

配合試験報告書例(ため池①)

平成 ■ 年度

■ 農村災害対策整備事業

■ 配合試験報告書

平成 ■ 年 ■ 月

老朽化ため池改修技術
ボンテラン工法開発民間機構
株式会社森環境技術研究所

目次

1. 試験概要	1
1.1 試験件名	1
1.2 試験目的	1
1.3 改良目標	1
1.3.1 改良土の目標品質	1
1.3.2 現場と室内の強度比による割増率の設定	2
2. 配合試験	3
2.1 試料の採取状況	3
2.2 改良対象土の物理特性	4
2.2.1 含水比および湿潤密度等の測定	4
2.3 配合試験メニュー	6
2.4 改良対象土含水比設定	8
2.5 一軸圧縮試験方法	9
2.6 透水試験方法	9
2.7 コーン指数試験方法	10
3. 試験結果	11
3.1 一軸圧縮試験結果	11
3.2 透水試験結果	12
3.3 コーン指数試験結果（参考）	13
3.4 品質目標評価	14
4. 環境（六価クロム溶出試験）	15
5. 総合評価	16
6. 乾湿繰返し試験	17
6.1 供試体の作成方法および配合	18
6.2 試験方法	18
6.3 乾湿繰返し試験状況	19
6.4 乾湿繰返し試験まとめ	25
7. 改良土の乾湿繰返し・凍結融解に対する耐久性について	26
8. 改良土の耐浸食性	29
9. 改良土の液状化抵抗性	30
10. 巻末 六価クロム溶出試験 濃度計量証明書	31

1. 試験概要

1.1 試験件名： [redacted] ため池における遮水性ゾーンの配合試験

1.2 試験目的： [redacted] ため池の遮水性ゾーンに現地発生土を再利用するための配合試験を実施する。

本配合試験では改良工法として乾湿・凍結耐久性、耐浸食性および液状化抵抗性に優れたボンテラン工法〔(社)農業農村整備情報総合センター ARIC NNTD 0245、 [redacted]、NETIS 登録 No,TH-020042-V(掲載期間終了)]を用いるものとする。

1.3 改良目標

1.3.1 改良土の改良目標

改良土の改良目標は以下に示す①～④の4項目とする。また、養生日数は養生3日とする。

① 設計基準強度: q_u

設計業務報告書(第3章9-7)より堤体の安定計算では、粘着力は $C=30$ [kN/m^2]以上と計算しており、設計基準強度 q_u (一軸圧縮強さ)は以下のとおりとなる。

$$q_u = 2 \times C = 2 \times 30 = 60 \text{ [kN/m}^2\text{]} \text{以上を目標値とする。}$$

② 透水係数: k

遮水性ゾーンとしての再利用を検討する為、求められる透水係数は以下のとおりとする(設計業務委託コンサルタントとの打合せにより)。

$$k = 1 \times 10^{-6} \text{ [cm/sec]} \text{以下(室内試験目標値)を目標値とする。}$$

③ トラフィカビリティ: q_c

施工機械(15t 級 BD)のトラフィカビリティ確保のためのコーン指数

$q_c = 500$ [kN/m^2]以上を目標値とする。

④ 六価クロム溶出試験基準値: 0.05 [mg/l]以下を目標値とする。

以上①～④に示す4項目の目標値を同時に満足する最も経済的な配合を求めるものとする。

1.3.2 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攪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-1に示す。ポンテラン工法は攪拌アタッチメントを装着したバックホウを用いるため、攪拌ムラが少なく、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 0.5 を採用する。

表-1 現場と室内の強度比の一例

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	

したがって、

- ①室内目標強度(一軸圧縮強さ) : $q_{ul}=60 \div 0.5=120$ [kN/m²]以上とする。
 - ②透水係数 k は強度の割増しには関連しないため $k=1 \times 10^{-6}$ [cm/sec]以下とする。
 - ③トラフィカビリティ : $q_{cl}=500 \div 0.5=1,000$ [kN/m²]以上とする。
 - ④六価クロムの溶出は強度の割増しには関連しないため溶出基準値は 0.05 [mg/l]以下とする。
- 以上 4 項目を改良目標値とする。

2. 配合試験

2.1 試料の採取状況

配合試験に用いる改良対象土は写真-1～3に示す工事用道路の現地発生土(褐色粘性土)を用いた。褐色粘性土は自然含水比が $W=29.4[\%]$ であり、写真-3に示すように塑性状態となっている。



写真-1 改良対象土の掘削状況



写真-2 改良対象土の確認



写真-3 改良対象土の採取状況

2.2 改良対象土の物理特性

2.2.1 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-4～8 に示すとおり含水比および湿潤密度、一軸圧縮強さ・透水係数・コーン指数(参考)を測定した。表-2 に測定結果を示す。



写真-4 含水比測定



写真-5 湿潤密度測定



写真-6 原泥の一軸圧縮強度試験



写真-7 原泥の透水係数測定



写真-8 原泥のコーン指数測定

表-2 測定結果

改良対象土	含水比 [%]	湿潤密度測定 [g/cm ³]	①一軸圧縮強さ [kN/m ²]	②透水係数 [cm/s]	③(参考) コーン指数 [kN/m ²]
現地発生土	29.4	1.871	95.19	1.29×10^{-6}	1,408
目標値	—	—	120 以上	1×10^{-6} 以下	1,000 以上
合否	—	—	×	×	合格

表-2 に示す試験結果から改良対象土(現地発生土)は遮水性ゾーンとして、1.3 に示したすべての室内目標強度および目標品質を確保できないことが確認された。

そこで、ポンテラン工法により配合試験を実施するものとする。

2.3 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。」^{※1}と規定されている。



図-1 盛土のクラック発生状況

※1 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 $25[\text{kg}/\text{m}^3]$ 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 $25[\text{kg}/\text{m}^3]$ とする。

乾湿繰返し試験方法		
供試体	乾湿 1 サイクル	確認項目
$\phi 5 \times 10 \text{cm}$	40°C 炉乾燥 2 日 20°C 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) の実施 ・ 各サイクルの乾燥後、水浸後の供試体の状況観察、写真撮影

試験方法：独立行政法人 土木研究所編著 建設汚泥再生利用マニュアル 乾湿繰返し試験方法に準拠

安定処理土は 2 サイクルで完全崩壊

ボンテラン改良土は 10 サイクル終了時においても変化なし

アルカリ性の表面水
乾湿繰返しによるクラックから水酸化物イオン(OH⁻)の再溶出が懸念。クラックからパイピングに発展。

中性の表面水
乾湿繰返しを受けても劣化せず、内部の水酸化物イオン(OH⁻)溶出は少ない。

撮影:H28,12,1
6ヶ月後
安定処理土の横断堤防によるクラック発生状況

撮影:H28,12,1
ボンテラン改良土の横断堤防、クラック発生無し

図-2 乾湿繰返し試験状況

実験に用いる固化材は一般軟弱土用セメント系固化材および高炉セメント B 種とする。表-3 に改良材料の一覧を、表-4 に材料配合を示す。

表-3 改良材料一覧表

No.	一般名称	商品名	メーカー名	単価	規格	備考
1	一般軟弱土用セメント系固化材	US10	宇部三菱セメント	13.8[円/kg]	1トンパック	■ 単価※2
2	高炉セメント B 種	BB	宇部三菱セメント	14.1[円/kg]※	1トンパック	■ 単価※2
3	繊維質泥土改良材	BF(ボンファイバー)	(株)森環境技術研究所	83[円/kg]	250[kg/個]	■ までの運賃込の単価(見積りによる)

