

掃流流砂量測定計器の開発に関する研究

流砂量計開発研究グループ

STUDIES ON THE EQUIPMENT FOR BED LOAD DISCHARGE MEASUREMENT

By Study Group of Sediment Measurement Techniques

Synopsis

In this paper, we presented the several kinds of apparatus for measuring the bed load discharge in an alluvial channel and discussed their merits and demerits.

In conclusion, we picked up the rotating bucket type and balance type measuring devices and manufactured them for trial. We tried to measure the bed load discharge with the former type apparatus in our experimental channel and could obtain the satisfactory results, but for the case of applying this apparatus to the practical field, we pointed out the several points which must be improved.

1. 緒 論

河道計画，ダム計画，砂防計画などをたてるにあたって，流水中の掃流流砂量を決定することは，極めて重要なことである。現在掃流流砂量公式を用いて計算によって，その量を求める手法がとられているが，その信頼性については必しも十分とはいえない。そこで実河川について掃流流砂量を適確に実測して，より正しい理論式を確立することが，多くの人々によって要望されている。ところが掃流流砂量を実測することは極めて難しく，現在信頼出来る計測器はないといっても過言ではないであろう。

現在実河川に適用されている計測器は Fig. 1 に示したような，ねずみとり器のようなかごを水中におろして採砂するという方法のものである。この計測器の欠点とされている点をあげると，次の諸点と思われる。

1) 流水特に洪水時にロープを使って投入することは困難である。鉛の錘をつけてその自重を増大しても流水の流速によって投入が思うようにできない。

2) 仮りに水中におろしたとしても，河床で水平に設置することが難しい。砂利を一つかんでも計測器は傾いてしまって，かごに掃流砂が自然の状態で流れこまない。

3) 流水の方向に平行に設置することも非常に難しい。このために翼をつけて出来るだけ流れ方向に平行になるような工夫がされているが，流れの乱れなどの影響をうけて平行性を保つことが難しい。以上の2)，3)の理由によって一般に採集される掃流流砂量は過少評価されがちになっている。

4) 金あみを使って流砂を捕獲するしかけになっているが，この金あみの網目をどの程度のものにしてよいか問題とされている。すなわち網目が粗いと細砂が流れ出てしまうし，反対に網目がこまかすぎると流水がさえぎられて，流砂がかごに流入しにくくなる。

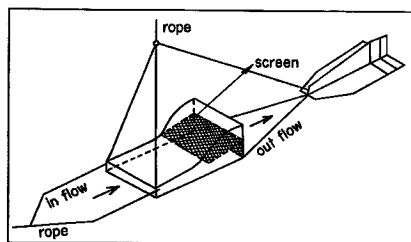


Fig. 1 Bed load sampler presently used.

5) 砂礫の移動層の厚さが現在よく分っていないので、河床にこの計測器を設置した場合に、上層の一層だけの掃流流砂量を計測する結果になっているのではないかという疑問が残されている。

6) 砂連や砂礫堆が移動してくると、場合によってはこの計測器を全部埋めてしまって、かごをのりこして流砂が流れ去ってしまうこともある。

以上のように取扱い上の不便や計測上の疑問が考えられるので、この計測器では実際の値の 30% 位しか採砂出来ていないのではないかという説もある。要するにこの型式の計測器では到底満足することが出来ないというのが現状であるといえる。

それではどうしたらよいか。これらの欠点を克服していくためにはどのような工夫がなされるべきか。以下この問題について考えてみることにしたい。

先づ一般論的に流砂量を測定する方法論について考えてみることにしよう。それには次の 3 つの考え方があげられる。

1) 運動方程式的な考え方として、たとえば F_s をある河川断面を通過する砂礫の総断面積とし、 V_s を砂礫の移動速度とすると、流砂量 Q_s は

$$Q_s = F_s \cdot V_s \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。砂礫の粒径は大きさまであるから積分形にして表わしてもよい。

2) 連統方程式的な考え方として、 Δt 時間に ΔV (流砂量の容積) または ΔG (流砂量の重量) の変化があったとすると、流砂量は

$$Q_s = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \text{または} \quad \frac{\Delta G}{\Delta t} \dots\dots\dots (2)$$

として表わされる。

3) 相関関係の理論式的な考え方として、 $x_1, x_2, \dots$ などを掃流砂現象に関連随伴する他の物理現象であるとするとき流砂量は

$$Q_s = f(x_1, x_2, \dots) \dots\dots\dots (3)$$

として表される。たとえば流砂現象に伴っておくる他の物理現象として、地かく変動、地盤振動などの現象との相関を理論的に解明することが出来れば、掃流流砂量そのものを計測しなくとも、これらの相関する他の物理量を計測することによって、流砂量を測定することが可能になってくる。現在 1) 及び 3) の方法については殆んど解決の目安がついていない。最も簡単なものは 2) の式を用いる方法と考えられるので、ここでは主としてこの考え方の方式についての考察を進めていくことにした。

