

(a) 再生石膏粉の水分及び化合水

40℃で乾燥して定量した水分付着率は、再生半水石膏で 0.1%未満、再生二水石膏で 0.3%であり、どちらも製造・保管状況は良好といえる。240～260℃で加熱して定量した化合水の含有率は、再生半水石膏で 5.8%、再生二水石膏で 19.5%であり、いずれも理論値である 6.2%、20.9%をやや下回った。これは前述の X 線回折による石膏の組成（純度）分析結果から、半水石膏には無水石膏が、二水石膏には無水石膏及び半水石膏が混在していること以外に、ボード紙の細片も混在していることが考えられる。

手法 1 により吸湿させた再生半水石膏の水分及び化合水の定量試験結果を表 1. 6-4 2 に示す。同表には、昨年度半水石膏を入手したときの定量値も併記している。

表 1. 6-4 2 再生半水石膏の水分及び化合水の定量試験結果

項目	単位	手法 1 により 138 日吸湿後	昨年度入手時
水分の付着率	%	1.8	<0.1
化合水の含有率	%	8.9	5.8

半水石膏の化合水（含有率）の理論値は 6.2%であることから、吸湿試験によって二水石膏が生成されたことになり、前述の X 線回折結果と一致する。また、無水石膏や半水石膏は、理論的には水分付着率はゼロであることから、このことから吸湿試験後の半水石膏には二水石膏が含まれていると判断される。

いま、手法 1 により吸湿した再生半水石膏の質量を 100g、水分の付着率をゼロ（化合水の定量を行うのに先立って水分量の定量を行うので、水分は消失する）と仮定する。

図 1. 6-3 2 に示す各種石膏の組成比と化合水の理論上の含有率から、それぞれの石膏の化合水を含んだ質量及び化合水の質量は表 1. 6-4 3 のようになり、全体としての理論上の化合水の含有率は 7.8%となる。これは表 1. 6-4 2 に示す実測値と 1.1%の開きがあるが、概ね妥当な結果と考えられる。

表 1. 6-4 3 手法 1 により吸湿させた再生半水石膏の化合水

	吸湿後の組成比 %	化合水の 理論含有率 %	石膏+化合水 g	化合水 g
無水石膏	10	0	10	0.000
半水石膏	75	6.2	75	4.650
二水石膏	15	20.9	15	3.135
計	100	—	100	7.785

(b) pH

石膏は一般に中性といわれるが、酸性の硫酸（ H_2SO_4 ）とアルカリ性のカルシウム化合物（たとえば CaO ）の化合物であるため、酸性にもアルカリ性にもなりうる。硫酸カルシ

ウム (CaSO_4) は結晶水が多い場合は弱酸性～中性を示すが、結晶水が少なくなるにつれて弱アルカリ性を示すようになる。実際、再生二水石膏は pH7.8 で中性であったが、再生半水石膏は pH9.3 で弱アルカリ性を示した。

クリンカアッシュを除く安定材と助材はいずれも pH>11 の強アルカリ性を示したが、クリンカアッシュは pH9.8 と弱アルカリ性であった。

(c) 電気伝導率

改質材懸濁液の EC は、クリンカアッシュを除いていずれも 200mS/m 超を示した。EC が 26.8mS/m のため池底泥土（山口）や 8.6mS/m の貯水池底泥土（新潟）をこれら改質材と混合した改質土の EC がいくらかになるか予測は難しいが、数値によっては土中埋設鋼材を腐食させたり（農業土木）、塩基濃度障害を引き起こす（農地土壌）ことが懸念される。

(d) 酸化還元電位

酸化還元電位は、プラスの数値が大きいほど酸化状態にあり、マイナスの数値が大きいほど還元状態にある。全ての改質材の ORP はプラスの数値であることから酸化状態であり、再生二水石膏が酸化状態を示したことで、作物の根の伸びが良好になることが期待される。

(e) 水溶性成分

塩化物イオンは、単体で地盤材料として用いても、土中の鋼材を腐食させる恐れのある値 (1mg/g) には満たなかったが、硫化物イオンはクリンカアッシュを除いては目安 (0.5mg/g) を超過した。特に、硫黄を主成分とする石膏と、石膏を添加している高炉セメント B 種、高炉スラグ微粉末（商品名：エスメント）は 9～十数 mg/g を示した。

(f) 化学成分

石膏は、主成分である三酸化硫黄 (SO_3) と酸化カルシウム (CaO) で 70～80% を占めた。高炉スラグ微粉末は、高炉スラグ微粉末をセメント代替材として使用できることから分かるように、高炉セメント B 種と成分組成が類似しており、いずれも酸化カルシウム (CaO)、二酸化ケイ素 (SiO_2)、酸化アルミニウム (Al_2O_3) の 3 化合物で 85% 以上を占めた。消石灰 (Ca(OH)_2) は酸化カルシウム (CaO) が 70%、強熱減量が 24.7% で、両者合わせて約 95% を占めた。クリンカアッシュはフライアッシュと成分組成が類似しており、二酸化ケイ素 (SiO_2)、酸化アルミニウム (Al_2O_3)、酸化第二鉄 (Fe_2O_3) で 85% 以上を占めた。なお、石膏を添加材として加えている高炉セメント B 種と高炉スラグ微粉末は、規格値 (4.0% 以下) の範囲で三酸化硫黄が定量されている。

3) 安定化試験

(a) 石膏のペースト強度

半水石膏に水を加えると二水石膏に転化して硬化するが、加水した水の量とペースト強度（一軸圧縮強さ）の関係を調べた。加水した水の量は、コンクリートと同様に W/B (W : Water, B : Bassanite) で表した。

ボール内に入れた再生半水石膏に水を加えて練り上げ、 $\phi 5\text{cm}$, H10cm のモールド内に 3 層に分けて詰め、ジギング (JIS A 1104 に準拠) により締固めて供試体を作製した。但し、 $W/B=30$, 50% については、練混ぜ中にこぼりを生じ、流動性を呈さなかったため、JCSL-01:2006 に基づいて突き固めて供試体を作製した。

ペースト強度と W/B の関係は、図 1. 6-33 に示すように、 $W/B=50\%$ でピーク強度を示し、加水量の増加に伴って一軸圧縮強さは低下し、ピーク強度及びそれを示す時の

W/B は異なるが、両者の関係は既往の研究結果と一致した。

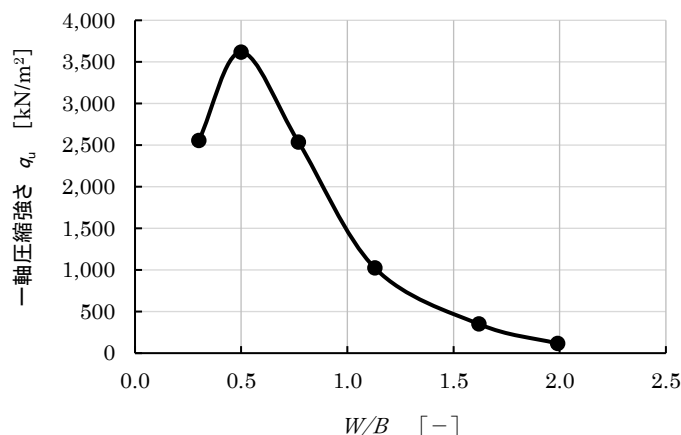


図 1. 6-33 再生半水石膏のペースト強度

(b) 石膏の膨張量

石膏の膨張量には、半水石膏が凝結硬化して二水石膏に転化するときの針状結晶の成長に伴う膨張と、硬化後の二水石膏の吸水膨張及び土中のアルミナと反応して生成されるエトリンガイトの成長に伴う膨張等が考えられるが、今回は二水石膏の吸水膨張を測定した。

