

論文

[1028] 高速流動コンクリートに関する基礎研究

正会員 ○ 三浦 律彦 (大林組技術研究所)
 正会員 近松 竜一 (大林組技術研究所)
 正会員 青木 茂 (大林組技術研究所)
 正会員 十河 茂幸 (大林組技術研究所)

1. 序

近年、コンクリート構造物の大型化や高層化が進む中、コンクリート作業員の人員不足が顕在化し、コンクリート工事の省力化や合理化が、建設工事において最も重要な課題となっている。一方、コンクリートの超高強度化が進むにつれて、低水セメント比におけるコンクリートの粘性の増大が施工性を低下させる一因となることも指摘されている。このような背景から、最近では流動性を著しく高めたコンクリート（以下高流動コンクリート [1] と呼ぶ）に関する研究が盛んに行われるようになってきた [2], [3], [4]。

これらの研究では、スランプフローを大きく設定し、適度の分離抵抗性を付与することで、流動性や充填性が改善できることが示されている。しかし、スランプフローのみでコンクリートの流動性の良否を評価しており、粘性の違いによるワーカビリティの相違が検討されてはいない。一方、流動時の速度はコンクリートの粘性の違いにより大きく異なり、特に、ポンプやトレミーを用いたコンクリートの大量打設においては、打込み時間を左右する重要な要因となる。

そこで筆者らは、コンクリートの流動速度に着目し、その定量化を目的とした新しい試験法 [5] を考案して、各種の配合要因が流動速度に及ぼす影響について実験的に検討を加えた。

2. 高速流動コンクリートの概念

2.1 変形ポテンシャルと流動速度

コンクリートの「打込みやすさ [5]」に影響する要因は、自重で変形し空間的にどこまで広がるかを示す「変形ポテンシャル」と、その時間的依存性を示す「流動速度」、それに流動中や流動前後の均質性を示す「分離抵抗性」の3つの要素に分けることができる (図-1)。このうち、「変形ポテンシャル」はコンクリートの降伏値を示すもので、スランプやスランプフローで評価される。「流動速度」は主としてコンクリートの粘性に関係するもので、後述する流下速度試験 [5] やL型フロー試験 [6] などを用いて評価できる。また、「分離抵抗性」はコンクリートのブリージングや骨材分離に関係するもので、例えば加圧ブリージング試験や骨材分離抵抗性試験 [5] などで評価される。このうち、骨材の分離抵抗性は主として変形ポテンシャルを示すスランプフローと、流動速度で示される粘性に左右されることが、筆者らの実験結果 [5] により明らかになっている。従ってコンクリートの打込みやすさは、「変形ポテンシャル」と「流動速度」で評価できると言える。

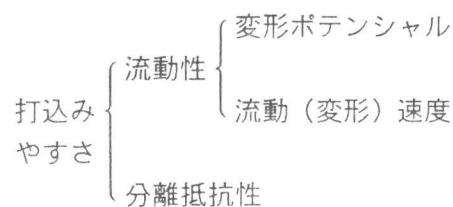


図-1 打込みやすさの構成要因

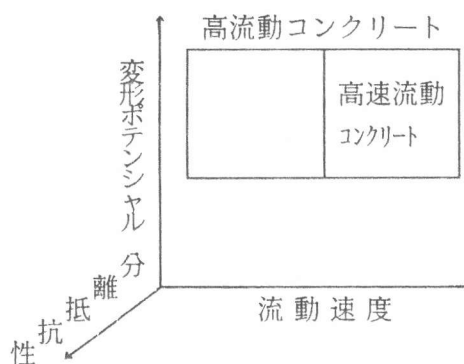


図-2 高速流動コンクリート

2.2 高速流動コンクリート

コンクリートの流動性を考える上で流動速度を考慮することが重要であるが、従来の高流動コンクリートではこの点がほとんど明確になっていない。本研究では、高流動コンクリートの中でも、流動速度が比較的速いものを「高速流動コンクリート」と呼称することにしている (図-2)。

3. 実験概要

3.1 使用材料

実験に使用した各種の材料を表-1に示す。微粉末材料として、粒形、粒度、活性の有無などを考慮して表に示すような5種類の材料を選定した。混和剤としては、セメントの分散性が高く、経時変化の少ない高性能AE減水剤を使用した。

