砂層内における有機泥の輸送に及ぼす浸透流量と間隙体積の効果

Effects of Flow Rate and Pore Size on Mud Transport in Sand Beds

TOUCH NARONG¹・中下慎也²・小枝豪志³・日比野忠史⁴

Narong TOUCH, Shinya NAKASHITA, Takeshi KOEDA and Tadashi HIBINO

The aim of this study is to reveal the effects of flow rate and pore size on the general behavior of mud transport in sand beds, which is a useful knowledge in the restoration of aggravated tidal flats and the construction of man-made sandy tidal flats. It is found that an increase in flow rate boosts the deposition amount of mud in sand beds. Moreover, it is noted that the deposition condition of mud in pores is mostly dependent on flow rate. Mud is easily deposited into pores in the case of a lower flow rate, and it deposits in a looser condition with a higher flow rate. Finally, it is suggested that the deposition distribution of mud corresponded with the pore distribution of sand bed, and mud deposits with a looser condition in larger pores.

1. はじめに

安全な地下水を提供するために、過去の数十年間に地盤内浸透における汚染物質・粒子の輸送に関する研究が多く行われている（表-1）。近年では、沿岸環境に関する課題、特に、有機物を含む細粒土粒子の堆積による干潟環境が深刻化しているため、干潟環境の悪化に至るメカニズムの解明や改善技術の開発に着目した研究が多く行われている。

本研究では、干潟地盤内での地下水の流動性を向上させ、生態環境を再生することを目的として、砂間隙内における有機泥（土粒子に有機物が付着した粒子、粒径1～100μm）の輸送に関する研究を進めてきた。Touchら（2010）は径深概念（流れ面積は間隙体積、潤辺は粒子の表面積として径深を導出）および新たに体積平均粒径をボアズイユの法則に導入することで、砂間隙内における圧力損失を定量評価するとともに、有機泥の残留による圧力損失の変化と有機泥の残留量との関係を実験的に明らかにし、砂層内での有機泥の残留体積の評価式（(1)式）を提案している。

$$\frac{\Delta P}{L} = 72\mu v_s V \frac{\left(\frac{V_S}{D_{eS}} + \frac{V_M}{D_{eM}} \right)^2}{(V - V_S - V_M)^3} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ΔP ：粒子による圧力損失 [dPa]、 L ：砂層の高さ [cm]、 μ ：粘性係数 [g/cm/s]、 v_s ：断面平均流速

[cm/s]、 V ：砂層の体積 [cm³]、 V_S ：全砂粒子の体積 [cm³]、 V_M ：有機泥の残留体積 [cm³]、 D_{eS} ：砂の有効粒径 [cm]、 D_{eM} ：有機泥の有効粒径 [cm] である。

Touchら（2010）は有機泥（中央粒径18μm）の浸透による砂層の透水係数の減少量は、無機物であるAl₂O₃（粒径16μm）の浸透（Moghadashiら、2004）に比べて約7倍大きい（粒子の残留量が多い）ことを見出している。さらに、Touchら（2011）は（1）式に基づいて砂層内での有機泥の残留量（（1）式の V_M ）に及ぼす有機物の性状の効果を実験的に定量評価し、有機泥に付着する有機物の性状（量、質）によって間隙内での有機泥の輸送特性（残留量・残留状態）が異なることを示した。すなわち、

