

研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設における
廃棄体の受入基準の設定
－有害な空げきが残らないこと－

Waste Acceptance Criteria for Waste Package Destined for Trench-type Disposal Facilities
for Waste Generated from Research, Industrial and Medical Facilities
-No Harmful Void-

仲田 久和 高尾 肇 千々松 正和 野間 康隆
天澤 弘也 坂井 章浩

Hisakazu NAKATA, Hajime TAKAO, Masakazu CHIJIMATSU, Yasutaka NOMA
Hiroya AMAZAWA and Akihiro SAKAI

核燃料・バックエンド研究開発部門
埋設事業センター

Radioactive Waste Disposal Project Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

March 2019

本レポートは国立研究開発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 (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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, 2019

研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設における廃棄体の受入基準の設定
—有害な空げきが残らないこと—

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 埋設事業センター

仲田 久和、高尾 肇^{※1}、千々松 正和^{※2}、野間 康隆^{※2}、天澤 弘也、坂井 章浩

(2018年12月13日受理)

日本原子力研究開発機構埋設事業センターは、研究施設等廃棄物のトレンチ埋設処分施設の設置を計画している。規制で定められる同施設の技術上の基準には、「廃棄物埋設地は、土砂等を充填することにより、当該廃棄物埋設地の埋設が終了した後において空げきが残らないように措置すること」がある。また、トレンチ埋設処分施設に埋設する金属廃棄物を鋼製容器に収納する場合、容器内に有害な空げきが残らないようにする必要がある。

金属廃棄物を鋼製容器に収納した場合、容器内に空げきが存在する。鋼製容器が、将来、腐食すると容器形状を維持できず空げき内に周辺土壌が入り込み、その結果として埋設処分施設が沈下・陥没する可能性がある。これによって、埋設処分施設の覆土が、雨水等が溜まりやすい覆土形状に陥没するなどして埋設処分の安全性に不利な影響を及ぼすことが考えられる。このため、埋設する鋼製容器内の空げき率を定量的に考慮した廃棄体の受入基準が必要となる。

本稿では、廃棄体内の上部空げき率に応じて、トレンチ埋設処分施設の上部覆土の沈下量をDEM解析により評価した。また、沈下後にも上部覆土表面の雨水等を排水するための勾配を確保するために必要な上部覆土の厚さ、勾配を検討した。この際、沈下後の上部覆土表面が、排水勾配を確保できて雨水等が溜まりやすい形状とならないことをもって、当該埋設処分施設には、技術上の基準で求められる有害な空げきはないとした。これに基づいて、廃棄体1体あたりの上部空げき率を20%以下と予備的に設定した。

本報告書は、日揮株式会社が国立研究開発法人日本原子力研究開発機構との契約により実施した業務成果に基づくものである。

旧本部事務所:〒319-1112 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

※1 日揮株式会社

※2 株式会社 安藤・間

Waste Acceptance Criteria for Waste Package Destined for Trench-type Disposal Facilities for Waste
Generated from Research, Industrial and Medical Facilities

-No Harmful Void-

Hisakazu NAKATA, Hajime TAKAO^{※1}, Masakazu CHIJIMATSU^{※2}, Yasutaka NOMA^{※2},
Hiroya AMAZAWA and Akihiro SAKAI

Radioactive Waste Disposal Project Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 13, 2018)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) plans to install disposal facilities for radioactive waste arising from research institutes. One relevant technical standard by the safety regulation is that the disposal facility shall be performance so as not to be left with harmful voids after backfilling with soil. Additionally no harmful void needs to exist in the waste packed in metal containers.

The harmful void is supposed to result in the collapse of the disposal facility after structural materials of the container deteriorate and then become a state that can not retain the structure on its own. That leads to have an adverse impact on the facility such that the shape of cover soil deforms the way in which stagnant water is likely to occur. For which reason, a waste acceptance criteria relating to the quantity of voidage in a waste package needs to be defined quantitatively.

Accordingly the deformation of cover-soil in the event of collapse is evaluated depending on the void ratio in the waste package by using a discrete element method. And then the specifications of cover-soil being capable of maintaining its rainwater drain gradient after the deformation are studied. That is the basis to determine if it is regarded as harmful void. The waste acceptance criteria relating to harmful void in a waste package is preliminary less than 20 percent in a volum ratio based on this study.

Keywords: Voidage, Near Surface Disposal, Cover-soil

This work was based on the study performed by JGC Corporation under contract with the Japan Atomic Energy Agency.

※1 JGC CORPORATION

※2 HAZAMA ANDO CORPORATION

目次

1. はじめに.....	1
2. 検討の手順.....	2
3. トレンチ埋設処分施設の陥没解析のプログラム、パラメータの設定.....	3
3.1 解析に使用するプログラム.....	3
3.2 解析に使用するパラメータの設定.....	3
3.2.1 密度、粒径及び粒度分布について.....	3
3.2.2 粒子間ばね定数、粒子間粘性係数、粒子間摩擦係数及び粒子間結合力について.....	3
3.3 設定したパラメータと室内試験結果・解析結果の比較.....	6
4. トレンチ埋設処分施設の陥没解析.....	7
4.1 トレンチ埋設処分施設の陥没解析のモデル.....	7
4.2 トレンチ埋設処分施設の陥没解析の検討ケース及びパラメータ.....	7
4.2.1 安定型トレンチ埋設処分施設.....	7
4.2.2 付加機能型トレンチ埋設処分施設.....	8
4.3 トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果.....	8
4.3.1 安定型トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果.....	8
4.3.2 付加機能型トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果.....	8
4.4 有害な空げきの観点から適切な覆土仕様.....	9
4.4.1 安定型トレンチ埋設処分施設の覆土仕様.....	9
4.4.2 付加機能型トレンチ埋設処分施設の覆土仕様.....	9
5. トレンチ埋設処分施設の覆土仕様及び廃棄体 1 体あたりの上部空げき率の基準.....	11
5.1 トレンチ埋設処分施設の覆土の仕様.....	11
5.2 廃棄体 1 体あたりの上部空げき率.....	11
6. おわりに.....	12
参考文献.....	12

Contents

1. Introduction	1
2. Approach	2
3. Calculation code and parameters for analysis of cover-soil	3
3.1 Calculation code for use	3
3.2 Parameters for use	3
3.2.1 Density, particle size and its distribution.....	3
3.2.2 Parameters such as a spring constant, viscosity, friction coefficient and cohesion between particles.....	3
3.3 Comparison with experimental result and analysis result.....	6
4. Behavior evaluation relevant to cover-soil in the event of collapse	7
4.1 Analysis model for behavior evaluation of cover-soil.....	7
4.2 Examination cases as for analysis of cover-soil and its parameters	7
4.2.1 Trench-type disposal facility.....	7
4.2.2 Trench-type disposal facility with impermeable functions	8
4.3 Analysis result of behavior evaluation of cover-soil.....	8
4.3.1 Analysis result as for the simple trench-type disposal facility	8
4.3.2 Analysis result as for the trench-type disposal facility with impermeable functions.....	8
4.4 Proper cover-soil specifications in terms of harmful voids.....	9
4.4.1 Cover-soil specifications of the simple trench type disposal facility.....	9
4.4.2 Cover-soil specifications of the disposal facility with impermeable functions.....	9
5. Cover-soil specifications of the disposal facility and the void ratio in a waste package	11
5.1 Cover-soil specifications of the trench-type disposal facility	11
5.2 Waste acceptance criteria relevant to the void ratio in a waste package	11
6. Summary.....	12
References.....	12

図表リスト

表 1	粒状体個別要素法で考慮する物理特性とパラメータ	13
表 2	粒状個別要素法の解析に必要なパラメータ	13
表 3	砂・土の挙動に係るパラメータスタディの結果から考察したパラメータの性質	13
表 4	砂・土の室内試験及び解析結果を踏まえて設定したパラメータ値	14
表 5	砂・土の室内試験結果と粒状個別要素法を用いた再現解析結果の比較	14
表 6	陥没解析の解析ケース	15
表 7	陥没解析の解析結果	16
表 8	排水勾配を考慮したトレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果	17
図 1	粒状個別要素法における各粒子要素間に作用する機械要素	18
図 2	粒状個別要素法を用いたパラメータ設定のための解析で設定した粒径加積曲線	18
図 3	パラメータ設定のための室内試験（砂）	19
図 4	パラメータ設定のための室内試験（土）	19
図 5	砂を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間ばね定数の影響	20
図 6	砂を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間粘性係数の影響	21
図 7	砂を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間結合力の影響	22
図 8	砂を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間摩擦係数の影響	23
図 9	土を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間ばね定数の影響	24
図 10	土を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間粘性係数の影響	25
図 11	土を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間結合力の影響	26
図 12	土を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間摩擦係数の影響	27
図 13	安定型トレンチ埋設処分施設の横断面図	28
図 14	付加機能型トレンチ埋設処分施設の横断面図	28
図 15	解析モデル（安定型トレンチ埋設処分施設；親杭横矢板方式）	29
図 16	陥没解析で設定した粒径加積曲線	30
図 17	解析モデル（付加機能型トレンチ埋設処分施設；オープンカット方式）	31
図 18	陥没解析の結果（安定型トレンチ埋設処分施設；埋め戻し材 砂；親杭横矢板方式）	32
図 19	陥没解析の結果（安定型トレンチ埋設処分施設；埋め戻し材 土；親杭横矢板方式）	33
図 20	陥没解析の結果（付加機能型トレンチ埋設処分施設；埋め戻し材 砂；オープンカット方式）	34
図 21	陥没解析の結果（付加機能型トレンチ埋設処分施設；埋め戻し材 土；オープンカット方式）	35
図 22	排水勾配を考慮した安定型トレンチ埋設処分施設の概念図	36
図 23	排水勾配を考慮した安定型トレンチ埋設処分施設の横断面図	36
図 24	排水勾配を考慮した安定型トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果	37

図 25	排水勾配を考慮した付加機能型トレンチ埋設処分施設の概念図	38
図 26	排水勾配を考慮した付加機能型トレンチ埋設処分施設の横断面図	38
図 27	排水勾配を考慮した付加機能型トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果	39
図 28	排水勾配をより大きくした付加機能型トレンチ埋設処分施設の横断面図	40
図 29	排水勾配をより大きくした付加機能型トレンチ埋設処分施設の解析結果	40
図 30	排水勾配が確保可能な上部覆土の勾配例（安定型トレンチ埋設処分施設、廃棄体の上部空げき率 10%）	41
図 31	排水勾配が確保可能な上部覆土の勾配例（安定型トレンチ埋設処分施設、廃棄体の上部空げき率 20%）	41
図 32	排水勾配が確保可能な上部覆土の勾配例（安定型トレンチ埋設処分施設、廃棄体の上部空げき率 30%）	42
図 33	排水勾配が確保可能な上部覆土の勾配例（付加機能型トレンチ埋設処分施設、廃棄体の上部空げき率 10%）	42
図 34	排水勾配が確保可能な上部覆土の勾配例（付加機能型トレンチ埋設処分施設、廃棄体の上部空げき率 20%）	43
図 35	排水勾配が確保可能な上部覆土の勾配例（付加機能型トレンチ埋設処分施設、廃棄体の上部空げき率 30%）	43

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構法に基づき、原子力機構及び国内の研究施設等から発生が見込まれる低レベル放射性廃棄物（以下、「研究施設等廃棄物」という。）の埋設事業の実施主体となっている。

研究施設等廃棄物の埋設処分にあたっては、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」第 51 条の 6 において、廃棄物埋設施設及び廃棄体がそれぞれの技術上の基準に適合していることについて原子力規制委員会の確認を受けることが定められている。

この技術上の基準は、「核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」において廃棄物埋設施設に係る基準として第 6 条第 1 項第 4 号に「廃棄物埋設地は、土砂等を充填することにより、当該廃棄物埋設地の埋設が終了した後において空げきが残らないように措置すること」が規定されている。

現在、埋設事業センターが計画している研究施設等廃棄物のトレンチ埋設処分施設では、主に廃止措置等により発生する大型の金属廃棄物を収納するため、200L ドラム缶に加えて、鋼製角型容器も埋設対象としているが、金属類をこれらの鋼製容器に収納することによって生じる容器内部の空げきの対策については、現行の技術上の基準では要求されていない。しかし、廃棄体内の空げきは、金属等を鋼製容器へ収納する段階で、土砂等で充填する等の対策を講じることが適切であり、廃棄体 1 体あたりの空げきが十分に低減されていることをもって、「当該廃棄物埋設地の埋設が終了した後において空げきが残らないように措置すること」の技術上の基準へ適合していることを示す必要がある。

そのため、廃棄体 1 体あたりの空げきが十分に低減されているものとして、定量的な基準値を定める必要があることから、以下の考え方に基つて検討した。

廃棄体に用いる鋼製容器は、将来、腐食すると容器形状を維持できず空げき内に周辺土壌が入り込み、その結果としてトレンチ埋設処分施設が陥没する可能性がある。埋設した廃棄体内の空げき率が大きい場合は、トレンチ埋設処分施設の上部覆土が、雨水等が溜まりやすい覆土形状に陥没するなどして埋設処分の安全性に不利な影響を及ぼすことが考えられる。したがって、雨水等が溜まりやすい上部覆土形状に陥没しないための、廃棄体 1 体あたりの空げき率の基準、また、その際の上部覆土の厚さ、勾配の仕様を検討する。これによって、廃棄体内の空げきが十分に低減され、廃棄体の技術上の基準にある有害な空げきには該当しないとする。

本報告書では、この観点から、陥没時に廃棄体周辺の埋戻し部及び上部覆土部がどのような挙動をするのか、また、廃棄体内の全容積に対する蓋の下面から固型化部の上面にできる空間の割合（以下、「上部空げき率」という。）の大小がどのように結果に影響を与えるのか数値解析的な評価を試行し、将来、具体のトレンチ埋設処分施設において、廃棄体 1 体あたりの上部空げき率に関する基準を設定するための方法論を提示することとし、暫定的に上部空げき率に関する基準を設定した。

なお、同基準は、トレンチ埋設処分施設を設置する地形、地質特性等に依存するものであることから、同施設の設置場所が決定した後に見直すものとする。

2. 検討の手順

埋設する廃棄体の上部空げき率の定量的な基準を検討するために、陥没時の覆土の挙動、また、廃棄体の上部空げき率の大小がどのように影響を与えるのか数値解析を行った。本報告書の構成は、以下のとおりである。

① トレンチ埋設処分施設の陥没解析のプログラム、パラメータの設定（第3章）

陥没に係る数値解析では、陥没時のトレンチ埋設処分施設の覆土の変形（沈下量）を計算する。ここでは、陥没解析のプログラムと、覆土材料等の変形に係るパラメータが必要となり、これらについて説明する。なお、現段階では、実際にトレンチ埋設処分施設で使用する覆土材料を決めていないため、覆土材料に係るパラメータは一般的な条件で検討した。

② トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果の検討（第4章）

想定するトレンチ埋設処分施設の形状、寸法、覆土に用いる地盤材料の種類（砂、土）、廃棄体に用いる容器（200L ドラム缶、鋼製角型容器）、廃棄体の上部空げき率（10%、20%、30%）を考慮し、①で設定したパラメータを用いて、陥没時のトレンチ埋設処分施設の覆土の変形（沈下量）を計算する。

計算の結果から、覆土の変形が大きく、雨水等が溜まりやすい覆土形状となる場合は、当初想定したトレンチ埋設処分施設の覆土の形状、寸法を変更して再度解析を行う。再解析では、廃棄体の上部空げき率（10%、20%、30%）に応じて、雨水等が溜まりやすい覆土形状とならない覆土の形状、寸法を検討する。

なお、トレンチ埋設処分施設の覆土が陥没時に雨水等が溜まりやすい形状とならないとは、上部覆土表面の排水勾配が陥没後に維持されることとした。

③ トレンチ埋設処分施設の覆土仕様及び廃棄体1体あたりの上部空げき率の基準（第5章）

②の結果に基づいて、廃棄体1体あたりの上部空げき率の基準、また、その際の覆土の厚さ、勾配の仕様を検討した。なお、ここで設定した廃棄体1体あたりの上部空げき率、覆土の仕様は、覆土材料について一般的なパラメータで評価した値であるため、実際のトレンチ埋設処分施設的设计時には、使用する覆土材料を決めて、あらためて陥没解析を実施する必要がある。

3. トレンチ埋設処分施設の陥没解析のプログラム、パラメータの設定

トレンチ埋設処分施設の陥没解析のプログラム、パラメータの設定は、最新の知見や、一般的な条件で検討することを考慮して、以下のとおりとした。

3.1 解析に使用するプログラム

本解析には、ITASCA 社により開発された粒状体個別要素法（以下、「DEM」という。）¹⁾を用いた 2 次元版のプログラム PFC2D (Ver.4.0) を使用した。

DEM では、要素を円形（2 次元）あるいは球体（3 次元）と仮定し、密度を与えて要素の質量を算出し、作用する合力・モーメントを考慮して、要素の運動を計算する。2 つの要素が接触した場合には、接触により発生する力・モーメントを仮想の弾性バネ、ダッシュポット、スライダー、ノン・エクステンション・ディバイダーを用いて、要素間の接触力を考慮し、要素の運動方程式を計算する。この際の概念図を図 1^{2), 3)}に示す。

弾性バネは要素間の変位に応じた反発力、ダッシュポットは粘性力、スライダーは摩擦力に係る。ノン・エクステンション・ディバイダーは粒子間の結合力を考慮することで引張力を表現する。これらを表 1 に示す。接触した要素間に粘着力を付与することで、結合力を生じさせることも可能である。要素自体は剛体である。

なお、円形要素を組み合わせて任意の形状の要素の結合体を要素として取り扱うこともでき、境界要素（壁要素）を設置することもできる。

3.2 解析に使用するパラメータの設定

本解析に必要なパラメータを表 2 に示す。表 2 中、密度、粒径、粒度分布については、以下に示すよう文献等により一般的な値を設定した。それ以外のパラメータについては、簡易な室内試験を実施し、その結果を DEM で解析し、解析において得られた結果と室内試験の結果が一致するようにパラメータを設定した。

3.2.1 密度、粒径及び粒度分布について

本解析における密度は、土粒子密度として与えた。既往文献⁴⁾より、一般的な無機質土であれば $2.60 \times 10^6 \text{g/m}^3 \sim 2.80 \times 10^6 \text{g/m}^3$ の範囲を示すとあるため、密度は、 $2.65 \times 10^6 \text{g/m}^3$ とした。

粒径（粒子の半径）は、 $0.625 \text{mm} \sim 1.25 \text{mm}$ と仮定した。粒度分布を図 2 に示す。DEM の解析の計算時間は要素数（粒子数）に依存し、土粒子自体をモデル化すると、計算時間が莫大となるため、数十分程度で解析が終了するように要素数に制限を設けて粒径、粒度分布を設定した。

3.2.2 粒子間ばね定数、粒子間粘性係数、粒子間摩擦係数及び粒子間結合力について

粒子間ばね定数、粒子間粘性係数、粒子間摩擦係数、粒子間結合力を設定するために、(1)項で述べる簡易な室内試験を実施した。また、DEM の解析では、これらのパラメータの値を、一般的と考えられる値から変化させ、室内試験の結果を再現できるパラメータを設定する。（以下、「パラメータスタディ」という。）

ただし、減衰特性については、表 1 に示したように、2 つのパラメータを設定する必要がある。

ひとつは粘性係数で、もう一つは減衰定数である。粘性係数はそれぞれの接点に働く粘性力である。その大きさは、接点における相対速度に比例する。一方、減衰定数の減衰力は粒子中心に作用する。その大きさは、粒子に働く合力（接点力の合力や体積力（重力等））に比例する。

粘性係数は、これまでの地盤材料を対象とした解析事例では、0～1の範囲でパラメータスタディが行われているが、本解析では、0～10の範囲とした。

減衰定数は、解析に使用するプログラムの初期設定値として静的解析で0.7、動的解析で0.157となっているが、本解析では、変形が短時間で起こるとして動的解析の初期設定値を参考に0.15とした。

(1) パラメータ設定のための室内試験

本解析では、トレンチ埋設処分施設内の廃棄体の上部空げき量の大小によって、陥没時の埋戻し部及び上部覆土部の変形を確認する。埋戻し部と上部覆土部の材料は、砂質土系の材料（砂）と粘性土系の材料（土）の2種類を対象とした。

