

# 石炭灰複合板の材料設計

—力学的強度と石炭灰特性の関係—

勝世 敬一, 堀川 弘善, 古賀 卓哉\*  
鈴木 敏之\*, 福島 康典\*

## Material Design of Coal Ash-Composite

-Mechanical Strength and Ash Characteristics-

Keiichi KATSUSE, Hiroyoshi HORIKAWA, Takuya KOGA\*  
Toshiyuki SUZUKI\*, Yasunori FUKUSHIMA\*

### 抄 録

火力発電所から排出されるフライアッシュの有効利用が大きな課題となっている。しかし、フライアッシュの性質は炭種によって大きく変動することが利用を妨げる要因の一つになっている。すでに製品化された利用法に、フライアッシュ、ガラス繊維、火山礫にフェノール樹脂を結合剤として成形した複合建材がある。これもフライアッシュによって材料物性が変動することから、フライアッシュに左右されない材料設計法を確立する必要がある。そこで、成形体強度に影響を及ぼす要因について検討した。その結果、強度、弾性率とも、フライアッシュ粒子間隙中に占める結合材の割合で整理することによって、フライアッシュの種類あるいは結合材の量に関わりなく、一本の直線で表せることがわかった。

### 1. はじめに

国内のエネルギーにおける石炭の割合は年々高まっており、それとともに、排出される石炭灰のフライアッシュをどう再利用するかが大きな問題となっている。石炭をエネルギー源に使用しているのは、発電所、化学工場、製紙工場などがあるが、中でも発電所から発生するフライアッシュが全体の約8割を占めている。ちなみに1989年の我が国における石炭灰の発生量は約400万tで有効利用率が49%であったが、2000年には1000万tを越えると見られている<sup>1)</sup>。

われわれはこれまで、火力発電所で発生するフライアッシュを主原料、火山礫を軽量骨材、ガラス繊維を強化材として、乾式で成形した複合建材の技術開発について共同研究を実施してきた<sup>2-4)</sup>。ここで主に使用したフライアッシュは国内炭由来のもので、溶融して球状を呈している粒子が多く、粉体物性も安定している。しかし、国内炭坑の相次ぐ閉山にともなって、発電所の燃料炭もほとんどが外国炭に切り替わってきている。外国炭のフライアッシュは、粒子径がかなり小さ

い方に片寄っているため粉体としての流動性にかける傾向がある。しかも、発電所では産地の異なるいくつもの外国炭をブレンドし、2～3週間の短い期間で切り替えて使っているため、フライアッシュの性状も大きく変動するという問題点が生じてきた。

そこで、将来このような外国炭のフライアッシュを使いこなして行くためには、外国炭フライアッシュの特性を把握し、その変動に対して何らかの対策を講じる必要がある。本研究はこのような背景から実施されたもので、北海道電力(株)から提供を受けた火力発電所のフライアッシュ11種類について、各フライアッシュ間における粉体物性の変動、また、各フライアッシュを樹脂で成形した成形体の力学的性質、さらにそれらにガラス繊維補強した成形体の力学的性質について主に検討した。

フライアッシュの粉体物性は、炭種、ボイラーの型式、燃焼条件等によって大きく変動するといわれている。フライアッシュの粉体物性の変動は、当然フライアッシュ成形体の物性にも影響を及ぼすことが予想される。そこで、基本的な粉体物性の変動について調査するために、7項目の粉体物性を測定した。

フライアッシュ成形体の強度は、これまででも、フライアッ

\*新日鐵化学株式会社

シュの種類によって大きく変動することは知られていたが、強度を決定する主要な因子を突き止めるには至っていなかった。原料であるフライアッシュの物性のいずれかと成形体強度との関係が明らかになれば、生産工程において適切な原料管理が可能になり、さらに材料設計、品質管理の水準も向上する。そこで、各種フライアッシュの粉体特性とそれらの成形体の力学特性（強度および弾性率）の関係について検討した。力学特性の評価は曲げ試験で行った。

また、前に述べたフライアッシュを用いた複合建材の製品において、フライアッシュ層はガラス繊維で強化されて用いられるため、ここではフライアッシュ成形体の強度特性に対するガラス繊維の役割についても検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 粉体物性の測定

各フライアッシュの基本的な粉体物性として、元素分析、粒子密度、比表面積、充填かさ密度、タップ密度、安息角、崩壊角の7項目を測定し、炭種の違いがフライアッシュの粉体物性に及ぼす影響について比較した。

実験に用いたフライアッシュは表1に示した11種類で、いずれも北海道電力(株)から提供を受けたものである。このうち、空知/太平洋以外はいずれも外国炭である。“/”で区切って表記してあるものは2種類以上の石炭を混合して燃焼に供したものであることを表している。

