

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

熊本大学大学院 学生会員 ○岩本 崇臣
九州大学大学院 正会員 佐川 康貴
熊本大学大学院 学生会員 堤 亮祐

熊本大学大学院 正会員 尾上 幸造
九州大学大学院 学生会員 太田 周

1. はじめに

ジオポリマーは Davidovits¹⁾ によって提唱された無機ポリマーであり、建設材料の分野においては水ガラスや NaOH をベースとするアルカリ溶液と活性フィラーと呼ばれる粉体（例えばフライアッシュ）から溶出した Si⁴⁺ や Al³⁺ などの金属イオンとのポリマー反応によって生じる固化体に関し研究²⁾ がおこなわれてきた。ジオポリマーの製造においては、アルカリ溶液や活性フィラーの種類、練混方法、養生方法など様々なパラメータが存在し、その設計を困難なものとしている。本研究では、タグチメソッドにおける動特性のパラメータ設計³⁾ に着目し、フライアッシュベースジオポリマーの配合最適化を試みた。

ここで、動特性とは入力に応じて出力がある幅を持って変動することを意味する。タグチメソッドにおける静特性のパラメータ設計（出力：一定値）によってジオポリマーの最適配合を示した研究⁴⁾ は数編報告されているが、実用に際しては任意の要求性能に対し入力を変化させることで対応できる動特性の方が有利であると考えられ、Onoue & Bier⁵⁾ が天然ポゾランの Trass と高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーの最適化における同手法の適用可能性について検討している。

表-1 使用したフライアッシュの品質

品 質	フライアッシュの種類	
	a	b
二酸化けい素含有量 (%)	58.6	66.7
強熱減量 (%)	2.2	1.7
密度 (g/cm ³)	2.33	2.28
比表面積 (cm ² /g)	3990	4050
フロー値比 (%)	108	108
活性度指数 (%)	材齢28日	89
	材齢91日	105

表-2 設計パラメータと入力値の水準

	入力値 (F/L)	0.9, 1.0, 1.1		
		1	2	3
	水準	4	5	6
タグチメソッド	(A)水ガラスとNaOHaqの質量比	0.5	1.0	1.5
	(B)NaOHaqの濃度(M)	2.0	2.5	3.0
	(C)BFS置換率	3	6	9
	(D)練混ぜ時間(分)	0.05	0.15	0.25
	(E)保持温度(°C)	4	6	8
	(F)積算温度(°C h)	60	75	90
	(F)積算温度(°C h)	640	1000	1360

表-3 L₁₈ 直交表

No.	A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	2	1	1	2	2	3
5	2	2	2	3	3	1
6	2	3	3	1	1	2
7	3	1	2	1	3	2
8	3	2	3	2	1	3
9	3	3	1	3	2	1
10	4	1	3	3	2	2
11	4	2	1	1	3	3
12	4	3	2	2	1	1
13	5	1	2	3	1	3
14	5	2	3	1	2	1
15	5	3	1	2	3	2
16	6	1	3	2	3	1
17	6	2	1	3	1	2
18	6	3	2	1	2	3

表-4 ノイズ条件の組合せ

ノイズ	実験機関	フライアッシュの種類
N ₁	熊本大学	a
N ₂	九州大学	b

2. 実験概要

(1) 使用材料

同一火力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, 物性を表-1に示す), 高炉スラグ微粉末 (比表面積: 4160 cm²/g, 密度: 2.91 g/cm³), 水ガラス (JIS K 1408における3号, 密度: 1.41 g/cm³), NaOH, 標準砂 (密度: 2.64 g/cm³) を用いた。NaOHaqの作製に際して、濃度に対する所定量のNaOHを純水に溶解させた後、24時間程度放置し、室温まで冷却された時点で定容しNaOHaqとして用いた。水ガラスとNaOHaqは練混ぜ時に混合した。

