

安全で長寿命化に資する安定型処分場の 試験・設計方法に関する研究

研究課題番号： 3-1707

研究実施期間： 2017～2019年度

研究経費： 48,456千円

代表研究者： 勝見 武（京都大学）

研究体制

| サブテーマ 番号 | サブテーマタイトル | 担当者 | 所属・役職 |
|-------------|-----------------------------|------|-------------------------------|
| ① | 試験・設計マニュアルの作成 と研究の総括 | 勝見 武 | 京都大学・地球環境学堂・ 教授 |
| ② | 廃棄物－えん堤の力学挙動 に関する研究 | 大嶺 聖 | 長崎大学・工学部・教授 |
| ③ | 廃棄物層の浸透水の水理・ 水質特性に関する研究 | 土居洋一 | 長野県短期大学・生活科学 科・教授（現;LS研究会） |
| ④ | 廃棄物層の力学特性評価と 現場試験に関する研究 | 山脇 敦 | 産業廃棄物処理事業振興財 団・資源循環推進部・部長 |
| ⑤ | 容量と密度の増加等につな がる設計法に関する研究 | 坂口伸也 | 前田工業株式会社・総合企 画部・グループ長 |

安定型廃棄物処分場

- 全国に1000ヶ所以上
- 埋立対象は安定5品目
(プラスチック類, ゴムくず, 金属くず, ガラス・
コンクリート・陶磁器くず, がれき類)



処分場へのニーズ

- 安全性(跡地利用や近隣住民の安心)
- 長寿命化(残余年数の延長や災害時の緊急対応)

