

(d) 保水性

土の保水性は、 $pF1.5$ ($-\phi=3.1$) のときの水分量と、 $pF3.0$ ($-\phi=98$) のときの水分量の差から易効性有効水（易効水）を求めるが、土の pF 或いはポテンシャルは測定範囲によって試験方法を変える必要があるため、 $pF1.5$ については吸引法（水頭法）、 $pF3.0$ については遠心法でそれぞれ求めた。なお、保水性は供試体の密度によって変わるため、次のように試験試料を作製（吸引法）或いは密度設定（遠心法）した。すなわち、運搬できない性状の底泥土が使われることはないため、ダンプトラックで運搬できる性状（ $q_c \geq 200 \text{ kN/m}^2$ ）に対応する含水比に調整した試料を、植栽用客土の品質基準に準じて、JIS A 1210 に規定されている内径 10cm、高さ 12.5cm のモールドに、2.5kg ランマーを用いて、ランマー落下高を 10cm として、1 層仕上げで 10 回転圧したときの供試体から、 $\phi 100 \text{ mL}$ コアサンプラーを用いて採取した試料を使用（吸引法）若しくは、それと同一密度になるように試験装置に詰めた（遠心法）。また、土の含水比（体積含水率）とマトリックスポテンシャルの関係を表す水分特性曲線は、排水過程か吸水過程かによっても異なるが、今回は飽和からの排水過程とした。

ため池底泥土（山口）の水分特性曲線を図 1. 6-18 に、貯水池底泥土（新潟）の水分特性曲線を図 1. 6-19 にそれぞれ示す。

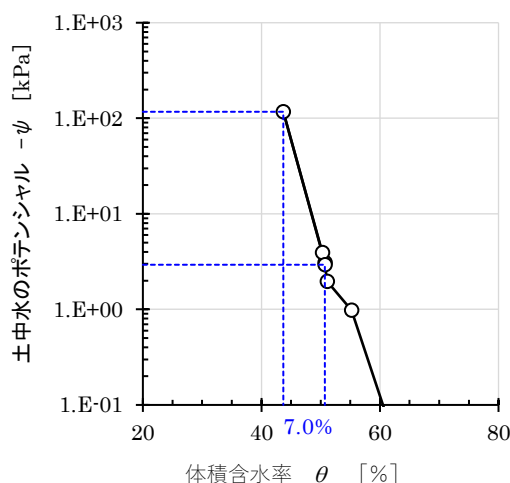


図 1. 6-18 ため池底泥土（山口）の水分特性曲線

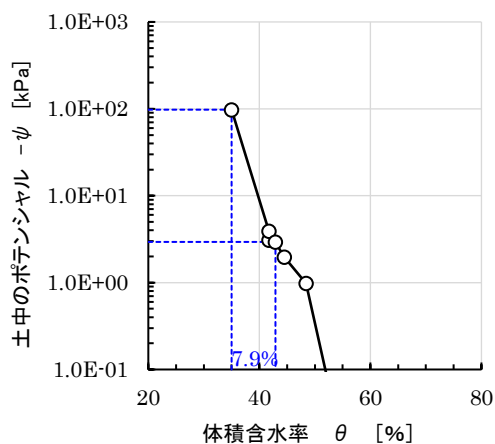


図 1. 6-19 貯水池底泥土（新潟）の水分特性曲線

(e) 透水性

底泥土の透水性は、2つの条件に対して求めた。“条件①”は、底泥土を運搬する($q_c=200\text{kN/m}^2$)ことを想定し、 $q_c=200\text{kN/m}^2$ に対応する含水比に調整した試料を、保水性試験(都市公団仕様)と同じ湿潤密度となるように、突固めによって供試体を作製した。“条件②”は、池底部に堆積している状態を想定し、ジグギング(JIS A 1104に準拠)により作製した。

透水試験結果を表 1. 6-30 に示す。

表 1. 6-30 ため池(山口)及び貯水池(新潟)底泥土の透水性試験結果

底泥土採取地				ため池底泥土 (山口)		貯水池底泥土 (新潟)			
供試体作製条件				条件①	条件②	条件①	条件②		
性状				土砂状	泥土状	土砂状	泥土状		
供試体作製方法				突固め	ジグギング	突固め	ジグギング		
供試体諸元	湿潤密度	ρ_t	Mg/m ³	1.304	1.361	1.561	1.615		
	含水比	w	%	52.2	110.6	35.1	56.6		
	乾燥密度	ρ_d	Mg/m ³	0.857	0.646	1.156	1.031		
	間隙比	e		2.058	3.055	1.335	1.618		
	飽和度	S_r	%	66.5	94.9	70.9	94.4		
透水係数				k	m/sec	2.23×10^{-6}	3.23×10^{-8}	1.15×10^{-7}	3.74×10^{-6}

いずれの底泥土も、条件①の方が条件②より乾燥密度が大きく間隙比が小さくなっているが、貯水池底泥土(新潟)の透水係数は乾燥密度や間隙比と対応した値を示したのに対し、ため池底泥土(山口)は乾燥密度や間隙比と異なる結果を示した。なお、供試体の作製方法により透水性が異なるが、いずれの底泥土も透水性が“低い”から“非常に低い”に分類される。

2) 化学試験

底泥土の化学試験結果を表 1. 6-31 に示す。

表 1. 6-31 ため池（山口）及び貯水池（新潟）底泥土の化学試験結果

試験項目	細 目	単 位	ため池 底泥土 (山口)	貯水池 底泥土 (新潟)	摘 要
土懸濁液の pH		—	9.1	6.9	
土懸濁液の電気伝導率		mS/m	26.8	8.5	
土の水溶性成分	ナトリウム	mg/g	0.023	0.009	
	カリウム	mg/g	0.034	0.020	
	カルシウム	mg/g	0.53	0.020	
	マグネシウム	mg/g	0.012	0.006	
	塩化物イオン	mg/g	0.011	0.004	
	硫化物イオン	mg/g	0.72	0.039	
土の強熱減量		%	8.8	5.3	
土の有機炭素含有量		%	2.5	1.2	
土の陽イオン交換容量		cmol(+)/kg	9.0	12	
酸化還元電位		mV	308	-20	

(a) 土懸濁液の pH

貯水池底泥土の pH は、ガラス電極式の携帯型 pH 計で測定した。土粒子試料に対し JIS K 0557 に規定する A2 の水（純水）を液固比 5 で作製した土懸濁液の pH は、ため池底泥土（山口）が 9.1 とアルカリ性を、貯水池底泥土（新潟）が 6.9 とほぼ中性を示した。

土の pH は、鉱物組成や土中に存在する無機塩類や有機物の種類や量などによって変化し、我が国では雨が多いため、土中の石灰分や塩基類が流出することに加え、雨そのものが酸性であるため、多くの土壌は酸性を示すことが多いが、試験研究に供したため池底泥土はアルカリ性～中性を示した。

すなわち、山口のため池底泥土は、中性域の再生石膏粉で改質したとしても、改質土の pH はアルカリ性を示し、土木分野においては土中の鋼材を腐食させる懸念が、農地土壌として単体で用いる場合には、好適 pH に近づけるために硫安などを添加して pH を低下させる必要があることを示唆している。

アルカリを中和するには酸を加えることは良く知られているが、pH が b の塩基（アルカリ性）を示す水溶液を水で 10^n 倍希釈すると、pH は $(b-n)$ となることから、アルカリ土壌に中性域の石膏を添加することで pH が下がることも期待しつつ、物理的性状の改質を優先して、ため池底泥土の酸度調整は特に行わなかった。

(b) 土懸濁液の電気伝導率

ため池底泥土の EC は、白金電極式の電気伝導率計で測定した。土粒子試料に対し JIS K 0557 に規定する A2 の水（純水）を液固比 5 で作製した土懸濁液の EC はため池底泥土（山口）で 26.8mS/m、貯水池底泥土（新潟）で 8.5mS/m であった。

改質土の EC がこれと変わらないとすると、土木分野に用いた場合には土中の鋼材を腐食させる懸念（ $EC \geq 200\text{mS/m}$ ）はほとんどないと考えられる。一方、農地土壌に用いる場合には、貯水池底泥土は植付時の適正な値（10～80mS/m）を、そしてため池底泥土、

貯水池底泥土とも適正範囲（50～100mS/m）を下回っており，肥料不足であることを示している．

（c）土の水溶性成分

金属イオンは JIS K 0102 工場排水試験法で規定されているフレイム原子吸光法により，塩化物及び硫酸塩は同規格のイオンクロマトグラフ法でそれぞれ分析した．

金属イオンに関しては，土の間隙中に溶解している成分と，水で簡単に溶解する土粒子中の成分を定量しており，理化学分析で求めた交換性塩基と比較することでため池底泥土自体の農地土壌としての適性を評価することができる．また，農業土木に適用した場合に，塩化物イオンは 1mg/g 以下であるため鋼材の腐食の懸念はほとんどないが，ため池底泥（山口）土は硫化物イオンが 0.5mg/g を越えているためコンクリート構造物の劣化に留意が必要となる．

（d）土の強熱減量と有機炭素含有量

感覚的には，ため池底泥土を農業土木に適用する場合には無機性汚泥が，農地土壌に適用する場合には有機性汚泥が適していることは想像に難くない．すなわち，土木用改質土と土壌用改質土とでは，原泥に含まれる有機物に対して真逆の要求となる．

無機性汚泥と有機性汚泥の識別・判定基準について明確に規定されたものはないが，廃棄物処理法施行令（第 6 条第 3 号ヲ）では熱灼減量 15%を閾値としている．強熱減量が（750±50）℃で恒量になるまで乾燥させるのに対し，熱灼減量は（600±25）℃で恒量乾燥することや，前者が土中の有機物含有量の指標であるのに対し，後者は廃棄物の燃焼程度を評価する指標といった違いがあるが，今回のため池底泥土は無機性汚泥の範疇に入ると判断される．

