Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-09

地盤工学分野における砕石副産物の有効利用に関する検討

鈴木, 麻里子
松家, 武樹
井上, 一哉

(Citation)
地盤工学会誌,69(4):13-16

(Issue Date)
2021-04

(Resource Type)
journal article

(Version)
Accepted Manuscript

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100476468

地盤工学会誌
公益社団法人 地盤工学会
報告

地盤工学分野における砕石副産物の有効利用に関する検討

Effective utilization of crushed stone by-products in the field of geotechnical engineering

鈴木　麻里子（すずき　まりこ）　神戸大学大学院農学研究科　助教
e-mail: msuzuki@peridot.kobe-u.ac.jp
松家　武樹（まつか　たけじゅ）　熊本高等専門学校　准教授
井上　一哉（いのうえ　かずや）　神戸大学大学院農学研究科　准教授

キーワード：砕石副産物，砕石脱水ケーキ，地盤材料，物理特性，力学特性

1. はじめに

コンクリート骨材や路盤材を製造する際，砕石工場からは，副産物として‘砕石粉’や‘砕石脱水ケーキ’が排出される。砕石副産物は，原石の約 10%，砕石生産量の約 2%，年間約 3,000 万 t 発生すると報告されている[1),2)]。砕石副産物の内訳は，全体の 3 分の 1 程度が砕石粉であり，残りの大部分は砕石脱水ケーキである。砕石は，コンクリート分野と密接な関係があるため，砕石粉はコンクリート用混和材として JIS A 5041 に規格化されている。一方，砕石脱水ケーキは，セメントやスラグなどを添加し造粒物として再利用する方法[3)]や，砕石脱水ケーキをコンクリート用混和材として利用する研究[4)]が存在する。しかしながら，砕石副産物の有用性や市場性の低さから，大部分が埋め立て廃棄されている状況である。現状のままでは，埋め立て処分場の逼迫や砕石副産物の処理費問題が懸念されるため，砕石副産物の再利用は喫緊の課題である。

このような砕石副産物を取り巻く環境は，これまでコンクリート用材料として再利用を目指した結果であり，特に水分を多く含有する砕石脱水ケーキの再利用は一般化されなかったと推察される。しかしながら，砕石，砕砂は，地盤材料として使用されることも多い。ゆえに，地盤工学分野は砕石副産物発生の一端を担っていると言える。また，砕石副産物は天然の岩石由来であり，安定的かつ一定品質で副産される点は，地盤材料として大きなアドバンテージになることが考えられる。よって，著者らは，砕石副産物の地盤材料への利用可能性を明らかにすることは重要であると考えた。砕石副産物の地盤材料への利用には，地盤工学分野の観点から砕石脱水ケーキの物理，力学特性を明らかにし，従来の地盤材料に対する管理規準や評価方法との関係を明確にしておくことが必要である。

本稿では，砕石副産物の大部分を占める砕石脱水ケーキに着目し，基本的な物理特性や含水比変化に伴う力学特性を明らかにするとともに，土工用粘性土などとの比較結果を報告する。なお，本報文の一部はすでに発表済みである[5)]。

2. 砕石脱水ケーキの諸特性

2.1 概要

本研究で対象とした砕石脱水ケーキは，近畿地方に広く分布し，堆積岩に分類される硬質砂岩から成る。砕石脱水ケーキは，砕砂製造時の洗い工程で発生する濁水（砕石スラッジ）に凝集剤を加え，0.7 MPa で 60 分間フィルタープレスにて脱水され排出される。図-1 に砕石脱水ケーキの外観を示す。性質は，非常に粘性が高く，ハンドリング性に乏しい。

