

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360185

研究課題名(和文) 廃棄物地盤における環境リスクの低減と、持続可能な社会への貢献

研究課題名(英文) Mitigation of environmental risk of waste ground for contribution to sustainable society

研究代表者

勝見 武 (Katsumi, Takeshi)

京都大学・地球環境学堂・教授

研究者番号：60233764

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円、(間接経費) 4,290,000円

研究成果の概要(和文)：狭隘な我が国においては、廃棄物地盤の土地資源化や自然由来基準超過土の適正利用が求められる。本研究では廃棄物地盤や底部粘土層、鉱山廃水等を対象に実験的検討を行い、(1)廃棄物地盤の初期剛性や強度は砂地盤と同程度であり、構造物によっては直接基礎を適用しうること、(2)海底粘土層を貫通する杭基礎が打設された場合、圧密降伏応力程度の圧密圧力しか界面に作用しない場合であっても、杭と粘土層の境界面の遮水性能は損なわれないこと、(3)重金属を含む酸性鉱山廃水の浸透を受けた場合であってもベントナイト系遮水材(GCL)は十分低い透水系数を維持し、周辺環境への重金属類の漏出を緩衝しうること、等が明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Since Japan has limited land space, it is essential to utilize closed waste landfills and naturally contaminated soil as resources. In this research, experimental studies were conducted to characterize waste ground, bottom clay layer and contaminated soil. The following items are mainly verified: 1) since waste ground can have as high strength as sandy ground from the viewpoint of initial stiffness and internal frictional angle, spread foundations are applicable according to type of structures, 2) when pile foundations are installed to reach the bearing layer beneath a bottom clay layer, the channel between the steel and the clay closed enough under the normally consolidated condition by the effect of clay deformation, and 3) the bentonitic barrier material, such as GCL, can maintain extremely low hydraulic conductivity even against acid rock drainage containing heavy metals, and can mitigate outward leakage of heavy metals.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：廃棄物地盤 埋立処分場 遮水材 災害廃棄物 跡地利用 地盤環境工学 海底粘土層

1. 研究開始当初の背景

近年の科学技術の重要課題として温室効果ガスの発生抑制，資源循環の一層の推進，省エネルギー型技術・システムの導入が挙げられる。廃棄物処分問題に関して言えば，廃棄物の発生を極力低減させるとともに，埋め立てざるを得ない廃棄物については埋立完了後，土地資源としての有効活用を図ることが望ましい。ここで廃棄物地盤は，掘削等による遮水工の破損や埋め立てられた廃棄物の攪拌等の行為がなく，生活環境保全上の問題が生じる恐れがない状態であれば，処分場の廃止が認められ，その跡地は土地資源としての活用が可能となる。このため，廃棄物地盤を早期に土地資源として有効活用できるように適切な埋め立て管理工法を導入するとともに，廃棄物地盤の地盤工学的特性を解明し，その評価方法を確立することが重要である。しかし廃棄物地盤の跡地利用に際しては，浸出水や保有水に長期間残存する汚濁物質の環境影響，廃棄物埋立地盤の工学特性の時間・空間的な不均質性，跡地利用時の形質変更に伴う二次的な環境リスク発生の可能性，等の課題の解決を図る必要がある。

また自然由来汚染土のような重金属基準超過土についても，特に比較的低濃度のものについては適切に管理しつつ地盤材料として利活用することが望ましい。適正かつ合理的な対応策の一つとして，そのような土砂を盛土として利用することや，土捨て場に堆積させた下部に，粘土などの鉱物によるバリア層を設け，外部への漏出を防止する方法が考えられる。鉱物バリアには遮水性能や吸着性能が期待されることから，ベントナイト，ゼオライト，フェリハイドライトなどの適用が考えられ，特にベントナイトを2枚のジオテキスタイルに挟み込んだジオシンセティッククレイライナー（以下，GCL）は現場の施工性にも優れており有効と考えられるものの，自然由来の重金属や酸性水に対するこれら鉱物バリアの性能に関する科学的な知見は限られていることから，重金属類や酸性水を対象とした鉱物バリアの遮へい性能について科学的に検証する必要がある。

