

再生半水石膏により地盤材料に改質した底泥土の特性

底泥土 再生半水石膏 コーン指数

(株) アイコ 正会員 ○鴫田 稔
(株) アイコ 正会員 平田 貴博
(株) アイコ 正会員 小島 淳一
(一社) 泥土リサイクル協会 正会員 野口 真一
(一社) 泥土リサイクル協会 正会員 西川 美穂

1. はじめに

貯水池とは、発電、灌漑、上水道、治水等の目的で、ダム等により河川をせき止めて水を貯めた水域を指し、ダム湖とも呼ばれる。一方、ため池とは、降水量が少なく、付近に取水できる大きな河川がない地域において、堤体を築造するなどして人工的に造られた灌漑用貯水施設である。ため池は灌漑のほか、洪水調節や土砂流出防止、生物の生息・育成の場、親水空間として地域住民の憩いの場の提供など、多面的な機能を有するものもあり、貯水池の一種（小規模な貯水池）ということもできる。

ダムは、通常、100年間に貯まると想定される土砂の量を堆砂容量として設計されているが、集中豪雨など、想定を上回る降雨により多量の土砂が貯水池に流入し、有効貯水容量が低下するなど、ダム本来の機能が低下したり、失われつつあるダムが表面化してきている。一方、我が国のため池の約7割は、江戸時代以前に築造、もしくは築造年代が不明¹⁾とされ、築造後長い年月が経過しているものが多い。このため、池底には流水によって運ばれてきた土砂が堆積し、貯水容量の減少といった機能低下を引き起こすだけでなく、底樋操作に支障をきたし、緊急放流ができないことによる二次災害のリスクといった安全面の障害に加え、水質悪化やそれに伴う悪臭など、生活環境に影響を及ぼしているものも少なくない。また、築造年代が古いため池の堤体は、現行耐震基準を満足しなかったり、老朽化や経年劣化に伴う堤体の弱体化により、頻発する豪雨や大地震に対する安全性が問題視されている。

こうした施設の機能回復や安全性確保のためには改修や補強を要するが、その際には池底に堆積した底泥土を浚渫、または落水掘削により除去しなければならない。しかし、底泥土のうち、上流側は粗粒分が卓越するが、下流側は細粒分を主体としており、一般的に高含水比で流動性あるいは粘性が高いため、再生利用はもとより、取り扱いも困難なものとなっている。このような高含水比泥土は、取り扱い性を容易にしたり再資源化するために、セメントや石灰を用いた化学的安定処理が行われることがある。しかし、汎用的な改質材はアルカリ性が高く、結果、改質土もアルカリ性を呈するため、地盤材料として利用する際に制約を受ける場合が少なくない。

本報は、廃石膏ボード由来の再生半水石膏を主材とする改質材を用いて、底泥土を地盤材料として再資源化した改質土の特性について述べるものである。

2. 廃石膏ボードの現状

石膏ボードは、不燃性、防火・耐火性、遮音性、断熱性及び施工性等に優れるため、建築用内装材として多用されている。その結果、高度経済成長期に建てられた住宅が解体・更新時期を迎えていることなどにより、図-1に示すように、廃石膏ボードの排出量は今後右肩上がりに増加することが予測されている²⁾。

石膏ボードが廃材となったものを廃石膏ボードと呼び、産業廃棄物（ガラスくず、コンクリートくず及び陶磁器くず）に分類され、図-2に示すように、排出プロセスと排出時の形状などから「製造時廃材（製造系廃石膏ボード）」、「新築時廃材（新築系廃石膏ボード）」、解体時廃材（解体系廃石膏ボード）の3つに区分される³⁾。このうち、製造系廃石膏ボードは、工場内で石膏とボード紙に分離されたのち、石膏はほぼ100%リサイクルされており⁴⁾、市場に出回ることはない。また、新築系廃石膏ボードは、広域認定制度を利用した石膏ボード製造業者による回収や、現場から発生する廃石膏ボードを中間処理業者経由で再資源化施設が受け入れることにより、約96%がリサイクルされている⁵⁾。これに対し、解体系廃石膏ボードは年々排出量が増加して年間数百万トンが排出されると推計されており、石膏とボード紙の分離及び下地材や金物などの雑物の選別除去、石膏の破砕等の中間処理によって減容化や再資源化が行われているが、リサイクルに係る体制や品質管理を含めた再資源化技術、大量消費が見込める利用分野が確立されていないことなどにより、リサイクル

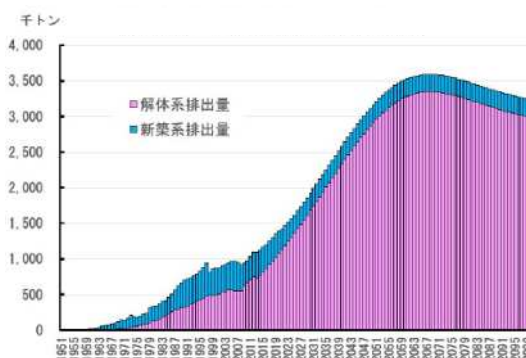
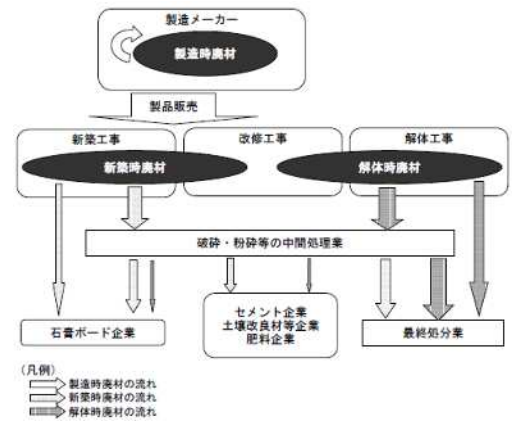


