

ジオテキスタイルを用いた盛土内の土壌浄化に関する基礎的研究

今野雄太¹・峯岸邦夫²・巻内勝彦³

近年、建設工事による産業廃棄物としての汚染土が増加し、それに伴い対策工法も多様化している。

そこで、本来廃棄処理する建設発生土を盛土材等の建設材料に転用するために行う土壌浄化改良工法として、ジオテキスタイルをドレーン材として使用し、その浄化効果を排水補強効果とともに評価・検討した。

本研究では、試料土に関東ロームと東金産山砂、川砂を使用し、汚染土とジオドレーン材による室内土槽モデル試験を行い、粒径、上載荷重、ドレーン材の敷設枚数、敷設条件、試料土の種類、汚染物質の種類、水頭等の諸条件を変化させ、着実な効果予測、より高い汚染除去能力を持つ、諸条件の組み合わせを見出すための基礎的実験を行い考察した。

キーワード：ジオテキスタイル，ドレーン材，土壌浄化

1. 研究背景と目的

建設工事による発生土は近年増加の一途をたどっており、その適切な有効利用が求められている。建設発生土は建設リサイクル法により再利用すべき副産物として指定されているが、有害物質が基準値以上混入している汚染土が、ここ数年発見が格段に増加傾向を示していることで、その調査・対策工事も同様の傾向を示している。しかし、現状では汚染物質の種類・形態による効果も様々であり、汚染の拡大する過程・現状土の状態等が十分に理解されていないことがある¹⁾。よって、既存の技術であっても効率的な効果の予測や低コスト技術への改良が必要がある。そこで、汚染土のリサイクル、軟弱地盤の補強と言った観点から、新たにジオテキスタイルをドレーン材として使用し、土壌内の余剰水ごと汚染物質を排出し土壌浄化を促す工法を検討してみた。本研究では、試料土に関東ロームと東金産山砂、比較として透水係数の良い川砂、ドレーン材として不織布ジオテキスタイルを使用して、汚染土とジオドレーン材による室内土槽モデル試験を行い、上載荷重、敷設枚数、敷設条件、試料土の種類、汚染物質の種類、水頭等の諸条件を変化させ、効果予測や、より高い汚染除去能力を求める実験を行った。

2. 試験方法

試料土として高含水比火山灰質粘性土（関東ロー

ム）と東金産山砂，比較対象として透水性の良い川砂を使用し，混入する汚染物質として灯油を使用した。ドレーン材にはスパンボンド不織布 S - 300（公称厚さ 3.0mm，目付け 300g/m²）を用いた。試験方法としては写真 - 1 に示す試験モデル土槽（内寸法 40cm × 55cm × 25cm）にドレーン材を水平敷設し，土槽上部から継続的に水を 700cm³/min で流入させ，給排水位を一定に保った。そして排水量がほぼ安定した後に土とドレーン材の複合体として図 - 1 に示すように面内方向通水・排出量と垂直方向透水・排出量の測定試験を行った。

以下に本研究の試験項目および条件を示す。

- (1) 関東ロームは自然含水比 ($w_n = 110\%$) 状態で湿潤密度 ρ_t を 0.9g/cm^3 になるように，山砂は湿潤密度 ρ_t を 1.4g/cm^3 になるように所定の締め固めエネルギーで土壌を均一に 8 分割して締め固める。川砂は絶乾状態で相対密度 D_r を 50% になるように同様に締め固めた。汚染物質は，その各層ごとに流入させた。また，流入量は乾燥状態の試料土質量に対して 2% とした。
- (2) 載荷重を 0，5，10，15，20kPa の 5 段階の条件で試験を行ない，土被り圧の影響を調べた。
- (3) ジオテキスタイルを図 - 2，図 - 3 のように中央 3 枚，分割 3 層敷設して，この条件による排水・排出量と，写真 - 2 に示すオイルシートを用いて測定する。汚染物質排出量は，オイルシートの油分のみを吸収する特性を利用して，排水量を測定した後にそれを攪拌して表面上に浮かび上がる油分を測定する。オイルシートの質量を除いた

¹学生会員，日本大学大学院理工学研究科社会交通工学専攻，博士前期課程（〒274-8501 船橋市習志野台7-24-1）

²個人会員，日本大学理工学部社会交通工学科，助手（同上）

³個人会員，日本大学理工学部社会交通工学科，教授（同上）

ものを汚染物質排出量として、その違いを比較検討した。

- (4) 排水試験によって得られた面内方向通水量と垂直方向透水量の割合および排水性能比を調べた。
- (5) 試験終了後に検知管を用いたガス吸引試験を行い、ベンゼン・石油ナフサの残留濃度を調べた。

