

養生日数・混合率が異なる高炉スラグ微粉末混合砂の強度・変形特性

福岡大学大学院 学生会員 ○坂本 龍太郎
 福岡大学 正会員 村上 哲, 西 智美, 樋原 弘貴
 福岡大学 学生会員 熊谷 寛太
 ジャステクト株式会社 非会員 堂免 護

1. はじめに

平成 28 年熊本地震により熊本平野部では甚大な液状化被害が生じ、表層から 3~5m 以浅に液状化層を有する地盤において宅地液状化被害に影響を及ぼしたり。宅地液状化対策工法は種々存在するが、昨今の液状化被害を受けて宅地住民から低コストの液状化対策の要望は大きい。そこで、製鉄過程で副産される高炉水砕スラグを粒度調整した高炉スラグ微粉末(以下 BFSFP:Blast Furnace Slag Fine Powder と示す)を用いることで材料コストの低減が期待できると考えた。本研究では、宅地液状化対策工法の一つである固化処理土の表層地盤改良の固化材として BFSFP を用い、養生日数・混合率の異なる BFSFP 混合砂の強度・変形特性について調査した。

2. BFSFP 混合砂の供試体作製方法

本研究で用いた固化材は BFSFP4000 ブレーン、母材は豊浦砂であり、豊浦砂に質量比で BFSFP を 5%~15% 混合し、十分攪拌させたものを混合砂とする。本文中では混合砂から作製した供試体を BFSFP 供試体と称す。なお、豊浦砂は試料分取器によって分取したものを、BFSFP は石膏無添加のものをを用いた。供試体作製方法は、まず混合砂をモールドに 3 層詰めで各層所定の回数振動を加え、相対密度が 50% になるよう充填した。充填する混合砂の質量は表-1 の BFSFP 混合砂の物理特性より求めた。使用するモールドは直径 50mm、高さ 100mm のプラスチック製で、モールド下部には約 1mm の浸透穴を開けたアクリル製の有孔板と濾紙を取り付け、養生液が浸透できるようにした。次に供試体を養生容器に設置し、7~365 日間水溶液中で養生を行った。養生液は BFSFP の潜在水硬性を引き出すために pH12 以上に調整した水酸化カルシウム水溶液($\text{Ca}(\text{OH})_2$)を用い、温度約 20°C の環境下で養生を行った²⁾。

表-1 BFSFP 混合砂の物理特性

BFSFP混合率(%)	ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}
5	2.664	0.953	0.531
6	2.665	0.946	0.523
6.5	2.667	0.947	0.521
7	2.668	0.947	0.520
10	2.673	0.950	0.492
15	2.694	0.954	0.425

3. BFSFP 供試体の一軸圧縮強度・変形特性

図-1a)~f)に BFSFP5%~15%供試体の一軸圧縮試験結果から得られる応力ひずみ曲線を示す。ここで、一軸圧縮試験は各養生日数、混合率で 3 本ずつ行っており、図-5~8 ではそれらの供試体の中で代表的だと思われる結果を示している。図-1 a)~f)より BFSFP5%は養生日数 56 日目、BFSFP6%は養生日数 21 日目、BFSFP6.5%は養生日数 14 日目、BFSFP7%、10%、15%は養生日数 7 日目より供試体が自立できる強度が得られた。また、いずれの BFSFP 供試体も破壊ひずみは 0.5%~1.0%程度であり、ピーク後圧縮応力が大きく低下する脆性的な破壊が生じていることが分かる。しかし、養生日数の増加に伴いピーク後の圧縮応力の低下が小さくなる挙動を示すことが分かる。さらに、養生日数の増加に伴い、応力ひずみ曲線の立上りが急になることから、剛性の増加も確認できる。これは、経時変化に伴う BFSFP 粒子の水和物の形成、あるいは BFSFP 粒子の水和物同士とのオーバーラップによるものであると考える。

