

鉄鋼スラグを混合した津波堆積土改良土の盛土の力学特性

Properties of Embankment Made from Tsunami Sediment Mixed Steel Slag

鈴木 操 SUZUKI Misao JFE スチール スラグ事業推進部 主任部員 (副部長)
林 正宏 HAYASHII Masahiro JFE スチール スラグ事業推進部 主任部員 (副部長)
吉澤 千秋 YOSHIZAWA Chiaki JFE ミネラル 技術サービス部・博士 (工学)

要旨

東日本大震災の復興における社会基盤整備事業においては、津波堆積物を処理して得られた津波堆積土を主体とする分級土を有効活用するとともに、鉄鋼スラグなどの循環資材を活用することも望まれている。一方、分級土は木片を多く含んでおり、復興資材として利用するためには施工性、力学的特性、環境安全性を把握する必要がある。このため、地盤工学会東北支部「東日本大震災における廃棄物資源循環のための研究委員会」の「鉄鋼スラグ有効利活用小委員会」において、分級土と分級土に鉄鋼スラグを混合して改良した土について、室内試験と現地盛土試験を行い、盛土材としての適用性を検討した。検討の結果、津波堆積土を鉄鋼スラグ混合で改良した土で盛土することで、高品質な盛土が構築可能であると判断することができた。

Abstract:

Effective utilization of classified soil mainly consisting of tsunami sediments classified from processing of tsunami deposits together with recycled resources such as steel slag is desired for social infrastructure development projects of the Great East Japan Earthquake. In order to use classified tsunami sediments which have many wood chips as reconstruction materials, their workability, mechanical properties and environmental safety need to be understood.

Applicability of classified tsunami sediments and mixed steel slag for embankment materials was studied by laboratory tests and field test. The study was conducted at the Japanese geotechnical society, Tohoku branch.

It was concluded that high quality embankment structure can be made from classified tsunami sediment by mixing steel slag.

1. はじめに

東日本大震災の復興における社会基盤整備事業では、環境負荷に配慮しながら安全で品質の良い社会基盤の構築が求められている。そのためには、津波堆積物を処理して得られた津波堆積土を主体とする分級土を有効活用するとともに、循環資材を活用することも望まれる¹⁾。

一方で、分級土は、木片等を多く含んでいるため、従来の地盤材料とは性状が異なっており、復興資材として利用するためには施工性、力学的特性、環境安全性を把握する必要がある。そこで、分級土または分級土と循環資材のひとつである鉄鋼スラグの混合土を盛土材として適用検討するため、室内試験と現地盛土試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 鉄鋼スラグと分級土の室内配合試験

2.1.1 鉄鋼スラグによる既存の地盤改良技術

鉄鋼スラグは、高炉で鉄鉱石を溶融・還元する際に生成する高炉スラグと、鋼を精錬する製鋼段階で生成する製鋼スラグに大別される。そのうちの製鋼スラグは、粒状材料であり、土と混合することで、かみ合わせ効果と製鋼スラグの主成分である酸化カルシウム (CaO) による安定処理効果による改質が期待できる。

製鋼スラグを用いた既存の代表的な地盤改良技術として、地盤改良深さが 3 m までの浅層地盤改良と 3 m 以上の深層地盤改良とがある。

ここでは浅層地盤改良の具体例として、林道舗装で検討された事例を紹介する。林道は、黒ぼく土と褐色土の二層からなる CBR が 2.5% の軟弱な路床に計画された。この土質は有機分を多く含んでおり、一般的に地盤改良が難しいとされている。これを製鋼スラグ混合で改良する検討を行い、**図 1** に示すように混合率 (乾燥質量比) が 40% を超え

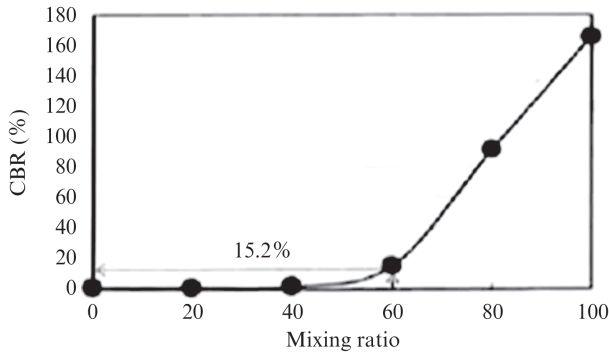


図1 CBRと製鋼スラグ配合率の関係²⁾

Fig. 1 Relationship between CBR and steel slag mixing ratio²⁾

ると地盤改良効果が発揮されることを確認した²⁾。この技術
を応用することで、津波堆積土を主体とする分級土を盛土
材として利用することができると考え、以下、検討を進めた。

