

隘口沥青混凝土心墙堆石坝岩溶坝基 稳定分析及处理研究

方朝阳, 代礼红, 段亚辉

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 研究岩溶坝基岩体稳定性评价方法和坝基处理措施, 灌浆是一种可靠和有效提高地基防渗性能和地基稳定性的方法。根据隘口工程特点, 确定基础灌浆处理方案, 对不同岩溶分布情况下坝基岩体的稳定性进行分析比较, 指出要保证沥青混凝土心墙的稳定和安全, 必须对基础进行加固处理。根据计算结果确定不同深度坝基岩溶的处理方式: 固结灌浆孔按 3 序逐渐加密加深, I 序孔孔距 12 m, 孔深 13~36 m, 河床坝基处深 36 m, 坝趾、坝踵和坝肩处 13 m; II 序孔孔距 6 m, 孔深 13~21 m, 河床坝轴线处深 21 m, 坝趾、坝踵及坝肩处深 13 m; III 序孔孔距 3 m, 孔深均为 13 m。对处理后的坝基岩体稳定性进行分析比较, 计算分析表明, 经灌浆处理后, 沥青混凝土心墙的工作性状满足工程要求, 基础处理方案是可行的。

关键词: 水利工程; 岩溶; 灌浆法; 强度储备法; 沥青混凝土心墙; 堆石坝

中图分类号: TV 31

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 3802 - 07

STUDY ON KARST FOUNDATION STABILITY AND TREATMENT MEASUREMENTS FOR AIKOU ASPHALT CONCRETE CORE ROCKFILL DAM

FANG Chaoyang, DAI Lihong, DUAN Yahui

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan,
Hubei 430072, China)

Abstract: Evaluation method of foundation rock stability and treatment measurements in karst areas is studied. Grouting is a kind of reliable and effective method to improve anti-seepage capacity and stability of foundation. On account of characteristic of Aikou, foundation grouting treatment scheme is determined. The stability of foundation rock with different karst distributions is analyzed and compared. To ensure asphalt concrete core's stability and safety, the dam foundation must be reinforced. Based on calculations, different treatment measurements to different depth karst foundations are determined as follows: 3 groups of consolidation grouting holes should be arranged, the distance between the adjacent groups is smaller and the depth of each group is deeper, group I hole distance is 12 m, depth 13 - 36 m(depth of river bed hole is 36 m, of dam toe, heel and abutment is 13 m), group hole II distance is 6 m, depth 13 - 21 m(depth of river bed hole is 21 m, of dam toe, heel and abutment is 13 m, group hole III distance is 3 m, depth 13 m. The stability of the treated dam foundation is calculated and compared, even big cave(beyond 50 m to dam foundation) were existed, the safety of the treated foundation can be ensured. It is proved that, with grouting treatment, work states of asphalt concrete core meet the request of engineering, and the treatment schemes are feasible and reliable.

Key words: hydraulic engineering; karst; grouting method; strength reserve method; asphalt concrete core; rockfill dam

收稿日期: 2005 - 12 - 30; **修回日期:** 2006 - 03 - 23

作者简介: 方朝阳(1968 -), 男, 博士, 1991 年毕业于武汉水利电力大学水电系水工结构专业, 现任副教授, 主要从事水利水电工程安全监控方面的教学与研究工作。E-mail: fcyfcywhu@163.com

1 引言

岩溶地基在我国分布范围广。在岩溶地基上修建水工建筑物常碰到的问题是地基承载力不足、不均匀沉降、地基滑动和塌陷等^[1]。随着西部开发的深入,越来越多的水电工程兴建在岩溶地区。岩溶地基处理不好就会造成建筑物损坏、水库渗漏,影响生产,危及人民生命财产安全。由于岩溶分布复杂,因此对岩溶地基进行处理,做到既经济合理,又能保证建筑物安全、防止渗漏,有着重要的意义。其中,对岩溶基础稳定性、安全性的研究尤其重要^[2-3]。

重庆市隘口沥青混凝土心墙堆石坝位于岩溶地区,而且岩溶数量多。从坝基基岩面至其下 50 m 范围内绝大部分坝基溶洞直线率大于 10%,岩溶强烈发育。溶洞充填物为软泥及泥夹砂砾石,占溶洞空间的 77% 以上。充填物强度很低,在上部荷载及高水头作用下,充填物可能被带走,甚至发生岩溶塌陷,严重影响心墙及坝体的稳定。因此,必须探明在如此高岩溶率地基上沥青混凝土心墙及其大坝的变形规律、坝基的安全状况、合理的处理方式和处理效果。

