

変形を与えた遮水材料の透水特性について

Permeability Property of Deformed Impervious Materials

片山遥平 Yohei KATAYAMA (広島大学工学研究科)
村上博紀 Hiroki MURAKAMI (広島大学工学研究科)
土田 孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学工学研究院)

2011年に発生した東日本大震災、福島第一原子力発電所事故によって、セシウム汚染廃棄物および除染土壌が大量に発生した。これらの廃棄物を大量に処分できる処分場として海面処分場に着眼した。海面処分場に用いる遮水材料として海成粘土にベントナイトと製鋼スラグを混合した材料を考え、遮水層が地震動等によりせん断変形を受けた際の透水係数の挙動を調べるため、室内実験を行った。実験より、海成粘土にベントナイトを混合することで遮水材が変形に追随し、ひずみを与えても透水係数の増加を抑えることが可能であるが、単位体積重量を増加させるために製鋼スラグを混合することは適切ではないという結論を得た。

キーワード：海成粘土，ベントナイト，製鋼スラグ，透水係数，せん断変形（IGC：D06）

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セシウムを含んだ災害廃棄物が大量に発生した。その後被災地域の除染事業の進展により除去した表土や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、被災地の各地に仮置きされた状態で保存され、被災地の復興を進める上で大きな障害となっている。現在、国は30年間保存するための中間貯蔵施設の建設を計画しているが、将来的には何らかの方法で最終処分が必要になると考えられる。本研究は、これら放射性セシウムで汚染された廃棄物や汚染土壌を処分するための管理型海面処分場の研究の一貫として実施した。

関東大震災や阪神淡路大震災など、わが国が過去に経験

した大震災からの復興では、海面を利用した災害廃棄物の処分がなされてきた。関東大震災の震災ガレキは東京港豊洲地区、横浜港山下公園の埋立に利用され、阪神大震災によって発生した震災ガレキは大阪湾広域臨海環境整備センターの海面処分場と神戸港の一部を埋め立てることによって約6ヶ月という短期間で処分が終了している。

海面処分場は広大な面積と水深を利用できるため、1箇所数百万 m^3 から1,000万 m^3 以上の大規模な容量の処分場を造成できる。このため、特に大都市において海面処分場が選択される場合が多い。一方で、海面の処分場は、波浪、高潮、津波、地震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。特に、放射性セシウムで汚染された土壌・廃棄物を処分する場合は、その放射能レベルが安全な水準まで低下するには長時間を要するため、通常よりも長期間の外力に対して安全性能を確保する必要がある。村上らは、海面処分場に放射性セシウム

