

# 泥 沙 研 究

第 二 卷    第 二 期

泥 沙 研 究 工 作 組 編 輯

1 9 5 7

水 利 出 版 社 出 版

# 泥 沙 研 究

## 第二卷 第二期

1957年9月

## 目 錄

|                                 |                                 |
|---------------------------------|---------------------------------|
| 异重流試驗第一階段报告·····                | 范家驊 姜乃森 ( 1 )                   |
| 全苏水利科学研究院在底沙研究方面的<br>新的工作·····  | 苏联И.И. 列維和В.С. 克諾洛茲 ( 13 )      |
| 动床水流模型試驗的方法·····                | 苏联И.И. 列維 ( 18 )                |
| 論动床河工模型試驗·····                  | 苏联С.Т. 阿尔圖寧<br>И.Я. 阿尔洛夫 ( 33 ) |
| 造床流量·····                       | 苏联Н.И. 馬卡維耶夫 ( 40 )             |
| 泥沙运动的研究·····                    | 苏联Н.А. 米哈依洛夫 ( 44 )             |
| 横向环流对明渠水流懸浮能力的影响·····           | 苏联Х.Ш. 夏皮諾 ( 53 )               |
| 关于沙紋对于泥沙輸移的作用·····              | 日本椿 东一郎 ( 57 )                  |
| 流水輸送細沙的研究·····                  | 美國A. A. 凱林斯基<br>中國 夏 宸 震 ( 67 ) |
| 論水流懸浮(挟沙)能力計算公式·····            | 苏联А. В. 耶甫列莫夫 ( 80 )            |
| 关于懸沙运动的理論·····                  | 苏联В. Г. 沙諾揚 ( 85 )              |
| 渠道中粘土性懸移質的运动·····               | 苏联С. Х. 阿巴里揚茨 ( 88 )            |
| 論沙土的不冲流速·····                   | 苏联Г. Ч. 特拉菲莫夫 ( 92 )            |
| 推移質輸沙率·····                     | 苏联И. В. 耶格札諾夫 ( 97 )            |
| 輸泥管水力計算現有方法与公式的分析<br>与实际建議····· | 苏联П. Д. 叶夫道基莫夫 ( 101 )          |

# 異重流試驗第一階段報告

范家驊 姜乃森

## 摘 要

本階段試驗包括在 1956 年所進行的兩部分工作：(1) 異重流阻力系數的試驗，(2) 異重流通過二元孔口出流的試驗。試驗利用不同濃度的鹽水作為異重流。

阻力系數是根據異重流不均勻流動方程計算，如式 (1.8) 所示。試驗結果示於圖 4。

二元孔口出流濃度的變化規律，可用  $\frac{\gamma' - \gamma_0}{\gamma' - \gamma}$  和  $\frac{\gamma' - \gamma}{\gamma} \cdot \frac{gh_1^2}{q^2}$  兩無量綱數來表示其關係，本報告僅作異重流的交界面高出於孔口高程時的情況。實驗得圖 7 上的曲線關係，它可用式 (2.15) 來表示。

以後還將利用泥水進行更廣泛的試驗。

## 緒 言

在水庫中關於利用異重流自壩底孔口排出一定數量的泥沙以減少水庫淤積容積的問題，在 1934 年阿爾及利亞福達河 (Fodda) 上的水庫泄空試驗中，已經引起很大注意，1935 年美國柯羅拉多河胡佛壩泄水孔發現排出渾水後，引起了更廣泛的注意。近一、二十年來在異重流問題上，不論在實地測驗方面和試驗、理論研究方面都做了不少工作。

當前迫切需要解決的問題是：水庫建成後，如何控制以減少水庫內部的泥沙淤積數量；在水庫排沙孔的設計方面，是如何布置孔口位置，決定孔口大小等問題。

為了尋求上述問題的解答，對於異重流流動的性質，它的發生、運行和消失的過程各方面都有研究的必要。關於異重流的研究，可試分成下列幾個方面：(1) 異重流在水庫進口部分的發生條件，也就是在什麼情況下，異重流開始潛入水庫底部向前推進而繼續運動；流量、含沙濃度、含沙粒徑、庫底比降等因子之間的關係如何；(2) 潛入水庫之後，異重流以什麼流動方式向前推進，沿程是否發生淤積或者沖刷，異重流頭部和交界面的混合情況如何，與底部邊界的關係怎樣？運動條件包括那些因素？(3) 在運動中的異重流受到阻礙（彎道、阻礙物等）後的運動情況如何，什麼因素以及在什麼情況下影響異重流停止運動；(4) 當異重流到達壩前的時候，在泄水孔開啓或者關閉時，流動情況受到那些影響；泄出水流中含沙數量與那些因素有關。

已有的文獻（包括水利工程、地質、氣象各方面），曾在北京舉行的異重流討論會進行介紹<sup>(1)</sup>；需要特別提出的是我國官廳水庫的測驗工作，近幾年來在異重流方面的觀測，提供了極為寶貴的有關發生條件及運動規律的資料；在阿爾及利亞的研究中提出異重流潛入條件的定性分析，並且也研究了排沙孔的排沙效率<sup>(2,3)</sup>，也是富有啟發性的。

本試驗報告包括兩個方面，即異重流的運動規律和孔口出流。選擇這兩個方面的原因是因為對於異重流發生後的運動過程了解不夠多，它在一般情況之下會不會經歷極長的距離而不衰退消失，運動的狀態是否接近均勻的運動，我們想通過試驗了解它的運動情況，並根據試驗中有关交界面阻力值

的推算，提供估算天然異重流的情況。至于孔口出流的試驗目的，在于了解孔口泄出水流濃度變化的規律，從而提供水庫設計與運用的參考；本報告僅包括二元孔口出流的一部分試驗。

本試驗報告包括 1956 年所進行的工作，參加本試驗工作的尚有西北水工試驗所朱嗣先同志及北京水利科學研究院王華丰、鄭福海同志。

## 甲、異重流的流動規律試驗

### 1. 以往研究成果

異重流流動規律的試驗，近年來研究較多。寇寧<sup>(4,5)</sup> (1937, 1951) 在試驗槽進行了濃度很高時異重流流動試驗，証明了流速與濃度差數的方根成正比；同時計算出謝才系數隨濃度而有改變。累諾<sup>(6)</sup>曾進行泥水異重流在層流和過渡流態範圍內阻力系數與雷諾數關係的試驗，蓋撒與鮑契錫<sup>(7)</sup>曾用不同油類（上層液體）和水（下層液體）進行層流和紊流範圍內運動規律的試驗，証明了這種流動和明渠水流運動規律相類似的。

累諾和蓋撒等試驗結果和分析，得出均勻流動情況下的關係式

$$V^2 = \frac{8g}{\lambda} \frac{\Delta\gamma}{\gamma'} Ri$$

式中  $\lambda = \lambda_i + \lambda_b \frac{b}{2h+b}$ ； $\lambda_i$  為交界面阻力， $\lambda_b$  為底部阻力， $V$  為平均流速， $\gamma'$  為異重流的重率， $\Delta\gamma = \gamma' - \gamma$ ， $\gamma$  為清水重率， $R$  為水力半徑， $i$  為底部比降。

累諾的試驗的異重流是穩定而均勻的，上下游測得含沙量相同，試驗主要在層流範圍內，雖然蓋撒和鮑契錫做到紊流範圍，但用清水做下層液體（上層為油類），顯然不考慮異重流密度在垂直方向上的變化。

本試驗用鹽水作為下層液體，以後還擬用泥水，試驗限于紊流範圍。

### 2. 試驗設備

試驗是在北京水利科學研究院水工廳活動玻璃水槽內進行，槽長 14 公尺，寬深各為 0.50 公尺，槽的底坡可以調節，最大達 3%。底上鋪以洋灰板，兩壁全部鑲有玻璃。在水槽前端上面，安裝水箱一個，容量 2.1 公方，最大出流流量可達 5 公升/秒。水箱在試驗前放入一定濃度的鹽水，然後密封，只留一保持定量出流的通氣管。流量以閘門控制，以定常流量下泄，槽的前部裝有隔板一道，使鹽水自下部潛入槽的下游。試驗之前固定槽底坡度（2/100、1/100）。

