

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.05.030

白龙江引水工程华池至延安段重大 工程地质问题研究

焦振华

(陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

摘要: 白龙江引水工程华池至延安段穿越黄土长梁、黄土峁梁、河谷阶地等地貌单元, 沿线地质条件复杂, 不良地质现象发育, 对工程建设有不利影响。综合运用各种勘察方法及试验, 对工程沿线进行了详细的水文地质调查, 分析了工程沿线突出的不良地质现象, 获取了覆盖层、基岩的基本物理力学参数, 重点对压力管线、隧洞、倒虹及涵洞重点工程段的工程地质情况进行了分析。通过调查研究发现, 白龙江引水工程华池至延安段存在沟坡稳定性、管基湿陷性、基坑与隧洞涌水问题、软岩变形以及围岩岩体破碎、成洞条件差等重大工程地质问题, 需要在工程设计、建设过程中引起重视, 相关勘察成果将为后续工程建设提供参考。

关键词: 引水工程; 压力管道; 隧洞; 工程地质问题

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)05—0170—05

Major Engineering Geological Issues of Huachi – Yan'an Section of Bailong River Diversion Project

JIAO Zhenhua

(Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710001, China)

Abstract: The Huachi – Yan'an section of the Bailong River Water Diversion Project passes through the loess long beams, loess ridge beams, valley terraces and other geomorphic units. The geological conditions along the line are complicated with the development of unfavorable geological phenomena, which has adverse effects on project construction. Comprehensive use of various survey methods, tests and detailed hydrogeological surveys along the project line, analysis of unfavorable geological phenomena protruding along the project line, and basic physical and mechanical parameters of overburden and bedrock are obtained. The engineering geology of the key engineering sections of pressure pipelines, tunnels, inverted rainbows and culverts is analyzed in detail. Through investigation and research, it is found that the Huachi – Yan'an section of the Bailong River Drinking Water Project has major engineering geology problems such as slope stability, collapsibility of pipe foundations, water inrush from foundation pits and tunnels, soft rock deformation, broken surrounding rock mass, and poor cave-forming conditions. Attention need to be paid to problems in the engineering design and construction process to provide reference for subsequent engineering construction.

Keywords: water supply project; pressure piping tunnel; engineer geological problem

水资源分布不均已成为制约人类社会发展的关键问题, 我国水资源人均占有量较低, 由于气候和地理条件差异, 水资源分布不均问题尤为突出, 主要表

现在时空分布不均匀^[1-3]。从时间上看, 雨季与旱季雨量差异较大, 从空间上看, 从南到北水资源数量依次递减^[4-5]。水资源分布不均问题导致的水资源

收稿日期: 2020-05-28

修稿日期: 2020-06-19

基金项目: 陕西省水利科技项目(陕西省水利工程地质灾害研究 slkj-2018014)

作者简介: 焦振华(1965—), 男, 陕西彬州人, 高级工程师, 主要从事水利水电工程地质、水文地质勘察及技术管理工作。

E-mail: jiaozhenhua008@163.com

供需矛盾问题日益严重。以陕西省为例,关中地区人均水资源占有量远远小于陕南地区,供需矛盾极为突出^[6]。为解决这一问题,实施修建引水、供水工程以实现跨地域调水显得极为迫切。

白龙江引水工程是为解决甘肃省东部地区及陕西省延安北部地区水资源短缺问题而修建的大型工程,横跨甘肃陕西两省,覆盖甘肃省陇东南天水、平凉、庆阳三市20县(区)以及陕西省延安市4县(区)共24县(区)^[7]。该工程建成后,将极大缓解延安革命老区及甘肃东部省市的缺水现状,对于推动陕、甘两省革命老区经济发展,提高区域供水安全保障能力,改善革命老区和六盘山区民生,巩固脱贫攻坚成果,促进受水区经济社会的可持续发展有着重要的作用^[8-9]。

白龙江引水工程由水源工程、输水总干线、输水干线和末端备用水库四部分组成,取水于水量丰沛的嘉陵江支流白龙江,是长江流域向黄河流域跨区域的调水工程。工程跨越多个地区,沿线地质环境复杂,不良地质发育。以延安段为例,输水管线跨越多个黄土地质单元,黄土湿陷性带来的浅表滑坡等地质灾害问题突出^[10-11]。为了白龙江输水工程的设计建设,需要对工程沿线进行详细的环境地质、水

