

緩衝材ブロックの製造管理を想定した X 線 CT 活用に関する基礎検討

～ 密度把握・推定の試み ～

大成建設

正○松井 秀岳 正 増岡 健太郎 正 小野 誠

原子力環境整備促進・資金管理センター 非 石井 智子 正 林 大介 正 八木 啓介

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリアの一部である緩衝材を定置する方法として、ベントナイト・ケイ砂混合材の圧縮成型ブロックをオーバーパック外周に配置する施工方法がある¹⁾。緩衝材ブロックの製造では、型枠内へ所定の含水量に調製した材料を投入し、載荷板を介してプレス・成型する。その際の品質管理項目として、30%の割合で混合されるケイ砂の均一性とブロック内の密度分布が挙げられる。それらの確認・検証は、ブロックの断面上でのケイ砂分布の観察や、部分サンプルの密度測定等の方法が考えられるが、限定的である。そこで本研究では、近年、土質・地盤分野で活用が進む X 線 CT を用いて、ケイ砂や密度の分布をきめ細かく網羅的に把握することを試みる。本報では、その基礎検討として、密度の推定に関して得られた知見を報告する。

2. 測定方法・内容

使用した X 線 CT 撮影装置は、大成建設(株)技術センターが所有するダイナミック型高出力マイクロフォーカス X 線装置「ScanXmate-RD300WSSS900」である。①試料を設置するステージを回転させての撮影、②ステージは固定して X 線源・検出部を回転させての撮影の二つの撮影機構を備えているが、今回は①を採用した。撮影に先立ち、X 線管出力をパラメータとした試測定にて出力を調整し、あわせて X 線照射窓（コリメータ部）に 3mm 厚の銅板フィルタを設置するノイズ対策を講じ、表 1 に示す測定条件を決定した。

今回の検討に用いた試験用の緩衝材ブロックの製造仕様を表 2 に示す。乾燥密度の製造仕様を $1.92 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ としたブロックは、直径 210mm のオーバーパックを模擬した管の周囲に設置し、外径 540mm の円筒形に積み上げることを前提としたもので、円周方向に 8 等分した厚さ 100mm の扇型である。これを木箱に収めて石膏で固定したのち、その中央部から直径 40mm、高さ 100mm のコアを採取し（図 1、以後、採取コアと呼ぶ）、これを試料ステージ中心に設置して X 線 CT 撮影を行った（図 2 左）。さらに、異なる寸法で撮影した X 線 CT 画像を比較するため、高さ 100mm の採取コア上部、中央、下部から各々高さ 25mm のコア（以後、分割サンプルと呼ぶ）を抜き出し、それら 3 つを横並びに配置して X 線 CT 撮影を行った（図 2 右）。最後に、各分割サンプルを用いてパラフィン法による湿潤密度測定（JIS A 1225:2009）と含水比測定を実施した。これらの作業を同一の仕様で製造されたブロック 3 体を対象に実施し、コア 3 本の CT 撮影と各コアを 3 分割したサンプル計 9 本の X 線 CT 撮影および密度・含水比測定を行った。

表 1 X 線 CT の測定条件一覧

X 線管電圧	300 kV
X 線管電流	200 μA
銅板フィルタ	3.0 mm
Voxel サイズ (画像マトリックス)	$153.6^3 \mu\text{m}^3$ (1504 × 1504)

表 2 緩衝材ブロックの製造仕様

材料	ベントナイト 70wt% +ケイ砂 3号 15wt% +ケイ砂 5号 15wt%
含水比	$10.5 \pm 2.0\%$
乾燥密度	$1.92 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$
成型圧力	約 33MN/m^2

3. 結果の考察

得られた X 線 CT 画像（図 3）において分割サンプルを採取した箇所を特定し、同領域の平均 CT 値を求めて湿潤密度との関係を整理した（図 4）。得られた湿潤密度の範囲 $2.08 \sim 2.13 \text{Mg/m}^3$ は、含水比を考慮すれば乾燥密度 $1.93 \sim 1.98 \text{Mg/m}^3$ に相当する。このことから緩衝材ブロックが品質管理範囲内の 0.05Mg/m^3 の幅の乾燥密度で製造されていることが確認された。次に CT 値と湿潤密度の関係について、分割サンプルと採取コアを比較すると、



図 1 緩衝材ブロックと採取コア

キーワード 地層処分, 緩衝材, 湿潤密度, X 線 CT, ベントナイト, ケイ砂

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設技術センター TEL 045-814-7221

採取コアでは湿潤密度と CT 値の正の相関が確認できる一方、分割サンプルの相関は相対的に不明瞭となった。両者で差異が生じた理由は明確ではないが、分割サンプルでは撮影方向によっては X 線が 3 体のサンプルを透過する等、採取コアの場合と条件が異なる点があり、これら条件の差異が CT 値に影響したものと考えられる。また、各採取コアで確認された湿潤密度と CT 値の相関は同一の傾向線上に分布せず、コアごとに異なる結果となっており、CT 値による密度推定にあたっては改善の余地がある。

