

シート排砂方式の開発

Development of Method of Sediment Discharge by Sheet

西 村 敬 一 物流・鉄構事業本部鉄構事業部水門設計部 課長

堆砂に埋まるダム貯水池が増えており、治水利水の両面において大きな社会的問題となっている。貯水量の維持回復のため低コストでの排砂技術の開発が求められている。本稿で述べるシート排砂方式は、堆砂面上に大きなシートを広げ、その中心に取り付けた吸引管からシートの下の堆砂を吸い上げるもので、低コストの排砂システムの構築を目指している。

Dam reservoirs tend to accumulate sediment, which is a big problem for both river improvement and irrigation. Low cost technology for sediment discharge is required for the maintenance and recovery of the water storage capacity. The sediment discharge system by sheet aims to construct a low cost sediment discharge system designed to suck up sediment using a suction pipe attached at the center of big sheet spread out on the sediment.

1. シート排砂方式の概要

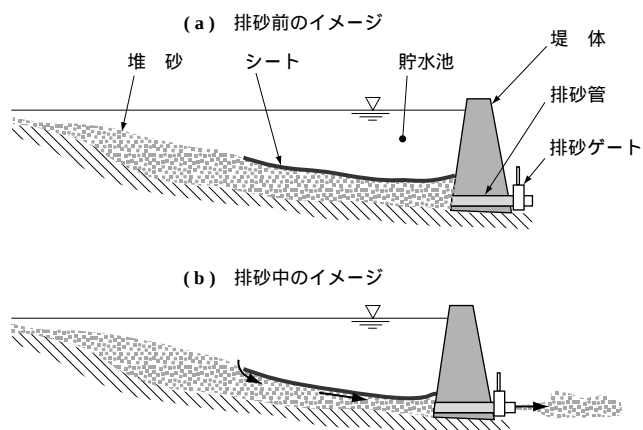
2002 年の国土交通省の調査によると、中規模以上の 782 のダム貯水池のうち、堆砂率が 20%を超えるダムは 124、50%を超えるダムは 44 にのぼる。これは特に中部地方に多い。堆砂の増加は貯水池の有効貯水量が減ることであり、治水や利水の機能が低下することである。また、土砂がせき止められることによる海岸の後退なども問題となっている。特に近年は新設ダムの建設が困難になってきており、ダム貯水池の機能回復は国家的重要事項になってきている。

出平ダム（関西電力株式会社）や宇奈月ダム（国土交通省）の排砂では、ダム貯水を全部捨てて貯水地底に河川流を作り、水流の掃流力で貯水池内に堆積した土砂の排砂を行っている。しかし、これは貯水位を容易に復旧できる河川であるからできることであって、一般のダム貯水池では、貯水は回復に時間の掛かる貴重な資源であり、堆砂排除のために貯水を捨てることはなかなかできることではない。

また、排砂ゲートを備えたダム貯水池は数多くあるものの、開けた場合に再度閉められるかという危ぐのため、大半の排砂ゲートは開かずの扉になっている。さらに、排砂ゲートを開けたとしても、排砂できるのは排砂管呑み口近傍にたまっている分だけで、貯水池全体の排砂を行うことは、上述のように貯水を全部捨てない限り不可能である。貯水位を低下させず、貯水池全体の堆砂を排除するには、貯水池水面上からの浚渫しかないが、浚渫は費用と時間が