高含水比泥土を固化させるのに普通セメントや高炉セメント使用した場合，フミン酸など土中の腐植物含有量が概ね 1.0%を超えると改良効果が大幅に低下することが指摘されており，そうした場合には SAC 含有率が比較的高い改良材が有効とされている．しかし，腐植酸量（フミン酸+フルボ酸）が 40%以下では改良材の種類に関係なく高い強度が得られるという報告や，今回改質対象であるため池底泥土は無機性汚泥とみなせることから，安定材・助材選定に際して有機物については考慮しなかった．

前述のように，JGS 0231 に基づく有機炭素含有量は，試料中の有機物を高温で燃焼させたときに発生する二酸化炭素量を有機物含有量に換算する方法であり，原理的には誤差がほとんど入らないとされている．しかし，有機物中の炭素の割合が一定ではないため，有機炭素含有量は有機物含有量とは一致しない．また，強熱減量は有機物だけの定量だけでなく，（110±5）℃で消散しない結合水や結晶水，炭酸塩類の熱分解によって失われる CO₂ や揮発性物質も含まれるため，有機炭素含有量より大きな値を示すといわれており，いずれの底泥土もそのとおりとなった．

土中の有機物含有量は，土の固化強度をはじめとする地盤の工学的特性，農地土壌としての適性に大きく関与する一方で，廃石膏ボードからの硫化水素ガス発生条件の一つとなっており，有機物含有量の多寡ではなく，存在有無自体が問題となることから，本研究開発に用いるため池底泥土は，再生石膏粉と混合したときに硫化水素ガスが発生する可能性があるものとして配慮した．

（e）土の陽イオン交換容量

陽イオン交換容量（CEC）は，与条件の中で土が吸着できる交換性陽イオンの最大値である．土の CEC に影響するのは土と接する水溶液の pH とイオン組成で，特に pH の

影響が大きいといわれている。

農地土壌については地力増進基本方針に改善目標が示されており、それと比較すると今回の測定値 9 ～12cmol(+)/kg は下限値ぎりぎりか改善目標をやや下回っている。

(f) 酸化還元電位

酸化還元電位の測定に際し、一般の学術論文等では、基準電極として標準水素電極 (N.H.E) が用いられることが多く、HORIBA の ORP 計 (ポータブル型 pH・ORP・電気伝導率メータ, D-74) の 3.33mol/l KCl-Ag/AgCl 電極での ORP との関係は 1 - (6) 式で表される。

$$E_{N.H.E.} = E + 206 - 0.7 (t - 25) \quad [mV] \quad 1 - (6) \text{ 式}$$

そこで、本研究開発において、HORIBA 製の ORP 計で測定した酸化還元電位は、表示値に 206 を加算 (温度補正項は 20℃恒温室内で測定しているため $\Delta E_h = 3.5mV$ と些少なので無視) した値を「酸化還元電位」として既往の研究結果と整合を図った。

酸化還元電位は、酸化力 (プラスの値が大きくなるほど大) 若しくは還元力の強さ (マイナスの値が大きくなるほど大) を示すが、ため池底泥土の ORP は $E_h = 308mV$ で酸化環境下に、貯水池底泥土の ORP は $E_h = -20mV$ で還元環境下あることが分かった。

3) 安定化試験

貯水池底泥土の安定化試験結果を表 1. 6 - 3 2 に示す。

表 1. 6 - 3 2 ため池 (山口) 及び貯水池 (新潟) 底泥土の安定化試験結果

試験項目	細 目	記号	単位	ため池 底泥土 (山口)	貯水池 底泥土 (新潟)	摘 要
突固めによる 土の締固め試験	最大乾燥密度	ρ_{d-max}	Mg/m ³	1.193	1.470	A-a 法
	最適含水比	w_{opt}	%	37.6	24.9	
締固めた土の コーン指数試験	コーン指数	q_c	kN/m ²	940	200	
	供試体含水比	w	%	45.5	35.1	
CBR 試験	設計 CBR		%	10.5	5.3	$w=OMC$
土の一軸圧縮試験	一軸圧縮強さ	q_u	kN/m ²	230	229	$w=OMC$

(a) 突固めによる土の締固め試験及び締固めた土のコーン指数試験

土の締固めは A-a 法 (モールド内径 10cm, 2.5kg ランマー, 3 層@25 回, 乾燥法で繰返し法) で行った。また、コーン指数試験は、最適含水比の湿潤側の供試体を用いて、コーン指数試験の適用範囲内 ($q_c = 1.0 \sim 1.5MN/m^2$) で実施した。

図 1. 6 - 2 0 にため池底泥土 (山口) の締固め曲線を示す。最大乾燥密度 ρ_{d-max} は 1.193Mg/m³, 最適含水比は $w_{opt}=37.6\%$ を示し、締固め曲線はなだらかな上に凸の形状を呈した。これは、比較的広い含水比の範囲で所定の締固め度を得ることができる土であることを示している。

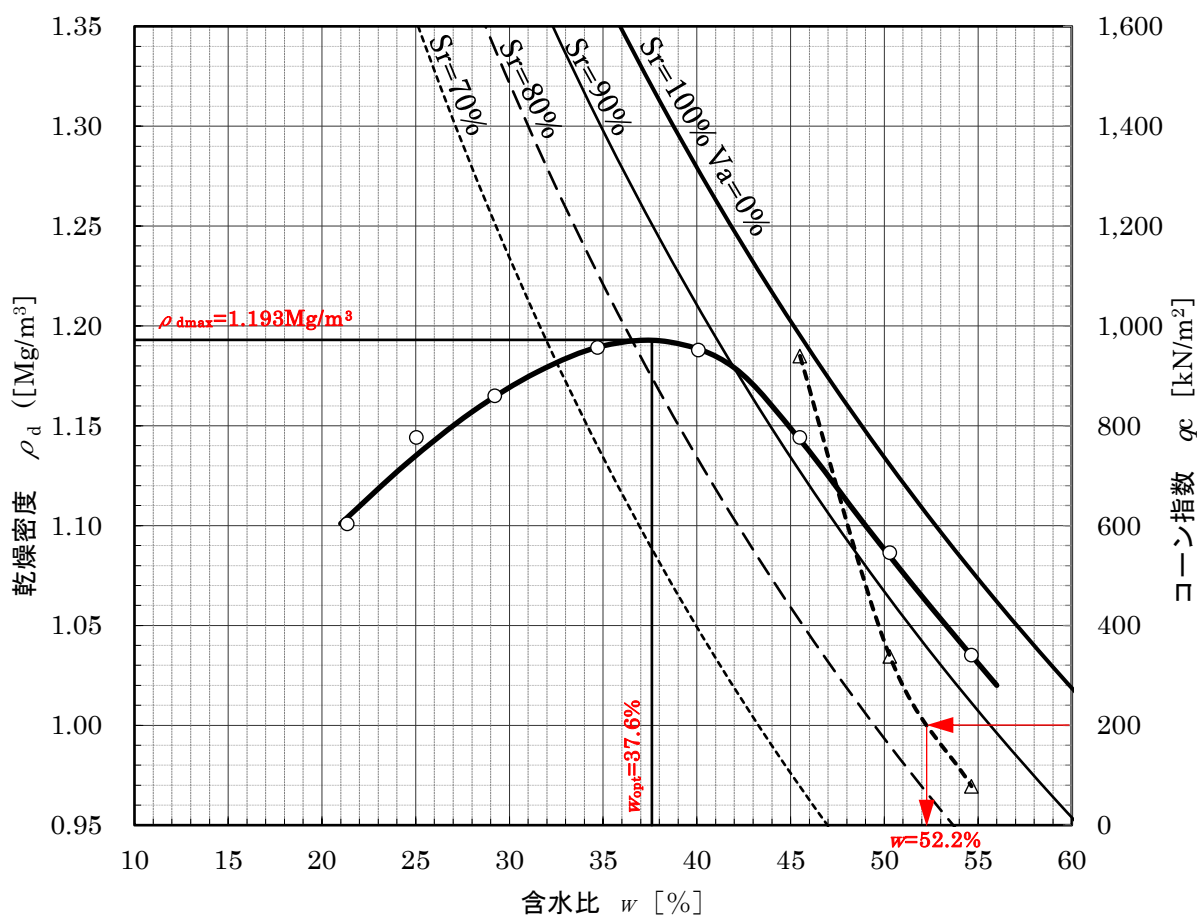


図 1. 6-20 ため池底泥土の締固め曲線及び含水比とコーン指数の関係（山口）

含水比の低下に伴ってコーン指数は増加し、ダンプトラックで運搬可能な $q_c=200\text{kN/m}^2$ を得るための含水比は $w=52.2\%$ であった。また、含水比が $w=45.5\%$ のとき $q_c=940\text{kN/m}^2$ を示し、ため池底泥土の含水比を低下させることで第 2 種処理土相当の品質が得られたが、吸水膨張による軟化、強度低下が懸念される。

図 1. 6-21 に貯水池底泥土（新潟）締固め曲線を示す。最大乾燥密度 $\rho_{d-\max}$ は 1.470Mg/m^3 、最適含水比は $w_{\text{opt}}=24.9\%$ を示し、締固め曲線は山口に比べるとシャープな上に凸の形状を呈した。これは、所定の締固め度を得るための含水比管理が厳密な土であることを示している。