供試体の作製方法は次のとおりである。まず $W/B=50\%$ の石膏ペーストを練り上げ、 $\phi 50\text{mm}$, $H100\text{mm}$ のサミットモールド内に JCAS L-01:2006 の方法に従って充填した。養生期間 7 日経過後、脱型して高さ 5cm に切断した。切断した供試体を圧密試験機にセットした圧密リング ($\phi 6\text{cm}$, $H5\text{cm}$) 内に設置し、圧密リングとの隙間に珪砂 5 号を充填した。供試体頭部に変位測定用の薄鋼板を載せ、容器内に脱気水を入れてダイヤルゲージで供試体の膨張量を測定した。

測定結果を図 1. 6-34 に示す。505 時間、約 21 日間測定の結果、膨張比は 0.01% とほぼ無視しうる値であった。

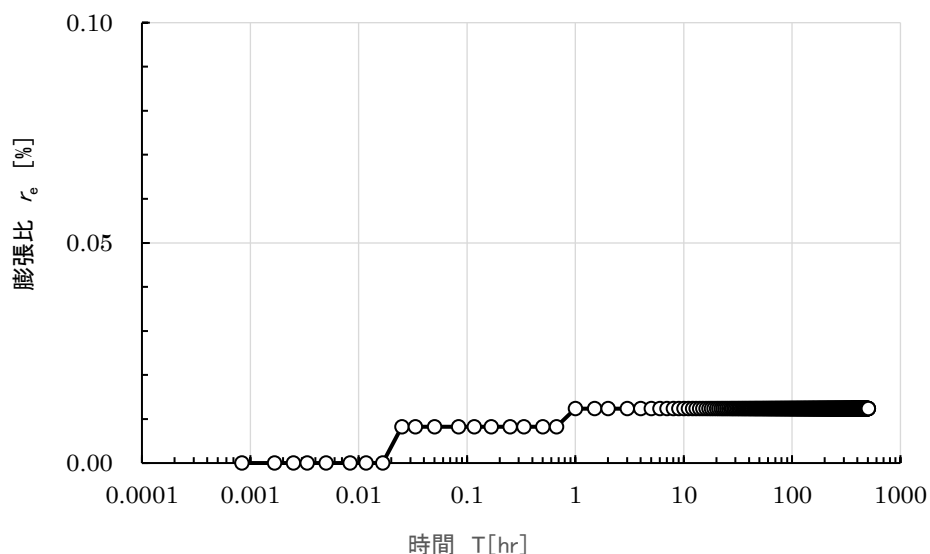


図 1. 6-34 二水石膏の吸水膨張比経時変化

4) 環境安全特性試験

改質材の溶出量，含有量，農用地の特定有害物質を表 1. 6-44～表 1. 6-46 に示す．基準値は改質材単味には適用されないが，参考までに記載した．

再生石膏粉は半水，二水ともふっ素の溶出量が，そして高炉セメント B 種は六価クロムの溶出量が土壤の基準値を超過した．

石膏ボードは，石炭火力発電所で副次的に発生する排煙脱硫石膏を主原料としているが，排煙脱硫石膏は，石炭含有の硫黄成分が石炭とともに燃焼して生成する硫黄酸化物 (SO_x) を消石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) で中和する脱硫プロセスの副産物として発生する．これと同時に，石炭に微量含まれるふっ素化合物が石炭とともに燃焼してふっ化水素 (HF) を生成するが，脱硫プロセスで消石灰とふっ化水素が反応し，ふっ化カルシウム (CaF_2) となって排煙脱硫石膏内に混入する．このように，ふっ素を含有している排煙脱硫石膏が石膏ボードの原料として使われるため，石膏ボードが廃棄されたときにふっ素が溶出する懸念があるといわれている．

一方，セメント原料である石灰石や粘土，原料を燃焼するロータリーキルンに貼られている耐火レンガにはクロムが三価の形で含まれているが，焼成過程で酸化して六価クロムに変化する．コンクリートの場合，クロム化合物はセメント水和化合物に固定されるためほとんど溶出しないが，地盤改良の場合，土の粘土鉱物や土中の有機化合物等によって水和化合物の生成が阻害されると，セメント水和物に固定されなかった六価クロムが溶出することがある．

改質材単味では溶出量が土壤環境基準を超過した（但し，改質材単味には土壤環境基準は適用されない）ものもあったが，現行制度ではこれによって改質材の使用を制約されるものではなく，改質材によっては，その成分中の硫黄分が還元剤として働き，六価クロムを三価クロムに還元して六価クロムの溶出を抑えたり，エトリンナイトがふっ素の溶出を抑えることから，合理的な溶出抑制対策を検討していく必要がある．

表 1. 6-44 改質材の溶出量

平成3年環境庁告示第46号

項 目	単位	基準値	再生半水石膏粉	再生二水石膏粉	高炉セメントB種	消石灰	高炉スラグ微粉末	クリンカーアッシュ
カドミウム	mg/L	(0.01)	0.008	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
鉛	mg/L	(0.01)	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
六価クロム	mg/L	(0.05)	<0.01	<0.01	0.44	0.02	<0.01	<0.01
ひ素	mg/L	(0.01)	0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
総水銀	mg/L	(0.0005)	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
セレン	mg/L	(0.01)	0.008	0.002	0.006	0.002	0.002	<0.002
ふっ素	mg/L	(0.8)	5.5	8.2	0.05	0.05	0.50	<0.05
ほう素	mg/L	(1)	0.07	0.04	<0.02	0.08	0.04	0.08

※改質材単味には土壌環境基準は適用にならないが、参考までに基準値を示す。

表 1. 6-45 改質材の含有量

平成24年底質調査法（環水大発120725002号）

項 目	単位	基準値	再生半水石膏粉	再生二水石膏粉	高炉セメントB種	消石灰	高炉スラグ微粉末	クリンカーアッシュ
カドミウム	mg/kg	(150)	0.87	0.58	2.8	1.6	0.08	<0.05
鉛	mg/kg	(150)	9.2	8.2	25	1.0	0.76	2.1
六価クロム	mg/kg	(250)	<2	<2	5	<2	<2	<2
ひ素	mg/kg	(150)	1.6	1.9	12	<0.4	<0.4	0.7
総水銀	mg/kg	(15)	0.10	0.081	0.007	<0.005	<0.005	<0.005
セレン	mg/kg	(150)	0.5	0.3	1.4	<0.1	1.3	<0.1
ふっ素	mg/kg	(4,000)	810	640	200	26	430	<15
ほう素	mg/kg	(4,000)	<10	<10	60	<10	110	330

※底質調査法では含有量の基準値は規定されていないが、土壌汚染対策法の基準値を参考として示す。

表 1. 6-46 改質材の農用地特定有害物質

農用地土壌汚染防止法

項 目	単位	基準値	再生半水石膏粉	再生二水石膏粉	高炉セメントB種	消石灰	高炉スラグ微粉末	クリンカーアッシュ
ひ素	mg/kg	(15)	—	1.1	—	<0.4	—	<0.4
銅	mg/kg	(125)	—	1.9	—	<0.5	—	0.5

※改質材単味には、農用地の土壌汚染防止等に関する法律に基づく対策地域の指定要件は適用にならないが、参考までに指定要件の基準値を示す。

表 1. 6-47 に再生二水石膏の硫化水素ガス発生ポテンシャルを示す。

硫化水素ガスの発生条件の一つに有機物の存在があるが、無水石膏や半水石膏のように加熱処理して製造した再生石膏は、有機物も燃焼により減少して硫化水素ガスの発生リスクも軽減されることから、二水石膏のみについて行った。結果は硫化水素ガス濃度 0.3ppm 未満であった。

表 1. 6-47 再生二水石膏の硫化水素ガス発生ポテンシャル

分析項目	単位	分析値
硫化水素ガス濃度	ppm	< 0.3
pH	—	7.8
EC	mS/m	251
ORP	mV	324
強熱減量	mass%	9.8
有機炭素含有量	mass%	—