廃棄物に対する考え方

安定で分解しない

強度特性の把握が難しく、土と同程度とみなしている

現在の設計要領

遮水工等設置義務なし

埋立高や土えん堤設計は管理型廃棄物処分場に準拠

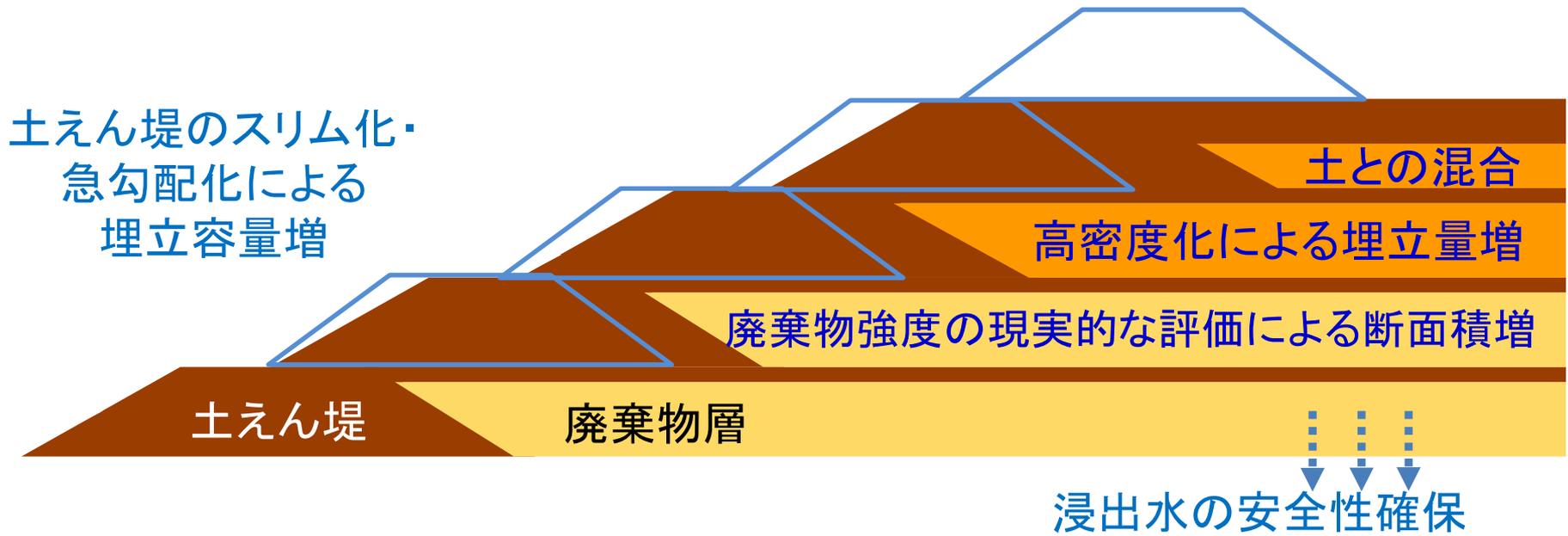
実際の処分場

分解性の廃棄物も混入

プラスチック等を含む廃棄物地盤の斜面安定性は高い

安全性に懸念

保守的容量増加見込める

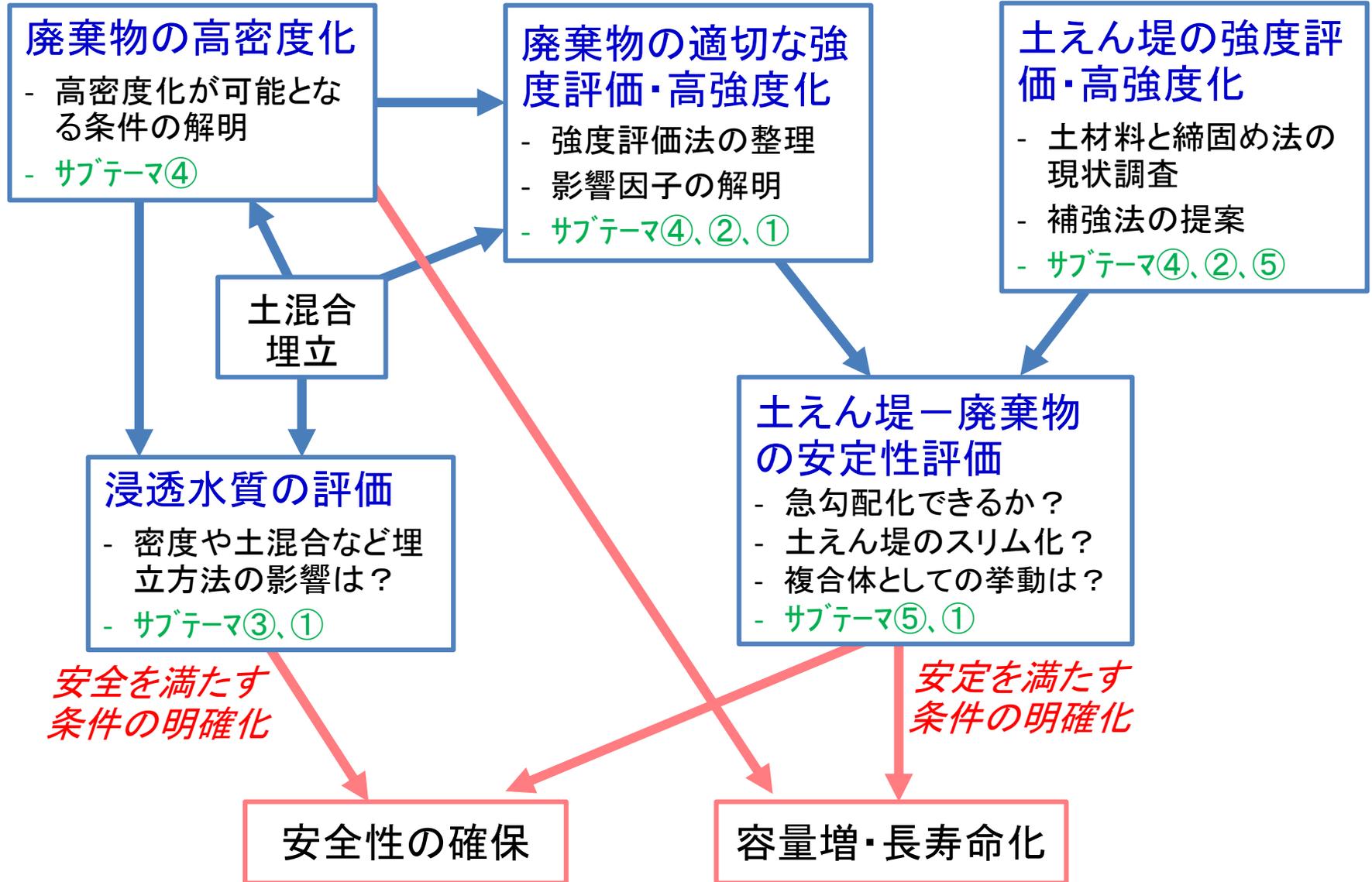


安全かつ長寿命化に資する安定型処分場の設計手法の確立が求められている



【目的】安定型廃棄物の力学特性・環境安全特性の把握

【具体的内容】 現場試験・室内試験による安定型廃棄物の強度特性の解明
カラム試験による浸透水質への影響要因の解明と埋立方法の検討
マニュアルの作成



目的

- 組成、空隙率、強度等の把握
- 試料採取

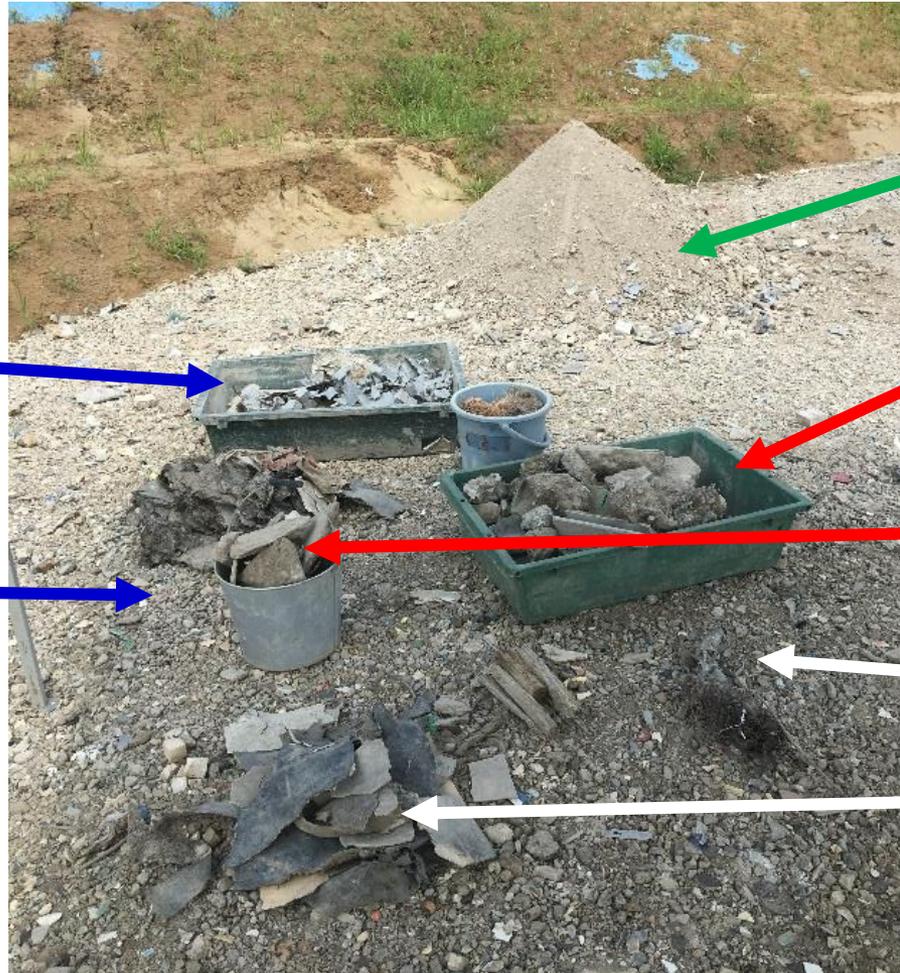
実施現場 (9処分場21地点)

- 処分場A(東北) — 3地点(埋立後0年、1年、10年経過)
- 処分場B(東北) — 1地点(埋立後4.5年経過)
- 処分場C(関東) — 2地点(埋立後0年、19年経過)
- 処分場D(関東) — 4地点(埋立後0.3年、2年経過)
- 処分場E(関東) — 1地点(埋立後10年経過)
- 処分場F(関東) — 2地点(埋立後0.1年、15年経過)
- 処分場G(北陸) — 5地点(埋立後0年、1年、1.8年、8年、15年経過)
- 処分場H(中国) — 2地点(埋立後0年、10年経過)
- 処分場I(中国) — 1地点(埋立後0.4年経過)

実施内容 (代表者・分担者・協力者が一致協力して実施)

- 組成分析
- 現場空隙率試験
- 現場強度試験(一面せん断試験、安息角試験、衝撃加速度試験)

廃棄物の組成分析



20 mm 篩下

プラスチック

礫

粒状材料

繊維廃材等

ガラス・
陶磁器くず

繊維廃材

木くず

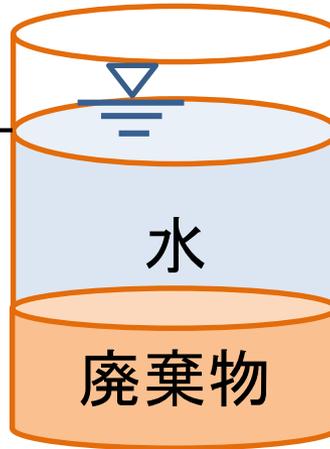
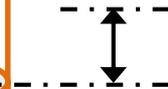
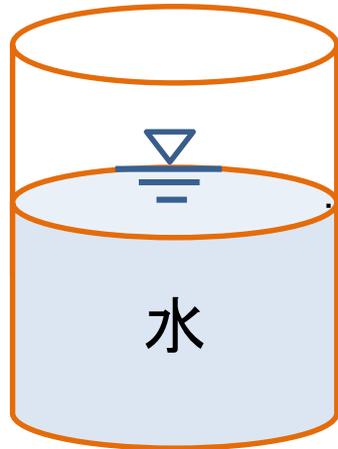
ゴム

その他

ドラム缶

固体部分体積

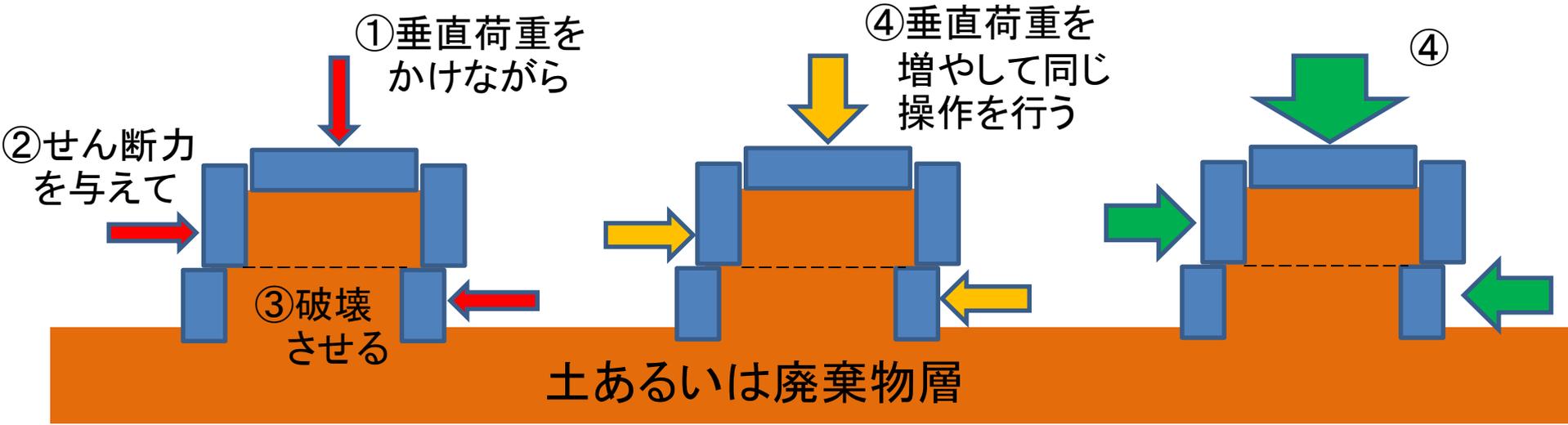
ΔV



現場空隙率(n)は、廃棄物を水浸させて次式で求められる。

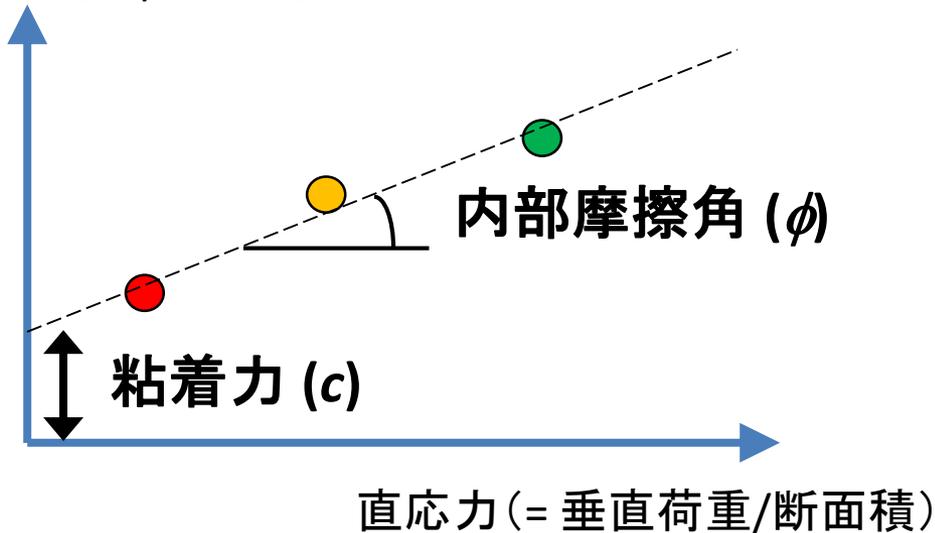
$$n = \frac{\text{空隙部分の体積}}{\text{空隙部分と固体部分の体積}} = \frac{(V - \Delta V)}{V}$$

現場一面せん断試験



せん断応力
(= せん断力/断面積)

