

報告

[1021] 特殊メタカオリンの高強度コンクリートへの適用性

正会員○両角 昌公 (竹中工務店技術研究所)

正会員 林 健二 (林 化成(株))

正会員 岩清水 隆 (竹中工務店技術研究所)

1. はじめに

近年、設計基準強度が500kgf/cm<sup>2</sup>前後の高強度コンクリートについては、調合、製造、ならびに施工に対する各技術が確立され、高層RCなどの建物において適用されるようになった。しかしながら、現在、設計上からは、設計基準強度が600kgf/cm<sup>2</sup>以上のコンクリートも計画され、これに関する技術の早期開発と材料の安定供給が強く望まれている。

このような背景から、より高強度なコンクリートを製造するための技術としては、材料、コンクリートの調合、および製造方法の改善などの方法が考えられている。このうち、材料面からは、高性能AE減水剤、およびシリカフェーム、フライアッシュ、ならびに高炉スラグの微粒子に例をみる超微粒子の適用などの応用技術が提案されている。

本報告は、各種の超微粒子について、その特性を比較するとともに、併せて高強度コンクリートへの適用性を述べたものであり、研究の全体は以下に示す二種類の実験で構成した。

- a. 高強度コンクリートに最適な超微粒子選定のためのモルタル実験、
- b. a項で選定した超微粒子の高強度コンクリートへの適応性に関する実験、

2. 高強度コンクリートに最適な超微粒子選定のためのモルタル実験

2.1 実験の概要

超微粒子は、水酸化カルシウムとのポゾラン作用を期待してシリカ質、またはシリカおよびアルミナ質を多量に含有するもので、特にSiO<sub>2</sub>の含有量50%以上を基本として選定した。その鉱物組成を表-1に示す。使用材料のうちセメント、細骨材は、それぞれ普通ポルトランドセメント、豊浦産の標準砂を、また、モルタルフローの調整にはアクリル系共重合化合物の高性能AE減水剤(Adと称す)を用いた。次に、モルタルの調合は、表-2に示すようにW/C、ならびにセメント/細骨材比を、それぞれ0.25、0.62とし、超微粒子は、単位セメント量の20%を内割りで用いた。また、モルタルは、オムニミキサ(容量:15ℓ)を用いて製造した。次に、比較した特性はフロー、ならびに圧縮強度(Ø10×20cm、標準水中養生)で、試験は、JISR 5201、ならびにJIS A 1114の方法に準拠した。

表-1 実験に用いた微粒子の特性

種類 組成	SP-33	微粉 A	微粉 B	微粉 C	微粉 D	微粉 E	微粉 F	微粉 G	微粉 H	微粉 I
粒子径 (μ)	1.4	0.15	2.9	20	6.0	30.0	0.8	1.4	1.4	10.0
吸油量 (cc/g)	50-60	—	98	—	80≤	130	85-95	45-55	50-60	—
pH	5-6	4.6-6.5	7.5-9.5	6.7-7.3	8.6	5.6-6.0	5.0-6.0	8.5-9.5	5-6	—
水分	0.5	0.8	1.0	1.0	10.0	2-3	—	—	0.5	0.0
SiO <sub>2</sub>	52.0	96.0	68.0	71.2	73.42	78.56	52.0	62.1	52.3	95.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44.6	0.3	12.0	14.2	13.99	13.21	44.2	25.3	44.6	2.5
CaO	0.03	0.2	1.7	2.4	1.23	1.51	—	0.23	0.03	—
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5	0.2	5.0	2.3	3.32	4.11	0.1	0.8	0.6	—
MgO	0.04	0.2	10.5	—	2.43	1.25	1.1	2.1	0.04	—
lg Loss	0.7	1.5	6.0	5.6	5.89	1.25	0.5	4.3	0.3	—

## 2.2 実験結果と考察

試験結果を表-3、4および図-1に示す。Adの使用量が10%以下で練り混ぜ可能な微粒子は、SP-33、微粒子A、E、G、ならびにHであった。しかし、微粒子Gは、静置状態で流動性を失い、また、微粒子Aは、Adの添加量に対して比較的小さいフロー値を示した。