試驗時槽內盛滿清水，鹽水進入槽內發生潛流後即以一定速度向前推進，頭部與清水混合，交界區較大，而異重流本身與清水的交界面則很是清晰，交界面上存在振動着的界面波。鹽水到達槽的末端，通過泄水孔排入水池。試驗時，清水水位保持不變。

試驗中測量的數據，計有流量，異重流高度，流速或流速分布，含鹽量分布，清水溫度，鹽水溫度，清水高度。

流量用閘門控制，閘門轉數與流量的關係用重量法定出。

平均流速用流量除異重流過水斷面算出，有時在試驗中也測量流速分布，我們曾試用了熱絲儀和浮子進行測量。由於熱絲在水中的變化性質尚難肯定，因之我們在試驗前後都做了熱絲儀讀數（即電流改變值）與流速的關係曲綫，取其平均關係來定流速值，但是在鹽水中測量，同時受到溫度和密度不同的影響，故測得結果只能代表性質上的變化趨勢。浮子是用玻璃或石臘製成，試驗時選擇不同比重的浮子放入異重流中測錄測點流速的平均值。由於試驗時間短，測讀工作不易做得很完全。我們也曾進行了兩種方法的比較測驗（圖 1）。

測量流速分布的最初意圖不僅僅是了解分布情況，而是打算通過分布關係，根據流量值求出交界面的高度。這種辦法在泥水試驗中顯得更加重要。我們目前所採用的用肉眼測量高度的辦法，誤差較大。

鹽水交界面很清晰，當流量增大時，交界面清晰程度就比較差些。根據這些高度的記錄，可以繪出縱斷面變化圖。

含鹽量是利用虹吸取出水樣後，測定導電係數（電阻）來決定，也有用烘干稱重確定的。虹吸取樣管口進水流速並不保持與該點水流速度相同，取樣吸出的流速較大。

### 3. 異重流不均勻流動方程

試驗觀察到異重流為穩定不均勻流態，上游深度較大，為加速流。

試寫出矩形水槽中異重流的運動方程：

在断面11  $Q=1.27$  公升/秒 平均 $V=5.4$  公分/秒

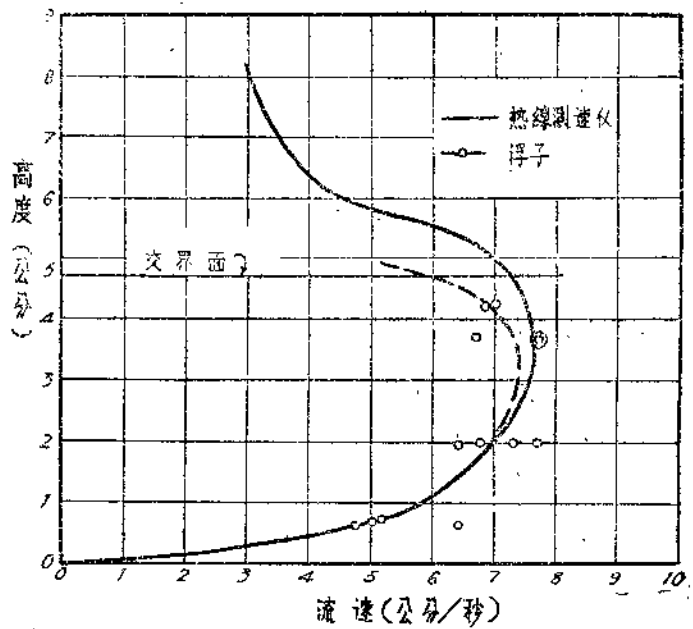


圖1 1956年10月16日 施測紀錄

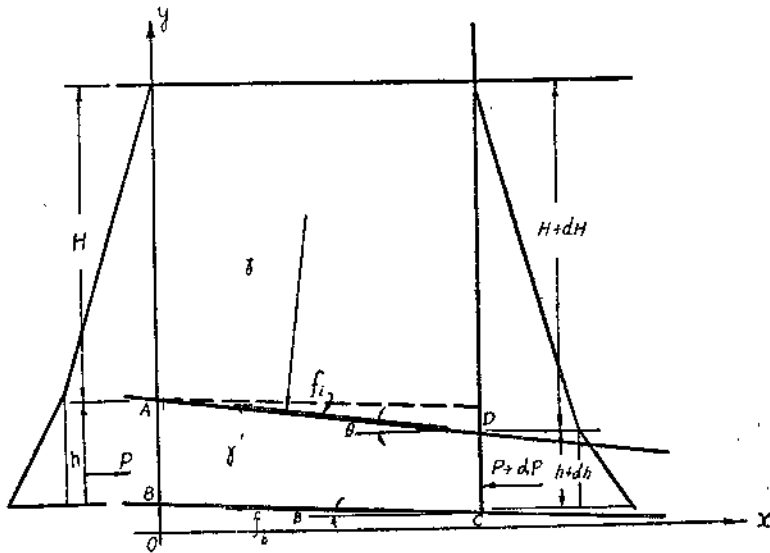


圖2

|                           |                                                                                            |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| ABCD 的重力沿底部方向的分力          | $\gamma' h \sin \beta b dx$                                                                |
| 底部阻力沿底部方向的分力              | $f_b b \cdot dx$                                                                           |
| 槽壁阻力沿底部方向的分力              | $f_w 2h dx$                                                                                |
| 交界面阻力沿底部方向的分力             | $f_i \cos \theta \sec (\theta - \beta) b dx$                                               |
| AB 面上的压力                  | $(\gamma H + \gamma' h + \gamma H) \frac{bh}{2}$                                           |
| CD 面上的压力                  | $(\gamma(H + dH) + \gamma'(h + dh) + \gamma(H + dH)) \frac{b(h + dh)}{2}$                  |
| AB 与 CD 之间的压力差, 在底部方向的分力为 | $(\gamma h \frac{dH}{dx} + \gamma H \frac{dh}{dx} + \gamma' h \frac{dh}{dx}) b \cos \beta$ |
| AD 上的压力在底坡方向上的分力          | $\gamma H b dx \frac{\sin (\theta - \beta)}{\cos \theta}$                                  |
| 单位时间内动量的变化率               | $\frac{d}{dx} (\alpha \gamma' \frac{Qv}{g}) dx$                                            |
| 列出平衡方程式为                  |                                                                                            |

$$\gamma' h \sin \beta = \left( \gamma h \frac{dH}{dx} + \gamma H \frac{dh}{dx} + \gamma' h \frac{dh}{dx} \right) \cos \beta + \gamma H \frac{\sin (\theta - \beta)}{\cos \theta} + f_b + f_w \left( \frac{2h}{b} \right) + f_i \sec (\theta - \beta) \cos \theta + \gamma' \alpha \frac{d}{dx} \left( \frac{Qv}{g} \right) \quad (1.1)$$

因为

$$\frac{dH}{dx} = \tan \theta, \quad \tan \beta = \frac{dh}{dx} + \frac{dH}{dx};$$

$$\frac{d}{dx} \left( \alpha \gamma' \frac{Qv}{g} \right) = -\alpha \gamma' \frac{V^2}{g} \cdot \frac{dh}{dx}$$

最后有

$$\gamma' h \sin \beta = \left\{ \gamma h \left( \tan \beta - \frac{dh}{dx} + \gamma H \frac{dh}{dx} \right) \right\} \cos \beta + \gamma' h \frac{dh}{dx} \cos \beta - \gamma H \left( \frac{\sin \theta \cos \beta - \sin \beta \cos \theta}{\cos \theta} \right) + f_b + f_w \left( \frac{2h}{b} \right) + f_i \sec (\theta - \beta) \cos \theta - \frac{\alpha \gamma' V^2}{g} \frac{dh}{dx} \quad (1.2)$$

