

DOI: 10.11779/CJGE2023S10028

高细粒含量砂砾石料的渗透特性试验研究

吴 平¹, 凌小东², 石北啸^{3,4}, 何 宁⁵

(1. 中铁水利水电规划设计集团有限公司, 江西 南昌 330029; 2. 南京工业大学海外教育学院, 江苏 南京 211816; 3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 4. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210029; 5. 甘肃电投炳灵水电开发有限责任公司, 甘肃 临夏 731600)

摘 要: 开展了不良级配高细粒含量覆盖层砂砾石料的渗透特性试验研究。结果表明: 随相对密度和小于 5 mm 粒径颗粒含量的增加, 渗透系数降低。渗透系数随相对密度的变化可用半对数公式描述, 渗透系数随 $P_{<5}$ 含量的变化可用幂函数描述。通过归一化方法提出了渗透系数经验公式, 可预测试验或文中建议范围内鄱阳湖覆盖层砂砾石料的渗透系数。高细粒含量砂砾石料的渗透变形破坏方式主要为过渡型或流土型, 随相对密度和 $P_{<5}$ 含量的提高, 渗透变形破坏方式逐渐由过渡型趋向于流土型。

关键词: 砂砾石料; 渗透特性; 高细粒含量; 相对密度

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0044-06

作者简介: 吴 平(1980—), 男, 本科, 正高级工程师, 主要从事水文地质与工程地质、水利水电工程地质勘察与水利工程地质等方面的研究工作。E-mail: 285676627@qq.com。

Experimental study on permeability characteristics of sandy gravel with high fines content

WU Ping¹, LING Xiaodong², SHI Beixiao^{3,4}, HE Ning⁵

(1. China Railway Water Resources and Hydropower Planning and Design Group, Nanchang 330029, China; 2. College of Overseas Education, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 4. MWR Key Laboratory of Reservoir Dam Safety Nanjing 210029, China; 5. Gansu Electric Power Investment Bingling Hydropower Development Co., Ltd., Linxia 731600, China)

Abstract: A series of tests are conducted on the permeability characteristics of sandy gravel with high fines content. It is found that the permeability coefficient of sandy gravel decreases with the increase of the particles less than 5 mm and the relative density. The change of permeability coefficient with the relative density can be described by the semi-logarithmic formula, and the change of permeability coefficient with the content of particles less than 5 mm can be described by the power function. By using the normalization method, the empirical formula is proposed to predict the permeability coefficient of sandy gravel for overburden in Poyang Lake area. The seepage deformation of sandy gravel with high content of particles less than 5 mm is characterized by the soil flow failure or transitional failure. With the increase of the content of particles less than 5 mm and the relative density, the transitional failure turns to the soil flow one.

Key words: sandy gravel; permeability characteristic; high fines content; relative density

0 引 言

在深厚覆盖层上建设水利水电工程, 基础防渗是关键技术问题, 天然覆盖层料的渗透性指标是防渗方案设计需考虑的重要因素。

覆盖层砂砾料渗透性能的影响因素众多, 级配方面包括小于 5 mm 粒径颗粒含量^[1]、黏粒含量^[2]、不均匀系数^[3-5]、曲率系数^[3-6]等。一般随小于 5 mm 粒径颗粒含量和黏粒含量的增加, 渗透系数降低。但不均匀系数与曲率系数对渗透系数的影响还未形成定论, 如随不均匀系数和曲率系数的增大, 砾石层料的渗透性

增大^[3]; 随不均匀系数增大渗透系数减小^[4-6]、随曲率系数增大渗透系数增大^[4,6]。砂砾石料的干密度越大、相对密度越高、孔隙比越小, 渗透系数越小^[6-7]。另外, 水流方向^[8]、缩尺效应^[9]、水力梯度^[10]等也是影响渗透性能的重要因素。

对于渗透变形, 主要取决于级配、颗粒形状、孔

基金项目: 江西省水利厅科技项目 (202124ZDKT06); 国家重点研究计划项目课题 (2022YFC3005502); 国家自然科学基金面上项目 (52279135)
收稿日期: 2023-07-05

