

现代坝工技术及其发展趋势(二)*

3
8-11

沈长松

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

TV641
TV641.4

2 土石坝

土坝、土石混合坝、堆石坝界限不明,统称为土石坝。古代保留下来的土石坝都是小坝、矮坝,均修建在小河上或旁侧水库,由于泄洪和渗透稳定问题没有解决,直到20世纪20年代,还没有出现100m高的土坝,到50年代末,100m以上的土石坝在各类高坝中所占比重才达到31%,70年代上升至62%(见表1)。由表1可知,全球100m以上的高坝中土石坝比重逐年增加,70年代比50年代增长1倍,而拱坝比重和重力坝比重逐年下降,重力坝下降50%,拱坝下降32%。全球230m以上的高坝共有16座(见表2),其中9座是土石坝(占60%),6座是拱坝,重力坝仅1座,300m以上的高坝2座,都是土石坝。

2.1 土石坝数量增加及其原因

土石坝在高坝中比重增加的原因主要是:

a. 经济性明显. 土石坝坝体断面为重力坝断面的4~6倍,而混凝土的单价,在欧美为土石方单价

的15~20倍,虽然土石坝枢纽的泄洪导流工程比混凝土坝的泄洪导流工程量大,但综合比较,土石坝枢纽比重力坝枢纽造价低,土石坝断面为双曲拱坝断面的10~16倍,拱坝的泄洪导流工程量比土石坝的小,所以当坝址地质条件较好时,薄拱坝和土石坝可以竞争,而重力坝已无竞争能力。

b. 岩土力学、计算技术、大型施工机械和施工技术的发展,使建造的高土石坝安全可靠。

c. 在北美和欧洲,地质条件好的坝址已开发殆尽,而对于深厚覆盖层或基岩较弱或地质缺陷多的坝址,混凝土坝比土石坝的基础处理复杂,工作量大、造价高、故多采用土石坝。发展中国家虽有很多优良的混凝土坝坝址,但由于土石坝经济可靠,仍多采用土石坝。

2.2 坝型的演变

早期比较高的土石坝大多是木面板和混凝土面板堆石坝,堆石由高栈桥抛投或是码砌,高度不超过50m,到30年代,山区坝高达到100m,如美国的Salt

表2 全球230m以上高坝

坝名	国家	完工年份	坝型	坝高/m	坝顶长/m	坝体体积/万m ³	库容/亿m ³	装机/万kW	开始运行年份	地震烈度/度
罗贡	前苏联	1989	SCERD	325	764	7000	130	360		9
努列克	前苏联	1980	CERD	310	730	5800	104	270	1976	9
大狄克桑	瑞士	1962	GD	285	695	595.7	4			6~7
英古里	格鲁吉亚	1985	AD	272	766	380	11	130	1985	7~8
瓦依昂	意大利	1961	DCAD	262	196	32.5	1.69			7~8
特里	印度	1990	CERD	261	570	2650	34.5	8		8
基绍	印度	1985	CERD	360						
瓜维奥	哥伦比亚	1989	CERD	250	380	1800		160		
买加	加拿大	1974	SCERD	242	792	3211	246.7	261	1976	7~8
萨扬-舒申斯克	前苏联	1981	CAD	242	1086	911.7	313	640	1980	6~7
奇柯森	墨西哥	1980	CERD	240	600	1200	16.6	240	1980	9
英瓦桑	瑞士	1957	DCAD	237	520	203	1.8			8
契伏	哥伦比亚	1977	SCERD	237	280	1080	8.15	100	1975	
奥洛维尔	美国	1968	SCERD	235	2316	5964	43	100	1967	7~8
契尔克	前苏联	1978	DCAD	233	338	122.6	27.8	100	1972	7.5
二滩	中国	在建	AD	240	769	405	58	330	1998	8

