

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文概要

論文題目

ベントナイト系材料の工法規定式締固めの適用と締固め密度が遮水性能に及ぼす影響に関する研究

Study on the application of specified compaction method of soil materials using bentonite and the compaction density effects on the water proof performance

申請者

山田 淳夫
Atsuo YAMADA

建設工学専攻 地盤工学研究

2021年12月

我が国の低レベル放射性廃棄物処分は、ともに地下水面下に埋設施設を建設する計画のものがあるため、地下水流動に伴う核種漏洩が懸念される。これらの施設は、核種漏洩抑制のため、低透水性を有する人工バリアを設置することとなっている。この人工バリアに要求される低透水性を満足するため、できるだけ均一に高密度にベントナイトまたはベントナイト混合土を締め固める必要がある。

このような人工バリアの構築はダムや盛土などと同様に転圧工法による締固めによって施工される。そのため、施工管理方法として、これらのような土工で行われている工法規定方式や品質規定方式の適用が考えられる。このうち、工法規定方式では、施工機械・材料の撒出し厚さ・転圧回数を規定し管理するもので、これらの規定量を満たせば必ずと要求される品質が満たされるものとみなし、少ない頻度で現場密度試験を実施して品質確認を行っている。品質規定方式は、実際に品質測定を行い要求される品質が満たされているかを確認するもので、破壊を伴う現場密度試験の頻度が工法規定方式よりも高く、構築した人工バリア部材の透水性に関する弱部となる部分が工法規定方式よりも多くなることが懸念される。そのため、破壊を伴う測定の頻度が少ない工法規定方式を主な施工管理方法とした方が良いと考えられる。工法規定方式を採用するためには、少ない頻度での測定値で品質を評価する必要がある。

そこで、本研究では、低レベル放射性廃棄物処分場のベントナイト混合土の締固め施工時における品質管理方法（測定項目・測定方法・測定頻度）やこの品質管理方法で取得したデータを用いて施工後の構造物全体での品質を評価（要求品質に達しているかを確認）する方法についてまとめ、提案することを目的とした。そのためには以下の2つの課題を解決する必要がある。

- ・施工に起因するばらつきが施工後の構造物全体での性能にどのように影響するのかを評価する。また、要求される性能を満足するばらつき許容度を評価する。

- ・施工段階での品質管理における測定頻度の設定の仕方についての考え方をまとめる。

これら二つの課題を解決するために行った研究成果を以下のようにまとめる。

1章では、本研究の目的と研究の進め方、本論文の構成についてまとめた。

2章では、中深度処分施設の人工バリアの一つである低透水層を対象とした。可能な限り均質に高密度に仕上げるため、アスファルトフィニッシャーを敷均しに適用した。側部低透水層に関しては、さらに幅1m・高さ約8mの狭隘なトレンチ状の、空間的に制限されている箇所に適合した施工システムの検討を行った。底部の低透水層の転圧方法は、小型振動ローラ、大型振動ローラを組み合わせとした。側部の低透水層の転圧方法は、小型振動ローラを用いた。敷均し厚さと転圧回数を変更して試験を行い、乾燥密度のばらつきや平面位置の違いの影響などについて確認した。その結果、高品質の低透水層の施工が可能であること

を確認した。同一層内の鉛直方向に密度差が生じることを確認した。平面位置によって異なる転圧条件の影響や、敷均し時の密度のばらつきが転圧後の乾燥密度に与える影響も小さいことも分かった。また、同一条件で施工を繰り返した結果、含水比調整、敷均し方法も含め、本研究で選択した施工方法によれば、転圧後の乾燥密度はある分布幅（ばらつき）を持つが、施工管理目標の値の範囲内に収めることが可能であることがわかった。実際に構築した低透水層から試料を採取し整形した供試体を用いた力学特性・膨潤特性・透水特性を確認する室内試験を実施した。その結果、室内で圧縮成型された供試体を用いた既往知見の結果は、本研究で得られたデータと近い結果であることを確認した。そのため、これまでの室内試験で得られたデータも実構造物の設計・評価に用いることが可能であることがわかった。

以上の結果から、本研究で取り上げた施工方法により、工法規定方式による施工管理を適用しても、中深度処分計画されている地下環境においてベントナイトを用いた人工バリア（低透水層）に要求される水準の品質を満足する施工が可能であることを確認した。