(3) 配合試験結果

1) 土木用改質土

ため池底泥土と改質材を混合した改質土は、改質材の強度発現と再生半水石膏のエージング処理を兼ねてポリ袋に入れて 6 日間養生し、7 日目に解砕して 9.5mm ふるい通過試験を試験に供した。

ため池底泥土（山口）を用いた土木用改質土の配合及び改質材添加量とコーン指数の関係を図 1. 6-35 及び表 1. 6-48 に示す。

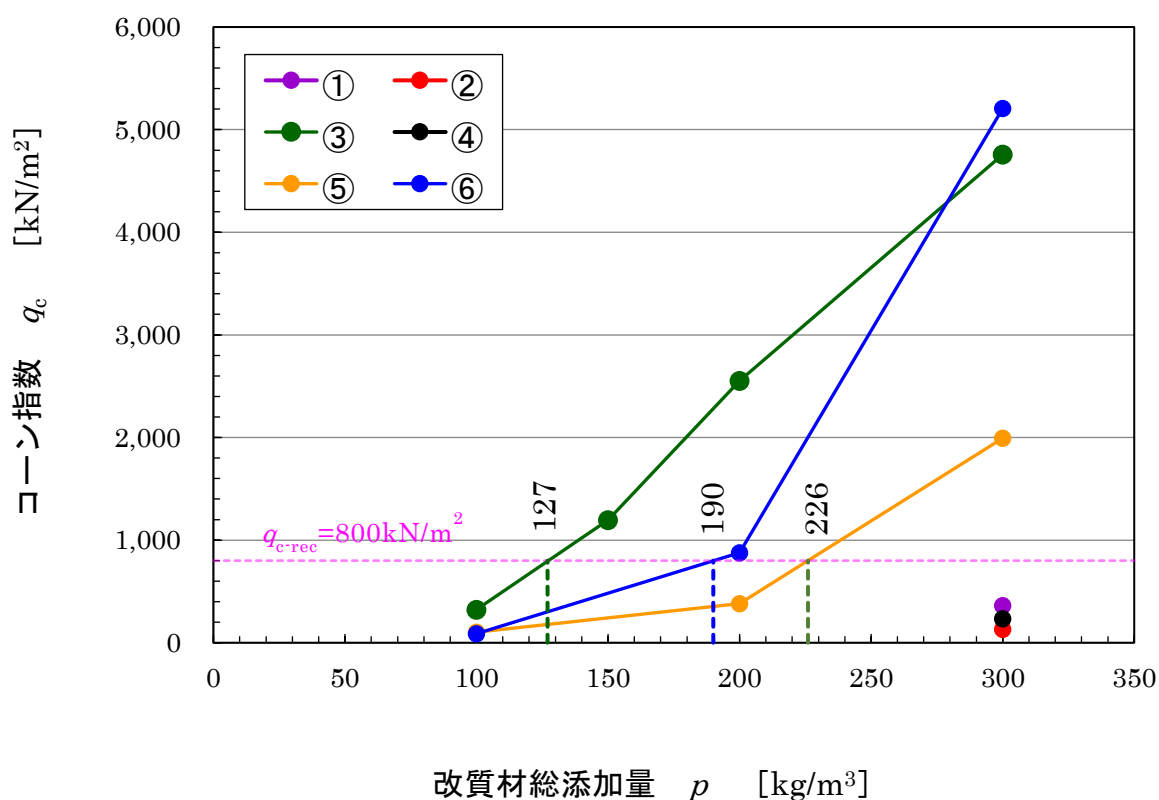


図 1. 6-35 土木用改質土の配合別改質材添加量とコーン指数の関係
(山口ため池)

表 1. 6-48 土木用改質土の配合及び改質材添加量とコーン指数の関係 (山口ため池)

配合ケース	総添加量	100			150			200			300			
		kg/m ³	B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS
①	改質材		100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	配合比	%	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	添加量	kg/m ³	100	0	0	150	0	0	200	0	0	300	0	0
	含水比	%	—	—	—	—	—	—	—	—	—	75.1	—	—
②	コ－ン指数	kn/m ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	363	—	—
	改質材		B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS
	配合比	%	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50
	添加量	kg/m ³	50	0	50	75	0	75	100	0	100	150	0	150
③	含水比	%	—	—	—	—	—	—	—	—	—	75.7	—	—
	コ－ン指数	kn/m ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	132	—	—
	改質材		B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS
	配合比	%	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0
④	添加量	kg/m ³	50	50	0	75	75	0	100	100	0	150	150	0
	含水比	%	88.0	84.7	84.7	84.7	84.7	84.7	79.8	70.6	70.6	70.6	70.6	70.6
	コ－ン指数	kn/m ²	323	1,195	1,195	1,195	1,195	1,195	2,553	4,757	4,757	4,757	4,757	4,757
	改質材		B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS
⑤	配合比	%	75	0	25	75	0	25	75	0	25	75	0	25
	添加量	kg/m ³	75	0	25	112.5	0	37.5	150	0	50	225	0	75
	含水比	%	—	—	—	—	—	—	—	—	—	73.8	—	—
	コ－ン指数	kn/m ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	235	—	—
⑥	改質材		B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS
	配合比	%	75	25	0	75	25	0	75	25	0	75	25	0
	添加量	kg/m ³	75	25	0	112.5	37.5	0	150	50	0	225	75	0
	含水比	%	94.8	83.9	83.9	83.9	83.9	83.9	83.9	83.9	83.9	72.7	72.7	72.7
⑦	コ－ン指数	kn/m ²	103	382	382	382	382	382	382	382	382	1,993	1,993	1,993
	改質材		B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS
	配合比	%	50	25	25	50	25	25	50	25	25	50	25	25
	添加量	kg/m ³	50	25	25	75	37.5	37.5	100	50	50	150	75	75
⑧	含水比	%	95.6	82.3	82.3	82.3	82.3	82.3	82.3	82.3	82.3	66.1	66.1	66.1
	コ－ン指数	kn/m ²	88	877	877	877	877	877	877	877	877	5,206	5,206	5,206

図 1. 6-35 から、 $q_c \geq 800 \text{ kN/m}^2$ が得られる配合ケースは③、⑤、⑥であり、それぞれの総添加量は補間法により $p=127 \text{ kg/m}^3$ 、 226 kg/m^3 、 190 kg/m^3 であることがわかった。

設計配合（山口での実証試験で採用する配合）については、改質材の経済比較を行い、表 1. 6-49 に示すように、最も経済的である配合③を採用した。

表 1. 6-49 土木用改質材の経済比較（山口）

項 目	単位	配合ケース								
		③			⑤			⑥		
改質材組成	%	Bassanite	BB	BFS	Bassanite	BB	BFS	Bassanite	BB	BFS
		50	50	0	75	25	0	50	25	25
改質材総添加量	kg/m^3	127			226			190		
各改質材添加量	kg/m^3	63.5	63.5	0.0	169.5	56.5	0.0	95.0	47.5	47.5
改質材単価	円/kg	10	15	17	10	15	17	10	15	17
各改質材費	円/ m^3	635	953	0	1,695	848	0	950	713	808
総改質材費	円/ m^3	1,588			2,543			2,470		
コスト比		1.000			1.602			1.556		

