

脱水・固化処理技術による湖沼浚渫土の地盤材料への有効利用 —脱水処理土(脱水ケーキ)の高品質化技術の開発—

Effective Use to the Ground Material of the Dredging Soil by Dewatering and Solidification Treatment

日高 厚*1 川西 順次*1 小山 孝*2
Atsushi Hidaka Junji Kawanishi Sho Ooyama
永塚 典幸*3 植島 生八*3
Noriyuki Nagatsuka Ikuya Ueshima

要旨

湖沼等の閉鎖性水域における水質改善や機能回復を目的として、浚渫等による底質の除去および脱水処理が行われているが、処理過程で大量に作製される脱水ケーキについては、再利用（リサイクル）や処分先が大きな課題となる。

筆者らは、湖沼浚渫土の脱水処理工事において大量に発生する脱水ケーキの有効利用を推進するため、重金属類汚染土壌の固化・不溶化で適用を進めているマグネシウム系固化材をフィルタープレス等の脱水機を用いた脱水処理に適用することで、高品質でかつ環境への負荷が低い脱水ケーキを、脱水処理工程のみで効率的に作製できる「脱水・固化処理技術」を開発した。

本報告では、脱水・固化処理技術の室内脱水実験および現場実証実験を行い、実工事における技術の適用性（脱水性、濾水性状等）や、作製された脱水ケーキの品質（強度等）、さらに実際のリサイクル材料（地盤材料）としての機能性（転圧締固め特性、ワーカビリティ等）、品質の長期安定性の検討を行った結果について紹介する。

キーワード：浚渫土 脱水ケーキ リサイクル 脱水処理 固化処理

1. はじめに

湖沼等の閉鎖性水域において、水質改善や底質の除去による機能回復、および底質等に含まれる富栄養化物質を除去するために浚渫による底質等の除去が行われる。除去された浚渫土は、フィルタープレス等の脱水機を用いた脱水処理が行われ脱水ケーキとして減容化されるが、大量に作製される脱水ケーキについては、再利用（リサイクル）や処分先が大きな課題となる。

脱水ケーキの再利用や処分方法としては、地盤材料としての再利用や底泥覆砂代替などの湖底還元が考えられているが、脱水ケーキは細粒分が主体であることや、脱水処理されたとはいえ依然として高含水比（概ね含水比が80%以上）であることから品質が非常に不安定である。そのため、乾湿繰り返しや吸水等によって強度低下や再泥化によるリサイクル材料としての機能不足が生じることや、リンや窒素の再溶出が懸念され、再利用先が限定されてしまうのが実状である。

そこで筆者らは、脱水ケーキの再利用先のさらなる拡大を目指し、有効利用を推進するため、脱水ケーキの高品質化手法の開発に取り組んだ結果、高品質でかつ環境への負荷が低い脱水ケーキを、脱水処理工程のみで効率的に作製

できる「脱水・固化処理技術」を開発した。

本報告では、脱水・固化処理技術の室内脱水実験による検討および現場実証実験を行った事例について紹介するとともに、浚渫土の有効利用の観点から、本技術の有効性について述べる。

2. 脱水・固化処理技術の概要

一般的に脱水ケーキの高品質化手法としては、セメントや石灰等の固化材を添加・混合（脱水処理後の改良）する固化処理方法が用いられているが、①改良工程が増える、②均一な混合が困難なため改良後の品質にばらつきが生じる、③改良土が高アルカリになり植生への影響が懸念される等の問題がある。

これに対し、今回開発した脱水・固化処理技術は、浚渫土を凝集処理した濃縮汚泥に対し、写真1に示すマグネシウム系固化材を脱水処理の前に添加することで、上述した問題点の解決を可能とする高品質化手法である。脱水・固化処理技術の概要図を図1に示す。

