

線状高分子混合処理土における靱性向上メカニズムの検討

Toughness Enhancement Mechanism of Hybrid Clay Barrier

西村 正樹* 赤井 智幸* 嘉門 雅史**
 Masaki Nishimura Tomoyuki Akai Masashi Kamon

(2007年6月22日 受理)

As a geomaterial for barrier systems of coastal landfill sites, a hybrid clay barrier (HCB) has been developed: it consists of dredged marine clay with high water content, a hardening agent, and polymeric fibrous materials. Actually, HCB has characteristics that improve the toughness of brittle cement-treated clay by inclusion of polymeric fibrous materials while retaining sufficient impermeability. Effects of inclusion of polymeric fibrous materials were examined using laboratory tests to study the toughness enhancement mechanism of HCB. Unconfined compression tests and falling head permeability tests were made using several types of polymeric fibrous material having different tensile properties. Pulling-out tests of a single polymeric fibrous material installed in the cement treated clay were also carried out. Results show that the toughness enhancement mechanism of HCB is mainly related to the pulling-out process of polymeric fibrous material from cement-treated clay.

キーワード：廃棄物最終処分場，線状高分子混合処理土，靱性，遮水性，引抜き特性

1. はじめに

近年の環境意識の高揚を背景に、より安全で信頼性ある廃棄物最終処分場の設計、建設が求められており、わが国でも遮水構造や維持管理に対する基準が強化、明確化されてきている¹⁾。また、陸上処分場建設が益々困難になる中、大規模でスケールメリットを活かせる海面処分場が、大都市圏を中心に今後主流になっていくと考えられており、海面処分場に関しても、管理型廃棄物埋立護岸の設計・施工・管理マニュアル²⁾が策定されている。しかし、海面処分場の設計、建設においては、陸上処分場に比べて、地盤条件や施工条件など考慮すべき課題が多く、さらに、圧密沈下や地震に起因する大変形に対しても遮水性能を維持できることが求められる。

一方、浚渫粘性土等の有効利用を目的に、粘性土とセメントを混合した固化処理土の遮水材料としての利用が図られている。しかし、一般に固化処理土は変形

に対して脆性的な挙動を示すため、地盤変形時には本来の遮水機能を十分に発揮できなくなると考えられる。

筆者らはこれまで、地盤変形追従性(靱性)と遮水性能を併せ持つ土質系遮水材料として、粘性土に固化材と線状高分子材料(短繊維)を混合した線状高分子混合処理土(HCB; Hybrid Clay Barrier)を開発してきた^{3,4)}。図1にHCBの概略を示す。HCBにおいては、脆性的変形挙動を示す固化処理土に線状高分子材料を

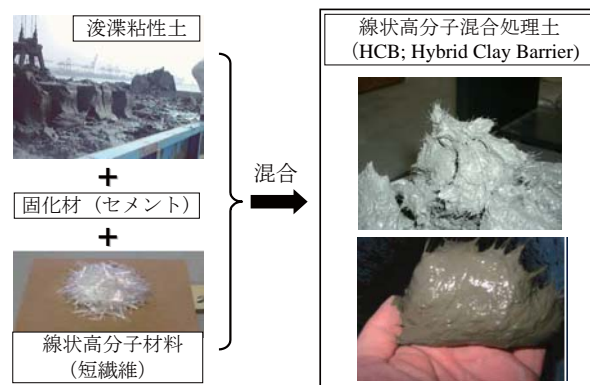


図1 線状高分子混合処理土 (HCB) の概略
 Schematic illustration of Hybrid Clay Barrier (HCB).

