

論文

[1062] モルタルの流動性と強度に及ぼすシリカフュームの品質の影響

田部健一郎^{*1}・児島孝之^{*2}・高木宣章^{*3}

1. はじめに

高性能AE減水剤、高流動化剤、水中不分離性混和剤など数多くの化学混和剤の開発により、多種用途に適応したコンクリートの開発が精力的に行なわれている。また、フライアッシュ、高炉スラグ、シリカフュームなどの混和材料は、産業副産物の有効利用という観点からではなく、施工性と耐久性の改善、あるいは高強度化のために、積極的に利用されるようになってきた。混和材料の中でも特にシリカフュームは、その充填作用とポゾラン反応の両面から、コンクリートを高強度、高耐久性、高流動化させることができる。海外においては、シリカフュームの品質規格およびシリカフュームコンクリートの設計・施工指針に基づいて、シリカフュームコンクリートが本格的に使用されている国もある。しかし、国内にあっては、現在、土木学会と建築学会でこれらの品質規格と設計・施工指針が検討されている状況である。

本研究は、高性能AE減水剤を使用したシリカフュームモルタルの流動特性と圧縮強度などの基礎的特性に及ぼすシリカフュームの品質の影響を、練りませ時間、高性能AE減水剤の種類、水結合材比などを要因として検討したものである。

2. 実験概要

2.1 実験計画

シリーズ1では、練りませ時間がモルタルの物性に及ぼす影響を検討する。シリーズ2では、シリカフュームの品質がモルタルの物性に及ぼす影響を、シリーズ3では、高性能AE減水剤とシリカフュームの相性について検討する。本試験で使用したシリカフュームと高性能AE減水剤の種類を各々表-1と表-2に示す。

シリーズ1、2、3とも、水結合材比は30%と50%の2水準とした。砂結合材比は、全てのシリーズともモルタルの流動性を考慮して、水結合材比30%と50%時で各々2.0、3.0とした。目標フロー値は、水結合材比30%と50%時で各々180±10、230±10とした。シリーズ1の実験要因を表-3に示す。シリカフューム混入率は0、5、10、15%の4水準、練りませ時間は水結合材比により異なるが6水準とした。ここで、練りませ時間は、全ての材料投入後の練りませ時間とした。シリカフュームは粉末のシリカフューム②を、高性能AE減水剤は混和剤Aを使用した。

シリーズ2の実験要因を表-4に示す。シリカフュー

表-1 シリカフュームの種類

銘柄	産地	形態
①	カナダ	粉末
②	ルウェー	粉末
③	ルウェー	顆粒
④	エジプト	粉末
⑤	ルウェー	粉末
⑥	ルウェー	粉末
⑦	日本	粉末
⑧	ルウェー	顆粒

表-2 高性能AE減水剤の種類

種類	主成分
A	β-ナフタリンスルホン酸Na塩
B	ポリカルボン酸Ca塩
C	ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体

表-3 シリーズ1の実験要因

水結合比 (%)	30, 50
SF混入率 (%)	0, 5, 10, 15
練りませ時間 (分)	1.5, 3, 5, 7, 10, 15
SFの種類	銘柄②
高性能AE減水剤	混和剤A

SF:シリカフューム

立命館大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)
立命館大学教授 理工学部土木工学科、工博 (正会員)
立命館大学助手 理工学部土木工学科、工修 (正会員)

ム混入率は0、10%の2水準、シリカフェームは8銘柄、高性能AE減水剤は混和剤Aを使用した。練りませ時間は3分間とした。

シリーズ3の実験要因を表-

5に示す。シリカフェーム混入率は0、10%の2水準、シリカフェームは4銘柄(②③④⑧)、高性能AE減水剤は3種類使用した。練りませ時間はシリーズ2と同様に3分間とした。

