

DOI: 10.11779/CJGE201901002

大石峡砂砾石坝料渗透特性及其影响因素研究

陈生水^{1,2}, 凌 华^{1,2}, 米占宽^{1,2}, 苗 喆³, 梅世昂^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要: 利用试样截面尺寸为 1000 mm×1000 mm 的超大型渗透仪和 Φ300 mm 的常规大型渗透仪, 针对大石峡面板坝筑坝砂砾石料的渗透特性开展了较为系统的试验研究。结果表明: 砂砾石料小于 5 mm 细粒含量对其渗透系数、抗渗透破坏能力及其破坏模式均具有重要影响; 经过缩尺的砂砾石料渗透特性试验结果将高估原型料的排水性能和抗渗透破坏能力; 试样尺寸越大, 在振动压实制样过程中, 砂砾石料中细颗粒离析至试样表面的现象越严重, 为提高试验结果的可靠性, 利用超大尺寸渗透仪开展试验时, 应模拟现场砂砾石料实际振动碾压过程进行制样; 大石峡高面板坝筑坝砂砾石料小于 5 mm 细颗粒含量较高, 渗透系数偏小, 有必要在垫层区和主堆砂砾料区之间设置过渡反滤区, 以提高垫层区料的抗渗透破坏能力。

关键词: 土石坝; 砂砾石料; 渗透特性

中图分类号: TV16

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)01-0026-06

作者简介: 陈生水(1962-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事土石坝试验技术、安全评价、灾害预测与防控方法的研究工作。E-mail: sschen@nhri.cn。

Experimental study on permeability and its influencing factors for sandy gravel of Dashixia dam

CHEN Sheng-shui^{1,2}, LING Hua^{1,2}, MI Zhan Kuang^{1,2}, MIAO Zhe³, MEI Shi-ang^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety

Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. HYDROCHINA Xibei Engineering Corporation, Xi'an

710065, China)

Abstract: A super-large cubic permeability meter (1000 mm×1000 mm) and a traditional cylindrical large-scale permeability meter (Φ300 mm) are used to conduct systematic experiments on the permeability characteristics of gravel materials to be used in Dashixia concrete face gravel dam (CFGD). It is found that the content of fine particles smaller than 5 mm has important effects on the permeability coefficient, the seepage failure resistance and the relevant failure modes. Scaling of specimens tends to result in an overestimation of the drainage behavior and seepage failure resistance of the test gravel. Evident particle segregation phenomenon is observed in compacted and prepared specimens, particularly in those prepared in the super-large cubic permeability meter. Therefore, to improve the reliability of the test results, the in-situ compaction condition should be taken into account carefully. The test results also show that the content of particles smaller than 5 mm is high in the gravel materials to be used in Dashixia CFGD, which is responsible for the low permeability measured in the tests. It is necessary to set a transition and filter zone between the main gravel zone and the cushion so as to enhance the seepage failure resistance of the cushion materials.

Key words: earth and rockfill dam; gravel material; permeability

0 引 言

大石峡混凝土面板坝最大坝高 247 m, 是目前世界上已开工建设的最高砂砾石坝。大量试验研究和已建成的多座高面板砂砾石坝原型观测资料表明^[1-4], 与爆破堆石料相比, 砂砾石料压实后具有较高的变形模量, 在高应力作用下颗粒破碎率低, 大坝竣工后的流

变量小, 变形控制难度相对较小。但是, 一般天然砂砾石料粒径小于 5 mm 的细颗粒含量较高, 且级配不连续、离散性大, 碾压过程中易发生颗粒离析现象、

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0404806); 国家自然科学基金项目 (51539006, 51679149, U1765203)

