

基于正交试验法的高模量区 $E-B$ 模型参数敏感性分析

李炎隆¹, 张敬华¹, 张再望², 刘云贺¹

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;
2. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安 710075)

摘要:为研究高模量区 $E-B$ 模型参数对超高镶嵌面板堆石坝有限元计算结果的影响, 基于正交试验法, 以超高镶嵌面板堆石坝高模量区模型参数为因素, 进行各因素对坝体沉降 u_3 、面板挠度 w 及顺坡向应力 σ 的敏感性分析。结果表明, 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, 对计算结果影响程度显著, 而弹性模量基数 K 、弹性模量指数 n 等参数的敏感性较低, 对计算结果影响程度不显著。因此, 选取 $E-B$ 模型计算参数时, 可对敏感性高的参数进行反演以节约计算成本, 而敏感性低的模型参数可采用工程类比等方法确定, 以实现保证计算精度的前提下提高计算效率的目的。

关键词: 超高镶嵌面板坝; 高模量区; 正交试验法; 敏感性分析

中图分类号: TV461.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2019)01-0034-05

Sensitivity analysis of $E-B$ model parameters in high modulus zone based on orthogonal test method//LI Yanlong¹, ZHANG Jinghua¹, ZHANG Zaiwang², LIU Yunhe¹ (1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: The influence of $E-B$ model parameters in high modulus zone on the finite element calculation results of ultra-high inlaid concrete faced rockfill dam is investigated in the present study. Based on the orthogonal test, the model parameters of the high modulus zone of the ultra-high inlaid concrete faced rockfill dam are taken as the main reference variables and their sensitivity on the dam settlement u_3 , panel deflection w and slope stress σ has been analyzed. The results show that the bulk modulus radix K_b , internal friction angle φ and the bulk modulus index m have higher sensitivity, indicating a higher impact on the calculation result. However, the elasticity modulus K and the elasticity modulus index n have lower sensitivity relatively and the calculation result is less influenced. Thus, parameters of $E-B$ model with high sensitivity should be taken as the main target in the inversion analysis to save the computational cost, and other parameters can be determined via engineering analogy. As a result, the purpose of improving the calculation efficiency under the premise of accuracy can be achieved.

Key words: ultra-high inlaid concrete faced rockfill dam; high modulus zone; orthogonal test method; sensitivity analysis

从引进、消化、吸收到创新,我国在面板堆石坝的建设方面已取得了长足进步,混凝土面板堆石坝越建越高,如规划中的茨哈峡(257.5 m)、马吉(277.5 m)等面板堆石坝坝高都在250~300 m之间。对于300 m级超高面板堆石坝的建设,其关键性难题是堆石体变形的控制与面板的防裂^[1]。在常规面板堆石坝上游底部位置设置坝踵混凝土结构,可对面板起到支撑作用,这种坝型称作镶嵌面板坝。相关研究表明^[2],镶嵌面板坝的结构形式可有效地改善堆石体及面板的应力变形,同时,坝踵混凝土

结构的应力变形也能满足其混凝土强度要求。

为了进一步改善堆石体及面板的应力变形特性,笔者将堆石体局部区域设为高模量区,而高模量区参数的合理选择,对镶嵌面板坝工程的设计、施工和运行管理具有深远的意义^[3]。因此,开展高模量区材料参数的敏感性分析十分必要。目前,敏感性分析的常用方法有单因素法及多因素法,针对堆石体材料,王玉赞等^[4]基于单因素敏感性分析法,进行了沈珠江模型拟合参数 c_1 、 c_2 、 c_4 、 c_5 对混凝土面板堆石坝地震残余变形的敏感性分析,结果表明参

