

赵鑫,周阳.基于有限元法的土石坝除险加固渗流问题分析[J].地震工程学报,2018,40(4):867-872.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.867

ZHAO Xin,ZHOU Yang.Seepage Problem in the Reinforcement of Earth-Rockfill Dam Based on Finite Element Method[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(4):867-872.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.867

基于有限元法的土石坝除险加固渗流问题分析

赵 鑫¹, 周 阳²

(1. 四川水利职业技术学院, 四川 成都 611230; 2. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000)

摘要:土石坝坝体在坝前水位作用下极易产生渗流,为研究坝体加固对渗透水压的影响,针对具体水库实例,采用有限元法对除险加固前/后的坝体进行渗透坡降、单宽渗流量、准流网等计算,分析 3 种工况下的渗流过程,为土石坝的除险加固设计提供参考。结果表明:加固后上游坡各工况下的安全系数明显提高,其中单宽渗流量最大,可达 $0.636 \text{ m}^3/\text{d}$,远大于规范允许值。

关键词:土石坝; 除险加固; 渗流; 有限元法; 渗透坡降; 准流网; 渗流稳定

中图分类号: TV314

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)04-0867-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.04.867

Seepage Problem in the Reinforcement of Earth-Rockfill Dam Based on Finite Element Method

ZHAO Xin¹, ZHOU Yang²

(1. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611230, Sichuan, China;

2. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: The earth-rockfill dam body can easily generate seepage when water level is below the dam. To study the influence of the dam body reinforcement on the seepage pressure, a finite element numerical simulation was conducted based on an actual reservoir, under three cases of an earth-rockfill dam before and after reinforcement. Seepage gradients, the discharge per unit width, and quasi drift were obtained. The research results show that the safety factors of upstream slope under the three cases after reinforcement significantly increased, and the discharge per unit width can reach $0.636 \text{ m}^3/\text{d}$, which is far greater than the standard value.

Keywords: earth-rockfill dam; reinforcement; seepage; finite element method; seepage gradient; quasi drift; seepage stability

0 引言

基于土石坝的诸多优点,在国内外坝工建设中,其得到了广泛应用。截至 2003 年,土石坝已占世界

建坝总量的 60% 以上^[1],2005 年底中国已建 30 m 以上土石坝占 59%^[2]。利用自重,土石坝能够有效地避免滑坡或倾覆。然而随着土石坝长期运行,结

收稿日期:2017-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51408377);石河子大学高层次人才科研启动项目(CRZX201435)

第一作者简介:赵 鑫(1980—),男,四川广元人,讲师,研究方向为工程施工及管理。E-mail:zhaoxn66@sina.com。

构稳定性发生变化,坝体或坝基抗剪强度不足,土石坝会出现不同程度的破坏;水平裂缝、横向裂缝、滑坡裂缝等均会影响坝体稳定性;水力破坏、渗流破坏、坝体管涌以及地震对坝体造成扰动而引起的结构失效等均会导致土石坝溃坝^[3]。渗流破坏引起的土石坝溃坝占失事比例的 25%^[4],其中包括坝体渗漏、坝基渗漏、绕坝渗漏、接触部位渗漏等。因此有必要对土石坝进行除险加固中的渗流分析,探讨其渗流相关机理。

国内外专家、学者对土石坝进行了诸多研究。陈勋辉等^[5]分别考虑渗流与不考虑渗流的作用,利用瑞典条分法、毕肖普法、M-P 法计算滑动面各条块力的分布与安全系数。李文涛等^[6]结合有限元法提出了一种高效的自适应松弛 Picard 法,可有效减少数值震荡,精确模拟一维、二维渗流。孟明^[7]基于亭口水库土石坝进行渗流与稳定数值模拟,建立了二维渗流稳定有限元分析模型。冯宵等^[8]采用 GeoStudio 软件的渗流分析模块 SEEP/W 和坝坡稳定分析模块 Slope/W,完成某土石坝除险加固设计的渗流稳定复核。周建烽等^[9]基于有效应力式并考虑渗流作用和地震荷载,建立了基于非线性规划的土石坝有限元塑性极限分析下限法模型。叶永等^[10]研究正常蓄水情况下渗流场和应力场耦合作用的影响。Hughes 等^[11]利用探测地下水的 Willowstick 方法,确定水工建筑物渗漏水渗径与渗漏型式。Aniskin 等^[12]充分考虑了渗流的各向异性问题,对土石坝坝坡稳定进行分析。Xu 等^[13]将土体材料作为控制变量以得到最优材料,在除险加固中利用饱和-非饱和和稳定渗流模型实现土石坝横截面的最优水力设计。Nourani 等^[14]提出多元水库与管道模拟(Multiple Reservoirs and Tubes Analog, MRTA),并用于瞬态工况中。Panthulu 等^[15]利用电阻系数法(Electrical Resistivity Method)、自然电位法(Self-potential Method),分别对渗流区域、渗径进行研究。

