

无黏性土层之间渗流接触冲刷机理试验研究

刘 杰

(中国水利水电科学研究院,北京 100048)

摘要 判别无黏性成层土产生接触冲刷的准则及确定产生接触冲刷的水力比降是研究渗流控制措施的必备要素,为工程界所关注。根据对试验资料的整理与分析,阐明了无黏性成层土产生接触冲刷的几何条件和水力条件,同时建立了产生接触冲刷的临界水力比降与两土层特征粒径的函数关系,可以用来判别无黏性双层土之间是否会产生接触冲刷。如果判明会产生接触冲刷,可进一步计算出产生接触冲刷的水力比降,这对土工建筑物的渗流控制具有指导意义。

关键词 无黏性土 成层结构 渗流 接触冲刷 临界水力比降

中图分类号 TV139.16

文献标识码 A

文章编号 1006-7647(2011)03-0027-04

Mechanism of seepage contact scour between cohesionless soil layers//LIU Jie (China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract To distinguish the criteria for contact scour in cohesionless layered soil and to determine the relevant hydraulic gradients are necessary elements for studying seepage control measures. It is a common concern in the engineering field. Based on the experimental data, the geometrical and hydraulic conditions for the generation of contact scour in cohesionless layered soil were illustrated. A functional relationship between the critical hydraulic gradient for the contact scour and characteristic grain size of two soil layers was established. It could be employed to determine whether the contact scour in the two cohesionless soil layers would happen or not. If the potential contact scour was distinguished, the corresponding hydraulic gradient would be calculated. It would be practical for the seepage control of civil structures.

Key words cohesionless soil; layered structure; seepage; contact scour; critical hydraulic gradient

水工建筑物中散离体的渗流破坏开始往往表现出各种不同的形式,但发展到最后都是以形成大的管涌通道而告终。所以早期将散离体的渗透破坏统称为管涌。由于对其渗流破坏机理无全面认识,所以有一种观点认为水工建筑物的渗透破坏是偶然的,应以纯统计的方法研究其渗流控制问题^[1]。随着渗流理论的发展,岩土工程界对土体渗透破坏机理的认识逐渐由宏观转为微观,并将复杂的渗透破坏机理解析为 4 种单一的类型,即流土、管涌、接触流失和接触冲刷^[2]。由此深化了对土体渗透破坏机理的认识,提高了综合分析工程实际问题的水平。

渗流的接触冲刷主要发生在两类土层的接触带。实际工程或者天然土层中,土性往往是非均质的,如果两土层渗透系数之比大于 50,在沿层面的渗流作用下是容易产生接触冲刷的。如青海沟后砂砾石面板坝的溃决与顶部砂砾石坝体施工中的分离有直接关系。由于砂砾石存在分离问题,极不均匀的砂砾石在施工中分离为粗细 2 个层,而且坝顶上

下游相连通,水库蓄到最高水位后坝顶漏水,在坝顶砂砾石坝体中产生了水平方向的接触冲刷,导致顶部防浪墙倒塌而溃决^[3]。几年前笔者在江河大堤的渗流模型试验中发现双层地基渗透破坏的一个主要因素是接触冲刷^[4]。由此可见,成层土的接触冲刷是工程界普遍关注的问题。

到目前为止,国内外对成层土接触冲刷问题的研究很少,除 50 多年前前苏联伊斯托美娜(Истомина В С)^[5]的试验资料外,很少看到别的试验资料。国内书刊中引用的资料,至今也只是 50 多年前伊斯托美娜提供的 1 条试验曲线^[6]。有的文献论述了接触冲刷发展过程,但无判别接触冲刷的准则,更无产生接触冲刷的水力条件,根本无法判别是否会产生接触冲刷^[7]。因此,层状无黏性土体在渗流作用下沿层面是否会产生接触冲刷,如何判别,产生接触冲刷的水力条件与粗细两土层颗粒组成之间的关系,以及临界水力比降的确定方法,都是工程界急需解决的问题。

经过多年的工程实践,笔者发现伊斯托美娜的试验资料是丰富而且可靠的,有必要进一步深化研究,经过对试验资料的进一步分析和整理,提出判别无黏性成层土产生接触冲刷的准则以及确定接触冲刷临界水力比降的计算方法,对土工建筑物的渗流控制具有指导意义。

