

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222134

土石坝粗粒料的湿化动力特性试验研究

张宏洋^{1,2}, 马 聪¹, 刘建龙³, 孙亚东¹, 宋子屹¹, 丁泽霖^{1,2}, 韩鹏举¹

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 黄河流域水资源高效利用省部共建协同创新中心, 河南 郑州 450046; 3. 江苏省秦淮河水利工程管理处, 江苏 南京 210022)

摘要: 采用大型静动力三轴试验仪对筑坝粗粒料做了常规和湿化三轴试验, 研究了粗粒料在湿化变形后动力特性的变化情况, 并与常规三轴动力试验结果进行对比。结果表明, 粗粒料的动力特性受湿化变形的影响较大, 粗粒料的动力性能参数发生了一定程度的衰减, 对比分析两种试验的 Hardin-Drnevich 模型参数, 发现湿化变形对 k_2 、 λ_{max} 影响较为明显, 数值发生衰减, 但对 n 、 k_1 的影响不明显。

关键词: 粗粒料; 湿化变形; 动力特性; Hardin-Drnevich 模型; 动力三轴试验

中图分类号: TV641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0063-04

1 引言

粗粒料作为土石坝的主要筑坝材料, 水库初次蓄水、调节水位及降雨入渗等都会引起湿化变形, 进而导致坝体发生沉降、产生裂缝和应力的重分布, 严重危及大坝的安全稳定运行^[1,2]。针对粗粒料的湿化变形已有大量试验研究^[3-6], 但研究动力特性所用的动力本构模型较多, 差异较大, 而 Hardin-Drnevich 模型^[7] 因试验参数确定较为简单且能由试验直接获取, 在实际工程中应用广泛。在我国西南地区建有大量大坝, 该地区地质条件复杂, 且位于地震活带, 地震对土石坝的影响较大, 在湿化变形和地震的双重作用下, 研究粗粒料的动力特性变化对土石坝的抗震设计和安全评估具有重要意义。根据已有研究^[8,9] 及相关规范^[10], 通过控制试验材料的物理特性(包括最大干密度、最小干密度、相对密度、制样干密度、级配等指标)与所模拟地区土石材料的物理特性相似, 即可认为试验可以模拟实际工程的相应结果。鉴此, 本文对河南某在建水库粗粒料采用单线法进行湿化动力试验, 对比分析了粗粒料在湿化前后的动力特性变化。

2 试验方案

2.1 试验材料

选取河南某在建土石坝的筑坝粗粒料, 基于《土工试验方法标准》^[10] 进行动力特性试验。室内试验时, 由于仪器尺寸的限制, 采用相似级配法和等量替换法相结合的方式对粗粒料进行缩尺。试验级配见表 1, 试验级配曲线见图 1。试验材料最大、最小干密度分别为 2.37、2.01 g/cm³, 相对密度为 0.83, 制样干密度为 2.19 g/cm³。

表 1 各粒径组含量表

Tab. 1 Contents of each particle size group

粒径组/mm	含量/%	粒径组/mm	含量/%
0~5	10	20~30	18.9
5~10	18.9	30~40	11.8
10~20	23.8	40~50	16.6

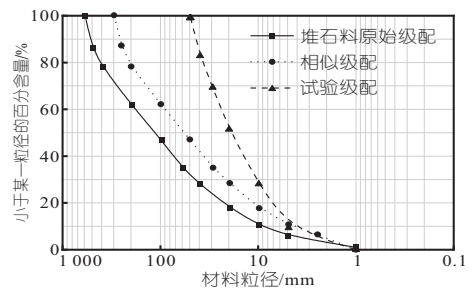


图 1 粗粒料级配图

Fig. 1 Coarse-grained material grading curve

2.2 试验设备

试验设备采用 STX-600 大型试样循环三轴

收稿日期: 2022-10-14, 修回日期: 2022-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609087, 51709114); 2021 河南省高等学校重点科研项目(21A570001)

作者简介: 张宏洋(1981-), 男, 副教授, 研究方向为水利工程试验及数值模拟, E-mail: zhyncwu@163.com

通讯作者: 丁泽霖(1983-), 男, 副教授, 研究方向为水工结构模型试验及数值模拟, E-mail: zzstar_ncwu_hs@163.com

试验系统。试样尺寸为 300 mm×150 mm,轴向最大动态加载为 800 kN,最大围压 2 MPa,最大轴向动态频率为 20 Hz,使用 LDCTTS 系统,通过 GDSLAB 软件的相关试验模块进行伺服控制。