强度储备法(折减法)作为评价坝基岩体稳定性的一种方法,是认为岩体抗剪强度参数 c, f 等具有一定的安全储备,将其下浮一个 K_f 倍,求出坝基岩体的安全系数,进而判断坝基岩体稳定^[4-8]。

2 坝基稳定性判别准则

关于坝基稳定性评判准则一般有点破坏准则、整体破坏准则及极限变形准则等,有关各种准则的适用情况及优缺点前人都有过研究^[4-6,9]。其中,点破坏准则是要求坝基中任何一点都不出现破坏。虽然这样的要求在实际工程中很难做到,因而被人们认为不适合用来分析坝基的安全状况。但是,通过计算模拟,如果坝基很多点发生了破坏,且这些发生破坏点的分布具有一定规律,或者这些点相互连通并且从坝基出露,很显然坝基会面临失稳,产生破坏,因此通过分析坝基各点的失稳破坏过程,同样可以分析判断坝基的稳定性。从另外意义上说,整体破坏准则就是寻找这样的滑动面,在这些滑动面上各点都处于临界失稳状态。

另外,通过研究坝基各点的点安全系数及其分

布、发展规律,尤其是不同强度储备情况下坝基点安全系数的变化分布规律,可以了解、掌握坝基的安全状态与坝基材料强度之间的关系,为基础处理和上部坝体结构布置提供重要参考依据。尤其是岩溶基础,其各项力学参数变异较大,通过不同的强度储备计算,可以更好地了解坝基的安全状况。

因此,结合强度储备法,利用点破坏准则研究分析坝基(包括岩溶坝基)的安全状况是合适的。点安全系数一般表达式^[5,6]可写为

$$K_i = (f'\sigma + c')/\tau \quad (1)$$

式中: f' , c' 为抗剪断参数; σ , τ 为有限元计算的应力。

从理论上说,只要可能滑动面上各点的 $K_i \geq 1$,则结构是稳定的。利用强度储备法,就是不断增大 K_f ,按照一定的屈服准则,通过有限元计算各个点的安全系数,直到形成完整的滑动面,以此判断坝基的稳定性。

3 岩溶灌浆及其适用条件

对于岩溶地基常采用的处理方法有填垫法(适用于裸露的或浅埋的岩溶)、加固法、跨越法(用板、梁、拱等跨越溶洞)、桩基法等^[1]。

对于埋深较大或岩溶分布较复杂的大坝基础,密钻灌浆法是一种比较可靠而有效的方法。使用密钻灌浆法应视岩溶洞隙含水程度和处理目的选择材料。用于填塞时,可用黏土、砂石、混凝土、水泥砂浆等;用于防渗时,可用水泥浆和沥青作帷幕,灌浆顺序可先外围后中间,先上游后下游;用于充填加固时,可用快干材料或砂石等将洞隙先行填塞再灌浆,灌浆时开始压力不宜过高,以免浆料大量流出加固范围。

采用这种方法要注意的问题是:(1)防止浆液流失。需探明地下水条件,采用速凝水泥并用浓浆。(2)合理确定钻孔灌浆的压力与间距。根据压水试验等,确定灌浆压力与间距,保证岩溶能充填密实或能将岩溶率控制在规定限度以内。

4 岩溶基础处理措施

由于隘口沥青混凝土心墙堆石坝基岩溶强烈发育,影响渗流和基础稳定,并且沥青混凝土心墙很薄,因此必须对岩溶坝基进行处理。经多方案比

较，采取的处理方式如下：

防渗体采取以小孔径钻孔、高压水泥灌浆为主，并辅以旋喷法灌浆泵入高流态混凝土，投入砾石，再灌注水泥砂浆、水泥黏土砂浆等方式建造。

对岩溶发育破碎的围岩，分别采用锚杆及固结灌浆处理，对大溶洞采用挖除溶洞淤泥回填混凝土处理。根据灌浆试验报告，F₂断层至河床右坝肩外50 m范围内，耗灰量按500 kg/m控制，其余按100 kg/m控制。帷幕灌浆底线要伸入最低层溶洞或溶隙以下，且透水率小于5 Lu下5 m，最大深度150 m，总进尺127 397 m，防渗帷幕面积1.642×10⁵ m²。