文地质及工程地质勘察,掌握沿线不良地质分布情况,以便采取相应的工程措施进行治理或进行绕避。本文根据白龙江引水工程华池至延安段的地质勘测成果,概括了基本的水文地质条件,对其沿线压力管线、隧道、涵洞等重要工程节点的工程地质情况进行了介绍,分析了其中面临的主要工程地质问题,对后续工程设计建设有一定的借鉴意义。

1 工程概况

白龙江引水工程华池至延安段西起甘肃省华池县城东北方向约6 km的乔河乡张庄村附近,东至宝塔区河庄坪镇红庄水库,线路总体呈东西向布置,工程由延安干线、4座事故检修库及退水设施组成。延安干线包括延安段、志安段、安宝段、吴起段、志丹段、安塞段、宝塔段。供水对象为延安市宝塔区、安塞区及吴起县、志丹县4县区的县城、工业园区等。该段引水工程总体布局示意图见图1。引水工程线路总长209.08 km,其中隧洞20座、长89.57 km、比降1:5000(局部1:1500)、断面2.5 m×2.5 m(局部2.5 m×3.05 m),压力管道长119.52 km,倒虹吸5座,长1.61 km,涵洞7座,长0.55 km,调压池1座,进、出水池11座,分水口4处。

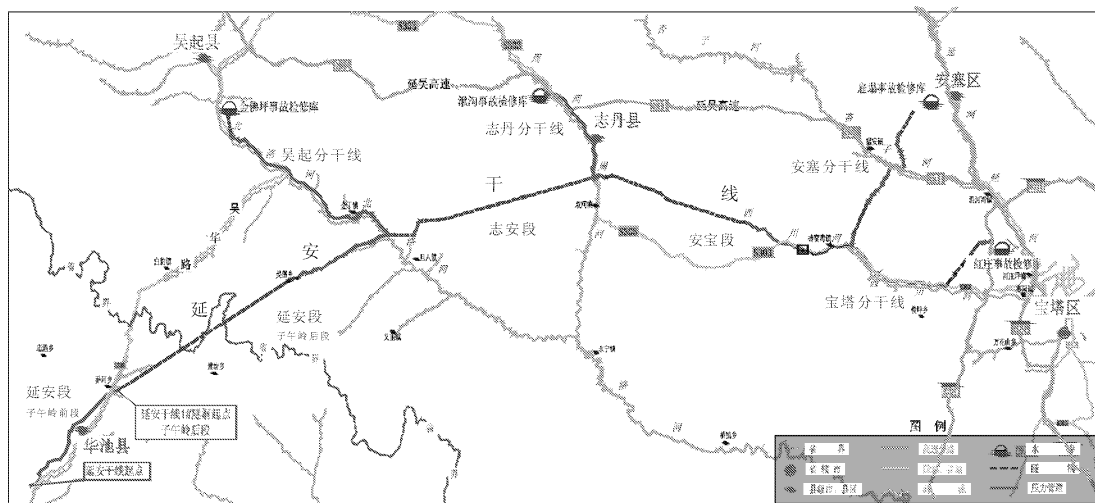


图1 引水工程总体布局示意图

2 工程地质条件

陕北黄土高原是在第三纪末起伏和缓的准平原基础上,历经第四纪以来多次黄土堆积和侵蚀作用形成的,水流切割使得本区地形破碎、沟壑发育^[12-14]。工程区一级地貌单元为黄土高原,地势总体西北高东南低,地面标高900 m~1 800 m。工程

区地势西北高东南低,平均海拔1 200 m。线路地面最大高程1 650 m,位于志丹县以西的西阳湾,最低高程为1 050 m,位于西川河河谷。工程区由于长期的侵蚀作用,地表支离破碎,梁峁密布,沟壑纵横,山高坡陡,河谷深切,基岩裸露。黄土梁、峁基本呈连续状分布,沟涧地与沟谷地交互纵横,支离破碎,梁峁相间,黄土覆盖厚度30 m~180 m(见图2)。北

