

破碎による粒度分布の変化が高炉水砕スラグのせん断強度特性に及ぼす影響

九州大学大学院 学生会員 ○坂田智美

九州大学大学院 フェロー会員 安福規之, 正会員 石蔵良平

1. はじめに

高炉水砕スラグは、鉄鉄を製造する過程で発生する産業副産物である。平成 27 年度の年間生産量は、高炉スラグの生産量の約 2,400 万 t に対し高炉水砕スラグは約 2,000 万 t であり、約 8 割を占める¹⁾。利用方法として、主に 7 割以上が高炉セメント等のセメント材料であるが、粒度分布が自然砂に類似し、軽量であり透水性に優れ、水と接触すると自硬性を発揮する等の特徴を有し²⁾、土質材料としても期待される。また、他のリサイクル材との競合などによりスラグの有効利用率が低下することが予想されるため、今後も利用用途拡大の検討が必要である。地盤改良材として利用することを想定すると、打設時に粒子破碎等が起き早期に硬化することが考えられる。そこで、本研究では、高炉水砕スラグの強度特性が粒子破碎による粒度分布の変化によってどの程度異なるのかを明らかにすることを目的として、未硬化時の高炉水砕スラグの原粒度試料と破碎試料の三軸圧縮試験を行い、せん断強度特性を調べた。

2. 実験概要

2.1 高炉水砕スラグ

試料は、2012 年に大分県の製鐵所で生成された高炉水砕スラグを用いた。高炉水砕スラグの主な化学成分には、珪素、酸化カルシウム、酸化アルミニウム等があり、セメントの化学組成に類似している³⁾。本研究では、施工時に粒子破碎が発生することを想定し、締固め方法 A-a 法を繰り返し 3 回行い破碎させ、破碎試料を作成した。高炉水砕スラグの原粒度試料と破碎試料の粒径加積曲線を図-1 に、密度及び最大・最小間隙比を表-2 に示す。比較対象として豊浦砂の値を併記している。ここで、破碎試料の破碎程度は、実際に地盤改良工法の SCP 工法において用いた際の破碎程度の少ない粒度分布に設定している⁴⁾。高炉水砕スラグは破碎すると、図より粒度分布は原粒度試料よりも左側に推移し、表より原粒度試料よりも最大・最小間隙比が 0.2 ほど小さく、平均粒径及び均等係数も小さくなっており、細粒分が増加していることがわかる。

2.2 実験条件

未硬化時の高炉水砕スラグの強度特性を検討することを目的として、圧密排水三軸圧縮試験を行った。供試体は直径 50 mm、高さ 100 mm で水中落下法で作成した。相対密度は密詰めの条件で $D_r = 80\%$ に設定した。高い飽和度を得るために二重負圧法を採用し、拘束圧は $\sigma = 50 \text{ kPa}$, 100 kPa , 200 kPa として、背圧は 200 kPa 、ひずみ速度は $0.3\%/min$ で行った。

表-1 水砕スラグと普通セメントの化学成分³⁾

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	S	MnO
高炉スラグ	41.7	33.8	13.4	7.4	0.8	0.3
普通セメント	64.2	22	5.5	1.5	2	—

(単位:%)

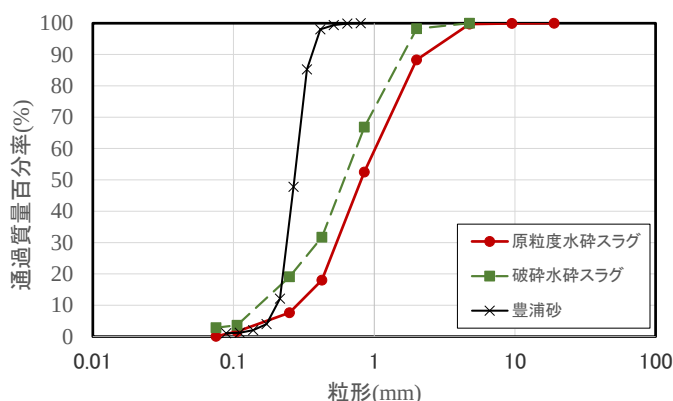


図-1 粒径加積曲線

表-2 高炉水砕スラグ(原粒度試料と破碎試料)と豊浦砂の物理特性

	原粒度 水砕スラグ	破碎 水砕スラグ	豊浦砂
土粒子密度 $\rho_s \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2.747	2.747	2.646
e_{max}	1.513	1.356	0.982
e_{min}	1.070	0.830	0.608
平均粒径 $D_{50} \text{ (mm)}$	0.8	0.7	0.3
均等係数 U_c	3.6	3.1	2.1

キーワード 高炉水砕スラグ, 粒子破碎, せん断強度

連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地 WEST2 号館 1108-1 九州大学 TEL 092-802-3378

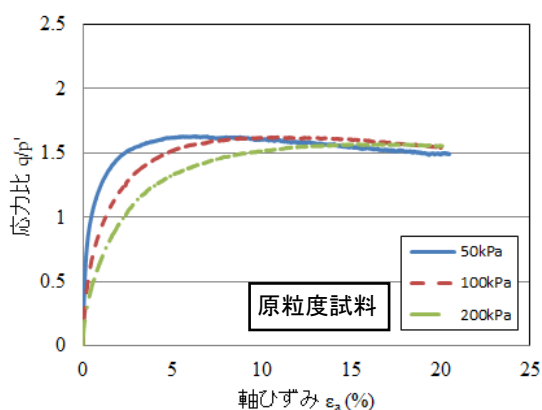
3. 実験結果および考察

図-2, 3 に原粒度試料と破碎試料の三軸圧縮試験結果として、応力比-軸ひずみの関係を図-2(a), 図-3(a)に、体積ひずみ-軸ひずみの関係を図-2(b), 図-3(b)に示す。ここで、

