

[18] シンダーアッシュおよびフェロシリコンダストのモルタル・コンクリートへの利用に関する検討

正会員 ○河野 清 (徳島大学工学部)
吉栖伸輔 (大本組 土木部)

1. まえがき

近年、種々の産業廃棄物の有効利用について調査、研究が進められており、1976年のコンクリート工学誌9月号には、産業副産物とコンクリートに関して特集を行い、その利用の現状と必要性を論じている。

高炉スラグ、フライアッシュなどの副産物は、セメント・コンクリート用としてかなり以前から一般的に使用されているが、他の副産物についてもより積極的に利用研究を行い、省資源・省エネルギーの立場からあるいは公害防止のためにも建材として使用可能なものは大いに活用しなければならない。とくに、多量のシリカを含むいわゆるけい酸質副産物はセメント・コンクリート用として適していると考えられる。

したがって、四国で入手できるけい酸質副産物としてシンダーアッシュとフェロシリコンダストを取りあげ、まず、モルタルについて混入量の影響、蒸気養生・オートクレーブ養生等の影響などについて調査を行ったのち、コンクリートについて強度特性の比較、促進養生の影響、乾燥収縮・水密性などの性質ならびに加圧成形・加圧養生の効果についても調べ、モルタル・コンクリートへの利用について基礎的な検討を行った。

2. 使用材料

表-1 シンダーアッシュ、フェロシリコンダスト、セメントなどの化学成分と物理的性質

使用材料	化学成分 (%)							比重	ふるい値 (cm^3/g)	過剰百分率 (%)				粗粒率 (mm) (FM)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Total			1.2	0.6	0.3	0.15	
CA	2.3	53.6	26.8	3.8	1.3	0.1	94.1	1.93	-	100	75	37	10	2.21
FSD	0.6	76.0	1.4	1.1	2.5	1.3	90.4	2.24	22700	-	-	-	100	-
セメント	65.4	21.8	5.3	3.0	1.4	1.8	98.7	3.15	3120	-	-	-	100	-

2.1. 使用した産業副産物

シンダーアッシュ——石炭火力発電所のボイラーの下部から排出する粗粒灰がシンダーアッシュ (以下

CAと略記)である。CAは灰分の70%近くを占め、フライアッシュに比べて多量に生じ、従来埋立地などに投棄されていたものである。電力会社から入手したCAの化学成分、比重等は表-1に示す。なお、嶋崎¹⁾は、CAを微粉碎し普通ポルトランドセメントとの混合使用について報告し、小林らは2000~3500 cm^3/g に粉碎した粗粒アッシュは混和材として、また未粉碎のものは細骨材の粒度調整用に使用可能と思われると報告している。

フェロシリコンダスト——製鋼用の脱酸・脱硫剤として用いられるフェロシリコンの製造工程において発生するダストを集じん機で捕集したものがフェロシリコンダスト (以下FSDと略記)である。きわめて微粉末でシリカ含有量が高い特徴がある (表-1参照)。高知市のフェロシリコンの製造工場から入手したものを使用した。

2.2. セメントおよび骨材

セメントは表-1に示す化学成分と物性で、28日圧縮強さは410 kgf/cm^2 の普通ポルトランドセメントを使用した。

モルタル試験用には表-2に示す豊浦標準砂を、コンクリート試験

用粗、細骨材は、吉野川産で最大寸法20mmの川砂利と、粗粒率3.00の川砂を使用した (表-3参照)。

表-2 豊浦標準砂の物理試験結果

比重	粒度・標準ふるい上残分 (%)				泥土量 (%)	単位容積 重量 (g/t)
	297 μ	210 μ	149 μ	105 μ		
2.63	0.7	45.8	97.6	99.7	0.33	1526

