

文章编号: 1000-7598 (2014) 增 1-328-06

复杂地质条件下多结构面对重力坝 坝基稳定性的影响及处理

李美蓉^{1,2}, 陈 媛^{1,2}, 张 林^{1,2}, 杨宝全^{1,2}

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 2. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065)

摘 要: 武都重力坝坝地质条件复杂, 发育有断层、层间错动带等多种不利地质构造, 且结构面相互交错组合形成多条潜在滑移面, 坝基深层抗滑稳定问题突出。为了研究多结构面对坝基深层抗滑稳定的影响及加固处理, 结合武都重力坝 19#坝段, 建立了三维数值模型进行有限元分析。首先, 对坝基中各软弱结构面的力学参数进行敏感性分析, 研究影响坝基稳定的主要因素, 揭示了坝踵处倾向下游的 $10f_2$ 、 F_{31} 断层对坝基抗滑稳定影响较大, 应进行重点加固处理。在该基础上, 在断层 $10f_2$ 、 F_{31} 拟定不同深度的混凝土置换, 对断层置换混凝土的深度进行敏感性分析, 得出不同置换深度下坝基的超载稳定安全系数。结果表明, 断层 $10f_2$ 、 F_{31} 的置换深约 19 m 时可以达到良好的加固效果, 位移和应力值得到良好的改善, 坝基塑性区域明显减小, 抗滑稳定安全系数得到明显提高, 并满足设计规范要求。研究成果对武都重力坝工程的加固处理提供了重要的科学依据, 对类似工程的稳定分析与加固处理具有参考价值。

关 键 词: 重力坝坝基稳定; 多结构面; 混凝土置换; 敏感性分析; 有限元计算
中图分类号: TV 64 **文献标识码:** A

Impacts of multi-structural planes on gravity dam foundation stability and treatment under complex geological conditions

LI Mei-rong^{1,2}, CHEN Yuan^{1,2}, ZHANG Lin^{1,2}, YANG Bao-quan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Development and Protection, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Foundation of Wudu gravity dam has the complex geological conditions, developed many adverse geological structures including faults and interbed shear zones. The stability of dam foundation is very serious due to the potential natural sliding paths formed by these interlaced planes. In order to study the impacts of multi-structural planes on foundation stability and reinforcement measures, a 3D numerical computation is conducted to analyze the typical dam section #19 of Wudu project by means of finite element method(FEM). First, the sensibility analysis is performed to study the impacts of various weak structural planes on stability. It reveals that the dam stability is severely affected by faults $10f_2$ and F_{31} incline downstream from dam heel, and the reinforcement measures should be taken and focus on the faults $10f_2$ and F_{31} . On this basis, another sensibility analysis of concrete replacement depth is also conducted. Through varying the concrete replacement depths for faults $10f_2$ and F_{31} , the corresponding safety factors are obtained. Results show that the reasonable replacement depth for faults $10f_2$ and F_{31} is about 19 m which can achieve favorable reinforcement effect; deformation and stress of dam have been improved; plasticity states of the dam foundation has been significantly reduced; the safety factor of anti-sliding stability is significantly improved; and the requirement of design specification is satisfied simultaneously. These research results provide an important scientific basis for the reinforcement of Wudu project, and also have the reference value for the stability analysis and reinforcement treatment of other similar projects.

Key words: stability of gravity dam foundation; multi-structural planes; concrete replacement; sensibility analysis; finite element calculation

收稿日期: 2013-11-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助 (No. 51379139); 国家自然科学基金青年基金资助 (No. 51109152); 四川大学青年教师基金资助 (No. 2012SCU11061)。

第一作者简介: 李美蓉, 女, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事水工结构工程及其基础工程方面的研究。E-mail: limeirong0803@163.com