隙率等土体自身几何条件和水力条件^[11]。一般随干密度、相对密度、密实度等的提升, 临界坡降和破坏坡降增加; 级配良好的土渗透破坏坡降相对较大; 随细粒含量的提高, 破坏方式由管涌型向流土型发展^[9]。关于不均匀系数、曲率系数对渗透坡降的影响则比较复杂, 如在不均匀系数、曲率系数不同范围内破坏坡降存在不同形式的相关性^[12], 不均匀系数相同时砂土为流土破坏而碎砾石却是管涌破坏^[13], 需要进行深入的研究。

天然覆盖层料一般级配离散, 往往粒径缺失导致级配不良, 密度分布也不均, 因此其渗透性能是工程建设的关键技术问题也难点问题。本文系统进行了鄱阳湖地区级配不良、高细料含量覆盖层砂砾石料的渗透特性试验研究。

1 试验级配与密度

1.1 级配特性

鄱阳湖覆盖层砂砾石料的 20 组颗分试验结果见图 1, 由于最大粒径为 60 mm, 因此直接采用检测级配的上包线、平均线和下包线作为大型渗透试验级配。

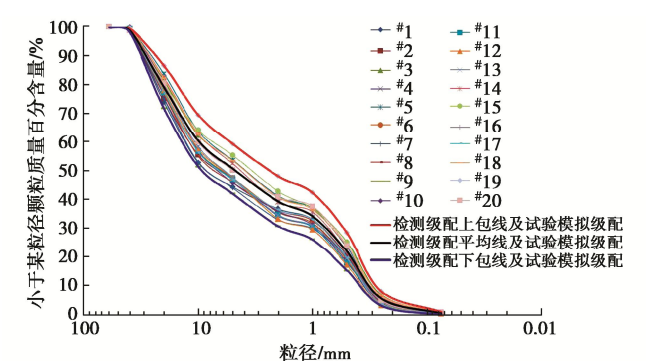


图 1 级配包络线与试验级配

Fig. 1 Grading envelopes and testing gradations

由图 1 可知, 砾粒 (60~2 mm) 含量 51.8%~69.0%, 粗砂 (0.5~2 mm) 含量 13.4%~19.6%, 中砂 (0.25~0.5 mm) 含量 12.2%~20.5%, 细砂 (0.075~0.25 mm) 含量 3~7%, 0~0.075 mm 细粒含量仅为 0.3%~1.2%, 不均匀系数为 18.9~38.5, 曲率系数为 0.13~0.62, 为级配不良砾。可见, 鄱阳湖覆盖层砂砾石料具有最大粒径小, 细颗粒 (0~5 mm) 含量 $P_{<5}$ 高, 级配不良等显著特点。

根据已有研究成果, 小于 5 mm 粒径颗粒含量高, 会降低砂砾石料的透水性; 但由于缺失细料、且级配不良, 虽有利于透水性能的增加, 却不利于渗透稳定, 因此级配的复杂性导致砂砾石料的渗透性能及抗渗能力具有一定的特殊性, 具有较明显的区域性特点。

1.2 试验密度

相对密度是砂砾料的重要性指标, 用以控制填筑质量、评价密实性能和预估力学特性等。相对密度试验见表 1, 对不同级配包络线选择 0.33, 0.55, 0.68, 0.80 等相对密度开展渗透性能试验。

由表 1 可知, 随 $P_{<5}$ 含量的提升, 文中砂砾料最小干密度和最大干密度变小, 相同相对密度所对应的干密度也降低。主要原因在于, 细颗粒含量增加会逐渐阻断粗颗粒形成的骨架并包裹部分大粒径颗粒, 粗细颗粒充填性变差, 土性也逐渐趋向于砂性土。

表 1 相对密度试验结果及试验干密度
Table 1 Test results of relative density and test densities

级配特性	相对质量密度	最小干密度/ (g·cm ⁻³)	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	相对密度 D_r	试验干密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙比
上包线 $P_{<5}=59.4\%$	2.64	1.81	2.10	0.55	1.96	0.348
				0.68	2.00	0.322
				0.80	2.03	0.297
平均线 $P_{<5}=50.8\%$	2.64	1.85	2.16	0.33	1.94	0.361
				0.55	2.01	0.314
				0.68	2.05	0.288
下包线 $P_{<5}=42.2\%$	2.64	1.91	2.22	0.80	2.09	0.263
				0.55	2.07	0.276
				0.68	2.11	0.251
				0.80	2.15	0.228