数 c_4 、 c_5 对坝体残余变形影响较大,参数 c_1 、 c_2 影响程度较小。李炎隆等^[5]基于正交试验法,进行了堆石料模型参数对堆石体竖向位移及上下游水平位移的敏感性分析。陈辉等^[6]基于双判别方式的正交试验方法,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。以上学者针对堆石体材料参数的敏感性问题开展了一系列研究工作,是本文研究的理论基础。本文旨在研究局部高模量区材料参数对坝体结构应力变形的敏感性,为高模量区材料参数的选取提供依据。拟以超高镶嵌面板坝高模量区的邓肯-张($E-B$)模型参数为对象,基于正交试验法,设计试验方案,并对各组试验方案进行有限元计算,采用极差及方差分析方法对有限元计算结果进行对比分析,得出高模量区各模型参数对坝体沉降、面板挠度及顺坡向应力的敏感性影响程度。

1 高模量区设计理念

混凝土面板在承担向下游堆石体传递水压力的同时还兼具大坝防渗的重任^[7],而从目前国内外已修建的面板堆石坝工程来看,面板开裂的情况普遍存在,个别大坝还相当严重^[8-9],究其原因,主要是由于堆石体应力变形过大引起。为了解决面板开裂的问题,陆希等^[2]提出了镶嵌组合坝的方案,此方案能明显改善面板的应力变形及其分布规律。周恒等^[10]研究表明,提高砂砾石料弹性模量基数 K 及体积模量基数 K_v ,能够有效地控制坝体的应力变形。因此,笔者在镶嵌坝的基础上,在堆石体内另设置一高模量区,以控制堆石体应力变形,并改善面板的开裂问题。

大量研究成果表明,混凝土面板堆石坝坝体变形最大值一般出现在 $1/2$ 坝高处,因此,在面板堆石坝上游中部位置设置高模量区,其目的在于减小堆石体变形,进而达到减小面板挠度的目的。但由于高模量区模型参数众多,且参数取值的合理性直接

关乎计算结果的准确性,而反演分析相对复杂,因此,对高模量区模型参数进行敏感性分析,得出各模型参数对指标的敏感性大小,可为获得精确参数提供依据,从而提高计算效率。

2 工程算例

2.1 工程概况

假定大坝建在新鲜完整的基岩上,建基面高程为 0 m ,坝顶高程为 260 m ,坝顶宽度为 15 m ,最大坝高为 260 m 。防浪墙墙高 5.2 m ,采用整体式结构。坝体上游坝坡 $1:1.6$,坝体下游坝坡 $1:1.8$ 。钢筋混凝土面板顶部厚度为 0.35 m ,底部最大计算厚度为 0.93 m 。

坝体由主堆石区、坝踵混凝土结构和堆石体的高模量区组成。坝踵混凝土结构高 90 m ,顶宽 9 m 。高模量区起始高程为 60 m ,高 80 m ,顶部沿坝轴线坡度为 $1:1$ 。高模量区材料 K 、 K_v 值较主堆石区相应参数取值提高 40% ,其他参数取值不变。坝体标准剖面及分区见图 1。

2.2 有限元计算模型及计算参数

2.2.1 有限元计算模型

根据该工程的混凝土面板堆石坝标准剖面建立有限元模型(图 2),计算坐标系如下:顺水流方向为 x 轴方向,以向下游为正;坝轴线方向为 y 轴方向,以向右岸为正;铅直方向为 z 轴方向,以向上为正;坐标原点位于左岸坝轴线堆石体底部。地基计算范围为:沿水流方向向上、下游分别延伸 260 m (1 倍坝高),沿深度方向亦延伸 260 m ,取河床部位 3 块面板坝段进行研究,假定每块面板宽度为 10 m ,因此大坝厚度方向取 30 m 。有限元模型采用空间六面体八节点单元剖分。

2.2.2 计算参数

堆石体材料模型均采用 $E-B$ 模型,材料参数由新疆大石峡面板砂砾石坝工程类比确定^[11],如表 1 所示。表中参数 ρ 、 n 、 R_f 、 φ 、 $\Delta\varphi$ 、 m 依次为密度、弹性