通讯作者: 陈媛, 女, 1973 年生, 博士, 副教授, 主要从事水工结构工程教学和研究工作。E-mail: chenyan8899@163.com

1 前 言

重力坝的地基需要具有足够的强度、整体性和均匀性、抗渗性及耐久性等,然而,天然地基总是存在不同程度的缺陷,如浅层岩体常常风化破碎,较新鲜的基岩中存在着各种节理和裂隙,且由于地质构造的作用,还经常出现横穿坝基的断层带和软弱夹层等地质问题。这些地质缺陷将影响坝基的抗滑稳定性,对大坝的安全造成严重的影响,因此,抗滑稳定分析是重力坝设计中的重要内容之一。目前研究重力坝坝基稳定性问题的方法^[1-3]主要有刚体极限平衡法、地质力学模型试验方法和数值分析方法等。刚体极限平衡法是一种传统的稳定分析方法,从计算方法、计算荷载等方面均积累了丰富的经验。地质力学模型试验中模型是真实的物理实体,能同时考虑多种因素,模拟多种复杂的地质构造,试验结果较直观形象。数值分析方法中以有限元法应用最为广泛,与其他方法相比,它在处理复杂构造、复杂边界和荷载条件、非线性问题方面有着显著的优势,能获得较为详尽、准确的结果。

随着中国大坝建设的快速发展,坝基地质情况的复杂性也越来越大,需要对坝基采取不同的工程处理措施,满足大坝对基础的要求。我国规范《混凝土重力坝设计规范》^[4]第 7.5 条中规定:根据软弱结构面埋深不同可分别采用混凝土置换、混凝土深齿墙、混凝土洞塞等措施,提高软弱结构面抗剪能力;必要时也可采用抗滑桩、预应力锚索、化学灌浆等措施。工程上对于断层破碎带和软弱夹层等地质缺陷的处理措施^[5-6],一般采取混凝土置换、固结灌浆、混凝土深齿槽、预应力锚固等,其中,混凝土置换是一种较实用的处理措施,在实际工程中得到广泛应用,如龙羊峡重力坝^[7],坝区附近存在 8 条断层,采用了以混凝土置换为主的处理措施;百色碾压混凝土重力坝^[8]坝基 F₆ 断层采用混凝土塞进行加固处理,并在混凝土塞底部增设加强钢筋;光照重力坝^[9]坝趾处 F₂ 断层和坝踵处 F₁ 断层的处理措施是采取开挖并回填混凝土和灌浆方式进行加固处理。这些加固措施在工程上都取得了良好的效果,由于混凝土置换的深度直接关系到工程安全及投资,如何得出既安全又经济的置换深度,将对工程的安全及造价产生重大影响。规范中对倾角较陡的断层破碎带的处理方法是当断层破碎带规模不大,但其组成物质以软弱的构造岩为主,且对基础的强度和压缩变形有一定影响时可用混凝土塞加固,混凝土塞的深度可采用 1.0~1.5 倍断层破碎带的宽度

或根据计算确定。设计中常常采用一些经验公式,计算混凝土置换深度,传统经验公式如美国垦务局采用 $h = 0.0067BH + 1.5$ m 计算(当 $H > 45$ m),日本一些工程采用 $h = 0.0067BH + 3.0$ m 计算(当 $H > 45$ m)。软弱带位于坝趾附近,采用 $h = (0.2 \sim 0.3)H$,其中 h 为混凝土塞的深度(m); B 为软弱带的宽度(m); H 为软弱带出露处的坝体高度(m)^[10]。这些经验公式计算的置换深度相差较大,只能作为初步估算使用。

本文结合四川武都重力坝工程,对典型坝段建立三维数值模型进行有限元计算分析,研究多结构面对重力坝坝基稳定的不同影响,分析确定合理的混凝土置换深度。首先,对坝基中各软弱结构面的力学参数进行敏感性分析,揭示影响坝基稳定的主要因素。在此基础上,对需重点加固的主要结构面进行混凝土置换,通过拟定不同的混凝土置换深度,研究置换深度对抗滑稳定超载安全系数的影响,提出混凝土置换深度的合理范围,为工程的加固处理提供参考依据。

