

論文 各種混和材がフレッシュコンクリートの分離抵抗性に及ぼす影響に関する研究

王 迎華*¹・谷川 恭雄*²・森 博嗣*³・黒川 善幸*⁴

要旨：本研究では、フレッシュコンクリートが鉄筋間あるいは鉄筋と型枠の間隙を通過する際のモルタルの先送り現象に関連するマトリックスモルタル流出分離抵抗性に与える各種混和材の影響を明らかにすることを目的としている。本報では、フレッシュコンクリート中のマトリックスモルタルの流出分離試験を行い、粘塑性モデルに基づいた定量的な評価手法によって、マトリックスモルタル流出分離抵抗性に及ぼすシリカフューム、高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよび石英砂粉の影響について検討した。

キーワード：フレッシュコンクリート、混和材、分離抵抗性、マトリックスモルタル流出分離試験、粘塑性モデル

1. はじめに

フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性は、コンクリートを均一に保ち、所要の強度、水密性、耐久性などを有する硬化コンクリートを製造するために要求される重要な性質である。特に、高流動コンクリートでは、フレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく流動性を保持するための合理的な調合設計を行うことが要求される。一方、微粉末を用いる粉体系高流動コンクリートの開発・実用化が進められ、混和材の性質がこの種のコンクリートの流動性に及ぼす影響を検討した研究^{1), 2), 3)}が数多く見られるが、材料分離抵抗性に及ぼす影響については情報が少ないのが実状である。

本研究では、フレッシュコンクリートが鉄筋間あるいは鉄筋と型枠の間隙を通過する際のモルタルの先送り現象に関連する材料分離抵抗性に着目し、各種混和材がフレッシュコンクリートの材料分離抵抗性に与える影響を明らかにすることを目的としている。本報では、フレッシュコンクリート中のマトリックスモルタルの流出分離試験⁴⁾を行い、図-1に示すような粘塑性モデルに基づいた定量的な評価手法によって、

マトリックスモルタル流出分離抵抗性に及ぼすシリカフューム、高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよび石英砂粉の影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

試料の作製には、普通ポルトランドセメント、ポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤、川砂(FM=2.67)、各種混和材として、シリカフューム(SF)、高炉スラグ微粉末(BS)、フライアッシュ(FA)および石英砂粉(QF)を用いた。各混和材の密度およびブレン値を表-1に示す。粗骨材の影響を除外するため、すべての調合において、直径 $d=17\text{mm}$ のガラス玉を用いた。

表-1 各混和材の密度および比表面積

混和材	密度(kg/m ³)	比表面積(cm ² /g)
シリカフューム(SF)	2,160	200,000
高炉スラグ微粉末(BS)	2,830	6,000
フライアッシュ(FA)	2,170	3,230
石英砂粉(QF)	2,440	3,000

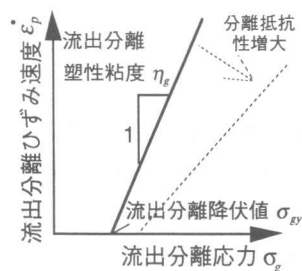
*1 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻 工修(正会員)
 *2 名古屋大学教授 工学研究科建築学専攻 工博(正会員)
 *3 名古屋大学助教授 工学研究科建築学専攻 工博(正会員)
 *4 名古屋大学助手 工学研究科建築学専攻 工修(正会員)

