

深覆盖层上高土石围堰渗流场的敏感性分析

王睿星, 王瑞骏, 赵叶

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 以某建基于深覆盖层上的高土石围堰工程为例,运用有限元法,进行了其渗流场关于覆盖层土体、基岩及混凝土防渗墙渗透系数的敏感性分析,探讨了围堰渗流场关于这些材料渗透系数的敏感性特征。结果表明:覆盖层土体、基岩及混凝土防渗墙渗透系数越大,围堰下游边坡出逸点越高,围堰及其地基的单宽渗流量越大,出逸段最大渗透坡降越大。因此,对于深厚覆盖层上的高土石坝围堰工程,覆盖层土体、基岩及混凝土防渗墙的渗透系数对其渗流场具有显著影响,在工程勘察设计过程中应尽可能合理地确定这些材料的渗透系数,以便通过准确合理地确定围堰及其地基渗流场,为围堰稳定分析提供可靠的依据。

关键词: 高土石围堰; 渗流场; 深厚覆盖层; 防渗墙; 有限元法; 敏感性分析

中图分类号: TV223.4; TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0215-04

Sensitivity analysis of seepage field of high earth-rock cofferdam in deep overburden

WANG Ruixing, WANG Ruijun, ZHAO Ye

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Taking the high earth-rock cofferdam project based on the deep overburden as an example, the sensitivity of the seepage field to the permeability coefficient of the layer of soil, the bedrock and the concrete cut-off wall is analyzed by using the finite element method. The sensitivity of the seepage field of cofferdam to the permeability coefficient of these materials is discussed. The results show that the greater the permeability coefficient of the layer of soil, the bedrock and the concrete cut-off wall is, the higher the exit-point the downstream slope of the cofferdam has, the larger the single width seepage of the cofferdam and its foundation is and the greater the maximum penetration gradient is. Therefore, for the high earth-rock dam cofferdam project, the permeability coefficient of the deep overburden, the layer of soil, the bedrock and the concrete cut-off wall have a significant influence on its seepage field, and should be determined as reasonably as possible in the engineering survey and design process, so that a reliable basis can be provided to cofferdam stability analysis through accurately and reasonably determining the cofferdam and its foundation seepage field.

Key words: high earth-rock cofferdam; seepage field; deep overburden; cut-off wall; finite element method; sensitivity analysis

1 研究背景

建基于深覆盖层上的高土石围堰,其稳定性与堰体和堰基的渗流状况密切相关^[1-2],在有关渗流研究方面,张拥军等^[3]计算比较了不同防渗墙深度对应的渗流场的变化;唐瑜莲等^[4]进行了混凝土防渗墙的控渗作用的研究;戴会超等^[5]对高土石围堰防渗设施的

不同布置方案的防渗效果进行对比;李静琪^[6]通过研究指出,周围岩体的渗透性和防渗墙布置的长度和深度等均对渗流状况影响显著;莫轻兵等^[7]研究了防渗帷幕深度的变化对围堰渗流场的影响。以上研究表明,堰体和堰基的渗流状况受到覆盖层土体、基岩及地基防渗结构(如用于覆盖层防渗的混凝土防渗墙、用于基岩的防渗帷幕)等渗透特性的直接影响^[8]。而

收稿日期:2017-06-15; 修回日期:2017-07-17

基金项目:国家自然科学基金项目(50779051)

作者简介:王睿星(1992-),女,陕西咸阳市,在读硕士研究生,主要从事水工结构分析及数值仿真研究。

在工程实际中,虽然针对覆盖层土体及基岩会进行较为深入的地质勘探及试验等工作,并对混凝土防渗墙的布置、材料和施工方法等进行精心设计,但覆盖层土体、基岩及混凝土防渗墙的渗透特性指标(如渗透系数)往往由于勘探试验条件或施工条件等的局限而具有不同程度的不确定性或变异性^[9-10]。因此,为确保关于深覆盖层上高土石围堰的稳定分析能够建立在切实合理的基础上,进行其渗流场关于覆盖层土体、基岩及混凝土防渗墙渗透系数的敏感性分析无疑是十分必要的。

