[redacted]農村地域防災減災事業
（ため池整備）[redacted]

配合試験報告書

[redacted]

老朽化ため池改修技術
ボンテラン工法研究開発民間機構
株式会社森環境技術研究所

目　次

1. 試験概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
1.1　試験件名・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
1.2　老朽化ため池改修についての知見集約・・・・・・・・・・・・・・2
1.3　知見集約を踏まえた対策工法（配合試験）の選定・・・・・・・・5
2. 改良目標の設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・6
3. 現場と室内の強度比による割増率の設定・・・・・・・・・・・・・・9
4. 配合試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・10
4.1　試料の採取状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・10
4.2　改良対象土の物理特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・10
4.2.1　含水比および湿潤密度等の測定・・・・・・・・・・・・・・・10
4.3　改良材料一覧・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・11
4.4　改良対象土含水比設定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・12
4.5　配合試験メニュー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・13
4.6　一軸圧縮試験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・15
4.7　コーン指数試験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・15
4.8　透水試験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・16
4.9　室内試験の手順と現場施工の整合について・・・・・・・・・・・17
5. 試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・18
5.1　一軸圧縮試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・18
5.2　コーン指数試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・19
5.3　透水試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・20
6. 環境（六価クロム溶出試験）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・21
7. 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・22
8. 総合評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・23
9. 乾湿繰返し試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24
10. 改良土の乾湿繰り返しおよび凍結融解に対する耐久性について・・・34
11. 改良土の耐浸食性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・37
12. 改良土の地震対策・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・38
13. 巻末　六価クロム溶出試験　濃度計量証明書・・・・・・・・・・・・39

1. 試験概要

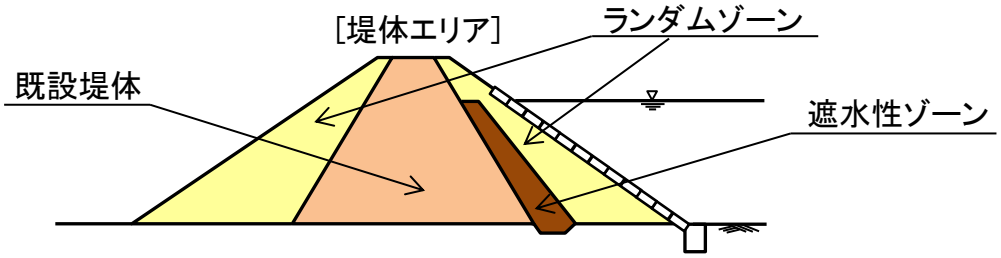
1.1 試験件名

[redacted]農村地域防災減災事業(ため池整備)[redacted]の混合土を原材料とした遮水性ゾーンの配合試験

1.2 老朽化ため池改修についての知見集約

①浚渫土(底泥土の活用)

近年、ダム近傍で堤体安定に必要な強度と遮水性を同時に満足する築堤土を入手することが難しく、堤体改修が計画的に進まない状況にある。一方、公益社団法人農業農村工学会、土地改良事業設計指針「ため池整備」、PP.25-26 には以下の記載がある。



②構造物としての基本条件の検討
　堤体、洪水吐等の安全性、堤体護岸の維持管理作業性、経済性等
③環境に配慮した資材の活用の検討
　浚渫土の活用の検討、堤体下流法面の緑化など

図-1 ため池における環境との調和に配慮した検討例

老朽化ため池には底泥土が厚く堆積しており、貯水容量の減少や水質の悪化などの貯水機能の阻害や低下の原因になっている。一部では機能回復のため底泥土の浚渫除去が行われているが、底泥土は含水比が極端に高い超軟弱な状態にあり、捨土するにもそのままの状態では運搬することさえも容易ではない。また、最近では底泥土の捨て場所を確保することが経済性だけでなく環境面からも難しくなってきている。
そこで、底泥土を原材料としたため池改修工法は経済性の観点から効果が期待される。

図-2 浚渫土（ため池底泥土）の活用事例

②財団法人国土技術センター「河川土工マニュアル」P.70 に以下の記載がある。

堤体材料として評価の低い土（浚渫土、高有機質土）は「土質安定処理工法によって築堤した場合、完成後の堤体に乾燥収縮によるヘアークラックが発生することがある。したがって、室内試験による基礎的な検討を行い、できれば試験施工による検証を行った上で工法を決定するのがよい。」

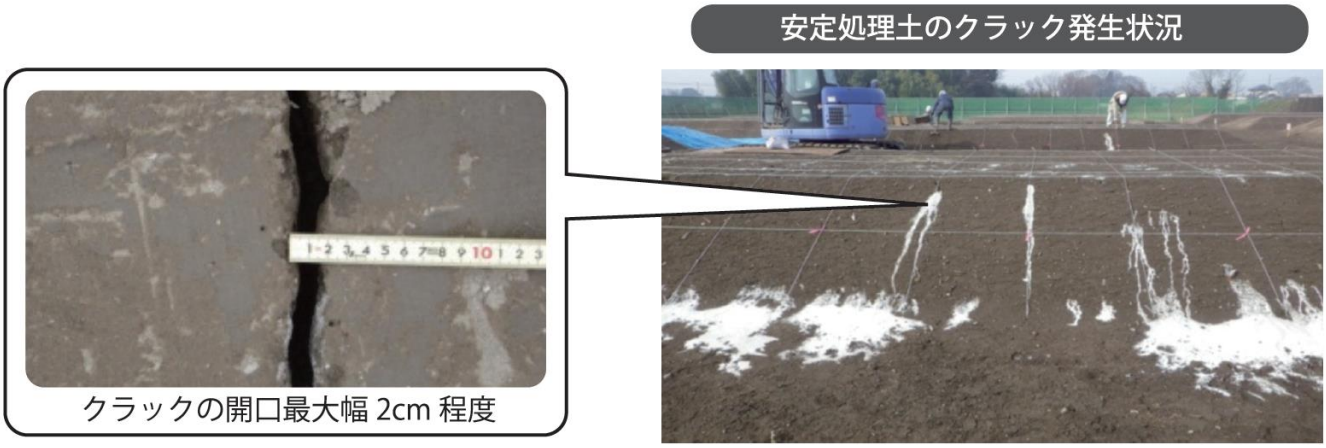


図-3 国土交通省関東地方整備局河川部河川工事課資料提供

③社団法人セメント協会、セメント系固化材による地盤改良マニュアル第 4 版、PP.56-57 では安定処理土の凍結融解および乾湿繰返しによる劣化に対する抵抗性について以下に示す注意を促している。

「安定処理土が地表面に露出している場合、気象条件の厳しい所や池等斜面部においては、凍結融解の繰返しや湿潤・乾燥の繰返し作用により改良土の表面は劣化する恐れが十分に考えられる。」

④独立行政法人土木研究所、建設汚泥再生利用マニュアル、PP.219-220 では、安定処理土の耐久性、乾湿繰返しについて以下に示す注意を促している。

「拘束圧の無い状態での乾湿繰返しにおいては、ときほぐされた建設汚泥改良土は、安定処理されていても表面部には細粒化が生じる。」

⑤公益社団法人地盤工学会、豪雨地盤災害に対する提言、河川堤防の被害 P.70（2019 年 5 月）には以下の記載がある。

堤防浸食について様々な検討が行われているものの、地盤材料の侵食特性については、力学特性のように三軸試験や一面せん断試験など、学会基準となるような統一的な手法による評価方法は提案されていないのが現状である。つまり、地盤材料に応じた侵食速度などを一般的な土質試験から得られる様々なパラメータから推定する方法は確立されていない。

越水により川裏側で洗堀が生じ、小規模な崩壊が継続して発生し、河川堤防が決壊に至る事例が多発している。

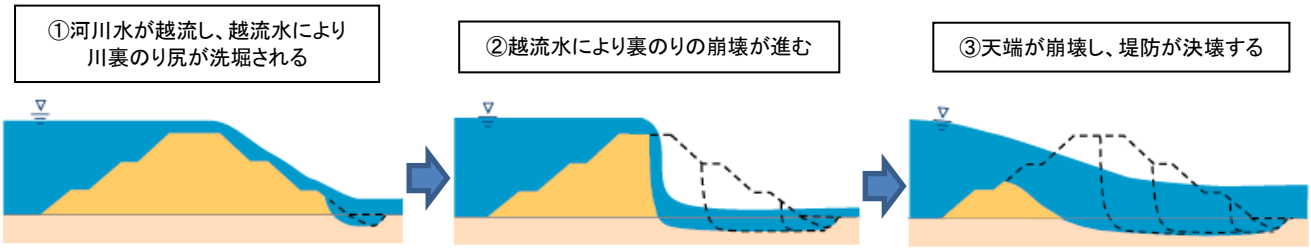


図-4 越水による堤防決壊のイメージ図

平常時の水位変動による上流堤体法面の浸食

ため池は自然の湖沼と比べ、かんがい期に放水され、その後、翌年の耕作に向けた貯水のため、水位が再び上昇するなど、人為的な操作により水位が大きく変動するという特徴を持つ。そのため上流側堤体法面が浸食される。

図-5 上流堤体法面の侵食

⑥公益社団法人地盤工学会豪雨地盤災害に対する提言ため池の被害 P.115（2019 年 5 月）には以下の記載がある。

「ため池堤体の豪雨に対する補強対策については、補強土工法や地盤改良などの地盤工学分野での最新の技術をため池の規模や基礎地盤状態などに応じて適切に適用する必要がある。これまでの、研究成果は模型実験や数値解析が主であり、実際のため池に適用できている技術は必ずしも多くはなく、いくつかの実施事例でもその経年的な状態の把握が十分ではない。このような、新技術の導入については、単純な実績主義と直工費だけで工法選定する従前の方針を改め、長期に亘る高い安全性が多様な方法で明らかになっている経済的な技術を社会に導入する行政的な転換とともに、これに応える研究・技術分野でのモニタリングや実証評価などの両面の取り組みが重要である。

1.3 知見集約を踏まえた対策工法（配合試験）の選定

一般社団法人農業農村整備情報総合センター（ARIC）が運営する農業農村整備民間技術情報データベース（NNTD）の分野別検索によれば「ため池底泥土」「堤体改修・補強」に関する技術は以下に示す 2 工法が登録されている。

1. 砕・転圧盛土工法　一般社団法人農業農村整備情報総合センター（ARIC NNTD 0194）

2. 老朽化ため池改修技術ボンテラン工法　㈱森環境技術研究所（ARIC NNTD 0245）

1.2 に示す知見を踏まえ

①クラックの発生抑制

②改良土の乾湿・凍結耐久性

③改良土の耐浸食性

④液状化抵抗性

⑤既設堤体との密着性

について上記 2 工法について各々が発行する技術資料および参考文献により忠実に精査し、ため池底泥土を原材料として人工材料を製造する堤体改修工法に関する比較検討書を作成した。（別途、比較検討書を添付する）

その結果、改良土のクラック発生、乾湿・凍結耐久性、耐浸食性、液状化抵抗性および既設堤体の密着性について、模型実験や数値解析の評価だけでは無く、実際のため池で適用を確認出来ている点を考慮し、老朽化ため池改修技術「ボンテラン工法」を採用することとし、以下、配合試験を実施するものとする。

2. 改良目標の設定

[redacted]の実施設計書に基づき設計基準を設定する。※1

ボンテラン改良土(安定処理土)は固化材による土粒子の科学的固結構造により所定の強度に制御できる。ボンテラン改良土のせん断強さSは粘着力Cが際立っているので図-6に示すとおり内部摩擦角 ϕ は考慮しないものとする。すなわち一軸圧縮試験により評価するものとする。※2

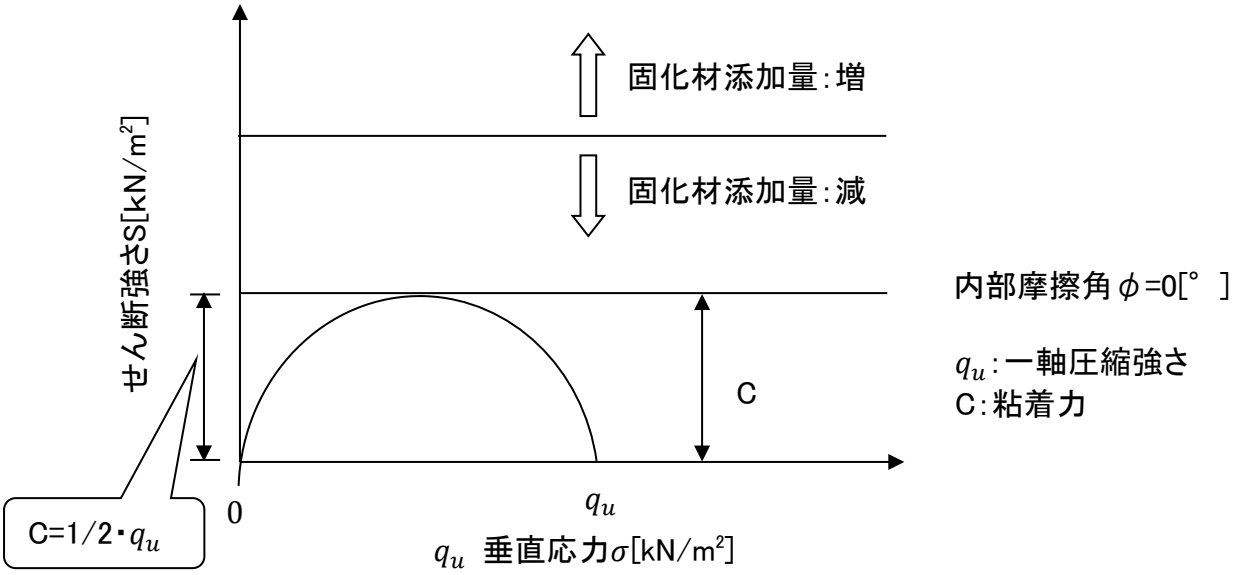


図-6クーロンの式

①円弧すべりの安定計算

実施設計書によれば、円弧すべりの安定計算では、内部摩擦角を 0〔°〕として
粘着力 C＝117〔kN/m²〕以上と設定している。
したがって求める一軸圧縮強さq_u＝2C となり、
q_u＝2×117＝234〔kN/m²〕となる。

