

532.542:621.6.04

水平管内の砂水混合流れに関する実験*

(第1報, 粒径が損失水頭に及ぼす影響について)

葛 原 定 郎**

Some Experiments of Mixture Flow of Sand
and Water in a Horizontal Pipe

(1st Report, Effects of the Granular Size on the Loss of Head)

by Sadao KUZUHARA

In order to investigate the effects of granular size on the loss of head when the mixture of water and sand or gravel flows through a horizontal pipe, the author carried out some experiments, using a transparent smooth pipe of which length was about 4 000 mm and inner diameter 38.5 mm, under various conditions of granular sizes (0.5~5.0 mm), concentration (0~20 % by wt.) and mean velocity of flow (0.8~5 m/s).

Results obtained are summarized as follows:

- 1) Additional loss of head due to grains increases rapidly with the increase of granular size in the region of the suspension flow.
- 2) From calculation of the data obtained and visual inspection of flow, it can be concluded that the flow of mixture of water and sand or gravel in this test shows a transition region in heterogeneous flow classified by Durand.

1. 結 言

管路による粉粒体の空気輸送や水力輸送は、近年、めざましい発達をしつつある。工業、鉱業、土木方面など応用例は多い。そしてこれらについては、基礎理論、基礎実験、現場の実測例など多くの報告がなされている。しかし、問題が複雑であるために、まだまだ未解決の分野が残されている。また、現在までの文献を調べてみると、空気輸送に関するものが大部分で、水に関するものは少ないようである。

筆者は砂またはれきと水の混合流れ*** についての基礎実験として、砂れきの粒径が損失水頭に及ぼす影響を調べた。すなわち、粒径がほぼ 0.5~5.0 mm の砂れきを5群にふるい分けたものと、これらを混合したもの、合計六つの群を作り、38.5 mm ϕ の透明水平管に流し、流れを観察しながら混合比と流速を変えて実験し、砂れきが浮遊して流れる流速の範囲で考察した結果、損失水頭はこの粒径の範囲で急に増加することを確かめた。また、「粒と空気の混合流れ」の理論を適用して定性的に考察を行なった。

2. 記 号

- D : 供試管内径 mm
 d_s : 砂れきの粒径 mm
 d_{sm} : 砂れきの平均粒径 mm
 l : 損失水頭測定区間 mm
 v_f : 砂れきの自由沈降速度 cm/s
 v_m, v_w, v_s : 管内平均流速 (添字の m は混合流れ, w は清水, s は砂れきについての値であることを示す。以下同じ) m/s
 v_{cr} : 限界流速 m/s
 $\Delta h_m, \Delta h_w, \Delta h_s$: 損失水頭 mmAq/m
 λ_w, λ_s : 管摩擦係数
 W_w, W_s : 吐出し重量 kg/s
 C : 重量混合比 %
 S : 砂れきの比重
 ψ : (4)式で定義される係数
 ν : 水の動粘性係数 cm^2/s
 g : 重力の加速度 m/s^2

*** 粒径によって細砂, 中砂, 粗砂, 細れき, 小石などの区別があるが、これらをいっしょにして以下本文中では「砂れき」ということにする。首題の「砂水混合流れ」とは厳密には砂またはれきを含んだ流れのことである。

* 昭和 37 年 11 月 10 日 山梨地方講演会において講演, 原稿受付 昭和 37 年 11 月 22 日。

** 正員, 三重大学農学部 (津市上浜町)。

3. 非等質混合体の管内流れについて

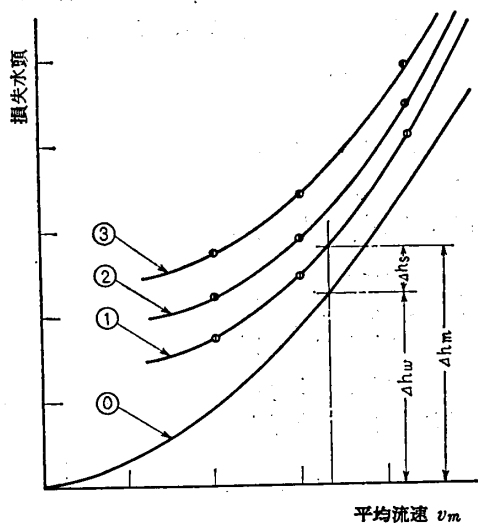
3-1 一般の考察 水と粒体の混合流れは、粒体の大きさ(粒径)によって流れの状態が異なる。細かい灰のように粒径がきわめて小さくなると沈降速度がきわめて小さくなるために、静止した水や流速の小さい流れにも完全に浮遊して等質な混合体を形成するが、粒径が大きくなってたとえば砂やれきのようになると、沈降速度が大きくなって完全に等質な混合体を形成しなくなる。