因此

$$\frac{dh}{dx} = \frac{(\gamma' - \gamma) \sin \beta - \left( f_b + f_w \left( \frac{2h}{b} \right) + f_i \sec (\theta - \beta) \cos \theta \right) \frac{1}{h}}{(\gamma' - \gamma) \cos \beta - \alpha \gamma' \frac{V^2}{gh}} \quad (1.3)$$

設

$$f = \frac{\lambda}{4} \gamma' \frac{V^2}{2g} \quad (1.4)$$

如令

$$\lambda_i' = \frac{(\lambda_b b + \lambda_w 2h) + \lambda_i b \sec (\theta - \beta) \cos \theta}{2(h + b)} \quad (1.5)$$

則有

$$\frac{dh}{dx} = \frac{(\gamma' - \gamma) \sin \beta - \frac{\lambda_i' \gamma' V^2}{8gR_i'}}{(\gamma' - \gamma) \cos \beta - \alpha \gamma' \frac{V^2}{gh}} \quad (1.6)$$

式中

$$R_t' = \frac{bh}{2(h+b)}$$

為便于與以往研究者試驗成果作比較，令

$$\lambda_t = \frac{\lambda_b b + \lambda_w 2h + \lambda_i b \sec(\theta - \beta) \cos \theta}{2h + b} \quad (1.7)$$

及

$$R = \frac{bh}{2h + b}$$

則可得

$$\frac{dh}{dx} = \frac{(\gamma' - \gamma) \sin \beta - \frac{\lambda_t \gamma' V^2}{8gR}}{(\gamma' - \gamma) \cos \beta - \alpha \gamma' \frac{V^2}{gh}} \quad (1.8)$$

因此，均勻流動只有在下列條件下才能獲得，即

$$(\gamma' - \gamma) \sin \beta - \frac{\lambda_t}{8} \gamma' \frac{V^2}{gR} = 0,$$

因此有

$$V^2 = \frac{8}{\lambda_t} \left( \frac{\gamma' - \gamma}{\gamma'} \right) gR \sin \beta \quad (1.9)$$

#### 4. 試驗結果

試驗結果分別說明如下：

(1) 異重流傳進速度與断面平均流速的比較

異重流潛入清水底部流動，取代了清水的位置前進，前端與清水混合，體積較大。混合的程度與流速值有關。

試驗記錄了異重流沿程的傳進速度，同時計算和測量了異重流各断面平均流速。試驗指出傳進速度在一般情況下較平均流速為小。如圖3所示。

(II) 阻力系數  $\lambda$  與雷諾數關係曲綫

自式(1.8)可寫出

$$\lambda_t = \left\{ (\gamma' - \gamma) \sin \beta - \left\{ (\gamma' - \gamma) \cos \beta - \gamma' \frac{V^2}{gh} \right\} \frac{dh}{dx} \right\} \frac{8}{\gamma'} \cdot \frac{gR}{V^2}$$

$\gamma'$ 、 $\gamma$ 、 $\frac{dh}{dx}$  等值均自試驗求得，可算出  $\lambda$  值。試驗數據如表1所示。根據計算數據繪出  $\lambda \sim Re$  關係綫，見圖4。

自式(1.7)，可自平均總阻力系數推算交界面阻力

$$\lambda_i = \frac{(2h + b)\lambda_t - (\lambda_b b + \lambda_w 2h)}{b \cos(\theta - \beta) \sec \theta},$$

