

断層ずれに伴う人工バリアの力学的挙動評価(II)

Assessment on Mechanical Effect of Engineering Barrier System
to Fault Movement (II)

齋藤 雄也 棚井 憲治 菊池 広人* 平井 卓*
西村 繭果*

Yuya SAITO, Kenji TANAI, Hirohito KIKUCHI*, Takashi HIRAI*
and Mayuka NISHIMURA*

地層処分研究開発部門
ニアフィールド研究グループ

Near-Field Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

断層ずれに伴う人工バリアの力学的挙動評価（Ⅱ）

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
地層処分基盤研究開発ユニット

齋藤 雄也^{*}、棚井 憲治⁺、菊池 広人^{*1}、平井 卓^{*2}、西村 繭果^{*2}

（2008 年 1 月 16 日 受理）

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」によると、処分場のサイト選定については、「将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生ずる恐れが少ないと見込まれる地区を選定する」としている。これを受け、わが国の地層処分概念では、地震・活断層の影響等、地層処分システムに著しい影響を及ぼす可能性のある天然現象については、サイト選定によってその影響を避けることを基本としている。

一方、原子力安全委員会では、「安全評価にあたっては、極めて多様な物理的、化学的、あるいは地球科学的な自然現象や人為的事象等が、緩慢に、あるいは突発的に関与する可能性に関し検討する必要がある」としている。これに対し、万が一断層ずれによる変位が生じる場合を想定し、人工バリア性能の限界状態を把握することも重要であると考えられる。また、こうした研究により、高レベル放射性廃棄物の地層処分に対する国民の合意形成を得ることにも寄与する。

これらを背景に、本研究では発生頻度、規模が小さいため事前調査で発見することが困難である C 級断層が人工バリアを直撃した場合を想定し、模型試験とシミュレーション解析を行い、人工バリアに及ぼす影響について検討してきた。成果として、試験結果より、断層のせん断変位速度が 100mm/sec、断層変位が緩衝材厚さの 80%の条件においては、腐食していないオーバーパックは健全であることが示されている。また、シミュレーション解析では、緩衝材の構成モデルとして修正 Cam-Clay モデルを用いることで試験結果を概略的に評価可能であることがわかっている。

本稿では、せん断変位速度の影響を評価するため、試験データの拡充を図るとともに、シミュレーション解析の精度向上のための検討を行った。その結果、せん断変位速度を 1/10 にした場合、緩衝材外周部で観測される土圧が 20%程度減少し、オーバーパックの安全性を評価するうえでせん断変位速度が大きい場合を想定することで安全側の評価が可能であることがわかった。また、数値解析においては、周辺岩盤の透水係数を適切に評価することが重要であることが明らかとなった。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

※ 技術開発協力員、核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課（兼務）

＋ 核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部 処分技術課（兼務）

*1 検査開発株式会社

*2 株式会社 竹中土木

Assessment on Mechanical Effect of Engineering Barrier System to Fault Movement (II)

Yuya SAITO[※], Kenji TANAI⁺, Hirohito KIKUCHI^{*1}, Takashi HIRAI^{*2} and Mayuka NISHIMURA^{*2}

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 16, 2008)

According to the national policy “Specified Radioactive Waste Final Disposal Act”, the site for repository should be where the likelihood of occurrence of significant geological movement due to seismic activity and other natural phenomena should be low now and in the future. Receiving that, the site with the potential to adversely affect the performance of the disposal system should be avoided by site selection in Japan.

On the other hand, according to Atomic Energy Commission, the possibility to occur the natural and artificial events suddenly should be examined. So it is important to examine about the critical state of the engineering barrier system (EBS) when if the fault move across the EBS. And this study helps to be understood by the nation.

From such a background, in this study, we examined the influence of the fault movement on the EBS by model test and simulation analysis. The fault is enough small as slip rate “C” to be difficult to be found out. Consequently, shear displacement, 80% of buffer thickness, didn’t affect overpack if velocity of fault movement was under 100 mm/sec. And simulation analysis with modified Cam-Clay model can express the behavior of the buffer roughly. In this paper, we examined the influence of the velocity of fault movement by the model test, and tried to improve the precision of the simulation analysis. Test results showed that the total pressure of the buffer inside was about 20% decreased when the velocity was a one-tenth. And it is important to set the permeability of the near-field rock appropriately when simulating the behavior of the buffer material affected by fault movement.

Keywords: Fault Movement, Velocity of Fault Movement, Shear Strength

※ Collaborating Engineer, Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering & Laboratories (Additional post)

+ Waste Isolation Technology Section, Waste Management Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering & Laboratories (Additional post)

*1 Inspection Development Company Ltd.

*2 Takenaka Civil Engineering & Construction Co., Ltd

目 次

1. はじめに	1
2. 模型試験	2
2.1 試験の概要	2
2.2 試験体の仕様	3
2.3 計測項目	4
2.4 試験条件	4
2.5 試験結果及び考察	5
2.5.1 飽和膨潤過程	5
2.5.2 せん断過程	8
2.5.3 オーバーパックに作用する応力	13
2.5.4 オーバーパックの変形	14
2.6 まとめ	15
3. シミュレーション解析	17
3.1 解析の概要	17
3.1.1 解析モデル	17
3.1.2 解析に用いた材料特性	17
3.1.3 解析ケース	19
3.2 解析結果	19
3.2.1 せん断荷重とせん断変位	19
3.2.2 せん断容器に作用する土圧	21
3.2.3 オーバーパックに作用する応力	25
3.2.4 緩衝材内部の状態	28
3.3 まとめ	33
4. おわりに	34
参考文献	35

Contents

1. INTRODUCTION	1
2. MODEL TEST	2
2.1 Outline of model test	2
2.2 Spec of test specimen	3
2.3 Measure items	4
2.4 Test conditions	4
2.5 Test results	5
2.5.1 Saturation and swelling process	5
2.5.2 Shearing process	8
2.5.3 Stress on overpack	13
2.5.4 Deformation of overpack	14
2.6 Summary	15
3. SUMULATION ANALYSIS	17
3.1 Outline of simulation analysis	17
3.1.1 Analysis model	17
3.1.2 Material parameter	17
3.1.3 Analysis case	19
3.2 Analysis results	19
3.2.1 Shear load and shear displacement	19
3.2.2 Stress on shear container	21
3.2.3 Stress on overpack	25
3.2.4 State of buffer inside	28
3.3 Summary	33
4. CONCLUSIONS	34
REFERENCE	35

表 目 次

表 2-1	試験ケース	5
表 2-2	オーバーパックに作用する荷重の組み合わせ	13
表 2-3	オーバーパックに作用する外圧値	13
表 3-1	解析に用いた材料定数	18
表 3-2	解析ケース	19

図 目 次

図 2-1	断層挙動の概念	2
図 2-2	試験装置概略	3
図 2-3	試験装置外観	3
図 2-4	緩衝材圧縮成型機と緩衝材ブロック	4
図 2-5	緩衝材のブロック構成 (単位: mm)	4
図 2-6	せん断容器内の計測機器配置	5
図 2-7	模擬オーバーパックの土圧計配置	5
図 2-8	飽和膨潤過程における土圧の時間変化 (Case-3)	6
図 2-9	飽和膨潤過程における土圧の時間変化 (Case-4)	7
図 2-10	飽和膨潤過程における間隙水圧の時間変化 (Case-3)	7
図 2-11	膨潤過程終了後の土圧と室内膨潤試験結果との比較	8
図 2-12	せん断過程における試験体挙動の概念図	8
図 2-13	せん断荷重とせん断変位の関係	10
図 2-14	せん断容器作用土圧とせん断変位の関係 (Case-3)	10
図 2-15	せん断容器作用土圧とせん断変位の関係 (Case-4)	11
図 2-16	各試験ケースにおける土圧計 8 の土圧増分とせん断変位の関係	11
図 2-17	各試験ケースにおける土圧計 9 (引張領域) の土圧増分とせん断変位の関係	12
図 2-18	各試験ケースにおけるオーバーパックに作用する土圧増分とせん断変位の関係	12
図 2-19	オーバーパックが過大に変形すると予想される荷重	14
図 2-20	試験後の試験体の様子	15
図 3-1	解析モデル	17
図 3-2	圧密非排水三軸試験結果と解析における応力-ひずみ関係の比較	18
図 3-3	せん断荷重とせん断変位の関係における試験結果と解析結果の比較 (V=100mm/s)	20
図 3-4	せん断荷重とせん断変位の関係における試験結果と解析結果の比較 (V=10mm/s)	20
図 3-5	受働領域における土圧とせん断変位の関係 (せん断変位速度 100mm/s)	23
図 3-6	主働領域における土圧とせん断変位の関係 (せん断変位速度 100mm/s)	23
図 3-7	せん断容器の受働側土圧とせん断変位の関係 (せん断変位速度 10mm/s)	24
図 3-8	せん断容器主働側土圧とせん断変位の関係 (せん断変位速度 10mm/s)	24
図 3-9	模擬オーバーパック主働側土圧とせん断変位の関係 (せん断変位速度 100mm/s)	26
図 3-10	模擬オーバーパック受働側土圧とせん断変位の関係 (せん断変位速度 100mm/s)	26

図 3-11	模擬オーバーパック主働側土圧とせん断変位の関係（せん断変位速度 10mm/s）	27
図 3-12	模擬オーバーパック受働側土圧とせん断変位の関係（せん断変位速度 10mm/s）	27
図 3-13	緩衝材の間隙水圧分布の時間変化.....	29
図 3-14	緩衝材内部の応力比の時間変化.....	31
図 3-15	塑性せん断ひずみの時間変化.....	32

1. はじめに

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」によると、処分サイトの選定については、「将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれる地区を選定する」としている。これを受け、「我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」¹⁾（以後「第2次取りまとめ」）においては、地震・活断層等の影響等、地層処分システムに著しい影響を及ぼす可能性のある天然現象については、サイト選定によってその影響を避けることを基本的考え方としている。

一方、原子力安全委員会では、「安全評価にあたっては、極めて多様な物理的、化学的、あるいは地球科学的な自然現象や人為的事象等が、緩慢に、あるいは突発的に関与する可能性に関し検討する必要がある」²⁾としている。

「第2次取りまとめ」では、活断層帯の活動における十万年程度の将来については、現在までと同様の活動が継続するものとして評価することが妥当であると考えられることから、現在の調査において明らかとなっている活断層を避けることにより、地層処分システムに対する重大な影響を避けることが可能であると考えている。これらのことから、地層処分システムに影響を及ぼす可能性のある断層としては、主断層から派生する副次的な断層が考えられる。このような断層は、変位速度が非常に小さく、浸食作用により断層の変位地形が残されないことから、未確認のものが多数存在している可能性が指摘されている³⁾。また、これらの断層はC級断層⁴⁾に分類されることから、研究対象として変位速度は最大で1 m/sec程度、変位量は1 m程度を設定し、この断層が人工バリア中央を定置方向と直行して横切る場合を想定し、研究を進めてきた⁵⁾。

本研究では、「第2次取りまとめ」におけるリファレンスケースを対象とした、縮小模型試験および数値解析を実施しており、これまでにせん断変位速度100 mm/secの試験データを取得し、シミュレーション解析により試験結果を概略的に評価可能であることを示した⁶⁾。

また、諸外国においては、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）において、せん断速度がせん断応答挙動に与える影響について試験的に検討しており、せん断速度が増加するとキャニスタ（日本でいうオーバーパック）の変形が大きくなることが示されている⁷⁾。また、緩衝材の仕様やせん断位置の影響等について、解析的な検討も行っており、ベントナイト密度やせん断位置がキャニスタの変形に影響を及ぼすことが示された⁸⁾。

本稿では、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する全体基本計画⁹⁾における当面5ヵ年程度の計画として、H17以降に実施した断層のせん断変位速度を変えた試験結果より、変位速度が地層処分システムに及ぼす影響について検討した。また、試験結果との比較により、数値解析モデルの適用性についても検討した。

2. 模型試験

2.1 試験の概要

試験装置は、「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成3年度—」¹⁰⁾で設定された、処分坑道横置き方式を 1/20 に縮小したものであり、人工バリアの中央に鉛直方向の断層ずれが発生した場合を想定したものである。断層の概念図を図 2-1、試験装置の概略図を図 2-2、試験装置概観を図 2-3 に示す。この試験装置は、せん断容器、せん断载荷装置、空気・水系制御装置、油圧発生装置、自動計測・制御装置、パーソナルコンピュータで構成される。試験は中央で分割された鋼製容器（以下「せん断容器」）に、緩衝材と鋼製の模擬オーバーパックを設置し、せん断容器内側の全面に設置された金属焼結フィルターより、0.2 MPa の水圧で加圧注水し緩衝材を飽和させた（飽和膨潤過程）。飽和膨潤過程では、有効応力が安定した段階で飽和の完了とした。飽和膨潤過程終了後、せん断容器の左側半分に鉛直方向に载荷し、所定の変位まで下降させることでせん断を模擬した（せん断過程）。試験装置のスペックは、最大せん断変位 100 mm、最大せん断変位速度 100 mm/s である。

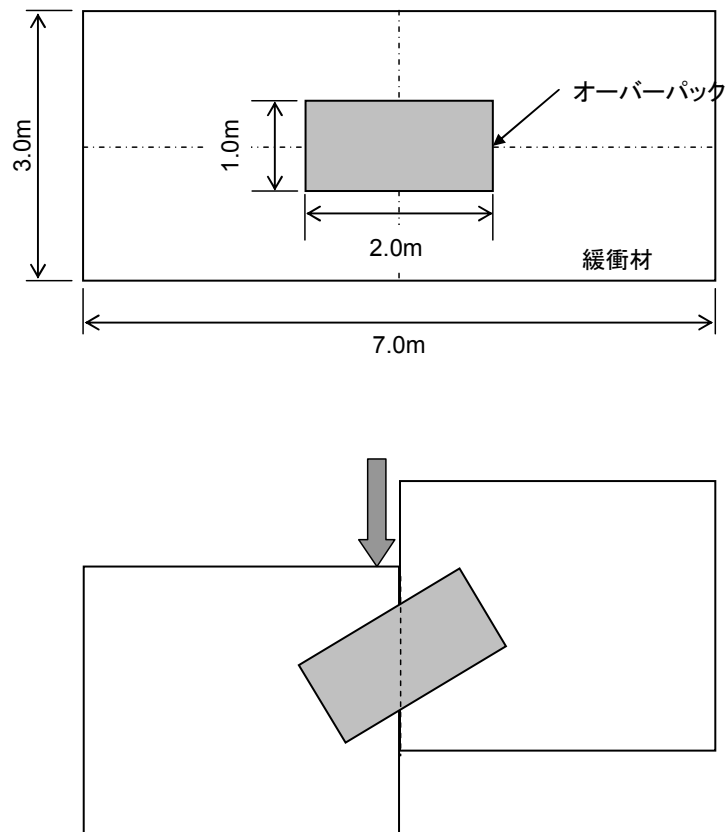


図 2-1 断層挙動の概念

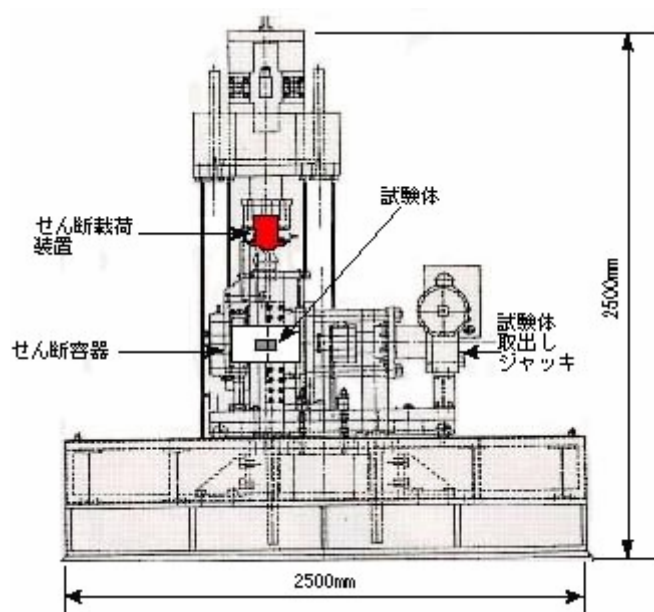


図 2-2 試験装置概略



図 2-3 試験装置外観

2.2 試験体の仕様

緩衝材は、第 2 次取りまとめにおけるレファレンスケースの材料（ベントナイト 70 wt%とケイ砂 30 wt%の混合体で乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} ）を用いた。緩衝材は、圧縮成型機を用いて作成した円形またはドーナツ状の 9 つのブロックで構成されている。緩衝材の圧縮成型機と作成したブロックを図 2-4 に示す。緩衝材のブロック構成を図 2-5 に示す。模擬オーバーパックには、ガラス固化体に相当する部分を中空とした胴部厚さ 15 mm、蓋部厚さ 10 mm の鋼製のものを使用した。