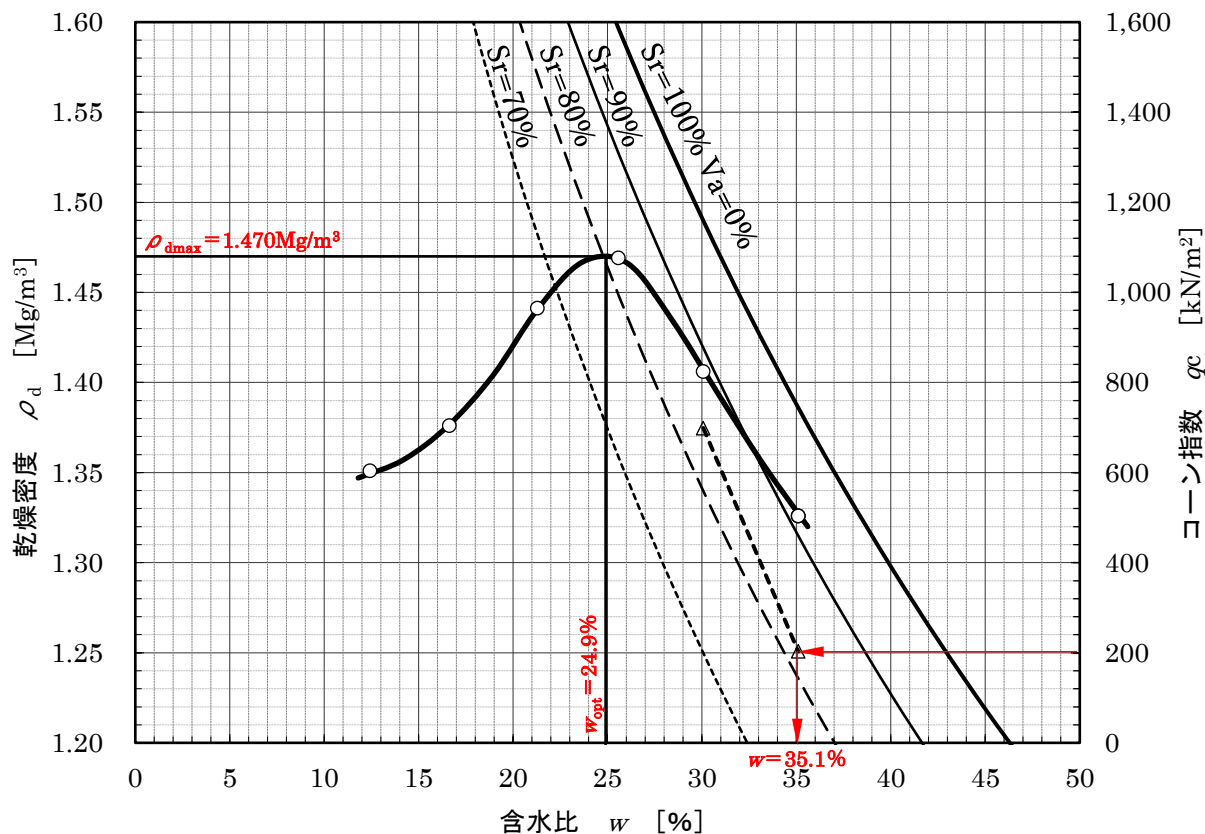


図 1. 6-2-1 貯水池底泥土の締固め曲線及び含水比とコーン指数の関係（新潟）

含水比の低下に伴ってコーン指数は増加し，ダンプトラックで運搬可能な $q_c=200\text{kN/m}^2$ を得るための含水比は $w=35.1\%$ と，ほぼ塑性限界（ $w_p=34.3\%$ ）であった。なお， $w=30.1\%$ のとき $q_c=699\text{kN/m}^2$ となることは確認できたが，次の含水比である $w=26.6\%$ の供試体には人力でコーン貫入させることができなかったため，第 2 種処理土である $q_c \geq 800\text{kN/m}^2$ を得るための含水比は確認できなかった。

（b）CBR 試験

CBR 試験供試体は，最適含水比（ $w_{opt}=37.6\%$ ）に調整した試料を，内径 15cm のモールド内に 4.5kg ランマーを用いて 3 層@67 回突固めて作成した。供試体作成後 96 時間水浸させて膨張量を測り，その後貫入試験を行った。

図 1. 6-2-2 にため池底泥土（山口）の荷重～貫入量曲線を示す。設計 CBR は 10.5% で，ため池底泥土を最適含水比に調整することで農水基準である 3% はクリアできるが，吸水による軟化や強度低下が懸念される。

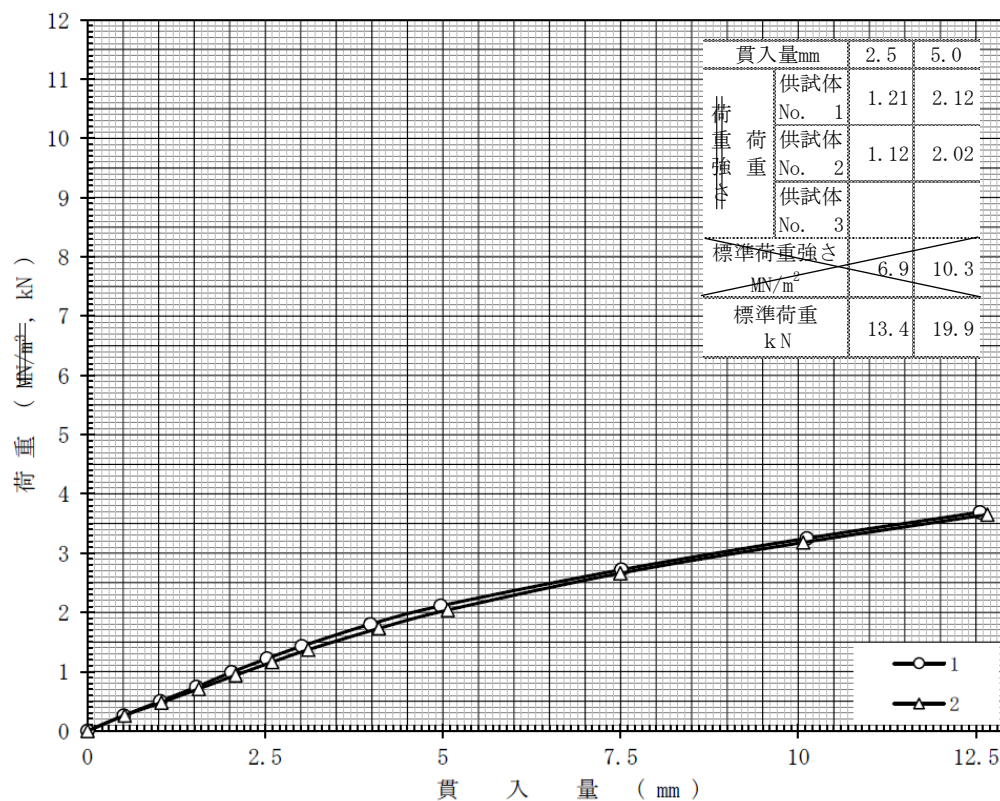


図 1. 6-22 たため池底泥土の荷重～貫入量曲線（山口）

図 1. 6-23 に貯水池底泥土（新潟）の荷重～貫入量曲線を示す。設計 CBR は 5.3% で、貯水池底泥土を最適含水比に調整することで農水基準である 3% はクリアできるが、吸水による軟化や強度低下が懸念される。

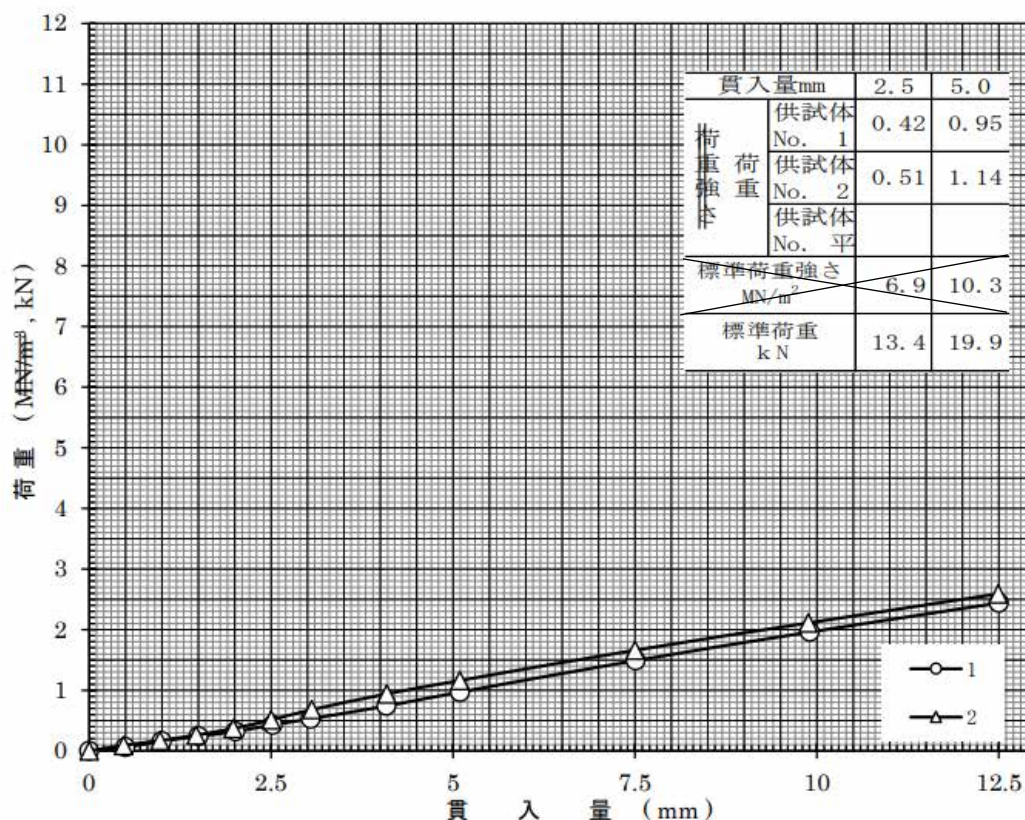


図 1. 6-23 貯水池底泥土の荷重～貫入量曲線（新潟）

(c) 土の一軸圧縮試験

一軸圧縮試験の供試体は、最適含水比（ため池底泥土； $w_{opt}=37.6\%$ ，貯水池底泥土； $w_{opt}=24.9\%$ ）に調整した試料を、直径 5cm，高さ 10cm のモールド内に 1.5kg ランマーを用いて 3 層@12 回突固めて作製した。一軸圧縮試験（載荷試験）は、1%/min の圧縮ひずみが生ずる速度で実施した。

