

高レベル放射性廃棄物処分場における 緩衝材の膨出変位量の推定

西本 壮志¹・荒井 郁岳^{2*}・橋爪 秀夫²

¹一般財団法人電力中央研究所 地球工学研究所（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

²株式会社ジオデザイン 技術部（〒108-0023 東京都港区芝浦3-20-6）

*E-mail: arai@geodesign.co.jp

高レベル放射性廃棄物処分場で生じる諸挙動を評価するために、幌延深地層研究センターにおける原位実証試験である人工バリア性能確認試験や、相似則に基づく縮尺模型を用いた時間加速試験である遠心模型試験などが実施されている。閉鎖後の初期では、再冠水によって緩衝材は坑道内の埋戻し材に膨出することが考えられる。人工バリア性能確認試験や遠心模型試験では、緩衝材の膨出を把握するために、長尺の薄板にひずみゲージを貼付した膨出センサーを設置している。本報告では、2つの試験の膨出センサーのひずみ値を参照し、大変形（有限ひずみ）理論を適用して緩衝材の膨出量（鉛直変位量）を推定した。

Key Words : *high level radioactive waste disposal repository, buffer material, swelling deformation, finite strain theory*

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物処分場周辺（以下、ニアフィールド）では、閉鎖後初期の数百年にわたり、廃棄体の発熱、地下水の再冠水、岩盤の変形、緩衝材や埋戻し材の膨潤変形といった熱-水理-力学（THM）連成挙動が生じる。この初期では、再冠水により緩衝材が膨潤することで坑道内の埋戻し材に膨出（緩衝材の膨潤変形による処分孔外へのはらみ出し）し、緩衝材の品質や廃棄体の挙動に影響を及ぼす可能性がある。

幌延深地層研究センターにおいては、原位置実証試験である「人工バリア性能確認試験」が実施されており、実際に地下深部において地層処分システムの設計、施工等の可能性を確認している。この原位置実証試験では、緩衝材の膨出挙動の把握を目的として、緩衝材膨出センサー（長尺の薄板にひずみゲージが貼付されたセンサー、詳細は3章を参照されたい）を開発・製作し、膨出挙動の把握を行っている¹⁾。

また、電力中央研究所では遠心力場における相似則を適用し、縮尺模型を用いた遠心載荷試験を実施しており、ニアフィールドのTHM長期挙動評価を行う技術開発を行っている²⁾。この技術を適用し、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「平成29年度高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する技術開発事業（処分システム工学

確証技術開発報告書）第3分冊、人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築³⁾」（以下、H29工学確証報告）では、廃棄体、処分孔、緩衝材、埋戻し材、岩盤から成る廃棄体周辺模型を使用し、50Gの遠心力場において遠心模型試験を実施した。遠心模型試験では、人工バリア性能確認試験と同様に、類似の膨出センサーを設置し、緩衝材の膨出挙動の把握を試みている。

そこで本報告では、2つの試験（人工バリア性能確認試験⁴⁾、遠心模型試験³⁾）の膨出センサーで計測されたひずみ値に対し、大変形（有限ひずみ）理論を適用して緩衝材の膨出量（鉛直変位量）を推定し、膨出の評価を試みた。

2. 大変形（有限ひずみ）理論の概要

大変形（有限ひずみ）理論とは、有限要素法の一環で、変形とひずみが大きい非構造問題を取り扱う際に主に使用されてきた⁵⁾。本方法は、Greenひずみを利用して計算を実施した。

Greenひずみは3次元空間においては次の式で表現される⁶⁾。

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ここで u : 水平方向 (x 軸方向) の変位, v : 鉛直方向 (y 軸方向) の変位, w : 前後方向 (z 軸方向) の変位である. 本報告では, 2 次元の変位を対象とするため, z 軸方向の変位は考慮しないことから, 式は次のとおりとなる.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (2)$$

膨出センサーは薄板にひずみゲージを貼付したもので, 薄板の長手方向に発生するひずみを計測している(図-1). 膨出による x 方向への変位は微小であると考え, 本報告の変位量の算出では膨出によるひずみ値 (ε_x) の増加が y 方向成分のひずみのみに寄与すると仮定した.

