

砂砾石与砂接触冲刷试验研究

陈 群¹, 彭 君², 朱分清²

(1. 四川大学 水利水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司 公路与市政分院, 四川 成都 610061)

摘 要: 渗流作用下土层之间的接触面是较易发生渗透破坏的薄弱环节。在开展砂砾石渗透破坏试验研究的基础上, 针对砂砾石与砂的接触面渗流及渗透破坏特性, 利用大型竖向渗透仪和自主研发的环状径向水平渗透仪, 研究了竖向和水平渗流作用下接触面渗流和渗透破坏的影响因素及接触冲刷的发生、发展过程。研究表明, 典型的砂砾石与砂的接触冲刷破坏过程可分为稳定渗流阶段、过渡阶段和破坏阶段 3 个阶段, 可用 2 个特征水力坡降进行划分, 稳定渗流阶段与过渡阶段的分界点对应的水力坡降称为启动坡降, 过渡阶段与破坏阶段的分界点对应的水力坡降称为破坏坡降; 砂砾石与砂组合试样的渗透系数随砂砾石密度的增大、颗粒变细而减小, 砂砾石与砂接触冲刷的抗渗坡降则随砂砾石密度的增大、颗粒变细而增大, 在水平渗流情况下试样的渗透系数较竖向的大, 但接触冲刷的抗渗坡降较竖向的小。

关 键 词: 接触冲刷; 渗流; 试验; 砂砾石

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 增 1-0295-06

Experimental study of contact scouring between sandy gravel and sand

CHEN Qun¹, PENG Jun², ZHU Fen-qing²

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Hydraulic and Hydropower Engineering, Sichuan University,

Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. Road & Municipal Design and Research Institute, China Railway Eryuan Engineering Group, Co., Ltd.,

Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The interface between two soils is a weak place where the seepage failure occurs easily. In order to investigate the seepage and seepage resistance properties of the interface between sandy gravel and sand, based on the seepage failure tests for the sandy gravel, the impact factors of the seepages and seepage failure, the occurrence and evolution of contact scouring under the conditions of vertical and horizontal seepages are studied by using large-scale vertical permeameter and self-built annular radial horizontal permeameter. It is concluded from the test results that the typical contact scouring process can be divided into three stages, i.e., stable seepage, transitional and failure stages. The three stages can be divided by two characteristic hydraulic gradients. The hydraulic gradient corresponding to the limit of the stable seepage stage is called starting gradient and that of the transitional stage is called failure gradient. The permeability of the combined sample of sandy gravel and sand decreases with increasing of the dry density, or decreasing of the particle size of the sandy gravel. But the seepage resistance of contact scouring increases with increasing of the dry density, or decreasing of the particle size of the sandy gravel. On the condition of horizontal seepage, the permeability of the sample is larger but the seepage resistance of contact scouring is less than that of vertical seepage.

Keywords: contact scouring; seepage; test; sandy gravel

1 引 言

我国主要河流的河床覆盖层厚度一般均可达到数十米甚至上百余米, 某些局部地段甚至达到了数百米^[1]。随着我国水利水电事业的蓬勃发展, 已有很多大坝建于覆盖层上^[2], 在深厚覆盖层上建坝

的问题受到越来越多的重视。天然沉积的覆盖层与人工填筑体不同, 具有天然性、显著的非均质、各向异性和成层性, 其密度、级配等物理性质不可人为控制, 相邻土层的性质可能差别较大, 尤其是当两层土的级配、渗透性相差较大时, 在渗流作用下土层间较易发生渗透变形破坏, 使建筑在其上的大

收稿日期: 2015-10-13

基金项目: 四川省学术和技术带头人培育基金 (川人[2015] 100-8)。

This work was supported by the Sichuan Provincial Academic and Technical Leaders Nurturing Fund (Chuanren[2015] 100-8).

