

差圧計による土砂の沈降分析について

土 屋 義 人・奥 村 武 信

ON A FALL-VELOCITY-FREQUENCY ANALYSIS OF SEDIMENTS WITH A DIFFERENTIAL PRESSURE GAGE

By Yoshito TSUCHIYA and Takenobu OKUMURA

Synopsis

In studying mechanics of transportation of sediments by stream, it is desirable to know fall velocity frequency distribution rather than size frequency distribution of sediments. Usual methods for observing characteristics of sediments are mainly for size frequency analysis of granular particles as minute as Stokes' law applicable. Differential pressure gages are already utilized for the sedimentation test, but its applicability is limited within granular particles and is not completely clarified yet. The authors performed some experiments on the applicability of this method to considerable coarse particles as gravels in a mountain stream and the limit of applicability is clarified based on the experimental results.

1. 緒 言

水流による土砂の輸送機構を論ずる場合には、個々の粒子の粒径よりも、個々の粒子の沈降速度を知っておく方が都合の良い場合が少なくない。とくに、山地河川におけるように、砂礫の形状が不均一で角礫状となっている場合には、粒径だけで議論することは不都合なことが多い。したがって、山腹土砂および溪流の堆積物の沈降分析を行なって、その特性を解明しようとしている。ところで、従来から行なわれている土砂の沈降分析法¹⁾の多くは、ふるい分け分析できない微細な土砂粒子群の粒径を測定する手段として工夫され実用に供されてきたものである。すなわち、Stokesの法則が適用できる範囲の粒径の粒子に適合した方法であって、その方法や装置は一般に小型である。したがって、かなり大きな粒径の土砂粒子に対しては、これらの多くは適用できない。沈降現象についての詳細な研究にあたっては、それぞれ独自の方法で沈降速度を求めているが²⁾、それらは時間と人手を要するものが多く、多量の試料について分析するのには不適當である。現在当研究所では、V. A. tube^{3), 4)}を使用して土砂粒子の沈降分析を行なっているが、差圧計を利用した方法との簡単な比較を行なえば、つぎのようである。まず第1に、V. A. tube法は沈降管の下端に堆積した sediment の堆積高さを肉眼で見ながら追跡していくもので、その記録は半自動的であるのに対して、次章で述べるように本方法は間接的ではあるが、土砂粒子の沈降量を差圧の減少として自動的に記録できる。第2に V. A. tube法では、堆積高さの測定精度をあげるために沈降管の端部の断面を縮小してあるから、沈降現象を束縛することになるが、本方法ではまったく自由な沈降をさせることができる。第3に V. A. tube法では、堆積する際の土砂粒子の空隙率を一樣とみなす必要があるが、この方法では砂礫の形状特性は直接記録に関係しない。このように、差圧計を利用した沈降分析法には V. A. tube法の欠点を取除くいくつかの利点もっているが、一般に差圧を電氣的に記録するので、計器の調整に時間を要するほか、精度的にも詳細な検討を必要とする。とくに、Appelは測定時間の短縮をはかるために、沈降時間に応じて、沈降距離を自動的に変化させる方法を考案して実験的研究を行なっているが⁵⁾、土砂粒子が比較的大きい場

合には問題点も少なくない。以上のことから本研究では、従来きわめて微粒な粒子に対して行なわれてきたこの分析法を、かなりの粒径の粒子にまで適用することを考え、沈降管の諸元と土砂粒子の特性および実験試料の量などの関係から、その適用性について実験的に検討し、この沈降分析法の実用化について考察した結果について述べるつもりである。

2. 差圧計を利用した沈降分析法の原理と試作した装置

(1) 本沈降分析法の原理

この沈降分析方法の原理というのは、沈降管の上下2点間の差圧は、2点間に存在する土砂の重量に比例するというのである。Fig. 1 に示すような断面積 $A\text{cm}^2$ の沈降管に $W\text{g}$ の土砂試料を投入すると、間隔 $L\text{cm}$ の piezometer 間には、

$$4p_0 = (1 - \rho/\sigma)W/A \text{ g/cm}^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

