DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2023.02.007

基于改进响应面的邓肯-张 E-B 模型参数全局敏感性分析

冯亚新[1],江兆强[2],孙一清[1],王润英[1],沈振中[1],徐力群[1],
甘 磊[1],李皓璇[1],刘 源[1],桂靖鹏[3]

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098;
2. 云南省滇中引水工程有限公司,云南 昆明 650051; 3. 淮安区运西水利管理所,江苏 淮安 223299)

摘要:为研究邓肯-张 E-B 模型参数及参数之间的交互作用对大坝变形的影响,以某均质黄土坝为研究对象,利用改进的响应面方法分析了邓肯-张 E-B 模型参数的全局敏感性。通过部分因子设计筛选出对土坝变形影响较为显著的 5 个参数为 R_f、γ、φ_0、K_b、K,再利用响应面方法中的中心复合设计对筛选结果做进一步的全局响应面分析,考察参数及参数之间的交互作用对土坝变形的影响。结果表明,R_f、γ、φ_0 是对大坝位移敏感性最强的 3 个参数,这 3 个参数之间的交互作用对于大坝变形的敏感性同样重要,且高于单个因素的敏感性,在类似工程计算中应考虑参数之间的交互作用。

关键词:邓肯-张 E-B 模型;均质黄土坝;部分因子设计;中心复合设计;全局敏感性分析

中图分类号:TV641.2+2 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-7647(2023)02-0044-07

Global sensitivity analysis of parameters in Duncan-Chang E-B model based on improved response surface//FENG Yaxin[1], JIANG Zhaoqiang[2], SUN Yiqing[1], WANG Runying[1], SHEN Zhenzhong[1], XU Liqun[1], GAN Lei[1], LI Haoxuan[1], LIU Yuan[1], GUI Jingpeng[3] (1. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *Central Yunnan Provincial Water Diversion Project Co.*, *Ltd.*, *Kunming* 650051, *China*; 3. *Huai'an District Yunxi Water Management Institute*, *Huai'an* 223299, *China*)

Abstract: In order to study the influence of Duncan-Chang E-B model parameters and their interactions on dam deformation, the global sensitivity of parameters in Duncan-Chang E-B model was studied using the improved response surface method for a homogeneous loess dam. Firstly, five parameters including R_f, γ, φ_0, K_b and K, which have significant influence on the deformation of earth dam were screened out by fractional factorial design. Then the central composite design in the response surface method was used to conduct further global response surface analysis on the screening results and investigate the influence of parameters and their interaction on the deformation of earth dams. The results show that R_f, γ and φ_0 are the three most sensitive parameters to dam displacement, and the interaction between them is also significantly sensitive to dam deformation, which is greater than the sensitivity of a single factor. Therefore, the interaction between the parameters should be considered in similar engineering calculations.

Key words: Duncan-Chang E-B model; homogeneous loess dam; fractional factorial design; central composite design; global sensitivity analysis

土石坝是水利工程建设中最常见的坝型之一,因其具有对各种地形和地质的适应能力强、可就地取材、施工方便等优点而被广泛应用,有着广阔的发展前景[1-2]。在我国,百米级的土石坝工程建设虽然起步晚,但发展速度极快。如今,我国土石坝建设高度已达 300 m 级,包括坝高 314 m 的双江口大坝和坝高 315 m 的如美大坝[3]。已有施工实践表明,在高土石坝建设与运行过程中,大坝常常会产生不同程度的位移变形。

由于大坝填料是非连续的颗粒,因此大坝坝体的变形常采用非线性有限元方法计算,其本构模型常采用邓肯-张 E-B 模型。赵晓龙等[4]、黄焜等[5]和汪天飞等[6]采用邓肯-张 E-B 模型对不同类型的土石坝进行了三维有限元计算,结果表明坝体位移、

基金项目:国家自然科学基金雅砻江联合基金(U1765205);国家重点研发计划(2019YFC1510802);国家自然科学基金面上项目(52179130)

作者简介:冯亚新(1998—),男,硕士研究生,主要从事水利工程渗流特性分析控制方法研究。E-mail:294581753@qq.com

通信作者:王润英(1972—),女,副教授,博士,主要从事水工程建设管理与安全评价研究。E-mail:wry6888@126.com

应力符合大坝变形的基本规律。其中,赵晓龙等[4]研究了深厚覆盖层上心墙堆石坝,发现心墙的拱效应很明显。姜海波[7]则以某复合土工膜高土石坝为例进行研究,计算结果表明复合土工膜对降低坝体浸润线,减小坝体孔隙水压力均有显著作用,堆石体的应力应变有了一定的改善。可见,邓肯-张 E-B 模型在大坝数值模拟研究中被广泛使用,但模型参数的准确获取仍是研究的重点。目前,针对大坝变形参数的获取,除了依靠三轴试验以外[8-9],比较常见的是利用参数反演获得。陆周祺[10]结合某堆石坝监测资料及室内三轴试验成果,基于免疫遗传算法对堆石坝流变参数进行反演,其计算结果与实测值较为吻合。贾宇峰等[11]利用变异粒子群算法对某堆石坝堆石料和心墙料参数进行反演,根据计算结果分析和预测了大坝的变形特性。但参数反演仍存在需要大量训练样本的缺陷,随着研究深入,学者们发现可以通过研究影响大坝变形参数的敏感性大小,将敏感性较低的参数采用工程类比等方法确定,以实现在保证计算精度的前提下提高计算效率的目的。