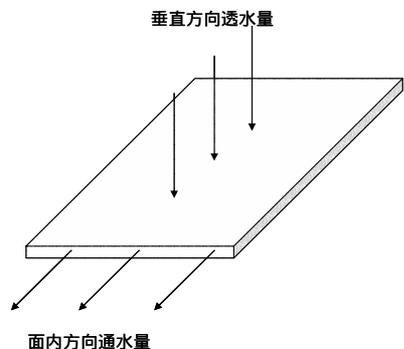


図 - 1 面内方向通水量・垂直方向透水量

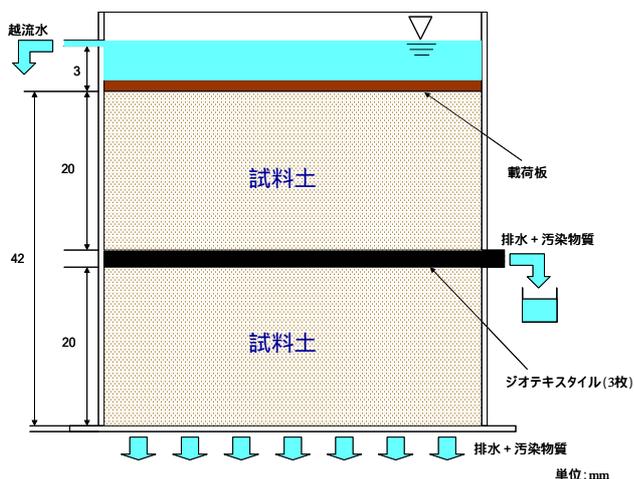


図 - 2 中央3枚敷設図

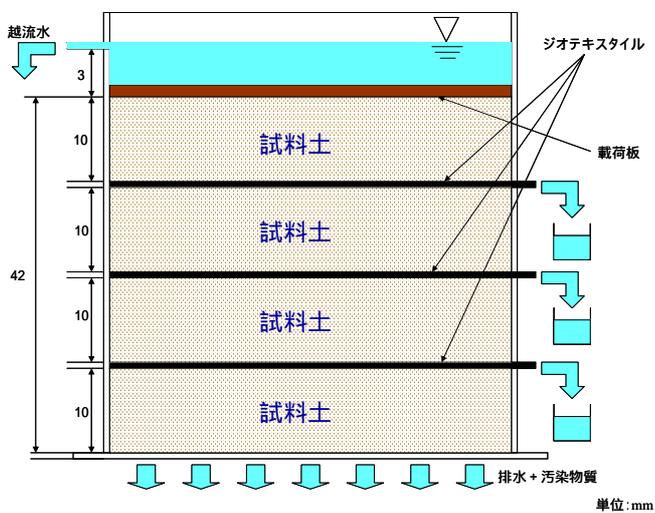


図 - 3 分割3枚敷設図

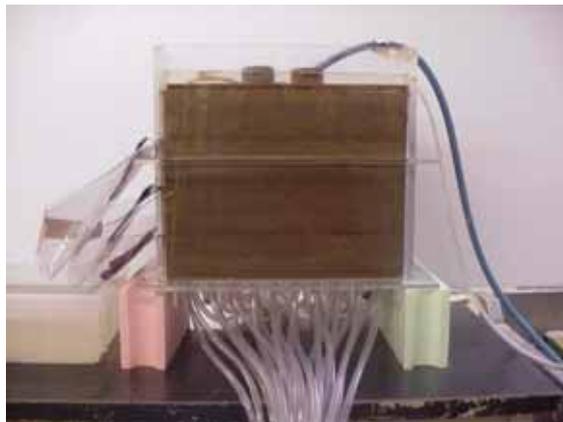


写真 - 1 中央3枚敷設図



写真 - 2 分割3枚敷設図

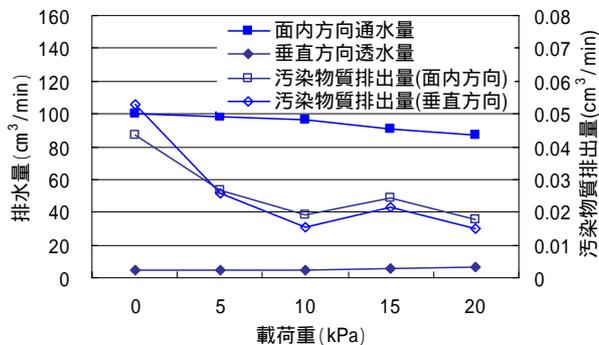


図 - 3 東金産山砂における排水・排出量と載荷重に関する関係 (中央3枚)

