

# 東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所

## 第二種廃棄物埋設事業許可申請

### 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び

### 設備の基準に関する規則第十三条

### (ピット処分及びトレンチ処分に係る廃棄

### 物埋設地) 第 1 項第三号及び第四号

### への適合性について

### 廃棄物埋設地の状態設定

### (状態変化の評価)

2023 年 1 月

日本原子力発電株式会社

## 目 次

1	はじめに .....	1
2	現象の整理 .....	1
3	状態変化の評価に用いる初期条件 .....	3
4	状態変化における陥没量の設定 .....	3
5	状態変化における陥没影響評価 .....	6
5. 1	力学的影響評価の考え方 .....	6
5. 2	解析に用いる諸条件の設定 .....	7
5. 3	解析結果 .....	23
6	状態変化の影響評価のまとめ .....	30
7	参考文献 .....	32

## 1 はじめに

本資料は、「東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所 第二種廃棄物埋設事業許可申請 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則第十三条（ピット処分又はトレンチ処分に係る廃棄物埋設地）第1項第三号及び第四号への適合性について」のうち、廃棄物埋設地の状態設定を補足説明するものである。廃棄物埋設地の状態設定に当たっては、廃棄物埋設地ごとの状態変化の評価として、生じる現象を予測し情報を整理した上で、側部低透水性覆土及び最終覆土のうち低透水性土層（以下「低透水性土層」という。）の低透水性への影響の評価を実施する。

## 2 現象の整理

廃棄物埋設地の状態設定のうち、状態変化の評価に係る現象を整理する。影響事象分析（補足説明資料 3「東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所 第二種廃棄物埋設事業許可申請 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則第十三条（ピット処分又はトレンチ処分に係る廃棄物埋設地）第1項第三号及び第四号への適合性について 廃棄物埋設地の状態設定（影響事象分析） 3 検討結果」を参照）から、熱、水理、力学及び化学の観点によって廃棄物埋設地に生じる物理的・化学的現象のうち低透水性に関する影響事象分析の結果を第1表に示す。現象の整理にあたっては、側部低透水性覆土及び低透水性土層の設計要件である低透水性（透水係数及び厚さ）に影響を与える「M3 地震による廃棄物層の沈下（陥没現象）」を対象とする。

側部低透水性覆土及び低透水性土層の透水係数及び厚さへの影響は、影響事象分析から、力学的影響として側部低透水性覆土及び低透水性土層自身の変形やそれに伴う密度変化によって生じる。

側部低透水性覆土及び低透水性土層の変形は、隣接する埋設トレンチの変形に支配されることから、埋設トレンチに生じる現象を対象とする。埋設トレンチに生じる現象は、埋設トレンチの陥没変形を想定する。埋設トレンチの陥没変形は、廃棄物の陥没現象として整理を行った。

廃棄物には、地震による振動及び応力によって、鉄箱内の充填砂のみかけ密度が上昇し、廃棄物内に微小な空隙が生じる可能性がある。微小な空隙が生じると、埋設した廃棄物の形状が変化することで、廃棄物層が沈下を起こし、埋設トレンチの陥没現象が生じることが想定される。

第 1 表 低透水性への影響事象分析の結果

項目	影響事象	影響評価結果
T (熱)	—	考慮する影響事象はない。
H (水理)	—	考慮する影響事象はない。
M (力学)	M1 廃棄物層 (金属廃棄物及び鉄箱) の金属腐食による膨張変形及びガス発生	影響事象として考慮しない。
	M2 ベントナイト混合土の膨潤	影響事象として考慮しない。
	M3 地震による廃棄物層の沈下 (陥没現象)	地震力による作用で、側部低透水性覆土及び低透水性土層に変形が生じることで低透水性に影響が生じる可能性がある。
C (化学)	C3 モンモリロナイト溶出 (ベントナイト混合土と浸透水の反応)	影響事象として考慮しない。

### 3 状態変化の評価に用いる初期条件

状態変化の評価は、廃棄物を埋設する埋設トレンチに起因した物理的・化学的相互作用を踏まえて、側部低透水性覆土及び低透水性土層の低透水性への力学的影響評価を行う。そのため、埋設される廃棄物及び鉄箱に係る初期条件を整理する。

#### (1) 金属類の廃棄物

配管などの金属廃棄物を切断し、鉄箱に収納したもの。

#### (2) コンクリート類の廃棄物

原子炉建屋の生体遮へい体であり、鉄筋コンクリートをおよそある程度の大きさに切断し、プラスチックシートでこん包したもの。一部にはコンクリートコアなどを破碎したコンクリートガラがあり、鉄箱に収納する。

#### (3) 鉄箱

金属類の廃棄物及びコンクリートガラの収納には、約 1.4 m×約 1.4 m×約 0.9 m（高さ）の鉄箱を用いる。収納する際には、有害な空隙が生じないように砂を充填する措置を施す。

### 4 状態変化における陥没量の設定

鉄箱に金属類の廃棄物及びコンクリートガラを収納する際には、有害な空隙が生じないように砂を充填する措置を施すが、地震の振動や応力によって、充填砂のみかけ密度が上昇することで微小な空隙が発生し、埋設トレンチが陥没する可能性が考えられる。なお、コンクリート類の廃棄物（コンクリートガラを除く）は、生体遮へい体の鉄筋コンクリートブロックであるため、鉄箱のような砂充填による空隙は生じないものと考えた。

廃棄物の陥没量は、鉄箱に充填した砂のみかけ密度の変化によるものが考えられ、振動や応力などの外力が加わると砂の間隙が減少することで、みか

け密度が上昇し、廃棄物内に微小な空隙が発生すると考える。

みかけ密度の上昇を想定するに当たっては、砂の相対的な締まり具合を示す指標として、以下で定義される相対密度  $D_r$  がある。ここで、 $e_{max}$  及び  $e_{min}$  は J I S A 1224 「砂の最小密度・最大密度試験方法」によって求められる。

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad \dots (1)$$

$e_{max}$  : 砂質土の最大間隙比 (最もゆるい (最小密度) 状態の間隙比)

$e_{min}$  : 砂質土の最小間隙比 (最も密な (最大密度) 状態の間隙比)

$e$  : 砂質土の間隙比

鉄箱に砂を充填する際には、加振による充填を行う (以下「振動充填」という)。振動充填は、廃棄物を入れない状態では、相対密度は 1.0 に近い非常に密な状態となることが分かっているが、廃棄物の形状が配管など<sup>1)</sup>の場合の振動充填試験<sup>(1)</sup>においては、収納方法などの条件によっては、配管内部の砂の相対密度が 0.6 まで低下する。

金属類の廃棄物及びコンクリートガラは、振動充填によって鉄箱に収納する計画であり、砂充填が比較的難しい配管などの廃棄物を含めても、鉄箱内の砂充填の相対密度は 0.6 以上を確保できるものと考ええる。

陥没量の設定においては、鉄箱全体で充填砂の相対密度を 0.6 とし、鉄箱内に生じる可能性がある空隙を算定する。

具体的には、鉄箱に充填した砂の相対密度が地震の振動や応力によって 0.6 から 1.0 になったと仮定して算出した値を、鉄箱内に生じる可能性がある空隙として設定する。なお、算出においては陥没量を保守的に設定するた

め、鉄箱内は廃棄物がなく、全て砂で充填されている状態を想定して、算定した。

ここで、算定においては間隙比 $e$ 、乾燥密度 $\rho_d$ 及び土粒子の密度 $\rho_s$ は、以下の関係を用いた。また、振動充填に用いる砂は、充填性の観点から粒径が小さく細粒分が多い鹿島珪砂6号を使用することを計画しており、最小密度・最大密度試験の結果から最大密度及び最小密度は第2表に示す値を用いた。

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad \dots (2)$$

第2表 鹿島珪砂6号の最小密度・最大密度試験結果

項目	設定値 (kg/m <sup>3</sup> )
最大密度 $\rho_{dmax}$	1,715
最小密度 $\rho_{dmin}$	1,401

陥没量の算定においては、最大密度における砂の充填量から相対密度における砂の充填量を引いた値で、最大密度で発生する可能性がある空隙量を算定し、鉄箱の底面積を割ることで鉄箱当たりの陥没量を算定した。

(算定方法)

$$\text{鉄箱当たりの陥没量(m)} = \{ \text{最大密度の充填量(kg)} - \text{相対密度の充填量(kg)} \} \div \text{最大密度 (kg/m}^3) \div \text{鉄箱の底面積 (m}^2)$$

上記の算定方法から、鉄箱内に生じる可能性がある空隙からの陥没量は、0.08 mとなる。埋設トレンチ内は中間覆土を間において3段で埋設する計画であることから、陥没量を3段分で算定し0.24 mと設定する。

