非飛散性アスベスト含有建材無害化処理物の含水比に応じた セメント改良技術の適用性[†]

乾 徹* 篠原智志** 諸富鉄之助**
勝見 武* 高井敦史* 水野克己***

Applicability of Cement Stabilization Technique to the High Water Content Residue Generated from Treatment of Waste Slate Containing Non-Scattering Asbestos

by

Toru INUI*, Satoshi SHINOHARA**, Tetsunosuke MOROTOMI**, Takeshi KATSUMI*, Atsushi TAKAI* and
Katsumi MIZUNO***

Development of low-cost and environmentally-friendly techniques to treat construction wastes containing toxic substances is one of the crucial issues in construction projects. A mechano-chemical treatment technology for construction waste containing non-scattering asbestos, such as cement-asbestos slate boards, has been developed recently. This treatment process discharges high water content sludge, which is composed of fine-grained waste slate, as a residue, since slate boards are crushed and ground into fine particles under a wet condition to enhance the reactivity between a treatment agent and asbestos. Recycling this high water content residual sludge is a challenging issue to improve the environmental suitability of this treatment technology. In this study, applicability of two cement treatment techniques (i.e. granulation and liquefied stabilization) was investigated for recycling this sludge in geotechnical applications. Granulated sludge was accepted for geotechnical utilization in regards to its mechanical properties. For liquefied stabilization, workability, bleeding, unconfined compression strength and consolidation characteristics were evaluated for the sludge treated with various water-cement (W/C) ratios. Testing results indicated that these characteristics of the liquefied stabilized sludge were consistent with those of typical high water content cement-stabilized soil, and W/C is a fundamental parameter for the compressive strength.

Key words:

Cement stabilization techniques, High water content residue, Mechanical properties, Consolidation

1 緒 言

スレートに代表される、廃石綿等の飛散性アスベスト以外のアスベストを含有する建材は過去に工場の外壁や屋根材および一般住宅の屋根材として大量に用いられていた。環境省によると、今後も毎年約 100 万トンの水準でこれらの建材が非飛散性アスベスト廃棄物として解体等に伴って排出されると予測されている。解体に際しては、表面や破断面からのアスベストの飛散を防止するとともに、熔融等のオフサイト処理、埋立処分等の適切な処理が必要となる。特に、大規模災害時には短期間に大量の非飛散性アスベスト廃棄物への対応が必要となることが想定され、汎用の機材を利用して各現場で実施可能なオンサイト処理システムの構築が有用であると考えられる。従来の埋立処分や熔融処理に替わる、経済的で建設現場でも実施できる無害化処理技術として、電解質硫酸溶液と一般的な破碎設備を用いたメカノケミカル処理方法が提案されている¹⁾。この処理過程においては建材を湿式破碎しながら薬剤と反応させることから、高含水比の細粒化されたスレート残渣が排出す

るが、当該技術が埋立処分の代替として開発されていることを鑑みると、残渣を処分せずに建設資材として再資源化して有効利用することが望ましい。本研究では、スレート建材を当該方法で処理した後の高含水比残渣を対象に、地盤材料としての再資源化を目的として、流動化処理、粒状化処理の 2 種類のセメントによる地盤改良技術の適用性を評価した。これらの処理は残渣の含水比や脱水処理の実施状況によって選択することを想定しており、粒状化処理は処理に先立って脱水や乾燥を実施する場合、流動化処理は脱水処理を実施しない場合に適用することを想定している。

2 試験方法

2・1 使用材料

スレート建材をボールミルで粒径 5 mm 以下に破碎後、建材の質量比 5%の無機硫酸電解質溶液と質量比約 200%の水を添加し、破碎ミルを用いて 48 時間湿式破碎して無害化処理を行ったものを試料とした。異なる時期に処理を行った試料 1 (処理前のアスベスト (クリソタイル) 含有量 5.0%)、および試料 2 (同 5.4%) を実験に

[†] 原稿受理 平成29年6月13日 Received June 13, 2017 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 京都大学大学院地球環境学 専攻 606-8501 京都市左京区吉田本町
Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto 606-8501.

** 京都大学大学院地球環境学 専攻 606-8501 京都市左京区吉田本町
Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto 606-8501.

*** 大幸工業(株) 〒559-0025 大阪市住之江区平林南
Daiko Kogyo Co., Ltd., Hirabayashi-Minami, Suminoe, Osaka 559-0025.

において使用しているが、処理によりアスベスト含有量がいずれも検出限界（0.1%）以下になっている。各試料の基本特性を Table 1、粒径加積曲線と試料 2 の外観を Fig. 1 にそれぞれ示す。母材や処理時の破碎方法の影響により試料 1, 2 の粒度分布が異なっているが、いずれの試料も液・塑性限界および細粒分含有率が高くなっている。

Table 1 Basic properties of the samples used in this study.