近年来,敏感性分析方法被广泛应用于大坝工程的参数寻优以及重要性判断方面。周邠鹏等[12]基于数值计算结果分析了渗控效应对黏土心墙、帷幕、山岩材料渗透系数的敏感性。陈志波等[13]采用邓肯-张非线性弹性模型研究了两河口心墙堆石坝坝体下游次堆石区范围及其参数变化、高塑性黏土厚度及其参数变化对坝体应力变形的影响。随着敏感性分析的深入,学者们发现可以通过科学安排试验次数,在较少的试验次数下尽可能全面地得到敏感性分析结果。李火坤等[14]将正交试验法与粒子群算法相结合,分析了拱坝及地基的动弹性模量区域对拱坝模态参数的敏感性,以此确定了待反演的动弹性模量区域。李炎隆等[15]基于正交试验法对面板堆石坝高模量区模型参数进行敏感性分析,发现体积模量基数 K_b、内摩擦角 φ、体积模量指数 m 敏感性较高,而弹性模量基数 K、弹性模量指数 n 等参数对坝体沉降、面板挠度及顺坡向应力的敏感性较低。陈辉等[16]对某堆石坝采用单因素敏感性分析方法和基于双判别式的正交试验敏感性分析方法,得出初始内摩擦角、体积模量数、密度、破坏比、弹性模量数等对大坝变形影响显著的结论。但上述使用试验设计对大坝变形参数敏感性的研究仍停留在局部敏感性分析阶段。

当前在大坝工程中应用的正交试验法多是局部敏感性分析,仅考虑了单因素作用对分析指标的影响,没有考虑因素之间的交互作用的影响,但是在实际工程中这种交互作用往往是不可忽略的。与此同时,邓肯-张 E-B 模型参数众多,做正交试验不可能同时考虑所有参数及参数之间的交互作用,因此需要对模型中的参数进行筛选,即剔除敏感性较弱的参数。本文以某均质黄土坝为例,先通过部分因子设计对邓肯-张 E-B 模型中参数进行敏感性分析,筛选出对大坝变形影响显著的参数,再利用中心复合设计对筛选出的参数进行全局响应面分析,研究参数及参数之间的交互作用对土坝变形的敏感性排序,以期为土石坝邓肯-张 E-B 模型参数选取提供参考。

1 敏感性分析原理

敏感性分析方法包括局部敏感性分析法和全局敏感性分析法。其中,全局敏感性分析法能够更好地反映因素之间交互作用[17]。但由于因素众多,无法将所有因素的交互作用都纳入考量,因此有必要先筛选出对试验指标敏感性较强的几个参数,然后再对筛选出来的参数进行全局敏感性研究,对响应面全局敏感性分析法进行改进。具体过程如下:①部分因子设计,利用部分因子试验对 8 个参数进行设计,对各试验的计算结果采用方差分析法进行分析,筛选出影响显著的参数;②中心复合设计,对部分因子设计筛选出的参数进行中心复合设计,对试验结果进行方差分析,绘制等值线图,进一步研究参数之间的交互作用对均质黄土坝变形的敏感性。

在大坝变形参数的选择上,邓肯-张 E-B 模型一共包括 10 个计算参数:黏聚力 c、内摩擦角 φ_0、围压增加一个对数周期下内摩擦角的减小值 $\Delta\varphi$、破坏比 R_f、弹性模量基数 K、体积模量基数 K_b、体积模量指数 m、弹性模量指数 n、卸载再加荷时的弹性模量基数 K_{ur}、卸载再加荷时的弹性模量指数 n_{ur}。由于在施工期的筑坝过程及完工后的蓄水过程中,黄土坝壳始终处在荷载状态,且黄土颗粒为散粒体材料,故 K_{ur}、n_{ur}、c 在敏感性分析时不参与讨论,同时将影响大坝变形的坝料容重 γ 加入敏感性分析的试验因素中[15]。

由于极差分析法具有一定的局限性,不能区分试验结果的差异具体是由什么因素引起[18],因此本文采用的两种试验设计方法的试验结果均采用方差分析法进行分析。在 F 分布表中查对应的 $F_{0.01}$、$F_{0.05}$、$F_{0.1}$、$F_{0.2}$ 值,并与计算得到的检验敏感性统计量 F_i 值比较,判断因素的显著性水平。若 $F_i>F_{0.01}$,说明该因素高度显著,记为 * *;若 $F_{0.01}>F_i>F_{0.05}$,说明该因素显著,记为 *;$F_{0.1}>F_i$,说明该因素有影响;若 $F_{0.1}>F_i>F_{0.2}$,说明该因素有一定影响;若 $F_{0.2}>F_i$,说明该因素无影响[18]。

1.1 部分因子设计

因子设计在各类试验中广泛应用,常用于探究各因素对试验指标的影响是否显著。全设计是指各个因子所有水平组合的设计。全设计的优点是能够考虑所有试验因子的主效应以及全部因子之间的交互作用,缺点是因子数量越多,所有的水平组合数就会急速增加,如 5 个因子,每个因子取两个水平,其所有的组合数高达 32 次。由于试验经费、资源、时间等有限,且高阶项之间的交互作用往往可以忽略,因此试验者只能选取全设计中的一部分,称为部分因子设计[19]。

1.2 中心复合设计

在试验中,常常需要研究自变量变化引起响应量变化的程度,从而可以找到自变量变化的规律,使得响应变量达到最佳值。通常的做法是先用两个水平的因子试验数据,拟合一个线性回归方程。其模型为(以两个自变量为例):

$$Y=\alpha_0+\alpha_1X_1+\alpha_2X_2+\alpha_{11}X_1^2+\alpha_{22}X_2^2+\alpha_{12}X_1X_2+\varepsilon \quad (1)$$

式中:Y 为响应变量;α_0 为常量;α_1、α_2、α_{11}、α_{22}、α_{12} 为系数;X_1、X_2 为自变量;ε 为误差项[20]。

由于自变量平方项的存在,需要补充试验点,最常用的方法就是中心复合设计。

中心复合设计包含 1 个中心点(图 1 中圆形点),用于提供一致精度和纯误差的估计,其各点的三维坐标皆为 0;6 个轴向点(图 1 中三角形点),用于估计纯平方项,除了一个坐标±α 外,其余坐标皆为 0;8 个立方体点(图 1 中星形点),各点坐标为 1 或−1,用于组成因子试验的部分[20]。

