参考資料１－５

補足説明資料４

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

（状態変化の評価）

2024 年 10 月

日本原子力発電株式会社

目　　次

１　はじめに 1
２　地震による廃棄物層の沈下（陥没現象） 3
２．１　現象の整理 3
２．２　状態変化の評価に用いる初期条件 3
２．３　状態変化における陥没量の設定 4
２．４　状態変化における陥没影響評価 6
２．４．１　力学的影響評価の考え方 6
２．４．２　解析に用いる諸条件の設定 7
２．４．３　解析結果 28
２．５　陥没現象による状態変化の影響評価のまとめ 43
３　参考文献 45

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，低透水性覆土及び遮水シートの低透水性への影響の評価を実施する。

「補足説明資料 3　廃棄物埋設地の状態設定（影響事象分析）」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への影響事象分析の結果を第１表に示す。

第１表　低透水性への影響事象分析の結果

項目	影響事象	影響事象分析の結果
熱	－	考慮する影響事象はない。
水理	ベントナイト混合土の乾湿	影響事象として考慮しない。
力学	廃棄物層（金属類及び鉄箱）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。
	ベントナイト混合土の膨潤	影響事象として考慮しない。
	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，低透水性覆土及び遮水シートに変形が生じることで低透水性に影響する可能性がある。
	地すべり	影響事象として考慮しない。
	侵食	影響事象として考慮しない。
化学	モンモリロナイト溶出（ベントナイト混合土と浸出水の反応）	影響事象として考慮しない。
	遮水シートの劣化	「補足説明資料5　線量評価パラメータ」で考慮する。

２　地震による廃棄物層の沈下（陥没現象）

２．１　現象の整理

側部低透水性覆土，低透水性覆土及び遮水シートの低透水性への影響は，力学的影響として側部低透水性覆土及び低透水性覆土の変形，それに伴う密度変化，遮水シートの引張ひずみによって生じる。

側部低透水性覆土及び低透水性覆土の変形は，隣接する廃棄物層の変形に支配されることから，廃棄物層に生じる現象を対象とする。廃棄物層に生じる現象は，地震による廃棄物層の沈下を想定する。廃棄物層の沈下は，廃棄物埋設地に埋設する放射性廃棄物の陥没現象として整理を行った。また，遮水シートの低透水性への影響については，隣接する低透水性覆土の変形によることから，側部低透水性覆土及び低透水性覆土の変形と同様に，廃棄物層に生じる現象を対象とし，放射性廃棄物の陥没現象として整理を行った。

放射性廃棄物の陥没現象は，地震による振動及び応力によって，鉄箱内の充塡砂の見かけ密度が上昇し，放射性廃棄物内に微小な空隙が発生し，放射性廃棄物の形状が変化することで生じると想定される。

２．２　状態変化の評価に用いる初期条件

状態変化の評価は，廃棄物層に起因した物理的・化学的相互作用を踏まえて，側部低透水性覆土，低透水性覆土及び遮水シートの低透水性への力学的影響評価を行う。そのため，放射性廃棄物及び鉄箱に係る初期条件を整理する。

（１）放射性廃棄物

ａ．金属類

配管などの金属廃棄物を切断し，鉄箱に収納する。

ｂ．コンクリート類

原子炉建屋の生体遮へい体であり，鉄筋コンクリートを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する。ただし，コンクリートコアなどを破砕したコンクリートガラは，鉄箱に収納する。

（２）鉄箱

金属類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 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。

２．３　状態変化における陥没量の設定

鉄箱に金属類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，充填砂の見かけ密度が上昇することにより微小な空隙が発生し，放射性廃棄物が陥没する可能性が考えられる。ただし，コンクリート類（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。

放射性廃棄物の陥没は，鉄箱に充填した砂の見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，見かけ密度が上昇し，放射性廃棄物内に微小な空隙が発生すると考える。

見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いを示す指標として，以下で定義される相対密度D_rがある（式（1）参照）。ここで，e_{max}及びe_{min}はＪＩＳ 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。

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \qquad \cdots (1)$$

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。)。振動充填により，鉄箱全体での充填砂の相対密度が 0.9 以上になるように放射性廃棄物を製作する。

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 0.9 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 0.9 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。ただし，陥没量を保守的に設定するため，鉄箱内は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ρ_d及び土粒子の密度ρ_sは，以下の関係式（2）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小密度及び最大密度は第 2 表に示す値を用いた。

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \qquad \cdots (2)$$

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^3）
最大密度 ρ_{dmax}	1,715
最小密度 ρ_{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）

鉄箱当たりの陥没量(m)＝{最大密度の充填量(kg)－相対密度の充填量(kg)}

÷ 最大密度（kg／m^3）　÷ 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で発生する陥没量は，0.02 m と算出される。放射性廃棄物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，廃棄物層の沈下量は放射性廃棄物を３段分で算定し 0.06 m となる。

したがって，廃棄物層に生じる可能性がある沈下量を 0.06 m と設定する。

２．４　状態変化における陥没影響評価

２．４．１　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。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[(1)(2)]。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）を用いたシミュレーション（以下「ＤＥＭ解析」という。）で，廃棄物層の沈下に伴う側部低透水性覆土，低透水性覆土及び遮水シートへの影響評価を行った。なお，ＤＥＭ解析は，斜面崩壊等の大変形を検討した実績[(3)(4)(5)]がある。

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。

２．４．２　解析に用いる諸条件の設定

ＤＥＭ解析における検討断面は，東側埋設トレンチのＮ－Ｓ断面を対象とする。

陥没現象を保守的に評価するために，陥没対象となる放射性廃棄物の数量が多くなるように，東側埋設トレンチに収納される放射性廃棄物が，全て鉄箱である場合を想定し，ＤＥＭ解析上は全て鉄箱を埋設した条件としている。なお，コンクリート類（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，鉄箱のような砂充塡による空隙は生じないものであり，廃棄物層の沈下に対して影響は与えない。

（１）解析モデル

解析モデルの作成に当たっては，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，断面の左側のみをモデル化した。廃棄物埋設地のモデル化範囲を第 1 図に示す。

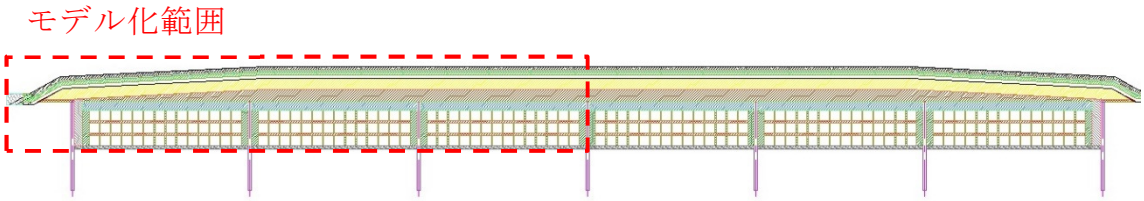
解析における各材料のモデル化は,各材料の試験結果を用いて設定した。解析における各材料のモデル化を第 3 表に示す。

解析モデルの詳細を第 2 図に，ＤＥＭ解析モデルを第 3 図に示す。

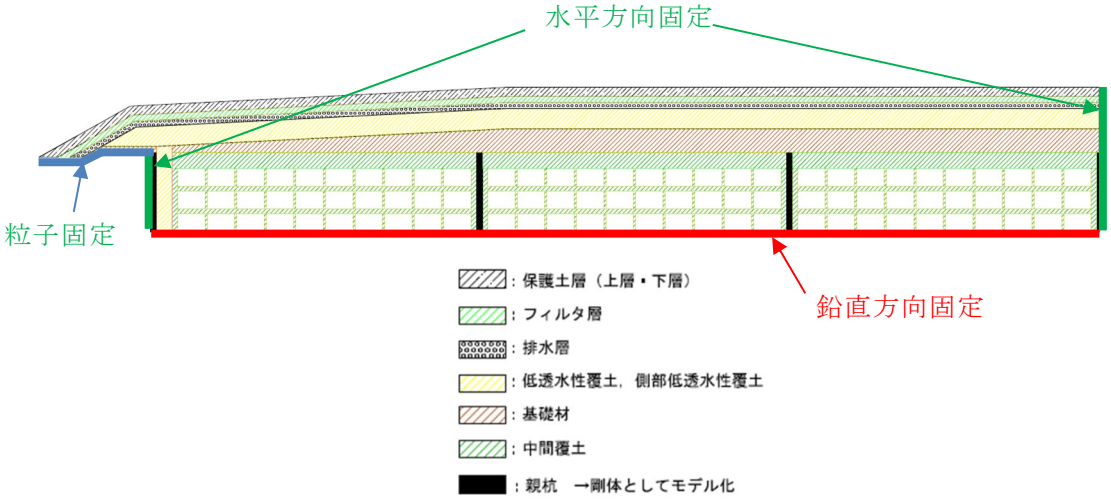
なお，廃棄物層の沈下に伴う周囲の覆土の変形挙動を保守的に評価できるように,モデル境界には,水平方向及び鉛直方向に固定条件を設定した。

第３表　解析における各材料のモデル化

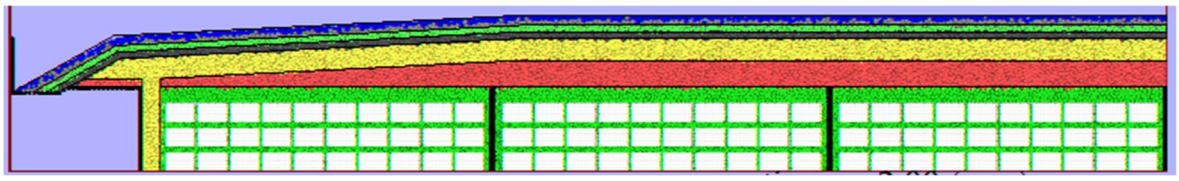
部材	使用材料， モデル化方針	設定根拠
保護土層（上層）， 保護土層（下層）	設定密度は，関東ロームと砂質土（現地発生土）の等価密度を設定その他は久慈川砂（自然含水比）の物性値を使用	保護土層（上層・下層）は，評価対象よりも上部に位置しているため，荷重が再現できれば問題ない
フィルタ層	クラッシャーラン （Ｃ－20）	三軸圧縮試験結果より設定
排水層	単粒度砕石 （Ｓ－30）	三軸圧縮試験結果より設定
遮水シート	モデル化しない	ＤＥＭ解析上は模擬しないため，初期段階で遮水シートの位置に相当する粒子を選定し，その粒子をモニタリングすることで引張ひずみを出力し，引張応力を文献値と比較
低透水性覆土， 側部低透水性覆土	ベントナイト混合土	三軸圧縮試験結果より設定
基礎材	粒度調整砕石 （Ｍ－25）	三軸圧縮試験結果より設定
放射性廃棄物	－	鉄箱内の空隙の圧縮変形を，放射性廃棄物の粒子を強制的に変位させることで再現
中間覆土	久慈川砂 （自然含水比）	三軸圧縮試験結果より設定
親杭	－	変形挙動を生じない材料としてモデル化（剛体としてモデル化）