表1 試験に用いたフライアッシュの種類

略号	産出地(国名)
UL(コ)	Ulan(オーストラリア)
CV/UL(コ)/BA	Coal Valley(カナダ)/Ulan(オーストラリア)/Blair Athol(オーストラリア)
大同	大同(中国)
S R	South Rosewood(オーストラリア)
I P	Ipswich(オーストラリア)
OP/BA	Optimum(南アフリカ)/Blair Athol(オーストラリア)
M Y	Myuna(オーストラリア)
T U	Tugnujsky(ロシア)
Li/BA	Lithgow(オーストラリア)/Blair Athol(オーストラリア)
WA/MO	Wanbo(オーストラリア)/Moura(オーストラリア)
空知/太平洋	空知(日本)/太平洋(日本)

元素分析は蛍光X線分析装置（リガク製、RIX3000）を用いて行い、ガラス・ビード法によって分析値を求めた。

粒子密度はベックマン比重計を用いた空気置換法、および比重ビンを用いた水置換法の2通りの方法で測定した。これは、フライアッシュ粒子の中には燃焼時に発泡して開口部をもつものがあって、その大きさが測定結果に影響することが考えられるため空気置換と水置換の2通りの方法で測定したものである。

比表面積は、セメント及びフライアッシュの標準的な測定

方法であるブレン法で測定した。この方法は試料を充填したパウダー・ベッドに空気を透過させてその透過速度から比表面積を求めるものである。したがって試料の充填状態によって測定値が変わってくるが、ここではパウダー・ベッドの空率率は0.51とした。

充填かさ密度、タップ密度、安息角、崩壊角の4項目は、ABD粉体物性測定器（筒井理化学機械）で測定した。充填かさ密度は、試料を容器に堆積したままの状態での粉体の質量と容器の容積から求めた。タップ密度は充填かさ密度を測定した後、3分間180回のタッピングを行った後、同様に粉体質量と容積から求めた。安息角はロートから60mmφの円盤上に落下させる底面限定法で測定した。また、安息角を測定後、試料受けの台を一度、上昇・落下させたときに残った試料の安息角を崩壊角とした。

### 2.2 フライアッシュ成形体の作成

フライアッシュ成形体の曲げ試験片は、表1に示したフライアッシュのうち、空知/太平洋を除く10種類について作成した。結合剤としてノボラック型の粉末フェノール樹脂を使用し、添加量は重量で10%、15%、20%の3段階とした。試験片の作成は加熱プレスで行い、成形温度160℃、成形圧20kgf/cm<sup>2</sup>、加圧時間15minの条件で行った。約30cm角に成形された各フライアッシュの1枚の成形体から周辺部分を除いて、長さ約190mm、幅約30mmの曲げ試験片（7本程度）を切り出した。なお、1枚の成形体に対し、各フライアッシュとも同量の800gを使用したため、フライアッシュによって試験片はそれぞれ異なる厚さになった。

各試験片は外形寸法と重量を測定して密度を求めたほか、フライアッシュと結合剤の比が部分によって変わらないものとして、フライアッシュ、フェノール樹脂および空隙の体積分率をそれぞれ算出した。なお、この時、フライアッシュの密度として空気置換法によって測定した粒子密度を、フェノール樹脂の密度として文献値より1.3g/cm<sup>3</sup>を、それぞれ用いて計算した。

### 2.3 ガラス繊維強化した成形体の作成

ガラス繊維強化したフライアッシュ成形体の曲げ試験片は、表1に示したフライアッシュのうち、空知/太平洋を除く10種類について作成した。結合剤としてノボラック型の粉末フェノール樹脂を使用し、添加量は重量で15%とした。前項の成形体試料の場合には、1枚の成形体に対して同量のフライアッシュを使用したため厚さの違いが生じたが、ガラス繊維強化した成形体については厚さがほぼ5mmになるようにフライアッシュと樹脂を配合し、さらにそれぞれ同量のガラス繊維30gを配合した。なお、ガラス繊維は約40mmにチョップしたストランドで試験片下側(曲げ試験の引張側)表層のごく近傍に散布した。試験片の作成は加熱プレスで行

い、成形温度 160℃、成形圧 20kgf/cm<sup>2</sup>、加圧時間 10min の条件で行った。約 30cm 角に成形された各フライアッシュの成形体のうち、周辺部分を除いて長さ約 190mm、幅約 30mm の曲げ試験片（7 本程度）を切り出した。

各試験片は外形寸法と重量を測定して密度を求めたほか、フライアッシュ、結合剤、ガラス繊維の比が部分によって変わらないものとして、フライアッシュ、フェノール樹脂、ガラス繊維および空隙の体積分率をそれぞれ算出した。なお、この時、フライアッシュの密度として空気置換法によって測定した粒子密度を、フェノール樹脂の密度として文献値より 1.3g/cm<sup>3</sup> を、同じくガラス繊維の密度に文献値 2.57g/cm<sup>3</sup> を用いて計算した。

#### 2.4 曲げ試験

曲げ試験はインストロン型万能材料試験機 DSS-10T-S（島津製作所）を用いて行い、スパン 150mm、クロスヘッドスピード 2mm、室温 23℃の条件の下で 3 点曲げ試験を行った。この時、試験機本体で曲げ強度を測定すると同時に、ロードセルの出力とクロスヘッドの変位を測定したダイヤルゲージの出力をデータロガー UCAM-20PC（共和電業）に取り込み、弾性率の測定に用いた。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 粉体物性