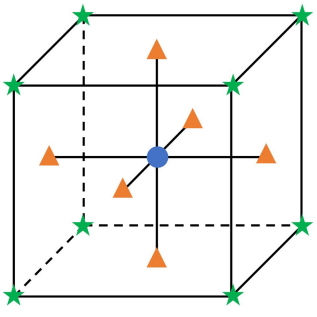


图 1 中心复合设计布点示意图

2 工程实例分析

2.1 工程概况

某水库大坝工程位于黄土土质地区,地形起伏不大,为中山丘陵地区。该大坝坝顶高程 1 557.00 m,最大坝高 96 m,防浪墙顶高程为 1 558.20 m,大坝全长 575 m。库区正常蓄水位为 1 554.00 m,库容 4 587 万 m^3。大坝河床典型剖面如图 2 所示。

2.2 有限元模型

2.2.1 模型计算坐标系

规定河流流动方向为 x 轴,且向下游为正,向上游为负;竖直方向为 z 轴,且向上为正,向下为负;坝轴线方向为 y 轴,且右岸指向左岸为正,左岸指向右岸为负。取计算模型最左下端为 x 轴零点,右岸坝轴线端为 y 轴零点,模型底部高程 1 216 m 为 z 轴零点。

2.2.2 模型边界范围

在 z 轴方向上,从大坝建基面高程 1 466 m 处再垂直向下取 2.5 倍坝高(250 m)作为地基,高程 1 216 m处为模型的下边界;在 x 轴方向上,从大坝上游坝脚处向 x 轴负坐标方向取 2 倍坝高,约为 200 m 处为模型的上游边界,从大坝下游坝脚处向 x 轴正坐标方向取 2 倍坝高,约为 200 m 处为下游边界;在 y 轴方向上,取大坝厚度为 100 m。

2.2.3 模型约束

位移约束分别加在地基 x 轴方向两侧与 y 轴方向两侧,分别约束 y 和 x 轴方向位移。底部约束加在计算模型底部的平面上,约束模型底部的 x、y 和 z 轴方向位移。该均质黄土坝三维有限元计算网格如图 3 所示。

2.3 计算参数

该土坝材料包括坝体填筑料(黄土)、上下游开挖料盖重、反滤排水层等,参与有限元计算的材料的本构模型采用邓肯−张 E-B 模型。地基及坝体各料区的计算参数取值如表 1 所示,其中 c 和 K_{ur} 虽不参与敏感性分析,但在实际静动力计算中需要用到。

2.4 分级加载过程

该土石坝工程建造过程共分 18 级加载完成坝体填筑和蓄水。分级加载及蓄水过程如表 2 所示。

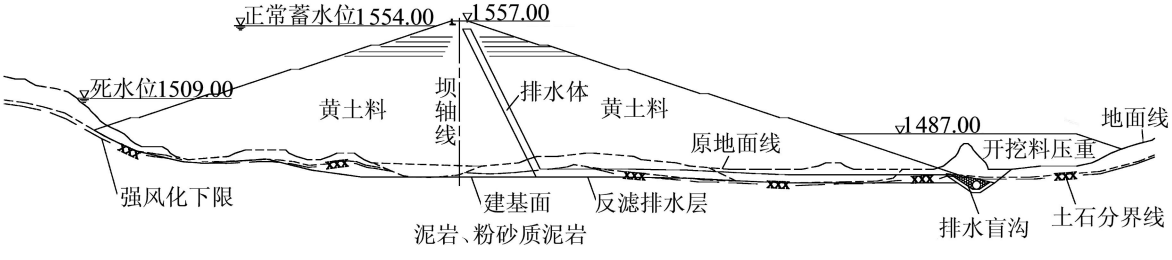


图 2 河床段大坝典型剖面(单位:m)

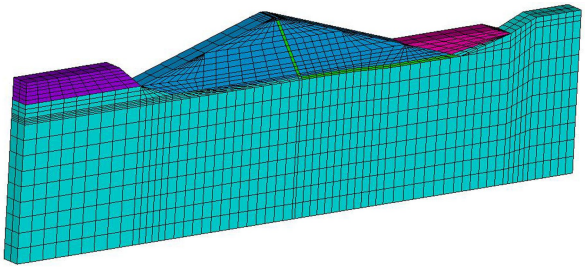


图 3　三维有限元计算网格

表 1　坝体填筑材料计算参数

坝料	γ/(kN·m^{-3})	c/kPa	φ_0/(°)	$\Delta\varphi$/(°)	K
坝基微新泥岩	23	240	36	6.00	650
坝基强风化泥岩	21	65	16		350
坝体填筑料(黄土)	18	20	28	5.50	440
上下游开挖料盖重	17	18	24		280
反滤排水层	20	0	36	3.50	800
坝料	n	R_f	K_b	m	K_{ur}
坝基微新泥岩	0.61	0.75	480	0.36	820
坝基强风化泥岩	0.45	0.85	180	0.25	525
坝体填筑料(黄土)	0.60	0.80	280	0.40	525
上下游开挖料盖重	0.40	0.85	180	0.25	525
反滤排水层	0.55	0.80	420	0.60	960

表 2　有限元计算分级加载及蓄水过程

分级加载序号	加载说明	坝体高程或水位/m	分级加载序号	加载说明	坝体高程或水位/m
1	覆盖层及地基	557	10	坝体	1530
2	开挖回填	1461	11	坝体	1545
3	坝体	1467	12	坝体	1552
4	坝体	1478	13	坝体	1557
5	坝体	1487	14	坝体	1589
6	坝体	1495	15	蓄水	1509
7	坝体	1505	16	蓄水	1524
8	坝体	1513	17	蓄水	1539
9	坝体	1522	18	蓄水	1554

