

製鋼スラグの高強度化技術に関する室内実験

株式会社大林組 正会員 ○宮岡 修二 株式会社大林組 正会員 森下 智貴
株式会社大林組 正会員 田島 孝敏 株式会社大林組 フェロー会員 浜井 邦彦

1. はじめに

鉄の製錬工程で副生成する製鋼スラグは締固めしやすく、水硬性の発現により粘着力成分が付加されて c-φ 材としての強度特性を有することから、その特性を活かしてサンドコンパクションパイル (SCP) などの地盤改良材として有効利用されている。岩崎ら¹⁾が行った経済設計の試験検討によれば、液状化対策に製鋼スラグと高炉スラグの混合資材を用い、粘着力成分を考慮すると施工本数を削減でき、約 40% のコスト削減が期待できると報告している。しかし、SCP 施工時、先行して打設したパイルには、あとから施工するパイルを打設する際に生じる水平土圧が作用する。先行打設したパイルが硬化したあとに、その近傍で後段パイルを打設すると、先行打設したパイルが水平土圧により破損し、粘着力成分にロスが生じることが懸念される。また、エージングされていない製鋼スラグには膨張性があるとともに、材料表面に脆弱部があり²⁾、材料自体に強度低下要因を抱えている。そこで、SCP 工法への適用を想定し、これに適した製鋼スラグを選定するとともに、硬化の発現が遅い資材を用いてタイムラグを確保し、施工時の強度低下を防止できる「製鋼スラグの高強度化技術」の開発を目標として室内実験を行った。

2. 実験方法

供試材料: [製鋼スラグ試料] 実験には、表-1 に基本物性を示す 3 試料を用いた。試料 No.1 は転炉精錬を効果的に行うために実施される銑鉄の予備処理工程で副生成する溶銑予備処理スラグであり、No.2 と No.3 は転炉で鋼を生産する際に副生成する転炉スラグである。No.1 は、CaO の組成割合および遊離石灰含有量が他の 2 試料に比べて小さく、pH が 10.2 で低い。尾上ら²⁾は、製鋼スラグ材料をロサンゼルスすり減り試験機 (LA) で磨砕処理すると脆弱部を除去でき、強度改善に有効であると報告している。そこで、製鋼スラグ試料 10kg を LA ミルに投入し、0.4kg 鉄球 11 個とともに 500 回転して磨砕処理を行った。[添加材] カルシウムシリケート等の結合物質の生成促進のため、ケイ素を含有する資材としてコンクリート用シリカフューム (SF)、高炉セメント B 種 (BB)、コンクリート用高炉スラグ微粉末 4000 (GBFS) を添加した。

膨張比測定試験: 圧密試験機の圧密容器内に、各製鋼スラグの #2mm ふるい通過分を突き棒にて充填し、地盤内における有効応力 50, 100, 200kN/m² を想定した载荷を行い、20℃にて供試体高さの変化を測定した。

強度試験: 製鋼スラグ材料の含水比を調整し、各種添加材を加えて人力で 5 分間混合し、これをモールド (φ 50mm, h100mm) に 3 層に分けて投入して突き固めて供試体を作製した。含水比は、突固めによる締固め試験により求めた最適含水比に調整した。締固め条件は、SCP 工法の締固めエネルギーを想定して³⁾、1.5 kg×72 回×3 層とした。供試体試料の作製条件を表-2 に示す。作製した供試体は 20℃で水浸養生し、7, 28, 56, 91, 180 日後に一軸圧縮試験を実施した。

表-1 基本物性

製鋼スラグ試料名		No.1	No.2	No.3
土粒子密度 (g/cm ³)		4.132	3.124	3.199
pH*		10.2	12.1	12.5
電気伝導度*(mS/m)		14	526	587
元素組成** (%)	CaO	32.5	40.6	56.4
	MgO	1.5	5.1	2.2
	SiO ₂	19.5	13.9	10.2
	Al ₂ O ₃	2.4	3.3	1.0
遊離石灰 ⁴⁾ (wt%)		0.6	3.6	5.3

* 固液比 1:5 で水に 60 分浸漬した検液を測定

**粉末蛍光 X 線法による定量分析

表-2 供試体の作製条件

ケース		1	2	3	4	5	6
製鋼スラグ試料名		No.1	No.1	No.1	No.1	No.1	No.1
磨砕処理の有無		有	有	有	有	無	無
添加材	種類	無添加	SF	BB	GBFS	GBFS	GBFS
	添加量 (wt%)	0.0	2.5	2.5	2.5	2.5	5.0

キーワード 製鋼スラグ、磨砕処理、高炉スラグ微粉末、一軸圧縮強さ、サンドコンパクションパイル工法
連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 株式会社大林組生産技術本部技術第二部 TEL03-5769-1302

3. 実験結果

膨張比の測定結果：供試体高さの経時変化から、初期値を基準として膨張比を求めた。その結果を図-1 に示す。遊離石灰含有量の最も大きい試料 No.3 では膨張比が大きく、90 日経過後も膨張比が増大傾向にある。試料 No.2 も膨張比が増大傾向にあり、90 日経過時点では収束していない。製鋼スラグが膨張すると、硬化した結合物質の構造が壊れて、強度低下することが懸念される。このため、以降の試験には試料 No.1 の溶銑予備処理スラグを用いることとした。