現時点では、使用する材料は未定であるため、ここでは砂、土に関して具体的な材料を想定せず、一般的な地盤材料とした。また、解析に必要なパラメータは、種々の室内試験を実施し、その結果を再現できるように設定する必要があるが、本検討では、図3及び図4に示す簡易な室内試験のみを実施し、その結果を再現できるようなパラメータとした。

図3は、砂を対象とした室内試験である。試験は、山形県産の5号珪砂を用いて、1回実施した。試験内容は、 $\phi 50\text{mm} \times H100\text{mm}$ のモールドに砂を図3(a)に示すように充填し、その材料を図3(b)に示すようにモールドから解放した時の形状を確認した。この解放時の形状を再現できるようにパラメータを設定した。

図4は、土を対象とした室内試験である。土の場合は、砂のようにモールドから解放しても形状が変化しないので、図4(b)に示すようにモールドから試料を取り出した後に30cmの高さから落下し、落下後の形状となる図4(c)を再現できるようにパラメータを設定した。試験は、秋田県で採取し4.75mmふるいを通過した砂質粘性土を用いて、1回実施した。

(2) パラメータ設定のための解析

粒子間ばね定数、粒子間粘性係数、粒子間摩擦係数、粒子間結合力の変化による、解析結果への影響を確認することを目的にパラメータスタディを実施した。

ここでは、各パラメータの違いに応じて、砂は材料解放後の安息角、土は落下時の変形に関する挙動を検討した。解析結果と室内試験の結果の比較は、砂の試験結果（図3）、土の試験結果（図4）のそれぞれに実施した。

本解析に用いた粒子の大きさ（半径）は0.625mm～1.25mmで、粒子数は1,469である。全解析で減衰定数は、前述のとおり動的解析とみなし0.15とした。

1) 砂の室内試験に係るパラメータスタディの結果

i) 砂の粒子間ばね定数の影響

図5に砂を対象にした室内試験の再現解析を、粒子間ばね定数 $1.0 \times 10^7 \text{N/m}$ 、 $1.0 \times 10^8 \text{N/m}$ 、 $1.0 \times 10^9 \text{N/m}$ ごとに示す。岩盤や地盤を解析対象とした解析事例¹⁾では、ばね定数は $5 \times 10^6 \text{N/m}$ ～

$5 \times 10^{10} \text{N/m}$ の値を用いており、本解析で用いるばね定数はこの範囲に入っている。図 5 より、粒子間ばね定数が大きくなるに従い安息角が若干大きくなる（山の勾配が大きくなる。）が、粒子間ばね定数の変化に対する解析結果に大きな差はない。

ii) 砂の粒子間粘性係数の影響

図 6 に砂を対象にした室内試験の再現解析を、粒子間粘性係数 0.0、5.0、10.0 ごとに示す。前述の粒子間ばね定数の大きな影響は見られないので、粒子間ばね定数は、解析プログラムの初期設定値である $1.0 \times 10^8 \text{N/m}$ とした。図 6 より、粒子間粘性係数が 10.0 の場合には安息角は比較的大きいが、0.0 と 5.0 の場合では解析結果に大きな差はない。

iii) 砂の粒子間結合力の影響

図 7 に砂を対象にした室内試験の再現解析を、粒子間結合力 0.0N、10.0N、15.0N、20.0N、25.0N、50.0N ごとに示す。岩盤や地盤を解析対象とした解析事例¹⁾では、粒子間結合力に関する言及はなく、粒子間結合力は、室内試験とパラメータスタディの結果を比較して設定した。図 7 より、粒子間結合力が 10.0N 以下では、安息角 $20 \sim 30^\circ$ 程度の粘性のない砂のような挙動を示すが、15.0N 以上になると、一部あるいは全体が自立した。

iv) 砂の粒子間摩擦係数の影響

図 8 に砂を対象にした室内試験の再現解析を、粒子間摩擦係数 0.0、0.5、1.0 ごとに示す。岩盤や地盤を解析対象とした解析事例¹⁾では、地盤材料の解析として内部摩擦角 $0 \sim 90^\circ$ を選定しており、粒子間摩擦係数は $0 \sim 1$ の範囲は適切と考えられる。図 8 より、粒子間摩擦係数が大きくなると安息角も大きくなった。

2) 土の室内試験に係るパラメータスタディの結果

i) 土の粒子間ばね定数の影響

図 9 に土を対象にした室内試験の再現解析を、粒子間ばね定数 $1.0 \times 10^7 \text{N/m}$ 、 $1.0 \times 10^8 \text{N/m}$ 、 $1.0 \times 10^9 \text{N/m}$ ごとに示す。図 9 より、粒子間ばね定数が大きくなるに従い落下後の山の勾配が大きくなるが、粒子間ばね定数の変化に対する解析結果に大きな差はない。

ii) 土の粒子間粘性係数の影響

図 10 に土を対象にした室内試験の再現解析を、粒子間粘性係数 0.0、5.0、10.0 ごとに示す。図 10 より、粒子間粘性係数が 5.0 と 10.0 の場合には落下後の材料が床上で広がりやすく、安息角も小さくなった。

iii) 土の粒子間結合力の影響

図 11 に土を対象にした室内試験の再現解析を、粒子間結合力 0.0N、75.0N、250.0N、350.0N、450.0N、1000.0N ごとに示す。岩盤や地盤を解析対象とした解析事例¹⁾では、粒子間結合力に関する言及はなく、粒子間結合力は、室内試験とパラメータスタディの結果を比較して設定した。図 11 より、粒子間結合力が 75.0N 以下では、落下後の変形が砂のような挙動となるが、250.0N

以上では、形状を保つ傾向となり土のような挙動を示した。粒子間結合力が 1000.0N では、落下後も変形が見られない形状となり、岩石材料のような物性値になると考えられる。

iv) 土の粒子間摩擦係数の影響

図 12 に土を対象にした室内試験の再現解析を、粒子間摩擦係数 0.0、0.5、1.0 ごとに示す。岩盤や地盤を解析対象とした解析事例¹⁾では、地盤材料の解析として摩擦角 0~90°を選定しており、粒子間摩擦係数は 0~1 の範囲は適切と考えられる。図 12 より、粒子間摩擦係数が大きくなると落下後の山の勾配も大きくなる傾向が見られた。

3.3 設定したパラメータと室内試験結果・解析結果の比較

パラメータスタディの結果を表 3 に示す。粒子間ばね定数、粒子間粘性係数、粒子間摩擦係数を変化させても、砂の場合、土の場合ともに安息角に大きな差はない。粒子間結合力は大きな値を設定すると土のように変形する傾向があり、解析結果に大きな影響を与えた。本パラメータスタディから、粒子間ばね定数、粒子間粘性係数、粒子間摩擦係数は同じでも粒子間結合力を適切に設定することで、安息角、落下後の変形に関する挙動を表現できると想定した。

この結果を踏まえ、次章に示すトレンチ埋設処分施設の陥没解析に用いる砂及び土のパラメータ値を表 4 のように設定した。このパラメータを用いた解析結果と室内試験の比較は表 5 に示す。解析結果は砂、土ともに、室内試験の結果と整合している。具体的には、砂の室内試験に係る解析では、安息角は 25°程度となった。また、土の室内試験に係る解析では、30cm の高さから落下させた後の試料の高さが 7~8cm であった。

これらのパラメータを用いて、トレンチ埋設処分施設の陥没解析を実施した。

4. トレンチ埋設処分施設の陥没解析

本章では、想定するトレンチ埋設処分施設の形状、寸法、覆土や廃棄体の埋戻しに用いる地盤材料の種類（砂、土）、廃棄体に用いる容器（200L ドラム缶、鋼製角型容器）、廃棄体の上部空げき率（10%、20%、30%）を、解析モデルとして具体的に設定し、陥没解析を行う。

また、陥没が発生した時の上部覆土表面が、雨水等が溜まりやすい形状にならないことを確認する。

4.1 トレンチ埋設処分施設の陥没解析のモデル

本解析では、図 13 及び図 14 に示す 2 つのトレンチ埋設処分施設の形式を解析対象とした。図 13 は安定型トレンチ埋設処分施設で、親杭横矢板方式で掘削された形式である。図 14 は付加機能型トレンチ埋設処分施設で、オープンカット方式で掘削された形式である。

本検討では、陥没前に施工した上部覆土表面の排水勾配が、陥没後でも維持されることをもって、雨水等が溜まりやすい形状ではないと解釈する。このため、陥没前の上部覆土表面の初期勾配として必要な角度を確認する。この主旨を踏まえると、陥没時の勾配がより厳しいと想定されるのは、縦断方向（長手方向）より横断方向（短手方向）であることから、図 13 及び図 14 中の横断面の半分を解析モデルとした。

4.2 トレンチ埋設処分施設の陥没解析の検討ケース及びパラメータ

トレンチ埋設処分施設の陥没解析の検討ケースを表 6 に示す。検討ケース及びパラメータは、安定型トレンチ埋設処分施設（親杭横矢板方式）、付加機能型トレンチ埋設処分施設（オープンカット方式）のそれぞれ以下のとおりである。

4.2.1 安定型トレンチ埋設処分施設

安定型トレンチ埋設処分施設の陥没解析のモデルを図 15 に示す。廃棄体の鋼製容器は、約 1m³ の鋼製角型容器とし、上部空げき率は、10%、20%、30%の 3 ケースを検討する。上部覆土の排水勾配は 0°とした。

廃棄体周辺の埋戻し材は、砂、土である場合の 2 ケースを検討する。上部覆土には、土を用いる。土、砂に関する DEM 解析に必要なパラメータは、表 4 のとおりである。

解析に用いた粒子数（要素数）と粒子の大きさ（半径）は、効率的に解析ができるように計算時間を考慮して設定した。陥没解析では、計算時間を数時間程度で終了するように要素数に制限を設け、要素数と境界条件に応じた粒子の大きさ（半径）を設定した。粒子数は、図 15 中の埋戻し部：13,939、上部覆土部：7,363、廃棄体：1,344 とした。

粒子の大きさ（半径）は、上部覆土部：0.025～0.05m とし、埋戻し部は廃棄体間の隙間への充填性を考慮してそれよりも小さくした。廃棄体部の粒子の大きさは、鋼製角型容器を 6 等分した大きさとした。すなわち、上部覆土部：0.025～0.05m、埋戻し部：0.0125～0.025m、廃棄体：0.094m とした。なお、上部覆土部と比べて埋戻し部の方がより複雑な変形挙動となると考え、上部覆土部に比べて埋戻し部の方をより小さい粒径となるように設定した。粒径分布は、図 16 に示したとおりである。

4.2.2 付加機能型トレンチ埋設処分施設

付加機能型トレンチ埋設処分施設の陥没解析のモデルを図 17 に示す。廃棄体の鋼製容器は、約 200L の鋼製オープンヘッドドラムとし、上部空げき率は、10%、20%、30%の 3 ケースを検討する。上部覆土の排水勾配は 0°とした。

廃棄体周辺の埋戻し材は、砂、土である場合の 2 ケースを検討する。上部覆土には、土を用いる。土、砂に関する DEM 解析に必要なパラメータは、表 4 のとおりである。

解析に用いた粒子数は、図 17 中の埋戻し部：18,519、上部覆土部：8,604、廃棄体：1,756 とした。粒子の大きさ（半径）は、上部覆土部：0.025～0.05m、埋戻し部：0.0125～0.025m、廃棄体：0.075m とした。粒径分布は、図 16 に示したとおりである。

4.3 トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果

トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果は、安定型トレンチ埋設処分施設（親杭横矢板方式）、付加機能型トレンチ埋設処分施設（オープンカット方式）のそれぞれ以下のとおりである。

4.3.1 安定型トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果

図 18 は、安定型トレンチ埋設処分施設において、廃棄体周辺の埋戻し材が砂の場合で、廃棄体の上部空げき率を 10%、20%、30%とした時の解析結果である。図 19 は、廃棄体周辺の埋戻し材を土とした場合の解析結果である。

安定型トレンチ埋設処分施設では、鋼製角型容器を埋設した領域が一様に陥没した。上部覆土の法面（法肩）から、鋼製角型容器を埋設した領域に向けて内向きに勾配が生じ、廃棄体を埋設した領域に雨水等が溜まりやすい上部覆土の形状に変形した。

安定型トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果を表 7 中 Case-A に示す。同表の「沈下量」は、陥没前の上部覆土天端の高さから陥没後の最も低い箇所との差であり、「高低差」は、陥没後の最も高い箇所と最も低い箇所の差である。

廃棄体の上部空げき率が大きいほど沈下量、高低差ともに大きくなった。また、廃棄体周辺の埋戻し材については、砂より土の方が沈下量は大きい傾向があるが、埋戻し材の違いによる解析結果への影響に大きな差はない。

4.3.2 付加機能型トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果

図 20 は、付加機能型トレンチ埋設処分施設において、廃棄体周辺の埋戻し材が砂の場合で、廃棄体の上部空げき率を 10%、20%、30%とした時の解析結果である。図 21 は、廃棄体周辺の埋戻し材を土とした場合の解析結果である。

付加機能型トレンチ埋設処分施設では、陥没後は上部覆土の法面（法肩）から、ドラム缶を埋設した領域に向けて内向きに勾配が生じている。また、付加機能型トレンチ埋設処分施設では、横断面の中央底部に施設内の保有水を集水するための集排水管を設置しており、横断面の中央付近にある廃棄体の積載段数は 3 段（底部法面部を除く、その外側は 4 段）となっている。横断面の中央部（解析モデルの左端部、廃棄体が 3 段である箇所）よりその外側（廃棄体が 4 段である箇所）の方が、沈下量が大きくなった。このため、廃棄体を埋設した領域に雨水等が溜まりやすい上部覆土の形状に変形した。

付加機能型トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果を表 7 中 Case-B に示す。廃棄体の上部空げき

率が大きいほど沈下量、高低差ともに大きくなった。また、廃棄体周辺の埋戻し材については、砂より土の方が沈下量は大きい傾向があるが、埋戻し材の違いによる解析結果への影響に大きな差はない。

なお、安定型トレンチ埋設処分施設の方が、付加機能型トレンチ埋設処分施設に比べて、沈下量、高低差ともに大きくなった。これは、安定型トレンチ埋設処分施設へ埋設する約 1m³ の鋼製角型容器の方が、一体あたりの容積が大きく、空げき率が同じでも空げき量が多くなるためである。

4.4 有害な空げきの観点から適切な覆土仕様

4.3 節の検討では、上部空げき率が 10%、20%、30%の廃棄体を埋設した場合、想定するトレンチ埋設処分施設の形状、寸法では、陥没が発生した時に上部覆土表面が、雨水等が溜まりやすい形状となり、埋設施設における有害な空げきの観点から適切な覆土仕様ではない。

このため、想定するトレンチ埋設処分施設の形状、寸法を変更して、陥没が発生した時の上部覆土表面が、雨水等が溜まりやすい形状とならないように検討する。

4.4.1 安定型トレンチ埋設処分施設の覆土仕様

陥没が発生した時の上部覆土表面が、雨水等が溜まりにくい形状とするために、上部覆土を厚くし、また、排水勾配を施工する方針とした。これによって、陥没後であっても、当初施工した排水勾配が維持されることを、陥没解析を行って確認する。陥没解析の解析対象は、廃棄体の上部空げき率が 20%の場合の安定型トレンチ埋設処分施設とし、埋戻し材が砂の場合である Case-A-1-20 とした。

排水勾配を考慮した安定型トレンチ埋設処分施設の概念図を図 22 に示す。図 18 より、安定型トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果は、鋼製角型容器を埋設した区画内側で一様に沈下する結果となったため、一様に沈下量の 2 倍の厚さを、原設計から積み増した上部覆土の仕様とする。この時、法面勾配は原設計の勾配で延長することとし、さらに 2%程度の排水勾配を上部覆土表面に付加する。図 23 に排水勾配を確保できる安定型トレンチ埋設処分施設の横断面図を示す。陥没解析の結果を図 24 に示す。陥没前の排水勾配は 2.4%（縦距離：0.25m、横距離：10.30m）であり、沈下後の排水勾配は 4.3%（縦距離：0.48m、横距離：11.36m）となった。このことから、沈下後でも上部覆土の排水勾配が確保できることから、雨水等が溜まりやすい形状に変形しなかった。

4.4.2 付加機能型トレンチ埋設処分施設の覆土仕様

陥没が発生した時の上部覆土表面が、雨水等が溜まりにくい形状とするために、上部覆土を厚くし、また、排水勾配を施工する方針とした。これによって、陥没後であっても、当初施工した排水勾配が維持されることを、陥没解析を行って確認する。陥没解析の解析対象は、廃棄体の上部空げき率 20%の場合の付加機能型トレンチ埋設処分施設とし、埋戻し材が砂の場合である Case-B-1-20 とした。

排水勾配を考慮した付加機能型トレンチ埋設処分施設の概念図を図 25 に示す。図 20 より、付加機能型トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果、沈下は一様ではなく、掘削底面の形状に依存する。そのため、最大の沈下が発生する箇所に、最大沈下量の 2 倍程度の土被り厚さが確保できるような初期の排水勾配を付加した。具体的には、トレンチ中央部で 0.6m 程度原設計より高く

し、法肩に向かって排水勾配（4.8%の勾配）をつけた。

(1) 上部覆土の排水勾配 4.8%の場合

図 26 に排水勾配 4.8%を確保できる付加機能型トレンチ埋設処分施設の横断面図を示す。陥没解析の結果を図 27 に示す。陥没前の排水勾配は 4.8%（縦距離：0.62m、横距離：12.92m）であったが、沈下後の排水勾配は、トレンチ中央部よりの区間では 6.4%（縦距離：0.44m、横距離：6.92m）となり沈下後でも排水勾配が確保できた。

しかし、法肩寄りの区間では、-1.2%（縦距離：-0.06m、横距離：5.41m）となった。ここで、マイナス（-）は、廃棄体を埋設した領域に向けて勾配が生じたことを示す。このため、陥没が発生した時の上部覆土表面が、雨水等が溜まりやすい形状となった。

(2) 上部覆土の排水勾配 9.3%の場合

図 28 に示すように、図 26 より上部覆土をさらに厚くした排水勾配 9.3%を確保できる付加機能型トレンチ埋設処分施設の横断面図に検討をした。

同モデルでは、トレンチ中央部で 1.2m 程度原設計より上部覆土を厚く、法肩に向かって排水勾配（9.3%程度の勾配）をつけた。

解析結果を図 29 に示す。陥没前の初期の排水勾配は 9.3%（縦距離：1.20m、横距離：12.93m）であり、沈下後の排水勾配は、トレンチ中央部よりの区間では 9.7%（縦距離：0.88m、横距離：8.99m）、法肩寄りの区間では、1.4%（縦距離：0.05m、横距離：3.79m）となり沈下後でも排水勾配を確保できた。このため、陥没が発生した時の上部覆土表面が、雨水等が溜まりやすい形状とならなかった。

ここで、4.4 節における安定型トレンチ埋設処分施設と付加機能型トレンチ埋設処分施設の陥没解析の計算結果を表 8 に示す。

5. トレンチ埋設処分施設の覆土仕様及び廃棄体 1 体あたりの上部空げき率の基準

4 章までの結果に基づいて、トレンチ埋設処分施設の覆土の厚さ、勾配の仕様を検討し、それに応じた廃棄体 1 体あたりの上部空げき率の基準を予備的に設定した。

5.1 トレンチ埋設処分施設の覆土の仕様

4 章の陥没解析の結果より、廃棄体 1 体あたりの上部空げき率に応じて、盛土の沈下量が大きくなる傾向である。この沈下量を、あらかじめ想定して、上部覆土の厚さ、排水勾配を設定することで、雨水等が溜まりやすい形状に変形しないことを確認した。

4.4 節の結果より、安定型トレンチ埋設処分施設と付加機能型トレンチ埋設処分施設のそれぞれで排水勾配を確保するための上部覆土の仕様の検討方針が異なる。以下、それぞれの上部覆土を検討する際の要点をまとめる。