また、鉄箱内に砂を充填する際には、鉄箱の上部においては、砂の散逸の

可能性から振動充填が難しく、鉄箱の上部に砂を十分に充填できないことに起因した空隙が生じる可能性も考えられる（以下「上部空隙」という。）。

上部空隙の陥没量の設定においては、振動充填の設計の目標値として鉄箱1つ当たり0.08 mを考慮し、3段分で0.24 mを加える。

したがって、鉄箱内に生じる可能性がある空隙で発生する陥没量及び上部空隙の陥没量で、埋設トレンチ内で生じる可能性がある陥没量を0.48 mと設定する。

## 5 状態変化における陥没影響評価

### 5.1 力学的影響評価の考え方

ベントナイト混合土の密度変化が生じることで、低透水性への影響を及ぼす可能性があるため、力学的影響評価によって確認する。

地盤工学の数値解析分野では、有限要素法 (Finite Element Method) (以下「FEM」という。) が広く用いられている。文献<sup>(2)(3)</sup>によると、FEMは計算格子を用いた計算手法であることから、地震時における地盤の安定性評価などの微小変形である数%程度までのひずみを対象として用いられている。数%のひずみを超える大変形においては、変形するにつれ要素に大きなひずみが生じ、計算精度を低下させる可能性がある。

このため、力学的な影響評価には、大変形を扱うことができる解析手法の一つである個別要素法 (Distinct Element Method) (以下「DEM」という。) を用いたシミュレーションで、廃棄物層の沈下に伴う側部低透水性覆土及び低透水性土層の陥没の影響評価を行った。

DEM解析は、対象物を粒子の集合体 (剛体) とし、粒子に運動方程式を適用することで、不連続体の挙動を再現する解析手法である。大変形の領域においては、分離、すべり、剥離のような不連続体としての挙動が顕著にな

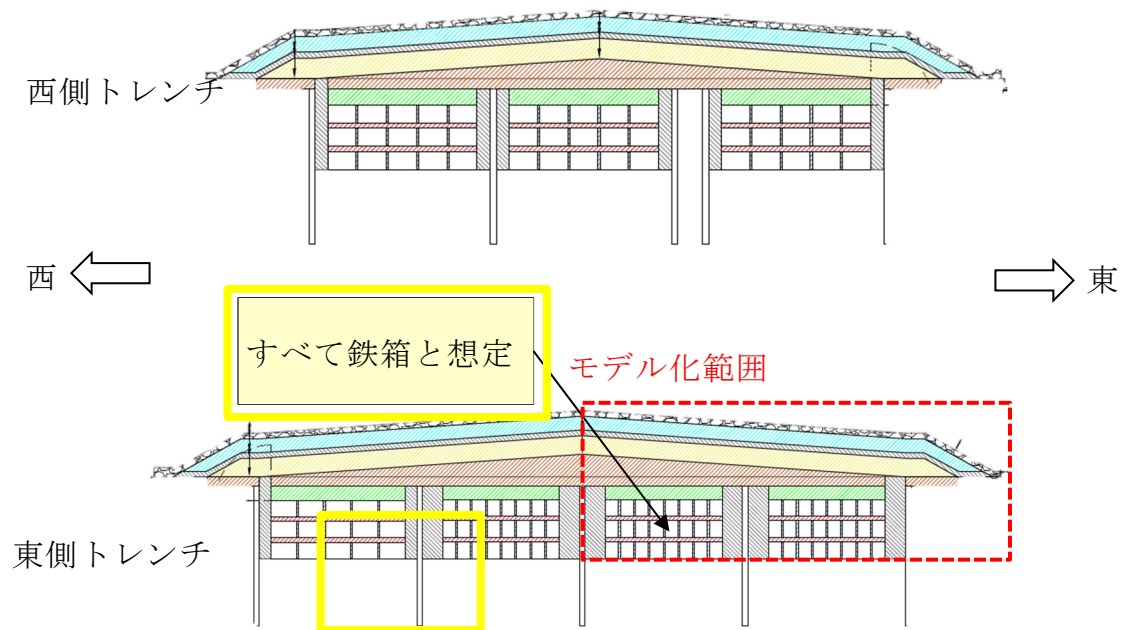


ることから、不連続体を対象とした解析手法であるDEM解析を用いることとした。

## 5. 2 解析に用いる諸条件の設定

DEM解析における検討断面は、側部低透水性覆土及び低透水性土層のベントナイト混合土の変形挙動を評価するために、廃棄物埋設地の東西断面を対象とした。西側トレンチと東側トレンチでは断面形状が異なるが、陥没対象となる廃棄物の数量が多い東側トレンチの方が、陥没を生じる箇所が広くなり、挙動としては保守的な評価になると考え、検討断面は東側トレンチを対象とした。

また、陥没現象を保守的に評価するために陥没対象となる廃棄物の数量が多くなるように、東側トレンチに収納される廃棄物が、全て鉄箱である場合を想定した。なお、コンクリート類の廃棄物（コンクリートガラを除く）は、生体遮へい体の鉄筋コンクリートブロックであるため、鉄箱のような砂充填による空隙は生じないものであり、陥没現象に対して影響は与えない。廃棄物埋設地の断面及びDEM解析におけるモデル化範囲を第1図に示す。



第1図 廃棄物埋設地の断面（東西断面）のイメージ図

### (1) 解析モデル

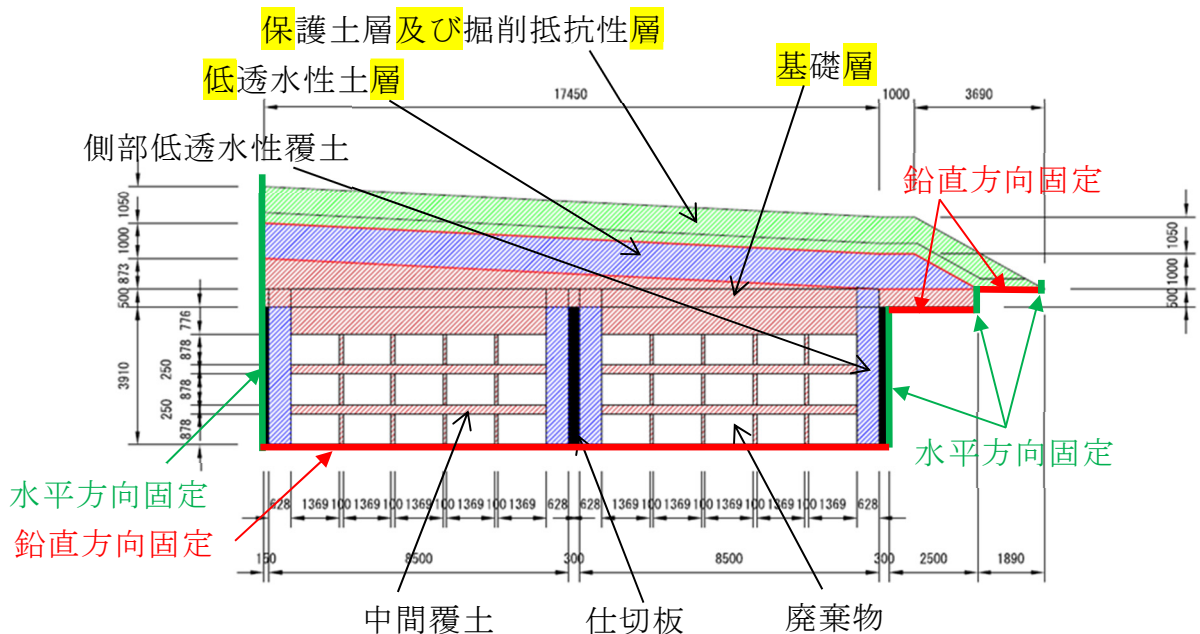
解析モデルの作成に当たっては、東西断面のセンターラインを中心として左右の変形挙動は**対称である**と仮定し、東側トレンチの右側のみをモデル化した。解析における各材料のモデル化は、久慈川砂及びベントナイト混合土(ベントナイトと久慈川砂の混合土)の試験結果を用いて設定した。解析における各材料のモデル化を第**3**表に示す。

なお、保護工（じゃかご等）は、廃棄物の**陥没**時の変形量を保守的に評価できるように、上載荷重としてモデル化した。

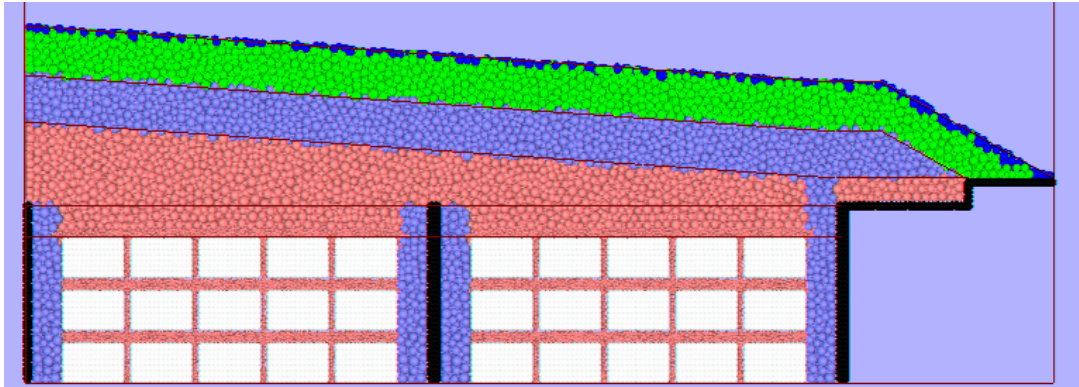
解析モデルの詳細、DEMによる解析モデルを第2図、第3図に示す。廃棄物の**陥没**に伴う周囲の覆土の変形挙動を保守的に評価できるように、モデル境界には、水平方向及び鉛直方向に固定条件を設定した。

