

DOI: 10.11779/CJGE2016S2015

# 砂砾石与黏土的接触冲刷试验研究

朱亚军<sup>1</sup>, 彭君<sup>2</sup>, 陈群<sup>\*1</sup>

(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, 成都 610061)

**摘要:** 覆盖层中的接触冲刷破坏是工程界越来越关注的渗透破坏问题, 砂砾石与黏土的接触面易发生接触冲刷, 因此有必要对其主要影响因素进行深入研究。通过竖向和水平向接触冲刷渗透试验分析成层土中砂砾石干密度和级配对砂砾石与黏性土的接触冲刷的影响规律及接触冲刷发生的过程。试验结果表明, 砂砾石与黏土的接触冲刷破坏过程分为稳定阶段、过渡阶段和破坏阶段, 渗透破坏刚开始发生时即稳定阶段与过渡阶段的交界点对应的水力坡降称为启动坡降, 渗透破坏充分发展时即过渡阶段与破坏阶段的交界点对应的水力坡降称为破坏坡降。接触冲刷的发生主要受砂砾石的干密度和级配影响。砂砾石的干密度越大, 试样整体渗透性越小, 发生接触冲刷的启动坡降和破坏坡降就越大。随着砂砾石级配的变粗, 试样整体渗透性变大, 发生接触冲刷的启动坡降和破坏坡降变小。相同条件下与竖向渗流相比, 水平向渗流接触冲刷的渗透系数更大, 破坏坡降更小。

**关键词:** 覆盖层; 接触冲刷; 砂砾石; 黏土

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0092-06

作者简介: 朱亚军(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土体渗流特性的研究。E-mail: zhuyajun163address@163.com。

## Contact scouring tests on sandy gravel and cohesive soil

ZHU Ya-jun<sup>1</sup>, PENG Jun<sup>2</sup>, CHEN Qun<sup>1</sup>

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

University, Chengdu 610065, China; 2. Road & Municipal Design and Research Institute, China Railway Eryuan Engineering Group Co.,  
Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The contact scouring in the covering layer has attracted more and more concern in the engineering. The contact scouring at the interface between sandy gravel and cohesive soil is easy to happen, so it is necessary to study the main influence factors and the process of contact scouring to reveal its mechanism. Through the experiments of vertical and horizontal contact scouring, the influence of the dry density and grading of sandy gravel on the contact scouring between sandy gravel and cohesive soil is analyzed. The results show that the process of contact scouring can be divided into three stages, stable stage, transition stage and failure stage. The hydraulic gradient when the contact scouring just happens is called starting gradient, and it is called failure gradient when the seepage failure finally occurs. The contact scouring is mainly affected by the dry density and grading of sandy gravel. The greater the dry density of sandy gravel, the lower the permeability of the sample. At the same time, the starting gradient and the failure gradient both increase. The permeability is greater and the starting gradient and the failure gradient of contact scouring are lower when the particle of the sandy gravel becomes coarser. Compared with those under vertical contact scouring under the same condition, the permeability of samples under horizontal seepage is greater and the failure gradient is lower.

**Key words:** overburden layer; contact scouring; sandy gravel; cohesive soil

## 0 引言

近年来, 越来越多的水利工程修建或即将修建在覆盖层上, 而作为坝基的覆盖层往往较厚<sup>[1]</sup>。覆盖层土体在地质作用下沉积, 具有一定的随机性, 当覆盖层相邻两层土在颗粒组成、渗透特性等方面有很大差异的情况下, 发生接触冲刷破坏的可能性很大, 对于

坝基的渗透稳定性相当不利, 对此, 国内外一些学者对接触冲刷进行了研究, 但目前在黏土层和无黏性土层之间接触冲刷方面的研究还不够完善。刘杰<sup>[2]</sup>、伊

基金项目: 四川省学术和技术带头人培育基金(川人[2015]100-8)

收稿日期: 2016-05-19

\*通讯作者 (E-mail: cq\_fq@sina.com)

