

砂群の沈降過程における分散に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE DISPERSION OF SEDIMENTATION PROCESS BY DUMPED SAND

米良 力¹・山本 忠幸²・竹澤 三雄³

Tikara MERA, Tadayuki YAMAMOTO and Mitsuo TAKEZAWA

¹ 正会員 中央工学校 土木測量学部土木工学科主任 (〒114-8543東京都北区王子本町1-26-17)

² 正会員 工修 中央工学校 土木測量学部次長 (〒114-8543 東京都北区王子本町1-26-17)

³ フェロー会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区駿河台1-8)

At the first step of the reclamation, the sand is dumped into the sea from hopper barges. The construction management requires the total amount of sand for completion of reclamation to study the sedimentation process and the range of the affected area of scattered sand to consider the environmental impact. In this paper the scattering range of dumped sand was estimated by the experimental study. The dispersion of sand both in a still water and in a jet flow of water was investigated by the model tests. Main conclusions are as follows. The critical velocity of jet flow where sand on sea bottom started to transfer, was 28cm/sec-31cm/sec regardless of a sand grain size. Secondly, the dispersing width of sand on the sedimentation path was in inverse proportion to the sedimentation rate.

Key Words : Ocean space, reclamation, sedimentation process, jet flow

1. 序

近年、沖合の大水深、高波浪及び超軟弱地盤の海象・気象・立地条件の厳しい沿岸海域を対象とした海洋スペースの有効利用がますます高まる傾向にあり、それに伴い土捨船による土砂の海中投棄も大規模化し、所定の場所にどの程度の土砂が着底するのか、土砂の沈降過程においてどの程度分散して水質汚濁に影響を与えるのか多くの課題を有している。単一土粒子の連続投下における水中、水底での散らばり、拡がりについては水理実験を通して、運動方程式や拡散方程式を用いた解析により、多くの報告がなされている^{1)~3)}。しかしながら、排砂管口から静水中に投下された土砂、鉛直噴流と共に投下された土砂、走行中に投下された土砂、さらに単独に投下された砂の団塊における沈降、分散について、従来この種の総合的に実施された再現実験は、これまであまり例が見られない。大水深になると、投下された土砂の沈降過程は、土砂の沈降に応じて分散し沈降速度を減じ、やがて単粒子の沈降に近い状態となり着底するが、その沈降過程は分散の時間的経過、土砂の種類、濃度、沈降速度等の相対関係になると想定される。したがって、本研究は以上についての砂群の沈降過程における分散に関する実験的研究であって、一応の結論が得られたのでここに発表する。