表-4 シリーズ2の実験要因

水結合比(%)	30,50
SF混入率(%)	0,10
SFの種類	8銘柄
高性能AE減水剤	混和剤A

SF:シリカフェーム

表-5 シリーズ3の実験要因

水結合比(%)	30,50
SF混入率(%)	0,10
SFの種類	4銘柄(②③④⑧)
高性能AE減水剤	3種類

SF:シリカフェーム

2.2 使用材料、配合および試験方法

表-6 セメントの物理化学的性質

物理的性質		化学成分(%)											
比重	比表面積 (cm ² /g)	Ig.Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
3.17	3270	0.6	21.3	5.3	2.6	64.4	2.2	1.9	0.28	0.60	0.37	0.20	0.10

表-7 シリカフェームの物理化学的性質 (*はメーカー試験値あるいは規格値)

NO.	物理的性質			化学成分(%)											
	比重	比表面積* (m ² /g)	湿分 (%)	Ig.loss		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	C
				(1000°C)	(750°C)										
①	2.38	18~20	0.65	2.94	2.50	94.53	0.17	0.15	0.24	0.55	0.09	0.13	0.77	0.0022	1.38
②	2.38	20	0.74	3.34	2.94	92.29	0.65	0.57	0.22	0.79	0.16	0.40	0.98	0.0030	1.43
③	2.57	20	0.59	2.73	2.45	89.29	0.35	3.52	1.11	0.76	0.46	0.41	0.72	0.0030	1.74
④	2.35	17	0.44	1.77	1.46	95.20	0.30	0.74	0.15	0.31	0.02	0.23	0.50	0.0016	0.46
⑤	2.36	15~20	0.96	4.28	3.33	88.65	0.57	1.15	0.40	1.85	0.70	0.42	1.58	0.0035	1.37
⑥	2.36	23	0.55	2.59	2.12	95.13	0.19	0.05	0.20	0.26	0.11	0.20	0.81	0.0012	1.36
⑦	2.57	-	1.27	5.28	3.00	82.29	0.22	5.69	0.63	0.82	2.10	0.22	1.86	0.0032	1.02
⑧	2.37	-	0.31	2.89	2.46	90.20	0.13	2.53	0.89	1.16	0.67	0.41	0.51	0.0016	1.01

表-9 モルタルの配合(単位:g)

W/(C+SF)	W	C+SF	S
30%	225	750	1500
50%	250	500	1500

セメントは、セメント協会製研究用普通ポルトランドセメント(比重3.17、比表面積3270cm²/g)を使用した。細骨材は、豊浦標準砂、相馬産の細砂と粗砂を1:1:1(重量比)で混

合使用した。セメントとシリカフェームの物理化学的性質を各々表-6と表-7に、シリカフェームの物理化学的性質の試験法を表-8に示す。モルタルの配合を表-9に示す。シリカフェームは、結合材重量に対して内割で混入した。高性能AE減水剤は、水の内割として容積計量した。

モルタルの練りませには、JIS R 5201のモルタル用練りませ機を使用した。練り鉢にあらかじめ水と高性能AE減水剤を入れ、パドルを低速回転(140rpm)させながら30秒間に結合材を入れ、その後の30秒間に細骨材を入れた。その後、パドルを所定時間、高速回転(285rpm)させた。高速回転で1分間練りませた後に、20秒間休止して、練り鉢とパドルに付着しているモルタルをかき落とした後に、再び残り時間を高速回転で練りませた。シリーズ1では、材料投入後も、低速回転で練りませたモルタルも作製した。空気量は、容積法で測定した。φ5x10cm供試体を用いて圧縮強度の測定を行なった。モルタル打設後1日で脱型し、その後水中養生を行なった。

3. 実験結果および考察

3.1 練りませ時間がモルタルの物性に及ぼす影響 (シリーズ1)

