

動特性のパラメータ設計によるジオポリマーの配合・製造条件の最適化

熊本大学 正会員 ○尾上 幸造 学生会員 高山 優司
九州大学 正会員 佐川 康貴 学生会員 香島 和輝

1. 目的

ジオポリマー (GP) は短時間での強度発現, 耐酸性, 耐熱性などの優れた性質を有し, 次世代建材として期待されている. 一方, 設計パラメータが多岐にわたり配合設計方法が未確立であることや品質のばらつき等の問題が実用化への障壁となっている. 本研究の目的は, タグチメソッドにおける動特性のパラメータ設計を適用し, フライアッシュ (FA) の産地 (発電所), ロット, 実験機関をノイズとして組み込んだ実験と SN 比 (シグナルノイズ比) を指標とした最適化により, 強度等の絶対値が大きいということではなく, ばらつきが小さく再現性の高いフライアッシュベースジオポリマー (FAGP) モルタルの製造条件を明らかにすることである.

2. 概要

著者らは, 四国の A 発電所からの JIS II 種 FA (FA-A) と高炉スラグ微粉末を活性フィラーに用いた FAGP モルタルの最適化に関する結果を昨年度報告¹⁾した. 本研究では, 活性フィラーとして四国の B 発電所からの JIS II 種 FA (FA-B) と高炉スラグ微粉末を用いた. 活性フィラーの密度および比表面積を表-1 に示す. アルカリ溶液には 3 号水ガラス (密度: 1.41 g/cm^3) と水酸化ナトリウム水溶液 (NaOHaq, 密度は 6M で 1.21 g/cm^3 , 9M で 1.30 g/cm^3 , 12M で 1.39 g/cm^3) の混合液を用い, 細骨材には標準砂 (密度: 2.64 g/cm^3) を用いた.

図-1 にタグチメソッド²⁾における静特性と動特性のパラメータ設計によるシステムを示す. 前者では最適化された設計パラメータの組合せに対し 1 つの出力値が得られるのに対し, 後者では最適化された設計パラメータで構成されるシステム (最適条件下で得られた線形回帰式) に入力値を与えると, それに応じた出力値が得られる. GP の最適化に関して静特性に着目した研究は海外でも行われている³⁾が, 動特性を適用した事例は著者らの研究^{1), 4)}を除き見当たらない. 実務においては要求性能に応じた設計が求められることから, 本研究では動特性のパラメータ設計を適用した. 入力値として, 活性フィラーとアルカリ溶液の容積比である F/L を用い, その水準を 0.6, 0.75, 0.9 に設定した. 本研究で採用した設計パラメータと水準を表-2 に示す. 実験条件の組合せには $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ 直交表を用いた.

高炉スラグ微粉末の活性フィラー全体に対する質量置換率は 0.15 に固定した. これは, 施工性の観点から高炉スラグ微粉末の質量置換率の上限が 0.2 程度と考えられること, また, 既往の研究⁴⁾により高炉スラグ微粉末の置換率は感度には大きく影響するものの SN 比にはそれほど影響しないことがわかっているためである. ノイズとして, FA のロット (a, b) と実験機関 (熊本大学, 九州大学) を取り上げ, 計 4 種類のノイズ

表-1 活性フィラーの密度および比表面積

	ロット	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)
FA-A	a	2.26	4040
	b	2.26	4010
FA-B	a	2.30	4210
	b	2.25	4200
高炉スラグ微粉末		2.91	4160

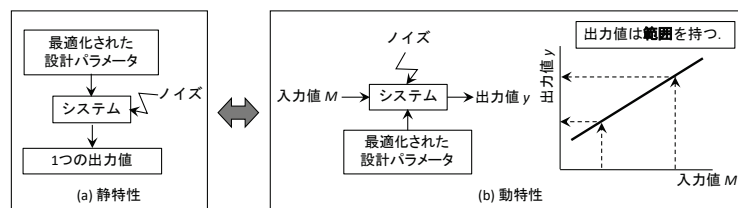


図-1 静特性および動特性のパラメータ設計によるシステム

表-2 設計パラメータと水準

設計パラメータ	水準1	水準2	水準3
A: 練混ぜ方法*	タイプ1	タイプ2	-
B: SS/SH*	1.0	2.0	3.0
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 ($^{\circ}\text{C}$)	60	75	90
F: 養生積算温度 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$)	640	1000	1360

*タイプ1では高炉スラグ微粉末をフライアッシュと同時に投入し, タイプ2ではフライアッシュとアルカリ溶液を練り混ぜた後に高炉スラグ微粉末を添加した.

**水ガラス(SS)とNaOHaq(SH)の質量比

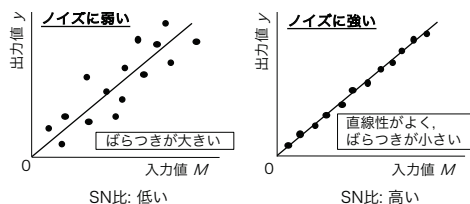


図-2 SN比の概念図

キーワード ジオポリマー, 最適化, タグチメソッド, フライアッシュ, 動特性, SN 比

連絡先 〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1 TEL 096-342-3542 E-mail: onoue@kumamoto-u.ac.jp

条件を設定した。実験回数は総計 216 回 (=18×3×4) であった。内訳の 18 は L_{18} 直交表の行数、3 は入力値、4 はノイズ条件である。モルタルの打設後、設計パラメータに応じた所定の加熱養生を施し、取出しから 24 ±6 時間後に曲げ強度と圧縮強度を測定した。