2. 研究の目的

上記のような背景を受け，本研究では廃棄物埋立地盤の地盤工学特性と環境リスクの評価を通して適切な埋め立て管理工法や廃棄物埋立地盤の造成方法を提案し，また自然由来等による重金属基準超過土を直接利用するための方策を実験的に明らかにすることで，積極的な廃棄物地盤跡地利用の推進と持続可能な基準超過土の活用に貢献することを目的とする。具体的には，積極的な跡地利用が期待される海面埋立処分場の廃棄物地盤の工学特性と環境影響物質の挙動の評価，海面処分場跡地利用時に杭打設を伴う際の粘土層の遮水性能評価，自然由来基準超過土等の対策における鉱物バリア材の

遮水性能と緩衝能の評価を行い，廃棄物地盤や重金属基準超過土の再資源化の可能性を科学的に検討する。

3. 研究の方法

本研究では，以下に示す3つのサブテーマに関して主に検討を行った。サブテーマごとにそれらの方法を示す。

(1) 海面埋立処分場の廃棄物地盤の工学特性と環境影響物質の挙動の評価

国内の某海面処分場の搬入基地に搬入された後，一連の運搬・積み替え過程を経て，処分場に投入される直前の廃棄物試料を現地で採取し，各種室内試験に供した。埋立てに至るまでの過程で廃棄物は攪拌作用を受けており均質性は高くなっている。原位置での正確な含水比は不明であるが，かなりの水分を含む湿潤状態であり，水和反応による熱を発生している状態であった。廃棄物試料の組成は時季により異なるが，約50%が焼却灰，スラグや汚泥といった産業廃棄物が40%程度である。採取した試料は，室温20°Cの恒温室内で風乾させた後，粒径9.5 mm以下にふるい分けしたものを使用した。粒度組成からこの廃棄物試料は砂質土に相当する粒度を有しており，化学組成からは酸化カルシウムがポルトランドセメント並みに多く含まれることが分かる。Ca, Si および Al が存在していることから，水和反応またはポゾラン反応により，廃棄物内に固結力が生じることが示唆される試料である。

この試料を最適含水比34.5%になるよう調整し，初期湿潤密度1.64 g/cm³の直径50 mm，高さ100 mmの円柱供試体を突固めによって作製した。この初期密度の設定にあたっては当該処分場において実測された廃棄物地盤の密度を参考に決定している。供試体の養生に際しては，海面処分場の内水を模擬した模擬内水中で水中養生をした。大阪府内の沿岸にて採取した海水と廃棄物試料を液固比10で混合して7日間放置した後，75 μmメッシュでろ過したものを使用した。模擬内水の水质はCa濃度 = 1850 mg/L，pH = 7.95であった。0~180日間の所定の養生期間終了後，拘束圧を50, 100, 150 kPa（背圧240 kPa）の3段階に変化させ，写真-1に示す圧密非排水（CU）三軸圧縮試験を行った。圧縮試験後の供試体は走査型電子顕微鏡（日本電子JSM-5610LV）による微視的構造の観察，およびX線回折分析（RIGAKU X線回折装置ガイガーフレックスRAD II，波長1.54184Å）に供した。

(2) 海面処分場跡地利用時に杭打設を伴う際の環境影響物質の挙動評価

廃棄物埋立地盤の支持力・変形特性は不均質であることに加え，底部の遮水層として機能している海底粘土層は軟弱であることから，大規模構造物を建設する際に支持力確保のため図-1のように粘土層を貫通する杭基礎の打設が想定されるが，この際，杭打設に

伴う連れ込みあるいは杭 - 粘土界面での漏水に伴う環境影響質の漏出が懸念される。既往の研究より連れ込みに伴う汚濁物質の漏出は僅かであることから、本研究では杭 - 粘土界面の遮水性能を実験的に評価した。