図 1. 6-24 にため池底泥土（山口），図 1. 6-25 に貯水池底泥土（新潟）の応力～ひずみ曲線を示す。

破壊ひずみは $\varepsilon_f \div 1.8 \sim 1.9\%$ ，一軸圧縮強さは $q_u = 229 \sim 230 \text{ kN/m}^2$ （3 供試体の平均値）と，両者類似した結果を示した。

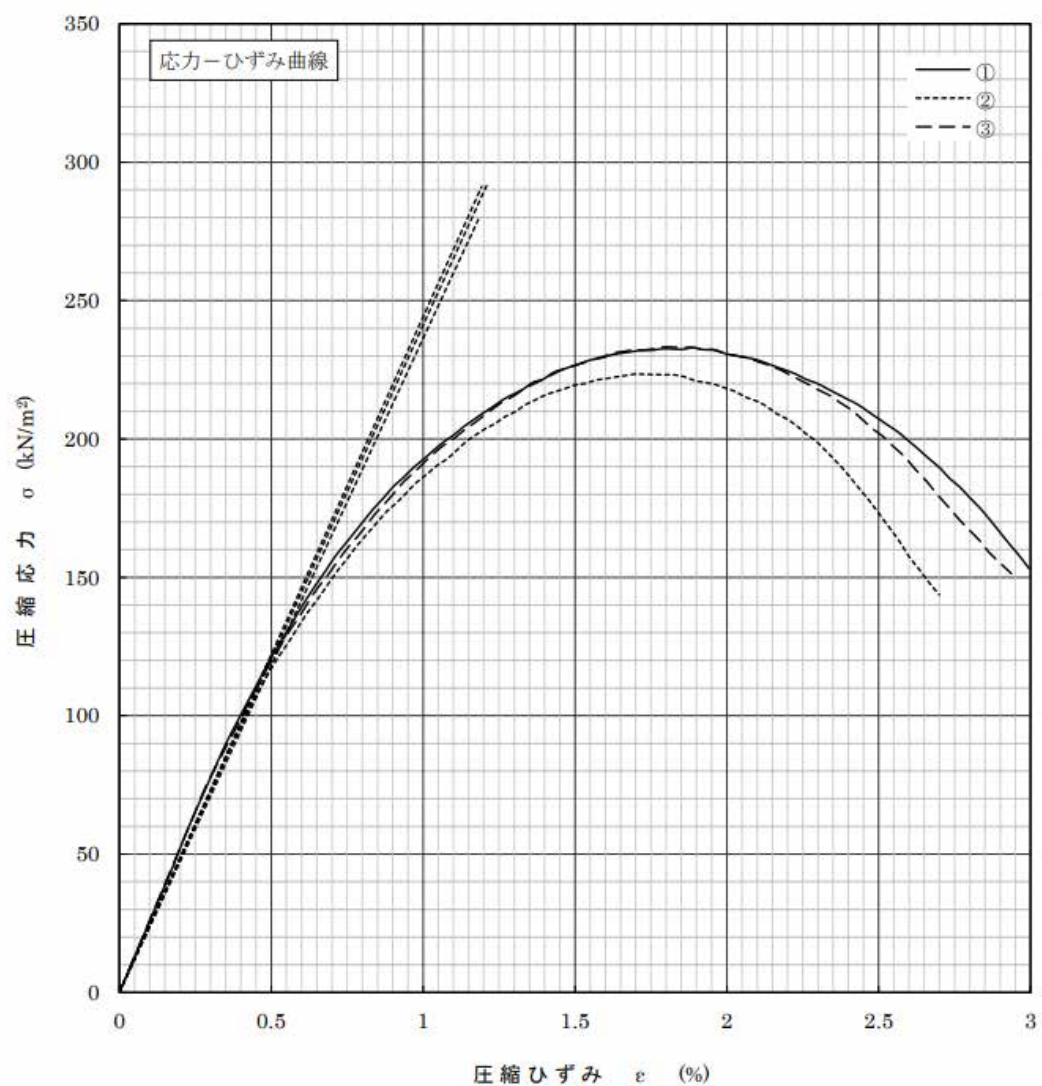


図 1. 6-24 たため池底泥土の応力～ひずみ曲線（山口）

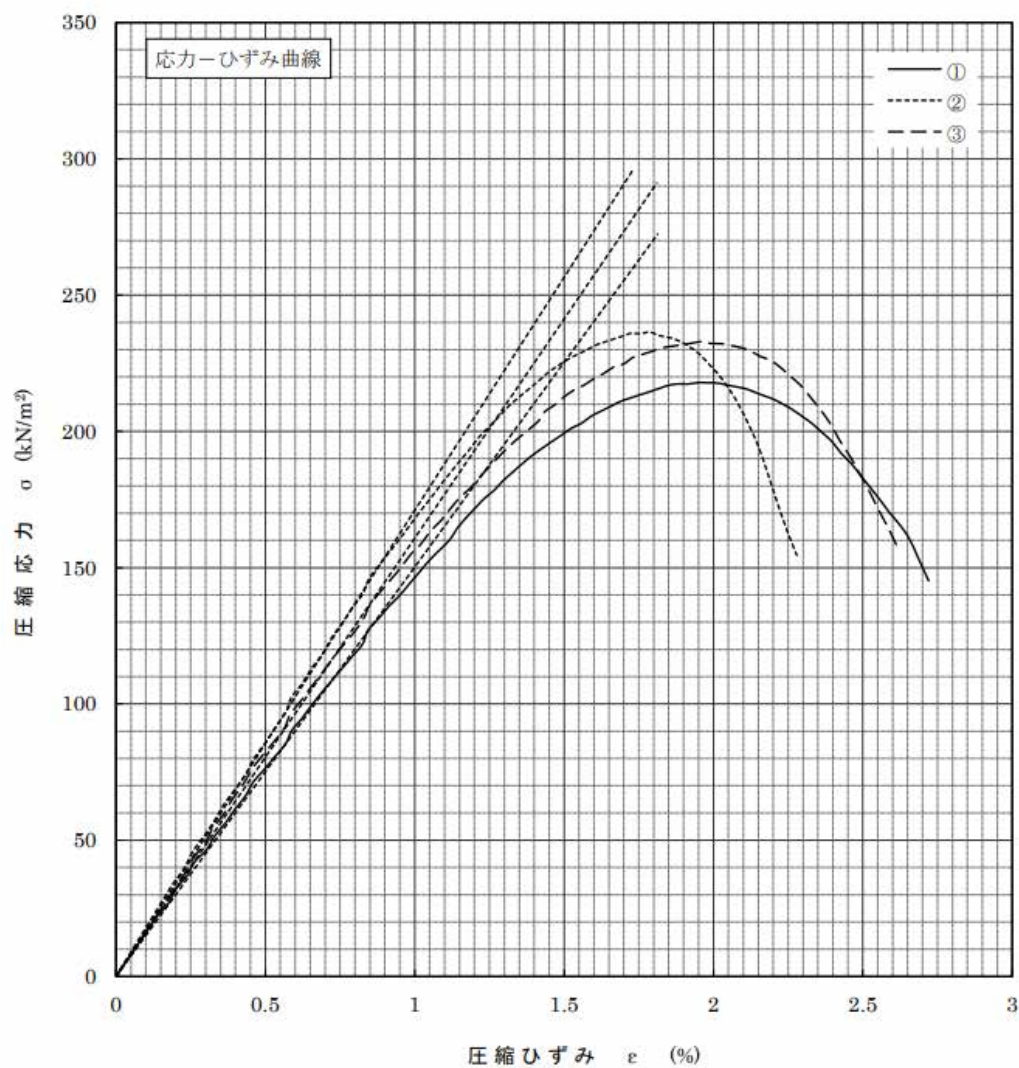


図 1. 6-25 貯水池底泥土の応力～ひずみ曲線（新潟）

4) 土壌理化学特性試験

表 1. 6-33 にため池（山口）及び貯水池（新潟）底泥土の土壌分析結果を示す。表中の色分けは、目標値に対して過剰・適正・不足を示す。

ため池底泥土は pH，電気伝導率及び塩基飽和度が高く，交換性カルシウムが過剰となっているのが特徴である，

表 1. 6-3-3 ため池（山口）及び貯水池（新潟）底泥土の土壌理化学試験結果

試料名称	単位	ため池底泥土（山口）		貯水池底泥土（新潟）	
		分析値	目標値	分析値	目標値
pH (H ₂ O)	—	8.6	6.0～6.5	6.1	6.0～6.5
電気伝導率 (EC)	mS/cm	0.31	0.3以下	0.04	0.3以下
交換性カルシウム (CaO)	mg/100g	771	215～319	153	127～189
交換性マグネシウム (MgO)	mg/100g	10.9	47.6～76.6	25.4	28.1～45.2
交換性カリウム (K ₂ O)	mg/100g	17.0	11.1～71.6	15.6	6.6～42.3
Ca/Mg比	—	51.0	2.6～3.75	4.35	2.6～3.75
Mg/K比	—	1.50	2.0～12.5	3.81	2.0～12.5
Ca/K比	—	76.4	6.5～37.5	16.5	6.5～37.5
陽イオン交換容量 (CEC)	meq/100g	16.9	10以上	9.97	10以上
塩基飽和度	%	168	70～90	70.8	70～90
可給態リン酸 (P ₂ O ₅)	mg/100g	<3.0	10～100	11.4	10～100
アンモニア態窒素 (NH ₄ -N)	mg/100g	7.58	—	4.34	—
硝酸態窒素 (NO ₃ -N)	mg/100g	<0.1	—	0.17	—
リン酸吸収係数	mg/100g	613	—	637	—
腐植	%	2.69	3以上	1.17	3以上
分析項目	単位	分析値	目標値	分析値	目標値
可給態-鉄 (Fe)	mg/kg	167	4.5以上	363	4.5以上
可給態-マンガン (Mn)	mg/kg	48.5	1以上	95.9	1以上
可給態-亜鉛 (Zn)	mg/kg	3.59	1以上	2.10	1以上
可給態-銅 (Cu)	mg/kg	1.73	0.2以上	2.93	0.2以上

