

10-16.

土石坝的若干新技术(一)

顾淦臣

TV 641

(河海大学水力发电工程系 南京 210098)

摘要 分析以前的工程实例可知,用抛投式堆石建高坝,不论是混凝土面板还是土心墙防渗,都未获成功。重型振动碾的应用促进了高堆石坝的发展。国内外成功的工程实例表明,可以在深厚覆盖层上建造混凝土面板堆石坝,文中特别介绍了对我国瀑布沟水电站采用混凝土面板堆石坝设计方案的论证工作。土工合成材料已广泛应用于土石坝,文中列举了许多土工膜应用于土石坝的典型实例。此外土工织物在堤、闸、煤灰坝、尾矿坝中也得到了广泛的应用。

关键词 土石坝 高坝 土心墙防渗 振动碾 深厚覆盖层 土工织物 渗流控制

1 抛投式堆石不适于建高坝

在20世纪初叶,美国用抛投式施工法填筑堆石建堆石坝,在坝的轮廓内先架设9~12m高的栈桥,运输车辆装载堆石从栈桥上卸车向下抛投,设想利用冲击力压实堆石,每次抛投层厚7~10m,再用高压水枪冲射堆石,使它滚动并湿化,细颗粒被冲到堆石孔隙中去,以便使堆石密实。然后再架设上一层栈桥卸抛堆石并冲射。规定抛投的堆石每块平均重3t。最大的每块重25t,限定较少的细颗粒含量。如果建混凝土面板堆石坝,则上游4~5m厚的范围内要用特大块石,每块重3~25t,用起重机吊装干砌,然后用贫混凝土把上游面找平,再浇筑钢筋混凝土面板。这种抛投式堆石,它的密实度并不理想,孔隙率在30%~40%,变形很大,达坝高的1%~3%。

1910~1930年,美国建成9座高26~50m的混凝土面板堆石坝,如Main Strawberry, North Bowma, Dix等坝。30年代,美国又建成高100m的Salt Springs坝,高70~80m的Cogswell, Wishon, Lower Bear River No1, Lower Bear River No4等面板堆

石坝^[1]。1934年,智利建成高84m的Cogoti面板堆石坝,这些坝都是抛投式堆石,高50m上下的坝,面板没有裂缝。高于70m的坝,面板都或多或少地有裂缝。而100m高的Salt Springs坝,面板严重裂缝,宽2.54cm的裂缝很多,漏水很大。此后,混凝土面板堆石坝停止发展。40~50年代,美国转向建土心墙抛投式堆石坝。130m高的Mud Mountain坝于1941年开工,二次世界大战期间停工,到1948年建成,施工期间就发现纵向裂缝,坝壳下沉并水平位移50~60mm,竣工后裂缝宽100mm,水库只能在低水位运行。1982年发现砾质少粘性土心墙中细颗粒流失,下游坝趾漏水增大。1986年在心墙中打设厚1m深125m的混凝土防渗墙^[2],1990年完成,才能正常运行。在Mud Mountain坝建筑的同时,还建成高90m左右的Wataugo坝和South Holston^[1]坝,也是土心墙抛投式堆石坝,与Mud Mountain坝一样,也出现裂缝。

虽然美国在40年代以后就不建混凝土面板堆石坝,而葡萄牙在1955年还建成了Paradela混凝土面板堆石坝^[3],仍是抛投式堆石,将坝的上游面修成中间凸起的锅底状,设想面板受水压力后,凸起部位可压缩变形

成为平面, 面板分缝将受压而不会拉开。但蓄水以后面板变形太大, 面板互相挤压, 混凝土压碎、错位、拉开, 漏水达 $3\text{m}^3/\text{s}$, 20 多年不能正常运行。直到 1982 年用加筋氯丁橡胶膜粘贴于面板上, 才防止了漏水, 可以蓄水运行。

