



地盤施工学的技術開発アプローチ ～ベントナイト混合土の締固め施工での適用事例の紹介～

安藤ハザマ ○山田淳夫

2017年12月20日

地盤工学会「福島第一原子力発電所の廃止措置への貢献を目指す『廃炉地盤工学』～地盤施工学の創設～」に関する講演会 2017



- 背景
- ベントナイト混合土の設計方法
- ベントナイト混合土の施工方法の検討
- まとめ



- ・福島第一で求められるプロジェクトマネジメント

- ・本事例における要求機能について

 - 放射性廃棄物の種類と処分方法

 - 放射性物質の生活圏への移行経路とシナリオ分類

 - 放射性廃棄物処分におけるベントナイトの役割



背景 福島第一で求められるプロジェクトマネジメント

- ・通常炉の廃止措置(原子炉/再処理施設等を含む、事故炉以外)
 - Decommissioning and Dismantling (D&D)
 - 放射性物質(燃料を含む)が管理下にある
 - 安全に放射性物質を取り出して処理・処分する
 - すでに実証された技術
 - マネジメント(現有手法の組み合わせ、工程・資金管理)
- ・廃炉(事故炉・福島第一)
 - Decommissioning of Reactor
 - 分散した放射性物質を一応の管理下に、燃料については不明
 - 新しい技術の開発を進めることが必要
 - マネジメント(新規技術と既存技術の組み合わせ)
 - トライアンドエラー

※プロジェクトマネジメントの種類が異なる



背景 福島第一で求められるプロジェクトマネジメント

○マネジメント(新規技術と既存技術の組み合わせ)

・何が求められるのか？ 何をすべきなのか？

⇒要求機能、要求性能が何か？、施工時の管理目標の設定をどうする？

・既往の技術で対応できないか？技術的に現状の課題は何か？

⇒要求機能、要求性能を満たすために必要な技術の抽出、開発

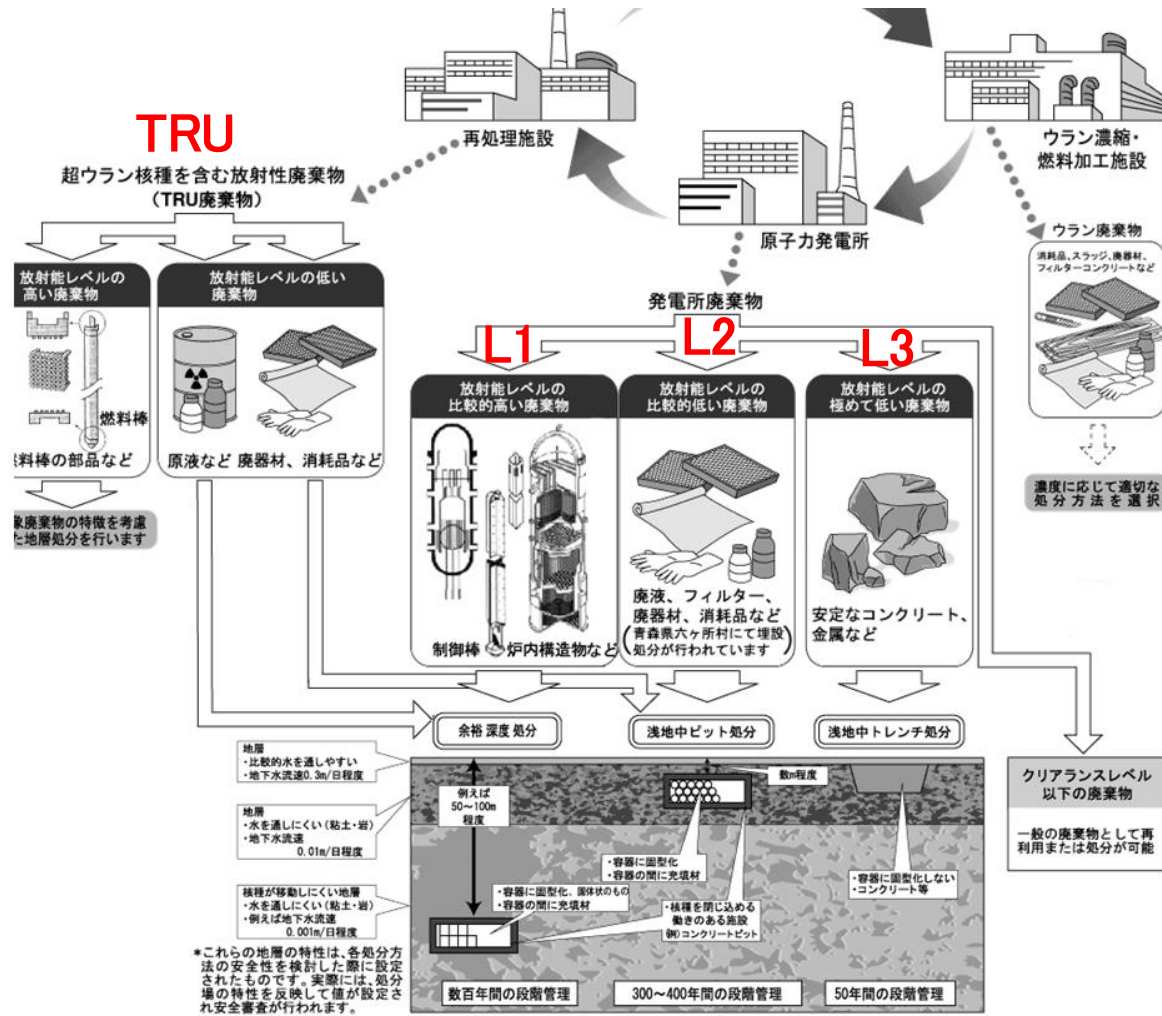
・与えられた条件(要求機能、要求性能、施工箇所、工程、予算・・・etc)に合致

※今回の事例紹介では、要求機能と具体的な性能値が与えられている場合、それらを満たすために必要な技術の抽出、開発要素の検討について説明する。



背景 本事例における要求機能について

放射性廃棄物の種類と処分方法



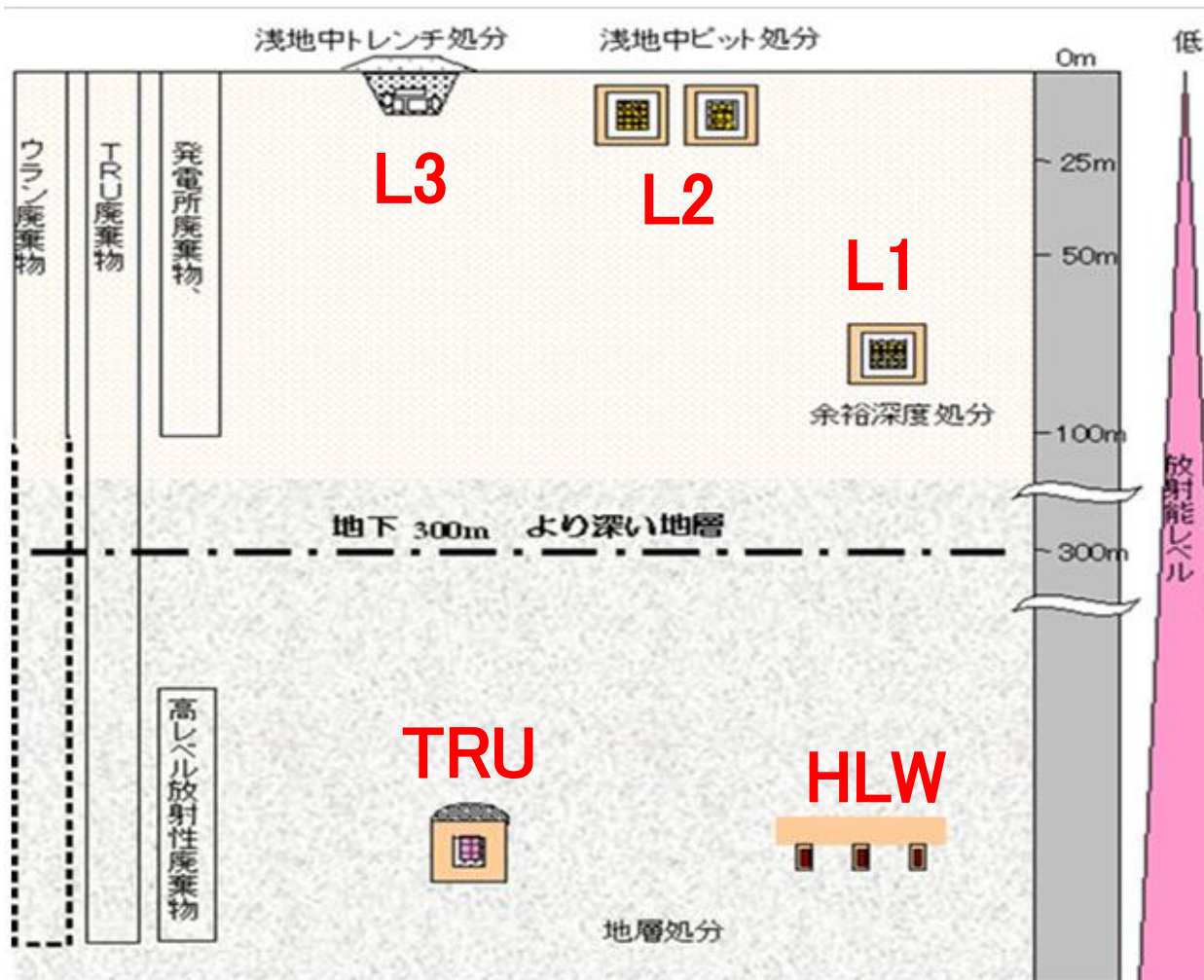
原子力発電所解体時の廃棄物の例

出典：資源エネルギー庁ホームページ



背景 本事例における要求機能について

放射性廃棄物の種類と処分方法



- ・廃棄物の放射能レベルによって処分方法が異なる。
- ・トレンチ処分を除き、バリア材としてベントナイトが使用される予定である。
- ・処分施設によりベントナイト系バリア材の仕様は異なる。