2.5　计算结果分析

计算时为了仅保留单元应力获得地基初始应力场,在加载时首先加载基岩和覆盖层,并在分级加载前将结点位移初始化为0。通过有限元模型计算大坝竣工期及运行期工况下的坝体典型剖面的位移分布如图4所示。

从总体来看,该土坝断面位移变化符合规律。在竣工期,坝体水平位移近似关于坝轴线呈对称分布。水平位移最大值为411.02 mm,发生于下游坝体处,垂直位移最大值为950.47 mm,发生在坝轴线附近距离坝基面约3/4坝高处。在运行期,由于库区蓄水,上游面水压力逐渐增大,在水平方向上坝体向下游变形逐渐增大,向上游变形逐渐减小,水平位移最大值为485.41 mm;在竖直方向上,坝体变形呈均匀下降趋势,垂直位移最大值为989.68 mm,最大值在坝体距离坝基面约2/3坝高处。运行期坝体垂直位移最大值约占最大坝高的1.03%。

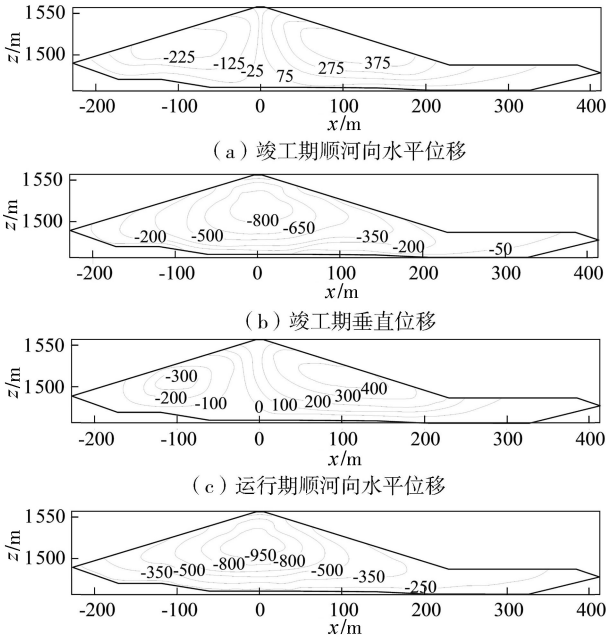


图 4　典型断面位移分布(单位:mm)

3　敏感性分析

3.1　部分因子设计

对 γ、φ_0、K、n、R_f、K_b、m、$\Delta\varphi$ 8个参数进行部分因子设计,试验指标为垂直位移 V,向上游水平位移 H_1 和向下游水平位移 H_2。8个参数作为8个因素,每个因素考察低(-1)和高(1)两个水平,其中低水平为设计参数的0.8倍,高水平为设计参数的1.2倍,各因素及水平如表3所示。

表 3　部分因子设计因素水平

水平	γ/(kN·m^{-3})	φ_0/(°)	K	n	R_f	K_b	m	$\Delta\varphi$/(°)
-1	14.4	22.4	352	0.48	0.64	224	0.32	4.4
1	21.6	33.6	528	0.72	0.96	336	0.48	6.6

为保证充足的试验次数以便分析出8个参数的显著性程度,设计一个16次试验的部分因子试验方案。具体试验方案及计算结果如表4所示,方差分析结果如表5所示。

从表5可以看出,各参数对 V 的敏感性排序依次为 R_f、γ、φ_0、K_b、K、n、m、$\Delta\varphi$,其中对 V 影响显著的是 R_f。各参数对 H_1 的敏感性排序为 R_f、φ_0、γ、K、n、K_b、$\Delta\varphi$、m,其中对 H_1 影响明显显著的是 R_f,显著的是 φ_0。各参数对 H_2 的敏感性排序为 R_f、φ_0、γ、K_b、K、$\Delta\varphi$、m、n。

综合来看,各参数对 V、H_1、H_2 的敏感性排序虽有不同,但总体上差异不大,其中 R_f、γ、φ_0、K_b、K 对均质黄土坝位移的影响更加显著,而 $\Delta\varphi$、m、n 对均质黄土坝的位移影响不大。

表 4　部分因子设计方案

方案	γ/(kN·m^{-3})	φ_0/(°)	K	n	R_f	K_b	m	$\Delta\varphi$/(°)	V/mm	H_1/mm	H_2/mm
1	14.4	22.4	352	0.48	0.64	224	0.32	4.4	1 029.00	397.42	528.99
2	21.6	22.4	352	0.48	0.64	336	0.48	6.6	1 016.97	594.91	792.00
3	14.4	33.6	352	0.48	0.96	224	0.48	6.6	1 680.52	444.33	572.21
4	21.6	33.6	352	0.48	0.96	336	0.32	4.4	2 129.86	641.75	897.24
5	14.4	22.4	528	0.48	0.96	336	0.48	4.4	1315.34	526.29	766.54
6	21.6	22.4	528	0.48	0.96	224	0.32	6.6	6 290.91	1 408.69	5 888.46
7	14.4	33.6	528	0.48	0.64	336	0.32	6.6	575.37	156.02	215.31
8	21.6	33.6	528	0.48	0.64	224	0.48	4.4	858.53	203.22	294.98
9	14.4	22.4	352	0.72	0.96	336	0.32	6.6	1 776.98	703.83	1 038.53
10	21.6	22.4	352	0.72	0.96	224	0.48	4.4	6 733.56	1 202.05	7 917.50
11	14.4	33.6	352	0.72	0.64	336	0.48	4.4	518.36	182.45	239.69
12	21.6	33.6	352	0.72	0.64	224	0.32	6.6	1011.03	217.01	334.02
13	14.4	22.4	528	0.72	0.64	224	0.48	6.6	805.60	254.70	351.64
14	21.6	22.4	528	0.72	0.64	336	0.32	4.4	809.68	277.94	396.99
15	14.4	33.6	528	0.72	0.96	224	0.32	4.4	1 221.22	235.62	329.48
16	21.6	33.6	528	0.72	0.96	336	0.48	6.6	1440.33	341.83	425.20