実験には用いたカオリン粘土は、液性限界 48.7%、塑性限界 29.7%であり、ASTM D 5084 に準拠した透水係数は 9.00×10^{-9} m/s である。用いた試験装置の概念図は図-2 に示すとおりであり、上部のキャップは、中心から直径 6 cm より内側部分の透水量と外縁部分の透水量が別々に採取できる構造となっているため、同一の供試体で粘土の透水係数 k_c と鋼製セルと粘土の境界からの漏水を含んだ透水係数 k_s を同時に求めることができる。手順としては、供試体とセルの間に所定の空隙厚が確保できるよう OHP フィルムをセル内壁に貼り付けた状態で、液性限界の 1.5 倍に含水比調整した試料をセル内に充填した。90 kPa の圧密圧力で予備圧密した後、予備圧密圧力前後の所定の本圧密圧力を载荷した。これにより、供試体を圧密変形させることで杭打設後の粘土地盤の圧密沈下による空隙の閉塞状況を模擬できる。各圧密圧力で 24 時間载荷した後、変水位透水試験により k_s と k_c を算出した。

(3) 自然由来基準超過土の対策における鉍物バリア材の遮水性能と緩衝能

本研究では、まず鉍山廃水の水質に関する 800 種類以上の既往データを整理し、掘削岩石からの重金属溶出や酸性廃水の発生の特徴を、水素イオン濃度指数や電気伝導度、重金属濃度のデータを体系的にとりまとめた。

それらの結果に基づき室内で作製した 10 種類の模擬鉍山廃水を用い、バリア材に GCL を用い透水試験及び膨潤試験を実施した。用いた GCL は織布及び不織布の間に Na 型ベントナイトを内包するニードルパンチ型のものである。透水試験では透水係数を算出するとともに、排出水を化学分析し重金属濃度を明らかにすることで、流入水との濃度比から重金属緩衝能を評価した。また鉍山廃水に含まれる重金属類のベントナイトへの吸着特性を評価するため、単一の重金属溶液に加えて、二種類の重金属を含む溶液や模擬浸出水を用いたバッチ吸着試験を体系的に実施した。