表-1 間隙内における汚染物質・粒子の輸送に関する研究

研究者	研究内容
Torokら（1996）	粗砂により形成された15cm浸透層でのCa ²⁺ 、Sr ²⁺ 、Cs ⁺ の輸送に及ぼす粘土鉱物の影響を実験的に明らかにした。
Noellら（1998）	ガラスビーズ（150～210μm）により形成された50cm浸透層におけるCs ⁺ の輸送に及ぼすシリカの影響を明らかにし、モデル化した。
Grolimundら（1998）	土粒子の造粒物（1～2mm）により形成された46cm浸透層における0.11μm球粒子の輸送を実験的に検討し、移流・拡散モデルの解析結果と比較した。
Masseiら（2002）	碎石砂利（1.5～3mm）により形成された120cm浸透層におけるシルト（2～60μm）の輸送を実験的に検討し、移流・拡散モデルの解析結果と比較した。
Bergendahlら（2003）	間隙内での0.11μm以下粒子の輸送は化学条件（イオン強度、pH）に支配されることを示した。
Moghadasiら（2004）	ダルシー則と質量保存則に基づいて粗砂およびガラスビーズにより形成された38cm浸透層におけるAl ₂ O ₃ 粒子（7,16μm）の輸送（残留）に伴う透水係数の減少をモデル化した。
Benamarら（2007）	碎石礫（2.15～3.15mm）およびガラスビーズ（3mm）により形成された浸透層におけるシルト（2～40μm）の輸送に及ぼす間隙率や浸透流速の影響を明らかにした。

1 学生会員 修(工) 広島大学 工学研究科 JSPS特別研究員
DC
2 正会員 博(工) 広島大学 工学研究院 助教
3 学生会員 広島大学 工学研究科 修士課程
4 正会員 博(工) 広島大学 工学研究院 准教授

表-2 砂層内における有機泥浸透の実験条件

ケース	砂層の条件		断面平均流速 ^{注(2)} [cm/s]		実験中の平均濁質濃度 [mg/L]	
	砂材料	有効間隙率 ^{注(1)} n_e [%]	初期	最終	流入	流出
Case 1	平均粒径=0.47mm 粒子密度=2.55g/cm ³	33.71	0.040	0.032	117	24
Case 2		33.94	0.049	0.034	115	13
Case 3		32.04	0.064	0.042	120	27
Case 4		32.67	0.078	0.036	115	19
Case 5		32.79	0.088	0.034	118	14
Case 6		37.56	0.063	0.048	117	26
Case 7		35.92	0.064	0.045	123	26
Case 8		31.06	0.064	0.046	113	14

注：(1) 有効間隙率は圧力損失から推定したものである。(2) 実験での有機泥の浸透時間は1時間である。

有機物量が少ない、あるいは有機物の分解が進んだ有機泥は砂層内に残留し難い（透水係数の減少量が小さい）ことを明らかにし、有機泥の輸送は浸透流量や砂層の間隙体積等に依存することを示したが、それらを定量評価するまでには至らなかった。

本論文では（1）式を用いて砂層内での有機泥の輸送に及ぼす浸透流量、および砂層の間隙体積の効果を実験的に検討し、浸透流量および砂層の間隙体積の変化に伴う有機泥の残留量（質量・体積）と残留状態の変化を定量評価することを行う。

2. 実験概要

(1) 実験方法および実験条件

砂層内における有機泥の輸送に及ぼす①浸透流量、および②間隙体積の効果を明らかにするため、有機泥の浸透実験を行った。実験に用いた装置はTouchら（2010）に記載している。実験では、水道水で満たした装置中で気泡を除去した砂材料を締め固め、砂柱（12.8～14cm）を作成する。次に、水位差を付与して鉛直下方向の浸透流を生じさせ、浸透流量、および圧力水頭を測定する。その後、有機泥を水道水と混合して上端から砂柱に浸透させ、15分毎に浸透流量と圧力水頭を測定する。本実験では、砂柱の高さ方向に1cmの間隔でマノメータを付けることで、浸透深さ毎の圧力水頭を測定した。実験条件は表-2に示されている。実験では、全てのケースで流入濁水の濃度が等しくなるように調整しており、濃度は平均散乱光強度とSS濃度との関係（Touchら，2010）から推定した値である。

①浸透流量の効果を明らかにするために、砂層の間隙率が等しくなるように調整し、砂層内へ異なる断面平均流速で有機泥を浸透させている（Case1～5）。なお、砂層の間隙率に関しては粒子の配列によって有効間隙率（流れる間隙率）が最大2%異なった（表-2）。次に、②間隙体積の効果を検討するために、断面平均流速が等しく