本文拟结合一建于深覆盖层上的高土石围堰典型工程,在深入分析包括深覆盖层在内的围堰工程地质特性的基础上,运用有限元法,进行其渗流场关于覆盖层土体、基岩及混凝土防渗墙渗透系数的敏感性分析,探讨围堰渗流场关于这些材料渗透系数的敏感性特征,以便为围堰稳定分析提供可靠的渗流荷载计算依据。

2 工程概况

某建于深覆盖层上的高土石围堰,基本设计断面挡水标准为30年一遇,围堰堰顶高程2 597.500 m,对应洪峰流量6 330 m³/s,堰顶长度164.072 m,围堰最

大堰高约60.30 m,堰顶宽度15.00 m,围堰下游坡脚距离大坝趾板开挖开口线留有一定距离,围堰下游坝基开挖最大深度达60 m左右。

围堰的两岸为基岩裸露,岩性均为绿泥角闪片岩,地表的岩体完整性较好。根据钻孔揭露,围堰处河床覆盖层的最大厚度为63~65 m,按其物质成分分为4小层,由上至下依次为:⑤Q^{al-5}层,河床冲积砂卵石层夹少量漂石,层厚(围堰轴线处,下同)为4.06m;③Q^{l-3}层,含淤泥质粉砂层、黏土质砂,层厚为14.96 m;②Q^{l-2}层,以砂质低液限黏土为主,层厚为31.92 m,该层自上而下可分为Q^{l-2-3}、Q^{l-2-2}、Q^{l-2-1}3个亚层,Q^{l-2-3}层以低液限黏土为主,多呈流塑状、Q^{l-2-2}层以低液限粉土和砂质低液限粉土为主,多呈可塑—软塑状、Q^{l-2-1}层以低液限黏土为主,局部为低液限粉土,多呈可塑—软塑状;①Q^{al-1}层,为卵石、块石夹砂,层厚为14.19 m;缺失第④层。

为适应围堰覆盖层基础特点,高程2 553.000 m以下堰体部分及基础采用塑性混凝土防渗墙防渗,防渗墙深度81.90 m,墙体厚度1.0 m。高程2 553.000 m以上堰体部分采用复合土工膜斜墙防渗,膜厚0.5 mm,土工膜下部设置砂料和砂砾石过渡料,砂料厚度0.5 m,砂砾石厚度1.5 m。围堰典型断面图见图1。

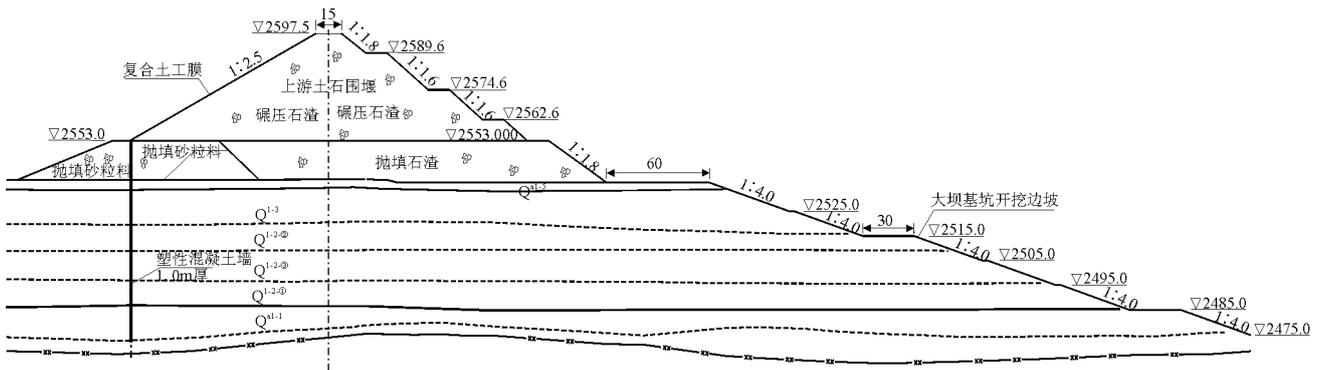


图1 围堰典型断面图

3 围堰渗流场的敏感性分析

3.1 计算工况及基本计算参数

本文选取围堰渗流计算工况为:围堰挡水期,覆

盖层第⑤、③、②-3、②-2、②-1、①层均已开挖,抽水至已开挖基坑底。上游水位Z_{s1}=2 595.05 m,下游水位为已开挖基坑底高程的稳定渗流期。计算参数见表1。

