

土質改良材としての製鋼スラグの強度改善効果について

友久 誠司* 鍋島 康之* 内藤 永秀** 角田 敏光*** 今西啓太***

Strength Improvement of Muddy Soil Mixed with Non-aging Steel Slag

Seishi TOMOHISA, Yasuyuki NABESHIMA, Nagahide NAITO, Toshimitsu KAKUDA, Keita IMANISHI

ABSTRACT

Most muddy soils are difficult to reuse as construction materials because of high water content and low strength, and the disposal sites for soils have been decreasing. Therefore, it is very important to develop a significant improvement method for such soils from the view point of natural resource preservation and environmental impact mitigation. The purpose of this study is to clarify the possibility of non-aging steel slag acting as an additive which affects the strength characteristic of muddy soils.

Results of this study suggest that the strength of the muddy soil mixed with non-aging steel slag increases because the water content of the muddy soil decreases by the absorption of slag. The larger the mixing rate of the steel slag, the higher the CBR of the treated soils becomes. Also, the effect on strength continues during the two-day aging period. However, remarkable results are obtainable within the first day after mixing.

KEY WORDS : CBR, lauan, muddy soil, non-aging steel slag, soil improvement

1. 緒言

人と廃棄物との関わりは、現在貝塚として各地で見られていることから旧石器時代に遡り、人が集落を形成したときから始まったと思われる。この集落が時代とともに次第に発展し、巨大化するに連れて廃棄物処理が大きな都市問題として取り上げられるようになってきている。この主な原因は、近年の科学技術の進歩により、人々の生活水準が大きく向上するに連れて廃棄物の種類が多様になったこと、および都市における急ピッチの人口増加と高度経済成長の波に乗った使い捨て文化が挙げられる。

建設リサイクル推進計画 2002 の平成 17 年度実績によると、アスファルト・コンクリート塊、アスファルト塊、建設発生木材のリサイクル率は 90%以上となっている。

一方、建設汚泥のリサイクル率、建設発生土利用率はそれぞれ 73%、63%と低い値にとどまっている。これらの利用されずに廃棄される量は膨大で、廃棄物の処分場の確保難や廃棄物の処理費の高騰など種々の社会問題を引き起こしており、有効利用方法の開発は喫緊の課題である^{1), 2), 3)}。

建設発生土や汚泥（以下、これらを「泥土」と呼ぶ）等を再利用する際には、その用途に応じた強度が要求される。泥土の改質にはセメント、石灰、高分子材料などの固化材を添加する固化処理が研究・開発の主流であるが、改良土にはコスト高、必要以上に剛性が大きくなり再掘削が困難でひび割れが発生する、強アルカリ性で周辺環境を悪化するなどの問題がある。

泥土の強度改善の一例に、製鋼スラグを加えた改良土がある。現在、製鋼スラグは地盤改良材や路盤材として多く利用されている⁴⁾。しかし、製鋼スラグは含有する遊離石灰が膨張するため、そのままでは利用が困難であ

*都市システム工学科 **技術教育支援センター

***建築・都市システム工学専攻

る。そこで製鋼スラグを製品として出荷するにはエージング処理を施し、膨張を抑制しなければならない。ここで、エージング処理とは製鋼スラグを約 1 週間蒸気養生するもので、スラグ中の遊離石灰が水と反応して消石灰に変わるときの体積増加を抑える効果がある⁵⁾。しかし、エージング処理には多大な時間と費用がかかるなどの問題がある。

本研究は、高含水比で低強度の泥土に製鋼スラグ、特にエージング処理を行っていない製鋼スラグ (以下、「未エージング製鋼スラグ」と呼ぶ) を添加材として用いる可能性を検討する。

未エージング製鋼スラグは、数年にわたり長期的に膨張する性質を有しているため、建設材料として用いる場合に不具合が生じる。そのため、膨張による影響を検討するには、長期間の追究が必要となる。そこで、本研究では製鋼スラグと同じ膨張特性を持ったラワン材を泥土に添加し、膨張が改良土の強度に与える影響を検討する。ラワン材を泥土に添加することによって、未エージング製鋼スラグの膨張特性を短時間で表すことができ、未エージング製鋼スラグを添加材として用いた改良土の特性を検討することが可能となる。

改良土の強度特性は CBR 試験を行って判定する。その目標強度は道路の路床材の基準強度としての CBR3% 以上である。軟弱な建設発生土に未エージング製鋼スラグを添加することで、有効利用が可能となれば、製鋼スラグを時間や経費のかかるエージング処理をしなくても添加材として使用でき、経済的で短時間の製造システムの構築ができるものと考えられる。