2.2 調査

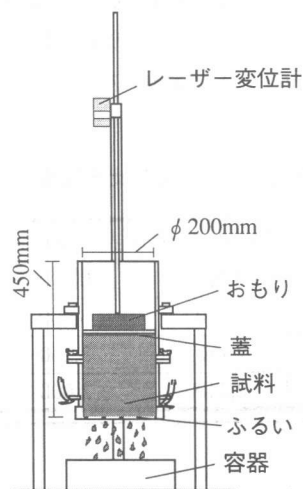
表一2に、実験に用いた試料の調査を示す。いずれの試料も、水粉体比 W/P を0.32、単位水量 W を175kg/m³、粗骨材体積比 V_g を0.33とした。また、高性能AE減水剤の添加率 HAE/P を2.16%および1.97%の2水準に変化させた。高性能AE減水剤添加率 $HAE/P=2.16\%$ の試料については、高炉スラグ微粉末(BS)は置換率を0.05とし、シリカフューム(SF)、フライアッシュ(FA)、石英砂粉(QF)は置換率を0.05、0.10および0.15の3水準とした。高性能AE減水剤添加率 $HAE/P=1.97\%$ の試料については、各種混和材の置換率を0.05および0.10の2水準とした。

2.3 測定方法

フレッシュモルタルの性質を把握するため、ミニスランブ試験⁴⁾



図一1 流出分離抵抗の構成則



図一2 流出分離試験装置

とミニスランブ試験⁴⁾を行い、B型回転粘度計を用いて、降伏値 τ_0 および塑性粘度 η を求めた。また、同時に付着試験⁵⁾も行った。その後、粗骨材を混入し、スランブフロー試験、円筒貫入試験^{6),7)}、および図一2に示すマトリックスモルタル流出分離試験⁴⁾を実施した。流出分離試験機の下部には、ふるい目寸法10mmのものをを用いた。

表一2 コンクリートの調査表

(a) シリカフューム (SF)

No.	W/P	BS/P	W	C	BS	S	G (Vg)	HAE/P	mSf
COH	0.32	0.00	175	547	0	837	772.2	2.16	362
C0		0.00		547	0	837	(0.33)	1.97	260
SF05H	0.32	0.05	175	520	27	827	772.2 (0.33)	2.16	313
SF10H		0.10		492	55	816			268
SF15H		0.15		465	82	806			249
SF05	0.32	0.05	175	520	27	827	772.2 (0.33)	1.97	225
SF10		0.10		492	55	816			220

(b) 高炉スラグ微粉末 (BS)

No.	W/P	SF/P	W	C	SF	S	G (Vg)	HAE/P	mSf
BS05H	0.32	0.05	175	520	27	834	772.2	2.16	428
BS05	0.32	0.05	175	520	27	827	772.2 (0.33)	1.97	353
BS10		0.10		492	55	817			381

(c) フライアッシュ (FA)

No.	W/P	FA/P	W	C	FA	S	G (Vg)	HAE/P	mSf
FA05H	0.32	0.05	175	520	27	827	772.2 (0.33)	2.16	398
FA10H		0.10		492	55	817			429
FA15H		0.15		465	82	806			448
FA05	0.32	0.05	175	520	27	827	772.2 (0.33)	1.97	309
FA10		0.10		492	55	817			369

(d) 石英砂 (QF)

No.	W/P	QF/P	W	C	QF	S	G (Vg)	HAE/P	mSf
QF05H	0.32	0.05	175	520	27	830	772.2 (0.33)	2.16	322
QF10H		0.10		492	55	824			367
QF15H		0.15		465	82	817			262
QF05	0.32	0.05	175	520	27	830	772.2 (0.33)	1.97	211
QF10		0.10		492	55	824			179

[Notes] W/P: Water-powder ratio, W: Water (kg/m³), P: Powder (kg/m³), C: Cement (kg/m³), S: Fine aggregate (kg/m³), G: Coarse aggregate (kg/m³), Vg: Volume fraction of coarse aggregate, BS: Ground granulated blast-furnace slag (kg/m³), SF: Silica fume (kg/m³), FA: Fly ash (kg/m³), QF: Quartz fume (kg/m³), BS/P: BS-powder ratio, SF/P: SF-powder ratio, FA/P: FA-powder ratio, QF/P: QF-powder ratio, HAE: High-range water-reducing AE agent, HAE/P: HAE-powder ratio (%), mSf: 1/2-Size slump-flow value (mm).

