繰返し利用したセメント安定処理土の力学特性と再利用の可能性[†]

藤川 拓朗* 佐藤 研一**

Mechanical Properties and Possibility of the Repetitive Use of Cement Stabilized Soil

by

Takuro FUJIKAWA* and Kenichi SATO**

Due to the wide spread of soft soil in Japan, different cement stabilization methods have been used to improve the soil property. Recently, the waste disposed by many industrial plants has been utilized effectively by cement stabilized method. The typical example is the utilization of disposed coal ash by thermal power plants. Currently, effective utilization of coal ash depends on cement raw materials. Under the situation of public work projects declines, it has led to the decreasing demand for cement. The cement stabilized soil will be excavated for construction work in future and reused. The excavated cement stabilized soil is usually resulted from road maintenance and repair of lifeline such as water and gas pipes. However, the excavated cement stabilized soils have been disposed due to the unknown characteristics of these materials. Therefore, studies on excavated cement stabilized soil should be carried out in order to encourage the recycling-oriented society. Correspondingly, this study deals with recycling and reusing of cement stabilized soil and/or cement stabilized soil mixed with coal fly ash, and examining the effect of reusing of cement stabilized soil on strength characteristics. The results of this study show the possibility of reusing of cement stabilized soils as alternative construction material.

Key words : Coal fly ash, Cement stabilization, Reuse, Unconfined compression test, Direct box shear test

1 緒 言

軟弱地盤の多い我が国では、土質改良を目的として、セメントや石灰等により安定処理された地盤が多数存在している。また、近年では他産業で排出される副産物がセメント安定処理により有効利用されており、その代表的な例として石炭灰を用いた石炭灰混合材料¹⁾が挙げられる。これらのセメント安定処理土（石炭灰混合材料を含む）は、多くの土木工事や港湾工事において利用されているが、供用期間終了や数十年後にライフライン等の維持修繕に伴い掘削（解砕）されるといった例も少なくない。現況として、これら解砕されたセメント安定処理土（以後、解砕処理土）は、再利用が想定されておらず、廃棄物として処分されている。

今後、我が国が循環型社会の形成に向けて取り組んでいくにあたり、このような解砕処理土を循環資源として上手に取り扱っていく必要がある。解砕処理土を有効利用していく上での課題として、力学特性や耐久性等の地盤工学的な面からの有用性と、環境安全性に配慮するための性質を有することが挙げられる。

本研究は、セメント安定処理土の循環利用（繰返し利用）を上述した2つの面から確立することを目標としており、本論文においては、解砕処理土の性状が再利用、再々利用時に与える影響と再利用の可能性について、力学特性の観点から検討した結果について報告する。

2 実 験

2・1 実験試料および供試体作製方法

実験試料にはカオリン粘土および仮設道路の供用期間終了後に掘削されたセメント安定処理土を使用した。なお、この掘削処理土は、性状およびコーン指数より泥土に土質区分²⁾される。また、混合試料として石炭灰（フライアッシュⅡ種）、固化材には高炉セメントB種を用いた。カオリン粘土、泥土および石炭灰の物理特性値をTable 1に示す。

供試体の作製は、カオリン粘土および泥土の含水比を $w = 25\%$ に調整し、固化材および石炭灰の添加量を土の湿潤質量に対して外割り配合で添加させた。その後、これらの攪拌をホバートミキサーで10分間行い、鋳鉄製のモールド（直径 $\phi = 5\text{cm}$ 、高さ $h = 10\text{cm}$ ）を用いて、突固め層数が3層となるように試料をモールドに入れ、ランマー（質量 1.5kg 、落下高さ $h = 20\text{cm}$ ）で突固め回数を

Table 1 Physical and chemical property of samples.

