

# [63] 石炭灰系軽量骨材を用いたコンクリートの基礎的性質に関する検討

正会員 向井 毅 (明治大学工学部)  
 正会員 O 菊池雅史 (明治大学工学部)  
 小室真一 (明治大学工学部)

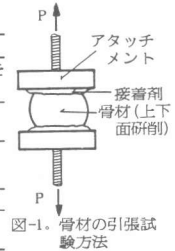
## 1. はじめに

わが国における火力発電所石炭灰ボイラーから発生する石炭灰の量は、1983年度実績で359万tonであり、1995年には1000万tonに達すると推定されている。現在、これら石炭灰は、その一部がセメントおよびコンクリート用原料として、さらに最近では、軽量骨材の主原料として注目を浴びてはいるものの、石炭灰全体の有効利用率は37%と極めて低い現状にあり、今後の発生量の急増を考えたとき、石炭灰の処理および再利用技術の開発は石炭火力立地上の最重要課題となろう。筆者らはかねてより、石炭灰の骨材資源としての活用化に関する研究を進めてきているが、本研究もその一部をなすものであり、1985年に人工軽量骨材としての認可を得た石炭灰軽量骨材を中心に、現在殆んど活用されていないクリンカーアッシュを細骨材の一部として用いたコンクリートについて基礎的実験を行い、石炭灰の骨材資源としての適用性について検討を行ったものである。

## 2. 実験の概要

表-1. 本検討に用いた骨材の種類およびその概略

種別	種類	記号	備考
粗骨材	石炭灰軽量骨材	F	火力発電用石炭灰ボイラーより発生したフライアッシュを主原料とする JIS A 5002 適合品 (造粒型) (K 社製)
	人工軽量骨材	L	膨脹頁岩を主原料とする JIS A 5002 適合品 (S 社製) 造粒型
細骨材	人工軽量骨材	S	膨脹頁岩を主原料とする JIS A 5002 適合品 (S 社製) 非造粒型
	川砂	N	大井川採取
	クリンカーアッシュ	CA	火力発電用石炭灰ボイラー炉底より採取 K 電力(株) 0 発電所産



### 2.1 使用材料

- a) セメント：普通ポルトランドセメント
- b) 骨材：粗骨材にフライアッシュを主原料とする石炭灰軽量骨材および膨脹頁岩系人工軽量骨材、細骨材に川砂、膨脹頁岩系人工軽量骨材およびクリンカーアッシュを用いた。

表-2. 本検討に用いた骨材の主要性質

物 理 的 性 質	性 質					化 学 的 性 質					
	粗 骨 材		細 骨 材			特 性 値	粗 骨 材		細骨材		
特 性 値	F	L	S	N	CA		F	L		CA	
最 大 寸 法 (mm)	15	15	(2.5)	(2.5)	(2.5)	SiO <sub>2</sub>	64.5	68	64.0		
粗 粒 率	6.47	6.28	2.73	2.77	1.69	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.0	15	15.0		
比 重	絶 乾 時	1.30	1.23	1.61	2.56	1.86	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.4	3	6.9	
	表 乾 時	1.61	1.42	1.70	2.62	1.91	Na <sub>2</sub> O	3.1	2	3.9	
24 時 間 吸 水 率 (%)	13.8	5.3	5.7	1.0	2.9	組 成 (%)	K <sub>2</sub> O	3.0	3	2.7	
単 位 容 積 重 量 (kg/ℓ)	0.81	0.78	1.05	1.60	0.82		CaO	2.1	1	1.5	
実 積 率 (%)	ジギング法	0.87	0.82	1.13	1.79		0.93	MgO	1.0	2	0.8
	現場計量法	57.5	63.1	58.4	61.8		44.2	SO <sub>3</sub>	0.2	0.05	0.4
骨 材 40t 破 砕 値 (%)	61.7	66.3	64.7	69.0	50.3	湿 分 (%)	—	—	12.9		
強 度 引 張 強 度 (kg/cm <sup>2</sup> )	40.0	37.9	—	—	—	強 熱 減 量 (%)	0.64	—	7.4		
耐 火 性	11.6	13.9	—	—	—	化 学 物 (%)	0.0001	0.005	0.04		
	良好	不良	—	—	—	M・B 吸着量 (mg/g)	—	—	—		