为防止坝基局部塌陷过大，保证坝基具有足够的稳定性，对整个坝基采取加固处理措施。其一，对表面溶洞、溶隙采用追踪扩挖并回填C15混凝土处理，追踪扩挖深度3~5 m；追踪扩挖工程量按岩溶率的25%估算；扩挖按1.5倍岩溶体积计算，回填混凝土按2.5倍岩溶体积计。其二，采用固结灌浆处理，固结灌浆孔按3序逐渐加密加深。I序孔孔距12 m，孔深13~36 m，河床坝基处深36 m，坝趾、坝踵及坝肩处13 m。II序孔孔距6 m，孔深13~21 m，河床坝轴线处深21 m，坝趾、坝踵及坝肩处深13 m。III序孔孔距3 m，孔深13 m。在施工过程中，当I序孔底部出现大于12 m溶洞时，将其邻近的II，III序孔加深至与I序孔一致，当II序孔底部出现大于8 m溶洞时，将邻近的I序孔加深至与II序孔一致。

固结灌浆采用高压冲洗、高压灌浆。根据《重庆市秀山县隘口水库工程现场灌浆试验报告》，固结灌浆孔平均耗灰量按550 kg/m控制。

5 岩溶坝基处理前后安全状况分析

由于坝基岩溶发育强烈，有限的钻孔不可能探

明全部岩溶的准确分布和尺度。因此，应假定各种不利的岩溶分布和尺度：在有钻孔的位置，岩溶分布以地质报告为准；在没有钻孔的位置，按照地质报告河床部位ε_{3m}为19.62%、ε_{3h}为5.63%，平均14.16%，坝基下30 m以内基岩溶洞直线率大于10%范围占坝基的绝大部分考虑岩溶的分布。考虑到地质勘探点毕竟有限，对不同岩溶分布率对坝基安全稳定的影响亦进行了分析比较。同时，考虑到地质条件复杂，岩溶强烈发育，计算中考虑了在坝基面以下存在大溶洞的情况^[10]。

计算采用Mohr-Coulomb屈服准则和考虑弱化的理想弹塑性本构关系，用强度储备法分析坝基的失稳破坏过程。

隘口沥青混凝土心墙堆石坝基岩体物理指标建议值分别见表1，2。

表1 隘口沥青混凝土心墙堆石坝基岩体物理指标建议值
Table 1 Physical parameters of foundation rock of Aikou asphalt concrete core rockfill dam

地层岩性	比重	重度/(kN·m ⁻³)			含水率/%	饱水率/%	吸水率/%	孔隙度/%
		烘干	自然	饱和				
白云质页岩	2.78	26.4	26.70	26.71	1.16	1.21	3.15	
ε _{3m} 深灰、紫灰色灰岩	2.71	26.8	26.93	26.98	0.17	0.59	0.97	
ε _{3m} 白云岩	2.78	26.8	27.00	27.10	0.54	0.63	0.89	
ε _{3h} 白云岩	2.82	27.6	27.70	27.80	0.30	0.67	0.50	

5.1 地基处理前坝基安全状况

按照地质报告提供的岩溶直线分布率假定坝基岩溶分布，利用平面弹塑性有限元进行计算。计算结果表明：

(1) 坝基最大应力均未超过岩石抗压强度，但由于岩溶的存在，岩溶周围应力分布状况恶化，应力变化梯度大。岩溶周围的岩石承受的应力较大，

表2 隘口沥青混凝土心墙堆石坝基岩体力学指标建议值

Table 2 Mechanical parameters of foundation rock of Aikou asphalt concrete core rockfill dam

地层岩性	单轴抗压强度/MPa		抗拉强度/MPa	抗剪断强度		抗剪强度			变形指标		
	饱和	天然		f'	c'/MPa	f'	c'/MPa	f	变形模量/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
白云质页岩	9.4	14.9	0.70	0.60	0.60	0.55	0.45	6 000	8 000	0.24	
深灰、紫灰色灰岩	55.0	67.0	1.00	0.90	1.00	0.75	0.85	18 000	20 000	0.25	
ε _{3m} 白云岩	52.0	60.0	0.60	0.85	0.90	0.72	0.75	16 000	18 000	0.25	
ε _{3h} 白云岩	45.0	54.0	0.60	0.80	0.80	0.70	0.70	15 000	17 000	0.24	
碎裂状白云岩	25.0	32.0	0.39	0.70	0.60	0.60	0.50	10 000	12 000	0.26	

