HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	消石灰と石膏による児島湖凌渫土の透水性改良
Author(s)	石黒, 宗秀; 濱邊, 亜希子; 赤江, 剛夫
Citation	農業土木学会論文集, 221, 43(575)-48(580) https://doi.org/10.11408/jsidre1965.2002.575
Issue Date	2002-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/71043
Rights	© 社団法人 農業農村工学会
Type	journal article
File Information	2002_575.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

農業土木学会論文集
Trans. of JSIDRE
No. 221, 43 ～ 48 (2002.10)

研究論文

消石灰と石膏による児島湖浚渫土の透水性改良

石黒宗秀* 濱邊亜希子** 赤江剛夫*

*岡山大学環境理工学部，〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1.
**岡山県土地改良事業団体連合会，〒700-0824 岡山市内山下 1-3-7.

要 旨

湖沼富栄養化の一因と考えられている児島湖浚渫土を用いて，消石灰および石膏による透水性の改良方法を検討した．消石灰あるいは石膏を，浚渫土と混合する方法，表面散布する方法，溶液状態で浸透させる方法の3種類の添加方法で，飽和透水試験装置を用いて飽和透水係数を比較した．石灰は，古くから土質安定処理に用いられ，その安定処理により透水性は減少するとされているが，実験により，消石灰では，混合法により，比較的大きな飽和透水係数が維持されることを明らかにした．これは，混合によりある程度不均質に試料中に分布した消石灰が化学反応を起こして構造を安定化させたため考えられる．一方，石膏は，溶液浸透法による結果が消石灰の混合法による結果と同程度の透水性を示した．これは，石膏の場合，Caが静電気力による吸着で凝集効果を及ぼしたためと考えられる．

キーワード：底泥，pH，飽和透水係数，石膏，消石灰，凝集

1. はじめに

児島湖では，富栄養化による水質汚染の改善対策として，底土の浚渫作業が農林水産省によって行われている．底土に含まれる養分が富栄養化を促進するため，浚渫作業は，その溶出を抑制しようとするものである．浚渫土は，種々の植生培地等としての利用が考えられるが，浚渫土を利用するにあたっては，その土地利用に適した化学性・安全性および物理性・透水性が要求される．児島湖浚渫土は，粘土分を多く含み，排水性の面で問題がある．そこで，改良剤とその添加方法を検討し，その透水性の改善を評価した．

児島湖浚渫土は，海水の影響を受けているため，Naを多量に含む．Naを多量に含む粘質土は，真水が浸透すると粘土が分散して透水性が極度に低下する．粘土の分散を抑制し，透水性を低下させないために，Caが用いられてきた（赤江，1998；西村・取出，1999）．石黒ら(2001)は，Na型の児島湖浚渫土に希薄溶液を浸透させると透水性低下が激しく，Ca型浚渫土では低下が抑制されることを示している．

透水性改良資材のCa塩として，石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)が良く用いられる（Kamphorst and Bolt, 1980）が，岡山県には石灰岩地帯があるため，本研究では消石灰($Ca(OH)_2$)を用いて石膏との比較検討を行った．消石灰はアルカリ性を示すため，石黒ら（2001）が指摘したアルカリ性における化学反応の影響が，透水性に相違をもたらすものと推測された．

2. 浚渫土試料と実験方法

2.1 浚渫土試料

浚渫土試料には，石黒ら(2001)の報文の試料と同一採取点の児島湖浚渫底土を用いた．浚渫土の土粒子密度は，2.65Mg/m³，強熱減量は，10.8%である．ピペット法による粒度試験結果は，粘土分(0.02mm 以下)54.3%，シルト分(0.002～0.02mm)38.0%，砂分(0.02～2mm)7.7%で土性はHCであった．主要粘土鉱物は，バーミキュライト，カオリナイト，イライトである．和田・岡村法（和田，1987）によってCa吸脱着で測定したCECは，pH7で0.073mol$_c$/kg，pH9で0.13 mol$_c$/kg，pH11で0.15 mol$_c$/kgである．

採取した浚渫土の土壌溶液は海水の影響を受け，そのpHは約7，電気伝導度は約10mS/cmであった．その電気伝導度の値は，NaCl溶液に換算すると約0.1mol$_c$/Lである．そこで，飽和透水試験に用いる試料は，0.1mol$_c$/L NaCl溶液で平衡させた．溶液pHは約7とした．含水比を400%に調整して飽和透水試験に用いた．

