

流砂量測定器の試作研究

澤 井 健 二

A STUDY ON THE EQUIPMENT FOR SEDIMENT DISCHARGE MEASUREMENT

By Kenji SAWAI

Synopsis

An equipment for automatic measurement of sediment discharge was devised. It consists of a sand trap, weighing mechanism and conveyers.

The sand trap is made of 0.3 mm mesh wire screen which is attached to the downstream end of a 50 cm wide flume. The sand particles gathered by the screen are conveyed to the weighing mechanism by means of a pump system. The weighing mechanism has five cups made of screen, which are cyclicly shifted in turn by a belt conveyer.

In five positions, the functions of receiving sand, weighing, dropping sand washing and waiting are repeated every one minute.

This device is applicable to the condition of the flow discharge between 1 and 40 l/s and the sediment discharge between 0.2 and 1 g/min for medium and coarse sand.

1. 緒 言

河川における土砂の動態を明らかにする上で、流砂量を正しく把握することは必須の課題である。従来、次元解析や力学モデルに基づいて多くの流砂量式が提案されているが、そのパラメータの同定には、主に定常状態における流砂量の実測値が用いられている。しかしながら、急激な水理量の変化や河床波の通過に伴って流砂量が時間的ならびに空間的に変化する場合に、それらがそのまま適用できるかどうかは疑問であり、最近、非平衡流砂に関する研究が相次いでなされるようになってきた。

その際、モデルの組立ての上でも、またその検証の上でも、流砂量の時間的な変化や場所的な変化を正しく計測することが重要となるが、それには、計測を自動化することがきわめて有効である。

流砂量計測の自動化に関しては、従来いくつかの研究がなされており¹⁻³⁾、実用に供されているものもあるが、装置が大がかりになりがちで、あまり普及していない。そこで、本研究は、水路実験用として、比較的簡易な自動流砂量計の開発を試みるものである。

2. 試作品の基本構想と構造諸元

流砂はその流送形態によって、掃流砂と浮遊砂に分けられ、それらを別個に計測することも多いが、ここではそれらを区別せずに全流砂として計測することを考える。その場合、流砂を捕捉せずにその通過量を計測できれば好都合であるが、粒径が細かくて断面全体にほぼ一様に分布する場合以外には、そのようなことは難しく、通常は流砂を一定時間捕捉して、その重量または体積を計測することになる。この場合、流砂量の計測断面を水路中の任意の位置に設定できるのが理想的であるが、実際にはそれは難しく、ここでは、水路下流端を対象とすることにする。

そこで、問題は、水路下流端に流出した流砂をいかにして捕捉するかということと、捕捉した流砂をいか

にして計量するかということに分けて考えることができる。

流量が少ない場合には、流水と流砂を分けずに、全量採取して計量することもさほど困難でないが、流量が多くなるにしたがってそれは困難となる。したがって、流量が多い場合には、まず、流水の大部分から流砂を分離させる必要がある。それには、大きく分けて、流速を軽減させて流砂を沈降させる方法と、ふるいにかけて強制的に分離させる方法とがあり、比較的穏やかな流れに対しては前者の方法がしばしば用いられるが³⁾、粒子が一部浮遊するような場合には、後者の方法を用いるのが有効である²⁾。その際、微細砂まで逃がさずに捕捉するには、できるだけふるい目を細かくすることが望まれるが、そうすると目詰まりを生じ易くなるので、ふるい目をいくらに設定するかがまず重要な問題となる。

これは、流量規模にもよるが、通常の水路実験でよく用いられる $1\text{ l/s} \sim 10\text{ l/s}$ のオーダーの流量を考えれば、 0.3 mm 以下のふるい目を通すことはかなり困難となる。そこで、本装置では、ふるい目の大きさを 0.3 mm に選ぶことにした。その場合、 0.3 mm 以下の砂粒子はふるい目を通過してしまうが、それらは浮遊させて濃度計測を行うなど、別途に取り扱う必要がある。本研究では、それら微細砂の取り扱いについては言及しないことにする。