Items	Unit	Sample 1	Sample 2
Solid density	g/cm ³	2.75	2.68
Liquid limit	%	139.8	89.3
Plastic limit	%	96.2	57.4
Plasticity index		43.6	31.9
Ignition loss	%	-	30.0

Fig. 1 Particle size distributions of the samples.

2・2 室内試験方法

2・2・1 粒状化処理 試料 1 の含水比を約 80%まで低減させたものを使用した。団粒化している試料は解きほぐし、粒径 2 mm 以下に調整した。著者らの既往研究²⁾の結果から、配合は試料の含水比を塑性限界程度の 90%、普通ポルトランドセメント添加量を試料の乾燥質量に対し 20%とした。攪拌機で 60 rpm で約 2 分間攪拌した後、回転ミル装置で 3 時間攪拌し粒状化処理を行った。処理物を 28 日間密閉養生し、定圧一面せん断試験を実施した。一面せん断試験は、養生後の湿潤状態の処理物を落下高さ 100 mm の空中落下法によって作製した円柱供試体 (60 mm 径, 20 mm 高さ) を対象に実施した。供試体を垂直応力 $\sigma = 50, 100, 150 \text{ kN/m}^2$ で圧密後、せん断速度 0.1 mm/min の条件で試験を行った。

2・2・2 流動化処理 流動化処理は、土砂に大量の水と固化材を加えて混合・攪拌することによって流動化させるセメント安定処理方法である。本研究においては、フロー試験により流動性、ブリージング試験により水との分離抵抗性、一軸圧縮試験により強度特性をそれぞれ評価し、流動化処理物の製造における適切な配合条件の検討を行った。さらに、決定した配合条件で作製した処理物を対象に圧密試験を実施し、圧密変形特性、二次圧密特性を調査し、一般的な流動化処理土との変形特性と比較を行った。試験方法の詳細は以下のとおりである。所定の含水比 (150%, 180%, 200% の 3 水準) に調整した無害化処理物 2 に乾燥質量比で 10%, 20%, 30% の高炉セメント B 種と分散剤を 2.5% 添加し混練した後、フロー試験 (JIS R 5201)、ブリージング試験 (JSCE F 522) を行った。その後、安定処理土の締固めをしない供試体

作製方法 (JGS 0821) に従い直径 50 mm、高さ 100 mm のプラスチックモールドで一軸圧縮試験用の供試体を作製した。圧密試験用の供試体は同様の方法で、直径 100 mm、高さ 200 mm のプラスチックモールドを用いて作製した処理物を養生し、直径 60 mm、高さ 20 mm の円柱状に成形した。どちらも 20℃ 条件下で密閉養生を行った。養生日数 28 日後の供試体に対しそれぞれ一軸圧縮試験 (JIS A 1216、毎分 1% のひずみ速度) および段階荷荷による圧密試験 (JIS A 1217) を行った。流動化処理後に地盤材料として利用するにあたっては比較的浅い深度での利用や埋設管の埋戻し等が想定されることから、圧密試験においては地下約 10 m での土被り圧に相当する 157 kN/m^2 を最終荷重段階の荷重とし、4000 分後までの変形を計測した。処理物の品質を評価するにあたっては埋設管の埋戻しに用いる流動化処理土の品質基準 (フロー値 160 mm 以上、ブリージング率 3% 未満、一軸圧縮強度 $130 \sim 500 \text{ kN/m}^2$ 、湿潤密度 1.35 Mg/m^3 以上) を採用した³⁾。さらに、一般的な流動化処理土との特性を比較するために、細粒分 75% 以上の泥土から製造した流動化処理土 (以下、比較試料) との比較実験を行った。

3 実験結果とその考察

3・1 粒状化処理物の強度変形特性

粒状化処理物の一面せん断試験における圧密後の供試体の乾燥密度、せん断応力-せん断変位関係とせん断時の垂直変位を Fig. 2 に示す。また、造粒処理物の外観と造粒前後、およびせん断試験後の粒径加積曲線を Fig. 3 に示す。なお、粒状化処理物については、処理物を解砕せずに計測した見かけの粒径加積曲線を示している。

Fig. 2 Shear stress and vertical displacement with horizontal displacement in direct shear test for the granulated sample.

Fig. 3 Particle size distributions of the granulated sample before/after shearing and appearance of the granulated sample.