由上述几个实例可见, 用抛投式堆石建高坝, 不论是混凝土面板还是土心墙防渗, 都未获成功。

我国在 50 年代也修建了几座抛投式和砌石式面板堆石坝, 如贵州猫跳河梯级水电站, 有一座坝是混凝土面板堆石坝, 因坝很矮, 面板无裂缝。四川龙溪河梯级水电站狮子滩坝, 高 50m, 为砌石式堆石, 上游面为混凝土重力墙, 在重力墙与堆石之间, 还设置了主动滑楔, 使重力墙受上游水压力后, 其上游趾部不产生拉应力, 这些低坝都是成功的。

60 年代, 不再用抛投式堆石, 而用块径较小的堆石, 铺筑层厚 45~61cm, 用汽胎碾、5t 振动碾、重型拖拉机碾压, 局部用 10t 振动碾碾压。有的坝堆石粒径小, 压实度高, 则获得成功, 如巴西高 127m 的 Furnas 斜心墙堆石坝^[4], 堆石粒径最大 20cm, 小于 2.54cm 的颗粒占 35%, 有效粒径 0.1mm, 此坝没有裂缝。而美国高 136m 的 Cougar 斜心墙堆石坝^[5]及高 134m 的 Round Butte 斜心墙堆石坝, 则堆石块径大, 最大达 61cm 及 50cm, 有效粒径为 10mm 及 25mm。用前述碾压机具压实, 都有类似 Mud Mountain 坝的裂缝。至 60 年代初德国用夯板夯实堆石, 也未取得良好效果。但是在此期间建成的土心墙或斜心墙砂卵石坝, 用汽胎碾、轻振动碾、重拖拉机压实, 可以达到高密实度。如原苏联高 300m 的 Hypek 心墙砂卵石坝、美国高 236m 的 Oroville 斜心墙砂卵石坝^[6]、加拿大高 242m

的 Mica 斜心墙砂卵石坝, 都没有裂缝。由此可见, 块径较大的堆石, 用汽胎碾、轻型振动碾、重型拖拉机等碾压不能奏效, 而砂卵石坝虽有大块径漂石, 但砂卵石含量多, 用上述机具碾压达到了理想效果。

2 重型振动碾的应用促进了高堆石坝的发展

1930 年, 德国制造了第一台振动板, 装在拖拉机上, 用于筑路, 夯实土层有效深度 2m。1950 年, 牵引式振动平碾应用于筑路, 滚碾重 4~6t, 60 年代应用于堆石坝碾压。正如前述, 碾压块径 20cm 以下的碎石是成功的, 碾压块径 61cm 以下的堆石则不成功。到 60 年代末, 13~15t 重型振动碾用于压实堆石才获得良好效果。1960 年, 发展了振动凸块碾, 用以压实粘性土、砾质土、风化泥岩页岩。我国于 1973 年首先在碧口土石坝应用重型振动平碾碾压堆石、砂卵石、反滤料, 获得良好效果。此重型振动平碾是牵引式的, 用 100 马力拖拉机牵引。振动平碾与机架共重 13.5t, 振动频率 1500~1800 次/min, 起振功率 120 马力, 由工程局机械修配厂制造, 牌号为 SD-80-13.5。现在全国各地已普遍应用这种振动碾了, 见图 1

此振动平碾滚筒直径为 1.8m, 宽 2m, 激振偏心块每块重 20kg, 三块共重 60kg, 偏心距 122mm, 偏心轴转速 1500~1800 次/min, 滚筒与机架间有气胎减振。

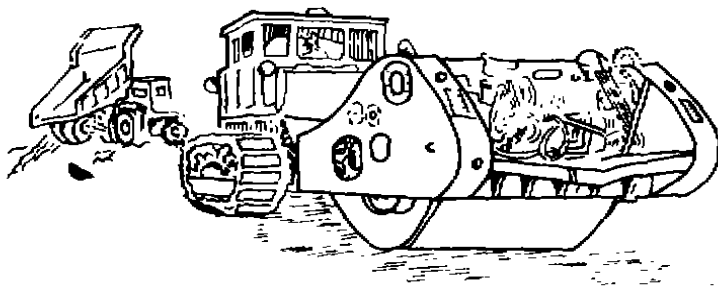


图 1 13.5t 牵引式振动碾

振动碾与羊足碾、气胎碾等的压实原理不同,它是借碾重与振动动力共同作用的。振动使土颗粒彼此分离,减小了颗粒间摩擦力,在碾重作用下产生位移,小颗粒进入大颗粒孔隙中,达到密实状态。

