

文章编号:1671-6833(2003)04-0067-05

无粘性土中管涌的临界水头梯度研究

刘忠玉

(郑州大学土木工程学院,河南 郑州 450002)

摘要:将管涌型无粘性土中的颗粒分为骨架颗粒、阻塞颗粒和可动颗粒三组,在分析骨架孔隙中可动颗粒受力的基础上,将总压力降分为骨架孔隙壁引起的压力降、骨架孔隙中静止颗粒引起的压力降及正在运动的颗粒引起的压力降三部分,从而得到了可动颗粒起动的临界水头梯度公式.对管涌试验的校验证实了该公式的有效性.计算结果表明:当有细颗粒流失后,级配不连续的管涌型土比级配连续的管涌型土更易发展成管涌破坏.同时还证实:随着可动颗粒的流失,管涌破坏可以转化为流土破坏.

关键词:无粘性土;管涌;临界水头梯度;颗粒级配

中图分类号:TV 139.11

文献标识码:A

0 引言

土体中的细颗粒在渗流作用下,由骨架孔隙通道流失的现象称为管涌^[1].由于它会对地基产生渐进性的破坏,已引起许多学者对于无粘性土中发生管涌时临界水头梯度的重视.文献^[2]曾对目前常用的方法作过总结,主要有:伊斯托敏娜公式、吴良骥公式^[3]、刘杰公式和沙金煊公式^[4]等,其中后两个被有关规范推荐使用^[5].这些公式基本上都是根据可移动的土颗粒在水中的自重和渗流力相平衡的原理得到的.此外,也有人利用容许全局水头梯度的概念来判断不透水堤坝下的土体发生管涌的可能性^[3].

尽管上述方法在实践中应用很广,但有关管涌的理论研究至今尚不成熟,其原因主要是发生管涌的渗流机理还没有在理论上突破,而且实验也很难测准^[3].

本文拟在该方面作进一步探讨.首先用文献^[6]方法区分骨架颗粒和松散颗粒,用文献^[7]的毛管模型描述骨架孔隙,从而将松散颗粒细分为阻塞颗粒和可动颗粒,并认为管涌过程中被冲出土体的仅是可动颗粒,然后分析可动颗粒在骨架孔隙中的运动和受力情况,得到了颗粒起动的临界水头梯度.并用文献^[8]的管涌实验进行了验证.

1 无粘性管涌型土的颗粒组成和骨架孔隙

一般将无粘性管涌型土的颗粒分为骨架颗粒和松散颗粒^[1~4].二者之间的界限颗粒 x_a 可用文献^[9]的颗粒孔隙链索模型计算.该模型建立了孔隙比 e 与颗粒级配曲线 $y(x)$ 之间的关系:

$$e = 2 \cdot c_1 \cdot \frac{A_a}{B_a} - y_a + 2 \cdot c_2 \cdot (1 - y_a) \quad (1)$$

式中:系数 c_1 和 c_2 分别表示颗粒形状和土体密实度的影响系数; A_a 和 B_a 定义为

$$A_a = \int_{y_a}^1 \frac{y}{x(y)} dy - y_a \cdot \int_{y_a}^1 \frac{dy}{x(y)} \quad (2)$$

$$B_a = \int_{y_a}^1 \frac{dy}{x(y)} \quad (3)$$

式中: y 为小于某粒径 x 的含量,以小数表示; y_a 表示松散颗粒的含量,即区分骨架颗粒及松散颗粒的界限粒径 x_a 对应的纵坐标.而后者可由下式确定

$$x_a = \frac{2c_1}{2c_1 + 1 + 2c_2} \cdot \frac{A_a}{B_a^2} \quad (4)$$

因为式(4)的等号右边也含有 x_a ,所以 x_a 的求解可采用试算法或迭代法.但是粒径小于 x_a 的松散颗粒并不一定都可以被冲出土体,这由下面的分析可以看出.