注:① SCERD为斜心墙土石坝;CERD为心墙土石坝;GD为重力坝;AD为拱坝;DCAD为双曲拱坝;GAD为重力拱坝。

②瓦依昂库区1963年因地震降雨,发生大滑坡,涌浪过坝成灾,水库淤废。

作者简介:沈长松,男,副教授,从事水工结构研究。

*“九五”期间河海大学“211工程”建设被改项目部分成果。本文第一部分刊登于《水利水电科技进展》1999年第5期16~19页。

Springs 坝,因抛投堆石变形大,导致面板裂缝.40年代,在平原丘陵地区采用水力冲填坝,坝高达78.5m(苏联的明格乔马尔坝,美国的福特培克坝坝高也达74m).因水力冲填坝在施工期常发生滑坡事故,筑坝上升速度受到限制,加之50年代后,大型运输车辆和重型碾压设备的出现,碾压式土石坝单价降低,故水力冲填技术除在矿山选矿时填筑尾矿坝外已不采用,现代的高土石坝不论土、砂或堆石都是经过碾压的,很少出现裂缝,故能正常运行.如前所述,60年代开始高土石坝发展迅速,各国共建成高100m以上的土石坝50余座,其中120m以上的有26座;70年代,土石坝高度达到240m(奇柯森坝);80年代坝高达到了300m,努列克坝为310m.这些坝都是粘性土心墙或斜心墙坝,坝壳采用漂卵石或堆石,经过重型振动碾压,孔隙率达到25%,有的达到20%,变形很小,都没有出现裂缝.

2.3 混凝土面板堆石坝的复兴^[1,2]

混凝土面板堆石坝在20世纪初就开始兴建,但由于施工机械和技术跟不上,堆石都由高栈桥下抛使其密实,其密实度是可以想象的,对50m以下的低坝,混凝土面板堆石坝尚能承受这种变形,70m以上的坝混凝土面板都因变形太大而裂缝漏水,如美国盐泉(Salt Springs)坝的混凝土面板裂缝宽达2.5cm,漏水很大,故从40年代起美国已停止修建混凝土面板坝.而其他国家接受这种经验教训却滞后了15年,如葡萄牙在1955年建成的110m高的Paradela混凝土面板堆石坝,将坝的上游面修成中间凸起的锅底状,设想当坝体变形后,面板可以挤紧而不致拉开,但因变形太大面板互相挤碎错台,有的部位则拉开,漏水达 $3\text{ m}^3/\text{s}$,20多年不能正常运行,到1982年用加筋氯丁橡胶薄膜贴于面板上,才防止了漏水.60年代末期,重型振动碾应用于压实堆石和砂卵石,不仅使土心墙和土斜墙坝提高了质量,而且使停建了约20年的混凝土面板堆石坝重新获得生命力.首先是美国将94.5m高的新国库(New Exchequer)拱形重力坝,用碾压式堆石钢筋混凝土面板坝加高到149m;然后是澳大利亚1968年开始修建110m高的Cethana混凝土面板堆石坝,用13.5t重型振动碾压压实堆石,1971年建成竣工后竖向变形很小,仅为坝高的0.1%,面板没有裂缝,取得很大成功.后来,各国相继采用该技术,我国在1989年成功地修建了95m高的西北口面板堆石试验坝后,又相继建成了江西东津、北京十三陵抽水蓄能电站上库、浙江的成屏、天荒坪抽水蓄能电站下库、辽宁的关门山等多座混凝土面板堆石坝,180m高的天生桥一级也已建成一半以上,现正在抓紧施工.目前已建成最

高的钢筋混凝土面板堆石坝是巴西的Foz do Areia坝,坝高160m.现代混凝土面板堆石坝与古老的混凝土面板堆石坝有很大不同,不能混淆,其主要不同点有:

a. 古典混凝土面板堆石坝的堆石料需从采石场挑选大块石,其石料的利用率很低,现代混凝土面板堆石坝的堆石料要求粗细颗粒级配良好,采石场的石料可全部利用,一般希望的级配为:占优势的粒径在30~50cm范围内,小于5mm的粒径占15%~25%,小于0.2mm的粒径不多于10%.这种堆石由采石场洞室爆破或排孔爆破都可得到,地下工程和岸坡溢洪道开挖料,除全风化以外的全部可以利用.

b. 古典混凝土面板堆石坝的堆石料由10m多高的栈桥上抛投并用水枪冲实,其孔隙率只能达到31%~36%,现代混凝土面板堆石坝的堆石料用重型振动碾压实,分层厚度为1.0m左右,碾压时洒水,其孔隙率能达到20%~25%.

c. 古典混凝土面板堆石坝的面板底下为特大块石码砌的垫层,现代混凝土面板堆石坝的面板底下垫层为级配良好的小于8cm粒径的碎石及砾砂,垫层与堆石之间还有一层粒径小于25cm的配级良好的过渡层,垫层与过渡层的水平宽度为4m左右,用重型振动碾压实,分层厚度为50cm左右,孔隙率达到20%~22%.

d. 古典混凝土面板堆石坝的面板用竖缝和水平缝分成方块,现代混凝土面板堆石坝的面板取消水平缝,只设竖缝,面板的周边与坝趾和靠近两岸的趾板设周边缝,周边缝和靠近两岸部位的几块面板的竖缝内设两道止水,并设缝口沥青橡胶柔性填料,设计施工时需特别注意,务使其不漏水.

