

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289145

研究課題名(和文)再生地盤材料のスケール効果とエイジングを考慮した材料評価試験方法の高度化

研究課題名(英文) Developing advanced testing methods for recycled geo-materials considering their scale and aging effects

研究代表者

乾 徹 (INUI, Toru)

京都大学・地球環境学堂・准教授

研究者番号：90324706

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,800,000円

研究成果の概要(和文)：再生資材や廃棄物由来材料を対象に地盤材料試験や環境安全性試験を適用する際のスケール効果およびエイジング作用が評価結果に及ぼす影響と因果関係を明らかにし、試験方法ならびに試験結果の解釈方法の新たな提案を行った。具体的には、廃棄物埋立地盤の強度変形特性に及ぼす水和反応性を有する物質による構造効果の影響、自然由来の重金属を含有する岩石の溶出特性に及ぼす試験スケールや破碎粒度の影響、有害物質の吸着層の性能評価における保持時間や共存イオンによる影響について各種実験的検討を行い、適切な評価試験方法の確立の観点から議論を行った。

研究成果の概要(英文)：Aging and scale effects on geotechnical and geoenvironmental properties of recycled or waste-based geo-materials were experimentally analyzed to develop and improve the testing methods and their interpretations to evaluate these effects. Particularly, this research addresses 1) aging effects on mechanical properties of waste mixture reclaimed at coastal waste landfill, mainly induced by the formation of several hydration products, 2) testing-scale and particle size effects on the long-term leaching properties of non-anthropogenic heavy metals and metalloids contained in excavated rock, and 3) inorganic contaminants sorption performance of the in-situ reactive layer, affected by retention time and cations existing in the leachate. Based on the testing results, the testing methods and protocols to address these aging and scale effects were proposed and discussed.

研究分野：地盤工学

キーワード：再生資材 地盤材料 有害物質 スケール効果 エイジング効果 強度変形特性

## 1. 研究開始当初の背景

地盤工学分野においては、建設発生土や廃棄物再資源化材を地盤材料として有効利用するための研究開発が 1990 年代半ば頃から精力的に実施されている。近年では、循環型社会への向け一層の要請を背景として、より多種多様な再生資材を地盤材料として利用するための技術開発を進めてきた。例としては、(1) 各種産業から発生する多様な産業廃棄物の地盤材料としての受入、(2) 東日本大震災の災害廃棄物処理過程で大量に発生する廃棄物混じり土砂の利用、(3) 廃棄物埋立地盤の跡地利用、などが挙げられる。このような動きは循環型社会の推進に貢献するものであるが、再生資材の材料特性、地盤構造物としての性能を事前に各種試験によって適切に評価し、社会基盤の健全性、信頼性を維持することが一層重要となる。再生資材自体の材料評価、利用のための各種改良技術や構造物としての性能評価にはこれまでは既存の地盤材料試験方法が準用されてきた。しかし、再生資材は天然の地盤材料とその組成が大きく異なるため、既存試験方法の適用に際しては様々な問題点が指摘される。しかしながら、これまでは既存の試験方法の適用性が十分に検討されないまま、試験方法に由来する問題と材料の時間的、空間的な不均質性を混在一体に「再生資材の品質のばらつき」として扱い、積極的に試験方法の適用性に関する議論や試験方法の改良が実施されてこなかった。

一方、廃棄物や副産物を原料とする再生資材は微量の有害物質を含有するものが多く、力学的特性の評価に加えて、事前に環境安全性を併せて照査する必要がある。従来は、再生資材を 2 mm 以下の粒径に破碎し、水と一定時間混合した際の溶出濃度を土壤環境基準値と比較する方法により判定が行われてきた。しかし、この試験方法は実際の材料の利用形態とは大きく異なる条件での溶出量を与えるものであり、申請者らは新たな環境安全性試験方法の枠組み、環境影響の評価方法を提示してきた。その結果、近年では敷地境界等での地下水中の有害物質濃度が地下水環境基準の範囲であれば積極的な再生資材の利用が推奨されたり、人の居住がなく、海水での希釈効果も期待できる港湾域での再生資材の利用にあたっては、溶出濃度が土壤環境基準の 3 倍値まで認められる、という新たな設計指針が整備されてきた。しかし、環境安全性評価の基本となる有害物質の溶出源評価については、力学的特性と同様に、試験スケールやエイジングといった要因を評価する試験方法や結果の解釈方法が確立されておらず、研究代表者が過去に実施した例など限られた事例が報告されているにすぎない。

