

論文 高流動コンクリートの自己充填性とモルタルのレオロジー特性に関する研究

新藤竹文*1・横田和直*2・横井謙二*3

要旨：本論文は、結合材や骨材の混合比率、分離低減剤や高性能AE減水剤の添加量などを配合要因とした各種の高流動コンクリートにおいて、その自己充填性とモルタルのレオロジー特性との関係を評価した結果についてまとめたものである。試験の結果、各種の配合要因ごとに高流動コンクリートとして自己充填性が可能となる場合のモルタルのレオロジー特性をレオロジー定数である塑性粘度と降伏値とを相関によって定量化できることが明らかとなった。

キーワード：高流動コンクリート、分離低減剤、自己充填性、レオロジー、塑性粘度、降伏値

1. はじめに

高強度あるいは低発熱化などの多種多様な要求性能に応じた高流動コンクリートにおいて、その強度特性や耐久性などの硬化コンクリートとしての品質については、開発の進んでいる種々の新しい材料を複合的に取り扱ったり、既存の材料を組み合わせることによっても比較的容易に対応することが可能である。しかしながら、そのフレッシュコンクリートの特性において、各種の配合要因に対して自己充填を可能とする、さらには最良とするような配合を定量的に判定できる配合選定手法はいまだに確立されていない。本論文は、高流動コンクリートにおける各種の配合要因を体系的に取り扱うことのできる配合選定手法の確立を目的として行った高流動コンクリートの流動性および分離抵抗性の定量評価試験について、特に、結合材や骨材の混合比率、分離低減剤や高性能AE減水剤の添加量などの各種の配合要因が自己充填性とそのモルタルのレオロジー特性に及ぼす影響についてまとめたものである。

2. 評価試験

2.1 評価手順

本評価試験の手順は図-1に示すとおりである。まず、配合要因の異なる各種の高流動コンクリートについて自己充填性を評価し、次に、コンクリートの流動特性としてスランプフローおよびフロー時間を測定し、さらに、コンクリート試料を5mmふるいでウェットスクリーニングしたモルタル試料においてレオロジー特性として塑性粘度および降伏値のレオロジー定数を測定する手順である。

本手法によって、高流動コンクリートとして自己充填が可能となるのに必要なコンクリートの流動特性とモルタルのレオロジー特性との定量的な相関を明らかにすることを試みたものである。なお、ここでは、基本とする配合の単位水量に対して±15%の範囲で水量を外割りで増減させた場合あるいは高性能AE減水剤の添加量を増減させた場合に

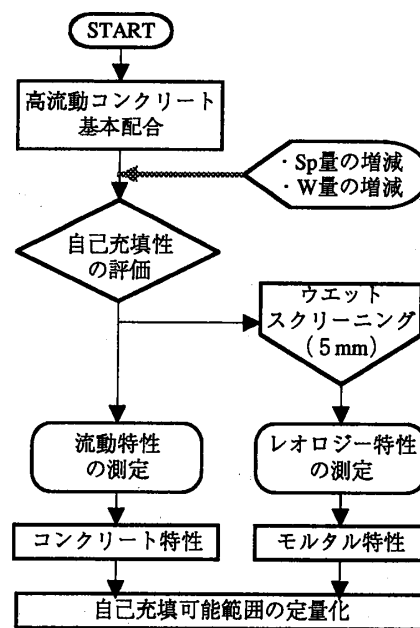


図-1 評価手順

*1大成建設(株) 技術研究所、副主任研究員、工博(正会員)

*2大成建設(株) 技術研究所、研究員、(正会員)

*3大成建設(株) 技術研究所、研究員、工修(正会員)

ついて同様の手順で評価試験を行い、材料分離にともなう閉塞から流動性の低下にともなう閉塞までの範囲において、高流動コンクリートとして自己充填が可能となる範囲とその時のレオロジー定数とを相関付けることとした。

2.2 評価方法

(1) 自己充填性の評価

自己充填性の評価は図-2に示す形状のU型充填試験装置[1]を用いて行った。本試験は、A室から、13mm異形棒鋼をピッチ50mmで平行に配筋した流動障害を通過した時のB室における充填高さ（ U_h ）を測定するものである。