の差圧が生ずる。ここに、 ρ および σ はそれぞれ清水および土砂の密度である。最大の沈降速度を有する土砂粒子が与えられた沈降距離 $L\text{cm}$ を沈降するまでの間、2点間の差圧 $4p_0$ は一定に保持される。そして、距離 $L\text{cm}$ を沈降した土砂粒子の重量に比例してその差圧は減少する。すなわち、 $t \text{ sec}$ 後の差圧 $4p$ は、

$$4p = (1 - \rho/\sigma)W'/A \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここに、 W' は L/t よりも小さい沈降速度を有する土砂粒子の総重量である。この差圧の変化は、Uゲージ型の差圧計によってとりだされ、strain-meter を経て pen-recorder によって、Fig. 2 に示すように差圧の時間的变化として記録される。図中の縦軸は試料投入直後一定になった差圧を100として示している。ところで、沈降距離がわかっているし、また差圧は土砂粒子の重量に比例しているわけであるから、

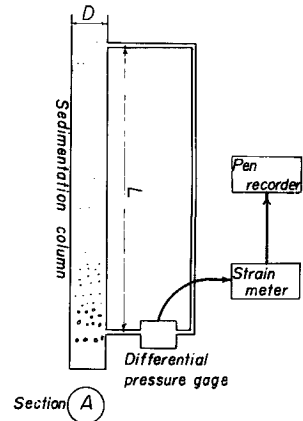


Fig. 1. Differential pressure gage arrangement and schematic diagram of transducer and recording equipment

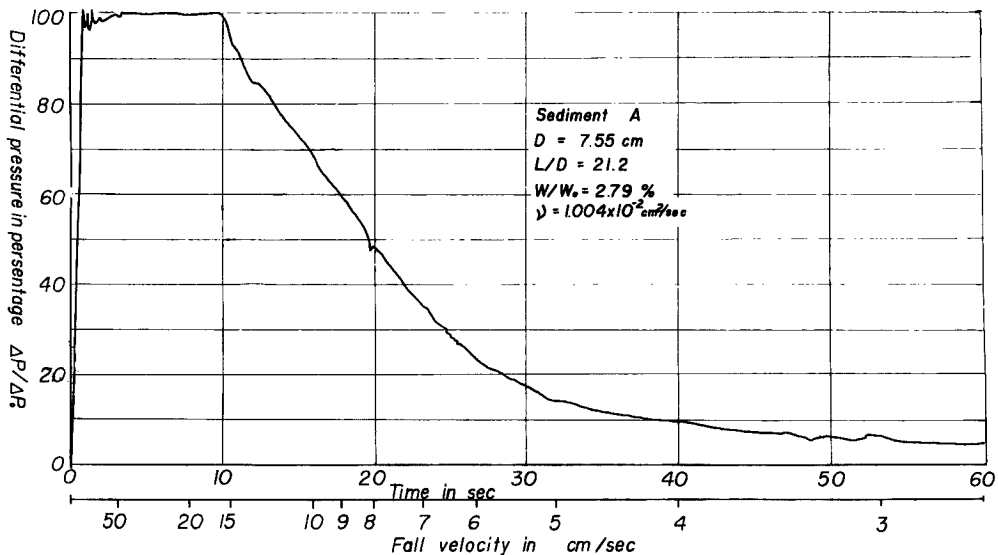


Fig. 2. An example of differential pressure records during sedimentation

Fig. 2の横軸であらわされる時間を $w=L/t$ という簡単な計算で沈降速度に換算すれば、縦軸 dp/dp_0 は (1) および (2) 式からそのまま W'/W であるから、沈降速度の重量加積曲線を直ちに求めることができる。なお、Fig 2においては、一般に試料投入時における差圧の変動が大きくあらわれているが、これは試料の投入時におけるわずかな衝撃のために沈降管が振動したためと考えられる。試料の投入をできるだけ瞬時に行なおうとすれば、この変動は大きくあらわれ、また一方この変動をなくそうとすれば、投入時間を長くする必要があり、いわゆる一斉沈降をさせることがむずかしくなってくる。したがって、正確な分析をしようとするれば、こうした変動は許容しなければならないであろう。