局部有较大的拉应力。

(2) 在完建期, 安全系数较小的范围主要集中在坝基较深的范围。而在正常蓄水位时安全系数值为 2.0 的范围延伸到上游坝脚(见图 1), 但并未从下游坝脚出露。而下游坝趾(H26 孔下)处由于岩溶较大, 安全度不足。如果考虑材料强度的储备安全系数, 在材料强度的储备安全系数为 1.5 时, 坝基面出现大量安全系数等于 1.0(实际上已经有部分破坏)的区域; 在材料强度的储备安全系数为 2.0 时, 坝基面下安全系数为 1.0 的区域从上游坝踵到下游坝趾连成一片, 相互贯通出露, 基础将处于不安全状态(见图 2)。

(3) 根据地质报告, 由于岩溶分布的不确定性, 基础面以下 30 m 范围内 ϵ_{3m} 层(坝轴线下游侧的坝基正好处在 ϵ_{3m} 层)岩溶直线率有可能达到 21%。在这种情况下安全系数小于 2.0 的区域占坝基面的绝大部分, 而且由于岩溶数量的增多, 在坝基下游侧 10~20 m 范围也出现了一片安全系数小于 2.0 的区域, 这些区域相互连通, 威胁坝基及坝体安全。

(4) 为进一步研究岩溶分布对坝基安全的影响, 研究了岩溶直线率 12% 基础面以下 40 m 范围内存在较大岩溶的影响。计算中假定在坝基设计处理深度底界处即 30 m 以下有 15 m 的大溶洞, 深度 21 m 以下出现 12 m 的大溶洞, 深度 13 m 处出现 8 m 的大溶洞, 并且根据坝轴线、坝踵和坝趾可能出现大溶洞的情况进行了组合。分析结果表明, 这种情况坝基面的安全也无法保证。

(5) 基础面以下 80~100 m 范围存在较大岩溶的情况对坝基及坝体安全的影响有限, 而且由于深

度较大, 处理的难度也非常大, 因此可不对此进行处理。

5.2 基础处理后坝基安全状况

根据初步拟定的基础与岩溶处理方案, 对于深度 10 m 以内的岩溶认为全部被灌浆所充填, 深度 10~20 m 范围岩溶直线率按 4% 计算; 深度 20~30 m 范围岩溶直线率 6%; 深度 50 m 以下岩溶不作处理, 而对于坝踵和坝趾实际采用的深度为 10 m。坝轴线与坝踵和坝趾之间近似按直线处理。作为比较分析, 计算中亦考虑了在进行基础处理后前述大溶洞依然存在的情况。

在完建期, 水平与竖直位移坝轴线上下游基本对称, 铅直正应力的分布也是对称的, 且沿高程的分布规律正常, 但由于岩溶的影响特别是大溶洞的影响局部出现一定的变化。完建期坝基面的沉陷值较小, 进行基础处理后坝基面的最大沉陷值减小约 30%(有大溶洞), 灌浆处理效果明显。

进行基础处理后, 坝基特别是坝基面附近的安全系数值增大明显, 同时, 坝轴线、坝踵及坝趾下一定范围的应力状况也有明显改善。正常蓄水位情况下坝基的安全系数都提高到 2.0 以上(见图 3)。

在正常蓄水位时, 即使是在有大溶洞的情况下(见图 4), 坝基面附近的安全系数均大于 2.0, 只是在灌浆廊道的下游侧局部区域安全系数小于 1.0。如果进一步考虑材料强度储备安全系数, 在材料强度储备安全系数为 1.3 和 1.5 时, 虽然坝基面附近出现了一些安全系数小于 1.0 的区域, 但这些区域都是分散的, 并未连成一片, 更没有从上游到下游相互连通。即使是材料强度储备安全系数为 2.0 时,