## 2. 研究の目的

上記の背景、およびこれまでの研究経過に

基づいて、本研究では再生資材を対象に地盤材料試験や環境安全性試験を適用する際のスケール効果およびエイジング作用が評価結果に及ぼす影響と因果関係を明らかにし、再生資材を対象とした試験方法ならびに試験結果の解釈方法に反映させ、試験方法の高度化を図ることを目的とする。具体的には、以下の 3 つの項目を明らかにする。

(1) スケール効果とエイジング効果が再生資材の溶出源評価に及ぼす影響の解明：拡散溶出試験、カラム通水試験といった一般的な溶出源評価試験を対象に、溶出特性のスケール効果の評価を実施する。再生資材や有害物質の種類によって、分配平衡律速、溶解度律速、移動律速など溶出機構が異なるが、これらの機構に準じてスケール効果の大小や傾向を概ね類型化する。併せて、自硬性を有する再生資材については時間効果が溶出挙動に及ぼす影響を長期的に検証する。

(2) 構造・スケール効果が地盤材料の工学的特性に及ぼす影響の解明：地盤工学分野で適用されている強度変形特性の評価技術を再生地盤材料に適用し、エイジング作用や構造効果が地盤材料特性に及ぼす影響を明らかにする。特に再構成試料の試験結果と現場における載荷試験等の結果を比較することにより、供試体作成方法と試験結果の因果関係やスケール効果との相関を明らかにするとともに、これらの技術の再生資材に対する有用性を明らかにする。

(3) 再生資材の地盤材料特性・環境安全性評価のための試験方法とその解釈方法の提案：再生資材の地盤材料特性を評価する際の供試体作成、品質評価を含めた試験方法の提示、および対象材料毎の留意事項の整理を行い、将来的な試験方法の基準化に向けた学術的根拠を蓄積する。環境安全性評価の側面からも、現場における溶出源評価に利用するための要素試験結果の定量的な解釈方法を提案する。

## 3. 研究の方法

(1) スケール効果とエイジング効果が再生資材の溶出源評価に及ぼす影響の解明：自然的原因で地層に含まれる重金属等を対象として、破碎粒径、供試体密度や間隙水の流況が有害物質の溶出特性に及ぼす影響を評価した。特に、化学平衡時と非化学平衡時の有害物質の溶出特性や周辺地盤への吸着特性の相違、地盤材料や廃棄物に含まれる共存イオンが有害物質の溶出特性に及ぼす影響についてカラム試験等を用いて詳細に評価を行った。得られた実験結果に基づき適切なカラム溶出操作の検討、および主要な共存物質が溶出特性に及ぼす影響とその程度の把握、メカニズムの推定を行った。

(2) 構造・スケール効果が地盤材料の工学的特性に及ぼす影響の解明: 構造効果やスケール効果が大きいとされる混合廃棄物埋立地盤を対象として、水和生成物の生成による構造効果が強度変形特性に及ぼす影響を評価するために、様々な材齢の水中養生試料と再構成試料を対象に実施して、強度変形特性の比較検討を行った。具体的には、焼却灰、スラグ、汚泥等で構成される海面処分場の廃棄物埋立材料を対象に、最大 180 日間に渡って模擬内水中で養生した混合廃棄物試料を対象に圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。さらには、X 線回折分析や電子顕微鏡観察などを併せて行い、その機構の同定を行った。

(3) 再生資材の環境安全性評価のための試験方法とその解釈方法の高度化: 自然由来の重金属等を含有する岩石等を盛土等に利用する際には、覆土や吸着層といった構造的に安定性の高い工法により環境安全性を担保することが重要となり、適切な評価試験の適用が必要となる。各項目を適切に評価しうる試験方法、もしくは既存試験方法を適用する際の留意点を明らかにするとともに、重要な項目である吸着層の性能に及ぼす保持時間依存性の検討を行った。

#### 4. 研究成果

(1) スケール効果とエイジング効果が再生資材の溶出源評価に及ぼす影響の解明: 自然的原因で地層に含まれる長期的な重金属等の溶出特性を建設工事で掘削された岩石を対象に様々なスケールの試験方法で検証を行ったところ、試験スケールや試験時の試料粒径の影響は硬岩系が相対的に大きく、泥岩系においては室内バッチ試験による溶出量評価の適用性は比較的高いことが明らかになった。また、掘削岩石を対象としたカラム通水溶出試験においては、破碎粒度や間隙率の制御が初期溶出量に及ぼす影響が大きいことを実験結果に基づいて明らかにした。