斯托美娜<sup>[3]</sup>等进行了接触冲刷方面的试验, 并进行了判别发生接触冲刷的公式总结工作, 但主要是针对无黏性土之间的接触冲刷。刘杰指出, 黏性土与砂砾石层的接触冲刷的发生机理与无黏性土存在差异, 黏土团粒间的作用力小于黏土颗粒间的作用力, 因此被渗透水流冲出的是黏土颗粒团而非单个颗粒。王保田等<sup>[4]</sup>对粉质黏土和粉土的成层土的渗透破坏进行了试验模拟, 试验中除了在粉砂层的薄弱部位会发生涌砂现象外, 在结合面也会发生接触冲刷现象, 当水位超过临界水位, 接触冲刷会在接触面中发展贯通, 最终发生破坏。

陈建生等<sup>[5]</sup>采用井流理论对砂砾石层和黏土层之间接触冲刷进行了数值模拟, 指出颗粒的移动取决于渗透流速的大小, 接触冲刷发展方向为从下游溯流而上, 垂直河岸方向发展最快。邓伟杰<sup>[6]</sup>对砂砾石和黄土之间接触冲刷进行了试验模拟, 主要考虑的是砂卵石层上覆黄土的结构。由以上研究可知, 对于更具一般性的黏土层和砂砾石层的接触冲刷问题有待进一步研究。

本文采用一般黏性土和不同级配、密度的砂砾石开展试验研究。利用自行研制的环状径向水平渗透试验仪和竖向渗透试验仪, 进行一系列水平方向和竖直方向的接触冲刷试验, 研究砂砾石与黏土接触面发生接触冲刷的过程, 分析砂砾石干密度和级配对砂砾石层与黏土层的接触冲刷的影响, 并考虑不同渗流方向的影响。

## 1 接触冲刷试验方案及土料

### 1.1 试验土料

试验中采用的砂砾石土料主要参考双江口水电站的坝基覆盖层砂砾石的级配<sup>[7]</sup>。根据试验仪器尺寸, 确定试样允许的最大粒径为 20 mm<sup>[8]</sup>, 对于土料中大于 20 mm 的粒径采用等量替代法处理<sup>[9]</sup>, 得到试验所用的土料颗粒组成见表 1, 级配曲线如图 1 所示。由颗粒组成可知, 大于 0.075 mm 的颗粒占总体 50%以上, 且大于 2 mm 的砾组占粗粒组的 50%以上, 根据《土工试验规程》(SL237—1999)<sup>[9]</sup>中土的分类, 定名为砾类土。

表 1 试验用砂砾石颗粒组成及定名

Table 1 Grain composition and denomination of sandy gravels in tests

土样	颗粒组成/%							不均系数	曲率系数	定名	
	20~10~5~ 10	10~5~ 5	5~2~ 2	2~1~ 1	1~0.5~ 0.5	0.5~0.25~ 0.25	<0.075 0.075				
(mm)											
下包线	51.3	34.2	4.5	3.5	3.5	2.5	0.5	0.0	5.2	2.7	GW
平均线	46.3	29.9	7.3	3.5	3.5	3.1	4.2	2.2	18.7	6.4	GP
上包线	29.2	24.2	16.0	7.3	7.3	2.0	6.0	8.0	53.6	3.4	GF

试验中所用黏土的颗粒组成见表 2, 级配曲线如图 1 所示。由试验测得该黏土的比重  $G_s$  为 2.67, 液限  $w_L$  为 34.0%, 塑限  $w_p$  为 18.3%, 塑性指数  $I_p$  为 15.7。根据《土工试验规程》(SL237—1999)<sup>[9]</sup>中土的分类, 定名为低液限黏土 (CL)。

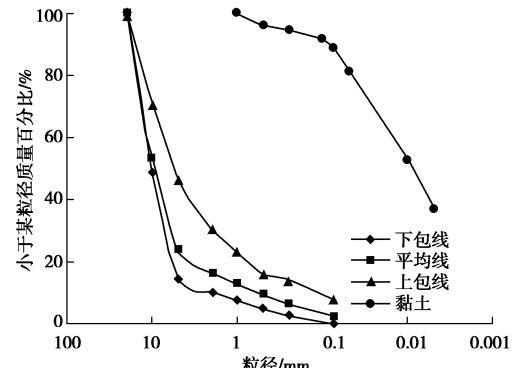


图 1 试验用砂砾石和黏土级配曲线图

Fig. 1 Particle-size distribution curves of sandy gravels and cohesive soil used in tests