2 工程概况

武都水利枢纽工程^[10]位于四川省江油市境内涪江干流上,是四川省“西水东送”总体规划中以防洪灌溉为主,结合发电,兼顾城乡工业、生活及环境用水等综合利用的大(I)型水利工程,枢纽主要建筑物为碾压混凝土重力坝和坝后式厂房,最大坝高 119.14 m。

武都重力坝修建于地质条件极其复杂的坝基上,坝基中有多种不利地质构造,严重影响坝基的稳定安全性,深层抗滑稳定问题突出。典型坝段 19[#]坝段是右岸最高坝段,该段坝基地质构造剖面图见图 1,坝基岩体和结构面力学参数见表 1。19[#]坝段坝基为软弱结构面发育,有多条断层、层间错动带等软弱结构面,若在坝踵处有倾向下游的断层(F₃₁、10f₂),下游坝基内有倾向上游的缓倾断层(f₁₁₄、f₁₁₅)以及在坝趾处有倾向上游的层间错动带(JC6-B、JC7-B),这些结构面相互组合形成多条潜在的双向滑移面,对坝基稳定影响显著。主要结构面的构造特征为:断层 10f₂,倾角约为 27.5°,破碎带由断层角砾岩、断层泥、岩屑、破碎岩块组成,厚 0.1~1.0 m;断层 f₁₁₄,倾角约为 22°,破碎带组成物质为断层构造岩、岩屑夹泥等,厚 0.1~0.86 m;断层 f₁₁₅,倾角约为 17°,破碎带组成物为断层角砾岩、岩屑夹泥等,厚 0.2~0.40 m;陡倾断层 F₃₁,倾角约为 66.9°,破碎带主要由糜棱岩、断层泥、角砾

岩和压碎岩组成, 宽 0.8~4.0 m。层间错动带 JC6-B 和 JC7-B, 由白云岩夹薄层状灰绿色泥灰岩

或泥灰岩碎片组成, 错动带宽 0.2~0.5 m (局部 1.0 m)。

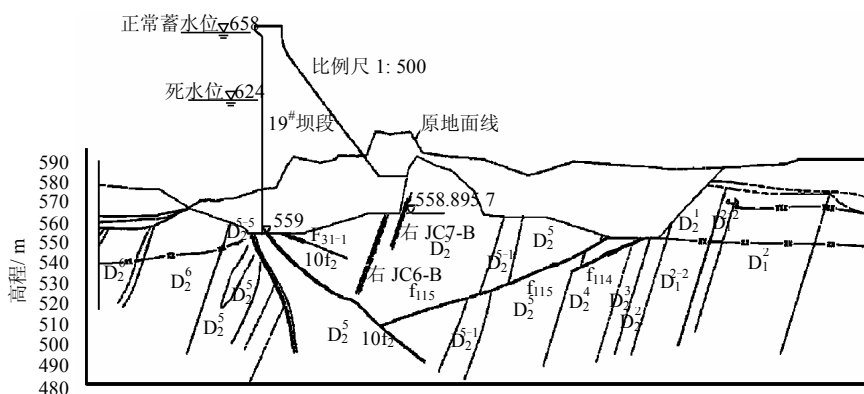


图 1 19#坝段坝基地质构造剖面图 (单位: m)

Fig.1 Geological structure of dam section #19 (unit: m)

表 1 坝基岩体和结构面物理力学参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock masses and structural planes in dam foundation