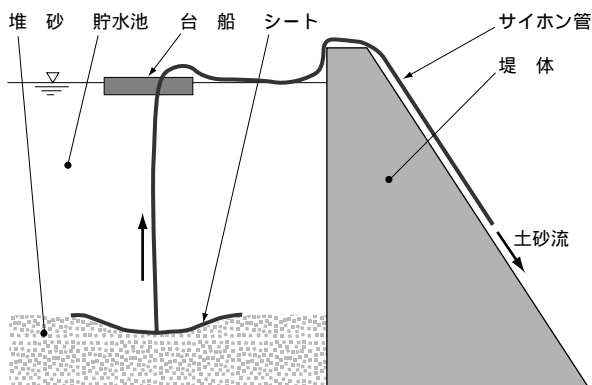
掛かり、また濁水発生源となるなど問題が多い。

そこで考え出したのは、第 1 図に示すように水底の堆砂上一面にシートを敷いて排砂する案であった。排砂ゲートから流出する水流はシートの下を通して流れざるをえないので、この水流が土砂を連行してシートの下で掃流が行われるだろうというものである。このアイデアを確認するため簡単な実験を行い、有効性のある程度確認できた。しかし、実施に当たっては重大な問題があった。排砂ゲートを開けたときに排砂管呑み口の堆砂中に圧力の不均衡が生じ、堆砂が崩れて非常に高濃度の土砂が流出するが、これが急激な圧力変動を伴って流れるので、排砂設備に損傷をもたらす危険がある、またシートが排砂管中に巻込まれないか、などである。



第 1 図 シート排砂方式の最初のアイデア
Fig. 1 First concept of sediment discharge

そこで、第 2 図に示すように堆砂面上に敷いたシートの中央から土砂を吸引する方式を考案した。本図ではサイホンで水流を作っているが、堤体の乗り越え高さが大きい場合は台船上にポンプを設置してもよい。このようにすれば水流はシートの下を流れざるを得ず、第 1 図と同様の掃流効果が得られるだろうと考えた。また、本方式によれば、排砂ゲート設備が無い貯水池でも排砂が可能であり、シートの製作可能範囲において広範囲に排砂ができる可能性がある。



第 2 図 シート排砂方式の次のアイデア
Fig. 2 Second concept of sediment discharge

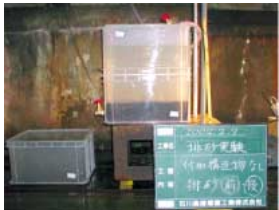
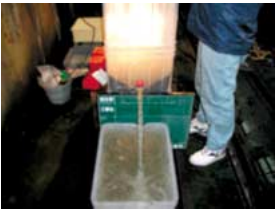
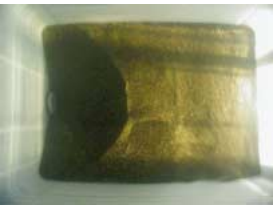
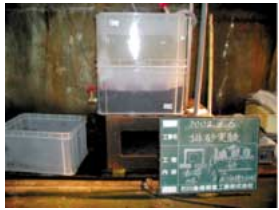
本シート排砂方式の基礎的な水理を確認するため、当社の総合開発センター水理実験場（横浜）で実験を行った。以下その概要を述べる。第 3 図に最初の簡易実験の状況を示す。

2. 実 験

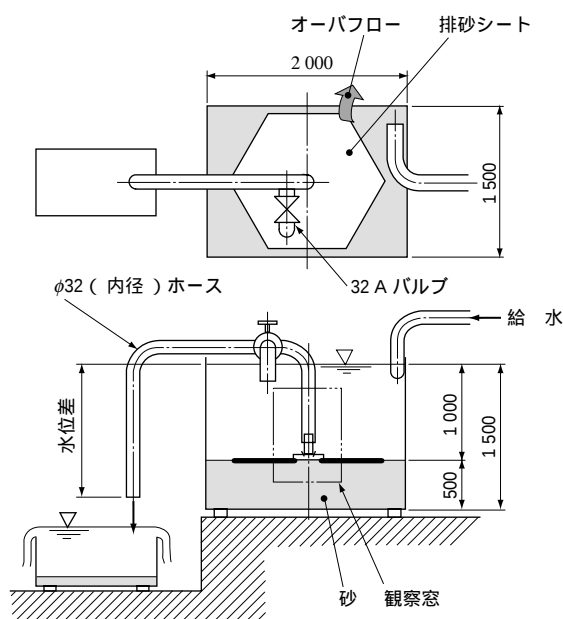
2.1 実験装置

実験装置の概要を第 4 図に、実験装置の全景を第 5 図に示す。長さ 2.0 m、幅 1.5 m、高さ 1.5 m の鋼製水槽に厚さ 0.5 m の砂を敷き、その上に排砂シート（以下、シートと呼ぶ）を敷き、給水しオーバーフローさせて水位を一定に保ちつつ、サイホンによってホース内に水流を作る。サイホンの水位差を変えることで流量を変える。水槽には側部に観察窓があり、横から水槽内を観察することができる。