＜安定型トレンチ埋設処分施設（親杭横矢板方式）＞

- ・ 上部覆土は、原設計より最大沈下量の 2 倍程度を一様に厚くする。
- ・ 上部覆土に 2%程度の排水勾配をつける。

＜付加機能型トレンチ埋設処分施設（オープンカット方式）＞

- ・ 最大沈下量の発生点において、最大沈下量の 2 倍程度の土被り厚さが確保できるような排水勾配を与える。

安定型トレンチ埋設処分施設と付加機能型トレンチ埋設処分施設のそれぞれについて、検討した上部覆土とした例を図 30～図 35 に示す。安定型トレンチ埋設処分施設の場合は、埋設する廃棄体の上部空げき率の増加に応じて、覆土が厚くなる。また、その厚さに応じて法肩がトレンチ内側に移動する。付加機能型トレンチ埋設処分施設（オープンカット方式）の場合は、埋設する廃棄体の上部空げき率の増加に応じて、上部覆土表面の排水勾配が大きくなる。

5.2 廃棄体 1 体あたりの上部空げき率

4 章で示したとおり、廃棄体 1 体あたりの上部空げき率が 30%となると、覆土の厚さ、排水勾配が大きくなり、トレンチ埋設処分施設が大型化する。この場合、埋設施設を設置するために必要な面積の増加、埋設施設の建設費が増加する方向となる。

この観点からは、廃棄体 1 体あたりの空げき率をできるだけ小さくすることが望ましいが、鋼製容器内に金属類をより密に収納するなど廃棄体作製者側の作業負担が増加する。また、金属類をドラム缶に収納し固型化材で固型化して、残存する空げき率を評価した既往事例では内部空げき率（固型化部の体積に対する、その内部の空げき量の割合）を 10%以下とすることは難しい⁵⁾。

これらを勘案して、埋設対象とする 200L ドラム缶、1m³ 鋼製角型容器を使用した廃棄体の上部空げき率の基準は、予備的に 20%と設定した。

6. おわりに

本検討では、DEM 解析を用いて廃棄体の上部空げき率に応じて、トレンチ埋設処分施設の上
部覆土の沈下量を評価し、沈下後にも上部覆土表面の排水勾配を確保するための上部覆土の仕様
を検討した。この際、陥没が発生した時の上部覆土表面が、雨水等が溜まりやすい形状とならな
いことをもって、当該廃棄物埋設施設には、技術上の基準で求められる有害な空げきはないとの
考え方を示した。

これに基づいて、覆土仕様を検討するための方法を示し、また、廃棄体 1 体あたりの上部空げ
き率を 20%以下と予備的に設定した。

なお、ここで設定した廃棄体の上部空げき率、覆土の仕様は、覆土材料について一般的なパラ
メータで評価した値であるため、具体のトレンチ埋設処分施設の設計時には、使用する覆土材料
を決めて、あらためてパラメータの設定及び陥没解析を行い見直す必要がある。

参考文献

- 1) 前田健一：個別要素法の基礎と地盤工学への応用，地盤に関する解析技術(個別要素法)講習会，
2010, p44.
- 2) 中瀬仁，安中正，片平冬樹，興野俊也：平面ひずみ圧縮試験に対する個別要素法の適用，土木
学会論文集 No.454/Ⅲ-20, pp.55-64, 1992.
- 3) 松岡元，山本修一：個別要素法による粒状体のせん断機構の微視的考察，土木学会論文集
No.487/Ⅲ-26, pp.167-175, 1994.
- 4) 社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説一二分冊の 1-1, 101p, 2009.
- 5) 仲田久和 他：研究施設等廃棄物浅地中処分施設における廃棄体の受入基準の設定 一有害な
空げきが残らないこと及び一体となるような充填一，JAEA-Technology 2016-001, 2016,
p112.

表 1 粒状体個別要素法で考慮する物理特性とパラメータ

粒状体の物理特性	機械要素*	パラメータ	特徴
弾性特性	バネ	ばね定数	接点の変位量に応答する弾性力を発揮する。
減衰特性	ダッシュポット	粘性係数 減衰定数	接点の速度等に比例した粘性力を発揮する。
摩擦特性 (接線方向のみ)	スライダー	摩擦係数	静止摩擦力に達すると流動変位し、これを超える力を伝達しない。
引張特性	ノン・エクステンション・デバイダー	結合力	引張力を伝達せず、非圧縮力になると力学的にも接触関係が解除される。

※ 個々の粒子が接した点において粒子に作用する力を、ばね等の機械要素で模擬し、個々の粒子の運動（位置、速度）を計算する。

表 2 粒状個別要素法の解析に必要なパラメータ

パラメータ
密度
粒径
粒度分布
粒子間ばね定数
粒子間粘性係数
粒子間摩擦係数
粒子間結合力

表 3 砂・土の挙動に係るパラメータスタディの結果から考察したパラメータの性質

パラメータ	砂の挙動	土の挙動
粒子間ばね定数	大きくなるほど、砂をモールドから解放した後、山の勾配が大きくなる。	大きくなるほど、土を 30cm の高さから落下させた後の山の勾配が大きくなる。
粒子間摩擦係数	大きくなるほど、砂を解放した後の山の勾配が大きくなる。	大きくなるほど、土を落下させた後の山の勾配が大きくなる。
粒子間粘性係数	大きくなるほど、砂を解放した後の山の勾配が大きくなる。	土を落下させた後の山の形状は、粘性係数に応じた一定の傾向はないが、大きな差はない。
粒子間結合力	大きくなるほど、解放後に自立するようになる。	大きくなるほど、落下させても形状を維持するようになる。

表 4 砂・土の室内試験及び解析結果を踏まえて設定したパラメータ値

パラメータ	設定値	
	砂	土
粒子間ばね定数 (N/m)	1.0×10 ⁸	1.0×10 ⁸
粒子間粘性係数 (-)	0.0	0.0
粒子間摩擦係数 (-)	0.0	0.0
粒子間結合力 (N)	0.0	350.0
減衰定数 (-)	0.15	0.15

表 5 砂・土の室内試験結果と粒状個別要素法を用いた再現解析結果の比較



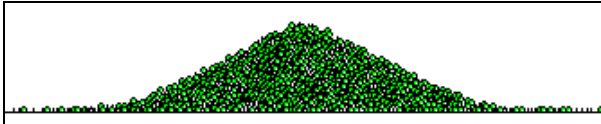
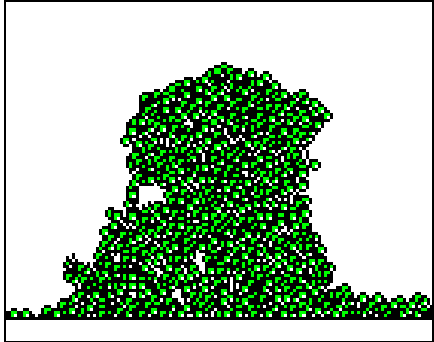
	砂	土
実験結果		
解析結果		

表 6 陥没解析の解析ケース

No.	解析ケース	埋設処分施設 形式	埋戻し材	廃棄体の上部 空げき率(%)
1	Case-A-1-10	<ul style="list-style-type: none"> ・安定型 ・親杭横矢板 	砂	10
2	Case-A-1-20			20
3	Case-A-1-30			30
4	Case-A-2-10		土	10
5	Case-A-2-20			20
6	Case-A-2-30			30
7	Case-B-1-10	<ul style="list-style-type: none"> ・付加機能型 ・オープンカット 	砂	10
8	Case-B-1-20			20
9	Case-B-1-30			30
10	Case-B-2-10		土	10
11	Case-B-2-20			20
12	Case-B-2-30			30

表 7 陥没解析の解析結果

解析ケース	埋設処分施設形式	埋戻し材	廃棄体の上部 空げき率(%)	沈下量 (m)	高低差 (m)
Case-A-1-10	<ul style="list-style-type: none"> ・安定型 ・親杭横矢板 	砂	10	0.57	0.28
Case-A-1-20			20	0.98	0.70
Case-A-1-30			30	1.38	1.02
Case-A-2-10		土	10	0.59	0.34
Case-A-2-20			20	1.01	0.75
Case-A-2-30			30	1.40	0.99
Case-B-1-10	<ul style="list-style-type: none"> ・付加機能型 ・オープンカット 	砂	10	0.46	0.22
Case-B-1-20			20	0.74	0.32
Case-B-1-30			30	1.01	0.58
Case-B-2-10		土	10	0.48	0.16
Case-B-2-20			20	0.76	0.29
Case-B-2-30			30	1.02	0.60

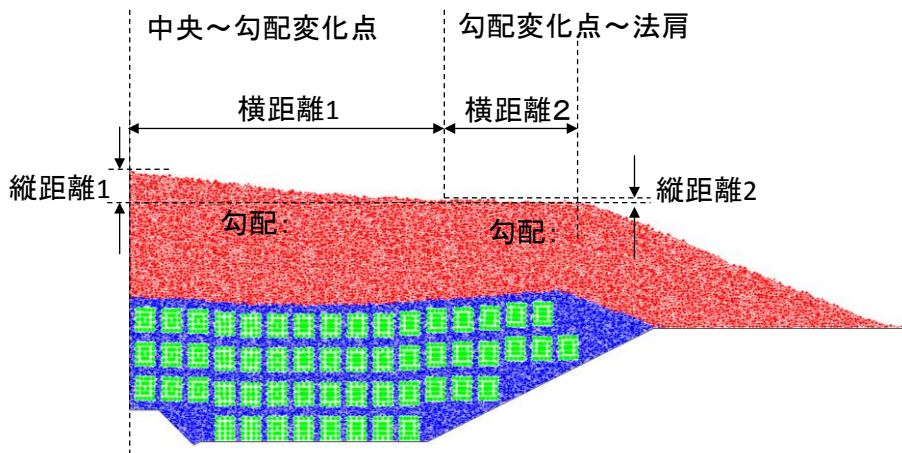
※1 Case A の廃棄体 (1m³の鋼製角型容器) の高さ・・・1.13m

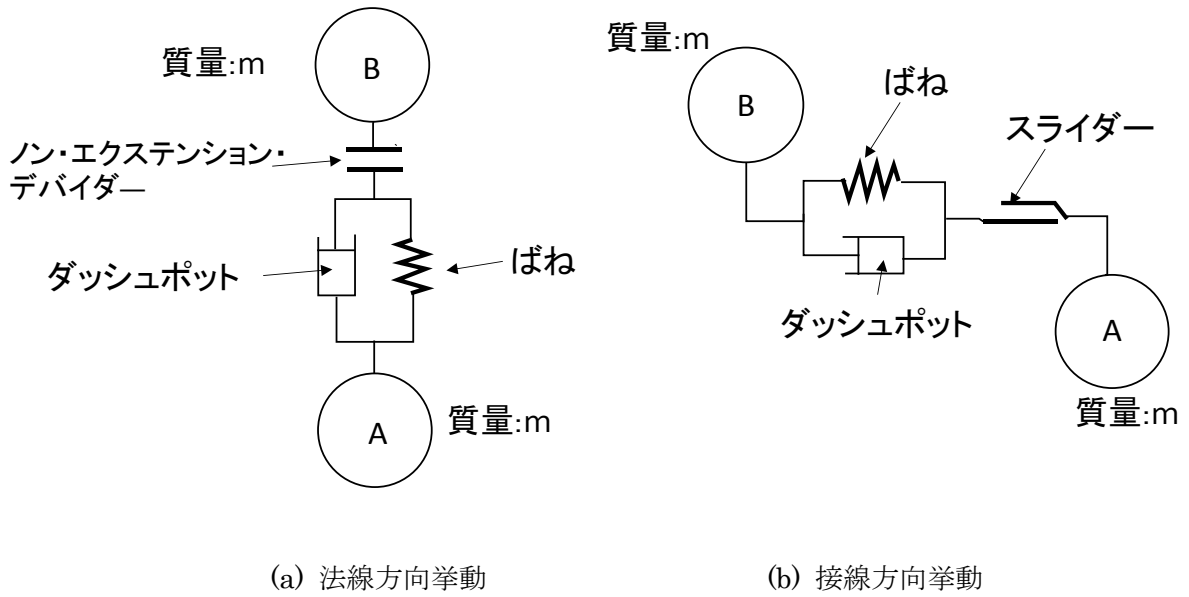
※2 Case B の廃棄体 (200L 鋼製オープンヘッドドラム) の高さ・・・0.90m

表 8 排水勾配を考慮したトレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果

解析ケース	区間	埋設処分施設形式	埋戻し材	廃棄体の上部 空げき率 (%)	縦距離 (m)	横距離 (m)	勾配 (%)
Case-A-1-20 (沈下前)	全区間	・安定型 ・親杭横矢板	砂	20	0.25	10.3	2.4
Case-A-1-20 (沈下後)	全区間				0.48	11.4	4.3
Case-B-1-20 (沈下前)	全区間	・付加機能型 ・オープンカット	砂	20	0.62	12.9	4.8
Case-B-1-20 (沈下後)	中央～ 勾配変化点				0.44	6.92	6.4
	勾配変化点～ 法肩				-0.06	5.41	-1.2
改良版 Case-B-1-20 (沈下前)	全区間	・付加機能型 ・オープンカット	砂	20	1.20	12.9	9.3
改良版 Case-B-1-20 (沈下後)	中央～ 勾配変化点				0.88	8.99	9.7
	勾配変化点～ 法肩				0.05	3.79	1.4

