

大桥水库钢筋混凝土面板堆石坝设计

胡继友

(四川省水利水电勘测设计研究院,成都,610072)

摘要 大桥水库工程地处高地震区,地质条件极为复杂。其面板堆石坝的设计在结构抗震、坝料选择、高边坡及坝基处理方面特点突出,尤其是采用天然洪积堆积层直接作垫层料在面板坝上的应用,丰富了料源途径,节省了投资。

关键词 面板堆石坝 高地震 高边坡 风化 卸荷 天然垫层料

1 工程概述

大桥水库工程位于四川省冕宁县境内,是安宁河流域水资源开发总体规划中确定的第一期开发的骨干工程和龙头水库,是一座以灌溉和工业、城镇生活供水为主,结合发电兼顾防洪、环保用水、水产养殖、旅游等综合利用的大()型水利工程。正常蓄水位 2 020 m,总库容 6.58 亿 m^3 ,灌溉面积 5.8 hm^2 ,电站装机容量 9 万 kW,年发电量 3.5 亿 kW h。

大桥水库工程位于高地震区,场地基本烈度为 8°,建筑物地震设防烈度 8.5°。工程区地质条件复杂,岩石风化,卸荷严重,岩体破碎,断层、裂隙等地质构造发育。

工程主体建筑物包括主坝、副坝、溢洪道、放空洞、引水洞、调压井、高压管道及电站厂区工程。其中钢筋混凝土面板堆石主坝高 93 m,坝轴线长 312 m。坝基岩体为印支期中酸性混染岩,其平面布置见图 1。碎石土心墙堆石副坝高 29.4 m,坝基为低压缩、弱膨胀、抗渗强度高、崩解快的昔格达半成软岩。水库枢纽为二等工程,主坝、副坝为二级建筑物。

工程于 1993 年 10 月正式动工,1995 年 11 月实现截流,1996 年 3 月开始主坝临时渡汛断面填筑,6 月底达到利用导流洞导流、拦截 50 年一遇洪水标准的渡汛高程并实现安全渡汛。

2 坝址区天然地形地质条件

主坝坝址位于北径河与苗冲河汇口下游长约

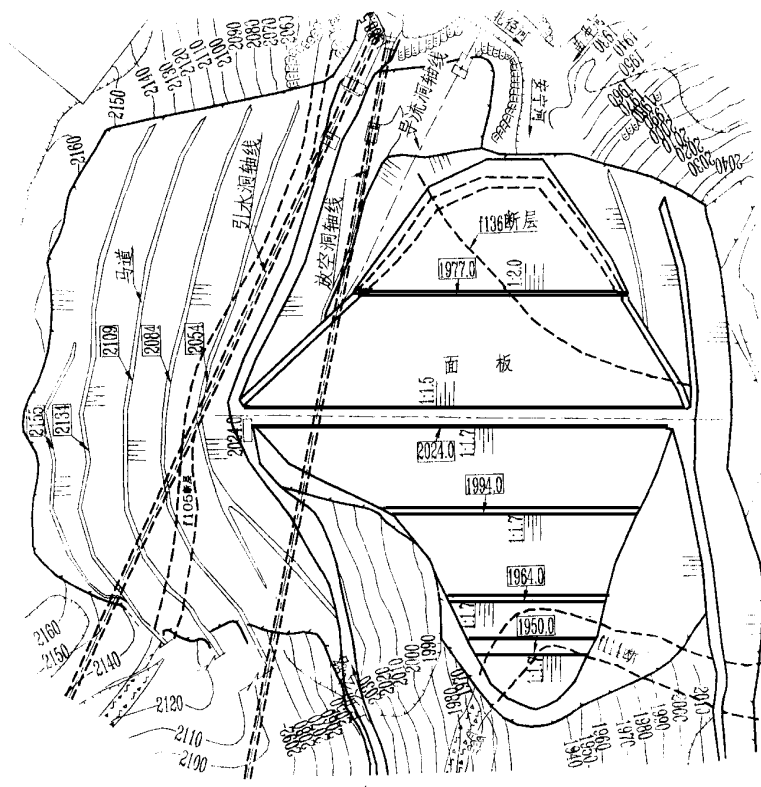


图 1 大坝平面布置图

700 m的安宁河顺直河段内。河床高程 1 931.5 ~ 1 939.7 m,宽 20 ~ 40 m;右岸山体雄厚,左岸山体较单薄,其左、右岸山脊最大高程分别为 2 066 m 和 2 169 m;左岸地形坡度为 40°~ 50°,局部可达 70°,右岸地形坡度为 26°~ 54°,呈“V”型河谷。