第一作者简介: 陈群, 女, 1972 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土体渗流与渗透破坏特性研究工作。E-mail: chenqun@scu.edu.cn

坝存在较高的破坏风险,因此,坝基、堤基等天然土层的渗流安全问题值得深入研究。

过去对人工填筑土体的渗透破坏或单层土的管涌研究较多^[3-7],对天然沉积的土层,尤其是土层之间的接触冲刷研究较少。陈建生等^[8]讨论了砂砾石层与黏土层发生接触冲刷时细砂从接触面因渗流冲刷而流失的发展过程,并将接触面的渗透性用光滑裂隙的渗透性代替,将渗流出口视为承压完整抽水井,基于井流理论,通过分时段的稳定流计算,模拟了接触冲刷的全过程。邓伟杰^[9]利用自行研制的接触冲刷仪对砂砾石与黏性土的接触冲刷进行了研究,得出了砂砾石级配对于接触冲刷破坏坡降的影响规律。刘杰^[10]详细分析了接触冲刷的破坏机制,提出了接触冲刷发生的条件。Guidoux 等^[11]利用水平渗透试验,对黏性土和粗粒土进行接触冲刷试验,提出了适用于黏性土的接触冲刷临界流速的计算公式。

上述研究针对某两种土层之间的接触冲刷问题,初步研究了接触冲刷的发展过程、发生机制以及判别方法,取得了可供工程参考的有用结论。但天然覆盖层土体种类多样,性质复杂,土层之间的接触面和渗流方向之间存在不同的组合形式,上述研究还不能囊括实际工程中可能遇到的各种情况,有待更加深入系统的研究。本次针对天然覆盖层砂与砂砾石的接触面渗流特性和接触冲刷过程,考虑不同的渗流方向,研究接触冲刷发生、发展过程及其影响因素,从而揭示无黏性粗粒土层接触面发生接触冲刷的机制。

2 试验仪器和方法

采用大型竖向渗透试验仪对两层土料进行竖向接触冲刷试验,试验仪的试样室为直径为 30 cm、高 30 cm 的圆柱体。试验时水流方向由下向上,通过试样底部的进口水箱为试样底面施加较高的常水头,试样的顶面为自由出水面,进口水箱侧壁上装有水压力表,可测得进口水压力。

试验时将圆柱形试样筒用竖向隔板分为对称的两半分别装填两种土料,分 3 层填装击实土料,层间进行刨毛处理,在试样筒壁涂抹一层厚约 0.5 cm 的高塑性黏土,防止发生沿试样筒壁的集中渗流。试样装好后采用水头饱和法进行土样的饱和,试验时逐级施加渗透水头,施加每级水头并稳定数小时后,每间隔 30~60 min 用秒表和量筒测记一定时间内的渗透水量,测定次数视流量稳定时间长短而异,且不少于 3 次。用流量稳定后 3 次读数的平

均值计算渗透流速,同时测读试样进口水压力值。当流量稳定后施加下一级水头,采用同种方法测量渗透流量。若某级水头作用下通过试样的渗透流量突然增大并且无稳定趋势或进口水头已经达到能够施加的最大水头值,则停止试验。

水平接触冲刷试验由自主研制的环状径向渗透试验仪^[12]进行,其试样室为内径为 2 cm、外径为 30 cm、高 30 cm 的空心圆柱体,如图 1 所示。此仪器采用环状结构,试样承受从中心到四周的水力坡降,水流从中心透水管流入试样,从带孔的试样桶壁流出。由于水平渗透仪顶、底面边壁为平面,其防渗处理更易于实现且效果较好,故渗流的边壁效应较小。水流方向为水平方向,与土样的层面平行,能更真实地模拟地基中渗流的主要方向,能够提供 60 m 的稳定高压水头,采用可升降式水箱和高压水泵相结合的供水方式。

