

少量セメント添加海成粘土を用いた遮水地盤材料の透水性とセシウムの吸着特性

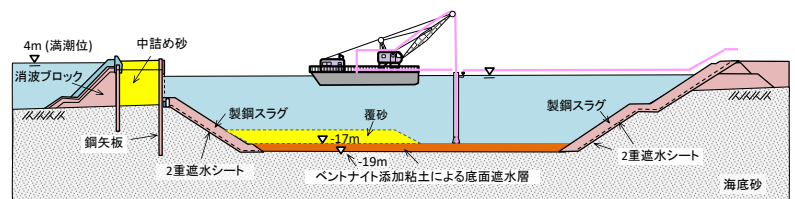
広島大学大学院工学研究科	非会員	○白神	拓也
広島大学大学院工学研究科	正会員	土田	孝
広島大学大学院工学研究科	学生会員	栗原	大
中電技術コンサルタント(株)	正会員	高橋	源貴

1. 目的

2011 年に発生した福島第一原発事故により放射性セシウムを含んだ大量の汚染土壌が発生した。最終処分場として海面処分場を対象とし、放射性セシウムの浸出を抑える遮水材料の開発を行っている。高橋ら¹⁾は海成粘土に間隙充填効果を有するベントナイトや陽イオン交換性を有するゼオライトを添加した遮水地盤材料の透水性やセシウムの吸着性に関する評価を行っている。しかし、底面遮水工が必要な場合、底面遮水材として海成粘土を母材として用いると非常に軟弱であるため、処分土壌埋立時の変形を防ぐ保護層の施工は多数回にわたって行わなければならない。底面遮水工を採用した海面処分場の実例として寒川東部産業廃棄物海面処分場²⁾が挙げられるが、トレミー管による圧送を行うため遮水層には $1.5 w_L$ のベントナイト添加粘性土に水ガラスを 20kg/m^3 添加することで初期強度を与えている。図 1 に処分場断面図を示す。後述するように水ガラス添加での初期強度は小さいため、本研究では遮水材料に初期強度を与える材料としてセメントに着目した。しかし、数百 kPa の強度では津波といった大きな外力によりクラックが生じ遮水性を保つことができない可能性がある。そこで数 kPa 程度の強度を有する少量のセメントの添加によって施工性を考慮した遮水地盤材料のセメント添加による影響について検討を行った。長期間の管理が必要となるため、本研究での検討内容は、水ガラス添加による初期強度やセメント添加による初期強度、遮水材としての遮水性能に加え、放射性物質を含んだ土壌を処分対象としていることから放射性物質に対する吸着性能についても検討していく。初期強度に関してはベーンせん断試験、標準圧密試験から求まる透水係数から遮水性能の検討を行い、また、圧密通水試験（通称、カラム試験）から求まる放射性物質の浸出挙動から吸着性能の検討を行った。

2. 試験方法

用いた試料は徳山港粘土（土粒子密度 $\rho_s=2.65\text{g/cm}^3$ ，液性限界 $w_L=111.6\%$ ），東京湾粘土（土粒子密度 $\rho_s=2.79\text{g/cm}^3$ ，液性限界 $w_L=133.9\%$ ），3 号水ガラス，ワイオミング産ベントナイト（土粒子密度 $\rho_s=2.89\text{g/cm}^3$ ，液性限界 $w_L=187\%$ ），相馬珪砂（土粒子密度 $\rho_s=2.67\text{g/cm}^3$ ），普通ポルトランドセメントである。添加率は海成粘土の乾燥重量に対する添加材料の重量の割合である。供試体の作製は以下のように行った。冷却した粘土に所定の添加材を添加し、人工海水を用いて海成粘土の液性限界の 1.5 倍になるよう



A-A' 断面



建設中の寒川産業廃棄物処分場 (2008)

図 1 寒川産業廃棄物処分場断面図

キーワード 海成粘土，セメント，セシウム

連絡先 〒730-0011 東広島市鏡山一丁目 4 番 1 号 A2 - 512

TEL 09053773149

表 1 検討ケース

粘土名	供試体名	水ガラス添加率 (%)	ペントナイト添加量 (kg/m ³)	砂添加率 (%)	セメント添加率 (%)
東京湾粘土	Y	0	-	-	-
	YW10	10	-	-	-
	YW20	20	-	-	-
	YB100S100W0	0	100	100	-
	YB100S100W10	10	100	100	-
徳山港粘土	T	-	-	-	0
	Tc2	-	-	-	2
	Tc4	-	-	-	4