3. モルタルに関する検討

3.1. 混入量の影響に関する実験

モルタルの配合——モルタルの基準となる配合は、セメント：砂=1：2、水セメント比60%とし、CAまたは

FSDの混入率はセメント重量に対して内割および外割でそれぞれ0%、5%、10%および15%とした。

表-3 使用した粗、細骨材の粒度および物理的性質

骨材の種類	ふるいを通るものの百分率 (%)										粗粒率 (FM)	比重	吸水率 (%)	単位容積 重量 (kg/m^3)	空隙率 (%)	有機不純物 試験
	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	mm						
粗骨材	100	83	50	0	0	0	0	0	0	0	6.00	2.62	1.54	1640	37.2	-
細骨材	-	-	-	100	83	66	42	7	2	2	3.00	2.60	1.26	1710	34.5	合格

J I S モルタル成形型枠 1 個分の配合を表-4 に示す。

モルタルの練りませと成形——容量 20ℓ の大型モルタルミキサを用い、セメントと C A または F S D を入れ水を加えて低速で 30 秒間ペーストを練ったのち、標準砂を加え低速で 30 秒間、高速で 1 分間さらに超高速で 30 秒間モルタルを練りませた。練りませ直後にフレッシュモルタルのフロー値を測定し、同時に $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ - 3 本組のモルタル型枠 3 個に詰め、フロー値から決めた突き数によって強度試験用供試体を成形した。

モルタルの養生——混入率の影響を調べる場合は、成形後 20℃ 恒温室に移し、数時間後にキャッピングを行って翌日脱型し、所定材令の 7 日、28 日および 91 日まで $20 \pm 2^\circ \text{C}$ の水中で標準養生を行った。

モルタルの強度試験——所定材令で養生水槽から供試体を 1 種につき 3 本取り出して重量を測定したのち、ミハエリス 2 重てこ型曲げ試験機で曲げ強度試験を行い、その折片は万能試験機で圧縮強度試験に供した。

3.2. 養生方法の影響に関する実験

前述の混入率を変えた標準養生の試験結果から、C A の場合には内割 5%、外割 10%、F S D では内割 10%、外割 10% のモルタル配合で供試体を作成し、標準養生と比較して蒸気養生およびオートクレーブ養生の強度への影響を調査した。蒸気養生には実験室用の蒸気養生槽を用い、前養生 + 温度上昇 + 等温養生 + 徐冷期間 = $4 + 3(17^\circ \text{C}_h) + 3(70^\circ \text{C}) + 14 \text{ h}$ の条件を、オートクレーブ養生には小型の高温高压がまを用い、前養生 + 加熱 + 等温・等圧 + 冷却期間 = $5 + 4(40^\circ \text{C}_h) + 5(180^\circ \text{C}, 10 \text{ atm}) + 10 \text{ h}$ の条件をそれぞれ従来³⁾⁴⁾の報告を参考にして採用した。促進養生後脱型し所定材令まで 20℃ 水中養生とした。蒸気養生供試体は材令 7 日と 28 日、オートクレーブ養生では 2 日と 28 日で曲げ強度および圧縮強度試験を行った。標準養生材令は 7 日および 28 日とした。

3.3. 実験結果とその考察

(1) 混入率のフロー値への影響

混入率とフロー値との関係を示した図-1 にみられるように、混入率の増加とともにフロー値は低下する。これは C A の場合、吸水率が約 2.7% あり、乾燥状態で使用しているの練りませ中に吸水してモルタルの軟度が低下するためであり、一方、F S D は粉末度がきわめて高いのでモルタルの粘性が増すためと考えられ、同一コンシステンシーにするためには単位水量の増加が必要となる。

表-4 型枠 / 個分のモルタルの配合

配合の種類	W/C (%)	水 (g)	セメント (g)	砂 (g)	CA または FSD (g)
プレーン	60	312	520	1040	-
C A および F S D	内割 5%	63.2	312	494	1040
	内割 10%	66.7	312	468	1040
	内割 15%	70.6	312	442	1040
C A および F S D	外割 5%	60	312	520	1014
	外割 10%	60	312	520	988
	外割 15%	60	312	520	962