表 2 试验用黏土颗粒组成及定名

Table 2 Grain composition and denomination of cohesive soil in tests

土样	颗粒组成/%						定名
	1~ 0.5	0.5~ 0.25	0.25~ 0.1	0.1~ 0.075	0.075~ 0.05	0.05~ 0.01	
黏土	3.37	1.63	3.03	2.53	7.80	28.87	15.26 37.51 CL

### 1.2 试验方案

参考已有的研究成果, 成层土接触面发生接触冲刷, 主要与土料本身的密度和级配有关, 邓伟杰在研究砂砾石和黄土的接触冲刷中指出影响两者材料接触冲刷的主要因素是较粗的土料的干密度和级配, 而黏土的密度和级配是次要因素<sup>[6]</sup>。本文针对干密度和级配的砂砾石与黏土进行接触冲刷试验。设计 1.88, 2.01, 2.14 g/cm<sup>3</sup> 三种干密度的砂砾石, 其级配都采用上包线, 同时渗流方向分为竖向和水平向两种。另设计三组不同级配 (上包线、平均线和下包线) 的砂砾石进行试验, 其干密度都采用 1.88 g/cm<sup>3</sup>, 具体试验方案见表 3。

表 3 接触冲刷试验方案

Table 3 Plans of contact scouring tests

试验分组及 渗流方向	试样编 号	砂砾石干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	砂砾石级配
1 竖向	1-1	1.88	上包线
	1-2	2.01	
	1-3	2.14	
2 水平向	2-1	1.88	上包线
	2-2	2.01	
	2-3	2.14	
3 竖向	3-1		上包线
	3-2	1.88	
	3-3		

## 2 试验仪器和方法

### 2.1 竖向渗透仪

竖向渗透试验采用 ST30-3 竖向渗透仪, 试样筒的筒壁为金属材料, 直径和高度都为 30 cm, 其结构如图 2 所示。试验时的水流方向为由下向上, 试样的顶面为自由出水面, 透水板的孔径为 5 mm。另外, 试验时的供水设备包括吊桶和提升架。吊桶上接有溢水管道, 能保持常水头。

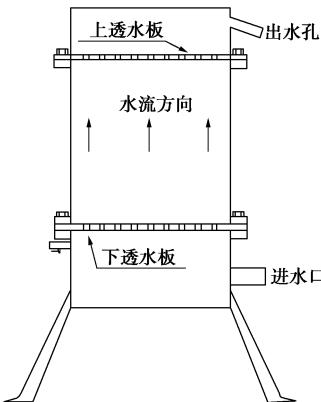


图 2 竖向渗透试验仪结构示意图

Fig. 2 Structural sketch of vertical permeameter

### 2.2 水平渗透仪

水平渗透试验采用环状径向水平渗透仪<sup>[8]</sup>, 试样室为内径 2 cm、外径 30 cm 的空心圆柱体, 其竖向剖面和横剖面的结构和尺寸如图 3 所示。水由进水管进入供水室, 然后传递到试样室中心的分布供水管, 形成均匀水平向水流进入试样, 通过试样后流入集水箱。环状径向渗透可有效减小边壁效应, 能够较好地模拟土石坝以及覆盖层中的水平渗流。