3.2 実験方法

練りまぜは容量100ℓの2軸強制練りミキサを用い、1バッチ80ℓで行った。練りまぜ時間は、微粉末材料と骨材を投入して空練り1分間、混和剤と水を投入して本練り2分間を標準とした。

試験項目はスランプ (JIS A 1101)、スランプフロー (水中不離性コンクリートマニュアル)、空気量 (JIS A 1128)、練上り温度 (アルコール温度計)、流下試験器 (図-3: ϕ ロートと呼称) による流下速度 (別報 [5] 参照) である。このうち、流下速度試験は ϕ ロート内に10ℓのコンクリート試料を入れ、全量の流下時間から直管部の平均的な流下速度を算定するものである。試験は3回行い、その平均値で流下速度を求め、粘性の違いを評価した。

3.3 検討要因

配合要因が変形ポテンシャルや流動速度に及ぼす影響を定量的に把握するため、表-2のように、要因の水準を幅広く変化させて検討した。

なお、流下速度については、高性能AE減水剤の使用量でスランプフローを一定に調整して検討を行った。

4. 変形ポテンシャルに及ぼす配合要因の影響

4.1 微粉末の種類、混入率と変形ポテンシャル

フライアッシュや高炉スラグ微粉末を普通セメントの一部に置き換えて使用した場合の、混和材混入率 (容積比率) とスランプフローの関係を図-4に示す。この図より、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などを混入するとコンクリートの変形ポテンシャルが大きく変化することや、粒形や粒度の違いにより、変形ポテンシャルがもっとも大きくなる最適な混入率が存在することが明らかである。また、これらの微粉末を2種類以上組合せて使用することにより、変形ポテンシャルを単独使用時よりさらに大きくできることが推察される。この結果から、以下の実験シリーズでは変形ポテンシャルが比較的大きい3種混合セメント (容積比でNPセメント20%、高炉スラグ微粉末50%、フライアッシュ30%を混合) を結合材として使用することにした。

表-1 使用材料の種類と物性

種類	略号	名称	比重	特性、主成分など
微粉末	NP	普通ポルトランド	3.15	比表面積: 3,460cm ² /g, R ₂₀ : 0.55%
	Sg	高炉スラグ微粉末	2.90	比表面積: 6,240cm ² /g, 塩基度: 1.87
	Fa	フライアッシュ	2.27	比表面積: 3,760cm ² /g, SiO ₂ : 53.4%
	Sf	シリカフェーム	2.20	平均粒径: 0.15μm, SiO ₂ : 94.0%
	Lf	石粉 (石灰石質)	2.73	比表面積: 4,600cm ² /g, 石灰純度: 94.5%
細骨材	S	陸砂 (木更津産)	2.60	吸水率: 1.93%, FM: 2.58, 実積率: 66.8%
粗骨材	G	碎石 (硬質砂岩)	2.65	G _{max} : 20mm, 吸水率: 0.78%, FM: 6.82
混和剤	SPA	高性能AE減水剤	1.15	変性リグニ、アルキルアルコール硫酸塩+活性持続リマー

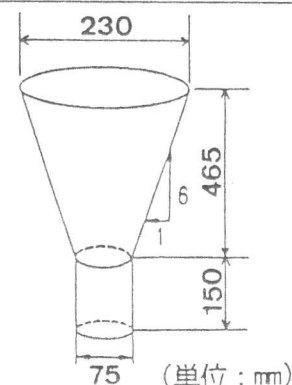


図-3 流下試験器 (ϕ ロート)

表-2 検討要因と各種の配合条件

No	検討要因	水準	配合条件				
			スランプロ (cm)	微粉末の種類	単位容積 (ℓ/m ³)		
				w	q	g*2	
I	微粉末の種類	NP, Sg, Fa Sf, Lf	*1	←	160	140	330
			60±3				
II	単位結合材容積 (q)	110~200 (ℓ/m ³)	*1	←	160	←	330
			60±3				
III	細骨材率 (s/a)	40~68%	*1	NP: 20% Sg: 50% Fa: 30%	160	160	220
			60±3			140	400
IV	単位水量 (w)	150~170 (ℓ/m ³)	60±3	←	140	330	

