

# 論文の要旨

題目 放射性セシウムによる汚染土等を対象とした海面処分場に関する研究

(Study on Offshore Disposal Facility for Soils and Wastes Contaminated with Radioactive Cesium)

氏名 栗原 大

福島第一原子力発電所事故後に実施された除染作業により 2,200 万  $\text{m}^3$  の除去土壌や廃棄物が発生し、除去土壌の処分が東日本大震災からの復興の課題となっている。過去の関東大震災や阪神・淡路大震災などの大震災からの復興では、一箇所でも 1,000 万  $\text{m}^3$  を超える膨大な廃棄物を処分できる利点をもつ海面処分場を利用した災害廃棄物の処分が行われてきた。また日本では、一般廃棄物や産業廃棄物の最終処分場として海面処分場が広く使用されてきた。既存の海面処分場の多くは粘性土層の上に建設されているが、構造安全性と長期管理の観点から海底地盤はよく締まった砂礫層であることが望ましい。海底面が砂質土の場合、海底面の上に遮水層を設置する必要があるが、例えば 2008 年に竣工した寒川海面処分場では、海成粘土ベントナイト混合土により厚さ 2m の底面遮水層が施工されている。

本研究では、除去土壌を海面処分場で最終処分することを想定し、海面処分場の底面遮水に用いる遮水地盤材料の開発を行った。まず、底面遮水のための遮水材料の必要性能について検討した。そして、海成粘土にベントナイト、砂、ゼオライトを混合した遮水地盤材料の透水特性、圧縮特性、圧密特性及びセシウム吸着特性、海成粘土にセメントを添加した遮水地盤材料の透水特性、セシウム吸着特性について検討した。ベントナイトは遮水性の向上、砂は遮水材料の圧縮性の低減及び圧密係数の増加による施工性の向上、ゼオライトはセシウムの吸着性の向上、セメントは施工に必要な強度を付与することを目的として添加した。

本論文は、全 9 章で構成している。

第 1 章では、序論として前述のような研究の背景と既往の研究を取りまとめた。

第 2 章では、想定する海面処分場の構造、底面遮水に用いる遮水地盤材料の透水性と吸着性に関する必要性能について示した。

第 3 章では、海成粘土を母材とし、ベントナイト、砂、ゼオライトを混合した遮水地盤材料の透水性について検討した。遮水地盤材料に対して段階的圧密試験を実施し、透水係数を求めた。砂の添加量が少ないとき Darcy 則の透水係数は変化しないと報告されてきたが、間隙内平均流速に関する透水係数  $k_{\text{pore}}$  で整理すると、砂添加による間隙比の減少により砂を添加したときの  $k_{\text{pore}}$  は無添加のものと比べて増加することがわかった。また、ベントナイトとゼオライトの添加では、ベントナイトの添加により  $k_{\text{pore}}$  が減少するが、ベントナイト添加量が同じ供試体では、ゼオライト添加比が多いほど  $k_{\text{pore}}$  が小さくなることがわかった。ベントナイト、ゼオライト、砂の添加による間隙率の変化から透水係数を予測し、ベントナイトと砂を添加した供試体では透水係数の予測値は実測値の約 1.3 倍、ベントナイトとゼオライトを添加した供試体では約 1.5 倍となった。

第 4 章では、海成粘土を母材とし、ベントナイト、砂、ゼオライトを混合した遮水地盤材料の圧縮特性、圧密特性について検討した。東京湾粘土、徳山港粘土、松島湾粘土にベントナイト、砂、ゼオライトを添加した試料の圧縮指数について、圧縮指数変化比  $C_c/C_{c0}$  と各材料の添加率の関係式を示し、ベントナイトと砂、ベントナイトとゼオライトを両方添加した試料の圧縮指数変化比が予測できることを示した。また、ベントナイトおよび砂・ゼオライ

