

过水堆石体渗流及其模型相似

胡去劣

(南京水利科学研究院水工所, 210029)

文 摘 本文以试验资料为依据并通过雷诺数 R_e 与阻力系数 K' 的关系, 提出三个渗流流区的渗流流速系数、渗流流速计算公式及渗流模型相似的比尺效应修正系数。它具有论据正确、概念清楚、形式简单、计算方便等优点, 可应用于堆石体渗流计算及渗流模型资料的引伸。

1. 前 言

过水堆石体既有表面溢流又有体内渗流, 其渗流特性要比无溢流时的渗流复杂得多, 而过水堆石体如堆石坝行洪、路基及堤防的洪水漫溢等又是工程中经常遇到的。另一方面, 液体在大颗粒孔隙中运动, 当雷诺数大到一定值时, 惯性力起主要作用, 细粒介质中渗透的达西定律不再适用。因此, 开展该项研究不仅有工程意义而且也有理论意义。

若把堆石体的孔隙通道近似地视作管道, 则水流在该管道内的作用力必然与水流在管道的阻力相平衡。由试验资料整理后得知, 水流在孔隙通道内的阻力系数与堆石体颗粒雷诺数之间存在如图1的规律性, 本文将利用该规律性关系进行渗流问题的分析与计算。

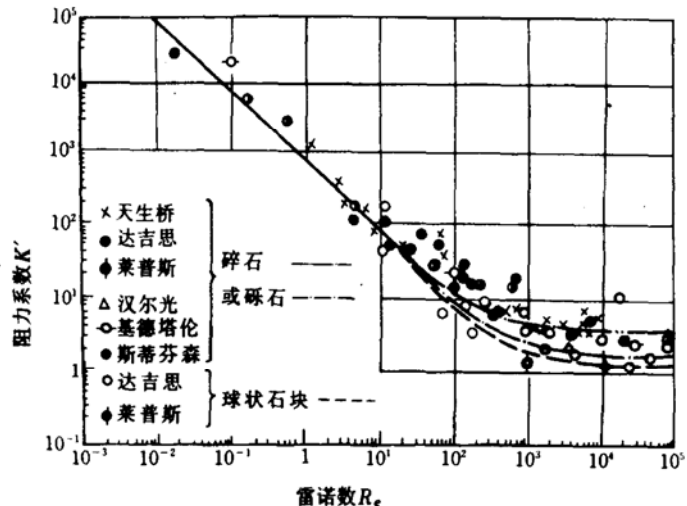


图1 渗流阻力系数与雷诺数的关系

2. 过水堆石体渗流线特性

通过大比尺模型试验用射色法测得过水堆石体渗流线见图2, 图3所示。过水堆石体渗流线有以下特性:

(1) 下游水面以下出逸的渗流线, 其出逸方向与斜坡面接近正交, 这是因为下游水面比降很小, 水面以下的下游坡面近似于等势面, 渗透水流总是沿着最大压力梯度方向流动的。下游水面以上出逸的渗流线, 出逸的方向接近水平。

(2) 渗流线有往下游水面与斜坡面交汇区域集中的趋势, 随着单宽流量增大, 渗流集中的现象亦愈明显, 因此斜坡上发生水跃范围是渗流最集中的地段, 也是较不安全的地段, 渗流在该处集中可能与跃后水面壅高有关。

(3) 对一定的堆石体, 保持上游水位相同, 改变下游水位测得的渗流线, 经比较后认为, 各渗流线自入渗点后在一定范围内是互相接近的, 受下游水位变化的影响较小。

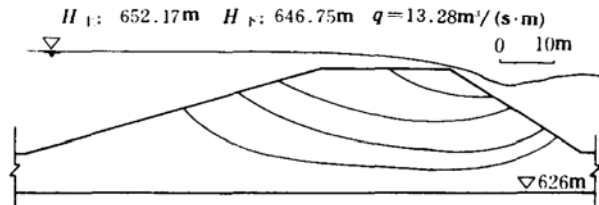


图2 渗流流线 ($d_e=1.2\text{cm}$)

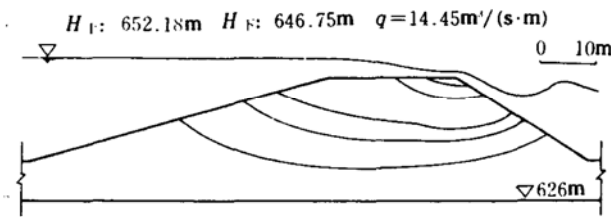


图3 渗流流线 ($d_e=4.4\text{cm}$)

