

国内産ベントナイトの静的締固め特性に関する試験検討

原子力発電環境整備機構 正会員○山本陽一 後藤考裕
電力中央研究所 正会員 渡邊保貴 吉川絵麻
安藤ハザマ 正会員 小栗光 伊藤歩夢 山田淳夫

1. はじめに

地層処分が必要とするベントナイトの量は、緩衝材として数十万トン、埋戻し材として百万トン以上に及ぶことが見込まれる。このため、地層処分に求められる安全性と性能の確保を前提として、経済性および安定した供給が可能と考えられるベントナイトを複数確保できることの見通しを得ておく必要がある。著者らは、これまでに産地等が異なる6種類の国内産ベントナイトに対して透水性や膨潤性に係わる基本的な特性データを取得し¹⁾、地層処分への技術的な成立性を確認するための検討を実施した²⁾。ここでは、緩衝材の製作に係る国内産ベントナイトの締固め特性の把握を目的として実施した静的締固め試験の結果を報告する。静的締固めによる方法は、高いエネルギーでのベントナイトの締固めが可能な大型プレス機による緩衝材製作を想定したものである。

2. 試験方法

試験は、山形県月布産（クニゲル V1）、新潟県細越産（天竜原鉱）、新潟県三川産（三川原鉱）のそれぞれ国内の異なる鉱山で産出された3種類のベントナイトに対して実施した。表-1に試料の物性を示す。以降、それぞれのベントナイトに、KV, TG, MGの略称を用いる。試験方法は以下の通りである。まず、所定の含水比に調整した試料 100 g を締固め試験用セル（φ 50 mm）に投入する。アムスラーにセットし、所定の圧力（成型圧）まで静的にプレスする。成型圧に達した後のプレス保持時間を10分とし、供試体高さを測定して除荷、脱型を行う。取り出した供試体の寸法、質量、含水比を測定する。試料の含水比は7%～34%まで3%ピッチで10通り、成型圧は1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 MPaの7通りとした。

3. 試験結果

図-1に締固め曲線を示す。KVについては、それぞれ圧縮時と脱型後の供試体体積から計算した乾燥密度、TGとMGは脱型後の乾燥密度に対する締固め曲線である。KVの締固め曲線は3種類のベントナイトの中で、最も締固め性が高いことを意味するように、すべての成型圧のケースで上に凸の曲線となった。TGとMGについては、2 MPa以下等の成型圧において、本試験の含水比の範囲では明瞭なピークが確認でき

表-1 試料の物性

試料	クニゲルV1 (KV)	天竜原鉱 (TG)	三川原鉱 (MG)
タイプ	Na	Na	Ca
土粒子の密度 (Mg/m ³)	2.768	2.675	2.605
平均粒径 (μm)	10.1	5.9	19.4
液性限界 (%)	436	239	94
塑性限界 (%)	26	40	30
塑性指数	410	199	63
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	73	102	73
陽イオン交換容量※ (meq/100g)	64	78	51