爆破开采的堆石料,在一般情况下,最大块径为60cm,优势块径为25~30cm,小于3mm粒径含量占15%~30%,小于0.1mm粒径含量占5%以下,这种堆石料每层铺厚0.8~1.2m,重型振动碾压4~6遍,压时洒水,堆石孔隙率可达20%~25%。如碾压砂卵石、每层铺厚1.0~1.6m,压4~6遍,压时洒水,相对密度可达0.8左右。堆石坝的坡面,可用较轻振动碾由坝顶的卷扬机牵引进行斜坡振动碾压。斜坡碾压工序为先静压2遍,然后振动压2~3遍。

碾压粘性土的振动羊足碾、振动凸块碾是为了增大接触压力,使粘性土达到理想压实效果。用7t自行式振动凸块碾(连同机架重11t)压实最优含水量附近的粘性土,压实后层厚为30cm,其压实度可达95%~100%,而16t静力羊足碾压实层厚只能为12~15cm,故前者效率提高1倍。10t振动羊足碾压实效果比40t气胎碾压实效果高。

1968年开工的澳大利亚高110m的Cethana混凝土面板堆石坝^[7],于1971年竣工。坝的横断面、堆石分区、纵剖面见图2。主堆石、垫层、下游区堆石级配见图3。

此坝垫层和过渡层堆石每层铺厚45cm,主堆石每层铺厚90cm,下游区堆石每层铺厚135cm,都用重型振动碾压4遍,压时洒水。填筑到坝顶后,用斜坡振动碾碾压坝坡,再用滑动模板浇筑混凝土面板。此坝竣工后,竖向位移仅为坝高的0.1%,故面板没有裂缝,获得了很大成功。后来,各国相继采用,目前已建成的最高混凝土面板堆石坝为巴西的Foz do Areia坝,高160m。我国正在施工的天生桥一级混凝土面板堆石坝高180m。

• 12 •

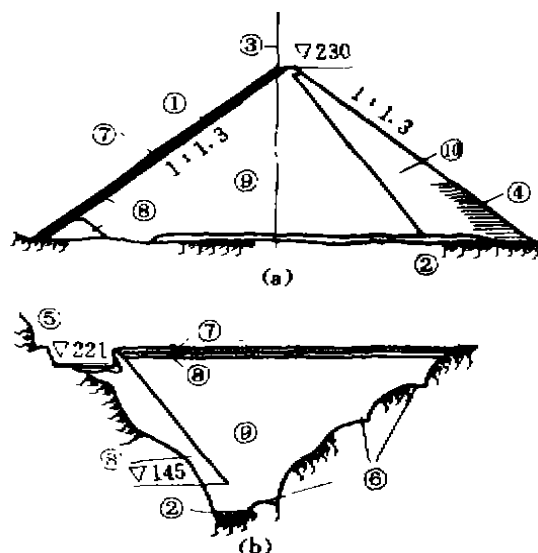


图2 Cethana混凝土面板堆石坝(单位:m)
(a)河床段剖面;(b)沿坝轴线剖面。

①钢筋混凝土面板;②河床砾石层;③坝轴线;④保护网及其锚着钢筋;⑤溢洪道;⑥施工道路;⑦面板垫层区(层厚0.45m);⑧过渡区(层厚0.45m);⑨主堆石区(层厚0.90m);⑩下游区(层厚1.35m)。

⑦区为面板下游垫层,宽3m,级配良好,最大粒径225mm;⑧区为堆石体,占坝体断面上游2/3区域,最大粒径600mm,是承受水库水压的主要部位;⑨区在坝体下游,约占断面的1/3,从沉陷角度看,比较不重要,在采用新鲜石料中,允许有少量风化岩石。除上述三个主要区域上,另有⑩区,采用与⑧区相同材料,但最大粒径减小到375mm,且将碾压层厚减小为0.45m。作为⑦⑨两区的过渡层,使用在⑧区上游3m范围,以及左岸145m高程以上的陡坡部位和右岸底座下游施工道路通过部位(图上未标明)。

