

水闸侧墙与土体接合部渗透破坏过程模拟试验

李娜^{1,2},汪自力^{1,2},赵寿刚^{1,2},岳瑜素^{1,2}

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院,河南 郑州 450003;
2. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心,河南 郑州 450003)

摘要:为深化对穿堤涵闸土石接合部渗透破坏发展机理的认识,研发了试验装置,实现了水闸侧墙与土体接合部渗透破坏过程的室内模拟。通过对黏粒质量分数分别为 4.6%、12.3% 及 22.6% 的土体开展试验,分析了接触冲刷的破坏特征及其发生发展规律,探讨了土体性质、水力比降、接触带压实度等因素对渗透破坏的影响。试验结果表明:土石接合部接触冲刷破坏过程分为稳定渗流阶段、管涌形成发展阶段和冲蚀破坏发展阶段;土体黏粒质量分数越大、压实度越大,土体稳定时间及破坏时间越长,抗冲蚀能力越强;冲蚀量与土体黏粒质量分数、水力比降及压实度均呈现明显的反比关系;水力比降较小时,压实度对土体抗冲性能影响显著,但随着水力比降的逐渐增大,土体性质起主导作用;初始破坏阶段土体细颗粒的流失受土体性质、压实度及水力比降各因素的综合作用,表现出不同的规律性。

关键词:土石接合部;接触冲刷;黏粒质量分数;水力比降;破坏特性

中图分类号:TV139.16 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)06-0075-07

Simulation test on seepage failure process of junctions between sluice side wall and soil mass //LI Na^{1,2}, WANG Zili^{1,2}, ZHAO Shougang^{1,2}, YUE Yusu^{1,2} (1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China; 2. Research Center on Levee Safety & Disaster Prevention, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: To deepen the understanding for the seepage failure mechanism of earth rock junctions for crossing-dyke sluices, a testing apparatus was designed to accomplish the indoor simulation for the seepage failure process of the junctions between sluice side wall and soil mass. Then, the failure characteristics of contact scouring and its development were analyzed with the clay mass fractions of 4.6%, 12.3% and 22.6%. The effects of soil properties, hydraulic gradient and compactness of the contact zone on seepage failure were studied. The results show that the typical contact scouring process can be divided into three stages, i. e., stable seepage, piping formation development, and erosion failure. The higher the clay content and compactness, the longer duration will be for stable and failure stages with stronger erosion resistance. There is a significant inverse relationship between erosion and clay mass fraction, hydraulic gradient and compactness. The compactness effect on soil erosion resistance is significant under weak hydraulic gradient. However, with the increase of hydraulic gradient, soil properties play a leading role. At the initial stage of failure, the loss of fine soil particles shows different regularities under the comprehensive effect of soil properties, compactness and hydraulic gradient.

Key words: earth rock junction; contact scouring; clay mass fraction; hydraulic gradient; failure characteristic

接触冲刷是指渗流沿着两种不同介质的接触面流动时,把其中颗粒层的细颗粒带走的现象。上下两层间的颗粒直径悬殊越大就越容易发生接触冲刷。在实际水利工程中水流沿着两种介质界面流动,例如土体与基岩、防渗墙、桩孔护壁、涵管及闸底板之间的接触面,一旦遭遇接触不良、地基不均或不均匀沉降等,较易发生接触冲刷破坏。就穿堤建筑物而言,涵闸与堤防土石接合部历来是堤防防洪的薄弱环节,常发生接触冲刷渗透破坏而引起堤防险情。其中,回填土难以碾压密实是造成土石接合部渗透破坏的重要原因之一^[1]。穿堤涵闸回填土如采用机械化施工,填土与建筑物接触带很难压实,易造成两种介质接触不紧密而发生接触冲刷直至渗漏。另外,止水破坏、渗水、上游高水位等也加剧了

这一破坏进程。且这种破坏初始过程大都隐于工程内部,探测难、监测难,一经发现险情,可能会迅速导致工程破坏,难以补救。例如,1998年,洞庭湖安垸大鲸港交通闸由于闸体石墙培箱不够密实,培箱与主体接合部被淘空而发生管涌险情;洞庭湖民主阳城垸蒿子港交通闸由于墙身与土体碾压不实,先后于1995年、1996年及1998年遭遇高水位时均发生管涌险情;2000年,汛后刘庄引黄闸因三层四油沥青麻布止水失效,在地基与岸箱的接触面出现渗水现象。因此,对接触冲刷发生发展过程及破坏特征的研究已成为影响水利工程能否安全运行的重要课题,越来越引起学者们的重视^[2-5]。