收稿日期: 2018-07-25

表 1 试验级配与试验干密度
Table 1 Testing gradation and density

坝体 分区	岩性	级配特性	小于某粒径颗粒质量百分含量/%														相对密度试验		试验 干密度 /(g·cm ⁻³)
			400 mm	200 mm	150 mm	100 mm	80 mm	60 mm	40 mm	20 mm	10 mm	5 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.075 mm	最小 干密度 /(g·cm ⁻³)	最大 干密度 /(g·cm ⁻³)	
垫层区	灰岩料	设计级配平均线及 试验模拟级配						100	88	69	54.5	42.5	30	21.5	14.5		1.83	2.34	2.28
过渡 反滤区	砂砾石料	设计级配平均线及 试验模拟级配						100	83.5	50	30	10	0				1.69	2.18	2.12
主堆 石区	砂砾石料	设计级配上包线			100	90	85	77	67	54	46	36	29	25	20	10	—	—	—
		最大粒径 150 mm			100	90	85	77	67	54	46	36	29	25	20	10	1.91	2.36	2.29
		上包线试验模拟级配																	
		最大粒径 60 mm						100	84.4	64.1	51.6	36	29	25	20	10	1.88	2.34	2.29
		上包线试验模拟级配																	
		设计级配平均线	100	88	82	73	67	59.2	52	41	33	24.4	19	16	13	6	—	—	—
		最大粒径 200 mm																	
		平均线试验模拟级配		100.0	92.9	82.2	75.0	65.8	57.2	44.1	34.6	24.4	19.0	16.0	13.0	6.0	1.89	2.35	2.28
		最大粒径 60 mm						100	84.4	60.5	43.1	24.4	19	16	13	6	1.85	2.34	2.28
		平均线试验模拟级配																	

致使粗细颗粒相对集中, 颗粒间咬合力减小, 故抗冲刷能力、渗透性和渗透稳定性比堆石料差^[5], 采用砂砾石填筑坝体时, 渗透稳定成为大坝设计的突出问题。

影响砂砾料渗透特性的影响因素很多, 如小于 5 mm 粒径颗粒含量^[6]、黏粒含量^[7-8]、不均匀系数^[9-10]、曲率系数^[11]等反映级配特性的因素, 还包括干密度、颗粒浑圆度、颗粒离析、水流方向等。

目前坝体防渗设计和渗流计算参数一般通过试样直径为 300 mm 的常规渗透仪得到, 试验前需将设计级配或检测级配缩尺成最大粒径 60 mm 的试验模拟级配, 显然存在渗透特性的缩尺效应问题。为此, 部分学者针对筑坝砂砾石料开展了试样直径达 1000 mm 的渗透试验^[6, 12]。这些试验获得的比较一致的认识是: 粒径小于 5 mm 的细颗粒含量对砂砾石料的渗透特性具有重要影响。但在砂砾石渗透特性的缩尺效应、试验方法对渗透试验结果影响以及小于 5 mm 的细颗粒含量对砂砾石料渗透破坏机理的影响等方面尚未形成共识。

本文利用试样截面尺寸为 1000 mm×1000 mm 的超大型渗透仪和Φ300 mm 的常规大型渗透仪, 针对大石峡特高面板坝筑坝砂砾石料的渗流特性、渗透破坏机理及其影响因素进行了较为系统的试验研究, 在此基础上提出了相应的大坝渗流安全控制措施。

1 筑坝砂砾石料渗透试验

1.1 试验级配与密度

大石峡工程垫层区、过渡反滤区、主堆石区砂砾料的设计级配, 以及采用等量替代法缩尺得到的试验模拟级配见表 1。对于垫层区料, 以孔隙率 17%确定试验干密度; 对于各区砂砾石料, 利用Φ300 mm 相对密度测试仪, 以相对密度 0.90 为标准确定了各试样控制干密度, 并用Φ1000 mm 的相对密度测试仪进行

了复核, 结果相近, 见表 1。

1.2 试验设备与试验方法

本次超大型和常规大型渗透试验均采用常水头法, 渗流方向为从下往上。常规大型渗透试验的试样直径为 300 mm, 渗径为 300 mm, 试验依据《土工试验规程》(SL237—1999) 进行。

超大型渗透试验在自主研发的超大型高压渗透仪上进行。该试验设备的试样桶为 1000 mm×1000 mm×1630 mm 的长方体, 如图 1 所示, 试样最大允许粒径 200 mm, 上覆应力 0~6.0 MPa, 渗透水压力 0~1.6 MPa, 可用于高土石坝筑坝材料在高应力和高水头作用下的渗透系数、渗透变形和防渗体层间渗流关系试验研究。