层位/结构面	密度 /(g/cm ³)	岩石单轴抗压强度/MPa		岩石抗剪强度 f	摩擦系数 f'	黏聚力 c' /MPa	岩石变形强度/GPa		泊松比
		干	湿				弹性模量	变形模量	
D ₂ ⁵	2.80	87.2	75.6	0.6~0.65	0.8~1.0	0.8~0.9	7.2~11.2	5.50~6.50	0.3
D ₂ ⁴ 、D ₂ ⁶ 、D ₂ ⁵⁻⁵	2.70	102.2	92.1	0.6	1.0~1.2	1.0~1.1	14.0	7.00	0.2
D ₂ ² 、D ₂ ⁵⁻⁶	2.70	98.4	34.8	0.5	0.7	0.5	5.0	3.00	0.3
D ₂ ¹ 、D ₂ ³	2.70	70.0	65.8	0.4~0.55	0.8	0.7~0.8	8.0	5.00	0.2
D ₁	2.70	112.8	89.6	0.7	1.0~1.2	1.0~1.1	14.0	7.0	0.2
D ₂ ⁵⁻¹	2.80	128.5	97.0		1.0	1.0	12.0	6.00	0.2
f ₁₁₄ 、f ₁₁₅ 、10f ₂ 、F ₃₁	1.65				0.4	0.02		0.10	0.4
JC(B)	1.80				0.4	0.15		0.15	0.4

3 研究方法和思路

武都重力坝工程坝地质条件复杂, 天然坝基中发育有多种软弱结构面, 存在多条潜在的滑移面, 坝基深层抗滑稳定问题十分突出。坝基中各软弱结构面对稳定性的影响程度如何, 工程中采用混凝土置换进行加固处理时应针对哪些薄弱部位进行重点加固? 如何确定混凝土置换的合理深度, 以保证坝基稳定性的有效提高与工程投资的经济性? 这些问题是工程安全建设的关键问题。本文结合 19#典型坝段, 通过三维非线性有限元计算分析, 对上述问题开展研究。研究内容包括两部分:

(1) 软弱结构面对坝基稳定的影响研究

对坝基中各软弱结构面的力学参数进行敏感性分析, 研究各软弱结构面对坝基稳定的不同影响, 揭示对坝基稳定影响较大的主要因素, 确定坝基加固处理的重点部位。

(2) 混凝土置换深度合理范围的确定

对坝基影响较大的结构面拟定几组不同的混

凝土置换深度, 进行混凝土的置换深度敏感性分析, 研究不同置换深度下重力坝的超载稳定安全系数, 提出坝基进行混凝土置换处理的合理深度。

4 软弱结构面对坝基稳定的影响及置换深度的研究

4.1 非线性有限元计算模型构建

采用 ANSYS 分析软件, 对武都重力坝 19#坝段建立三维数值模型进行非线性有限元计算。计算范围为: 坝体上游取 1.5 倍坝高, 坝体下游取 2 倍坝高, 坝基深度取 1 倍坝高。计算中考虑坝体自重、水压力 (正常水位▽658 m)、淤沙压力 (淤沙高程▽585 m) 以及扬压力 4 种荷载, 未考虑渗流及地震荷载, 计算模型坝体和置换混凝土采用 Solid65 单元, 坝基及各类软弱结构面采用 Solid45 单元, 边界约束条件为: 底面三向约束, 上下游边界为法向约束^[11], 采用弹塑性本构模型和 D-P 准则。计算单元的物理力学参数见表 1, 图 2 为计算模型的网格划分图。

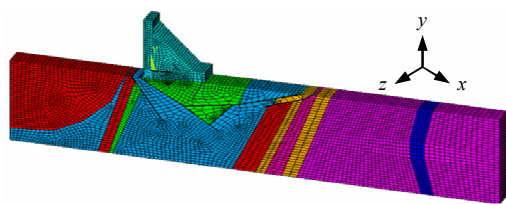


图2 19#坝段有限元计算网格图
Fig.2 Numerical mesh of dam section #19

根据重力坝及坝基岩体的实际, 计算中分阶段考虑不同的荷载作用: (1) 修建前, 将岩体自重应力场作为地应力场近似模拟大坝修建前的受力工况; (2) 完建工况, 考虑坝体与坝基自重模拟大坝完建未蓄水时坝体和岩体的应力变形状态; (3) 正常工况, 施加正常运行时的水沙荷载, 模拟大坝蓄水运行时应力变形状态; (4) 超载情况, 对上游水荷载逐步进行超载, 直至坝与地基出现整体失稳破坏为止, 研究坝与地基的超载能力。