3章では、浅地中ピット処分施設の人工バリアの構築に関する検討を行った。施工試験に先立ち、材料の配合設計の仕方および施工試験時の管理目標値を設定した。設定した施工管理目標を満たすための施工方法、すなわち練り混ぜ方法・敷均し方法・転圧方法の概要、施工後の品質測定の方法についてまとめた。浅地中ピット処分施設の人工バリアでも敷き均し方法はアスファルトフィニッシャーを適用し、敷均し厚さ・転圧回数・施工機械を設定することで工法規定方式の施工管理が適用できるのかの検討を行った。その結果、転圧後の乾燥密度は $1.69 \pm 0.05 \text{Mg/m}^3$ と大きくばらつきのない構造物を施工できた。施工後の採取試料を整形した供試体を用いた透水試験の結果は、透水係数は $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ を下回り、要求される性能を満足する結果となった。浅地中ピット処分施設の人工バリア構築においても、本研究で示した施工方法を適用すれば、工法規定方式での施工管理でも要求性能を満たす施工が可能であることを示すことができた。

4章では、施工段階のデータ（乾燥密度・含水比・混合率等）を用いて迅速に透水係数を評価するための代替指標についてまとめた。本研究では、中深度処分の材料については、既往研究の結果が適用できることを確認している。一方、浅地中ピット処分の材料について、間隙中を満たす水の存在形態について、自由に移動できる状態の自由水、モンモリロナイトの結晶層間に取り込まれた状態の層間水、土粒子表面に吸着した状態の吸着水の三つの状態を考慮した。そして、層間水・吸着水は通水に寄与しない間隙とした。通水に関わる間隙と吸水膨潤後のモンモリロナイトの体積比を「吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} 」として定義した。 e_{msat} と透水係数の関係を整理した結果、 e_{msat} と透水係数との間の相関性は、有効飽和度 Sr' ごとに整理できることがわかった。ここで、 Sr' をモン

モリロナイトの吸水膨潤と土粒子表面への水の吸着による影響を考慮した間隙と自由水の体積比と定義した。 Sr' で正規化した有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat}' と透水係数との間の相関性を示す決定係数 R^2 は、 $R^2 = 0.8676$ と比較的良好な相関性を示した。本研究ではこの結果より、 e_{msat}' を代替指標として提案した。

5章では、施工後の土構造物の透水性を評価するための解析手法を示した。この解析手法は、品質確認データがない箇所を地球統計学的手法で補間し透水係数の三次元モデルを作成すること、このモデルを用いて三次元飽和定常浸透流解析を実施することの組み合わせとした。解析結果はマクロ透水係数（構造物全体を均一な透水係数を持つ要素と見立てた場合の等価な透水係数）として透水性を評価した。また、粒子追跡法を浸透流解析後の計算結果に適用し、施工後の土構造物を水が横断する時間を計算した。マクロ透水係数および粒子追跡法による到達時間の結果は、構造物全体としての透水性能は要求性能を満足するものであった。

次に、透水係数のばらつきの許容限界について評価を行った。その結果、要求性能を満たす目標の値（本研究では透水係数： $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ ）よりも 0.70σ 程度（ σ は標準偏差）大きい値を平均値とすればよいことが分かった。その次に、施工時の測定頻度の影響について評価した。その結果、測定頻度を小さくしても（ $1 \text{m}^2/\text{点} \Rightarrow 10 \text{m}^2/\text{点}$ ）影響は少ないことが分かった。さらに、含水比および混合率のばらつきの許容限界を評価した。その結果、本研究の場合、含水比： $19.0 \pm 3.0\%$ 、混合率： $30.0 \pm 3.0\%$ であれば、施工後の構造物全体での透水性能への影響は少ないことがわかった。

6章では、現場での乾燥密度の測定は非破壊で測定時間が短い3Dスキャナによる方法（敷均し時の見かけ密度が均一とし、転圧前後の見かけの層厚変化より転圧後の乾燥密度を求める方法）を主に、この測定法と解析手法との組み合わせによるものを提案した。この時、マクロ透水係数が $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ を上回るような解析結果が生じないことを条件とした。その結果、回帰直線推定時のデータ数は最低50点以上が必要であることがわかった。最後に、3Dスキャナによる方法を含めた現場での乾燥密度等の測定方法、および施工後の土構造物の透水性評価解析を活用した現場での品質管理方法の提案を行った。これは、本施工の前に、試験盛土等で50点以上のデータを採取し、3Dスキャナによる方法に用いる回帰直線や地球統計学的手法に用いる相関長などのパラメータを取得するというものである。

本研究により、施工に起因するばらつきを考慮した、施工目標値の設定の考え方や、施工段階での品質管理における測定頻度の設定の仕方についての考え方をまとめることができた。また、低レベル放射性廃棄物処分施設の人工バリアのうち、低透水性を求められるベントナイト系材料の構築には、施工段階における現場密度試験の測定頻度も含め、工法規定方式での施工管理でも十分に対応できることを示すことができた。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 山田 淳夫