図-1 廃石膏ボードの排出量²⁾

廃石膏ボードは、工場内で石膏とボード紙に分離されたのち、石膏はほぼ100%リサイクルされており⁴⁾、市場に出回ることはない。また、新築系廃石膏ボードは、広域認定制度を利用した石膏ボード製造業者による回収や、現場から発生する廃石膏ボードを中間処理業者経由で再資源化施設が受け入れることにより、約96%がリサイクルされている⁵⁾。これに対し、解体系廃石膏ボードは年々排出量が増加して年間数百万トンが排出されると推計されており、石膏とボード紙の分離及び下地材や金物などの雑物の選別除去、石膏の破砕等の中間処理によって減容化や再資源化が行われているが、リサイクルに係る体制や品質管理を含めた再資源化技術、大量消費が見込める利用分野が確立されていないことなどにより、リサイクル

されずに最終処分される割合が高く、リサイクル率は 30%程度と推定されている⁶⁾。

なお、廃石膏ボードを埋立処分した場合、条件が揃うと、石膏ボードに含まれる有機物の分解副産物を栄養源とする硫酸塩還元菌により硫酸イオンが還元されて硫化水素ガスが発生する⁷⁾。このため、廃石膏ボードを埋立処分する場合には、紙と石膏を分離したうえで管理型最終処分場に処分することが義務付けられている⁸⁾。しかし、管理型最終処分場は安定型最終処分場と比べると施設数が少ない上に、処理コスト及び維持管理費が高く、また、残余容量も限られている。これらを受けて、廃石膏ボードの再利用技術に関する研究開発⁹⁾が進められるとともに、廃石膏ボードのリサイクルを促進するため、石膏ボードの特定建設資材への指定を要望する動きも活発化した¹⁰⁾・¹¹⁾。また、こうした実情を踏まえ、廃石膏ボードのリサイクルシステムを確立するためのガイドライン¹²⁾が策定された。



図ー2 廃石膏ボードの排出及び処理の流れ³⁾

3. 底泥土の現状

浚渫土は、排出源が港湾、河川（運河を含む）、貯水池、湖沼、ため池といった具合に多岐にわたり、それぞれの管理者が異なることもあって、建設汚泥のように、発生量、再資源化状況及び最終処分量等の動向に関する実態を把握する調査¹³⁾は行われておらず、したがって、浚渫土全体の排出量については把握されていないようである。そうした中、貯水池に関しては、国土交通省が各地方整備局、（独法）水資源機構及び各地方公共団体が管理している多目的ダムの堆砂状況を公表¹⁴⁾しており、堆砂量が堆砂容量を超過しているダムが散見することが確認できる。一方、前述のように、ため池は築造後の経過年月が経過して老朽化しているものが多く、排水施設（土砂吐ゲート）が機能しないため池では底泥土が排除できず、池底には数 m 規模の底泥土が堆積していることが想定される。しかし、ため池は、各地方農政局、地方公共団体が所有・管理しているものもあれば、地方公共団体や自然人（個人）が所有しているものを土地改良区（水土里ネット）、財産区、各種組合（管理組合、水利組合）、自然人（個人）が管理しているもの、或いは所有者が不明なものも少なくなく、複雑な管理形態がとられていることに加え、数が多いこともあり、堆積している底泥土の量を把握していないのが実態である。以前は、稲作が終わった晩秋から早春にかけての農閑期に、施設の点検・補修、底泥土除去による有効貯水量の確保と水質改善、捕獲した魚類を冬場の食料にするなどを目的として掻い掘りが行われ、除去した底泥土は農耕地の豊饒化のために客土として利用されていた。しかし、近年ではため池の所有・管理者に関する複雑な権利関係に加え、農業従事者の高齢化や営農者の離農により、掻い掘りは地域の交流行事として行われる以外は、あまり実施されることはなくなってきている。また、堤体の亀裂や水漏れなどの点検も、池の水を抜かずに堤体の後法（下流側法面）の観察等によって行うことが多い。このため、平時におけるため池底泥土の堆積状況の確認はほとんど行われておらず、底泥土の除去も不具合が顕在化しない限り実施されることはほとんどないようである。

4. 底泥改質土に求められる地盤材料としての品質と判定指標

底泥改質土を地盤材料として使用する場合、その利用用途としては、路体・路床材、埋戻材、盛土材、裏込め材、築堤材などが考えられ、用途によって求められる特性に多少相違があるが、概ね以下のとおりである。

- ①敷均しや締固め等の施工性が容易であること
- ②強度が大きく、変形や圧縮性が小さいこと
- ③透水性が低い（または排水性が良好）こと
- ④吸水による膨張性が低いこと
- ⑤雨水や地下水などによる侵食及び再泥化・細粒化が生じないこと
- ⑥生活環境保全上支障がないこと

土は特性相互に関連性があり、ある特性から別の特性を類推することが可能である。また、一般的には、所定の材料特性を満足すれば、施工仕様をコントロールすることで土構造物として要求される品質を満たすことが可能となる。これらを踏まえて、試験の簡便性と結果判定の迅速性から、建設汚泥処理土の品質区分¹⁵⁾や、発生土の土質区分¹⁶⁾はコーン指数によって判定している。そこで、本件においてもこれらの技術基準に準拠して、コーン指数を底泥改質土の品質判定指標とし、基準値は利用に際して特段の配慮を必要としない $q_c \geq 800 \text{ kN/m}^2$ （第2種処理土）とした

5. 試料土

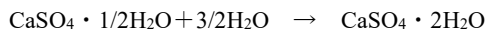
実験に使用した底泥土は、技術の汎用性を高めるため、異なる2か所から採取した。1つは、ため池改修工事のために落水干陸している山口県の農業用ため池からバックホウで採取したもの（以下、「底泥土Y」と称す。）で、もう1

つは、施設維持管理のために水位を低下させた新潟県の貯水池から泥上掘削機で採取したもの（以下、「底泥土N」と称す。）である。写真-1に各底泥土の有姿を示す。採取した底泥土は内袋付フレコンバックに詰めて愛知県の試験室に運搬し、4.75mmふるい通過試料を室内試験に供した。試料の各特性については、改質土と併せて後述する。