区内基岩为印支期中酸性混染岩,岩性复杂,以花岗岩、闪长岩为主,约占 60% ~ 80%,辉绿岩次之,约占 11% ~ 22.7%,后者多以捕虏体形式出现,局部呈脉状。

河床覆盖层较薄,厚 2 ~ 7 m,由沙卵石组成,河床无深切河槽,其基岩无全、强风化带,弱风化带厚度一般为 11 ~ 17 m。

左岸坡除坝轴线下游分布有厚 5 ~ 15 m 的块碎石夹亚砂土堆积层外,上游大部份岩石裸露,只有小范围分布厚达 11 m 的覆盖层,其基岩全、强、弱风化带厚度分别为 0 ~ 3 m、5 ~ 17 m、15 ~ 40 m,岸边卸荷带水平宽度 7.5 ~ 12 m。

右岸坡顺水流方向呈凹弧形。在高程 1 950 ~ 1 972 m 以上至坡顶为崩坡积块碎石夹亚砂土所覆盖,堆积体顺坡展布长度为 420 m,沿山坡展布长度为 110 ~ 240 m,厚度为 1.5 ~ 27 m,该堆积体厚度和块碎石含量分布差异性较大,结构松散,局部具架空结构且透水性强。堆积体下部岩坡基岩裸露,其全、强、弱风化带分别厚 0 ~ 3 m、10 ~ 23 m、15 ~ 32 m,卸

荷带水平宽度达 17 m。

坝区发育断层主要有 f_{136} 、 f_{149} 、 f_{114} 、 f_{105} 断层。 f_{136} 断层位于坝轴线与河床趾板之间,斜穿河谷,在左右坝肩斜截趾板,趾板处出露宽度为 0.4 ~ 0.8 m; f_{149} 断层横穿安宁河,在河床趾板上游出露,出露宽度为 0.4 m,在趾板下埋深 35 ~ 40 m; f_{114} 断层横穿安宁河,在下游坝脚出露,河床出露宽度为 19 ~ 34 m; f_{105} 断层横截北径河沿右岸山脊延伸,厚度达 15 m。坝轴线的选择除考虑围堰布置要求外,主要受 f_{136} 、 f_{114} 断层空间分布不利因素的制约。

基岩透水性主要受风化、卸荷及构造因素的影响。微风化带下部岩体为微透水或极微透水带,断层破碎带为相对隔水层。基岩相对隔水层埋藏较深且不均一。

3 坝体结构设计

3.1 坝顶及坝坡

坝体外形轮廓的拟定主要依据筑坝材料性质及国内外已建工程经验,并考虑地震因素。大坝横剖面见图 2。其填筑体顶高程 2 024 m,坝顶设 1.2 m 高的钢筋混凝土防浪墙,墙顶高程 2 025.2 m,趾板最低高程 1 931.0 m,最大坝高 93 m,坝顶宽 12 m。

大坝上游坝坡为 1 1.5,下游坝坡为 1 1.7。

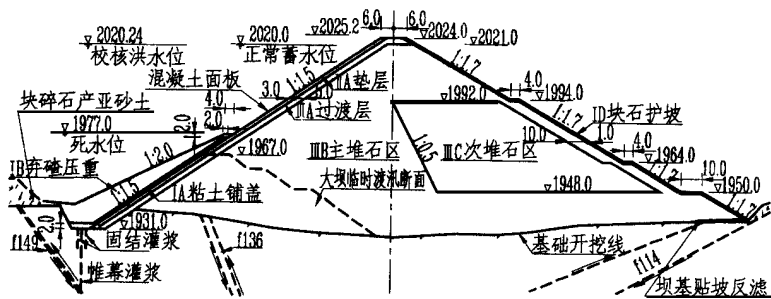


图 2 大坝横剖面图

下游坝坡在 1 994 m 和 1 964 m 高程设有二级宽 4 m 的马道,并在 1 950 m 高程 f_{114} 断层破碎带在河床出露处形成宽 10 m 的压脚平台。

