

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

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

2022 年 2 月

本論文は、我が国の低レベル放射性廃棄物処分施設に構築されようとしている低透水層を対象として、その締固め施工と施工後の品質の評価を論じたものである。低レベル放射性廃棄物処分施設は、地下水面下に埋設施設を建設する計画であるため、地下水流動に伴う核種漏洩が懸念される。核種漏洩を防ぐ目的の低透水層に要求される性能を満足するためには、可能な限り均一・高密度にベントナイト系材料を締め固める必要があるが、本論文ではダムや盛土などのような土工で行われている工法規定方式を適用し、その適用性について実証している。工法規定方式では、施工機械・材料の敷均し厚・転圧回数を規定して管理する。

これらの規定量を満たせば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う。このような工法規定方式の適用にあたり、低透水層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し、要求品質に達しているのかを確認する方法についてまとめ、最終的に得られる土構造物全体での低透水性を評価している。

また、これらの成果を活用し、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検討するとともに、要求される性能を満足するばらつきの許容度についても議論している。さらに、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、これらの知見に基づいた現場での品質管理手法について提案している。

審査にあたっては、2021年11月2日に審査員予定者3名による予備審査会を実施し、専攻内縦覧に付して良い旨の判定を得た。11月3日から15日間の建設工学専攻における縦覧の後、11月18日の専攻会議で博士論文受理申請が承認され、12月16日の創造理工学研究科運営委員会で論文が受理された。2022年1月11日に公聴会を開催した。研究倫理については受理前に申請者が所定の単位を取得していることを確認するとともに、論文の剽窃・盗用チェックを実施して問題のないことを確認した。

本論文は、全7章から構成され、以下にその概要と審査結果を述べる。

第1章は序論であり、本論文の目的と研究の進め方、構成についてまとめている。

第2章では、中深度処分施設の低透水層の施工方法と施工時の品質管理について述べている。可能な限り均一・高密度に仕上げるため、敷均しにアスファルトフィニッシャー等を、転圧には小型振動ローラ・大型振動ローラを適用している。工法規定方式適用の結果、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、施工管理目標の範囲内に収める高品質な締固めが可能であることを明らかにした。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結果、室内で圧縮成型された供試体を用いた既往研究の結果は、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ている．その結果，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を解明している．

第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についてまとめている．施工試験に用いた材料の配合設計の仕方および施工試験時の管理目標値の設定について示し，設定した施工管理目標を満たすための施工方法として，練混ぜ・敷均し・転圧方法の概要，施工後の品質測定の方法をまとめている．さらに，浅地中ピット処分施設の人工バリアでも敷均し方法はアスファルトフィニッシャーを使用し，施工機械・敷均し厚さ・転圧回数を規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ている．

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，ばらつきのない施工ができたことを示し，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，透水係数は $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 以下であり，要求性能を満足する結果となっていることを確認している．したがって，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立証している．

第4章では，施工段階のデータ（乾燥密度・含水比・混合率等）を用いて透水係数を評価する手法についてまとめている．中深度処分の材料においては，高レベル放射性廃棄物地層処分用に開発された既往の方法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，既往の方法では十分な評価ができないことから新たに，間隙中を満たす水の存在形態に着目した新しい代替指標の提案を行っている．すなわち間隙中を自由に移動できる状態の自由水のみに着目し，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， e_{msat} 透水係数の関係を整理している．その結果， e_{msat} と透水係数との間の相関性は，有効飽和度 Sr' （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）ごとに整理できることを解明している． 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 の値から比較的良好な相関性を示すことから， e_{msat}' を浅地中ピット処分の材料の代替指標として提案している．

第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ている．この解析手法は，品質確認データが無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し，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から構成されている．解析では，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（マクロ透水係数）として透水性を評価するとともに，粒子追跡法を適用し，施工後の土構造物を水が通過する時間も

算定している。

次に、透水係数のばらつきの許容限界についても評価し、要求性能を満たす目標の値（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を示し、推定結果の尤度はやや低下するが、測定頻度を 10 m^2 あたり1点程度にまで少なくしても影響は小さいことを立証している。さらに、含水比および混合率のばらつきの許容限界については、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小さいことを確認している。

第6章では、非破壊で測定時間が短い3Dスキャナによる現場での乾燥密度測定方法と解析手法を組み合わせた新しい透水係数の評価方法を提案している。具体的には、解析により得られるマクロ透水係数が $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 以上としないことを条件とした結果、層厚変化と乾燥密度の関係を示す回帰直線推定時のデータ数は最低50点以上必要であることを示し、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を提示している。すなわち、本施工の前に試験盛土等で50点以上のデータを採取することで、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同定し、低透水層の透水性性能を評価している。

第7章では、本研究で得られた成果をとりまとめている。

以上を要約すると、本研究は、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要約したものである。これにより、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おいて、工法規定方式による施工管理で十分に対応できることを示したものと評価できる。よって、本論文は放射性廃棄物処分に係る地盤工学技術に寄与する研究成果と判断され、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2022年1月

審査員

主査	早稲田大学教授	博士（工学）	早稲田大学	小峯	秀雄
	早稲田大学教授	工学博士	早稲田大学	赤木	寛一
	早稲田大学教授	博士（工学）	東北大学	秋山	充良