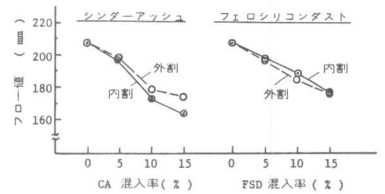


図-1 混入量のフロー値への影響

(2) 混入率のモルタル強度への影響

C A の混入率とモルタル強度との関係を図-2 に示す。内割の場合、混入率の増加とともに強度は明らかに低下するが、外割で加えた場合は、多少の変動はあるが 10% まではプレーンモルタルの強度と大差なく、圧縮、曲げとも同様の傾向を示している。次に、F S D の場合は図-3 にみられるように内割の場合は初期材令では大差ないが、材令 91 日では明らかに大であり、一方外割で加えた場合には初期材令の圧縮強度も高くなる。なお、混入率 10% までの強度増加率が大きいが、15% とは大差ない。一方、曲げ強度は圧縮強度の場合とは傾向が異なり、内割では効果がなく、外割 10 ~ 15% がやや高くなる。なお、同一フロー値の場合、C A を表乾状態で使用した場合などには水量が増すので、強度のロス⁵⁾を考慮する必要がある。

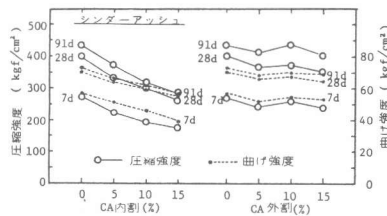


図-2 シンダーアッシュの混入率とモルタル強度

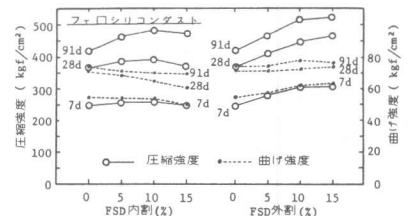


図-3 フェロシリコングラストの混入率とモルタル強度

(3) 養生方法の影響

養生方法の相違が強度発現に及ぼす影響を示した図-4にみられるように、CAおよびFSDを用いた場合、標準養生7

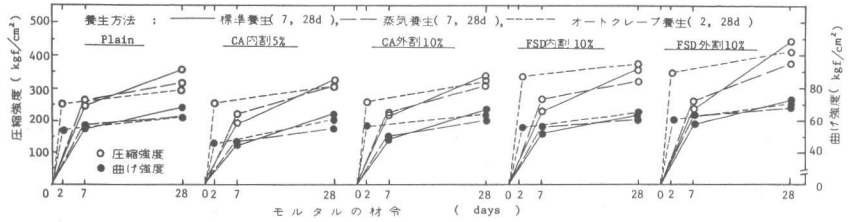


図-4 標準養生、蒸気養生およびオートクレープ養生を行った各種モルタルの材令と強度

日強度よりオートクレープ養生2日強度や蒸気養生7日強度が圧縮、曲げとも高くなる。促進養生は初期強度発現に有利であるが、強度増進率が低下するので材令28日では標準養生がもっとも強くなる傾向がある。FSDは高温高圧養生による初期強度発現が顕著であり、Menzelの指摘のようにシリカ質混和材の効果を示している。

4. コンクリートに関する検討

4.1. 実験の概要

使用コンクリートの配合——セメントの節約による経済配合を考え、CAは内割5%、FSDは内割10%混入した表-5の配合を用いた。

表-5 使用コンクリートの配合

配合の種類	Amax. (mm)	Slump (cm)	Air* (%)	W/C** (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				
						W	C	CA or FSD	S	G
P1	20	6-7 (2.0)	53.0	50	186	351	-	887	894	
CA 5%	20	6-7 (2.0)	53.0	50	186	333	17.6	883	890	
FSD10%	20	6-7 (2.0)	53.0	50	186	316	35.1	881	888	