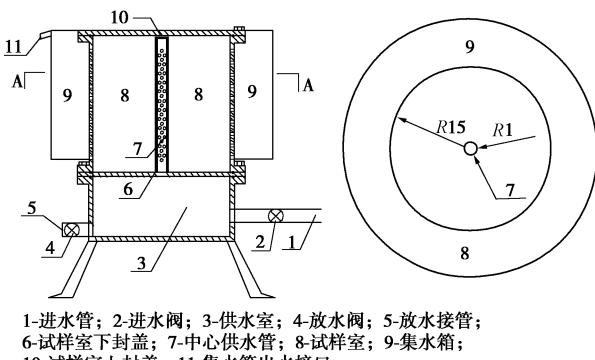


图 3 环状径向水平渗透试验仪

Fig. 3 Structural sketch of horizontal permeameter

### 2.3 试验方法及过程

试验前, 根据制样干密度、体积、级配和含水率备料, 并静置 24 h, 使水分均匀分布在土料中。填装时, 对于竖向渗透试验, 首先在下透水板铺一层土工

布, 以防土料细颗粒堵塞水孔。在桶壁内侧涂抹一层 3~5 mm 黄黏土护壁, 以防水流沿桶壁集中渗透。然后将砂砾石料和黏土料分左右两部分填装, 先用隔板沿直径位置隔开, 填装一侧, 拆掉隔板后填装另一侧。每侧分三层 (每层厚度 10 cm) 均匀填装压实。

对于径向水平渗透试验, 首先用土工布包裹中心供水花管, 在桶底铺设 3~5 mm 黄黏土, 然后将砂砾石料和黏土料分上下两部分填装, 每种土料高 15 cm, 每种料分 3 层击实填装 (每层 5 cm), 最后填装完再在试样顶部也铺设 3~5 mm 黄黏土层, 加盖不透水板密封试样。装填土料时, 相同土料两层之间要刨毛处理。将放水出口设定为略高于渗透仪顶面位置, 进行排水饱和。用量测管量测单位时间内的渗透水量, 当相邻几次渗水量相同时, 认为饱和完成。

接触冲刷破坏发生时的渗透坡降一般不大, 因此逐级加载水头不易过大。试验时, 待渗流量达到稳定 (约 30~60 min), 测定记录渗流量、水温及进出口测压管读数。然后逐级加载水头 (每级增加 0.05~0.1 的水力坡降, 接近破坏时适当减小梯度)。试验中, 观察并记录试验现象。当流量突然增大且无稳定趋势时停止试验。

## 3 试验结果

### 3.1 接触冲刷破坏现象

在不同干密度的砂砾石接触冲刷试验中, 砂砾石的干密度越大, 试样的渗透系数越小。随着渗透水头的不断增加, 流量逐渐增加, 当水头增大到一定程度时, 砂砾石和黏土的接触面处开始出现细小颗粒的跳动和带出, 此时开始出现接触冲刷, 对应的坡降称为启动坡降。当水头继续增大, 部分试样接触冲刷持续发展最终发生破坏, 在另一部分试样中, 若水头保持不变, 细小颗粒的跳动和带出现象会慢慢停止。但随着水头的增加, 细颗粒被水流带出现象逐渐加剧, 并在接触面逐步发展。当水力坡降增大到某一值时, 渗流量突然增大, 并伴有接触面附近的大量细颗粒的冒出和堆积, 水流开始变得浑浊, 表明砂砾石和黏土的接触带已经发生接触冲刷破坏, 前一级对应试样未完全破坏的坡降称为破坏坡降。

对于不同级配条件下的砂砾石和黏土, 在竖向渗透试验中, 也出现细颗粒跳动、液面变浑浊等现象, 且当水力坡降增大到一定程度, 细小颗粒大量渗出, 发生接触冲刷破坏。

由试验过程中的观察可知, 一般接触面的接触冲刷是先于砂砾石料本身的管涌破坏的。原因是接触面处的黏土颗粒远小于砂砾石中的砂颗粒, 因此, 更容

易沿着接触面处砂砾石的孔隙被水流带出而发生接触冲刷破坏。

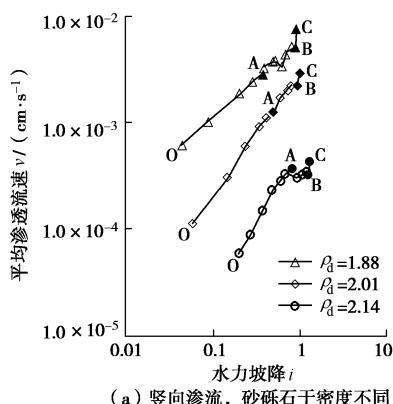
### 3.2 接触冲刷的发生、发展过程

试验所获得的渗透流速  $v$  与水力坡降  $i$  之间的关系曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出, 随着水力坡降的增加, 开始阶段平均渗透流速随之线性增大, 当水力坡降达到一定值时(图 4(a)中的 A 点), 流速增大趋势开始出现变化和波动, 此时试样中开始出现细颗粒的迁移和被水流带出现象。水力坡降继续增大到一定值时(B 点), 渗流流速急剧增大, 发生渗透破坏。