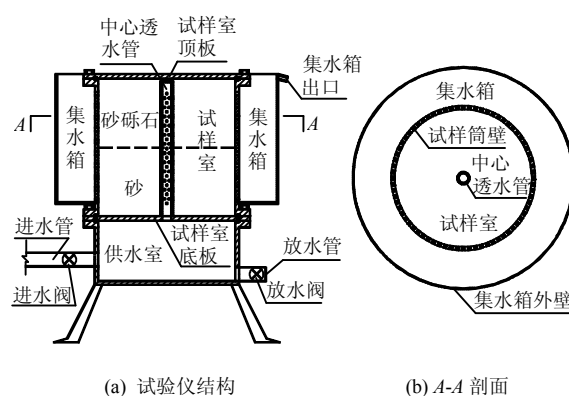


图 1 环状径向水平渗透试验仪结构示意图

Fig. 1 Profile of annular radial horizontal permeameter

试验时将试样室分为上下相同的两部分,分界面见图 1 中虚线。两种土样的高度均为 15 cm,平截面都为环形。装样时,中心透水管用土工布包裹,以防止土料细颗粒堵塞供水管出水孔。在筒底和顶部铺设约 5 mm 的高塑性黏土,以防止水流沿底板和顶板集中渗透。每种土都分 3 层装填。试样饱和且流量稳定后每隔 30~60 min 测量记录渗流量,然后施加下一级水头。当流量突然增大且无稳定趋势或进水口水头已经达到仪器的最大水头 60 m 时,停止试验。

3 试验用土料和试验方案

3.1 试验用土料

试验中采用的砂和砂砾石料主要参考水电工程坝基覆盖层的土料种类进行设计。根据试验所采用仪器的试样室尺寸,试验允许的最大粒径为

20 mm^[13], 土料的粒径按 20 mm 控制, 试验土料的级配曲线如图 2 所示, 其粒组含量及定名见表 1。一般砂层的级配变化不大, 仅采用一种级配曲线。砂砾石的级配较宽, 级配随各粒组含量的变化而变化, 试验时采用了 5 种砂砾石级配, 其级配曲线见图 2 中 G1~G5。砂砾石 G1~G5 的颗粒依次变粗。

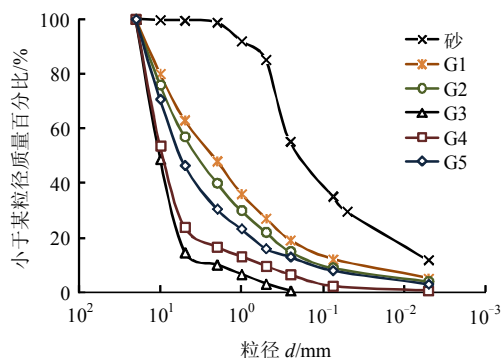


图 2 试验用砂和砂砾石的级配曲线

Fig.2 Particle size distribution curves of sand and sandy gravel

表 1 试验用砂和砂砾石颗粒组成及定名

Table 1 Particle composition and denomination of sand and sandy gravel used in tests

土样	颗粒组成/%			不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	分类定名
	砾	砂	粉、黏粒			
砂	1.2	63.7	35.1	82.8	2.7	SC
G1	52.0	36.0	12.0	107.9	2.5	GF
G2	60.0	31.0	9.0	58.0	1.7	GF
G3	69.5	22.5	8.0	57.7	4.1	GF
G4	83.5	14.3	2.2	19.3	6.0	GP
G5	90.0	10.0	0.0	5.7	2.2	GW

3.3 试验方案

为了研究砂砾石本身的渗透破坏特性, 进行砂与砂砾石组合试样的接触冲刷试验研究之前, 先采用竖向渗透仪研究不同级配和不同密度的砂砾石的渗透破坏特性, 试验方法和步骤与组合试样的类似, 限于篇幅, 本文未列出具体方案, 仅在结果分析中给出主要结论。

由前人的接触冲刷研究^[8]可知, 两种材料发生接触冲刷与否, 与材料本身的密度、级配等特性有关。文献[8]的研究显示两种土料中相对较粗的土料的密度和级配对接触冲刷的影响更显著, 本文主要研究砂砾石的密度和级配以及渗流方向对接触冲刷的影响, 分别设计 3 组试验考虑这些影响因素, 具体的试验方案见表 2。表中, 试样编号的前一个数字代表试验组, 后一个数字代表序号。前 2 组试验

为竖向渗透试验, 分别改变砂砾石的密度和级配, 第 3 组试验为水平渗透试验。采用 3 种砂砾石级配, 与第 2 组竖向渗透试验进行对比, 探讨渗流方向对砂砾石与砂的接触冲刷的影响。试验过程中未对所有试样开展平行试验, 但若出现反常现象或者试验结果的规律性较差的情况, 会重复进行此试验以获得较为可靠的试验结果。

