

再生材の特性を活かした利用技術の開発に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：リサイクルチーム

研究担当者：岡本誠一郎、宮本豊尚、山下洋正

【要旨】再生材の土木材料への利用では、これまで安全性評価の検討がなされてきており、利用技術の開発が求められている。そこで下水汚泥溶融スラグ並び改良土に対して利用技術を開発および安全性評価を実施した。スラグはアルカリで改質すると吸水率が向上し、ブリージング率が改善された。耐酸性についても評価したが、効果が確認できなかった。スラグを粗骨材として利用したコンクリートを暴露試験した結果、ポップアウトは確認されていない。改良土の安全性試験では、供試体の個体差が大きいため材齢と溶出量の関係は見出せなかった。

キーワード：下水汚泥溶融スラグ、コンクリート用骨材、耐酸性、改良土、安全性試験

1. はじめに

再生材の土木材料利用では、これまで安全性評価の検討がなされてきたが、物性等の品質面は通常製品の規格によることが多い。平成 18 年度に、一般廃棄物、下水汚泥等の溶融スラグ骨材について JIS 化されており、土木研究所においても「他産業リサイクル材利用技術マニュアル」が策定されたところである。再生材の利用促進のためには、更なる利用技術の開発が求められている。

本研究では安全性の確認された再生材について、その特徴を活かした利用用途を開発するとともに、試験施工の段階など実績の少ないものについて利用を促進するための技術を開発する。

2. 研究方法

2. 1 溶融スラグの特徴を活かしたコンクリート二次製品の開発

下水汚泥溶融スラグは年間 3.6 万 t (H18 年度¹⁾) 発生しているが、その多くは埋め戻し材・アスファルト用骨材・コンクリート用骨材として利用されているが、利用用途の多様化、高度化が求められている。そこで、コンクリート用骨材としての有効利用を促進するため、以下の 3 つの課題を設定し、評価を行った。

- ① 溶融スラグの改質
- ② 下水汚泥溶融スラグを使用したコンクリートの耐酸性の評価
- ③ 溶融スラグを粗骨材として利用したコンクリートの耐久性

2. 2 下水汚泥焼却灰を用いた改良土の利用技術の開発

再生材の利用に際しては、利用形態に応じた試験方法が検討されている²⁾。そこで、下水汚泥焼却灰を用いた改良土を対象に、従来の環境庁告示 46 号試験だけでなく、タンクリーチング試験を行い、時間的な溶出傾向について安全性の確認を行った。

3. 研究結果

3. 1 溶融スラグに関する実験結果

3. 1. 1 溶融スラグの改質

下水汚泥溶融スラグは一般に角が尖っており、また多くのスラグは再結晶化されておらず、ガラス質のためぬれ性が悪いと予想される³⁾。ぬれ性が悪いとコンクリートの流動性を確保するために練り混ぜに必要とされる水量が増加し、余分な水の影響で材料分離が起きやすくなることでコンクリートの品質が悪くなる。

そこで、骨材のぬれ性を改善することによりコンクリート用骨材としての性能向上について検討を行い、表乾密度と吸水率、さらにブリージングに与える影響を調査した。

(1) 改質方法

① アルカリ処理

スラグの表面をアルカリによって侵食し、表面に凹凸をつけることでぬれ性を改善することをねらった。水砕スラグを 1 mol の NaOH 水溶液中に一ヶ月間浸し、取り出して十分な洗浄を行った。

