汚染地盤のバイオレメディエーションにおけるジオシンセティックスの適用

防衛大学校土木工学教室 宮田喜壽, 木暮敬二

(株)フジタ技術センター技術研究所 華嶽一郎, 近藤敏仁, 岡田正明, 畠 俊郎

概要

汚染地盤の修復技術として、エネルギー消費量が小さいバイオレメディエーションが期待されている。しかし、我が国の平野部に多く堆積している沖積粘土や火山灰質粘性土は一般に透気性や透水性が小さく、バイオレメディエーションの適用が困難となる。本研究においては、バイオレメディエーションを粘性土に対し適用する場合、汚染土の消石灰改良とジオシンセティックスの適用が有効であるという観点から、石油系炭化水素による汚染地盤の修復を対象に、室内試験と模型実験を実施した。本文では、消石灰改良とジオシンセティックスの適用を伴うバイオレメディエーションの基本的な概念を説明し、本文で提案する修復工法の実用化を検討するために実施した室内試験と模型実験の結果を示す。

キーワード：複合ジオシンセティックス、フィルター、バイオレメディエーション、目詰まり

Application of geotextile filter for the bioremediation of contaminated ground

National Defense Academy, Y. Miyata, K. Kogure

Fujita co., I. Kagaku, T. Kondo, M. Okada, T. Hata

Abstract

Today, there are a number of contaminated sites that have soils contaminated with oils and organic solvents. Bioremediation is one of the relatively few methods for actually destroying organic contaminants other than incineration and few chemical methods. In this study, in order to discuss the effective application method of the geotextile filters for the remediation system, laboratory test and model test were carried out. As a result, it was investigated that the effect of moving of soil particle and collection of Ca on the geotextile filter.

Keywords: geo-composite, filter, bioremediation, clogging

汚染地盤のバイオレメディエーションにおけるジオシンセティックスの適用

防衛大学校土木工学教室 宮田喜壽, 木暮敬二

(株)フジタ技術センター技術研究所 華嶽一郎, 近藤敏仁, 岡田正明, 畠 俊郎

1. はじめに

汚染地盤の修復技術を開発する必要性が高まっている。現在、汚染地盤の修復技術として、原位置処理や掘削土処理の方法がいくつか確立されているが、低濃度の地盤汚染の場合、エネルギー消費量が小さいバイオレメディエーション（生物の機能を利用する環境汚染の浄化技術の総称）が有力な修復技術として期待されている^{1), 2)}。しかし、我が国の平野部に多く堆積している沖積粘土や火山灰質粘性土は一般に透気性や透水性が小さい。このような地盤が長い年月を経て汚染された場合、微生物の分解活動を維持するために必要となる適当な水分や酸素、そして栄養塩を供給することが難しいために、バイオレメディエーションの適用が困難となる。

本研究においては、バイオレメディエーションを粘性土に対し適用させるためには地盤環境をコントロールする必要があり、その場合汚染土の消石灰改良とジオシンセティックスの適用が有効であるという観点から、石油系炭化水素による汚染地盤の修復を対象に、室内試験と模型実験を実施した。本文では、はじめに消石灰改良とジオシンセティックスの適用を伴うバイオレメディエーションの基本的な概念を説明する。次いで、バイオレメディエーションにおいて地盤内環境をコントロールする効果を室内の基礎実験より明らかにする。そして最後に、本文で提案する修復工法の実用化を検討するために実施した模型実験の結果を示す。

2. 消石灰改良とジオシンセティックスの適用を伴うバイオレメディエーション

2. 1 技術の概要

長い年月を経て炭化水素で汚染された粘性土をバイオレメディエーションによって修復することは容易でない。そこで、著者らは、汚染した粘性土の透水性および透気性を消石灰改良によって改善し、修復系に対する微生物と栄養塩、そして酸素の供給を、ジオシンセティックスを用いて行う修復工法を考えた。本文で検討する修復工法の概要を図-1に示す。修復の手順は以下のとおりである。まず、汚染した粘性土を掘削して修復サイトに移動させ、そこで消石灰改良する。次に、ジオシンセティックスを用いながらある程度の高さまで改良した汚染土を盛り立てる。ここで、土中に敷設するジオシンセティックスには次の3つの機能を期待する。(1) 微生物と栄養塩、そして酸素を修復系に供給する、(2) 汚染土より構成された盛土を安定化する、(3) ジオシンセティックス内に電熱線などを収め、土中温度を一定の高さに保つ。以上の操作によって、小規模なヤードで比較的大量の汚染土を修復できると考える。なお、消石灰改良やジオシンセティックスの適用は原位置でも可能であるから、地下水の流れの制御に困難を伴わない場合、以上の概念に基づく工法は汚染サイトで直接的に適用できるとも考えている。