2. 実験の概要

(1) 装置

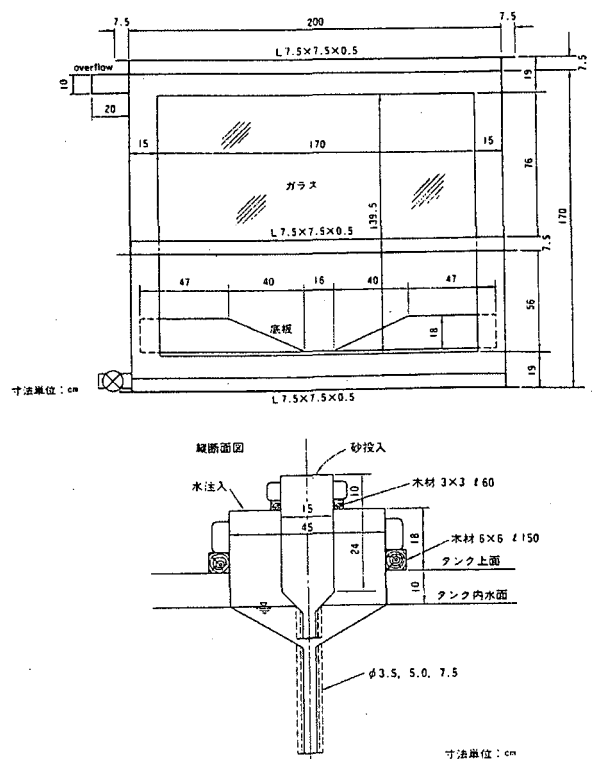


図-1 実験水槽と排砂管

実験水槽は、図-1に示すように幅2m、奥行き1.3m、高さ1.8mの鋼板製で、前面に幅1.7mのガラス板、水槽上下に越流口、排水口を取り付け、水槽底には溝形の鉄板があり、その上に沈降土砂が堆積するようになっている。水槽上部に渡したアングル上に、管径35mm、50mm、75mmのステンレス製の排砂管を取り付け、外側の排砂管の中にホースより注水、内側の排砂管の中に砂箱を挿入し、適宜、排砂量を調節できるスライド蓋を備えつけた。排砂管走行装置は、水槽上部に渡したアングル上を所定の速度で走行できるように無段変速モーターを用いた装置を製作した。噴流流速の測定は、直径5mm、8枚羽根の超小型プロペラ式流速計を用い、前面ガラス及び水槽背面上に記した目盛位置の見通し線内に静置する方法によって行った。

(2) 実験の種類

実験に用いた砂は、表-1に示す0.3~0.6mm、0.6~1.2mm、1.2~2.5mmの3種と豊浦標準砂である。その粒度範囲は図-2の通りである。土砂投下実験は、静水中、噴流中、排砂管走行中の3方式と排砂管径3種の組合せにより行い、各々2~3回の測定を行った。なお、スライド蓋の開きと排砂量、噴流流速と給水バルブ開度、排砂管走行速度とモーターレンジとの関係ならびに単粒(砂ひとつかみ)の沈降速度の定性的な実験をあらかじめ行った。

表-1 砂の性状

砂種	豊浦砂	0.3~0.6mm	0.6~1.2mm	1.2~2.5mm
比重	2.63	2.66	2.66	2.66
Void(水中)	39.8%	42.6	43.3	43.5
50%粒径	0.17mm	0.42	0.86	1.70

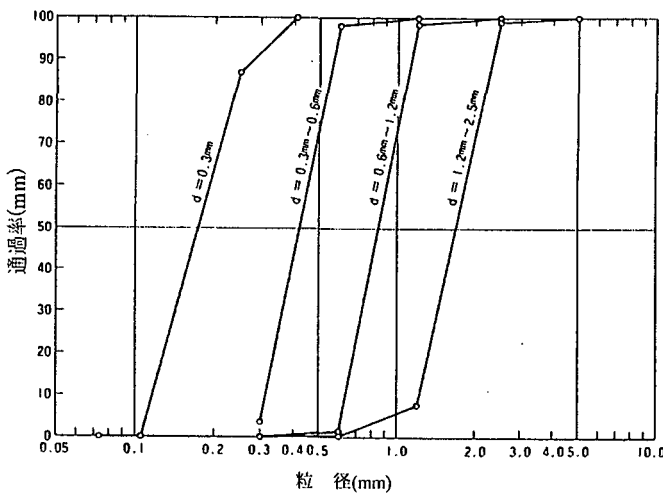


図-2 砂の粒径加積曲線

3. 実験結果および考察

(1) 静水中での砂群の沈降過程

排砂管径35mm、50mm、75mmの各管から、98~1470mN/secの砂を投下して、管口から底板まで沈降する状況を観察するとともに、ほぼ先頭の砂粒の沈降時間を実測した。砂群は管口を離れた時が最も沈降速度が速く、沈降するにつれて水平方向に拡がるとともに沈降速度が遅くなる。この沈降状況から、砂群の沈降速度は砂が密に集中しているほど速く、分散するにつれて遅くなることが確認された。また、砂群の沈降速度は排砂管径に影響されないものと考えられ、砂の容積濃度が等しければ管径が異なっても沈降速度に系統的な差は見受けられなかった。このことから、砂群の沈降速度は一義的に砂の容積濃度によって決定されるものとして、沈降速度と濃度との関係を調べた。ただし、砂の見かけ容積濃度は式(1)によって与えられる。

$$N_v = \frac{W}{\gamma_s(I-\lambda)} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 N_v : 砂の見かけ容積濃度(%), $W=W_s/AW_1$, W_s : 投下砂量(mN/sec), A : 管断面積(cm^2), W_1 : 沈降速度(cm/sec), γ_s : 砂の単位体積重量(mN/cm^3), λ : 空隙率. 式(1)で得られる砂の見かけ容積濃度は、沈降途中のある段階での濃度であって、指標的濃度である。