注) 改質材単価は、材料費+輸送費+梱包費

貯水池底泥土（新潟）を用いた土木用改質土の配合及び改質材添加量とコーン指数の関係を図 1. 6-36 及び表 1. 6-50 にそれぞれ示す。

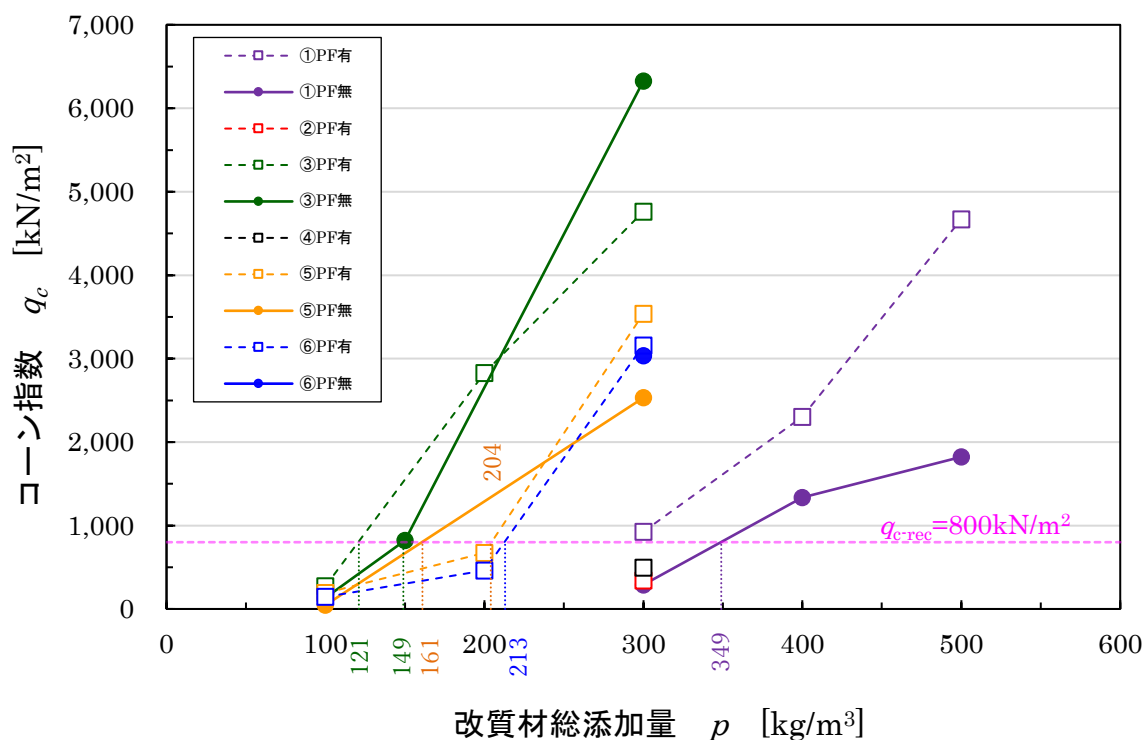


図 1. 6-36 土木用改質土の配合別改質材添加量とコーン指数の関係（新潟貯水池）

表 1. 6-50 土木用改質土の配合及び改質材添加量とコーン指数の関係 (新潟貯水池)

配合ケース	総添加量 単位	100			150			200			300			400			500		
		B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS	B	BB	BFS
①	改質材																		
	配合比	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	添加量 kg/m ³	100	0	0	150	0	0	200	0	0	300	0	0	400	0	0	500	0	0
	含水比																		
②	コーン指数 kN/m ²										41.7			40.1			36.0		
	改質材										290			1,335			1,822		
	配合比	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50
	添加量 kg/m ³	50	0	50	75	0	75	100	0	100	150	0	150	200	0	200	250	0	250
③	含水比																		
	コーン指数 kN/m ²																		
	改質材																		
	配合比	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0
④	添加量 kg/m ³	50	50	0	75	75	0	100	100	0	150	150	0	200	200	0	250	250	0
	含水比										36.6								
	コーン指数 kN/m ²										6,327								
	改質材																		
⑤	配合比	75	0	25	75	0	25	75	0	25	75	0	25	75	0	25	75	0	25
	添加量 kg/m ³	75	0	25	112.5	0	37.5	150	0	50	225	0	75	300	0	100	375	0	125
	含水比																		
	コーン指数 kN/m ²																		
⑥	改質材																		
	配合比	75	25	0	75	25	0	75	25	0	75	25	0	75	25	0	75	25	0
	添加量 kg/m ³	75	25	0	112.5	37.5	0	150	50	0	225	75	0	300	100	0	375	125	0
	含水比										38.7								
⑦	コーン指数 kN/m ²										2,531								
	改質材																		
	配合比	50	25	25	50	25	25	50	25	25	50	25	25	50	25	25	50	25	25
	添加量 kg/m ³	50	25	25	75	37.5	37.5	100	50	50	150	75	75	200	100	100	250	125	125
⑧	含水比										38.1								
	コーン指数 kN/m ²										3,035								
	改質材																		
	配合比	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0
⑨	添加量 kg/m ³	50	50	0	75	75	0	100	100	0	150	150	0	200	200	0	250	250	0
	含水比																		
	コーン指数 kN/m ²																		
	改質材																		
⑩	配合比	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0	50	50	0
	添加量 kg/m ³	50	50	0	75	75	0	100	100	0	150	150	0	200	200	0	250	250	0
	含水比																		
	コーン指数 kN/m ²																		

新潟の貯水池底泥土の改質に際しては、高分子凝集剤（以下、PF と略す.）を使用しない方針としたが、PF 使用有無の差異を確認するため、配合試験では PF を添加したケースについても調べた。

補間法による第 2 種処理土の基準値である $qc \geq 800 \text{ kN/m}^2$ を得るための添加量は、配合③の $p=121 \text{ kg/m}^3$ が最小値であるが、これは PF を使用しているのを除外した。次点は同じく配合③の $p=149 \text{ kg/m}^3$ であり、これは PF を使用していないことから、これを設計配合（新潟の実証試験で採用する配合）とした。なお、改質材の製造メーカーによる違いが結果に及ぼす影響を回避するため、改質材は山口のときと同じメーカーより調達することとしたため、配合決定に際して改質材の経済比較は行わなかった。

2) 土壌用改質土

農地土壌用改質土の一次判定は土性（粒度）、コンシステンシー、三相分布で行ったが、いずれも材齢 7 日後に試験を行った。

(a) 土性

ため池底泥土（山口）に改質材を $p=200 \text{ kg/m}^3$ 添加した土壌用改質土の、水中篩別法と沈降分析による粒度試験（団粒分析）結果を表 1. 6-51 に、粒径加積曲線を図 1. 6-37 に、粒度組成を図 1. 6-38 に、土性三角図表を図 1. 6-39 にそれぞれ示す。

表 1. 6-51 団粒分析による土壌用改質土の粒度試験結果（山口ため池）

項 目	ため池底泥土	改質土					
		配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
最大粒径 $D_{\max}$ mm	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
砂分 2~0.02mm %	27.0	70.3	78.8	82.1	77.7	78.5	86.3
シルト分 0.02~0.002mm %	47.9	19.7	13.6	12.1	14.9	13.0	7.7
粘土分 0.002mm 未満 %	25.1	10.0	7.6	5.8	7.4	8.5	6.0
土性区分	シル質埴土 SiC	砂壤土 SL	砂壤土 SL	砂壤土 SL	砂壤土 SL	砂壤土 SL	壤質砂土 LS

