

微粒子注入工法における高炉スラグ微粉末粉碎と注入材の検討に関する研究

東京都市大学大学院 学 ○XUE HAOXUAN 学 田代 怜 東京都市大学 正 末政 直晃
強化土エンジニアリング(株) 正 佐々木隆光 佐藤工業(株) 正 永尾 浩一

1. はじめに

近年, 新たな液状化対策工法として, 改良費用が安価で住宅地など狭隘地で施工可能な工法の開発が求められている. しかし, 安価かつ高強度であるセメント系懸濁型注入材を用いて地盤内に浸透注入する場合, 微粒子の粒径が地盤の粒径に近しいと目詰まりが発生し浸透性に影響を与えてしまう. そこで著者らは, 非セメント系懸濁型注入材としてシリカと水酸化カルシウムに産業副産物である高炉スラグ微粉末を加えた微粒子注入工法の開発を試みている¹⁾. 本報告では, これまでシリカの粉碎が可能であったことから高炉スラグ微粉末の粉碎を試みた. また, 粉碎したシリカと水酸化カルシウムと高炉スラグ微粉末を用いた配合において改良体を作製し, 一軸圧縮試験を実施した.

2. 高炉スラグ微粉末の粉碎試験

粉碎する高炉スラグ微粉末(以下 BS)は平均粒径が $18\mu\text{m}$ (BS^I)と $6\mu\text{m}$ (BS^{II})の二種類を用いた. 微粒化を行うにあたりスギノマシン製のスターバーストラボ(以下 SBL)を用いた. SBL は化粧品や医薬品に用いられる粉碎機であり, 245MPa に加圧した原料同士をチャンバー内で斜向衝突させることにより分散・粉碎を行う湿式微粒化装置である. 試料投入から粉碎され排出されるまでを1pass とし, 平均粒径が $1\mu\text{m}$ 以下を目標に複数回による粉碎を行った. 翌日に粉碎された微粒子を島津製作所製レーザ回折式粒度測定装置 SALD-2300 で湿式による測定を行うことで粒度分布を求め, 粉碎前と比較した.

BS^Iの粉碎結果を図-1 に示す. 未粉碎と比べて, 粉碎した BS^Iの粒径は全体的に細くなったが, 1pass から 5pass までの平均粒径は $7\mu\text{m}$ となり, 目標とする $1\mu\text{m}$ には達しなかった. 次に BS^{II}の粉碎結果を図-2 に示す. BS^Iとは違い 0pass から 5pass まで変化がないことから粉碎効果が確認されなかった. また湿式粉碎であることから溶液状にした時点で BS^{II}の凝集が始まっていると考えられ, 本来の未粉碎粒径より大きく表れた可能性がある. そこで沈殿防止ため凝集遅延剤(マスターポゾリス No.89)を用いることで沈殿・凝集を抑止した上で粉碎効果を向上させられるかを検討した. BS^{II}の 1pass にかかる時間を計測し 3 サイクルするまでに完全に沈殿しない凝集遅延剤の量として BS^{II}の 10%を混合させて粉碎を行った. 1 時間ごとの平均粒径を示した凝集遅延剤の効果を図-3 に, BS^{II}に凝集遅延剤を加えた場合における粉碎結果を図-4 に示す. 未粉碎 0pass から 5pass までにおいて平均粒径が $6\mu\text{m}$ から $4\mu\text{m}$ まで粉碎がされたが, 目標粒径の $1\mu\text{m}$ には到達しなかった. 5pass 以上の pass で粉碎し続けた場合, 更に粉碎される可能性は考えられるが粉碎コストが掛かることになるため経済的ではない. また凝集遅延剤が配合に対してどのような影響を与えるのかわからないことから利用については配合の確認が必要である. また一方で, 効率よく粉碎できなかったのは BS 微粒子の構造によるものであるとも考えられる. 微粒子はいくつかの粒子