2.1.2 室内配合試験

宮城県名取市閑上地区より採取した木片を含む津波堆積
土等の発生土に製鋼スラグを混合した土の改質効果を確認
するため、室内試験により配合を決定し、その結果を基に現
地盛土試験を実施し、施工性、盛土としての性能等を確認
した³⁾。分級土と製鋼スラグの混合率を決定するため、事前
に製鋼スラグの混合割合を変化させた室内配合試験を実施
した。製鋼スラグを分級土に対し、20%、40%、60%と混合
した3種類のケースで締め固めた土のコーン指数試験を行っ
た結果を表1に示す。製鋼スラグ混合率による大きな違い
は見られなかった³⁾。

製鋼スラグによる膨張影響を確認するため、これらの混
合土に対して、80℃水浸膨張試験による膨張量の測定を行っ
た結果を図2に示す。製鋼スラグ単体では、JIS A 5015 道路
用鉄鋼スラグの規格値 1.5%を大きく超えてしまうが、20%、
40%、60%の各混合率では、膨張比がそれぞれ0.42%、0.86%、
1.22%であった。土との混合により、膨張量を抑制するこ
とができることを確認した。

以上の結果より、分級土を多く利用すること、膨張量を
低く抑えることを考慮して、土に対し製鋼スラグの混合率を
40%とすることとした。

40%混合土の一軸圧縮試験結果を図3に示す。経過時間
とともに強度が増加する様子が確認された。製鋼スラグの
CaOによる水和反応が進んだものと推測され、土の改質効

表1 室内でのコーン貫入試験結果

Table 1 Result of cone penetration laboratory test

Test case	Cone index (kN/m ²)
20% mixed slag	1.248
40% mixed slag	1.173
60% mixed slag	1.210

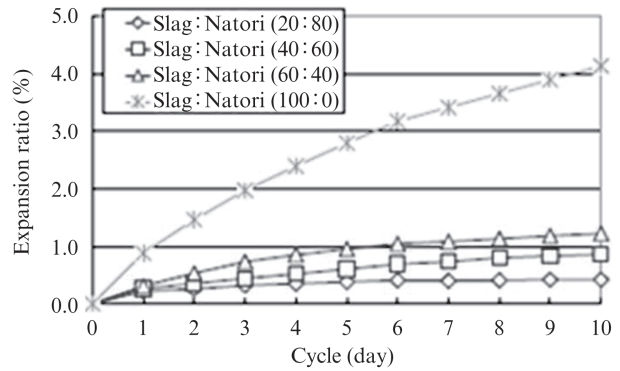


図2 水浸膨張試験結果

Fig. 2 Expansion stability test (80°C)

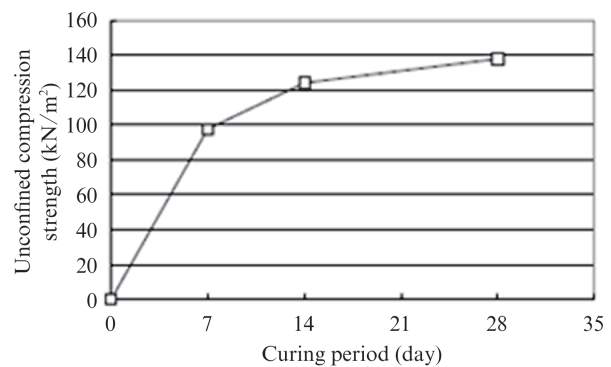


図3 一軸圧縮試験結果

Fig. 3 Result of unconfined compression test

果を十分に発揮することが確認できた。

2.2 盛土試験

2.2.1 現場施工性試験

盛土試験に際し、前述の名取市の分級度のほかに、木片
の含まれている量の少ない宮城県山元町の分級土を対象に、
製鋼スラグを混合した盛土試験を実施した³⁾。分級土と製
鋼スラグは、図4に示すように、鉄鋼スラグを下層、分級
土を上層に撒き出し、スタビライザーにより混合した。