マグネシウム系固化材は、酸化マグネシウム（MgO）を主成分とし、低アルカリで六価クロム等の重金属類を含まない特殊固化材で、フィルタープレス等の脱水機に使用して

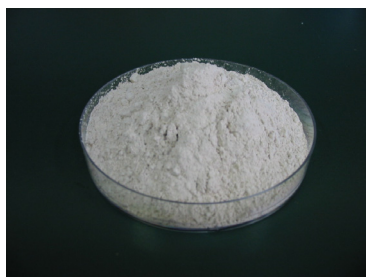


写真1 マグネシウム系固化材

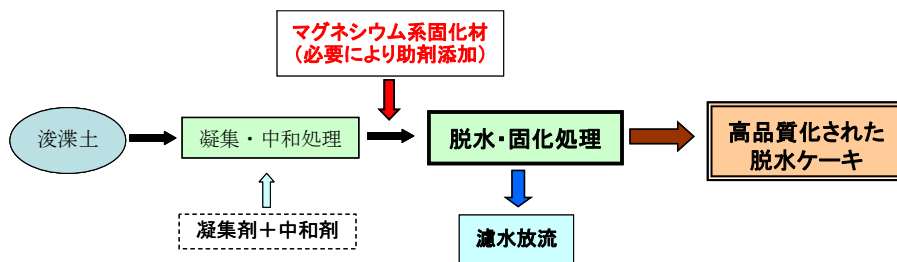


図1 マグネシウム系固化材を用いた脱水・固化技術処理概要図

も、配管やポンプ等の閉塞や濾布の目詰まり等の悪影響をもたらすことがない（セメント等の固化材は影響があり適用困難）ため、固化材の脱水処理前の添加が可能である。これにより、脱水処理と固化処理を一連の脱水処理工程のみで行う脱水・固化処理が可能となり、工程が増えることがなく、また濃縮汚泥と固化材の均一な混合により脱水ケーキの品質にばらつきが生じず、濾水や脱水ケーキへのアルカリの影響も少ない高品質化手法の開発が実現できた。

3. 室内脱水実験事例

3.1 実験概要

マグネシウム系固化材を用いた脱水・固化処理技術について、脱水性や脱水ケーキの強度等についてその適用効果を確認し、マグネシウム系固化材を添加しない場合（従来の脱水処理を想定）と比較することにより、室内レベルにおける本技術の適用性を評価することを目的とし、実際に浚渫による脱水処理工事を行っている湖沼の浚渫土（以下、原泥水と記す）を用い、マグネシウム系固化材の添加量をパラメータとした室内脱水試験機（ミニフィルタープレス）による室内脱水実験を行った。室内脱水試験機を写真2に示す。また、実験に用いた原泥水の性状を表1に示す。なお、原泥水については実工事における凝集処理前の泥水の状態（浚渫土を土砂分離機により1次処理した状態）と同条件にするため、あらかじめ礫・砂分およびゴミ等を除去し、粒径0.075mm以下に調整して用いることとした。



写真2 室内脱水試験機

表1 原泥水（調整後）の性状

項目	物性
泥水比重 (g/cm ³)	1.060
含水比 (含水率) (%)	974.8 (90.7)
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.458
強熱減量 (%)	18.5
pH	7.0

3.2 実験方法

実験用泥水の配合を表2に示す。配合は、現状の脱水処理工事の配合として、原泥水に対し凝集剤および中和剤としてPAC（ポリ塩化アルミニウム）および消石灰を、泥水中の乾土量に対してそれぞれ10.0wt%、2.0wt%添加した場合（配合①）、および現状の配合にマグネシウム系固化材を3.0、5.0、7.5、10.0 wt%添加する場合（配合②～⑤）の計5ケースとした。

表2 実験用泥水の配合

配合No	PAC (乾土あたりwt%)	消石灰 (乾土あたりwt%)	Mg系固化材 (乾土あたりwt%)
①	10.0	2.0	0
②			3.0
③			5.0
④			7.5
⑤			10.0

室内実験では、配合ごとにあらかじめ計量された原泥水に対し、所定量のPACおよび消石灰を添加・混合し、凝集・中和処理を行った後、マグネシウム系固化材を所定量を添加・混合して実験用泥水を作製し、脱水試験および強度試験を行った。実験フローを図2に示す。脱水試験および強度試験方法の詳細については以下に示す。

3.2.1 脱水試験

作製した実験用泥水を用いて室内脱水機により脱水処理を行い、脱水処理における処理時間および処理量について、また、脱水処理により生じた濾水の性状（pH）、脱水処理直後の脱水ケーキの性状（含水比、コーン指数）について測

定し、脱水処理における本技術の適用性について評価を行った。脱水処理の条件としては、打込み圧を 1.5MPa とし、脱水時間は、脱水機起動時を脱水開始とし、濾過水量がほぼ出なくなった時点まで脱水の完了と判断した。