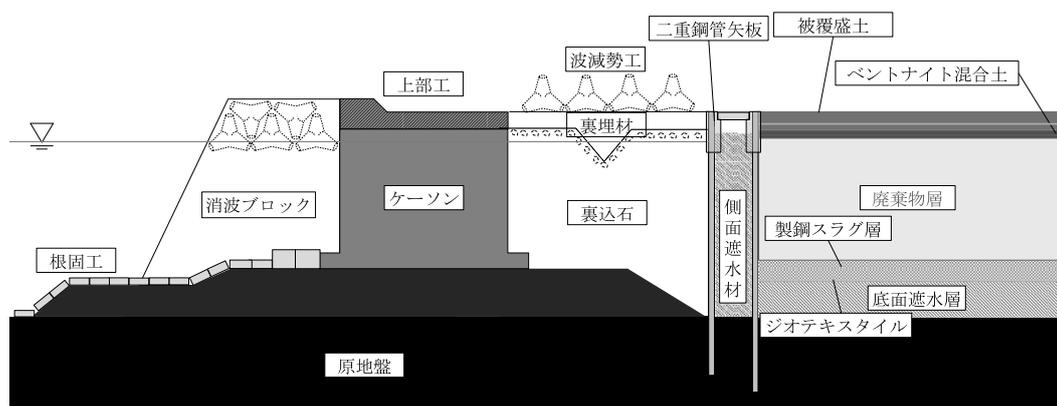


図-1 本研究で想定する海面処分場のイメージ²⁾

で汚染された土壌・廃棄物を処分する場合の処分場遮水構造の性能を検討し、必要性能を提案するとともに性能が150年以上維持される必要があると試算している²⁾。

海面に立地する管理型処分場では、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ため、構造的には側方の遮水だけが問題となる。大阪湾広域臨海環境整備センターの処分場や東京都の新海面処分場など、多くの海面処分場はこのような条件の粘土地盤上に建設されている。しかし、一般に底面が粘土層の場合、地盤の支持力が小さいため巨大地震などの大きな外力に対する安全性の確保が問題となる。一方、海底地盤が砂質地盤である場合は、支持力としては良好であるが海底地盤の透水性が大きいため底面遮水を行う必要がある。上野ら、山田らは底面遮水のための遮水地盤材料の開発を行っており³⁾⁴⁾、この材料により底面遮水を行って砂質地盤で海面処分場を造成した事例としては愛媛県寒川東部産業廃棄物処分場がある⁵⁾。底面遮水をして海面処分場を造成する場合、処分場内と外の水位差（潮位などによる）によって底面遮水層には上向きの揚圧力が作用するので底面遮水層は単位体積重量が大きいことが望ましいが、一般には不足するためカウンターウエイトとして覆土が行われる。

図-1 は本研究で想定している海面処分場のイメージである。図のように土質系遮水材料が底面および側面の遮水に用いられている。遮水材料が長期間安定してその機能を発揮するためには、地震などの外力によって、遮水層内にせん断変形が発生しても、遮水機能が低下しないことが求められる。本研究では、海面処分場の底面遮水材料として海成粘土、ベントナイト及び製鋼スラグを混合した遮水材料を用い、室内試験によってせん断変形が透水性におよぼす影響について実験的に調べた。

本研究の目標は底面遮水層のせん断変形と透水係数の関係を調べることであるが、すでに上野らが実験的に調べた結果を報告している²⁾。実験には名古屋粘土にワイオミング産ベントナイトを混合した供試体を用いており、図-2 に示す形で模型実験が行われた。試験結果を図-3 に示す。

ここで、図-3 中の γ の後の数字は与えたせん断ひずみを、W の後の数字は名古屋港粘土 1m³ 当たりのワイオミング産ベントナイトの混合量を表している。試験結果より、セメント固化処理土では亀裂が入り遮水性が維持できなくなる程度の変形を与えても、NW75 の供試体は変形に追随し亀裂が入ることなく遮水性を維持できることがわかった。

