DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.02.004

无黏性土管涌的临界流速

赵正信[1],陈建生[1],陈　亮[1],叶合欣[2]

(1.河海大学岩土工程研究所,江苏 南京　210098;2.河海大学科学研究院,江苏 南京　210098)

摘要 根据多孔介质中的变截面管模型,分析单个颗粒在孔隙通道中的受力情况,建立力的平衡方程,从而推导出管涌发生时的水流临界流速公式。结合试验对该公式进行了验证,当作用于水流的拖曳力与静水压力的作用大于阻碍其运动的作用时,认为可动颗粒开始起动。算例分析表明,运用临界流速公式能够准确地预测土体的管涌破坏。

关键词 无黏性土;管涌;临界流速;颗粒级配;孔隙率

中图分类号 P641.2;TV698.2+33　　**文献标识码** A　　**文章编号** 1006-7647(2008)02-0013-03

Critical hydraulic velocity for piping in non-cohesive soils//ZHAO Zheng-xin[1], CHEN Jian-sheng[1], Chen Liang[1], YE He-xin[2]

(1. *Geotechnical Research Institute of Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *Research Institute of Science and Technology*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: Using a variable-section tube model through porous media, forces acting on a single particle in the pore channel were analyzed, and a critical hydraulic velocity formula for piping occurring in non-cohesive soil was deduced from the force balance equation. The formula was verified by experiments under the assumption that removable particles will be initiated when the actions of tractive stress on water flow and hydrostatic pressure exceed the retarding forces. A case study shows that failure type can be precisely estimated by use of the critical hydraulic velocity formula.

Key words: non-cohesive soil; piping; critical hydraulic velocity; grain-size distribution; porosity

管涌是指土体中的细颗粒在渗流作用下从骨架孔隙通道流失的现象[1]。由于管涌会对堤防或地基产生破坏,在学术界一直受到许多专家学者的重视。关于管涌破坏,前人已做了相当多的研究,得到许多有用的结论,如吴良骥[2]、沙金煊[3]、刘忠玉等[4]分别得出了各自的无黏性土管涌的临界坡降公式,陈建生等[5]则对堤防产生集中渗流通道机理进行了详细的分析,并得出了管涌发生后土层中各点水力坡降的计算公式。本文针对无黏性土建立了孔隙通道管模型,然后考虑颗粒在孔隙通道中所受力的平衡建立方程,推导出管涌发生时的临界流速。从临界流速的角度对无黏性土的管涌破坏进行分析,讨论避开了土层中渗透系数不均匀的影响,公式中只考虑了土粒的颗粒级配、孔隙率、土粒密度等几个可变参数,对工程实际来说,应用这样的公式确定土体的管涌破坏是方便和有效的。

1　颗粒孔隙通道的物理模型

为了从粒径分布曲线上计算平均孔隙直径 d_1,引入有效粒径的概念。如图 1 所示,假设土体颗粒具有相同的形状,土体颗粒的有效直径可以由式(1)给出[6-7]:

$$D_h = \frac{1}{\sum \frac{\Delta S_i}{D_i}} \tag{1}$$

式中:ΔS_i 为土体颗粒中第 i 粒组的质量;D_i 为该粒组的代表粒径。

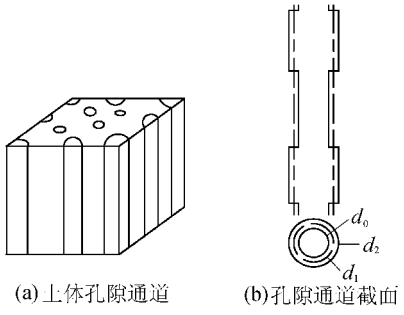

图 1　变截面管孔隙通道模型

进一步考虑颗粒形状为非球圆形,引入颗粒形状系数 β,对于球形颗粒 β 取值为 6。假设当颗粒粒

基金项目:国家自然科学基金(50579017)