表1 堰体及覆盖层土体渗流计算渗透系数表

(cm/s)

碾压石渣	抛填石渣	抛填砂砾料	Q ^{al-5} 河床冲积砂卵石层夹少量漂石	Q ^{l-3} 淤泥质粉砂层、黏土质砂	Q ^{l-2-3} 低液限黏土为主	Q ^{l-2-2} 低液限粉土、砂质低液限粉土	Q ^{l-2-1} 低液限黏土、低液限粉土	Q ^{al-1} 卵石、块石夹砂	岸坡及下伏基岩	防渗墙
5 × 10 ⁻²	5 × 10 ⁻¹	5 × 10 ⁻²	1.0 × 10 ⁻¹	4.1 × 10 ⁻⁴	3.4 × 10 ⁻⁵	1.7 × 10 ⁻⁴	3.0 × 10 ⁻⁵	1.0 × 10 ⁻²	5 × 10 ⁻⁴	1 × 10 ⁻⁷

3.2 围堰渗流场分析的有限元模型

有限元分析方法是一种先进有效的数值模拟法^[11],围堰渗流场有限元计算主要是通过求解渗流场内的水头函数,从而确定渗流场内的自由面及出逸点高程,以及渗流量、渗透坡降等渗流参数^[12]。本次渗流分析采用 GEO-STUDIO 软件中的 Seep/w 渗流模块实施计算。Seep/w 模块是基于渗流基本方程式,运用有限元法来计算二维稳定和非稳定渗流场的专用模块,可以准确给出各种计算工况下的渗流场分布及单宽渗流量等计算结果^[13]。

计算模型所选剖面为图 1 所示围堰最大横剖面,包括 11 个材料区,坐标分别为 X 轴顺河指向下游为正,Y 轴沿坝高铅直向上为正,计算选取范围为:水平方向自距上游坝坡 200 m 处至距下游坝坡 500 m 处,铅直方向自坝顶至基岩面;边界条件:上下游坡面为水头边界,模型左右侧、底边界为不透水边界,围堰下游水位以上的表面为溢流面。所建模型共有 10 052 个节点,10 328 个单元,分三角形和四边形单元。其中,复合土工膜的有限元模拟方法采用“等效土体法^[14]”,即将复合土工膜等效为具有一定厚度且渗透系数相对较大的土体进行计算,以便于在有限元计算中选取单元并确保计算收敛。

3.3 围堰渗流场敏感性分析方案

敏感性分析是系统分析的一种^[15],传统的参数敏感性分析常用单因素分析法,该方法选定一个

基准指标,假定与该基准指标相关的其他参数保持不变,仅分析当其中一个参数发生变化时基准指标随该参数的变化关系曲线,以此来反映基准指标对于该参数的敏感性^[16]。

本文采用单因素分析法,为了分析围堰渗流场关于覆盖层土体、基岩渗透系数及混凝土防渗墙渗透系数的敏感性特征,拟定以下 5 种渗透系数选取方案:

方案 1:采用基本计算参数,见表 1。

方案 2:其他参数不变,围堰覆盖层③、②层及下伏基岩渗透系数均扩大 10 倍的围堰渗流敏感性分析。

方案 3:其他参数不变,围堰覆盖层③、②层及下伏基岩渗透系数均扩大 20 倍的围堰渗流敏感性分析。

方案 4:其他参数不变,防渗墙渗透系数扩大 10 倍的围堰渗流敏感性分析。

方案 5:其他参数不变,防渗墙渗透系数扩大 100 倍的围堰渗流敏感性分析。

3.4 计算结果分析

各方案的计算成果见表 2,主要分析了各个方案单宽流量、防渗墙后浸润线高程、出逸点高程及堰基、出逸段最大渗透坡降。各方案渗流场浸润线位置示意图见图 2~3,其中,由于渗流场中水头等值线分布规律相似,图中仅给出方案 1 的水头等值线。