⑤ 破壊時のせん断応力
と直応力をプロットする



1組のcと ϕ を得るのに
2~3人がかりで約半日かかる

安息角試験

廃棄物を山状に積み上げて、その斜面が静止状態を維持しうる最大斜面角（**限界安息角**）と、限界安息角を超えて崩れが発生した後、崩れが停止した時の斜面角（**停止安息角**）を測定する。



衝撃加速度試験（キヤスポル）

質量4.5 kgのランマーを45 cm高さから自由落下させて衝撃加速度を測定し、**インパクト値**に換算する。



現場の廃棄物組成

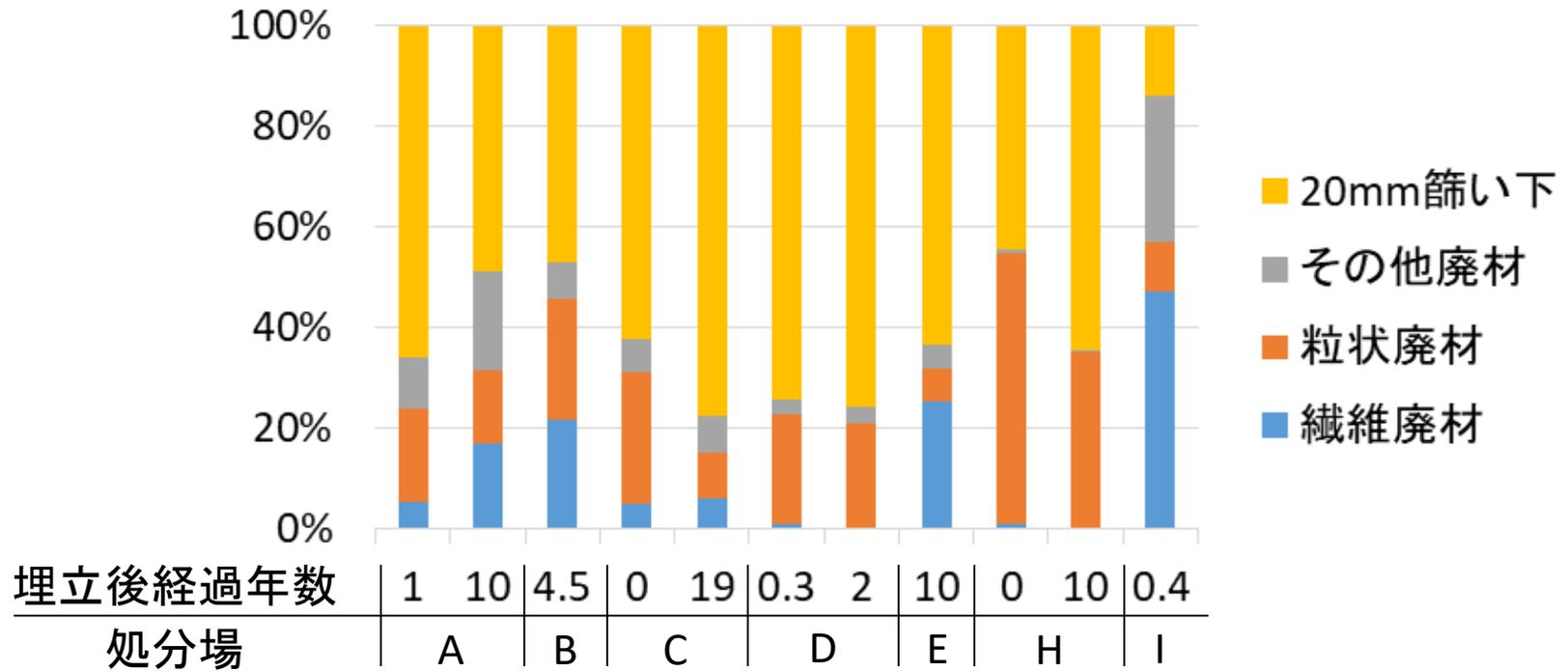
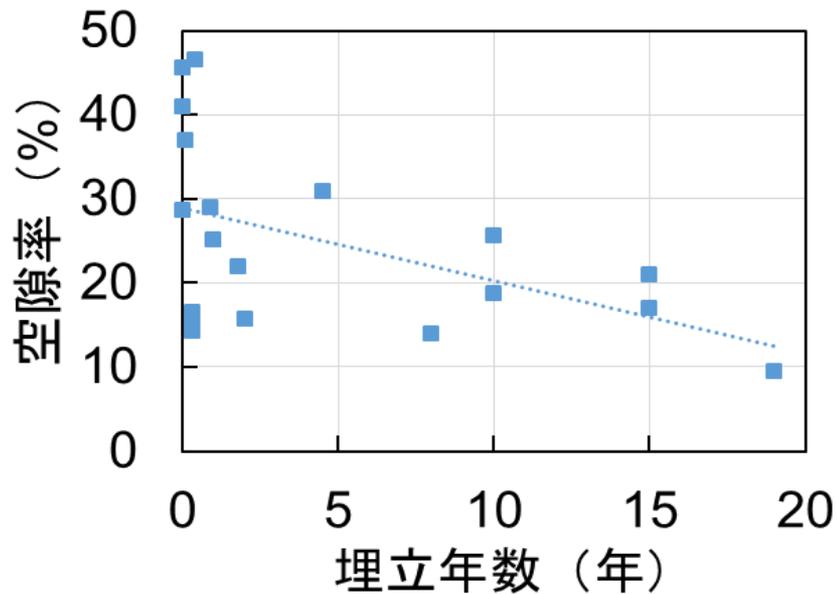


写真 処分場H（埋立後10年）

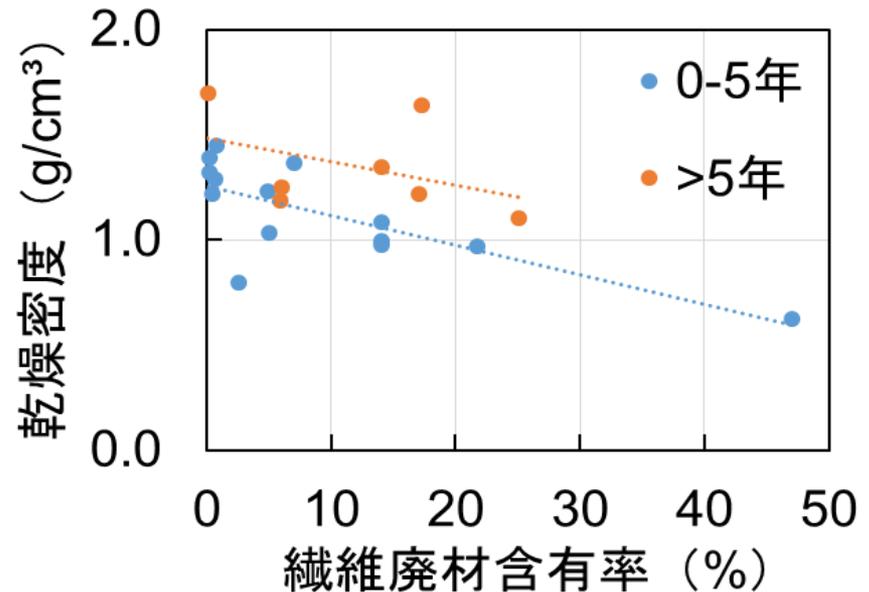
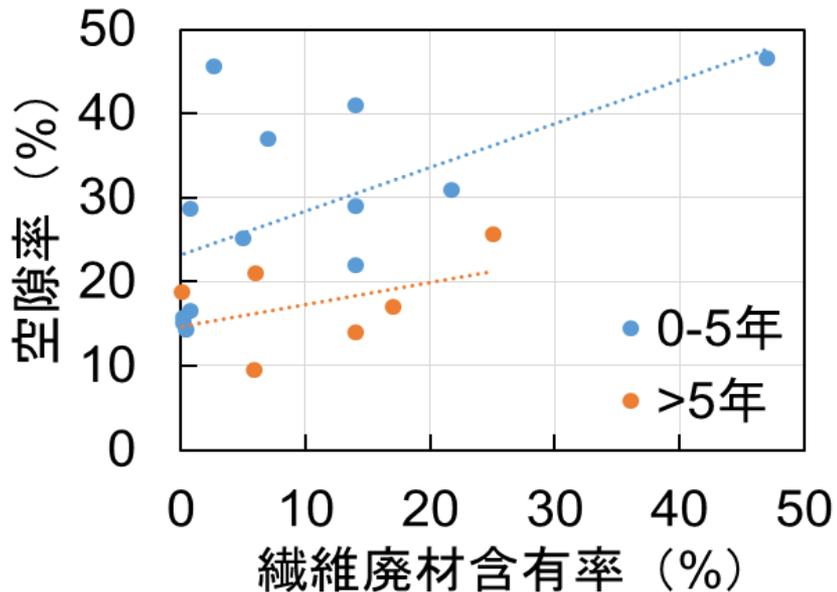