出典：資源エネルギー庁ホームページ



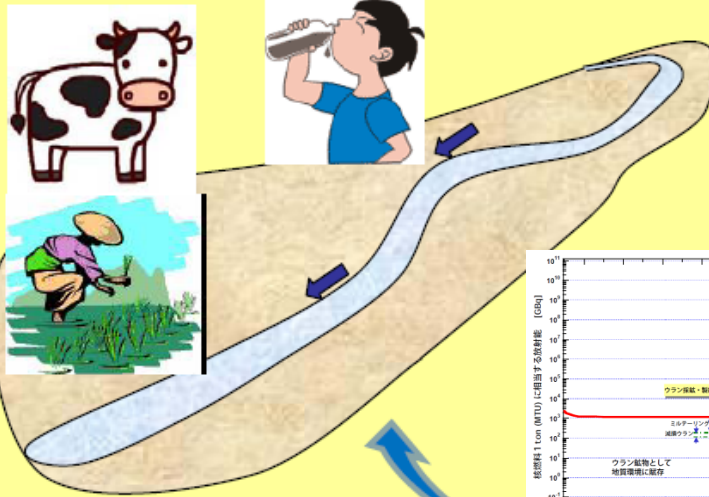
背景 本事例における要求機能について

放射性物質の生活圏への移行経路とシナリオ分類

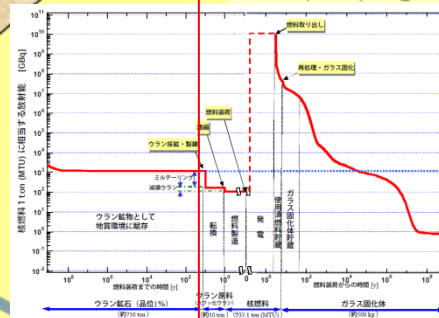


岩石・土壌に残存する放射性物質に直接・間接に接触する土地利用シナリオ

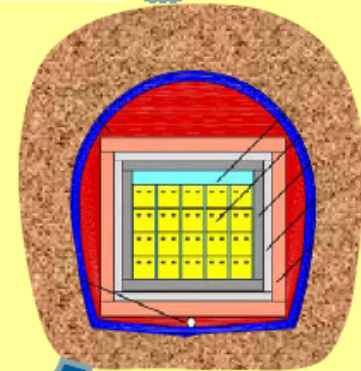
ガスの浮力や圧力により移行するガス移行シナリオ



地下水を介して移行する地下水シナリオ



※ベントナイト系バリア: 地下水の流れを遅くし、放射性物質の移動を抑制する
→廃棄物の放射能は時間と共に減衰



放射性物質の生活圏に至る全ての経路(液体、気体、固体)を考慮



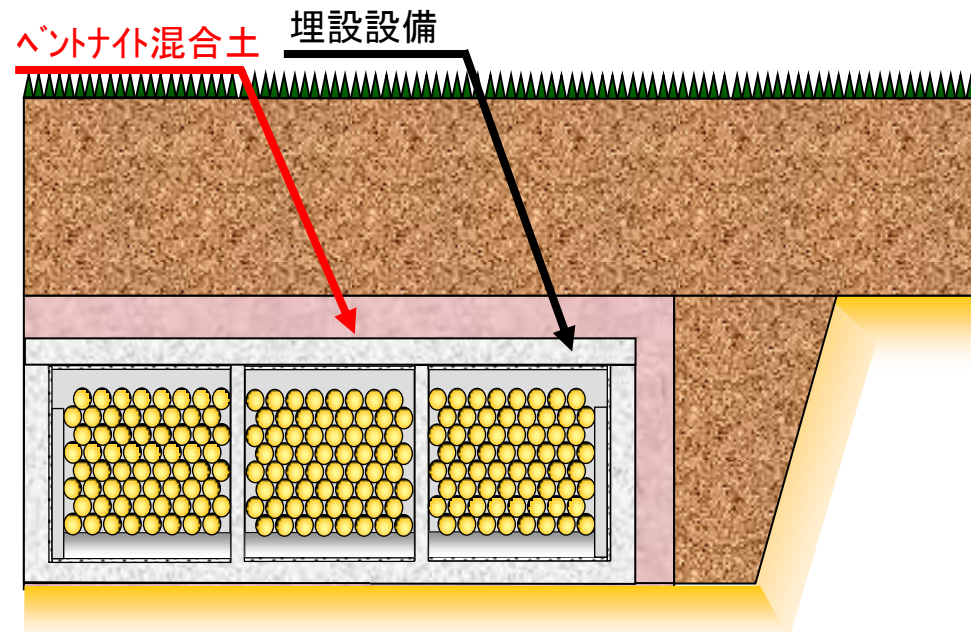
背景 本事例における要求機能について

放射性廃棄物処分におけるベントナイトの役割

- 放射性廃棄物の処分施設では、地下水による核種の移行を抑制するために埋設設備の周囲を**ベントナイト系バリア**で覆うことで、埋設設備内への地下水の侵入を極力抑えることとしている。
- 処分施設は、一般構造物とは異なり、放射性廃棄物を扱うことから、**長期の耐久性や機能維持**が求められる。

ベントナイト系バリアに要求される機能

ベントナイト系バリアに要求される機能の一つとして**低透水性(L2の場合透水係数で 10^{-10} m/s程度以下)**が期待され、その機能は、**長期に渡って維持**される必要がある。



浅地中処分施設 (L2) の概念図



低レベル放射性廃棄物処分施設(L2)における 人工バリアであるベントナイト混合土の 設計方法の検討例

- ・既往検討事例の参照
- ・要求性能から考慮する施工仕様
- ・設計のための物性値取得試験の例
- ・透水試験結果と配合設定に関する検討の例
- ・ベントナイト混合土の施工時の品質管理



ベントナイト混合土の設計方法

既往検討事例の参照

・ベントナイト混合土⇒土質材料

Q1.土工事(道路盛土、ダムなど)の既往事例を参照できないか？

Q2.設計方法、施工時の管理方法が適用できないか？

Q3.ベントナイトの混合土を施工した事例は無いか？

A1.通常の土工事(道路盛土、ダムなど)では、締固め機械で施工している

A2.要求機能は構造物によって異なるが、概ね締固め後の乾燥密度(=締固め度)、強度(支持力)、遮水性(低透水性)を満たす事が要件となっている。

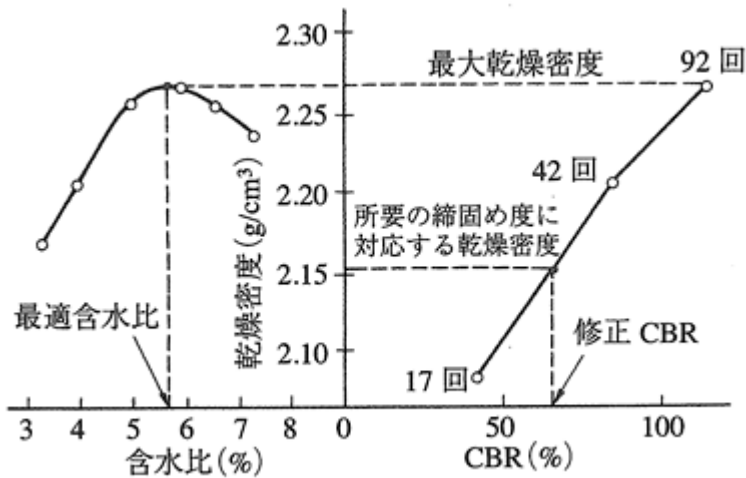
A3.一般廃棄物の処分場での実績がありそう。そこでの施工方法も参考となる。

⇒一から技術開発をすることが課題ではなく、これらの既往の考え方を踏襲できるかを確認することが課題となる。



ベントナイト混合土の設計方法

既往検討事例の参照



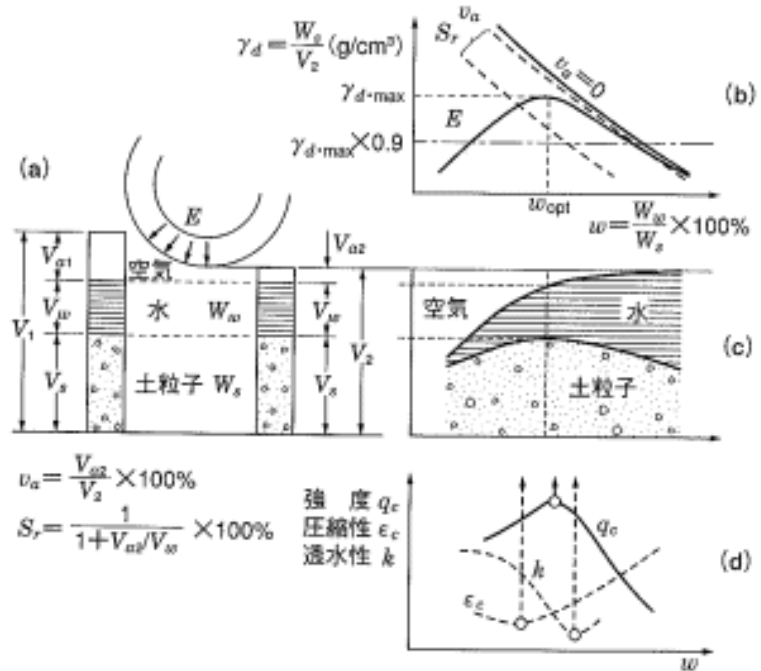
乾燥密度とCBR(支持力)との関係の例

(一財)新潟県建設技術センターHPより



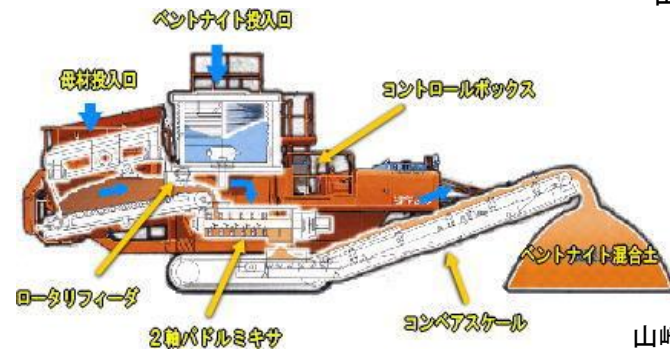
廃棄物処分場の遮水工に
利用されるベントナイト!