さて 2) の方式では Δt 時間に容量 ΔV または重量 ΔG を何らかの方法で計測すれば目的を達することが出来るので、一見非常に簡単に解決できそうにみえるが、実際に具体的に工夫してみるとなかなか良案が生れてこない。

そこでいろいろの案を考案して長短を比較検討してみることにした。この諸案は既にその大部分は雑誌河川 (昭和 42 年 8 月) に発表済みのものであるが、その後考えついた案を加えて以下列記することにする。

2. 開 発 試 案

流砂量は流量の変化につれて変化するから、時々刻々の流砂量を計測しなければならない。このために大別して流砂を採集して計量するという方法と、採集しないで流砂量の重さを圧力や回転数などに転換して計測しようとする方法に分けることができる。前者の場合には採集した流砂の粒径が分る利点があり、後者の場合にはそれができない欠点がある。しかし後者の方法では圧力や回転数を自記させることができるので、計測が極めてらくにできる利点がある。以下採集方式と非採集方式に分けて、われわれが考えた計測手法のいろいろの案を記述することにしよう。

2.1 採集方式

(1) ベルトコンベアー案 (Fig. 2)

Fig. 2 に示すように河床にベルトコンベアーを設置して、流砂を順次ベルトによって捲上げて採集し、これをチッピングワゴンに投下し、順次これを計測していこうという案である。ベルトコンベアーはコンクリートの暗渠にいて、流砂の落込む部分には特別に窓式に開口部を設けておく。暗渠の上下流の河床変動を防ぐために相当の床固工が必要であろう。

(2) 垂直バケットコンベアー案 (Fig. 3)

河の中に鉄塔をたてることになるので、余り好しい案ではない。またバケットが流砂を入れて上昇すると、次のバケットが所定の位置に到達するまでの間に底のコンクリート箱に流砂が落ちこんでたまるから、これを防止するための工夫が必要になってくる欠点もある。

(3) パイプ案 (Fig. 4)

砂防ダムその他落差のある工作物を利用して集砂箱に流下した流砂をパイプで自然流下せしめて、これを採集して計測する方式のものである。最も注意を要する点はパイプの直径を可成り大きなものにしないと流木や巨石のためにパイプがつまってしまう欠点が予想されることである。この点を改良する一つの方法として河床に埋設する集砂箱にパイプの直径程度のメッシュの格子を蓋状に設けることが考えられる。

(4) ポンプ案 (Fig. 5)

落差のない場所では集砂箱に流下した流砂をポンプで吸い上げる方式の案が考えられる。この案では流砂の径が砂利程度のものに限定されるであろう。動力費にかなりの金額を必要とする他、吸い上げる力を余り大きくすると自然の流砂量以上のものを吸い込むことになるので設計上かなり難しい欠点がある。

(5) 埋込式吊籠案 (Fig. 6)

現在の掃流流砂計は先にも述べたように、流水にむかって投入すること自体に困難があり、これに加うるに流水方向にまた河床面に平行して設置することが困難である。この欠点を克服する一つの手段として Fig. 6 のように予めいくつかの籠をぶらさげて河床にセットさせておいて、出水にあたって順次ある時間間隔に引き上げていく方式のものである。この案の最大の欠点は籠の上面のふたの開閉を自由に遠隔操作させる工夫を必要とすることである。また籠には数の限度があるから 2~3 日も続く洪水時には全期間にわたっての観測には充分の成果は期待出来ないことであろう。

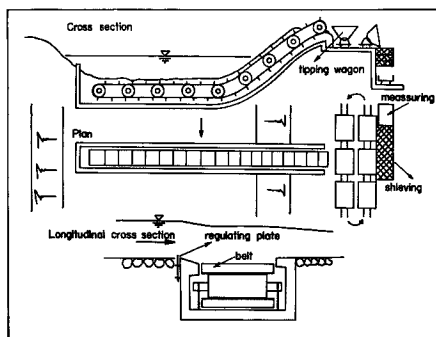


Fig. 2 Belt conveyor type.

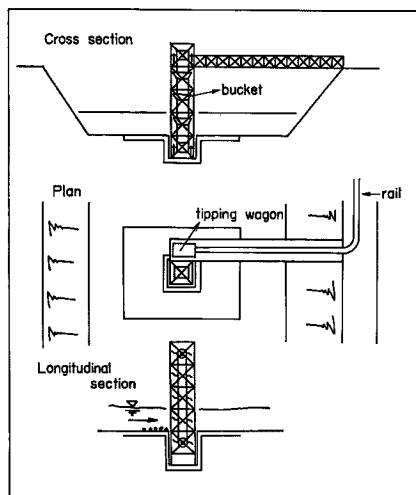


Fig. 3 Bucket conveyor type.