例えば, 緩衝材の膨出変形を簡易的に模擬した図-2のような問題を考える. 微小ひずみにおけるひずみの定義は, 次式で与えられる.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \quad (3)$$

微小ひずみ, Greenのひずみとともに $\partial v / \partial x$ は,

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \pm \sqrt{2\varepsilon_x} \quad (4)$$

となる. また, 図中における $\partial v / \partial x$ の真値は次式で与えられる.

$$\frac{v}{L_0} \quad (5)$$

ここで, $L_0=2.0$, $v=0.1$ を仮定すると, 微小ひずみを利用して算出した $\partial v / \partial x$ は 0.04988, Greenのひずみを利用して算出したそれは 0.05 となり真値と同等となる. この $\partial v / \partial x$ を x 方向に積分することによってひずみゲージを貼付した各点の変位を算出することができる. ただし, 算出した各点の変位は式(4)によるため符号の正負が判別できないが, 本報告では膨出は孔外にはらみ出す現象であることからその形状は上に凸となると仮定した.

ここで図-3にH29工学確証報告の遠心模型試験終了後の緩衝材と埋戻し材境界部付近のCT画像を示す. 圧力容器から取り出した後の撮影のため, 試験(終了)時の応力状態ではないが緩衝材の膨出形状を観察できる. 左図において, 膨出の形状が上に凸であることがわかる(黄点線). また, (a), (b)のCT画像は図左部の模型縦断面画像の左に示した矢印の位置での横断面である. 緩衝材と埋戻し材周辺のCT画像(b)は埋戻し材(a)のCT画像とは明らかに異なる傾向(白色部)を示し, 付着物(白色部)が, 上部埋戻し材の粒間を充填しているように見える. これは緩衝材が上方に膨出してその一部が岩盤と埋戻し材の間に侵入したと考えられる. この結果から, 緩衝材は上向きに膨潤し, 中心部は処分孔壁の影響を受けにくいと考えられるため変位勾配の正負が逆転する点を緩衝材中心部のひずみゲージ(3章, 図-5)におけるゲ

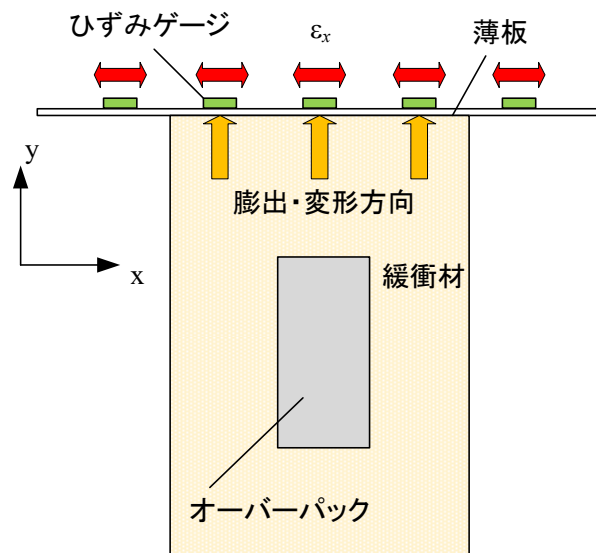
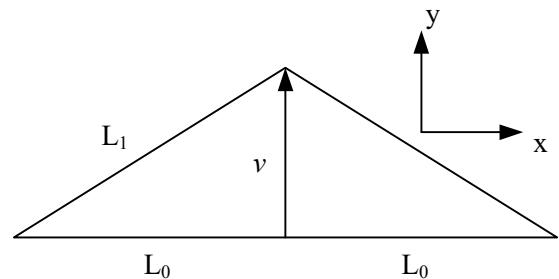


