

1. はじめに

太田川感潮域に形成される河口干潟は河川の断面構造の違いによって、土砂の粒度が大きく異なっている。これまでの研究から、二枚貝の優占する干潟地盤内では、透水性が高く、地下水面の以深では濁質の輸送量が干潟表面に比べて多いことがわかっている。干潟地盤内における濁質輸送を伴う流動は、干潟表面に堆積した有機物や酸素を地盤内へ輸送していることが考えられる。著者らは洪水後に 60cm 以上の土砂が堆積した干潟において地下水が流動する 80cm 以深の地盤内で二枚貝が棲息していたことも確認している。

土田ら(2006)は細粒分が 10%程度含まれる砂層に、潮汐に相当する一次元水压変動を载荷した場合に、砂層表面に層内のシルト分が表出することを明らかにした。また細粒分の液性限界が 40%以上では細粒分の移動が起こらないことが指摘されている。

本研究では砂層中の細粒分の移動機構に及ぼす地下水の影響を実験的に検討し、その移動に伴う土砂内での有機物輸送をモデル化するための間隙比と透水係数の関係等、砂層内での細粒分の輸送に関する基礎的な知見を見出すことを目的としている。

2. 実験の概要と実験結果

(1)実験装置と材料及び実験条件

図-1 に本実験で用いた浸透流水槽を示す。図のように、本水槽は中央部に仕切りを入れることで、浸透層がある部分とない部分の 2 つに区切られた構造になっている。水槽水位は 0cm ~ 20cm まで変動させることができ、水頭差を付与することで、実験試料に浸透流を生じさせることができる。実験では、細粒分の流出を検出するために、実験試料の表面から 4cm 離れた高さの位置に濁度計を設置して、連続的に濁度を

測定した。また、透水係数は越流量を測定し、ダルシー則により算出した。

地下水による細粒分の移動には細粒分の粘着力、間隙水の流れなどの要因が関係すると考えられる。本実験では、地盤内の細粒分含有率によって地盤内での細粒分の移動を評価する。試料の異なる 2 ケースの実験を行い、Case1 は細粒分含有率(F)が細粒分の移動限界に及ぼす影響を検討し、Case2 は間隙比の違いによる細粒分の移動に伴う間隙水流れの変化を検討する。実験試料の初期条件を表-1 に示す。混合試料に用いた材料として、細粒分は広島湾に堆積した有機泥(含水比 343%, 強熱減量 11%, 粒径 0.1mm 以下)で、砂は乾燥砂(土粒子密度 2.53g/cm³, 粒径 1.18mm~1.7mm)である。

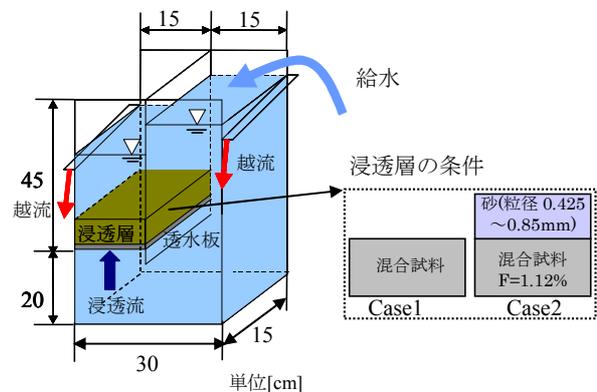


図-1 浸透流実験装置(F: 細粒分含有率)

表-1 実験試料の初期条件

Case1:一層試料(混合試料)

試料	粒径[mm]		細粒分含有率 F[%]
	砂	細粒分	
1	1.18	0.1以下	7.87
2	}		4.49
3			2.24
4	1.7		1.12

Case2:二層試料

試料	上層 初期間隙比(e)	下層試料 細粒分含有率 F=1.12%, 間隙 比e=0.97
	1	
2	0.219	
3	0.179	

(2)地下水による細粒分の移動

図-2 は、Case1 における各試料での細粒分の流出に伴う透水係数の変化を示している。細粒分の流出率は試料上の水中での浮遊物質濃度(SS)と流量から算出した。濁度と SS の関係は実験結果から(1)式のように求められ、(2)、(3)式で細粒分の流出率を求めることができる。

$$SS = 0.0021 \times Turb - 0.0728 \quad (1)$$

$$M = SS \times Q \times t \quad (2)$$

$$\Delta M = \frac{M}{M_0} \times 100 \quad (3)$$

- ここに SS : 浮遊状物質質量[g/l]
 Q : 水頭差を付与したときの単位時間当たりの流量[l/s]
 t : 水頭差を付与する時間[s]
 M : 細粒分の流出量[g]
 M₀ : 初期の細粒分量[g]
 ΔM : 細粒分の流出率[%]
 Turb : 濁度[FTU]