* 化学環境部 繊維応用系

** 京都大学地球環境学大学院

添加することで、靱性を付与し、かつ、固化処理土が本来有する遮水性を保持することができる。しかし、線状高分子材料の添加による靱性向上メカニズムについては、これまで十分に検討されていなかった。ここでは、HCBにおける靱性向上メカニズムについての検討結果を報告する。

2. 実験方法

(1) 線状高分子材料種の影響評価

表1に示す5種類の線状高分子材料(長さ:20 mm、直径:26 μm)を用い、大阪湾内で採取した粘性土、および固化材(高炉B種セメント)と混合して、HCB試料を作製した。作製したHCB試料は、海水中で一定期間(以下、「材齢」と称す)静置・養生し、固化させた。粘性土の物理特性を表2に示す。粘性土は、液性限界の約2倍の含水比となるように海水を加えて用いた。また、固化材は、HCB試料中に固化材が100 kg/m³含まれるように調整し、添加した。なお、各線状高分子材料は、固化処理土に対して1 vol%となるように添加し、比較のため、線状高分子材料を添加していない固化処理土も作製した。

これらのHCB試料について、圧縮ひずみ速度1.0%/minで一軸圧縮試験⁵⁾を行い、靱性を評価した⁶⁾。また、変水位透水試験⁷⁾により遮水性への影響を調べた。一軸圧縮試験の装置概略図を図2に示す。

(2) 線状高分子材料の引抜き特性

表1のPVAおよびPPについて、固化処理土中に線状高分子材料を一本ずつ埋め込み、一本の線状高分子材料が固化処理土から引き抜かれる際に生じる抵抗力を評価した^{8,9)}。上記と同様の方法で固化処理土を作製し、設定埋め込み長10 mm、埋め込み間隔20 mmで線状高分子材料を固化処理土に埋め込んだ後、材齢28日まで海水中で静置・養生し、引抜き試験用の試料とした。作製した試料を図3に示す引抜き試験装置に固定し、一本の線状高分子材料が固化処理土から一定速度で引き抜かれる際の変位量と荷重を計測した。ここでは、引抜き速度を0.2 mm/minとし、PVAおよびPPについて各10回ずつ試験を実施した。

また、線状高分子材料の引抜き特性には、線状高分子材料の表面形状が影響すると考えられるため、PVAおよびPPの表面を走査型電子顕微鏡(SEM; ニコン社製ESEM-2700)で観察した。

3. 結果と考察

表1 各線状高分子材料の引張り特性
Tensile properties of polymeric fibrous materials.

線状高分子材料種	略称	織度 [tex]	切断時の強さ [N]	引張強さ [N/tex]
ビニロン	PVA	0.692	0.507	0.733
ナイロン	PA	0.664	0.216	0.325
ポリプロピレン	PP	0.567	0.195	0.344
再生ポリプロピレン	R-PP	0.537	0.134	0.250
ポリエチレン	PE	0.522	0.091	0.174

線状高分子材料種	略称	伸度 [%]	初期引張抵抗度 [N/tex]
ビニロン	PVA	5.8	19.6
ナイロン	PA	48.5	1.62
ポリプロピレン	PP	157	2.91
再生ポリプロピレン	R-PP	191	1.34
ポリエチレン	PE	200以上	1.24

表2 粘性土の物理特性
Physical properties of clay.

土粒子密度 ρ _s [kg/m ³]		2.65×10 ³
粒度組成	砂・礫分 [%]	11.3
	シルト分 [%]	55.5
	粘土分 [%]	33.2
コンシステンシー	液性限界 W _L [%]	94.0
	塑性限界 W _P [%]	0.3
	塑性指数 I _P	93.7

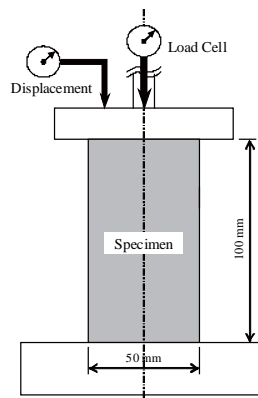


図2 一軸圧縮試験の装置概略図
Schematic of apparatus for unconfined compression test.

