

# 管涌发生后临界水力梯度研究

戴双庆, 陈建生, 陈亮, 白兰兰  
 河海大学岩土工程研究所, 江苏南京 (210098)

E-mail: [sixisixi1808@126.com](mailto:sixisixi1808@126.com)

**摘要:** 对管涌发生后的临界水力梯度进行分析, 在管涌发展过程中, 由于细小颗粒被渗透水流带出, 土体的孔隙率和等效粒径都将发生变化。通过对土体中细小土颗粒的受力分析, 及孔隙率变化, 等效粒径的变化, 推出管涌发生后各单元小颗粒发生运动的临界水力梯度。

**关键词:** 管涌; 孔隙率; 临界水力梯度; 等效粒径

## 1. 无粘性土管涌抗渗强度研究现状

无粘性土的管涌临界水力梯度理论的研究到目前为止还不完全成熟, 主要是发生管涌的渗流机理还没有在理论上取得突破, 在试验上也很难准确测定, 且对管涌的判别也缺乏一个明确的标准。目前的临界水力梯度的确定通常是采用土的渗透变形试验进行测定, 还有一些理论和半经验计算方法, 以及根据可移动的土颗粒在水中的自重和渗流相平衡的原理得到公式。主要有伊斯托敏娜方法<sup>[1]</sup>、康德拉且夫方法<sup>[1]</sup>、吴良骥公式<sup>[2]</sup>、沙金焯公式<sup>[3]</sup>、刘杰公式<sup>[1]</sup>等, 其中后两个被有关规范<sup>[4]</sup>推荐使用。

## 2. 管涌发生后临界水力梯度研究

### 2.1 堤基土体的结构构成假设

为方便研究管涌发展过程, 可以假设堤基土体是由大小两种粒径球形颗粒组成, 粗颗粒(骨架颗粒, 不移动)粒径为  $d_1$ , 细颗粒(填充的细颗粒, 可移动)粒径为  $d_2$ , 其密度为  $\rho$ , 粗颗粒互相接触, 组成土体的骨架, 细颗粒则填充与粗颗粒形成的孔隙中, 可以在孔隙中移动。

### 2.2 经过 $\Delta t$ 时间, 单元细砂量的变化

当管涌发生时, 堤基中的水力坡降达到或者超过细砂启动的临界坡降, 细砂在渗透水流的作用下将会发生移动, 向管涌口移动, 并被渗透水流带出。

在多孔介质中, 细砂的流动速度与水流速度成正比关系<sup>[5]</sup>

$$u_s = \delta u_w \quad (1)$$

其中  $u_s$  为细砂的流动速度,  $u_w$  为水流速度,  $\delta$  为比例系数。

可以设堤基单元划分如图 1 所示, 单元的上下两边与流线相重合, 左右两邻边与等势线相重合<sup>[5]</sup>。我们取其中径向的第  $i$  单元进行研究。

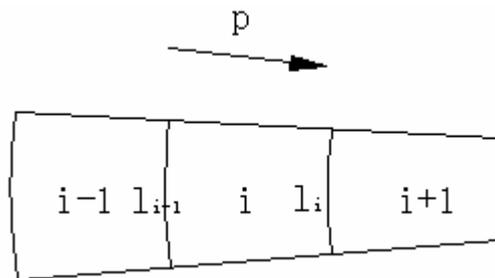


图 1 堤基单元划分图

取第  $i$  单元为研究对象, 在单位时间  $\Delta t$  内第  $i$  单元内流出的细砂量体积:

$$V_i = \delta u_{wi} l_i \Delta t = \delta k_i J_i l_i \Delta t$$

在单位时间  $\Delta t$  内第  $i$  单元内流入的细砂量体积:

$$V_{i-1} = \delta u_{w(i-1)} l_{i-1} \Delta t = \delta k_{i-1} J_{i-1} l_{i-1} \Delta t$$