Durand は混合体を粒の大きさで区別して前者を等質混合体、後者を非等質混合体と称し、両者の間に中間混合体があるといっている⁽¹⁾。さらに、非等質混合体を次の三つに分けている。

- a) 懸濁状態で輸送されるもの ($d_s=0.05\sim 0.2\text{mm}$)
- b) 過渡的状态のもの ($d_s=0.2\sim 2.0\text{mm}$)
- c) 跳躍によって運ばれるもの ($d_s>2.0\text{mm}$)

等質混合体の流れについては理論的研究が進んでいるが、非等質混合体については十分であるとはいえない。しかし、空気輸送において粒体の運動によって付加される一種の管摩擦係数 λ_s を導入した Weidner の基礎理論⁽²⁾と、それを展開した池森の報告⁽³⁾は砂れきと水の混合流れにも適用できるものと考えられる。

3-2 砂れきの水力輸送試験 本実験における供試砂れきは $d_s=0.5\sim 5.0\text{mm}$ で 3-1 の分類では非等質混合体の b) と c) に属する。この範囲の粒径の砂れきに対する実験では O'Brien⁽⁴⁾, Howard⁽⁵⁾, Durand⁽⁶⁾, 長谷川⁽⁷⁾, 小川⁽⁸⁾ らの報告があり、さらに粒径が大きくなると Worster と Denny による石炭の水力輸送実験⁽⁹⁾がある。いずれも使用管径は $D=50\sim 150\text{mm}$ である。



第1図 損失水頭の構成

これらの実験結果は第1図⁽¹⁰⁾のように示すことができる。混合流れの平均流速を横軸に、損失水頭を縦軸にとって同じ混合比の点を結ぶと曲線①, ②, ③...ができる。曲線①は水だけを流した場合の損失である。そして、砂れきが混在する場合の全損失水頭 Δh_m は、平均流速 v_m と同じ流速で水だけを流した場合の損失 Δh_w と、砂れきによる付加損失 Δh_s との和と考えることができる。すなわち

$$\Delta h_m = \Delta h_w + \Delta h_s \dots\dots\dots(1)$$

Durand によれば、粒子による付加損失は、水平管路で粒子が沈でんしない範囲内では

$$\Delta h_s = C\psi\Delta h_w \dots\dots\dots(2)$$

と表わすとき、 ψ は $\psi-v_m$ 平面である粒径については一つの曲線に乗るといっている⁽¹¹⁾。

(1)式と(2)式から

$$\Delta h_m = \Delta h_w(1+C\psi) \dots\dots\dots(3)$$

$$\psi = \frac{\Delta h_m - \Delta h_w}{C\Delta h_w} = \frac{\Delta h_s}{C\Delta h_w} \dots\dots\dots(4)$$

4. 試料, 装置および実験方法

4-1 供試砂れき 第1表に供試砂れきの特性を、第2図に写真を示す。砂れきは海岸砂と川砂を標準網ふるいでふるい分けたもの(No. 1~5)と、これらを任意に混合したもの(No. 6)で、平均径はNo. 1~5ではふるい目の平均値をとり、No. 6は粒度分析を行なって50%の粒径を示してある。比重はJISの土質試験法で測った。沈降速度は供試管と同質同径のものを鉛直に取付け、試料の各群から任意に30粒ずつをとって測ったものの平均値である。第3図にNo. 1~5の沈降速度とNo. 6の粒径加積曲線を示す。

4-2 供試管の特性 第5図に示すように $D=38.5\text{mm}$, 長さ1mの硬質透明管を4本つないで試験区間とした。まず、管の特性を知るために、接続部および管の中央部に設けた①~③の圧力タップで水だけの場合の損失を測った。その結果、損失は直線的に増加し接続部の影響がないことがわかった。この損失は(1)式の Δh_w であって次式で表わされる。