②土被り圧に対する目標強度

実施設計書 3-36 に示す標準断面より最大盛土高 H＝5.5〔m〕と示されている。
土被り圧σ_v＝ρ_t・g ・Z
湿潤密度ρ_t＝1.871〔g/cm³〕※3
重力加速度g＝9.8〔m/sec〕
土被り深さZ（最大盛土高 H）Z＝5.5〔m〕

土被り圧σ_v＝1.871×9.8×5.5≒100〔kN/m²〕

$q_u \geqq \sigma_v$と設定するので、土被り圧に対する目標強度は
一軸圧縮強さq_u＝100〔kN/m²〕以上となる。

③トラフィカビリティ

表-1に示す建設機械の走行に必要なコーン指数より施工機械（15t級ブルドーザー）のトラフィカビリティ確保のため、設計基準強度（コーン指数）q_c＝500〔kN/m^2〕以上とする。

表-1 建設機械の走行に必要なコーン指数※4

建設機械の種類	コーン指数 qc(MN/m^2)	建設機械の接地圧 (kN/m^2)
超湿地ブルドーザー	0.2 以上	15～23
湿地ブルドーザー	0.3 〃	22～43
普通ブルドーザー(15t 級程度)	0.5 〃	50～60
普通ブルドーザー(21t 級程度)	0.7 〃	60～100
スクレープドーザ	0.6 〃（超湿地型は 0.4 以上）	41～56(27)
被けん引式スクレーパ（小型）	0.7 〃	130～140
自走式スクレーパ（小型）	1.0 〃	400～450
ダンプトラック	1.2 〃	350～550

④透水係数

土地改良事業設計指針「ため池整備」公益社団法人農業農村工学会※5にはコア材の透水係数 k は
室内試験値：k＝5×10^{-6}〔cm/s〕以下
現場試験値：k＝1×10^{-5}〔cm/s〕以下と記載されている。
さらに実施設計書 3-43 に同様の値が記載されている。
なお、ランダム材は設定なしとされている。
したがって、室内試験値目標透水係数：k＝5×10^{-6}〔cm/s〕以下とする。

⑤六価クロム溶出試験※6

施行前の配合設計時の室内配合試験段階で環境庁告示 46 号溶出試験（試験方法 1）を実施し、六価クロムが土壌環境基準値 0.05〔mg/ℓ〕以下にあることを確認しなければならない。
したがって、配合試験時に六価クロム溶出試験を実施して、土壌環境基準値 0.05〔mg/ℓ〕以下であることを確認することとする。
したがって、六価クロム溶出試験目標基準値は 0.05〔mg/ℓ〕以下とする。

以上①～⑤より
①円弧すべりの安定計算の設計基準強度、一軸圧縮強さq_{uck}＝234〔kN/m^2〕以上

②土被り圧に対する設計基準強度、一軸圧縮強さq_{uck}＝100〔kN/m^2〕以上
したがって、①、②を同時に満足する一軸圧縮強さq_{uck}＝234〔kN/m^2〕以上とする。

③トラフィカビリティ設計基準強度、コーン指数q_c＝500〔kN/m^2〕以上とする。

④室内試験値設計基準透水係数：k＝5×10^{-6}〔cm/s〕以下とする。

⑤六価クロム溶出試験、土壌環境基準値 0.05〔mg/ℓ〕以下とする。

※1 [redacted]の実施設計書より引用
※2 セメント系固化材による地盤改良マニュアル、第 4 版、pp.94-95
※3 当該配合試験報告書、p.10
※4 建設機械の走行に必要なコーン指数、地盤材料試験の方法と解説、社団法人地盤工学会、p.391
※5 土地改良事業設計指針「ため池整備」公益社団法人農業農村工学会発行、p.18
※6 国官技第 16 号国営建第 1 号、平成 13 年 4 月 20 日、「セメント及びセメント系固化材を使用した改良土の六価クロム溶出試験要領（案）」の一部変更について、当該配合試験報告書 p.21 参照

3. 現場と室内の強度比による割増率の設定

現場と室内の強度比とは室内試験と現場施工における条件の違いを調整するもので、施工機械と室内試験用混合機械の撹拌性能による混合程度の相違と、養生温度の相違に起因する強度の差及び改良区域での土質のバラツキや含水比の相違による現場強度の変動をも含めて経験的にカバーするものである。
施工形態別に現場と室内の強度比の目安を表-2 に示す。ボンテラン工法は撹拌アタッチメントを装着したバックホウを用いるため、撹拌ムラが少なく、効率がよい事が確認されており、(現場/室内)強度比はスタビライザの最大値 0.65 を採用する。

表-2 現場と室内の強度比の一例※7

固化材の添加方式	改良の対象	施工機械	現場と室内の強度比
粉体	軟弱土	スタビライザ	0.5～0.8
		バックホウ	0.3～0.7
	ヘドロ 高含水有機質土	クラムシェル	0.2～0.5
		バックホウ	

※7 セメント系固化材による地盤改良マニュアル第 4 版、社団法人セメント協会、pp.110-111

図-7 ドライブミキシング

したがって、目標強度、目標値は以下のとおりとなる。
①、②室内目標強度(一軸圧縮強さ)qul＝234(quck)÷0.65＝360〔kN/m^2〕以上とする。
③トラフィカビリティ室内目標強度 qc＝500÷0.65＝769〔kN/m^2〕以上とする。
④透水係数 k は強度の割増しには関連しないため室内透水係数 k＝5×10^{-6}〔cm/s〕以下とする。
⑤六価クロム溶出基準値は強度の割増しに関連しないため室内目標値は 0.05〔mg/ℓ〕以下とする。

4. 配合試験

4.1 試料の採取状況

配合試験に用いる混合土の採取状況を写真-1、2 に示す。

写真-1 混合土の状況

写真-2 混合土の試料採取状況

4.2 改良対象土の物理特性

4.2.1 含水比および湿潤密度等の測定

改良対象土の物理特性を把握するため、写真-3、写真-4 に混合土の含水比および湿潤密度を測定した。表-3 に測定結果を示す。

写真-3 混合土含水比測定

写真-4 混合土湿潤密度測定

表-3 測定結果

改良対象土	含水比:W 〔%〕	湿潤密度:ρt 〔g/cm^3〕
混合土	24.4	1.871

4.3 改良材料一覧

実験に用いる固化材は高炉セメントB種、特殊土用セメント系固化材、高有機質土用セメント系固化材の 3 種類とする。表-4 に改良材料の一覧を示す。

表-4 改良材料一覧表

No.	一般名称	商品名	メーカー名	単価〔円/kg〕	規格	備考
1	高炉セメントB種	B種	太平洋セメント	14.2	1 トンパック	[redacted]単価※8
2	特殊土用セメント系固化材	GS200	〃	15.5	1 トンパック	[redacted]単価※9
3	高有機質土用セメント系固化材	GS225	〃	16.5	1 トンパック	[redacted]単価※9
4	繊維質系泥土改良材	BF（ボンファイバー）	森環境技術研究所	83	250〔kg/個〕	[redacted]までの運賃込の単価※10

※8 2019 年 11 月積算資料，一般財団法人経済調査会，p.78 より引用
※9 2019 年 11 月積算資料，一般財団法人経済調査会，p.533 より引用
※10 2019 年 11 月積算資料，一般財団法人経済調査会，p.535 より引用，[redacted]
[redacted]単価 83[円/kg]に補正して計上しております。

4.4 改良対象土含水比設定

本試験に用いる改良対象土は写真-5 に示す通り塑性状態であり、繊維質系泥土改良材「ボンファイバー」および固化材の色が目立たなくなるまでの均一な混合が難しい状態となっている。そこで含水比を調整して均一な混合に適した改良対象土の含水比を把握するため事前試験を実施した。含水比を 3 種類として配合試験の BF:25〔kg/m^3〕、特殊土用セメント系固化材(GS200):50〔kg/m^3〕にて土の性状を確認した。

表-5 および写真-6～8 に示す試験結果より、BF:25〔kg/m^3〕＋特殊土用セメント系固化材:50〔kg/m^3〕では含水比 W＝45%に加水調整した泥土が均一な混合が容易にできることが確認された。

以下、含水比 W＝45%に加水調整した改良土を用いて配合試験を実施する。

写真-5 改良対象土の性状

表-5 改良対象土含水比設定試験

加水調整 含水比	BF 添加量	固化材添加量	混ぜ易さ	ヘバリツキの有無
W＝40%	25〔kg/m^3〕	50〔kg/m^3〕 特殊土用 セメント系固化材	固く混ぜ難い	ヘバリツキ有り
W＝45%			混ぜ易い	ヘバリツキ無し
W＝50%			やわらかく混ぜ難い	ヘバリツキ有り

：均一な混合が容易にできる

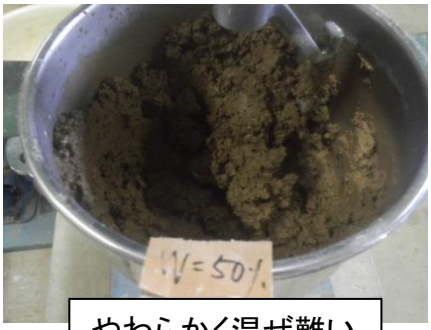
ボンファイバー:25〔kg/m^3〕＋特殊土用セメント系固化材(GS200):50〔kg/m^3〕

固く混ぜ難い

写真-6 W=40%改良土性状

混ぜ易い

写真-7 W=45%改良土性状



やわらかく混ぜ難い

写真-8 W=50%改良土性状

4.5　配合試験メニュー

河川土工マニュアルには、「土質安定処理工法によって築堤した場合、完成後の堤体に乾燥収縮によるヘアークラックが発生することがある。したがって、室内試験による基礎的な検討を行い、できれば試験施工による検証を行った上で工法を決定するのがよい。」[※11]と規定されている。

図-8 盛土のクラック発生状況

※11 財団法人国土技術研究センター：河川土工マニュアル　平成 21 年 4 月，2009，P.70

そこで、弊社では既に全国の数多くの泥土サンプルを用いて乾湿繰返し試験を実施した。その結果、ボンファイバーの最少添加量は 25〔kg/m^3〕程度の結果を得ている。

したがって、ボンファイバー添加量は 25〔kg/m^3〕とする。表-6 に材料配合表を示す。

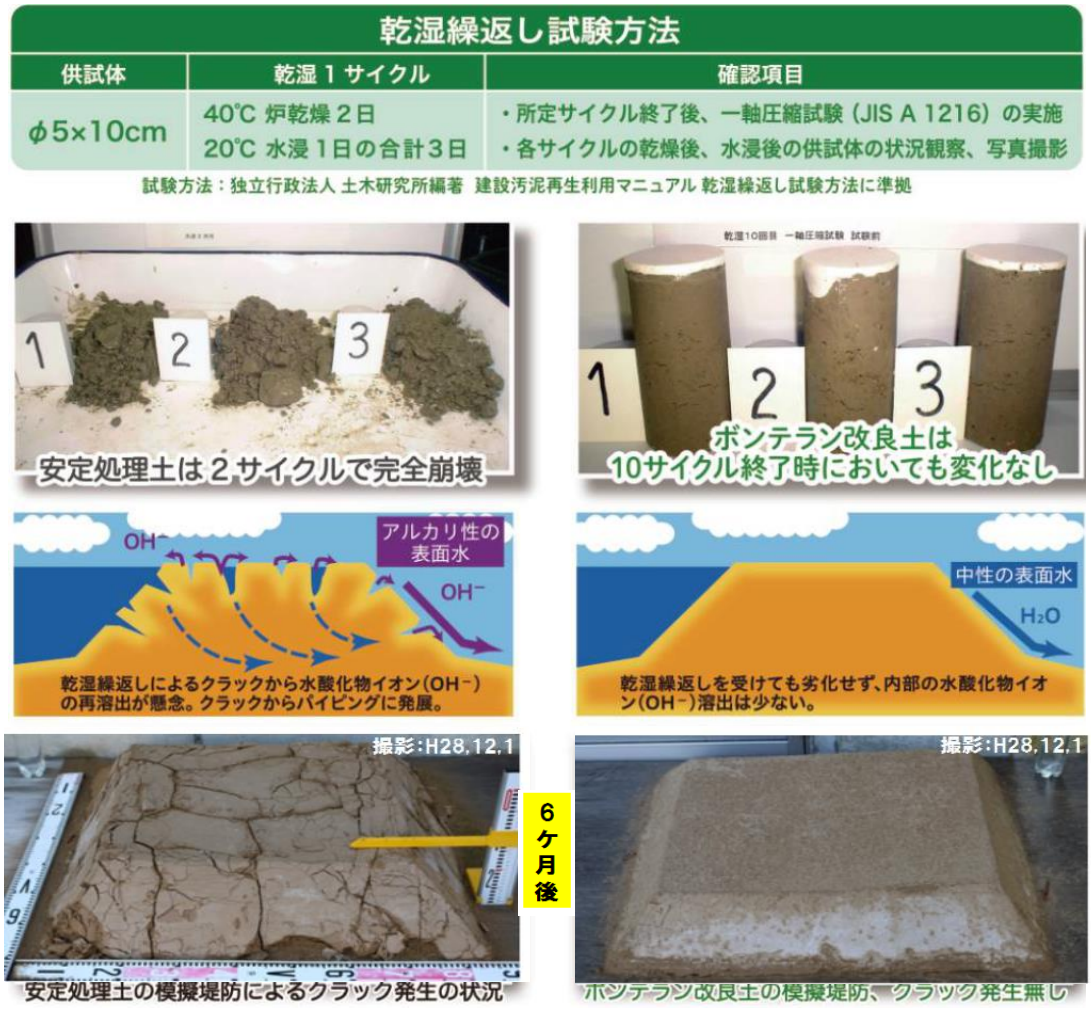


図-9 乾湿繰返し試験状況

表-6 材料配合

No.	ボンファイバー添加量 〔kg/m^3〕	固化材の種類	固化材添加量 〔kg/m^3〕
1	25	高炉セメントB種	30
2			50
3			70
4		特殊土用 セメント系固化材 （GS200）	30
5			50
6			70
7		高有機質土用 セメント系固化材 （GS225）	30
8			50
9			70