接触冲刷的研究一般采用室内试验的研究方式,取得了一定的研究成果。刘杰^[2]进行了土的渗流接触冲刷抗渗强度试验;河南水利科学研究所^[6]进行了土坝心墙与基岩接触冲刷试验;黎国凡^[7]对温峡口石渣组合坝黏土心墙与岩基的接触冲刷进行了试验模拟;詹美礼等^[8]进行了法向力作用下心墙与基岩接触冲刷试验;邓伟杰^[9]对土石坝砂砾石层与黏性土层之间接触冲刷进行了试验模拟。但大多研究集中在无黏性土层之间^[10]、砂砾石与砂之间^[11]、砂砾石层与黏土层之间^[12-13]以及黏性土质防渗体与基岩接触带之间^[2, 8]的接触冲刷,对于土体与混凝土结构这两种材料之间的接触冲刷问题研究相对较少。已有研究成果表明,接触冲刷渗透破坏与土体性质、土体密度、接触带状态等因素密切相关^[2-3]。但目前人们对于穿堤涵闸土石接合部接触冲刷破坏大多止于宏观认识上,其破坏变化发展过程及影响因素等问题还有待进一步研究。本文根据黄河下游穿堤涵闸土石接合部工程特性,选取黄河下游堤防典型土体,利用自行设计的试验装置,模拟施工中较易出现的涵闸侧墙与两侧填土存在不密实情况下的渗透破坏,研究其发生发展过程及演化规律,并对比分析土体黏粒质量分数、压实度、水力比

降对接触冲刷的影响。

1 试验装置与试验方法

1.1 试验装置制作

由于水闸底板或侧墙等构件多为长方体结构,接触冲刷试验装置相应设计为箱式结构(图1)。为便于试验现象的观察,箱体为透明有机玻璃,壁厚8 mm,内部尺寸为150 mm×200 mm×200 mm。接触冲刷试验装置上、下游侧边缘均为厚20 mm钢板,钢板与有机玻璃箱体之间设置厚12 mm的硅胶防水圈,顶杆用于紧固有机玻璃箱体和上、下游侧,在紧固螺栓和顶杆作用下钢板与有机玻璃箱体之间密闭防水。为使上游水流均匀平稳,与进水口相连的上游侧设有孔径1.5 mm的带孔金属透水板。试验时利用吊桶和提升架控制作用水头大小,并在吊桶上接有溢水管道,为试样提供较高的稳定进口水头。

1.2 制样过程

试验前,根据土体最优含水率、最大干密度、试样体积和既定压实度备料,分别计算出密实区和接触带不密实区所需土体质量及铺土高度。将试验装置竖向放置进行装样,填装时,首先在透水钢板上铺设一层土工布,以防土料细颗粒堵塞水孔。在接触带与箱体接触的侧向观测面外的其余三面均匀涂抹一层膨润土护壁,以防水流沿边壁集中渗漏。为模拟施工过程,每个试样分层装料,共分4层填筑,表面平整后振捣压实。填料时,尽量使土体颗粒分布均匀且层与层之间进行剖毛处理(剖毛深度为1~2 cm);击实时,击锤要分布均匀直击到要求层高,且试样与仪器边壁接触的周边一定要击实。试样的顶面为自由出水面。

1.3 试验过程

制样后,将试验装置平放进行试验(图1(a))。试验模拟工程水位骤升、骤降时止水破坏情况下侧墙与两侧填土不密实的最不利工况,并观察土石接

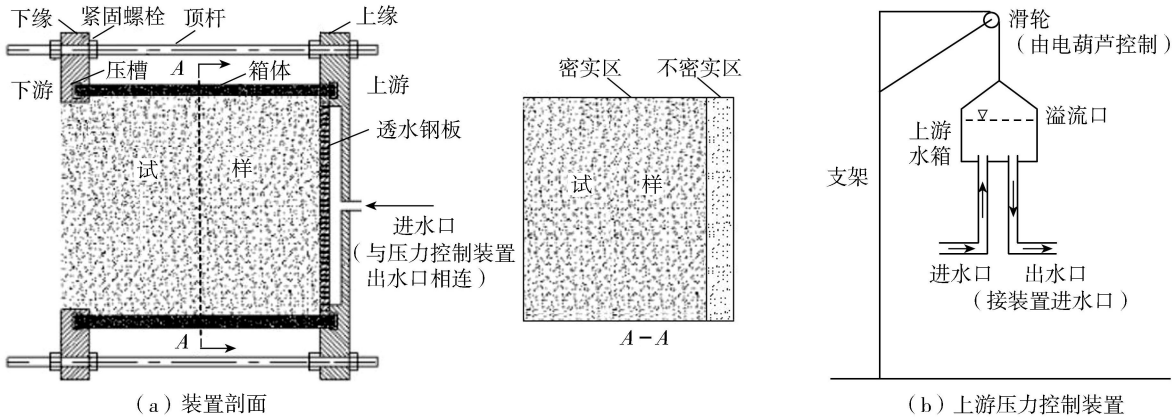


图1 接触冲刷试验装置

合部局部发生渗透破坏的过程。试样不预先饱和,直接施加水头进行试验,下游面临空无侧向限制。将上游水头调整至预定高度,检查进水口是否堵塞,打开进水阀,检查装置周边是否渗水。初始水头施加后,观察试样与仪器接触带不密实区土体随水头施加时间的变化,并观察记录土体的变化过程。记录试样水平向距离(渗径) L ,上游水位与试样进口位置高度差 H ,近似算出平均水力比降 $J^* = H/L$ (为方便计算,暂不考虑渗径的沿程变化)。若在水头作用下出现了土体脱落,即认为试样已破坏。观察并记录主要试验现象,分别记录试样破坏后每2 min内的冲刷量(共记录5次),5次冲刷结束后停止试验。试验过程中对初始析出土体细颗粒进行筛分试验,并与原始土体进行比较。