クニミネ工業HPより



締固めた土の状態変化・特性値との関係の例

山崎建設HPより



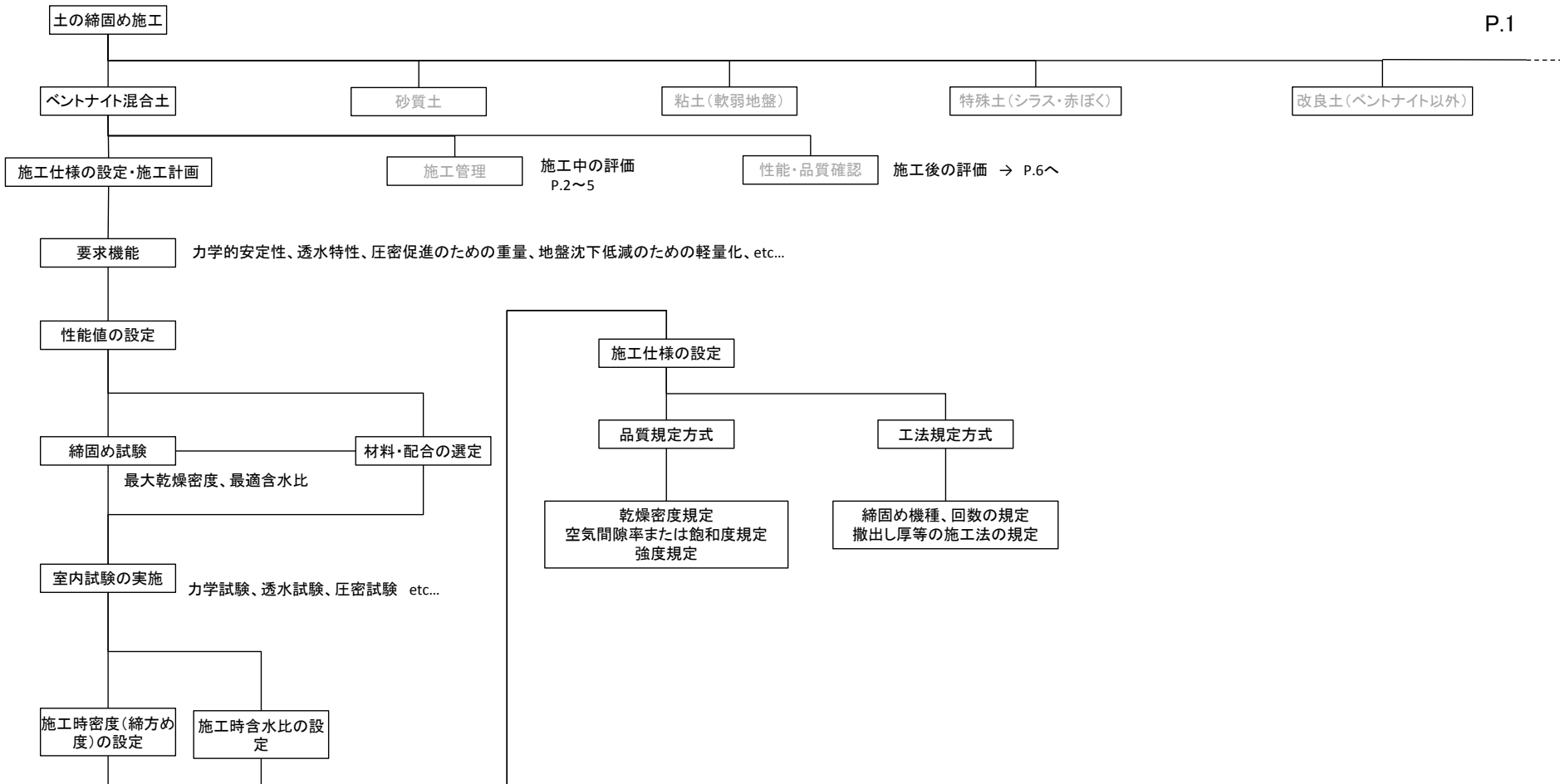
山崎建設HPより



ベントナイト混合土の設計方法

ベントナイト混合土の締固めの技術ツリー 施工仕様の設定・施工計画

P.1



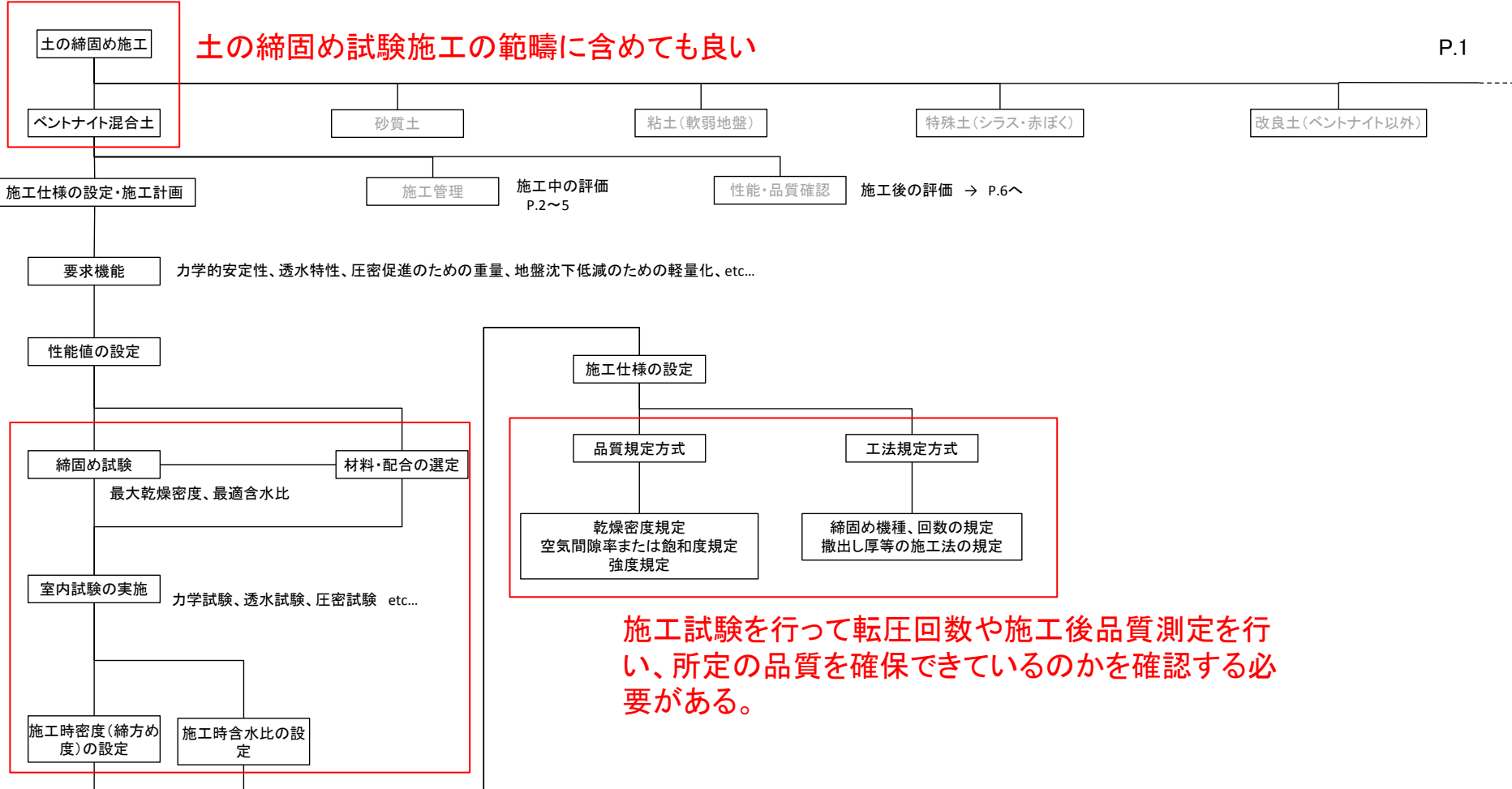


ベントナイト混合土の設計方法

ベントナイト混合土の締固めの技術ツリー 施工仕様の設定・施工計画

P.1

土の締固め試験施工の範疇に含めても良い



施工試験を行って転圧回数や施工後品質測定を行い、所定の品質を確保できているのかを確認する必要があります。

締固め試験、特性測定試験(強度試験、透水試験棟)で施工仕様を設定(乾燥密度・含水比・混合率)



要求性能から考慮する施工仕様の検討

ベントナイト系バリアに要求される主な機能

低透水性(L2の場合、透水係数で 10^{-10} m/s程度以下)

(L1やHLWでは、 10^{-13} m/s程度が必要とされることもある)

長期に渡って性能が維持されること



配合の検討(ベントナイトの混合率の設定)

- ・適用可能な材料の選定(入手の容易さ、コスト、長期的な化学的安定性)
- ・室内配合選定試験の実施(さまざまな条件・配合での透水試験の実施)



施工性の検討

- ・室内締固め試験 ⇒ 施工試験(透水係数を満たす乾燥密度・含水比の選定)
- ・施工時の品質管理方法の検討(例:代替特性としての締固め度)