注) * エントラップドエア ** CA, FSDともセメントの一部と考えてW/Cを計算

練りませおよび締め成形——容量50ℓの強制

練りミキサを用い、最初モルタルで1分練り、粗骨材を投入して1分30秒間練りませを行った。排出後スランブ試験を行うと同時に、φ10×20cm円柱型枠(圧縮強度、引張強度)、□10×10×40cmはり型枠(曲げ強度、乾燥収縮)などに詰め、振動数6000rpm、振幅1.0mmの振動台を用いて15秒間締め成形を行った。

養生方法と強度試験——標準養生は20±2℃の水中養生で材令28日、蒸気養生は4+3(17℃/h)+3(70℃)+14hの条件で行い材令7日および28日で、オートクレープ養生は5+4(40℃/h)+5(180℃, 10atm)+10hの条件で行い2日および28日で圧縮強度試験を行った。なお、引張強度と曲げ強度は材令28日のみとした。

なお、□10×10×40cmのはり供試体の成形できる加圧成形型枠を用い、成形の際に10kgf/cm²の加圧力を3分間加えながらボルトとナットでその圧力を保持して型枠のまま蒸気養生槽に入れる加圧養生も行い、その効果についても検討を行った。この場合、曲げ強度試験のあと、その折片について圧縮強度を試験した。

乾燥収縮および透水試験——□10×10×40cmはり供試体に乳白ガラスを埋込み、脱型後材令7日まで水中養生したのち、温度20±1℃、相対湿度65~80%の恒温槽で乾燥養生し、コンパレータ法で収縮を測定した。

FSDを混入したコンクリートについては水密性を調べるために、φ15×30cm型枠の中央にφ2cmの丸鋼を配置した透水試験用型枠で作製した中空円柱供試体を脱型後標準養生し、材令7日および28日で水中より取り出し、外圧式透水試験機に同時に3本の供試体をセットして、試験水圧20kg/cm²を加えて試験を行った。

4.2. 実験結果とその考察

(1) フレッシュコンクリートのコンシステンシー

練りませ直後のスランブの実測値は、プレーンコンクリート(P1)の7.5cmに対してCAコンクリートは6.8cm、FSDを混入した場合は5.9cmとなり、スランブは低くなるので、同一コンシステンシーとするためには単位水量を少し増加する必要がある。なお、CAを細骨材の一部とみなし表乾状態にして使用する場合を考えると、プレーンコンクリートとのスランブ差はより小となる。

(2) 圧縮強度、引張強度および曲げ強度について

材令28日の強度試験結果を示した表-6にみられるように、圧縮強度と曲げ強度は同様の傾向であり、FSDを混入したものがもっとも大きく、CAの場合はプレーンコンクリートより若干低くなる傾向がみられる。しかし、引張強度についてはCAコンクリートもよい結果を示している。スランブを2

表-6 圧縮強度、引張強度および曲げ強度

コンクリートの種類	材令28日の強度 (kgf/cm²)		
	圧縮	引張	曲げ
P1	315 (100)	27.3 (100)	59.3 (100)
CA 5%	295 (94)	29.6 (108)	57.9 (98)
FSD 10%	331 (105)	28.3 (104)	61.1 (103)

cm増すと圧縮強度は $10\sim 20\text{ kgf/cm}^2$ 低下するとの報告もあり⁶⁾、同一スランブではFSDコンクリートはプレーンコンクリートとほぼ同じ値になるとされる。

(3) 促進養生の圧縮強度への影響

3種の養生方法の圧縮強度試験結果を比較した図-5にみられるように、オートクレーブ養生を行うと材令2日で標準養生28日強度と同程度の値がえられ、CA、FSDとも 300 kgf/cm^2 以上の強度となっている。蒸気養生を行った場合、材令7日で28日標準強度の

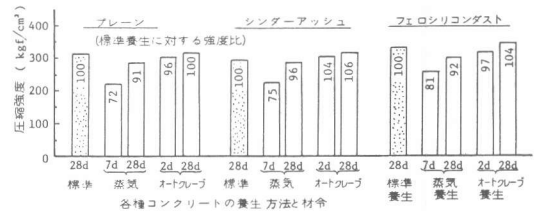


図-5 各種コンクリートの養生方法の相違による強度比較

72~81%であり、蒸気養生28日では91~96%となる。この比すなわち相対強度はCAやFSDを混入したコンクリートがプレーンコンクリートより少し高く、従来の報告に比べてもやや高目の値を示しており、促進養生によるこれらのコンクリートの強度発現は良好と考えられ、製品用コンクリートに使用可能と思われる。