3.2.2 強度試験

脱水試験により作製された脱水ケーキを用いて、脱水ケーキの強度（一軸圧縮強さ、コーン指数、CBR）、および浸水状態における脱水ケーキの安定性（水中養生後の一軸圧縮強さの強度変化）を測定し、脱水ケーキの有効利用における本技術の適用性について評価を行った。一軸圧縮試験は、セメント系固化材による安定処理土の試験方法（セメント協会）に準じて供試体を作製し、気中養生用の供試体は 20℃の恒温室内で材令 28 日まで密封養生し、試験を行った。また水中養生用の供試体は、材令 7 日まで気中養生した後、恒温室内の水槽内で 21 日間水中養生し、材令 28 日（気中 7 日+水中 21 日）で試験を行った。コーン試験、CBR 試験については、供試体を作製後、20℃の恒温室内で材令 28 日まで密封養生し、それぞれの試験方法に基づき試験を行った。

3.3 実験結果

3.3.1 脱水試験

脱水試験結果について表 3 にまとめて示す。またマグネシウム系固化材の添加量と脱水処理直後の脱水ケーキ性状（含水比、コーン指数）の関係を図 3 に示す。

試験結果から、まず脱水性について比較すると、マグネシウム系固化材を添加しない配合①が脱水処理完了までの時間が 60 分であったのに対し、マグネシウム系固化材を添加した配合②～⑤は、脱水処理完了までの時間が 40 分であった。この結果から、本技術により脱水処理にかかる時間が大幅に短縮され、時間あたりの処理量が約 1.5 倍程度まで向上することが確認できた。

次に脱水処理直後の脱水ケーキ性状を比較すると、マグネシウム系固化材の添加量の増加に伴い、脱水ケーキの含

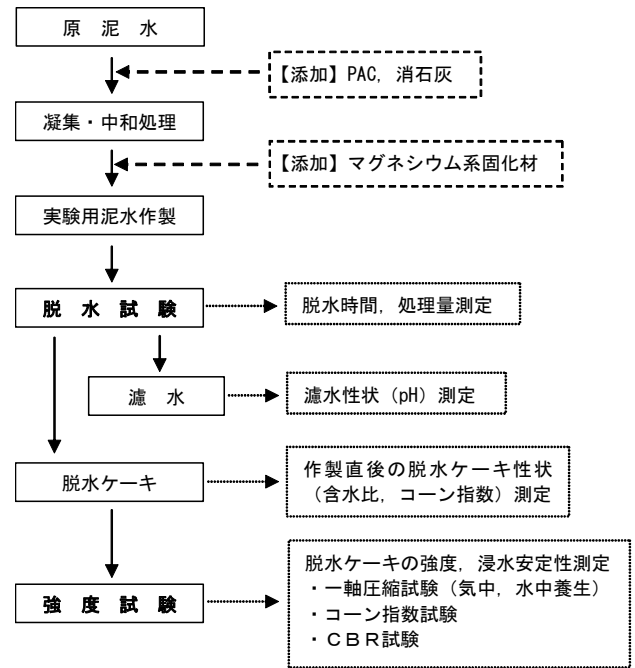


図 2 室内脱水実験フロー

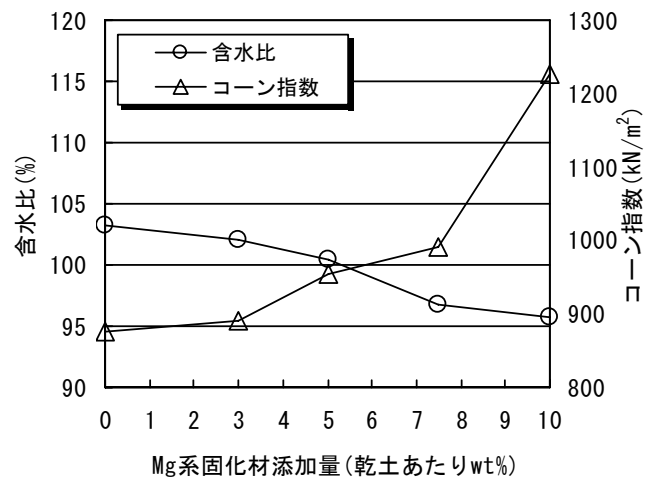


図 3 固化材添加量と脱水ケーキ性状の関係

表 3 脱水試験結果

配合 No	Mg系固化材添加量 (wt%)	脱水圧力 (MPa)	脱水時間 (分)	泥水処理量 (kg)	時間当たり処理量 (kg/h)	泥水性状 (pH)	濾水性状 (pH)	脱水ケーキ性状 (脱水処理直後)	
								含水比 (%)	コーン指数 (kN/m ²)
①	0.0	1.5	60	10.80	10.80	8.4	8.1	103.3	875
②	3.0		40	10.11	15.16	8.8	8.6	102.0	890
③	5.0		40	10.20	15.30	9.1	8.7	100.4	954
④	7.5		40	10.27	15.41	9.4	9.0	96.7	990
⑤	10.0		40	10.38	15.57	9.5	9.3	95.7	1226