第１図　廃棄物埋設地のモデル化範囲



第２図　解析モデルの詳細

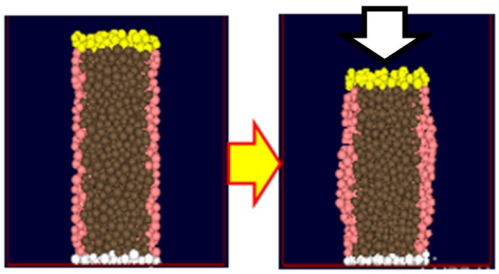


第３図　ＤＥＭ解析モデル

（２）解析用物性値の設定

ＤＥＭ解析に用いるフィルタ層，排水層，低透水性覆土，側部低透水性覆土，基礎材及び中間覆土のパラメータは，三軸圧縮試験を行い，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。ただし，保護土層（上層・下層）は，再現解析を実施せず，粒子密度以外は久慈川砂（自然含水比）の解析用物性値を設定する。

ＤＥＭ解析による三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。



第４図　ＤＥＭ解析による三軸圧縮試験のシミュレーションのイメージ

ａ．保護土層（上層）及び保護土層（下層）

保護土層（上層）及び保護土層（下層）の解析物性値は，以下のとおり設定する。

ＤＥＭ解析で適用する密度（以下「設定密度」という。）は，保護土層（上層）は「関東ローム」，保護土層（下層）は「現地発生土」の等価密度を設定する。なお，その他の物性値は，久慈川砂（自然含水比）の解析物性値を用いる（「ｆ．中間覆土」を参照）。

保護土層の設定密度は，文献値及び試験結果を参考に，第４表に示すように等価密度を設定する。

第４表　保護土層の設定密度

部材	材料	高さ（cm）	湿潤密度（g／cm^3）	等価密度（g／cm^3）
上層	関東ローム	30	1.4285	1.5023※1
下層	現地発生土	15	1.65	

※１：等価密度＝{（関東ロームの高さ 30 cm×関東ロームの湿潤密度 1.4285 g／cm^3）＋（現地発生土の高さ 15 cm×現地発生土の湿潤密度 1.65 g／cm^3）}／保護土層全体の高さ 45 cm＝1.5023 g／cm^3

保護土層の設定する入力パラメータを第５表に示す。保護土層は粒子密度以外の解析物性値は久慈川砂（自然含水比）を用いる。

粒子密度は，下式により設定する。

保護土層の粒子密度＝久慈川砂（自然含水比）の粒子密度×保護土層の密度／久慈川砂（自然含水比）の密度

なお，粘性減衰係数は，式（3）より反発係数が 0.1 になるように設定しているため，保護土層の粒子密度に併せて変更する。

$$\eta_n = \frac{\left|\log_e e\right| \cdot 2\sqrt{mk_n}}{\sqrt{\pi^2 + \left(\log_e e\right)^2}} \quad \cdot\cdot\cdot (3)$$

η_n：粘性減衰係数

e：反発係数

m：粒子質量

k_n：バネ係数

第 5 表　保護土層の入力パラメータ

粒子密度 （kg／m³）	粒子 半径 （m）	バネ係数 （N／m）	粘性減衰 係数 （N／m・s）	粒子間 摩擦角 （°）	転がり 摩擦係数 （－）	引張 限界力 （N）
2,350	0.084～ 0.12	4.00×10^{6}	7.42×10^{3}	20	0	0

b．フィルタ層

クラッシャーラン（Ｃ－20）の設定密度を第 6 表に，フィッティング結果を第 5 図に示す。フィッティングは，三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。なお，小さい拘束圧の試験を用いたほうが初期剛性は低い値でフィッティングされること（保守的）になるため，試験の仕様上可能な最小値（50 kN／m²）を採用する。

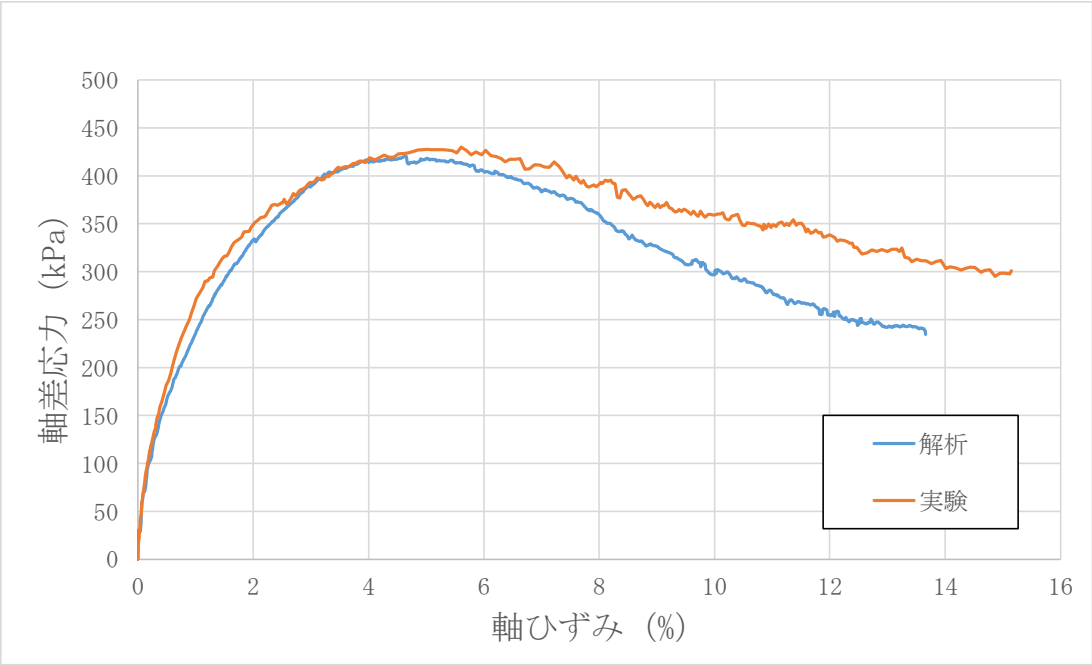
試験結果とＤＥＭ解析によるフィッティング結果では，ピーク強度ま

では両者の整合性はよいが，それ以降のひずみ軟化過程ではＤＥＭ解析によるフィッティングが難しく両者に乖離がみられる。しかしながら，フィッティング結果の方が残留強度は小さくなり，変形挙動としては保守側な設定となることから，本フィッティング結果を採用することとした。

設定する入力パラメータを第７表に示す。

第６表　クラッシャーラン（Ｃ－20）の設定密度

材料	供試体 No.	拘束圧 (kN／m^2)	湿潤密度 (g／cm^3)	平均値 (g／cm^3)	設定密度 (g／cm^3)
クラッシャーラン（Ｃ－20）	1	50	2.091	2.091	2.1
	2	100	2.091		
	3	200	2.092		



第５図　クラッシャーラン（Ｃ－20）のフィッティング結果

第７表　クラッシャーラン（Ｃ－20）の入力パラメータ

粒子密度 (kg／m^3)	粒子 半径 (m)	バネ係数 (N／m)	粘性減衰 係数 (N／m・s)	粒子間 摩擦角 (°)	転がり 摩擦係数 (－)	引張 限界力 (N)
3,250	0.084～ 0.12	3.40×10^6	8.04×10^3	30	0.12	0

ｃ．排水層

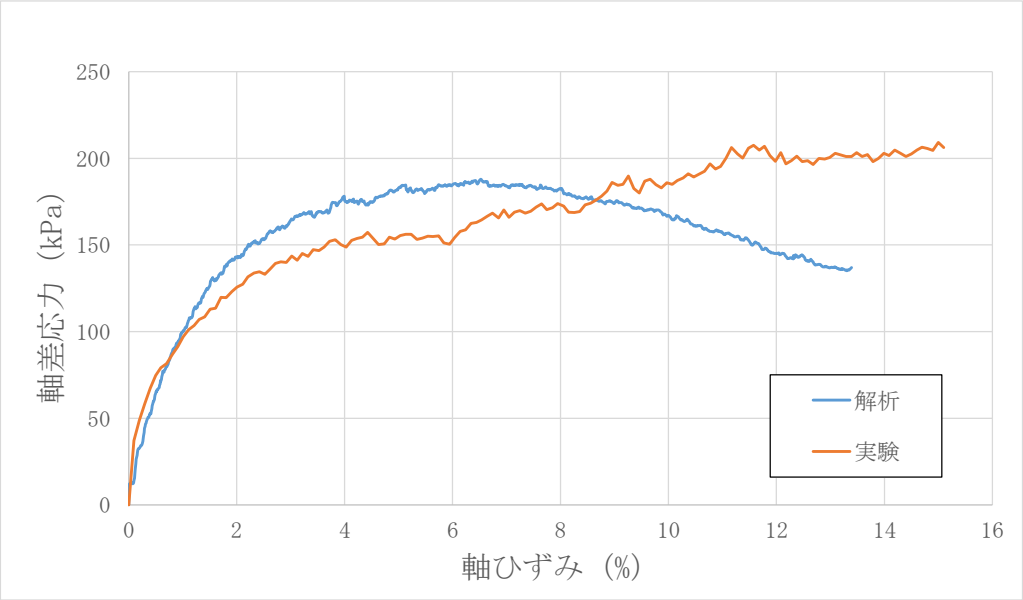
単粒度砕石（Ｓ－30）の設定密度を第８表に，フィッティング結果を第６図に示す。フィッティングは，三軸圧縮試験で得られた応力－ひずみの関係に整合させるようにパラメータを設定した。なお，小さい拘束圧の試験を用いたほうが初期剛性は低い値でフィッティングされること（保守的）になるため，試験の仕様上可能な最小値（50 kN／m^2）を採用する。

試験結果とＤＥＭ解析によるフィッティング結果では，ピーク強度となる軸ひずみが試験結果よりも小さくなり両者に乖離がみられる。しかしながら，フィッティング結果の方が残留強度は小さくなり，変形挙動としては保守側な設定となること及び解析と試験結果のピーク強度を比較すると試験結果の方が大きいため，強度特性としては保守側な設定となることから，本フィッティング結果を採用することとした。

設定する入力パラメータを第９表に示す。

第８表　単粒度砕石（Ｓ－30）の設定密度

材料	供試体 No.	拘束圧 (kN／m^2)	湿潤密度 (g／cm^3)	平均値 (g／cm^3)	設定密度 (g／cm^3)
単粒度砕石（Ｓ－30）	1	50	1.421	1.422	1.4
	2	100	1.423		
	3	200	1.423		