写真 処分場I

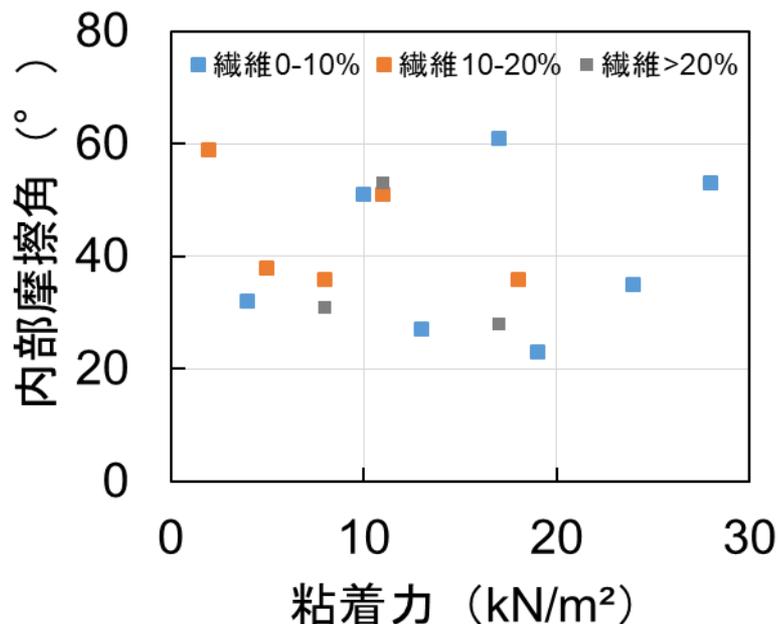
現場の密度と空隙率



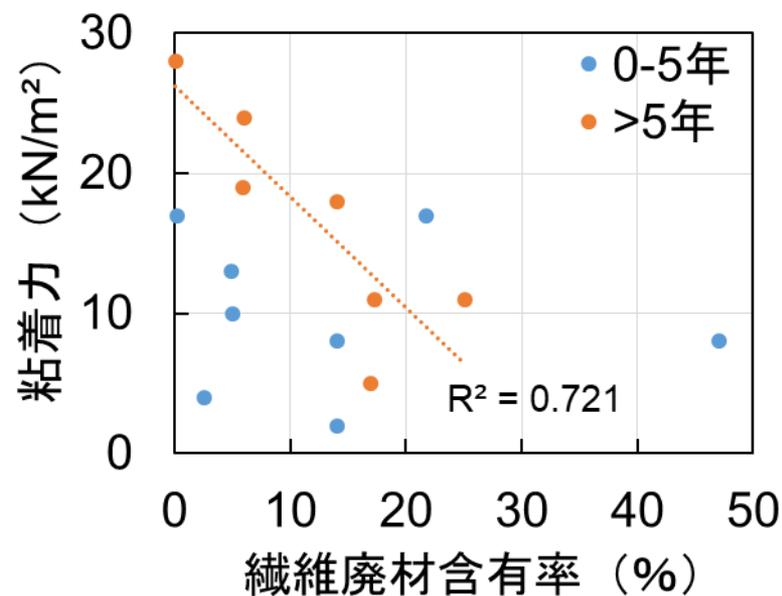
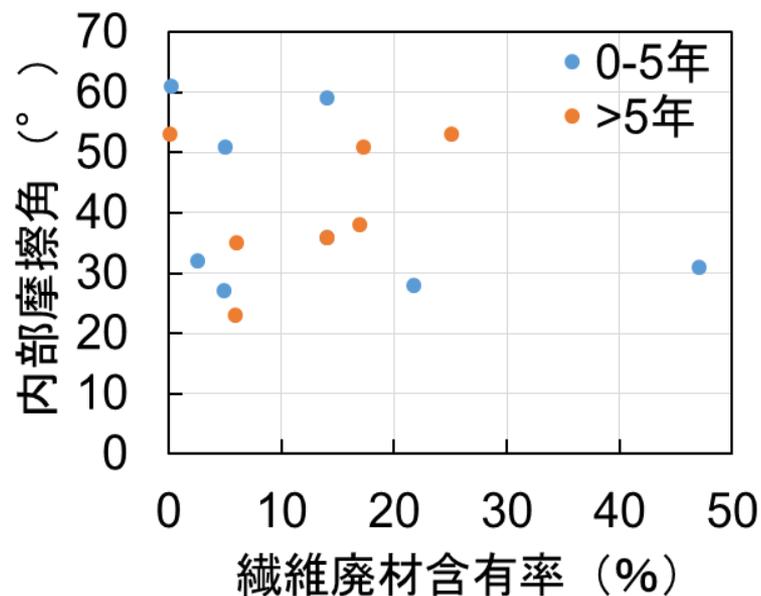
- 時間の経過とともに密実化していく傾向がみられる(左上図)。
- 概ね5年を境に、傾向を区分できそう(左右下図)。
- 組成に基づいて、密度を概略推定できそう。



現場強度試験の結果



- 内部摩擦角 ϕ と粘着力 c は、いずれも値の幅が大きい(左上図)。
- 内部摩擦角 ϕ は、繊維廃材等含有率の増加に伴い増加している(左下図、及び他の実験結果)。
- 粘着力 c は、繊維廃材等含有率の増加に伴い減少する(右下図)。(篩下が増えれば増加する。)



| 試験 | パラメータ | 考察 |
|-----------|--------------|--|
| 現場一面せん断試験 | 粘着力 c | <ul style="list-style-type: none"> 繊維廃材等含有率・粒状廃材含有率・空隙率と負の相関、篩下含有率と正の相関 $c = 2 \sim 28 \text{ kN/m}^2$で、値の幅が大きい |
| | 内部摩擦角 ϕ | <ul style="list-style-type: none"> 繊維廃材等含有率・空隙率と正の相関、粒状廃材含有率と負の相関 $\phi = 23 \sim 61^\circ$で、値の幅が大きい |
| 安息角試験 | 安息角 | <ul style="list-style-type: none"> 停止安息角・限界安息角・それぞれの差は繊維廃材等含有率と正の相関 |
| 衝撃加速度試験 | インパクト値 | <ul style="list-style-type: none"> 繊維廃材等含有率・空隙率と負の相関、粒状廃材含有率と正の相関 |

中間ヒアリング時のスライドに、数値を更新

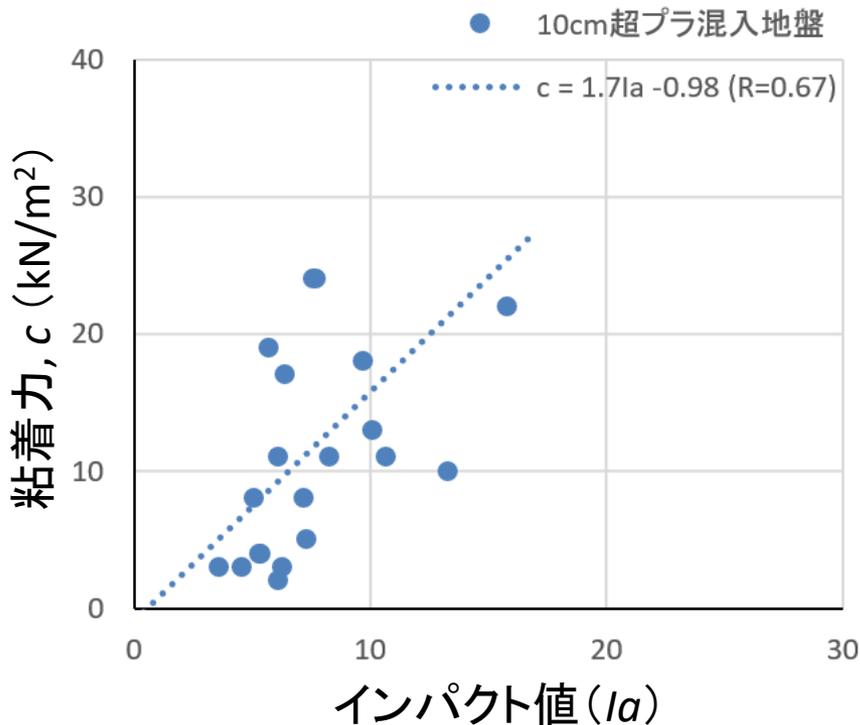
- 安定型廃棄物の強度定数(c, ϕ)は、一般的な砂質土より大きい。
- データのばらつきが大きいことについて、中間ヒアリングで指摘頂いた。

| | | 乾燥密度 ρ_d (g/cm ³) | 空隙率 (%) | 粘着力 c (kN/m ²) | 内部摩擦角 ϕ (°) |
|------------------|----------|---------------------------------------|------------|---------------------------------|---------------------|
| 埋立 年数 | 5年未満 | 0.62 – 1.5 | 14 – 47 | 2.0 – 17 | 27 – 61 |
| | 5年以上 | 1.1 – 1.7 | 9.5 – 26 | 5.0 – 28 | 23 – 53 |
| 繊維廃 材等含 有率 | 0 – 10% | 0.80 – 1.7 | 9.5 – 46 | 4.0 – 28 | 23 – 61 |
| | 10 – 20% | 0.99 – 1.6 | 14 – 41 | 2.0 – 18 | 36 – 59 |
| | > 20% | 0.62 – 1.1 | 26 – 47 | 8.0 – 17 | 28 – 53 |
| 全試料範囲 | | 0.62 – 1.7 | 9.5 – 47 | 2.0 – 28 | 23 – 61 |
| 全試料平均 | | 1.2 | 25 | 13 | 41 |