土 壌 理 化 学 性

微 量 成 分

過剰

適正

不足

5) 環境安全特性試験

ため池（山口）及び貯水池（新潟）底泥土の土壌溶出量を表 1. 6-34, 土壌含有量を表 1. 6-35, 農用地特定有害物質を表 1. 6-36, 及び水素ガスの発生ポテンシャルを表 1. 6-37 にそれぞれ示す。溶出量, 含有量（底質調査法には基準値はない）, 特定有害物質とも基準値以内であり, 硫化水素ガス濃度は定量下限値以下だった。

表 1. 6-34 ため池（山口）及び貯水池（新潟）底泥土の溶出量試験結果

平成3年環境庁告示第46号						
計量の対象	単位	基準値	ため池底泥土（山口） ^{注3)}		貯水池底泥土（新潟） ^{注3)}	
			計量結果	判定	計量結果	判定
カドミウム ^{注1)}	mg/L	≤0.01	<0.001	0.K.	—	—
		≤0.003	—	—	<0.0003	0.K.
全シアン	mg/L	検出されないこと	検出されず	0.K.	検出されず	0.K.
有機燐	mg/L	検出されないこと	検出されず	0.K.	検出されず	0.K.
鉛	mg/L	≤0.01	<0.005	0.K.	<0.005	0.K.
六価クロム	mg/L	≤0.05	<0.01	0.K.	<0.01	0.K.
ヒ素	mg/L	≤0.01	0.005	0.K.	<0.005	0.K.
総水銀	mg/L	≤0.0005	<0.0005	0.K.	<0.0005	0.K.
PCB	mg/L	検出されないこと	検出されず	0.K.	検出されず	0.K.
ジクロロメタン	mg/L	≤0.02	<0.002	0.K.	<0.002	0.K.
四塩化炭素	mg/L	≤0.002	<0.0002	0.K.	<0.0002	0.K.
クロロエチレン（塩化ビニルモノマー）	mg/L	≤0.002	<0.0002	0.K.	<0.0002	0.K.
1, 2-ジクロロエタン	mg/L	≤0.004	<0.0004	0.K.	<0.0004	0.K.
1, 1-ジクロロエチレン	mg/L	≤0.1	<0.002	0.K.	<0.002	0.K.
1, 2-ジクロロエチレン	mg/L	≤0.04	<0.004	0.K.	<0.004	0.K.
1, 1, 1-トリクロロエタン	mg/L	≤1	<0.001	0.K.	<0.001	0.K.
1, 1, 2-トリクロロエタン	mg/L	≤0.006	<0.0006	0.K.	<0.0006	0.K.
トリクロロエチレン ^{注2)}	mg/L	≤0.03	<0.002	0.K.	—	—
		≤0.01	—	—	<0.001	0.K.
テトラクロロエチレン	mg/L	≤0.01	<0.0005	0.K.	<0.0005	0.K.
1, 3-ジクロロプロペン	mg/L	≤0.002	<0.0002	0.K.	<0.0002	0.K.
チウラム	mg/L	≤0.006	<0.0006	0.K.	<0.0006	0.K.
シマジン	mg/L	≤0.003	<0.0003	0.K.	<0.0003	0.K.
チオベンカルブ	mg/L	≤0.02	<0.002	0.K.	<0.002	0.K.
ベンゼン	mg/L	≤0.01	<0.001	0.K.	<0.001	0.K.
セレン	mg/L	≤0.01	<0.002	0.K.	<0.002	0.K.
ふっ素	mg/L	≤0.8	0.25	0.K.	<0.05	0.K.
ほう素	mg/L	≤1	<0.02	0.K.	<0.02	0.K.
1, 4-ジオキサン	mg/L	≤0.05	<0.005	0.K.	<0.005	0.K.

注1) カドミウムの基準値は, 2021年3月31日までは0.01mg/Lであるが, 2021年4月1日より0.003mg/Lに強化された

注2) トリクロロエチレンの基準値は, 2011年3月31日までは0.03mg/Lであるが, 2021年4月1日より0.01mg/Lに強化された

注3) ため池底泥土（山口）は2020年12月までに, 貯水池底泥土（新潟）は2021年9月に, それぞれ分析を実施

表 1. 6-35 ため池（山口）及び貯水池（新潟）底泥土の含有量試験結果

平成24年底質調査法（環水大水発120725002号）

計量の対象	単位	計量結果		基準値 ^{注)}
		ため池底泥土 （山口）	貯水池底泥土 （新潟）	
カドミウム	mg/kg	0.28	0.30	(150)
鉛	mg/kg	25	11	(150)
六価クロム	mg/kg	<2	<2	(250)
ひ素	mg/kg	32	13	(150)
総水銀	mg/kg	0.081	0.049	(15)
セレン	mg/kg	0.5	0.4	(150)
ふっ素	mg/kg	330	190	(4,000)
ほう素	mg/kg	30	50	(4,000)

※底質調査法では含有量の基準値は規定されていないため、土壌汚染対策法の基準値を参考までに示す。

表 1. 6-36 ため池（山口）及び貯水池（新潟）底泥土の
農用地特定有害物質試験結果

農用地土壌汚染防止法

計量の対象	単位	基準値	ため池底泥土（山口）		貯水池底泥土（新潟）	
			計量結果	判定	計量結果	判定
ひ素	mg/kg	15	8.0	0. K.	2.4	0. K.
銅	mg/kg	125	4.7	0. K.	9.4	0. K.

表 1. 6-37 ため池（山口）及び貯水池（新潟）底泥土の
硫化水素ガス発生ポテンシャル試験結果

国立環境研究所法

分析項目	単位	計量結果	
		ため池底泥土 （山口）	貯水池底泥土 （新潟）
硫化水素ガス濃度	ppm	<0.3	<0.3
pH	—	9.1	6.9
EC	mS/m	26.8	8.5
ORP	mV	308	186
強熱減量	mass%	8.8	5.3
有機炭素含有量	mass%	2.5	1.2

(2) 改質材

1) 物理試験

改質材の物理試験結果を表 1. 6-38 に示す。

表 1. 6-38 改質材の物理試験結果

項 目			単位	再生半水石膏	再生二水石膏	高炉セメントB種	消石灰	高炉スラグ微粉末	クリンカアッシュ
一般	粒子密度	ρ_s	Mg/m ³	2.44	2.20	3.04	2.24	2.88	2.10
	自然含水比※	w_n	%	4.56	22.86	0.53	-2.02	0.84	11.70
粒度組成	礫分	(2~75mm)	%	3.6	7.1	0.0	0.0	0.0	10.0
	砂分	(0.075~2mm)	%	82.6	82.1	1.2	18.0	0.9	84.1
	細粒分	F_c (0.075mm未満)	%	13.8	10.8	98.8	82.0	99.1	5.9
	最大粒径	G_{max}	mm	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75
分類	地盤材料の分類名			細粒分まじり砂	細粒分まじり砂	—	—	—	細粒分まじり砂
	分類記号			(S-F)	(S-F)	—	—	—	(S-F)

※JIS A 1203に基づき、(110±5)℃で乾燥

(a) 粒子密度

一般に、固体粒子 (Solid) の密度は水 (Water) のそれより大きいので、石膏の場合は無水>半水>二水の順で密度は大きくなる。再生石膏粉の密度は、その組成や夾雑物の混入具合によっても異なるが、純粋な半水石膏 (B) で $\rho_s \div 2.6 \text{ Mg/m}^3$ 、同じく二水石膏 (G) で $\rho_s \div 2.3 \text{ Mg/m}^3$ 程度である。今回試験に供した再生石膏の密度は、再生半水石膏が $\rho_s = 2.44 \text{ Mg/m}^3$ 、再生二水石膏粉が $\rho_s = 2.20 \text{ Mg/m}^3$ であったことから、密度の小さな夾雑物 (例えばボード紙) が混入していることが考えられる。

高炉セメント B 種 (BB) の密度は $\rho_s = 3.04 \text{ Mg/m}^3$ と標準的な値であり、風化の懸念はないといえる。

消石灰 (SL) の密度は $\rho_s = 2.24 \text{ Mg/m}^3$ で、一般的な値である $\rho_s = 2.0 \sim 2.4 \text{ Mg/m}^3$ の範囲内の値を示した。

コンクリート用高炉スラグ微粉末 (BFS) は、高炉で銑鉄を製造する際に副産物として生成した高温の高炉スラグを急冷してミルで乾燥・粉砕したものである。高炉スラグは多孔質であるため、密度は $\rho_s = 2.2 \sim 2.6 \text{ Mg/m}^3$ 程度であるのに対し、微粉砕した BFS は JIS A 6206 で密度が $\rho_s = 2.80 \text{ Mg/m}^3$ 以上であることが規定されており、今回の試験値 $\rho_s = 2.88 \text{ Mg/m}^3$ は規格を満足するものである。

クリンカアッシュ (CA) は多孔質であるためその密度は小さく、一般に $\rho_s = 1.9 \sim 2.5 \text{ Mg/m}^3$ の範囲であるが、今回の製品の密度は $\rho_s = 2.10 \text{ Mg/m}^3$ で、標準的な値を示した。