※抽出した陽イオン(Na, Ca, K, Mgイオン)の総量

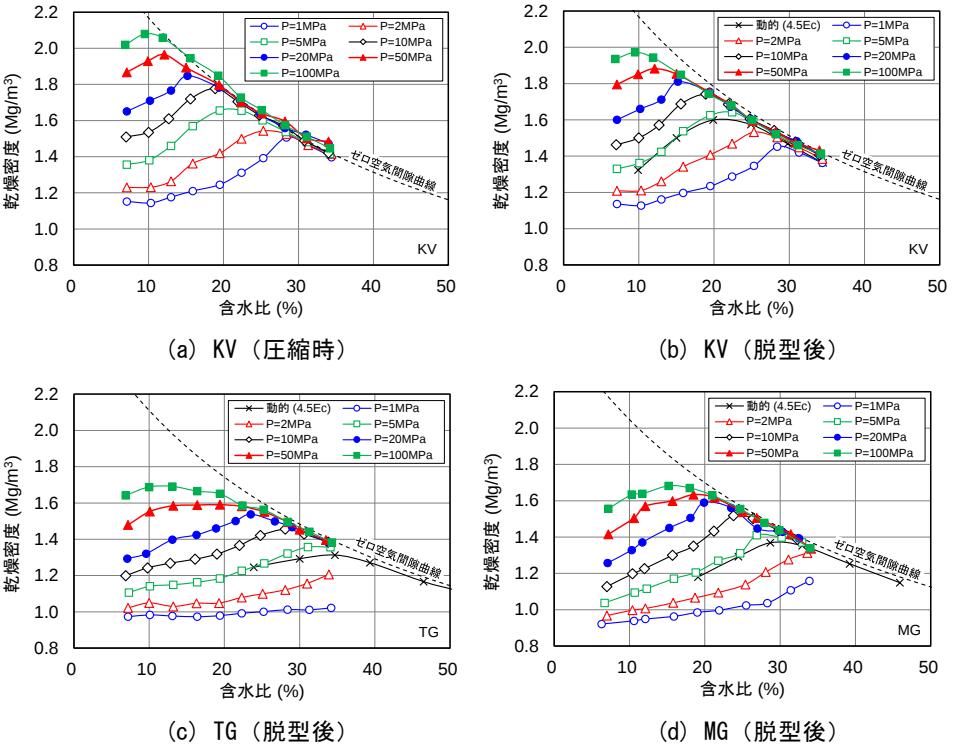


図-1 締固め曲線

キーワード 地層処分, ベントナイト, 緩衝材, 最大乾燥密度, 最適含水比

連絡先 〒108-0014 東京都港区芝 4-1-23 三田 NN ビル 2F 原子力発電環境整備機構 技術部 TEL 03-6371-4004

なかった。KV の圧縮時と脱型後の締固め曲線の比較から分かるように、脱型後の乾燥密度は除荷後のリバウンドにより体積増加するため乾燥密度は低下した。データ整理の結果からは、リバウンド率に成型圧や含水比との相関は見られず、1%~7%の範囲であった。図-1 の脱型後の乾燥密度に対する締固め曲線の図中には、締固めエネルギー4.5Ec の動的締固め（突固めによる締固め試験）の結果¹⁾を加えているが、本試験の成型圧 5 MPa の締固め曲線とよく整合していた。

図-2 では最大乾燥密度（脱型後）、最適含水比と成型圧の関係をそれぞれのベントナイトに対して比較した。最大乾燥密度と成型圧の関係は双曲線状の傾向を示した。ベントナイトに対する比較では、KV の最大乾燥密度が最も高く、最適含水比は逆に最も低かった。TG と MG の最大乾燥密度と最適含水比は同程度であった。土の締固め試験の一般的な傾向として最大乾燥密度の高い土ほど最適含水比は低くなる。森³⁾はレキを含む砂質土から粘土にわたる広範囲な土質に対する多数の標準締固め試験結果を整理し、最大乾燥密度と最適含水比の間に土の種類によらない一定の関係が成立することを明らかにしている。また、小峯・緒方⁴⁾はこの関係がベントナイトにも成立することを示している。図-3 に最大乾燥密度と最適含水比の関係を示す。プロットは本試験の 3 種類のベントナイトに対する試験結果であり、図中実線は森の示した関係式³⁾を描いたものである。両者の関係は整合的であり、本試験結果は既往の知見を支持するものであった。図-3 中の括弧で囲ったプロットは森の関係式³⁾から外れた位置にあるが、これは TG の成型圧 50, 100 MPa の結果であった。図-1 からこの条件の締固め曲線において明確なピークが見られないため、極値になり得ていないことが推察された。図-3 の関係が成立する時、すなわち最適含水比（最大乾燥密度）を与える点の土の飽和度は 80%~90%とされている^{3),4)}。そこで、図-4 に示すように最適含水比における飽和度と成型圧の関係を整理して本試験での傾向を確認した。概ね 20 MPa より低い成型圧で飽和度は 80%~90%の範囲にあるが、これを超えて成型圧が高くなると飽和度は低下する傾向を示すことが分かった。図-2 の関係において、概ね 20 MPa の成型圧を超えると成型圧の増加に対して乾燥密度は増加しにくい状態になることを示していたことと合わせると、間隙水の排出遅延、過剰間隙水圧の発生等、締固めを阻害する何等かの要因が生じた可能性がある。このため、20 MPa の成型圧が土質力学的な傾向を超えない範囲で締固め特性を表すことのできる閾値になった可能性が考えられた。なお、小峯・緒方⁴⁾の結果は、20 MPa 以下の成型圧に対して実施されたベントナイト等の静的締固め試験に対するものである。

