

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○村上 博紀
広島大学大学院工学研究院 正会員 土田 孝
広島大学工学部 学生会員 片山 遥平

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震と津波によって発生した福島第一原子力発電所の事故により、福島県を中心とした広範囲の地域において 2,700 万 m^3 ものセシウムを含んだ災害廃棄物が発生した¹⁾。また、復興事業の過程で、被災地域の除染にともなって除去した表土、放射能レベルの高い廃棄物焼却灰、下水処理場や河川底質に集積した放射能汚泥が発生し続けている。これらの放射性セシウムを含む廃棄物・除染発生土等は、通常の廃棄物処分場に処分できないため仮置きとして保管せざるを得ないが、その量が増加するとともに被災地の復興を進める上で大きな障害となっている。この問題に対処するため国は中間貯蔵施設の建設を計画しているが、将来的には最終処分が必要になると考えられる。

わが国では、過去に経験した大震災からの復興において、海面を利用した災害廃棄物の処分がなされてきた。阪神大震災によって発生したガレキは 2,000 万トンに達したが、大阪湾広域臨海環境整備センターが臨海部に計 1,500 万 m^3 分の処分地を提供したことと、迅速に港湾計画を改訂して神戸港内に 450 ha の災害ガレキによる埋立を行ったことにより、比較的短期間で処分が終了している²⁾。海面に立地する管理型処分場は、陸域の処分場に比べ、1箇所でも 100 万 m^3 から 1,000 万 m^3 以上の容量を有すること、船舶を用いることで廃棄物の運搬過程で発生する問題を軽減できるという長所がある。一方で、波浪、高潮、地震、津波などの厳しい外力が作用するため構造安全性に十分留意する必要がある。また、海底に厚い粘土層が堆積している場合は海底地盤自体が底面遮水層となるが、海底が砂質地盤の場合は底面遮水を行う必要があり、このための遮水地盤材料の研究が行われてきた^{3), 4), 5)}。

本研究で対象とする海面処分場では、セシウムで汚染された廃棄物を対象とする。そのため、廃棄物を処分場内に投入する際に発生する余水を処分場外へ放流

することは困難であることが予想される。本研究では、廃棄物の埋立による余水を発生させないために、あらかじめ処分場内の水位を低下させて廃棄物を投入することを想定した。この条件では、内外水位差により遮水層に大きな揚圧力が作用するので、遮水層の上にカウンターウエイトとしての覆土が必要になる。しかし、覆土層が厚くなると処分場の容積が減少することになるので、必要な覆土層を少なくするためには、単位重量の大きな遮水材料を遮水層に用いることが望ましい。

筆者らのこれまでの検討で、海成粘土にベントナイトを添加した場合、透水係数を減ずることできるという結果が得られている⁶⁾。また、渡部らは透水係数の低い粘土に砂を混合する一連の実験を行い、砂分混合率がある範囲内であれば透水係数はほとんど変化しないことを報告している⁷⁾。これらの既往の研究報告を参考にして、本研究では単位重量の大きな遮水地盤材料として、海成粘土にベントナイトと単位重量の大きな製鋼スラグを添加した材料について遮水材料としての適用性を検討することとした。海成粘土に製鋼スラグを透水係数が増加しない範囲で添加した場合、以下のような効果が期待される。

- a) 圧縮性が減少するため、圧密係数が増加する。遮水層の圧密が早期に進行し、有効圧密応力増加による透水係数の低下を期待できる。
- b) 製鋼スラグを添加することで遮水材料の単位重量が増加させることができ、覆土層の厚さを抑えることができる。

本研究では、これらの効果の実現可能性を検討するために、海成粘土に対し、様々な配合量でベントナイトと製鋼スラグを配合し、遮水性能とセシウムに対する吸着性能について検討した。

2. 遮水性能の検討

2.1 試験方法

本研究では海成粘土として徳山港粘土、ベントナイ

トとしてワイオミング産ベントナイト（以後、ベントナイト）、製鋼スラグを用いた。表-1 にそれぞれの物性値を示す。製鋼スラグについては、0.85～2mm に粒度調整し、水洗いを行って細粒分を十分に除去したものをを用いた。表-2 に本研究で用いた供試体の配合パターンを示す。表-2 のベントナイト添加量とは液性限界の1.5 倍の含水比の徳山港1 m³に対する添加量である。また、製鋼スラグの体積比とは粘土粒子（ベントナイト粒子も含む）体積に対する乾燥体積比である。

遮水性能の検討については、段階載荷圧密試験を実施し、試験からも求まる透水係数から評価した。まず、それぞれの供試体の含水比を液性限界の1.5 倍程度に調湿した。その後、直径60 mm、高さ20 mmの圧密リングにスラリー状の供試体を充填した。載荷応力については、応力増分比 $\Delta p/p=1$ で、圧密応力4.9～627.2 kPaの計8段階の段階載荷を行った。また、透水係数については式(1)を用いて算出した。

