

## 地層処分施設における多連設坑道の 設計手法に関する検討 (IV)

Studies on the Design Method of Multi Tunnels in Geological Disposal Facility (IV)

林 克彦 岸 裕和 小林 保之 武部 篤治  
藤山 哲雄 平本 正行 水谷 和彦 森田 篤

Katsuhiko HAYASHI, Hirokazu KISHI, Yasushi KOBAYASHI, Atsuji TAKEBE  
Tetsuo FUJIYAMA, Masayuki HIRAMOTO, Kazuhiko MIZUTANI and Atsushi MORITA

地層処分研究開発部門  
地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人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>)  
より発信されています。

独立行政法人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  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

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, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

地層処分施設における多連設坑道の設計手法に関する検討 (IV)

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

林 克彦\*, 岸 裕和, 小林 保之\*1,

武部 篤治\*2, 藤山 哲雄\*2, 平本 正行\*2, 水谷 和彦\*2, 森田 篤\*2

(2010年 12月 15日 受理)

地層処分施設における多連設坑道の設計手法については, 第2次取りまとめの考え方にに基づき, さらに詳細化・合理化を図ることを目的に「掘削影響領域: EDZ(Excavation Disturbed Zone)の発生挙動に関する検討」, 「ピラーの安定性評価に関する検討」, 「多連設坑道モデルでの適切な解析領域の設定」, 「簡略化モデルにおけるピラー全幅が塑性化した場合の FEM 弾塑性解析の留意点」, 「支保工及び補助工法による塑性領域抑制効果」, 「数値解析に用いる構成則の影響に関する解析的検討」, 「3次元モデルによる応力解放率に関する解析的検討」をこれまでに実施した。その結果, 以下のことがわかった。多連設坑道モデルでは, 隣接する坑道の逐次掘削に伴って EDZ が変化し, 掘削された坑道群全体(パネル規模)で安定状態となるのに対して, 簡略化モデルでは, このような挙動は表現できない。このため, 簡略化モデルでは, 全ての坑道において画一化された支保設計となるが, 多連設坑道モデルでは各坑道に対して個別の設計が可能となり, より詳細で合理的な設計が可能となる。坑道間の岩盤であるピラーの安定性については, 多連設坑道モデルによる数値解析を実施すれば, ピラー強度およびピラーに作用する荷重の双方ともに適切に評価できる。FEM 弾塑性解析における多連設坑道モデルの解析領域は, 側方領域  $3W \sim 5W$  ( $W$  は坑道群幅), 底面領域は  $3W \sim 4W$  程度が適切である。ピラーで塑性領域が干渉し合うような場合には, 簡易モデルでの FEM 解析ではピラーに作用する荷重を適切に評価できず, ピラー全域が塑性化するようなことが無いように坑道間隔を十分に取る必要がある。多連設坑道モデルにおける支保工効果は, 支保工の設置時期, 剛性により塑性領域抑制効果が異なり, ピラーの力学特性改良を目的とした補助工法は, 塑性領域の抑制効果が大きい。多連設坑道の詳細設計時には, 対象岩盤がひずみ軟化挙動を示すかどうかを確認し, 解析に用いる構成則を適切に選定することが重要である。また, 2次元解析時においては, 坑道ごとに異なる応力解放率を設定する必要はなく, 全ての坑道に対して同値の応力解放率を設定してよい。

本検討では, さらに詳細化・実用化を図ることを目的として, 坑道の掘削順序の影響に関する解析的検討, および昨年度の追加として幌延の岩石試験で得られたひずみ軟化データを反映した解析検討を実施した。掘削順序の影響に関する解析的検討では, 2次元モデルによる検討の範囲であるが, ある程度離隔を持った坑道掘削を先行して行い, 後ほど坑道間の坑道掘削を行う方法が望ましいこと, ただし使用する掘削機械や実施工レイアウトなどを参考に, より現実的かつ詳細な検討が必要であることを示した。またひずみ軟化データを反映した解析検討では, 幌延の岩石試験で得られた実測データを参考にしたモデルを適用することで, より信頼性の高い EDZ を示すことができた。さらに, 既往の多連設坑道の設計手法に関する検討から, 設計実務への適用を指向した設計手法の体系化(案)を作成した。

---

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, \*1 東京電力株式会社, \*2 前田建設工業株式会社

Studies on the Design Method of Multi Tunnels in Geological Disposal Facility (IV)

Katsuhiko HAYASHI<sup>※</sup>, Hirokazu KISHI, Yasushi KOBAYASHI<sup>\*1</sup>,  
Atsuji TAKEBE<sup>\*2</sup>, Tetsuo FUJIYAMA<sup>\*2</sup>, Masayuki HIRAMOTO<sup>\*2</sup>,  
Kazuhiko MIZUTANI<sup>\*2</sup> and Atsushi MORITA<sup>\*2</sup>

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

(Received December 15, 2010)

In order to refine and rationalize a design method of multi tunnels in the deep geological repository, “Study on the spatially-spread behavior of EDZ(Excavation Disturbed Zone)”, “Study on the stability evaluation of the pillars”, “Study on configuration of analytical domain of the multi tunnels model”, “Remainders on an elasto-plastic FEM (Finite Element Method) analysis for the simplified model with the full width plastic deformation of pillar”, and “The suppression effect of the plasticity domain by the ground support and the auxiliary construction method” have been conducted, based on the H12 report. As the results, in case of the multi tunnels model, EDZ properties were changed by the excavation sequence of tunnels, and the whole tunnels (in panel scale) are more stabilized, however the simplified model are not possible to represent these behaviors. Each tunnel has the same design results by using the simplified model, however it is possible to design an individual tunnel by using the multi tunnels model for the detailed and rational design. The stability of the pillars on the disposal tunnels was studied by considering “Pillar strength” and “Pillar load”. As the results, the pillar strength and pillar load can be evaluated by numerical analysis with the multi tunnels model. The proper analytical domain of multi tunnels should be assigned 3-5W (W: width of multi tunnels) for a horizontal side from the endmost tunnel and 3-4W for below of the tunnels by an elasto-plastic FEM (Finite Element Method) analysis. In case of interference of plastic deformation domains on the pillar, FEM analysis with simplified model does not have good simulation accuracy of the pillar load. It is absolutely needed that the space between tunnels is wider than the maximum width for the full width plastic deformation of pillar. Regarding the suppression effect of the plasticity domain by the ground support and the auxiliary construction method, we confirmed that the ground support effect has different suppression effect of the plasticity domain depends on the installation time and rigidity, and the auxiliary construction method for the purpose of improvement in mechanical properties of pillar has good the suppression effect of the plasticity domain. For the detailed design of multi tunnel excavation, there are three issues as follows. It is necessary to confirm mechanical behavior of in situ rock. It is important to choose suitable constitutive models. It is possible for all tunnels in multi tunnels model to have same stress relief ratio.

---

※ Collaborating Engineer

\*1 The Tokyo Electric Power Company, Incorporated

\*2 Maeda Corporation

In this study, we did several investigations for the detailed design and practical use. The first investigation is the order of the multi-tunnels excavation. The second is the strain-softening model for multi-tunnels which is based on test data at Horonobe site. As results of first investigation, we showed as 2 dimensional analyses that it was desirable to excavate the tunnel of the remote distance at first and excavate the tunnel between these tunnels next, and it is necessary for the examination that reflected a real plan, such as evacuation machine and actual multi tunnel layout. As the results of second investigation, we also showed the more reliable EDZ by using the strain-softening model that is based on test data at Horonobe site. Furthermore, we standardized the design method (Draft) for the practical use by referring the past studies of multi tunnel design method.

Keywords : Multi-tunnels, EDZ, Strain-softening Model

This is a blank page.

目 次

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 1. はじめに.....                        | 1  |
| 2. 坑道の掘削順序の影響に関する解析的検討.....         | 2  |
| 2. 1 はじめに.....                      | 2  |
| 2. 2 解析条件.....                      | 3  |
| 2. 3 解析結果.....                      | 8  |
| 2. 4 まとめ.....                       | 13 |
| 3. 軟化域を考慮したひずみ軟化モデルによる解析的検討.....    | 18 |
| 3. 1 はじめに.....                      | 18 |
| 3. 2 軟化域を考慮したひずみ軟化モデルのモデル化.....     | 19 |
| 3. 3 解析条件.....                      | 42 |
| 3. 4 解析結果.....                      | 43 |
| 3. 5 まとめ.....                       | 47 |
| 3. 6 幌延深地層研究施設の岩盤物性を考慮した試解析.....    | 49 |
| 4. 設計実務への適用を考慮した多連設坑道設計手法の体系化案..... | 52 |
| 4. 1 処分施設を構成する坑道群の設計フロー.....        | 52 |
| 4. 2 これまでの検討内容.....                 | 54 |
| 4. 3 多連設坑道設計手法の体系化案の作成.....         | 56 |
| 4. 4 まとめ.....                       | 58 |
| 5. おわりに.....                        | 59 |
| 参考文献.....                           | 60 |
| 付録.....                             | 61 |

CONTENTS

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduction.....                                                                      | 1  |
| 2. Analytical study on the effect of the tunnel excavating order.....                     | 2  |
| 2.1 Introduction.....                                                                     | 2  |
| 2.2 Analysis conditions .....                                                             | 3  |
| 2.3 Analysis results.....                                                                 | 8  |
| 2.4 Conclusion .....                                                                      | 13 |
| 3. Analytical study on the Strain-softening model that considered a softening domain...18 |    |
| 3.1 Introduction.....                                                                     | 18 |
| 3.2 Modeling of the Strain-softening model that considered a softening domain .....       | 19 |
| 3.3 Examination conditions .....                                                          | 42 |
| 3.4 Analysis results.....                                                                 | 43 |
| 3.5 Conclusion .....                                                                      | 47 |
| 3.6 Experimental analysis by the Strain-softening model at the Horonobe rock.....         | 49 |
| 4. Systematization plan on the design method of multi tunnels for design business .....   | 52 |
| 4.1 Design flow of the multi tunnels in geological disposal facility .....                | 52 |
| 4.2 Conventional examination contents.....                                                | 54 |
| 4.3 Systematization plan on the design method of multi tunnels .....                      | 56 |
| 4.4 Conclusion .....                                                                      | 58 |
| 5. Concluding remarks .....                                                               | 59 |
| Reference .....                                                                           | 60 |
| Appendix.....                                                                             | 61 |



表目次

|        |                                              |    |
|--------|----------------------------------------------|----|
| 表 2-1  | 坑道仕様                                         | 3  |
| 表 2-2  | 境界条件                                         | 5  |
| 表 2-3  | 岩盤物性値                                        | 6  |
| 表 2-4  | 解析ケース                                        | 6  |
| 表 3-1  | 実測データからピックアップした軸差応力と軸ひずみのデータ (HDB-1 孔 CD 試験) | 26 |
| 表 3-2  | 実測データからピックアップした軸差応力と軸ひずみのデータ (HDB-2 孔 CD 試験) | 27 |
| 表 3-3  | 実測データからピックアップした軸差応力と軸ひずみのデータ (HDB-3 孔 CD 試験) | 27 |
| 表 3-4  | 実測データからピックアップした軸差応力と軸ひずみのデータ (HDB-3 孔 CU 試験) | 28 |
| 表 3-5  | 算出した強度定数 $c'$ , $\phi'$ の結果の一覧               | 36 |
| 表 3-6  | ひずみ軟化領域における強度と軸ひずみの算出値の一覧                    | 37 |
| 表 3-7  | 岩盤物性値                                        | 42 |
| 表 3-8  | 解析ケース                                        | 42 |
| 表 3-9  | 幌延深地層研究施設で得られた岩盤物性値の一覧                       | 49 |
| 表 3-10 | 設定した岩盤物性値                                    | 49 |

図目次

|        |                                          |    |
|--------|------------------------------------------|----|
| 図 2-1  | 地層処分施設のレイアウト例（軟岩系岩盤， 縦置き方式）              | 2  |
| 図 2-2  | 処分坑道の仕様（軟岩系岩盤）                           | 3  |
| 図 2-3  | 処分孔縦置き方式の仕様（軟岩系岩盤）                       | 3  |
| 図 2-4  | 多連設坑道モデル                                 | 4  |
| 図 2-5  | 安全率 $F_s$ の定義                            | 5  |
| 図 2-6  | 4 パターンの掘削順序の概要                           | 7  |
| 図 2-7  | 塑性領域分布図（Case-C1）                         | 8  |
| 図 2-8  | 塑性領域分布図（Case-C2）                         | 9  |
| 図 2-9  | 塑性領域分布図（Case-C3）                         | 9  |
| 図 2-10 | 塑性領域分布図（Case-C4）                         | 9  |
| 図 2-11 | 塑性領域分布図（Case-D1）                         | 10 |
| 図 2-12 | 塑性領域分布図（Case-D2）                         | 10 |
| 図 2-13 | 塑性領域分布図（Case-D3）                         | 11 |
| 図 2-14 | 塑性領域分布図（Case-D4）                         | 11 |
| 図 2-15 | 塑性領域分布図（Case-E1）                         | 11 |
| 図 2-16 | 塑性領域分布図（Case-E2）                         | 12 |
| 図 2-17 | 塑性領域分布図（Case-E3）                         | 12 |
| 図 2-18 | 塑性領域分布図（Case-E4）                         | 12 |
| 図 2-19 | 最終ステップの塑性領域分布の拡大図（Case-C1～C4 の坑道 6,7,8）  | 13 |
| 図 2-20 | 最終ステップの塑性領域分布の拡大図（Case-D1～D4 の坑道 6,7,8）  | 14 |
| 図 2-21 | 最終ステップの塑性領域分布の拡大図（Case-E1, E2 の坑道 6,7,8） | 15 |
| 図 2-22 | 坑道掘削により生じるせん断方向の概念図                      | 15 |
| 図 2-23 | Case-E1, Case-E2 のある対象要素における応力経路の比較      | 16 |
| 図 2-24 | 最終ステップの塑性領域分布の拡大図（Case-E3 の坑道 6,7,8）     | 16 |
| 図 2-25 | 最終ステップの塑性領域分布の拡大図（Case-E4 の坑道 6,7,8）     | 17 |
| 図 3-1  | 主な応力-ひずみ関係                               | 18 |
| 図 3-2  | ひずみ軟化モデルのモデル化領域                          | 18 |
| 図 3-3  | HDB-1 孔の硬質頁岩に相当する三軸試験データ                 | 20 |
| 図 3-4  | HDB-2 孔の硬質頁岩に相当する三軸試験データ (1/2)           | 21 |
| 図 3-4  | HDB-2 孔の硬質頁岩に相当する三軸試験データ (2/2)           | 22 |
| 図 3-5  | HDB-3 孔の硬質頁岩に相当する三軸試験データ                 | 23 |
| 図 3-6  | HDB-6 孔の硬質頁岩に相当する三軸試験データ                 | 24 |
| 図 3-7  | HDB-11 孔の硬質頁岩に相当する三軸試験データ                | 25 |
| 図 3-8  | 三軸試験データの応力～ひずみ関係の概要と変化のポイント              | 26 |
| 図 3-9  | 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係（HDB-1 孔， 500m， CD 試験） | 29 |
| 図 3-10 | 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係（HDB-1 孔， 600m， CD 試験） | 30 |
| 図 3-11 | 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係（HDB-1 孔， 700m， CD 試験） | 30 |
| 図 3-12 | 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係（HDB-2 孔， 300m， CD 試験） | 31 |
| 図 3-13 | 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係（HDB-2 孔， 400m， CD 試験） | 31 |
| 図 3-14 | 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係（HDB-2 孔， 500m， CD 試験） | 32 |
| 図 3-15 | 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係（HDB-2 孔， 600m， CD 試験） | 32 |
| 図 3-16 | 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係（HDB-2 孔， 700m， CD 試験） | 33 |
| 図 3-17 | 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係（HDB-3 孔， 500m， CD 試験） | 34 |
| 図 3-18 | 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係（HDB-3 孔， 500m， CU 試験） | 34 |
| 図 3-19 | 偏差応力 $q_f$ と平均有効応力 $p_f$ の関係             | 35 |
| 図 3-20 | Mohr-Coulomb の破壊基準の概要                    | 35 |
| 図 3-21 | ピーク強度後のひずみ軟化挙動（HDB-1 孔）                  | 38 |
| 図 3-22 | ピーク強度後のひずみ軟化挙動（HDB-2 孔）                  | 38 |

|        |                                       |    |
|--------|---------------------------------------|----|
| 図 3-23 | ピーク強度後のひずみ軟化挙動 (HDB-3 孔) .....        | 39 |
| 図 3-24 | 全試験データを参考に設定した強度低下の傾きパターン .....       | 40 |
| 図 3-25 | 全試験データを参考に設定した変曲点強度のパターン .....        | 41 |
| 図 3-26 | 全試験データを参考に設定したひずみ軟化領域のモデル化パターン .....  | 41 |
| 図 3-27 | 塑性領域分布図 (CaseA-1.5) .....             | 44 |
| 図 3-28 | 塑性領域分布図 (CaseA-1.0) .....             | 44 |
| 図 3-29 | 塑性領域分布図 (CaseA-0.5) .....             | 44 |
| 図 3-30 | 塑性領域分布図 (CaseB-1.5) .....             | 45 |
| 図 3-31 | 塑性領域分布図 (CaseB-1.0) .....             | 45 |
| 図 3-32 | 塑性領域分布図 (CaseB-0.5) .....             | 45 |
| 図 3-33 | 塑性領域分布図 (CaseC-1.5) .....             | 46 |
| 図 3-34 | 塑性領域分布図 (CaseC-1.0) .....             | 46 |
| 図 3-35 | 塑性領域分布図 (CaseC-0.5) .....             | 46 |
| 図 3-36 | 掘削終了時の坑道 7 近辺の塑性領域分布図 (全ケース) .....    | 47 |
| 図 3-37 | 「CaseB-1.0」を参考にモデル化したひずみ軟化モデル .....   | 50 |
| 図 3-38 | 坑道 1~13 の塑性領域分布図 (幌延の岩盤物性値を参考) .....  | 51 |
| 図 3-39 | 坑道 6~8 の塑性領域分布拡大図 (幌延の岩盤物性値を参考) ..... | 51 |
| 図 3-40 | 処分坑道の設計における検討フロー .....                | 53 |
| 図 3-41 | 多連設坑道を対象とした設計の検討フロー (案) .....         | 57 |

This is a blank page.

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物（以下、HLW）の地層処分施設では、地下 300m 以深に多くの坑道群を並列に配置することが想定されている。これは、土木構造物では過去に例のない地層処分施設特有のレイアウトであり、建設・操業時の安全性確保には特に留意しておく必要がある。「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—」<sup>1)</sup>（以下、第 2 次取りまとめ）では、従来の双設トンネルの設計例にならい、境界条件の対象性を考慮した単一坑道モデルにより、坑道間岩盤の破壊領域が干渉しない離間距離を確保する考え方（局所破壊基準に基づく設計）を基本とし、坑道から数 m 程度の範囲を対象とした解析モデルによる検討が実施され、処分パネル規模での検討は実施されていない。言い換えると、坑道付近の岩盤の応力状態に着目した力学的安定性は確認されているものの坑道群全体としての広範囲における応力状態や掘削影響領域（Excavation Disturbed Zone, 以下、EDZ とする）については十分に把握されていない。また、このモデルによる検討では、処分パネルを構成する坑道の支保仕様が画一的となり、支保設計の合理化や更なる高度化を図ることが困難となっている。

本検討は、昨年度に引続き平成 19 年度の検討<sup>2)</sup>を通じて新たに発生した課題に対して取り組むものである。昨年度までに、多連設坑道モデルにおける解析領域検討、塑性領域が広範囲に発生する場合の留意点、支保工および補助工法による塑性領域の抑制効果について、数値解析に用いる構成則の影響に関する解析的検討、3 次元モデルによる応力解放率に関する解析的検討を実施し、以下に示す知見を得ている。<sup>3),4)</sup>

- FEM 弾塑性解析における多連設坑道モデルの解析領域は、側方領域  $3W \sim 5W$  ( $W$  は坑道群幅)、底面領域は  $3W \sim 4W$  程度が適切である。
- ピラーで塑性領域が干渉し合うような場合には、簡易モデルでの FEM 解析ではピラーに作用する荷重を適切に評価できない。
- 支保工効果は、支保工の設置時期、剛性により塑性領域抑制効果が異なり、ピラーの力学特性改良を目的とした補助工法は、塑性領域の抑制効果が大きい。
- 多連設坑道の詳細設計時には、対象岩盤がひずみ軟化挙動を示すかどうかを確認し、解析に用いる構成則を適切に選定することが重要である。
- 2 次元解析時において、坑道ごとに異なる応力解放率を設定する必要はなく、全ての坑道に対して同値の応力解放率を設定してよい。

本年度の検討にあたっては、平成 19 年度の検討<sup>2)</sup>で課題に挙げた課題 1 と昨年からの引き続きである課題 2 について検討した。

課題 1：坑道の掘削順序の影響に関する解析的検討

課題 2：軟化域を考慮したひずみ軟化モデルによる解析的検討

## 2. 坑道の掘削順序の影響に関する解析的検討

### 2. 1 はじめに

本来、坑道の掘削は、実施工のレイアウトや支保仕様、掘削方法、使用する掘削機械などが決定された後、掘削順序が決定されると考えられる。そのため、掘削順序による周辺岩盤への影響を検討する際、現実的な掘削順序を想定した3次元的な検討を行うことが望ましい。しかし、現状では、処分場サイトが未選定であり、かつ処分場の施工レイアウト（図 2-1）なども計画段階であり、現実的な掘削順序を決定することが出来ない。

そのため、考えられる「極端な掘削順序」を想定し、設計上問題になると思われる「掘削順序」を洗い出すことを本検討における主な目的とした。本章では、これらの特徴的な坑道掘削順序が、坑道周辺の EDZ（解析上では塑性領域）に与える影響についての検討内容・結果について述べる。

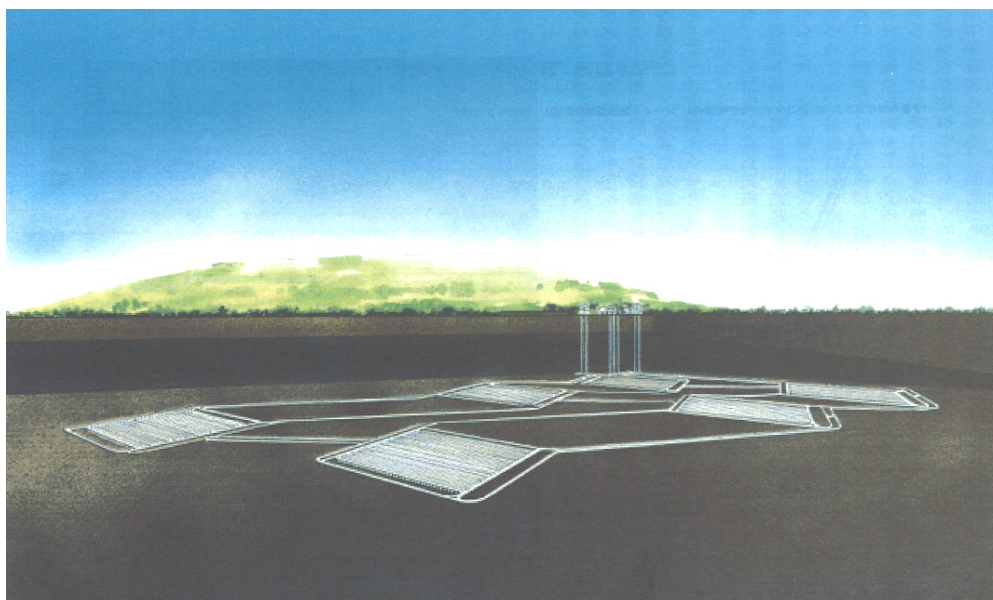


図 2-1 地層処分施設のレイアウト例（軟岩系岩盤，縦置き方式）<sup>1)</sup>

2. 2 解析条件

(1) 坑道仕様

坑道仕様は、第2次取りまとめ<sup>1)</sup> および平成19年度の検討<sup>2)</sup> に準拠し、両モデルともに表2-1、および図2-2、図2-3に示す通りとした。なお、EDZの発生挙動をより明確化するために、支保工はモデル化しないこととした。

表2-1 坑道仕様<sup>2)</sup>

|               |            |
|---------------|------------|
| 処分方式          | 処分孔縦置き方式   |
| 処分坑道の深度 h [m] | 500        |
| 坑道仕上がり径 D [m] | 5          |
| 坑道離間距離 [m]    | 13 (=2.6D) |
| 支保工           | モデル化しない    |

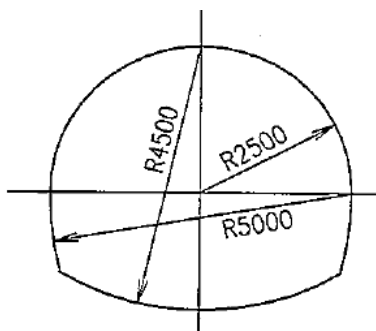


図2-2 処分坑道の仕様（軟岩系岩盤）<sup>1)</sup>

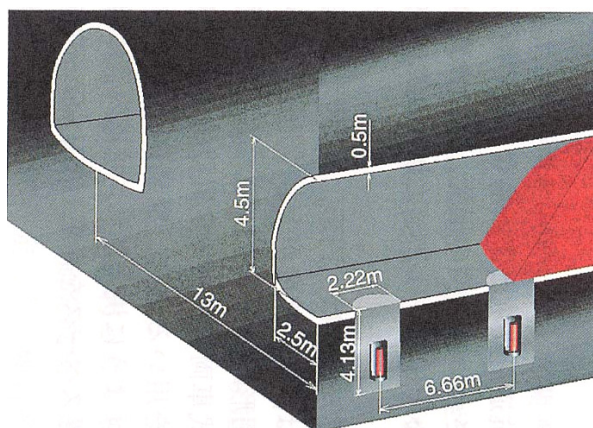


図2-3 処分孔縦置き方式の仕様（軟岩系岩盤）<sup>1)</sup>

(2) モデル化

本検討に用いた解析モデルを図 2-4 に示す。平成 19 年度の検討<sup>2)</sup>に準拠し、解析領域は、坑道群幅  $W$  に対して、左右に  $5W$ 、下方に  $3W$  を確保した。また、13 本の坑道をモデル化し、左側の坑道から順に、坑道 1、坑道 2、…、坑道 13 と称した。

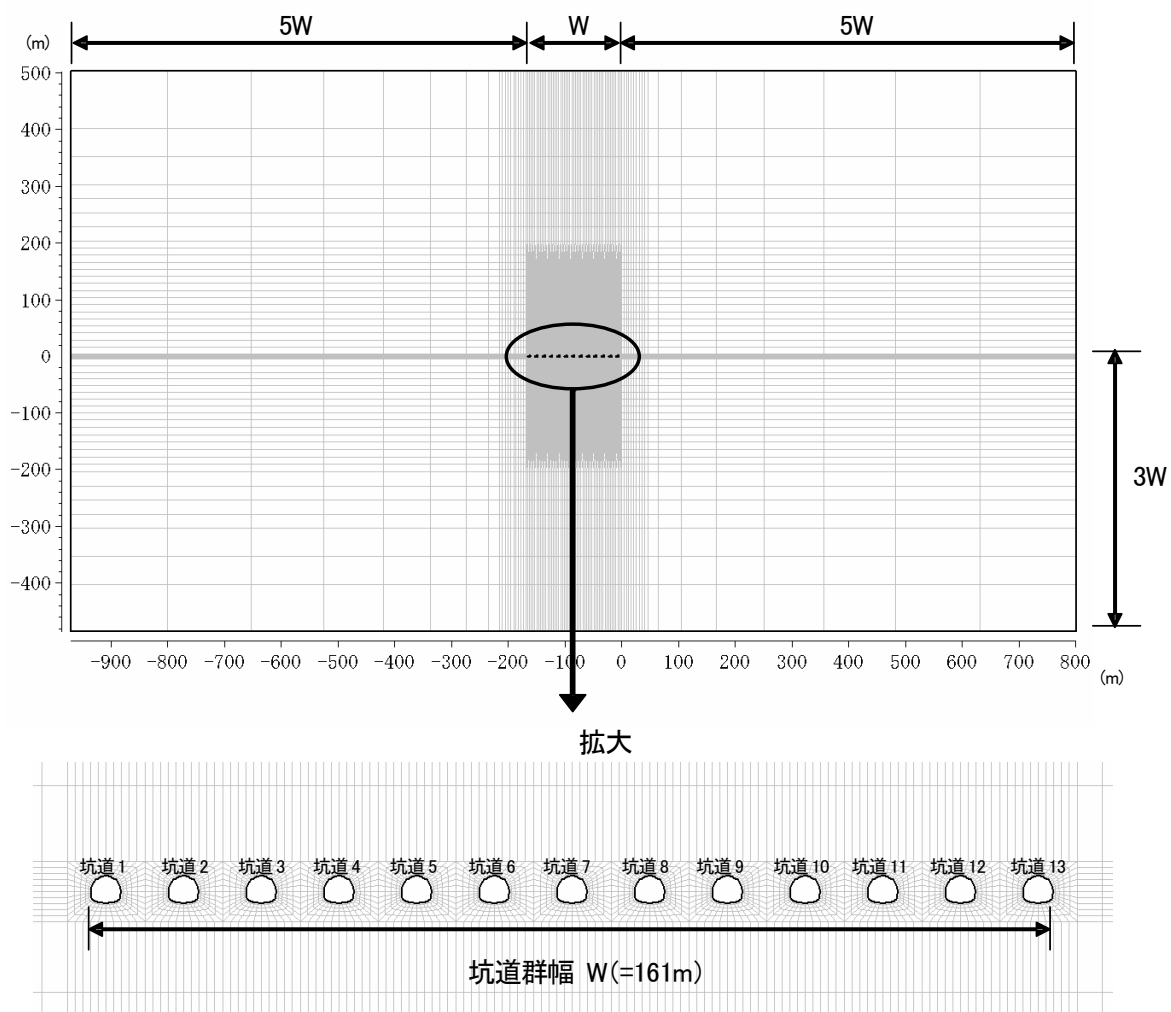


図 2-4 多連設坑道モデル<sup>2)</sup>



(3) 境界条件

境界条件は、第2次取りまとめ<sup>1)</sup> および平成19年度の検討<sup>2)</sup> に準拠し、表2-2に示す通りとした。

表2-2 境界条件<sup>1)</sup>

|    |               |
|----|---------------|
| 上面 | 水平方向自由，鉛直方向自由 |
| 側面 | 水平方向固定，鉛直方向自由 |
| 下面 | 水平方向自由，鉛直方向固定 |

(4) 解析手法

解析手法は、有限差分法 (FDM) による弾塑性解析とし、解析コードは、HClasca 社の FLAC3D<sup>5)</sup> を用いた。また、岩盤は、第2次取りまとめ<sup>1)</sup> および平成19年度の検討<sup>2)</sup> に準拠し、Mohr-Coulomb の破壊規準に従うものとし、安全率  $F_s$  は式(2-1)および図2-5に示す通り定義した。

$$F_s = \frac{\min(L_1, L_2)}{d} \quad \text{式(2-1)}$$

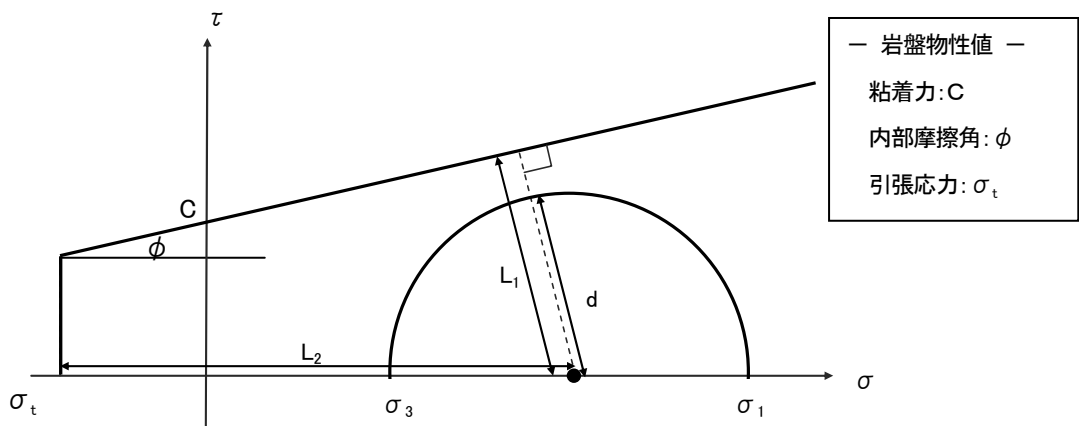


図2-5 安全率  $F_s$  の定義

(5) 解析ステップ

STEP は、平成19年度の検討<sup>2)</sup> に準拠し、STEP1では、自重解析により初期地圧を各要素に付与した。STEP2以降は、左側の坑道から順に13本の坑道を逐次掘削するケースを「基本ケース」、掘削は全断面掘削とし、応力解放率は100%とした。

(6) 岩盤物性値

岩盤物性値は、第2次取りまとめ<sup>1)</sup>を参考に、3種類の軟岩系岩盤データセット「SR-C」「SR-D」「SR-E」を用いた(表2-3参照)。

表 2-3 岩盤物性値<sup>1)</sup>

|                                      | SR-C  | SR-D  | SR-E  |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|
| 単位体積重量 $\gamma$ [kN/m <sup>2</sup> ] | 22    | 19.5  | 17    |
| 弾性係数 E [MPa]                         | 3,500 | 2,500 | 1,500 |
| ポアソン比 $\nu$ [-]                      | 0.30  | 0.30  | 0.30  |
| 粘着力 C [MPa]                          | 3.0   | 2.0   | 1.0   |
| 内部摩擦角 $\phi$ [deg]                   | 28    | 27    | 25    |
| 引張強度 $\sigma_t$ [MPa]                | 2.1   | 1.4   | 0.7   |

(7) 側圧係数

側圧係数(K)は、第2次取りまとめ<sup>1)</sup>、および平成19年度の検討<sup>2)</sup>に準拠し、 $K=1.07$ とした。

(8) 解析ケース

考えられる掘削順序と表2-3に示した岩盤物性の組み合わせに応じた解析ケースを設定した。具体的な掘削順序は以下に示す4ケースとする(図2-6参照)。

1. 基本ケース：坑道1から坑道13までを順次掘削するケース
2. 両端順掘削ケース：両端の坑道1, 13から中心の坑道7に向かって順次掘削するケース
3. 一斉掘削ケース：坑道1~13までを一斉に掘削するケース
4. スキップ掘削ケース：奇数番号坑道を一斉掘削後、偶数番号坑道を一斉掘削するケース

これらの掘削順序と岩盤物性の組み合わせを表2-4に示す。

表 2-4 解析ケース

|           | SR-C    | SR-D    | SR-E    |
|-----------|---------|---------|---------|
| 基本ケース     | Case-C1 | Case-D1 | Case-E1 |
| 両端順掘削ケース  | Case-C2 | Case-D2 | Case-E2 |
| 一斉掘削ケース   | Case-C3 | Case-D3 | Case-E3 |
| スキップ掘削ケース | Case-C4 | Case-D4 | Case-E4 |

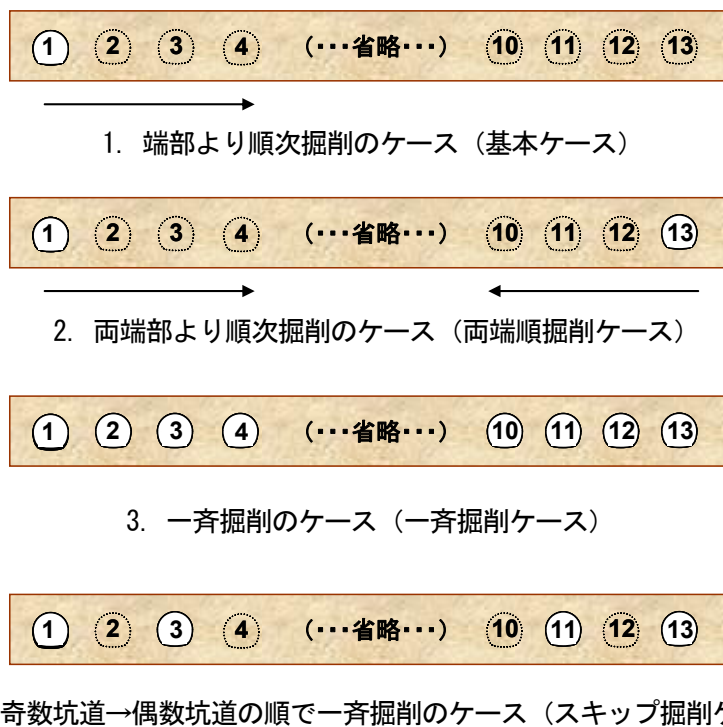


図 2-6 4 パターンの掘削順序の概要

2. 3 解析結果

本検討では、EDZに関連する指標として、塑性領域分布に着目している。図2-7～図2-18に各解析ケースにおける塑性領域分布図を、岩盤物性ごとに整理して示す。ただし、Case-C1, D1, E1については、代表として、掘削開始時（坑道1掘削時）、掘削途中（坑道7掘削時）、掘削終了時（坑道13掘削時）の結果のみを記載している。また、Case-C2, D2, E2については、代表として、掘削開始時（坑道1, 13掘削時）、掘削途中（坑道4, 10掘削時）、掘削終了時（坑道7掘削時）の結果のみを記載している（全ての結果は「添付資料1.」を参照）。