3.2 坝体分区及坝料设计

堆石坝分区目的是在保证大坝安全运行前提下力求获得最大的经济性。根据本工程各种筑坝料性质和面板坝工作条件,大坝从面板以下依次分为垫层区、过渡区、主堆石区和次堆石区,在面板上游死水位 1 977.0 m 高程以下还设有辅助粘土防渗体,用任意弃碴维持稳定,并沿周边缝下游侧设置特殊垫层区。大坝垫层、过渡层料天然级配曲线见图 3。

垫层 A 区:水平等宽 3 m, $D_{max} = 100$ mm。料

源为天然洪积堆积层,经大量的室内外实验证实,其基本属性类似于坚硬石子的中酸性混染岩石渣,虽组成物质均一性较差,但级配连续,剔除大于 100 mm 超粒径颗粒后,小于 5 mm 含量的占 21.5% ~ 40.7%,平均为 31.3%。小于 0.1 mm 含量的占 4.6% ~ 9.6%,平均为 7%,小于 0.005 mm 含量的占 1.2% ~ 3.8%,平均为 2.6%,平均级配不均匀系数 $C_u = 84.4$ 。振实后 < 5 mm 粒径含量的增量为 3% ~ 7.5%。在料场级配范围内,振实试样线性强度指标大于 40°,非线性强度指标。大于 44°,较小;平均级配压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ 达 124.3 MPa,具低压缩性,高抗剪强度。室内实验和料场碾压试验测定

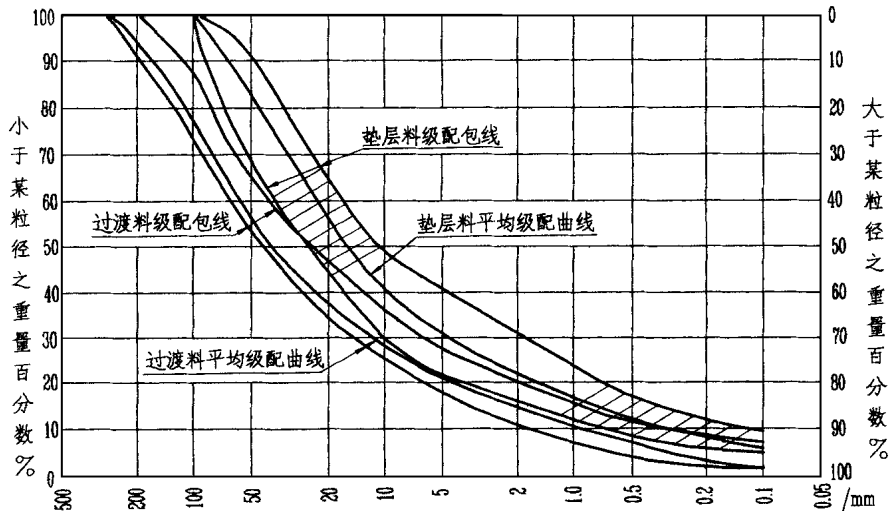


图3 大坝垫层、过渡层料天然级配曲线图

渗透系数 K 为 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$ 量级。施工单位也曾测得 $5.13 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 的试验数据。设计填筑干密度 $d = 2.24 \text{ g/cm}^3$, 孔隙率 $n = 21\%$ 。施工参数: 铺筑层厚 0.5 m , 16 t 振动碾碾压 6 遍。施工时要求清除料场表面无用层, 在勘探划定的平面分布范围和深度内开采。平采、立采相结合, 并经振动筛分别除超径料, 使坝料混合均匀。

施工情况表明, 斜坡碾压上下全振时坡面未出现石子滚落、坍塌、凹陷或凸起现象 (10 t 振动碾碾 6 遍, 上、下以两遍计)。坝面实测渗透系数 $K = 1.34 \times 10^{-3} \sim 4.56 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 说明垫层料质量良好。

过渡层 A 区: 水平等宽 5 m , $D_{\max} = 300 \text{ mm}$ 。料源为河滩天然沙砾石料, 砾石成份以花岗岩、闪长岩为主, 中~细粒沙以石英、长石为主, 有用层稳定, 质量均一, 级配连续, 超径石较少, 小于 5 mm 含量为 $17.6\% \sim 27.5\%$, 平均为 20.8% , 小于 0.1 mm 含量为 $1.2\% \sim 5.5\%$, 平均为 1.7% , 小于 0.005 mm 含量平均为 0.5% , 级配满足对垫层料的反滤过渡要求。设计碾压干密度 $d = 2.28 \text{ g/cm}^3$, 相对密度 $D_r = 85\%$, 渗透系数 $K = 10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。施工参数: 铺筑层厚 0.5 m , 16 t 振动碾碾压 6 遍, 洒水量 10% 。