図-1 膨出センサーの概念図



$\varepsilon_x: L_0$ が L_1 になった際の x 方向のひずみ

図-2 大変形(有限ひずみ)理論変位量計算の一例

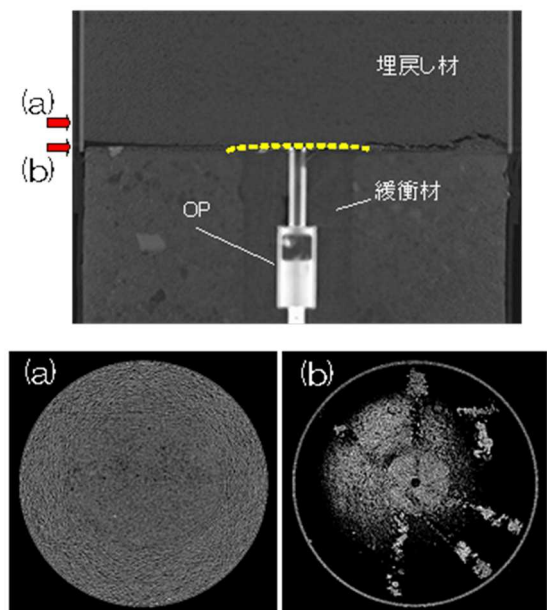


図-3 遠心模型試験終了後のCT画像

ージsw3)と仮定した。

3. 各試験における膨出センサーの概要

(1) 人工バリア性能確認試験の膨出センサー

人工バリア性能確認試験において使用された膨出センサーの概要を図-4に示す。センサーの片端部が固定されたカンチレバー式であり、緩衝材上端面（埋戻し材の境界部）に2枚1組で設置されている。膨出センサーは薄板に光ファイバーひずみゲージが各7枚貼付されている。

本報告では、数値データの公開されている2014年9月10日から2016年3月31日までの期間のひずみ値⁴⁾に対し大変形（有限ひずみ）理論を適用し、膨出量を推定した。適用において、計測開始日時である2014年9月10日を $t=0$ として、ひずみの増分で緩衝材の鉛直変位量（膨出量）を評価した。

(2) H29工学確証報告の膨出センサー

H29工学確証報告の遠心模型試験は、埋戻し材、緩衝材、模型オーバパック、岩盤から成る模型を圧力容器に封入、地圧相当の応力を模型に付与し再冠水を模擬した試験である。試験は遠心加速度50G場において実施し、模型下端部から間隙水を注水し模型上端部へ排水している。遠心模型試験における膨出センサーは、図-5に示す片端固定、片端スライド方式の梁状で厚さ0.1mmのリン青銅板にひずみゲージを貼付したものを使用している。設置位置は人工バリア性能確認試験と同様に緩衝材と埋戻し材の境界部となっている。なお、図中の括弧内の寸法は、遠心加速度場50Gにおける相似則を適用させた実物換算値である。

4. 結果

(1) 人工バリア性能確認試験における膨出量

図-6および図-7に人工バリア性能確認試験における膨出センサー（ひずみ）の経時変化を示す。プラスが引張ひずみである。CH6、CH13については固定部近辺であるため、数値計算では膨出量（鉛直変位量）を0とし、CH7、CH14については固定部より外側にあるため対象としなかった。

CH12では初期にマイナス方向にひずみ値が減少し、CH11では値が漸減傾向にあるが、その他のひずみ値は計測開始から横ばい若しくは漸増傾向にある。ひずみの最大値は、CH1で659 μ 程度となった。