然而针对除险加固中土石坝渗流问题的研究大多在理论阶段或是侧重研究具体某一个因素的影响,在实际工程应用方面仍存在不足。本文从实际工程案例入手,利用理正岩土软件^[15]对某水库土石坝除险加固前/后正常洪水位、设计洪水位、校核洪水位时三种工况的稳定渗流进行研究,以得到渗透坡降、单宽渗流量与准流网等,并进行渗流稳定复核,以期研究土石坝该类型问题提供一个可以参考的理论研究方式。

1 理论基础

1.1 达西定律^[17]

经大量实验表明,渗流量 Q 与断面面积 A 和水力坡度 J 成正比,且与土壤的透水性能有关,即

$$Q \propto AJ \quad (1)$$

引入比例系数 k

$$Q = kAJ = kA \frac{h_w}{l} \quad (2)$$

断面平均流速为

$$v = \frac{Q}{A} = kJ \quad (3)$$

式(3)即为达西定律。其中 k 为渗透系数,反映孔隙介质透水性能。

进一步推广至其他孔隙介质的非恒定渗流、非均匀渗流等,水力坡度 J 与达西定律可分别用微分形式表示,即

$$J = -\frac{dH}{ds} \quad (4)$$

$$u = -k \frac{dH}{ds} \quad (5)$$

1.2 理正岩土软件^[16]

主要对土体中的渗流问题进行渗流分析计算,适用于土堤、土坝、闸坝地基、堤防的渗流分析,基坑降水的流场分析等。并可以将流场的数据传递到稳定分析软件,以便分析考虑流场的稳定问题。该软件具有诸多优点^[17],如可处理各种非均质土层分布及复杂坝体情况;可设置给定水头、给定流速、不透水边界等多种边界条件;自动计算浸润线(面),并将计算结果自动传递给理正边坡软件等。

(1) 渗流的分析方法:公式法、有限元法。

(2) 公式法依据《堤防工程设计规范》提供的计算公式。适用于一般稳定渗流计算、双层地基稳定渗流计算、水位上升过程中不稳定渗流计算、水位降落过程中不稳定渗流计算。

(3) 有限元法是依据非饱和土理论、达西定律等,采用稳定流及非稳定流中多种边界条件、多种材料的堤坝或土体的渗流分析。但有限元法分析渗流问题是以线性达西定律为基础,因此不适应非线性达西定律的流场分析,且不足达西定律的流场分析。

各专家学者基于理正岩土软件进行了渗流分析,其中宋国涛^[17]利用理正岩土软件,对同一水位下的水库渗流情况进行分析,并验证了加固效果。颜鲁林^[18]对围堰的渗流、稳定等问题进行了分析计

算,最终确定围堰的结构断面形式。

2 渗流计算

2.1 工程概况

某水库主要由大坝、黏土心墙、溢洪道、放水管等组成。工程等别为 V 等,主要建筑物级别为 5 级,水库设计防洪标准为 20 年一遇设计,200 年一遇校核。

此水库坝高 19 m,坝长 113 m,坝顶宽 5.0 m,坝右侧修建砌石拱涵放水管,坝左侧建溢洪道,进口底宽 21 m,进口高程 295.62 m。

2.2 加固前

2.2.1 渗流分析

对大坝各典型断面进行渗流分析,各区域透水性如表 1 所列。采用有限元法进行坝体的渗流分析。大坝渗流计算断面如图 1 所示。

表 1 坝址区各岩土层计算指标

Table 1 Calculation indexes of each rock and soil layer in dam site

位置		容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	渗流系数/(m·s ⁻¹)	透水性分级
基岩	砂页岩	26.8	201	4.3×10^{-5}	弱透水
坝体	人工填土	18.6	17.2	2.6×10^{-4}	中等透水
土体	黏土心墙	17.6	16.9	1.32×10^{-4}	弱~中等透水