(4) コンクリートの乾燥収縮について

材令91日までの乾燥収縮試験結果を図-6に示す。プレーンコンクリートに比べて、極微粉末のFSDを混入したものは乾燥収縮が13週の値で11%ほど大きく、終極ひずみを計算しても6%ほど大となっている。CAを混入した場合、逆にプレーンコンクリートより低目の値となったが、セメント量の減少やCAの吸水の影響と考えられ、終極ひずみでは差が小となっている。

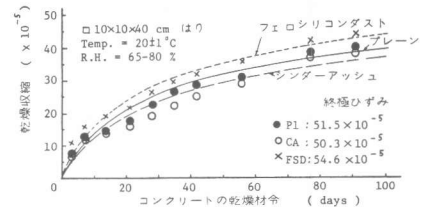


図-6 各種コンクリートの乾燥収縮の比較

(5) FSDを混入したコンクリートの水密性

FSDはシリカ質微粉末なので水密性の改善に有効と考えられるが、透水試験結果を示した表-7のように、材令7日、28日とも明らかに透水係数が小となっている。乾燥収縮が大きいので乾燥状態にさらされる構造物には不向きであるが、水密性を要する水工構造物に使用可能といえる。湿潤養生期間を長くするのも水密性の向上に効果的である。

表-7 透水試験結果

コンクリート	材令 (日)	透水係数 ; K_d (cm/sec)
プレーンコンクリート	7	2.84×10^{-10} (100)
	28	0.056×10^{-10} (100)
フェロシリコンダスト (内割10%)	7	1.50×10^{-10} (53)
	28	0.011×10^{-10} (20)

(6) 加圧成形・加圧養生の効果について

加圧成形によって自由水の一部がしぼり出されて水セメント比が小となり、空げきが少なくなって緻密なコンクリートがえられるので、図-7のように圧縮強度、曲げ強度とも増加する。堅固な型枠を必要とし、経済性的問題はありますが品質向上にきわめて有効な工法である。

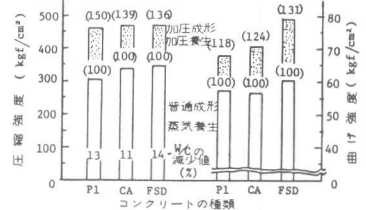


図-7 加圧成形加圧養生を行ったコンクリートの強度

5. 結論

シンダーアッシュ、フェロシリコンダスト等のけい酸質副産物を混和材として使用するとモルタルのフロー値やコンクリートのスランブは低下の傾向を示す。シンダーアッシュの場合、混入率とともに圧縮強度や曲げ強度は低くなる傾向があるが、フェロシリコンダストとともに蒸気養生、オートクレーブ養生などの促進養生による強度発現は比較的良好であり、製品用コンクリートに使用可能と思われる。また、フェロシリコンダストは水密性を向上するので水工構造物のコンクリートへの利用も考えられる。なお、粗粒のシンダーアッシュは細骨材の一部としての使用も考えられ、混入量が多くなると耐久性等の品質への影響をさらに検討する必要がある。

- 参考文献 1) 嶋崎博章;材料 Vol.19, No.202, pp.51~56(1970).
 2) 小林正凡,野口博章;第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.77~80(1980).
 3) 河野 清;コンクリートジャーナル Vol.4, No.4, pp.22~28(1966).
 4) A C I Committee 516 ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 62, pp. 869~908(1965).
 5) C. A. Menzel; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 31, pp. 125~148(1935).
 6) 河野 清,大塩 明;コンクリートジャーナル Vol.5, No.2, pp.19~26(1967).