混凝土面板堆石坝的上游坡比土斜墙的上游坡陡得多,前者为1:1.3~1:1.4,后者为1:2.5~1:3.前者可节省较多的工程量,且施工速度快,与堆石施工没有干扰,即在全坝填筑完成以后用滑动模板一次浇筑混凝土面板,或在堆石填筑到一半坝高时,用滑模浇筑混凝土面板至半高,最后在全坝填筑完成后,再用滑模浇筑上半部面板,这种施工还受降雨和冬季的影响.此外,由于坝坡陡,坝底宽度小于其它土石坝,故导流洞、泄洪洞、溢洪道、发电引水洞或尾水洞均比其它土石坝的短,因此,造价省、工期短是钢筋混凝土面板堆石坝的突出优点.

正因为如此,坝工专家一致认为混凝土面板堆石坝是一种最有发展前途的坝型,现在几乎所有高坝枢纽都将钢筋混凝土面板堆石坝与斜心墙堆石坝及拱坝作为比选方案.我国九五期间研究的水布垭300m级高坝,就选择了混凝土面板堆石坝和心墙土石坝进行比较.目前正在研究之中.

2.4 土工膜防渗土石坝的兴起^{[3,4]①}

土工膜应用于土石坝的防渗体在国外已有近40年的历史,坝高也由60年代的10余米,发展到80年代的百米级高坝,如1984年建成的西班牙波扎捷洛斯拉莫斯(Poza de Los Ramos)坝高134 m,采用2 mm的复合土工膜防渗,至今运行良好;六七十年代,前苏联的阿特巴申坝,努列克大坝的围堰以及法国的考道尔坝等,都是应用土工膜防渗成功的范例。我国将土工合成材料应用于水利工程也有30多年的历史,如从1966年起我国就建成了一批橡胶坝,迄今全国已有150多座,在严寒的东北三省有60多座,溢流时有石块、冰凌、树木杂物由坝袋上经过,坝体都无严重损伤,运行30多年来绝大部分正常运行;又如我国辽宁省桓仁单支墩大头坝,高78.5 m,因施工质量不好,混凝土裂缝漏水严重,用沥青-聚合物薄膜两层,上用60 cm厚的混凝土保护,效果很好。80年代,我国又相继应用土工膜处理病险坝的防渗,如江西的军山水库、湖南桐子仑水库、福建岫嵛水库等,都取得了很好的效果。1991年我国在浙江鄞县修建了坝高为36.4 m的小岭头复合土工膜防渗堆石坝,坝体由垫层、过渡层和堆石区组成,垫层及过渡层水平厚度分别为100 cm和300 cm,复合土工膜防渗体系自内向外分别是6 cm厚无砂混凝土找平层,骨料粒径5~30 mm;二布一膜复合土工膜,规格为400 g/0.5 mm/400 g;预制混凝土块保护层,规格为40 cm×40 cm×10 cm;坝体上下游边坡为1:1.3。运行结果表明,土工膜防渗效果好,下游坝面无渗水,但由于坝坡太陡(1:1.3)又无充分的防滑措施,纵向压梁间混凝土预制块护面有向下游滑移的迹象。目前正在修建的江西钟吕复合土工膜防渗堆石坝,坝高51 m,上游边坡设计成1:1.5,下游马道以上为1:1.4,马道以下为1:1.5,设计时要求在复合土工膜下面垫层的无砂混凝土上涂抹水泥砂浆,复合土工膜上面的护坡采用现浇混凝土,以利用其粘结力增加稳定性。钟吕大坝的建成,将成为我国第一座坝高超过50 m的复合土工膜防渗的堆石坝。

总之,土工膜防渗堆石坝坝坡较陡,可节省工程量、施工方便、造价低、工期短、不受降雨和冬季的影响,是一种很好的、有发展前景的新坝型,土工膜也可用作碾压混凝土坝防渗层。目前研究的问题主要是施工技术和防老化问题。

2.5 土石坝设计理论的发展^[5-8]

土石坝虽是最古老的坝型之一,但在设计理论方面却落后于其它坝型。这是因为土石料的物理力学性质要比其它材料(如混凝土、钢材等)复杂得多,使得土石坝的渗透、稳定和应力变形分析难度很大。