表 2 渗流计算结果分析

方案	单宽流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	防渗墙后浸 润线高程/m	堰基最大渗透坡降		出逸点 高程/m	出逸段最大 渗透坡降
			数值	位置		
方案 1	6.266×10^{-5}	2522.93	0.784	$Q^{1-2-①}$ 层	2478.61	0.164
方案 2	4.298×10^{-4}	2537.88	0.669	$Q^{1-2-①}$ 层	2537.00	0.242
方案 3	7.130×10^{-4}	2538.62	0.556	$Q^{1-2-①}$ 层	2537.00	0.245
方案 4	1.038×10^{-4}	2532.11	1.120	$Q^{1-2-③}$ 层	2485.29	0.179
方案 5	1.399×10^{-4}	2538.04	1.348	$Q^{1-2-③}$ 层	2485.29	0.180

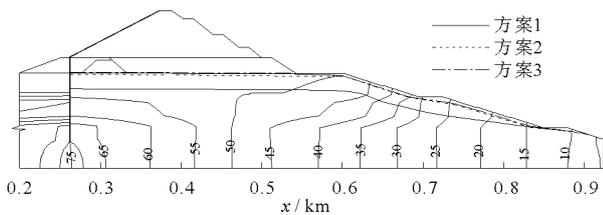


图 2 方案 1~3 的浸润线比较

(1)渗透系数对于单宽渗流量的影响。由表 2 可以看出,方案 1 单宽流量为 6.266×10^{-5}

$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$,随着覆盖层土体、基岩及防渗墙渗透系数的增大,围堰防渗作用减弱,单宽流量均增大。其中,变化最小值为当防渗墙渗透系数扩大 10 倍(方案 4)时,单宽流量增大至 $1.038 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$,相比于方案 1 增大了 0.66 倍;最大值为当围堰覆盖层③、②层及基岩渗透系数均扩大 20 倍(方案 3)时,单宽流量增大至 $7.130 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$,相比于方案 1 增大了 10.4 倍。

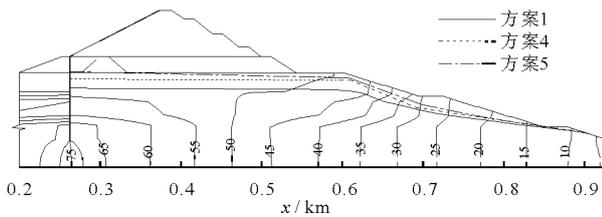


图3 方案1、4和5的浸润线比较

(2) 渗透系数对于浸润线位置的影响。覆盖层土体、基岩及防渗墙渗透系数增大时,渗流场的变化并不明显,等水头线走势有明显的规律性,主要集中在渗透系数相对较小的弱透水层 Q^{1-2} 内,水头沿顺河向透过防渗墙后骤然下降,防渗墙具有一定降低水头的作用,防渗墙附近水头差最大,水头等值线最密,离开防渗墙后,水头等值线逐渐变疏。方案1中防渗墙后浸润线高程为2 522.93 m,当覆盖层土体、基岩及防渗墙渗透系数增大时,浸润线高程均有所抬高,其中,变化最小值为当防渗墙渗透系数扩大10倍(方案4)时,防渗墙后浸润线高程上升到2 532.11 m,相比于方案1抬高了9.18 m;最大值为当围堰覆盖层③、②层及基岩渗透系数均扩大20倍(方案3)时,防渗墙后浸润线出逸点高程上升到2 538.62 m,相比于方案1抬高了15.69 m。

方案1出逸点在基坑开挖底部高程为2 478.61 m处,当覆盖层③、②层及基岩渗透系数扩大10倍(方案2)、20倍(方案3)时,出逸点高程均在2 537.00 m处,相比于方案1抬高了58.39 m;当防渗墙渗透系数分别扩大10倍(方案4)、100倍(方案5)时出逸点高程均在2 485.29 m处,相比于方案1抬高了6.68 m。可见,随着覆盖层土体、基岩及防渗墙渗透系数增大,覆盖层中浸润线整体抬高,不利于渗流场的稳定。