図－１ 消石灰改良とジオシンセティックスの適用を伴うバイオレメディエーション

2. 2 本修復工法の技術課題

以上の工法の実用化に際しては種々の技術的課題がある。まず、消石灰で改良を行うと、汚染土がアルカリ性を呈することになるので、アルカリ条件下で石油系炭化水素を分解する微生物を探索する必要があることである。この問題については、著者らは別途検討を行い、中性条件で炭化水素を分解する微生物と同等の分解性能を有する微生物の分離に成功している³⁾。他の課題としては、炭化水素の分解過程で、微生物や栄養塩を供給する効果を確認することと、ジオシンセティックス内部および表面の目詰まり特性および目詰まりに伴う面内方向通水性能の変化の影響について調べる事が挙げられる。本論文においては、以上の課題について検討するために室内試験と模型実験を実施した。次章以降では、それらの結果について考察する。

3. 炭化水素の分解過程で微生物と酸素を供給する効果

3. 1 実験の概要

(1) 実験試料

汚染物質として想定する石油系炭化水素として軽油を用いた。それをガスクロマトグラフィーと赤外分光光度計で定量した結果、今回用いた軽油は全油分量の 26.4 %が n-アルカンであり、炭素数が 24 までの n-アルカンが含まれていることが分かった。供試した微生物は活性汚泥、人工汚染土、魚水槽腐泥、油田跡地土、畑地土壌より分離したものの中から最も活性の高いものを用いた。

(2) 実験方法

本実験の目的は、初期の分解速度を維持するためには、石油系炭化水素の分解過程において、どのような補給が有効であるかを明らかにすることである。実験方法は以下のとおりである。まず、表－1 に成分を示した培地 15 ml を 125 ml 容量のバイアル瓶に注入し、軽油を濃度 20000 mg/l になるように加え、微生物を植菌して密栓した。次に、25℃、160 rpm の振とう培養を行い、所定の日数ごとに分析試料を抜き取った。予備実験では、この条件において約 20 日間培養した後、残留油分量の減少速度が緩慢になった。そこで、培養開始後 21 日目に表－2 に示す 3 種類の補給を行い、再び密栓して約 1 ヶ月間培養を継続し、そ

表－１ 培地の成分

Hydro carbon	NH ₄ Cl	K ₂ HPO ₄	MgSO ₄ ・7H ₂ O	CaCl ₂ ・2H ₂ O	FeCl ₃ ・7H ₂ O	trace mixture	酵母エキス	agar	Na ₂ CO ₃	D.W
所定量	0.5 g	1.0 g	0.2 g	0.02 g	0.05 g	1.0 ml	0.01 g	20 g	10 g	1000 ml

trace mixture：微量元素の濃縮混合液， agar：生物実験用の寒天 D.W.：蒸留水

表－２ 補給した微生物と栄養塩そして水の構成

微生物	10 ⁹ cells/ml の微生物濃度の溶液 1 ml
栄養塩	窒素と塩類の濃度が表－１に成分を示した培地の 15 倍を有する溶液 1.0 ml
水	滅菌水 10.0 ml

図－２ 分解途中での微生物，栄養塩，水の補給効果

の後全油分量を計測することで，効果的な補給方法を検討した。

2. 2 実験結果と考察

残留炭化水素濃度の推移を図－２に示す。培養開始後 20 日までの油分分解濃度は約 11.0 mg/l/hr を示した。21 日目に表－２に示す各補給を行った後，微生物と塩類を補給したケースについては当初の分解速度を維持することができた。しかし，微生物のみを補給したケースでは，補給後の分解をほとんど進めることはできなかった。培養 55 日後におけるアルカンの残留状況を図－３に示す。炭素数が 20 を超える炭化水素については，各ケースの差はほとんどない。しかし，炭素数が 17 以下の炭化水素においては，微生物と塩類を補給したケースでの分解が顕著に認められる。以上のことから，分解過程において微生物と栄養塩を定期的に補給すると，汚染物質の速やかな分解が可能になることが分かった。