(1) 岩盤物性「SR-C」

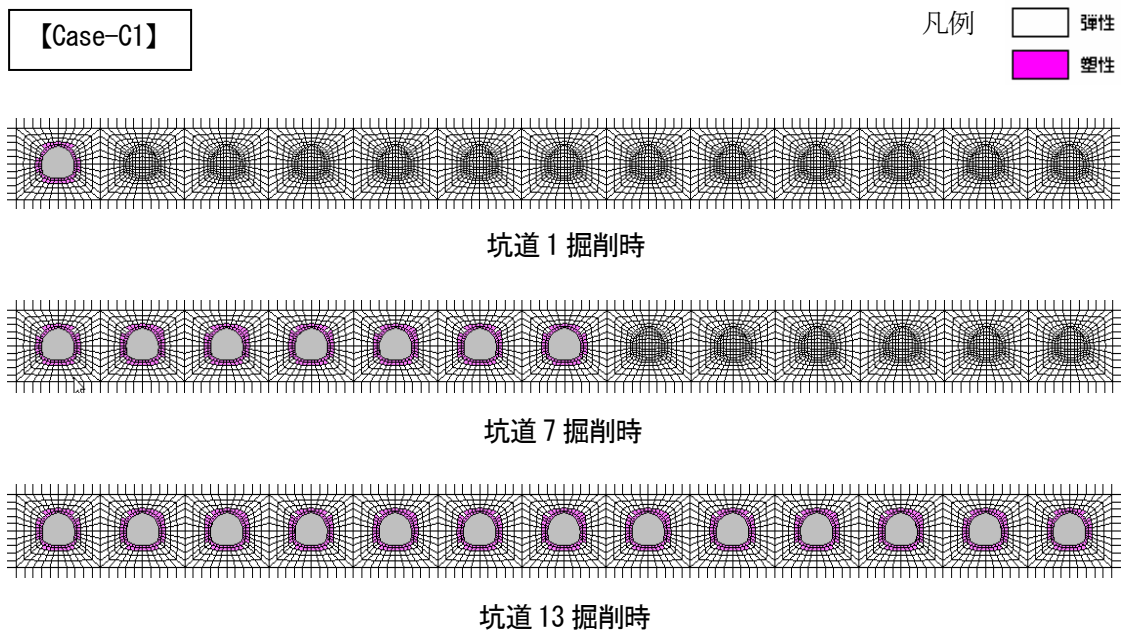


図2-7 塑性領域分布図 (Case-C1)

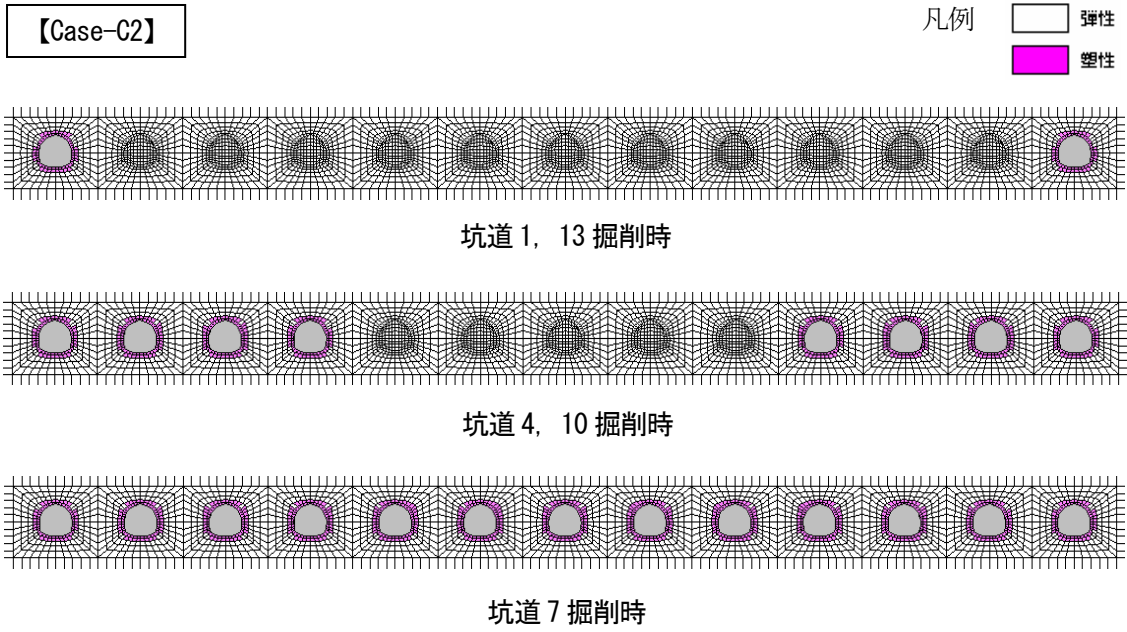


图 2-8 塑性領域分布図 (Case-C2)

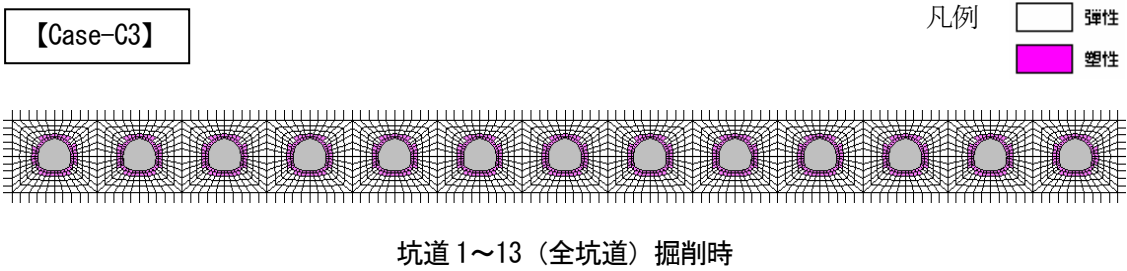


图 2-9 塑性領域分布図 (Case-C3)

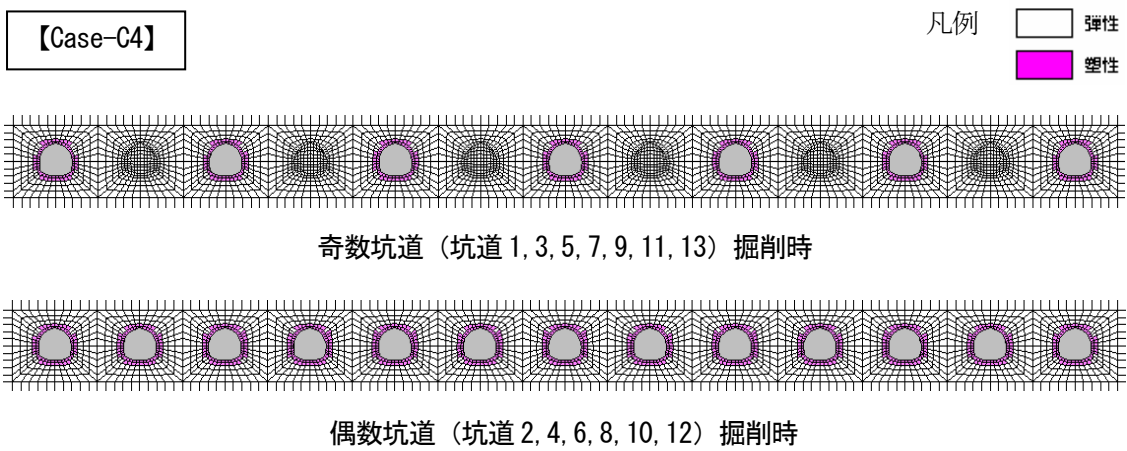


图 2-10 塑性領域分布図 (Case-C4)

(2) 岩盤物性「SR-D」

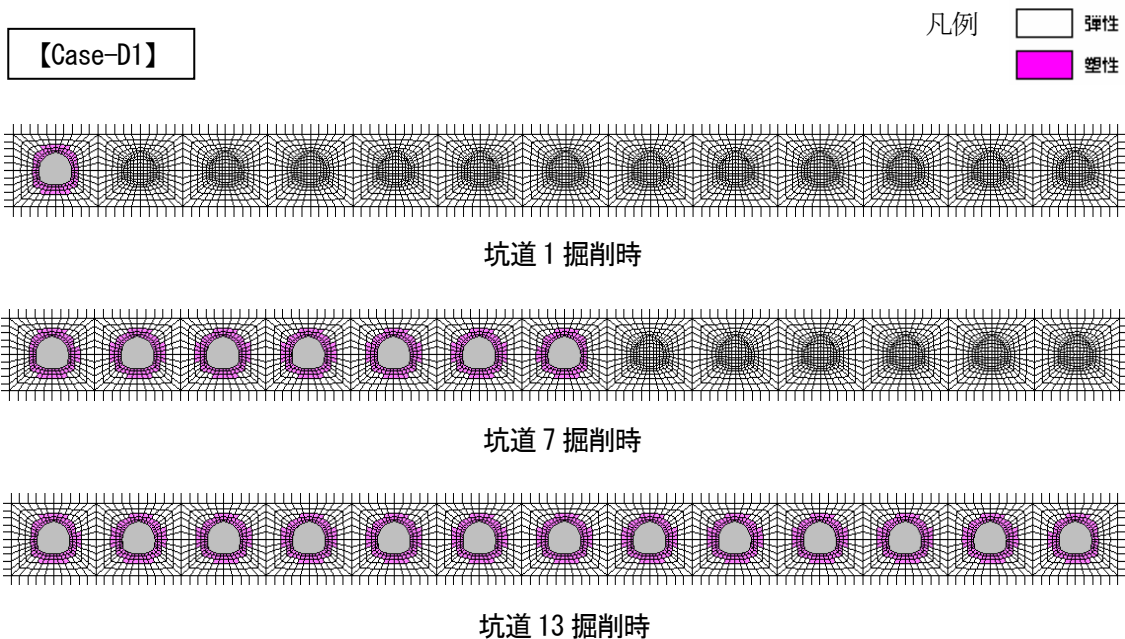


图 2-11 塑性領域分布图 (Case-D1)

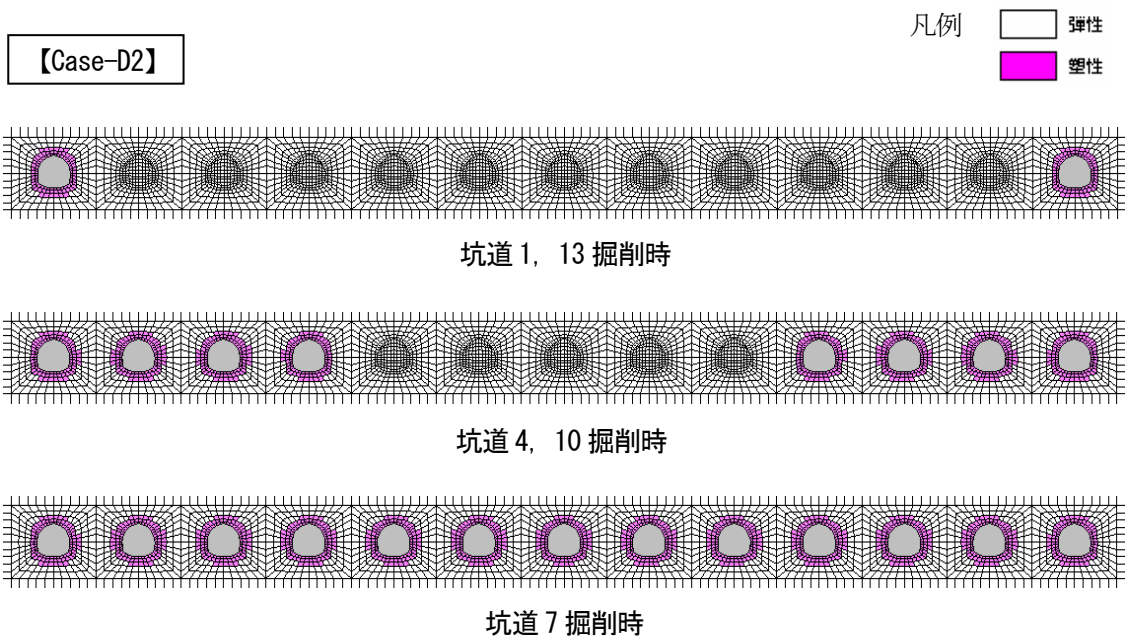


图 2-12 塑性領域分布图 (Case-D2)

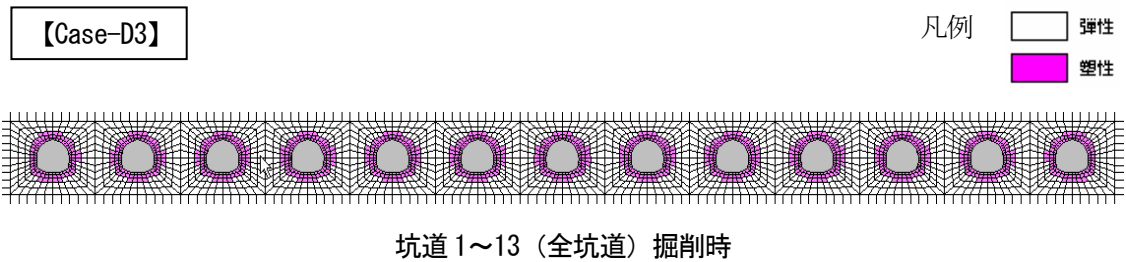


图 2-13 塑性領域分布图 (Case-D3)

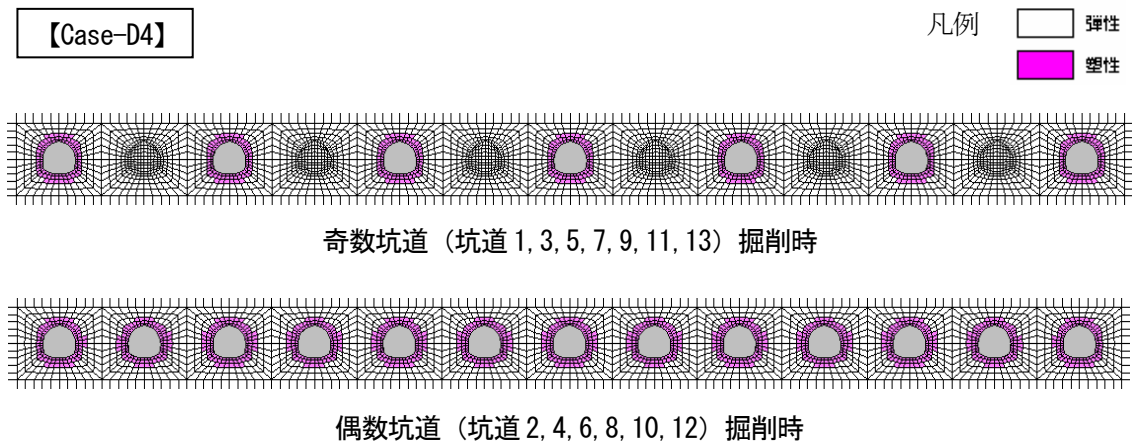


图 2-14 塑性領域分布图 (Case-D4)

(3) 岩盤物性「SR-E」

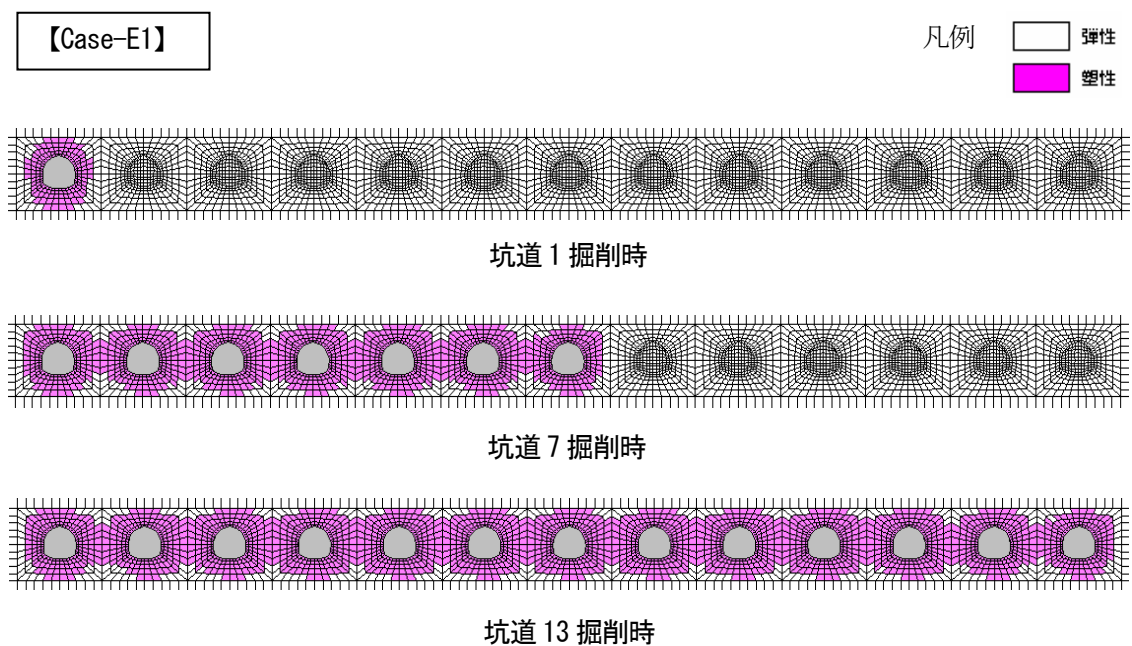


图 2-15 塑性領域分布图 (Case-E1)



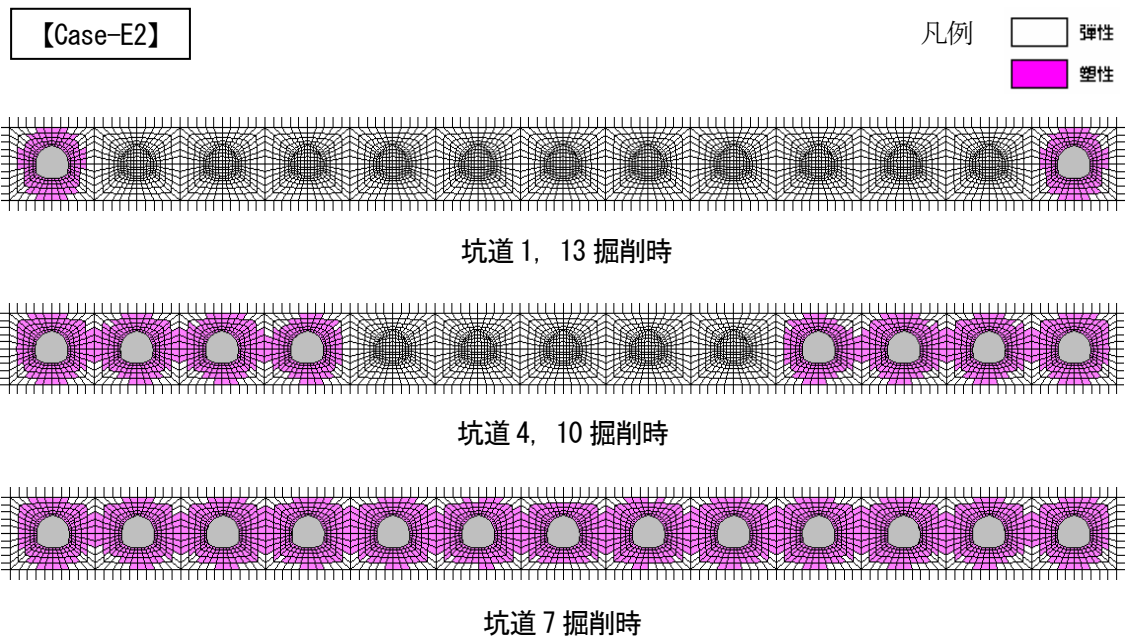


図 2-16 塑性領域分布図 (Case-E2)

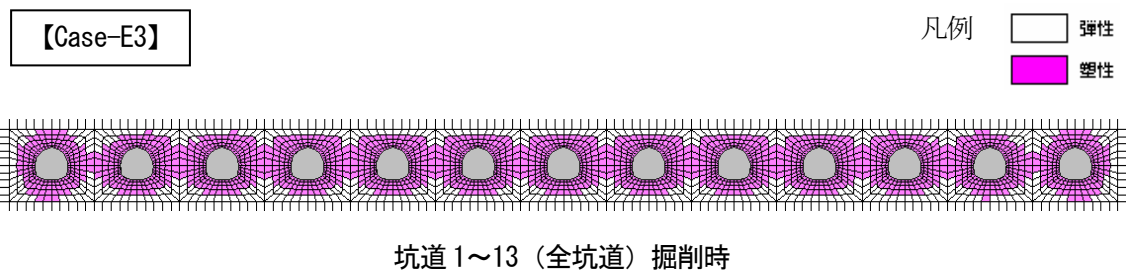


図 2-17 塑性領域分布図 (Case-E3)

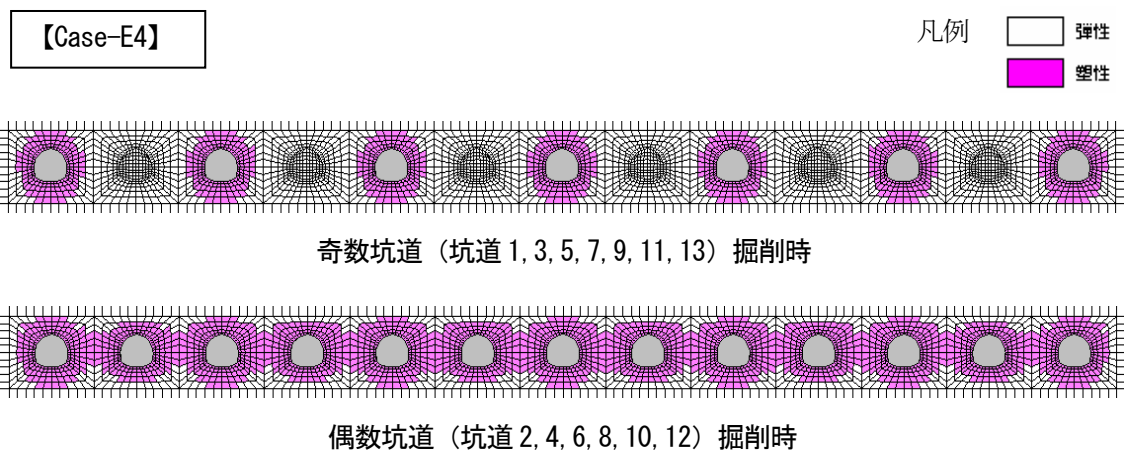


図 2-18 塑性領域分布図 (Case-E4)



2. 4 まとめ

図 2-7～図 2-18 に示す塑性領域分布図より、得られた知見を以下に示す。

- ・ 図 2-19 に Case-C1～C4 最終ステップの塑性領域分布図を示す。わかりやすくするため、各ケースの坑道 6, 7, 8 部分を拡大している。これより軟岩系岩盤データセットの内比較的硬質系の岩盤物性「SR-C」では、塑性領域に対する掘削順序の影響はほとんど無いことが確認された。

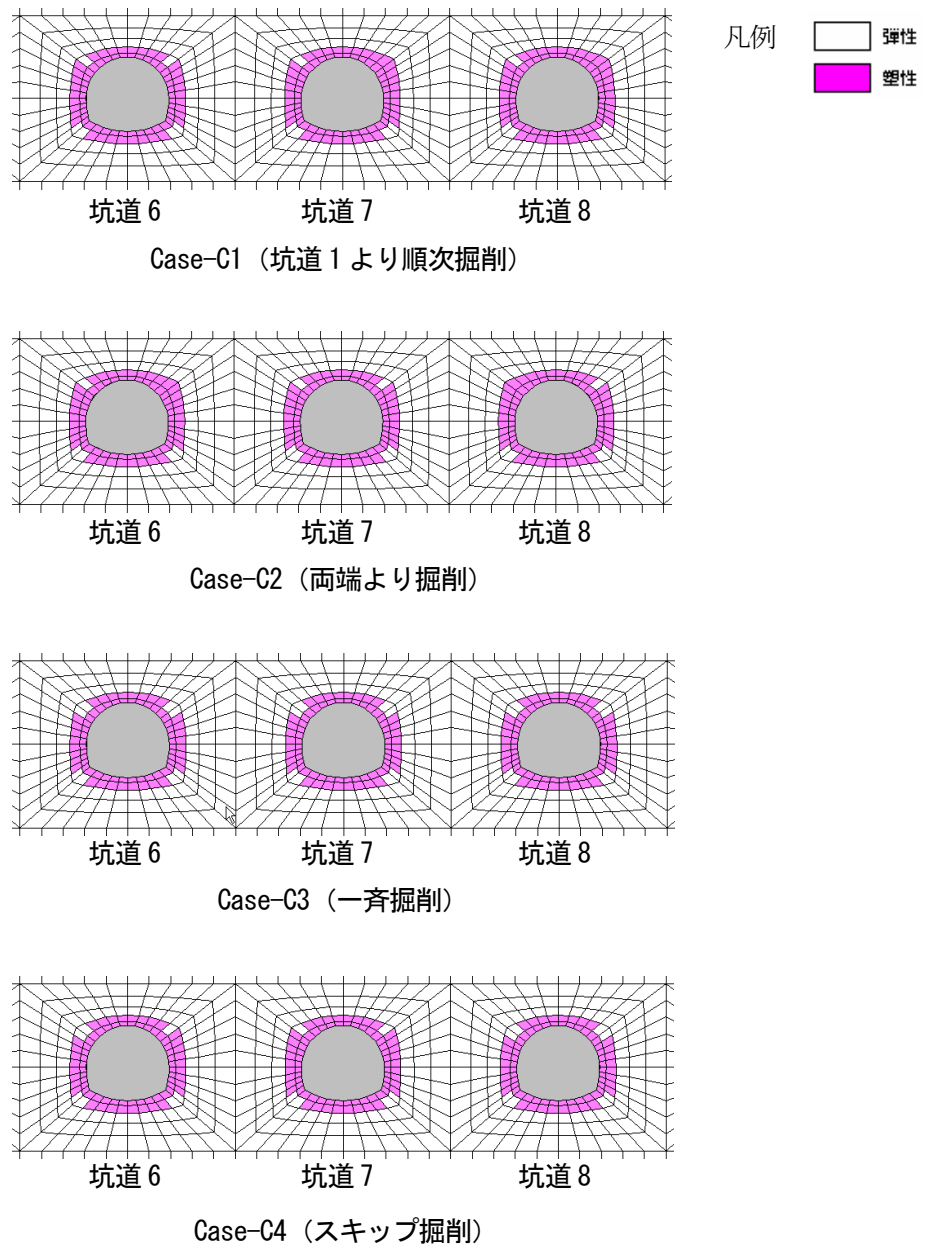


図 2-19 最終ステップの塑性領域分布の拡大図 (Case-C1～C4 の坑道 6, 7, 8)

- 図 2-20 に、Case-D1～D4 最終ステップの坑道 6, 7, 8 の塑性領域分布図を示す。順次掘削した Case-D1, 両端から掘削した Case-D2, 奇数→偶数坑道の順に掘削した Case-D4 よりも、一斉掘削した Case-D3 の方が、僅かであるが塑性領域は小さいことがわかる。ただし、Case-D2 の最後に掘削した坑道 7 や Case-D4 の偶数坑道の塑性領域分布は、一斉掘削した Case-D3 の塑性領域分布と同様の広がりを示している。
- 全体的に、周辺岩盤や坑道に影響を及ぼすほど、ケース間の塑性領域に大きな相違はなく、岩盤物性「SR-C」と同様、塑性領域に対する掘削順序の影響はほとんど見られないと判断できる。

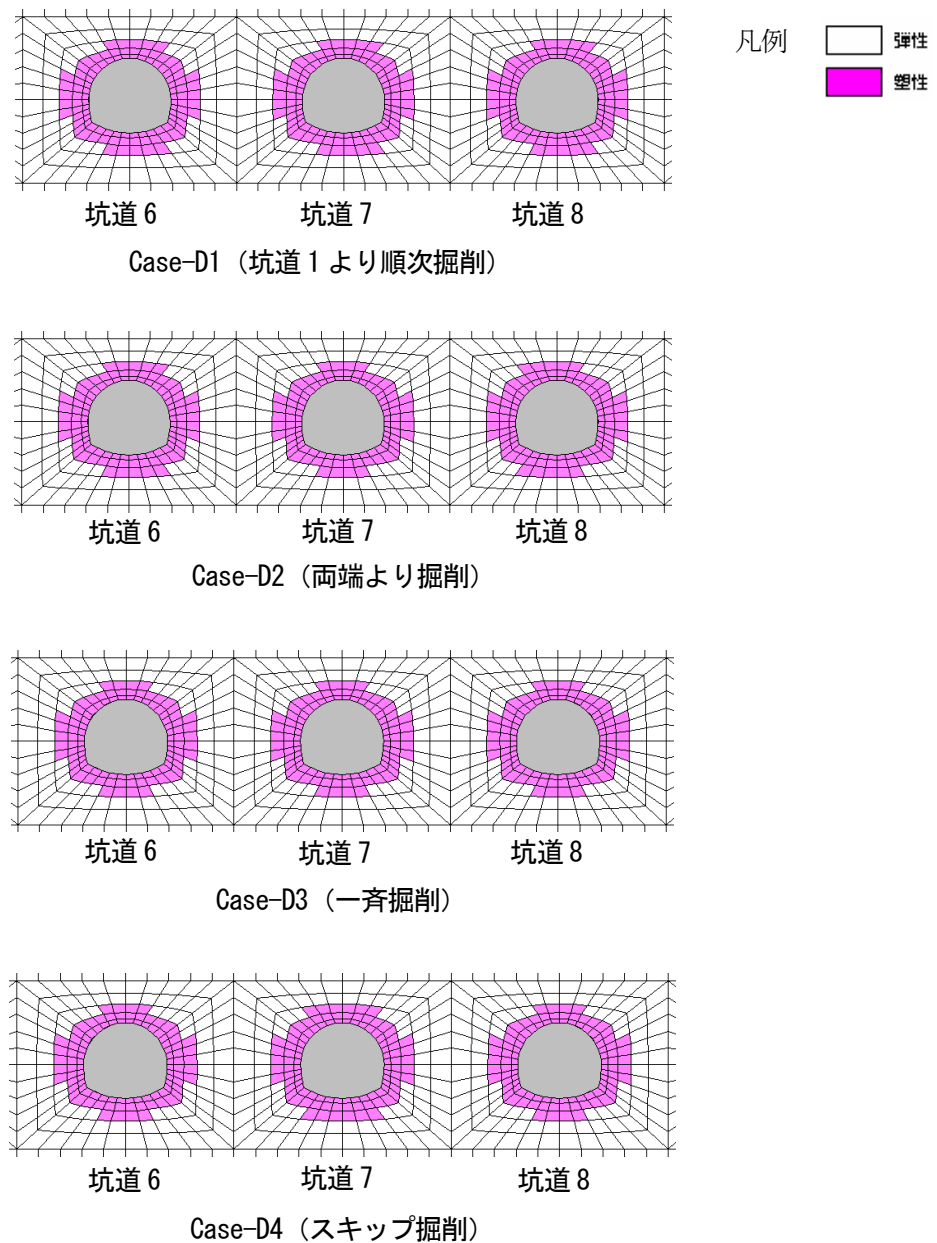


図 2-20 最終ステップの塑性領域分布の拡大図 (Case-D1～D4 の坑道 6, 7, 8)

軟質系の岩盤物性「SR-E」では、順次掘削した Case-E1 と両端から掘削した Case-E2 における掘削時の塑性領域に若干違いが見られた。例として、それぞれの最終ステップの坑道 6, 7, 8 の塑性領域分布を図 2-21 に示す。これは、坑道の掘削する向きが異なることにより、坑道間に生じるせん断ひずみの方向の違いから生じたものと考えられる<sup>2)</sup> (図 2-22 参照)。また、Case-E2 の坑道 7 掘削時に塑性領域が小さいことも特徴の一つである。岩盤物性「SR-C」や「SR-D」でこのような違いが見られなかったのは、塑性領域の範囲が狭く、塑性領域の分布の差が明確に現われなかったためと考えられる (図 2-19, 図 2-20 参照)。

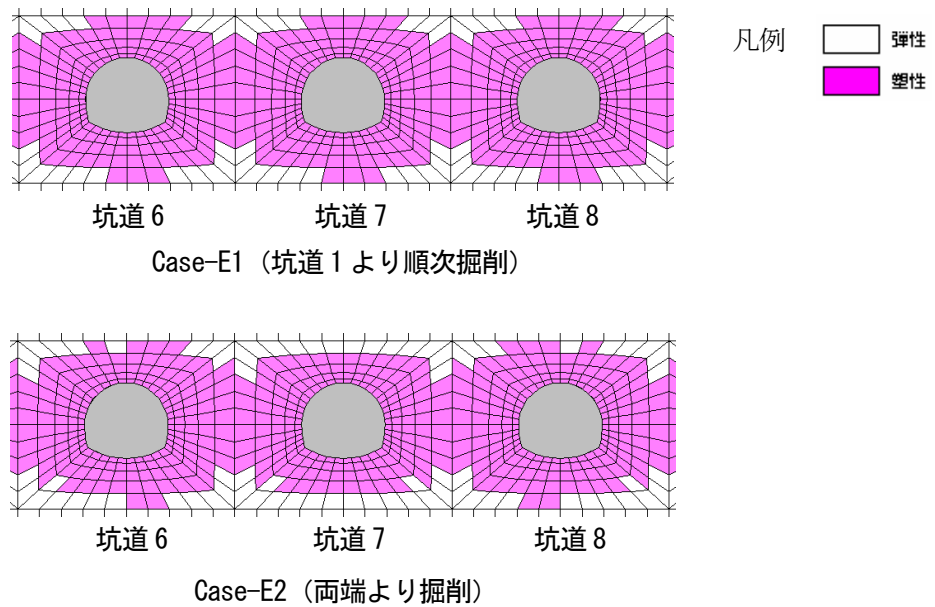


図 2-21 最終ステップの塑性領域分布の拡大図 (Case-E1, E2 の坑道 6, 7, 8)

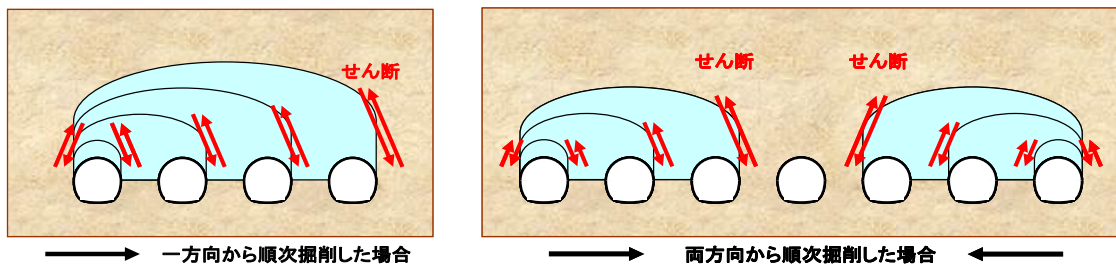


図 2-22 坑道掘削により生じるせん断方向の概念図

- 順次掘削した Case-E1 と両端掘削した Case-E2 について、塑性領域の発生に差が出た坑道 7 近傍の要素 7441, 7442 に着目し、掘削にともなう偏差応力  $q$  と平均主応力  $p$  の比（応力比  $q/p$ ）の変化を調べた結果を図 2-23 に示す。これを見ると、両ケースとも直近の坑道 7 が掘削された瞬間にせん断力が大きく作用するため、応力比  $q/p$  が急上昇している。しかし、順次掘削した Case-E1 の方が両端掘削した Case-E2 に比べて応力比  $q/p$  がわずかに大きく、これが塑性化の有無に影響したことが伺える。このように、掘削順序の違いによって周辺岩盤の応力状態が異なり、これが塑性領域の発生範囲に差を生じさせたことがわかる。

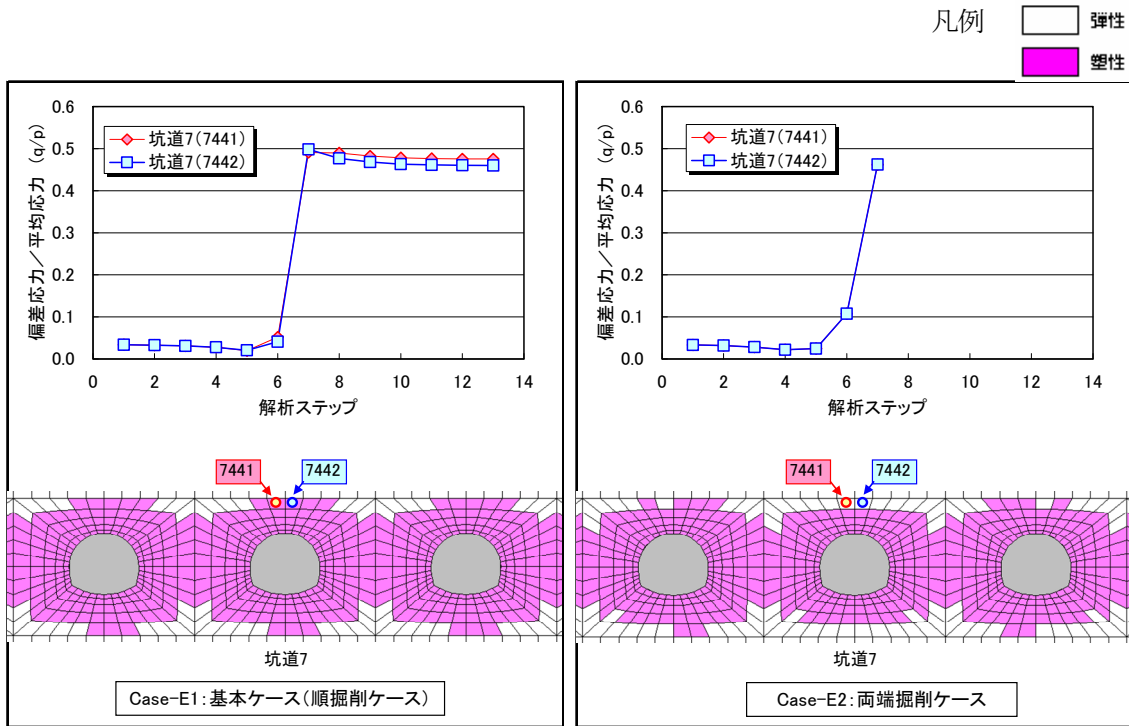


図 2-23 Case-E1, Case-E2 のある対象要素における応力経路の比較

岩盤物性「SR-E」の Case-E3 では、坑道間に生じる塑性領域が Case-E1 や Case-E2 よりも小さくなった。これは、坑道を順次掘削していくのではなく、一斉掘削したことによって、坑道間にせん断ひずみが生じにくい状態となったためと推察される（図 2-24 参照）。

