

粒度分布の違いが高炉水砕スラグの強度特性の経時変化に及ぼす影響

九州大学大学院 学生会員 ○坂田智美

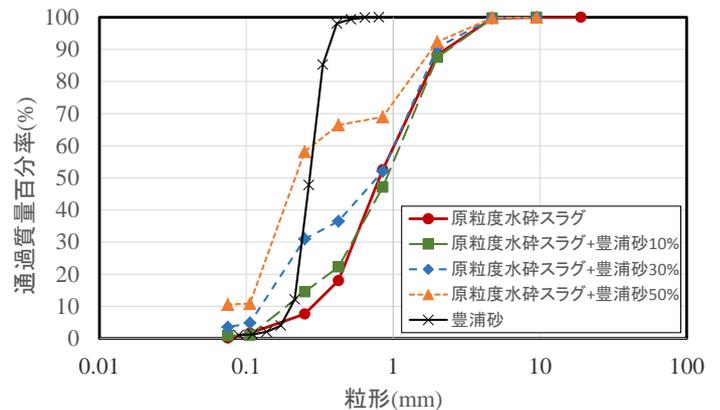
九州大学大学院 フェロー会員 安福規之 正会員 石藏良平

1. はじめに

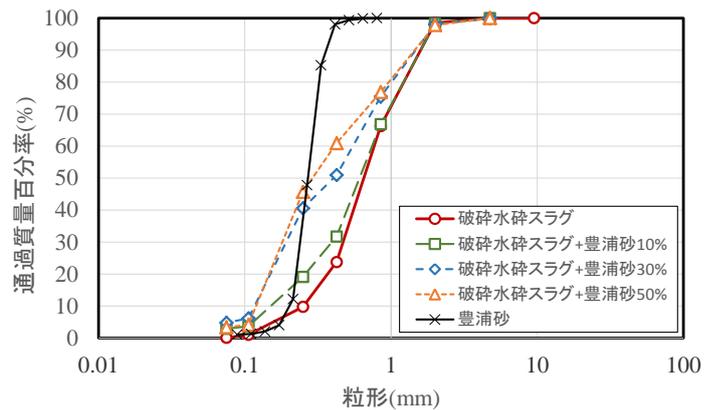
高炉水砕スラグは、銑鉄を製造する過程で発生する産業副産物である。平成 26 年度の年間製造量は、高炉スラグの生産量の約 2,500 万 t に対し高炉水砕スラグは約 2,000 万 t であり、約 8 割を占める¹⁾。高炉水砕スラグの特徴には、高炉水砕スラグは粒度分布が自然砂に類似し、軽量であり透水性に優れ、水と接触すると自硬性を発揮する等が報告されている²⁾。利用方法として、主に 7 割以上が高炉セメント等のセメント材料であるが、他のリサイクル材との競合などによりスラグの有効利用率が低下することが予想されるため、今後も利用用途拡大の検討が必要である。そこで、本研究では、高炉水砕スラグの強度特性が粒度分布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、破碎や自然砂混合を行い幾通りかに粒度調整した試料を意図的に硬化させ、高炉水砕スラグの一軸圧縮試験を行った。また、各試料の粒度分布により求めた粒度特性を用い、粒度分布の違いと強度特性の経時変化との関係を検討した。