4.6　一軸圧縮試験方法

一軸圧縮試験方法は JIS A 1216 に準拠し実施する。試験の手順を図-10 に示す。

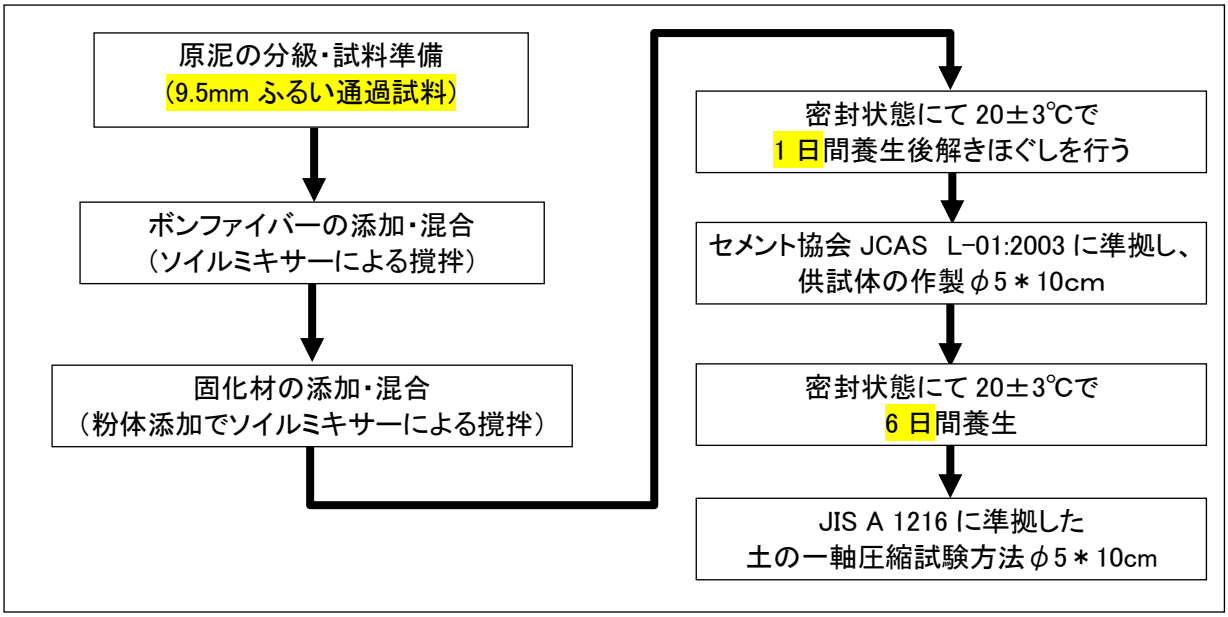


図-10　一軸圧縮試験手順

4.7　コーン指数試験方法

本試験に用いる強度試験はコーン指数試験（JIS A 1228 に準拠）とし、試験手順を図-11 に示す。

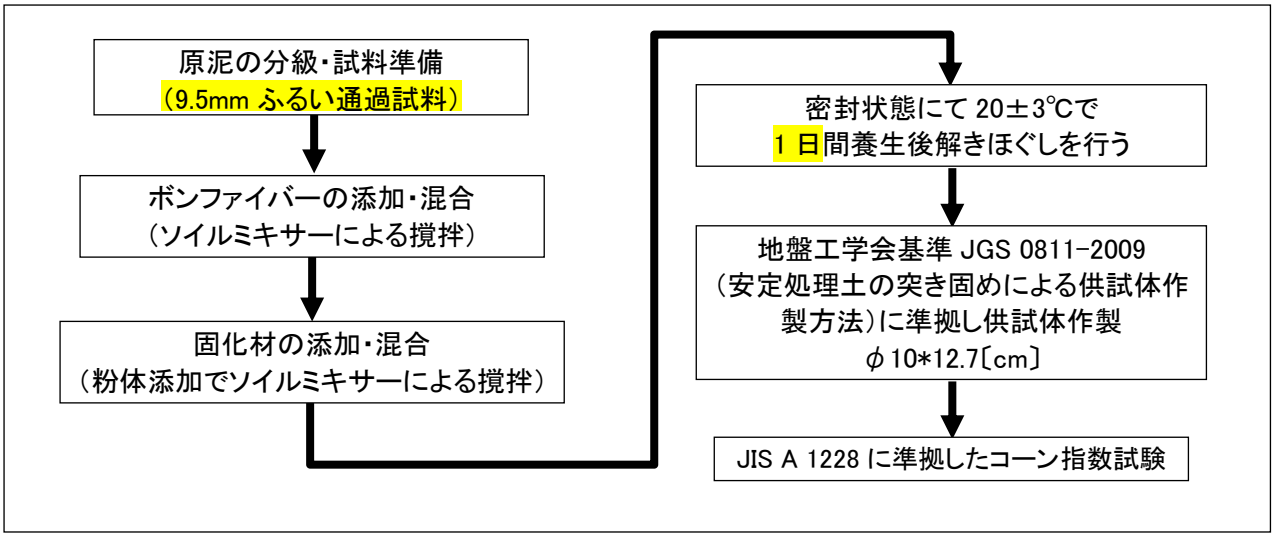


図-11　コーン指数試験の手順

4.8 透水試験方法

透水試験方法は JIS A 1218（変水位透水試験）に準拠し実施する。試験手順を図-12 に示す。

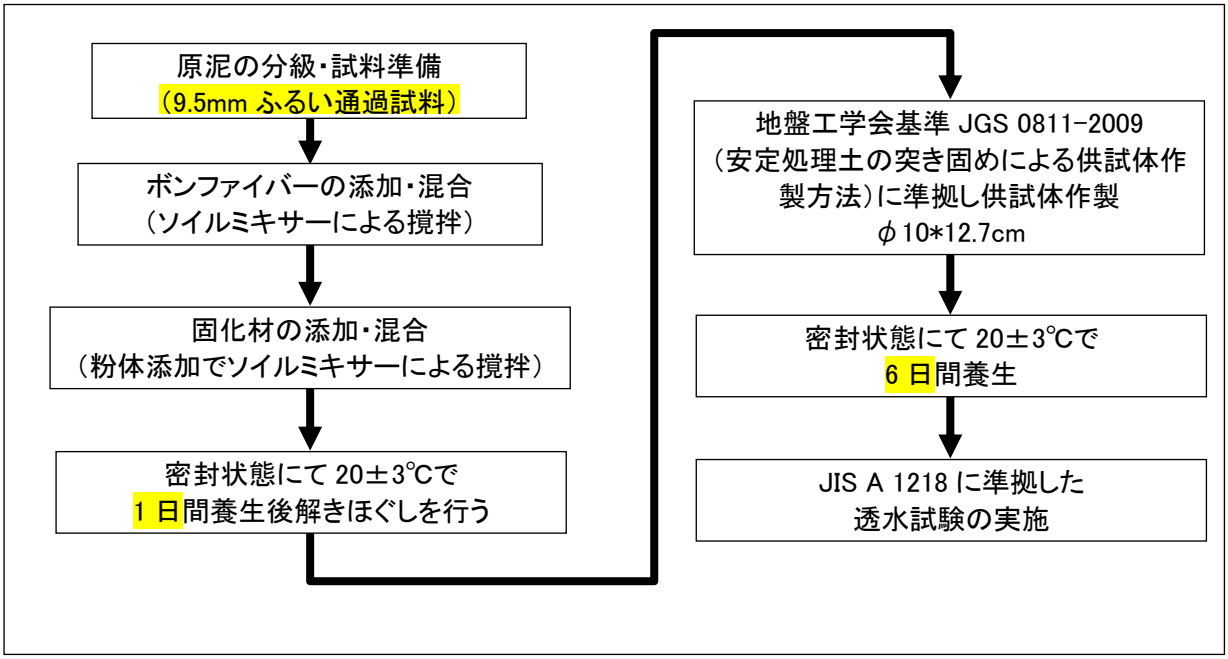


図-12 透水試験手順

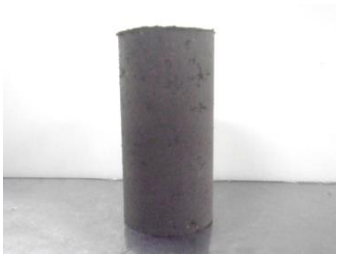
本試験詳細

一般的に、改良土はその利用過程において、固化後にある程度の大きさに解きほぐされ利用現場で締固められる。

本試験では、7 日養生後に締固めが行われることを想定し、土の強度、剛性、遮水性などの工学的性質を確認するため一軸圧縮試験（JIS A 1216）、コーン指数試験（JIS A 1228）および変水位透水試験（JIS A 1218）を実施する。

各試験で与えられる締固めエネルギーEc≒550〔kJ/m^3〕（Standard Proctor）に相当する。

4.9 室内試験の手順と現場施工の整合について

室内試験	現場施工
1. ソイルミキサーによるボンファイバー・固化材添加・混合 	1. 撹拌槽によるボンファイバー・固化材添加・混合
2. 養生 恒温器による所定期間養生	2. 現場養生 現場内にて所定期間仮置養生（冬場）
3. 解きほぐし・供試体作製 解きほぐし 締固め・供試体作製	3. 敷均し・締固め 敷均し状況 締固め状況
4. 供試体  供試体 一軸圧縮試験	4. 完成 ため池堤体改修工事完了

5. 試験結果

5.1 一軸圧縮試験結果

一軸圧縮試験結果を表-7 に、固化材添加量と一軸圧縮強さの関係を図-13 に示す。

表-7 一軸圧縮試験結果

養生	改良対象土	ボンファイバー添加量〔kg/m³〕	固化材種類	固化材添加量〔kg/m³〕	一軸圧縮強度〔kN/m²〕
7日	混合土W=45%に加水調整	25	高炉セメントB種	30	90
				50	352
				70	639
			特殊土用セメント系固化材（GS200）	30	83
				50	354
				70	548
			高有機質土用セメント系固化材（GS225）	30	141
				50	434
				70	693

