

现代坝工技术及其发展趋势(一)

④
16-19

沈长松

TV64

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

摘要 简要回顾坝工技术发展的历史,重点介绍重力坝、拱坝和土石坝等坝型在设计理论、设计方法和筑坝技术等方面的发展过程和当前研究水平,针对计算分析中存在的问题,反分析研究愈来愈受到重视。同时也对当前流行的碾压混凝土坝、混凝土面板堆石坝、复合土工膜防渗土石坝等新材料、新坝型、新技术进行了论述。在深厚透水坝基防渗处理方面重点介绍混凝土防渗墙技术和高压喷射灌浆处理技术等。

关键词 重力坝;拱坝;土石坝;碾压混凝土坝;混凝土面板堆石坝;复合土工膜;高压喷射灌浆

筑坝蓄水灌溉农田,已有几千年的历史,用于发电则仅有 100 多年的历史。而坝工建设的迅速发展是 20 世纪才开始的。对于坝若按建筑材料来分类,可分为混凝土坝和当地材料坝。混凝土坝包括重力坝、拱坝、支墩坝。当地材料坝则包括土坝(均质坝、心墙坝、斜墙坝)和堆石坝(含面板堆石坝)。坝型不同其发展进程也不一样,表 1 列出了 40 年代后世界高坝建设的各种坝的比重。

表 1 全球 100m 以上各类高坝的比重情况

建成时期	总数	土石坝		重力坝		拱坝	
		数量	比重/%	数量	比重/%	数量	比重/%
1950 年以前	42	13	31	16	38	13	31
1951~1960	71	22	31	21	30	28	39
1961~1968	110	42	38	24	22	44	40
1969~1974	60	34	56	7	12	19	32
1975~1980	88	55	62	14	16	19	22
1981~1986	110	56	51	30	27	24	22
总计	481	222		112		147	

由表 1 可见,全球 100m 以上高坝,土石坝比重逐年增加,70 年代土石坝比重比 50 年代增长 1 倍,拱坝比重和重力坝比重逐年下降,到 70 年代重力坝所占比重已很小,而土石坝的比重已遥遥领先。

60 年代中,日本在高坝中,重力坝占压倒优势(占高坝总数的 67.5%)。70 年代,日本 100m 以上高坝以土石坝和拱坝占优势,重力坝比重较低。巴西 80m 以上的坝中,土石坝占 75%。美国 60m 以上的坝土石坝占 80% 以上。

下面按坝型介绍坝工技术的发展情况。

1 混凝土坝

1.1 重力坝

重力坝依靠自重维持稳定,坝体体积大,稳定性好。50 年代以前所建的大坝,重力坝占总数的 38%。美国在 40 年代初期就建成了大古力、方坦那、夏斯塔等著名重力坝(后来才转向修建高土石坝),在所建的重力坝中拱形重力坝占有一定的比例,其设计思想是藉拱作用来增加坝的安全度,故只按重力坝进行抗滑稳定和应力计算,不考虑拱作用也不考虑按重力拱坝计算应力和拱座山体稳定。但实际拱作用较大,拱座山体会受到拱端推力,若设计时考虑不周将造成大坝失事。美国洛杉矶的圣弗兰西斯重力拱坝溃坝失事,就是一个典型的例子。后来 1928 年开工的胡佛坝设计吸取了圣弗兰西斯坝的教训,按拱坝设计。

我国乌江渡采用定圆心等外半径拱形重力坝,对坝体下部 100m 的横缝进行灌浆,使其成为整体,将静水压力的一部分传递至两岸,上部 65m 两岸地质条件较差,故坝体横缝不灌浆,以消除拱作用防止拱推力传递给两岸。但经多种方法(含试验)研究分析,拱承担的水荷载仍达 57%,说明拱的作用明显。

由此可见,拱形重力坝不但要满足重力坝的要求,还要满足拱坝的要求,如不作较为全面的分析计算,片面将拱作用作为安全储备,则可能潜在失事的危险,且拱形重力坝较重力坝的坝轴线长,除非地质条件的限制,一般并不经济。

