

II-22 流水による粘土分を含む砂れきの移動限界に關与する粘着力の評価

北見工業大学工学部 正会員 早川 博
北見工業大学工学部 正会員 内島邦秀

1. はじめに

粘土分を含む砂れきの流砂機構について、これまで芦田・田中¹⁾、芦田・江頭ら²⁾によって実験的・理論的研究が手掛けられている。しかし粘土分の粘着力については粘土の複雑な物理・化学的性質によってまだ十分に説明されていないのが現状である。著者らはこれまでに粘土分を含む砂れき（以下、粘着砂と呼ぶ）の移動限界を明らかにする目的で、粘着砂に含まれる粘土分が砂れきの空隙以下の場合を対象に、粘着砂に含まれる粘土の粘着力と粘着面積を個々に評価する方法³⁾と土質試験から得られる粘着砂の粘着力を用いて評価する方法⁴⁾を検討してきた。いずれも種類の粘土についての検討しか行っていないので、今回は他の性質が異なる粘土を含む粘着砂の移動限界を調べ、粘土の性質の違いによる相違点を明らかにする。また、これらの評価方法について再検討を行う。

2. 粘着砂の移動限界に關与する粘着力の評価

粘土分を含む砂れきの移動限界は、無次元限界掃流力 τ_{xoc} の形で表示する。砂れきに含まれる粘土は砂れき同士を粘着面積に応じた粘着力で付着させているので、それによる掃流力の増分を砂れきだけの限界掃流力に付加したのが粘着砂の限界掃流力である。砂れきの初期移動を滑動形式とした場合、無次元化して河床勾配を無視すると以下のように表現できる²⁾。

$$\tau_{xoc} = \tau_{xc} + \Delta \tau_{xoc} \quad \dots(1)$$

$$\Delta \tau_{xoc} = \frac{k_1 d^2 f_c}{(\rho_s - \rho) k_3 d^3} \frac{\tau_{xc}}{\mu_s} \quad \dots(2)$$

ここに、 d ：砂れき径、 ρ_s 、 ρ ：砂れきおよび水の密度、 f_c ：単位面積当りの粘着力、 $k_1 d^2$ ：粘土の粘着面積、 k_3 ：砂粒子の形状係数（球形の場合 $\pi/6$ ）、 μ_s ：静摩擦係数である。したがって、粘着砂の移動限界は $\Delta \tau_{xoc}$ を推定すれば良いことになる。 $\Delta \tau_{xoc}$ の推定には次の2通りの方法がある。

2.1 粘着力と粘着面積を個々に評価する方法²⁾³⁾

$\Delta \tau_{xoc}$ は(2)式から粘土の粘着力 f_c と粘着面積 $k_1 d^2$ を求めればよい。粘着力 f_c は物理・化学的性質を考慮して評価すべきであるが、ここでは土質試験で得られる粘着力（せん断強さ）で評価する。なお、粘着力は一般に含水比の増加とともに減少するので、実験中の粘土の含水比が変化した場合には補正を行う。一方粘着面積は砂れきと粘土の存在状態をモデル化して評価する。これらを(2)式に代入して $\Delta \tau_{xoc}$ を誘導すると以下ようになる。

芦田・江頭らのモデルの場合²⁾

$$\Delta \tau_{xoc} = \frac{3n}{2} \frac{f_c}{(\rho_s - \rho) g d} \left[\left\{ 1 + \frac{1}{1 - \lambda} \frac{p_f (1 + \sigma w)}{p_f \sigma w + 1} \right\}^{2/3} - 1 \right] \frac{\tau_{xc}}{\mu_s} \quad \dots(3)$$

著者らのモデルの場合³⁾

$$\Delta \tau_{xoc} = \frac{3 f_c}{(\rho_s - \rho) g d} \frac{1 - \lambda}{\lambda} \frac{p_f}{1 - p_f} (1 + \sigma w) \cdot (1 - \cos \beta) \frac{\tau_{xc}}{\sin \beta} \quad \dots(4)$$