部岬多于梁;南部梁多于岬;东南部还有少量残塬。此外,在各种坡面、陡壁发育有细沟、线沟、切沟、悬沟、崩沟、滑坡、黄土柱以及缓坡,局部地段发育有陷穴、浅凹等小地貌。山大沟深,切割深度达 200 m,河沟一般呈“V”字形。引水工程穿越的主要地貌单元有:黄土长梁、黄土岬梁、河谷阶地。黄土长梁和黄土岬梁上部土层最大厚度 180 m(黄土层厚 8 m~25 m,黄土状壤土层厚 140 m~150 m,新近系红黏土层厚 15 m~25 m);河谷阶地主要以冲洪积堆积物为主(砂质壤土、粉质壤土积砂砾石)。黄土长梁地层中黄土、古土壤及黄土状壤土均具有一定的湿陷性。

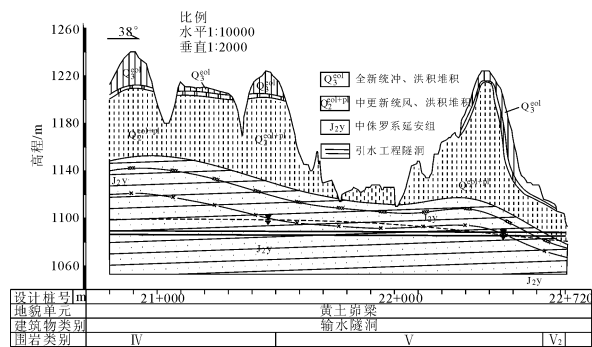


图 2 引水工程隧洞典型断面示意图

引水工程线路两侧 100 km 范围内无区域深大断裂带和活动断层,线路沿线地质构造简单,构造活动对工程影响较小。发育的不良地质现象主要为浅表层土质滑坡和崩塌,距离线路较远,对线路无影响^[15],可不予考虑。

根据地质调查及勘探,工程区沿线出露的地层主要为白垩系和侏罗系两大地层。其中白垩系出露环河组(K1h)砂质泥岩、页岩及长石砂岩及洛河组(K1l)长石砂岩;侏罗系出露安定组(J2a)泥灰岩、白云质灰岩、直罗组(J2z)砂质泥岩、粉砂岩以及延安组(J2y)砂岩、砂质泥岩等。

地下水以第四系孔隙潜水及基岩裂隙水为主;环境水地表水及地下水对混凝土无腐蚀性;对混凝土结构中的钢筋为弱腐蚀性;对钢结构为弱腐蚀性。

引水工程隧洞长 89.57 km,以基岩隧洞为主。其中土洞长 2.7 km,占隧洞总长 3.01%;基岩洞室长度为 86.61 km,占隧洞总长的 96.7%。V类围岩长度 10.31 km,占隧洞总长的 11.51%;IV类围岩长度 30.24 km,占隧洞总长的 33.76%;III类围岩长度为 46.32 km,占隧洞总长的 51.71%);隧洞主要以III类围岩为主,IV类次之。洞室位于地下水水位以下段长 74.03 km(基岩洞室长 72.86 km,黄土洞室长

1.17 km),占隧洞总长 82.65%。

3 重大工程地质问题

引水工程线路由压力管线、隧洞、倒虹与涵洞等单项工程组成,其中压力管道长 119.52 km,隧洞 20 座(全长 89.57 km),倒虹吸 5 座(合计长 1.61 km),涵洞 7 座(合计长 0.55 km)。引水工程存在黄土湿陷、基坑排水、边坡稳定,隧洞同时存在围岩稳定、隧洞涌水、软岩变形等工程地质问题,是制约线路方案选择的主要工程地质问题。

3.1 压力管线重大工程地质问题

压力管道主要沿吴堡川河漫滩及一、二级阶地布设,地形起伏不大,坡度 2°~5°,存在的岸坡主要为跨越地貌单元时的天然陡坎和人工明挖管沟临时边坡两种。

压力管线长 119.522 km,黏性土管基段长 14.43 km,占管道总长的 12.07%;粗粒土管基段长 89.96 km,占管道总长的 75.27%;基岩管基段长 11.41 km,占管道总长的 9.55%。压力管线段存在黄土湿陷、基坑排水等工程地质问题。