2.2 飽和透水試験

上述の前処理をした浚渫土試料を用いて飽和透水試験を行った．塩類無添加・石膏添加・消石灰添加それぞれの条件で流出量，流出液の電気伝導度，流出液pHを測定し比較した．飽和透水係数は，測定流出量から計算した．浚渫土試料への添加方法は，試料と混合する方法，浚渫土試料を試験カラムに充填後表面散布する方法，溶液浸透による方法の3種類について実験した．それらの方法は，次の通りである．

(1) 混合法：試験管に浚渫土試料とCa資材を入れ，蓋をして1分間上下に良く振り混ぜ，その後1分間超音波装置にかける．混合試料を透水試験装置に充填し，純水を飽和浸透させ実験を始める．
(2) 表面散布法：浚渫土試料を透水試験装置に充填した後，表面に粉末のCa資材をできるだけ均質に散布する．

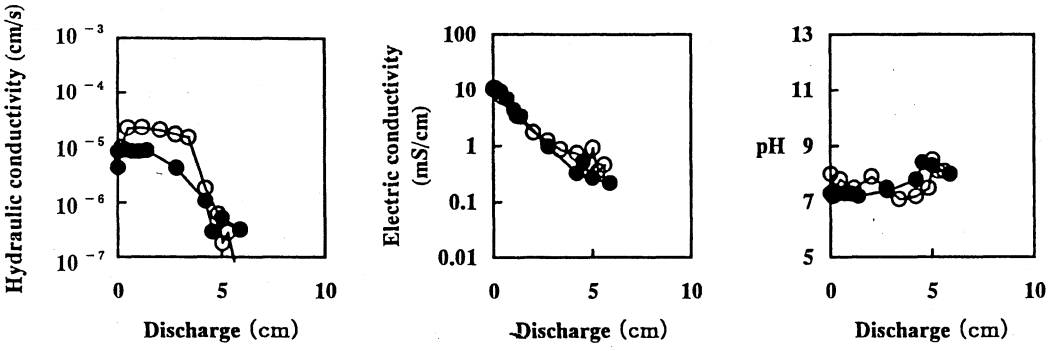

Fig.1 Ca無添加透水実験における飽和透水係数（左図）・電気伝導度（中図）・pH（右図）.
Saturated hydraulic conductivity, Electric conductivity and pH for the hydraulic conductivity experiment without Ca application.

散布むらはある程度出来る．純水を飽和浸透させ，実験を開始する．

(3) 溶液浸透法：浚渫土試料を透水試験装置に充填し，5 mol/m³ の石膏あるいは消石灰の溶液を所定量だけ飽和浸透させる．溶液浸透開始から変化を測定する．溶液を所定量浸透させた後は，純水を浸透させ，測定を続ける．

石膏と消石灰の添加量はそれぞれ，0.1mol/kg 乾土，0.3mol/kg 乾土，1mol/kg 乾土の3条件とした．0.1mol/kg 乾土の添加量は，CEC より少し多い程度の量である．これらの添加量は，質量換算では，石膏でそれぞれ 17.2g/kg 乾土，51.7g/kg 乾土，172g/kg 乾土，消石灰でそれぞれ 7.41g/kg 乾土，22.2g/kg 乾土，74.1g/kg 乾土である．ただし，消石灰の溶液浸透における最大添加量は，1mol/kg 乾土の代わりに 0.7mol/kg 乾土とした．これは，質量換算で 51.9g/kg 乾土である．

飽和透水試験の実験手順は，次の通りである．

1. 内径 3cm の試験カラム下端に No.1 ろ紙を敷き，その上に試料土を均質になるようにシリンジで丁寧に流し入れ，試料厚さを 1cm にする．これは，乾土量で 1.6g に相当する．
2. 純水で試料カラム上部の空間を満たし，試料上下端の全水頭差を 10cm に固定した後，純水を流して流出量を経時的に測定する．上端の水頭は，マリオットボトルを用いて一定にしておく．溶液浸透による添加実験では，純水の代わりに 5mol/m³ の石膏あるいは消石灰の溶液を用いる．

それぞれの条件につき，2連のカラムで実験した．

なお，20℃における水に対する溶解度は，石膏で 0.298g/100g，消石灰で 0.126g/100g である．これをモル濃度に換算すると，石膏で 21.9mol/m³，消石灰で 17.0 mol/m³ であり，両者に大きな差はない．