シートは対辺長さ 1 400 mm の正六角形にした厚さ 1 mm の透明ビニルシートで、浮き上がり防止のため周辺に鋼製チェーン（183 g/m）を巻いている（第 6 図）。シートには寸法の目安として同心円で 200 mm ピッチで、また周方向に 30 度ピッチで黒線を引いている。シートの中央は直径 300 mm のアクリル製のフランジがあり、着底したと

1. 付加構造物なし				
	1.1. 実験装置 ・砂と水を入れた状態	1.2. 堆砂面上に何も無い状態	1.3. 左図状態に水を補給し放流 ・程なく水しか流れなくなる。	1.4. 左図状態で水抜き後の状況 ・呑み口周りにすり鉢状に排砂される。
2. シート位置				
	2.1. 呑み口部に水路を作り、堆砂上にビニルシートを敷き、重しを載せた状態	2.2. 左図を上から見たところ	2.3. 左図に水を入れた後、放流・しばらく高濃度の土砂流が流れる。	2.4. 堆砂の半分程度が流出される
3. 水路を延ばす				
	3.1. 呑み口部水路を延長した状態	3.2. 堆砂流出後の側面の状況	3.3. 堆砂の大半が流出される。	3.4. 後方上から水路を見たところ

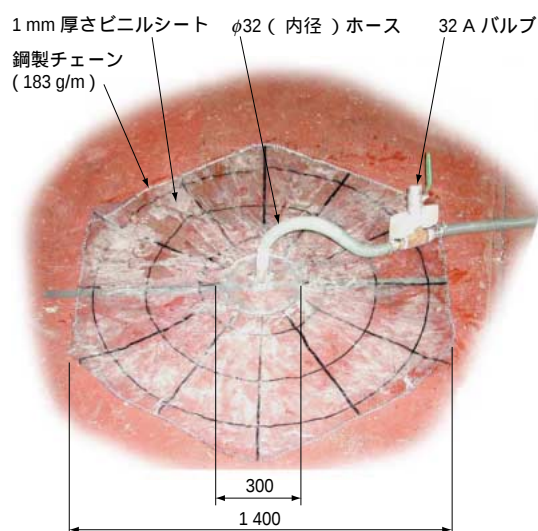
第 3 図 最初の簡易実験
Fig. 3 First simple test



第 4 図 実験装置の概要 (単位: mm)
Fig. 4 Outline of test equipment (unit: mm)



第 5 図 実験装置の全景
Fig. 5 View of test equipment



第 6 図 実験に用いた排砂シート (単位: mm)
Fig. 6 Sediment discharge sheet used in test (unit: mm)

きのホースの倒れ止めとしている。ホースは内径 32 mm の透明樹脂ホースで、途中位置の水面付近にチーズ管とバルブを分岐させている。サイホンを始めるときは、このバルブを水中で開けておき、ホースの先端から水を入れて、ホースが充水したら下に落としてバルブを閉める、という手順で実施した。

2.2 実験材料

粒径の異なる 3 種類の砂を使用した。第 1 表に実験材料の主要な物性値を示す。

2.3 細砂の実験

2.3.1 水位差による変化

水位差を 5 段階 (0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 1.9 m) に変えて実験を行った。第 2 表に細砂の実験結果を示す。水位差 1.2 m 以上では 3 分間水を流した後に人為的にサイホンを止めたが、水位差 0.4 m と 0.8 m のときは、サイホン水位差より流水抵抗の方が大きくなったらしく、3 分前にサイホンが止まってしまった。サイホン水位差が 1.2 m のときの砂体積濃度が低いのが不審であるが、全般にサイホン水位差に従って管内流速と砂体積濃度が上昇している。第 7 図にサイホン水位差に対する管内流速と砂の体積濃度を示す。吸引管による浚渫における砂濃度は、通常 10% 以下といわれており、水位差 1.6 m と 1.9 m 時の濃度はかなり高い。