凡例図





※ A、Bは個々の粒子要素を示す。個々の要素の法線と接線方向について、上記の機械要素を考慮した運動方程式を解いている。

図1 粒状個別要素法における各粒子要素間に作用する機械要素

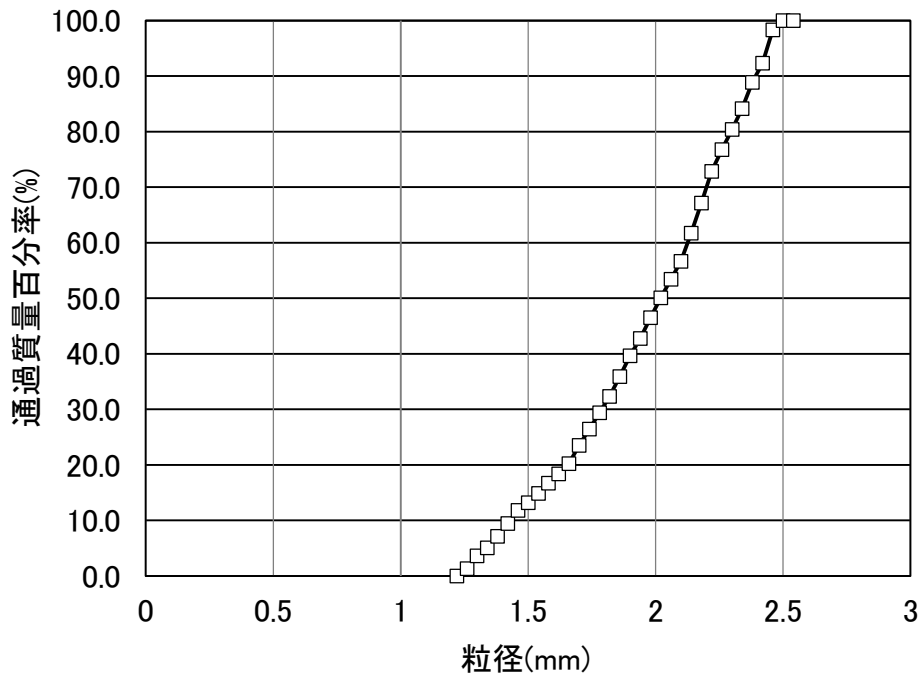


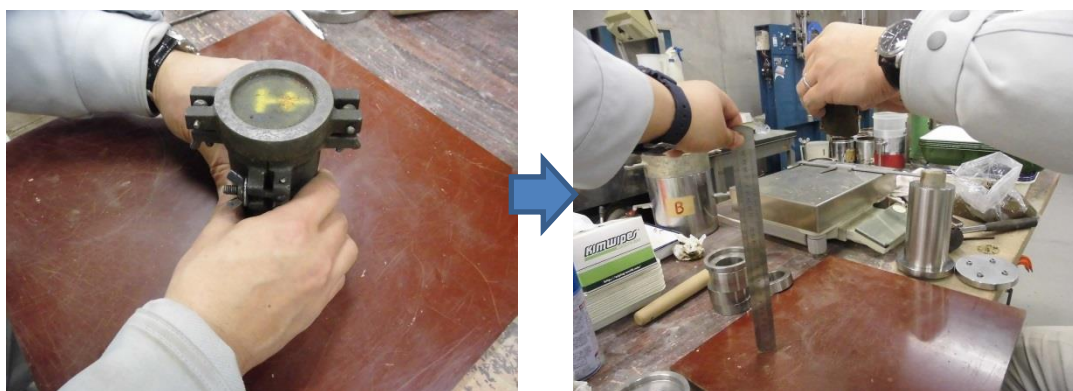
図2 粒状個別要素法を用いたパラメータ設定のための解析で設定した粒径加積曲線



(a) 材料解放前

(b) 材料解放後

図3 パラメータ設定のための室内試験（砂）



(a) 材料製造時

(b) 材料落下前



(c) 材料落下後

図4 パラメータ設定のための室内試験（土）

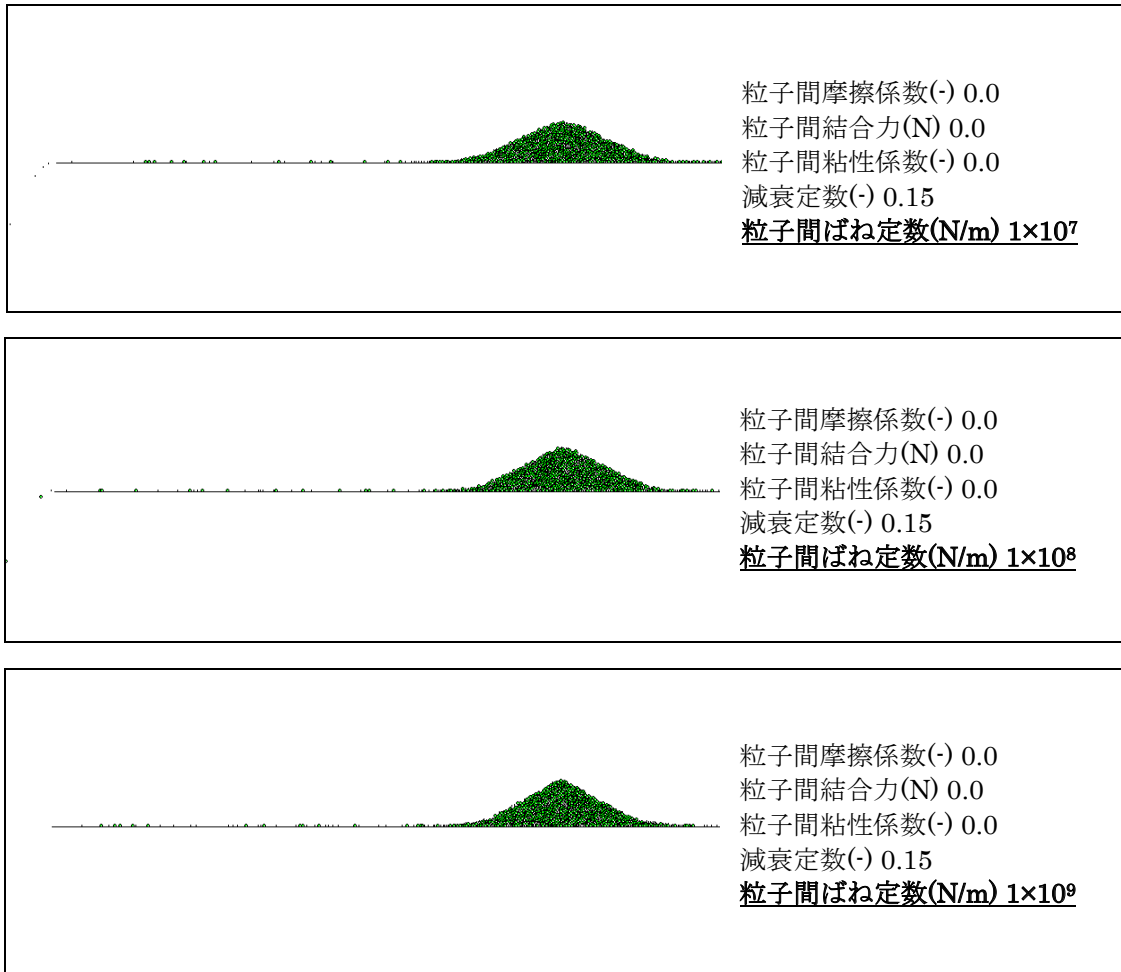


図 5 砂を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間ばね定数の影響

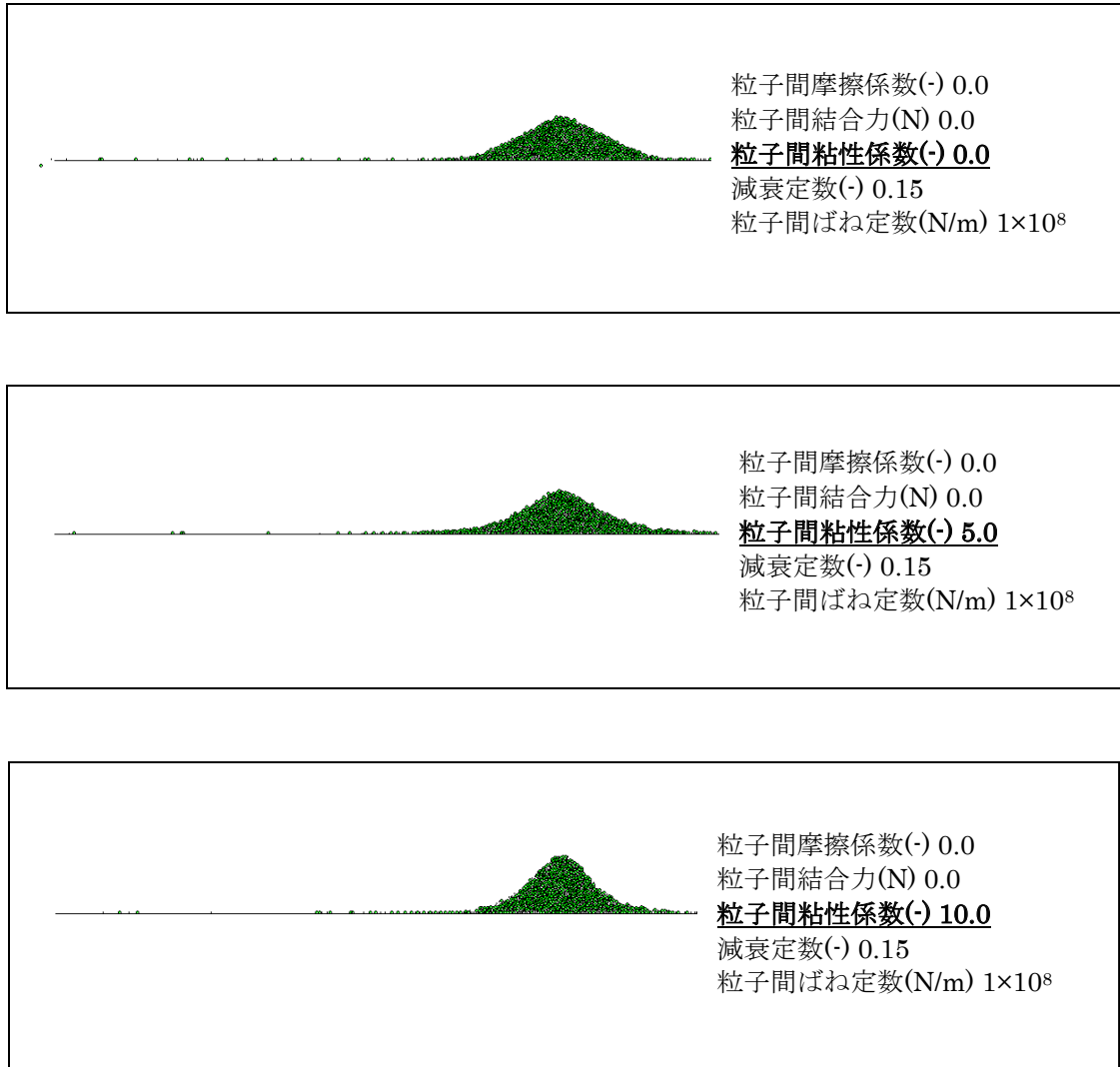


図 6 砂を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間粘性係数の影響

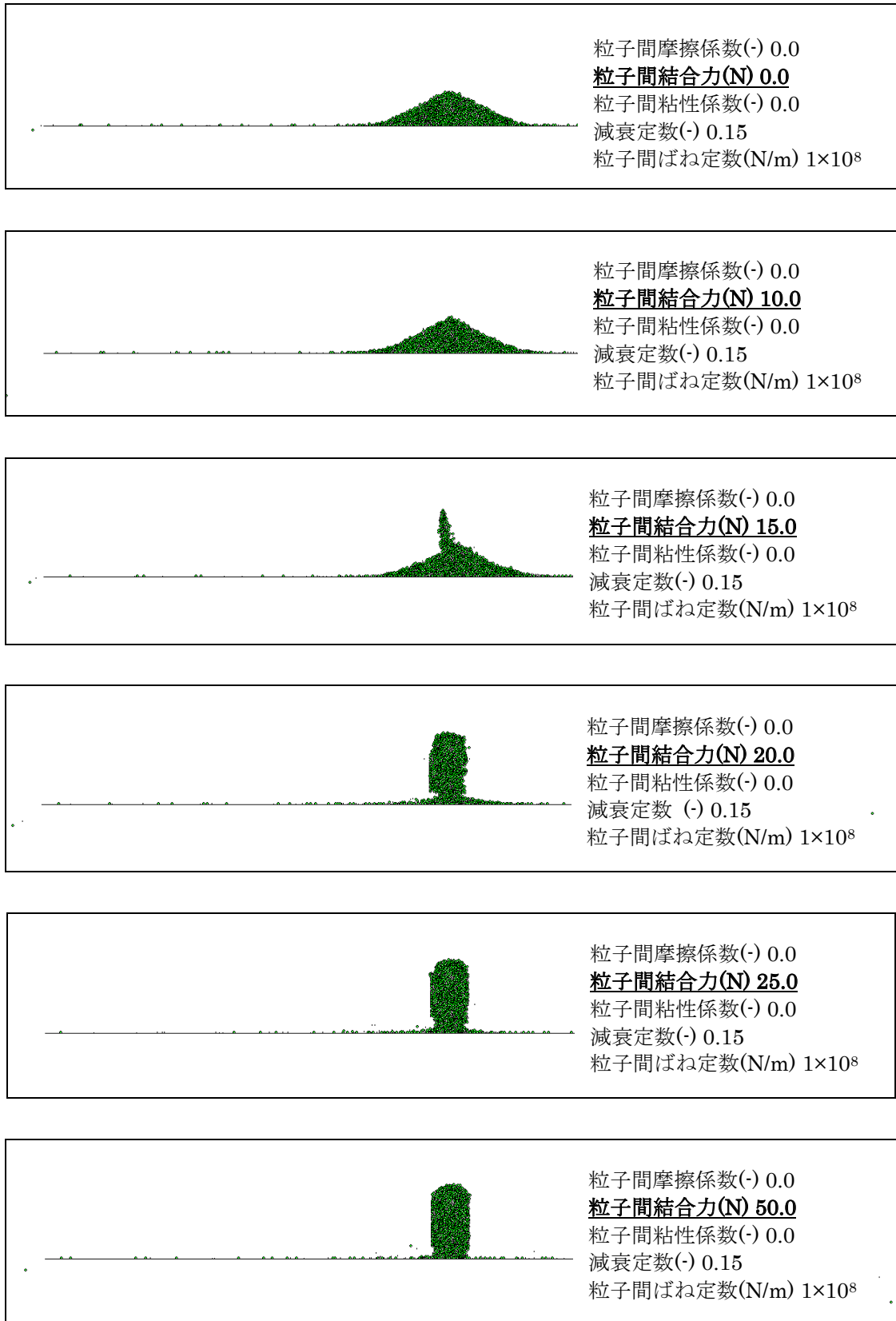


図 7 砂を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間結合力の影響

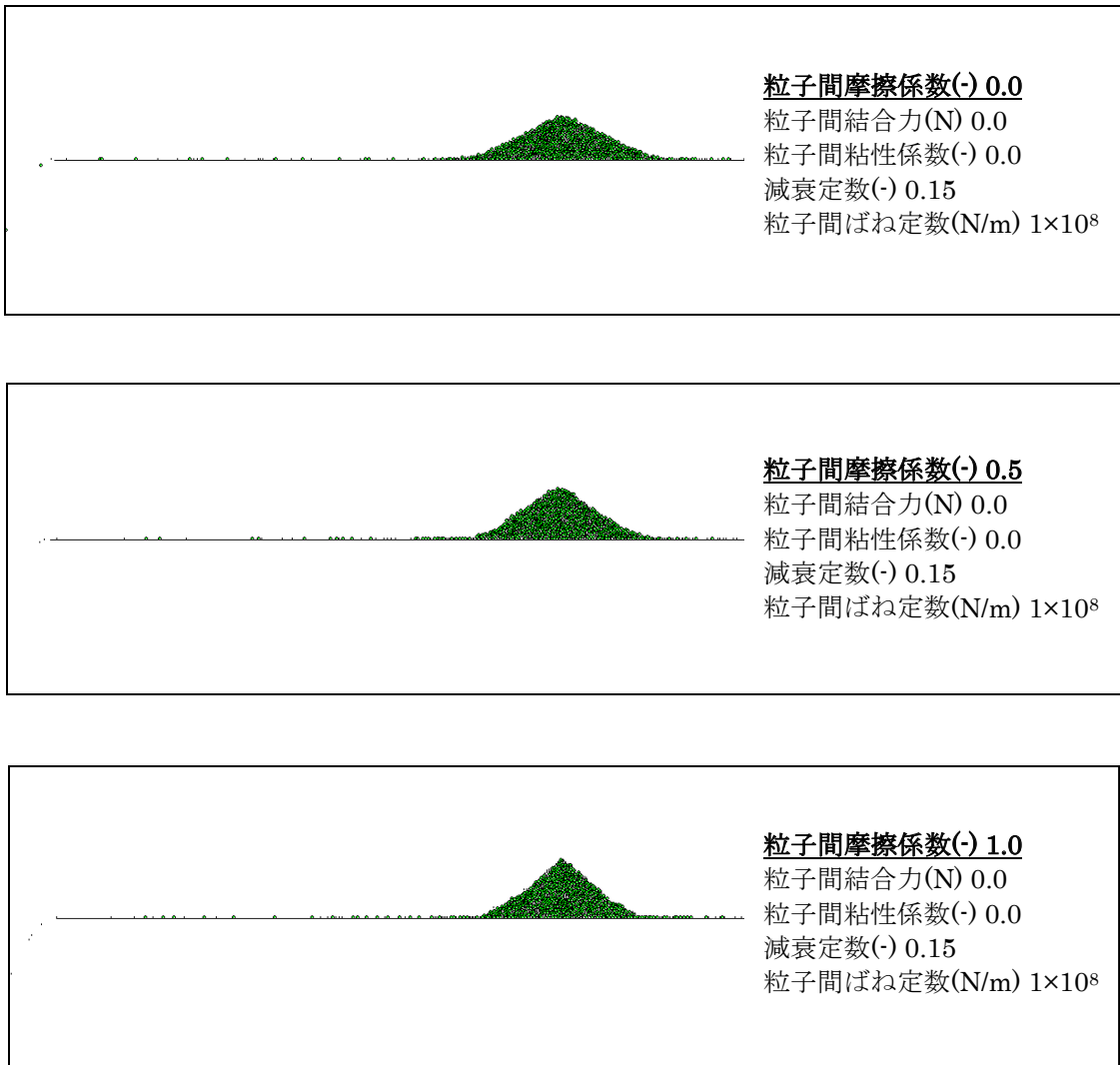


図 8 砂を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間摩擦係数の影響

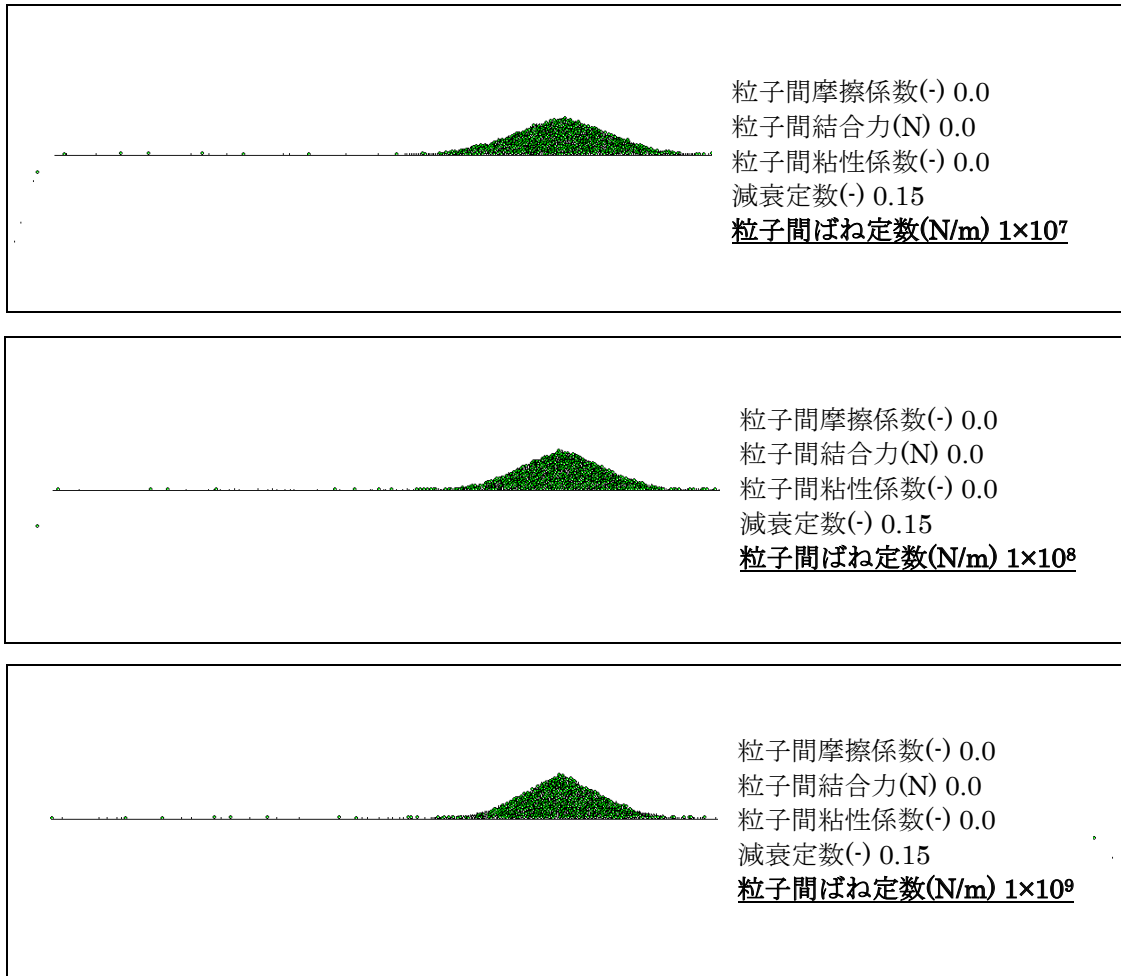


図9 土を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間ばね定数の影響