一方、微粒子B、C、D、ならびにFは、空練りに似た状態で製造不可能であった。

次に、圧縮強度に対する微粒子の影響を材令8週で見れば

Eを除いてはほぼ一様な分布を示している。しかし、短期材令では、SP-33、ならびにGがよい結果を示した。

以上の結果から、高強度コンクリート用の微粒子としては、SP-33が比較的優れているものと判断された。

### 3. SP-33の概要

#### 3.1 SP-33の製造工程と主な諸元

SP-33の製造工程、および主な諸元は表-1、ならびに以下に示すとおりである。

第1工程— 原料カオリナイトに水と特殊な分散剤を添加しカオリン・スラリーに調整する。

第2工程— 比重、遠心分離などで平均粒子径を1~2 $\mu$ mに調整し、さらに不純物を除去する。

第3工程— 特殊磨砕処理で最大粒子径を8 $\mu$ m以下、かつ平均粒子径を0.5~2 $\mu$ mに調整する。

第4工程— 洗浄、脱水、乾燥後、所定温度でか焼し、さらに $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ を所定の比率に調整する。

- a. 外見: 白色粉末、 b. アルミナ/シリカ: 1.1~1.3、
- c. 最大粒子径: 8 $\mu$ m以下、
- d. 平均粒子径: 0.5~2 $\mu$ m、 e. 比重: 2.45~2.55

#### 3.2 SP-33の強度発現、流動性に関するメカニズム

現在までに得られた知見をもとに効果に対するメカニズムを推測する。まず、強度発現については、第4製造工程において原料カオリナイトをか焼処理すると初期で

は吸着水が放出し、また有機物は分解蒸発する。次いで、570 $^{\circ}$ C前後で石英は $\gamma$ 型から $\beta$ 型に移転し、さらにカオリナイトは構造水を失いメタカオリンに変化する。以上の過程を(1)式に示す。

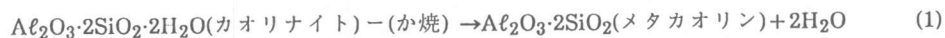


表-2 モルタルの調合

W/C (%)	セメント/砂	単位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		セメント	水	細骨材	微粉末
25	0.62	848	266	660	212

表-3 Adの使用量とまだ固まらないモルタルの性質

微粒子の種類	高性能減水材の使用量 (c×%)	まだ固まらないモルタルの性状			
		空気量 (%)	フロー値	温度	モルタルの状態
SP-33	4.0	3.2	178×167	29.5	状態良
微粉末A	10.0	3.3	135×133	33.0	流動性無し
微粉末E	10.0	3.5	192×182	31.0	状態良
微粉末G	4.5	2.8	188×180	30.5	静置すると粘性大、および流動性無し
微粉末H	4.5	4.1	208×198	29.0	状態良

表-4 モルタルの圧縮強度

微粒子の種類	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	材令1週	材令4週	材令8週
SP-33	875	1229	1227
ベース	695	957	1031
微粉末A	558	800	959
微粉末E	220	287	356
微粉末G	755	1084	1256
微粉末H	704	1063	1203

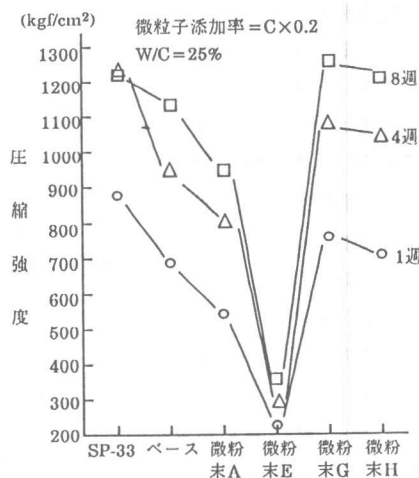


図-1 モルタルの圧縮強度

さらに、950°C以上の高温で焼成するとメタカオリン格子は破壊され、 $\text{AlSi}$ スピネル(焼成カオリン)と呼ばれる中間相が生成され $\text{SiO}_2$ は遊離し、再結晶化する。以上の過程を(2)式に示す。