(2)式において、流出した細粒分が浸透流とともに流出するものだけが透水係数へ影響を及ぼすと仮定する。

透水係数の変化は浸透流により試料の間隙(体積)が変化するために生じると考えられるが、本実験では浸透流による試料体積の変化は見られなかった。また、図-2 において、細粒分の流出率が增加することに伴う透水係数の変化が見られた。これは、砂の骨格が維持されたまま細粒分が流出することに伴う間隙が増大することで透水係数が増加するためと考えられる。以上のことから、干潟地盤内での細粒分が流出する原因の一つとして地下水流が考えられる。また、細粒分が流出するとともに透水係数が増加したため、干潟地盤内の細粒分の流出量を求めるには透水係数の変化から推定できると考えられる。

(3)細粒分の移動限界流速

図-4 は水頭差を増加させたときの浸透流速と水頭差の関係を細粒分含有率別に示している。本図において、細粒分含有率が大きくなると間隙が小さくなり、同じ水頭差を与えた場合

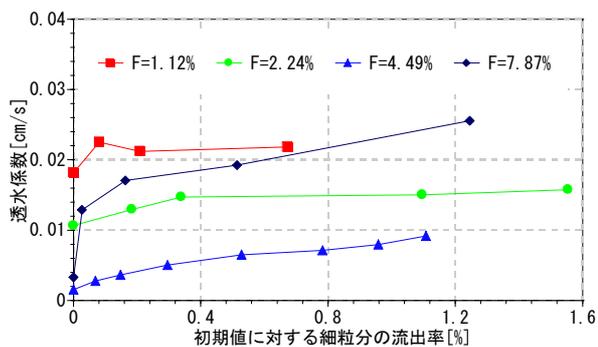


図-2 細粒分の流出に伴う透水係数の変化[Case1]

に流速が小さくなるのが分かる。Case1 の実験結果から、細粒分の流出によって透水係数が増加とわかった。また、濁度の結果(図-3)より、細粒分含有率が1.12%と2.24%の試料では水頭差が0cm から2cm まで増加させたときに濁度の変化がなかった。これに対して、細粒分含有率が4.49%と7.87%の試料では水頭差が0cm から4cm まで増加させたときに濁度の変化がなかった。

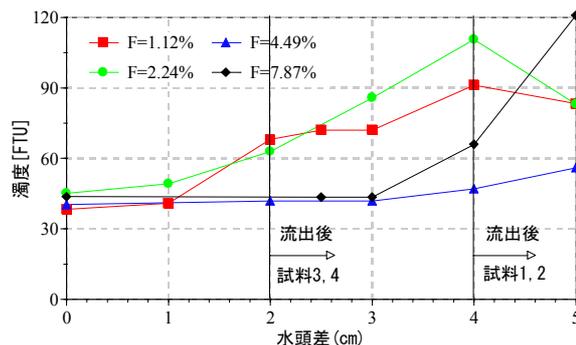


図-3 水頭差の増加に伴う濁度の変化[Case1]

以上のことから細粒分含有率が1.12%と2.24%の試料は水頭差が2cm のときに細粒分が流出し、細粒分含有率が4.49%と7.87%の試料は水頭差が4cm のときに細粒分が流出することがわかった。図-4 においても、細粒分の流出後の浸透流速の勾配(単位水頭あたりの速度増加)が増加することが分かる。このことは、細粒分の流出によって、間隙が増加したため流速が大きくなると考えられる。

図-5 は各試料の細粒分含有率と流出し始めたときの浸透流速の関係を示している。本図には細粒分含有率と移動限界流速の関係を細粒分の移動曲線で示している。図-5 から、干潟地盤内での細粒分の移動を判別できると考えられる。すなわち、干潟地盤内での細粒分含有率

に対する流速が移動曲線より上にある場合は細粒分が移動する．なお，細粒分の移動は細粒分の粘着や砂層の間に依存すると考えられる．

(4) 動水勾配の変化に伴う細粒分の移動特性

水頭差がない状態からある状態に変化した際の細粒分の移動を明らかにするため，細粒分含有率が 2.24% の試料を用いて，水頭差を 5cm まで増加させて，その後の時間的な細粒分の移動を検討した．試料の初期透水係数は $7.98 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ であり，水頭差が 5cm に増加する直前の濁度は約 44FTU であった．

