

文章编号:1673-9469(2024)01-0033-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.01.005

基于正交试验的土体动力等效线性模型参数敏感性分析

张富有¹,葛凯¹,周强强²,魏宇辰¹

(1. 河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210024;2. 中建中环生态环保科技有限公司,江苏 苏州 215000)

摘要: 针对土体材料具有不均匀性的特点,动力参数存在一定的不确定性问题,基于正交试验法,以一堰塞坝为例,采用等效线性模型,对堰塞坝坝体竖向地震峰值加速度和竖向永久变形进行了等效线性模型参数的敏感性分析。结果表明:动力模型中参数 k_2 、 n 、 λ_{\max} 对于坝体竖向地震峰值加速度的影响较大,其中 k_2 的敏感性最大,其次是 n ;参数 k_2 、 k_1 、 λ_{\max} 对坝体竖向永久变形的影响较大,其中 k_2 的敏感性最大,其次是 k_1 。

关键词: 正交试验法;地震作用;等效线性模型;敏感性分析

中图分类号:TU441

文献标识码:A

Parameter Sensitivity Analysis of Soil Dynamic Equivalent Linear Model Based on Orthogonal Tests

ZHANG Fuyou¹, GE Kai¹, ZHOU Qiangqiang², WEI Yuchen¹

(1. College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2. CSCEC Zhonghuan Ecological Environmental Protection Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000, China)

Abstract: In response to the non-uniformity of soil materials and the uncertainty of dynamic parameters, based on the orthogonal experimental method and taking a dam as an example, an equivalent linear model was used to analyze the sensitivity of equivalent linear model parameters to the vertical seismic peak acceleration and vertical permanent deformation of the dam body. The results indicate that the parameters k_2 , n , and λ_{\max} have significant impacts on the vertical seismic peak acceleration of the dam body, with k_2 being the most sensitive, followed by n . The parameters k_2 , k_1 , and λ_{\max} have significant impacts on the vertical permanent deformation of the dam body, with k_2 being the most sensitive, followed by k_1 .

Key words: orthogonal test method; seismic effects; equivalent linear model; sensitivity analysis

土体力学性质的研究在岩土工程领域具有重要意义,对于确保工程结构的安全性和可靠性至关重要。其中土体本构模型参数的敏感性分析是保证工程分析准确性的关键步骤。过去的研究主要集中在土体静力本构模型参数的敏感性分析上,而对土体动力本构模型参数的深入研究相对较少。在岩土工程静力分析中,邓肯-张模型是最常用的本构模型之一^[1-2],前人对其参数敏感性已有较多的研究。李炎隆等^[3]基于正交试验法对混凝土面板坝坝体的竖向位移和水平位移进行了邓肯-张 E-B 模型参数的敏感性分析,结果表明参数

K_b 、 φ_0 、 K 、 R_f 对坝体变形计算结果影响显著,而参数 m 、 n 、 $\Delta\varphi$ 对计算结果影响较小。陈斌等^[4]通过分解应力球量与应力偏量,导出了位移对参数偏导数的计算公式,并通过算例得出参数的敏感性与位移值的变化趋势相似的结论,且内粘聚力 c 敏感性最大,弹性模量系数 K 、破坏比 R_f 和内摩擦角 φ 也较敏感;而后又在文献[5]通过算例分析指出邓肯-张 E-B 模型参数对位移的敏感性除了考虑几何效应外,还应考虑荷载效应和自身取值效应的影响。邓成发等^[6]研究了邓肯-张 E-v 模型参数对基坑支护结构变形的敏感性,表明影响基坑

收稿日期:2023-08-15

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41977240)

作者简介:张富有(1972-),男,河南驻马店人,博士,副教授,研究方向:工程抗震及隔震减震。

支护结构变形的主要参数为 K 、 G 、 R_f 和 n 。在弹塑性模型方面,范益群等^[7]为研究弹塑性模型参数的位移敏感度,以 Drucker-Prager 准则为例将应力球量与应力偏量进行分解,导出一个有限元计算中位移对参数灵敏度的闭合形式公式。

在动力反应分析中,土体的动力模型目前常用的主要包括基于粘弹性理论^[8]的等效线性模型和基于弹塑性理论^[9-11]的非线性模型两种。等效线性方法通过不断迭代来近似地反映土体的非线性,不仅计算效率高、而且适用于大多数情况^[12-13]。在进行动力模型参数敏感性分析时,通常需要同时考虑多个试验因素,传统的参数敏感性分析方法只能考虑单因素对基准指标值的影响^[3],若进行全面试验,则试验的规模将很大,而正交试验则利用正交表选出最优水平组合进行分析,极大地减小了工作量。

