

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の静的締固め試験（その1）

原子力発電環境整備機構 正会員 〇高橋 拓麻 山本 陽一 北川 義人
清水建設株式会社 正会員 沖原 光信 竹内 伸光 戸栗 智仁

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において人工バリアの有力な設計オプションと考える PEM（Prefabricated Engineered Barrier System Module の略：地上施設で廃棄体を人工バリアと一体化したモジュールを地下施設に搬送し定置する技術）方式の製作技術については、PEM 容器を複数に分割した鋼殻リング内で緩衝材を製作し、これを積み重ねて組み立てるという方法の試験が、実規模スケールで実施されている¹⁾。この方法では、多連装ランマによる動的締固め方式を採用することにより、目標乾燥密度の緩衝材を製作可能であることを確認している¹⁾。しかしながら、この方法では、緩衝材の目標乾燥密度にするための一層当りの締固め厚さが、ランマによる締固めエネルギーとの関係から 5 cm と薄いことや、容器の複数分割化による組立工程および品質管理工程の増加などにより、PEM1 体当たりの製作に時間を要することが課題であった。このため、今回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静的締固め方式を採用した小スケール（実規模の直径に対し約 1/8 スケール）の緩衝材製作試験を計画し実施した。大型プレス機による緩衝材製作については、効率化が期待できる一方で、一度のプレスによる緩衝材の製作径や仕上がり厚さ等の適用限界が不明であることから、試験は PEM 容器と一体化させた緩衝材製作の実現可能性やこれらの適用限界の把握を目的とした。本稿では、1 層当たりのプレスを保持する時間や载荷パターンの違いによる緩衝材製作への影響を検討した結果を報告する。

2. 静的締固め試験方法

試験材料には緩衝材に求める様々な性能を満たすことの見通しを得ている²⁾ Na 型ベントナイトのクニゲル V1 を、ケイ砂等との混合を行うのではなく単体で使用した。PEM 容器を模擬した成形容器には図 1 に示すとおり、内径φ300 mm の既製の鋼管（STK400）を高さ 650 mm にカットしたものを使用した。成形容器の周りには、プレス時に成形容器が変形しないように締結ボルトで固定した補強金物を配置した。試験は 20,000 kN 油圧式プレス機（下降速度 15 mm/sec）を用いて、表 1 に示す試験条件により実施した。試験ケースに設定した载荷パターンを図 2 および図 3 に示した。プレス保持時間については最終の締固め厚さを 300 mm として、この厚さに達したところでプレスを保持する時間を 5 min, 30 min に変化させた場合を試験条件に設定した。载荷パターンは最終の締固め厚さまで 1 段階でプレスする場合と 3 段階でプレスする場合とを試験条件とした。3 段階プレスでは、基準面から 450 mm, 375 mm の高さで一旦停止させた。最終の締固め厚さにおけるベントナイトの乾燥密度の目標値を 1.6 Mg/m³、含水比は 20%に設定した。本試験に先駆けて実施した要素レベル（φ50 mm のモールドを使用）の静的締固め試験結

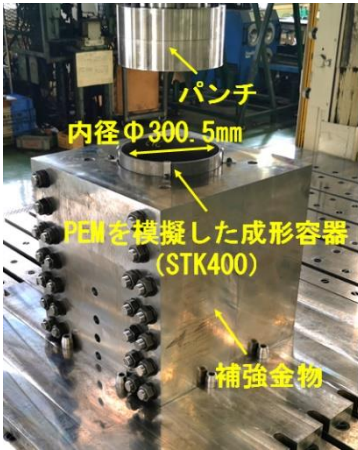


図 1 成形容器（φ300.5 mm）

表 1 試験条件

試料（ベントナイト）	クニゲル V1（クミネ工業社製）
配合	ベントナイト 100%
目標乾燥密度	1.6 Mg/m ³ （圧縮時）
含水比	20%±1%
製作方法	プレス機による静的締固め
成形容器の内径	300.5 mm
締固め厚さ	300 mm（最終ステップ圧縮時）
プレス保持時間	5 min, 30 min
载荷パターン	1 段階プレス, 3 段階プレス

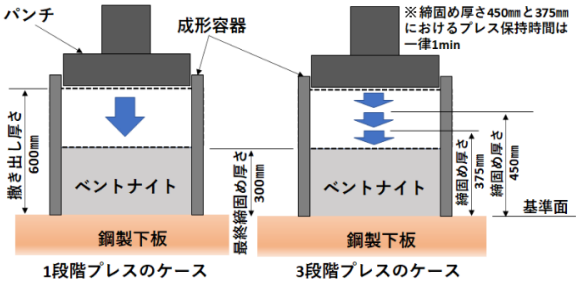


図 2 载荷パターンの違い

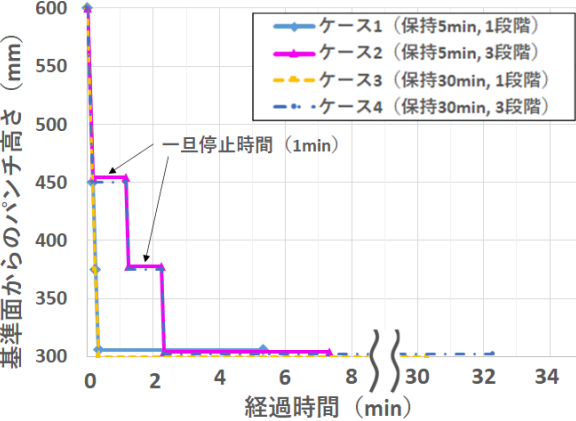


図 3 载荷パターンとプレス時間

キーワード 放射性廃棄物、地層処分、ベントナイト、乾燥密度、締固め性、PEM

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

果からクニゲル V1 圧縮成型時の締固め曲線³⁾を得ており、要素試験では概ね 5 MPa 程度の成形圧力で目標乾燥密度を達成できていることが分かっている。この時の飽和度は約 80%と推定される。試料の含水比調整における混練作業では、混合パン傾斜タイプのみキサー（アイリッヒみキサー、R05T 型）を用いてベントナイトと水を混練し、混練作業の前後で含水比確認を実施して設定含水比 $\pm 1\%$ を満足することを確認した。また、プレス時には成形圧力、側方土圧を測定し、除荷後はベントナイトのリバウンド量を、3D レーザースキャナー（ABSOLUTE ARM 7 軸 RS5、測定精度 0.028 mm (2 σ)）を用いて測定した。試験状況を図 4 に示す。