図-2は、原料カオリナイト、メタカオリン、ならびに焼成カオリンのX線回折(回折方法:粉末X線回折法のうち反射法に準拠)結果を示したものである。メタカオリンは、原料カオリナイト、ならびに焼成カオリンに比べて回折ピークが小さく、さらに散乱強度も高い。これは、非結晶質の割合の高いことを示唆するもので、水酸化化合物とボゾラン反応を起し易いことを示している。また、写真-1は、モルタル実験における供試体(材令4週)の電子顕微鏡写真( $\times 10,000$ 倍)である。SP-33の表面がボゾラン反応によって侵食されている状態が示されている。

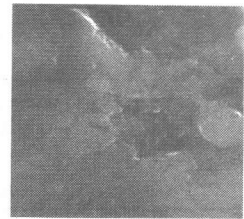


写真-1 反応状況

以上の結果から、SP-33の強度発現に対するメカニズムは一応解明されたものと考えられる。しかし、メカニズムの究明は極めて難しく今後の研究に待つところも少なくない。なお、SP-33の流動性の向上については、特殊な磨砕処理、か焼による粒子表面の球形化、ならびに粒子径が大きいことなどが考えられるがメカニズムの解明には至っていない。

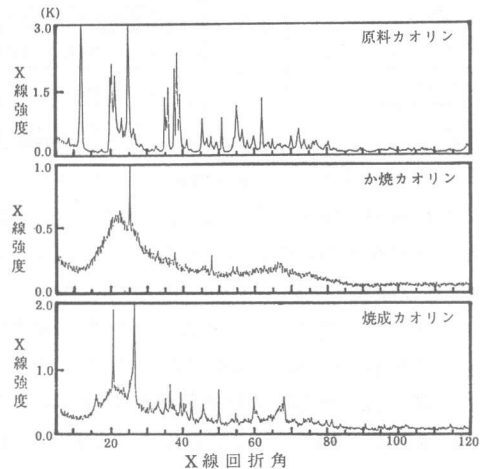


図-2 X線回折結果

#### 4. 超微粒子(SP-33)の高強度コンクリートへの適応性に関する実験

##### 4.1 実験の概要

本実験で用いた超微粒子は、2項の結果からSP-33微粒子A、II、およびモルタルに關する追加実験から圧縮強度などに効果が認められた表-1に示す超微粒子Iの3種類である。使用材料のうちセメントは、普通ポルトランドセメント( $\rho=3.16$ )を、細骨材には、男木島沖産海砂と赤穂産砕砂の混合砂( $\rho=2.55$ 、 $\text{FM}=2.77$ )を、粗骨材は赤穂産砕石( $\rho=2.63$ )を用いた。また、調合一定の条件でのスランブ調整には、アクリル系共重合化合物のAdを用いた。次に、コンクリートの調合を表-5に示すが、W/Cは、30%、ならびに微粒子の添加量は、単位セメントに対して内割り15%を基本とした。なお、SP-33については、圧縮強度に対するC/W、ならびに微粒子の添加量の影響も併せて検討した。次に、コンクリートは、二軸強制練りミキサ(容量:100ℓ)を用いて製造した。なお、比較検討した特性は、スランブ、空気量、圧縮強度( $\text{Ø}100 \times 200\text{mm}$ 、標準水中養生)、および乾燥収縮で、試験は、JIS A 1101、JIS A 1128、JIS A 1108、およびJIS A 1129の各方法に準拠した。

表-5 コンクリートの調合

コンクリートの種類	調合条件				単位容積重量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				
	Sl	Air	W/C	s/n	C	W	G	S	微粉
微粉末混入	18.0 cm	4.0 %	25%	33%	578	170	1,026	496	102
			30%	35%	495	175	1,040	549	87
			35%	37%	437	180	1,035	596	77
無混入			30%	35%	583	175	1,040	549	0

4.2 実験結果と考察

実験結果を表-6に示す。図-3は、スランブ19cmを得るのに必要なAd使用量とフロー値を示している。SP-33のAd使用量は、微粉末A、IIに比べて約30~50%少なく、またフロー値は超微