第1表 供試砂れき

No.	種類	粒径 d_s mm	平均径 d_{sm} mm	比重 S	沈降速度 v_t cm/s	粒径/管径 d_{sm}/D
1	海岸砂	0.29~0.59	0.44	2.67	7.2	1.14×10^{-2}
2	"	0.84~1.19	1.02	2.64	12.4	2.65
3	川砂	1.90~2.46	2.18	2.63	21.9	5.66
4	川れき	2.46~4.04	3.25	2.64	29.8	8.44
5	"	4.04~5.16	4.60	2.64	31.3	12.00
6	混合	0.29~5.16	1.55 (50%)	-	-	4.03

$$\Delta h_w = \lambda_w \frac{l}{D} \frac{v_w^2}{2g} \dots\dots\dots(5)$$

圧力タップ③と⑦の間 ($l = 2 \text{ m}$) を損失測定区間として λ_w を求め、レイノルズ数で整理すると第 4 図を得た。実験における $v_w \approx 0.8 \sim 5.0 \text{ m/s}$ に対して Blasius の式とよく合う。

4.3 装置および実験方法 流れに粒を供給するには、ポンプの吸込側に供給する方法と吐出し側に供給する方法とがあるが、いずれにしても一定の割合で供給し、かつ、平均流速を一定に保ちながら混合比を変えることはむずかしい。このために、筆者は第 5 図に示す装置を作り、砂れきが吸込そうに投入されてから管路を一定の状態で行くように流れるようになるまで待つて測定する方法をとり、混合比と流速を適当に組合せて実験を繰返し、測定結果を(4)式の ψ で整理した。れきの場合に管路を循環させると碎ける心配があるが、これは、測定を早くすませることと試料を常に新しいものと取換えることによって防いだ。

第 5 図で吸込そう (ST) は混合そうを兼ねるもので、ここに投入された砂れきは分岐管 (BP) から吸込そうにもどる水のためにかく乱され、そう底に沈でんすることなくポンプに吸込まれる。サンドポンプ (SP) から送出された砂水混合流れは、立上がり管の上にある沈降室 (SC) でもう一度かくはんされ、水平方向に出て損失測定部に流入する。測定部について

は 4.2 に述べた。なお、上流側の軟質ビニル管 (SVP) はポンプの振動が測定部に伝わらないようにするためのものであり、もどり管 (RP) の先端のものは吐出し口を量水そう (MT) に切換えるためのものである。量水そうにはスクリーンがあって混合流れの平均流速と混合比を求めることができる。

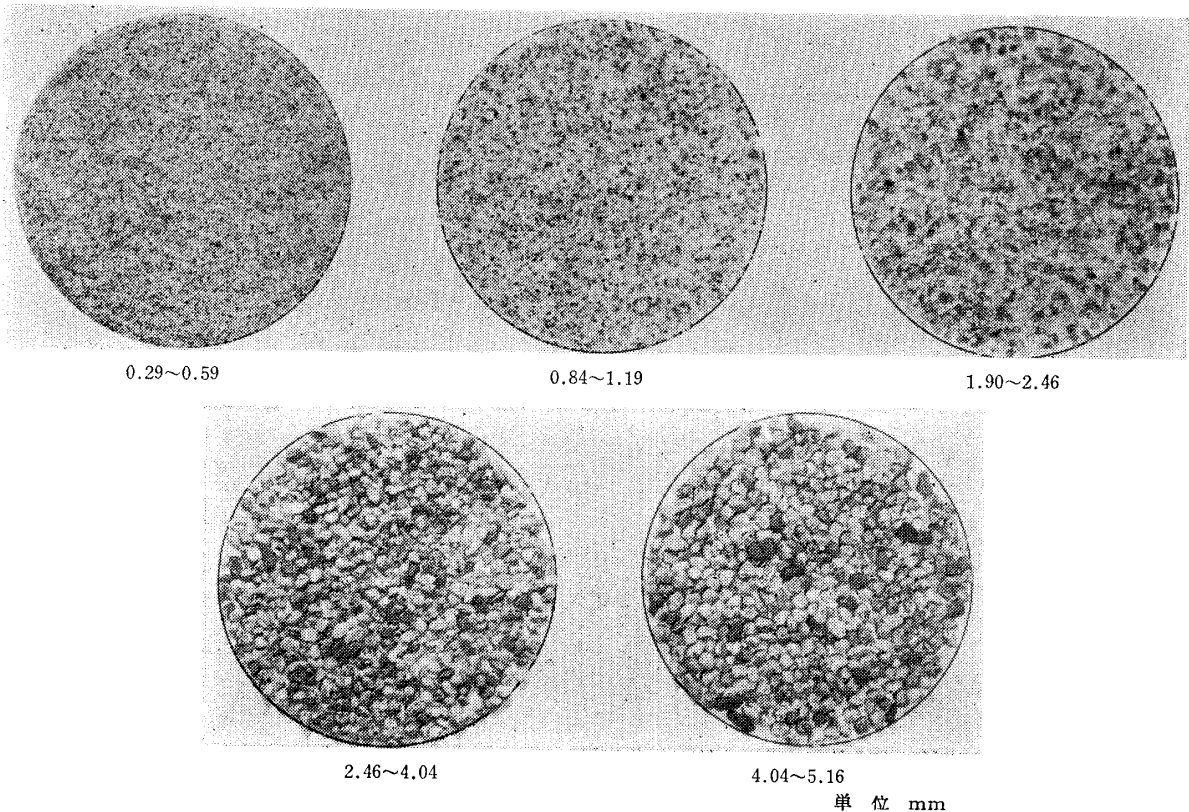
流量の調節は $V_1 \sim V_4$ の弁の開閉を適当に組合せて行なった。 $V_1 \sim V_3$ はスルース弁であり、 V_4 は軟質ビニル管をはさんで通路面積を変えるようにしたものである。混合比は、流れを観察しながら吸込そうへの砂れきの投入量を加減して変えた。また、吸込そうには常に新しい水を補給して越流させ、そう内の水のよごれを防ぐとともに水温を一定に保たせた。

