

H-6

高炉スラグ微粉末とフライアッシュを混和したジオポリマーに関する配合設計指標

Mix Proportion Design Guidelines for Geopolymers Incorporating Blended Ground Granulated Blast Furnace Slag and Fly Ash

○関根大晟¹, 佐藤正己², 小泉公志郎³, 梅村靖弘²

*Taisei Sekine¹, Masaki Sato², Koshirou Koizumi³, Yasuhiro Umemura²

The mix proportion design for geopolymers (GP) has not been established, unlike that for concrete. This study aimed to establish a mix design methodology for GP using room-temperature-curing fly ash (FA) and ground granulated blast furnace slag (BS). To achieve this, existing mix designs were investigated, and indicators for mix design were examined. The results confirmed that when air-curing with water glass and sodium hydroxide solution as alkali solutions, the ratio of total silica and sodium to total water content serves as a mix design indicator for compressive strength, while the ratio of total active filler (FA and BS) to total water content serves as an indicator for flow value.

1. はじめに

ジオポリマー(GP)は、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした微粉末を活性フィラー(P)として、アルカリ溶液と練混ぜを行い硬化させた縮重合体である。代表的なPとしてフライアッシュ(FA)や高炉スラグ微粉末(BS)が用いられるが、セメントコンクリートと異なり配合設計手法が確立されていない。FA単体では蒸気養生が必要だが、BSを混和することで常温養生での施工が可能になり、一般的な施工現場への適用にも常温養生で実用強度が得られることからFAの他にカルシウムを含有するBSを混和したGPが多く使用されている。[1]本研究では、常温硬化型のFA及びBSを使用したGPの配合設計手法の確立のために既往研究における配合を調査して配合設計のための指標を検討した。

2. 調査研究の概要

2.1 既往の研究における配合の調査

GPに関する文献調査を行った結果194件の文献を収集した。その文献を基に、配合設計において重要な圧縮強度や流動性と関係する影響要因を調査した。収集した194件の文献から次に示す条件に基づいて選定を行った。文献の選定条件としては、「モルタル配合」、「活性フィラーとしてFA(II種)及びBSを主体」、「圧縮強度試験もしくは流動性評価試験、またはその両方を実施」、「化学混和剤(流動化剤等)を不使用」、「体積比換算が可能な情報(材料密度)の記載有」の5項目とした。

2.2 配合設計の指標となる要因の抽出

Table1に配合調査の結果より得られた圧縮強度及び流動性に関する配合設計の指標となる要因を示す。活性フィラーとして、FAとBSの他にケイ素成分の増加添加を目的としたシリカフューム(SF)を混和している場合がある。アルカリ溶液(W)として、水ガラス(WG)1, 2号, 蒸留水(WT)に水酸化ナトリウム(NH)他にメタ珪酸ナトリウム(MS)やメタ珪酸ナトリウム9水塩(MS9W)を溶かした水溶液を使用している。

Table1. Formulation Design Indicators

Indicator	Definition
$(Si+A)/W$ (Silica + Alkali) / Water ratio	Mass ratio of the SiO ₂ (contained in WG, FA, BS) and Na (contained in WG, NH) to W (contained in WG and in the mixing water, WT)
W/P Water/Powder (active filler) ratio	Mass ratio of water (WG, WT) to powder P (FA, BS)
FA/BS Fly ash/ Ground granulated blast furnace slag ratio	Mass ratio of FA to BS

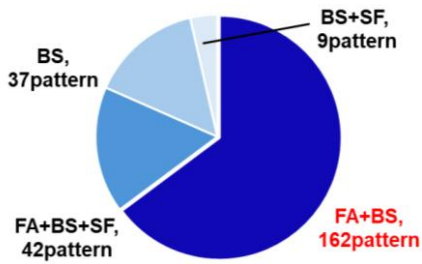
3. 調査結果

3.1 配合と養生条件

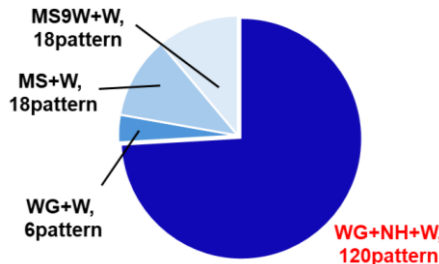
Figuer 1に活性フィラー(P)の組合せを示す。本研究の文献選定条件を満たす文献における配合は全体で250パターンとなった。この中で、PをFAとBS(以下、FA+BS)とした配合が162パターンで最も多く全体の約65%を占めた。Figuer 2にアルカリ溶液(W)の組合せを示す。PをFA+BSとした場合、WにWG, NH及びWTを用いた配合(以下、WG+