図 2-4 緩衝材圧縮成型機と緩衝材ブロック

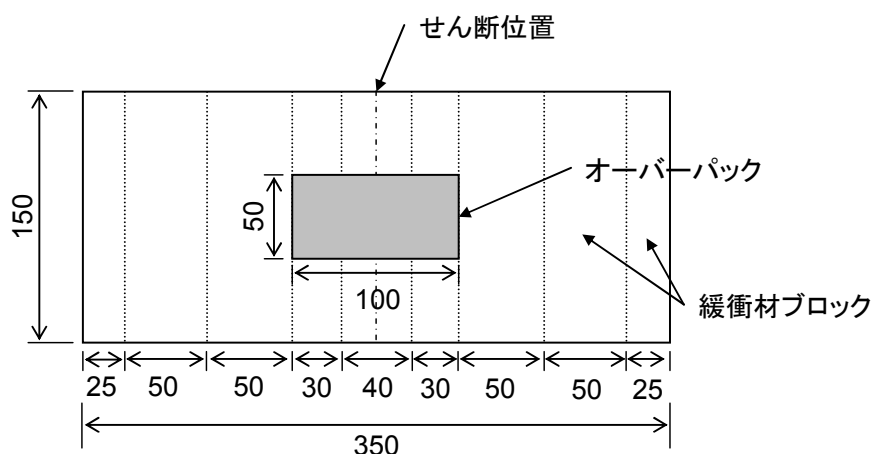


図 2-5 緩衝材のブロック構成 (単位:mm)

2.3 計測項目

計測項目は、せん断荷重、せん断変位、せん断容器内壁に作用する土圧 (11 点)、間隙水圧 (11 点) および模擬オーバーパックに作用する土圧 (2 点) とした。ここで、せん断に要する載荷重をせん断荷重、せん断による変位量をせん断変位と呼ぶ。せん断容器内の計測機器は、試験装置の対称性を考慮し図 2-6 に示すように配置した。また、模擬オーバーパックの土圧計配置を図 2-7 に示す。OP2 については、試験ケースにより設置位置を変更している。

2.4 試験条件

表 2-1 に試験条件を示す。表には既往の試験ケース (Case-1 および 2) についても記載した。せん断過程の載荷条件は、せん断変位量を 40 ~70 mm、せん断変位速度を 10~100 mm/sec とした。このせん断変位量は緩衝材厚さ 50 mm の 80~140 % に相当する。また、せん断変位速度は想定するせん断変位速度 1 m/sec に対し 1/100~1/10 となっているが、試験装置スペック以上の変位速度については、数値解析により検討を行う。

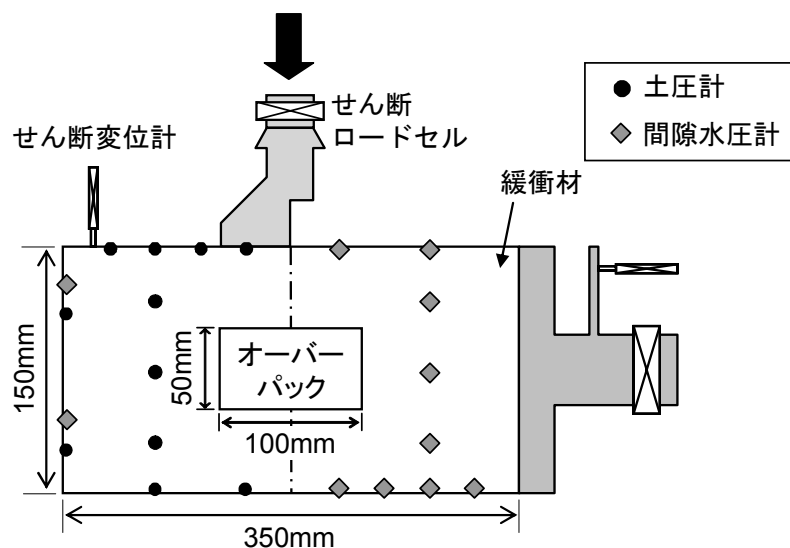


図 2-6 せん断容器内の計測機器配置

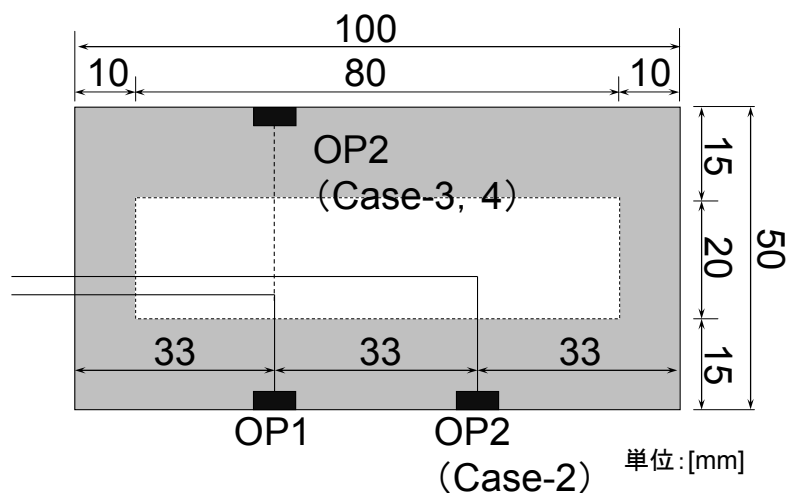


図 2-7 模擬オーバーパックの土圧計配置

表 2-1 試験ケース

試験ケース	せん断変位	せん断変位速度	備考
Case-1	40mm	100mm/sec	既往
Case-2	40mm	100mm/sec	既往
Case-3	70mm	10mm/sec	新規
Case-4	70mm	10mm/sec	新規

2.5 試験結果及び考察

2.5.1 飽和膨潤過程

新規に実施した Case-3、Case-4 の飽和膨潤過程における土圧および間隙水圧の時間変化を図 2-8、図 2-9、図 2-10 に示す。Case-4 の間隙水圧については、試験中にすべての間隙水圧計が異常値を示したためグラフ化は省略する。図 2-8、図 2-10 に示す Case-3 の 3000 時間経過付近で、土圧および間隙水圧の計測値に急激な上昇が見られるが、これは試験施設の 90 時間程度にわたる停電の影響であると

考えられる。土圧の時間変化を見ると、Case-3 では1000 時間経過まで徐々に上昇し、その後 3000 時間経過後には 0.6MPa～1.0MPa でほぼ一定の値を示した。一方、Case-4 では2000 時間程度まで土圧は徐々に上昇し、その後 3000 時間経過後には 0.2MPa～0.4MPa で一定の値を示した。Case-3 と比較して、土圧の増分が小さいが、一定値に収束したことから飽和に達したと判断した。膨潤応力については、室内試験が行われており、今回の試験で用いた緩衝材の仕様での膨潤応力は 0.4MPa～0.6MPa であることが確認されている¹¹⁾。図 2-11 に、膨潤過程終了時の土圧と室内膨潤試験データ¹²⁾との比較を示す。図中には、参考までに既往の試験である Case-1、2 もプロットした。また、0.2MPa で加圧給水していることを考慮し、飽和膨潤過程終了時の土圧より水圧分 0.2MPa を差し引いてプロットした。この図より、Case-3 の土圧はこれまでの試験結果及び室内試験結果と比較しても妥当な値であることがわかる。Case-4 については、土圧が小さく水圧分を差し引くことで下限値が室内試験結果と大きく乖離するため、最大値のみのプロットとした。今回の試験で Case-4 については、膨潤応力の挙動、間隙水圧計の計測不具合等、試験データに関して不明な点が多いため、この試験データに関しては参考値とし、取り扱いには注意を要すると考えられる。

間隙水圧の変化については、図 2-10 の Case-3 のグラフより、土圧と同様停電の影響で計測値に変動が見られるが、3000 時間経過時をみると異常値を示すいくつかを除けば 0.15MPa～0.20MPa 程度の値に収束しており、給水圧である 0.2MPa と近い値であることから妥当な値を示しているといえる。しかし、飽和膨潤過程に計測不能となり、後述するせん断過程での間隙水圧の計測はできなかった。この間隙水圧計の不具合については、今後計測機器の改良等の対策が必要である。

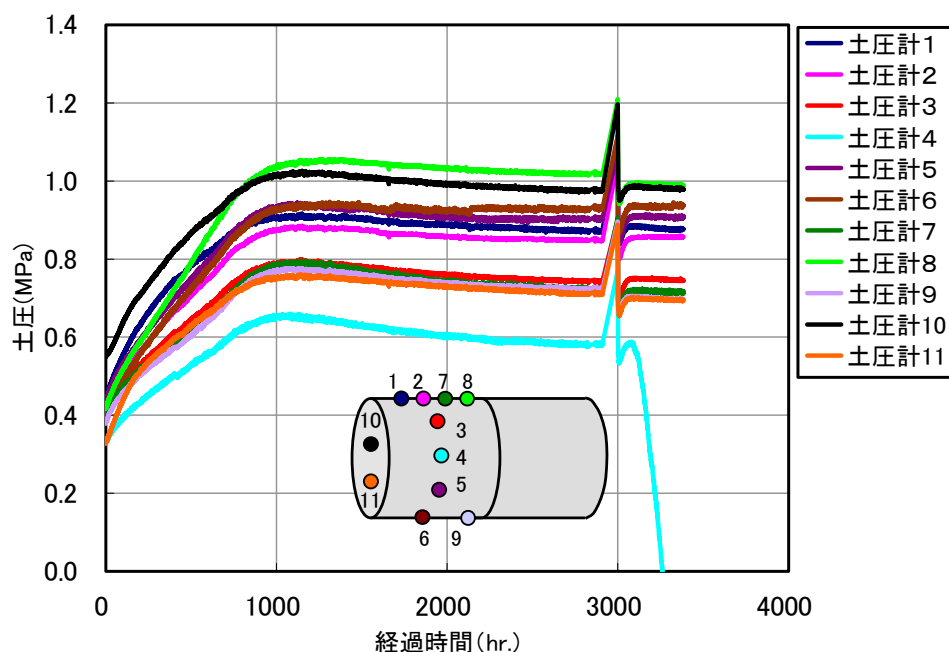


図 2-8 飽和膨潤過程における土圧の時間変化 (Case-3)

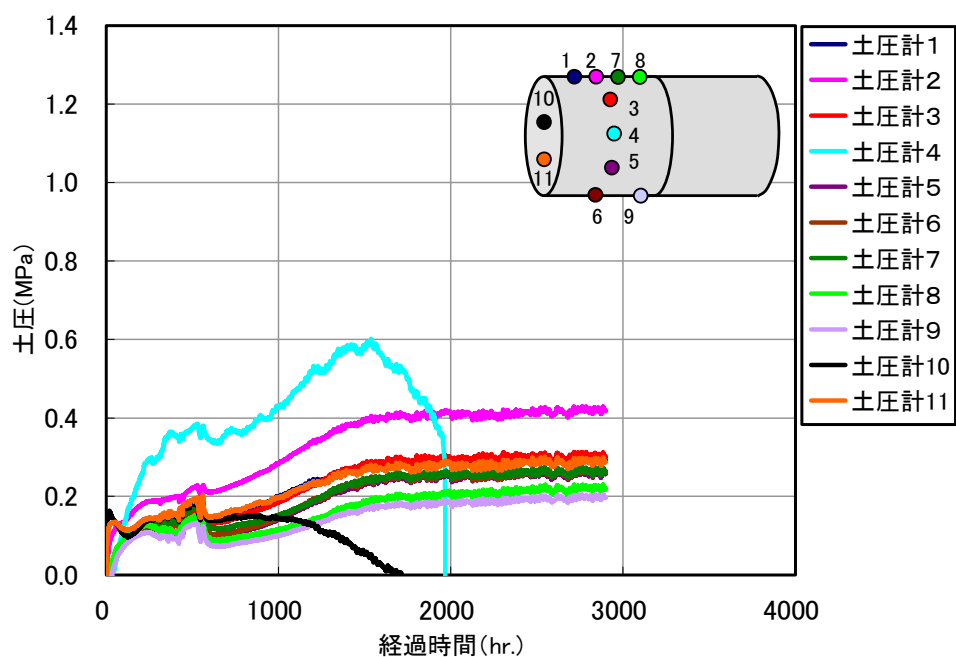


図 2-9 飽和膨潤過程における土圧の時間変化 (Case-4)

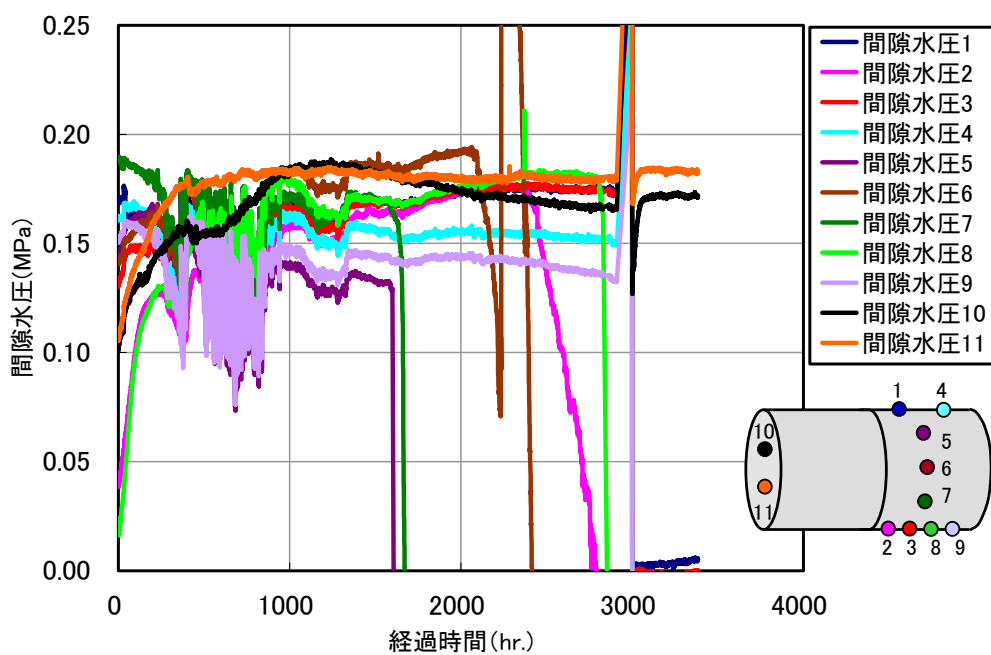


図 2-10 飽和膨潤過程における間隙水圧の時間変化 (Case-3)