(2) 沈降分析装置の概要

著者らの試作した装置の概要はつぎのとおりである。

a. 沈降管 使用した沈降管は2種類で、内径7.55cm, 全長2.50m, 沈降距離 100cm, 120cm, 140cm, 160cm, 180cm, 200cmのものと、内径3.49cm, 全長 1.20m, 沈降距離 46.25cm, 64.75cm, 74.0cm, 92.5cmのものであって、いずれも硬質塩化ビニール管である。

b. 差圧計 最大感度 0.05kg/cm^2 および 0.02kg/cm^2 のUゲージ型の差圧計で東洋測器製である。

c. 記録器 新興通信社製動ひずみ測定器で、日本電気機材製のバリコーダーで記録することにした。

なお、土砂の投入法について著者らのとった方法について簡単に述べよう。前述したように土砂試料を投入するには、瞬間的にしかもできるだけ沈降管に振動を与えないように考慮すべきであるから、一般にはかなり巧妙な機構をもつ装置が必要となるわけである。しかし以下に述べる実験においては、とりあえずビーカーに入れた乾燥土砂試料をできるだけ静かに、しかも瞬時に投入するように心がけて行なうことにした。また、差圧の取り出し方は、さきにあげた沈降距離に相当する断面に、細孔を1つずつつけ、コックを取付けビニールパイプで差圧計に連結した。

(3) 実験方法

すでに述べたように、著者らは差圧計を利用した沈降分析法において、砂礫を多分に含む土砂試料を使用した場合に、沈降管の諸元、土砂試料の重量およびその特性によって、本分析法の適用限界を求めようとするのが本実験の目的である。したがって、同一の試料を使用して、沈降管の諸元を変えたときに、測定され

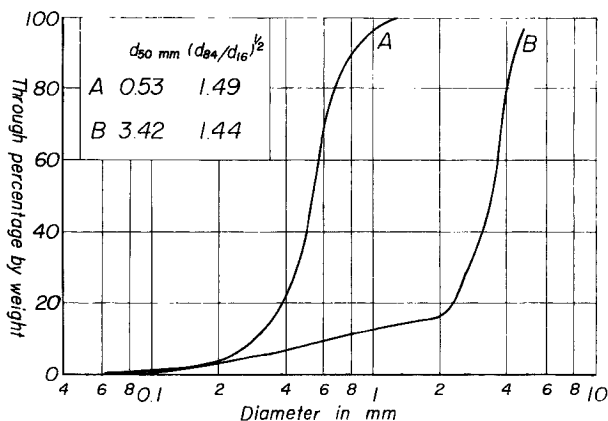


Fig. 3. Sieve analysis curves of sandy soils used

る沈降速度がどのように変わるかを検討することにした。まず、使用した土砂試料の粒度分布曲線はFig. 3に示すとおりであって、中央粒径 0.53mm 、標準偏差 1.49 のものと、中央粒径 3.42mm 、標準偏差 1.44 のもの

の2種類である。この実験用土砂を用いて、任意に取出した同一重量の試料に対して3回ないし6回実験をくり返し、実験を行なった。そして、沈降距離を適宜変えて同様な実験をくり返し、この沈降分析法に及ぼす沈降管の長さおよび土砂粒子の濃度の影響などを検討できるようにした。また、沈降管の大きさの影響を検討するために、前述したような直径の相違する2種類の沈降管について同様な実験を行なった。