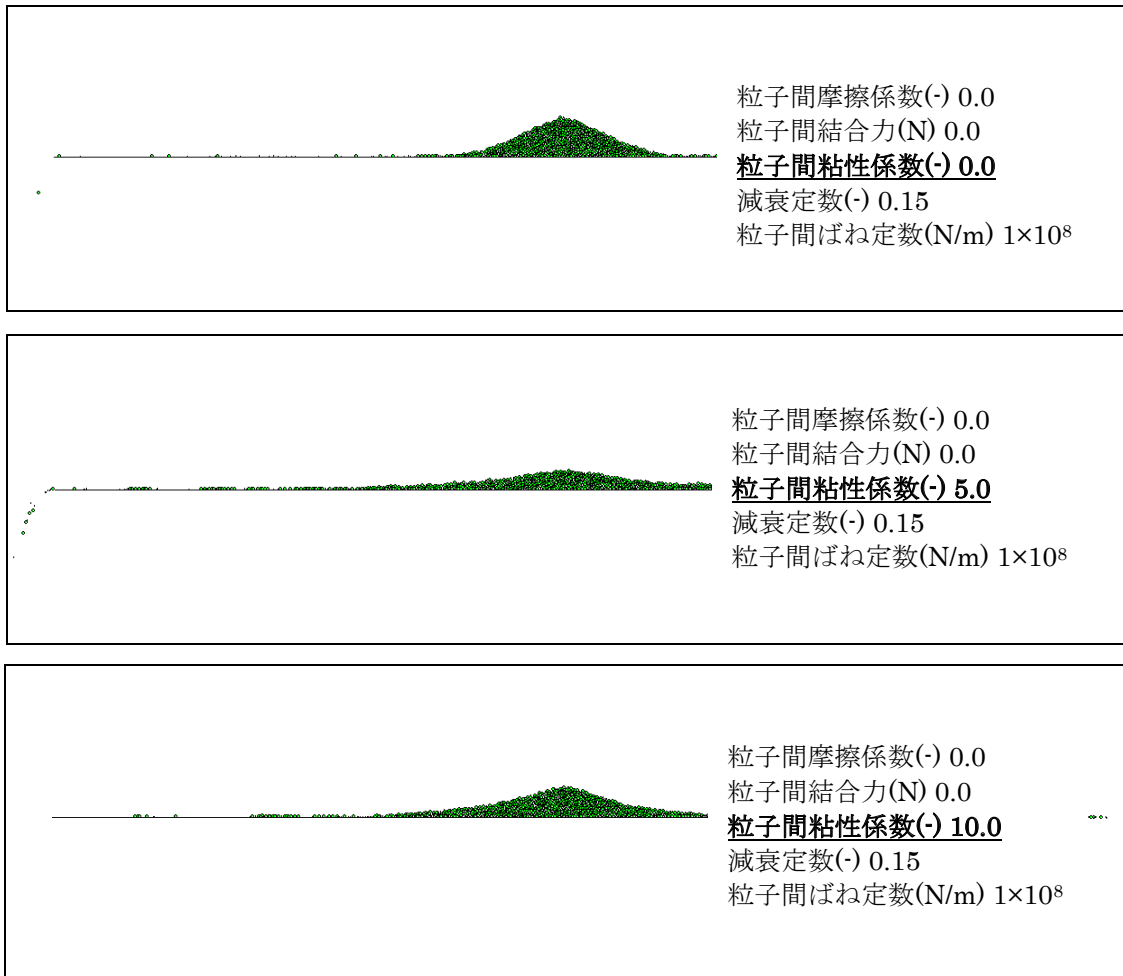


図 10 土を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間粘性係数の影響

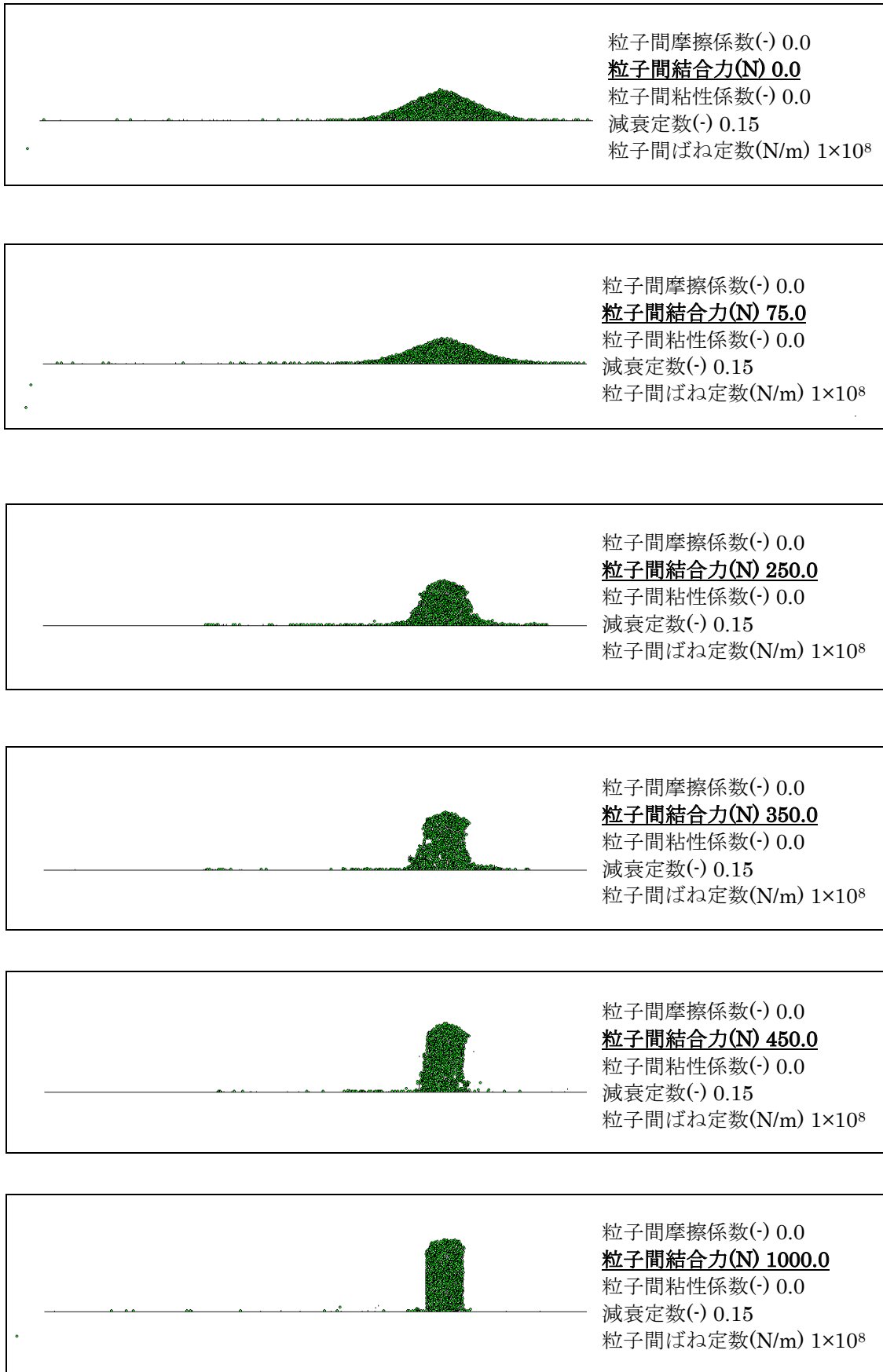


図 11 土を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間結合力の影響

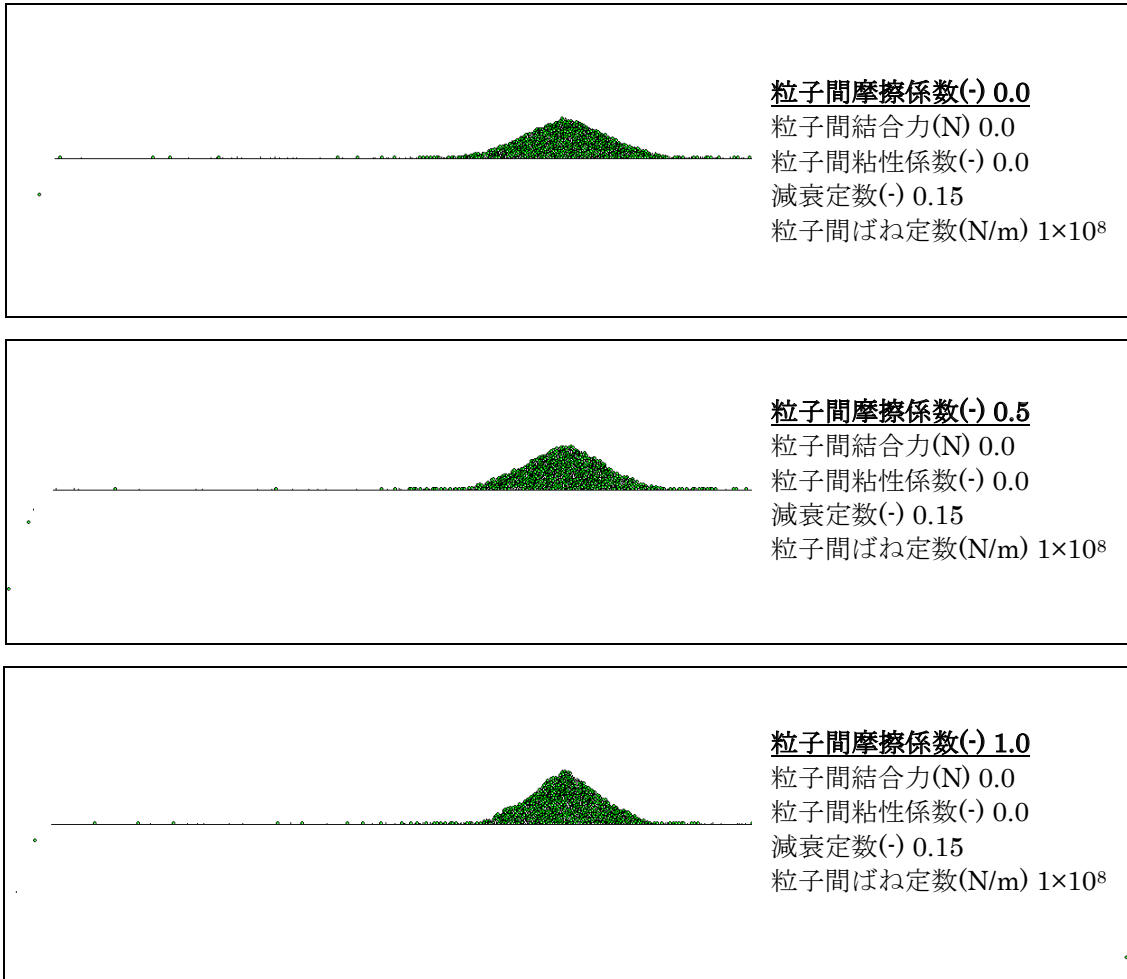


図 12 土を対象とした室内試験結果の再現解析における粒子間摩擦係数の影響

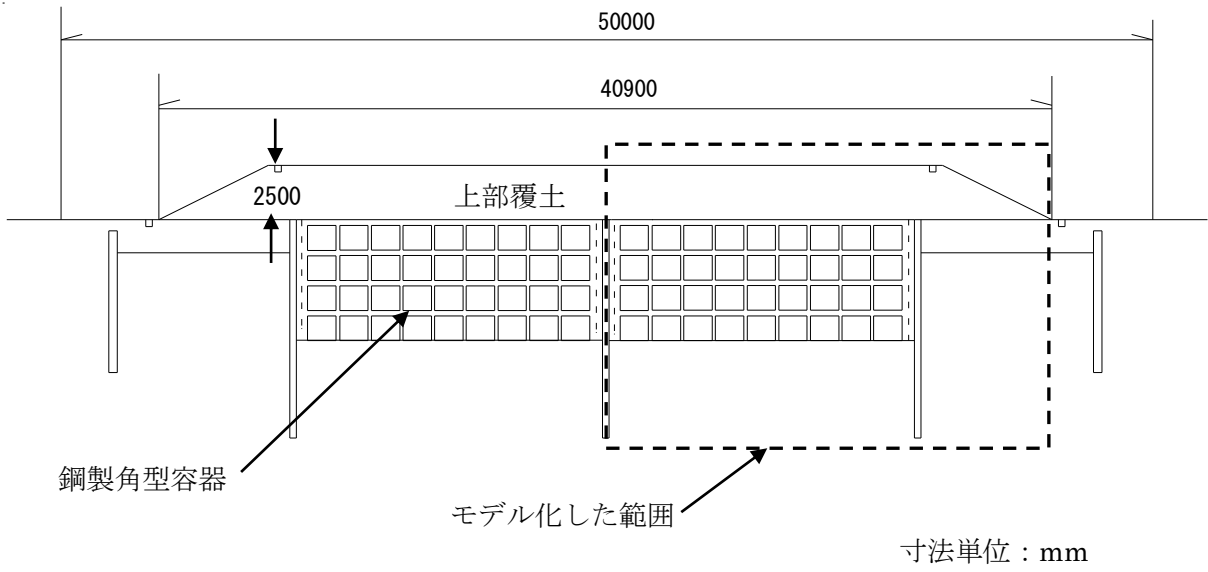


図 13 安定型トレンチ埋設処分施設の横断面図

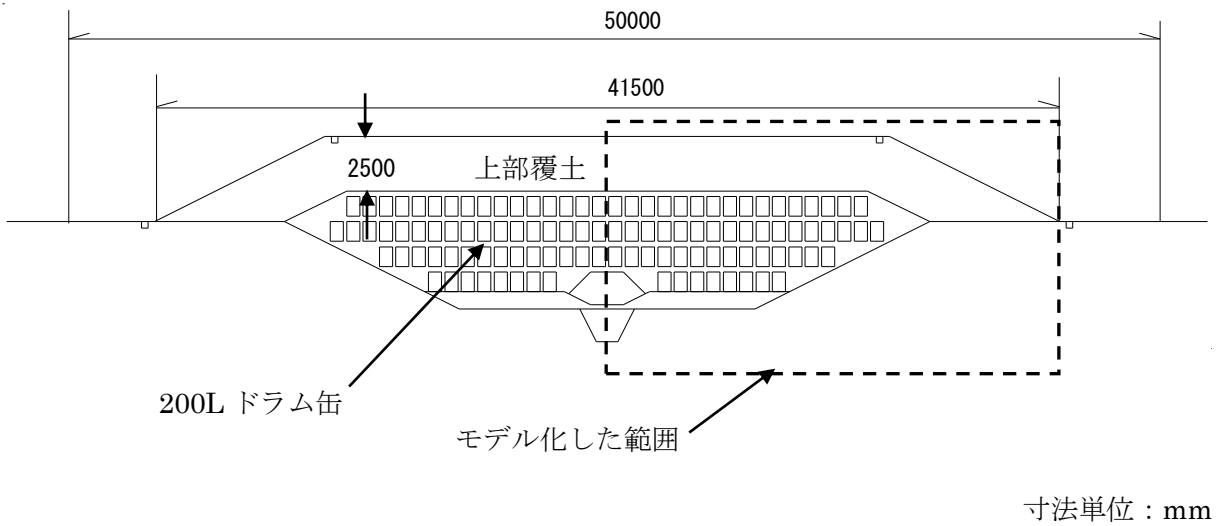
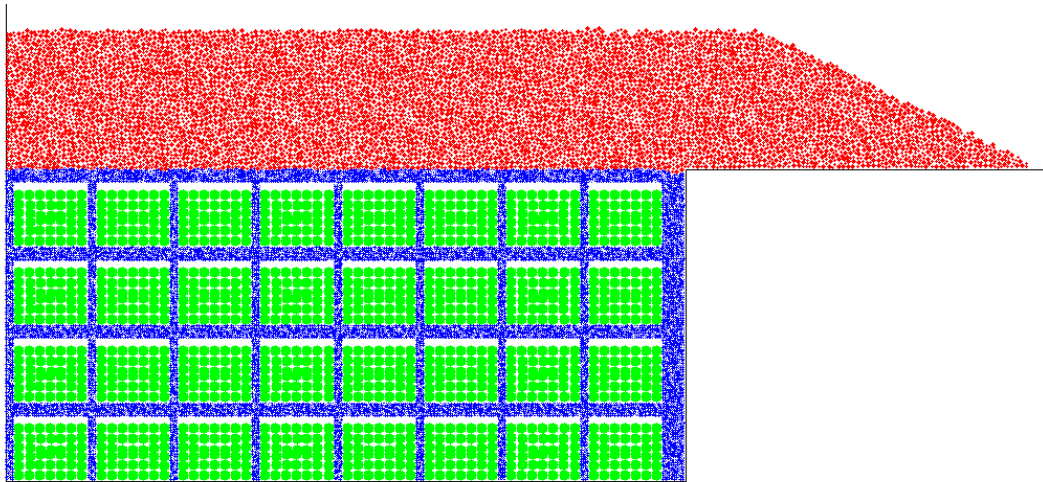
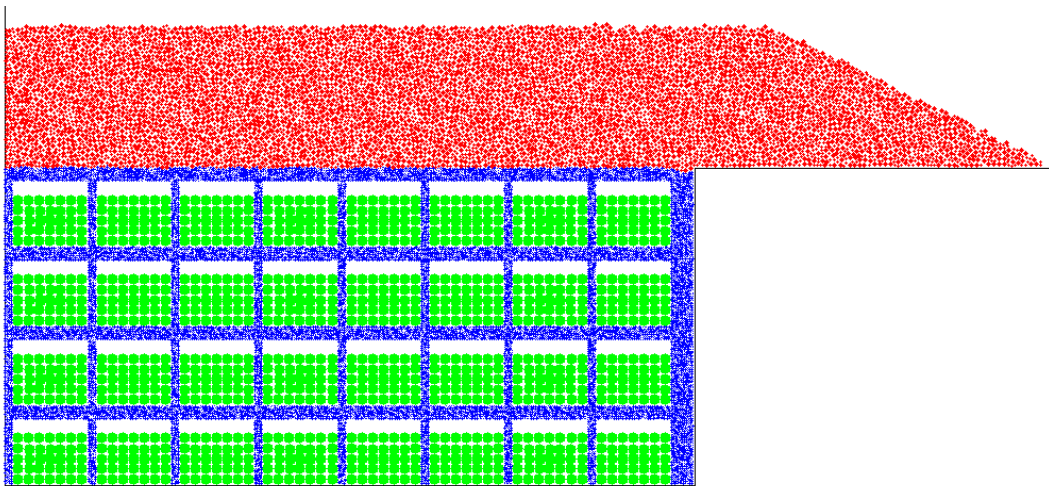


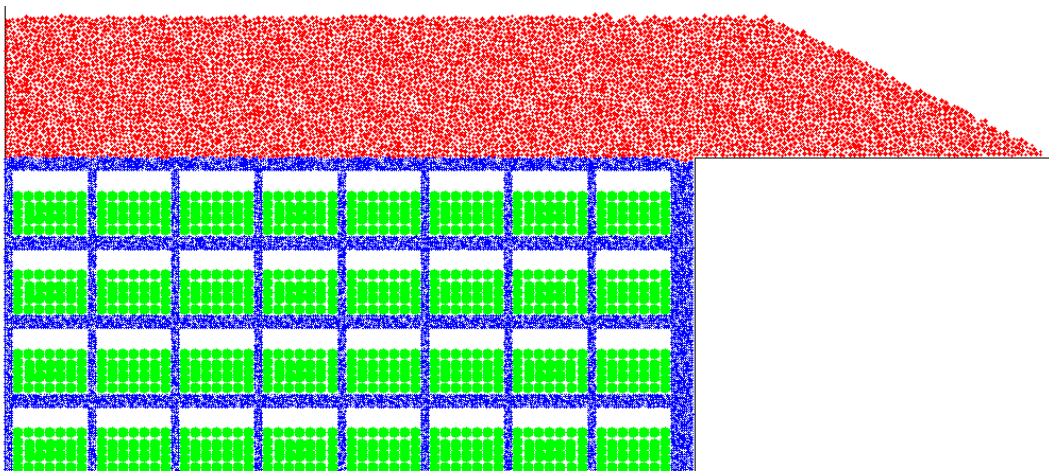
図 14 付加機能型トレンチ埋設処分施設の横断面図



(a) 鋼製角型容器内の上部空げき率 10% (白色部)



(b) 鋼製角型容器内の上部空げき率 20% (白色部)



(c) 鋼製角型容器内の上部空げき率 30% (白色部)

上図において、上部覆土 (赤色部、材質: 土)、埋戻し材 (青色部、材質: 砂又は土)、廃棄体 (緑色部)。

図 15 解析モデル (安定型トレンチ埋設処分施設; 親杭横矢板方式)

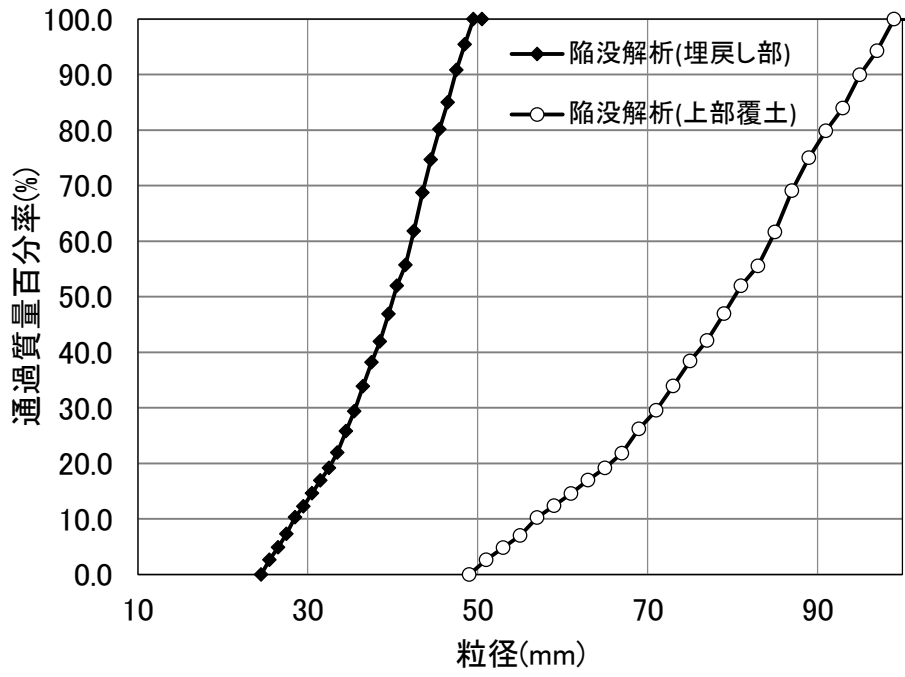
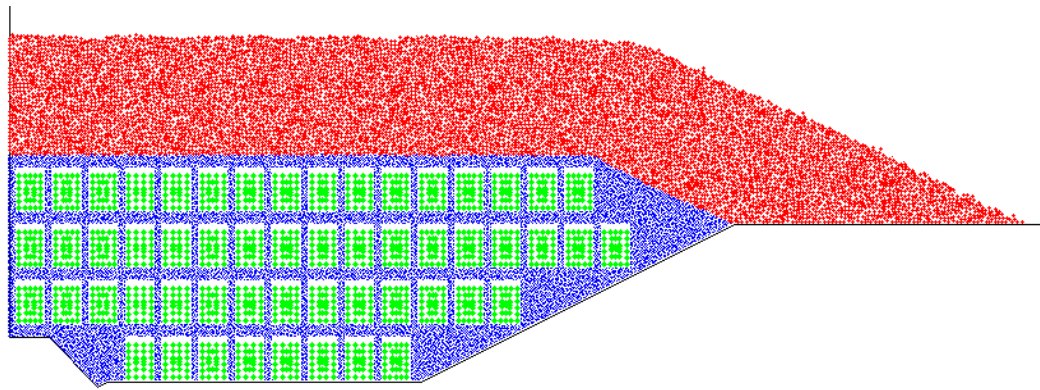
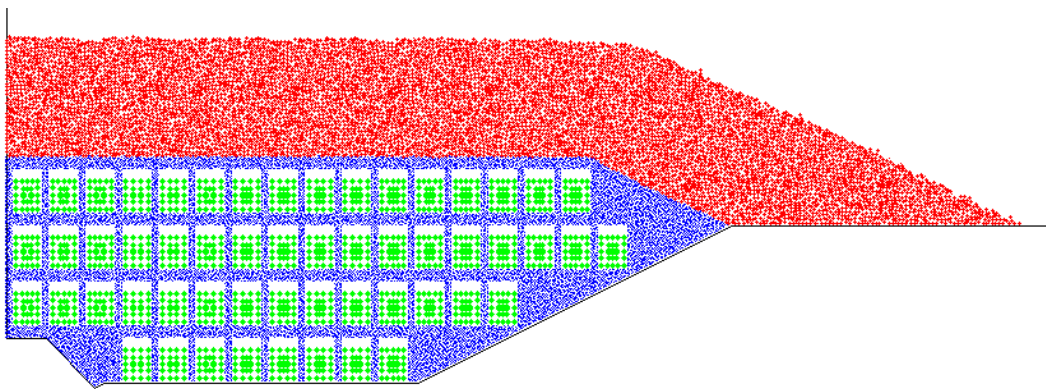