6. 改質材

改質材には、底泥土の地盤工学的特性の改善効果が期待でき、かつ、改質土の利用に際して制約を受けることが少ないpHが中性域（ $5.8 \leq \text{pH} \leq 8.6$ ）の石膏に着目し、廃石膏ボードの処理問題や、循環型社会の構築を踏まえて、廃石膏ボード由来の再生石膏を選定した。

石膏は硫酸カルシウム（ CaSO_4 ）を主成分とする無機鉱物で、結晶水の分子数により二水石膏（G：Gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）、半水石膏（B：Bassanite, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ）及び無水石膏（A：Anhydrite, CaSO_4 ）の3種類に大別（結晶構造を加味して細別すると7種類に分類）される。二水石膏は軟石膏ともいわれ、自然界では非常に安定しており、水とほとんど反応しない。この二水石膏を150～180℃で加熱すると結晶水全体の3/2を失って半水石膏に転化する。半水石膏は焼石膏とも呼ばれ、結晶構造の違いからα型とβ型に分類される。α型は緻密な構造で粒子密度が高く、硬化速度がβ型よりも速いことから主に医療用として使われている。一方、β型はポーラスで粒子密度がα型より小さく、石膏ボード等の建築材料として利用されている。これらの半水石膏を180℃以上で加熱すると結晶水全てが消失して無水石膏に転化する。半水石膏に加水すると、(1)式に示すように再び二水石膏に転化するが、その際、水和反応に伴い、結晶が絡み合っで短時間で硬化するという特性を有する。



また、(1)式からも明らかなように、分子量の計算から、半水石膏1,000gは186gの水分を結晶水として取り込んで1,186gの二水石膏を生成するため、湿潤土と混練すると含水比の低減効果が得られる。その結果、図-3に示すように、コンシステンシー指数 I_c が1に、液性指数 I_L がゼロにそれぞれ近づくことで、土のコンシステンシー特性が改善される。そこで、再生半水石膏を改質材の主材として採択した。なお、半水石膏の圧縮強度は、セメント同様 W/B （ W ：単位水量 [kg]、 B ：単位半水石膏質量 [kg]）に依存し、 W/B が小さいほど圧縮強さが大きくなるが、 W/B がある値を下回ると水和反応に必要な水が不足するため強度が小さくなり、更に小さくなると、練混ぜ自体が困難となる。図-4に再生半水石膏のペースト強度（材齢3日）を示す。最大圧縮強さは $W/B=50\%$ の時 $q_c \approx 3,500 \text{ kN/m}^2$ で、セメントペースト（材齢28日）と比べると概ね1/20程度である。また、二水石膏の溶解度は $0.2 \text{ g}/100 \text{ gH}_2\text{O}$ （0～100℃）¹⁷⁾ と決して大きくはないが、水に濡れると徐々に溶けて改質土が再泥化することが指摘されている¹⁸⁾。そこで、改質土の品質・性能を安定させるための安定材や、品質・性能を向上させるための助材の併用を検討し、表-1に示す安定材及び助材を選定した。

表-2に改質材の化学的性質を示す。特徴的なことは、一般に石膏のpHは中性域といわれるが、アルカリ性を示したことである。

再生半水石膏の水分等は、JIS R 9101（石膏の化学分析方法）に基づいて測定した。240～260℃で恒量となるまで乾燥させて求めた化合水の含有率は5.8%で、理論値である6.2%をやや下回った。これは、試験に供した再生半水石膏中には



(a) 底泥土 Y



(b) 底泥土 N

写真-1 底泥土有姿

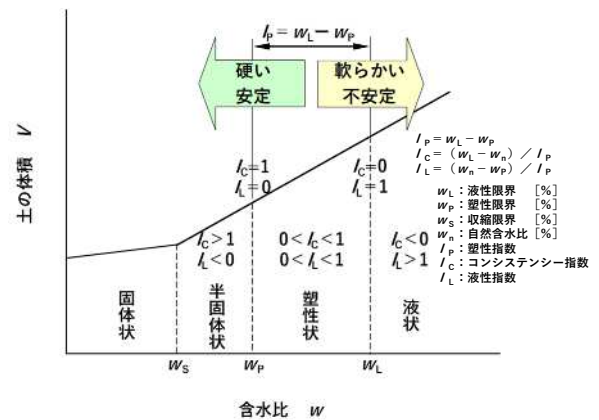


図-3 土のコンシステンシー限界

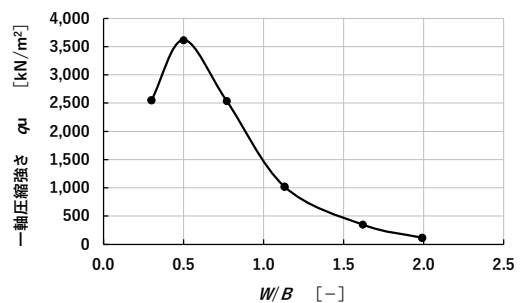


図-4 再生半水石膏ペースト強度

無水石膏やボード紙などの夾雑物が混入している可能性を示唆しているが、粉末X線回折法による組成分析の結果、試験に供した再生石膏の組成は二水：半水：無水=0：75：25で、既往の研究で使用した再生半水石膏^{19), 20)}とほぼ同じ組成を示したことから、再生半水石膏の製造・保管及び純度は適切であるといえる。

表-3は、JLT-46（平成3年度環境庁告示第46号）に基づいて行った改質材の溶出試験結果を示す。改質材単味には土壌環境基準は適用されないが、再生半水石膏のふっ素と、高炉セメントB種の六価クロムが基準値を超過した。

7. 室内配合試験

室内配合試験は、図-5に示す組成の改質材を、底泥土1m³あたり100~300kg添加して実施した。底泥土と改質材を混合して作製した改質土は、ポリ袋に入れ、改質材の強度発現と石膏のエトリンナイト析出に伴う結晶生成圧による膨張の収束²¹⁾を考慮して6日間養生し、7日目に解砕して、技術基準²²⁾に準拠してコーン指数を測定した。