1.4 试验用料

黄河下游堤防工程从临背河取土逐渐修筑而成,筑堤土质较为复杂。黄河堤防堤身代表性土体黏粒质量分数多数介于15%~30%,少数黏粒质量分数为10%左右^[14]。结合调研分析结果及试验的特点,选取黏粒质量分数分别为4.6%(A类土体,低液限粉土)、12.3%(B类土体,低液限黏土)和22.6%(C类土体,低液限黏土)的土体作为试验用土。3种土体试样最优含水率分别为15.53%、15.8%和13.7%,最大干密度分别为1.81 g/cm³、1.69 g/cm³和1.72 g/cm³。土体物理力学性能指标见表1。

表1 试验用土物理力学性能指标及定名

土样 类别	不同粒径组质量分数/%					液限	塑限	塑性指	土体 定名
	0.50 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.10 mm	0.10 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.005 mm	<0.005 mm	ω_L /%	ω_P /%	数 I_p	
A	0.0	41.9	18.4	35.1	4.6	23.5	14.0	9.5	ML
B	1.4	9.4	24.6	52.3	12.3	27.2	15.4	11.8	CL
C	0.4	1.8	13.5	62.1	22.6	29.3	12.5	16.8	CL

1.5 试验方案

GB50286—2013《堤防工程设计规范》规定黏性土堤的填筑标准压实度 K_b 不应小于0.95,因此,土样密实区 K_b 设定为0.95,不密实区 K_b 分别按0.75、0.80、0.85考虑,不密实区宽度为50 mm,上游作用水头分别为4 m、2 m、1 m、0.7 m和0.5 m,相应的 J^* 分别为20.0、10.0、5.0、3.5和2.5。

2 接触冲刷破坏现象及发展过程

接触带不密实区土体在上游水头长期作用下,一方面,随着土体内部细颗粒的析出,土体内部结构发生调整,土体颗粒骨架更为疏松,加之接触带底部土体所受较大水压力及上部土体重力作用,破坏从接触带底部开始;另一方面,由于土体结构的变化,

含水率增大,土体抗剪强度减小,土体在外荷载作用下发生破坏。从最终试验现象来看,土石接合部接触冲刷破坏表现为从接触带土层上游顶部至下游出口处形成一条强渗流通道。

土体黏粒质量分数越大,其抗渗性能越强,在上游水头不大或短时间作用的情况下较难发生渗透破坏,上游水流也较难传递过来,致使试验后期渗透破坏前土体颗粒析出时间持续较长、析出土体黏粒也较多。试验初始阶段,水压主要由整个试样承担,试样进口底部承受较强的侧向水压力,随着上游水头的持续作用,试样内土体中大量的细颗粒被带出。在土体颗粒涌出后,试样内水压重新分布,当上游水压力不断增加,破坏了土体的静力平衡后,整个试样水力比降上升,水力比降的增加又迫使土体内达到启动流速的细颗粒急剧涌出,同时内部土体逐渐破坏,土体较大颗粒甚至局部土样也被带出,继而渗径继续缩短直至形成渗漏通道,土体与刚性介质的接触带被冲开并发生冲刷破坏。试样破坏后出口附近底部土体在沿接触带并指向出口方向上的渗透比降最大,该方向为接触冲刷破坏的优先方向,渗漏通道的位置也由下游出口方向接触带沿底部向土体密实区发展。渗漏通道形成前虽伴随有土体颗粒的持续涌出,但也会有短时间的堵塞,这种短暂的堵塞会改变水流系统的流动特性,使得渗漏现象变得复杂且难以预测。从试验现象看,渗漏通道形成并不连续,其形成过程具有间歇性、突发性和随机性等特点,较难控制。

当渗漏通道上的大部分细颗粒被带走后,在较强水流作用下接触带主通道一侧的土体开始流失,使渗漏通道逐渐变宽,作用时间持续越长,通道宽度越宽。土体承载力将大大降低,最终土体试样被冲刷形成一条弯曲的渗漏通道。随着上游高水压的继续作用,整个接触带土体被淘空,并逐渐向密实区底部土体发展。渗漏通道的形成及接触带大量土体的流失,致使穿堤涵洞土石接合部脱空、土体坍塌,以致发生险情。

