

— 経常研究 —

ジオポリマーコンクリート製造技術の開発

環境・機能材料科 山口典男・木須一正

要約

火力発電所から排出されるフライアッシュ (FA) と都市ごみ溶融スラグ (スラグ) を原料として作製したジオポリマーコンクリートの圧縮強度と流動性を示すスランプ特性を評価し、最適な配合組成を決定した。単位水量が 190kg/m^3 、硬化液/(FA+スラグ)比が 0.7、スラグ/(FA+スラグ)比が 0.25 の条件で作製した試料の圧縮強度は 26.7MPa 、スランプは 16cm であった。また、乾燥収縮は、セメントコンクリートよりも小さくなる傾向が確認された。

キーワード：ジオポリマー、コンクリート、フライアッシュ、スラグ、圧縮強度、スランプ、乾燥収縮

1. はじめに

長崎県内において、火力発電所では石炭灰 (フライアッシュ) が、各自治体などでは都市ごみ溶融スラグが排出されており、全てを有効利用できていない。これら無機廃棄物の有効利用への要求は高いがほとんど進んでいないのが現状である。

一方、ジオポリマー技術は、無機粉末を 100°C 以下の低温で固化する技術であり、セメントの代替技術として注目され始めている。ジオポリマーは、水ガラス水溶液を主成分とする専用の硬化液を用い、粉末から溶出するイオンとケイ酸イオンの縮重合で硬化すると考えられている。このように、セメントを使用しない硬化法であることから、二酸化炭素の排出もセメントに対し、最大 80% 削減できるとの試算¹⁾もある。これまで、フライアッシュや都市ごみ溶融スラグを対象にジオポリマー技術の適用について検討し、ジオポリマー技術によりフライアッシュ等の無機廃棄物の有効利用が可能であることを示してきた²⁾。そこで、本研究ではセメントコンクリートの代替材料としての可能性を検討するために、県内で発生するフライアッシュおよび都市ごみ溶融スラグを用い、ジオポリマーコンクリートの特

表1 フライアッシュ系ジオポリマー配合組成

単位水量 (kg/m^3)	Liq.	秤量重量(kg)			
	FA	硬化液	FA	細骨材	粗骨材
150	0.90	1.203	1.335	7.171	8.761
170	0.60	1.360	2.274	6.532	7.982
170	0.70	1.362	1.941	6.701	8.191
170	0.90	1.362	1.512	6.931	8.474
180	0.60	1.444	2.405	6.381	7.802
180	0.70	1.443	2.061	6.560	8.019
180	0.80	1.442	1.800	6.701	8.190
190	0.50	1.521	3.041	5.970	7.290
190	0.60	1.524	2.533	6.240	7.622
190	0.70	1.521	2.173	6.433	7.858
190	0.90	1.521	1.692	6.690	8.172
200	0.60	1.601	2.670	6.091	7.454

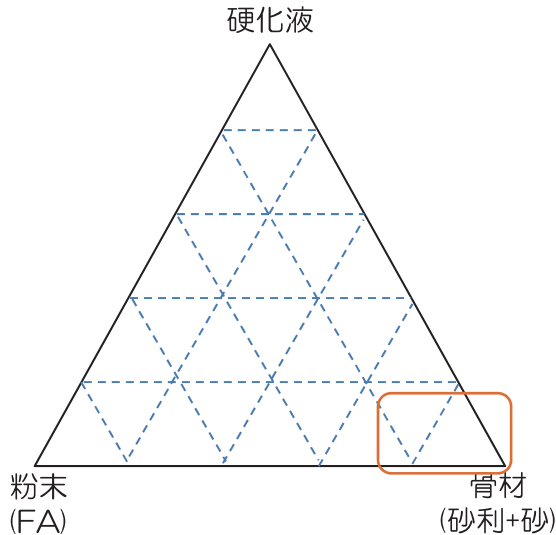
※ Liq.: 硬化液、FA: フライアッシュ

性および耐久性を評価することを目的としている。平成26年度は、フライアッシュおよび都市ごみ溶融スラグを原料にしたジオポリマーコンクリートの強度やスランプ特性について検討した。