図－3 微生物や栄養塩そして水補給後のn－アルカン残留状況

4. 模型実験の結果と考察

4. 1 模型実験の概要

(1) 実験装置

実験装置を図－4に示す。装置は、人工汚染土の修復を行う土槽と土槽内に微生物と栄養塩の水溶液を供給するための水循環装置、土槽内に酸素を送り込むための空気循環装置、土槽内の温度を一定の高さに保つためのヒーターおよび断熱層、土槽内の水分と温度の変化をモニタリングするための各種計測器から構成される。水循環装置および空気循環装置は、ロータリータイマーを用いて自動制御した。

図－4 模型実験装置

(2) 実験試料

山梨県上野原に堆積していた表層の火山灰質粘性土（自然含水比 100 %）を採取し、軽油を 5000 mg/l となるように添加して、人工汚染土を作製した。供した複合ジオシンセティックスは、写真－1に示すようにヘチマ状の硬質な心材を薄手の不織布で挟んだ製品であり、供した碎石は、40 mm 以下に粒度調整されたものである。

(3) 実験方法

(2)に述べた方法で作製した人工汚染土を消石灰で処理したあと（消石灰の添加率は重量比にして 5 %），碎石をまきだし，複合ジオシンセティックスを敷設した後，人工汚染土を 3 回に分けてドラム缶に投入し

た。そして、1回の投入ごとに栄養塩水溶液（表－1に示した培地とほぼ同じ物質構成もの）3Lと微生物懸濁液（好アルカリの石油分解微生物と軽油馴養液）2Lをジョウロで散布した。次に、微生物と栄養塩の水溶液を定期的に循環させるための水循環装置、酸素を土槽内に定期的に送り込むための空気循環装置、温度計、土壤水分計を取り付けた。2. では温度調整にもジオシンセティックスを用いることを述べたが、それについては今後の検討課題とし、土槽の温度を一定に保つためのヒーターおよび断熱材をドラム缶に巻きつけ浄化を開始した。浄化途中においては、土槽内温度と含水比、循環水の pH およびリン・窒素濃度、排出量を定期的に測定しながら、微生物と栄養塩を水循環装置を用いて修復系に供給した。その後、浄化開始後160日目に土槽を解体して、その時点で土槽内の温度、含水比、単位体積重量、pHの分布を測定し、さらに複合ジオシンセティックスの変化、n-アルカンの除去率を評価した。

写真－1 供した複合ジオシンセティックス

4. 2 実験結果と考察

(1) 土槽内の状態

土槽解体時に土槽内12点（鉛直方向4段階、平面方向3点）で測定した温度、含水比、単位体積重量、pHを表－3に示す。なお、土槽内の各位置の説明は表の右側に示した図のとおりである。使用したヒーターの性能のために、土槽全体を同じ温度に保つことはできなかったが、実験を冬季に実施したにもかかわらず、土槽上部で25℃、下部で30℃程度に維持することができた。含水比は、下層ほど、そしてAの方向ほど高い傾向を示したが、単位体積重量はほぼ一定の値が計測された。pHは含水比の高い地点ほど大きな値を示す傾向が認められた。

(2) 浸透に伴う細粒径土粒子の移動

上部から微生物と栄養塩を浸透させるので、細粒径の土粒子が下層に移動し、複合ジオシンセティックス表面を目詰まりさせる危険性がある。そこで、土槽解体時に表－3の右図中B-1～4で表される4点において試料を採集し、粒度分析を行った。結果を図－5に示す。この結果より、例えば20%粒径に着目すると、その値は下層ほど小さくなることが分かる。浄化開始前はほぼ同一の粒度分布を示していたと考えられ、この違いは浸透に伴う細粒径の土粒子の移動によってもたらされたと考えることができる。また、細粒径の土粒子の構成比が大きくなった下層ほど土の保水性が高まったために、表－3に示した含水比分布が生じたと考えられる。図－6では、4層の平均の粒度分布と消石灰改良前の人工汚染土の粒径分布を比較した。ここで50%粒径に着目すると、消石灰改良によって、50%粒径が大きくなっていることが分かり、その分土槽全体に微生物と栄養塩を均一に供給しやすい環境に近づけることができたことが分かる。