堰塞坝坝体由滑坡体形成,其本身材料具有大粒径、宽级配、不均匀性等特点,动力参数存在一定的不确定性。因此本文以某堰塞坝为例,坝体和坝基材料静力模型采用邓肯 E-B 模型,动力模型采用等效线性模型,基于正交试验法,对堰塞坝坝体竖向地震峰值加速度和竖向永久变形进行等效线性模型参数的敏感性分析,这一研究旨在为土体等效线性模型参数的选取提供有针对性的参考,特别是在考虑动力因素不确定的情况下,对于提高工程分析的准确性和可靠性具有重要意义。

1 等效线性模型

土体等效线性模型^[14]由于计算效率高,在动力计算中广泛运用。它是由粘弹性理论发展而来,通过反复迭代计算近似反应土体的动力特性,其应力应变关系^[13]为

$$\tau = G\gamma + \eta_c \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中, G 为剪切模量, kPa; τ 为剪应力, kPa; γ 为剪应变; η_c 为剪切粘滞系数,按下式计算:

$$\eta_c = 2G\lambda/\omega \quad (2)$$

式中, ω 为圆频率, rad/s; G 和 λ 分别为土体的剪切模量和阻尼比,可以采用沈珠江^[15]提出的以下公式进行计算:

$$G = \frac{k_2}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} p_a \left(\frac{\sigma'_3}{p_a} \right)^n \quad (3)$$

$$\lambda = \lambda_{\max} \frac{k_1 \bar{\gamma}_d}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} \quad (4)$$

式中, σ'_3 是围压, kPa; k_1 、 k_2 和 n 是试验确定的材料参数; $\bar{\gamma}_d$ 为归一化的剪应变,可由地震过程中的最大动剪应变 $\gamma_{d\max}$ 计算:

$$\bar{\gamma}_d = 0.65 \gamma_{d\max} \left(\frac{\sigma'_3}{p_a} \right)^{n-1} \quad (5)$$

2 永久变形计算

对土石坝的永久变形,可以采用残余应变势模型计算。该方法通过静力计算得到九个应力分量以及动力计算得到最大动剪切应变,结合动三轴试验所得的残余应变结果,最终得到残余应变列向量。本文采用沈珠江模型^[13,15]计算土石料残余体积应变增量 $\Delta\varepsilon_v$ 及残余剪切应变增量 $\Delta\gamma$, 公式如下:

$$\Delta\varepsilon_v = c_1 (\gamma_d)^{c_2} \exp(-c_3 S_1^2) \frac{\Delta N}{1 + N} \quad (6)$$

$$\Delta\gamma = c_4 (\gamma_d)^{c_5} S_1^2 \frac{\Delta N}{1 + N} \quad (7)$$

式中, N 和 ΔN 分别为总振动次数与其时段增量; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 和 c_5 为 5 个试验参数。

3 等效线性模型参数的敏感性分析

以世界上首座堰塞坝综合水利枢纽工程为例,堰塞坝最大坝高 169 m,坝长 601.2 m。上下游蓄水高度分别为 133.7 和 49.3 m,混凝土防渗墙贯穿坝身到坝底。堰塞坝是由滑坡体改造而成,因此考虑坝体为一次性形成,不进行坝体分步填筑模拟。上游分 4 步蓄水至坝顶,坝体分区由堰塞体 1、堰塞体 2、滑坡体、河床 1、河床 2 组成。坝体横断面如图 1 所示,邓肯-张 E-B 模型材料参数、等效线性模型参数以及残余变形参数如表 1、表 2 和表 3 所示。坝底为岩土层,防渗墙采用混凝土材料,两者浮密度均为 1.5 g/cm³,弹性模量分别为 6.0 和 28 GPa,泊松比分别为 0.3 和 0.2。

工程区抗震设防烈度 7 度,且用于地震动力计算的地震波从岩石层底部输入,同时考虑顺河向、横河向和竖向三向输入,其加速度时程曲线如图 2 所示。

3.1 计算模型

采用 8 节点 6 面体单元对堰塞坝模型进行网格划分,共划分为 89 862 个单元,67 498 个节点,堰塞坝坝体网格划分如图 3 所示。混凝土防渗墙与坝体之间刚度差异显著,通过设置接触面进行