考虑仅由骨架颗粒组成的假想土体,其中的孔隙率为

收稿日期:2003-08-21;修订日期:2003-09-26

基金项目:郑州大学青年骨干教师基金资助项目

作者简介:刘忠玉(1968-),河南省延津县人,郑州大学副教授,博士,主要从事岩土力学方面的教学和科研工作.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$n_a = \frac{e + \gamma_a}{1 + e} \tag{5}$$

为了描述骨架孔隙,采用文献[7]建议的有两个不同截面的毛管模型(图1),这里骨架孔隙的最小直径 d_1 和最大直径 d_2 为

$$d_1 = \frac{8n_a}{3(1-n_a)} \frac{D_h}{\alpha} \tag{6}$$

$$d_2 = 1.86d_1 \tag{7}$$

式中: α 表示土颗粒的形状系数; D_h 表示骨架颗粒的有效粒径.

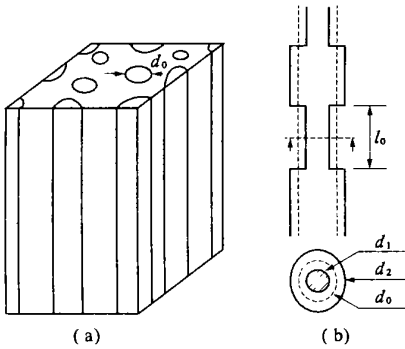


图1 截面孔隙模型

Fig.1 Variable-section capillary model for pores

$$D_h = \left(\sum \frac{\Delta S_i}{D_i} \right)^{-1} \tag{8}$$

式中: ΔS_i 表示骨架颗粒中第 i 粒组的质量含量; D_i 表示该粒组的代表粒径.

很明显,骨架孔隙的最小粒径 d_1 有可能小于界限粒径 x_a ,这意味着松散颗粒不一定都可以被移出土体.我们把可以被移出土体的松散颗粒称为可动颗粒,不能被移出土体的称为阻塞颗粒.实际上后者仅在骨架孔隙的一定范围内移动,甚至可能堵塞孔隙,阻止其它松散颗粒的移动.例如图2所示的骨架孔隙中,颗粒a为阻塞颗粒,颗粒b为可动颗粒.所以无粘性土中能否发生管涌应看其中是否存在以及存在多少可动颗粒.

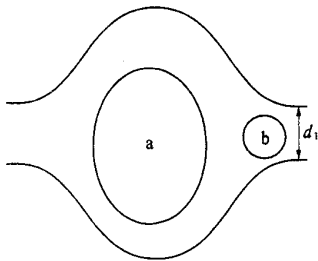


图2 骨架孔隙中的阻塞颗粒与可动颗粒

Fig.2 Clogging and movable grain in a skeleton pore

2 单个可动颗粒的受力分析

骨架孔隙中的可动颗粒受到的力有:渗流水流的拖曳力、水下重力、与孔隙壁之间的摩擦力和颗粒与颗粒之间的相互作用力(包括碰撞力、双电场力等).当仅考虑自下而上的渗流时,只有可动颗粒所受到的拖曳力为起动力,其它力都为阻力.当可动颗粒离开孔隙壁后,摩擦力就不存在,因此,从保守的角度讲,可以不计此力.另外,颗粒与颗粒之间的相互作用力是十分复杂的,不过由于一般情况下,可动颗粒的含量比较少,所以,我们可以假定骨架孔隙中水与可动颗粒组成的混合物为稀薄系统(dilute system),这样就可以忽略其中颗粒与颗粒之间的相互作用力.那么,阻止颗粒起动的仅仅是它的水下重力,即^[9]

$$G = (\gamma_s - \gamma_w) \cdot \frac{4}{3} \pi a^3 = 6\pi \eta a U_{TS} \tag{9}$$

式中: γ_w 和 γ_s 分别为水和土颗粒的重度; U_{TS} 是无界静止流体中半径为 a 颗粒的最终沉降速度,即

$$U_{TS} = \lambda \frac{2(\gamma_s - \gamma_w) a^2}{9\mu} \tag{10}$$

式中: λ 为非圆球颗粒的修正系数,一般在0.85~1之间; μ 为颗粒-流体系统的表观粘滞系数,它不同于纯流体的粘滞系数,在零阶近似(即不考虑颗粒之间的相互作用)时,二者之间的关系为^[9]

$$\mu = \mu_s(1 + 2.5s) \tag{11}$$

式中: s 为流体中的颗粒组分(体积含量).所以,问题就剩下如何合理地计算拖曳力.