※ため池底泥土の試験法は JIS A 1204

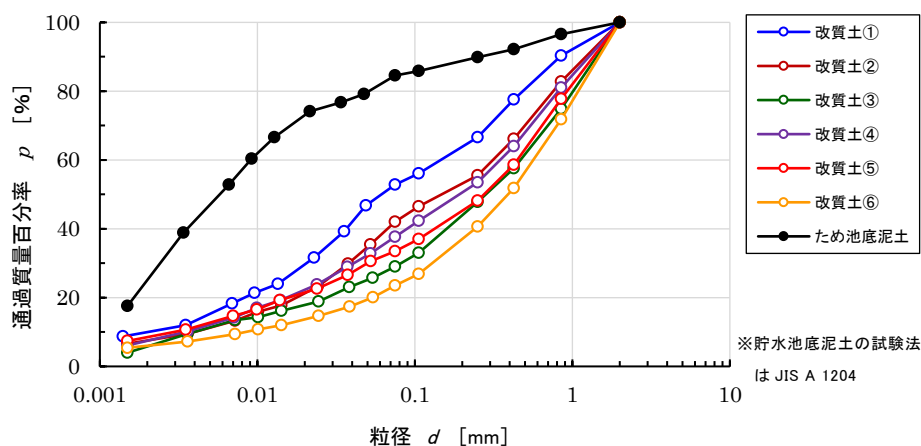


図 1. 6-37 団粒分析による土壌用改質土の粒径加積曲線（山口ため池）

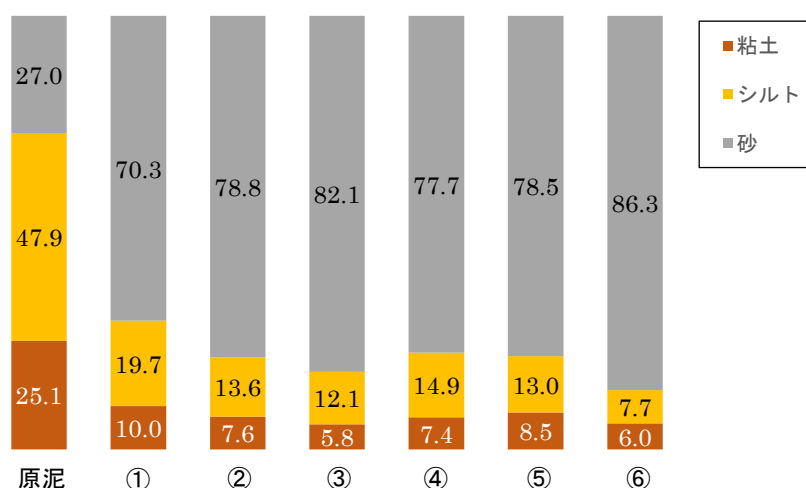


図 1. 6-38 団粒分析による土壌用改質土の粒度組成（山口ため池）

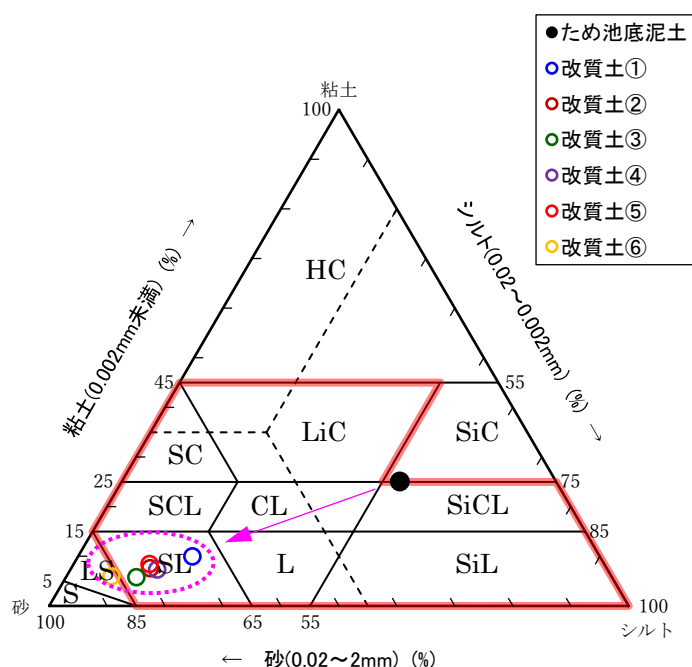


図 1. 6-39 団粒分析に基づく土壌用改質土の土性三角図表（山口ため池）

また、た貯水池底泥土（新潟）に改質材を $p=200\text{kg/m}^3$ 添加した土壌用改質土の、水中篩別法と沈降分析による粒度試験（団粒分析）結果を表 1. 6-52 に、粒径加積曲線を図 1. 6-40 に、粒度組成を図 1. 6-41 に、土性三角図表を図 1. 6-42 にそれぞれ示す。

表 1. 6-52 団粒分析による土壌用改質土の粒度試験結果（新潟貯水池）

項 目	貯水池 底泥土	改質土					
		配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
最大粒径 $D_{\max}$ mm	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
砂分 2~0.02mm %	30.4	53.1	60.8	62.0	58.8	61.9	66.1
シルト分 0.02~0.002mm %	49.4	34.4	26.8	26.1	27.8	27.3	24.6
粘土分 0.002mm 未満 %	20.2	12.5	12.4	11.9	13.4	10.8	9.3
土性区分	シルト質砂 砂埴壤土 SiCL	壤土 L	壤土 L	壤土 L	壤土 L	壤土 L	砂壤土 SL