5. 実験結果および考察

5.1 一般的考察 第 6 図の (I) は粒径別の、(II) は混合比別の損失水頭を示す。横軸には混合流れの平均流速を、縦軸には供試管 1 m あたりの損失水頭を水柱で示してある。平均流速は単位時間に量水そうに吐出された混合体の容積を管断面積で除したものであり、混合比は、混合体を水と砂れきに分離し、砂れきの風乾状態における重さと残りの水の重さとの比、すなわち重量混合比であって次の値である。

$$C = (W_s / W_w) \times 100 \% \dots\dots\dots(6)$$

第 6 図において、点線と実線の曲線は、それぞれ

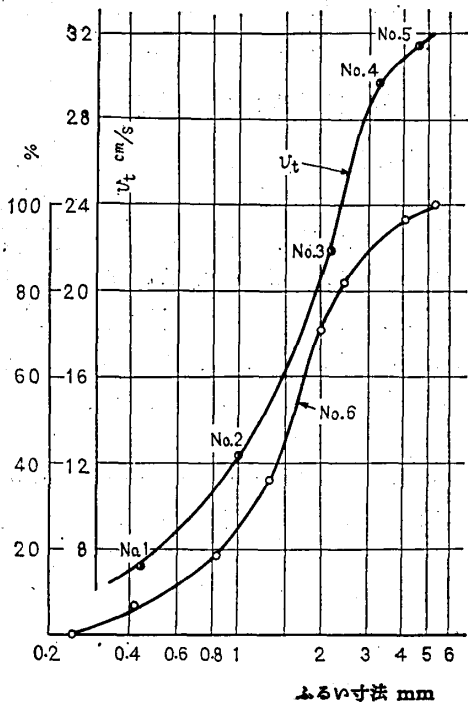


第 2 図 供 試 砂 れ き

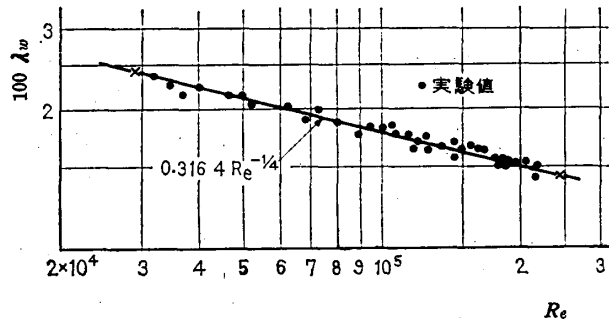
18°C ($\nu=0.106 \text{ cm}^2/\text{s}$) と 29°C ($\nu=0.082 \text{ cm}^2/\text{s}$) の清水に対する乱流滑管の抵抗損失 Δh_w で、(5)式の v_w を v_m に置換えて求めたものである。実験は $d_s=0.84\sim 1.19 \text{ mm}$ (⊕印) のものが約 (18±2) °C で、残りは (29±2) °C の水温で行なわれた。図には二つの異なった水温での実験結果が同時に記入されている。

