

DOI: 10.11779/CJGE20221129

茨哈峡水电站垫层料与过渡料联合抗渗试验研究

崔家全¹, 马凌云¹, 段军邦², 张路², 崔家铭¹, 何静斌¹, 常玉鹏¹

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司工程实验监测院, 陕西 西安 710000; 2. 青海黄河上游水电开发有限责任公司工程建设分公司, 青海 西宁 810003)

摘要: 对于天然砂砾石料作为筑坝料的超高混凝土面板堆石坝工程, 其坝体各分区料联合抗渗稳定性对坝体安全性十分重要。研究采用自主研发的高水头大型渗透试验设备, 对茨哈峡水电站原级配砂砾石填筑料的垫层料与过渡料进行联合抗渗试验; 监测各分区填筑料的渗流特性演变过程, 总结了垫层料与过渡料筑坝料联合抗渗试验的演变基本规律, 验证过渡料对垫层料的反滤保护作用, 为茨哈峡水电站坝体填筑料的级配设计优化、渗透稳定安全性的论证提供了数据参考。

关键词: 垫层料; 过渡料; 渗透变形; 原级配试样; 联合抗渗试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)01-0216-07

作者简介: 崔家全(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事粗粒土渗流方面的研究工作。E-mail:1258938026@qq.com。

Combinated seepage failure tests on cushion and transition materials for Cihaxia Hydropower Station

CUI Jiaquan¹, MA Lingyun¹, DUAN Junbang², ZHANG Lu², CUI Jiaming¹, HE Jingbin¹, CHANG Yupeng¹

(1. Northwest Engineering Corporation Limited Engineering Experiment and Monitoring Institute, Xi'an 710000, China; 2. Qinghai

Yellow River Upstream Hydropower Development Corporation Limited Engineering Construction Branch, Xining 810003, China)

Abstract: For the ultra-high concrete face rockfill dams, natural sand and gravel materials are used as the dam materials for rockfill dam projects. The combined impermeability stability of the dam partition materials is very important to the dam safety. In this study, the self-developed high-head large-scale permeability test equipments are used to conduct the combined seepage failure tests on the sand and gravel dam materials for Cihaxia Hydropower Station. The evolution process of seepage characteristics of the filling materials in each district are monitored. The anti-filtering protection effects of the transition materials on the cushion materials are verified. The results may provide data reference for the optimization of gradation design of dam filling materials of Cihaxia Hydropower Station and the demonstration of seepage stability safety.

Key words: cushion material; transition material; seepage deformation; original gradation sample; combined seepage failure test

0 引言

茨哈峡混凝土面板坝坝高 257.5 m, 采用天然砂砾石料筑坝, 是拟建的世界最高混凝土面板坝工程。由于天然砂砾石料磨圆度好, 颗粒间的咬合作用差, 且级配是天然的, 存在分选问题, 较人工掺配的粗粒料渗透稳定性差。因此, 本研究以茨哈峡面板堆石坝工程天然砂砾石坝料, 开展垫层料与过渡料的联合抗渗试验, 这对坝体安全性评价十分重要^[1-3]。

工程界对筑坝砂砾料渗透变形的研究主要采用渗透仪进行试验^[4-5]。但现有试验规范对全级配粗粒料的组合抗渗反滤试验方法不完善, 受渗透仪尺寸限制, 相关试验对试样超粒径多采用缩尺处理^[6-7], 国内学者对砂砾料试样缩尺和缩尺前后渗透特性变化^[8]、不同

应力状态下的反滤料联合抗渗特性^[9]、反滤料的设计要求^[10-11]、垫层料和过渡料的渗透及渗透变形^[12-13]、粗粒土渗透系数影响因素^[14]等方面进行了相关研究探讨, 但对原级配砂砾石筑坝料联合抗渗试验演变过程相关研究较少。本文主要对茨哈峡水电站垫层料与过渡料之间的联合抗渗试验进行研究, 分析全级配砂砾料联合抗渗演变过程, 验证茨哈峡水电站垫层料与过渡料分区的反滤保护及排水作用。

1 联合抗渗试验研究

1.1 试验设备

试验设备采用中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司自主研制的高水头原级配大型渗透仪器,如图1所示。设备参数如下:①试验供压供水采用恒压水源控制系统,可在0~300 m 试验水头之间调频稳定供压,其最大供水量为42.0 m³/h;②水头压力测量采用多通道压力传感器实时自动采集,其精度为±0.25%F.S;③渗流量测量分梯度自动测量,小流量($Q < 200$ mL/s)采用磁翻板液位计法测量,当试验渗流基本稳定时,关闭磁翻板液位计量筒开关,动态实时观测渗流量,观测结束时打开量筒开关;大流量($Q \geq 200$ mL/s)采用电磁流量计法测量,电磁流量计安装在渗流出流管上,实时观测出流量;④组合式渗透仪,其渗透仪箱体为矩形断面,有效截面尺寸为1.0 m × 1.0 m;单节箱体试样段长2.0 m,组合后总长可达16.0 m。箱体可承受分级施加的最大水头为300 m的水压荷载。试验段箱体两侧分别设置有水压观测接口孔。