4.2 软弱结构面对坝基稳定的影响

软弱结构面是影响坝基稳定的控制性因素, 其力学参数对坝基稳定的影响至关重要, 尤其是抗剪断强度参数 f' 和 c' 的影响较大^[13-14]。为了研究各软弱结构面对坝基稳定的不同影响程度, 揭示影响坝基稳定的主要因素, 采用敏感性分析方法, 通过改变结构面的 f' 和 c' 值, 计算在不同参数情况下的坝基抗滑稳定安全系数, 计算分析得到结构面参数变化率与超载安全系数 K_p 值变化率的关系曲线如图3所示。

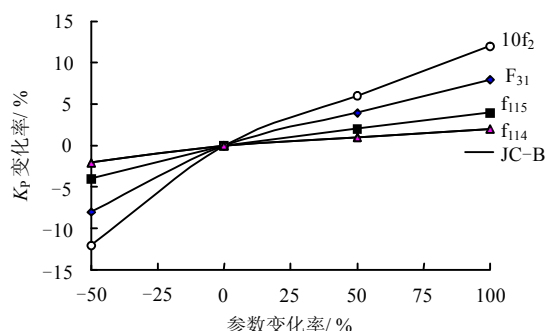


图3 结构面参数变化率-超载安全系数变化率的关系曲线
Fig.3 Variation curves of parameter variation and overload safety factor

由图3可见, 对坝基抗滑稳定性影响最大的是断层 $10f_2$, 其次是断层 F_{31} , 而断层 f_{115} 、 f_{114} 及层间错动带 JC-B 对坝基稳定性的影响相对较小。当断层 $10f_2$ 的抗剪断强度参数提高 50% 时, 安全系数 K_p 可以提高 6%; 参数降低 50% 时, K_p 将降低

12%; 当断层 F_{31} 的参数提高 50% 时, K_p 提高 4%, 参数降低 50% 时, 安全系数 K_p 降低 8%。由此可见, 抗滑稳定安全系数对结构面参数的降低比较敏感, 在实际工程运行中, 结构面的力学参数在库水渗漏及应力场长期作用下将会发生降低, 对坝基稳定的影响不容忽视, 此外, 天然坝基在正常工况下的坝基抗滑稳定安全系数仅为 2.0, 低于设计规范规定的 3.0, 坝基抗滑稳定安全性不能满足规范要求, 对结构面进行加固处理十分必要。

综上分析, 武都重力坝坝基中发育的多条软弱结构面对坝基稳定性存在较大影响, 其中影响较大的是断层 $10f_2$ 、 F_{31} 。因此, 坝踵部位是影响坝基稳定的薄弱部位, 工程处理应针对这些结构和部位进行重点加固, 以有效提高坝基的抗滑稳定性。

4.3 断层置换深度合理范围的确定

通过对天然地基条件下武都重力坝的坝基稳定性研究, 并进行多种方案论证, 工程设计拟采用以置换混凝土齿槽为主的加固处理方案, 对 19#坝段坝踵处的断层 $10f_2$ 、 F_{31} 进行了开挖置换。为了取得良好的加固效果, 需对混凝土置换深度的合理范围进行研究。本文计算时对断层 $10f_2$ 、 F_{31} 拟定了几组不同的混凝土置换深度, 对混凝土置换深度进行敏感性分析, 分别计算其置换后的超载稳定安全系数, 通过对比天然坝基条件下的稳定安全系数, 获得置换深度对坝基稳定安全系数的影响, 以确定出合理的混凝土置换深度。