ここで得られた充填高さ（ U_h ）は間隙通過性の良否の定量的な指標となるものであり、充填高さが大きいほど良好な自己充填性を有する高流動コンクリートであると評価できる。ここで、試料と容器内面との摩擦が無いと仮定すれば、左右が水平となる計算上の最大充填高さは36.5cm（A室側下がり量31.5cm）であり、また、良好な自己充填性を有する高流動コンクリートの場合は本装置の最大値相当の充填高さとなる。なお、極めて高密度な配筋条件と言える型枠内に充填する試験[2]、および、51mm異形鉄筋が純間隔50～75mmで配筋された実構造物を対象とした実工事における知見[1]により、充填高さが30cm以上であれば実用的に十分良好な自己充填性を有することが明らかとなっている。したがって、ここでは充填高さ30cm以上となる場合を自己充填可能と判定することとした。

(2) 流動特性の測定

コンクリートの流動特性はスランプフローを測定することによって評価した。なお、スランプフローの測定と合わせて、試験開始直後からスランプフローが50cmに到達するまでに要する時間：フロー50cm到達時間（ T_{50} ）を測定した。フロー50cm到達時間は流動速度の指標であり、これまでの研究[3]により、下式（1）より求めたスランプフロー50cm時の速度（ V_{50} ）はスランプフロー40cm～60cmの範囲での平均速度と高い精度で一致し、さらに、このフロー速度の逆数は分離抵抗性の指標と考えられる見掛けの塑性粘度と線形的な相関があることが明らかとなっている。

$$V_{50} = [(Sf_{50} - Sf_{20}) / 2] / T_{50} = 15 / T_{50} \quad \dots (1)$$

ここで、 V_{50} ：フロー速度（cm/sec）、 $Sf_{50} \sim Sf_{20}$ ：初期～フロー50cmまでの流動距離（cm）

T_{50} ：フロー50cm到達時間（sec）

(3) レオロジー特性の測定

モルタルのレオロジー特性は図-3に示す外円筒回転型回転粘度計を用いて測定した。ここで、試験条件は2分間で回転数を0～50rpmまで変化させることとし、その角速度と内筒に加わるトルク値とのレオロジー曲線をもとに、レオロジー定数である塑性粘度（ η ）および降伏値（ τ ）を算出した。

2.3 検討ケース

対象とした高流動コンクリートの基本配合および使用材料の品質を表-1、表-2に示す。ここで、空気量の目標値は4%である。表-1に示すように、ここでは大きく3種類の配合要因を対象とした。

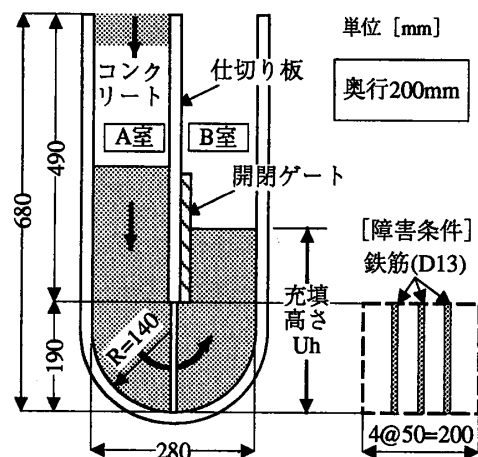


図-2 U型充填試験装置

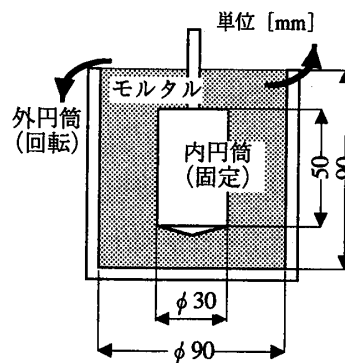


図-3 回転粘度計の形状

シリーズ [I] は、高ビーライト系低発熱セメントを主体とした圧縮強度80N/mm²以上の高強度特性を付与した高流動コンクリートである。本シリーズでは、基本配合に対して高性能AE減水剤の添加量を変化させた場合に、ここに対象とする分離低減剤 [4] の添加の有無と自己充填性の相関について比較を行った。

シリーズ [II] は、普通ポルトランドセメントに石灰石微粉末を混合した高流動コンクリートである。それぞれの基本配合は単位水量を一定として、粉体量の増加に合わせて細骨材量を減じた配合であり、充填高さが最大となるように高性能AE減水剤の添加量を調整して選定した。これらの基本配合に対して水量のみを外割りで増減させた場合に、粉体量の違いが自己充填性に及ぼす影響を比較検討した。