粒子Aに比べて約70%大きい。次に図-4は、W/C=30%の圧縮強度を示している。SP-33の4週強度は、無混入に比べて約25%、微粉末A、II、およびIに比べて約10~20%大なる値を示した。次に、図-5は、W/C=30%の乾燥収縮を示している。材令56日の乾燥収縮は、微粉末II、無混入、微粉末HA、I、およびSP-33の順に小さく、SP-33の収縮量は微粉末Hの約50%であった。

表-6 コンクリートの物理的試験結果

微粒子の種類	W/C (%)	微粉末使用量 (C×%)	高性能減水剤使用量 (C×%)	固まらないconの性質				硬化コンクリートの性質					
				Sl (cm)	Air (%)	フロー (mm)	温度 (°C)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		乾燥収縮 (×10 <sup>-6</sup> )			
								1W	4W	1D	1W	4W	8W
SP-33	30	15	1.73	19.6	2.8	367	25.0	695	860	49	124	206	217
無混入		0	1.15	18.2	2.6	323	25.0	576	690	81	177	292	370
微粒子A		15	2.55	21.4	2.7	442	25.0	607	797	82	180	292	328
微粒子II			1.90	20.5	2.9	324	24.0	597	749	63	199	351	406
微粒子I			1.40	25.0	0.6	495	25.5	600	703	78	175	244	284

以上の結果から、SP-33は、他の微粒子に比べてAdの使用量が少なく、さらに、施工性、圧縮強度、および乾燥収縮などの特性に対しても優れている。次に、図-6には、C/Wと圧縮強度の関係を示すが、両者の関係には、高い相関性が認められたことから、通常の見方で調合計画が可能であると思われる。また、図-7には、SP-33の添加量と圧縮強度の関係を示すが、SP-33の添加量は15%前後が適量であると考えられる。

5. 結語

超微粒子の高強度コンクリートへの適用性に関する基礎研究から、超微粒子としてはSP-33を選定し、その効果を確認した。今後は、効果に対するより詳細なメカニズムの追求と実大による力学的特性、ならびに施工性などについて検討したいと考えている。

謝辞: 本実験でご協力いただいたイズミエンジニアリングサービス(株)、ならびに竹本油脂(株)の関係各位に感謝の意を表します。

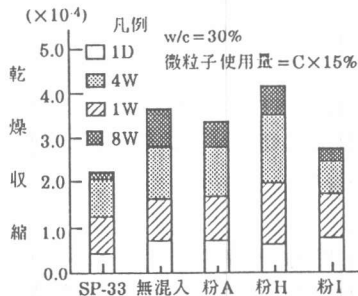


図-5 乾燥収縮に及ぼす効果

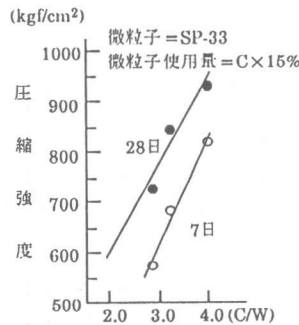


図-6 C/Wと圧縮強度

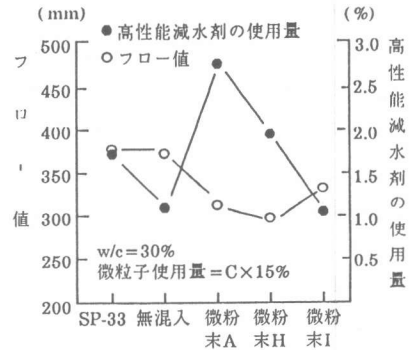


図-3 施工性の向上に及ぼす効果 (スランブ19cmで補正した値)

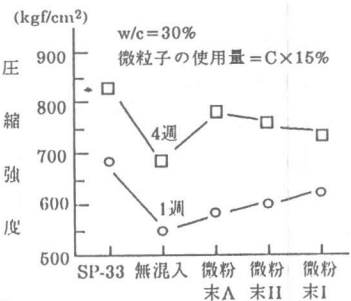


図-4 圧縮強度

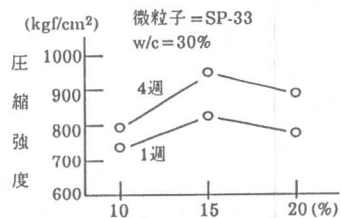


図-7 微粒子使用量と圧縮強度