表 2 にフライアッシュの化学組成を、表 3 に測定した粉体特性をまとめて示した。

表 2 からわかるように、いずれのフライアッシュも成分的には SiO<sub>2</sub> と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が大部分を占めている。X 線回折のプロファイルをみると非晶質特有のベースラインが観察され、これにムライトや石英のピークが乗っている。したがって、フライアッシュのは大部分はガラス質のシリカであり、一部ムライトと石英が析出している状態と考えられる。

他の成分では、UL（コ）、CV/UL（ロ）/BA、WA/MO の 3 種類は 6～13% の LOI が認められるが、これは未燃カーボンによるものと思われる。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は大同だけが 15.57% と群を抜いて多くっており、次は TU の 6%、他は 2～3% である。CaO は CV/UL（ロ）/BA が 7.35% で特に多いが、他は 0～4% の間に分散している。

表 3 の粉体物性をグラフで比較したのが図 1～6 である。

粒子密度は空気置換法および水置換法による結果を図 1 に示した。空気置換法で各フライアッシュの値を比較すると、

表2 フライアッシュの化学組成

炭 種	(単位：%)										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	P	CaO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	合計
UL(コ)	67.31	19.26	0.19	0.16	0.04	0.45	0.74	1.00	2.83	8.38	100.36
CV/UL(ロ)/BA	61.29	18.37	0.90	1.05	0.17	7.35	0.44	0.77	3.52	6.41	100.27
大同	55.18	19.00	0.32	0.98	0.15	3.25	1.68	0.79	15.57	2.21	99.13
SR	64.81	26.43	0.63	0.78	0.16	1.69	0.48	2.11	2.99	0.61	100.69
IP	63.42	24.67	0.39	0.60	0.20	1.64	0.45	2.29	4.23	2.10	99.99
OP/BA	57.54	29.16	0.28	0.98	0.85	3.18	0.43	1.78	2.61	2.15	98.96
MY	61.32	29.02	0.45	0.86	0.03	1.23	1.10	1.30	3.62	1.40	100.33
TU	57.03	26.58	0.44	1.10	0.84	3.42	1.20	1.52	6.19	1.16	99.48
LI/BA	62.34	27.70	0.29	0.40	0.17	0.50	2.05	1.58	1.94	2.68	99.65
WA/MO	53.55	22.09	0.56	0.99	0.33	2.36	0.87	1.16	4.96	12.80	99.67

測定は蛍光X線（ガラスビード法）による。

表3 フライアッシュの粉体特性

炭 種	粒子密度、g/cm <sup>3</sup>		比表面積* cm <sup>2</sup> /g	充填かさ密度 g/cm <sup>3</sup>	タップ密度 g/cm <sup>3</sup>	安息角崩壊角 deg deg	
	空気置換法	水置換法					
UL(コ)	2.28	2.14	5730	0.633	0.855	47.7	46.0
CV/UL(ロ)/BA	2.45	2.11	4990	0.699	0.906	43.3	40.0
大同	2.45	2.42	3960	1.067	1.353	49.0	42.7
SR	2.07	2.06	3340	0.946	1.157	43.3	37.0
IP	2.15	2.10	3200	0.946	1.166	40.7	36.7
OP/BA	2.28	2.21	3270	0.939	1.190	40.3	38.0
MY	2.13	2.08	2680	0.916	1.144	43.3	37.7
TU	2.34	2.29	2290	1.111	1.350	41.7	37.3
LI/BA	2.22	2.17	3790	0.813	1.039	47.0	42.7
WA/MO	2.36	2.10	4860	0.626	0.826	44.7	39.3

\*ブレン法

CV/UL(口)/BA 及び大同が 2.45 ともっとも大きく、最も小さいものが 2.07 の SR と空知/太平洋の 1.96 である。大同の値が大きいのは大量の  $Fe_2O_3$  が含まれているためと考えられる。空気置換法と水置換法の測定値を比較すると、全般に水置換法の値が空気置換法を下回っており、特に CV/UL(口)/BA、WA/MO、UL(口) でその差が大きい。これは粒子内部に発泡などによる空隙があり、それが微小な開口部で外部につながっており、空気置換の場合には浸入できるが、水置換の場合は浸入できないためと推定される。

図 2 は比表面積（プレーン法）の結果である。図からわかるように、フライアッシュ間でかなり大きな変動があり、最小の  $2290\text{cm}^2/\text{g}$  から最大の  $5730\text{cm}^2/\text{g}$  まで 2.5 倍程度の開