シリーズ [III] は、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末とフライアッシュの3成分系結合材を使用した高流動コンクリートである。各ケースの基本配合は水結合材比および砂結合材比を一定とした同じ配合のモルタルであり、粗骨材量の増加分に合わせてモルタル量を減じた配合とした。ここでは、特に粗骨材どうしのアーチング作用に着目し、それぞれの基本配合に対して水量のみを外割りで増減させた場合に、粗骨材量の違いが自己充填性に及ぼす影響について比較検討した。

表-1 検討ケースおよび基本配合

シリーズ	配合 ケース	W/P (%)	単位量(kg/m ³)								Sp (P×%)	Bp (W×%)
			水 W	粉体 P					S	G		
				Op	Bl	Bs	Fa	Ls				
[Ⅰ]	C-1	30	165	-	500	-	50	-	792	813	1.95	0.3
	C-2	29.5	162						800		2.00	0
[Ⅱ]	C-3	47	165	350	-	-	-	0	982	793	2.30	0.3
	C-4	37						100	884		2.00	
	C-5	30						200	788		1.80	
[Ⅲ]	C-6	33	178	215	-	215	107	-	881	663	1.60	0.6
	C-7		165	200		100	819		795	1.60		
	C-8		157	190		96	782		875	1.70		

表-2 使用材料の品質

材料区分	種 別	品 質
粉体 P	Op 普通ポルトランドセメント	比重=3.16 比表面積=3270cm ² /g
	Bl 高ビーライト系低発熱セメント	比重=3.22 比表面積=3440cm ² /g
	Bs 高炉スラグ微粉末	比重=2.90 比表面積=4430cm ² /g
	Fa フライアッシュ	比重=2.23 比表面積=3080cm ² /g
	Ls 石灰石微粉末	比重=2.70 比表面積=3000cm ² /g
細骨材	S 比重=2.59 粗粒率=2.64	
粗骨材	G 比重=2.65 粗粒率=6.68 実積率=61% Gmax=20mm (碎石)	
混和剤	Sp 高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系+架橋ポリマー
	Bp 分離低減剤	水不溶性天然高分子 (β-1,3グルカン)

3. 結果および考察

3.1 シリーズ [I]

高性能AE減水剤の添加量の増減と充填高さおよびレオロジー定数の関係を図-4に示す。図-4において、充填高さ30cm以上となる充填可能範囲を見ると、分離低減剤を添加しないC-2は高性能AE減水剤の増減に対して明確な充填可能範囲が認められるが、分離低減剤を添加したC-1は特に高性能AE減水剤の増加に対して良好な自己充填性を大きな範囲まで確保していることが分かる。

また、レオロジー定数の変化を見ると、両ケースともに高性能AE減水剤の増減に対して、塑性粘度の変化は僅かであるが降伏値は顕著に変化する傾向にあり、高性能AE減水剤を添加した場合のレオロジー特性として一般的に知られているのと同じ結果が得られた。ただし、高性能AE減水剤の添加量の増減に

対する降伏値の変化が、分離低減剤の有無によらず両ケースともに同等である点は特徴的であり、これは、ここに使用した分離低減剤が高性能AE減水剤の流動性付与効果を阻害しないことを示す結果と解釈できる。

図-5は降伏値と塑性粘度の関係を示したものである。塑性粘度と降伏値との関係を見ると、分離低減剤を添加しないC-2は塑性粘度と降伏値との傾き (η/τ) が大きく、高性能AE減水剤の添加量の増加にともなう降伏値の減少とともに塑性粘度が減少する割合が大きいことが分かる。

降伏値および塑性粘度の減少は分離抵抗性の低下を意味しており、これが、配合ケースC-2において高性能AE減水剤を増量した場合に充填高さの減少すなわち自己充填性の低下を生じた理由であると言える。しかし、前述のとおり高性能AE減水剤の添加量の増減に対する降伏値の変化は分離低減剤の有無によらず両ケースともに同等であることから、高流動コンクリートの分離抵抗性は主に塑性粘度に左右されるとともに、高流動コンクリートの自己充填性と分離抵抗性との相関をモルタルの塑性粘度と降伏値との傾き η/τ によって評価できるものと考えられる。