：目標値を満足した配合

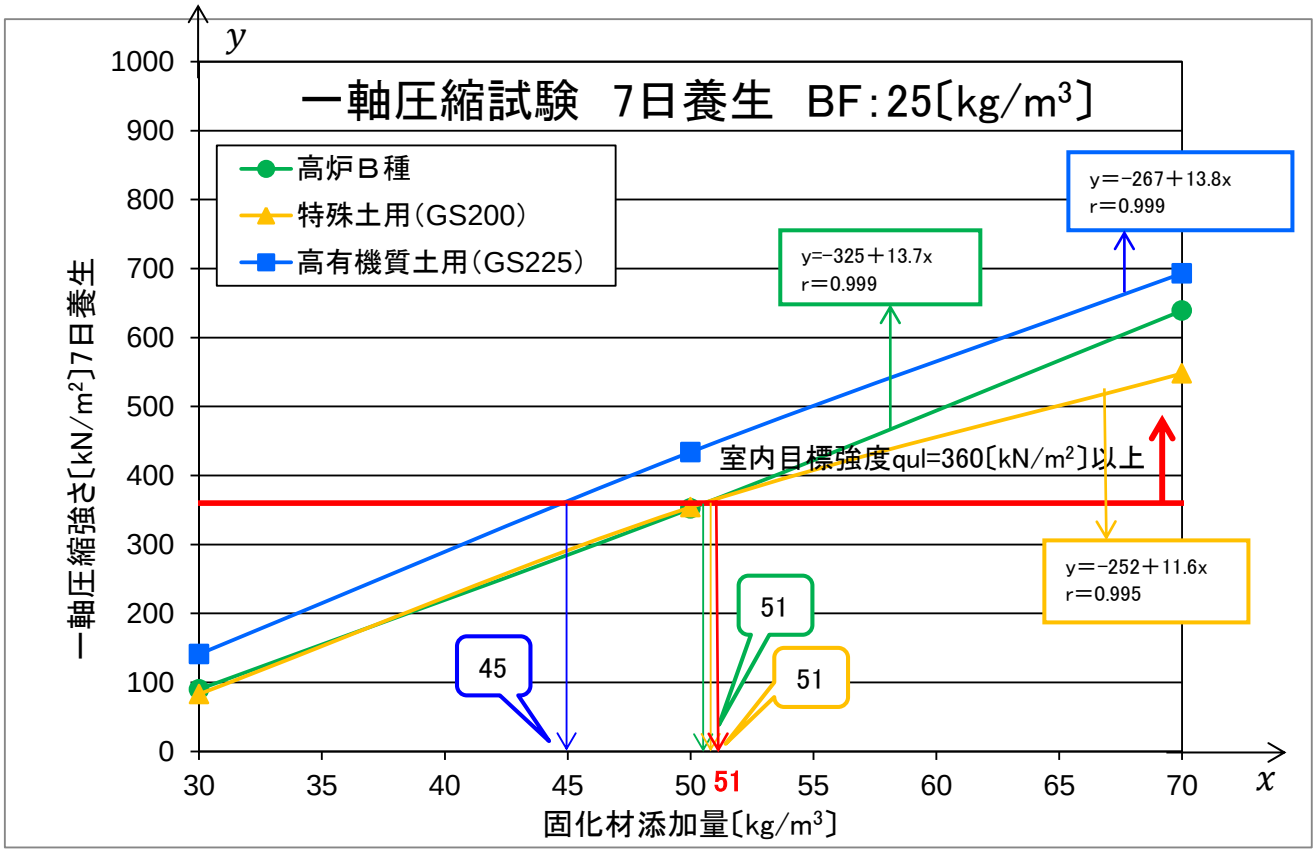


図-13 固化材添加量と一軸圧縮強さの関係

図-13 に示す固化材添加量と一軸圧縮強さの関係から、室内目標強度 qul＝360〔kN/m²〕以上を満足する配合は以下に示す。

- BF：25〔kg/m³〕＋高炉セメント B 種：51〔kg/m³〕以上
- BF：25〔kg/m³〕＋特殊土用セメント系固化材(GS200)：51〔kg/m³〕以上
- BF：25〔kg/m³〕＋高有機質土用セメント系固化材(GS225)：45〔kg/m³〕以上

5.2 コーン指数試験結果

コーン指数試験結果を表-8 に、固化材添加量とコーン指数の関係を図-14 に示す。

表-8 コーン指数試験結果

養生	改良対象土	ボンファバー添加量〔kg/m³〕	固化材種類	固化材添加量〔kg/m³〕	コーン指数強度〔kN/m²〕
1日	混合土W=45%に加水調整	25	高炉セメントB種	30	402
				50	1430
				70	2637
			特殊土用セメント系固化材（GS200）	30	532
				50	2369
				70	4683
			高有機質土用セメント系固化材（GS225）	30	724
				50	3170
				70	5452

：目標値を満足した配合

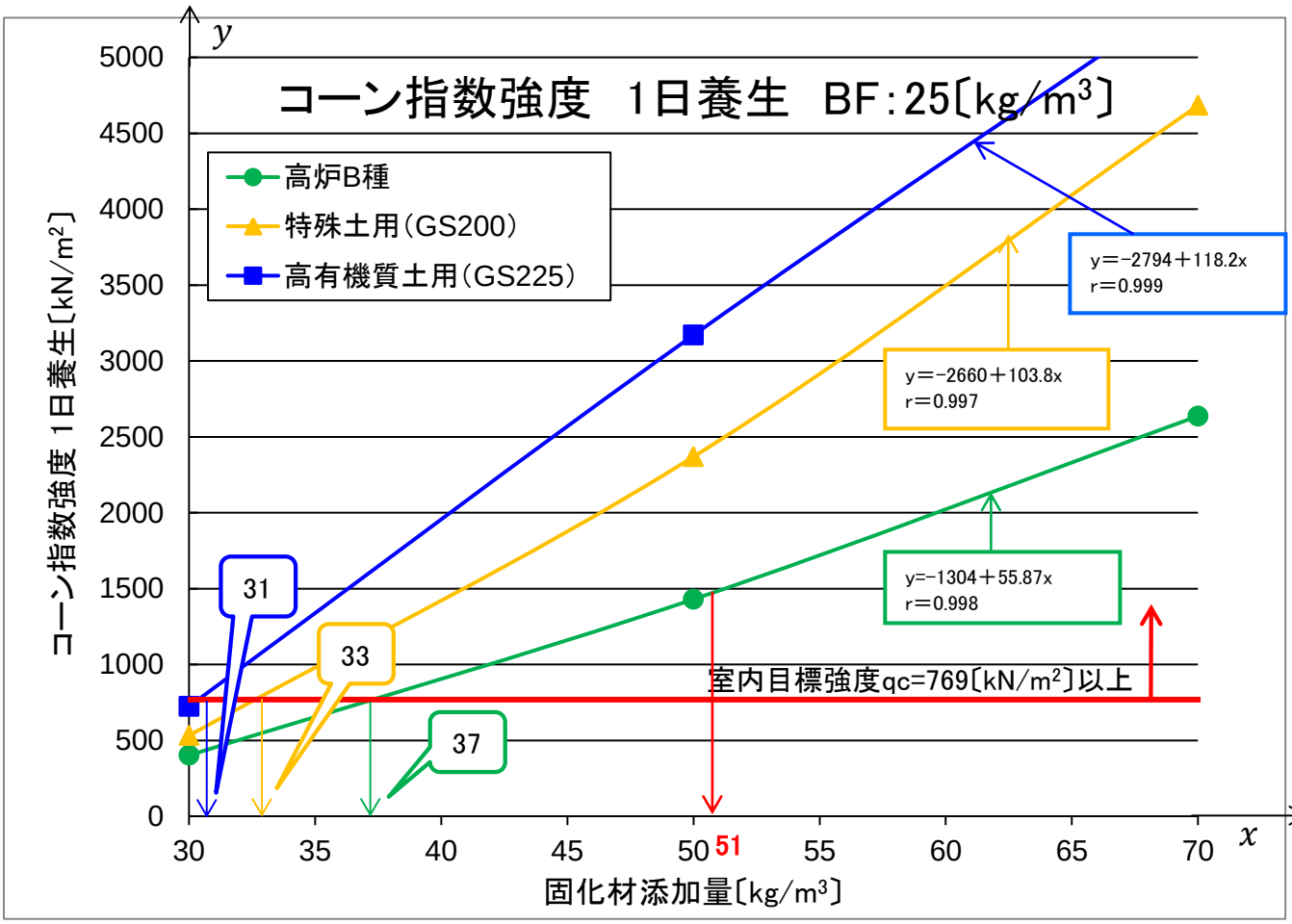


図-14　固化材添加量とコーン指数の関係

図-14 に示す固化材添加量とコーン指数の関係から、室内目標強度 qc＝769〔kN/m²〕以上を満足する配合は以下に示す。

・BF：25〔kg/m³〕＋高炉セメント B 種：37〔kg/m³〕以上

・BF：25〔kg/m³〕＋特殊土用セメント系固化材（GS200）：33〔kg/m³〕以上

・BF：25〔kg/m³〕＋高有機質土用セメント系固化材（GS225）：31〔kg/m³〕以上

5.3　透水試験結果

透水試験結果を表-9 に、固化材添加量と室内透水係数の関係を図-15 に示す。

表-9　透水試験結果

養生	改良対象土	ボンファイバー添加量〔kg/m^3〕	固化材種類	固化材添加量〔kg/m^3〕	透水係数 k〔cm/s〕
7日	混合土W=45%に加水調整	25	高炉セメントB種	30	1.84E-06
				50	6.51E-07
				70	9.65E-07
			特殊土用セメント系固化材（GS200）	30	1.20E-05
				50	2.52E-06
				70	5.05E-06
			高有機質土用セメント系固化材（GS225）	30	2.93E-06
				50	6.26E-06
				70	2.94E-05

：目標値を満足した配合

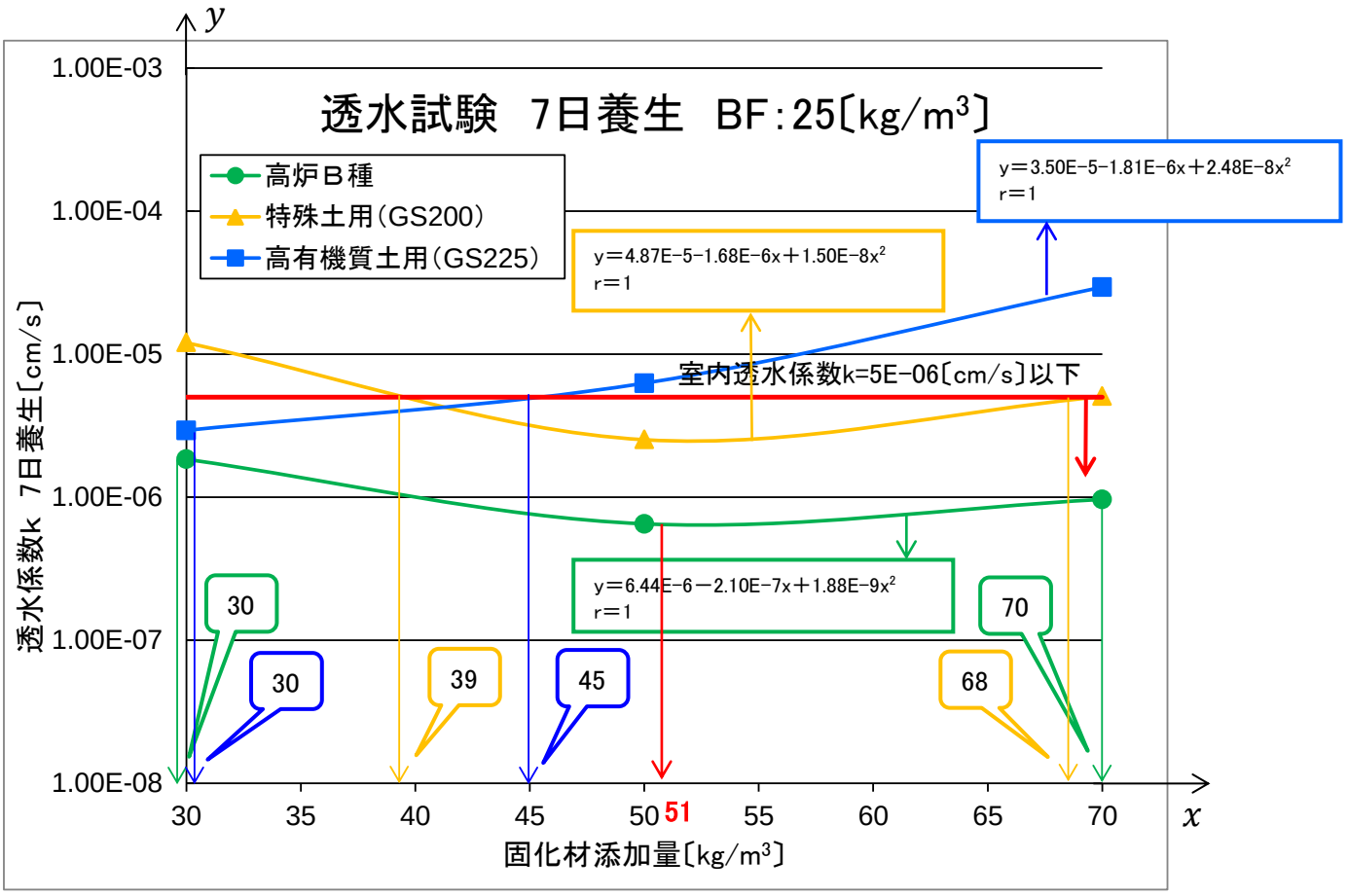


図-15　固化材添加量と透水係数の関係

図-15 に示す固化材添加量と透水係数の関係から、室内透水係数 k＝5×10^{-6}〔cm/s〕以下を満足する配合は以下に示す。

・BF：25〔kg/m^3〕＋高炉セメント B 種：30～70〔kg/m^3〕の範囲

・BF：25〔kg/m^3〕＋特殊土用セメント系固化材(GS200)：39～68〔kg/m^3〕の範囲

・BF：25〔kg/m^3〕＋高有機質土用セメント系固化材(GS225)：30～45〔kg/m^3〕の範囲

6. 環境（六価クロム溶出試験）

セメントおよびセメント系固化材による地盤改良を行う場合、配合段階において六価クロム溶出試験（環境省告示 46 号溶出試験）を行う必要がある。室内配合試験における溶出試験用供試体により溶出試験を行うとしている。

計量証明事業者による六価クロム溶出試験結果を表-10、巻末に計量証明書を示す。

表-10 六価クロム溶出試験結果

工法名	添加材	単位	試験結果	基準値	定量下限値	判定
ボンテラン改良土	高炉セメントB種：50〔kg/m^3〕	mg/ℓ	0.05	0.05 以下	0.01	○
	特殊土用セメント系固化材（GS200）：50〔kg/m^3〕	mg/ℓ	0.03	0.05 以下	0.01	○
	高有機質土用セメント系固化材（GS225）：50〔kg/m^3〕	mg/ℓ	0.07	0.05 以下	0.01	×