図-3は静水中の砂群の沈降速度と容積濃度の関係を示すもので、容積濃度が大きい方が沈降速度が大になる傾向があり、砂の粒径による差は顕著にあらわれていない。

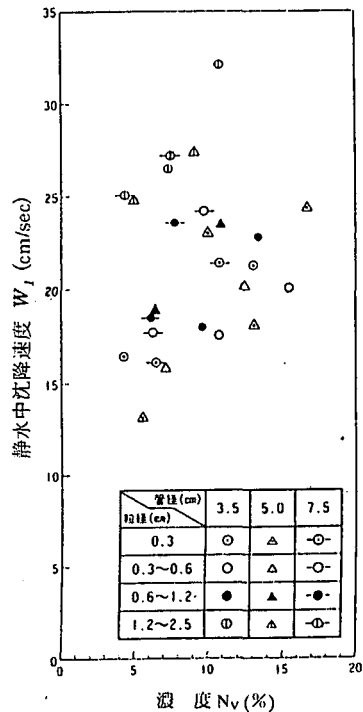


図-3 静水中沈降速度と砂の見かけ容積濃度の関係

砂が着底してから横へ拡がる現象は、砂が静かに沈降堆積するだけで、横走りはしなかった。着底直

前の砂群の水平分布幅は、沈降速度が遅く、濃度が小さい場合は幅広く拡がり、沈降速度が速く、濃度が大きい場合は、その幅が狭くなる傾向があった。堆積砂の水平分布幅の半径は沈降距離の約20%であった。

(2) 噴流中での砂群の沈降過程

図-4 は鉛直下向き噴流の中で砂群が沈降する場合、噴流の発達過程の概略を示し、あわせて記号を併記した。

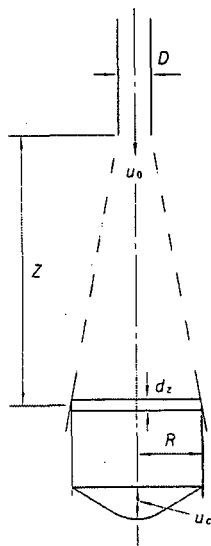


図-4 噴流概要図

ただし、排砂管口からの吐出流速 U_0 は、排砂管内に注水した流量を、管径 D の管断面積で割った値である。また、 R : 噴流中心軸から測った噴流の拡がり半径、 Z : 排砂管口から下向き鉛直距離、 U_c : 距離 Z における噴流中心流速、 U_0 : 排砂管出口での中心流速である。

実験結果より、噴流の拡がり半径 R は、排砂管口からの距離 Z の0.24倍であり、また噴流の中心流速の変化は、式(2)で表されることが確認された。

$$\frac{U_c}{U_0} = \frac{6.2}{Z/D} \quad (2)$$

距離 Z における微小区間 dz を噴流が通過するに要する時間 dt は

$$dt = \frac{dz}{U_c} = \frac{Zdz}{6.2U_0D}$$

である。したがって、噴流が排砂管口から底板までに要する時間 T は

$$T = \int_0^h dt = \frac{h^2}{12.4U_0D} \quad (3)$$

となる。ただし、排砂管口から底板までの距離は h である。そこで、排砂管口から底板までの噴流の平均中心流速 U_m は、式(4)で示される。

$$U_m = \frac{h}{T} = \frac{12.4U_0D}{h} \quad (4)$$

したがって、噴流内での砂の沈降速度は、平均的に考えて、噴流流速を含んだ実測沈降速度 w_u から噴流平均流速 U_m を差し引いた値である。

噴流中実測沈降速度 w_u と砂の見かけ容積濃度 N_v の関係は図-5のとおりである。なお、見かけ容積濃度 N_v は静水中での沈降の場合の式(1)同様に指標的濃度である。