第3表 解析における各材料のモデル化

材料	解析におけるモデル化	設定における考え方
保護土層及び掘削抵抗性層	久慈川砂 (濡れた状態)	雨水の影響を受けやすい材料であると想定し、濡れた状態の久慈川砂で設定。
側部低透水性覆土及び低透水性土層	ベントナイト混合土	ベントナイト(15%)と久慈川砂(85%)の混合土を雨水の影響を受けた状態(飽和に近い状態)で設定。
基礎層及び中間覆土	久慈川砂 (乾いた状態)	雨水の影響を受けにくい材料であると想定し、乾いた状態の久慈川砂で設定。
廃棄物及び鉄箱	—	廃棄物の圧縮変形を、廃棄物の粒子を強制的な変位で表現。
仕切板	— (剛体)	変形挙動を生じない材料として設定。



第2図 解析モデルの詳細



第3図 DEMによる解析モデル

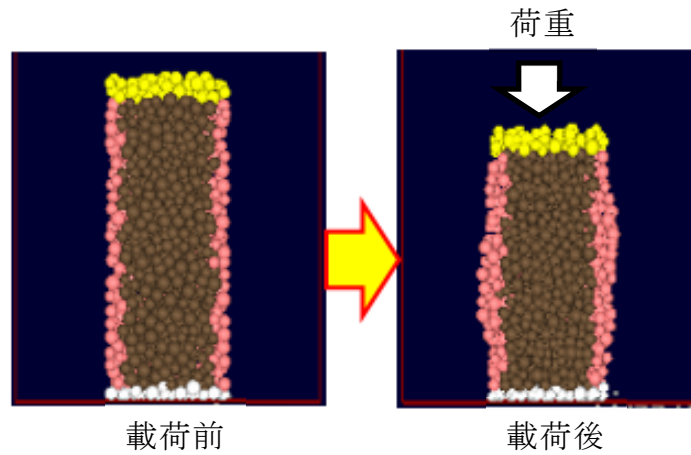
## (2) 解析用物性値の設定

DEM解析に用いる最終覆土や中間覆土などの土質材料のパラメータは、一軸圧縮試験及び形状確認試験を行い、試験結果を再現できるパラメータをフィッティング解析で求め、DEM解析における解析用物性値を設定した。DEMによる一軸圧縮試験のシミュレーションのイメージを第4図に示す。

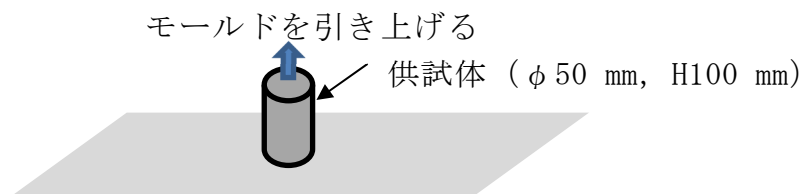
ベントナイト混合土のような粘土を含み粘着力をもつ材料に対して、引張限界力を設定するために引張限界力を推定できる一軸圧縮試験を実施した。なお、試験の砂材料については、材料調達の優位性を踏まえて、久慈川砂を用いた。

中間覆土や最終覆土を対象とする砂については、 $\phi 50 \text{ mm} \times H100 \text{ mm}$ のモールドに材料を充填し、その後モールドを引き上げて材料を解放した際の形状を確認した(第5図参照)。試験の対象とした覆土材料及びDEM解析で適用する覆土材料の密度を第4表に示す。

密度は試験結果を参考として設定しているが、DEM解析では、解析手法上、密度の微小量のフィッティングは難しいため、有効数字二桁までの設定とした。



第4図 DEMによる一軸圧縮試験のシミュレーションのイメージ



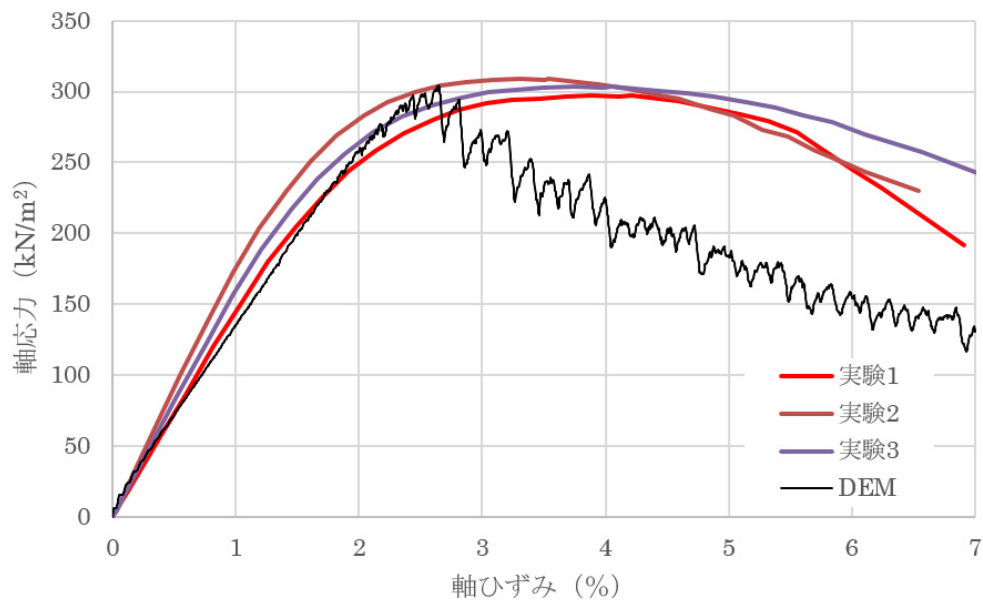
第5図 形状確認試験（砂）

第4表 試験の対象とした覆土材料及びDEM解析で用いる密度

対象	覆土材料	DEM解析で用いる密度 (kg/m <sup>3</sup> )
ベントナイト混合土	<ul style="list-style-type: none"> <li>ベントナイトと久慈川砂の混合土。</li> <li>実際の埋設環境に近く、雨水の影響を受けた状態（飽和に近い状態：含水比18%）を想定。</li> </ul>	2.1×10 <sup>3</sup> (湿潤密度)
中間覆土及び基礎層	<ul style="list-style-type: none"> <li>久慈川砂（乾燥状態：含水比0%）</li> <li>雨水の影響が少ない状態を想定。</li> </ul>	1.4×10 <sup>3</sup> (乾燥密度)
保護土層及び掘削抵抗性層	<ul style="list-style-type: none"> <li>久慈川砂（濡れた状態：含水比7.8%）</li> <li>雨水の影響を受けた状態を想定。</li> </ul>	1.5×10 <sup>3</sup> (湿潤密度)

### (3) ベントナイト混合土のフィッティング

ベントナイト混合土のフィッティング結果を第6図に、入力パラメータの設定値を第5表に示す。フィッティングは、一軸圧縮試験で得られた応力-ひずみの関係に整合させるようにパラメータを設定した。実験結果とDEMによるフィッティング結果では、ピーク強度までの整合性はよいが、それ以降のひずみ軟化過程ではDEMによるフィッティングに乖離がみられる。しかしながらフィッティング結果の方が剛性(軸応力)は小さくなり、変形挙動としては保守的な評価となることから、本フィッティング結果を採用した。



第6図 ベントナイト混合土のフィッティング結果

第5表 入力パラメータの設定値 (ベントナイト混合土)

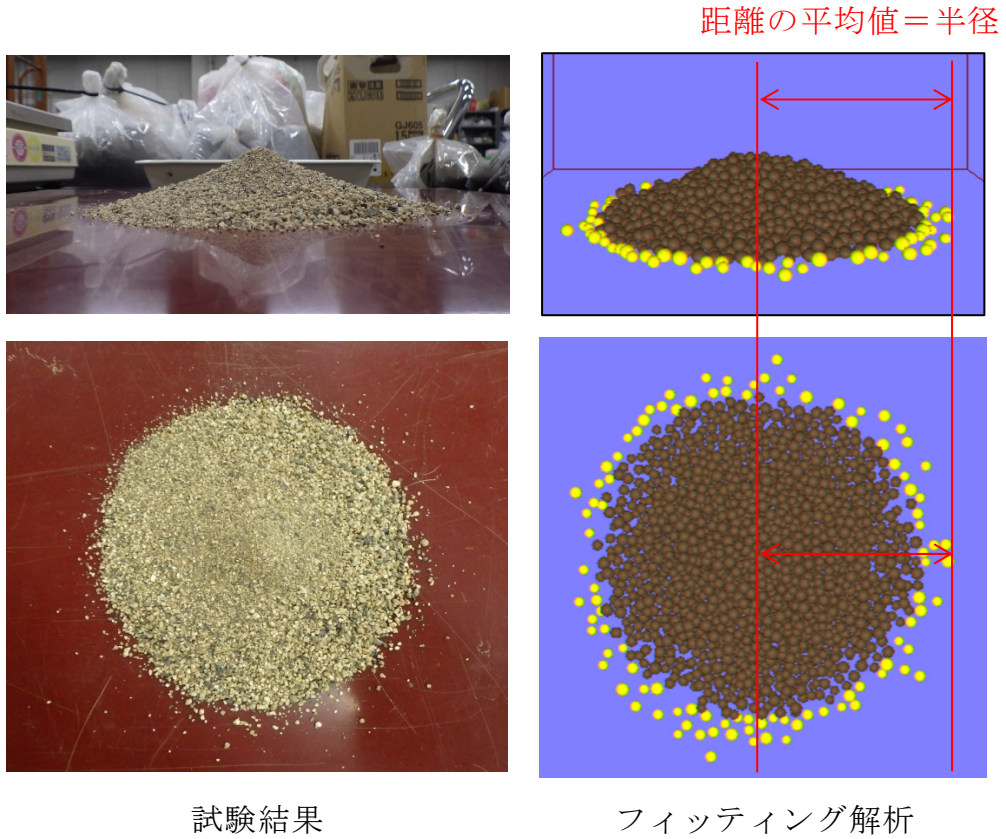
項目	設定値
バネ係数 (N/m)	$3.3 \times 10^6$
減衰係数 (N/m·s)	$3.25 \times 10^3$
粒子密度 (kg/m <sup>3</sup> )	3,050
粒子の最大半径 (m)	0.12
粒子の最小半径 (m)	0.084
粒子間摩擦角 (°)	30
転がり摩擦係数 (-)	0.05
引張限界力 (N)	7,700