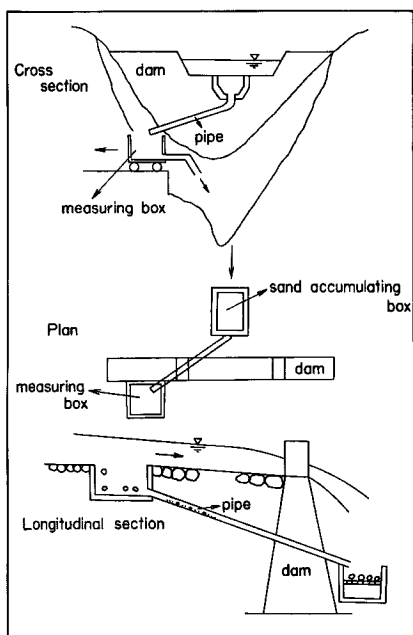


Fig. 4 Pipe type.

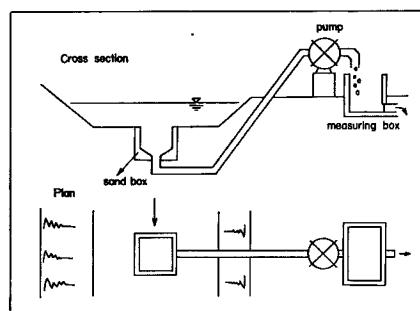


Fig. 5 Pump type.

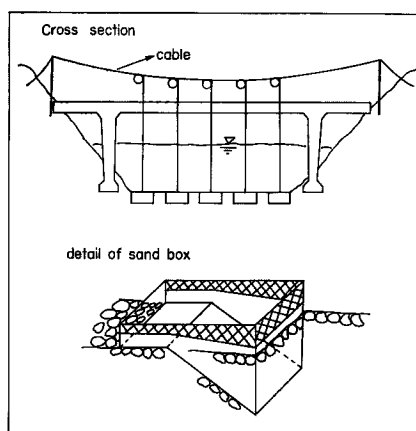


Fig. 6 Preliminary set type.

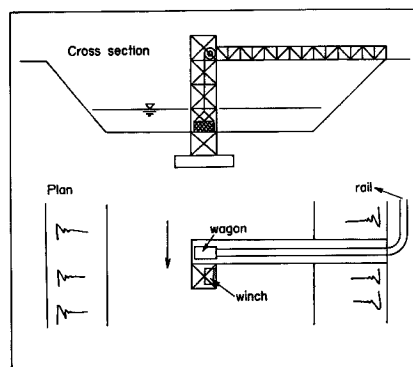


Fig. 7 Guide-rail type.

(6) ガイドレール付吊籠案 (Fig. 7)

籠の投入や引上げるなどの作業に困難しているから、この点を改良する案として、4本のガイドレールにそわして籠を上下せしめれば一つの解決策ともなる。しかしこの案で問題になることは、河床にコンクリートの柵を設ける場合、それが埋まらない工夫が必要となってくる。

この問題は何れの場合にも共通的に発生する問題点であって、掃流砂量計測の困難の一つの大きな原因であろう。

(7) 砂防ダム利用案 (Fig. 8)

砂防ダムの水通しから落下してくる砂礫を堰堤の下で左右岸に分けて集めて、これをチップングワゴンに集めて計測する方法である。この案では砂と水を分離して砂礫のみを採集することが必要であるが、前記の籠の蓋の開閉操作の必要もなく、また河床変動の対策に工夫を要しない長所があるが、相当の経費がかかることが予想される。チップングワゴンで採集し計測するにはかなりの人力が必要であり夜間作業などには不向きであるから、後に記述する転倒枳の案を併用して回転数を自記せしめる方法をとるとこの点の欠点が除かれる。

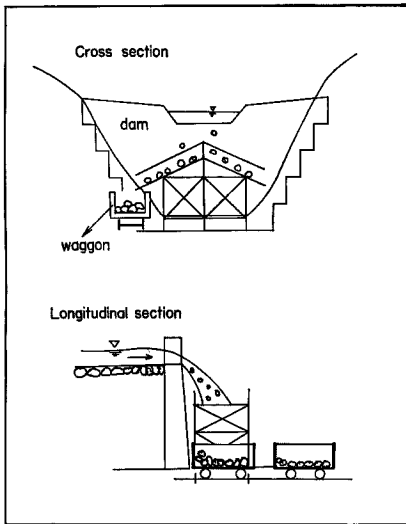


Fig. 8 Sabō-dam type.

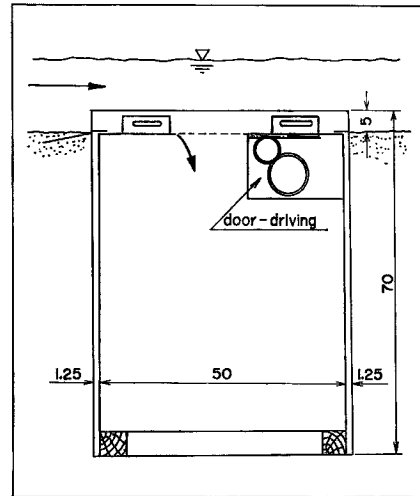


Fig. 9 Automatic door closing type.