Sample	Kaolin clay	Mud	Coal ash
ρ_s (g/cm^3)	2.731	2.609	2.357
w_n (%)	0	24.6	0
w_L (%)	51.7	42.2	N.P.
w_P (%)	34.3	17.9	N.P.
F_c (%)	100	56.6	99.7
Ig-loss (%)	3.11	5.66	5.83

[†] 原稿受理 平成25年5月10日 Received May 10, 2013 ©2014 The Society of Materials Science, Japan

* 福岡大学工学部 〒814-0180 福岡市城南区七隈, Dept. Civil. Eng., Fukuoka Univ., Jonan-ku, Fukuoka, 814-0180

** 正 会 員 福岡大学工学部 〒814-0180 福岡市城南区七隈, Dept. Civil. Eng., Fukuoka Univ., Jonan-ku, Fukuoka, 814-0180

12 回としてセメント安定処理土を作製した (JIS A 1210). なお突固め回数は, 突固めエネルギー $E_c \approx 550$ (kJ/m³) となるように調整している. 供試体作製後, 供試体をラップで密封し 20°C 一定の恒温室内で所定期間, 空气中養生させたものを Fig. 1 に示す回転式破碎混合混練機³⁾を用いて破碎した. この破碎機は, 回転数とチェーンの本数を設定することで, 任意の粒径が作製可能である. なお, 本研究で作製した破碎処理土の粒径は検討項目により最大粒径を変化させている.

2・2 破碎粒径の違いが繰返し利用時の破壊形態に及ぼす影響

掘削したセメント安定処理土は, セメントにより土粒子同士が膠着した状態にあるため, 一般的な土と比べて締固め後の力学特性や破壊形態が異なることが十分に考えられる. 特に, 破碎する粒径の違いは力学特性や破壊形態に影響を与える因子になると考えられる. そこで, 破碎処理土の粒径が再利用時における強度発現および破壊形態に及ぼす影響に着目し評価を行う. Table 2 に示す条件で作製したサンプルを 28 日間空气中養生させた後, 回転式破碎混合混練機を用いて破碎し, 最大粒径 4.75mm (以後, CCS-a₁-4.75) および 9.5mm (CCS-a₁-9.5) の粒径の異なる 2 種類の破碎処理土を作製した (CCS は, Crushed Cement-stabilized Soil: 破碎処理土の略). なお, 今回の実験では, いずれの破碎処理土も破碎後の最大粒径に着目して品質管理を行っており, 破碎後の粒度分布等までの把握には至っていない. これらの破碎処理土を 2-1 に示す方法と同様に, 突固めエネルギーを管理 ($E_c \approx 550$ (kJ/m³)) して供試体を作製し, 養生後に一軸圧縮試験を行った. なお本研究では, 港湾空港技術研究所が所有するマイクロフォーカス X 線 CT スキャナ装置⁴⁾ (SMX-225CT: 島津製作所) を用い一軸圧縮過程における供試体内部の破壊状況を観察した.

Fig. 1 Crushing and mixing (twister) machine.

Table 2 Testing condition considered the difference of crushed grain size of cement stabilized soil.

Classification of crushed stabilized soil	Soil	Cement content (%)	Ash content (%)	Curing day until crushing (day)	Maximum grain size (mm)
CCS-a ₁ -4.75	Mud	3	10	28	4.75
CCS-a ₁ -9.5					9.5

2・3 破碎までの期間および仮置き期間が繰返し利用時の強度発現に及ぼす影響

実際に破碎処理土が発生する際には, 早期に破碎される場合と長期間を経て破碎される場合のように異なる養生日数での破碎が考えられ, いずれも再利用の際に一度仮置きという措置を取ることが予想される. そこで, セメント安定処理土が破碎されるまでの養生日数および仮置き日数と強度発現の関係性について検討を行った. なお比較条件として, 石炭灰混入の有無による影響についても検討を行っている. Fig. 2 は, セメント安定処理土 (未破碎処理土) と破碎処理土の一軸圧縮試験までの流れを示したものであり, 破碎処理土が破碎される (掘削される) までの養生期間と, 破碎後に仮置きされそこから再利用されるまでの仮置き期間に着目し, 未破碎処理土と一軸圧縮強度の比較を行っている. 作製した破碎処理土の分類および配合条件を Table 3 に示す. 作製した破碎処理土 b₁, c₁ (CCS-b₁ および CCS-c₁) を用い供試体の乾燥を避けるためにビニール袋内で湿潤状態となるように密封して仮置きを行った. 所定の期間仮置きしたものを 2-1 と同様のエネルギーで再度締固めて供試体を作製し, 養生終了後に一軸圧縮試験を行った.

2・4 セメント安定処理土の繰返し利用が力学特性と強度定数に及ぼす影響

ここでは, セメント安定処理土の循環資源としての性能を評価するために, 繰返し利用した際の力学特性および強度定数の変化について検討を行う. 実験に使用する破碎処理土は最大粒径 9.5mm 一定とし, 破碎までの養生日数を 28 日とした. 本研究における繰返し利用 (Reuse) の捉え方と定義を Fig. 3 に, 作製した破碎処理土の分類

Fig. 2 Flow diagram of this study considered crushing and temporary storage of CCS.