#### (4) 砂のフィッティング

砂の乾いた状態及び濡れた状態におけるフィッティングの状況を第7図及び第8図に示す。また、それぞれのフィッティングの結果を第6表及び第7表に示す。フィッティングは、安息角が砂のせん断強度と相関の高い指標であることから、形状確認試験で得られた安息角（モールド解放後の材料の半径及び高さから算出）に整合させるようにパラメータを設定した（フィッティング状況に示すフィッティング解析の黄の粒子は、中心からの半径を計測するための端部の粒子であり、中心から黄の粒子までの距離の平均値を半径とした。）。

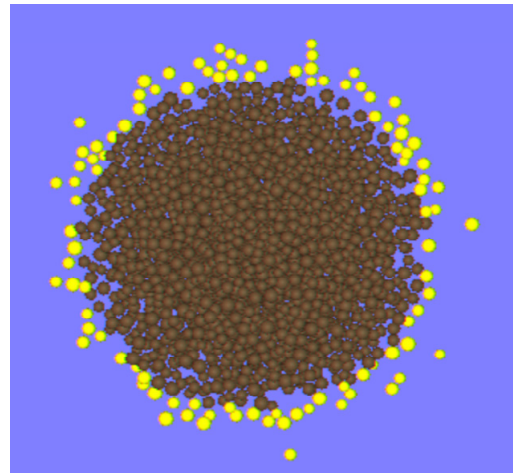
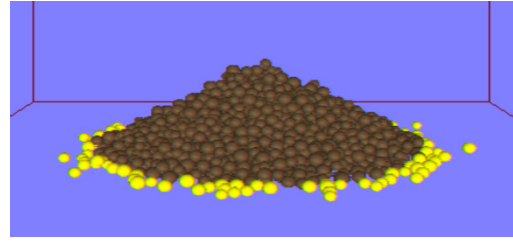
砂の乾いた状態及び濡れた状態における入力パラメータを第8表及び第9表に示す。フィッティング解析の砂の粒子半径は、最大半径 0.0030 m と最小半径 0.0021 m と設定した。砂の挙動に対して支配的なパラメータは、粒子間摩擦角と転がり摩擦係数であるため、実際の砂の粒子半径とフィッティング解析の砂の粒子半径が異なってもフィッティングの結果には影響がないと考えるが、フィッティングの精度を

高めるため実際の砂の粒径に近づけるように、可能な限り小さい設定とした。



第7図 フィッティングの状況（久慈川砂：乾いた状態）





試験結果

フィッティング解析

第 8 図 フィッティングの状況 (久慈川砂：濡れた状態)

第 6 表 フィッティングの結果 (久慈川砂：乾いた状態)

試験結果			フィッティング解析		
半径 (mm)	高さ (mm)	安息角 (°)	半径 (mm)	高さ (mm)	安息角 (°)
75.0	35.5	25.3	75.1	33.7	24.2

第7表 フィッティングの結果（久慈川砂：濡れた状態）

試験結果			フィッティング解析		
半径 (mm)	高さ (mm)	安息角 (°)	半径 (mm)	高さ (mm)	安息角 (°)
70.2	45.7	33.0	70.0	42.4	31.2

第8表 入力パラメータの設定値（久慈川砂：乾いた状態）

項目	設定値
バネ係数 (N/m)	$3.0 \times 10^5$
減衰係数 (N/m·s)	3.32
粒子密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2,240
粒子の最大半径 (m)	0.0030
粒子の最小半径 (m)	0.0021
粒子間摩擦角 (°)	30
転がり摩擦係数 (-)	0.143
引張限界力 (N)	0

第9表 入力パラメータの設定値（久慈川砂：濡れた状態）

項目	設定値
バネ係数 (N/m)	$3.0 \times 10^5$
減衰係数 (N/m・s)	3.43
粒子密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2,400
粒子の最大半径 (m)	0.0030
粒子の最小半径 (m)	0.0021
粒子間摩擦角 (°)	30
転がり摩擦係数 (-)	0.264
引張限界力 (N)	0

(5) 解析用物性値（設定値）

a. ベントナイト混合土及び砂

フィッティングによって設定したベントナイト混合土と砂（乾いた状態）及び砂（濡れた状態）の解析用物性値（入力パラメータ）を第10表に示す。粒子密度は、形状確認試験及び一軸圧縮試験の密度となるように設定し、それ以外の入力パラメータは、形状確認試験及び一軸圧縮試験を再現できるようにフィッティングさせて設定している。なお、砂の挙動に対して支配的なパラメータは粒子間摩擦角と転がり摩擦係数であることから、砂（乾いた状態）及び砂（濡れた状態）の粒子半径は、解析結果に影響がないため、ベントナイト混合土と同一の値を設定した。また、砂（乾いた状態）及び砂（濡れた状態）のバネ係数は、ひずみを一定にするためのバネ係数の相似則に基づき、粒子半径を大きくした分バネ係数を大きくする必要があるため、ベントナイト混合土と同一の値とした。減衰係数についても粒子半径を大きくした影響を考慮して設定

した。

第 10 表 解析用物性値の設定値

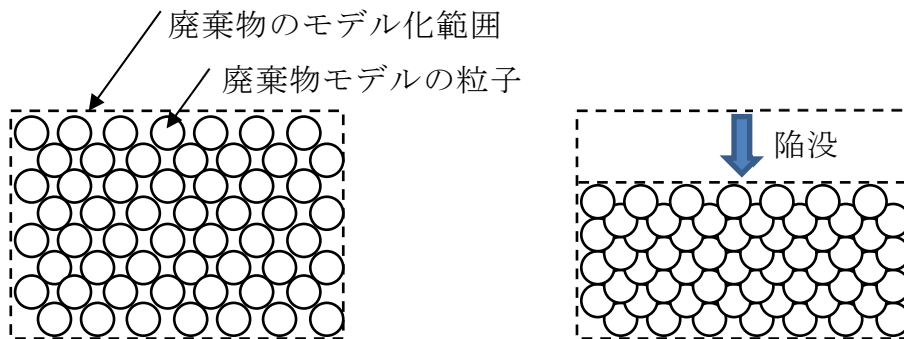
項目	ベントナイト 混合土	砂 (乾いた状態)	砂 (濡れた状態)
バネ係数 (N/m)	$3.3 \times 10^6$	$3.3 \times 10^6$	$3.3 \times 10^6$
減衰係数 (N/m・s)	$3.25 \times 10^3$	$2.78 \times 10^3$	$2.88 \times 10^3$
粒子密度 (kg/m <sup>3</sup> )	3,050	2,240	2,400
粒子の最大半径 (m)	0.12	0.12 <sup>*</sup>	0.12
粒子の最小半径 (m)	0.084	0.084 <sup>*</sup>	0.084
粒子間摩擦角 (°)	30	30	30
転がり 摩擦係数 (-)	0.05	0.143	0.264
引張限界力 (N)	7,700	0	0

※廃棄物容器間及び廃棄物容器の上部の砂（乾いた状態）は、**陥没時の廃棄物容器間**への砂の入り込みを再現するために、周囲の砂よりも粒子径を小さくした（最大半径 0.049 m、最小半径 0.034 m）。

## b. 廃棄物及び鉄箱

鉄箱が変形することによって発生する陥没量は、鉄箱を考慮しない廃棄物をモデル化した粒子に強制的に変位量を与えることでモデル化した。廃棄物の陥没のモデル化のイメージを第9図に示す。

陥没量は、「4 状態変化における陥没量の設定」で設定したとおり、鉄箱内に発生する可能性のある空隙と上部空隙で、陥没量(強制変位量)を3段の合計で0.48 mとした。



第9図 廃棄物の陥没のモデル化のイメージ

## c. 解析における上載荷重

保護工(じゃかご等)は、道路土工盛土工指針<sup>(4)</sup>を参考に「盛土の砂及び砂礫」の単位体積重量の値  $20 \text{ kN/m}^3$  を用いて、施工厚さ  $0.3 \text{ m}$  に対して  $6.0 \text{ kN/m}^2$  を上載荷重として設定した。

