資　料

石炭灰を用いた窯業建材の開発（その1）

福富　大地*・岡本　恵美*・原田　達也**

1. 目　　的

近年，世界各国でカーボンニュートラル達成に向けた動きが加速する中，日本も2050年までの達成を宣言しており，社会全体で脱炭素化に向けた取り組みの実施が求められている．これに関連して，島根県の地場産品である石州瓦等の窯業建材は，その製造工程において多くのエネルギーを必要とし，燃料の燃焼によって多量のCO_2を排出している．

そこで，本研究ではアルミナシリカ粉末とアルカリ溶液との縮重合反応で生成される固化体であるジオポリマーに着目した．ジオポリマーはその合成において，高温での焼成を必要とせず，反応促進の為の加温養生も60～80℃程度の温度で済むことから[1)]，粘土がわらのように従来技術において，製造に高温処理を必要とする製品をジオポリマーで代替することは大きなCO_2排出低減効果を見込むことが出来る．

また，ジオポリマーの合成に使用するアルカリ溶液に可溶なアルミナシリカ粉末（活性フィラー）として，石炭灰や高炉スラグ微粉末等を有効利用可能であるため，これら産業副産物の大量消費にも期待できる[2)]．

島根県内では石炭火力発電所より大量の石炭灰が排出されており，既に土木・建設分野等で再生利用が進められているが，全てを再利用できていないため，さらなる用途開発が求められている．このことから，ジオポリマーの主原料として石炭灰を選択し，特に県内の火力発電所で副生したフライアッシュ（以下,FAと記す）を用いることとした．

以上の点から，石炭灰を主原料としたジオポリマーを用いた，粘土がわらの代替となる窯業建材の開発を本研究の目的とした．

なお，既往の石炭灰を用いたジオポリマーに関する研究では，主に高炉水砕スラグ（以下，BSFと記す）やシリカヒューム（以下，SFと記す）が混和材として使用されている[2)～4)]．活性フィラーの混和材はこれらに倣い，BSF，SFを用いることとした．

本資料では，FAを主原料とし，その一部をBSF，SFによって置換したジオポリマー試験体をプレス成型によって作製して，FAの置換率および使用するアルカリ水溶液の濃度が曲げ強度へ与える影響を確認した結果について記す．

2. 方　　法

2.1　ジオポリマー試験体の作製

2.1.1 使用材料および配合条件

使用材料を表1に示す．活性フィラーにはFA，BFS，SFを，アルカリ溶液には水酸化ナトリウム（NaOH）水溶液を使用した．

検討対象とした試験体の配合条件を表2に示す．活性フィラーにFAのみを用いた配合を基本の条件とし，BFSまたはSFによってFAを内割比で10%，15%，20%置換した試験体を作製した．NaOH水溶液の添加量は，プレス成型時の溶液のにじみ出しおよび金型への試験体貼り付きが生じない水・粉体質量比（W/P）となるように設定した．NaOH水溶液の濃度は20wt%とした．

また，FA置換率20%の条件について，アルカリ水溶液の濃度が曲げ強度に与える影響を調査するため35wt%NaOH水溶液を用いた試験体も合わせて作製した．

2.1.2 材料の混合および成型

材料の混合は，まず活性フィラー（主原料FA，それを置換するBFS，あるいはSF）のみをミキサーへ投入して高速で1分間混合後，容器に付着した粉体をかき落とし，再度高速で1分間混合した．その後，活性フィラーとアルカリ水溶液をビニール袋へ投入し，アルカリ水溶液が活性フィラー全体に馴染むまで約2分間練り混ぜを行った．なお，活性フィラーにFAのみを用いた試験体についてはミキサーによる混合は実施せず，アルカリ水溶液の練り混ぜのみ実施した．

材料の練り混ぜ後，プレス成型機（前川試験機製作所，MS-100BC）を用いて幅40mm，長さ100mm，厚さ8mmの試験体を作製した．プレス条件はプレス圧20t，プレス時間1分間とした．

その後，試験体をトレーに載せて水を張ったケースへ入れ，恒温乾燥機中で湿潤養生を行った．養生条件は80℃の温度で24時間保持とした．

*無機材料・資源科，
**無機材料・資源科（現：企画調整スタッフ）

表 1　使用材料

記号	材料	略号	備考
活性フィラー	フライアッシュ	FA	JIS A6201 第Ⅱ種適合品
	高炉水砕スラグ	BFS	JIS A6206 高炉水砕スラグ 4000　適合品
	シリカヒューム	SF	JIS A6207 適合品
アルカリ水溶液	水酸化ナトリウム水溶液	NaOH	濃度：20wt%，35wt%

表 2　ジオポリマー試験体の配合条件

活性フィラー	FA 置換率 (%)	W/P (質量比)	NaOH 水溶液濃度 (wt%)
FA	0	0.20	20
FA・BFS	10	0.20	20
	15	0.17	20
	20	0.13	20, 35
FA・SF	10	0.13	20
	15	0.12	20
	20	0.12	20, 35