图 1 超大型渗透试验仪

Fig. 1 Super-large permeability testing equipment

由于超大型渗透试验的试样尺寸较大, 单个试样质量超过 2000 kg, 故采用分层称取试样和分层制样的方法, 以保证试样级配和试样密度的均匀性。由各试样最大粒径颗粒尺寸, 根据 1000 mm 的试样高度, 垫层区料、过渡反滤区料、主堆石区上包线试样分 4 层,

主堆石区平均线试样分 3 层。称取试样时, 按 200~150, 150~100, 100~60, 60~40, 40~20, 20~10, 10~5, 5~1, 1~0 mm 九种粒径范围进行。制样前, 在透水孔直径为 5 mm 的下透水板上铺设一层滤网, 以防止细颗粒堵塞透水板, 试样桶内壁涂凡士林, 方形试样桶边角处涂玻璃胶, 以避免桶壁和边角处产生集中渗流。超大型渗透仪的制样过程见图 2。



图 2 超大型渗透试样的制样

Fig. 2 Preparation of super-large specimens

试样成型后采用水头法进行饱和。在渗透水流和测压管(试样底部与试样顶部各安装 1 只测压管)水位稳定后, 测量一定时间内的排水量, 同时测定进水、出水的温度。对于渗透变形试验, 在本级水头下试样无异常情况, 再进行下一级水头试验, 直至试样破坏为止。需指出的是, 目前部分研究单位在进行砂砾石料的渗透试验时, 采用水流方向从上往下的试验方法, 与水流从下往上方法相比, 该方法的水流方向与坝体内渗流的实际方向更为接近, 两者得出的砂砾石料渗透系数也基本相同, 但采用水流从上往下试验方法研究砂砾石料的抗渗透破坏能力时, 往往得出很大的渗透破坏坡降, 甚至超出试验仪器的极限范围。笔者认为, 出现这一现象的主要原因是试验底部铺设的滤网、卵石层或透水板发挥了反滤保护层的作用, 从而使得砂砾石料试样的抗渗透破坏能力得以大幅提高, 也就是说, 采用水流从上往下试验方法得到的是砂砾石料在有反滤保护条件下的渗透破坏坡降。

1.3 试验结果

基于上述试验, 得到了两种试样尺寸下大石峡面板砂砾石坝垫层料、过渡反滤料以及主堆石区砂砾石

料的渗透系数、抗渗透破坏能力和渗透破坏模式(见表 2)。

表 2 渗透系数与渗透变形试验结果
Table 2 Results of permeability and seepage tests

坝体分区	级配特性	ρ_d /(g·cm ⁻³)	试样直径或边长/mm	k_{20} /(cm·s ⁻¹)	临界坡降	破坏坡降	破坏模式
垫层区	平均线	2.28	1000	4.90×10^{-4}	1.90	2.06	流土
			300	8.19×10^{-4}	2.17	2.32	流土
过渡反滤区	平均线	2.12	1000	3.63×10^{-1}	—	—	—
主堆石区	上包线	2.29	1000	2.36×10^{-5}	2.37	2.51	流土
			300	1.34×10^{-4}	3.33	3.59	流土
	平均线	2.28	1000	6.69×10^{-4}	0.82	2.39	管涌
			300	3.35×10^{-3}	1.29	3.20	过渡

2 砂砾料渗透特性及其影响因素

2.1 细颗粒含量对渗透特性的影响

主堆石区砂砾石料试样上包线小于 5 mm 粒径的细颗粒含量为 36%, 平均线试样的细颗粒含量为 24.4%。由表 2 可见, 细颗粒含量高的上包线试样的渗透系数明显低于细颗粒含量较低的平均线试样的渗透系数, 而且随着小于 5 mm 粒径的细颗粒含量的降低, 渗透破坏的模式也由流土型向管涌型转变。这表明小于 5 mm 粒径的细颗粒含量对砂砾石料的渗透特性具有重要影响。因此, 开展砂砾石料渗透特性的级配缩尺试验时, 建议应采用不改变小于 5 mm 粒径细颗粒含量的等量替代法。