2. 試料

2.1 試料土

本研究で用いる試料土は、京都府桂川右岸流域下水道幹線建設工事で発生した泥土である。この泥土の物理的性質を表 1 に示す。泥土の自然含水比は 41.0%、CBR は 0.7% であり、高含水比かつ低強度であるためそのままでは建設材料としての利用が困難である。本試験では、泥土の含水比を 30%、40% および 50% の 3 段階に調整して用いる。

2.2 製鋼スラグ

泥土の改良に用いる添加材は、広鋳技建株式会社産の製鋼スラグである。

製鋼スラグの最大寸法は 20mm、密度は 3.439g/cm³ であり、体積膨張率は約 4% である⁶⁾。

2.3 ラワン材

本研究で使用したラワン材は、一辺が 15mm の立方体をロサンゼルスすりへり試験機により角をとり、丸みをもたせるように加工したもので、乾燥炉で 1 日間以上乾燥させた乾燥ラワン材(密度 0.381g/cm³)と、2 日間水浸させた飽和ラワン材の 2 種類を用いる。

図 1 はラワン材 (立方体) の外観である。ここで a 辺はラワン材の繊維方向、b 辺と c 辺は繊維に直角な方向を示している。

図 2、3 はそれぞれラワン材を水浸あるいは含水比 50% の土中に埋めた場合のラワン材の吸水率と膨張率を示している。図 2 より、水浸と土中、いずれのラワン材とも時間の経過とともに吸水率は増加する。吸水率は吸水しやすい環境である水浸において大きく増加するが、土中のものは 2 日以降の吸水率の増加はわずかである。そして、2 日後には水浸のラワン材は土中に比べて約 2 倍の吸水率を示している。土中に埋めた図 3 によると、繊維

表 1 泥土の物理的性質

試験項目	単位	特性値
自然含水比	%	41.0
土粒子密度	g/cm ³	2.63
液性限界	%	50.9
塑性指数	—	18.9
CBR	%	0.73

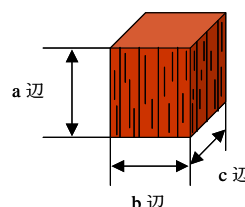


図 1 ラワン材 (立方体) の外観

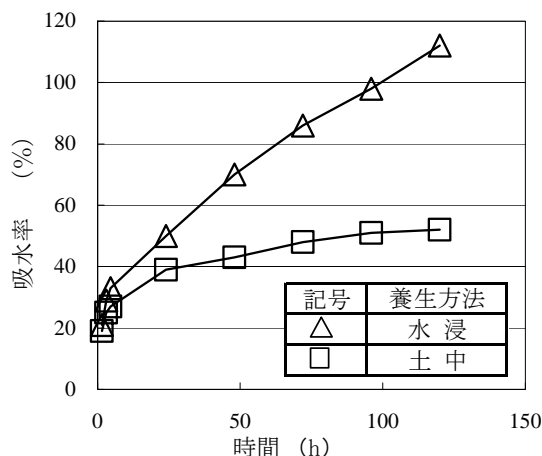


図 2 乾燥ラワン材の吸水率

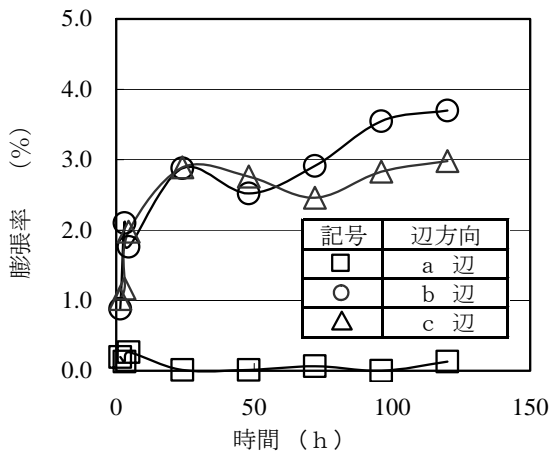


図3 乾燥ラワン材の膨張率

方向 (a 辺) の膨張率は0.1%と大変小さな値である。一方、繊維に直角方向 (b 辺と c 辺) の膨張率は2.6%、2.8%となり、膨張はおおよそ2日間で収束し、ラワン材の吸水率の結果と同様の傾向を示している。そして、ラワン材の体積膨張率は約6%であることが明らかになった。