作者简介:赵正信(1979—),男,江苏江都人,硕士研究生,从事地下水渗流研究。E-mail:zxzhao@hhu.edu.cn

径小于或者等于 d_0 时，土体是潜在不稳定的。已知样土的孔隙率 n，孔隙通道的最小直径 d_0 和最大直径 d_2 分别为[6,8-9]

$$d_0 = 2.67\frac{n}{1-n}\frac{D_h}{\beta} \tag{2}$$

$$d_2 = 1.86d_0 \tag{3}$$

根据 Poiseuille 方程，模型通道中每一孔隙通道的水流流量为[9-10]

$$Q_0 = \pi\left(\frac{\rho_w g}{\mu_w}\right)\left(\frac{d_0^4}{128}\right)J \tag{4}$$

式中：J 为水力梯度；μ_w 和 ρ_w 分别为水的黏滞度和密度；g 为重力加速度。

土样中穿过单位截面积的孔隙通道数量为[6] $N = 4n/d_0^2$，因此水流流速为[6,9]

$$v = Q_0 N = n\left(\frac{\rho_w g}{\mu_w}\right)\left(\frac{d_0^2}{32}\right)J \tag{5}$$

实际上，式(5)所求的流速为平均流速，根据 Darcy 定律，对比式(5)可得孔隙通道的渗透系数计算式为[6,9]

$$k = n\left(\frac{\rho_w g}{\mu_w}\right)\left(\frac{d_0^2}{32}\right) \tag{6}$$

2 管涌水力条件的探讨

研究管涌水力条件的目的是估计颗粒开始起动的临界水力条件，假定实际水流速度超过一定值时颗粒便在水流拖曳力的作用下被渗透水流带走。评测这一水力约束条件的目的是建立作用于孔隙通道中颗粒的各种力的平衡方程。骨架孔隙中的可动颗粒受到的力有渗透水流的拖曳力、水下重力以及颗粒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)。

2.1 孔隙中颗粒的受力分析

孔隙通道模型被认为是半径为 d_0 的水流通道集合，同时 d_0 也被认为是最重要的影响参数，它限定大于该粒径的颗粒不被侵蚀。颗粒直径为 d，假设颗粒为球形、水流为层流。在本文的研究中，一些瞬时的现象如：固结、膨胀以及土体的收缩将不被考虑。由于大多数土体中孔隙通道形状不规则，很难准确地模拟颗粒受力的真实情况，为了能够建立定量的管涌渗流模型，先从简单的模型入手，然后对各种复杂级配情况的管涌发生发展进行深入的研究。采用文献[11]的假设，设土层中的颗粒为球体构造，其排列有 2 种形式，一种是能产生错动的排列，另一种是不能产生错动的排列。假设通道中的颗粒大小相等且为球体，从保守角度采用较难发生管涌破坏的、不能产生错动的排列的情况加以研究，若在此情况下的颗粒能够流失，那么其他情况时颗粒就更易流失。

2.2 颗粒在孔隙通道中运动受力分析($d < d_0$)

孔隙通道中的颗粒排列，从保守角度出发，采用如图 2 所示的颗粒排列，假设孔隙通道中的颗粒直径相等，欲使颗粒 1 移动，考虑作用在颗粒 1 上的所有作用力的力矩平衡，对于 N 点有

$$(\boldsymbol{F}_p + \boldsymbol{F}_D)\frac{d}{2}\cos\frac{\pi}{6} - (\boldsymbol{W} - \boldsymbol{U}_p)\frac{d}{2}\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) = 0 \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{F}_D$ 为水流作用于颗粒的拖曳力；$\boldsymbol{W}$ 为颗粒的自重；$\boldsymbol{U}_p$ 为上举力(颗粒浮力)；$\boldsymbol{F}_p$ 为作用于具体颗粒表面上的静水压力；α 为土体孔隙的倾斜角。