※2 固化材の単価は積算資料:(一財)建設物価調査会, P75, P361 より引用。高炉セメント B 種の単価は 12.6 円/kg にバラとフレコンの差額 1.5 円を考慮し 14.1 円/kg とした。

表-4 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	一般軟弱土用 セメント系固化材 (US10)	30
2			50
3			70
4		高炉セメント B 種 (BB)	30
5			50
6			70

2.4 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-9 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には改良対象土の加水調整が必要になる。そこで含水比を調整してポンテラン工法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最低配合であるBF添加量:25[kg/m³]、一般軟弱土用セメント系固化材添加量:30[kg/m³]で改良して、改良土の性状を確認した。

表-5 および写真-10~12 に示す試験結果より、含水比 W=44[%]に加水調整した泥土の状態が最も混合に適した含水比であることが確認された。したがって、以降のポンテラン改良土の改良対象土は含水比 W=44[%]に加水調整したものをを用いるものとする。



写真-9 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	へバリツキの有無
W=39%	25[kg/m ³]	30[kg/m ³] (一般軟弱土用 セメント系固化 材)	固く混ぜ辛い	へバリツキ有り
W=44%			混ぜ易さ	へバリツキ無し
W=49%			やわらかく混ぜ辛い	へバリツキ有り



写真-10 W=39%改良土性状



写真-11 W=44%改良土性状



写真-12 W=49%改良土性状

2.5 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-3 に示す。

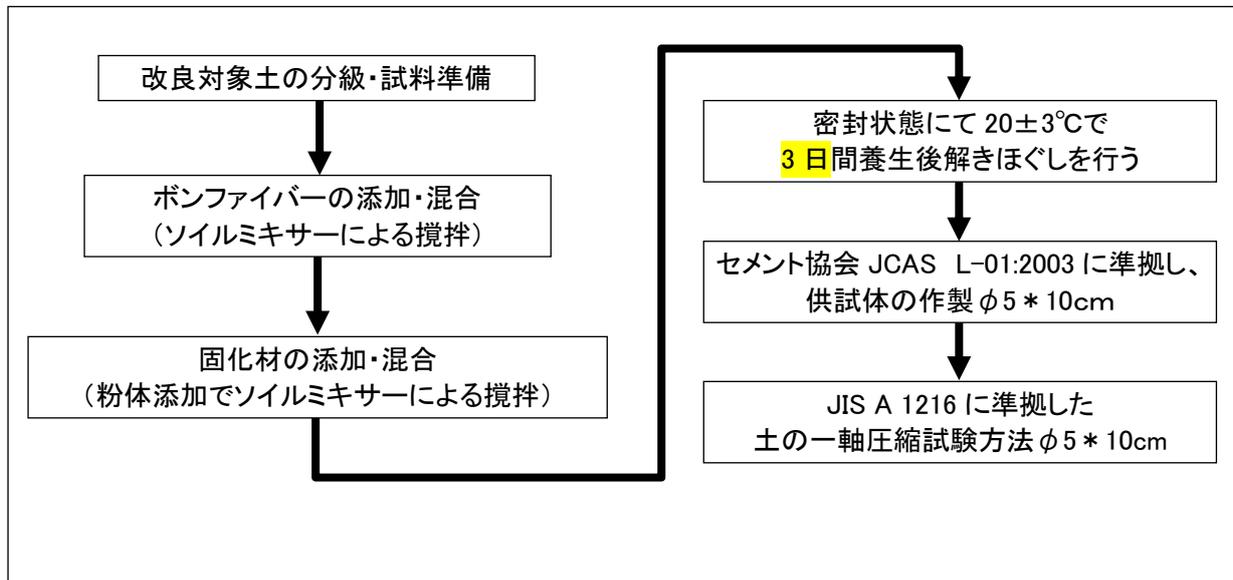


図-3 一軸圧縮試験手順

2.6 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-4 に示す。

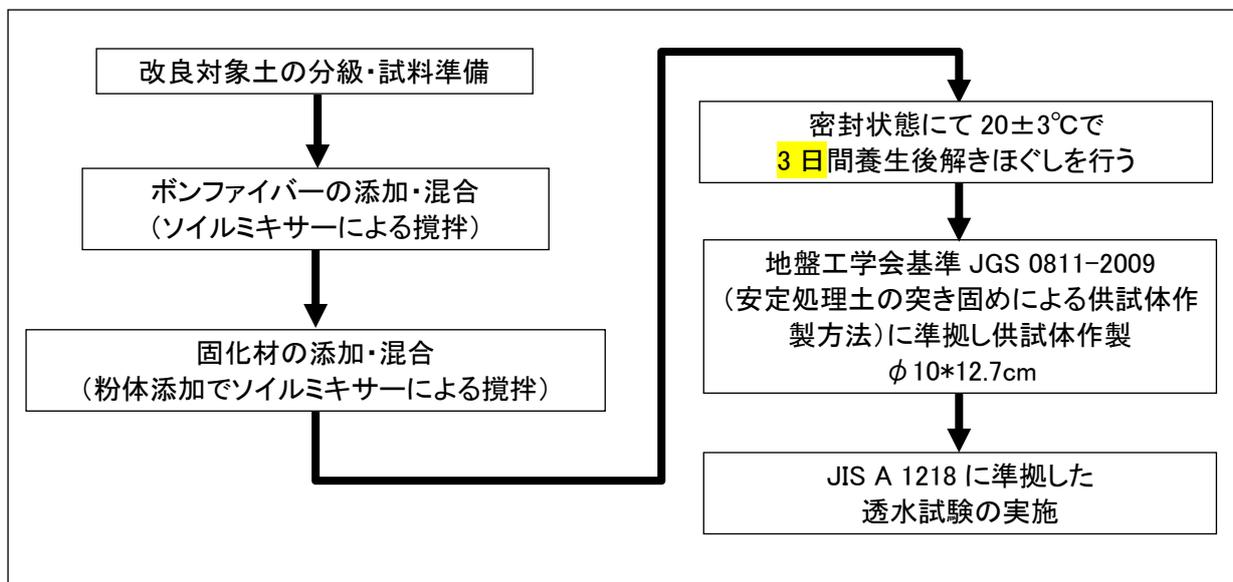


図-4 透水試験手順

2.7 コーン指数試験方法(参考)