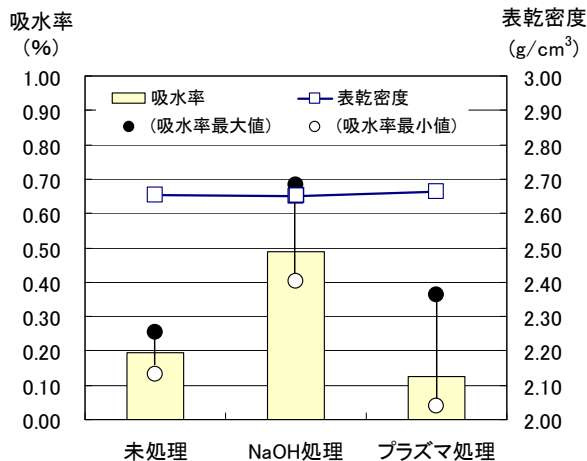


図-1 吸水率、表乾密度への改質の影響

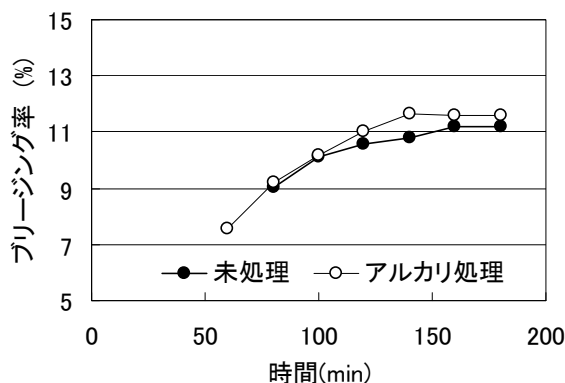


図-2 ブリージングへの改質の影響

② プラズマ処理

活性化されたプラズマ粒子には「表面を清浄・脱脂」、「表面を粗す」、「表面を活性化」の3種類の作用があり、ぬれ性の改善に効果が期待できる。スラグを数十g毎に小分けし、キーエンス社製プラズマ照射器 ST-7000 を使用してプラズマ改質を行った。照射時間は各 15 秒×3 回とし、絶縁体容器中で試料を攪拌しながら照射した。

(2) 表乾密度および吸水率への影響

アルカリ処理・プラズマ処理を施した改質スラグと未処理のスラグについて、20℃の実験室で JIS A 1109 に従い表乾密度および吸水率試験を行った。その結果を図-1 に示す。

表乾密度はいずれも約 2.65g/cm³ であり、改質処理の影響は現れなかった。なお、表乾密度に関するコンクリート用及び道路用骨材の JIS 規格では、2.45 g/cm³ 以上であり、これを満足する結果となっている。

吸水率は、未処理のものでは 0.20% 程度であった。アルカリ処理を行ったものは 0.50% 程度となり吸水率が上昇している。これはアルカリ処理によりぬれ性が改善した影響が考えられる。一方プラズマ処理をしたものは吸水率には大きな変化が見られず、プラズマ処理がぬれ性に与える影響は小さいと考えられる。なお、いずれのスラグも JIS に規定されている吸水率の 3.0% 以下を満足していた。

(3) ブリージングへの影響

(2) で効果の確認されたアルカリ処理を行った

スラグと未処理のスラグを用い、モルタルを作成してブリージングについて評価を行った。配合の割合を表-1 に示す。作成したモルタルを3つのプラスチック容器に三等分し、50回打接を行った。ブリージングの測定は打接後60分後から180分後まで行った。図-2 に、モルタルの平均ブリージング率を示す。アルカリ改質によるブリージング率への影響は不明確であった。

3. 1. 2 下水汚泥溶融スラグ微粉末を使用したコンクリートの耐酸性の評価

新田ら⁴⁾は、溶融スラグを用いた耐酸性コンクリートを開発している。このコンクリートは通常のセメントを全く用いず、強度は普通コンクリートと同程度、耐酸性・耐薬品性にすぐれている。

そこで通常のコンクリートに対し、溶融スラグ骨材セメント代替および細骨材代替として溶融スラグ微粉末・溶融スラグ細骨材を利用し、その耐酸性について評価を行った。配合表を表-2 に、材例と強度の関係を図-3、質量変化との関係を図-4、浸透深さとの関係を図-5 に示す。

(1) セメント代替

下水汚泥溶融スラグ微粉末をセメントに対して 50% 使用した。下水汚泥溶融スラグ微粉末をセメント代替として用いた場合には、セメント単味と比較して、強度発現が著しく低下する。また、本試験の範囲では、セメント代替として下水汚泥溶融スラグ微粉末を用いた場合の耐硫酸性の改善効果は、硫酸浸漬に伴う質量減少が小さいものの、浸透深さが大きく、不明瞭であった。