$$N_v = \frac{Wu}{V_s(1-\lambda)} \times 100 \quad (5)$$

ただし、この場合の Wu は実測沈降速度で砂が管内を通過したものと仮定して求めた流水の単位容積当たりの砂の重量で、 $Wu = W_s / A w_u$ である。ここに、 W_s : 毎秒投下砂重量 (mN/sec)、 A : 管断面積 (cm^2)、 w_u : 実測沈降速度 (cm/sec) である。

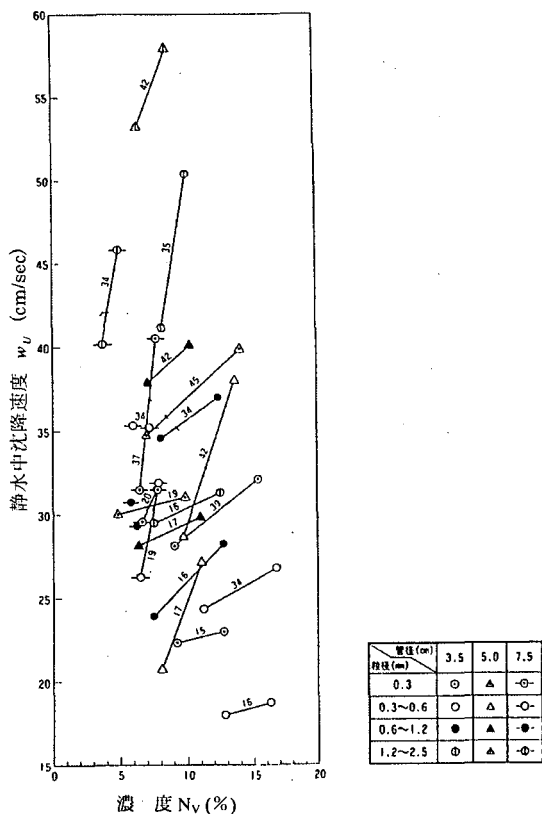


図-5 噴流中実測沈降速度と砂の見かけ容積濃度の関係

図-5 中の直線は等しい吐出流速を示し、この直線はすべて右上がりであることから、砂の見かけ容積濃度が大きくなると沈降速度も大きくなる傾向がある。また、吐出流速が大きくなると沈降速度も大きくなる。

図-6 は砂の見かけ容積濃度と噴流内での砂の沈降速度の関係を示したもので、同一管径、同一粒径においては、砂の見かけ容積濃度が大きくなると噴流内での砂の沈降速度が大きくなる傾向を示した。ま

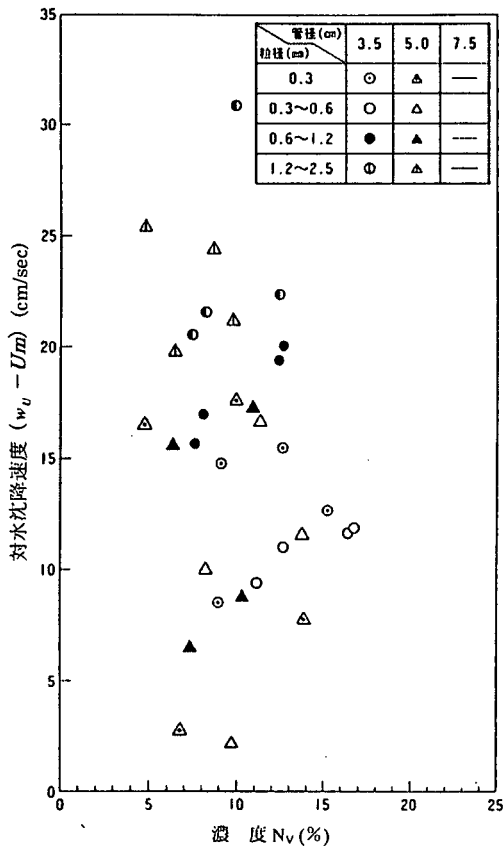


図-6 噴流内での砂の沈降速度と砂の見かけ容積濃度の関係

表-2 着底時の砂の水平拡がり幅 (cm)