1 已有判别接触冲刷的方法

这方面的研究工作很少,主要介绍甫拉维德^[8]及伊斯托美娜^[5]的方法。

1.1 甫拉维德的研究成果

甫拉维德认为,当细土层的粒径 d_i 与粗土层的孔隙直径 D_0 之比 $d_i/D_0 < 0.7$ 且渗流的雷诺数 $Re < 20$ 时,两土层之间的渗流才会出现接触冲刷,并建议按式(1)确定在纵向渗流作用下粗细两土层之间接触冲刷的临界水力比降:

$$J_{c.cr} = \frac{1}{\sqrt{\varphi_1}} \left(3 + 15 \frac{d_3}{D_0} \right) \frac{d_3}{D_0} \sin \left(30^\circ + \frac{\theta}{8} \right) \quad (1)$$

其中 $D_0 = 0.455 \sqrt[n_{粗}]{Cu} \frac{1 - n_{粗}}{n_{粗}} d_{17}$

式中: $J_{c.cr}$ 为接触冲刷临界水力比降; φ_1 为系数,砂砾石取 1.0,碎石取 0.35~0.4; θ 为重力方向与水流方向的夹角; Cu , $n_{粗}$ 及 D_{17} 分别为粗粒土的不均匀系数、孔隙率及等效粒径。

采用该公式计算时取 $d_i = d_3$,即小于该粒径的土重占总土重的 3%,在实际工程中很难应用,公式过于复杂。

1.2 伊斯托美娜的研究结果

伊斯托美娜的试验仪器为水平管涌仪,长 85 cm,土样长 65 cm,仪器壁一侧透明,可以直接观察接触冲刷性状。试验结果表明,沿两土层层面接触冲刷的机理,主要是纵向渗流首先借助于粗土层表面的孔隙将细土层的细颗粒带出土体以外,随后沿细土层层面向深层不断发展。

图 1 是伊斯托美娜试验采用的细土层的颗粒组成曲线,基本上反映了自然界中经常出现的细土层的特征。图 2 为粗土层的颗粒组成曲线, D_{20} 变化于 0.7~25 mm 之间,由粗砂到粗砾,变幅较大,试验能

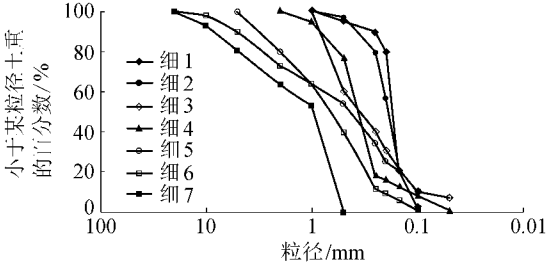


图 1 细土层的颗粒组成曲线

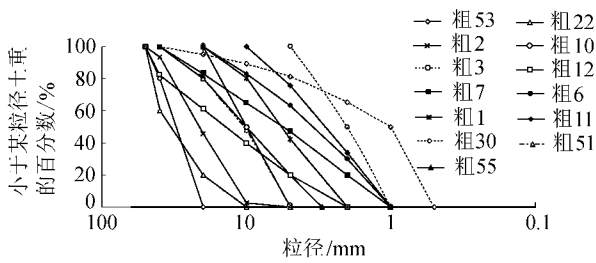


图 2 粗土层的颗粒组成曲线

体现接触冲刷问题。表 1 为细土层的基本特征,表 2 为粗土层的特征参数。表 3 给出了两土层无接触冲刷条件下的试验结果,表中 J 为未产生接触冲刷的试验終了时的最大水力比降。

表 1 细土层的基本特征参数

土样编号	特征粒径/mm			Cu	$\varphi/(^\circ)$	$\tan \varphi$
	d_{60}	d_{20}	d_{10}			
细 1	0.18	0.15	0.12	1.6	31.5	0.61
细 2	0.21	0.15	0.13	1.6	31.5	0.61
细 3	0.50	0.14	0.10	5.0	35.0	0.70
细 4	0.42	0.25	0.13	3.3	35.0	0.70
细 5	0.70	0.15	0.10	7.0	37.5	0.77
细 6	0.90	0.30	0.24	3.8	35.0	0.70
细 7	1.40	0.64	0.57	2.5	38.5	0.80

注: φ 为摩擦角。

表 2 粗土层的特征参数

土样编号	特征粒径/mm			Cu
	D_{60}	D_{20}	D_{10}	
粗 1	6.80	3.10	2.40	2.8
粗 2	22.50	12.50	11.30	2.0
粗 3	2.30	1.25	1.15	2.0
粗 6	4.60	1.60	1.30	3.5
粗 7	8.30	2.00	1.40	5.9
粗 11	3.50	1.50	1.30	2.7
粗 12	19.50	5.00	3.10	6.3
粗 30	1.51	0.65	0.56	2.7
粗 10	12.50	6.50	6.20	2.0
粗 22	40.00	20.00	15.00	2.7
粗 51	11.80	6.50	5.80	2.0
粗 53	34.00	23.00	22.00	1.5
粗 55	11.80	5.00	3.80	3.1