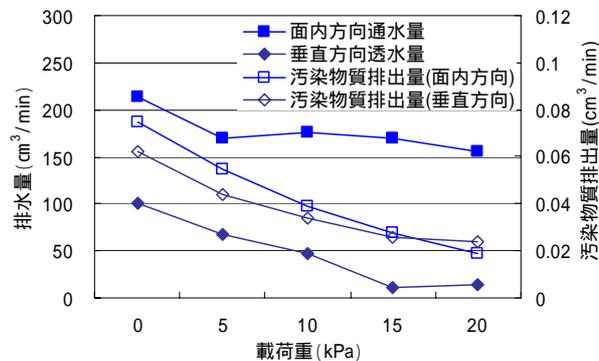


図 - 4 川砂における排水・排出量と載荷重に関する関係 (中央3枚)

3. 室内試験結果と考察

図 - 3 ~ 図 - 8 は、試料土別に排水（通水・透水量）・汚染物質排出量と載荷重の関係を示したもので、図 - 3 ~ 図 - 5 は中央に3枚重ねて敷設した条件、図 - 6 ~ 図 - 8 は、分割して3枚敷設した条件である。載荷重が5kPa, 10kPa, 15kPa, 20kPaと増加するにつれて排水量・汚染物質排出量が減少していくのがわかる。これは、関東ローム、東金産山砂においては、載荷重が増加するにつれて土の密実化が進み透水係数が低下、ドレーン材の排水断面積の減少、目詰まりによる排水材の透水係数の低下といったことが挙げられる。川砂においても、排水量が大きく減少するという結果になった。これには、ドレーン材や試料土の圧密作用による透水係数の低下は若干作用するものの、ジオテキスタイルの表面に油膜のような物を作ることによって排水材の透水係数がここまで低下したと考えられる。また図 - 5 より載荷重が0 kPa のとき、垂直方向のほうが汚染物質排出量の値が大きかったのは関東ロームが載荷重を増加することによりドレーン材から汚染物質を押し出したと考えられる。

川砂と関東ロームでは排出量の減少率が異なり、川砂で約70%、関東ローム20%の減少であった。関東ロームは、吸着作用によりあらかじめ排出される汚染物質の量が制限される。よって、排出される油分が少量であったことから、油による目詰まりが発生しその分低減されたと考えられる。

試験前は、載荷重を段階的に増加させるにつれて、灯油が排水とともに排出されると予想した。しかし、川砂・東金産山砂においては、若干の汚染物質排出量の増加が見られたが、すぐに減少し安定していった。関東ロームにおいては、増加傾向は殆どみられず、無載荷の段階からわずかの量しか排出されなかった。原因として粘性土特有の性質である吸着作用が挙げられる。関東ロームに代表される粘性土を構成する粘土鉱物は、マイナスの電荷を帯びていることが一般的であるので、粘性土の表面は陰イオンに荷電しており、陽イオンを吸着する性質を持っている²⁾。本実験で使用した石油系化学物質は、複数の有機物を含む³⁾ため、水に溶け出した陽イオンが土壤に吸着するものと考えられる。図 - 9 は、粒径と無敷設時の汚染物質排出量の関係を示したものである。図から吸着は川砂や東金産山砂にはあまり作用せず、排出量を見ても川砂の場合、関東ロームの3倍~4倍、東金産山砂においても1.5倍から3倍位の格差があることがわかる。この結果から、粒径が小さければ小さくなるほどその吸着力は強くなる。以上のことから、汚染物質の排出には載荷重よりも、対象となる試料土に起因する傾向が強いことがわかった。

図 - 10, 図 - 11 は、各試料土別に見た、全排水量と全汚染物質排出量との関係を示した物であり、また表 - 1, 表 - 2, 表 - 3 はそれらの全排水量と

