

## タグチメソッドによるフライアッシュを用いたジオポリマーの 製造条件の最適化と再現性の検討

熊本大学大学院 学生会員 ○高山 優司 正会員 尾上 幸造 学生会員 薬師寺 弘幸  
九州大学大学院 正会員 佐川 康貴 学生会員 香島 和輝 学生会員 榮徳 雄斗

### 1. 目的

次世代の環境負荷低減型コンクリートとしてジオポリマーが注目されている。ジオポリマーとは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、水酸化物水溶液の少なくとも1種類を用いて硬化させたものである。ジオポリマーはセメントを使用しないため、セメント製造時に発生するCO<sub>2</sub>の排出量を約80%削減できるほか、短期間での高強度発現、耐酸・耐熱・耐アルカリ性を持つなどの様々な特長を持つ。しかし、ジオポリマーの実用化に対して設計パラメータが多岐にわたることや品質のばらつき等が課題となっている。既往の研究<sup>1)</sup>において、タグチメソッドの動特性パラメータ設計<sup>2)</sup>を用いた九州産フライアッシュ（FA）をベースとするジオポリマーモルタル（GPモルタル）の配合および製造条件の最適化とその有用性が報告されている。本研究では、タグチメソッドの動特性パラメータ設計を適用し、四国産のFAをベースとしたGPモルタルの配合および製造条件の最適化と再現性について検討した。

### 2. 実験概要

#### (1) 使用材料

GPモルタルの材料には活性フィラーとして四国の発電所で生産されたロットの異なるFA（FA-a，FA-b，密度はいずれも2.26 g/cm<sup>3</sup>）と高炉スラグ微粉末4000（GGBS，密度2.91 g/cm<sup>3</sup>），アルカリ溶液として3号水ガラス（密度：1.41 g/cm<sup>3</sup>）と水酸化ナトリウム水溶液（NaOHaq，密度：6Mで1.21 g/cm<sup>3</sup>，9Mで1.30 g/cm<sup>3</sup>，12Mで1.39 g/cm<sup>3</sup>），細骨材として標準砂（密度：2.64 g/cm<sup>3</sup>）を用いた。

#### (2) 入力，出力，設計パラメータおよびノイズ条件の設定

本研究では入力を活性フィラーとアルカリ溶液の容積比（F/L）とし，出力を15打フロー値および曲げ・圧縮強度とした。入力値と設計パラメータを表-1に，ノイズ条件を表-2に示す。表-1中の練混ぜタイプは図-1に示すように練混ぜの最後の4分間でGGBS投入のタイミングを変えており，タイプ1ではアルカリ溶液とFAと同時に，タイプ2では標準砂と同時に投入した。L<sub>18</sub>直交表を用いて実験条件の組合せを作成し，入力値とノイズの条件を含め，合計216回（=18×3×4）の実験を行った。

#### (3) 配合・製造条件の最適化

最適化にはタグチメソッドの動特性パラメータ設計を適用した。タグチメソッドとはデータのばらつきやシステムの劣化による問題を事前に排除するための予防保全技術である。各入力値と出力値の間の理想関係をゼロ点比例式または基準点比例式としてSN比（機能の精度とばらつきの比）を求めた。このSN比大きいほどシステムの再現性が高いといえる。最適化は各設定パラメータについてSN比が最大となる水準を組み合わせることで行った。

表-1 入力値と設計パラメータ

入力値(F/L)	0.6	0.75	0.9
設計パラメータ			
A:練混ぜタイプ	1	2	
B:水ガラス/NaOHaq	1	2	3
C:NaOHaq濃度(M)	6	9	12
D:練混ぜ時間(分)	4	8	12
E:養生保持温度(°C)	60	75	90
F:養生積算温度(°C・h)	640	1000	1360

表-2 ノイズ条件

ノイズ	実験機関	FA ロット
N <sub>1</sub>	熊本大学	a
N <sub>2</sub>	熊本大学	b
N <sub>3</sub>	九州大学	a
N <sub>4</sub>	九州大学	b

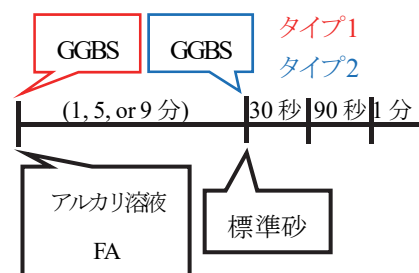


図-1 練混ぜ方法

キーワード ジオポリマー，フライアッシュ，タグチメソッド，SN比，設計パラメータ，再現性

連絡先 〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1 TEL 096-342-3542

### 3. 実験結果および考察

実験結果から SN 比を算出し、15 打フロー値、曲げ・圧縮強度それぞれの要因効果図（図-2）を作成し設計パラメータの最適化を行った。最適条件は設計の主な基準となる圧縮強度を優先して決定した（表-3）。最適条件下での入出力関係を図-3 に示す。15 打フロー値においては、4 種類すべての試験結果がほとんど一直線上に乗り、良好な再現性が得られた。曲げ・圧縮強度に関しては理想機能の直線から出力値が多少ばらつく結果となった。この 2 つの出力の結果に再現性を確認した（表-4）。同表中の（推定値-確認結果）の値が±3 db に収まる場合に再現性がある<sup>2)</sup>といえる。曲げ強度は±3 に収まったため図-3 の近似直線は再現性のある関係であるといえる。圧縮強度は±3 に収まらなかった。図-3 の圧縮強度をみると実験機関により出力値に差があることからノイズの影響として FA のロットよりも実験機関の方が大きいといえる。