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”建设教改项目部分成果。

不论是重力坝还是拱形重力坝或重力拱坝,坝基扬压力均较大,它抵消了坝体的有效重量,不得不将坝体尺寸加大,这是重力坝的缺点.为克服这一缺点,在50年代后期,我国和前苏联首先采用宽缝重力坝,如105m高的新安江大坝(我国第一座自行设计施工的大坝),114m高的云峰大坝,107m高的黄龙滩大坝和108m高的潘家口大坝以及121m的故县坝等均为宽缝重力坝,缝宽占坝段的25%~40%,它使坝基扬压力大大减小,从而可节省混凝土7%~15%.为使扬压力进一步减小,70年代初期采用封闭式抽水减压排水系统,使灌浆排水廊道下游的坝基扬压力低于坝下游水位的水头.我国丹江口宽缝重力坝采用此种形式排水,效果良好.国外也采用这种抽水减压措施,如德意志民主共和国1912年建成的李斯脱(Lister)重力坝,由于1965年在该坝下游建比格(Bigge)坝,回水淹至李斯脱坝1/3坝高处,危及坝的稳定,故补设一条廊道和排水孔幕,用水泵抽水,使坝基扬压力低于下游水位,扬压力总值比原来减少了80%.我国在建工程三峡水利枢纽,大坝采用实体重力坝,为与下游葛洲坝水电站联合运行,下游水位较高,故分别在上、下游设帷幕和排水,中间设两道排水幕用水泵抽水以降低坝基较大的扬压力^[1,2].

重力坝的另一个缺点是坝体体积大,温控措施难度大,因此采用薄层通仓浇筑方法以减小水泥水化热的影响.世界上最早采用通仓浇筑工艺的是1965年建成的意大利阿尔卑吉拉重力坝,坝高178m,该坝采用低热水泥搅拌混凝土,用自卸汽车运输混凝土入仓,用推土机平仓,薄层浇筑振捣,取消冷却水管,初凝后用振动刀片切横缝,在坝的上游面铺设薄钢板防渗,以备混凝土可能裂缝时不漏水,取消昂贵的混凝土温控措施,而以钢板护面防渗,这在经济上是合算的,施工速度也可加快.该坝的建成为碾压式混凝土坝和土工薄膜护面防渗开辟了道路.

我国有不少采用薄层通仓浇筑的实例,但要大幅度降低水泥水化热还是采用碾压式混凝土坝.

目前,碾压混凝土坝在世界上正方兴未艾,且不断向高坝方向发展,如日本的玉川坝(100m)、月山坝(125m)和宫濑坝(155m),坝高均在100m以上,墨西哥的特里戈米尔坝(100m)、安哥拉的卡潘达坝(110m)和智利的潘戈坝(115m),坝高都在100m或以上.美国的奥本坝,坝高达209m,我国的岩滩(110m)、水口(101m)、宝珠寺(132m)、大朝山(120.5m)、江垭(131m)等坝也都超过了100m.目前正在设计中的沙牌水电站,大坝拟采用碾压混凝土拱坝,坝高130m,将是世界上最高的碾压混凝土拱

坝.即将兴建的龙滩坝,一期工程坝高192m,二期工程坝高220m,将成为世界上最高的碾压混凝土重力坝.

碾压混凝土坝的关键技术包括下面几个方面.

1.1.1 碾压混凝土坝的材料^{[3]①}

经由振动碾压密固结的混凝土可大致分为三种:①水泥稳固砂砾料碾压混凝土,胶凝材料含量60~80kg/m³,其中粉煤灰占30%;②低粉煤灰掺量碾压混凝土,胶凝材料120kg/m³左右,其中粉煤灰占20%~30%;③高粉煤灰掺量碾压混凝土,胶凝材料含量150kg/m³,其中粉煤灰占50%以上.三者中以低粉煤灰掺量碾压混凝土应用较多.

1.1.2 碾压混凝土坝的设计^[3]

由于掺入了大量的粉煤灰,水泥水化热大大降低,但碾压混凝土的抗渗性能则不如常规混凝土.因此,在碾压混凝土坝设计时需考虑防渗系统的布置和相应填筑碾压方式,目前常采用的典型布置方式有三种:

第一种典型布置是在坝体与基岩和两岸的连接部位设常规混凝土垫座,在坝顶和上下游面设常规混凝土保护层,亦称“金包银”.其厚度及原材料配合比由工作条件(如抗渗、抗冻、抗冲耐磨、强度、构造和施工要求)决定.其中上游面的常规混凝土厚度一般不小于2.5m,在坝体内部,除廊道和管道周围应按强度要求,设置一定厚度的低含钢率钢筋混凝土外,其余部分均为碾压混凝土,碾压混凝土填筑时碾压分层较厚,一般为75~100cm,碾压后间隔一定时间先进行层面处理,然后再填筑上层.坝体设横缝,横缝迎水面的止水和坝体排水管均设在常规混凝土内,碾压混凝土部分的横缝则在碾压后凝固前用振动切缝机造成,缝内用聚乙烯板充填.