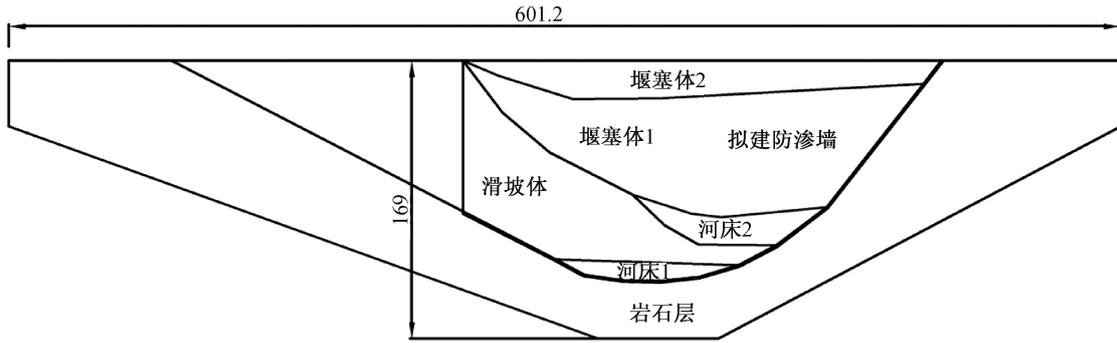


图 1 坝体横断面(单位:m)

Fig. 1 Dam cross section (unit: m)

表 1 邓肯-张 E-B 模型材料参数

Tab. 1 Material parameters of Duncan-Chang E-B model

材料	密度 ρ $/(g \cdot cm^{-3})$	破坏比 R_f	切线模量 系数 K	切线模量 指数 n	体积模量 系数 K_v	体积模量 指数 m	卸载模量 系数 K_{ur}	初始内摩 擦角 $\varphi_0/(^\circ)$	摩擦角差值 $\Delta\varphi/(^\circ)$
堰塞体 1	2.20	0.72	720	0.26	320	0.15	1 080	51.0	9.0
堰塞体 1	2.20	0.70	500	0.21	250	0.14	750	48.0	8.0
滑坡体	2.24	0.82	900	0.24	400	0.25	1 800	46.0	6.0
古河床 1	2.15	0.74	500	0.27	280	0.10	600	49.0	8.8
古河床 2	2.15	0.80	680	0.32	350	0.10	1 050	52.0	9.6

表 2 等效线性模型材料参数

Tab. 2 Material parameters of equivalent linear model

材料	试验参数 k_1	试验参数 k_2	试验参数 n	泊松比 ν	最大阻尼比 λ_{max}
堰塞体 1	16.20	3 759	0.38	0.32	0.100
堰塞体 1	16.20	3 759	0.38	0.32	0.100
滑坡体	18.63	4 357	0.41	0.33	0.115
河床 1	13.77	3 272	0.32	0.35	0.085
河床 2	13.77	3 272	0.32	0.35	0.085

表 3 残余变形材料参数

Tab. 3 Residual deformation material parameters

材料	试验参数				
	$c_1/\%$	c_2	c_3	$c_4/\%$	c_5
堰塞体 1	0.74	0.43	0	9.55	0.38
堰塞体 1	0.74	0.43	0	9.55	0.38
滑坡体	0.69	0.53	0	9.12	0.35
河床 1	0.56	0.42	0	8.25	0.40
河床 2	0.56	0.42	0	8.25	0.40

接触分析,实现防渗墙网格精细化划分。堰塞坝坝体分区如图 4 所示。

3.2 正交试验设计

正交试验是利用正交表来安排和分析多因素试验的设计方法,在工程中应用广泛^[16-19]。选取坝体竖向峰值加速度和竖向永久变形作为试验指标,对等效线性模型中的 k_1 、 k_2 、 n 、 ν 、 λ_{max} 5 个参数进行敏感性分析,并将坝体中的滑坡体作为正交