写真-1 三軸圧縮試験装置の外観

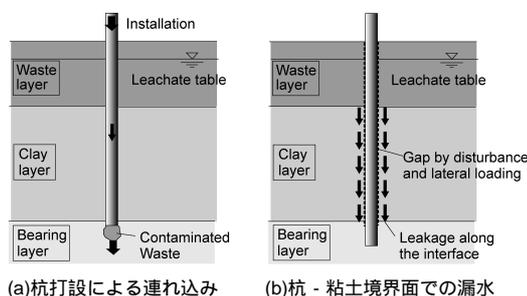


図-1 杭打設時に想定される汚濁物質漏出シナリオ

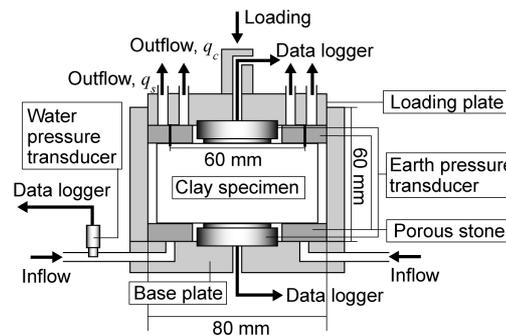


図-2 剛壁型透水試験装置の模式図

4. 研究成果

(1) 海面埋立処分場の廃棄物地盤の工学特性と環境影響物質の挙動の評価

写真-2 に養生 0 日、および養生 150 日の供試体の電子顕微鏡観察写真（倍率 100 倍および 5000 倍）を示す。100 倍倍率の画像においては養生日数の差異による間隙構造の大きな相違は確認できないが、5000 倍倍率の画像においては養生 150 日の供試体において針状に析出したエトリンガイトが水中養生によって増加している様子がわかる。別途実施した養生 180 日の供試体の X 線回折結果では、明確な二水石膏、エトリンガイトの回折ピークが確認でき、水中養生日数の経過とともにエトリンガイトが増加することが示唆されている。一方、他にもカルシウムシリケート水和物、およびカルシウムシリケート水和物等についても明確なピークが確認されたことから、海水中のマグネシウムイオンや硫酸イオンなどとの相互作用によって、供試体中には様々な形態の水和物が生成しており、供試体の間隙構造に変化が起きていることが明らかとなった。図-3 にすべての試験ケースにおける破壊時の平均主応力と軸差応力の関係を示す。破壊が発生した軸差応力はピーク強度、もしくは明確なピークが発生していない場合は軸ひずみ 15%における軸差応力で定義した。破壊時の軸差応力と平均主応力の関係は養生日数を問わずほぼ一定であること、ならびに養生日数が長い供試体ほど破壊時の平均主応力が大きくなり結果としてせん断強度が増加する傾向が確認できる。このことから、各供試体で得られた非排水せん断強度は水和物の生成による粒子間の固結力の発生やせん断抵抗の増大に起因するものではなく、せん断時に作用する平均主応力の大小によって決定されると考えられる。

これは、水和物の生成によって間隙が充填され、非排水せん断時の体積変化量が減少したことで間隙水圧の発生が抑制され、作用する平均主応力が増大したと考えられる。また、図-3 に示すように養生日数を問わず強度定数は一意的に求められ、有効応力に基づくせん断抵抗角および粘着力はそれぞれ $\phi = 46.7$ 、 $c' = 0$ kPaであった。これらの結果から、廃棄物地盤の初期剛性や強度自体は、砂地盤と同程度であることから、構造物によっては直接基礎を適用しうると考えられる。

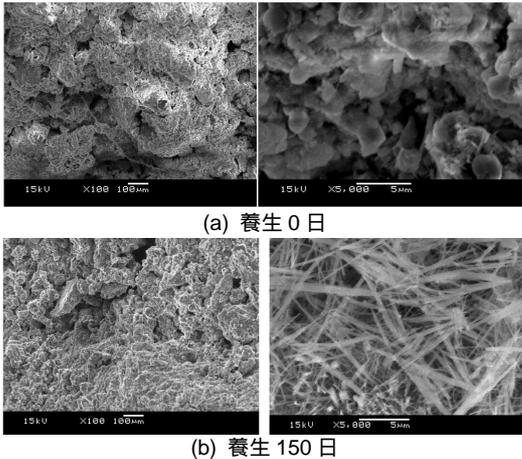


写真-2 養生日数が異なる供試体の電子顕微鏡写真(左:観察倍率100倍,右:同5000倍)

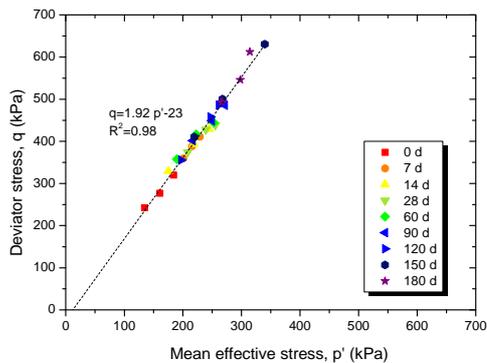


図-3 平均主応力と破壊強度の関係

(2) 海面処分場跡地利用時に杭打設を伴う際の粘土層の遮水性能

「一般廃棄物および産業廃棄物の最終処分場に係わる技術上の基準を定める省令」では、遮水工の要件として廃棄物処分場の底面粘土層の層厚が5 m以上、透水係数が 1×10^{-7} m/s以下とされている(以下、構造基準)。本研究では透水係数に関する基準に焦点を当てており、この透水係数に関する構造基準と比較するために、まず杭周面の漏水の指標として界面透水量係数 K_L (m²/s)を下式により算出した。

$$Q_m = \left(\frac{\pi D^2}{4} k_c + \pi D \cdot K_L \right) \cdot i$$

ここで、 Q_m :流入量 (m³/s)、 D :供試体直径 (m)、 k_c :粘土の透水係数 (m/s)、 K_L :界面透水量係

数 (m²/s)、 i :動水勾配である。さらに図-4に示すように杭周面からの透水量 Q_L と、杭の体積分の仮想粘土柱を通過する透水量 Q_c' が等価と仮定し、換算透水係数 k_c' を算出した。