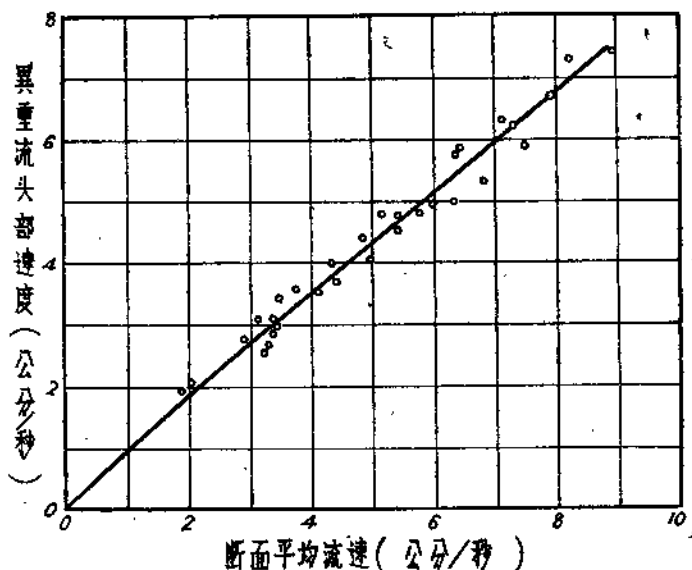


圖3 異重流平均流速與其头部推進速度的關係

当宽度很大, 比降不大时, 有

$$\lambda_t = \lambda_b - \lambda_w$$

$\lambda_b$  值可自底部糙率试验或计算求得。目前尚未用盐水进行明渠流试验测定阻力系数  $\lambda_b$  和  $\lambda_w$ 。

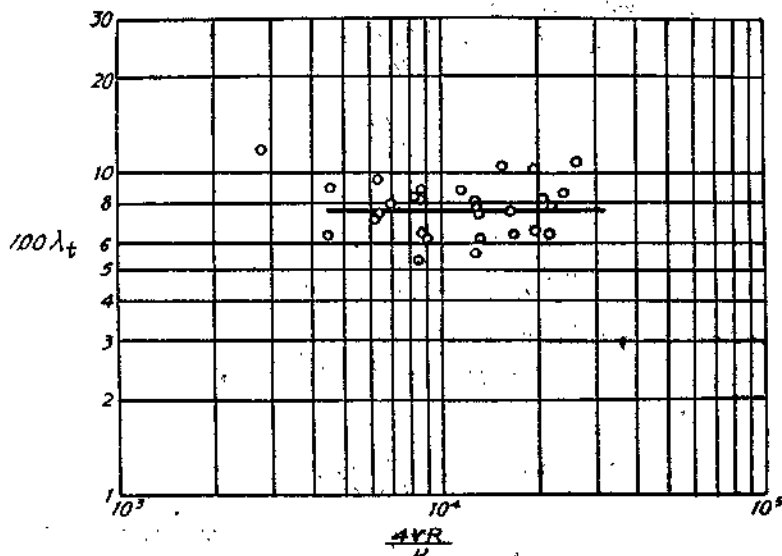


图4 总阻力系数与雷诺数的关系

表1

盐水混重流总阻力系数试验数据

| 编号 | 日期    | $Q$<br>公升/秒 | $h_m$<br>公分 | 底坡   | $\frac{dh}{dx}$ | 平均含盐量<br>克/公升 | $v_m$<br>公分/秒 | 清水温度<br>°C | 盐水温度<br>°C | $100\lambda_t$ | $\frac{4VR}{\nu}$ |
|----|-------|-------------|-------------|------|-----------------|---------------|---------------|------------|------------|----------------|-------------------|
| 2  | 7.10  | 0.93        | 4.7         | 0.02 | 0.00234         | 2.6           | 4.0           | 19.6       | 21         | 7.5            | 6,260             |
| 3  | 7.11  | 1.26        | 4.1         | 0.02 | 0.00247         | 8.0           | 6.2           |            |            | 8.9            | 8,560             |
| 4  | 7.13  | 1.95        | 9.0         | 0.02 | 0.00288         | 2.78          | 4.3           |            |            | 8.8            | 11,500            |
| 5  | 7.14  | 1.95        | 5.2         | 0.02 | 0.0018          | 9.6           | 7.5           |            |            | 7.5            | 12,900            |
| 6  | 7.16  | 1.26        | 6.2         | 0.02 | 0.00346         | 3.1           | 4.1           | 20.5       | 23.0       | 9.3            | 8,050             |
| 8  | 7.23上 | 1.95        | 5.3         | 0.02 | 0.00185         | 8.5           | 7.4           | 19.2       | 19.8       | 7.8            | 12,800            |
| 9  | 7.23下 | 1.26        | 4.9         | 0.02 | 0.00311         | 4.9           | 5.2           | 19.5       | 22         | 8.2            | 8,440             |
| 10 | 7.24下 | 0.62        | 3.0         | 0.02 | 0.00309         | 3.3           | 4.1           | 22.2       | 23         | 6.3            | 4,400             |
| 11 | 7.25  | 0.62        | 2.8         | 0.02 | 0.00173         | 7.32          | 4.4           | 18.9       | 21.8       | 8.9            | 4,450             |
| 12 | 7.26  | 0.93        | 4.5         | 0.02 | 0.00247         | 3.2           | 4.1           | 19.1       | 21.9       | 9.6            | 6,300             |
| 13 | 7.27上 | 2.56        | 6.5         | 0.02 | 0.0018          | 8.35          | 7.9           | 19.9       | 21.0       | 7.6            | 16,200            |
| 14 | 7.27下 | 2.56        | 8.9         | 0.02 | 0.00243         | 5.5           | 5.8           | 19.2       | 21.9       | 10.4           | 15,100            |
| 15 | 7.31上 | 0.38        | 2.5         | 0.02 | 0.00198         | 5.0           | 3.0           | 19.5       | 20.5       | 11.8           | 2,730             |
| 16 | 7.31下 | 4.88        | 16          | 0.02 | 0.00396         | 4.0           | 6.1           | 18.6       | 21.5       | 9.3            | 24,200            |
| 17 | 8.1   | 4.88        | 12.4        | 0.02 | 0               | 7.6           | 7.9           | 21         | 21.3       | 10.8           | 26,200            |
| 18 | 8.2   | 3.81        | 14          | 0.02 | 0.00562         | 3.51          | 5.4           | 19.7       | 21.4       | 10.3           | 19,500            |
| 19 | 8.3上  | 3.81        | 11.4        | 0.02 | 0.00505         | 3.82          | 6.7           | 20.4       | 21.2       | 8.1            | 20,800            |
| 20 | 8.3下  | 1.95        | 6.3         | 0.02 | 0.00081         | 4.85          | 6.0           | 21.1       | 21.8       | 7.96           | 12,600            |
| 23 | 8.30  | 1.95        | 5.4         | 0.02 | 0.0018          | 6.4           | 7.2           | 18.7       | 21.0       | 6.2            | 13,100            |
| 24 | 9.3   | 1.26        | 3.8         | 0.02 | 0.00154         | 7.2           | 6.6           | 18.6       | 19.6       | 6.1            | 8,780             |
| 25 | 9.4   | 1.95        | 5.3         | 0.02 | 0.0027          | 5.1           | 7.4           | 18.6       | 19.8       | 5.6            | 12,800            |
| 26 | 9.5   | 2.56        | 6.5         | 0.02 | 0.00201         | 6.6           | 8.2           | 17.8       | 20.0       | 6.4            | 16,800            |
| 27 | 9.6   | 3.18        | 7.6         | 0.02 | 0.00302         | 6.2           | 8.4           | 19         | 20.1       | 6.5            | 19,500            |
| 28 | 9.20  | 3.81        | 10.5        | 0.02 | 0.00259         | 4.3           | 7.3           | 19.3       | 17.7       | 7.8            | 21,400            |
| 29 | 9.26  | 3.81        | 10.6        | 0.02 | 0               | 5.0           | 7.2           | 15.6       | 19.6       | 6.4            | 21,300            |
| 30 | 9.27  | 1.26        | 5.1         | 0.01 | 0.00144         | 6.0           | 4.9           | 16         | 19         | 5.3            | 8,400             |
| 34 | 10.9  | 0.93        | 5.0         | 0.01 | 0               | 4.5           | 3.7           | 17.9       | 18         | 7.4            | 6,180             |
| 35 | 10.16 | 1.26        | 4.7         | 0.01 | 0.00216         | 8.2           | 5.4           | 14.8       | 15.5       | 6.4            | 8,700             |
| 39 | 11.10 | 1.02        | 4.8         | 0.01 | 0.00216         | 6.9           | 4.3           | 13         | 14         | 7.9            | 6,850             |

## 乙、異重流二元孔口出流試驗

## 1. 以往試驗成果及本試驗目的

異重流到達壩址的時候，由於動能的轉換而升高，流出泄水孔的水流，因在孔口前清渾水混合的結果，其濃度較異重流濃度為小，這個問題可分兩方面來看，一是排出水流濃度變化的問題，另一方面是排出高度的極限問題。實質上，濃度的變化也包括在排出高度的問題之內，高度到達上下兩極限時，濃度即達最高、最低值。

加里埃在 1946 年發表了關於不同濃度液體的排出極限高度的試驗<sup>(8)</sup>，克拉亞對這個問題也曾進行理論分析<sup>(9)</sup>。柯力根<sup>(10)</sup>也做過分析。

排出液體的濃度問題，對於水庫運用有很大的實際意義。開啓閘門的時間和出流流量的決定，以及閘門位置的決定，都取決於對這個問題的了解。

本試驗目的在於企圖通過二元孔口出流試驗所顯示的現象和試驗成果，了解有關這個問題的性質。為以後對實際問題的試驗準備條件。

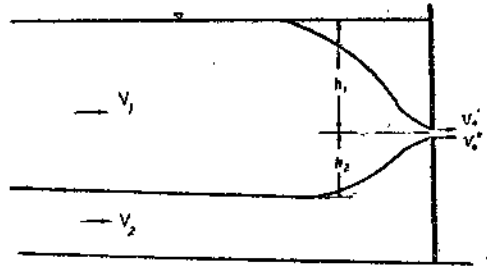


圖 5

## 2. 試驗條件的分析

本報告僅考慮孔口位置高度一定，不同大小的二元孔口，在進入流量與出口流量保持相等，清水水位保持不變的情況。

試驗條件如圖 5 所示。

(1) 寫出交界面上清水流綫的伯奴里方程（忽略損失水頭）

$$\frac{\gamma V_1^2}{2g} + \gamma h_1 = \frac{\gamma v_0'^2}{2g} + P_0 \quad (2.1)$$

鹽水流綫的方程式為

$$\frac{\gamma' V_2^2}{2g} + \gamma(h_1 + h_2) - \gamma' h_2 = \gamma' \frac{v_0''^2}{2g} + P_0 \quad (2.2)$$

$P_0$  為孔口處交界面上的壓力。

在出口流量中，分別以  $d_1$ 、 $d_2$  表示通過清水和鹽水的部分，總單寬面積為  $d$ ，連續方程

$$q = q_1 + q_2 \quad (2.3)$$

$$q = v_0' d_1 + v_0'' d_2 \quad (2.4)$$

而

$$q_1 = v_0' d_1, \quad q_2 = v_0'' d_2 \quad (2.5)$$

同時

$$q_1 = v_1(h_1 + h_2), \quad q_2 = v_2(p - h_2) \quad (2.6)$$

$p$  為孔口下緣至槽底的高度。

(2.2) 減 (2.1) 消去  $P_0$ ，得

$$\frac{\gamma' V_2^2}{2g} - \frac{\gamma V_1^2}{2g} - (\gamma' - \gamma) h_2 = \frac{\gamma' v_0''^2}{2g} - \frac{\gamma v_0'^2}{2g} \quad (2.7)$$

自 (2.5) 至 (2.7)，如已知  $q$ 、 $q_1$ 、 $h_2$ ，即可求得  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $v_0'$ 、 $v_0''$ 、 $d_1$ 。將以上各值代入式

$$\gamma_0 q = \gamma q_1 + \gamma' q_2 = \gamma d_1 v_0' + \gamma' d_2 v_0'' \quad (2.8)$$