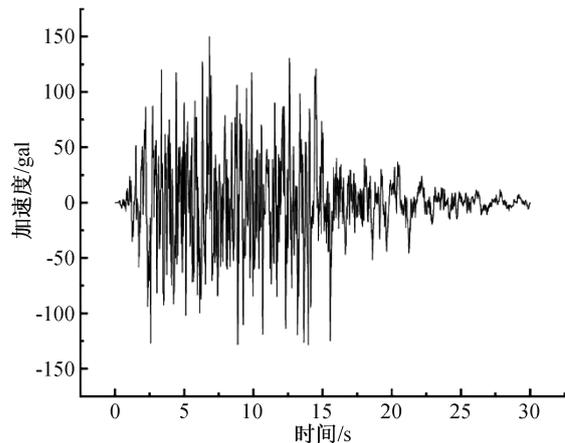


图 2 地震加速度时程曲线

Fig. 2 Seismic acceleration time history curve

试验分析的研究对象。以设计工况下(试验水平 2)的材料参数为基础,将试验水平 2 的材料参数(因素)向下浮动 20%作为试验水平 1,向上浮动 20%作为试验水平 3,总计 3 个试验水平。具体试



图3 堰塞坝坝体网格划分图

Fig.3 Diagram of dam body grid division of barrier dam

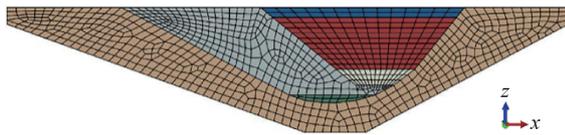


图4 堰塞坝坝体分区图

Fig.4 Partition diagram of dam body of barrier dam

验参数及其对应的因素水平取值见表4。表4中共5个试验因素,3水平试验,如将全部水平进行组合,共有243种试验方案;若进行全面实验工作量大,耗费时间长,因此本文设计了16种正交试验,将实验因素的取值随机分配到正交表中,以此来模拟全面实验。

3.3 试验结果分析

正交试验的具体方案如表5所示,表中的每一

表4 正交试验因素水平取值

Tab.4 Value of orthogonal test factor level

水平	因素				
	试验参数 k_1	试验参数 k_2	试验参数 n	泊松比 ν	最大阻尼比 λ_{max}
1	14.904	3 485.44	0.324 8	0.264	0.092
2	18.630	4 356.80	0.406 0	0.330	0.115
3	22.356	5 228.16	0.487 2	0.396	0.138

行代表一个试验方案,从A1到A16共16种试验方案;表中的1、2、3分别代表表4中各参数的3种取值方案。对各方案进行三维动力分析,整理考核指标坝体的最大加速度和竖向永久变形的计算结果,如表5所示。表中显示,方案A13坝体的加速度峰值最小,为 2.54 m/s^2 ;方案A10坝体的加速度峰值最大,为 4.80 m/s^2 ;方案A15坝体的竖向永久变形最小,为 45.1 cm ;方案A9坝体的竖向永久变形最大,为 47.34 cm 。将峰值加速度最大的方案A10坝体最大纵断面的竖向地震峰值加速度和横断面的永久变形等值线画出,如图5和图6所示,图中显示,最大纵断面坝体竖向峰值加速度最大值为 4.8 m/s^2 ,最大永久变形为 46.27 cm ,坝体加速度的分布规律符合一般土石坝的加速度反应规律。

表5 正交试验方案及试验结果

Tab.5 Orthogonal test scheme and test results

试验方案	试验方案编号					峰值加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	竖向永久 变形/cm
	试验参数 k_1	试验参数 k_2	试验参数 n	泊松比 ν	最大阻尼比 λ_{max}		
A1	1	2	3	1	2	2.83	47.14
A2	1	1	1	1	1	3.53	45.31
A3	1	1	2	3	1	4.57	46.14
A4	1	3	1	2	3	2.87	47.16
A5	1	3	2	1	2	2.73	46.74
A6	1	1	3	2	1	4.39	46.59
A7	1	1	1	1	1	3.53	45.31
A8	1	2	1	3	3	2.71	47.30
A9	2	2	2	2	1	2.70	47.34
A10	2	1	3	1	3	4.80	46.27
A11	2	3	1	1	1	2.60	47.07
A12	2	1	1	3	2	3.92	45.42
A13	3	3	3	3	1	2.54	46.17
A14	3	1	2	1	3	4.48	45.66
A15	3	1	1	2	2	3.87	45.10
A16	3	2	1	1	1	2.86	46.73

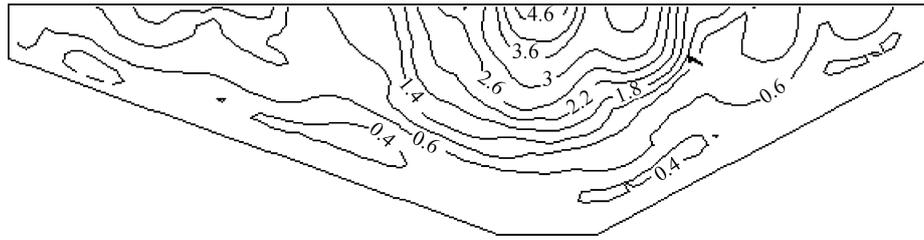


图 5 竖向峰值加速度(单位:m/s²)