設計のための物性値取得試験の例

試験項目

①基礎試験

土質試験、化学分析
メレンブルー吸着量測定

②力学試験

一軸、三軸圧縮強度試験

③膨潤試験

膨潤圧試験、膨潤変形試験

④透水試験

低透水性材料 (10^{-9} m/s以下) を対象にした試験



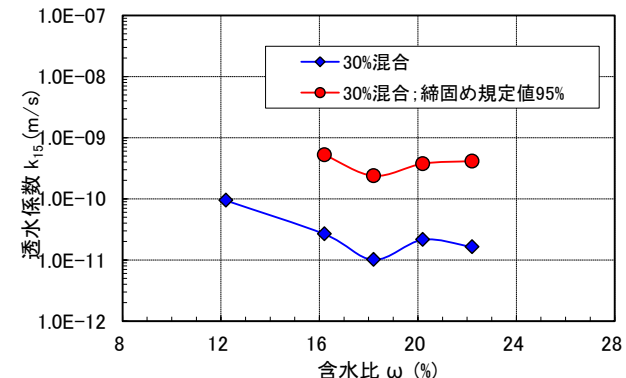
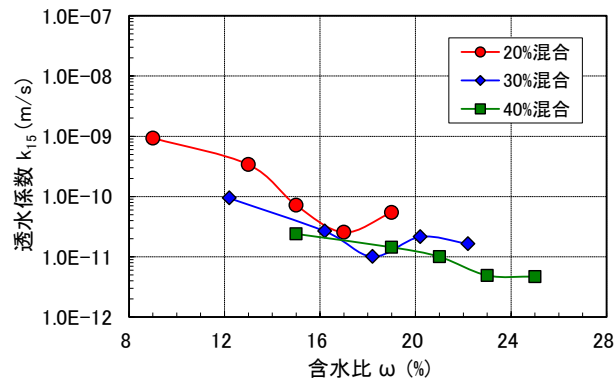
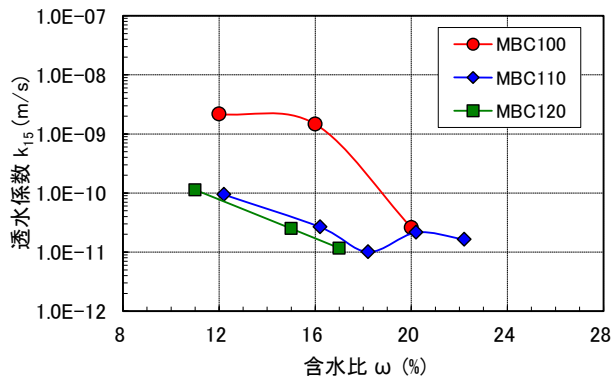
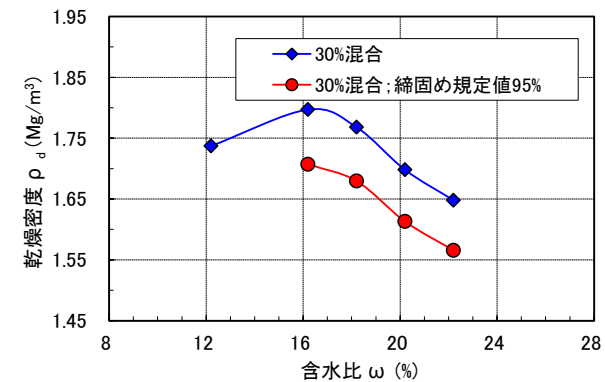
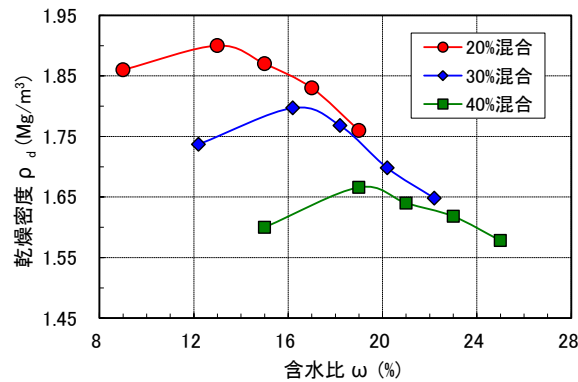
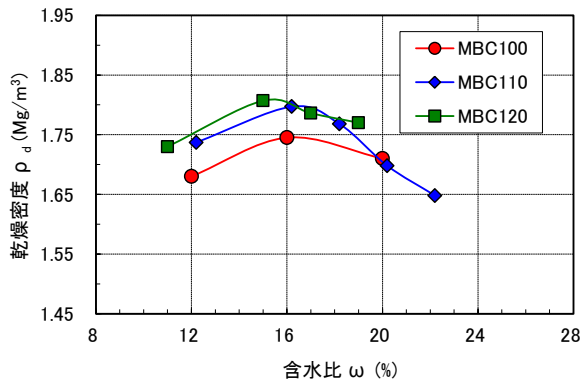
透水試験装置

ベントナイト混合土の配合を変えながら実施。

その結果と締固め試験で得られる乾燥密度・含水比との関係を把握し、施工時の仕様を設定する。(特に透水係数との関係を把握)



透水試験結果と配合設定に関する検討の例



ベントナイトの品質の影響

ベントナイトの配合率の影響

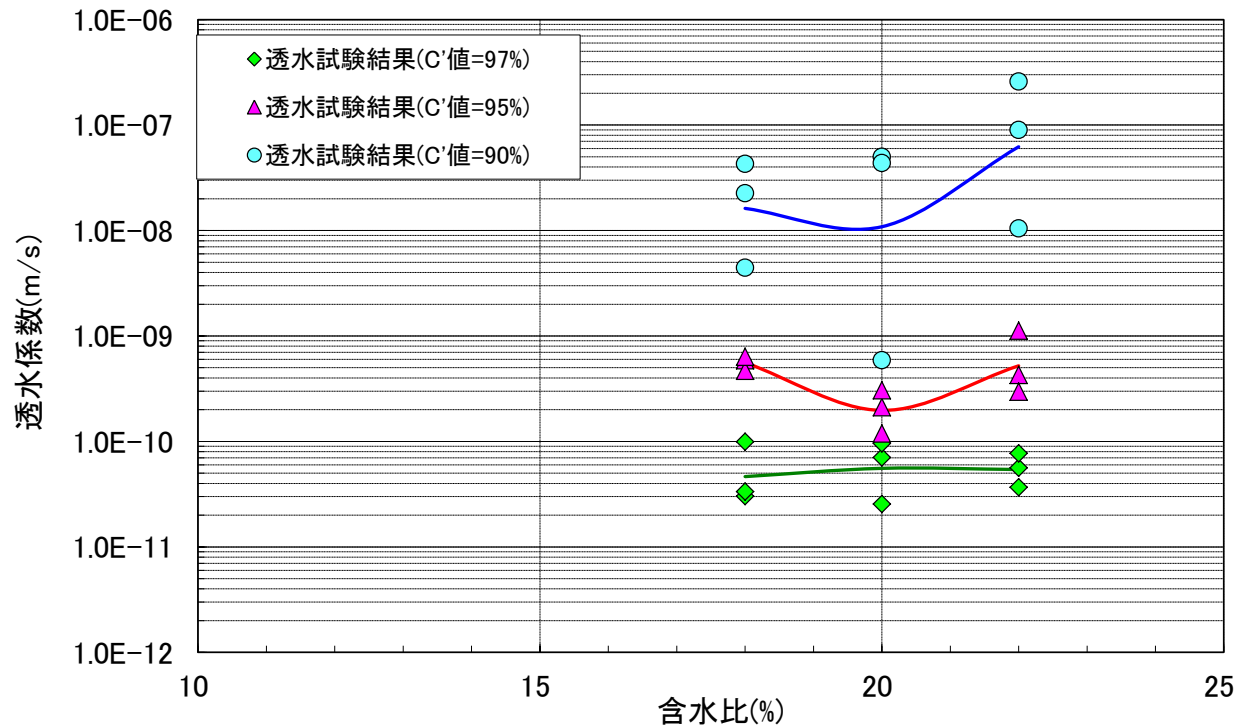
締固め規定値C値の影響

透水試験結果より最適な乾燥密度・含水比の関係を把握。施工時の条件を抽出。

⇒ベントナイト(Ca型ベントナイト、クニボンド)を乾燥質量比30%を砂に混合



透水試験結果と配合設定に関する検討の例



- ・最適含水比よりも湿潤側 ($w_{opt}+4\%$ 程度) \Rightarrow 締固め度Dではなく締固め規定値Cの採用
- ・締固め規定値C値 $> 95\%$ を目標 (モディファイドプロクターに対して)
- ・低透水性を確保するため、高い締固めエネルギーで締め固める必要がある



「要求性能から考慮する施工仕様の検討」に関するまとめ

- ・従来の考え方である、締固め曲線を基本とした乾燥密度・含水比で施工仕様を設定する方法が踏襲できそうであることがわかった。
- ・締固め曲線上の乾燥密度・含水比によって透水係数が変化し、これによって混合率や施工時の乾燥密度・含水比を抽出できることがわかった。
- ・混合率30%が合理的。
- ・最適含水比よりも湿潤側 ($w_{opt}+4\%$ 程度) \Rightarrow 締固め度Dではなく締固め規定値Cの採用
- ・締固め規定値C値 $> 95\%$ を目標 (モディファイドプロクターに対して)
- ・透水係数を満足するためには、ベントナイトの出荷時の品質、混合土の混合率・含水比を所定の値にする必要がある。
- ・低透水性を確保するため、高い締固めエネルギーで締め固める必要がある



材料製造	混合率, 含水比
敷均し	かさ密度 高さ(レベル測量)
転圧	乾燥密度, 透水係数 高さ(レベル測量)

- ・均質で高品質な締め固めを行うためには、各施工プロセスで品質確認を行う必要がある
- ・最終的には透水係数が目標を満足し、透水性に関する弱部をつくらなければ良い。
- ・そのための施工方法の開発と、施工後の品質確認の方法について検討