きがあるが、これは粒度に起因するもので、粒子形状を球形と仮定して比表面積から粒子径を計算すると、約  $5 \sim 12 \mu\text{m}$  に相当する。一方、レーザー回折法で求めた粒度分布のデータからは平均粒径  $22 \sim 43 \mu\text{m}$  という値が得られた。図 3 に 2 つの測定法で得られた測定値の相関性を示す。図 3 からわかるようにこれらの間にはほとんど相関性がみられない。図 4 に示した SEM 写真では、観察される粒径はプレーン法による値に近いが小さい方の粒子は互いに融着、あるいは凝集しているように見える。したがって、測定法による値の違いは、プレーン法がフライアッシュの 1 次粒子の特性を、レーザー回折法が 2 次粒子の特性を強く表した結果と考えることができる。

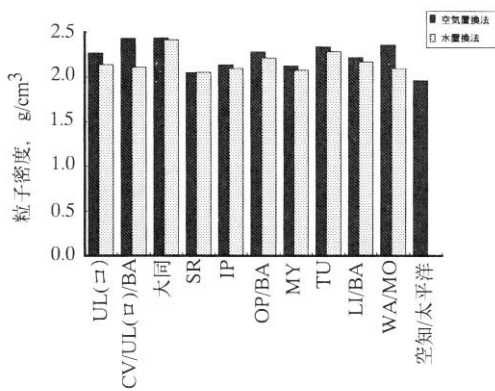


図1 粒子密度の変動

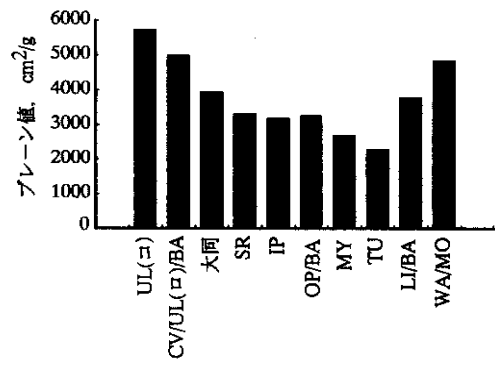


図2 比表面積の変動

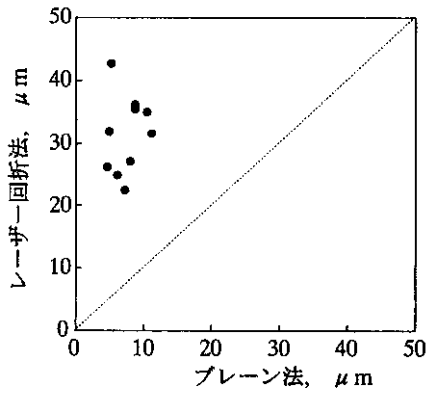


図3 測定法による平均粒径の違い

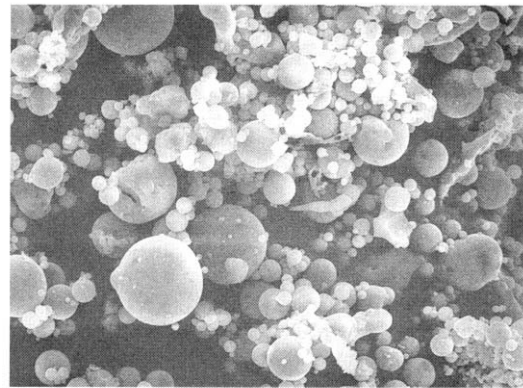


図4 フライアッシュのSEM写真

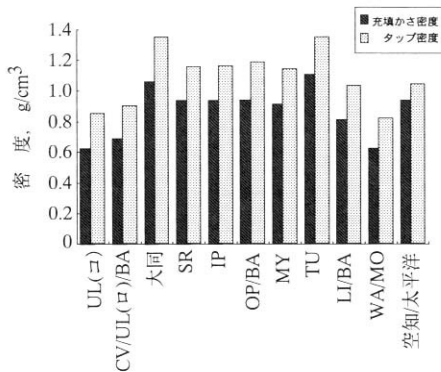


図5 かさ密度の変動

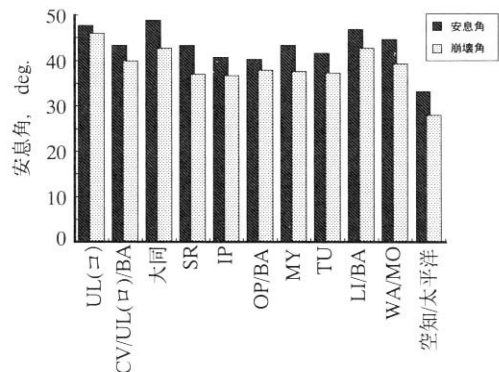


図6 安息角の変動

図5に示したように、かさ密度のうち充填かさ密度は約0.6～1.1と2倍近い開きになっており、フライアッシュの種類によって充填率に大きな差の生ずることがわかる。タップ密度と充填かさ密度との差をみると、大同が0.286と大きく、空知/太平洋が0.107で小さいほかはだいたい同程度である。