由两土层之间未产生接触冲刷的试验结果(表 3)可知,当 $D_{10}/d_{10} = 12.9$ 时两土层之间仍不存在接触冲刷问题,因而认为当 $D_{10}/d_{10} \leq 10$ 时两土层之间渗透稳定性质趋于一致,无接触冲刷问题。

2 双层结构土体接触冲刷机理分析

分析试验过程得出,接触冲刷的本质是细土层中的细颗粒从粗土层孔隙中流失,当粗土层中的孔隙直径大于细土层中可移动的颗粒粒径时,接触冲刷才具备基本条件,这种基本条件称为几何条件,也就是土层本身所具备的条件,是内因。另一条件是外部条件,即推动可移动颗粒运动的条件,称为水力

表 3 无接触冲刷条件下的土层试验结果

试验 编号	粗土层 土样编号	细土层 土样编号	粗土层		细土层			$\frac{D_{10}}{d_{10}}$	$\frac{D_{20}}{d_{10}}$	$\frac{D_{20}}{d_{20}}$	J	$\frac{D_{20}}{d_{10} \tan \varphi}$
			D_{10}/mm	D_{20}/mm	d_{10}/mm	d_{20}/mm	$\tan \varphi$	$\frac{d_{10}}{d_{10}}$	$\frac{d_{10}}{d_{10}}$	$\frac{d_{20}}{d_{20}}$		
85	粗 11	细 1	1.30	1.50	0.12	0.15	0.61	10.8	12.5	10.0	2.13	20.5
68	粗 7	细 1	1.40	2.00	0.12	0.15	0.61	11.7	16.7	13.3	1.66	27.4
67	粗 30	细 1	0.56	0.65	0.12	0.15	0.61	4.7	5.4	4.3	2.41	8.9
69	粗 6	细 1	1.30	1.60	0.12	0.15	0.61	10.8	13.3	10.7	2.31	21.8
72	粗 3	细 1	1.15	1.25	0.12	0.15	0.61	9.6	10.4	8.3	1.93	17.0
66	粗 30	细 2	0.56	0.65	0.13	0.15	0.61	4.3	5.0	4.3	2.31	8.2
70	粗 6	细 2	1.30	1.70	0.13	0.15	0.61	10.0	13.1	11.3	2.63	21.5
73	粗 3	细 2	1.15	1.25	0.13	0.15	0.61	8.8	9.6	8.3	2.00	15.7
77	粗 11	细 2	1.30	1.50	0.13	0.15	0.61	10.0	11.5	10.0	1.68	18.9
62	粗 12	细 6	3.10	5.00	0.24	0.30	0.70	12.9	20.8	16.7	1.69	29.8
61	粗 12	细 7	3.10	5.00	0.57	0.64	0.80	5.4	8.8	7.8	1.33	11.0

条件。只有同时具备了这 2 种条件,层状土在层间渗流的作用下才会产生接触冲刷。

2.1 接触冲刷的几何条件

如上所述,接触冲刷的几何条件即为粗土层的孔隙粒径大于细土层可移动颗粒的粒径,即 $D_0/d_i > 1.0$ 。甫拉维德及伊斯托美娜分别以 D_{17} 和 D_{10} 代表粗土层的孔隙直径,分别以 d_3 和 d_{10} 代表细土层中可移动颗粒的粒径。由表 3 可知,伊斯托美娜的 11 组试验 D_{10}/d_{10} 变化于 4.3 ~ 12.9, J 变化于 1.33 ~ 2.63,这些试验均未出现接触冲刷问题,故从安全角度出发认为 $D_{10}/d_{10} \leq 10$ 是细土层颗粒没有从粗土层孔隙中流失的基本条件。

笔者认为,代表粗土层孔隙直径的最佳粒径应为 D_{20} ,如果细土层可移动细颗粒的粒径仍以 d_{10} 为代表,由表 3 可知,不产生接触冲刷的基本条件应是 $D_{20}/d_{10} < 11.5$ 。如果以 D_{20}/d_{20} 为标准,则 D_{20}/d_{20} 变化于 4.3 ~ 16.7,其中 80% 的试验结果大于 7.8,而破坏水力比降均大于 1.33,故选取不产生接触冲刷的条件为 $D_{20}/d_{20} \leq 7.8$ 。