図-5に、 $D = 50$ cmとして算出した初期空隙厚1.56 mmと1.68 mmの場合における、圧密圧力と k_c' の関係を示す。初期空隙厚に関わらず、予備圧密圧力(90 kPa)付近で空隙は閉塞し、 k_c' は構造基準を満たす程度に低下していることがわかる。過圧密領域で急激に圧密圧力を増加させたCase 1では、段階的に荷重を増加させたCase 2よりも小さい圧密圧力で空隙が閉塞しているが、これはCase 1の方が圧密荷重の荷重増分比が大きく、粘土の圧縮量が增大し空隙が早期に閉塞したためであると考えられる。このように、荷重増分の違いによって空隙閉塞の程度に違いはあるものの、粘土の遮水性能に著しい影響を与えるものではないことから、圧密降伏応力程度の圧密圧力しか界面に作用しない場合であっても、杭と粘土層の境界面は密着し、境界部分の遮水性能は担保されると判断できる。

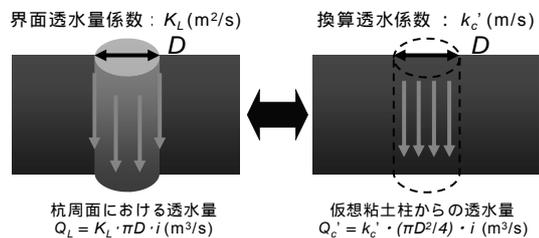


図-4 換算透水係数 k_c' の概念

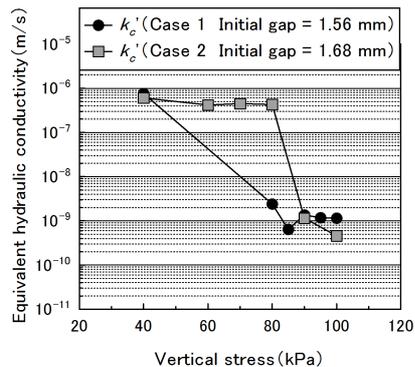


図-5 k_c' と圧密圧力の関係

(3) 自然由来基準超過土の対策における鉋山バリア材の遮水性能と緩衝能

多価カチオンを多く含む溶液がGCLに流下する場合、透水係数は急激に増加することになるが、GCLに最初に浸透させる溶液が水である場合、その程度を軽減することができる。これはPrehydrationと呼ばれ、水等に最初に曝露された場合はGCL中のベントナイトが十分に膨潤できることから、乾燥状態のGCLが最初に曝露される溶液の種類によって、GCLの遮水性能は大きく影響を受ける。GCLの遮水性能は、包含されるベントナイトの膨潤性に依存していることから、模擬鉋山廃水に対して乾燥ベントナイトの膨潤試験

を行った。図-6 に示すとおり、溶液の電気伝導率 (EC) が増加するほどベントナイトの膨潤量が減少していることがわかる。つまり溶液中の重金属濃度が高くなるほど EC が上昇し、結果としてベントナイトの膨潤が阻害されていることから、鉱山廃水の化学組成は GCL の性能を評価する上で極めて重要な因子であることがわかる。図-7 はベントナイトの膨潤量と、透水試験から算出した GCL の透水係数の関係を示したものであるが、GCL 中のベントナイトの膨潤量と GCL の透水係数には処分場浸出水の場合と同様に一定の相関があり、既存のモデル式を適用することで遮水性能を予測しうることを明らかにした。一方、化学平衡を満たすべく実施した長期の透水試験の結果、鉱山廃水中に含まれる化学物質の影響によって遮水性能は影響を受けるもののその程度は限定されており、封じ込めに十分適用しうる低い透水係数を有することが示された。

また単一の重金属溶液や二種類の重金属を含む溶液、模擬浸出水を用いて行ったバッチ吸着試験の結果、浸出水中の金属濃度の低減には吸着現象に加えて沈殿現象の寄与が重要なこと、特に自然由来の重金属類として多く存在するヒ素の溶出防止には、図-9 に示すように鉄分の存在が寄与していることを示した。つまり鉱山廃水中にも十分に含まれる鉄イオンの存在によりヒ素が吸着されることを明らかにした。また、透水試験における排出水の重金属濃度の定量によってもヒ素の封じ込め効果を明らかにし、特に鉱物バリアの低透水性が間隙中への鉄分等の沈殿物の析出を促進させ、重金属類の周辺環境への漏出を緩衝しうることが明らかとなった。

