

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.029



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



不同振碾条件下高坝堆石料的颗粒破碎与渗透特性

李榕佳¹, 张建清^{2,3,4}, 王成龙¹, 王峰^{2,3,4}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 长江地球物理探测(武汉)有限公司, 武汉 430010;
3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010; 4. 国家大坝安全工程技术研究中心, 武汉 430010)

摘要:在高土石坝工程中,堆石料的破碎和渗透特性是影响坝料物理力学特性的重要指标,经振碾处理后的堆石料质量控制是堆石坝施工的关键,研究振碾后堆石料的颗粒破碎与渗透特性具有重要意义。以玉龙喀什水电站缩尺堆石料为对象,通过室内振碾试验,研究不同振碾时长下堆石料的颗粒破碎特性。进行常水头渗透试验,测算振碾试验后堆石料的渗透系数,并分析得出不同振碾时长对堆石料渗透系数变化的影响规律。根据颗粒级配曲线建立三维结构模型,对其进行渗流模拟,对比不同振碾时长下堆石料孔隙结构、渗透特性的变化,对比室内试验与模型模拟结果,对室内试验所得结论进行验证。对影响渗透系数的部分参数进行拟合分析,获得渗透系数的计算公式。结果表明:在振碾作用下,堆石料颗粒级配曲线变缓,颗粒排列更加紧密,在振碾 4 min 后,堆石料孔隙率由初始值 42% 降至 15%~17%,渗透系数由 0.162 cm/s 降至 0.08~0.09 cm/s,水流在孔隙结构中流动更加缓慢,建立的三维结构模型较好地反映了这一过程。

关键词:堆石料;颗粒破碎;振碾;级配特性;渗透特性

中图分类号:TV641.4 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2026)03-0144-10

Particle breakage and permeability characteristics of high dam rockfill under different vibratory compacting conditions

LI Rongjia¹, ZHANG Jianqing^{2,3,4}, WANG Chenglong¹, WANG Feng^{2,3,4}

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Changjiang Geophysical Exploration and Testing Co., Ltd., Wuhan 430010, P. R. China; 3. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, P. R. China; 4. National Dam Safety Research Center, Wuhan 430010, P. R. China)

Abstract: In the domain of high earth and rock dam engineering, the particle breakage and permeability characteristics of rockfill materials are important indicators that affect the physical and mechanical properties of dam materials. The quality control of rockfill materials post-vibratory crushing treatment is paramount for the construction of rockfill dams. A comprehensive study of the particle breakage and permeability characteristics of rockfill materials after vibratory compacting is, therefore, of the utmost importance. Indoor vibration tests were conducted on the scaled-down rockfill materials of the Yulongkashi Hydropower Station to investigate the particle breakage characteristics of rockfill materials under different vibration times. Laboratory constant-head

收稿日期:2024-02-05

基金项目:新疆葛洲坝玉龙喀什水利枢纽开发有限公司科研项目(YLKS-SW-2022-016)

作者简介:李榕佳(2002-),男,主要从事地下能源结构研究,E-mail:982132983@qq.com。

Received: 2024-02-05

Foundation item: Yulong Kashgar Special Scientific Research Project (No. YLKS-SW-2022-016)

Author brief: LI Rongjia (2002-), main research interest: geotechnical energy structure, E-mail: 982132983@qq.com.

penetration experiments were designed to measure the permeability coefficient of rockfill materials after vibratory compacting. The effect of varying vibration times on the change of permeability coefficient of the rockfill materials was analysed. A three-dimensional structural model was established based on the particle size distribution curve. Subsequently, a simulation of seepage was conducted on the model. Changes in the pore structure and permeability characteristics of rockfill materials under different vibration and compacting durations were compared. The results of indoor tests and model simulations were compared to validate the conclusions obtained from the indoor tests. Finally, some parameters affecting the permeability coefficient were subjected to fitting analysis, and the calculation formula of the permeability coefficient was obtained. The research results indicated that under the influence of vibration and compacting, the particle size distribution curve of the rockfill materials became smoother and the particle arrangement became more compact. After vibration compacting for four minutes, the porosity of the rockfill materials decreased from the initial value of 42% to 15%-17%, and the permeability coefficient decreased from 0.162 cm/s to 0.08-0.09 cm/s, and water flow within the pore structure slowed down. The established three-dimensional structural model well reflected this process.

Keywords: rockfill materials; particle breakage; vibration compaction; grading characteristics; permeability characteristics

作为土石坝的主要坝型之一,面板堆石坝由面板、垫层区、过渡区、主堆石区、次堆石区等结构组成。为节约成本,主堆石区与次堆石区使用的坝料通常取自邻近区域。主堆石区具有支撑坝体、储存水能、排水渗透等功能,是堆石坝的核心区域。其稳定的关键在于堆石料经碾压施工后的质量,包括密度、级配和渗透特性等,若堆石料的参数不符合主堆石区设计所需,可能引起坝体的不均匀沉降、面板破坏、渗漏甚至溃坝,给人民的生命财产安全带来严重威胁。

关于坝料参数的控制,已经有了详尽的研究。柯昌佳等^[1]的研究表明,随着碾压次数的增加,堆石料的不均匀系数 C_u 增加,曲率系数 C_c 则无明显变化。李杨等^[2]建立了堆石料的颗粒模型,展现其级配、破碎效应等,提供了一种更接近现场碾压的模拟方法。朱晟等^[3]进行了堆石体现场振动压实试验,推导求得不同碾压遍数下堆石体的相对密度变化,为堆石坝填筑提供相对密度质量控制依据。