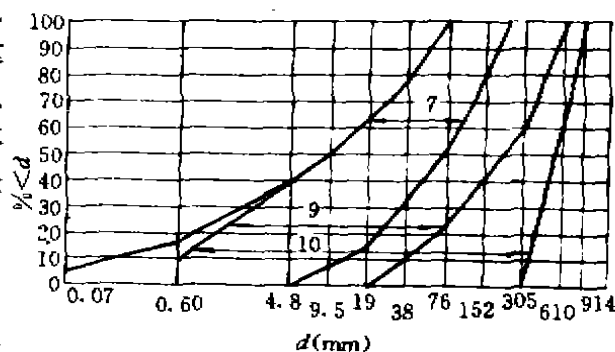


图3 Cethana坝堆石料级配外包线

40年代已经停顿的混凝土面板堆石坝,至此获得了强大的生命力。心墙和斜心墙堆石坝,也同样获得快速发展。经历了60年的摸索,伴随着机械制造业的发展而将重型振动碾应用于筑坝,堆石坝的施工技术,至此已臻成熟。

3 深厚覆盖层上建混凝土面板堆石坝

Cethana 混凝土面板堆石坝坝基覆盖层厚仅6m,将趾板底部及其下游60m范围内覆盖层挖除,混凝土趾板建在基岩上^[7]。其下游趾部30m范围内覆盖层也挖除,填筑加筋堆石,准备施工期过洪水时不冲刷加筋堆石基础。以后建成的14座100m高度以上的混凝土面板堆石坝以及我国的西北口、关门山等混凝土面板石坝,坝基覆盖层都不厚,容易挖除,故趾板都建在基岩上。但是有许多坝址基岩上覆盖着深厚砂卵石层,如果将它挖除,把趾板建在基岩上,将延长工期,增加投资。在早期,比较矮的坝采用了在覆盖层内打设混凝土防渗墙,混凝土面板与防渗墙顶部连接,其运行情况令人满意。1981年我国建成高42m的柯柯亚混凝土面板砂卵石坝^[8],1991年又建成铜街子水电站副坝,高48m的混凝土面板砂卵石堆石坝^[9]。1995年智利建成高103m的Santa Juana混凝土面板砂卵石漂石坝^[10]。现在,智利又开工建设高80m的Puclaro混凝土面板砂卵石漂石坝。这些坝都是混凝土防渗墙接混凝土面板的型式,下面将略作介绍。最近,我国正在设计高186m的瀑布沟土石坝,其覆盖层最厚处达75m,笔者曾建议采用上述坝型,此课题列入了“八五”国家科技攻关项目,研究结论也将略作介绍。

3.1 阿尔及利亚在1939年建成Bou Hanifia坝,高54m,是砌石式堆石坝(图4),上游坝坡1:0.8及1:1,下游坝坡1:1.3。坝基为细砂层,微胶结,厚19~72m。基岩为第三

纪砂岩、砾岩、泥灰岩互层,有多条断层,岩层较破碎。在坝基细砂层中打设混凝土防渗墙,墙厚4m。墙顶为现浇混凝土,设廊道。坝的上游防渗面板为沥青盖钢筋混凝土面板。坝底堆石与细砂坝基间设三层反滤,总厚1m,并设排水管。施工时最大竖向位移20cm,竣工后10年竖向位移8cm。蓄水后,面板与混凝土防渗墙间接缝没有拉开,并有压紧趋势^[11]。

