

タグチメソッドを用いたフライアッシュベースジオポリマーの 配合および製造条件の最適化に関する基礎的検討

熊本大学 学生会員 ○山口 瑤一朗
熊本大学大学院 学生会員 岩本 崇臣
九州大学大学院 学生会員 上野 貴行

熊本大学大学院 正会員 尾上 幸造
九州大学大学院 正会員 佐川 康貴
九州大学 学生会員 浅田 純

1. はじめに

ジオポリマーは、セメントクリンカーを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ金属のケイ酸塩、炭酸塩、水酸化物水溶液を用いて固化させたものである。ジオポリマーは、材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量がセメントコンクリートに比べて 70%ほど少なく、低環境負荷のコンクリートとして注目されている。一般に活性フィラーとしてフライアッシュや高炉スラグ微粉末が、アルカリシリカ溶液として水酸化ナトリウム水溶液や水酸化カリウム水溶液と水ガラスを合わせたものが用いられることが多い。また、ジオポリマーは耐酸性や耐火性、アルカリ骨材反応に強い等の特性を有し、加熱養生を行うことで高い強度を示すことが知られている。しかし、設計パラメータが多く最適な配合・製造条件が確立されていない背景から、本研究ではタグチメソッド³⁾を用い、JIS II 種フライアッシュを用いたジオポリマーの最適化を試みた。

2. 実験概要

(1) 使用材料

単一の発電所から生じたロットの異なる 2 種類のフライアッシュ (JIS II 種、品質を表-1 に示す)、高炉スラグ微粉末 4000 (密度 2.91 g/cm³, 比表面積: 4160 cm²/g)、水ガラス (JIS K 1408³⁾ の 3 号品、密度: 1.41 g/cm³、水酸化ナトリウム水溶液 (密度: 1.21 g/cm³)、高炉スラグ微粉末 (比表面積: 4160 cm²/g, 密度: 2.91 g/cm³)、標準砂 (密度: 2.64 g/cm³) を用いた。

(2) タグチメソッド⁴⁾

タグチメソッドとは、品質のばらつきや劣化といった問題が発生しないようにするための予防保全技術⁴⁾である。今回は、出力が入力につれて変動する場合に用いられる動的手法⁴⁾を用いた。入力値を変化させながら、出力変動を評価することで、システム内の設計パラメータを最適化する。

(3) システムについて

本研究では、入力を活性フィラー (F) とアルカリ溶液 (L) の容積比 (以下、 F/L と示す)、出力を 15 打フロー値、曲げ・圧縮強度とした。入力値ならびに設計パラメータを表-2 に示す。今回 3 水準にした理由は、ノイズの影響が入出力の線形関係の乱れとして現れることも含め評価するためである。実験の組み合わせを L_9 直交表 (表-3) に割り付けた。また、配合条件のうちフライアッシュに対する高炉スラグ微粉末の質量置換率は 15%、使用する水酸化ナトリウム水溶液濃度は 6M が最適である⁵⁾ことを確認しているため、この 2 条件を固定した。ノイズとして、実験機関およびフライアッシュのロットを 2 種類ずつ、計 4 種類の組み合わせを取り上げた (表-4)。

(4) 実験および解析方法

実験は、練混ぜ、15 打フロー試験、打設、加熱養生、脱型、強度試験の順番で行った。各実験にて用いる標準砂は、全ての実験において 1 袋 (1350g) を使用し、設計パラメータに応じた配合計算をおこなった。

入出力間の線形関係には、ゼロ点比例式、1 次式、基準点比例式が存在する。実験結果より、15 打フロー値、曲げ・圧縮強度全てにおいて 1 次式の関係性が見られたことに基づき、SN 比 (単位: db) を算定した。SN 比とは入出力関係のノイズに対する強さを示し、値が高いほど線形関係からのばらつきが小さいこと⁴⁾を意味する。最適化では、圧縮強度の SN 比を最優先し、材料ならびにジオポリマー製造におけるコスト等も考慮して、適切な水準を選定した。

表-1 使用したフライアッシュの品質

品質	ロット1	ロット2
二酸化けい素含有量 (%)	57.0	58.3
強熱減量 (%)	2.8	2.6
密度 (g/cm ³)	2.27	2.24
比表面積 (cm ² /g)	4020	3980
フロー値比 (%)	108	98
活性度指数 (%)	材齢28日	83
	材齢91日	81
		97
		101

表-2 入力値および設計パラメータ

パラメータ	水準1	水準2	水準3
入力値 (F/L)	0.6	0.75	0.9
A) 水ガラス: NaOH	1	2	3
B) 練混ぜ時間 (分)	4	6	8
C) 保持温度 (°C)	60	75	90
D) 積算温度 (°C・h)	640	1000	1360