3. 配合と試験方法

3.1 配合

本研究は泥土に添加するラワン材の割合で改良土の配合を示す。膨張後の体積が未エージング製鋼スラグの膨張後と等しくなる様なラワン材の量を製鋼スラグの質量に換算した割合 (以下、「換算スラグ率」と呼ぶ) で表し、泥土の湿潤質量に対して22%、33%、50%である (表2)。

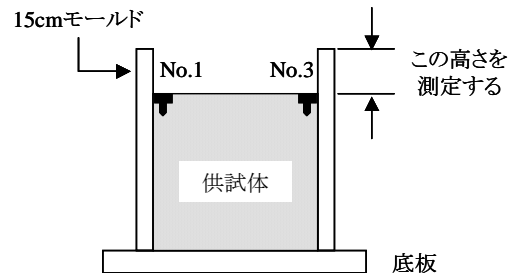
3.2 試験方法

本研究の試験方法は以下のとおりである。

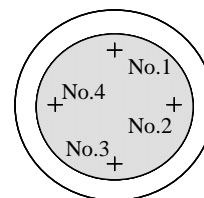
- ① 泥土の含水比を30%、40%、50%に調整する。
- ② 所定の配合になるように泥土とラワン材を計量する。
- ③ 供試体は内径15cmのモールドで、JGS 0821「安定処理土の締固めをしない供試体作製方法」に準拠し、6層に分け空隙が発生しないように成形する。
- ④ 供試体は養生しないものと、温度20℃、湿度95%の恒温恒湿室に静置し、1日および2日間養生を行う。
- ⑤ 養生期間中は供試体の膨張量を測定する。膨張量は供試体上端からモールド外縁部までの高さをノギスで4ヶ所測定する (図4)。
- ⑥ CBR試験は成形直後と養生後に行う。CBR試験は非水浸の標準方法により、JSF T721-1990に準じて行う。

表2 改良土の配合

泥土 (%)	換算スラグ率 (%)	乾燥ラワン材の質量百分率 (%)	添加材 (膨張後) の体積百分率 (%)
100	0	0	0
	22	2.4	11
	33	3.6	16
	50	5.4	25



(a) 供試体側面図



(b) 供試体平面図

図4 供試体の膨張量測定箇所

4. 結果と考察

4.1 配合とCBRの関係

図5は、乾燥ラワン材を添加した改良土の換算スラグ率と2日間養生後のCBRの関係を示している。含水比30%、40%、50%における泥土単体のCBRはそれぞれ1.8%、0.6%、0.2%であり、泥土の含水比低下に伴ってCBRの増加割合も大きくなっていることがわかる。

いずれの泥土含水比の改良土も、換算スラグ率の増加に伴いCBRが増加している。含水比50%改良土の場合、換算スラグ率33%でCBRは0.4%であり、泥土単体からのCBR増加はわずかである。一方、含水比30%改良土の場合、ラワン材の添加によるCBRの大きな増加が見られ、すべての改良土で道路路床材の基準値であるCBR3%を達成している。また、換算スラグ率10%増加によるCBRの増加量は、含水比30%、40%、50%でそれぞれ0.8%、0.3%、0.06%であり、含水比30%改良土は含水比40%改良土と比較して約2倍、50%改良土では約10倍となっており、非常に大きくなっている。これより、添加材混合前の泥土の含水比低下が改良効果に大きな影響を及ぼし、泥土の前処理の重要性を示している。