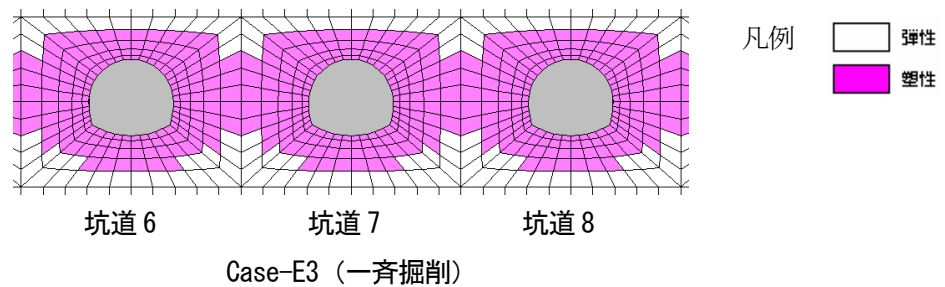


図 2-24 最終ステップの塑性領域分布の拡大図 (Case-E3 の坑道 6, 7, 8)

- 岩盤物性「SR-E」の Case-E4 では、はじめに掘削した奇数坑道周辺に生じる塑性領域より、後から掘削した偶数坑道周辺に生じる塑性領域の方が小さいことが確認された。これは、Case-E2 最終ステップの坑道 7 に見られた特徴と酷似している。また、Case-E1 や Case-E2 と比べ、全坑道の掘削終了時の塑性領域が若干小さいという特徴がある（図 2-25 参照）。

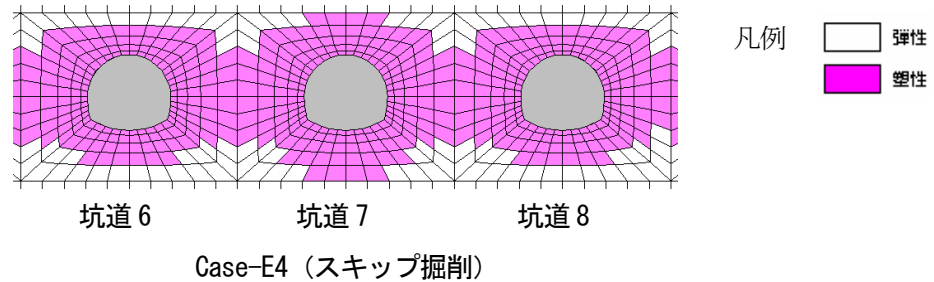


図 2-25 最終ステップの塑性領域分布の拡大図 (Case-E4 の坑道 6, 7, 8)

- 今回の解析的検討により、順次隣接する坑道を掘削するパターンは塑性領域を大きくすることがわかった。小さい塑性領域で掘削するためには、一斉に全坑道を掘削するか、もしくは、ある程度離隔を持った坑道掘削を先行して行い、後ほど坑道間の坑道掘削を行う、というパターンが望ましい。
- 応力経路が塑性領域の発生範囲に影響を及ぼすことが確認されたことから、多連設坑道の設計では、応力経路を左右する掘削順序に留意する必要がある。今回は均質な岩盤を対象とした検討であったが、特に、坑道周辺岩盤が不均質な状態である場合（弱部の存在、断層の有無など）などには掘削順序の影響が顕著になると推測される。それらの検討は今後の課題である。
- 今回は 2 次元モデルによる解析的検討であるため、奥行き方向に関する掘削方向（手前から掘削するのか、奥側より掘削するのか）など、3 次元的な検討までは確認できていない。本来は、使用する掘削機械や実施工レイアウトなどを参考に、より現実的な検討が必要である。今後の課題として、具体的は処分場レイアウトや掘削方法を考慮した掘削順序、多段掘削のケース、横置き方式や縦置き方式に関する検討などを 3 次元的に確認する必要があると考える。

### 3. 軟化域を考慮したひずみ軟化モデルによる解析的検討

#### 3. 1 はじめに

弾性解析ならびに弾塑性解析に用いられる主な応力-ひずみ関係<sup>6)</sup>を図3-1に示す。平成20年度は、数値解析に用いる構成則の違いによるEDZの発生領域の影響について検討を行うため、(c)完全弾塑性モデル、および(d)軟化域を考慮しない残留強度モデル(1)を用いた解析的検討を行った<sup>3)</sup>。本来、硬岩系では(d)のモデル、軟岩系では軟化域の挙動を考慮した(e)のモデルになると考えられるが、降伏後の強度低下による影響を解り易くする為、平成20年度は軟化域を考慮しない(c)と(d)の残留強度モデルの検討を行った<sup>3)</sup>。

本検討では、昨年度から残った課題である(e)残留強度モデル(2)の挙動を考慮した解析的検討を行うため、幌延深地層研究所で取得されたボーリング孔HDB-1, HDB-2, HDB-3, HDB-6, HDB-11の供試体を用いた三軸試験データの結果を参考に、図3-2に示すような「軟化域を考慮したひずみ軟化モデル」をモデル化し、坑道周辺の塑性領域に与える影響を検討した。以下では、三軸試験データの実測結果を用いたひずみ軟化領域のモデル化について説明し、その後、そのモデルを適用した解析の検討結果について述べる。

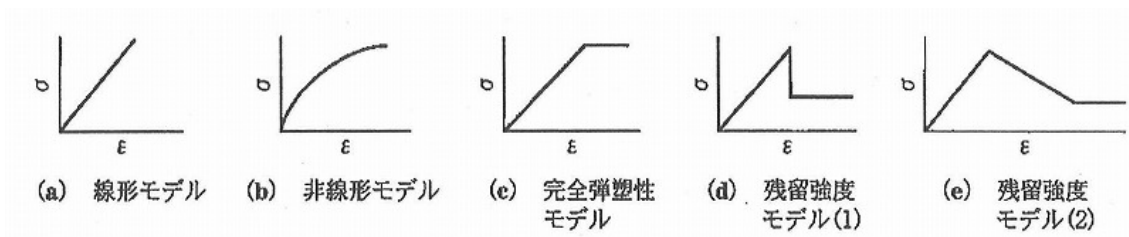


図3-1 主な応力-ひずみ関係<sup>6)</sup>

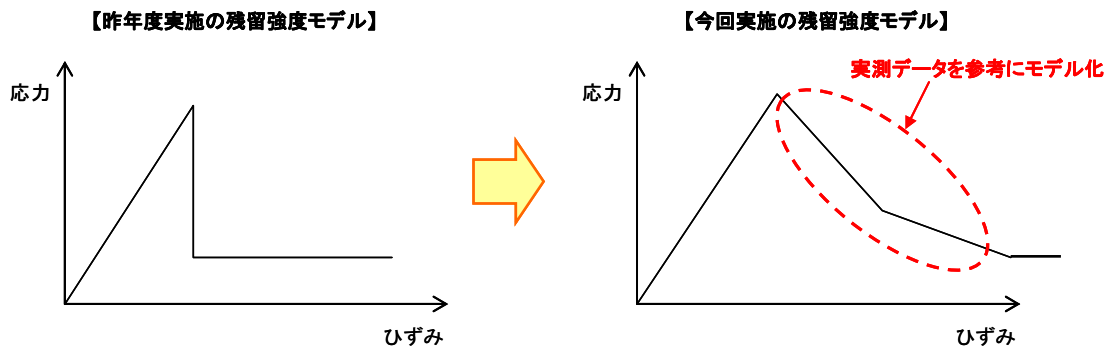


図3-2 ひずみ軟化モデルのモデル化領域

### 3. 2 軟化域を考慮したひずみ軟化モデルのモデル化

#### (1) 三軸試験の実測データ

幌延深地層研究所にて実施された三軸試験<sup>7),8),9)</sup>では、各ボーリング孔(HDB-1, HDB-2, HDB-3, HDB-6, HDB-11)で採取された深度ごとの供試体を使用され、その試験方法はCD試験(圧密排水試験)とCU試験(圧密非排水試験)であった。試験データ数は、HDB-1で14データ、HDB-2で14データ、HDB-3で10データ、HDB-6で10データ、HDB-11で2データ、合計50データであった。ただし、後述する解析検討の対象領域は、深度500mの硬質頁岩であるため、硬質頁岩に相当する供試体を用いた三軸試験データのみをモデル化の対象とすることにした。

図3-3～図3-7に、各ボーリング孔の硬質頁岩に相当する三軸試験データの軸差応力～軸ひずみ関係を示す。HDB-1では深度500m, 600m, 700mの供試体を用いた試験データ、HDB-2では深度300m, 400m, 500m, 600m, 700mの供試体を用いた試験データ、HDB-3では深度500mの供試体を用いた試験データ、HDB-6では深度550mの供試体を用いた試験データ、HDB-11では深度720mの供試体を用いた試験データが対象となる。各試験は、CD試験とCU試験を行い、かつ拘束圧を変化させた試験を4パターン実施しているが、HDB-6の供試体を用いた試験では、拘束圧の変化が2パターンのみであり、かつひずみ速度を3パターン変化させた試験が行われている。またHDB-11の供試体を用いた試験では、CU試験のみの実施であり、かつピーク強度以降のデータが十分に計測されていなかった。このことから、ひずみ軟化領域のモデル化に適用する三軸試験データは、HDB-1, HDB-2, HDB-3の硬質頁岩に相当する三軸試験データのみとする。



No.1: 拘束圧(静水圧×0.25) No.2: 拘束圧(静水圧×0.50)  
 No.3: 拘束圧(静水圧×1.00) No.4: 拘束圧(静水圧×2.00)

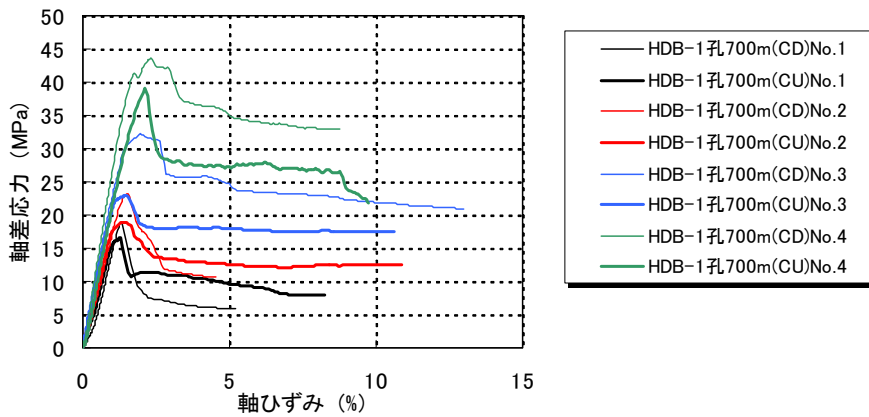
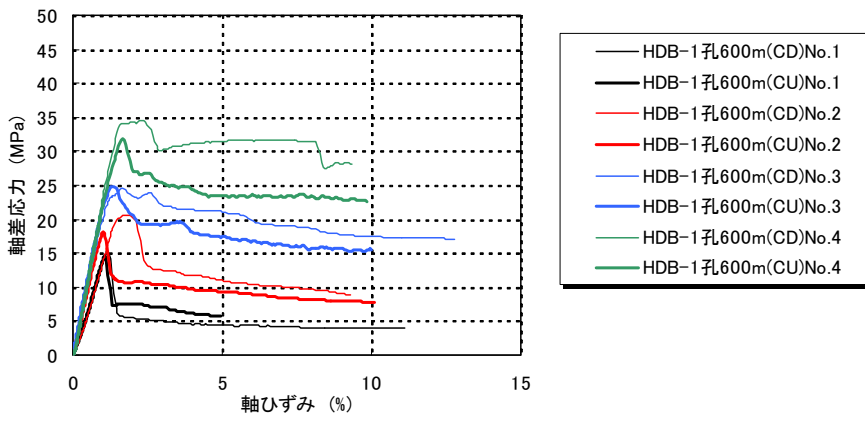
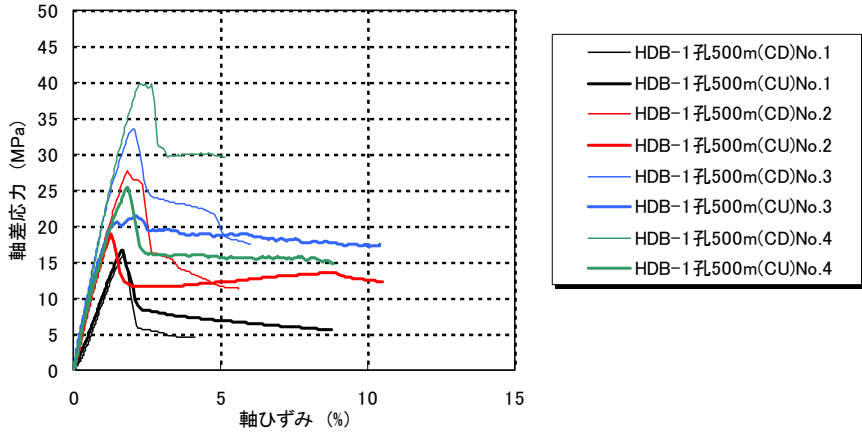
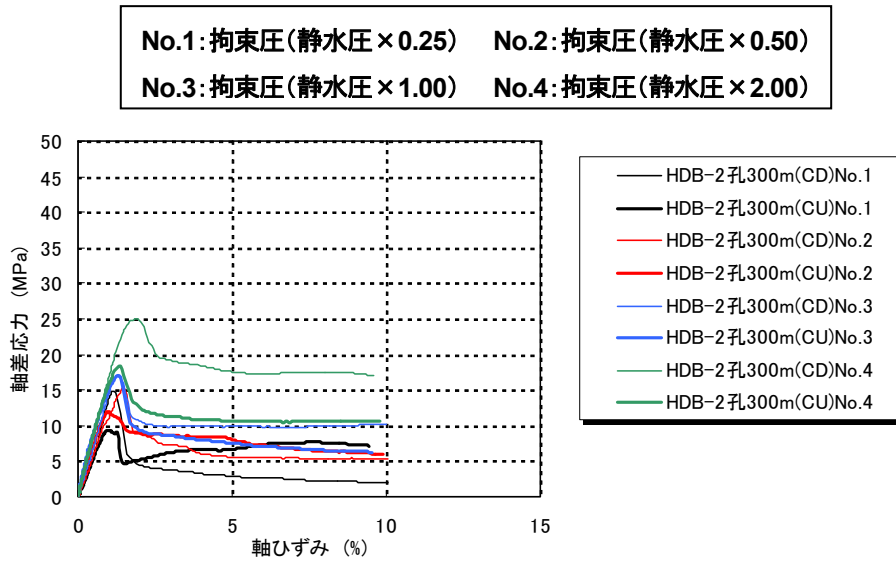
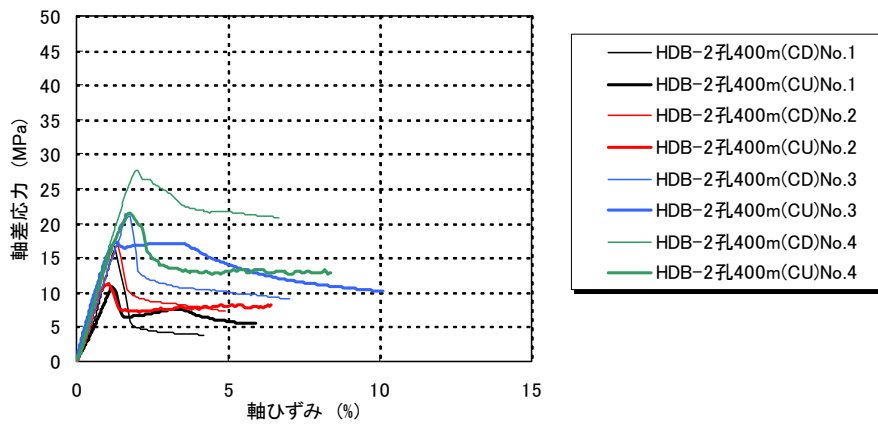


図 3-3 HDB-1 孔の硬質頁岩に相当する三軸試験データ

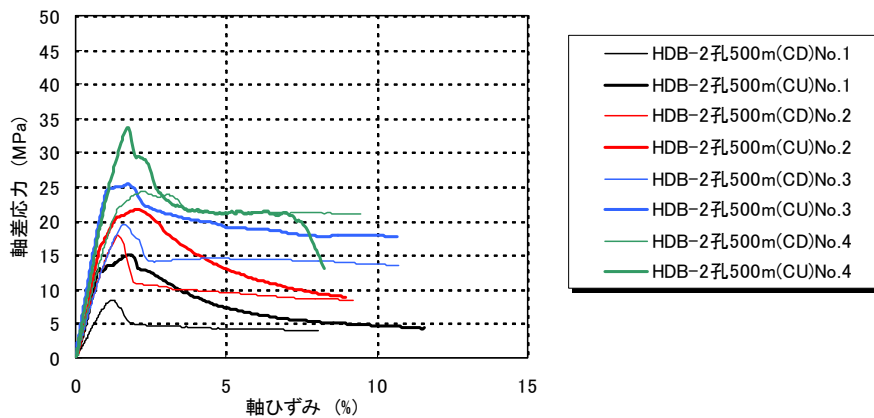




HDB-2 孔 (深度 300m, CD&CU 試験)



HDB-2 孔 (深度 400m, CD&CU 試験)



HDB-2 孔 (深度 500m, CD&CU 試験)

図 3-4 HDB-2 孔の硬質頁岩に相当する三軸試験データ (1/2)

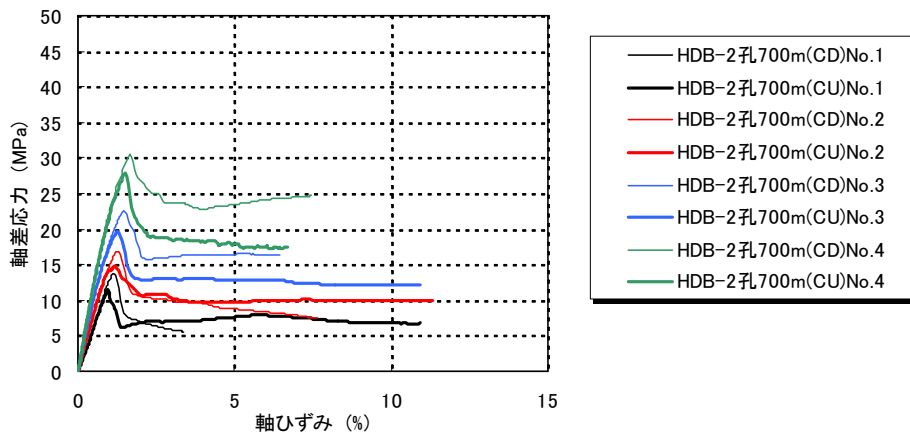
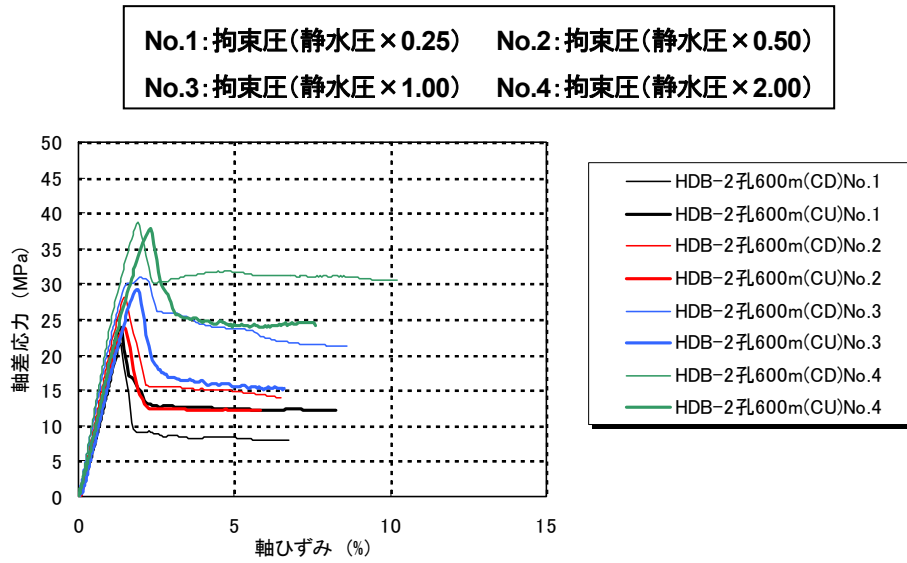
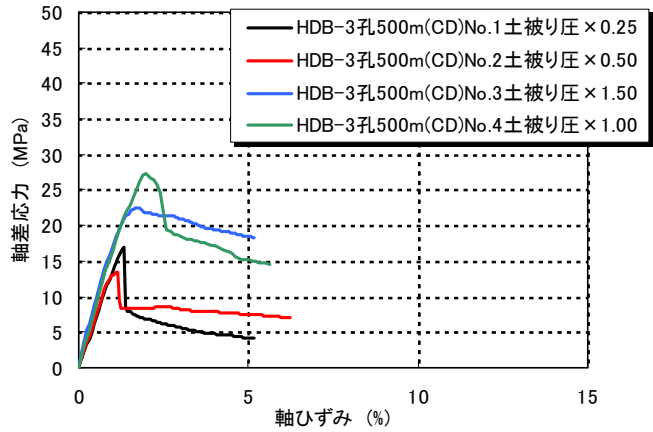
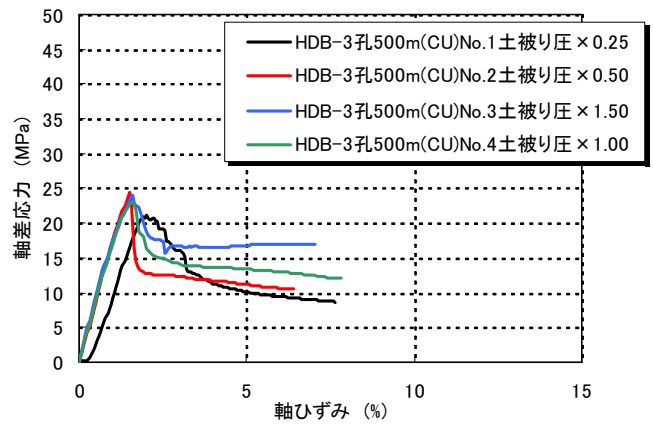


図 3-4 HDB-2 孔の硬質頁岩に相当する三軸試験データ (2/2)

No.1: 拘束圧(静水圧×0.25) No.2: 拘束圧(静水圧×0.50)  
 No.3: 拘束圧(静水圧×1.50) No.4: 拘束圧(静水圧×1.00)



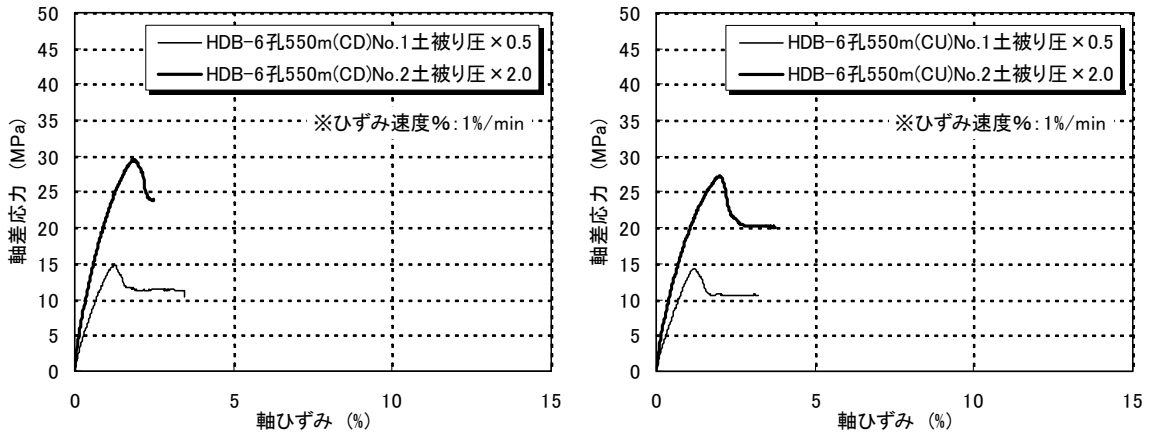
HDB-3 孔 (深度 500m, CD 試験)



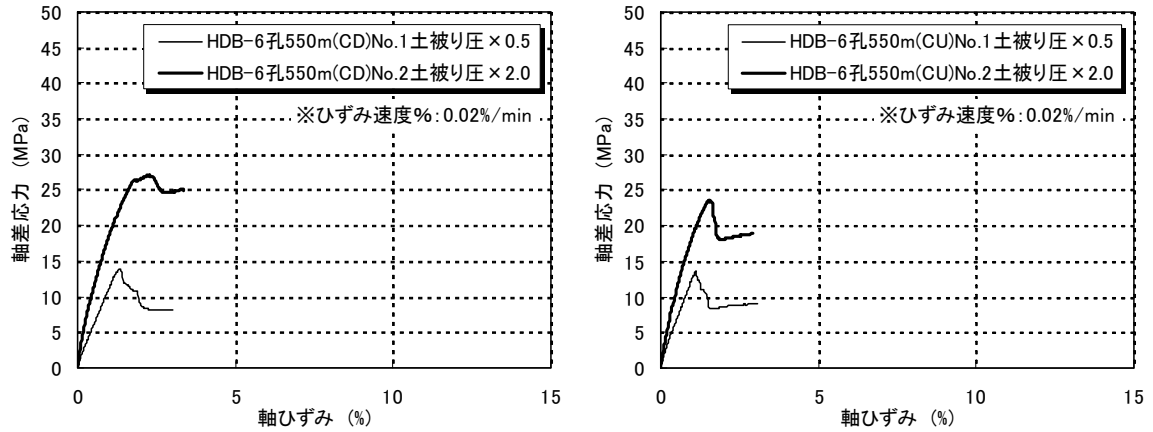
HDB-3 孔 (深度 500m, CU 試験)

図 3-5 HDB-3 孔の硬質頁岩に相当する三軸試験データ

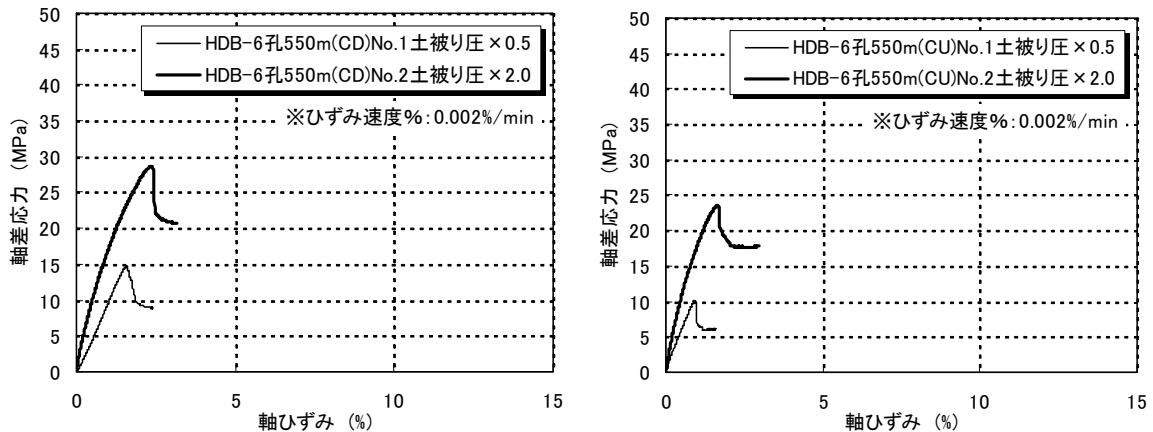
No.1: 拘束圧(静水圧×0.5) No.2: 拘束圧(静水圧×2.0)



HDB-6 孔 (深度 550m, ひずみ速度 1%/min 载荷) 左: CD 試験, 右: CU 試験



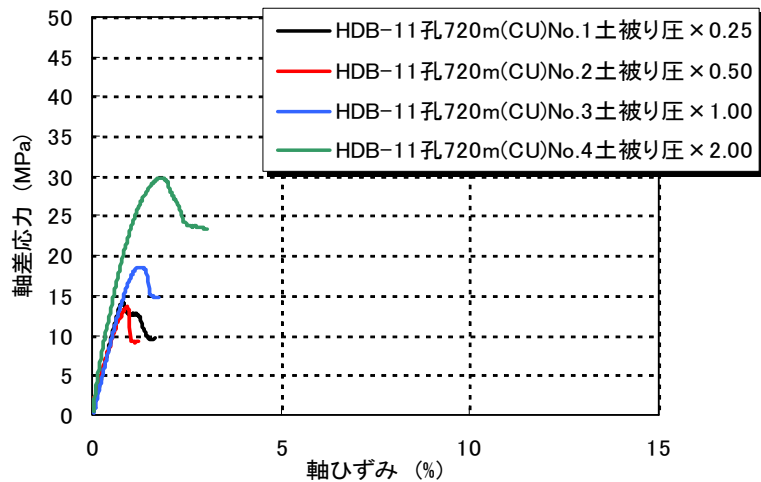
HDB-6 孔 (深度 550m, ひずみ速度 0.02%/min 载荷) 左: CD 試験, 右: CU 試験



HDB-6 孔 (深度 550m, ひずみ速度 0.002%/min 载荷) 左: CD 試験, 右: CU 試験

図 3-6 HDB-6 孔の硬質頁岩に相当する三軸試験データ

No.1: 拘束圧(静水圧×0.25)    No.2: 拘束圧(静水圧×0.50)  
 No.3: 拘束圧(静)



HDB-11 孔 (深度 720m, CU 試験)

図 3-7 HDB-11 孔の硬質頁岩に相当する三軸試験データ

(2) 三軸試験実測データの整理

モデル化の対象とした HDB-1, HDB-2, HDB-3 の硬質頁岩の三軸試験データでは、おおよそ図 3-8 に示すような応力～ひずみ関係にある。そのため、傾きが変化するポイントを①ピーク強度、②ひずみ軟化域の変曲点強度、③残留強度の 3 点に絞り、実測データからそれらのポイントの応力とひずみデータをピックアップした。表 3-1～表 3-4 に、各試験のピックアップした軸差応力と軸ひずみデータの一覧表を示す。ただし、HDB-1 と HDB-2 の CU 試験については、間隙水圧の測定を行っていないため、対象データから除外している。

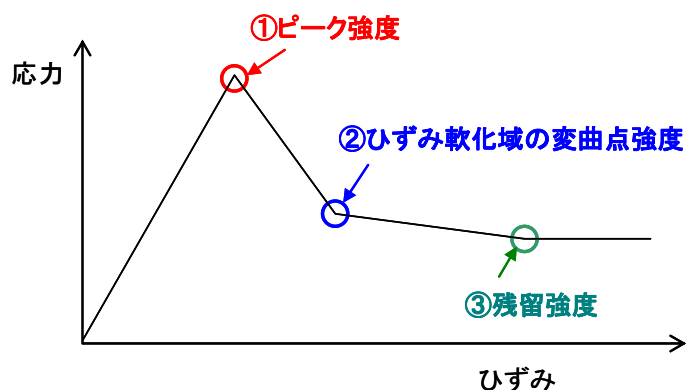


図 3-8 三軸試験データの応力～ひずみ関係の概要と変化のポイント

表 3-1 実測データからピックアップした軸差応力と軸ひずみのデータ (HDB-1 孔 CD 試験)

|          |       | 静水圧×0.25          |                 | 静水圧×0.50          |                 | 静水圧×1.0           |                 | 静水圧×2.0           |                 |
|----------|-------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|          |       | 軸差<br>応力<br>(Mpa) | 軸ひ<br>ずみ<br>(%) | 軸差<br>応力<br>(Mpa) | 軸ひ<br>ずみ<br>(%) | 軸差<br>応力<br>(Mpa) | 軸ひ<br>ずみ<br>(%) | 軸差<br>応力<br>(Mpa) | 軸ひ<br>ずみ<br>(%) |
| 500<br>m | ピーク強度 | 16.27             | 1.72            | 27.64             | 1.83            | 33.52             | 2.04            | 39.79             | 2.26            |
|          | 変曲点強度 | 5.81              | 2.26            | 16.16             | 2.84            | 23.98             | 2.73            | 30.82             | 3.05            |
|          | 残留強度  | 4.62              | 4.13            | 11.35             | 5.62            | 17.54             | 6.00            | 29.59             | 5.14            |
| 600<br>m | ピーク強度 | 15.33             | 1.16            | 20.55             | 1.77            | 24.56             | 1.68            | 34.60             | 2.37            |
|          | 変曲点強度 | 5.71              | 1.62            | 12.71             | 2.69            | 19.32             | 6.29            | 30.27             | 2.85            |
|          | 残留強度  | 3.89              | 11.13           | 8.79              | 9.29            | 17.13             | 12.80           | 28.11             | 9.33            |
| 700<br>m | ピーク強度 | 18.82             | 1.30            | 23.15             | 1.52            | 32.20             | 1.96            | 43.56             | 2.32            |
|          | 変曲点強度 | 7.93              | 2.15            | 11.75             | 2.91            | 25.82             | 3.09            | 36.87             | 3.64            |
|          | 残留強度  | 5.93              | 5.22            | 10.65             | 4.54            | 20.95             | 12.98           | 32.93             | 8.76            |

表 3-2 実測データからピックアップした軸差応力と軸ひずみのデータ (HDB-2 孔 CD 試験)

|          |       | 静水圧×0.25          |                 | 静水圧×0.50          |                 | 静水圧×1.0           |                 | 静水圧×2.0           |                 |
|----------|-------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|          |       | 軸差<br>応力<br>(Mpa) | 軸ひ<br>ずみ<br>(%) | 軸差<br>応力<br>(Mpa) | 軸ひ<br>ずみ<br>(%) | 軸差<br>応力<br>(Mpa) | 軸ひ<br>ずみ<br>(%) | 軸差<br>応力<br>(Mpa) | 軸ひ<br>ずみ<br>(%) |
| 300<br>m | ピーク強度 | 14.91             | 1.19            | 15.41             | 1.49            | 17.01             | 1.28            | 24.95             | 1.90            |
|          | 変曲点強度 | 4.98              | 1.79            | 8.91              | 1.95            | 10.14             | 2.32            | 19.30             | 2.84            |
|          | 残留強度  | 2.01              | 10.05           | 5.36              | 10.06           | 10.20             | 10.00           | 17.00             | 9.60            |
| 400<br>m | ピーク強度 | 16.51             | 1.28            | 16.88             | 1.38            | 21.12             | 1.77            | 27.65             | 1.96            |
|          | 変曲点強度 | 4.85              | 2.03            | 9.54              | 1.89            | 12.29             | 2.22            | 22.44             | 3.57            |
|          | 残留強度  | 3.77              | 4.20            | 7.28              | 4.91            | 9.06              | 7.02            | 20.72             | 6.66            |
| 500<br>m | ピーク強度 | 8.49              | 1.23            | 17.92             | 1.43            | 19.53             | 1.67            | 24.39             | 2.25            |
|          | 変曲点強度 | 5.07              | 1.86            | 10.83             | 2.05            | 14.07             | 2.51            | 21.63             | 3.83            |
|          | 残留強度  | 3.89              | 8.04            | 8.50              | 9.22            | 13.50             | 10.71           | 21.07             | 9.46            |
| 600<br>m | ピーク強度 | 21.67             | 1.37            | 28.12             | 1.45            | 30.90             | 2.00            | 38.81             | 1.91            |
|          | 変曲点強度 | 9.04              | 2.06            | 15.54             | 2.33            | 26.00             | 2.63            | 30.15             | 2.47            |
|          | 残留強度  | 7.95              | 6.76            | 13.92             | 6.51            | 21.23             | 8.61            | 30.52             | 10.23           |
| 700<br>m | ピーク強度 | 13.78             | 1.14            | 16.86             | 1.25            | 22.54             | 1.44            | 30.46             | 1.64            |
|          | 変曲点強度 | 7.40              | 1.72            | 10.82             | 1.81            | 15.81             | 2.18            | 23.64             | 2.93            |
|          | 残留強度  | 5.64              | 3.39            | 7.50              | 7.64            | 16.42             | 6.42            | 24.73             | 7.43            |

表 3-3 実測データからピックアップした軸差応力と軸ひずみのデータ (HDB-3 孔 CD 試験)

|          |       | 静水圧×0.25          |                 | 静水圧×0.50          |                 | 静水圧×1.0           |                 | 静水圧×1.5           |                 |
|----------|-------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|          |       | 軸差<br>応力<br>(Mpa) | 軸ひ<br>ずみ<br>(%) | 軸差<br>応力<br>(Mpa) | 軸ひ<br>ずみ<br>(%) | 軸差<br>応力<br>(Mpa) | 軸ひ<br>ずみ<br>(%) | 軸差<br>応力<br>(Mpa) | 軸ひ<br>ずみ<br>(%) |
| 500<br>m | ピーク強度 | 16.89             | 1.35            | 13.37             | 1.10            | 27.35             | 2.00            | 22.52             | 1.70            |
|          | 変曲点強度 | 8.02              | 1.45            | 8.29              | 1.40            | 19.08             | 2.70            | 18.31             | 5.16            |
|          | 残留強度  | 4.16              | 5.15            | 7.08              | 6.21            | 14.64             | 5.61            | -                 | -               |

表 3-4 実測データからピックアップした軸差応力と軸ひずみのデータ (HDB-3 孔 CU 試験)

|              | 静水圧 × 0.25    |               |             | 静水圧 × 0.50    |               |             | 静水圧 × 1.0     |               |             | 静水圧 × 1.5     |               |             |
|--------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|-------------|
|              | 軸差応力<br>(Mpa) | 間隙水圧<br>(MPa) | 軸ひずみ<br>(%) | 軸差応力<br>(Mpa) | 間隙水圧<br>(MPa) | 軸ひずみ<br>(%) | 軸差応力<br>(Mpa) | 間隙水圧<br>(MPa) | 軸ひずみ<br>(%) | 軸差応力<br>(Mpa) | 間隙水圧<br>(MPa) | 軸ひずみ<br>(%) |
| ピーク強度        | 21.06         | 0.38          | 2.00        | 24.39         | 1.22          | 1.50        | 23.23         | 1.80          | 1.60        | 23.93         | 2.48          | 1.60        |
| 500<br>変曲点強度 | 13.05         | -0.19         | 3.25        | 12.80         | 0.03          | 2.00        | 15.43         | 0.49          | 2.21        | 18.21         | 1.91          | 2.06        |
| m<br>残留強度    | 8.70          | -0.33         | 7.65        | 10.54         | -0.32         | 6.41        | 12.10         | 0.04          | 7.82        | 16.97         | 1.13          | 7.02        |