安息角と崩壊角の変動は図6に示した。安息角は、大同、UL(コ)、LI/BAの3種類が47～49degと大きく、空知/太平洋が28degで最も小さい。他は40～45degの値を示している。また、崩壊角についても、安息角と同様な傾向を示している。

### 3.2 フライアッシュ成形体の力学特性

成形体の曲げ強度および曲げ弾性率がフライアッシュの種類によってどの程度変わるかを、図7～8に示した。

この結果と各フライアッシュの粉体物性との関連性について検討した。その結果、ほとんどの項目との間に相関性はなく、ただ一つ相関性の認められた粉体物性がかさ密度であった。図9と図10にそれぞれフライアッシュの充填かさ密度に対してその成形体の曲げ強度、曲げ弾性率（いずれもフライアッシュ毎の平均値）をプロットした図を示した。前に述べたように、曲げ試験片は結合剤であるフェノール樹脂の量を10、15、20wt%の3段階に変えて作製したが、図9～

10からわかるように、強度、弾性率とも同じ樹脂量のグループでは充填かさ密度に対して直線的な関係が認められた。

力学特性がかさ密度と相関性があるということから、成形体を構成するフライアッシュ、樹脂、空隙の構成比と関連づけられる可能性が考える。そこで、試験片毎に各組成の体積分率を算出し、フライアッシュ、樹脂、空隙の体積分率に対する曲げ強度の関係を調べた。その結果、フライアッシュの体積分率に対する曲げ強度では樹脂量によるグループがはっきりと分かれているのに対し、樹脂に対しては、分かれているもののフライアッシュの場合より1本の線に近くなっている。さらに図11に示した、空隙に対する関係では、空隙率25%以上で広がりが大きくなっているのを除けば、樹脂量やフライアッシュの種類に関係なく一本の線に近くなっていることがわかる。

そこで、力学的性質を決定する要因をさらに詳細に調べるために、このような多孔体の破壊および変形挙動に関するモデルを検討した。図12は破壊時のモデルで、単純化するために引っ張り力を受けるものとして考える。“F”はフライアッシュ粒子の相、“R+V”はフライアッシュ粒子間の樹脂と空隙の相を表す。ノボラック型フェノール樹脂は硬化時に発泡して空隙を満たすので、“R+V”相は発泡した樹脂の相として考えることができる。そこで、樹脂を結合剤としたフライアッシュ成形体はこの2相からなると考えると、そ

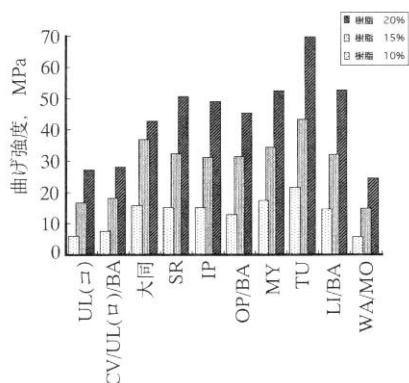


図7 成形体の曲げ強度の変動

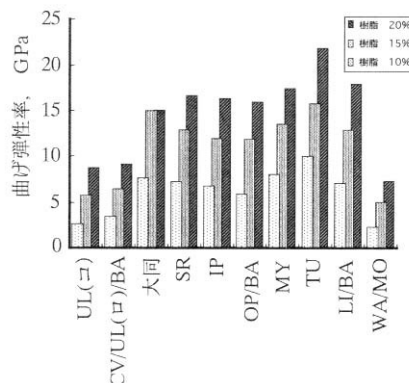


図8 成形体の曲げ弾性率の変動

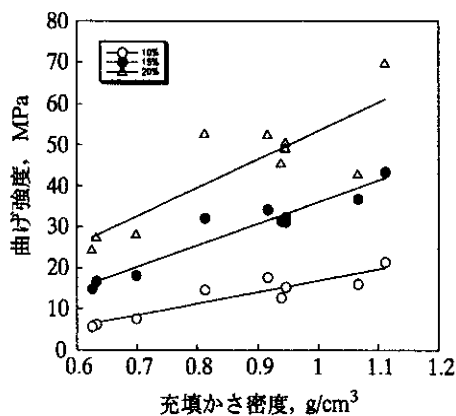


図9 充填かさ密度と曲げ強度

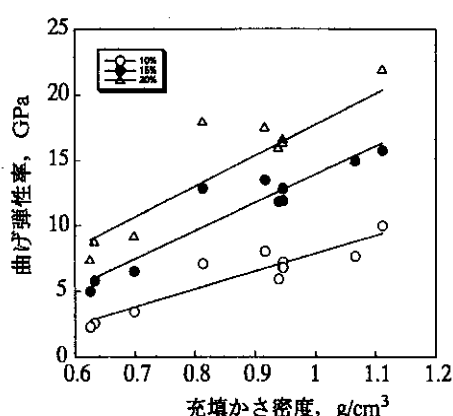


図10 充填かさ密度と曲げ弾性率

それぞれの相の強度はフライアッシュ粒子の相がはるかに大きいので、破壊は“R + V”相のみで進行すると考えられる。次に、樹脂の体積分率を Vr、空隙の体積分率を Vv とすると、(Vr + Vv)/Vr は体積 Vr の樹脂が発泡して体積 Vr + Vv になった時の発泡倍率、あるいはフライアッシュ粒子間隙に対する樹脂容積の割合の逆数を表す。そこで、“R + V”相の強度は、発泡倍率 (Vr + Vv)/Vr の関数であると考えられることができる。