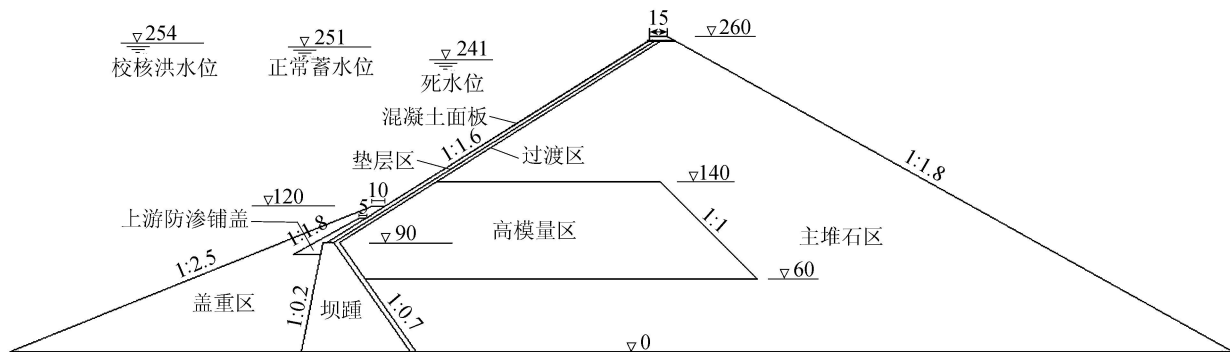


图 1 设置高模量区镶嵌面板堆石坝标准剖面(单位:m)

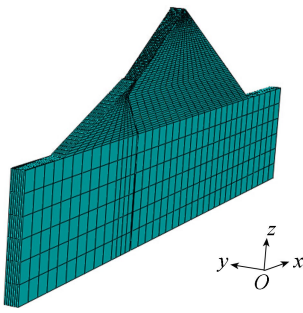


图2 镶嵌面板堆石坝有限元模型

模量指数、破坏比、内摩擦角、围压增加一个对数周期下内摩擦角的减小值和体积模量指数。

表1 筑坝材料 E-B 模型参数

分区	$\rho/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	K	n	R_f	$\varphi/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	K_b	m
垫层区	2.31	920.20	0.29	0.67	49.3	5.9	560.20	0.30
过渡区	2.27	1294.10	0.32	0.74	50.1	6.3	725.50	0.34
主堆石区	2.26	1104.40	0.34	0.69	49.1	5.4	650.40	0.16
高模量区	2.26	1546.16	0.34	0.69	49.1	5.4	910.56	0.16

混凝土面板、防浪墙及趾板材料均采用 C35 混凝土,坝踵混凝土结构采用 C25 混凝土。混凝土面板、坝踵混凝土结构、防浪墙、趾板及基岩均假定为线弹性材料。

在混凝土面板与堆石体、坝踵混凝土结构与堆石体之间设置接触面,接触单元选择无厚度 goodman 单元模型,模型参数见表 2。表中参数 K_1 、 K_2 、 n_1 、 R_f 为非线性指标。 K_1 、 K_2 为接触面两个方向上摩擦力的剪切模量系数; n_1 为剪切模量指数,由试验确定; δ 为接触面的界面摩擦角; γ_w 为水的容重; P_a 为大气压。面板与趾板、面板与面板、面板与防浪墙之间设置摩擦接触,摩擦因数均取 0.35。

表2 Goodman 单元模型参数

接触面	K_1	K_2	n_1	R_f	$\delta/$ ($^\circ$)	$\gamma_w/$ ($kN \cdot m^{-3}$)	$P_a/$ kPa
坝踵混凝土与堆石体	2000	2000	0.56	0.75	36	9.8	100
面板与堆石体	2000	2000	0.56	0.75	36	9.8	100