黏性土管基段线路长 14.43 km,均具有湿陷性,占管道总长的 12.07%;其中湿陷等级为 I 级(轻微)段长 0.65 km,占管道总长 0.31%;湿陷等级为 II 级(中等)段长 2.73 km,占总长 1.31%;黄土及黄土状壤土管基长度为 11.05 km,占管道总长的 5.31%,湿陷等级为 III 级(严重)—IV 级(很严重)。

第四系堆积体管基占总长 90.14%,基岩管基占 9.86%,具有湿陷性的管基长度占总长的 6.9%,存在基坑涌水的长度为 2.9%。

3.2 隧洞重大工程地质问题

隧洞长 89.57 km,以基岩隧洞为主。其中土洞长 2.7 km,占隧洞总长 3.01%;基岩洞室长度为 86.61 km,占隧洞总长的 96.7%。隧洞段存在洞室围岩稳定、黄土湿陷、地下水涌水以及进出口边坡稳定性等工程地质问题。

隧洞 V 类围岩长度 10.31 km,占隧洞总长的 11.51%;围岩岩体破碎,围岩开挖后不能自稳,初步衬砌后洞段变形破坏严重,导致初期支护破坏,型钢亦发生严重扭曲变形,喷层开裂、剥落、掉块;位于第四系中更新统黄土状土中的 V2 类围岩,长度 193 m(安宝段 95 m、宝塔段 98 m),洞室极不稳定,成洞条件差。IV 类围岩长度 30.24 km,占隧洞总长的 33.76%;围岩自稳性差,隧洞施工期间应特别注意

分析结构面的组合形式及相互切割关系,对潜在的不稳定地质体提前作出预报。Ⅲ类围岩长度为46.32 km,占隧洞总长的51.71%;围岩自稳性较好,局部可能产生掉块现象或小规模坍塌问题。

黄土隧洞湿陷变形段长1.17 km;黄土崩梁和黄土长梁地层中黄土、古土壤及黄土状壤土上部均具有一定的湿陷性,属自重湿陷性场地,地基土湿陷等级为Ⅱ(中等)—Ⅳ(很严重),地基土自重湿陷性量最大值达1 047.0 mm,基础下剩余湿陷量最大值达1 043.0 mm。

洞室位于地下水位以下段长74.03 km(基岩洞室长72.86 km,黄土洞室长1.17 km),占隧洞总长83.0%。洞室最大埋深300.0 m,最小埋深约3.0 m,隧洞穿越浅埋段沟道共7处,沟道常年流水,存在较大的外水压力,可能会持续下渗、发生隧洞涌水,隧洞最大涌水量 $2.719 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

基岩隧洞穿越的地层岩性主要为长石砂岩、砂质泥岩及页岩互层。砂质泥岩及页岩为软质岩—中硬岩地层,属黏土岩,胶结程度差,颗粒较细、含有亲水性黏土矿物及较大的比表面积,具有遇水软化、失水崩解的特性,水理性质差;岩体相对软弱,可能发生软岩变形,其长度约13.0 km。

隧洞进、出口有土质斜坡、混合型斜坡、基岩斜坡。土质部分岩性为风积堆积(Q_3^{col})黄土和风洪积堆积($Q_2^{\text{col+pl}}$)黄土状壤土;岩质部分岩性为环河组长石砂岩、砂质泥岩及页岩等,薄层至中厚层状,水平层理,往往受节理裂隙切割,岩体较破碎;斜坡坡面基本平整,植被较发育,呈上缓下陡,上部自然坡角 $35^\circ \sim 45^\circ$,下部自然坡角 $40^\circ \sim 55^\circ$ 。隧洞进出口边坡稳定性影响工程施工及洞口段的安全。

根据地质资料和现场勘察资料,引水隧洞沿线,洞身多位于完整性较好的白垩系砂岩或砂质泥岩中,岩体透水性以弱—微透水为主,局部中等透水。一般条件下,岩体本身不易发生规模较大的集中渗流、涌水或暴发性突水。

3.3 倒虹及涵洞段重大工程地质问题

引水工程共布设倒虹5座(长度1.61 km)、涵洞7座(长度0.55 km);倒虹及涵洞段存在边坡稳定、沟道冲刷以及基坑排水等工程地质问题,其基础位于河漫滩、黄土塬及基岩斜坡上,两岸边坡现状基本稳定。河漫滩基础存在排水问题、黄土塬基础存在湿陷问题。