实际上,当用变截面直毛管模型描述骨架孔隙时,可动颗粒在其中的运动类似于颗粒在圆管流体中的移动.而在半径为 R_0 的Poiseuille圆管中,距圆管中心为 b 的单个颗粒以速度 U 沿轴向运动(见图3)时所受到的拖曳力 F 以及由颗粒引起的压力降 ΔP_s 的零阶近似为^[9]

$$F = 6\pi \eta a \left[U_0 \left(1 - \frac{b^2}{R_0^2} \right) - U \right] \tag{12}$$

$$\Delta P_s = \frac{12\eta a}{R_0^2} \left(1 - \frac{b^2}{R_0^2} \right) \left[U_0 \left(1 - \frac{b^2}{R_0^2} \right) - U \right] \tag{13}$$

式中, U_0 为圆管中心处流体的流速.当颗粒受力平衡时,令 $F=G$,则

$$U = U_0 \left(1 - \frac{b^2}{R_0^2} \right) - U_{TS} \tag{14}$$

另外,仅由管壁的摩擦引起的压力降为

$$\Delta R_0 = \frac{8\mu}{R_0^2} \cdot U_m l \tag{15}$$

式中: U_m 为流体的平均流速, $U_m = U_0/2$; l 为圆管的长度. 所以, 总压力降应为式(13)和(15)之和.

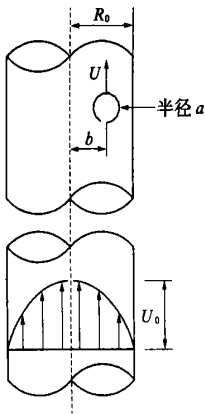


图 3 圆管中的颗粒和液体的运动
Fig. 3 Particle and fluid motion in a circular cylinder

3 骨架孔隙中可动颗粒起动的临界水头梯度

假定所有土颗粒的密度相同, 且可动颗粒在骨架孔隙中均匀分布, 并设松散颗粒占土颗粒的总含量为 S . 将可动颗粒从细到粗分为 M 个粒组, 记第 i 个粒组的代表粒径为 D_i , 半径为 a_i , 占土颗粒的含量为 S_i , 单位体积骨架孔隙中的颗粒数为 N_i . 由于单位土体积内第 i 个可动粒组的颗粒数为

$$N'_i = \frac{(1-n) S_i}{\frac{4}{3} \pi a_i^3} \tag{16}$$

那么, 该粒组在单位骨架孔隙体积内的颗粒数为

$$N_i = \frac{N'_i}{n_a} = \frac{(1-n) S_i}{\frac{4}{3} \pi a_i^3 [n + S(1-n)]} = \frac{3}{4 \pi a_i^3} s_i \tag{17}$$

其中, 该粒组在骨架孔隙中的体积含量 s_i 为

$$s_i = \frac{(1-n) S_i}{n + S(1-n)} = \frac{S_i}{e + S} \tag{18}$$

式中: e 为初始孔隙比.

设细骨架孔隙段的参考长度为 l , 首先考虑其中的第 i 可动粒组. 处于半径 R 和 $R+dR$ 之间的颗粒和水的混合体的体积为 $dV = l(2\pi R dR)$, 其中含有的第 i 可动粒组的颗粒数为 $N_i l(2\pi R dR)$, 由式(13)可得这些颗粒引起的压力降为

$$d(\Delta P_{si}) = N_i l(2\pi R dR) \left(\frac{12 \eta a_i}{R_1^2} \right) \left(1 - \frac{R^2}{R_1^2} \right) \cdot \left[(U_0 - U_i) - U_0 \frac{R^2}{R_1^2} \right] \tag{19}$$