3.2 シリーズ [II]

水量の増減と充填高さおよびレオロジー定数の関係を図-6に示す。図-6において充填高さ30cm以上となる充填可能範囲を求め、これと同じ水量変化に対する降伏値と塑性粘度の範囲を求めることによって、高流動コンクリートとして自己充填が可能となる降伏値と塑性粘度の上限値と下限値を定量化することとした。

図-7は降伏値と塑性粘度の関係、および、上記の方法により求めた降伏値および塑性粘度の上限値と下限値の関係を示したものである。降伏値と塑性粘度の関係は対数曲線によってほぼ近似できるが、粉体量（ペースト量）の増加にともない近似曲線は上方へシフトするのが分かる。

図-6を見ると分かるように粉体量の増加にともない充填可能範囲は大きくなるが、このように、粉体量の増加にともない同じ降伏値に対する塑性粘度が増加することによって分離抵抗性が大きくなったことが、充填可能範囲が大きくなった理由であると考えられる。

図-7において、いずれの配合も流動特性の低下すなわち塑性粘度と降伏値が増加する方向において、塑性粘度の変化は僅かであるのに降伏値が急増する傾向にあり、この降伏値の急増する領域と充填可能範囲として得られた上限値とはほぼ一致することが分かる。また、分離抵抗性の低下すなわち塑性粘度と降伏値が減少する方向における充填可能範囲の下限値については塑性粘度が支配的であり、粉体量（ペースト量）や高性能AE減水剤の添加量の違いによらず降伏値は $\tau=5\sim 10\text{N/m}^2$ 程度に収束する傾向に

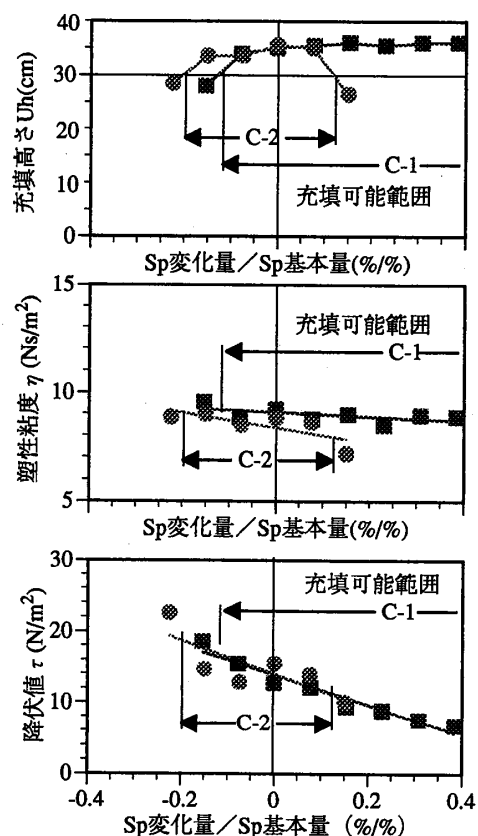


図-4 Sp添加量と充填高さ・レオロジー定数の関係

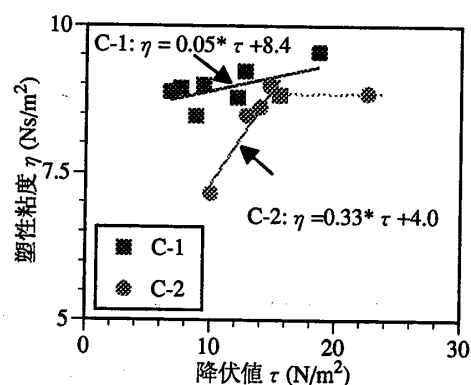


図-5 降伏値と塑性粘度の関係

ある。この結果は、流動特性の低下に対しては降伏値が支配的となり、分離抵抗性の低下に対しては塑性粘度に支配されるが降伏値についても一定の限界値があることを示唆するものである。

図-8はスランプフローとフロー速度の関係を示したものである。粉体量の増加にともない同じスランプフローにおけるフロー速度は遅くなる傾向が認められるが、これは、前述のように粉体量の増加にともない同じ降伏値に対する塑性粘度が大きくなることが理由であり、コンクリートの流動特性が塑性粘度によって左右されることを改めて示す結果と言える。