(3) 渗透系数对于堰基及出逸段最大渗透坡降的影响。方案1~3堰基最大渗透坡降均发生在等水头线集中的 $Q^{1-2-①}$ 层,方案1堰基最大渗透坡降为0.784,覆盖层③、②层及基岩渗透系数扩大10倍(方案2)、20倍(方案3)时,堰基最大渗透坡降分别为0.669、0.556,相比于方案1分别减小了15%、29%。这是由于随着覆盖层土体、基岩的渗透系数增大,减弱了黏土层的防渗作用,土层内渗透压力有所减小,则其渗透坡降减小。可见,增大渗透系数对黏土层这种抗渗能力强的土层的稳定影响并不大。当防渗墙渗透系数分别扩大10倍(方案4)、100倍(方案5)时,堰基最大渗透坡降分别为1.120、1.348,相比于方案1分别增大了43%、72%,均发

生在 $Q^{1-2-③}$ 层。由渗流场水头等值线分布可知,随着防渗墙渗透系数增大到与同层土体的渗透系数值接近,方案4、方案5出现防渗墙上下游水头集中损耗在黏土层的现象,堰基最大渗透坡降增大,虽然大于 $Q^{1-2-③}$ 层允许渗透坡降,但预计在防渗墙的保护下堰基不致发生渗透破坏。

方案1出逸段最大渗透坡降为0.164,当覆盖层③、②层及基岩渗透系数扩大10倍(方案2)、20倍(方案3)时,出逸段最大渗透坡降变化明显,从渗流场中等水头线分布情况可以看出,方案2、方案3在下游坡段的水头线明显变密,所以出逸段最大渗透坡降也增大,相比于方案1分别增大了48%、49%,更接近于临界坡降值,容易发生渗透破坏,应采取必要的防渗措施延长渗径,降低此处渗透坡降。当防渗墙渗透系数分别扩大10倍(方案4)、100倍(方案5)时,出逸段最大渗透坡降相比于方案1分别增大了9%、10%,可见随着防渗墙渗透系数增大,出逸段最大渗透坡降也增大。但对离防渗墙很远的下游覆盖层而言,防渗墙的影响还是相对较小。

4 结 论

本文以某水电站工程上游围堰为例,对建基于深覆盖层上的高土石围堰典型工程进行稳定渗流计算,以及其渗流场关于覆盖层土体、基岩及混凝土防渗墙渗透系数的敏感性分析,探讨围堰渗流场关于这些材料渗透系数的敏感性特征,通过计算分析得出以下几点结论:

(1) 建基于深覆盖层上的高土石围堰,其渗流场等水头线走势有明显的规律性,主要集中在渗透系数相对较小的弱透水层内。覆盖层土体、基岩及混凝土防渗墙渗透系数越大,围堰下游边坡出逸点越高,不利于围堰渗流场的稳定。

(2) 覆盖层土体、基岩及混凝土防渗墙渗透系数越大,围堰及地基单宽渗流量越大,出逸段最大渗透坡降越大,若能降低其渗透系数,可以有效降低单宽流量,延长渗径,减小堰基及出逸段最大渗透坡降,有效提高防渗效果,保证围堰渗流稳定。

(3) 深厚覆盖层上的高土石坝围堰工程,覆盖层土体、基岩及混凝土防渗墙的渗透系数对其渗流场具有显著影响,在工程勘察设计过程中应尽可能合理地确定这些材料的渗透系数,进而准确地确定围堰及其地基渗流场,为围堰稳定分析提供可靠的依据。

(下转第225页)