(2) 構造・スケール効果が地盤材料の工学的特性に及ぼす影響の解明: 最大 180 日間に渡って模擬内水中で養生した混合廃棄物試料を対象に圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。得られた応力 - ひずみ関係や有効応力に関する強度定数より、水中養生によって有効主応力  $p'$  で正規化したピークせん断強度 ( $q/p'$ ) が明らかに増加する傾向がみられた。これは、養生による水和物の生成、間隙の充填効果によって過圧密土に類似の挙動を示したと考えられる (図 1)。特に水中養生期間が長いほどその傾向は顕著であった。養生に伴い、供試体中に生成する膨張性のエトリンガイトが等の水和生成物による間隙の充填が微視的観察、および透水試験結果によって明らかになった。一方で、ひずみが進展した後の残留強度自体には、生成物による固結効果やせん断抵抗の増加などはほとんどみら

れなかった。以上より、再構成試料を用いた強度評価においては低ひずみ領域の構造効果に起因する強度増加は再現できないが、残留強度自体は適切に評価できることが明らかになった。

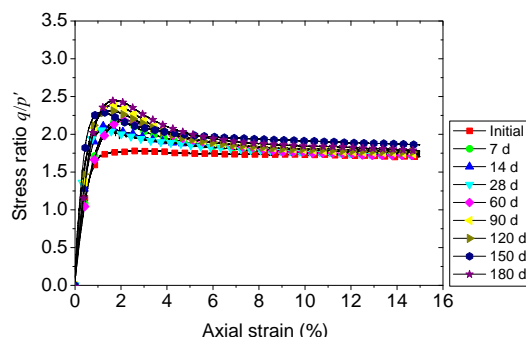


図 1 再構成試料と養生試料のせん断応力比-ひずみ関係

(3) 再生資材の環境安全性評価のための試験方法とその解釈方法の高度化: 自然由来の重金属等を含有する岩石等を盛土等に利用する際の吸着層を対象にして、吸着層材料への接触時間が吸着性能に及ぼす影響を明らかにし、吸着層の水理学的条件を考慮した場合の吸着性能の評価手法を提示した。さらには、セシウム汚染土・廃棄物の中間貯蔵時における吸着層の適用性を評価する上で、共存イオン濃度がセシウムの分配係数に及ぼす影響がオーダーレベルであり (図 2), 設計時の共存イオンの影響の考え方を提示した。

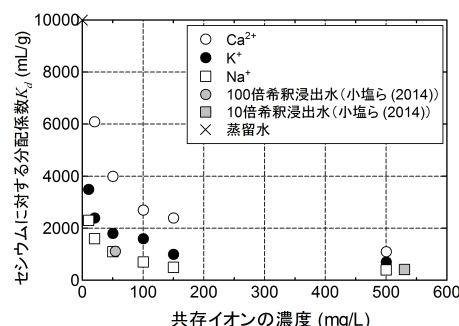


図 2 共存イオン濃度と粘土材料へのセシウム分配係数の関係 (模擬浸出水に対する分配係数を併記)

#### 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 20 件)

Nguyen, C.L., Inui, T., Ikeda, K., and Katsumi, T.: Aging effects on the mechanical property of waste mixture in coastal landfill sites, *Soils and Foundations*, 査読有, Vol.55, 2015, 1441-1453.

DOI: 10.1016/j.sandf.2015.10.009

Tang, Q., Kim, H., Endo, K., Katsumi, T., and Inui, T.: Size effect on lysimeter test evaluating the properties of construction and demolition waste leachate, *Soils and*