后, 将得到  $\gamma_0$  与其他已知值的函数关系。

以上为定常情况下的关系。

但在目前試驗中進入流量为鹽水异重流, 出口流量中則包含一部分清水, 因此对于清水 (同样对于鹽水) 而言。進出流量不同, 所以是不穩定的, 即  $q_1$  (和  $q_2$ ) 是随時間而改变的, 但这种变化如果比較緩慢, 則可視為緩变流态, 在一定时段內, 可近似地看作为定常的情况。用下列方法, 可求得与  $h_2$  相应的  $q_1$  值。

試驗表明, 出口濃度  $S_0$  的时间变化率接近于常数, 因此可自 (2.8) 的关系式得到清水或鹽水流量 (其濃度为  $\gamma'$ ) 的时间变化率,

$$\left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_s}\right) \frac{\partial S_0}{\partial t} = \frac{\partial(\gamma_0 - \gamma)}{\partial t} = (\gamma' - \gamma) \frac{\partial(q_2/q)}{\partial t} = \text{常数} \quad (2.9)$$

式中

$$\gamma_0 = S_0 \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_s}\right) + \gamma \quad (2.10)$$

因此, 可从出口濃度的時間过程綫, 作出  $q_1/q$  的过程綫, 从而定出在一定  $h_2$  时的  $q_1/q$  值。

用 (2.8) 亦可計算出  $\frac{q_1}{q} : \frac{q_1}{q} = \frac{\gamma' - \gamma_0}{\gamma' - \gamma}$ , 在不同的  $\gamma_0$  及  $h_2$  值, 就有相应的  $q_1/q$  值。

(II) 令出口平均流速为  $v_0$ , 而  $v_0 = \frac{q}{d}$ , 則

$$v_0 = \frac{v_0' d_1 + v_0'' d_2}{d} = v_0' - \frac{d_2}{d} (v_0' - v_0'')$$

当  $d_2 = 0$  时,  $v_0 = v_0'$ , 全部出流为清水, 这时的  $h_2$  达到某極限值  $h_l$ , 加里埃 (B) 試驗得

$$\frac{\gamma' - \gamma}{\gamma} \cdot \frac{g h_l^3}{q^2} = 0.43$$

当  $d_2 = d$  时,  $v_0 = v_0''$ , 出口流量全部为异重流鹽水, 此时的  $h_2$  为負值, 也将达到某極限值。

(III) 試驗中的資料表明, 出口濃度和  $h_2$  的时间变化率均接近于常值, 其次, 当  $h_2$  为負值时, 即交界面高出于孔口下緣的高度时,  $\frac{\partial h_2}{\partial t}$  和  $\frac{\partial S_0}{\partial t}$  的比值接近于常值, 因此可寫出下列近似条件,

$$\frac{\partial S_0}{\partial h_2} = -k_1$$

或

$$\frac{\partial(\gamma_0 - \gamma)}{\partial h_2} = -k_1 \quad (2.11)$$

積分得

$$\gamma_0 - \gamma = -k_1 h_2 + k_2 \quad (2.12)$$

当  $h_2 \rightarrow 0$  时, 对于小孔口, 我們假定  $S_0 = \frac{S'}{2}$ , 即  $\gamma_0 = \frac{\gamma' + \gamma}{2}$ , 当  $h_2$  达到極限值  $-h_l$  时,  $\gamma_0 = \gamma'$ , 它应有同加里埃試驗所得的类似的关系式

$$\frac{\gamma' - \gamma}{\gamma} \cdot \frac{g h_l^3}{q^2} = k_3 \quad (2.13)$$

求出  $k_1, k_2$  得  $\frac{\gamma' - \gamma_0}{\gamma' - \gamma} = 0$  至 0.5 范围内的关系式:

$$\frac{\gamma' - \gamma_0}{\gamma' - \gamma} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{h_2}{h_l}\right)$$

和

$$\frac{\gamma' - \gamma_0}{\gamma' - \gamma} = \frac{1}{2} \left\{1 - k \left(\frac{\gamma' - \gamma}{\gamma} \cdot \frac{g h_2^3}{q^2}\right)^{1/3}\right\}^* \quad (2.14)$$

\* 当  $h_2$  为正时, 在同样条件下, 可得类似关系; 这种試驗尚在進行中。

式中  $k = \left(\frac{1}{k_3}\right)^{\frac{1}{3}}$ , 為負值,  $k$  值可自試驗中定出。

### 3. 出流現象的描述

根據我們試驗中觀察, 孔口出流時, 當異重流到達孔口前面, 異重流受到阻碍而向上升起, 這時部分異重流由孔口排出, 其他部分則滯留孔前; 由於孔口以上和前面的清水同時有一部分排出, 因此, 上升了的鹽水就能隨清水陸續排出, 這種情況繼續并不久, 就會把孔口以上上升起的鹽水排完。此外, 孔口前滯留的鹽水受到阻碍後發生反射, 向上游推進。在本試驗孔口高度一定、流量不大的範圍內, 初期的壅高高度和孔口的高度相差不多, 幾乎是平齊的, 等到壅水範圍之內完全壅高以後, 鹽水壅高將繼續增高而超過孔口的高度。在這變化的過程中, 出口濃度隨壅高高度而有不同程度的增加。

上面所描述的過程, 如把異重流和上層清水分開來看, 則它們都是不穩定的情況, 而進口流量和出口流量相同, 整個而言, 則是穩定的。

交界面的升高隨時間的增長而改變; 在開始壅高時, 升高速度是比較快的, 而當與孔口高度接近平齊時, 則因繼續向上游擴展, 需要較長的時間才能包括全部壅高範圍, 因之, 這時在孔口附近壅高的變化則是非常之小的。這時可以看作是緩變狀態。過了這個緩變的階段, 槽內交界面的升高, 變化又較快了 (隨槽子長短而異)。

### 4. 試驗設備及操作情況

試驗是在上述 14 公尺兩壁裝有玻璃的水槽中進行, 水槽後部在斷面上安裝二元銳邊孔口, 孔口寬 50 公分, 高 2~4 公厘, 隨出口流量進行調整, 孔口離槽底高 15 公分。槽底坡度為 1/100。上游發生異重流後, 待其到達孔口前, 即進行孔口處的觀測。

主要觀測項目有孔口前後含鹽量的變化, 以及異重流交界面在孔口前面的高度的變化過程。除最初幾次試驗外, 一般每隔 30 秒至 60 秒取樣及測讀一次。異重流的高度及含鹽量分布 (孔口前及其上游) 亦分別加以施測。

當流量較小 (在 1 公升/秒以下) 時, 開始壅高的高度常較孔口高度為低, 而在試驗時間之內幾乎以孔口高度為其極限; 流量較大, 壅高高度一開始就超過孔口高度。

孔口前交界面的數據, 一般在孔口上游 10~15 公分處取得。

### 5. 試驗結果

試驗放水計 20 余次, 試驗數據, 如表 2 所示。表中孔口前含鹽量數據, 是由孔口前含鹽量分布取平均定出。該處含鹽量數值與上游異重流本身的含鹽量平均值接近。

出口濃度的變化隨時間而有改變, 它和交界面高度的變化是相適應的, 見圖 6。我們所選擇的是壅高高度和出口濃度變化比較小的時段中的平均值。

資料按 (2.14) 式分析結果如圖 7 所示。當  $\frac{\gamma' - \gamma_0}{\gamma' - \gamma}$  等於 0 及 1 時, 應分別接近於極限值。圖 7 的實線部分:  $\left(\frac{\gamma' - \gamma_0}{\gamma' - \gamma}\right) < 0.5, \left(\frac{\gamma' - \gamma}{\gamma}\right) \cdot \frac{gh_1^3}{q^2} < 0$  的範圍內, 可用下式表示