第二种典型布置是全剖面均为碾压混凝土,只利用常规混凝土作模板兼坝面防护层;采用高粉煤灰掺量,其所占胶凝材料总量中的比例可达70%,胶凝材料用量变幅很大,可降至60~70kg/m³,也可达到240~250kg/m³,填筑时采用薄层连续碾压,层面不进行处理,多数也不设横缝,这种剖面布置的坝基本上是从现代碾压式土石坝演变而来的,它具有构造简单、施工方便、建造速度快、经济效益高等明显优点,但坝体防渗防冻抗裂性能稍差.美国威洛里克碾压混凝土坝是修建最早的,初期漏水较严重,后对坝体进行灌浆处理后满足了防渗要求.

第三种典型布置是剖面的绝大部分均为碾压混凝土,粉煤灰掺量也较高,填筑碾压方式与第二种类似,但在坝的上游需有专门的防渗设施,如:①设置沥青防渗层,并用预制钢筋混凝土板兼作模板与护

①水利水电混凝土坝信息网.混凝土坝技术(二滩水电站专辑),1998(1,2)

面板,我国第一座碾压混凝土坝坑口坝就是这样布置的;②敷设合成橡胶防渗薄板;③喷涂低粘度聚合物防渗层;④在上游面安装预制空格模板,随着坝体上升而在其中浇筑常规混凝土或预填骨料,然后进行水泥灌浆,形成防渗板。

上述三种典型的布置方式,表明了不同设计思想的不同结果,其目的都是为在满足强度、稳定、防渗、经济等要求下尽量简化结构,方便施工。如一般都认为在碾压混凝土坝内尽量少设廊道和孔洞,坝基帷幕灌浆宜在坝踵处的平台上进行,确需在坝内设置廊道和孔洞时,其周边必须妥善施工,保证质量,也可在碾压后挖除廊道和孔洞部位的碾压混凝土,回填无胶凝材料的骨料,而后继续填筑,待工程完成后再挖除回填的骨料,形成廊道和孔洞。此外,由于碾压混凝土的设计、施工等要求与常规混凝土坝不同,对枢纽布置和导流方案选择也会产生影响,如碾压混凝土大坝的水电站引水管道最好不穿过坝体,不得不采用穿过坝体方案时,则应尽可能采用坝身背管或坝基卧管而不宜用坝内斜管,以免对施工干扰太大。又如,为便于全坝连续碾压施工并保证施工质量,施工导流方案宜采用一次断流,而不用分期导流在坝内设底孔,再如采用二级配富浆碾压混凝土可较好地解决防渗和抗裂问题,故近年来所有的碾压混凝土坝已普遍采用全断面碾压的结构模式,用二级配碾压混凝土直接作为防渗体,以取代“金包银”模式,等等。因此,新坝型的出现,将带来一系列技术问题需要不断的深入研究。

1.2 拱坝

混凝土拱坝是1903年开始修建的,到1985年建成和在建的高于120m的拱坝有93座,从不同时期世界各国拱坝高度变化发展看,有如下一些特点:

a. 从1919~1940年全球所建高100m以上的拱坝和重力拱坝总数少于重力坝,这期间的拱坝大多数建于美国,多数为重力拱坝,如胡佛坝等。1941~1985年全球建成120m以上的拱坝数远远超过重力坝,建设地区也由美国转向欧洲,美国从50年代后转向建高土石坝。

b. 1940年以后所建的高拱坝,大多数是双曲拱坝,第一座双曲薄拱坝是意大利的米纳蒂苏利斯坝,坝高136m,厚高比0.1,意大利最薄的拱坝是斯贝舍里双曲薄拱坝,厚高比为0.08,世界上最薄的双曲拱坝是法国的托拉坝,坝高88m,厚高比0.0227。

c. 1959年法国Malpasset薄拱坝溃坝,使下游10km处的弗雷茹斯成为废墟。该坝坝高66m,坝底最大厚度6.91m,厚高比0.105,溃坝后检查左岸重力墩移动了2.11m,右岸残留少部分坝体,其余坝体