ここで、既往の研究により、海成粘土はセシウムを吸着する性質を有すること⁶⁾、ベントナイトはセシウムを吸着するだけでなく、変形を与えても十分に追随し、遮水性

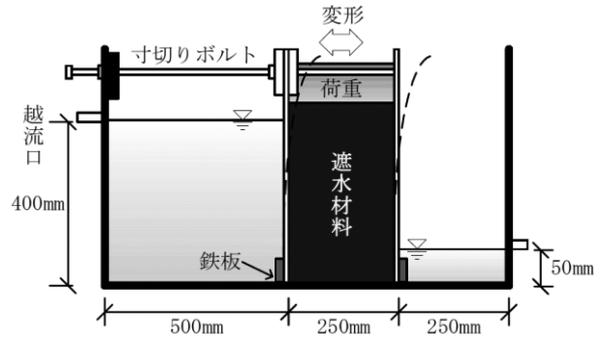


図-2 変形追随性実験概要図³⁾

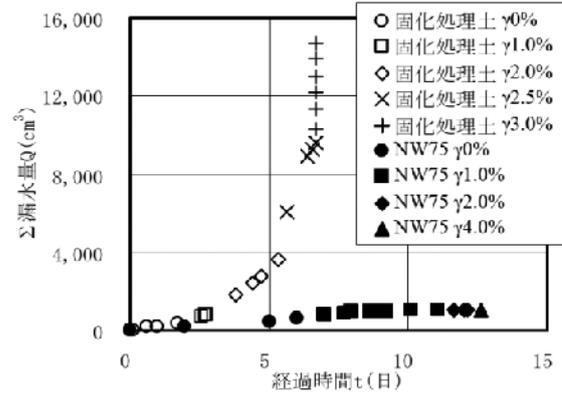


図-3 漏水量の推移³⁾

表-1 圧密試験の配合パターン

供試体名	ベントナイト (徳山港粘土 1m ³ 当り)	製鋼スラグ(粘 土粒子に対す る体積率)
TOS93	—	93%
TOS50	—	50%
T25S50	25kg/m ³	
T50S50	50kg/m ³	25%
T0S25	—	
T50S25	50kg/m ³	
T150	150 kg/m ³	—
T100	100 kg/m ³	—
T75	75 kg/m ³	—
T50	50 kg/m ³	—
T25	25 kg/m ³	—
T0	—	—



写真-1 圧密試験状況

を低下させない性質を有することが判明している⁷⁾。一方、放射性セシウムを含む廃棄物を対象とする海面廃棄物処分場においては余水を水処理して放流することが難しいと考えられるため、処分場内の水位をあらかじめ低下させることにより、余水を発生しない埋立方法を検討した。この場合、処分場内外の水頭差により遮水層に揚圧力が生じるので、揚圧力に対する安定性を確保する必要がある。製鋼スラグは海成粘土よりも単位体積重量が大きいので、遮水材に混合することで遮水層の重量が増加することが期待される。以上が海成粘土にベントナイトと製鋼スラグを混合した理由である。

海面廃棄物処分場が波浪、地震動などの外力や地盤沈下等を受けた場合、遮水層に大きな変形を生じ、遮水層の遮水性が低下することが懸念される。本研究では、遮水材にせん断変形を与えた時の透水係数の挙動を調べるため、海成粘土、ベントナイト及び製鋼スラグの配合量の異なる供試体を用いてせん断変形と透水係数の関係を調べた。

2. 遮水性能の検討方法

本研究で用いた材料は、徳山港粘土($\rho_s=2.616\text{g/cm}^3$, $w_L=110.6\%$)、海面処分場の遮水材料として実績があるワイオミング産ベントナイト($\rho_s=2.898\text{g/cm}^3$, $w_L=510.6\%$)及び製鋼スラグ($\rho_s=3.44\text{g/cm}^3$)である³⁾⁴⁾⁵⁾。表-1 に予備圧密を行っていないスラリー状の試験体を、厚さ 20mm、直径 60mm の圧密リングに空気が混入しないように充填し、水浸容器内を蒸留水で満たした後、応力増分比 $\Delta p/p=1$ で 4.9kPa から 672.2kPa までの合計 8 段階で段階荷重した。写真-1 に圧密試験状況、図-4 に圧密試験模式図を示す。

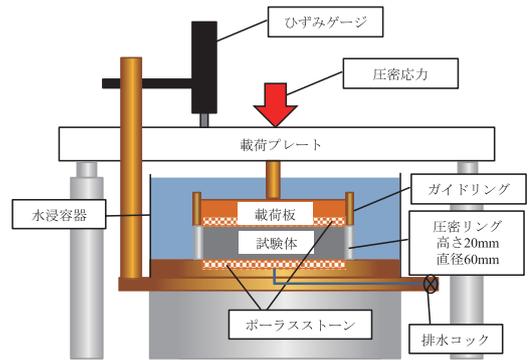


図-4 圧密試験模式図

図-5 は徳山港粘土とベントナイト及び製鋼スラグを混合した供試体の圧縮曲線と透水係数であり、圧密試験から求めている⁹⁾。図-5 を見ると、製鋼スラグの混合率が大きくなるほど透水係数が増大していることが分かる。

圧密試験の配合パターンを示す。供試体名の T は徳山港粘土、T の後ろの数字はベントナイトの混合量、S は製鋼スラグ、S の後ろの数字は製鋼スラグの混合量をそれぞれ示す。ここで、ベントナイトに関しては重量で、製鋼スラグに関しては体積で配合量を調整しているのは渡部らの既往の研究⁸⁾と実験結果を比較するためである。