ここに、 n ：一個の砂粒子の接点数、 w ：粘土の含水比、 p_f ：粘土の含有率、 λ ：空隙率、 $\sigma = \rho_s / \rho$
 β ：下流側隣接砂粒子との接線と平均河床面とのなす角でガラスビーズの場合 $\beta \approx 30^\circ$ である。

2.2 粘着砂の粘着力から評価する方法⁴⁾

上記の方法は $\Delta \tau_{xoc}$ を推定するために(3)、(4)式中の諸量が既知でなければならず、これらをすべて求めるのはかなり煩雑である。そこで、 f_c と $k_1 d^2$ のかわりに土質試験から求められる粘着砂の粘着力 C を用い

て $\Delta\tau_{xc}$ を誘導してみる。まず、せん断試験で生じた破壊面を模式的に図1のように表す。その破壊面には垂直応力 σ と面に平行なせん断応力 τ と粘着力 C が作用し、内部摩擦角を ϕ とすると $\tau = C + \sigma \tan \phi$ のクーロンの式が成り立つ。この式から粘着力 C は垂直応力や内部摩擦角に無関係であることがわかる。したがって、粘着力 C は破壊面に占める粘土の粘着面積 S に比例した粘着力 $f_0 \cdot S$ を破壊面の面積 A で除した応力で $C = f_0 \cdot S / A$ となる。次に破壊面の砂れきに注目し、砂れき同士の粘着面積 $k_1 d^2$ が砂れきの破壊面への投影面積 $\pi d^2 / 4$ に占める割合 $k_1 d^2 / \pi d^2 / 4$ が S / A に等しいと仮定すると、 $C = f_0 \cdot k_1 d^2 / \pi d^2 / 4$ となる。これを(2)式に代入すると次の関係式が得られる。

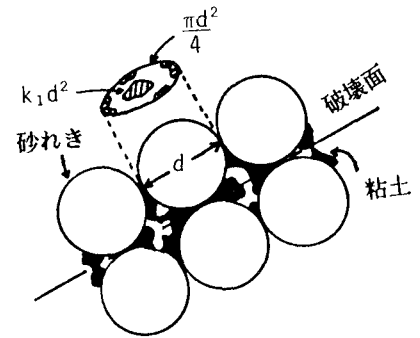


図1 破壊面の模式図

$$\Delta\tau_{xc} = \frac{C \pi d^2 / 4}{(\rho_s - \rho) g k_1 d^3} \frac{\tau_{xc}}{\mu_s} \quad \dots(5)$$

3. 実験の種類とその方法

実験には砂れき材料にガラスビーズ、粘土材料にベントナイトとパルクレイを用いた。ガラスビーズの粒径、比重および空隙率は、それぞれ $d=5\text{mm}$ 、 $\sigma=2.53$ 、 $\lambda=0.388$ である。ベントナイト（日本礦研備製黒色ベントナイト）とパルクレイ（林化成備製造）の比重、塑性限界および液性限界は、それぞれ $PL=40$ 、 $LL=200$ 、 $\sigma=2.40$ および $PL=31.3$ 、 $LL=50.0$ 、 $\sigma=2.63$ である。粘着砂はガラスビーズと粘土と水を所定の配合でモルタルミキサーを用いて練り混ぜ、練り混ぜ後はほぼ同じ時刻に実験を開始した。

