

碾压混凝土拱坝的发展

黄达海

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

TV642.4
TV642.2

摘要:简述碾压混凝土材料的温度特性、变形特性和强度特性;介绍国内外碾压混凝土拱坝在结构设计方面的工程实践经验,根据几座碾压混凝土拱坝温度场、应力场仿真分析的成果,分析碾压混凝土拱坝在温度控制方面面临的一些问题,讨论碾压混凝土拱坝在施工工艺上存在的某些局限性,最后从材料性质、结构设计、施工措施等方面探讨碾压混凝土拱坝的发展趋势。

关键词:碾压混凝土;拱坝;温度应力;仿真分析;结构设计

中图分类号:TV642.4

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2000)03-0021-04

1 碾压混凝土材料的主要特点

碾压混凝土是一种以碾压方式密实的干硬性混凝土(roller compacted concrete, RCC)、高比例的粉煤灰掺量,一方面使混凝土具有良好的可碾性,满足了连续、快速、高强的施工要求;另一方面使其温度特性、变形特性、强度特性与常规混凝土(conventional mass concrete, CMC)有较大的不同。就碾压混凝土温度特性而言,大体积碾压混凝土早期温升较低,后期温升较高,达到最高温度的时间及最高温度的持续时间均较长,所以,碾压混凝土坝在施工期的散热量很小,依然存在温度裂缝问题。就碾压混凝土的变形特性而言,其极限拉伸值比同标号的常规混凝土的极限拉伸值略低,但其徐弹比只有常规混凝土的 $1/3 \sim 2/3$ ^[1],这对混凝土抗裂分析不利。在水胶比相同的条件下,碾压混凝土的抗压、抗拉极限强度与常规混凝土相差不大^[2],但其软化特性差别较大,这对碾压混凝土后期的抗裂性质具有较大的影响。

和以振捣方式密实的常规混凝土相比,碾压混凝土在材料性质上的变化主要是因为粉煤灰的大量掺入、水泥用量明显减少引起的。就大坝混凝土而言,不同比例的粉煤灰掺量将得到不同品质的混凝土。文献[3]比较了“高掺”、“中掺”、“低掺”粉煤灰混凝土对大坝防渗能力、应力水平以及施工工艺的影响,并且特别强调了碾压混凝土的后期强度。因此,粉煤灰在大坝混凝土中不仅取得了“经济组分”的合理地位,而且还赢得了“功能组分”的美称。对碾压混凝土拱坝而言,由于其应力水平相对较高,某些

部位的开裂在所难免,所以特别注重混凝土的抗裂能力,而高比例的粉煤灰掺量使混凝土的软化特性、徐变特性严重下降,仿真分析的结果表明,温度应力问题仍然是碾压混凝土拱坝结构设计的主要问题^[4,5]。

但值得注意的是,在与面板堆石坝进行坝型比较的争论高峰期^[6],中国水力发电工程学会碾压混凝土筑坝委员会在1994年春天召开的“碾压混凝土材料研讨会”上,乐观地估计了碾压混凝土的上述三个方面的材料性质^[7],促进了中低碾压混凝土坝快速发展,使中国的碾压混凝土建设在坝型、坝高等方面短期内不断攀登世界高峰^[8],也使这一领域的科研工作水平不断提高。进一步的碾压混凝土材料试验表明^[9],工程用大体积碾压混凝土与试验室用碾压混凝土材料性质差别甚大,对大体积碾压混凝土的温度应力问题以及材料抗裂能力应予以高度重视。

2 国内外碾压混凝土拱坝的工程实践

在碾压混凝土重力坝的施工中,由于横缝(transverse joint)对坝体的分割,使碾压混凝土的坝面运输受到干扰,坝面工序增多,抑制了碾压混凝土快速施工的特点;同时也由于有些碾压混凝土重力坝断面很大,工程量多,而坝肩的地质条件又相当好,其较大的基础承载能力并没有得到发挥,因此,能较好地解决上述两问题的碾压混凝土拱坝就应运而生了。

众所周知,碾压混凝土拱坝的核心问题是温度应力问题,所以在温度应力没有搞清楚的情况下,人们

的初步做法是将坝体轴线做成微拱形或拱形,称为拱形重力坝(arched gravity dam),如我国的岩滩上游围堰和隔河岩上游围堰。但拱形重力坝不是拱坝,做成拱形的目的首先在于极限平衡的条件下,坝体两端可以获得比整体式重力坝更为可靠的侧向阻滑力和额外的稳定度^[10];其次在于依靠水压作用下的轴向压力,降低均匀温降荷载作用下的坝轴向拉应力。