第 8 図にサイホン水位差 1.9 m で排砂した後の堆砂地形と排砂シートを示す (これは実験当初のもので、まだシートに線を入れていない)。

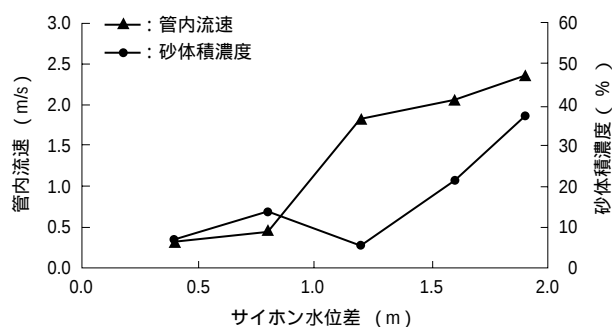
第 9 図に細砂の排砂後の堆砂地形を示す。南 (S)・北 (N) 方向と、東 (E)・西 (W) 方向の堆砂地形を示している。方向によって多少異なるが、ほぼ円すい状のクレータができていく。図中の細い斜線は、細砂の水中安息角である。半径 150 mm のフランジのみでシートが無い場合には斜線のような地形になるはずである。斜線の下から太い折れ線までの体積がシート排砂の効果ということになる。体積を比較してみるとシートが有る場合は無い場合の 3 倍程度排砂量が多い。

第 1 表 実験材料
Table 1 Materials for test

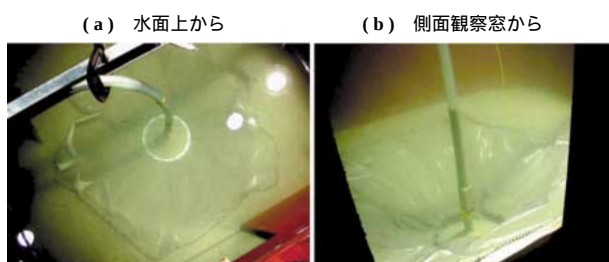
種 類	平均粒径 (mm)	乾燥見掛け密度 (kg/l)	水中見掛け密度 (kg/l)	水中安息角 (°)
粗 砂	約 1.0	1.60	1.96	35.5
細 砂	約 0.3	1.59	1.95	34.4
シルト	約 0.04	1.48	1.93	40.8

第 2 表 細砂の実験結果
Table 2 Test results using fine sand

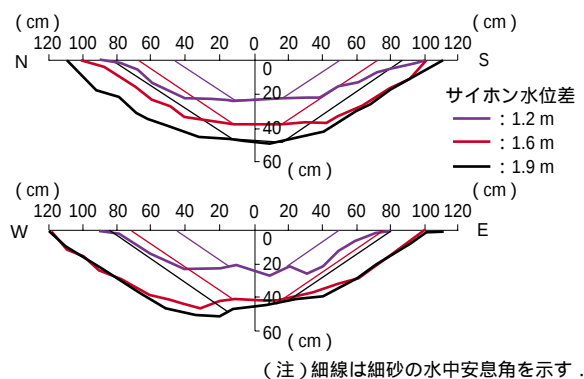
水位差 (m)	排砂時間 (s)	総体積 (m^3) $\times 10^{-3}$	総流量 (m^3/s) $\times 10^{-3}$	管内流速 (m/s)	砂 量 (m^3) $\times 10^{-3}$	砂流量 (m^3/s) $\times 10^{-3}$	砂体積濃度 (%)
0.4	112	29.7	0.27	0.33	2.0	0.02	6.7
0.8	100	37.1	0.37	0.46	5.0	0.05	13.5
1.2	180	267	1.48	1.84	14.8	0.08	5.5
1.6	180	297	1.65	2.05	63.3	0.35	21.3
1.9	180	341	1.89	2.36	126.0	0.70	37.0



