

混合粒径砂における移動層厚と漂砂量に関する研究

Mohammad Dibajnia*・高沢大志**・渡辺 晃***

1. はじめに

現地の砂浜では各点で砂の粒径はほぼ均一になっていることが多いが、河川の流入部や、最近盛んになってきている養浜の影響などで混合砂の海岸が形成されることがある。養浜後の砂浜の地形を予測するうえで混合砂の研究は欠かせない。しかし、これまでの漂砂に関する研究のほとんどは均一粒径の砂に対して行われており、混合砂に関する研究は近年になって行われるようになりはじめている（例えば砂村, 1984；田中ら 1989；乾ら 1995）。

これらの研究によれば、混合砂の中の細砂の移動量は均一砂のそれよりも小さくなる。この理由は、混合砂では粗粒砂の空隙に細粒砂が入り込むことによって空隙率が減少し、強度が増すことであり、また、アーマリング効果によって粗粒砂が表面に現れて細粒砂を覆うことである。しかし、粗砂の移動量は細砂からの影響をあまり受けない。この様に混合砂の移動機構が少しずつ解明されてきてはいるが、未知な部分がまだ多い。特に地形変化の正確な計算をするうえで不可欠な混合層厚に関する研究はほとんどない。

一方、碎波帯付近で見られる漂砂の移動形態はシートフローであり、高濃度の移動砂層が形成され、多量の土砂移動を引き起こすことが知られている。したがって、この現象の海浜地形変化におよぼす影響は極めて大きく、混合砂のシートフロー現象に対する知見を得ることは海岸過程を予測する上で必要不可欠である。

本研究ではシートフローでの実験をもとに、混合粒径砂における漂砂現象のメカニズムを解明することを目的とした。その中で特に混合層厚に影響を与える砂の移動層厚に着目し、これを測定するとともに漂砂量も測りその関係を調べた。

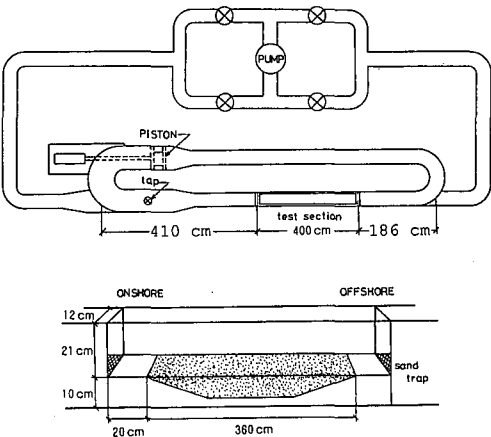


図-1 実験装置とその観測部

2. 実験の概要

(1) 実験装置及び方法

任意の流速波形を与えることができる振動流装置を用いて実験をした。観測部は長さが約 4 m で、高さ 21 cm、幅 12 cm の長方形断面である。観測部の両端にはハニカムで作製した捕砂器を設置し、底質の流失を防止した。この実験ではあらかじめ粗砂と細砂を混合させ、振動流装置の観測部に厚さ 8 cm に敷きつめた。細砂混合率は 50%, 75% の 2 通りにした。粗砂にはわかりやすいように染料で黒く色をつけた。流速波形として一次のクノイド規則波相当のもの(図-2)を、流速振幅をシートフローになる範囲でいろいろ変えて作用させた。流速をある程度大きくしつつも、水粒子軌道直径が観測部の長さの半分よりも大きくならないようにするために、周期は 3 s とした。作用時間を長くして移動の様子をじっくり観察

表-1 砂の性質

砂	中央粒径 (cm)	比重	沈降速度 (cm/s)
豊浦砂	0.02	2.65	2.3
相馬砂	0.055	2.65	7.0
相馬砂	0.08	2.65	10.0

* 正会員 工 博 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科
** 正会員 修(工) (株)新日本製鐵
*** 正会員 工 博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻

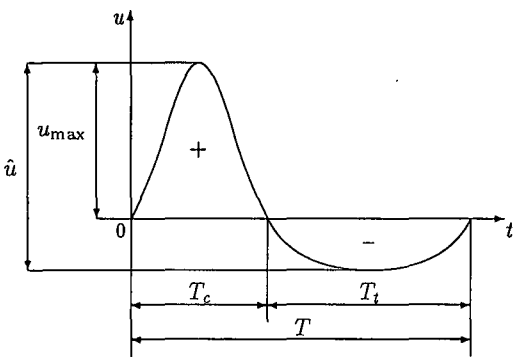
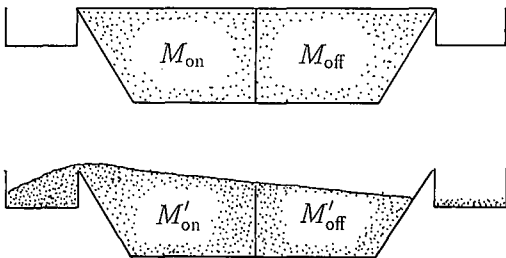