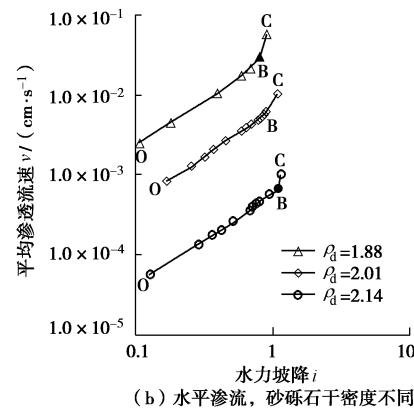
图 4(a) 为砂砾石干密度不同的竖向接触冲刷试验结果, 曲线明显分为三个阶段, OA、AB 和 BC 三段, OA 段为稳定阶段, 未发生接触冲刷, AB 段为过渡阶段, 接触冲刷开始发生, 细颗粒开始移动, 当水力坡降到达 B 点后, 试样的渗透流速明显增大, 接触冲刷发展贯通, 发生最终破坏。图 4(a) 中三个阶段的两个交界点 A 和 B, 分别称为发生接触冲刷的启动坡降和破坏坡降。

由图 4(b) 中水平向不同干密度砂砾石与黏土的  $v - i$  关系曲线可以明显看出三条曲线都只有一个拐点。对比图 4(a) 和 (b) 可知, 竖向试验中都出现了明显的过渡段, 水平试验中过渡段不明显, 细颗粒开始移动紧接着就发生渗透破坏。这是由于在水平渗透试验中接触面为土层的层面, 孔隙的连通性更好, 因此细颗粒更易直接被水流带出。

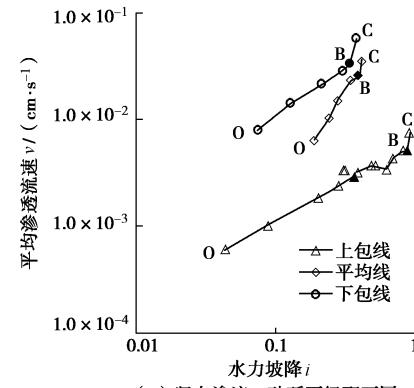
当砂砾石级配不同时(图 4(c)), 随着颗粒变粗, 平均渗透流速增加, 可以看出接触冲刷试验的  $v - i$  关系曲线有明显的破坏坡降拐点 B, 当水力坡降达到破坏坡降拐点 B 后, 渗流流速突然增大, 试样破坏。其中在上包线的曲线上, 也可以看出明显的过渡段, 这与细颗粒运动所受阻力有关, 上包线砂砾石的颗粒较细, 孔隙更小, 细颗粒在孔隙中运动更容易发生局部的阻塞, 接触冲刷的发展更难, 并出现阶段式发展。水力坡降影响接触冲刷中细颗粒开始迁移运动的发生, 孔隙的连通性影响接触冲刷的发展过程。



(a) 竖向渗流, 砂砾石干密度不同



(b) 水平渗流, 砂砾石干密度不同



(c) 竖向渗流, 砂砾石级配不同

图 4 平均渗流流速与坡降的关系曲线

Fig. 4 Relation between average seepage velocity and gradient

### 3.3 接触冲刷的影响因素

不同级配的砂砾石与黏土的竖向接触冲刷试验的渗透系数及破坏坡降如表 4 所示。可见, 随着砂砾石变粗, 渗透性增大, 试样的平均渗透系数逐渐增大, 这与砂砾石级配对纯砂砾石渗透性的影响规律<sup>[10]</sup>一致。这是因为在砂砾石和黏土的组合试样中, 砂砾石的渗透性明显大于黏土, 因此试样的渗透性主要受砂砾石控制。同时随砂砾石变粗, 发生接触冲刷破坏的坡降相应减小。说明较粗的砂砾石与黏土的接触面更容易发生接触冲刷破坏。