表 5　部分因子试验方差分析结果

因素	F_i							
	γ/(kN·m^{-3})	φ_0/(°)	K	n	R_f	K_b	m	$\Delta\varphi$/(°)
V	3.60	2.98	0.19	0.01	7.10*	2.81	0.01	0.00
H_1	4.72	10.37*	1.15	1.10	12.41**	1.05	0.10	0.25
H_2	2.59	3.21	0.21	0.02	3.35	2.04	0.05	0.05

3.2　响应面分析

根据上述部分因子设计试验筛选出对均质黄土坝位移影响显著的参数包括 R_f、γ、φ_0、K_b、K，对这 5 个参数进行中心复合设计，研究 R_f、γ、φ_0、K_b、K 这 5 个参数之间两两交互的影响。由于三阶及四阶交互效应显著性太小，在此不予分析。每个参数设计 3 个水平，高水平(1)取试验设计参数的 1.2 倍，低水平(−1)取试验设计参数的 0.8 倍。各因素及水平如表 6 所示，中心复合设计试验方案及计算结果如表 7 所示。

表 6　中心复合设计试验因素水平取值

水平	γ/(kN·m^{-3})	R_f	φ_0/(°)	K_b	K
−1	14.4	0.64	22.4	224	352
0	18.0	0.80	28.0	280	440
1	21.6	0.96	33.6	336	528

根据各试验方案的计算结果再计算 R_f、γ、φ_0、K_b、K 这 5 个参数以及参数之间二阶交互效应的方差大小。对表 7 数据结果进行方差分析，垂直位移、向上游位移、向下游位移的方差分析结果如表 8 所示。可以看出，对 V 的敏感性程度由高到低次序为 R_f、γ、φ_0、γR_f、$\varphi_0 R_f$、$\gamma\varphi_0$、KK_b、φ_0^2、R_f^2、K_b^2、K_b、K、K^2、γ^2、KR_f、γK、$\varphi_0 K_b$、$R_f K_b$、γK_b、$\varphi_0 K$，其中 R_f 明显显著，γ、φ_0、γR_f 显著。对 H_1 的敏感性程度由高到低次序为 φ_0、R_f、γ、φ_0^2、$\varphi_0 R_f$、γR_f、K、K_b、$\gamma\varphi_0$、$R_f K_b$、KK_b、R_f^2、K^2、γK_b、γ^2、KR_f、$\varphi_0 K$、$\varphi_0 K_b$、K_b^2、γK，其中 φ_0、R_f、γ、φ_0^2、$\varphi_0 R_f$、γR_f、K 明显显著，K_b、$\gamma\varphi_0$ 显著。对 H_2 的敏感性程度由高到低次序为 R_f、φ_0、γ、γR_f、K、$\varphi_0 R_f$、KR_f、γK、φ_0^2、$\varphi_0 K_b$、$\gamma\varphi_0$、KK_b、R_f^2、K^2、$\varphi_0 K$、γ^2、γK_b、K_b^2、$R_f K_b$、K_b，其中 R_f、φ_0、γ、γR_f 明显显著，K、$\varphi_0 R_f$、KR_f、γK 显著。

表 7　中心复合设计试验方案

方案	γ/(kN·m^{-3})	φ_0/(°)	K	R_f	K_b	V/mm	H_1/mm	H_2/mm
1	14.4	22.4	352	0.64	336	740.87	342.67	452.50
2	21.6	22.4	352	0.64	224	1 227.16	519.72	727.67
3	14.4	33.6	352	0.64	224	766.22	202.93	279.92
4	21.6	33.6	352	0.64	336	714.61	261.53	353.17
5	14.4	22.4	528	0.64	224	858.56	268.09	369.79
6	21.6	22.4	528	0.64	336	837.03	339.53	476.21
7	14.4	33.6	528	0.64	336	512.77	136.59	189.13
8	21.6	33.6	528	0.64	224	901.41	169.65	257.16
9	14.4	22.4	352	0.96	224	2 003.15	866.92	1 254.75
10	21.6	22.4	352	0.96	336	4 867.27	1 287.13	4 588.97
11	14.4	33.6	352	0.96	336	1 327.81	354.29	454.54
12	21.6	33.6	352	0.96	224	2639.50	834.79	2 086.92
13	14.4	22.4	528	0.96	336	1318.21	509.43	769.14
14	21.6	22.4	528	0.96	224	4 472.15	1 429.97	2 074.24
15	14.4	33.6	528	0.96	224	1236.61	270.09	371.94
16	21.6	33.6	528	0.96	336	1 522.11	356.68	467.05
17	10.8	28.0	440	0.80	280	659.98	231.95	315.79
18	25.2	28.0	440	0.80	280	1095.10	529.00	675.52
19	18.0	16.8	440	0.80	280	1 736.49	1 069.99	1 560.01
20	18.0	39.2	440	0.80	280	711.43	204.18	282.78
21	18.0	28.0	264	0.80	280	1 025.22	547.17	731.83
22	18.0	28.0	616	0.80	280	822.03	264.82	371.76
23	18.0	28.0	440	0.48	280	678.82	167.54	230.63
24	18.0	28.0	440	1.12	280	1 536.62	681.30	1194.71
25	18.0	28.0	440	0.80	168	1 269.43	398.50	548.95
26	18.0	28.0	440	0.80	392	707.10	312.40	427.41
27	18.0	28.0	440	0.80	280	883.93	344.64	481.48
28	18.0	28.0	440	0.80	280	883.93	344.64	481.48
29	18.0	28.0	440	0.80	280	883.93	344.64	481.48
30	18.0	28.0	440	0.80	280	883.93	344.64	481.48
31	18.0	28.0	440	0.80	280	883.93	344.64	481.48
32	18.0	28.0	440	0.80	280	883.93	344.64	481.48