2.3 加载过程

a. 施工期:坝体施工荷载采用逐级加载方式,共分 40 级,其中第 1 级模拟基岩;第 2~10 级浇筑坝踵混凝土结构至 90 m 高程;第 11~19 级填筑坝踵上、下游两侧堆石体至 90 m 高程;第 20~36 级全断面填筑堆石体至 256 m 高程;第 37 级浇筑趾板;第 38 级浇筑面板;第 39 级填筑面板上游侧堆石体 90~120 m 高程;第 40 级浇筑防浪墙。堆石体的高模量区只替换材料参数,加载次序与主堆石体加载次序一致。

b. 蓄水期:考虑正常蓄水位以下水荷载作用在坝踵混凝土结构和面板上,蓄水期分 3 级蓄至正常蓄水位 251 m 高程。

2.4 正交试验设计

正交试验法是一种科学设计多因素、多水平的试验,并采用统计学方法分析试验结果^[12]。正交试验法在不影响试验效果的基础上减小试验次数,已在科学试验中得到广泛应用。在正交试验中,“指标”为考察的对象,“因素”是可能对指标产生影响的参数,而在具体试验设计中各因素的不同取值为“水平”。

2.4.1 试验指标

堆石体在自重和水荷载作用下,考虑到高模量区对坝体铅直位移影响较大,同时考虑到面板挠度和顺坡向应力过大是引起面板开裂的主要原因,因此选取坝体最大铅直位移 u_3 、面板最大挠度 w 和最大顺坡向应力 σ 作为参数敏感性分析的主要试验指标。

2.4.2 试验因素和水平

E-B 模型共有 10 个参数: K 、 n 、 R_f 、 φ 、 $\Delta\varphi$ 、 K_b 、 m ,以及黏聚力 c 、卸载再加荷时的弹性模量基数 K_{ur} 和弹性模量指数 n_{ur} ,但由于堆石坝在填筑过程及蓄水过程中,堆石区处于加荷状态,模型参数中的 K_{ur} 和 n_{ur} 不参与计算,并且堆石料为散粒体材料, c 可按零考虑,因此,进行敏感性分析的试验因素为 K 、 n 、 R_f 、 φ 、 $\Delta\varphi$ 、 K_b 、 m 。

本文设 3 个试验水平,通过工程类比确定各基础参数,并分别乘以 1.2 和 0.8,作为各参数正交试验的不同因素水平,具体取值如表 3 所示。

表3 正交试验不同因素水平取值

因素水平	K	n	R_f	$\varphi/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	K_b	m
1	1236.93	0.27	0.55	39.28	4.32	728.45	0.13
2	1546.16	0.34	0.69	49.10	5.40	910.56	0.16
3	1855.39	0.41	0.83	58.92	6.48	1092.67	0.19

2.5 正交试验表及计算结果

本文选择 $L_{18}(2 \times 3^7)$ 正交表设计正交试验,由于只有 7 个试验因素,故将第 1 列设为空列,第 1 列不参与计算分析,并将各因素的不同水平对应填入。假定各试验因素之间无相互作用,将各试验因素随机填入正交表后 7 列,即可得到对应的正交试验表,并分别计算蓄水期坝体最大铅直位移 u_3 、面板最大挠度 w 和最大顺坡向拉应力 σ ,试验方案及试验结果见表 4。

表4 正交试验方案及试验结果

方案	因素水平	K	n	R_f	$\varphi/(\circ)$	$\Delta\varphi/(\circ)$	K_b	m	u_3/cm	w/cm	σ/MPa
1	1	1236.93	0.27	0.55	39.28	4.32	728.45	0.13	-226.32	-112.89	-5.65
2	1	1236.93	0.34	0.69	49.10	5.40	910.56	0.16	-199.58	-97.08	-3.87
3	1	1236.93	0.41	0.83	58.92	6.48	1092.67	0.19	-189.79	-86.43	-3.43
4	1	1546.16	0.27	0.55	49.10	5.40	1092.67	0.19	-191.28	-94.74	-3.14
5	1	1546.16	0.34	0.69	58.92	6.48	728.45	0.13	-205.29	-99.17	-6.63
6	1	1546.16	0.41	0.83	39.28	4.32	910.56	0.16	-205.72	-105.34	-5.60
7	1	1855.39	0.27	0.69	39.28	6.48	910.56	0.19	-202.03	-112.28	-3.73
8	1	1855.39	0.34	0.83	49.10	4.32	1092.67	0.13	-194.82	-81.10	-7.37
9	1	1855.39	0.41	0.55	58.92	5.40	728.45	0.16	-202.91	-95.32	-5.62
10	2	1236.93	0.27	0.83	58.92	5.40	910.56	0.13	-201.46	-87.18	-5.64
11	2	1236.93	0.34	0.55	39.28	6.48	1092.67	0.16	-195.64	-96.92	-3.73
12	2	1236.93	0.41	0.69	49.10	4.32	728.45	0.19	-205.66	-101.11	-5.83
13	2	1546.16	0.27	0.69	58.92	4.32	1092.67	0.16	-192.73	-79.32	-6.59
14	2	1546.16	0.34	0.83	39.28	5.40	728.45	0.19	-222.76	-118.48	-6.08
15	2	1546.16	0.41	0.55	49.10	6.48	910.56	0.13	-197.97	-84.15	-7.53
16	2	1855.39	0.27	0.83	49.10	6.48	728.45	0.16	-209.93	-92.57	-8.70
17	2	1855.39	0.34	0.55	58.92	4.32	910.56	0.19	-196.41	-87.72	-4.27
18	2	1855.39	0.41	0.69	39.28	5.40	1092.67	0.13	-194.72	-101.68	-3.88