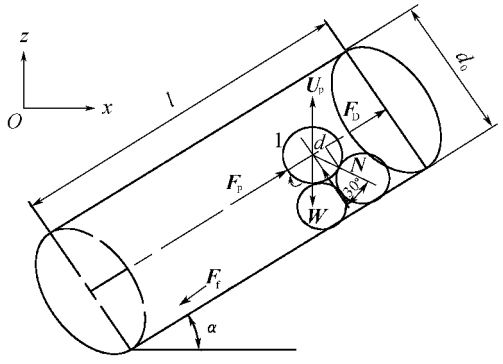

图 2 颗粒在孔隙通道中的受力分析示意图

(l 为孔隙通道长度；F_f 为颗粒与孔隙通道壁间的摩擦力)

根据 Darcy 定律，并由 $v = kJ$ 得到 $J = v/k$，静水压力可以在数学简化后由式(8)给出[9]：

$$\boldsymbol{F}_p = J\rho_w g l\left(\frac{\pi d^2}{4}\right) = \frac{v}{k}\rho_w g l\left(\frac{\pi d^2}{4}\right) \tag{8}$$

式中：k 为土体的渗透系数；ρ 为颗粒密度。水流拖曳力 $\boldsymbol{F}_D$ 可根据 Stokes 定律给出，Happel 利用 Stokes 公式推导出 Poiseuille 管中水流作用于颗粒的拖曳力[7]：

$$\boldsymbol{F}_D = 3\pi\mu_w d v \tag{9}$$

将式(8)、式(9)以及 $\boldsymbol{W}$ 和 $\boldsymbol{U}_p$ 的值代入公式(7)并且化简，可得

$$v = \frac{\frac{\pi d^3}{3\sqrt{3}}\rho' g\left|\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right)\right|}{\frac{\rho_w g}{4k}l\pi d^2 + 3\pi\mu_w d} \tag{10}$$

可取 $l = d$[6]。由于 d_0 为孔隙通道的最小直径，故认为变截面对流速的影响可以忽略不计。而由于孔隙通道中的水流流速 v 与渗流速度 v_s 的关系为 $v_s = nv$[6]，将式(7)代入式(10)，得到管涌发生时临界水流流速的计算公式：

$$v_c = \frac{1}{2}n\frac{\frac{\sqrt{3}d^2}{9}(\rho_s - \rho_w)g}{\frac{4}{n}\mu_w\left(\frac{d}{d_0}\right)^2 + \frac{3\mu_w}{2}}\left|\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right)\right| \tag{11}$$

3 算例与分析

为了验证本文所推导公式的正确性，对文献[12]的管涌试验所用的土样 A 和土样 B 进行计算，文献[12]自配了 4 种砂土，土样高度 155 mm，置于内径为 139 mm 的圆管内，圆管下端放置过滤层，水流自下而上，在整个试验过程中保持水温为 20 ℃，土样 A 级配不连续，土样 B，C，D 级配连续，试验结果表明土样 A 和土样 B 发生了管涌，对于土样 A 和 B 有 $d_0 > d_5$，根据文献[4]的计算知这 2 种土样中可动颗粒的质量分数分别为 15% 和 8.72%，大于满足土体发生管涌 5% 细颗粒流失的条件，取 $d_0 = d_5$（d_5 为小于该粒径的土占土体总质量的 5%），可利用公式(11)计算 v_c。20 ℃ 时取水的黏滞系数 $\mu_w = 1.002 \times 10^{-3}$ Pa·s，根据土样的放置情况及水流流向取 $\alpha = 90°$。

管涌的发生、发展与颗粒的流失密切相关，可以认为式(2)中的 d_0 为颗粒流失的控制粒径（见图 1），显然，只有直径小于 d_0 的颗粒才能从土体中移出。起初，水流流速较小，被水流带走的颗粒为小颗粒，随着水流速度的增大，更大的颗粒被水流带走，对于土样 A 和土样 B，本文取使土体颗粒流失量占总土体质量 5% 所对应的流速为管涌发生时的临界流速，根据试验所满足的假设条件，分别代入式(11)进行计算，结果见表 1，由计算与试验所得流速值对比可知，本文计算结果与文献[12]的试验结果比较吻合。

表 1 试验及计算结果[9,12-13]

土样	n/%	ρ/(kg·m^{-3})	d/mm	d_0/mm	$J_{临界}$ 试验值	v_c/(cm·s^{-1}) 试验值	计算值
A	34	2.57×10^3	0.15	0.57	0.20	0.21	0.25
B	37	2.82×10^3	0.20	0.42	0.34	0.50	0.42