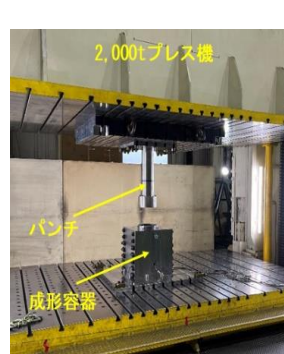


図 4 試験状況

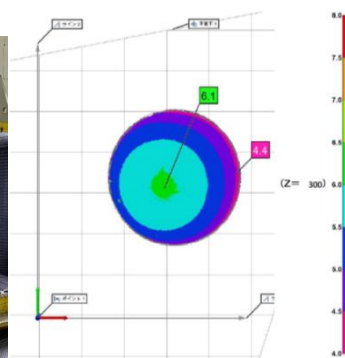


図 5 リバウンドの分布

3. 試験結果

図 5 に除荷後の締固めたベントナイト表面におけるリバウンド分布の測定データ（ケース 1）の例を示す。リバウンド量は中央部分で大きく同心円状に分布していることが分かる。各ケースの最大成形圧力、成形圧力の除荷後経過時間に応じたリバウンド量、密度変化に換算したリバウンド率の結果を図 6 に、容器内側圧の測定結果を図 7 に示す。これらの結果から、以下の傾向が見られた。

- 最大成形圧力はいずれのケースも約 5 MPa 程度となり、要素試験³⁾で示した成形圧力と同等であった。
- 側方土圧はプレス停止時に最大値を示した。側方土圧の最大値は、最大成形圧力の 68～77%程度であった。
- プレス保持時間中に側方土圧は時間とともに徐々に低下した。保持時間 30 分後の側方土圧は最大値の 51～65%程度まで低下した。
- 除荷に伴い、寸法変化として膨張が起きる部分はベントナイトの頂部かつ中央付近であった。
- 除荷後のリバウンド量に測定時間の違いによる差はみられなかった。また、リバウンド量に载荷パターンとプレス保持時間の違いによる有意な差はみられなかった（密度変化に換算すると 1.2%～1.8%）。

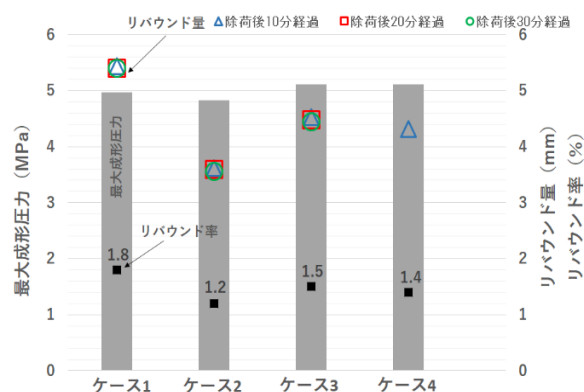


図 6 試験結果

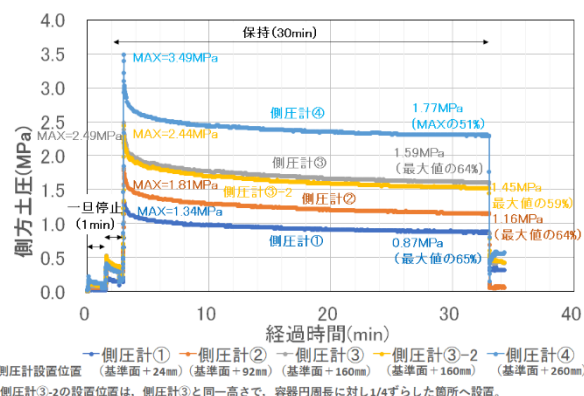


図 7 側方土圧（ケース 4）

以上の結果から、本試験で設定した保持時間や载荷パターンの違いといった载荷方法の条件が緩衝材製作におけるベントナイトの締固め性に及ぼす影響は小さいことが分かった。このことから、1 層当たりのプレス保持時間 5 min を、また撒き出し厚さ 600 mm の条件においては 1 段階で最終の締固め厚さまでプレスすることを、その後の静的締固め試験の標準値に設定することとした。これにより、多連装ランマによる動的締固め方式にくらべて緩衝材製作の大幅な時間短縮が図れる見通しを得ることができた。

4. おわりに

本検討の結果、緩衝材の静的締固め試験条件である保持時間や载荷パターンの違いによる緩衝材製作への影響を確認することができた。クニゲル V1 のみでなく、他の国内産ベントナイト材料や、H/D 比の違いによる締固め特性に関する緩衝材の静的締固め試験の結果については、関連発表である「高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の静的締固め試験（その 2）」を参照されたい。

参考文献

- 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 一人工バリア品質評価技術の開発ー 平成 19 年度～平成 24 年度の取りまとめ報告書，2013。
- 山本他：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。
- 山本他：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，第 78 回土木学会年次学術講演会，2023。