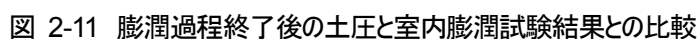


図 2-12 にせん断過程における試験体挙動の概念図を示す。以下、試験体中心のせん断ずれが生じる面をせん断面、せん断に伴いせん断容器が模擬オーバーバックに接近し、緩衝材が圧縮される側を圧縮領域、せん断容器が離れ、緩衝材が引張りを受ける側を引張領域とする。

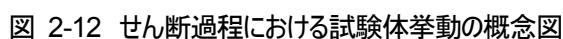


図 2-13 にせん断荷重とせん断変位の関係を示す。図中には、既往の試験結果である Case-1、2 の結果も併せてプロットした。図より、試験ケースによるせん断変位速度の影響は無く、すべてのケースにおいてせん断荷重の値は 6~8kN の値を示している。また、せん断荷重は載荷後すぐに最大値まで上昇し、その後せん断終了までほぼ一定値となった。せん断変位 70mm まで載荷した Case-3、4 でも同様の傾向を示しており、これはせん断開始直後にせん断面で緩衝材が塑性化し、それ以降せん断抵抗を発揮することなくずれが進行しているためであると考えられる。

Case-3、4 におけるせん断過程の土圧とせん断変位の関係を図 2-14、図 2-15 に示す。これらの図では、せん断過程中に計測値が異常値を示した土圧計についてはプロットから除外した。Case-3 では、せん断面に最も近い圧縮領域に配置された土圧計 8 において、せん断開始より土圧が上昇し、せん断変位 30mm 程度で最大値 2.1MPa を示し、その後ほぼ一定の値となっている。また、せん断面に最も近い引張領域に設置された土圧計 9 では、せん断初期に土圧が 0.5MPa 程度減少し、その後せん断変位 30mm まで上昇し一定値となっている。その他の土圧はせん断開始より緩やかに上昇し、同様にせん断変位 30mm 付近で一定値となっている。これより、圧縮領域ではせん断変位により緩衝材が圧縮され、引張領域では緩衝材が引張りを受けることで膨張していることが明らかであり、またその影響はせん断面に近い領域ほど大きいと考えられる。Case-4 についても、同様にせん断面近傍の土圧計に関してせん断の影響が見られ、土圧計 8 ではせん断開始直後から土圧が上昇し、土圧計 9 では初期に土圧が減少し、その後上昇した。土圧の上昇量に関しては Case-3 と比較してやや小さく、また Case-3 ではせん断変位 30mm 付近で最大値を示したのに対し、せん断終了まで緩やかに土圧が増加する傾向が見られた。

また、土圧の時間変化に関して既往の試験結果との比較を行うため、圧縮領域、引張領域で土圧の変化量が大きい土圧計 8 と土圧計 9 に着目した。各試験ケースでの土圧計 8、9 における土圧とせん断変位の関係を図 2-16、図 2-17 に示す。図における土圧は比較を容易にするため、初期値からの増分で示している。図より、土圧計 8 においては、せん断変位速度が 100mm/sec である Case-1、2 では最大で 1.5MPa 程度の値を示し、せん断速度が 10mm/sec である Case-3、4 では最大で 1.2MPa 程度となり、せん断変位速度が 1/10 になると土圧の増分が 20%程度減少する結果となった。土圧計 9 においては、初期の土圧減少の後に増加といった傾向はすべてのケースで見られた。土圧の最小値、最大値に関しても大きな差は見られなかったが、土圧減少後の増分量については、せん断変位速度が大きい方が若干大きい結果となった。

図 2-18 に各試験ケースにおけるオーバーパックに作用する土圧増分とせん断変位の関係を示す。図より、Case-2 においては、引張領域にある土圧計 OP1 においては、せん断開始後土圧の減少が見られ、その後せん断変位の増加とともに増加する傾向となり、せん断容器土圧計 9 と同様の傾向が見られた。また、圧縮領域にある土圧計 OP2 においては、せん断開始より単調に増加し、最大せん断変位である 40mm 付近で最大値 2.5MPa 程度の土圧増分となっており、せん断容器土圧計 8 と同様の傾向となった。また、せん断変位速度が 1/10 である Case-3、Case-4 においては、2 つの試験結果に差異が見られ、Case-3 では、Case-2 と同様の傾向であるが、土圧計 OP1、OP2 とともに土圧の増分量が大きく減少する結果となったが、Case-4 においては、土圧計 OP1 と OP2 の傾向が逆転し、土圧の増分量も Case-2 とほぼ同等の傾向となった。どちらかの試験ケースにおいては、計測誤差の影響で信頼できない結果である可能性が高く、後述の解析結果との比較により検討が必要であると考えられる。

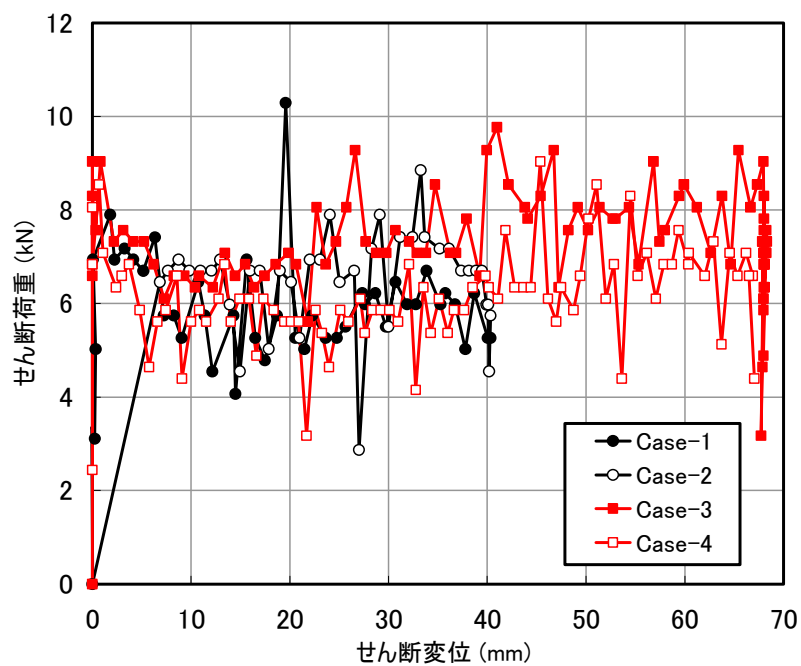


図 2-13 せん断荷重とせん断変位の関係

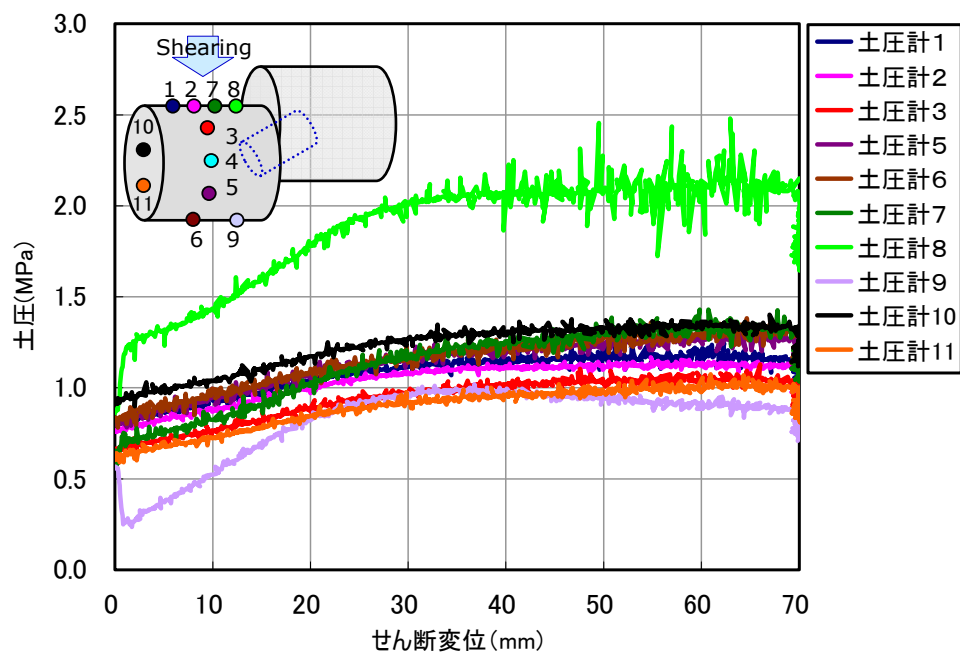


図 2-14 せん断容器作用土圧とせん断変位の関係 (Case-3)

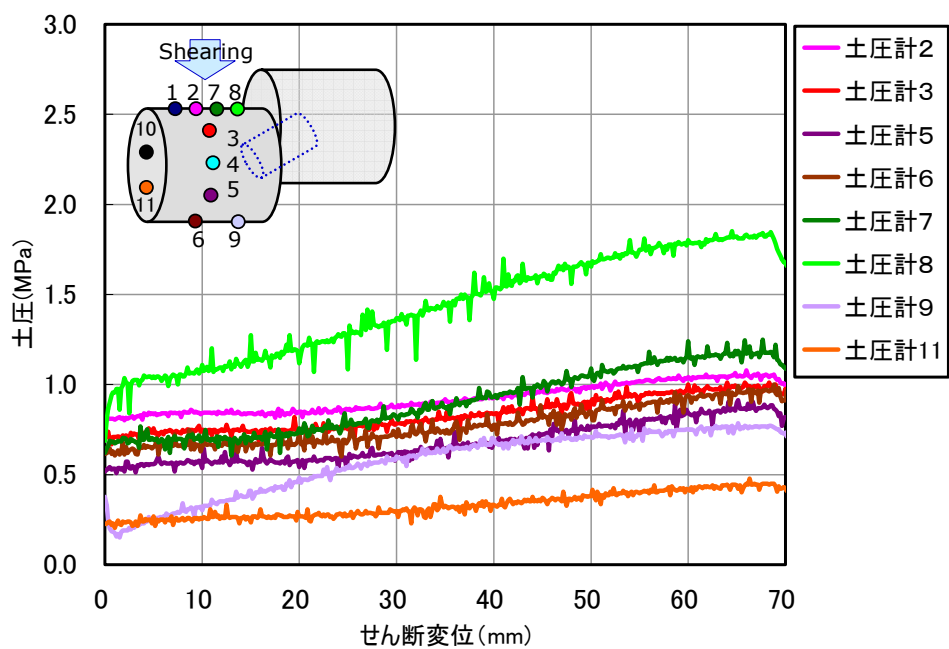


図 2-15 せん断容器作用土圧とせん断変位の関係 (Case-4)