表2为断层置换深度对应的超载安全系数和相对增长率表。由表2和图4可知, 断层置换深度达到 19~23 m 前, 超载安全系数呈稳步增长趋势; 置换深度达到 19~23 m 时, 超载安全系数为 3.0 单位置换深度的安全系数增长率达到了最大值 5.26, 如继续加大置换深度, 超载安全系数的增长则明显减缓。图5、6分别为正常运行工况下的天然地基和断层置换深度为 19 m 时加固坝基的塑性区分布图。由图可见, 置换深度 19 m 的塑性区域相比天然地基的明显减小, 坝基受力条件得到改善, 提高了坝基的变形稳定性, 同时也改善了坝体的结构性态。由表3可见, 随着断层的置换深度的不断加大, 坝与地基各控制点的位移和应力值比天然地基状态都有所改善, 即置换深度为 19 m 时, 坝踵顺河向位移减少了 0.85 cm, 坝踵竖直向位移减少了 1.42 cm, 坝趾位移分别减少了 0.75 和 0.12 cm, 坝顶位移(下游侧)分别减少了 0.22、1.16 cm。此外, 坝基的应

力集中区域减小, 应力分布的均匀性得到改善, 对坝踵、坝趾处的应力控制更加有利。在此基础上, 如继续加大置换深度, 对进一步提高坝与地基受力和变形能力的效果则不明显。综上考虑, 断层 $10f_2$ 、 F_{31} 的置换深度约为 19 m 时较为合理, 对改善坝体工作性态和提高坝基抗滑稳定性均有较好的加固效果。

表 2 断层不同置换深度的超载安全系数与安全系数的单位深度增长率

Table 2 Overload safety factor and unit rise rate under different replacement depths for faults

置换深度 / m	超载安全系数 K_P	K_P 单位深度增长率 / %	置换深度 / m	超载安全系数 K_P	K_P 单位深度增长率 / %
0	2.0		21	3.0	4.76
5	2.2	4.00	23	3.0	3.91
10	2.5	5.00	25	3.1	3.20
15	2.7	4.67	27	3.1	2.59
17	2.8	4.71	30	3.1	2.33
19	3.0	5.26	35	3.2	1.43

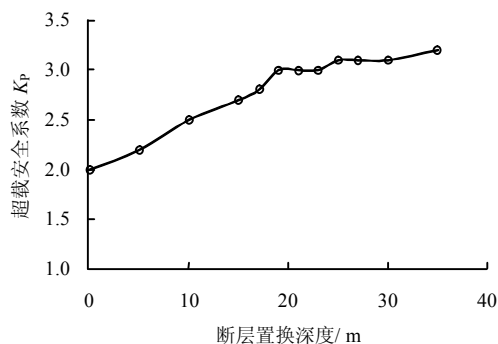


图 4 断层置换深度与超载安全系数关系曲线

Fig.4 Relationship between replacement depth for faults and overload safety factor

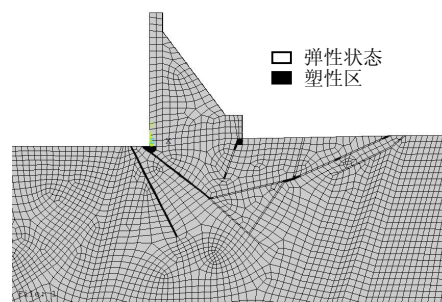


图 5 天然地基状态下坝基塑性区分布图

Fig.5 Plasticity states of the original foundation

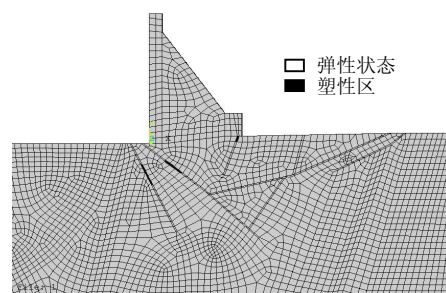


图 6 断层置换深度为 19 m 时坝基塑性区分布图

Fig.6 Plasticity states of the dam foundation when the replacement depth for faults is 19 m