倒虹及涵洞段跨越沟道多呈“V”型、混合型斜坡,沟内季节性流水。沟坡上部为第四系松散堆积

黄土及黄土状壤土组成的土质斜坡,下部侏罗系中统延安组(J_2y)强风化砂岩、泥岩互层,自然坡角 $40^\circ \sim 52^\circ$,两岸小冲沟较发育,植被不甚发育。倒虹及涵洞管基位于黄土塬与基岩斜坡上,沟坡的稳定性将影响倒虹及涵洞工程的施工安全。沟道比降较大,河流冲刷深度2.0 m~2.5 m,建议埋深大于沟道冲刷深度(2.5 m),并对上、下游进行砌护处理,建议允许冲刷流速 $V_0 = 0.8 \text{ m/s} \sim 1.0 \text{ m/s}$ 。基础位于地下水位以下,存在基坑排水问题,施工时应采取排水措施。

倒虹或涵洞管基位于河漫滩冲洪积堆积层地段,河流冲刷深度最大可达2.5 m,管基可能遭受沟水冲刷;管基局部位于地下水位以下,存在基坑涌水、排水问题。

引水工程主要工程地质问题见表1。

表1 引水工程主要工程地质问题及评价

线路工程	线路概况	工程地质问题
压力管道	119.52 km	(1) 黄土湿陷性问题;场地黄土段具轻微—严重湿陷性,自重湿陷性场地;管道地基土具有湿陷性。 (2) 场地河漫滩段河流冲刷问题;场地基岩段位于地下水位以下的水浸问题。 (3) 地基土对混凝土结构和混凝土结构中的钢筋均具微腐蚀性。 (4) 砂类土边坡稳定性差,需进行防护。
隧洞	隧洞20座 (89.57 km)	(1) 隧洞进出口边坡稳定性问题。 (2) 黄土洞段的湿陷问题;场地黄土段具轻微—严重湿陷性,自重湿陷性场地;地基土湿陷等级为Ⅲ级(严重)—Ⅳ(很严重)。 (3) 围岩稳定问题;黄土隧洞围岩强度低,属极不稳定的 V_1 类— V_2 类围岩,边墙、拱顶极易产生坍塌变形,一般变形破坏严重,成洞条件差。 (4) 隧洞涌水问题;隧洞穿越常年流水沟道时,可能会持续向下渗透,最大涌水量 $0.263 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ 。 (5) 软岩变形问题;砂质泥岩和页岩等软岩遇水软化、失水崩解,软岩段可能产生径向大变形,出现挤压变形及掌子面稳定问题;在3#隧洞桩号K45+690—K48+360 m段、5#隧洞桩号K62+525—K64+000 m段及6#—10#隧洞段可能发生软岩变形、崩解。
倒虹及涵洞	倒虹5座 (1.61 km); 涵洞7座 (0.55 km)	(1) 人工边坡稳定。 (2) 沟道冲刷;河流冲刷深度2.0 m~2.5 m。 (3) 基础位于地下水位以下,存在基坑排水问题。

4 结 论

(1) 白龙江引水工程华池至延安段由压力管

线、隧洞、倒虹与涵洞等单项工程组成,穿越的主要地貌单元有黄土长梁、黄土崩梁、河谷阶地。沿线的重要工程主要有压力管线、隧洞、倒虹及涵洞。

(2) 压力管线长 119.522 km,其中具 I 级(轻微)—IV 级(很严重)湿陷性的管道总长 14.43 km(占 12.07%);地下水埋深较浅段,长约 3.5 km(占 2.9%),存在基坑涌水问题。

(3) 隧洞长 89.57 km,其中长 10.31 km 的 V 类围岩岩体破碎,围岩开挖后不能自稳,初步衬砌后洞段变形破坏严重;位于第四系中更新统黄土状土中的 V₂ 类围岩(长度 193 m)极不稳定,成洞条件差。隧洞穿越浅埋段沟道共 7 处,沟道常年流水,存在较大的外水压力,可能发生隧洞涌水,隧洞最大涌水量 2.719 m³/d。隧洞砂质泥岩及页岩为软质岩—中硬岩地层相对软弱,可能发生软岩变形。