堆石坝的安全稳定不仅与堆石料的物理性质相关,同时也受到其渗透系数的影响。若堆石料渗透系数低于设计下限值,会导致堆石料排水不畅,进而危害大坝的安全稳定运行。张家发等^[4]对堆石坝垫层料进行研究发现,垫层料的渗透系数随着其级配和密度而改变。马凌云^[5]针对垫层料的渗透系数影响因素进行研究,结果表明,水流的不同渗透方向对试样渗透系数的影响较小,在工程层面上可以忽略不计。王俊杰等^[6]研究粗粒土渗透系数的影响因素发现,影响最大的是颗粒级配,其次是颗粒形状,最后是颗粒干密度。孔令伟等^[7]研究中细粒含量对渗透系数的影响发现,一定范围内,细粒含

量的增加会降低砂土的渗透系数。已有研究表明,颗粒级配对渗透系数有着不可忽视的影响,但这种影响还缺乏较为直观的描述。

建立准确的三维重构模型对于渗透特性的研究具有重要意义。王波等^[8]总结了多孔介质模型重构的物理实验方法和数值重构方法,并对重构方法的优缺点及适用性进行了分析。罗滔等^[9]采用多视角三维重建技术,构建了堆石料的三维数字模型库,对堆石料的几何形态进行了量化评估。蔡沛辰等^[10]通过计算机断层扫描(CT)与图像处理构建了原状土体三维模型,应用COMSOL与AVIZO联合仿真求解获得土体三维模型的单相水渗流模拟结果。现有的颗粒形态获取方式主要包括CT扫描和三维激光扫描两种手段,而现场情形较为复杂,应用以上两种方式存在成本、适用性等问题。而PFC (particle flow code)可以生成数百个有代表性的颗粒单元并模拟颗粒介质之间的相互作用^[11],具有对复杂结构进行三维重构的能力。

笔者对玉龙喀什水利枢纽大坝中的主堆石料进行研究,由于该面板堆石坝坝体较高,属于超高面板堆石坝,与普通面板堆石坝相比,坝体对主堆石料的物理力学性能要求更高。此外,大坝还面临复杂的地质与气候条件,进一步增加了设计与建设的难度。为确保坝体的安全与稳定,对振碾后堆石料的渗透特性进行研究至关重要。从现场料场取样并测得颗粒级配。现场堆石料最大粒径达800~1000 mm,由于试验设备尺寸限制,目前尚无法直接进行室内试验,所以对现场级配曲线进行缩尺,获得室内试验级配曲线。对初始试样进行振碾,模拟工程中对现场堆石料的碾压过程,获得近似碾压

后的现场填料的密实度。对处理后的试样进行筛分,测量其颗粒级配,获得相应的级配曲线,并分析不同振碾时长作用下颗粒级配的变化特征。同时,对振碾前后的试样进行渗透试验,观察振碾作用下堆石料渗透系数的变化。通过 PFC 输入颗粒级配,生成近似现场试样堆积方式的三维重构模型,对生成的三维模型进行切片,获取其剖面结构,对所得剖面结构进行孔隙提取,获取相应的孔隙参数,进行渗流模拟以观察振碾试验对渗流效果造成的影响;将室内试验结果与数值分析结果进行对比,分析振碾过程对堆石料渗流效果的影响;对渗透系数、级配、空隙比等参数进行拟合分析,获得适用于描述堆石料渗透特性的渗透系数计算公式。

1 试验概况

1.1 试验准备

试验所用堆石料取自新疆和田玉龙喀什水利枢纽工程现场,对料场中 20 个坑测点内不同粒组的石料进行采集,将现场石料运回实验室,进行下一步试验。对现场石料进行筛分,获得其级配曲线。由于现场堆石料体积过大,难以在实验室内进行振碾,故对其级配进行缩尺处理。

平行级配法通过保持原级配曲线的形态不变,按一定比例缩小所有粒径,模拟原级配的颗粒组成,被广泛应用于缩尺试验研究中^[12-13]。缩尺采取平行级配法,选择 13.33 作为缩尺比例,现场石料作为室内试验原料,根据现场堆石料中各粒径的比例进行加权计算,得到适用于室内试验的试样级配包线。在试验过程中尽可能地模拟实际碾压施工过程中颗粒的特性,通过保持颗粒形状、密度、大小等特性的相似性,使室内试验结果更接近实际施工结果,从而提高试验的可信度和适用性。

1.2 振碾试验

根据室内试验级配所选粒径(60、40、20、10、5、2、0.5、0.25、0.075 mm)对堆石料进行筛分,应用不同规格的仪器,分别完成大小粒径的筛分工作。

在获得不同粒组的堆石料后,根据级配缩尺得到室内级配曲线,计算得出各粒组堆石料质量百分比,并从筛分试样中称量出每粒组石料所需质量,将所有粒组堆石料进行混合,得到近似现场堆石料情况并符合室内级配曲线的堆石料试样。

选取不同质量的试样,分别对其进行不同时长的振动碾压,通过控制振碾试验的作用时长,结合振碾仪器参数进行计算,可间接实现对击实功、击振次数等指标的控制。试验工况 A 编号如表 1 所示。

表 1 试验工况

Table 1 Test conditions

试样质量/kg	编号			
	未振碾	振碾 1 min	振碾 2 min	振碾 4 min
10	ZN-0	ZN-10-1	ZN-10-2	ZN-10-4
20		ZN-20-1	ZN-20-2	ZN-20-4

振碾试验所用仪器为单相振动冲击夯,跳起高度为 40~60 mm,前进速度为 8 m/min,电机功率为 3 kW,冲击次数为 420~650 次/min,产品质量为 90 kg,所应用模具尺寸为 470 mm×470 mm,高度为 10 mm。

基于室内级配曲线配制试样,将试样置入刚性模具中进行不同时长的振碾,分别测试、计算,获得振碾后的级配曲线变化特征。

振碾试验结束后,对获得的 6 组堆石料试样进行筛分,以获取其颗粒级配曲线,与之前的室内级配曲线进行对比,分析不同振碾时长下堆石料的级配变化情况。筛分后各粒组堆石料的质量百分比如表 2 所示。