3. 実験結果と考察

3.1 Ca 資材無添加の場合

2連で行った Ca 無添加の透水試験結果を Fig.1 に示す．図の横軸は，累積流出液量を降雨量等と同様に cm 単位で表している．飽和透水係数は，初期の 2~4cm までは徐々に小さくなり，その後急激に低下している．流出液の電気伝導度は，最初が最も高く純水の浸透に伴って低下している．電気伝導度は，イオン濃度にほぼ比例するから，この電気伝導度の低下は，初期の高濃度土壌溶液が純水の浸透に伴い流出し純水に置き変わって行くことを示している．従って，飽和透水係数は，高濃度の凝集状態ではあまり減少しないが，分散状態となる低濃度になって相対的に疎な間隙が目詰まりを起こし，急激に低下したものと考えられる．流出液の pH は，pH7～8 の間にあった．

試料土の厚さは，圧密により初期の 1cm から 0.7～0.8cm 程度に変化した．

3.2 石膏添加の場合

石膏を添加した透水試験における飽和透水係数の結果を Fig.2 左図に示す．Ca 無添加の場合のような 10^{-6}cm/s 以下となる急激な低下は見られなかった．Ca の添加による分散抑制効果があったためと考えられる．透水係数が 10^{-4}cm/s のオーダーの大きな値を維持したのは，0.3mol/kg 乾土及び 1mol/kg 乾土添加の溶液浸透法の場合であった．次に大きな値を維持したのは，表面散布法と，0.3mol/kg 乾土及び 1mol/kg 乾土添加の混合法の場合で，10^{-5}cm/s のオーダーであった．0.1mol/kg 乾土添加の混合及び溶液浸透法の場合が最も小さくなり，10^{-6}cm/s のオーダーを示した．

0.3mol/kg 乾土及び 1mol/kg 乾土添加の溶液浸透法の場合が，最も高い透水係数を維持したが，0.1mol/kg 乾土添加の溶液浸透法の場合は透水係数の小さな値に徐々に低下している．0.1mol/kg 乾土の添加量は，CEC より少し多い量だが，これでは最大の透水係数を維持するには不十分であった．これは，浸透した Ca が徐々に流出してしまったためと考えられる．0.1mol/kg 乾土添加では，表面散布法の場合が最も大きな透水係数を維持した．これは，表面散布された Ca が徐々に溶解して最も長い時間その効果を維持したためと考えられる．どの添加量においても，混合法の場合が最も透水係数が小さくなった．溶液浸透法が間隙の隅々まで Ca を拡散して凝集状態を維持したのに対し，混合法は，間隙の隅々まで行き渡らず，かつカラムからの Ca 流出が速かったため，このような結果になったと考えられる．