3.1 粘土および粘着砂の粘着力

粘土および粘着砂の粘着力を求めるには、前報の一軸圧縮試験の他、直接せん断試験、三軸圧縮試験とベーン試験が一般的である。前報では比較的粘着力が大きな範囲の試験であったので、一軸圧縮試験を行うことができた。しかし、その範囲の粘着力をもつ砂れきの移動限界は実験水路の能力を越えている場合が多い。そこで比較的弱い粘着力を求める試験として、軟弱な粘土質地盤のせん断強さを求めるために用いられるベーン試験を両粘土に適用した。ベーン試験は、下端に4枚の羽根（ベーン）を十字字に取付けたロッドを試料の中に差込み、ロッドの頂部にトルクを与えると、羽根の幅を直径とし、その差込み深さを高さとした円柱形の土の部分が生断され、そのときの抵抗を測定してせん断強さを求める方法である。粘土のように内部摩擦角 ϕ が $\phi=0$ である場合には、せん断応力 τ_c が粘着力 f_0 に等しくなる。また、粘着砂のように $\phi \neq 0$ の場合の粘着力 C については次節で述べる。実験に用いたベーン試験機は、せん断強さの大きさに応じて二種類の力計を使い分けることで、広範囲のせん断強さが測定できる。また、試料の締め固めは後で述べる水路実験と同じ配合条件で同程度の単位体積重量になるように突き固めて試験を行う。

3.2 粘土の浸水試験

粘土表面の含水比の経時変化を間接的に調べるために以下の実験を行う。内径5.1cmのエンビ管を輪切りにした高さ2cmのリングに所定の含水比の粘土を詰め、表面を滑らかに仕上げる。それをガラス板に載せて水に浸し、所定の時間毎一個づつ取り出す。表面の余分な水を取り去り、表面から2mm毎に3層の粘土を剥ぎとり含水比の変化を調べる。

3.3 粘着砂および粘土の移動限界

粘着砂の移動限界は基本的には前報³⁾と同様に、移動した砂れきの累加個数と無次元掃流力の関係から求めたが、以下の点について改良を加えた。①長さ9m幅30cmの木製水路を1/40の勾配に設定し、より大きな掃流力までの実験ができるようにした。②移動床区間は図2のように左右側壁を透明なアクリル製にし、鉄製の容器に試料を詰め、水路底に埋め込んで移動床とした。この容器は水路底から取り外しが可能で、単位体

積重量、空隙率を求め、上記の土質試験と試料の締め固めを同じくできるようにした。また、移動床区間が長さ60cm幅15cmであるので、移動個数は前報と同じ面積当り(750cm²)に補正した。③無次元限界掃流力 τ_{xc} を前報では移動個数が急増する地点で定義して

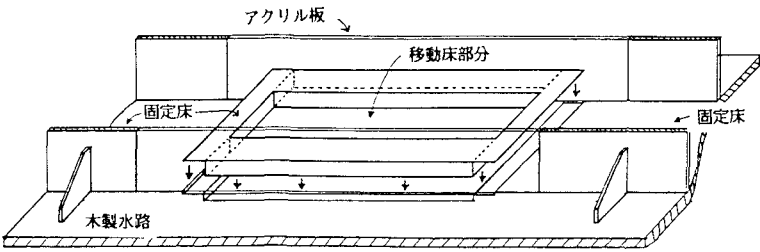


図2 実験水路の概略図

いたが、試料の締め固め、配合条件によっては必ずしも急増する点が明確でなく、移動した砂れきの累加個数が 12個/分/750cm²となる点で τ_{xc} を定義することにした。この12個という数は前報で定義したガラスビーズだけの場合の $\tau_{xc}=0.045$ に対応した移動累加個数である。この定義で前報の τ_{xc} を見直したが大きな違いは認められなかった。

一方、粘土の移動限界は、粘着砂と同じ含水比の粘土を水路の固定床部分に張付けてあるガラスビーズの間隙に詰め、掃流力の増加に伴う粘土の浸食の様子を目視で判断した。この実験は砂れきの間隙にある粘土がどの程度の掃流力で移動し始め、砂れきの移動限界時の粘着面積の減少の影響を調べる。

4. 実験結果と考察

4.1 粘土と粘着砂の粘着力

粘土のベーン試験結果を図3に示す。両粘土とも粘着力は含水比 w の増加にともない減少し、指数関数で近似できる。図中の丸印はベントナイトについて前報の自由落下方式によるユーン試験³⁾(○印)とベーン試験(●印)を比較したものであるが、ほぼ同じ結果が得られた。パールクレイはベントナイトに比べると含水比に対する粘着力の変化の割合が大きく $w=100\%$ で粘着力が0.1(gf/cm²)以下になっている。ベントナイトが同じ値になるのは $w=300\%$ 付近で、高含水比までかなりの粘着力を発揮するようである。このように粘着力は含水比に大きく左右されるので、水路実験で含水比が変化する場合には何らかの粘着力の補正をする必要がある。