この方法により、分級土と製鋼スラグは、十分に混合する
結果が得られた。盛土は、混合土を 350 mm で撒き出し、

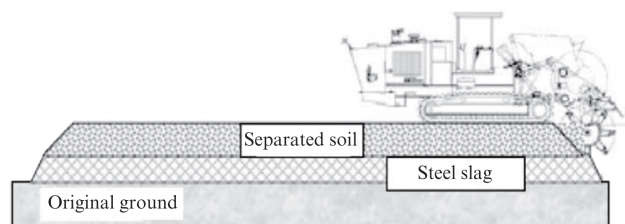


図4 混合方法

Fig. 4 Mixing method

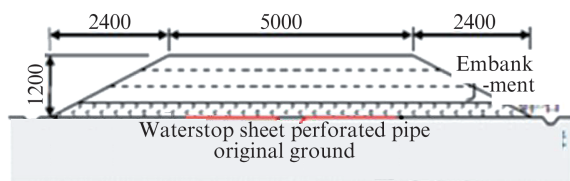


図5 盛土断面

Fig. 5 Embankment section (workability test)

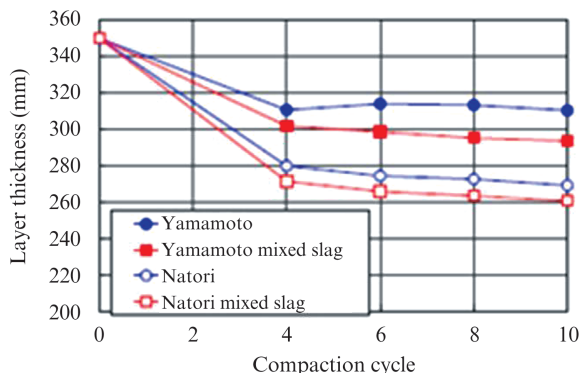


図6 転圧回数と層厚変化の関係

Fig. 6 Relationship between compaction cycle and layer thickness

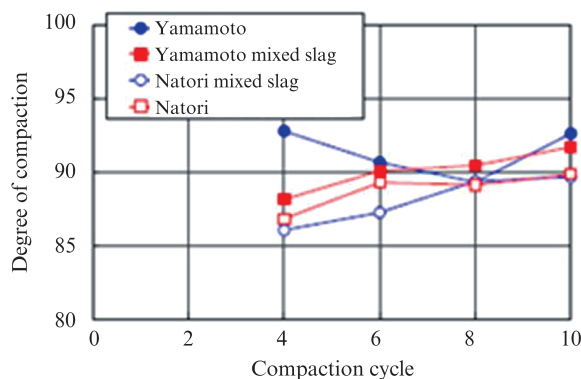


図7 転圧回数と締固め度

Fig. 7 Relationship between compaction cycle and compaction degree

10 t級のタイヤローラーにより転圧して造成した。図5に断面を示す。転圧回数と層厚の変化，締固め度，コーン指数，および現場 CBR 試験の結果を図6～図9に示す。

図には比較のため，分級土単体の結果も示した。転圧による沈下量は，転圧回数4回でどのケースもほとんど終了し，製鋼スラグ混合による施工性への影響は無いことが示された。

スラグ混合土の締固め度は，転圧回数6回程度で90%近い値となった。コーン指数は，分級土単体に対し，製鋼スラグ混合土は大きく上昇する結果が得られた。現場 CBR は，分級土の結果にバラツキが見られたが，製鋼スラグ混合土は分級土単体より大きな値を示した。これらの結果より，製