管径 D (cm)	水の状態	粒 径 (mm)			
		豊浦砂	0.3~0.6	0.6~1.2	1.2~2.5
3.5	静	40	30	20	15
	流	20~25	20	20	10~15
5.0	静	40	30	25	20
	流	25~30	20~25	20~25	15~20
7.5	静	40	35~40	25~30	25
	流	30~35	25~30	25~30	20~25

た、図-6 の上部の実験値は、噴流の平均流速が小さい場合 ($U_m = 7\text{cm/sec} \sim 13\text{cm/sec}$) であって噴流内での砂の沈降速度は、静水中の砂の沈降速度とほぼ等しいが、下部の実験値は噴流の平均流速が大きい場合 ($U_m = 15\text{cm/sec} \sim 33\text{cm/sec}$) で、静水中の砂の沈降速度よりも遅い。なお、排砂管径 7.5cm の場合には図から除いた。

表-2 は目視による着底寸前の砂の水平拡がり幅を集計したものであり、各管径、各粒徑を通じて静水中より噴流中の方が拡がり幅が小さい。また、砂の粒徑が細かい砂より粗い砂の方がその拡がり幅が小さい。すなわち、等しい沈降距離では、砂の沈降速度が速いほど砂の水平拡がり幅は小さい。これは静水中での砂の沈降過程についても見られたことで、

一般的に砂の水平拡がり幅は砂の沈降速度に逆比例するといえる。また、着底時の砂の拡がり幅の半径は、沈降距離の 24%以内であり噴流法則の適用が可能と考えられる。

(3) 排砂管走行中での砂群の沈降過程

走行中の排砂管から砂を投下した場合には、走行速度に応じて砂が撒かれるため、単位面積当たりの砂量が少なく、それが沈降しながら鉛直方向にも水平方向にも分散してさらに濃度が小となり、その結果沈降速度は、静水中よりかなり遅くなることが想定される。

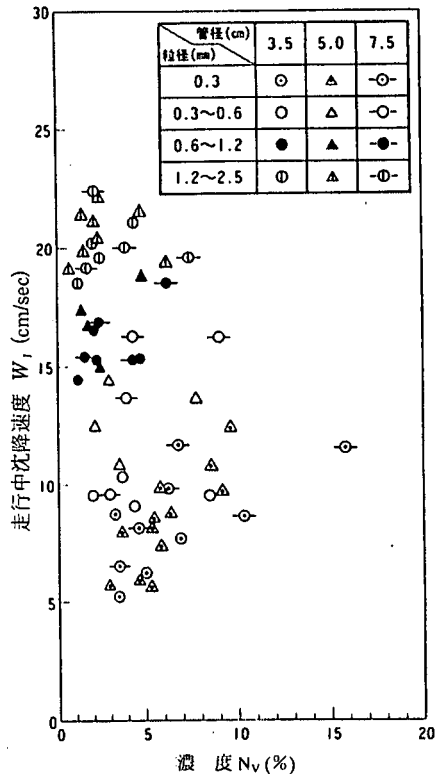


図-7 走行中の沈降速度と砂の見かけ容積濃度の関係

この場合の砂の見かけ容積濃度は式(6)で示される。

$$N_v = \frac{W_s}{DuW_s \gamma_s (1-\lambda)} \times 100 \quad (6)$$

ここに、 N_v : 砂の見かけ容積濃度 (%), W_s : 毎秒投下砂量 (mN/sec), D : 管径 (cm), u : 速行速度 (cm/sec), W_s : 沈降速度 (cm/sec), γ_s : 砂の単位体積重量 (mN/cm³), λ : 空隙率である。