Fig. 5 Vertical peak acceleration (unit: m/s²)

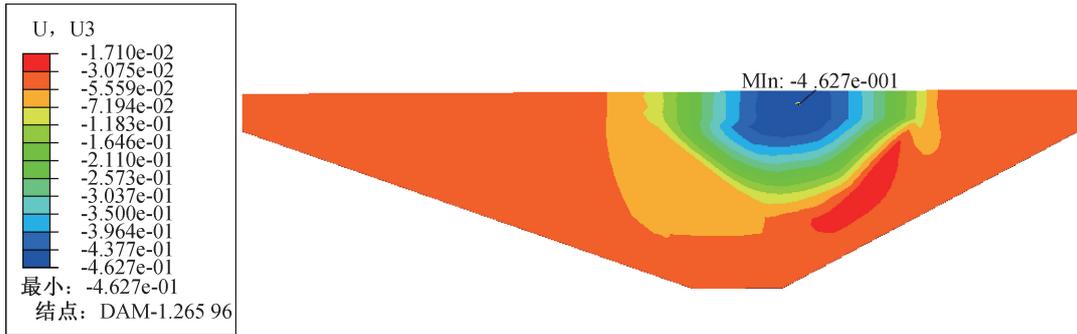


图 6 竖向永久变形(单位:m)

Fig. 6 Vertical permanent deformation (unit: m)

采用极差分析法,通过 SPSSAU 分别对 3 个试验水平的坝体竖向峰值加速度及永久变形进行分

析,结果如表 6、表 7 所示。表中 K_{jm} 为 j 因素所有 m 水平的试验指标值总和,将其除以表 5 中 j 因素

表 6 竖向加速度峰值影响因素极差分析结果

Tab. 6 Range analysis results of factors affecting the peak vertical acceleration

项	水平	试验参数 k_1	试验参数 k_2	试验参数 n	泊松比 v	最大阻尼比 λ_{max}
K_{jm}	1	27.16	33.09	25.90	27.36	26.72
	2	14.03	11.11	14.47	13.83	13.35
	3	13.74	10.73	14.56	13.74	14.86
\bar{K}_{jm}	1	3.40	4.14	3.24	3.42	3.34
	2	3.51	2.78	3.62	3.46	3.34
	3	3.44	2.68	3.64	3.43	3.71
最佳水平		2	1	3	2	3
R_j		0.11	1.45	0.40	0.04	0.38
敏感性大小排序				$k_2 > n > \lambda_{max} > k_1 > v$		

表 7 竖向永久变形影响因素极差分析结果

Tab. 7 Range analysis results of factors affecting vertical permanent deformation

项	水平	试验参数 k_1	试验参数 k_2	试验参数 n	泊松比 v	最大阻尼比 λ_{max}
K_{jm}	1	371	366	369	370	370
	2	186	188	185	186	184
	3	183	187	186	185	186
\bar{K}_{jm}	1	46.4	45.7	46.2	46.2	46.3
	2	46.5	47.1	46.4	46.6	46.1
	3	45.9	46.7	46.5	46.2	46.6
最佳水平		2	2	3	2	3
R_j		0.56	1.38	0.34	0.34	0.45
敏感性大小排序				$k_2 > k_1 > \lambda_{max} > v \geq n$		

m 水平的个数即为 K_{jm} 的平均值 \bar{K}_{jm} , 极差值 R_j 为 j 因素最大 \bar{K}_{jm} 与最小 \bar{K}_{jm} 之差, 其代表试验因素变动时, 试验指标的变化程度, 将各参数的极差值 R_j 绘制成如图 7 所示的柱状图。由极差分析法可知, 极差值的大小可以反映该参数对考核指标的敏感性大小。因此, 由图 7 可知: 对竖向加速度峰值而言, 各因素的极差值 R 对应参数 k_2 的最大, 为 1.45, 其次为参数 n , 极差值为 0.40, 最大阻尼比参数对应的极差值为 0.38, 而参数 k_1 和 v 的极差值较小, 分别为 0.11 和 0.04, 因此, 对坝体竖向地震峰值加速度的参数敏感性从大到小依次为 k_2 、 n 、 λ_{\max} 、 k_1 、 v , 其中 k_2 较其它参数影响最大, k_1 和 v 影响较小。同样地, 对坝体竖向永久变形而言, k_2 、 k_1 、 λ_{\max} 、 v 、 n 各参数的极差值分别为 1.38、0.56、0.45、0.34、0.34, 因此, 参数敏感性从大到小依次为 k_2 、 k_1 、 λ_{\max} 、 v 、 n , 同样 k_2 影响显著, v 和 n 影响较小。