これら骨材の概略および主要性質を表-1および2に示す。

- c) 混和剤：表-3に示す3種類の化学混和剤を用いた。
- d) 練り水：水道水を用いた。

注 1. 物理的性質は筆者らの実験値、化学的性質は工場および発生場の報告値による。  
 注 2. M・B：メチレンブルーの略記号  
 注 3. 骨材の引張強度：粒径および含水率の異なる各72試料の平均値 (試験方法：図-1 参照)

### 2.2 試料コンクリート

- a) 種類：粗・細骨材の組合せ、クリンカーアッシュによる細骨材の置換量、混和剤種類、水セメント比等を変化させた合計84種類

表-3. 本検討に用いた混和剤の種類およびその概略

種別	記号	主 成 分	備 考
A E 剤	A	レジソ系	一般用空気連行剤
減水剤	P1	WR	リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体
		AD1	変成ロジソ系
	P2	WR	リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体
		AD2	高アルキルカルボン酸系

を用意した。試験体種類の一覧を表-4に示す。

- b) 調 合：「コンクリートの調合設計。調合管理。品質検査指針案・同解説」に示す軽量コンクリート 1 種および 2 種の調合を基準とし、石炭灰軽量骨材および細骨材の一部をクリンカーアッシュで置換したものについては、それぞれの骨材の特性に基づいて細骨材率を決定した。単位水量および混和剤の添加量は、試し練りを行って決定した。実施調合の一覧を表-4に示す。
- c) 練りませ、成形：練りませは、表-5に示す2方法により行った。硬化したコンクリートの物性用試験

体はすべてX法により練りませた。まだ固まらないコンクリートの性質に関する実験は、20℃RH80%で行った。

3.1 実験結果および検討  
3.1 また固まらないコンクリートの性質

a) 単位水量  
各種コンクリートの単位水量を表一4に示す。これによると石炭灰軽量骨材を用いた場合、在来の軽量コンクリート1種および2種に比べ、スランブ18cm程度での単位水量は10~15ℓ/m<sup>3</sup>増加した。また、クリンカーアッシュの置換量が15~30%に増加するのに伴い、AE剤の場合で最大30ℓ(16%)、減水剤使用の場合でも最大26ℓ(16%)増加した。また、減水剤使用の場合、所要の減水率を確保するために、置換量15%および30%でそれぞれ、標準添加量の1.5倍、2~2.5倍の添加量が必要であった。

b) 空気量：空気量5%前後を得るためのAE剤および空気量調整剤の添加量を表一4に示す。これより、クリンカーアッシュを用いた場合の空気連行剤の添加量を求めると(1)式ようになる。

$$T = t(1 + C + CB^X) \quad (1) \text{式}$$

ここに、T：空気量5%前後を得るための空気連行剤添加量(%)

t：空気連行剤の標準添加量(%)、

空気量調整剤(AD1):0.0025(%) レジン系AE剤:0.025(%)

$$C = (C_i - C_s) / C_s \quad (2) \text{式}$$

C：当該調合における単位セメント量による補正值

C<sub>i</sub>：当該調合における単位セメント量(kg/m<sup>3</sup>)

C<sub>s</sub>：補正のための標準セメント量(kg/m<sup>3</sup>)、FN,FS:360kg/m<sup>3</sup>、LN,LS:330kg/m<sup>3</sup>

CB：コンクリート1m<sup>3</sup>中におけるクリンカーアッシュ等に含まれる未燃カーボン量(kg)

ただし、計算上は無名数扱いとする。

X：実験定数、レジン系AE剤：0.650±0.025、空気量調整剤(AD1)：0.425±0.025

表一4 本検討に用いた試料コンクリートの種類およびその調合 (SL:18cm, AIR:5%)