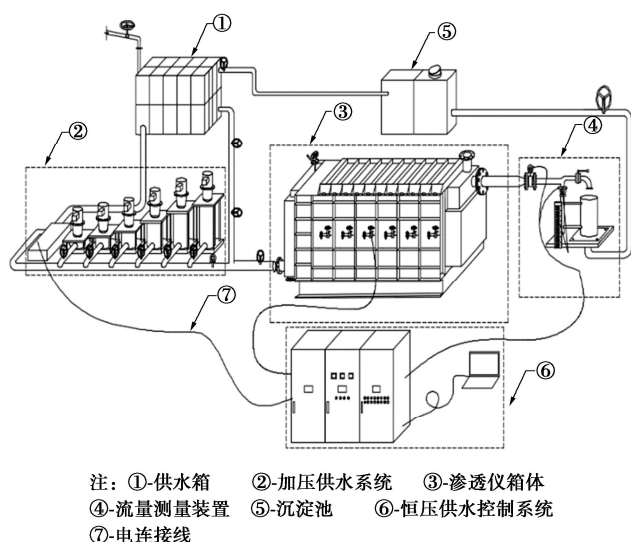


图 1 试验设备图

Fig. 1 Test equipments

1.2 联合抗渗试验方案

垫层料与过渡料进行联合抗渗试验时,垫层料为被保护料,其试样长度为 1.5 m,过渡料为保护料,其试样长度为 0.5 m,两种填筑料分界坡面为垂直,虚铺填筑料时,在试样分界面处设置垂直薄钢板挡板,防止不同填筑料混淆。采用 1 m×1 m 组合式渗透仪允许试样粒径分布曲线的 D85 不大于 250 mm。茨哈峡水电站垫层料与过渡料的原级配料 D85 分别为 50, 105 mm,均小于 250 mm,故可用 1 m×1 m 组合式渗透仪对设计平均级配筑坝材料进行原级配填筑料联合抗渗试验研究。填筑料平均级配曲线如图 2 所示。原级配联合抗渗试验制样标准见表 1。

为尽可能模拟土石坝大坝渗流实际情况,联合抗渗试验的渗流方向平行于制样分层面,试验时渗透仪箱体水平放置,透水板垂直于水平面,前后透水板直接接触试样,渗流出水口略高于试样顶面。透水板开孔率为 18%,孔径为 1.0 cm。

表 1 原级配渗透特性试验制样标准

Table 1 Standard for sample preparation of permeability characteristic tests on original gradation

填筑料类别	制样干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	相对密度 D_r
垫层料	2.32	0.95
过渡料	2.36	0.95

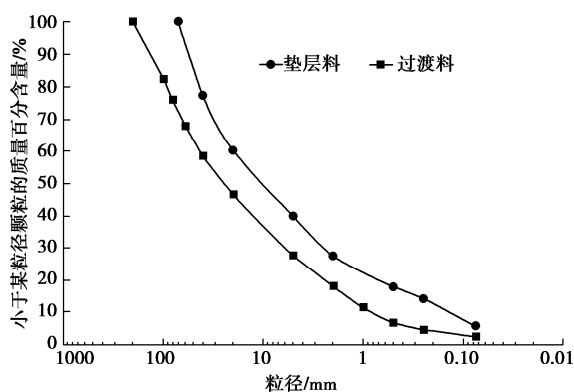
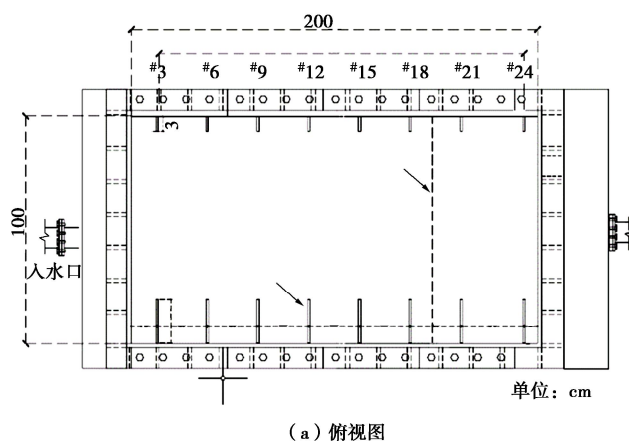


图 2 茨哈峡水电站砂砾石筑坝料级配曲线图

Fig. 2 Grain-size distribution curves of gravel dam materials for Cihaxia Hydropower Station