全部冲走。另一座拱坝的灾害事故是意大利的瓦依昂双曲拱坝,坝高262m,厚高比0.084,1961年建成并开始蓄水,1963年受地震影响,上游左岸发生滑坡,滑坡体积2.5亿 m^3 (比库容大1.65亿 m^3),以25~30m/s的速度滑入水库,涌浪翻越坝顶高达180m,有2300万 m^3 水翻过坝顶,将下游1.6km处的龙加朗镇(Longarone)全部摧毁,但拱坝屹立不动,这项工程从整体来说是失败的,但双曲薄拱坝极其成功。这两个事件的经验教训十分宝贵,值得勘测设计研究人员借鉴。

d. 早期的拱坝,坝体内避免开孔,坝顶也不布置泄流,40年代以后通过对坝体孔洞进行应力计算和模型试验,逐步尝试在坝体内开孔和在坝顶布置溢流取得成功。如萨扬舒申斯克坝在坝体内设11个宽5m高6m的泄水孔,孔底水头75m,孔口单宽流量 $247\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。我国的高水头大孔口弧门技术处于世界先进水平,如我国的白山拱坝坝顶设4个宽12m高16m的溢流孔,单宽流量 $142\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$,坝内设3个深式泄水孔,宽6m高7m,孔底水头70m,孔口单宽流量 $222\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。

e. 拱坝的发展颇为迅速,坝高从1910年的100m到1936年的221m,1957年的237m到1961年发展到262m,1974年发展到272m。我国规划中的小湾296m,溪洛渡拱坝高283m,拉西瓦250m,都已走在世界前列。

1.3 混凝土坝设计理论和方法的发展^[4]

1.3.1 重力坝设计理论的发展

近代重力坝在进行了长达半个多世纪的探索之后,人们对它的工作性态的认识日益深刻,到20世纪之后重力坝无论是在坝高还是在数量上都以前所未有的速度发展,其设计理论亦日臻完善,主要反映在应力分析和稳定分析两个方面。

1.3.1.1 应力分析方法的发展

在应力分析方面,现代重力坝主要采用材料力学法(亦称重力法)和弹性理论法,因材料力学法假定垂直正应力呈直线分布,给计算带来了许多方便,故我国SDJ21—78《混凝土重力坝设计规范》(试行)中就规定了30~70m的低坝,按材料力学法计算坝的应力,无需进行其他的研究;对70m以上的高坝也是按材料力学法计算,宜同时进行模型试验或采用有限元法进行研究。值得一提的是,当今世界上最高的重力坝——大狄克逊坝,就是用材料力学法进行设计的。

利用弹性理论求解重力坝的应力始于19世纪末,首先是用经典的弹性理论求解无限楔体在自重及某些边界力作用的应力分布解答。从20世纪初到20世纪中叶,各国的研究者们又提出过多种计算应力的方法。如平板模拟法、格栅模拟法等,这些方法虽能给出符合相

容条件的严谨解答,求坝及坝基内的应力和变形,但计算冗长费时,实用上受到限制.60年代以后,有限单元法的出现为弹性理论法的应用开创了新的局面.有限单元法可考虑复杂的边界条件和荷载情况,使应力分析能了解坝体不同部位的应力大小及其分布.加上计算机技术和软件工程的发展,使大坝的设计更精确和快捷.不过有限元计算结果的可信性还有赖于所用参数能否反映实际,坝体角缘处的应力集中和失真现象还较严重,世界各国迄今尚未制定出与之相适应的应力控制标准.因此今后的努力方向应是力求准确确定所用参数和应力计算方法的改进.如利用原型观测资料反演材料参数,用断裂力学方法研究坝踵应力集中、坝体裂缝发展以及断裂准则等课题.