Fig. 3 より, 粒状化処理を行うことで無害化処理物の粒度が改善され, 砂質土に似た粒度分布となった. Fig. 2 に示すせん断中の体積変化をみると, 供試体の乾燥密度が $0.61 \sim 0.64 \text{ Mg/m}^3$ と小さいにも関わらず, いずれの垂直応力でもせん断初期にわずかな負のダイレイタンスが生じた後に正のダイレイタンスが生じるという密な砂のせん断挙動と類似の傾向を示した. これは, 粒状化処理物内部に存在するミクロな間隙の影響により, みかけの乾燥密度が小さくなっていることを反映していると考えられる. 粒状化処理物がせん断時において粒子破碎を伴う可能性が示唆されることから, 試験前後の粒度分布を測定・比較した. Fig. 3 に最も高い垂直応力を作用させた $\sigma = 150 \text{ kN/m}^2$ でのせん断試験前後の粒径加積曲線を示しているが, 試験前後で粒径加積曲線に大きな差異はみられず, 本試験条件下では顕著な粒子破碎は起こっていないと考えられる. 一面せん断試験から推定される粘着力 c は 33 kN/m^2 , 内部摩擦角 ϕ は 46° となった. 粘着力が生じた理由としては, 湿潤状態の試料を供試したことによると考えられる.

3・2 流動化処理物のフレッシュ性状と強度変形特性

Table 2 に流動化処理の配合毎のフロー値およびブリージング率を示す. 細粒分含有量の高い無害化処理物の処理にあたってフロー値の確保が困難と予想されたが, 今回のように含水比 150%以上の範囲では基準のフロー値 160 mm 以上を満足した. すべてのケースにおいてブリージング率が 0%を示したが, 無害化処理物に多く含まれる細粒分が高い水分保持性を有することによると考えられる.

Table 2 Workability and bleeding ratio of the samples after liquefied stabilization.

Case	Water content W (%)	Cement content C (%)	W/C	Workability (mm)	Bleeding ratio (%)
Waste slate residue	150	10	15	190	0
		20	7.5	175	
		30	5	165	
	180	10	18	190	
		20	9	185	
		30	6	185	
	200	10	20	195	
		20	10	200	
		30	6.7	200	
Construction sludge	600	125	4.8	300 以上	1.5

$W = 200\%$, 養生 28 日のケースにおけるセメント添加率毎の一軸圧縮試験で得られた応力-ひずみ関係を Fig. 4 に示す. セメント添加量の増加に伴い一軸圧縮強さ, 変形係数の改善が確認された. その一方で, 破壊ひずみはセメント添加に伴い上昇している. $C = 30\%$ では供試体はぜい性的な破壊挙動を示し, ピーク強度に達した後急激に強度が低下するひずみ軟化傾向を示した.

Fig. 5 に流動化処理土の W/C と一軸圧縮強さの関係を示す. いずれも W/C との相関が高く, W/C を調整することで所要の圧縮強度を有する流動化処理土の製造が可能であると判断できる. 例えば, W/C を 7.5~13.5 の範

囲に設定することで, 先述の埋設管の埋戻し材として適切な強度である $130 \sim 500 \text{ kN/m}^2$ を確保することができる. 一方, 比較実験の結果から一般的な泥土よりも同程度の W/C であればやや高い一軸圧縮強さを得られることがわかった. これは, 無害化処理物の保水性が高いことから同様の流動性を得るには泥土の場合の方が水量が大きくなるためであると考えられる.

Fig. 4 Stress-strain curves of the samples after liquefied stabilization with different cement contents.

Fig. 5 Relationships between the unconfined compression strength and W/C of the sample after liquefied stabilization.

3・3 流動化処理物の圧密特性

無害化処理物を用いた流動化処理物の湿潤密度は $1.20 \sim 1.32 \text{ Mg/m}^3$ となり, すべてのケースで流動化処理土を埋戻し材として使用する際に一般的に適用される湿潤密度の基準値 1.35 Mg/m^3 を満たしていない. これは, 細粒分主体の無害化処理物の保水性が高く, 処理物内部にミクロな間隙が存在するためであり, 結果として流動化処理土の間隙比が大きくなるためである. したがって, 長期的に荷重が作用した場合のクリープ変形の発生が懸念される. 特に, 無害化処理物の母材が土とは異なるスレート材であることを考慮すると, 一般的な泥土から製造した流動化処理土の変形性能と比較して把握しておくことは重要である. そこで, 宮本ら⁴⁾が実施した一般的な粘性土を母材とする高間隙比セメント改良土を対象とした同様の試験結果と無害化処理物から製造した流動化処理土の圧密試験結果の比較を行った.

