施工から 16 年が経過した高炉水砕スラグ試験盛土の土質特性の調査†

原 弘行* 松田 博* 本田 秀樹**
篠崎 晴彦** 和田 正寛*** 中西 淳****

Investigation of Soil Characteristics of Test Embankment Using Granulated Blast Furnace Slag After 16 Years from Construction

by

Hiroyuki HARA*, Hiroshi MATSUDA*, Hideki HONDA**,
Haruhiko SHINOZAKI**, Masahiro WADA*** and Jun NAKANISHI****

The test embankment using granulated blast furnace slag (GBFS) was constructed in 2001, and its long-term characteristics were investigated. In this study, a sampling was conducted at the embankment after 16 years passed from construction, physical, chemical and mechanical properties were examined by field measurement and laboratory tests. Conclusions of this study are obtained as follows: 1) The dry density of the GBFS indicated about 1.2 g/cm³, and it was confirmed that the lightness of embankment was maintained. 2) The unconfined compressive strength shows more than 1 MPa by the hydraulic property of GBFS. 3) A high pH was observed directly under the embankment. But at other points, the pH showed near neutrality, and it is considered that there is no influence on the surrounding area.

Key words:

Granulated blast furnace slag, Test embankment, Physical property, Hydraulic property, Unconfined compressive strength, pH

1 緒 言

高炉水砕スラグ（以下、水砕スラグ）は、銑鉄の製造過程で生産される副産物であり、平成 29 年度には 1,944 万トンが生産されている¹⁾。水砕スラグの粒度組成は自然砂に類似し、多数の気泡を有するため軽量であり、角張った形状から高い内部摩擦角を発揮する。さらに水砕スラグは自硬性を有しており、自身から化学成分を溶出し、水和反応の進行によって硬化する性質を有する。そのため、水砕スラグは自然に存在する材料にない特性を持つ有用な地盤材料として活用できると考えられており、すでに多くの施工実績がある^{2)~4)}。しかしながら、その多くは港湾工事への利用であり、盛土などの陸上構造物への利用事例は多くはない。

水砕スラグは、先に述べた軽量性や高い強度定数および自硬する性質を活かして、軟弱地盤への荷重低減を図る軽量盛土工法⁵⁾の材料としての利用が期待できる。そこで、水砕スラグの軽量盛土材としての適用性を検討するために、山口県宇部市において水砕スラグを用いた試験盛土を造成し、その経年変化をモニタリングしている。既往の研究⁶⁾では、施工後 8 年間に実施した調査結果から物理特性や力学特性の経年変化を報告した。本研究では、施工から約 16 年後に調査を実施し、当該試験盛土に設置されている観測井を用いた pH の現地計測およびボーリングによってサンプリングした試料に対して室内試験を

実施した。本調査によって得られた結果と前回までの調査結果から、盛土材料に適用した水砕スラグの諸特性の経年変化および周辺環境への影響を報告する。

2 調査概要

2・1 試験盛土の概要

本研究の調査対象は、山口県宇部市において、2001 年 11 月に施工された試験盛土である。盛土材として使用した水砕スラグは製鉄所内で約 4 か月間仮置きして一度硬化させ、団粒化したものを破碎してもとの粒状材にしたものである。水砕スラグの物理特性および粒径加積曲線を Table 1, Fig. 1 に示す。

本盛土は 17×23×2m（盛土高）の規模で施工を行っている。試験盛土の平面図および断面図を Fig. 2 に示す。断面図に記した地層区分は盛土中央付近（図中の B-1）で実施したオールコアボーリングの観察記録から求めている。本試験盛土はその中央を境に施工時の撒き出し層厚が異なっており、片方は 0.3m/層、もう一方は 1.0m/層となっている。一般に、盛土施工時の撒き出し層厚は 0.3m であるが、水砕スラグ粒子が角張った形状をしていることに起因したインターロッキング効果を期待して撒き出し層厚を 1.0m/層でも施工を行っている。また、施工時にどの程度の勾配で法面の形成が可能かを検証するために、4 つの法面をそれぞれ異なる勾配で施工している。その結果、最急の法面勾配は 1:1.4 であった。現在もいずれの法

† 原稿受理 令和元年6月8日 Received June 8, 2019 ©2020 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 山口大学 大学院 〒755-8611 宇部市常盤台, Graduate School, Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

** 鉄鋼スラグ協会 〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町, Nippon Slag Assoc., Chuo-ku, Tokyo 103-0025

*** 宇部市役所 〒755-8601 宇部市常盤町, Ube City Hall, Tokiwa-cho, Ube, 755-8601

**** 山口大学 大学院 〒755-8611 宇部市常盤台, Graduate School, Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

Table 1 Physical properties of granulated blast furnace slag.