水頭差が 5cm まで増加したとき，透水係数及び濁度がそれぞれ $1.02 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ，86FTU に増加した(図-6 の経過時間が 0min)ため，細粒分が流出したことがわかる．しかし，水頭差を 5cm にして時間が経過すると透水係数はほぼ一定になって，濁度が減少した(水頭差が一定であれば流出した粒径が同じと考える)．また，一定になった透水係数は使用した砂のみ(細粒分含有率 0%)の透水係数(0.05 cm/s)より小さく，細粒分が試料にまだ含まれているが，移動しなくなったと考えられる．

このことから，浸透流を一定にした場合，初期では細粒分が浸透層中の間隙をふさぐように移動し，それに伴い間隙水流れが変化することによって長期的に細粒分が移動せずに細粒分含有率がある一定の値に保たれると考えられる．

(5) 間隙水の流れに及ぼす細粒分移動の影響

干潟地盤では，流れの作用や土粒子の堆積過程などによって間隙が層構造を成すと考えられる．そこで，異なる間隙比を持つ干潟地盤内の細粒分の移動に伴う間隙水の流れの変化について検証を行った．そのため，Case2 として，実験試料を 2 層に分け，上層は砂層(粒径 0.425mm~0.850mm，土粒子の比重 2.53)，下層は Case1 の試料 4 と同じ細粒分含有率が 1.12% の試料を用いた．上層を締め固めて，次式から間隙比を推定する．

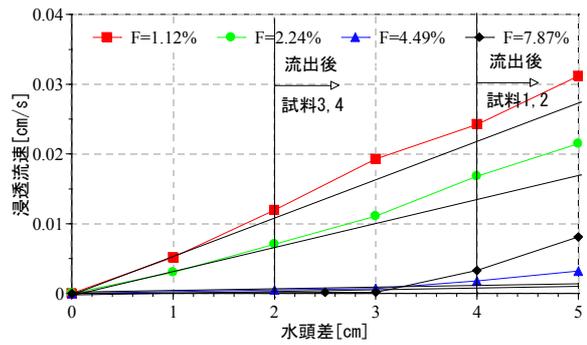


図-4 細粒分の流出による流速の変化[Case1]
(図中の細い直線は細粒分の流出前の流速の勾配を示している)

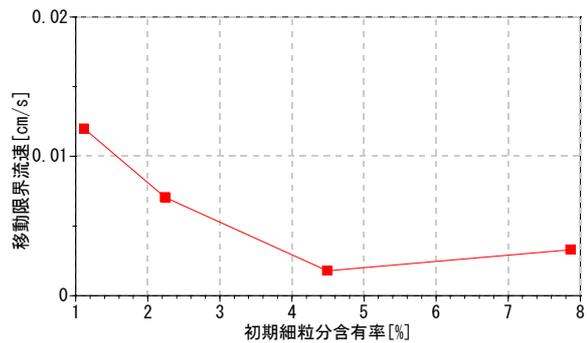


図-5 細粒分の移動限界流速[Case1]

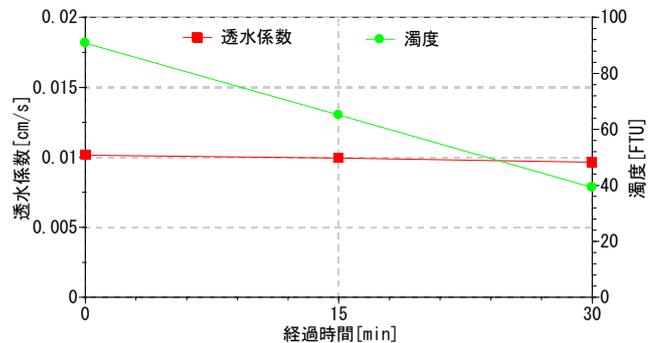


図-6 水頭差 5cm ときの時間的な透水係数の変化[Case1]

$$e = \frac{G_s V}{W_s} \gamma_w - 1 \tag{4}$$

ここに， G_s : 土粒子の比重

V : 上層の体積 [cm^3]

W_s : 上層の粒子の重さ [g]

γ_w : 水の単位体積重量 [g/cm^3]

e : 間隙比

図-7 の縦軸は 2 層の鉛直方向平均透水係数を示している．上層を締め固めた後の下層試料の間隙比，細粒分含有率は Case2 のすべての試料が同じであると仮定する．