水比が低下するとともに、脱水ケーキのコーン指数が増加することが確認できた。特にコーン指数については、添加量が 10.0% の場合に大きく上昇することが確認できた。

濾水の性状 (pH) について比較すると、マグネシウム系固化材を添加すると、濾水がややアルカリ性を示すことが確認できた。しかし pH10 以下の弱アルカリ性の範囲であり、通常の脱水処理工事における中和処理等により十分に対応可能な pH であると考えられる。

3.3.2 強度試験

強度試験結果について表 4 にまとめて示す。また各強度試験結果 (一軸圧縮強さ、コーン指数、CBR 値) について、配合①の値を基準とした場合の相対比 (配合①の値に対する配合②~⑤の値の比率) で比較したグラフを図 4 に示す。試験結果から、マグネシウム系固化材を添加しない配合①と比較して、マグネシウム系固化材を添加した配合②~⑤では、一軸圧縮強さ (気中養生)、コーン指数、CBR 値のいずれにおいても脱水ケーキの強度が向上することが確認できた。特に図 4 からわかるように、マグネシウム系固化材の添加量が 7.5wt% 以上になると大幅に強度が向上することが確認できた。逆にマグネシウム系固化材の添加量が 5.0wt% 以下の場合については、脱水ケーキの強度は向上するものの、大幅な強度向上効果はみられなかった。

次に、浸水状態による脱水ケーキの安定性について比較するため、気中養生と水中養生における一軸圧縮強さについて比較したグラフを図 5 に示す。図 5 から分かるように、マグネシウム系固化材を添加しない配合①では、水中養生により脱水ケーキの強度が約 1/3 程度まで大幅に低下する結果となった。一方、マグネシウム系固化材を添加した配合②~⑤では、若干の強度低下は見られるものの、大幅な強度低下はみられなかった。さらに浸水状態における強度低下の割合は、マグネシウム系固化材の添加量が増加するほど低くなることを確認できた。

4. 現場実証実験事例

4.1 実験概要

マグネシウム系固化材を用いた脱水・固化処理技術について、実工事における技術の適用性 (脱水性、濾水性状等) や、作製された脱水ケーキの品質、さらに実際のリサイクル材料としての機能性 (転圧締固め特性、ワーカビリティ等) について評価を行うため、実際に湖沼浚渫底泥の脱水処理工事を行っている現場において、現場実証実験を実施した。

現場実証実験では、浚渫工事で採取した浚渫底泥を、一次処理した後、品質を均一にするためあらかじめ必要量を

表 4 強度試験結果

配合 No	材令28日			
	一軸圧縮強さ q_u (N/mm ²)		コーン指数 q_c (kN/m ²)	CBR値 (%)
	気中養生	水中養生		
①	0.09	0.03	980	2.3
②	0.13	0.09	1134	3.0
③	0.17	0.13	1963	6.5
④	0.45	0.37	貫入不能 (約2500以上)	17.9
⑤	0.63	0.60	貫入不能 (約2500以上)	28.8

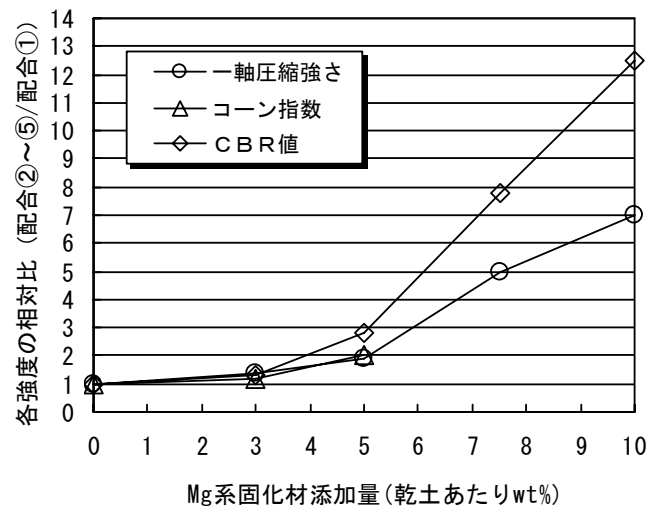


図 4 各強度試験値の相対比 (配合①を 1 とした場合)