図-6は、それぞれの底泥土に関する改質材総添加量 p とコーン指数 q_c の関係を示す。いずれの底泥土に

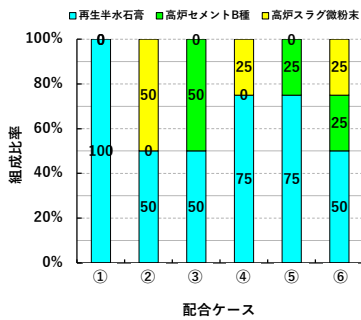
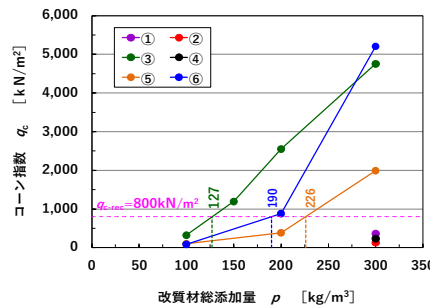
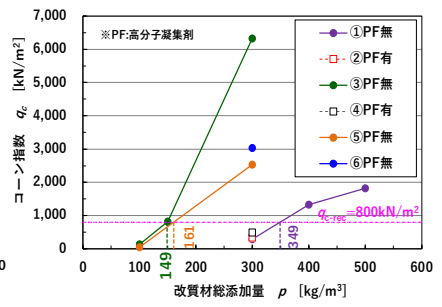


図-5 改質材の組成



(a) 底泥土Y



(b) 底泥土N

図-6 改質材添加量とコーン指数の関係

おいても、高炉セメントB種を添加しない配合①、②及び④は $p=300\text{kg/m}^3$ 添加しても目標とするコーン指数は得られなかった。一方、高炉セメントB種を添加した配合③、⑤及び⑥は所定の品質を満足したため、添加量が最少となる配合③を採択し、底泥土Yについては $p=130\text{kg/m}^3$ 、底泥土Nについては $p=150\text{kg/m}^3$ を設計配合とした。

8. 改質土の特性

(1) 物理特性

表-4は、各底泥土及び改質土の物理特性を示す。改質材の添加により固形分が増加したこと、再生半水石膏及び高炉セメントB種の化学的吸水作用により含水比が低下し、コンシステンシー特性が改善されたことが分かる。また、粒度に関して、土粒子が団粒化（砂質土化）したことが分かる。

(2) 化学特性

表-5は、各底泥土及び改質土の化学特性を示す。底泥土YのpHは9.1とアルカリ性を示したが、これは

表-1 底泥土の改質に使用した安定材及び助材

区分	主材	安定材	助材
品目	再生半水石膏 (B)	高炉セメントB種 (BB)	高炉スラグ微粉末 (BFS)
目的・効果	● 固化・硬化 (水和反応) ● 含水比低下 (solid分増加) ● 吸水作用 (化合水取込み)	● 固化・硬化 (水和反応) ● 含水比低下 (solid分増加) ● 吸水作用 (化合水取込み) ● 重金属等の固定化 (溶出抑制)	● 固化・硬化 (潜在水硬性) ● 含水比低下 (solid分増加)

表-2 改質材の化学的性質

区分	項目	単位	再生半水石膏粉 (B)	高炉セメントB種 (BB)	高炉スラグ微粉末 (BFS)
水分等	水分の付着率	%	<0.1	—	—
	化合水の含有率	%	5.8	—	—
水素イオン濃度	pH	—	9.3	12.4	11.2
水溶性成分等	ナトリウム (Na)	mg/g	0.16	0.28	0.018
	カリウム (K)	mg/g	0.099	1.2	0.24
	カルシウム (Ca)	mg/g	6.5	11	6.8
	マグネシウム (Mg)	mg/g	0.079	<0.001	0.004
	塩化物イオン	mg/g	0.049	0.088	0.027
	硫化物イオン	mg/g	15	9	14

表-3 改質材の重金属等溶出量

項目	単位	基準値	再生半水石膏粉 (B)	高炉セメントB種 (BB)	高炉スラグ微粉末 (BFS)
カドミウム	mg/L	(≤ 0.01)※	0.008	<0.001	<0.001
鉛	mg/L	(≤ 0.01)	<0.005	<0.005	<0.005
六価クロム	mg/L	(≤ 0.05)	<0.01	0.44	<0.01
ひ素	mg/L	(≤ 0.01)	0.005	<0.005	<0.005
総水銀	mg/L	(≤ 0.0005)	<0.0005	<0.0005	<0.0005
セレン	mg/L	(≤ 0.01)	0.008	0.006	0.002
ふっ素	mg/L	(≤ 0.8)	5.5	0.05	0.50
ほう素	mg/L	(≤ 1)	0.07	<0.02	0.04

※カドミウムは2021年4月1日より、基準値が0.003mg/Lに強化された（本分析は2020年10~11月に実施）。

表-4 底泥土及び改質土の物理特性

区分	項目	試験値					
		底泥土Y (原泥土Y)	改質土Y (配合③)	底泥土N (原泥土N)	改質土N (配合③)		
改質材組成 B:BB:BFS		—	50:50:0	—	50:50:0		
改質材添加量		p	100	—	150		
一般	土粒子の密度	ρ_s	2.620	2.731	2.699	2.716	
	自然含水比	w_n	111.1	88.0	56.7	43.2	
	粒度組成	繰分 (2~75mm)	%	4.3	21.2	0.4	6.4
		砂分 (0.075~2mm)	%	14.7	44.2	7.8	43.1
		シルト分 (0.005~0.075mm)	%	36.1	26.0	60.3	37.4
		粘土分 (0.005mm未満)	%	44.9	8.6	31.5	13.1
		最大粒径	D_{max}	mm	4.8	4.8	4.8
	細粒分含有率	F_c (0.075mm未満)	%	81.0	34.6	91.8	50.5
	コンシステンシー	液性限界	w_L	124.0	96.4	48.8	53.7
		塑性限界	w_P	46.4	71.1	34.3	37.6
塑性指数		I_P	—	77.6	25.3	14.5	16.1
液性指数		I_L	—	0.17	0.33	-0.54	0.65
液性指数		I_L	—	0.83	0.67	1.54	0.35
水理	透水係数	k	m/s	2.23×10^{-6}	9.73×10^{-8}	1.15×10^{-7}	7.95×10^{-8}
分類	地盤材料の分類名	—	粘土 (高液性限界)	細粒分質 硬質土	シルト (低液性限界)	シルト (高液性限界)	
	分類記号	—	(CH)	(SFG)	(ML)	(MH)	