図-8に人工バリア性能確認試験のひずみ値の増分か

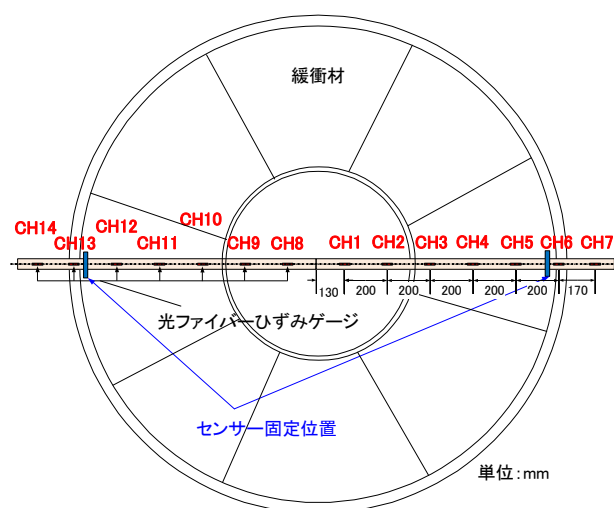


図-4 人工バリア性能確認試験での膨出センサー配置図

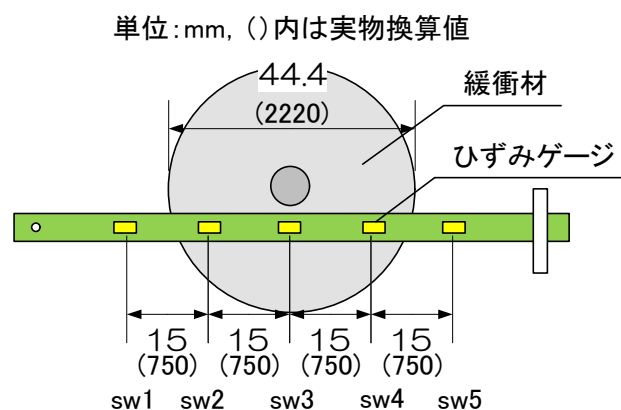


図-5 遠心模型試験での膨出センサー配置図

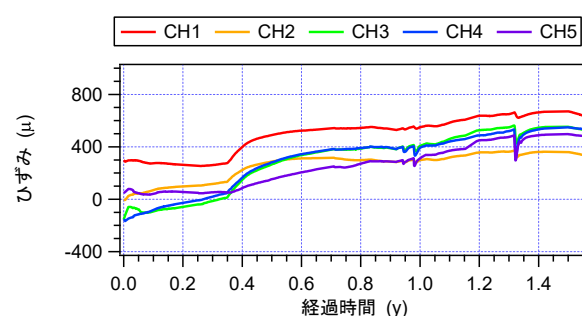


図-6 CH1～CH5の膨出センサーのひずみ経時変化

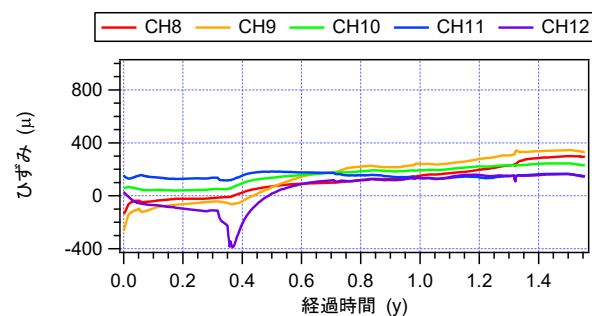


図-7 CH8～CH12の膨出センサーのひずみ経時変化

ら、大変形理論を適用し見積もられた膨出量の分布を示す。横軸は図-4に示すCH13の位置をゼロとした水平位置であり、縦軸は鉛直変位（膨出高さ）である。また図-9に人工バリア性能確認試験を対象としたTHM連成解析コードを用いた緩衝材の密度変化に着目したニアフィールドの長期挙動に関する事例解析⁷⁾（以下、ニアフィールドの長期挙動に関する解析）において見積もられた膨出量の推定値を示す。図-8では、実験開始から1年後の鉛直変位と1.5年後の鉛直変位を示している。なお、水平位置400mmにあるCH11は、ひずみの増分がマイナスとなり積分不能となったため、データ欠損扱いとした。