根据试验观察,可将试验过程分为3个阶段:稳定渗流阶段、管涌形成发展阶段和冲刷破坏发展阶段。

a. 从水头初始施加到下游面有清水渗出为稳定渗流阶段。水头初始施加阶段,颗粒相对稳定,不会发生土体颗粒调整或流失。试样润湿从接触带不密实区开始,待不密实区试样底部完全润湿后,下游右下方有水渗出,出水清澈,渗水量较小,此时并未发现土体有明显变形现象。这一阶段持续时间相对较长,记为稳定时间 t_1 。 t_1 与试样接触带状态及作用水头有关,若接触带密度较小、水头较大,则 t_1 较小(或直接发生破坏)。

b. 从试样的渗流量增大到试样中渗漏通道形成成为管涌形成发展阶段。随着上游水头作用时间的持续增长,渗流量突然增大,试样下游面有浑水渗出,土体开始出现局部变形,继而内部土体细颗粒持续涌出。在水流作用下,接触带底部试样土体被一点点侵蚀,土体细颗粒逐渐从底部被带出,有泥浆流出,此时接触带不密实区土体内部已发生局部的渗漏破坏,内部土体颗粒正在逐渐流失,土体渗透性显著加强。但土体颗粒的涌出时快时慢,还会短暂停止,持续一段时间后,底部突破口变形区域逐步扩大,随之有大量土体颗粒从接触带底部持续不断涌出,进而从渗流出口处向上游方向逐步发展,渗漏通道由下游侧向上游侧回溯发展,直至与上游连通,形成贯通的渗漏通道,通道口呈不规则的圆形洞。通过对接触带土体的破坏情况及渗漏通道的形成情况进行观察和分析,发现接触带不密实区的破坏范围大部分呈扇形破坏面,且土体试样中最终形成的渗漏通道通常是弯曲的,最终底部渗漏通道口横向贯穿整个接触带。在这一阶段水平向的渗流通道已初步形成,但密实区土体仍未见明显破坏。由于土体自重及水流作用,渗漏破坏发展范围也仅限于下游接触带下部附近。从试样浑水渗出至渗漏通道形成的持续时间为破坏时间 t_2 。这一阶段土体变形主要发生在接触带不密实区, t_2 与土体性质及作用水头密切相关,历经时间也有所差别,几分钟至几十分钟不等。尤其在上游较大水头作用下,土体从初始破坏到渗漏通道形成时间非常短。

c. 从通道贯通至接触带土体冲刷为冲蚀发展阶段。随着渗漏通道的形成,在水流的持续作用下,大量土体颗粒从渗漏通道口涌出,并在接触带与有机玻璃侧壁之间发生了冲刷,接触带不密实区土体被不断淘刷,渗流通道出口面积不断扩大,最终接触带土体流失,此时流量较大,但密实区土体仍未发生明显变形。实际上,这一阶段是土层接触冲刷破坏的最终结果,即接触带不密实区土体被淘空。

3 试验结果与分析

接触冲刷破坏机理复杂,涉及因素较多,就本次试验来看,接触冲刷发生破坏过程、抗冲性、土体内部颗粒流失及分布情况、冲蚀量等问题与土体性质、 K_b 及 J^* 等密切相关。

3.1 试样的抗冲能力

t_1 与 J^* 的关系如图 2 所示。由图 2 可知,对于不同黏粒质量分数的土体, K_b 及 J^* 相同时,土体黏粒质量分数越大, t_1 越大;对于同种土体, K_b 越大,则 t_1 越大,抗冲性越强。但不同土体的 t_1 在 J^* 较

大时表现出一定的离散性。例如, $K_b = 0.75$ 、 $J^* = 20.0$ 时, A、B、C 类土体的 t_1 分别为 3 min、0.5 min 和 8.0 min。同样条件下,黏粒质量分数 4.6% 的 A 类土体反而较黏粒质量分数 12.3% 的 B 类土体的 t_1 大。这一现象反映了影响土体接触冲刷因素的随机性,同时,也反映出在工程施工过程中土石接合部渗透破坏实际制约因素较大。

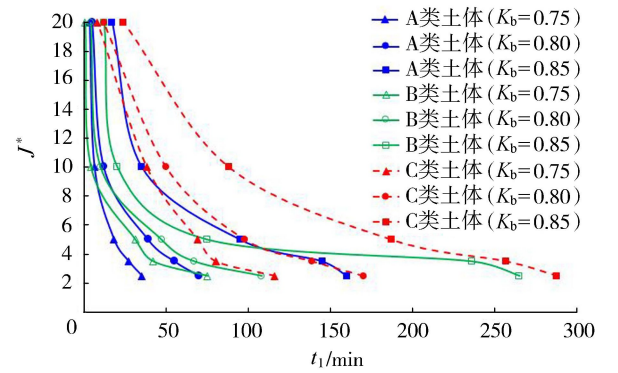


图 2 $t_1 \sim J^*$ 关系

t_2 与 J^* 的关系如图 3 所示。土石接合部存在缺陷情况下,在上游较高水头的长时间作用下,较易发生接触冲刷破坏,这与工程实际也较为一致。同样,在相同条件下,黏粒质量分数越大、 K_b 越大的土体抗冲刷能力较强。例如, $J^* = 5.0$, K_b 分别为 0.75、0.80 和 0.85 时,黏粒质量分数为 12.3% 的 B 类土体的 t_2 较黏粒质量分数为 4.6% 的 A 类土体分别增大了 90%、25% 和 39%。