- 出版社,1997.
- [2] 王磊,吴善能. 上海地区深基坑施工对周围历史建筑物的影响[J]. 低温建筑技术,2011,33(4):107-108.
- [3] 周奎,刘奕斌,余金鑫. 隧道开挖对近接既有人防工程影响的监测方法[J]. 上海理工大学学报,2013,35(1):91-96.
- [4] 张陈蓉,俞剑,黄茂松. 基坑开挖对邻近地下管线影响的变形控制标准[J]. 岩土力学,2012,33(7):2027-2034.
- [5] 姜峥. 基坑开挖引起邻近管线变形的理论解析[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(2):362-368.
- [6] 郑刚,杜一鸣,刁钰,等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(4):599-612.
- [7] 杨德春,刘建国. 地铁隧道附近软土深基坑设计与施工关键技术分析[J]. 建筑结构,2012,42(7):109-114+67.
- [8] 温忠义,张丽娟,陈松,等. 基坑支护结构变形对邻近地铁隧道的影响研究[J]. 路基工程,2014(5):144-148.
- [9] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [10] 屠传豹,陈勇,刘国彬,等. 地铁深基坑测斜监控指标的探讨及实践[J]. 岩土工程学报,2012,34(S1):28-32.
- [11] 叶任寒,单华峰,王显椿,等. 软土地区深基坑开挖变形监测[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(S1):306-311.
- [12] 李巍,段富凯,琚海明. 深部位移监测技术在城市深基坑监测中的应用[J]. 山西建筑,2009,35(3):120-122.
- [13] 吴建华. 深基坑开挖施工中的动态监测方法[J]. 四川建筑,2006,26(4):124-125.
- [14] Ou C Y, Liao J T, Lin H D. Performance of diaphragm wall constructed using top-down method[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering,1998,124(9):798-808.
- [15] Tan Y, Li M. Measured performance of a 26 m deep top-down excavation in downtown Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal,2011,48(5):704-719.
- [16] 李青. 软土深基坑变形性状的现场试验研究[D]. 上海:同济大学,2008.

(上接第218页)

参考文献:

- [1] 王学武,党发宁,蒋力,等. 深厚复杂覆盖层上高土石围堰三维渗透稳定性分析[J]. 水利学报,2010,41(9):1074-1078+1086.
- [2] 王正成,毛海涛,姜海波,等. 深厚覆盖层弱透水层对防渗墙防渗效果的影响[J]. 人民黄河,2017,39(2):112-115+119.
- [3] 张拥军,牛运华,杨波. 汉江兴隆水利枢纽一期土石围堰二维渗流分析[J]. 人民长江,2011,42(16):11-14.
- [4] 唐瑜莲,朱岳明,丁兵勇. 深覆盖层地基碎石土心墙堆石坝的渗流特性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2008,30(6):11-15.
- [5] 戴会超,王玲玲. 三峡深水高土石围堰工程的渗流研究[J]. 水科学进展,2005,16(6):849-852.
- [6] 李静琪. 某工程坝基防渗系统敏感性分析[J]. 红水河,2009,28(4):96-99.
- [7] 莫轻兵,王建新,王思敬. 金沙江某拟建水电站上游围堰防渗帷幕敏感性分析[J]. 工程勘测,2011,39(10):33-36+83.
- [8] 曾海燕,张建海,王震洲,等. 某堆石坝帷幕缺陷处理后渗流稳定敏感性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(6):118-122.
- [9] 张飞,卢晓春,田斌,等. 基于深厚覆盖层变化的土石围堰堰基渗透特性[J]. 人民黄河,2014,36(8):127-129.
- [10] 卢晓春,田斌,孙开畅. 深厚覆盖层上土石围堰渗流及边坡稳定性研究[J]. 人民长江,2014,45(9):55-61.
- [11] 侯俊平,郭炜. 有限元计算方法在大坝渗流分析中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2005,38(5):65-68.
- [12] 陈士俊,张俊霞,李莉,等. 工程渗流有限元计算方法研究[J]. 人民黄河,2000,22(9):34-36.
- [13] 陆美霞,任德记,王刚. 基于 seep/w 的吊江岩水电站闸坝渗流稳定分析[J]. 水利科技与经济,2010,16(2):224-226.
- [14] 彭云枫,郝丹. 土工膜防渗工程的渗流计算探讨[J]. 安徽农业科学,2013,41(7):3241-3243.
- [15] 张宜虎,杨裕云,王亮清,等. 确定坝基工程地基渗透系数的敏感分析方法[J]. 地球科学-中国地质大学学报,2004,29(3):375-378.
- [16] 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(2):245-252.