図-2 流速波形



$$\Delta M_{on} = M'_{on} - M_{on} \quad \Delta M_{off} = M'_{off} - M_{off}$$

図-3 漂砂量の評価方法

するためには漂砂量はあまり大きくなってほしくないの
で、非線形性パラメータ ($u_{max}/\bar{u}$) を 0.6 にした。また、
すべての実験を最新型のデジタルビデオで撮影した。

(2) 実験に用いた砂

細砂には中央粒径 0.2 mm の砂を、粗砂には中央粒径
0.55 mm、もしくは 0.8 mm の砂を用いた。実験に使った
砂の性質を表-1 に示す。

(3) 漂砂量の測定

漂砂量は図-3 のように観測部を 2 つに分けてあらか
じめ重量を量っておき、実験後にふるい分けし、乾燥さ
せてから再び重量を量りその差から漂砂量を求めた。

$$q = \frac{\Delta M_{on} - \Delta M_{off}}{2\rho_s B \Delta t} \dots\dots\dots (1)$$

ここで q は岸向きを正とした単位幅・単位時間当たりの
正味の漂砂量、 ρ_s は砂の密度を表し、 B は実験装置観測
部の幅を表す。 ΔM は質量の変化分、 Δt は実験時間を表
し、on, off はそれぞれ岸側と沖側を表す。

また、今回の実験では比較的大きな流速を使った関係
で、実験によっては多くの砂が損失したケースもある。
漂砂量データの信頼性を測る上で以下のように Error
を定義した。

$$Error = \frac{\Delta M_{on} + \Delta M_{off}}{\Delta M_{on} - \Delta M_{off}} \dots\dots\dots (2)$$

(4) 移動層厚の測定

層厚の測定にはビデオを用いた。粗砂と細砂は全く違
う動きを見せるので別々に測った。図-4 のように移動
層厚を定義し、今回の研究では 1 周期の中で最大になっ

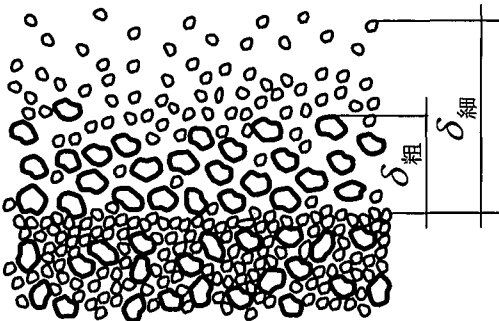


図-4 移動層厚の定義

表-2 実験結果

case	u_{max} [cm/s]	u_{rms} [cm/s]	Δt [s]		%	δ [cm]	q [cm ³ /s]	Error
1	185	160	168	粗	50	1.3	-0.072	0.53
				細	50	5.0	-0.0094	3.2
3	116	100	150	粗	50	0.5	0.1845	0.18
				細	50	0.9	0.0597	0.26
4	131	113	150	粗	50	0.6	0.3092	0.04
				細	50	1.8	0.1908	0.05
5	139	120	150	粗	50	0.8	0.4088	0.16
				細	50	2.0	0.1614	0.40
6	116	100	150	粗	25	0.4	0.1258	0.25
				細	75	1.5	0.1101	0.45
7	147	126	120	粗	25	—	0.0734	0.07
				細	75	—	-0.0577	2.31
8	131	113	150	粗	25	0.5	0.0912	0.36
				細	75	1.7	0.1048	0.60
9	116	100	150	粗	25	0.4	0.1247	0.33
				細	75	1.7	0.1719	0.39
10	154	133	150	粗	25	0.6	0.0933	0.01
				細	75	2.1	0.0943	2.93
11	162	140	180	粗	25	0.6	0.0917	0.35
				細	75	2.2	-0.0786	2.53
12	139	120	150	粗	25	0.4	0.1017	0.01
				細	75	2.0	0.0786	0.36
13	139	120	150	粗	50	0.7	0.3574	0.07
				細	50	1.7	0.1729	0.13
14	162	140	150	粗	50	1.1	0.1845	0.34
				細	50	2.3	-0.1017	0.22
15	116	100	120	粗	50	0.5	0.0957	0.20
				細	50	1.4	-0.1297	0.60
16	158	136	150	粗	50	0.80	—	—
				細	50	1.8	-0.1782	0.33
17	147	126	90	粗	50	0.7	0.3319	—
				細	50	1.6	-0.0838	—
18	131	113	90	粗	50	0.6	0.2201	—
				細	50	1.4	0.0314	—
19	158	136	150	粗	100	—	0.2379	—
20	166	143	120	粗	100	1.4	0.2332	—