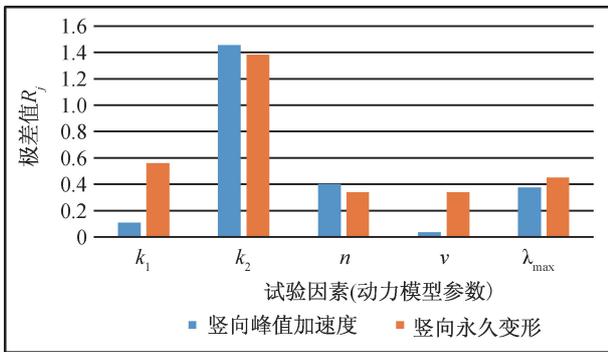


图 7 堰塞坝各试验指标参数敏感性对比结果

Fig. 7 Comparison results of sensitivity of various experimental indicators parameters for weir dam

4 结论

本文以堰塞坝为例, 基于正交试验法研究了土体动力等效线性模型参数的敏感性, 计算结果表明动力模型中参数 k_2 、 n 、 λ_{\max} 对于堰塞坝坝体的地震反应影响较大, 其中 k_2 影响最为显著, k_1 、 v 对堰塞坝的地震响应影响较小; 参数 k_2 、 k_1 、 λ_{\max} 对坝体竖向永久变形的影响较大, 其中 k_2 影响同样最为显著, n 、 v 对竖向永久变形影响较小, 以上结论可为土体动力本构模型参数的选取提供参考。

参考文献:

[1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 54-60.
[2] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and

Foundations Division, 1970, 96(5): 1629-1653.

- [3] 李炎隆, 李守义, 丁占峰, 等. 基于正交试验法的邓肯-张 E-B 模型参数敏感性分析研究[J]. 水利学报, 2013, 44(07): 873-879.
[4] 陈斌, 吉林, 张旭晖. 邓肯模型参数敏感性分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2002(04): 10-13.
[5] 陈斌, 周力军, 张旭晖. 对邓肯模型参数敏感性的讨论[J]. 中国港湾建设, 2003(04): 30-33.
[6] 邓成发, 翟守俊, 胡广伟. 邓肯-张参数对基坑支护结构变形的敏感性研究[J]. 工程地质学报, 2008(05): 605-610.
[7] 范益群, 李锡夔. 岩土力学弹塑性模型参数反演中的灵敏度分析[J]. 岩土工程学报, 1998(02): 15-18.
[8] SEED H B, WONG R T, IDRISS I M, et al. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(11): 1016-1032.
[9] 孔宪京, 邹德高, 徐斌, 等. 紫坪铺面板堆石坝三维有限元弹塑性分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(02): 213-222.
[10] ZOU D, XU B, KONG X, et al. Numerical simulation of the seismic response of the Zipingpu concrete face rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 49: 111-122.
[11] 王睿, 张建民, 王刚. 砂土液化大变形本构模型的三维化及其数值实现[J]. 地震工程学报, 2013, 32(02): 213-222.
[12] 费康, 彭劼. ABAQUS 岩土工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017: 305-310.
[13] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 345-348.
[14] HARDIN B O, DRNEVICH V. Shear modulus and damping in soils [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1972, 98(7): 667-692.
[15] 沈珠江, 徐刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水电工程学报, 1996(02): 143-150.
[16] 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(01): 34-38+45.
[17] 张文兵, 任杰, 杨杰, 等. 基于正交试验土石坝热-流耦合模型参数的敏感性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(01): 147-154.
[18] 王瑞骏, 李阳, 丁占峰. 堆石料流变模型参数敏感性分析的正交试验法[J]. 水利学报, 2016, 47(02): 245-252.
[19] 贾超, 张凯, 张强勇, 等. 基于正交试验设计的层状盐岩地下储库群多因素优化研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(06): 1718-1726.

(责任编辑 王利君)