掘削抵抗性層は、第3表で示すように久慈川砂(濡れた状態)でモデル化しているが、掘削抵抗性層は碎石又は石(栗石等の粒径が大きなもの)及び砂又は砂質土で構成されると考えられるため、単位体積重量は保護工(じゃかご等)と同様の「盛土の砂及び砂礫」の値  $20 \text{ kN/m}^3$  とし、施工厚さ  $0.3 \text{ m}$  から、 $6.0 \text{ kN/m}^2$  を荷重とした上で、その荷重から第4表に示す久慈川砂(濡れた状態)の密度から算定される荷重

4.4 kN/m<sup>2</sup> (= 1,500 kg/m<sup>3</sup> × 9.8 m/s<sup>2</sup> × 0.3 m) を差し引いた  
 1.6 kN/m<sup>2</sup>を重量増加分として上載荷重に設定した。なお、作業時荷重  
 として 10 kN/m<sup>2</sup>を想定し追加した。

以上の合計で、17.6 kN/m<sup>2</sup> (= 6.0 kN/m<sup>2</sup> + 1.6 kN/m<sup>2</sup> + 10 kN/m<sup>2</sup>) を解析における上載荷重として設定した。

#### (6) 解析結果の求め方

陥没影響によるベントナイト混合土の透水係数の変化を確認するために、  
 解析によってせん断ひずみ及び密度を評価した。評価指標としての「せん  
 断ひずみ」及び「密度」は以下の通りとした。

##### a. せん断ひずみ

ベントナイト混合土のひずみを可視化するため、まず第 10 図 (a) に  
 示すように、解析領域をマイクロゾーンに分割する。そして着目する粒  
 子 i が存在するマイクロゾーンの上下左右のマイクロゾーン (赤) に存  
 在する n 個の粒子 j の相対変位増分  $\delta_{ij}$  を考える (第 10 図 (b))。  $\delta_{x_{ij}}$   
 及び  $\delta_{y_{ij}}$  は、  $\delta_{ij}$  の x 及び y 成分である。これによれば、粒子 i の  
 周辺粒子の運動による見かけの直ひずみは次式で求められる。

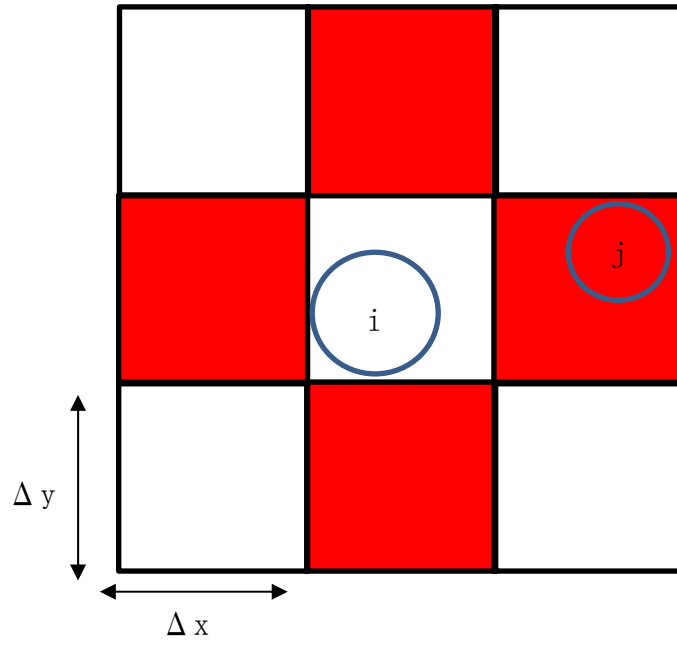
$$\varepsilon_{xi} = \frac{\sum_{j=1}^n \varepsilon_{xij}}{n} \quad \varepsilon_{xij} = \frac{(x_j - x_i) \delta_{xij}}{|x_j - x_i| \Delta_x} \quad \dots (3)$$

$$\varepsilon_{yi} = \frac{\sum_{j=1}^n \varepsilon_{yij}}{n} \quad \varepsilon_{yij} = \frac{(y_j - y_i) \delta_{yij}}{|y_j - y_i| \Delta_y} \quad \dots (4)$$

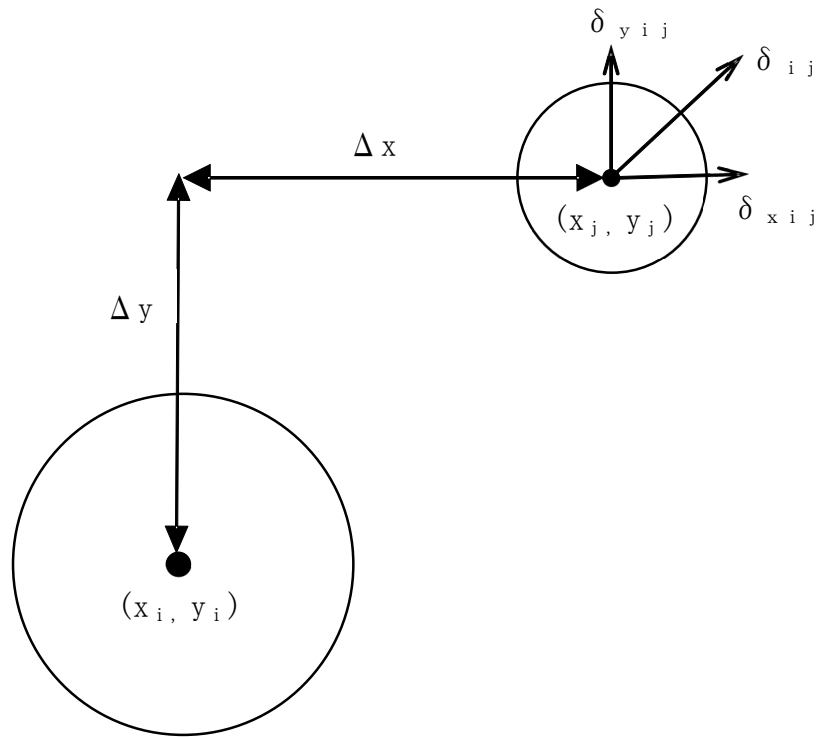
また、粒子 i の周辺粒子の運動による見かけのせん断ひずみは次式で  
 求められる。

$$\gamma_{xyi} = \frac{\sum_{j=1}^n \gamma_{xyij}}{n}$$
$$\gamma_{xyij} = \left( \frac{(x_j - x_i) \delta_{xij}}{|x_j - x_i| \Delta_y} + \frac{(y_j - y_i) \delta_{yij}}{|y_j - y_i| \Delta_x} \right)$$

• • • (5)



(a) 対象とするセル



(b) 粒子  $i$ ,  $j$  の位置関係と相対変位増分  $\delta_{ij}$

第 10 図 粒子  $i$  のひずみ算出におけるマイクロゾーニングと  
計算に用いる粒子  $j$

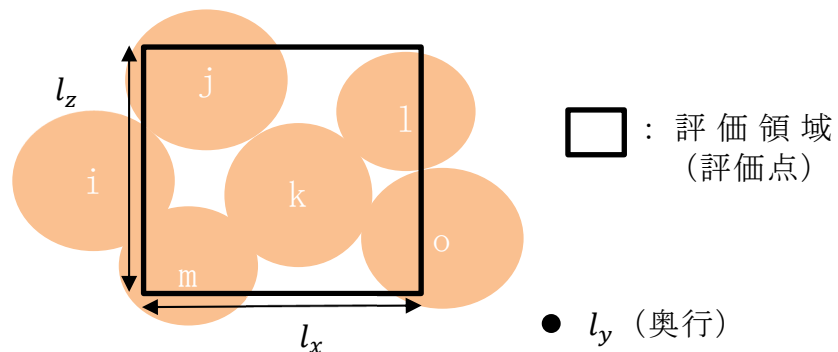


## b. 密度

ベントナイト混合土の密度を計算するため、第 11 図に示すような幅  $l_x$ 、高さ  $l_z$ 、奥行  $l_y$  の評価領域（評価点）を設定する。この領域に一部でも含まれる粒子を対象に体積の総和を求めた。この例では、粒子 i, j, k, l, m, o が対象であり、k は粒子の体積がそのまま、それ以外は黒枠で示す評価領域で切り取られる各体積を計算して合算し、粒子体積の総和  $V_p$  を求める。このようにして評価領域の密度は、粒子密度  $\rho_p$  を用いて次式で求めた。

$$\rho = \frac{\rho_p \times V_p}{l_x \times l_y \times l_z}$$

・・・(6)