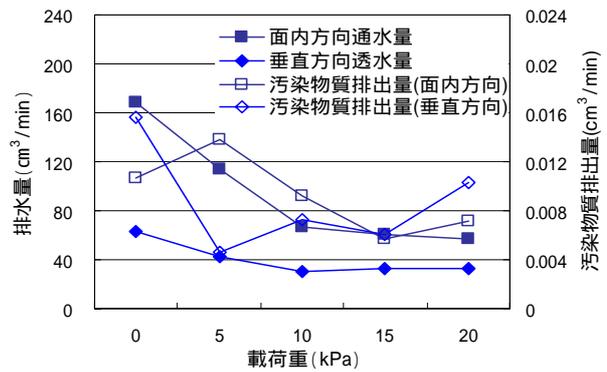


図 - 5 関東ロームにおける排水・排出量と載荷重に関する関係（中央3枚）

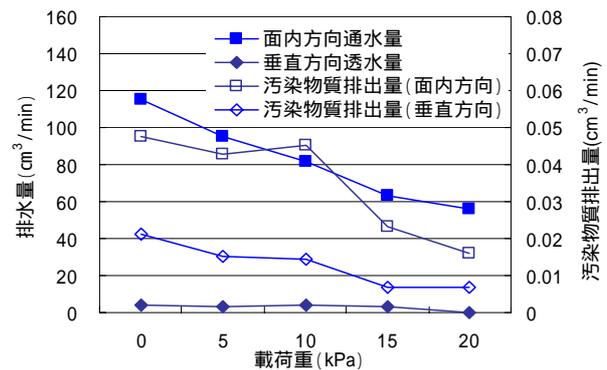


図 - 6 東金産山砂における排水・排出量と載荷重に関する関係（分割3枚）

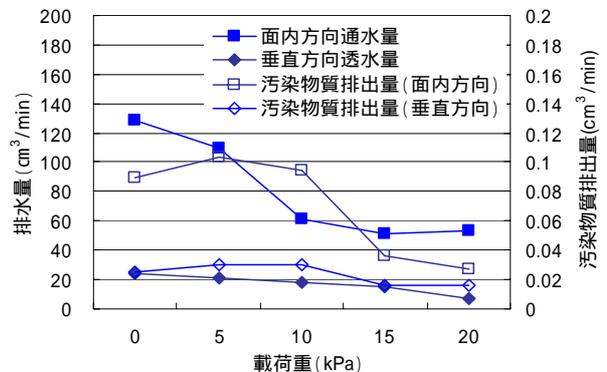


図 - 7 川砂における排水・排出量と載荷重に関する関係（分割3枚）

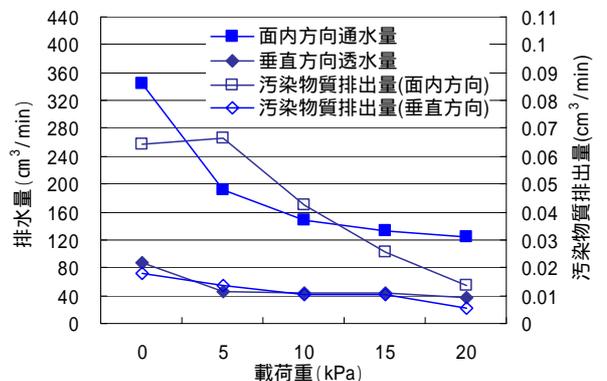


図 - 8 関東ロームにおける排水・排出量と載荷重に関する関係（分割3枚）

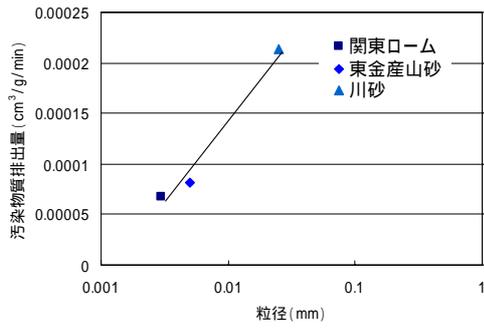


図 - 9 排出量と粒径の関係

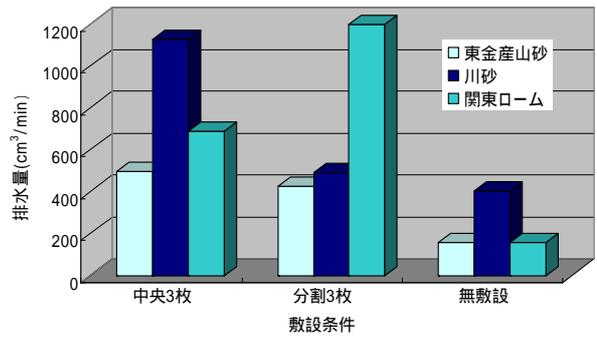


図 - 10 敷設条件別排水量の比較

表 - 1 無敷設条件における排水・排出量

試料土	排水量 (cm ³ /min)	汚染物質排出量 (cm ³ /min)
山砂	155.93	0.71
川砂	402.87	1.91
関東ローム	155.86	0.41

表 - 2 中央3枚敷設条件における排水・排出量

試料土	排水量 (cm ³ /min)	汚染物質排出量 (cm ³ /min)
山砂 面内方向	472.16	0.13
山砂 垂直方向	25.05	0.13
川砂 面内方向	884.14	0.21
川砂 垂直方向	240.03	0.19
関東ローム 面内方向	467.80	0.05
関東ローム 垂直方向	201.78	0.04