联合抗渗试验对试样各测压断面两侧分别安装测压传感器,其中#2, #5, #8, #11, #14, #17, #20, #23 传感器深入试样内部 12 cm,其中#3, #6, #9, #12, #15, #18, #21, #24 传感器深入试样内部 3 cm;除#23, #24 传感器外,其余相邻传感器之间的试样渗径为 25 cm,其中#20~#23, #21~#24 传感器之间试样渗径为 35 cm, #23 传感器距离出水口透水板距离为 3 cm,联合抗渗试验试样总长度为 2.0 m;此次联合抗渗试验测压传感器#2 至测压传感器#23 间的有效渗径长度为 1.85 m,如图 3 所示。



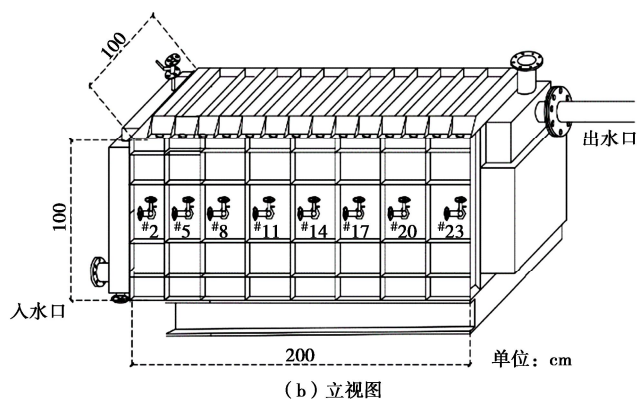


图3 联合抗渗试验传感器布置示意图

Fig. 3 Layout of sensors for combined seepage failure tests

1.3 试验方法

联合抗渗试验方法在执行《水电水利工程粗粒土试验规程》的基础上,为提升试验成果的精度,对试样与渗透箱体边壁绕流问题、试样振动击实问题、试样内部水压测试、试样封堵、试样制备等问题进行了优化改进。

(1) 针对试样与箱体边壁接触处理问题,箱体内侧壁表面涂抹具有黏结性、弹塑性聚脲涂层,聚脲涂层包括底涂黏结剂和聚脲层,涂层厚度控制在 3~4 mm,在试验渗透水压 2.0 MPa 条件下,箱体边壁与涂层之间黏结稳固,不产生离层。能在试样和箱体之间起到较好的缓冲作用,使试样和渗透仪边壁的结合更加紧密,避免试样与仪器边壁接触面形成渗流薄弱界面。

(2) 由于试验制样密度相对较高,箱体形状为矩形,制样过程中边壁及边角制样密实程度处理困难,根据试样粒径确定制样分层厚度,垫层料装填时分层厚度为 12.5 cm,过渡料装填时分层厚度为 20.0 cm,根据试验制样标准计算出每层的试样质量。模拟大坝碾压工艺,利用特制可调频可变功率振动器,上述振动器其夯板边长为 500 mm×500 mm,厚度为 20 mm 方形板,可提高对方形容器边角区域的压实度;通过变频器调节振动电机的频率,采用“高频低幅”的振动压实方法,避免粒料离析分层,将试样击振至分层设计标高,通过测量试样箱体内试样的高度,控制填筑压实指标。

(3) 试样内部水压测试,采用测压延伸管将水头压力传感器测点伸入试样内部,测压延伸管包括外过滤网、填充料、内过滤网、刚性延伸管、柔性延伸管、排气阀门、开关阀,外过滤网与内过滤网之间填充细砾,其后连接延伸管,通过柔性延伸管角度移动提供位移变位,避免延伸管阻碍试样击实时的颗粒移动,保证延伸管周围试样密实,延伸管与渗透仪箱体内壁

采用螺纹连接。主要有两方面目的:①避免测压管直接测量箱体侧壁薄弱面的局部水头代表该断面水头,降低绕壁渗流作用对测压管水头量测值的影响;②本次渗透试验试样尺寸较大,通过改变伸入箱体内部连接杆长度,可对比测试同一断面内试样不同位置的水压值,其大小差异可用以评估对试验结果的影响。

(4) 试样与上盖板间密封采用微膨胀缓凝早强砂浆,即有利于试样密封操作,其早期强度满足试验的强度要求有利于尽早进行试验。

2 试验成果及分析

根据高水头原级配大型渗透仪器设备的特征,总试验水头由基于 PLC 的工业控制系统开发的恒压水源供水供压装置控制;试验过程中分级施加水头,每级施加的水头值为有效渗径与试验坡降的乘积,坡降增值为 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.50, 0.70, 1.00, 1.50, 2.00, 3.00, 其中临界坡降之前递增小于 0.20, 坡降大于 20 以后按照 3.00 递增;高水头原级配大型渗透仪器设备加压稳压性能好,加压后其水头均能稳定在目标值;试验过程中对渗流量、各试样断面的水位、出水浑浊程度等指标进行观测,每级水头加载 45 min 后,选取 3 次间隔 15 min 出流测量值的平均值为本级出流量观测值。