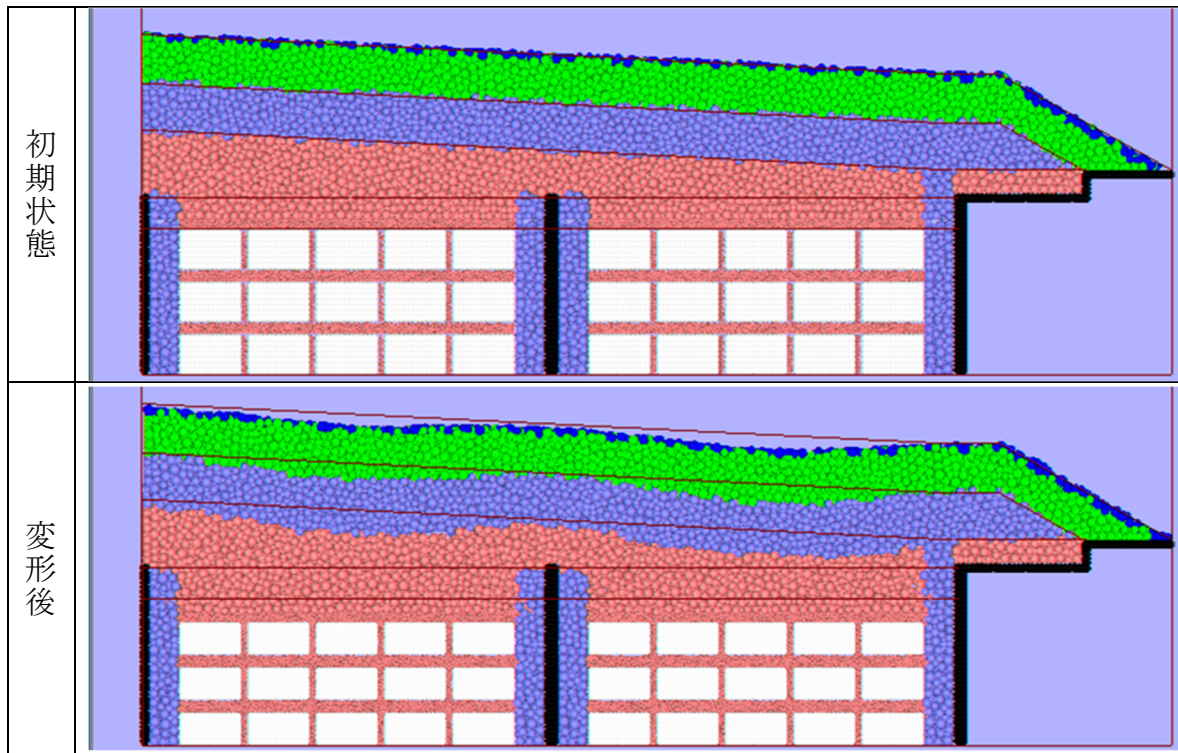
第 11 図 密度の評価領域と考慮する粒子

## 5. 3 解析結果

### (1) 最終覆土の変形

DEM解析における最終覆土の変形図を第 12 図に示す。廃棄物層の沈下に伴い、覆土が波打つように沈下する結果となっている。ベントナイト混合土の変形が、地盤と強制沈下させた廃棄物層の境界で生じているためと考える。

法肩部付近は、地盤と強制沈下が生じる廃棄物層との境界に位置し、相対的な沈下が顕著に現れている。変形形状によって、法肩部付近の覆土は、せん断変形が生じている。変形後のベントナイト混合土の層厚が、極端に小さくなる箇所や層が切断するような箇所は確認されなかった。

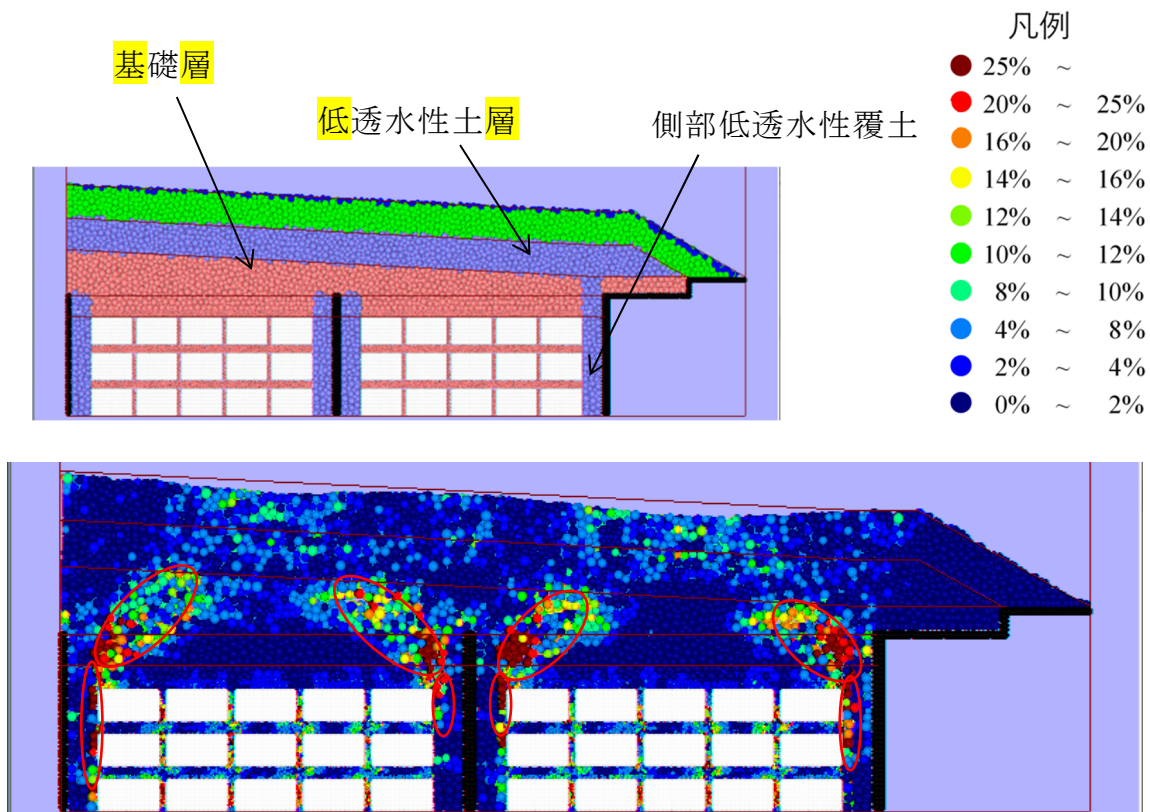


第 12 図 DEM解析による最終覆土の変形図

## (2) せん断ひずみ分布

変形後のせん断ひずみ分布を第 13 図に示す。廃棄物層上部の基礎層でせん断ひずみが大きくなっており、低透水性土層では顕著なせん断ひずみの増加はみられない。側部低透水性覆土では、廃棄物層と接する位置でせん断ひずみが局所的に大きくなるが、これは廃棄物層の強制沈下の影響を大きく受けたためであると考えられる。この位置では、せん断ひずみは局所的に大きくなるものの、部材を貫通するような分布にはなっていないため、側部低透水性覆土の低透水性が確保できなくなるような問題は生じな

いと考えられる。

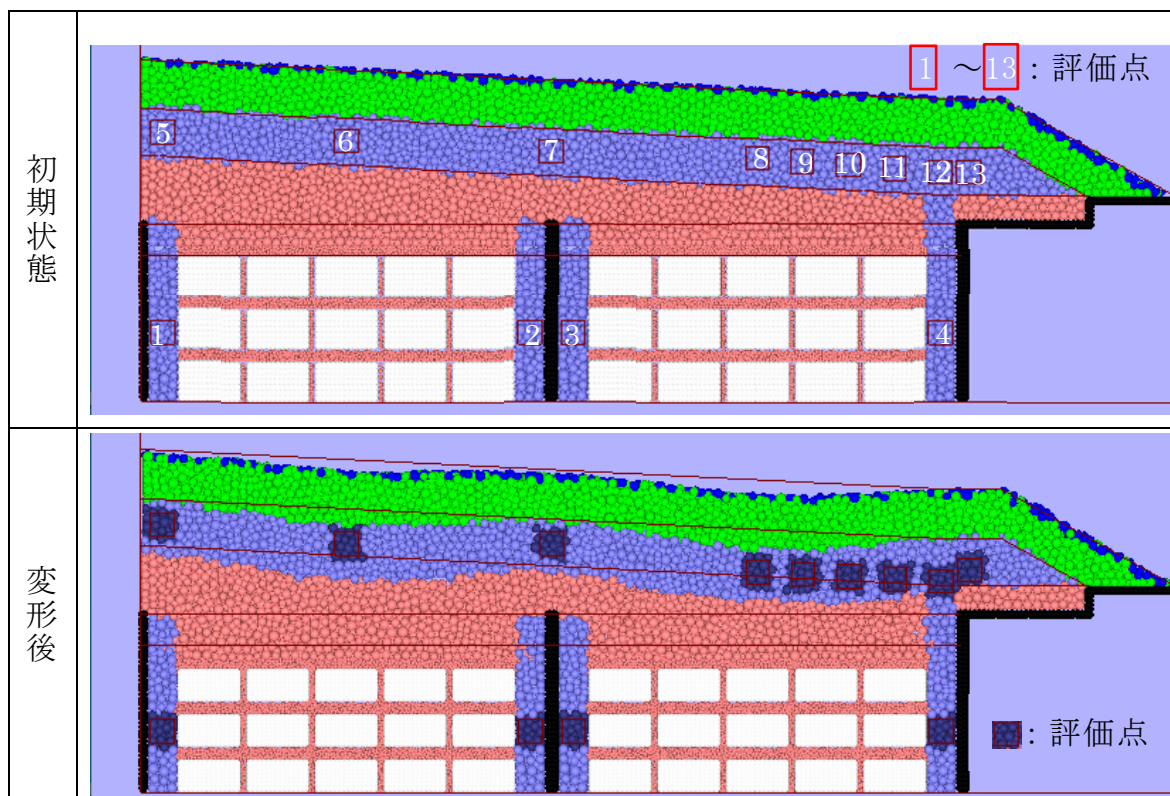


第 13 図 せん断ひずみ分布 (変形後)