表 - 3 分割3枚敷設条件における排水・排出量

試料土	排水量 (cm ³ /min)	汚染物質排出量 (cm ³ /min)
山砂 面内方向	411.01	0.18
山砂 垂直方向	14.51	0.06
川砂 面内方向	404.50	0.35
川砂 垂直方向	85.24	0.12
関東ローム 面内方向	1118.43	0.24
関東ローム 垂直方向	76.98	0.04

表 - 4 透水係数

試料土	東金産山砂	関東ローム	川砂
透水係数 (cm/s)	2.22×10^{-3}	4.94×10^{-4}	1.20×10^{-2}

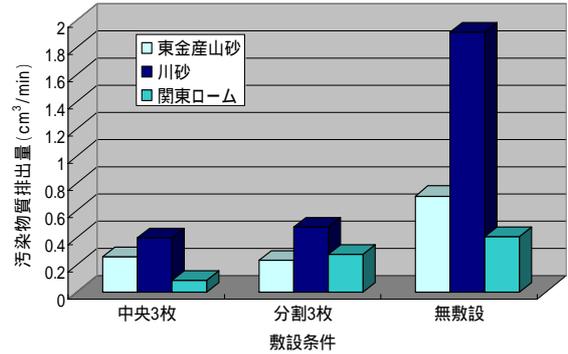


図 - 11 敷設条件別汚染物質排出量の比較

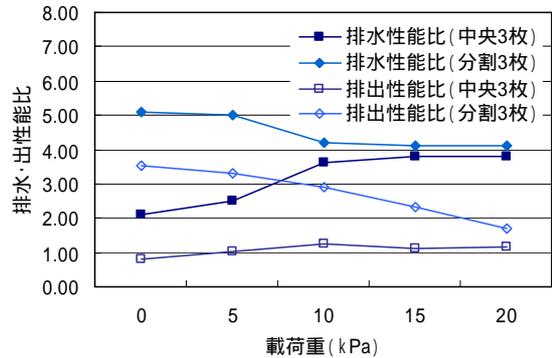


図 - 12 排水性能・吐出性能比と載荷重の関係 (東金産山砂)

ドレーン材の除去量を敷設条件別に数値化したものである。

まず、汚染物質排出量で見ると、東金産山砂において無敷設で 0.71cm³/min、川砂において無敷設で 1.91cm³/min、関東ロームにおいて無敷設で 0.41cm³/min と、全ての試料土において敷設していない条件の方が油の排出量は多かった。しかし、全排水量は、全条件中一番低く排水量と汚染物質排出量は比例関係ではないことを裏付ける結果となった。

これには、前述したように油による目詰まり・吸着が考えられ、ジオテキスタイルに油膜のような物を作り、排出されるはずであった油がそのまま、ドレーン材内部に吸着・残留し、以後の排水・排出に

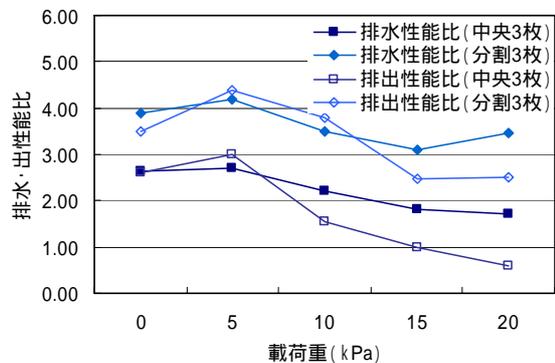


図 - 13 排水性能・吐出性能比と載荷重の関係 (川砂)

も影響を及ぼしたと考えられる。一方、無敷設の場合ドレーン材のような吸着する物がないので、水と同様に油もそのまま浸透し、このような傾向を示したと考えられる。また分割3枚敷設条件の通水量以外は関東ロームの汚染物質排出量が少なかった。このことから、粘性土特有の性質である吸着が作用していることがわかる。

次に最も排水量が多い敷設条件で見てと、東金産山砂において中央3枚で $497.21\text{cm}^3/\text{min}$ 、川砂において中央3枚で $1124.17\text{cm}^3/\text{min}$ 、関東ロームにおいて分割3枚で $1195.39\text{cm}^3/\text{min}$ と、砂質土で中央3枚、粘性土で分割3枚という結果になった。既往の研究⁴⁾では、分割に3枚敷設するよりも中央3枚敷設した方が、排水量は多くなる傾向とあった。これは、中央3枚敷設の方が、土が目詰まりする箇所が一箇所になり、逆に3枚を分割して敷設すると、目詰まりする箇所が3箇所に増加してしまい、ドレーン材全体の透水係数が低下するという結果になった。今回ようになった要因として、3枚重ねた1枚目に油と土の強固な目詰まり現象を起こしたために、残り2枚の排水機能が発揮できなかったと考えられるが、明確な原因説明は今後の研究課題とする。