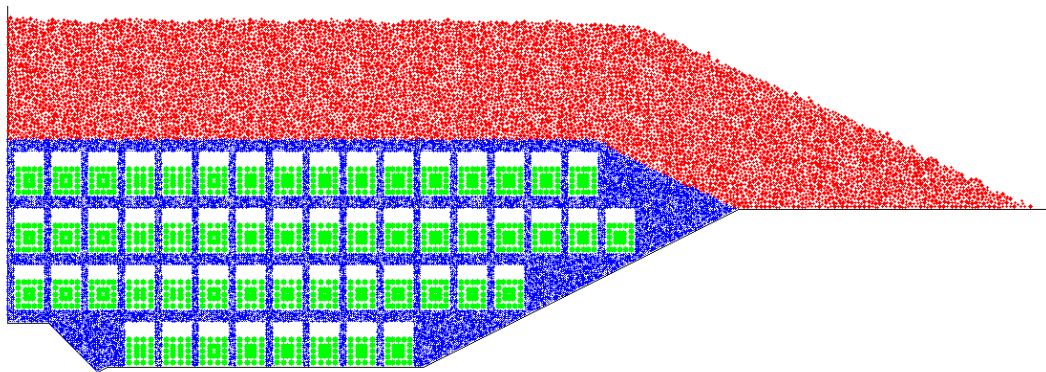
図 16 陥没解析で設定した粒径加積曲線



(a) 200L ドラム缶内の上部空げき率 10% (白色部)



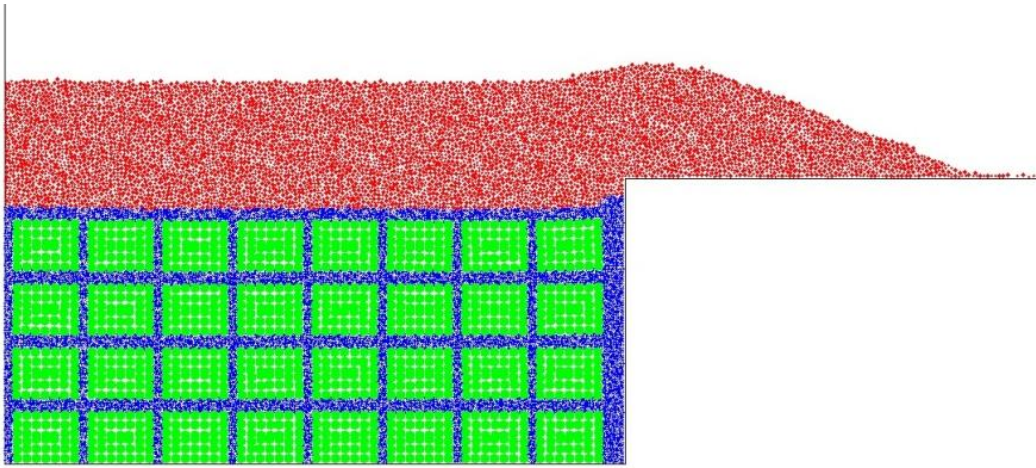
(b) 200L ドラム缶内の上部空げき率 20% (白色部)



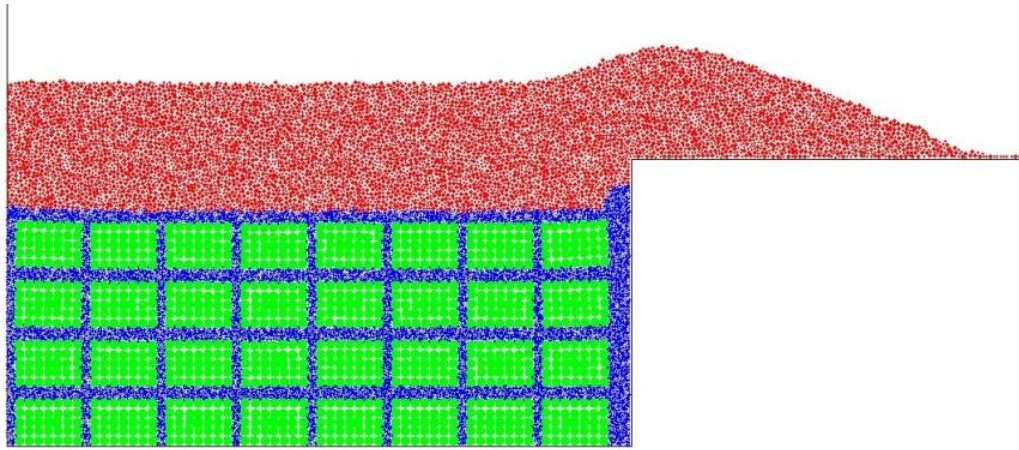
(c) 200L ドラム缶内の上部空げき率 30% (白色部)

上図において、上部覆土 (赤色部、材質：土)、埋戻し材 (青色部、材質：砂又は土)、廃棄体 (緑色部)。

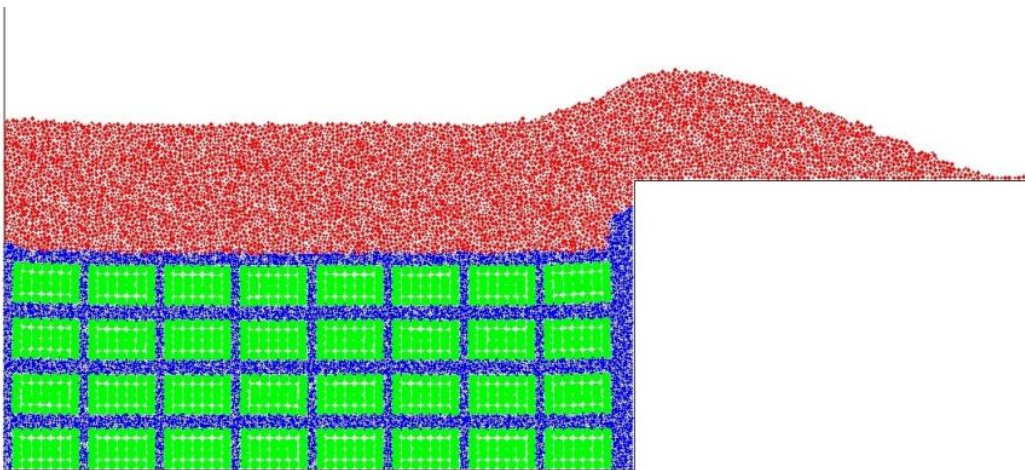
図 17 解析モデル (付加機能型トレンチ埋設処分施設；オープンカット方式)



(a) CaseA-1-10 (埋戻し材；砂、鋼製角型容器内の上部空げき率；10%)

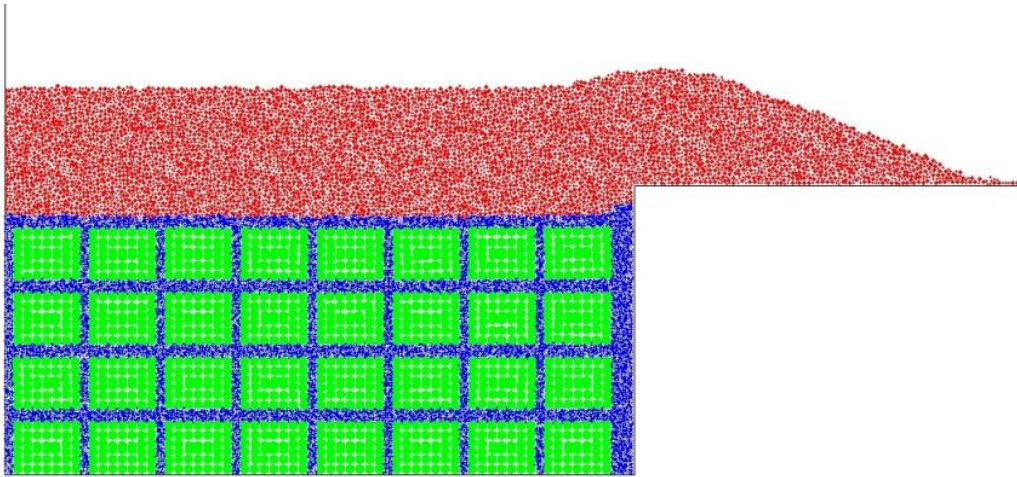


(b) CaseA-1-20 (埋戻し材；砂、鋼製角型容器内の上部空げき率；20%)

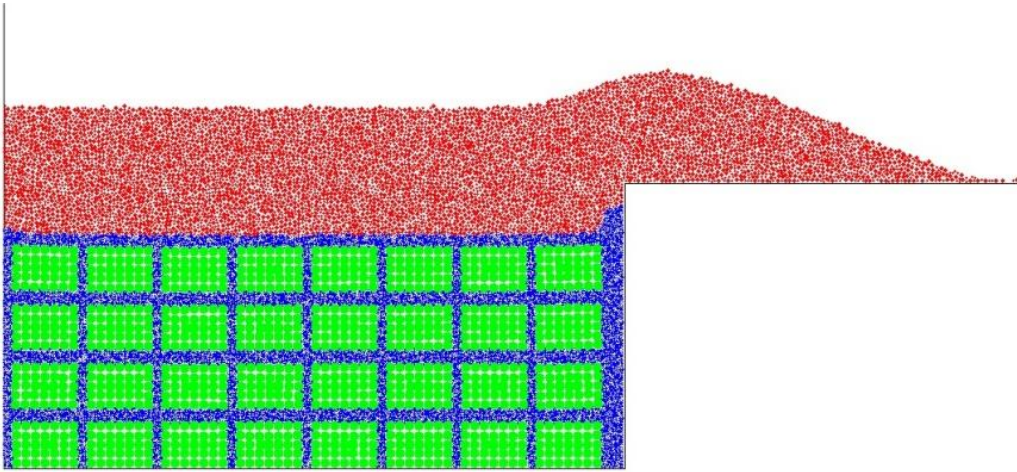


(c) CaseA-1-30 (埋戻し材；砂、鋼製角型容器内の上部空げき率；30%)

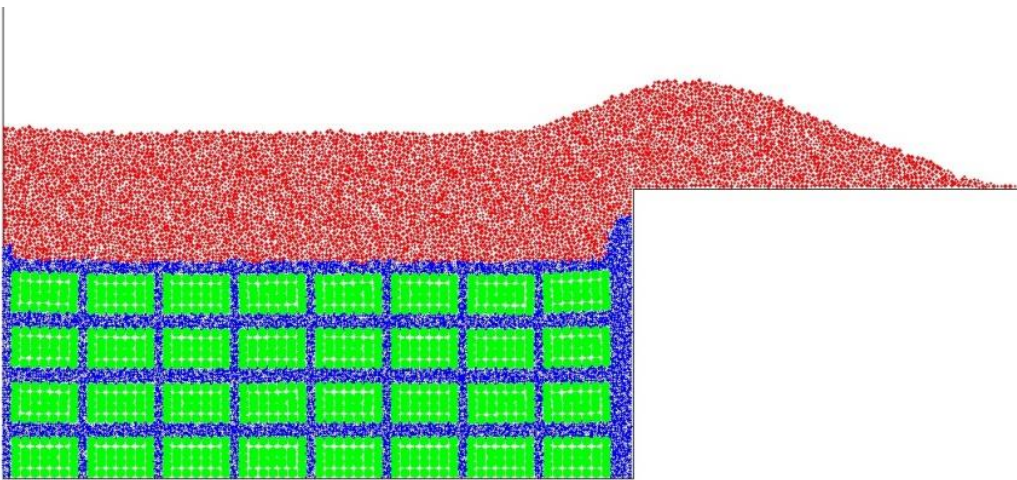
図 18 陥没解析の結果 (安定型トレンチ埋設処分施設；埋戻し材 砂；親杭横矢板方式)



(a) CaseA-2-10 (埋戻し材 ; 土、鋼製角型容器内の上部空げき率 ; 10%)

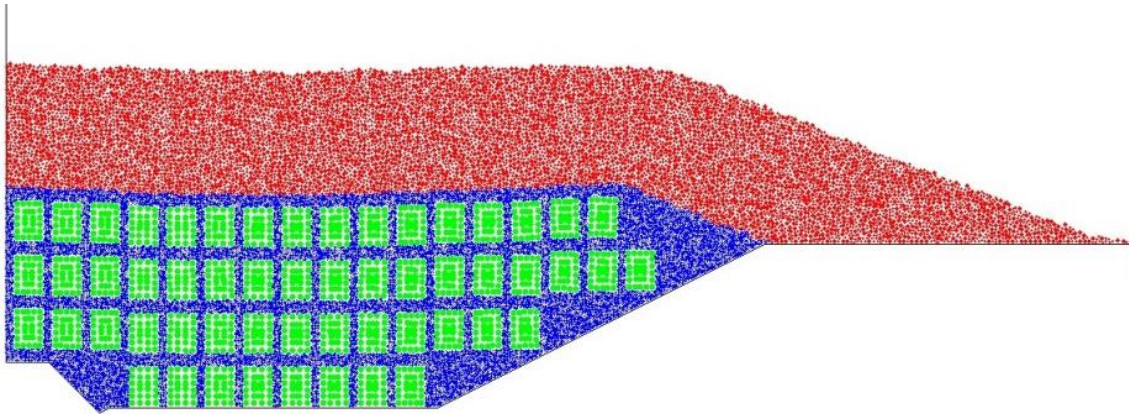


(b) CaseA-2-20 (埋戻し材 ; 土、鋼製角型容器内の上部空げき率 ; 20%)

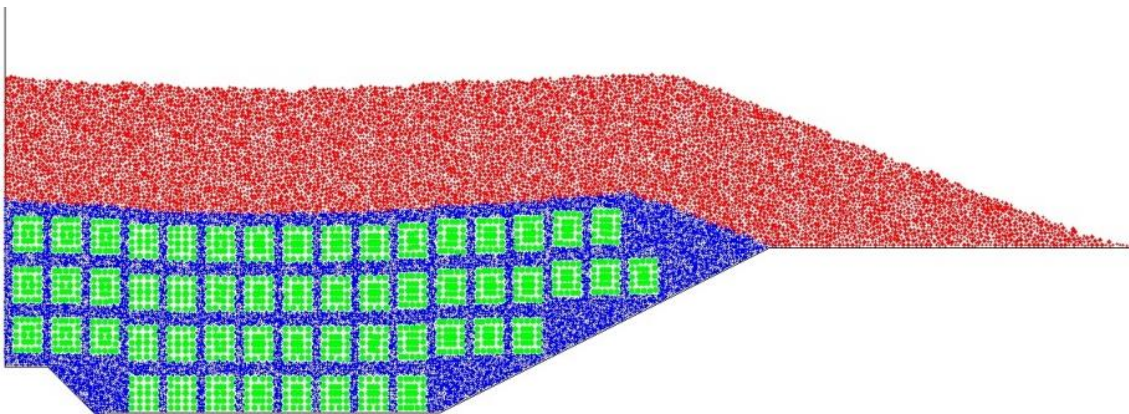


(c) CaseA-2-30 (埋戻し材 ; 土、鋼製角型容器内の上部空げき率 ; 30%)

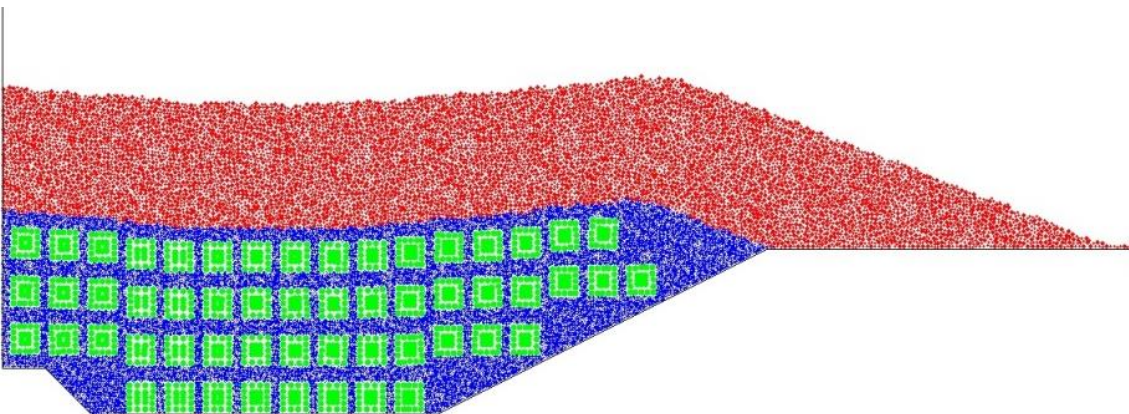
図 19 陥没解析の結果 (安定型トレンチ埋設処分施設 ; 埋戻し材 土 ; 親杭横矢板方式)



(a) CaseB-1-10 (埋戻し材；砂、200L ドラム缶内の上部空げき率；10%)

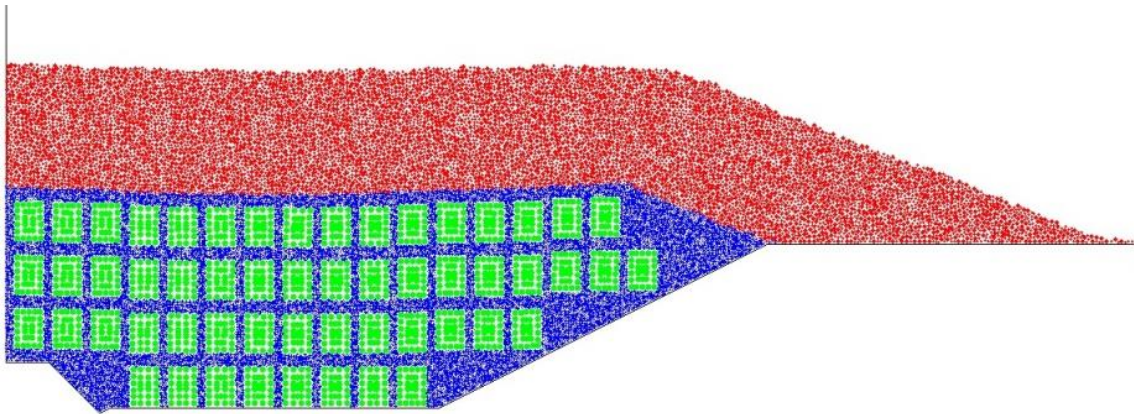


(b) CaseB-1-20 (埋戻し材；砂、200L ドラム缶内の上部空げき率；20%)

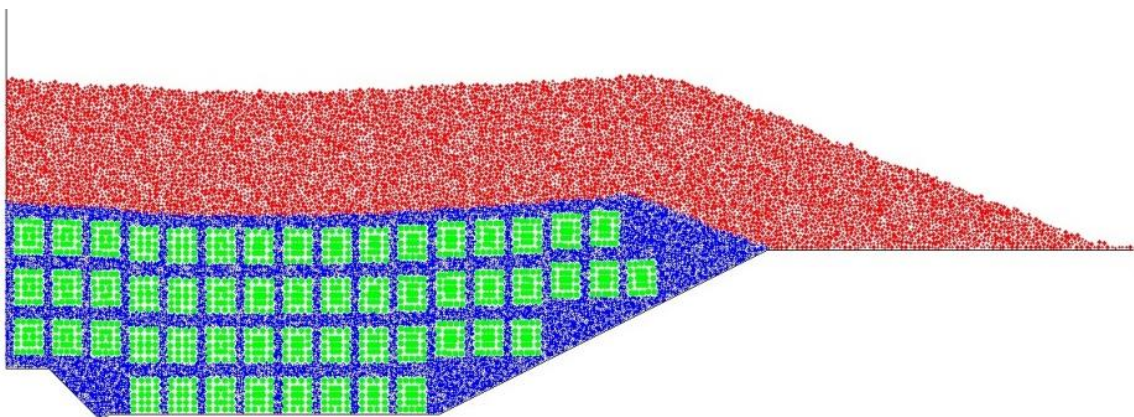


(c) CaseB-1-30 (埋戻し材；砂、200L ドラム缶内の上部空げき率；30%)