全材料投入後、3分間の練りませ時のフロー値が、水結合材比30%で 180 ± 10 、水結合材比50%で 230 ± 10 となるように、高性能AE減水剤量(混和剤A)で調整した。高性能AE減水剤量とシリカフェーム混入率の関係を図-1に、フロー値と練りませ時間の関係を図-2に、圧縮強度と練りませ時間の関係を図-3に示す。同一フロー値を得るのに必要な高性能AE減水剤量は、水結合材比が比較的大きい50%の場合には、シリカフェーム混入率に伴い直線的に増加する。しかし、水結合材比が小さくなると、15%のシリカフェームの混入により、モルタルの流動性がシリカフェーム無混入時とほぼ同程度に改善される。シリカフェームを混入したモルタルのフロー値は、水結合材比とシリカフェーム混入率によって幾分の変動はあるものの、練りませ時間3~5分あたりまでは、フロー値に大きな変化はない。5分以上練りませると、フロー値は練りませ時間に伴い低下する。シリカフェームモルタルのフロー値は、練りませ時間の増加に伴い増大するとの報告[1][2]とは異なる結果となった。低速練りにおいても、水結合材比30%のシリカフェーム無混入モルタルを除き、練りませ時間がフロー値に及ぼす著しい影響は観察されていない。

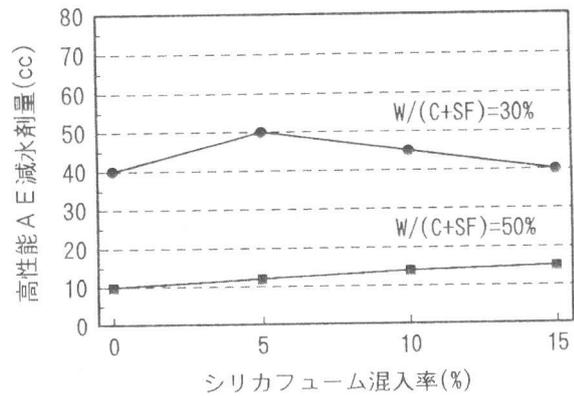


図-1 高性能AE減水剤量とシリカフェーム混入率の関係

練りませ時間がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響が観察された。水結合材比50%時のシリカフェームモルタルの圧縮強度は練りませ時間に伴い増加し、例外はあるものの練りませ時間5分辺り