(b) 含水比

乾燥温度を 40℃ から 160℃ まで変化させ、各温度で 24 時間乾燥させたときの各種改質材の含水比試験結果を図 1. 6-26 に示す。

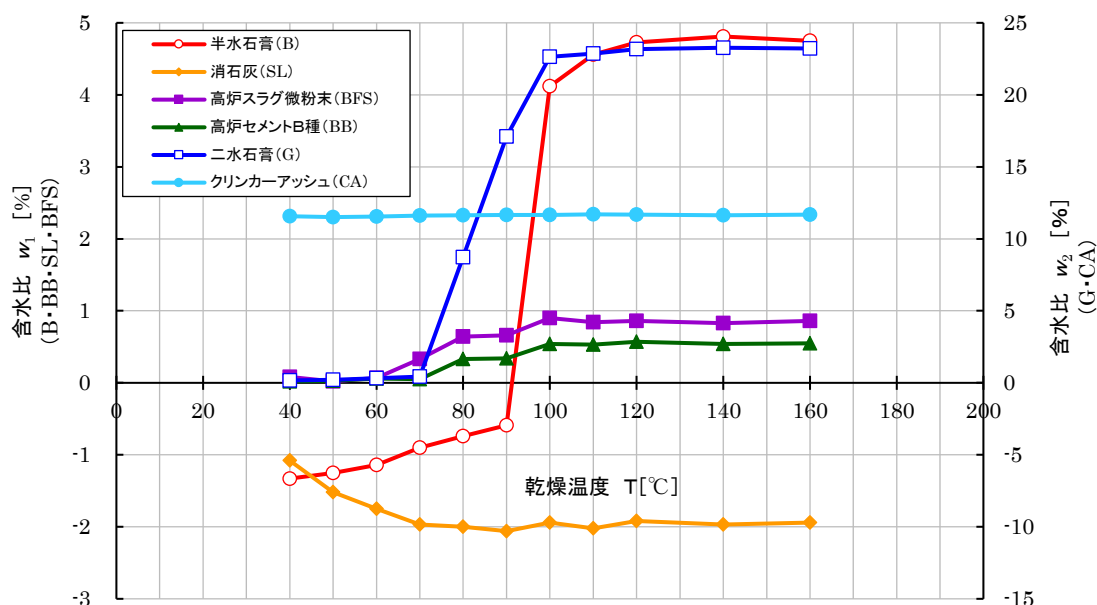


図 1. 6-26 乾燥温度別の改質材の含水比

再生二水石膏は 80～100℃で、再生半水石膏は 100～120℃で急激に質量が減少（含水比が増加）している．これは温度に若干の差異があるが、既往の研究結果と一致しており、再生二水石膏は 80～100℃で半水石膏に、再生半水石膏 100～120℃で無水石膏に転化（結晶水が消失）し始めており、改質土を JIS A 1203 の (110±5)℃で乾燥すると結晶水の一部も定量されることが示差された．

高炉セメント B 種と高炉スラグ微粉末の含水比は 1%未満であり、やや吸湿しているが基本的には乾燥状態といえ、高炉セメント B 種は 80～100℃で、高炉スラグ微粉末は 70～100℃で湿気が消散している．

消石灰は乾燥温度が 80℃以下では含水比が増加しており、炉内で吸湿している可能性があるが、その後の含水比は落ち着いている．消石灰（水酸化カルシウム： $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）が結晶水を蒸発させて生石灰（酸化カルシウム： CaO ）となるためには 580℃の温度で加熱する必要がある、含水比試験の加熱温度である 105～115℃では消石灰として存在しているといわれている．

クリンカーアッシュは 40～160℃の範囲では、含水比に有意な差は認められなかった．

(c) 粒度組成

改質材の粒径加積曲線を図 1. 6-27 に示す．

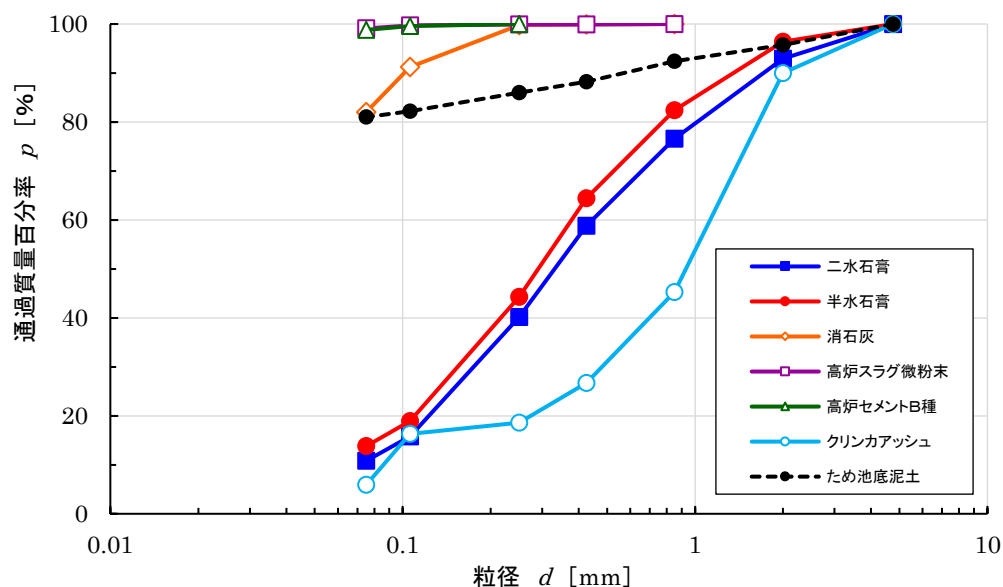


図 1. 6-27 改質材の粒径加積曲線

いずれの改質材も、ふるい分析のみ行った。

石膏以外の改質材は、混練時に粉体粒子が破砕される可能性は少ないが、石膏については粒子が手で潰れるものもあるため、ため池底泥土と混練した際に破砕して、粒径が変わる可能性がある。

(d) 再生石膏粉の嵩比重

再生石膏粉の嵩比重試験結果を表 1. 6-39 に示す。当然のことながら、半水石膏も二水石膏も loose より dense の方が嵩比重が大きくなった。また、半水石膏より二水石膏の方が若干大きな値を示した。

表 1. 6-39 再生石膏粉の嵩比重試験結果

項 目	単 位	再生半水石膏						再生二水石膏						摘 要
		loose [スプーンで5層詰]			dense [7層@25回ジグギング]			loose [スプーンで5層詰]			dense [7層@25回ジグギング]			
番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
容器質量	g	51.42	51.56	51.44	51.41	51.47	51.27	51.32	51.40	51.33	51.51	51.54	51.31	
(容器) + (初期試料) 質量	g	155.02	153.72	154.13	195.36	195.70	197.90	154.82	155.03	156.37	204.53	198.64	204.11	
試料初期質量	g	103.60	102.16	102.69	143.95	144.23	146.63	103.50	103.63	105.04	153.02	147.10	152.80	
体積	cm ³	196.35	196.35	196.35	196.35	196.35	196.35	196.35	196.35	196.35	196.35	196.35	196.35	
嵩比重	g/cm ³	0.53	0.52	0.52	0.73	0.73	0.75	0.53	0.53	0.53	0.78	0.75	0.78	
平均嵩比重	g/cm ³	0.52			0.74			0.53			0.77			
標準偏差	—	0.0030			0.0061			0.0036			0.0140			

(e) 再生半水石膏粉の吸湿試験

サミットモールドに詰めた再生石膏粉の吸湿試験状況（大気に晒して139日経過）を写真 1. 6-5 に示す。なお、吸湿試験は嵩比重試験に引き続いて行ったが、dense の方は試料天端の沈下はなかったが、loose の方は時間の経過に伴い沈下が生じており、自重によって締まったことが見て取れる。



写真 1. 6-5 サミットモールドに詰めた再生石膏粉の吸湿試験状況（手法 1）

図 1. 6-28 にサミットモールドに詰めた再生石膏粉の吸湿試験結果を示す。

再生半水石膏の吸水比は再生二水石膏の 10 倍以上で、いずれも 1 ヶ月以降は大きな変化はなく、早い段階で吸湿して収束することが確認された。また、試料の詰め方による違いは、looseの方がdenseよりも大きな値を示している。