図 (I) を見ると同じ印の点が相当散らばっているが、これは混合比に無関係に粒径だけで分類したためであって、小さい粒径でも混合比が大きければ損失は大きく、粒径が大きくても混合比が小さいと損失は小

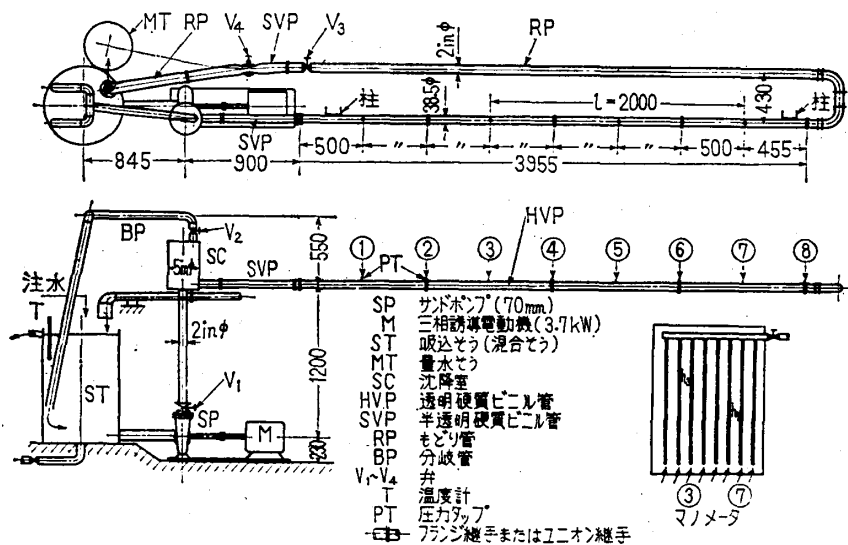
さいからである。特に低速度での散らばりがはげしい。しかし、全般的にみて粒径が大きくなると損失がふえるといえる。次に図(II)の混合比別の表示では、図(I)ほどではないがやはりある程度の散らばりがある。これは同じ混合比であっても粒径が異なることと、混合比の区分が5%とびになっているためであろう。しかし、混合比が増すと損失が大きくなる傾向がはっきり現われている。また、混合比の等しい点を結ぶと第1図のような曲線ができ、損失はある v_m の所で最小になり、それより下の流速では再び損失が増すことがわかる。