对试验过程中的测压传感器的读数进行分析,在低试验水头(不大于 15 m),同一断面的测压传感器所测的水头值基本相同,在中试验水头(15~40 m),同一断面的测压传感器所测的水头值存在差异,高试验水头(大于 40 m),同一断面的测压传感器所测的水头值差异变大。具体表现为深入试样内部距离小的传感器延伸管测得水头值偏大,相邻传感器数值更早的趋于一致。本次选用测量传感器为#2, #5, #8, #11, #14, #17, #20, #23 传感器读数作为试验水头观测数据。

各试验水头下不同传感器观测水头与渗流量关系如图 4 所示。在临界坡降之前(总水头小于 2.5 m),各测压传感器所测得水头基本等差递减分布,临界坡降之后,随着试验水头提升, #17 与 #20 传感器测值的水头差值不断增大。目测渗流水口的颜色:坡降 $i < 1.35$ 时,水色呈透明;在坡降 $i = 1.35$ 左右,水色呈半透明的白玉状;继续提升水头,坡降至 $i = 4.60 \sim 7.80$,初始时段水色呈非透明暗玉状,持续一段时间后,水色逐渐变为半透明暗玉状,说明试样内部颗粒调整,达到稳定;继续提升水头,水色逐渐浑浊至泥水色,直至破坏。45 级左右水头后,除临近出流口透水板的 #23 传感器,其余各个传感器所测试样断面均已贯通,

顾各测压传感器测得水头值趋于一致, 水头线重叠。

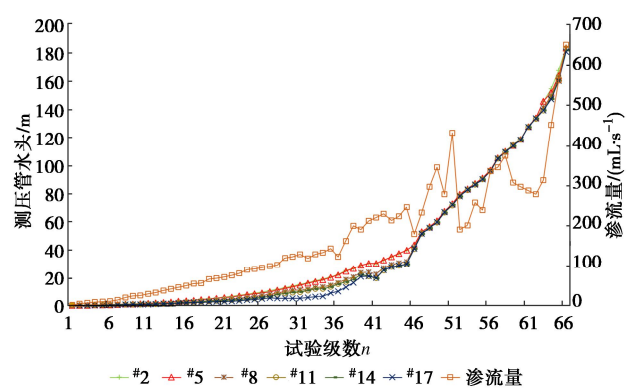


图 4 测压管水头和渗流量试验过程动态曲线

Fig. 4 Dynamic curves of piezometric pipe head and seepage test process

为了更完整地表述联合抗渗试验的整个演变过程, 分别对试验中的试样整体、被保护料部分、保护料与被保护料试样反滤界面处试样段分别进行渗流演变过程分析。

2.1 试样整体渗流演变过程分析

选取#2~#20 传感器之间的试样段进行反滤试验渗透特性分析, 试样渗径长度为 1.50 m, 渗透 $\lg i\text{-}\lg v$ 曲线如图 5 所示, 试验测得整体试样段渗透系数为 $k_{20}=4.21\times 10^{-3}\text{ cm/s}$, 由渗透 $\lg i\text{-}\lg v$ 曲线(图 5)并结合出水口水色变化等试验现象综合分析, 判断临界坡降 $i_k=1.35$, 此时渗透 $\lg i\text{-}\lg v$ 曲线出现向右平移转折; 当坡降值为 19.61 时, 继续提升试验水头值渗透 $\lg i\text{-}\lg v$ 曲线出现明显向下转折, 坡降值减小, 说明试样各断面之间渗透通道已贯通, 判定试样的破坏坡降为 $i_F=18.25$, 此时出水口水色呈颜色较深泥水色。试验成果如表 2。

表 2 垫层料-过渡料联合抗渗试样整体试验成果

Table 2 Overall test results of combined seepage failure samples of cushion materials -transition materials

试样渗径	渗透系数 $k_{20}/$ ($10^{-3}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	临界坡降 i_k	破坏坡降 i_F
整体试样段 (#2~#20 传感器间 试样段, $L=1.50\text{ m}$)	4.21	1.35	18.25
级配缩尺后的 联合抗渗成果	3.89	0.78	10.33

注: 试样级配缩尺后的联合抗渗特性试验采用渗透仪尺寸为 50 cm×50 cm×100 cm, 缩尺后最大粒径为 60 mm。

选取#2~#23 传感器之间的试样段进行渗透特性分析, 其试样渗径长度为 1.85 m, 渗透 $\lg i\text{-}\lg v$ 曲线如图 5 所示; 由于出水口刚性透水板的支撑和反滤作用, 对透水板前试样形成保护作用, 随着试验水头提升, 后部#23 传感器紧邻渗流出水口, 读数基本保持不变,