3. 実験結果とその考察

前述した実験装置を用いて、差圧計を利用した沈降分析法の適用性を検討するためにえられた実験結果について述べるとともに、若干の考察をすれば、つぎのようである。

(1) 実験結果の表示

Fig. 2 に示すように、本方法によるときわめて簡単に土砂の沈降分析曲線を記録させることができるが、いうまでもなく一般にこうした土砂粒子の沈降現象には、水温の変化が大きく関係する。したがって、もし可能であれば、沈降分析曲線を何らかの方法によって無次元表示できれば、適当な水温で実験した結果を任意の水温における沈降現象に適用することが可能になる。一般に土砂粒子の沈降現象が Stokes の法則に従う場合には、差圧の比 $\Delta p/\Delta p_0$ は

$$\Delta p/\Delta p_0 = f(gd^2t/(\sigma/\rho - 1)\nu L, L/D, d/D, W/\rho D^2 L) \dots\dots\dots (3)$$

の関係によって表示されるものと考えられる。ここに、 d : 土砂粒子の大きさ、 σ/ρ : 土砂粒子の比重、 L : 沈降管の長さ、 D : 沈降管の直径、 W : 土砂試料の重量であり、上記の関係中右辺第2および第3項は沈降管の大きさの影響をあらわし、また第4項は土砂粒子の濃度の影響をあらわす。したがって、上式第4項の影響がない場合を考えることにし、沈降管の大きさが与えられると、差圧の時間的変化は無次元量 $gd^2t/(\sigma/\rho - 1)\nu L$ によって表示されることになる。これに反して、Stokes の法則が適用されない場合には、上記のように土砂粒子の特性に対応して、その沈降速度を理論的に求めることができないので、一般には同様な表示は不可能である。したがって、本文では、上記の表示にならぬ水温の変化による沈降速度曲線の変化を補正するための1つの方法として、沈降管の直径と土砂粒子の比重とが一定の場合に対して、 $gd^2t/(\sigma/\rho - 1)\nu L$ の代りに $gD^2t/\nu L$ を用いて実験結果を整理することにした。Fig. 4 は、著者らの用いた土砂試料は Stokes の法則が適用されないもので、上記の方法で差圧の時間的変化を図示した結果の一例である。この表

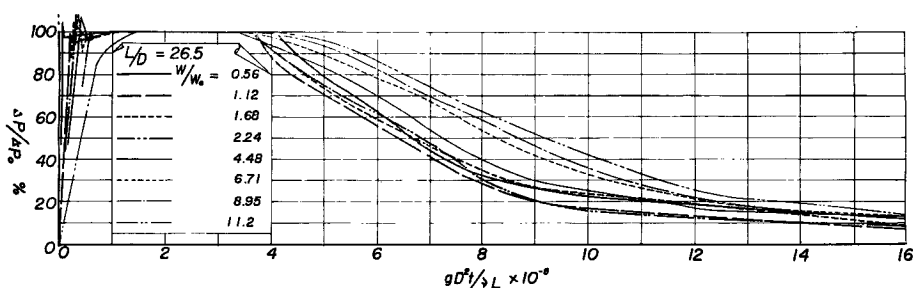


Fig. 4. Examples of experimental results for fall velocity measurement of sediments in dimensionless form

示法については、前述したように十分な検討をしたものではないので、問題点も少なくないが、この図からつぎのことがわかるであろう。すなわち、土砂試料の濃度がある値以下であると、いちおう実験曲線を集中させてあらわすことができるが、ある濃度以上になると、非常に実験結果が相違してくることがわかる。この点については、あらためて後述するつもりである。

(2) 沈降速度分布曲線

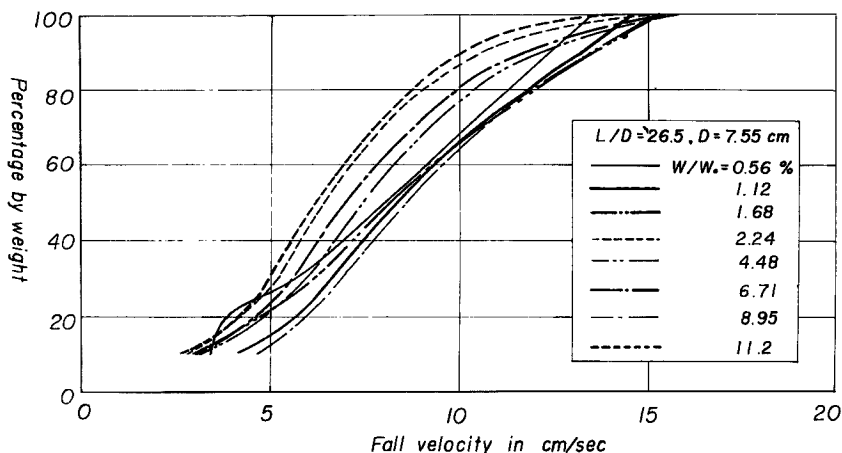


Fig. 5 (a) Variations of fall velocity accumulation curves with concentration of sediments in case of sediments A