3 正交试验结果分析

3.1 极差分析法

在极差分析法中,通过极差 R_j 的大小来判断因素的敏感性程度,即因素水平的改变对试验指标的影响程度,极差越大,说明该因素水平的改变对试验指标影响越大^[13]。极差通过因素在各水平下的统计参数 K_{ij} 计算而来^[14-15]:

$$K_{ij} = \frac{1}{p_{ij}} \sum_{k=1}^{p_{ij}} Y_k - \bar{Y} \quad (1)$$

$$R_j = \max\{K_{1j}, K_{2j}, \dots\} - \min\{K_{1j}, K_{2j}, \dots\} \quad (2)$$

式中: K_{ij} 为因素 j 在 i 水平下各次试验结果平均值; p_{ij} 为因素 j 在 i 水平下的试验次数; Y_k 为第 k 个试验指标值; \bar{Y} 为所有试验结果的平均值。

3.1.1 坝体最大铅直位移的影响因素分析

采用极差分析法,对正交试验结果汇总表中 u_3 这列各方案结果进行处理,见表5。由表5可知,各参数关于 u_3 的敏感性程度由高到低依次为 K_b 、 φ 、 n 、 R_f 、 $\Delta\varphi$ 、 K 、 m 。

表5 u_3 影响因素极差分析

因素	K	n	R_f	$\varphi/(\circ)$	$\Delta\varphi/(\circ)$	K_b	m
K_{1j}	-1.13	-2.01	0.19	-5.92	-1.66	-10.20	-1.48
K_{2j}	-0.68	-0.47	1.94	2.07	-0.17	1.42	0.86
K_{3j}	1.81	2.48	-2.13	3.85	1.84	8.78	0.62
R_j	2.94	4.49	4.07	9.77	3.50	18.98	2.34

3.1.2 面板最大挠度的影响因素分析

采用极差分析法,对正交试验结果汇总表中 w 这列各方案结果进行处理,结果如表6所示。由表6可知,各参数关于 w 的敏感性程度由高到低依次为 φ 、 K_b 、 m 、 $\Delta\varphi$ 、 R_f 、 K 、 n 。

表6 w 影响因素极差分析

因素	K	n	R_f	$\varphi/(\circ)$	$\Delta\varphi/(\circ)$	K_b	m
K_{1j}	-0.63	-0.19	1.01	-11.63	1.72	-6.95	1.94
K_{2j}	-0.56	-0.44	-2.14	4.51	-2.78	0.68	1.88
K_{3j}	1.19	0.63	1.12	7.11	1.05	6.27	-3.82
R_j	1.82	1.07	3.26	18.74	4.50	13.22	5.76

3.1.3 面板最大顺坡向拉应力的影响因素分析

采用极差分析法,对正交试验结果汇总表中 σ 这列各方案结果进行处理,结果如表7所示。由表7可知,各参数关于 σ 的敏感性程度由高到低依次为 K_b 、 m 、 φ 、 K 、 $\Delta\varphi$ 、 R_f 、 n 。