第 7 図 サイホン水位差に対する管内流速と砂の体積濃度
Fig. 7 Flow velocity in tube and volume density of sand related to the differential flow



第 8 図 水位差 1.9 m で排砂した後の堆砂地形と排砂シート
Fig. 8 Topography of sediment and sheet after discharge with differential level of 1.9 m



第 9 図 細砂を排砂した後の堆砂地形
Fig. 9 Topography of sediment after fine sand discharge

2. 3. 2 応用実験

(1) 巨礫、沈木の抑え込み

従来の浚渫方法で、バケット浚渫の場合には巨礫、

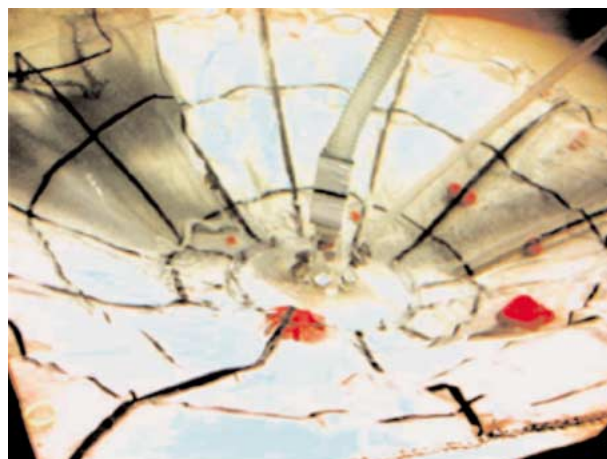
沈木などもつかみ上げることができるが、吸引管方式の場合には管径より大きいものは吸い上げられない。吸引管がそのようなものに遭遇した場合には、いったん吸引を停止して吸引管を別な場所に移さなければならず、あるいは多少管径より小さいものを吸い込んだ後で管を詰まらせたりすることがあり、稼働率の低下につながっていた。

しかし本シート排砂方式の場合には、シート下の圧力は水が流れるために低下し、シートは堆砂面に押しつけられる。このためシート下に大きな異物があり、それがシート面に現れるとシートに抑えつけられて移動することができなくなる。つまり、砂だけを選択的に吸引することが可能となるはずである。

このことを確認するため、径が数 cm 程度の礫と、木片を細砂中に入れて異物吸入実験を行った (第 10 図)。予想どおり、これらはシートに抑えつけられてほとんど移動できなかった。これは、不運にも吸引口の真下に異物が現れない限り、シート排砂方式は異物の多い堆砂中から砂だけを選択的に吸引する特性をもっていることを示唆する。

(2) 地形追従性

実際の堆砂面は、必ずしも平坦とは限らない。そこで、堆砂面の一部を事前に掘っておき、そこをシートが覆うように敷いて排砂を試みた。結果的には、他実験とほとんど変わらないクレータが形成され、穴の部分で特に排砂が停滞したり進行したりはしていない。これは、穴の縁が崩れて大きな水空間ができると、その部分の流速が遅くなって掃流が停止し、ほかの部



第 10 図 異物吸入実験
Fig. 10 Suction tests of foreign materials (gravels)

分の排砂が進行するまで地形的変化が起きにくい
と思われる（第 11 図）。

(3) シートのしわの影響

模型実験といえども、シートを堆砂面上にしわのない状態に敷くのは容易ではなかった。まして実施工では容易ではなく、ある程度のしわが残ってしまうのはやむをえないだろうと思われた。そこで、あえて大きなしわを作って排砂を行った場合、どのような現象が起こるか観察した。