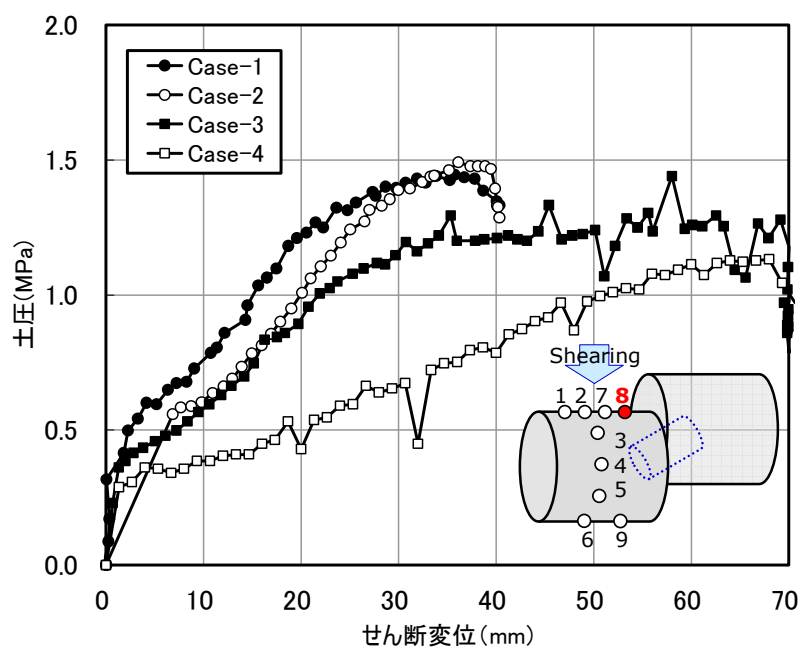


図 2-16 各試験ケースにおける土圧計8の土圧増分とせん断変位の関係

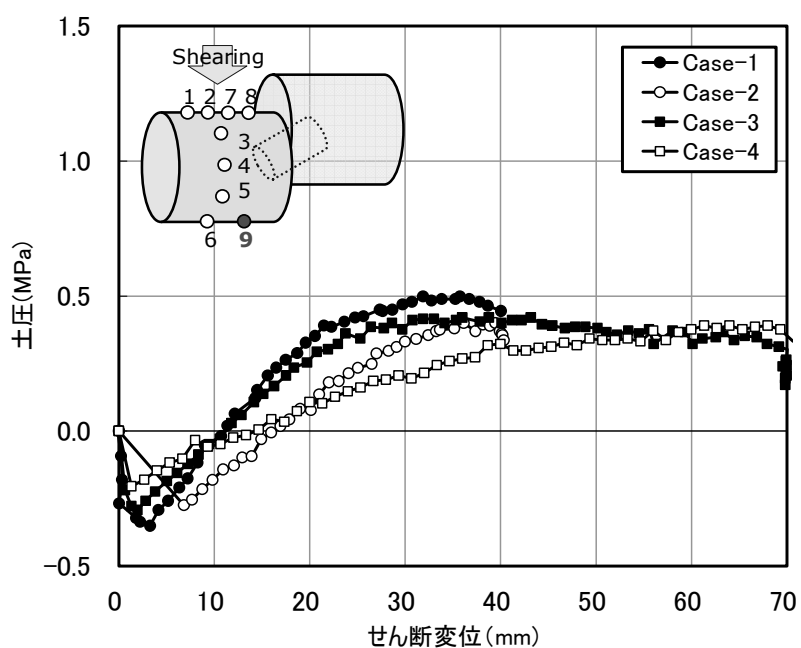


図 2-17 各試験ケースにおける土圧計 9(引張領域)の土圧増分とせん断変位の関係

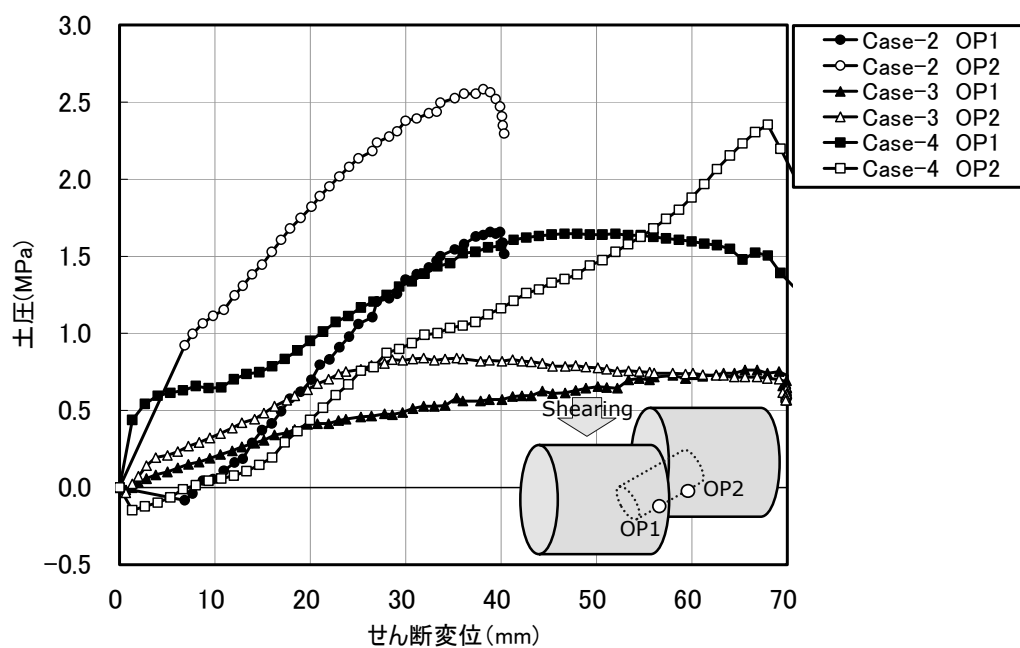


図 2-18 各試験ケースにおけるオーバーパックに作用する土圧増分とせん断変位の関係

2.5.3 オーバーパックに作用する応力

第2次取りまとめにおいて、オーバーパックの耐圧強度上の限界となる偏圧状態を把握することを目的に、有限要素法解析を実施し、オーバーパックが過大に変形すると予想される荷重 P を算出している。本研究の目的である断層ずれによる影響を考慮するためには、この荷重 P として、常時作用する外圧と、今回の試験より得られたせん断により作用する土圧増分との和を用いればよいと考えられる。第2次取りまとめ¹³⁾において、オーバーパックに作用する荷重の組み合わせとして硬岩系岩盤、軟岩系岩盤についてそれぞれ表 2-2 のように設定し、作用外圧値として表 2-3 のように設定した。また、本研究において、せん断変位、せん断変位速度を変えた試験を行い、オーバーパックに作用する土圧を計測した結果得られた最大土圧は、せん断変位 40mm、せん断変位速度 100mm/s の試験ケースにおける模擬オーバーパック受働側土圧であり、約 2.6MPa となった。このせん断による土圧と、表における硬岩系岩盤の外圧の合計値 10.7MPa との和は約 14MPa となる。この外圧の合計値と算出された荷重 P を比較したものを図 2-19 に示す。図より、厚さ 150mm のオーバーパックにおける荷重の最小値は 40MPa であり、今回の断層ずれによる土圧の増加を考慮してもオーバーパックの変形に対する安全裕度は十分に確保されていると考えられる。ただし、今回の試験ではせん断速度に関して、想定するせん断速度 1m/s の 1/10 の試験結果であり、今後実規模の解析を行い、せん断によりオーバーパックに作用する土圧に関して検討をする必要があると考えられる。

表 2-2 オーバーパックに作用する荷重の組み合わせ

	荷重の組み合わせ
硬岩系岩盤 (深度 1,000m)	[地下水静水圧]+[オーバーパックの腐食膨張により生じる緩衝材の圧密反力(緩衝材の膨潤応力含む)]
軟岩系岩盤 (深度 500m)	[地下水静水圧]+[岩盤クリープ変形により生じる緩衝材の圧密反力]+[岩盤クリープ終了後、オーバーパックの腐食膨張により生じる緩衝材の圧密反力の増加分(緩衝材の膨潤応力含む)]

表 2-3 オーバーパックに作用する外圧値

	作用外圧値[Mpa]	
	硬岩系岩盤	軟岩系岩盤
地下水静水圧	9.80	4.90
岩盤のクリープ変形および腐食性生物膨潤圧による緩衝材の圧密反力	0.86 (岩盤クリープは考慮しない)	1.87
合計	10.70	6.80

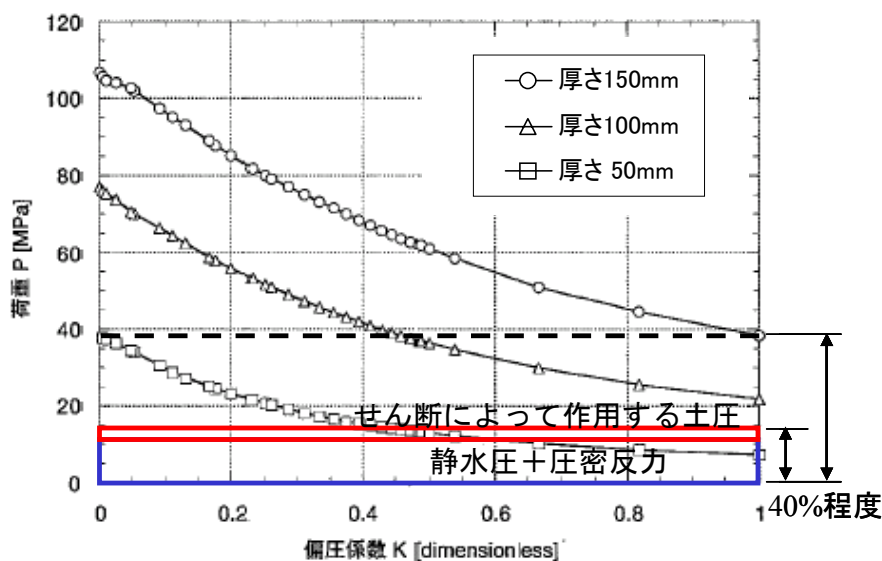


図 2-19 オーバーパックが過大に変形すると予想される荷重(第2次取りまとめ, 1999 に加筆)

2.5.4 オーバーパックの変形

各試験後、オーバーパックの観察を行ったが、既往の試験と同様にオーバーパックに損傷は見られなかった。図 2-20 に Case-3 試験後にオーバーパックが露出するように緩衝材の一部を切り取った試験体の様子を示す。オーバーパックに損傷等がないことから、せん断中オーバーパックは緩衝材の中で回転したと考えられる。オーバーパックがその中心を軸として回転した場合の回転角は次式 (2-1) で求めることができる。

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\delta}{L}\right) \quad (2-1)$$

ここに、 θ はオーバーパックの回転角、 δ はせん断変位 (70mm)、 L はオーバーパック長さ (100mm) である。これにより、今回の試験におけるオーバーパック回転角の理論値は 44.4° となる。

試験後の実測によるオーバーパックの回転角は、Case-3 で 45.0° 、Case-4 で 43.9° となり、理論値と近い値となっている。このせん断によるオーバーパックの回転は、緩衝材の剛性に影響を受け、剛性が大きければオーバーパックは回転することなく、緩衝材からの抵抗により損傷を受ける可能性がある。今回の結果より、オーバーパックの回転角が理論値に近いことから、せん断中にオーバーパックが緩衝材から適度な抵抗を受け回転したと考えられ、緩衝材は適度な剛性であり緩衝材の応力緩衝性効果が発揮されたといえる。

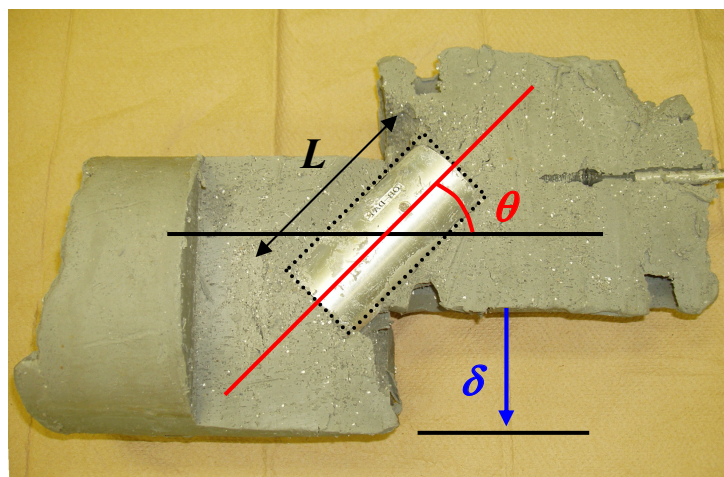


図 2-20 試験後の試験体の様子

2.6 まとめ

せん断速度の影響について検討するため、既往の試験ケースのせん断変位速度 100mm/sec に対して 1/10 となる 10mm/sec での試験を行った。得られた知見を以下に示す。

- ・ 飽和膨潤過程においては、既往の試験と同様に、土圧は時間の経過とともに収束しほぼ一定の値を示した。Case-3 においては、室内試験データと比較して妥当な結果を示したが、Case-4 では小さい値を示した。これは、試験体の作成から設置までの過程において試験体になんらかの影響があったものと考えられるが、特定はできない。
- ・ 飽和膨潤過程における間隙水圧計に関して、Case-3 においては加圧給水圧である 0.2MPa の値を示しており妥当であるが、Case-4 ではすべての間隙水圧計が異常値を示し、参考となるデータは得られなかった。間隙水圧計の計測に関しては、今後の対策が必要であると考えられる。
- ・ せん断過程におけるせん断荷重とせん断変位の関係では、せん断変位速度の影響はあまり見られず、すべての試験ケースにおいて、せん断荷重はせん断の初期に 7kN 程度で最大値を示し、その後ほぼ一定の値を示した。
- ・ せん断過程における各土圧計の土圧とせん断変位の関係では、圧縮領域である土圧計 8 では、Case-3、4 ともに初期に土圧の急激な増加が見られ、その後最大値である 1.2MPa 程度まで増加した。Case-3 ではせん断変位 30mm 程度で最大値を示し、Case-4 では最大変位である 70mm で最大値を示した。一方、引張領域である土圧計 9 では、Case-3、4 ともに初期に土圧の減少がみられ、その後ゆるやかに土圧が増加し、0.5MPa 程度の最大値を示した。
- ・ せん断過程における土圧に関して、既往試験結果との比較を行った。圧縮領域である土圧計 8 では、せん断変位速度が 1/10 になることで土圧の増分が 20%程度減少した。また、土圧計 9 では、初期に土圧の減少がみられ、その後増加するといった同様の傾向が見られた。土圧減少後の増加量をみると、せん断変位速度の大きいケースの方が若干増加量が大きい傾向が見られた。
- ・ せん断変位量の影響に関しては、各土圧計の計測結果では Case-4 では最大せん断変位まで土圧が増加したが、Case-3 ではせん断変位 30mm 以降はほぼ一定の値となっている。既往の実験結果で

ある Case-1、2 の土圧とせん断変位の関係ではせん断変位 30mm 程度で最大値に達し、それ以降はほぼ一定の値となっている。また、せん断荷重をみると全ての実験ケースにおいてせん断初期に最大値を示した後、せん断中ほぼ一定の値となっており、せん断変位量の影響は小さいと考えられる。よって、実験結果からは Case-4 を除いて、せん断変位 30mm 以降はほぼ一定の傾向を示しており、せん断変位量の影響は少ないと考えられる。これは、緩衝材があるせん断変位で降伏し、それ以降は変位のみが進行しているものと考えられる。

- せん断過程におけるオーバーパックに作用する土圧とせん断変位の関係では、Case-2、Case-4 においては、せん断容器に作用する土圧と同様の傾向が見られ、圧縮領域に設置した土圧計 OP2 ではせん断変位の増加とともに土圧が増加し、Case-2 では最大値 2.5MPa、Case-4 では最大値 0.8MPa 程度となり、せん断変位速度が 1/10 となることで、土圧増分が大幅に減少する結果となった。また、引張領域に設置した土圧計 OP1 では初期に土圧が減少し、その後増加する結果となった。しかし、Case-3 の結果では、圧縮領域と引張領域における傾向が逆の結果となり、土圧増分の大きさも Case-2 と同程度の結果となった。
- せん断過程終了後、試験体を解体しオーバーパックの回転角及び損傷の有無を確認した。オーバーパック回転角は、せん断変位から求まる理論回転角とほぼ等しい値となり、緩衝材から適度な抵抗を受けながら回転していると考えられる。また、オーバーパックに損傷や変形は見られず、緩衝材の応力緩衝性が発揮されたと考えられる。

3. シミュレーション解析

3.1 解析の概要

シミュレーション解析の精度向上を図るため、2 章の模型試験のシミュレーション解析を実施し、解析の妥当性について検証した。解析は非線形 3 次元 FEM 解析であり、解析コードは ABAQUS を用いた。

3.1.1 解析モデル

解析モデルは模型試験の対称性を考慮し、図 3-1 に示す半断面モデルとした。緩衝材は模型試験と同様に直径 150mm、長さ 350mm とし、内部中央にオーバーパックを設置し、せん断容器内壁は金属焼結フィルターを配置した。この金属焼結フィルターは周辺の岩盤の役割を果たす。モデル中央部には幅 10mm の要素を設け¹⁴、せん断帯とし、このせん断帯を境にモデル半分に強制変位を与えることでせん断を模擬した。

境界条件として、固定側のせん断容器に相当する外周部及び側面を完全固定とし、可動部の外周部及び側面にせん断を模擬する鉛直方向の強制変位を与え、その他の変位は拘束した。また、せん断帯を除く外周部は非排水条件とした。

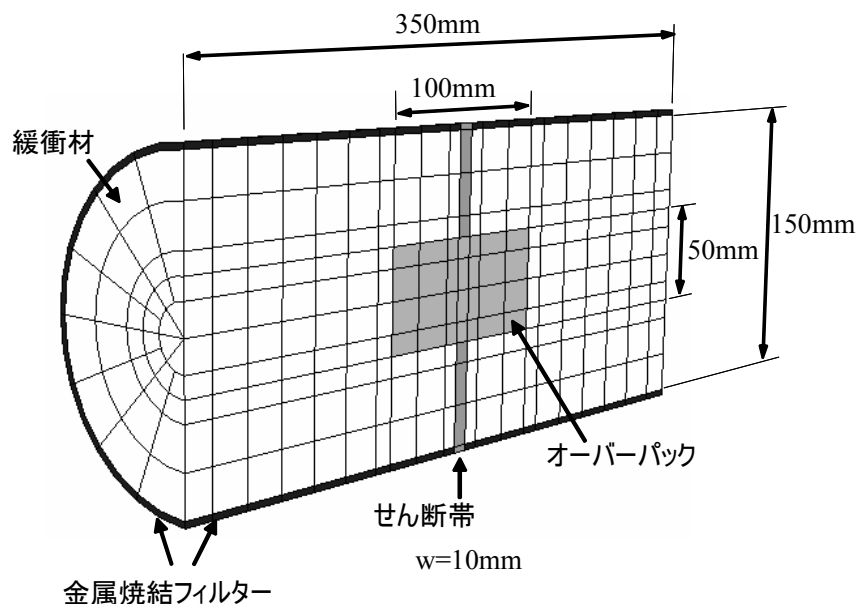


図 3-1 解析モデル

3.1.2 解析に用いた材料特性

材料モデルは、緩衝材は構成則に修正 Cam-Clay モデル¹⁵⁾¹⁶⁾を用いた弾塑性体とし、オーバーパックは弾性体、金属焼結フィルターは多孔質弾性体とした。模型試験のオーバーパックは中空であるが、試験において変形がみられなかったことから、一様な材料としてモデル化した。緩衝材の弾塑性挙動評価モデルとしては、修正 Cam-Clay モデルを用いて模型試験の挙動を概略的に評価できることが示

されている²⁾。よって、本報告でも修正 Cam-Clay モデルを用いて解析を行った。

模型試験に用いた第2次取りまとめリファレンスケースの緩衝材に対する圧密非排水三軸圧縮試験結果と、本解析に用いた弾塑性モデルにおける応力-ひずみ関係を図 3-2 に示す。図より、拘束圧 2.5MPa 以上の実験における軟化挙動は表現できていないが、解析に用いた材料モデルにより、緩衝材の材料特性がある程度表現できているといえる。今回の試験での緩衝材に作用する有効拘束圧は膨潤応力である 0.5MPa 程度となるため、高拘束圧における試験値との差異による解析結果への影響は小さいと考えられる。