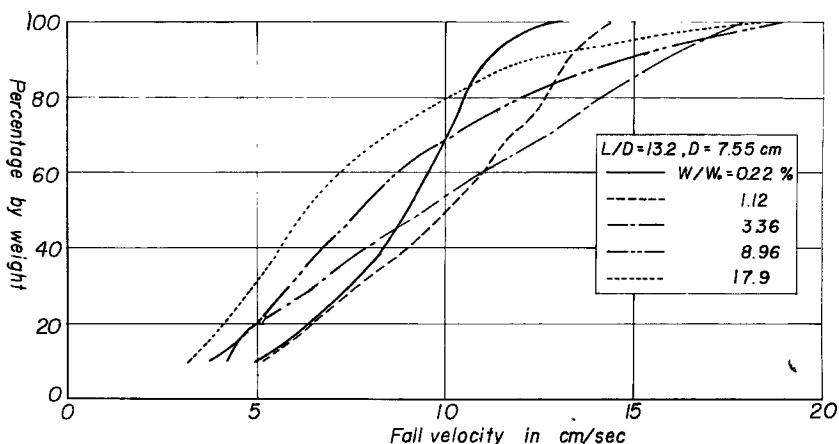


Fig. 5 (b) Variations of fall velocity accumulation curves with concentration of sediments in case of sediments A

Fig. 5 は Fig. 3 に示した実験試料 A を用いた場合の沈降速度の重量加積曲線を示したものの一例であって、試料の濃度による変化と沈降管の長さや直径の比 L/D の影響も検討できる。このほか、沈降管の長さのみならず直径をも相違する場合の実験結果を参照して、つぎのことが結論される。すなわち、沈降速度の分布曲線は、一般に試料の濃度によって変わるが、前述したようにある濃度以下ではほとんど相違しないようになるけれども、沈降管の大きさをあらわす L/D の値によってもかなり変わることがわかる。とくに、Fig. 5 (a) の結果から明らかなように、 L/D の値が 13.2 である場合には、実験結果は非常に相違し、濃度が 1 % 以下になっても精確な沈降分析ができないように思われる。

(3) 沈降速度に及ぼす土砂濃度の影響

Fig. 6 は沈降速度に及ぼす土砂濃度の影響を検討したものであって、直径 7.55 cm および 3.49 cm の沈降管

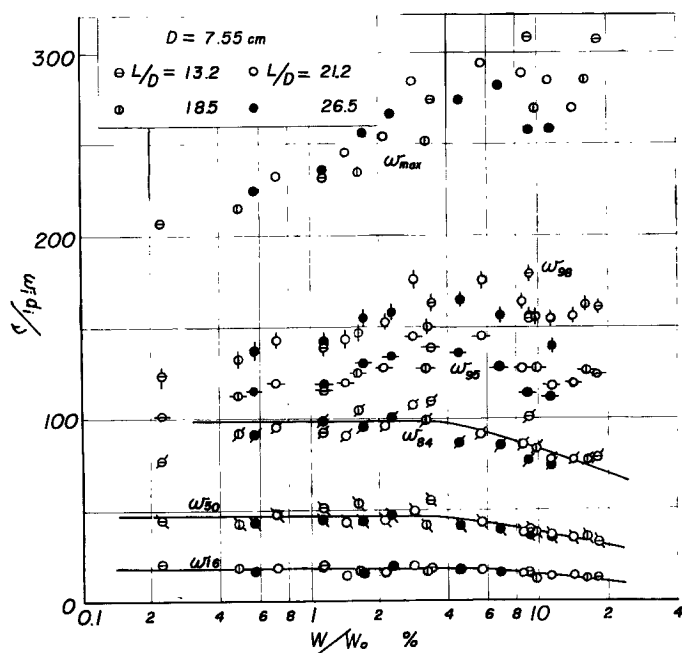


Fig. 6(a) Variations of fall velocities with concentration of sediments in case of sedimentation tube with diameter of 7.55cm and sediments A