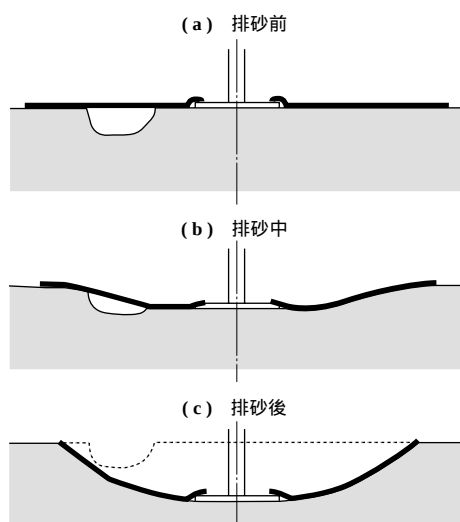
第 12 図にシートのしわの影響を示す。実験前（- (a)）にあらかじめ、シートの半分ずつ横じわ（シート左側）と立てじわ（シート右側）を作っておいた。実験後（- (b)）は、横じわ部は中心部に寄せられてしまったが、立てじわ部はシートの移動は起こらず排砂が進行した。

実施工の場合には、横じわが生じないように敷くことが必要と考えられるが、どのようにして大きなシートを堆砂面に広げるかを現在検討中である。

2.4 粗砂の実験

一通り細砂による実験を終了してから粗砂の実験に取り掛かった。細砂の場合と同様な実験を行った結果、フランジ下の砂だけが吸引され、その周囲の砂はシートに抑えつけられて、第 13 図に示すような形状になった。原因は、砂の透水係数の違いにあるように思われる。透水係数が大きいと、吸引する水量の全量がフランジの下から供給され得るので、シートと砂の間に水が流れなかったためと思われる。

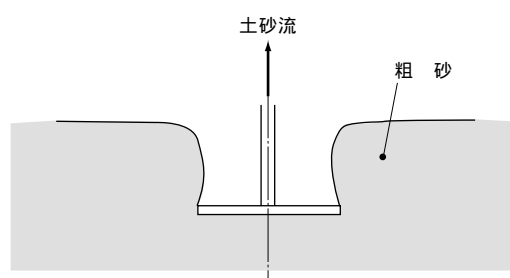
そこで、フランジを水面上から吊るして吸引させたところ、第 14 図に示すようにシートはフランジ周りにぶら下が



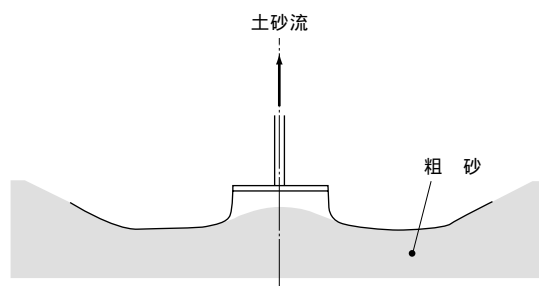
第 11 図 地形追従性実験
Fig. 11 Experiment on topographical adjustment



第 12 図 シートのしわの影響
Fig. 12 Effect of wrinkles in the sheet



第 13 図 最初の粗砂の実験
Fig. 13 First test on rough sand



第 14 図 フランジを吊るしての排砂
Fig. 14 Discharge by hanging the flange

る形になった。フランジ直下からの砂の吸引は低下し、シートの下に水流が生じ、シート下にクレータが形成された。ただし、吸引する砂の濃度はかなり低下した。そこで、さ

第3表 粗砂の実験結果
Table 3 Test results using rough sand

水位差 (m)	排砂時間 (s)	総体積 (m^3) $\times 10^{-3}$	総流量 (m^3/s) $\times 10^{-3}$	管内流速 (m/s)	砂 量 (m^3) $\times 10^{-3}$	砂流量 (m^3/s) $\times 10^{-3}$	砂体積濃度 (%)
1.9	180	276	1.53	1.92	40.6	0.225	14.7

らにホースを昇降装置に結びつけ、フランジ周りのシートの傾斜がほぼ水平になるよう、砂の吸引とともに下げていった。この結果、細砂の場合とほぼ同様なクレータが形成されるようになった。ただし、吸引濃度は細砂の場合の半分以下になった。粗砂の実験結果を第3表に示す。