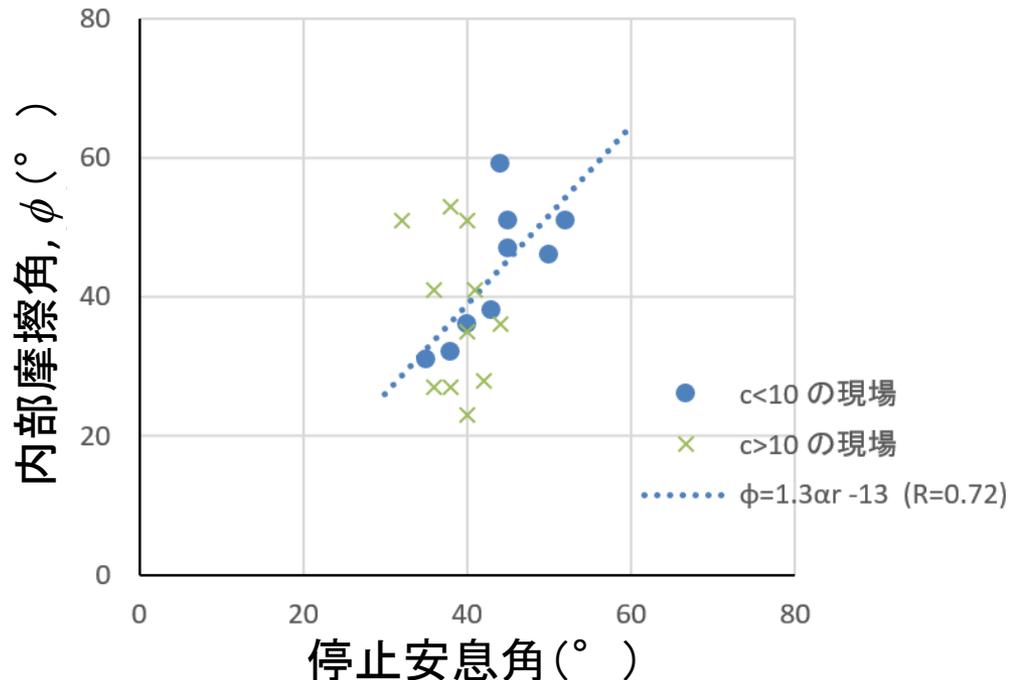
- 安定解析には、密度 ρ 、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ が必要である。

内部摩擦角 $\phi \geq 23^\circ$

粘着力 $c \geq 5 \text{ kN/m}^2$ (ただし埋立5年以上経過であれば)



簡易評価法「キャスポル」による

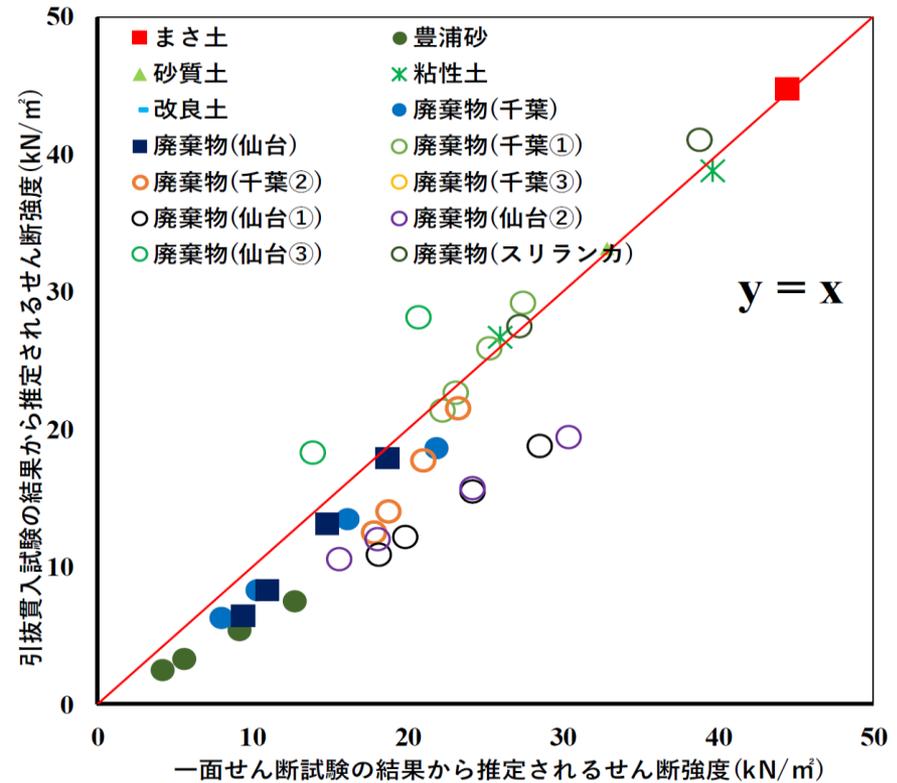


簡易評価法「安息角試験」による

10 cm以上のプラスチックの混入が多い廃棄物地盤では、**キャスポル**から粘着力(c)を推定できる。



粘着力(c)が高ければ、斜面はcでもつ。
 粘着力(c)が低い場合は、内部摩擦角(ϕ)の評価が重要となる。右図より $c < 10 \text{ kN/m}^2$ 以下の場合には、**停止安息角**から内部摩擦角(ϕ)を推定できる。

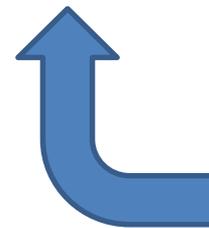


新たな簡易現場強度評価法の提案:
 スパイラル杭(左)の引抜抵抗と
 ポータブルコーン(右)の貫入抵抗から
 せん断強度を推定

グラフの通り、両者から得られるせん断強度には
 高い相関がみられた。

今後は以下の検討が必要:

- 粘着力(c)と内部摩擦角(ϕ)を精度よく推定する
 方法の確立
- 各試験方法の標準化



現場一面せん断試験

円弧すべりによる安定解析(簡易設計)

スライド15ページを参考に、廃棄物層の粘着力 $c = 5 \text{ kN/m}^2$ (最低値)に固定して、内部摩擦角 ϕ と地震時安全率の関係を試算した。

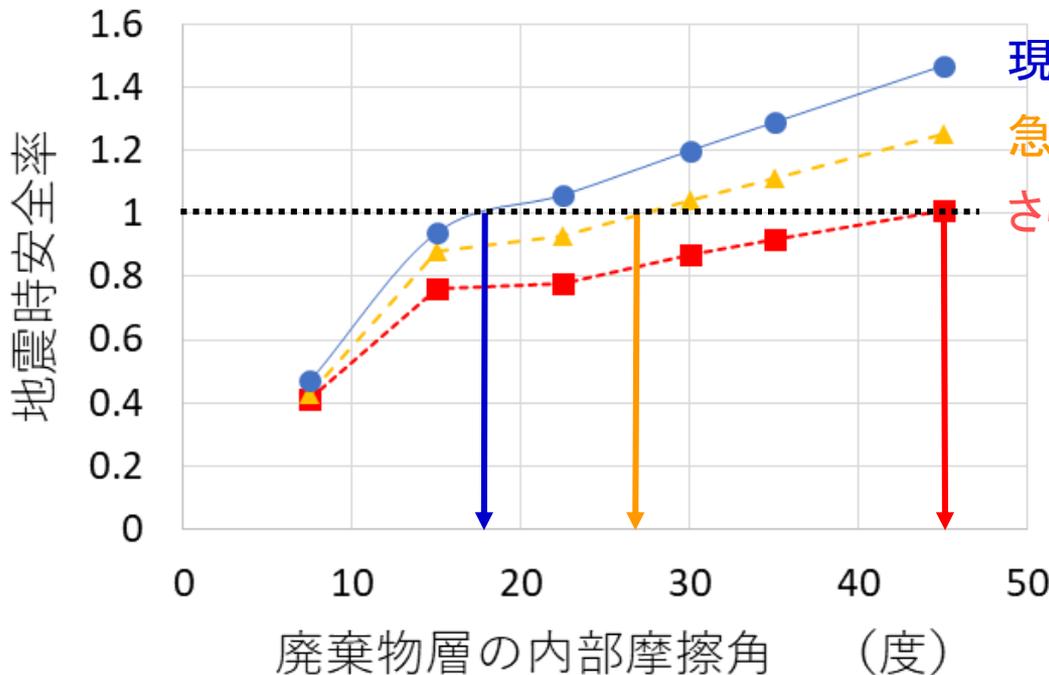
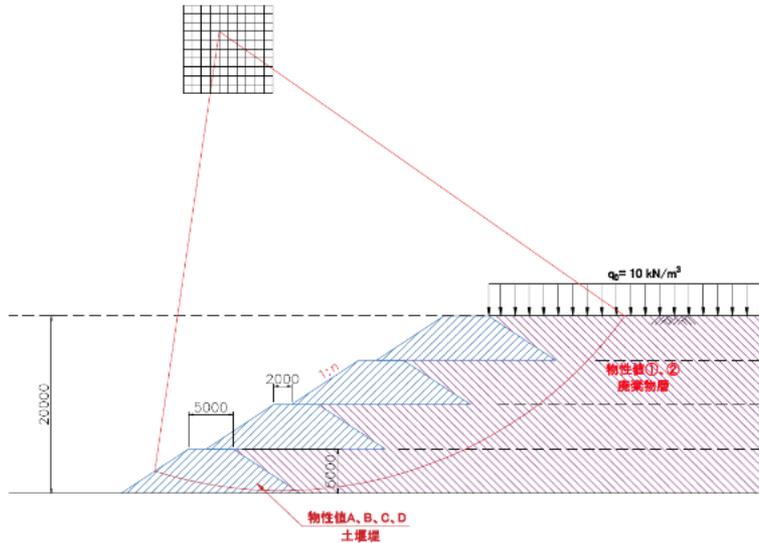
水平震度 $k_h = 0.15$ (L1地震相当)