1年後の緩衝材の膨出は、中心部ほど変位量が大きく（最大25.1mm）、外周部に向かうにつれて変位量が小さくなった。1.5年後の膨出形状も1年後の膨出形状と同様であり、最大の鉛直変位は28.5mmとなった。CH1～CH6側の膨出量がCH8～CH13側の膨出量に比べ大きくなっている。このことは、緩衝材の膨出形状が必ずしも対称な形状ではないということを示唆している。また、ニアフィールドの長期挙動に関する解析結果⁷⁾において、緩衝材上面における鉛直方向の変位に関する解析結果よれば最大の変位量が2～4年経過時点で15mm～30mmとなっており（図-9）、本研究で適用した大変形理論による変位の推定量の結果と類似している。このことから、人工バリア性能確認試験ではカンチレバー式のセンサーを使用したことで境界条件に起因する $\partial u / \partial x$ の発生が少なかったと考えられる。

(2) H29工学確証報告・遠心試験における膨出量

H29工学確証報告の遠心模型試験における膨出センサーの形状は、片端固定、片端スライド方式となっている。この方式ではカンチレバー式のセンサーと違い、緩衝材の中心部の変形の対するひずみが計測できるという利点があるが、今回の変位の推定方法では式(4)によって変位勾配が決定されるため、勾配の正負を判断することができない。このため、図-3の膨出形状から膨出センサー中心部（sw3）で勾配の正負が変化すると仮定して積分し、膨出量（鉛直変位）を算出、膨出形状を推定した。また、遠心模型試験における膨出センサーは模型縮尺の寸法の制約から計測点が5点であり、これを用いた推定となる。

図-10に遠心模型試験における膨出センサーのひずみの経時変化を示す。経過時間は、相似則による実物換算時間で記載した。なお(a)は全試験期間、(b)に人工バリア性能確認試験と比較するために、10年相当経過時までを拡大して示した。膨出センサーは約0.4年相当経過時点からひずみが発生し始め、sw5を除いてひずみの値が増加している。sw5に関しても約1.5年相当経過時点からひずみ値がプラスとなっている。sw5はスライド端に近い

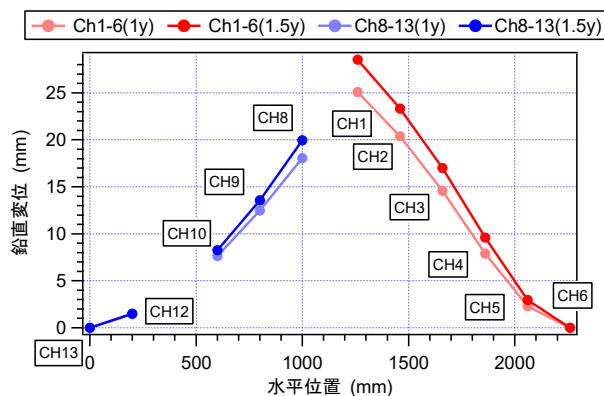


図-8 緩衝材の推定膨出形状(人工バリア性能確認試験)

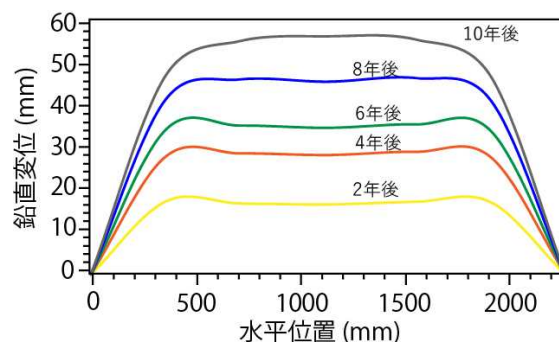
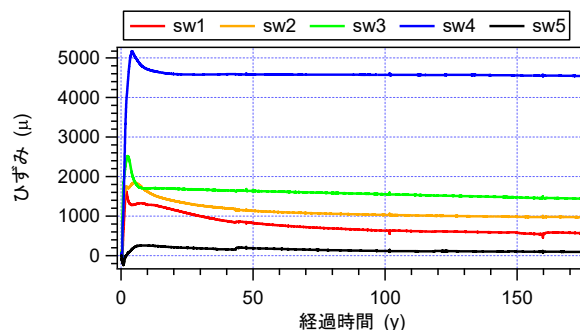
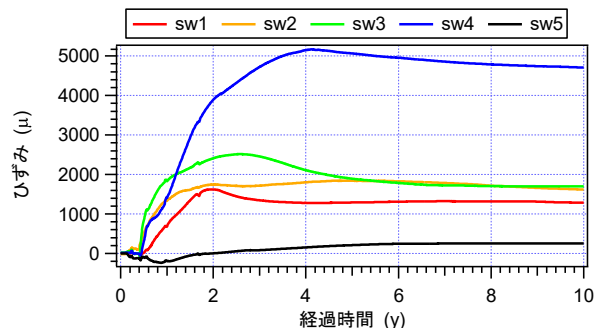