2.3 试验方法

用干装法制备试样,保证试样自然风干后,按照设计级配配料并搅拌均匀,将制样筒放在振动台上,把试样分 6 层添加到制样筒中,每填一层振动台振捣 60 s,最终振捣至目标密度。试样制作完成后,将试样放置在仪器上,拆除制样筒,安装试样,套上压力室,推入加载架,施加一定的偏应力和围压。在试样底部通水,同时试样顶部抽气以保证试样真空,当与试样顶部连接的排水管内无连续气泡逸出、排出的水流均匀时,认为湿化完成。试验在固结应力比 $K_c = 1.0$ 的条件下进行固结。在进行动力三轴试验前,对试验粗粒料进行剪切破坏试验,将粗粒料的轴向应变达到试样高度的 15% 视为破坏,得到不同条件下达到破坏标准的轴向应力峰值。固结完毕后关闭排水阀门,施加轴向偏应力,在同一围压下,逐级施加正弦动荷载,激振频率为 1.0 Hz,每一级动应力振动 6 次,共计 30 次,选取每一级的第三个循环数据计算动力特性参数。

共进行了 9 组湿化试验和 9 组常规试验及相应的对照试验,共计 36 组。对应 3 个围压,每个围压对应 3 个不同的应力水平。应力水平 S 为试样在同一围压下,系统施加偏应力与破坏峰值偏应力之比,即 $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 。固结应力比 K_c 取 1.0,具体试验方案见表 2,施加的五级正弦动荷载见图 2,试验前后对比见图 3。

表 2 试验加载的荷载值

Tab. 2 Load value of experiment loading

σ_3 /kPa	K_c	f /Hz	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ /kPa	S	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ /kPa	5 级振动幅值/kPa
200	1.0	1.0	1 285	0.25	321	120,200,280、
				0.50	643	360,440
				0.75	964	
400	1.0	1.0	1 986	0.25	497	240,400,560、
				0.50	995	720,880
				0.75	1 491	
600	1.0	1.0	2 708	0.25	677	360,600,840、
				0.50	1 353	1 080,1 320
				0.75	2 031	

3 试验结果与分析

重点分析湿化动力三轴试验过程,并对比分析了常规动力三轴试验和湿化动力三轴试验的动力特性。

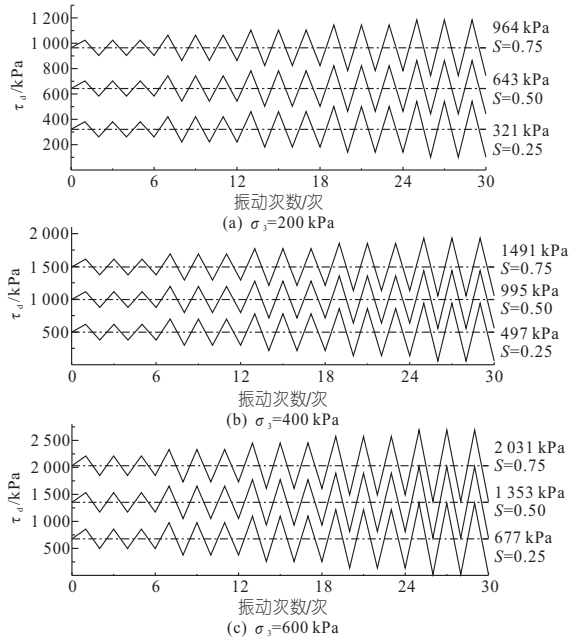


图 2 正弦动荷载

Fig. 2 Sinusoidal dynamic stress

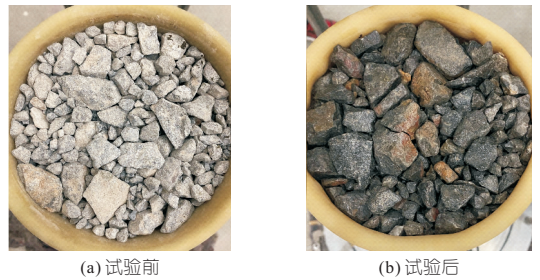


图 3 试验前后粗粒料对比

Fig. 3 Comparison of coarse-granular material before and after the experiment

3.1 动剪切模量 G_d 与动剪切应变 γ_d 的关系

根据试验结果,取每级动应力下的第 3 个循环为该级动应力下的滞回曲线,连接各级动应力滞回曲线顶点,根据式(1)得到材料在 200、400、600 kPa 三个围压下的动应力 τ_d 与动剪切应变 γ_d 的关系^[4],见图 4。

