が遅くなったためと考えられる。

図-7は、スラグの種類をパラメータとして、スラグ置換率と分離率および流動速度との関係を示したものである。図より、スラグの粉末度の違いによる影響は本研究の範囲内では確認できなかった。

図-8は、スラグ置換率をパラメータとして、細骨材率と分離率および流動速度との関係を示したものである。図より、細骨材率 46%においては、スラグ置換率 0, 30%で多少粗骨材の分離がみられる。これは、細骨材率が小さくなることによって、コンクリートが鉄筋部分を通過する際の通過阻害に寄与する骨材の割合が増加したためと考えられる。

以上の結果より、本研究で用いた分離抵抗性試験装置はコンクリートの流動状態からだけでは分離に対する判断は困難であり、骨材の洗い試験等が必要である。また、この種の試験装置では、鉄筋の間隔、鉄筋障害の個数と間隔によって、分離の程度が異なることが報告されており [5]、今後、さらなる検討が必要である。

4.3 充填性の評価

図-9は、水結合材比をパラメータとして、スラグ置換率とU型フロー試験における流動開始からb点まで流れるのに要した時間 (T_b) および流動が停止したあとの左右の高低差との関係を示したものである。本研究の条件としたスランプフロー60cm

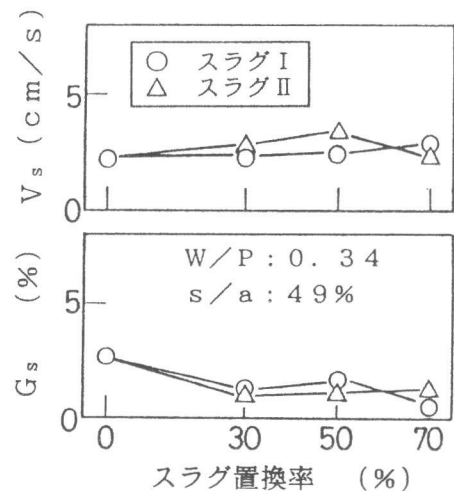


図-7 分離抵抗性試験結果 (スラグの種類の影響)

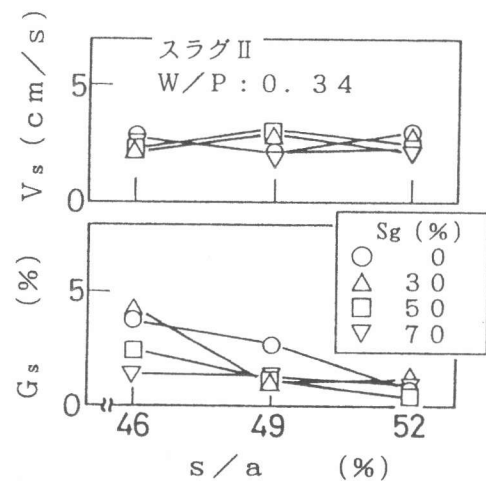


図-8 分離抵抗性試験結果 (細骨材率の影響)

のコンクリートはセルフレベルリング性に優れており、そのほとんどが左右の高低差 2cm以内に入っていた。

図-9より、b点まで流れるのに要した時間は、水結合材比が小さいほどスラグ置換率の影響を受け、スラグ置換率が増加するにしたがって長くなる傾向にあった。また、スラグ置換を行わない場合よりもスラグ置換を行った場合に左右の高低差が小さくなる傾向がみられた。

5. まとめ

本研究は、流動性の高いコンクリートのワーカビリティ評価法を確立するための基礎的資料を得ることを目的とし、水結合材比、高炉スラグの粉末度および置換率等を要因に選んだフレッシュコンクリートにL型フロー試験、分離抵抗性試験およびU型フロー試験の3種類のボックスフロー試験を行った。

各試験の指標のうち、L型の流動距離およびU型の高低差はコンクリートの降伏値に関連した指標であり、流動速度あるいは流動時間は塑性粘度に関連した指標であると考えられる。また、分離抵抗性試験の指標は粗骨材とモルタルとの分離を評価するものであると考えられる。以下に本研究の主な結果を要約し、まとめとする。

- 1) スランプフロー一定の条件で、スラグ置換率ごとに最も流動速度が速くなる細骨材率が存在し、しかもスラグ置換率が増加するに伴って最もL型フロー試験の流動速度が速くなる細骨材率は小さくなる傾向を示した。
- 2) 流動距離LFが同程度の場合L型フロー試験による流動速度で、使用材料あるいは配合要因がコンクリートの粘度に及ぼす影響をとらえることができる。
- 3) コンクリートのモルタル部分の塑性粘度および細骨材率と鉄筋部分をコンクリートが通過する際の粗骨材の分離とは密接な関係がある。

《参考文献》

- [1] 米澤敏男ほか：高強度コンクリートのワーカビリティに関するL型フロー試験法による研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11, No.1, pp.171~176, 1989.6
- [2] 土木学会：フレッシュコンクリートの物性値測定方法についてのガイドライン（案），フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集，pp.190~191, 1986.3
- [3] 新藤竹文ほか：超流動コンクリートの基礎物性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13, No.1, pp.179~184, 1991.6
- [4] 近田孝夫・松下博通・前田悦孝：高炉スラグ粉末を用いたセメントペーストのレオロジー特性，コンクリート年報工学年次論文報告集，Vol.13, No.1, pp.113~118, 1991.6
- [5] 松田幸彦・小沢一雅・山宮浩信：材料分離に着目したフレッシュコンクリートの充填性評価，土木学会学第46回年次学術講演会概要集，第5部，pp.584~585, 1991.9

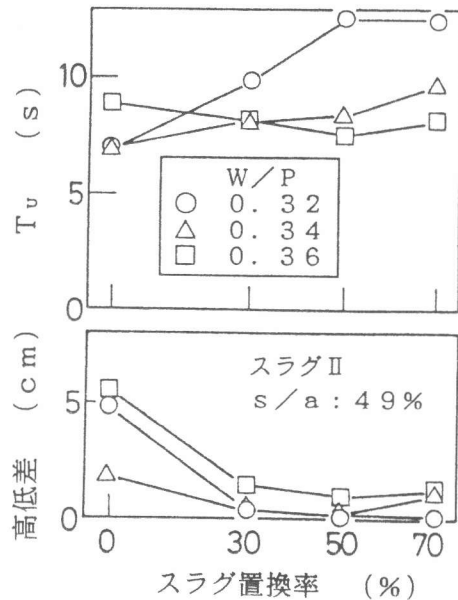


図-9 U型フロー試験結果