(8) 自動開閉式採集箱案 (Fig. 9)

流砂の採集箱または籠の蓋の開閉を遠隔操作で自由に開閉させる具体的な一案として Fig. 9 に示すような鋼製箱の天井に自動開閉式のスライディングドアをつけたものを河床に数多く設置する。洪水時に順次一つ一つ扉をあけて砂礫を流れ込ませて、ある時間 Δt 後にまた自動的に閉める。順次いくつかの箱をこのように遠隔操作して洪水後に箱に入っている砂礫を計測していこうという考え方のものである。自動開閉扉が砂をかんで動かなくなる心配があるのでこの点の工夫は必要と思われるが、この案は溪流のように比較的粒径の大きい砂礫の流砂量を計測するには適しているように思われる。

2.2 非採集自記方式

河床の砂礫を直接採集しないで、砂礫の重量を回転数や、圧力に転換して自記せしめる方法である。設備や記録計に欠点があれば労少く、かつ夜間の暴風雨時にも計測が容易に出来る長所をもっている。この方式は考え方としては先に述べた(3)式の範疇に属するものと言えよう。

(1) 自掃式スプリング重量計測装置案 (Fig. 10)

河床にコンクリート又は鋼製の箱を設置し、スプリングで支持された鋼板で砂礫を受け、その重量をスプリングの弾性に転換して、スプリングの歪を電氣的にとり出して自記せしめる方式のものである。箱に砂礫が満杯するとジャッキで押し上げて、流水の掃流力を利用して下流に流下せしめる。次に鋼板を再び下げて砂礫を受け入れる。

(2) 天秤式重量計測装置案 (Fig. 11)

スプリングの代りに単拵で支持せしめ、その反力を天秤式にベローズまたは圧力計に伝達せしめて、電気

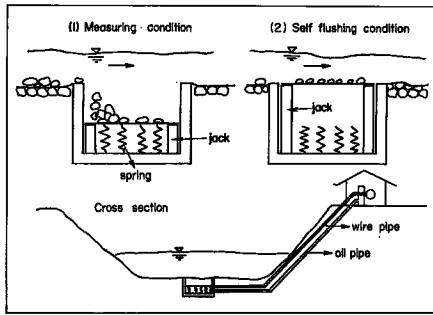


Fig. 10 Self flushing type.

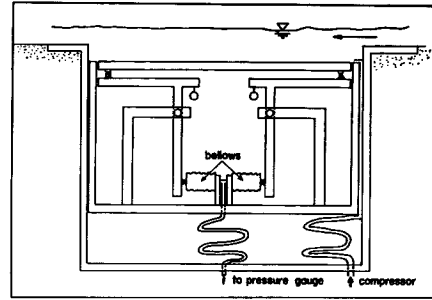


Fig. 11 Simple beam type.

信号に転換してこれを記録計に自記せしめようとするものである。この場合には自掃方式をとらないから、別に圧縮空気または高圧水で砂礫を掃流せしめる必要があるので、現地河川では相当の工夫を要することが一つの欠点である。われわれは実験水路用としてこの型のものを試作した。

(3) 転倒櫛式重量計測装置案 (Fig. 12)

自記雨量計に用いられている転倒櫛の回転数を記録せしめる現行の考え方のものを流砂量計に応用しようとするものである。原理的には最も簡単で構造も複雑ではないので、試作品を作って実験を行なってみた。大体所期の目的を達しているが、現地河川で実行するとなるといろいろの点でなお十分に検討をする必要がある。特に問題になるのは箱に集積される砂礫を排砂してやる必要がある。われわれはこのために計測器に附属して垂直のスクリーコンベヤーを設けて刻々と転倒櫛から落ちてくる砂礫を排砂する設備を試作した。この試作品を用いて実験水路で掃流砂量を計測した結果については後に記述することにした。

(4) ゴム袋式計測装置案 (Fig. 13)

箱に流れ落ちた砂礫を計ることよりも、次第にたまっていく砂礫をいかにして排除するかということの方が難しいものである。今迄このためにジャッキで押しあげて自掃したり、スクリーコンベヤーで押しあげ

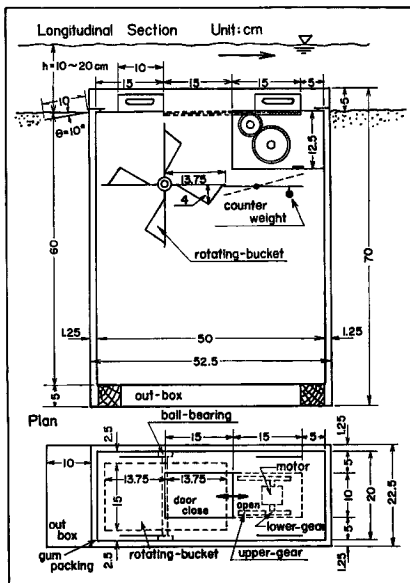


Fig. 12 Rotating bucket type.