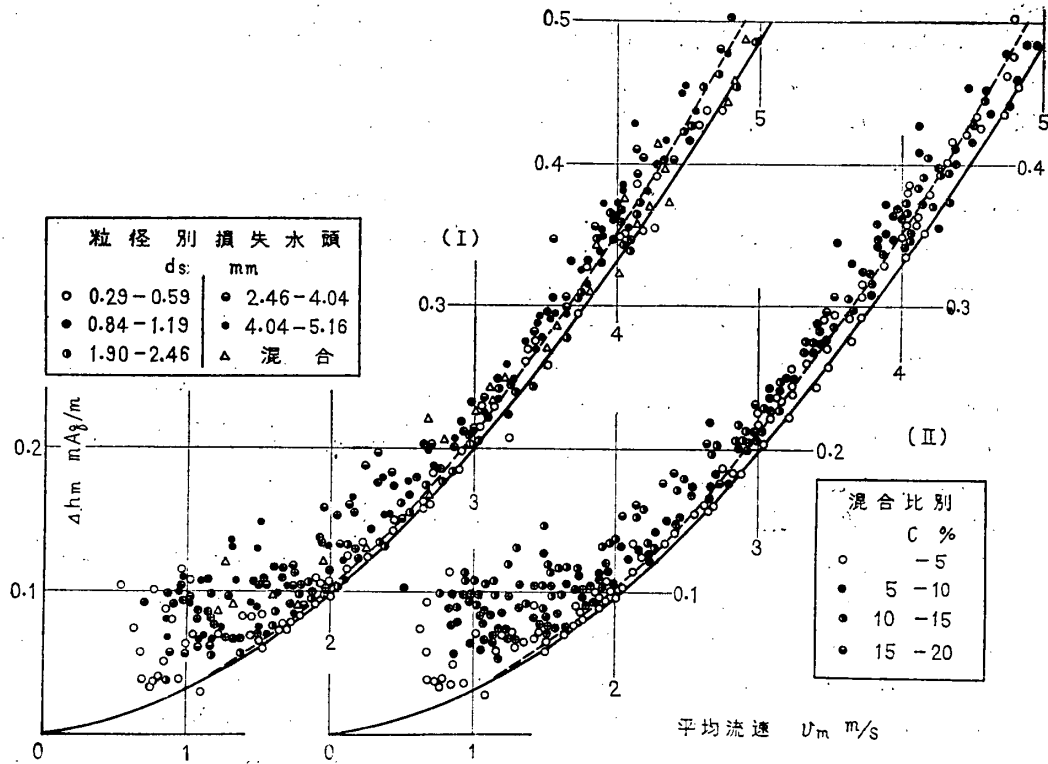
第3図 粒径加積曲線 (No. 6) と沈降速度



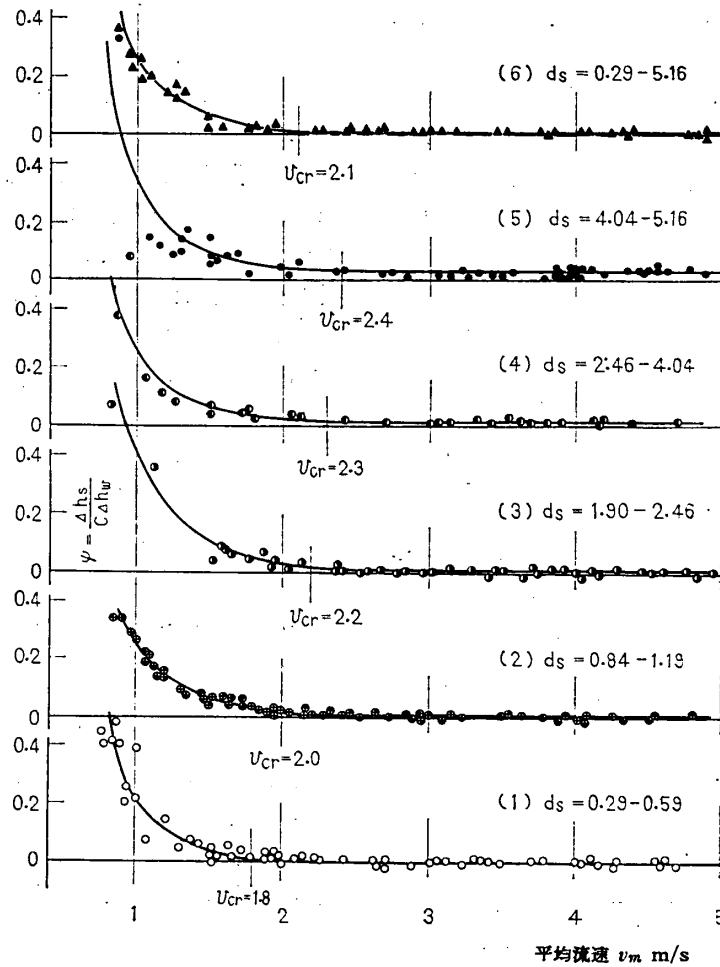
第4図 供試管の摩擦損失係数



第5図 実験装置



第 6 図 粒径別 (I) および混合比別 (II) 損失水頭



第 7 図 係数 ψ の変化

い積し始め、管の有効断面積が減少して損失が大きくなる。粒径によっては ψ が横軸の上下にプロットされているものがあるが、これは、(4)式の分子が正または負になることであり、混合流れの損失と水だけの損失がほとんど変わらないことを示す。

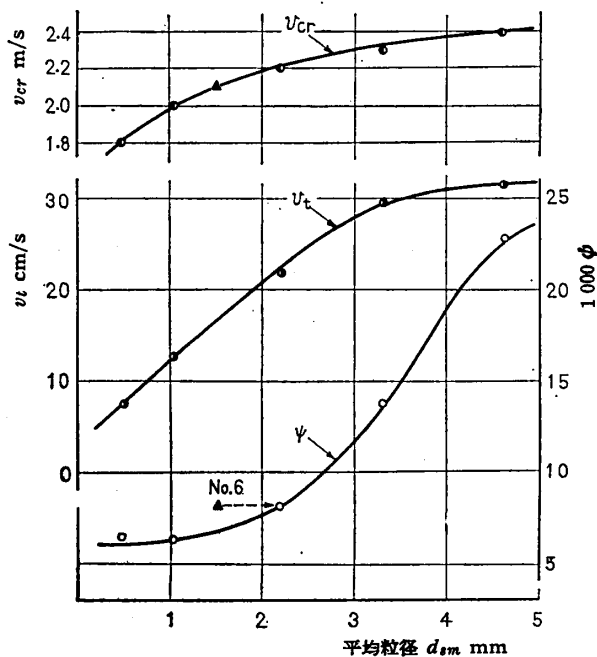
さて、砂れきが浮遊していると考えられる $v_m > v_{cr}$ の範囲に対して考察してみると、 ψ は第7図に示すように一つの直線にのると考えられる。そして、その平均値は粒径とともに大きくなるのがわかる。ただ、 $d_s = 4.04 \sim 5.16$ mm においては $v_m > 4$ m/s で ψ が再び上昇する傾向にあるのは、流速が大きくなると、いままでも管の下半分くらいに浮遊して流れていた粒が管の全周に衝突するようになるためであろうか。