前述の表 3-1～表 3-4 に示した軸差応力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )、間隙水圧  $\Delta u$ 、拘束圧  $\sigma_3$  から、以下の式を用いて偏差応力  $q_f$  と平均有効応力  $p_f$  を算出する。

偏差応力 :  $q_f = (\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2$  式 (3-1)

平均有効応力 :  $p_f = (\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2$  式 (3-2)

$\therefore \sigma'_1 = \sigma_1 - \Delta u, \quad \sigma'_3 = \sigma_3 - \Delta u$

ここで、 $\sigma'_1$ : 有効主応力、 $\sigma'_3$ : 有効拘束圧、である。

算出した偏差応力  $q_f$  と平均有効応力  $p_f$  の相関関係を、試験ごとに整理したものを図 3-9～図 3-18 に示す。図 3-9～3-11 は HDB-1 孔の 500m、600m、700m の CD 試験より得られた関係、図 3-12～3-16 は HDB-2 孔の 300m、400m、500m、600m、700m の CD 試験より得られた関係、図 3-17、3-18 は HDB-3 孔 500m の CD 試験、CU 試験より得られた関係である。

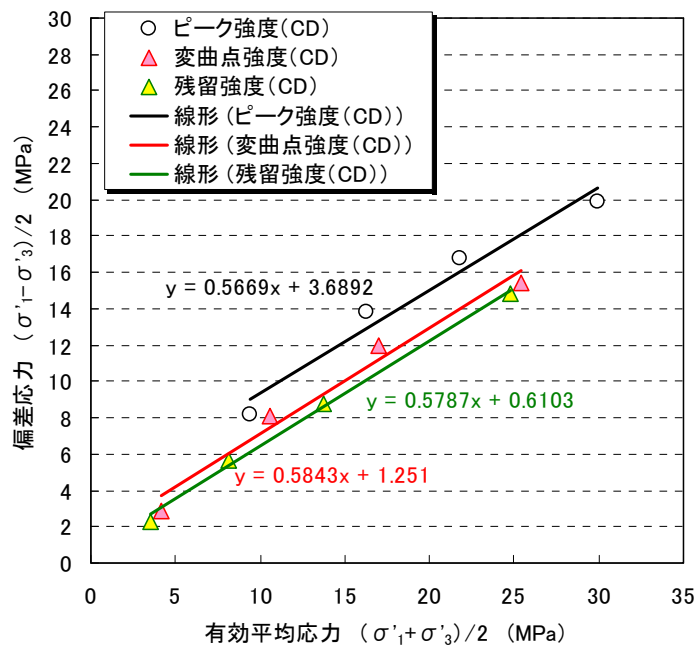


図 3-9 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係 (HDB-1 孔, 500m, CD 試験)

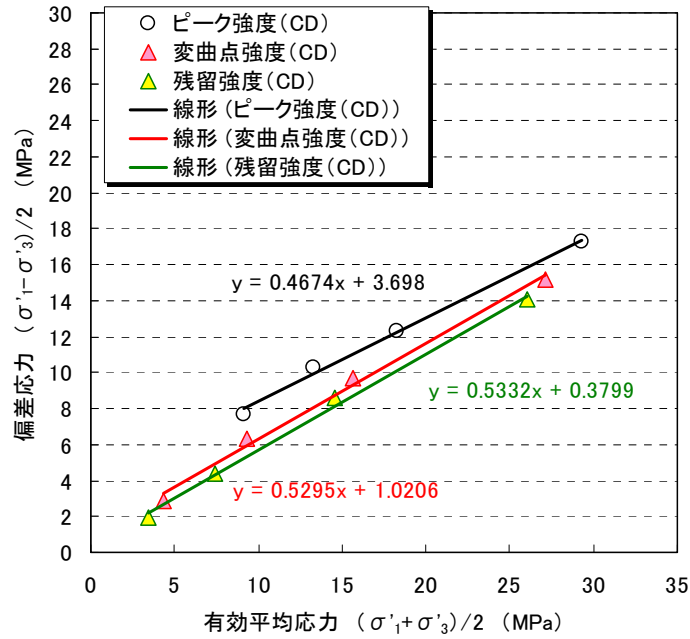


図 3-10 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係 (HDB-1 孔, 600m, CD 試験)

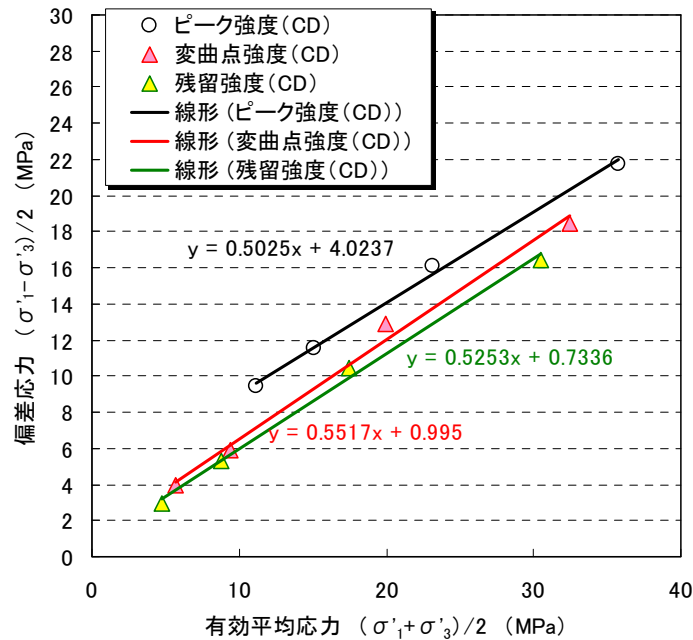


図 3-11 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係 (HDB-1 孔, 700m, CD 試験)

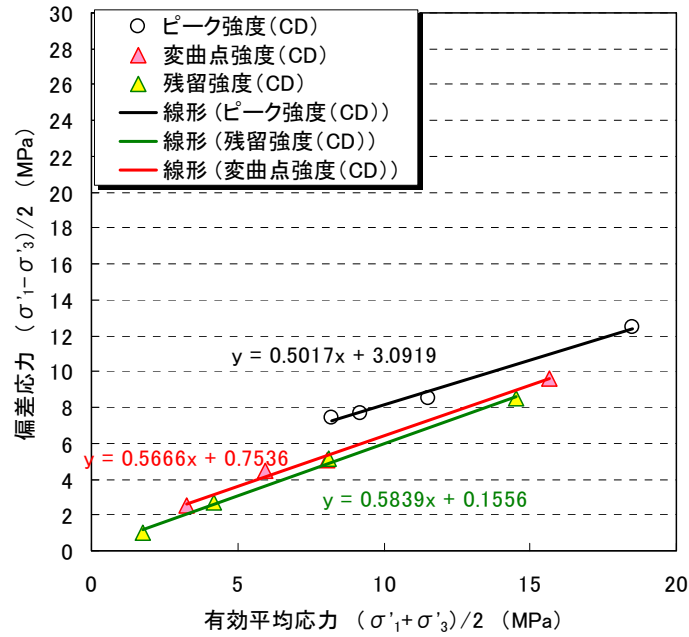


図 3-12 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係 (HDB-2 孔, 300m, CD 試験)

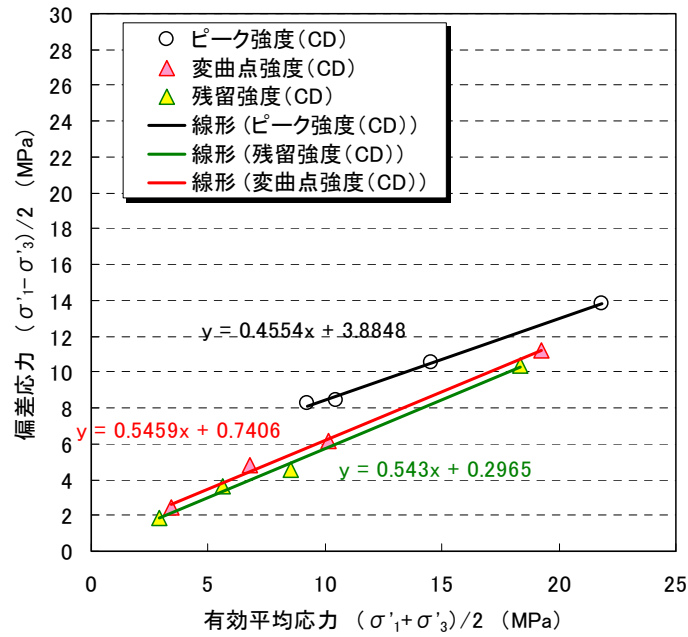


図 3-13 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係 (HDB-2 孔, 400m, CD 試験)

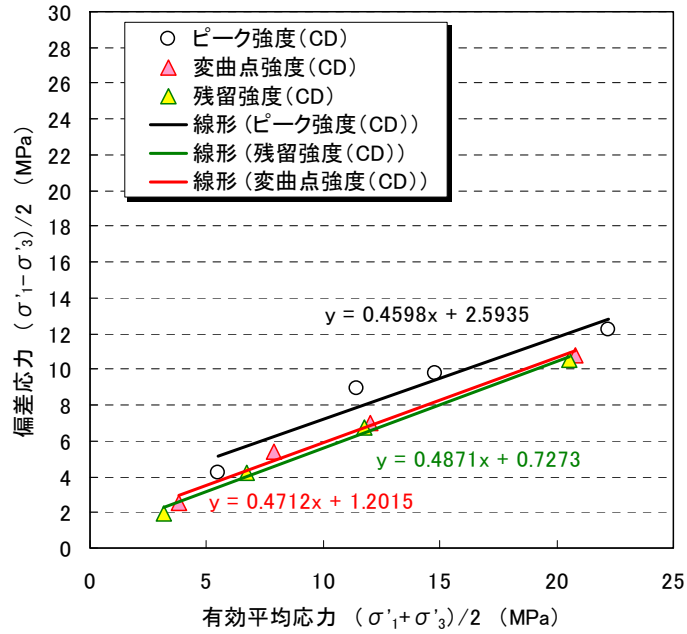


図 3-14 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係 (HDB-2 孔, 500m, CD 試験)

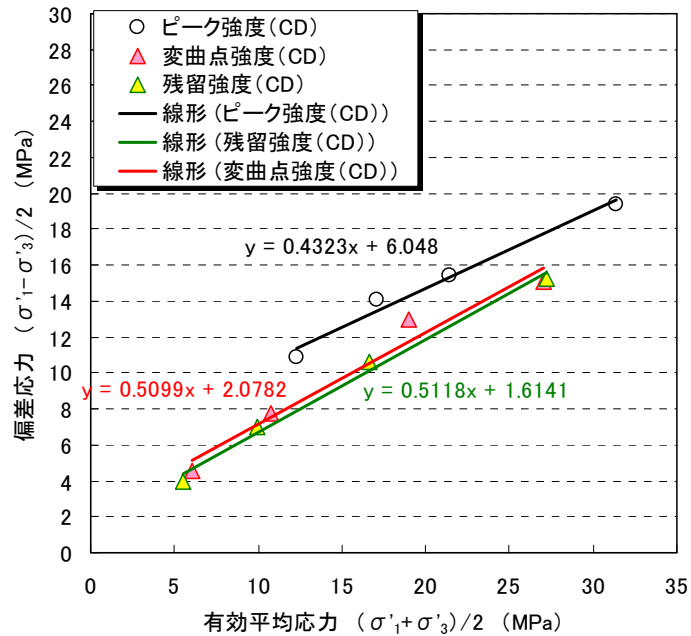


図 3-15 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係 (HDB-2 孔, 600m, CD 試験)

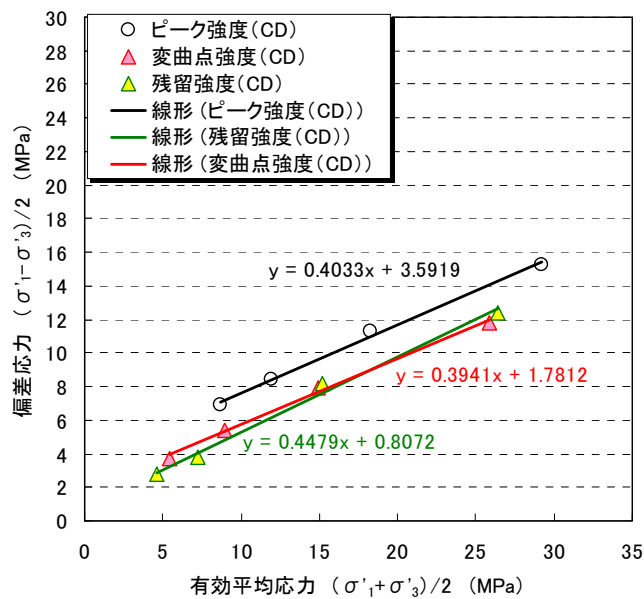


図3-16 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係 (HDB-2 孔, 700m, CD 試験)

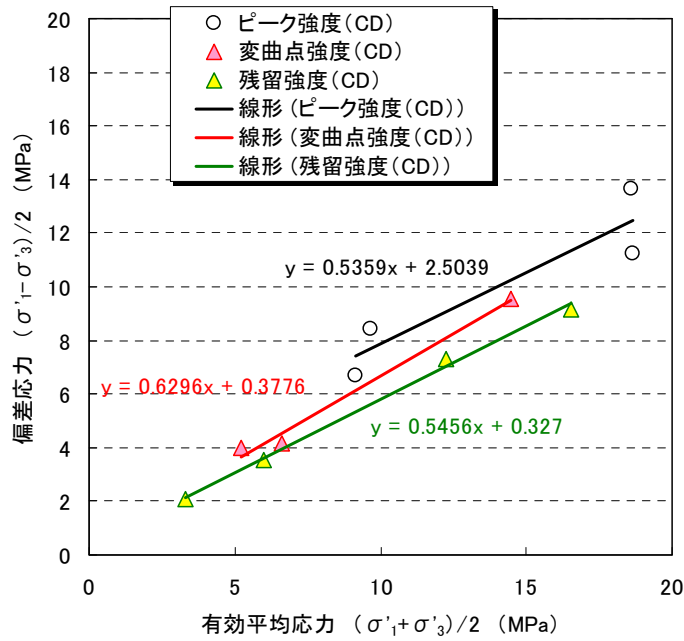


図 3-17 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係 (HDB-3 孔, 500m, CD 試験)

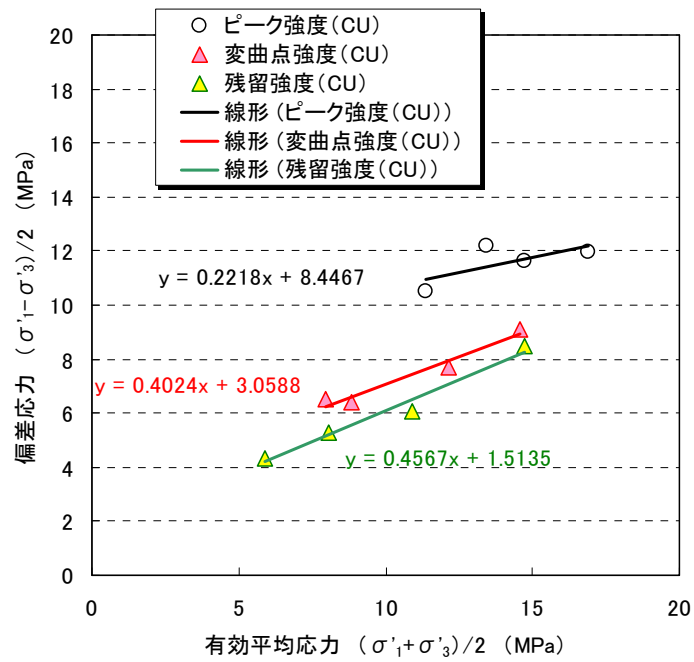


図 3-18 各強度の偏差応力と平均有効応力の関係 (HDB-3 孔, 500m, CU 試験)

図 3-9～3-18 に示した偏差応力  $q_f$  と平均有効応力  $p_f$  の関係は、図 3-19 に示すように、縦距  $q_0$  と勾配角  $\beta$  により表される。この関係は、図 3-9～3-18 の図中に示した近似線に相当する。また、Mohr-Coulomb の破壊基準は、図 3-20 に示すように、粘着力  $c'$ 、内部摩擦角  $\phi'$  の 2 つの強度定数により基準線が決定されるが、図 3-19 と図 3-20 に示した縦距  $q_0$  と勾配角  $\beta$ 、および粘着力  $c'$  と内部摩擦角  $\phi'$  の間には、一般的に以下のような関係が成り立つ<sup>10)</sup>。

$$\text{縦距} \quad : \quad q_0 = c' \cos \phi' \quad \text{式(3-3)}$$

$$\text{勾配角} \quad : \quad \tan \beta = \sin \phi' \quad \text{式(3-4)}$$

図 3-9～3-18 の図中に示した近似線から、各強度の縦距  $q_0$  と勾配角  $\beta$  を決定し、式(3-3) と 式(3-4) から、各強度の強度定数  $c'$ 、 $\phi'$  を算出した。算出した強度定数  $c'$ 、 $\phi'$  の結果の一覧を表 3-5 に示す。

また、解析で適用する岩盤物性値の「粘着力 C」は、軟岩系岩盤データセット「SR-C」の 3.0MPa である。そのため、表 3-5 の「強度定数  $c'$ 」を参考にして、ピーク強度を基準とした変曲点強度、残留強度の低下率を算出し、その低下率により軟化領域の強度低下を表現した。低下率から算出した軟化領域の各強度と軸ひずみの値を表 3-6 に示す。また図 3-21～3-23 には、それぞれ HDB-1, HDB-2, HDB-3 のピーク強度後のひずみ軟化挙動を示す。

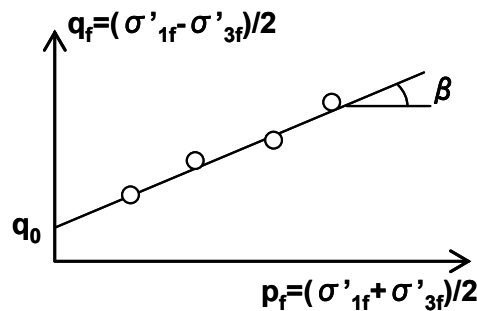


図 3-19 偏差応力  $q_f$  と平均有効応力  $p_f$  の関係

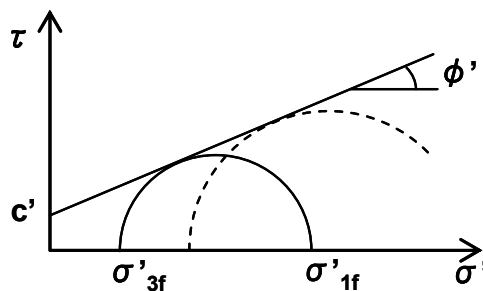


図 3-20 Mohr-Coulomb の破壊基準の概要

表 3-5 算出した強度定数  $c'$  ,  $\phi'$  の結果の一覧

|       |           |       | 粘着力<br>$c'$ (MPa) | 内部摩擦角<br>$\phi'$ (°) |
|-------|-----------|-------|-------------------|----------------------|
| HDB-1 | 500m      | ピーク強度 | 4.48              | 34.5                 |
|       |           | 変曲点強度 | 1.54              | 35.8                 |
|       |           | 残留強度  | 0.75              | 35.4                 |
|       | 600m      | ピーク強度 | 4.18              | 27.9                 |
|       |           | 変曲点強度 | 1.20              | 32.0                 |
|       |           | 残留強度  | 0.45              | 32.2                 |
|       | 700m      | ピーク強度 | 4.65              | 30.2                 |
|       |           | 変曲点強度 | 1.19              | 33.5                 |
|       |           | 残留強度  | 0.86              | 31.7                 |
| HDB-2 | 300m      | ピーク強度 | 3.57              | 30.1                 |
|       |           | 変曲点強度 | 0.91              | 34.5                 |
|       |           | 残留強度  | 0.19              | 35.7                 |
|       | 400m      | ピーク強度 | 4.36              | 27.1                 |
|       |           | 変曲点強度 | 0.88              | 33.1                 |
|       |           | 残留強度  | 0.35              | 32.9                 |
|       | 500m      | ピーク強度 | 2.92              | 27.4                 |
|       |           | 変曲点強度 | 1.36              | 28.1                 |
|       |           | 残留強度  | 0.56              | 29.2                 |
|       | 600m      | ピーク強度 | 6.71              | 25.6                 |
|       |           | 変曲点強度 | 2.42              | 30.7                 |
|       |           | 残留強度  | 1.88              | 30.8                 |
|       | 700m      | ピーク強度 | 3.93              | 23.8                 |
|       |           | 変曲点強度 | 1.94              | 23.2                 |
|       |           | 残留強度  | 0.90              | 26.6                 |
| HDB-3 | 500m (CD) | ピーク強度 | 2.97              | 32.4                 |
|       |           | 変曲点強度 | 0.49              | 39.0                 |
|       |           | 残留強度  | 0.39              | 33.1                 |
|       | 500m (CU) | ピーク強度 | 8.66              | 12.8                 |
|       |           | 変曲点強度 | 3.34              | 23.7                 |
|       |           | 残留強度  | 1.70              | 27.2                 |



表 3-6 ひずみ軟化領域における強度と軸ひずみの算出値の一覧

|       |       |       | 「SR-C」粘着力<br>C (MPa) | 軸ひずみ<br>$\epsilon$ (%) |
|-------|-------|-------|----------------------|------------------------|
| HDB-1 | 500m  | ピーク強度 | 3.00                 | 0.00                   |
|       |       | 変曲点強度 | 1.03                 | 0.76                   |
|       |       | 残留強度  | 0.50                 | 3.26                   |
|       | 600m  | ピーク強度 | 3.00                 | 0.00                   |
|       |       | 変曲点強度 | 0.86                 | 1.62                   |
|       |       | 残留強度  | 0.32                 | 8.89                   |
|       | 700m  | ピーク強度 | 3.00                 | 0.00                   |
|       |       | 変曲点強度 | 0.77                 | 1.17                   |
|       |       | 残留強度  | 0.56                 | 6.10                   |
| HDB-2 | 300m  | ピーク強度 | 3.00                 | 0.00                   |
|       |       | 変曲点強度 | 0.77                 | 0.76                   |
|       |       | 残留強度  | 0.16                 | 8.46                   |
|       | 400m  | ピーク強度 | 3.00                 | 0.00                   |
|       |       | 変曲点強度 | 0.61                 | 0.83                   |
|       |       | 残留強度  | 0.24                 | 4.10                   |
|       | 500m  | ピーク強度 | 3.00                 | 0.00                   |
|       |       | 変曲点強度 | 1.40                 | 0.91                   |
|       |       | 残留強度  | 0.57                 | 7.71                   |
|       | 600m  | ピーク強度 | 3.00                 | 0.00                   |
|       |       | 変曲点強度 | 1.08                 | 0.69                   |
|       |       | 残留強度  | 0.84                 | 6.35                   |
|       | 700m  | ピーク強度 | 3.00                 | 0.00                   |
|       |       | 変曲点強度 | 1.48                 | 0.79                   |
|       |       | 残留強度  | 0.69                 | 4.85                   |
| HDB-3 | 500m① | ピーク強度 | 3.00                 | 0.00                   |
|       |       | 変曲点強度 | 0.49                 | 0.37                   |
|       |       | 残留強度  | 0.39                 | 3.99                   |
|       | 500m② | ピーク強度 | 3.00                 | 0.00                   |
|       |       | 変曲点強度 | 1.16                 | 0.70                   |
|       |       | 残留強度  | 0.59                 | 5.55                   |

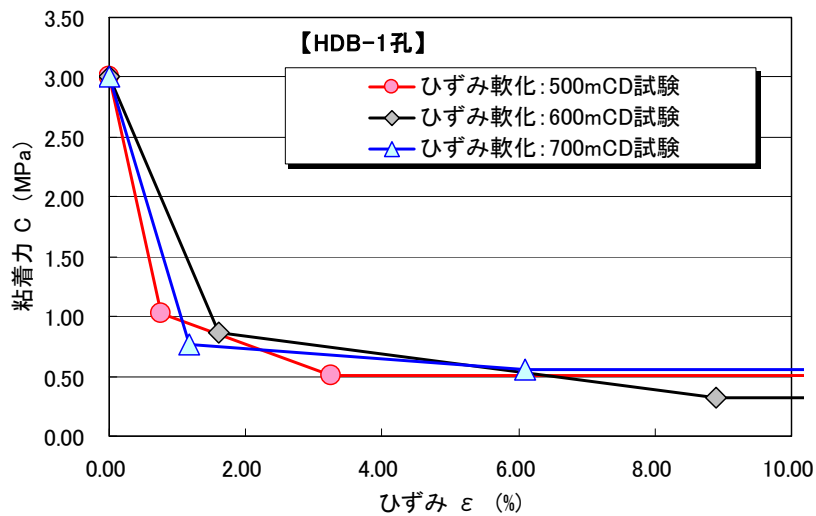


図 3-21 ピーク強度後のひずみ軟化挙動 (HDB-1 孔)

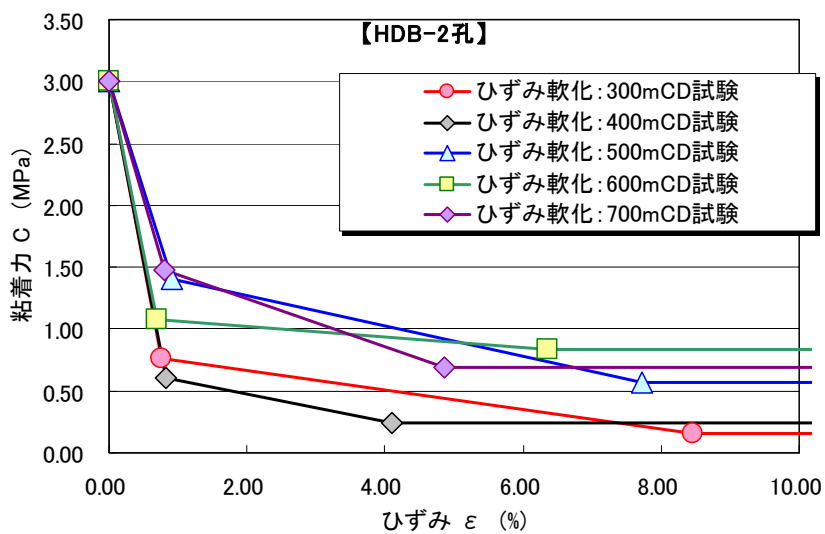


図 3-22 ピーク強度後のひずみ軟化挙動 (HDB-2 孔)

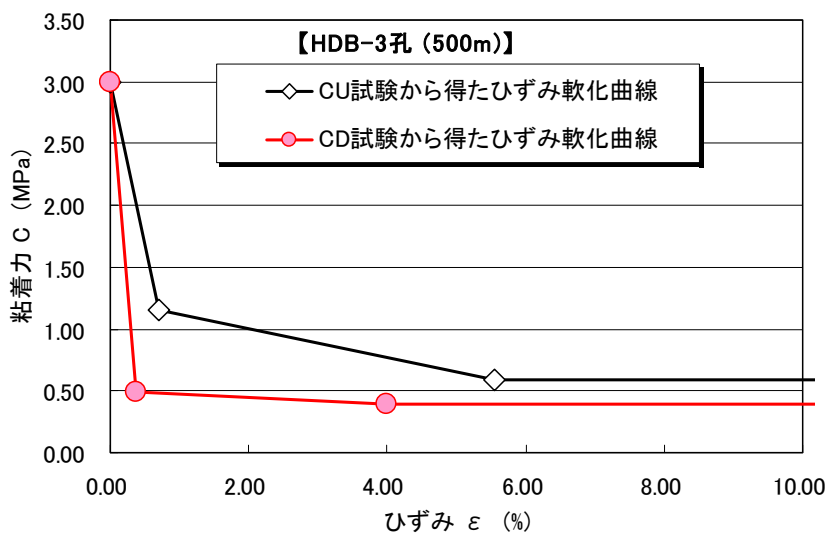


図 3-23 ピーク強度後のひずみ軟化挙動 (HDB-3 孔)

(3) ひずみ軟化領域のモデル化

前項では、それぞれの試験データからピーク強度後のひずみ軟化挙動を示した(図 3-21～3-23 参照)。ここでは、それらのひずみ軟化曲線を参考に、ピーク強度から変曲点強度までの低下挙動の傾きと低下強度に着目したひずみ軟化領域のモデル化を行う。

まずピーク強度後の強度低下の傾きに注目し、全試験データを参考にして、傾きの最大(赤線)と最小(緑線)、およびその平均(青線)の3パターンを選択した(図 3-24 参照)。それぞれ傾きの大きいものから、パターン A, B, C とする。次に、低下強度(変曲点強度)の値に着目し、全試験データの変曲点強度の値から、1.5MPa, 1.0MPa, 0.5MPa の3パターンを選択した。以上から、ピーク強度後の変曲点は、3パターンの強度低下の傾きと3パターンの変曲点強度値から、図 3-25 に示すように、9パターンが設定される。最後に、変曲点強度から残留強度までの挙動であるが、変曲点強度から残留強度までの低下率の平均値 0.52, およびそこまでの軸ひずみの増分の平均値 5.0%を用いて設定した。すなわち、変曲点強度 1.5MPa, 1.0MPa, 0.5MPa の 52%強度、0.78 MPa, 0.52 MPa, 0.26 MPa を残留強度とし、そこまでのひずみ量を 5.0%として整理すると、図 3-26 に示すような9パターンのひずみ軟化領域の挙動がモデル化された。

このように、実測モデルを参考に、ひずみ軟化モデルを9パターン作成した。「ピーク強度後の強度低下の傾き」は、「ピーク強度後の強度低下が急激に生じるのかどうか」を表し、「変曲点強度の値」は、「ピーク強度後、どの程度まで強度が低減するのか」を表している。これらのモデルを用いて解析を実施し、ひずみ軟化モデルの相違による塑性領域の発生状況を比較する。

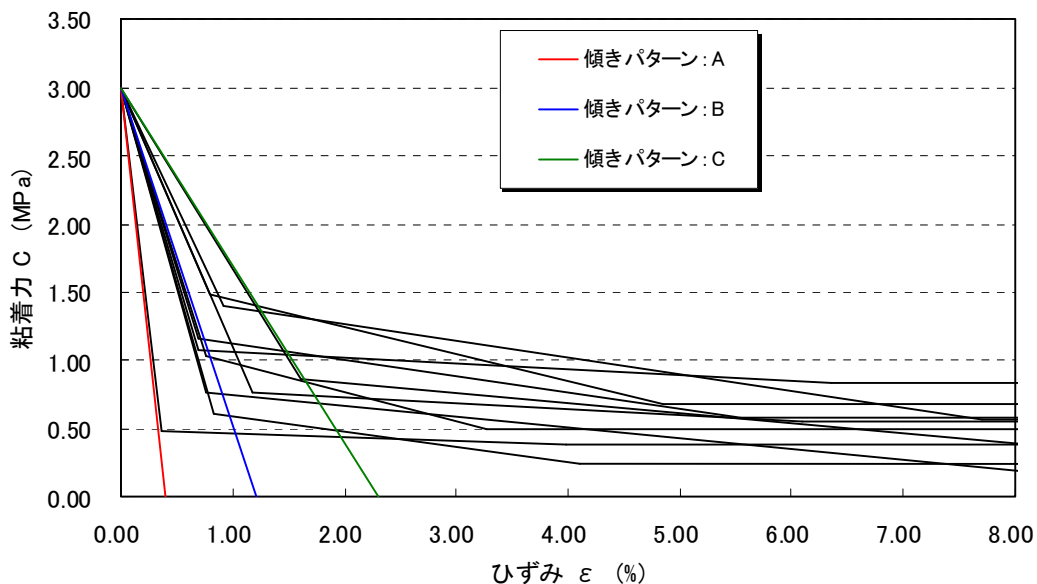


図 3-24 全試験データを参考に設定した強度低下の傾きパターン

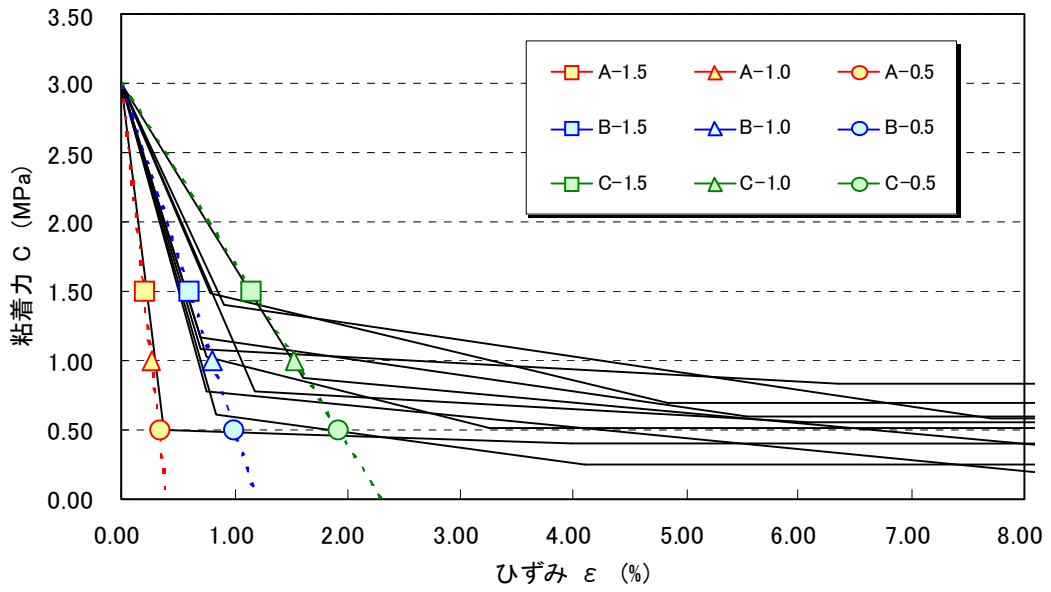


図 3-25 全試験データを参考に設定した変曲点強度のパターン

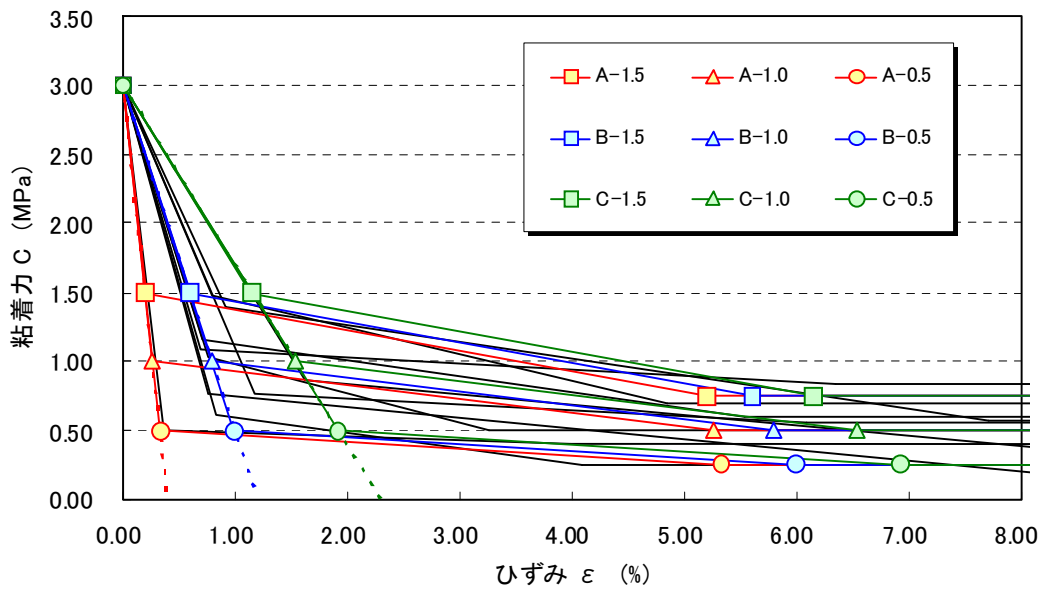


図 3-26 全試験データを参考に設定したひずみ軟化領域のモデル化パターン

3. 3 解析条件

検討する坑道仕様，解析モデル，境界条件，破壊基準，解析ステップ，側圧係数は，2. 2項に示した「基本ケース」の解析条件と同じであるため，そちらを参照（p3～p7）のこと。以下では，本解析検討に用いた岩盤物性値，及び実施した解析ケースについて述べる。

(1) 基本的な岩盤物性値

岩盤物性値は，第2次取りまとめ<sup>1)</sup> および平成19年度<sup>2)</sup> の検討に準拠し，軟岩系岩盤データセット「SR-C」を基本とし，表3-7に示す通りとした。

表3-7 岩盤物性値<sup>1),2)</sup>

|                                      | SR-C  |
|--------------------------------------|-------|
| 単位体積重量 $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | 22    |
| 弾性係数 E [MPa]                         | 3,500 |
| ポアソン比 $\nu$ [-]                      | 0.30  |
| 粘着力 C [MPa]                          | 3.0   |
| 内部摩擦角 $\phi$ [deg]                   | 28    |
| 引張強度 $\sigma_t$ [MPa]                | 2.1   |

(2) 解析ケース

解析ケースは，図3-26に示したモデル化パターンを参考に，「ピーク強度後の強度低下の傾き」と「変曲点強度の値」の組み合わせにより，表3-8に示す9ケースを設定した。

表3-8 解析ケース

|       |              | 強度低下の傾き   |           |           |
|-------|--------------|-----------|-----------|-----------|
|       |              | A : 傾き大   | B : 傾き中   | C : 傾き緩   |
| 変曲点強度 | 1.5MPa (50%) | CaseA-1.5 | CaseB-1.5 | CaseC-1.5 |
|       | 1.0MPa (33%) | CaseA-1.0 | CaseB-1.0 | CaseC-1.0 |
|       | 0.5MPa (17%) | CaseA-0.5 | CaseB-0.5 | CaseC-0.5 |