拱形重力坝仍需要大量地造缝,影响施工进度。有的学者从预裂爆破成缝机理^[11]中得到启发,提出了在碾压混凝土拱形重力坝中设间断缝(discontinuity joint)的建议^[12],既可保证坝体收缩时沿设有止水的间断缝拉开,又较大幅度地降低了造缝工作量。但这种坝型仍然没有充分发挥坝肩岩石和坝体混凝土的材料潜力。南非工程师 Hollingworth^[13]在积累了几座碾压混凝土重力拱坝的设计与施工经验之后,于1988年领导建成了第一座真正意义上的碾压混凝土拱坝——南非 Knellpoort 坝(高 50 m,坝顶长 200 m,混凝土 59 000 m³)^[14]。与间断缝的概念相似,他们在坝体中设置了数量众多的诱导缝(crack director),以备在诱导缝张开之后用重复灌浆(regrouting system)的方式保证坝体的整体性。

在南非 Knellpoort 坝竣工不久,世界上第二座碾压混凝土拱坝——南非的 Wolwedans 坝(高 70 m,坝顶长 200 m,混凝土 59 000 m³)^[14]也宣告完工。这两座碾压混凝土拱坝对温度应力问题均给予了高度重视。他们在拱坝的上下游两面沿坝轴线方向每隔 10 m 左右设诱导缝,并在其中设有温度及温度应力观测系统、重复灌浆系统,以期有组织地解决温度收缩裂缝(contraction crack)问题。由于坝体应力状态的复杂性和碾压混凝土材料的不均匀性,工程师们很难确定究竟哪个断面首先开裂,所以谨慎地选择了“密间距诱导缝”方案。

我国于 1987 年开始在岩滩上游围堰(高 54.3 m)和隔河岩上游围堰(高 37.0 m)上将碾压混凝土材料应用于拱形重力坝之中。普定碾压混凝土拱坝(1993 年完工)是世界上第三座也是已完工的最高的碾压混凝土拱坝,坝高 75 m,坝顶总长 196.0 m,混凝土 103 000 m³。我国工程师在借鉴南非经验和拱形重力围堰设计经验的基础上,根据实际工程情况和边界条件,用三维有限元方法首次对大仓面整体碾压的混凝土坝体进行了温度及温度应力的仿真分析(simulating analysis),基本摸清了碾压混凝土拱坝温度和温度应力(temperature stress)的分布规律,在坝肩设了一道横缝,在坝体中部设了两条诱导缝^[15]。在材料方面,选择了迟缓型微膨胀水泥;在施工过程中,严格控制了浇筑季节和浇筑温度。该坝完工 2 年

后,原型观测的结果表明,仿真计算的坝体温度和温度应力与实际观测值非常接近^[4]。由于选材得当,温控有力,上部两拱端诱导缝运行 6 年并没有张开,拱坝的整体性良好。

普定碾压混凝土拱坝的成功,推动了我国碾压混凝土拱坝建设的快速发展。完建于 1994 年的温泉堡碾压混凝土拱坝,坝高 47.5 m,坝顶宽 4.0 m,坝顶沿轴线总长 188.0 m。温泉堡位于北方,冬季严寒,不能填筑混凝土,只能在春秋季节较低温度时浇筑。由于温升后温差超过规定,因此采用了两条非贯通式横缝(uncross transverse joint)和两条非贯通式诱导缝(uncross induced joint)。由于坝体较薄,内热散发快,横缝于 1993 年 3 月张开,最大达 4.68 mm,于 1994 年 4 月在坝体下半部进行了灌浆。运行后未发现漏水。1996 年 3 月,部分横缝再次张开,管理单位启用了重复灌浆系统。为确保安全,在上游面用土工薄膜做了二道防线^[16]。

清华大学刘光廷教授在碾压混凝土拱坝的新型结构设计方面,作出了重要贡献^[17]。他和他的学生们将断裂力学的成果融入功能强大的仿真计算程序中,以仿真计算的成果指导设计,并在溪柄碾压混凝土拱坝(高 63.5 m,1996 年完工)的实际工程中得到成功的应用。溪柄拱坝坝址河谷狭窄,气候温和,坝体可在一个冬季碾压完毕。仿真计算成果表明,坝体可不设横缝和诱导缝,仅在两岸坝肩设置止水人工短缝(artificial short joint)用以改善不同工况下的坝体应力状态。观测的结果也表明,人工短缝改善了水压及温度荷载引起的坝体应力^[18]。