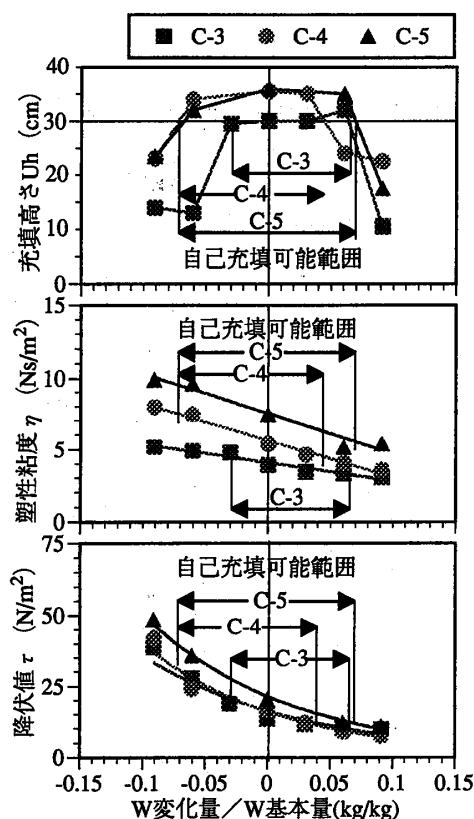


図-6 水量変化と充填高さ・レオロジー定数の関係

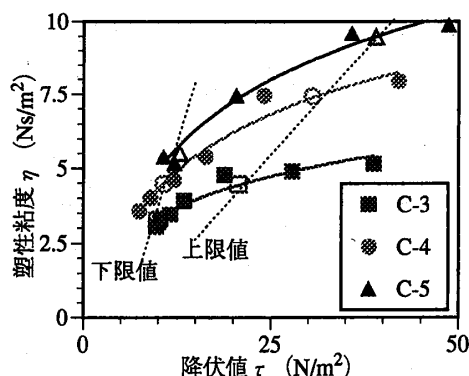


図-7 降伏値と塑性粘度の関係

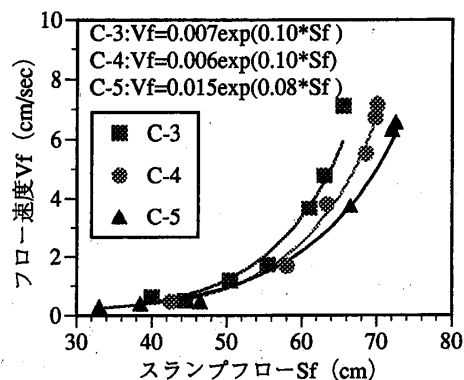


図-8 スランプフローとフロー速度の関係

3.3 シリーズ [Ⅲ]

水量の増減と充填高さおよびレオロジー定数の関係を図-9に示す。図-9を見ると、水量の変化に対するモルタルのレオロジー定数の変化はいずれのケースも同等であるが、充填可能範囲は大きく異なり、粗骨材どうしの物理的な噛み合いにより高流動コンクリートの自己充填性が著しく左右されることが良く分かる。図-10はスランプフローとフロー速度の関係を示したものである。両者の関係はほぼ指数曲線によって近似できるが、いずれの配合ケースもほぼ同じ曲線となる。このことから、粗骨材量は高流動コンクリートの自己充填性を大きく左右する要因となるものの、モルタルのレオロジー特性が同じであれば、高流動コンクリートの流動特性であるスランプフローとフロー速度の関係は粗骨材量の違いによらずほぼ同等であると考えられる。

図-11は粗骨材体積比と降伏値に対する塑性粘度の比 (η/τ) との関係において、先のシリーズ [Ⅱ] で述べたと同じ方法により求めた降伏値および塑性粘度の上、下限値を示したものである。

同図には、水セメント比55%と45%でスランプ8cmのコンクリート、および、水セメント比45%で高性能AE減水剤を適量添加してスランプ18cmとしたコンクリートの結果も示す。これらの一般コンクリートは粗骨材体積比が0.39~0.4程度であり、高流動コンクリートにおける上限値と下限値との交点と推定される粗骨材量の限界を越えていることから推定できるように、自己充填性は有していない。