第６図　単粒度砕石（Ｓ－30）のフィッティング結果

第９表　単粒度砕石（Ｓ－30）の入力パラメータ

粒子密度 (kg／m^3)	粒子半径 (m)	バネ係数 (N／m)	粘性減衰係数 (N／m・s)	粒子間摩擦角 (°)	転がり摩擦係数 (－)	引張限界力 (N)
2,100	0.084～0.12	1.00×10^6	3.55×10^3	30	0.01	0

d．低透水性覆土及び側部低透水性覆土

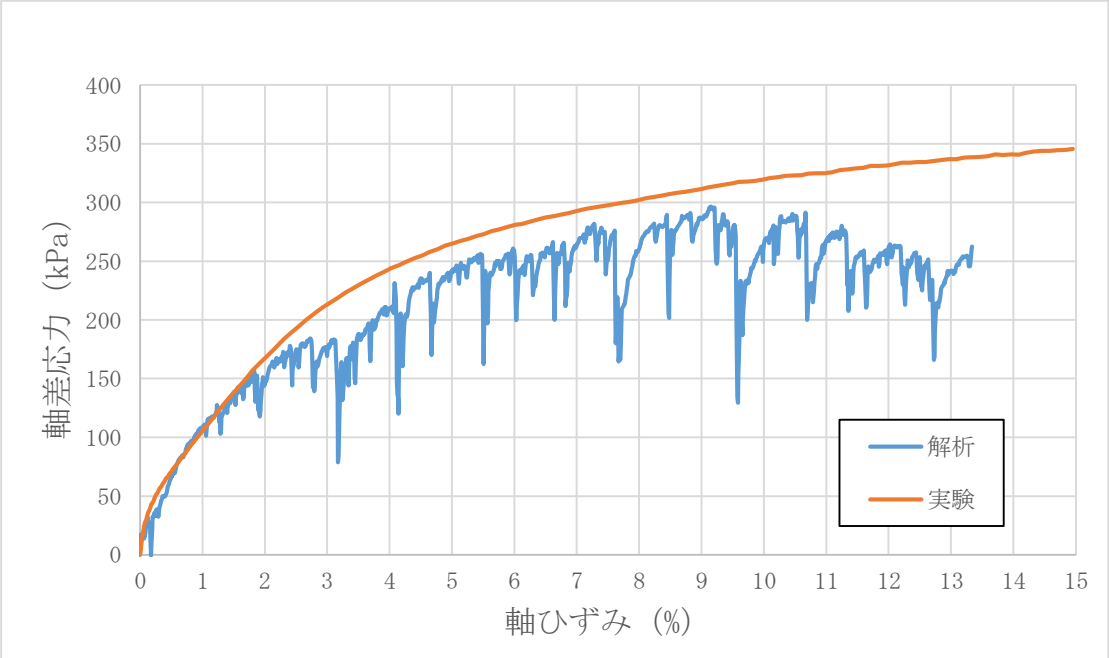
ベントナイト混合土の設定密度を第 10 表に，フィッティング結果を第 7 図に示す。フィッティングは，三軸圧縮試験で得られた応力－ひずみの関係に整合させるようにパラメータを設定した。なお，小さい拘束圧の試験を用いたほうが初期剛性は低い値でフィッティングされること（保守的）になるため，ベントナイト混合土の膨潤圧よりも大きくなるように設定した試験条件の中の最小値（100 kN／m^2）を採用する。

試験結果とＤＥＭ解析によるフィッティング結果では，軸ひずみ 9%までの範囲においては両者の整合性はよいが，それ以降のひずみ軟化過程ではＤＥＭ解析によるフィッティングが難しく両者に乖離がみられる。しかしながら，フィッティング結果の方が残留強度は小さくなり，変形挙動としては安全側の評価となることから，本フィッティング結果を採用することとした。また，ベントナイト混合土のフィッティング結果は，他の材料に比べて軸差応力の振れ幅が大きい。これは，ベントナイト混合土のみ引張限界力を設定しているため，粒子間に働く引張力が引張限界力を超えた際に軸差応力が下がることに起因するものであると考えられる。

設定する入力パラメータを第 11 表に示す。

第 10 表　ベントナイト混合土の設定密度

材料	供試体 No.	拘束圧 (kN／m^2)	湿潤密度 (g／cm^3)	平均値 (g／cm^3)	設定密度 (g／cm^3)
ベントナイト混合土	1	100	2.095	2.114	2.1
	2	200	2.117		
	3	300	2.130		



第 7 図　ベントナイト混合土のフィッティング結果

第 11 表　ベントナイト混合土の入力パラメータ

粒子密度（kg／m³）	粒子半径（m）	バネ係数（N／m）	粘性減衰係数（N／m・s）	粒子間摩擦角（°）	転がり摩擦係数（－）	引張限界力（N）
3,250	0.084～0.12	5.00×10^{6}	9.75×10^{3}	30	0.05	7,700

e．基礎材

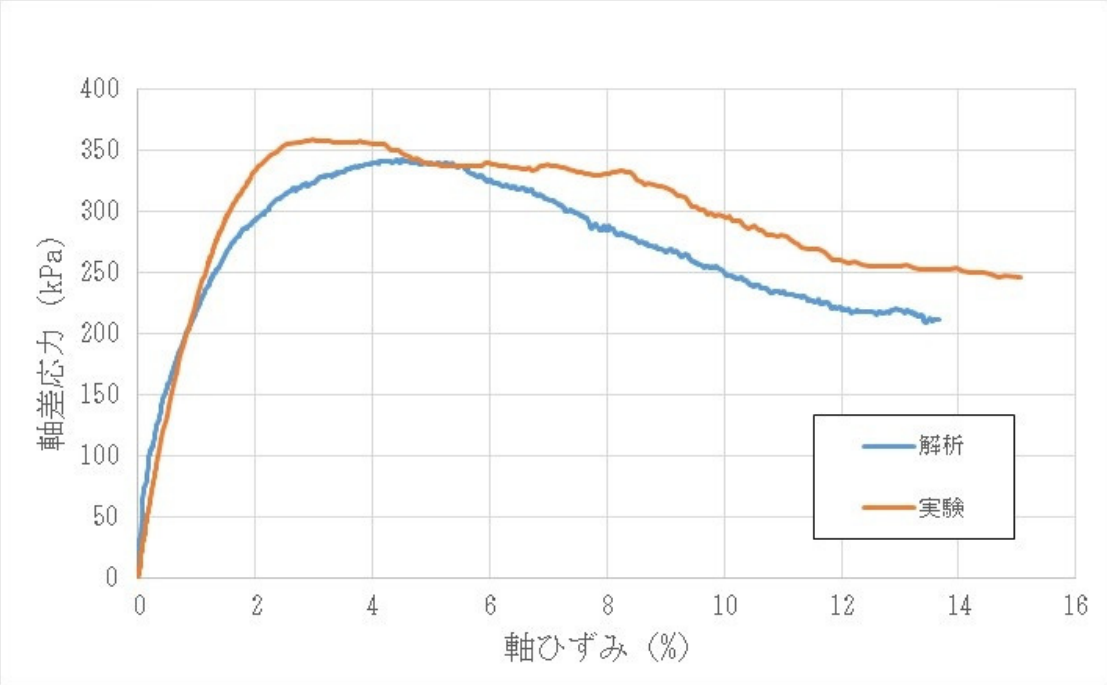
粒度調整砕石（M－25）の設定密度を第 12 表に，フィッティング結果を第 8 図に示す。フィッティングは，三軸圧縮試験で得られた応力－ひずみの関係に整合させるようにパラメータを設定した。なお，小さい拘束圧の試験を用いたほうが初期剛性は低い値でフィッティングされること（保守的）になるため，試験の仕様上可能な最小値（50 kN／m²）を採用する。

試験結果とＤＥＭ解析によるフィッティング結果では，ピーク強度までは両者の整合性はよいが，それ以降のひずみ軟化過程ではＤＥＭ解析によるフィッティングが難しく両者に乖離がみられる。しかしながら，フィッティング結果の方が残留強度は小さくなり，変形挙動としては安全側の評価となることから，本フィッティング結果を採用することとした。

設定する入力パラメータを第 13 表に示す。

第 12 表　粒度調整砕石（Ｍ－25）の設定密度

材料	供試体 No.	拘束圧 (kN／m^2)	湿潤密度 (g／cm^3)	平均値 (g／cm^3)	設定密度 (g／cm^3)
粒度調整砕石（Ｍ－25）	1	50	2.148	2.148	2.1
	2	100	2.148		
	3	200	2.148		



第 8 図　粒度調整砕石（Ｍ－25）のフィッティング結果

第 13 表　粒度調整砕石（Ｍ－25）の入力パラメータ

粒子密度 (kg／m^3)	粒子 半径 (m)	バネ係数 (N／m)	粘性減衰 係数 (N／m・s)	粒子間 摩擦角 (°)	転がり 摩擦係数 (－)	引張 限界力 (N)
3,400	0.084～ 0.12	3.40×10^6	8.23×10^3	30	0.09	0

ｆ．中間覆土

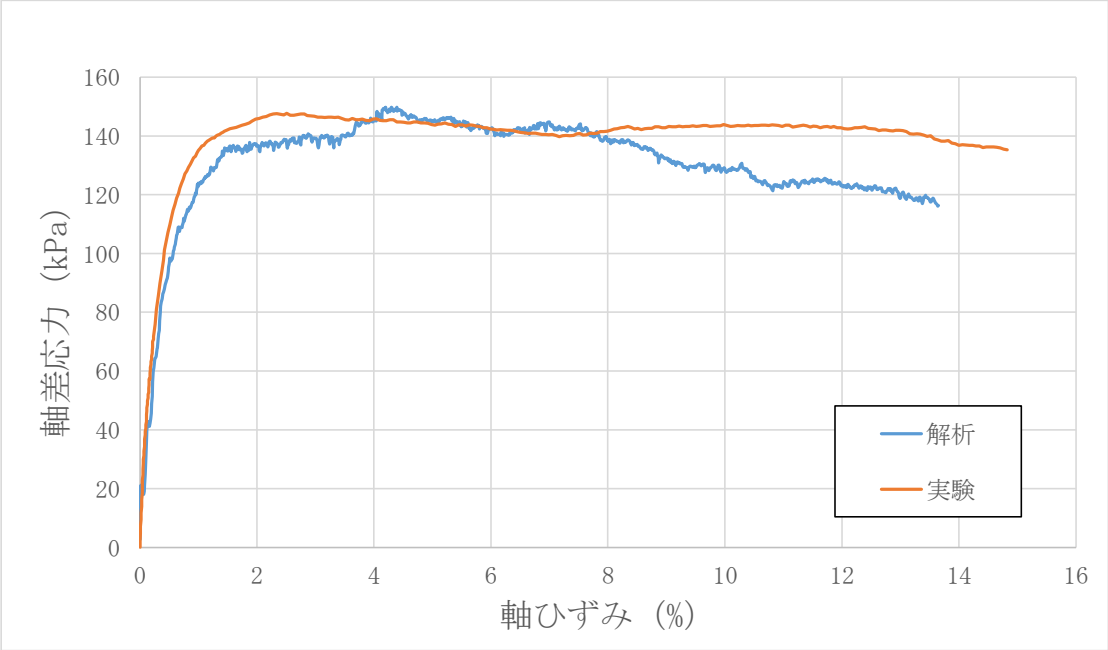
久慈川砂（自然含水比）の設定密度を第 14 表に，フィッティング結果を第 9 図に示す。フィッティングは，三軸圧縮試験で得られた応力－ひずみの関係に整合させるようにパラメータを設定した。なお，小さい拘束圧の試験を用いたほうが初期剛性は低い値でフィッティングされること（保守的）になるため，試験の仕様上可能な最小値（50 kN／m^2）を採用する。