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (1)$$

ここで c_v は圧密係数、 m_v は体積圧縮係数、 γ_w は水の単位重量である。

2.2 試験結果

図-1 に透水係数 k と平均圧密応力 $\bar{p}$ の関係を示す。徳山港粘土にベントナイトを添加するに従い、透水係数が低下（遮水性能が向上）していることがみてとれる。これは、ベントナイトが膨潤し、徳山港粘土の間隙を充填したためと考えられる。一方、徳山港粘土に製鋼スラグを添加した場合、透水係数が大幅に増加（遮水性能が低下）していることが確認できる。特に製鋼スラグを体積比で93%添加した（T0S93）場合、徳山港粘土のみの供試体（T0）に比べて10 倍程度透水係数が大きくなるという結果となった。一般に製鋼スラグを粘土スラリーと混合すると固化が進行するがこれはスラグ中のCaと粘土中のAlやSiとの水和反応によるものとされている⁸⁾。この固化反応が透水係数増加の原因として考えられるが、この点については今後検討が必要である。

図-2 に圧密係数 c_v と平均圧密応力 $\bar{p}$ の関係を示す。まず、徳山港粘土にベントナイトを添加した供試体については、ベントナイトの添加量が多いほど圧密係数が小さいことがみてとれる。これは、ベントナイトの

表-1 用いた試料の物性値

試料	徳山港粘土	ワイオミング産ベントナイト	製鋼スラグ
土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	2.616	2.898	3.44
液性限界 w_L [%]	110.6	510.6	-
塑性限界 w_P [%]	40.0	44.0	-
塑性指数 I_P	70.6	466.6	-

表-2 配合パターン

試料名	製鋼スラグ（粘土の乾燥体積に対する体積比）	ベントナイト添加量（粘土スラリー1m ³ 当り）
T0	無添加	無添加
T25		25kg/m ³
T50		50kg/m ³
T75		75kg/m ³
T100		100kg/m ³
T150		150kg/m ³
T0S93	93%	無添加
T0S50	50%	無添加
T25S50		25kg/m ³
T50S50		50kg/m ³
T0S25	25%	無添加
T50S25		50kg/m ³

膨潤効果により、供試体内の間隙に含まれる自由水が減少したためだと考えられる。一方、徳山港粘土に製鋼スラグを添加した供試体については、製鋼スラグの添加量が多いほど圧密係数の値が大きいことがみてとれる。これは図-1でも確認されたように、製鋼スラグ添加により透水性が向上することで、排水速度が向上したためだと考えられる。

図-3 に間隙比 e と圧密応力 p の関係を示す。徳山港粘土にベントナイトを50 kg/m³までの添加量であれば、間隙比を減ずる効果が確認できた。しかし、ベントナイトを75 kg/m³以上添加した場合は、逆に間隙比が大きくなっていることがみてとれる。これは、ベントナイトが膨潤し、ベントナイト粒子の粒径が大きくなることで、間隙が生じやすい状況になったためと考えられる。一方、製鋼スラグを添加した供試体については、製鋼スラグを添加していない供試体に比べて $e - \log p$ 曲線の傾きが緩くなっていることがみてとれる。これは徳山港粘土に圧縮性の非常に低い製鋼スラグを添加することで、供試体の圧縮性が低下してしまったためだと考えられる。