試料コンクリート種類				調 合 概 要											
コンクリート種別	骨材の組合		記号	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量(kg/m <sup>3</sup> )			混和剤添加量						
	粗骨材	細骨材				混和剤種別			混和剤種別						
						A	P1	P2	P1		P2				
									WR	AD1	WR	AD2			
石炭灰軽量骨材コンクリート	F	N+CA	0	FN0	45	45.7	187	169	—	1S	1W	0.8A	—	—	—
			15	FN1	55	49.0	186	172	179	1S	1W	1A	—	1W	1a
			30	FN2	65	51.3	186	169	—	1S	1W	1A	—	—	—
		0	FS0	45	44.5	213	180	—	3.2S	1.5W	1.75A	—	—	—	
		15	FS1	55	48.0	204	178	192	3.5S	1.5W	2.00A	1.5W	2.75a	—	
		30	FS2	65	50.2	198	176	—	3.75S	1.5W	2.25A	—	—	—	
	0	LS0	45	43.3	217	189	—	4.5S	2W	2.5A	—	—	—		
	15	LS1	55	47.0	206	186	201	5S	2W	2.5A	2W	4.5a	—		
	30	LS2	65	49.1	203	181	—	5.52S	2W	2.5A	—	—	—		
	0	LN0	45	47.1	184	170	—	1S	1W	0.8A	—	—	—		
	15	LN1	55	50.7	181	172	180	1S	1W	1A	1W	1a	—		
	30	LN2	65	53.0	181	168	—	1S	1W	1A	—	—	—		
人工軽量骨材コンクリート	L	N+CA	0	LN0	45	45.7	195	180	—	3S	1.5W	1.75A	—	—	
			15	LN1	55	49.4	188	173	185	3.25S	1.5W	2A	1.5W	2.5a	
			30	LN2	65	51.7	183	171	—	3.52S	1.5W	2.25A	—	—	
		0	LS0	45	44.3	203	182	—	4.25S	2W	2.25A	—	—		
		15	LS1	55	48.1	198	174	186	4.52S	2W	3.25A	2W	4.25a		
		30	LS2	65	50.4	195	183	—	5S	2W	3.5A	—	—		
	0	LN0	45	44.2	178	161	—	0.8S	1W	1A	—	—			
	15	LN1	55	47.5	175	157	164	1S	1W	1A	1W	1a			
	30	LN2	65	49.8	175	154	—	1S	1W	1A	—	—			
	0	LS0	45	43.0	203	163	—	3.2S	1.5W	1.75A	—	—			
	15	LS1	55	46.5	191	159	172	4S	1.5W	2.25A	1.5W	2.75a			
	30	LS2	65	48.7	188	161	—	4S	1.5W	2.5A	—	—			
0	LN0	45	41.8	200	174	—	4.25S	2W	3.25A	—	—				
15	LN1	55	45.5	197	175	193	4.75S	2W	3.75	2W	4.75a				
30	LN2	65	47.6	197	176	—	5S	2W	4A	—	—				
0	LS0	45	45.1	170	161	—	1S	1W	1A	—	—				
15	LS1	55	48.7	168	160	166	1S	1W	1A	1W	1a				
30	LS2	65	51.0	166	160	—	1S	1W	1A	—	—				
0	LN0	45	43.7	192	168	—	3.2S	1.5W	2A	—	—				
15	LN1	55	47.4	178	171	171	4S	1.5W	2.25A	1.5W	2.75a				
30	LN2	65	49.7	176	174	—	4S	1.5W	2.5A	—	—				
0	LS0	45	42.3	192	183	—	5S	2W	3.25A	—	—				
15	LS1	55	46.1	189	187	181	5.52S	2W	3.5A	2W	4.5a				
30	LS2	65	48.4	189	186	—	5.52S	2W	3.75A	—	—				