Table 3 Testing condition considered the difference of temporary storage period of crushed cement stabilized soil.

Classification of crushed stabilized soil	Soil	Cement content (%)	Ash content (%)	Curing day until crushing (day)	Maximum grain size (mm)
CCS-b ₁ -9.5	Mud	3	0	3, 28, 91	9.5
CCS-c ₁ -9.5			10	3, 91

Fig. 3 Definition of repeatedly-used in this study.

および配合条件を Table 4 に示す。なお、解砕処理土 e_1 については解砕時における含水比低下が著しく、締固めが困難であったために、突固めによる締固め試験 (JIS A 1210) を実施して締固め曲線から得た最適含水比 ($w_{opt} = 30.0\%$) に調整を行った。それらの解砕処理土を用いて 2-1 と同様のエネルギーで供試体を作製し定圧一面せん断試験 (JGS 0561) を行い、盛土材等として繰返し利用することによる強度定数の変化を把握した。なお、供試体寸法は、直径 $\phi = 60\text{mm}$ 、高さ $h = 20\text{mm}$ であり、せん断速度は 0.2mm/min 、拘束圧 $100, 150, 200\text{kN/m}^2$ とし、反力板荷重を一定にしたまま、せん断変位 7.0mm で終了させた。今回のように最大粒径の大きな土を通常の一面せん断試験の供試体寸法に適用する場合、供試体寸法に及ぼす最大粒径の影響および適用性について懸念されるところである。しかし、解砕処理土の最大粒径を 9.5mm として用いた一面せん断試験結果が、解砕前のセメント安定処理土の一面せん断試験結果と比較して同等あるいはそれ以下のせん断強度であったことから、今回その影響は小さいものと考えている。

3 実験結果および考察

3・1 解砕粒径が強度発現および破壊形態に及ぼす影響

Fig. 4 に解砕前の一軸圧縮試験結果を示し、Fig. 5 には Fig. 4 の試料を約 28 日養生後に解砕させ (解砕処理土 a_1)、再び突固めて作製した供試体の一軸圧縮試験結果を示す。解砕前後の供試体の一軸圧縮強さを比較すると、解砕粒径の違いに関係なく再び突固めて作製した供試体は、一軸圧縮強さが半分程度低下することが分かる。また、Fig. 5 の粒径の違いに着目すると、ピーク強度および破壊ひずみの大きさは解砕粒径の大小に関わらず、ほぼ同程度の値を示すことが分かる。しかし、CCS- a_1 -9.5 についてはピーク強度以降のひずみの増加に伴う応力低下が著しく見られた。そこで、Fig. 6 (a), (b) に一軸圧縮過程における水平および鉛直断面画像を示す。両者共にピーク強度付近 ($\epsilon = 1.5\%$) においては画像中にクラックは確認できないが、ピーク強度以降においてクラックが確

Fig. 4 Unconfined compression test results. (Before crushing)

Fig. 5 Unconfined compression test results of the CCS a_1 considering the crushed grain size of stabilized soil.

認され、ひずみの増加に伴いクラックが大きく生じていることが分かる。また、(a), (b) ともに解砕粒径の大きな粒子同士の接触部分の付着が弱く、そこからクラックが生じていることが分かる。クラックの発生の仕方は、CCS- a_1 -4.75 は供試体の外側にクラックが生じているのに対し、CCS- a_1 -9.5 はクラックが内部まで進行しており、脆弱な供試体であることが確認できる。これらより、本研究で作製した解砕処理土については、解砕粒径の違いによりピーク強度および破壊ひずみの大きさに違いは見られないが、ピーク強度以降の破壊挙動に変化を及ぼすと考えられる。

3・2 解砕処理土の解砕・仮置き期間が強度発現に及ぼす影響

Fig. 7 に解砕処理土の解砕までの日数 (図中では Crus. と表記) および仮置き日数 (図中では Temp. と表記) の違いが締固め後の一軸圧縮強さに与える影響について示す。図中には、基本となるセメント安定処理土の一軸圧縮強さを「Uncrushed sample (未解砕)」として表記している (スケールの関係上、(a) では 56 日以降、(b) では 28 日以降の結果を示していないが、(a) の養生 180 日の一軸圧縮強さは、 $q_{u180} = 993.9\text{kN/m}^2$ であり、(b) では、 $q_{u180} = 1921.8\text{kN/m}^2$ であった)。一般的に解砕し締固めた改良土の一軸圧縮強さは、未解砕時のものと比べて低下することが知られている。⁵⁾ 本研究で作製した改良土においても、解砕後の強度低下がみられ、解砕前

Table 4 Testing condition considered repeatedly-used of CCS.