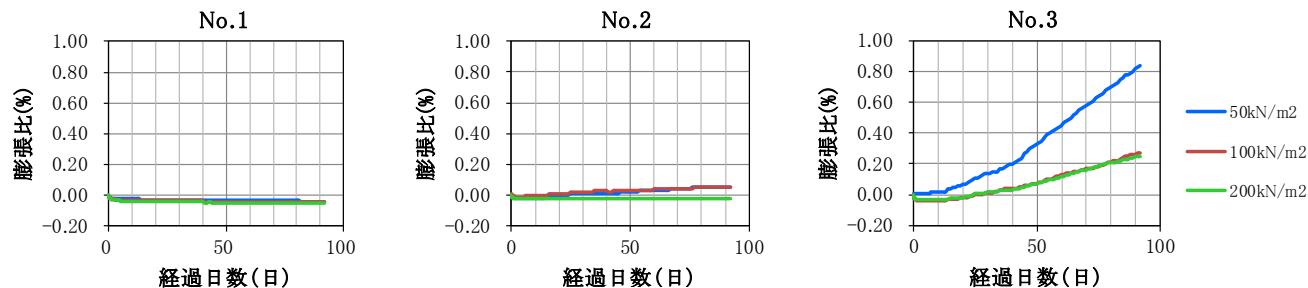


図-1 膨張比測定試験の結果

強度試験の結果：試料 No.1 の磨砕処理前および処理後の粒度を図-2 に示す。処理することにより細粒化し、#0.075mm ふるい通過分の質量百分率が 0.8%から 7.2%に増加した。国土交通省共通仕様書では、SCP 用材料の#0.075mm ふるい通過分の質量百分率は約 15%以下である。このことを考慮し、強度試験では添加材使用量を、磨砕処理後の材料に対して質量比で 2.5wt%，無処理の材料に対して 2.5 および 5.0wt%とした。表-2 の条件で作製した供試体の水浸養生後の一軸圧縮試験の結果を図-3 に示す。一軸圧縮強さ q_u の増加に対して、BB および GBFS の添加が有効であった。

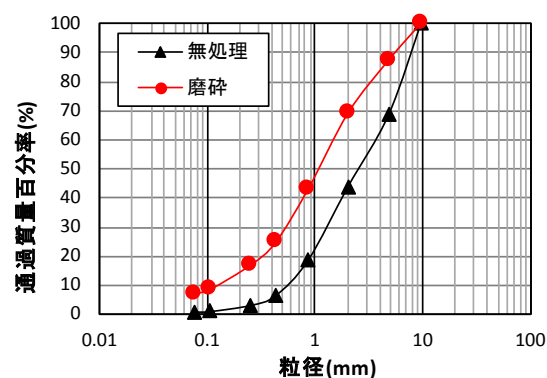


図-2 磨砕処理前後の粒度

q_u の立ち上がる時期に着目すると、BB は 7 日、一方の GBFS は 28 日経過以降であった。このタイムラグの間にパイロ打設を行うことで、施工時の先行打設パイロの強度低下を防ぐことが可能と考えられる。また、磨砕処理には一軸圧縮強さを大きくする効果が認められた。GBFS 添加と組み合わせることにより、合理的な地盤改良仕様を決定することが可能である。

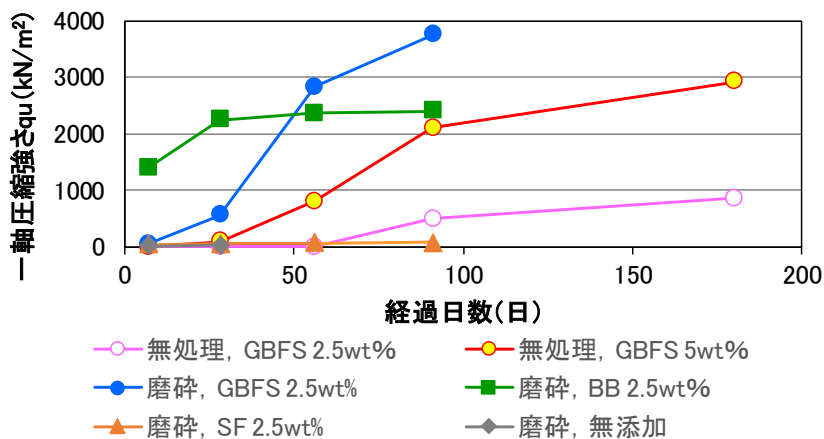


図-3 各供試体の一軸圧縮強さの経時変化

4. まとめ

遊離石灰含有量の小さい溶銑予備処理スラグを用い、GBFS を添加して締め固めることにより、タイムラグをもって高強度化できることがわかった。今後は現場実験に取り組み、地盤改良技術の確立をめざしたい。

参考文献

- 1)岩崎ら：地域特性を活かしたリサイクル材（鉄鋼スラグ）の利用によるコスト縮減について，平成 20 年度国土技術研究会報文
- 2)尾上ら：鉄鋼スラグ水和固化体の水中における圧縮疲労強度とその改善に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.25, pp.75-84, 2014
- 3)松尾稔，本城勇介：地盤環境工学の新しい視点，技報堂出版，pp.144, 1999
- 4)日本鉄鋼協会：鉄鋼スラグ中フリーCaO のキャラクタリゼーション技術の標準化最終報告書，2013