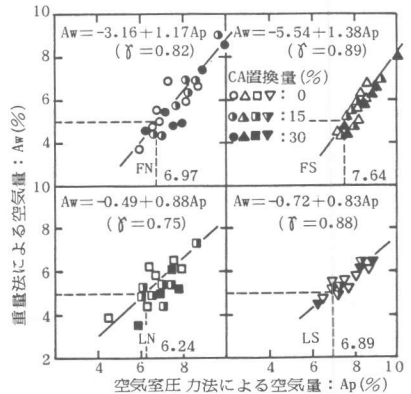
注) 混和剤添加量は、標準添加率に対する倍率を示す。

1 S:0.025%, 1 W:0.25%, 1 A:0.0025%, 1 a:0.006%

表一5 まだ固まらないコンクリートの物性試験に用いた練りませ、試料採取方法

試験項目	練りませ方法および記号
凝結ブリージング	X 全固形分投入後、30秒空練りし加水、その後2分30秒練りませて排出
	Y クリンカーアッシュを除く固形分を投入後30秒空練りし加水、その後2分間練りませてクリンカーアッシュを投入し、さらに30秒間練りませた後排出。
スランブ、空気量経時変化	X法により練りませ終了後練り舟に排出し、測定時間30秒前に練り舟中で30秒間練り返した後試料採取。

注) 硬化したコンクリートの物性用試験体は、X法により練りませ、採取した。



図一2.各種試料コンクリートの空気量試験結果 (Aw:JIS A 1116法, Ap:JIS A 1128法)

これらから、クリンカーアッシュを細骨材の一部として使用した場合の混和剤の添加量は、標準添加量に比べレジン系AE剤で3~5.5倍、未燃カーボンの吸着作用に対応した空気量調整剤の場合でも1.8~4.8倍の添加が必要となる。また、図-2は、各種コンクリートの空気室圧力法(JIS A 1128)と重量法(JIS A 1116法)による空気量の関係を示したものであるが、これから各種コンクリートの骨材修正係数を求めると、FN、FS、LNおよびLSコンクリートで、それぞれ2%、2.6%、1.2%および1.9%程度となる。

c) スランプおよび空気量の経時変化：結果の一部を図-3に示す。これによると、クリンカーアッシュを用いた場合、その吸着作用により空気量、スランプともかなり低下する傾向がみられたが、AD2タイプにおいて低下抑止効果が認められた。

d) ブリージングおよび凝結時間：結果を図-4に示す。これによると、クリンカーアッシュを使用した場合でもブリージング量は $0.3\text{cc}/\text{cm}^3$ 以下であり大差はみられなかった。一方、凝結時間は置換量の増加に伴って遅延する傾向がみられたが、これは主として混和剤の過剰添加に起因するといえる。また、練りませ時にクリンカーアッシュの投入時期を遅らせる方法は、ブリージング量を低減し、凝結時間を早める効果があるといえる。

### 3.2 硬化したコンクリートの性質

a) 圧縮強度：図-5に各種コンクリートの材令4週時強度試験結果を示す。これによると、石炭灰軽量骨材を粗骨材として用いたコンクリートでは、在来の軽量コンクリートに比べ、1種で約4%の強度増がみられたが、2種では全く差異がみられなかった。また、混和剤種類の影響については、P1タイプを用いた場合で他の2種類の混和剤を用いた場合に比べ、かなりの強度増進がみられたが、その増進割合は1種に比べ2種で大となった。

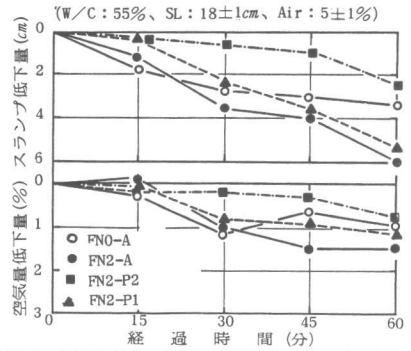


図-3. FNコンクリートにおける経時スランプ、空気量変化 (W/C: 55%, SL:  $18 \pm 1\text{cm}$ , Air:  $5 \pm 1\%$ )