*1 SPA 添加率一定 (スランプフローは変化)

*2 g: 単位粗骨材容積

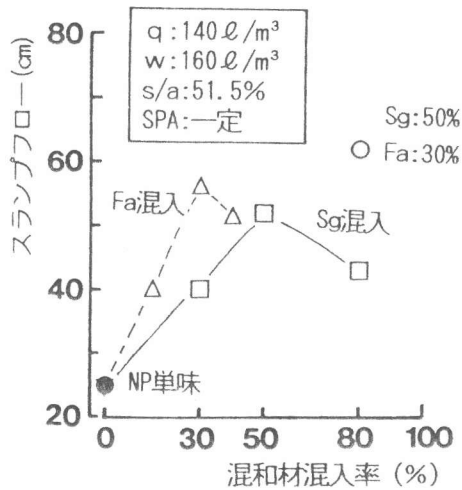


図-4 混和材混入率とスランプフロー

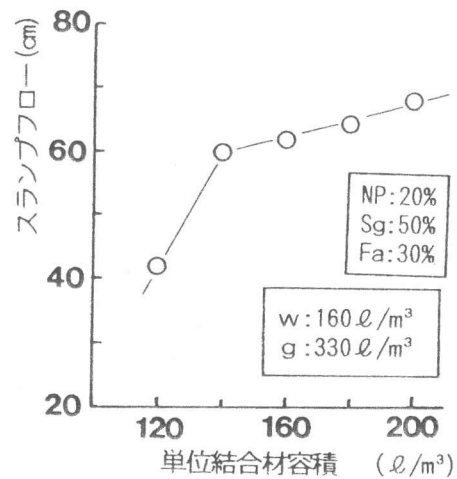


図-5 単位結合材容積とスランプフロー

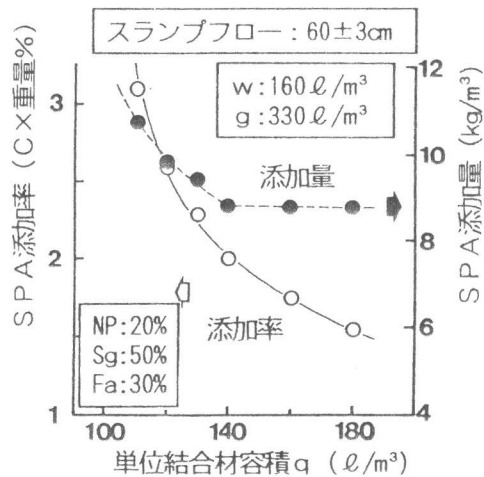


図-6 単位結合材容積とSPA添加量

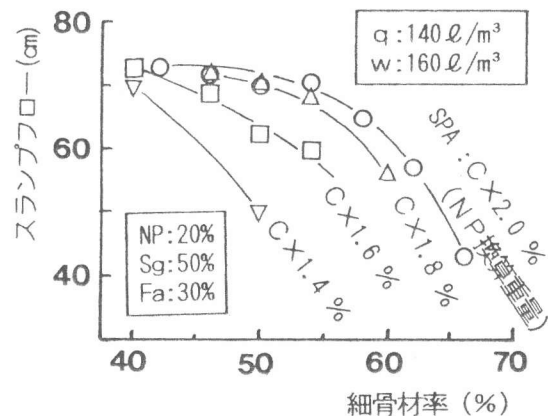


図-7 細骨材率とスランプフロー

4. 2 単位結合材容積と変形ポテンシャル

単位水量、混和剤添加率、単位粗骨材容積を一定としたときの、単位結合材容積とスランプフローの関係を図-5に示す。スランプフローは単位結合材容積が大きいほど大きくなるが、特に120~140 l/m³ での変化が著しい。図-6は単位水量、単位粗骨材容積を一定とした場合に、所定のスランプフロー(60cm)を得るのに必要な高性能AE減水剤の添加量を示したもので、単位結合材容積が140 l/m³より少なくなると高性能AE減水剤の添加量が急激に増加する。これらの結果から、ある変形ポテンシャルを得るのに必要な最小結合材容積が存在することが推察される。例えば、3種混合セメントを使用し、単位水量160 l/m³、単位粗骨材容積330 l/m³の条件で60cmのスランプフローを得るための最小結合材容積は140 l/m³程度と考えられる。