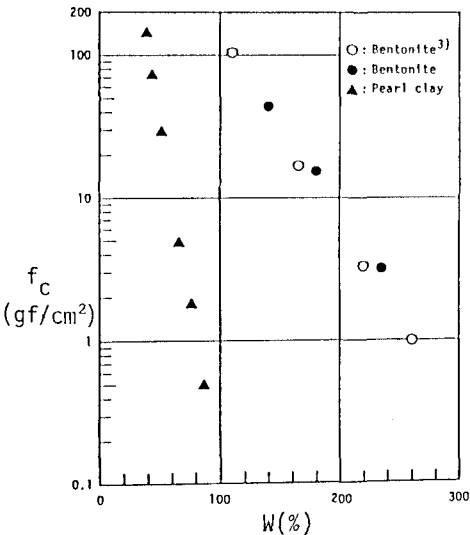


図3 粘着力と含水比

次に、粘着砂のベーン試験結果を図4-1, 2に示す。図は縦軸にせん断応力 τ_s 、横軸に粘着砂の間隙に占める粘土の飽和度 α をとり、含水比 w をパラメータにして表した。飽和度が等しいと粘土の種類が違っていても存在状態は同じである。本研究の対象は粘土分が砂れきの空隙以下の状態を想定しているの、飽和度 α が1以下の範囲である。飽和度 α は p_r , w , ρ_s および λ から次式で表される。

$$\alpha = \frac{1-\lambda}{\lambda} \frac{p_r}{1-p_r} (1 + \sigma w) \quad \dots(6)$$

両図とも α が増えるにしたがい τ_s が大きくなり、 $\alpha \approx 100\%$ 、つまり飽和状態近くで τ_s が減少する傾向にある。これは粘着砂の間隙が粘土で埋め尽くされると、砂れき同士の摩擦が減少するためと考えられる。また、図3からベントナイトの $w=50\%$ とパールクレイの $w=150\%$ 、 $w=70\%$ と $w=250\%$ はほぼ同じ粘着力で、 α が

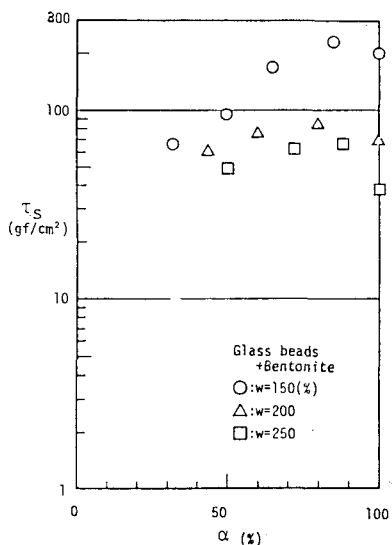


図4-1 せん断応力と飽和度(ベントナイト)

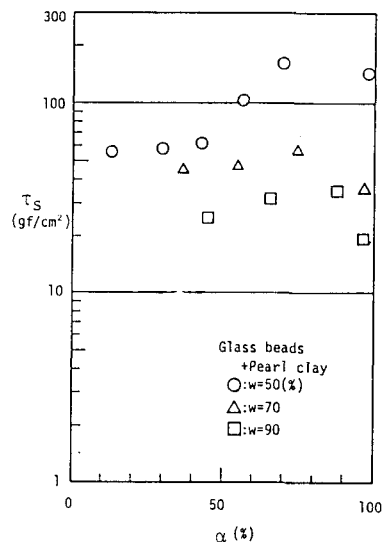


図4-2 せん断応力と飽和度(パールクレイ)

