

論 文

[1027] 超流動コンクリートの基礎物性に関する研究

正会員○新藤竹文（大成建設技術研究所）

正会員 松岡康訓 （同 上）

正会員 S. Tangtermsirikul （同 上）

正会員 坂本 淳 （同 上）

1. はじめに

コンクリートは比重の異なる種々の材料を組合せた複合材料であるため、運搬・打込み・締固め等の各施工段階で分離しやすく、部材全体として均等質を確保することが難しい材料と言える。

特に締固めについては、不十分であれば局部欠陥を生じ、逆に、過度の締固めは材料分離を助長することから、責任技術者の入念な品質・施工管理が要求される。

これに対して、流動性が大きくかつ分離抵抗性の大きいコンクリートを用いることができれば、締固め作業を無くすことが可能であり、施工性を飛躍的に改善させるばかりでなく、人為的な技術や管理の良否に左右されることなくコンクリート構造物を均等質にできるものと期待される。

このような締固めを不要とするコンクリートの基本コンセプトは、小沢らによって「ハイパフォーマンスコンクリート（HPC）」として提唱されている [1]。著者らは、このHPCの配合を基本として、さらに、天然高分子の多糖類ポリマーを分離低減剤として使用することによって、HPCの流動性および充填性とほぼ同等の性能を有するコンクリート（以下、超流動コンクリートと称する）を開発した。

超流動コンクリートのフレッシュコンクリートに要求される基本性能の中では高流動性と高材分離抵抗性が特に重要であり、両性能を適正にバランスさせた上で極力大きくすることによって、締固めを行うことなく鋼材が複雑に配置された部分への充填が可能になると考えられる。

しかし、これらの超流動コンクリートに要求される性能を定量的に評価する方法はまだ確立されていない。そこで、著者らは独自の評価試験方法を提案し、超流動コンクリートのフレッシュな状態に要求される基礎物性の定量的な評価を行った。なお、本評価試験により最適な単位水量や分離低減剤の添加量を選定することが可能である [2]。

本研究は、超流動コンクリートのフレッシュな状態における基礎物性および要求性能を定量的に評価・判定することを目的に行ったもので、最適細骨材率の選定および分離低減剤を添加した場合の効果について行った試験結果ならびに超流動コンクリートに要求される性能の適正範囲について総合的に評価した結果について言及したものである。

2. 評価方法

超流動コンクリートの要求性能の評価は、図-1に示すフローに従って行った。

図-1に示すように、スランプフロー測定と分離抵抗性測定によって流動性と

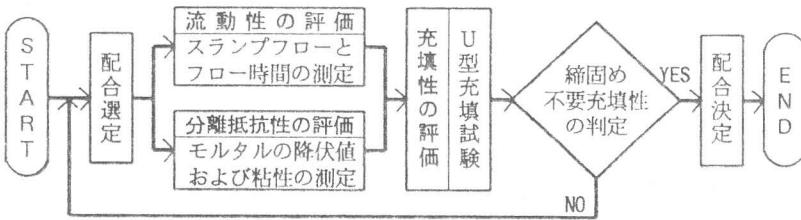


図-1 超流動コンクリートの性能評価フロー

モルタルの粗骨材に対する分離抵抗性を定量的に把握し、U型充填試験により締固め不要による充填性の良否を判定するものである。

2.1 スランプフロー試験

本試験は水中不分離性コンクリートに対して行われている試験と同様である。すなわち、JIS A 1101に準拠したスランプ試験後の直徑とフロー終了時間を測定し、コンクリートの流動性を評価するものである。

2.2 分離抵抗性試験

本試験はモルタルの粗骨材に対する分離抵抗性を測定するものである。図-2に示すように、コンクリートのモルタル部について、予め試料中に挿入した十字の鋼板を一定速度で引上げ、その時の引上げ速度と引上げ荷重の関係から、図-3に示すように、モルタルの見掛けの降伏値および粘性を測定するものである。