表－3 土槽内の温度，含水比，単位体積重量，pH の分布

	温度 (°C) / 含水比 (%) / 単位体積重量 (g・cm-3) / pH			
	A	B	C	
1	26 / 126 / 1.37 / 8.9	19 / 121 / 1.32 / 9.4	18 / 121 / 1.35 / 10.8	
2	36 / 127 / 1.34 / 9.8	28 / 126 / 1.23 / 11.0	26 / 125 / 1.22 / 10.9	
3	37 / 125 / 1.35 / 10.5	31 / 124 / 1.28 / 11.1	28 / 126 / 1.25 / 10.7	
4	34 / 132 / 1.32 / 11.2	31 / 133 / 1.27 / 11.2	29 / 118 / 1.33 / 10.9

(3) 複合ジオシンセティックスの変化

土槽解体後，修復土の下に配置した複合ジオシンセティックス表面には，図－7に示す位置に白い析出物が確認された．その析出物の元素組織の分析結果を図－8に示す．析出物の大半はカルシウムであり，消石灰の成分が複合ジオシンセティックス表面に析出されたと考えられる．本実験では，ヒーターの性能のために，Aの方向ほど土中温度が高い傾向にあった．そのことが，複合ジオシンセティックス表面に析出物を生じさせた要因になったと考えられる．また，複合ジオシンセティックス表面の析出状況をみると，その部分の透気性および透水性はほぼゼロの状態に変化していたであろうことが予測でき，このこともその周辺の含水比が高くなった要因になったと考えられる．今後，このようなメカニズムで生じる目詰まりについて詳しく調べる予定である．

(4) n－アルカンの除去率

最後に，n－アルカンの除去率の分布を表－4に示す．n－アルカンの除去率は表層ほど高い値を示しており，この実験結果からみると，有効修復深さは土槽表面から30～40 cmであったと評価できる．現段階において，以上(3)に示した複合ジオシンセティックス表面の目詰まりの問題がn－アルカンの除去率に及ぼした影響を定量的に評価することはできない．ただ，3つの効果を期待して（参照：図－1），修復土からなる盛土内にジオシンセティックスを配置する場合，その配置間隔の決定には本文に示した実験結果をふまえ検討する必要があると考える．

図－5 160日浄化後の土槽内における粒度分布の違い

図－6 消石灰改良の効果

図-8 複合ジオシンセティックス表面の析出物の解析

表-4 各地点での n アルカンの除去率 (%)

	A	B	C
1	74	65	65
2	76	41	44
3	71	38	21
4	24	15	12

5. まとめ

本論文に示した内容は以下のようにまとめられる。

- (1) 消石灰改良とジオシンセティックスの適用を組み合わせたバイオレメディエーションの考え方を示した。この工法では、修復系に微生物と栄養塩そして酸素を供給する、汚染土で構成される盛土を安定化する、修復系を一定の温度に保つという 3 つの効果を期待して、ジオシンセティックスを適用する。
- (2) 分解過程において微生物と塩類を定期的に補給すると、汚染物質の速やかな分解が可能になることを室内試験の結果より示した。
- (3) 2 m³ 程度の人工汚染土を用いた模型実験より、消石灰改良とジオシンセティックスの適用を伴うバイオレメディエーションがある程度の実用性を有していることを示した。一方、その技術は複合ジオシンセティックス表面でのカルシウムの析出などの課題を有していることも示した。

参考文献

- 1) Flathman, P.E. et al. : Bioremediation Field Experience, Lewis Publishers, 1994.
- 2) Brubaker, G.E. : In-situ bioremediation: how has it changed in the past 20 years? How will it change in the next 10?, Proc. of Geoenvironment 2000, Published by ASCE, Vol.2, pp.1437-1455, 1995.
- 3) 木暮敬二・宮田喜壽・近藤敏仁, 岡田正明 : 石油系炭化水素汚染土の改良を伴うバイオレメディエーションに関する基礎的研究, 土と基礎, 47-10, pp.5-8, 1999.