次に、流水の大部分から分離した砂を計量する最も単純な方法としては、ふるいごと秤量することが考えられるが、流れのある条件下で精度の高い秤量を行うことは困難であるので、ふるいを流れのない所に移動させるか、または、流れを一時他の場所へ切り換える必要がある。しかし、それらはいずれもかなり大がかりな構造を必要とするため、ここでは、ふるいは固定しておいて、その上の砂を別の場所へ移動させて計量することを考える。

それには、ふるいに適当な傾斜をつけるとともに、完全な排水を行わずに適度な流れを残しておく都和合がよい。その際、ふるいに振動や回転を加えると、砂が一層移動し易くなるとともに、目詰まりの防止にも効果を発揮するが²⁾、ここでは、単に傾斜をつけることと、排水面積を可変にすることのみにとどめておく。

Fig. 1 は、水路下流端にセットした流砂捕捉網の構造を示したものである。水路幅は 50 cm 、流量範囲は $1 \sim 40\text{ l/s}$ 、対象とする砂の粒径は $0.3 \sim 2\text{ mm}$ で、流量によって排水網の底板を着脱して、下流端に適度な流れ（約 1 l/s ）が到達するように調節する。さらに、下流端の樋の出口部分にゲートが設けられており、流量調節ができるようになっている。

このようにして樋に集められた砂と水は、かなり扱い易くなっており、手で採取を行うにはこれで十分であるが、自動化のためには、さらに流量を安定させるとともに、容易に停水できるようにもしておく都和合がよい。そこで、樋から出てきた砂と水を、一旦水槽の中に立てた円筒の中に落とし込み、その底部から一定流量のポンプで吸引して、計量部へ輸送することにした。円筒の底付近の壁面には、 0.3 mm メッシュの金網を張った孔があけてあり、水槽との間で水が出入りできるようになっている。これにより、計量部への流量が安定し、かつ、計量部を操作のし易い任意の場所に切り離すことが可能となった。後に述べるように、

計量操作は間欠的に行われるので、それに同期させて、ポンプも断続運転するようにしている。

次に計量機構であるが、連続的あるいは断続的に計量動作を反復するためには、計量した砂をすばやく排除して、次の計量に備える必要がある。従来の流砂量計では、転倒ますの用いられた例が多いが²⁾、先にも述べたように、流れのある条件下での秤量には精度上難点があるので、ここでは、金網製容器で一定時間採砂し、容器ごと別の場所に移してロードセルで秤量し、その後、排砂、洗浄を経て再び受砂できるよう、ベルトで移動させることにした。**Fig. 2** は、その概略を示

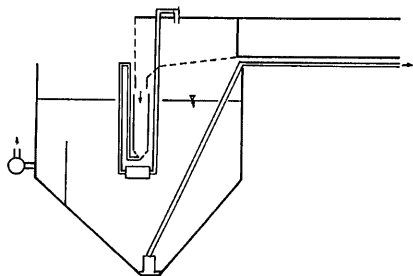


Fig. 1 Sand trap and conveying system.

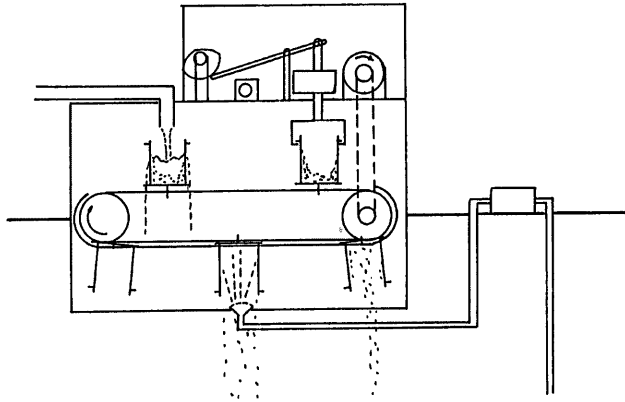


Fig. 2 Weighing mechanism.