なお、本試験はレオロジー定数を評価するものではなく、モルタルと粗骨材との相対的な分離抵抗性を測定する試験と言える。

2.3 U型充填試験

本試験は、鉄筋が密に配置された部材中に、締固めを行わないでコンクリートの充填が可能であるか否かを判定することが目的である。

試験は図-4に示すように、中央部に純間隔35mmで鉄筋(13mm異形棒鋼)を配置した障害部を設けたU型充填装置により行うもので、中央部のゲートを開めた状態で片側にコンクリート試料を詰め、一気にゲートを開け、障害部を通過した後のコンクリートについて充填高さ:Hおよび洗い試験による障害通過後の粗骨材量を測定した。ここで、水にて同様の試験を行った場合の充填高さ:Hは30cmであったことから、コンクリート試料と容器周面との摩擦の影響を考慮して、良好な超流動コンクリートを用いて障害部の無い状態で充填試験を行い、充填高さが30cmとなるように調整した重りを載せることとした。また、充填性の評価は、充填高さが30cm以上でかつ障害部通過後の粗骨材量が通過前と同量となる場合を充填性良好と判定した。

3. 使用材料

結合材および骨材の品質は表-1に示すとおりである。結合材には普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを3:3:4の比率で混合したものを使用し、粗骨材は最大寸法20mmの碎石を使用した。また、ナフタリンスルホン酸ホルマリン高縮合物系

表-1 使用材料の品質

材料種別	混合比(%)	比重	プレーン値(cm ³ /g)	粗粒率
普通ポルトランドセメント	30	3.16	3270	—
高炉スラグ微粉末	30	2.90	4280	—
フライアッシュ	40	2.24	3140	—
細骨材(相模川・木更津混合砂)	—	2.57	—	2.80
粗骨材(八王子碎石:Gmax=20mm)	—	2.69	—	6.45

の高性能減水剤、および、分離低減剤として天然高分子の多糖類ポリマー（ブドウ糖が400～500直鎖状に結合）を使用した。

4. 評価試験結果

4.1 最適細骨材率の選定

表-2に示すように細骨材率を変化させた7種類の配合について、スランプフローおよび充填高さを測定し、最適細骨材率の選定を行った。

細骨材率とスランプフローおよび充填高さの関係を図-5に示す。また、同図中にはJIS A 1104に準拠して行った細・粗骨材の実積率試験から求めた、空隙率を併記する。

図-5より、細骨材率が35%から45%までのスランプ

フローはほぼ同等であるが、45%より大きくなると急激に低下するのが分かる。一方、充填性が良好な細骨材率は42%～46%の範囲にあり、45%の場合に最も充填性が良いのが分かる。

また、この結果は骨材の空隙率が最小となる細骨材率とほぼ一致することから、充填性が良好となる細骨材率は空隙率が最小となる場合であると考えられ、従って、超流動コンクリートの配合検討に際して、使用骨材の空隙率を最小とする細骨材率を求めることは、適確な配合選定を行う上での有効な指標となり得るものと考えられる。

4.2 分離低減剤の評価

(1) 流動性への効果

表-3に示す分離低減剤の添加量を変えた4種類の配合について、本分離低減剤が流動性および充填性に与える効果について検討した。

ここで、各コンクリートの配合は、U型充填試験を行ない、充填性が良好で最も流動性（スランプフロー）が大きい状態を最良配合と考え、高性能減水剤の添加量を調整し選定した。図-6は、分離低減剤の各添加量におけるスランプフロー、充填高さ、およびモルタルの粘性を示したものである。図-6より、本分離低減剤を添加することによって、高性能減水剤の添加量を僅かに増加させるだけで、練上がり時のスランプフロー（イニシャルフロー）を6cm

表-2 最適細骨材率の選定における配合および試験結果

配合NO	水結合材比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)		混和剤添加量 高性能減水剤	分離低減剤	評価試験結果		
			水W	結合材P			フロー(cm)	空気量(%)	充填高さH(cm)
CASE-1	32	35	160	500	1.5	1.0	67	4.3	17.5
CASE-2		39					68	3.9	24.4
CASE-3		42					68	3.9	35.2
CASE-4		45					69	4.0	36.3
CASE-5		46.5					67	5.1	35.5
CASE-6		48					59	3.6	32.0
CASE-7		51					56	3.7	32.5