### (3) 密度分布

密度分布の評価は、低透水性土層及び側部低透水性覆土を対象とし、第 12 図の変形図及び第 13 図のせん断ひずみ分布を参考にして代表的な評価点を選定した。評価点と密度計算に用いた粒子を濃紺で第 14 図に示す。各評価点の密度変化を第 11 表に示す。

密度変化率から、親杭や底面による拘束を受けやすい評価点 1~4 の側部低透水性覆土では、密度が増加している。一方、法肩部付近のせん断変形が大きくなる評価点 13 のベントナイト混合土では、密度が 3.5%低下している。他の評価点でも、密度の減少はあるものの、法肩部付近と比べると変化は小さい。



第 14 図 密度分布の評価点

第 11 表 評価点の密度変化

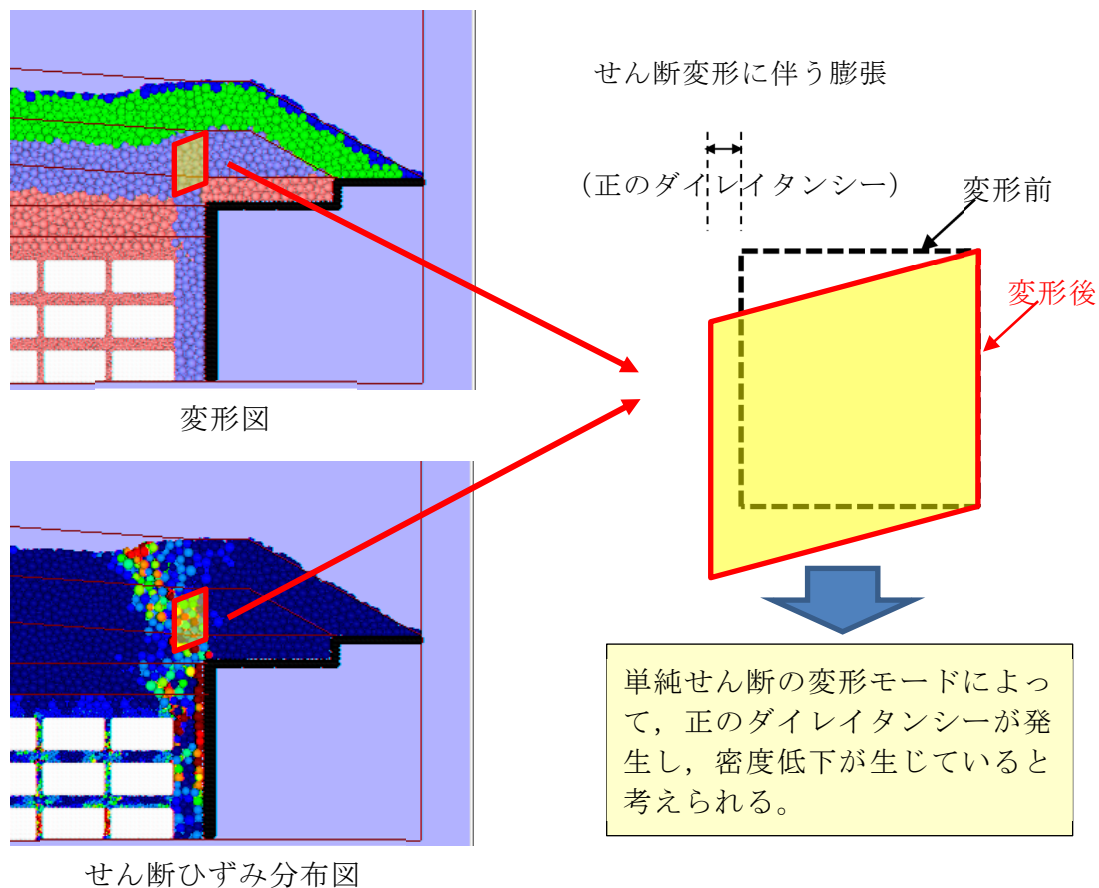
評価点	初期状態の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	変形後の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	密度変化率 (%)	部位
1	1,823	1,881	3.2	側部低透水性覆土
2	1,828	1,875	2.6	
3	1,821	1,875	3.0	
4	1,825	1,877	2.8	
5	1,894	1,880	-0.7	低透水性土層
6	1,899	1,897	-0.1	
7	1,851	1,807	-2.4	
8	1,888	1,885	-0.2	
9	1,884	1,886	0.1	
10	1,926	1,908	-0.9	
11	1,884	1,861	-1.2	
12	1,976	1,948	-1.4	
13	2,007	1,936	-3.5	

(4) ベントナイト混合土の透水係数

透水係数への影響は、有効モンモリロナイト乾燥密度と相関があること

から、陥没前後の密度変化を確認し評価する。DEM解析に用いられている粒子の大きさ、空隙構造や空隙量が実態の土粒子と異なるため、定量的な評価を行うことは困難であるが、定性的な変化を把握するため、密度の低下率を確認することで評価する。

せん断の影響を大きく受けている箇所では、せん断変形に伴う膨張（正のダイレイタンス）によって、密度低下が発生する可能性がある。解析結果から、法肩部付近の相対的な沈下量が大きくなる箇所（第14図の評価点13）で、密度は3.5%程度の低下となっている。法肩部付近では、第15図に示すように、変形図及びせん断ひずみ分布から単純せん断の変形モードとなっており、密度低下が生じていると考えられる。



第15図 法肩部付近のベントナイト混合土の変形モード

室内試験におけるベントナイト混合土の透水係数と有効モンモリロナイト乾燥密度の関係を第 16 図に示す。A 法締固め（締固め度 90%，95%）と C 法締固め（締固め度 90%）の締固めエネルギーが異なるものをプロットしているが、有効モンモリロナイト乾燥密度は、締固めエネルギーを加味した指標であるため、近似式は全データを対象として求めた。

ベントナイト混合土の固相（ベントナイト，砂）のせん断時のダイレイタンスによる変形は均一で生じると仮定し、湿潤密度の変化率と乾燥密度の変化率は同等とした。

第 16 図より、変形前の透水係数を  $1.0 \times 10^{-10}$  m/s とした場合、有効モンモリロナイト乾燥密度は  $0.266 \text{ Mg/m}^3$  である。式 (A) の乾燥密度と有効粘土乾燥密度の関係及び式 (B) の有効粘土乾燥密度と有効モンモリロナイト乾燥密度の関係より、変形前の乾燥密度は、 $1.68 \text{ Mg/m}^3$  となる。変形後に乾燥密度が 3.5% 低下すると、変形後の乾燥密度は  $1.62 \text{ Mg/m}^3$  となる。変形前の有効モンモリロナイト乾燥密度は  $0.266 \text{ Mg/m}^3$  であり、式 (A) 及び式 (B) より、変形後の有効モンモリロナイト乾燥密度は、 $0.245 \text{ Mg/m}^3$  となることから、有効モンモリロナイト乾燥密度は変形後に 8% 低下する。以上から、DEM 解析の結果より算定した乾燥密度の低下量 (3.5%) は、有効モンモリロナイト乾燥密度だと 8.0% 低下に相当する。

乾燥密度と有効粘土乾燥密度の関係は、以下の式から求めた。

$$\rho_b = \frac{\rho_d (100 - R_s)}{100 - \frac{R_s \cdot \rho_d}{\rho_s}} \quad \dots (A)$$

$\rho_b$  : 有効粘土乾燥密度 ( $\text{Mg/m}^3$ )

$\rho_d$  : 乾燥密度 ( $\text{Mg/m}^3$ )

$R_s$  : 骨材混合率 (%) ( $R_s = 85\%$ )

$\rho_s$  : 骨材の土粒子密度 ( $\text{Mg/m}^3$ ) ( $\rho_s = 2.672 \text{ Mg/m}^3$ )