2 渗透系数试验研究

依据《土工试验方法标准》GB/T50123—2019^[14], 开展了不同级配包络线、不同相对密度砂砾石料的渗透系数试验, 试样直径 300 mm、高度 300 mm, 水流方向从下往上。标准温度 20℃时的渗透系数 k 见表 2。

表 2 渗透系数测试结果

Table 2 Results of permeability coefficient

级配特性	相对密度	$\rho_d /$ (g·cm ⁻³)	$k /$ (cm·s ⁻¹)	$\frac{k_{D_r}}{k_{0.55}}$	$\frac{k_{P_{<5}}}{k_{59.4\%}}$
上包线 $P_{<5}=59.4\%$	0.55	1.96	9.81×10^{-3}	1.000	1
	0.68	2.00	6.11×10^{-3}	0.623	1
	0.80	2.03	3.77×10^{-3}	0.384	1
平均线 $P_{<5}=50.8\%$	0.33	1.94	2.11×10^{-2}	1.808	—
	0.55	2.01	1.17×10^{-2}	1.000	1.188
	0.68	2.05	7.48×10^{-3}	0.642	1.224
下包线 $P_{<5}=42.2\%$	0.80	2.09	4.46×10^{-3}	0.382	1.183
	0.55	2.07	1.41×10^{-2}	1.000	1.436
	0.68	2.11	8.77×10^{-3}	0.622	1.435
	0.80	2.15	5.05×10^{-3}	0.359	1.341

由表 2, 随相对密度的增加、渗透系数降低; 随 $P_{<5}$ 含量的减少, 渗透系数增加, 且同种相对密度情况

下不同包络线试样的渗透系数差异不显著。

研究表明,当 $P_{<5}$ 含量达到 30%~35% 时,细料能较好地充填于粗颗粒骨架的孔隙中,并参与骨架作用,相同击实功下能获得较大的干密度,最小干密度和最大干密度在此处会出现峰值。表 3 列出了某高坝填筑砂砾料渗透系数试验结果,其中 $P_{<5}$ 含量为 17%~37%,随 $P_{<5}$ 含量增加,试验干密度增大,相应过水面积减小,在此双重作用下,相同相对密度各级配包络线试样的渗透系数差异较为显著。但对于文中砂砾石料, $P_{<5}$ 含量达到了 42.2%~59.4%,由下包线到上包线,相同相对密度所对应的试验干密度降低,因此虽然细料 $P_{<5}$ 含量增加,但由于密度降低、孔隙比增大、过水面积增加,导致不同级配料的渗透系数差异不显著。因此,相同相对密度条件下不同级配料的渗透性能差异性并不一致,研究砂砾料渗透性能时应综合考虑级配和密度特性。

表 3 某高坝砂砾石料渗透系数

Table 3 Permeability coefficients of sandy gravel of a high dam				
级配特性	$P_{<5}/\%$	D_r	$\rho_d /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
上包线	37	0.90	2.28	2.50×10^{-4}
平均线	25	0.90	2.27	6.01×10^{-3}
下包线	17	0.90	2.22	7.73×10^{-2}

相同级配情况下,渗透系数 k 随相对密度 D_r 的变化如图 2 所示,发现可用半对数函数较好的描述同种级配料渗透系数随相对密度的变化,

$$k = a' \ln(D_r) + b' \quad (1)$$

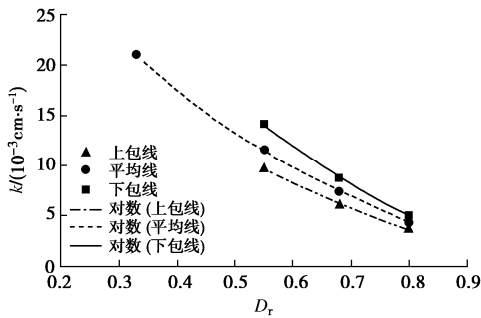


图 2 k 随 D_r 的变化

Fig. 2 Change of k with D_r

不同级配料的参数 a' , b' 不相同,因此必须归一化才能实现渗透系数计算和预测的简单化和实用化。定义同种级配料不同相对密度时的渗透系数与相对密度为 0.55 时渗透系数比值为 $k_{D_r}/k_{0.55}$,数值见表 2。点绘 $k_{D_r}/k_{0.55}$ 随 $D_r/0.55$ 的变化如图 3 所示,发现能较好的归一化不同级配特性情况下的渗透系数随相对密度的变化。