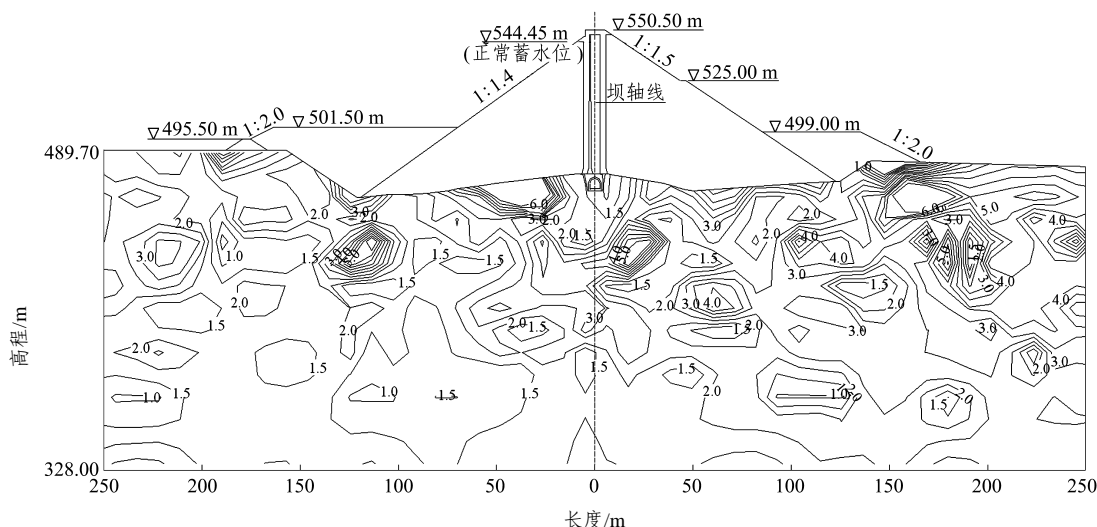


图 1 正常蓄水位坝基安全系数等值线图

Fig.1 Safety factor isogram of dam foundation under normal water level

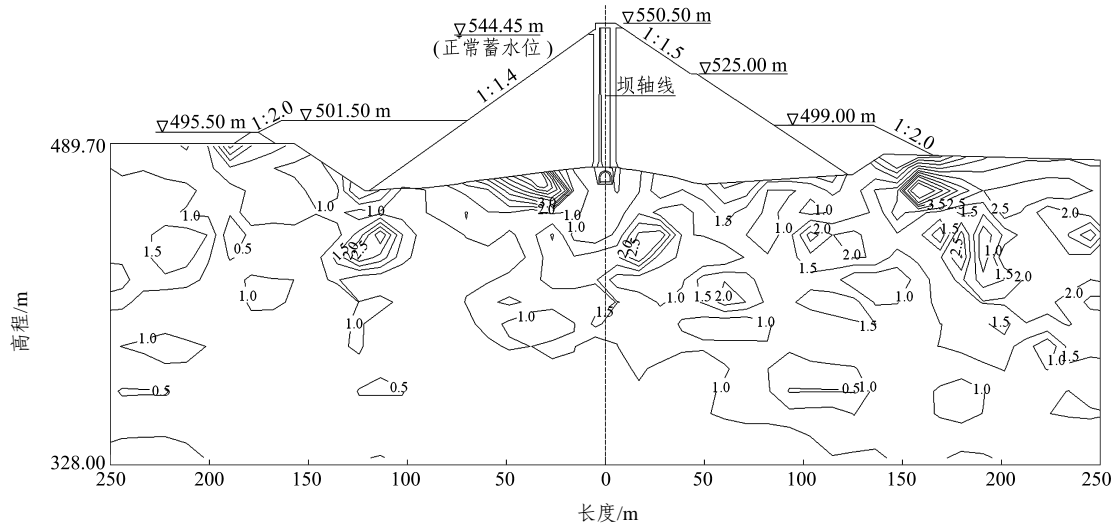


图2 正常蓄水位坝基安全系数等值线图(材料强度储备安全系数为2.0)

Fig.2 Safety factor isogram of dam foundation under normal water level(strength reserve coefficient of material is 2.0)