表-3 実験に用いた有機泥の性状

浸透粒子	有機物量IL [%]	POC [mg/g]	PON [mg/g]	C/N比
有機泥	12.4	29.53	1.53	22.55

(注) POC：全炭素含有量，PON：全窒素含有量，C/N比=14POC/12PON

なるように調整し、間隙率が異なる砂層内に有機泥を浸透させている（Case 6～8）。

(2) 実験に用いた砂および有機泥の特性

本実験では、太田川中流域で採取した砂を用いた。砂の平均粒径は0.47mm（ D_{20} ：0.50mm， D_{50} ：0.70mm），粒子密度は2.55g/cm³である。また、天満川河口から4.5kmにある泥干潟に堆積した有機泥を採取し、75μmふるいを通過したものを浸透粒子（75μm以下の有機泥）として使用した。実験に用いた有機泥の性状を表-3に示した。有機泥の中央粒径が18μm（島津：SALD-2000J）である。

3. 濁水の浸透による砂層内での有機泥の残留分布

測定された圧力損失と（1）式により砂層の有効間隙比が算出できることを利用して、有機泥を浸透させる前の圧力損失から算出した砂層の有効間隙比分布、および有機泥を浸透させてから30分と60分後の圧力損失から算出した砂層内での有機泥残留率（残留率=残留体積/有効間隙体積，有効間隙体積=砂層の体積×有効間隙率）の分布を図-1に示した。

図-1では、間隙が均一になるように構成された砂柱においても有効間隙比が0.2（間隙率の差9%）程度のバラツキがある。有機泥は間隙が大きい層に残留しており、有機泥の残留分布は砂層の間隙構造（分布）に依存することがわかる。これは見かけ上、平均流は等流であるが、間隙が大きい層では遅い流れが生じることから、浸透力が弱い層に有機泥が残留し易いことを示している。有効間隙比が0.42以下の間隙の小さい層では有機泥が堆積しておらず、初期（浸透時間 $t=0$ min）の断面平均流速に対

図-1 圧力損失から算出した砂層内での有機泥の残留分布（有機泥を浸透させてから30分、60分）、(a)：Case3、(b)：Case4

して間隙水流速（断面平均流速/有効間隙率）が3.4倍程度になると、有機泥が残留し難くなることがわかった。一方、上層（0～7cm）と下層（7～13cm）の間隙比が同じ場合には有機泥が上層に残留する傾向が強くなり、有機泥が上層に多く残留するのは、残留しやすい有機泥から残留（堆積）が起こるためと考えられる。有機泥が残留し始めると、層内への残留量は浸透時間とともに増加していく。これは有機泥の浸透に伴って浸透流量が低下し、浸透流速が減少することに加えて有機泥の体積が増大することによって粒子が相互に付着・凝集し易くなるためである。

4. 砂層間隙内における有機泥の輸送

図-2に有機泥を60分間浸透させた後の、砂柱に残留した有機泥の質量（残留質量）の経時変化が示されている。残留質量は流入する濁水の濃度差から推測した値である。図-2では、砂柱内での有機泥の残留質量は濁水の浸透時間とともに線形的に増加しているが、増加勾配は浸透流量、および間隙体積の条件によって異なっている。この結果から浸透流量の増大（Case1～5）と間隙体積の減少（Case6～8）に伴って残留質量は増加することがわかる。

(1) 残留量に及ぼす浸透流量と間隙体積の効果

図-3には初期の断面平均流速と（a）残留質量、（b）残留体積（1式により推定）との関係、図-4には砂柱の初期の有効間隙率と有機泥の（a）残留質量、（b）残留体積との関係が示されている。ここで示す残留質量と残留体積は有機泥浸透を開始してから15分までの砂柱に残留した量である。15分までの値を用いたのは、浸透流量は有機泥の浸透時間とともに減少するため、短い浸透時間内の残留量が初期の断面平均流速による残留量として近似できるためである。図-1の結果から浸透流速が大きくなると、有機泥が流出し易く有機泥の残留量（残留体