从文献[9]可知,无黏性土的渗透系数可表示为 $k = 234n^3 d_{20}^2$,若忽略孔隙率 n 的变化,则不产生接触冲刷的条件还可表示为 $k_{\text{粗}}/k_{\text{细}} \leq 60$ 。此式同时表明,若以渗透系数为标准,两土层渗透系数之比小于或等于 60 时,两土层之间不存在渗流接触冲刷问题。

2.2 接触冲刷的水力条件

伊斯托美娜根据试验结果给出了接触冲刷的水力比降与土层特征粒径之间的函数关系,即

$$J_{c.cr} = f\left(\frac{D_0}{d_{10} \tan \varphi}\right) \tag{2}$$

并据此绘出图 3,图 3 中仅给出了产生接触冲刷时的试验结果,未给出未产生接触冲刷时的试验结果。

2.2.1 无黏性土的孔隙直径

在土体的渗流研究中,经常将孔隙抽象为一束

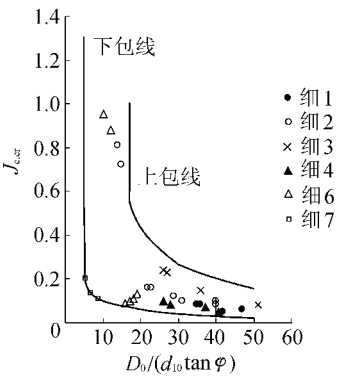


图 3 $J_{c.cr} = f\left(\frac{D_0}{d_{10} \tan \varphi}\right)$ 关系曲线

束的毛细管道,管道直径即为孔隙直径。伊斯托美娜根据试验资料给出了无黏性土孔隙直径 D_0 与土的不均匀系数 Cu 的关系曲线,表示为 $D_0/d_{50} = f(Cu)$,式中 d_{50} 为土体的中值粒径,也有人称之为平均粒径。该曲线表明,随着土体不均匀系数的增大, D_0/d_{50} 不断减小;对于 $Cu < 5$ 的土, D_0/d_{50} 的变化范围为 0.2 ~ 0.4,平均值为 0.3; $Cu > 20$ 后, D_0/d_{50} 的平均值趋于常数,约为 0.1。如果将笔者的试验结果和伊斯托美娜的试验资料同用 $D_0 = f(nd_{20})$ 进行整理,则 D_0 与 Cu 无明显关系, $D_0/(nd_{20})$ 为常数,可表示为 $D_0 = 0.63 nd_{20}^{[9]}$ 。

2.2.2 临界水力比降

将图 3 中的 D_0 采用 D_{20} ,可得图 4,即接触冲刷的临界水力比降可写为 $J_{c.cr} = f\left(\frac{D_{20}}{d_{10} \tan \varphi}\right)$ 。

如上所述,接触冲刷的机理是接触带细土层中的细颗粒在粗土层孔隙中的移动和流失,和单一土体中管涌型土的管涌破坏机理相一致,因此接触冲刷临界水力比降的确定可借用文献[10]中确定土体管涌破坏水力比降的数学模式。将可移动颗粒的代表性粒径取为 d_{10} ,粗土层孔隙直径的代表粒径采用 D_{20} ,并考虑接触冲刷多为水平方向,与渗透力相平衡的颗粒重力变为摩擦力,则

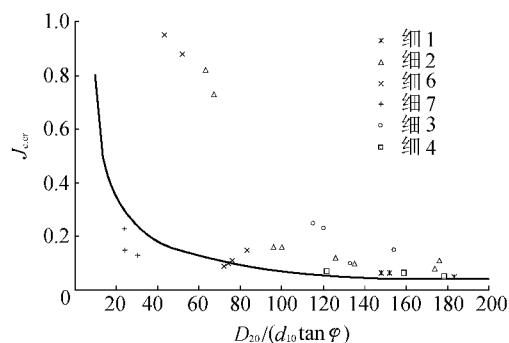


图4 $J_{c.cr} = f\left(\frac{D_{20}}{d_{10}\tan\varphi}\right)$ 关系曲线

$$J_{c.cr} = A(1 - n_{\text{细}})(1 - G_s)\left(\frac{d_{10}}{D_{20}}\right)\tan\varphi \approx B \frac{d_{10}}{D_{20}}\tan\varphi \quad (3)$$

式中: A 为颗粒形状球形理想化的形状修正系数; $n_{\text{细}}$, G_s 分别为细土层的孔隙率和相对密度; φ 为细土层的内摩擦角; B 为系数。