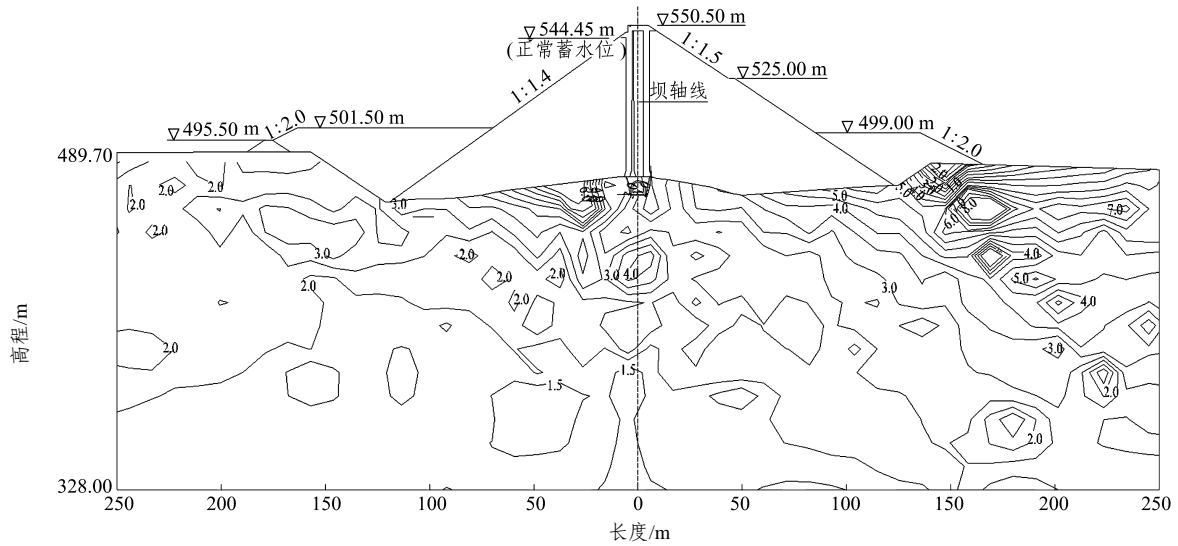


图3 正常蓄水位坝基安全系数等值线图(处理后)

Fig.3 Safety factor isogram of dam foundation under normal water level(after being grouted)

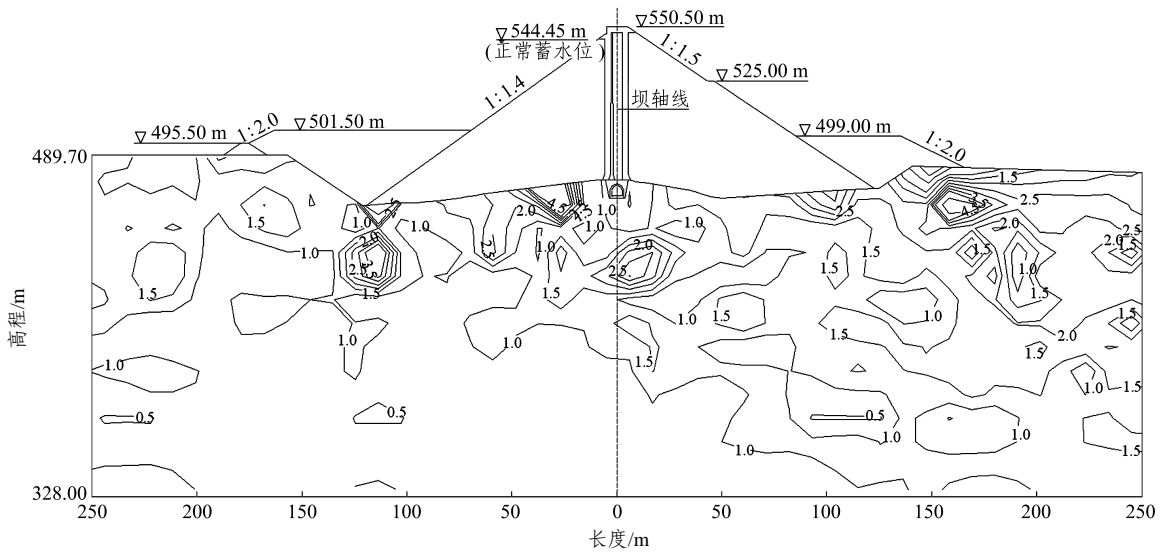


图4 正常蓄水位坝基安全系数等值线图(处理后材料强度储备安全系数为2.0, 有大溶洞)

Fig.4 Safety factor isogram of dam foundation under normal water level(after being grouted, strength reserve coefficient of material is 2.0, big cave exists)

虽然从上游坝踵到坝轴线的区域出现安全系数小于1.0的连通区域, 但该区域并未从下游坝脚出露。所以经处理后, 坝基面附近的安全是有保证的。如果坝基没有这样的大溶洞, 则坝基的安全将更加有保证。

6 地基处理对沥青混凝土心墙的影响

运用三维有限元程序对进行基础处理后的坝体应力 - 应变进行计算。各种计算工况坝体沉降及应力水平特征值见表 3。沥青混凝土心墙最大断面中轴线水平和竖向位移及应力水平分别参见图 5~7。

表 3 坝体沉降及应力水平特征值表

Table 3 Characteristic values of dam's settlement and stress level

工况	沉降		心墙应力水平	
	最大值/mm	出现部位	最大值	出现部位
完建期	227.8	2/3 坝高之垫层区	0.37	1/3 心墙高度
520 m 水位	230.2	2/3 坝高之过渡区	0.36	1/3 心墙高度
正常蓄水位	234.0	2/3 坝高之下游坝体	0.32	1/3 心墙高度
校核洪水位	245.8	2/3 坝高之下游坝体	0.37	1/3 心墙高度