于 1998 年 10 月开始碾压的沙牌碾压混凝土拱坝(高 132.0 m,坝顶轴线长 250.0 m,混凝土 390 000 m³),是中国科学家与工程师历时 10 年攻关的扛鼎之作。该坝在结构设计上吸收了横缝与诱导缝的优点,在坝体上部的两边,为缓解整体浇筑时自重产生的拉应力和温度收缩应力,设置了两条横缝;在拱冠两边,从坝底到坝顶,设置了两条诱导缝,作为控制温度应力的预备措施。由于有一部分坝体要在高温季节浇筑,坝体的均匀温降不仅量大,而且时间较长,在朱伯芳院士的推荐下,拟在这一部位通冷水降温。因沙牌碾压混凝土拱坝坝体较高,拱坝的中心角大,为缓解梁向拉应力,在坝体底部设置了适当角度的倒坡,使整个坝体的应力状态更趋合理。

在普定与沙牌等碾压混凝土拱坝建设的带动下,中国的碾压混凝土拱坝的建设渐趋活跃。石门子(高 110 m)、高塘(高 110 m,坝顶轴向长 355 m)、白莲崖(高 107 m)、引子渡等碾压混凝土拱坝正处于设计或施工阶段^[16],说明碾压混凝土筑坝技术前景广阔。

3 碾压混凝土拱坝设计与施工的基本经验

自世界上第一座碾压混凝土重力坝——日本岛地川坝竣工以来(1981年),坝工界迎来了人类筑坝史上的第二个里程碑。此后的二十几年来,世界各国竞相修建碾压混凝土重力坝、碾压混凝土重力拱坝、碾压混凝土拱坝等,不拘一格,其数量之多,规模之大,速度之快,足以振奋坝工界。工程师与科学家携手,把碾压混凝土重力坝的高度提升到了216.5 m(中国龙滩)^[19],把碾压混凝土拱坝的高度定位在132.0 m(中国沙牌)。相应地,世界各国在碾压混凝土材料性质、设计技巧、施工方法、管理模式研究等诸多方面硕果累累。下面仅就与碾压混凝土拱坝设计、施工有关的经验作一简述。

a. 材料性质方面:配合比合适,施工措施得当的碾压混凝土,其抗压强度、抗拉强度、密实性等均不低于同等条件下的常态混凝土^[7];石粉是改善碾压混凝土性能的重要成分,掺量适当的石粉,可以提高碾压混凝土的均质性、密实性和抗渗性^[7];最大骨料粒径对碾压混凝土的整体质量影响很大,尤其是影响碾压混凝土的均匀性,工程上以不超过80 mm为宜;碾压混凝土的强度与变形与应力状态关系极大,其拉压弹模比、拉压强度比劣于常规混凝土^[4],其后期徐弹比也较低,对其抗裂分析不利^[1];碾压混凝土本体具有良好的抗渗性,层间的渗漏亦不难处理,因此主体结构可以放弃“金包银”模式,以二级配碾压混凝土取而代之^[3]。这一方面,已有上静水、荣地、温泉堡、长顺等碾压混凝土坝作为参考。

b. 结构设计方面:整体式大仓面碾压施工的混凝土拱坝如能在一个低温季节浇筑完毕,其结构设计将非常简单,止水人工短缝即可以有效地分配温度荷载和水荷载;当浇筑期跨越高温季节,温降滞后的温度场将使大坝在运行期遭遇各种不利的应力状态,因此需要在不同部位采取不同结构措施;诱导缝和横缝的单独使用或联合使用,可以处理不同地域、不同高度的碾压混凝土拱坝的应力问题;有关横缝和诱导缝的构造^[5]应以可靠、方便为原则,因地制宜。