※貯水池底泥土の試験法は JIS A 1204

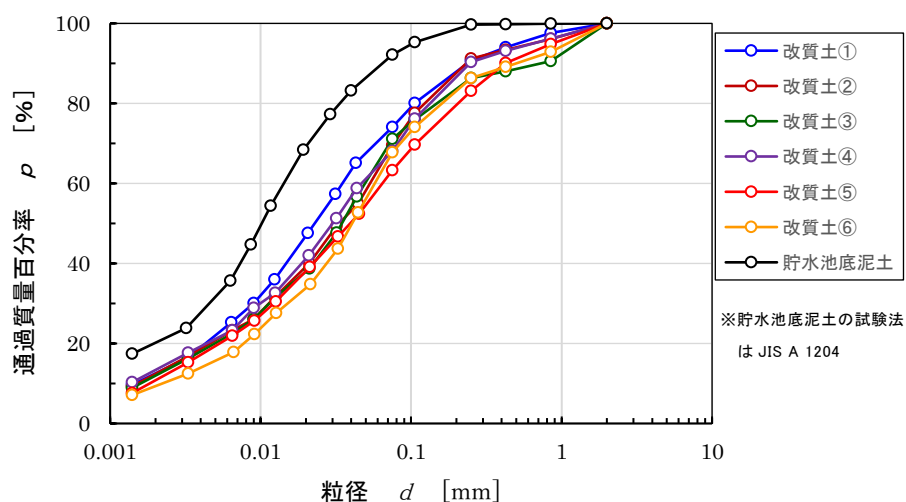


図 1. 6-40 団粒分析による土壌用改質土の粒径加積曲線（新潟貯水池）

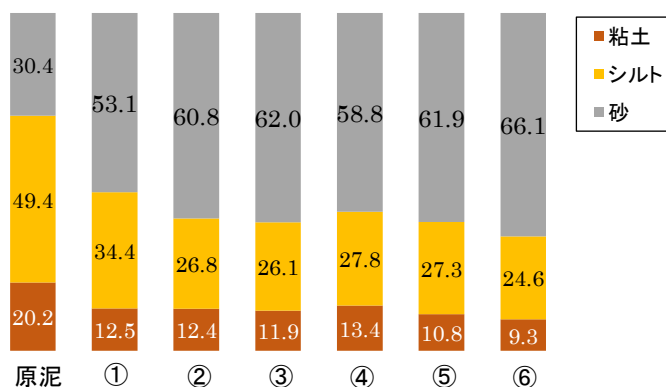


図 1. 6-41 団粒分析による土壌用改質土の粒度組成（新潟貯水池）

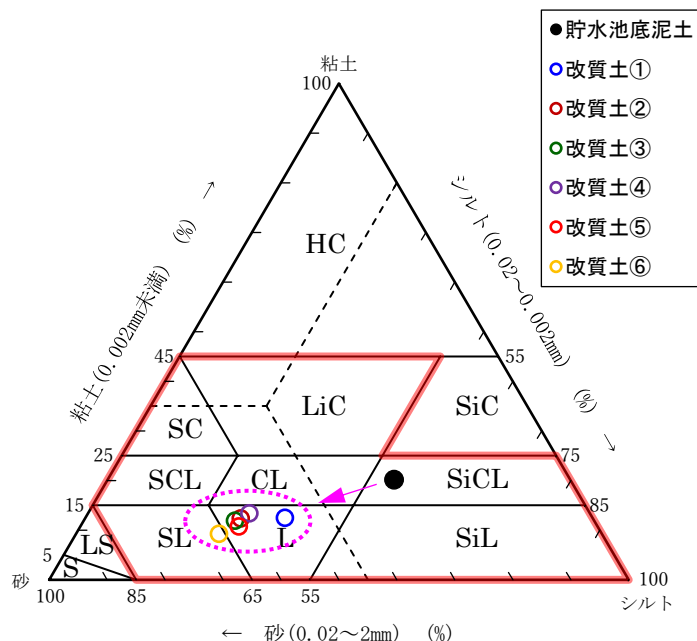


図 1. 6-4.2 団粒分析に基づく土壌用改質土の土性三角図表（新潟貯水池）

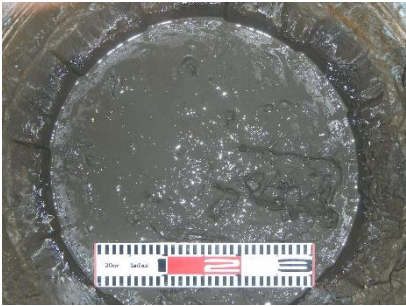
ため池底泥土及び貯水池底泥土に改質材を添加したことで、添加量・配合にかかわらず、細粒分組成比が減少して砂分組成比が増加した。ため池底泥改質土は、改質土⑥以外は砂壤土（SL）に区分され、貯水池底泥改質土は、改質土⑥は砂壤土（SL）、それ以外は壤土（L）に区分され、いずれも土性区分が変化した、改良目標範囲での移行であり、石膏による団粒化形成効果と考えられる。

（b）コンシステンシー

改質直後の土壌用改質土の状況を写真 1. 6-8（山口ため池）及び写真 1. 6-9（新潟貯水池）に示す。定性的な評価であるが、いずれの底泥土、配合とも改質材を添加することで余剰水が減少し、握ると団子状になるとともに、変形に対する抵抗性を示すようになり粘性が低下した。特に消石灰を添加した配合③、⑤及び⑥は、塑性状態から半固体状態に移行した。なお、新潟の貯水池底泥土については PF（高分子凝集剤）添加有無を比較したが、PF を添加しない場合には改質土は団塊化することが多かったが、PF を添加することで団粒を形成する傾向が認められた。

 ・ため池底泥土 ・$w=111.1\%$ (4.75mm 以下) ・粘土 (高液性限界) ・放置すると余剰水 (重力水) がにじみ出る	
配合①	配合②
 ・団塊状～団粒状 (ベタベタ) ・振動を与えると少々余剰水が現れる。	 ・団塊状～団粒状 (ベタベタ) ・振動を与えると少々余剰水が現れる。
配合③	配合④
 ・団粒状 ・握ると団子状になるが、外力によって容易に崩れる。	 ・団塊状～団粒状 (ベタベタ) ・振動を与えると少々余剰水が現れる。
配合⑤	配合⑥
 ・団粒状 ・握ると団子状になるが、外力によって容易に崩れる。	 ・団粒状 ・握ると団子状になるが、外力によって容易に崩れる。

写真 1. 6－8 改質直後の土壌用改質土 (山口ため池)

 ・貯水池底泥土 ・$w=56.7\%$ (4.75mm 以下) ・シルト (低液性限界) ・放置すると余剰水 (重力水) がにじみ出る	
配合① PF 有り	配合① PF 無し
	
団粒状～粒状 握ると団子状になるが、外力によって容易に崩れる。	団塊状～団粒状 (ベタベタ) 握ると団子状になる。
配合② PF 有り	配合② PF 無し
	
団粒状 握ると団子状になる。	団塊～団粒状 (ベタベタ) 振動を与えると少々余剰水が現れる。
配合③ PF 有り	配合③ PF 無し
	
団粒状～粒状 握ると団子状になる。	団粒状～粒状 握ると団子状になるが、外力によって容易に崩れる。

配合④ PF 有り	配合④ PF 無し
	
団粒状～粒状 握ると団子状になる。	団塊状～団粒状（ベタベタ） 振動を与えると少々余剰水が現れる。
配合⑤ PF 有り	配合⑤ PF 無し
	
団粒状～粒状 握ると団子状になる。	団塊状～団粒状 握ると団子状になる。
配合⑥ PF 有り	配合⑥ PF 無し
	
団粒状～粒状 握ると団子状になる。	団粒状 握ると団子状になる。

写真 1. 6－9 改質直後の土壌用改質土（新潟貯水池）

ため池底泥土の土壌用改質土のコンシステンシー特性を表 1. 6－53 に示す。

表 1. 6-53 土壌用改質土のコンシステンシー特性（山口ため池）

項目	ため池 底泥土	改質土					
		配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
G:SL:CA	—	100:0:0	50:0:50	50:50:0	75:0:25	75:25:0	50:25:25
w(%)	111.1	88.9	87.3	84.6	87.3	86.8	85.8
w _L (%)	124.0	125.1	127.9	118.5	122.1	115.3	118.1
w _P (%)	46.4	62.1	59.6	68.7	59.0	62.1	67.9
I _P	77.6	63.0	68.3	49.8	63.1	53.2	50.2
I _C	0.17	0.57	0.59	0.68	0.55	0.54	0.64
I _L	0.83	0.43	0.41	0.32	0.45	0.46	0.36

改質後の含水比は、高含水比のため池底泥土に、ほとんど含水比がない改質材を添加しているため、Solid 分の増加によりいずれの配合も低下しており、とりわけ消石灰を添加している配合③、⑤、⑥の低下が顕著となっている。

ため池底泥土に関して、改質材を添加することによる含水比低下効果については、以下のことがいえる。

- ①配合①と配合②～⑥を比較すると、二水石膏（G）のみより安定材や助材を添加した方が効果的
- ②配合②と配合③、配合④と配合⑤を比べると、クリンカアッシュ（CA）より消石灰（SL）の方が効果的
- ③配合②と配合④を比べると、二水石膏とクリンカアッシュの効果はあまり変わらない
- ④配合③と配合⑤、配合④と配合⑥を比較すると、二水石膏より（G）消石灰（SL）の方が効果的
- ⑤配合⑤と配合⑥を比べると、二水石膏よりクリンカアッシュの方が効果的

貯水池底泥土の土壌用改質土のコンシステンシー特性を表 1. 6-54 に示す。

表 1. 6-54 土壌用改質土のコンシステンシー特性（新潟貯水池）

項目	貯水池 底泥土	改質土					
		配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
G:SL:CA	—	100:0:0	50:0:50	50:50:0	75:0:25	75:25:0	50:25:25
w(%)	56.7	49.2	41.5	36.2	42.3	45.4	35.3
w _L (%)	48.8	50.6	49.7	59.4	48.7	62.7	58.8
w _P (%)	34.3	31.8	29.4	42.0	31.1	37.1	35.3
I _P	14.5	18.8	20.3	17.4	17.6	25.6	23.5
I _C	-0.54	0.07	0.40	1.33	0.36	0.68	1.00
I _L	1.54	0.93	0.60	-0.33	0.64	0.32	0.00

貯水池底泥改質土についても、貯水池底泥土にほとんど含水比がない改質材を添加しているため、改質後の含水比は Solid 分の増加によりいずれの配合も低下している。ため池底泥土（山口）では、改質土の含水比低下が顕著だったのは消石灰を添加している配合③、⑤、⑥であったが、貯水池底泥土（新潟）では配合③、⑥は含水比が大きく低下したものの、配合⑤は配合①に次いで含水比の低下量が少なかった。