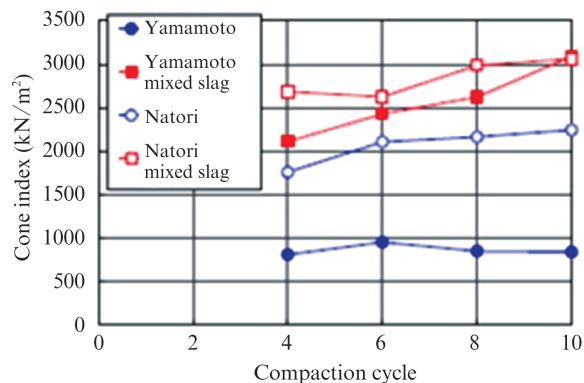


図8 転圧回数とコーン指数の関係

Fig. 8 Relationship between compaction cycle and cone index

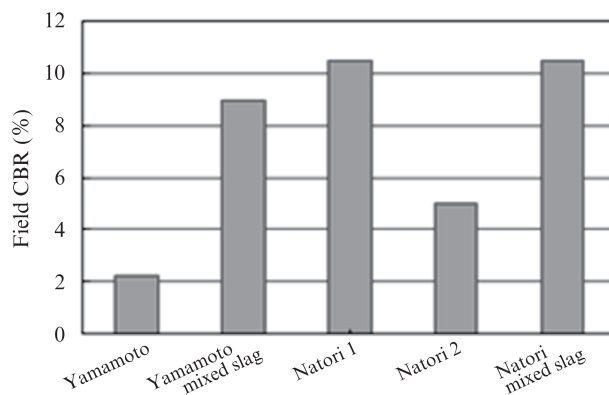


図9 現場 CBR

Fig. 9 Field CBR

鋼スラグ混合土を盛土に適用することで，物理的な改質効果が発揮されることを確認できた。

2.2.2 盛土試験概要

実験は宮城県亶理郡山元町の中浜小学校跡地のグラウンドで実施した⁴⁾。盛土は平成26年2月中旬～3月中旬にかけて施工した。盛土材料を表2に示す。盛土材は分級土(山元, 名取)，およびそれらのスラグ混合土，主灰造粒固化物，被覆用の山元良質土，吸着材混合土である。混合土の混合方法と混合割合についても表に示した。盛土の平面図，断面図および実験ケースを図10，図11および表3に示す。

これらは分級土(ケース1, 5)，スラグ混合土(ケース2, 6)，放射線遮蔽効果(ケース3, 4)，吸着材(ケース7)である。各盛土の第1層は碎石層とし，2層目以降は撒き出し厚350 mmとして10 t級タイヤローラーにより6回(3往復)走行することで転圧し層厚300 mmに仕上げた。なお，盛土タイプII以外の盛土では，降雨により盛土内を通過した浸透水の水質分析を行うために，採水用の遮水シートおよび有孔管を設けた。試験盛土作製時の測定項目は，沈下量，現場密度(RI試験)，コーン貫入抵抗，含水比，CBR(現場)である。盛土完成後は定期的に沈下量測定，のり面侵食状

表2 盛土材料

Table 2 Material of embankment

No.	Material	Overview
1	Yamamoto separated	Sediment, 0-30dia.
2	Natori separated	Sediment, 0-20dia.
3	Steel slag	JFE Fukuyama, 0-30dia.
4	Absorbent	Sumitomo Osaka, MFX
5	Yamamoto quality	Natural ground soil
6	Solid ash	Yamamoto disaster waste ash
7	Mixed absorbent	Natori separated
8	Yamamoto mixed slag	Yamamoto separated
9	Natori mixed slag	Natori separated

表3 実験ケース

Table 3 Test case

Case	Material	Type
1	Yamamoto separated	I
2	Yamamoto separated mixed slag	I
3	Yamamoto separated, Yamamoto quality	II
4	Solid ash, Yamamoto quality	II
5	Natori separated	I
6	Natori separated mixed slag	I
7	Absorbent, Natori separated	III