则在单位时间  $\Delta t$  内, 第  $i$  单元细砂减少的体积为:

$$\Delta V_i = V_i - V_{i-1} \quad (2)$$

### 2.3 堤基土中孔隙率变化研究

取单位土体研究, 设未发生管涌时原来堤基土体的初始孔隙率为  $n$

$$n = V_v / V$$

其中：  $V_v$  为土中孔隙的体积

$V$  为单位土体的总体积

经过  $\Delta t$  时间后，由于细颗粒的流出，流出的细颗粒所占的体积都变为孔隙，则变化后各个单元的孔隙率为：

$$n' = \frac{V_v + \Delta V}{V} = \frac{V_v}{V} + \frac{\Delta V}{V} = n + \frac{\Delta V}{V} \quad (3)$$

其中：  $n'$  为经过  $\Delta t$  时间后各个单元的孔隙率；  $\Delta V$  各个单元细砂减少的体积

### 2.4 堤基土中等效粒径计算

管涌发生  $\Delta t$  时间后，由于细颗粒的流出，堤基的等效粒径也将发生变化，可用平均粒径法计算，本文用柯森法<sup>[3]</sup>计算：

$$\frac{1}{d_\theta} = \frac{g_2 - \rho \Delta V}{d_2} + \frac{3}{2} \frac{g_1}{d_1}$$

则有：

$$d_\theta = \frac{2d_1d_2}{2d_1g_2 - 2\rho\Delta Vd_1 + 3d_2g_1} \quad (4)$$

其中：  $g_1$ ，  $g_2$  为原来堤基土中粗细两种粒径颗粒的重量。  $d_1$ ，  $d_2$  为粗细两种颗粒的粒径大小。

### 2.5 管涌发生 $\Delta t$ 时间后，临界水力梯度推导

管涌过程中，细颗粒在渗透水流的作用下，克服阻力发生起动，在孔隙中移动并被带出土体。这是管涌发生的动力条件。现取孔隙中的细颗粒来研究该动力条件。

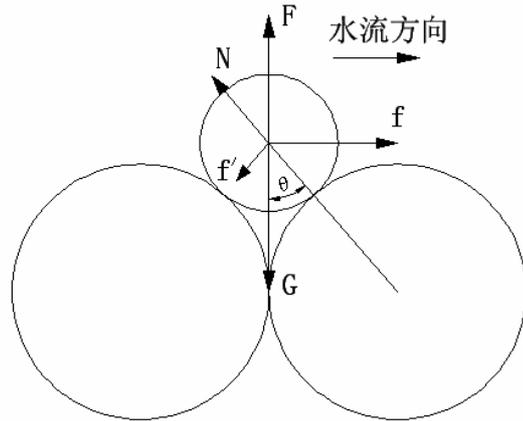


图 2 细颗粒受力分析图

在土体中，细颗粒与周围粗颗粒相接触，受力分析如图 2，细颗粒在渗透水流中受到五个力：颗粒自重  $G$ ，浮力  $F$ ，渗透力  $f$ ，周围颗粒的作用力  $N$  及摩擦力  $f'$ 。

#### 2.5.1 单颗粒上的渗透力

渗透力通常是指单位土体的渗透力： $P = \gamma_w J$ ，其大小与水力梯度成正比，其作用方向与渗流方向一致，是一种体积力<sup>[6]</sup>。但每个颗粒上所受到的渗透力有  $f$  多大，至今无法直接测定。

设有一土体，高为  $l$ ，截面积为  $a$  渗流由下向上，则作用在该土体上的动水压力为  $P$ ： $P = a\gamma_w \Delta h$

式中  $\gamma_w$  为水容重， $\Delta h$  为渗流通过该土体的水头差。由水力学原理可知，水流在管道内流动时，其作用力必然与水流和管壁薄膜间的摩阻力相平衡，今若以  $\tau_0$  代表单位面积摩阻力， $s$  代表孔隙管道的总表面积，则渗流通过此土体孔隙管道的总阻力  $\tau$  为：

$$\tau = \tau_0 s \quad (5)$$

根据作用力  $P$  与总阻力  $\tau$  相平衡，则得： $\tau_0 = a\gamma_w \Delta h / s$  (6)