土堰堤の $c = 15 \text{ kN/m}^2$

土堰堤の $\phi = 25^\circ$

土堰堤の $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ (中間土相当)

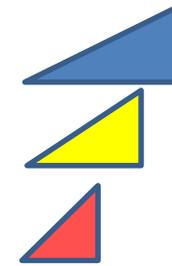
廃棄物層の $\gamma = 13.2 \text{ kN/m}^3$ (現場計測値の平均)



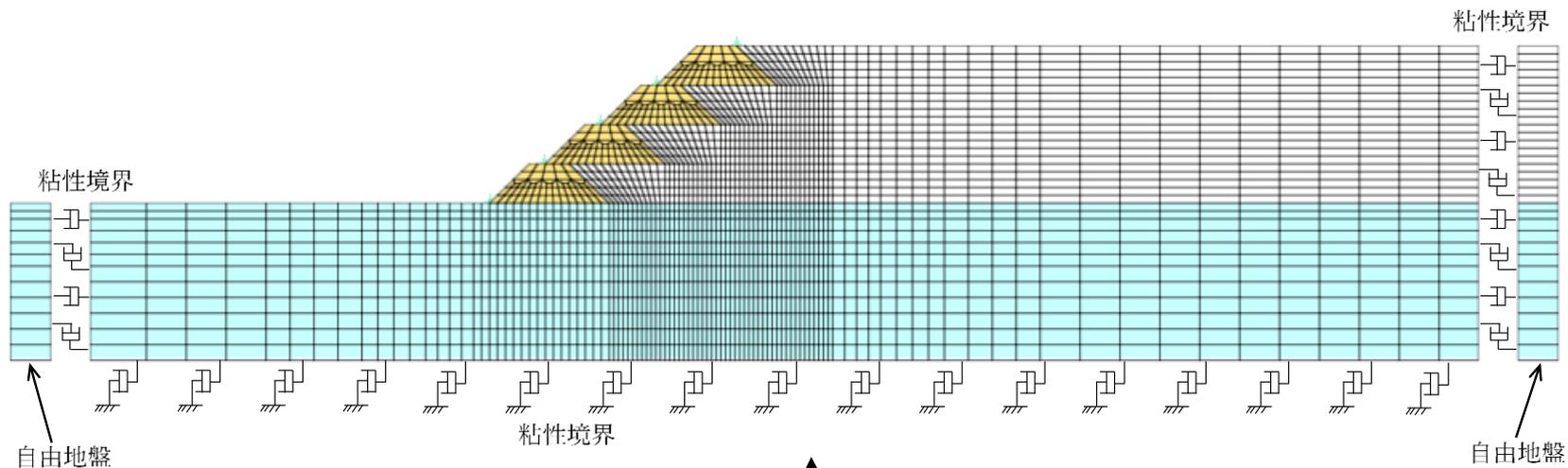
現状の斜面勾配(1:2)

急勾配化(1:1.5)

さらに急勾配化(1:1)



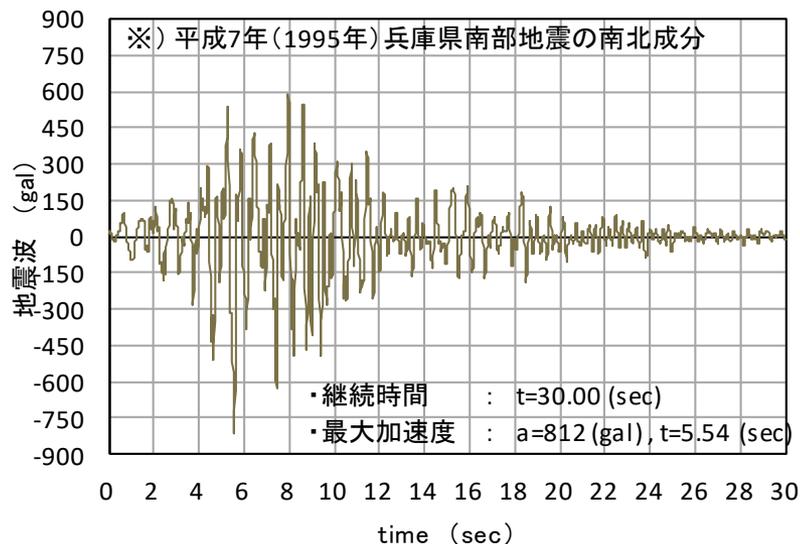
内部摩擦角 $\phi \geq 23^\circ$ を踏まえると、**1:1.8の勾配は現実的**と考えられる。



上図の二次元断面に地震動が作用したときの、各要素の変位や応力を求める。

【解析条件】

- ① 入力地震動：2種類 (L1、L2)
- ② 斜面勾配：3種類 (1:1, 1.1.5, 1:2)
- ③ 土堰堤剛性：2種類 (セメント改良土、粘性土)
- ④ 廃棄物物性：2種類 (繊維状物質含まない、繊維状物質含む)



【セメント改良土えん堤 + 繊維状物質を含まない廃棄物の場合】

【本ファイルでは動画を省略しております。】

繊維状物質を含まない廃棄物の場合、変形量が大きくなる(両図)。

土えん堤は、粘性土よりもセメント改良土の方が、背面の廃棄物の変形が抑えられる。

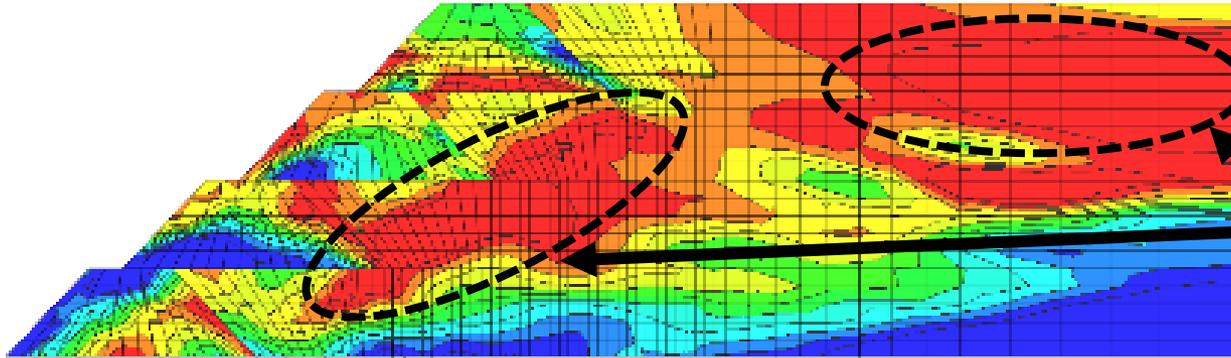
【粘性土えん堤 + 繊維質を含まない廃棄物の場合】

【本ファイルでは動画を省略しております。】

→ セメント改良土の有効性

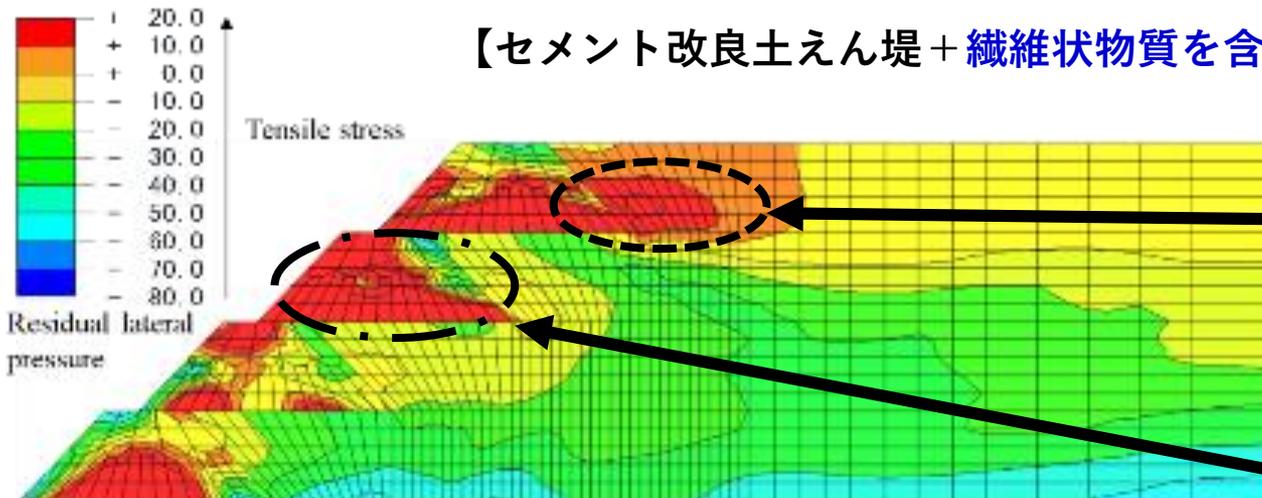
(動画では、変形量をデフォルメ(処分場の断面寸法の100倍に拡大)して示している。)