表 2 接触冲刷试验方案

Table 2 Test scheme of contact scouring

渗流方向	变化因素	试样编号	砂砾石干密度 $\rho_d / (\text{g/cm}^3)$	砂砾石级配
竖向	砂砾石干密度	1-1	1.88	
		1-2	2.01	G3
		1-3	2.14	
	砂砾石级配	2-1		G1
		2-2		G2
竖向	砂砾石级配	2-3	1.88	G3
		2-4		G4
		2-5		G5
		3-1		G1
		3-2	1.88	G2
水平	砂砾石级配	3-3		G3

4 试验结果分析

4.1 砂砾石渗透破坏试验研究

从砂砾石试样发生渗透破坏的过程和现象可知, 砂砾石主要发生管涌破坏, 且在管涌的发展过程中出现 2 个水力坡降特征值, 前一个对应细颗粒刚开始移动的坡降, 称为启动坡降, 当水力坡降大于此值后, 渗透流速与水力坡降的关系曲线会偏离直线, 变为非线性关系。后一个水力坡降特征值对应管涌破坏的发生, 称为破坏坡降, 当水力坡降大于此值后渗透流速会持续增大, 细颗粒持续被水流带出。试验所测得的砂砾石的渗透系数、发生管涌破坏的启动坡降和破坏坡降见表 3。由表中数据可知, 砂砾石发生管涌破坏的启动坡降和破坏坡降都随土样干密度的增大而增大, 随土样变粗而减小。

表 3 砂砾石的渗透系数及抗渗坡降

Table 3 Coefficients of permeability and seepage resistance gradients of sandy gravel

干密度 $\rho_d / (\text{g/cm}^3)$	级配	渗透系数 $k / (\text{cm/s})$	启动坡降	破坏坡降
1.88	G3	3.83×10^{-2}	0.18	1.14
2.01		7.67×10^{-3}	0.50	3.68
2.14		3.90×10^{-3}	0.64	3.85
1.88	G4	4.95×10^{-2}	0.15	1.02

G5	1.18×10^{-1}	0.12	0.93
----	-----------------------	------	------

4.2 接触冲刷的发生发展过程

在竖向接触冲刷试验过程中发现,随着水头的不断提升,渗透流量逐渐增大,当水头增加到一定程度时在砂砾石与砂的接触面处有细小颗粒的跳动、带出,保持水头不变的情况下细小颗粒的跳动、带出现象逐渐停止。随着水头的继续增大,细颗粒的带出现象逐渐加剧,范围越来越大,并且围绕着接触面发展,最终渗透流量突然增大且无稳定趋势,砂砾石与砂的接触面附近有大面积的细小颗粒被带出,水面越来越浑浊,说明砂砾石与砂已经发生了接触冲刷破坏。从试验中观察到细颗粒的移动首先从接触面处开始,两种土接触面处的接触冲刷破坏是先于两种土本身的管涌或者流土破坏的。

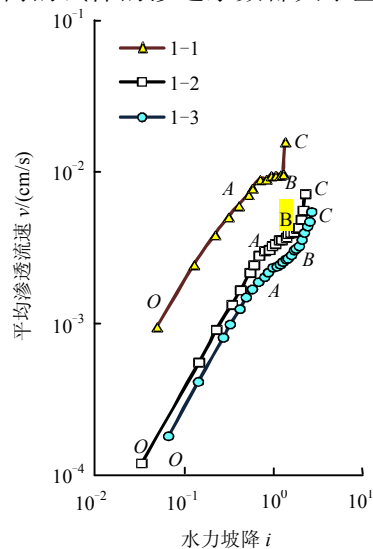
图3为渗透流速与水力坡降之间的双对数关系曲线。从图中可以看出,渗透流速都随水力坡降的增加而增大,典型的渗透流速与水力坡降的关系曲线上有2个明显的拐点A、B,拐点将接触冲刷过程分为3个阶段:第1阶段曲线为接近45°的斜线(图中OA段),说明渗透系数为一个常数,为稳定渗流阶段;第2阶段曲线变缓,渗透系数随水力坡降的增大而减小(图中AB段),说明接触面出现了细颗粒的移动并可能在孔隙中聚集,因此曲线斜率改变,渗透系数发生变化;当水力坡降足够大时(图中B点),渗透流速突然增大,曲线斜率陡增,此时接触面的细颗粒持续被带出,形成集中渗漏通道,接触冲刷破坏发生。