印

(2021年 11月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 論文	
○論文	山田淳夫, 千々松正和, 秋山吉弘, 小峯秀雄, 飯塚敦: 放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いる側部低透水層の転圧工法による施工品質の評価, 土木学会論文集C (地圏工学) 72(2), 2016.6, pp.164-178.
○論文	山田淳夫, 千々松正和, 藤原斉郁, 矢田勤, 秋山吉弘, 小峯秀雄, 飯塚敦: 放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いる底部低透水層の転圧工法による施工品質の評価, 土木学会論文集C (地圏工学) 71(3), 2015.7, pp.147-162.
2. 講演	
○講演	山田淳夫, 伊藤歩夢, 千々松正和, 太田征志, 矢込吉則, 伊藤喜広: 実施工に向けた難透水性覆土および下部覆土の小型機械による施工試験結果, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会講演概要集 CS12-21, 2020.9
○講演	山田淳夫, 千々松正和, 小栗光, 伊藤歩夢: 礫混じりベントナイト混合土を対象とした施工後の乾燥密度測定に関する研究, 第55回地盤工学研究発表会要旨集 23-7-4-04, 2020.7
○講演	山田淳夫, 千々松正和, 小栗光, 塚尾伸, 工藤淳, 伊藤裕紀, 伊藤喜広: 実施工に向けた覆土の施工試験結果, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会講演概要集 VII-142, 2019.9
○講演	Atsuo Yamada, Masakazu Chijimatsu, and Hideo Komine : Method for Measuring Dry Density of Compacted Bentonite Mixture Soil Using 3D Laser Scanner data, WM2019 Conference proceedings 19119, 2019.3
○講演	山田淳夫, 小栗光, 千々松正和, 塚尾伸, 工藤淳, 矢込吉則: 連続式ミキサーで製造した砂・ベントナイト混合土の施工試験結果 (その2 中型および小型振動ローラーによる締固め施工), 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集 CS7-037, 2018.8, pp.73~74.
○講演	山田淳夫, 田嶋宏之, 千々松正和, 荻原績: 放射性廃棄物処分施設におけるベントナイト混合土の施工技術および3Dレーザー測量による品質管理技術の開発, 土木学会土木建設技術発表会2017概要集, 2017.11, pp.24~29.
○講演	山田淳夫, 永井裕之, 千々松正和, 浪岡翔吾, 工藤淳, 増田良一, 矢込吉則: 難透水性覆土の施工後品質測定における簡易手法による乾燥密度測定と補正に関する検討, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集 VII-057, 2017.9, pp.113~114.
○講演	山田淳夫, 千々松正和, 永井裕之, 壺阪知広, 菊池喜昭, 龍岡文夫: ベントナイト混合土を用いた難透水性覆土の施工後の品質確認方法の検討, 第60回地盤工学シンポジウム, 2016.12, pp.53-56.
○講演	山田淳夫, 千々松正和, 永井裕之: 混練時間と加水方法の違いによるベントナイト混合土の透水性への影響, 第51回地盤工学研究発表会要旨集 1099, 2016.9, pp.2197-2198.
○講演	山田淳夫, 永井裕之, 千々松正和, 石濱裕幸, 田嶋宏之, 荻原績: 低レベル放射性廃棄物処分施設における難透水性覆土の施工の高度化の検討, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集 CS13-018, 2016.9, pp.35~36.
○講演	山田淳夫, 秋山吉弘, 千々松正和, 永井裕之: 低レベル放射性廃棄物処分における埋戻し材に関する材料特性評価試験について (その3), 第50回地盤工学研究発表会要旨集 1182, 2015.9, pp.2363-2364.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 山田 淳夫