同じ場合各々の τ_s も等しい値を示している。

さて、粘着砂の粘着力 C はせん断応力 τ_s から砂れき同士の摩擦成分を引いたもので、前報の一軸圧縮試験結果から、粘土の含有量が増えるにしたがい大きくなり、 $\alpha=1$ で粘土の粘着力 f_c に等しくなると考えられる。しかし、ペーン試験はせん断応力 τ_s を直接測定するので、摩擦成分を見積ることが難しく、 C の算定は現在種々検討中である。したがって、2.2の評価方法の検討は機会を改めて発表する予定である。

表1 実験条件と結果

Run No.	clay type	p_f	$w(\%)$	I	γ_t	λ	λ'	$\alpha(\%)$	τ_{s00}	$\Delta\tau_{s00}$
10	non-clay	0		1/40		0.388	0.388	0	0.045	0.0
11	bentonite	0.048	150	1/40	1.61	0.435	0.303	30.3	0.099	0.054
12	"	"	200	"	1.68	0.422	0.250	40.8	0.066	0.021
13	"	"	250	"	1.70	0.429	0.223	48.0	0.053	0.008
14	"	0.070	150	"	1.71	0.431	0.231	46.4	0.107	0.062
15	"	"	200	"	1.75	0.437	0.190	56.5	0.093	0.048
16	"	"	250	"	1.80	0.434	0.137	68.4	0.057	0.012
17	"	0.091	150	"	1.73	0.453	0.196	56.7	0.118	0.073
18	"	"	200	"	1.86	0.433	0.097	77.6	0.098	0.053
19	"	"	250	"	1.90	0.446	0.046	89.7	0.112	0.067
20	"	0.130	250	"	1.84	0.523	0.007	98.7	0.119	0.074
100	pearl clay	0.048	50	1/40	1.47	0.458	0.398	13.1	0.053	0.008
101	"	0.091	50	"	1.67	0.426	0.298	30.0	0.081	0.036
102	"	"	70	"	1.70	0.425	0.268	36.9	0.062	0.017
103	"	"	90	"	1.72	0.428	0.243	43.2	0.045	0.0
104	"	0.130	50	"	1.74	0.439	0.252	42.6	0.090	0.045
105	"	"	70	"	1.83	0.424	0.188	55.7	0.069	0.024
106	"	"	90	"	1.87	0.424	0.144	66.0	0.045	0.0
107	"	0.167	50	"	1.85	0.436	0.185	57.6	0.086	0.041
108	"	"	70	"	1.97	0.419	0.102	75.7	0.056	0.011
109	"	"	90	"	1.93	0.448	0.091	79.7	0.050	0.005

4.2 粘土の浸水試験

浸水している粘土の含水比の経時変化を粘土表層の場合について図5に示す。両粘土とも初期含水比が小さいほど含水比の変化が大きくなる傾向にあり、ベントナイトは時間が経ってもなかなか一定にならないようである。パールクレイは最初の10分ではほぼ一定になっている。この結果から、含水比の変化量を求め、粘着力の補正を行った。なお、表層以下の部分は含水比がほとんど変化していなかった。

4.3 粘着砂および粘土の移動限界

先に粘土の移動限界について述べる。パールクレイは $w=50\%$ のとき $\tau_c=0.028$ で表面が所々剝離し始め、それが全面に広がっていった。侵食の深さはガラスビーズ表面から約2mm程度までで、それから先の侵食は僅かであった。 $w=70\%$ 、 90% のように含水比が大きいと $w=50\%$ の場合のような剝離現象はみられず、 $\tau_c=0.02$ 付近から粘土が舞い上がるようにして移動し始め、一様に侵食が進んだ。侵食量は $w=90\%$ の方が多かった。一方、ベントナイトは $w=150\%$ のとき $\tau_c=0.06$ 付近で粘土が舞い上がり始めたが一様に侵食されるだけで剝離現象は認められなかった。 $w=200\%$ でも $\tau_c=0.06$ で移動し始め、 $\tau_c=0.1$ 付近で粘土表面が押し流されて波打つ現象が観察された。 $w=250\%$ では $\tau_c=0.045$ 付近で粘土表面に細い亀裂が生じ、 $\tau_c=0.055$ 付近から粘土が取れ出した。以上の観察結果からパールクレイは砂れきの移動限界 $\tau_{cc}=0.045$ 時点でもかなり侵食され、粘着面積の減少が考えられる。一方ベントナイトは砂れきとはほぼ同時に移動し始めるようである。