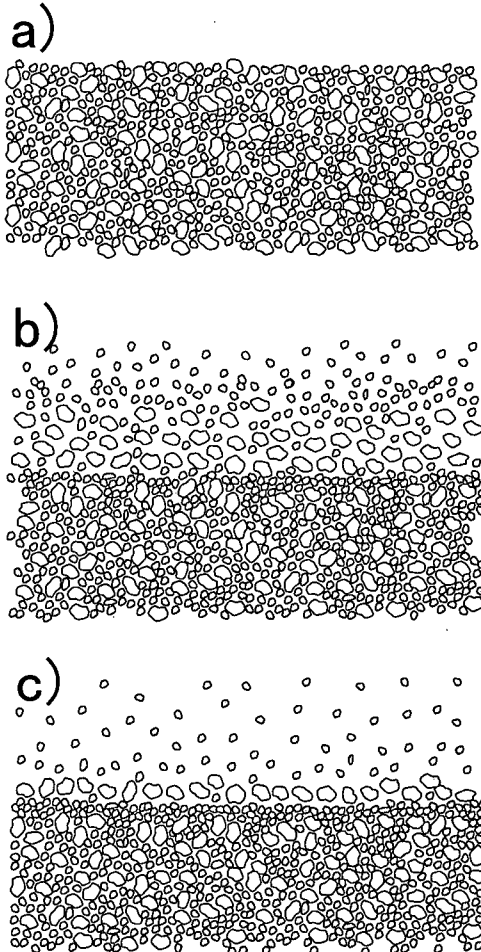
たときのものを使用した。

実験終了後にガラス管によってサンプリングを行って見たが、その際に起こる砂の乱れが激しいために、層厚の測定には用いなかった。

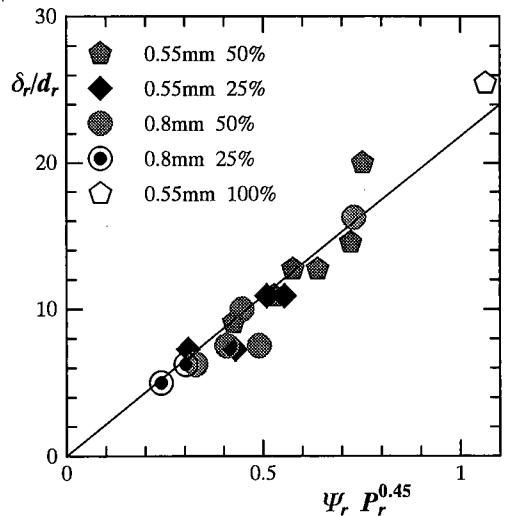
3. 実験結果および考察

(1) 実験および観察結果

実験を始めてまもなく粗砂と細砂は別々に移動するようになる。細砂は粗砂の上を浮遊して移動するが、一部は粗砂の移動層の下に取り込まれ薄い層を形成する。粗砂の移動層厚は流速や混合率によって変化するが、どのようなケースでもある程度時間が経過すると一層だけになり掃流状態で移動するようになる。実験装置の長さがある有限であるために、観測部の両端から砂が徐々になくなっていくのが直接の原因である。これにより、以後ほとんど漂砂は起きない平衡状態に達する。実際あるケー



図一五 砂の移動の様子 a) 実験前, b) 実験初期, c) 平衡状態



図一六 無次元層厚とシールズ数、混合率の関係

スで10分程度実験を続けてみたが、ほとんど漂砂は起きていなかった。原因は薄い細砂の層にある。この細砂層はそれより下の砂の移動を妨害し、粗砂の供給を減らすとともにその上にある粗砂の移動を滑らかにする働きをする。一般的に砂は流速の3乗程度に比例して運ばれるとされているが、このような状態では砂の粒子が水粒子とほとんど同じ（流速に比例する）動きをするため、1周期の漂砂量は激減する。