注) 混和剤添加量：高性能減水剤＝結合材×重量%、分離低減剤＝単位水量×重量%

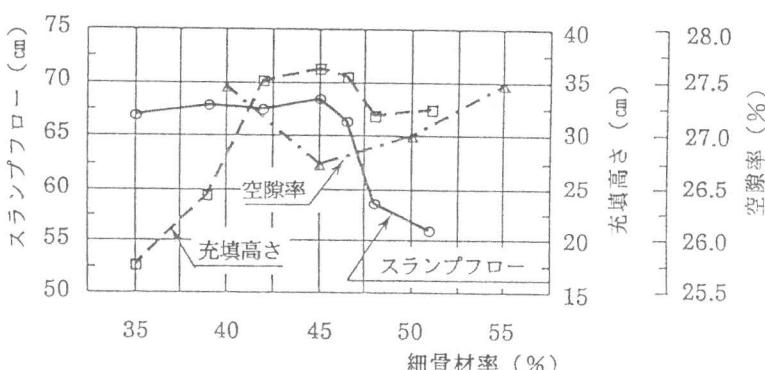


図-5 細骨材率とスランプフロー・充填高さ・空隙率の関係

配合NO	水結合材比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)		混和剤添加量 高性能減水剤	分離低減剤	評価試験結果		
			水W	結合材P			フロー(cm)	空気量(%)	充填高さH(cm)
CASE-1	32	45	160	500	1.15	0	63	3.0	30.0
CASE-2					1.30	0.3	64	3.2	31.0
CASE-3					1.40	0.6	69	3.3	34.5
CASE-4					1.50	1.0	70	3.0	34.0

注) 混和剤添加量：高性能減水剤＝結合材×重量%、分離低減剤＝単位水量×重量%

表-3 流動性への効果における検討配合および試験結果

~8 cm 大きくすることが可能で、良好な充填性が得られることが分かる。

(2) 単位結合材量に対する検討

表-4に示す、単位結合材量を変えた6種類の配合について、分離低減剤の有無による流動性を評価した。各配合は材料分離を生じない範囲

で最もスランプフローが大きくなるように、高性能減水剤の添加量を調整し選定した。また、水結合材比は32%を基本としたが、単位結合

材量400 kg/m³ の場合は、分離低減剤の有無によらず粘性の大きな硬いコンクリートとなつたため、単位水量を7 kg/m³ 増やし水結合材比を34%とした。

図-7は、単位結合材量とスランプフローの関係を分離低減剤の有無の両者について示したものである。

図-7より、単位結合材量の増加にしたがってスランプフローが大きくなる傾向は、分離低減剤の有無によらず同様であるが、分離低減剤を添加した場合は添加しないものに比較して大きなスランプフローが得られ、特に、単位結合材量が450 kg/m³ 以上の場合は、流動性を5 cm程度高める効果があるのが分かる。

また、分離低減剤を添加することにより、添加しない場合と同等のスランプフローを得るのに必要な単位結合材量を、50 kg/m³ 程度低減することが可能であると考えられるが、良好な充填性を安定して得るために単位結合材量としては500 kg/m³ 程度が妥当であると考えられる。

(3) 過剰添加の影響

分離低減剤の過剰添加が圧縮強度に及ぼす影響を、表-5に示す4種類の配合について検討した。

ここで、各配合の

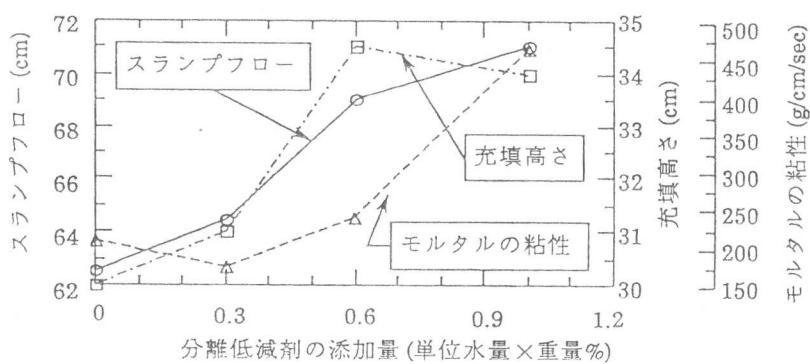


図-6 分離低減剤の添加量とフロー・粘性・充填高さの関係

表-4 単位結合材量に対する検討配合および試験結果

配合No	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)	混和剤添加量		評価試験結果		
				水W	結合材P	高性能減水剤	分離低減剤	フロー (cm)
CASE-1	32	45	160	500		1.70	0.6	72 4.4 35.7
CASE-2			144	450		1.10	0	67 5.0 35.0
CASE-3	32	45	135	400		2.10	0.67	66 5.0 23.0
CASE-4			135	400		1.30	0	62 4.3 24.5
CASE-5	34		135	400		4.00	0.71	62 6.8 16.0
CASE-6			135	400		1.90	0	60 4.9 16.5