：目標値を満足した配合

六価クロム溶出試験実施要領（案）

国官技第 16 号　国営建第 1 号　平成 13 年 4 月 20 日

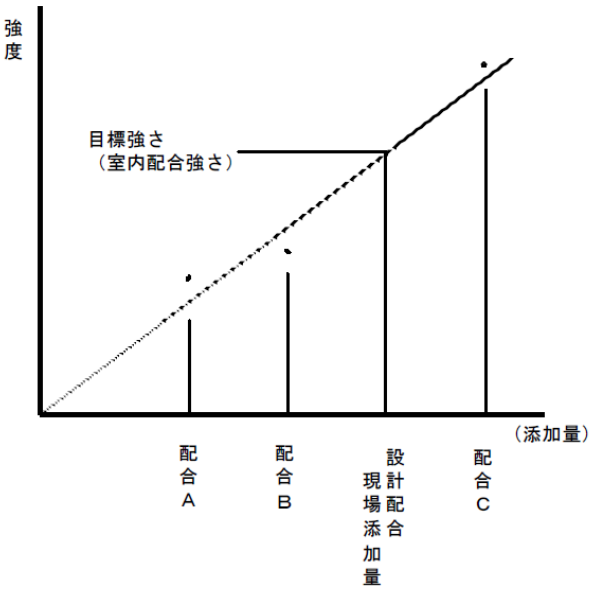
「セメント及びセメント系固化材を使用した改良土の六価クロム溶出試験要領（案）」の一部変更について

３－１　セメント及びセメント系固化材を地盤改良に使用する場合

（１）配合設計の段階で実施する環境庁告示４６号溶出試験（「試験方法１」に対して）

室内配合試験時の強度試験等に使用した供試体から、400 ～ 500g 程度の試料を確保する。

配合設計における室内配合試験では、深度方向の各土層（あるいは改良される土の各土質）ごとに、添加量と強度との関係が得られるが、実際には右図のように、室内配合試験を行った添加量（配合Ａ，Ｂ，Ｃ）と、現場添加量（目標強さに対応した添加量）とが一致しない場合が多い。そのため、室内配合試験のなかから、現場添加量に最も近い添加量の供試体（配合Ｃ）を選び、各土層（あるいは改良される土の各土質）ごとに供試体（材齢７日を基本とする）を１検体ずつ環境庁告示４６号溶出試験に供する。

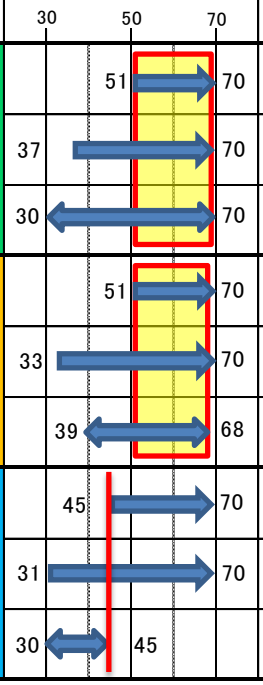


7. 考察

①、②一軸圧縮強さ：qul=360〔kN/m^2〕以上、③コーン指数：qc=769〔kN/m^2〕以上、④透水係数：k=5×10^{-6}〔cm/s〕以下、⑤六価クロム溶出試験基準値 0.05〔mg/ℓ〕以下を同時に満足する配合を表-11 に示す。

表-11 一軸圧縮強さ、コーン指数、透水係数、六価クロム溶出試験基準値を同時に満足する配合

養生	ボンファイバー添加量〔kg/m^3〕	試験項目 室内目標強度および室内目標品質	固化材の種類	固化材添加量〔kg/m^3〕	固化材添加範囲〔kg/m^3〕		⑤六価クロム溶出試験〔mg/ℓ〕	評価
7日	25	①、②一軸圧縮強さ：qul=360〔kN/m^2〕以上	高炉セメントB種	51～70	51～70	51～70	0.05	○
1日		③コーン指数試験：qc=769〔kN/m^2〕以上		37～70	37～70			
7日		④透水係数：k=5×10-6〔cm/s〕以下		30～70	30～70			
7日	25	①、②一軸圧縮強さ：qul=360〔kN/m^2〕以上	特殊土用セメント系固化材（GS200）	51～70	51～70	51～68	0.03	○
1日		③コーン指数試験：qc=769〔kN/m^2〕以上		33～70	33～70			
7日		④透水係数：k=5×10-6〔cm/s〕以下		39～68	39～68			
7日	25	①、②一軸圧縮強さ：qul=360〔kN/m^2〕以上	高有機質土用セメント系固化材（GS225）	45～70	45～70	45	0.07	×
1日		③コーン指数試験：qc=769〔kN/m^2〕以上		31～70	31～70			
7日		④透水係数：k=5×10-6〔cm/s〕以下		30～45	30～45			



：目標値を満足した配合

結果）

以上の試験結果から上記 4 項目の目標値を同時に満足する配合は

・BF：25〔kg/m^3〕＋高炉セメント B 種：51～70〔kg/m^3〕

・BF：25〔kg/m^3〕＋特殊土用セメント系固化材（GS200）：51～68〔kg/m^3〕となる。

8. 総合評価

7. 考察の試験結果より、①経済性、②環境（六価クロム）について総合的な評価を実施した。表-12 に総合評価を示す。六価クロム濃度計量証明書は巻末に示す。

表-12 総合評価表

種類 / 評価項目	ボンテラン改良土 BF：25〔kg/m³〕+高炉 B 種	ボンテラン改良土 BF：25〔kg/m³〕+特殊土用セメント系固化材（GS200）	ボンテラン改良土 BF：25〔kg/m³〕+高有機質土用セメント系固化材（GS225）
①経済性	室内目標強度 4 項目を同時に満足する配合は ボンファイバー：25〔kg/m³〕 +高炉セメント B 種：51 〔kg/m³〕以上の配合である。 ボンファイバー：25〔kg/m³〕× 83〔円/kg〕 =2,075〔円/m³〕 高炉セメント B 種：51〔kg/m³〕 ×14.2〔円/kg〕 =724〔円/m³〕 計 2,799〔円/m³〕	室内目標強度 4 項目を同時に満足する配合は ボンファイバー：25〔kg/m³〕 +特殊土用セメント系：51 〔kg/m³〕以上の配合である。 ボンファイバー：25〔kg/m³〕× 83〔円/kg〕 =2,075〔円/m³〕 特殊土用セメント系：51 〔kg/m³〕×15.5〔円/kg〕 =791〔円/m³〕 計 2,866〔円/m³〕	室内目標強度 4 項目を同時に満足する配合はない。
評価	○	○	―
②環境 （六価クロム） 評価	0.05	0.03	0.07
評価	○	○	×
総合評価	◎	○	×

決定配合

7. 考察に示す目標強度、目標値 4 項目を同時に満足する最も経済的な配合は
ボンファイバー：25〔kg/m³〕＋高炉セメント B 種：51〔kg/m³〕と確認された。

9. 乾湿繰返し試験

河川土工マニュアル、平成 21 年 4 月、財団法人国土技術研究センターでは、安定処理土の取り扱いについて以下に示す注意を促している。
土質安定処理工法によって築堤した場合、土質、添加材、混合率、混合方法によっては、完成後の堤体に乾燥収縮によるヘアークラックが発生することがある。したがって、室内試験による基礎的な検討（乾湿繰返し試験）を行い、できれば試験施工による検証を行った上で、工法を決定するのがよい。※12

そこで、国土交通省関東地方整備局河川部河川工事課では江戸川河動掘削により発生した大量の粘性土を用いて、石灰やセメント等の改良材を用いて試験盛土を実施した。
その結果、石灰・セメント安定処理土は深部まで多量のクラックが発生し、石灰水投入後の染み出しが多く見受けられた。（クラックの開口幅最大 2cm程度）※13

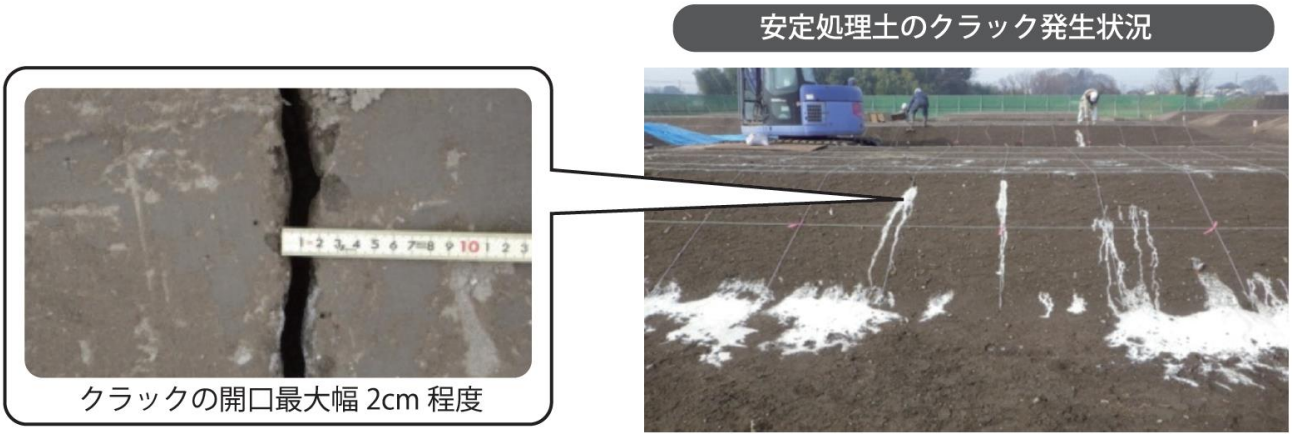


図-16　安定処理土のクラック発生状況

※12　河川土工マニュアル，平成21年4月，国土研究センター，p.70
※13　論文．写真引用：道津友弘氏（関東地方整備局河川部河川工事課）「堤防材料としての土質安定処理土の適用性検討について」資料提供

9.1　供試体の作成方法および配合

[redacted]農村地域防災減災事業（ため池整備）[redacted]配合試験報告書」8. 総合評価に示す決定配合を採用した。表-13 に供試体の配合を示す。

表-13　供試体の配合

	ボンファイバー〔kg/m³〕	高炉 B 種〔kg/m³〕
ボンテラン改良土 ts＝1〔日〕 tcc＝6〔日〕	25	51
砕・転圧盛土 ts＝1〔日〕 （安定処理土）tcc＝6〔日〕	0	51

ts：初期固化状態における日数
tcc：初期固化処理土を解砕・転圧してからの経過日数

9.2 試験方法

本試験は表-14 に示すように、40℃炉乾燥 2 日、20℃水浸 1 日の合計 3 日間を 1 サイクルとし、各サイクルの乾燥後および水浸後に供試体の状況観察・写真撮影を行う。

また、試料 1-1～1-2 それぞれ 4 本の供試体を作成し、0、2、6、10 サイクル終了時に 1 本の供試体を使用して一軸圧縮試験を実施する。

更に、サイクル毎の供試体状況を表-15 に示す健全度ランクを基に A～H の 8 段階で数値化し、平均の健全度ランクを求める。

表-14 乾湿繰返し試験方法

試験項目	試験方法		
	供試体	乾湿 1 サイクル	確認項目
乾湿繰り返し試験	φ5×10（cm）	40℃炉乾燥 2 日 20℃水浸 1 日 の合計 3 日	• 所定サイクル終了後、一軸圧縮試験（JIS A 1216） • 各サイクルの乾燥後、水浸後に供試体の状況観察、写真撮影

表-15 供試体健全度ランク

	クラック状況	欠落状況
A	外見上，ほとんど変化なし	
B	微細クラック，局部クラック発生	表面剥離が局部的に発生
C	明瞭なクラックが一部に発生	供試体の一部が僅かに欠落
D	明瞭なクラックが全体に発生	供試体がより大きく欠落
E	供試体の一部または全体が崩落（～20%程度）	
F	供試体が全体的に崩落，崩壊．供試体としての形は存在	
G	供試体全体が崩壊し，片々は塊状	
H	供試体全体が崩壊し，片々は細粒化～泥状化	

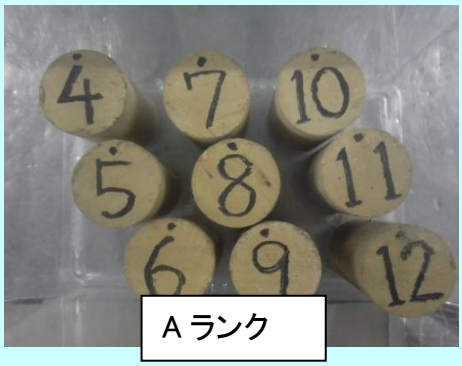
ここで細粒化とは、粒径 2mm 程度の粒状に細分化された状況を指す。

9.3 乾湿繰返し試験状況

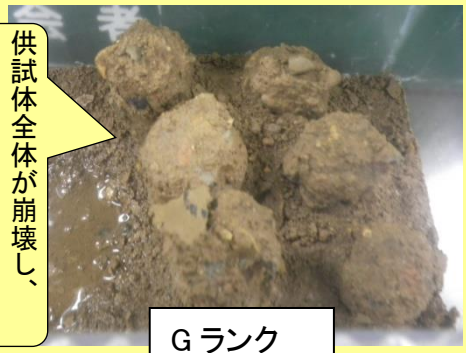
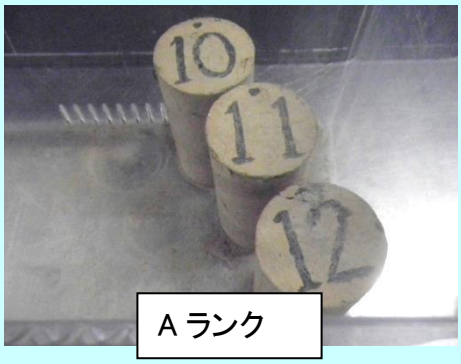
図-17 に乾湿繰返し試験状況、図-18 に健全度ランク、図-19 に所定サイクルごとの一軸圧縮強さを示す。