ここで、海成粘土に製鋼スラグを混合した時の固化の有無に関する村上の実験結果を図-6 に示す。製鋼スラグを混合した徳山港粘土を液性限界の 1.5 倍に調泥し、ベーンせん断試験でせん断強度を測定した。その後、サミットモールドに充填し、塩分濃度 3% の人工海水に浸漬させ、28 日養生させた後に、自立できる供試体に関しては一軸圧縮試験、自立できない供試体に関してはベーンせん断試験で

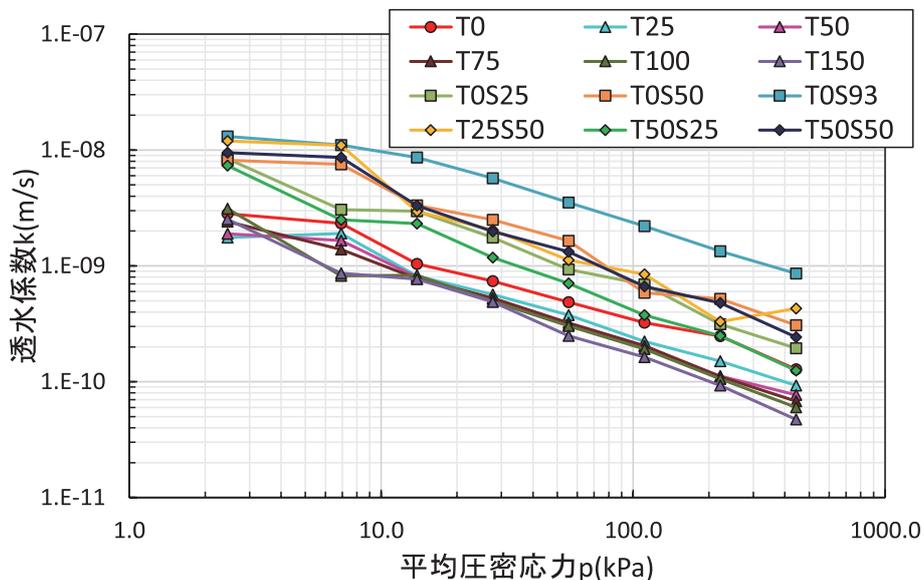


図-5 $k\text{-log}p$ 曲線⁹⁾

せん断強度を測定した。図-6 より、製鋼スラグの混合量が多いほど、また養生日数が長いほど試験体のせん断強度が増加した。筆者は海成粘土に製鋼スラグを混合した時の透水係数の増大の一つの原因として、製鋼スラグと粘土表面との間の化学反応が影響していると考えている⁹⁾。

また、図-7 に圧密試験より求めた e - $\log p$ 曲線を示す。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。ベントナイトの混合量が少ないときは粘土粒子の間隙にベントナイトが入り込み、膨潤することで間隙を埋めるが、ベントナイトの混合量が必要以上に多くなると、ベントナイトの含水比の高さゆえに間隙が大きくなるものと考えられる。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たものである。

この圧密試験結果より、ベントナイトを含まない場合と 50kg/m³ 含む場合を選び、それぞれに体積 25%、50%の製鋼スラグを混合した条件で、製鋼スラグの影響を検討した。表-2 に配合条件を示す。

表-2 の試験体に対して、室温 20 度の実験室で三軸圧縮試験と変水位透水試験を行った。まず、12.25kPa、24.5kPa、49kPa の 3 段階で予備圧密を行い、トリミングして粘土供試体を作製した。供試体寸法は直径 50mm、高さ 50mm とした。その後、供試体を図-8、写真-2 に示す三軸圧縮試験機に設置し、セル圧を 20kPa から 100kPa まで 20kPa ごとに上げていき、それと同時に背圧を 10kPa から 90kPa ま