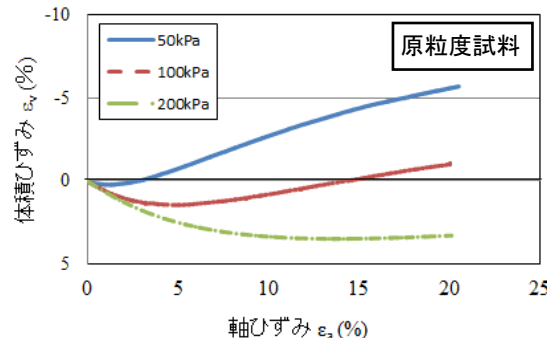
$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p' = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/3$$

である。各図の(a)応力比-軸ひずみの関係より、同一の軸ひずみ

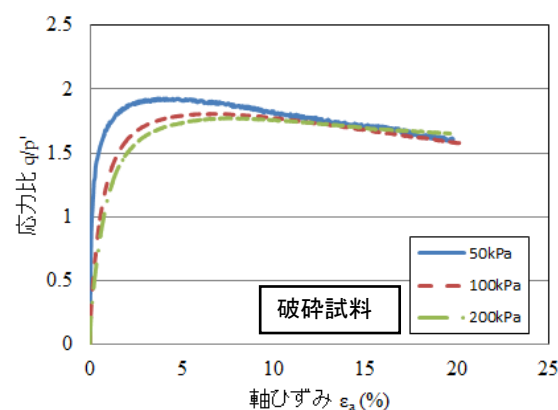


(a) 応力比と軸ひずみの関係

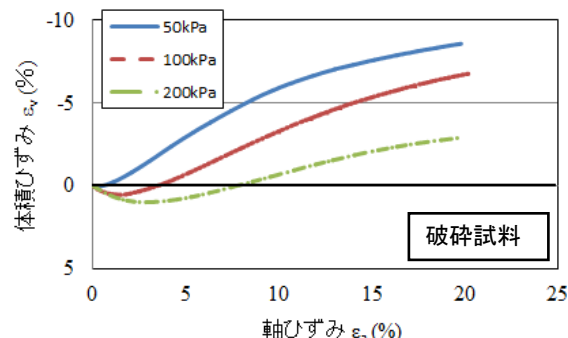


(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

図-2 原粒度水砕スラグの三軸圧縮試験結果



(a) 応力比と軸ひずみの関係



(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

図-3 破碎水砕スラグの三軸圧縮試験結果

において拘束圧が大きいほど応力比が小さくなっており、ひずみの増加とともに一定の応力比に収束する傾向にあることがわかる。これは、せん断に伴い供試体内でさらに粒子破碎が生じたためと考えられる。また、破碎試料より原粒度試料の方が各拘束圧の応力比の値に差が大きいため、せん断に伴う破碎の程度が大きいことが考えられる。各図の(b)体積ひずみと軸ひずみの関係より、いずれの試料においても拘束圧の増加に伴い、体積変化は収縮傾向を示した。収縮の程度は破碎試料の方が大きく、粒子破碎による粒度分布の違いが影響していると考えられる。

次に、図-4 に試験時の応力がピークを示した時の内部摩擦角と拘束圧の関係を示した。原粒度試料に比べ破碎試料の内部摩擦角はいずれの拘束圧においても 5° 前後大きいことがわかる。これは粒子破碎することで細粒分が増加し間隙が小さくなったことが影響したと考えられる。

4. まとめ

高炉水砕スラグが粒子破碎したことを想定し、その時のせん断強度特性の違いを三軸圧縮試験にて検討した結果、次のような知見を得た。原粒度試料及び破碎試料は拘束圧が大きいほど応力比は小さくなった。また内部摩擦角は、原粒度試料に比べ破碎試料は拘束圧によらず大きい値を示した。

謝辞 本文の作成にあたり、研究内容においてご指導頂きましたハザリカ・ヘマンタ教授、実験においてご指導頂きました中島通夫技術協力スタッフに感謝の意を表します。

【参考文献】1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報，鉄鋼スラグ協会，2016. 2) (社)地盤工学会：高炉水砕スラグの地盤工学的利用促進に関する研究委員会報告書，2010. 3) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの化学的特性，<http://www.slg.jp/slag/character.html>(2017.4 確認). 4) 篠崎晴彦 他：高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用，土木学会論文集 C, Vol.62 No.4, pp.858-869, 2006.

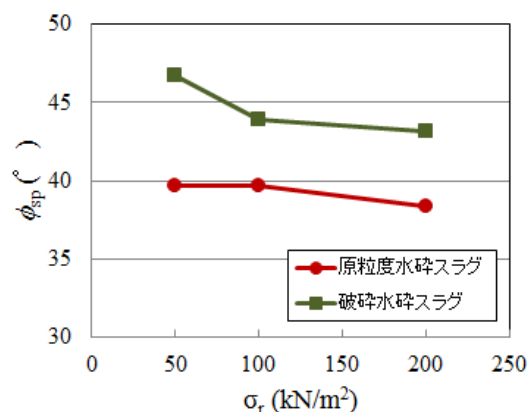


図-4 内部摩擦角と拘束圧の関係