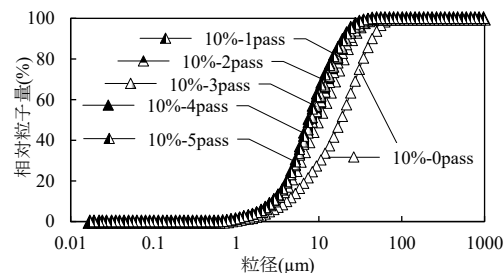
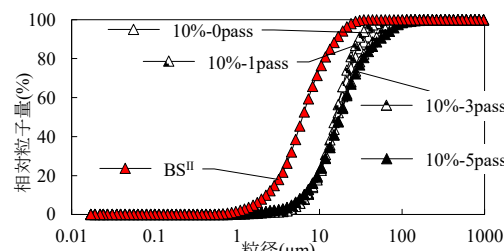
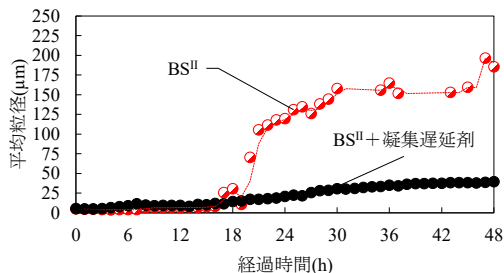
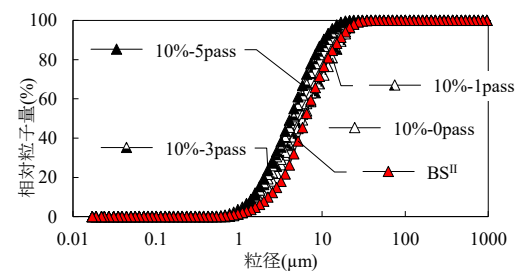
図-1 BS^I粉碎結果図-2 BS^{II}粉碎結果

図-3 凝集遅延剤の効果

図-4 BS^{II}凝集遅延剤入り粉碎結果

キーワード: 液状化対策, 微粒子注入, 微粒子粉碎

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 TEL:03-5707-0104 E-mail: g2081618@tcu.ac.jp

が集まった凝集体と凝集体を構成する一次粒子が存在する。BS^{II}は凝集粒子ではなく一次粒子であると考えられ、分子間の結合が強く粉砕は困難と考えられる。

3. 粉砕シリカを用いた配合試験

上村ら²⁾は、高純度シリカ(以下 SiO₂)と水酸化カルシウム(以下 Ca(OH)₂)を用いた配合比では 1:1 において液状化対策に求められる改良体の一軸圧縮強度の下限値を上回ることを確認し、田代ら³⁾は、SiO₂とCa(OH)₂にBSを加えることで強度発現することが確認している。本実験では、これらの結果をふまえ SiO₂とCa(OH)₂の配合比を 1:1 とし、BS 比を変化させた配合を検討した。また SiO₂は湿式粉砕装置で3回粉砕したものを、BS は未粉砕の BS^Iを使用した。図-6 に供試体作製方法を示す。供試体は内径 5cm 高さ 10cm のプラモールド内で珪砂 6号を注入材中に液中落下させることで作製した。

実験結果を図-7 に示す。SiO₂:Ca(OH)₂ 配合であるシリカ未粉砕と粉砕を比較すると、粉砕することで強度が増加することが確認された。これは微粒子が粉砕されることで比表面積が大きくなり、化学反応が活発化したこと、また砂間隙をより満たしやすくなったためであると考えられる。一方、SiO₂:Ca(OH)₂:BS 配合では BS が最も少ない配合において養生 3 日目から高強度を示した。一方、BS が最も多い配合は養生 3, 7 日目では低強度であったものの、養生 28 日目において強度は増加した。全ケースとも養生 28 日目において、液状化対策に求められる改良体の一軸圧縮強度の下限値⁴⁾を上回る結果となった。BS が最も多い SiO₂:Ca(OH)₂:BS=1:1:8 配合においては他の配合と比べ、7 日目から 28 日目にかけて強度の増加傾向が最大となった要因は、配合に含まれる BS の潜在水硬性⁵⁾が考えられる。BS は急冷されて出来ることから不安定な分子構造をしている。潜在水硬性は BS の化学組成に含まれている SiO₂, Al₂O₃, CaO の不安定な結合が pH11 以上で切断されることで、徐々にカルシウム系水和物(C-S-H ゲル, C-A-H ゲル)を生成して硬化していく。田代ら³⁾より本配合は pH12 近くのアルカリであり、徐々に中性に向かって低下しながら固化することが分かっている。BS を多く含む配合ではアルカリ消費に時間が掛かるため、養生 28 日目において強度が増加したと考えられる。