表-3 L_9 直交表

No.	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

表-4 ノイズ条件の組合せ

ノイズ	実験機関	フライアッシュのロット
N ₁	熊本大学	1
N ₂	九州大学	1
N ₃	熊本大学	2
N ₄	九州大学	2

3. 実験結果

実験結果より算定した SN 比について、15 打フロー値、曲げ強度および圧縮強度の要因効果図を作成した (図-1～3)。以下、各設計パラメータの最適化を示す。

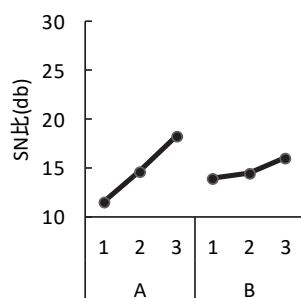


図-1 15 打フロー値に関する SN 比

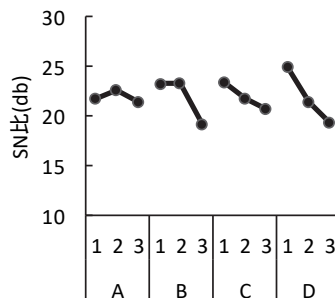


図-2 曲げ強度に関する SN 比

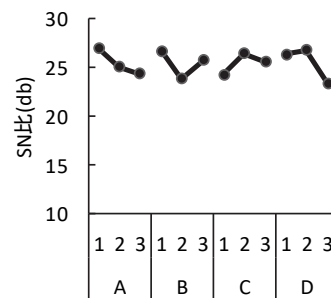


図-3 圧縮強度に関する SN 比

- A) 水ガラスと NaOH 水溶液の質量比は、15 打フロー値の水準による差が大きいことや、NaOH 水溶液のコストが高いこと、曲げ強度の SN 比が最高値を示したことから水準 2 を最適とした。
- B) 練混ぜ時間は、曲げ・圧縮強度では水準 1 が最も高い。一方、フロー値は水準による変化が小さいことから、水準 1 を最適とした。
- C) 加熱養生時の保持温度は、圧縮強度の SN 比が最高値を示した水準 2 を最適とした。
- D) 加熱養生時の積算温度は、曲げ強度では水準 1 が最高であるが、本研究では圧縮強度を優先し、水準 2 を最適とした。

以上より得られた最適条件 (表-5) で打設・強度試験を行った結果を図-4 に示す。図-4 より、 F/L から曲げ・圧縮強度、 L/F からはフロー値を予測する式が得られた。15 打フロー値の入出力関係において、ロット 1 とロット 2 で差が現れた原因は、強度の SN 比を優先したためと考えている。

表-5 設計パラメータの最適条件

最適パラメータ	
A) 水ガラス:NaOH	2
B) 練混ぜ時間(分)	4
C) 保持温度(°C)	75
D) 積算温度(°C・h)	1000

今後は、最適配合における長期的な強度や耐久性に関するデータ蓄積に取り組む予定である。

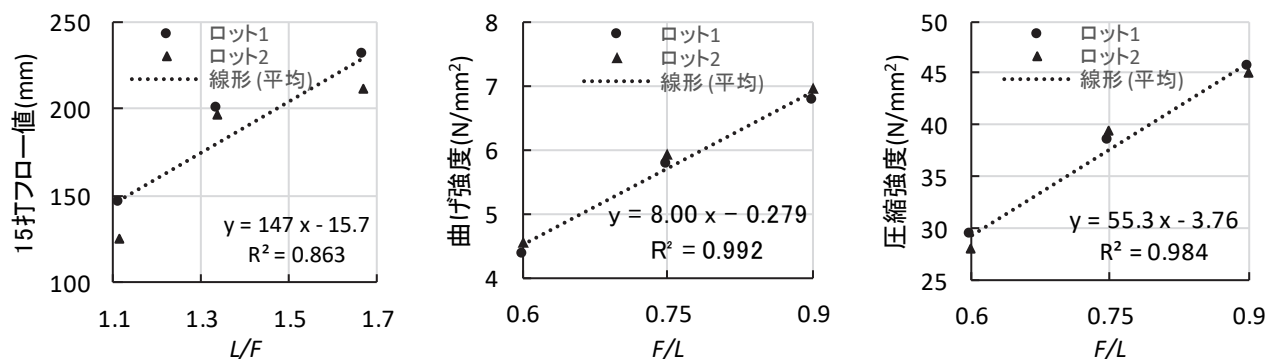


図-4 最適条件における 15 打フロー値、曲げ強度および圧縮強度の入出力関係

謝辞：本研究は JSPS 科研費 基盤研究 (C) JP16K06442 助成を受け実施した。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
- 2) 一宮一夫，原田耕司，津郷俊二，池田攻：活性フィラーにフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーの耐酸性と高温特性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35，No. 1，pp. 2005-2010，2013
- 3) JIS K 1408 「けい酸ナトリウム (けい酸ソーダ)」，1966
- 4) 立林和夫：入門タグチメソッド，日科技連，2004
- 5) 岩本崇臣ほか：タグチメソッドによるフライアッシュベースジオポリマーの配合最適化，土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集，V-087，pp. 173-174，2017