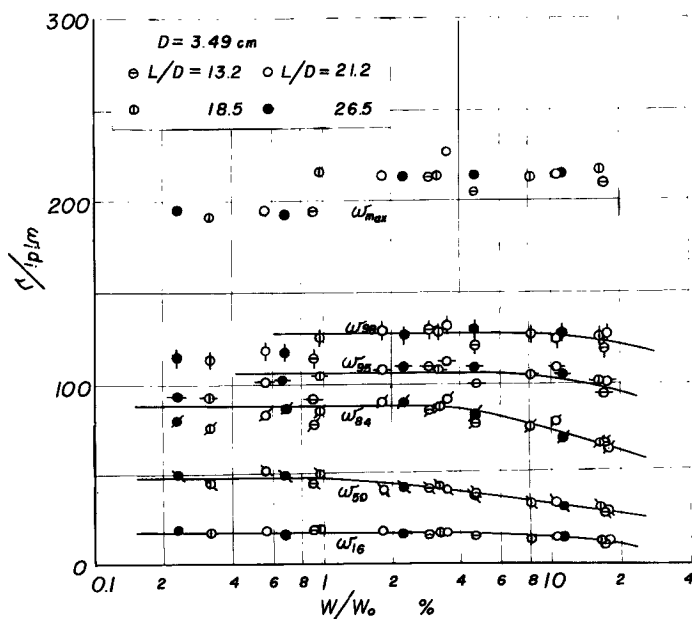


Fig. 6(b) Variations of fall velocities with concentration of sediments in case of sedimentation tube with diameter of 3.49cm and sediments A

を用いた場合の結果を示してある。図中の縦軸は沈降速度に及ぼす水温の影響を去除するために、沈降速度と粒径とで構成される Reynolds 数であらわしてあり、また図中の $w_{\max}$, w_{98} , w_{95} , w_{84} , w_{50} および w_{16} はそれぞれ通過重量分布であらわした場合の最大、98%、95%、84%、50%および16%に相当する沈降速度をあらわしている。また、沈降速度 w_i に対応した土砂粒子の粒径 d_i は、便宜上 Fig. 3 に示した粒度分布曲線から求められる値を用いた。これらの結果から、つぎのことがわかるであろう。すなわち第1にいずれの場合にも粒径の大きい範囲では、実験値の散乱がきわめて大きいが、沈降速度 w_{84} になると、これは顕著でなくなることがわかる。このことは、それぞれの土砂試料の特性が必ずしも一定でなく、若干相

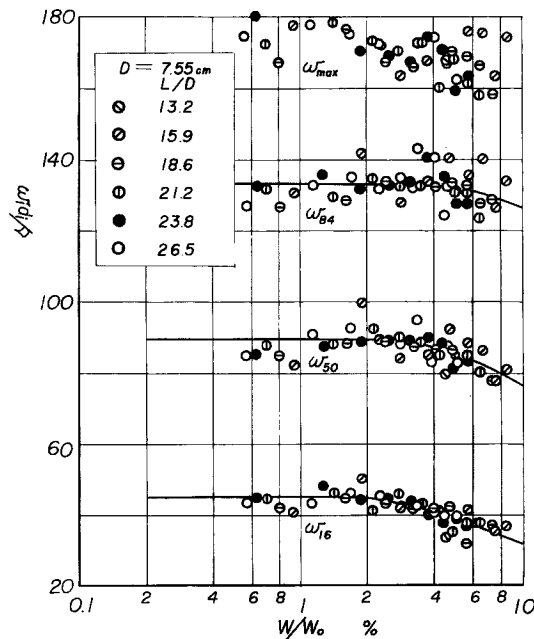


Fig. 6(c) Variations of fall velocities with concentration of sediments in case of sedimentation tube with diameter of 7.55cm and sediments B