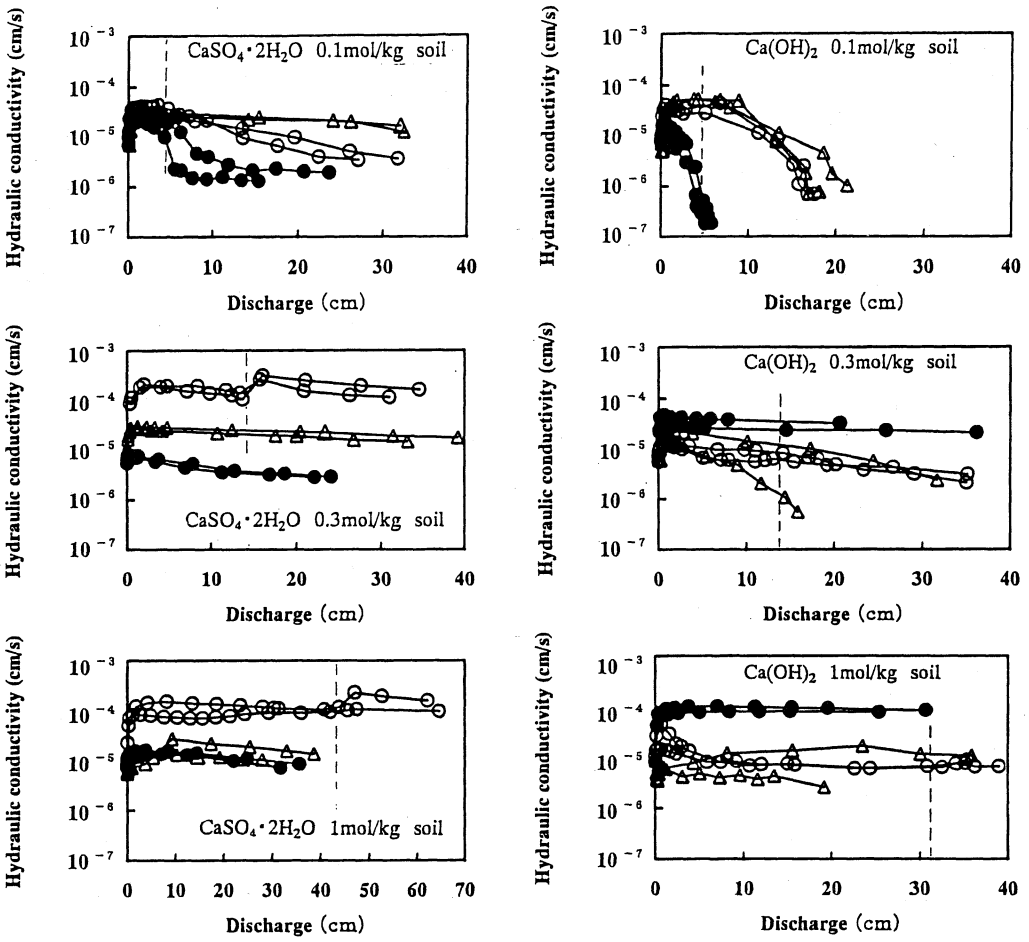

Fig.2 石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$;左図)と消石灰($Ca(OH)_2$;右図)の添加による飽和透水係数の比較. 添加量は乾土 1kg 当たり上段図 0.1mol, 中段図 0.3mol, 下段図 1mol. ただし, 下段図 1mol に示した消石灰の溶液浸透法では 0.7mol. ●は混合法, △は表面散布法, ○は溶液浸透法の結果を表す. 図中の点線は, 溶液浸透法の試験で流入液が溶液から純水へ切り替わった点を示す.
Saturated hydraulic conductivity of the sediment with gypsum or hydrated lime. ● denotes mixing, △ surface application, ○ solution application. Dotted line indicates the point that the influent was changed from solution to pure water in solution application experiment.

Fig.3 左図に石膏を添加した透水試験の流出液電気伝導度の結果を示す. 0.1mol/kg 乾土及び 0.3mol/kg 乾土添加の条件において, 電気伝導度の低下が混合法の場合に最も早く, 混合法で Ca が早く流出したことを示唆する. それに対して, 0.1mol/kg 乾土及び 0.3mol/kg 乾土添加の表面散布法では, 他の添加法に比べて電気伝導度がゆっくりと低下し, Ca が徐々に溶解流出していることが分かる. 溶液浸透法では, 流出液量 5cm あたりから 5mol/m^3 浸透溶液を純水に切りかえる図中の点線のあたりまで, 電気伝導度が 1mS/cm 強の安定した値を取っている. これは, 石膏浸透溶液の電気伝導度 0.9mS/cm に近い値で, ほぼ定常的な溶質の流れとなったことがわかる.

Fig.4 左図に石膏を添加した透水試験の流出液 pH の結果を示す. pH は, 5.7～7.8 の範囲を示した.

試料土の厚さは, 圧密により初期の 1cm から 0.8cm 程度に変化したが, 添加量や添加方法による相違は明確でなかった. Ca 無添加の場合より, 凝集効果により若干圧密の影響が小さくなったようである.

3.3 消石灰添加の場合

消石灰を添加した透水試験における飽和透水係数の結果を **Fig.2** 右図に示す. Ca の凝集効果により, Ca 無添加の場合のような急激な低下は見られなかったものの, 添加量の最も少ない 0.1mol/kg 乾土では, 大きな低下傾向が見られた. この CEC より少し多い程度の添加量では透水係数低下を抑制するには不十分であることが分かる. 1mol/kg 乾土添加の混合法の場合が 10^{-4}cm/s 程度の最も透水係数が大きな値を維持した. 次いで大きな値は 0.3mol/kg 乾土添加の混合法の場合で, $2\sim5\times10^{-5}$cm/s の値を示した. 次に 0.7mol/kg 乾土添加の溶液浸透法と 1mol/kg 乾土添加の表面散布法の場合の 10^{-5}cm/s の程度, そして 0.3mol/kg 乾土添加の溶液浸透法と表面散布法の場合の 10^{-6}cm/s の程度となった. このように, 概して添加量の多い順に透水係数も大きな値を取ったが, 特に, 混合法で大きな透水係数を維持した.