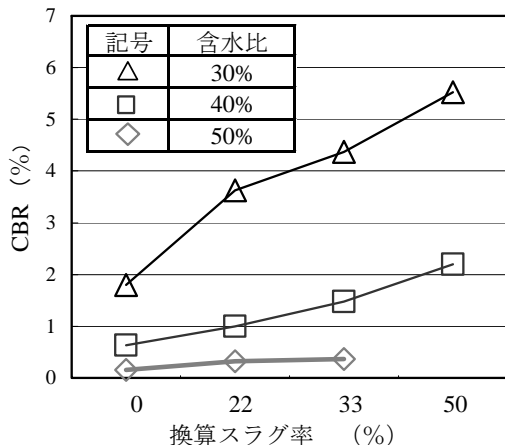


図5 換算スラグ率と CBR の関係

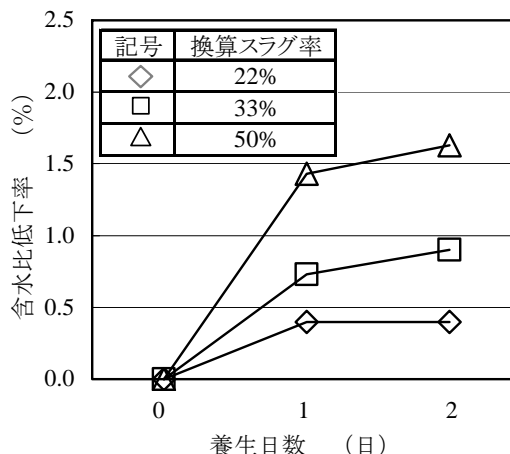


図7 養生日数と含水比低下率の関係

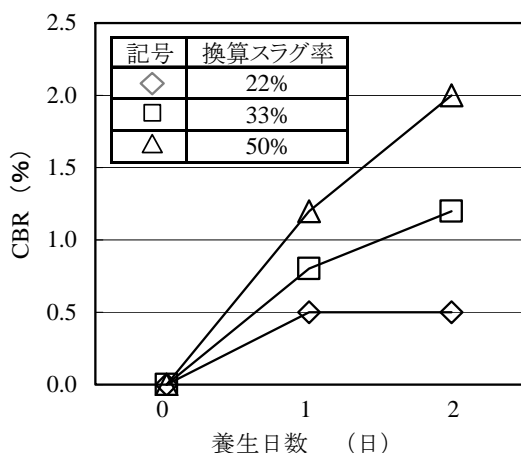


図6 養生日数と CBR の関係

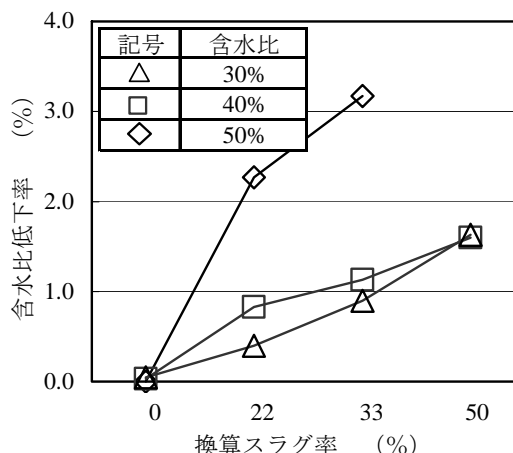


図8 換算スラグ率と含水比低下率の関係

4・2 養生日数と含水比低下率、CBR の関係

図 6、7 は、乾燥ラワン材を添加した含水比 30%改良土の養生日数と、CBR および改良土中の泥土の成形直後からの含水比低下率の関係である。

図 6 より、養生の経過に伴い CBR が増加しており、増加の割合は換算スラグ率が高いほど大きくなっている。また、養生日数 1 日から 2 日に比べ、0 日から 1 日の方が CBR の増加割合は大きくなっている。また、図 7 では養生の経過に伴う含水比低下率の増大が見られる。この含水比の低下率と CBR の増加量は同様の傾向を示しており、この含水比の低下が養生の経過に伴い CBR が増加する要因である。

図 8 は、2 日間養生後の換算スラグ率と泥土の含水比低下率の関係を示したものである。換算スラグ率が増加するに従い含水比低下率が増加することが確認できる。これは、換算スラグ率が増加することにより吸水量も大きくなり泥土の含水比が低下したものである。また、泥土の含水比の高い方が含水比低下率も大きい傾向が見ら

れる。これは、図 2 で示した水浸での吸水率と土中での吸水率との差にあらわれているように、乾燥ラワン材が存在する周辺の水分が多くなると吸水率も高くなるためである。

4・3 ラワン材の状態と体積膨張の関係

図 9、10 は、含水比 30%改良土における換算スラグ率と、体積膨張率ならびに CBR の関係を示している。ここで、図 9 の理論値は、乾燥ラワン材が 6%膨張したときに、泥土の体積が変化しないと仮定した場合の改良土供試体が膨張する率を示している。

図 9 より、乾燥ならびに飽和ラワンを添加した改良土は、いずれの換算スラグ率においても供試体に膨張がみられる。また、換算スラグ率の増加に伴い体積膨張率は大きくなっている。ほとんど膨張のない飽和ラワン材を添加した改良土の体積膨張はわずかであり、CBR の増加傾向は見られない (図 10)。一方、吸水により膨張する乾燥ラワン材を添加した改良土は、理論値と飽和ラワン