2. 実験試料

本実験では、2012 年に大分県の製鐵所で製造された高炉水砕スラグを用いた。異なる粒度分布の設定は締固め方法 A-a 法を繰り返し 3 回行い破碎させ作成した。この粒度は既往の研究による SCP 杭打設前後の水砕スラグの粒度分布³⁾を参考に、破碎の程度が小さい場合を想定している。また、高炉水砕スラグと粒度分布の異なる豊浦砂を、原粒度試料と破碎試料に質量比で 10%、30%、50% で混合し、粒度分布の異なる試料を作成した。ここで、破碎試料の混合試料は、豊浦砂を原粒度の高炉水砕スラグと混合した後に上記の破碎方法で破碎し作成した。それぞれの試料の粒度加積曲線、物理特性および粒度特性を図-1、表-1 に示す。図-1 より、高炉水砕スラグに豊浦砂を混合すると、混合率が増えるほど粒度分布は左に移動していることが分かる。また、表-1 より、原粒度試料と破碎試料を比較すると、破碎試料の方が平均粒径と均等係数がいずれも小さくなっており細粒分が増えたことが分かる。また、豊浦砂を混合すると均等係数は大きくなるが、混合率 50% になるにつれ小さくなる事が分かる。



(a) 原粒度の高炉水砕スラグおよび豊浦砂混合試料



(b) 破碎した高炉水砕スラグおよび豊浦砂混合試料
図-1 粒径加積曲線 (高炉水砕スラグおよび豊浦砂)

表-1 高炉水砕スラグ(原粒度試料、破碎試料、混合試料)と豊浦砂の物理特性および粒度特性

	原粒度 水砕スラグ	豊浦砂 10%混合	豊浦砂 30%混合	豊浦砂 50%混合	破碎 水砕スラグ	豊浦砂 10%混合	豊浦砂 30%混合	豊浦砂 50%混合	豊浦砂
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.747	2.621	2.624	2.642	2.747	2.644	2.655	2.657	2.646
e_{max}	1.513	1.332	1.145	1.031	1.356	1.210	1.076	1.008	0.982
e_{min}	1.070	0.865	0.715	0.609	0.830	0.713	0.634	0.604	0.608
平均粒径 D_{50} (mm)	0.8	0.9	0.8	0.2	0.7	0.6	0.4	0.3	0.3
均等係数 U_c	3.6	6.3	7.7	2.9	3.1	4.7	4.4	3.3	2.1

3. 実験結果および考察

3.1 高炉水砕スラグ及び混合試料の強度特性の経時変化

硬化に至るまでの高炉水砕スラグの経時的な強度特性の検討を行うため、養生した供試体で一軸圧縮試験を行った。内径 $\phi = 5 \text{ cm}$ 、高さ $h = 10 \text{ cm}$ のモールドを用い、相対密度は $D_r = 80 \%$ で統一して試料を詰めた供試体を作成し、間隙水を滞留させた状態で養生を行った。モールドの底面には、約 1.5 mm の浸透穴を開けている。養生水は、硬化促進のため水温 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ の水酸化ナトリウム水溶液 ($\text{pH} \approx 12$) を用いた。

図-2(a), (b) に原粒度試料と破碎試料とそれぞれに豊浦砂を混合させた供試体の一軸圧縮強度の経時変化を示す。図-2(a), (b) より、28日養生までの強度はいずれの図においても豊浦砂混合率30%の供試体の強度が最も大きくなった。また、豊浦砂混合率50%の供試体はいずれの試料においても養生20日程度までは明らかに強度の発現が遅く、圧縮強度は最も小さいが、養生56日後においては急速に圧縮強度が増加している。これは豊浦砂の混合量により初期間隙比が小さくなったことから、硬化の開始に伴って、粒子間の結合力が急激に増加したことなどが要因として考えられる。