今回、排水性能試験結果として汚染物質の排出に関しては、あまり良い結果は得られなかったが、排水量では中央3枚・分割3枚両条件とも、無敷設の状態と比較して全排水量は増加が確認できた。このことから、ジオテキスタイルをドレーン材として敷設することによって排水補強効果が期待できる。

表 - 4 は今回の実験で使用する試料土別の透水係数である。ここでは図示しないが載荷重を増加させると、間隙比の減少などによりこの値よりも低い数値となった。

図 - 12 ~ 図 - 14 に各載荷重における面内方向通水量と排水性能比・排出性能比の関係を示す。ここで、排水性能比 (Q_h/Q_v) とは面内方向通水量 Q_v と垂直方向透水量 Q_h の比で、通水量の確保性を知るためにこのような形で表した。同様に、油の排出量を知るために排出性能比をという形で示す。排水性能比同様に排出性能比 (V_h/V_v) とは面内方向汚染物質排出量 V_v と垂直方向汚染物質排出量 V_h の比率のことをさす。これらの図を見ると殆どの条件で載荷重の増加に伴い面内方向通水量、排水性能比、排出性能比は減少傾向を示している。面内方向通水量へ与えるマイナス要因としては、載荷重による間隙の減少、すなわち透水係数 k の低下による排水量の減少、また透水係数 k に依存する浸透流の低下、目詰まりによる排水量の低下などがあり、プラス要因としてはドレーン材の排水能力と集排水効果の組み合わせによる排水量の増加、載荷重による圧密排水の促進（間隙水圧の上昇）、試料土別では粒径の大きさにおける吸着性（油に対する粘性）による排出量の違い、透水係数 k の違いなどの様々な要因で結果的にこのような減少するという変化が生じたと考えられる。今回の試験結果では、排水性能比が載荷

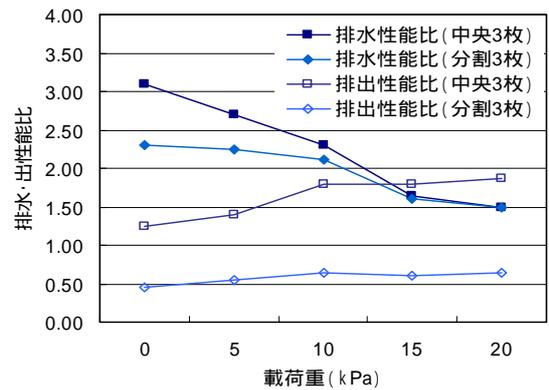


図 - 14 排水性能・排出性能比と載荷重の関係 (関東ローム)