3. 実験結果および考察

3.1 流出分離試験の結果

図-3に、各試料からのマトリックスモルタルの流出量 V の時刻変化曲線を示す。混和材の種類が同じ場合、高性能AE減水剤添加量 $HAE/P=2.16\%$ の試料の方が $HAE/P=1.97\%$ の試料

より、最終流出量が大きく、流出速度も大きい。高性能AE減水剤添加量 HAE/P が同じ場合は、シリカフューム(SF)、フライアッシュ(FA)、高炉スラグ微粉末(BS)、石英砂粉(QF)を用いた試料の順に最終流出量が減少する。シリカフューム(SF)とフライアッシュ(FA)を用いた場

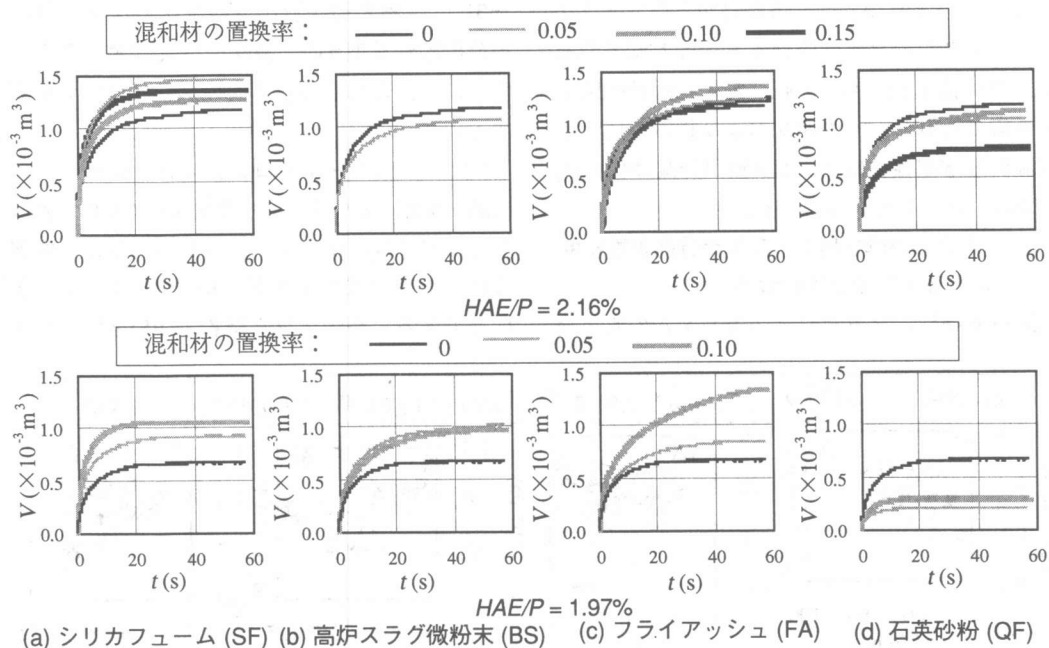


図-3 マトリックスモルタルの流出量 V と流出時間 t の関係

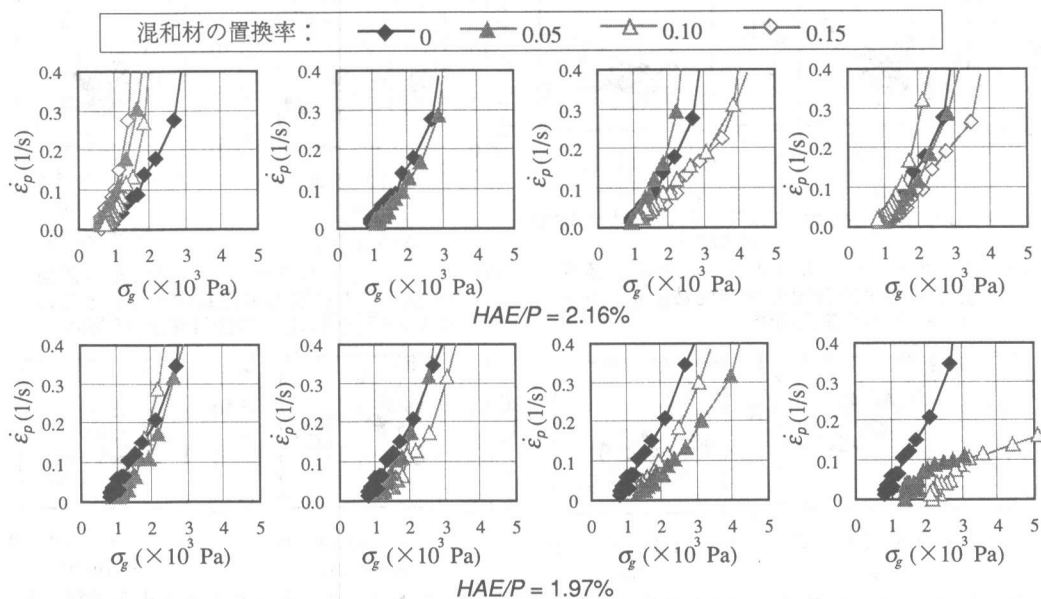


図-4 マトリックスモルタルの流出分離ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_p$ と流出分離応力 σ_g の関係

合の最終流出量は混和材を用いない基準試料より大きく、石英砂粉(QF)の場合は基準試料より小さい。一方、高炉スラグ微粉末(BS)を用いた試料では、基準試料より大きくなる場合と、小さくなる場合がある。