貯水池底泥土に関して、改質材を添加することによる含水比低下効果については、以下のことがいえる。

- ①配合①と配合②～⑥を比較すると、二水石膏（G）のみより安定材や助材を添加した方が効果的（ため池底泥土と同様）
- ②配合②と配合③を比べると、クリンカアッシュ（CA）より消石灰（SL）の方が効果的で（ため池底泥土と同様）あるが、一方、配合④と配合⑤を比べると、消石灰（SL）よりクリンカアッシュ（CA）の方が効果的とため池底泥土と逆の傾向を示した
- ③配合④と配合⑥を比較すると、二水石膏より（G）消石灰（SL）の方が効果的（ため池底泥土と同様）
- ⑤配合⑤と配合⑥を比べると、二水石膏（G）よりクリンカアッシュ（CA）の方が効果的（ため池底泥土と同様）

農地土壌の場合、地盤材料としての特性や安定性を示すコンシステンシーとは直接関係はないが、同一視点で捉えてみると、以下のことが確認された。

塑性指数（ I_p ）は、細粒分が多く含まれる場合に大きな値を示すことが知られている。ため池底泥土、貯水池底泥土とも図 1. 6-39 及び図 1. 6-42 に示すように、いずれの配合の改質土も原泥（底泥土）より粒度が粗くなったが、ため池底泥土（山口）が全ての配合について I_p が原泥より小さくなった（塑性状態を示す含水比に範囲が狭くなった）のに対し、貯水池底泥土（新潟）ではいずれの配合においても改質土の I_p は原泥より大きな値（塑性状態を示す含水比の範囲が広がった）を示した。

塑性指数からみた 6 つ配合は、表 1. 6-55 に示すように、ため池底泥土は 2 つのグループに、貯水池底泥土は 3 つのグループに分けられる。

表 1. 6-55 改質土のコンシステンシーの変化

	I_p	グループ	LL 及び PL の変化	配合
山口 ため池底泥改質土	減少	グループ 1	↑ LL PL ↑ ↑	①, ②
		グループ 2	↓ LL PL ↑	③, ④, ⑤, ⑥
新潟 貯水池底泥改質土	増加	グループ 3	↑ ↑ LL PL ↑	③, ⑤, ⑥
		グループ 4	↓ LL PL ↓ ↓	④
		グループ 5	↑ LL PL ↓	①, ②

粒径加積曲線からは、ため池底泥土、貯水池底泥土とも粒度が粗くなったことを示しているが、コンシステンシーから捉えると、ため池底泥改質土は砂質土化、貯水池底泥改質

土は粘性土化していることになり，同じ種類，配合の改質材を添加していることから，原泥（底泥土）の粒度特性に対する相対評価と考えられる．

コンシステンシー指数（ I_c ）は，ゼロに近ければ不安定で，1 又はそれ以上を示せば安定状態にあるとされる．ため池底泥土はいずれの配合も改質に伴って I_c が大きくなっており，安定化したことが分かる．一方，貯水池底泥土は自然含水比が液性限界より大きいいため，原泥のコンシステンシーはマイナスを示したが，改質により液性限界が塑性限界より大きくなったことで，いずれの配合も数値が増加しており，安定状態に近づいた．

液性指数（ L ）は，ゼロに近いほど安定しているといわれ，ため池底泥改質土，貯水池底泥改質土，いずれの配合も数値が低下しており，安定状態に近づいたといえる．

なお，ため池底泥土については，コンシステンシーを基準に配合を選定すれば，表 1. 6-53 から配合⑤となる．同様に，貯水池底泥土についてもコンシステンシーを基準に配合を選定すれば，表 1. 6-54 から配合③となるが，配合⑤と比べると消石灰の添加量が多く，後述のように pH が高いため，配合⑤を決定配合とした．

（c）三相分布

土は固相（Solid），液相（Liquid），気相（Air）の 3 層から構成されているが，それぞれの体積比は，土の物理量を使用して 1 - （7）式～1 - （9）式で表すことができる．

$$\text{固相 [\%]} : V_s = \{ \rho_t / (1+W) \} / \rho_s \times 100 = \rho_d / \rho_s \times 100 \quad 1 - (7) \text{ 式}$$

$$\text{液相 [\%]} : V_l = \{ W / (W+1) \times \rho_t \} / \rho_w \times 100 = (\rho_t - \rho_d) / \rho_w \times 100 \quad 1 - (8) \text{ 式}$$

$$\text{気相 [\%]} : V_a = 1 - (V_s + V_l) \quad 1 - (9) \text{ 式}$$

土壌用に改質した底泥土を，JIS A 1104（骨材の単位容積質量及び実積率試験方法）に準じて $\phi 15\text{cm}$ ， $H30\text{cm}$ のサミットモールドに充填して測定した三相分布は表 1. 6-56 及び図 1. 6-43（山口ため池）並びに表 1. 6-57 及び図 1. 6-44（新潟貯水池）に示すとおりである．

表 1. 6-56 土壌用改質土の三相分布（山口ため池）

項 目	記号	単位	ため池 底泥土	改質土					
				配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
含水比	w	mass%	111.1	88.9	87.3	84.6	87.3	86.8	85.8
湿潤密度	ρ_t	Mg/m^3	1.361	1.203	1.342	1.139	1.219	1.069	1.133
乾燥密度	ρ_d	Mg/m^3	0.645	0.637	0.716	0.617	0.651	0.572	0.610
三相分布	固相	V_s	vol%	24.6	24.3	27.3	23.5	24.8	21.8
	液相	V_l	vol%	71.6	56.6	62.6	52.2	56.8	49.7
	気相	V_a	vol%	3.8	19.1	10.1	24.3	18.4	28.5

※土粒子の密度は，いずれも $\rho_s=2.620\text{Mg/m}^3$ とする

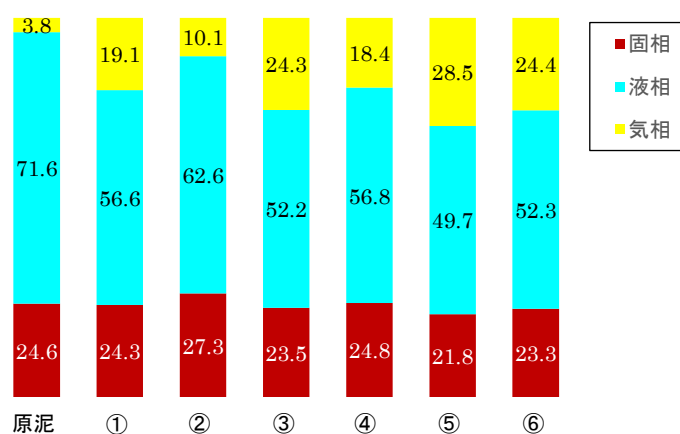


図 1. 6-43 土壌用改質土の三相分布（山口ため池）

表 1. 6-57 土壌用改質土の三相分布（新潟貯水池）

項 目		記号	単位	貯水池 底泥土	改質土					
					配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
含水比		w	mass%	56.7	49.2	41.5	36.2	42.3	45.4	35.3
湿潤密度		ρ_t	Mg/m ³	1.615	1.675	1.751	1.172	1.729	1.297	1.248
乾燥密度		ρ_d	Mg/m ³	1.031	1.123	1.237	0.860	1.215	0.829	0.922
三相分布	固相	V_s	vol%	38.2	40.7	45.7	31.9	44.5	32.7	34.0
	液相	V_l	vol%	58.4	55.2	51.4	31.2	51.4	40.5	32.6
	気相	V_a	vol%	3.4	4.1	2.9	36.9	4.1	26.8	33.4