注) 混和剤添加量: 高性能減水剤=結合材×重量%、分離低減剤=単位水量×重量%

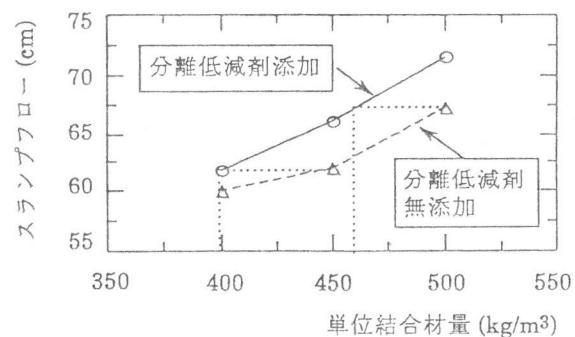


図-7 単位結合材量とスランプフローの関係

表-5 過剰添加に対する検討配合および試験結果

配合No	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)	混和剤添加量		評価試験結果		
				水W	結合材P	高性能減水剤	分離低減剤	フロー (cm)
CASE-1	32	45	160	500		0.60	0	16.5 3.5 スランプ
CASE-2						1.70	1.0	68 4.1 —
CASE-3						1.90	2.0	53 3.8 —
CASE-4						3.00	3.0	2.0 5.1 スランプ

注) 混和剤添加量: 高性能減水剤=結合材×重量%、分離低減剤=単位水量×重量%

強度比較は分離低減剤を添加しないCASE-1配合を基準としたが、本配合については高性能減水剤の影響を極力少なくするため、スランプ16cmのコンクリートとした。また、CASE-4配合の場合もスランプで2cm程度の硬いコンクリートであったが、同様の理由から、これ以上高性能減水剤を添加しなかった。

なお、通常の場合、分離低減剤の添加量は単位水量の1%以下であることから、CASE-3およびCASE-4配合は、通常添加量の2倍ないし3倍以上の過剰な添加と言える。

図-8は、分離低減剤の各添加量における材令3日、7日、28日の圧縮強度の結果である。

なお、図中の()内数値は、CASE-1配合の強度を基準(100%)とした場合の、各配合の強度比率である。

図-8より、分離低減剤を通常添加量の2倍程度添加しても、硬化後の強度低下は認められず、材令7日以降では基準値よりも大きな強度となっているのが分かる。

また、分離低減剤の添加量が3倍程度となると強度低下が認められるが、材令28日では基準値とほぼ同等の強度であるのが分かる。このことから、分離低減剤を通常の2倍程度と過剰に添加しても強度低下のないことが確認された。

4.3 適正範囲の総合評価

超流動コンクリートに要求される性能は高流動性と高分離抵抗性と言えるが、基本的には両者は相反する性能である。従って、両性能がバランスする適正範囲を定量的に把握することは、超流動コンクリートを選定する上で最も重要な課題と考えられる。ここでは、種々の配合における流動性および分離抵抗性の測定結果

をもとに、適正範囲の総合的な評価を行った。なお、これらの配合は、水結合材比32~36%、単位結合材量400~500kg/m³、細骨材率45~48%、分離低減剤の添加量0~1%（単位水量×重量%）の範囲であり、結合材にシリカフュームを使用したものも含む。