Fig.3 右図に消石灰を添加した透水試験の流出液電気伝導度の結果を示す. 添加法の相違が電気伝導度に現れたのは, 1mol/kg 乾土添加の場合である. 混合法での値が, 表面散布法及び溶液浸透法の値より 20cm 台の流出量まで大きい. これは, 混合法の方が Ca が流出しやすく, 表面散

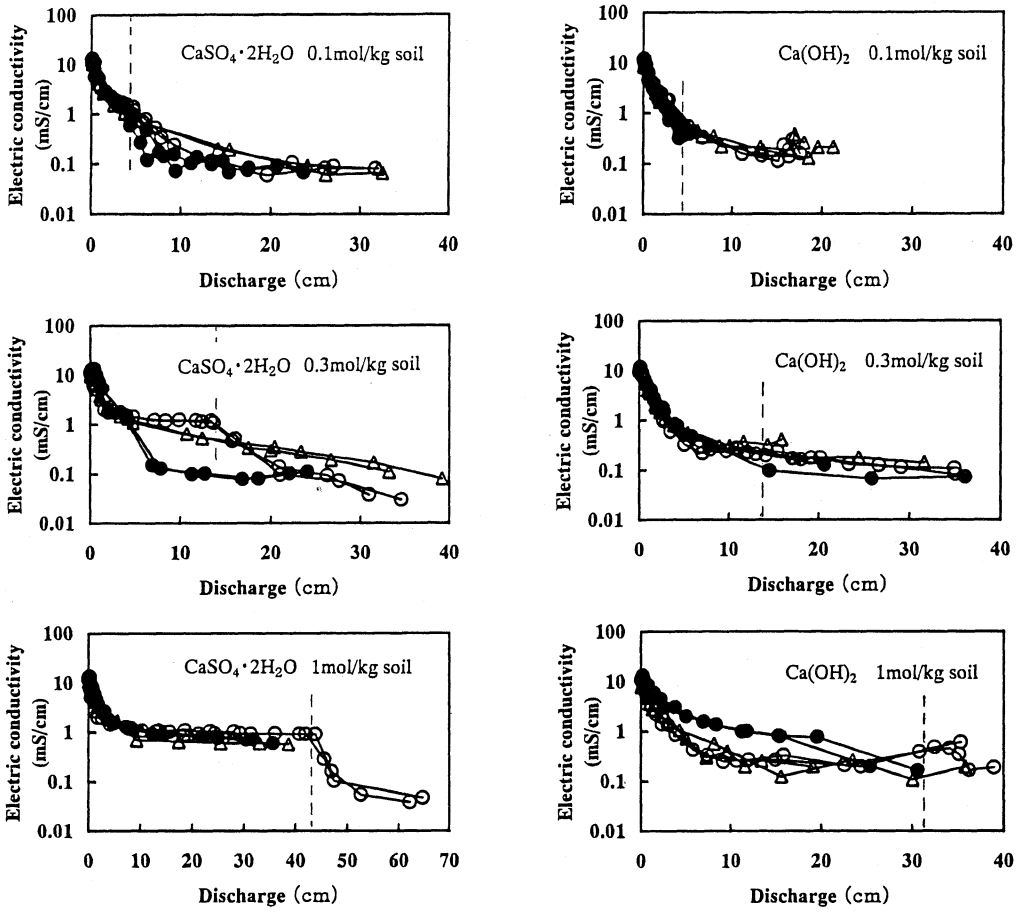

Fig.3 石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$；左図)と消石灰($Ca(OH)_2$；右図)の添加透水試験における流出液の電気電導度変化．添加量は乾土 1kg 当たり上段図 0.1mol，中段図 0.3mol，下段図 1mol．ただし，下段図 1mol に示した消石灰の溶液浸透法では 0.7mol．●は混合法，△は表面散布法，○は溶液浸透法の結果を表す．図中の点線は，溶液浸透法の試験で流入液が溶液から純水へ切り替わった点を示す．

Electric conductivity of the effluent in hydraulic conductivity experiment. ● denotes mixing, △ surface application, ○ solution application. Dotted line indicates the point that the influent was changed from solution to pure water in solution application experiment.