Foundations, 査読有, Vol.55, 2015, 720-736.  
DOI: 10.1016/j.sandf.2015.06.005  
Nguyen, C.L., Inui, T., and Katsumi, T.: Scale effects on the shear strength of waste in coastal landfill sites, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 査読有, Vol.2, 2015, 1824-1828.  
DOI: 10.3208/jgssp.VNM-04  
Mo, J., Inui, T., Katsumi, T., Takai, A., Kuninishi, K., and Hayashi, S.: Performance of sorption layer using Ca/Mg immobilizing agent against natural contamination, Proceedings of the 10th Asian Regional Conference of the International Association for Engineering Geology and the Environment - Geohazards and Engineering Geology, 査読有, Vol.10, 2015, No. TP4-06.  
Mo, J., Inui, T., Katsumi, T., Kuninishi, K., and Hayashi, S.: Effectiveness of immobilizing agent used as a sorption layer against natural contamination, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 査読有, Vol.1, 2015, 19-24.  
DOI: 10.3208/jgssp.JPN-22  
田村成仁・乾徹・中澤祐樹・高井敦史・勝見武・増淵淳: ソイルベントナイト遮水壁材料の拡散係数の評価手法に関する検討, Kansai Geo-Symposium 2015 - 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, 査読有, 2015, 101-104.  
竹尾美幸・肴倉宏史・Naka Angelica・乾徹・勝見武・佐藤研一・藤川拓朗: 上向流カラム通水試験において試験条件が溶出特性に及ぼす影響, 第 11 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 査読有, 11, 2015, 429-434.  
Inui, T., Katsumi, T., and Takai, A.: Cesium sorption/desorption characteristics of sodium bentonite affected by major cations in leachate from MSW incinerator ash, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 査読有, Vol.2, 2015, 1841-1844.  
DOI: 10.3208/jgssp.JPN-071  
乾徹・勝見武: 土壌溶出量試験の技術的課題と展望, 廃棄物資源循環学会誌, 査読なし, 25, 2014, 369-377.  
義経浩平・矢野賢・乾徹・高井敦史・勝見武: プラスティック片を含有する廃棄物地盤の強度変形特性, 第 11 回地盤改良シンポジウム論文集, 査読有, 2014, 61-66.  
乾徹・木原翔太・小塩美香・勝見武・高井敦史・木村文昭: 指定廃棄物の埋立処分に用いられる Na 型ベントナイトのセシウム吸脱着特性, 第 11 回地盤改良シンポジウム論文集, 査読有, 2014, 97-100.  
大嶋英雄・乾徹・勝見武・高井敦史: 海面処分場の底部粘土層 - 鋼管杭界面の閉塞と透水特性の実験的検討, Kansai Geo-Symposium 2014 論文集, 査読有, 2014, 27-30.

乾徹・片山真理子・勝見武・高井敦史・嘉門雅史: 屋外暴露試験による自然由来重金属を含有する岩石の長期溶出挙動評価, 材料, 査読有, 63, 2014, 73-78.  
DOI: 10.2472/jsms.63.73  
Nguyen, C.L., Inui, T., and Katsumi, T.: Aging effects on shear strength properties of waste in coastal landfill, Geotechnics for Sustainable Development: Proceedings of the Second International Conference Geotec Hanoi 2013, P.D. Long (ed.), Construction Publishing House, Hanoi, 査読有, 2013, 379-387.  
Nguyen, C.L., Inui, T., and Katsumi, T.: Effect of biodegradation phases on mechanical properties of municipal solid waste in bioreactor landfill in Vietnam, Proc. 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, K. Sato et al. (eds.), Kyushu Branch of the Japanese Geotechnical Society, 査読有, 2013, 99-104.  
Inui, T., Katsumi, T., Takai, A., and Kamon, M.: Evaluating the long-term leaching characteristics of heavy metals in excavated rocks, Proc. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering -Challenges and Innovations in Geotechnics, P. Delage et al.(eds.), Presses des Ponts, Paris, 査読有, 4, 2013, 3037-3040.  
Inui, T., Katsumi, T., Takai, A., and Kamon, M.: Factors affecting heavy metal leaching from excavated rocks with natural contamination, Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics -From Theoretical and Experimental Research to Practical Applications, M. Manassero, A. Dominijanni, S. Foti, and G. Musso (eds.), CRC Press, 査読有, 2013, 587-592.  
Ngyuen Lan Chau・乾徹・勝見武・高井敦史: 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, 査読有, 2013, 77-80.  
Naka, A., Flores, G., Katsumi, T., and Inui, T.: Role of heavy metals in the immobilization of arsenic in geosynthetic clay liners, Proceedings of 10th National Symposium on Environmental Geotechnics, Japanese Geotechnical Society, 査読有, 2013, 463-470.  
乾徹・島岡隆行・勝見武: 海面処分場の現状と将来性, 4. 海面処分場の地盤工学上の課題 その 2 汚濁物質の挙動と環境評価, 地盤工学会誌, 査読なし, 61(6), 2013, 58-65.

〔学会発表〕(計 17 件)

辰巳鴻介・高井敦史・乾徹・勝見武・増淵淳・荒木進: 拡散輸送を考慮したソイルベントナイトの物質移行特性評価, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016 年 9 月 13 日 ~ 15 日, 岡山大学, 岡山

谷尻陽祐・乾徹・高井敦史・勝見武: 掘削ずりの破碎性が自然由来重金属等の溶出挙動に及ぼす影響, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016 年 9 月 13 日 ~ 15 日, 岡山大学, 岡山

Mo, J., Inui, T., Katsumi, T., Takai, A., and Kuninishi, K.: Time-dependent sorption behavior in sorption layer method, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016 年 9 月 13 日 ~ 15 日, 岡山大学, 岡山