図-7 は走行中の砂の沈降速度と砂の見かけ容積濃度の関係を示すもので、排砂管走行中の速度が大きくなると砂の容積濃度が小さくなるため、沈降速度も小さくなる傾向がある。

(4) 堆砂移動し始めの鉛直流速

表-3 は、排砂管口から鉛直下向けに放出された噴

流で底板上に堆積している砂が移動し始めた時の砂面上における噴流中心流速である。測定は底板位置をジャッキによって底板から 0cm, 14cm, 33cm 位置に設置し、流速を変化させながら行った。

表-3 砂移動し始めの限界流速

粒径 (mm)	流速 (cm/sec)
豊浦砂	30.9
0.3~0.6	28.5
0.6~1.2	28.1
1.2~2.5	30.1

表-3 の流速は、式(2)で求められた噴流の中心流速で、砂が移動し始めたかどうかは、表面の砂が連続して動き始めた時の流速で判定した。なお、砂が移動し始めた時の砂面上1cm くらいの位置で実測した鉛直流速の値は 15 cm/sec であった。表-3 の流速の約 1/2 であるが、これは砂表面付近で流れの鉛直方向と水平方向が混在していると考えられる。また、表-3 に示す移動し始めの流速は粒径によってあまり差異がなかった。次に噴流によって発生した底面砂の穴の直径は約 33cm であり、この値は、排砂管口から砂面までの距離 $Z=72\text{cm}$ に対する噴流の拡がり直径 $2R=2 \times 0.24Z=34.6\text{cm}$ と大体一致している。

(5) 静水中での砂の団塊の沈降過程

表-4 に示す上下の開いた円筒形の型に乾燥した砂を詰め、これを底板にのせたまま水中に静かに沈め、気泡が出てしまってから底板を水平に、瞬時に取り去って砂を沈降させると、まず、砂は団塊として急速に沈降し、その後砂の団塊周辺部から砂が分散し、ある距離沈降したところで砂の分散が終了し、砂粒がばらばらになって、単粒の沈降に近い状態でゆっくり沈降する。砂の団塊の分散終了は目視によって判定した。

表-4 砂型寸法

砂型番号	内径(cm)	高さ(cm)	容積(cm ³)
No1	2.61	4.10	21.92
No2	3.85	5.30	61.67
No3	5.14	6.05	125.47
No4	8.30	8.10	438.04

その結果、砂の団塊が最も分散し難いのは 0.3mm 砂であり、分散しやすいのは 1.2~2.5mm 砂であった。なお、砂が着底した時の分散の幅を視認によって測定した結果は表-5 のとおりである。

表-5 を見ると、豊浦標準砂と 0.3~0.6mm 砂は分散幅はほぼ等しく、0.6mm 以上の砂では砂が粗になるほど分散幅は小さい。これは微粒砂は分散した後の沈降速度が遅いため雲状のように拡がったが、粗砂では分散後も沈降速度が速いため、水平方向への

分散がなかったからである。これは、噴流中沈降速

表-5 着底時の分散幅 (cm)

粒径(mm) \ 砂型	豊浦砂	0.3~0.6	0.6~1.2	1.2~2.5
No1	50	50	35	20
No2	50	50	45	25
No3	30	30	30	20
No4	30	30	35	40

度の場合も同様で、一般的に水平拡がり幅は沈降速度に反比例するものと考えられる。また、砂の団塊は沈降途中で分散し終わるため、砂が着底してから横走りすることはなかった。