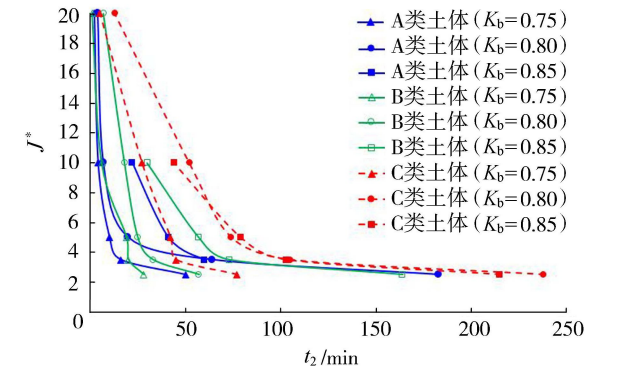


图 3 $t_2 \sim J^*$ 关系

3.2 冲蚀量的变化规律

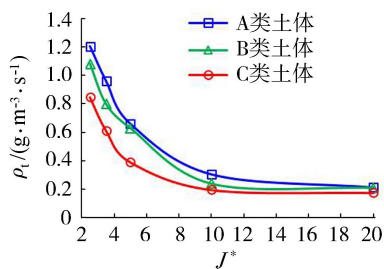
本文所述冲蚀量指下游出现浑水后,单位时间内、单位体积浑水中所含干沙的质量 ρ_1 ,计算公式为

$$\rho_1 = \frac{W_s}{Vt} \quad (1)$$

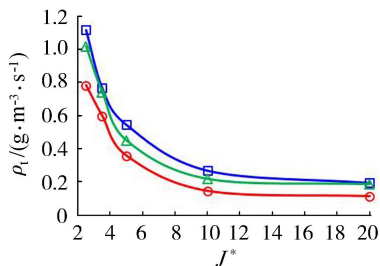
式中: W_s 为水样中的干沙质量, g; V 为水样体积, m^3 ; t 为冲刷持续时间, s。

不同条件下,冲蚀量随水力比降的变化如图 4 所示。从图 4 可以得出:

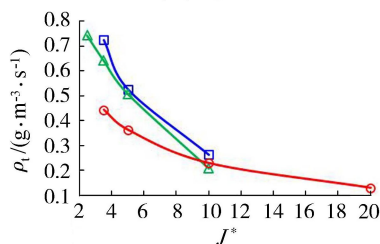
a. 相同试验条件下,3 种土体 ρ_1 随着黏粒质量



(a) $K_b=0.75$



(b) $K_b=0.80$



(c) $K_b=0.85$

图4 $\rho_i \sim J^*$ 关系

分数的增加均呈现非线性减小趋势,黏粒质量分数 22.6% 的 C 类土体 ρ_i 反而较黏粒质量分数 4.6% 的 A 类土体小。 $K_b=0.80$ 时,这两类土体 ρ_i 最大可相差 1.93 倍,但随着 J^* 增加,这种差异逐渐缩小。但 $J^*>10.0$ 时,土体差异不再表现出明显作用,此时 J^* 起主导作用。

b. 总体上,在相同条件下, K_b 与 ρ_i 也成反比关系, K_b 越小,则 ρ_i 越大。这是因为 K_b 越大,土体结构越稳定,颗粒间越密实,黏结力越大,就越难分散。 J^* 较小时,3 类土体 ρ_i 差别相对较为明显,但随着 J^* 的增大这种差异表现并不显著。

c. 在不同的 J^* 情况下, ρ_i 的变化也表现出不同的特点。不同黏粒质量分数土体的 ρ_i 随 J^* 的增大总体上呈现明显的减小趋势,且随着 J^* 的持续增大,其后期曲线较为平缓。例如, $K_b=0.75$ 、黏粒质量分数 4.6% 的 A 类土体, $J^*=5.0$ 时相应的冲蚀量分别是 $J^*=10.0$ 和 $J^*=20.0$ 时的 2.2 倍和 3.14 倍。初步分析认为, J^* 较小时,接触带土体由稳定、破坏至渗漏通道形成时间较长,土体内部颗粒水土作用持续时间较长,可动颗粒潜在移动范围及距离较大,细颗粒流失导致土体结构疏松,颗粒在内部复杂水土作用下较有可能出现孔隙填充现象,以致在渗漏通道形成后冲出土体质量较大。