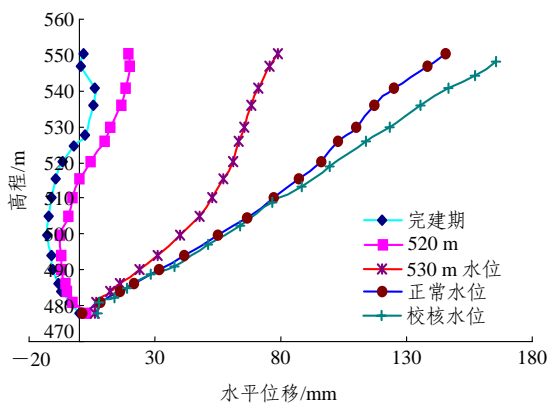


图 5 心墙中轴线水平位移图

Fig.5 Horizontal displacements of central core axis

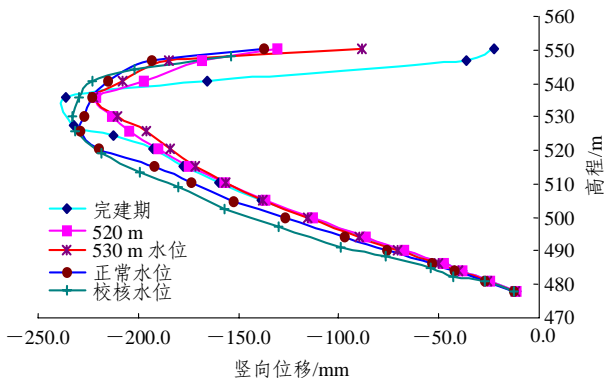


图 6 心墙中轴线竖向位移图

Fig.6 Vertical displacements of central core axis

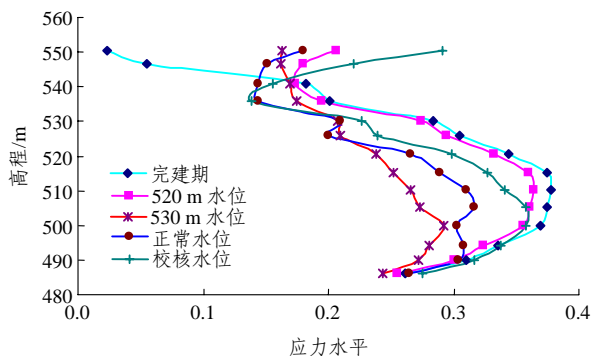


图 7 心墙中轴线应力水平图

Fig.7 Stress level of central core axis

从各计算结果及图表中可以看出, 沥青混凝土心墙的位移较大。竣工时, 在沥青心墙底部和 1/3 坝高区域内产生向上游的位移, 最大位移为 -12.6 mm。但随着水位的不断升高, 沥青混凝土心墙顺河流向水平位移逐渐转向下游, 最大位移为 168 mm(校核洪水位), 最大位移均发生在坝顶。竣工时最大断面坝体的最大沉降为 227.8 mm, 正常蓄水位时的最大沉降为 234.0 mm, 校核洪水位时的最大沉降为 245.8 mm, 均出现在坝高的 2/3 高度部位。心墙在正常蓄水位时的最大沉降为 228.7 mm, 校核洪水位时的最大沉降为 231.8 mm。由于坝体及心墙各部位的高度差异, 坝体两岸向河床中心的位移明显, 垂直河流向水平位移左岸最大为 79.3 mm, 右岸为 83.0 mm, 右岸的位移较大。由于两岸向河床中心的位移较大, 导致两岸小主应力较小。因此, 对于沥青混凝土心墙的施工必须保证质量, 以应对这种复杂的变化, 在施工时尽可能提高两岸坝体的填筑密实度, 并认真进行基础处理。

从大主应力 σ_1 等值线图(限于篇幅未绘出)可以看出, 沥青心墙两侧的大主应力变化较平缓, 同时心墙的沉降也基本对称, 说明设置的过渡层和垫层对于缓解应力集中、改善心墙的工作状况发挥了重要作用。