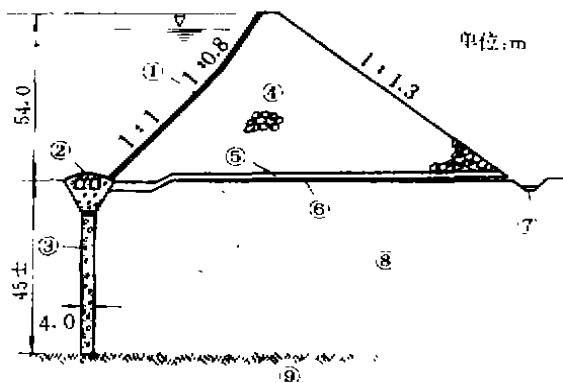


图4 Bou Hanifia坝

①沥青上盖钢筋混凝土板保护;②廊道;③混凝土防渗墙;④砌石式堆石;⑤反滤层;⑥排水管;⑦排水沟;⑧细砂地层;⑨第三纪砂岩、砾岩、泥灰岩

3.2 1958年建成的意大利Campo Moro I混凝土面板干砌块石坝,高34.5m。坝基为厚21m的砂卵石覆盖层。建塑性混凝土防渗墙达基岩,防渗墙厚2m,墙顶与面板的底座相接。面板顶部厚0.5m,底部厚2.25m,布双向钢筋,面板与干砌石之间,浇筑1m厚贫混凝土垫层,面板竖缝间距15m,设二条横缝,横缝处有横梁嵌在砌石中。面板与底座间设周边缝,缝中埋止水铜片。面板的上游坡自上而下为1:0.72,1:0.74,1:0.76,坝的下游坡为1:1,设1.5m宽的戗台3道。图5为坝的剖面图。

3.3 1981年我国建成柯柯亚混凝土面板砂卵石坝,坝高42m,地震基本烈度7度,坝基覆盖层厚37.5m,建混凝土防渗墙达基岩,墙厚0.8m,混凝土面板顶部厚30cm,底部

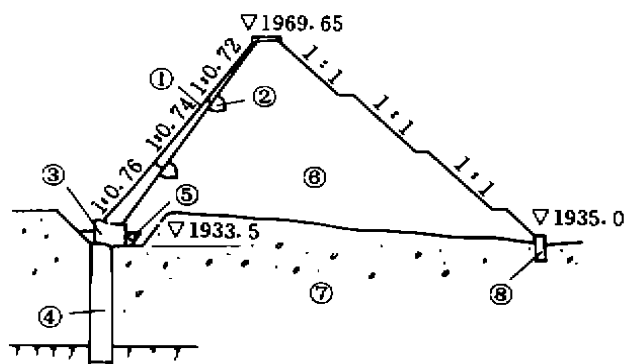


图5 Campo Moro I 坝剖面图(单位:m)

①混凝土面板;②混凝土横梁;③底座;④塑性混凝土防渗墙;
⑤排水管;⑥干砌块石;⑦砂卵石地层;⑧排水沟

厚 50cm,底部与防渗墙顶部下游侧直接接触,未设座垫,但邻近底部处,面板呈拱形,设想减小面板对防渗墙的推力。根据对瀑布沟混凝土面板堆石坝的三维有限元分析,发现面板对防渗墙的推力极小,而坝体填筑时作用在地基的自重对防渗墙产生的侧压力很大,故不必采取拱形面板。柯柯亚坝体为砂卵石,用振动碾压实,铺土层厚 0.7m,上游坝坡 1:2.0,1:2.75,下游坝坡 1:1.75,1:2.0,设戕台 2 道。面板为现浇无筋混凝土,设竖缝横缝,分块尺寸 5m×7m,缝中填塞焦油-塑料粘弹性嵌缝剂,与混凝土表面有较强的粘着力,并在缝顶贴焦油-塑料砂浆板。在防渗墙与面板的接缝处,铺贴三毡四油玻璃丝布封闭止水,坝剖面及防渗墙与面板接头大样见图 6。

以上三座坝运行情况都良好,它们与现代混凝土面板堆石坝不同的是:①面板设横缝;②柯柯亚坝缝内填塞胶粘剂,不用止水铜片;③面板底部不设趾板。但其原理并无不同,故现代混凝土面板堆石坝趾板建在混凝土防渗顶部是能够成功的。