施工时要求在勘探划定的平面分布范围和深度内开采, 全级配上坝, 对个别大于 300 mm 的超径石, 上坝铺摊时抛入主堆区内。

主堆石 B 区: 在次堆区底部高程 1948 m 以下和坝顶下 30 m 范围内填筑主堆区, 以利于下部排水和坝顶抗震稳定 (省地震局确定坝址 50 年超越概率 3% 时, 其地面最大加速度为 0.51 g , 而经有限元动力分析, 坝顶加速度放大倍数达 1.83), $D_{\max} = 800$

mm 。料源为强~微风化中酸性混染岩, 其岩石干密度 $d = 2.64 \sim 2.73 \text{ g/cm}^3$, 湿抗压强度为 $50 \sim 84 \text{ MPa}$, 吸水率为 $0.31\% \sim 0.62\%$, 具密度高、吸水率低、抗压强度高的特点, 质量满足主堆石料要求。要求堆石料级配连续, 小于 5 mm 含量为 $5\% \sim 10\%$, 小于 0.1 mm 含量不超过 5% 。设计填筑干密度 $d = 2.16 \text{ g/cm}^3$, 孔隙率 $n = 21.7\%$, 渗透系数 $K = 1 \sim 10^{-1} \text{ cm/s}$ 。施工参数: 铺筑层厚 1.0 m , 16 t 振动碾碾压 8 遍, 洒水量为 $10\% \sim 25\%$ 。要求通过控制爆破开采, 以取得良好的堆石级配, 满足设计要求。

次堆石 C 区: 位于坝轴线下游, $D_{\max} = 1.0 \text{ m}$ 。料源为主坝开挖中的强、弱风化岩石料, 溢洪道开挖中的强风化石料及硇碇石料。要求 $< 0.1 \text{ mm}$ 含量不大于 10% 。设计填筑干密度 $d = 2.1 \text{ g/cm}^3$, 孔隙率 $n = 25\%$ 。

特殊垫层 AA 区: 筛取粒径小于 40 mm 的沙砾石填筑, 铺筑层厚 20 cm , 要求用平板振动器等轻型设备夯实。

4 面板、趾板及分缝止水设计

4.1 面板

为满足面板防渗和耐久性要求, 其厚度按以下经验公式拟定

$$e = 0.3 + 0.002H$$

式中 H ——为计算断面至面板顶部的垂直高度, 以 m 计。

面板不设永久水平缝。垂直缝在中部面板受压区域按 16 m 宽度划分 (B 型缝), 而两岸受拉区域按 8 m 宽度划分 (A 型缝), 其拉压范围根据有限元计

算成果和坝基形态确定。

为限制面板裂缝开展,在面板中部设置了单层双向钢筋,各向配筋率为 0.4% (以设计厚度计)。另外,沿受压区 B 型缝和周边缝边缘设置加强筋,以防混凝土挤压破碎。

面板混凝土设计指标:抗压强度 200 号,抗渗 S_8 ,抗冻 D_{100} 。混凝土初凝后湿养护至水库蓄水。

4.2 趾板

趾板是面板和地基防渗结构的连接构件,其宽度的确定依据基岩风化、破碎情况,允许渗透比降和基础处理措施综合确定,本工程按 1/10 水头设计成 9 m、7.5 m、6 m 三种宽度趾板型式。

趾板均厚 0.5 m,按单层双向配筋,单向含筋率 0.4%。混凝土设计抗压强度、抗渗、抗冻要求与面板相同。

通过锚杆锚固拔拉试验,并参照已建工程经验,设置纵横间距为 1.0 m × 1.2 m、28 的 300 号砂浆锚杆,其基岩锚固长度为 4 m,以加强趾板与基岩的连接。

由于趾板沿线基岩完整性差异较大,趾板从河床到坝顶按长度 14 m 至 23 m 设置横缝。

4.3 止水设计

周边缝:根据已建工程施工经验,为确保周边缝处混凝土的浇筑质量,在施工设计阶段,取消了中间橡胶止水,只设底部 'F' 型铜止水和表面塑性填料两道止水,缝间设 12 mm 厚沥青木板以适应水库蓄水前面板端部的压应力集中。