図-2 砂柱に残留した有機泥の質量の経時変化

積、残留質量）が減少すると予想されるが、平均流量を変えた実験では浸透流速の増大に伴い残留質量が増加することがわかる（図-3）。これは、一定濃度の濁水流入下で有機泥が砂柱内に残留する場合において浸透流量の増大は砂柱内への有機泥の輸送量が增大することを示しており、有機泥の残留量は輸送量に比例して増加するためである。また、有機泥の残留質量は砂柱の間隙体積（間隙率）を減少させることに対して増大傾向がある（図-4(a)）。さらに、浸透流速の増加に伴う残留体積の増大傾向は残留質量の増大傾向と異なる（図-3）のは有機泥の残留体積は有機泥の残留（堆積）状態に依存するためである。

(2) 間隙内での有機泥の残留状態

同質量の有機泥が沈降・堆積する場合においても有機泥の詰まり具合（堆積状態）によって有機泥の体積は一定にならないことから、間隙内においても残留した有機泥の体積は有機泥の堆積（残留）状態によって変化すると考えられる。

本実験では間隙内での有機泥の残留状態を直接に観察することができないが、砂層内での有機泥の残留体積と残留質量との関係から残留状態（密度）を推測することが可能である。図-5には浸透時間とともに変化する有機泥の残留体積と残留質量との関係が示されている。図中

図-3 初期の断面平均流速と有機泥を浸透させてから15分までの有機泥の (a) 残留質量, (b) 残留体積との関係

図-4 砂柱の初期の有効間隙率と有機泥を浸透させてから15分までの有機泥の (a) 残留質量, (b) 残留体積との関係

に示した残留質量と残留体積との比 (勾配) は砂柱内に残留する有機泥の状態を乾燥状態に換算した密度 (以降、残留密度と呼ぶ) を表している。本実験で得られた残留密度は $0.12 \sim 0.24 \text{ g/cm}^3$ (図-5中の破線、および実線) の範囲で変化しており、浸透流量、および砂層の間隙体積によって有機泥の残留状態が異なることが理解できる。

(3) 浸透流量と間隙体積による残留状態への効果

金ら (2009) は重力に逆らう浸透流を生じさせながら有機泥を沈降させると、浸透流がない場合に比べて有機泥が緩い状態で堆積 (堆積密度が減少) することを確認している。間隙内に有機泥の堆積方向と異なる流れ (間隙内の乱れ) が生じた場合には、浸透流量が増大するにつれて間隙内の乱れが大きくなるため、有機泥の残留密度が減少し、見かけ上の残留体積が増大することになる。浸透流量と間隙体積による有機泥の残留状態への効果を明らかにするため、(a) 初期の断面平均流速および砂柱の初期の有効間隙率、(b) 初期の換算レイノルズ数 (Touchら, 2010) と残留密度との関係を図-6に示した。図中の残留密度は4. (1) 節と同様に浸透を開始後15分間の有機泥の残留質量と残留体積から算出された。

浸透流速 (Case1～5) あるいは間隙率 (Case6～8) が增大することによって、残留密度が減少し、有機泥は残留密度が小さい状態で堆積していることがわかる (図-6

図-5 有機泥の残留体積と残留質量との関係 (残留密度)

(a)). 流速と間隙率を同時に表す換算レイノルズ数 (間隙水流速、および間隙率と砂粒径で決まる径深を用いる) を用いれば、砂間隙中への堆積においても換算レイノルズ数の増大に伴って間隙内の乱れが大きくなり、有機泥が緩い状態で堆積することを表現できる (図-6 (b)). また、流量を変えることと間隙率を変えることに伴う換算レイノルズ数の変化による堆積状態への効果がほぼ同じであった。換算レイノルズ数を0.190 (Case1) から0.411 (Case5) に増大すると、残留密度が 0.38 g/cm^3 (残留含水比180%) から 0.12 g/cm^3 (残留含水比780%) に減少した。ここで用いた換算レイノルズ数はTouchら (2010)、残留含水比はTouchら (2011) の推定法を用いて算出した値である。