次に粘着砂の移動限界を、3.3の定義にしたがって求めた。一例として、ベントナイトの含有率 p_r が0.091の場合について、ガラスビーズの離脱個数の累加個数 N と無次元掃流力 τ_c の関係を、含水比 w をパラメータにして図6に示す。図中の一点鎖線が $N=12$ 個/分で N と τ_c との関係を近似した実線との交点が粘着砂の無次元限界掃流力 τ_{c0} である。この値から τ_{cc} を引いて $\Delta\tau_{c0}$ を求め、結果を表1に実験条件とともに示す。また、飽和度 α に対する $\Delta\tau_{c0}$ の変化について w をバ

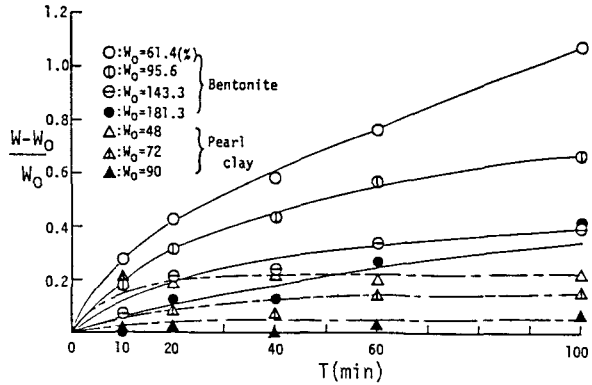


図5 含水比の経時変化

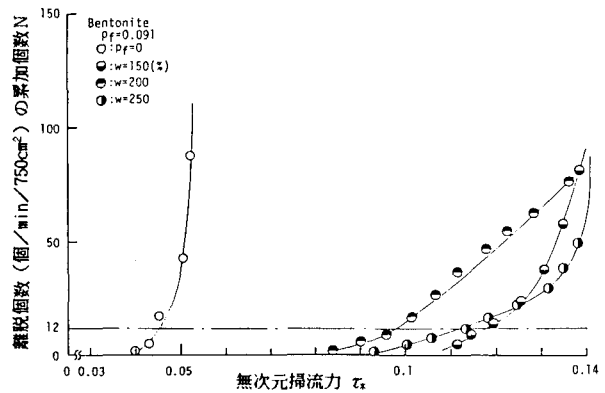


図6 離脱累加個数と無次元掃流力

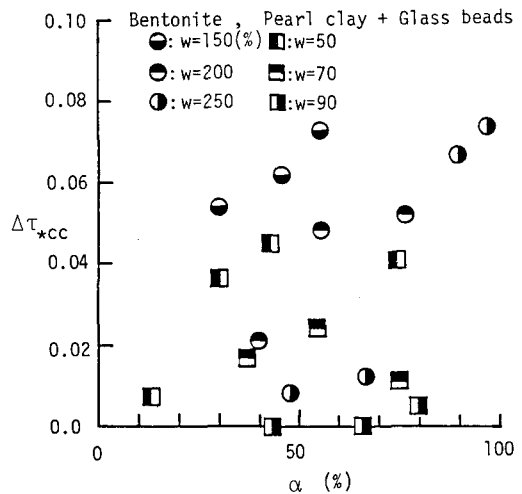


図7 無次元掃流力の増分と飽和度

ラメータにして図7に示す。ベントナイトは α の増大にともない $\Delta\tau_{cc}$ が増加していくが、パールクレイは α が大きくなるとある地点から逆に $\Delta\tau_{cc}$ が減少する傾向がみられる。また、ベントナイトの $w=250\%$ の場合に、 $\alpha=1$ 付近で極端に $\Delta\tau_{cc}$ が大きくなっている。このとき粘着砂の表面が間隙の粘土で平らになり、流れに対する抵抗力が増加したためと考えられる。更に図4との比較から、同じ飽和度で同じ τ_c のときにはパールクレイの方が移動し易い傾向にある。つまり粘着砂の移動限界は粘土の移動限界にかなり影響を受けている。