印

(2021年 11月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○講演	<u>山田淳夫</u> , 秋山吉弘, 永井裕之, 千々松正和: 地下空洞型処分施設における上部埋戻し材の施工時の品質管理手法に関する検討, 土木学会第70回年次学術講演会講演概要集 CS12-011, 2015.9, pp.21~22.
○講演	<u>ATSUO YAMADA</u> , YOSHIHIRO AKIYAMA, MASAKI NAKAJIMA, TSUTOMU YADA, MASAKAZU CHIJIMATSU, TAKAHIRO NAKAJIMA: Studies of construction methods for Bentonite engineered barrier systems for Sub-surface disposal: vibratory compaction, Geological Society London Special Publications 400(1), 2014.9, pp.135-pp.144.
○講演	<u>山田淳夫</u> , 秋山吉弘, 永井裕之, 千々松正和, 安田恵太: 地下空洞型処分施設における上部埋戻し材の施工確認試験（その2）—施工後の品質の確認—, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集 CS9-025, 2014.9, pp.49~50.
○講演	<u>山田淳夫</u> , 秋山吉弘, 石橋勝彦: 地下空洞型処分施設における側部緩衝材を対象とした初期性能確認試験, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集 CS11-023, 2013.9, pp.45~46.
○講演	<u>山田淳夫</u> , 秋山吉弘, 河原忠弘, 千々松正和: 低レベル放射性廃棄物処分における上部埋戻し材に関する材料特性評価試験について, 第48回地盤工学研究発表会要旨集 1090, 2013.7, pp.2179-2180.
○講演	<u>山田淳夫</u> , 千々松正和, 中越章雄, 中島貴弘, 秋山吉弘: 締固め工法により施工された側部緩衝材の初期性能確認—地下空洞型処分施設性能確認試験による—, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集 CS3-002, 2011.9, pp.3~4.
3. その他	
(講演)	<u>山田淳夫</u> , 伊藤歩夢, 川久保政洋: 模擬坑道を対象とした地層処分場の埋め戻し材の転圧施工試験, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会講演概要集 CS12-39, 2021.9
(講演)	<u>山田淳夫</u> , 小栗光, 伊藤歩夢: 礫混じりベントナイト混合土への非破壊検査法の適用性に関する研究, 第56回地盤工学研究発表会要旨集 13-6-4-06, 2021.7
(講演)	塚尾伸, 工藤淳, 伊藤裕紀, 千々松正和, <u>山田淳夫</u> , 小栗光, 伊藤喜広: 実施工に向けた覆土の施工方法検討, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会講演概要集 VII-141, 2019.9.
(講演)	<u>山田淳夫</u> , 千々松正和, 小栗光: Na型ベントナイト混合土を対象とした施工後品質の測定方法に関する研究, 第54回地盤工学研究発表会要旨集 1047, 2019.7, pp.2093~2094.
(講演)	小栗光, <u>山田淳夫</u> , 千々松正和, 塚尾伸, 工藤淳, 矢込吉則: 難透水性覆土材の環境条件による品質変動確認試験, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集 CS7-038, 2018.8, pp.75~76.
(講演)	<u>山田淳夫</u> , 千々松正和, 小栗光: 礫混じりの混合土を対象とした施工後乾燥密度測定方法の検討, 第53回地盤工学研究発表会要旨集 0405, 2018.7, pp.809-810.
(講演)	千々松正和, <u>山田淳夫</u> , 永井裕之, 田嶋宏之, 石濱裕幸, 荻原績: 浅地中処分施設における難透水性覆土の施工技術の高度化に関する検討, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集 VII-065, 2017.9, pp.129~130.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 山田 淳夫

印

(2021年 11月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
(講演)	小栗光, 永井裕之, <u>山田淳夫</u> , 千々松正和, 成島誠一, 新井靖典: 放射性廃棄物処分場における施工管理方法 (その1. 非破壊密度測定による管理), 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集 VII-052, 2017.9, pp.103~104.
(講演)	田嶋宏之, 千々松正和, <u>山田淳夫</u> , 荻原績: 放射性廃棄物処分場における施工管理方法 (その2. 3Dレーザー測量による高さ管理), 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集 VII-053, 2017.9, pp.105~106.
(講演)	永井裕之, 千々松正和, <u>山田淳夫</u> , 三反畑勇, 壺阪知広: 難透水性覆土の品質確認へのRI計器,SDGの適用性検討, 第60回地盤工学シンポジウム, 2016.12, pp.57-60.
(講演)	千々松正和, <u>山田淳夫</u> , 永井裕之: 低透水性材料の透水試験方法に関する検討, 第60回地盤工学シンポジウム, 2016.12, pp.23-28.
(講演)	石濱裕幸, 田嶋宏之, 千々松正和, <u>山田淳夫</u> , 秋山吉弘: 地下空洞型処分施設における上部埋戻し材の施工確認試験 (その1) —施工性の確認—, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集 CS9-024, 2014.9, pp.47~48.
(講演)	秋山吉弘, 中島昌樹, <u>山田淳夫</u> , 矢田勤, 千々松正和, 中島貴弘: 狭隘部におけるベントナイト締固めによる側部緩衝材 (低透水層) の施工性確認—平成23年度地下空洞型処分施設性能確証試験による—, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集 CS13-015, 2012.9, pp.29~30.
(講演)	中島貴弘, <u>山田淳夫</u> , 木村誠, 千々松正和: ベントナイト混合土の品質管理方法 (混合率) に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集 CS13-010, 2012.9, pp.19~20.
(講演)	中島貴弘, 秋山吉弘, 中島昌樹, 矢田勤, 千々松正和, <u>山田淳夫</u> : 放射性廃棄物処分における狭隘部ベントナイト緩衝材の小型振動ローラによる施工結果評価について—平成23年度地下空洞型処分施設性能確証試験による—, 第47回地盤工学研究発表会要旨集 962, 2012.7, pp.1915-1916.