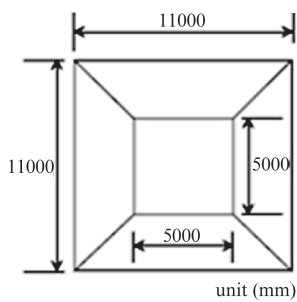


図10 盛土平面図

Fig. 10 Embankment plan view

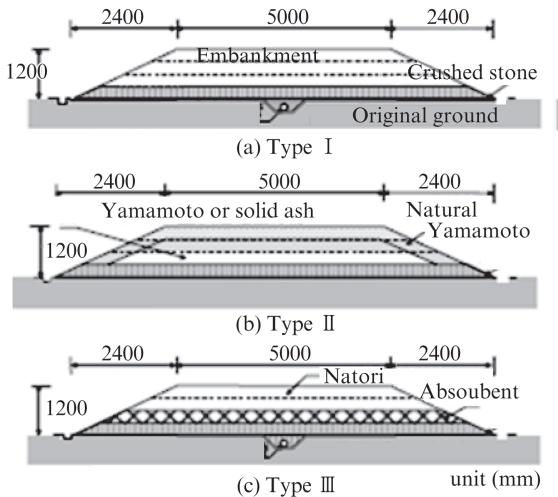


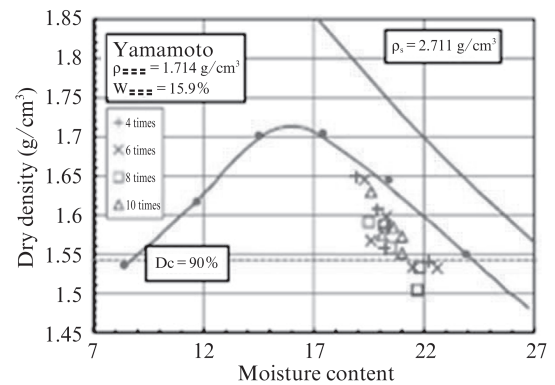
図11 盛土断面図

Fig. 11 Embankment section (field test)

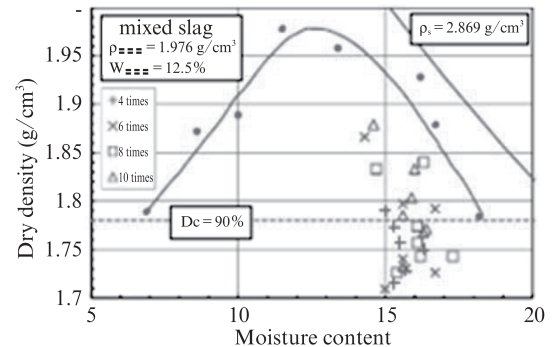
況観察、浸出水の採取・分析を実施した。これらの計測は約1年間実施し、平成27年3月末に盛土を解体・撤去した。

2.2.3 盛土試験結果

山元分級土およびスラグ混合土の締固め特性および現場密実試験結果を図12に示す。スラグを混合することで最適含水比が低下するとともに、最大乾燥密度が増加している。これはスラグ混合による粗粒分の増加により、盛土材料の嘴



(a) Yamamoto separated soil



(b) Yamamoto mixed slag soil

図12 山元分級土と混合土の締固め曲線と現場密度

Fig. 12 Moisture density curve of Yamamoto classified soil and slag mixed soil

み合わせが改善されたものとする。また締固め度は90%前後の値となっており、従来の地盤材料と同様に締固めが可能である。次に施工後の盛土の性状について報告する。図13に盛土天端の沈下量を示す。山元分級土は施工後3か月で約6mm沈下している。

一方、スラグ混合土の膨張量は最大で3~4mmで層厚900mmに対して膨張比は0.5%以下と小さかった。3ヶ月後の山元分級土とスラグ混合土の盛土の状況を図14に示す。

すべての盛土でのり面に侵食は認められなかった。また、表面には雑草がみられるが、スラグ混合土ではいくぶん雑草が少なくなっていることが確認できた。さらに盛土からの

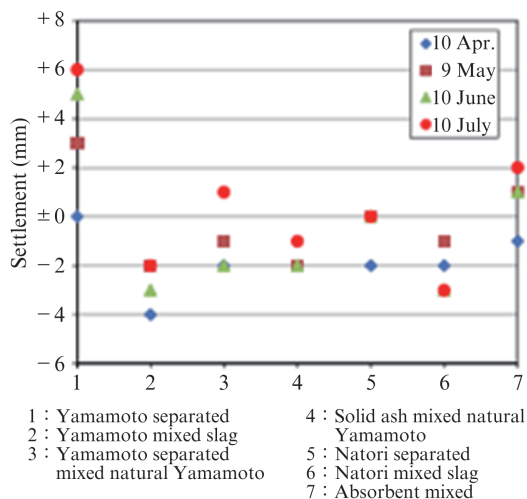


図 13 盛土天端の沈下量

Fig. 13 Embankment crest settlement



(a) Yamamoto separates (case 1)