違っていることに大きく依存するものと考えられるし、また試料の投入時における投入の仕方によって、粒径の大きいほどその影響を受けやすいためと考えられる。前者に対しては、全く同一の試料を使用し繰り返し実験することによって確認することができるが、著者らの装置ではかなり面倒であったので実施しなかった。また、後者に対しては、適当な試料投入装置を考案することによって解決されるであろう。第2にいずれの結果も試料の濃度が約3~4%付近までは、測定された沈降速度はほとんど変わらないが、それ以上になるとかなり顕著にその効果があらわれることがわかる。このことは、いうまでもなく沈降現象に及ぼす土砂粒子の相互作用であって、沈降分析法の適用限界を示すものである。一方、土砂試料の濃度が高くなると、平均の動粘性係数は増大するものと考えられるから、そのような適当な補正がみつければ、ある程度統一した表示が可能であるかもしれない。しかし、沈降分析の方法としては、やはりこの限界を適用限界として考察すべきであろう。第3に、Fig. 6 (a) および (b) の結果を比較すると、直径の小さい沈降管の方が実験値のばらつきが小さいことがわかる。このことは、おそらくつぎの事実によるものと考えられる。すなわち、著者らの用いた沈降管においては、Fig. 1 に示したように差圧を上下2箇所より1つずつの細孔で

取出しているために、沈降管の直径が大きくなると、沈降現象にともなう差圧の変化を一様に感受することが困難になり、とくに、土砂粒子が沈降管の断面に一様に沈降せず、一方にかたよるような場合には適確な差圧を測定することができないことになって、一般に直径の大きい沈降管ほどこの傾向が強くあらわれるものと考えられるので、上記のような結果になると思われる。したがって、差圧の取出し方を適当に工夫することにすれば、比較的簡単にこの問題を解決できるものと考えられる。つぎに、第4としてわかることは、Fig. 6 (a) および (b) の結果を比較して、沈降管の大きさが小さい方が沈降速度が一般に小さくあらわれていることであって、とくに粒径が大きいと考えられる沈降速度 w_{84} 以上の実験値では顕著である。しかし、沈降速度 w_{50} になると、両者はほとんど一致していることがわかる。この事実は、沈降現象における沈降管の側壁の効果と考えられよう。いまのところ、著者らはこの問題について詳しい検討を行っていないが、単一粒子の沈降現象に及ぼす側壁の影響についての McNown および Malaika らの実験結果⁶⁾を参照して検討すれば、つぎのようである。すなわち、彼らの実験結果は Stokes の法則が成立する範囲のものであるが、近似的にその関係が著者らの場合にも成立するものと考えらるならば、沈降速度の誤差を5%以内におさめるためには、直径7.55cmの沈降管の場合、土砂粒子の大きさは約1.7mm、また直径3.49cmの場合には約0.78mmとなって、いちおうFig. 6 (a)の結果においては実験値はかなりの精度をもっていることがわかる。

(4) 沈降管の大きさの影響

Fig. 7 は土砂の沈降速度に及ぼす沈降管の大きさの影響を検討したものであって、とくに沈降管の長さとの比 L/D の効果をあらわしている。すなわち、この結果によると、 L/D の値が15~20程度より小さくなるとその影響があらわれるようであり、その傾向は沈降速度の大きい土砂粒子ほど著しいようである。