4. まとめ

国内産 3 種類のベントナイトについて、最大 100 MPa までの成型圧に対する締固め特性に関するデータを取得した。最大乾燥密度と最適含水比の関係は他の土質やベントナイトの結果と整合的であった。最適含水比における飽和度は 20 MPa を超える成型圧で低下する傾向が確認された。

参考文献：1) 山本ほか：国内産ベントナイトおよびベントナイト混合土の基本特性データ，NUMO-電中研共同研究報告書，NUMO-TR-21-02，2022。2) 山本ほか：地層処分におけるベントナイトオプションの検討 種類の異なるベントナイトの緩衝材への適用性について，第 75 回土木学会年次学術講演会，CS12-15，2020。3) 森：土の最大乾燥密度と最適含水比について，土と基礎，Vol. 10, No. 9, pp. 12-16, 1962。4) 小峯・緒方：塑性限界を導入した粘土の締固め特性の評価法の提案，土木学会論文集，No. 436/III-16, pp.103-110, 1991。

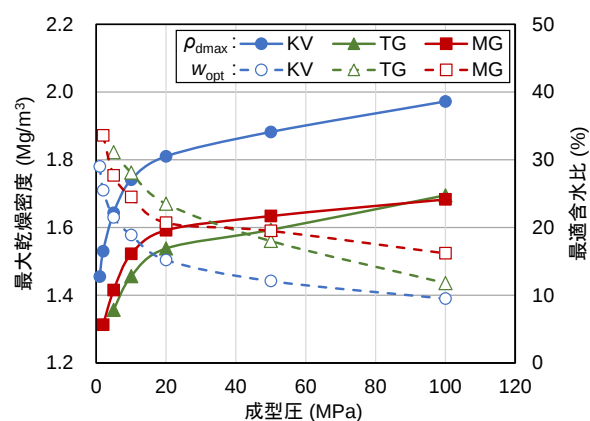


図-2 最大乾燥密度、最適含水比と成型圧の関係

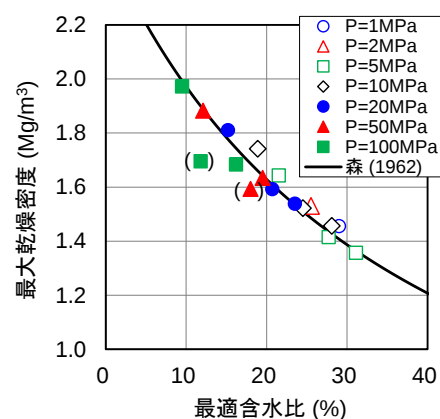


図-3 最大乾燥密度と最適含水比の関係

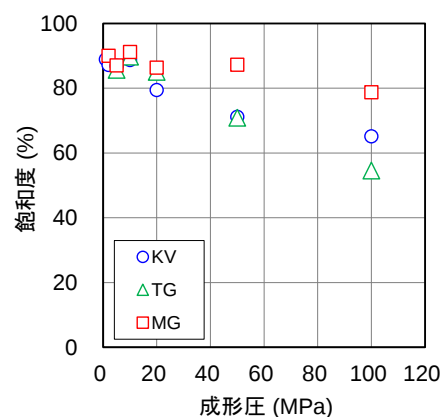


図-4 最適含水比における飽和度と成型圧の関係