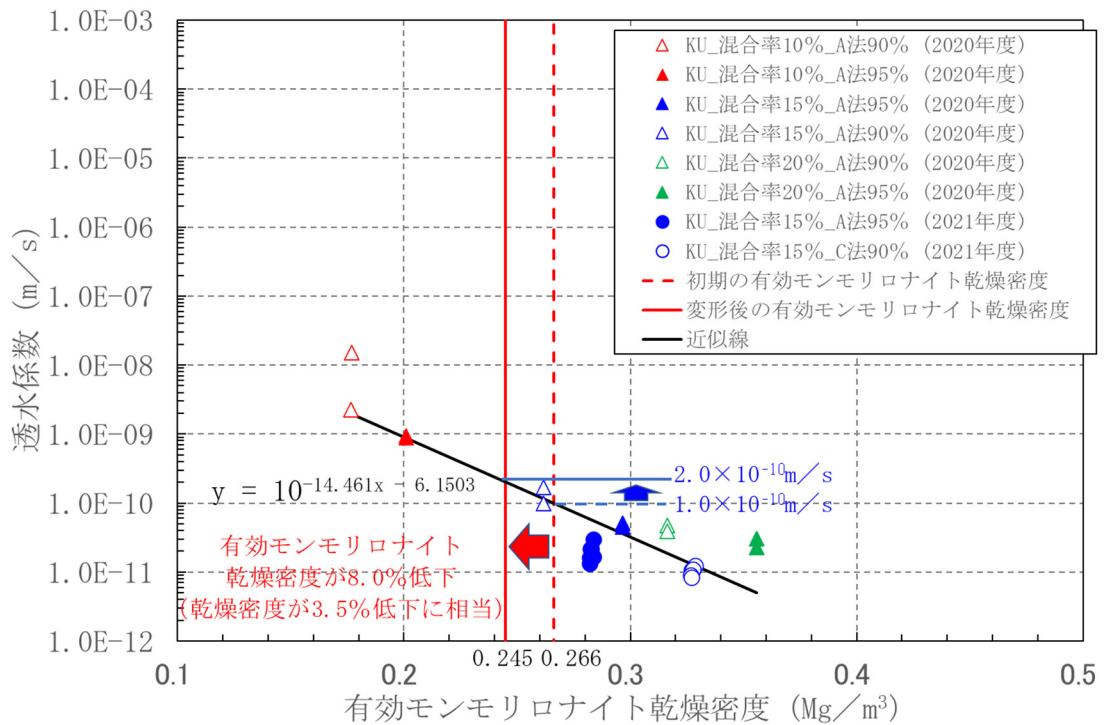
また、有効粘土乾燥密度と有効モンモリロナイト乾燥密度の関係は以下から求めた。

$$\rho_{em} = \frac{C_m \cdot \rho_b}{100 - (100 - C_m) \frac{\rho_b}{\rho_{nm}}} \quad \dots (B)$$

$\rho_{em}$  : 有効モンモリロナイト乾燥密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

$C_m$  : モンモリロナイト含有率 (%) ( $C_m = 44\%$ )

$\rho_{nm}$  : 随伴鉱物の土粒子密度 (Mg/m<sup>3</sup>) ( $\rho_{nm} = 2.81\text{Mg/m}^3$ )

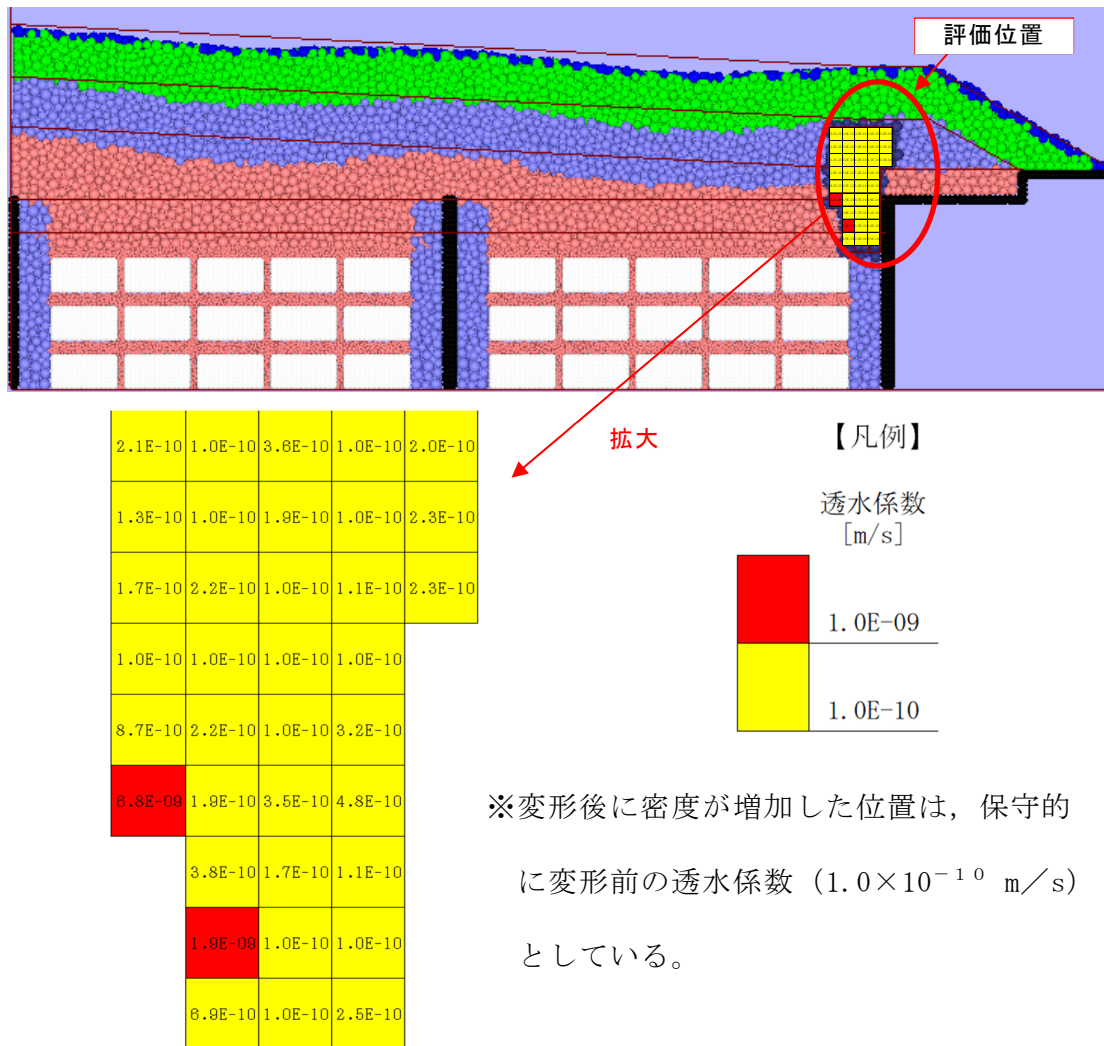


第 16 図 変形後の透水係数の推定

透水係数は、変形前を  $1.0 \times 10^{-10}$  m/s とした場合には、第 16 図より変形後は  $2.0 \times 10^{-10}$  m/s となり、法肩部付近の密度が低下している範囲 (第 14 図及び第 11 表参照) で、局所的には透水係数は 2 倍程度に増加すると推定される。

また、部材厚の中で透水係数が増加する箇所がどのように分布している

のかを分析するため、法肩部付近を評価範囲として細分化し、**透水係数が増加する箇所が部材を貫通していないかを確認した**。細分化した**評価位置における変形後の透水係数**の結果を第 17 図に示す。細分化した評価位置では、変形後の透水係数は概ね  $10^{-10}$  m/s オーダーのままとなっている。



第 17 図 細分化した評価位置における変形後の透水係数の推定

## 6 状態変化の影響評価のまとめ

陥没に起因する影響において、DEM解析によって側部低透水性覆土及び**低透水性土層**の低透水性（透水係数及び厚さ）への影響評価をした結果、陥没事象で力学的変形が生じることによって、局所的な密度変化により透水係



数の増加が生じるが、部材を貫通するような分布ではないこと（第 17 図参照）から、ベントナイト混合土の破断や厚さの大きな変化は発生せず、低透水性に影響は生じないと考える。

したがって、透水係数は、最も可能性が高い状態においては、側部低透水性覆土及び低透水性土層に影響はなく、 $1.0 \times 10^{-10}$  m/s から増加しないものとして設定する。

最も厳しい状態においては、密度低下が大きい法肩部においても透水係数の増加は 2 倍程度であるが、局所的に密度低下が生じる可能性が考えられる低透水性土層で、透水係数の増加が部材を貫通するように生じるものと考え、保守的に  $5.0 \times 10^{-10}$  m/s と設定する。なお、細分化した評価位置における変形後の透水係数（第 17 図参照）を確認しても、 $5.0 \times 10^{-10}$  m/s 以上となる箇所は部材を貫通していない。側部低透水性覆土は、廃棄物と隣接する部分において、ベントナイト混合土の密度低下は生じていないことから、 $1.0 \times 10^{-10}$  m/s から増加しないものとして設定する。陥没現象の影響における透水係数の設定を第 12 表に示す。

第 12 表 陥没現象の影響における透水係数の設定

対象	最も可能性が高い状態	最も厳しい状態
低透水性土層	$1.0 \times 10^{-10}$ (m/s)	$5.0 \times 10^{-10}$ (m/s)
側部低透水性覆土		$1.0 \times 10^{-10}$ (m/s)

## 7 参考文献

- (1) 仲田 久和他 (2018) : 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－トレンチ処分対象廃棄体への砂充填の検討－, J A E A, J A E A－Technology 2017－031
- (2) 桐山 貴俊 (2018) : 粒子方に基づく地盤大変形解析技術の開発と応用
- (3) 若井 明彦他 (2013) : 地すべりを再現するための数値解析手法の現状, 日本地すべり学会誌 50 卷 1 号, p7-17
- (4) 日本道路協会 (2010) : 道路土工 盛土工指針 (平成 22 年度版)

以上