2.2 基本的性質

砕石脱水ケーキの物理特性を明らかにするために，土粒子密度試験（JIS A 1202），含水比測定（JIS A 1203），

図－1　砕石脱水ケーキ

表－1　物理試験結果

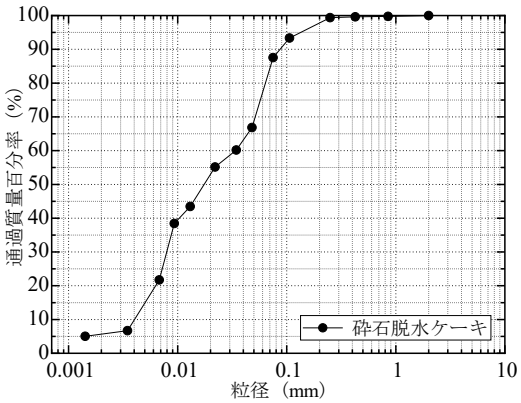
	W_L (%)	W_P (%)	I_P	IL(%)	pH	ρ_s (g/cm^3)	grain size	W_0 (%)	W_{opt}(%)	k (cm/s)
砕石脱水ケーキ	44.3	21.1	23.2	8.0	8.2	2.71	100 μm (95%)	24.8	19.7	7.1×10^{-8}
カオリン	53.7	44.2	9.5	-	4.0	2.63	5 μm (99%)	-	30.1	-
笠岡粘土	63.3	45.6	17.7	5.5	8.0	2.45	250 μm (95%)	-	26.9	-

W_L: 液性限界，W_P: 塑性限界，I_P: 塑性指数，IL: 強熱減量，ρ_s: 土粒子密度，W_0: 自然含水比，W_{opt}: 最適含水比，k : 透水係数

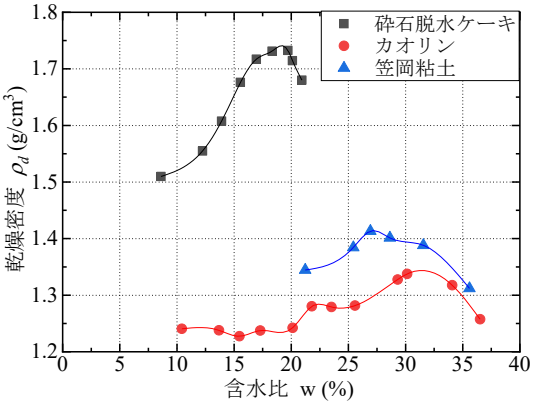
粒度試験（JIS A 1204），液性塑性限界試験（JIS A 1205），強熱減量試験（JIS A 1226），pH 測定（JGS 0211）を実施した。砕石脱水ケーキの物理特性を表-1，粒径加積曲線を図-2 に示す。なお，比較のために実施したカオリン，笠岡粘土の物性値も併せて同図表に示す。

塑性指数は，高いほど吸水による強度低下が著しいと言われており，路盤材などの良否を判定する重要な要素となっている。砕石脱水ケーキの塑性指数は 23.2 と比較的大きな値を示した。塑性図による分類では，低圧縮性粘土（CL）に分類されることが明らかとなった。JIS A 1218 に則り実施した変水位透水試験より，砕石脱水ケーキの透水係数は，7.1×10^{-8} cm/s であることが分かった。また，粒径加積曲線より，砕石脱水ケーキの粒径は細粒分で構成され，D_{10} が 0.004 mm，D_{30} が 0.008 mm，D_{50} が 0.017 mm，D_{60} が 0.038 mm であった。

砕石脱水ケーキの pH 値は 8.2 であり，厚生労働省が定めた水道水質基準 5.8 以上 8.6 以下 [6]に含まれ，添加された凝集剤の影響はないことが明らかとなった。