したものである。ベルトは、間欠的に駆動させ、駆動時には、砂がこぼれないよう、送砂ポンプを停止させる。

秤量は完全な乾燥状態または浸水状態で行うのが精度が良いが、短い時間内に砂を乾燥させることは困難であり、また、浸水状態で計量を行うには、装置が複雑になるので、ここでは、適当な校正を行うことを前提にして、不完全な水切り状態で湿潤重量を測定する。

秤量を終えた砂は、容器を逆さにすることによって大部分落下するが、さらにシャワーを吹きつけて洗浄する。落下させた砂は、水槽の底部にセットしたポンプによって水路の上流端へフィードバックさせ、若干の時間遅れを伴うものの、水路から流出した砂がそのまま上流へ戻る流砂循環システムを構成している。もちろん、ポンプを止めて、流砂の循環を停止させることも可能である。

これら、一連の動作の指令信号は、同期モーターに取りつけたカムにより、マイクロスイッチを断続させることによって与えている。

3. 試作品の性能と測定例

Fig. 3 は、本装置の性能のチェックに用いた砂の粒度分布を示したものである。**Fig. 4** はロードセルからの出力電圧をペンレコーダに記録したものの一例で、受砂容器が受砂位置から秤量位置に移動した時刻を $t=0$ とおいている。 $t=10$ sec において、ロードセルが上方に引き上げられることによって出力が急激に立ち上がり、ややオーバーシュートした後、出力が漸減し、続いて小さな負のステップが現れた後、出力が急激に低下して元の値に戻っている。出力が急減する前に負のステップが現れるのは、ロードセルが引き上げられた状態から下降する状態への遷移点に相当しており、受砂容器の底部にとりつけてある駆動用の金具とベルトとの間に付着した水の抵抗によるものと考えられる。その前に出力が漸減

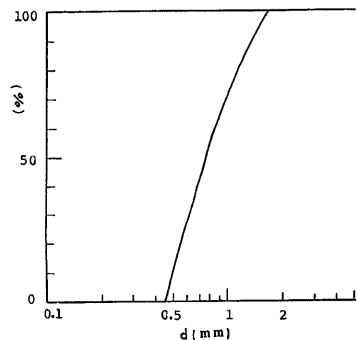


Fig. 3 Grain size distribution of used sand.

しているのは、ロードセルをひき上げて秤量している最中にも排水が進行しているからである。しかしながら、読み取りまでの排水時間を一定にすれば、砂量に応じて排水量も定まり、乾燥重量と湿潤重量との間に一定の関係を保つことができるであろう。そこで、ここでは $t=20\text{ sec}$ における読みを湿潤重量として用い

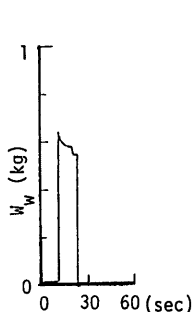


Fig. 4 An example of the output voltage of the load cell.

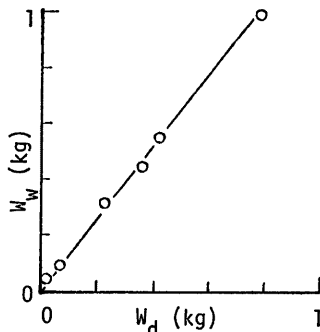


Fig. 5 A calibration curve between the wetted and dry weights.

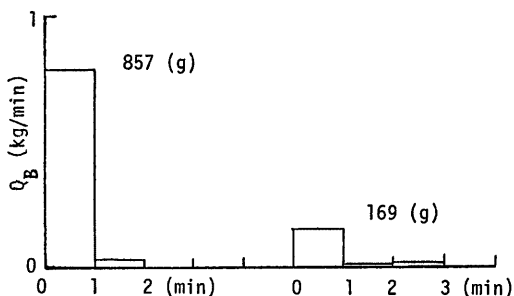


Fig. 6 A check of the time response of the equipment.