水溶性成分の1つであるカルシウム濃度が比較的高いことが原因と考えられる。また、いずれの改質土もアルカリ性の改質材を添加したため、改質土のpHはアルカリ性を示した。なお、両改質土とも石膏を改質主材としているため、硫化物イオン濃度(SiO²⁻)が高くなり、コンクリートの化学的劣化環境の基準とされる0.2%^{2,3)}(=2mg/g)を超過した。

(3) 安定化特性

安定化試験は、底泥土に改質材を $p=100\text{kg/m}^3$ (底泥土Y) または 150kg/m^3 (底泥土N) 添加・混合して製造した改質土をポリ袋に入れて6日間養生し、7日目に解砕して試験に供した。突固めによる土の締固め試験はJIS A 1210に準拠し、底泥土はA-a法、改質土はA-c法で行った。図-7は、底泥土と改質土の締固め特性を示す。いずれの底泥土も改質により最大乾燥密度 $\rho_{d-\max}$ が減少、最適含水比 w_{opt} が増加し、締固め曲線は右下にシフトして形状がなだらかになった。 $\rho_{d-\max}$ の減少に関して、改質土を緻密で重厚な土構造物を築造する材料として用いる場合には議論の余地があるが、構造物に対する上載荷重や側圧を軽減できることから、合理的設計への反映が期待される。また、 w_{opt} が増加したことで、従来は締固めが困難だった含水比でも締固めが可能になるとともに、含水比の広い範囲で所定の締固め度を得ることができ、扱いやすい地盤材料となったことを示している。

表-5 底泥土及び改質土の化学特性

項目	単位	底泥土Y (原泥Y)	改質土Y (配合③)	底泥土N (原泥N)	改質土N (配合③)	
土懸濁液のpH	—	9.1	11.3	6.9	11.0	
土懸濁液の電気伝導率	mS/m	26.8	211	8.5	140.6	
土の水溶性成分	ナトリウム	mg/g	0.023	0.011	0.009	0.033
	カリウム	mg/g	0.034	0.060	0.020	0.045
	カルシウム	mg/g	0.530	6.7	0.020	6.7
	マグネシウム	mg/g	0.012	0.002	0.006	0.004
	塩化物イオン	mg/g	0.011	0.027	0.004	0.008
	硫化物イオン	mg/g	0.072	8.3	0.039	12

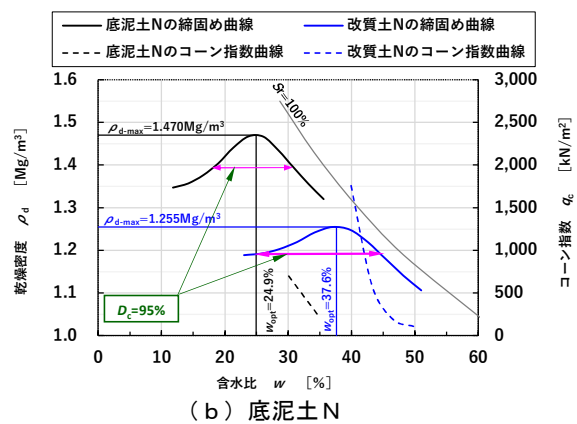
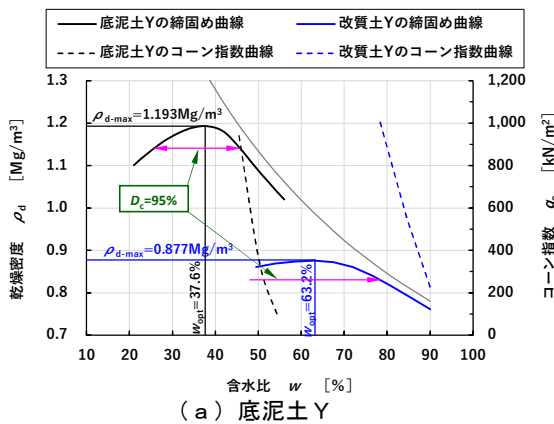


図-7 底泥土及び改質土の締固め曲線

図-8は、最適含水比に調整した試料を用いて、JIS A 1211 (CBR 試験) に準拠して行った底泥土と改質土の荷重と貫入量の関係(設計 CBR)を示す。改質土の方が含水比が高く、乾燥密度が小さいにもかかわらず、設計 CBR は改質土の方が底泥土より大きな値を示し、底泥土Yは約3.1倍、底泥土Nは約1.6倍となっている。

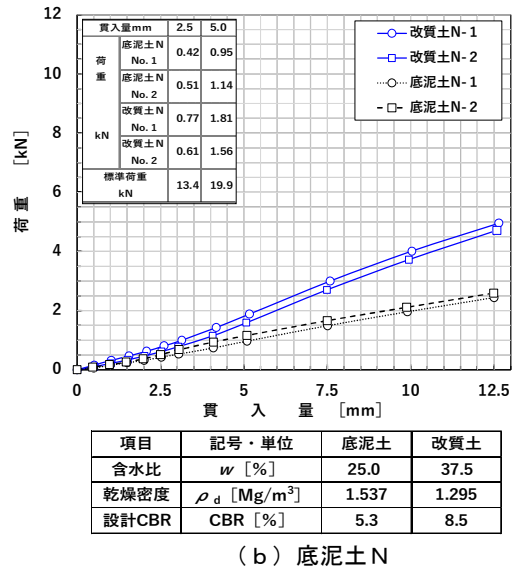
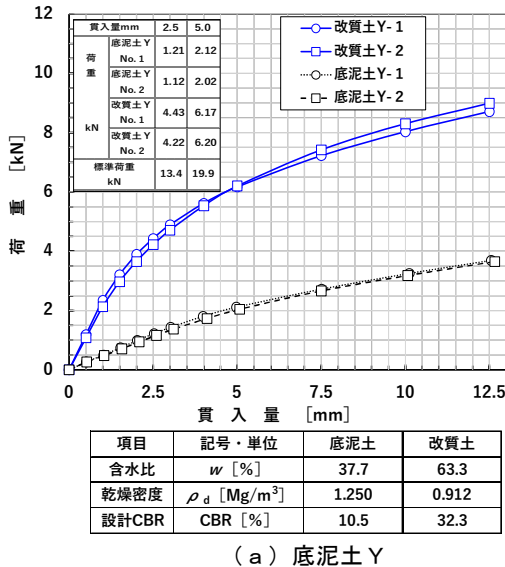