実験結果より SN 比を算定し、各設計パラメータの SN 比が最大となる水準の組合せを最適条件とした。SN 比の概念図を図-2 に示す。入力値と出力値の線形関係を表す理想機能²⁾に関し、本研究では 15 打フロー値についてはゼロ点比例式、曲げ強度と圧縮強度については基準点比例式を用いて SN 比を算定した。15 打フロー値については入力値の逆数 (L/F) と 15 打フロー値から初期値の 100 を差し引いた値がゼロ点比例式に従うと仮定し、曲げ強度と圧縮強度については基準点を (0.2, 0) と仮定し結果を整理した。

3. 実験結果

図-3 に FA-B を用いた本研究による SN 比の要因効果図を示す。圧縮強度の SN 比を優先し、 $A_2B_3C_1D_1E_1F_2$ を最適条件として決定した (表-3)。この組合せは、FA-A を用いた既往の研究¹⁾と一致する。試みに FA-A と FA-B のデータを併せて解析したところ、図-4 のようになり大勢に変化のないことが確認された。最適条件下で追加実験を行い、図-5 に示す入出力関係を得た。15 打フロー値と曲げ強度に関してはデータのばらつきがやや大きい、圧縮強度に関してはデータのばらつきが小さいことが読み取れる。再現性の検討結果を表-4 に示す。差 (利得) について (推定値 - 確認結果) の値が ±3 db の間であれば再現性が高いと判断される²⁾。本研究の結果について、圧縮強度に関しては再現性が確保されているが、15 打フロー値と曲げ強度に関しては再現性が低いといえる。よって、圧縮強度に関しては図-5 の線形回帰式を用いることで要求性能に応じた FAGP の設計が可能である。

4. まとめ

タグチメソッドにおける動特性のパラメータ設計を適用し、四国産 JIS II 種 FA (FA-B) を用いた FAGP モルタルの配合と製造方法の最適化を検討した。その結果、異なる発電所からの JIS II 種 FA (FA-A) を用いた既往の研究¹⁾と最適条件の組合せが一致した。また、圧縮強度に関して高い再現性が確認された。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 (JP19K04558) の助成を受け実施した。また、実験に際して薬師寺弘幸氏、中園美紀氏、榮徳雄斗氏、楠野寿都氏の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献

- 高山優司, 尾上幸造, 薬師寺弘幸, 佐川康貴, 香島和輝, 榮徳雄斗: 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方法の最適化と再現性の検討, 令和2年度土木学会全国大会第75回学術講演会, V-28, 2020
- 立林和夫: 入門タグチメソッド, 日科技連, 2004
- 例えば, Olivia M & Nikraz H: Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method, *Materials & Design*, 36, pp. 191–198, 2012
- 例えば, 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*, 219, pp. 1–10, 2019

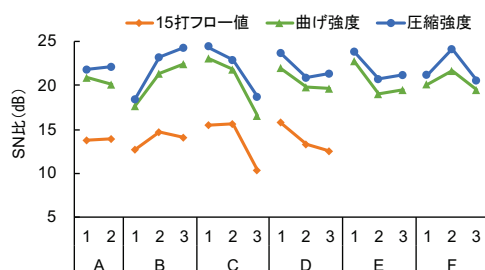


図-3 SN 比の要因効果図
(FA-B のデータを用いて解析)

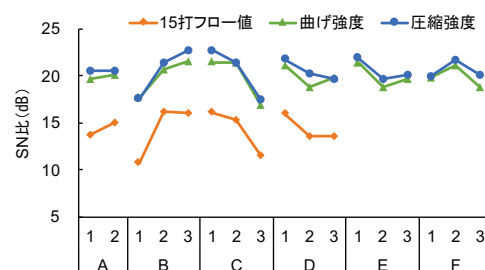


図-4 SN 比の要因効果図
(FA-A と FA-B のデータを併せて解析)

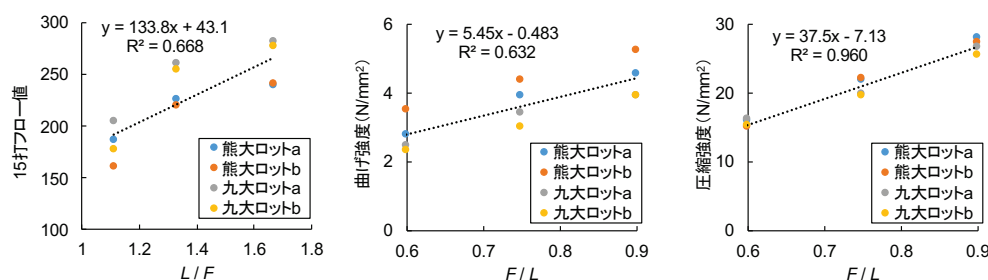


図-5 最適条件下での入出力関係

表-3 最適条件の組合せ

設計パラメータ	最適水準	
A: 練混ぜ方法	2	タイプ2
B: SS/SH	3	3.0
C: NaOH濃度 (M)	1	6
D: 練混ぜ時間 (分)	1	4
E: 養生保持温度 (°C)	1	60
F: 養生積算温度 (°C・h)	2	1000

表-4 再現性の検討結果

SN比(db)	15打フロー値		曲げ強度		圧縮強度	
条件	推定値	確認結果	推定値	確認結果	推定値	確認結果
最適条件	17.6	9.3	26.5	21.5	28.3	31.8
参照条件	15.2	14.1	22.0	22.9	23.5	25.2
差(利得)	2.5	-4.8	4.5	-1.4	4.7	6.7
推定値-確認結果	7.3		5.9		-1.9	