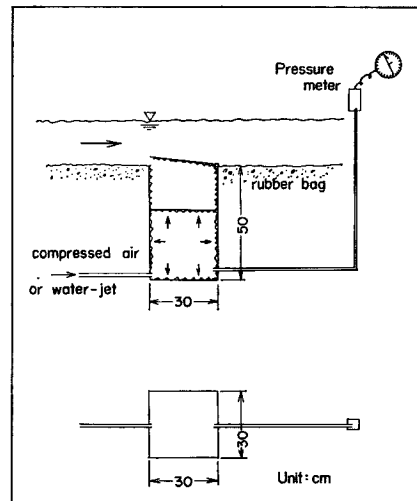


Fig. 13 Rubber bag type.

たり、圧さく空気や高圧水で押し流したりする案を考えてみたが、この案は伸縮自在のゴムの袋を利用してこの役目をはたさせようとしたものである。Fig. 13 に図示したように箱の中にゴム袋をいれてこれに空気または水を送ってまずふくらましておく。流砂が箱に落ちこんできてその重さのため袋の中の空気または水の容量が圧縮されて縮み、圧力が増加するからその量を記録計に自記せしめようとするものである。砂礫が箱に満杯してきたら、こんどは空気または水を加圧して袋をふくらまして、砂礫を河床まで押し上げて、あとは流水の掃流力で自掃せしめようとするものである。

2.3 以上諸案の問題点について

以上 12 の案についての原理的な説明をしたが、これらは何れも原理的な構想にすぎないのであって、実際に試作して、先づ実験水路で検討してみる必要がある。そのうえで可能性のあるものを現地河川に適用してみることが望しい。われわれは現在以上のうちほんの 1, 2 のものを試作したにすぎず、今後いろいろの案についての比較検討を試みたいと思っている。掃流流砂量の現地計測の必要性は多くの河川砂防技術者が痛感するところで既に若干試みられているようである。例えば建設省北陸地方建設局の立山砂防工事事務所で常願寺川の本宮砂防堰堤の副堰堤に設置された装置がある。これは掃流砂を左岸に設けたコンクリートの池に導入して一洪水の全流砂量の容量を計測する方式のものである。この方式では時々刻々の流砂量の変化は計測出来ない。また同局金沢工事事務所では手取川の中流部河道にコンクリートの箱を河床に埋設して、ウインチで上面扉を開閉する装置を設置している。すでに記述した採集方式の(8)の自動開閉式採集箱はこの構想を若干改案して水中モーターとギアで扉を開閉出来るようにしたものである。京大防災研究所穂高砂防観測所でも落差のある床止工を利用して掃流砂を採集する上記(7)の砂防ダム利用案に準じた装置を、岐阜県上宝村の蒲田川支流足洗谷の試験流域に設けて、現在計測を行なっている。

さて上記の諸案のうち、まづ採集方式の装置についての共通的な欠点とされる問題点をあげてみよう。第 1 に箱とか籠を用いる場合に計測時以外には流砂が流れこまないようにするために何らかの工夫をしなければならないことである。例えば開閉可能な蓋をとりつけて自由に開閉が遠隔操作で出来るようにするなどその一つである。第 2 に採集した砂礫をチップングワゴンに投入して、順次ワゴンを移動してやる必要があるから、エンドレスループの軌条を敷設することが必要となってくる。このためにかなりの敷地を必要とすることになる。第 3 に全体的に労力と時間がかかる欠点がある。言うまでもなく掃流砂計測は一般には洪水時の観測だから、夜間のことも勿論ありうるし、暴風雨が激しいこともありうるので、相当の危険と労力が余儀なくされる。こういうやり方は出来ればなるべく避けたいことで、もっと近代的な省力化を考えることが必要である。第 4 に河床変動に応じて計測器を上下に調節してやる必要があるが、これは実際には難しい。この欠点は何れの案にも共通した悩みとも言える。したがって相当の区域にわたって河床が変動しないように床止工を施行する必要がおこってくる。

あるいは河床変動がおこらない地点を選択することによって防止するしかないように思われる。以上のように何れも問題点がいろいろあるが、この方式の長所は砂礫を直接採集出来るので、粒径の分布を確実に計測が出来るという点である。

次に採集しないで流砂量を他の物理量に転換して自記せしめる方式のものは、労力的に非常にらくで夜間とか暴風雨時でも計測が出来る。しかし最大の欠点は流動している砂礫の粒径分布が把握出来ないことである。さらにこの方式は何分にも計測器がデリケートであるから、僅かな計器の不調がおこると欠測になってしまう恐れがある。したがってこの方式をとる場合には極力簡単なメカニズムのものを考案することが望ましい。また動力の問題を考えると採集方式に比べると、非採集方式の方が比較的少い動力ですむ利点があげられる。何れにしても両方式には長短半ばして、どれが最もよいかを判断することは難しい。結局現地のいろいろの条件を考慮して経費のかからない、しかも確実に計測出来る案を考えるよりしかたがないのではないかと思われる。