表 4 竖向渗流作用下不同级配的砂砾石与黏土的渗透系数和发生接触冲刷的破坏坡降

Table 4 Coefficients of permeability and failure gradient of samples with different grain gradation of sandy gravel under vertical seepage

级配	渗透系数 $k$ /(cm·s⁻¹)	破坏坡降
上包线	$1.06 \times 10^{-2}$	0.86
平均线	$2.48 \times 10^{-2}$	0.38
下包线	$1.02 \times 10^{-1}$	0.33

根据图 4(a), (b) 两图, 不同渗流方向和不同干密度条件下的砂砾石与黏土组合试样的渗透系数和破坏坡降列于表 5 中, 其中渗透系数随砂砾石干密度的变化曲线如图 5 所示。在相同水力坡降下, 水平向渗流比竖向渗流的流速更大, 渗流量也更大。由图 5

可见,不同砂砾石干密度对接触冲刷破坏的影响较大,砂砾石的干密度越大,接触冲刷试样的渗透系数会减小,这与干密度对砂砾石本身渗透性能的影响规律一致。主要是因为两层试样的接触冲刷试验,试样的渗透性主要是由颗粒较粗、渗透系数较大的砂砾石决定。表5不同干密度的砂砾石与黏土组合试样的渗透系数和发生接触冲刷的破坏坡降

Table 5 Coefficients of permeability and failure gradient of samples with different dry densities of sandy gravel

渗透方向	干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	渗透系数 $k / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	破坏坡降
水平向	1.88	$3.03 \times 10^{-2}$	0.80
	2.01	$5.45 \times 10^{-3}$	0.89
	2.14	$4.78 \times 10^{-4}$	1.09
竖向	1.88	$1.06 \times 10^{-2}$	0.86
	2.01	$2.45 \times 10^{-3}$	0.91
	2.14	$4.26 \times 10^{-4}$	1.21

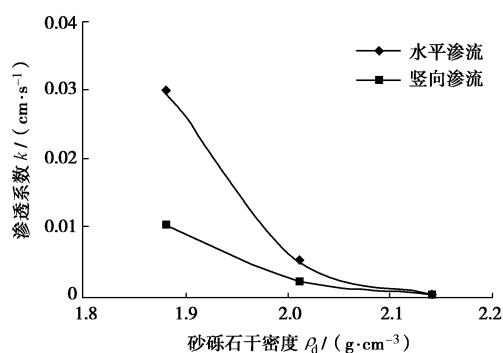


图5 渗透系数随砂砾石干密度的变化曲线

Fig. 5 Relation between coefficients of permeability and dry density of sandy gravel

发生接触冲刷的破坏坡降随砂砾石干密度的变化曲线如图6所示。由图6可见,随着砂砾石干密度的增大,发生接触冲刷的启动坡降和破坏坡降会变大。干密度为2.01 g/cm<sup>3</sup>相对于干密度为1.88 g/cm<sup>3</sup>条件下的抗渗能力提高了约10%,干密度为2.14 g/cm<sup>3</sup>相对于干密度为1.88 g/cm<sup>3</sup>条件下的抗渗能力提高了约30%~40%。这是因为随着干密度的增大,孔隙减小,在接触带上,细颗粒的移动所受的约束力随之增大,细颗粒在孔隙中移动所需的驱动力也增大,即需要更大的水头,故启动坡降增大。同样,试样发生破坏所需要的坡降,即破坏坡降也增大。

由图5和图6可见,渗透方向对渗透系数和接触冲刷的破坏坡降也有影响。相同的砂砾石干密度和级配条件下,水平向的渗透系数大于竖向的,干密度越小,这种差异性越明显,随着干密度的增大,水平和竖向渗透的渗透系数相差越来越小。同时在相同的砂砾石干密度和级配条件下,水平向渗透的破坏坡降也略小于竖向渗透的值。这是由于试样都是水平成层装