(2) 設計パラメータ, 入力値およびノイズ条件

設計パラメータとして、本研究では (A) 水ガラスと NaOHaq の質量比, (B) NaOHaq の濃度, (C) 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, (D) 練混時間, (E) 加熱養生の保持温度, (F) 加熱養生の積算温度を採り上げた。それらの水準を表-2に示す。経験上、影響が大きいと予想されたパラメータ A のみ6水準とした。実験の組合せは表-3に示す L₁₈ 直交表に各設計パラメータを割り付けることで決定した。ここで、同表中の1~3は設計パラメータの水準を表している。入力値として、既往の研究⁵⁾ を参考に、活性フィラー (F) とアルカリ溶液 (L) の容積比 (F/L) をとり、フロー値に関する予備実験の結果からその水準を 0.9, 1.0, 1.1 とした。実験のノイズとして、実験機関 (熊本大学, 九州大学) およびフライアッシュの種類 (a, b) を採り上げ、その組合せを表-4の通りとした。以上より、最適化のための総実験回数は 18×3 (入力値の水準数) ×2 (ノイズ条件数) =108 回であった。

(3) 実験方法

モルタルの練混ぜには容量 2L のホバートミキサを使用した。モルタルの配合は、細骨材の量を 1350 g で一定とし、他の構成材料の量は設計パラメータに基づいて計算し、1 バッチあたり 0.88 L となるように決定した。所定量

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, 動特性, SN 比, 感度

連絡先：〒 860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1 Tel 096-342-3542 Fax 096-342-3507

の水ガラス, NaOHaq, フライアッシュ, 高炉スラグを投入し, 30 秒間低速で練り混ぜた後, 標準砂を 1350 g (1 袋) 投入し, 30 秒間低速, 30 秒間高速, 90 秒間休止後, さらにパラメータ D の練混ぜ時間 (4 分, 6 分, 8 分) に応じて高速で 60 秒, 180 秒または 300 秒練り混ぜた. 15 打フロー値を測定した後, 40 mm×40 mm×160 mm 供試体用の鋼製 3 連型枠を振動台に固定し, JIS R 5201⁶⁾ に準じてフレッシュなジオポリマーモルタルを型枠に流し込んだ. その後, 打設面をこてでならし, 型枠全体をラップフィルムで 3 重に覆い, 型枠投入後約 3 時間で恒温装置に入れ, 設計パラメータ E, F に応じた所定の温度・時間で加熱養生を施した. 加熱養生時の昇温速度は 20 °C/h とし, 降温時はヒーターを停止した状態での自然冷却とし積算温度に達した時点で恒温装置から取り出した. 脱型後, 供試体を 20 °C, 60% R.H. の室内で 24 時間静置し, JIS R 5201 に準じて曲げ強度と圧縮強度を測定した.

(4) 実験結果の解析と最適化方法

実験結果に基づき, SN 比 (入力の変化に対する出力のばらつきの少なさの指標) および感度 (入力の変化に対する出力勾配の大きさ) を算定した. システムの最適化は, 原則 SN 比に基づくこととし, 各設計パラメータの SN 比が高くなる水準を組み合わせることでおこなった.

3. 実験結果

図-1 に各出力値の SN 比と感度に及ぼす要因効果図を示す. 15 打フロー値の感度に及ぼすパラメータ A の影響に着目すると, 右肩下がりとなっている. これは, アルカリ溶液に占める水ガラスの割合が多くなることで粘性が高くなったためと考えられる. その他, 感度の結果より, NaOHaq の濃度が高いほど, BFS 置換率が高いほど曲げ強度と圧縮強度が高くなることが示されている. SN 比と感度の結果を総合的に検討し, 原則として SN 比の大きさを優先することで, 本研究では設計パラメータの最適水準を $A_4B_2C_2D_3E_2F_2$ とした (表-5).

最適条件の下で得られた入力と出力の関係を図-2 に示す. フロー値のみ, 入力値として L/F をとっている. また, 図中のプロットは熊本大学と九州大学で得られた結果を平均したものである. これらの図を用いることで, 要求性能に応じたジオポリマーの設計が可能となる.

4. まとめ

タグチメソッドにおける動特性のパラメータ

設計をフライアッシュベースジオポリマーの最適化に適用する検討を実施し, 最適条件を見出した. 今後, 異なる産地やロットのフライアッシュに関しても同様の実験を実施するとともに, 長期強度や耐久性について検討する予定である.