図-9 緩衝材上面の鉛直変位に関する解析結果⁷⁾



(a)全試験期間



(b)試験開始から10年相当経過時までの拡大図

図-10 膨出センサーのひずみ経時変化(遠心模型試験)

ため、他のひずみゲージの値と比べ小さい傾向にある。4年相当経過時点に最大値を示した後、全てのひずみ値が減少傾向を示し、150年相当経過時でのひずみの時間あたりの変化量はほぼゼロとなった。

図-11に遠心模型試験における緩衝材の膨出形状を示す。縦軸は鉛直変位（膨出高さ）、横軸はsw1からの水平距離を実物換算距離で示している。sw1の外側4mm（実物換算値200mm）の位置に固定端があり、鉛直方向への変位がないと仮定し、sw1の変位量は0mmとした。このため、求めまるsw2～5の変位は相対変位である。試験開始から1年相当経過時点にはsw4で-12mmの変位、2年相当経過時点にもsw4で-19mm、sw5で-52mmとなっているが、これは実験初期でひずみ量が微小である中sw4の値が他に比べると大きい傾向を示しているため、変位勾配の正負をsw3（緩衝材中心部）で設けるとsw4及びsw5で収縮する結果となってしまったものと考えられる。実験時間の経過とともに膨出量は増加しており、2年相当経過時点には緩衝材中心部で40mmとなり、人工バリア性能確認試験と比べると約1.4～2倍の値であった。また4年相当経過時点ではsw3で88mmを示した。その後はひずみ値の漸減（図-10）に従って変位量も減少している。10年相当経過時点の変位の最大値は84mmで、ニアフィールドの長期挙動に関する解析において算出されている10年時点の鉛直変位は56mm程度と解析結果の約1.5倍となった。ひずみ値が収束する傾向にある100年相当経過時点にはsw3での変位が68mmとなった。

今回の大変形理論を適用した数値計算では、緩衝材の膨出による $\partial u / \partial x$ が発生しないと仮定して計算を実施しているため、変位量が過大に算定されたものと考えられる。また、片端がスライド式でありx方向の拘束が無いとしているが実際には上部に埋戻し材があること、スライド機構の摩擦があることでx方向のセンサーの伸びが発生しているものと考えられる。このことから、より詳細な膨出量の推定には、 $\partial u / \partial x$ を考慮した計算をする必要がある。

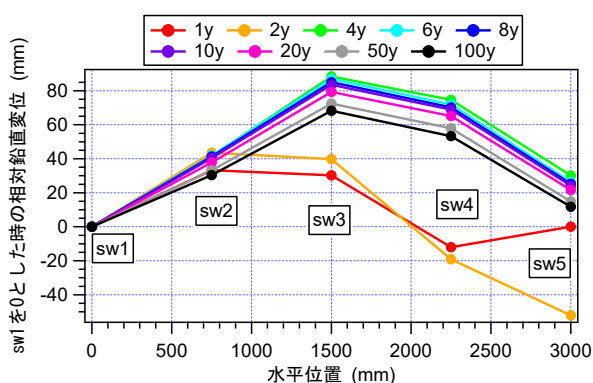


図-11 緩衝材の推定膨出形状（遠心模型試験）

5. まとめ

高レベル放射性廃棄物処分場の閉鎖後初期の再冠水期間に生じる緩衝材の膨出現象を定量的に評価するために、本研究では2つの試験で計測された膨出センサーのデータ（ひずみ）に対して、大変形（有限ひずみ）理論を適用し、緩衝材上端面における鉛直変位量とその膨出形状を評価した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 人工バリア性能確認試験の膨出量