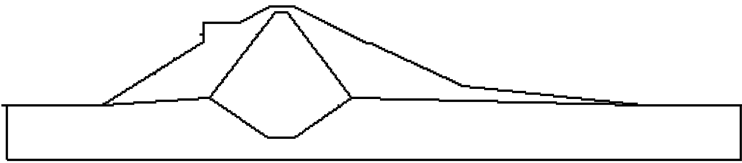


图 1 大坝渗流计算断面图

Fig.1 Section map of the seepage calculation of the dam

计算结果所得的比降云图与准流网图(图 2~图 4),大坝下游渗透计算成果如表 2 所列。

- (1) 正常水位稳定渗流(图 2)。
- (2) 设计洪水位稳定渗流(图 3)。
- (3) 校核洪水位稳定渗流(图 4)。

由计算结果可知,正常水位时,坝体和坝基渗透坡降均在允许范围内,不会发生渗透破坏;设计水位下稳定渗流时坝体渗透坡降超过允许值,会发生渗透破坏;校核洪水位已过大坝黏土心墙,水库已不能正常运行。

2.2.2 稳定复核

在渗流计算的基础上,进行坝坡稳定复核算算。

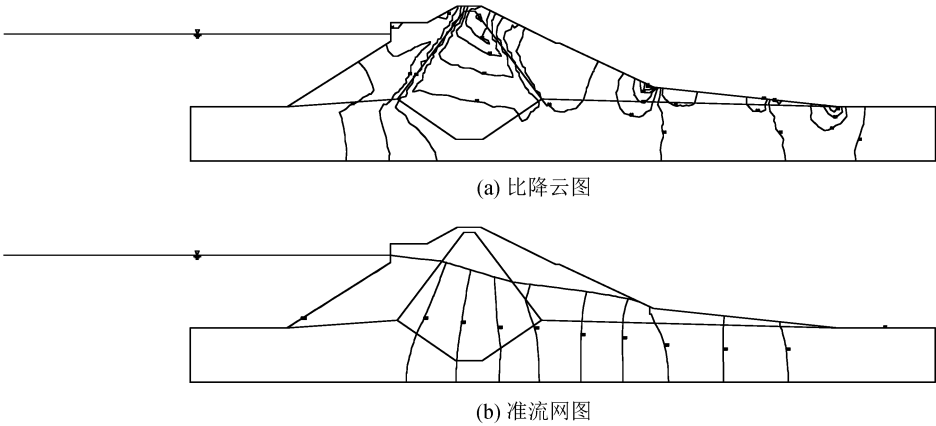
(1) 计算工况

根据《碾压式土石坝设计规范》^[19],某水库坝坡稳定分析计算工况分为:

- ①正常洪水位稳定渗流时上、下游坝坡稳定分析;
- ②设计洪水位稳定渗流时上、下游坝坡稳定分析;
- ③校核洪水位稳定渗流时下游坝坡稳定分析。

(2) 计算结果

根据《碾压式土石坝设计规范》^[19],采用瑞典圆



(坝体下游逸出点渗透比降最大值为 0.4,坝基渗透比降最大值为 0.2)

图 2 正常水位时大坝各点比降云图及准流网图

Fig.2 Nephogram of the gradient and quasi-flow network of each point on the dam at normal water level