在武都重力坝工程的实际设计工作中, 通过坝基加固方案的全面研究, 工程设计最终对 19#坝段采取的坝基处理加固措施是: 对坝踵处 $10f_2$ 、 F_{32} 进行开挖置换, 设置梯形 C25 混凝土齿槽, 齿槽下底面高程为 540.85 m, 混凝土置换深度为 18.15 m。坝趾后, 回填 C15 混凝土至 583.0 m。计算分析及试验研究表明^[15]: 加固处理后, 19#坝段的坝基稳定的超载安全系数由 2.0 提高为 3.2, 表明对坝踵处断层采用混凝土置换的加固处理措施能有效阻隔滑移通道的形成, 可明显提高坝基抗滑稳定性。

表 3 断层不同置换深度下坝体位移值和应力值

Table 3 Displacements and stresses of gravity dam under different replacement depths for faults

置换深度 / m	坝踵 U_x / cm	坝踵 U_y / cm	坝趾 U_x / cm	坝趾 U_y / cm	坝顶 U_x / cm	坝顶 U_y / cm	坝踵 σ_1 / MPa	坝踵 σ_3 / MPa	坝趾 σ_1 / MPa	坝趾 σ_3 / MPa
0	1.84	2.09	2.03	-0.83	5.14	1.97	0.52	0.13	2.57	0.55
5	1.23	1.10	1.52	-0.69	5.11	1.23	0.88	0.20	2.31	0.44
10	1.07	0.88	1.37	-0.69	5.03	0.99	1.07	0.28	2.10	0.36
15	1.00	0.73	1.38	-0.69	4.98	0.86	1.26	0.34	1.93	0.29
17	1.00	0.70	1.29	-0.69	4.97	0.82	1.49	0.45	1.88	0.21
19	0.99	0.67	1.28	-0.71	4.92	0.81	1.70	0.51	1.81	0.18
21	0.96	0.65	1.56	-0.74	4.88	0.77	1.76	0.59	1.72	0.15
23	0.95	0.60	1.24	-0.71	4.86	0.73	1.80	0.63	1.63	0.13
25	0.95	0.58	1.23	-0.71	4.84	0.71	1.84	0.69	1.49	0.12
27	0.94	0.55	1.22	-0.72	4.70	0.70	1.90	0.73	1.35	0.12
30	0.93	0.47	1.21	-0.71	4.76	0.67	1.98	0.80	1.28	0.10
35	0.93	0.51	1.19	-0.72	4.72	0.56	2.01	0.82	1.11	0.08

5 结 论

(1) 坝踵处的断层 $10f_2$ 、 F_{31} 对坝基稳定影响较大, 而坝趾处和下游侧的断层 f_{115} 、 f_{114} 及错动带 JC-B 的影响相对较小, 揭示了影响坝基稳定的主要因素与薄弱部位, 提出了应重点针对坝踵处的断层 $10f_2$ 、 F_{31} 进行加固处理的建议。

(2) 针对工程设计采用的混凝土置换加固方案, 对断层 $10f_2$ 、 F_{31} 采取不同的混凝土置换深度进行敏感性分析, 得出不同置换深度下坝基的超载安全系数。当置换深度为 19~23 m 时, 超载安全系数为 3.0, 继续加大置换深度后超载安全系数增长缓慢, 单位置换深度的安全系数增长率在 19 m 时达到最大值, 继续加大置换深度对坝与地基的位移和应力值的改善作用不明显。断层 $10f_2$ 、 F_{31} 置换深度的合理值约为 19 m, 可以达到良好的加固效果。

(3) 武都重力坝的工程设计, 对 19#坝段坝踵采用了混凝土齿槽的加固方案, 混凝土置换深度为 18.15 m, 且齿槽具有一定宽度与深度, 对坝踵处断层的置换加固较充分, 结合其他加固措施对提高坝与地基的整体稳定安全性具有良好效果。