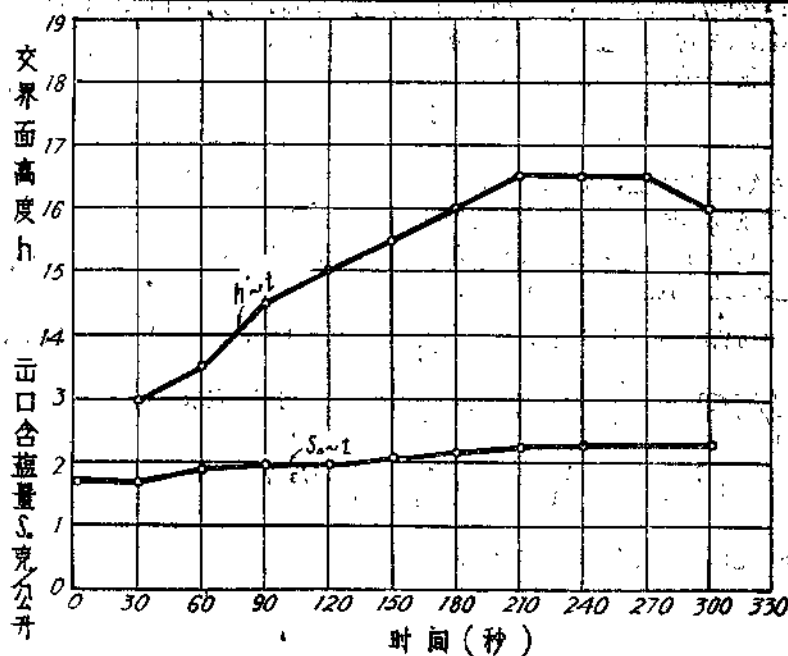
$$\left(\frac{\gamma' - \gamma_0}{\gamma' - \gamma}\right) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + 3.42 \left( \frac{\gamma' - \gamma}{\gamma} \cdot \frac{gh_1^3}{q^2} \right)^{1/3} \right\} \quad (2.15)$$

至於  $\left(\frac{\gamma' - \gamma}{\gamma'}\right) \frac{gh_1^3}{q^2} > 0$  範圍內的試驗, 將在以後進行。

表 2

鹽水異重流二元孔口出流試驗數據

| 編號 | 日期                 | $\frac{q}{\text{公分}^2/\text{秒}}$ | $h_2$<br>公分 | $\gamma'$ | $\gamma_0$ | $\gamma$ | $\frac{\gamma' - \gamma_0}{\gamma' - \gamma}$ | $\left(\frac{\gamma' - \gamma}{\gamma}\right) \frac{gh^2}{2}$ | 溫 度  |      |
|----|--------------------|----------------------------------|-------------|-----------|------------|----------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------|------|
|    |                    |                                  |             |           |            |          |                                               |                                                               | 清水   | 鹽水   |
| 1  | 11.19              | 18.6                             | +0.2        | 1.0031    | 1.0018     | 0.999478 | 0.359                                         | +0.000082                                                     | 12.4 | 9    |
| 2  | 11.23 <sup>上</sup> | 18.6                             | 0           | 1.0018    | 1.0008     | 0.999632 | 0.461                                         | 0                                                             | 11   | 12   |
| 3  | 11.23 <sup>下</sup> | 14                               | +0.2        | 1.002     | 1.0007     | 0.999478 | 0.515                                         | +0.0001005                                                    | 12.4 | 12.2 |
| 4  | 11.26 <sup>上</sup> | 14                               | -0.5        | 1.0017    | 1.001      | 0.999524 | 0.322                                         | -0.00135                                                      | 12   | 12.3 |
| 5  | 11.27 <sup>上</sup> | 24                               | +0.7        | 1.0015    | 1.0003     | 0.999601 | 0.632                                         | +0.00322                                                      | 11.3 | 12   |
| 7  | 11.30 <sup>下</sup> | 26                               | -1.5        | 1.0009    | 1.0008     | 0.999453 | 0.069                                         | -0.00713                                                      | 12.6 | 9.8  |
| 8  | 12.1 <sup>上</sup>  | 37                               | -2.5        | 1.002     | 1.0016     | 0.999542 | 0.163                                         | -0.002635                                                     | 12   | 9.3  |
| 9  | 12.5 <sup>上</sup>  | 26                               | -1.5        | 1.0014    | 1.0011     | 0.999536 | 0.161                                         | -0.00917                                                      | 11.9 | 9    |
| 10 | 12.6 <sup>上</sup>  | 30                               | -1          | 1.001     | 1.0007     | 0.999524 | 0.203                                         | -0.0016                                                       | 12   | 8.8  |
|    |                    |                                  | -1.5        |           |            |          |                                               | -0.00542                                                      |      |      |
| 11 | 12.6 <sup>下</sup>  | 12                               | -1          | 1.0013    | 1.0009     | 0.999672 | 0.246                                         | -0.01105                                                      | 10.7 | 9    |
|    |                    |                                  | -1.5        |           |            |          |                                               |                                                               |      |      |
| 12 | 12.10 <sup>上</sup> | 16                               | -0.3        | 1.0042    | 1.0019     | 0.999642 | 0.503                                         | -0.00047                                                      | 10.9 | 6.5  |
| 13 | 12.10 <sup>上</sup> | 20                               | 0           | 1.0022    | 1.0014     | 0.999339 | 0.279                                         | 0                                                             | 13.5 | 8.6  |
| 15 | 12.13 <sup>上</sup> | 14                               | -0.2        | 1.0017    | 1.0012     | 0.999243 | 0.204                                         | -0.000098                                                     | 14.2 | 9    |
| 16 | 12.13 <sup>上</sup> | 18                               | 0.1         | 1.0015    | 1.0009     | 0.999185 | 0.259                                         | 0                                                             |      |      |
| 17 | 12.14 <sup>上</sup> | 30                               | -1.5        | 1.0017    | 1.0014     | 0.999171 | 0.1175                                        | -0.0093                                                       | 14.7 | 9.4  |
| 18 | 12.14 <sup>上</sup> | 22                               | -1.6        | 1.0015    | 1.0013     | 0.9992   | 0.087                                         | -0.0195                                                       | 14.5 | 9.8  |
| 19 | 12.14 <sup>上</sup> | 34                               | -2          | 1.0015    | 1.0012     | 0.999156 | 0.124                                         | -0.01635                                                      |      |      |
| 20 | 12.15 <sup>上</sup> | 40                               | -2          | 1.0021    | 1.0019     | 0.999126 | 0.0671                                        | -0.01455                                                      | 15   | 10   |
| 21 | 12.17 <sup>上</sup> | 46                               | -4          | 1.0018    | 1.0018     | 0.999156 | 0                                             | -0.0782                                                       |      |      |

圖 6 交界面高程  
与出口含鹽  
量的变化过  
程

編號 17,  
試驗日期:  
1956.12.14 上午第一  
次

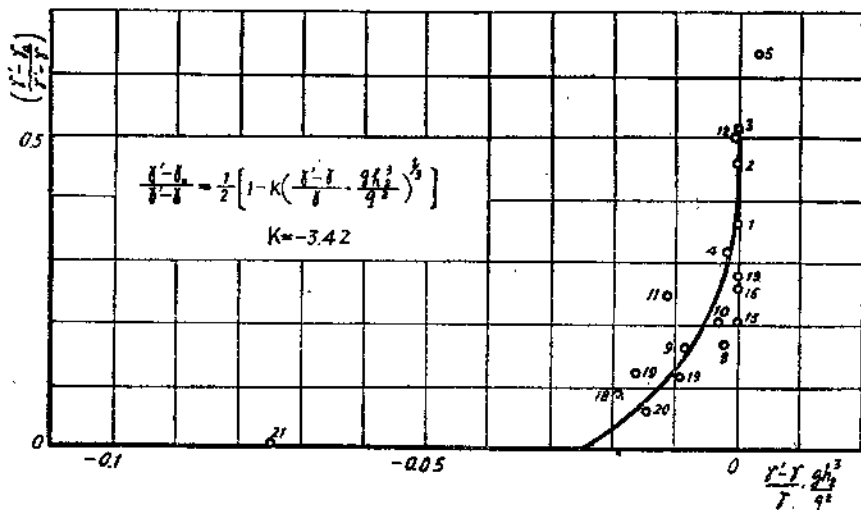


圖7  $\frac{v' - v}{v' - v_0}$  与  $\frac{v' - v}{v'} \cdot \frac{gh_2^3}{q^2}$  的关系