$$G_d = \tau_d / \gamma_d \quad (1)$$

在 200 kPa 围压下滞回曲线的形状相对于 400、600 kPa 围压有所区别,这是由于湿化变形作用下粗粒料试样的颗粒发生滑移和重排列,内部的组织结构重调整,200 kPa 围压条件下,围压和动应力相对较小,试样内部的密实程度相对较低,在动力加卸载过程中,内部结构对 τ_d 、 γ_d 有一定的影响,导致其滞回曲线的形状相对于其他围压有一定的误差,但这是合理的。

根据 Hardin-Drnevich 模型^[7]的特性,拟合直线的截距为 a ,斜率为 b ,可得:

$$1/G_d = a + b\gamma_d \quad (2)$$

当 $\gamma_d = 0$ 时, $1/a$ 为最大的动剪切模量 G_{dmax} 。

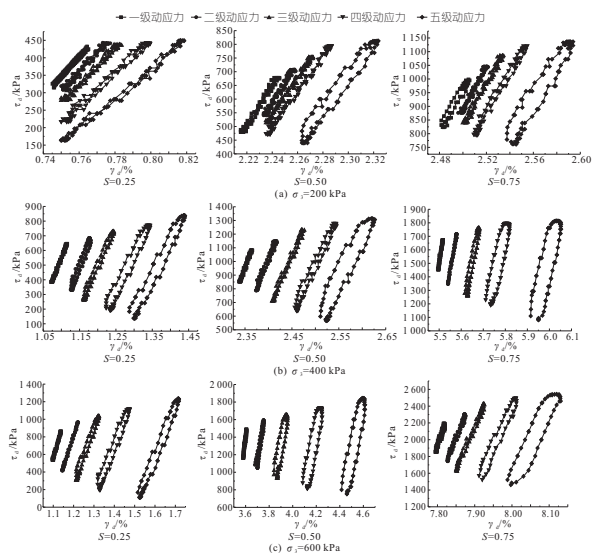


图 4 不同围压下滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis curves under different confining pressure

由拟合结果可知, G_{dmax} 与 σ_3 成正相关, 与 γ_d 成负相关, G_{dmax} 的衰减速率与 S 成正相关。说明 σ_3 对试样侧面起到约束作用, 内部接触紧密, 表现出弹性状态, G_{dmax} 随之增大, 当达到一定值时, 土体产生了明显的塑性变形, σ_3 对 G_{dmax} 的影响作用变小。

3.2 最大动剪切模量 G_{dmax} 与有效应力 σ_m 的关系

G_{dmax} 与 σ_m 的关系为:

$$G_{dmax} = k_2 P_a (\sigma_m / P_a)^n \quad (3)$$

在双对数坐标系下 G_{dmax} 与 σ_m 的关系见图 5, 根据各组试验结果, 可知拟合得到的直线斜率为 n , 横坐标为 1 时直线的截距为 k_2 。由图 5 可知, G_{dmax} 与 σ_m 成正相关, S 与 G_{dmax} 成正相关, G_{dmax} 的增速随 S 的增大而逐渐减缓。由于 S 的不断增大, 试样中的颗粒间发生挤压、破碎, G_{dmax} 的增速也随之减缓。