3.3 土体细颗粒流失的变化规律

初始涌出土体细颗粒流失情况见表 2。

表 2 土体细颗粒流失情况

J^*	K_b	初始涌出土体黏粒质量分数/%		
		A 类土体	B 类土体	C 类土体
2.5	0.75	13.1	18.7	22.6
3.5		13.5	14.8	19.8
5.0		14.0	14.9	22.6
10.0		14.5	13.7	17.8
20.0		15.0	12.8	19.4
2.5	0.80	13.5	15.4	23.4
3.5		13.6	14.1	23.6
5.0		14.9	14.1	22.7
10.0		16.7	15.0	23.3
20.0		18.6	19.7	23.3
2.5	0.85		13.6	
3.5		13.3	15.7	23.3
5.0		13.6	15.1	23.2
10.0		15.6	15.3	22.6
20.0				20.9

3.3.1 土体性质对细颗粒流失的影响

土体黏粒质量分数越大,初始析出的土体黏粒质量分数也越大,且大部分大于原始土体黏粒质量分数。 $K_b=0.85$ 、 $J^*=5.0$ 时, A 类、 B 类及 C 类土体的初始涌出土体黏粒质量分数分别为 13.6%、 15.1% 和 23.2%, 分别是原始土体黏粒质量分数的 2.96 倍、 1.23 倍和 1.03 倍。 A 类土体细颗粒流失及变化最为明显: 初始涌出土体黏粒质量分数为原始土体黏粒质量分数的 2.85 ($K_b=0.75$ 、 $J^*=2.5$) ~ 4.04 ($K_b=0.80$ 、 $J^*=20.0$); 其余两类土体的黏粒质量分数变化略有差别, B 类土体析出细颗粒黏粒质量分数变化不大, 在 1.04 ($K_b=0.75$ 、 $J^*=20.0$) ~ 1.60 ($K_b=0.80$ 、 $J^*=20.0$) 之间; C 类土体析出细颗粒黏粒质量分数变化范围在 0.7 ~ 1.04 倍之间, 出现了较原始土体黏粒质量分数少的情况。初步分析认为, 对于黏粒质量分数较少的 A 类土, 土体结构较为疏松, 颗粒之间相互作用力不强, 水流作用力较易克服土颗粒的自重和颗粒之间的作用力, 细颗粒较易析出。

3.3.2 压实度对细颗粒流失的影响

K_b 的变化对不同种类的土体初始涌出土体细颗粒的影响规律并不一致。对于 A 类土体, $K_b=0.80$, J^* 分别为 2.5、 3.5、 5.0、 10.0、 20.0 时, 其涌出土体黏粒质量分数分别为 13.5%、 13.6%、 14.9%、 16.7% 和 18.6%, 普遍较 $K_b=0.75$ 时大。然而初始涌出土体黏粒质量分数与 K_b 并非呈现线性增长关系, 当 $K_b=0.85$ 时, 初始析出土体黏粒质量分数反而较 $K_b=0.80$ 时小。 K_b 较大时, 土体具有一定的抗冲刷破坏能力, 故而出现了 K_b 较大但土体细颗粒析出较少情况。

对于 B 类土体, $J^*=2.5$ 时, 析出土体细颗粒多

少与 K_b 成反比关系; $J^*=3.5、5.0$ 时,析出土体黏粒质量分数随着 K_b 增大先减小后增大;但 $J^*=10.0$ 时,析出土体黏粒质量分数与 K_b 成正比关系。

对于C类土体,同样的 J^* , $K_b=0.75$ 时析出土体黏粒质量分数较 $K_b=0.80、0.85$ 时小,在 $K_b=0.80$ 时析出土体黏粒质量分数达到最大值, $K_b=0.85$ 时又略有下降。对于 $K_b=0.75、0.80$ 情况,其含有的潜在可移动土体颗粒较多,不稳定性较大,析出的土体黏粒质量分数变化也较为明显,但当接触带 $K_b=0.85$ 时,抗冲刷性有一定的提高,反而出现了土体黏粒质量分数下降的情况。

3.3.3 水力比降对细颗粒流失的影响

由表2可知, J^* 越大,A类土体的初始涌出土体黏粒质量分数均较原始土体黏粒质量分数大。例如 $K_b=0.75、J^*=20.0$ 时,A类土体的涌出土体黏粒质量分数为15.0%,是原始土体黏粒质量分数的3.26倍。但对于黏粒质量分数12.3%的B类土体及黏粒质量分数22.6%的C类土体, J^* 的变化对土体颗粒级配变化影响不大,且随着 J^* 的增大,甚至出现了涌出土体黏粒质量分数下降的现象。初步分析认为,相同试验条件下,黏粒质量分数较大土体抗冲

刷破坏较强,一旦发生内部土体颗粒的移动、涌出,则并非单个土体颗粒的移动,而是某个黏粒团的迁移。因此,出现了在某级 J^* 作用下,析出土体的黏粒质量分数时大时小的现象。