表 8　垂直位移、向上游位移、向下游位移的方差分析

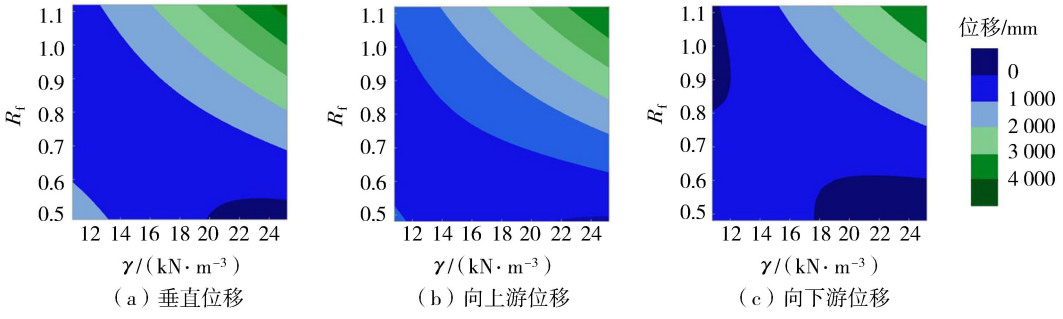
因素	F_i			因素	F_i		
	V	H_1	H_2		V	H_1	H_2
γ	9.07 *	37.16 **	14.47 **	$\gamma\varphi_0$	3.26	5.98 *	3.72
φ_0	8.06 *	102.00 **	19.38 **	γK	0.10	0	5.24 *
K	0.97	14.16 **	8.83 *	γR_f	7.32 *	16.96 **	12.80 **
R_f	22.25 **	101.46 **	29.63 **	γK_b	0.02	1.36	0.50
K_b	1.21	6.05 *	0	$\varphi_0 K$	0	0.44	0.78
γ^2	0.75	0.95	0.51	$\varphi_0 R_f$	4.21	17.19 **	7.12 *
φ_0^2	2.60	21.37 **	4.51	$\varphi_0 K_b$	0.07	0.39	4.31
K^2	0.93	1.78	0.81	KR_f	0.60	0.91	6.55 *
R_f^2	1.85	2.55	2.05	KK_b	2.91	2.63	2.67
K_b^2	1.22	0.38	0.47	$R_f K_b$	0.02	4.57	0.16

因为 γR_f、$\varphi_0 R_f$、$\gamma\varphi_0$ 参数之间对于大坝位移有显著的交互作用，以下通过绘制等值线图（图 5～7）做进一步分析。

由图 5 可知，当保持 $\varphi_0=28°$，$K=440$，$K_b=280$ 时，在 γ 处于高水平时，V、H_1、H_2 随着 R_f 的增大而增大且等值线密集，说明此时 R_f 的变化对 V、H_1、H_2 的变化影响更加显著，显著性随着 γ 的减小而减弱；在 R_f 处于高水平时，V、H_1、H_2 随着 γ 的增大而增大且等值线密集，说明此时 γ 的变化对 V、H_1、H_2 的变化影响更加显著，显著性随着 R_f 的减小而减弱。除此之外，可以发现，云图呈弧度过渡，而不是简单的线性过渡，这进一步说明 γ 与 R_f 之间存在一定的交互作用，且共同影响 V、H_1、H_2 的变化。

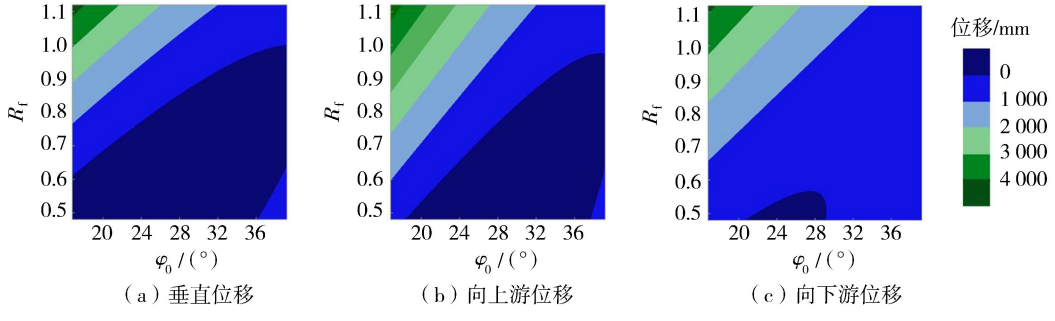
由图 6 可知，当保持 $\gamma=18\ \mathrm{kN/m^3}$，$K=440$，$K_b=280$ 时，在 φ_0 处于低水平时，R_f 的变化对 V、H_1、H_2 的变化影响更加显著，显著性随着 φ_0 的增大而减弱；在 R_f 处于高水平时，φ_0 的变化对 V、H_1、H_2 的变化影响更加显著，显著性随着 R_f 的减小而减弱。φ_0 与 R_f 之间存在一定的交互作用，且共同影响 V、H_1、H_2 的变化。

由图 7 可知，当保持 $R_f=0.8$，$K=440$，$K_b=280$ 时，在 γ 处于高水平时，φ_0 的变化对 V、H_1、H_2 的变化影响更加显著，显著性随着 γ 的减小而减弱；在 φ_0 处于低水平时，γ 的变化对 V、H_1、H_2 的变化影响更加显著，显著性随着 φ_0 的增大而减弱。γ 与 φ_0 之间存在一定的交互作用，且共同影响 V、H_1、H_2 的变化。