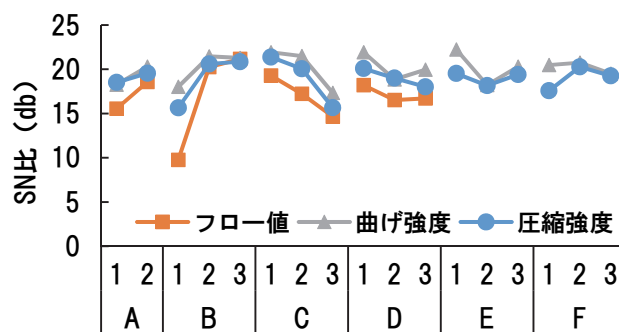


図-2 SN 比の要因効果図

表-3 最適パラメータ水準および最適条件

設計のパラメータ	最適水準設定値						最適条件
	フロー値		曲げ強度		圧縮強度		
A:練り混ぜタイプ	2	2	2	2	2	2	2
B:水ガラス/NaOHaq	3	3.0	2	2.0	3	3.0	3.0
C:NaOHaq 濃度 (M)	1	6	1	6	1	6	6
D:練り混ぜ時間 (分)	1	4	1	4	1	4	4
E:養生保持温度 (°C)	影響		1	60	1	60	60
F:養生積算温度 (°C・h)	しない		2	1000	2	1000	1000

### 4. まとめ

本研究では、タグチメソッドの動特性パラメータ設計を利用して GP モルタルの配合・製造の最適化を行った。その結果、15 打フロー値と曲げ強度については安定した入出力関係を導くことができ、要求性能に応じた FA ベースジオポリマーを作製できる可能性が示された。また、GP モルタルを作製する際にノイズを与える影響として、FA のロットの違いよりも実験機関の方が大きいことが分かった。

表-4 曲げ・圧縮強度における再現性の確認

SN 比 (db)	曲げ強度		圧縮強度	
	推定値	確認結果	推定値	確認結果
最適条件	25.60	24.24	25.95	17.97
参照条件	15.58	11.93	13.95	11.31
差 (利得)	10.02	12.30	12.00	6.66
(推定値-確認結果)	-2.29		5.34	

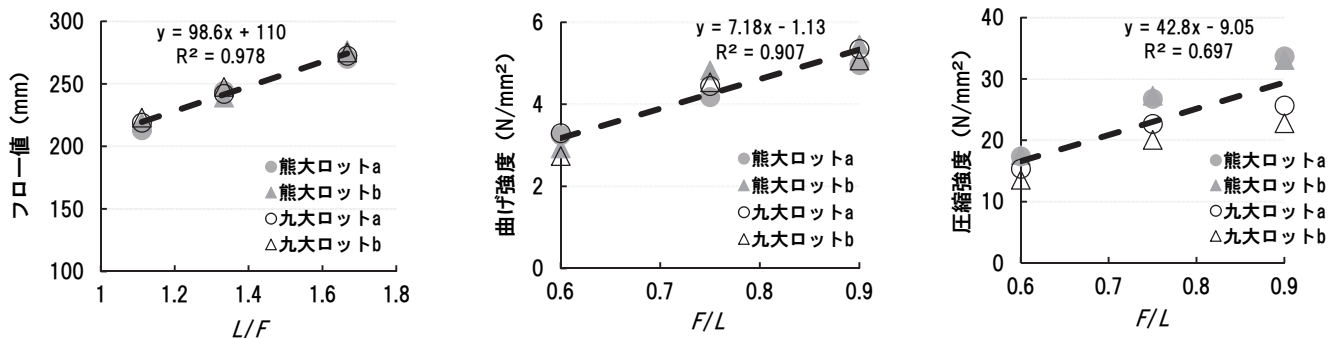


図-3 最適条件下での入出力関係

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP19K04558 の助成を受け実施したものであり、関係各位に誠意を表す。

### 参考文献

- 1) Onoue K, Iwamoto T, Sagawa Y: Optimization of the design parameters of fly ash-based geopolymer using the dynamic approach of the Taguchi method, *Construction and Building Materials*, Vol. 219, pp. 1-10, 2019
- 2) 立林和夫：入門タグチメソッド，日科技連，2004