試験結果とＤＥＭ解析によるフィッティング結果では，ピーク強度までは両者の整合性はよいが，それ以降のひずみ軟化過程ではＤＥＭ解析によるフィッティングが難しく両者に乖離がみられる。しかしながら，フィッティング結果の方が残留強度は小さくなり，変形挙動としては安全側の評価となることから，本フィッティング結果を採用することとした。

設定する入力パラメータを第 15 表に示す。

第 14 表　久慈川砂（自然含水比）の設定密度

材料	供試体 No.	拘束圧 (kN／m^2)	湿潤密度 (g／cm^3)	平均値 (g／cm^3)	設定密度 (g／cm^3)
久慈川砂（自然含水比）	1	50	1.598	1.598	1.6
	2	100	1.598		
	3	200	1.598		



第 9 図　久慈川砂（自然含水比）のフィッティング結果

第 15 表　久慈川砂（自然含水比）の入力パラメータ

粒子密度 (kg／m^3)	粒子半径 (m)	バネ係数 (N／m)	粘性減衰係数 (N／m・s)	粒子間摩擦角 (°)	転がり摩擦係数 (－)	引張限界力 (N)
2,500	0.084～0.12	4.00×10^6	7.65×10^3	20	0	0

なお，放射性廃棄物間の中間覆土（以下「中間覆土（廃棄物間）」という。）については，解析上，放射性廃棄物間に粒子が入り込めるように，粒子半径を小さくする。それに伴い，バネ係数及び粘性減衰係数についても，第 15 表で設定した入力パラメータから変更する。

変更後の設定する入力パラメータを第 16 表に示す。

第 16 表　中間覆土（廃棄物間）の入力パラメータ

粒子密度 (kg／m^3)	粒子 半径 (m)	バネ係数 (N／m)	粘性減衰 係数 (N／m・s)	粒子間 摩擦角 (°)	転がり摩 擦係数 (－)	引張限 界力 (N)
2,500	0.034～ 0.049	1.63×10^6	1.28×10^3	20	0	0

g．各部材の解析用物性値

a ～ f で設定した各部材の解析用物性値を第 17 表に示す。

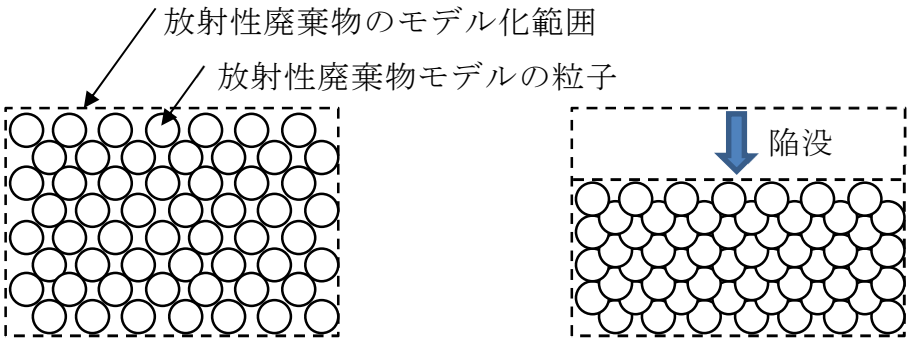
第 17 表　各部材の解析用物性値

部材	粒子密度 (kg／m^3)	粒子半径 (m)	バネ係数 (N／m)	粘性減衰 係数 (N／m・s)	粒子間 摩擦角 (°)	転がり 摩擦係数 (－)	引張 限界力 (N)
保護土層	2,350	0.084～ 0.12	4.00×10^6	7.42×10^3	20	0	0
フィルタ層	3,250	0.084～ 0.12	3.40×10^6	8.04×10^3	30	0.12	0
排水層	2,100	0.084～ 0.12	1.00×10^6	3.55×10^3	30	0.01	0
低透水性覆土, 側部低透水性 覆土	3,250	0.084～ 0.12	5.00×10^6	9.75×10^3	30	0.05	7,700
基礎材	3,400	0.084～ 0.12	3.40×10^6	8.23×10^3	30	0.09	0
中間覆土	2,500	0.084～ 0.12	4.00×10^6	7.65×10^3	20	0	0
中間覆土 （廃棄物間）	2,500	0.034～ 0.049	1.63×10^6	1.28×10^3	20	0	0

（３）強制変位量

鉄箱が変形することによって発生する陥没量は，鉄箱を考慮しない放射性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。放射性廃棄物の陥没のモデル化のイメージを第 10 図に示す。

強制変位量は，「２．３　状態変化における陥没量の設定」のとおり，廃棄物層に生じる可能性がある沈下量の 0.06 m と設定した。



第 10 図　放射性廃棄物の陥没のモデル化のイメージ

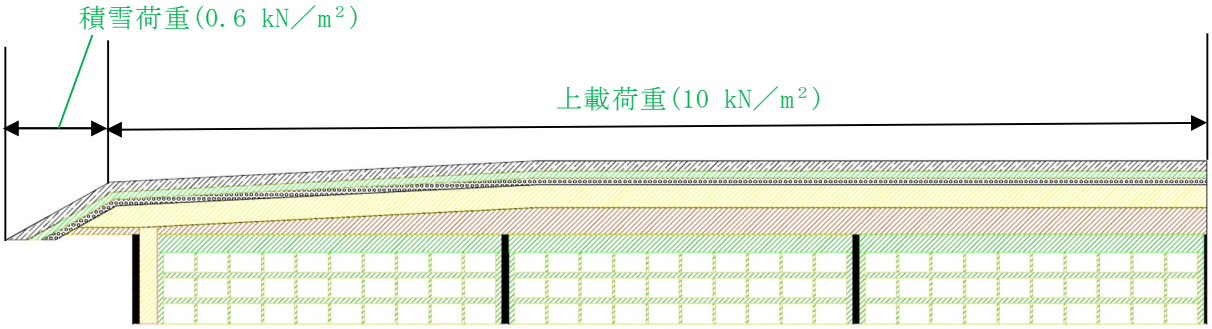
（４）解析における上載荷重

上載荷重は，車両等による荷重を考慮する。上載荷重の値は，日本道路協会（2010）[6] より，載荷重の 10 kN／m^2 を考慮する。また，上載荷重は，覆土の 5%勾配の法面部及び覆土の平坦部に作用させ，覆土の 1:1.8 勾配の法面には，車両等が通行すると考えにくいことから，上載荷重を作用させない。

積雪荷重は，「建築基準法施行令第 86 条」及び「茨城県建築基準法等施工細則第 16 条の 4」に従って設定する。積雪の厚さ 1 cm 当たりの荷重を 20 N／m^2／cm として，積雪量は 30 cm としていることから，積雪荷重は，0.6 kN／m^2 とする。ただし，積雪時には，車両等は通行しない，又は除雪をしてから車両等が通行すると想定し，積雪荷重と上載荷重を重畳させな

いこととする。両者の荷重を比較すると，常時の積雪荷重(0.6 kN／m^2)よりも上載荷重(10 kN／m^2)が大きいことから，上載荷重を作用させる範囲では，荷重値が大きい上載荷重のみを考慮し，積雪荷重は考慮しない。したがって，積雪荷重を考慮する範囲は，覆土の 1:1.8 勾配となる。

以上より，解析における上載荷重は第 11 図のとおりとする。



第 11 図　解析における上載荷重の概要図

（５）解析結果の求め方

本解析では,「モデル全体の変形図」,「モデル全体のせん断ひずみコンター図」,「低透水性覆土及び側部低透水性覆土の密度」及び「遮水シートの引張ひずみ」を用いて解析結果を示す。

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」は以下のとおり求めることとした。

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 12 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。また，第 12 図 (b) に示すように，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（赤色）に存在する n 個の粒子 j の相対変位増分 δ_{ij} を考える。δ_{xij} 及び δ_{yij} は，δ_{ij} の x 及び y 成分である。これによれ

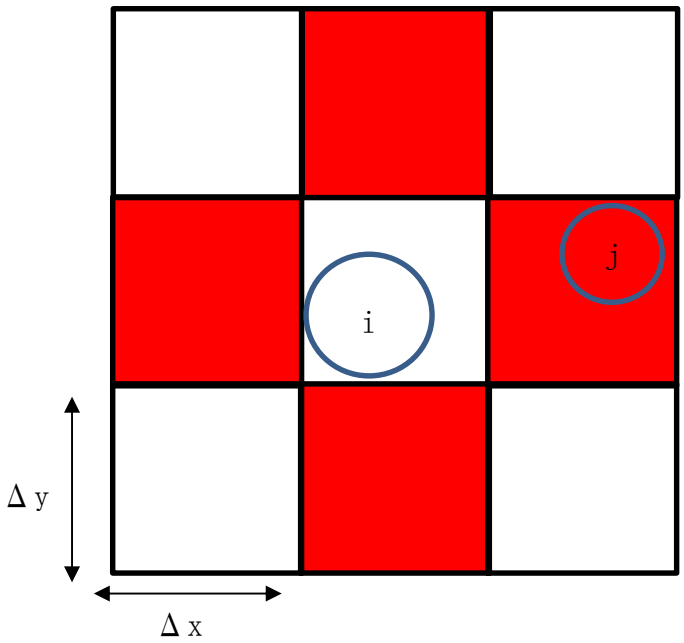
ば，粒子ｉの周辺粒子の運動による見かけの直ひずみは式（4），式（5）で求められる。

$$\varepsilon_{xi} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \varepsilon_{xij}}{n} \qquad \varepsilon_{xij} = \frac{(x_j - x_i)}{|x_j - x_i|} \frac{\delta_{xij}}{\Delta_x} \quad \cdot\cdot\cdot (4)$$