図-4 に湿潤単位重量 γ と圧密応力 p の関係を示す。徳山港粘土にベントナイトを添加しても、供試体の湿潤単位重量に大きな変化はみられなかった。一方、徳

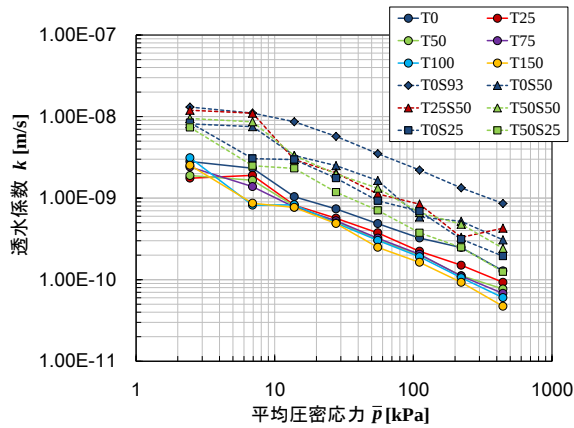


図-1 $k - \bar{p}$ 曲線

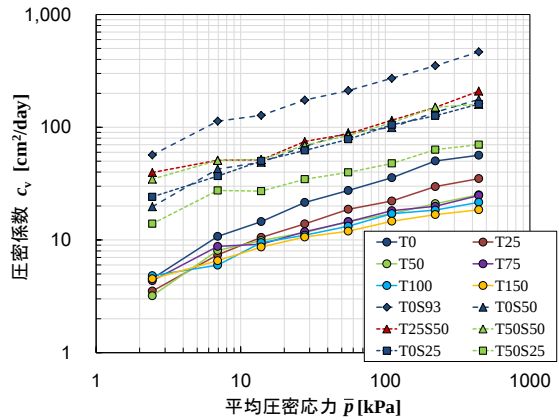


図-2 $c_v - \bar{p}$ 曲線

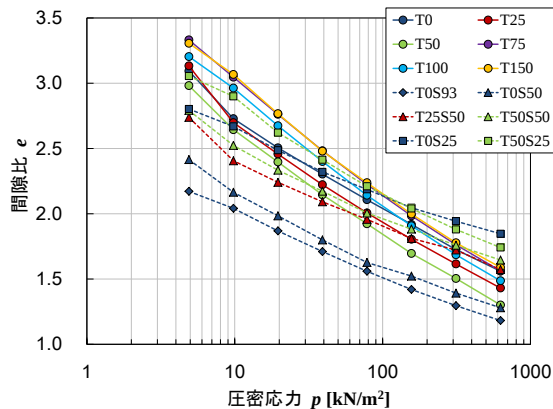


図-3 $e - \log p$ 曲線

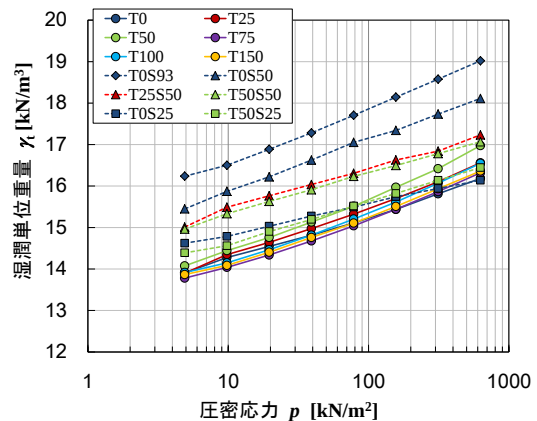


図-4 $\gamma - \log p$ 曲線

山港粘土に製鋼スラグを添加した場合、大幅に湿潤単位重量が増加していることがみてとれる。これより、単位重量の大きな遮水材料という点では、製鋼スラグの添加は有効であることが確認された。

3. セシウムに対する吸着性能の検討

3.1 試験方法

本研究では、セシウムに対する吸着性能の検討として、圧密通水試験（カラム試験）を実施した。図-5に本研究で用いた装置の概略図を示す。本研究では通水時間短縮のために高さ 10 mm、直径 60 mm の圧密リングを使用した。また、試験を実施した供試体は表-2に示した T0, T25, T75, T150, T50S50 である。供試体の形成については、段階载荷圧密試験と同様にスラリー状態のまま圧密リングに空気が混入しないように投入した。その後、試験機を設置し、応力増分 $\Delta p/p=1$ で 4.9kPa から 19.6kPa まで段階载荷を行った。圧密圧力 19.6kPa での圧密終了後、圧密排水によって満たされた載荷板内部の水を二重円筒管により 30 ppm セシウム

溶液と入れ替えた。その後、二重円筒管に空気圧 19.4 kPa を常に与え、図-5 の矢印方向の通水経路で供試体にセシウム溶液を通水させた。供試体に計 300 mL のセシウム溶液が通水した時点で試験を終了した。また、供試体にセシウム溶液が 10mL 通水するごとに、透過液を採取し、原子吸光分析機により濃度測定を行った。圧密通水試験による吸着性能については、供試体を通過し、漏出したセシウムの濃度と PVF の関係から行った。PVF とは供試体中の間隙水が何回入れ替わったかを表しており、式(2)のように計算できる。

$$PVF = \frac{\Sigma V_c}{V_v} \quad (2)$$

ここで、 ΣV_c は安定セシウム溶液累積通水体積、 V_v は供試体の間隙体積である。

3.2 試験結果

図-6 に圧密通水試験から得られた安定セシウムの漏出濃度 C_f と PVF の関係を示す。図より徳山港粘土にベ

ントナイトを添加することで、安定セシウムが漏出し始める PVF が小さくなっていることがわかる。これより、徳山港粘土にベントナイトを添加することで、吸着性能が低下したといえる。これは液性限界の大きなベントナイトを添加することで供試体の間隙体積が大きくなり、(2)式より、小さい PVF の値でセシウムが漏出したためと考えられる。また、製鋼スラグを添加した供試体については、安定セシウムが漏出し始める PVF が比較的大きかった（吸着性能が高かった）。しかし、漏出後の濃度増加勾配が他の供試体に比べて一番大きいことが分かった。これについても、製鋼スラグ添加による、固化反応が原因として考えられるが、どのようなメカニズムでこのような結果となったのか、今後検討する必要がある。