布法及び溶液浸透法では Ca が流出しにくいことを示唆している．しかし，0.1mol/kg 乾土添加及び 0.3mol/kg 乾土添加の条件では，添加法によるこのような明瞭な相違は見られない．溶液浸透の条件において，図の点線で示した純水への浸透液切り替え時の流出液の電気伝導度は 1mS/cm 以下で，消石灰浸透液の値 1.2mS/cm より明らかに低い．浚渫土に浸透した Ca が浚渫土中で何らかの反応を起こして流出しない部分があるためと考えられる．混合法での電気伝導度が 0.1mol/kg 乾土添加及び 0.3mol/kg 乾土添加の条件で表面散布法及び溶液浸透法の値とほぼ同じであることから，どの添加法においても Ca が浚渫土中で反応を起こし流出しない部分があると推測される．1mol/kg 乾土添加の場合に混合法の値が大きくなったのは，添加量が多量なため混合により流出しやすくなったものと考えられる．つまり，表面散布法及び溶液浸透法では，添加 Ca は流出するためには全て浚渫土表面から下端まで通過する必要があるのに対し，混合法では下端に近い部分から流出しやすかったものと思われる．なお，CEC 以上の多量の添加量でも，溶液浸透法の流出液の電気伝導度が流入液の電気伝導度を下回ることから，この反応が単純な静電気力による吸着反応でないことは明らかである．つまり，静電気力による吸着反応であれば，Ca 吸着が完了した後は，浸透液のイオン濃度は変化せず，流出液の電気伝導度は，流入時と同じ値になるはずであるが，そうなっていない．これは，石灰の土質安定処理技術で良く知られているように，高 pH で Ca と土粒子の間に起こるケイ酸石灰塩（$CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ を主とする）やアルミン酸石灰水和物（$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O$ を主とする）の生成反応が起こっているためと考えられる（有泉，1978）．

Fig.4 右図に消石灰を添加した透水試験の流出液 pH の結果を示す．消石灰添加量が多いほど pH が高くなり，純水の浸透に伴い高い pH が低下する傾向にある．この実験では最終的に，0.1mol/kg 乾土添加及び 0.3mol/kg 乾土添加で pH8 程度，1mol/kg 乾土添加で pH9～11 程度の値である．土は緩衝作用を持つため，アルカリ性の消石灰を 0.1mol/kg 乾土の量だけ混合法で添加しても流出液 pH は 8～9 を維持している．しかし，多量に混合した 1mol/kg 乾土の場合では，初期の pH は 12 程度の高い値となり，消石灰溶液が流出しやすくなっていることがこれからも分かる．溶液浸透で用いた 5mol/m³ の消石灰溶液の pH は，約