式中 R_1 应取为 d_1 的一半. 从 $R=0$ 到 R_1 积分, 则细骨架孔隙段中第 i 可动粒组引起的压力降为

$$\Delta P_{si} = N_i l 8 \pi \eta a_i \left(U_m - \frac{3}{4} U_i \right) \tag{20}$$

很明显, 当第 i 可动粒组都不动, 即 $U_i = 0$ 时, 下式成立

$$\Delta P_{si}' = N_i l 8 \pi \eta a_i U_i \tag{21}$$

当第 i 可动粒组有颗粒被冲走时, 设单位时间内孔隙某断面该粒组颗粒的净通过量为 Ψ_i , 即

$$\int_0^{R_1} N_i U_i 2 \pi R dR = \Psi_i \tag{22}$$

设 U_{TSi} 是无界静止流体中第 i 可动颗粒的最终沉降速度, 并将式(14)代入上式, 可得

$$U_m - U_{TSi} = \frac{\Psi_i}{N_i \pi R_1^2} \tag{23}$$

这样, 由式(20)可得细骨架孔隙中第 i 可动粒组引起的压力降为

$$\Delta P_{si} = \frac{24 \pi \eta a_i l}{R_1^2} U_{TSi} \left[\frac{\Psi_i}{2 \pi U_0} + \frac{U_{TSi} N_i R_1^2}{2 U_0} \right] \tag{24}$$

若该粒组正好没有颗粒的净迁移, 即 $\Psi_i = 0$, 式(23)化为

$$U_m = U_{TSi} \tag{25}$$

则式(24)可化为

$$\Delta P_{si} = 12 \pi \eta a_i N_i \frac{U_{TSi}^2}{U_0} = 6 \pi \eta a_i N_i U_m \tag{26}$$

设第 $k-1$ 可动粒组已经流失, 研究第 k 可动粒组的起动. 第 k 可动粒组引起的压力降可由上式确定. 由于第 $k+1$ 到 M 可动粒组都不动, 参照式(21), 它们引起的压力降为

$$\Delta P_s' = 8 \pi \eta U_m \sum_{j=k+1}^M N_j a_j \tag{27}$$

所以, 将式(15)、(26)和(27)相加可得总压力降为

$$\Delta P = \left(\frac{1}{R_1^2} + \frac{3}{4} N_k \pi a_k + \pi \sum_{j=k+1}^M N_j a_j \right) \cdot 8 \eta U_m \tag{28}$$

即第 k 粒组起动的临界条件是

$$I_{1k} = \left(\frac{1}{R_1^2} + \frac{3}{4} N_k \pi a_k + \pi \sum_{j=k+1}^M N_j a_j \right) \cdot \frac{8 \mu}{\gamma_w} U_m \tag{29}$$

考虑到式(25), 并将式(10)和(17)代入上式, 可得

$$I_{1k} = \lambda \left\{ \frac{16}{9} \left(\frac{a_k}{R_1} \right)^2 + s_k + \frac{4}{3} \sum_{j=k+1}^M \left[\left(\frac{a_j}{a_j} \right)^2 \cdot s_j \right] \right\} \cdot (d_s - 1) \tag{30}$$

当分组较多时, 上式中的 s_k 项很小, 可忽略不计. 假定粗细骨架孔隙的长度相等, 根据流量相等, 且考虑到式(7), 易得总的临界水头梯度 I_{crk} 为

$$I_{crk} = 0.542 I_{1k} \tag{31}$$

4 算例及分析

文献[8]自配了四种砂土(A,B,C和D),其级配见图4,土样高度155 mm,置于内径139 mm的透明圆管内,土样下端放置有过滤层,水流自下而上,并在土样的几个适当高度处设置测压管,量测孔隙水头.在整个试验过程中,水温保持在20℃.其中土样A的颗粒级配不连续,而土样B的级配连续.实验表明土样A和B发生了管涌,临界水头梯度分别为0.20和0.34.