表 3-1 に解析に用いた緩衝材、金属焼結フィルター部およびオーバーパックの材料定数を示す。

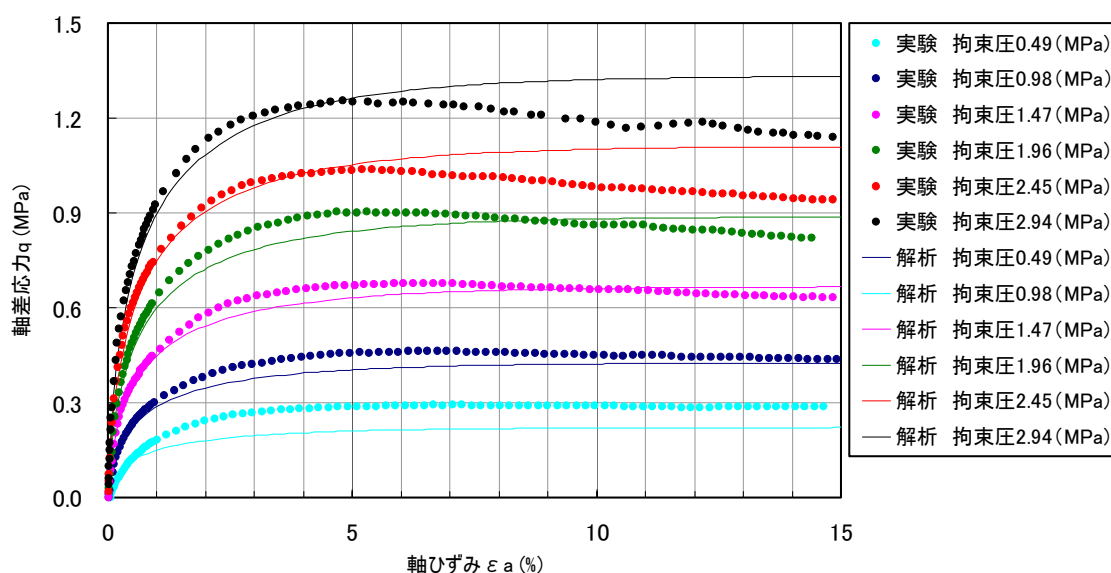


図 3-2 圧密非排水三軸試験結果と解析における応力-ひずみ関係の比較

表 3-1 解析に用いた材料定数

オーバーパック	弾性係数	E	2.10E+05	MPa
	ポアソン比	ν	0.30	
緩衝材	ポアソン比	ν	1.00E-03	
	圧縮指数	λ	1.17E-01	
	膨潤指数	κ	6.23E-02	
	限界状態パラメータ	M	0.63	
	透水係数	k	4.50E-13	ms ⁻¹
	初期間隙比	e_0	0.70	
周辺岩盤 (金属焼結フィルター)	弾性係数	E	2.10E+05	MPa
	ポアソン比	ν	0.30	
	透水係数	k	1.00E-06	ms ⁻¹
			1.00E-07	
			1.00E-08	

3.1.3 解析ケース

表 3-2 に解析ケースを示す。せん断変位速度、せん断変位量は試験条件と同様に 2 ケース実施し、各ケースに対し、緩衝材周辺要素（試験では金属焼結フィルター部）の透水係数を表 3-1 に示す 3 種類の値に設定し、計 6 ケースの解析を実施した。

表 3-2 解析ケース

解析ケース	せん断変位	せん断変位速度	透水係数
A-1	40mm	100mm/sec	$k=1.0E-6$
A-2	40mm	100mm/sec	$k=1.0E-7$
A-3	40mm	100mm/sec	$k=1.0E-8$
B-1	70mm	10mm/sec	$k=1.0E-6$
B-2	70mm	10mm/sec	$k=1.0E-7$
B-3	70mm	10mm/sec	$k=1.0E-8$

3.2 解析結果

3.2.1 せん断荷重とせん断変位

図 3-3、図 3-4 にせん断荷重とせん断変位の関係における試験結果と解析結果の比較を示す。図 3-3 は変位速度 100mm/s（Case-1、Case-2）、図 3-4 は変位速度 10mm/s（Case-3、Case-4）における結果であり、解析ケースは図 3-3 は A-1、図 3-4 は B-1 との比較を示している。全ての解析ケースでの比較も行っているが、せん断荷重とせん断変位の関係においては、緩衝材周辺要素の透水係数の影響は小さく、結果に差は見られなかった。図より、試験・解析ともに初期にせん断荷重が急激に増加し、その後試験ではほぼ一定の値となり、解析では緩やかに増加する結果となった。解析結果はいずれのケースにおいても、試験結果と比較してやや小さく、5kN 程度においてせん断荷重の増加が緩やかとなる結果となっている。また、試験、解析ともに変位速度による影響は小さく、同様の結果となった。変位量については、試験では変位量が大きいケース（Case-3、Case-4）においてもほぼ同程度の値のまま変位のみが進行する結果となったが、解析においてはせん断荷重の上昇は最大変位まで継続し、その結果変位量が大きいケースにおいて、試験結果と乖離する結果となった。

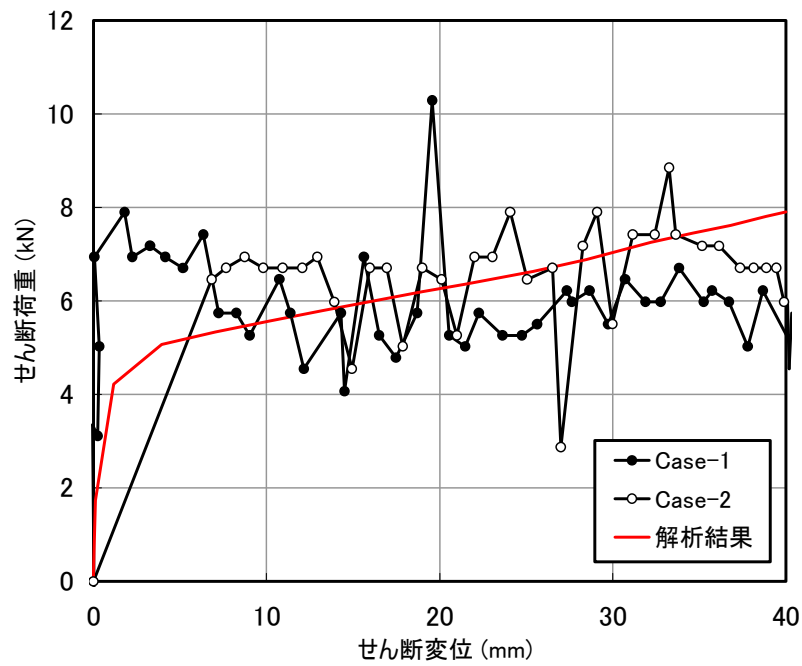


図 3-3 せん断荷重とせん断変位の関係における試験結果と解析結果の比較 ($V=100\text{mm/s}$)

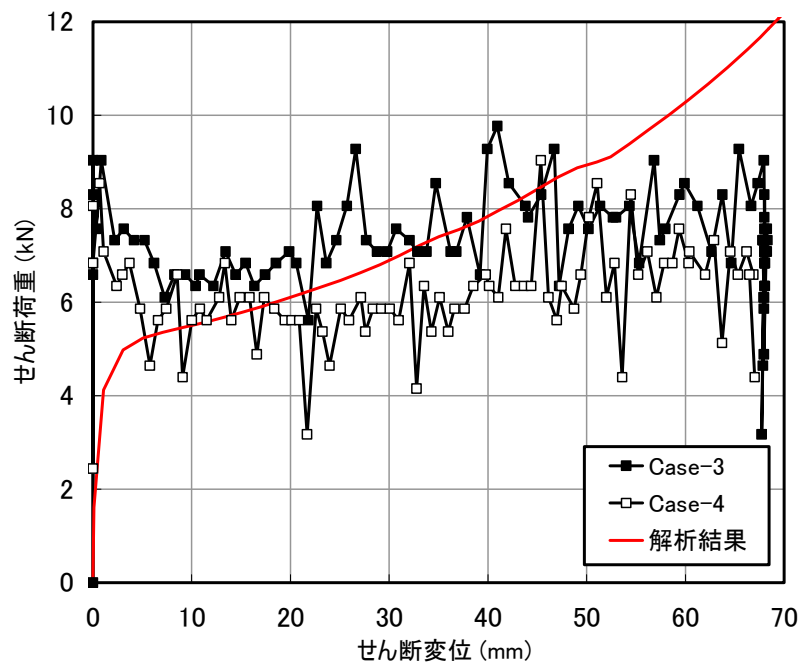


図 3-4 せん断荷重とせん断変位の関係における試験結果と解析結果の比較 ($V=10\text{mm/s}$)

3.2.2 セン断容器に作用する土圧

(1) セン断変位速度 100mm/s

図 3-5 は、せん断により模擬オーバーパックが接近する圧縮領域におけるせん断容器に設置した土圧計 8 の計測結果と解析結果を比較したものであり、せん断変位と土圧の関係を示している。図より、 $k=1.0E-6$ としたケースでは、試験と同様の傾向となっているが、最大せん断変位における土圧の最大値を比較すると試験結果より小さな値となっている。解析においては、フィルターの透水係数が低いほど土圧の上昇量が大きくなる傾向が見られ、 $k=1.0E-7$ のケースでは、せん断変位 20mm 程度まで試験結果と良く一致している。しかし、透水係数の低い解析ケースにおいては、せん断変位 20mm 程度で最大土圧を示し、その後土圧が減少しており、試験とは異なる傾向となっている。これは、透水係数が低いために、せん断により生じる過剰間隙水圧の消散が遅くなり、間隙水圧が上昇することによるものであると考えられる。試験結果との差異に関しては、試験でのフィルター内の間隙水のモデル化、緩衝材とせん断容器、オーバーパック間の相互作用の影響等が解析により正確に表現できていないことによると考えられる。しかし、実際の処分場では緩衝材の周辺は岩盤に囲まれており、解析では緩衝材の厚さに対して十分に厚みのある岩盤をモデル化することで、実現象を解析することが可能であると考えられるが、岩盤内部の割れ目等の不確定要素も多数存在するため、この緩衝材周囲の要素のモデル化に関しては今後の検討が必要である。

図 3-6 は、せん断により模擬オーバーパックが離れる引張領域における結果を示したものである。図より、せん断初期に土圧が減少する傾向は試験と解析でよく対応している。試験ではその後、せん断変位 5mm 程度より土圧が緩やかに上昇しており、解析でも同様の傾向となっている。しかし、解析においては、せん断変位 20mm 程度より土圧が減少しており、これ以降試験結果と乖離する傾向となった。土圧の上昇量に関しては、フィルターの透水係数が低いほど大きくなり、 $k=1.0E-7$ のケースが試験結果とよく対応している。

以上、せん断容器に作用する土圧に関して試験結果と解析結果を比較した結果、せん断変位 20mm 程度まではよい対応をしていると言える。しかし、それ以降の挙動は試験と異なる傾向を示している。

(2) セン断変位速度 10mm/s

図 3-7 に(1)と同様に圧縮領域における試験結果と解析結果との比較を示す。図より、解析では(1)の結果と同様に、透水係数が低いほど、大きな土圧が生じる結果となっている。せん断変位 40mm 程度までは試験結果と同様の傾向を示しているが、それ以降は解析での土圧が急激に上昇し、試験結果と乖離する結果となっている。これは、せん断変位量が大きいため解析における計算が不安定になっているものと考えられ、変形メッシュを見ても、緩衝材内部のメッシュが重なり合うように変形しているのが確認された。よって、解析結果におけるせん断変位 40mm 以降のデータは信頼性のあるものではなく、ここでの議論はせん断変位 40mm 程度までにとどめることとする。試験結果の 2 ケースにも差異があるため、解析との比較は簡単ではないが、せん断変位 40mm までの結果では、試験結果と解析結果は比較的良い対応をしていると判断できる。

図 3-8 は、引張領域における結果を比較したものである。図 3-7 と同様に、せん断変位 40mm までの結果について比較すると、初期の土圧の減少は解析においても表現できており、その後土圧が増加

する傾向も対応している。しかし、解析では土圧の上昇後、せん断変位 20mm 付近で再び減少する傾向が見られ、その後は試験結果と乖離する結果となった。これは、(1)においても同様の結果となっており、せん断変位 20mm 以降の挙動に関しては、解析上の課題であると考えられる。

(3) せん断変位速度の影響

以上(1)、(2)よりせん断変位 20mm 程度までの挙動を解析により表現することができた。せん断変位速度の影響に関しては、試験結果からはせん断速度が速い方が土圧の上昇が大きいことが確認された。今回の解析では緩衝材の構成モデルとして弾塑性モデルを用いており、材料の時間依存性は考慮していないが、間隙水の挙動をとらえることで、過剰間隙水圧の消散による有効応力の増加に時間依存性があり、解析結果からもわずかにせん断速度による違いが表現できている。

クリープ挙動等の材料の時間依存性を表現できる構成モデルは、地震時の断層ずれのような短時間の挙動には影響が小さいと考えられるが、緩衝材の構成モデルに弾粘塑性モデルを取り入れることも必要であると考えられる。

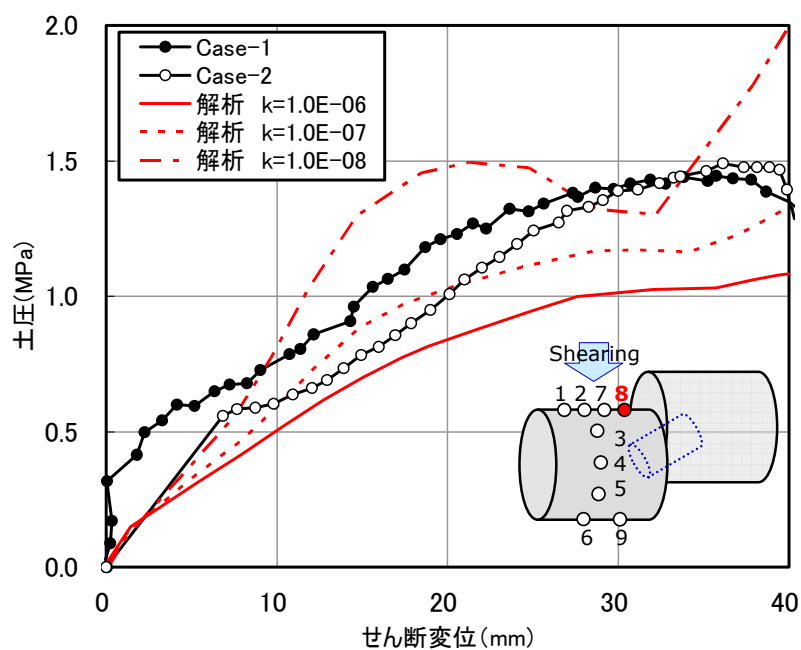


図 3-5 受働領域における土圧とせん断変位の関係(せん断変位速度 100mm/s)