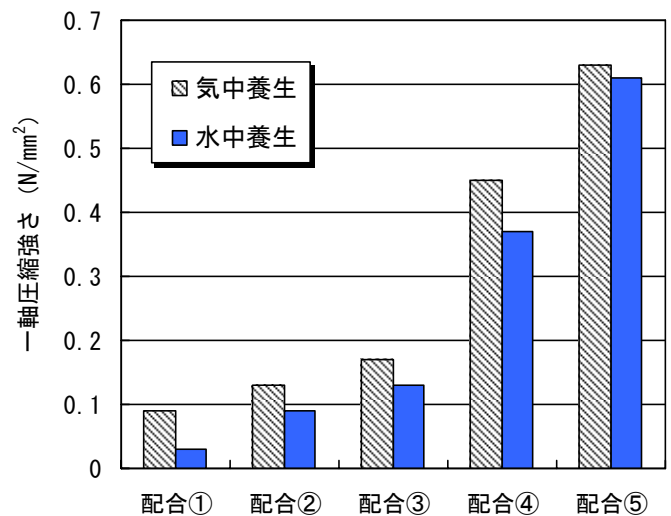


図 5 気中養生と水中養生による一軸圧縮強さの比較

貯泥ピットに確保・貯留し、攪拌を行い均一な状態にして使用した。実験に用いた原泥水の性状を表5に示す。また脱水処理は、現場で使用している高圧薄層フィルタープレス機（打込み圧：1.5MPa）を用いて行った。

表5 原泥水（一次処理後）の性状

項目	物性
泥水比重 (g/cm ³)	1.070
含水比 (含水率) (%)	834.6 (89.3)
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.544
強熱減量 (%)	16.4
pH	7.2

4.2 添加剤の配合

原泥水に添加する添加剤の配合を表6に示す。配合は、現状の脱水処理工事の配合として、原泥水に対し凝集剤および中和剤としてPACおよび消石灰を、泥水中の乾土量に対してそれぞれ10.0wt%、2.0wt%添加した場合（配合①）、および現状の配合にマグネシウム系固化材を5.0、10.0wt%添加する場合（配合②、③）の計3ケースとした。

表6 添加剤の配合

配合No	PAC (乾土あたりwt%)	消石灰 (乾土あたりwt%)	Mg系固化材 (乾土あたりwt%)
①			0
②	10.0	2.0	5.0
③			10.0

4.3 実験の手順

実証実験として、図6に示すフローの通り、脱水試験、盛土試験、脱水ケーキの室内試験を行った。

4.3.1 脱水試験

脱水処理における処理時間および処理量について、また、脱水処理により生じた濾水、脱水ケーキの性状について測定を行った。

マグネシウム系固化材の添加方法は、写真3、4に示すようにPACおよび消石灰添加後の泥水に対して、スラリー状にした状態で脱水処理直前に必要量を添加した。また、脱水処理により作製された脱水ケーキは、仮置きピット内に運搬し、写真5に示すように、配合別に山積みした状態で約1ヶ月間暴露状態で養生した。