図-2,3 は図-1 で示した BFSFP5%~15%供試体の一軸圧縮試験結果より得られる一軸圧縮強度、変形係数をそれぞれ縦軸にとり、養生日数との関係を表す。なお、図-2,3 に示す一軸圧縮強度、変形係数は各養生日数、混合率の供試体において一軸圧縮試験を行った 3 本の平均値である。図-2,3 よりいずれの混合率においても養生日数の増加に伴い、一軸圧縮強度、変形係数は増加傾向にあることが分かる。しかし、混合率ごとの曲線を見ると混合率が低くなるほど、養生初期の曲線の立ち上がりが緩やかになる。つまり、混合率が低くなるほど強度発現が緩やかになることが分かる。これは、混合率の違いに伴う粒子間距離の違いにより粒子同士がオーバーラップする時期が異なるためであると考えられる。いずれの混合率においても強度・変形係数が急激に増加する期間が存在し、混合率が小さくなるほど強度が大きく増加する期間が遅延すること考えられる。

図-4 は BFSFP5%~15%供試体の変形係数と一軸圧縮強度の関係を表す。各混合率の BFSFP 供試体における変形係数と一軸圧縮強度の関係はおおよそ 3.70×10^{-3} の傾きを持った原点を通る直線で近似できると考えられる。このことから変形係数と一軸圧縮強度は養生日数、混合率によらず比例関係にあり、相関係数は 0.99 以上と両者に高い正の相関が見られた。この関係を用いることで、変形係数から一軸圧縮強度の推定が可能になると考えられる。

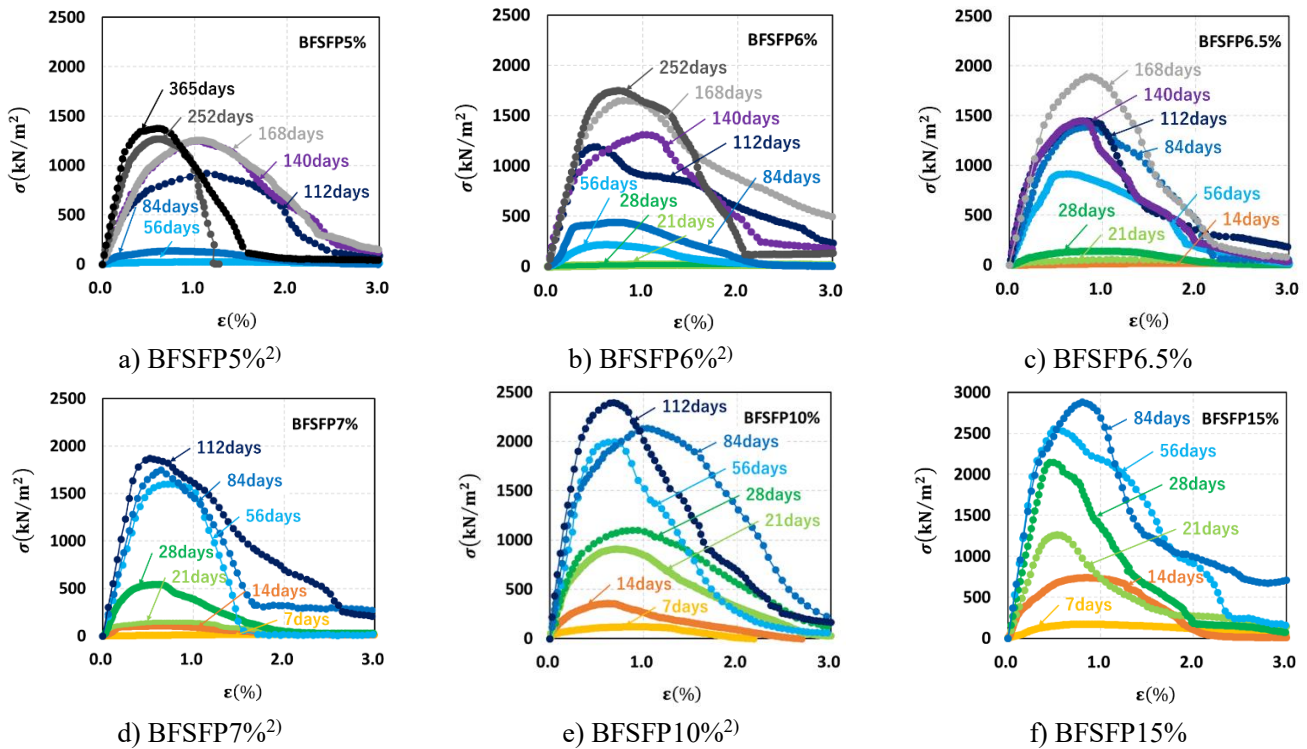
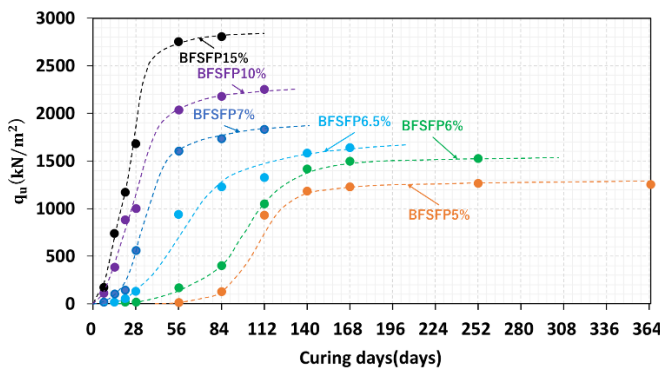
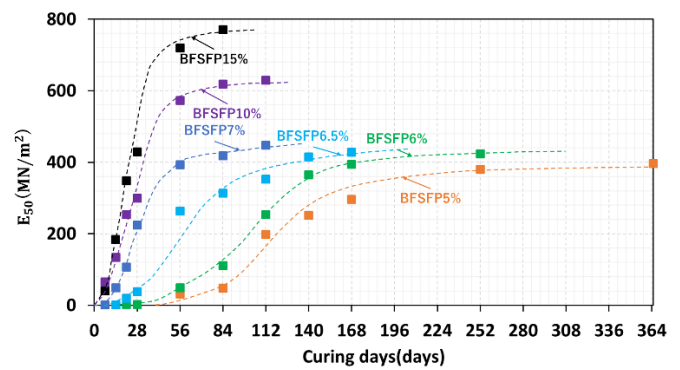