理论分析上的难度和建造土石坝的优点,使得有人认为:土石坝不宜进行精细的计算。

由于土力学、土质学及岩石力学理论与实验技术的进步,土石坝的设计理论才有了较快的发展。60年代以前,人们在设计土石坝时主要是考虑渗透和边坡稳定两方面的问题,虽然也注意到应该考虑坝体内的应力与变形问题,但由于缺乏计算分析手段,故难以进行分析。

土石坝渗流分析的理论基础是达西定律,由此导出的拉普拉斯方程,能针对不同的边界条件求其解析解,但当边界条件复杂时,求其解析解是极为困难的。因此工程上实用的方法是水力学方法。该法最早由前苏联的巴甫洛夫斯基提出,后来又有其他学者如米哈依洛夫进行了改进。该法利用杜平假定将坝体分段,从而求出坝体的平均渗流要素(渗透压力、渗流量和渗透坡降)。

随着计算机的高速发展,用有限元法求解土石坝在复杂边界条件下的渗流问题成为可能,现在已广泛应用于土石坝设计的渗流分析以及变形和渗流耦合分析中。

土石坝的稳定问题是土石坝能否安全运行的最直接反映,渗流作用对土石坝的稳定有直接的影响。早期有人沿用重力坝稳定分析的概念,但对土石坝无实际意义。现场观测表明,土石坝的稳定破坏都是坝坡局部滑动,破坏面往往是圆弧面,于是从1916年起就有了众所周知的瑞典滑弧法。经过几十年的研究探索,从50年代开始研究考虑条间作用力的影响,以毕肖甫的研究最为著名。不论是瑞典滑弧法还是考虑条间作用力的毕肖甫方法,都假定土体为刚体,不考虑土体本身的应力和变形,这虽会带来一定的误差,但精度能满足工程要求,以致于现行的碾压式土石坝设计规范中的抗滑稳定安全系数仍以圆弧滑动法计算结果为基础。

土石坝有限元分析是把数值计算方法应用于研究土石坝应力、变形和稳定等问题的一种方法。虽然土石体中的问题是极为复杂的,如成层、各向异性、材料非线性、复杂边界条件、复杂加荷过程等,但与其它方法相比,它确实能解决许多用传统方法无法解决的问题。用有限元法解决土石坝稳定和变形主要是解决材料的本构关系和模型参数确定的问题。30多年来,已经出现了上百个模型,有弹性非线性的、也有弹塑性的等,其中应用较广的是双曲线模型(即 Duncan-Chang 模型)和剑桥模型。我国学者提出的椭圆-抛物双屈服面模型、南水模型、清华模型也有相当的应用。之所以出现这样多的模型,是因为土石体问题本身实在太复杂,使得研究者们不畏困难,

① 河海大学,江西、湖南、福建、浙江四省土工膜防渗土石坝的现状调查报告,1997。

想出各种各样的方法去改进,提出新模型.究竟何种模型才能让大家接受,有待深入研究.况且这些模型中还未考虑时间因素(如材料的蠕变等).可以预见,这将成为新的研究热点.

较准确地确定模型参数是有限元分析计算中又一极为复杂的问题,它与模型选择是相辅相成的.尽管选择何种更为合理的模型尚在研究探索之中,但人们已在探讨参数确定的方法.目前确定模型参数所用的常规方法有室内样品试验、现场样品试验和室内、现场模型试验方法,由于存在样品与总体之间的差异以及受尺寸效应等因素的影响,难以达到满意的结果.利用1:1模型(原型)的观测资料反演材料参数,是近几年来学术界讨论得较多的问题之一.可以预见这也将成为新世纪研究的热点之一.

3 深厚透水坝基防渗技术的更新^[9,10]