渗透 $\lg i\text{-}\lg v$ 曲线(图 5)出现多次折叠上升, 流速周期性增减, 折叠上升后的渗透 $\lg i\text{-}\lg v$ 曲线与原曲线近似平行, 出水口水色特别浑浊, 试样的渗透系数变小。

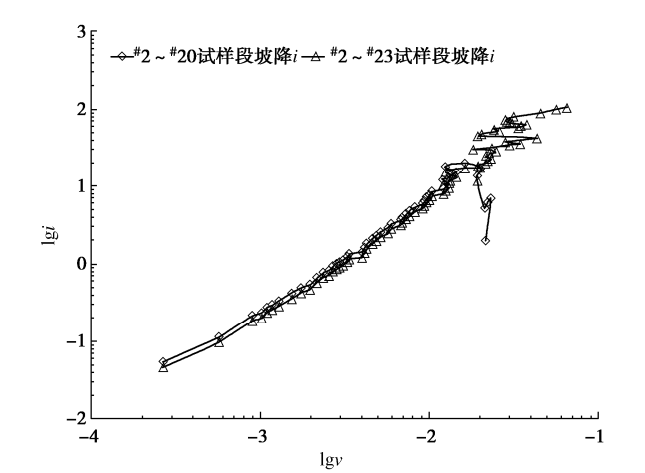


图 5 #2~#20、#2~#23 传感器测试断面之间试样段 $\lg i\text{-}\lg v$ 曲线

Fig. 5 $\lg i\text{-}\lg v$ curves of sample sections between #2~#20 and sensors of #2~#23

对比#2~#20、#2~#23 传感器之间的试样段的渗透特性曲线可知: 当垫层料与过渡料分界面处试样段未贯通时, 两条渗透 $\lg i\text{-}\lg v$ 曲线形态基本一致, 说明过渡料试样段渗流的稳定性; 随着试验水头的提升, #17~#20 传感器间试样段渐渐贯通形成渗流通道, 垫层料与过渡料间反滤作用破坏, 此时#2~#20 传感器之间试样段坡降快速降低, 而#2~#23 传感器之间试样段坡降仍处于增大阶段; 表面此时已造成试样内部颗粒调整, 渗流量也随之出现较大波动。

#17 传感器布置在垫层料内, #20 传感器布置在过渡料内, 分析垫层料/过渡料联合抗渗试验的试验加压水头与各试样段及试样分界面试样段的坡降关系, 试验水头 H 与坡降 $\lg i$ 关系曲线如图 6 所示。分析得知: 随着试验水头提升, #17 与#20 传感器测值的水头差值不断增大, 当试验水头提升至 30.72 m 时, #17 与#20 传感器测试断面之间形成最大水头差值为 20.49 m, 此时传感器#17 与#20 间的试样段承受坡降值为 81.96。分析可知#17 与#20 传感器之间试样段为最大水头损失试样段。其后继续提升试验水头值, #20 传感器所测水头值增幅较快, #17 与#20 传感器两测试断面测得水头差值逐步降低, 水头提升至 35.50 m 时, #17 与#20 传感器读数基本相同, 说明此段试样已贯通形成渗流通道。

其后最大水头损失试样段后移至#20 与#23 传感器试样段, 当试验水头提升到 67.79 m 时, 此时除#23 传感器外所有的传感器读数基本相同, 随着试验的进行, 直至水头提升至 184.15 m 结束试验时, 所有传感器的读数保持此试验现象。