図－2　砕石脱水ケーキの粒径加積曲線



図－3　砕石脱水ケーキと粘性土の締固め曲線比較

2.3 締固め特性

盛土等の土構造物の施工では，密度と含水比の関係を把握しておくことが重要である。よって砕石脱水ケーキの含水比と乾燥密度関係を明らかにするために，突固めによる土の締固め試験（JIS A 1210）を実施した。締固め試験結果（図-3）より，砕石脱水ケーキの最大乾燥密度は，1.73 g/cm^3，最適含水比は 19.7%であった。砕石脱水ケーキの外観は粘性土に類似していたが，締固め特性はカオリンや笠岡粘土と大きく異なることが明らかとなった。一般的に，砂質分を多く含む土の締固め曲線の傾斜は急で，かつ最適含水比は低い傾向にある。一方，粘土やシルト質ロームなどでは，含水比が変化しても締固め効果に顕著な差が見られず，平坦な締固め曲線になる [7]。砕石脱水ケーキの締固め曲線は，カオリンや笠岡粘土に比べ，最適含水比が低く，ピークを持った曲線であり，砂質土に近い特徴を有していた。砕石脱水ケーキは，人工的に粉砕された岩石由来の細粒分の集合体である。ゆえに，一般的な薄片状の粘土鉱物の粒子とは異なる挙動を示したと考えられる。

3. 砕石脱水ケーキの力学的性質

3.1 一軸圧縮試験

砕石脱水ケーキが転圧機やダンプトラックなど重機の走行に耐えうる強度を有しているかを明らかにするために一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮供試体は直径 50 mm，高さ 100 mm の円筒モールドを用い，突固めによる土の締固め試験（JIS A 1210）と同様の締固めエネルギー（550 kJ/m^2）となるように 1.5 kg ランマーで突固めて作製した。

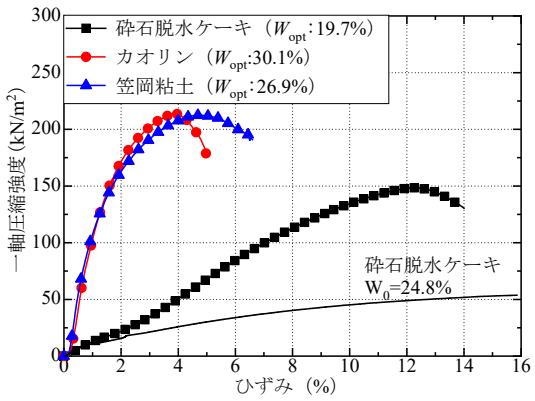
最適含水比で作製された砕石脱水ケーキとカオリン，笠岡粘土との一軸圧縮強度の比較を図-4 に示す。カオリンと笠岡粘土の応力ひずみ曲線は同等であったが，最も含水比が小さいにもかかわらず砕石脱水ケーキの応力ひずみ曲線の挙動は大きく異なっていた。各供試体の変形係数（E50）を比較すると，砕石脱水ケーキの変形係数は 1.38 MN/m^2，カオリンの変形係数は 10.3 MN/m^2，笠岡粘土の変形係数は 10.7 MN/m^2 であった。カオリンや笠岡粘土と比較し，砕石脱水ケーキの変形係数は著しく小さいことが明らかとなった。

一軸圧縮強度と含水比の関係を図-5 に示す。カオリンの最適含水比は 30.1%，笠岡粘土の最適含水比は 26.9%であり，一軸圧縮強度の最大値は，最適含水比のやや乾燥側で生じたことから，一般的な締固めた土の力学的性質と一致する。しかしながら，砕石脱水ケーキの含水比と一軸圧縮強度の関係は，最適含水比よりも乾燥側になればなるほど，強度が増加する特異な傾向を示した。同時に，砕石脱水ケーキの一軸圧縮強度は，含水比の変化に敏感であり，取り扱いの難しさが露呈された。この現象は，添加された凝集剤の影響に起因すると考えられる。以上より，砕石脱水ケーキは，最適含水比，最大乾燥密度で最も大きな強度が発現せず，一般的な土質材料の締固め特性に基づいて定められた施工管理基準で取り扱えない可能性が示唆された。