図-8 底泥土及び改質土の荷重～貫入量曲線

(4) 強度・変形特性

改質土の強度・変形特性は、一軸圧縮強さを調べた。試験に用いた試料は安定化試験に用いたものと同じで、所定材齢養生したのち含水比を最適含水比に調整し、セメント協会標準試験方法²⁴⁾に基づいて供試体を作製、JIS A 1216 (土の一軸圧縮試験方法) に準拠して圧縮試験を行った。

図-9は、底泥土と改質土の応力とひずみの関係（一軸圧縮強さ）を示す。改質土の方が含水比が高く、乾燥密度が小さいにもかかわらず、改質土の一軸圧縮強さ q_u は底泥土と比較して、底泥土Yが約1.1倍、底泥土Nが約1.4倍、同様に、変形係数 E_{50} は、底泥土Yが約1.9倍、底泥土Nが約2.7倍となった。

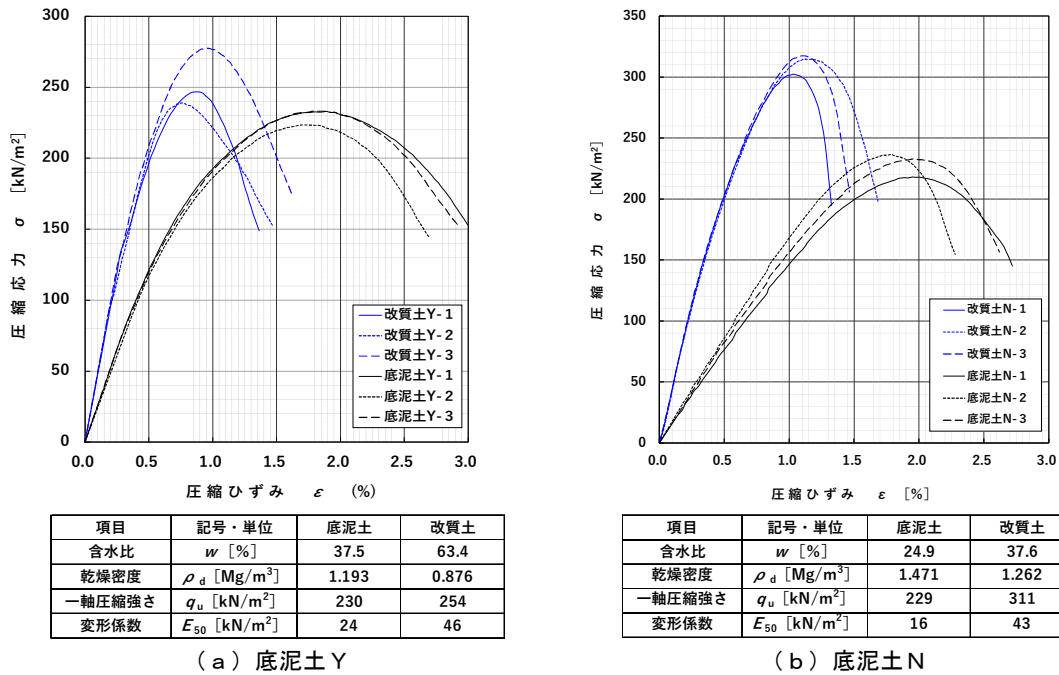


図-9 底泥土及び改質土の応力～ひずみ曲線

(5) 環境安全性

表-6は、JLT-46（平成3年度環境庁告示第46号）に基づいて行った底泥土及び改質土の溶出試験結果を示す。改質材単味では再生半水石膏のふっ素と高炉セメントB種の六価クロムが基準値を超過していたが、改質土に関してはいずれも基準値以内に収まっており、高炉セメントB種による重金属等の固定化作用（不溶化効果）や、土壌の吸着作用が機能していると思われる。

表-6 底泥土及び改質土の重金属等溶出量

項目	単位	基準値	底泥土Y (原泥)	改質土Y (配合③)	底泥土N (原泥)	改質土N (配合③)
カドミウム	mg/L	≤ 0.01	<0.001	<0.001	—	—
		≤ 0.003	—	—	<0.0003	0.0003
鉛	mg/L	≤ 0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
六価クロム	mg/L	≤ 0.05	<0.01	0.02	<0.01	0.03
ひ素	mg/L	≤ 0.01	0.005	0.007	<0.005	0.008
総水銀	mg/L	≤ 0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
セレン	mg/L	≤ 0.01	<0.002	<0.002	<0.002	0.002
ふっ素	mg/L	≤ 0.8	0.25	0.47	<0.05	0.30
ほう素	mg/L	≤ 1	<0.02	0.04	0.02	0.05

※カドミウムは2021年4月1日より基準値が0.003mg/Lに強化された（底泥土Yの分析は2020年12月に、底泥土Nの分析は2021年9～10月にそれぞれ実施）。

9. 実証試験

実証試験は、室内試験で得られた知見を基に、現地において実機を使用し、実際に底泥土を処理して、実現可能性と実機処理土（改質土）が所定品質を満足していることを確認することを目的として行った。目標品質は、配合試験同様第2種処理土（ $q_c \geq 800 \text{ kN/m}^2$ ）で、品質保証材齢は7日とした。なお、現地における処理直後の適否判定として、目視によりコンシステンシーを確認した。