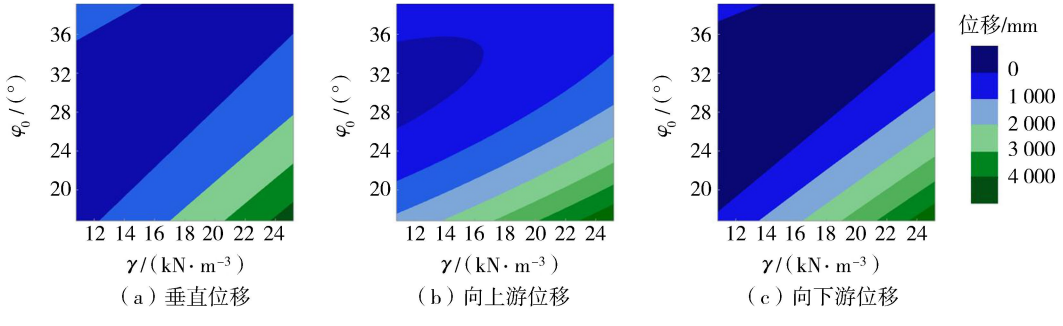
（a）垂直位移　（b）向上游位移　（c）向下游位移

图 5　γR_f 位移等值线（$\varphi_0=28°$，$K=440$，$K_b=280$）



（a）垂直位移　（b）向上游位移　（c）向下游位移

图 6　$\varphi_0 R_f$ 位移等值线（$\gamma=18\ \mathrm{kN/m^3}$，$K=440$，$K_b=280$）



（a）垂直位移　（b）向上游位移　（c）向下游位移

图 7　$\gamma\varphi_0$ 位移等值线（$R_f=0.8$，$K=440$，$K_b=280$）

4 结 论

a. 整体来看,该均质黄土坝的变形分布符合一般规律:在竣工期坝体水平位移分布近似关于坝轴线呈对称分布。在运行期坝体蓄水后,在坝体自重和上游水压力的共同作用下,水平位移分布规律由对称分布逐渐向下游变形,垂直位移呈现均匀下降趋势。

b. 8 个参数中对土坝变形影响较为显著的 5 个参数为 R_f、γ、φ_0、K_b、K。R_f、γ、φ_0 是对大坝位移敏感性最强的 3 个参数,γR_f、$\varphi_0 R_f$、$\gamma\varphi_0$ 参数之间的交互作用对于大坝位移的敏感性也不可忽视。

c. 当 R_f 位于高水平时,γ 和 φ_0 的变化对 V、H_1、H_2 的变化影响更加显著;当 γ 位于高水平时,R_f 和 φ_0 的变化对 V、H_1、H_2 的变化影响更加显著;当 φ_0 位于低水平时,R_f 和 γ 的变化对 V、H_1、H_2 的变化影响更加显著。

参考文献:

[1] 袁俊平,邱豪磊,胡有方,等. 土石坝力学参数反演技术研究进展与展望[J]. 水利水电科技进展,2021,41(3):1-10. (YUAN Junping, QIU Haolei, HU Youfang, et al. Research progress and prospects on inversion technology of mechanical parameters for earth-rockfill dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(3):1-10. (in Chinese))

[2] 朱安龙,张胤,廖洁,等. 大角度折线型高面板堆石坝坝体和面板的应力与变形规律[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):48-55. (ZHU Anlong, ZHANG Yin, LIAO Jie, et al. Research on stress and deformation law of dam body and face slab of high concrete face rockfill dam with large angle broken line[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(1):48-55. (in Chinese))

[3] 程展林,潘家军. 土石坝工程领域的若干创新与发展[J]. 长江科学院院报,2021,38(5):1-10. (CHENG Zhanlin, PAN Jiajun. Some innovations and developments in the field of earth-rock dam engineering[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2021,38(5):1-10. (in Chinese))

[4] 赵晓龙,朱俊高,王平. 两种本构模型的土石坝应力变形分析比较[J]. 中国农村水利水电,2018(1):165-169. (ZHAO Xiaolong, ZHU Jungao, WANG Ping. A comparison of two constitutive models in stress and deformation analysis of earth rockfill dams[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(1):165-169. (in Chinese))

[5] 黄焜,蔡德所,涂小龙. 猴子岩超高面板堆石坝应力和位移非线性有限元分析[J]. 水电能源科学,2018,36(5):57-60. (HUANG Kun, CAI Desuo, TU Xiaolong. Nonlinear finite element analysis of stress and displacement of Houziyan high concrete face rockfill dam[J]. Water Resources and Power,2018,36(5):57-60. (in Chinese))

[6] 汪天飞,徐青. 基于邓肯-张模型的堆石坝有限元分析[J]. 中国农村水利水电,2016(10):151-155. (WANG Tianfei, XU Qing. Finite element analysis of rock-filled dams based on Duncan-Chang model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(10):151-155. (in Chinese))

[7] 姜海波. 复合土工膜心墙与斜墙高土石坝应力应变研究[J]. 长江科学院院报,2014,31(1):53-57. (JIANG Haibo. Stress and strain of high earth-rock dam with composite geomembrane core-wall and inclined-wall[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014,31(1):53-57. (in Chinese))

[8] 马春景,姜谙男,白冰,等. 三轴试验确定邓肯-张模型参数及其在 $FLAC^{3D}$ 中的应用[J]. 大连海事大学学报,2014,40(4):113-118. (MA Chunjing, JIANG Annan, BAI Bing, et al. Method of determining parameters of Duncan-Chang model based on triaxial test and its application in $FLAC^{3D}$[J]. Journal of Dalian Maritime University,2014,40(4):113-118. (in Chinese))

[9] 陈家琦,岑威钧,李邓军,等. 基于改进 ACMPSO 并行算法的土石坝本构参数反演[J]. 水利水电科技进展,2021,41(3):66-71. (CHEN Jiaqi, CEN Weijun, LI Dengjun, et al. Inversion of constitutive parameters of earth-rock dams based on improved ACMPSO parallel algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(3):66-71. (in Chinese))