当相对密度为 0.55 时, $D_r/0.55=1$, $k_{D_r}/k_{0.55}=1$,点绘 $k_{D_r}/k_{0.55}-\ln(D_r/0.55)$ 关系曲线,令截距为 1,发现

仍具有非常高的拟合度,见图 4。则不同级配砂砾料的渗透系数随相对密度的变化可用下式描述:

$$\frac{k_{D_r}}{k_{0.55}} = a \ln\left(\frac{D_r}{0.55}\right) + 1 \quad (2)$$

式中: a 为试验参数,其值为 -1.654,数值为负,反映了随相对密度的增加,渗透系数降低。

点绘相对密度相同时不同级配料的渗透系数 k 随小于 5 mm 粒径颗粒含量 $P_{<5}$ 的变化,见图 5。发现可用幂函数描述,

$$k = c'(p_{<5})^{d'} \quad (3)$$

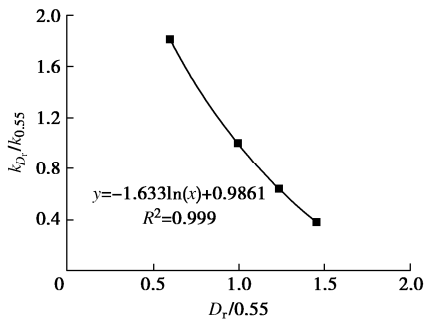


图 3 $k_{D_r}/k_{0.55}$ 随 $D_r/0.55$ 的变化

Fig. 3 Change of $k_{D_r}/k_{0.55}$ with $D_r/0.55$

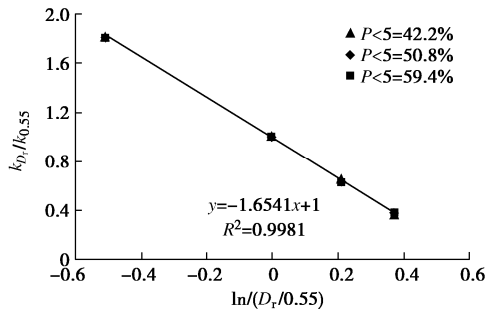


图 4 $k_{D_r}/k_{0.55}-\ln(D_r/0.55)$ 关系曲线

Fig. 4 Relationship between of $k_{D_r}/k_{0.55}$ and $\ln(D_r/0.55)$

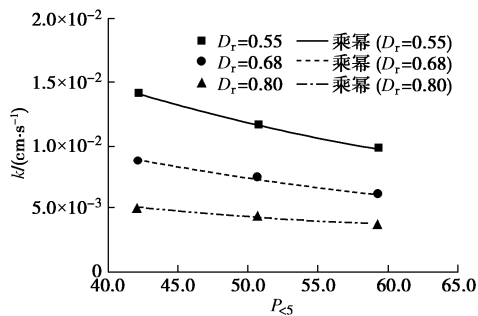


图 5 k 随 $P_{<5}$ 的变化

Fig. 5 Change of k with $P_{<5}$

类似,采用相同方法归一化不同相对密度条件下渗透系数随 $P_{<5}$ 的变化。同种相对密度条件下,不同 $P_{<5}$ 含量试样渗透系数与 $P_{<5}$ 为 59.4% 时的渗透系数比值为 $k_{P<5}/k_{59.4\%}$,见表 2。点绘 $k_{P<5}/k_{59.4\%}$ 随 $P_{<5}/59.4\%$