次に、粘塑性モデルに基づいた定量的な評価手法⁹⁾によって算出した、各試料からのマトリックスモルタルの流出分離ひずみ速度と流出分離応力の関係を図-4に示す。また、両者の関係を直線で近似し、その勾配および横軸の切片から流出分離塑性粘度 η_g および流出分離降伏値 σ_{gy} を求め、以下の考察に用いる。

3.2 流出分離降伏値および流出分離塑性粘度に及ぼす各種要因の影響

図-5~8に、マトリックスモルタルの流出分

離降伏値 σ_{gy} および流出分離塑性粘度 η_g に及ぼすスランプフロー値 Sf 、スランプフロー値が50cmに到達する時間 Sft 、B型回転粘度計によって求めたモルタルの降伏値 τ_y 、塑性粘度 η 、モルタルの相対付着タフネス⁵⁾ Tar および円筒貫入試験によるモルタル流入量 Fm の影響を示す。また、表-3に、各種要因が流出分離降伏値 σ_{gy} および流出分離塑性粘度 η_g の増減傾向に及ぼす影響を示す。以下、これらの各要因の影響について考察する。

(1) コンクリートのコンシステンシー

図-5(a)によれば、シリカフューム(SF)で置換した試料では、 σ_{gy} はスランプフロー値 Sf の増加に伴ってやや減少するが、 η_g は Sf とほとんど無関係である。高炉スラグ微粉末(BS)を用いた試