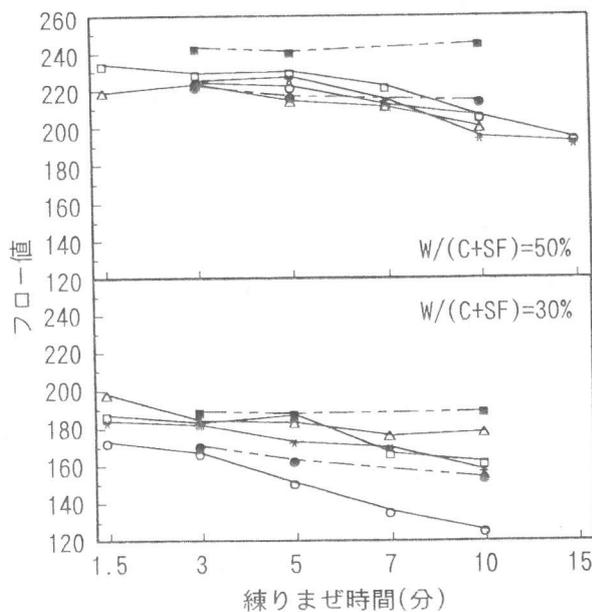


図-2 フロー値と練りませ時間の関係

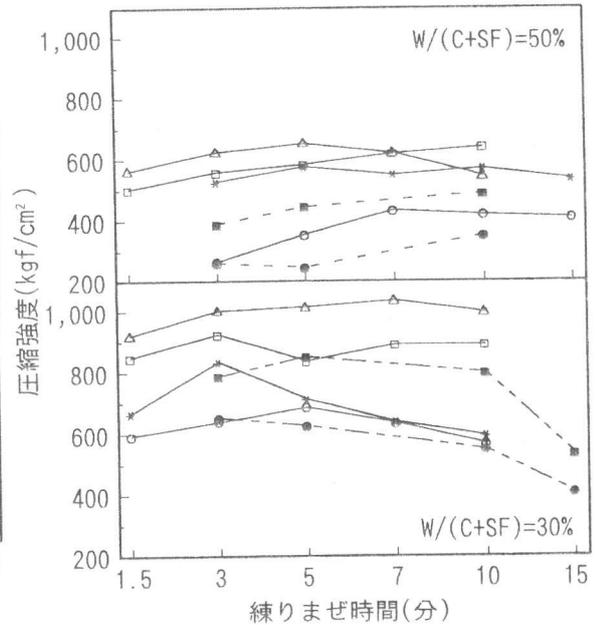


図-3 圧縮強度と練りませ時間の関係 (圧縮強度は28日強度)

で最大値を示すものが多い。水結合材比30%においても練りませ時間に伴い圧縮強度は増加するが、練りませ時間3分辺りで最大値を示すものが多い。圧縮強度への練りませ時間の影響を考慮して、シリーズ2とシリーズ3では練りませ時間を3分間とした。低速練りしたモルタルは、高速練り時より練りませ性能が劣るために、一般に高速練りしたモルタルより小さい圧縮強度となった。

3.2 シリカフュームの種類がモルタルの物性に及ぼす影響（シリーズ2）

高性能AE減水剤Aを使用し、各種のシリカフュームを混入したモルタルの圧縮強度を図-4に示す。水結合材比50%でシリカフューム無混入時およびシリカフューム③⑤⑧を使用したモルタルは、空気量が9~12%と大きく、強度の低下が著しいので、シリーズ2の検討では除外する。シリカフューム③と⑧は、形態が顆粒である。水結合材比30%の材令28日圧縮強度は、シリカフューム③を使用したモルタルでは、粉末のシリカフュームに比較して低下するが、シリカフューム⑧を使用したモルタルは低下しないので、形態が圧縮強度に及ぼす影響は本試験では明らかにならなかった。

モルタルの圧縮強度とシリカフューム中のSiO₂量、強熱減量、湿分の関係を図-5に示す。高性能AE減水剤を使用しないモルタルの流動性と強度特性に及ぼすシリカフュームの品質の影響に関しては既に報告されている[3]。本試験では、シリカフュームの現