カンチレバー方式の膨出センサーでは、変位勾配の正負が逆転する箇所を考慮する必要がないため、大変形（有限ひずみ）理論を比較的適用しやすい。また、別途実施された人工バリア性能確認試験の数値計算結果における緩衝材の鉛直変位と本研究において人工バリア性能確認試験の膨出センサーで計測されたひずみから求めた鉛直変位の変化の傾向は類似点が認められた。

(2) H29工学確証報告の遠心模型試験の膨出量

片端固定、片端スライド方式の膨出センサーを使用した遠心模型試験では、画像や試験事後の観察によって変位勾配の正負の変化点を推察および仮定する必要があるが、大変形（有限ひずみ）理論を適用することができる。人工バリア性能確認試験の数値計算結果と比べると変位値が大きくなったが、これは $\partial u / \partial x$ が発生しないと仮定しているためと考えられる。

(3) 計測センサーの違いによる計算結果への影響

片端固定・片端スライド方式の膨出センサーでは緩衝材の中心のひずみが計測できる一方、膨出量を過大に評価する可能性がある。これは、膨出センサーの固定条件によって左右されている。片端固定・片端自由のカンチレバー式の膨出センサーでは片端自由であるため、膨出センサーのひずみが $\partial u / \partial x$ の発生には大きく寄与せず、片端固定・片端スライド方式の膨出センサーは、スライド機構はあるものの上載圧や岩盤部とセンサーとの摩擦等が働くことによって $\partial u / \partial x$ が大きく発生してしまうものと考えられる。

以上のことから、大変形（有限ひずみ）理論を用いることで、膨出センサーのひずみデータを使用して緩衝材の膨出量を比較的簡易に推定することができる。今後の課題として、 $\partial u / \partial x$ 設定方法について検討し、より正確な膨出形状の推定を試みる予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、岡三リビック株式会社顧問・小林正樹氏に大変形（有限ひずみ）理論に関する

る助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構：平成 27 年度地層処分技術調査等事業・処分システム評価確証技術開発報告書，pp.2-24-2-27，2016.
- 2) Nishimoto S., Sawada M. and Okada T. : New Rapid Evaluation for Long-Term Behavior in Deep Geological Repository by Geotechnical Centrifuge. Part 1: Test of Physical Modeling in Near Field Under Isotropic Stress-Constraint Conditions. Rock Mech. Rock Eng., 49, pp.3323-3341, 2016.
- 3) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 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（処分システム工学確証技術開発）第 3 分冊 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築 成果報告書，pp.3-33-3-95，2018.
- 4) 中山雅，大野宏和，中山真理子，小林正人：幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験計測データ集（平成 27 年度），JAEA-Data/Code 2016-005., 2016.
- 5) 瀬口靖幸：有限要素法による大変形大ひずみ解析の考え方，「材料」第 22 巻，第 237 号，pp.68-77，1973.
- 6) O. C. Zienkiewicz : The Finite Element Method, pp. 517-526, Mc Graw Hill, 1977.
- 7) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構：平成 29 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・処分システム評価確証技術開発報告書，pp.2-5-2-17，2016.

ESTIMATION OF SWELLING DEFORMATION OF BUFFER MATERIAL IN HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL REPOSITORY

Soshi NISHIMOTO, Fumitaka ARAI, and Hideo HASHIZUME

In order to evaluate various behaviors occurring in the HLW disposal repository, the in-situ experiment at Horonobe Underground Research Laboratory and a centrifugal modeling test using a scale model were carried out. In the initial stage after closure, it is inferred that the buffer material deforms into the buckfill material until resaturation. In in-situ experiment and the centrifugal modeling test, the swelling sensors are installed in order to measure the swelling deformation of the buffer. In this paper, we refer to the strain values of the swelling sensors of the these tests, and apply the finite strain theory to estimate the swelling deformation of the buffer material.