Fig. 6 に $W=150\%$ のケースの $C=10\%$ (繰返し回数: 2 回), $C=20\%$ (同: 3 回) の圧縮曲線 (圧密圧力-間隙比関係) を示す. $C=10\%$ のケースでは圧密圧力 $p = 157 \text{ kN/m}^2$ においては正規圧密領域となり比較的大きな勾配を示している一方で, $C=20\%$ のケースでは大きな圧密沈下は発生していない. これは, セメント添加量の増加による強度変形特性の相違が反映されていると考えられる.

Fig. 6 Compression curves of the samples after liquefied stabilization with different cement contents.

Fig. 7に W/C と膨張指数 C_s の関係, および W/C と二次圧密係数 C_α の関係を示す. 前述したように, 本研究での成果に加えて宮本ら⁴⁾によるセメント改良土を対象とした実験結果もプロットしており, いずれも圧密圧力 $p = 157 \text{ kN/m}^2$ における値である. 全体的な傾向としては W/C が低下するに伴って C_s と C_α もそれぞれ低下しており, W/C の低下による圧縮性の減少が確認された.

セメント改良土や比較として実施した泥土の流動化処理土の値と比較すると, C_s は無害化処理物から製造した流動化処理土の方が大きな傾向が見られた. このことは弾性的な圧縮変形量が比較的大きいことを示しており, 一軸圧縮試験における変形係数が比較的大きいことからわかるように供試体の剛性に依存すると考えられる. 一方, C_α は若干の相違はあるものの概ね同程度の値となっている. このことから, 一定荷重が長期に渡り作用した際の長期的な変形特性については, 無害化処理物から製造した流動化処理物と泥土を母材とする高間隙比の流動化処理土やセメント改良土は同等の変形性を示すと判断できる.

Fig. 7 Relationships between the swell index and W/C (Upper) and the coefficients of secondary consolidation and W/C (Lower) of the sample after liquefied stabilization.

4 結 言

本研究では, 非飛散性アスベストを 5%程度含有するスレート建材の無害化処理した後の高含水比残渣の地盤材料としての再資源化を目的として, 残渣の含水比や乾燥処理の有無に応じて流動化処理, 粒状化処理という2種類の地盤改良技術の適用性を改良体の強度変形特性の観点から評価を行った. 結果を以下に要約する.

- 粒状化処理を実施することにより, 顕著な粒子破砕を生じずに砂質土と類似したせん断強度を発揮することが明らかになった.
- 無害化処理物に対する流動化処理技術の適用性をフレッシュ性状, 強度変形特性の観点から明らかにした. 一般の泥土を対象とした流動化処理土と比較して, 無害化処理物は保水性が高く, 製造した流動化処理物の密度が小さくなる特徴を有する. 一方で, 同程度の W/C においてもブリージングが発生しにくく, 一軸圧縮強度・変形係数が大きくなる. また, 含水比, セメント添加量を問わず W/C と一軸圧縮強さには良好な相関が認められた. 同程度の間隙比, W/C のセメント改良土と比較して, 膨張指数, 二次圧密係数ともに同程度の値を示すことから, 通常の流動化処理土と同等の変形性を有すると判断できる.
- 2種類のための非飛散性アスベスト含有建材を対象とした試験結果ではあるものの, 高含水比の無害化処理物に対してその含水比や乾燥処理の有無に応じて, 粒状化処理や流動化処理を適用することにより地盤材料として再資源化しうる可能性が示唆された.

なお, 本研究は環境研究総合推進費研究事業「大量に廃棄される非飛散性アスベスト含有建材の常温分解処理と再利用法の開発と研究 (3K143011)」の一環として実施した.

参 考 文 献

- 1) M. Tabata, A. Shono and A. Ghaffar, "Decomposition of asbestos by a supernatant used for immobilization of heavy metals in fly ash", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, DOI: 10.1007/s10163-016-0491-2 (2016).
- 2) S. Yano, A. Yamada, T. Inui, T. Katsumi and A. Takai, "Developing techniques to utilize the residue from the treatment of construction wastes containing asbestos in geotechnical applications", *Proceedings of the Symposium on Monitoring Technologies for Geoenvironment 2012*, Japanese Geotechnical Society Kansai Branch, pp.131-138 (2012).
- 3) Public Works Research Institute, "Technical manual on liquefied stabilizing soil application", pp.42 (1997) Gihodo.
- 4) Y. Miyamoto, Y. Ozawa and J. Takemura, "Experimental study on consolidation properties of cement stabilized soil with high void ratio", *Proceeding of the 39th Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, Japanese Geotechnical Society, pp.703-704 (2004).