4. まとめ

本実験より以下の知見が得られた。

1. BS の粉砕を試みた結果、平均粒径 6 μ m が一次粒子の状態であることからこれ以上の粉砕は SBL では難しい。
2. 粉砕シリカと未粉砕を比較すると、粉砕することで比表面積が大きくなることで強度増加する。
3. SiO₂:Ca(OH)₂:BS 配合では、BS の潜在水硬性のよって徐々に硬化していくことで液状化対策に求められる強度に達する。

本研究は科学研究費助成事業「宅地にも適用可能な液状化対策としての混合微粒子注入工法の確立」の研究の一部である。

表-1 配合条件

Case	配合比	P/W
0 ²⁾	SiO ₂ ^{未粉砕} :Ca(OH) ₂ =1:1	0.1
1	SiO ₂ ^{3pass} :Ca(OH) ₂ =1:1	0.1
2	SiO ₂ ^{3pass} :Ca(OH) ₂ :BS ^I =1:1:8	0.1
3	SiO ₂ ^{3pass} :Ca(OH) ₂ :BS ^I =2:2:6	0.1
4	SiO ₂ ^{3pass} :Ca(OH) ₂ :BS ^I =3:3:4	0.1
5	SiO ₂ ^{3pass} :Ca(OH) ₂ :BS ^I =4:4:2	0.1

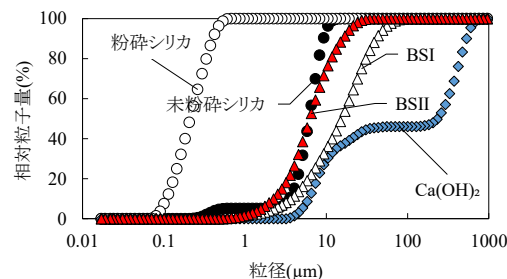


図-5 微粒子粒径

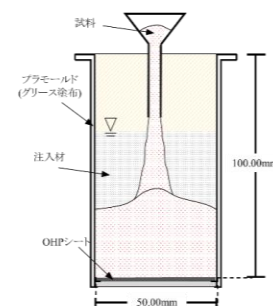


図-6 供試体作製方法

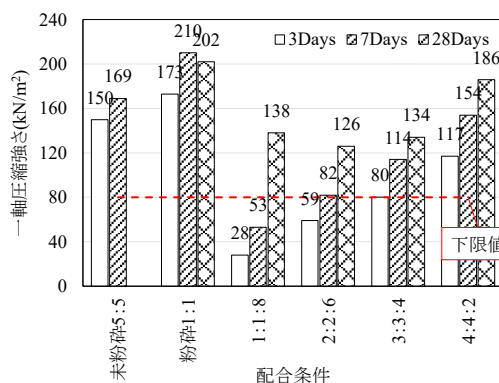


図-7 一軸圧縮試験結果

<参考文献>

- 1) 永尾他:シリカ微粒子注入工法における粒子粉砕に関する研究, 土木学会全国大会第75回年次学術講演会, I-207, 2020
- 2) 上村他:シリカ微粒子の土粒子間注入に関する研究, 土木学会全国大会第69回年次学術講演会, I-083, pp. 165-166, 2014
- 3) 田代他:高炉スラグ微粉末を用いた微粒子注入工法の開発, 第55回地盤工学研究発表会, 2222-29-04, 2020
- 4) 山崎他:溶液型薬液注入工法の液状化対策への適用, 港湾空港技術研究所報告, Vol.41, No.2, pp.119-151, 2002
- 5) 国府勝郎:高炉スラグ微粉末, 公益社団法人日本コンクリート工学会, コンクリート工学ジャーナル, 26巻4号 p.25-31, 1988