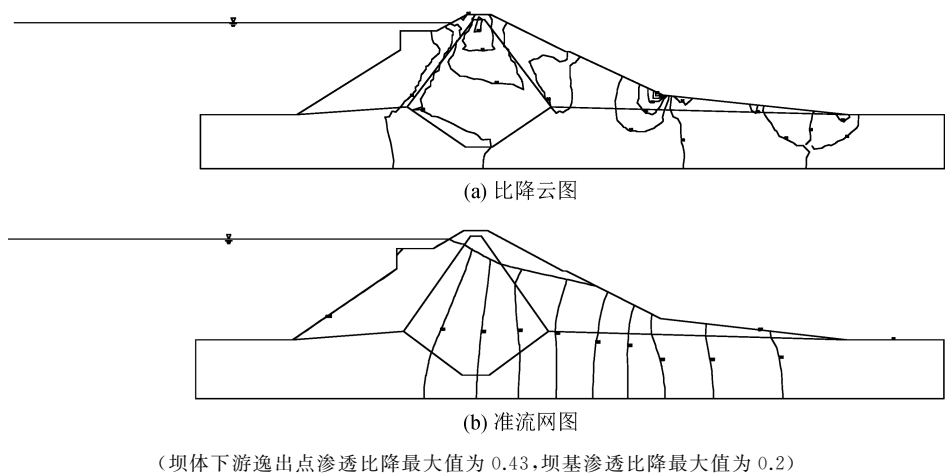


图 3 设计洪水水位时大坝各点比降云图及准流网图

Fig.3 Nephogram of the gradient and quasi-flow network of each point on the dam at design flood level

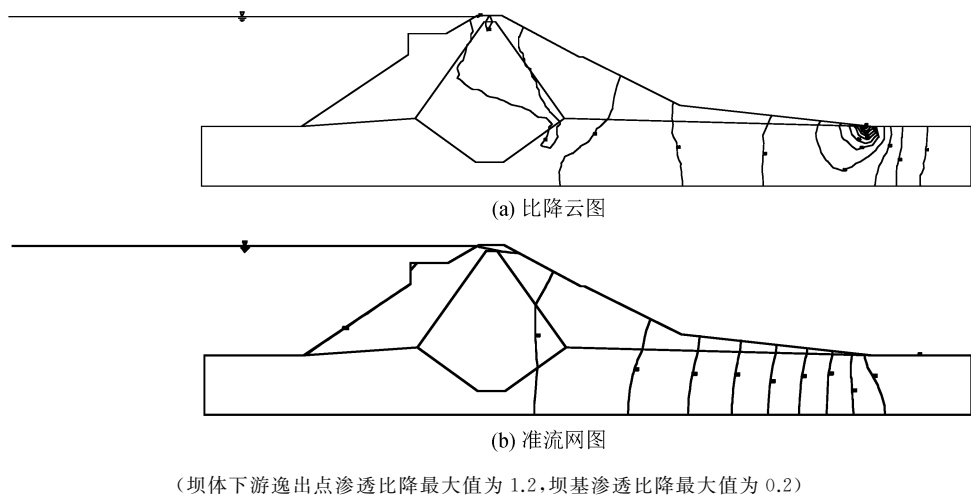


图 4 校核洪水水位时大坝各点比降云图及准流网图

Fig.4 Nephogram of the gradient and quasi-flow network of each point on the dam at check flood level

表 2 大坝下游稳定渗流计算结果

Table 2 Calculation results of the steady seepage in downstream of the dam						
计算工况	位置	渗透坡降		比较结果	逸出点 高程/m	单宽渗透量 /(m ³ ·d ⁻¹)
		计算值	允许值			
正常水位	坝体	0.40	0.495	小于允许值	286.75	0.375
	坝基	0.20	0.525			
设计洪水位	坝体	0.72	0.483	坝体大于允许值	289.0	0.636
	坝基	0.20	0.535			
校核洪水位	水位已高于黏土心墙,水库已不能正常运行					

弧法计算。抗滑稳定安全系数应满足:正常情况不小于 1.25,非常情况不小于 1.10。采用瑞典圆弧法计算坝坡稳定时,安全系数可降低 8%,即正常情况不小于 1.15,非常情况不小于 1.012。大坝坝坡抗滑稳定安全系数如表 3 所列。