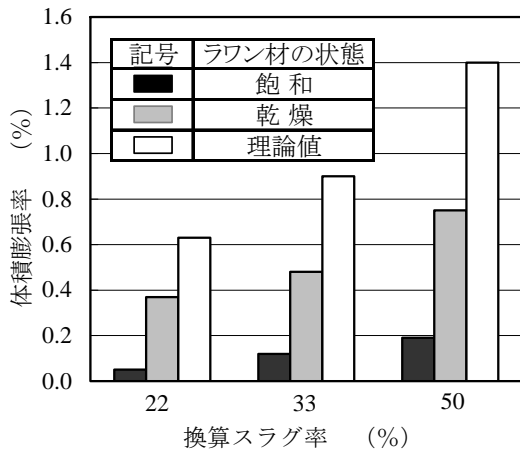


図9 換算スラグ率と体積膨張の関係

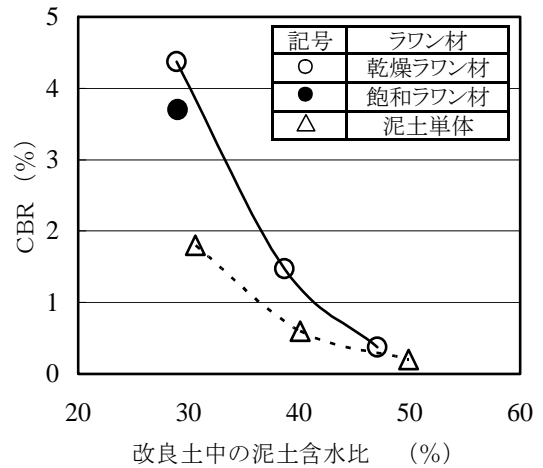


図11 泥土の含水比と CBR の関係

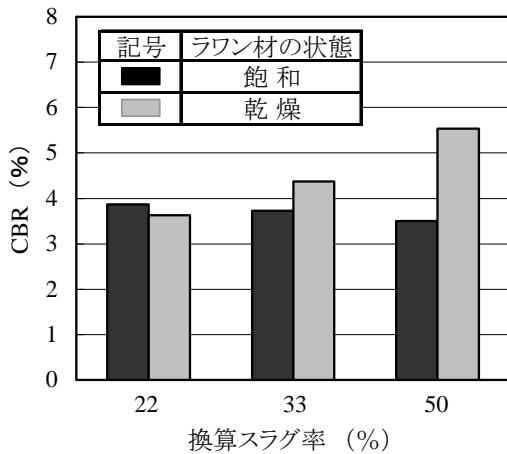


図10 換算スラグ率と CBR の関係

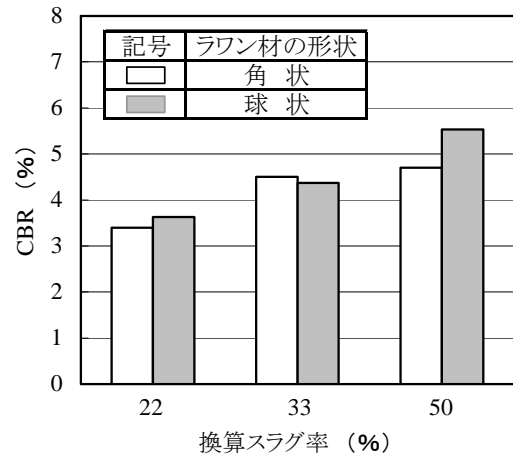


図12 換算スラグ率と CBR の関係

材の中間程度の体積膨張がみられ、CBR は換算スラグ率とともに増加している。このことは、乾燥ラワン材の膨張の一部が改良土に吸収されたことを示しており、この結果、改良土の相対密度が増加したものと考えられる。

4・4 含水比と CBR の関係

図 11 は、泥土単体と、飽和、乾燥ラワン材を換算スラグ率 33% で添加した改良土の 2 日間養生後における改良土中の泥土含水比と CBR の関係を示している。いずれの条件においても含水比の低下に伴い CBR が増加している。

泥土単体の CBR に対して、乾燥ラワン材を添加した改良土の CBR は、泥土の含水比 30% で約 2.5 倍、含水比 40、50% で約 2 倍となっている。これらの CBR の増加は、泥土の一部が乾燥ラワン材と置換されたことによる粒度改善効果、ラワン材の膨張による相対密度の増加、

およびラワン材の吸水による改良土の含水比低下によるものと考えられる。また、同じ含水比 30% の改良土において比較すると、飽和ラワン材を添加した改良土の CBR は 3.7%、乾燥ラワン材を添加した改良土の CBR は 4.4% であり、0.7% 乾燥ラワン材を添加した改良土の方が大きな CBR になる。この CBR の差は乾燥ラワン材の膨張による泥土の相対密度の増加が CBR 増加に寄与するためと考えられる。