Soil particle density ρ_s (g/cm ³)	2.77
Maximum void ratio $e_{\max}$	1.45
Minimum void ratio $e_{\min}$	0.89

Fig.1 Particle size distribution of granulated blast furnace slag.

面においても崩壊等は生じておらず, 1:1.4 から 1:2.0 の勾配を維持している. 図には pH 計測のために設置した観測井の位置と 2018 年 2 月の調査において試料をサンプリングした位置も併せて示している. なお, 設置した観測井の先端は深度 2.75~4.95m の砂混じり粘土層に位置している. 図中の A-1, A-2, B-1, B-2 では水砕スラグ試験盛土の試料採取のため, 天端から 1.8m の深さまでサンプリングを行った. B-1, C-1, C-2 の位置では, 原地盤のサンプリングを実施した.

2・2 調査内容

施工後約 16 年後の調査は, 2018 年 2 月に実施した. 試験盛土の試料採取は, 以下のようにして行った. サンプリングは, Fig. 2 に示したように各撒き出し層厚の範囲からそれぞれ 2 地点ずつ選定し, トリプルサンプリングで盛土天端から約 1.8m の水砕スラグ試料を採取した. 採取した試料に対して含水比試験, 乾燥密度の測定, 一軸圧縮試験を実施した. また, A-2 の位置でサンプリングした撒き出し層厚 0.3m の試料に対してのみ, 上記の試験に加えて水和反応率試験も実施した. 水和反応率試験には, 近藤ら⁷⁾が提案しているサリチル酸・アセトン・メタノール溶液を用いた選択溶解法を採用した. 本手法は用いる水溶液によって硬化した水砕スラグに含まれる水和物のみを選択的に溶解させることができるため, スラグと水和物の質量比から水和反応の進行程度が求められる. また, 水砕スラグはアルカリ成分を溶出するため, これによる周辺環境への影響が懸念される. そこで, 試験盛土の中心部および周辺に設置している観測井から地下水を採取し, その pH を測定した. なお, B-1, C-1, C-2 の位置では, 原地盤から採取したコア試料を用いて pH を測定した. 測定方法は, コア試料に直接 pH 電極を挿入する手法によって 0.1m 間隔で行った.

本試験盛土では, 今回だけでなく 2001 年の施工直後から数度にわたって調査が行われてきている. その際は,

Fig. 2 Plan view and cross-section view of test embankment.

試験盛土の法肩付近において 1 辺 30~50cm 程度のブロック状で深さ方向に数か所採取し, それを試験室に持ち帰ってから切り分けて整形後, 含水比, 湿潤密度, 一軸圧縮強さを調べた. ブロックサンプリングによる調査は, 2002 年 8 月, 2005 年 12 月, 2009 年 4 月, 2012 年 12 月の計 4 回実施してきており, それぞれ施工から約 8 か月後, 4 年後, 8 年後, 11 年後に相当する. また, 施工後 0 日, 3 日, 2 年後ではブロックサンプリングは行わず, 砂置換法による現場密度試験と含水比の測定のみを行い, 強度試験は実施しなかった. なお, 観測井を用いた pH 測定は今回の調査と同様の方法で, 現在まで定期的に行われてきている. 2018 年の調査の実施状況を Fig. 3 に示す.

3 調査結果

3・1 含水比および飽和度

含水比の深度分布を Fig. 4 に示す. 調査時期や撒き出し層厚によらず深さ方向に含水比の大きな変化はみられない. また, 施工直後には 15%前後であった含水比が 8 か月後には 20%を超えている. さらに時間経過とともに含水比は徐々に増加し, 16 年後には 30~40%を示していることがわかる. Fig. 5 は含水比と乾燥密度の調査結果から推定した飽和度の深度分布を示したものである. 施工直後 40%程度であった飽和度が 16 年後には 80%以上を示している. 今回の調査では, 盛土内の地下水位は Fig. 2 に示した B-1 の位置でのみ観測されており, その水位は盛土天端から 1.10m の位置であった. 地下水が観測されなかった箇所や地下水位以浅においても高い飽和度を示していることがわかる. 盛土内の飽和度は降雨や季節によって変動すると考えられるが, 明らかに経年的に増加する

(a) Installation of boring machine

(b) Sampling of test embankment

(c) Measuring pH of collected sample

Fig.3 Appearance of investigation of test embankment.