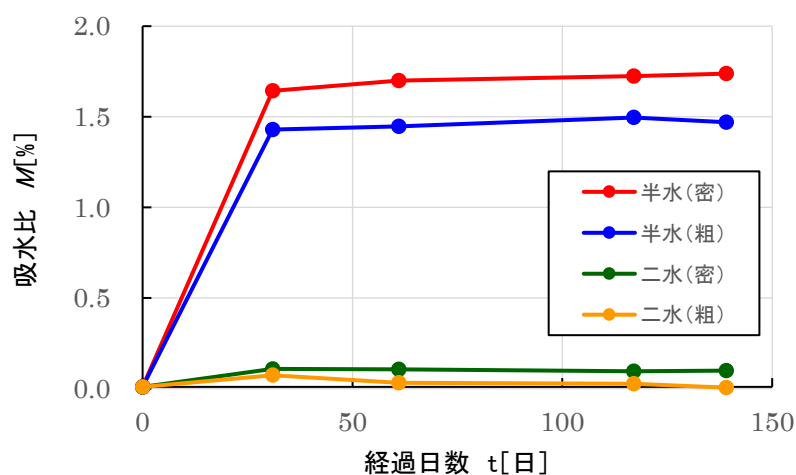


図 1. 6-28 サミットモールドに詰めて気中に曝した再生石膏粉の吸湿試験結果（手法 1）

アルミ容器に入れた再生半水石膏粉の吸湿試験状況を写真 1. 6-6 に示す。



写真 1. 6-6 アルミ容器に入れた再生半水石膏粉の吸湿試験状況（手法 2）

図 1. 6-29 にアルミ容器に入れた再生半水石膏粉の吸湿試験結果を示す。

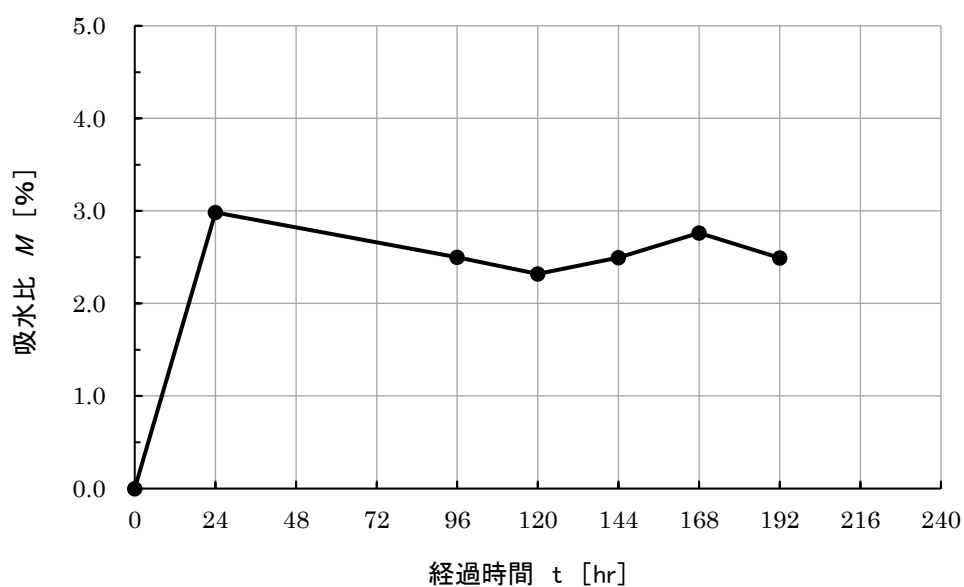


図 1. 6-29 アル容器に入れて気中に曝した
再生半水石膏粉の吸湿試験結果（手法 2）

この結果から、吸湿は曝露後概ね 24 時間以内に収束し、それ以降は温湿度の影響を受けて変動すると思慮される。

写真 1. 6-7 は、吸湿促進試験の状況を示す。



写真 1. 6-7 再生半水石膏粉の吸湿促進試験状況（手法 3）

手法 1 から石膏の吸湿は 1 ヶ月以内，手法 2 から石膏の吸湿は 24 時間以内に収束することが判明したため，吸湿促進試験は暴露初期の測定間隔を密にして行った。

図 1. 6-30 は，吸湿促進箱内に格納した再生半水石膏粉の吸湿試験結果を示す．同図には初期状態の化合水含有率を理論値（ $w_c=6.2\%$ ）と仮定した化合水含有率も併記している．

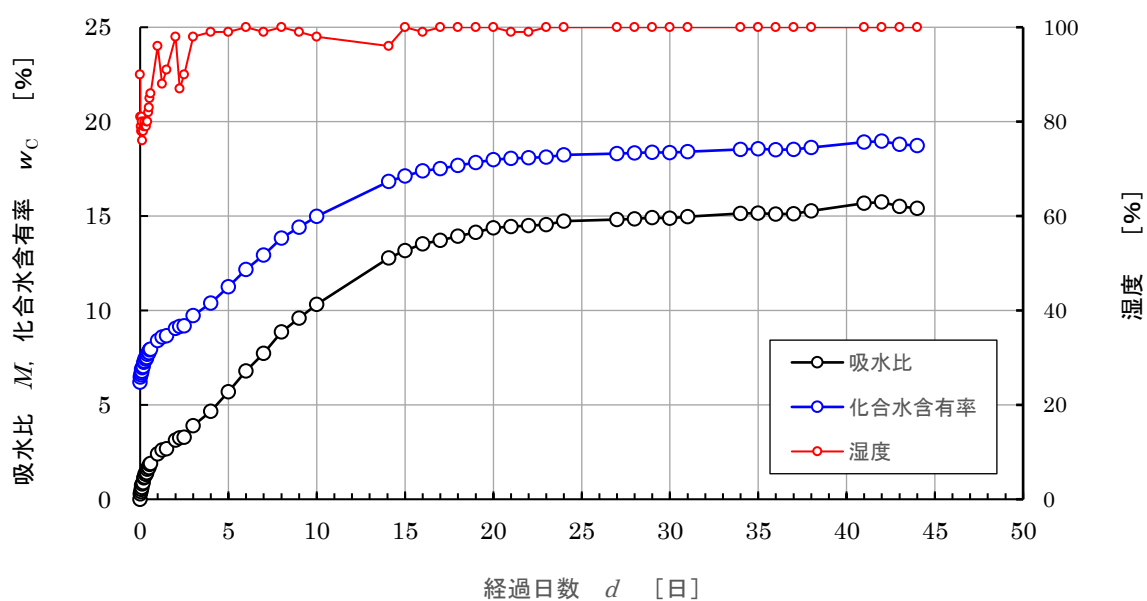
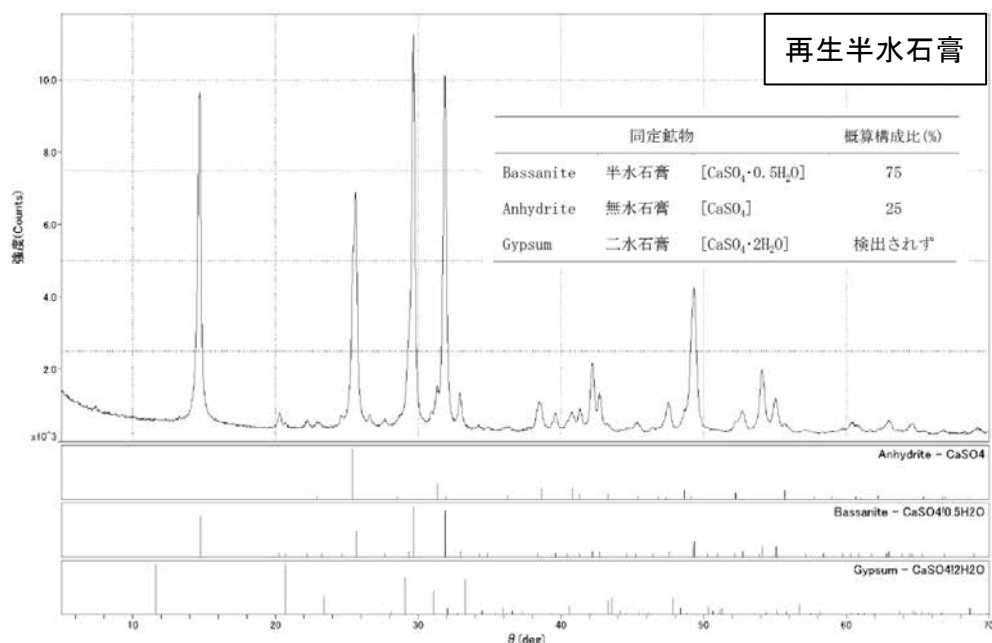


図 1. 6-30 吸湿促進環境における再生半水石膏粉の吸湿試験結果（手法 3）

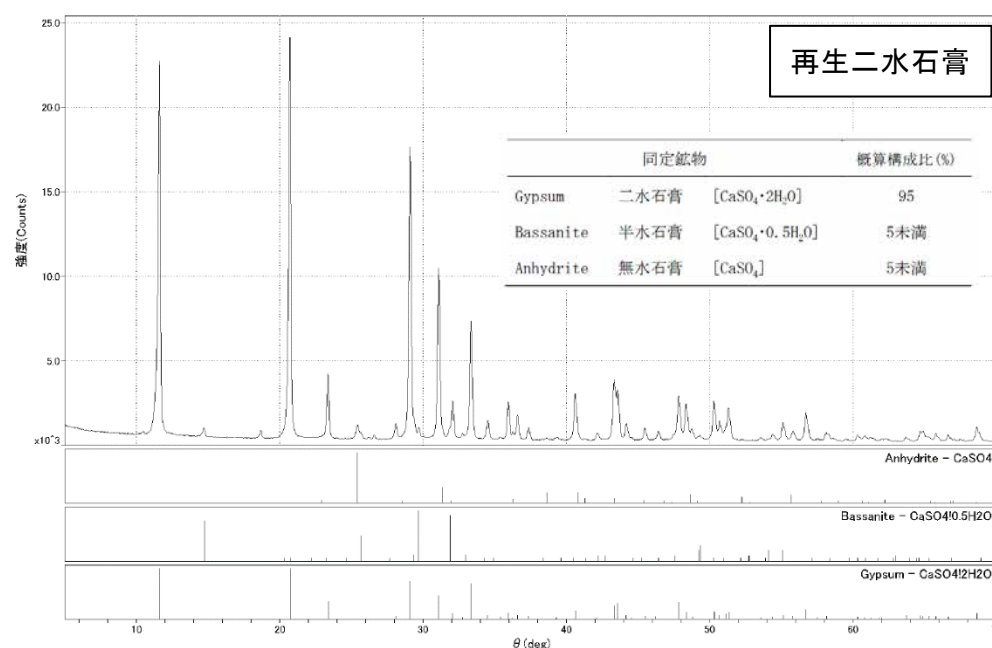
予想に反し、24 時間経過後も吸湿は進行し、15 日目頃までは吸水比が直線的に増加した。その後吸湿速度は低下し、25 日経過後、ようやく落ち着き始めたが収束には至っていない。また、恒量したときの吸水比は、手法 1 が 1.4% (loose)、手法 2 が 3.0%であったのに対し、手法 3 は 15%に達し、化合水含有率に換算すると約 19%で、二水石膏の理論化合水含有率 20.9%にほぼ近づいた。理論値との差は、夾雑物（ボード紙）や半水石膏や無水石膏の混入と考えられる。

(f) 再生石膏粉の組成分析

図 1. 6-31 は、再生石膏粉入手直後に行った組成分析（X線回折）結果を示す。



(a) 再生半水石膏



(b) 再生二水石膏

図 1. 6-31 再生石膏粉の X 線回折チャート

再生品を含めて、石膏の種類を特定するにあたり、その組成比に関する規定はなく、唯一硫酸カルシウム二水和物（試薬）が純度として $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の質量分率を 98.0～102.0%としているのみである。