このような仮定のもとに、曲げ強度を発泡倍率の逆数 Vr / (Vr + Vv) に対してプロットしたのが図 13 である。そうすると図からわかるように、曲げ強度 σ はフライアッシュの種類や樹脂の添加量に関わりなく、次に示す実験式で表せることがわかった。

$$\sigma = 98.9 \frac{V_r}{V_r + V_v} - 11.16 \quad [\text{MPa}]$$

またここでフライアッシュの体積分率を Vf とすると、粒子間隙は Vr + Vv = 1 - Vf であるから、

$$\sigma = 98.9 \frac{V_r}{1 - V_f} - 11.16 \quad [\text{MPa}] \quad \dots\dots(1)$$

となる。したがって実験式 (1) からわかるように、フライアッシュの粒子密度を測定しておき、製造工程と同じ圧力でフライアッシュを加圧して Vf を求めると、樹脂をどの程度添加すると設計強度を満足するか、添加すべき樹脂量を予測することができる。

つぎに弾性率についても強度と同様に検討した。これもフライアッシュ粒子の相と発泡樹脂の相の 2 相に分けて考えると、発泡樹脂相の弾性率に比較してフライアッシュ粒子の弾性率ははるかに大きい。したがって、引張力を受けたときの成形体全体の伸びは発泡樹脂相の伸びのみによることを

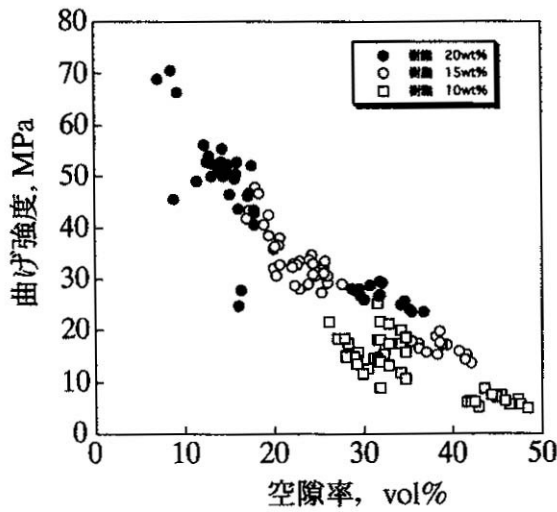


図11 空隙率に対する曲げ強度の関係

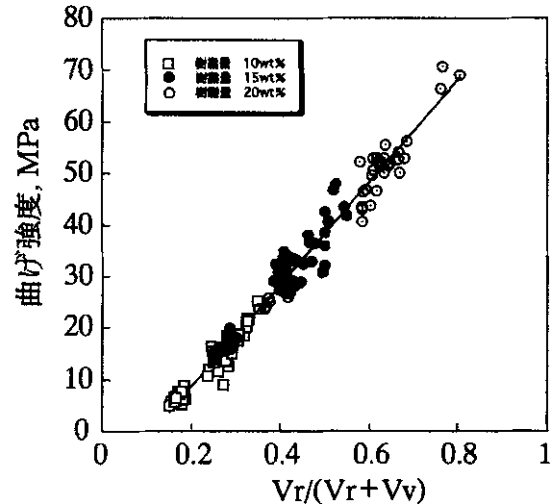


図13 曲げ強度と樹脂の発泡倍率の関係

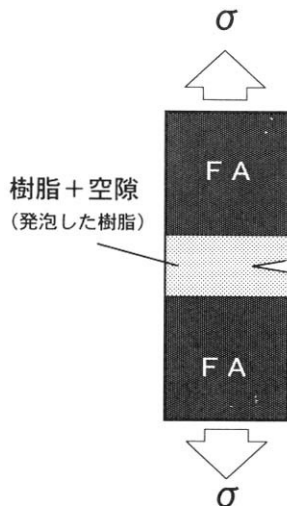


図12 破壊様式のモデル

とができる。ここで、図 14 に示したように、単位面積、単位長さの成形体を考え、これに σ の応力がかかっているものとする。そして発泡樹脂相の弾性率 Erv は、強度について仮定したと同様に、発泡倍率 (Vr + Vv)/Vr の関数と考えると、

$$E_{rv} = f\left(\frac{V_r + V_v}{V_r}\right)$$

と表すことができる。また、発泡樹脂相の伸び = 成形体全体の伸び d は、かかっている応力 σ と発泡樹脂相の体積分率 (Vr + Vv) に比例し、発泡樹脂相の弾性率 Erv に反比例すると考えられるので、

$$d = \frac{\sigma (V_r + V_v)}{E_{rv}}$$

と表すことができる。したがって、成形体全体の弾性率（見かけの弾性率） $E_{ap}$  は、

$$E_{ap} = \frac{\sigma}{d} = \frac{1}{(V_r + V_v)} f\left(\frac{V_r + V_v}{V_r}\right)$$