図-6 (a) 初期の断面平均流速 (Case1~5) および有効間隙率 (Case6~8) に対する有機泥の残留密度との関係 (b) 初期の換算レイノルズ数 (Touchら, 2010) と残留密度との関係

5. おわりに

本研究では、有機泥によって地下水の流れが阻害されない砂層構造の設計を行うために、砂層の間隙状態、および浸透流量による有機泥の地盤内輸送への効果を検討した。結果を以下にまとめる。

- 不均一な構造を持つ砂柱内で浸透する有機泥は間隙が大きい層に残留するが、上層から多く残留していく傾向が強い。これは、有機泥は当初浸透流速の小さい高間隙の空間に堆積するが、浸透経過時間とともに浸透流速が遅くなると、上層から残留し始めた層に集中して残留するためである。
- 有機泥の残留量は砂層の間隙体積、および流入濁水の浸透流量に依存しており、浸透流量の増大と間隙体積の減少に伴って残留量が増加する。
- 間隙内では有機泥の堆積方向に異なる流れ（間隙内の乱れ）が存在しており、換算レイノルズ数の増大に伴う間隙内の乱れが大きくなるため、有機泥が緩く堆積することが明らかになった。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究B（代表者：日比野忠史）、および日本学術振興会特別研究員奨励費（代表者：トウ ナロン）による助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 金キョンヘ・阿部真己・駒井克昭・日比野忠史 (2009)：底泥の巻き上げりに及ぼす浸透流の影響，海岸工学論文集，第56巻，pp.971-975.
- TOUCH NARONG・駒井克昭・中下 慎也・日比野忠史 (2010)：砂層内での有機微細粒子の移動に関する実験的な研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp.1076-1080.
- TOUCH NARONG・中下 慎也・小枝豪志・日比野忠史 (2011)：砂層内における有機泥の移動に及ぼす有機物の性状，水工学論文集，第55巻，pp.1681-1686.
- Benamar, A., N. D. Ahfir, H. Q. Wang and A. Alem (2007)：Particle transport in a saturated porous medium: Pore structure effects, Comptes Rendus Geosciences, Vol.339(10), pp.674-681.
- Bergendahl, J. A. and D. Grasso (2003)：Mechanistic basis for particle detachment from granular media, Environmental Science & Technology, Vol.37(10), pp.2317-2322.
- Grolimund, D., M. Elimelech, M. Borkovec, K. Barmettler, R. Kretzschmar and H. Sticher (1998)：Transport of in situ mobilized colloidal particles in packed soil columns, Environmental Science and Technology, Vol.32(22), pp.3562-3569.
- Massei, N., M. Lacroix, H. Q. Wang and J. P. Dupont (2002)：Transport of particulate material and dissolved tracer in a highly permeable porous medium: comparison of the transfer parameters, Journal of Contaminant Hydrology, Vol.57(1-2), pp.21-39.
- Moghadasi, J., H. M. Steinhagen, M. Jamialahmadi and A. Sharif (2004)：Theoretical and experimental study of particle movement and deposition in porous media during water injection, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol.43, pp.163-181.
- Noell, L. A., J. L. Thompson, M. Y. Corapcioglu and I. R. Triay (1998)：The role of silica colloids on facilitated cesium transport through glass bead columns and modeling, Journal of Contaminant Hydrology, Vol.31(1-2), pp.23-56.
- Torok, J., L. P. Buckley and B. L. Woods (1990)：The separation of radionuclide migration by solution and particle transport in soil, Journal of Contaminant Hydrology, Vol.6(2), pp.185-203.