表-1 モルタルの配合

単位g		
水	セメント	スラグ
120	240	420

表-2 モルタルの配合

配合番号	水粉体比 (wt.%)	水セメント比 (wt.%)	単位量(kg/m ³)					
			水	セメント	スラグ微粉末	高炉スラグ微粉末	陸砂	スラグ細骨材
0-0(基準配合①)	55	55	273	495	—	—	1484	—
A-0	57	111	273	247	230	—	1484	—
0-A	41	55	273	495	167	—	1336	—
C-0(基準配合②)	55	184	270	147	—	343	1470	—
C-a	55	184	270	147	—	343	—	1640

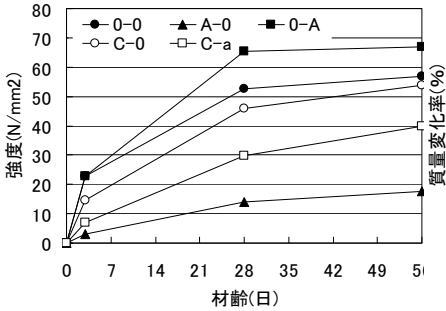


図-3 材齢と強度

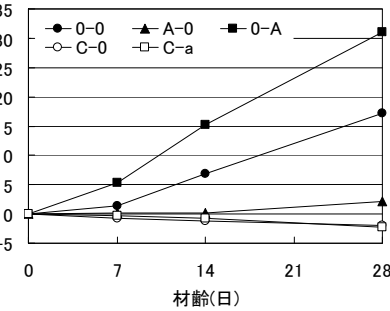


図-4 材齢と質量減少

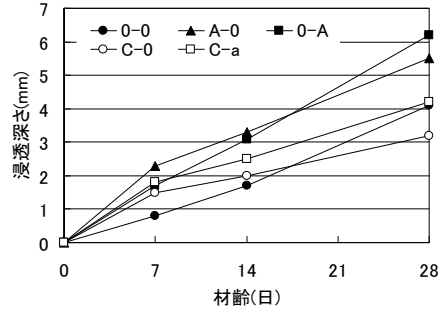


図-5 材齢と浸透深さ

(2) 細骨材代替

下水汚泥溶融スラグ微粉末を細骨材代替として10%用いた場合には、細骨材(陸砂)単味と比較して、強度発現が大きい。一方、耐硫酸性の改善効果は、セメント単味と比較して質量減少および浸透深さともに大きいことから期待できない。下水汚泥溶融スラグ細骨材を用いた場合には、天然細骨材と比較して、強度発現が著しく低下していた。耐硫酸性の改善効果は、天然細骨材と比較して同等または若干劣る程度であった。

3. 1. 3 溶融スラグを粗骨材として利用したコンクリートの耐久性

溶融スラグの粗骨材利用を検討するために下水汚泥溶融処理検討プロジェクトにおいて2006年秋まで暴露試験が行われた⁵⁾。5年間の暴露試験後の供試体を譲り受け、暖地で暴露していた供試体は2008年4月よりつくば市内で、寒冷地で暴露していた供試体は2008年7月より北海道千歳市美々で暴露試験を再開している。供試体は10cm×10cm×10cmの立方体である。暴露試験による供試体の劣化を確認するため、目視での表面観察の他、質量測定、超音波パルス伝播速度試験を再暴露前および2008年10月に行った。暴露試験の様子を図-6に示す。

(1) 表面観察

川上らは下水汚泥溶融スラグを粗骨材として利用したコンクリート供試体の一部で試験開始4年後にポップアウトが発生したと報告している⁶⁾。しかし本供試体においては、5年間の暴露試験中、再暴露



(1) 標準状態



(2) 暖地屋外



(3) 寒地屋外

図-6 暴露試験の様子

表-3 超音波伝達速度 単位 km/s

	標準状態	暖地屋内	暖地屋外	寒地屋外
再暴露前	4.6	4.2	4.3	4.4
2008年10月	4.3	4.1	4.1	4.5

前および暴露開始半年後に供試体を観察したところ、いずれのコンクリート供試体にもポップアウトを確認することはできなかった。

(2) 質量変化

半年間の暴露試験の結果、わずかではあるが水中および屋外の供試体は質量が増加しており、屋内にいたものは質量が減少していた。これは、再暴露まで屋内で約半年近く保管されていたため供試体が乾燥しており、水中および屋外では水分を吸収したことによる影響と考えられる。