填制成,水平方向孔隙的连通性更好,因此具有较大的渗透系数和较小的抗渗坡降。

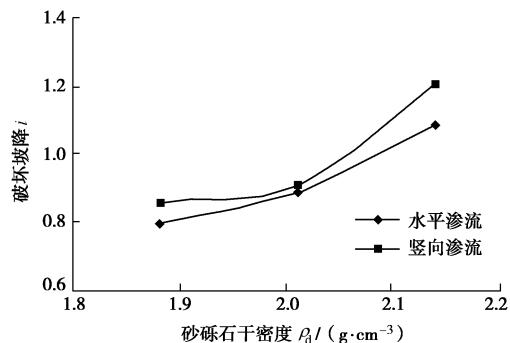


图6 发生接触冲刷的破坏坡降随砂砾石干密度的变化曲线  
Fig. 6 Relation between failure gradient and dry density of sandy gravel

## 4 结论

通过竖向以及径向水平渗透试验仪,模拟黏土与砂砾石的接触冲刷破坏过程,分析了砂砾石土和黏性土的接触冲刷现象和影响因素,得出以下结论:

(1)砂砾石和黏土的接触冲刷发展过程分为稳定阶段、过渡阶段和破坏阶段。水力坡降达到启动坡降后,试样中的细颗粒会被水流带出;达到破坏坡降时,发生最终的渗透破坏。

(2)水力坡降相同,渗透方向不同的条件下,与竖向渗流相比,水平向渗流的渗透系数更大,渗透流速也更大,破坏坡降更小。

(3)随着砂砾石干密度的增加,组合试样的渗透性减小;随着砂砾石级配中粗颗粒的增多,试样的渗透性增大。

(4)砂砾石干密度增大,启动坡降和破坏坡降随之增大,抗接触冲刷能力增强;级配中粗颗粒含量增加,启动坡降和破坏坡降减小。

## 参考文献:

- [1] 夏万洪,魏星灿,杜明祝.治勒水电站坝基超深厚覆盖层Q3的工程地质特性及主要工程地质问题研究[J].水电站设计,2009,25(2): 81~87. (XIA Wan-hong, WEI Xing-can, DU Ming-zhu. Study on engineering geology properties and main problems of Yele Hydropower Station Dam foundation extra-thick overburden Q3[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2009, 25(2): 81~87. (in Chinese))
- [2] 刘杰.无黏性土层之间渗流接触冲刷机理试验研究[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))
- [3] ИСТОМИНА В. С. Фильтрационная устойчивость грунтов. Госстройиздат[M]. 1957. (ISTOMINA B. C. Soil seepage stability[M]. Moscow: Institute of Water Resources and Hydropower Research, 1957. (in Russian))
- [4] 王保田, 陈西安. 悬挂式防渗墙防渗效果的模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊 1): 2766 - 2771. (WANG Bao-tian, CHEN Xi-an. Research on effect of suspended cut-off wall with simulation test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S1): 2766 - 2771. (in Chinese))
- [5] 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, QIAO Yue-hong. Simulation study on the contact scouring development between underground layers[J]. Engineering Science, 2003, **5**(7): 33 - 39. (in Chinese))
- [6] 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. Experiment and analysis of the contact scouring of earth-rock dam[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [7] 冯建明, 张世殊, 田 雄, 等. 双江口水电站坝址区深厚覆盖层工程地质特性初步研究[J]. 水电站设计, 2011, **27**(2): 55 - 57. (FENG Jian-ming, ZHANG Shi-shu, TIAN Xiong, et al. Preliminary study of the engineering geological features of the deep layer in Shuangjiangkou hydropower station[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2011, **27**(2): 55 - 57. (in Chinese))
- [8] 陈 群, 谷宏海. 土体水平向渗透系数测量仪[P]. 中国: 201010523941.5.2012.5. (CHEN Qun, GU Hong-hai. Horizontal permeameter of soil[P]. China: 201010523941.5.2012.5. (in Chinese))
- [9] SL237—1999 土工试验规程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1999. (in Chinese))
- [10] 朱崇辉, 王增红, 刘俊民. 粗粒土的渗透破坏坡降与颗粒级配的关系研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(3): 72 - 75. (ZHU Chong-hui, WANG Zeng-hong, LIU Jun-min. Study on the relation between the permeation damage slope and the grain composition of coarse-grained soil[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(3): 72 - 75. (in Chinese))

(责任编辑 明经平)