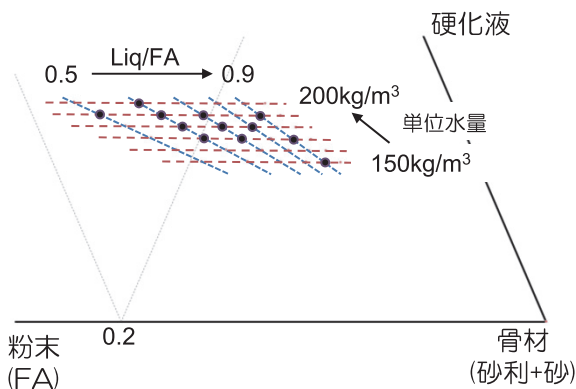
2. 実験方法

2.1 フライアッシュ系ジオポリマー コンクリートの作製

フライアッシュⅡ種、骨材(砂・砂利)および硬化液を表1に示す組成で配合した。また、その三



(a) 硬化液-粉末-骨材ダイアグラム



(b) (a)で囲んだ部分の拡大図

図1 フライアッシュ系ジオポリマー配合組成を示すダイアグラム

角ダイアグラムを図1に示す。硬化液は、1号水ガラスを原料とした希釈水ガラスと、10N-NaOH水溶液を3:1の体積比で混合したものを使用した。なお、希釈水ガラスは、1号水ガラスと水を1:1.13の重量比で混合・溶解したものとした。また、10N-NaOH水溶液は、48%-苛性ソーダと水を1.58:1の重量比で混合・溶解したものとした。

フライアッシュと砂をモルタル混練機にて空練りした後、硬化液を加えよく混練しモルタルを調製した。その後、砂利とモルタルをプラスチック製容器に移し、鍬で均一となるまで混練しコンクリートを調製した。混練したコンクリートをスランプ試験に突き棒で突きながら充填し、スランプ試験を実施した。コーンを引き抜いた後、ゆっくりと変形するものについては、動きが止まった高さをスランプとして読み取った。次に、スランプ後のコンクリートを直径100mm×高さ200mmのプラスチック型枠に充填し、圧縮試験片を作製した。充填した型枠ごと恒温恒湿器に入れ、温度80℃、相対湿度80%で24hr養生した。養生後型枠から取り出した試験片は約7day室内に放置した後、圧縮強度を測定した。なお、各条件で3本ずつ圧縮強度を測定した。

2.2 フライアッシュ-スラグ混合系ジオ ポリマーコンクリートの作製

2.1で選定した配合組成を基に、フライアッシュの一部を都市ごみ熔融スラグ粉末で置き換えた試験片を表2に示す配合で作製した。スラグは、ポットミルで粉碎後、63μm以下に分級した粉体を用いた。硬化液、混練方法、スランプ試験、養生条件等は2.1で記した条件と同じで行なった。なお、圧縮強度測定においては、上下にアンボンドキャピンをはめて実施した。

表2 フライアッシュ-スラグ系ジオポリマー配合組成

単位水量 (kg/m ³)	Liq.		SLG		秤量重量(kg)		
	SLG	(SLG+FA)	硬化液	FA	SLG	細骨材	粗骨材
190	0.70	0.00	1.520	2.172	0.000	6.518	7.966
190	0.70	0.25	1.521	1.629	0.543	6.560	8.015
190	0.70	0.50	1.520	1.088	1.086	6.599	8.065
190	0.70	0.75	1.524	0.543	1.629	6.641	8.115

※ Liq.: 硬化液、FA: フライアッシュ、SLG: スラグ

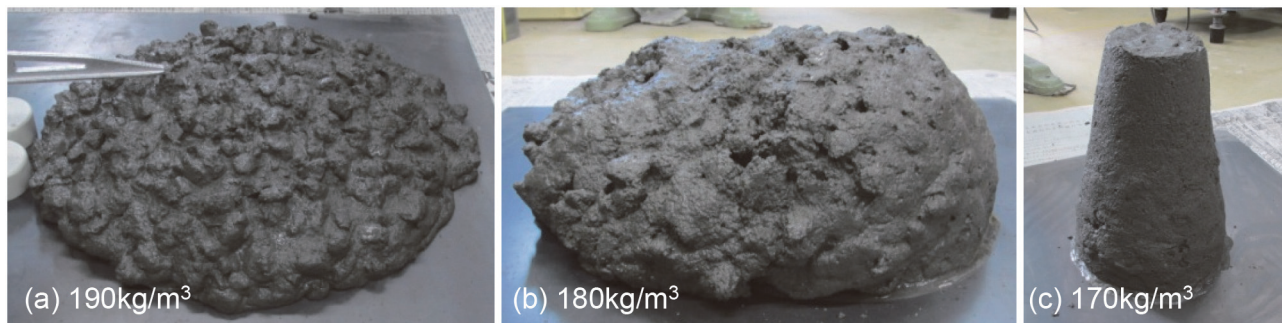


図2 フライアッシュ系ジオポリマーのスランプ試験後の様子
(数値は単位水量を表す。硬化液 / フライアッシュは全て 0.7)

表3 フライアッシュ系ジオポリマーのスランプ特性

(単位 : cm)

単位水量 (kg/m ³)	硬化液/FA				
	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
150					0
170		3.5	6.5		5.0
180		13.0	17.0	8.0	
190	×	18.5	21.0		17.0
200		21.0			