※変曲点強度のパーセンテージは，ピーク強度「3.0MPa」に対する割合を表している

### 3. 4 解析結果

本検討では、EDZに関連する指標として、塑性領域分布に着目した。図 3-27～3-35 に各解析ケースにおける塑性領域分布図を示す。ただし、ここでは各ケースの代表として、掘削途中（坑道 7 掘削時）、掘削終了時（坑道 13 掘削時）の結果のみを記載している（全ての結果は「添付資料 2」を参照）。

(1) 強度低下の傾きパターンAのケース

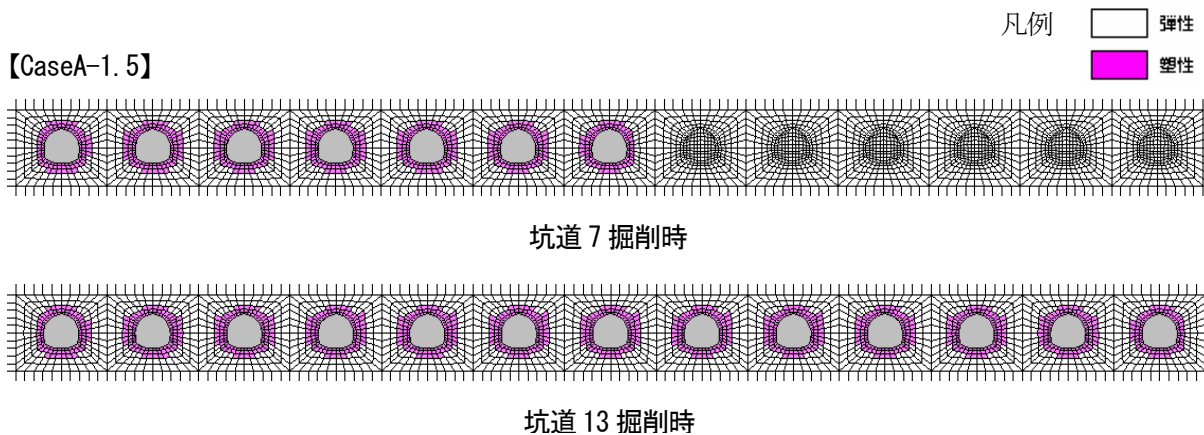


図 3-27 塑性領域分布図 (CaseA-1.5)

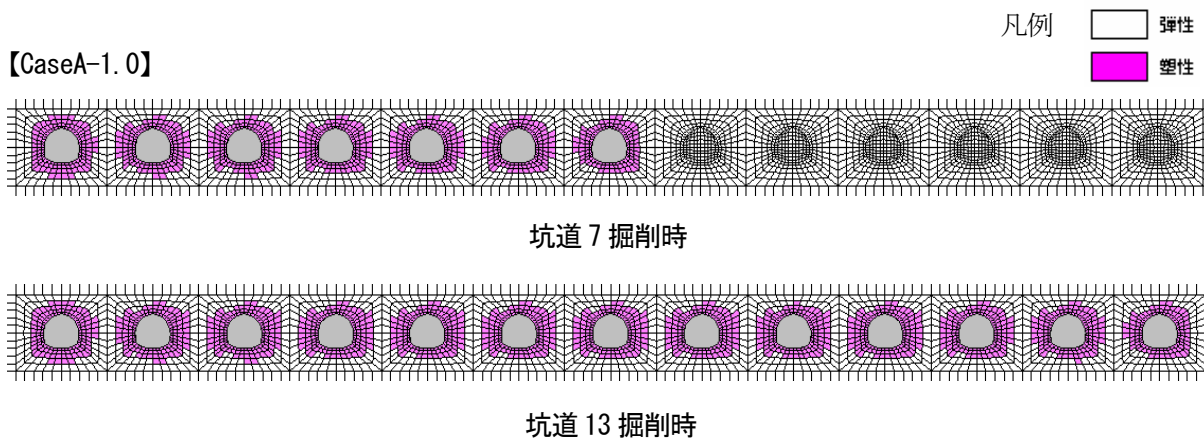


図 3-28 塑性領域分布図 (CaseA-1.0)

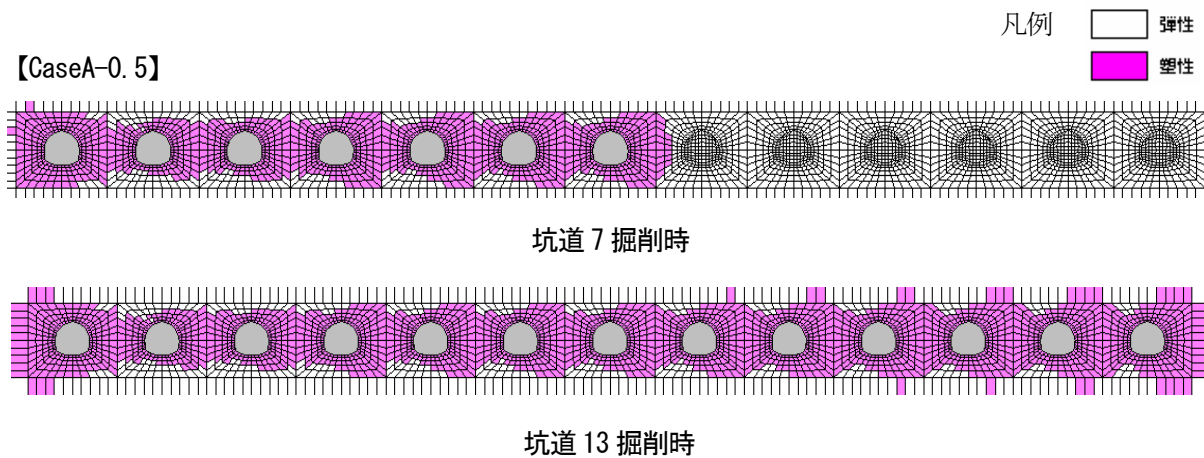


図 3-29 塑性領域分布図 (CaseA-0.5)



(2) 強度低下の傾きパターンBのケース

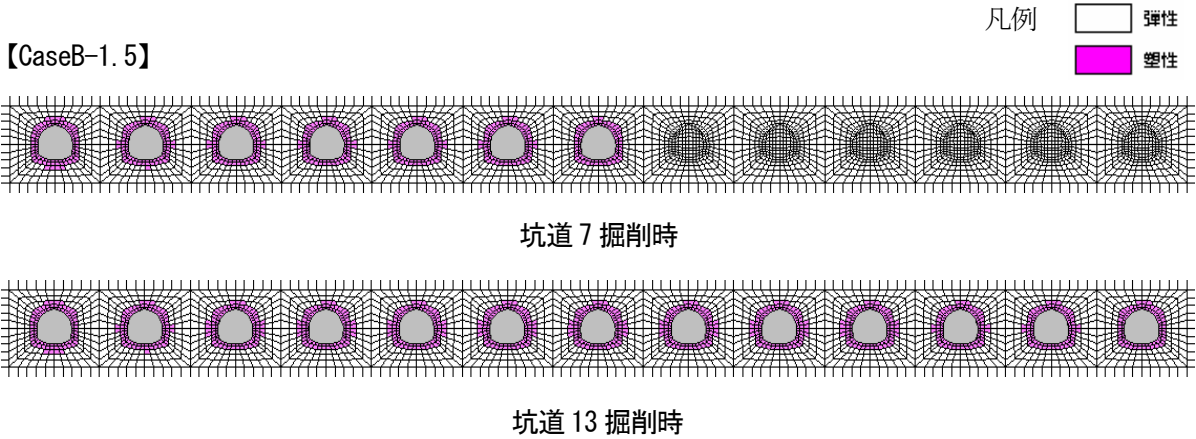


図3-30 塑性領域分布図 (CaseB-1.5)

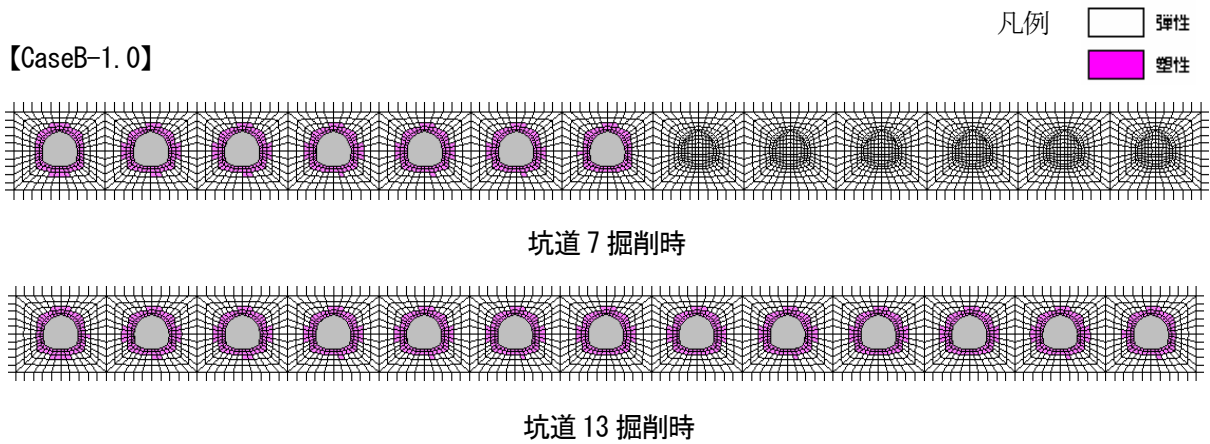


図3-31 塑性領域分布図 (CaseB-1.0)

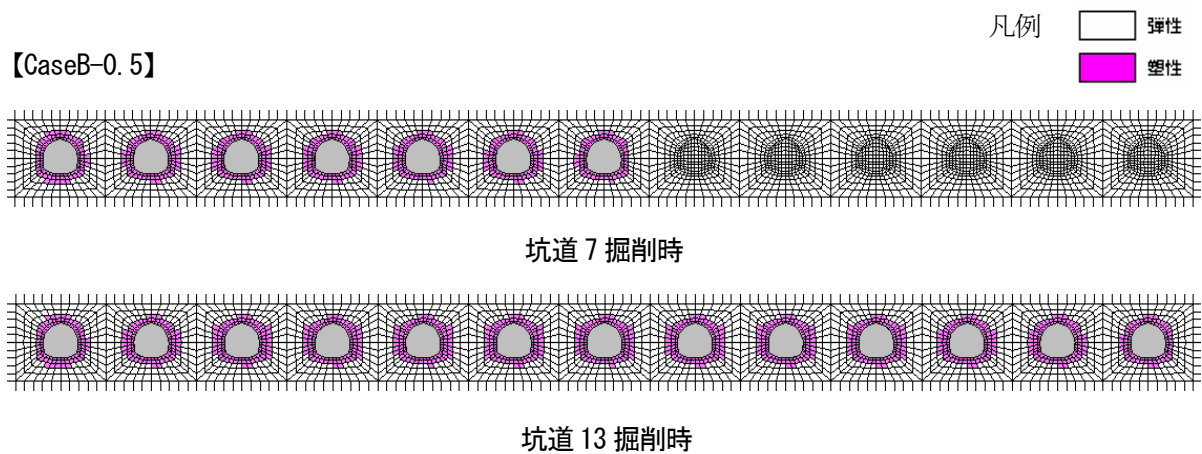


図3-32 塑性領域分布図 (CaseB-0.5)

(3) 強度低下の傾きパターンCのケース

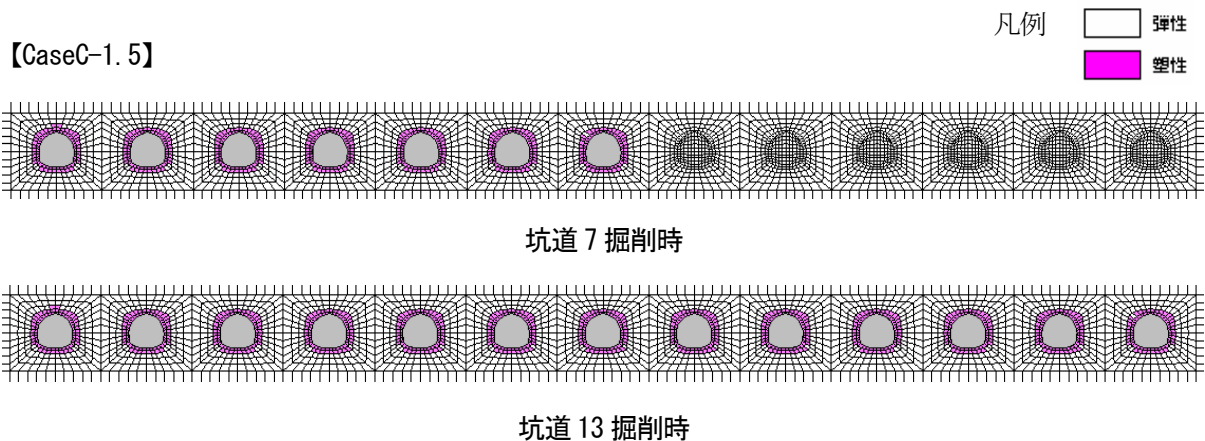


図 3-33 塑性領域分布図 (CaseC-1.5)

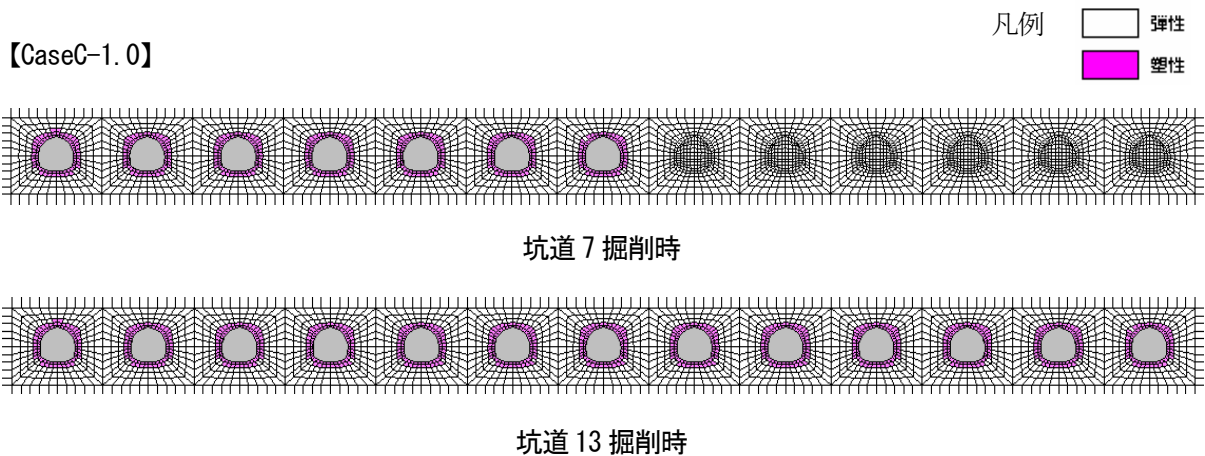


図 3-34 塑性領域分布図 (CaseC-1.0)

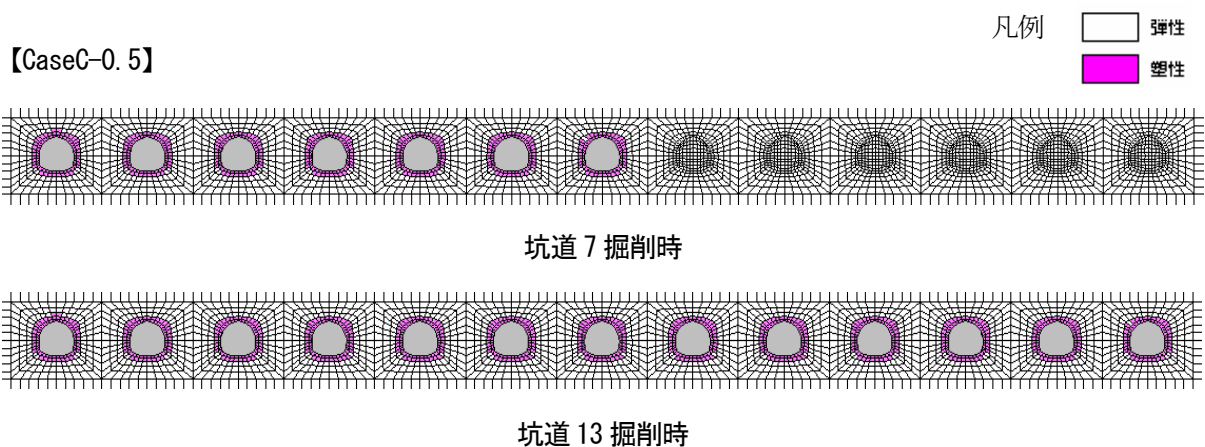


図 3-35 塑性領域分布図 (CaseC-0.5)

3. 5 まとめ

図3-27～3-35に示した塑性領域分布の内、掘削終了時（坑道13掘削時）の坑道7近辺の塑性領域分布に着目し、各ケースで整理したものを図3-36に示す。

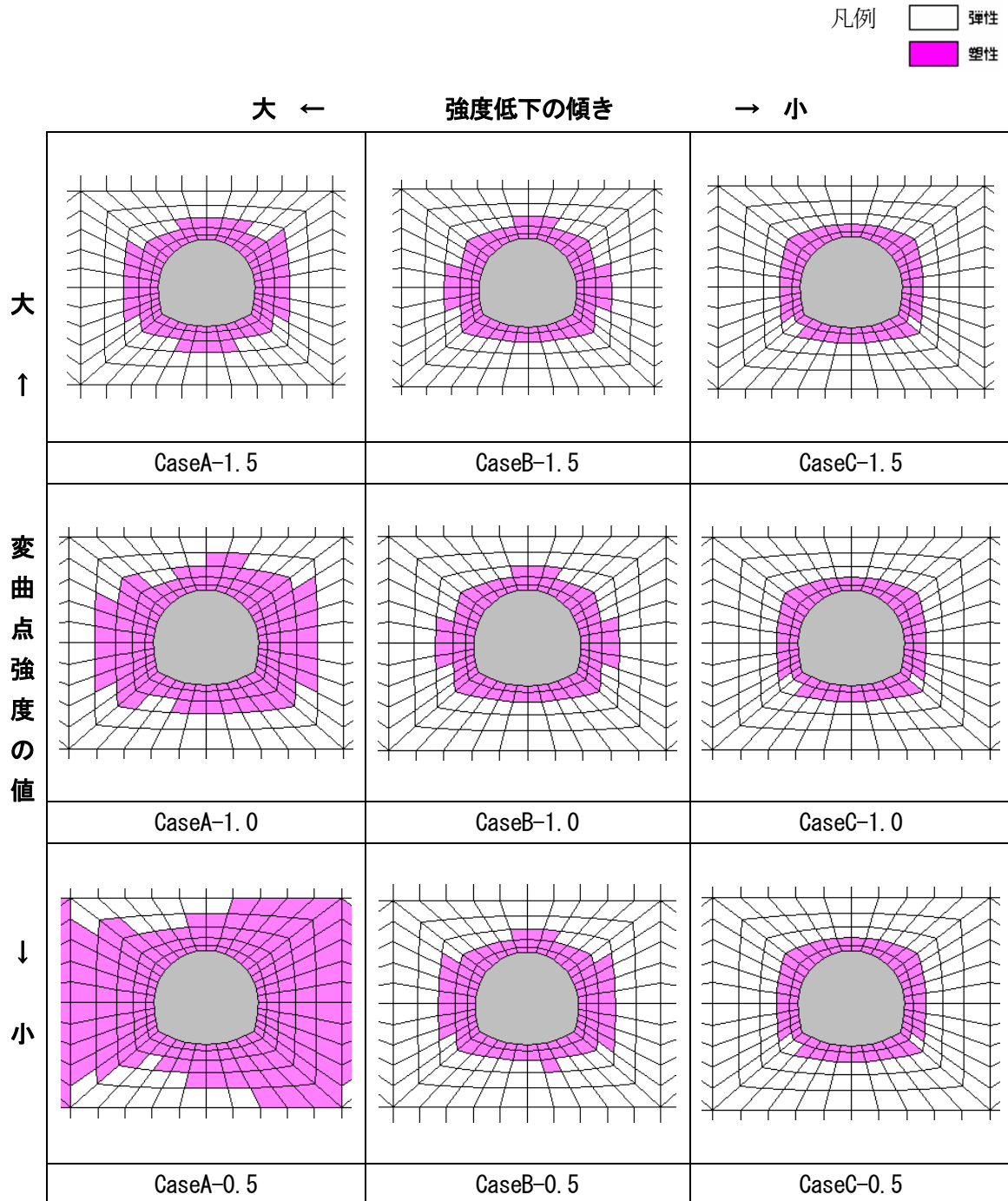


図3-36 掘削終了時の坑道7近辺の塑性領域分布図（全ケース）

今回試験データを参考に、ピーク強度以降の強度低下の傾きと変曲点強度の値に着目したひずみ軟化モデルを設定し、解析的検討を実施した。以上の結果から得られた知見を以下に示す。また、今回の一連の解析では、支保工を考慮していないことに留意されたい。

- ・ ピーク強度以降の強度低下の傾きが大きくなるに従い、塑性領域の範囲が大きくなることを確認した。「強度低下の傾きが大」とは、ピーク強度後、急激に強度低下が生じる現象を表している。
- ・ ただし、変曲点強度の値が大きくなると、塑性領域の増加は抑制されることがわかる。
- ・ 変曲点強度の値が小さくなるに従い、塑性領域の範囲が大きくなることを確認した。「変曲点強度の値が小」とは、ピーク強度後の強度が著しく低下することを表している。
- ・ ただし、強度低下の傾きが小さい場合、塑性領域の増加は抑制されることがわかる。特に「ケース C」シリーズでは、変曲点強度の値にかかわらず、塑性領域の範囲に変化は見られない。
- ・ 以上から、「強度低下の傾き」と「変曲点強度の値」は両者の組み合わせにより、塑性領域の範囲が大きく変化するため、対象とする岩盤領域の三軸試験データから、ピーク強度以降の挙動を正確に把握することが重要であることがわかる。

この解析結果を踏まえ、ひずみ軟化モデルの参考にした三軸試験データを振り返り、以下のことが確認できた。

- ・ 「強度低下の傾き」に着目して、試験データから直接得た図 3-26 のひずみ軟化モデルを確認すると、パターン A に相当する試験データは「HDB-3 孔深度 500mCD 試験」のみ、またパターン C に相当する試験データは「HDB-1 孔深度 600mCD 試験」のみであり、ほとんどの試験データはパターン B に属していることがわかった。
- ・ 「変曲点強度の値」に着目して、試験データから直接得た図 3-26 のひずみ軟化モデルを確認すると、データに偏りや傾向は見られず、およそ 0.5~1.5MPa の間である程度ばらついていることがわかった。
- ・ 以上から、ひずみ軟化モデルで優先的に着目すべき点は「強度低下の傾き」であり、「パターン A」に近い挙動（ピーク強度後に急激な強度低下が生じるパターン）を示す場合は、有意な問題である可能性が高く、次に「変曲点強度の値」に留意した軟化領域の挙動の確認が必要である。
- ・ このように、多連設坑道の詳細設計の際に、対象岩盤がひずみ軟化挙動を示すと判断された場合、解析に用いるひずみ軟化モデルを適切に選定し、モデル化することが重要であると言える。

3. 6 幌延深地層研究施設の岩盤物性を考慮した試解析

前項までの検討結果を踏まえ、ここでは、幌延深地層研究施設で得られている実際の岩盤物性値を用いて、ひずみ軟化モデルを考慮した試解析を実施した。以下にその結果を示す。

(1) 解析条件

森岡ら<sup>11)</sup>により得られた幌延深地層研究施設の岩盤物性値を表3-9に示す。対象とする岩盤は、深度500m近辺の硬質頁岩であり、かつ適用した三軸試験データ(表3-5参照)の強度定数Cがおおよそ3.0を超えていたことから、表3-10に示す岩級区分「CM-M」の値を用いることとした。引張強度 $\sigma_t$ については、一軸圧縮強度 $Q_u$ の1/10として、1.3MPaと設定した。

表3-9 幌延深地層研究施設で得られた岩盤物性値の一覧<sup>11)</sup>

| 岩級区分 | 菊地の岩級区分との対比 | 岩石物性値                       |           |          |        | 岩盤物性値                        |                 |          |        | ヘアークラックによる低減係数(Hr低減係数) |      |
|------|-------------|-----------------------------|-----------|----------|--------|------------------------------|-----------------|----------|--------|------------------------|------|
|      |             | 単位体積重量<br>kN/m <sup>3</sup> | Qu<br>MPa | E<br>MPa | 静ポアソン比 | 変形(平板載荷試験相当)<br>(割れ目による低減係数) |                 | 強度       |        | 変形                     | 強度   |
|      |             |                             |           |          |        | 変形係数<br>MPa                  | 静弾性係数<br>MPa    | C<br>MPa | $\phi$ |                        |      |
| CM-H | 平均的CM級      | 18.5                        | 13.0      | 1740     | 0.186  | 1500<br>(1.00)               | 2500<br>(1.00)  | 5.2      | 25     | 0.8                    | 0.3  |
| Hr有  | ⑦1200       |                             |           |          |        | ⑦2000                        | ⑧1.6            | ⑨25      |        |                        |      |
| CM-M | ①CM級下限      | 18.5                        | 13.0      | 1740     | 0.186  | ②1000<br>(0.67)              | ②1500<br>(0.60) | ③3.1     | ④25    | ⑥0.9                   | ⑥0.5 |
| Hr有  | ⑦900        |                             |           |          |        | ⑦1350                        | ⑧1.6            | ⑨25      |        |                        |      |
| CM-L | 平均的CL級      | 18.5                        | 13.0      | 1740     | 0.186  | 400<br>(0.27)                | 500<br>(0.20)   | ③1.0     | ④25    | ⑤1.0                   | ⑤1.0 |
| Hr有  | ⑦400        |                             |           |          |        | ⑦500                         | ⑧1.0            | ⑨25      |        |                        |      |
| CL-H | CL級上限       | 15.1                        | 3.6       | 500      | 0.164  | 800<br>(1.00)                | 1300<br>(1.00)  | 2.2      | 15     | 0.8                    | 0.7  |
| Hr有  | ⑦640        |                             |           |          |        | ⑦1040                        | ⑧1.5            | ⑨15      |        |                        |      |
| CL-M | 平均的CL級      | 15.1                        | 3.6       | 500      | 0.164  | 400<br>(0.50)                | 500<br>(0.38)   | ③0.8     | ④15    | ⑥0.9                   | ⑥0.8 |
| Hr有  | ⑦360        |                             |           |          |        | ⑦450                         | ⑧0.6            | ⑨15      |        |                        |      |
| CL-L | ①CL級下限      | 15.1                        | 3.6       | 500      | 0.164  | ②200<br>(0.25)               | ②300<br>(0.23)  | ③0.5     | ④15    | ⑤1.0                   | ⑤1.0 |
| Hr有  | ⑦200        |                             |           |          |        | ⑦300                         | ⑧0.5            | ⑨15      |        |                        |      |

【設定方法】 太字：原位置・室内試験結果に基づく設定値。菊地の岩級区分との対応結果  
 ①：孔内水平載荷試験のデータがない岩級区分について、菊地の岩級区分との対比結果  
 ②：①による変形係数、静弾性係数の推定結果および低減係数  
 ③：CM-H、CL-Hの粘着力に静弾性係数での割れ目による低減係数を乗じて算出した値。  
 ④： $\phi$ は泥岩の特性から割れ目の影響無と評価  
 ⑤：明瞭な割れ目が多数存在するCM-L、CL-Lはヘアークラックの影響無と評価  
 ⑥：CM-M、CL-Mの低減係数は、-H、-Lの中間程度に設定。  
 ⑦：変形係数、静弾性係数は、変形のヘアークラック低減係数を乗じて算出した値。  
 ⑧：Cは、強度のヘアークラック低減係数を乗じて算出した値。  
 ⑨： $\phi$ は、ヘアークラックによる影響無と評価。

表3-10 設定した岩盤物性値

|                                      | 「CM-M」 |
|--------------------------------------|--------|
| 単位体積重量 $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | 18.5   |
| 弾性係数 E [MPa]                         | 1,500  |
| ポアソン比 $\nu$ [-]                      | 0.186  |
| 粘着力 C [MPa]                          | 3.1    |
| 内部摩擦角 $\phi$ [deg]                   | 25     |
| 引張強度 $\sigma_t$ [MPa]                | 1.3    |

また、ひずみ軟化モデルのケースは、平均的なケースである「CaseB-1.0」を参考にして、ひずみ軟化モデルを設定した（図 3-37 参照）。また側圧係数については、森岡ら<sup>10)</sup>により、鉛直応力を 1 として最小主応力：最大主応力=0.9：1.3 が得られていたため、その平均値である「1.1」を設定している。

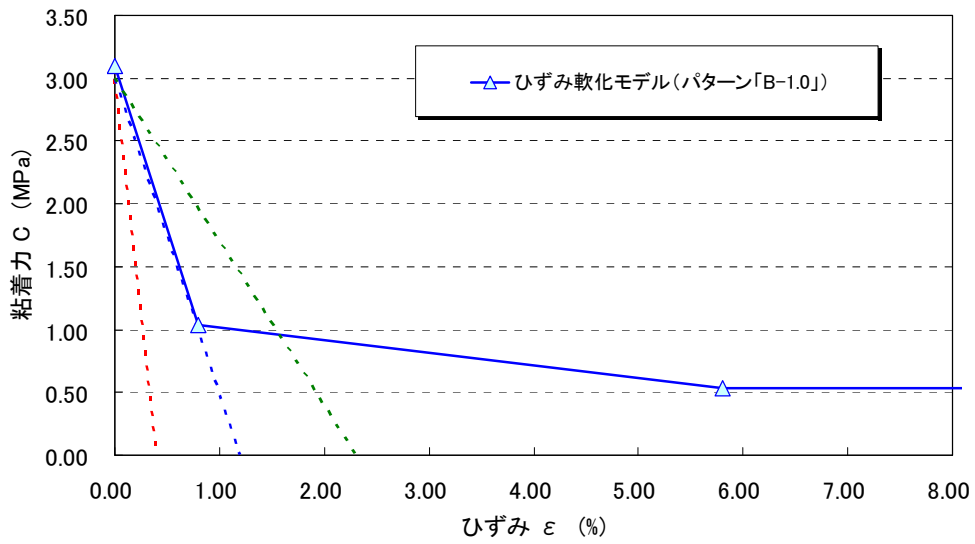


図 3-37 「CaseB-1.0」を参考にモデル化したひずみ軟化モデル



(2) 解析結果

解析結果として、図 3-38 には、坑道 7 まで掘削した時と掘削終了時の坑道 1~13 までの塑性領域分布を示す（全ての結果は「添付資料 3」を参照）。また図 3-39 には、掘削終了時の坑道 6~8 までを拡大した塑性領域分布を示す。

ひずみ軟化パターン「CaseB-1.0」の結果（図 3-31, 図 3-36 参照）と、今回の結果（図 3-38, 図 3-39 参照）を比べると、両者で粘着力  $C$  はほぼ同等であり、かつ同じひずみ軟化モデルを適用しているにもかかわらず、幌延岩盤物性値を適用したケースの方が塑性領域の範囲が大きく出ている。これは、内部摩擦角  $\phi$  や引張強度  $\sigma_t$  については幌延岩盤の方が小さいこと、また変形係数  $E$  も小さいため掘削にともなう坑道周辺岩盤のせん断変形が大となることから、幌延岩盤の方が塑性化しやすかったものと考えられる。このように、ひずみ軟化モデルのパターンのみで塑性領域の出現範囲がパターン化されるわけではなく、他の岩盤物性値も塑性領域範囲に大きな影響を及ぼすことが示唆される。2章においても、岩盤物性値の違いによる塑性領域範囲の相違を示しているが、そのことを再度示す結果となった。

いずれにしても、ひずみ軟化領域を適切にモデル化することが望ましいことには変わりはないが、そのことだけに留意するのではなく、対象とする岩盤の状態を含め、対象とする岩盤の物性値全体に留意した確認が必要である。

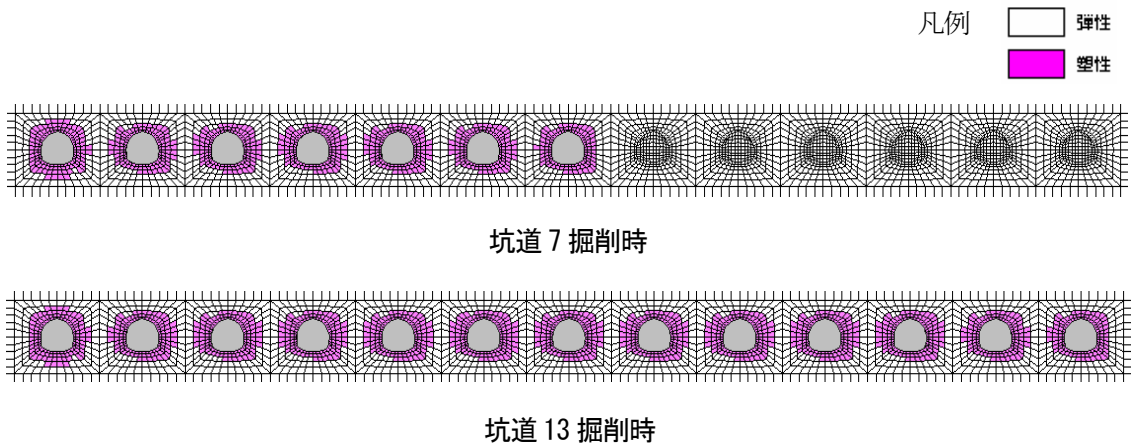


図 3-38 坑道 1~13 の塑性領域分布図（幌延の岩盤物性値を参考）

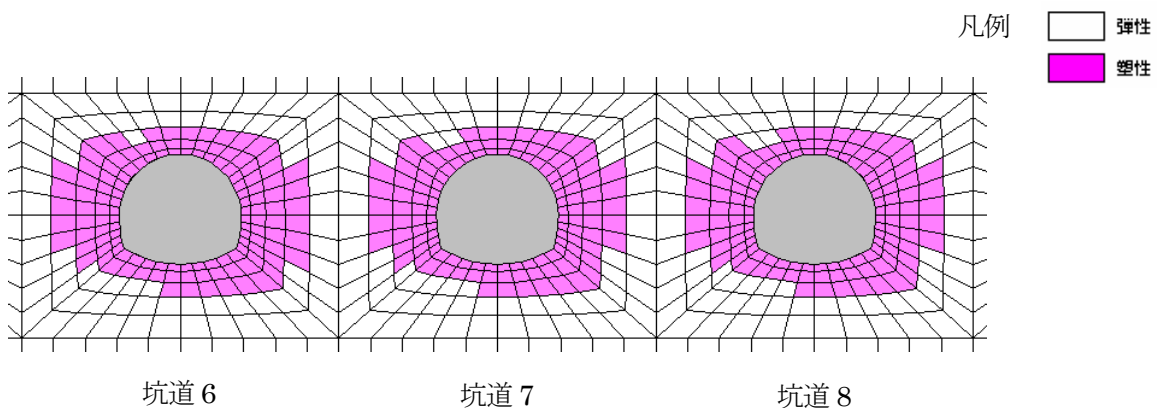


図 3-39 坑道 6~8 の塑性領域分布拡大図（幌延の岩盤物性値を参考）

## 4. 設計実務への適用を考慮した多連設坑道設計手法の体系化案

### 4. 1 処分施設を構成する坑道群の設計フロー

処分施設を構成する坑道群は地下深部に建設されるため、地圧が大きくなることが予想され、空洞の力学的安定性を確保することが優先事項となり、そのため支保工の設置が必要となる場合がある。坑道支保工の設計には、経験に基づく方法と力学的計算に基づく方法の2種類があるが、地層処分施設のような大深度地下での施工事例が少ないこと、パネル状の坑道群の建設であること、など経験の無い要素を数多く含むため、第2次取りまとめ<sup>1)</sup>では計算によって設計することが示されている。処分施設を構成する各坑道群の設計フロー<sup>1)</sup>を図3-40に示す。ここに示された設計のステップは、大きく以下のステップによって構成されている。

**STEP 1:** 各坑道に対して、理論解析にて概略の支保工を算定する。

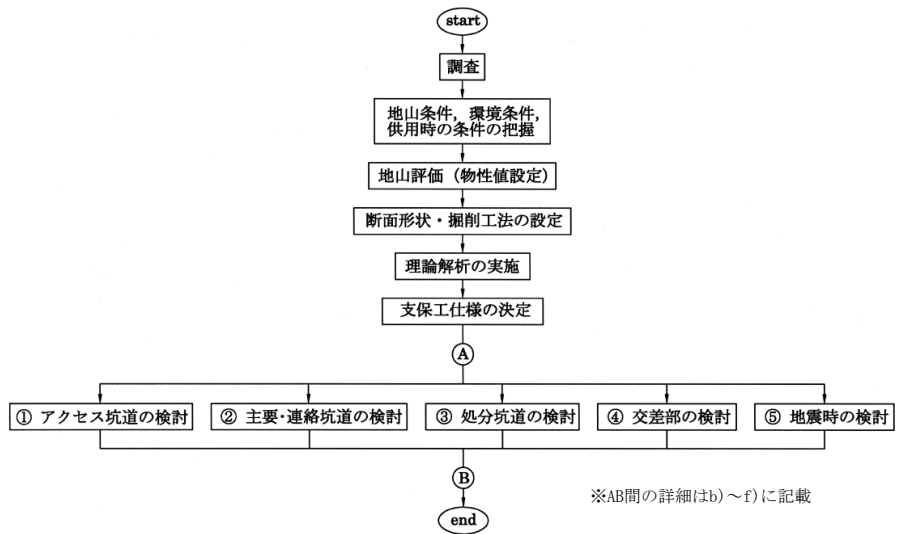
**STEP 2:** 数値解析により、アクセス坑道を単一空洞として、その他の坑道を連設空洞として、理論解析で求めた支保工仕様の妥当性を確認するとともに、力学的安定性の観点から坑道離間距離、処分孔間隔を設定する。

**STEP 3:** これらの検討で求められた支保工仕様により、数値解析を用いて坑道の地震時安定性、坑道交差部における補強工の必要範囲を設定する。

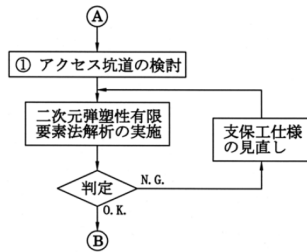
なお、実施設計にあたっては、事前調査で得られた情報のみでなく、情報化施工の考え方にに基づき、建設時に得られた調査結果および計測結果を、適宜坑道の設計に反映していく必要性が示されている。