坝坡稳定复核结果显示,某水库下游坝坡抗滑稳定性均满足规范要求,整体稳定性较好;上游坝坡抗滑稳定性均不满足规范要求,存在较大的稳定问题。

2.3 加固后

加固设计主要包括上游护坡工程、下游坝坡工程、下游排水导渗工程与坝顶整修。

(1) 由软件分析结果可知,此次设计满足要求(表 4)。

(2) 计算方法采用瑞典条分法,浸润线数据采用大坝渗流分析计算结果。安全系数如表 5 所列,其值均满足要求。

表 3 坝坡抗滑稳定安全系数

Table 3 Anti-slide safety coefficients of dam slope

坝坡	工况	分析条件	计算安全系数	规范允许安全系数	是否满足规范要求
下游坡	正常	设计洪水位稳定渗流	1.369	1.15	满足
	非常	校核洪水位稳定渗流	1.277	1.012	满足
	正常	正常水位稳定渗流	1.369	1.15	满足
上游坡	正常	设计水位稳定渗流	0.913	1.012	不满足
	正常	正常水位稳定渗流	0.979	1.012	不满足

表 4 大坝下游渗透计算结果

Table 4 Calculation results of the infiltration in downstream of the dam

计算工况	位置	渗透坡降		比较结果
		计算值	允许值	
正常水位	坝体	0.37	0.493	小于允许值
	坝基	0.28	0.515	
设计洪水位	坝体	0.382	0.493	小于允许值
	坝基	0.21	0.515	
校核洪水位	坝体	0.391	0.493	小于允许值
	坝基	0.28	0.515	

表 5 坝坡抗滑稳定安全系数(瑞典圆弧法)

Table 5 Anti-slide safety coefficients of dam slope (Sweden arc method)

坝坡	工况	分析条件	计算安全系数	规范允许安全系数	是否满足规范
上游坡	正常	设计水位时	1.324	1.012	满足
	正常	正常水位时	1.379	1.012	满足
下游坡	正常	设计洪水位稳定渗流时	1.439	1.15	满足
	非常	校核洪水位稳定渗流时	1.290	1.012	满足
	正常	正常水位稳定渗流时	1.402	1.15	满足

3 结论

渗流稳定性对土石坝除险加固设计尤为重要,本文基于有限元法对某水库土石坝坝体进行渗流计算,并进行渗流稳定复核。结合渗透坡降、单宽渗流量、准流网等多个指标,较为全面地对坝体的稳定性进行分析,主要结论如下:

(1) 分析了多种工况下坝体的稳定性。对某水库土石坝除险加固前在正常洪水位、设计洪水位、校核洪水位三种工况下进行渗流分析,分析结果表明:单宽渗流量最大,可达 0.636 m³/d,此时坝体的渗透坡降已超过规范允许值。

(2) 除险加固后,各工况下的渗透坡降均有所下降。其中,设计洪水位时下降幅度最大,工程效果明显;校核洪水位时,坝体、坝基渗透坡降均低于允许值。加固前,上游坡各工况下的安全系数均低于规范允许值;加固后,安全系数明显提高,均满足设计要求。

参考文献(References)

[1] 贾金生,袁玉兰,李铁洁.2003 年中国与世界大坝情况[J].中国

水利,2004(13):233.
JIA Jinsheng,YUAN Yulan,LI Tiejie.Dam Conditions in China and World in 2003[J].China Water Resources,2004(13):233.
[2] 贾金生,袁玉兰,马忠丽.2005 年中国与世界大坝建设情况[C]//中国水力发电工程学会水水泥沙专业委员会第七届学术讨论会论文集(上册).2007:251-253.
JIA Jinsheng,YUAN Yulan,MA Zhongli.Dam Construction Condition in China and World in 2005[C]//The 7th Symposium of Chinese Society of Hydroelectric Engineering.2007:251-253.
[3] SHIVAKUMAR S Athani,SHIVAMANTH,CH Solanki,GR Dodagoudar.Seepage and Stability Analyses of Earth Dam Using Finite Element Method[C]//.International Conference On Water Resources,Aquatic Procedia,2015,4:876-883.
[4] 邓苑苑.病险土石坝渗流破坏机理分析[D].新疆:石河子大学,2006.
DENG Yuanyuan.Seepage Failure Mechanism Analysis of Earth-rockfill Dam[D].Xinjiang:Shihezi University,2006.
[5] 陈勋辉,陈义涛,黄耀英,等.边坡稳定性分析的三种极限平衡法对比研究[J].人民黄河,2016(1):116-119.
CHEN Xunhui,CHEN Yitao,HUANG Yaoying,et al.Comparative Analysis of Three Different Rigid Body Limit Equilib-