表 2 不同振碾时长下的颗粒级配

Table 2 Particle grading under different vibration-compaction duration

粒径/mm	小于某粒径试样的质量分数/%						
	原状土	ZN-10-1	ZN-10-2	ZN-10-4	ZN-20-1	ZN-20-2	ZN-20-4
0.075	1.45	1.69	2.41	5.79	0.28	0.4	0.62
0.25	4.7	10.38	11.94	14.66	6.04	8.61	10.81
0.5	9	16.3	19.82	19.7	13.02	15.62	22.79
2	20	29.17	30.24	34.56	25.48	28.29	36.20
5	32.5	37.39	42.16	43.51	34.4	44.28	50.1
10	46	48.7	53.54	56.47	47.16	57.79	62.69
20	63	67.06	67.61	74.7	64.61	74.49	80.20
40	84	88.72	91.46	96.23	89.98	91.96	94.30
60	100	100	100	100	100	100	100

由表 2 可见,振碾试验后粒径 20 mm 以上的颗粒含量减少,2 mm 以下的颗粒含量增加。振碾试验中大颗粒(40 mm 以上)被破碎,小颗粒(2 mm 以下)不断生成,在表 2 中则体现为相应质量分数的增减。随着振碾时长的增加,这种变化越明显。对比 10 kg 试样组与 20 kg 试样组可以发现,在短时间内,对 10 kg 试样组振碾造成的颗粒破碎效果优于 20 kg 试样组,振碾时长为 1 min 时,10 kg 试样组中小颗粒生成更多。

从图 1 所示颗粒级配曲线的变化可以发现,振碾后的颗粒级配曲线变得更加平缓,大颗粒破碎生成了小颗粒。在这一过程中,小颗粒可能会填充大

颗粒间的孔隙,使得颗粒间的孔隙减小,另外,振碾使得石料颗粒之间重新排列和紧密联结,从而增强堆石料试样的密实程度。

质量对孔隙率有明显影响,相关影响需进行更深入的研究。

1.3 渗透试验

在振碾作用下,6组堆石料试样的颗粒级配和孔隙率都发生了变化。试样的渗透系数也随颗粒级配、孔隙率的变化而发生改变,渗透系数的改变对大坝稳定性有重要影响。试验通过常水头渗透试验对振碾后的6组试样进行渗透系数测定。试验仪器采用堆石料渗透试验仪(图3),试样筒尺寸为300 mm。剔除60 mm以上粒径的大颗粒,颗粒尺寸控制在2~60 mm。以水温20℃为标准温度,计算标准温度下6组试样的渗透系数。

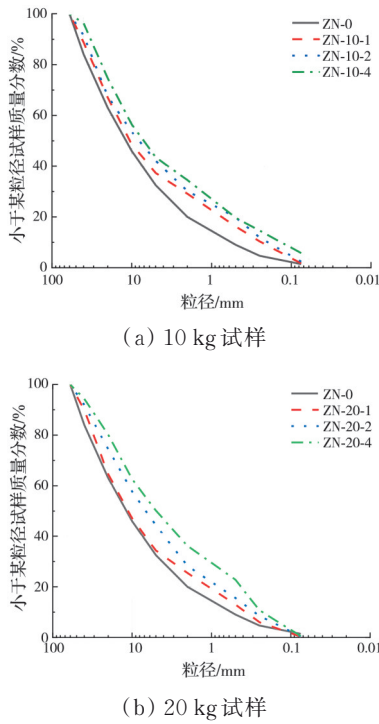


图 1 不同质量试样振碾前后的级配变化

Fig. 1 Grading changes of samples with different masses before and after vibration compaction

为探究振碾时长与振碾试样质量对试样孔隙率的影响,对振碾前后的试样进行孔隙率测定。试验采用水饱和法,将一定量的试样置入容器中,缓慢注水,使得试样完全被水浸透直至饱和。通过测量浸泡前后的体积差获得孔隙率,振碾前后的孔隙率如图2所示。

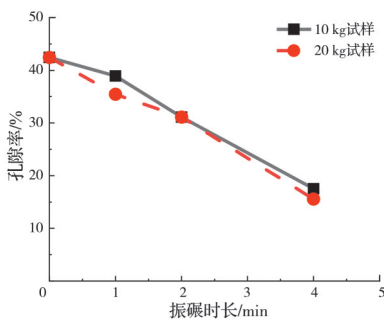


图 2 不同质量试样振碾前后孔隙率的变化

Fig. 2 Changes in porosity of samples with different masses before and after vibration compaction

由图2可见,堆石料的孔隙率初始值为42%,振碾1 min后,其孔隙率降低至35%~39%;振碾2 min后,其孔隙率降低至31%附近;振碾4 min后,其孔隙率降低至15%~17%。由于振碾试验选取样品较少,碾空间较小,并未观察到振碾作用下试样

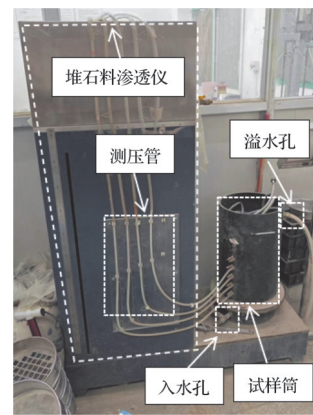


图 3 堆石料渗透仪

Fig. 3 Permeameter for rockfill materials

渗透试验过程如下:

- 1) 组装仪器,连接水管和调节管,确保无漏水。充水至指定高度,关闭止水夹。
- 2) 取试样,分层置入容器,用木锤击实,填充至一定厚度。测量试样顶部至仪器口的剩余高度,计算试样净高度。设置粗砂过渡层,防止细砂流失。
- 3) 打开止水夹,缓慢注水至试样完全饱和。继续注水至水位高过溢水孔,关闭止水夹。
- 4) 静置后检查测压管水位是否与溢水孔持平。打开止水夹,从上部注水,调整调节管位置,使水渗入试样,通过调节管流出。
- 5) 渗透中,调节供水管,使流量略多于溢水量。保持溢水孔有余水溢出,保持水位恒定。
- 6) 测压管水位稳定后记录水位,计算水位差。计时并用量筒测量一定时间内的渗透水量。试样渗透系数按式(1)计算。

$$K_T = \frac{2QL}{At(H_1 + H_2)} \quad (1)$$

式中: K_T 为水温 T ℃时试样的渗透系数,cm/s; Q 为 t 秒内渗透的水量,cm³; L 为渗径,cm,取值为两测压孔中心间的试样高度; A 为试样的横截面积,cm²; t 为时间,s; H_1 、 H_2 为水位差,cm。

根据试验获得的结果,计算振碾后 6 组试样的渗透系数,结果如表 3 所示。

表 3 振碾试样的渗透系数

Table 3 Permeability coefficient of vibration-compacted samples

试样质量/ kg	渗透系数/(cm/s)			
	未振碾	振碾 1 min	振碾 2 min	振碾 4 min
10	0.162	0.129	0.115	0.093
20	0.162	0.135	0.093	0.081

将 6 组试样的渗透系数绘制成图,以显示振碾后渗透系数的变化情况,如图 4 所示。在振碾作用下,20 kg 试样的渗透系数由 0.162 cm/s 降至 0.08 cm/s,10 kg 试样的渗透系数由 0.162 cm/s 降至 0.093 cm/s。在短期振碾作用下,渗透系数下降较快,在 1 min 振碾作用下,渗透系数降低了约 0.03,振碾时间延长后,渗透系数降低的速率变缓。

渗透系数下降的原因为:

1) 在振碾作用下,大粒径颗粒发生破碎,堆石料空间结构发生破坏,新形成的小粒径颗粒填充至大孔隙,使得堆石料的结构变得更加密实。

2) 振碾过程减小了颗粒间的孔隙,堆石料变得更加紧密,进而导致渗透系数降低。

3) 振碾时试样的水分含量发生变化,导致颗粒之间的黏合增加,降低了孔隙的连通性,进而影响了渗透性能。

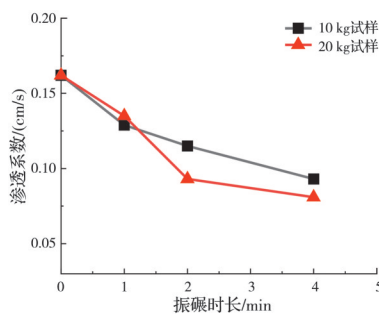


图 4 不同振碾时长下渗透系数的变化

Fig. 4 Changes in permeability coefficient under different vibration-compaction durations

坝体主堆石料的渗透性能受多种因素影响,如温度、湿度、孔隙结构、颗粒间相互作用等,而这些因素无法通过室内试验完全模拟,因此,室内振碾试验后堆石料的渗透性能定性反映了现场堆石料的部分渗透特性。试验中通过选用适当的缩尺比例,使用相同的堆石料与室内模拟现场环境条件等方式,尽可能地提高室内渗透试验对坝体主堆石料渗透的模拟效果。通过室内试验,从渗透系数的角度对坝体主堆石料的渗透性能进行研究,通过分析振碾试验作用后的堆石料渗透系数变化来定性反

映主堆石料原料在碾压作用后渗透性能的改变。

2 堆石料细观孔隙比和渗透特性分析

在获得振碾试验中颗粒的级配信息后,通过在 PFC 软件中输入堆石料的二维级配信息获得近似现场堆石料的三维结构模型,结合二维图像信息,建立堆石料颗粒二维和三维几何特性的映射关系,实现由二维级配曲线建立三维结构模型。

根据室内级配曲线与振碾试验获得的数据绘制三维结构模型图,如图 5 所示。观察其结构可知,生成的颗粒随机分布在给定的空间内,并根据振碾试验后不同的颗粒级配生成不同的堆石料三维结构模型,获得的模型完全随机,以近似拟合现实状态下的空间结构。同时,由于颗粒生成完全随机,构建的三维模型可能与实际情形存在误差,需在之后的研究中进一步对算法进行优化和调整。

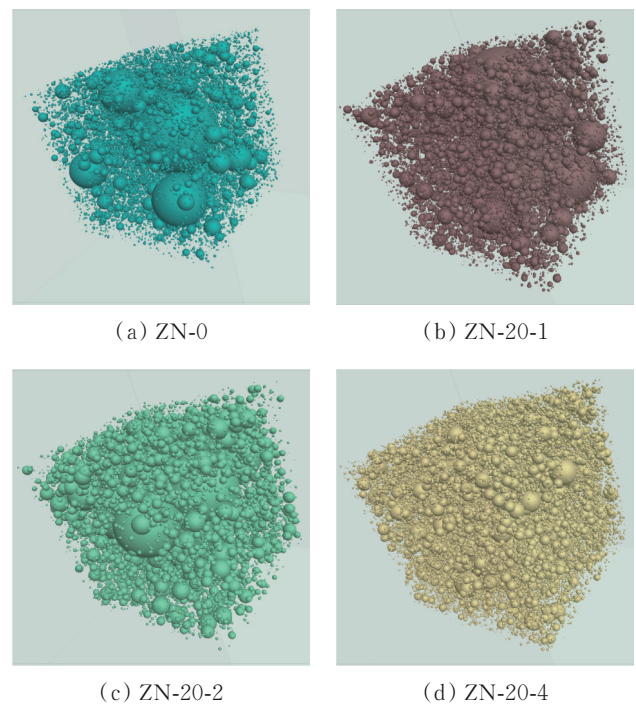


图 5 堆石料的三维结构模型

Fig. 5 Three-dimensional structural model of rockfill materials

对比不同振碾时间后颗粒空间结构的变化发现,颗粒结构在振碾后变得更加密实,堆石料大颗粒被破碎成中小颗粒,原有孔隙逐渐被小颗粒填充。随着振碾时间的增加,结构变得愈加紧凑,孔隙率不断减小,大颗粒占比减少,中小颗粒占比增加。