3. 試作品の検討

上記のいくつかの案のうち構造が簡単で現場に適用しうる可能性のあるものとして(2)の天秤式と(3)の転倒柵式の計測装置を先づ試作してみた。Fig. 14 は天秤式の設計図で、縦横ともに 28.5 cm、深さ 15.0 cm の箱の中に次の部分で構成されるものを考えた。

1. 流砂受け支持板 (4 点支持)
2. 反力伝達装置
3. ベローズ
4. 圧力伝達管及び差動変換器記録計

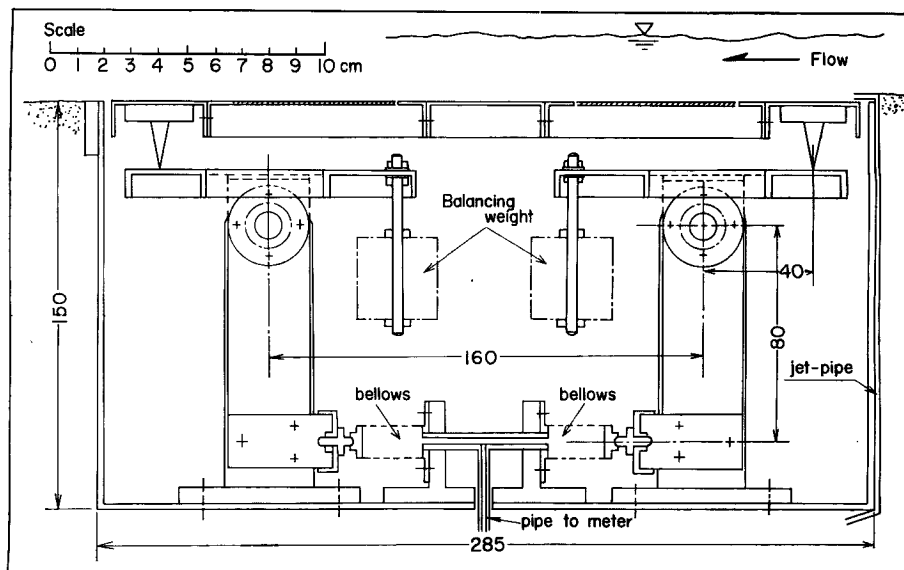


Fig. 14 Design of balance type measurement device.

これらの構造によって砂礫の重さをベローズをへて差動変換器に伝え、これを自記せしめることにした。これは現在実験中なので、別の機会にその成果を報告することにして今回はふれない。転倒柵式の計測装置は Fig. 15 に示すように、流れ方向に 52.5 cm、流れ方向に直角に 22.5 cm、深さ 65.0 cm の外箱をつくり、この内に転倒柵装置と扉開閉装置をおさめた上箱と、集砂のための下箱の 2 つを別々にして出し入れが容易に出来るように設計した。先にもふれたように、転倒柵から落下してくる砂礫は次第に下箱の集砂箱に蓄積してくるので、長時間の計測を続けるためには、Fig. 16 に示したようなスクリュウ・コンベアを設けて排砂することにした。排砂装置ははたして現地河川に適用した場合にうまくいくかどうかは今のところ確信はない。場合によってはこの型の排砂方法をやめて、数多くのこの計測箱を河床に埋設して、一つの計測箱が満砂すれば扉を閉じて、次のを使用していくという方法をとらざるをえないことになるかもしれない。

実験水路は京大防災研究所宇治川水理実験所に設けられている巾 2.0 m、長さ 20.0 m の水路を利用した。水路巾 2.0 m の内中央 1.0 m のみを用い、砂をしきつめて水路床勾配を 1:300 として、先づ定常流の実験を行なった。計測器及び水路の一部を Photo. 1 に示した。

Run-1 の実験は流量 37.4 l/sec、水深 6.72 cm、Run-2 の実験は流量 31.3 l/sec、水深 5.63 cm、Run-3 の実験は流量 22.0 l/sec、水深 5.00 cm の場合である。流砂の平均砂粒径は何れも 0.81 mm である。