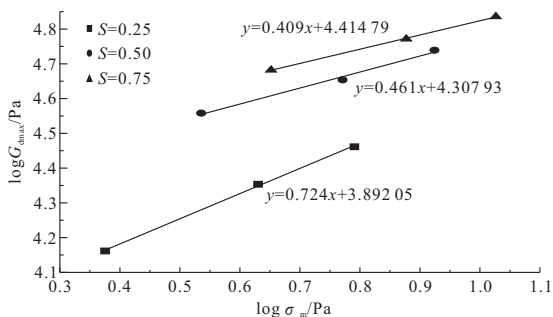


图 5 G_{dmax} 与 σ_m 关系

Fig. 5 Relationship of G_{dmax} and σ_m

3.3 动剪切模量比 G_d/G_{dmax} 与动剪切应变 γ_d 的关系

将式(3)代入式(2)可得 G_d/G_{dmax}

$$G_d/G_{dmax} = 1/(1 + k_1 \bar{\gamma}_d) \quad (4)$$

其中 $k_1 = k_2 b \sigma_3 \quad (5)$

$$\bar{\gamma}_d = \gamma_d / (\sigma_m / P_a)^{1-n} \quad (6)$$

根据式(5), 令 $G_d/G_{dmax} = 0.5$ 时动应变为 $(\bar{\gamma}_d)_{0.5}$, $\bar{\gamma}_d$ 为归一化动应变, 可得:

$$k_1 = 1/(\bar{\gamma}_d)_{0.5} \quad (7)$$

根据式(4)对试验数据进行处理, 得到 G_d/G_{dmax} 与 γ_d 成负相关, 且衰减速率逐渐减缓, G_d/G_{dmax} 与 S 成正相关。

3.4 阻尼比 λ 与动剪切应变 γ_d 之间的关系

Hardin-Drnevich 模型假定 λ 随 γ_d 的关系满足式(8), 根据实测 λ 与 γ_d 关系拟合试样的最大阻尼比 λ_{max} 。

$$\lambda/\lambda_{max} = k_1 \bar{\gamma}_d / (1 + k_1 \bar{\gamma}_d) \quad (8)$$

根据式(8)对数据进行拟合得到 λ 与 γ_d 成正相关, 当增大到一定程度时, λ 的增长速率逐渐放缓, 曲线也趋于平缓, 此时 λ 接近最大值 λ_{max} 。

3.5 Hardin-Drnevich 模型参数

本次试验得到的粗粒料 Hardin-Drnevich 模型参数见表 3。

表 3 等效线性模型计算参数

Tab. 3 Hardin-Drnevich model calculated parameter

材料	S	k_1	k_2	n	λ_{max}
粗粒料	0.25	95.3	779	0.724	0.09
	0.50	201.3	2 032	0.461	0.12
	0.75	252.9	2 598	0.409	0.23

4 粗粒料动力特性对比分析

4.1 G_{dmax} 对比分析

对比常规和湿化动力三轴试验在各种条件下的 G_{dmax} (表 4), G_{dmax} 与围压和 S 均成正相关, 常规试验的 G_{dmax} 大于湿化试验, 随着应力水平的增大, 二者之间的差距变大, 衰减速率与 σ_3 和 S 成正相关, 在 $\sigma_3 = 600$ kPa, $S = 0.75$ 时衰减率达

表 4 各试验条件下 G_{dmax} 值

Tab. 4 G_{dmax} value under different experiment conditions

σ_3 /kPa	S	常规试验	湿化试验	衰减 率/%
		G_{dmax} /MPa	G_{dmax} /MPa	
200	0.25	158.22	147.71	6.64
	0.50	248.48	225.25	9.35
	0.75	328.26	288.18	12.21
400	0.25	305.38	283.28	7.22
	0.50	407.35	366.49	10.03
	0.75	432.11	378.79	12.34
600	0.25	326.31	298.33	8.59
	0.50	468.92	421.23	10.17
	0.75	794.28	694.44	12.57

到最大,为 12.57%。由此可知,受湿化变形的影响,材料的动力特性值发生衰减。

4.2 最终轴向应变对比分析

对比常规和湿化动力三轴试验,得到粗粒料在不同 σ_3 、 S 条件下的最终轴向应变,见表 5、图 6。由表 5、图 6 可知,最终轴向应变与 σ_3 和 S 成正相关,湿化试验和常规试验最终轴向应变之比在 1.10~1.70 之间,由此可知,湿化变形对轴向应变的影响非常明显。

表 6 Hardin-Drnevich 模型参数值

Tab. 6 Parameters value of Hardin-Drnevich model under

材料	应力水平 S	试验类型	k_1	n	k_2	λ_{max}
粗粒料	0.25	常规	101.4	0.756	812	0.13
		湿化	95.3	0.724	779	0.09
	0.50	常规	197.5	0.459	2 263	0.17
		湿化	201.3	0.461	2 032	0.12
	0.75	常规	245.1	0.394	3 043	0.26
		湿化	252.9	0.409	2 598	0.23