在三维模型结构生成后,对其进行切片,获得剖面孔隙结构,对所得结构进行孔隙提取与渗流模拟。

图 6 所示为模拟生成模型的剖面孔隙结构,剖面位置选取模型中部,剖面选用(0,0,0)作为中心点,获取位于 yoz 平面的模型剖面。图 6 中灰色区域为堆石料颗粒,黑色区域为孔隙区域。由于使用图形为孔隙结构的剖面,不规则形状为颗粒的重叠所致,且颗粒的生成具有不确定性,可能导致最终结果有误差。

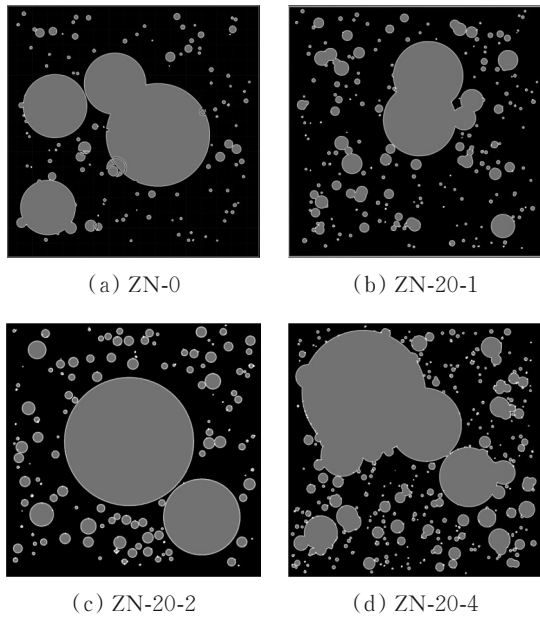


图 6 模拟生成的堆石料孔隙结构
Fig. 6 Simulated pore structure of rockfill materials

由图 6 可知,大粒径颗粒在空间中占比较大,数量较少,小粒径颗粒在空间中占比较小,数量较多。通过对比不同振碾时长下孔隙结构的变化发现,随着振碾时长的增加,孔隙区域面积逐渐减小,堆石料孔隙率下降,结构变得更加密实,大粒径颗粒面积减小,但数量并未发生显著变化,小粒径颗粒面积占比增加,数量增多。表明振碾试验并未对大粒径颗粒造成完全破坏,但造成了体积损伤。

对所得孔隙结构进行渗流模拟,分析水在孔隙中的流动。渗流模拟可以得到水在孔隙结构中流动的速度分布,进而反映振碾作用后结构抵抗水作用能力的变化。

选取蠕动流条件作为探究渗流模拟时结构在稳态时的区域流速分布。首先进行渗流区域的提取,并对所得区域进行网格划分。设定流体为水,温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,区域左侧为流体入口,在压力作用下向右侧出口流动。采取动量守恒的斯托克斯方程和质量守恒的连续性方程进行计算,获得流体最终达到稳态时的速度分布。

在静压作用下,水由入口向出口流动,其渗流

速度分布如图 7 所示。由图 7 可见,在颗粒周围区域,由于颗粒对水流的阻挡,流体速度很小甚至趋近于 0,当空间内颗粒数量较少时,孔隙区域范围较大,流体流动速度较快。在振碾作用下,颗粒级配发生变化,孔隙率相应减小,孔隙减少,流体流动速度随之减小。对比振碾前与振碾 4 min 后的试样,水流的最大流速、平均流速都出现不同程度降低。试样孔隙区域减小导致其密实程度增加,使得水分在试样中的运动受到限制,最终表现为流体流速减小。同时,较小的孔隙结构可能增加堆石料对水流的阻力,导致水流流速降低。

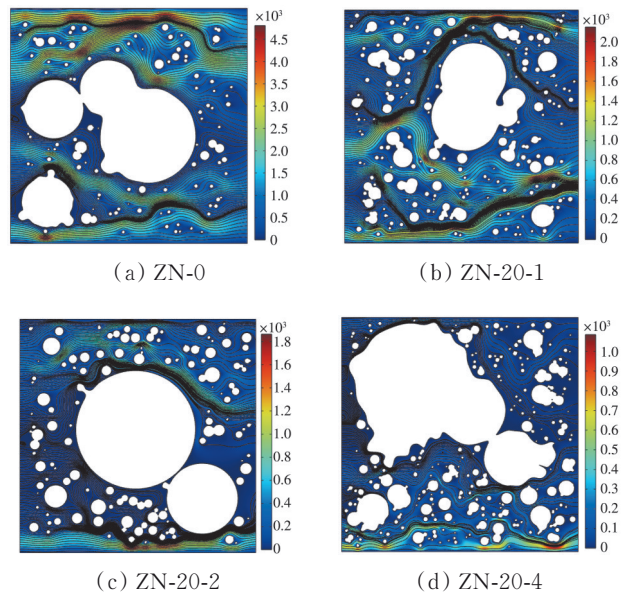


图 7 孔隙结构渗流速度分布

Fig. 7 Distribution of seepage velocity in pore structures

水流在堆石料孔隙中的渗流受到多种因素影响,如温度、孔隙结构、颗粒形状、压力差、堆石料的黏性等^[14-17]。试验中,渗流模拟分析了确定温度、压力差条件下不同级配、不同孔隙率堆石料的渗流性质变化,而对其余参数的影响仍需进一步研究。

3 渗透系数计算公式拟合分析

堆石料的渗透特性是大坝质量控制的关键,渗透系数的大小对于大坝的安全稳定具有重要影响。大坝的渗透系数通常由室内试验或现场试验测得,但现场试验存在耗时较长、试验效率较低等缺点,室内试验则存在不能准确反映工程实际工况的问题。如何高效准确地测量出渗透系数成为工程建设中的关键。