×は型枠から抜けなかったため測定不能。

表4 フライアッシュ系ジオポリマーの圧縮強度

(単位 : MPa)

単位水量 (kg/m ³)	硬化液/FA				
	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
150					12.4
170		17.8	18.3		13.2
180		18.3	16.5	15.6	
190	13.8	18.3	18.8		15.4
200		18.6			

2.3 乾燥収縮測定

表 2 の配合表において、スラグの置換率が 0、25、75wt% の 3 種類の配合において、10 × 10 × 40cm の試料をそれぞれ作製した。なお、長さ変化をコンパレータにより測定するために、試料の両端にゲージプラグを埋め込んだ。相対湿度約 60%、室温にて放置し、定期的に試料長をコンパレータ (西



図3 フライアッシュ系ジオポリマーコンクリート
固化体 (左) と圧縮試験後 (右) の様子の一
例 (配合組成は、単位水量 190kg/m³, 硬化
液 / 粉末比 0.7)

日本試験機製) により測定した。また、重量測定も合わせて行なった。なお、比較のため、セメントコンクリートの硬化体を養生条件 60℃、24hr にて作製し、同様な計測を行なった。

3. 結果および考察

3.1 フライアッシュ系ジオポリマー コンクリート

各配合におけるスランプを表 3 に示す。また、代表的な状態を図 2 に示す。単位水量が増えるに従いスランプが大きくなる傾向がみられるが、硬化液 / FA の比率が高くなってもスランプが大きくなる傾向は確認されなかった。また、硬化液として水ガラスの希釈液を使用しているため、粘り気のあるような変形を示す配合も見られた。