濁度の測定結果から、水頭差が 2cm のとき、下層から細粒分が流出したことを確認した。

図-7 には下層の細粒分の流出に伴う上層の間隙比の違いによって、2層平均透水係数の変化が異なることが分かる。間隙比が小さい(間隙比が 0.179 の試料)場合には水頭差が 3cm ときの透水係数が大きく減少した。下層の細粒分の流出によって下層の透水係数が増加して、細粒分が上層に残留しなければ2層平均透水係数が増加すると考えられる。しかし、下層試料の細粒分が流出することによって上層残留すれば、上層の透水係数が減少するといえる。よって、実験結果から下層試料の細粒分の流出することによって細粒分が上層に残留して(間隙が小さくなる)2層平均透水係数が減少するとなり、2層平均透水係数は透水係数が小さい層に依存すると考えられる。

図-8 は Case2 試料 3 の実験前後の上層に含まれた細粒分をみると実験後では上層に粒径 75 μm ~ 100 μm の土粒子が含まれることを確認できた。

このことから、異なる間隙比を持つ干潟地盤内で細粒分の移動によって、間隙が小さい層に細粒分が残留し、間隙水の流れが小さくなると考えられる。

3. 結論

干潟地盤内での細粒分の移動に及ぼす地下水の影響を検討し、細粒分の流出モデルを作成するための実験結果から、以下のことが分かった。

- (1) 地下水流によって細粒分が流出し、透水係数が増加した。このことから、透水係数の変化が細粒分の流出量モデルを構築には重要なパラメタであると考えられる。
- 2) 細粒分含有率の違いによって、細粒分の移動が生じる移動限界流速が異なる。
- (3) 浸透流が一定であれば細粒分の流出前後の間隙構造の変化が間隙水の流れに影響を及ぼすことによって、細粒分の流出が長期にわたって生じることなく、細粒分含有率がある一定値に保たれることが明らかになった。

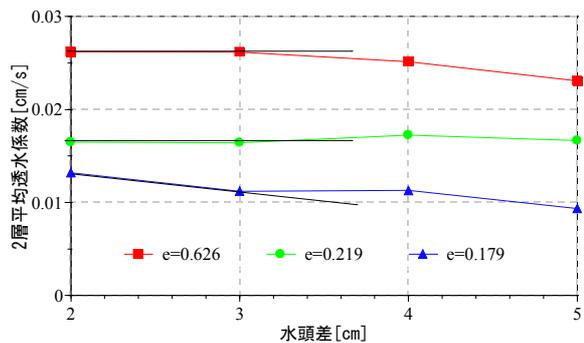


図-7 間隙比別の水頭差と平均透水係数の関係[Case2](図中の実線は水頭差が 2cm ~ 3cm 間の透水係数変化の傾きを示す)

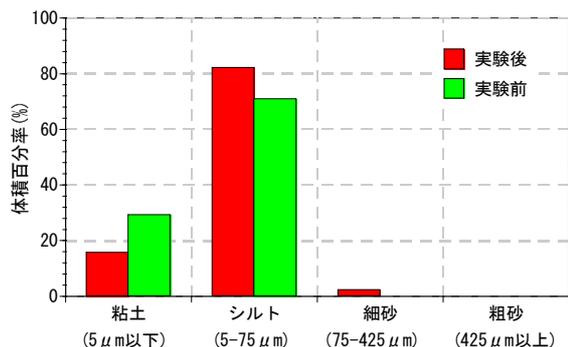


図-8 実験前後の上層に含まれた細粒分 [Case2, 試料 3]

参考文献

土田孝, 吉牟田卓, 浅海綾一: 一次元水圧変動による海底地盤表層からの細粒分移動に関する研究, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp491-495, 2006

中下慎也, 日比野忠史: 複断面形状が形成する地下水流と河口干潟の特性, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.1246-1250, 2007

日比野忠史, 松本英雄, 水野雅光: 太田川デルタ地下水の流動と海底濁度層の形成, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp1146-1150

Javis N, Villholth K, Ulen B (1999): Modelling particle mobilization and leaching in macroporous soil, European Journal of Soil Science, 50, 621-632

Munenori Hatanaka, Akihiko Uchida and Naoto Takehara(1997): Permeability characteristics of high quality undisturbed sands measured in a triaxial cell, Soils and Foundations, Vol.37, No.3, pp.129-135