実証試験は、建設汚泥を地盤材料として再資源化することを目的に開発されたイーキューブシステム（E³システム）²⁵⁾の処理機を使用して行った。地盤改良等における現場配合は、室内と現場の条件の違いを考慮して割増係数の概念が導入されるが、E³システムでは、過去の実績から室内配合試験結果と、現地での実機による結果に大差がなく、通常は割増係数を考慮しないが、今回は、室内配合試験と実証試験の間があき、その間底泥土の性状変化等が想定されたことから、現場配合は設計配合の30%増し²⁶⁾として実施した。写真-2は、実証試験状況を示す。

写真-3は、底泥土と実機処理土（改質土）の有姿を示す。粘性の高い底泥土Y及び流動性が高い底泥土Nのコンシステンシーが改善され、団粒化したことが見て取れる。

図-10は、底泥土と室内配合試験及び実機で処理した改質土の締固め特性並びにコーン指数を示す。実機処理土の品質目標は第2種処理土（ $q_c \geq 800 \text{ kN/m}^2$ ）としたが、実測値は目標9～10倍の値を示した。これは、実証試験で使用した底泥土の



(a) 底泥土 Y



(b) 底泥土 N

写真-2 実証試験状況

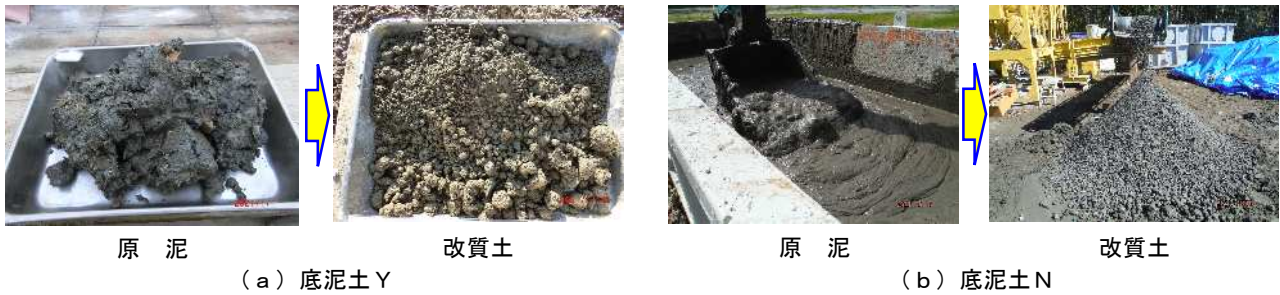


写真-3 底泥土と実機改質土

含水比が配合試験時より低下（底泥土Y： $w_0=111.1\% \Rightarrow w'=71.4\%$ ，底泥土N： $w_0=56.7\% \Rightarrow w'=49.7\%$ ）したこと，改質材添加量が配合試験時より多い（底泥土Y： $p_0=100\text{kg/m}^3 \Rightarrow p'=180\text{kg/m}^3$ ，底泥土N： $p_0=150\text{kg/m}^3 \Rightarrow p'=200\text{kg/m}^3$ ）ことによるものと考えられる。

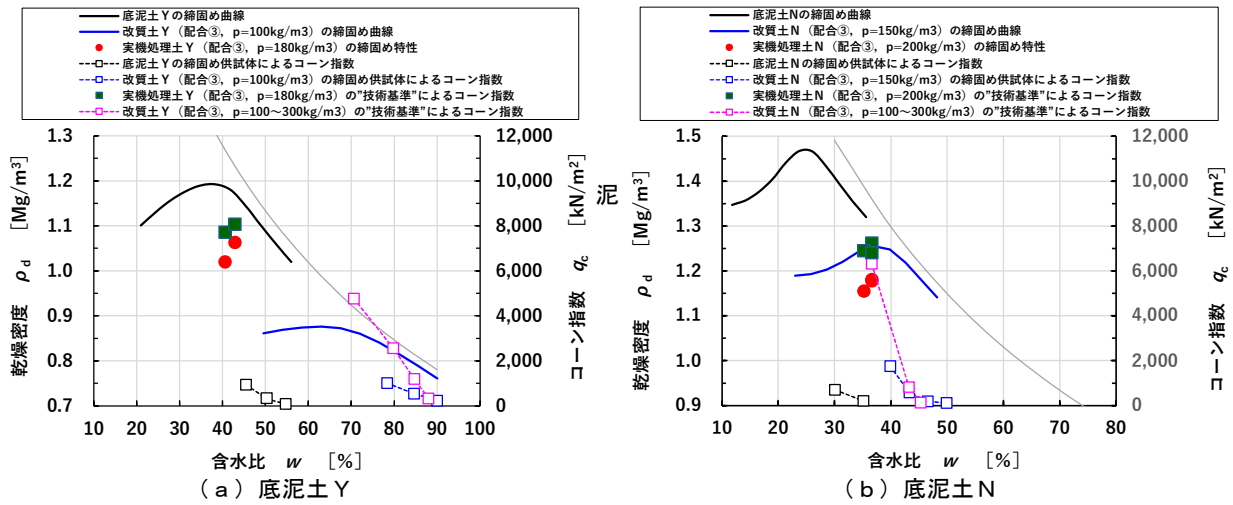


図-10 実機処理土（改質土）のコーン指数

10. 機能監視

機能監視は，実証試験で製造した改質土（実機処理土）を使用し，道路路体（幅1.0m，長さ3.0m，厚さ1.0m）を模して造成した観察ヤードにおいて，簡易動的コーン貫入試験方法（JGS 1433）に基づき，地盤の貫入抵抗の経時変化をモニタリングして，改質土の短・中期的安定性を評価した．1回の測定は3か所実施し，その平均値を N_d 値とした．

図-11は，動的コーン貫入抵抗の深さ方向の経時分布の変化を示す．測点，深度，時期によってばらつきが見受けられるが，2か月弱の観察期間中における貫入抵抗の大きな低下はなく，改質土は製造時の品質を維持しているものと推察される．