(3) 超音波パルス伝達速度変化

超音波速度測定装置(東横エルメス社製 エルソニック)を使用し、向かい合う面の中心間の超音波伝達速度を測定した。各暴露環境下における全供試体の測定結果の平均値を表-3に示す。

文献値⁷⁾と比較するといずれもコンクリートの品質としては優~良に相当し、品質には問題がないといえるが、暖地屋内、暖地屋外の値が小さくなっている。これは乾燥による含水率の低下が影響していると考えられる。また、石灰系のスラグを用いたコンクリートでは、相対的に伝達速度が遅くなっている傾向にあった。

3. 2 改良土に関する実験結果

改良土の長期溶出傾向を把握するために、セメント及びセメント系固化材を使用した改良土の六価クロム溶出試験実施要領(案)⁸⁾に示す方法に準じて、タンクリーチング試験を行った。このとき、締め固め後の材齢による溶出傾向と溶液の pH の違いによる溶出傾向の違いを調査した。試験に用いた供試体は表-4に示す形状である。

(1) 材齢依存性試験(試験1)

材齢が3日、10日、17日、28日、90日、180日の供試体に対して、有姿のまま固液比が1:10となるように溶媒として純水を加えて静置した。28日後の溶出液を採取した。供試体からの重金属溶出量は微量であり、すべての材齢において、水質汚濁に係る環境基準に定められた人の健康の保護に関する環境基準値⁹⁾を下回っている。なお、使用した改良土は

表-4 供試体形状

	形状	直径 (cm)	高さ (cm)	重量 (g)	含水率 (%)	養生期間 (日)
試験1	円筒形	10	20	約1600		3/10/17/28/90/180
試験2	円筒形	5	10	351.86	23.7	22
	粒状	-	-	388.11	22.7	-

既往の研究から土壤環境基準を満足している。供試体の個体差が大きいことから、材齢による溶出傾向は不明瞭であった。

(2) 溶出量の時系列変化(試験2)

十分に養生を行ったA市、B市の二種類の改良土供試体を用い、pHおよび溶出量の時系列変化を調査した。いずれの改良土も土壤環境基準を満足している。pHの時系列変化を図-7に示す。48時間で溶出が確認された金属類はAl, Ca, K, Na, B, V, Cr, Ni, Cu, Zn, Mo, Baであった。両市の下水処理方式の違いによる焼却灰の性質の違いや地質の違いにより、pHや溶出金属類の傾向が異なっている。溶出初期においては pH と Ca²⁺イオンの高い相関が確認される(図-8)。

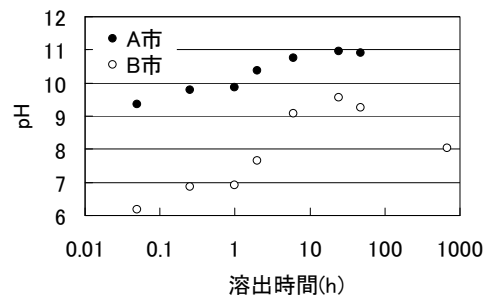


図-7 pHの時系列変化

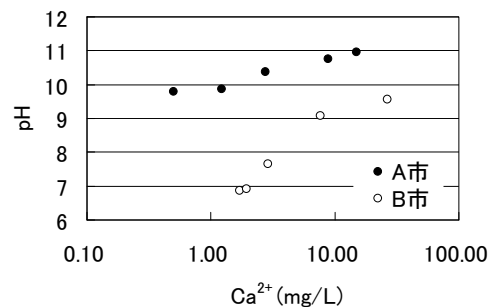


図-8 pHとCa²⁺の関係

表-5 pHと電気伝導度(B市)