4. 結論

余水が発生しない海面処分場を使用することを想定し、単位体積重量が大きい遮水材の開発という観点から、海成粘土とベントナイト、製鋼スラグを混合した材料の透水性とセシウム吸着生について調べた。主な結論は以下のようである。

- 1) 海成粘土・ベントナイト混合材料に製鋼スラグを添加すると、供試体の単位重量は大きくなったが、透水係数は最大で 10 倍程度増加するという結果が得られた。また、製鋼スラグを添加した場合でも、ベントナイトを添加することで、ある程度透水係数の増加を抑えることができるが、やはり 2 倍程度は透水係数が増加することが分かった。この結果は、砂を混合したときの渡部らの既往の研究と大きく異なっている。
- 2) 製鋼スラグ・ベントナイトを配合した材料について圧密通水試験を実施し、セシウムに対する吸着性能の検討を行った。その結果、製鋼スラグを配合していない供試体に比べて安定セシウムが漏出し始める PVF （間隙水の入れ替わり回数）は比較的大きかったが、漏出後の濃度増加率が增加するという結果となった。

参考文献

- 1) 環境省廃棄物・リサイクル対策部：災害廃棄物等処理の進捗状況（3 県沿岸市町村（避難区域を除く）），pp.1, 2013.
- 2) 土田孝，水上純一，菊池喜昭，吉野博之：阪神・淡路大

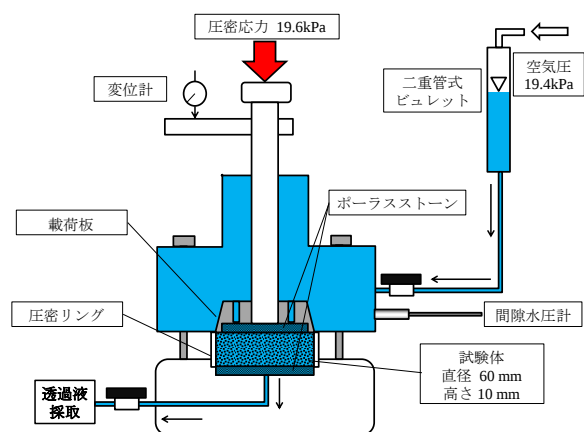


図-5 圧密通水試験装置

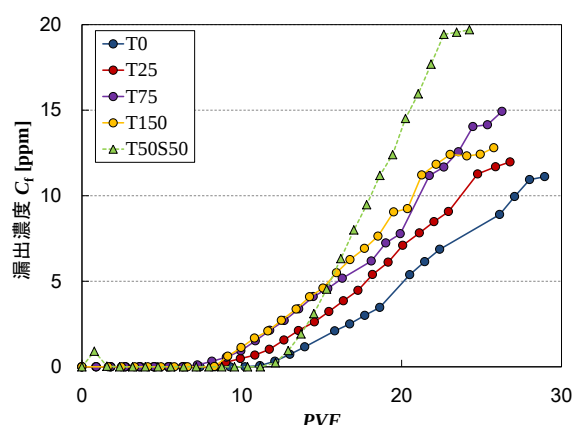


図-6 C_t - PVF 曲線

震災におけるガレキの処理・活用に関する調査と考察，港湾空港技術研究所資料，No.0899，1998.

- 3) 山田耕一，上野一彦，羽田晃，土田孝，渡部要一：変形追従性遮水材料を用いた管理型海面廃棄物最終処分場の新しい遮水構造の提案，海洋開発論文集，pp.77-82，2002.
- 4) 上野一彦，山田耕一，渡部要一：管理型海面廃棄物処分場に用いる浚渫粘土を主材料とした土質遮水材料の提案，土木学会論文集 G，Vol.64，No.2，pp.177-186，2008.
- 5) 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，地盤と建設，Vol.27，No.1，地盤と建設，pp.187-194，2009.
- 6) 村上博紀，土田孝，安部太紀：放射性セシウムで汚染された廃棄物を対象とした海面処分場に用いる遮水地盤材料の研究，第 10 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.311-318，2013.
- 7) Watabe, Y., K, Yamada and K, Saitoh: Hydraulic conductivity and compressibility of mixtures of Nagoya clay with sand or bentonite. *Geotechnique* 61, No. 3, pp.211-219, 2011.
- 8) (社)日本鉄鋼連盟：転炉系製鋼スラグ海域利用の手引き，pp.24-28，2008.