- rium Methods[J]. Yellow River, 2016(1): 116-119.
- [6] 李文涛, 马田田, 韦昌富. 基于自适应松弛 Picard 法的高效非饱和渗流有限元分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 256-262.
- LI Wentao, MA Tiantian, WEI Changfu. An Efficient Finite Element Procedure for Unsaturated Flow Based on Adaptive Relaxed Picard Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 256-262.
- [7] 孟明. 亭口反调节水库土石坝渗流与稳定数值分析研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2016.
- MENG Ming. Research on Seepage and Stability Numerical Analysis of Tingkou Counter Reservoir Embankment Dam[D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2016.
- [8] 冯霄, 卢敏, 王淑文, 等. 土石坝除险加固渗流稳定复核研究[J]. 水力发电, 2015, 41(11): 64-66, 74.
- FENG Xiao, LU Min, WANG Shuwen, et al. Study on Seepage Stability Check in the Reinforcement of Earth-rock Dams[J]. Water Power, 2015, 41(11): 64-66, 74.
- [9] 周建烽, 王均星, 陈炜, 等. 线性与非线性强度的土石坝坝坡稳定分析下限法[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 233-239.
- ZHOU Jianfeng, WANG Junxing, CHEN Wei, et al. Lower Bound Method for Slope Stability of Earth-rockfill Dam with Linear and Nonlinear Strengths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 233-239.
- [10] 叶永, 许晓波, 牟玉池. 基于 COMSOL Multiphysics 的重力坝渗流场与应力场耦合分析[J]. 水利水电技术, 2017, 48(3): 7-11.
- YE Yong, XU Xiaobo, MOU Yuchi. COMSOL Multiphysics Based Coupled Analysis on Seepage Field and Stress Field of Gravity Dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(3): 7-11.
- [11] HUGHES A K, JESSOP M L, ATKINS Ltd. Locating Seepage Through, Beneath and Around Dam[J]. Dam & Safety, 2016(3): 83-86.
- [12] ANISKIN N A, RASSKAZOV L N, YADGOROV E Kh. Seepage and Pore Pressure in the Core of a Earth-and-Rockfill Dam[J]. Power Technology and Engineering, 2016, 50(4): 378-384.
- [13] XU Y Q, UNAMI K, KAWACHI T. Optimal Hydraulic Design of Earth Dam Cross Section Using Saturated-Unsaturated Seepage Flow Model[J]. Advances in Water Resources, 2003, 26(1): 1-7.
- [14] NOURANI V, AMINFAR M H, ALAMI M T, et al. Unsteady 2-D Seepage Simulation Using Physical Analog, Case of Sattarkhan Embankment Dam[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 177-189.
- [15] PANTHULU T V, KRISHNAIAH C, SHIRKE J M. Detection of Seepage Paths in Earth Dams Using Self-potential and Electrical Resistivity Methods[J]. Engineering Geology, 2001, 59(4): 281-295.
- [16] 北京理正软件设计研究院有限公司. 理正岩土软件应用指南丛书[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Beijing Lizheng Software Corp., Ltd. Lizheng Geotechnical Software Application Guide[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [17] 宋国涛. 基于理正软件的病险水库除险加固设计研究[J]. 东北水利水电, 2013, 31(3): 12-13.
- SONG Guotao. Research on Risks Reinforcement Design of Risky Reservoir Based on Lizheng Software[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2013, 31(3): 12-13.
- [18] 颜鲁林. 外雄水电站一期横向土石围堰渗流稳定分析[J]. 水利科技与经济, 2013, 19(11): 92-93.
- YAN Lulin. Seepage Stability Analysis of Lateral Rock-soil Cofferdam of Huaxiong Hydropower Station[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2013, 19(11): 92-93.
- [19] 碾压式土石坝设计规范: SL274-2001[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- Design Code for Rolled Earth-Rock Fill Dams: SL 274-2001[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2002.