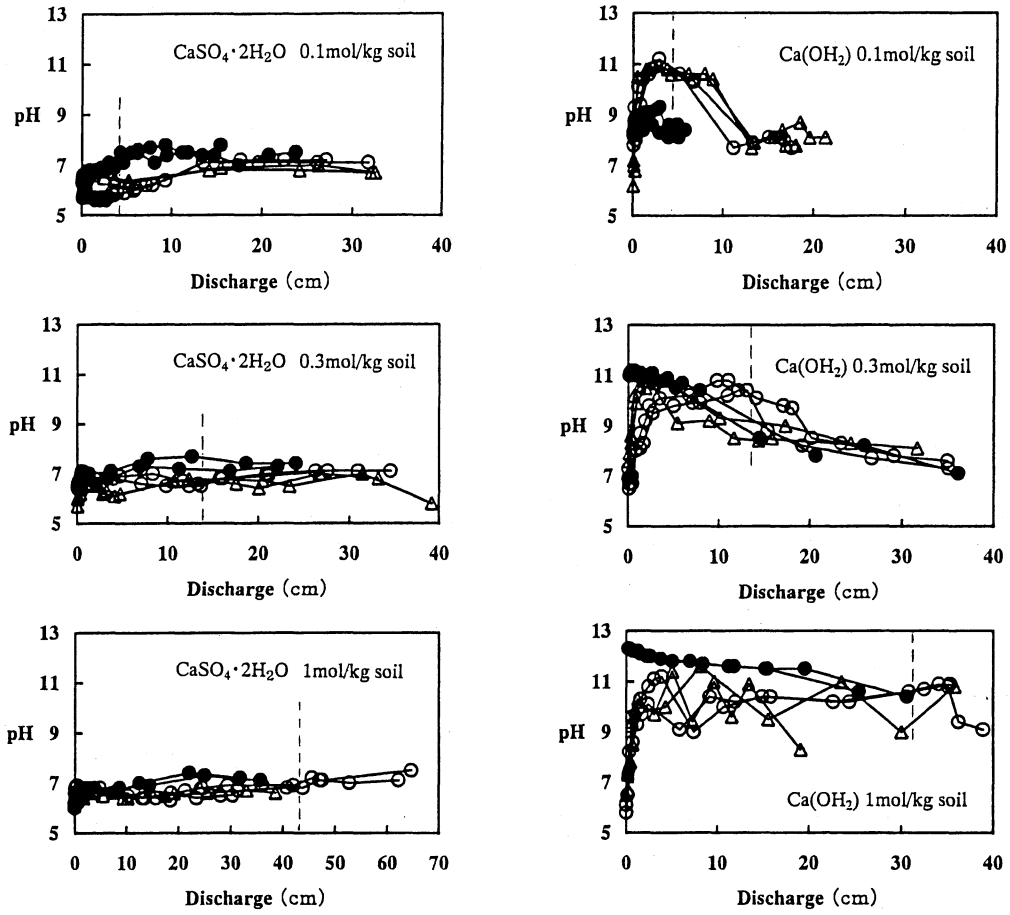

Fig.4 石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$；左図)と消石灰($Ca(OH)_2$；右図)の添加透水試験における流出液のｐＨ変化．添加量は乾土 1kg 当たり上段図 0.1mol，中段図 0.3mol，下段図 1mol．ただし，下段図 1mol に示した消石灰の溶液浸透法では 0.7mol．●は混合法，△は表面散布法，○は溶液浸透法の結果を表す．図中の点線は，溶液浸透法の試験で流入液が溶液から純水へ切り替わった点を示す．

Effluent pH in hydraulic conductivity experiment. ● denotes mixing, △ surface application, ○ solution application. Dotted line indicates the point that the influent was changed from solution to pure water in solution application experiment.

12 であるが，溶液浸透法で溶液を流し続けても流出液 pH は 11 を上回らず，土の強い緩衝作用を示す．この結果も，単なる静電気力による吸脱着反応のみでない化学反応の存在を示唆している．

石膏添加の場合と同じく，試料土の厚さは，圧密により初期の 1cm から 0.8cm 程度に変化したが，添加量や添加方法による相違は明確でなかった．

3.4 石膏添加と消石灰添加の比較

飽和透水係数が 10^{-4}cm/s のオーダーを維持したのは，石膏 0.3mol/kg 乾土及び 1mol/kg 乾土添加の溶液浸透法の場合と，消石灰 1mol/kg 乾土添加の混合法の場合であった（**Fig.2**）．このように，大きな透水係数を維持した添加方法は，石膏と消石灰で異なった．これは，石膏の場合が Ca の静電吸着による凝集効果が主であるのに対し，消石灰の場合が前述の化学反応を主とする凝集効果であるための相違と考えられる．0.3mol/kg 乾土及び 1mol/kg 乾土添加の溶液浸透法における流出液の電気伝導度が，石膏で流入液の電気伝導度に近くなるのに対し，消石灰で流入液の電気伝導度より明らかに小さな値を示した（**Fig.3**）ことからも，両者の反応の相違が示唆される．

石膏で溶液浸透法が効果的であったのは，溶液浸透によって Ca が浚渫土中を満遍なく移動し吸着して，Ca による凝集効果が働いたためと考えられる．一方，消石灰においても溶液浸透法は浚渫土上端から均質に Ca が浸透したと考えられるが，0.7mol/kg 乾土添加においても 10^{-5}cm/s の程度のあまり大きくない透水係数に留まっている（**Fig.2** 右下図）．この場合，均質に浸透した溶液は，土粒子間に化学反応を起こして土粒子間を結びつけ，構造も均質化したと推測される．そのため相対的に大きな間隙が出来ず，透水係数が大きくならなかったと考えられる．石灰の土質安定処理では，一般に透水性が減少する（有泉，1978）とされており，これと類似の効果があったと推察される．しかし，前述のように，消石灰添加においても，混合法で 1mol/kg 乾土添加した場合，石膏と同程度の高い透水係数を維持している．これは，溶液浸透法と比較して，混合法は試料中に消石灰が不均質に添加されたため，化学反応により土粒子間が結びついた部分と，そうでない部分との不均質な構造が形成されたものと推測される．そのため，相対的に大きな間隙が出来て，透水性が高く維持されること