早期在深厚透水坝基上建土石坝,常在坝基打设钢板桩防渗(主要在美国采用).例如,1937年建成的27 m高的马歇尔溪(Marshall Creek)坝,砂砾坝基打设15 m深的钢板桩;1941年建成的福特培克(Fort Peck)冲填坝,高74 m,透水坝基打设50 m深的钢板桩;1958年建成的高156 m的斯维夫特(Swift)坝透水坝基厚60 m,上部30 m开挖回填粘土,下部打设30 m深的钢板桩.由于前述各坝打设的钢板桩漏水较大,故Swift坝基的钢板桩焊在18 in(0.457 m)的工字钢的翼板上,打下去后,将工字钢中间的砂砾挖出,回填混凝土.这种措施造价十分昂贵,而单排钢板桩则因遇到大卵石时易出现桩尖卷刃,板桩倾斜,接头槽口撕开等问题,效果不理想,故美国在60年代以后已不再采用钢板桩,而采用泥浆槽防渗技术,即用泥浆护壁索铲挖槽,拌和砂砾壤土回填入槽,这种方法造价低、速度快,适宜于30 m厚的透水地基.美国于1962年建成Wanapum坝的泥浆槽深30 m.1968~1969年又建成Duncan Lake坝、West Point坝等,这些坝的槽深18~23 m,槽宽2.5 m或3.05 m,承受水头20~41 m,如需承受更高水头可改用更大索铲,以增加槽宽.

深厚透水坝基防渗的另一种技术是水泥粘土灌浆帷幕,法国首先在128 m高的Serre Poncon坝中采用,该坝透水坝基的砂卵石覆盖层深达110 m,用预埋穿孔管双塞高压灌浆法施灌,钻灌19排孔,帷幕厚35 m,1957年建成,此后各国相继采用,目前最深的砂卵石灌浆帷幕是High Aswan坝,深200 m,承受水头110 m.1954年,意大利首先在30 m高的马利亚拉哥坝的砂卵石坝基覆盖层中建成40 m深的柱列式混凝土防渗墙,用泥浆护壁冲击钻造孔,用溜管法在泥浆下浇筑混凝土,随后各国相继采用.我国在密云、毛家村、碧口、十三陵等20多座坝基砂卵石层中

建成混凝土防渗墙,碧口坝水头100 m,墙深62.5 m,国外有50多座坝采用这种坝基防渗措施.加拿大Manic 3号坝水头105 m,墙深131 m,是目前世界上最深的混凝土防渗墙.

混凝土防渗墙技术,我国已进入世界先进行列,目前正在施工的黄河小浪底工程覆盖层最深处70多米,是国内最深的.混凝土防渗墙的槽孔施工采用钻劈法,设备采用CZ-30和CZ-20型冲钻机.美国的钢板桩技术,各国很少采用,他们自己亦已放弃.砂砾石层水泥粘土灌浆,我国虽有少数坝基采用,但效果不理想,而法国、前苏联、加拿大等国应用此种灌浆技术却很成功.1980年开始,我国首先将高压定向喷射技术应用于透水坝基防渗处理,日本于1973年用高压旋喷桩加固地基,我国将其发展成高压定向喷射板墙,该项技术防渗效果好,施工速度快,造价低.大量用于病险坝的坝基防渗加固和新建坝的坝基防渗处理,取得了很好的效果.喷射板墙的渗透系数达 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6}$ cm/s,抗压强度为6.0~20.0 MPa,容许渗透比降为80~100,定向喷射板墙的施工速度为每台日100~200 m²,比混凝土防渗墙施工速度快10倍以上,一道板墙的造价为混凝土防渗墙造价的1/4,两道板墙的造价为混凝土防渗墙造价的1/2.

顾淦臣教授、董利川教授为本文提供部分资料,在此表示感谢.

参考文献

- 1 左东启,王世夏,林益才主编.水工建筑物(上、下册).南京:河海大学出版社,1995
- 2 付志安,凤家骥主编.钢筋混凝土面板堆石坝.武汉:华中理工大学出版社,1993
- 3 张恩海.复合土工膜堆石坝研究与计算:[学位论文].南京:河海大学,1996
- 4 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会.土工合成材料工程应用手册.北京:中国建筑工业出版社,1994
- 5 朱诗赞.坝工技术史.北京:水利电力出版社,1995
- 6 殷宗泽.土力学学科发展的现状与展望.河海大学学报,1999,27(1):1~5
- 7 姜弘道主编.水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序.南京:河海大学出版社,1992
- 8 沈长松,顾淦臣.面板堆石坝参数反分析及变形规律探讨.河海大学学报,1996,24(6):13~19
- 9 白永年,吴士宁,王洪恩等.土石坝加固技术.北京:水利电力出版社,1992
- 10 水利部小浪底水利枢纽建筑管理局.黄河小浪底建筑工程技术论文集.北京:中国水利水电出版社,1997

(除以上文献外,本文还参考了1958~1983年的International Water Power and Dam Construction.)

(收稿日期:1998-06-17 编辑:张志琴)