傾向が窺える。セメント改良土では、水和反応の進行とともに吸着水や水和生成物に取り込まれた水和水が増加することが知られている⁸⁾。本試験盛土においても、時間経過とともに進行した水砕スラグの水和反応によって、それらが増加し、含水比が増加したものと推察される。これは、高い飽和度を示しているにもかかわらず、Fig. 4に示したように間隙内の水分が流下せず、深さ方向に含水比の変化がみられないこともとも符合する。なお、水和水の多くは110℃では蒸発しないため、ここで示した含水比は水和生成物中の取り込まれた水分量をすべて計測できているわけではないことに留意する必要がある。

3・2 乾燥密度

乾燥密度の深度分布をFig. 6に示す。いずれの撒き出し層厚の場合も、乾燥密度は深さ方向に大きな変化は確認されず、1.0～1.3g/cm³程度の値を示している。Fig. 7は乾燥密度の平均値の経時変化を示したものである。撒き出し層厚にかかわらず、施工直後は乾燥密度1.3 g/cm³程度であったが、その後全体的に低下する傾向が示された。今回の16年後の調査以前は、試験盛土の法肩付近で実施

(a) 0.3m/layer

(b) 1.0m/layer

Fig.4 Distribution of water content with depth.

(a) 0.3m/layer

(b) 1.0m/layer

Fig.5 Distribution of degree of saturation with depth.

Fig. 6 Distribution of dry density with depth.

Fig. 8 Distribution of unconfined compressive strength with depth.

Fig. 7 Change with time of dry density.

Fig. 9 Distribution of Hydration reaction ratio with depth (0.3m/layer).

したブロックサンプリングや現場密度試験から乾燥密度を求めている。したがって、施工から11年以前における乾燥密度の測定に供した試料は盛土表層付近に位置しており、水砕スラグからの化学成分の溶出が起りやすいと考えられる。その結果、固相質量の減少が生じ、盛土中央付近で採取した今回の調査結果に比べて低い値を示したと考えられる。乾燥密度低下の原因について、詳細は不明であるが、水砕スラグの軽量性は施工後16年が経過した現在も維持されていることが確認された。

3・3 一軸圧縮強さ

一軸圧縮強さの深度分布を Fig. 8 に示す。いずれの撒き出し層厚の場合も、深度方向に明瞭な変化の傾向は確認されないが、今回の調査の結果、施工16年後では表層部

の一軸圧縮強さが他の深度に比べて著しく低い値を示す傾向がみられた。Fig. 9 は選択溶解法による水和反応率の深度分布を示したものである。深さ方向に大きな変化はみられず、表層付近も深部と同程度の値を示していることがわかる。したがって、表層部は他の深度と同様に水和反応は進行しているものの、生成された水和物が乾湿繰返しの影響を受けて粒子間のセメンテーション効果が崩壊するなどして、高い一軸圧縮強さが発揮されなかったものと考えられる。既往の研究⁹⁾によると淡水環境で1年間養生した水砕スラグ供試体の水和反応率は1%にも達しておらず、本試験盛土の水砕スラグは施工から16年間で20%前後の値を示しており、水和反応が著しく進行していることがわかる。

Fig.10 Change with time of unconfined compressive strength.

一軸圧縮強さの経年変化を Fig. 10 に示す。図中の点線は一軸圧縮強さの平均値を示している。一軸圧縮強さは施工から 8 か月後には平均で 500kN/m² 以上を示した。その後、徐々に強度増加して 16 年後には平均で 1000kN/m² 以上に達している。これは、先述の水和反応の進行に起因した硬化によるものと推察される。施工から 11 年後までは撒き出し層厚が小さい方が一軸圧縮強さの平均値が大きい傾向がみられるが、16 年後にはその傾向が逆転している。これは、撒き出し層厚 0.3m の方が 1.0m に比べて表層部の強度が小さかったことや水和反応の著しい進行によって強度に及ぼす密度の影響が小さくなったことによるものと考えられる。

3・4 観測井の pH

16 年後の調査で実施した各観測井の pH の計測結果を Fig. 11 に示す。盛土中央に設置された観測井 No.1 は、pH=11.25 と高い値を示している。各観測井で実施した水位計測の結果から判断すると、地下水の流向は概ね西から東へと流れていると推測された。施工直後の調査¹⁰⁾においても地下水の流向は本調査で推測した方向と同様であることが報告されており、流向はほとんど変化していないものと考えられる。盛土周辺の観測井からは高い値は観測されず、下流側の観測井 No.7 や No.8 も含めて pH=6～7 程度であった。Fig. 12 は Fig. 2 の平面図における B-1, C-1, C-2 の位置で実施したボーリングによる原地盤のサンプリング試料の pH 計測結果を示したものである。試験盛土と原地盤の境界の位置を深度 0m としている。試験盛土外の C-2 における 0m 以浅のプロットは、試験盛土造成時に盛土周辺に撒き出された水砕スラグが、当該位置の表層部でサンプリングされたことを示している。試験盛土内部（深度 0m 以浅）から深度 0.5m 程度までは高い pH が観測されるものもみられるが、それ以降ではいずれの試料も pH=5～8 程度を示しており、どの深度においても観測井 No.1 で観測されたような高い pH には至っていないことがわかる。したがって、観測井 No.1 で高い pH を示した原因は、水砕スラグと接触して高 pH を呈した雨水が観測井と地盤の間を流下して井戸内に入り込むなどして、観測井の pH を上昇させたものと考えられる。なお、深さ 2m 付近で一部 pH が低くなっている。これは地表面付近では酸化作用を受けて pH が低下したことによるもの

Fig.11 pH value at each measurement point.