表7 σ 影响因素极差分析

因素	K	n	R_f	$\varphi/(\circ)$	$\Delta\varphi/(\circ)$	K_b	m
K_{1j}	0.71	-0.17	0.41	0.63	-0.48	-1.01	-0.71
K_{2j}	-0.52	0.08	0.32	-0.67	0.70	0.30	-0.28
K_{3j}	-0.19	0.09	-0.73	0.04	-0.22	0.71	0.99
R_j	1.23	0.26	1.14	1.30	1.18	1.72	1.70

从表5~7看出,对 u_3 、 w 、 σ 而言, K_b 、 φ 、 m 这3个参数的敏感性较高,对计算结果影响显著,而 K 、 n 、 R_f 、 $\Delta\varphi$ 对各指标的影响不显著,这4个参数敏感性较低。

3.2 方差分析法

极差分析可以直观地反映各因素的敏感性高低次序,但无法区分试验结果的波动到底是由因素水平变化引起的,还是由试验误差导致的,也没有一个明确的界限标准判定该因素是否敏感。因此,一方面为了区分因素水平变化与试验误差的影响,并明确指出该因素敏感性程度,另一方面对极差分析的结果进行进一步的对比验证,本文采用方差分析法对试验结果进行分析,其基本原理如下^[16]:

$$F_j = \frac{S_j/f_j}{S_e/f_e} \quad (3)$$

式中： F_j 为检验敏感性的统计量，反映了各因素水平变化对指标的影响程度； S_j 为因素的变动平方和； S_e 为误差的变动平方和； f_j 为各因素自由度； f_e 为试验误差自由度。

通过式(3)中的 F_j 值判断各因素对指标的敏感性程度。给出特定的检验水平置信度 α ，从 F 分布表中查找检验临界值 $F_\alpha(f_j, f_e)$ 。将各个因素的统计量 F_j 值与检验临界值 $F_\alpha(f_j, f_e)$ 进行比较，从而确定各因素的敏感性程度。

检验水平置信度选用 $\alpha=0.10$ 或 $\alpha=0.25$ ，在 F 分布表中查询可知， $F_{0.10}(2, 3) = 5.46$ ， $F_{0.25}(2, 3) = 2.28$ 。将计算所得 F_j 与之对比，以判断因素的显著水平。判断标准为：当 $F_j > F_{0.10}(2, 3)$ 时，该因素影响高度显著，敏感性高；当 $F_{0.10}(2, 3) \geq F_j \geq F_{0.25}(2, 3)$ 时，该因素影响一般显著，敏感性中等；当 $F_j < F_{0.25}(2, 3)$ 时，该因素影响不显著，敏感性低。

3.2.1 坝体最大铅直位移的影响因素分析

采用方差分析法，对正交试验结果汇总表中 u_3 这列各方案结果进行处理，结果如表 8 所示。由表 8 各因素 F_j 值可知，对 u_3 而言，参数敏感性由高到低依次为 K_b 、 φ 、 n 、 R_f 、 $\Delta\varphi$ 、 K 、 m ，其中 K_b 、 φ 对 u_3 的影响高度显著，敏感性高； n 、 R_f 、 $\Delta\varphi$ 、 K 、 m 对 u_3 的影响不显著，敏感性低。

表 8 u_3 影响因素方差分析

因素	误差	K	n	R_f	$\varphi/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	K_b	m
S_j	48.94	30.06	62.66	50.23	324.81	37.05	1098.99	20.00
f_j	3	2	2	2	2	2	2	2
F_j		0.92	1.92	1.54	9.96	1.14	33.68	0.61