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-5に示す。

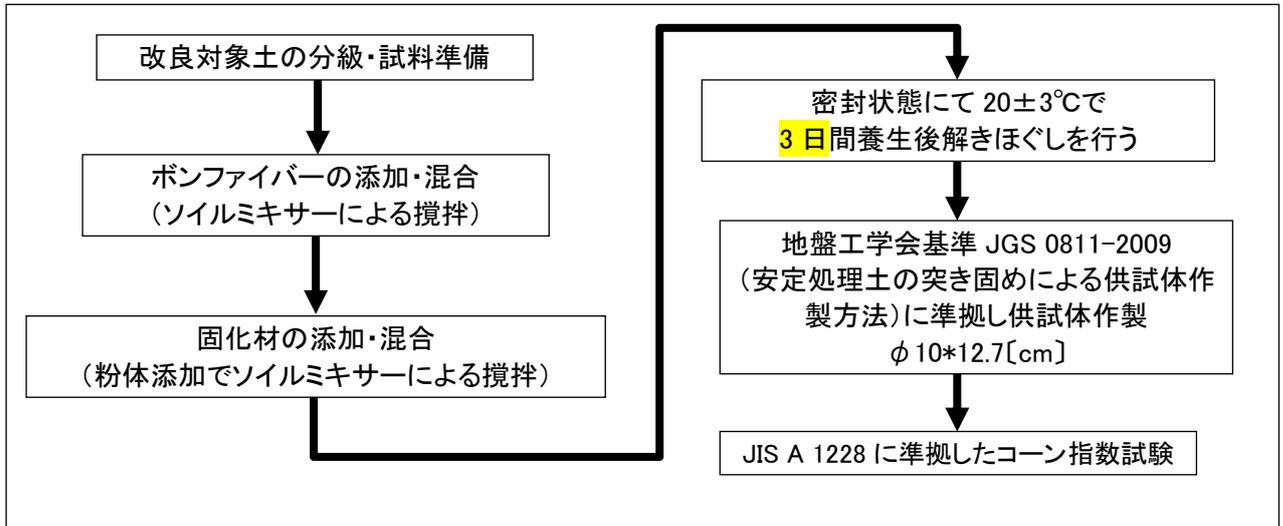


図-5 コーン指数試験の手順

3. 試験結果

3.1 一軸圧縮試験結果

一軸圧縮試験結果を表-6 に、固化材添加量と一軸圧縮強さの関係を図-6 に示す。

表-6 一軸圧縮試験結果

改良対象土	養生〔日〕	配合			一軸圧縮強さ q_u 〔kN/m ² 〕			
		BF添加量〔kg/m ³ 〕	固化材種類	固化材添加量〔kg/m ³ 〕	1	2	3	平均
工事用道路の掘削土(褐色粘性土)	3	25	一般軟弱土用セメント系固化材	30	94.62	92.24	88.40	91.75
				50	193.83	214.46	221.59	209.96
				70	230.34	230.18	228.80	229.77
	3	25	高炉セメントB種	30	39.73	37.09	34.70	37.17
				50	176.27	156.31	173.39	168.66
				70	322.14	316.49	325.55	321.39

: 室内目標強度を満足した配合

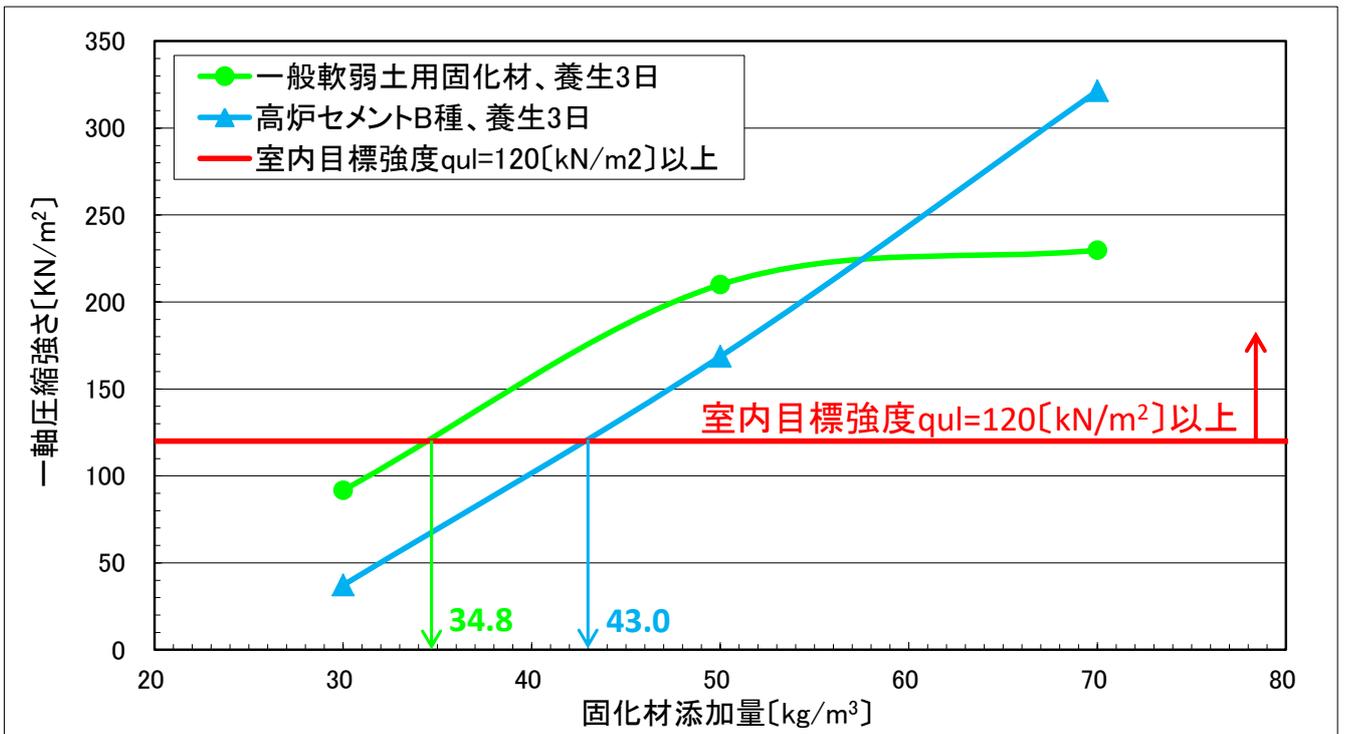


図-6 固化材添加量と一軸圧縮強さの関係

図-6 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 $q_u=120$ 〔kN/m²〕以上を満足する固化材添加量を以下に示す。

- ・BF: 25〔kg/m³〕+一般軟弱土用セメント系固化材 (US10) : 34.8〔kg/m³〕以上
- ・BF: 25〔kg/m³〕+高炉セメント B 種 : 43〔kg/m³〕以上

3.2 透水試験結果

透水試験結果を表-7 に、固化材添加量と透水係数の関係を図-7 に示す。

表-7 透水試験結果

改良対象土	養生〔日〕	BF添加量〔kg/m ³ 〕	固化材種類	固化材添加量〔kg/m ³ 〕	透水係数〔cm/sec〕
工事用道路の掘削土 (褐色粘性土)	3	25	一般軟弱土用 セメント系固化材	30	7.21E-07
				50	1.60E-06
				70	7.62E-05
	3	25	高炉セメントB種	30	1.02E-06
				50	5.06E-07
				70	9.65E-07