(2) 移動層厚と漂砂量

平衡状態に達するまでに計測した漂砂量、移動層厚を表一2に整理した。ケース1～8では中央粒径0.8mmの粗砂を、それ以外には中央粒径0.55mmの粗砂を用いた。また、細砂混合率はケース1～5, 13～18で50%, ケース6～12で75%, ケース19, 20では0%となっている。 ψ はシールズ数で以下の式で表される。

$$\psi = \frac{f_w u_{rms}^2}{2sgd} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 f_w はJonsson(1966)の方法による摩擦係数、 s は砂の水中比重、 g は重力加速度、 d は粒径、 u_{rms} は流速のrms値である。

まず粗砂について考える。粗砂層厚 δ_r ($r=0.55, 0.8$)を粒径 d_r で除した無次元粗砂層厚とシールズ数 ψ_r 、混合率 P_r の係数に注目する。図一6からこれらの間には以下のような関係があるということが出来る($A_1=21.7$)。

$$\frac{\delta_r}{d_r} = A_1 P_r^{0.45} \psi_r \dots\dots\dots (4)$$

図一7ではシールズ数から摩擦係数をのぞいた Θ (=Mobility Number)によって整理した($A'_1=0.21$)。

$$\frac{\delta_r}{d_r} = A'_1 P_r^{0.45} \Theta_r \dots\dots\dots (5)$$

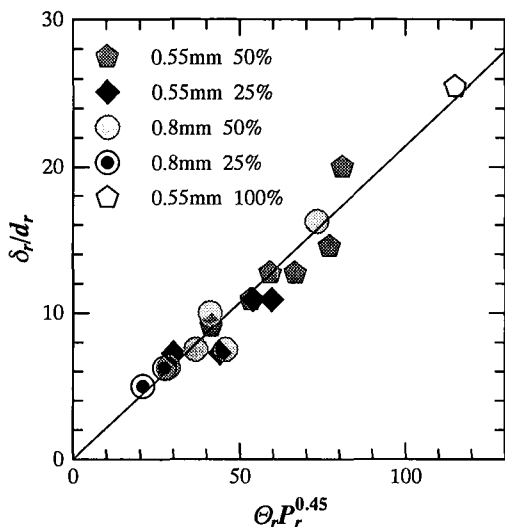


図-7 無次元層厚と Mobility Number, 混合率の関係

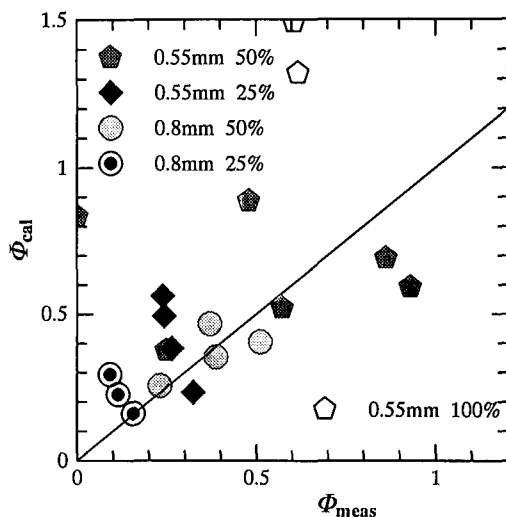


図-9 無次元漂砂量

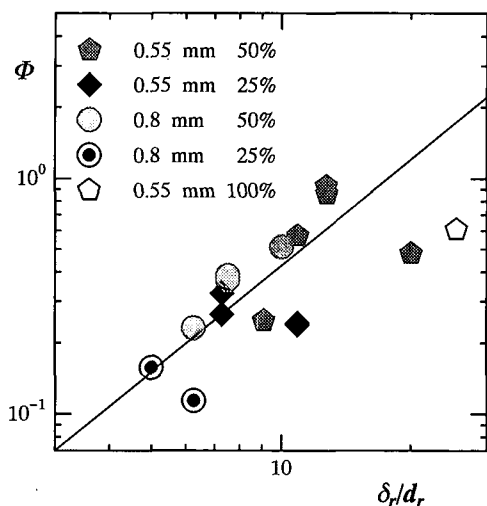


図-8 無次元層厚と無次元漂砂量

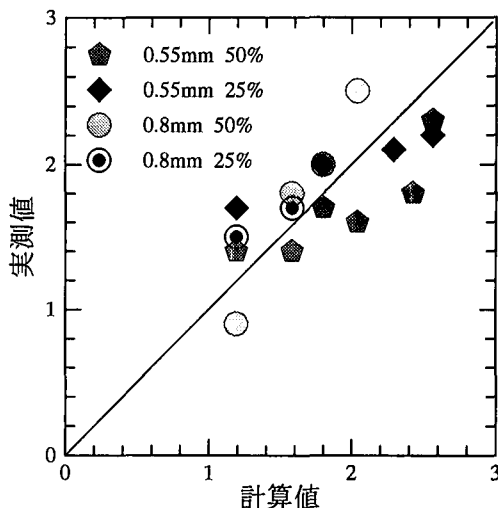


図-10 細砂層厚 (cm) と李ら (1993) の式との比較

混合粒径の砂における摩擦係数の取り扱いが難しく、今回の研究では粗度に、それぞれの砂の粒径をそのまま用いている。このやり方が正しいとは思わず、摩擦係数の正確性に疑問が残る。摩擦係数なしで整理できるのなら、そちらの方がよりよいと思われ、上記の結果からもそれが十分可能だと言うことが分かる。

また、図-8 より無次元粗砂層厚と無次元漂砂量 Φ の間には次の関係がみられる ($A_2=0.013$)。

$$\Phi = A_2 \left(\frac{\delta_r}{d_r} \right)^{1.5} \dots\dots\dots (6)$$

今回は実験装置の観測部の長さが有限であったために途中から砂の供給が無くなってしまった。そのせいも

あってか有意な漂砂が起きなくなってしまうので、このデータはその前までのものである。しかし実際の現地ではそうなるとは限らず、砂の供給が無くならないかぎり妥当な式といえる。

以上から、無次元漂砂量とシールズ数、混合率には以下の式が成り立つ ($A_3=1.36$)。

$$\Phi = A_3 \psi_r^{1.5} \cdot P_r^{0.675} \dots\dots\dots (7)$$

この式による漂砂量の計算値と実測値を比較したのが図-9である。一部のデータをのぞいて良い一致を見せているのが分かる。また、今回の実験データは Dibajnia・Watanabe (1996) の式による計算結果ともほぼ一致して