トの添加による圧密係数の変化率  $c_v/c_{v0}$  と添加率の関係式による予測について検討した。

第 5 章では、海成粘土を母材とし、ベントナイト、砂、ゼオライトを混合した遮水地盤材料のセシウム吸着特性について検討した。バッチ吸着試験および圧密通水試験により遮水地盤材料のセシウム吸着特性について調べた。また、層厚の違いがセシウムの吸着破過特性に及ぼす影響について検討し、セシウム吸着性能の指標として、圧密通水試験での破過点の PVF（累積通水量/供試体の間隙体積）の目標値を提案した。また、遮水地盤材料の各材料の配合から破過点の PVF が予測できることを示した。最後に、X 線回折分析により、セシウムの吸着効果のある層状ケイ酸塩鉱物やゼオライトが各材料中に存在することを示した。

第 6 章では、海成粘土を母材とし、ベントナイト、砂、ゼオライトを混合した遮水地盤材料の、透水性、セシウム吸着特性、圧縮性および圧密特性を考慮した配合設計を行う方法をまとめた。まず、第 3 章で検討した透水係数の予測および第 5 章で検討した破過点の PVF の予測を用いて、透水性およびセシウム吸着特性を考慮したベントナイトとゼオライトの配合方法を示した。また、第 4 章で検討した圧縮指数変化率の予測を用いて、圧縮性を考慮した砂の配合方法を示し、圧密係数変化率の予測を用いて、圧密にかかる時間を確認した。

第 7 章では、海成粘土にセメントを添加した遮水地盤材料の特性について検討した。乾燥質量比 2~4% 程度のセメントを添加する少量セメント添加粘土に対し、ベーンせん断試験、圧密試験、中空ねじり試験を実施した。少量セメント添加粘土は、時間とともに数 kPa の強度が発現しており、施工上必要な強度を与える観点からは少量セメント添加は選択肢となりうると考えられる。少量セメント添加粘土は、圧密時に間隙比の減少が無添加の場合よりも抑制されるため、同一の圧密圧力において透水係数が増加するので、この影響を十分考慮する必要がある。中空ねじり三軸試験によって、せん断変形を与えた前後の透水係数の変化を調べた。貧配合セメント固化処理土（添加率 10%、15%）では 20% のせん断変形によりクラックが生じ透水係数が上昇したが、少量セメント添加粘土ではせん断変形によって透水係数は低下し、上昇はみられなかった。第 5 章と同様の方法で少量セメント添加粘土のセシウム吸着特性を調べた結果、セメントを添加したことにより、破過点の PVF に大きな差はなく、吸着特性はほとんど変わらないことがわかった。また、セメントの添加率が大きくなるにつれて破過後の濃度の勾配は大きくなり、破過後の濃度上昇が早くなることがわかった。

第 8 章では、海面処分場の建設方法及び除去土壌等の処分方法、除去土を海面処分場に処分したときの建設および処分に要する費用について検討を行った。除去土や遮水工に用いる浚渫土の海上の運搬距離を 5~200km としたとき、海面処分場の建設費と運搬費を合わせた直接工事費は 4,776 億~5,492 億円、概算工事費は 6,209 億~7,140 億円であった。Yasutaka ら<sup>1)</sup>は輸送と中間貯蔵施設にかかる費用を 5,700 億円と試算しており、海面処分場による除去土の最終処分には、中間貯蔵施設と同規模の費用が必要となることがわかった。処分容量 1m<sup>3</sup>あたりの建設費と浚渫土運搬費を合わせた概算工事費は 25,600~26,500 円となり、Yasutaka ら<sup>1)</sup>が試算に用いた既存の管理型最終処分場（処分容量 90 万 m<sup>3</sup>）の残土受入単価 33,300 円/m<sup>3</sup>と比較して 7,700~6,800 円安かった。除去土の最終処分に海面処分場を用いた場合、2,000 万 m<sup>3</sup>の処分容量を 1 箇所確保し、1m<sup>3</sup>あたりの工事費も安くできる可能性があることがわかった。除去土の海上運搬費と Yasutaka ら<sup>1)</sup>の試算による除去土の陸上運搬費の比較により、運搬距離 5~180km のとき海上の運搬費に比べて陸上の運搬費は 3.5~4.7 倍高くなることがわかった。

第 9 章では、結論として各章で得られた知見をまとめるとともに、今後の課題について言及した。

1) Yasutaka, T., & Naito, W. (2016). Assessing cost and effectiveness of radiation decontamination in Fukushima Prefecture, Japan. *Journal of environmental radioactivity*, 151, 512-520.