学者们建立了多个渗透系数计算公式,如 Terzaghi 公式(式(2))^[18]和 Hazen 改进公式(式(3))^[19]。

$$K = 2D_{10}^2 e^2 \quad (2)$$

$$K = D_{10}^2 \quad (3)$$

式中: e 为孔隙比; D_{10} 为小于此粒径的颗粒体积含量占全部颗粒的10%时所对应的粒径; K 为渗透系数。

已有研究在一定程度上解决了渗透系数获取困难的问题,但仍存在公式适用性不足的缺点。笔

者基于室内试验数据,结合丁瑜等^[20]文中的数据集(表4),计算不均匀系数 C_u 、孔隙比 e (由孔隙率 n 换算获得)及渗透系数 K 的相互关系,并模拟得到可能的关于渗透系数 K 的计算公式。表中 C_c 为曲率系数。

表4 样本数据集

Table 4 Sample dataset

样本 编号	全级配特征粒径/mm										e	C_u	C_c	$K/(\text{cm/s})$
	D_{10}	D_{20}	D_{30}	D_{40}	D_{50}	D_{60}	D_{70}	D_{80}	D_{90}	D_{100}				
1	2.36	6.52	9.15	12.83	17.68	24.65	34.36	44.09	51.75	60.00	0.27	10.44	1.44	0.010
2	2.36	6.52	9.15	12.83	17.68	24.65	34.36	44.09	51.75	60.00	0.24	10.44	1.44	0.008
3	2.36	6.52	9.15	12.83	17.68	24.65	34.36	44.09	51.75	60.00	0.22	10.44	1.44	0.007
4	0.25	0.50	1.00	1.61	2.54	4.06	6.03	8.38	12.42	20.00	0.35	16.24	0.99	0.008
5	0.25	0.50	1.00	1.61	2.54	4.06	6.03	8.38	12.42	20.00	0.37	16.24	0.99	0.022
6	0.25	0.50	1.00	1.61	2.54	4.06	6.03	8.38	12.42	20.00	0.56	16.24	0.99	0.094
7	0.25	0.94	2.32	4.69	7.70	10.45	12.73	14.95	17.26	20.00	0.45	41.80	2.06	0.067
8	0.25	0.87	2.11	4.04	6.44	9.05	11.57	14.09	16.75	20.00	0.45	36.20	1.97	0.045
9	0.20	0.36	1.00	2.64	5.00	7.50	10.00	17.20	26.93	40.00	0.44	37.50	0.67	0.080
10	0.20	0.34	0.60	2.23	5.00	7.60	11.63	20.00	28.79	40.00	0.44	38.00	0.24	0.100
11	0.20	0.32	0.50	1.74	5.00	8.20	14.04	22.34	30.18	40.00	0.44	41.00	0.15	0.121
12	0.39	1.34	3.52	7.19	11.63	17.36	24.25	32.13	40.04	60.00	0.54	44.30	1.82	0.135
13	0.30	1.02	2.32	4.20	7.12	11.32	17.31	26.31	37.76	60.00	0.45	37.80	1.59	0.093
14	0.25	0.5	1	1.61	2.54	4.06	6.03	8.38	12.42	20	0.44	16.24	0.99	0.033
15	0.25	0.5	1	1.61	2.54	4.06	6.03	8.38	12.42	20	0.46	16.24	0.99	0.038
16	0.2	0.41	1.4	2.94	5	7.3	8.99	14.21	24.48	40	0.44	36.5	1.34	0.059
17	0.25	1.63	2.45	3.18	3.99	5	6.21	7.61	10	20	0.39	20	4.8	0.024
18	0.25	0.37	0.5	0.71	1	1.42	2	2.73	3.7	5	0.55	5.68	0.7	0.055
19	0.2	0.51	1.8	3.21	5	7.1	8.33	11.85	21.11	40	0.44	35.5	2.28	0.046
20	0.25	1	1.26	1.47	1.69	2	2.48	3.12	3.96	5	0.71	8	3.18	0.055
21	0.25	0.73	1.09	1.41	1.79	2.49	3.67	5.92	11.43	20	0.45	9.96	1.91	0.019
22	0.48	1.08	2	5	7.94	12	17.12	25.06	37.34	60	0.22	25	0.69	0.005
23	0.2	0.3	0.43	1.14	5	9.5	16.89	24.31	31.32	40	0.44	47.5	0.1	0.202

Kozeny-Carman^[21-22]公式描述了孔隙特征对渗透系数的影响,被广泛用于计算饱和渗透系数。其形式为

$$K = \frac{\gamma}{C\mu S_0^2} \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (4)$$

式中: γ 为水的重度; C 为常数; μ 为水的动力黏度; S_0 为比表面积, cm^2/cm^3 。

式(4)表明,当其他影响因素不变时,渗透系数 K 与 $e^3/(1+e)$ 存在线性关系。曲诗章等^[23]将渗透系数与孔隙率的函数形式设为

$$K = A_0 \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (5)$$

式中: A_0 为土颗粒形状的相关常数; n 为孔隙率,与孔隙比 e 之间存在换算关系 $e^3/(1+e)=n^3/(1-n)^2$ 。Kim等^[24]也提到了这个形式,并在函数式中引入了不均匀系数 C_u 与 D_{50} (小于某粒径的土粒质量占试