再生石膏を用いた既往の研究で使用した半水石膏の組成は表 1. 6-40 に示すとおりであり、本研究開発で用いた再生半水石膏はこれらと同等以上であることから、半水石膏とみなした。

表 1. 6-40 既往の研究で使用した再生半水石膏の組成比

事例	組成比 (%)			半水石膏とみなした理由
	二水石膏	半水石膏	無水石膏	
事例 1	5.3	92.6	2.1	水と反応する半水、無水の比率が全体の 95% を占める
事例 2	11.9	75.3	12.8	水硬性がある半水、無水の割合が全体の 88% 以上を占める
事例 3	12.5	76.5	11.0	大部分が半水石膏
本研究開発	0	75	25	

図 1. 6-32 は、吸湿試験（手法 1）後の再生半水石膏の組成分析結果（X線回折）を示す。

X線回折結果より、再生半水石膏を大気に晒すことで、半水石膏の組成比 75% は変わらないが、無水石膏が 15% 減少し、二水石膏が 15% 増加している。二水石膏が生成されたのは、半水石膏と、無水石膏が半水石膏を経て転化して二水石膏になったケースと、半水石膏は転化せずに、無水石膏のみが半水石膏を経て二水石膏になるケースとが考えられるが、間違いなく言えることは、無水石膏の 15% は半水石膏或いは二水石膏に転化したことと、無水石膏と半水石膏が二水石膏に転化したのは合計で 15% であることである。

半水石膏の組成比に規定がないことは前述のとおりであるが、元々無水石膏と半水石膏を合わせて 100% だったものが 85% に低下したため、品質の低下は否めず、再生半水石膏の保管に際しては、吸湿防止に十分配慮する必要があることを示している。

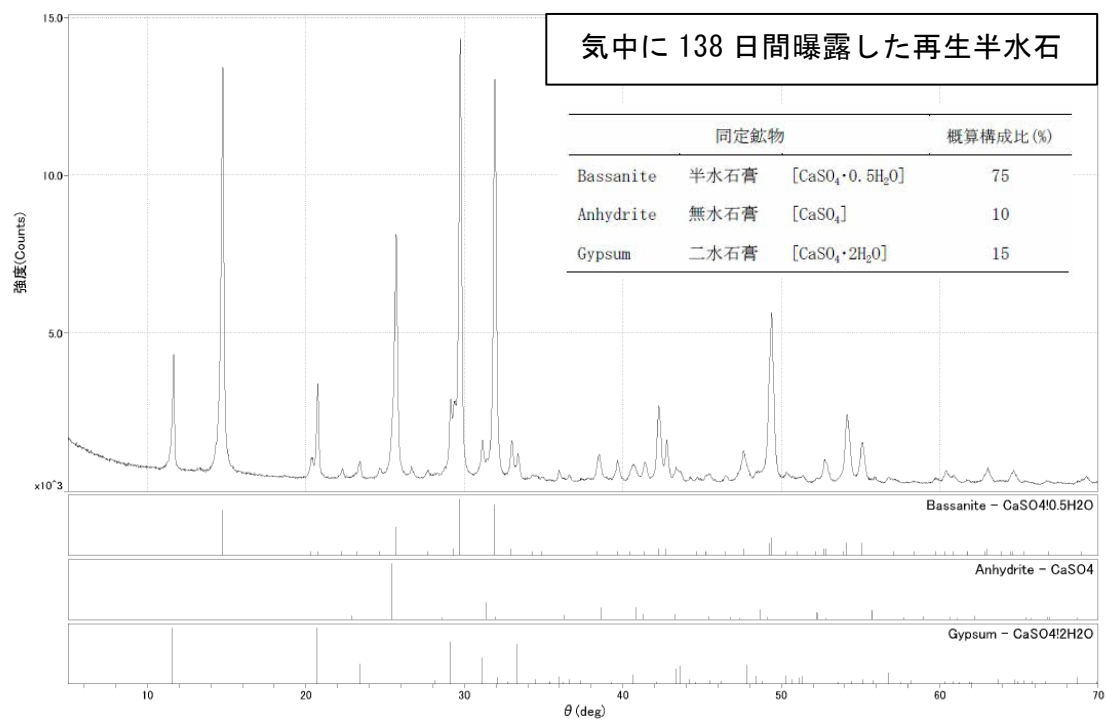


図 1. 6-32 気中に曝露した再生石膏粉の X 線回折チャート (手法 1)

2) 化学試験

改質材の化学試験結果を表 1. 6-4 1 に示す.

表 1. 6－4 1 改質材の化学試験結果

区 分	項 目	単 位	基準値、規格値、理論値 ¹⁾	ため地泥土 (S)	貯水地泥土 (S)	再生半水石膏 (B)	再生二水石膏 (G)	高炉セメントB種 (BB)	消石灰 (SL)	高炉スラグ微粉末 (BFS)	クリンカアッシュ (CA)
水分	水分の付着率	%	—	—	—	<0.1	0.3	—	—	—	—
	化合水の含有率	%	[B: 6.2%, G: 20.9%] (6.0(5.5)~6.5) ⁶⁾	—	—	5.8	19.5	—	—	—	—
	pH	—	—	9.1	6.9	9.3	7.8	12.4	12.7	11.2	9.8
	電気伝導率	mS/m	(≤ 200) ⁷⁾	26.8	8.5	568	251	665	892	246	448
	酸化還元電位	mV	—	308	-20	288	324	180	144	39	330
水溶性成分等	ナトリウム(Na)	mg/g	—	0.023	0.009	0.16	0.17	0.28	0.017	0.018	0.002
	カリウム(K)	mg/g	—	0.034	0.020	0.099	0.33	1.2	0.016	0.24	0.010
	カルシウム(Ca)	mg/g	—	0.53	0.020	6.5	8.0	11	8.8	6.8	0.11
	マグネシウム(Mg)	mg/g	—	0.012	0.006	0.079	0.094	<0.001	<0.001	0.004	0.014
	塩化物イオン	mg/g	(≤ 1) ⁷⁾	0.011	0.004	0.049	0.031	0.088	0.032	0.027	0.001
化学成分等	陽イオン交換容量(GEC)	cmol(+) / kg [meq / 100g]	(≤ 0.6) ⁷⁾	0.72	0.039	15	19	9.0	0.54	14	0.012
	二酸化ケイ素(SiO ₂)	mass%	—	9.0	12.0	—	—	—	—	—	—
	酸化アルミニウム(Al ₂ O ₃)	mass%	—	—	—	1.3	1.1	25	0.37	33	56
	酸化第二鉄(Fe ₂ O ₃)	mass%	—	—	—	0.32	0.25	8.0	0.16	12	20
	酸化カルシウム(CaO)	mass%	[SL: ≥ 72.5] ⁸⁾	—	—	0.14	0.11	1.7	0.046	0.31	9.2
	酸化マグネシウム(MgO)	mass%	[BB: ≤ 6.0 , BFS: ≤ 100] ⁹⁾	—	—	35	31	52	70	41	4.8
	三酸化イオウ(SO ₃)	mass%	[BB: ≤ 4.0 BFS: ≤ 4.0] ⁹⁾	—	—	0.094	0.10	3.1	0.37	5.8	1.9
	酸化ナトリウム(Na ₂ O ₃)	mass%	—	—	—	52.2	45.4	2.1	0.1	2.0	<0.1
	酸化カリウム(K ₂ O)	mass%	—	—	—	0.046	0.039	0.21	0.007	0.21	0.90
	二酸化チタン(TiO ₂)	mass%	—	—	—	0.047	0.064	0.34	0.003	0.33	1.2
	酸化リン(P ₂ O ₅)	mass%	—	—	—	0.071	0.022	0.40	0.007	0.51	1.0
	酸化マンガン(MnO)	mass%	—	—	—	0.07	0.05	0.10	0.02	0.01	0.11
	有機炭素含有量 ²⁾	mass%	—	—	—	0.003	0.007	0.088	0.004	0.12	0.15
	強熱減量(ig-loss) ³⁾	mass%	[BB: ≤ 5.0 , BFS: ≤ 30] ⁹⁾	2.5	1.2	—	—	—	—	—	—
	不溶残分(insol) ⁴⁾	mass%	—	8.8	5.3	4.7	9.8	0.6	24.7	<0.1	0.2
SAC含有比率 ⁵⁾			(≥ 0.29) ¹⁰⁾	—	—	1.8	1.5	0.14	0.32	0.17	90
SAC含有比率 ⁵⁾			—	—	—	1.501	1.473	0.194	0.004	0.341	4.188

注1) [基準値]、[規格値]、[許容値]、[理論値]
注2) 「有機炭素含有量」とは、土に含まれる有機物に由来する炭素の量の、土の(110±5)℃炉乾燥質量に対する比率
注3) 「強熱減量(ig-loss)」とは、(110±5)℃で恒量になるまで乾燥した試料を、(750±50)℃で強熱したときの減少質量の炉乾燥試料質量に対する比率
注4) 「不溶残分(insol)」とは、試料を希硫酸で溶解したとき、残留分(不溶部)の元の試料質量に対する比率
注5) SAC含有比率=(SO₃+Al₂O₃)/CaO
注6) 普通畑の標準的な値
注7) 土中の肥料を腐食しない目安
注8) JIS R 9011(工業用石灰)消石灰特号の規格
注9) BBIはJIS R 5211(高炉セメント)、BFSはJIS A 6206(コンクリート用高炉スラグ微粉末)の種別4000の規格
注10) 高有機質土における適当な固化工(社団法人 北海道開発技術センター、泥炭性軟弱地盤対策工指針編纂委員会監修：泥炭性軟弱地盤対策工指針、昭和63年10月)