的变化见图 6, 仍可用幂函数高度拟合, 则不同相对密度条件下渗透系数随 $P_{<5}$ 含量变化可用下式描述:

$$\frac{k_{P_{<5}}}{k_{59.4\%}} = c \left(\frac{P_{<5}}{59.4\%} \right)^d \quad (4)$$

当 $P_{<5}$ 为 59.4% 时, $k_{P_{<5}}/k_{59.4\%}=1$, 因此 c 可取定值 1.0。

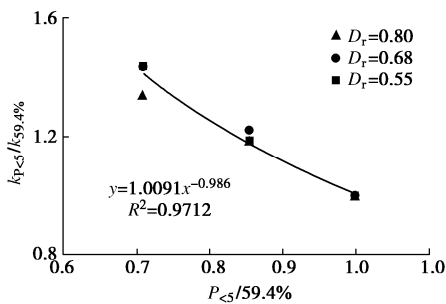


图 6 $k_{P_{<5}}/k_{59.4\%}$ - $P_{<5}/59.4\%$ 关系曲线

Fig.6 Relationship between $k_{P_{<5}}/k_{59.4\%}$ and $P_{<5}/59.4\%$

由式 (2)、(4) 可知, 当以 0.55 相对密度、 $P_{<5}$ 含量为 59.4% 的渗透系数 $k_{0.55,59.4\%}$ 为基准值时, 不同相对密度、不同 $P_{<5}$ 含量的渗透系数为

$$k = k_{0.55,59.4\%} \cdot \left(a \ln \left(\frac{D_r}{0.55} \right) + 1 \right) \left(\frac{P_{<5}}{59.4\%} \right)^d \quad (5)$$

式中: a , d 均为试验参数, 前者反映了相对密度的影响, 后者反映级配特征参数 $P_{<5}$ 含量的影响; 对于文中所用砂砾料, a 为-1.654, b 为-0.986, 均为负值, 表明随相对密度增大、小于 5 mm 粒径颗粒含量的增加, 渗透系数降低。式 (5) 为非线性表达式, 综合反映了级配与相对密度对渗透系数的影响。

由式 (5) 计算各级配不同相对密度的渗透系数见表 4, 相对误差为-2.4%~4.2%, 具有非常高的精度。考虑到文中砂砾料具有鲜明的地区级配特性, 具体应用时仅适当放宽, 建议 $P_{<5}$ 含量为 42.2%~64.4%, 相对密度为 0.28~0.85。

表 4 渗透系数试验与计算对比

Table 4 Strength indexes of sandy gravel

小于 5 mm 粒径含量 $P_{<5}/\%$	相对 密度 D_r	渗透系数 计算值/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	渗透系数 试验值/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	相对 误差/%
59.4	0.55	9.81×10^{-3}	9.81×10^{-3}	0.0
59.4	0.68	6.37×10^{-3}	6.11×10^{-3}	4.2
59.4	0.80	3.73×10^{-3}	3.77×10^{-3}	-1.0
50.8	0.33	2.11×10^{-2}	2.11×10^{-2}	0.2
50.8	0.55	1.15×10^{-2}	1.17×10^{-2}	-1.8
50.8	0.68	7.43×10^{-3}	7.48×10^{-3}	-0.7
50.8	0.80	4.36×10^{-3}	4.46×10^{-3}	-2.3
42.2	0.55	1.38×10^{-2}	1.41×10^{-2}	-2.4
42.2	0.68	8.93×10^{-3}	8.77×10^{-3}	1.8
42.2	0.80	5.23×10^{-3}	5.05×10^{-3}	3.5

3 渗透变形试验研究

进行了砂砾石料渗透变形试验, 试样直径 300 mm、高度 300 mm, 水流方向从下往上。得到的临界坡降、破坏坡降和破坏方式见表 5。由于 $P_{<5}$ 含量达到了 42.2%~59.4%, 小于 2 mm 含量也达到了 31%~48.2%, 因此其破坏方式以过渡型和流土型为主。