4. 3 細骨材率(単位粗骨材容積)と変形ポテンシャル

細骨材率のみを変化させ他の条件を一定とした時の、スランプフローの変化を図-7に示す。全般に、細骨材率が増加するとスランプフローは低下する傾向にあるが、高性能AE減水剤の添加量が多い場合には、細骨材率で55%程度まではあまり大きな低下は認められない。

5. 流動速度に及ぼす配合要因の影響

5. 1 微粉末の種類、混入率と流動速度

変形ポテンシャルを示すスランプフローを同一にして、微粉末の種類と混入率が流下速度に及

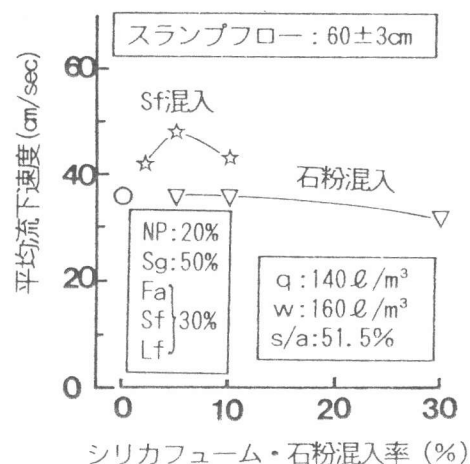
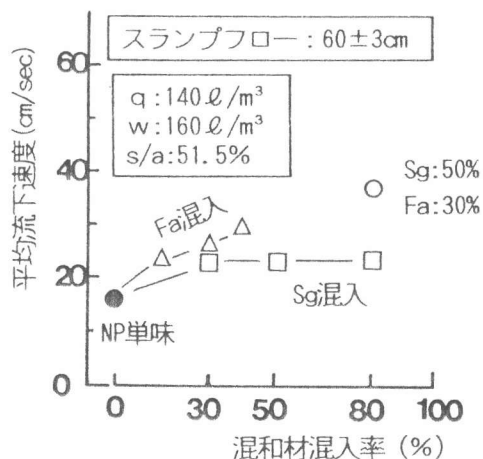


図-8 フライアッシュ、スラグ微粉末の流下速度への影響 図-9 石粉、シリカフェームの流下速度への影響

ばす影響を調べた結果の一例を図-8、図-9に示す。図-8は単位水量、単位結合材容積、細骨材率、スランプフローを一定とし、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混入した配合の混入率と流下速度の関係を示したものである。NPに比べてフライアッシュや高炉スラグ微粉末を混入した配合の流下速度はいずれも速くなり、特にフライアッシュを40%混入したものでは約2倍、フライアッシュ30%と高炉スラグ微粉末50%を混合使用したものでは2.5倍もの速さとなっている。同じスランプフローでこれだけ流下速度が変わるのは、コンクリートの粘性の低下によるものと考えられ、粒径、粒度の異なる微粉末材料を最適な割合で混合して全体の粒度分布を整えることにより、コンクリートの粘性をかなり低減できることが推察される。

図-9はフライアッシュを30%、高炉スラグ微粉末を50%混合した配合をベースに、フライアッシュの一部を石粉やシリカフェームで置き換えた場合の流下速度の変化を示したものである。石粉で置換した場合の流下速度は、混入率10%（1/3を置換）程度まではほとんど変化が見られず、全量（30%）置換しても流下速度は若干遅くなるだけで、粒形の違いによる悪影響は比較的少なく、石粉による粘性低減効果が大きいことがうかがえる。シリカフェームで置換した場合には、混入率10%まではいずれも流下速度が速くなり、流下速度が最も速くなる混入率（5%）が存在することがうかがえる。この理由は、シリカフェームがセメントに比べて著しく細かく、粒形も丸いため、高性能AE減水剤を併用すると適度に分散されて、コンクリートの粘性が低下する[7]ためである。また、微粉末全体の粒度分布が最適となる混入率でコンクリートの粘性が最も低くなるため、この混入率で変形速度が著しく改善されることが推察される。