<table>
<tr><th>サイクル</th><th>乾湿</th><th>ボンテラン改良土

ボンファイバー：25〔kg/m³〕
高炉 B 種：51〔kg/m³〕</th><th>砕・転圧盛土
（安定処理土）
ボンファイバー：0〔kg/m³〕
高炉 B 種：51〔kg/m³〕</th></tr>
<tr><td>0</td><td>試験前</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1</td><td>乾</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>湿</td><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

サイクル	乾湿	ボンテラン改良土 ボンファイバー：25〔kg/m³〕 高炉Ｂ種：51〔kg/m³〕	砕・転圧盛土 （安定処理土） ボンファイバー：0〔kg/m³〕 高炉Ｂ種：51〔kg/m³〕
2	乾	 Ａランク	 Ｂランク
	湿	外見上、ほとんど変化なし Ａランク	供試体がより大きく剥落 Ｄランク
3	乾	 Ａランク	 Ｄランク
	湿	外見上、ほとんど変化なし Ａランク	供試体が全体的に崩落・崩壊 Ｆランク

サイクル	乾湿	ボンテラン改良土 ボンファイバー：25〔kg/m^3〕 高炉 B 種：51〔kg/m^3〕	砕・転圧盛土 （安定処理土） ボンファイバー：0〔kg/m^3〕 高炉 B 種：51〔kg/m^3〕
4	乾	 A ランク	 F ランク
	湿	外見上、ほとんど変化なし A ランク	供試体が全体的に崩落・崩壊 F ランク
5	乾	 A ランク	 F ランク
	湿	 A ランク	 G ランク

サイクル	乾湿	ボンテラン改良土 ボンファイバー：25〔kg/m^3〕 高炉Ｂ種：51〔kg/m^3〕	砕・転圧盛土 （安定処理土） ボンファイバー：0〔kg/m^3〕 高炉Ｂ種：51〔kg/m^3〕
6	乾	 Ａランク	 Ｇランク
	湿	外見上、ほとんど変化なし Ａランク	供試体全体が崩壊し、片々は塊状  Ｇランク
7	乾	 Ａランク	終了
	湿	外見上、ほとんど変化なし Ａランク	終了

サイクル	乾湿	ボンテラン改良土 ボンファイバー：25〔kg/m^3〕 高炉 B 種：51〔kg/m^3〕	砕・転圧盛土 （安定処理土） ボンファイバー：0〔kg/m^3〕 高炉 B 種：51〔kg/m^3〕
8	乾		終了
	湿		終了
9	乾		終了
	湿		終了

サイクル	乾湿	ボンテラン改良土 ボンファイバー：25〔kg/m³〕 高炉Ｂ種：51〔kg/m³〕	砕・転圧盛土 （安定処理土） ボンファイバー：0〔kg/m³〕 高炉Ｂ種：51〔kg/m³〕
10	乾		終了
	湿		終了

図-17　乾湿繰返し試験状況

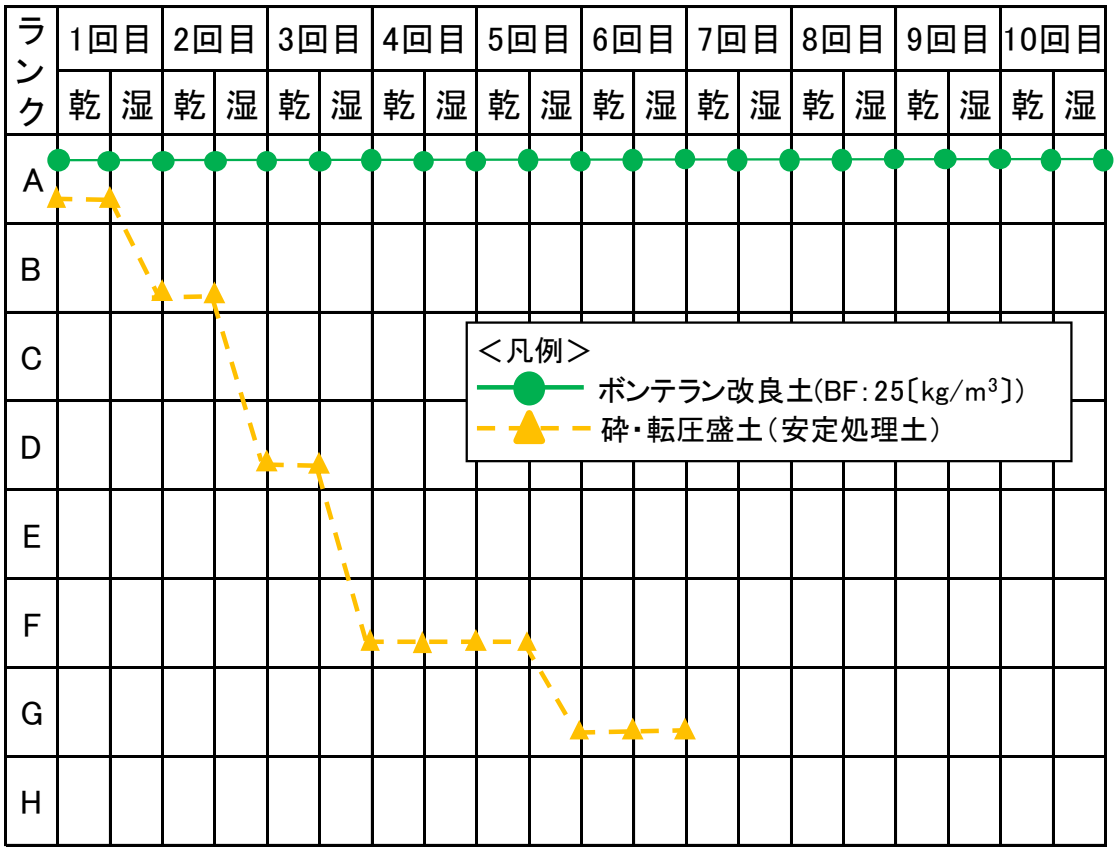
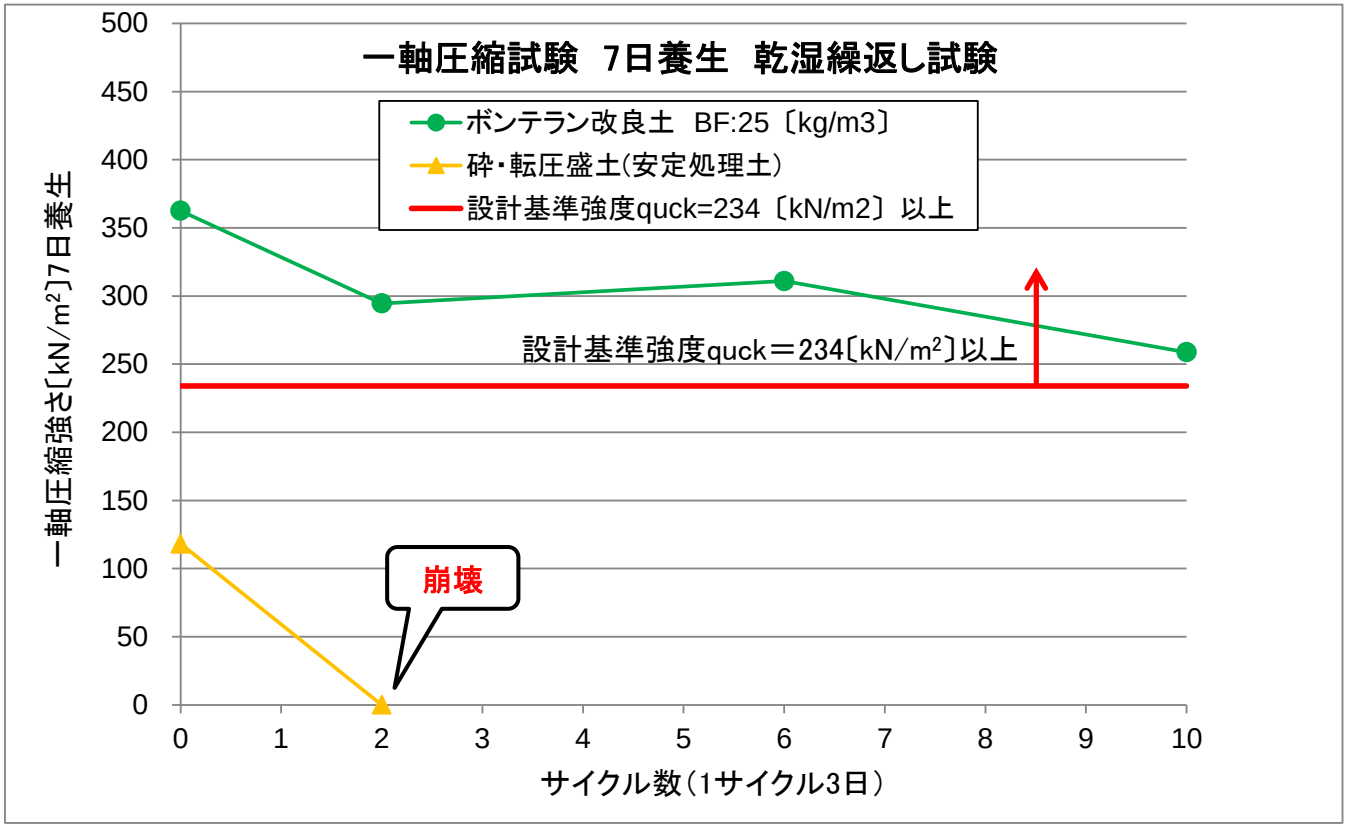


図-18　健全度ランク

ボンテラン改良土および砕・転圧盛土（安定処理土）を用いて乾湿繰返し試験を行った。その結果、砕・転圧盛土（安定処理土）は 1 サイクルの水浸において表面剥離が局部的に発生し 6 サイクルの水浸後供試体全体が崩壊し、片々は塊状。供試体健全度ランクは G と確認され、乾湿繰返し耐久性について脆弱であることが明らかとなった。一方、ボンテラン改良土は乾湿繰返しを受けても外見上ほとんど変化がなく、供試体健全度ランクは A と確認され、極めて高い耐久性を示すことが明らかとなった。



図−19　所定サイクルごとの一軸圧縮強さ

図−19 に示す所定サイクル毎の一軸圧縮強さを概観するとボンテラン改良土は設計基準強度 quck＝234〔kN/m²〕を各サイクルにおいて、すべて満足しており、乾湿繰り返しを受けても極めて高い耐久性を示すことが確認された。
一方、砕・転圧盛土（安定処理土）は室内目標強度を各サイクルにおいて、すべて下回っており、乾湿繰返し耐久性について強度の観点からも脆弱であることが確認された。

9.4　乾湿繰返し試験まとめ

河川土工マニュアルに示す通り、室内試験で乾湿繰返し試験を実施した結果、砕・転圧盛土（安定処理土）は脆弱性を示し、乾湿繰り返しに対する耐久性が低いことが確認された。

一方、ボンテラン改良土は 10 サイクル終了後も劣化がないことが確認された。したがって、ボンテラン改良土は図-20 に示すとおりクラックが生じないため極めて高い耐久性を示すことが明らかとなった。

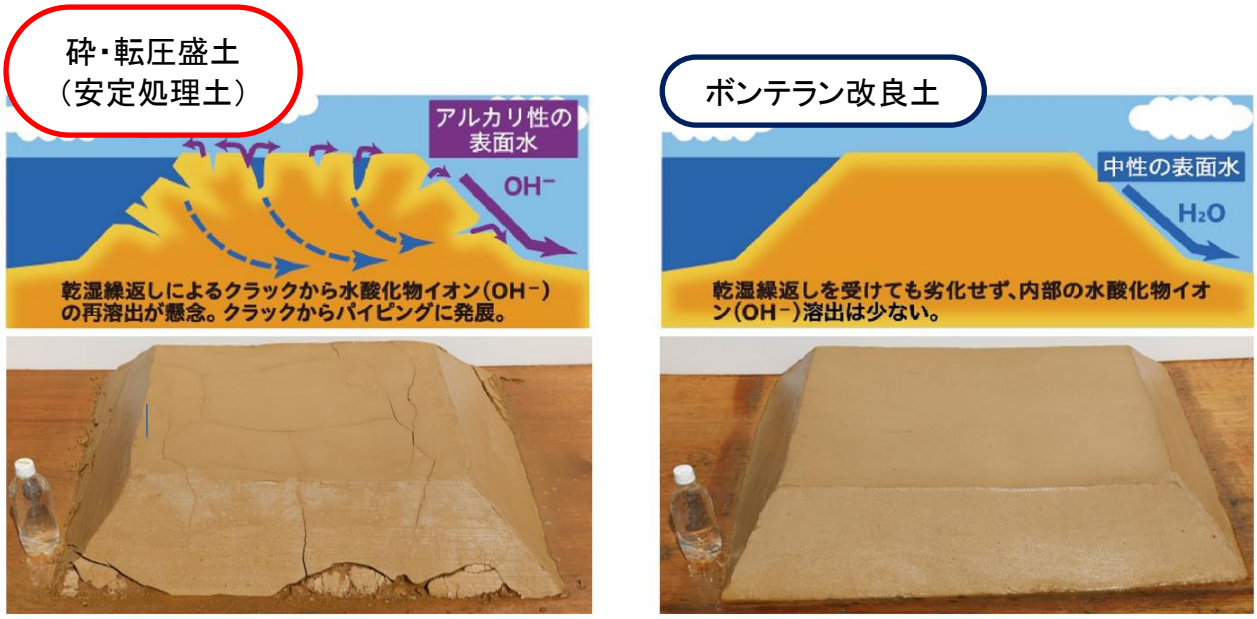


図-20　ボンテラン改良土と砕・転圧盛土（安定処理土）のクラック発生

10. 改良土の乾湿繰返しおよび凍結融解に対する耐久性について

河川土工マニュアル、平成 21 年 4 月、財団法人国土技術研究センターP70 に以下の記載があります。「土質安定処理工法によって築堤した場合、土質、添加材、混合率、混合方法によっては、完成後の堤体に乾燥収縮によるヘアークラックが発生することがある。したがって、室内試験による基礎的な検討を行い、できれば試験施工による検証を行った上で、工法を決定するのがよい。」※14