目前,碾压混凝土拱坝的高度与常规混凝土拱坝还有一定差距,其体形一般受控于坝肩稳定条件和施工条件,所以,已建的碾压混凝土拱坝均采用了方便施工的圆弧拱圈,为缓解其梁向拉压力,坝体底部设小角度的倒坡;为提高层间抗剪稳定性,施工时层面可以做成微倾向上游的缓坡(如1:30);从投资分配的角度,为提高碾压混凝土拱坝的耐久性,降低后期维护费用,碾压混凝土拱坝的厚高比(thick-

ness height ratio)均较大^[7,20]。

c. 施工措施方面:碾压混凝土的生命力在于快速、经济;符合标准的碾压混凝土的原材料费用与加工费用大约为同等级常态混凝土费用的80%~85%^[17];其薄层连续上升的施工方法一般可使总工期提前1年以上^[17];对于正常情况下需要跨年度浇筑的碾压混凝土,采用强化施工措施,确保主体混凝土在低温季节浇筑,既是温度控制的上策,又是解决结构设计问题的有效途径之一。因此,碾压混凝土拱坝的施工技术应在普通碾压混凝土坝施工技术的基础上,重点解决连续拌和与皮带运输的配套问题,解决大落差入仓的骨料分离问题^[21],进一步提高上坝强度。

根据南非 Wolwedans 碾压混凝土拱坝和我国铜街子碾压混凝土重力坝的施工经验,在高温季节对仓面采用喷雾措施,可降温5~7℃,为避免烈日暴晒,采用白天保护、夜晚浇筑的方法也是高温季节混凝土浇筑的有效方式。有些专家认为:碾压混凝土对常规混凝土的革命性进步主要体现在密实方式与温控方式上,不赞成在碾压混凝土坝内布置冷却水管^[22]。由于目前的通水材料与方式比10年前大有进步,必要时(如欲加快降温速度,提前灌浆蓄水)也可以采用这种冷却方法。总之,碾压混凝土坝的核心技术问题仍是温度控制问题,其理论与方法均在不断的发展中。

4 碾压混凝土拱坝的发展趋势

碾压混凝土拱坝从诞生到现在已过10年,但已完建的工程不足10座,且主要分布在中国,其发展速度远不能与碾压混凝土重力坝相比。这一方面说明工程师们的谨慎态度,他们称当前条件下修建100 m以上碾压混凝土拱坝为“step in the dark”^[23];另一方面也说明问题的复杂性及此种坝型的局限性,主要表现在:

a. 碾压混凝土的运输方式与密实方式使大坝混凝土物理力学指标的均匀性受到限制。尽管实验室碾压混凝土的强度和变形指标比较好,但坝体与两岸、地基结合处、泄水孔、廊道等应力复杂的地方恰为材料参数难以控制的区域,大坝安全可靠降低。

b. 温度场及应力场的仿真分析虽能在宏观上探明大坝最大应力,最高温度发生的部位和时间,但输入的环境温度和施工参数与大坝实际施工时的温度和参数有较大的出入,且我国目前离反馈设计(feedback design)的距离还很遥远^[24]。所以,工程师对仿真计算的成果持谨慎态度。

c. 对温度应力问题的最佳解决办法存在着“材料方式”、“结构方式”、“施工方式”等三种完全不同

的观点.对中低碾压混凝土拱坝,以“材料方式”与“施工方式”为主;对100 m以上的高碾压混凝土拱坝,主要依靠“结构方式”.到目前为止,“结构方式”的可靠性仍处在研究之中^[25].

d. 薄层连续施工的方法,很难使常规混凝土坝中应用非常有效的温度控制方式,如骨料预冷等,在碾压混凝土拱坝施工中得到应用;而早期被弃之不用的二次冷却系统是否应在碾压混凝土拱坝中加以应用,专家们意见不一.

鉴于以上分析可以看出,碾压混凝土拱坝今后的发展可能有如下趋势:

a. 更加重视材料配比的研究,开发强度高、弹模低、极限拉伸值大的碾压混凝土品种.其中包括水泥品种、骨料品种、外加剂品种、粉煤灰合理掺量等的研究,提高碾压混凝土的抗裂能力^[26].

b. 加强施工组织管理,对施工过程进行仿真分析^[27],在施工过程的每一环节控制混凝土的质量,以克服碾压混凝土质量离散性大的顽疾.

c. 100 m以下的碾压混凝土拱坝将迅速发展.这类大坝比常规混凝土拱坝略厚,常能在一个低温季节碾压完毕,且坝体各部位的应力水平也较低,即使开裂,也不会影响大坝的安全^[28,29].相反地,100 m以上的碾压混凝土拱坝的发展将受到限制.可以为例证的是:南非在6年前就设计了2座180 m高的碾压混凝土双曲拱坝^[30],可至今未见施工的报道;我国在6年前就设计了高110 m的高塘碾压混凝土拱坝,至今也未正式施工.

d. 更加系统、准确地收集和处理施工过程、施工环境参数,充分考虑温度场及温度应力的仿真计算成果,使坝体从施工的第一天起,各部分的应力和温度都处于受控状态,发挥仿真分析和反馈设计的优势,彻底解决高碾压混凝土拱坝的结构设计问题.