5.2 単位結合材容積、細骨材率、単位水量と流動速度

単位水量、単位粗骨材容積、スランプフローを一定としたときの、単位結合材容積と流下速度の関係を図-10に示す。この結果より、流下速度は単位結合材容積が120~140 ℓ/m³程度で最も速くなり、160 ℓ/m³以上や110 ℓ/m³以下では遅くなるのが明らかである。この図においては、単位水量、単位粗骨材容積が一定の条件で結合材容積を変化させているため、単位結合材容積が大きいものほど細骨材率（53.5~48.4%）や水結合材比（52.5~32.1%）は小さくなっている。従って、単位結合材容積が大きいもので流動速度が低下したのは、水結合材比の低下に伴う粘性の増加が主要因と思われる。また、単位結合材容積が著しく小さいものでは、ペースト容積の減少により骨材分離の傾向が顕著となり、テーパ一部で閉塞ぎみとなって、コンクリートの流動速度が低下したのものと思われる。このように、流動速度の観点から、単位水量、単位粗骨材容積、スランプフローに見合った最適な単位結合材容積が存在することが推察される。

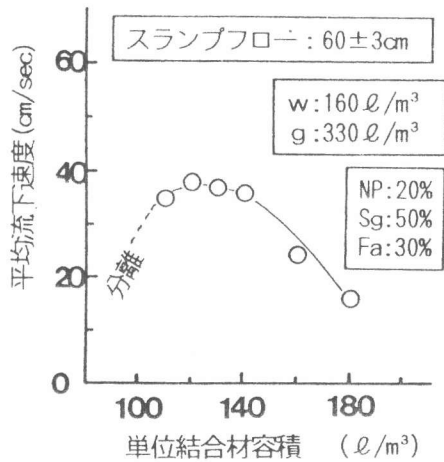


図-10 単位結合材容積と流下速度の関係

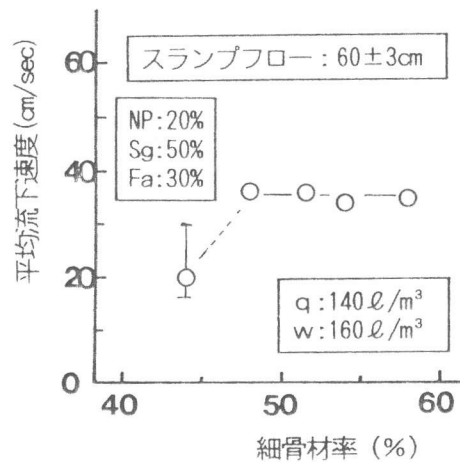


図-11 細骨材率と流下速度の関係

単位水量、単位結合材容積、スランプフローを一定としたときの、細骨材率と流下速度の関係を図-11に示す。この結果より、細骨材率が44%（単位粗骨材容積は380 l/m³）の場合には3回の測定値に大きなばらつきが見られ、平均値でみた流下速度もかなり小さくなっている。これは、単位結合材容積が少ない場合と同様にルートからの流下の途中に、閉塞ぎみとなって流下時間が大きくなるためである。このように、単位水量や単位結合材容積、スランプフローに見合った細骨材率の下限値（最小細骨材率）が、流動速度の観点から定まることが推察される。なお、図-10、11の結果から明らかなように、ルートで求めた流下速度はコンクリートの粘性の違いのみならず、流動による骨材分離の程度を評価することも可能である。

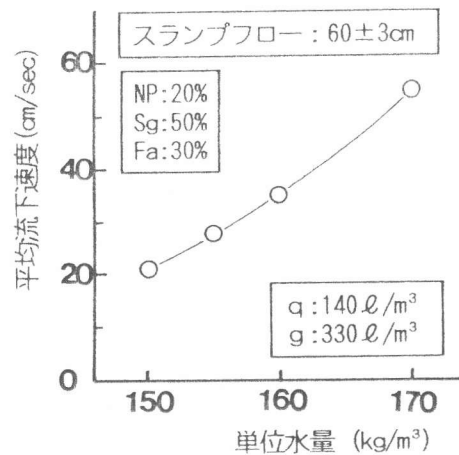


図-12 単位水量と流下速度の関係

単位結合材容積、単位粗骨材容積、スランプフローを一定としたときの、単位水量と流下速度の関係を図-12に示す。この結果より、単位水量が多いほど流下速度は速くなることが明らかである。これは、単位水量の増加に伴い水結合材比が増大し、コンクリートの粘性が低下したためと思われる。