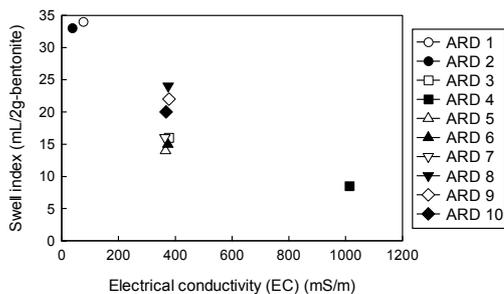


図-6 模擬鉱山廃水の EC とベントナイトの膨潤量

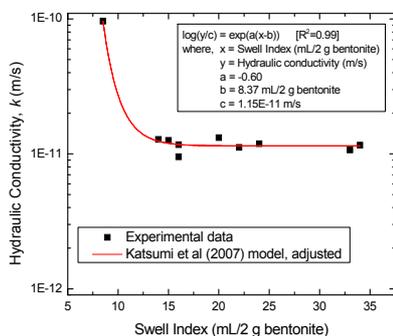


図-7 ベントナイトの膨潤量と GCL の透水係数

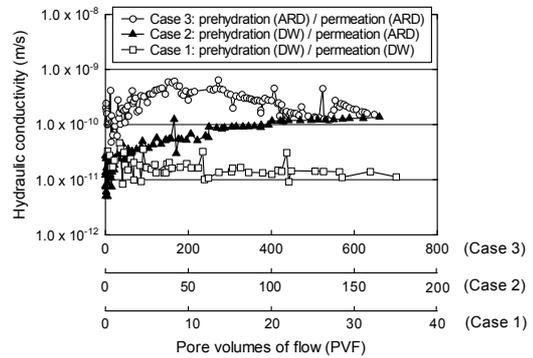


図-8 初期水和条件、透水溶液の異なる GCL の透水係数の長期変化

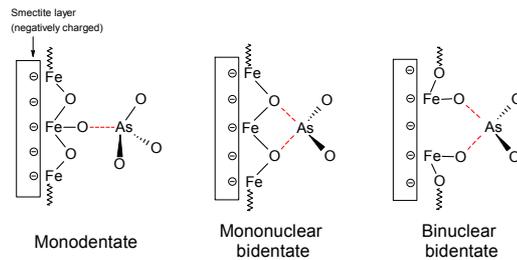


図-9 鉄分存在下でのベントナイトへのヒ素の吸着機構

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 68 件)

- 1) N.C. Lan, 乾 徹, 勝見 武, 高井敦史 (2013): 海面処分場廃棄物埋立地盤の強度・変形特性に及ぼすエージング効果の影響, *Kansai Geo-Symposium 2013 - 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム - 論文集*, 地盤工学会関西支部・地下水地盤環境に関する研究協議会, pp.77-80, 査読有
- 2) Inui, T., Yasutaka, T., Endo, K., and Katsumi, T. (2012): Geo-environmental issues induced by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and tsunami, *Soils and Foundations*, Vol.52, Issue 5, pp.856-871, 査読有
- 3) N.C. Lan, 乾 徹, 勝見 武, 高井敦史 (2012): 海面処分場における廃棄物層の強度・変形特性の経時変化, 第 10 回地盤改良シンポジウム論文集, 日本材料学会, pp.151-154, 査読有
- 4) Inui, T., Katsumi, T., Ohshima, H., Takai, A., and Kamon, M. (2012): Effects of pile installation on barrier performance of clay layer at coastal landfill sites, *Testing and Design Methods for Deep Foundations*, T. Matsumoto (ed.), pp.411-416, 査読有
- 5) Katsumi, T., Kotake, N., and Viswanadham, B.V.S. (2012): Geosynthetics for environmental protection – Compatibility and

integrity, *Geosynthetics Asia 2012 - 5th Asian Regional Conference on Geosynthetics*, D.T. Bergado (ed.), pp.47-68, 査読有