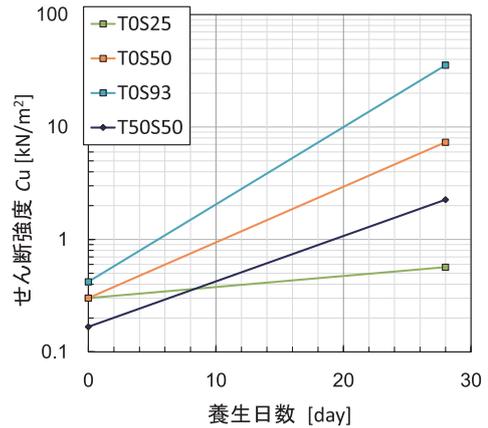


図-6 固化によるせん断強度の増加

表-2 三軸圧縮試験及び変水位透水試験の配合

供試体名	ベントナイト (徳山港粘土 1m ³ 当たり)	製鋼スラグ(粘土 粒子に対する体 積率)
TOS50	—	50%
T50S50	50kg/m ³	
TOS25	—	25%
T50S25	50kg/m ³	
T0	—	—

で 20kPa ごとに上げた。その後、供試体を完全に飽和させるために背圧のコックを開放したまま二時間放置した。その後、軸力とセル圧を上げながら計 5 段階の圧密を行った。5 段階の圧密後、供試体に 0%から 10%まで 2%ごとのひずみを与え、供試体上下面に 5kPa の圧力差、すなわち 50cm の水頭差を与えながら透水した。2 本の二重管式ビュレットより、各段階で 3 回ずつ 1.5 分～1 時間の透水量を測定し、その平均からそれぞれのひずみでの透水係数を求めた。

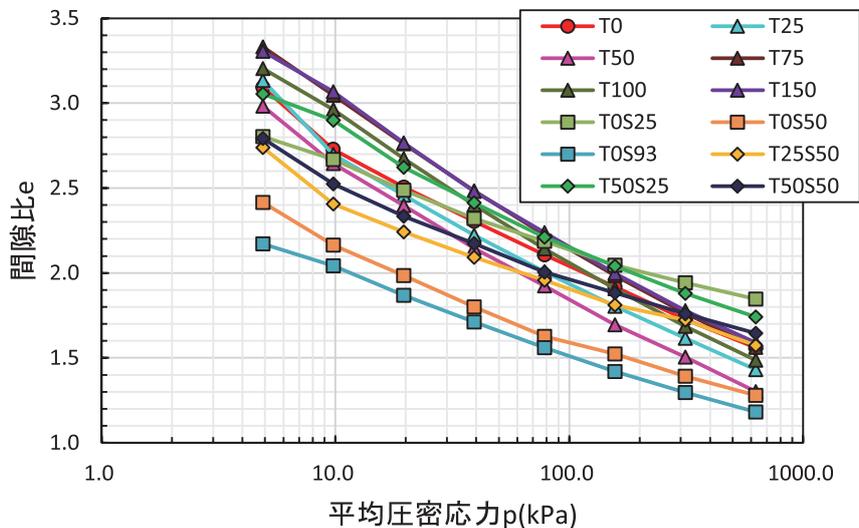


図-7 e - $\log p$ 曲線⁹⁾

3. 圧縮ひずみと透水係数の関係と考察

図-9 に透水係数-ひずみ曲線を示す. 一部を除き, ひずみが大きくなるほど, 透水係数が增大していることがわかる. T0, T0S25, T50S25 の供試体においてひずみ初期段階で透水係数が小さくなっているのは, この段階ではまだ破壊が生じておらず, 圧縮力によって供試体がより密実になったからと考えられる.