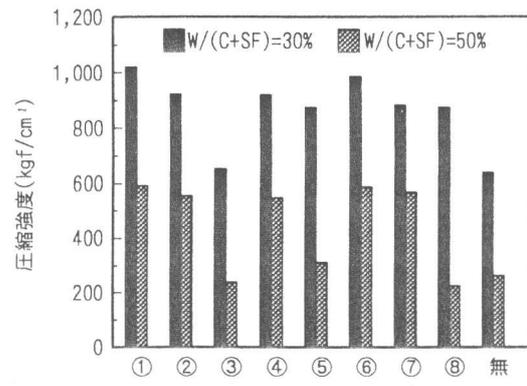


図-4 圧縮強度（材令28日）

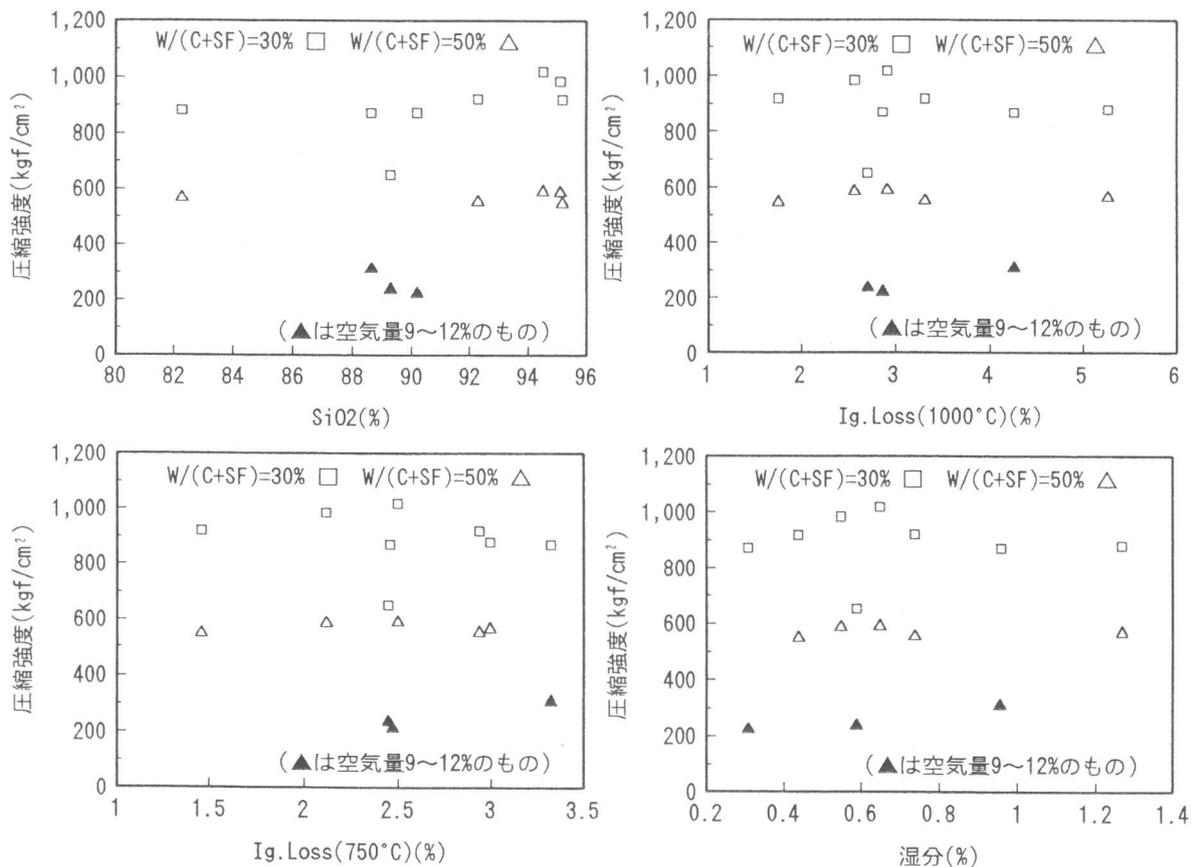


図-5 圧縮強度とシリカフューム中の成分との関係（圧縮強度は28日強度）

実的な利用とその品質との関連を考慮して、高性能AE減水剤を使用したモルタルへのシリカフュームの品質の影響を検討している。顆粒のシリカフューム③を除くと、シリカフュームの形態が同じであれば、水結合材比30%と50%とも、シリカフューム中のSiO₂量が80%以上、強熱減量が100°Cでは5.5%以下、750°Cでは3.5%以下、湿分が1.5%以下であれば、これらの要因がシリカフュームモルタルの圧縮強度へ及ぼす影響は少ないものと考えられる。

3.3 高性能AE減水剤とシリカフュームの相性（シリーズ3）

高性能AE減水剤の種類がモルタルの流動性と圧縮強度に及ぼす影響を図-6に示す。本試験では、空気量の調整は行なっていない。混和剤Aは、コンクリートに使用すると空気連行しにくい混和剤である。しかし、細骨材として使用した豊浦標準砂の細粒分（0.1~0.3mm）が多いために、モルタルの空気量がかなり増加する場合もあった。例えば、水結合材比50%時には、シリカフューム無混入時およびシリカフューム③⑧を使用したモルタルは、空気量が9~12%に達した。混和剤とシリカフュームの組み合わせによっても、空気連行性が著しく異なった。特に、混和剤Bと混和剤Cは、シリカフューム④を使用したモルタルでは、異常に多量の空気を連行した。