2.2 缩尺效应对渗透特性的影响

从表 2 给出的试验结果发现, 对于垫层区料, 两种试样尺寸的级配与干密度均相同, 但边长 1000 mm 试样的渗透系数约是直径 300 mm 试样渗透系数的 0.6 倍, 笔者认为这很可能是试样桶的边壁效应引起的, 随着试样尺寸增大, 渗透试验的边壁效应将降低。对于主堆石区砂砾石料, 边长 1000 mm 试样的渗透系数是直径 300 mm 试样渗透系数的 0.18~0.20 倍, 随着试样尺寸增大, 渗透系数明显降低。笔者认为, 除了试样的边壁效应外, 主要原因是全级配料的不均匀系数高, 振动密实制样过程中试样的细颗粒离析现象更为严重, 从而在试样表面形成了一弱透水薄层(见图 3), 导致其渗透系数大幅降低。

需要指出的是, 现场碾压试验表明, 砂砾石料在碾压过程中也会出现明显的细颗粒离析现象, 形成密实且较光滑表层。因此, 边长 1000 mm 试样的渗透系数试验结果应该更接近实际, 直径 300 mm 试样的试验结果高估了砂砾石料的透水性, 不利于大坝渗流安全。对于砂砾石坝料, 建议采用大尺寸渗透仪, 尽可能开展全级配料的渗透特性试验。

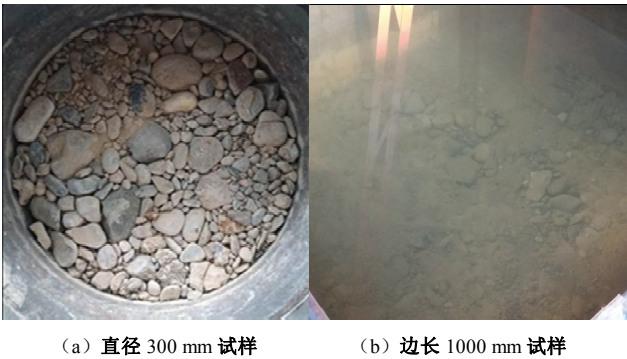


图 3 不同尺寸试样的细颗粒离析现象

Fig. 3 Particle segregation of specimens with different sizes

2.3 试验方法对渗透特性的影响

前文已述,主堆石区砂砾石平均线超大型渗透试验试样高度达到了 1000 mm,由于试样密度较高,相对密度较大,同时为了符合《土工试验规程》(SL237—056—1999)关于分层厚度的规定(d_{85} 的 1.5~2.5 倍),因此分为 3 层进行振动压实。由于颗粒离析,振动压实后 3 个分层试样的表面均形成了弱透水薄层。

实际面板坝工程砂砾石料碾压铺层厚度一般为 80 cm,碾压后也仅表层形成弱透水薄层。为模拟现场砂砾料填筑时的颗粒离析特性和反映实际层高,另开展了两组补充试验,以分析颗粒离析引起的弱透土层数对渗透特性的影响和研究现场砂砾石填筑料的实际渗透性能。

第一组试验:试样分 3 层制作,振动压实后每层高度为 29 cm。第一、二两层振动压实完成后,分别刨除表层离析出的细颗粒,再制作下一层试样。为模拟砂砾石坝料现场振动碾压过程中细颗粒离析现象,保留最后一层试样(第三层)表面离析出的细颗粒,控制试样的总高度约 80 cm。被刨除的细料级配、刨除细料后的前两层试样平均级配见表 3。

第二组试验:试样同样分 3 层制作,振动压实后每层高度 27 cm。第一、二两层振动压实完成后,分别刨除表层离析出的细颗粒料,并将其掺入下一层试样中,搅拌均匀后再进行下一层试样的制作,与第一组试验相同,保留最后一层试样(第三层)表面离析出的细颗粒,试样的总高度为 81 cm。

表 3 砂砾石料试验级配

Table 3 Gradation of test gravel materials								
级配特性	小于某粒径颗粒质量百分含量/%							
	200	150	100	60	40	20	10	5
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
原级配(第三层)	100.0	92.9	82.2	65.8	57.2	44.1	34.6	24.4
刨除细料后前两层试样平均级配	100.0	92.2	80.5	62.6	53.5	41.1	32.3	22.6
被刨除的细料级配				100.0	97.3	77.2	59.7	44.1