4. 2項で述べた「多連設坑道の設計」に関する一連の研究は、図3-40中の「d」処分坑道の検討」のフローに相当する。第2次取りまとめ<sup>1)</sup>における「d」処分坑道の検討」は、連設坑道（双設トンネル）としての考え方が含まれているものの、単一坑道半断面をモデルとした解析であり、かつ坑道離隔と支保工の仕様に着目した検討であった。

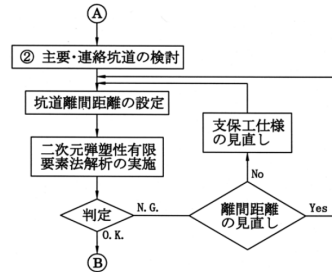




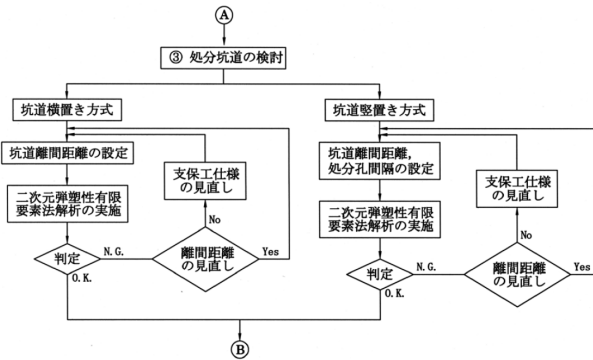
a) 全体図



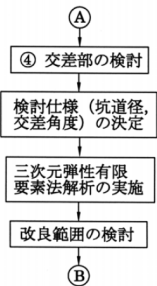
b) ①アクセス坑道の検討



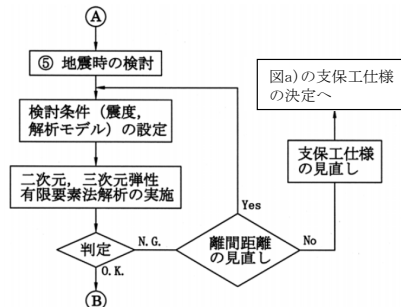
c) ②主要・連絡坑道の検討



d) ③処分坑道の検討



e) ④坑道交差部の検討



f) ⑤地震時の検討

図 3-40 処分坑道の設計における検討フロー<sup>1)</sup>

## 4. 2 これまでの検討内容

これまでの地層処分施設における多連設坑道の設計手法に関しては、昨年度までに、「地層処分施設における多連設坑道の設計手法に関する検討」<sup>2)</sup>、「地層処分施設における多連設坑道の設計手法に関する検討(Ⅱ)」<sup>3)</sup>、及び「地層処分施設における多連設坑道の設計手法に関する検討(Ⅲ)」<sup>4)</sup>で取りまとめている。これらの検討で明確になったこと、確認したことを以下に簡単に整理する。

### (1) 「地層処分施設における多連設坑道の設計手法に関する検討」<sup>2)</sup>について

第2次取りまとめ<sup>1)</sup>の考え方にに基づき、さらに詳細化・実用化を図ることを目的とし、「EDZの発生挙動に関する検討」「ピラーの安定性評価に関する検討」を実施した。それにより、以下の知見を得ている。なお、ここで言う「ピラー」とは、坑道間の岩盤部分のことである。

- ・ 1パネル分を想定した「多連設坑道モデル」と、第2次取りまとめ<sup>1)</sup>の考え方である単一坑道を想定した「簡略化モデル」のEDZ発生挙動を比較したところ、両モデルによる発生挙動が大きく異なることから、解析領域を十分に確保した「多連設坑道モデル」によって、EDZ発生挙動を正確に予測することが重要である。
- ・ 「ピラーの安定性評価」の考え方を基に、坑道間の安定性を評価したところ、多連設坑道モデルによる数値解析により、ピラー強度およびピラーに作用する荷重を適切に評価できることがわかった。

### (2) 「地層処分施設における多連設坑道の設計手法に関する検討(Ⅱ)」<sup>3)</sup>について

本報告書では、支保工の仕様や坑道離間距離などの合理的な設計手法を構築するための課題として、以下の5点を挙げている。

- ① 支保工および補助工法の効果に関する解析的検討
- ② 坑道の掘削順序の影響に関する解析的検討
- ③ 数値解析に用いる構成則の影響に関する解析的検討
- ④ 作業中の岩盤の時間依存性挙動（クリープ挙動）を考慮した解析的検討
- ⑤ 3次元を考慮した解析的検討

さらに「FEM弾塑性解析手法の信頼性向上に関する検討」として、「適切な解析領域の設定検討」と「FEM弾塑性解析の留意点」、および上記5課題の①に相当する「支保工および補助工法の効果検討」を実施した。それにより、以下の知見を得ている。

- ・ 1パネル分を想定した「多連設坑道モデル」をモデル化する場合、側方領域は3W～5W（Wは坑道群の幅）、底面領域は3W～4W程度が適切であることが確認された。またピラー（坑道間岩盤領域）で塑性領域が干渉しあう場合はピラーに作用する荷重が適切に評価できないことが判明したため、ピラー全域が塑性化しないような坑道離隔を取る必要があることがわかった。

- ・ 「支保工および補助工法の効果検討」では、支保工の設置時期や剛性により塑性領域の抑制効果が異なること、ならびにピラーの力学的特性(主に粘着力)の改良を指向する補助工法がとれば、塑性領域発生の抑制効果に即効性が高いことがわかった。

(3) 「地層処分施設における多連設坑道の設計手法に関する検討(Ⅲ)」<sup>4)</sup>について

この報告書では、(Ⅱ)に引き続き合理的な設計手法を構築するために挙げた5つの課題の内、③に相当する「数値解析に用いる構成則の影響に関する解析的検討」および⑤に相当する「3次元モデルによる応力解放率に関する解析的検討」を実施した。これらの解析的検討を通じて以下の知見を得ている。

- ・ 「数値解析に用いる構成則の影響に関する解析的検討」では、多連設坑道の詳細設計時、対象岩盤がひずみ軟化挙動を示すかどうかを確認し、解析に用いる構成則を適切に選定することが重要であることを確認した。
- ・ 「3次元モデルによる応力解放率に関する解析的検討」では、2次元解析において、坑道ごとに異なる応力解放率を設定する必要はなく、全ての坑道に対して同値の応力解放率を設定してよいことがわかった。

#### 4. 3 多連設坑道設計手法の体系化案の作成

地層処分施設は処分坑道，主要・連絡坑道，アクセス坑道などから構成され，数多くのトンネルがパネル状に掘削される。これらの地下空洞（坑道群）の全体的な設計フローとして，第2次取りまとめでは，図3-34に示したステップを踏み，坑道群の安定性評価およびその指標を提示している。

これまで実施してきた「多連設坑道の設計」に関する研究成果と，本年度に得た知見を参考に，パネル状に配置された多数の坑道群である「多連設坑道」を設計することを考えると，坑道離隔距離と支保工仕様の他にも多連設坑道特有の着目すべき点はいくつかあり（例えば，掘削順序の影響や適切な補助工法の検討など），またこれらの相互影響を含めた評価が必要な場合は坑道群全体をモデル化して検討することが望ましい。

これらのことを踏まえた上で，多連設坑道設計手法の体系化に向けて再整理した「処分坑道の検討」フローの案を図3-41に提示する。図中に赤字で示している項目は，未実施の検討項目である。このフロー案は，多連設の処分坑道を設計する上で，必要な検討項目を抽出すること，および現状を把握することを目的としている。今後の主な課題として，「岩盤の強度回復特性」を考慮した検討，各項目の相互影響の評価，などを挙げている。

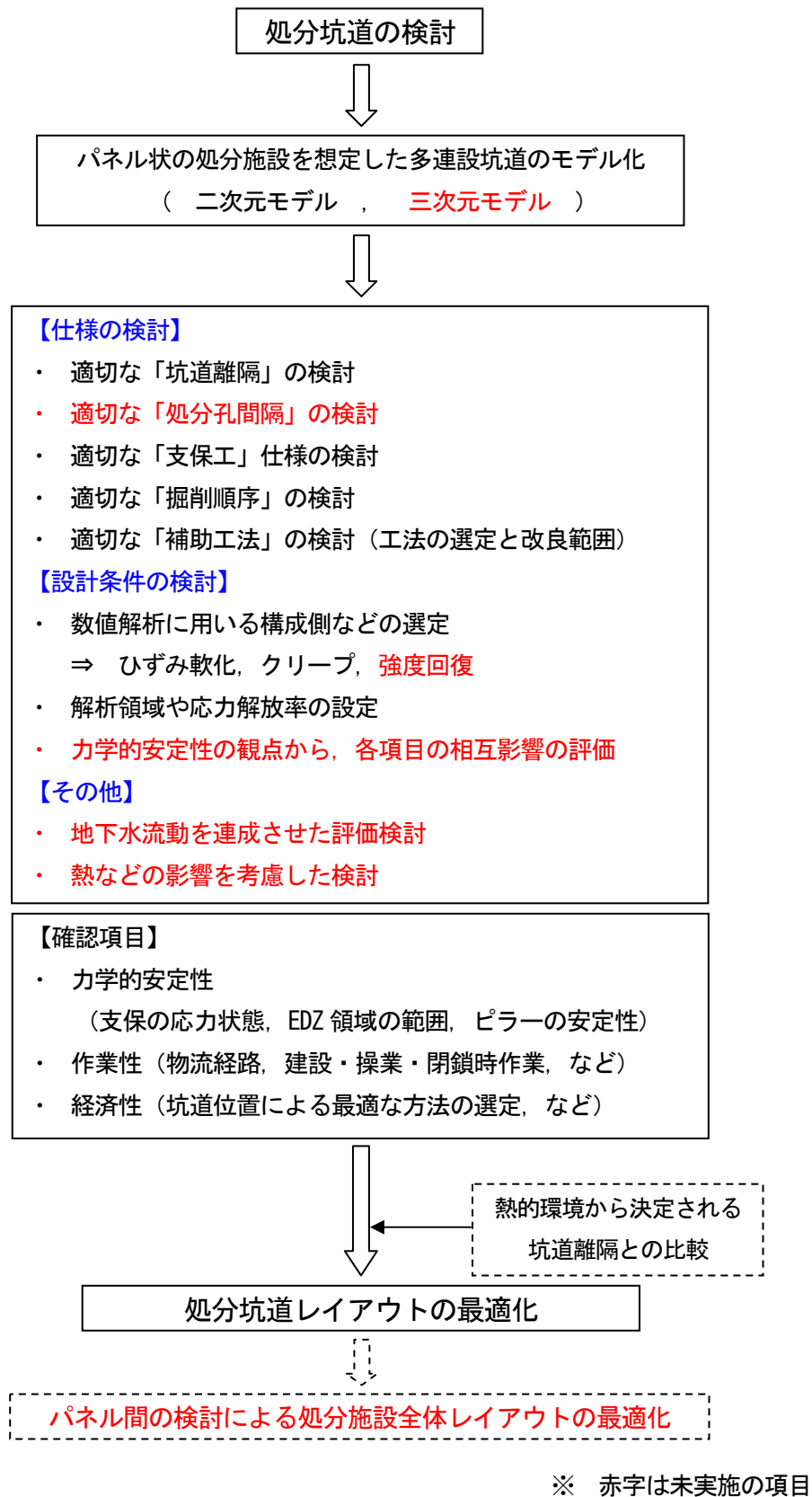


図 3-41 多連設坑道を対象とした設計の検討フロー（案）

#### 4. 4 まとめ

ここでは、地層処分施設における多連設坑道の設計手法について、第2次取りまとめ<sup>1)</sup>の考え方に基づき、さらに詳細化・実用化を図ることを目的とし、今までに検討してきた結果をまとめて、設計実務への適用を考慮した多連設坑道設計手法の体系化案を作成した。すなわち、これまでの処分坑道の設計に対し、「多連設坑道の設計」概念を組み込んだ検討フロー案を提示した。第2次取りまとめ<sup>1)</sup>でも述べられているが、地層処分施設のような大深度地下での施工で、かつパネル状に大多数の坑道群を掘削する工事は、未知の領域であり、経験の無い要素を数多く含んでいる。今回は1つの案として「多連設坑道の設計」フローを示したが、適切かつ合理的に設計をするためには、実施項目や設計フローを、一時的ではなく継続的に見直し、その合理化や精度の向上に努めることが重要である。また、ここに提示した多連設坑道の設計フロー（案）は、必要と思われる検討項目を羅列しただけのものであるため、今後の検討事項の結果も取り入れて一般的な多連設坑道の設計フローとして集約し、最終的な成果として予定する多連設坑道設計手法のマニュアル化に活用したい。

## 5. おわりに

本報告では、昨年度までの知見を踏まえ、設計手法の体系化やニアフィールド岩盤の力学的特性を考慮した設計手法に関する検討を実施し、以下の結論を得た。

2章では、地層処分施設における多連設坑道の設計手法について、第2次取りまとめ<sup>1)</sup>の考え方に基づき、さらに詳細化・実用化を図ることを目的とし、坑道の掘削順序の影響に関する解析的検討、および軟化域を考慮したひずみ軟化モデルによる解析的検討を実施した。掘削順序の影響に関する解析的検討では、2次元モデルによる検討の範囲であるが、ある程度離隔を持った坑道掘削を先行して行い、後ほど坑道間の坑道掘削を行う方法が望ましいことがわかった。ただし、使用する掘削機械や実施工レイアウトなどを参考に、より現実的かつ詳細な検討が必要であることを示した。

3章では、軟化域を考慮したひずみ軟化モデルによる解析的検討を実施し、幌延の岩石試験で得られた実測データを参考にしたモデルを適用することにより、より信頼性の高い掘削影響領域（EDZ）を示すことができた。このことから、多連設坑道の詳細設計時に、対象岩盤がひずみ軟化挙動を示すと判断された場合には、解析に用いるひずみ軟化モデルを適切に選定し、モデル化することが重要であると結論付けた。

4章では、これまでの多連設坑道の設計手法に関する検討を参考に、設計実務への適用を指向した設計手法の体系化（案）を作成し、それを提示した。

## 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 地層処分の工学技術”，JNC TN1400 99-022，  
(1999).
- 2) 平本正行，小林保之，中間茂雄，水谷和彦，森田篤：“地層処分施設における多連設坑道の設計手法に関する検討”，JAEA-Research 2008-001，(2008).
- 3) 林克彦，小林保之，平本正行，水谷和彦，森田篤：“地層処分施設における多連設坑道の設計手法に関する検討（Ⅱ）”，JAEA-Research 2009-016，(2009).
- 4) 林克彦，岸裕和，小林保之，武部篤治，藤山哲雄，平本正行，水谷和彦，森田篤：“地層処分施設における多連設坑道の設計手法に関する検討（Ⅲ）”，JAEA-Research 2009-056，(2010).
- 5) HClasca 社：“FLAC3D（3次元有限差分法解析プログラム）”，  
<http://www.engineering-eye.com/FLAC/outline.html>，(accessed 2010-11-17) .
- 6) 土木学会：山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務 トンネルライブラリー第16号，  
pp.145，(2006).
- 7) 丹生屋純夫，松井裕哉：“研究所設置地区選定のためのHDB-1,2孔における岩盤力学的調査及び検討結果”，JNC TN5400 2005-012，(2005).
- 8) 丹生屋純夫，松井裕哉：“HDB-3～8孔における岩盤力学的調査結果及び研究所設置地区の岩盤力学的概念モデル検討”，JAEA-Research 2006-086，(2007).
- 9) 真田祐幸，丹生屋純夫，松井裕哉：“HDB-9～11孔における岩盤力学的調査結果及び研究所設置地区の岩盤力学的概念モデル更新”，JAEA-Research 2008-069，(2008).
- 10) 山口柏樹：土質力学（全改訂），pp.149～150，技報堂，(1987).
- 11) 森岡宏之，山崎雅直，松井裕哉，尾留川剛，山口雄大：“幌延深地層研究計画における地下施設の支保設計（実施設計）”，JAEA-Research 2008-009，(2008).

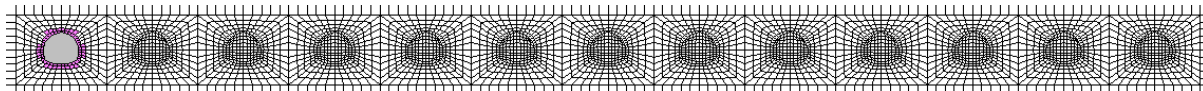


付録1. 「坑道の掘削順序の影響に関する解析的検討」の全解析結果

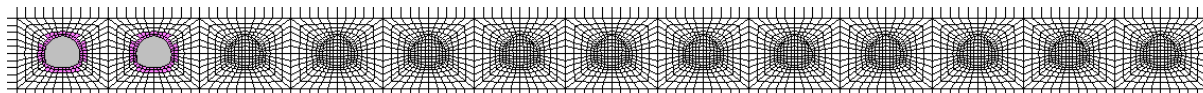
(1) 岩盤物性「SR-C」

【Case-C1】

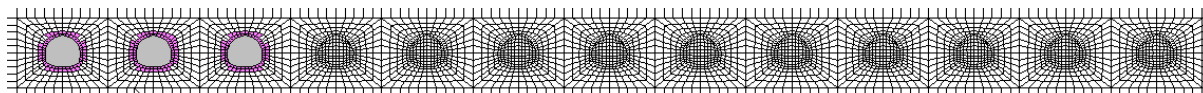
凡例  弾性  
 塑性



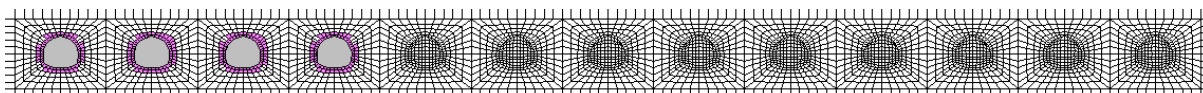
坑道 1 掘削時



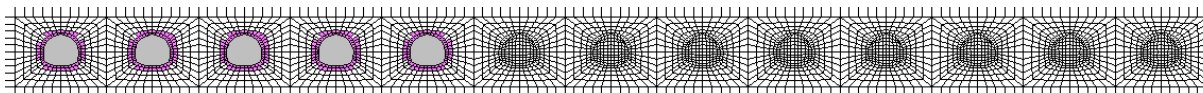
坑道 2 掘削時



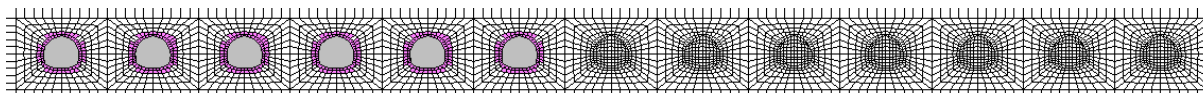
坑道 3 掘削時



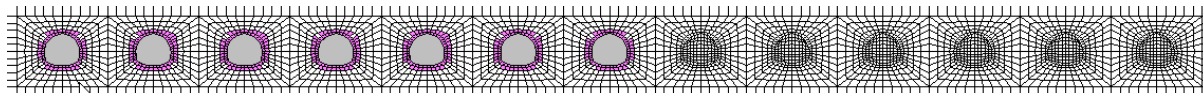
坑道 4 掘削時



坑道 5 掘削時

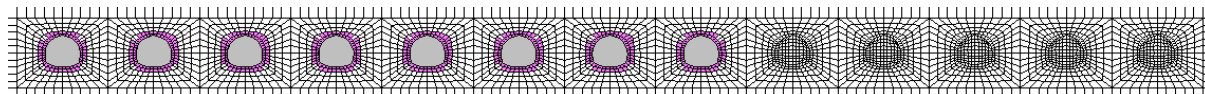


坑道 6 掘削時

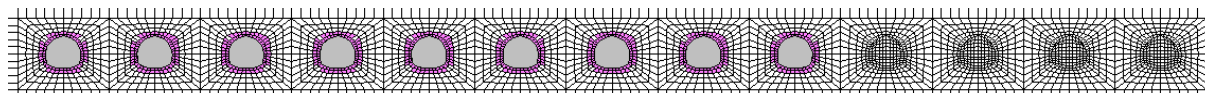


坑道 7 掘削時

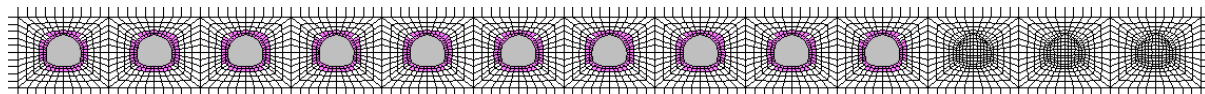
付図 1-1 塑性領域分布図 (Case-C1) 1/2



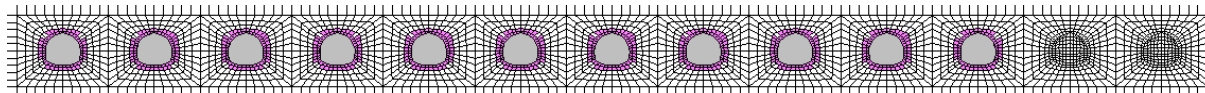
坑道 8 掘削時



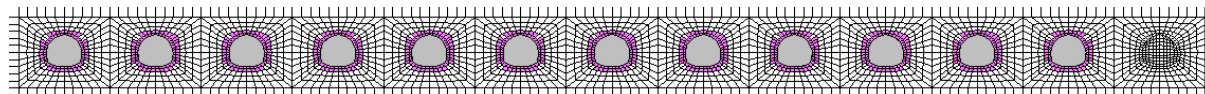
坑道 9 掘削時



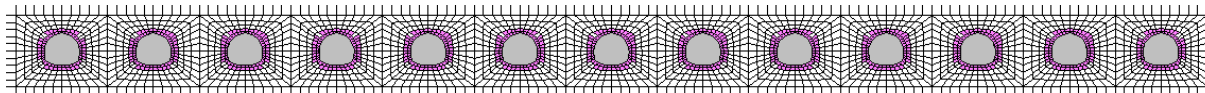
坑道 10 掘削時



坑道 11 掘削時



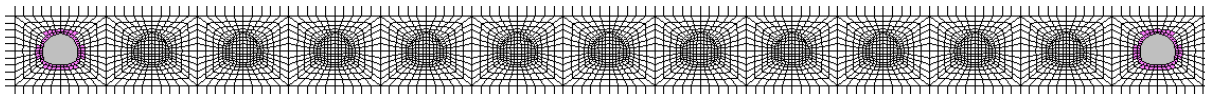
坑道 12 掘削時



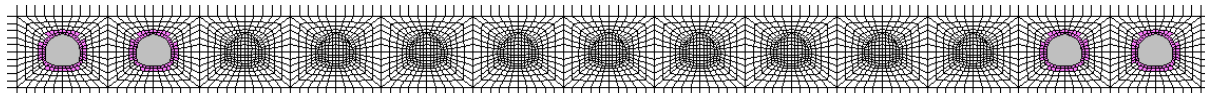
坑道 13 掘削時

付図 1-1 塑性領域分布図 (Case-C1) 2/2

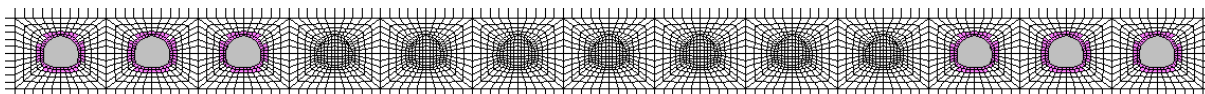
【Case-C2】



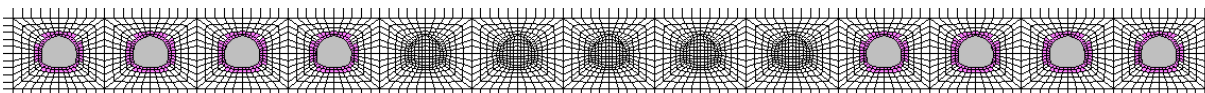
坑道 1, 13 掘削時



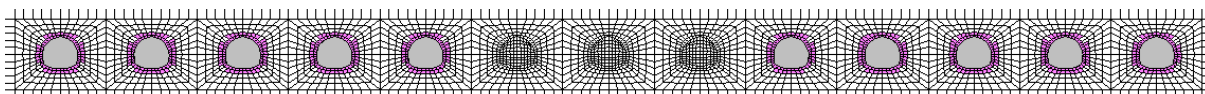
坑道 2, 12 掘削時



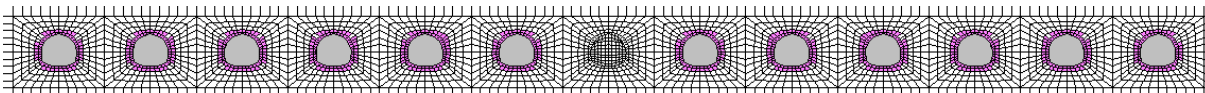
坑道 3, 11 掘削時



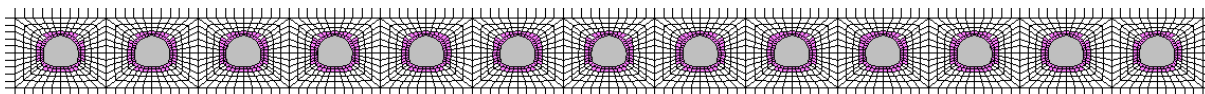
坑道 4, 10 掘削時



坑道 5, 9 掘削時



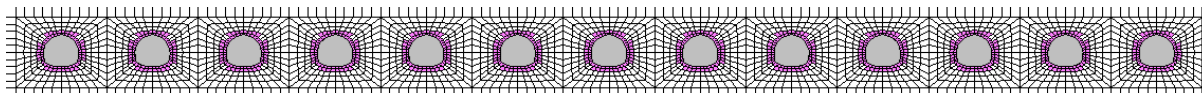
坑道 6, 8 掘削時



坑道 7 掘削時

付図 1-2 塑性領域分布図 (Case-C2)

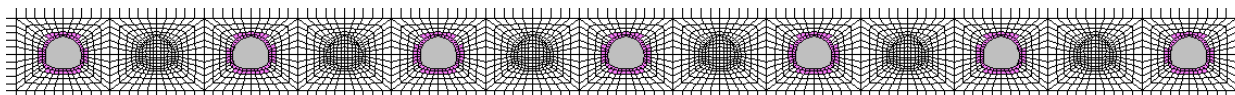
【Case-C3】



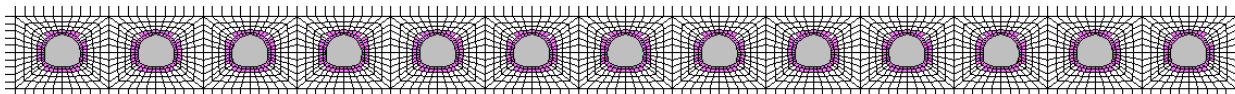
坑道 1~13 (全坑道) 掘削時

付図 1-3 塑性領域分布図 (Case-C3)

【Case-C4】



奇数坑道 (坑道 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13) 掘削時



偶数坑道 (坑道 2, 4, 6, 8, 10, 12) 掘削時

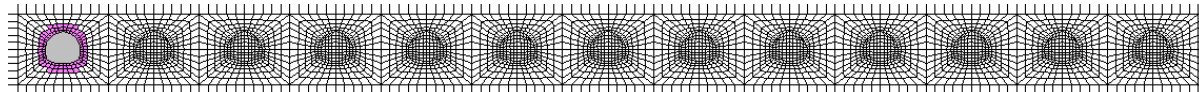
付図 1-4 塑性領域分布図 (Case-C4)



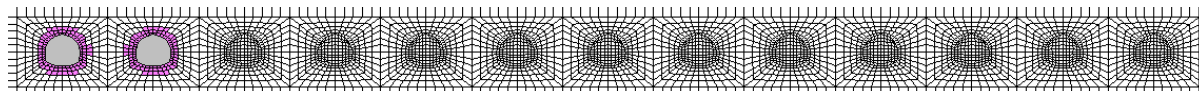
(2) 岩盤物性「SR-D」

【Case-D1】

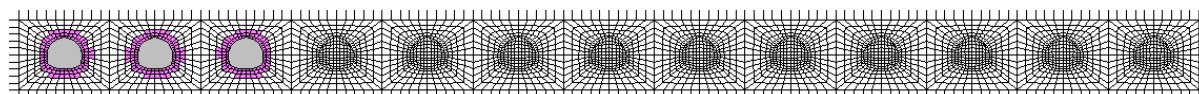
凡例  彈性  塑性



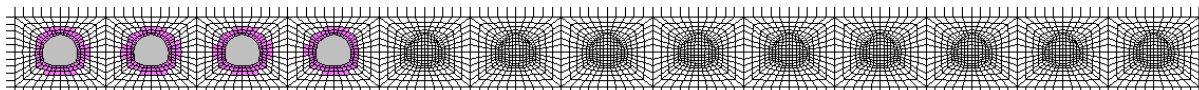
坑道 1 掘削時



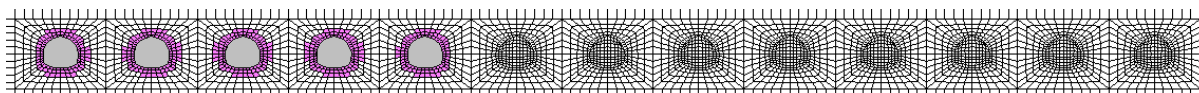
坑道 2 掘削時



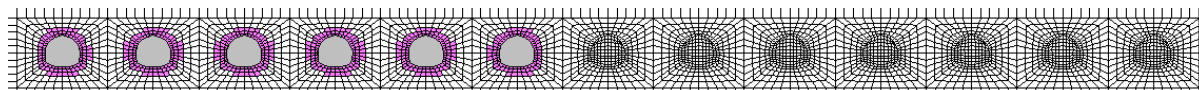
坑道 3 掘削時



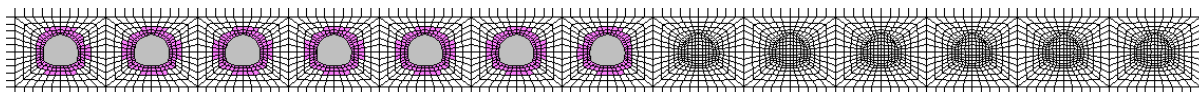
坑道 4 掘削時



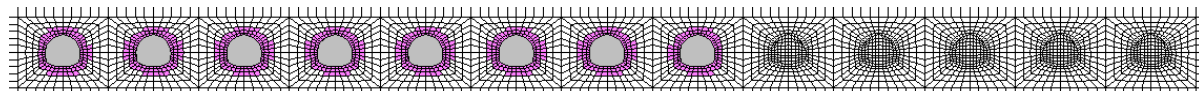
坑道 5 掘削時



坑道 6 掘削時

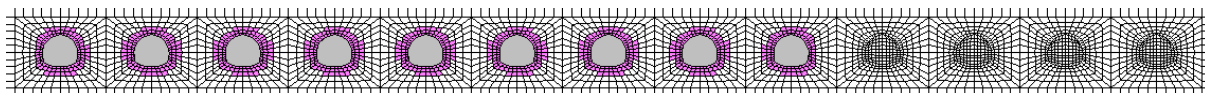


坑道 7 掘削時

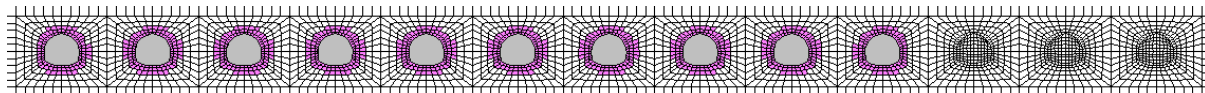


坑道 8 掘削時

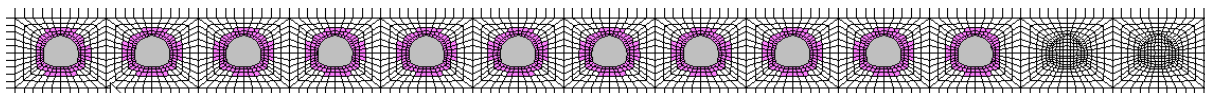
付図 1-5 塑性領域分布図 (Case-D1) 1/2



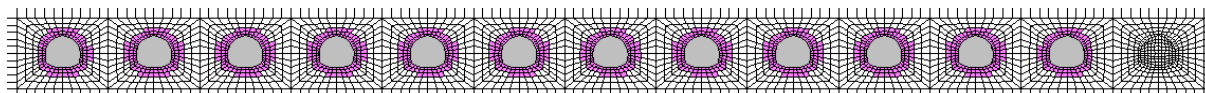
坑道 9 掘削時



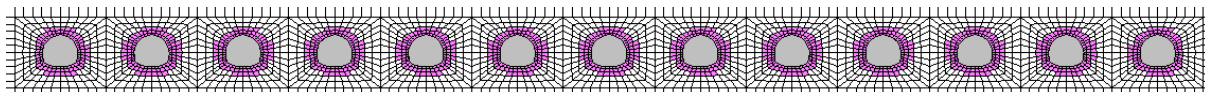
坑道 10 掘削時



坑道 11 掘削時



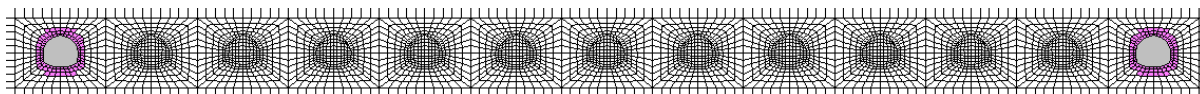
坑道 12 掘削時



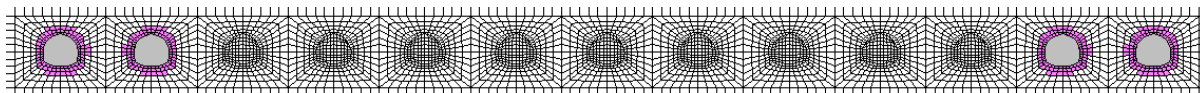
坑道 13 掘削時

付図 1-5 塑性領域分布図 (Case-D1) 2/2

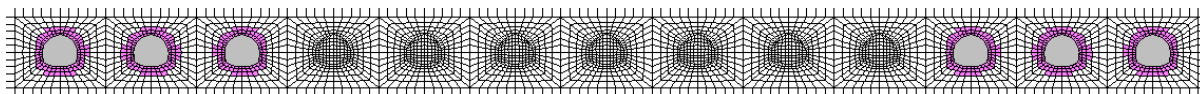
【Case-D2】



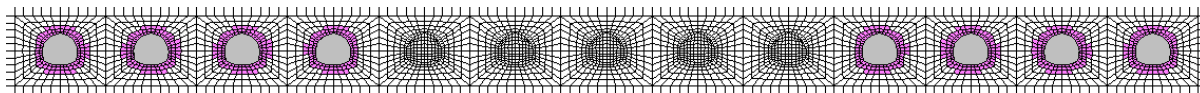
坑道 1, 13 掘削時



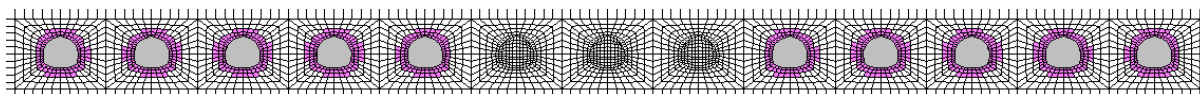
坑道 2, 12 掘削時



坑道 3, 11 掘削時



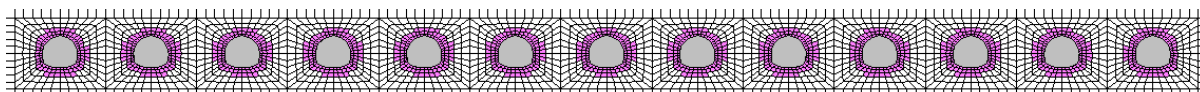
坑道 4, 10 掘削時



坑道 5, 9 掘削時



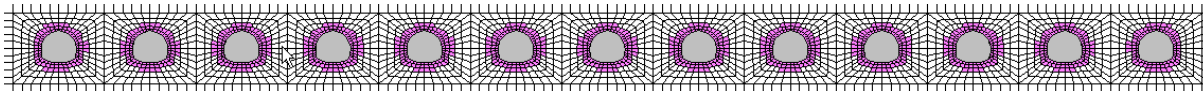
坑道 6, 8 掘削時



坑道 7 掘削時

付図 1-6 塑性領域分布図 (Case-D2)

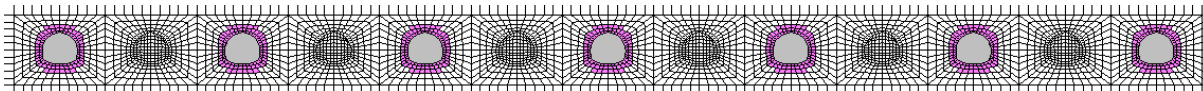
【Case-D3】



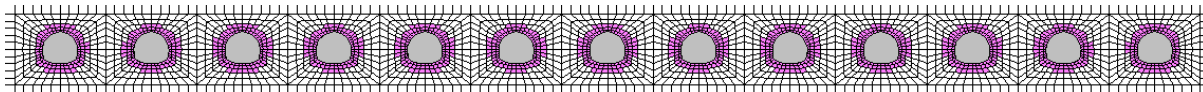
坑道 1~13 (全坑道) 掘削時

付図 1-7 塑性領域分布図 (Case-D3)

【Case-D4】



奇数坑道 (坑道 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13) 掘削時



偶数坑道 (坑道 2, 4, 6, 8, 10, 12) 掘削時

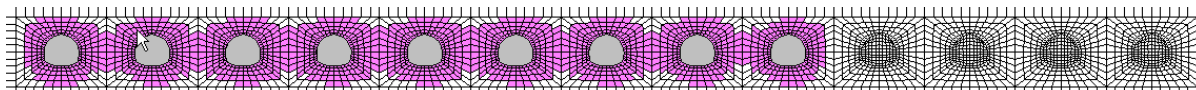
付図 1-8 塑性領域分布図 (Case-D4)