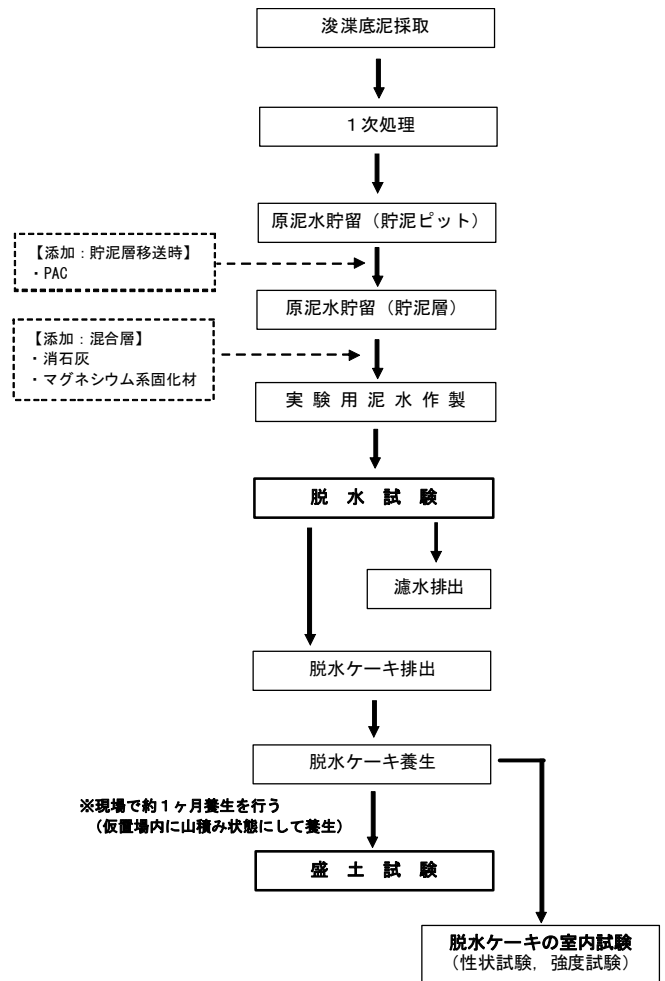


図6 現場実証実験フロー



写真3 Mg系固化材スラリー作製状況



写真4 Mg系固化材スラリー添加状況



写真5 作製後脱水ケーキの仮置き状況



写真6 試験盛土作製状況

4.3.2 盛土試験

現場内で1ヶ月間養生した脱水ケーキを用いて試験盛土を作製し、盛土の施工性（転圧締固め特性等）、強度特性について測定を行った。盛土試験のフローを図7に示す。

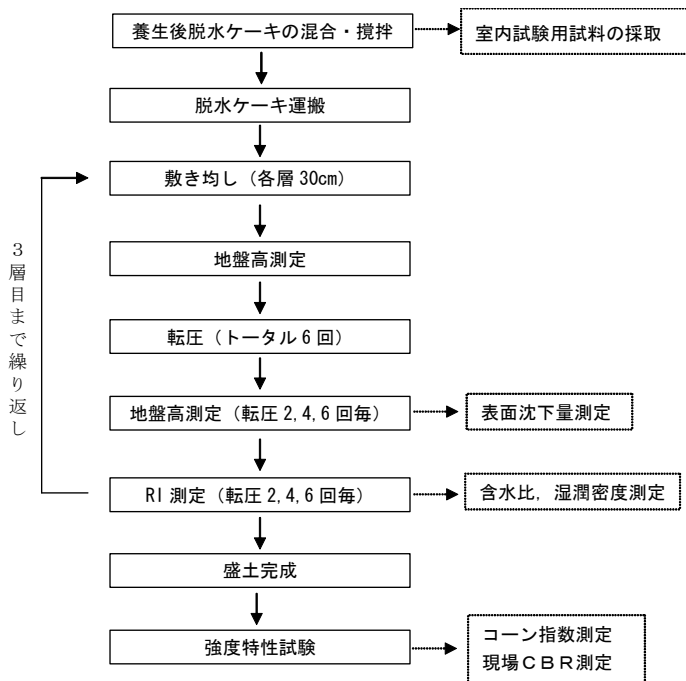


図7 盛土試験フロー

試験盛土は、図8に示すように各配合別にエリアを分けて作製し、転圧は振動ローラー（8t級）を用いて行った。盛土試験状況を写真6に示す。

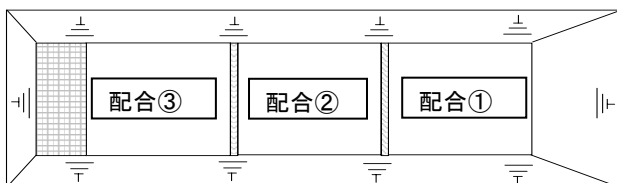


図8 試験盛土平面図

4.3.3 脱水ケーキの室内試験

現場内で1ヶ月間養生した脱水ケーキを用いて、一軸圧縮強さ、コーン指数、CBR値、吸水性（含水比の変化）、水浸状態による強度変化等について室内試験を行い、養生後の脱水ケーキの強度、水中安定性について測定を行った。

4.4 実験結果

4.4.1 脱水試験

脱水試験の結果を表7に示す。また、各測定項目の評価について下記に記述する。

表7 脱水試験結果

配合No	脱水時間(分)	泥水pH	濾水pH	脱水ケーキ性状(脱水処理直後)		
				pH	含水比(%)	コーン指数(kN/m ²)
①	90	7.6	8.1	8.0	88.3	863
②	74	9.2	8.6	9.4	87.2	1201
③	70	9.8	8.7	10.0	84.6	1351

(1) 脱水性

マグネシウム系固化材の添加量増加に伴い、脱水時間の短縮が図れていることが分かる。また、マグネシウム系固化材の添加量が多いほどその短縮効果も上昇する。このことから、マグネシウム系固化材を用いた脱水・固化処理技術により脱水性が向上し、脱水処理効率が向上すると評価できる。