高性能AE減水剤の空気連行性の程度にもよるが、同一フロー値を得るために必要な高性能AE減水剤量は、シリカフュームと高性能AE減水剤の種類により大きな影響を受けた。水結合材比50%で

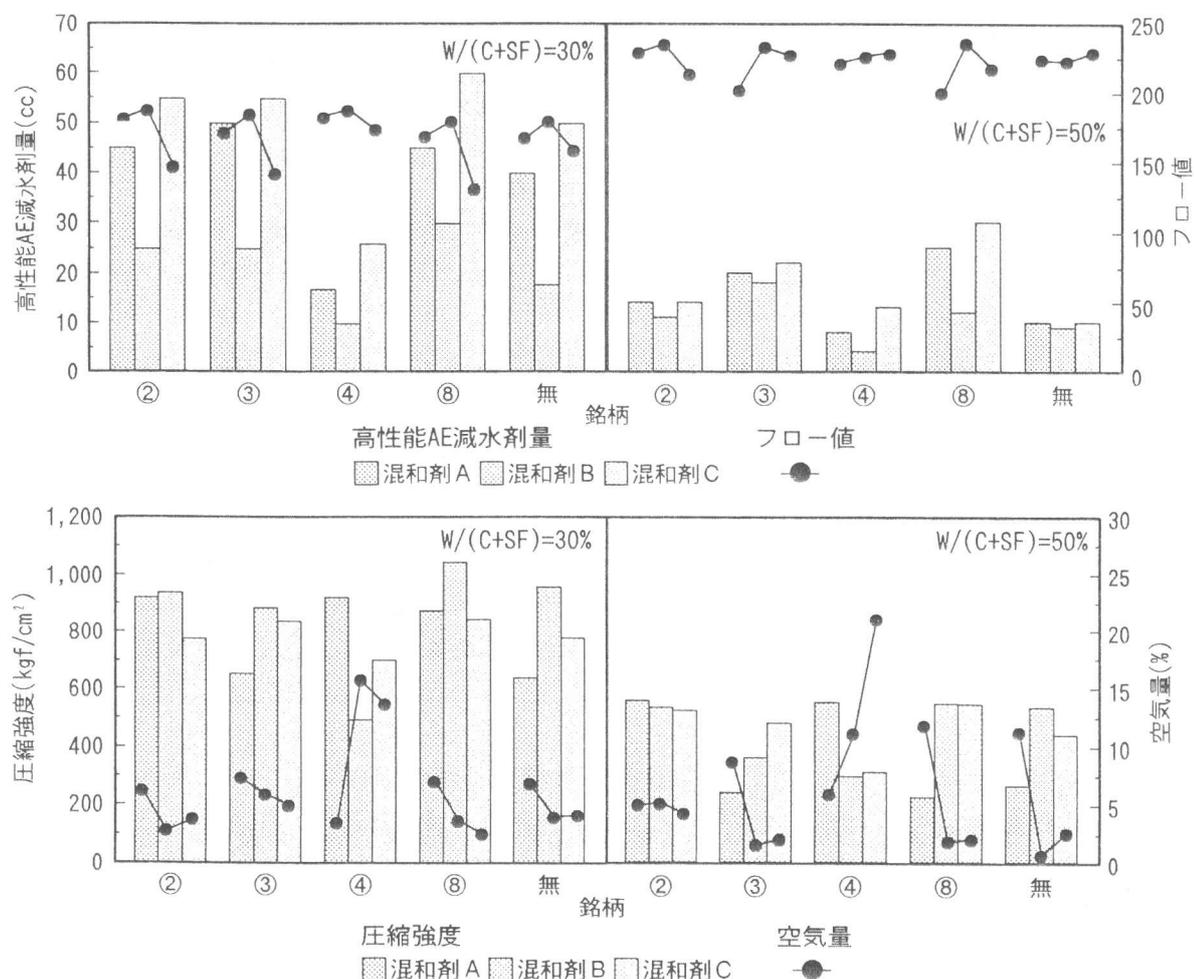


図-6 高性能AE減水剤の種類がモルタルの流動性と圧縮強度に及ぼす影響（圧縮強度は28日強度）

は、どの混和剤を使用しても、ほぼ目標フロー値（ 230 ± 10 ）を得ることができたが、水結合材比の小さい30%では、混和剤Cのように、目標フロー値（ 180 ± 10 ）を得ることがむずかしい混和剤もあった。混和剤Cのように、使用量を多くしても目標フロー値に達しない時には、最大フロー値を得ることができる使用量の内、最小の使用量を採用している。

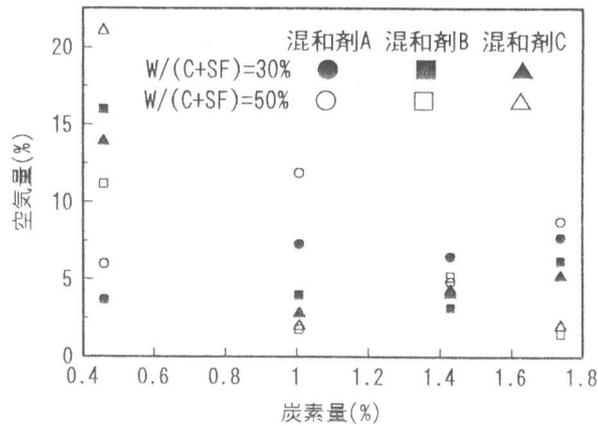


図-7 空気量とシリカフェーム中の炭素量の関係

空気量とシリカフェーム中の炭素量の関係を図-7に示す。空気量は、高性能AE減水剤の種類に依存し、また例外はあるものの、シリカフェーム中の炭素含有量が増加すると、空気量は減少する傾向にあった。

シリカフェーム無混入モルタルでは、細骨材の細粒分の影響を受け、空気を連行しやすい高性能AE減水剤がある。シリカフェームモルタルでは、シリカフェームと高性能AE減水剤の組合せによっては、空気連行性が高まる場合がある。そのような配合では、モルタルの圧縮強度は低下する。そのため、シリカフェームの品質管理として、高性能AE減水剤を使用したモルタルの強度試験を行なう場合には、空気量の管理が非常に重要である。