样总质量50%的粒径)等级配参数,更详细地研究了颗粒级配对渗透系数的影响,其公式为

$$K \propto \frac{e^3 D_{50}^2}{(1+e)(C_u+7)^2} \quad (6)$$

由于振碾试验对试验原料进行缩尺处理,导致颗粒级配特征发生变化。为减小缩尺处理对渗透系数计算结果的影响,弱化了公式中 D_{50} 的占比,并采用幂函数形式进行拟合。幂函数能更好地适应非线性关系,具有灵活性、稳健性和准确性,并能捕捉复杂关系和处理异常值和噪声,更好地适应非线性关系。结合已有研究并考虑级配参数和孔隙率对渗透系数的影响,拟构建计算式为

$$K = A_1(A_2 C_u + B) \frac{e^3}{1+e} \quad (7)$$

式中: A_1 、 A_2 、 B 、 C 为通过对渗透系数拟合获得的常数,其数值大小通常受到颗粒形状、矿物成分的影响。

响。对样本数据集进行拟合,获得式中的未知系数。最终计算获得渗透系数计算公式为

$$K = 0.284(0.62446C_u - 2.6052)^{0.5} \frac{e^3}{1+e} \quad (8)$$

式(7)拟合的 $R^2=0.8322$ 。

选取其丁瑜等^[20]文中数据集为研究对象,分别应用 Terzaghi 公式、Kim 公式与式(8)计算渗透系数

预测值,将预测值与渗透系数试验值进行对比,并求解出其相对误差 δ 。

$$\delta = \frac{|K_{\text{计算值}} - K_{\text{实测值}}|}{K_{\text{实测值}}} \times 100\% \quad (9)$$

将式(1)、式(6)、式(8)的计算结果列于表 5,通过对比计算所得的相对误差,以验证公式对渗透系数计算的准确性。图 8 为式(8)的计算结果。

表 5 渗透系数计算结果对比

Table 5 Comparison of permeability coefficients calculation results

样本编号	D_{10}	D_{50}	e	C_u	试验值 $K/$ (cm/s)	渗透系数计算值/(cm/s)			相对误差/%		
						$K_{\text{式(8)}}$	$K_{\text{式(1)}}$	$K_{\text{式(6)}}$	$\delta_{\text{式(8)}}$	$\delta_{\text{式(1)}}$	$\delta_{\text{式(6)}}$
1	3.46	19.91	0.27	9.3	0.01	0.00789	1.7455	0.0231	21.24	17354	131.24
2	2.36	17.68	0.28	10.44	0.011	0.00964	0.8733	0.0176	12.41	7839	60.23
3	0.25	2.54	0.51	16.24	0.072	0.0685	0.0325	0.00105	4.88	54.84	98.54
4	0.25	2.54	0.53	16.24	0.087	0.0759	0.0351	0.00116	12.81	59.64	98.66
5	0.25	1.28	0.55	8	0.056	0.0471	0.0378	0.000782	15.84	32.48	98.60
6	0.25	2	0.55	10.12	0.06	0.0587	0.0378	0.001465	2.09	36.7	97.56
7	1	11.03	0.27	16	0.01	0.012	0.1458	0.003564	19.62	1358	64.36
8	1	11.03	0.22	16	0.008	0.00673	0.0968	0.002007	15.80	1110	74.91
9	2.36	17.68	0.25	10.44	0.009	0.0284	0.6962	0.012846	21.97	7635	42.74
10	1	11.03	0.25	16	0.009	0.00965	0.1250	0.002875	7.19	1288	68.06

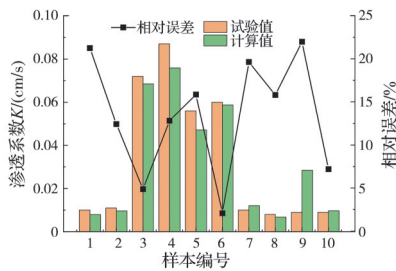


图 8 渗透系数试验值与式(8)计算值的对比

Fig. 8 Comparison between experimental and calculated values of permeability coefficient

由表 5 可知, Terzaghi 公式计算获得的渗透系数数值与试验值相对误差较大,表明 Terzaghi 公式在预测渗透系数方面存在一定的不准确性。Kim 公式综合考虑了不均匀系数 C_u 与 D_{50} 、孔隙比 e 与渗透系数 K 之间的关联,得到的渗透系数值更接近试验值,数据精确度更高。式(8)在 Kim 公式的基础上进行了调整,采用不均匀系数 C_u 、孔隙比 e 对渗透系数进行计算,兼顾了试样的整体级配信息与孔隙比对渗透系数产生的影响,进一步提高了数据的精确性和可靠性。

由图 8 可知,式(8)计算结果与渗透系数试验值相对误差较小,表明式(8)对渗透系数的预测效果较好,在工程中具有一定的适用性,可以在一定程度上反映实际工程中的渗透系数。但堆石料的渗透系数还受颗粒形状、温度、流体性质等因素的影响,要快速准确地计算得到渗透系数仍需进行深入

研究。

4 结论

以玉龙喀什当地堆石料作为研究对象,通过对大坝缩尺堆石料开展室内振碾试验,分析不同振碾时长作用下堆石料的级配演变、孔隙率变化以及渗透系数变化。并根据颗粒级配重构了相应的三维空间模型,利用空间模型的切片进行渗流效果的微观分析,对比验证振碾试验对堆石料渗流效果的影响。最后通过拟合分析,获得了适用于堆石料的渗透系数计算公式。主要结论如下:

1) 经过振碾作用后,小粒径颗粒体积分数增加,大粒径颗粒体积分数减小。堆石料孔隙率减小,振碾作用使孔隙结构发生改变,堆石料颗粒的原有位置发生变化,大颗粒与小颗粒之间相互嵌合,其空间结构变得更加紧密。