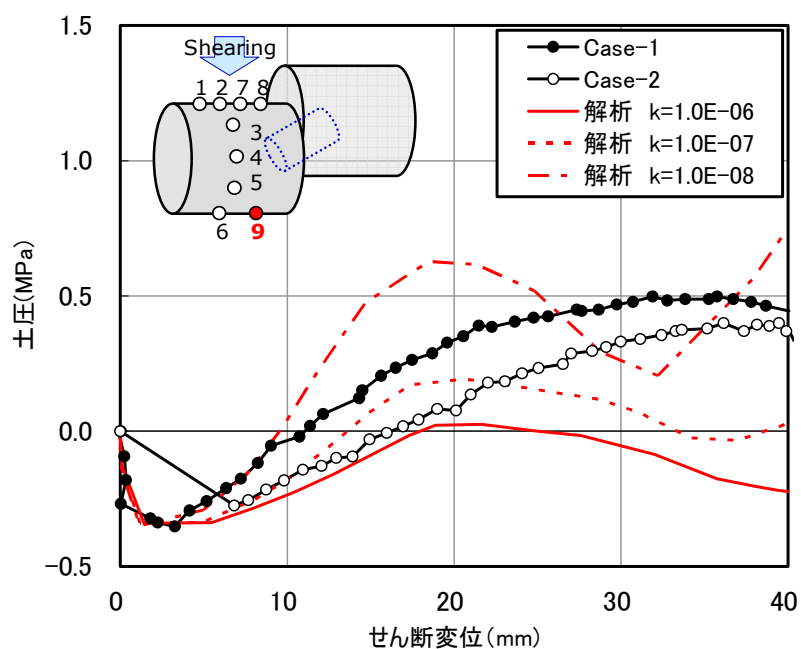


図 3-6 主働領域における土圧とせん断変位の関係(せん断変位速度 100mm/s)

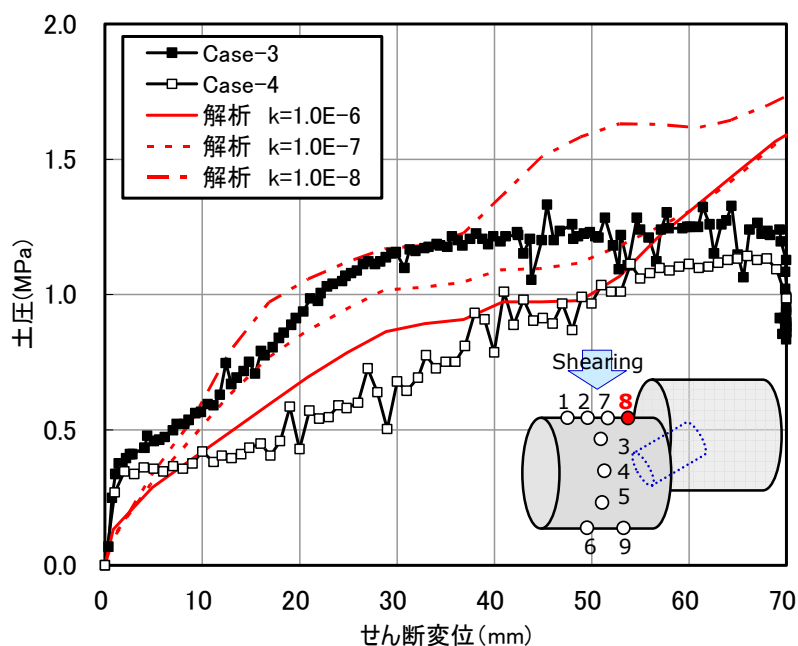


図 3-7 せん断容器の受働側土圧とせん断変位の関係(せん断変位速度 10mm/s)

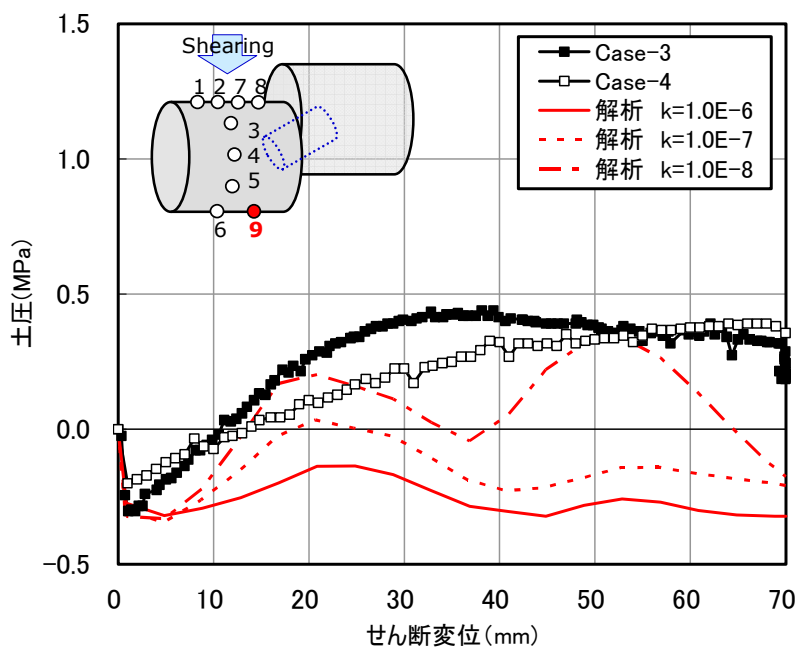


図 3-8 せん断容器主働側土圧とせん断変位の関係(せん断変位速度 10mm/s)

3.2.3 オーバーパックに作用する応力

(1) せん断変位速度 100mm/s

図 3-9、図 3-10 は、圧縮領域 (OP1) 及び引張領域 (OP2) において模擬オーバーパックに作用する土圧とせん断変位の関係について試験結果 (Case-2) と解析結果を比較したものである。模擬オーバーパックへの土圧計の設置は試験 Case-2 より導入したものであるため、Case-1 では計測していない。図 3-9 より、圧縮領域である OP1 においては、試験よりせん断開始直後に土圧の減少が見られ、その後増加している。解析においても初期の土圧減少、その後の増加の傾向が得られており、せん断変位 20mm 程度までは試験とよく対応している。せん断容器に作用する土圧と同様に、透水係数が低いほど土圧は大きく、試験値と比較すると、 $k=1.0E-7$ が最も近い結果となっている。せん断変位 20mm 以降は、解析では土圧の減少が見られ、試験と異なる結果となっている。図 3-10 より、引張領域である OP2 では、試験においてせん断開始から最大せん断変位に至るまで土圧が増加し、2.5MPa 程度まで達している。解析においては、初期の土圧の増加傾向は一致しているが、せん断変位 20mm 付近より土圧の増分が小さくなり、その後減少に転じている。

以上より、せん断変位速度 100mm/s における解析では、せん断変位 20mm 程度までは試験の傾向をよく表現できているが、それ以降の挙動に差異が見られる結果となった。

(2) せん断変位速度 10mm/s

(1)と同様にせん断速度 10mm/s の試験結果と解析結果との比較を行う。図 3-11、図 3-12 に試験結果と解析結果の比較を示す。解析においては、せん断変位 40mm 付近までを信頼性がある結果とし、それ以降の結果については評価から除外する。せん断速度 10mm/s である試験 Case-3、Case-4 の計測結果では、同じ試験条件であるにも関わらず、土圧の大きさに差異が見られる。これには、計測機器の不具合や試験体の状態の違い等さまざまな原因が考えられるが、他の計測結果にはこのような差異がみられないことから、どちらかの試験ケースにおける模擬オーバーパックに設置した土圧計に不具合があった可能性が高いと考えられる。解析結果との比較を見ると、試験 Case-3 の方が解析値と傾向が近いので、他の解析結果においても試験結果とある程度対応がみられることから、Case-3 の試験結果の方が信頼できるものであると考えられる。よって、Case-4 の結果は比較の対象から除外し、Case-3 と解析結果との比較を行う。図より、圧縮領域である OP1 においては、試験においてせん断開始直後にわずかに土圧が減少し、その後最大せん断変位まで緩やかに増加している。解析では、初期の土圧減少が大きく、その後土圧が増加する傾向が見られ、せん断変位 30mm 程度までは試験結果と類似の傾向が見られた。それ以降は他の解析結果と同様に試験結果と異なる傾向を示している。一方、引張領域である OP2 では、試験、解析ともにせん断開始より土圧の増加がみられ、せん断変位 30mm 付近からゆるやかな土圧の減少がみられる。解析では、初期の土圧の増加を示した後、せん断変位 30mm 付近より急激な減少がみられた。土圧の大きさは、いずれの透水係数においても解析値の方が大きな値を示した。

(3) せん断変位速度の影響

模擬オーバーパックに作用する土圧に関して、異なるせん断変位速度の試験結果と解析結果の比較を行った。試験結果、解析結果ともにせん断変位速度が大きい方が作用する土圧も大きくなる傾向を示し、せん断容器に作用する土圧と同じ結果となった。よって、断層ずれによるオーバーパックの健全性を検証するにあたっては、せん断変位速度の大きい場合を想定することで、安全側の評価が可能であることが確認できた。

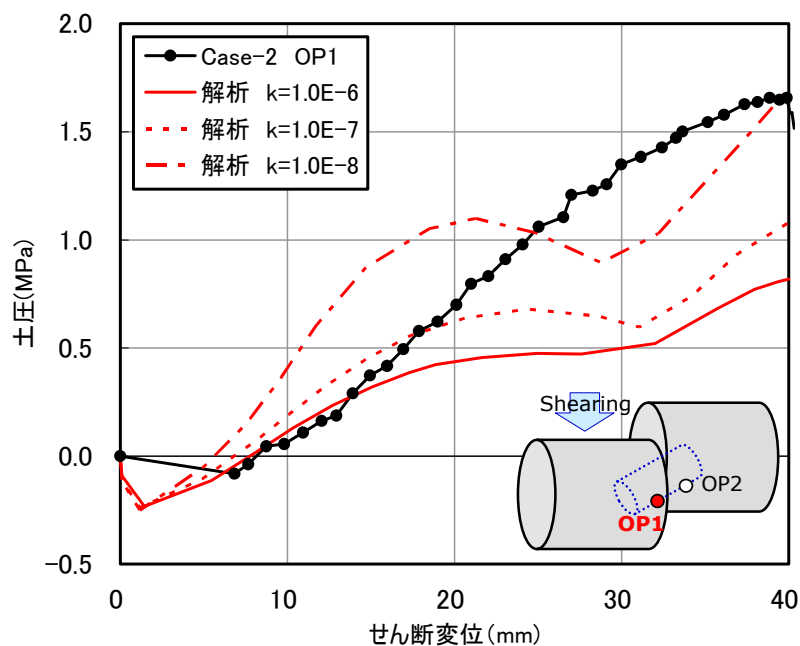


図 3-9 模擬オーバーパック主働側土圧とせん断変位の関係(せん断変位速度 100mm/s)

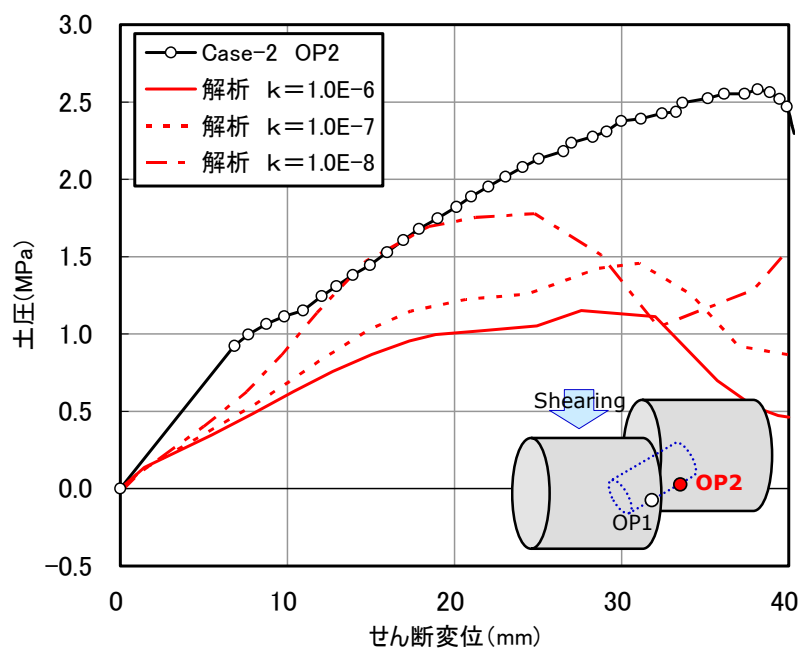


図 3-10 模擬オーバーパック受働側土圧とせん断変位の関係(せん断変位速度 100mm/s)

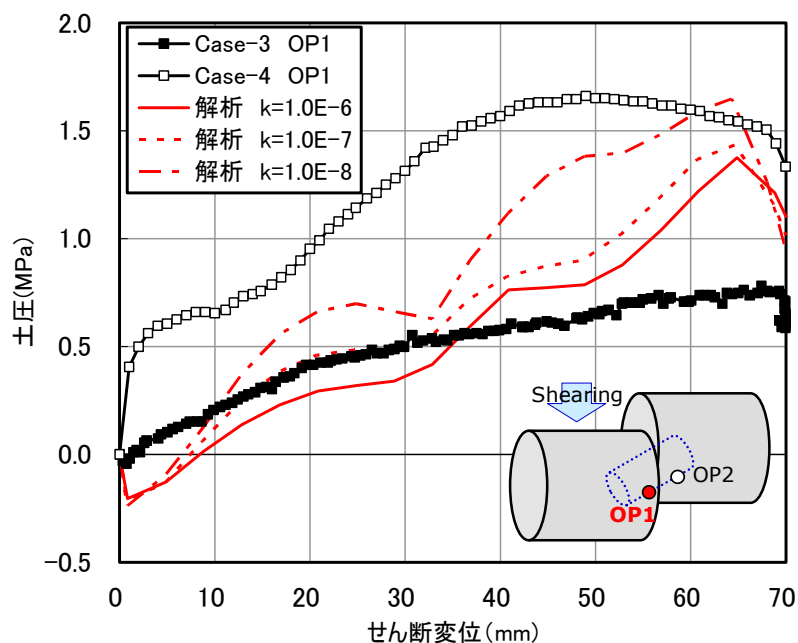


図 3-11 模擬オーバーパック主動側土圧とせん断変位の関係(せん断変位速度 10mm/s)

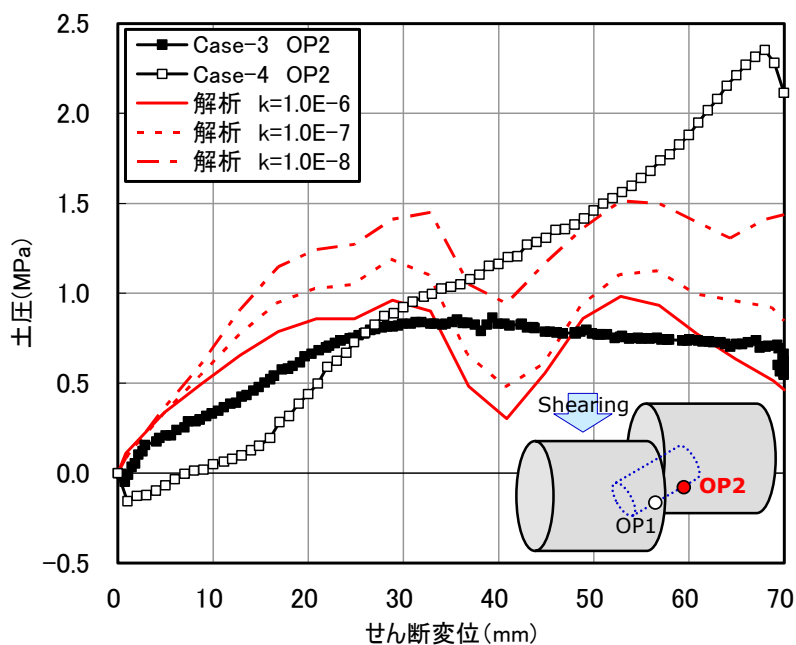


図 3-12 模擬オーバーパック受働側土圧とせん断変位の関係(せん断変位速度 10mm/s)