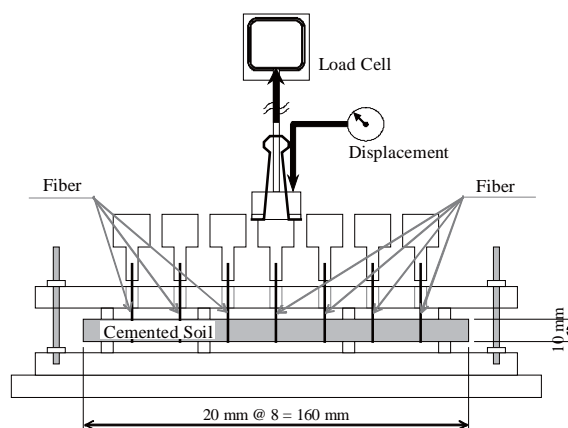


図3 線状高分子材料引抜き試験の装置概略図
Schematic of apparatus for pull-out test of polymeric fibrous materials.

(1) 線状高分子材料種の影響評価

材齢 7 日および 28 日において一軸圧縮試験を行った結果を図 4 に示す。図 4 より、材齢 7 日、28 日ともに、線状高分子材料を添加しない場合、圧縮応力は最大値を示した後に急激に低下するのに対し、いずれの線状高分子材料を用いた場合でも、大ひずみ領域において応力が保持されることがわかった。このことから、線状高分子材料の種類に関わらず、さらにはリサイクル材料である R-PP を用いた場合でも、固化処理土の脆性的挙動が改善し、靱性が向上することを確認した。また、線状高分子材料の種類による顕著な差異は認められなかったが、PVA を用いた場合に、比較的高い最大圧縮応力を示した。

また、これらのサンプルについて変水位透水試験を行ったところ、図 5 に示す結果が得られた。図 5 より、いずれの線状高分子材料を用いた場合でも、材齢 7 日および 28 日の両方において、透水係数は 1.0×10^{-6} cm/s 以下を維持していた。一般に、廃棄物最終処分場に用いる土質系遮水材料には、その透水係数が 1.0×10^{-6} cm/s 以下であることが求められる¹⁾。したがって、いずれの線状高分子材料を用いた場合でも、遮水材としての要求性能を満たすことがわかった。

以上の結果から、材質や引張り特性の異なる線状高分子材料を用いても、HCB の特性には大きくは影響しないことがわかった。一方、線状高分子材料を添加することで靱性は確実に向上しており、HCB においては、変形に伴って生じるひずみエネルギーを固化処理土中の線状高分子材料が分担することで、靱性が発現すると考えられる。これらのことから、HCB の靱性向上メカニズムには、線状高分子材料自体の引張り特性だけでなく、線状高分子材料の固化処理土からの引抜き特性が大きく寄与していると推測された。

(2) 線状高分子材料の引抜き特性

PVA および PP について引抜き試験を行った結果、図 6 のような関係が得られた。図 6 より、いずれの線状高分子材料を用いた場合でも、引抜き荷重は、引抜き長の小さい領域で急峻なピークを示した後、引抜き長に概ね比例して低下し、埋め込まれた線状高分子材料が全て引き抜かれる 10 mm 近傍でほぼゼロとなる傾向が確認された。これは、引き抜きに対する荷重の起源が、固化処理土と線状高分子材料の静的な付着力から両者の動的な摩擦力に移行することと対応していると考えられる。また、PVA と PP を比較すると、測定結果にばらつきはあるものの、付着力、摩擦力ともに PVA の方が大きくなっており、一軸圧縮試験の結果との相関が示唆された。さらに、引抜き試験におい