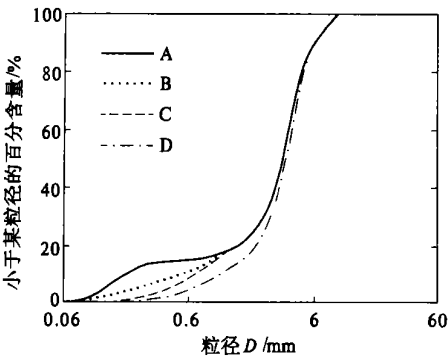


图4 试样的颗粒级配曲线

Fig.4 Grain size distribution curves of soil samples

在用本文方法对土样A,B进行理论计算时,取 $d_s=2.65$, $\lambda=0.93$, $\alpha=12$,其它参数见表1.首先计算了它们的界限粒径 x_a 、骨架孔隙最小直径

表1 土样参数

Tab.1 Parameters of soil samples

| 土样 | $n/\%$ | C_u | c_1 | c_2 | x_a/mm | d_1/mm | 可动颗粒含量/ $\%$ | 阻塞颗粒含量/ $\%$ |
|----|--------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|
| A | 34 | 24 | 0.8 | 0.098 | 1.0 | 0.568 | 15.00 | 0 |
| B | 37 | 10.00 | 0.8 | 0.128 | 0.431 | 0.417 | 8.72 | 0.18 |

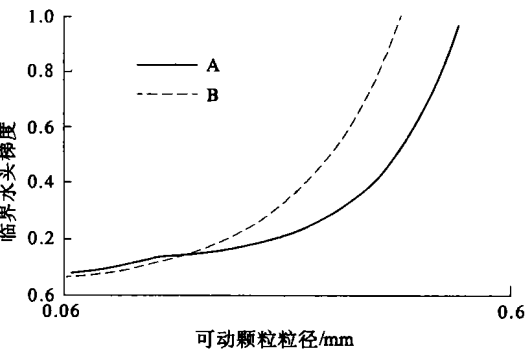


图5 可动颗粒起动的临界水头梯度

Fig.5 Critical hydraulic gradient for movable grains' incipient motion

另外,由图5和6可以看出,随着可动颗粒的流失,流失颗粒粒径逐渐增大,颗粒起动所需要的

d_1 、可动颗粒以及阻塞颗粒含量,结果示于表1.可见这两种土样中可动颗粒的含量是比较多的,均大于5%,因此应为管涌型土.

然后,计算了土样A和B的每种可动颗粒的起动临界水头梯度(图5).可以看出,对同一粒径,不同土样的起动临界水头梯度是不一样的,这反映出临界水头梯度与土体的颗粒级配有很大关系.把图5的横坐标换为对应于该粒径的百分含量,即颗粒的流失量,可画成图6.由此二图可以看出,土样A的曲线明显缓于土样B.这意味着对土样A来说,当一定的水力条件使得细小颗粒流失后,仅需小幅度地增大水头梯度,就可使更粗大的可动颗粒流失.而土样B却不是这样,粗大颗粒的流失需要较大幅度地增大水头梯度.这种现象应与土体颗粒级配的连续性有关:土样A的颗粒级配缺失中间粒径,而土样B的颗粒级配曲线是连续的.所以,对于级配不连续的土体,当有小颗粒移动时,要严格限制水头梯度的增长,否则将可能很快造成管涌破坏;对于级配连续的土体来说,细小颗粒的微小移动,并不会很快造成管涌破坏,它需要较大的水头梯度.因此,从安全角度考虑,对于颗粒级配不连续的土体取用的安全系数要大于级配连续的土体.