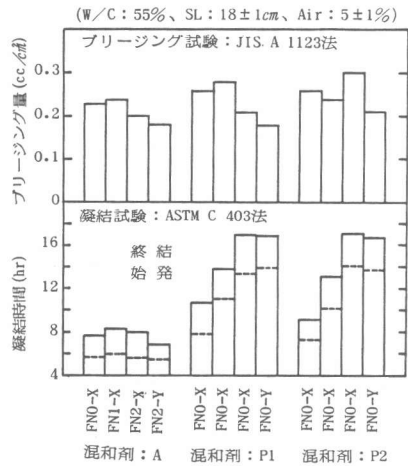


図-4. 各種コンクリートにおけるブリージングおよび凝結試験結果

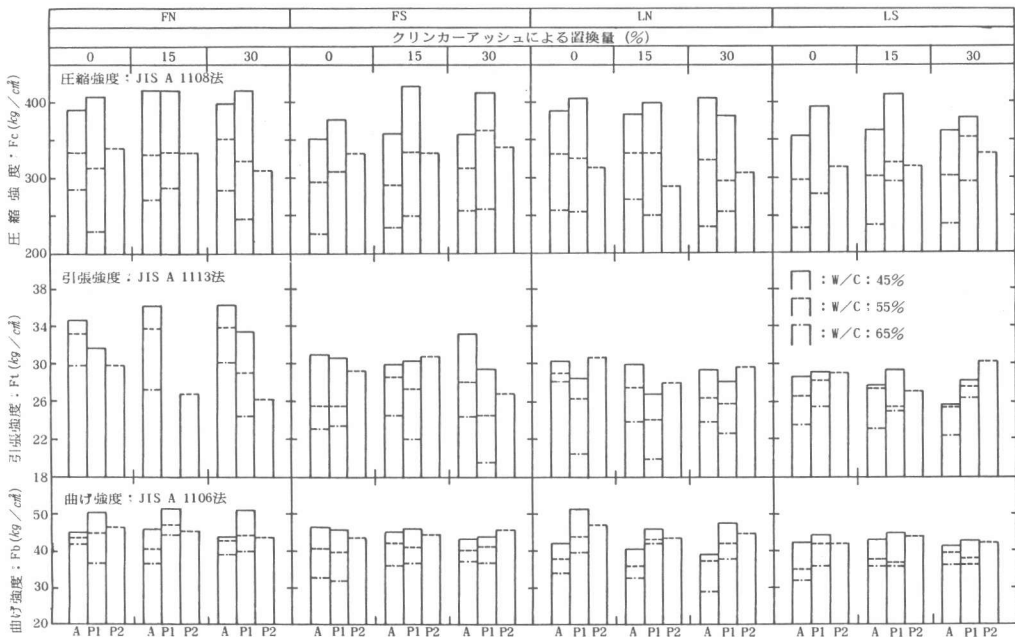


図-5. 各種コンクリートにおけるクリンカーアッシュによる置換量、水セメント比、混和剤種類と諸強度の関係(4週時)

図一 6はクリンカーアッシュ混入量と強度指数の関係を示したものであるが、石炭灰軽量骨材を用いた場合には、クリンカーアッシュ使用により全平均で約 4%の強度増がみられた。一方、在来の軽量コンクリートでは、1種、2種とも置換量 0%と比べ殆んど差異はみられなかった。また、材令13週時では、クリンカーアッシュの混入により、いずれのコンクリート種類においても平均5~8%の強度増進がみられた。

b) 引張および曲げ強度：( 図一5 および図一 6参照 )

石炭灰軽量骨材を用いたコンクリートでは、在来の軽量コンクリートに比べ引張(Ft)および曲げ強度(Fb)とも若干増加する傾向がみられた。また、クリンカーアッシュにより置換した場合でも、前者は若干の強度増を、後者は若干の強度低下を示した。この原因については明らかでない。

圧縮強度(Fc)に対する比率については、石炭灰軽量骨材コンクリート全平均で、 $F_t/F_c = 0.087$ 、 $F_b/F_c = 0.13$ 、在来軽量コンクリートの全平均で、 $F_t/F_c = 0.084$ 、 $F_b/F_c = 0.12$  であり、前者で幾分高い値を示した。この傾向は、クリンカーアッシュ混入の場合にもみられた。

c) 圧縮弾性：結果を図一 7に示す。これによると、石炭灰軽量骨材を用いた場合には、在来の軽量コンクリートに比べ、全平均で約 5%大のヤング係数を示した。また、クリンカーアッシュを用いることにより、ヤング係数は全平均で約 2%低下したが、その影響は極めて小さいといえる。

d) 長さ変化：結果を図一 8に示す。これによると、材令13週時の乾燥収縮率は、石炭灰軽量骨材を用いた場合で $5 \sim 6.5 \times 10^{-4}$ 、在来の軽量コンクリートで $4 \sim 5 \times 10^{-4}$  であり、前者で約 25%大の値を示した。また、全体的にみて、クリンカーアッシュを用いることにより乾燥収縮は幾分大きくなるといえる。