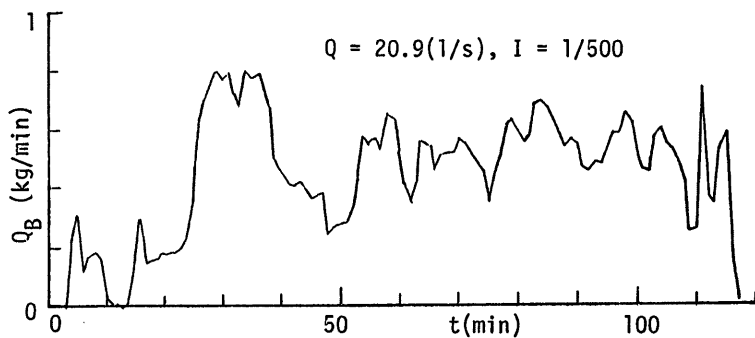


Fig. 7 An example of the time change of the sediment discharge measured by this equipment.

ることとする。

Fig. 5 は、水路からの流砂がない条件で、流砂量計を動作させておき、受砂容器の中に乾燥重量 W_d が既知の砂を投入して、検出される湿潤重量 W_w との関係をプロットしたものである。検出湿潤重量は乾燥重量の 1.25 ± 0.25 g の範囲に保たれている。しかしながら、この関係は、砂の粒度分布によって若干変化する可能性がある。

次に、本装置の時間応答特性を調べるために、水路下流端に既知量の砂を投入し、検出された砂量の時間変化を示したのが **Fig. 6** である。この図からわかるように、水路下流端に達した土砂は、1 分以内にほぼ全量が秤量部に送られており、砂の滞留や遅延はほとんど問題にならない。

Fig. 7 は、実際に水路を運転して、2 時間にわたって 1 分間おきに流砂量を観測したものであり、流砂量の時間変化が克明に把握されている。水利条件は、 $Q=20$ l/s、 $I=1/500$ であるが、この条件における河床形態は砂堆であり、図に見られる流砂量の変動は、主として砂堆の通過によるものであると考えられる。

4. 試作品の問題点と対策

本装置における流砂量の絶対秤量精度は乾燥重量に換算して約 20 g であるため、相対精度を 10% 以上にするには、200 g 程度以上の砂をまとめて秤量する必要がある。したがって、流砂量が極端に少ない場合には、その時間変化を精度よく検出することはできない。一方、流砂量が極端に多い場合には、サンプリング間隔を短くしなければ、受砂容器から溢れる恐れがあり、受砂容器を大きくするか、サンプリング間隔を短くする必要がある。本装置の受砂容器の容量は約 2 l であるが、1 kg 以上の砂が入ると、1 l/s の水を排水しきれず、水とともに砂が溢れ出す。また、現在のところ、種々の駆動機構の制約から、サンプリング間隔は 1 分間に固定されている。したがって、十分な精度で計測ができる流砂量の範囲は 0.2~1 kg/min 程度と比較的狭い。

受砂容器の容量をあまり大きくすることは得策でないから、より広範囲の流砂量を精度よく計測できるようにするには、流砂量に応じてサンプリング間隔を変化させるのが有効であろう。これを自動的に行うには、流砂量の測定値をベルトの駆動にフィードバックさせる必要があり、現在、マイクロコンピュータを用いた制御機構に変更できるよう検討を加えている。その場合、単にベルトの駆動用信号を得るだけの目的ならば、容器内の土砂量あるいは水量がある限界値に達しているか否かの判断さえできればよいのであるが、できれば、受砂中に砂量の連続的な検出のできることを望まれる。

次に、本装置では、40 l/s までの流量条件下に適用できることを企図したが、実際には、30 l/s 程度の流量で水路下流端の金網の目詰まりによって排水不良を生じ、せき上げが水路部にまで及んで、現象自体に影響を及ぼしてしまうことが時々生じた。これを防ぐには、排水面積を増すか、金網に回転や振動を与えるか、ワイパーのようなもので絶えず付着物を取除くことが必要である。しかし、排水面積が大き過ぎると、流量が少ない時に排水過剰となり、金網の上に砂が滞留してしまうので、流量に応じて排水面積を変化させる必要がある。本装置では、現在のところそれが手動になっており、流量の変化範囲が大きい場合には、完全な自動計測に至っていない。これを自動化するには、装置が大きかりになる恐れがある。