(b) Yamamoto mixed slag (case 2)

図 14 施工より 3 か月後の盛土の状況

Fig. 14 Embankment situation after 3 months of construction

浸出水の採取状況について説明する。日降水量 70 mm 程度の降雨イベントがあったが、まったく採水することができなかった。これは、締固めにより強固な盛土が構築されたため、透水性も低下して雨水が盛土内に容易に浸透しなかったことが原因であると考えた。このことを確かめるために盛土天端位置で現場飽和透水試験を実施した。現場飽和透水係数を図 15 に示す。透水係数は $1.7 \times 10^{-6} \text{ m/s} \sim 5.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ とかなり低い値であることが確認できた。

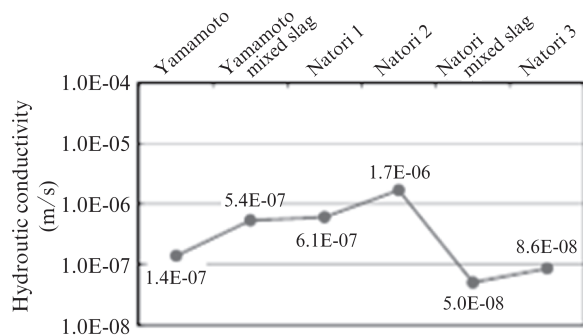


図 15 盛土の現場飽和透水係数

Fig. 15 Field saturation hydraulic conductivity

3. まとめ

木片を含む津波堆積土等の現地発生土に製鋼スラグを混合した盛土試験を実施した結果、以下の結論が得られた。

- 1) 室内試験および現地での盛土試験により、製鋼スラグによる浅層地盤改良の技術を応用することができる。
- 2) 製鋼スラグの混合による施工への影響はない。
- 3) 製鋼スラグの混合により、コーン指数や現場 CBR などの改善効果が期待できる。
- 4) 1 年間の限られた期間であるが、盛土に沈下や膨張はほとんど発生しないこと、雨水に対する耐侵食性が高いこと、盛土内に雨水が浸透しづらいことを確認した。

以上により、製鋼スラグを混合した材料で盛土することで、高品質な盛土が構築できると判断できる。

4. おわりに

津波で被災した防災緑地の復旧・復興工事において、本研究の成果、得られた知見が活かされた。津波堆積物に覆われた軟弱な地盤上に盛土を構築する際、製鋼スラグを敷設、現地盤を改良することで、計画どおりの盛土を行うことができた。今後も東日本大震災の復興に少しでも寄与できるよう、微力ながら関わって行くつもりである。

また、本成果が、今後の想定される地震の事前検討に何らかの情報を提供できれば幸いである。

謝辞

本文は、地盤工学会東北支部「東日本大震災における廃棄物資源循環のための研究委員会」の「鉄鋼スラグ有効利活用小委員会」にて得られた成果や知見をまとめたものである。

現地実験の実施にあたり、宮城県、名取市、山元町には試験材料、フィールドを提供いただいた。株式会社フジタ、住友大阪セメント株式会社には多大な協力をいただいた。

現場飽和透水係数の測定については岡山大学竹下祐二教授にご協力いただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 地盤工学会. 災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン. 2014.
- 2) 田辺和康, 吉澤千秋, 鈴木 操, 林 正宏. 製鋼スラグを用いた地盤改良技術への取り組み. 地盤工学会誌. 2015, vol. 63, no. 8, p. 8-11.
- 3) 林 正宏, 鈴木 操, 吉澤千秋, 仙頭紀明. 津波堆積土等の発生土の盛土試験 (その2 鉄鋼スラグを混合した改良土の力学特性). 土木学会. 第71回年次学術講演会, III-385. 2016, p. 769-770.
- 4) 仙頭紀明, 飛田善雄, 風間基樹, 今西 肇, 大河原正文. 津波堆積土等の発生土の盛土試験 (その1 盛土試験の概要). 土木学会. 第71回年次学術講演会, III-384. 2016, p. 767-768.



鈴木 操



林 正宏



吉澤 千秋