そこで、独立行政法人土木研究所が規定した乾湿繰返し試験に準拠し、試験を実施した結果、図-21 に示すとおり安定処理土はサイクルの進展に伴い、乾燥収縮により亀裂が発生して劣化するが、ボンテラン改良土は乾湿繰返しを受けても劣化せず、極めて高い耐久性を示すことが確認されました。また、ボンテラン改良土はクラックが生じないために、改良体内部からの長期にわたるアルカリ等の溶出懸念が無いことが明らかとなりました。

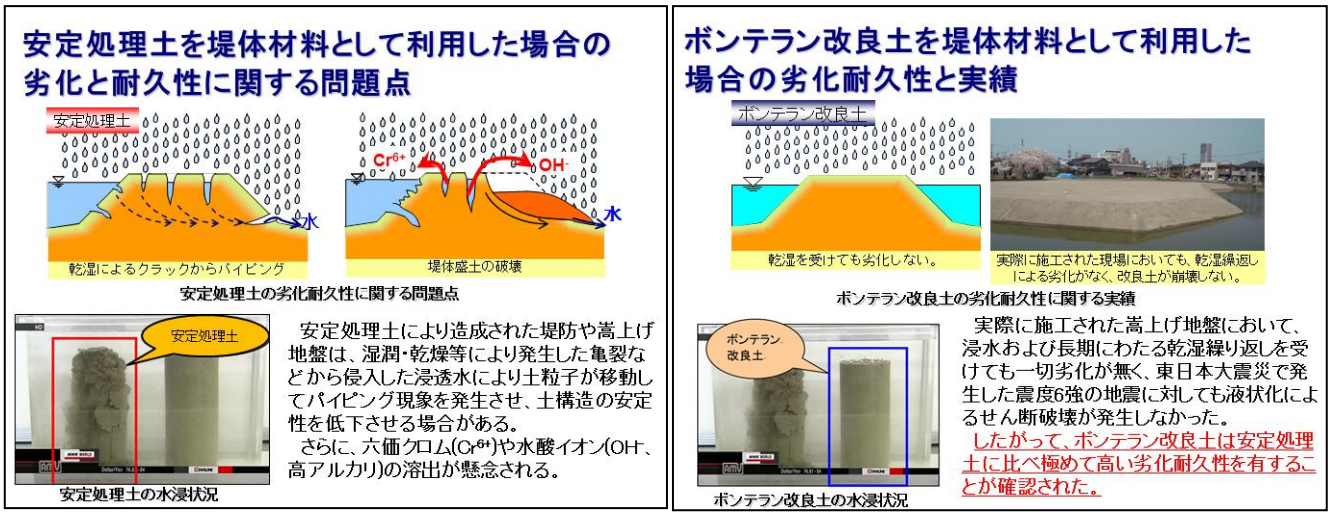
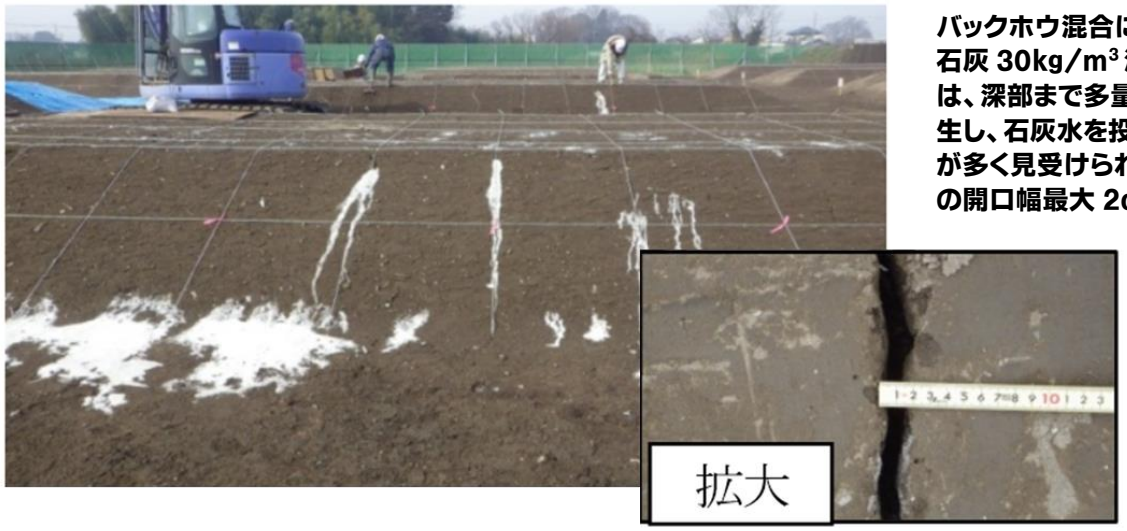


図-21　安定処理土およびボンテラン改良土を堤体材料として利用した場合

以上の知見につきましては、東北大学大学院環境科学研究科高橋弘教授および(株)森環境技術研究所の共同研究により「繊維質固化処理土の乾湿繰返し試験による耐久性に関する実験的研究」として資源と素材学会 2005,2,3,Vol,121 に査読論文として発表掲載されております。

一方、安定処理土の乾湿繰返し耐久性については、図-22 に示すとおり関東地方整備局　道津友弘氏が「堤防材料としての土質安定処理土の適用性検討について」においてフィールド試験を実施した結果、安定処理土に数多くのクラック発生を確認して、平成 27 年度スキルアップセミナー関東で論文を発表しております。

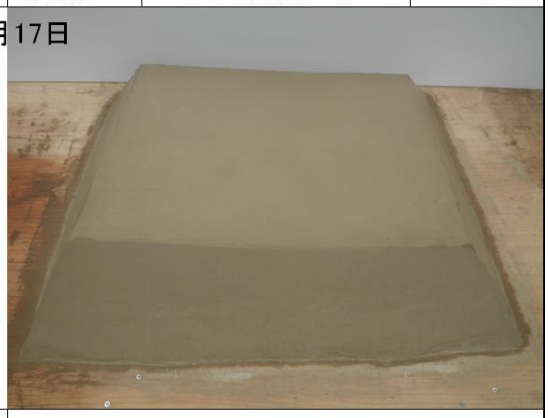
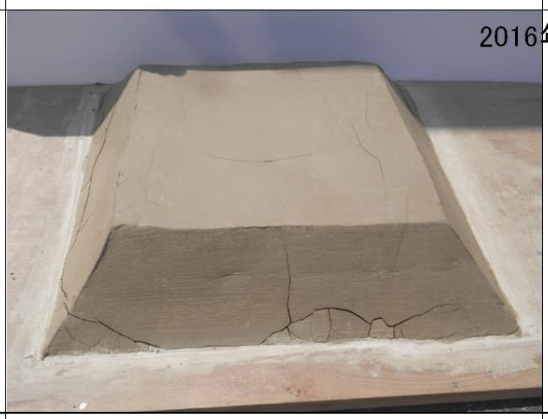
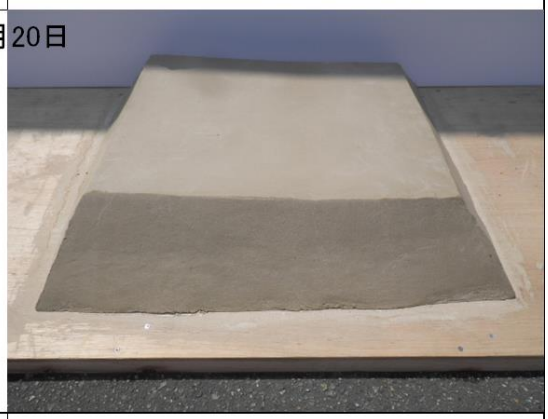
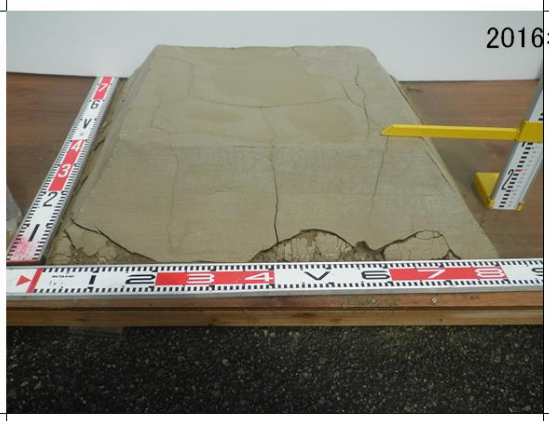
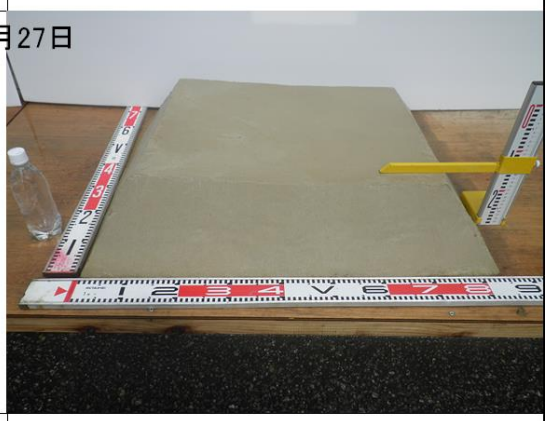
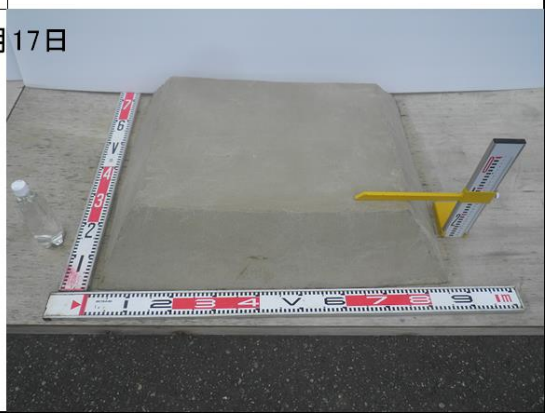


バックホウ混合による粘性土に石灰 30kg/m³ 添加した配合では、深部まで多量のクラックが発生し、石灰水を投入すると染出しが多く見受けられた。(クラックの開口幅最大 2cm 程度)

写真引用 道津 友弘氏(関東地方整備局河川部河川工事課):堤防材料としての土質安定処理土の適用性検討について,平成 27 年度スキルアップセミナー関東

図-22　安定処理土のクラック発生状況

これを受けて、東北大学大学院環境科学研究科高橋弘教授と(株)森環境技術研究所は、安定処理土とボンテラン改良土の乾湿繰返しおよび凍結融解に対する耐久性試験をフィールドで実施した。その結果図-23:番号 2 に示すとおり、養生 3 日後(2016 年 6 月 20 日撮影)には安定処理土に乾湿繰返しの影響によりクラックが発生した。養生 180 日後(2016 年 12 月 1 日撮影)には、図-23:番号 5 に示すとおり乾湿繰返しと凍結融解による多数のクラックが確認された。

番号	安定処理土			経過	ボンテラン改良土		
	含水比100%	セメント系固化材55kg/m3			含水比100%	セメント系固化材55kg/m3	BF25kg/m3
1				2016年6月17日 設置直後			
2				2016年6月20日 養生3日経過			
3				2016年6月27日 養生10日目			
4				2016年7月17日 養生30日目			