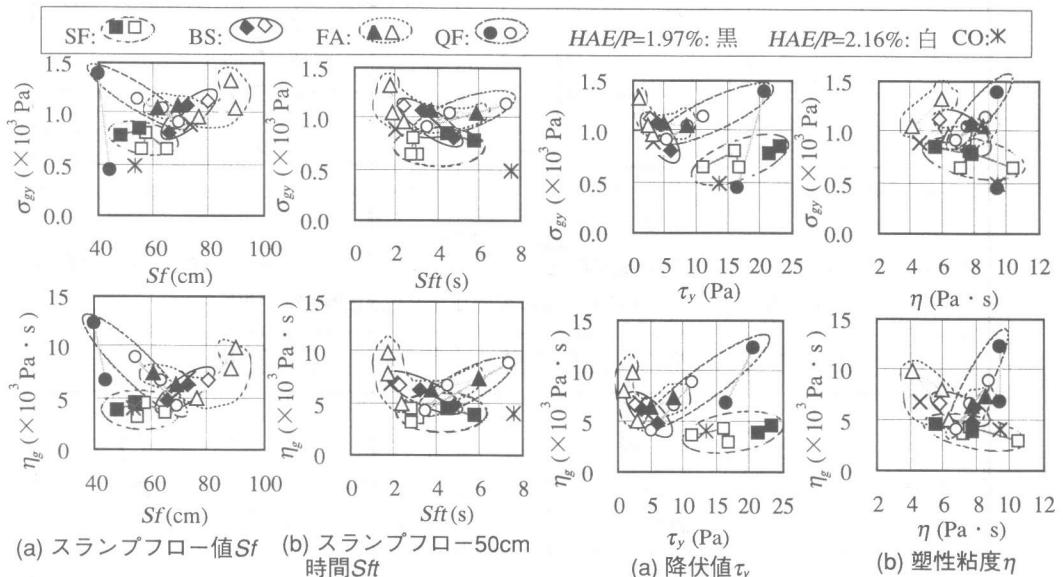


図-5 マトリックスモルタルの流出分離降伏値 σ_{gy} および流出分離塑性粘度 η_g とコンクリートの性質の関係

図-6 マトリックスモルタルの流出分離降伏値 σ_{gy} および流出分離塑性粘度 η_g とモルタルの降伏値 τ_y および塑性粘度 η の関係

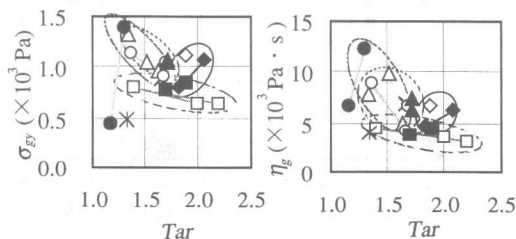


図-7 マトリックスモルタルの流出分離降伏値 σ_{gy} および流出分離塑性粘度 η_g とモルタルの相対付着タフネス Tar の関係

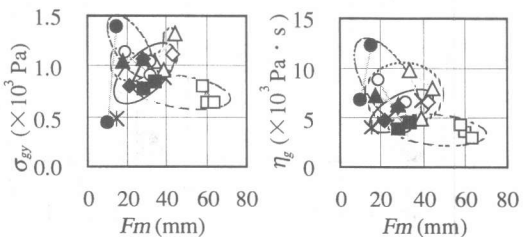


図-8 マトリックスモルタルの流出分離降伏値 σ_{gy} および流出分離塑性粘度 η_g と円筒貫入試験による流入モルタル量 Fm の関係

料では、 σ_{gy} および η_g はともに、 Sf の増加とともに増加する傾向がある。フライアッシュ(FA)を用いた試料の σ_{gy} および η_g は、 Sf の増加に伴って減少するが、 Sf が80cmを超える試料では増加に転じる。これは、このような試料では試験前から分離を生じていたため、粗骨材の沈降によって閉塞が発生し、値が増加したものと考えられる。そこで、以下の考察および表-3ではこのような粗骨材が沈降している試料を除外した。また、石英砂粉(QF)を用いた試料の σ_{gy} および η_g は、 Sf の増加に伴って減少する。

一方、図-5(b)によれば、シリカフューム(SF)で置換した試料では、 σ_{gy} および η_g は、 Sft の増減とほとんど無関係である。高炉スラグ微粉末(BS)の試料では、 Sft の増加に伴って減少するが、フライアッシュ(FA)および石英砂粉(QF)の試料では、 Sft の増加とともに増加する傾向を示す。