に含水比を調整する．ハンドミキサーを用いて約 2 分間混合した後，大型のミキサーで 30 分間混合した．以下ではそれぞれの試験方法について説明する．本研究での検討ケースを表 1 に示す．T は過去に行われたケースを用いている 3)．

(1) ベーンせん断試験

上記の方法で試料を作製し，高さ 70mm，直径 60mm のアクリルケースに充填し，養生を行う．養生後，高さ 10mm，直径 20mm の十字翼を供試体内に埋め込み，回転させることで抵抗値を求める．式 1 を用いて強度を求める．

$$C_u = \frac{M}{\pi \left(\frac{D^2 H}{2} + \frac{D^3}{6} \right)} \quad (1)$$

ここで C_u : せん断強さ (kN) M : 計測された最大トルク (kN・m) D : 十字翼の直径 (m) H : 十字翼の高さ (m) である．

(2) 標準圧密試験

上記の方法で供試体を作製し，高さ 20mm，直径 60mm の圧密リングに充填した後，試験機内で 7 日間養生を行う．圧密応力増分比 $\Delta p/p=1$ で 4.9kPa から 627.2kPa まで 8 段階圧密を行い，圧密度が 100%に達したことを確認し各段階を 1 時間で終了する．

(3) 圧密通水試験

上記試験同様に上記の方法で供試体を作製し，高さ 10mm，直径 60mm の圧密リングに充填し，試験機内で 7 日間養生を行う．圧密を 4.9kPa，9.8 kPa，19.6 kPa の圧密応力で圧密を行い，圧密完了後に図 2 に示すように二重管式ビュレットを試験機に接続する．背圧 19.4kPa を加えてセシウム濃度が 30ppm の安定セシウム溶液を供試体に通水させる．透過液は 10ml 毎に採取し，原子吸光分析機を用いて透過液内のセシウム濃度を測定する．式 2 に示す間隙水の入れ替わり回数に相当する FPV (flow per pore volume) を用いて検討を行った．また供試体に対する吸着量を式 3 により算出している．

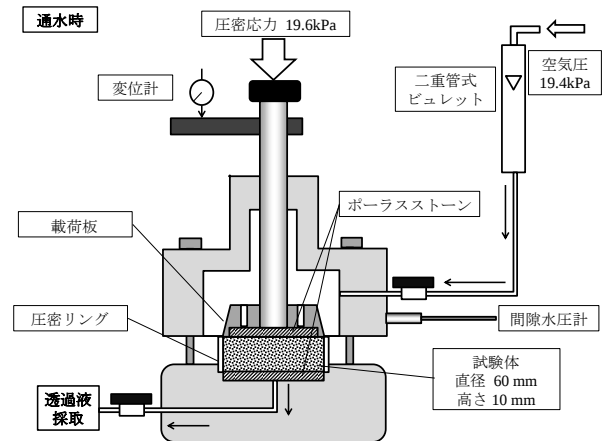


図 2 圧密通水試験機概要図

$$FPV = (\text{透過液の体積}) / (\text{間隙水の体積}) \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^k \left(\frac{(C_0 - C_i)V_i}{m_d} \right) \quad (3)$$

ここで S : 累計吸着量(mg - ¹³³Cs /kg), C_0 : 初期セシウム濃度(mg/L), C_i : 測定したセシウム濃度(mg/L), V_i : 採取した透過液量(ml), m_d : 粘土の乾燥重量(kg/m³)である．

3. 試験結果

水ガラスを用いた供試体でのベーンせん断試験の結果を図 3 に示す。水ガラスのみを添加した供試体では 28 日強度がおよそ 1kPa の強度が得られていることがわかる。また海成粘土に対してベントナイト・砂を添加した供試体について粘土のみの供試体と比べ、強度に大きな差はないがさらに水ガラスを添加した場合、約 2.2kPa の強度が得られている。この強度増加の原因としてはベントナイトに含まれる多価金属イオンによってゲル化が進んだためであると考えられる。水ガラスを用いて強度を発現させるにはベントナイトといった他の添加材料が必要になることがわかる。

セメントを添加した供試体でのベーンせん断試験の結果を図 4 に示す。28 日強度をみると、Tc2 において 2.0kPa, Tc4 において 2.3 kPa が得られた。徳山港粘土においては少量のセメント添加によって 28 日強度では 2kPa 程度の強度が得られることがわかる。1.5w_L の海成粘土に水ガラスを添加した場合、強度はおよそ 1 kPa 程度の強度が得られることから、セメントを添加した場合では、約 2 倍の強度が得られている。しかし強度に関しては、粘土の性状によってセメント添加による強度発現は異なるため、粘土毎に強度試験を行う必要がある。