3.4 1991 年我国建成铜街子水电站大坝,其左岸副坝是深厚覆盖层上的混凝土面板堆石坝,最大坝高 48m,地震设防烈度 8 度。深

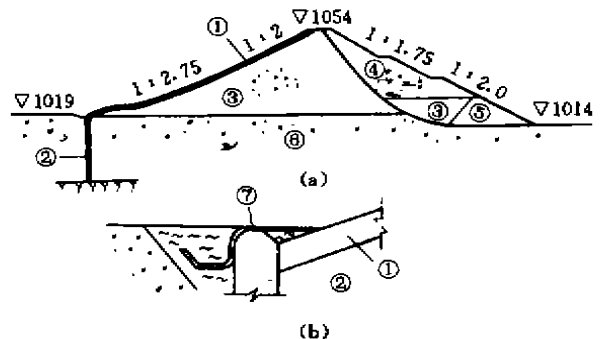


图6 柯柯亚坝剖面及防渗墙与面板接头大样图

(a)剖面图(单位:m);(b)墙与面板接头大样图。

①混凝土面板;②混凝土防渗墙;③砂卵石填筑区;④任意料填筑区;⑤粗卵石填筑区;⑥砂卵石覆盖层;⑦三毡四油玻璃丝布用 60 号冷底子油粘贴于墙顶

槽中砂卵石覆盖层最厚达 73.5m,副坝长 434.5m,坝轴线与深槽走向斜交。此坝与导流明渠的左导墙结合。左导墙是高 28m 的混凝土重力式墙,其底部由两道间距 16m 的混凝土防渗墙支承。为使两道防渗墙联合受力,增大其抗弯刚度,两墙之间设横隔墙,间距 15m。墙的厚度都是 1m。

混凝土面板底部与混凝土导墙下游面相接,接缝内埋设止水铜片及塑料止水片各一道。受挤压的竖缝缝内填玛蹄脂,受张拉的竖缝埋设塑料止水片,混凝土面板厚 40cm,中间铺一层钢筋网,水平筋 $\phi 18@200\text{mm}$,坡向筋 $\phi 18@150\text{mm}$,垫层厚 3m,为粒径 0.075~80mm 砾卵石,小于 5mm 粒径占 35%,压实干容重 2.25t/m^3 。坝体填料除底部与基岩接触部位填玄武岩石渣外,其它部位填砂卵石,用振动碾分层碾压。垫层坡面用斜坡振动碾压实后喷 2~3cm 水泥砂浆。然后铺钢筋网。

为了分析混凝土防渗墙、面板及坝体的应力和变形,对铜街子混凝土面板堆石坝做了二维和三维非线性有限元分析。发现混凝土防渗墙压应力达到 20MPa。为了减小压应

力,在防渗墙顶与混凝土导墙接头处填塞沥青麻片厚 5cm,可产生 2cm 压缩变形,使混凝土导墙的部分荷载由地基砂卵石层承担。混凝土防渗墙采用 $R_{28}350$ 混凝土并在顶部 4.5m 范围内配置钢筋。

该坝已蓄水运行 3 年多,缝的变形、面板的挠度都很小。坝后无渗漏,运行正常。坝断面见图 7。

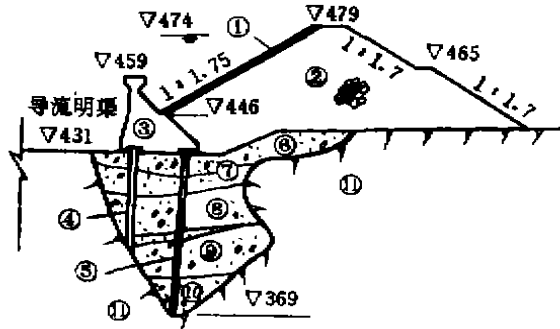


图 7 铜街子水电站左岸副坝混凝土面板堆石坝剖面(单位:m)