: 室内目標透水係数を満足した配合

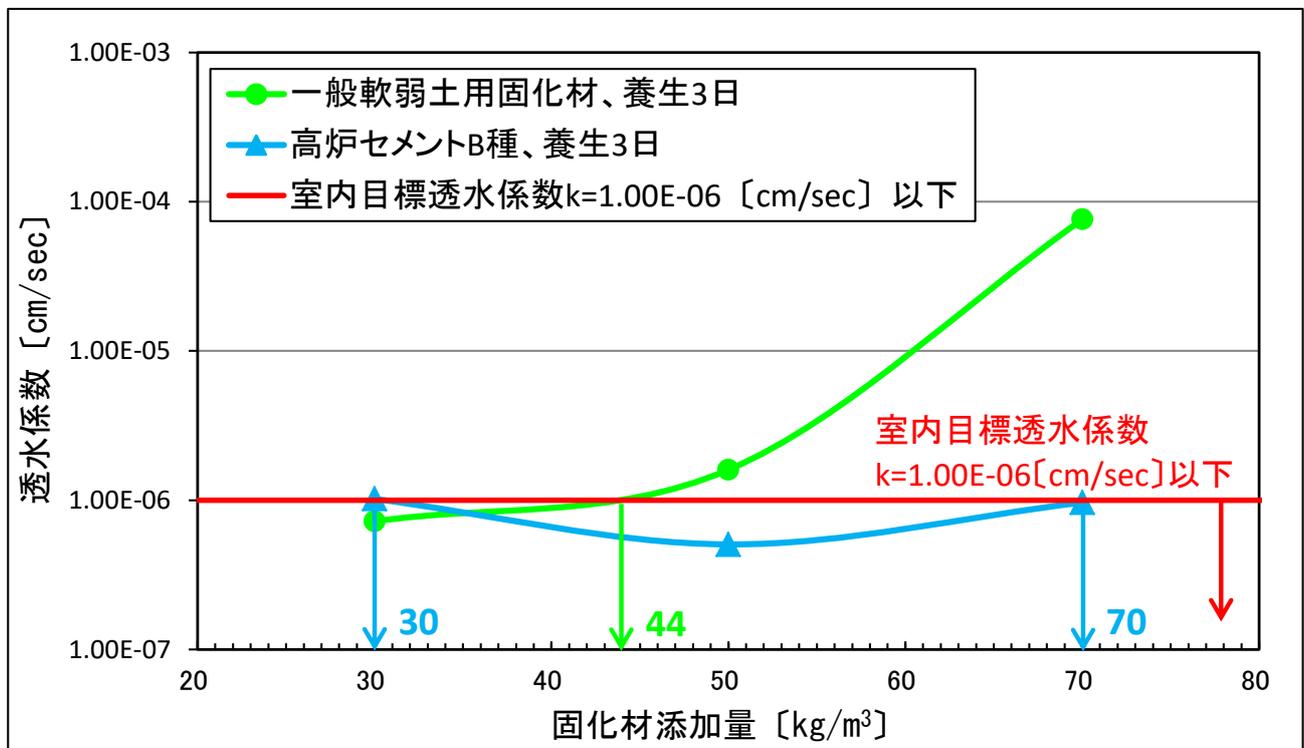


図-7 固化材添加量と透水係数の関係

図-7 に示す固化材添加量と透水係数の関係から室内目標透水係数 $k=1 \times 10^{-6}$ [cm/sec] 以下を満足する固化材添加量を以下に示す。

- ・BF: 25[kg/m³] + 一般軟弱土用セメント系固化材 (US10) : 30~44[kg/m³] の範囲
- ・BF: 25[kg/m³] + 高炉セメント B 種 : 30~70[kg/m³] の範囲

3.3 コーン指数試験結果(参考)

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-8 に示す。

表-8 コーン指数試験結果

改良対象土	養生	配合			コーン指数[kN/m ²]			
		BF添加量 [kg/m ³]	固化材種類	固化材 添加量	読み			qc
					5[cm]	7.5[cm]	10[cm]	
工事用道路の 掘削土 (褐色粘性土)	3	25	一般軟弱土用 セメント系固化材	30	60.0	63.0	73.0	876
				50	50.0	54.0	60.0	3,939
				70	78.0	79.0	80.0	5,692
	3	25	高炉セメントB種	30	3.5	4.0	4.0	276
				50	26.0	31.0	31.0	2,114
				70	50.0	65.0	69.0	4,419

 : 室内目標強度を満足した配合

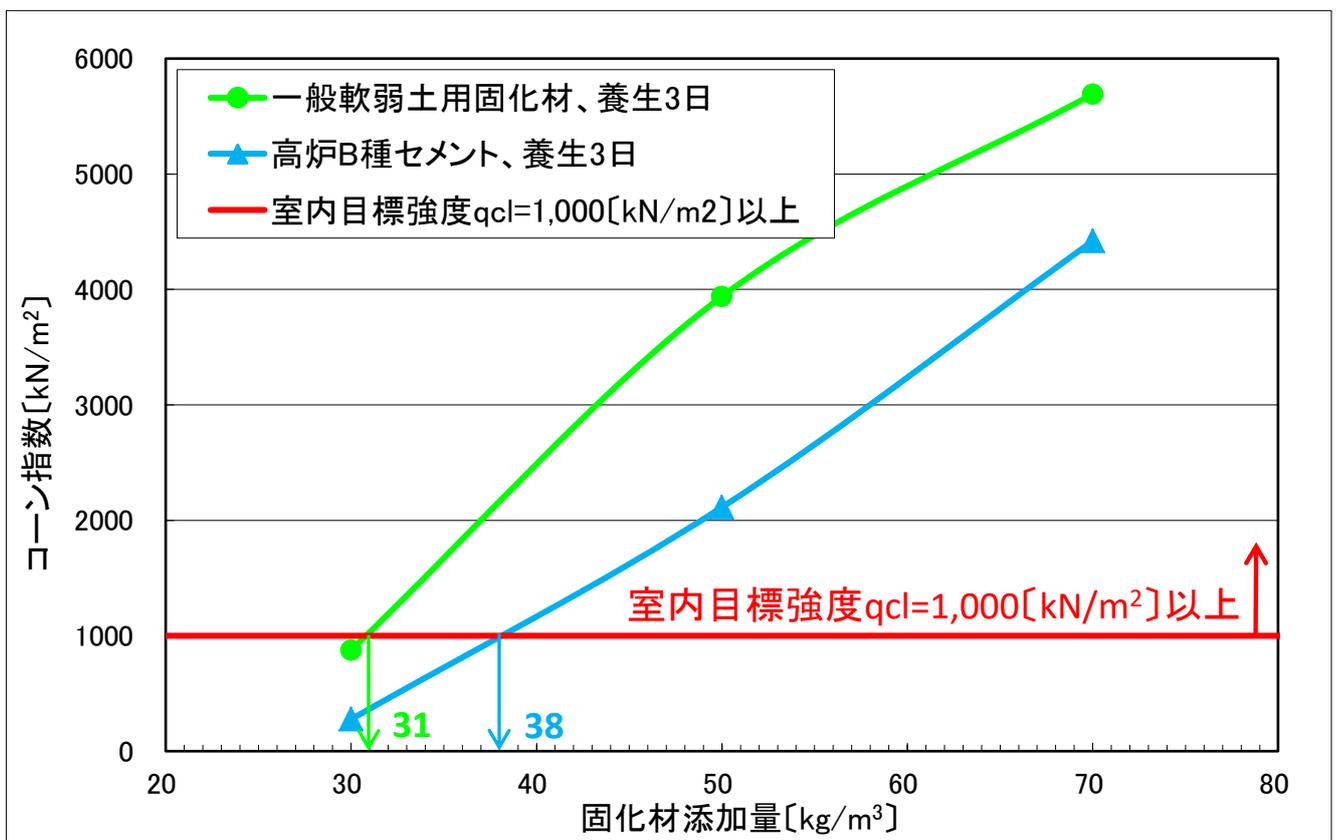


図-8 固化材添加量とコーン指数の関係

図-8 に示す固化材添加量とコーン指数の関係から室内目標コーン指数 $q_{cl}=1,000$ [kN/m²] 以上を満足する固化材添加量を以下に示す。

- ・BF: 25 [kg/m³] + 一般軟弱土用セメント系固化材 (US10): 31 [kg/m³] 以上
- ・BF: 25 [kg/m³] + 高炉セメント B 種: 38 [kg/m³] 以上

3.4 総合評価

- ①一軸圧縮強さ: $q_{ul}=120[\text{kN/m}^2]$ 以上、
 - ②透水係数: $k=1 \times 10^{-6}[\text{cm/sec}]$ 以下
 - ③コーン指数: $q_{cl}=1,000[\text{kN/m}^2]$ 以上
- 3項目の目標値を同時に満足する配合を表-9に示す。