Classification of crushed stabilized soil	Soil	Cement content (%)	Ash content (%)	Curing day until crushing (day)	Maximum grain size (mm)
Cement stabilized soil	Kaolin	2	0	28	9.5
Reuse1	CSS-d ₁	-	-		
Reuse2	CSS-d ₂	-	-		
CCS added FA	Kaolin	2	25		
Reuse1	CSS-e ₁	-	-		
Reuse2	CSS-e ₂	-	-

Fig. 6 Transverse section and vertical profiling computed tomography image in the process of unconfined compression test.

Fig. 7 Change in unconfined compressive strength of the cement stabilized soil which compacted after crushing with elapsed days.

の一軸圧縮強さが大きい程、強度低下率が高いことが分かる。また、解砕までの日数や仮置き日数が異なっても、それらを締固めた直後の一軸圧縮強さは、いずれも $100 \sim 200 \text{ kN/m}^2$ 程度の強度を担保していることが分かる。その後、一旦は低下した強度も解砕までの日数が短いものについては養生の経過に伴い再び水和が進行し強度が増加することが分かる。しかし、解砕日数 91 日においては (a), (b) ともに養生経過後の強度増加が低いことが分かる。特に石炭灰を混入した条件では、この傾向が顕著である。そこで、解砕後の強度増減割合についてみるため、Fig. 8 に養生 28 日後の未解砕の改良土に対して、ある経過日数（解砕までの養生日数 + 仮置き期間）において締固めた解砕処理土の養生 28 日後の強度比を R と定義し、経過日数と強度比 R の関係で整理したグラフを示す。これより、経過日数が長くなる程、締固め後の強度増加は低く、養生 28 日までにおける強度低下が著しいことが分かる。

このように長期養生後および仮置き日数の経過により締固め後の強度増加が低下する要因として

Fig. 8 Relationship between strength ratio "R" and elapsed days.

は、処理土内の水和反応が停滞していたものと考えられる。これより、経過日数が長期における程、締固め後の強度増加は低いと考えられ、また水和反応の進行速度が速い養生 28 日までに於ける強度低下が著しいと考えられる。これらより、解砕および仮置きに伴う締固め後の強度発現は水和反応に依存すると考えられる。

3・3 繰返し利用が一軸圧縮強さおよび強度定数に及ぼす影響

Fig. 9 に養生 28 日における一軸圧縮試験結果を示す。セメント安定処理土においては繰返し利用に伴う破壊ひずみの大きな変化は見られない。しかし、石炭灰を添加させた石炭灰混合材料については、未解砕処理土と比較して解砕処理土の破壊ひずみが大きくなっていることが確認できる。これは、CCS-e₁ については解砕時に最適含水比に調整を行ったことにより、未解砕処理土と比較してやや延性的な破壊形態になったものと考えられる。また、いずれの条件においても変形係数は解砕を伴うことで大きく低下し、繰返し利用を続けていくに伴って剛性の低下がみられる。これは、徐々に水和反応による固結力が弱まっていることに起因すると考えられる。

Fig. 10 に繰返し利用における一軸圧縮強さの変化を示す。未解砕処理土は養生に伴う強度増加が大きくみられることが分かるが、解砕処理土については養生日数に伴う強度増加がみられるものの、未解砕処理土であるセメント安定処理土と比較して小さいことが分かる。次に、Fig. 11 に養生 7 日における一面せん断試験結果を示す。未解砕処理土は、いずれの条件においても明確なピークを示し、密詰の砂に類似した挙動を呈している。しかしながら、繰返し利用をするにつれて密度の低下やセメントの固結効果が喪失することによりせん断応力は失われ、セメント安定処理土のような明確なピークを示さなくなることが分かる。また体積変化については、いずれの条件においても正のダイレンタンシーが生じており、繰返し利用に伴う影響はほとんど見られないことが分かる。Fig. 12 に各条件における供試体のせん断強さ τ と垂直応力 σ の関係を示す。図中には得られた粘着力 c_d および内部摩擦角 ϕ_d を併せて示している。なお、比較のため西日本に広く分布するまさ土（花崗岩質岩石の風化残積土⁶⁾）を用いた試験結果も示している。まさ土は締固め試験

(a) CCS-d₁

(b) CCS-e₁ (Coal ash contents: 25%)

Fig. 9 Unconfined compression test results in the process of repeatedly-used.