となる。

このような仮定の下に、曲げ弾性率  $\times (V_r + V_v)$  を発泡倍率の逆数  $V_r / (V_r + V_v)$  の対数に対してプロットしたのが図 15 である。図からわかるように、弾性率に関してもフライアッシュの種類や樹脂量に関係なく、直線的な関係を示している。この図から、弾性率に関する実験式、

$$E = \frac{1}{1 - V_f} \{10.3 \log\left(\frac{V_r}{1 - V_f}\right) + 8.80\} \quad [\text{GPa}] \quad \dots(2)$$

が得られた。したがって弾性率についても強度と同様、 $V_f$  を測定することによって適切な樹脂の添加量を決定することができる。

以上のように、フライアッシュ成形体の力学的性質はかさ密度と相関性があることを見出したことから一歩進めて、 $V_f$  を測定すれば添加する樹脂量によって任意の強度、弾性率を設計できることを見出した。

### 3.3 フライアッシュのガラス繊維補強成形体の力学特性

前項と同様に、各試験片におけるフライアッシュ、樹脂、空隙の体積分率を算出し、曲げ強度、曲げ弾性率との関係を調べた。ここにおける体積分率は前項との整合性を保つため、フライアッシュ、樹脂、空隙で 100% になるように、ガラス繊維を除いて算出している。

ガラス繊維強化した成形体の曲げ強度および曲げ弾性率の結果を、前項と同じように  $V_r / (V_r + V_v)$  に対してプロットしたものを図 16～17 に示した。ここで、白丸はガラス繊維強化した成形体の試験結果、直線は前項で求めた繊維強化しない成形体の実験式である。

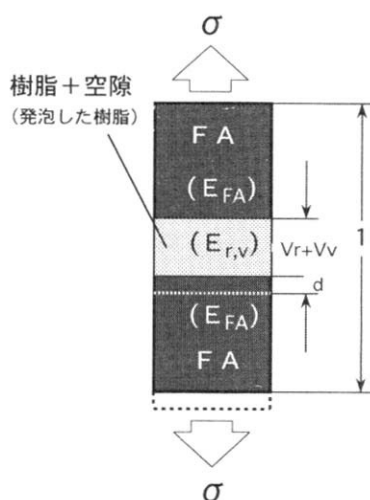


図14 弾性変形のモデル

図 16 の曲げ強度についてみると測定値の白丸はばらつきが大きく、繊維強化しない成形体のように実験式を求められるような相関関係を見出すには至らなかった。しかし、すべての測定値が直線より上にプロットされており、ガラス繊維強化することによって強度が増加していることがわかる。

次に曲げ弾性率であるが、図 17 を見ると弾性率も強度と同じようにばらつきが大きい、その分布を見ると直線の上下に均等に分散している。したがって強度と違って、弾性率に対するガラス繊維の補強効果はほとんどないといえる。

ガラス繊維強化した成形体と繊維強化しない成形体とを応力-ひずみ曲線で比較すると、繊維強化しない成形体はほとんど直線的に増加して瞬間的な破断を迎えるのに対して、繊維強化した成形体は初め直線状に増加するが、次第に傾きを減少させて上に凸の曲線を描いた後、何度かの比較的大きな応力緩和を経て次第に強度を失うが、そのようにしてガラス繊維が引き抜きを受けた後もつながっており、破断して完全に分離することはない。

これらの結果から、フライアッシュ成形体に対するガラス繊維の効果は、弾性変形領域においては補強効果は現れないが、クラック発生後、靱性を増加させて脆性的な破壊を防ぐとともに、最大強度もガラス繊維のない時に比べて増加させる点にあることが明らかになった。