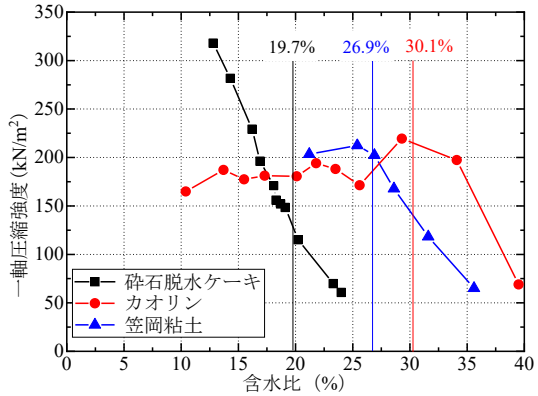
3.2 三軸圧縮試験

地盤材料として砕石脱水ケーキを使用するためには，自然状態での強さを正確に把握することは必要不可欠であるため，砕石脱水ケーキに対し三軸圧縮試験（CUbar）を実施した。供試体は一軸圧縮試験で使用したものと同様の寸法のモールドを用い，締固め度 95%となるように突き固めた。一般的に，三軸圧縮試験で使用する供試体は飽和後，間隙圧係数（B 値）は 0.95 以上（軟らかい粘性土は 0.9 程度）と規定されている。しかしながら，本稿で対象としている砕石脱水ケーキは，長期間の通水や二重負圧法を実施しても，B 値が 0.8 程度までしか上昇せず，完璧な飽和状態とはならなかった。

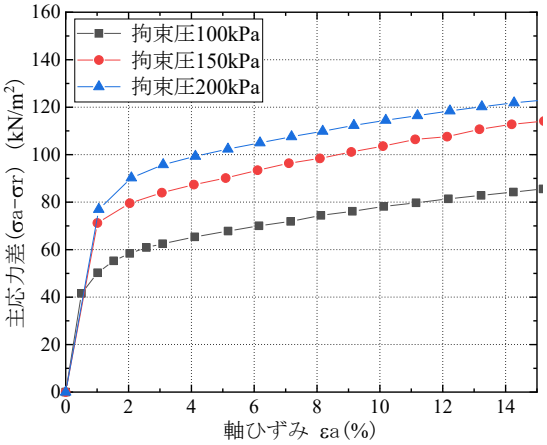
軸差応力-軸ひずみ曲線を図-6 に，モールの応力円を図-7 に示す。砕石脱水ケーキの軸差応力挙動は，拘束



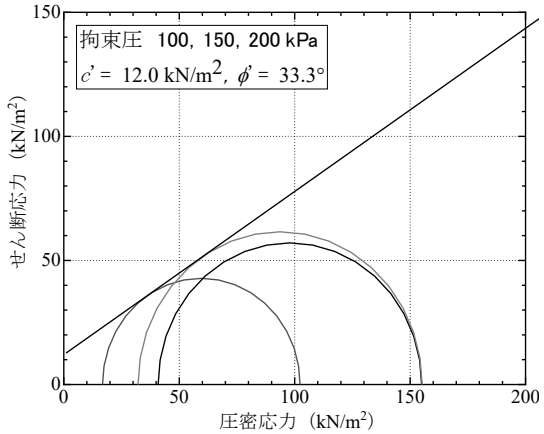
図−4　砕石脱水ケーキと粘性土の一軸圧縮強度比較



図−5　一軸圧縮強度と含水比の関係



図−6　軸差応力と軸ひずみの関係



図−7　モールの応力円

圧に依らずせん断開始後軸ひずみ 1.0%付近から増加傾向は緩やかになり，明確な最大値が現れなかった。モールの応力円より，砕石脱水ケーキの強度定数は，$c' = 12.0$ kN/m^2，$\phi' = 33.3°$ であることが明らかとなった。一般的に 75 μm 以下の微粒分を 50%以上含む粘性土は，せん断強度の大半を粘着力が占め，粒子の摩擦による抵抗力は小さい。しかしながら，砕石脱水ケーキは砕石から削り出された石粉であるため，角ばった形状をしている。ゆえに，大きなせん断抵抗角を示し，砂と類似した強度定数を示したと考えられる。