从前述分析中可知,土体黏粒质量分数、 K_b 及 J^* 这3个因素中,土体黏粒质量分数对涌出土体细颗粒的变化影响最为显著, K_b 次之, J^* 的影响最小。在一定水头作用下,土体颗粒主要承受自身重力、水压力等作用,但在土体颗粒启动后,则需克服其自身重力作用。黏粒由于粒径和平均质量较小,在水流作用下优先启动。然而,当土体黏粒质量分数较大时,其启动并不是单个颗粒,而是黏粒团的运动,黏粒团的启动也因土体性质及 J^* 的变化而有所不同。因此,涌出土体细颗粒的黏粒质量分数变化规律不一致。总体看来,影响试样破坏因素多且较为复杂。

3.4 试样抗冲蚀时间

根据不同黏粒质量分数土体试样的冲刷试验成果,分别绘制不同黏粒质量分数土体的 t_1 及 t_2 等值线如图5、图6所示。

由图5和图6可见,在所选土体黏粒质量分数及 K_b 试验范围内, t_1 和 t_2 等值线并未出现时间极

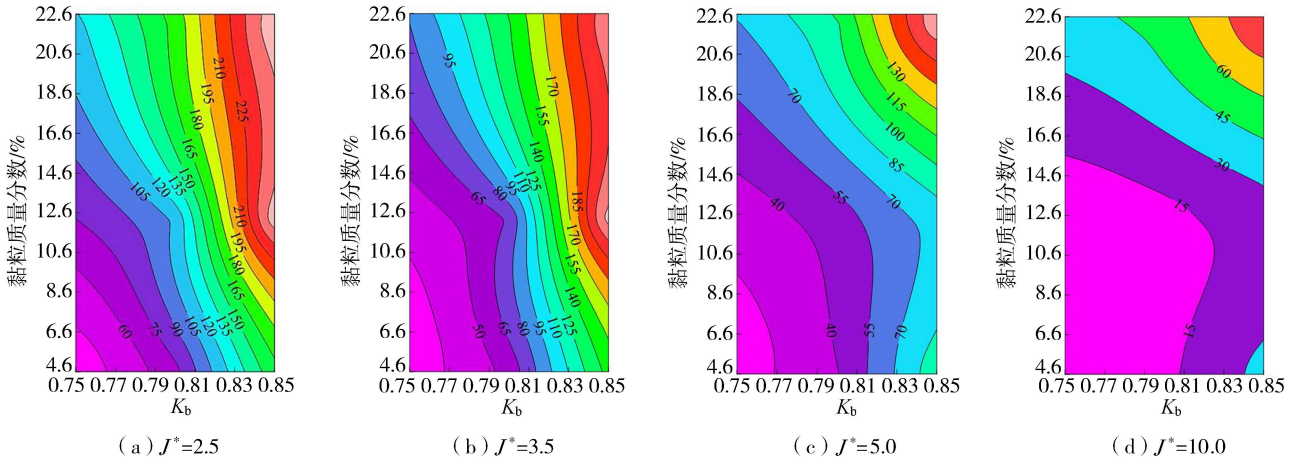


图5 t_1 等值线 (单位:min)

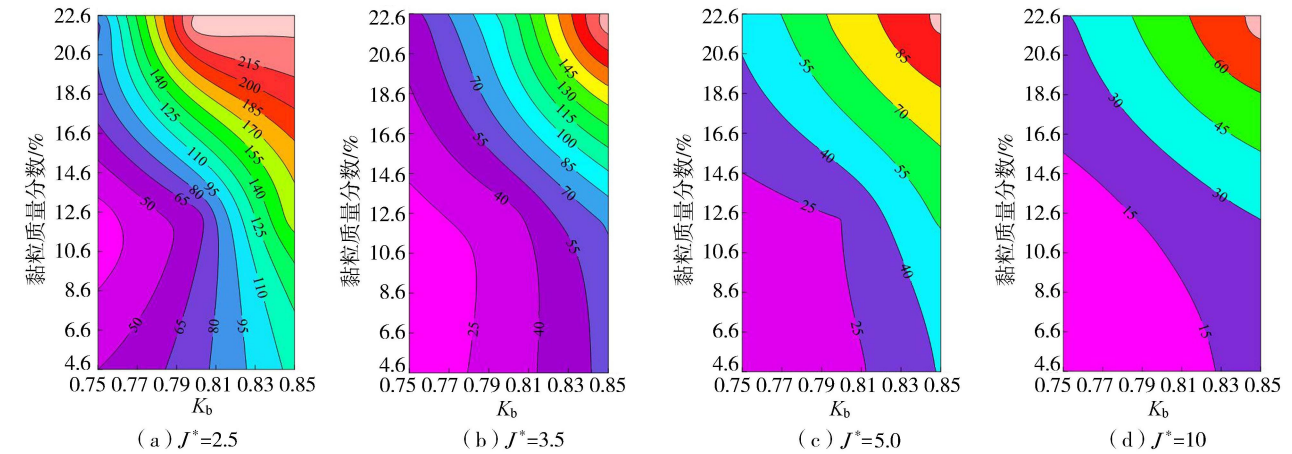


图6 t_2 等值线 (单位:min)