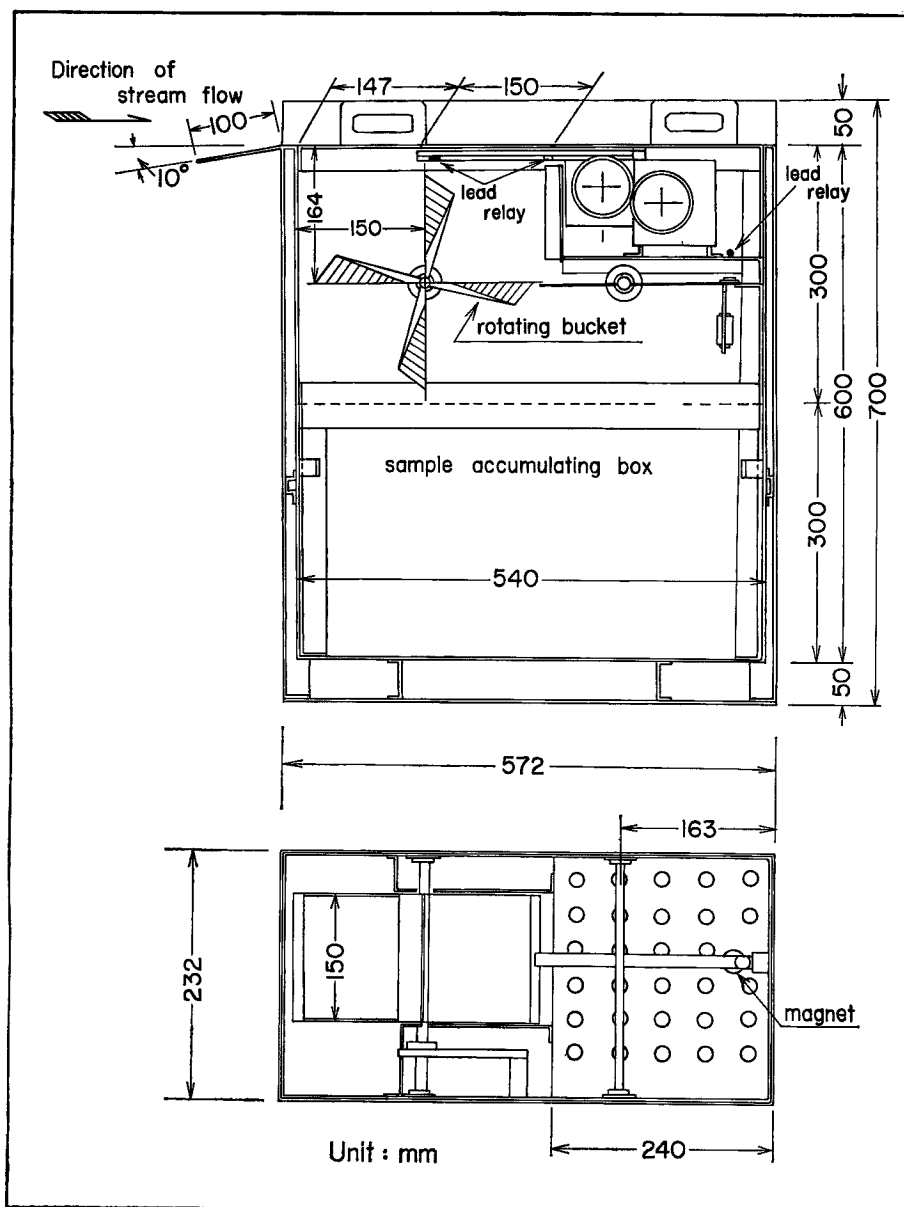


Fig. 15 Design sheet of rotating bucket type.