两组渗透试验结果见表 4。第一组试验:相比原级配,刨除表层细颗粒后第一层和第二层小于 5 mm 细颗粒含量减少了 1.8% (直径 300 mm 渗透仪测得的刨除细颗粒料的渗透系数为 6.82×10^{-5} cm/s),细颗粒料含量变幅虽然不是很大,但试验得出的渗透系数却由 6.69×10^{-4} 增大至 2.77×10^{-3} cm/s,提高了约 4 倍,这表明砂砾石料制样过程中振动碾压引起的细颗粒离析现象对其渗透系数具有明显影响。第二组试验:将第一层和第二层表面离析出的细料刨除后掺入下一层料后,可保持整个试样的级配不变,试样高度 81 cm 也与砂砾石坝施工振动碾压的实际分层厚度基本一致,不刨除最后一层试样(第三层)表面离析出的细颗粒也可较好模拟每层砂砾石料振动碾压施工过程中细颗粒离析至其表面的这一现象。采用该方法制作的试样,试验得出的渗透系数为 1.09×10^{-3} cm/s,较第一组试验结果降低了 2.5 倍,但比不刨除第一层和第二层表面细颗粒料试样的渗透系数增大了 1.6 倍。显然,制样方法对砂砾石料渗透系数的试验结果具有明显影响,第二组试验的制样方法应该更符合砂砾石坝实际施工碾压过程。

表 4 砂砾石料渗透系数试验结果

Table 4 Permeability of test gravel materials			
试样名称	试验情况	ρ_d /(g·cm ⁻³)	k_{20} /(cm·s ⁻¹)
主堆石区 平均线砂 砾料	不刨除前两层细料(见表 2)	2.28	6.69×10^{-4}
	刨除前两层表面细料	2.28	2.77×10^{-3}
	刨除的细料(试样直径 300 mm)	2.28	6.82×10^{-5}
	前两层表层细料掺入后一层	2.28	1.09×10^{-3}

3 砂砾石料渗透破坏机理及其影响因素

3.1 细粒含量对渗透稳定性的影响

从表 2 给出的试验结果以及观察到的试样渗透破坏现象(见图 4)可以发现,砂砾石料中小于 5 mm 细颗粒含量对其渗透稳定性和渗透破坏模式也具有重要影响。主堆石区砂砾石料平均线试样(小于 5 mm 细颗粒含量为 24.4%)在渗透变形试验过程中出现了多处集中渗流通道,其破坏方式为“管涌”型;主堆石区砂砾石料上包线试样小于 5 mm 细颗粒含量提高至 36.0%,试验过程中试样以及试样筒边壁处的细颗粒流失较为严重,试样内部几乎没有观察到颗粒跳动和泉眼等现象,试样整体渗透变形破坏。也就是说,随着小于 5 mm 细颗粒含量的增加,砂砾石料的渗透破坏模式由“管涌”型转变为“流土”型,而且其临界坡降也从 0.82 明显提高至 2.37 (见图 5)。

已有的研究成果表明^[1, 7],当砂砾石料中小于 5 mm 的细料含量达到 30% 左右时,细料能较好地充填

表 5 反滤试验结果

Table 5 Results of filter tests

试验 序号	被保 护料	级配 特性	试样干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	保护料	试验级配	试样干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	被保护料 临界坡降	被保护料 破坏坡降
1	垫层区	平均线	2.28	过渡反滤区	平均线	2.12	12.1	13.3
2	垫层区	平均线	2.28	主堆石区	上包线	2.29	—	3.21
3	垫层区	平均线	2.28	主堆石区	平均线	2.28	—	3.49

于粗颗粒的孔隙之中，并能参与骨架作用，碾压后能获得较大的干密度，且具有较高的强度和模量。本次试验也进一步佐证了这一结论，当砂砾小于 5 mm 细颗粒含量由 24.4% 增加至 36.0% 时，细粒料能更好参与骨架作用，其抗渗透破坏能力也得到明显提高，渗透破坏模式也由“管涌”型转变为“流土”型。