乾徹・竹尾美幸・高井敦史・勝見武: カラム試験による掘削ずりの溶出特性とその粒径依存性の評価, 第 22 回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会, 2016 年 6 月 23 日 ~ 24 日, 京都大学, 京都

辰巳鴻介・高井敦史・乾徹・勝見武・増淵淳: 拡散輸送を考慮したソイルベントナイトの物質移行パラメータの評価, 平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2016 年 6 月 11 日, 立命館大学, 滋賀

谷尻陽祐・乾徹・高井敦史・勝見武: 破碎を考慮した自然由来のヒ素を含む掘削ずりの溶出特性の評価, 平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2016 年 6 月 11 日, 立命館大学, 滋賀

Inui, T. and Katsumi, T.: Geotechnical issues for developing coastal waste landfill, Tokyo Metropolitan University Kenkyukan Project Work Shop (招待講演), 2015 年 12 月 1 日 ~ 2 日, 首都大学東京, 東京

瀬尾葵・乾徹・高井敦史・勝見武・國西健史・林慎太郎: 吸着層に用いる Ca/Mg 系固化材改良土の砒素吸着特性に及ぼす共存イオンの影響, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2015 年 9 月 1 日 ~ 4 日, 北海道科学大学, 北海道

竹尾美幸・肴倉宏史・Naka Angelica・乾徹・勝見武: 供試体乾燥密度が上向流カラム通水試験での溶出挙動に及ぼす影響の検討, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2015 年 9 月 1 日 ~ 4 日, 北海道科学大学, 北海道

瀬尾葵・乾徹・高井敦史・勝見武・國西健史: 自然由来重金属等を対象とした土壤吸着層におけるヒ素移行特性に及ぼす pH の影響, 平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2015 年 5 月 30 日, 摂南大学, 大阪

Seo, A., Inui, T., Takai, A., Katsumi, T., Kuninishi, K., and Hayashi, S.: Effects of pH and anions on arsenic sorption of the soil enhanced by calcium/magnesium stabilizing agent, 14th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering, 2015 年 5 月 21 日 ~ 22 日, Concordia University, Canada

義経浩平・矢野賢・乾徹・高井敦史・勝見武: 廃棄物地盤の強度変形特性に及ぼす混入プラスティック片の影響, 第 49 回地盤工学研究発表会, 2014 年 7 月 15 日 ~ 17 日, 北九州国際会議場, 福岡

小塩美香・木原翔太・木村文昭・乾徹・高井敦史・勝見武: 放射性セシウム含有焼却灰の封じ込めを想定したベントナイトの吸脱着特性, 2014 年 7 月 15 日 ~ 17 日, 北九州国際会議場, 福岡

Yoshitsune, K., Yano, S., Inui, T., Takai, A., and Katsumi, T.: Mechanical properties of soil-plastic shred mixtures simulating illegally piled wastes, Geo-Environmental Engineering 2014, 2014 年 5 月 30 日, 札幌

Takemoto, R., Inui, T., Takai, A., Katsumi, T., and Kuninishi, K.: Characterizations of lead and arsenic immobilized by various stabilizing agents with sequential extraction techniques, 13th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering, 2014 年 5 月 30 日, 札幌

木村文昭・Angelica Naka・乾徹・高井敦史・勝見武: ベントナイトのセシウム吸着特性と, 共存電解質が及ぼす影響, 第 48 回地盤工学研究発表会, 2013 年 7 月 23 日 ~ 26 日, 富山

Kimura, F., Naka, A., Inui, T., Takai, A., and Katsumi, T.: Cesium sorption characteristics of sodium bentonite affected by coexisting cations in leachate, 12th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering, 2013 年 5 月 31 日, ソウル国立大学, 韓国

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/zC7wA> (研究成果データベース)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

乾 徹 (INUI, Toru)

京都大学・大学院地球環境学学・准教授  
研究者番号: 9 0 3 2 4 7 0 6

(2) 研究分担者

勝見 武 (KATSUMI, Takeshi)

京都大学・大学院地球環境学学・教授  
研究者番号: 6 0 2 3 3 7 6 4

高井 敦史 (TAKAI, Atsushi)

京都大学・大学院地球環境学学・助教  
研究者番号: 3 0 5 9 8 3 4 7

ナカ アンヘリカ (Naka, Angelica)  
国立研究開発法人国立環境研究所・資源循環・廃棄物研究センター・研究員  
研究者番号：90737339  
(平成26年度のみ)

(3) 連携研究者 (平成25, 27年度)

ナカ アンヘリカ (Naka, Angelica)  
国立研究開発法人国立環境研究所・資源循環・廃棄物研究センター・研究員  
研究者番号：90737339