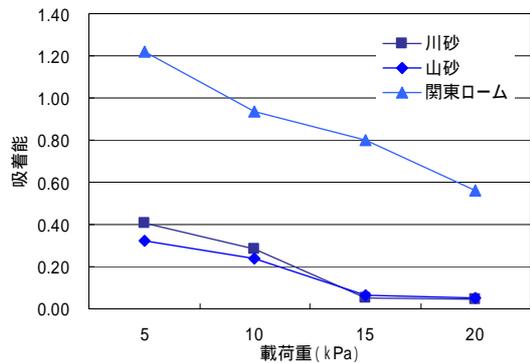


図 - 15 無敷設条件における吸着能と載荷重の関係

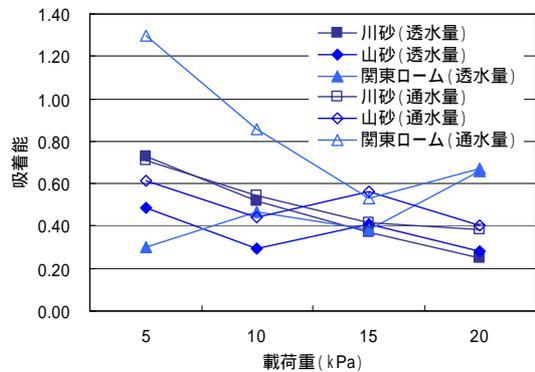


図 - 16 中央3枚敷設条件における吸着能と載荷重の関係

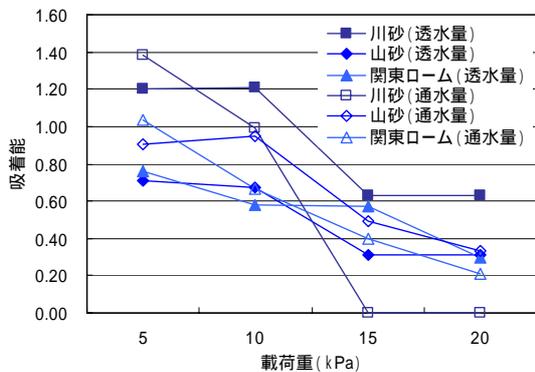


図 - 17 分割3枚敷設条件における吸着能と載荷重の関係

重を増やしても増加する傾向はなかった。これは、既往の研究⁴⁾と異なって、高い面内方向通水量を確保できなかったということである。むしろ、時間が経過するにつれて油による目詰まりが激しくなっていくことを示す結果となった。

図 - 15 ~ 図 - 17 は各載荷重、各土壌における汚染物質排出量の吸着能の関係を示す。ここで、吸着能とは 5kPa, 10kPa, 15kPa, 20kPa での汚染物質排出量と無載荷状態での汚染物質排出量との比率であり、載荷をすることにより汚染物質排出量が変化するメカニズムを知るためにこのような形で表す。

図 - 15 より、川砂・東金産山砂に比べて関東ロームの吸着能が非常に高いことがわかる。これは前述したように、粘性土特有の吸着作用によるもので、川砂・東金産山砂は 20 kPa において 0.1 未満なのに対して関東ロームは 0.5 を超えているのがわかる。図 - 16 から中央 3 枚敷設条件においても同様の傾向が得られたが、吸着能は全体的に大きくなっている。これは、ドレーン材の目詰まりにより浸透できなくなったことで汚染物質が蓄積してしまったためと考えられる。しかし図 - 17 を見ると全体的に減少傾向を示している。このことから分割に 3 枚敷設したほうが汚染物質は蓄積されないことがわかる。

また関東ロームの吸着能がすべての条件で載荷重が 5 kPa のとき 1.0 を超えている。これは無載荷重の場合よりも 5 kPa のほうが汚染物質排出量が多かったことを示し、載荷重を加えることでドレーン材から吸着していた汚染物質が押し出されたためと考えられる。このことから汚染物質排出量は多少なりとも載荷重の影響を受けるといえる。

4. ガス吸引試験結果と考察

本実験では、排水・排出性能試験を行った後、油の残留濃度を調べるためにガス吸引試験を行った。ガス成分の対象は、ベンゼンと石油ナフサである。測定箇所は図 - 18 に示す通り 9 箇所の排水孔付近に設定し、土中においてガス吸引試験を行った。試験結果を表 - 5 ~ 表 - 7 に示す。中央 3 枚、分割 3 枚の両試験条件ともベンゼンが殆ど検出されなかった。これは、ベンゼンは非常に空気中に消散しやすい物質でその融点は 5.5 である。水に溶解して流出したのではと考えたのだが、ベンゼンは水には溶解しにくい物質でその密度は水よりも低い。

一方、石油ナフサの沸点は 30 ~ 120 でこちらは常温での揮発はほとんどない¹⁾のでこのような結果になったと思われる。表 - 5 ~ 表 - 7 に示すように、敷設条件別に見てみると、東金産山砂、川砂両条件においてドレーン材付近の濃度が高いのがわかる。川砂、東金産山砂の中央 3 枚の上部 3 箇所（図 - 13 中の 1, 2, 3 の測定箇所）においては高い浄化が確認され、ジオテキスタイルの集水効果によって油分が集められたことを意味する。しかし、関東

ロームにおいては吸着性が高いために平均的な濃度となっている。

前述したが敷設条件別の排水量・排出量の検討を行ったが、吸引試験と照らし合わせてみるとその結果は、川砂・東金産山砂においては排水量が高くなればなるほど浄化効果が高くなることが確認された。