(4) 倒虹及涵洞段跨越沟道多呈“V”型、混合型斜坡,管基位于黄土塬与基岩斜坡上,沟坡的稳定性将影响倒虹及涵洞工程的施工安全。

参考文献:

- [1] 齐泓玮,尚松浩,李江. 中国水资源空间不均匀性定量评价[J]. 水力发电学报,2020,39(6):28-38.
- [2] 刘佳骏,董锁成,李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报,2011,26(2):258-269.
- [3] 徐锦才. 西部地区农村水电开发及其可持续发展研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):11-14,22.
- [4] 李雪松,李婷婷. 中国水安全综合评价与实证研究

[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(3):162-168.

- [5] 佟晓辉,刘向培,贾庆宇,等. 1960—2011 年中国日降水集中程度的时空变化特征[J]. 气候与环境研究,2017,22(3):301-314.
- [6] 李瑛,金弈,董磊华,等. 引汉济渭工程水库生态调度方案研究[J]. 人民黄河,2020,42(7):80-82,94.
- [7] 李新,曾发琛. 白龙江引水工程可调水量分析研究[J]. 甘肃水利水电技术,2019,55(6):10-12,17.
- [8] 王若臣,陈学林,任东,等. 简析白龙江拟建引水工程对供水区水资源的影响[J]. 甘肃水利水电技术,2015,51(10):1-3.
- [9] 任利波,高旭艳,靳楠. 甘肃白龙江引水工程向延安延伸供水必要性浅析[J]. 陕西水利,2020(1):98-99.
- [10] 毛深秋,朱维娜,赵旭阳. 白龙江引水工程区域地质环境[J]. 水利水电工程设计,2019,4(34):35-37,56.
- [11] 李国宝. 结合白龙江引水工程浅析陇东地区湿陷性黄土工程地质特性[J]. 甘肃水利水电技术,2018,54(10):90-93.
- [12] 王志强,杨萌,张岩,等. 暴雨条件下黄土高原长陡坡耕地细沟侵蚀特征[J]. 农业工程学报,2020,36(12):129-135.
- [13] 党星海,孙雅杰. 地理信息系统应用下的黄土高原地区土壤侵蚀量估算[J]. 科学技术与工程,2019,19(25):13-17.
- [14] 金珊,贾玉华,郭成久,等. 陕北黄土区切沟内陷穴发育特征研究[J]. 土壤通报,2017,48(4):948-954.
- [15] 陕西省水利电力勘测设计研究院. 甘肃省白龙江引水工程延安段地质勘察报告[R]. 西安:陕西省水利电力勘测设计研究院,2020.

(上接第 164 页)

- [6] 江强强,焦玉勇,宋亮,等. 降雨和库水位联合作用下库岸滑坡模型试验研究[J]. 岩土力学,2019,40(11):4361-4370.
- [7] 汪儒鸿,周海清,吴润泽,等. 土体的结构性对边坡突变失稳影响研究综述[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(6):64-68.
- [8] 张龙飞,杨宏伟,李曜男,等. 库水与降雨对凉水井滑坡变形及稳定性的影响[J]. 水利水运工程学报,2019(2):16-24.
- [9] 赵志阳,杨雪琪,宋扬,等. 基于 Scoops 3D 模型的区域库岸边坡稳定性分析[J]. 人民黄河,2020,42(4):135-139.
- [10] 缪信,胡殿坤,缪海波. 库水位变动下庄屋滑坡变形与稳定性分析[J]. 水电能源科学,2018,36(12):121-124.

- [11] 卢书强,易庆林,易武,等. 三峡库区卧沙溪滑坡变形失稳机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2013,24(2):21-25.
- [12] 尚敏,徐鑫,Dave Chan,等. 基于降雨渗流场变化的三峡库区白水河滑坡变形机制与预测[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(2):26-32.
- [13] 范庆来,刘远财. 库水位涨落与降雨联合作用下绿草码头滑坡渗流场分布规律及稳定性分析[J]. 水电能源科学,2015,33(1):115-118,132.
- [14] 薛聪聪,卢书强. 库水与降雨作用下三门洞滑坡渗流特征及稳定性分析[J]. 武汉理工大学学报,2015,37(5):70-75.
- [15] GEO-SLOPE International Ltd. 非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 用户指南[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.