また、いずれにしても、金網を用いる限り、長期にわたって使用すれば目詰りが進行することは避けられず、その除去あるいは金網の交換が容易に行えるようにしておくことも重要である。場合によっては、目詰まりの問題を解消するために、排水方法、採砂方法に根本的な改良を加えることも検討せねばならないであろう。

次に、本装置では、ポンプを用いて流砂を輸送する部分があるが、砂に対してはうまく作動しても、礫を含むと閉塞や摩耗の問題が生じる可能性がある。また、ポンプの吸引側の経路に空気が混入すると、ポンプが作動しなくなる危険もあり、システムが順調に作動している間とはかくとして、ひとたびトラブルが発生すると、閉塞したり、溢れ出たりした土砂の処理に多大の労力を要する。できれば、砂礫の移動経路をも

っと単純なものにすることが望まれる。

最後に、本装置で検出される流砂量は、水路下流端におけるものであり、水路途中におけるものとは、単にタイミングがずれているだけでなく、変動特性そのものが異なっている可能性がある。特に、水路下流端付近には、床止めと水位調節用の堰が設けてあり、下流端に流出する土砂は、それらの影響を強く受けている恐れがある。著者が本装置を用いて解明しようとしている当面の課題は、河床波の変形過程における流砂量の時間変化であるが、それは、決して水路下流端を対象とするものではなく、水路途中のある断面を想定したものである。河床波の変形過程の解析には、さらに流砂量の空間分布も重要となるが、本計測法ではそれを明らかにすることはできない。

5. 結 語

以上のように、本研究では、比較的簡易な自動流砂量計を考案・試作し、限られた条件下ではあるが、実用段階に達することができた。得られた結果を要約して結語とする。

1° 本装置は、水路下流端における流出土砂を全量採取して、自動的に秤量を繰り返すものであり、流砂の捕捉・輸送機構と計量機構とから成っている。

2° 流砂の捕捉には、ふるい目 0.3 mm の金網を用い、排水量を調節することによって、流砂の全量と約 1 l/s の水を樋に導き、ポンプで計量部へ輸送する。

3° 計量部では、5 つの金網製の受砂容器を、ベルトにより 1 分間隔で移動・循環させ、受砂→秤量→排砂→洗浄→待機を反復させる。秤量にはロードセルを用い、一定の水切り状態で湿潤重量を計測する。

4° 平均粒径 0.8 mm のほぼ均一砂を用いて秤量精度や時間応答特性を調べたところ、水切り状態のばらつきや種々の変動要素を勘案すれば、秤量精度は約 25 g 程度であり、1 分間隔で 10% 程度の精度で測定できる流砂量の範囲は、0.2~1 kg/min である。

5° 本装置が使用できる流量範囲は 1~40 l/s であるが、流量が少ない時には、排水過剰で砂が滞留しないよう、排水網の一部を覆う必要がある。また、流量が多い場合には、金網の目詰まりを防ぐため、時々、金網の前面を清掃する必要がある。現段階では、これらの操作が手動となっているが、流量が 20 l/s 以内でかつ変動範囲が 5 l/s 程度以内の場合には、それらの操作は必要でなく、完全な自動計測が行える。

今後、さらに広い条件下に適用できるよう、改良を加えるとともに、水路下流端だけでなく、水路途中の任意の断面における流砂量、さらにはその空間分布をも計測できるような方法について、研究を進めたいと考えている。

なお、本研究の一部は、昭和60年度文部省科学研究費補助金自然災害特別研究(1)(代表者：北大岸力教授)の補助を受けて行ったものである。また、装置の設計・製作にあたっては、京都大学防災研究所附属宇治川水理実験所北川吉男技官の労に負うところが多い。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 流砂量計測開発研究グループ：掃流流砂量計測計器の開発に関する研究，京大防災研究所年報，第14号B，1971，pp. 239-249.
- 2) 芦田和男・高橋 保・沢田豊明：山地流域における出水と土砂流出(10)，京大防災研究所年報，第24号B-2，1981，pp. 223-237.
- 3) Hubbell, D. W., H. H. Stevens, J. V. Skinner and J. P. Beverage: New Approach to Calibrating Bed Load Samplers, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 111, No. 4, 1985, pp. 677-694.