5.3 粒径と v_{cr} , v_t , ψ の関係 第7図で v_{cr} と $v_m > v_{cr}$ における ψ の平均値を求めると第2表を得る。これに v_t を加えて示したものが第8図である。図をみてまずわかることは $d_{sm} = 1.0$ mm くらいから ψ の値が急に大きくなることである。また、 v_{cr} , v_t ともにこの粒径の範囲でその増し方が変化していることもわかる。

水平管における粒体の空気輸送に関して池森の導いた式⁽¹²⁾を、砂水混合流れに適用して添字を変えて書直すと

第2表 v_{cr} と ψ

No.	1	2	3	4	5	6
d_{sm} mm	0.44	1.02	2.18	3.25	4.60	1.55
v_{cr} m/s	1.8	2.0	2.2	2.3	2.4	2.1
ψ	6.5×10^{-3}	6.4	7.9	13.7	22.7	8.2



第8図 粒径と ψ , v_{cr} , v_t の関係

$$\frac{\Delta h_m}{\Delta h_w} = 1 + \frac{\lambda_s}{\lambda_w} \left(\frac{v_s}{v_w} \right)_m C \dots\dots\dots (7)$$

(3)式と(7)式を比較して

$$\psi = \frac{\lambda_s}{\lambda_w} \left(\frac{v_s}{v_w} \right)_m \dots\dots\dots (8)$$

$(v_s/v_w)_m$ は砂れきと水の定速区間における速度比で、沈降速度に関するフルード数の関数となり、形状抗力を受ける場合(粒体)には次式で表わされるものである。

$$\left(\frac{v_s}{v_w} \right)_m = 1 / \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\lambda_s}{2}} \left(\frac{v_t}{\sqrt{gD}} \right) \right\} \dots\dots\dots (9)$$

砂水混合流れに対して(7)~(9)式によって考察すると、粒径が大きくなるにつれて v_t , λ_s ともに大きくなり、 λ_s/λ_w は増し、(9)式から $(v_s/v_w)_m$ は減る。(8)式から ψ はこれらの積で変るはずであるが、 $d_s = 1$ mm くらいから流れの中の砂粒の運動が激しくなり、粒と粒、粒と壁との衝突や、粒を浮揚させるための水のせん断流れによる摩擦がふえる結果、速度比の減少よりも λ_s/λ_w の増加のほうがより大きく ψ の値に影響するようになるものと思われる。砂粒の運動が激しくなることは、管壁に対する粒の衝突音の発生あるいは視察から容易に知ることができる。また、この観点から試料 No. 1, No. 2 の粒径が1 mm より小さいものでは、懸濁状態で流れると考えることができる。

結局、供試砂れきの場合に損失水頭は $d_s = 1 \sim 4.5$ mm において急に大きくなるといえる。3.1に述べた Durand の粒径の分類と多少のずれがあるが、この分類は厳密に行なうことができるものではないことを考えると、 $d_s = 3$ mm くらいが b) と c) の境界になるのではなからうか。

最後に、No. 6の混合資料に対する ψ の平均値を第7図(6)から求め、50%粒径に相当する位置に記入すると第8図の▲印となる。これは $d_{sm} = 1.55$ mm に相当する ψ よりも大きい。同じ ψ を持つ粒径は図から $d_s = 2.3$ mm であるから、種々の粒径を混合したものでは最小粒径と最大粒径の単なる平均値をとることはできない。大きい粒の影響が出てくるからである。