从应力水平可以看出: 心墙虽然变形复杂, 但应力水平较低, 这一方面说明沥青混凝土心墙变形模量较低, 有利于降低心墙的应力水平; 另一方面说明经基础处理后心墙的工作性态较好。在未进行基础处理前, 坝体的沉降较大, 应力水平变化复杂。

7 结 语

以上的计算分析表明, 对岩溶地基进行灌浆等

处理后,坝基的安全系数值明显提高,同时坝基应力状况也明显改善,不会发生塌陷和失稳破坏。进行基础处理后,沥青混凝土心墙的工作性状明显改善,受基础不利变形的影响较小,心墙的变形和应力都在规定的范围之内。这一研究成果和基础处理方案也已被应用于隘口沥青混凝土心墙坝基的处理设计。通过对该工程的研究分析,可以得出如下认识:

(1) 岩溶的存在对坝基安全有较大影响。由于岩溶及其分布的复杂性及勘探工作的有限性,对各种可能岩溶分布情况下的坝基安全状况进行分析是非常必要的,对采取合适的基础处理方案有着重要的指导意义。

(2) 对于大面积的岩溶地基,尤其是坝基的处理,采用灌浆法进行加固和防渗处理是一种有效可靠的方法。

(3) 利用强度储备理论和点破坏准则研究岩溶坝基的安全状况是有效的,也是可行的。

(4) 本工程对于岩溶地基加固处理的措施可以为类似工程提供参考。

参考文献(References):

- [1] 周建普,李献民,张可能.岩溶地基处理方法[J].矿冶工程,2002,22(1):32-33.(Zhou Jianpu, Li Xianmin, Zhang Keneng. Treatment methods of karst foundation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2002, 22(1): 32-33.(in Chinese))
- [2] 赵明阶,敖建华,刘绪华,等.岩溶尺寸对隧道围堰稳定性影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(2):213-217.(Zhao Mingjie, Ao Jianhua, Liu Xuhua, et al. Modeling testing research on influence of karst cave size on stability of surrounding rockmasses during tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 213-217.(in Chinese))
- [3] 欧阳崇云.隔河岩工程防渗帷幕的几个技术问题[J].人民长江,1995,26(5):10-14.(Ouyang Chongyun. Technical problems about Geheyan Project's seepage proof curtain[J]. Yangtze River, 1995, 26(5): 10-14.(in Chinese))
- [4] 赖国伟,王宏硕,陆述远.具有软弱结构面坝基地稳定分析[J].武汉水利电力学院学报,1987,67(4):1-10.(Lai Guowei, Wang Hongshuo, Lu Shuyuan. Stability analysis of dam foundations with weak layer[J]. Journal of Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Engineering, 1987, 67(4): 1-10.(in Chinese))
- [5] 段亚辉,赖国伟.碾压混凝土重力坝失稳破坏机制的初步分析[J].水利学报,1995,(5):55-59.(Duan Yahui, Lai Guowei. Study on failure mechanism of roller compacted concrete gravity dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, (5): 55-59.(in Chinese))
- [6] 陈进,黄薇.混凝土重力坝抗滑稳定安全系数与安全度探讨[J].长江科学院院报,1995,12(3):1-7.(Chen Jin, Huang Wei. Inquiry to safety coefficient and safety degree of stability against sliding of concrete gravity dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1995, 12(3): 1-7.(in Chinese))
- [7] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343-346.(Zhao Shangyi, Zheng Yingren, Shi Weimin, et al. Analysis of safety factors of slope by strength reduction finite element[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343-346.(in Chinese))
- [8] 郑宏,李春光,李焯芬,等.求解安全系数的有限元法[J].岩土工程学报,2002,24(5):323-328.(Zheng Hong, Li Chunguang, Lee C F, et al. Finite element method for sloving the factor of safety[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 323-328.(in Chinese))
- [9] 赖国伟,陆述远,常晓林,等.基于不等比例降强度参数的龙滩碾压混凝土坝稳定分析[J].水利水运工程学报,2002,92(2):43-47.(Lai Guowei, Lu Shuyuan, Chang Xiaolin, et al. Stability analysis of Longtan RCC dam by unequal proportional reduction material strength parameters method[J]. Hydro-science and Engineering, 2002, 92(2): 43-47.(in Chinese))
- [10] 武汉大学.隘口水库工程沥青混凝土心墙堆石坝三维有限元分析报告[R].武汉:武汉大学,2003.(Wuhan University. Report on three-dimensional finit element analysis of Aikou reservoir asphalt concrete core rockfill dam[R]. Wuhan: Wuhan University, 2003.(in Chinese))