(2) 濾水性状

濾水のpHについては、マグネシウム系固化材量の増加によりアルカリ性を示す方向に推移するが、脱水処理前の実験用泥水のpHよりもかなり低下し、ほぼ現場管理の上限値であるpH=8.6に近い値となっており、現状設備内の中和処理で対応できる範囲のpHであると評価できる。

(3) 作製直後の脱水ケーキ性状

作製される脱水ケーキの性状については、脱水処理時間が短縮したにもかかわらず、脱水ケーキの含水比が低下し、

コーン指数が増加していることから、マグネシウム系固化材の添加により処理後の脱水ケーキの品質が向上し、マグネシウム系固化材の添加量が多いほどその効果も大きいと評価できる。また脱水ケーキのpHは10.0前後のアルカリ性を示すが、セメントや石灰による改良土(概ね12.0以上)と比較して十分低い値である。

4.4.2 盛土試験

脱水試験の結果を表8に示す。また、各測定項目の評価について下記に記述する。

表8 盛土試験結果

配合No	締固め度 (%)	コーン指数 (kN/m ²)	現場CBR (%)
①	91.4~93.9 (平均: 92.2)	435~440 (平均: 435)	表面状態が悪く 実施不可
②	94.3~96.1 (平均: 94.5)	960~1252 (平均: 1151)	5.2
③	91.6~94.0 (平均: 92.6)	貫入不能 (3000以上)	12.7

(1) 試験盛土の施工性および品質

試験盛土の作製については、撤出し→敷均し→転圧という一連の施工におけるワーカビリティ面で大きな問題点はなく、ほぼ計画通りに施工することができ、マグネシウム系固化材を用いた脱水ケーキが盛土材として十分に施工可能な材料であることが確認できた。また盛土の品質についても締固め度として90%以上が確保され、写真7に示すように転圧完了後の試験地盤の表面は凹凸が少なく、締固め状況としては非常によい状況であったことから、品質面でも問題のないことが確認できた。



写真7 試験盛土表面状況 (手前：配合②、奥：配合③)

(2) 試験盛土の強度

試験盛土における強度測定結果から、マグネシウム系固化材添加量5%および10%の脱水ケーキともにコーン指数として800kN/m²以上、また現場CBR値としてマグネシウム系固化材添加量5%でCBR5%以上、マグネシウム系固化材添加量10%でCBR10%以上が得られたことから、

脱水・固化処理技術により作製された脱水ケーキは、盛土材料として適用した場合にその要求品質を十分に満足できるリサイクル材料であると評価できる。

4.4.3 脱水ケーキの室内試験

脱水ケーキの室内試験の結果を表9に示す。また、各測定項目の評価について下記に記述する。

表9 脱水ケーキの室内試験結果

配合No	含水比 (%)	材令28日強度試験結果			材令28日 + 水中養生28日	
		一軸圧縮強さ (N/mm ²)	コーン指数 (kN/m ²)	CBR値 (%)	含水比 (%)	一軸圧縮強さ (N/mm ²)
①	97.8	0.04	604	1.6	—	測定不能 (崩壊)
②	81.2	0.19	1888	5.6	86.6	0.14
③	71.4	0.34	貫入不能 (3000以上)	45.5	81.0	0.27

(1) 養生後の脱水ケーキ性状

脱水ケーキの養生中に、化学的な固化反応による脱水ケーキの強度向上とともに養生前の含水比より脱水ケーキの自然含水比が低下するが、その程度はマグネシウム系固化材の添加量が多いほど含水比の低下が大きくなることが確認できた。また、脱水・固化処理技術で作製された脱水ケーキは、養生中の強度低下がほとんどなく品質安定性が非常に高いと評価できる。

(2) 養生後の脱水ケーキの強度および水中安定性

各配合の強度試験値を比較すると、マグネシウム系固化材を添加しない配合①と比較して、配合②において概ね3~5倍程度、配合③において概ね8~10倍程度(CBR値は10倍以上)強度増加していることから、マグネシウム系固化材を添加することで脱水ケーキが高強度化し、マグネシウム系固化材の添加量が多いほどその効果も大きいと評価できる。また、水中安定性についてもケース①の供試体は、水中養生中に崩壊(再泥化)してしまったため、一軸圧縮試験を実施できなかった。一方、マグネシウム系固化材を添加したケース②、ケース③の供試体については強度低下するものの、大幅な強度低下および吸水は見られなかったことから、マグネシウム系固化材を添加することによって脱水ケーキの水中安定性が向上し、再泥化の防止が可能となると評価できる。