表-9 一軸圧縮強さと透水係数およびトラフィカビリティ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	固化材の種類	30 40 50 60 70					固化材添加範囲 [kg/m ³]	
		室内目標強度および室内目標品質								
σ3	25	一軸圧縮強さ: $q_{ul}=120[\text{kN/m}^2]$ 以上	一般軟弱土用 セメント系 固化材	34.8 → 44					34.8以上	34.8以上 44.0以下
		透水係数: $k=1 \times 10^{-6}[\text{cm/sec}]$ 以下		← 30 31					30.0以上 44.0以下	
		トラフィカビリティ $q_{cl}=1,000[\text{kN/m}^2]$ 以上		← 31					31.0以上	
σ3	25	一軸圧縮強さ: $q_{ul}=120[\text{kN/m}^2]$ 以上	高炉セメント B種	43 → 70					43.0以上	43.0以上 70.0以下
		透水係数: $k=1 \times 10^{-6}[\text{cm/sec}]$ 以下		← 30					30.0以上 70.0以下	
		トラフィカビリティ $q_{cl}=1,000[\text{kN/m}^2]$ 以上		← 38					38.0以上	

結果)

- ・BF: 25[kg/m³] + 一般軟弱土用セメント系固化材 (US10) : 34.8~44.0[kg/m³]
- ・BF: 25[kg/m³] + 高炉セメント B 種 : 43.0~70.0[kg/m³]

4. 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。本試験は一般軟弱土用セメント系固化材および高炉セメント B 種、計 2 種類の六価クロム溶出試験を実施した。

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

材料名	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	ボンファイバー:25[kg/m ³] 一般軟弱土用セメント系固化材(US10):35[kg/m ³]	mg/l	0.12	0.05 以下	0.01	×
ボンテラン改良土	ボンファイバー:25[kg/m ³] 高炉 B 種:50[kg/m ³]	mg/l	0.02	0.05 以下	0.01	○

 : 目標値を満足した配合

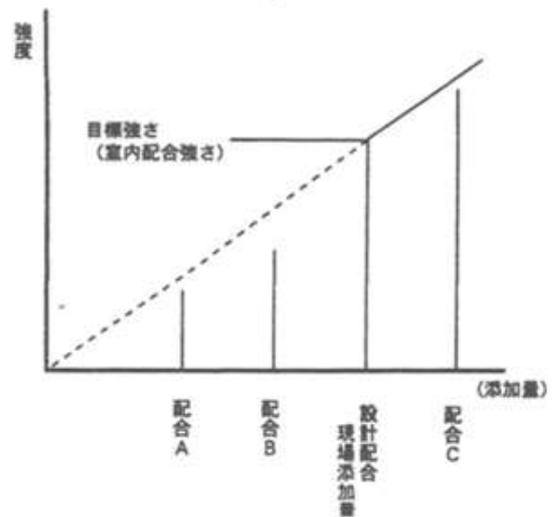
六価クロム溶出試験実施要領(案)

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。



結果)

一般軟弱土用セメント系固化材を用いた配合 BF:25[kg/m³]+US10:35[kg/m³]では六価クロムの溶出量測定値 0.12[mg/l]が基準値 0.05[mg/l]以下を超過していることから採用しないものとする。

高炉セメント B 種を用いた配合 BF:25[kg/m³]+高炉 B 種:50[kg/m³]では六価クロムの溶出量測定値が 0.02[mg/l]であり基準値を満足した。

3.4 の品質目標評価より、高炉セメント B 種を用いた配合は(BF:25[kg/m³]+固化材 43.0~70.0[kg/m³])と確認された。

5. 総合評価

以上の試験結果より、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-11 に総合評価を示す。

表-11 総合評価表

種類 評価項目	ボンテラン改良土 一般軟弱土用セメント系固化材(US10)	ボンテラン改良土 高炉セメント B 種
①強度	養生 3 日において室内改良目標強度 $q_{ul}=120$ [kN/m ²]以上を満足する配合はホンファイバー: 25[kg/m ³]+US10: 34.8[kg/m ³]以上の配合である。	養生 3 日において室内改良目標強度 $q_{ul}=120$ [kN/m ²]以上を満足する配合はホンファイバー: 25[kg/m ³]+高炉セメント B 種: 43[kg/m ³]以上の配合である。
②透水係数	養生 3 日において室内改良目標透水係数 $k=1.0 \times 10^{-6}$ [cm/sec]以下を満足する配合はホンファイバー: 25[kg/m ³]+US10: 30[kg/m ³]以上、44[kg/m ³]以下の配合ある	養生 3 日において室内改良目標透水係数 $k=1.0 \times 10^{-6}$ [cm/sec]以下を満足する配合はホンファイバー: 25[kg/m ³]+高炉セメント B 種: 30[kg/m ³]以上、70[kg/m ³]以下の配合ある。
③(参考) トラフィカビリティ	養生 3 日において室内目標強度 $q_{cl}=1,000$ [kN/m ²]以上を満足する配合はホンファイバー: 25[kg/m ³]+US10: 31[kg/m ³]以上の配合である。	養生 3 日において室内目標強度 $q_{cl}=1,000$ [kN/m ²]以上を満足する配合はホンファイバー: 25[kg/m ³]+高炉セメント B 種: 38[kg/m ³]以上の配合である。
④経済性	強度、透水係数およびトラフィカビリティ(養生 3 日)の目標品質を同時に満足する最も経済的な配合の材料費は以下のとおり。 ホンファイバー: 25[kg/m ³] × 83[円/kg] =2,075[円/m ³] US10: 34.8[kg/m ³] × 13.8 円/kg =480[円/m ³] 計 2,555[円/m ³]	強度、透水係数およびトラフィカビリティ(養生 3 日)の目標品質を同時に満足する最も経済的な配合の材料費は以下のとおり。 ホンファイバー: 25[kg/m ³] × 83[円/kg] =2,075[円/m ³] 高炉 B 種: 43[kg/m ³] × 14.1 円/kg =606[円/m ³] 計 2,681[円/m ³]
評価	◎	○
⑤環境 (六価クロム) 評価	ホンファイバー: 25[kg/m ³] +US10: 35[kg/m ³] 測定結果: 0.12[mg/ℓ] (基準値 0.05[mg/ℓ]以下) 六価クロム溶出判定: × 本試験による対象土は一般軟弱土用セメント系固化材との組み合わせでは六価クロムが溶出してしまうことから採用しないものとする。	ホンファイバー: 25[kg/m ³] +高炉 B 種: 50[kg/m ³] 測定結果: 0.02[mg/ℓ] (基準値 0.05[mg/ℓ]以下) 六価クロム溶出判定: ○
評価	×	◎
総合評価	×	◎

当該配合試験報告書 p.2 に示す目標値 4 項目を同時に満足する最も経済的な配合を表-12 に示す。

表-12 決定配合

固化材種類	ボンファイバー添加量 [kg/m ³]	固化材添加量 [kg/m ³]
高炉セメントB種	25	43

6. 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。^{※3}

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)^{※4}



図-9 安定処理土のクラック発生状況

※3 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

※4 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

6.1 供試体の作成方法および配合

- ① 原泥に所定の改良材を添加・混合する。
- ② 試料を密封し、3日間養生する。
- ③ 改良土をいったん解きほぐし、JCAS L-01:2003 に準拠し、供試体(φ5cm×10cm)を作成する。
- ④ 乾湿繰返し試験を開始。