### 丙、討 論

1. 自水槽異重流試驗，根據計算 $\lambda$ ，可將交界面的阻力系数分開算出，用以估計天然異重流的运动流速。

本試驗僅以鹽水作為異重流，試驗測得的含鹽量分布，与泥沙含量的分布近似。以後進行泥水試驗時，將對兩者之間的區別進行比較。

2. 从二元孔口試驗可以看出，只有在異重流到达壩前，發生反射以前，它的升高較大，而在孔口繼續出流的过程中，壅水高程受到一定限制，逐漸形成一個壅水区，其表面接近于水平。官廳水庫在1956年測驗到在壩前渾水面高度低于水电厂進口高程時，進水口內未發現渾水進入。這說明了，異重流繼續不斷地升高而經孔口排出的情况，並不是一種普遍的情况。

因此，孔口的位置，如果放的太高，將難于發生排沙作用。二元試驗更証明：出流濃度随上游交界面高度而有改变，最好的情况是異重流的交界面能高于孔口的高程。這個問題將在三元孔口的試驗中繼續研究。

3. 从試驗中看到另一種現象，就是異重流刚到孔口時，除剛到达時出口濃度略大外，一般出流濃度較小，以後随壅水高度的穩定和增加而有所提高。一直到上游異重流停止進入時，濃度才开始隨之減小。这种情况可以說明应在什么时候開啓泄水孔方能得到較高的排出效率，以及預計關閉閘門的時間。阿尔及利亞福达河<sup>(3)</sup>的觀察，同樣說明了這個問題：1937年12月14~16日發生洪水后，在19日下午1时15分至4时20分開啓泄水孔閘門，出流流量最大达90公方/秒，出流濃度（密度）自1.25降至1.075；20日上午9时7分又开，至10时8分關閉，濃度自1.250降至1.00（清水）；21日上午8时又开，排出全为清水。由此可見，掌握開啓時間，是非常重要的。

根據二元試驗，開啓時間应在異重流已經到达壩前的持續期內，这时的排沙效率最大。這個問題在今后的試驗中將繼續研究。

最后，我們對中國科学院力学研究所蔡樹棠同志和我所諸位同志給我們的幫助，表示衷心的感謝。

# 参 考 文 献

1. 异重流問題的討論材料 (油印本初稿):  
    (一) 异重流的特性及其在水工上的意义 (錢寧)  
    (二) 异重流在海洋地質上的意义 (錢寧)  
    (三) 泥沙的膠結現象 (吳世康)  
    (四) 关于异重流的实測資料 (范家驊)  
    (五) 异重流的穩定問題 ( ( I ) 曹俊 ( II ) 蔡樹棠 ( III ) 林同驥 )  
    (六) 异重流的模型律 (魏顯年)  
    (七) 关于异重流若干試驗的介紹 (范家驊)
2. Duquenois, H., New methods of sediment control in reservoirs, Water Power, vol. 8, no. 5, pp. 174~180, 1956.
3. Duquenois, H., Lutte contre la sédimentation des barrages reservoirs, Comptes Rendu no. 2, 1955.
4. Kuenen, Ph. H., Properties of turbidity currents of high density, Society of Economic Paleontologists and mineralogists, special publications no. 2, 1951.
5. Kuenen, Ph. H., Turbidity currents of high density, "Report of the 18 th Session, Great Britain, 1948" pt. VIII, Intern. Geol. Congress.
6. Raynaud, J. P., Etude des courants d'eau boueuse dans les retenues, Transn, vol. 4, Congress on large dams, 1951.
7. Gaza, Bata and Bogich, K., Some observations on density currents in the laboratory and in the field, Proc. Minnesota International Hydraulics Convention, 1953.
8. Gariel, P., Sur la loi de la hauteur limite d'aspiration dans deux fluides de densités différentes, Comptes Rendus, Acad. Sci. (France) tome 222, pp. 781—783, 1946.
9. Craya, A., Loi de la hauteur limite d'aspiration dans deux fluides de densités différentes, C R A S (France) tome 222, pp. 1159~1160, 1946.
10. Keulegan, G. H., Report on investigation of density currents, 1936.

# 全苏水利科学研究院 在底砂研究方面的新的工作

教授 И.И. 列維和副教授 В.С. 克諾洛茲

(全苏水利科学研究院)

1. 对卵石和砂子的冲刷流速的研究証明, 在泥沙顆粒脱离底面时, 水流上举力所起的作用 是很大的。吉明捷亦夫 (М.А. Дементьев) 根据理論和实验的研究, 提出了下面的上举力系数的关系式, 此式对紊流平方区流态是正确的 ( $d > 2$  公厘的顆粒)。

$$C_{oy} = 0.23 \frac{d}{v_d} \left| \frac{dv}{dy} \right|_d \quad (1)$$

式中  $v_d$  ——底部流速

$$\left| \frac{dv}{dy} \right|_d \text{ ——高度为 } d \text{ 处的速度梯度, } \left| \frac{dv}{dy} \right|_d = a \frac{v_*}{d}$$

進一步分析 (И.И. 列維) 証明, 系数  $C_{oy}$  也可通过阻力系数  $\lambda_0$ , 以及底速  $v_d$  对平均速度之比  $\frac{v_d}{u} = \varphi = f\left(\frac{h}{d}, Re\right)$  来表示

$$C_{oy} = 0.23 a \frac{v_*}{v_d} = a_1 \frac{\sqrt{\lambda_0}}{\varphi} \quad (2)$$

若注意到側压力  $C_{ox}$  可表示为

$$C_{ox} = d \frac{\lambda_0}{\varphi^2} \quad (3)$$

的形式, 其中  $d$  为形状系数, 則  $C_{oy}$  和  $C_{ox}$  之間的关系可确定如下:

$$\frac{C_{oy}}{C_{ox}} = \frac{a_1 \sqrt{\lambda_0} \varphi^2}{a \lambda_0 \varphi} = \frac{a_1 \varphi}{a \sqrt{\lambda_0}} = \frac{d}{\sqrt{C_{ox}}} \quad (4)$$

在一般情況下,  $C_{ox} = f(Re)$ , 同时随着雷诺数的减小,  $C_{ox}$  系增長, 而  $\frac{C_{oy}}{C_{ox}}$  减小 (見圖 1)。

我們知道, 顆粒对于冲刷的稳定性是决定于下面的关系式

$$\frac{\sqrt{v_{0*}}}{\sqrt{gd}} = \frac{K}{\sqrt{1 + \frac{C_{oy}\beta}{C_{ox}}}} \quad (5)$$

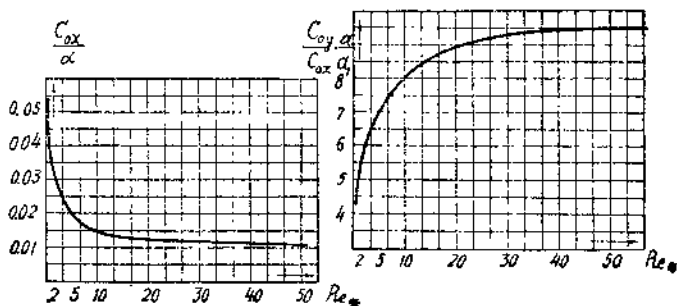


圖 1

因而, 可以認為, 随着顆粒直径  $d$  (以及  $Re_d = \frac{d\sqrt{gd}}{v}$ ) 的减小,  $\frac{v}{\sqrt{gd}}$  值也必定增長, 这已为实验所証实, 根据这些实验可以确定冲刷平均流速  $u_0$  的下面一些式子, 它們相应于三种紊流区