3. 大颗粒渗透的渗流流速计算

过水堆石体内渗流属大颗粒渗透。液体在大颗粒孔隙通道内流动, 犹如液体在管道中流动。这时的压力损失 ΔP , 主要受液体的密度 ρ , 动力粘滞系数 μ , 管长 l , 管径 D 及管流流速 $\bar{V}$ (在堆石体孔隙内为真流速 $\frac{V}{n}$) 等因素制约。即

$$\Delta P = f(\rho, \mu, l, D, \bar{V}) \quad (1)$$

把多因子的式(1)用于堆石体渗流并根据孔隙通道内渗流特性组合成下列两个无尺度数——雷诺数 R_e 与阻力系数 K'

$$R_e = \frac{V d_e}{n \nu} \quad (2)$$

$$K' = \frac{i g d_e n^2}{V^2} \quad (3)$$

$$d_e = 1 / (P_1/d_1 + P_2/d_2 + \cdots + P_n/d_n)$$

式中 n 为堆石体孔隙率; d_e 为堆石体的有效粒径; P_i 表示 d_i 粒径所占的重量百分数 (下脚 $i=1, 2, \cdots, n$); i 为水力坡降, g 为重力加速度; ν 为水的运动粘滞系数。

以上各式体现了液体在堆石体内运动时的各种制约因素。通过以上两个无尺度数可表示出渗流运动中各种流态的关系(图1)。分析图1中曲线, 不同流态区的阻力系数分别用以下方程拟合^[1]:

$$\text{层流区: } K' = \frac{800}{R_e} \quad (4)$$

$$\text{紊流区: } K' = K_t \quad (5)$$

$$\text{过渡区: } K' = \frac{800}{R_e} + K_t \quad (6)$$

式中
$$K_t = \begin{cases} 1 & (\text{光滑的圆石})^{[1]} \\ 2 & (\text{半圆石块}) \\ 4 & (\text{尖棱石块}) \end{cases}$$

若把式(3)代入式(6)得

$$\frac{id_e g n^2}{V^2} = \frac{800}{R_e} + K_t \quad (7)$$

为了考虑大雷诺数时出现的非线性关系, 曾有过多种数学表达式^[2], 其中富许梅(Forchheimer)建议在达西定律的表达式后面加一个二次项去适应试验资料

$$i = AV + BV^2 \quad (8)$$

由式(7)可得

$$i = \frac{800\nu}{gd_e^2 n} V + \frac{K_t}{gd_e n^2} V^2 \quad (9)$$

对比式(8)及式(9)得

$$A = \frac{800\nu}{gd_e^2 n}$$

$$B = \frac{K_t}{gd_e n^2}$$

为了说明大雷诺数时出现渗压降与流速非线性关系的机理, 以前曾有人用开始出现紊流来解释。也有人试图以孔隙大小的不均匀性来解释, 但两者都无法说明现象变化的本质关系。为此, 另一些学者将偏离达西定律解释为惯性力的作用, 因为小雷诺数时, 运动以液体粘滞力作用为主, 保持粘滞力与流速成一次方的关系, 惯性力可略去不计。而在大雷诺数时, 惯性力已大到不可忽略的程度, 惯性力与流速成二次方的关系, 根据这种解释, 可将流动状态划分为四个不同的区域:

a) 层流区。流线相互平行, 无交叉, 流体流动阻力以粘滞力作用为主, 水头损失和流速成一次方关系。

b) 非线性层流区。渗流开始偏离达西定律, 惯性力的项和粘滞力相比已不可忽略。

c) 紊流过渡区。微观流速已出现脉动, 运动阻力以惯性力的作用为主, 但液体粘滞力的作用也不能完全忽略。

d) 完全紊流区。微观流速杂乱摆动, 运动阻力完全由惯性力支配, 水头损失与流速的平方严格成比例。

从图1中发现, 雷诺数 R_e 与阻力系数 K' 的关系曲线无突然变化的明显转折点, 是条逐渐过渡的光滑曲线, 这也是大颗粒孔隙中渗流不同于管流的地方。

渗流流态既然可以按雷诺数 R_e 的大小来分区, 那末就存在划分各流态区界的雷诺数,

一般认为

层流与非线性层流区的分界, $Re=5\sim 10$;

非线性层流与紊流过渡区的分界, $Re=90\sim 100$;

紊流过渡区到完全紊流区的分界, $Re=10^3\sim 10^4$ 。

根据以上粗颗粒孔隙间液体分区流动的机理, 即液体粘滞力与惯性力对液体运动阻力的影响关系, 并利用式(7), 就可求出各流区的渗流流速计算公式

层流区, $\frac{800}{Re} \gg K_t$, 忽略 K_t 得

$$V = \frac{gd_e^2 n}{800\nu} i \quad (10)$$

紊流区, $\frac{800}{Re} \ll K_t$, 忽略 $\frac{800}{Re}$ 得

$$V = n \left(\frac{gd_e}{K_t} \right)^{\frac{1}{2}} i^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