(2) モルタルのレオロジー性質

図-6(a)によると、シリカフューム(SF)で置換した試料では、 σ_{gy} および η_g は、 τ_y の増加に伴いやや増加する。高炉スラグ微粉末(BS)の試料では、 τ_y の増加に伴って減少し、フライアッシュ(FA)の試料では、 τ_y の増加につれて増加する傾向を示す。また、石英砂粉(QF)の場合には、 τ_y の増加とともに増加する。一方、図-6(b)によると、シリカフューム(SF)および高炉スラグ微粉末(BS)で置換した試料では、 σ_{gy} および η_g は、 η の増加に伴って減少する傾向を示す。フライアッシュ(FA)を用いた試料の σ_{gy} および η_g は、 η の増加につれて増加する。また、石英砂粉(QF)の試料では、 η の増加とともに顕著に増加する。以上の結果、石英砂粉の試料だけ、 σ_{gy} および η_g とともに、 τ_y および η の増加に伴って増加する傾向を示すことがわかった。

図-7によると、シリカフューム(SF)および石英砂粉(QF)で置換した試料では、相対付着タフネス Tar の増加に伴い σ_{gy} および η_g が減少するが、シリカフューム(SF)では減少傾向がやや緩やかである。また、高炉スラグ微粉末(BS)およびフライアッシュ(FA)を用いた試料では、 Tar の増加

表-3 各種要因が流出分離降伏値 σ_{gy} および流出分離塑性粘度 η_g の増減傾向に及ぼす影響

	使用 混和材	影響因子の増加					
		Sf	Sft	τ_y	η	Tar	Fm
σ_{gy}	SF	→	→	→	→	→	→
	BS	↗	↘	↘	↘	↗	↗
	FA	→	→	→	→	↗	↘
	QF	↘	↗	↗	↗	↘	↘
η_g	SF	→	→	→	→	→	→
	BS	↗	↘	↘	↘	↗	↗
	FA	↘	↗	↗	↗	↗	↘
	QF	↘	↗	↗	↗	↘	↘

[Notes] BS: Ground granulated blast-furnace slag, SF: Silica fume, FA: Fly ash, QF: Quartz fume, σ_{gy} : Flowing segregation yield value, η_g : Flowing segregation plastic viscosity, Sf : Slump-flow value, Sft : Slump-flow time, τ_y : Yield value of mortar, η : Plastic viscosity of mortar, Tar : Relative adhesive toughness of mortar, Fm : Mortar flowing value obtained by using a cylinder penetration test.

SF: BS: FA: QF:
HAE/P=1.97%: 黒 HAE/P=2.16%: 白 CO:*

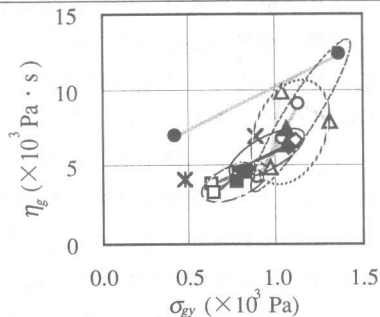


図-9 マトリックスモルタルの流出分離塑性粘度 η_g と流出分離降伏値 σ_{gy} の関係

に伴い σ_{gy} および η_g が増加する。

(3) 円筒貫入試験による流入モルタル値

図-8によれば、流入モルタル値 Fm が増加するにしたがって σ_{gy} および η_g は全体的に減少する傾向にあるが、高炉スラグ微粉末(BS)を用いた試料だけは、 Fm の増加に伴って増加する。

(4) 混和材種類

図-9に、マトリックスモルタルの流出分離塑性粘度 η_g と流出分離降伏値 σ_{gy} の関係を示す。全体的に、 η_g は σ_{gy} の増加に伴って増加する傾向を示す。同種類の混和材を用いた試料では、 σ_{gy} および η_g は、黒塗マーカで示すHAE/Pの少ない試料の方が大きい。また、 σ_{gy} および η_g はシリカ

フューム(SF)を用いた試料が、最も小さく、次いで高炉スラグ微粉末(BS)、フライアッシュ(FA)、石英砂粉(QF)の順に大きい。これは、各種の混和材の比表面積の大きさとの関係があると考えられる。