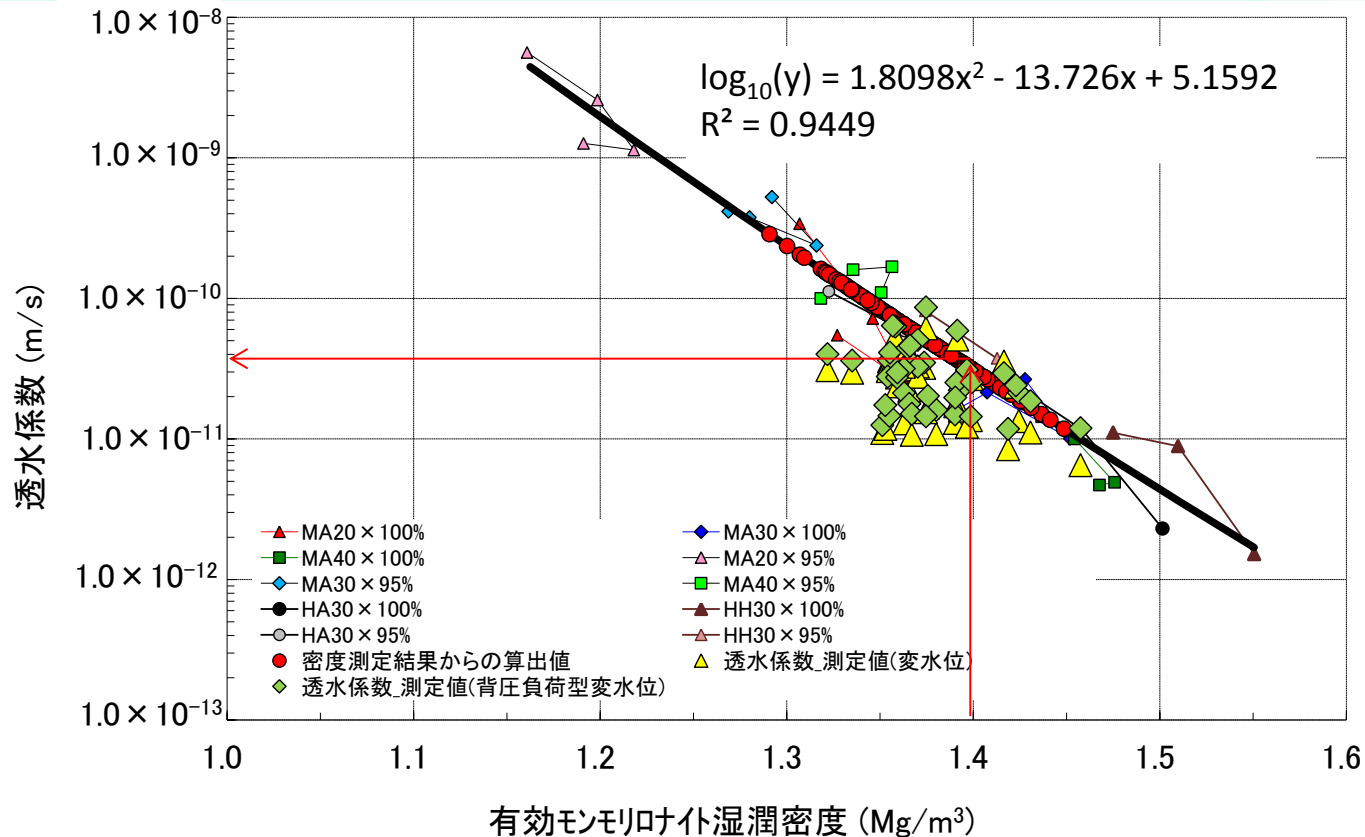
材料製造	混合率, 含水比
敷均し	かさ密度 高さ(レベル測量)
転圧	乾燥密度, 透水係数 高さ(レベル測量)

・透水試験⇒数十日を要する

※即時的に透水係数が目標に達しているかの確認方法は乾燥密度との相関性より推定することとしている。



ベントナイト混合土の施工時の品質管理



・有効モンモリロナイト湿潤密度⇒乾燥密度とベントナイト中のモンモリロナイトの含有率より算出

※ベントナイト中のモンモリロナイト量の確保(ベントナイトの製品としての品質の確保)と施工後の乾燥密度の測定が重要



ベントナイト混合土の施工方法の検討

- ベントナイト混合土の施工に関する技術の要点
- 練り混ぜ技術の技術開発要素の抽出
- 敷均し技術の技術開発要素の抽出
- 締固め施工技術の技術開発要素の抽出
- 性能、品質確認に関する技術開発要素の抽出



ベントナイト混合土の施工に関する技術の要点

- ・低透水性を確保するため、締固め規定値C値は95%以上が必要
⇒モディファイドプロクター程度の締め固めを行って
乾燥密度を確保
 - ・透水性に関して弱部を作らないために、均質な締め固めを行う必要がある
⇒ベントナイト混合土の練混ぜ製造段階でもばらつきを抑制
⇒敷均し高さ・かさ密度のばらつきも抑制
 - ・透水係数と有効モンモリロナイト密度(≒乾燥密度)との間に相関性がある
⇒乾燥密度を測定することで、透水係数を推定
- ※施工技術(練混ぜ・敷均し・転圧)、品質管理技術(乾燥密度)の確立が重要



練り混ぜ技術の技術開発要素の抽出

バッチ式



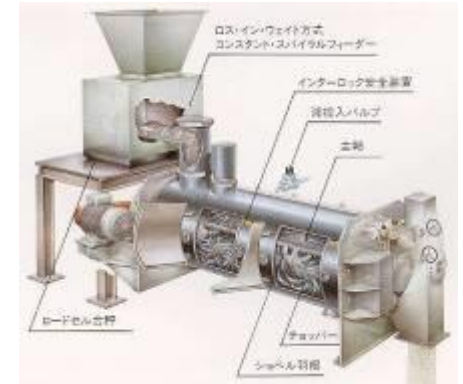
パグミル

ジクロス

ペレガイア

アイリッヒ

連続式



自走式土質改良機SR-2000G

GeoTom(二軸)

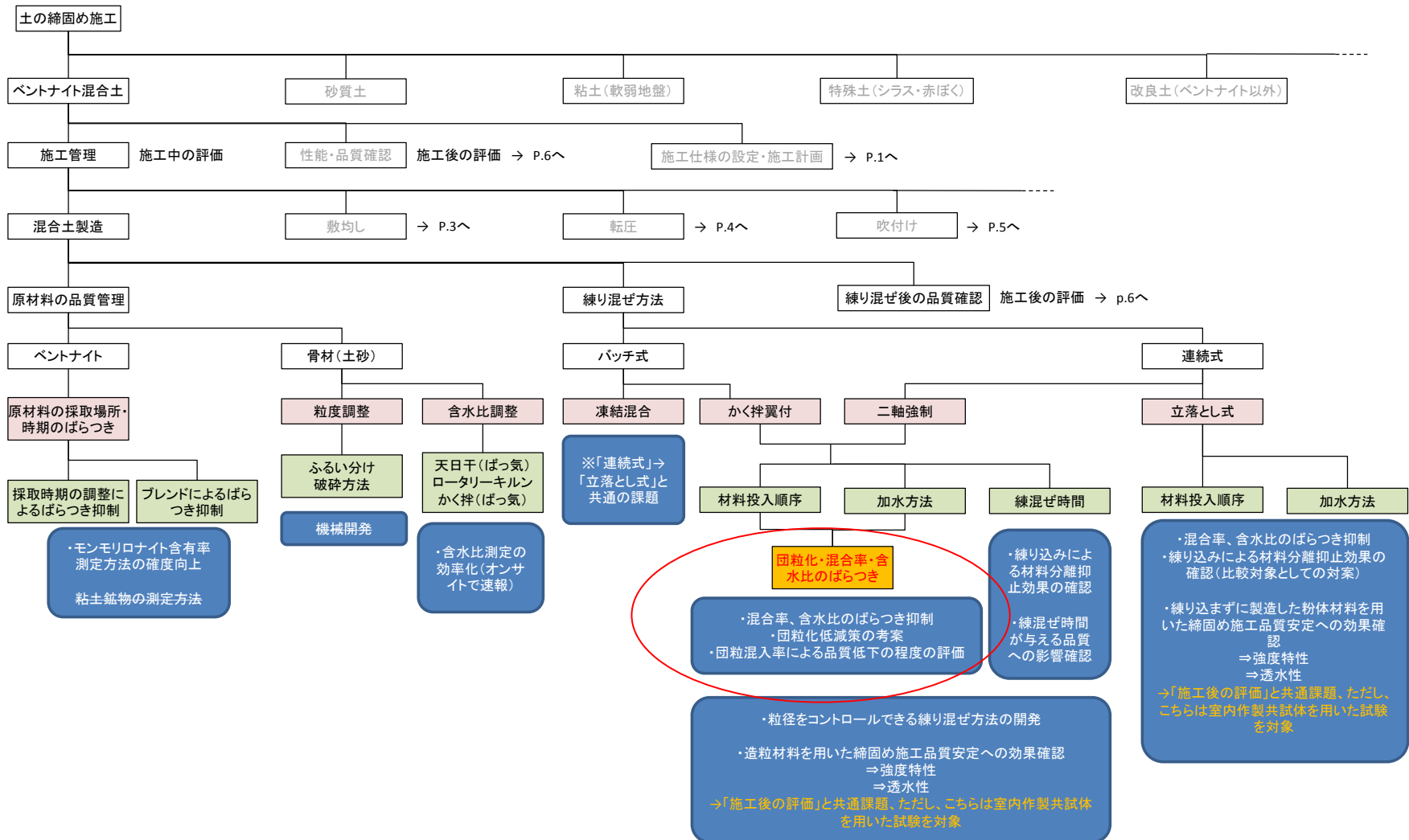
プロシエア

※混合土の仕様や必要量に応じて適切な工法を選択する。



練り混ぜ技術の技術開発要素の抽出

ベントナイト混合土の締固めの技術ツリー 混合土製造





敷均し技術の技術開発要素の抽出



大型フィニッシャー



小型フィニッシャー
(幅2m)