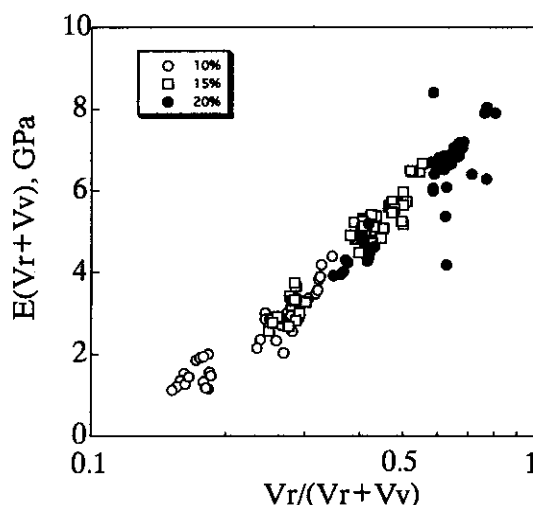


図15 曲げ弾性率と樹脂の発泡倍率の関係

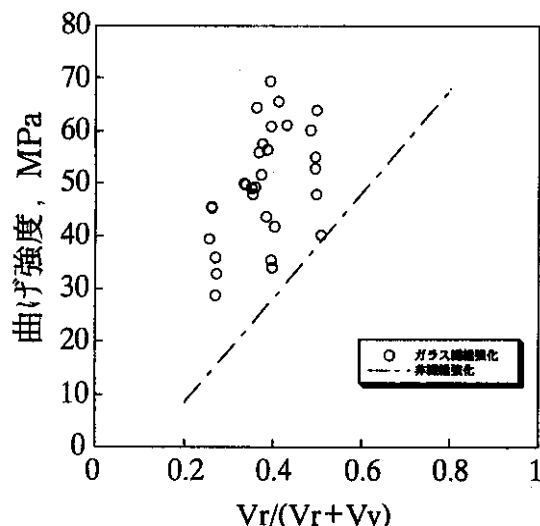


図16 ガラス繊維強化した成形体の曲げ強度

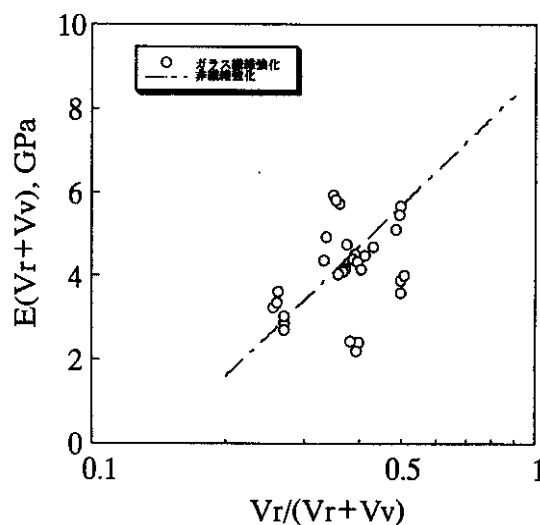


図17 ガラス繊維強化した成形体の曲げ弾性率

#### 4. まとめ

フライアッシュ 10 種類について、成形体の曲げ強度および曲げ弾性率を決定する因子について検討し、強度に関する材料設計法の確立を試みた。その結果は次のようにまとめられる。

(1) 成形体が破壊するとき、クラックはフライアッシュ粒子間隙（結合剤樹脂と空隙の混合相）のみを伸展すると仮定し、成形体の強度はフライアッシュ粒子間隙に対する結合剤樹脂の割合の関数になる、というモデルを提案した。

(2) 上のモデルに基づいて曲げ強度  $\sigma$  のデータを  $V_r/(1-V_f)$  に対してプロットしたところ、フライアッシュの種類、結合材の量に関わりなくすべてのデータが 1 本の直線で表され、

$$\sigma = 98.9 \times V_r / (1 - V_f) - 11.16 \quad [\text{MPa}]$$

という実験式が得られた。

(3) 成形体が弾性変形するとき、変形はフライアッシュ粒

子間隙（結合剤樹脂と空隙の混合相）のみが負担すると仮定し、成形体の見かけの弾性率はフライアッシュ粒子間隙に対する結合剤樹脂の割合の関数に比例し、かつフライアッシュ粒子間隙に反比例する、というモデルを提案した。

(4) 上のモデルに基づいて曲げ弾性率  $E_{ap} \times (1 - V_f)$  を  $\log \{V_r/(1 - V_f)\}$  に対してプロットしたところ、(2)と同様にすべてのデータが 1 本の直線で表され、

$$E_{ap} = \{1/(1 - V_f)\} [10.3 \log \{V_r/(1 - V_f)\} + 8.80] \quad [\text{GPa}]$$

という実験式が得られた。

(5) 以上の結果からフライアッシュの物性が変動しても、ある成形体強度を実現するのに必要な結合剤の量、あるいは、ある量の結合剤を添加したときの成形体強度および弾性率は、圧密されたフライアッシュの体積分率を測定することによって、容易に推定できるようになった。

(6) フライアッシュ成形体に対するガラス繊維の補強効果は、弾性率にはあまり効果がないが、クラック発生後、破断強度、靱性を大きく増加させる効果がある。

#### 参考文献

- 1) S.Nagataki, Proceedings of Int. Clean Coal Tech. Sympo. on Coal Ash Utilization, pp (別冊) 2-3 (1996), Tokyo
- 2) 勝世, 赤澤, 丸山, 古賀, 池口, 石炭技術研究所・石炭利用技術研究発表北海道大会講演集, pp.128-135 (1990), 札幌
- 3) T.Koga, T.Suzuki, Y.Fukushima, S.Okada, K.Katsuse, Proceedings of Int. Clean Coal Tech. Sympo. on Coal Ash Utilization, pp.301-303, (1996), Tokyo
- 4) 勝世, 堀川, 古賀, 鈴木, 日本材料学会第 45 期学術講演会講演論文集, pp.141-142 (1996)