ここで、既往事例との比較を通して、今回得られた CT 値と密度の関係を考察する。緩衝材を対象とした X 線 CT 活用事例として、地下水浸潤による膨潤に伴う緩衝材の密度変化を観察・評価した研究事例²⁾がある。図 5 に、関連する文献データ³⁾をトレース・再構成した CT 値と湿潤密度の関係を示す。この事例は、比較的広い密度範囲を対象としており、CT 値については水の密度 1Mg/m^3 に対して 0、空気に対して $-1,000$ となるよう補正⁴⁾されているため、そのような補正を採用していない今回の結果とは絶対値としては乖離がある。そこで、図 4、図 5 中の実測密度と、各図中に付記した相関式で各 CT 値から推定した推定密度の関係を求めて比較した (図 6)。この図を見ると、今回の検討は非常に狭い範囲の密度を CT 値から推定した結果と位置付けられ、その推定精度は先行事例に劣らない水準と見ることができる。以上の結果から、広範な密度変化の観察には十分であった X 線 CT による密度推定精度について、今回の検討対象のように比較的密度が均一となる緩衝材の製造管理を目的とした場合には、さらなる精度向上の余地があることがわかった。

4. まとめ

本報では、比較的密度の均一なベントナイト試料を対象に X 線 CT による湿潤密度の推定を試みた。その結果、今回の測定結果は既往の研究と同等の精度を有するものの、緩衝材の製造管理など、より高い精度の密度測定が求められる場合には、さらなる精度向上の余地があることを確認した。別報⁹⁾するケイ砂分布の評価とあわせて、緩衝材の密度・ケイ砂分布の合理的な確認・検証方法としての X 線 CT 技術の適用性を引き続き追及する。

本報告は経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である「令和 2 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (ニアフィールドシステム評価確証技術開発)」の研究成果の一部である。

参考文献 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—, 分冊 2 地層処分の工学的技術, pp.IV-1-IV-205, 1999. 2) 松本一浩, 棚井憲治：X 線 CT スキャナによる亀裂侵入ベントナイトの密度測定に関する適用性, 原子力バックエンド研究, Vol.15, No.1, pp. 27-35, 2008. 3) 核燃料サイクル開発機構：Experimental and Modeling Studies on Gas Migration in Kunigel V1 Bentonite, Japan Nuclear Cycle Development Institute Tokai Works, 2003. 4) 肥後陽から：X 線 CT から見る土質力学, 2. X 線 CT の概要と研究動向, 地盤工学会誌, Col.65, No.10, pp.41~48, 2017. 5) 松井秀岳ら：緩衝材ブロックの製造管理を想定した X 線 CT 活用に関する基礎検討 ～ケイ砂分布把握の試み～, 地盤工学研究発表会, 2021 (投稿中)



図 2 採取コアと分割サンプルの撮影状況

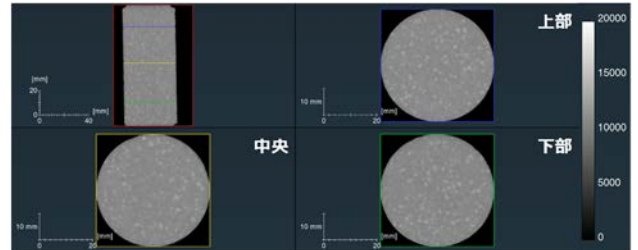


図 3 X 線 CT 画像の例 (採取コア)

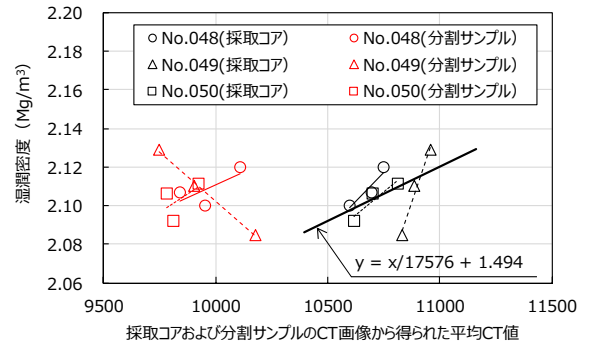


図 4 平均 CT 値と湿潤密度の関係

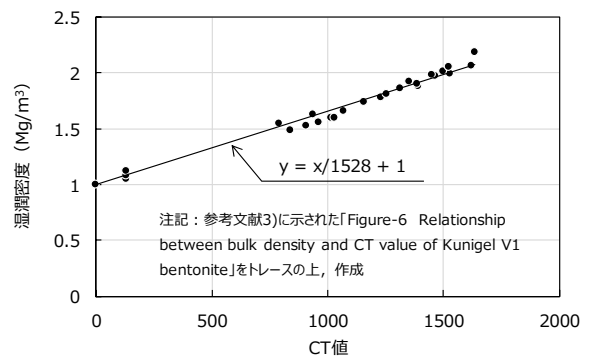


図 5 既往事例³⁾の CT 値と密度の関係

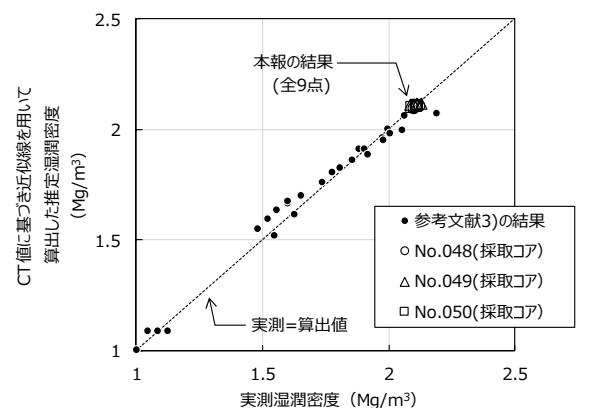


図 6 実測湿潤密度と推定値の関係