5. 現場実証実験後の継続調査

5.1 調査概要

現場実証実験において作製された試験盛土について、盛土を撤去するまでの約8ヶ月間、盛土性状の経時変化について調査を行った。各測定項目の評価について記述する。

5.2 調査結果

5.2.1 試験盛土の品質

試験盛土作製直後から、気候の変動による乾湿繰り返しや温度変化等により、試験盛土の表面にひび割れ等が発生したが、配合①の脱水ケーキで作製した地盤は非常にひび割れが大きかったのに対して、配合②、配合③の脱水ケーキで作製した地盤はひび割れが小さく、自然環境の変化に対する耐久性に優れ、品質の安定性が高いことが確認された。また、盛土撤去時に断面状況を確認したところ、空隙や品質が劣化している部分はみられず、試験盛土作製時の転圧状況が良好であり、長期的に品質が安定していることが確認された。

5.2.2 試験盛土の強度

試験盛土のコーン指数の経時変化を図9に示す。コーン指数の測定は盛土作製後から2ヶ月ごとに行った。測定結果から、配合①、②、③（配合③は貫入不能（3000kN/m²以上））ともに経時変化によるコーン指数結果に大きな変化はみられず、試験盛土の強度が安定していることから、脱水・固化処理技術により作製された脱水ケーキは、強度面においても長期的に安定な地盤材料であることが確認された。

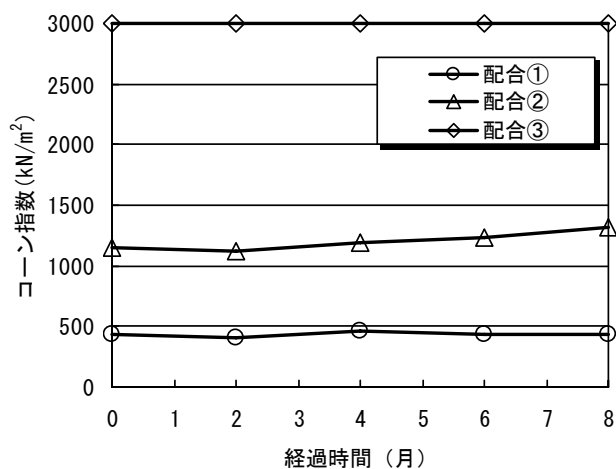


図9 試験盛土のコーン指数の経時変化

5.2.3 試験盛土の植生状況

試験盛土の植生状況（盛土作製から約3ヶ月後）を写真8に示す。本技術で作製される脱水ケーキ自体がアルカリ性を呈していることや、脱水ケーキや盛土地盤の強度が高いことから植生への影響が懸念されたが、配合①の部分と比較してやや植生部分の密度や発育状態が劣っているものの、配合②、③の部分とも十分に植生している状態であったことから、本技術で作製された脱水ケーキを地盤材料として使用した場合、植生に対して特に問題のないことが確認された。



写真8 試験盛土の植生状況

6. まとめ

今回実施した室内脱水実験および現場実証実験の結果より、浚渫土の有効利用の観点から、本技術の有効性をまとめると以下の点が挙げられる。

1) 脱水ケーキの品質が安定している

固化材の前添加により、品質にばらつきがほとんど生じず、また化学的改良効果により、脱水ケーキの品質変化（含水比増加、強度低下等）も少なく、常に安定した品質のリサイクル材料を提供することができる。

2) 脱水ケーキの強度が非常に高い

脱水ケーキが高品質化されることにより、道路用盛土、河川堤防、土地造成など幅広い再利用が可能となる。さらに固化材添加量を調整することで、CBR10%以上が求められるような高規格道路等への適用についても可能である。

3) 脱水ケーキの水中安定性が高い

脱水ケーキの水中安定性が高く、水中投入時や長期間水中に置かれた状態においても再泥化等の懸念が少なく、湖岸堤や底泥覆砂代替などの湖底還元再利用することが可能である。

4) その他、施工面や環境面でのメリット

通常セメントや石灰等の固化処理（脱水処理後の固化処理）のように、別途工程が増えることなく、現状の処理工程内での施工が可能である。また、脱水時間が短縮するため、処理サイクル時間の縮減となり処理能力の向上も図れる。さらに植生への影響もほとんどなく、環境に優しい。

閉鎖性水域の浄化を目的とした底質の除去は、今後も増加していくものと考えられ、湖沼等の浚渫・脱水処理工事においては、処分場不足や資源の有効利用の観点から浚渫土のリサイクルは必要不可欠であり、「脱水・固化処理技術」が湖沼における底質除去による水質浄化に貢献できれば幸いである。