6. 結 論

実験結果を、粒が浮遊して流れる範囲 ($v_m > v_{cr}$) について考察した結果、次のようにまとめられる。

- (1) 供試砂れきの6群とも(4)式で計算される係数 ψ の値は流速に無関係にほぼ一定である(第7図)。
- (2) 粒径別に ψ の平均値を求めると $d_s = 1 \sim 4.5$

mmで急に大きくなる(第8図)。

(3) 供試砂れきは3・1に述べた非等質混合流れのb)とc)の分類に属し、損失が流動状態の変化と関係があることがわかる。

(4) 粒径の異なる砂とれきが混在するものでは大きい粒の影響が現われる。

しゅう動流れおよび沈でんを生ずる流れについては後に詳しく調べたい。なお、この実験は、装置の製作と実験の一部が名古屋大学水力実験室でなされ、後に三重大学に移して継続されたものであることを特記し、種々のご便宜とご指導を賜わった名古屋大学の古屋先生はじめ伊藤、山田両先生に厚くお礼申上げるとともに、実験の手伝いをされた河原、角田、藤田の学

生諸君に感謝の意を表したい。

文 献

- (1) 草間, 第125回講習会教材, (昭34-11), 6.
- (2) G. Weidner, *Forsch. Ing.-Wesen.*, 21-5 (1955), 145.
- (3) 池森, 機械学会誌, 62-480 (昭34-1), 89.
- (4) O'Brien, *Univ. Calif. Publications. in Engng.*, 3-7 (1937), 343.
- (5) G.W. Howard, *Proc. Amer. Soc. Chem. Engrs.*, 64 (1938), 1377.
- (6) R. Durand & Condolios, *Study of the Transport of Solids in Pipes*, 1952 Société Hydrotechnique de France. Deuxième Journées d'Hydraulique, June.
- (7) 長谷川・ほか, 運輸技術研究所報告, 7-6 (昭32-7), 1.
- (8) 小川, 土木学会誌, 38-4 (昭28-4), 133.
- (9) Worster & Denny, *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, 169-32 (1955), 563.
- (10) H.E. Rose, *Engineer*, 203-5290 (1957-6), 939.
- (11) Worster, 文献(9), 581 ページ.
- (12) 池森, 文献(3), 93~94 ページ.

621.224-55:621-501.2

水車調速機の動特性*

木下克巳**, 藤井 勝***, 亀井 勉****, 磯村修一*****

Dynamic Characteristics of a Hydraulic Turbine Governor

by Katsumi KINOSHITA, Masaru FUJII, Tsutomu KAMEI,
and Syuichi ISOMURA

Recently, for the purpose of the automatic frequency control of electric power system, we are required to analyze and synthesize the hydraulic and steam turbine governors, and it is becoming easy to analyze governors by means of feedback control theory and electronic computers.

We describe analytically the dynamic characteristics of Escher Wyss Type 38 Governor, which includes two nonlinear feed back elements.

1. まえがき

近年電力系統における周波数調整の要求が高まり、AFCの採用とあまって水車および蒸気タービンの調速機の重要性がクローズアップされるに至った。さらに自動制御工学、電子計算機の発達にもない、従来経験や実験により設計されていた調速機にもその手法が導入され、制御装置としての調速機、および制御対象である水車や蒸気タービンの動特性解析⁽¹⁾、調速系の最適制御^{(2)~(4)}などに関する報告がなされつつある。

ここでとりあげた調速機 Escher Wyss 38 形アクチュエータは古典的な機械式調速機であるにもかかわらず、電気式にもおとらぬ性能と実績をもっており、その制御装置としての一般的な演算能力である P-D 動作のほかに、剛性復元のゲインを可変にする無負荷カムや弾性復元のダブルピストン機構など非線形要素の積極的利用は興味ある問題である。これらの動特性を明確にし設計および使用に資するため各定数は製作図から決定し、計算機の助けをかりて解析を試みた。

2. 38形アクチュエータの構成

構造の概略は第1図のスケルトン線図に示すように、同期モータとスピードからなる速度検出部、油圧駆動用歯車ポンプ、パイロット弁、サーボモータ、速度調整用調速機モータ、サーボモータから斜板を経てパイロットスリーブへフイードバックしている剛性復

* 昭和37年10月29日第40期全国大会講演会において論文講演として講演、原稿受付 昭和37年7月26日。

** 正員、三菱造船社長崎造船所。

*** 正員、三菱造船会社。

**** 三菱造船会社。

***** 准員、三菱造船会社(長崎市飽ノ浦町1)。