3.2 粒度分布の違いと強度特性の関係

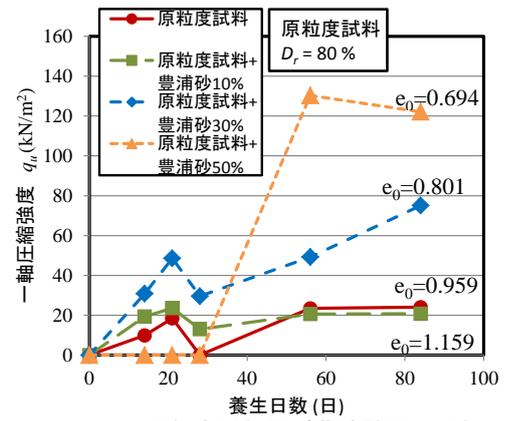
粒度分布の形状を数値的に示す均等係数 (d_{60}/d_{10}) を用いて粒度分布の違いと強度特性の関係を検討した。図-3(a), (b) に一軸圧縮強度と均等係数との関係を示す。図-3(a) より原粒度試料の高炉水砕スラグは、養生28日までは均等係数が大きいほど強度発現が早く強度も大きい。さらに養生期間が経過すると均等係数が小さい試料において強度が大きくなっていることが分かる。また、図-3(b) より破碎試料の高炉水砕スラグにおいても同様のことが言える。これらの図から、今回の結果は、均等係数が大きいほど強度発現が早く、養生期間が長くなると $U_c \approx 3.0$ となるような粒度の試料の強度が大きくなる傾向を示した。この要因については今後検討していく。

4. まとめ

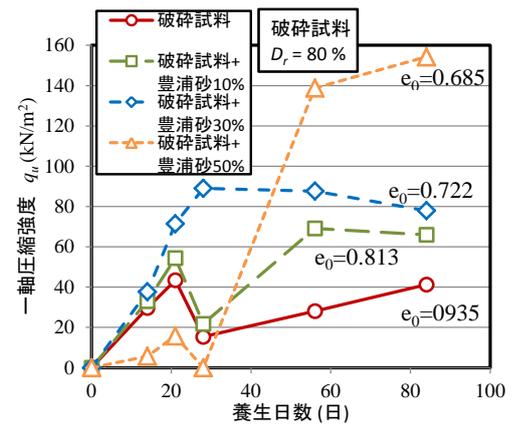
高炉水砕スラグの一軸圧縮強度の経時変化と異なる粒度分布の影響を考察した結果、以下の結論を得た。1) 養生56日以降において、高炉水砕スラグに豊浦砂を混合すると混合率が大きいほど強度は大きい。2) 養生56日以上経過すると、均等係数 $U_c \approx 3.0$ となるような粒度分布の試料が最も大きい強度を示した。

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，2015. 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) 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.

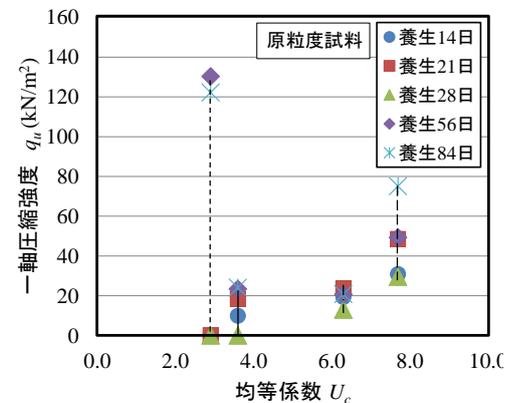


(a) 原粒度試料及び豊浦砂混合試料

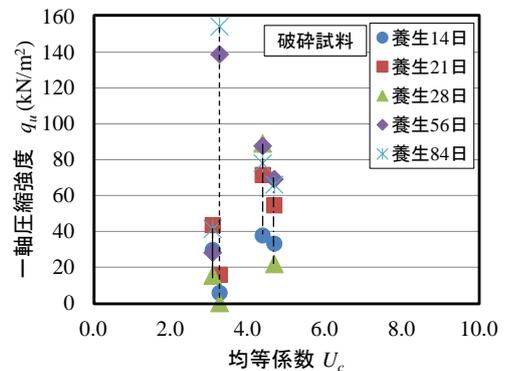


(b) 破碎試料及び豊浦砂混合試料

図-2 一軸圧縮強度の経時変化



(a) 原粒度試料及び豊浦砂混合試料



(b) 破碎試料及び豊浦砂混合試料

図-3 一軸圧縮強度と均等係数の関係