注：取试验临界水力梯度时所对应的流速为试验临界流速。

4 结 语

本文通过建立土体孔隙管道模型，分析可动颗粒在管中的受力情况，建立了力的平衡方程，得到管涌发生时颗粒起动的临界水流流速公式。管涌的发生与细颗粒的流失密切相关，管涌发生初期极细颗粒出现流失情况，随着水流的继续流动，较大粒径的颗粒逐渐流失。对于 $d_5 < d_0$ 的土样，本文计算时取使 d_5 粒径的颗粒发生流失的水流流速为管涌破坏的临界流速，若 d_0 远大于 d_5，根据文献[4]分析可动颗粒含量，判断是否为管涌破坏。对于流土破坏，本文公式不适用。计算结果与文献[12]的试验结果基本吻合。公式中只需要知道土粒密度、孔隙率以及颗粒的级配曲线等几个比较容易确定的参数，因此，应用这一公式来估算管涌土的临界水流流速，对于工程实际来说是比较有效的。

参考文献：

[1] GB/T50279—98，岩土工程基本术语[S].

[2] 吴良骥.无黏性土管涌临街坡降计算[J].水利水运科学研究，1980(4)：90-95.

[3] 沙金煊.多孔介质中的管涌研究[J].水利水运科学研究，1981(3)：89-93.

[4] 刘忠玉，苗天德.无黏性管涌型土的判定[J].岩土力学，2004，25(7)：1072-1076.

[5] 陈建生，李兴文，赵维炳.堤防接触冲刷产生集中渗漏通道机理研究[J].水利学报，2000(9)：48-54.

[6] KOVACS G. Seepage hydraulics [M]. New York：Elsevier Scientific Publishing Company，1981.

[7] HAPPEL J. Low Reynolds number hydrodynamics [M]. Leyden：Noordhof，1973.

[8] 刘忠玉.无黏性土中管涌的临界水头梯度研究[J].郑州大学学报：工学版，2003，24(4)：61-71.

[9] INDRARATNA B. Analysis of critical hydraulic gradient for particle movement in filtration[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，ASCE，2002，128(4)：347-350.

[10] OJHA C S P，SINGH V P. Determination of critical head in soil piping [J]. Journal of Hydraulic Engineering，ASCE，2003，129(7)：511-518.

[11] 陈建生，刘建刚，焦月红.接触冲刷发展过程模拟研究[J].中国工程科学，2003，5(7)：33-39.

[12] KEMPTON A W，BROGAN J M. Experiments on piping in sandy gravels[J]. Geotechnique，1994，44(3)：449-460.

[13] 毛昶熙.管涌与滤层的研究：管涌部分[J].岩土力学，2005，26(2)：209-215.

（收稿日期：2007-06-19 编辑：高建群）

·简讯·

第二届全国水工岩石力学学术会议将在武汉召开

由中国岩石力学与工程学会等单位主办的第二届全国水工岩石力学学术会议将于 2008 年 10 月 25～26 日在湖北省武汉市召开。会议将围绕水工岩石力学基础理论、试验方法、高坝坝基稳定、高边坡稳定与治理、超大规模地下洞室群设计与安全控制以及深埋水工长隧洞建设等问题开展交流与讨论。会议主要议题如下：复杂地质高坝坝基设计理论与分析方法；复杂地质高陡边坡岩石工程安全评价与治理；复杂地质大型地下洞室群设计与安全控制；基于 TBM 隧洞施工技术的岩石力学研究方法与应用；复杂应力路径岩体力学特性与试验方法；岩体应力场和渗流场测试与分析理论；岩体结构描述和岩体断续介质力学方法研究进展与应用；岩体非线性力学数值模拟技术与工程应用；复杂地质岩体精确爆破技术与安全控制；工程岩体形状测试与隐患探测及预报新技术；复杂地质岩体灌浆与锚固新技术与工程实践。 （本刊编辑部供稿）