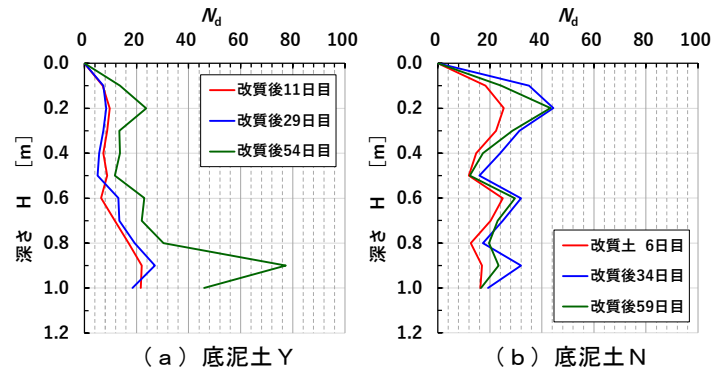


図-11 模擬道路路体の動的コーン貫入抵抗

11. まとめ

廃石膏ボード由来の再生半水石膏を用いて，底泥土を再資源化した改質土の特性について検討した．その結果，石膏単味では所定の品質が得られないが，安定材及び助材を併用することで地盤材料として利用可能な品質に改質できることを確認した．また，実証試験の結果，E³処理機を用いて所定品質の改質土が得られることを確認した．さらに，2か月弱の観察期間ではあるが，改質土の品質は維持されていることも確認できた．しかし一方で，中性域の改質土を目指していたが，高炉セメントB種を安定材として使用したことに加え，底泥土及び再生石膏がアルカリ性を示したこともあり，改質土はアルカリ性を呈した．なお，改質土の硫酸イオン濃度がコンクリートの化学的劣化環境の基準値を超過したことに関しては， $W/C=50\%$ で練り上げたモルタル供試体を，硫酸イオン濃度15mg/g（=1.5%）の試験液中に90週浸漬しても硫酸塩劣化が認められないことを確認している^{27), 28)}．

謝辞

本研究は、農林水産省の補助（官民連携新技術研究開発事業，2農振第2166号，3農振第2049号）を受けて実施したものである。

【参考文献】

- 1) 農林水産省：ため池の歴史，入手先〈https://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/attach/pdf/index-116.pdf〉（参照 2024年8月8日）
- 2) 国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター：再生石膏粉の有効利用ガイドライン（第一版），令和元年5月
- 3) 環境省，廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する検討委員会：廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する報告書，平成14年12月
- 4) 前掲3)
- 5) 一般社団法人石膏ボード工業会：石膏ボードハンドブック，第5章 環境編，平成28年4月
- 6) 前掲5)
- 7) 独立行政法人国立環境研究所，井上雄三編：安定型最終処分場における高濃度硫化水素発生機構の解明ならびにその環境汚染防止対策に関する研究，国立環境研究所研究報告，第188号，平成17年3月
- 8) 環境省：廃石膏ボードから付着している紙を除去したものの取扱いについて（通知），環廃産発第060601001号，平成18年6月1日
- 9) 前掲3)
- 10) 公益社団法人全国産業廃棄物連合会：建設リサイクル法等に関する制度の見直しについての要望書，平成29年9月25日，入手先〈https://www.zensanpairen.or.jp/wp/wp-content/themes/sanpai/assets/pdf/activities/demand_20170925_01.pdf〉（参照 2024年8月8日）
- 11) 九都県市首脳会議：建設リサイクル法等に関する制度の見直しについての要望書，平成30年12月6日，入手先〈<https://www.re-square.jp/report/201805.pdf>〉（参照 2024年8月8日）
- 12) 前掲2)
- 13) 国土交通省：建設副産物実態調査，入手先〈https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/d02status/index_0201status.htm〉（参照 2024年8月13日）
- 14) 国土交通省：ダムの堆砂状況，入手先〈https://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/dam/taisa/index.html〉（参照 2024年8月8日）
- 15) 国土交通省：建設汚泥処理土利用技術基準，平成18年6月12日
- 16) 国土交通省：発生土利用基準について，平成18年8月10日
- 17) 瀬戸山克己，高橋聡：セッコウの結晶系制御と結晶形態制御，*Inorganic Materials*, Vol.2, No.259, pp.498-505, 1995
- 18) 伊藤恵輔，佐藤研一，押方利郎：再生半水石膏により改良された土質材料の基本特性の検討，第45回地盤工学研究発表会論文集，247, pp.493-494, 2010年8月
- 19) 亀井健史，蓬萊秀人：高炉セメントB種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発，地盤工学ジャーナル，Vol.4, No.1, pp91-98, 2009
- 20) 亀井健史，小川靖弘，志比利秀：半水石膏と石炭灰を添加したセメント安定処理土の強度変形特性とその内部構造－ハイブリッド型地盤材料の創出－，地盤工学ジャーナル，Vol.5, No.1, pp.35-43, 2009
- 21) 重松宏明，西澤誠，藪下諒二，吉村康平，田中均，辻要：廃石膏ボード由来の半水石膏を混合した石灰安定処理土の強度発現特性，土木学会論文集C（地圏工学），Vol.69, No.2, 272-284, 2013
- 22) 前掲15)
- 23) 公益社団法人土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕，p.168, 2017.
- 24) 一般社団法人セメント協会：セメント協会標準試験方法，JCAS L-01：2006，セメント系固化材による改良体の強さ試験方法，2000年3月
- 25) 一般社団法人泥土リサイクル協会：イーキューブシステムとは，入手先〈<http://www.deido-recycling.jp/E3system/E3system01.htm>〉（参照 2024年8月9日）
- 26) 社団法人日本道路協会：舗装施工便覧（平成18年版），平成18年2月
- 27) 鴫田稔，平田貴博，小島淳一，野口真一，西川美穂：再生半水石膏で改質したため池底泥土によるコンクリートの硫酸塩劣化，第59回地盤工学研究発表会論文集，23-6-3-01, 2024
- 28) 鴫田稔，平田貴博，小島淳一，野口真一，西川美穂：再生半水石膏を用いて改質した貯水池底泥土によるコンクリートの硫酸塩劣化，令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会概要集，III-435, 2024（投稿中）