2.2　3点曲げ試験

試験体に対する 3 点曲げ破壊試験は，万能試験機（エー・アンド・デイ，RTF-2350）を用いて行った．試験数は N = 3，支点間距離は 80mm，圧下速度は 0.50mm/min とした．

3. 結　果

3.1　FAの置換率と曲げ強度

アルカリ溶液に 20wt%NaOH 水溶液を使用して作製した各試験体の 3 点曲げ試験結果を図 1，2 に示す．

FA を BFS で置換した試験体では，15% までは置換率の増加に伴う曲げ強度の上昇が見られたが，20% の試験体では増加しなかった．FA を SF で置換した試験体では，置換率の増加に伴う曲げ強度の上昇が確認された．

3.2　アルカリ溶液濃度と曲げ強度

BFS または SF による FA 置換率が 20% の配合において，アルカリ溶液濃度をそれぞれ 20wt%, 35wt% として作製した試験体の 3 点曲げ試験結果を図 3 に示す．

BFS で置換した試験体では，アルカリ溶液の濃度上昇に伴う曲げ強度の増加が見られた．一方，SF で置換した試験体では曲げ強度は増加しなかった．

図 4 に BSF 置換した試験体，図 5 に SF 置換した試験体における，曲げ破壊後の破断面の写真を示す．BSF 置換した試験体及び，20wt%NaOH 水溶液を用いた SF 試験体の破断面には空隙は確認されなかったが，35wt%NaOH 水溶液を用いた試験体には空隙が確認された（図中赤矢部）．SF 置換試験体の曲げ破壊強度低下は内部に発生した空隙の影響を受けたものと考えられる．高濃度アルカリ溶液を用いた場合に SF 置換試験体の内部に空隙が発生する原因は現時点ではわかっていない．

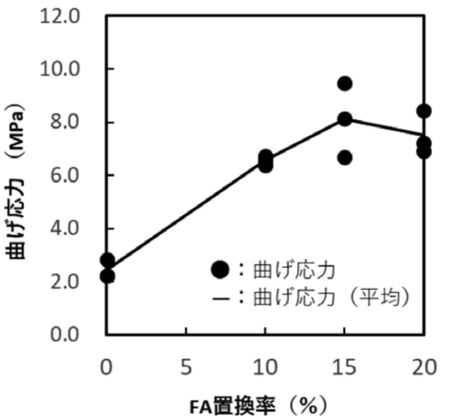

図 1　BFS による FA 置換率と曲げ強度の関係
（アルカリ溶液：NaOH 水溶液 20wt%）

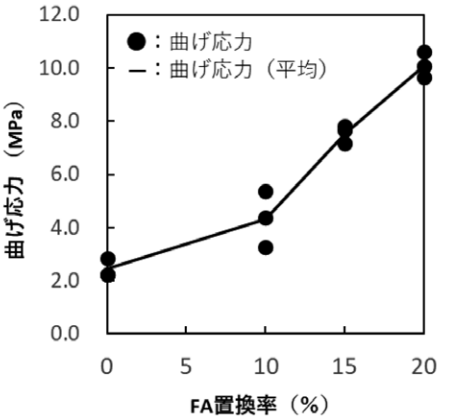

図 2　SF による FA 置換率と曲げ強度の関係
（アルカリ溶液：NaOH 水溶液 20wt%）

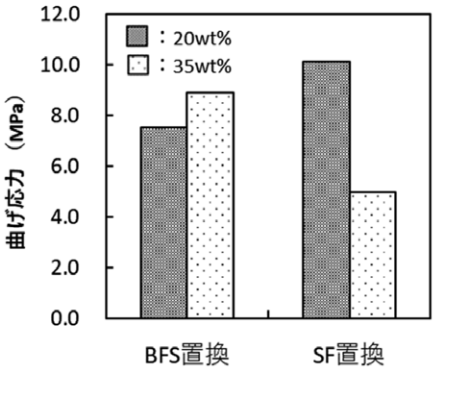

図 3　NaOH 水溶液濃度と曲げ強度の関係
（FA 置換率：20%）

図 4　BSF 置換した試験体の破断面
(NaOH 水溶液の濃度 上：20wt% , 下：35wt%)

図 5　SF 置換した試験体の破断面
(NaOH 水溶液の濃度 上：20wt% , 下：35wt%)

文　　献

1) 日本コンクリート工学会．月間コンクリート技術 2017 年 6 月号．https://www.jci-net.or.jp/j/concrete/technology/201706_article_1.html,（参照 2025-08-15）.

2) 一宮一夫. ジオポリマーの研究開発の現状. コンクリート工学. 2017, Vol.55, No.2, p.131-137.

3) 東原ほか．短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの実用化に向けた基礎的検討．コンクリート工学年次論文集．2015, Vol.37, No.1, p.1963-1968.

4) 川尻ほか．ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究．コンクリート工学年次論文集．2011, Vol.33, No.1, p.1943-1948.