①混凝土面板;②砂卵石及石渣;③混凝土导墙;④一号混凝土防渗墙;⑤二号混凝土防渗墙;⑥漂卵石夹砂;⑦中细砂;⑧卵石夹砂;⑨碎卵石夹砂;⑩漂卵石夹块石;⑪玄武岩

3.5 智利的 Santa Juana 混凝土面板堆石坝,1990 年开工,1995 年竣工,坝高 103m,坝顶长 400m。坝基为砂卵石冲积层,厚 30m。混凝土面板的底座建在冲积层上,底座端头设混凝土防渗墙直达基岩。在底座部位,将砂卵石冲积层挖除 4.5m,打设混凝土防渗墙,顶部下游侧与混凝土底座相接,混凝土面板与底座相接,设周边缝。在底座上面填筑粉细砂,厚 5m。如果蓄水后周边缝拉裂,粉细砂将被水携带入缝内堵塞缝隙。坝的主堆石区为卵石,最大粒径 600mm,碾压层厚 0.8m,下游部位次堆石区为卵石及堆石,最大块径 1m,碾压层厚 1.2m,垫层为砾石,最大粒径 75mm,水平厚度 4m,坝的上游坡率 1:1.5,下游坡率 1:1.6^[10]。

此坝位于强烈地震区,最大震级 8.4 级,

震中距 58km,最大地震水平加速度 0.56g,强震持续时间 59s,卓越周期 0.2s。Santa Juana 坝的断面见图 8。

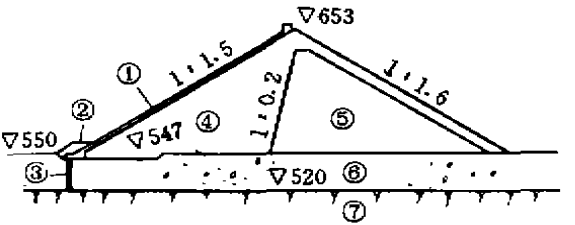


图 8 Santa Juana 剖面图(单位:m)

①砼面板;②粉细砂填筑区;③混凝土防渗墙;④卵石填筑区;⑤卵石及堆石填筑区;⑥砂卵石覆盖层;⑦基岩

3.6 智利高 80m 的 Puclaro 混凝土面板砾卵漂石坝^[12]将于 1995 年开工。该坝坝顶长 640m,坝址砂卵石覆盖层最厚达 113m,采用厚 80cm 的混凝土防渗墙,是否深达基岩,尚在研究。防渗墙顶部下游面与趾板端头相接,接缝内设止水片和沥青玛瑙脂。坝的断面见图 9。坝体各区砾卵漂石的最大粒径和压实分层厚度见表 1。

表 1 Puclaro 坝的填筑料粒径

分区	填筑料	最大粒径(mm)	压实分层厚(cm)
1A	粉细砂细砾	1.2	20
1B	任意料	76	40
2A	砂细砾	4.8	20
2B	砾石	38	30
3B	砾漂卵石	610	60
3C	砾漂卵石	610	90

此坝位于强烈地震区,500 年一遇的最大可能地震水平加速度为 0.54g。

3.7 瀑布沟水电站是大渡河具有较大调节库容的重要梯级,库容 50.6 亿 m^3 ,装机 330 万 kW。坝基覆盖层厚度 40~60m,最厚处 75m。坝高 186m,坝顶长 539m,混凝土面板堆石坝是设计方案之一,还有砾质粉砂土心墙方案,在比较之中。混凝土面板厚度顶部 0.3m,以下按 $t=0.3+0.002H$ 渐增。面板分缝间距 15m,岸坡面板分缝间距 5~10m。上下游坝坡都是 1:1.5。