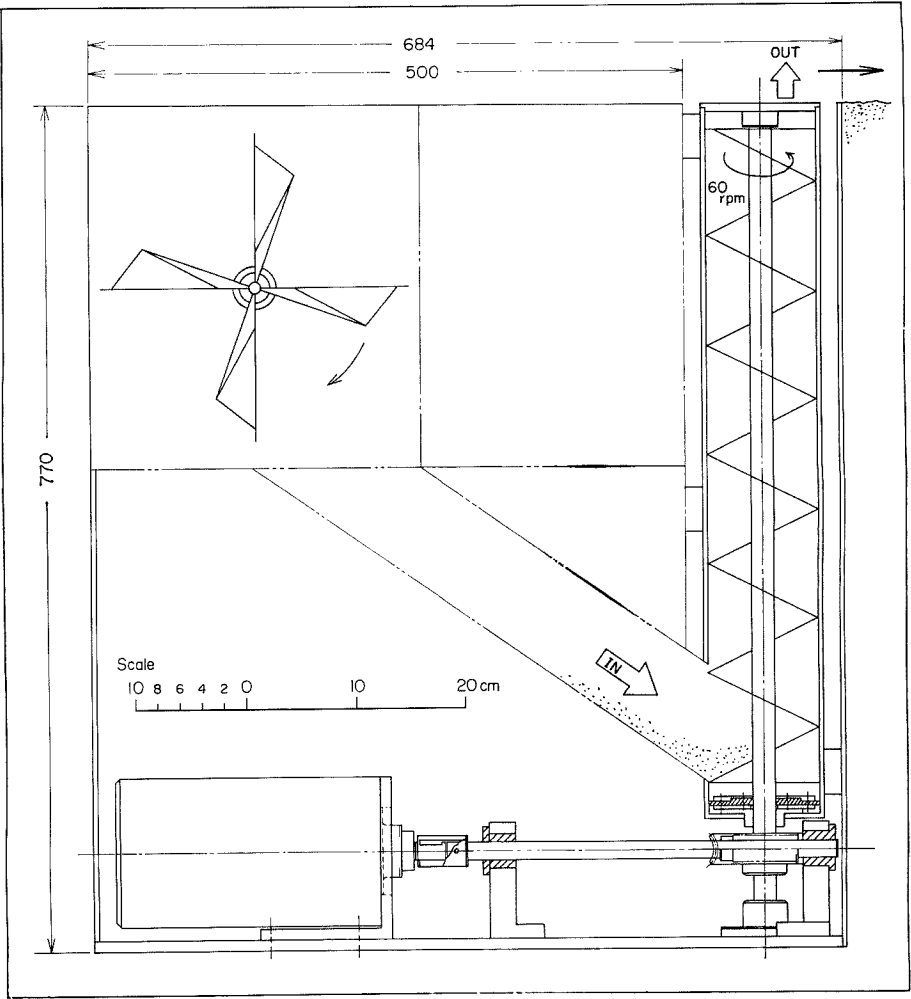


Fig. 16 Sand excluding device.

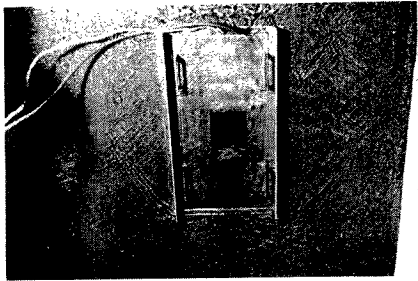


Photo. 1 Measuring apparatus, set in channel.

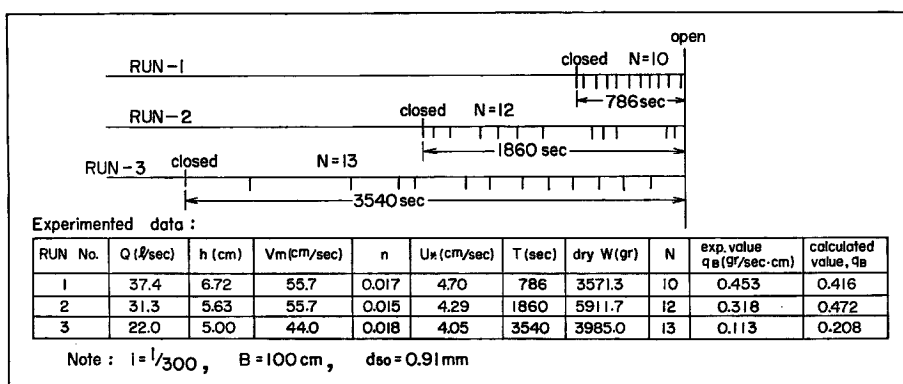


Fig. 17 Recorded pulse and tables of experimented data.

記録計に現れたパルスは Fig. 17 に示してあるように、何れも等間隔になっていない。これは流砂が砂漣のために量的に変動を生じることが主原因である。Fig. 17 中の表にまとめられている実験データで、流砂量の実験値は実験中に下箱にたまった砂の乾燥重量を実験継続時間で割ったもので、比較されている計算値は土研公式で計算したものである。一方、実験中のパルスの回数 N で乾燥重量を割って、柵の回転に必要な平均の重量を求めると、RUN 1 で 357.13 g, RUN 2 で 492.64 g, RUN 3 では 306.54 g と変動が大きい。このことの主な原因としては、落下して柵にたまる砂の移動速度がその都度異なっており、カウンターウェイトを持った柵子に作用する荷重が柵内の砂のたまり方によって異なることが考えられる。この欠点を克服するために、流砂が閉閉部から落下したものを、一度ロート状のうつわに集めて、集中して転倒柵に落下せしめうようにしてみたところ、回転に要する重量の変動は大幅に縮小されることが判明した。

以上の定常流による実験の結果と、多少の改良の結果より、本装置によって大体所期の目的を達することができる見通しが得られたが、なお、実験水路での作業でさえ、以下に述べるような問題点があり、さらに検討を加える必要があるように思われる。

(1) 扉のすきまに微小粒径の砂やゴミがつまって、扉の開閉に時に円滑に作動しないことがある。

(2) 転倒柵のどこかに同じく細砂がつまって転倒しないことがある。

(3) この計測箱を水路床にセットするにあたって、一応箱の扉の上面に水路床を一致させたとしても、その後水路床が変動すれば、落ち込む砂の量に変化を生じやすくなる。したがって、かなり砂漣が発達するような状態の場合や、平均的な大規模な河床変動がある場合には、箱のセットの仕方に問題が残されている。

現地に適用するとすると、施工、管理の問題の他に、流木その他障害物の問題、砂漣・砂堆といったスケールの大きい変動にいかにして対処するかを考えなければならない。

この研究は昭和 44, 45 年度の文部省科学研究費試験研究費によって行なわれたものである。実験及び製図などには防災研究所吉田義則技官に、また、試作品の製作には三光精密株式会社に多大の労を煩した。ここに感謝の意を表する次第である。

この研究のための研究グループのメンバーは矢野勝正、高橋保、道上正規（砂防研究部門）および芦田和男、村本嘉雄（河川災害研究部門）であって、実験は高橋・道上が担当し、討議は全員にて行なった。本文は矢野が担当した。