以上拙见,有待时间的检验,更企盼专家们的批评.

参考文献:

- [1] 朱伯芳,许平.碾压混凝土重力坝的温度应力与温度控制[J].水利水电技术,1996(4):18~25.
- [2] 朱伯芳.碾压混凝土坝温度徐变应力的研究[J].水利水电技术,1987(10):21~28.
- [3] 王宏硕.论RCC筑坝技术中的几个关键性问题[J].水力发电学报,1995(1):77~85.
- [4] 黄淑萍.普定碾压混凝土拱坝整体碾压温度控制技术研究[J].水力发电,1995(10):15~19.
- [5] 朱伯芳.碾压混凝土拱坝的温度控制与接缝设计[J].水力发电,1992(9):11~17.
- [6] 傅志安,蒋国澄.混凝土面板堆石坝[M].南京:河海大学

出版社,1992.

- [7] 中国水力发电工程学会碾压混凝土筑坝委员会.“碾压混凝土材料研讨会”简讯[J].水力发电,1994(8):58~59.
- [8] 潘家铮.中国的混凝土坝建设要攀登新的高峰[J].混凝土坝技术,1996(2):1~4.
- [9] Sarkaria G S, Andriolo F R. Special factors in design of high RCC gravity dams[J]. Water Power and Dam Construction, 1995(4):39~44.
- [10] 陈东平.微拱重力坝设计问题的探讨[J].水利水电技术,1990(1):36~41.
- [11] 梁润.施工技术[M].北京:水利电力出版社,1986.
- [12] 丁汉涛.碾压混凝土坝横缝的新型结构——间断缝初探[J].水利水电技术,1990(2):47~50.
- [13] Hollingworth F, Druyts F H W M. Rollercrete: some applications to dams in South Africa[J]. Water Power and Dam Construction, 1986(1):37~45.
- [14] Hollingworth F, Hooper D J. Roller compacted concrete arched dams[J]. Water Power and Dam Construction, 1989(11):51~55.
- [15] 汪志福,王传志.普定水电站碾压混凝土拱坝性态研究[J].水力发电,1995(10):20~25.
- [16] 沈崇刚.我国碾压混凝土坝技术的新发展[J].水力发电,1996(9):52~57,1996(10):45~49.
- [17] 刘光廷,张国新,刘志辉.含灌浆横缝碾压混凝土拱坝仿真应力和双轴强度判别[J].清华大学学报,1996(1):13~19.
- [18] 刘光廷,麦家焯,张国新.溪柄碾压混凝土薄拱坝的研究[J].水力发电学报,1997(2):19~28.
- [19] Janet Dansie. Ready to roll at Longtan[J]. Water Power and Dam Construction, 1995(3):24~25.
- [20] 吴媚玲.碾压混凝土坝的可靠性[J].水力发电,1992(12):26~30.
- [21] 吴亚军.碾压混凝土真空溜管入仓技术的研究和应用[J].水力发电,1994(1):36~40.
- [22] 林伯洗.碾压混凝土筑坝技术在我国的应用与发展[J].水力发电,1996(1):55~62.
- [23] Conference Report. International symposium on RCC dams[J]. Water Power and Dam Construction, 1992(2):10~11.
- [24] 潘家铮.岩石力学与反馈设计[J].水电站设计,1994(9):1~12.
- [25] 张严明.我国碾压混凝土筑坝技术的应用与发展[J].水力发电,1991(7):12~17.
- [26] 杨忠义,黄绪通.提高碾压混凝土抗裂性的研究[J].水力发电,1997(4):18~20.
- [27] 王仁超,钟登华.高碾压混凝土坝施工过程仿真分析.水力发电学报,1995(1):26~37.
- [28] 朱伯芳.论拱坝的允许拉应力问题[J].水利学报,1991(8):20~24.
- [29] 张仲卿.碾压混凝土拱坝设计和应力分析研究[J].水利学报,1992(7):77~81.
- [30] 张光斗.碾压混凝土筑坝新技术[J].水力发电学报,1993(1):82~98.

(收稿日期:1998-12-14 编辑:熊水斌)