这里  $\tau_0$  在数值上是渗流对单位管壁面积的作用力而方向相反。若近似地假定土体中任一颗粒具有球形表面积（粒径为  $d$ ），则渗流对此颗粒的作用力，即作用在单颗粒

上的渗透力为  $f = \alpha\gamma_w\Delta h\pi d^2/s$  (7)

其中总表面积  $s = 6\alpha(1-n)al/d_\theta$ ，式中  $\alpha$  为形状系数，对各种砂粒  $\alpha=1.16\sim 1.17$  对于锐角颗粒  $\alpha=1.50\sim 1.67$ 。 $d_\theta$  为土体的等效粒径。则有渗透力<sup>[3]</sup>

$$f = \gamma_w J \pi d^2 d_\theta / 6\alpha(1-n) \quad (8)$$

其中  $J = \Delta h/l$

### 2.5.2 颗粒自重

$$G = \frac{1}{6} \pi d_2^3 \gamma_s \quad (9)$$

### 2.5.3 浮力

$$F = \frac{1}{6} \pi d_2^3 \gamma_w \quad (10)$$

### 2.5.4 周围颗粒的作用力

$$N = f \sin \theta + (G - F) \cos \theta \quad (11)$$

### 2.5.5 摩擦力

$$f' = N \tan \phi \quad (12)$$

其中摩擦角  $\phi$  一般可取  $20^\circ - 35^\circ$

考虑细小颗粒切向的移动，令渗透力与阻力相等，根据这些力的平衡可得到临界水力梯度：

$$J_{cn} = \alpha(1-n) \frac{\tan \theta + \tan \phi}{1 - \tan \theta \tan \phi} \frac{d_2}{d_\theta} \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (13)$$

又  $\tan(\theta + \phi) = \frac{\tan \theta + \tan \phi}{1 - \tan \theta \tan \phi}$ ，上式变为：

$$J_{cn} = \alpha(1-n) \tan(\theta + \phi) \frac{d_2}{d_\theta} \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (14)$$

将经过  $\Delta t$  时间后，堤基土的孔隙率和等效粒径都将发生变化，将变化后堤基土的孔隙率 (3) 和等效粒径 (4) 代入

$$J_{cn} = \alpha \left(1 - n - \frac{\Delta V}{V}\right) \tan(\theta + \phi) \frac{2d_1 g_2 - 2\rho \Delta V d_1 + 3d_2 g_1}{2d_1} \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (15)$$

15) 该式即为管涌发生后，考虑细颗粒流失对土体孔隙率及等效粒径影响的临界水力梯度公式。

通过公式 (15) 可见管涌发生后的临界

水力梯度变化与流出的细颗粒  $\Delta V$  存在着某种函数关系，即与该时刻的细颗粒含量的关系。计算该时刻的细颗粒含量为：

$$S = \frac{g_2 - \rho \Delta V}{g_1 + g_2 - \rho \Delta V} \times 100\% \quad (16)$$

将上式化为  $\Delta V = \frac{g_2 - S(g_1 + g_2)}{\rho(1-S)}$  并

带入公式 (15) 可得：

$$J_{cn} = \alpha \left(1 - n - \frac{g_2 - S(g_1 + g_2)}{\rho V(1-S)}\right) \tan(\theta + \phi) \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \times \frac{2d_1 g_2 - 2d_1(g_2 - S(g_1 + g_2)) / (1-S) + 3d_2 g_1}{2d_1} \quad (17)$$