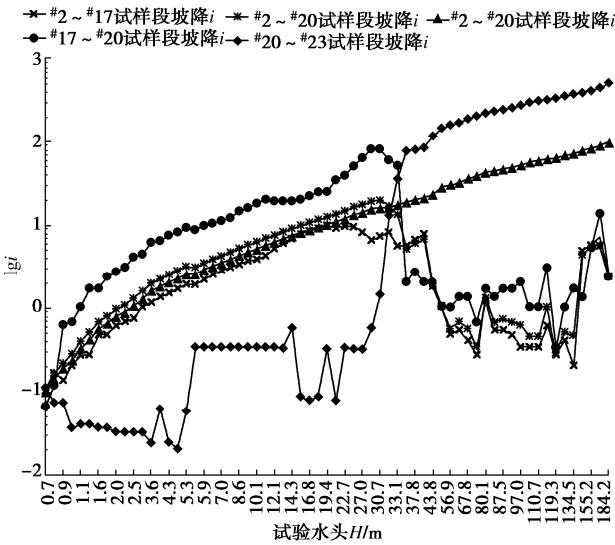


图 6 试验水头 H -坡降 $lg i$ 关系曲线

Fig. 6 H - $lg i$ curves

2.2 垫层料试样段渗流演变过程分析

对垫层料/过渡料反滤试验垫层料部分进行渗透特性分析，具体选取#2~#14、#2~#17 传感器之间的垫层料试样段进行渗透特性分析，垫层料试样段渗流 $lg i$ - $lg v$ 曲线如图 7 所示。渗透系数均值为 4.72×10^{-3} cm/s，临界坡降均值为 $i_k=1.51$ ，破坏坡降 $i_F=10.83$ （见表 3）。从渗透曲线形态分析可知，垫层料#2~#14 传感器间试样段渗流 $lg i$ - $lg v$ 曲线形态更平滑，#2~#17 传感器间试样段渗流 $lg i$ - $lg v$ 曲线较波动，这与#17 测压传感器更接近试样分界面有关。

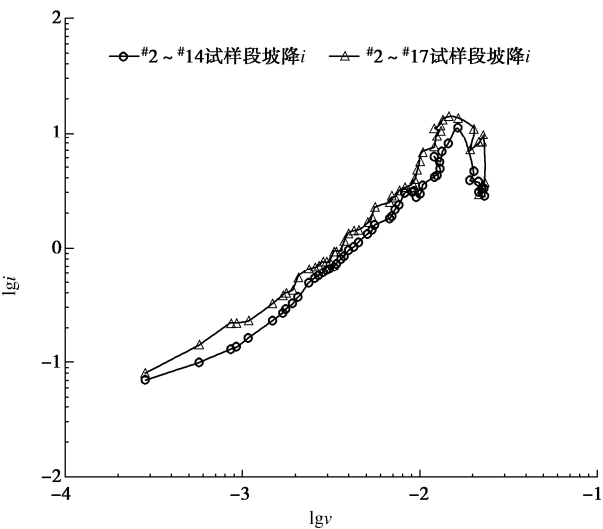


图 7 #2~#14、#2~#17 垫层料试样段渗透试验 $lg i$ - $lg v$ 关系曲线

Fig. 7 $lg i$ - $lg v$ curves of cushion material sample sections between sensors of #2~#14 and #2~#17

对该垫层料单独进行水平渗透试验取得渗透特性参数为：渗透系数 $k_{20}=4.11 \times 10^{-3}$ cm/s，临界坡降 $i_k=1.01$ ，破坏坡降 $i_F=7.23$ 。

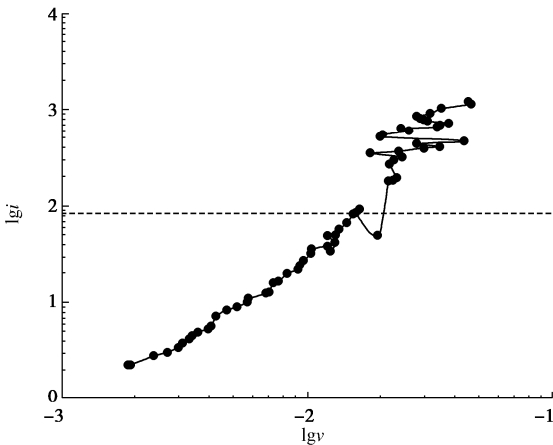
表 3 垫层料试样段渗流试验成果

Table 3 Seepage test results of cushion material sample sections

试样渗径	渗透系数 $k_{20}/(10^{-3}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	临界坡降 i_k	破坏坡降 i_F
垫层料试样段 (#2~#17 传感器间 试样段, $L=1.25$ m)	4.17	1.43	10.52
垫层料试样段 (#2~#14 传感器间 试样段, $L=1.00$ m)	5.26	1.58	11.14
均值	4.72	1.51	10.83

2.3 分界面试样段渗流演变过程分析

垫层料和过渡料的试样分界面在#17与#20 传感器测压断面之间，选取对垫层料进行反滤保护的#17~#20 传感器之间试样段进行渗透特性分析。根据试验现象及渗透 $lg i$ - $lg v$ 曲线（见图 8）可知，试样的分界面试样段为首个最大水头损失试样段，该试样段坡降值由 2.26 逐步提升至 84.91（即图 8 渗流 $lg i$ - $lg v$ 曲线的起点时坡降至虚线以下点位的最大坡降）；继续提升试验水头该试样段逐步贯通，承担的坡降值变小，渗透 $lg i$ - $lg v$ 曲线出现明显转折。



注：虚线以下为渗流界面在#17~#20传感器测压试样段时渗流 $lg i$ - $lg v$ 曲线，虚线以上为渗流界面后移到#20~#23传感器测压试样段时，该段渗流 $lg i$ - $lg v$ 曲线