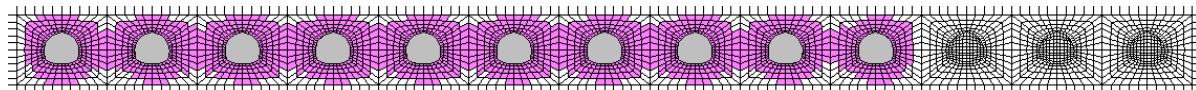
(3) 岩盤物性「SR-E」



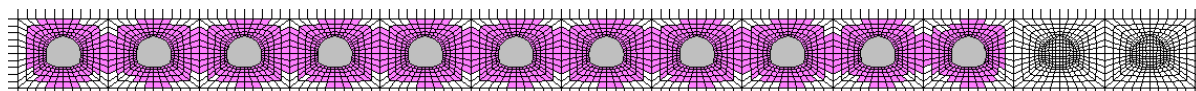
付図 1-9 塑性領域分布図 (Case-E1) 1/2



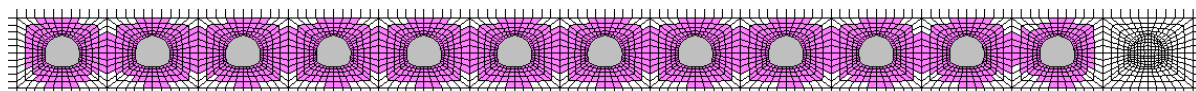
坑道 9 掘削時



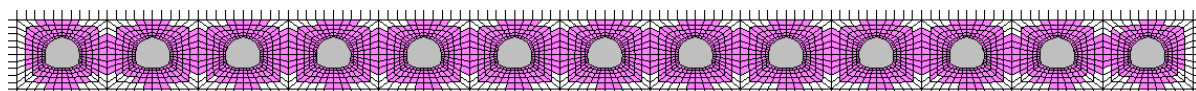
坑道 10 掘削時



坑道 11 掘削時



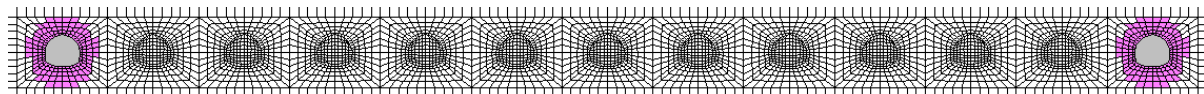
坑道 12 掘削時



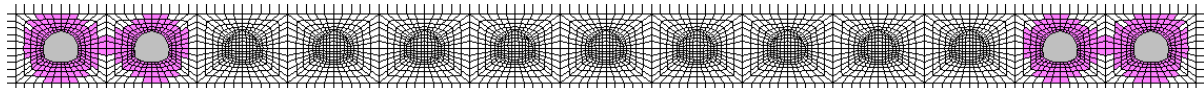
坑道 13 掘削時

付図 1-9 塑性領域分布図 (Case-E1) 2/2

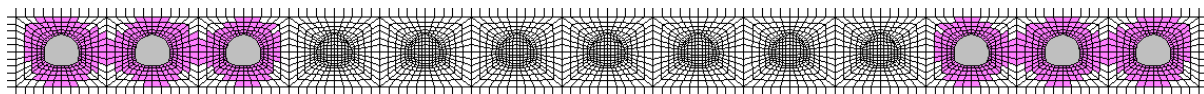
【Case-E2】



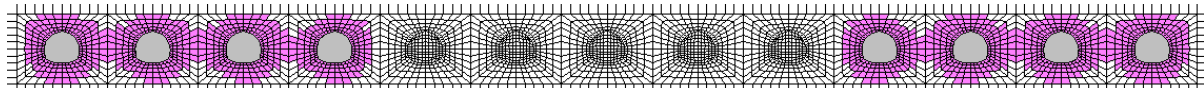
坑道 1, 13 掘削時



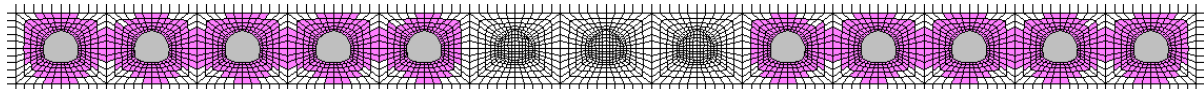
坑道 2, 12 掘削時



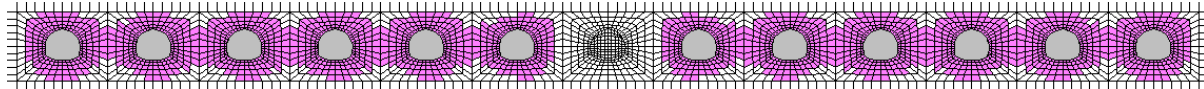
坑道 3, 11 掘削時



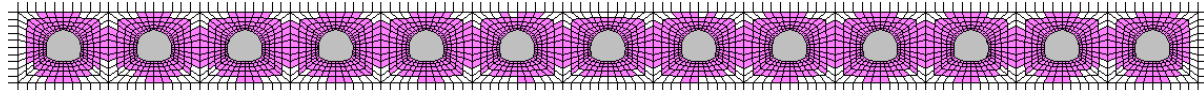
坑道 4, 10 掘削時



坑道 5, 9 掘削時



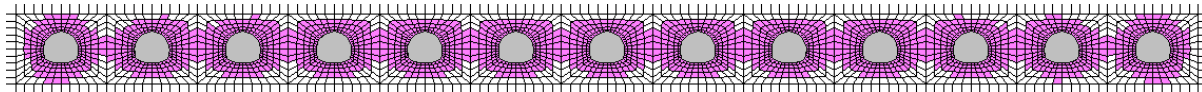
坑道 6, 8 掘削時



坑道 7 掘削時

付図 1-10 塑性領域分布図 (Case-E2)

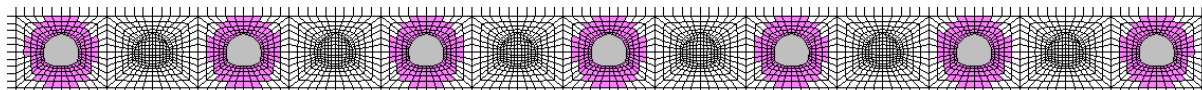
【Case-E3】



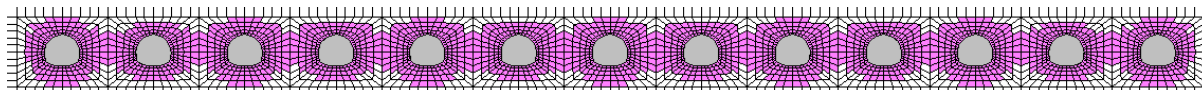
坑道 1~13 (全坑道) 掘削時

付図 1-11 塑性領域分布図 (Case-E3)

【Case-E4】



奇数坑道 (坑道 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13) 掘削時



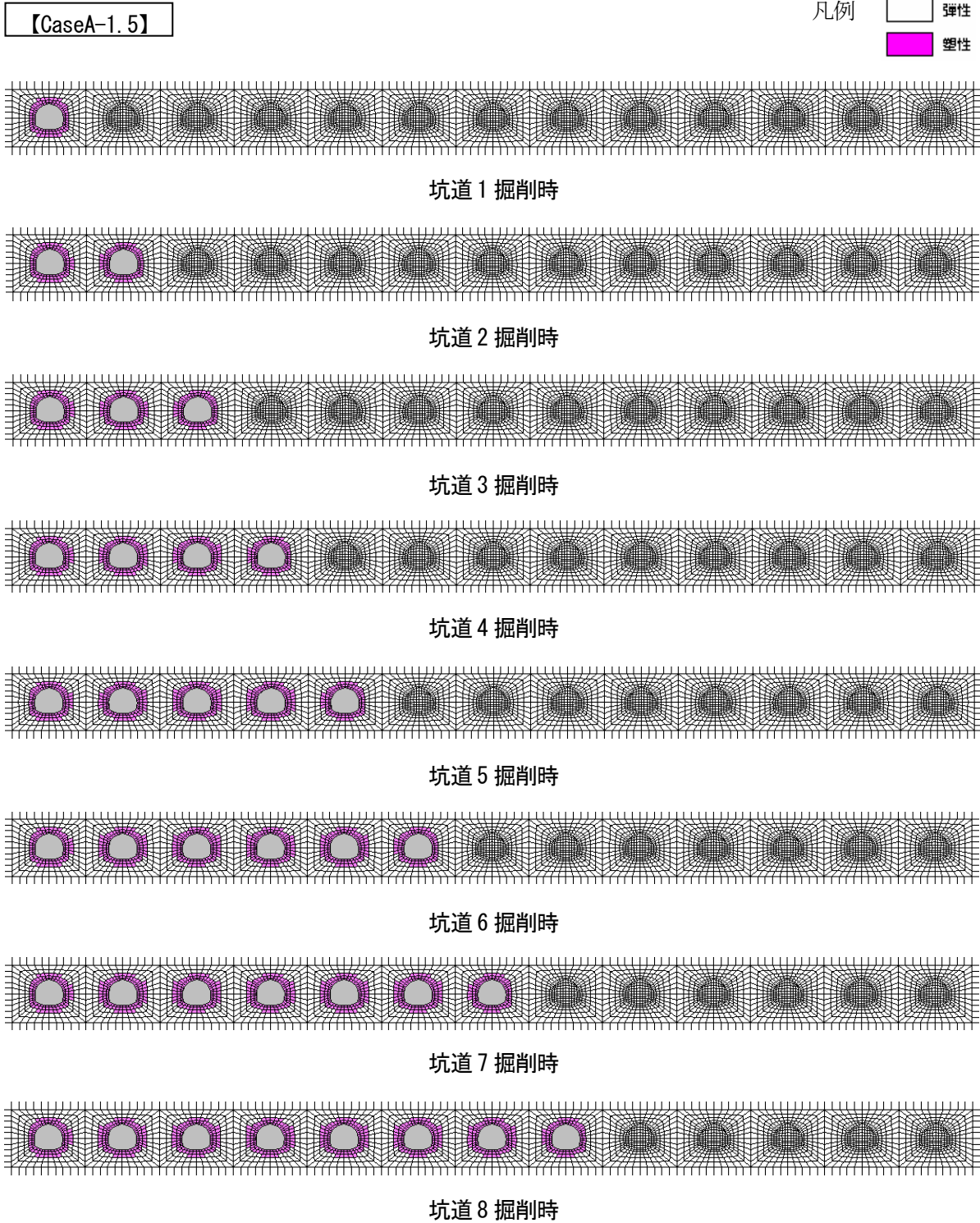
偶数坑道 (坑道 2, 4, 6, 8, 10, 12) 掘削時

付図 1-12 塑性領域分布図 (Case-E4)