標準圧密試験の結果を示す。図 5 が e -log p 曲線、図 6 が平均圧密応力 p と透水係数 k の関係、図 7 が e -log k 関係である。図 5 からセメントの添加を行った供試体では間隙比が大きくなっていることがわかる。T と比べると Tc4 において最大で約 1.46 倍となり、Tc2 においては最大で約 1.41 倍に上昇している。これにはセメント固化によって粘土の構造が変化し間隙が生まれてしまったことが考えられる。図 6 に示すとおり同じ圧密応力に対して、透水係数はセメント添加を行った供試体で大きく上昇しており、平均圧密応力 443.5kPa で T と比較すると、それぞれ 2.17 倍、3.17 倍になっている。遮水性能としてはセメント添加により低下しているといえる。図 7 ではセメント添加の影響はみられない。したがってセメント添加による k の増加は同じ圧密応力に対して間隙比が高くなることによるものである。

次に圧密通水試験の結果を示す。図 8 が FPV と透過液内のセシウム濃度との関係、図 9 が累計吸着量と透過液内セシウム濃度との関係である。図 8 をみると T ではセシウムの浸出が開始される FPV の値は 11.1 となっている。セメントを添加した供試体 Tc2, Tc4 では、それぞれ 10.5,

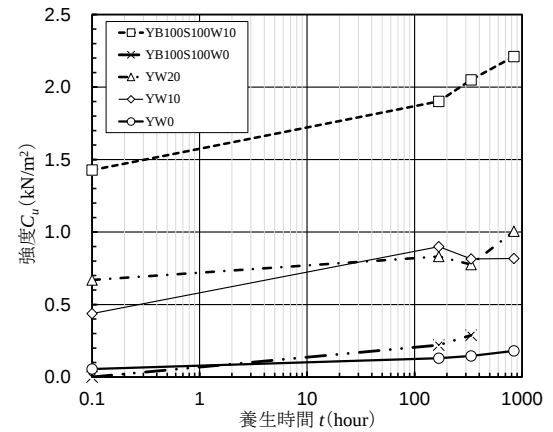


図 3 水ガラス添加による強度

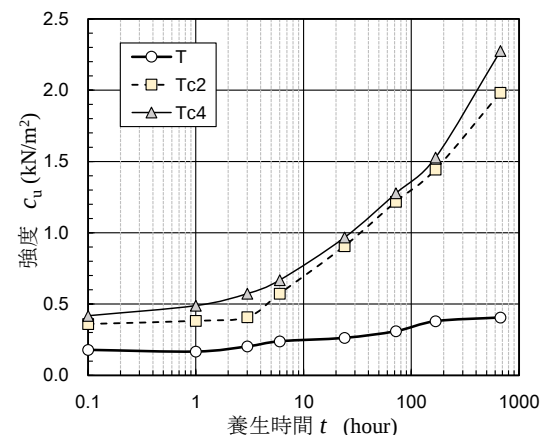


図 4 セメント添加による強度

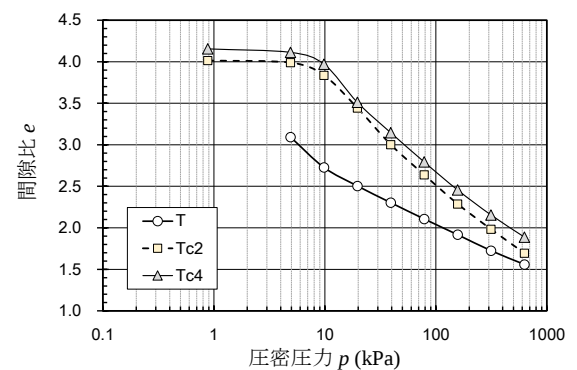


図 5 e -log p 曲線

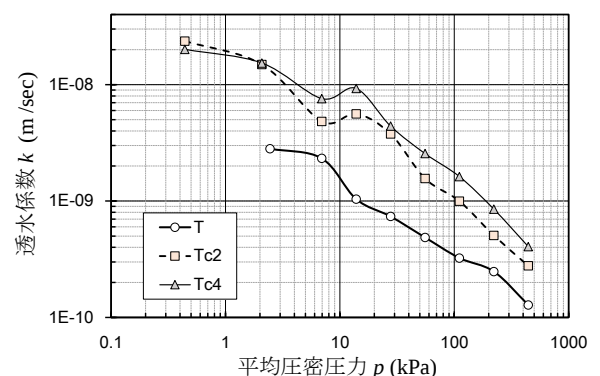


図 6 透水係数と圧密応力との関係

10.4 であり、比較すると約 0.95 倍、約 0.94 倍となっている。セシウムの浸出が開始する FPV は小さくなっているものの、セメントを添加することによる FPV の変化は小さいことがわかる。次に累計吸着量をみてみると、T において約 $220 \text{ mg} - {}^{133}\text{Cs/kg}$ 、Tc2、Tc4 では約 $350 \text{ mg} - {}^{133}\text{Cs/kg}$ 、約 $360 \text{ mg} - {}^{133}\text{Cs/kg}$ となっており、セメントを添加することでセシウムの浸出が開始される累計吸着量は約 1.6 倍に増加していることがわかる。この吸着量の増加にはセメント添加による pH の増加が考えられる。しかし本試験では pH の測定は行っていないため、今後検討していく必要がある。