面板垂直缝:A 型张拉缝设底部 'W' 型铜止水和顶部塑性填料;B 型压缩缝只设一道底部 'W' 型铜止水。缝间涂 3 mm 厚乳化沥青。

趾板横缝:只设一道中间 'V' 型铜止水,缝间涂刷乳化沥青。

面板水平施工缝不设止水,只作缝面凿毛处理,要求面板纵向钢筋贯穿水平施工缝。因坝顶防浪墙底部高于校核洪水水位之上,面板与防浪墙间坝顶缝只设一道橡胶止水。

除坝顶缝外,要求所有缝间相同止水必须很好连接,以组成坝体完整封闭的防渗系统。

5 坝基处理

5.1 开挖设计

坝址中酸性混染基岩岩体破碎,风化严重,卸荷作用强烈,其全风化和卸荷岩体不宜作趾板地基。

考虑到强风化层深厚,全部挖除工程量较大,虽强风化岩体完整性差。但岩块强度高,单块湿抗压强度达 50 MPa,岩体整体稳定且可灌性好,通过基础灌浆处理能达到趾板建基要求。如前所述,两岸覆盖层结构疏松,局部架空严重,厚度分布不均,不宜作大坝基础;全风化岩石已崩解或分解为松散的土状,虽厚度较薄,但考虑地处高烈度地区,大坝对基础要求较高,应予以清除;坝轴线下游 2 m 左右厚的河床沙卵石原则上可保留,但因自上而下削坡施工时,坝坡堆积物滚落河槽与之混合,故在施工时全部挖除。大坝开挖标准是:

(1) 趾板基础(包括趾板 'X' 线下游侧 7 ~ 10 m 宽的垫层和过渡区范围内的基础)原则上挖至卸荷带岩体下限且垂直 'X' 线方向为等高线,使趾板置于稳定的强风化和弱风化岩体上。经开挖清理的趾板基础岩体要求在 1 980 m 高程之上,纵波波速 V_p 2 000 m/s,在 1 980 m 高程之下 V_p 2 500 m/s。

(2) 坝基要求挖除所有覆盖层和全风化基岩。

(3) 在满足大坝基础开挖要求和枢纽布置的前提下确保岸坡稳定。对右岸坝顶高程以上高 140 m 的高边坡,要求每 25 ~ 30 m 高差设一道 3 m 宽的马道,其永久开挖边坡坡度:覆盖层 1 1.3 ~ 1 1.4;全风化层岩体 1 1.25 ~ 1 1.3;强风化层岩体 1 0.5 ~ 1 0.7,要求对开挖边坡及时衬护并分区域作好地面排水。衬护方式依边坡实际地质情况具体确定(挂网喷锚、浆砌)。因基岩卧坡角与全风化层设计边坡比相当,实际上全风化岩石已大部清除。

随着左岸削坡高程的降低,在坝轴线上游、高程 1 987.5 ~ 2 003.0 m 之上揭露出一长 75 m、平面宽 70 m、水平深 16 ~ 25 m 的卸荷错落体。经勘察,左岸原设计趾板基础大部处卸荷体内,故结合边坡的处理进行了趾板的第二次定线。同时,坝轴线下游坡块碎石夹亚砂土覆盖层下部存在一定厚度的沙砾石层,经鉴定,密实度较高,且地处坝体低应力部位,设计要求予以保留,在沙砾石及其上较为密实的薄层块碎石夹亚砂土与堆石体间设置 1.0 m 厚的反滤过渡料。

5.2 基础灌浆设计

5.2.1 帷幕灌浆

灌浆范围:沿趾板线向左右坝头延伸,左坝头顺坝轴线左延伸入分布于外侧岸坡相对隔水的昔格达岩层并截断 f_{114} 断层;右坝头帷幕顺坝轴线由平硐向山里延伸,与地下水位相接。

趾板段帷幕设主副两排。主帷幕位于副帷幕下

游侧,排距 1.5 m,孔距 2.0 m,梅花型布置;岸幕(指延伸段)设单排,孔距 1.5 m。

灌浆深度:主帷幕和岸幕按 $q = 3 Lu$ 线控制其深度,其中河床部位主帷幕深 55 m。副帷幕深度为相应部位主帷幕深度的 0.6 倍。主帷幕及两岸延伸段岸幕最终深度要求根据序孔(起先导孔作用)所揭示的地质条件变化而作相应调整。帷幕灌浆质量标准 $q = 3 Lu$ 。