图 8 最大水头损失试样段渗透试验（ $lg i$ - $lg v$ ）曲线图

Fig. 8 $lg i$ - $lg v$ curves of maximum head loss samples

破坏坡降计算公式为

$$i_F = \frac{i'_2 + i'_1}{2},$$

式中， i'_2 为试样破坏时的渗透坡降， i'_1 破坏前一级的渗透坡降。

由式（2）得出该试样段破坏坡降值 $i_F=83.07$ ，其试样分界面处试验段渗流成果见表 4。

随着水头的提升分界面试样段不断贯通破坏，渗流最大水头损失试样段不断后移，当#17与#20 传感器间试样段坡降值增加至 93.60 时，继续提升试验水头，此时最大水头损失试样段后移至#20与#23 传感器测压断面之间（其中#23 测点距出水口透水板 3 cm），随着

水头的提升其坡降由 78.06 升至 524.17, $\lg i-\lg v$ 曲线呈现折叠上升形态, 试样#17-#20 试样段和#20-#23 试样段的渗流 $\lg i-\lg v$ 曲线如图 9 所示。

表 4 试样分界面处试样段渗流成果

Table 4 Seepage results of sample section at sample interface	
试样渗径	破坏坡降 i_F
垫层料/过渡料组合料试样分界面处试样段 (#17-#20 传感器间试样段, $L=0.25\text{ m}$)	83.07

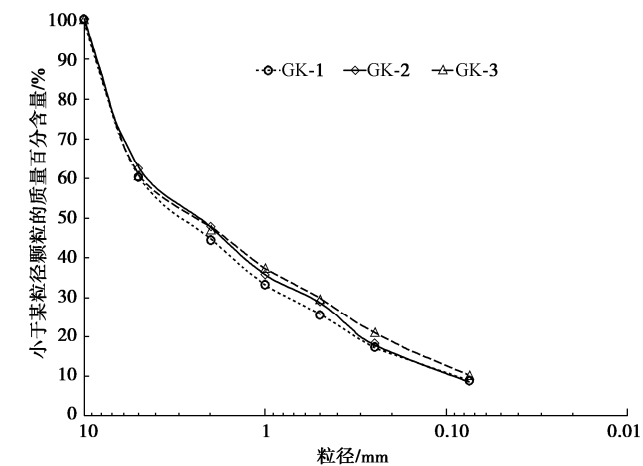


图 9 过渡料渗流颗粒级配分析曲线图

Fig. 9 Grain-size distribution curves of transition material seepage

2.4 过渡料渗流颗粒级配分析

反滤试验前, 在试样分界面后部过渡料中取样一组, GK-1; 反滤试验后, 在试样分界面后部的过渡料中取样 2 组, 分别为 GK-2, GK-3。对所取试样进行颗粒级配分析试验, 试验成果见图 9。颗分成果表明, 过渡料中粒径小于 2 mm 的试样含量增多, 垫层料试样随着渗流的进行, 存在粒径小于 2 mm 的试样被水流带入分界面后过渡料中, 说明在试样分界面前后试验的过程中细颗粒不断移动, 并在试样的后部淤积。

2.5 试验成果分析

原级配垫层料-过渡料联合抗渗整体试样段渗透系数更接近于本次试验垫层料试样段的渗透系数, 与以往该筑坝料级配缩尺后该类型试验测得渗透系数比较接近, 但原级配联合抗渗试验所求的临界坡降和破坏坡降大于级配缩尺后的联合抗渗试验所求的上述参数值。

该试验垫层料试样段的渗流系数和以往该筑坝料缩尺后单一料渗透试验和缩尺后联合抗渗试验所测得参数值接近。该试验垫层料试样段的破坏坡降大于单一垫层料渗透试验所求参数值, 说明垫层料-过渡料联合抗渗试验中过渡料对垫层料有良好的保护作用。

原级配垫层料-过渡料联合抗渗试验分界面试样段 (#17-#20 传感器间试样段) 贯通破坏过程中, 所承担的坡降大于周围相同长度试样段所承担坡降值。与

以往该填筑料缩尺后联合抗渗试验分界面试样段相比, 此次试验分界面试样段前后水头差更大, 反滤作用更为明显。

3 结 论

(1) 对试验结果进行分析可知, 垫层料-过渡料联合抗渗试样整体试样渗透系数更接近单一料中垫层料的渗透系数, 符合试样整体的等效渗透系数取决于渗透系数最小的试样部分的基本规律。

(2) 联合抗渗试验首个承担最大水头压力值的试样段在两种筑坝料分界面附近, 说明保护料对被保护料的保护作用明显; 试样分界面前后试样段的渗透系数小于任一单一料的渗透系数, 说明试验过程中保护料与被保护料之间形成明显的反滤淤积保护作用。

(3) 通过渗流演变过程分析可发现, 随着试验提升水头的增大, 试验水头压力并不是由试样长度范围内各试样段平均分担, 而总是出现局部试样段以较短渗径承担较大水头压力差值。