Fig. 10 Relationship between q_u and curing day.

(JIS A 1210) より得られた $\rho_{dmax} = 1.890 \text{ g/cm}^3$, $w_{opt} = 12.7\%$ をもとに締固め度 $D = 95\%$ となるように供試体を作製している。

未解砕であるセメント安定処理土については養生経過に伴う粘着力の増加が大きく見られるが、解砕処理土についてみると養生経過に伴い粘着力の増加および内部摩擦角の変化が小さくなっていくことが分かる。これらは、セメント安定処理土作製時から繰返し利用に伴う日数が

(a) CCS-d₁ (b) CCS-e₁ (Coal ash contents:25%)

Fig. 11 Results of consolidated constant pressure direct box shear test.

(a) CCS-d₁ (b) CCS-e₁ (Coal ash contents:25%)

Fig. 12 Change in strength parameter of the cement stabilized soil which compacted after crushing with elapsed days.

経過していくことで水和反応の進行が停滞していたことに起因すると考えられる。解砕処理土はセメント安定処理土と比較して養生に伴う強度増加は小さいが、繰返し2回目以降においても一軸圧縮強さ $q_u = 150 \text{ kN/m}^2$ 以上を有しており、盛土等に用いる場合の目標強度を満足している。⁵⁾ また、未解砕処理土と比べ、繰返し利用に伴い養生日数の増加に対する粘着力および内部摩擦角の変化が小さくなっており、それらはまさ土の強度定数と比べて同等以上の値を示している。よって、セメント安定処理土は、解砕後もまさ土のような天然資源の代替材として十分に使用可能であると考えられる。

4 結 言

本研究は、繰返し利用におけるセメント安定処理土の力学特性に着目し、循環利用の可能性について実験的検討を行った結果、以下の知見を得た。

(1) 解砕粒径の違いはクラック発生量および発生箇所に影響を及ぼし、ピーク強度以降の破壊挙動に影響を及ぼす。

(2) 解砕までの日数および仮置き期間が短いものについては、締固め後に再び水和が進行し強度が回復する。一方、解砕までの日数および仮置き期間が91日以上経過した条件では、強度増加に期待出来ないことが判明した。

(3) 石炭灰添加の有無に関わらず、セメント安定処理土は繰返し利用に伴い強度・剛性は低下する。しかしながら、繰返し利用に伴い強度および強度定数は一定値に収束していき、まさ土等の天然資源の代替材として十分に再利用可能であることが判明した。

本研究を進めるにあたり、(独)港湾空港技術研究所の水谷崇亮氏、東京理科大学の菊池喜昭先生、元福岡大学大学院(現:住軽日軽エンジニアリング株)の久富優二氏の協力を得ました。末筆ながらここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Japan coal energy center, "Kouwan kouji ni okeru sekitan-bai kongou zairyou no yuukouriyu gaidorain" (2011).
- 2) Public works research center, "Kensetsu hasseido riyu gijyutsu manyualu", pp.27-34 (1997).
- 3) N. Nakajima, S. Yokota, H. Kuroyama, K. Sasabe and Y. Oiki, "The application of rotary crushing mixture (twister) method to geo-environmental field", Proceedings of the Seventh National Symposium on Ground Improvement, pp.159-162 (2006).
- 4) Y. Kikuchi, T. Mizutani, T. Nagatome and T. Hatal, "Study on applicability of micro-focus x-ray CT scanner for geomaterials", technical note of the port and airport research institute, No.1125 (2006).
- 5) Public works research institute, "Kensetsu odei saisei riyu-manyualu", pp.214-216 (2003).
- 6) The Japanese Geotechnical Society, "Japanese standards and explanations of laboratory tests of geomaterials", p.1008 (2009).