いま砂の団塊の直径を d_2 、砂粒の比重を γ_s 、砂の団塊の空隙率 λ とすると、砂の団塊の沈降距離は h_s は、 d_2 が大きいほど大きく、 λ が大きいほど沈降する途中で砂の団塊は早く分散することから、 h_s は d_2 に比例し、 λ に反比例する。したがって、砂の団塊の沈降距離 h_s は

$$h_s = k \frac{(\gamma_s - 1) d_2}{\lambda} \quad (7)$$

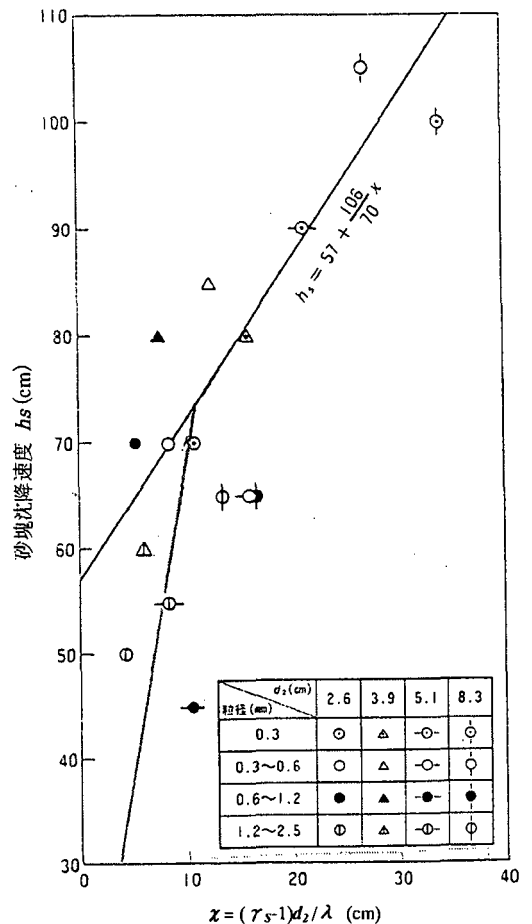


図-8 砂の団塊沈降距離 h_s と x との関係

と示すことができる。ただし、 k は比例定数である。

図-8 は、式(7)に関する実験結果であり、 $\alpha = (\gamma_s - 1) d_2 / \lambda > 10 \text{cm}$ に対しては、式(8)で与えられ、 $\alpha = (\gamma_s - 1) d_2 / \lambda < 10 \text{cm}$ に対しては式(9)で与えられる。

$$hs = 57 + \frac{106 (\gamma_s - 1) d_2}{70 \lambda} \quad (8)$$

$$hs = \frac{75 (\gamma_s - 1)}{10 \lambda} \quad (9)$$

4. 結論

結論は次の通りである。

- (1) 砂群の沈降速度は砂の容積濃度に比例する。最も速いのは砂が団塊として沈降する場合であり、最も遅いのは単粒で沈降する場合である。
- (2) 鉛直下向きの噴流中での砂群の沈降速度は、噴流速度が小さい間は静水中における砂群の沈降速度に近いが、噴流流速が大になると静水中における砂群の沈降速度よりかなり小さくなる。
- (3) 排砂管走行中の場合、静水中と同様、砂群の沈降速度は砂の容積濃度によって左右される傾向を示す。
- (4) 鉛直下向き噴流によって、堆砂が移動し始める噴流の中心限界流速は砂の粒径に関係なくほぼ同じである。
- (5) 沈降過程での砂群の水平分布幅は、沈降速度に反比例する。
- (6) 砂の団塊の分散終了時の沈降距離と団塊の大きさとの関係は、砂の団塊が大きくなればなるほど団塊分散終了時の沈降距離は長くなる。

以上、本研究の遂行にあたって、本学校長須郷進およびアクト情報ビジネス専門学校長柳井修一両氏のご協力に対し、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小川・竹内：土捨船による投棄土砂の分散，土木学会論文集，第 161 号，PP39～49，1969 年
- 2) 吉川・福岡：流体と個体粒子の相互作用に関する研究，土木学会論文集，第 260 号，PP89～100，1977 年
- 3) 河野・藤田：水中を落下する固体粒子の散らばりに関する研究，第 27 回海岸工学講演会論文集，PP230～234，1980 年