4. 結論

- 1) $1.5 w_L$ の東京湾粘土に水ガラス（乾燥重量比 10%，20%）を添加することでおよそ 1kPa の 28 日強度が得られた。ベントナイトといった他の添加材をさらに加えることで 2.2kPa まで増加した。
- 2) 徳山港粘土において少量のセメント（乾燥重量比 2，4%）を添加することで初期強度が 0.4kPa から 2kPa 程度まで増加することがわかった。水ガラスのみ添加した供試体と比較すると約 2 倍の強度が得られた。
- 3) 海成粘土にセメントを添加した場合、同圧密応力下における透水係数が上昇することがわかった。これは間隙比が高くなるためである。遮水材料として用いる場合、圧密などによる透水係数の低下は求められる。
- 4) セシウムの浸出に関して FPV ではセメントを添加した場合と粘土のみを比較するとほとんど変化は見られなかった。しかし、粘土の乾燥重量あたりの累計吸着量は大きくなっており、セメントを添加することでセシウムの吸着性能は向上したと言える。

参考文献

- 1) 高橋源貴，土田孝，村上博紀：海面処分場に用いる遮水地盤材料の吸着性能に関する研究，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol. 71, No. 2, I_1071-I_1076, 2015.
- 2) 川崎隆広，山田耕一，上野一彦：海面処分場における土質遮水材料の施工事例，地盤工学会中国支部論文報告集，Vol. 27, No. 1, pp. 187- 194, 2009.
- 3) 村上博紀，土田孝，安部太紀，上野一彦，田中裕一：放射性セシウムで汚染された廃棄物を対象とした海面廃棄物処分場に用いる遮水地盤材料の研究，地盤工学ジャーナル，Vol. 10, No. 1, 2015.

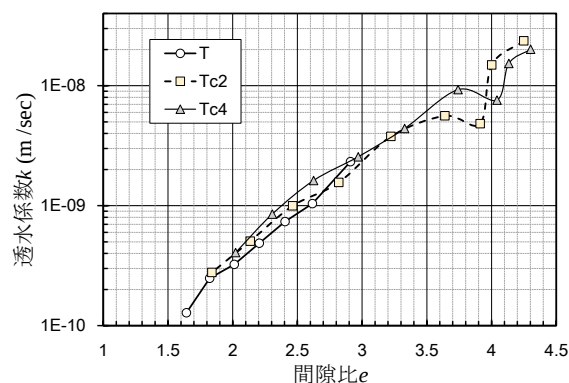


図7 e - $\log k$ 関係

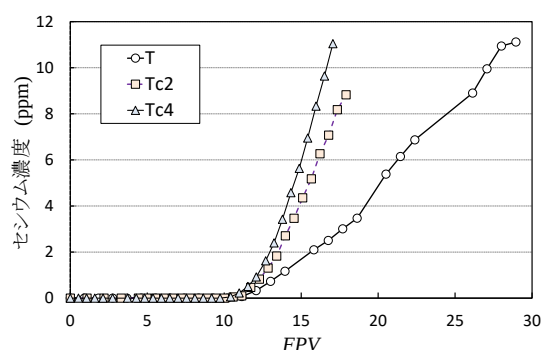


図8 FPV と透過液内のセシウム濃度の関係

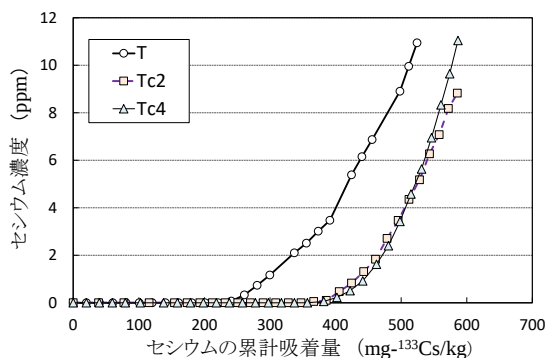


図9 吸着量と透過液内のセシウム濃度の関係