4. 結論

本研究で得られた結果を要約すると、以下のようになる。

- (1) シリカフェームの形態が同じであれば、シリカフェームのSiO₂量が80%以上、強熱減量が750℃では3.5%以下、湿分が1.5%以下であれば、シリカフェームの品質がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響は少ない。
- (2) シリカフェームと高性能AE減水剤には相性があり、組合せによっては、空気連行性が増大し、流動性と強度特性に大きな影響を及ぼす。
- (3) シリカフェームの品質管理として、高性能AE減水剤を使用したモルタルの強度試験を行なう場合には、空気量の管理が非常に重要である。

<謝辞> 本研究を実施するにあたり、住友セメント(株)内田清彦氏、シリカフェーム技術研究会、土木学会・シリカフェーム調査研究小委員会の方々のご協力を頂きましたことを付記し、御礼申し上げます。

【参考文献】

- [1] 大賀宏行, 魚本健人, "シリカフェームを混和したモルタルの諸特性に及ぼす練混ぜの影響", 土木学会第47回年次学術講演会V, pp.680-681, 1992
- [2] 添田政司, 大和竹史, 江本幸雄, "練混ぜの相違がシリカフェームを用いたモルタルの諸性状に及ぼす影響について", 土木学会第48回年次学術講演会V, pp.432-433, 1993
- [3] 久田真, 長滝重義, 大即信明, 北出啓一郎, "シリカフェームの物理化学的性質がモルタルの諸特性に及ぼす影響", 土木学会第47回年次学術講演会V, pp.678-679, 1992