表 5 各试验条件下最终轴向应变值

Tab. 5 Final axial strain value under different experiment conditions

σ_3 /kPa	S	常规试验应变	湿化试验
		γ_d /%	γ_d /%
200	0.25	0.547	0.768
	0.50	1.496	2.307
	0.75	2.014	2.609
400	0.25	0.924	1.490
	0.50	1.836	2.660
	0.75	5.519	6.232
600	0.25	1.292	1.929
	0.50	3.020	4.643
	0.75	6.986	8.243

5 结论

a. 粗粒料的动力特性受湿化变形的影响较大, G_d 、 G_{dmax} 、 λ 、 λ_{max} 等动力特性参数均发生不同程度的衰减。

b. Hardin-Drnevich 模型参数中的 k_2 、 λ_{max} 受湿化变形影响较为明显,发生了不同程度的衰减,而 n 、 k_1 的变化不明显。

c. 试验结果可为土石坝在设计 and 动力计算方面提供一定的借鉴和参考。

参考文献:

- [1] 张小洪, 邱珍锋. 掺软岩粗粒料的湿化试验研究[J]. 水电能源科学, 2018,36(6):110-113.
- [2] 罗伟, 漆文邦, 王亚洲, 等. 不同应力水平砂岩颗粒料湿化变形试验研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12):137-140,120.
- [3] 周雄雄, 迟世春, 贾宇峰. 粗粒料湿化变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019,41(10):1943-1948.
- [4] 吕小龙, 迟世春, 贾宇峰. 堆石料动力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018,40(9):1729-1735.
- [5] 谭凡, 张婷, 徐晗. 基于大型动三轴试验的筑坝砂砾石料动模量和阻尼比研究[J]. 长江科学院院报, 2020,37(7):130-134.
- [6] 何建新, 王景, 杨海华. 基于大型三轴试验的筑坝材料动力特性对比分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(8):107-111.
- [7] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soil: measurement and parameter effects[J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1972,98(6):603-624.
- [8] 吕小龙, 迟世春, 贾宇峰. 堆石料动力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018,40(9):1729-1735.
- [9] 曹敏, 范逸峰, 武利强. 粗粒料干密度缩尺效应规律及影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2017,35(10):120-122.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[S]. 北京:中国计划出版社, 2019.

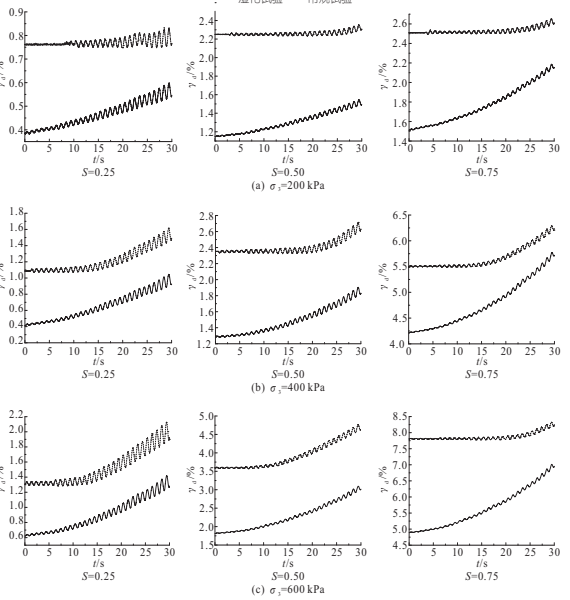


图 6 不同围压下的应变关系

Fig. 6 Strain relation under different confining pressure

4.3 Hardin-Drnevich 模型参数对比分析

Hardin-Drnevich 模型的参数值对比见表 6。由表 6 可知,湿化变形对系数 k_2 、 λ_{max} 影响显著,粗粒料湿化后均出现衰减,模型参数 n 、 k_1 的变化却没有一定的规律性,受湿化变形的影响不明显。

预测结果的残差近乎均小于 LSTM 模型和 SVM 模型。

c. FCM-WOA-LSTM 模型预测结果的平均绝对误差 M_{MAE} 、均方误差 M_{MSE} 、均方根误差 R_{RMSE} 均为 3 种模型中最小,模型具有较强的泛化能力和较高的预测精度,为大坝变形的精准预测提供了新途径。

参考文献:

- [1] 唐国磊,周惠成,李宁宁,等. 一种考虑径流预报及其不确定性的水库优化调度模型[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 641-647,656.
- [2] 张静文,郭家力,刘佳,等. 鄱阳湖流域入湖径流时空变化预测[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 41-48,70.
- [3] 陈芳,张志强,李扉,等. 基于 EEMD 分解与 BOA 算法优化神经网络的密云水库大阁水文站径流预测[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(6): 188-194.
- [4] 鄢涛,陈波,曹恩华,等. 基于 EEMD-ELM 的大坝

变形预测模型[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 70-73,80.