#### 4. まとめ

骨材資源としての石炭灰の活用に関する検討結果をまとめると大要、以下のように要約できる。

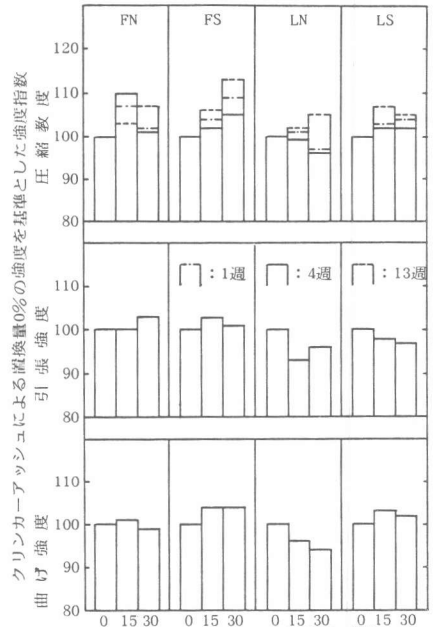
1) 石炭灰中のフライアッシュを主原料とする石炭灰軽量骨材は、調合面では単位水量の増加、硬化したコンクリートの性質においては乾燥収縮が幾分大きくなるものの、物性全般をみた場合在来の人工軽量コンクリートと大差ない性質を有している。

2) クリンカーアッシュを細骨材として用いる場合、粒度、強熱減量等のほか、粒子中の未燃カーボンの吸着作用により、混和剤添加量の増加をはじめとし、それに起因する諸問題がある。

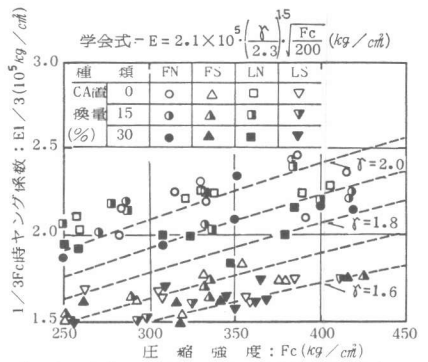
しかし、硬化したコンクリートの性質については、今回の実験の範囲内では特に問題となる点はみあたらなかった。

「参考文献」1) 向井、菊池、小室「石炭灰軽量骨材を用いたコンクリートおよびRC部材の力学的性状に関する研究(その1~3) 日本建築学会大会学術講演梗概集(昭和60年、東海)

「謝 辞」本研究に際し、石炭灰軽量骨材およびクリンカーアッシュを九電産業(株)より、人工軽量骨材を住友金属鉱山(株)より、また、混和剤の一部をボソリス物産(株)より提供頂きました。ここに厚く謝意を表します。

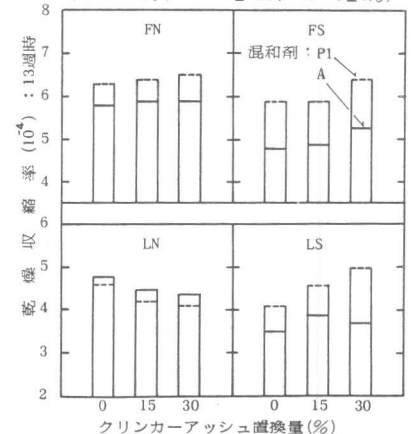


図一 6. 各種コンクリートにおけるクリンカーアッシュ置換量と強度発現の関係



図一 7. 各種コンクリートにおける圧縮強度とヤング係数の関係(材令：28日時)(コンプレッソメータ法)

(W/C: 55%, SL:  $18 \pm 1$ cm, Air:  $5 \pm 1$ %)



図一 8. 各種コンクリートの長さ変化試験結果 (JIS A 1129: コンパレータ法)