5. 3 高速流動コンクリートの配合に関する一考察

以上の結果から明らかなように、粒子形状や粉末度、活性の異なる微粉末系材料を適当に混合したものを結合材とし、単位水量や単位結合材容積、細骨材率を適当に選定することにより、変形ポテンシャルが大きく、さらに流動速度が大きい高速流動コンクリートが製造できる可能性が示された。この場合、変形ポテンシャルや流動速度をどの程度に設定したら、高品質なコンクリートが施工できるかについてはまだ不明の点も多く、特に、流動速度と分離抵抗性の関係把握も含め、今後さらに詳細な検討が必要と思われる。

6. 結論

本研究で明らかになったことをまとめると以下のようなになる。

- (1) コンクリートの流動性は変形ポテンシャルと流動速度で表現できるが、変形ポテンシャルを示すスランプフローが同じであっても、コンクリートの流動速度は配合要因の違いによる粘

性の違いによって大きく異なる。

- (2) コンクリートの変形ポテンシャルは微粉末材料の種類や混入率の影響を受け、粒形や粒度の違いにより、変形ポテンシャルが最も大きくなるような最適な混入率が存在する。また、各種の微粉末材料を混合使用することにより、結合材全体の粒度分布[8]が適正となり、コンクリートの変形ポテンシャルを著しく大きくできる。
- (3) 単位結合材容積には、大きな変形ポテンシャルを得るために必要な最小値が存在し、この値は結合材の種類、単位水量、混和剤量、細骨材率によって異なる。
- (4) コンクリートの流動速度は微粉末材料の種類や混入率の影響を受けるが、粒形や粒度の違いにより、流動速度への影響の程度はかなり異なる。例えば、フライアッシュを40%混入することによりNPの約2倍に、また、フライアッシュ30%と高炉スラグ微粉末50%を混合使用することにより約2.5倍の速さとなる。さらに、シリカフェームを5%程度混入することにより、流動速度をNPの3倍まで速くすることが可能となる。
- (5) 単位水量が一定の場合、流動速度を速くするのに最適な単位結合材容積や、細骨材率の最小値が存在する。また、同じスランプフローでも単位水量が多いほど流動速度は速くなる。
- (6) 以上の要因を適正に組み合わせることにより、変形ポテンシャルならびに流動速度が大きい高速流動コンクリートを製造することが可能である。

一般に、コンクリートの配合は、強度、耐久性、施工性、経済性を考慮して定めることになっているが、本研究では流動速度という観点からコンクリートの施工性を再検討し、高速流動コンクリートの配合について有益な知見が得られた。今後は、高速流動コンクリートの配合要因と分離抵抗性という観点から、実際の施工条件に見合った検討を行なう予定である。

【参考文献】

- 1) 坂田 昇ほか：高流動コンクリートの充填性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12、No. 1、pp. 301-306、1990. 6
- 2) 小沢一雅ほか：ハイパフォーマンスコンクリートの開発、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 11、No. 1、pp. 699-704、1989. 6
- 3) 竹下治之ほか：締固め不要な高流動コンクリートに関する基礎的研究、コンクリート工学論文集、Vol. 1.1、No. 1、pp. 143-153、1990. 1
- 4) 青木 茂ほか：各種スランプロス低減型流動化剤を用いた高強度コンクリート、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 9、No. 1、pp. 229-234、1987. 7
- 5) 近松竜一ほか：コンクリートの流下速度試験による打込みやすさの一評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13、1991. 6 (別報)
- 6) 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
- 7) 三浦律彦ほか：コンクリートの圧送性の改善に関する基礎研究、土木学会、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. 125-130、1986. 3
- 8) 近松竜一ほか：異種粒度の結合材を用いたフレッシュコンクリートの性質、コンクリート工学年次論文報告集Vol. 12、No. 1、pp. 93-98、1990. 6