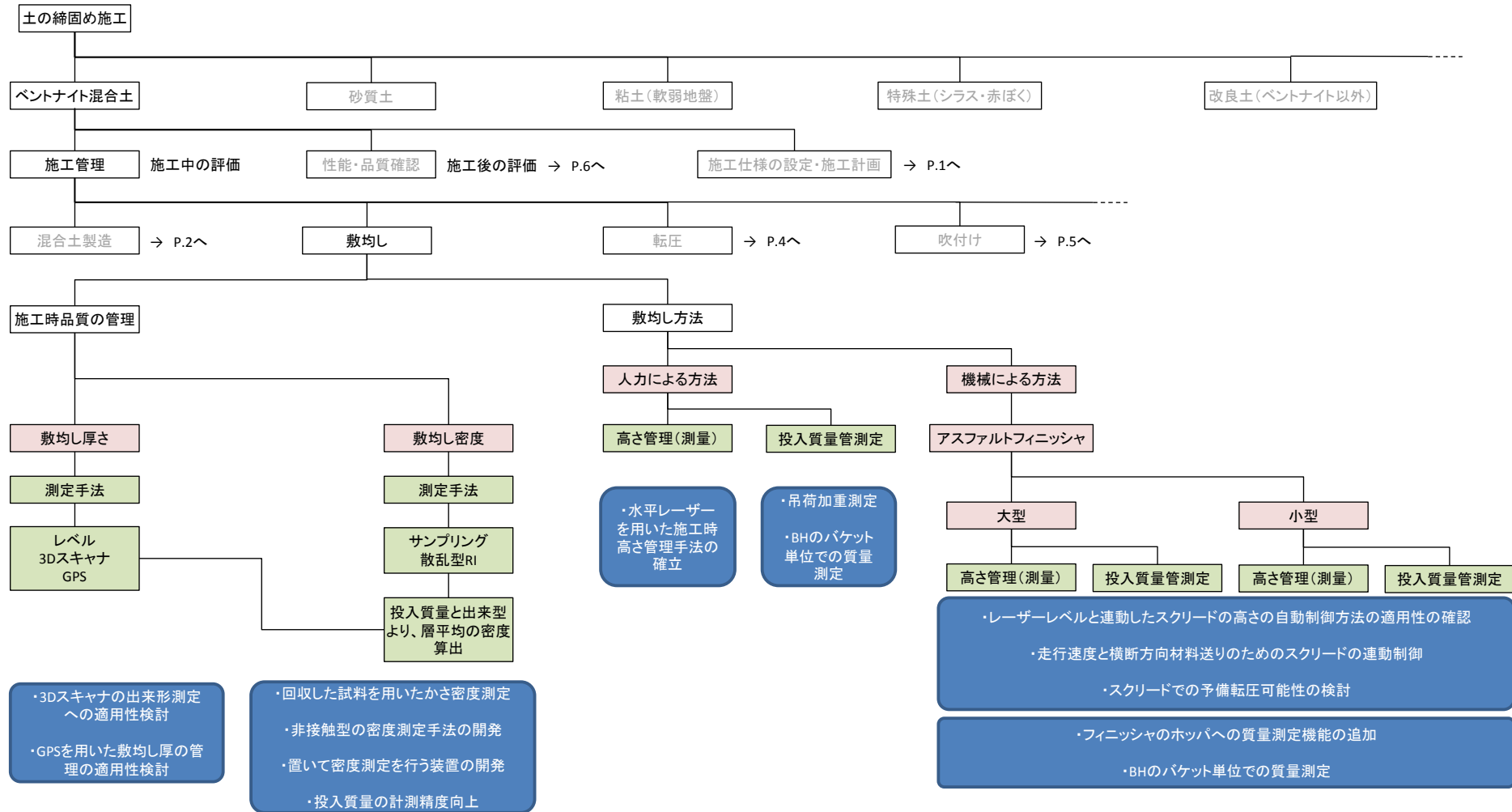
小型敷均し機
(幅1m)