典型接触冲刷破坏过程的3个阶段分别为稳定渗流阶段(OA段)、过渡阶段(AB段)和破坏阶段(BC段)。曲线上的拐点A、B分别称为启动坡降和破坏坡降,前者对应接触面处细颗粒移动的开始,后者对应最终接触冲刷破坏的发生。少部分曲线未出现AB段,细颗粒开始移动时紧接着就发生了渗透破坏。在相同水力坡降下渗透流速随着砂砾石干密度的增大而减小,砂砾石的颗粒越粗,渗透流速越大。

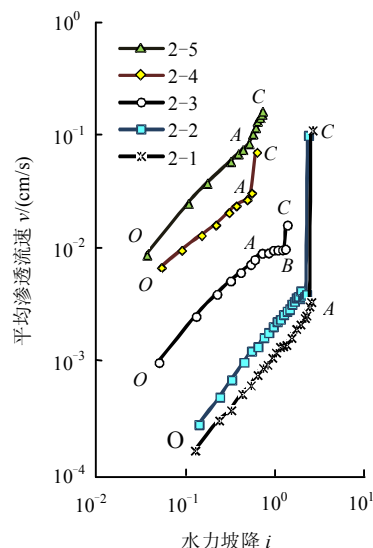
4.3 土样的渗透性

由图3中稳定渗流OA段可求出试样的渗透系数,各组试样的渗透系数随砂砾石干密度或级配的变化情况见图4。由图可见,渗透系数随砂砾石干密度的增大而非线性减小,说明干密度越大时同样干密度增量对应的渗透系数减小量越小,砂砾石的颗粒越粗,渗透系数越大,这与单层土的渗透性随颗粒变粗而增大的规律一致。由图4(b)可见,对于不同级配的砂砾石与砂组成的土样,渗流和接触面