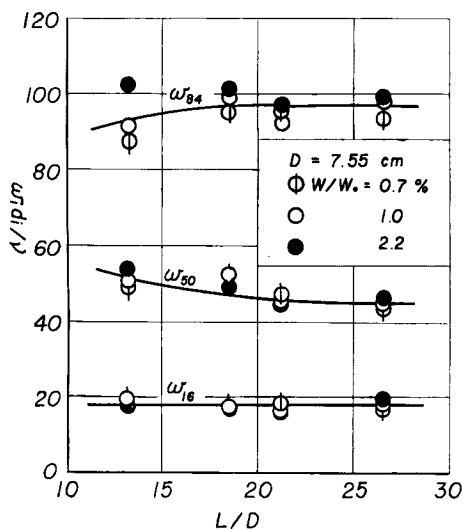


Fig. 7 (a) Influences of ratio L/D on fall velocities of sediments (1)

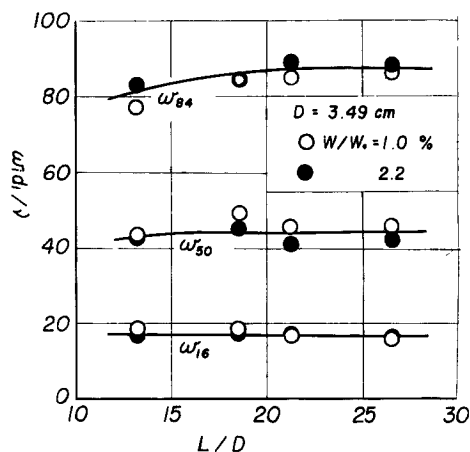


Fig. 7 (b) Influences of ratio L/D on fall velocities of sediments (2)

そして、この傾向は、土砂試料の濃度によってはあまり変わらないことがわかる。したがって、実用的には沈降管の長さとの比 L/D を20程度以上に大きくすることが望ましいことがわかる。

4. 結 語

以上、差圧計を利用した土砂の沈降分析法に関連した二、三の実験結果について述べた。すなわち、この

方法は土砂の沈降分析を行なうには実用的にかなり有用なものであって、測定もきわめて簡便に、またかなりの精度で実施することができるようと思われる。しかし、本文で述べた実験的検討では決して十分ではなく、今後さらに実際の土砂について多方面に適用し、その問題点を究明するべきであるが、本方法の適用にあたって参考にするべきえられた結果をあげれば、つぎのようである。

1. 土砂試料濃度は約3%以下で測定すべきである。
2. 沈降管は長い方がよいが、あまり長くすると、測定上の不便さといひまって、所要時間が長くなるから実用上200cm程度が良好と思われる。
3. 一方、沈降管の長さとの比は20以上必要であり、その際直径の大きさは土砂試料に含まれる最大粒径のものへの沈降管側壁の効果を考慮して決定すべきである。
4. 実際問題としては、差圧をいかにとり出すかがかなり問題であって、できるだけ沈降管の断面の平均差圧が測定できるように考慮すべきである。また、試料の投入方法については、適当な装置を考察すべきであるように考える。

以上、本研究でえられた事項を要約したわけであるが、今後さらにこの沈降分析法について検討するとともに、実際問題への適用についても検討をすすめていきたい。最後に、本研究の実施にあたってご教示いただいた矢野勝正教授および岩垣雄一教授に謝意を表明するとともに、実験の遂行や図面の作成に熱心に助力していただいた角野稔君および元技術員橋本彰君に謝意を表す。なお、本研究が文部省試験研究費による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 久保輝一郎他編：粉体—理論と応用—，丸善，昭37，pp.108—124.
- 2) たとえば，Schulz, E. F., Wilde, R. H. and Albertson, M. L. : Influence of shape on the fall velocity of sedimentary particles, Sediment series No. 5, Colorado Agricultural and Mechanical College 1954, pp. 36—65.
- 3) 岩垣雄一，西平福宏：Visual accumulation tubeによる砂の粒度分析について，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，昭34，pp. 55—57.
- 4) Colby, B. C. and Christensen, R. P. : Visual accumulation tube for size analysis of sands, Proc. A. S. C. E., Vol. 85, 1956, pp. 381—397.
- 5) Appel, D. W. : An instrument for rapid. size-frequency analysis of sediment, State Univ. of Iowa, Bul. 34, 1953, pp. 263—286.
- 6) 石原藤次郎：応用水理学，中 I，丸善，昭33. p. 9.