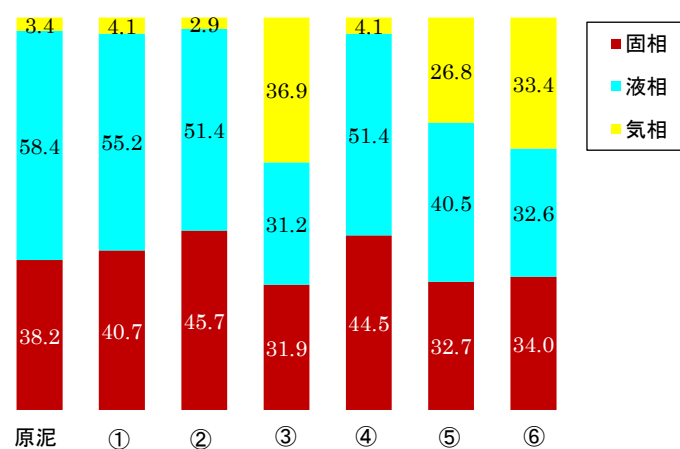


図 1. 6-44 土壌用改質土の三相分布（新潟貯水池）

以上述べたように、土性、コンシステンシー、三相分布の一次判定を満足するため池底泥改質土は配合③及び配合⑤で、配合⑥は土性がわずかながら目標範囲を外れた。

そこで土木同様、改質材の経済比較を行い、表 1. 6-58 に示すように、最も経済的である配合⑤を設計配合（実証試験で採用する配合）とした。

表 1. 6-58 土壌用改質材の経済比較（山口）

項 目	単位	配合ケース								
		③			⑤			⑥		
改質材組成	%	Gypsum	SL	CA	Gypsum	SL	CA	Gypsum	SL	CA
		50	50	0	75	25	0	50	25	25
改質材総添加量	kg/m ³	200			200			200		
各改質材添加量	kg/m ³	100.0	100.0	0.0	150.0	50.0	0.0	100.0	50.0	50.0
改質材単価	円/kg	3	25	51	3	25	51	3	25	51
各改質材費	円/m ³	300	2,500	0	450	1,250	0	300	1,250	2,550
総改質材費	円/m ³	2,800			1,700			4,100		
コスト比		1.000			0.607			1.464		

注）改質材単価は、材料費+輸送費+梱包費

なお、一次判定を満足する貯水池底泥改質土は配合③、⑤及び⑥であるが、土木同様、改質材の製造メーカーによる違いが結果に及ぼす影響を回避するため、改質材は山口のときと同じメーカーより調達することとしたため、配合決定に際して改質材の経済比較は行わなわず、後述のように⑤の改質土の pH が最も小さかったため、配合⑤を設計配合（実証試験で採用する配合）とした。

（４）改質土の特性

１）土木用改質土

（a）物理試験結果

ため池底泥土を用いた土木用改質土の物理試験結果を表 1. 6-59 に、貯水池底泥土を用いた土木用改質土の物理試験結果を表 1. 6-60 に、それぞれ示す。

表 1. 6-59 土木用改質土の物理試験結果（山口ため池）

項 目			ため池 底泥土 ¹⁾	改質土 ¹⁾		
配合ケース			—	配合③	配合⑤	配合⑥
B : BB : BFS			—	50:50:0	75:25:0	50:25:25
改質材総添加量			kg/m ³	100	200	200
一般	土粒子の密度	ρ_s Mg/m ³	2.620	2.731	2.794	2.732
	自然含水比	w_n %	111.1	88.0	83.9	82.3
粒度組成	礫分	(2~75mm) %	4.3	21.2	8.5	11.8
	砂分	(0.075~2mm) %	14.7	44.2	36.0	39.8
	シルト分	(0.005~0.075mm) %	36.1	26.0	44.6	19.2
	粘土分	(0.005mm 未満) %	44.9	8.6	10.9	29.2
	最大粒径	D_{max} mm	4.75	4.75	4.75	4.75
	細粒分	$F_d(0.075\text{mm 未満})$ %	81.0	34.6	55.5	48.4
特性 コンシステンシー	液性限界	w_L %	124.0	96.4	—	—
	塑性限界	w_P %	46.4	71.1	—	—
	塑性指数	I_P —	77.6	25.3	—	—
	コンシステンシー指数	I_C —	0.17	0.33	—	—
	液性指数	I_L —	0.83	0.67	—	—
水理	透水係数 ²⁾	k m/sec	2.23×10^{-6}	9.73×10^{-8}	—	—
			3.23×10^{-8}	—	—	—
分類	地盤材料の 分類名		粘土 (高液性限界)	細粒分質 礫質砂	細粒土	礫まじり 細粒分質砂
	分類記号		(CH)	(SFG)	(Fm)	(SF-G)

注 1) ため池底泥土，改質土とも 4.75mm ふるい通過試料を使用

注 2) ため池底泥土の透水試験の条件は表 1. 6-27 参照，改質土の透水試験の条件は最適含水比に調整した試料を締固め度 $D_c=100\%$ で締固め。

表 1. 6-60 土木用改質土の物理試験結果（新潟貯水池）

項 目			貯水池底泥土 ¹⁾	改質土 ¹⁾
配合ケース			—	配合③
B : BB : BFS			—	50:50:0
改質材総添加量			kg/m ³	150
一 般	土粒子の密度	ρ_s Mg/m ³	2.699	2.716
	自然含水比	w_n %	56.7	43.2
粒 度 組 成	礫分	(2～75mm) %	0.4	6.4
	砂分	(0.075～2mm) %	7.8	43.1
	シルト分	(0.005～0.075mm) %	60.3	37.4
	粘土分	(0.005mm 未満) %	31.5	13.1
	最大粒径	$D_{\max}$ mm	4.75	4.75
	細粒分	$F_d(0.075\text{mm 未満})$ %	91.8	50.5
コ ン シ ス テ ン シー 特 性	液性限界	w_L %	48.8	53.7
	塑性限界	w_P %	34.3	37.6
	塑性指数	I_P —	14.5	16.1
	コンシステンシー指数	I_C —	－0.54	0.65
	液性指数	I_L —	1.54	0.35
水 理	透水係数 ²⁾	k m/sec	1.15×10^{-7}	7.95×10^{-8}
			3.74×10^{-6}	—
分 類	地盤材料の 分 類 名		シルト (低液性限界)	シルト (高液性限界)
	分類記号		(ML)	(MH)

注 1) 貯水池底泥土，改質土とも 4.75mm ふるい通過試料を使用

注 2) 貯水池底泥土の透水試験の条件は表 1. 6-28 参照，改質土の透水試験の条件は最適含水比に調整した試料を締固め度 $D_c=100\%$ で締固め。

山口，新潟とも，ため池底泥土の土粒子密度より密度が小さい再生半水石膏（ $\rho_s=2.44\text{Mg/m}^3$ ）及び密度が大きい高炉セメント B 種（ $\rho_s=3.04\text{Mg/m}^3$ ）を添加したが，改質土の土粒子密度はいずれも原泥の土粒子密度より大きな値を示した。

1-（4）式に示したように，半水石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ は土中の水 $2/3\text{H}_2\text{O}$ を吸収して二水石膏になり，含水比を低下させる。分子量の計算から，半水石膏 1,000g に対して 186g の土中水が石膏に吸水され，1,186g の二水石膏が生成される。また，セメントは 4 種類のクリンカー鉱物で構成されているため石膏ほど単純ではないが，セメント 1,000g が水和するのに必要な水の量はセメント質量の 25%といわれる。

すなわち，初期含水比が w_0 のため池底泥土に，半水石膏を $p_1\%$ （ $=G/M_s \times 100$ ），セメントを $p_2\%$ （ $=BB/M_s \times 100$ ）添加した後の改質土の含水比 w_1 は 1-（10）式で与えられる。