シリカフューム(SF)で置換した試料は、高炉スラグ微粉末(BS)やフライアッシュ(FA)の試料より流動性が低下し、モルタルの τ_v 、 η および Tar が比較的大きいにもかかわらず、 σ_{xy} および η_s が小さくなり、 Fm が大きくなる傾向がある。比表面積の大きいシリカフュームでは、粒子表面を覆うのに必要な水量が増加するため τ_v と η が増加するが、シリカフューム粒子はサイズが小さく、形状が丸いため、粗骨材の間隙を通過しやすく、流出分離抵抗性が小さいものと考えられる。

高炉スラグ微粉末(BS)を混入した試料では、 Tar の増加により、 σ_{xy} および η_s が増加する。これは、高炉スラグ微粉末の表面に高性能AE減水剤が吸着して、強い分散性が生じることにより、粗骨材表面に付着したペーストの界面における欠陥が減少するためと考えられる。

フライアッシュ(FA)は、粒子形状がほぼ球形であるため、ベアリング効果により、フレッシュコンクリートの流動性が大きくなるとされている。フライアッシュで置換した試料は τ_v 、 η および Tar が小さい。 σ_{xy} および η_s は減少し、 Fm がやや大きくなる。

石英砂粉(QF)を混入した試料では、石英砂粉の表面に吸着する高性能AE減水剤が少なく、分散性が低いため、試料の流動性が低く、 τ_v と η が顕著に大きくなる。これにより、 Fm が小さくなり、 σ_{xy} および η_s が大きくなる。すなわち、マトリックス流出分離抵抗性は、主としてモルタルの降伏値と塑性粘度によって評価できるものと考えられる。

4. まとめ

各種混和材がフレッシュコンクリートの分離抵抗性に及ぼす影響について実験的に検討した結果、以下のような知見が得られた。

- 1) シリカフューム(SF)を用いたコンクリートでは、モルタルの降伏値、塑性粘度および相対付着タフネスが比較的大きいにもかかわらず、マトリックス流出分離抵抗性は低下する。
- 2) 石英砂粉(QF)を混入したコンクリートのマトリックスモルタル流出分離抵抗性は、モルタルの降伏値と塑性粘度の増加に伴って増加する。
- 3) 高炉スラグ微粉末(BS)とフライアッシュ(FA)を混入したコンクリートでは、流動性が同じ範囲にあれば、その流出分離抵抗性は類似しているが、高炉スラグ(BS)を用いたコンクリートの流出分離抵抗性は、モルタルの付着性と相関性がある。

【謝辞】

本研究に際して、水柿洋之君（名古屋大学大学院生）、鳴滝康宏君（同）、名口芳和君（名古屋大学学生）の助力を得た。また、本研究費の一部は、平成10年度文部省科学研究費補助金・基盤研究(A)（研究代表者：友澤史紀・東京大学教授）、同・基盤研究(B)および同・奨励研究(A)によった。付記して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 相良健一・魚本健人：使用材料の粒度分布が高流動コンクリートのフレッシュ時の品質に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.31-36, 1997.6.
- 2) 三浦律彦・近松竜一・青木茂・十河茂幸：高速流動コンクリートに関する基礎研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.185-190, 1991.
- 3) 為石昌宏・上村和也・山口孝史・川上正史：高炉スラグ超微粉末が高流動コンクリートのフレッシュ時の性状に及ぼす影響について、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.79-84, 1997.6.
- 4) 王迎華・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸：フレッシュコンクリート中のマトリックスモルタルの流出分離抵抗性に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集, No.514, pp.1-7, 1998.12.
- 5) Watanabe,K., Teranishi,K., Mori,H. and Tanigawa,Y.: Study on Adhesion and Slipping Characteristics of Fresh Concrete, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.16, pp.33-40, 1994.12.
- 6) 松田敏・佐藤孝一・石田良平：円筒貫入計による高流動コンクリートのコンシステンシー評価に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）, A, pp.511-512, 1994.9.
- 7) 谷川恭雄・森博嗣・若林信太郎：高流動コンクリートのリング貫入試験および円筒貫入試験に関する研究、セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.672-677, 1996.12.