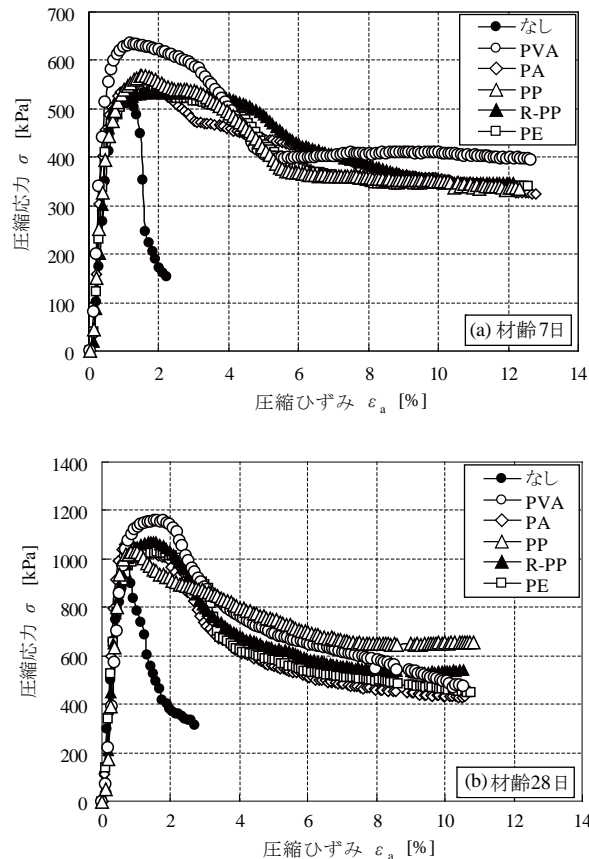


図 4 各種線状高分子材料を用いた HCB の一軸圧縮試験の結果 (a) 材齢 7 日 (b) 材齢 28 日
Stress-strain curves for unconfined compression tests of HCB using various types of polymeric fibrous materials on (a) curing 7 days and (b) curing 28 days.

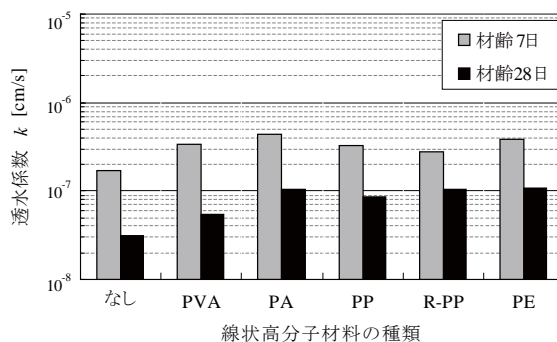


図 5 各種の線状高分子材料を用いた HCB の透水係数
Coefficients of permeability of HCB with various types of polymeric fibrous materials.

て線状高分子材料に加わる荷重は、引張り試験における切断時の荷重の 10 % 程度であった (表 1 参照)。したがって、HCB に大きなひずみ加わった際に発生する局所的な破壊面においては、引張り変形よりも引き抜きが優先的に起こると推測され、これは、「HCB における靱性向上メカニズムには、線状高分子材料の固化処理土からの引抜き特性が大きく寄与する」とい

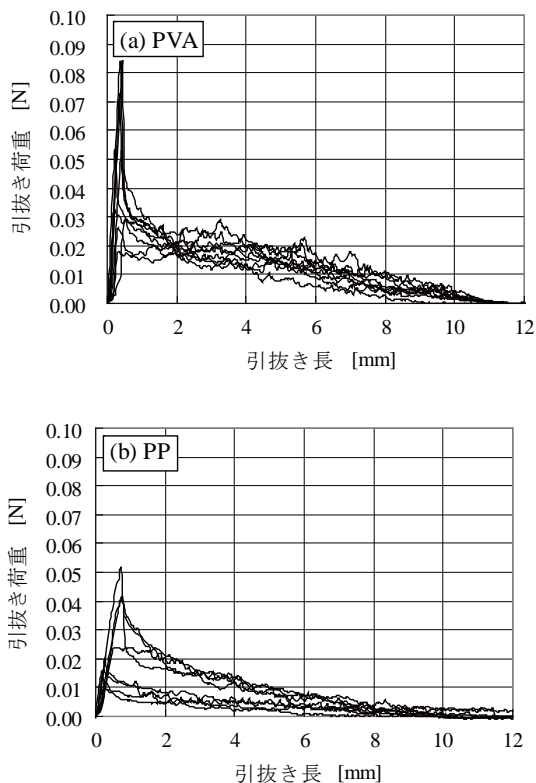


図6 引抜き試験における引抜き長と引抜き荷重の関係 (a) PVA (b) PP
Relations between pulling-out length and load on pulling-out tests for (a) PVA and (b) PP.