図-1 BFSFP 供試体の応力ひずみ曲線

図-2 養生日数と一軸圧縮強度の関係²⁾図-3 養生日数と変形係数の関係²⁾

4. まとめ

豊浦砂に BFSFP を質量比で 5%～15%混合させた供試体を 7 日～365 日水酸化カルシウム水溶液中で養生させた。養生後の BFSFP 供試体において一軸圧縮試験を行い、強度・変形特性について調査した結果、以下の知見が得られた。

- (1) BFSFP5%～15%供試体の応力ひずみ曲線よりいずれの BFSFP 供試体も破壊ひずみは 0.5%～1.0%程度であり、ピーク後圧縮応力が大きく低下する脆性的な破壊が生じていることが分かった。
- (2) いずれの混合率においても経時変化に伴い、一軸圧縮強度、変形係数は増加傾向にあることが分かる。しかし、混合率が低くなるほど、養生初期の強度発現が緩やかになることが分かった。
- (3) BFSFP 供試体における変形係数と一軸圧縮強度の関係はおおよそ傾き 3.70×10^{-3} の原点を通る直線で近似できると考えられる。

【謝辞】本研究を進めるに当たり、日鉄高炉セメント株式会社より高炉スラグ微粉末を提供いただいた。記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 山口紗奈, 村上哲, 西智美, 樋原弘貴, 坂本龍太郎, 三輪滋, 平成 28 年熊本地震における液状化メッシュ Rank と液状化危険度の関係について, 土木学会西部支部研究発表会, pp277-278, 2020.3. 2) 坂本龍太郎, 西智美, 村上哲, 樋原弘貴, 堂免護: 水酸化カルシウム水溶液中で養生した高炉スラグ微粉末混合砂供試体の経時変化に伴う一軸圧縮強度・変形特性の変化, 第 14 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.301-304, 2020.12.

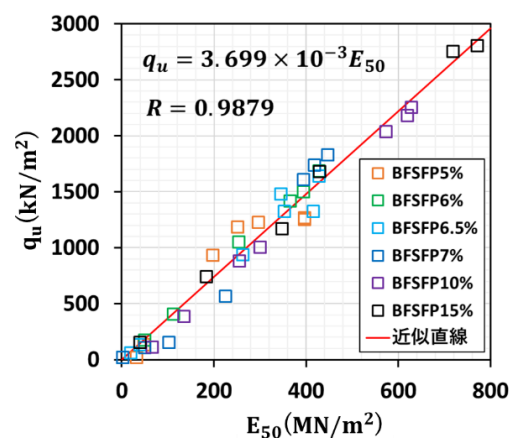


図-4 変形係数と一軸圧縮強度の関係