- [5] 苏燕,付家源,林川,等. 基于时间注意力机制的大坝动态变形预测模型[J]. 水力发电学报, 2022, 41(7): 72-84.
- [6] 温勇兵,徐镇凯,魏博文,等. 基于逐步回归和 GDCS-SVM 的大坝变形预测组合模型[J]. 水电能源科学, 2017, 35(5): 92-94,91.
- [7] 蔡国伟,刘旭,张旺,等. 基于改进灰狼优化算法的分布式电源优化配置[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 134-141.
- [8] 邵光成,章坤,王志宇,等. 基于 IABC-RBF 神经网络的地下水埋深预测模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(7): 1323-1330.
- [9] 周有荣,王凯. 改进鲸鱼算法优化混合核支持向量机在径流预测中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2020(7): 50-53.
- [10] 范振东,崔伟杰,杨孟,等. 基于模糊 C-均值聚类和支持向量机的大坝安全变形预警模型及应用[J]. 水电能源科学, 2014, 32(12): 71-74.

Dam Deformation Prediction Model and Its Application Based on FCM-WOA-LSTM

CAO Meng-xi^{a,b}, ZHENG Dong-jian^{a,b}

(a. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering; b. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the continuous accumulation of dam deformation monitoring data and the continuous increase of deformation measuring points, it often takes a lot of time to predict all deformation measuring points, which is easy to cause the problem of untimely feedback. Therefore, the fuzzy C-means clustering algorithm (FCM) was introduced to partition the dam according to the similarity of deformation laws. The whale optimization algorithm (WOA) was used to optimize the parameters of long short-term memory neural network (LSTM), and a dam deformation prediction model based on FCM-WOA-LSTM was established. The measured deformation data of a concrete double-curvature arch dam was used as sample data for prediction, and the prediction results were compared with those of LSTM model and SVM model. The results show that the average absolute error (M_{MAE}), mean square error (M_{MSE}) and root mean square error (R_{RMSE}) of the prediction results of FCM-WOA-LSTM model are the smallest among the three models, and the three evaluation indexes of the fitting section are close to those of the prediction section, respectively. Compared with the existing models, the FCM-WOA-LSTM model has higher prediction accuracy and better applicability.

Key words: dam deformation; partitions of measuring points; fuzzy C-means clustering; whale optimization algorithm; long short-term memory network

(上接第 66 页)

Experimental Study on Wetting Dynamic Characteristics of Coarse Grained Materials in Earth Rockfill Dam

ZHANG Hong-yang^{1,2}, MA Cong¹, LIU Jian-long, SUN Ya-dong¹,
SONG Zi-yi¹, DING Ze-lin^{1,2}, HAN Peng-ju¹

- (1. College of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Protection Engineering of Henan Province, Zhengzhou 450046, China, 3. Management Division of Jiangsu Qinhua River Hydraulic Engineering, Nanjing 210022, China)

Abstract: Conventional and wetting triaxial experiments were carried out on coarse grained materials for dam construction with a large static and dynamic triaxial tester. The dynamic characteristics of coarse grained materials after wetting deformation were studied, and the results were compared with those of conventional triaxial dynamic experiments. The experimental results show that the dynamic characteristics of coarse grained materials are greatly affected by wetting deformation, and the dynamic performance parameters of coarse grained materials are attenuated to a certain extent. The Hardin-drnevich model parameters of the two experiments were compared and analyzed. It was found that wetting deformation had a significant effect on k_2 and λ_{max} , and the numerical values were attenuated, but the effects on n and k_1 were not significant.

Key words: coarse grained materials; wetting deformation; dynamic characteristic; Hardin-Drnevich model; dynamic triaxial experiment