3.2.4 緩衝材内部の状態

せん断変位速度 100mm/s とした解析ケース (A-1) でのせん断過程における緩衝材内部の状態について検討を行う。

(1) 間隙水圧分布

(b) せん断変位約 20mm

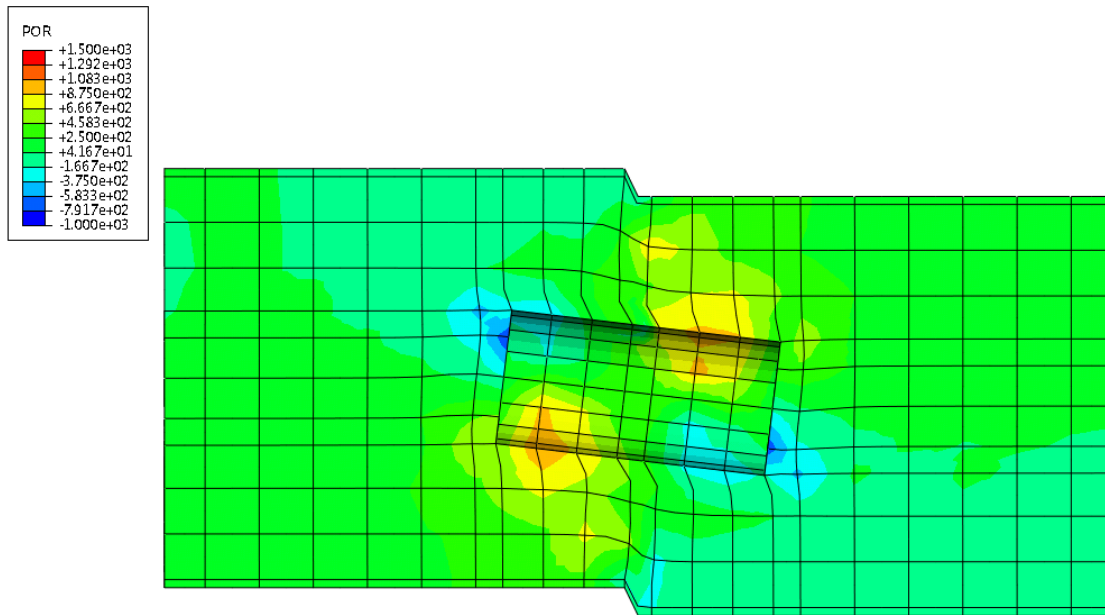
図 3-13 に間隙水圧分布の時間変化を示す。図は、せん断開始よりせん断変位約 10mm ほどの分布を示している。緩衝材内部の間隙水圧は、せん断開始よりオーバーパック周囲より間隙水圧の変化が見られる。圧縮領域にておいては、間隙水圧の上昇がみられ、引張領域と近傍のオーバーパック側面において間隙水圧の減少がみられる。これは、せん断により緩衝材が圧縮および引張を受け、またオーバーパック側面ではオーバーパックの回転により緩衝材との間に隙間ができるような方向に引張りが生じたためであると考えられる。せん断変位 30mm の時点では、せん断帯付近にも間隙水圧の減少が見られるが、これはせん断帯を連続体で表現しているために生じたものであると考えられる。変位 30mm と 40mm を比較すると、圧縮領域における間隙水圧は減少し、引張領域およびオーバーパック側面における負圧の領域は広がっている。これは、オーバーパック側面と比較して受働領域の方が排水境界であるせん断帯に近く、間隙水圧の消散が早いためであると考えられる。

(2) 破壊接近度

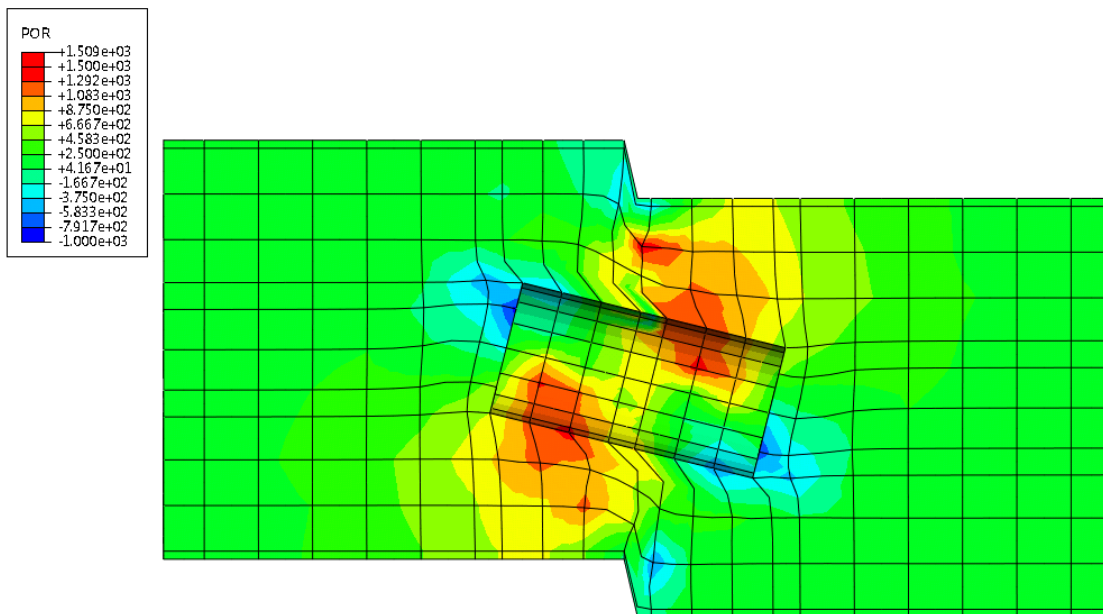
図 3-14 に緩衝材の破壊接近度を示す。修正 Cam-Clay モデルでは応力状態が破壊状態に近づくと、応力比が限界状態パラメータ M に漸近する。図は、応力比の分布図を示しており、本解析においては $M=0.63$ であることから、この値が 0.63 に近いほど緩衝材が限界状態にあることを示している。図 3-14(a) より、緩衝材はせん断変位約 1.5mm の時点でオーバーパック上下面およびせん断面近傍において、限界状態に達しており、わずかなせん断変位で緩衝材が塑性化していることがわかる。その後、せん断変位約 5mm の時点では、オーバーパックの側面を除く周囲全体およびせん断面周囲全体が限界状態に達している。側面では、オーバーパックは緩衝材と離れる方向へ回転するため、応力が集中しないことから、応力比が上昇していないと考えられる。オーバーパック周辺では、オーバーパックの回転により緩衝材がせん断を受け塑性化したものと考えられる。実際には、オーバーパックと緩衝材の間にすべりが生じると考えられるが、解析ではすべりを考慮していないため、緩衝材はオーバーパックに引張られる状態となっている。図 3-14(c) はせん断変位 40mm の時点を示しているが、さらに破壊領域が拡大していることがわかる。

(3) 塑性せん断ひずみ

図 3-15 に緩衝材の塑性せん断ひずみの時間変化を示す。図は塑性せん断ひずみが 0.2 以上の領域を赤色で示しており、この領域はせん断により緩衝材が塑性化し、これ以上の応力を負担することができず塑性変形のみが進行する領域（塑性領域）であると考えられる。図より、図 3-14 の応力比分布と同様に、せん断面およびオーバーパックの上下面よりひずみの進行が見られる。せん断変位が大きくなるにつれ、塑性領域の拡大が見られ、特にオーバーパックの周囲で発生している。せん断変位 40mm の時点では、オーバーパックの側面を除く周囲全体および緩衝材の圧縮領域全体にまで塑性領域の拡大が見られる。