各配合における圧縮強度を表 4 に示す。代表的な供試体および圧縮試験後の様子を図 3 に示す。硬化

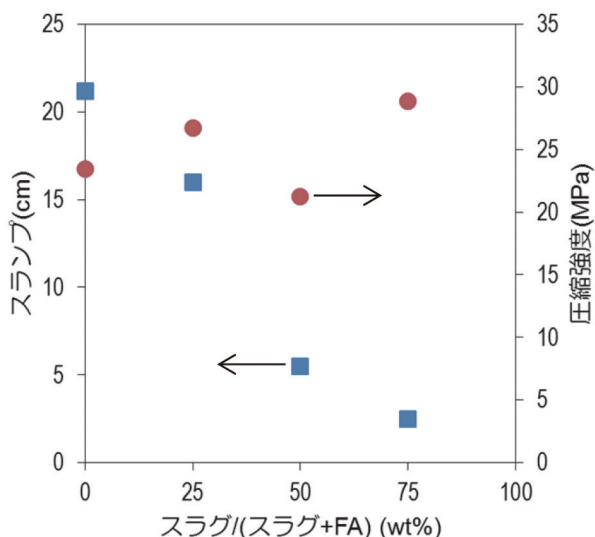


図4 フライアッシュ-スラグ系ジオポリマーのスランプ特性と圧縮強度

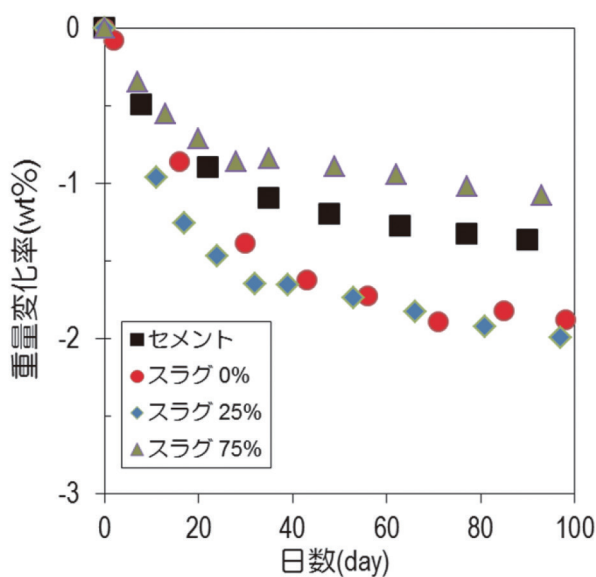


図6 各試料の重量変化率

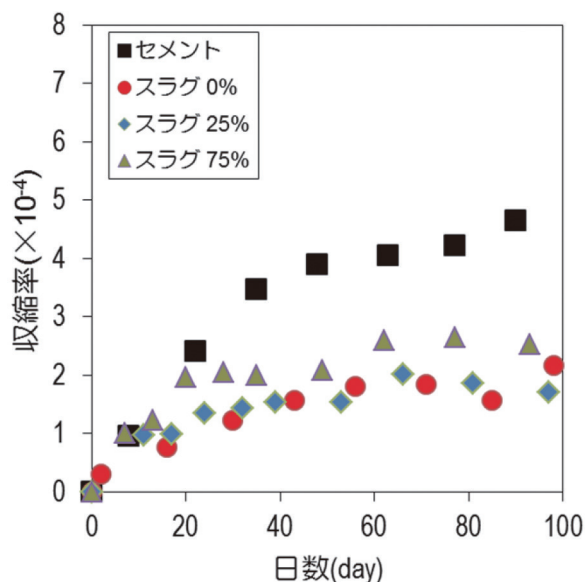


図5 各試料の乾燥収縮率

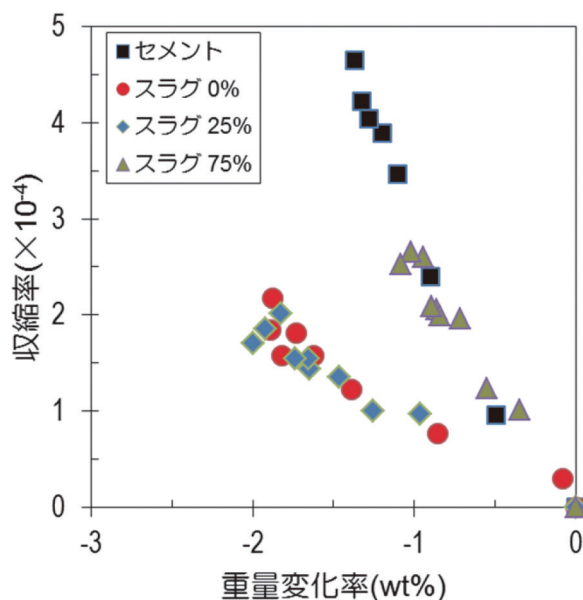


図7 重量変化率と乾燥収縮率の関係

液 /FA が 0.6~0.7 のサンプルにおいて約 18MPa となることが分かった。混練が難しく、スランプの小さな配合においては、型枠への充填も行ないにくく、圧縮強度も低くなる傾向があった。

スランプと圧縮強度および作業性の観点から、単位水量として 190kg/m³ で硬化液 /FA が 0.7 をフライアッシュ系の最適な配合として判断した。

3.2 フライアッシュ-スラグ混合系ジオポリマーコンクリートの作製

3.1 で設定した配合で、活性フィラー成分である

フライアッシュを最大 75 wt% までスラグで置換し、配合した際のスランプとその硬化体の圧縮強度を図 4 に示す。スランプは、スラグの配合量が増えるに従って小さくなり、流動性が低下することがわかった。また、50wt% で強度が低下する要因については不明であるが、スラグの配合量が増えるに従い、強度は高くなる傾向が確認された。

3.3 乾燥収縮挙動

乾燥収縮挙動を図 5 に示す。ジオポリマーコンクリートは、どの配合においてもセメントコンク

リートよりも収縮が小さい傾向が確認された。重量変化は、スラグの配合量の少ない試料(0wt%、25wt%)において大きいことが分かった(図6)。ジオポリマーによる固化はシリケートイオンの脱水縮合反応によると考えられており、重量減少は脱水した水分が蒸散したためであると推察された。一方、スラグ配合量の多いジオポリマー(75wt%)では、重量減少が少ないことが分かる。そこで、重量減少に対する収縮率を図7に示す。スラグを75wt%配合したジオポリマーはセメントと同じ傾向を示した。フライアッシュ中のCaの含有量はCaO換算で5.7%でありほとんど含まれないが、スラグは28.6%でありCaOを多く含んでおり、セメントと類似の反応も起きている可能性が考えられた。

4. まとめ

長崎県内で発生するフライアッシュと都市ごみスラグを用い、ジオポリマーコンクリートを作製し、強度、スランプ特性、乾燥収縮を測定し、以下のことが明らかとなった。

- (1) フライアッシュ系ジオポリマーでは、単位水量 190kg/m^3 で、硬化液/フライアッシュ比が0.7で圧縮強度が最大となり、また、流動性も良好であった。
- (2) フライアッシュ-スラグ系ジオポリマーでは、スラグの配合量が増えるに従い、強度が高くなる傾向が確認されたが、流動性は著しく低下する傾向が確認された。
- (3) スラグの配合量の少ないジオポリマーコンクリートは、セメントコンクリートよりも乾燥収縮しにくいことがわかった。

参考文献

- 1) 相原直樹、辻村太郎、上原元樹、土屋広志、「鉄道用材料のLCAによる環境評価」、鉄道総研報告、23(6)、5-10(2009).
- 2) 永石雅基、山口典男、木須一正、池田攻、中邑義則、「低温反応プロセスを用いた無機廃棄物からの機能性材料の開発」、長崎県窯業技術センター研究報告、58、1-6(2010).