表-13 供試体の配合

	ボンファイバー (kg/m ³)	高炉 B 種セメント (kg/m ³)
ボンテラン改良土	25	43
安定処理土	0	43

6.2 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
乾湿繰返し試験	φ5×10 (cm)	40℃炉乾燥 2 日 20℃水浸 1 日 の合計 3 日	<ul style="list-style-type: none"> ● 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

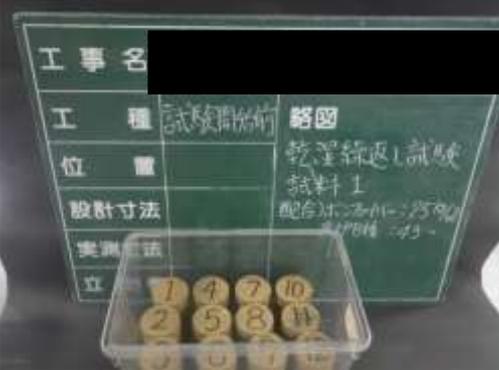
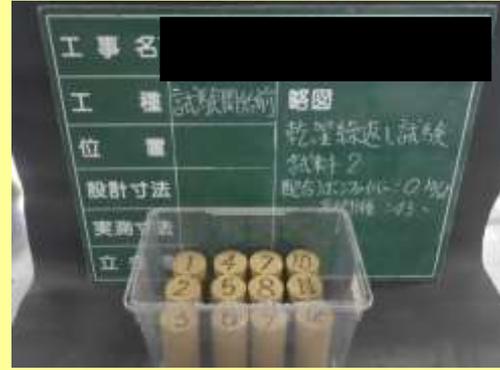
表-15 供試体健全度ランク

	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。

6.3 乾湿繰返し試験状況

図-10 湿繰返し試験状況、図-11 健全度ランク、図-12 所定サイクルごとの一軸圧縮強さを示す。

サイクル	乾湿	ボンテラン改良土 ボンファイバー: 25kg/m ³ 高炉 B 種: 43kg/m ³	安定処理土 ボンファイバー: 0kg/m ³ 高炉 B 種: 43kg/m ³
0	試験前	 	 
1	乾	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>
1	湿	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">G ランク</p>

供試体全体が崩壊し、片々は塊状

サイクル	乾湿	<p style="text-align: center;">ボンテラン改良土</p> <p style="text-align: center;">ボンファイバー: 25kg/m³ 高炉 B 種: 43kg/m³</p>	<p style="text-align: center;">安定処理土</p> <p style="text-align: center;">ボンファイバー: 0kg/m³ 高炉 B 種: 43kg/m³</p>
2	乾	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">G ランク</p>
	湿	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">G ランク</p>
3	乾	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">G ランク</p>
	湿	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">G ランク</p>

サイクル	乾湿	ボンテラン改良土 ボンファイバー: 25kg/m ³ 高炉 B 種: 43kg/m ³	安定処理土 ボンファイバー: 0kg/m ³ 高炉 B 種: 43kg/m ³
4	乾	 <p>A ランク</p>	 <p>G ランク</p>
	湿	 <p>A ランク</p>	 <p>H ランク</p>
5	乾	 <p>A ランク</p>	 <p>H ランク</p>
	湿	 <p>A ランク</p>	 <p>H ランク</p>

供試体全体が崩壊し、
片々は細粒化し、泥状

サイクル	乾湿	<p style="text-align: center;">ボンテラン改良土</p> <p style="text-align: center;">ボンファイバー: 25kg/m³ 高炉 B 種: 43kg/m³</p>	<p style="text-align: center;">安定処理土</p> <p style="text-align: center;">ボンファイバー: 0kg/m³ 高炉 B 種: 43kg/m³</p>
6	乾	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">H ランク</p>
	湿	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">H ランク</p>
7	乾	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">H ランク</p>
	湿	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">H ランク</p>

サイクル	乾湿	<p style="text-align: center;">ボンテラン改良土</p> <p style="text-align: center;">ボンファイバー: 25kg/m³ 高炉 B 種: 43kg/m³</p>	<p style="text-align: center;">安定処理土</p> <p style="text-align: center;">ボンファイバー: 0kg/m³ 高炉 B 種: 43kg/m³</p>
8	乾	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">H ランク</p>
	湿	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">H ランク</p>
9	乾	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">H ランク</p>
	湿	 <p style="text-align: center;">A ランク</p>	 <p style="text-align: center;">H ランク</p>

サイクル	乾湿	ボンテラン改良土	安定処理土
		ボンファイバー: 25kg/m ³ 高炉 B 種: 43kg/m ³	ボンファイバー: 0kg/m ³ 高炉 B 種: 43kg/m ³
10	乾		
	湿		

図-10 湿繰返し試験状況

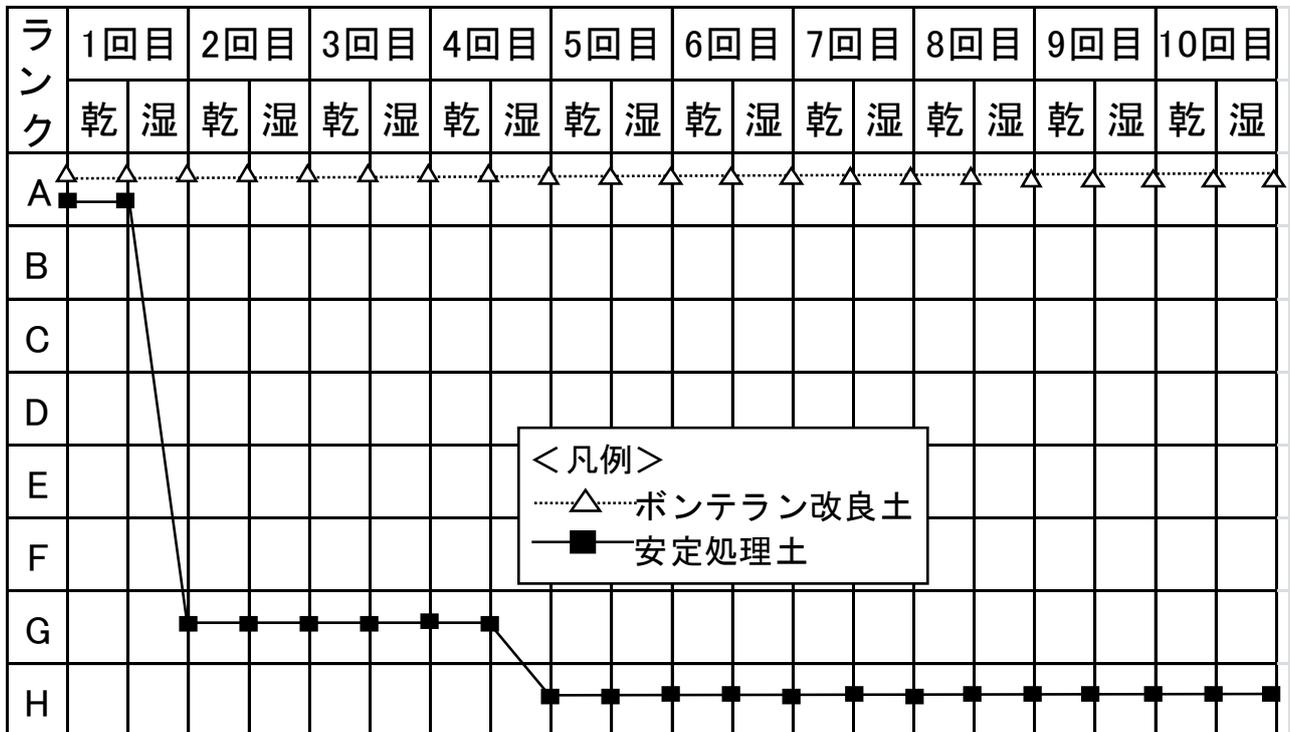


図-11 健全度ランク

6.4 乾湿繰返し試験まとめ

ボンテラン改良土およびセメント安定処理土を用いて乾湿繰返し試験を行った。その結果、セメント安定処理土は1サイクルの水浸においてすべての供試体が崩壊し、乾湿繰返しに対する耐久性が非常に低いことが確認された。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た。