将图3的试验资料用式(3)的模式加工整理,得到式(4):

$$J_{c.cr} = 6.5 \frac{d_{10}}{D_{20}}\tan\varphi \quad (4)$$

式(4)即为确定两土层接触冲刷临界水力比降的计算公式。根据式(4)绘出下包线,见图4。由于式(4)是试验结果的下包线表达式,确定允许水力比降时可用较小的安全系数。若采用1.2,则允许水力比降

$$J_c = 5.4 \frac{d_{10}}{D_{20}}\tan\varphi \quad (5)$$

细土层中多为不含砾或仅含少量砾石的砂类土,内摩擦角 φ 一般变化于 $32^\circ \sim 39^\circ$ 之间,平均值可取 35° , $\tan\varphi = 0.7$ 。

3 工程实例

青海省沟后水库大坝是一座面板砂砾石堆石坝,最大坝高为71m,1990年竣工,1993年溃决。溃坝主要因为坝体砂砾石很不均匀,不均匀系数超过100,施工铺土层较厚,在1.0m以上,施工中土体严重分离。铺土后砂砾石分离成粗细2层,下层为粗颗粒砾石层,厚约30cm,表层为细砂层,厚约70cm。由于坝顶较窄,施工层由上游到下游为同一施工段,致使坝顶土层粗细分离层呈上下游连通状,满足渗流冲刷的条件。当水库蓄水到高于防浪墙底板高程以后,底板接缝大量漏水,加之顶部防渗面板脱空,脱空体与库水直接相连通,库水通过面板脱空体直接进入坝体,使大量渗流沿坝顶砾石层直奔下游坝坡,并从坝顶逸出,粗细分离层之间产生接触冲刷,坝顶下沉,防浪墙

倒塌,库水漫顶而过,导致大坝溃决。

溃坝模型试验结果:当粗土层的特征粒径 D_{20} 与细土层的冲刷粒径 d_{10} 之比大于150且 $J = 0.15$ 时,从模型中可以明显看到两层面产生了接触冲刷,并在细土层中发展为大的孔洞。与本文图4相比,当 $D_{20}/(d_{10}\tan\varphi) > 200$ 时, $J_{\text{允许}} = 0.05$,沟后模型试验结果 $J_{\text{破坏}} = 0.15$,表明式(5)具有足够的可靠性^[3]。

4 结论

a. 接触冲刷的破坏机理是接触层面的细颗粒从粗土层孔隙中流失,对于最小颗粒粒径大于0.075mm的无黏性土,当 $D_{20}/d_{20} \leq 7.8$ 时两土层之间渗流速度的差异性逐渐消失,不存在接触冲刷问题。或者两土层渗透系数之比小于或等于60,同样不存在接触冲刷问题。

b. 两水平土层之间产生接触冲刷时接触冲刷的水力条件与颗粒组成之间的关系可表示为 $J_{c.cr} = 6.5(d_{10}/D_{20})\tan\varphi$,若取1.2的安全系数,允许水力比降 $J_c = 5.4(d_{10}/D_{20})\tan\varphi$,其中 φ 一般变化于 $32^\circ \sim 39^\circ$ 之间,可取 35° 。

c. 接触冲刷问题是土层渗透破坏的开始阶段,最终结果是沿土层接触带形成大的集中渗流通道,此时不再属于接触冲刷的范畴,而是土体的整体渗流破坏。

参考文献:

- [1] ЧУТАЕВ Р. Р. Подземный контур гидротехнических сооружений [M]. Москва: Госэнергоиздат, 1962.
- [2] 前苏联给水、排水、水工建筑物和工程地质科学研究所. 在非基岩上挡水建筑物地下轮廓设计指示 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1957.
- [3] 刘杰, 丁留谦, 缪良娟, 等. 沟后面板砂砾石坝溃坝机理模型试验研究 [J]. 水利学报, 1998, 29(11): 69-75.
- [4] 刘杰, 谢定松, 崔亦昊. 江河大堤堤基砂砾石层管涌破坏危害性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1188-1191.
- [5] ИСТОМИНА В. С. Фильтрационная устойчивость грунтов [M]. Москва: Гостройиздат, 1957.
- [6] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制 [M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [7] 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(7): 33-39.
- [8] ГОЛБЬДИН А. Л., РАССКАЗОВ Л. Н. Проектирование грунтовых плотин [M]. Москва: Изд. АВС, 2001.
- [9] 刘杰. 无黏性土的孔隙直径及渗流特性 [C]// 水利水电科学研究院. 水利水电科学研究院科学论文文集. 第8集. 北京: 水利出版社, 1982: 106-113.
- [10] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.

(收稿日期 2010-09-02 编辑 骆超)