(a) 流土（上包线试样） (b) 管涌（平均线试样）

图 4 渗透破坏现象

Fig. 4 Failure phenomena observed in seepage tests

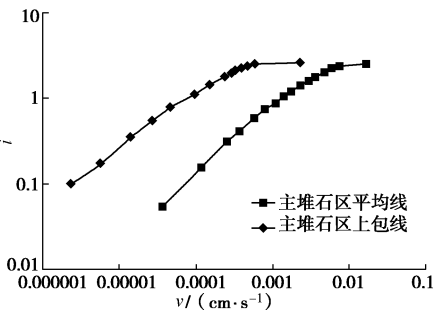


图 5 渗流速度与渗透坡降的关系

Fig. 5 Relationship between seepage velocity and head gradient

3.2 缩尺效应对渗透稳定性的影响

对于无黏性粗粒土，通常渗透系数越小其临界坡降和破坏坡降越大。但由表 2 可知，无论是主堆石区上包线试样还是平均线试样，边长 1000 mm 试样的渗透系数比直径 300 mm 试样的渗透系数要低，但前者的临界坡降和破坏坡降也低于后者，主堆石区平均线试样的渗透破坏模式甚至也由常规尺寸试样的“过渡”型转变为超大尺寸试样的“管涌”型，即试样最终破坏并非是整个浮起而是由内部形成集中渗流通道所引起的。笔者认为，产生这一问题的主要原因是：试样尺寸越大，由于制样等原因在试样中形成的潜在集中渗漏通道的可能性越大，这也是级配与密度相同，但试样尺寸不同的垫层区砂砾石料渗透特性不相一致的

主要原因。可以推断，相比试验室规范化操作，砂砾石料在现场大面积碾压施工时形成的潜在薄弱环节会更多，建议设计人员运用室内渗透试验成果时应考虑这一因素。

由上述分析可知，砂砾石料渗透特性缩尺试验结果将高估其排水性能和抗渗透破坏能力，对于渗透破坏坡降富裕度不大的重要砂砾石坝工程，有必要利用更大试样尺寸的试验设备，开展全级配砂砾石料渗透特性试验。

3.3 有过渡反滤区保护下垫层区渗透稳定性研究

为研究大石峡混凝土面板砂砾石坝垫层区后是否有必要设置过渡反滤区，利用边长 1000 mm 的超大型渗透仪，针对垫层区后设置过渡反滤区、垫层区直接填筑在主堆区平均线级配和上包线级配砂砾石料上开展了 3 组试验研究。试验渗流方向从下向上，依次制备被保护垫层区和保护区，渗径分别为 660, 640 mm，在被保护区底部、保护区与被保护区界面以及保护区顶部均布置测压管，试验结果见表 5。

从表 5 中的试验结果可以看出，如果在垫层区后设置过渡反滤区，由于过渡区料的渗透系数显著大于垫层区料的渗透系数（见表 2），垫层区承受了绝大部分水头，过渡反滤区发挥了明显的排水减压作用，导致其几乎不承担水头。在过渡反滤区保护下，垫层区料的渗透破坏坡降由 2.06 大幅提高至 13.3，垫层区料的抗渗透破坏能力显著增强。如果将垫层区直接填筑在主堆区砂砾石料上，由于垫层区料与主堆区料渗透系数接近（见表 2），水头由两者共同承担，使得垫层区料的渗透破坏坡降明显小于有过渡反滤区保护下的渗透破坏坡降。因此，对于细粒料含量较高的大石峡面板坝料场的砂砾石料，有必要在垫层区后设置过渡反滤区，以提高垫层区的抗渗透破坏能力。

需要指出的是，本次试验时，为提高过渡反滤区料的透水性，剔除了其中小于 2 mm 的细粒料含量，导致其很难压实。建议在坝体实际施工过程中适当增加过渡反滤区料中小于 2 mm 的颗粒含量，以增加过渡反滤区料压实后的干密度，在保证垫层区料渗透稳定的前提下，进一步提高过渡反滤区料的强度和变形模量，这显然有利于坝坡稳定和坝体变形控制。过渡反滤区料中小于 2 mm 颗粒含量可依据上述原则，通过试验研究确定。

4 结论与建议

利用试样截面尺寸为 1000 mm×1000 mm 的超大型渗透仪和 Φ300 mm 的常规大型渗透仪, 针对大石峡特高面板坝筑坝砂砾石料的渗流特性、渗透破坏机理及其影响因素进行了较为系统的试验研究, 得到以下 4 点结论和建议。

(1) 砂砾石料小于 5 mm 细粒含量对其渗透特性具有重要影响。它不仅能显著改变砂砾料的渗透性能, 还对其渗透破坏模式具有决定性影响。对砂砾石料渗透特性进行缩尺试验时, 建议应采用不改变小于 5 mm 粒径细颗粒含量的等量替代法。