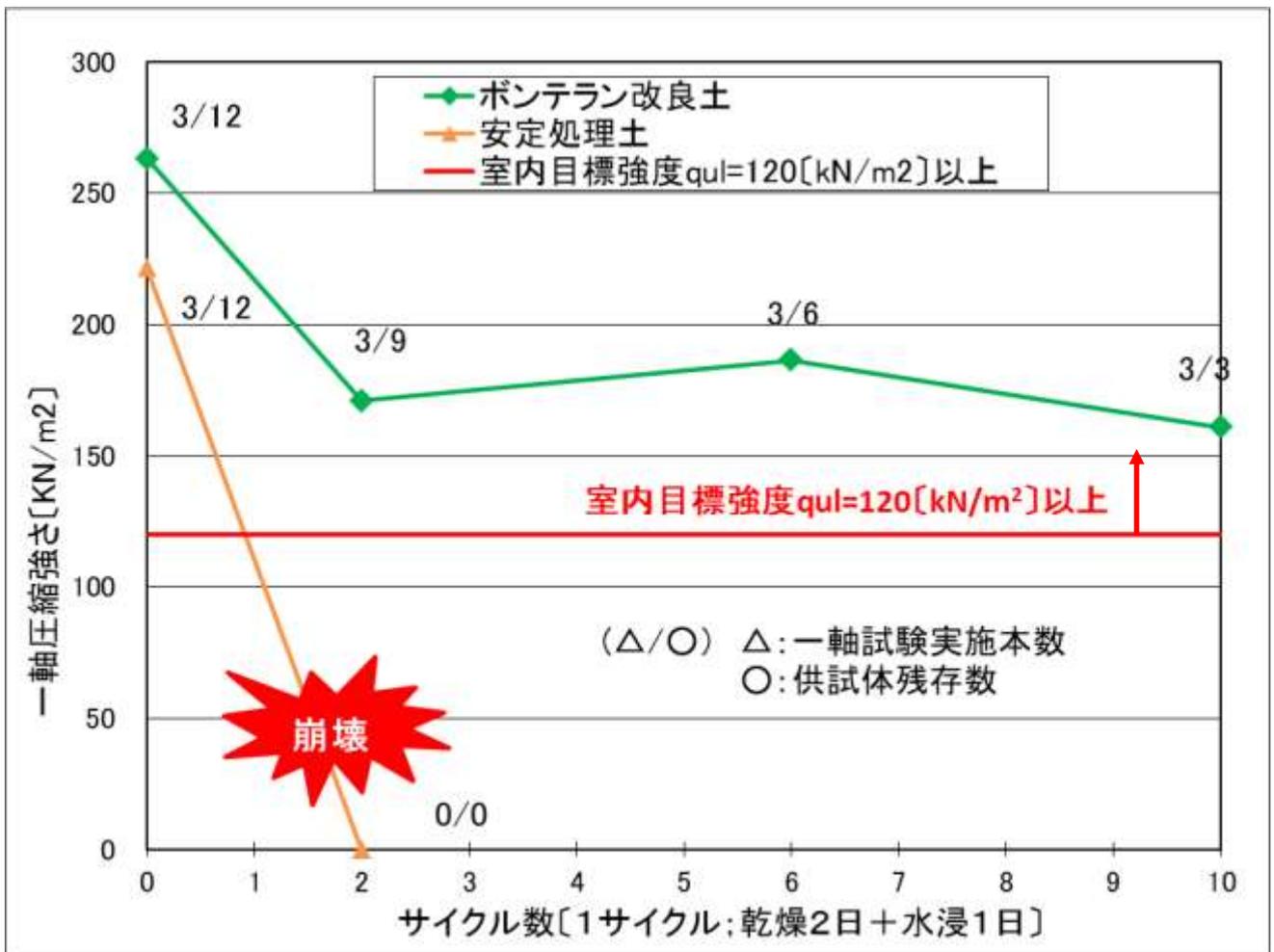


図-12 所定サイクルごとの一軸圧縮強さ

サイクル毎の一軸圧縮強さを比較してみると、安定処理土は1サイクルの水浸においてすべての供試体が崩壊したために一軸圧縮試験を継続することができなかった。ボンテラン改良土は10サイクルまで室内目標強度 $q_{ul}=120$ [KN/m²] をすべて満足する結果を得た。

7. 改良土の乾湿繰返し・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。」

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-13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、ポ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、ポ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。

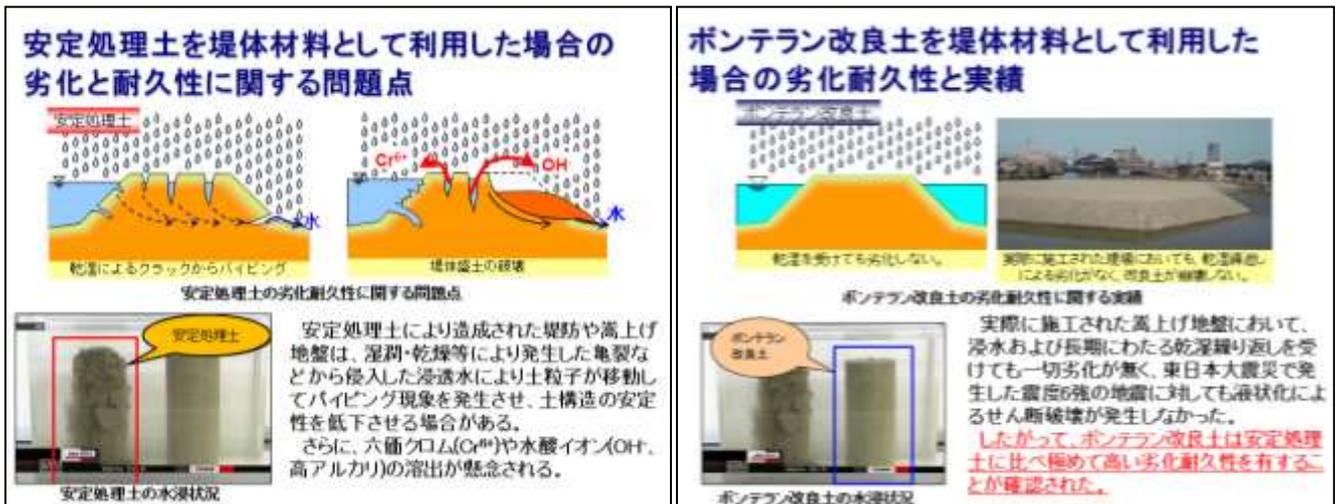
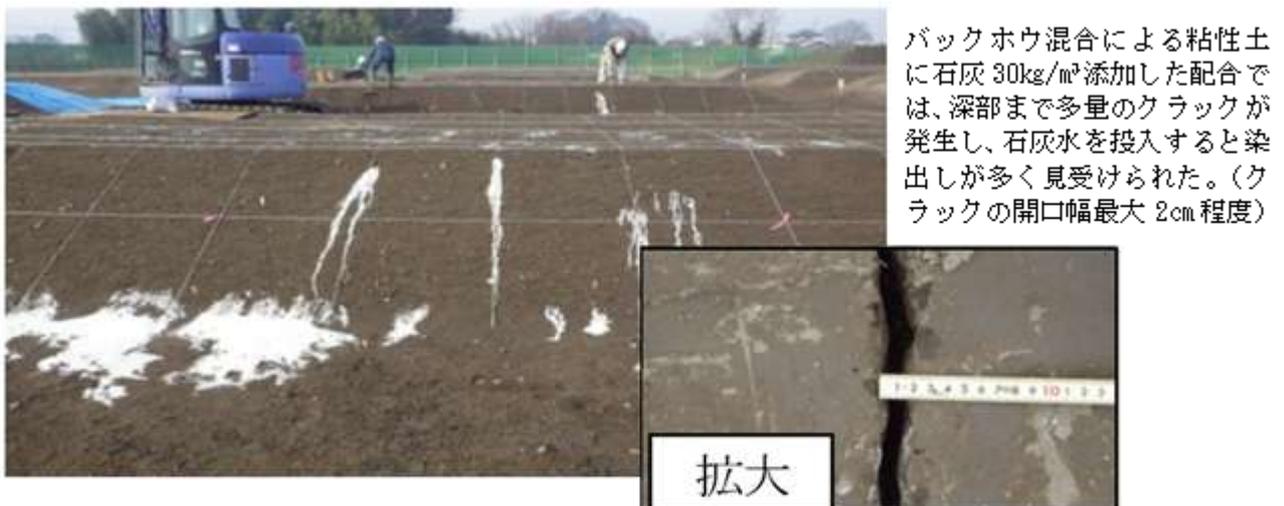