5. 粘着力の評価方法の検討

2.1で示した(3),(4)式から求めた $\Delta\tau_{cc}$ の計算値と実験値との比較を行う。図8は、含水比が $w=200\%$ のベントナイトの粘着砂において、粘土の飽和度 α に対する $\Delta\tau_{cc}$ の変化について計算値と実験値の比較をしている。計算に用いた粘土の粘着力 f_c は含水比の変化による補正を行い $f_c=5.7\text{gf/cm}^2$ とした。また、空隙率 λ は実験の平均値で $\lambda=0.431$ 、他の値は $\rho_s/\rho=2.53$ 、 $d=0.5\text{cm}$ 、 $w=2.0$ 、 $n=3$ 、 $\mu_s=0.577$ 、 $\beta=30^\circ$ 、 $\tau_{cc}=0.045$ として計算した。図から、計算値は実験値より(3)式で約20倍、(4)式で約5倍ほど大きくなっている。粘着力の補正と実験の空隙率を与えたことで、前報よりかなり実験値に近づいた。しかし、今後更に実験値との対応を良くするには、粘土の物性、化学的性質を考慮して粘着力の評価をしていかなければならない。

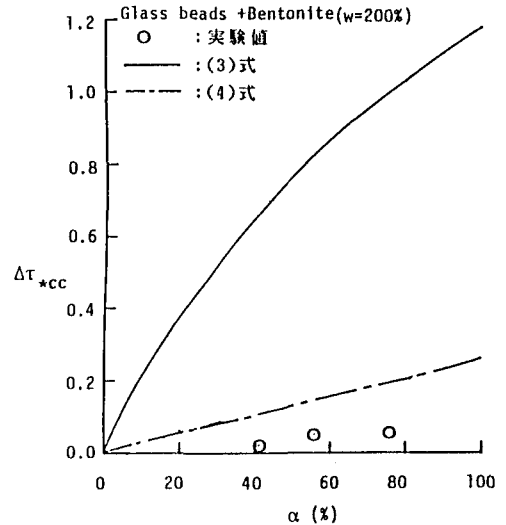


図8 無次元掃流力の増分と飽和度

6. おわりに

本研究では、性質の違う粘土を混ぜた粘着砂の移動限界を調べ、粘着力の評価方法の検討を行った。その結果をまとめると以下のようである。

- (1) 粘着砂の移動限界は含まれる粘土の性質、特に流水に対する移動限界に左右され、パールクレイのように粘土の移動限界が小さいと粘土の含有量が多くても移動し易くなることがある。
- (2) 粘着砂のせん断強さが同じで、粘土の飽和度が等しい、つまり粘土の存在状態が同じでも粘土の性質によって移動限界は異なる。
- (3) 粘土の粘着力と粘着面積を個々に評価する方法は、粘土の含水比の変化の影響を考慮することで実験値との対応がかなり改善された。

【参考文献】

- 1) 芦田和男・田中健二：粘土分を含有する砂れき床の侵食と流砂機構に関する研究，京大防災研究所年報，第17号B，pp.571～584，1974。
- 2) 芦田和男・江頭進治・加本 実：山地流域における侵食と流路変動に関する研究（1）—— 粘着性材料を含む砂れきの移動限界と流砂量 ——，京大防災研究所年報，第25号B-2，pp.340～360，1982。
- 3) 内島邦秀・早川博：流水による粘土分を含む砂れきの初期移動について，土木学会北海道支部論文報告集，第43号，pp.233～238，1987。
- 4) 早川博・内島邦秀：流水による粘土分を含む砂れきの移動に係る粘着力の実験的検討，土木学会第42回年次学術講演会講演概要集第2部，pp.310～311，1987。