点绘相同级配条件下破坏坡降 i_F 随 D_r 的变化见图 7, 点绘相同相对密度条件下破坏坡降随 $P_{<5}$ 含量的变化见图 8。

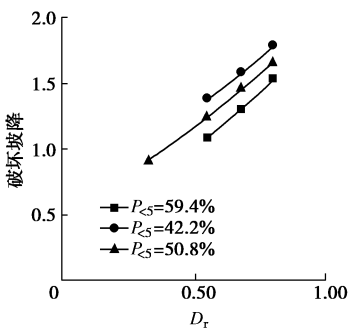


图 7 i_F - D_r 的变化

Fig. 7 Change of i_F with D_r

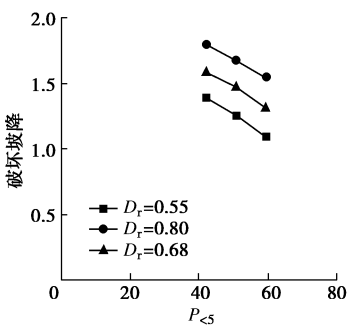


图 8 i_F - $P_{<5}$ 的变化

Fig. 8 Change of i_F with $P_{<5}$

由表 5, 图 7, 8, 对于相同级配试样, 相对密度较低时, 试验期间产生了细颗粒流失、试样表面浑浊、冒泡等现象, 继续提升水头超过破坏坡降后, 试样浮起, 水流增大, 破坏方式主要表现为过渡型。随相对密度的提高, 试样破坏前观察不到异常现象, 对数坐标上流速 v 与坡降 i 曲线的斜率也不发生偏移, 当水头超过破坏坡降后, 水流增大, 试样浮起, 发生流土破坏。即随相对密度的提高, 破坏方式逐渐由过渡型趋向于流土型, 临界坡降和破坏坡降均有所提高。

当相对密度相同时, 随 $P_{<5}$ 含量的增加, 破坏方式由过渡型趋向于流土型, 由于高细粒含量试样的密度小, 其破坏坡降反而降低, 见图 8, 9。但对于临界坡降, 由于破坏方式的变化, 无固定规律, 如相对密度 0.55 时, 各包络线均为过渡性破坏方式, 随细颗粒含量的增大, 由于密度影响临界坡降降低; 但相对密

度为 0.68 时, 由于平均线试样和下包线试样为过渡型破坏方式, 其临界坡降反而要低于产生流土型破坏的上包线试样, 见图 9。当相对密度为 0.80 时, 试样密实, 试样均浮起产生流土型破坏, 随细粒含量增加, 同样由于密度的影响, 临界坡降降低。

表 5 渗透变形参数
Table 5 Strength indexes of sandy gravel

级配特性	相对密度	$\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	临界坡降	破坏坡降	破坏方式
上包线 $P_{<5}=59.4\%$	0.55	1.96	0.45	1.09	过渡
	0.68	2.00	1.15	1.31	流土
	0.80	2.03	1.37	1.53	流土
平均线 $P_{<5}=50.8\%$	0.33	1.94	0.21	0.93	过渡
	0.55	2.01	0.54	1.25	过渡
	0.68	2.05	0.69	1.46	过渡
	0.80	2.09	1.52	1.67	流土
下包线 $P_{<5}=42.2\%$	0.55	2.07	0.61	1.38	过渡
	0.68	2.11	0.77	1.58	过渡
	0.80	2.15	1.63	1.79	流土

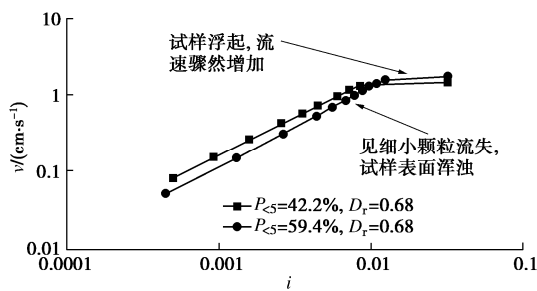


图 9 流速与坡降关系曲线

Fig. 9 Relationship between seepage velocity and head gradient
上述分析表明, $P_{<5}$ 含量、相对密度及其具体试验密度是临界坡降、破坏坡降和破坏方式的重要影响因素, 渗透变形参数及其破坏方式取决各因素的综合影响作用。