1.3.1.2 稳定分析的发展

在稳定分析中,摩擦公式因其多年成功的经验,所以至今仍被广泛采用.不过现在使用的摩擦公式已不是光面试验的结果,而是源于较符合实际的抗剪试验.在摩擦公式中因未计入凝聚力的作用,不能完全反映坝的工作状态,故从20世纪30年代起,在摩擦公式中被忽略了的抗剪力重新受到注意,对高坝提出用剪摩公式计算重力坝的抗滑稳定.剪摩公式中的 f 值由单独摩擦试验获得,而纯剪强度由纯剪试验获得.这虽考虑了抗剪力对重力坝抗滑稳定的影响,但将这两个由不同试验获得的参数组合在一起确定抗剪力,没有明确的物理概念.故在50年代有人对剪摩公式作了改进,建议用抗剪断试验关系曲线 $\tau = f\sigma + c'$ 中的抗剪断摩擦系数 f 代替剪摩公式中的 f ,用抗剪断凝聚力 c' 代替纯剪强度.这样使物理概念更为明确,被广泛采用.但总的说来重力坝的抗滑稳定分析,已往的计算方法是可靠的,但对重力坝的破坏机理研究不够,稳定计算公式中的系数实际上都是具有不同程度不确定性的随机变量,用一定值(K)来评价结构的安全度是不合理的.如果分别考虑各参数的统计特性,用安全概率(或失事概率)来表示坝体的安全度,就有明确的综合安全度的概念.新的混凝土重力坝设计规范已明确规定用极限状态法设计重力坝,但所采用的设计指标仍处于“套改”阶段,即套用已有的经实践证明属安全的因素去确定相应因素的可靠度.因此今后的工作首先是收集研究各随机变量的统计特性及其分布型式,以准确确定荷载和结构的分项系数.

1.3.2 拱坝设计理论的发展^[5]

和重力坝设计理论一样,拱坝设计理论的发展也经历了相当长的过程,从圆筒法、纯拱法、试载法(拱冠梁法)直到现在的有限单元法.圆筒法理论在拱坝设计史上曾起了开创性作用,但因其忽略的因素太多,与实际情况相差较大.20世纪初由较符合实际情况的试载

法所取代.半个世纪以来,试载法一直作为拱坝应力分析的基本方法.不少国家的拱坝设计标准都以试载法的计算结果为基础.自有限元法被广泛应用于结构的弹性和弹塑性分析以来,不少学者对拱坝材料、坝体裂缝、坝基断层等的本构关系以及材料的破坏准则、计算方法进行了不少有益的探索,这些探索主要包括拱坝的极限承载能力分析和接触问题处理等.

拱坝的极限承载能力与材料的破坏准则有关,实践证明,局部应力超过材料的极限强度时,并不意味着拱坝丧失承载能力.因此傅作新教授等提出两种模型准则:一是最大正应力准则,当坝体拉应力大于材料的抗拉强度时,结构在垂直于拉应力的方向产生裂缝,当压应力大于材料的抗压强度时,该部位的材料被压碎,这个准则在形式上同传统的设计准则一致;二是脆性损伤准则,将材料的拉伸应力应变曲线用以极限拉应力(应变)为顶点的双折线表示,给出材料和拉梅系数及损伤度有关的应力应变关系.根据这两种模型准则算出拱坝在各级荷载作用下的开裂和破碎区,并绘出超载系数 K 和拱坝最大位移 δ 的关系曲线,曲线的折点即为拱坝的极限状态.

接触问题的处理是大坝结构设计中的又一个倍受关注的问题.如何精确模拟坝基中的断夹层和坝体中的裂缝,不少学者进行了研究和探讨,如雷晓燕等提出接触单元考虑四种接触约束:①固定,界面紧贴,不产生滑动;②滑动界面紧贴,可产生两个方向的滑动;③自由界面分离;④混合,界面紧贴,只产生一个方向的滑动.这种模型可以模拟摩擦滑动、分离和初始的重新组合.李同春等则用混合坐标系下的子结构法来解决接触-摩擦问题.邓德生等用优化和有限元相结合的方法对有缝拱坝进行分析,仍将拱坝划分为拱和梁,对每层拱圈和梁(连同一定范围的地基),按平面问题处理,用优化方法求得拱梁交点变位一致来进行荷载分配.它考虑地基和缝对拱坝结构的影响,从而在一定程度上克服了试载法的局限性.

参考文献

- 1 汝乃华.重力坝考虑抽水扬压后的设计扬压力.水力发电,1983(6)
- 2 潘家铮.发电(三峡工程小丛书).北京:水利电力出版社,1992
- 3 左东启,王世夏,林益才.水工建筑物.南京:河海大学出版社,1995
- 4 朱诗赞.坝工技术史.北京:水利电力出版社,1995
- 5 邓昌铁,俞国青.国际拱坝会议论文综述(二).河海科技进展,1993,13(2):12~20
- 6 International Water Power and Dam Construction. 1958~1983

(待续)

(收稿日期:1998-06-17 编辑:熊水斌)