図-10 に透水係数の増加率 X -ひずみ曲線を示す. ここで, 増加率 X を次式で定めた.

$$X = \frac{k_x}{k_{T0}} \quad (1)$$

ここで, k_x は任意のベントナイト・製鋼スラグ配合比での透水係数, k_{T0} は供試体 T0 の透水係数である. 試験結果より T0S50 の供試体の透水係数の上昇が最も大きく, ひずみが 10% のときに初期値の 12 倍程度にもなっていることがわかる. ここで, 写真-3 に村上らによる, SEM による製鋼スラグを混合した海成粘土の微視構造を示す⁹⁾. 製鋼スラグの混合率が 25% の時は粒子周辺の間隙はほぼ見られないが, 製鋼スラグの混合率が 50% の時は製鋼スラグの粒子周辺に間隙が形成していることが分かる. ひずみの増大によりこの間隙が広げられ, 透水係数の増大に繋がったのではないかと考える. しかし, ベントナイトを添加することで透水係数 k の増加が 4 倍程度に抑えられていることが分かる. 特に, T50S25 の供試体ではひずみを与えたことによる透水係数の上昇がほとんどないことが分かる. これらより, 粘土に製鋼スラグを混合するとひずみを与えた時に透水係数の増加幅が大きくなること, ベントナイトを添加することで透水係数の上昇を最大で 3 分の 1 程度に抑えることができることが分かった.

しかし, 製鋼スラグの混合によりひずみを与えない場合でも透水係数が増加し, 製鋼スラグを体積比で 50% 添加したときにひずみとともにさらに増加したことから併せて考えると, 製鋼スラグを混合することは適切でないと言える. 今後は別の種類の海成粘土および混合材料を用いて実験を行う予定である.

また, 今回の試験は圧縮の方向と透水の方向が同じという条件であるが, 今後せん断変形方向と透水の方向を変化させた場合についても検討を行う予定である.

4. 結論

海面処分場に用いる遮水材料として海成粘土にベントナイトと製鋼スラグを混合した材料を考え, 遮水層が地震動等によりせん断変形を受けた際の透水係数の挙動を調べるため, 室内実験を行った. 結論を以下に示す.