1: 日大理工・院(前)・土木, 2: 日大理工・教員・土木, 3: 日大理工・教員・一般

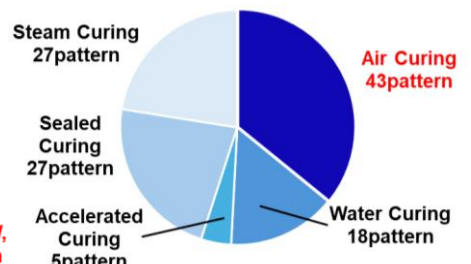
NH+W)が162パターン中120パターンで最も多く全体の約75%を占めた。Figuer 3にPとしてFA+BSを、WとしてWG+NH+WTの組合せを用いた配合の養生方法を示す。気中及び封かん養生が120パターン中70パターンで最も多く、全体の約60%を占めておりBSを混和した場合に加熱する養生方法の割合は少なかった。



Figuer 1. Combination of Active Fillers (P)



Figuer 2. Combinations of Alkaline Solutions (W)



Figuer 3. Combination of curing methods

3.2 配合指標の検討

Figuer 4に圧縮強度とFA,BSの質量比(FA/BS)の関係を示す。FA/BSは、①:1.2~1.5②:1.7~1.9③:2.7~3.2となり、BSの混和率はFAに対して概ね①:75%、②:55%、③:35%の3領域に分類された。

Figuer 5に圧縮強度と(Si+A)/Wの関係を示す。FA/BSを3領域に分類したデータはFiguer 4に示すようにFA/BSによる強度発現性の違いを考慮した以下の3つの回帰式が得られた。

- ① FA/BS=1.2~1.5: $f_c=113.2(Si+A)/W-126.3$
- ② FA/BS=1.7~1.9: $f_c=52.9(Si+A)/W-52.3$
- ③ FA/BS=2.7~3.2: $f_c=52.3(Si+A)/W-57.5$

Figuer 6にフロー値と(W/P)の関係を示す。GPの型枠への良好な充填性を考慮した場合、フロー値は200mm以上が必要であることから、流動化剤が無添加の場合におけるW/Pは30%以上が必要となり、次の回帰式が得られた。

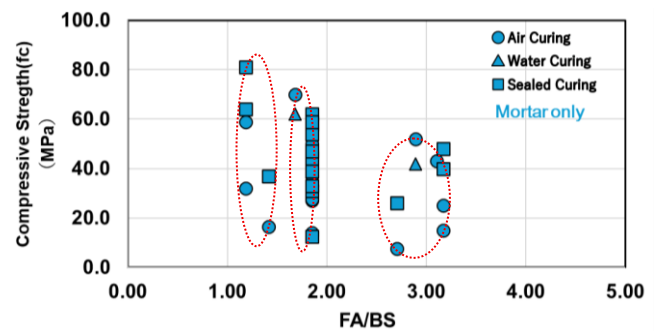
$$\text{Flow}=4.2 \times 10^2 (W/P)+1.1 \times 10^2$$

4. まとめ

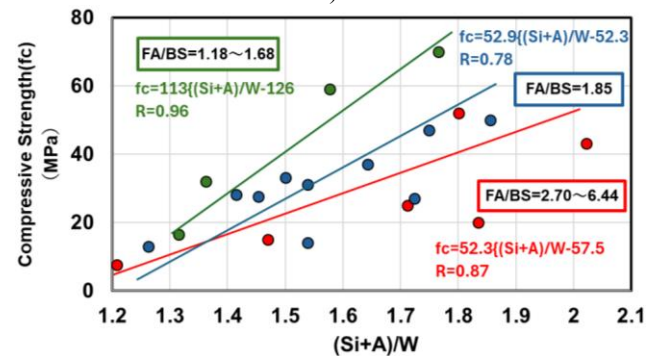
常温硬化型のFAとBSを使用したGPの配合設計の指標を検討した結果、アルカリ溶液として水ガラスと水酸化ナトリウム水溶液を使用して気中養生した場合、圧縮強度は、SiとNaの総量と総水量の比、フロー値は、活性フィラー(FAとBS)の総量と総水量の比が配合指標となることが確認できた。

5. 参考文献

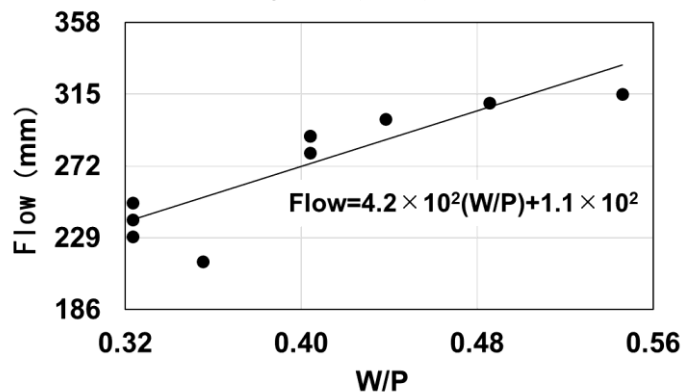
[1]岩倉麻悠美, 佐藤正己, 小泉公志郎, 梅村靖弘: フライアッシュとシリカフェームを使用したジオポリマーペーストの配合設計指標, 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会, V-446, 2024



Figuer4. Relationship between compressive strength and FA/BS ratio at 28 days of curing (FA+BS, WG+NH+WT)



Figuer5. Relationship between 28-day compressive strength and (Si+Al)/W



Figuer6. Relationship between Flow Value and (W/P)