吸引された土砂流の砂体積濃度は、細砂の場合（吸入口を吊らなかった場合）の半分程度に低下したが、吸引管による浚渫時の濃度が10%以下といわれており、悪い数字ではない。

排砂後のクレータは詳しい計測をしていないが、だいたい第15図のような形状になった。細砂の場合より幾分くぼみの傾斜が緩くなっている。

2.5 シルトの実験

水中のシルトはわずかな水流で巻上げられ、なかなか沈降せず、水槽中が観測可能になるまで非常に時間が掛かり（1日程度）、また、泥状になって扱いが非常に厄介であった。

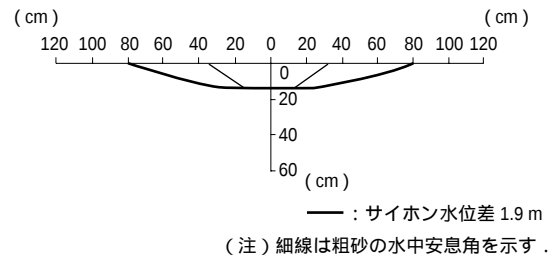
まずは細砂の場合と同様の実験を行ったが、サイホンができなかった。これは、サイホンを始めるとフランジ下のシルトがフランジ面に密着してしまい、なおかつ透水係数が小さいため、サイホンを持続する水が供給されなくなるためと考えられる。

そこで、フランジ面のボルト（M16）孔を一つ開放し、ここから外部の水をサイホンに供給できるようにした。また粗砂の実験と同様にホースを昇降装置に吊るし、シート下に水流ができやすいようにして実験を再開した。この結果、泥水が吸引管の中を流れるようにはなったものの、濃度は粗砂の実験の場合に比べ、半分の10%以下となった（第16図）。

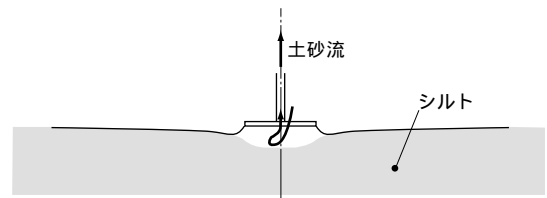
水の清澄を待つ間にシート上にシルトが沈降し、また吸引を始めるとどこからともなく水が濁りだし、シート下面でどのように水と砂が流れているかは観察できない。

実験後、シートを取り払って調査した結果、第16図に示すように、フランジの下は50 mm 程度くぼんでいるものの、シートの下はほとんど平坦であった。

以上から、シルトの場合には、吸引された土量の大半はフランジ面の孔から吸引された水流によって崩されたシルトだったということになり、シートの効果はあまりなかつ



第15図 粗砂を排砂した後の堆砂地形
Fig. 15 Topography of sediment after rough sand discharge



第16図 シルトを使用した排砂実験
Fig. 16 Test results using silt

た。しかし、シートのしわが寄っていたところはわずかにくぼんでいたことから、シルトの場合にはシートの下に何らかの方法で水道を設けることによって、シート下での排砂が可能であると推測できる。

3. 今後のシート排砂方式の開発について

細砂と粗砂については、シート排砂方式の可能性が見いだされた。シルトについては局部的な排砂しかできなかったが、まだ工夫の余地はあると考えている。ダム堆砂の状況はさまざまであり、あらゆる状況に対応できる排砂方式を実現するのは困難と思われる。しかし、一般に、ダム貯水池の堆砂は半分以上がシルト以下の粒径で、このような細かい土砂の排砂を効率的に行うことができれば、適用の可能性は大きく広がる。

現在、当社は独立行政法人土木研究所、および株式会社小島組とそれぞれ共同研究を行っている。前者については本稿で紹介した方式とは多少異なる方式で排砂方式の開発を進めている。後者については、ほぼ本稿で紹介した方式で、主に施工方法を課題として開発を進めている。

今後とも、新たなニーズに対応できる技術開発に、鋭意取り組んでいく所存である。