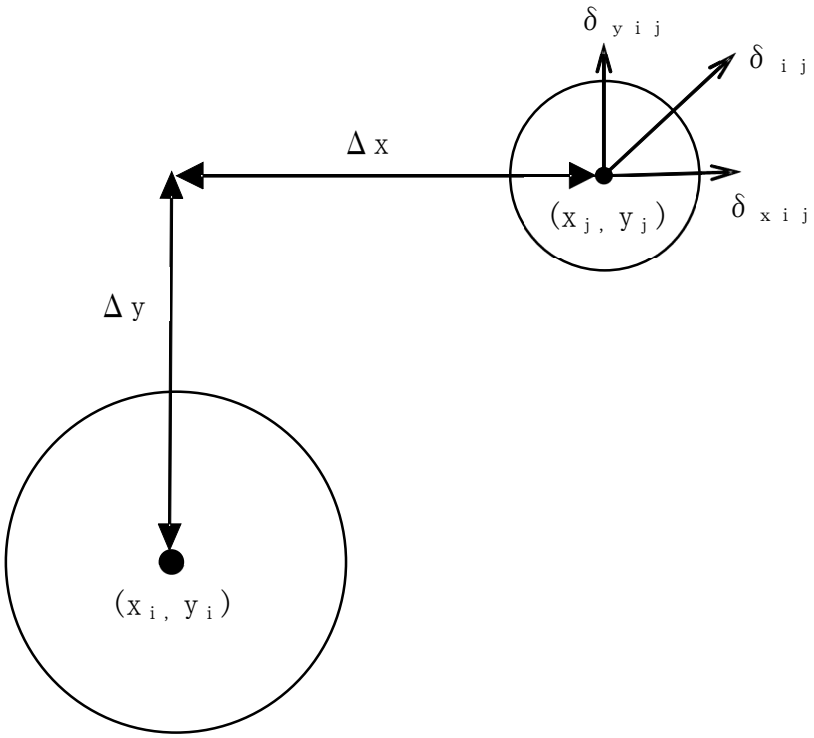
$$\varepsilon_{yi} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \varepsilon_{yij}}{n} \qquad \varepsilon_{yij} = \frac{(y_j - y_i)}{|y_j - y_i|} \frac{\delta_{yij}}{\Delta_y} \quad \cdot\cdot\cdot (5)$$

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式（6）で求められる。

$$\gamma_{xyi} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \gamma_{xyij}}{n} \qquad \gamma_{xyij} = \left(\frac{(x_j - x_i)}{|x_j - x_i|} \frac{\delta_{xij}}{\Delta_y} + \frac{(y_j - y_i)}{|y_j - y_i|} \frac{\delta_{yij}}{\Delta_x} \right) \quad \cdot\cdot\cdot (6)$$



(a) 対象とするセル



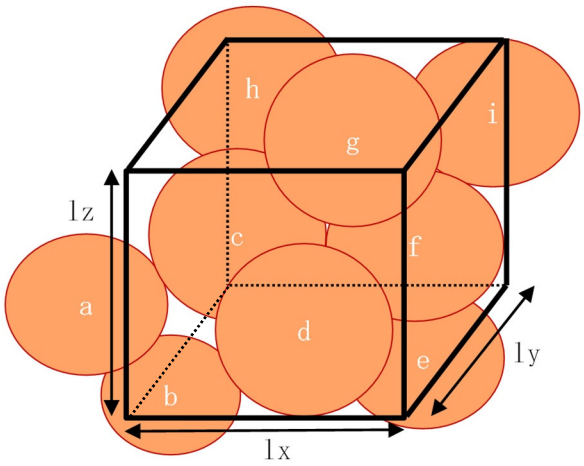
(b) 粒子 i， j の位置関係と相対変位増分 δ_{ij}

第 12 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 13 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を近似的に求めて，その総和を算出する。この例では，粒子 a, b, c, d, e, f, g, h, i が対象であり，粒子 c, d, f, g は粒子全体の体積，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ρ_pを用いて式（7）で求めた。

$$\rho = \frac{\rho_p \times V_p}{l_x \times l_y \times l_z} \qquad \cdot\cdot\cdot(7)$$



第 13 図　密度の評価領域と考慮する粒子

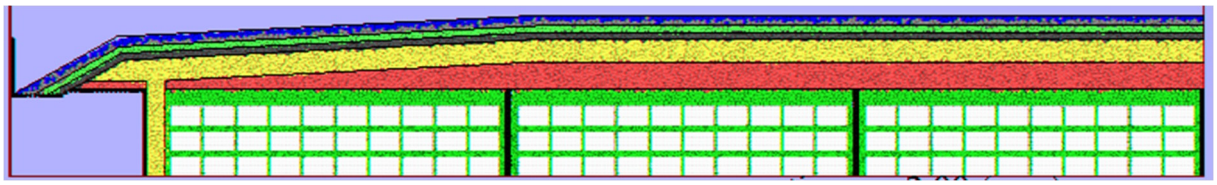
２．４．３　解析結果

（１）最終覆土の変形

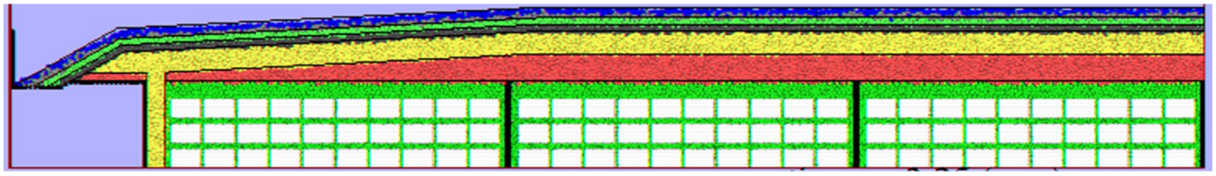
ＤＥＭ解析における最終覆土の変形図を第 14 図に示す。廃棄物層の沈下に伴う覆土の変形はほぼ生じない結果となった。また，廃棄物層の沈下により，低透水性覆土及び側部低透水性覆土が不連続になるような挙動はみられなかった。

次に，より詳細な変形挙動を評価するために，変形前後の地表面の粒子座標に着目し，廃棄物層の沈下による地表面形状への影響を確認した。水平方向座標の代表値ごとの沈下量図を第 15 図に示す。

側部低透水性覆土及び親杭周辺で 5 cm 以下の不等沈下が確認された。また，側部低透水性覆土及び親杭上部以外での沈下量は，約 6 cm であり，廃棄物層の沈下量 6 cm とおおむね同等であり，地表面は廃棄物層の沈下に追従して沈下していると考えられる。

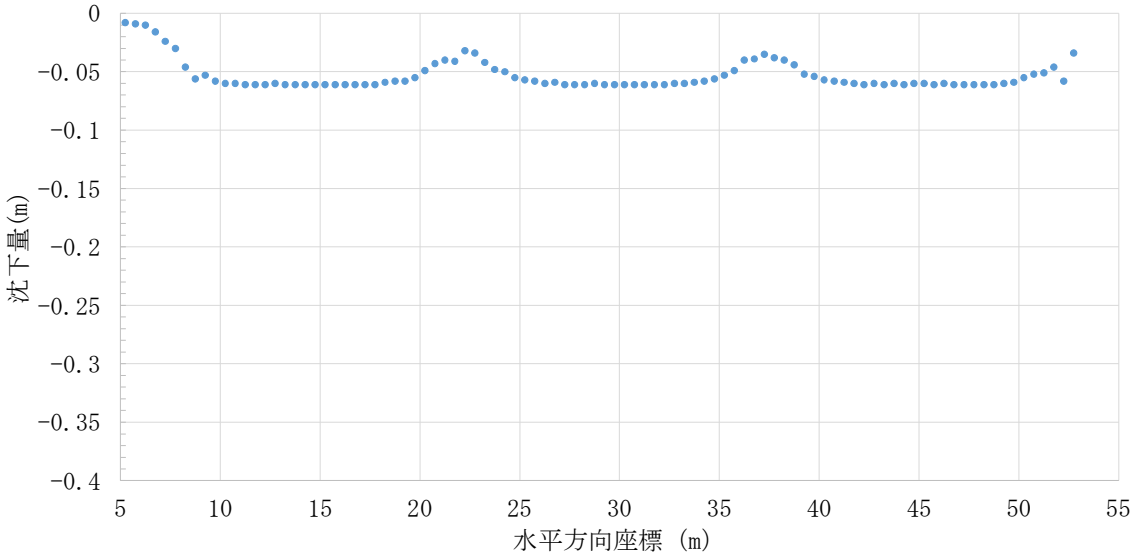


（１）初期状態



（２）変形後

第 14 図　モデル全体の変形図



第 15 図　水平方向座標の代表値ごとの沈下量図

（２）せん断ひずみ分布

変形後のせん断ひずみ分布を第 16 図に示す。

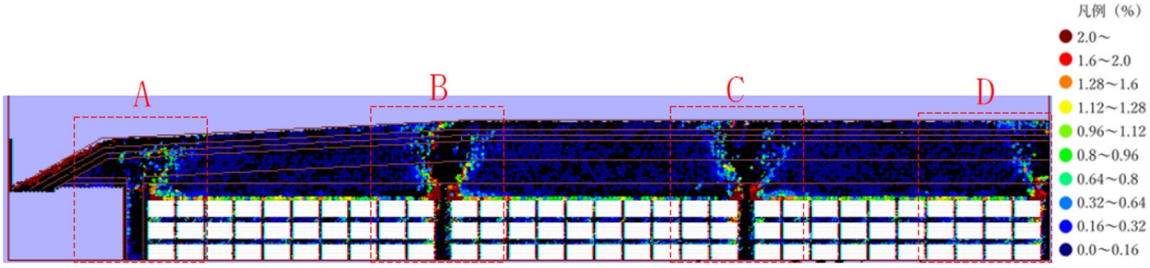
第 16 図より，親杭付近及び側部低透水性覆土上部から斜め上方向に地表面までせん断ひずみが大きくなるせん断帯が確認できる。これは，廃棄

物層の沈下に伴う不等沈下によるものであるためと考えられる。

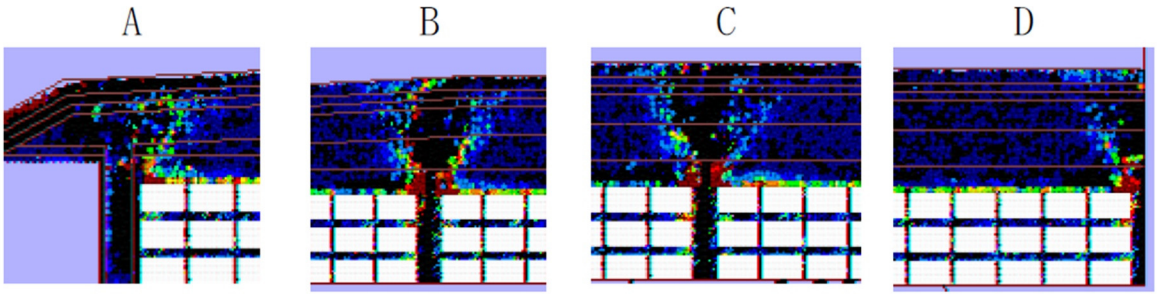
低透水性覆土及び側部低透水性覆土においてもせん断ひずみが発生する箇所は局所的であり，その値はおおむね 2%以下であることがわかる。

ここで，第 17 図に示すベントナイト混合土の三軸圧縮試験結果と比較すると，せん断ひずみと軸ひずみが同等であると仮定した場合，三軸圧縮試験におけるピーク強度時のひずみ 15%に対して，発生しているひずみは 2%であり，せん断破壊による大きな密度低下は生じないと考えられる。