上記の推測を支持する結果であった。ただし、引き抜き過程において線状高分子材料の一部に応力が集中した場合には、線状高分子材料の局所的な変形の寄与が大きくなると考えられ、固化処理土から引き抜かれる過程での線状高分子材料の変形について、さらに詳細な検討が必要である。

また、PVA および PP の表面状態を SEM で観察したところ、図7に示すように、両者の表面は平滑であり、大きな差異は認められなかった。よって、PVA と PP の引抜き特性の違いは、線状高分子材料と固化処理土の間の表面相互作用や、あるいは線状高分子材料の局所的変形など、他の要因によるものと推察される。

4. まとめ

HCB における線状高分子材料の添加による靱性向上メカニズムについて検討するため、各種の線状高分子材料を用いた室内実験を行った。

添加する線状高分子材料の違いが HCB の靱性および遮水性に及ぼす影響を調べたところ、材質や引張り特性の異なる線状高分子材料を用いても、HCB の特

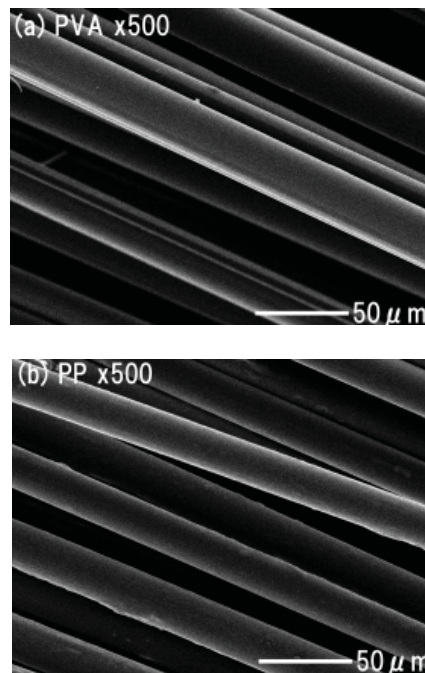


図7 線状高分子材料の表面 (a) PVA (b) PP
SEM images for surfaces of (a) PVA and (b) PP.

性には大きくは影響しないことがわかった。このことから、HCB の靱性向上メカニズムには、線状高分子材料自体の引張り特性だけでなく、線状高分子材料の固化処理土からの引抜き特性が大きく寄与していると推測される。

また、HCB における線状高分子材料の固化処理土からの引抜き特性について、引抜き試験および線状高分子材料の表面形状観察により検証した。結果、HCB における靱性発現のメカニズムには、単純な繊維の引張り特性よりも、固化処理土との間の相互作用などに起因する引抜き特性が大きく寄与していると考えられる。

なお、線状高分子混合処理土工法は、東洋建設株式会社、太陽工業株式会社、京都大学地球環境学大学院、大阪府立産業技術総合研究所の共同出願工法である。

参考文献

- 1) 総理府令・厚生省令：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令の一部を改正する命令 (1998).
- 2) 運輸省港湾局：管理型廃棄物物理立護岸 設計・施工・管理マニュアル (2000).
- 3) N. Kotake, M. Hirata, T. Akai, M. Nishimura, M. Yamamoto and M. Kamon: Proc. of the 6th Japan-Korea-France Joint Seminar on G. E. E. (2006) p.17.
- 4) 西村正樹, 馬淵伸明, 赤井智幸: 第13回春季セミナー, 日本繊維機械学会 (2007) p.156.

- 5) JIS A 1216 (1998); 土の一軸圧縮試験方法 .
- 6) 小竹 望, 平田昌史, 赤井智幸, 西村正樹, 山本正人, 嘉門雅史: ジオシンセティックス論文集, 国際ジオシンセティックス学会日本支部 (2006) p.315.
- 7) JIS A 1218 (1998); 土の透水試験方法 .
- 8) 西村正樹, 赤井智幸, 小竹 望, 山本正人, 嘉門雅史: 日本繊維機械学会第 60 回年次大会講演要旨集, 日本繊維機械学会 (2007) p.32.
- 8) N. Kotake, M. Hirata, T. Akai, M. Nishimura, M. Yamamoto and M. Kamon: Proc. of the 7th Japanese-Korean-French Seminar On G. E. E. (2007) p.225.