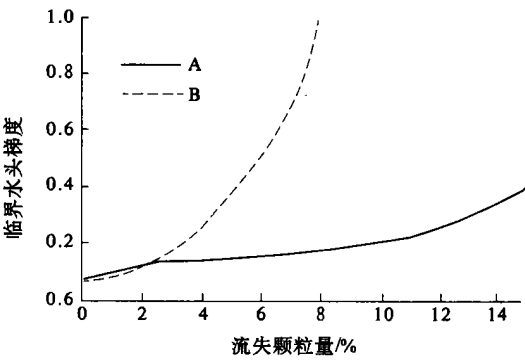


图6 流失颗粒量与起动临界水头梯度的关系

Fig.6 Relationship between washout and critical hydraulic gradient

水头梯度越来越大,甚至可以接近于1,后者是土体发生整体破坏即流土所需要的水头梯度.这意

味着渗透破坏的形式发生了变化,也就是说,当可动颗粒减少到一定程度,管涌破坏将变成流土破坏.

我们知道,管涌的发生尽管是从较小颗粒流失开始的,但是若在实际工程中,严格要求没有任何颗粒的移动实际上是太保守了.即使有细小颗粒的流失,只要数量很少,对工程的安全使用是没有影响的.所以,可认为某一定量的颗粒流失时对应的水头梯度为管涌临界水头梯度^[3,4].对土样 A 和 B,本文取 5% 的颗粒流失为管涌临界条件,结果见表 2.可见与文献[8] 的实验结果相当接近.

| 表 2 管涌临界水头梯度的计算和实验结果 | | |
|---|------------|--------|
| Tab.2 Results of experiments and Calculation for critical hydraulic gradient for piping | | |
| 土样 | 文献[8] 实验结果 | 本文计算结果 |
| A | 0.20 | 0.15 |
| B | 0.34 | 0.38 |

5 结论

本文通过分析可动颗粒在骨架孔隙中的运动和受力,得到了管涌发生的临界水头梯度公式.计算结果与有关文献中的试验基本一致.

通过分析可动颗粒起动的临界水头梯度发现,对于级配连续土,细小颗粒流失后,较大颗粒的起动需要较大的水头梯度,而对于级配不连续

土,细小颗粒流失后,稍微增大水头梯度,较大颗粒就可起动.因此从安全角度看,为防止管涌破坏,要严格限制级配不连续土中的水头梯度,且其安全系数的取值要大于级配连续土.另外还证实,随着可动颗粒的流失,管涌破坏可转化为流土破坏.

参考文献:

[1] GB 50287—99,水利水电工程地质勘察规范[S].
[2] 陶同康.土工合成材料与堤坝渗流控制[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
[3] 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,(4):90~95.
[4] 沙金焯.多孔介质中的管涌研究[J].水利水运科学研究,1981,(3):89~93.
[5] MEYER W, SCHUSTER R L, SABOL M A. Potential for seepage erosion of landsilde dam[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, 120(7): 1211~1229.
[6] ABERG B. Void ratio of noncohesive soils and similar materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1992, 118(9): 1315~1334.
[7] KOVACS G. Seepage hydraulics [M]. New York : Elsevier Scientific Publishing Company , 1981.
[8] KEMPTON A W, BROGAN J M. Experiments on piping in sandy gravels [J]. Geotechnique , 1994, 44(3): 449~460.
[9] HAPPEL J, BRENNER H. Low Reynolds Number Hydrodynamics [M]. Leyden : Noordhoff , 1973.

Critical Hydraulic Gradient for Piping in Noncohesive Soils

LIU Zhong-yu

(College of Civil Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002, China)

Abstract : In this paper , the grains of piping -typed noncohesive soils are classified into three groups : skeleton , movable and clogging . Based on the analysis of the forces acting on movable grains , the pressure drop is ascribed to the wall of skeleton pores , the at -rest grains and moving ones in skeleton pores , and therefore a formula of critical hydraulic gradient for movable grains ' incipient motion is obtained . Its application to some examples of piping tests gives reasonable results in comparison to the experimental observations . The calculated results show that , after some fines is washed out , piping failure more easily takes place in the piping -typed soil with a bimodal grain -size -distribution than in the soil with the uni modal grain -size -distribution . In addition , it also proves that the piping failure can turn into soil -flow failure with the washout of movable grains .

Key words : noncohesive soil ; piping ; critical hydraulic gradient ; grain -size distribution