したがって，親杭付近及び側部低透水性覆土上部から斜め上方向にせん断ひずみ帯は発生するものの，せん断破壊による大きな密度低下は生じないと考えられる。

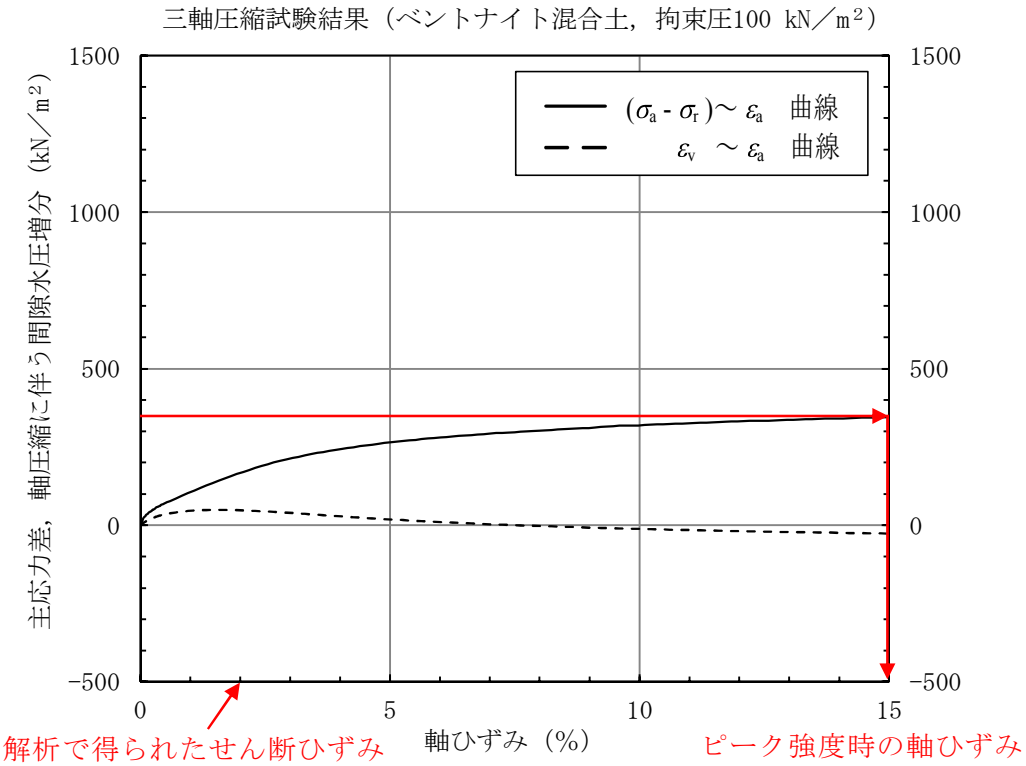


せん断ひずみ　0～2%



せん断ひずみ　0～2%（拡大図）

第 16 図　変形後のせん断ひずみ分布



第 17 図　ベントナイト混合土の三軸圧縮試験結果との比較

（３）密度分布

「（２）せん断ひずみ分布」にて，せん断破壊による低透水性覆土及び側部低透水性覆土の密度低下は生じないと考えられるが，より局所的な評価をするために，密度低下率について次のとおり評価を実施した。

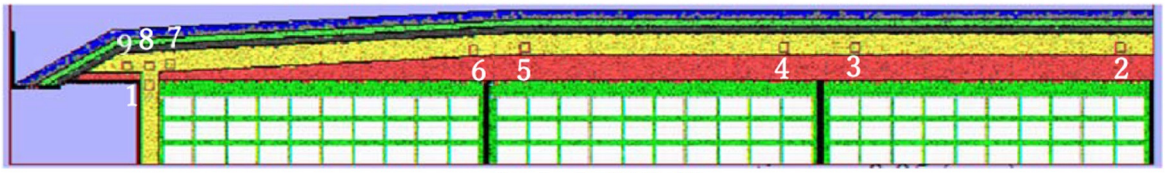
密度の評価は，低透水性覆土及び側部低透水性覆土を対象とし，代表的な評価点を選定して評価した。代表的な評価点は，第 16 図のせん断ひずみ分布を参考にし，低透水性覆土にせん断帯が発生している親杭上部及び側部低透水性覆土の両脇を対象とした。

以上より，評価点は第 18 図に示す 9 点を選定した。

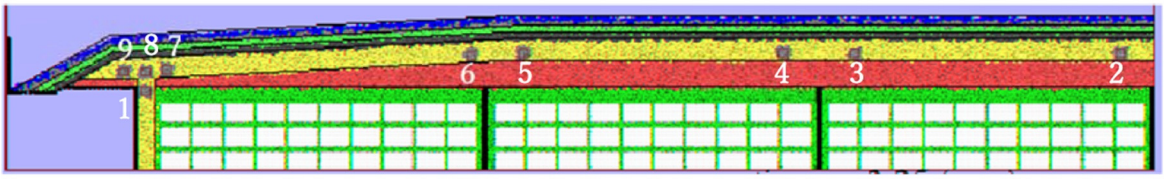
第 18 図（１）の初期状態は，解析モデル内に評価対象範囲を赤枠で示しており，第 18 図（２）の変形後は，解析モデル内に評価対象範囲を赤枠で，評価対象粒子をグレー色にして表示している。第 18 図（３），（４）は，第 16 図に評価点位置を追記したものである。

各評価点の初期状態と変形後の密度を第 18 表に示す。初期状態と変形後の密度の変化率に着目すると，親杭による拘束及び廃棄物層の沈下を受けて，せん断に近い変形が生じている評価点 2，4～7，9 の低透水性覆土において密度が低下している。その中でも親杭付近の評価点 4 では，密度が 2.1％低下している。

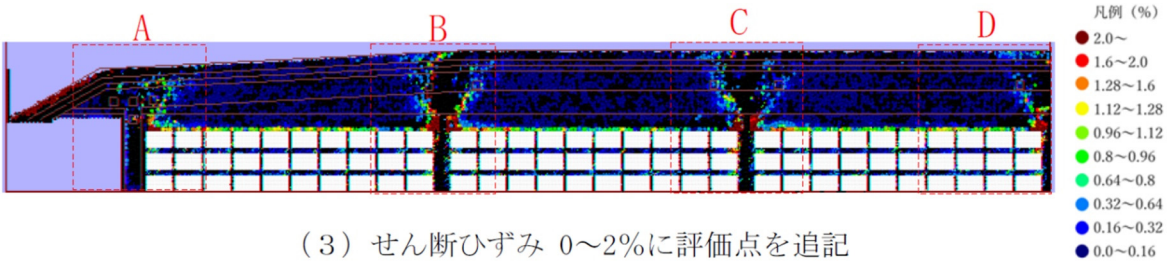
なお，低透水性覆土と側部低透水性覆土の隅角部に位置する評価点 8，側部低透水性覆土に位置する評価点 1 については，密度は増加しており，その数値はそれぞれ，0.3％，0.6％であり，圧縮している結果にはなっているが，ほとんど密度変化は生じていないと判断できる。



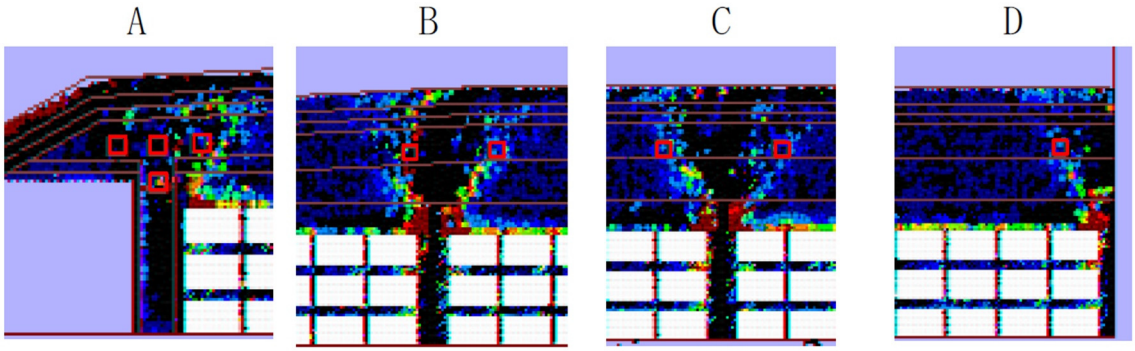
（１）初期状態



（２）変形後



（３）せん断ひずみ 0～2%に評価点を追記



（４）せん断ひずみ 0～2%拡大図に評価点を追記

第 18 図　密度分布の評価点

第 18 表　評価点の密度変化

評価点	初期状態の密度（kg／m^3）	変形後の密度（kg／m^3）	密度の差分（kg／m^3）	密度の変化率（%）	変形後の密度の増減
1	1,924	1,936	12	0.6	増
2	2,027	2,016	−11	−0.5	減
3	2,041	2,041	0	0.0	―
4	2,040	1,997	−43	−2.1	減
5	2,011	1,988	−23	−1.1	減
6	2,007	1,974	−33	−1.6	減
7	2,022	2,010	−12	−0.6	減
8	2,021	2,027	6	0.3	増
9	1,962	1,960	−2	−0.1	減

（４）密度低下によるベントナイト混合土の低透水性への影響

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（正のダイレイタンシー)により,密度低下が発生する可能性があることから，ベントナイト混合土の透水試験結果を参考にして，密度低下がベントナイト混合土の透水係数に与える影響について評価した。

第 18 図及び第 18 表で示した密度の評価点で，沈下前後の密度の低下率が大きくなった評価点 4 に着目すると，密度低下率は 2.1%となった。当該地点の変形モードは，第 19 図に示すように，単純せん断の変形モードとなっていると推測できるため，当該評価点は正のダイレイタンシーが発生したために密度低下が生じたと考えられる。

室内試験で取得した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より,2.1%に対してバラツキを考慮して小数点第一位を切り上げた 3.0%の密度低下が生じた場合の透水係数に与える影響を評価する。なお，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シー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。乾燥密度と有効モンモリロナイト乾燥密度の関係は，式（8），式（9）より求めた。

$$\rho_{em} = \frac{C_m \cdot \rho_b}{100 - (100 - C_m)\dfrac{\rho_b}{\rho_{nm}}} \qquad \cdot\cdot\cdot(8)$$

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \dfrac{R_s \cdot \rho_d}{\rho_{nm}}} \qquad \cdot\cdot\cdot(9)$$