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 基盤 (C) 16K06442 の助成を受けて実施された.

参考文献

- Davidovits J: US Patent No. 4349386 "Mineral polymers and methods of making them", 1982.
- 例えば, 一宮一夫ら: ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 575-580, 2011
- 立林和夫: 入門タグチメソッド, 日科技連, 第 19 刷, pp. 39-75, 2014
- 例えば, Olivia M, Nikraz H: Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. Materials & Design, 36, pp. 191-198, 2012
- Onoue K, Bier TA: Optimization of alkali-activated mortar utilizing ground granulated blast-furnace slag and natural pozzolan from Germany with the dynamic approach of the Taguchi method. Construction & Building Materials, 144, pp. 357-372, 2017
- JIS R 5201 『セメントの物理試験方法』, 2015

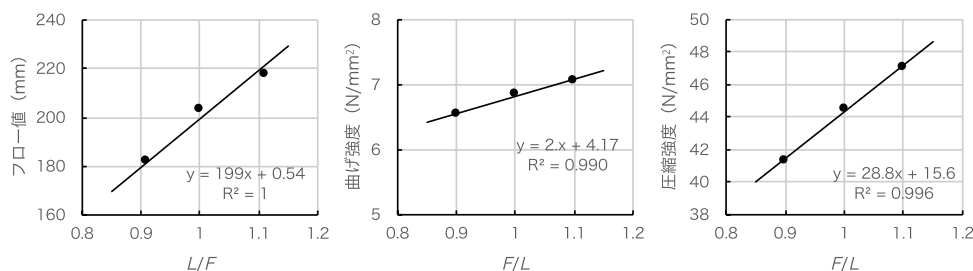


図-2 最適条件下における入力と出力の関係

アスタリスクは分散分析結果: *5%有意, **1%有意

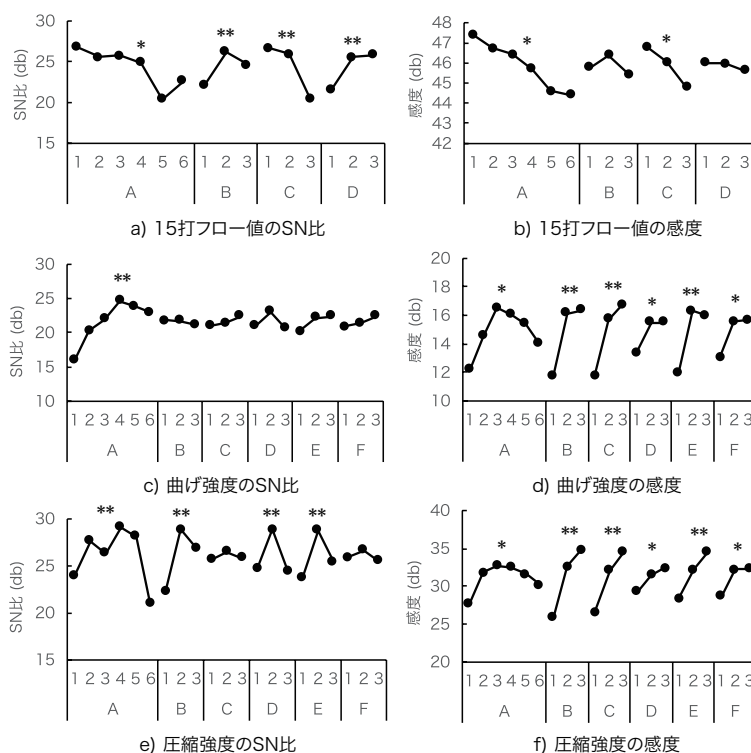


図-1 要因効果図

表-5 設計パラメータの最適水準

(A)水ガラスとNaOHaqの質量比	2.0
(B)NaOHaqの濃度(M)	6
(C)BFS置換率	0.15
(D)練混ぜ時間(分)	6
(E)保持温度(°C)	75
(F)積算温度(°C・h)	1000