になったものと思われる．

浸透液のpHは，石膏の場合中性付近の値であったが，消石灰の場合多量の添加によりアルカリ性となった（**Fig.4**）．

4. 結論

本研究では，児島湖浚渫土に石膏及び消石灰を添加し，飽和透水係数を比較した．石灰は，古くから土質安定処理に使われ，土質安定処理では透水性も減少するとされている．しかし，浚渫土試料と消石灰粉末を混合させる方法によって，石膏添加と同程度あるいはそれ以上の高い透水性を維持できることがわかった．これは，ある程度不均質に試料中に分布した消石灰が化学反応を起こして構造を安定化したためと考えられる．一方，石膏は，溶液浸透法による添加が最も高い透水性を維持した．これは，石膏の場合Caが静電気力による吸着で凝集効果を及ぼすためと考えられる．Ca資材の種類や添加法による，これらの土粒子構造の相違を明らかにするには，今後，微細な土粒子構造の可視化や土粒子表面の化学組成等の分析を行う必要がある．

消石灰を多量に添加すると，土壌溶液がアルカリ性となるため，利用上留意する必要がある．石灰は農業において酸性土壌の中和に広く用いられており，酸性土壌との組み合わせ等を図る場合有効となろう．

謝辞：本研究は，岡山県石灰工業協同組合の特定中小企業集積活性化促進事業の助成を受けて行いました．農林水産省山陽東部土地改良建設事務所には，底土試料採取でお世話になりました．ここに感謝の意を表します．

引用文献

赤江剛夫(1998)：干拓地土，p.92-96，岩田進午・赤江剛夫・粕渕辰昭・長谷川周一・宮崎毅編著，豊かな土づくりをめざして，農土学会．

有泉昌（1978）：石灰安定処理，土質工学会編，土質工学における化学の基礎と応用，土質工学会，p.164-177.

石黒宗秀・岩元亮一・石田智之・赤江剛夫(2001)：児島湖底土の飽和透水係数に及ぼす土壌溶液pHの影響，農土論集，216，p.65-70.

Kamphorst，A. and Bolt G. H. (1980)：塩類土壌とソーダ質土壌，p.191-212，Bolt，G.H. and Bruggenwert，M.G.M. (ed.)，岩田進午・三輪睿太郎・井上隆弘・陽捷行訳，土壌の化学，学会出版センター．

西村拓・取出伸夫(1999)：コロイドから見た土の透水性と侵食，農土学会誌，67(3)，p.277-283.

和田信一郎(1987)：イオン交換容量測定，p.681-684，日本粘土学会編，粘土ハンドブック第二版，技報堂出版．

［2002．2．12受稿，2002．8．5閲読了］
［この研究論文に対する公開質疑あるいは討議(4,000字以内，農業土木学会論文集編集委員会あて)は，2003年3月24日まで受け付けます．］

Improvement of Permeability of Lake Kojima Sediment with Hydrated Lime and Gypsum

ISHIGURO Munehide*， HAMABE Akiko** and AKAE Takeo*

*Faculty of Environmental Science and Technology， Okayama University， 3-1-1 Tsushima-naka， Okayama 700-8530， JAPAN

**Okayama Prefectural Federation of Land Improvement Association.， 1-3-7 Utisannge， Okayama 700-0824， JAPAN

Abstract

Improvement method of permeability of Lake Kojima Sediment with hydrated lime and gypsum were investigated. Three application methods were compared in the saturated hydraulic conductivity experiment; mixing， surface distribution and solution percolation. Lime has been used for soil stabilization for a long time and the stabilized soil permeability was considered to become low. However， our experiment showed that hydrated lime application with mixing maintained high hydraulic conductivity. The soil structure was supposed to be stabilized by chemical reaction between soil and heterogeneously distributed hydrated lime. On the other hand， gypsum application with solution percolation maintained the same hydraulic conductivity as that of hydrated lime application with mixing. In that case， electrostatic adsorption of Ca was considered to generate flocculation and kept high permeability.

Key words： *sediment， pH， saturated hydraulic conductivity， hydrated lime， gypsum， flocculation*