ρ_{em}：有効モンモリロナイト乾燥密度（Mg／m^3）

Cm ：モンモリロナイト含有率（%）（Cm＝52%）

ρ_{nm}：随伴鉱物の土粒子密度（Mg／m^3）（ρ_{nm}＝2.81 Mg／m^3）

ρ_b ：有効粘土乾燥密度（Mg／m^3）

ρ_d：乾燥密度（Mg／m^3）

Rs ：骨材混合率（%）（Rs＝85%）

ρ_s：骨材の土粒子密度（Mg／m^3）（ρs＝2.677 Mg／m^3）

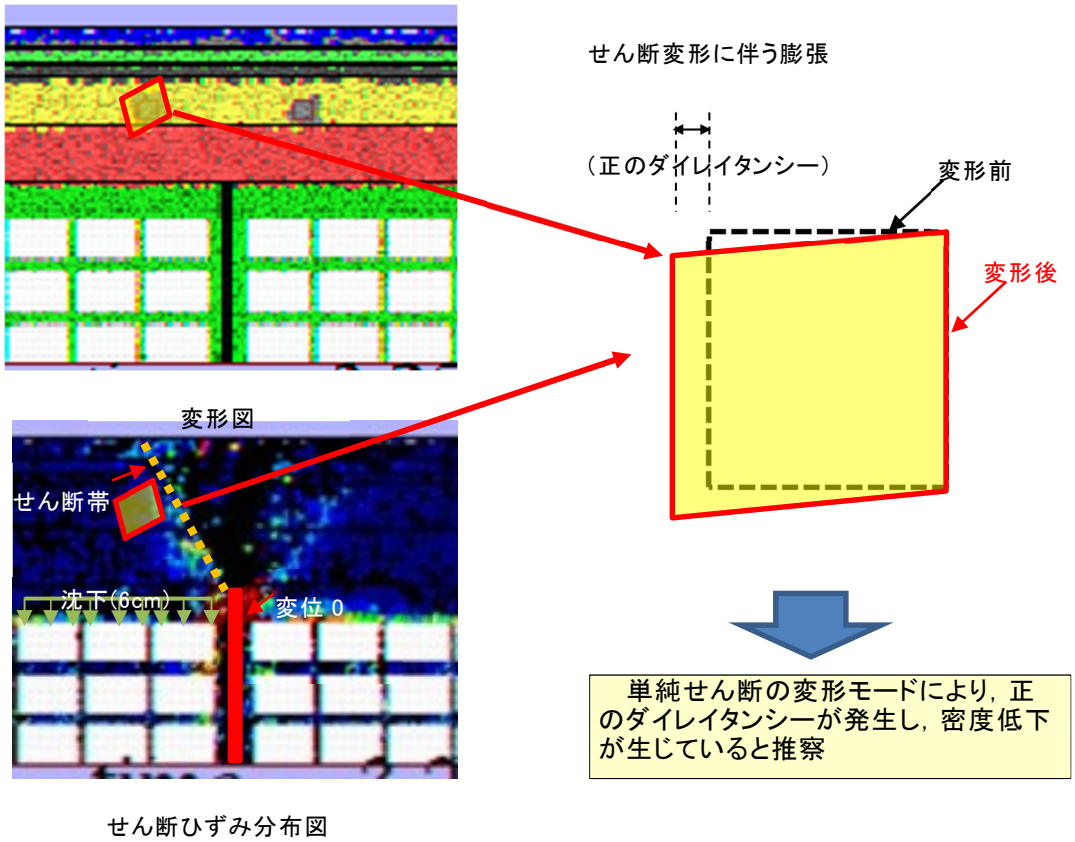
せん断変形を受ける前の初期の有効モンモリロナイト乾燥密度は,式(10)より，目標透水係数 1.0×10^{-10} m／s に相当する値として 0.252 g／cm^3 とした。

$$y=-4.5383x-8.8569 \quad \cdots (10)$$

x：有効モンモリロナイト乾燥密度（g／cm^3）

y：対数透水係数（m／s）

以上より算出した，変形前後の有効モンモリロナイト乾燥密度及び透水係数の計算結果を第 19 表に示す。乾燥密度が 3.0%低下した場合は，有効モンモリロナイト乾燥密度は 6.1%低下し，変形後の透水係数は，1.2×10^{-10} m／s に増加する。また，密度低下によるベントナイト混合土の透水係数の変化を第 20 図に示す。

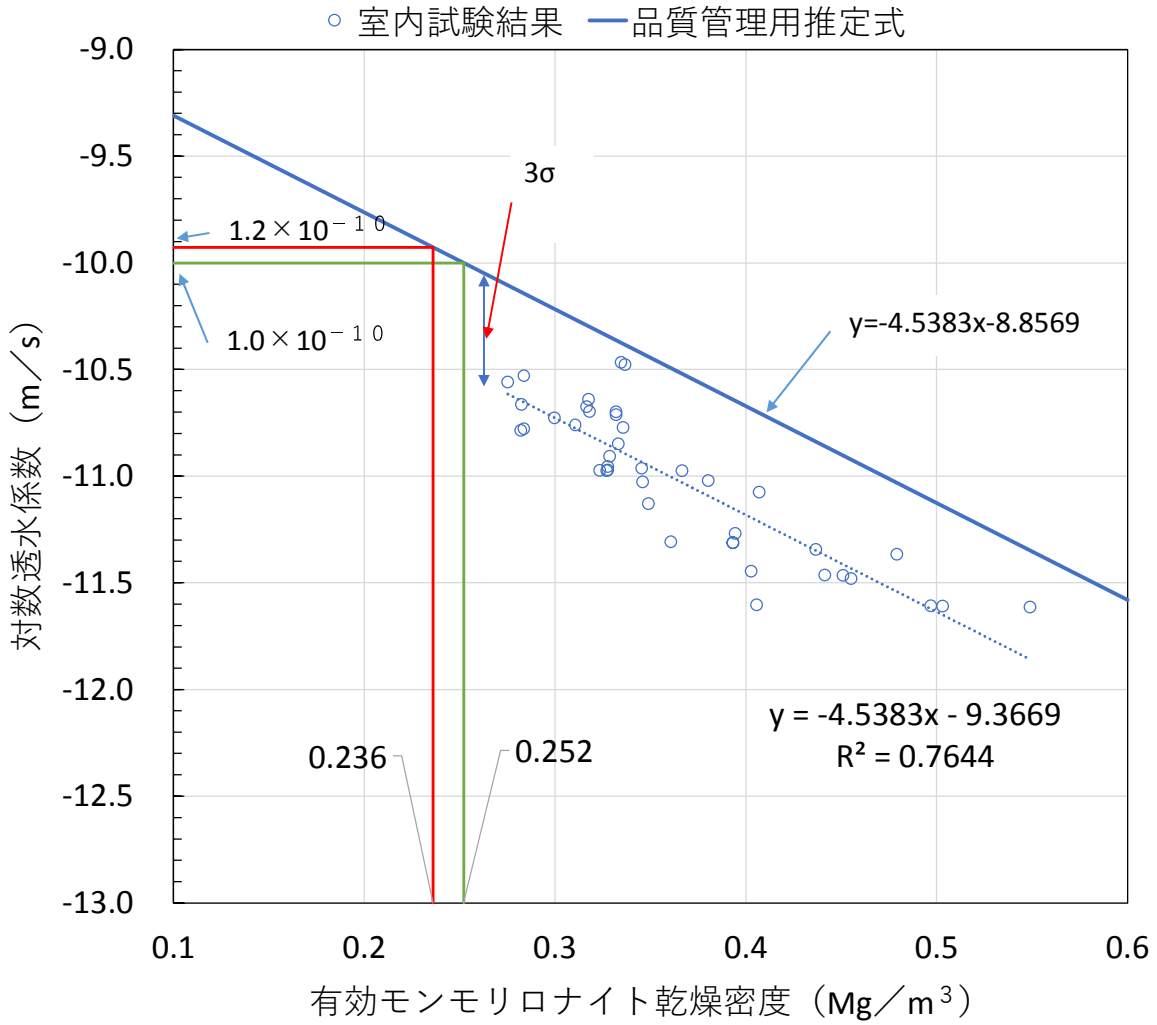


第 19 図　評価点 4 の推測される変形モード

第 19 表　変形前後の有効モンモリロナイト乾燥密度及び透水係数

初期の 有効モンモリロナイト 乾燥密度 (Mg／m³)	初期の 有効粘土乾燥密度 (Mg／m³)	初期の 乾燥密度 (Mg／m³)	乾燥密度の 低下率 (－)	変形後の 乾燥密度 (Mg／m³)
0.252	0.446	1.530	0.030	1.484

変形後の 有効粘土乾燥密度 (Mg／m³)	変形後の 有効モンモリロナイト 乾燥密度 (Mg／m³)	有効モンモリロナイト乾燥密度の低下率 (－)	変更前の 透水係数 (m／s)	変形後の 透水係数 (m／s)
0.421	0.236	0.061	1.0×10^{-10}	1.2×10^{-10}



第 20 図　密度低下によるベントナイト混合土の透水係数の変化

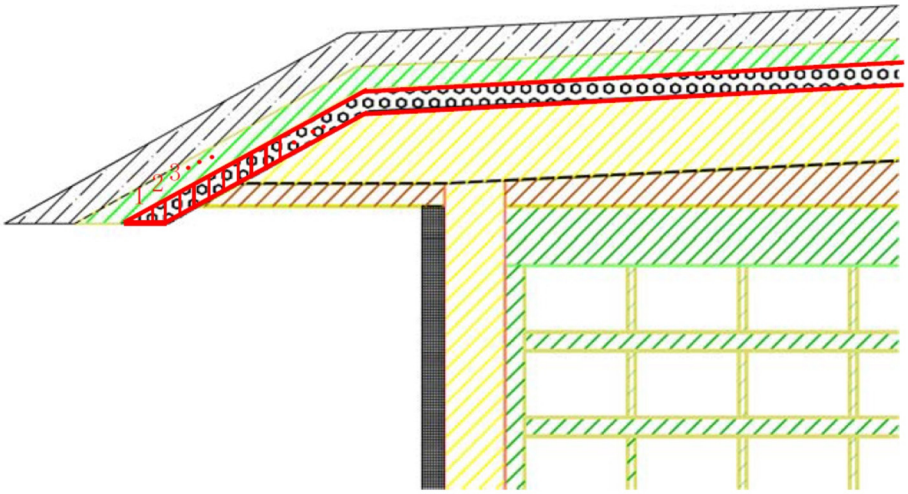
（５）遮水シートの引張ひずみ

廃棄物層の沈下を考慮した遮水シートの低透水性への影響については，遮水シートの厚みが 1.5 mm 程度と薄く，上下の材料の沈下挙動に追従して沈下すると考えられることから，排水層の全粒子の挙動と遮水シートの挙動がおおむね一致すると仮定して，排水層粒子の挙動を評価する。

排水層の引張ひずみの評価手法を以降に示す。

ａ．排水層を水平方向 20 cm 毎にマイクロゾーニング

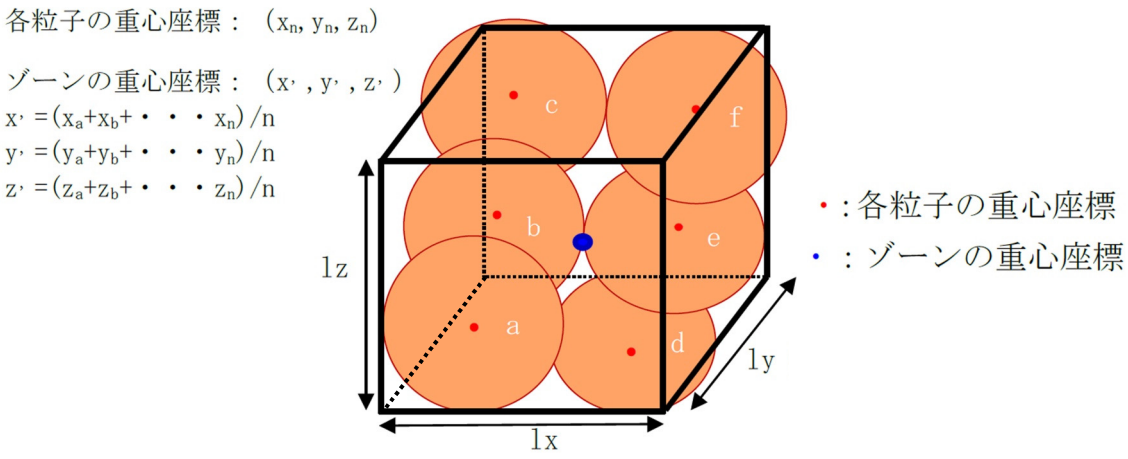
遮水シートの引張ひずみは局所的に発生すると考えられるため，局所的な評価ができるように粒子の直径と同等な 20 cm でゾーニングした。ゾーニング概要図を第 21 図に示す。