(4) 局部承担较大水头压力的试样段在试样中会有多个, 随着反滤试验进行, 组合料在试样的分界面处形成首个最大水头差承压界面试样段, 继续提升试验水头, 部分试样颗粒在渗流带动作用下不断移动堆积调整形成新平衡有关, 当试样段管涌通道逐步贯通后, 颗粒又逐步迁移调整形成下一个新的平衡, 总体上是 从上游向下游推移。

(5) 当试样逐步贯通, 反滤保护界面一直后移至刚性透水板处时, 由于出水口刚性透水板的支撑和理想状态下的反滤保护作用, 随着试验水头的提升, 试样整体的坡降不断增大, 但试验渗流量并未明显增大, 而是呈现往复增减, 在渗透变形曲线 $\lg i-\lg v$ 上的表现形式为曲线折叠上升。

参考文献:

[1] 刘 杰, 谢定松. 我国土石坝渗流控制理论发展现状[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 714-718. (LIU Jie, XIE Dingsong. Advances of earth-rock dam seepage control theory in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 714-718. (in Chinese))

[2] 陈生水, 凤家骥, 袁 辉. 砂砾石面板坝关键技术研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 16-20. (CHEN Shengshui, FENG Jiaji, YUAN Hui. Research on key techniques of facing sandy gravel dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 16-20. (in Chinese))

[3] 邓铭江. 严寒、高震、深覆盖层混凝土面板坝关键技术研究综述[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 985-996. (DENG

- Mingjiang. Advances in key technology for concrete face dams with deep overburden layers under cold and seismic conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 985-996. (in Chinese))
- [4] 土工试验方法标准: GB50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020. (Standard for Soil Test Methods: Gb50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2020.(in Chinese))
- [5] 水电水利工程粗粒土试验规程: DL/T 5356—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007. (Code for Coarse-Grained Soil tests for Hydropower and Water Conservancy Engineering: DL/T 5356—2006[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007. (in Chinese))
- [6] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. (GUO Qingguo. Engineering Characteristics and Application of Coarse-Grained Soil[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Resources Press, 1998. (in Chinese))
- [7] 吴鑫磊, 徐卫卫, 刘赛朝, 等. 粗粒料缩尺效应的试验研究进展[J]. 水利科学与寒区工程, 2020, **3**(3): 1-7. (WU Xinlei, XU Weiwei, LIU Saichao, et al. Research on scale effect of the coarse aggregate in constructing dam[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2020, **3**(3): 1-7. (in Chinese))
- [8] 陈生水, 凌 华, 米占宽, 等. 大石峡砂砾石坝料渗透特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 26-31. (CHEN Shengshui, LING Hua, MI Zhankuan, et al. Experimental study on permeability and its influencing factors for sandy gravel of Dashixia Dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 26-31. (in Chinese))
- [9] 邹玉华, 陈 群, 何昌荣, 等. 不同应力条件下砾石土防渗料和反滤料联合抗渗试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(8): 2323-2329. (ZOU Yuhua, CHEN Qun, HE Changrong, et al. Filter tests on gravelly soil and filter material under different stress states[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(8): 2323-2329. (in Chinese))
- [10] 朱建华. 面板堆石坝碎石垫层料的渗透稳定及反滤料设计[J]. 水利学报, 1991, **22**(5): 57-63. (ZHU Jianhua. Seepage stability and filter material design of crushed stone cushion material for face rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, **22**(5): 57-63. (in Chinese))
- [11] 碾压式土石坝设计规范: DL/T 5395—2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008. (Design Specification for Rolled Earth-Rock Fill Dams: DL/T 5395—2007[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008. (in Chinese))
- [12] 张家发, 定培中, 张 伟, 等. 水布垭面板堆石坝过渡料设计及其渗透变形特性研究[J]. 长江科学院院报, 2009, **26**(10): 1-6. (ZHANG Jiafa, DING Peizhong, ZHANG Wei, et al. Study on design requirements and seepage deformation characteristics of transition zone material for shuibuya concrete face rockfill dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, **26**(10): 1-6. (in Chinese))
- [13] 张家发, 定培中, 张 伟, 等. 水布垭面板堆石坝垫层料渗透与渗透变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(10): 3145-3150. (ZHANG Jiafa, DING Peizhong, ZHANG Wei, et al. Studies of permeability and seepage deformation characteristics of cushion material for Shuibuya Concrete Faced Rockfill Dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(10): 3145-3150. (in Chinese))
- [14] 王俊杰, 卢孝志, 邱珍锋, 等. 粗粒土渗透系数影响因素试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(6): 16-20. (WANG Junjie, LU Xiaozhi, QIU Zhenfeng, et al. Experimental studies on influence factors of permeability coefficients of coarse-grained soil[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(6): 16-20. (in Chinese))