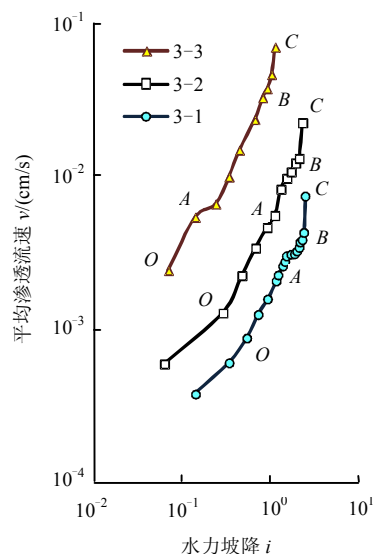
为水平方向的试样的渗透系数都大于竖向的渗透



(a) 竖向、干密度不同



(b) 竖向、级配不同



(c) 水平向、级配不同

图3 渗透流速与水力坡降的关系曲线
Fig.3 Relationships between seepage velocity and

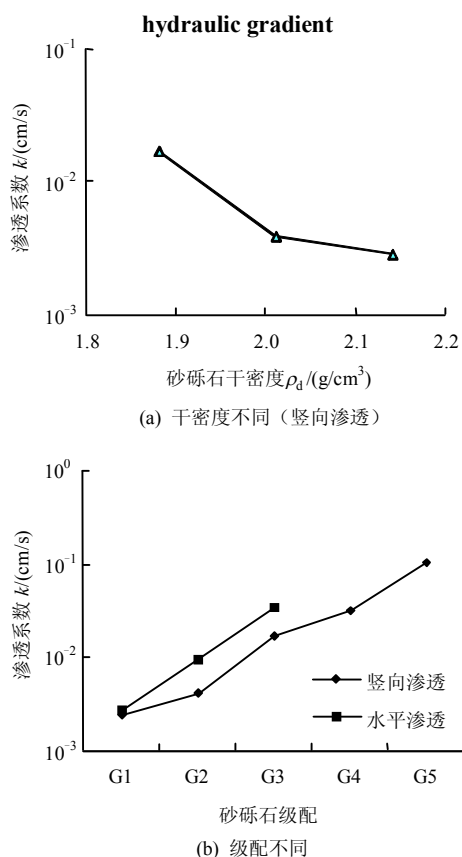


图 4 渗透系数随砂砾石干密度和级配的变化曲线

Fig.4 Change curves of permeability coefficient with dry density and gradation of sandy gravel

系数。除了最细的砂砾石 G1 与砂的组合试样外,其余 2 个砂砾石与砂组合试样的水平渗透系数约为竖向渗透系数的 2 倍左右。这是由于试样都是水平分层填装的,与现场分层沉积的土层类似,竖向所受的压力大于水平方向的压力,致使水平方向孔隙的连通性更好,加之填装层面也可能是渗流的主要通道,因此,水平方向的渗透系数一般大于竖向的渗透系数。

4.4 试样的抗渗能力

图 3 中各曲线上的 A 点和 B 点的横坐标分别对应试样中细颗粒刚开始移动的启动坡降和试样发生接触冲刷的破坏坡降,这两个坡降可统称为抗渗坡降。图 5 为抗渗坡降随砂砾石干密度和级配的变化曲线。由于不同级配的砂砾石组成的某些试样的流速变化过程未出现明显的过渡段,其启动坡降与破坏坡降重合,对于不同级配试样仅绘出破坏坡降的变化情况,从图 5 中可以看出,试样发生接触冲刷的启动坡降和破坏坡降都随砂砾石密度的增大而非线性增大,随砂砾石变粗而减小。砂砾石的干密度越大,或者颗粒越细,其中的孔隙尺寸就越小,因此接触面处的细颗粒的移动越困难,试样的抗渗坡

降就越大。对于竖向接触冲刷试验,破坏坡降约为启动坡降的 2~3 倍。由图 5(b)可知,对于不同级配的砂砾石与砂的组合土样,水平方向渗流时破坏坡降都稍小于竖向渗流的情况,但两者的破坏坡降随砂砾石级配变化的规律一致,破坏坡降都随砂砾石变粗而减小。由于成层制样时水平方向所受压力较竖向小,且存在装填土样的层面,孔隙的连通性更好,细颗粒的移动也就更容易。另外,水平方向颗粒的移动不受重力的影响,试样水平方向的抗渗能力低于竖向。

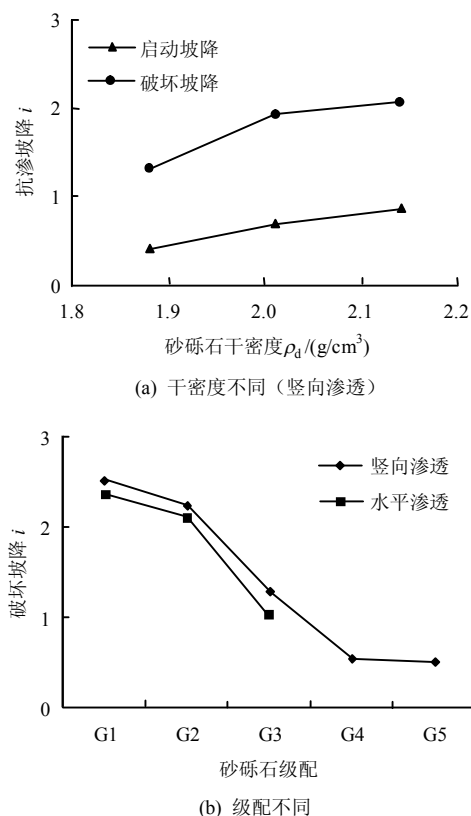


图 5 抗渗坡降随砂砾石干密度和级配的变化曲线

Fig.5 Change in seepage resistance gradient with dry density and gradation of sandy gravel