4. 適用先の検討と今後の課題

砕石脱水ケーキを廃棄物ではなく，大切な資源と捉え，新たな活用を見出すために，各種実験を実施した。本実験から得られた砕石脱水ケーキの基本的性質や力学的性質を以下にまとめる。

①塑性指数が大きく，塑性図による分類では低圧縮性粘土（CL）に分類される。

②透水係数は 7.1×10^{-8} cm/s と非常に小さい。

③締固め特性は砂質土に近い特徴を有する。

④一軸圧縮強度は，最適含水比付近で最大を示さず，乾燥すればするほど大きな強度を発現する。

⑤強度定数は $c' = 12.0$ kN/m^2，$\phi' = 33.3°$ であり，砂に近いせん断抵抗角を有する。

排水が必要な農地や道路盛土では，透水係数の大きな土質材料が必要とされる。一方，最終処分場の遮水工に使用するのであれば，1.0×10^{-8} cm/s の粘土層を敷設する必要があり [8]，ため池遮水材に使用するのであれば室内試験値で 5.0×10^{-6} cm/s の透水係数が必要となる [9]。砕石脱水ケーキが有する低い透水性は，遮水材として利用できる可能性が示された。

砕石脱水ケーキの強度定数（c'，ϕ'）は，過去の施工例から実際にため池遮水材料として使用した低圧縮性粘土のせん断特性 [9]，c_{sat} =13 kN/m^2，ϕ= 28±2° と比較したところ大差ない。しかしながら，砕石脱水ケーキは，初期含水比が高く，大部分が細粒分で構成されているため，副産された状態のままではトラフィカビリティの確保が困難であり，粘性の高さから施工性の悪さも懸念される。

今後は，初期含水比の低下や施工性の改善を目指し，砕石工場内で発生する砕砂，スクリーニングス（砕石ダスト）や，もう一つの砕石副産物である砕石粉などを添加することで砕石脱水ケーキの諸特性がどのように変化するかを明らかにする。また，砕石業者の現状や要望，社会のニーズを把握したうえで，地盤工学分野から持続可能な社会の形成に向けた取り組みを継続していきたい。

謝辞

本研究は，科研費若手研究（課題番号：20K15622）および令和元年度一般社団法人日本砕石協会助成金の助成を受けて実施した。また，本研究を実施するにあたり，中央砕石株式会社の松下晴彦氏，神戸大学大学院農学研究科博士課程前期課程学生の齊藤裕仁君に多大なる協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

1) 佐藤道生，佐伯竜彦，井下一郎(2002)：湿式にて捕集した砕石スラッジの混和材としての特性，コンクリート工学年次論文集，24(1)，1335-1340.
2) 本居貴利，片山一司，中原信幸，田村隆弘（2015）：湿式砕石粉を添加したコンクリートの性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，37(1)，1909-1914.
3) 竹下祐二，宇城　真，尾島勇次，成田　豊，田村二郎（2002）：水砕スラグ微粉により安定処理した砕石スラッジの地盤工学特性，土と基礎，51(4)，26-28.
4) 佐藤道生，佐伯竜彦，井下一郎（2002）：湿式にて捕集した砕石スラッジの混和材としての特性，コンクリート工学年次論文集，24(1)，1335-1340.
5) 鈴木麻里子，齊藤裕仁，松家武樹，松下晴彦，井上一哉（2020）：砕石脱水ケーキの物理特性と力学挙動に関する一考察，農業農村工学会論文集，88(2)，I_179-I_184.
6) 厚生労働省，水質基準項目と基準値（51 項目），入手先＜https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/kijunchi.html＞（参照 2019.12.19）
7) 河上房義（2007）：土質力学，森北出版 pp.222-223.
8) 日本道路協会（1986）：道路土工　土質調査指針，p. 276.
9) 農林水産省農村振興局整備部（2015）：土地改良事業設計指針「ため池整備」.

（原稿受理　）