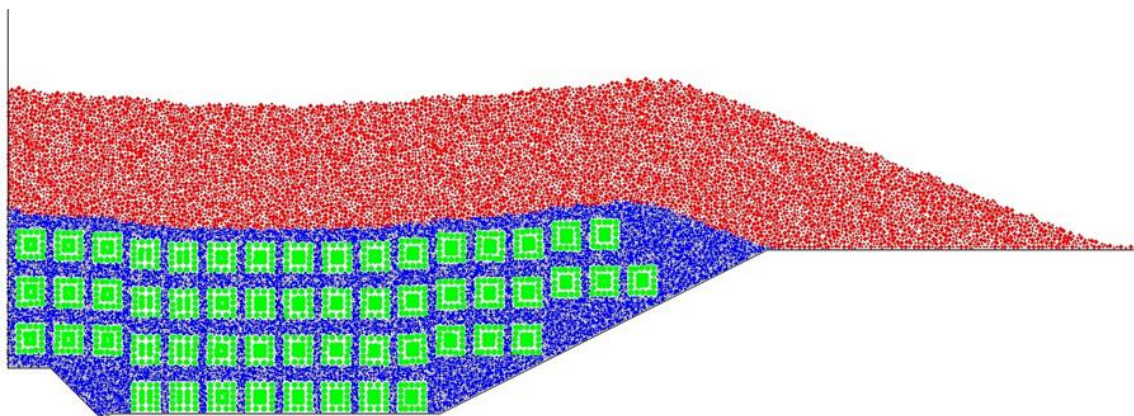
図 20 陥没解析の結果 (付加機能型トレンチ埋設処分施設；埋戻し材 砂；オープンカット方式)



(a) CaseB-2-10 (埋戻し材 ; 土、200L ドラム缶の上部空げき率 ; 10%)



(b) CaseB-2-20 (埋戻し材 ; 土、200L ドラム缶内の上部空げき率 ; 20%)



(c) CaseB-2-30 (埋戻し材 ; 土、200L ドラム缶内の上部空げき率 ; 30%)

図 21 陥没解析の結果 (付加機能型トレンチ埋設処分施設 ; 埋戻し材 土 ; オープンカット方式)

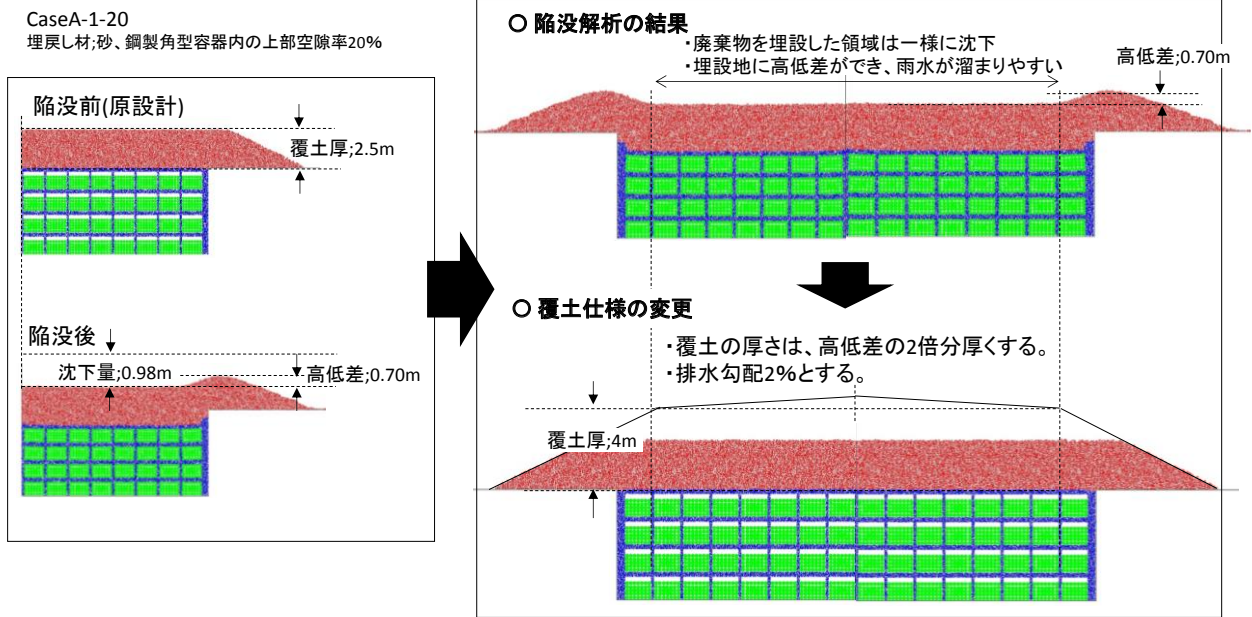


図 22 排水勾配を考慮した安定型トレンチ埋設処分施設の概念図

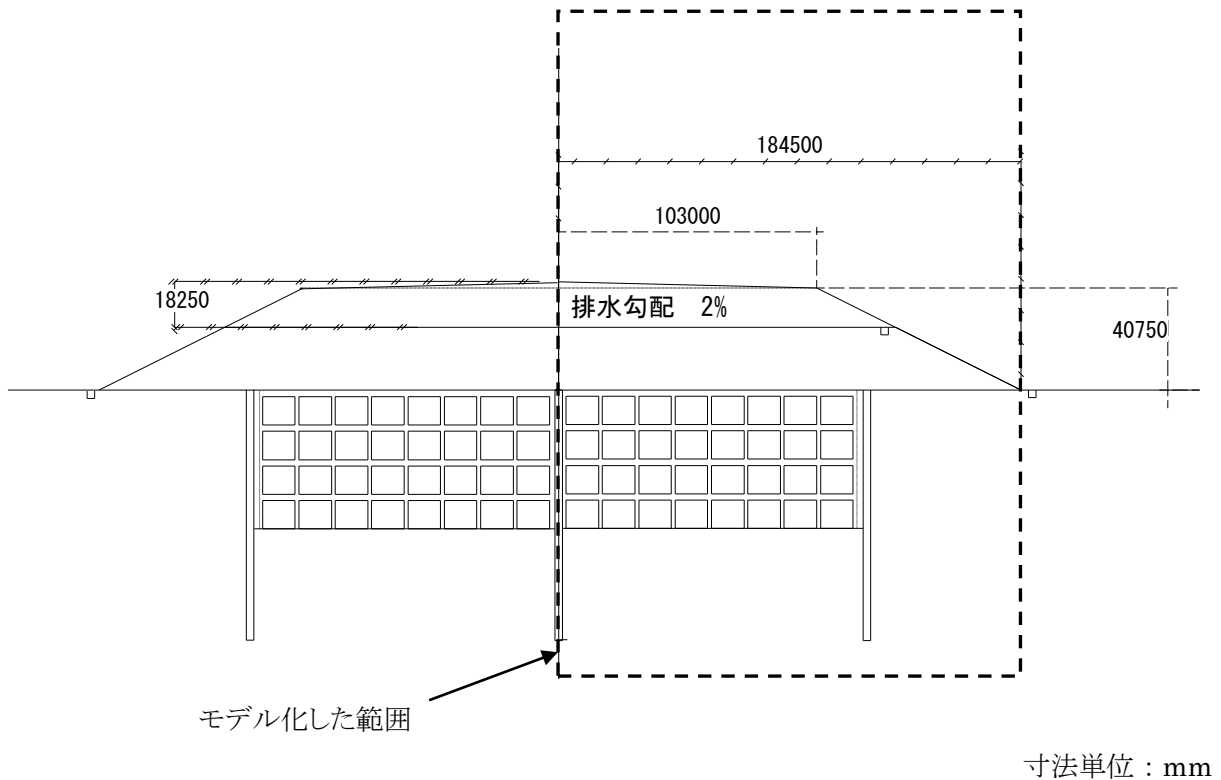
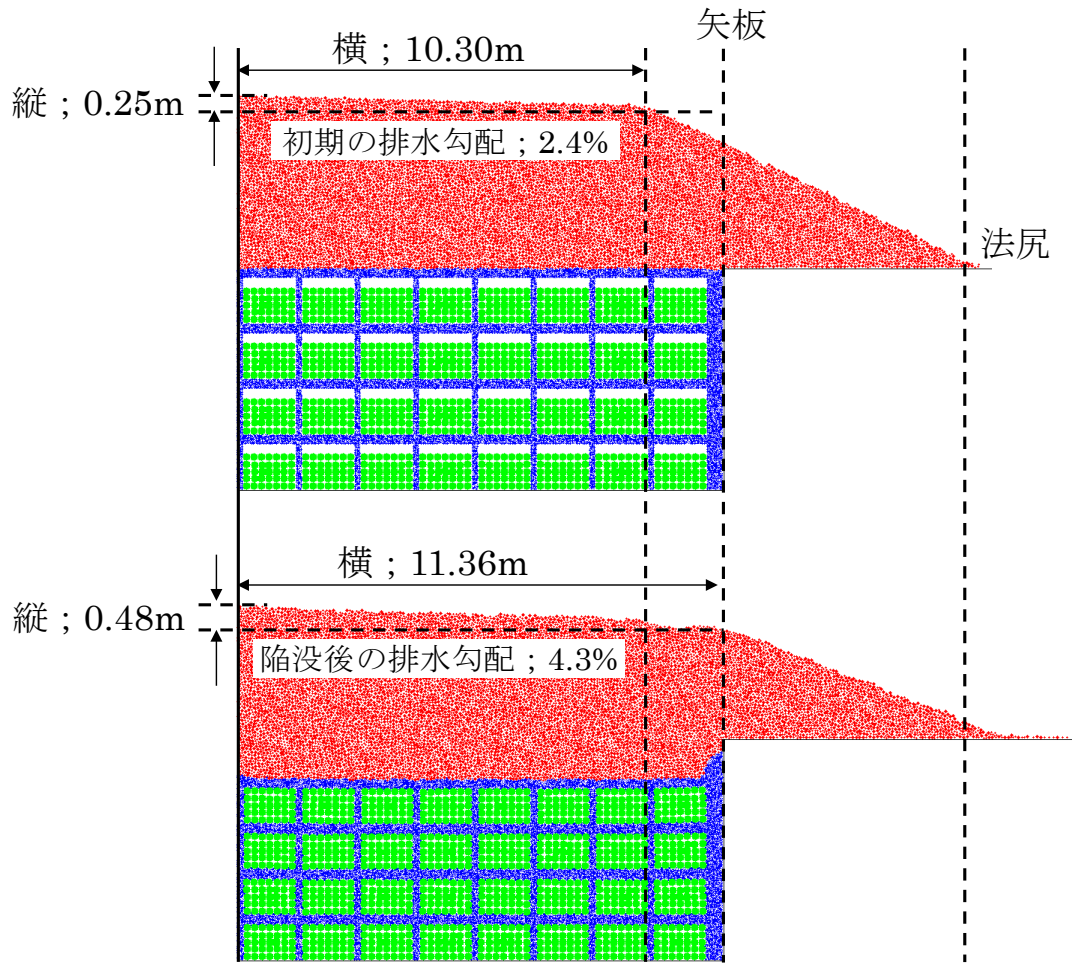


図 23 排水勾配を考慮した安定型トレンチ埋設処分施設の横断面図



上図 : 陥没前、下図 : 陥没後

(埋戻し材 ; 砂、鋼製角型容器内の上部空げき率 ; 20%)

図 24 排水勾配を考慮した安定型トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果

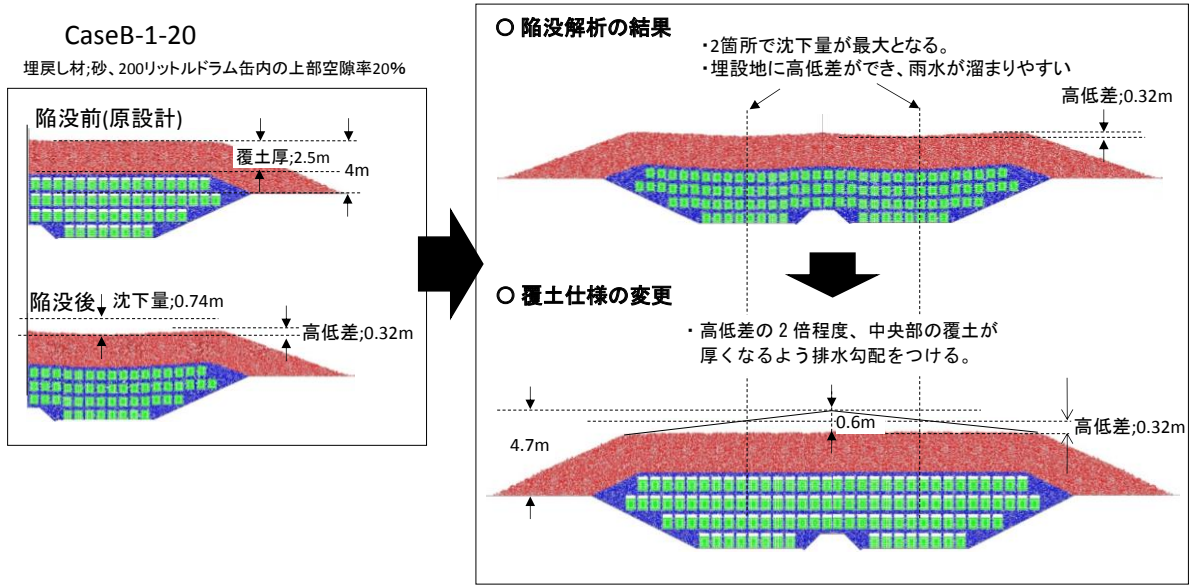


図 25 排水勾配を考慮した付加機能型トレンチ埋設処分施設の概念図

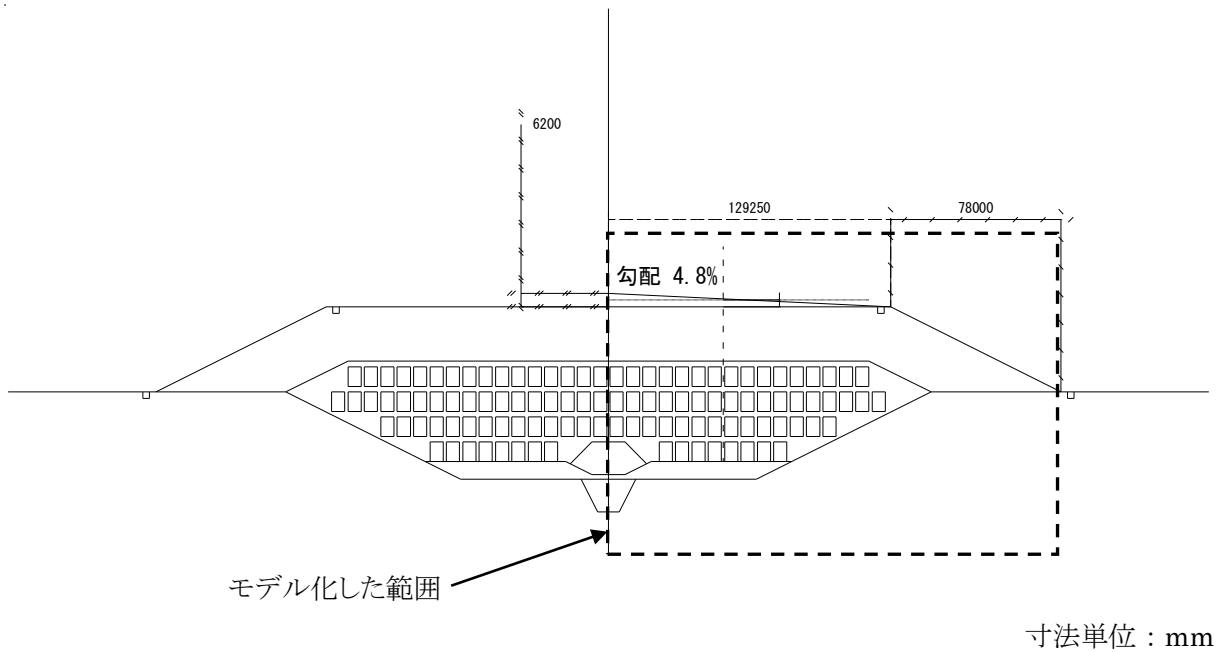
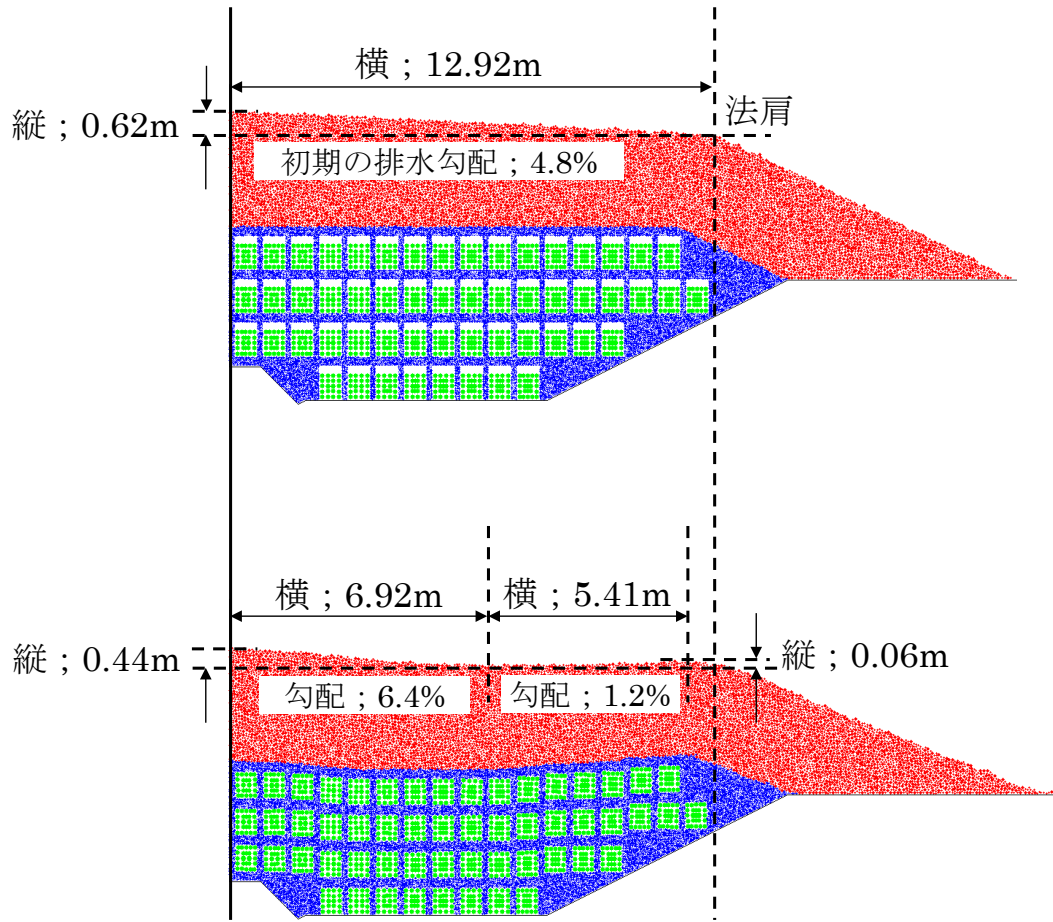


図 26 排水勾配を考慮した付加機能型トレンチ埋設処分施設の横断面図



上図 : 陥没前、下図 : 陥没後

(埋戻し材 ; 砂、ドラム缶内の上部空げき率 ; 20%)