本文研究成果已应用于实际工程, 为武都工程的加固处理提供了科学依据, 可为类似工程的稳定分析和加固处理提供参考。

参 考 文 献

- [1] 戴会超, 苏怀智. 三峡大坝深层抗滑稳定研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 643—647.
DAI Hui-chao, SU Huai-zhi. Stability against sliding in intake dam section of Three Gorges Project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 643—647.
- [2] 郭天明. 重力坝坝基抗滑稳定计算方法[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(2): 121—122.
GUO Tian-ming. Calculation methods for stability against sliding of gravity dam's base[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2010, 8(2): 121—122.
- [3] 陈建叶, 张林, 陈媛, 等. 武都碾压混凝土重力坝深层抗滑稳定破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2097—2102.
CHEN Jian-ye, ZHANG Lin, CHEN Yuan, et al. Failure model test on deep anti-sliding stability of Wudu rcc gravity dam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(10): 2097—2102.
- [4] 水利部长江水利委员会长江勘察规划设计院. SL319—2005 混凝土重力坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [5] 董昊雯, 陈娜. 重力坝坝基软岩带处理措施研究[J]. 科技信息, 2013, 30(13): 346—346.
DONG Hao-wen, CHEN Na. Treatment on the weak fractured zones of the gravity dam foundation[J]. **Science & Technology Information**, 2013, 30(13): 346—346.
- [6] 李永强, 张宪, 李永生. 重力坝地基存在的问题及处理措施探讨[J]. 科技信息, 2011, 11(3): 759—759.
LI Yong-qiang, ZHANG Xian, LI Yong-sheng. Discussion on the existing problems and measurements of gravity dam foundation[J]. **Science & Technology Information**, 2011, 11(3): 759—759.
- [7] 李瓚. 龙羊峡重力拱坝的断层深部处理[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(4): 335—345.
LI Zan. The faults measurements of Longyangxia gravity dam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1988, 7(4): 335—345.
- [8] 杨夏. 百色水利枢纽碾压混凝土重力坝基础处理设计[J]. 广西水利水电, 2003, 30(2): 20—23.
YANG Xia. Foundation processing design of rolled concrete gravity dam of Baise multi-purpose dam project[J]. **Guangxi Water Resources and Hydropower Engineering**, 2003, 30(2): 20—23.
- [9] 徐卫亚, 江涛, 赵志峰, 等. 光照重力坝坝基断层影响及处理的三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1099—1105.
XU Wei-ya, JIANG Tao, ZHAO Zhi-feng, et al. 3D numerical simulation of impact of key fault and fault enhancement on foundation rock mass of Guangzhao high gravity dam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(6): 1099—1105.
- [10] 赵永刚. 二滩水电站坝基软弱岩带的处理方法[J]. 水电站设计, 2001, 17(3): 23—27.
ZHAO Yong-gang. Treatment on the weak fractured zones of Ertan hydropower station dam foundation[J]. **Design of Hydroelectric Power Station**, 2001, 17(3): 23—27.
- [11] 武都引水工程建设局武都局. 武都引水工程[J]. 中国投资, 2003, 16(8): 121—121.
Wudu Construction Bureau, Wudu Authority. Wudu water-diversion project[J]. **China Investment**, 2003, 16(8): 121—121.
- [12] 赵代深. 重力坝有限元计算网格剖分与应力控制标准问题[J]. 水利学报, 1996, 41(5): 37—43.
ZHAO Dai-shen. On the subdivision of grids in computation for gravity dams[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1996, 41(5): 37—43.
- [13] FISHMAN Y A. Features of shear failure of brittle materials and concrete structures on rock foundations[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2008, 45(6): 976—992.
- [14] 李珍, 吴旭东. 强度折减方法中对各材料参数调整的探讨[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2006, 19(1): 65—68.
LI Zhen, WU Xu-dong. The discussion of the modification of material parameters[J]. **Journal of Yancheng Institute of Technology(Natural Science)**, 2006, 19(1): 65—68.
- [15] 何江达, 肖明砾, 谢红强, 等. 四川省武都引水第二期工程碾压混凝土重力坝坝基稳定及基础处理研究[R]. 成都: 四川大学, 2007.