过渡区, 解式(9)得

$$V = \sqrt{\left(\frac{400\nu n}{d_e K_t} \right)^2 \frac{gd_e n^2}{K_t} i - \frac{400\nu n}{d_e K_t}} \quad (12)$$

或由式(7)得

$$V = n \sqrt{\frac{gd_e i}{800/Re + K_t}} \quad (13)$$

以上是本文提出的堆石体内渗流流速计算公式, 公式推导过程表明, 这些公式是建立在雷诺数 Re 与阻力系数 K' 关系的基础上的, 它的正确性已被大量的试验资料所证实^[1,3]。

4. 渗流模型相似与修正

决定过水堆石体内渗流的主要因素有: ①石料粒径 d ; ②级配; ③孔隙率 n ; ④水力坡降 i ; ⑤过水堆石体的体形轮廓。在重力相似模型中, 满足渗流相似的必要条件是原型与模型渗流流区相同。由于模型中石料已按模型比尺缩小, 渗流流速也相应降低, 在原型中具有水位比降的堆石体其渗流常属于紊流区, 而模型中为过渡区, 当渗压降很小时甚至会出现层流区。因为所属流区不同, 模型与原型之间也就不再符合重力相似。由此引起的差异, 人们常称之为“比尺效应”或“缩尺影响”。为了达到流区相同的目的, 除增大模型比尺外, 前人也有采用加大石块粒径及孔隙率 n 的方法, 但都有一定的限制。例如, 通过扩大块石粒径所取得的渗流相似与块石稳定试验相似是相悖的。

本文以试验资料为依据, 通过分析提出渗流比尺效应修正系数。设原型中渗流为紊流, 模型中渗流属过渡区(或层流区), 若以脚标 p , m 分别表示原型与模型, 然后将式(11)除以式(13), 则

$$\frac{V_p}{V_m} = \frac{n_p}{n_m} \sqrt{1 + \frac{800}{Re K_t} \sqrt{\frac{i_p}{i_m}} \sqrt{\frac{d_{ep}}{d_{em}}}} \quad (14)$$

在重力相似模型中, 一般模型石料系根据原型石料尺寸按模型比尺缩制后选用, 即彼此石料粒径满足以下关系:

$$\sqrt{\frac{d_{ep}}{d_{em}}} = L^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式中 L_r 为模型比尺。

将式(15)代入式(14)后得

$$\frac{V_p}{V_m} = \eta_0 L_r^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

$$\eta_0 = \frac{n_p}{n_m} \sqrt{1 + \frac{800}{R_e K_t}} \sqrt{\frac{i_p}{i_m}} \quad (17)$$

众所周知, 模型按重力相似设计, 原型与模型流速之间应保持模型比尺平方根的关系。但受缩尺影响, η_0 是一个大于1的数, 故称 η_0 为渗流比尺效应修正系数。为了进一步阐明 η_0 值的意义, 以下按流区进行讨论。

(a) 当模型中 $R_e < 10$ 时, $800/(R_e K_t) \gg 1$, 利用式(17)求得的 η_0 值较大, 这相应于原型渗流为紊流而模型中属层流时的修正。 η_0 值愈大表示渗流流速按重力相似引伸的偏差亦愈大。

(b) 当模型中 $R_e > 10^3 \sim 10^4$, $1 \gg 800/(R_e K_t)$, 如 $n_p = n_m$, $i_p = i_m$ 即 $\eta_0 = 1$, 此时原型与模型同属紊流区, 过水堆石体的溢流与渗流均依从重力相似。

(c) 当模型处在过渡区而原型为紊流区时, η_0 值介于上述两者之间。

5. 结 论

过水堆石体的渗流问题在工程中常见, 迄今尚缺乏足够的研究。本文以试验资料为依据并利用雷诺数与阻力系数的关系, 提出适用于各渗流流区的计算公式及渗流模型比尺效应修正系数。公式简单、概念清楚、可供今后过水堆石体模型试验及工程过水保护设计时参考。

参 考 文 献

1. David Stephenson. Rockfill in Engineering, Amsterdam Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
2. 沙金焯. 多孔介质中的渗流和管涌. 南京水利科学研究所研究报告汇编(水工研究分册, 渗流部分). 1966~1978.
3. 胡去劣, 李屏君. 天生桥堆石坝施工期渡汛过水试验研究. 水利水运科学研究. 1991, (4).

Seepage of Overflow Rockfill and Models Simulation

Hu Qu-lie

(Nanjing Hydraulic Research Institute)

Abstract

On the basis of experimental data and the relationship between Reynolds number R_e and seepage drag coefficient K' , formulas for seepage velocity, velocity coefficient and the modifying factor for scale effect of seepage models simulation, for all seepage zones are presented. They can be used in seepage flow calculation and extension of experimental data to prototype.