※均質、平滑に敷き均して転圧後のばらつきを抑制するには、ブルドーザー等ではなく、アスファルトフィニッシャーのような敷均しが必要。



敷均し技術の技術開発要素の抽出

ベントナイト混合土の締固めの技術ツリー 敷均し





締固め施工技術の技術開発要素の抽出



大型振動ローラ



吹付け施工



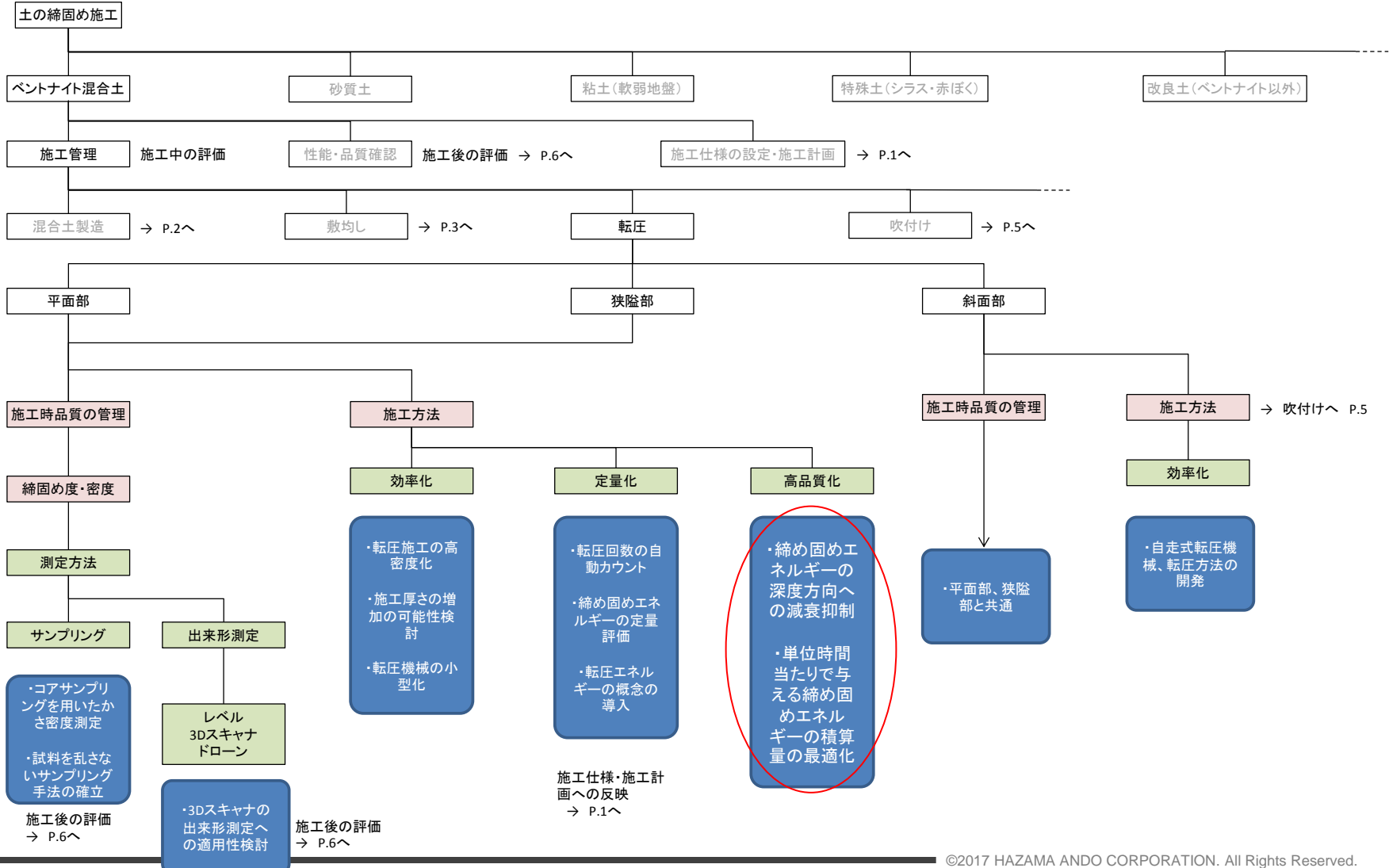
小型振動ローラ

※高密度に転圧する転圧ローラーは適用性の確認が必要。吹付けに関しては、適用性・施工後の乾燥密度がどの程度なのかを確認する必要がある。



締固め施工技術の技術開発要素の抽出

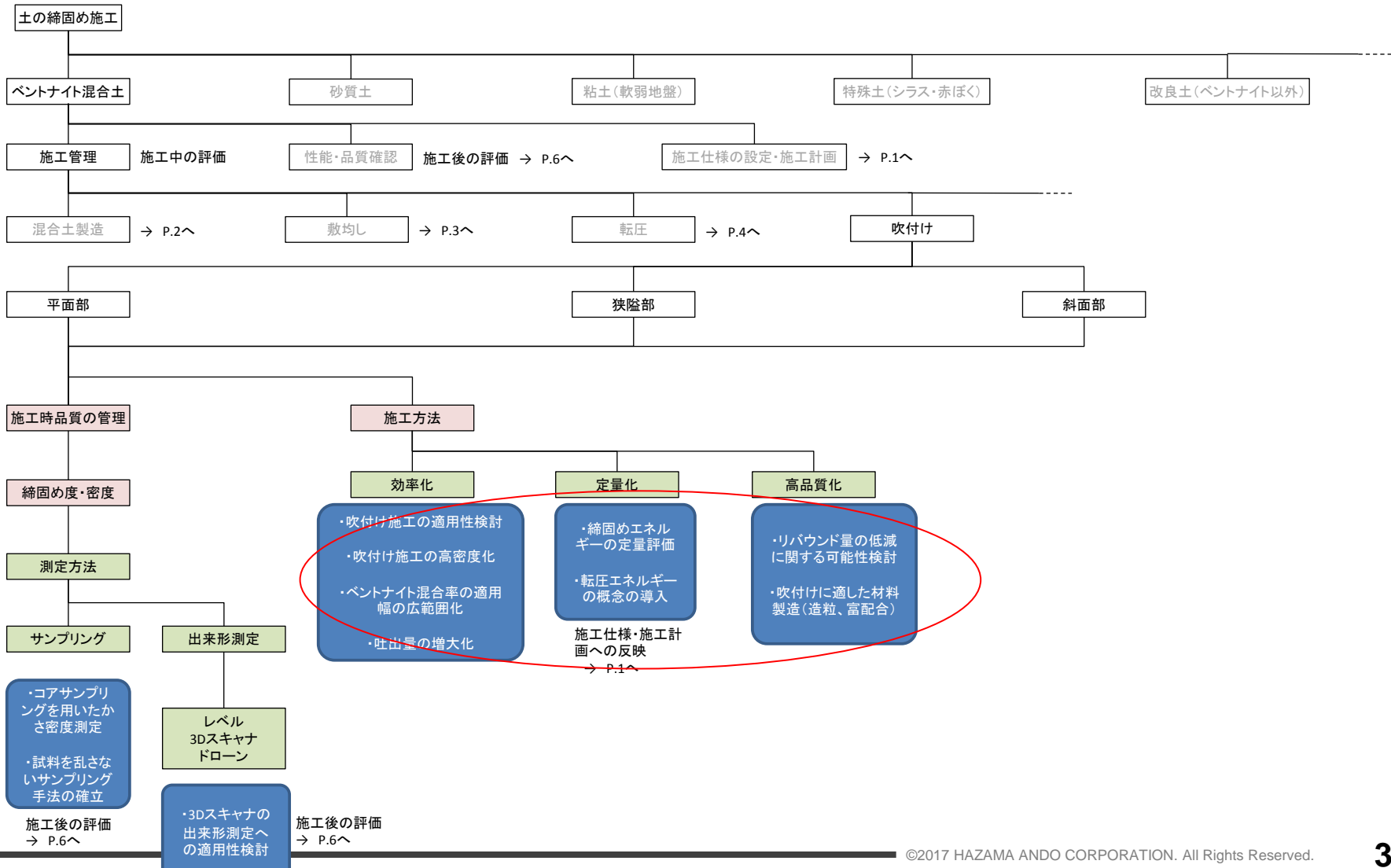
ベントナイト混合土の締固めの技術ツリー 転圧





締固め施工技術の技術開発要素の抽出

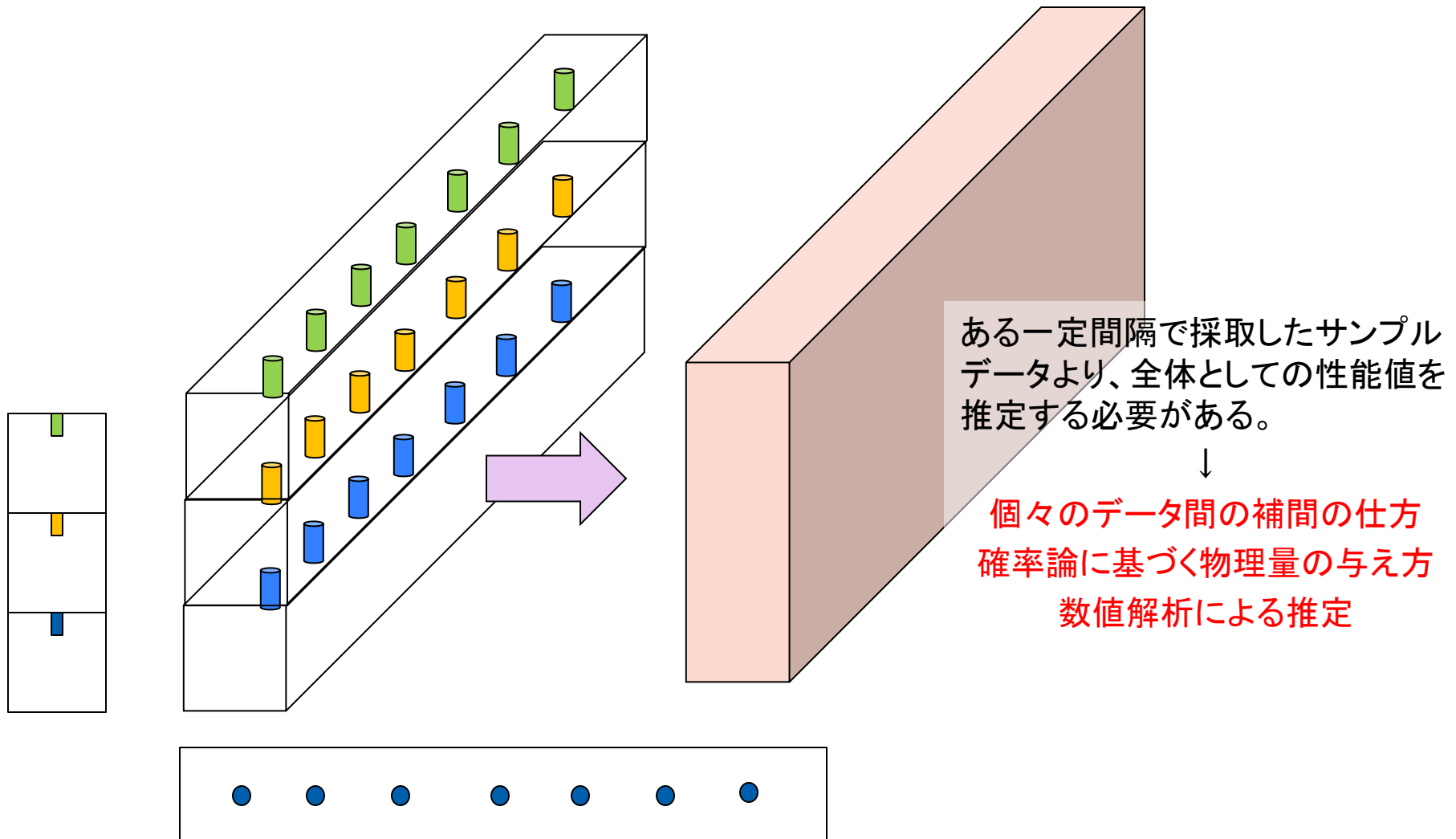
ベントナイト混合土の締固めの技術ツリー 吹付け





性能、品質確認に関する技術開発要素の抽出

- ・点群データからの連続したデータの推定

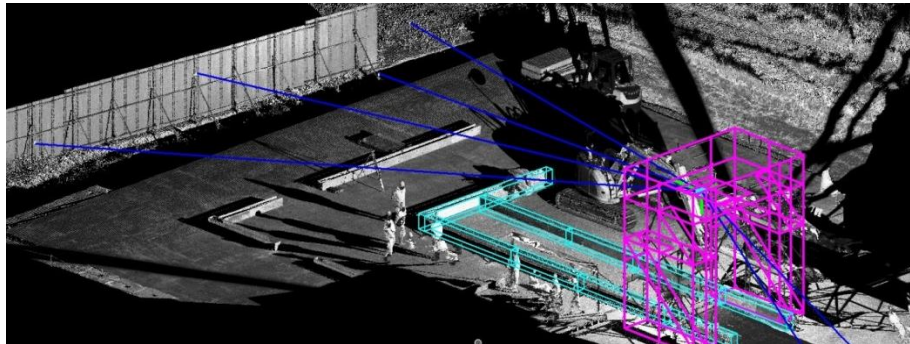




性能、品質確認に関する技術開発要素の抽出

項目	手法	機材 (メーカー)	写真
密度・含水比	破壊	コア サンプリング (-)	
	非破壊	散乱型RI (フィールド テック)	
		土壌密度計 SDG (TRANSTECH SYSTEM)	

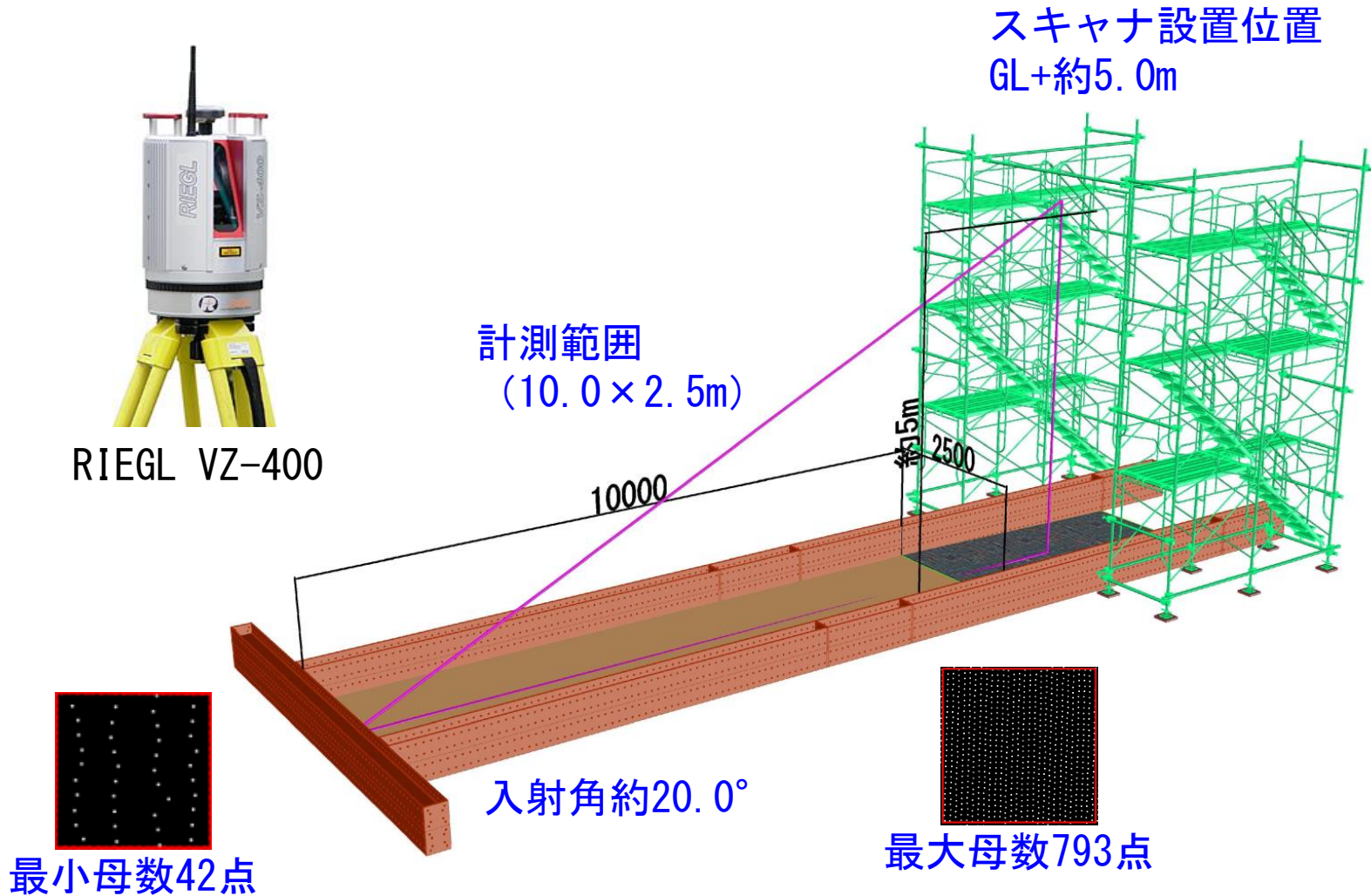
項目	手法	機材 (メーカー)	写真
高さ測定結果を用いた密度の換算	測量	3Dレーザース キャナー (REIGL VZ-400)	