5.2.2 固结灌浆

固结灌浆均在趾板基础内进行。灌浆孔排距为 1.5 m,孔距 3.0 m,孔深 10 m(特殊情况除外),均为铅直孔,梅花型布置。

固结灌浆质量标准:在 1 980.0 m 高程之上,岩体纵波波速 $V_p > 3 000$ m/s;在 1 980.0 m 高程之下,纵波波速 $V_p > 3 500$ m/s。

趾板基础灌浆要求先固结后帷幕,且固结、帷幕灌浆均按三序两次加密、自上而下分段钻孔循环灌浆的方法进行。

5.3 基础处理设计

(1) 断层破碎带的处理。地质编录显示,在整个趾板附近(包括横穿趾板)的断层中,除 f_{136} 断层规模较大外,其余断层宽度都小于 50 cm,其中 f_{136} 断层穿越坝轴线上游坝基,分别在左、右坝肩(高程分别为 2 005.0 m、1 940.0 m)斜截趾板。坝基范围以 f_{114} 断层在坝脚出露规模为大。

对趾板附近宽度大于 30 cm 的断层。设计要求在趾板基础及其下游挖槽作 150 号混凝土塞处理。其处理长度根据断层产状及与趾板的关系具体确定,贯通趾板上下游时其处理长度一般不小于 $1/2 H_K$ (H_K 为趾板处水深),槽深 $2B$ (B 为断层带宽度);若断层带宽度小于 30 cm,则设计要求清掏趾板、垫层、过渡层范围内断层物不小于 $(1 \sim 2) B$ 深,再用 150 号混凝土或 200 号水泥砂浆回填密实。

虽然 f_{114} 断层在坝基中规模较大,但经有限元分析论证,该断层对坝体应力和位移影响较小,可按常规方式处理。故对 f_{114} 断层及坝轴线上游所有断层

在坝基出露部位,其表面铺设有 1.0 m 左右厚的反滤过渡料。

(2) 由于岩体完整性差,节理裂隙发育,除要求在趾板浇筑前对基础节理和裂隙中充填物进行全面的清理、冲洗、灌注水泥或沙浆外,尚应在趾板下游 $1/8 H_K$ 宽度范围喷 15 cm 厚的 200 号混凝土铺盖(最小宽度为 3 m),局部条件特差的地段还需加强,以延长渗径(趾板基础水力梯度降为 5)和防止灌浆时冒浆过远,且在坝轴线上游两岸边坡与堆石接触部位用 1.0 m 厚上坝反滤过渡料铺填,这样处理,即可增加接触部位的密实度,又有利于渗流控制。

(3) 施工揭示,在右坝肩原设计趾板高程 1 950.0 ~ 1 965.0 m 间,长约 40 m 范围的基础下还存在厚达 2 ~ 8 m 的基岩松散体,对此,设计要求全面清除至强风化稳定岩体,按最不利荷载条件下高趾墙设计,靠放缓设计基面下游混凝土边坡和锚杆维持稳定。为了减小该处周边缝下堆石体的沉陷和不均匀沉陷,并有利于趾墙稳定,在周边缝特殊垫层料下填筑上坝沙砾石过渡料,要求薄层碾实,其干密度 d_s 提高至 2.32 g/cm^3 。

(4) 经趾板地基钻孔声波测试,在右坝肩设计趾板高程 1 965.0 ~ 1 999.0 m 之间,即松散体上部长约 81 m 范围的基面之下,存在深度约 10 ~ 14 m 的低波速卸荷岩体 (V_p 小于 2 000 m/s),且整个大坝趾板强风化基岩面下普遍存在波速小于 2 000 m/s、深 1 ~ 2 m 的松动层。对该卸荷岩体‘简易’灌浆和已实施的强风化基础灌浆试验证明,岩体可灌性好,灌后岩体波速提高较大,说明通过加强固结灌浆能大大提高该地质缺陷岩体的物理力学参数,增加其完整性,能满足趾板基础要求,故保留了该处卸荷岩体,但要求通过专门的灌浆试验以最终确定灌浆工艺参数,同时增长趾板下游喷混凝土长度,使趾板水力梯度达到 2 ~ 3。对基岩松动层,要求通过加强趾板下接触段灌浆进行处理。

作者简介

胡继友 男 四川省水利水電勘测设计研究院 工程师 硕士

(收稿日期:1997-12-22)