Fig.12 Distribution of pH with depth.

Fig.13 Change with time of pH at each measurement point.

のと考えられる。しかし、直上に存在する水砕スラグ試験盛土によって、地表面に近いほど pH が低下するわけではなく水砕スラグのアルカリ性と酸化作用がバランスして 2m 前後で最も低い pH を示したのと考えられる。次に、各観測井の pH の経時変化を Fig. 13 に示す。盛土中央の No.1 は、ばらつきはみられるが他の計測点に比べ高い pH を示していることがわかる。それ以外では、盛土に最も近い No.3 や下流側の No.7 でも高い pH が計測された時期がみられるが、施工から 4 年程度経過してからはほとんど 8 以下の pH を示している。したがって、盛土直下のみ高い pH を示す場合もみられるが、その他の計測点ではほとんどの場合中性付近の値を示しており、盛土下部の地盤が有する緩衝作用によって盛土周辺にはほとんど影響が及んでいないものと判断できる。

4 結 言

本研究では, 2001 年に施工した水砕スラグを用いた試験盛土の現在までのモニタリング結果に加え, 2018 年 2 月に新たに実施した施工 16 年後の調査結果から軽量盛土材料として用いた水砕スラグの諸特性の経年変化および周辺環境に及ぼす影響について調べた. 得られた知見をまとめると以下ようになる.

- (1) 水砕スラグを用いた試験盛土は, 自身の水和反応の進行によって保持される水分量が増加することに起因して, 経年的に含水比が増加する傾向が確認された.
- (2) 乾燥密度は時間とともに低下する傾向がみられ, その軽量性は長期間経過した後も維持されていることが確認された.
- (3) 試験盛土のごく表層部に限っては深部に比べて低い一軸圧縮強さを示したが, 水砕スラグの強度は, その著しい水和反応の進行によって施工から 16 年が経過した現在も増加していることが確認された.
- (4) 試験盛土中央に設置された観測井のみ高い pH が観測されたが, 盛土周辺の観測井ではいずれも中性付近を示しており, 盛土下部の地盤が持つ緩衝作用によって広範囲にわたる影響はみられなかった.

参 考 文 献

- 1) Nippon Slag Association, “Statistical yearbook of iron and steel slag”, (2018).
- 2) Y. Kikuchi, M. Ikegami and H. Yamazaki, “Field investigation on the solidification of granulated blast furnace slag used for backfill of quay wall”, Journal of Japan Society of Civil Engineers, No.799/III-72, pp.171-182, (2005).
- 3) H. Shinozaki, H. Matsuda, E. Sakai, K. Ono, M. Suzuki and M. Nakagawa, “Hardening property of granulated blast furnace slag and its application to soil improvement”, Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, Vol.62, No.4, pp.858-869, (2006).
- 4) H. Shinozaki, H. Matsuda and W. Baek, “Cyclic shear strength of granulated blast furnace slag in the process of hardening”, Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, Vol.64, No.1, pp.175-180, (2008).
- 5) Japan Road Association, “Road work, Guidelines on countermeasures for soft ground”, pp.333-343, (2012).
- 6) H. Matsuda, R. Ishikura, M. Wada, N. Kitayama, W. Baek and N. Tani, “Aging effect on the physical and mechanical properties of granulated blast furnace slag as lightweight banking”, Japanese Geotechnical Journal, Vol.7, No.1, pp.339-349, (2012).
- 7) R. Kondo and S. Ohsawa, “Studies on a method to determine the amount of granulated blast furnace slag and the rate of hydration of slag in cements”, Ceramics Association Journal, Vol.77, pp.39-46 (1969).
- 8) W. Zhu, C. L. Zhang and Abraham C. F. Chiu, “Soil-water transfer mechanism for solidified dredged materials”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.135, No.5, pp.588-598 (2007).
- 9) M. Wada, H. Matsuda, H. Hara, S. Nakamura and N. Igawa, “Quantitative evaluation of strength development and self-restorative capacity of granulated blast furnace slag”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.65, No.1, pp.28-33, (2016).
- 10) M. Ohtsubo, H. Matsuda, N. Kitayama, M. Murakami, A. Katayama, T. Murakami, K. Nakayama, Y. Nakano and K. Morioka, “Case study of embankment using the granulated blast furnace slag as a light material”, Proceedings of the Japan National Conference on Geotechnical Engineering, Vol.37, pp.899-900, (2002).