- 6) Ishimori, H. and Katsumi, T. (2012): Temperature effects on the swelling capacity and barrier performance of geosynthetic clay liners permeated with sodium chloride solutions, *Geotextiles and Geomembranes*, Elsevier, Vol.33, pp.25-33, 査読有
- 7) Abedin, M.A., Katsumi, T., Inui, T., and Kamon, M. (2011): Arsenic removal from naturally contaminated groundwater by zero valent iron: A mechanistic and long-term performance study, *Soils and Foundations*, JGS, Vol.51, No.3, pp.369-377, 査読有
- 8) Naka, A., Li, Z., Inui, T., Katsumi, T., and Mogami, H. (2010): Heavy metals retention in geosynthetic clay liners and its potential role in acid rock drainage treatment, *Geosynthetics Engineering Journal*, Vol.25, pp.233-240, 査読有
- 9) Plata, H., Inui, T., Katsumi, T., Oya, Y., and Kamon, M. (2010): Speciation and mobility of zinc in coastal landfill sites with MSW incinerator ash, *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol.136, No.8, pp.762-768, 査読有

〔学会発表〕(計 57 件)

- 1) N.C. Lan: Aging effects on shear strength properties of waste in coastal landfill, The 2nd International Conference GEOTEC Hanoi 2013, 2013/11/28, Meliã Hotel Hanoi (Vietnam)
- 2) 勝見 武: 建設リサイクルと社会への貢献, 建設リサイクルシンポジウム(基調講演), 2013/03/11, 建設交流館(大阪)
- 3) 森田康平: 地震と津波により発生した廃棄物混じり土砂の物理化学特性, 第 18 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 2012/06/14, 埼玉会館(埼玉)
- 4) 大嶋英雄: 廃棄物処分場の跡地利用における杭 - 粘土層境界面の遮水性能に関する研究, 平成 24 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2012/06/09, 神戸市立工業高等専門学校(兵庫)
- 5) A. Naka: Bentonite barrier against heavy metal and acid rock drainage, 第 17 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 2011/06/16, サンピアンかわさき(神奈川)
- 6) 石森洋行: 廃棄物海面埋立処分場内のガス挙動解析と酸素供給量の評価, 第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2011/11/03, 東洋大学白山第 2 キャンパス(東京)
- 7) A. Naka: Heavy metal sorption on bentonite and its potential role in acid rock drainage treatment, 日本応用地質学会平成 22 年度研究発表会, 2010/11/05, 福井市地域交流プラザ(福井)

- 8) T. Katsumi: Geosynthetics applied in waste landfills and containment facilities (基調講演), 9th International Conference on Geosynthetics, 2010/05/25, Sofitel Jequitimar Convention Center (Brazil).

〔図書〕(計 2 件)

- 1) 嘉門雅史・大嶺 聖・勝見 武(2010): 地盤環境工学, 共立出版, pp.219.
- 2) 地盤工学会 勝見武監修(2010): Web ラーニングプラザ「大地をめぐる環境問題」, 科学技術振興機構, URL: http://weblearningplaza.jst.go.jp/cgi-bin/user/top.pl?next=lesson_list&type=simple&field_code=35&course_code=725.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

勝見 武 (TAKESHI KATSUMI)
京都大学・地球環境学堂・教授
研究者番号: 60233764

(2) 研究分担者

乾 徹 (TORU INUI)
京都大学・地球環境学堂・准教授
研究者番号: 90324706

高井敦史 (ATSUSHI TAKAI)
京都大学・地球環境学堂・助教
研究者番号: 30598347

小竹 望 (NOZOMU KOTAKE)
香川高等専門学校・建設環境工学科・教授
研究者番号: 60512704

稲積真哉 (SHINYA INAZUMI)
明石工業高等専門学校・都市システム工学科・准教授
研究者番号: 90324706

石森洋行 (HIROYUKI ISHIMORI)
立命館大学・理工学部・講師
研究者番号: 60512704