しかしながら、図-11を見ると、水セメント比45%のコンクリートにおいては高流動コンクリートの充填可能範囲と同等のレオロジー定数の範囲にあるのが分かる。先のシリーズ [II] におけるC-3のように水量の変化に対して充填可能範囲が狭い敏感な配合となる可能性は高いが、少なくとも、このモルタルのレオロジー定数のままで粗骨材量を減じることで自己充填性が付与できる可能性はある。

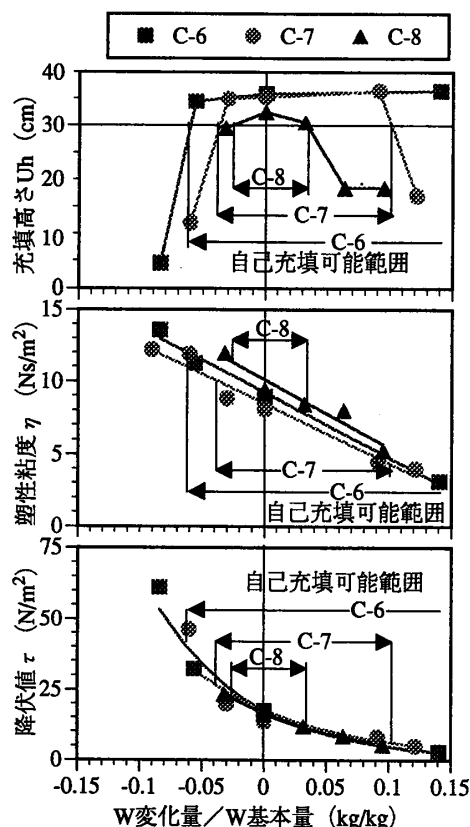


図-9 水量変化と充填高さ・レオロジー定数の関係

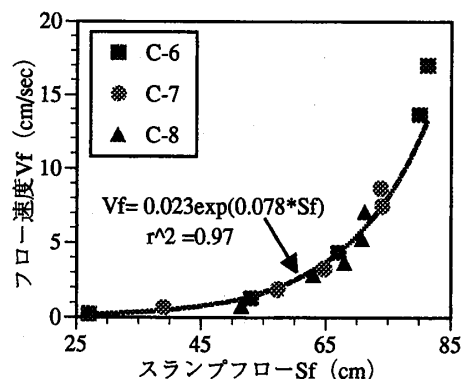


図-10 スランプフローとフロー速度の関係

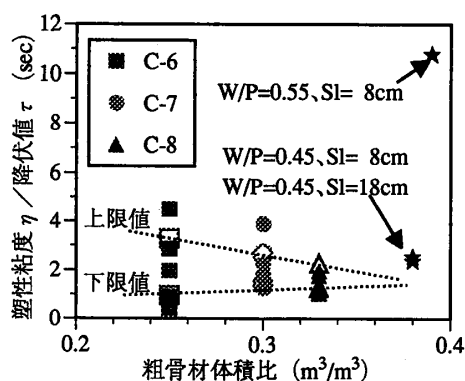


図-11 粗骨材量と塑性粘度/降伏値の関係

4. まとめ

ここでは、各種の配合要因について高流動コンクリートの自己充填性とモルタルのレオロジー特性との相関を定量的に評価することを試みた。本評価試験の結果、各種の配合要因に対して自己充填が可能なレオロジー特性の範囲をレオロジー定数である塑性粘度および降伏値によって定量化するとともに、高流動コンクリートの分離抵抗性をモルタルの塑性粘度と降伏値との傾きによって相関付けられる可能性を見いだした。今後は、モルタルのレオロジー特性と高流動コンクリートの流動特性との相関をより明らかにするとともに、さらに、粗骨材のアーチング作用が自己充填性に及ぼす影響について定量的な検討を加える所存である。

参考文献

- [1] 松岡康訓、新藤竹文、赤塚一司：超流動コンクリートの実構造物への適用、コンクリート工学、Vol.30、No.5、pp.53-62、1992
- [2] 岡村 甫、前川宏一、小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、1993
- [3] Somnuk.T., et al. : A Study on Velocity of Deformation of Super Workable Concrete、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、pp.1161-1166、1992
- [4] 奈良 潔ほか：コンクリート用分離低減剤 β -1,3-グルカン（カードラン）の性質、コンクリート工学論文集、Vol.5、No.3、pp.23-28、1994