(B.C.克諾洛茲)

1) 光滑区

$$u_0 = \frac{100d^{0.05} R^{1/2}}{\sqrt{7.5 + \sqrt{R}}} \quad (6)$$

式中  $R$  以公分計

2) 过渡区

$$u_0 = 35d^{0.25} \left( \lg 7.5 - \frac{R}{d} - 6d \right) \quad (7)$$

3) 阻力平方区

$$u_0 = 1.4 \sqrt{gd_{0p}} \lg \frac{12R}{d_{0.05}}$$

关系式(3)和(4)必須用試驗來証实,其办法是确定液体粘滯性对于不冲流速值的直接影响,試驗应采用相同的顆粒,在不同粘滯性的液流中进行。

关于底砂运动方面的重要問題之一,就是研究各种形式的砂法等河床形成物的形状,并确定在这种情况下河床阻力的关系式。在这个方面近年来已作了許多的实验,根据这些实验可以确定影响沙浪形状和河床阻力的基本因素。

属于上述基本因素的有:

1) 河床的相对糙率—— $\frac{d}{R}$ 2) 水流速度和不冲流速間的比值  $\frac{u}{u_0}$  (或  $\frac{u}{\sqrt{gd}}$ )3) 雷諾数—— $Re = \frac{uh}{\nu}$ 

正如在列寧格勒工業学院河床試驗室中所作試驗所得出的(O.H.C.茲那敏斯卡雅),在泥沙沿水底运动的情况下,相应于紊流区下限的雷諾数  $Re_{KB}$  由下式确定

$$Re_{KB} = \frac{20R}{\sqrt{\lambda R d}} \quad (1)$$

式中  $R$ ——水力半徑

(2)——在給定的糙率下由沙浪所構成河床之阻力系数

由此式可得到下面的結論,即甚至在砂的粒徑甚小的情况下( $d=0.1 \sim 0.25$  公厘),由于河床上沙浪的存在,在洪水时流态仍接近于平方区状态的流态。由于这种緣故,雷諾数的影响只能出现在流速小的时候,即平水时期和冬季(当冰被表面平坦的情况)。如果槽底是由粗粒徑顆粒(大于1公厘)所構成,則当有沙浪存在时可以去不理會雷諾数的影响。

为了表示沙浪形状与上述基本因素的关系,可近似地应用 B.C.克諾洛茲的公式,这些公式主要是以試驗室資料为根据,一部分是根据原状观测。

$$\frac{h_{rp}}{h_0} = 3.5 \frac{\left( \frac{u-u_0}{u} \right)^{2/3}}{\lg \frac{h}{d} + 6} \quad (2)$$

$$\frac{h_{rp}}{h_0} = J_{rp} = \frac{1.25}{\lg \frac{h}{d} + 6} \left( \frac{u-u_0}{u} \right)^{5/2} \quad (3)$$

式中  $h_{rp}$  和  $J_{rp}$ ——沙浪之高度和裴降(圖2,3)

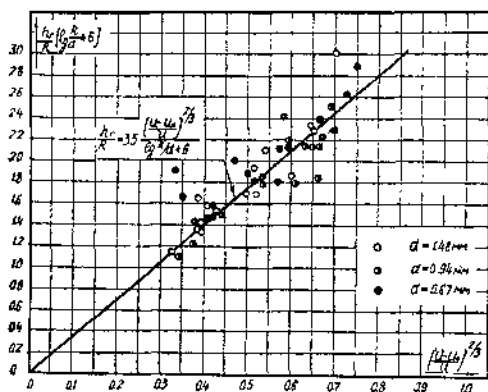


圖 2

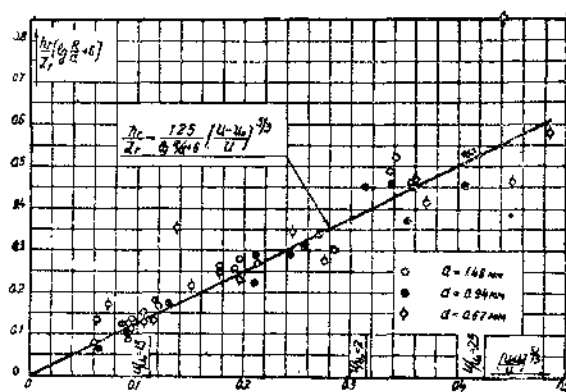


圖 3

随着实测资料和试验室（在大深度下）资料的积累，这两个公式必定会得到精确和改善。B.C. 克诺洛兹曾尝试地确定沙浪的移动速度，结果得到下面的关系式，此式在深度  $h$  小于 0.5 公尺，颗粒粒径  $d$  大于 0.5 公厘的情况为有效（图 4）。

$$u_{rp} = 0.425 \sqrt{gd} \left( \frac{u - u_0}{\sqrt{gR}} \right)^{2.5} \quad (4)$$

研究沙浪的阻力系数  $\lambda_{sp}$  具有重大意义。根据在列宁格勒工业学院河工试验室和全苏水利科学研究所作的实验，可以得出下面的结论，即影响  $\lambda_{sp}$  的基本因素为：

- 1) 河床的相对糙率  $\frac{d}{h}$
- 2) 沙浪的相对高度 ( $h_{rp}$ ) 和 坡降 ( $J_{rp}$ )
- 3) 雷诺数 ( $Re_{rp}$  值根据 (1) 式确定)

对平方区而言，可采用下面的  $\lambda_{sp}$  式（近似）

$$\lambda_{sp} = C \left( \frac{d}{R} \right)^{0.25} \left( \frac{h_{rp}}{R} \right)^{0.33} J_{rp}^{0.33} \quad (5)$$

此式在  $\frac{R}{d} < 200$  时有效；它是在底面（胶合板  $d \approx 0.25$  公厘）比较平坦的情况下得到的。

所提出的这个  $\lambda_{rp}$  式，必须根据原体和在大深度试验槽中的进一步研究而加以精确。

除了上述试验研究外，B.C. 克诺洛兹还曾研究了由沙浪所构成的河底中之紊动强度。为此，曾对泥沙和比重等于一的小球在水流中之运动作了快速电影摄影，与此同时，

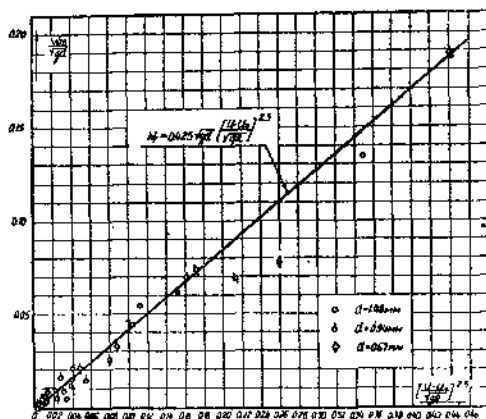


圖 4

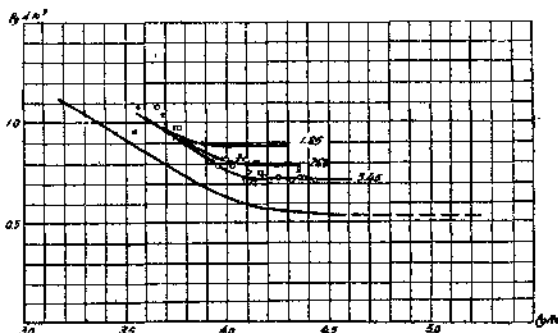


圖 5