(2) 砂砾石料渗透特性缩尺试验结果将高估其排水性能和抗渗透破坏能力, 对于渗透破坏坡降安全裕度不大的重要砂砾石坝工程, 有必要利用更大试样尺寸的试验设备, 开展全级配砂砾石料渗透特性试验。

(3) 在振动压实过程中, 砂砾石料中的细颗粒存在明显的离析至试样表面的现象, 试样尺寸越大, 离析现象越严重, 从而影响试验结果的准确性。因此, 利用超大尺寸渗透仪开展试验时, 应模拟现场砂砾石料实际振动碾压过程进行制样。

(4) 大石峡特高面板坝筑坝砂砾石料小于 5 mm 细颗粒含量较高, 渗透系数偏小, 有必要在垫层区和主堆砂砾料区之间设置过渡反滤区, 以提高垫层区料的抗渗透破坏能力。同时增设与过渡反滤层相连通的坝内排水体, 确保渗透至坝内的水流能及时排出坝体。

参考文献:

- [1] 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 Sheng-shui, FENG Jia-ji, YUAN Hui. Research on key techniques of facing sandy gravel dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 16 - 20. (in Chinese))
- [2] 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): 986 - 996. (DENG Ming-jiang. 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): 986 - 996. (in Chinese))
- [3] 傅 华, 凌 华, 蔡正银. 砂砾石料渗透特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, **8**(4): 69 - 71. (FU Hua, LING Hua, CAI Zheng-Yin. Experimental study on seepage properties of sandy gravel[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, **8**(4): 69 - 71. (in Chinese))
- [4] 郭诚谦. 沟后水库溃坝原因分析[J]. 水力发电, 1998(11): 40 - 45. (GUO Cheng-qian. Analysis on the causes of dam breach of Gouhou Reservoir[J]. Water Power, 1998(11): 40 - 45. (in Chinese))
- [5] 汪 洋, 曲 苓. 乌鲁瓦提砂砾石面板高坝渗流控制的设计[J]. 水利水电技术, 2000, **31**(1): 66 - 70. (WANG Yang, QU Ling. Seepage control design for Wuluwati dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2000, **31**(1): 66 - 70. (in Chinese))
- [6] 郭爱国, 凤家骥, 汪 洋, 等. 砂砾石坝料渗透特性试验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, **32**(3): 93 - 97. (GUO Ai-guo, FENG Jia-ji, WANG Yang, et al. Experimental research on permeability of sandy gravel for dam mass[J]. J Wuhan Univ of Hydr & Elec Eng, 1999, **32**(3): 93 - 97. (in Chinese))
- [7] SATO M, KUWANO R. Suffusion and clogging by one-dimensional seepage tests on cohesive soil[J]. Soils and Foundations, 2015, **55**(6): 1427 - 1440.
- [8] SEGHIR A, BENAMAR A, WANG H. Effects of fine particles on the suffusion of cohesionless soils. experiments and modeling[J]. Transport in Porous Media, 2014, **103**(2): 233 - 247.
- [9] 屈智炯, 吴剑明. 压实石渣料渗透变形的试验研究[J]. 成都科技大学学报, 1984(2): 67 - 76. (QU zhi-jiong, WU Jian-ming. An experimental study of seepage deformation of the compacted rock debris sample[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1984(2): 67 - 76. (in Chinese))
- [10] 樊贵盛, 邢日县, 张明斌. 不同级配砂砾石介质渗透系数的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2012, **43**(3): 373 - 378. (FAN Gui-sheng, XING Ri-xian, ZHANG Ming-bin. Experimental study on permeability of the sandy gravel media with different gradtion[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2012, **43**(3): 373 - 378. (in Chinese))
- [11] 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 Jun-jie, LU Xiao-zhi, QIU Zhen-feng, 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))
- [12] 杨得勇, 雍 莉. 混凝土面板砂砾石坝垫层料过渡料渗流及渗透稳定性试验研究[J]. 西北水电, 2001(2): 47 - 50. (YANG De-yong, YONG Li. Study on bedding and transition aterials' seepage and permeation stability tests for Heiquan concrete face sand/gravel dam[J]. Northwest Hydropower, 2001(2): 47 - 50. (in Chinese))