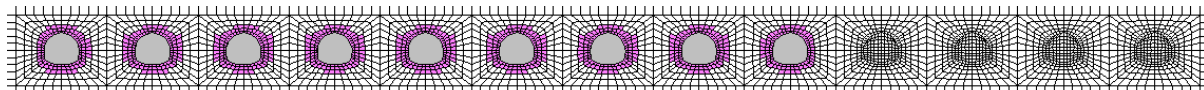


添付2. 「軟化域を考慮したひずみ軟化モデルによる解析的検討」の全解析結果

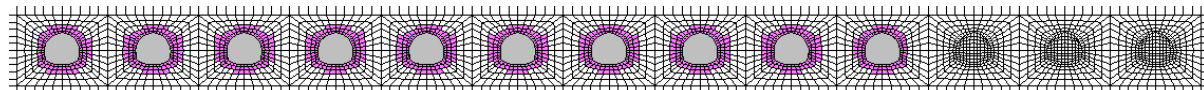
(1) 強度低下の傾きパターンAのケース



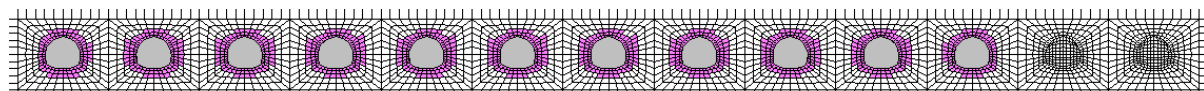
付図1-13 塑性領域分布図 (CaseA-1.5) 1/2



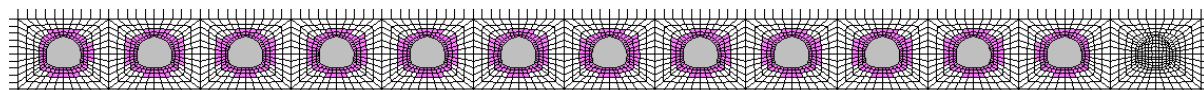
坑道 9 掘削時



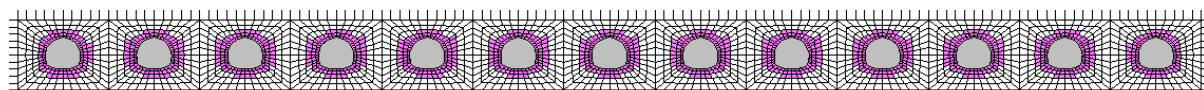
坑道 10 掘削時



坑道 11 掘削時



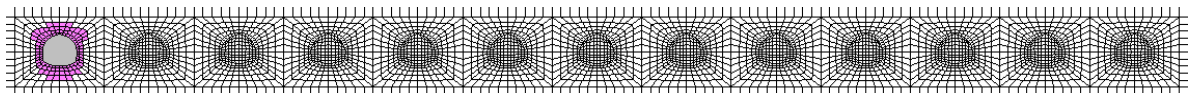
坑道 12 掘削時



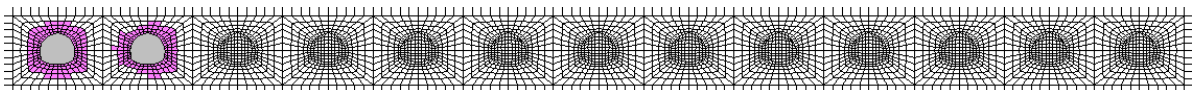
坑道 13 掘削時

付図 1-13 塑性領域分布図 (CaseA-1.5) 2/2

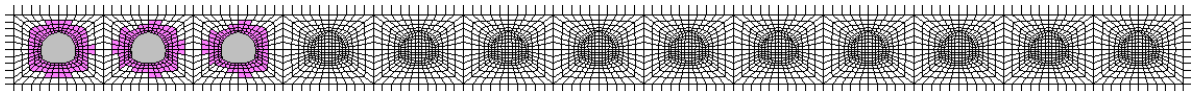
【CaseA-1.0】



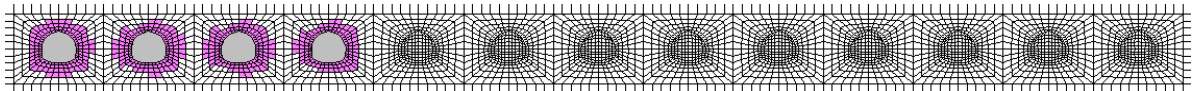
坑道 1 掘削時



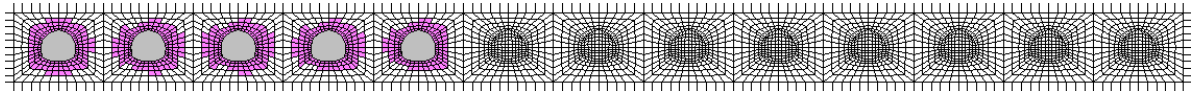
坑道 2 掘削時



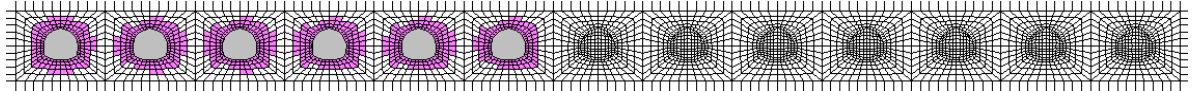
坑道 3 掘削時



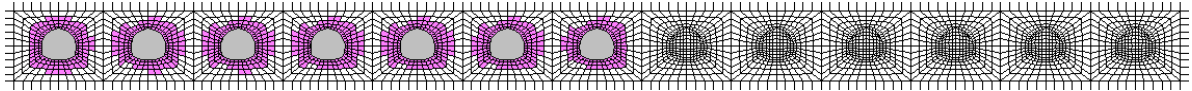
坑道 4 掘削時



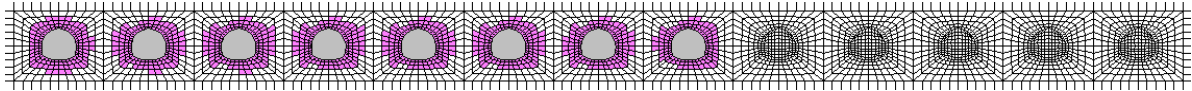
坑道 5 掘削時



坑道 6 掘削時

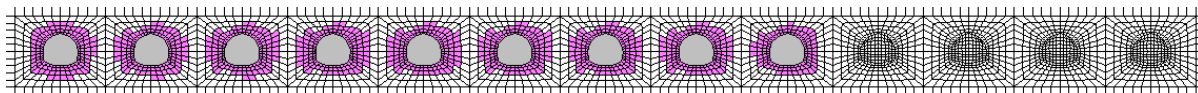


坑道 7 掘削時

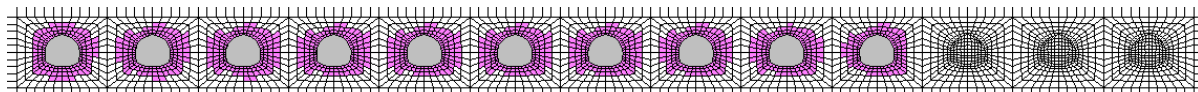


坑道 8 掘削時

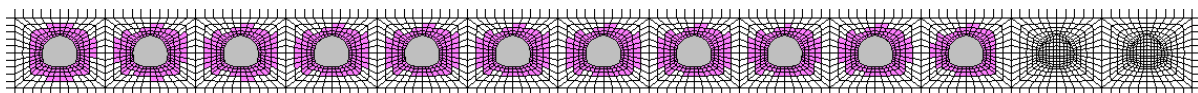
付図 1-14 塑性領域分布図 (CaseA-1.0) 1/2



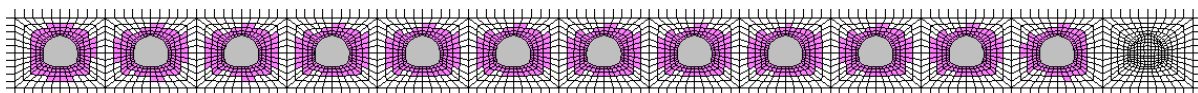
坑道 9 掘削時



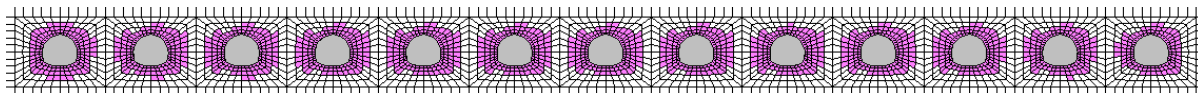
坑道 10 掘削時



坑道 11 掘削時



坑道 12 掘削時

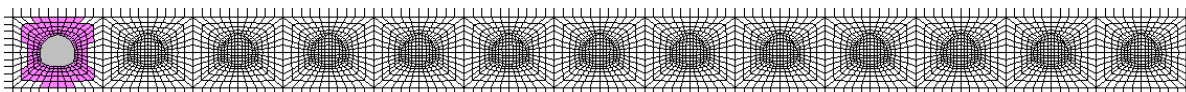


坑道 13 掘削時

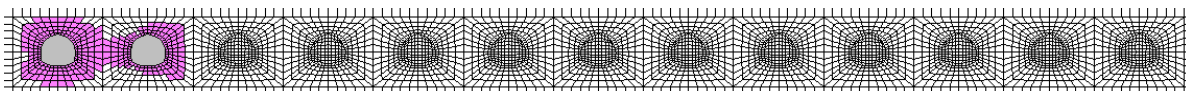
付図 1-14 塑性領域分布図 (CaseA-1.0) 2/2



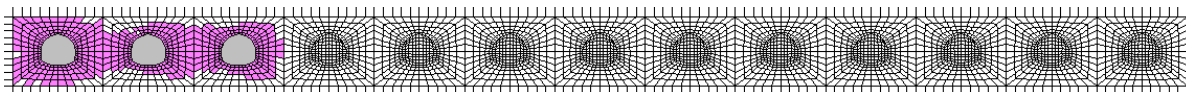
【CaseA-0.5】



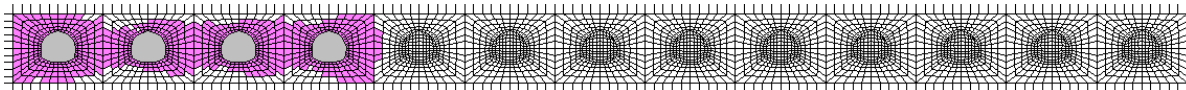
坑道 1 掘削時



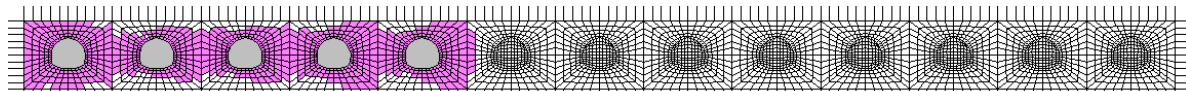
坑道 2 掘削時



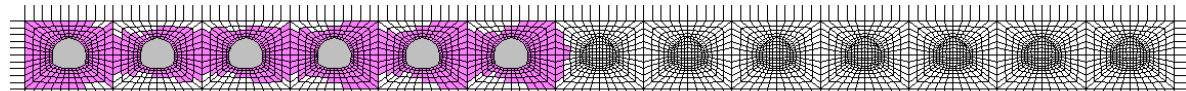
坑道 3 掘削時



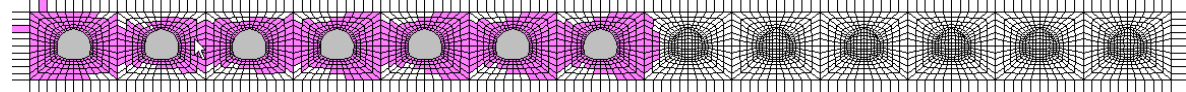
坑道 4 掘削時



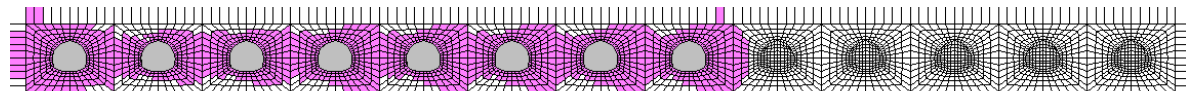
坑道 5 掘削時



坑道 6 掘削時

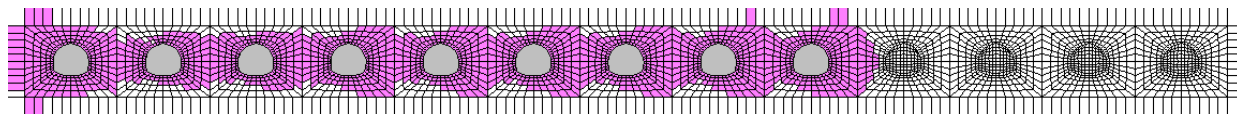


坑道 7 掘削時

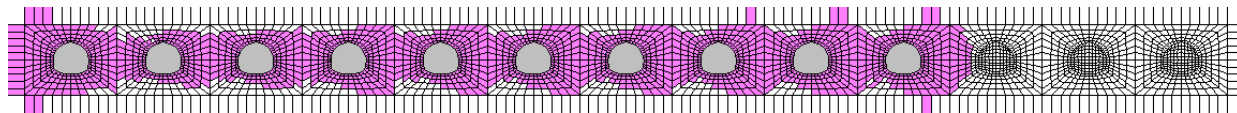


坑道 8 掘削時

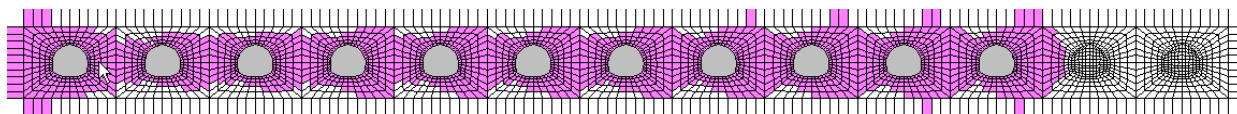
付図 1-15 塑性領域分布図 (CaseA-0.5) 1/2



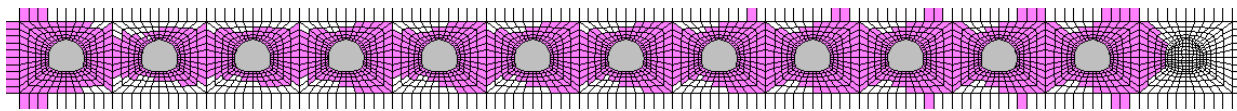
坑道 9 掘削時



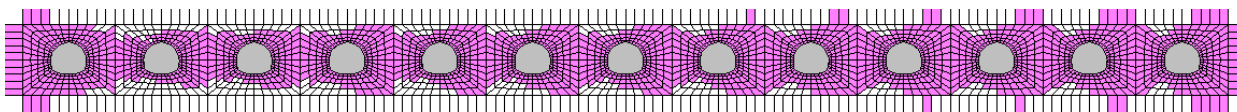
坑道 10 掘削時



坑道 11 掘削時



坑道 12 掘削時



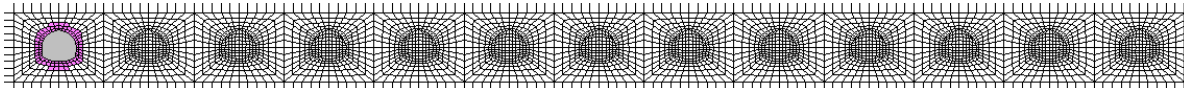
坑道 13 掘削時

付図 1-15 塑性領域分布図 (CaseA-0.5) 2/2

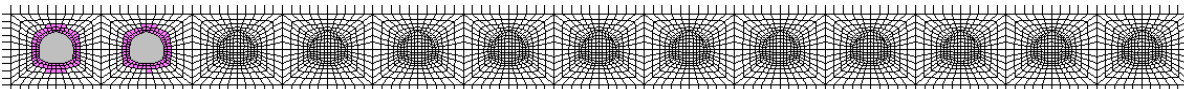
(2) 強度低下の傾きパターンBのケース

【CaseB-1.5】

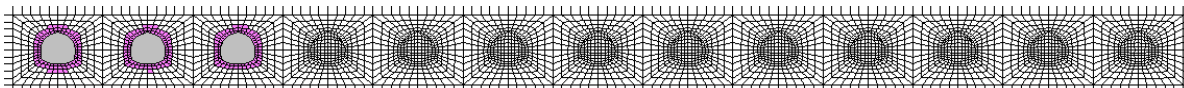
凡例  弾性  
 塑性



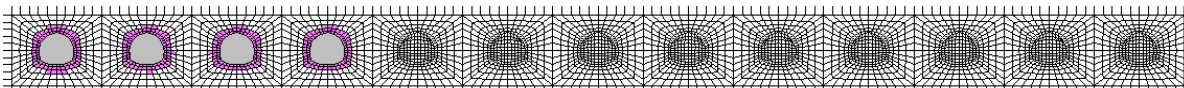
坑道 1 掘削時



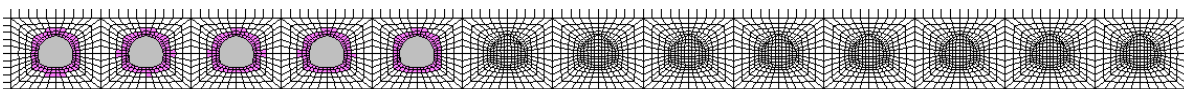
坑道 2 掘削時



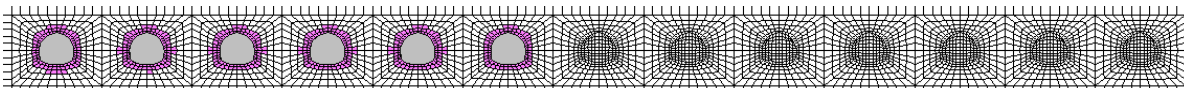
坑道 3 掘削時



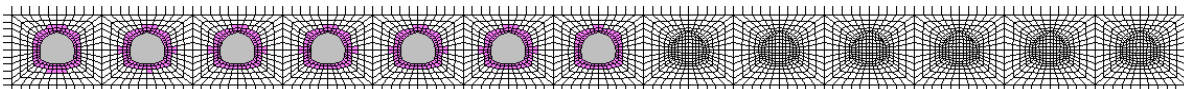
坑道 4 掘削時



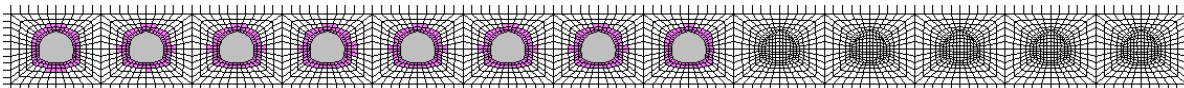
坑道 5 掘削時



坑道 6 掘削時

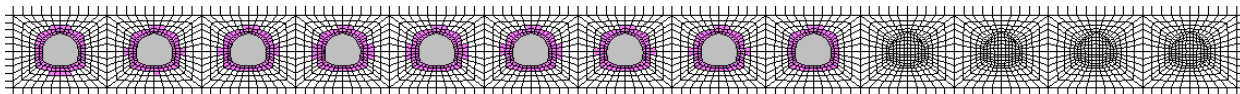


坑道 7 掘削時

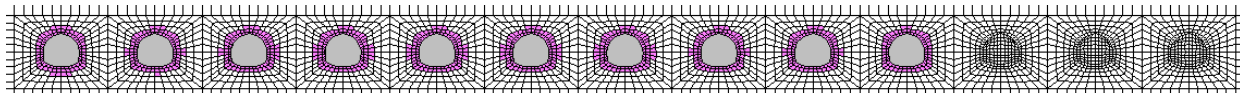


坑道 8 掘削時

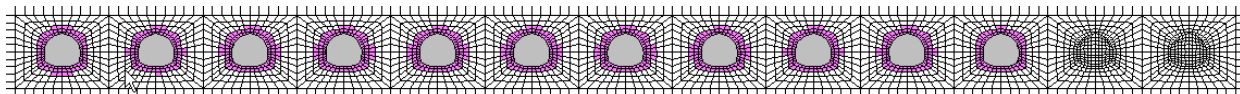
付図 1-16 塑性領域分布図 (CaseB-1.5) 1/2



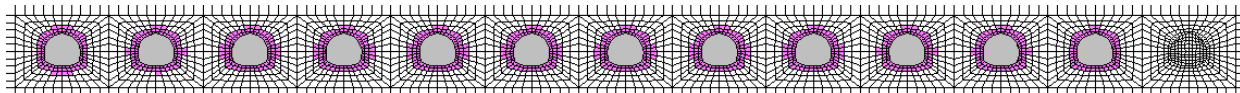
坑道 9 掘削時



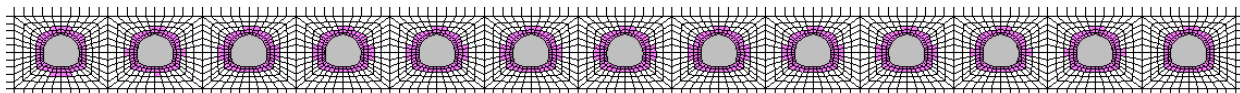
坑道 10 掘削時



坑道 11 掘削時



坑道 12 掘削時

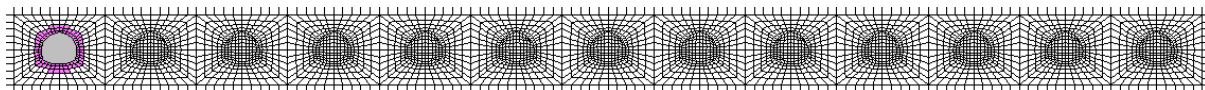


坑道 13 掘削時

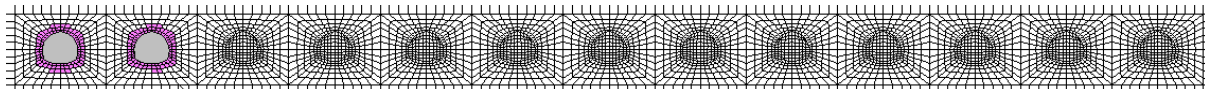
付図 1-16 塑性領域分布図 (CaseB-1.5) 2/2



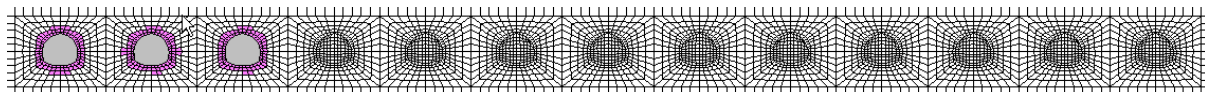
【CaseB-1.0】



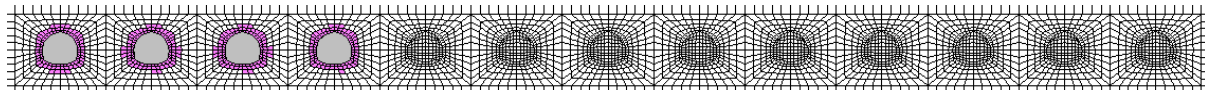
坑道 1 掘削時



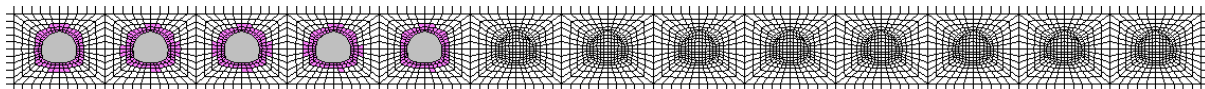
坑道 2 掘削時



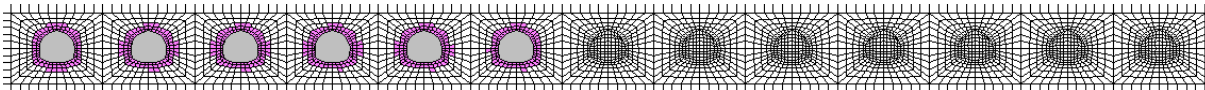
坑道 3 掘削時



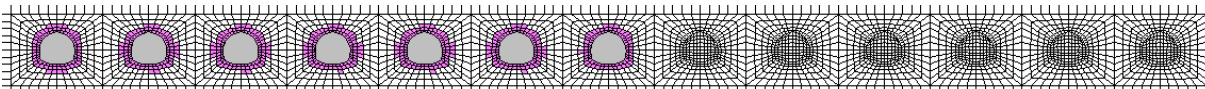
坑道 4 掘削時



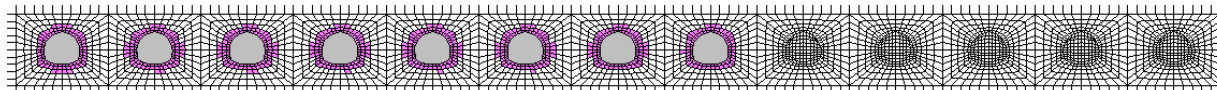
坑道 5 掘削時



坑道 6 掘削時

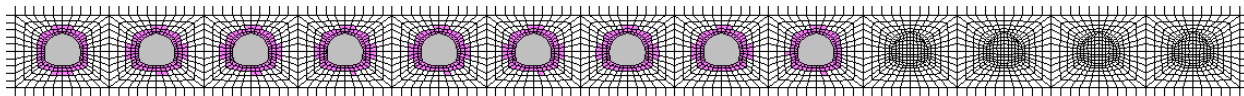


坑道 7 掘削時

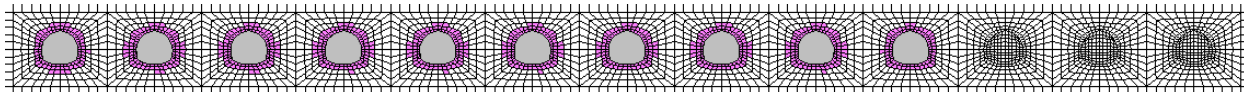


坑道 8 掘削時

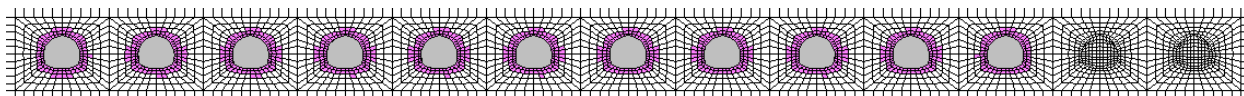
付図 1-17 塑性領域分布図 (CaseB-1.0) 1/2



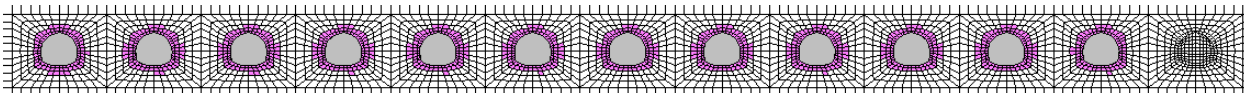
坑道 9 掘削時



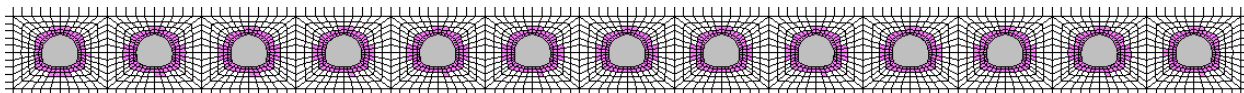
坑道 10 掘削時



坑道 11 掘削時



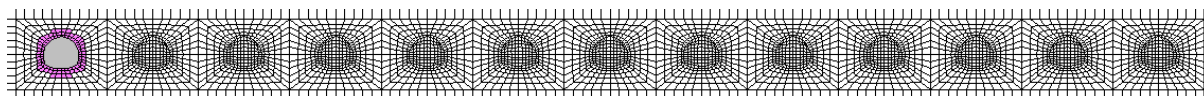
坑道 12 掘削時



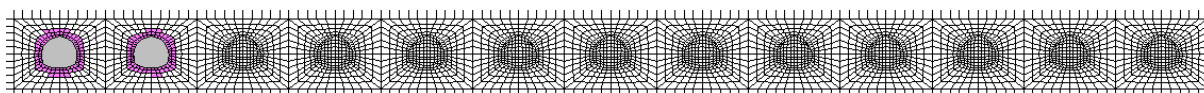
坑道 13 掘削時

付図 1-17 塑性領域分布図 (CaseB-1.0) 2/2

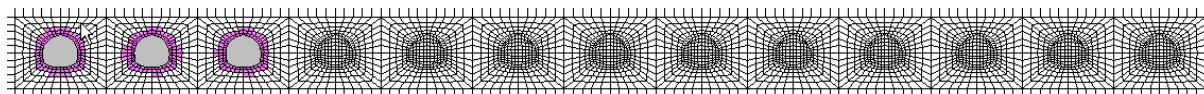
【CaseB-0.5】



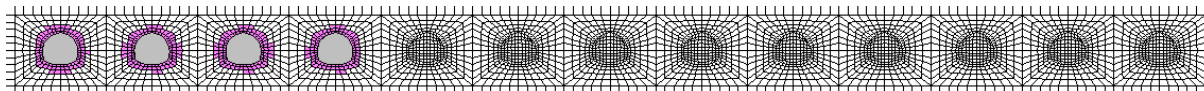
坑道 1 掘削時



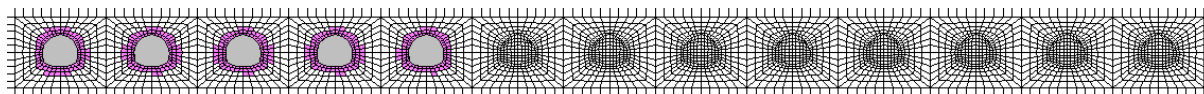
坑道 2 掘削時



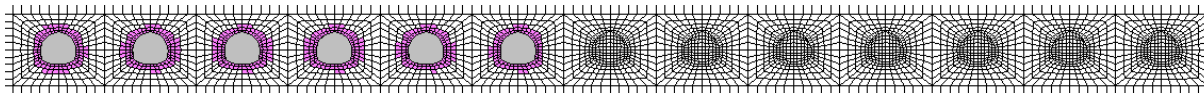
坑道 3 掘削時



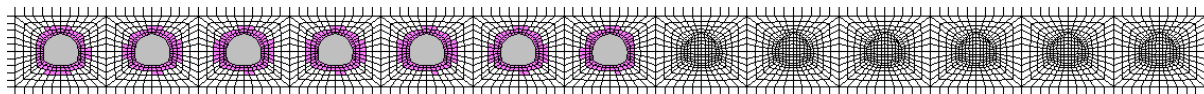
坑道 4 掘削時



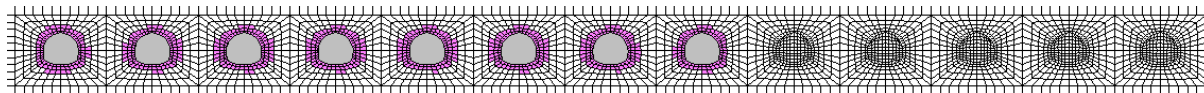
坑道 5 掘削時



坑道 6 掘削時

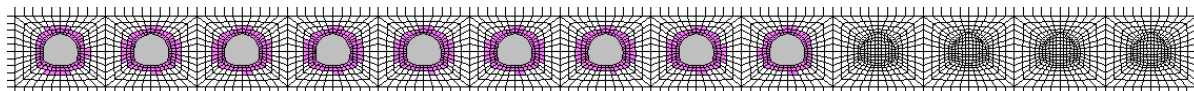


坑道 7 掘削時

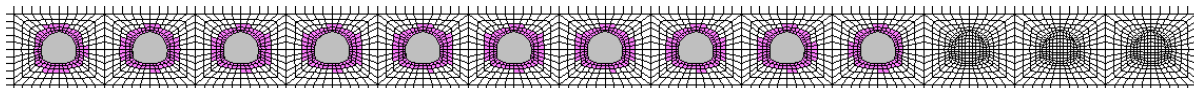


坑道 8 掘削時

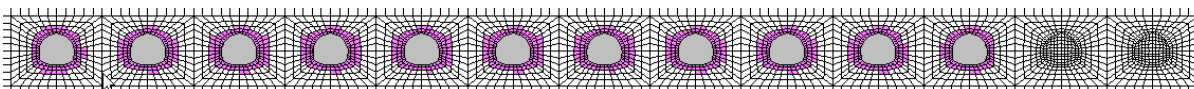
付図 1-18 塑性領域分布図 (CaseB-0.5) 1/2



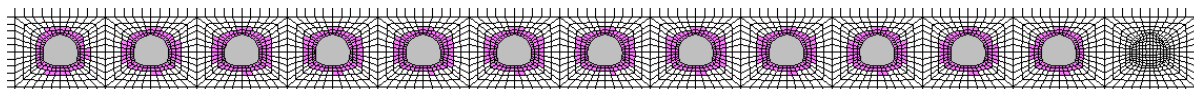
坑道 9 掘削時



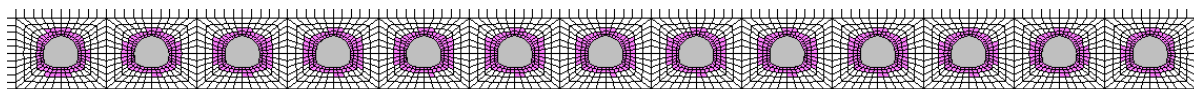
坑道 10 掘削時



坑道 11 掘削時



坑道 12 掘削時



坑道 13 掘削時

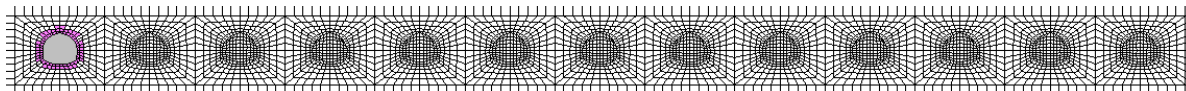
付図 1-18 塑性領域分布図 (CaseB-0.5) 2/2



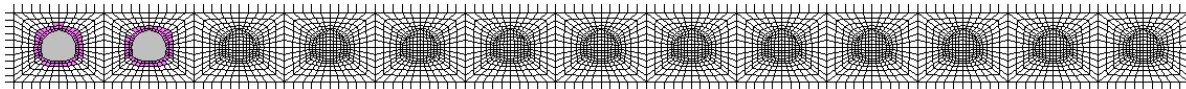
(3) 強度低下の傾きパターンCのケース

【CaseC-1.5】

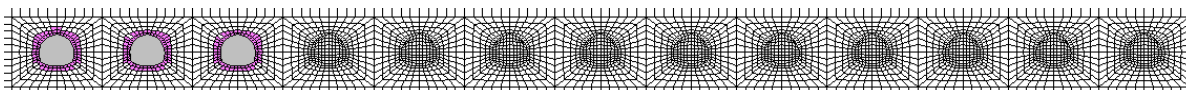
凡例  弾性  
 塑性



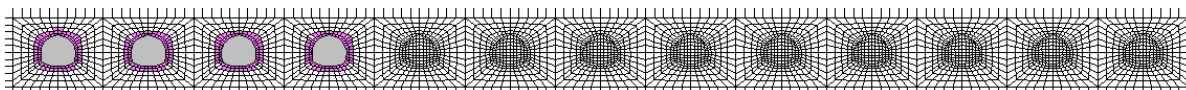
坑道 1 掘削時



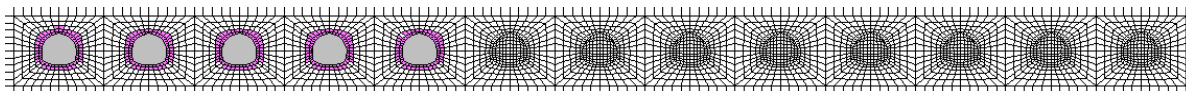
坑道 2 掘削時



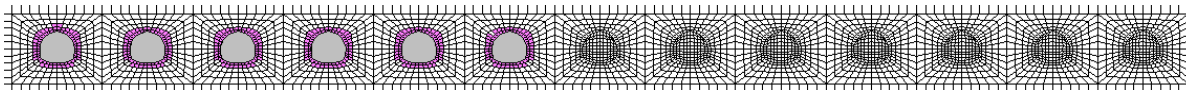
坑道 3 掘削時



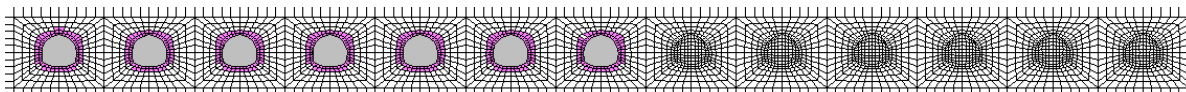
坑道 4 掘削時



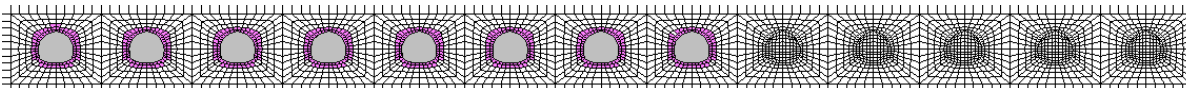
坑道 5 掘削時



坑道 6 掘削時

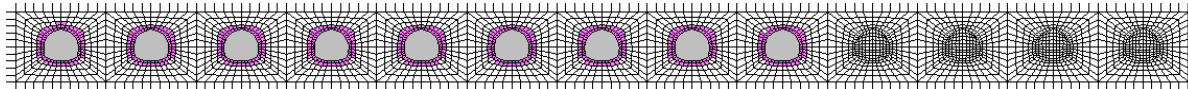


坑道 7 掘削時

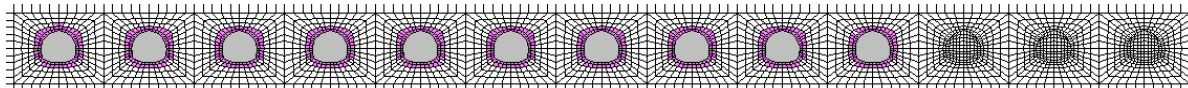


坑道 8 掘削時

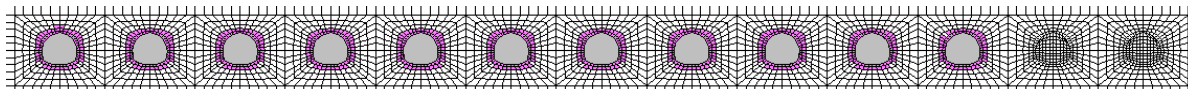
付図 1-19 塑性領域分布図 (CaseC-1.5) 1/2



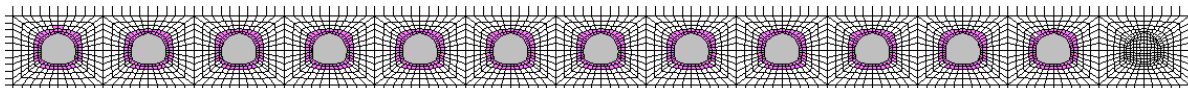
坑道 9 掘削時



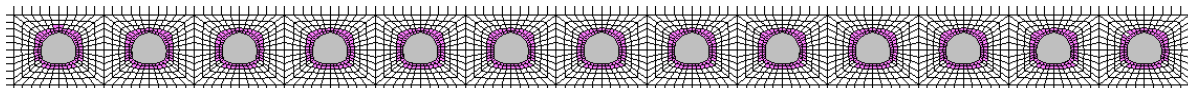
坑道 10 掘削時



坑道 11 掘削時



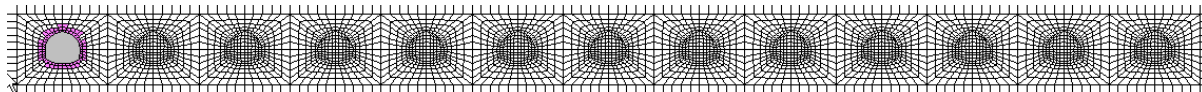
坑道 12 掘削時



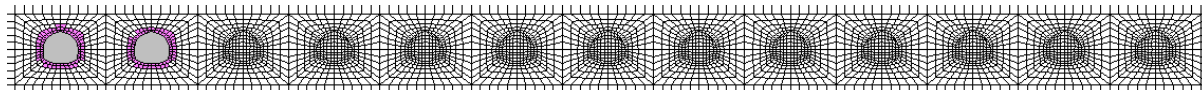
坑道 13 掘削時

坑付図 1-19 塑性領域分布図 (CaseC-1.5) 2/2

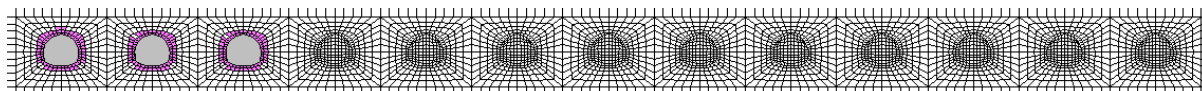
【CaseC-1.0】



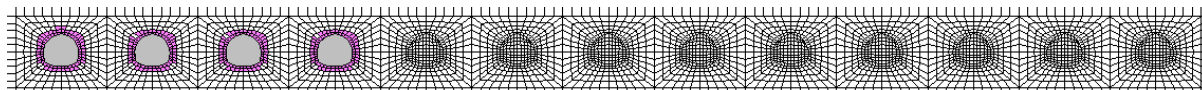
坑道 1 掘削時



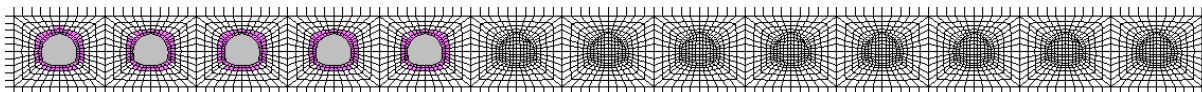
坑道 2 掘削時



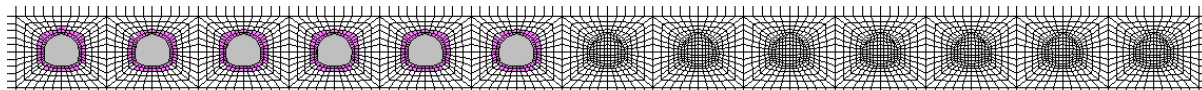
坑道 3 掘削時



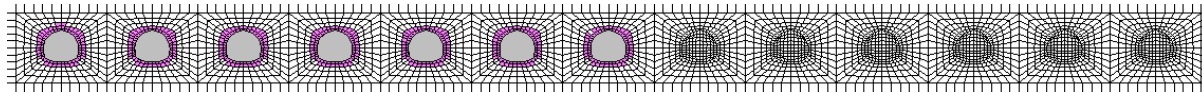
坑道 4 掘削時



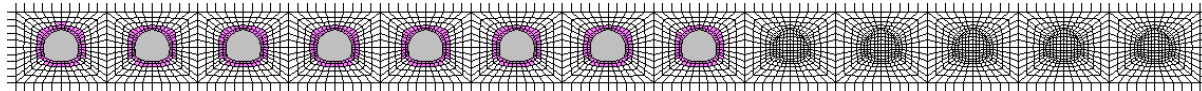
坑道 5 掘削時



坑道 6 掘削時

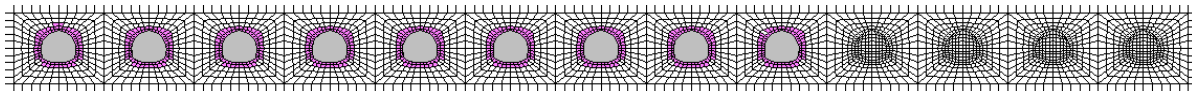


坑道 7 掘削時

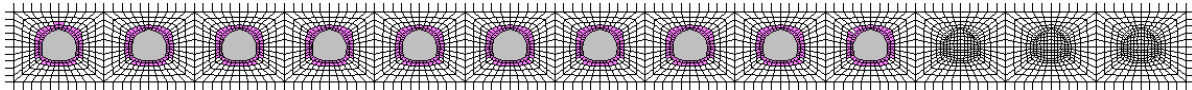


坑道 8 掘削時

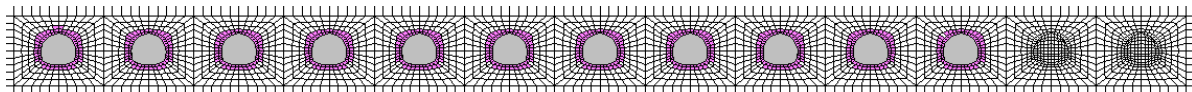
付図 1-20 塑性領域分布図 (CaseC-1.0) 1/2



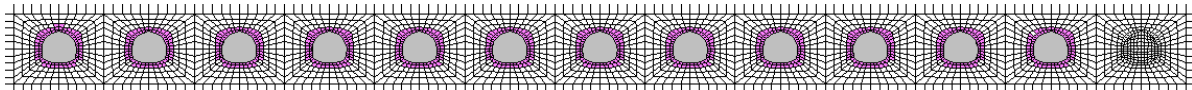
坑道 9 掘削時



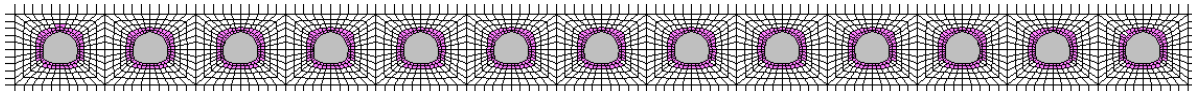
坑道 10 掘削時



坑道 11 掘削時



坑道 12 掘削時

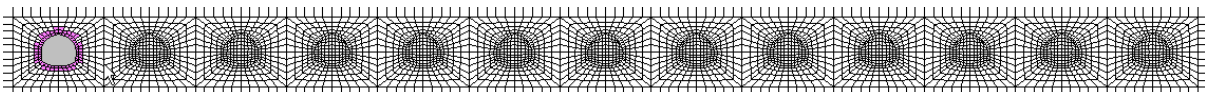


坑道 13 掘削時

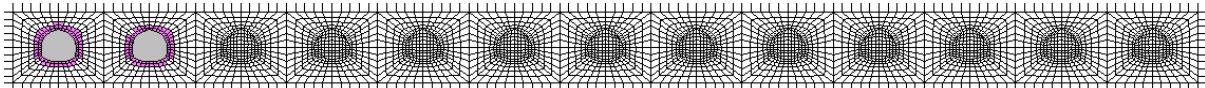
付図 1-20 塑性領域分布図 (CaseC-1.0) 2/2



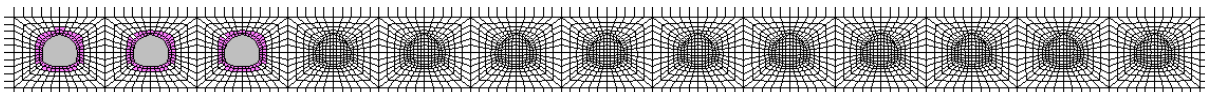
【CaseC-0.5】



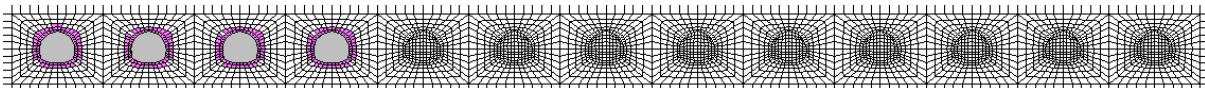
坑道 1 掘削時



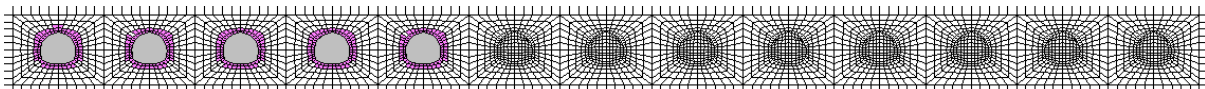
坑道 2 掘削時



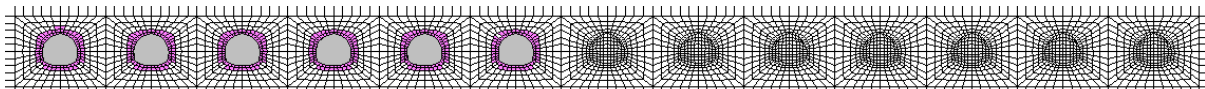
坑道 3 掘削時



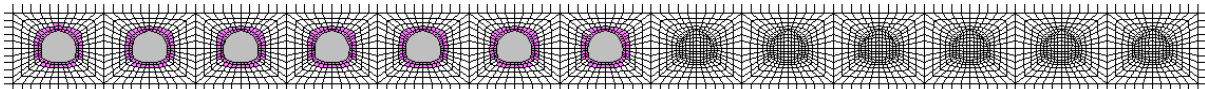
坑道 4 掘削時



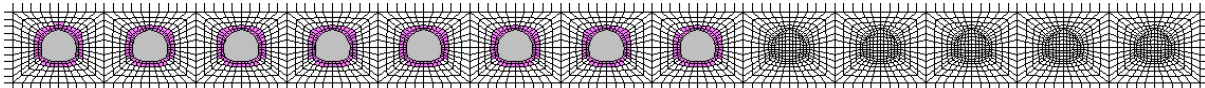
坑道 5 掘削時



坑道 6 掘削時

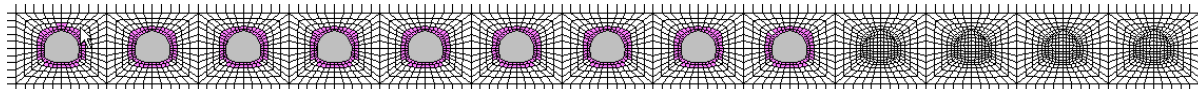


坑道 7 掘削時

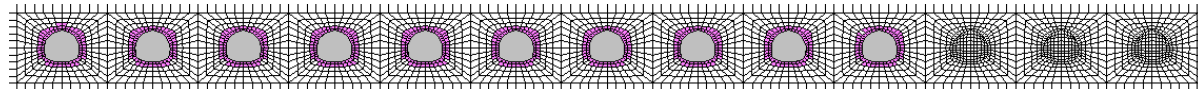


坑道 8 掘削時

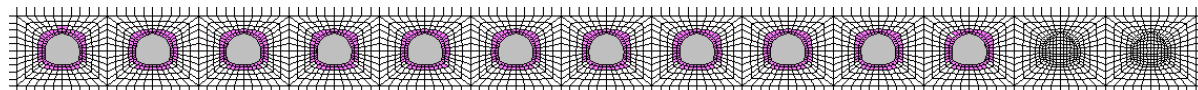
付図 1-21 塑性領域分布図 (CaseC-0.5) 1/2



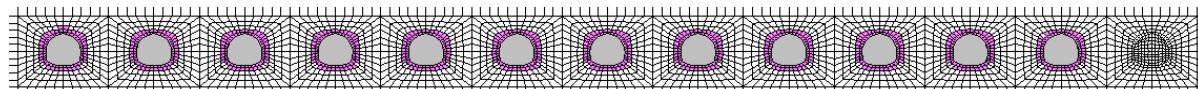
坑道 9 掘削時



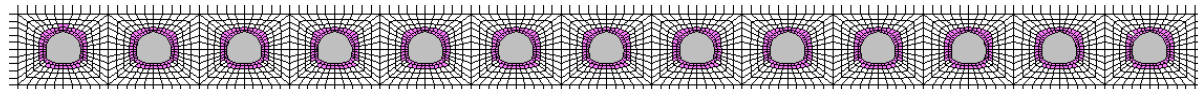
坑道 10 掘削時



坑道 11 掘削時



坑道 12 掘削時

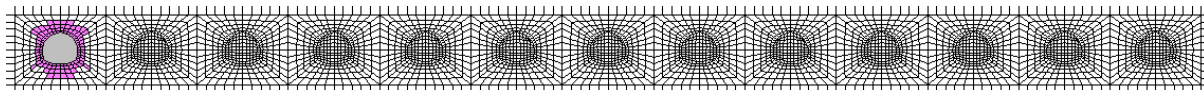


坑道 13 掘削時

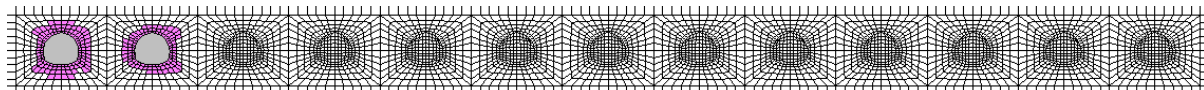
付図 1-21 塑性領域分布図 (CaseC-0.5) 2/2

添付3. 「幌延深地層研究施設の岩盤物性を考慮した試解析」の全解析結果

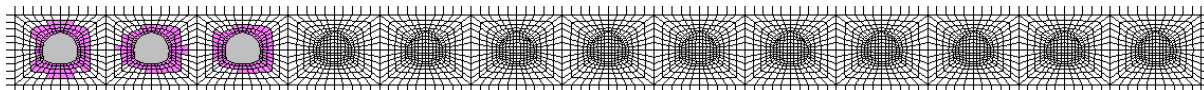
凡例  弾性  
 塑性



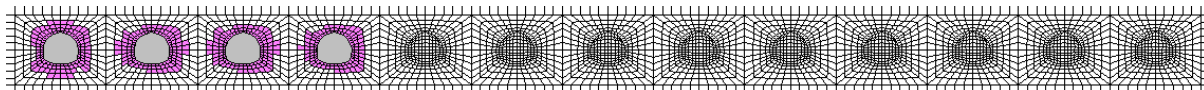
坑道1 掘削時



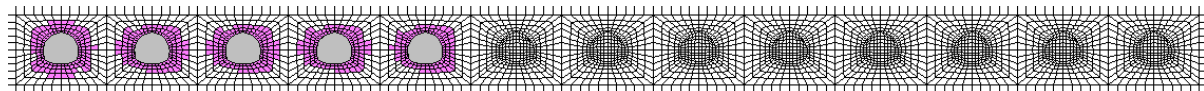
坑道2 掘削時



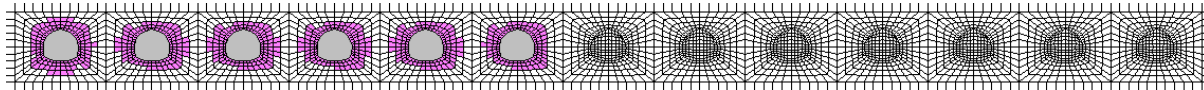
坑道3 掘削時



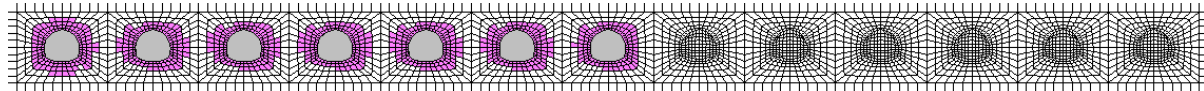
坑道4 掘削時



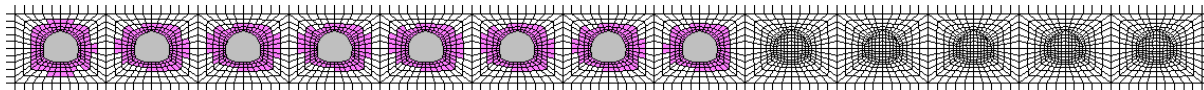
坑道5 掘削時



坑道6 掘削時

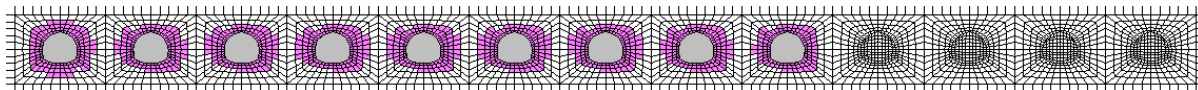


坑道7 掘削時

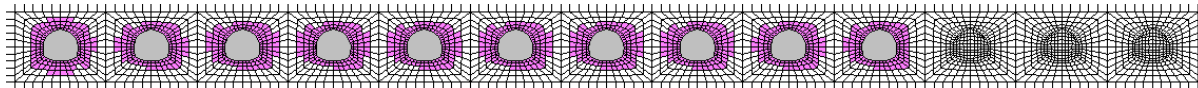


坑道8 掘削時

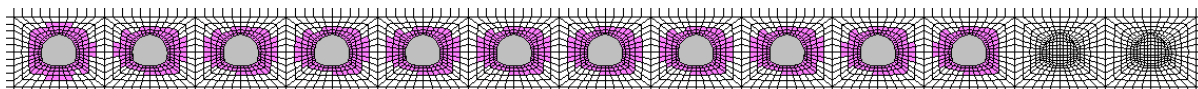
付図1-22 塑性領域分布図（幌延物性値を適用） 1/2



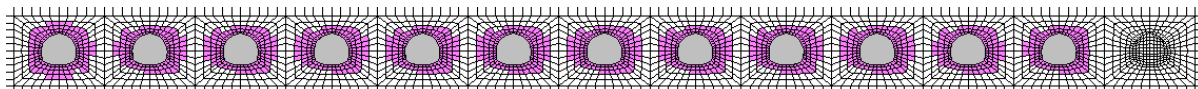
坑道 9 掘削時



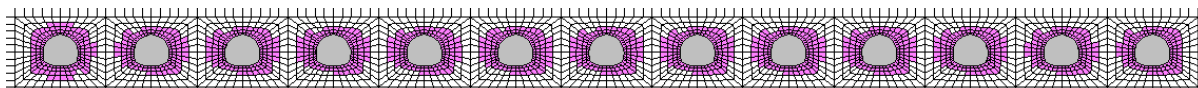
坑道 10 掘削時



坑道 11 掘削時



坑道 12 掘削時



坑道 13 掘削時

付図 1-22 塑性領域分布図（幌延物性値を適用） 2/2



# 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   |
| 物質量   | モル     | mol |
| 光度    | 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 <sup>2</sup>     |
| 体積                      | 立方メートル       | m <sup>3</sup>     |
| 速度                      | メートル毎秒       | m/s                |
| 加速度                     | メートル毎秒毎秒     | m/s <sup>2</sup>   |
| 波数                      | 毎メートル        | m <sup>-1</sup>    |
| 密度, 質量密度                | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 面積密度                    | キログラム毎平方メートル | kg/m <sup>2</sup>  |
| 比体積                     | 立方メートル毎キログラム | m <sup>3</sup> /kg |
| 電流密度                    | アンペア毎平方メートル  | A/m <sup>2</sup>   |
| 磁界の強さ                   | アンペア毎メートル    | A/m                |
| 量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度 | モル毎立方メートル    | mol/m <sup>3</sup> |
| 質量濃度                    | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |
| 輝度                      | カンデラ毎平方メートル  | cd/m <sup>2</sup>  |
| 屈折率 <sup>(b)</sup>      | (数字の) 1      | 1                  |
| 比透磁率 <sup>(b)</sup>     | (数字の) 1      | 1                  |

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表される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 <sup>(b)</sup>   | rad               | 1 <sup>(b)</sup>     | m/m                                                            |
| 立体角                          | ステラジアン <sup>(b)</sup> | sr <sup>(c)</sup> | 1 <sup>(b)</sup>     | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>                                 |
| 周波数                          | ヘルツ <sup>(d)</sup>    | Hz                |                      | s <sup>-1</sup>                                                |
| 力                            | ニュートン                 | N                 |                      | m kg s <sup>-2</sup>                                           |
| 圧力, 応力                       | パスカル                  | Pa                | N/m <sup>2</sup>     | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                             |
| エネルギー, 仕事, 熱量                | ジュール                  | J                 | N m                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                              |
| 仕事率, 工率, 放射束                 | ワット                   | W                 | J/s                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>                              |
| 電荷, 電流量                      | クーロン                  | C                 |                      | s A                                                            |
| 電位差 (電圧), 起電力                | ボルト                   | V                 | W/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 静電容量                         | ファラド                  | F                 | C/V                  | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> |
| 電気抵抗                         | オーム                   | Ω                 | V/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>              |
| コンダクタンス                      | ジーメンズ                 | S                 | A/V                  | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup> |
| 磁束                           | ウェーバ                  | Wb                | Vs                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>              |
| 磁束密度                         | テスラ                   | T                 | Wb/m <sup>2</sup>    | kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>                             |
| インダクタンス                      | ヘンリー                  | H                 | Wb/A                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>              |
| セルシウス温度                      | セルシウス度 <sup>(e)</sup> | °C                |                      | K                                                              |
| 光照度                          | ルーメン                  | lm                | cd sr <sup>(c)</sup> | cd                                                             |
| 放射線量                         | ルクス                   | lx                | lm/m <sup>2</sup>    | m <sup>-2</sup> cd                                             |
| 放射線種の放射能 <sup>(f)</sup>      | ベクレル <sup>(d)</sup>   | Bq                |                      | s <sup>-1</sup>                                                |
| 吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ          | グレイ                   | Gy                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 線量当量, 周辺線量当量, 方向線量当量, 個人線量当量 | シーベルト <sup>(g)</sup>  | Sv                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |
| 酸素活性化                        | カタール                  | kat               |                      | s <sup>-1</sup> mol                                            |

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。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である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含む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                                                                         |
| 粘力のモーメント        | パスカル秒             | Pa s                  | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>                                                   |
| 表面張力            | ニュートンメートル         | N m                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                                                    |
| 角速度             | ニュートン毎メートル        | N/m                   | kg s <sup>-2</sup>                                                                   |
| 角加速度            | ラジアン毎秒            | rad/s                 | m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>                                   |
| 熱流密度, 放射照度      | ラジアン毎秒毎秒          | rad/s <sup>2</sup>    | m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>                                   |
| 熱容量, エントロピー     | ワット毎平方メートル        | W/m <sup>2</sup>      | kg s <sup>-3</sup>                                                                   |
| 比熱容量, 比エントロピー   | ジュール毎ケルビン         | J/K                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                    |
| 比エネルギー          | ジュール毎キログラム毎ケルビン   | J/(kg K)              | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                       |
| 熱伝導率            | ジュール毎キログラム        | J/kg                  | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                                       |
| 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 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>                                                 |
| 電界の強さ           | ジュール毎立方メートル       | J/m <sup>3</sup>      | m <sup>1</sup> kg s <sup>-2</sup>                                                    |
| 電荷密度            | ボルト毎メートル          | V/m                   | m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>                                                 |
| 表面電荷            | クーロン毎立方メートル       | C/m <sup>3</sup>      | m <sup>-3</sup> s A                                                                  |
| 電束密度, 電気変位      | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> s A                                                                  |
| 誘電率             | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> s A                                                                  |
| 透磁率             | ファラド毎メートル         | F/m                   | m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>                        |
| モルエネルギー         | ヘンリー毎メートル         | H/m                   | m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>                                                 |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル           | J/mol                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>                                  |
| 照射線量 (X線及びγ線)   | ジュール毎モル毎ケルビン      | J/(mol K)             | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>                  |
| 吸収線量率           | クーロン毎キログラム        | C/kg                  | kg <sup>-1</sup> s A                                                                 |
| 放射線強度           | グレイ毎秒             | Gy/s                  | m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>                                                       |
| 放射輝度            | ワット毎ステラジアン        | W/sr                  | m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> |
| 酵素活性濃度          | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m <sup>2</sup> sr) | m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>                |
|                 | カタール毎立方メートル       | kat/m <sup>3</sup>    | m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol                                                   |

表5. SI接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称    | 記号   | SI単位による値                                                                                    |
|-------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 分     | min  | 1 min=60s                                                                                   |
| 時     | h    | 1 h=60 min=3600 s                                                                           |
| 日     | d    | 1 d=24 h=86 400 s                                                                           |
| 度     | °    | 1°=(π/180) rad                                                                              |
| 分     | '    | 1'=(1/60)°=(π/10800) rad                                                                    |
| 秒     | "    | 1"=(1/60)'=(π/648000) rad                                                                   |
| ヘクタール | ha   | 1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>                                      |
| リットル  | L, l | 1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> |
| トン    | t    | 1 t=10 <sup>3</sup> kg                                                                      |

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、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単位で表される数値                                 |
|----------|----|---------------------------------------------|
| 電子ボルト    | eV | 1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J   |
| ダルトン     | Da | 1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg  |
| 統一原子質量単位 | u  | 1 u=1 Da                                    |
| 天文単位     | ua | 1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m |

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称        | 記号   | SI単位で表される数値                                                                                    |
|-----------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| バール       | bar  | 1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa                                                       |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1 mmHg=133.322 Pa                                                                              |
| オングストローム  | Å    | 1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m                                                          |
| 海里        | M    | 1 M=1852 m                                                                                     |
| バイン       | b    | 1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup> |
| ノット       | kn   | 1 kn=(1852/3600) m/s                                                                           |
| ネーパ       | Np   | SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。                                                                       |
| ベベル       | B    |                                                                                                |
| デジベル      | dB   |                                                                                                |

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称                    | 記号  | SI単位で表される数値                                                                             |
|-----------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| エルグ                   | erg | 1 erg=10 <sup>-7</sup> J                                                                |
| ダイン                   | dyn | 1 dyn=10 <sup>-5</sup> N                                                                |
| ポアズ                   | P   | 1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s                                                  |
| ストークス                 | St  | 1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> |
| スチルブ                  | sb  | 1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>                         |
| フォトル                  | ph  | 1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx                                        |
| ガラ                    | Gal | 1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>                           |
| マクスウェル                | Mx  | 1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb                                           |
| ガウス                   | G   | 1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T                                           |
| エルステッド <sup>(c)</sup> | Oe  | 1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>                                          |

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

| 名称        | 記号   | SI単位で表される数値                                                        |
|-----------|------|--------------------------------------------------------------------|
| キュリー      | Ci   | 1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq                                       |
| レントゲン     | R    | 1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg                                     |
| ラド        | rad  | 1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy                                    |
| レム        | rem  | 1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv                                    |
| ガンマ       | γ    | 1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T                                        |
| フェルミ      | f    | 1 f=1 fm=10 <sup>-15</sup> m                                       |
| メートル系カラット |      | 1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> 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  | 1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ) |
| マイクロン     | μ    | 1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m                                        |