図 27 排水勾配を考慮した付加機能型トレンチ埋設処分施設の陥没解析の結果

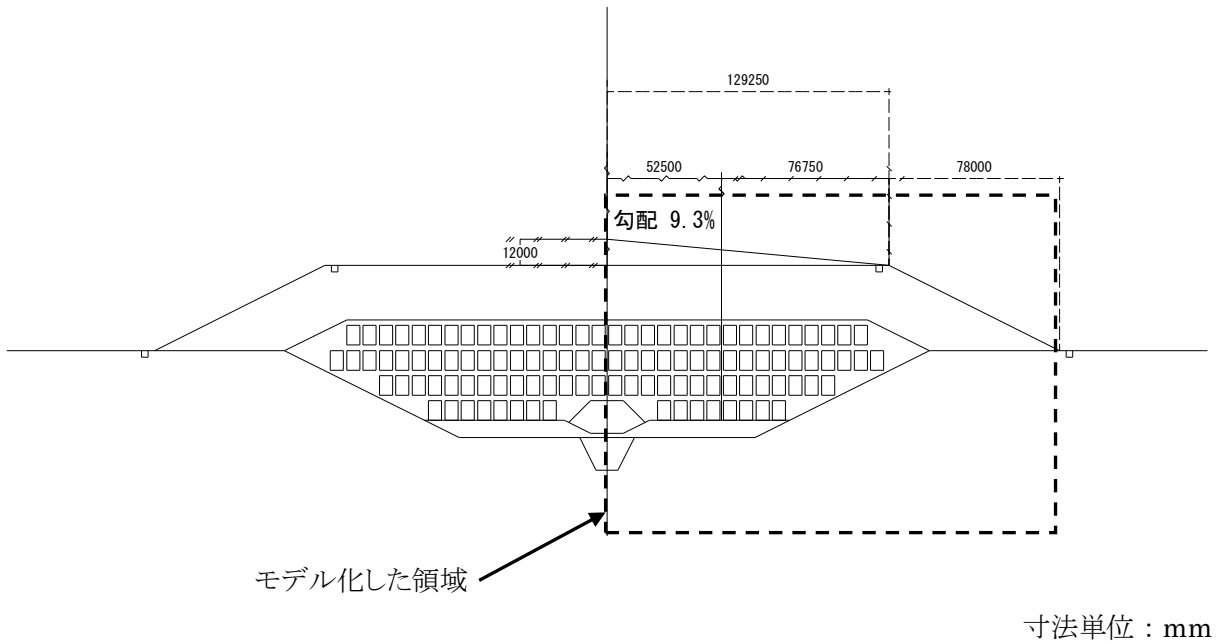


図 28 排水勾配をより大きくした付加機能型トレンチ埋設処分施設の横断面図

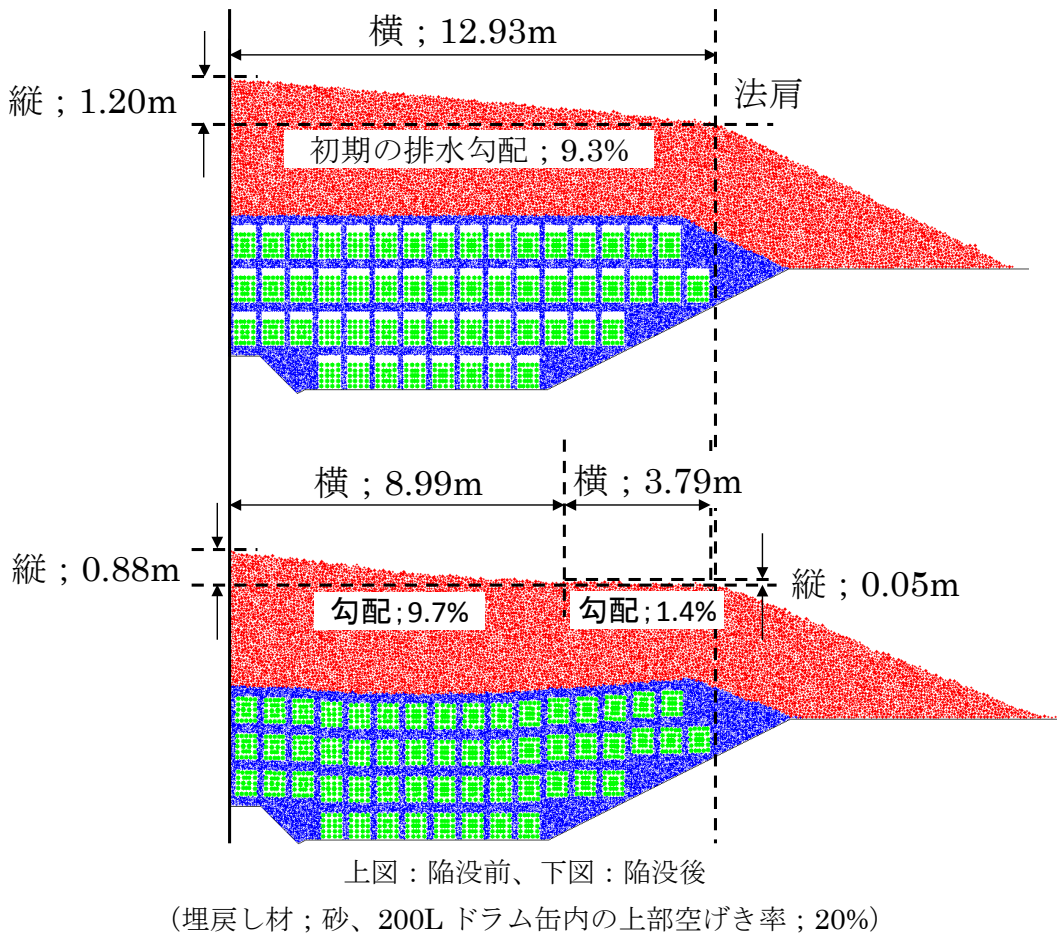
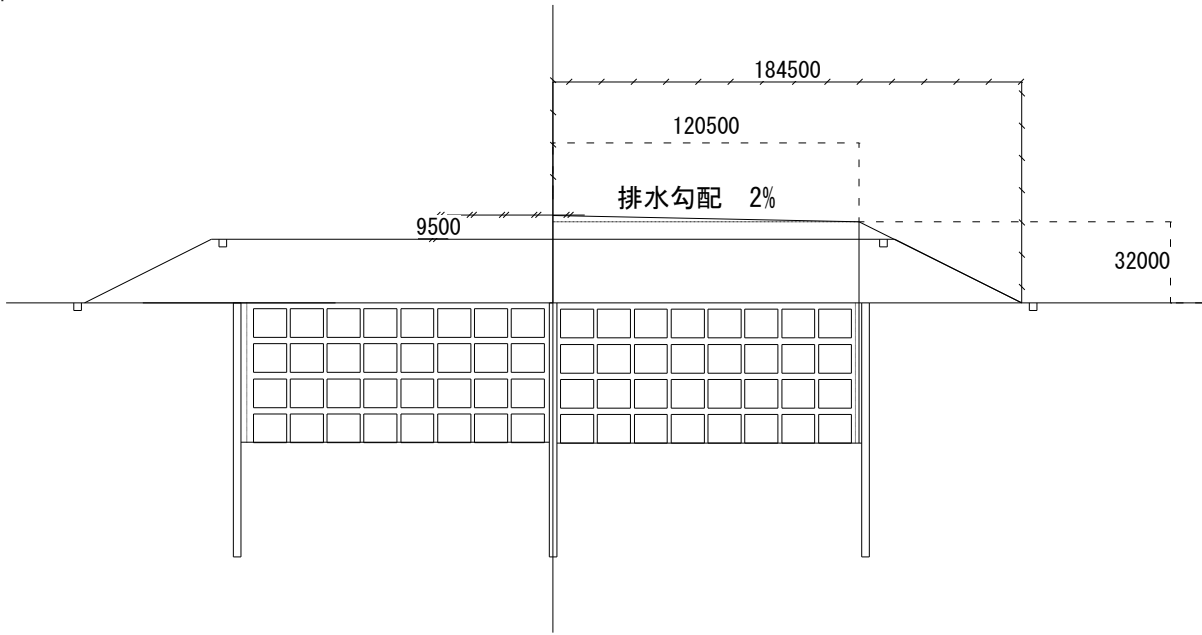
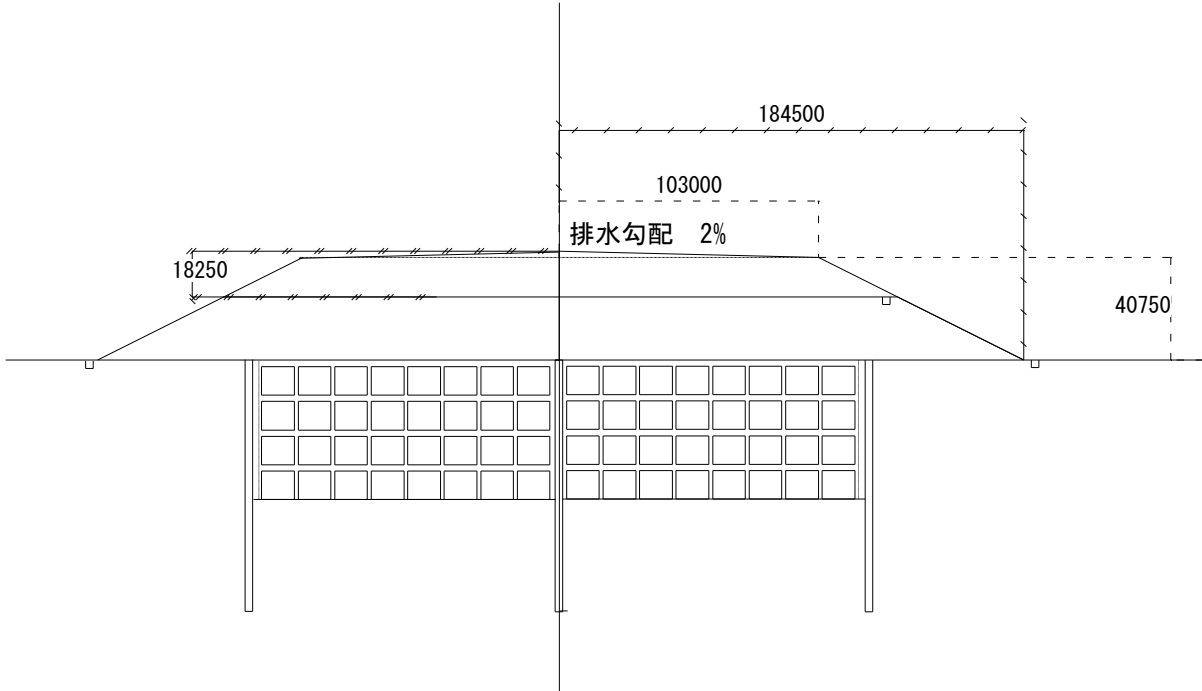


図 29 排水勾配をより大きくした付加機能型トレンチ埋設処分施設の解析結果



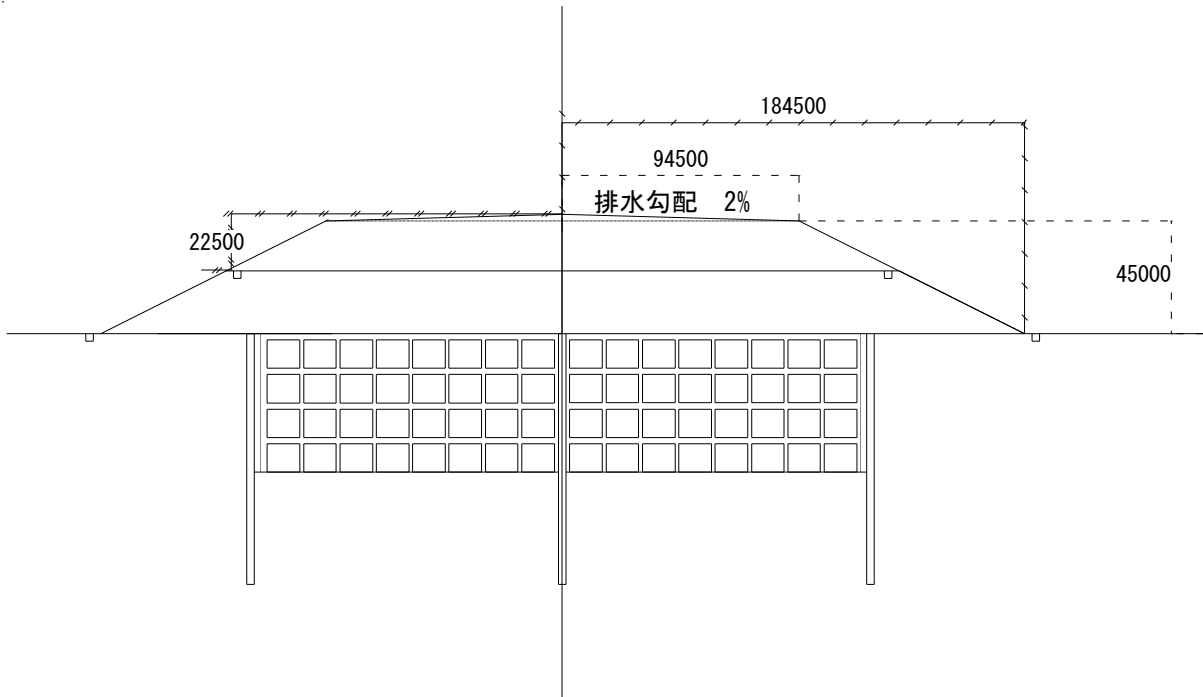
寸法単位：mm

図 30 排水勾配が確保可能な上部覆土の勾配例
(安定型トレンチ埋設処分施設、廃棄体の上部空げき率 10%)



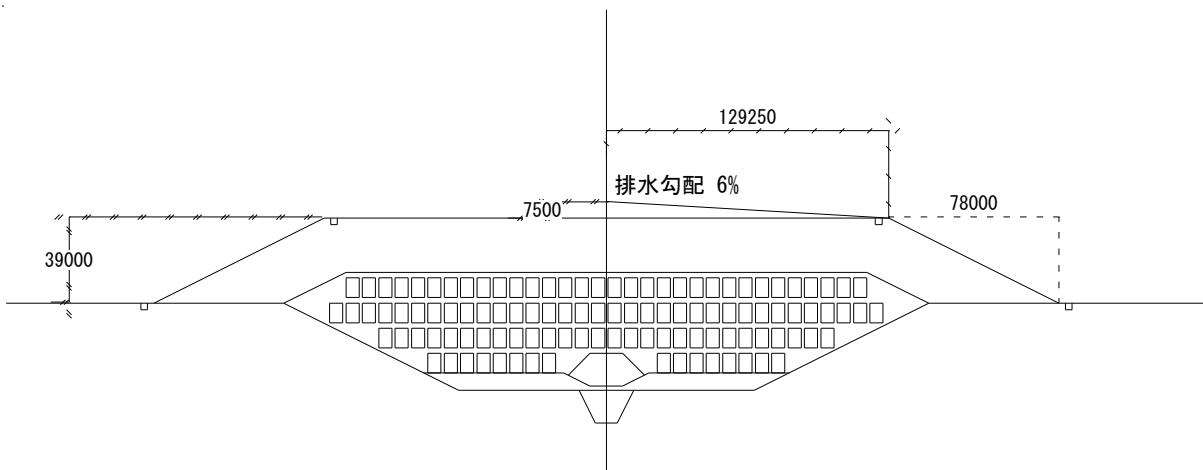
寸法単位：mm

図 31 排水勾配が確保可能な上部覆土の勾配例
(安定型トレンチ埋設処分施設、廃棄体の上部空げき率 20%)



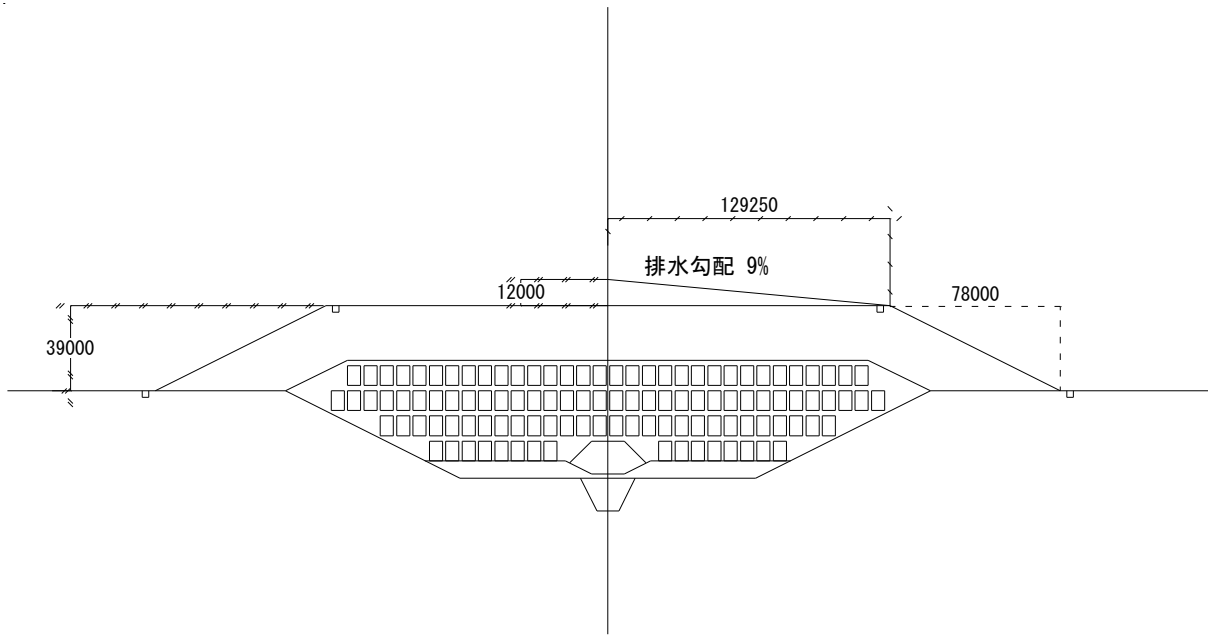
寸法単位：mm

図 32 排水勾配が確保可能な上部覆土の勾配例
(安定型トレンチ埋設処分施設、廃棄体の上部空げき率 30%)



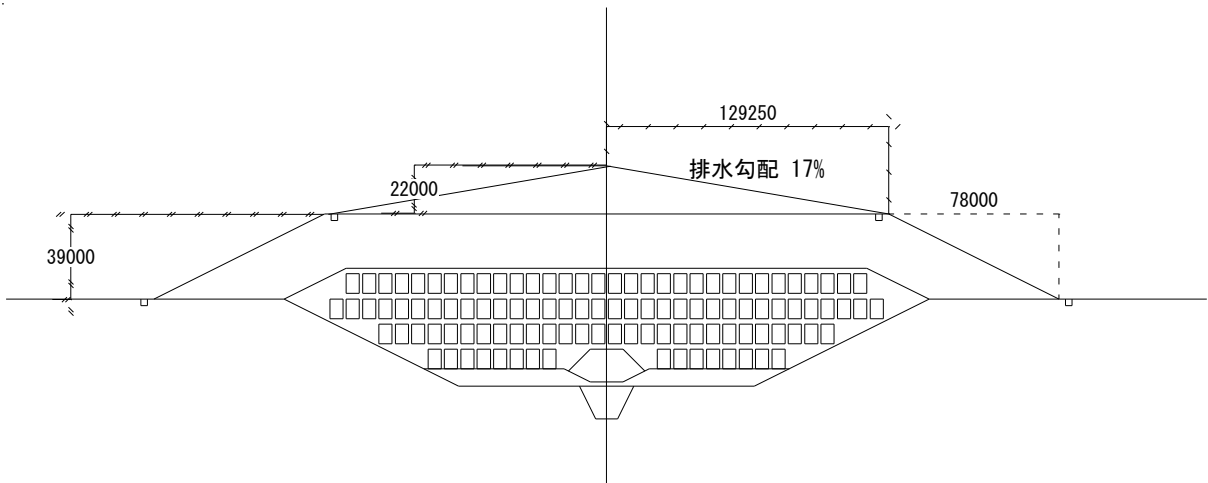
寸法単位：mm

図 33 排水勾配が確保可能な上部覆土の勾配例
(付加機能型トレンチ埋設処分施設、廃棄体の上部空げき率 10%)



寸法単位：mm

図 34 排水勾配が確保可能な上部覆土の勾配例
(付加機能型トレンチ埋設処分施設、廃棄体の上部空げき率 20%)



寸法単位：mm

図 35 排水勾配が確保可能な上部覆土の勾配例
(付加機能型トレンチ埋設処分施設、廃棄体の上部空げき率 30%)

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	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 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光線	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ 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み、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 ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
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 ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
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 ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
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 ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

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

表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=60 s
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/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ 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 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ 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 ¹¹ 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=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	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	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 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 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