4・5 ラワン材の形状と CBR、含水比低下率の関係

図 12、13 は含水比 30% の泥土に球状と角状ラワン材の二つの粒子形状の乾燥ラワン材を添加した改良土の換算スラグ率に対する CBR と含水比低下率の結果である。

図 12 より、22% から 50% のいずれの換算スラグ率でも球状と角状のラワン材を添加した改良土は良く似た CBR を示している。そのため今回の泥土の含水比の範囲

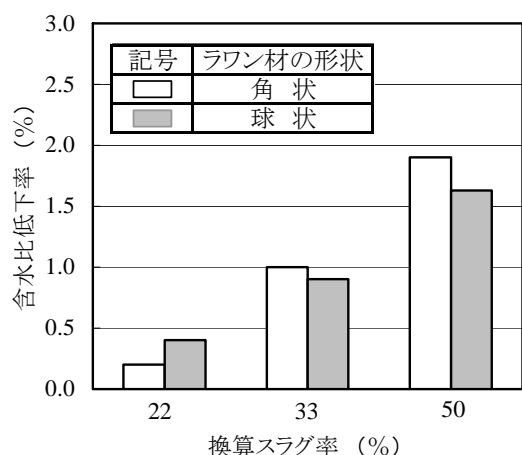


図 13 ラワン材の状態と含水比低下量の関係

(30%から 50%) では、泥土に添加する添加材の形状が CBR に与える影響は小さいと考えられる。

図 13 によると、泥土の含水比低下率は換算スラグ率が大きくなると増大するが、当然ながらラワン材の形状が含水比低下率に与える影響はほとんどないことがわかる。これがラワン材の形状に関わらず、ほぼ同様の CBR を示した原因である。

6. 結論

本報告は建設材料としての使用が困難な高含水比かつ低強度の泥土を有効利用することを目的とし、泥土に未エージング製鋼スラグを添加して土質改良材として利用する可能性を、ラワン材を代替品として用いて追究した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 未エージング製鋼スラグを添加した改良土の特性はラワン材を添加することにより概ね再現できる。
- (2) 乾燥ラワン材と未エージング製鋼スラグは膨張性を有するという点においては同じであるが、乾燥ラワン材は繊維方向の膨張はほとんど生じないため異方性を示す。
- (3) ラワン材を泥土に添加することにより、粒度改善が図られ CBR は増加する。また、換算スラグ率が高いほど CBR の増加の程度は大きい。

- (4) 改良前の泥土の含水比が改良効果に大きな影響を及ぼすため、泥土の前処理が重要である。
- (5) 乾燥ラワン材を添加した改良土は養生の経過に伴い含水比が低下して強度は増加する。
- (6) 乾燥ラワン材を添加した改良土の膨張量は理論値の約半分である。したがって、ラワン材の膨張は改良土に吸収されることにより改良土の相対密度が増加して CBR は増加する。
- (7) 未エージング製鋼スラグを泥土に混合すると、製鋼スラグの膨張によりエージング処理されたものより泥土の相対密度が増加し、わずかながら CBR は大きくなる。
- (8) 泥土の含水比が 30% の場合、換算スラグ率が 50% 以下であれば、添加材の粒子形状は CBR および含水比低下率にほとんど影響を与えない。

参考文献

- 1) 嘉門雅史：発生土の有効利用に伴う環境影響とその評価、基礎工、Vol. 32, No. 8, pp. 2～7, 2004.
- 2) 通商産業省工業技術院資源環境技術総合研究所編：身近な環境問題最前線、森北出版、p.136, 1997.
- 3) 国土交通省：平成 17 年度建設副産物実態調査結果、報道発表資料、<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/pdf/fukusanbutsu/jittaichousa/H17sensus.pdf>, 2007, 8.21 取得.
- 4) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報 (平成 17 年度実績), <http://slg.jp/bib/download/fs-100.pdf>, 2007.8.21 取得.
- 5) 財団法人沿岸開発技術研究センター：製鋼スラグの港湾工事用材料としての適用技術の研究報告書、製鋼スラグ協会、p.32, 1999.
- 6) 伊藤翔太、金子広明：製鋼スラグを混合した粘性土の強度と膨張特性に関する研究、明石工業高等専門学校平成 16 年度卒業論文、pp.1～36, 2005.