第 21 図　ゾーニング概要図

ｂ．各ゾーンの重心位置の算出

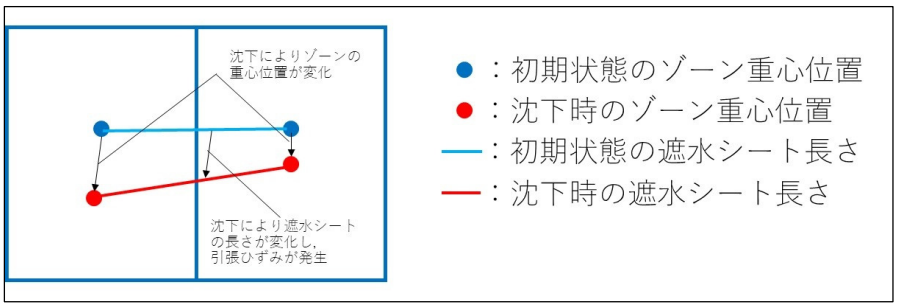
各ゾーンに含まれる粒子の座標を平均してその時の重心を求めた。各ゾーンの重心算出方法概要図を第 22 図に示す。



第 22 図　各ゾーンの重心算出方法概要図

c．引張ひずみの算出

「b.各ゾーンの重心位置の算出」で示した初期状態の粒子を追跡し，沈下時の重心間の距離を計算して初期状態からの引張ひずみを算出した。引張ひずみの概要図を第 23 図に示す。



第 23 図　引張ひずみの概要図

引張ひずみは式（11）より求めた。

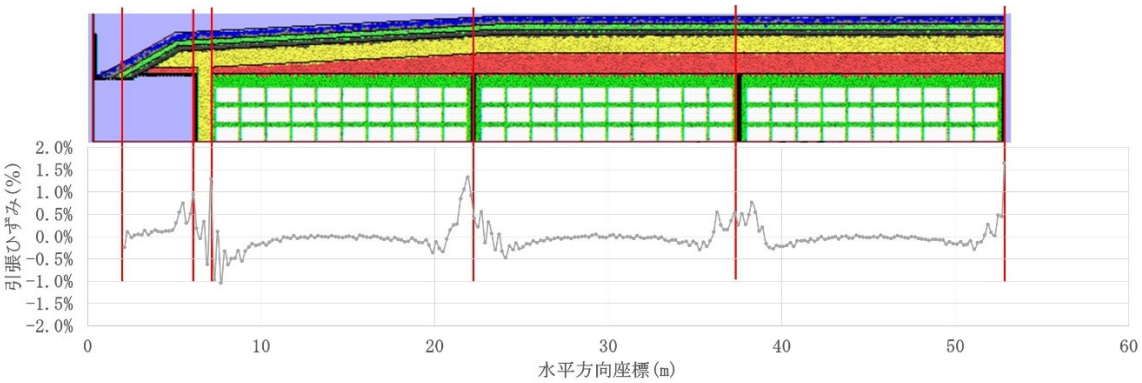
引張ひずみ＝ΔL/Li　　・・・(11)

ΔL：L-Li

Li　：初期状態の重心間の距離

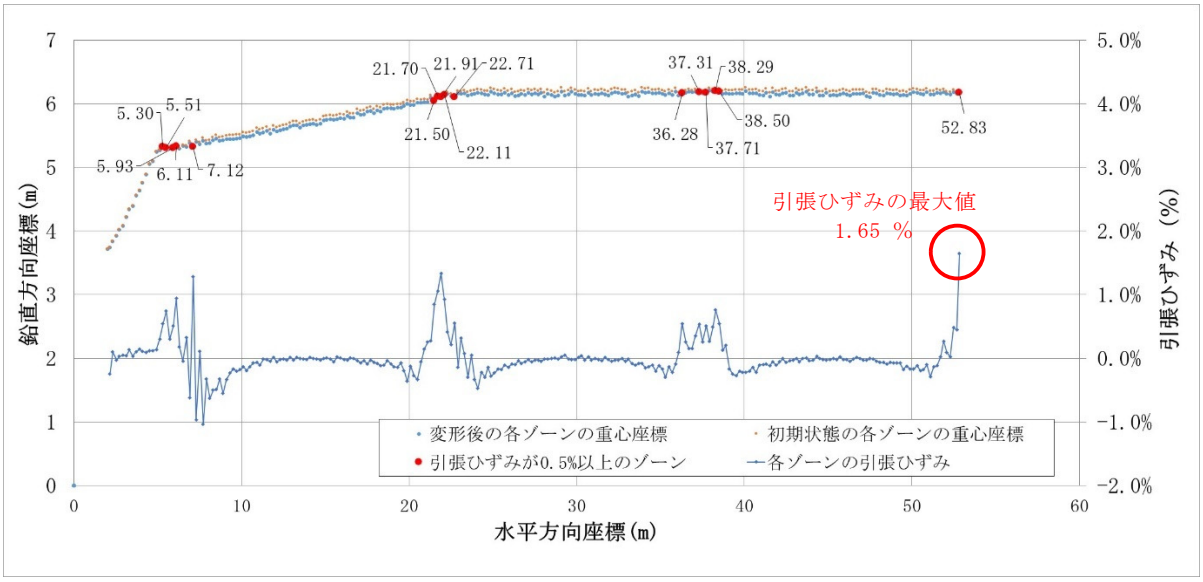
L　：沈下後の重心間の距離

変形後の遮水シートの引張ひずみ分布を第 24 図に示す。遮水シートの引張ひずみは，側部低透水性覆土付近及び親杭付近で大きくなっている。これは，側部低透水性覆土や親杭上部は沈下がほとんど生じないのに対して,廃棄物層が沈下することで,その上部付近で不等沈下が生じ,せん断変形が発生したためであると考えられる。



第 24 図　変形後の遮水シートの引張ひずみ分布

次に，変形後における引張ひずみが 0.5%以上のゾーンの引張ひずみを評価し，引張ひずみの最大値を確認した。変形後の引張ひずみ 0.5%以上のゾーン位置図を第 25 図に示す。第 25 図から引張ひずみの最大値は 1.65%であった。



第 25 図　変形後の引張ひずみ 0.5%以上のゾーン位置図

ｄ．遮水シートの低透水性への影響評価

遮水シートの低透水性への影響は，遮水シートに作用する引張応力と引張応力許容値を比較して評価した。引張応力許容値は，遮水シート（自主）規格解説[7]に示されている高弾性タイプの素材強度（厚さ換算）の23.33 MPaを用いた。

遮水シートに作用する引張応力は，「ｃ．引張ひずみの算出」で求めた引張ひずみを用いて，下式より算出した。

引張応力σ(MPa)＝引張ひずみε(－)×ヤング率E(MPa)

ヤング率は，坪井他（1998）[8]に示される高密度ポリエチレン（ＨＤＰＥ）の温度依存性のヤング率算定式より算出した564 MPaを用いた。なお，温度は，「補足説明資料１　地質環境等の状態設定」にて示されている年平均外気温14℃とした。

上記より，遮水シートに作用する引張応力σ(MPa)は，

σ(MPa)＝引張ひずみε(－)×ヤング率E(MPa)

＝0.0165(－)×564(MPa)＝9.306≒9.31(MPa)となる。

本施設で遮水シートに作用する引張応力（9.31 MPa）は，引張応力許容値（23.33 MPa）よりも小さいことから，廃棄物層の沈下により，遮水シートが破断することはないと考えられ，遮水シートの低透水性への影響はない。

２．５　陥没現象による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覆土の低透水性への影響を評価した結果から，側部低透水性覆土及び低透水性覆土の透水係数を設定する。

本解析結果より，低透水性覆土のせん断変形による透水係数への影響は，

せん断ひずみが発生している箇所で生じると考えられるが，低透水性覆土でせん断ひずみが発生する箇所は局所的であることから，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。このため，低透水性覆土の透水係数は，最も可能性が高い状態においては，1.0×10^{-10} m／ｓから増加しないものとして設定する。ただし，最も厳しい状態においては，限定的な範囲であるものの，せん断ひずみが発生している箇所があることから，その範囲における透水係数の増加が 1.0×10^{-10} m／s から 1.2×10^{-10} m／s であることを踏まえ，保守的に 2.0×10^{-10} m／ｓと設定する。

側部低透水性覆土の透水係数については，低透水性覆土と側部低透水性覆土の隅角部,側部低透水性覆土の密度低下はほとんど生じていないことから，透水性への影響は生じないと考え，1.0×10^{-10} m／s と設定する。

陥没現象の影響における透水係数の設定を第 20 表に示す。

なお，陥没現象による遮水シートの低透水性への影響については，沈下時の遮水シートの引張ひずみより，遮水シートに作用する引張応力を評価し，引張応力の許容値以下であることを確認した。

第 20 表　陥没現象の影響における透水係数の設定

<table>
<tr><td rowspan="2">対象</td><td colspan="2">透水係数（m／s）</td></tr>
<tr><td>最も可能性が高い状態</td><td>最も厳しい状態</td></tr>
<tr><td>低透水性覆土</td><td rowspan="2">1.0×10^{-10}</td><td>2.0×10^{-10}</td></tr>
<tr><td>側部低透水性覆土</td><td>1.0×10^{-10}</td></tr>
</table>

3　参考文献

(1) 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

(2) 若井明彦，吉松弘行（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 巻 1 号，p.p.7-17

(3) 土木学会原子力土木委員会 地盤安定性評価小委員会（2021）：原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術＜技術資料＞「2020 年度版」

(4) 中瀬仁，岩本哲也，曹国強，田部井和人，阪口秀，松島亘志（2017）：個別要素法簡易モデルによる地震起因斜面崩落土の堆積範囲評価法の提案，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)

(5) 中瀬仁（2019）：斜面崩壊の解析例，地盤工学会誌

(6) 日本道路協会（2010）：道路土工 盛土工指針（平成 22 年度版）

(7) 日本遮水工協会：遮水シート（自主）規格解説

(8) 坪井正行，宮地秀樹，野本哲也，今泉繁良（1998）：廃棄物処分場遮水シートに発生する熱応力の評価，土木学会論文集 No.603／Ⅲ-44，p.p.147-155

以　上