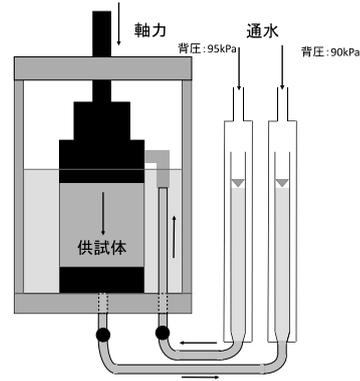


図-8 三軸圧縮試験機模式図

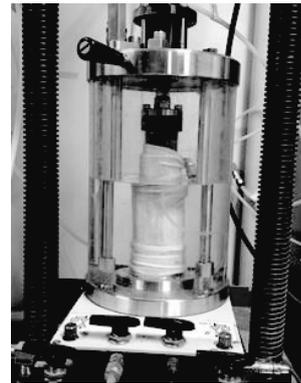


写真-2 三軸圧縮試験機

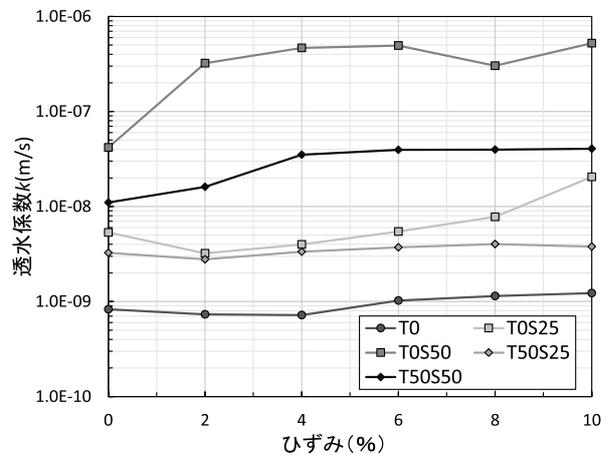


図-9 透水係数と供試体に加えた圧縮ひずみの関係

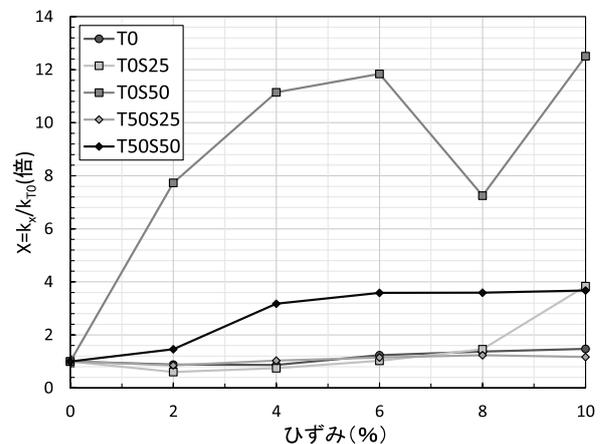


図-10 透水係数の増加率 X -ひずみ曲線

- (1) 海成粘土に製鋼スラグを体積比で25%混合し、ベントナイトを添加した供試体ではひずみ(最大10%)を与えたことによる透水係数の増加がほとんど見られなかった。海成粘土にベントナイトを混合することで遮水材が変形に追随し、ひずみを与えても透水係数の増加を抑えることが可能であると考えられる。
- (2) 単位体積重量を増加させる目的で製鋼スラグを体積比で50%加えた供試体では、ひずみの増加とともに透水係数は最大で12倍以上になった。ベントナイトを加えた供試体でも4倍まで増加した。
- (3) 製鋼スラグの混合によりひずみを与えない場合でも透水係数が増加した。製鋼スラグを体積比で50%添加したときにひずみとともにさらに増加したことから併せて考えると、製鋼スラグを混合することは適切でないと言える。
- (4) 今回の実験はせん断面が発生する方向と、透水の方向が異なっていた。これは試験装置の制約によるものであるが、今後はせん断面の方向と透水の方向を変化させた場合について検討を行う必要がある。

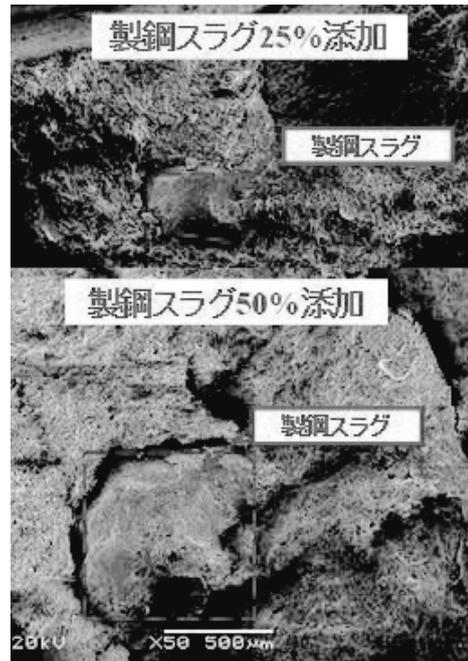


写真-3 製鋼スラグ混合時のSEMによる供試体面観察⁹⁾

謝辞

本研究は、環境省による平成24年度、25年度環境研究総合推進費(補助金)課題名「放射能で汚染された廃棄物を対象とした海面最終処分場に関する研究」によって実施したものである。協力いただいた関係各位に心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 土田孝, 水上純一, 菊池喜昭, 吉野博之: 阪神・淡路大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.
- 2) 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, 地盤工学会, 第10回環境地盤工学シンポジウム, pp.311~318, 2013.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 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) 山岸皓彦: 粘土鉱物にとりこまれたセシウムイオンの

構造を明らかにしました

<http://www.lab.toho-u.ac.jp/sci/chem/sakutai/research/tjoimi0000001n2t-att/tjoimi0000001n56.pdf>

- 7) クニミネ工業株式会社 HP, 土木建築分野, ベントナイト, 応用編
http://www.kunimine.co.jp/bent/bent_02.htm
- 8) Watabe, Y., K, Yamada and K, Saitoh: Hydraulic conductivity and compressibility of mixtures of Nagoya clay with sand or bentonite, Geotechnique, Vol.61, No.3, pp.211-219, 2011.
- 9) 村上博紀, 土田孝, 片山遥平: セシウムを含む廃棄物を対象とした海面処分場に用いる遮水地盤材料に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発)特集号, Vol.70, No.2, pp.846-851, 2014.

(2014年6月23日 受付)