図-9はスランプフローと充填高さの関係を示したものである。

図-9より充填高さ30cm以上の良好な充填性を得るために必要なスランプフローは、概ね60cm~70cmの範囲であると言える。

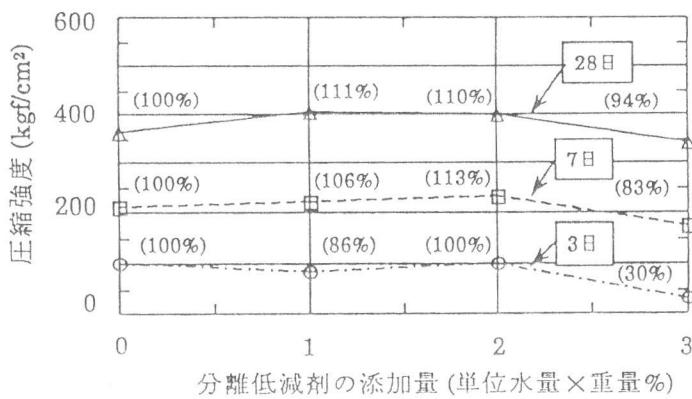


図-8 分離低減剤の添加量と圧縮強度の関係

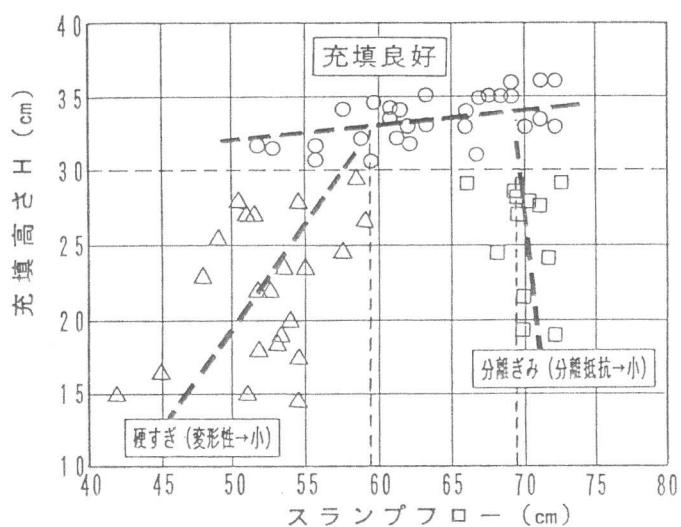


図-9 流動性における適性範囲

図-10は、モルタルの見掛けの降伏値と粘性および充填性の良否の判定結果の関係を示したものである。

図-10より良好な充填性を得るために必要なモルタルの分離抵抗性は、降伏値として100g～300gの範囲であり、粘性として300g/cm/sec～1000g/cm/secの範囲で、特に、300g/cm/sec～700g/cm/secの範囲において良好であるのが分かる。

このように、粘性と降伏値においては両者共に適正範囲を外れる場合は勿論のこと、どちらか一方が卓越し両者のバランスが崩れた場合でも良好な充填性は得られないものと考えられる。

5. まとめ

本評価試験により、超流動コンクリートに要求される性能を定量的に評価することが可能であり、さらに、充填性が良好となり得る超流動コンクリートは、流動性および分離抵抗性として適正な範囲があることが確認された。本評価試験によって得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 充填性が良好となる細骨材率は、骨材の空隙率を最小とする細骨材率とほぼ一致し、この値は超流動コンクリートの配合を適確に選定する上での有効な指標となり得る。
- (2) 本分離低減剤を添加することによって、高性能減水剤の添加量を僅かに増加させるだけで、添加しない場合と比較してスランプフローを6cm～8cm大きくすることができる。
- (3) 本分離低減剤を添加することにより、添加しない場合と同等のスランプフローを得るために必要な単位結合材量を、50kg/m³程度低減することが可能である。
- (4) 良好的充填性を安定して得るために必要な単位結合材量は500kg/m³程度と言える。
- (5) 分離低減剤を通常使用量の2倍以上と過剰に添加しても、圧縮強度の低下は生じない。
- (6) 超流動コンクリートにおいて充填高さ30cm以上となる良好な充填性を得るために必要なスランプフローの範囲は60cm～70cmと言える。
- (7) 超流動コンクリートのモルタルにおいて、充填高さ30cm以上となる良好な充填性を得るために必要な分離抵抗性は、見掛けの降伏値として100g～300gの範囲であり、粘性として300g/cm/sec～700g/cm/secの範囲と言える。

(参考文献)

- [1] 小沢一雅・前川宏一・岡村甫：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
- [2] 新藤竹文・松岡康訓・T. Somnuk・坂本淳：締固め不要コンクリートのフレッシュな状態における性状、土木学会第45回年次学術講演会、第5部、V-101、pp. 228-229、1990. 9