【セメント改良土えん堤 + 繊維状物質を含まない廃棄物の場合】



残留側方土圧がマイナス(=引張)となり、**廃棄物地盤が広域的に主働破壊**していることを示している。

【セメント改良土えん堤 + 繊維状物質を含む廃棄物の場合】



残留側方土圧がマイナス値になるのは最上部層近傍に限られ、**廃棄物地盤は全体的に安定**している。

(土えん堤内の引張応力はセメント改良土の引張強度以下なので、安定上の問題はない。)

* 赤および黄土色は、引張応力の発生域を表す

遠心模型載荷実験とは、斜面模型全体に遠心力をかけることによって、遠心力相当分の拡大倍率で現象を再現できる実験法

【本研究の実験条件】

遠心加速度 = 50 G

地震加速度 = 400 gal

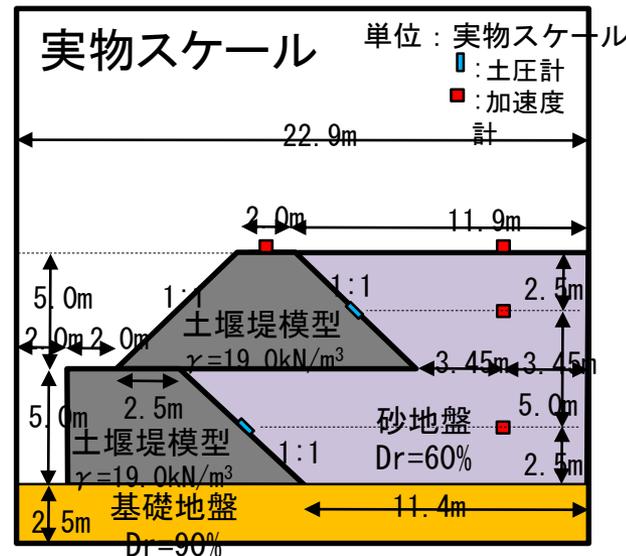
(正弦波1Hz、20波)



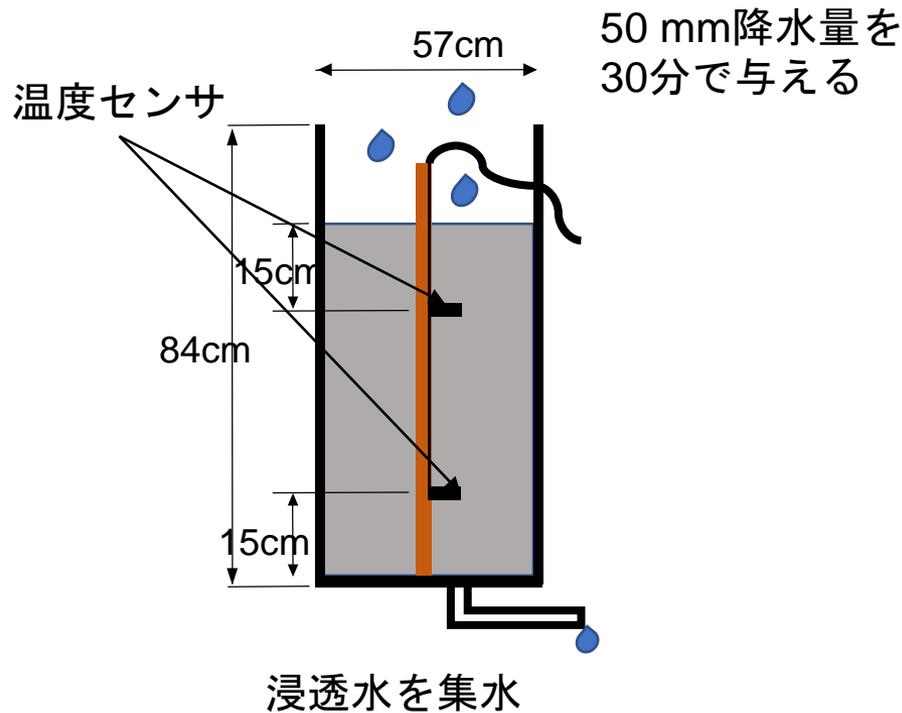
遠心模型実験と数値解析(前頁)の結果から、巨大地震(L2)時の斜面変状の抑制には

- 土堰堤の強度確保
- 粘り強い廃棄物層、すなわち混合埋立

が有効なことを示している。



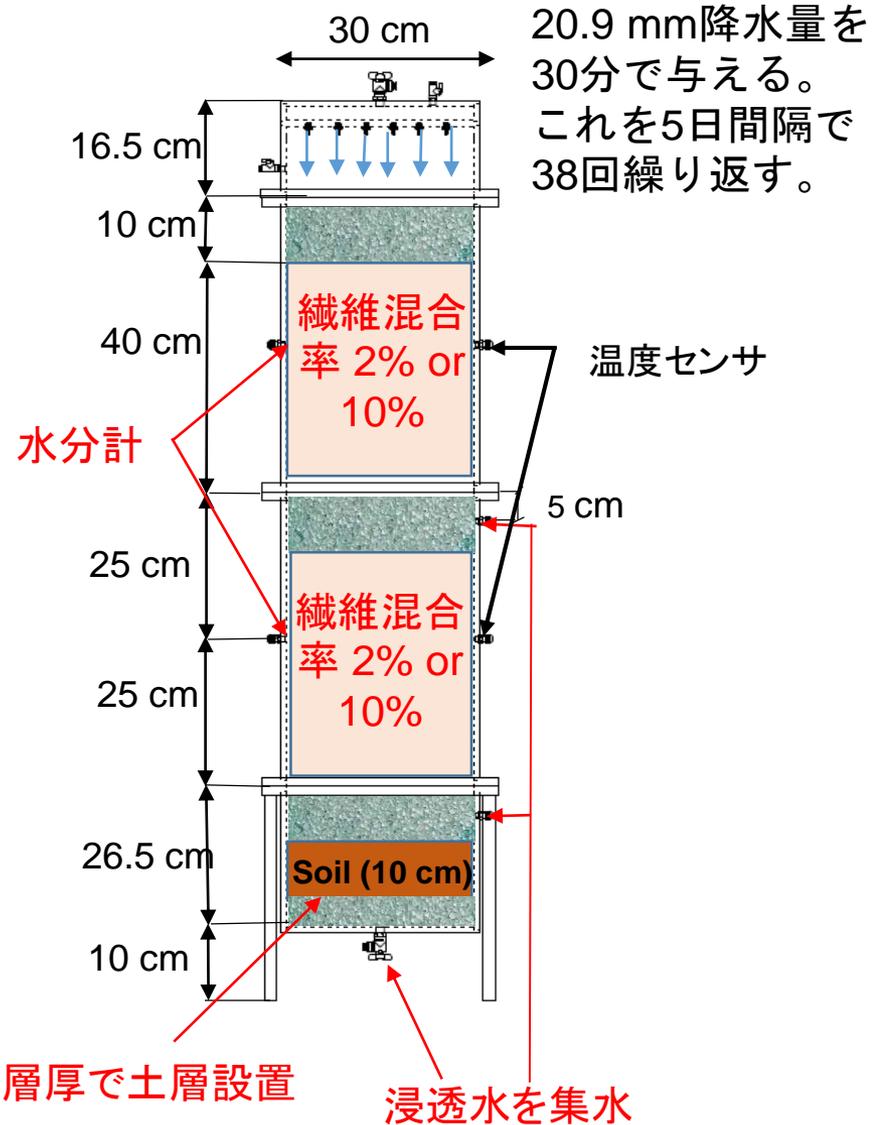
大型カラム試験



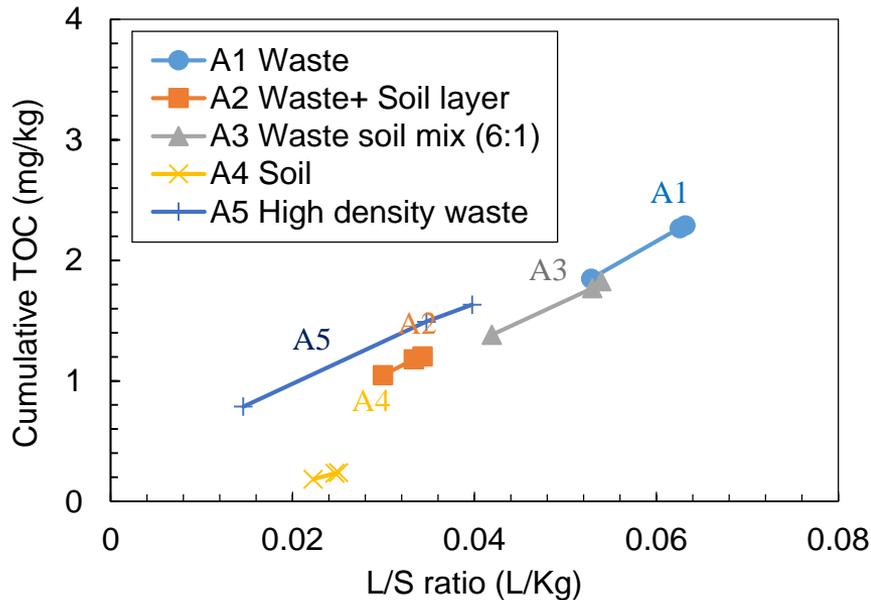
実験ケース

1. 廃棄物のみ
2. 廃棄物の下に土層
3. 廃棄物と土を混合
4. 土のみ
5. 廃棄物のみ(高密度化)