2) 经过振碾作用后,堆石料试样的渗透系数下降,增加振碾时长可进一步降低试样的渗透系数,但降低速率逐渐减小。

3) 由 PFC 对试样进行三维重构,对比振碾试验验证了振碾作用后颗粒孔隙结构、颗粒级配发生的变化,直观展现了振碾作用下大颗粒与小颗粒体积所占空间比重的变化。

4) 对三维模型进行切片,导入 COMSOL 仿真软件进行渗流模拟,获得不同孔隙结构下水流速度

的变化,验证了振碾试验对水流在堆石料中的渗流效果的弱化影响。

5)结合试验测得的颗粒级配、孔隙比和渗透系数,分析三者间可能存在的联系。通过引用文献中的数据集扩大数据含量,拟合获得了渗透系数计算公式。

参考文献

- [1] 柯昌佳,刘义佳,吴世然,等.南公1水电站面板堆石坝主堆石区碾压参数试验研究[J].水电与新能源,2021,35(3):50-53.
Ke C J, Liu Y J, Wu S R, et al. Experimental study on rolling parameters for main rockfill zone of the concrete face rockfill dam in namkong I hydropower station[J]. Hydropower and New Energy, 2021, 35(3): 50-53. (in Chinese)
- [2] 李杨,余成学,焦小亮.堆石料碾压试验的颗粒流模拟新方法[J].岩土力学,2017,38(10):3029-3038.
Li Y, She C X, Jiao X L. A new method for simulating rockfill roller compaction using particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 3029-3038. (in Chinese)
- [3] 朱晟,卢知是,刘纯,等.堆石体现场振动压实试验研究与应用[J].岩土力学,2021,42(9):2569-2577.
Zhu S, Lu Z S, Liu C, et al. Field vibration compaction test of rockfill and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(9): 2569-2577. (in Chinese)
- [4] 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 J F, Ding P Z, Zhang W, 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)
- [5] 马凌云.面板堆石坝垫层料渗透特性试验的影响因素探究[J].西北水电,2012(5):72-77.
Ma L Y. Study on factors affecting permeability tests of materials for CFRD bedding cushion[J]. Northwest Hydropower, 2012(5): 72-77. (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 J J, Lu X Z, Qiu Z F, 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] 孔令伟,李新明,田湖南.砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性[J].岩土力学,2011,32(增刊2):21-26,41.
Kong L W, Li X M, Tian H N. Correlation between fine particle effect of sand permeability coefficient and its state parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (Sup 2): 21-26, 41. (in Chinese)
- [8] 王波,宁正福,姬江.多孔介质模型的三维重构方法[J].西安石油大学学报(自然科学版),2012,27(4):54-57,61,116.
Wang B, Ning Z F, Ji J. Study on 3D reconstruction methods of porous medium model[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2012, 27(4): 54-57, 61, 116. (in Chinese)
- [9] 罗滔,王志鹏,张天祺,等.大粒径堆石料多视角三维重构及其形态学分析[J].水力发电学报,2023,42(11):92-100.
Luo T, Wang Z P, Zhang T Q, et al. Multi-view 3D reconstruction and morphological analysis of large particle size rockfill material[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(11): 92-100. (in Chinese)
- [10] 蔡沛辰,阙云,李显.COMSOL与AVIZO联合仿真土体三维细观渗流特性[J].福州大学学报(自然科学版),2021,49(6):856-862.
Cai P C, Que Y, Li X. COMSOL and AVIZO co-simulation on 3D mesoscopic seepage characteristics of soil[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2021, 49(6): 856-862. (in Chinese)
- [11] 周健,池永,池毓蔚,等.颗粒流方法及PFC2D程序[J].岩土力学,2000,21(3):271-274.
Zhou J, Chi Y, Chi Y W, et al. The method of particle flow and PFC2D Code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 271-274. (in Chinese)
- [12] 朱晟,陆雪妮,汤洪洁,等.大粒径砂砾料的缩尺试验方法及应用[J].水利规划与设计,2022(12):5-10.
Zhu S, Lu X N, Yang H J, et al. Scale test method of large grain size sand gravel material and its application [J]. Water Resources Planning and Design, 2022(12): 5-10. (in Chinese)
- [13] Ovalle C, Dano C. Effects of particle size-strength and size-shape correlations on parallel grading scaling[J]. Géotechnique Letters, 2020, 10(2): 191-197.
- [14] Li H, Yang J, Yu X Q, et al. Permeability prediction of pervious concrete based on mix proportions and pore characteristics[J]. Construction and Building Materials, 2023, 395: 132247.
- [15] Ren J C, Feng Z, Guo J C. Influence mechanism and optimization of the plugging capacity of temporary plugging zones with different particle sizes based on pore structure[J]. Geoenery Science and Engineering, 2023, 230: 212269.
- [16] Liu Y F, Jeng D S. Pore scale study of the influence of

- particle geometry on soil permeability[J]. *Advances in Water Resources*, 2019, 129: 232-249.
- [17] Li R R, Zhang L Q, Zhou J, et al. Investigation on permeability anisotropy in unconsolidated hydrate-bearing sediments based on pore-scale numerical simulation: effect of mineral particle shape and pore-filling[J]. *Energy*, 2023, 267: 126456.
- [18] Terzaghi K. Principles of soil mechanics: III. Determination of permeability of clay[J]. *Engineering News Records*, 1925, 95(21): 832-836.
- [19] Chapuis R P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(5): 787-795.
- [20] 丁瑜, 饶云康, 倪强, 等. 颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 108-116.
Ding Y, Rao Y K, Ni Q, et al. Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 108-116. (in Chinese)
- [21] Kozeny J. Ueber kapillare leitung des wassers im boden [Capillary flow of water in the soil][J]. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien*, 1927, 136: 271-306.
- [22] Carman P C. Fluid flow through granular beds[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1997, 75: 32-48.
- [23] 曲诗章, 刘晓明, 黎莉, 等. 基于双分形级配模型参数的粗粒土渗透系数计算公式[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(1): 144-152.
Qu S Z, Liu X M, Li L, et al. Formula for permeability coefficient of coarse-grained soil based on parameters of two-dimensional fractal gradation model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(1): 144-152. (in Chinese)
- [24] Kim J, Zhang Y D, Seol Y, et al. Particle crushing in hydrate-bearing sands[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2020, 23: 100133.

(编辑 王秀玲)