4 结 论

- (1) 随相对密度和 $P_{<5}$ 含量的增加, 渗透系数降低。由于鄱阳湖覆盖层具有级配不良、高细粒含量等显著性区域特点, 相对密度相同时不同包络线试样的渗透系数差异性并不显著。
- (2) 渗透系数随相对密度的变化可用半对数公式描述, 渗透系数随 $P_{<5}$ 含量的变化可用幂函数描述, 通过归一化方法提出了渗透系数经验公式, 可预测建议范围内鄱阳湖覆盖层砂砾料的渗透系数。
- (3) 高细粒含量砂砾石料的渗透变形破坏主要为过渡型和流土型, 随相对密度和 $P_{<5}$ 含量的提高, 渗透变形破坏方式逐渐由过渡型趋向于流土型; 过渡型

和流土型破坏方式前提下, 临界坡降综合取决于 $P_{<5}$ 含量、相对密度及其对应试验干密度等, 破坏坡降数值主要受试验干密度控制, 干密度越大破坏坡降越高。

参考文献:

[1] 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 Aiguo, FENG Jiayi, WANG Yang, et al. Experimental research on permeability of sandy gravel for dam mass[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1999, 32(3): 93-97. (in Chinese))

[2] SATO M, KUWANO R. Suffusion and clogging by one-dimensional seepage tests on cohesive soil[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(6): 1427-1440.

[3] 侯孝东, 涂国祥, 邱 满, 等. 汉源九襄地区深厚砾石层渗透特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(4): 192-197. (HOU Xiaodong, TU Guoxiang, QIU Xiao, et al. Permeability characteristics of deep gravel layer in Jiuxiang area of Hanyuan[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(4): 192-197. (in Chinese))

[4] 杨 兵, 刘一飞, 万奋涛, 等. 级配特性对砂土渗透系数影响试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 855-861. (YANG Bing, LIU Yifei, WAN Fentao, et al. Experimental study on influence of particle-size distribution on permeability coefficient of sand[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 855-861. (in Chinese))

[5] 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 Guisheng, XING Rixian, ZHANG Mingbin. Experimental study on permeability of the sandy gravel media with different gradation[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2012, 43(3): 373-378. (in Chinese))

[6] 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))

[7] 谢定松, 蔡 红, 魏迎奇, 等. 覆盖层不良级配砂砾石料渗透稳定特性及影响因素探讨[J]. 水利学报, 2014, 45(增刊 2): 77-82. (XIE Dingsong, CAI Hong, WEI Yingqi, et al. Discussion of seepage stability characteristic of bad graded sand and gravel overlay[J]. Journal of Hydraulic Engineering,

- 2014, **45**(S2): 77-82. (in Chinese))
- [8] 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 Zhengyin. Experimental study on seepage properties of sandy gravel[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, **8**(4): 69-71. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 梅世昂, 钟启明, 陈澄昊, 等. 级配特征和水力梯度对砂砾料渗透性影响研究[J]. 人民黄河, 2020, **42**(6): 130-134, 139. (MEI Shiang, ZHONG Qiming, CHEN Chenghao, et al. Research on the influence of gradation characteristics and hydraulic gradient on permeability of sandy gravel material[J]. Yellow River, 2020, **42**(6): 130-134, 139. (in Chinese))
- [11] 吴梦喜, 高桂云, 杨家修, 等. 砂砾石土的管涌临界渗透坡降预测方法[J]. 岩土力学, 2019, **40**(3): 861-870. (WU Mengxi, GAO Guiyun, YANG Jiaxiu, et al. A method of predicting critical gradient for piping of sand and gravel soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(3): 861-870. (in Chinese))
- [12] 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): 72-74, 77. (ZHU Chonghui, WANG Zenghong, LIU Junmin. 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): 72-74, 77. (in Chinese))
- [13] 齐俊修, 赵晓菊, 刘 艳, 等. 碎砾石和砂渗透变形类型差异性研究[J]. 工程地质学报, 2018, **26**(增刊):618-622. (QI Junxiu, ZHAO Xiaoju, LIU Yan, et al. Study on differences of seepage deformation types of crushed-Gravel and sand[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, **26**(S1): 618-622.
- [14] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Soil Test Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)