由以上分析可知,对于特定的土样,抗渗能力随各影响因素的增减变化与渗透性随相同因素的变化规律是相反的,渗透系数随干密度的增大而减小,而抗渗能力随干密度的增大而增大;土样颗粒越粗,渗透系数越大,但接触冲刷的破坏坡降越小;水平渗流时渗透系数大于竖向渗流,但其破坏坡降小于竖向渗流的情况。

5 结 论

(1) 砂砾石与砂的接触冲刷破坏过程可分为稳定渗流、过渡和破坏 3 个阶段。3 个阶段之间的 2 个转折点所对应的水力坡降分别称为启动坡降和破

坏坡降。两种土接触面处的接触冲刷破坏总是先于这两种土本身的管涌或者流土破坏。

(2) 随着砂砾石干密度的增大, 砂砾石与砂组合试样的渗透系数逐渐减小, 发生接触冲刷破坏的抗渗坡降逐渐增大。砂砾石越粗, 砂砾石与砂组合试样的渗透系数越大, 发生接触冲刷破坏的抗渗坡降越小。

(3) 在其他条件相同的情况下, 水平向渗流时的砂砾石与砂组合试样的渗透系数比竖向渗流时的大, 但抗渗坡降比竖向渗流时的小。

参考文献

- [1] 许强, 陈伟, 张倬元. 对我国西南地区河谷深厚覆盖层成因机制的新认识[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 448—456.
XU Qiang, CHEN Wei, ZHANG Zhuo-yuan. New views on forming mechanism of deep overburden on river bed in Southwest of China[J]. **Advances in Earth Science**, 2008, 23(5): 448—456.
- [2] 党林才, 刘荣丽, 王仁坤. 利用覆盖层建坝的实践与发展[M]// 利用覆盖层建坝的实践与发展. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 1—13.
DANG Lin-cai, LIU Rong-li, WANG Ren-kun. Practice and development of damming using overburden[M]// Practice and Development of Damming Using Overburden. Beijing: China Water Power Press, 2009: 1—13.
- [3] MOFFAT R, FANNIN R J, GARNER S J. Spatial and temporal progression of internal erosion in cohesionless soil[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2011, 48(3): 399—412.
- [4] RICHARDS K S, REDDY K. R. Experimental investigation of initiation of backward erosion piping in soils[J]. **Geotechnique**, 2012, 62(10): 933—942.
- [5] CHANG D L, ZHANG L M. Critical hydraulic gradients of internal erosion under complex stress states[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2013, 139(9): 1454—1467.
- [6] FLESHMAN M S, RICE J D. Laboratory modeling of the mechanisms of piping erosion initiation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2014, 140(6): 04014017.
- [7] 姚秋玲, 丁留谦, 刘昌军. 堤基管涌破坏特性研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(4): 349—357.
YAO Qiu-ling, DING Liu-qian, LIU Chang-jun, et al. Overview on the research of the mechanism of backward erosion piping in dike foundations[J]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2014, 12(4): 349—357.
- [8] 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.
Chen Jian-sheng, LIU Jian-gang, JIAO Yue-hong. simulation study on the contact scouring development between underground layers[J]. **Engineering Science**, 2003, 5(7): 33—39.
- [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.
DENG Wei-jie. Testing and analysis on contact scouring of soil-rock dams[D]. Nanjing: Hehai University, 2008.
- [10] 刘杰. 无黏性土层之间渗流接触冲刷机制实验研究[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.
- [11] CYRIL G, YVES-HENRI F, RÉMI B, et al. Contact erosion at the interface between granular coarse soil and various base soils under tangential flow condition[J]. **Journal of Geotechnical and Geo- environmental Engineering**, 2010, 136(5): 741—750.
- [12] 陈群, 谷宏海. 土体水平向渗透系数测量仪[P]. 中国, 201010523941.5, 2012-05-02.
CHEN Qun, GU Hong-hai. Instrument for measuring horizontal permeability coefficient of soil[P]. 中国, 201010523941.5, 2012-05-02.
- [13] 南京水利科学研究院. SL 237-1999 土工试验规程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
Nanjing Hydraulic Research Institute. SL 237-1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.