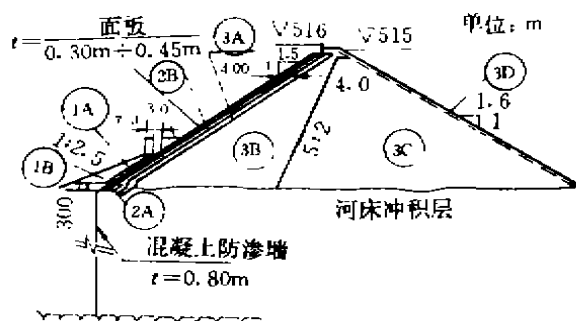


图9 Puclaro 坝的代表性断面

在趾板底部覆盖层内打设两道混凝土防渗墙,净间距 8m,每道墙厚 1.2m,深达基岩面。

用三维非线性有限元法对坝及地基进行静力动力分析。坝体、地基、混凝土面板、混凝土防渗墙、水体都剖分成空间单元,面板与垫层间设接触面单元、面板间接缝及面板与趾板间的周边缝设缝间连接单元,共剖分 2 384 个单元,2 426 个结点。横断面 0+360 的单元剖分见图 10,纵剖面单元剖分及其它横断面单元剖分图从略。

按施工程序、施工期渡汛水位、蓄水程序分 16 级加荷,动力分析则输入三个地震加速度分量的过程线,最大水平加速度 0.211g。通过分析计算得到以下结论:

a. 通常沿着上游坝坡与河床河滩地面的交线布置趾板,则趾板与防渗墙在平面上呈折线拱。筑坝堆石使地基产生侧压力作用于拱的下游面。三维计算表明拱产生切向拉应力 4.3MPa,蓄水以后,拱上游面受水压

力,使切向拉应力略有减小,但仍有 3.9MPa。因此,应将滩地开挖到河床地面同高,使趾板与防渗墙在平面上成直线。并改变筑坝施工程序,先填筑至半坝高,再打设防渗墙,然后填筑上半部坝体。

b. 经上述改进以后,防渗墙在坝填筑期最大拉应力为 0.7MPa(坝轴向)。蓄水后,防渗墙最大拉应力为 2.4MPa(坝轴向),最大压应力为 10.3MPa(竖向)。蓄水后,面板最大挠度 1.073m,面板顺坡向最大压应力为 28.7MPa。周边缝拉张 16cm,法向错动 20cm。

c. 在上述输入地震过程线作用下,坝顶加速度放大倍数为 2.34,防渗墙最大动拉应力为 1.1MPa,最大动压应力为 1.2MPa。面板最大动拉应力和最大动压应力都是 1.5MPa。周边缝动位移为 0.5cm。

d. 防渗墙和面板的静应力动应力都在混凝土强度允许范围内。只是周边缝静位移偏大,要作专门的止水设计方案。

由此可见,瀑布沟坝采用混凝土防渗墙顶部接趾板与混凝土面板的方案在技术上是成立的。

综上所述,深厚覆盖层上建混凝土面板堆石坝已经从早期的低坝向 100m 以上高坝发展,通过现代计算技术对 186m 高面板堆石坝的分析研究,已经提出了数据,可供设计采用,可以消除人们的疑虑。采用上述方案,经过细致设计、精心施工,必能建成经济安全的深厚覆盖层上的高面板堆石坝。(待续)

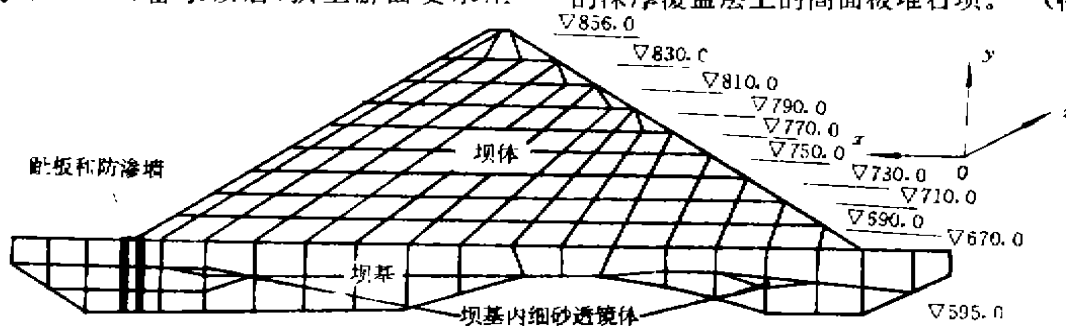


图 10 0+360 横断面单元剖分图(单位: m)