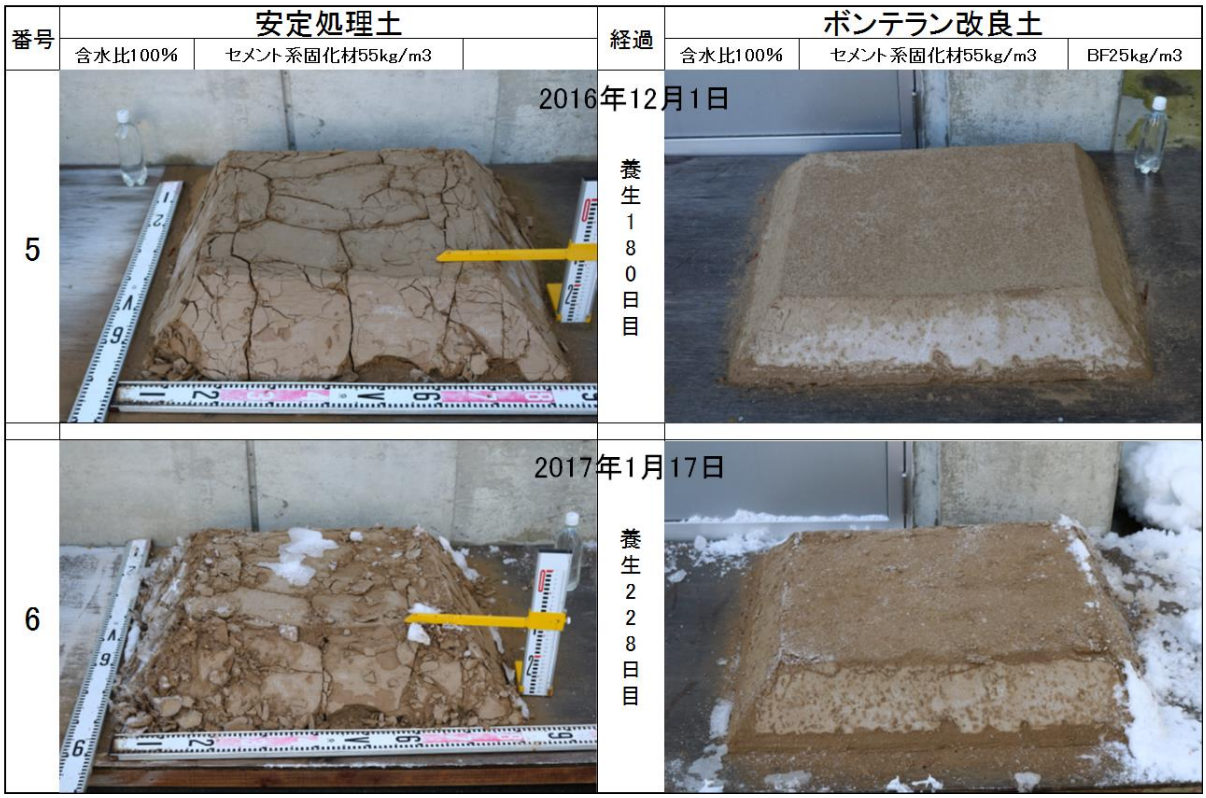


図-23　模擬堤防での乾湿繰返し・凍結融解による耐久性試験（フィールド）
（左：安定処理土、右：ボンテラン改良土）

以上、フィールド試験の結果から、ボンテラン改良土は乾湿繰返しおよび凍結融解を受けてもほとんど劣化せず、極めて高い耐久性を示すことが確認されました。

したがいまして、「ボンテラン工法」による泥土リサイクル技術は、河川やため池等をはじめ、堤体盛土、道路路体盛土、宅地や嵩上げなどの造成盛土など、気象条件による乾湿繰返しや凍結融解を受ける場所においても使用可能であることが明らかとなりました。

※14 財団法人国土技術研究センター：河川土工マニュアル　平成 21 年 4 月，2009，P.70

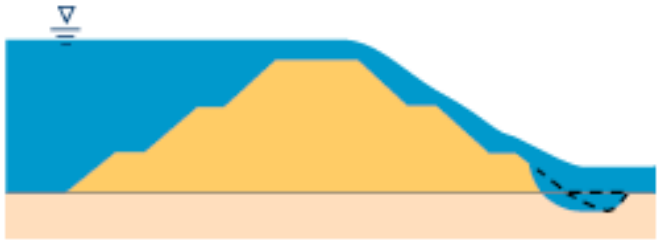
＜ボンテラン改良土とセメント系安定処理土の耐久性比較実験動画＞

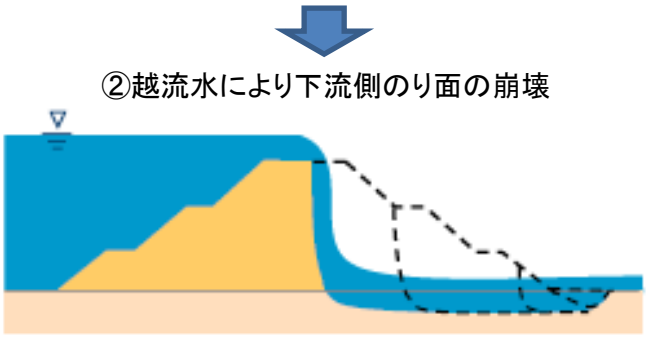
実験動画は下記 URL、YouTube ページにアップされておりますのでぜひご覧ください。
https://www.youtube.com/watch?v=qkAXQV6LCNU

11. 改良土の耐浸食性

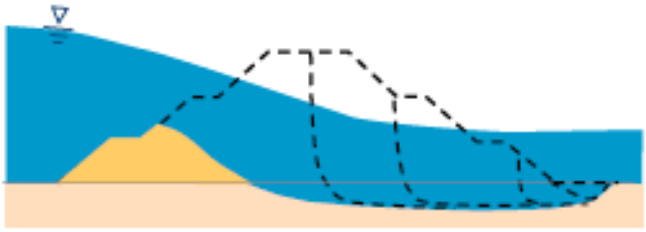
越流水によりため池下流側に小規模な崩壊が継続して発生し、決壊に至る事例が多発している。

①越流水により下流側のり面が洗堀される





②越流水により下流側のり面の崩壊

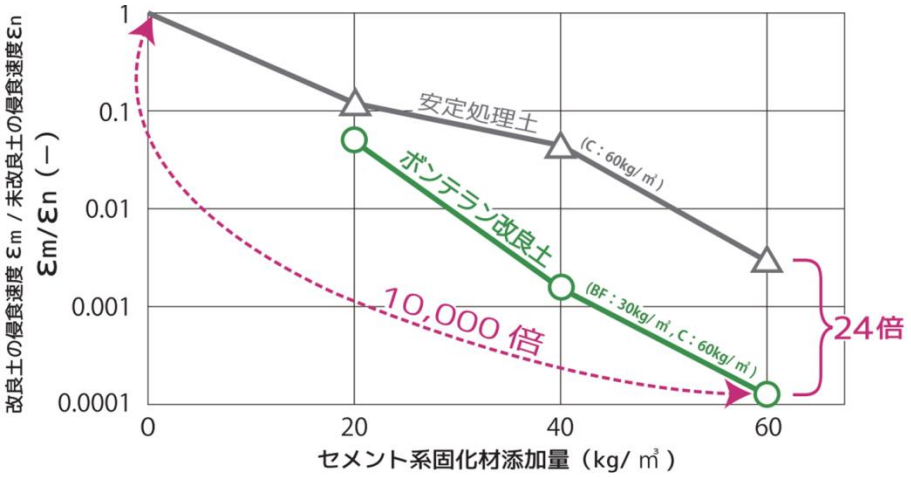


③天端が崩壊し、ため池が決壊する

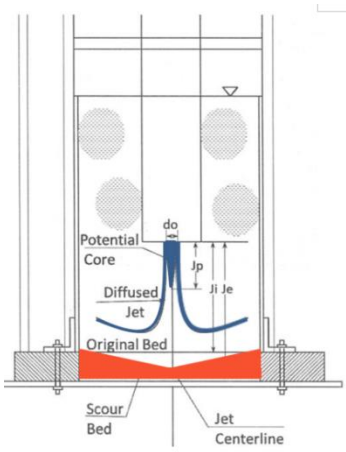
越流水によるため池決壊のイメージ図

ボンテラン改良土の水際利用(浸食なし)

そこで、本研究では Hanson らが考察した水中噴流試験装置を用いて、経過時間に対する浸食量を測定し、限界せん断応力(τ_c)と浸食係数(K_d)を算定して、土の浸食に対する脆弱性について検討した。



安定処理土とボンテラン改良土の浸食速度の比較



浸食速度の計測に用いた水中噴流試験装置

その結果、ボンテラン改良土は未改良土に対して約 10,000 倍の耐浸食性を有し、安定処理土に対して 24 倍といった極めて高い耐浸食性を有していることが確認された。※15

※15 ボンテラン工法論文リスト 83, 高橋弘, 熊谷翔太, et al, 津波堆積物を用いて作成した放射能汚染土覆土材の耐浸食性に関する研究

浜尾地区築堤工事

工事名　：平成14年度浜尾地区築堤工事
発注者　：国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所
工期　　：平成14年7月～平成15年3月
改質量　：3,000m^3　　含水比：約50%
工事概要
本事例は、平成14年(2002年)に福島県須賀川市の浜尾遊水池築堤工事において地内のため池底泥土を原材料として「ボンテラン工法」で堤体盛土に再利用した工事です。
平成23年(2011年)3月に発生した東日本大震災において須賀川市では震度6強、水平加速度K-net493～672[※16]〔Gal＝cm/s^2〕を観測し、現地発生土（砂質土）を用いた浜尾堤防はせん断破壊や液状化により堤体天端にクラックが発生し被災しました。さらに浜尾地区からL＝35km離れた藤沼ダムは決壊して大災害となりました。一方、底泥土を用いたボンテラン堤体はクラック被害は一切確認されず、地震対策用地盤材料として有効性が実証されました。

福島県須賀川浜尾遊水池右岸堤防被災状況[※17]

被災なし

福島県須賀川浜尾遊水池右岸堤防被災状況

ボンテラン改良土を用いた浜尾遊水池右岸堤防

福島県須賀川市藤沼湖被災状況[※18]

$F_L = R/L$

F_L：液状化に対する抵抗率
R　：動的せん断強度比(繰返し三軸試験)
L　：地震時せん断応力比

	砂質土	ボンテラン改良土
地表面加速度 α_{max} [cm/s^2]	200	200
液状化抵抗率 F_L	0.52	4.25
液状化判定	×	○
$\frac{F_L(\text{ボンテラン})}{F_L(\text{砂質土})}$	$\frac{4.25}{0.52}$ ＝	8.17倍

地層条件：GL-4mの場合，Z1=2.0，Z2=2.0[m]

平成 27 年 5 月 1 日土地改良事業設計指針「ため池」改訂に準拠
砂質土とボンテラン改良土の液状化抵抗率

繰返し三軸試験装置

※16 東北地方太平洋沖地震による谷埋め盛土の被害と今後の課題について，原勝重
※17 福島河川国道事務所における東日本大震災の対応と教訓，服部司，土木技術資料 54-3(2012)，p. 40
※18 毎日新聞，東日本大震災決壊の須賀川・藤沼ダム，2017 年 4 月 25 日

[redacted]

濃度計量証明書

[redacted] 殿

計量証明事業登録宮城県 第45号
事業者 エヌエス環境株式会社
〒105-0011 東京都港区芝公園七丁目2番9号
事業所 東北支社 仙台分析センター
〒983-0013 仙台市宮城野区中野一丁目3番地の2
TEL (022) 254－4561
計量管理者 渡辺 泰彦
環境計量士(濃度関係) 登録番号 第5327号

貴依頼による計量の結果を下記のとおり証明致します。

試料採取日	2019年10月1日	採取時刻	10:00	採取者／所属	客先
採取状況	天候:晴れ、気温:20℃				
採取場所	[redacted]				
件　名					
試料名	①BF:25kg/m3,高炉B種:50kg/m3、σ7			計量の対象	土壌

計量の項目	(単位)	計量の結果	定量下限値	計量の方法
六価クロム	(mg/L)	0.05	0.01	JIS K 0102 65.2.1(2019)
以下余白				

備考	
	・計量に供した試料は、客先が採取した持込試料であり、採取状況は採取者の記録を引用して記載しました。 ・検液の作成方法;環境庁告示第46号(平成3年 改正平成28年環告30号)による。

[redacted]

濃度計量証明書

[redacted] 殿

計量証明事業登録宮城県 第45号
事業者 エヌエス環境株式会社
〒105-0011 東京都港区芝公園一丁目2番9号
事業所 東北支社 仙台分析センター
〒983-0013 仙台市宮城野区中野 一丁目3番地の2
TEL (022) 254 － 4561
計量管理者 渡辺 泰彦
環境計量士(濃度関係) 登録番号 第5327号

貴依頼による計量の結果を下記のとおり証明致します。

試料採取日	2019年10月1日	採取時刻	10:00	採取者／所属	客先
採取状況	天候:晴れ、気温:20℃				
採取場所	[redacted]				
件　名					
試料名	②BF:25kg/m3,特殊土用セメント系固化材(GS200):50kg/m3、σ7			計量の対象	土壌

計量の項目	(単位)	計量の結果	定量下限値	計量の方法
六価クロム	(mg/L)	0.03	0.01	JIS K 0102 65.2.1(2019)
以下余白				

備考
・計量に供した試料は、客先が採取した持込試料であり、採取状況は採取者の記録を引用して記載しました。
・検液の作成方法;環境庁告示第46号(平成3年 改正平成28年環告30号)による。

[redacted]

濃度計量証明書

[redacted] 殿

計量証明事業登録宮城県 第45号
事業者 エヌエス環境株式会社
〒105-0011 東京都港区芝公園一丁目2番9号
事業所 東北支社 仙台分析センター
〒983-0013 仙台市宮城野区中野二丁目3番地の2
TEL (022) 254 - 4561
計量管理者 渡辺 泰彦
環境計量士(濃度関係) 登録番号 第5327号

貴依頼による計量の結果を下記のとおり証明致します。

試料採取日	2019年10月1日	採取時刻	10:00	採取者／所属	客先
採取状況	天候:晴れ、気温:20℃				
採取場所	[redacted]				
件　名					
試 料 名	③BF:25kg/m3,高有機質土用(GS225):50kg/m3、σ7			計量の対象	土壌

計量の項目	(単位)	計量の結果	定量下限値	計量の方法
六価クロム	(mg/L)	0.07	0.01	JIS K 0102 65.2.1(2019)
以下余白				

備考
・計量に供した試料は、客先が採取した持込試料であり、採取状況は採取者の記録を引用して記載しました。
・検液の作成方法;環境庁告示第46号(平成3年 改正平成28年環告30号)による。