值。 J^* 越大, t_1 和 t_2 相对越小; 在 J^* 相同条件下, 随着土体黏粒质量分数或 K_b 的增大, t_1 和 t_2 也增大, 这一规律与前述基本一致。在稳定阶段, J^* 较小时, 时间等值线在横向差异较大, t_1 主要受 K_b 影响; 随着 J^* 的逐渐增大, 土体性质影响作用逐渐显现。尤其是在土体试样破坏后, 土体性质的影响作用表现得更为明显。

针对工程施工过程中接合部土体不易压实的问题, 可适当提高土体的黏粒质量分数, 以提高抗渗能力。GB50286—2013《堤防工程设计规范》规定均质土堤的土料宜选用黏粒质量分数为 10% ~ 35% 的黏性土, 1 级堤防压实度不应小于 0.95。从本次试验结果看, 当 J^* 较小时, 可对土体黏粒质量分数及 K_b 要求适当降低, 例如 $J^* = 2.5$ 时, 如若留有 110 min 的抢险时间, 从 t_1 等值线看, 黏粒质量分数 20%、 $K_b = 0.81$ 即可满足要求; 而当 J^* 较大时, 土体黏粒质量分数及 K_b 均应有所提高; 若 J^* 处于中间值时, 可采取增加 K_b 、降低土体黏粒质量分数的措施或降低 K_b 、提高土体黏粒质量分数的措施。

4 结 论

- a. 侧墙与两侧土体接合部碾压不密实情况下接触冲刷破坏主要集中在不密实区, 其破坏过程分为 3 个阶段: 稳定渗流阶段、管涌形成发展阶段和冲刷破坏发展阶段。渗漏通道形成过程并不连续, 具有间歇性、突发性和随机性等特点, 较难控制。
- b. 在相同的试验条件下, 土体黏粒质量分数越大、 K_b 越大, t_1 和 t_2 越大, 其抗冲刷能力也越强; 冲刷量随着黏粒质量分数的增加而减小, 随着 K_b 和 J^* 的增加总体上呈明显的减小趋势。
- c. 在 K_b 相同的情况下, 对于黏粒质量分数较小的低液限粉土, J^* 越大, 初始涌出土体黏粒质量分数越大, 且均大于原始土体黏粒质量分数; 但对于低液限黏土, 在相同试验条件下, 初始涌出土体黏粒质量分数与 K_b 并非呈现线性增长关系, 且出现了 K_b 越大, 析出土体黏粒质量分数反而越小的情况。
- d. J^* 较小时, 时间等值线在横向差异较大, t_1 主要受 K_b 影响; 随着 J^* 的逐渐增大, 土体性质影响作用逐渐显现。

参考文献:

[1] 梁军. 纵向增强体土石坝的设计原理与方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 128-133. (LIANG Jun. Design principle and method for the earth rockfill dam with longitudinal reinforcements[J]. Journal

of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(2): 128-133. (in Chinese))

[2] 刘杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[3] 常利营, 陈群. 接触冲刷研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(2): 79-82. (CHANG Liying, CHEN Qun. Progress in contact scouring research[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(2): 79-82. (in Chinese))

[4] 满晓磊, 束一鸣, 曹明杰, 等. 管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1): 28-35. (MAN Xiaolei, SHU Yiming, CAO Mingjie, et al. Experimental study on dam core sand scouring through seams between tubes of a geotube dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1): 28-35. (in Chinese))

[5] CHEN Shoukai, HE Qidong, CAO Jigang. Seepage simulation of high concrete-faced rockfill dams based on generalized equivalent continuum model [J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(3): 250-257.

[6] 河南水利科学研究所. 土坝心墙与岩基接触冲刷试验研究报告[R]. 郑州: 河南水利科学研究所, 1981.

[7] 黎国凡. 温峡口水库石渣组合坝粘土心墙与基岩的接触冲刷试验[J]. 水利水电技术, 1987, 18(7): 18-22. (LI Guofan. Experimental study on contact scouring between clay core wall and bedrock of Wenxiakou Reservoir Dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1987, 18(7): 18-22. (in Chinese))

[8] 詹美礼, 高峰, 何淑媛, 等. 接触冲刷渗透破坏的室内试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(增刊1): 206-208. (ZHAN Meili, GAO Feng, HE Shuyuan, et al. Experimental study on contact scouring of clay under normal stress [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2009, 28(Sup1): 206-208. (in Chinese))

[9] 邓伟杰. 土石坝接触冲刷试验与分析研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.

[10] 刘杰. 无黏性土层之间渗流接触冲刷机理实验研究[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(3): 27-30. (LIU Jie. Mechanism of seepage contact scour between cohesionless soil layers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(3): 27-30. (in Chinese))

[11] 陈群, 彭君, 朱分清. 砂砾石与砂接触冲刷试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 295-300. (CHEN Qun, PENG Jun, ZHU Fenqing. Experimental study of contact scouring between sandy gravel and sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 295-300. (in Chinese))

(下转第 94 页)