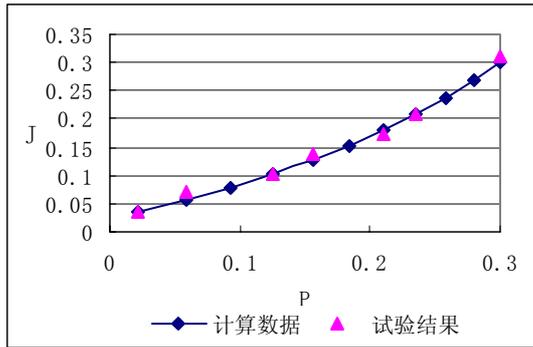
## 3. 试验验证

为了验证该公式的正确性，取某无粘性土堤基，由粗细两种颗粒组成，粗颗粒  $g_1 = 0.70\text{kg}$ ， $d_1 = 10\text{mm}$ ，细颗粒  $g_2 = 0.30\text{kg}$ ， $d_2 = 0.4\text{mm}$ ，粗细两种颗粒的密度  $\rho = 1.9\text{g/cm}^3$ ， $\gamma_s = 26\text{g/cm}^3$  初始孔隙率  $n = 0.283$ ，取  $\alpha = 1.6$ ， $\theta = 5^\circ$ ， $\phi = 20^\circ$  进行计算，并进行试验验证，计算和试验结果见表 1：

表 1 计算结果

实验的临界水力梯度 $J_{cn}$	细颗粒含量 $S\%$	临界水力梯度 $J_{cn}$
0.311	30	0.302
	28	0.270
	26	0.238
0.207	23	0.208
0.173	21	0.180
	18	0.152
0.138	16	0.126
0.104	13	0.101
	9	0.078
0.069	6	0.056
0.035	2	0.036

绘制  $J_{cn} \sim S$  曲线，如图 3：

图3 J<sub>cn</sub>~S

由表1及图3可见,随着细颗粒不断被渗透水流带出,土体中的孔隙不断增大,即 $\Delta V$ 不断增大,土体中的细颗粒含量 $S$ 不断减少,这引起了细小颗粒发生移动的临界水力坡降 $J_{cn}$ 的变化,临界水力坡降随着细颗粒含量的降低而不断变小,且细颗粒含量越小,其临界水力坡降下降的速度越慢。图3中绘制的实验数据也在该曲线上下,进一步验证了公式(15)较正确,符合管涌发生后临界水力梯度变化的规律。

#### 4. 总结

在管涌发生以后,水力梯度达到或超过初始状态下的临界水力梯度,细颗粒在渗透水流带动下发生起动,向管涌口移动,并被水流带出,引起土体孔隙率及等效粒径的

化,则细颗粒发生移动的临界水力梯度也发生改变。堤基各处土体的临界水力梯度随细颗粒流出而不断变小,且由于水流速度的不均匀,各个单元发生移动的细颗粒量也是不等的,则各个单元内细颗粒发生移动的临界水力梯度也是不相等的。所以堤基土的临界水力梯度不是一成不变的,而是不断变化的。据此,我们在研究管涌渗流的时候,应考虑堤基土的临界水力梯度是随管涌发生过程不断变化的,这对我们研究渗漏通道的形成,管涌影响范围将产生影响。也为我们汛期时有效的控制管涌险情的发展提供了理论依据。

#### 参考文献

- [1] 刘杰,土的渗透稳定与渗流控制,[M],北京,水利水电出版社,1992年,53~59
- [2] 吴良骥,无粘性土管涌临界坡降的计算,[J],水利水运科学研究,1980年第四期,90~95
- [3] 沙金焯,多孔介质中的管涌研究,[J],水利水运科学研究,1981年第三期,89~93
- [4] GB 50287-99,水利水电工程地质勘察规范[S]
- [5] 焦月红,无粘性土渗透破坏机理及坝基渗漏通道探测方法研究,[J],2002年,21~25
- [6] 卢廷浩,土力学,[M],河海大学出版社,2002年,80

## Research in critical hydraulic gradient after piping started

Dai Shuangqing, Chen Jiansheng, Chen Liang, Bai Lanlan  
Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing (210098)

#### Abstract

An analysis was given about critical hydraulic gradient after piping started. The porosity and equivalent diameter of soil will be changed because of the flowing of small grains in the process of piping. We can get the critical hydraulic gradient with the analysis of the force on small grains and the change of porosity and equivalent diameter.

**Keywords:** piping; porosity; critical hydraulic gradient; equivalent diameter

**作者简介:**戴双庆,男,1982年生,汉族,江苏省南通人,河海大学岩土工程在读硕士研究生,主要从事管涌及渗流方面的研究。