[10] 陆周祺. 基于免疫遗传算法的堆石坝流变反演分析[J]. 人民长江,2019,50(4):194-200. (LU Zhouqi. Back analysis on rheological deformation of core rockfill dam based on Immune Genetic Algorithm[J]. Yangtze River,2019,50(4):194-200. (in Chinese))

[11] 贾宇峰,朱茂林,迟世春. 基于变异粒子群算法的大坝土料流变参数反演:以观音岩混合坝为例[J]. 人民长江,2017,48(14):73-78. (JIA Yufeng, ZHU Maolin, CHI Shichun. Back-analysis of creep deformation parameters of Guanyinyan composite dam based on parallel mutation particle swarm optimization[J]. Yangtze River,2017,48(14):73-78. (in Chinese))

[12] 周邠鹏,柴军瑞,雷艳. 黑河金盆水库坝区三维渗控效应评价与材料参数敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(1):207-215. (ZHOU Binpeng, CHAI Junrui, LEI Yan. Simulation of seepage control effect and sensitivity analysis of material parameters at dam site of Heihe Jinpen Reservoir[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(1):207-215. (in Chinese))

(下转第 81 页)

[J]. 计算机研究与发展,2013,50(9):1799-1804. (YU Kai, JIA Lei, CHEN Yuqiang, et al. Deep learning: yesterday, today, and tomorrow[J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50(9): 1799-1804. (in Chinese))

[6] BENGIO Y, SIMARD P, FRASCONI P. Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994, 5(2): 157-166.

[7] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.

[8] 周松林,茆美琴,苏建徽. 基于主成分分析与人工神经网络的风电功率预测[J]. 电网技术,2011,35(9):128-132. (ZHOU Songlin, MAO Meiqin, SU Jianhui. Prediction of wind power based on principal component analysis and artificial neural network[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 128-132. (in Chinese))

[9] 黄耀英,丁月梅,吕晓曼, 等. 闸墩混凝土结构温控防裂措施智能优选研究[J]. 中国工程科学,2014,16(3):59-63. (HUANG Yaoying, DING Yuemei, LYU Xiaoman, et al. Intelligent optimization of temperature control and crack prevention measures for sluice pier concrete structure[J]. Engineering Sciences, 2014, 16(3): 59-63. (in Chinese))

[10] 傅德印. 主成分分析中的统计检验问题[J]. 统计教育,2007(9):4-7. (FU Deyin. Statistical testing problems in principal component analysis[J]. Statistical Education, 2007(9): 4-7. (in Chinese))

[11] 蒋昂波,王维维. ReLU 激活函数优化研究[J]. 传感器与微系统,2018,37(2):50-52. (JIANG Angbo, WANG Weiwei. Research on optimization of ReLU activation function[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018, 37(2): 50-52. (in Chinese))

[12] 欧斌,吴邦彬,袁杰, 等. 基于 LSTM 的混凝土坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):21-26. (OU Bin, WU Bangbin, YUAN Jie, et al. LSTM-based deformation prediction model of concrete dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 21-26. (in Chinese))

[13] 公丽艳,孟宪军,刘乃侨, 等. 基于主成分与聚类分析的苹果加工品质评价[J]. 农业工程学报,2014,30(13):276-285. (GONG Liyan, MENG Xianjun, LIU Naiqiao, et al. Evaluation of apple quality based on principal component and hierarchical cluster analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(13): 276-285. (in Chinese))

[14] KINGMA D P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization[C]//International Conference on Learning Representations. Ithaca: NYarXiv, 2014.

(收稿日期:2022-05-26　编辑:骆超)

(上接第 50 页)

[13] 陈志波,朱俊高. 两河口心墙堆石坝应力变形及参数敏感性三维有限元分析[J]. 福州大学学报(自然科学版),2010,38(6):893-899. (CHEN Zhibo, ZHU Jungao. Three-dimensional finite element analysis on stress-strain and materials parameters sensibility of Lianghekou core rockfill dam[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2010, 38(6): 893-899. (in Chinese))

[14] 李火坤,王刚,魏博文,等. 基于敏感性分析与粒子群算法的拱坝原型动弹性模量反演方法[J]. 水利学报,2020,51(11):1401-1411. (LI Huokun, WANG Gang, WEI Bowen, et al. Inversion of prototype dynamic elastic modulus of arch dam based on sensitivity analysis and particle swarm optimization[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(11): 1401-1411. (in Chinese))

[15] 李炎隆,张敬华,张再望,等. 基于正交试验法的高模量区 E-B 模型参数敏感性分析[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):34-38. (LI Yanlong, ZHANG Jinghua, ZHANG Zaiwang, et al. Sensitivity analysis of E-B model parameters in high modulus zone based on orthogonal test method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1): 34-38. (in Chinese))

[16] 陈辉,刘东海,戚蓝. 改进的堆石坝变形计算参数敏感性分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):406-412. (CHEN Hui, LIU Donghai, QI Lan. Improved sensitivity analysis method for calculating the deformation parameters of the rock-fill dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 406-412. (in Chinese))

[17] MARA T A, TARANTOLA S. Application of global sensitivity analysis of model output to building thermal simulations[J]. Building Simulation, 2008, 1(4): 290-302.

[18] 何为,薛卫东,唐斌. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京:化学工业出版社,2012.

[19] 赵胜利. 正规部分因子设计的最优性理论与构造方法[J]. 应用概率统计,2015,31(3):320-336. (ZHAO Shengli. The optimality theories and construction methods on regular fractional factorial designs[J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 2015, 31(3): 320-336. (in Chinese))

[20] 闵亚能. 实验设计(DOE)应用指南[M]. 北京:机械工业出版社,2011.

(收稿日期:2022-05-25　编辑:俞云利)