いる。

細砂についても粗砂と同様の整理を行った。李ら (1993) が提案した均一砂の場合の全層厚とシールズ数との関係式との比較を行った結果が図-10 である。

$$\delta_0/d = 17.5\Omega^{1.15} \dots\dots\dots (8)$$

$$\delta_L/d = 14660\Omega^{2.07}(a/d)^{-1} \dots\dots\dots (9)$$

ここで $\Omega = \Psi/\tan(\phi_0)$ で、 ϕ_0 は水中安息角をあらわす。 d は粒径で a は水粒子の移動振幅である。また添え字の U と L はそれぞれ初期地形より上側と下側をあらわす。

一部のデータを除いてこの式と良く一致しているところを見ると、細砂のまき上がり高さには粗砂の影響はそれほどないものと考えられる。

細砂に関しては層厚と漂砂量の間には関係は見いだせなかった。細砂の層厚は砂が浮遊した状態にある部分を測っているために漂砂量には結びつかないものと思われる。細砂の漂砂量は流速反転時の砂の受け渡しが大きいため、より綿密な整理方法が必要になってくる。

4. 結 論

混合砂のシートフローでは細砂の一部が粗砂の移動層の下に取り込まれ薄い層を作る。この層の影響で、下からの粗砂の供給が妨害され、ある程度時間が経過した後には漂砂が起きない状態になる。観測部の両端からの粗砂

の供給がないのも原因の一つであり、実際の海岸でこのようなことが起こるかどうかはまだよくわからない。また、細砂、粗砂の層厚をシールズ数、混合率などで表すことが出来た。細砂の層厚には粗砂の影響はほとんど現れなかった。さらに、粗砂の漂砂量をシールズ数と混合率でかなり良く整理することが出来た。実際の現地に海岸では波は不規則波であり、またこの実験のように砂がなくなってしまうとは限らない。今後このような点を考慮した研究が必要になってくる。

参 考 文 献

- 砂村継夫 (1984): 砂浜決壊の防止工法とその適用性に関する研究, 5. 新工法, 文部省科学研究費 自然災害特別研究研究成果, No. A-5-1, pp. 75-91.
- 田中 仁・片山裕貴・加賀正之・須賀寛三 (1988): 混合砂海浜における漂砂量則, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 307-311.
- 李 立亜・沢本正樹・佐藤忠浩 (1993): シートフロー状底質運動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 341-345.
- 乾 武史・Mohammad Dibajnia・磯部雅彦・渡辺 晃 (1995): 細粗混合砂のシートフロー漂砂量の算定式について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 521-525.
- Dibajnia, M. and A. Watanabe (1996): A transport rate formula for mixed-size sands, Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 3791-3804.
- Jonsson, I.G. (1966): Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 127-148.