性能、品質確認に関する技術開発要素の抽出

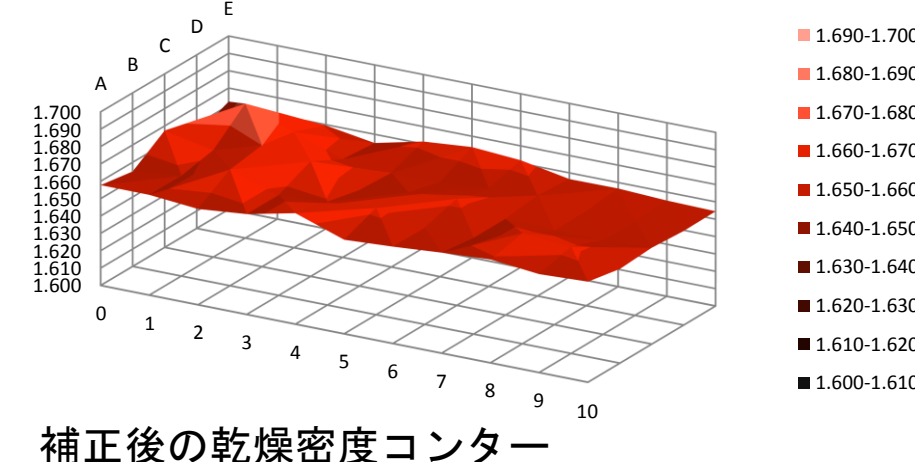
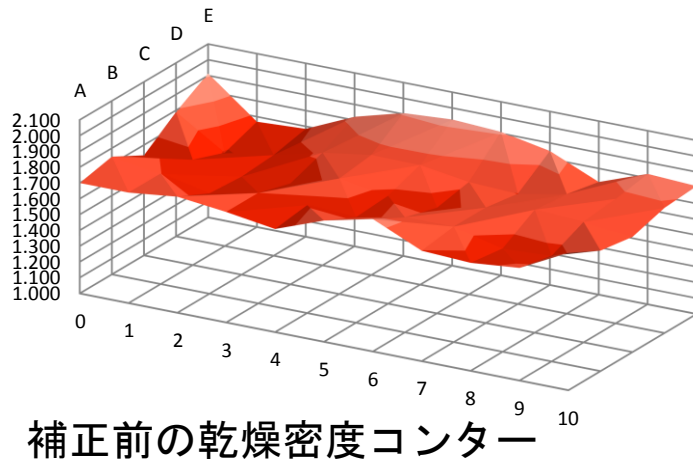
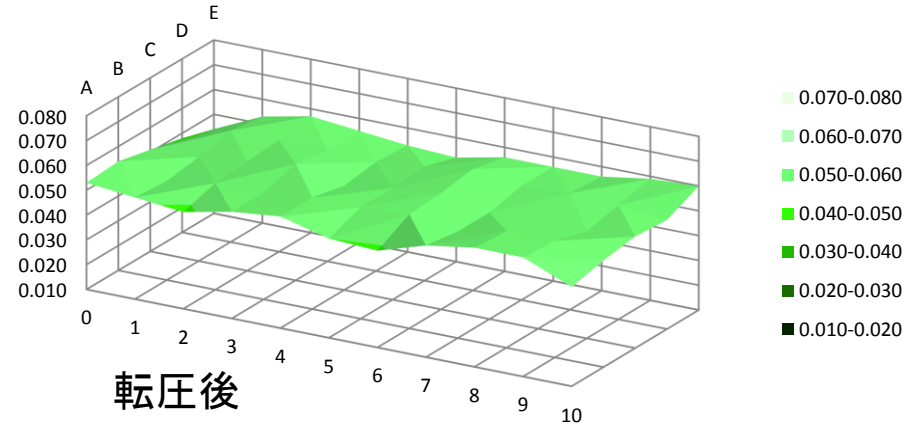
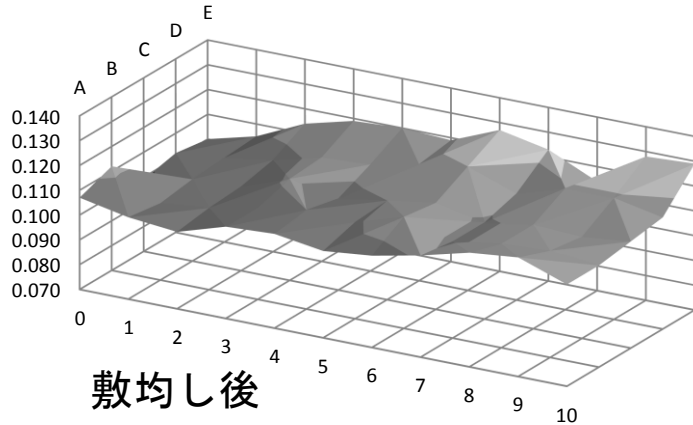
3Dレーザースキャナの測量結果からの乾燥密度の推定事例





性能、品質確認に関する技術開発要素の抽出

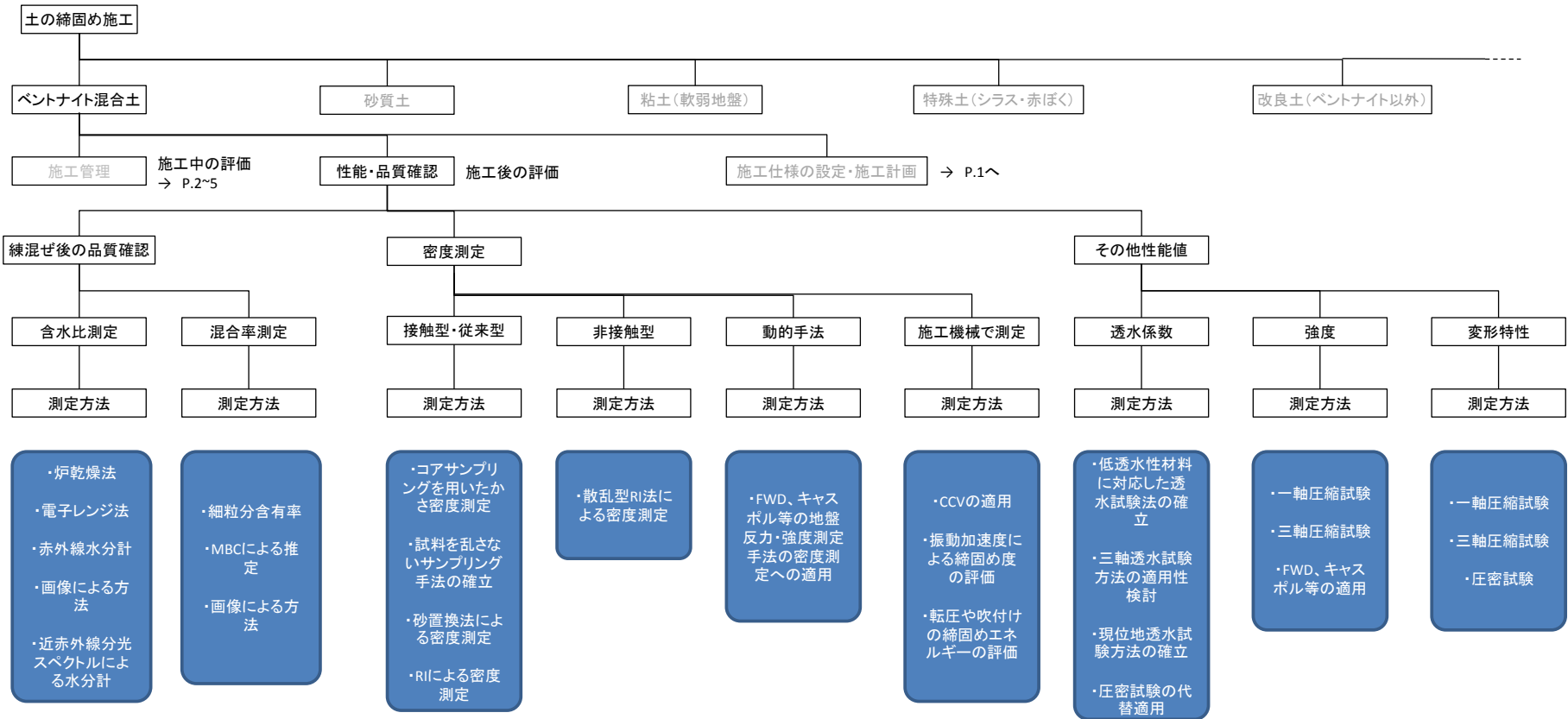
3Dレーザースキャナの測量結果からの乾燥密度の推定事例





性能、品質確認に関する技術開発要素の抽出

ベントナイト混合土の締固めの技術ツリー 性能・品質確認



- ・点情報から線的、面的な構造物全体としての性能評価
- ・マクロ統帥係数、マクロ視点での強度評価、耐震性能評価
- ・弱点があった場合、性能値が下振れした場合の全体性能への影響評価
- ・構造物全体としての性能から考慮した施工誤差の許容幅の評価



放射性廃棄物処分施設における人工バリアであるベントナイト混合土の設計方法、施工方法、品質管理方法の開発要素の抽出を行うプロセスについて説明した。今回は低レベル放射性廃棄物の処分施設のベントナイト混合土を例として紹介した。

- ・基本的に、ベントナイト混合土も土の締固め施工の範疇として取り扱うことができることを示した。
- ・設計方法、施工方法、品質管理方法について、既往の土の締固め施工での技術の適用かその延長としての開発で対応できることを示した。
- ・既往技術調査の取りまとめ方法として、要因特性図のような技術ツリーを示した。このツリーによって技術開発要素の抽出が容易にできることを示した。



ご清聴ありがとうございました。