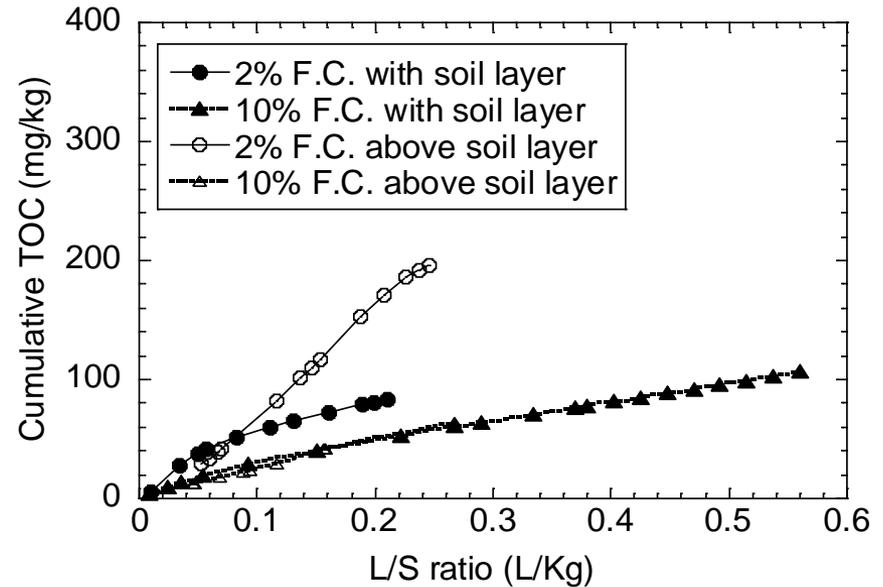
中型カラム試験



大型カラム試験

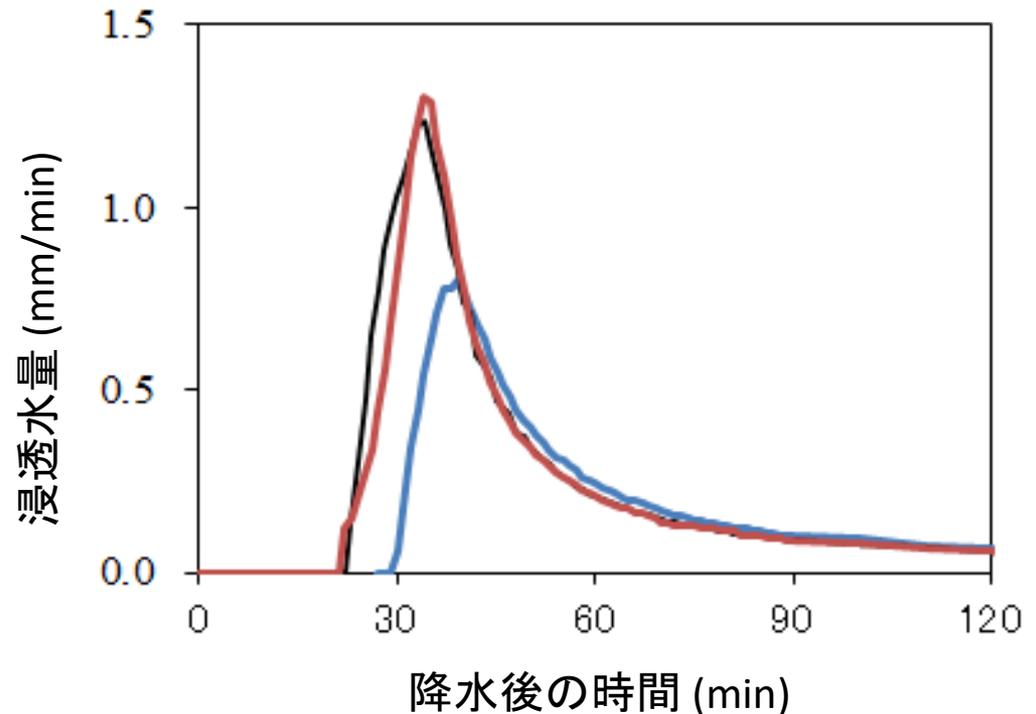


中型カラム試験



- 大型カラム試験では、土層の設置や土との混合により水質が改善される傾向がみられた。
- 高密度化では、密度相当分の水質の悪化傾向がみられた。
- 中型カラム試験では、繊維廃材等が多い方が水質が良好であった。
- 土層により水質が改善される傾向がみられた。

- 土層による水質改善効果あり。
なお、土層(10cm厚)を設けたケースと廃棄物/土混合ケースには顕著な差はない。
- 高密度埋立は密度比に応じてTOC等が悪化する。
- 10 cm超の繊維廃材等含有率が高いほど、概してTOCが大きい。
- 10 cm超の繊維廃材等を除去すると、浸透水の流下速度が増す。水の滞留を防がれる。
(右図の通り)



- 廃棄物試料(現場採取)
- 廃棄物試料(10 mm以上はふるい分けで除去)
- 廃棄物試料(10 mm以上は切断)

斜面勾配について

- 斜面安定解析(円弧すべり計算)で所要の安全率が得られる場合は、従来の1:2.0勾配ではなく、**1:1.8勾配で埋立が可能**
- 安定解析に用いる廃棄物のパラメーター(c, ϕ, γ)は、次のように決定できる。

- (1) **新規処分場建設の場合**: 埋立廃棄物が類似する既存処分場の試験値を活用 or **強度定数の範囲(マニュアルに記載)**を活用
- (2) **既存処分場拡張の場合**: 既存区画の試験値を活用 or **強度定数の範囲(マニュアルに記載)**を参考に推定

埋立方法について

- **廃プラスチックは、15 cm以下にして埋め立てる。**
(浸出水質悪化防止の観点から)
- **できるだけ廃棄物を混合して埋め立てる。**
(サイズ分布(粒度分布)が広く均等であれば、強度や空隙量抑制で有利であり、できるだけ廃棄物の偏りがないよう混合して埋め立てる)

土えん堤について

- **高強度・剛性の土えん堤を推奨**

マニュアル案の目次

1. 適用範囲
2. 安全性確保のための留意事項
 - (1) 地盤中の浸透水の流れ
 - (2) 浸透水質に悪影響を与える廃棄物
3. 設計のための必要事項と試験法
 - (1) 基本条件の整理
(組成、重量、含水比、空隙率等)
 - (2) 荷重の種類と評価方法
(廃棄物荷重、水圧、地震力等)
 - (3) せん断強度と試験法
(一面せん断試験、安息角試験等)
4. 設計方法
 - (1) 貯留構造物
 - (2) 土えん堤と埋立勾配、高さ
 - (3) 浸透水集排水設備
5. 搬入管理と展開検査方法
 - (1) 搬入管理上の留意点
 - (2) 展開検査場
6. 土砂等との混合理立方法

学術論文・発表

- 土木学会論文集（査読付き論文）
- 廃棄物資源循環学会論文誌（査読付き論文）
- Waste Management & Research誌（査読付き論文）
- 18th Expert Meeting on Solid Waste Management in Asia and Pacific Islands（国際会議発表） など

技術支援

- 実処分場における設計支援
- スリランカにて廃棄物処分場の崩落現場の調査と応急対策に従事
- 外務大臣およびJICAより感謝状授与（山脇氏）



- 廃棄物地盤の強度パラメーターに及ぼす影響因子を明らかにした。また、現場設計に用いる**強度パラメーターの範囲**を示した。(主にサブテーマ④)
- 安定解析を行う上で必要となる内部摩擦角や粘着力が、**簡易強度試験法(キャスポル、安息角試験)**から推定できることを示した。また、さらなる簡易強度評価法(スパイラル杭等)の可能性を示した。(同②)
- 安定解析と模型実験により、得られた強度パラメーターの範囲で、従来(2割勾配)より**高勾配(1.8割勾配)**の断面が可能であることを示した。(同⑤)
- 土層の設置や土との混合は水質の改善効果があること、大きな**プラスチック・繊維廃材等の存在は水理・水質に影響を及ぼしうる**ことを示唆した。(同③)
- 以上の成果に基づき、処分場の設計(廃棄物の強度評価、急勾配化など)や埋立方法(土との混合など)を整理した「**産業廃棄物安定型最終処分場の試験・設計方法に関するマニュアル(案)**」をまとめた。(同①)

本研究の実施にあたり次の方々にご指導やご協力を頂きましたので、記してお礼を申し上げます。

プログラムオフィサー： 乙間末廣先生

アドバイザー： 井上雄三先生、原 雄先生

研究協力者： 石黒 健氏(前田建設)、高井敦史氏(京大)、
出口資門氏(長崎大)、小林優子氏(長野県
短大)、ほか各位

本研究に現場等を提供頂いた処分場事業者・関係者の方々