図-13 安定処理土およびポンテラン改良土を堤体材料として利用した場合

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。



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-14 安定処理土のクラック発生状況(フィールド試験)

一方、安定処理土の乾湿繰返し耐久性については、図-14 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。

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ました。その結果図-15 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ました。養生 228 日後(2017 年 1 月 17 日撮影)には、図-15 番号 6 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ました。

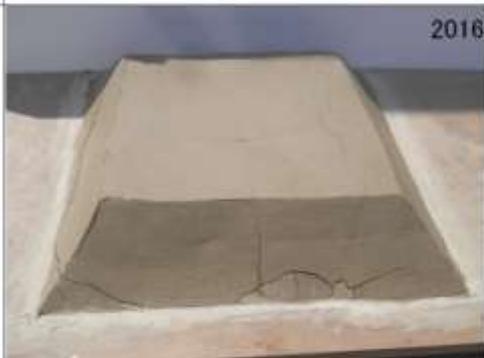
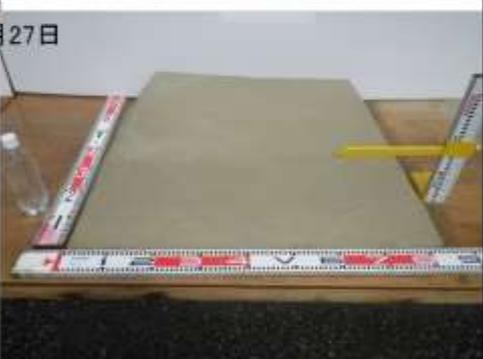
番号	安定処理土		経過	ボンテラン改良土		
	含水比100%	セメント系固化材55kg/m ³		含水比100%	セメント系固化材55kg/m ³	BF25kg/m ³
1			設置直後			
2			養生3日経過			
3			養生10日目			
4			養生30日目			



図-15 模擬堤防での乾湿繰返しによる耐久性試験(フィールド)
(左:安定処理土、右:ポンテラン改良土)

以上の見地から、ポ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ており、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になっております。

したがって、「ポンテラン工法」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、多様な現場で再利用が可能です。

<ポ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>

8. 改良土の耐浸食性

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。^{※5}

※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, p.24



上流堤体法面の浸食

改良土の耐用年数の評価



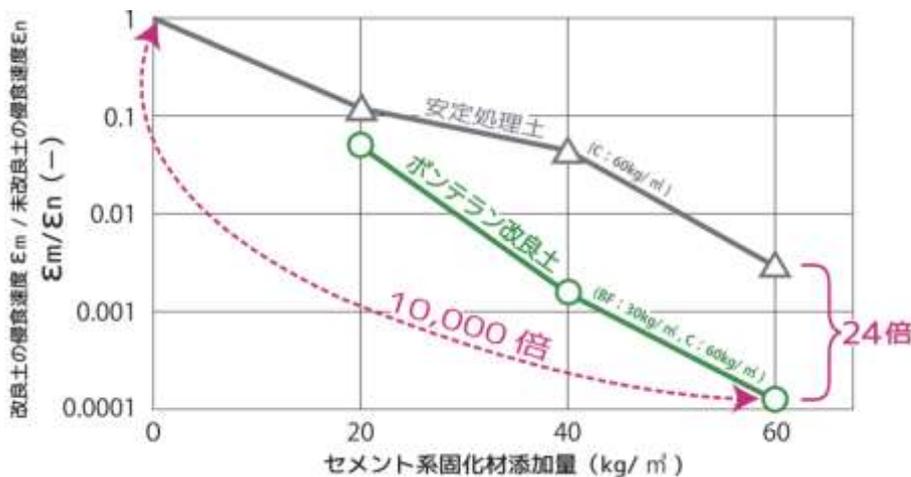
山砂による高速道路路肩盛土のガリ浸食



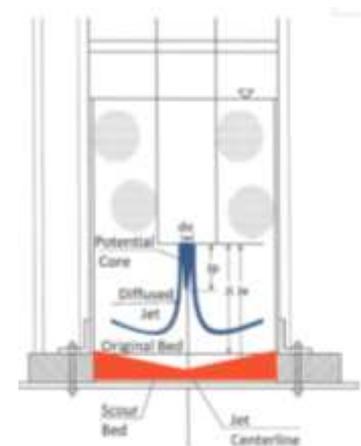
ボンテラン改良土の水際利用(浸食なし)

ため池用水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、営農活動に合わせた人為的な操作により年間周期で水位が大きく変動するという特徴を持つ。

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

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。^{※6}

※6 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

9. 改良土の液状化抵抗性

液状化を抑制

平成 14 年度に完成した福島県須賀川市の浜尾遊水地では、東日本大震災により震度 6 強を観測し、砂質土を用いて施工した堤防は、液状化によるせん断破壊やクラックが発生した。一方、ボンテラン工法により現地のヘドロを原料として再資源化した堤防は、液状化等の被害が確認されず、液状化対策地盤材料としての有効性が実証された。そのことが評価され、国土交通省関東地方整備局主催の平成 23 年度建設技術フォーラムで「東日本大震災で効果のあった技術」として選定されている。



砂質土を用いた堤防

ボンテラン改良土を用いた堤防

液状化の判定

液状化抵抗率(F_L)が 1.0 以下の場合に液状化するものとみなされます。東北大学高橋研究室では、砂質土と砂質土を改良したボンテラン改良土の液状化抵抗率を検討するため、「繰返し非排水三軸試験」を実施した。砂質土の液状化抵抗率は $F_L=0.52$ であるのに対し、ボンテラン改良土は $F_L=4.25$ であり砂質土の 8 倍の液状化抵抗率(F_L)を確認した。^{※7}

$$F_L = R/L$$

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「ため池整備」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

※7 ボンテラン工法論文リスト 47, 高橋弘, 高橋研太, et al, 繊維質固化処理土の動的強度に関する実験的研究