写真 - 3 ガス吸引試験機

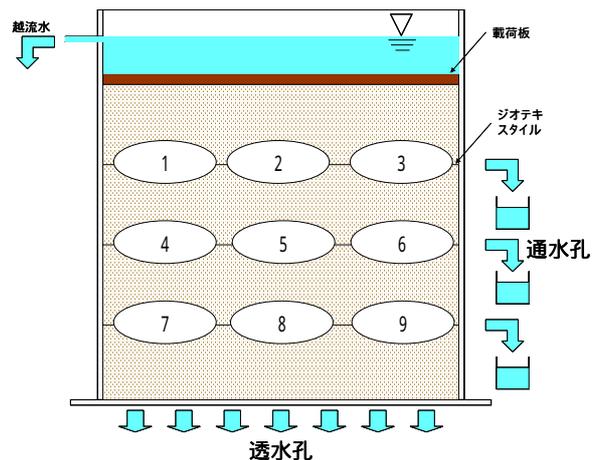


図 - 18 ガス吸引試験測定箇所

表 - 5 東金産山砂におけるガス吸引試験結果

測定箇所	中央3枚		分割3枚	
	ベンゼン (ppm)	石油ナフサ (mg/l)	ベンゼン (ppm)	石油ナフサ (mg/l)
1	0	0.5	0	2.1
2	0	0.8	0.1	1.8
3	0	0.8	0	2
4	0	1.2	0	1.3
5	0.1	1	0.1	1.4
6	0	0.9	0	1.6
7	0	0.6	0	1.5
8	0	0.8	0.1	2
9	0	0.6	0	2.1

表 - 6 川砂におけるガス吸引試験結果

測定箇所	中央3枚		分割3枚	
	ベンゼン (ppm)	石油ナフサ (mg/l)	ベンゼン (ppm)	石油ナフサ (mg/l)
1	0	0.2	0	0.5
2	0	0.7	0	0.8
3	0	0.1	0	0.8
4	0	0.2	0	1.2
5	0	1.3	0.1	1
6	0	1.8	0	0.9
7	0	1.2	0	0.6
8	0	1.4	0	0.8
9	0	1.3	0	0.6

5. 結論

以上の結果より今回得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 荷重を段階的に増加させることにより、排水量は低下していく。これは、関東ロームにおいて顕著に見られ、透水係数・排水断面積の減少が主な原因である。
- (2) 試料土への油の吸着には、試料土の粒径に依存する。粒径が小さくなるにつれて、土粒子との吸着は強くなる。
- (3) 化学的作用によるジオテキスタイルの目詰まりは顕著に影響が出る。排水材の透水係数が70%位まで減少する場合もあるので、今後検討が必要である。
- (4) 3種類の土壌で試験を行ったが、川砂、東金産山砂において石油ナフサの減少がみられたので、土壌浄化の可能性を見出すことができたと言える。

6. 今後の課題

本研究では汚染土壌で構築された盛土や擁壁などの地盤構造物を対象に室内モデル土槽試験機を作成しジオテキスタイルを水平ドレーン材として適用したときの面内方向通水性と垂直方向透水性の相互作用または相関性について調べ、土とジオテキスタイル複合体としての浄化作用について調べたが、試験装置や解析にはまだ改良すべき余地があり、以下に今後の課題を示す。

- (1) 試験土槽を改良してドレーン材の敷設条件を検討し、より効率的な敷設条件を見出す。
- (2) 目詰まりをしない排水材を使用する。
- (3) 分散剤などを用いて汚染物質の土壌への吸着をなくす。
- (4) 目詰まりによる透水係数の低減率を求め、それを条件にFEM解析を行う。

表 - 7 関東ロームにおけるガス吸引試験結果

測定箇所	中央3枚		分割3枚	
	ベンゼン (ppm)	石油ナフサ (mg/l)	ベンゼン (ppm)	石油ナフサ (mg/l)
1	0	1.2	0	1.6
2	0	1	0	1.7
3	0	1.1	0	1.9
4	0	2	0	1.7
5	0	1.3	0	1.9
6	0	1.5	0	1.7
7	0	1.3	0	2
8	0	1.5	0	1.8
9	0	1.3	0	2

参考文献

- 1) 平田健正監修：土壌汚染の対策と実務，(社)土壌環境センター，2001
- 2) 竹内均監修：地球環境調査計測事典，(株)フジ・テクノシステム，2002
- 3) 日本地盤環境浄化推進協議会編：土壌・地下水汚染の実態とその対策，(株)オーム社，2000
- 4) 椋澤竜生：地盤内におけるジオシンセティックス水平ドレーン材の通水・透水特性，日本大学修士論文，2001

謝辞

本研究を進めるにあたり、元本学学生の増田貴之氏の協力を得たことを記し、ここに感謝の意を示します。

A Fundamental Study on Embankment Soil Remediation Using Geotextile

By Yuta KONNO, Kunio MINEGISHI and Katsuhiko MAKIUCHI

There are a variety of soil remediation methods at present. In this study the effects of geotextile drain on soil remediation were investigated in the case of reuse of surplus soil for embankment. A laboratory model test was carried out using both cohesive and sand soils. It was found from the experiment that drainage and soil remediation effects were affected by overburden pressure, gradation of soil particles and placing condition of geotextile.

Key words: Geotextile, Drain, Soil remediation