3.2.2 面板最大挠度的影响因素分析

采用方差分析法，对正交试验结果汇总表中 w 这列各方案结果进行处理，结果如表 9 所示。根据表 9 中各因素 F_j 值判断，对 w 而言，参数敏感性由高到低依次为 φ 、 K_b 、 m 、 $\Delta\varphi$ 、 R_f 、 K 、 n ，其中 φ 、 K_b 对 w 的影响高度显著，敏感性高； m 对 w 的影响一般显著，敏感性中等； $\Delta\varphi$ 、 R_f 、 K 、 n 对 w 影响不显著，敏感性低。

表 9 w 影响因素方差分析

因素	误差	K	n	R_f	$\varphi/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	K_b	m
S_j	78.3	12.82	3.79	41.08	1237.04	70.69	528.86	131.50
f_j	3	2	2	2	2	2	2	2
F_j		0.25	0.07	0.79	23.70	1.35	10.13	2.52

3.2.3 面板最大顺坡向拉应力的影响因素分析

采用方差分析法，对正交试验结果汇总表中 σ 这列各方案结果进行处理，结果如表 10 所示。根据表 10 中各因素 F_j 值判断，对 σ 而言，参数敏感性由高到低依次为 K_b 、 m 、 φ 、 K 、 R_f 、 $\Delta\varphi$ 、 n ，其中 K_b 、 m 对 σ

的影响一般显著，敏感性中等； φ 、 K 、 R_f 、 $\Delta\varphi$ 、 n 对 σ 影响不显著，敏感性低。

综上可知，对指标 u_3 、 w 、 σ 而言， K_b 、 φ 、 m 这 3 个参数的敏感性较高，对计算结果影响程度显著，而 K 、 n 、 R_f 、 $\Delta\varphi$ 对各指标的影响不显著，这 4 个参数敏感性较低。从上述分析可知，通过方差分析得出的结论与极差分析所得出的结论一致。

表 10 σ 影响因素方差分析

因素	误差	K	n	R_f	$\varphi/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	K_b	m
S_j	4.73	4.91	0.26	4.85	5.05	4.61	9.76	9.41
f_j	3	2	2	2	2	2	2	2
F_j		1.56	0.08	1.54	1.60	1.46	3.09	2.98

4 结 语

本文基于正交试验法，对超高镶嵌面板坝高模量区的 $E-B$ 模型参数进行敏感性分析。通过有限元计算，对其结果进行极差和方差对比分析，得出以下结论：参数 K_b 、 φ 、 m 敏感性较高，对计算结果影响程度显著，而参数 K 、 n 、 R_f 、 $\Delta\varphi$ 敏感性较低，对计算结果影响程度不显著。在对 $E-B$ 模型参数进行反演分析时，可对敏感性高的参数进行反演以节约计算成本，敏感性低的模型参数可采用工程类比等简易方法确定，从而在保证计算精度的前提下，提高计算效率。本文的初步研究成果，可为 300 m 级超高面板坝本构参数的准确、快捷取值提供一种新思路。

参考文献：

- [1] 徐泽平. 超高混凝土面板堆石坝建设中的关键技术问题[J]. 水力发电, 2010, 36(1): 51-53. (XU Zeping. Key technical problems on the construction of super-high CFRD [J]. Water Power, 2010, 36(1): 51-53. (in Chinese))
- [2] 陆希, 徐宏璐. 镶嵌组合坝混凝土坝体结构体型探讨[J]. 西北水电, 2014(6): 30-33. (LU Xi, XU Honglu. Study on concrete dam structural outline of embedded composite dam [J]. Northwest Water Power, 2014(6): 30-33. (in Chinese))
- [3] 李炎隆, 张再望, 卜鹏, 等. 镶嵌面板坝高模量区优化设计研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(2): 358-364. (LI Yanlong, ZHANG Zaiwang, BU Peng, et al. The optimization design of high modulus zone to inlaid concrete faced rockfill dam [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(2): 358-364. (in Chinese))
- [4] 王玉赞, 迟世春, 邵磊, 等. 堆石料残余变形特性与参数敏感性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 856-862. (WANG Yuzan, CHI Shichun, SHAO Lei, et al. Residual deformation behavior of rock-fill materials and sensitivity analysis of parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 856-862. (in Chinese))

(下转第 45 页)