	48時間後	28日後
pH	9.25	8.03
電気伝導度 (μS/cm)	182	958

A市の改良土には焼却灰のほかに助剤として加えられている生石灰が影響し、pHが11まで上昇したと予想される。その後は、別途行った実験によると水浸後57日目でpHは9程度を示していた。これは空気中の二酸化炭素が溶液中に溶解したことが主たる要因として考えられる。

B市の改良土は土壌改良剤として焼却灰のみが使用されており、pHの上昇は水浸24時間後にpH=10で止まっている。一方で電気伝導度は増加しており(表-5)、水酸化物イオンが平衡に達した後も総イオンではまだ平衡に達していないことが予想される。

4. まとめ

本研究から、以下の事象が明らかとなった。

(1) 溶融スラグの特徴を活かしたコンクリート二次製品の開発

- 1) スラグのぬれ性を改善するため、アルカリ処理及びプラズマ処理で改質を試みた結果、アルカリ処理では吸水率が改善した。しかし、ブリージング率への影響は不明確であった。
- 2) 耐酸性を期待してスラグの微粉末及び細骨材をセメント及び細骨材代替として使用したが、強度や浸透深さから効果を確認できなかった。
- 3) スラグを粗骨材として利用したコンクリート供試体の暴露試験を行った結果、ポップアウトは確認されなかった。超音波パルス伝達速度から、コンクリートの品質は優～良であった。今後も継続的な調査を行っていく予定である。

(2) 下水汚泥焼却灰を用いた改良土の利用技術の開発

- 1) 改良土からの溶出量は微量であり、土壌環境基準を満足していた。溶出は供試体の個体差が大きいことから、材齢による溶出傾向は不明瞭であった。
- 2) 下水処理方式の違いによる焼却灰の性質の違いや地質の違いにより、pHや溶出金属類の傾向が異なっている。また、溶出は時間に依存しており、時間溶出初期においてはpHとCa²⁺イオンの高い相関が確認された。いずれの供試体でも環境安全性を確認できた。

参考文献

- 1) (社)日本下水道協会：「平成18年度下水道統計」、2008

- 2) 肴倉宏史、大迫政浩：「建設系再生製品を対象とした環境安全性評価試験システムの廃棄物学会規格化への取り組み」、廃棄物学会誌、Vol. 18、No. 6、pp.321-329、2007
- 3) 石井淑夫、小石真純、角田光雄：「ぬれ技術ハンドブック」、pp.471-479、2005
- 4) 新田智博、杉山武、石田泰之、石森正樹：「下水溶融スラグを用いた耐酸性コンクリートの諸物性」、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.2、pp.1249-1254、2000
- 5) 宮本豊尚、尾崎正明、岡本誠一郎：「下水汚泥溶融スラグを粗骨材に用いたコンクリートの長期暴露試験」、第45回下水道研究発表会講演集、pp.476-478、2008
- 6) 川上勝弥、依田彰彦、横室隆、吉崎芳郎：「溶融スラグ骨材を用いたコンクリートの長期性状」、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.103-108、2005
- 7) (社)日本材料学会：建設材料実験、pp.228-232、平成15年第3版
- 8) 平成13年4月20日付 国土交通省大臣官房技術審議官通達：「セメント及びセメント系固化材を使用した改良土の六価クロム溶出試験実施要領(案)」
- 9) 昭和46年12月28日 環境庁告示第59号：「水質汚濁に係る環境基準について」

Study to develop utilization technology that preserves the characteristics of recycled materials

Abstract: To support the application of recycled materials to public works, the environmental safety of such use has been studied, but the needed technologies and systems must now be studied. Through this study, we developed new utilization technologies for sewage sludge melt-solidified slag and improved soil using sewage sludge ash. Saturating slag with alkali has improved its water absorption and bleeding ratio. The acid resistance of mortar pieces contained slag or slag powder has been assessed, but the effects are unconfirmed. The concrete test pieces with slag as their coarse aggregate are now undergoing an exposure test. At this time, they have still not popped out. The results of safety testing of the improved soil have not clarified the effect of material age.

Key words: sewage sludge melt-solidified slag, aggregate, acid resistance, improved soil, safety test