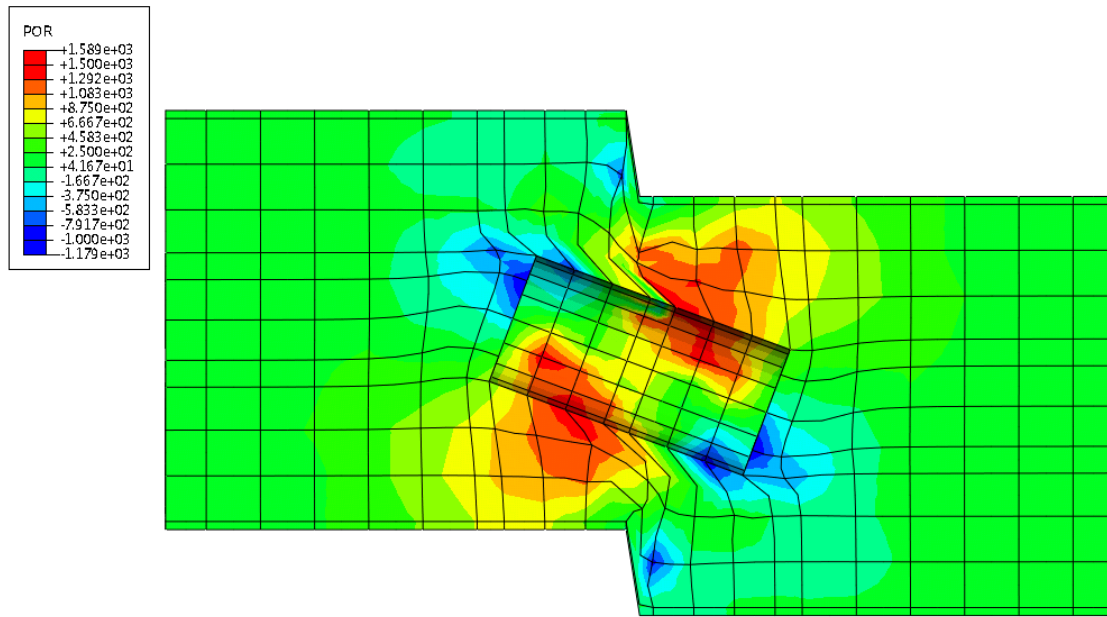


(a)せん断変位約10mm

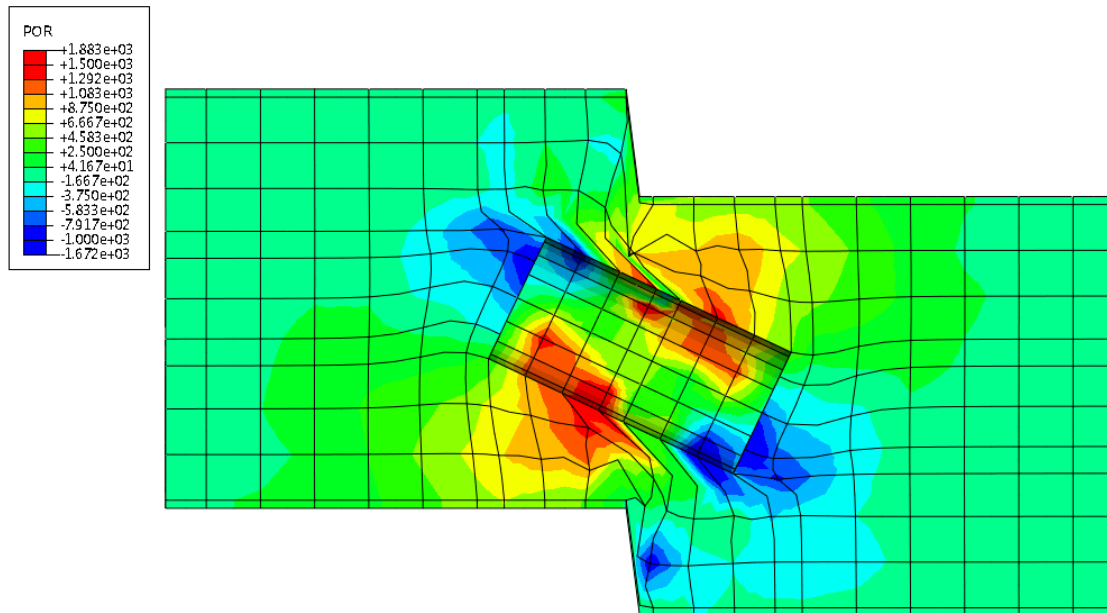


(b)せん断変位約 20mm

図 3-13 緩衝材の間隙水圧分布の時間変化

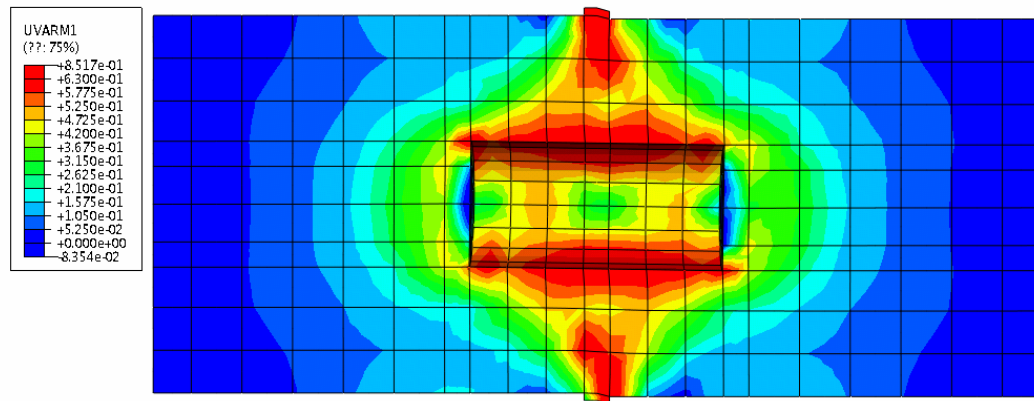


(c)せん断変位約 30mm

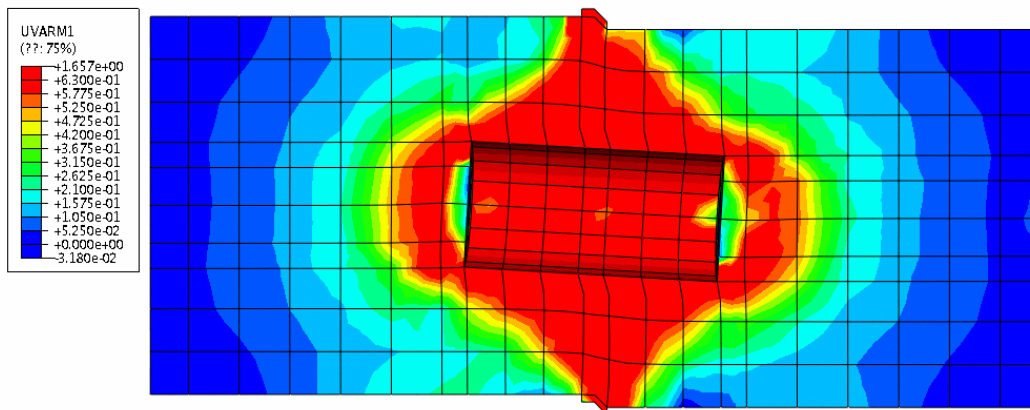


(d)せん断変位 40mm

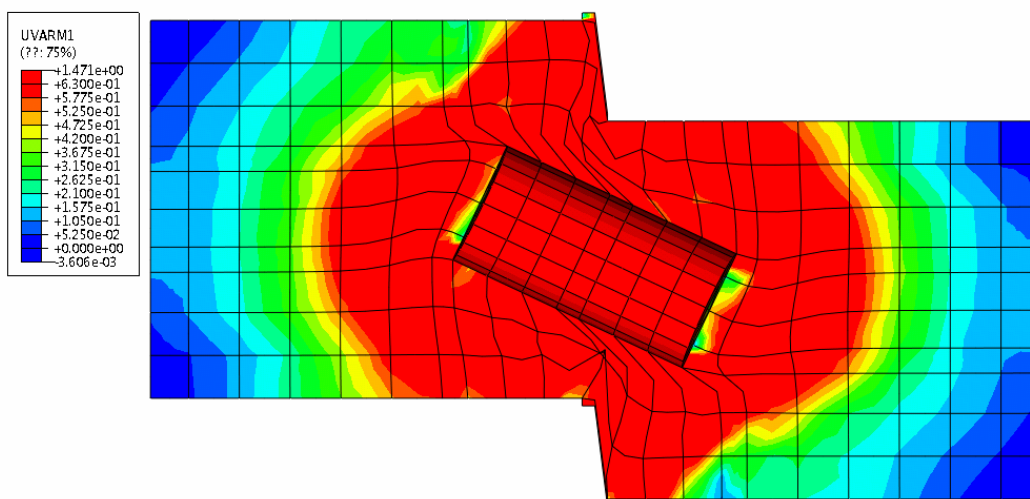
図 3-13 緩衝材の間隙水圧分布の時間変化



(a)せん断変位 約 1.5mm

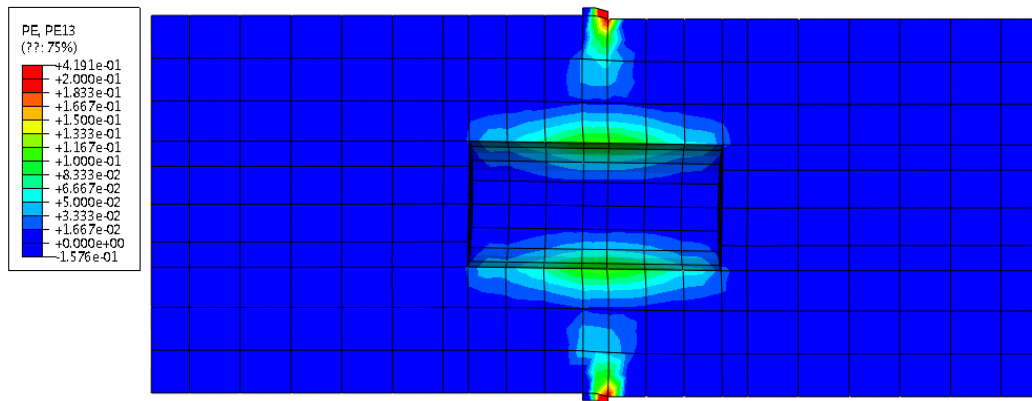


(b)せん断変位 約 5.0mm

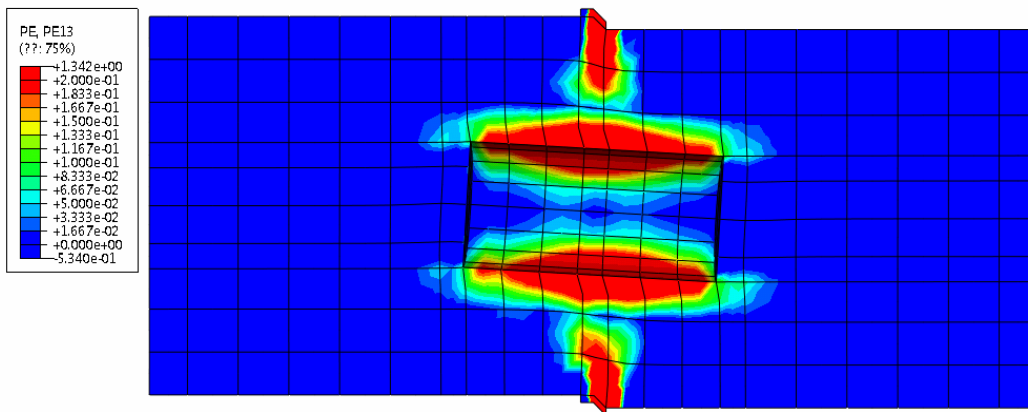


(c)せん断変位 40mm

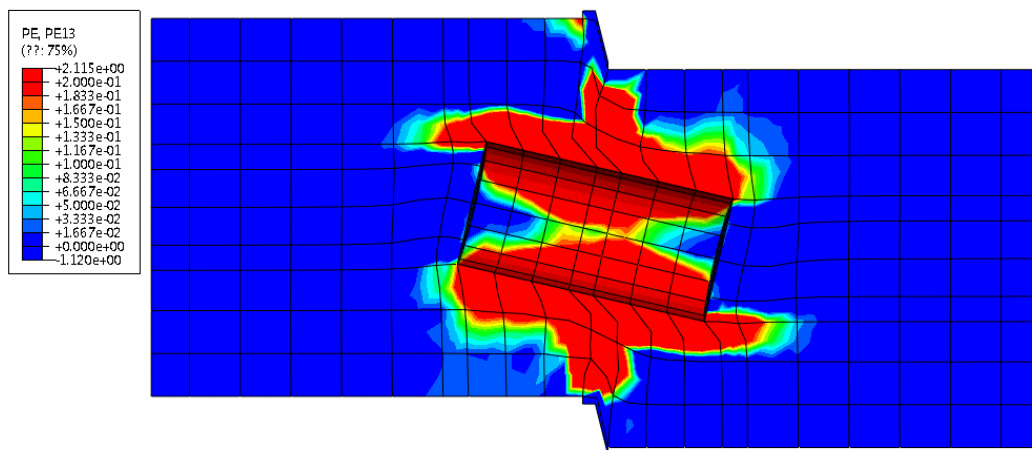
図 3-14 緩衝材内部の応力比の時間変化



(a)せん断変位 約 1.5mm

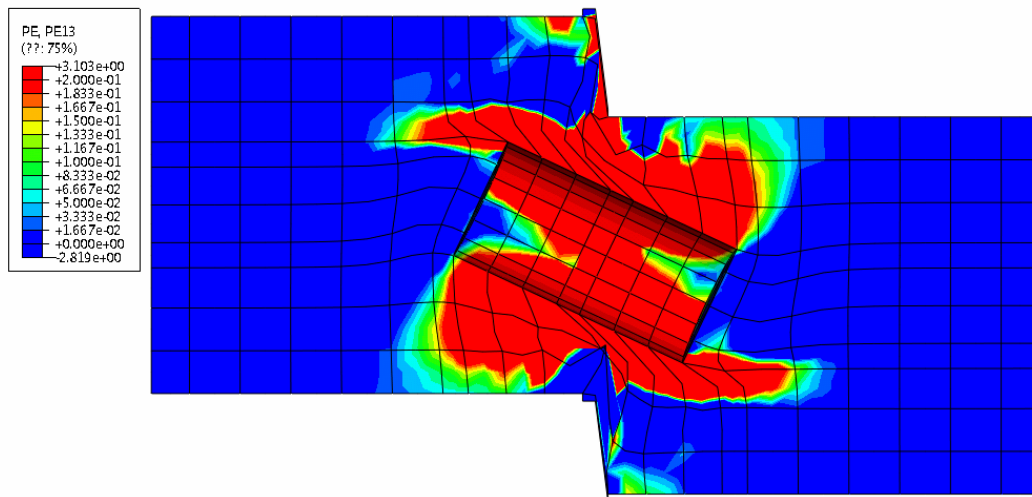


(b)せん断変位 約 5.0mm



(c)せん断変位 約 20mm

図 3-15 塑性せん断ひずみの時間変化



(d)せん断変位 40mm

図 3-15 塑性せん断ひずみの時間変化

3.3 まとめ

3次元 FEM 解析により、1/10 の人工バリアを模擬した模型試験のシミュレーション解析を実施し、試験結果との比較を行った。得られた知見を以下に示す。

- せん断荷重とせん断変位の関係では、試験値がせん断開始直後に急激に上昇し、その後ほぼ一定の値になるのに対し、解析では最大変位までゆるやかに上昇した。その結果、変位が大きくなると試験結果との差異がみられた。せん断荷重のせん断変位速度影響に関しては、試験結果と同様にせん断変位速度の影響は見られなかった。
- 緩衝材内部の応力状態については、せん断変位速度 100mm/s ではせん断変位 20mm 程度まで、せん断変位速度 10mm/s では 40mm 程度までの状態を概略シミュレートすることができた。それ以降の変位に関しては、緩衝材が限界状態を超え、計算が不安定となり信頼性のあるデータを得ることはできなかった。
- 修正 Cam-Clay モデルを用いて間隙水圧の挙動を考慮することにより、せん断容器に作用する土圧の挙動に関して、せん断変位速度の影響を評価することができた。その結果、試験結果と同様の傾向が得られた。
- オーバーパックの変形に対する安全評価に関して、せん断変位速度が大きい方がオーバーパックに作用する土圧が大きいことを確認し、今回の試験条件においては、オーバーパックが過度に変形する可能性のある応力よりも十分に小さい土圧増分であることが確認できた。
- 緩衝材周辺要素（実際には周辺岩盤）の透水係数により、過剰間隙水圧の消散挙動への影響により、緩衝材内部に作用する土圧が変化することを確認した。よって、解析においては周辺の岩盤の透水係数を適切に評価することが重要である。
- 解析により、緩衝材内部の状態について検証した結果せん断開始後わずかな変位で緩衝材が限界状態に達していることがわかった。

4. おわりに

断層ずれにより人工バリア周囲の岩盤に変位が生じた場合の力学的挙動について、1/10 スケール模型試験を実施し、せん断変位速度の影響について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) せん断過程におけるせん断荷重とせん断変位の関係においては、せん断変位速度の影響は見られず、全ての試験ケースにおいてせん断開始直後に 7kN 程度の最大値を示し、その後ほぼ一定の値を示した。
- (2) せん断過程におけるせん断容器土圧計とせん断変位の関係においては、圧縮領域ではせん断開始より土圧が増加する傾向を示し、引張領域においてはせん断開始直後より土圧の減少が見られ、その後増加する傾向となり、全ての試験ケースにおいて同様の傾向を示した。
- (3) せん断過程におけるせん断容器土圧増分の最大値は、せん断変位速度 100mm/s では約 1.5MPa、せん断変位速度 10mm/s では 1.2MPa となり、せん断変位速度が 1/10 となることで土圧増分が 20% 程度減少する結果となった。また、ともにせん断変位 30mm 程度で最大値を示し、その後はほぼ一定の値を示しており、せん断変位量の影響は少ないものと考えられる。
- (4) せん断過程終了後にオーバーパックの回転角度および損傷の有無を確認した結果、オーバーパックの回転角は理論値とほぼ等しく緩衝材に抵抗されることなく回転していると考えられる。また、せん断による土圧の増分に対しても、オーバーパックが過度に変形する可能性は極めて低く、緩衝材の応力緩衝効果が確認された。

次に、模型試験のシミュレーション解析を実施した。解析では緩衝材の弾塑性挙動および間隙水圧の影響を考慮するため、構成モデルに修正 Cam-Clay モデルを用いた。得られた知見を以下に示す。

- (1) せん断過程におけるせん断荷重とせん断変位の関係において、試験結果と同様にせん断開始直後にせん断荷重の急激な増加が見られたが、解析ではその後もゆるやかに増加する傾向となり、最大せん断変位におけるせん断荷重は試験値より大きな荷重を示した。
- (2) せん断過程におけるせん断容器に作用する土圧とせん断変位の関係では、解析により最大せん断変位の 1/2 程度までの挙動を評価することができたが、その後の挙動に関しては試験結果と差異が見られた。また、土圧の評価には緩衝材周辺要素の透水係数が影響することを確認し、解析におけるパラメータ設定の重要性を確認した。
- (3) 間隙水圧の挙動を考慮することにより、せん断変位速度の影響について解析で評価することができた。その結果、せん断変位速度の影響は間隙水圧挙動に起因していることが確認できた。

以上の検討の結果、今回の試験条件であるせん断変位速度 10~100mm/s、せん断変位 40~70mm（緩衝材厚さの 80~140%）の断層ずれに対してオーバーパックは力学的に安定であるといえる。また、せん断速度が大きいほど、緩衝材およびオーバーパックに作用する応力の増分は大きくなることが明らかとなった。しかし、シミュレーション解析ではせん断変位が大きくなると試験結果と差異が生じる結果となった。今後は、緩衝材の粘性を考慮した構成モデルの採用により信頼性の向上を図る必要がある。また、せん断変位速度、せん断変位がさらに大きい場合についても解析的に検討が必要である。

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— 総論レポート”, JNC TN1400 99-020 (1999)
- 2) 原子力安全委員会: “放射性廃棄物の安全規制における共通的な重要事項について”, 平成16年6月10日. (2004)
- 3) 池田俊雄, 岡田勝也, 池田研一, 長谷川達也: 活断層調査から耐震設計まで, 鹿島出版会, pp.56-57 (2000)
- 4) 松田時彦: “活断層から発生する地震の規模と周期について”, 地震, 第2輯, 28, pp.269-283 (1975)
- 5) 平井卓, 棚井憲治, 菊池広人, 鈴木英明, 高治一彦, 大沼敏: “断層ずれに伴う人工バリアの力学的挙動評価”, JNC TN8400 2003-009 (2003)
- 6) 核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築, 平成17年取りまとめ, 分冊2, 工学技術の開発”, JNC TN1400 2005-025 (2005)
- 7) SKB TR86-26 Lennart Börjesson, “Model shear tests of canisters with smectite clay envelopes in deposition holes”, SKB Technical Report TR-86-26 (1986)
- 8) SKB TR04-02 Lennart Börjesson, Lars-Erik Johansson, Jan Hemelind: “Earthquake induced rock shear through a deposition hole”, SKB Technical Report TR-04-02 (2004)
- 9) 資源エネルギー庁・(独) 日本原子力研究開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画”, 2006年12月 (2006)
- 10) 動力炉・核燃料開発事業団: “高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成3年度—”, PNC TN1410 92-081 (1992)
- 11) 鈴木英明, 藤田朝雄: “緩衝材の膨潤特性”, JNC TN8400 99-038 (1999)
- 12) 独立行政法人 日本原子力研究開発機構: 緩衝材基本特性データベース (2006), <http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>
- 13) 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 地層処分の工学技術”, JNC TN1400 99-020 (1999)
- 14) Mayuka Nishimura, Takashi Hirai, Kenji Tanai, and Mikazu Yui: “A Study of Mechanical Effect of Simulated Fault Movement on Engineered Barrier System”, Mat.Res.Soc.Symp.Proc.932, pp227-234 (2006)
- 15) Roscoe, K. H. and Burland, J. B. “On the Generalized Stress-Strain behavior of 'Wet' Clay, Engineering Plasticity”, Cambridge University Press, pp.535-609. (1968)
- 16) Schofield, A. N. and Wroth, C. P.: Critical state soil mechanics, McGraw-Hill, London (1968)

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光の度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度（質量密度）	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積（比体積）	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
（物質量の）濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	（数の）1	1

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率，放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	℃		K
光の度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときいくつかの用例は表 4 に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号 rad 及び sr が用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号 sr を単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度 m℃ のように SI 接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
流密度，放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量，エン트로ピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg・s ⁻³
質量熱容量（比熱容量），質量エン트로ピー	ジュール毎平方メートル	J/K	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー（比エネルギー）	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m・kg・s ⁻³ ・K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
体積電荷	ボルト毎メートル	V/m	m・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m・kg・s ⁻² ・A ⁻²
モルエン트로ピー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg・s ⁻² ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s・A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =m ² ・kg・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =kg・s ⁻³

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1° =(π/180) rad
分	′	1′ =(1/60)° =(π/10800) rad
秒	″	1″ =(1/60)′ =(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で SI 単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1. 60217733 (49) ×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1. 6605402 (10) ×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1. 49597870691 (30) ×10 ¹¹ m

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852 m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0. 1 MPa=100 kPa=1000 hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0. 1 nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1 b=100 fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0. 1 Pa・s
ストークス	St	1 St =1 cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≐10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≐ (1000/4 π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≐10 ⁻⁸ Wb
スチルプ	sb	1 sb =1 cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1 cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表 10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3. 7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2. 58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1 X unit=1. 002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

