

中国碾压混凝土筑坝技术及其发展

王松春

(中国水利水电闽江工程局、福建 福州 350000)

摘要:从坝工设计、混凝土原材料、施工技术、施工工艺、施工机具等方面,总结我国碾压混凝土筑坝技术近20年来的发展水平,我国碾压混凝土筑坝技术的研究和工程实践表明,不论在筑坝数量上,还是在筑坝高度上,我国均处于世界先进水平,碾压混凝土筑坝因其具有速度快、工期短、投资省等优越性,在我国水利水电工程施工中正处于快速发展时期,目前我国碾压混凝土筑坝技术已形成自己的特色,拥有先进的碾压混凝土工法。

关键词:碾压混凝土;坝工设计;混凝土原材料;施工技术

中图分类号:TV544+.921

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2001)02-0016-03

自1981年开始,我国对碾压混凝土筑坝技术进行全面的探索研究和建设实践,在科学技术研究及筑坝建设方面都取得了令人瞩目的丰硕成果,形成一整套较成熟的筑坝新技术,它在水利水电工程建设中发挥了积极的作用。

1 中国碾压混凝土筑坝技术发展水平

我国的第一座碾压混凝土坝——福建大田县坑口重力坝,已建成投产14年,运行经验和实际观测证实,坑口大坝设计和施工采用的技术路线是正确的,尽管许多技术在当时还是首次应用,但仍获得成功,成功的关键在于以严格的科学试验研究成果、分析论证与积极开拓创新相结合作为技术基础,由此形成了以整体式坝体结构、中胶凝材料高掺粉煤灰、大仓面薄层连续浇筑为特点的符合我国国情的碾压混凝土筑坝技术模式,这是我国碾压混凝土筑坝技术发展的一个重要里程碑。

坑口碾压混凝土坝以其筑坝速度快、工期短、投资省等优越性和优良的坝体质量,很快得到普遍认同,并形成一种动力,促进碾压混凝土坝建设迅速发展。近20多年来,已建成的碾压混凝土坝共有24座,在建的有14座,正在设计或即将开工的有20座。我国碾压混凝土筑坝技术多应用于中、高坝,特别是百米以上的碾压混凝土高坝数量、比重居世界领先地位,拱坝方面更为突出,不仅结构设计上有特色,而且坝体结构、坝体质量和投产后的良好运行状况,都比国外高出一筹,已建成投产的碾压混凝土

坝,经过多年的实际运行,普遍渗流量小,未产生明显的裂缝,变形的特性优于设计,这标志着我国的碾压混凝土筑坝技术是可靠、成熟的。

1.1 坝工设计

由于采用低水泥用量、高掺粉煤灰混凝土,明显改善了坝体的抗裂性能和温度应力状况,所有重力坝均取消纵缝,一些较窄河谷中的中型重力坝(如坑口、龙门滩、水东、山仔、荣地等重力坝)设计成没有横缝的整体式坝,在山仔和水东两坝设计中,针对窄河谷特点,考虑两坝坝肩的嵌固约束作用,运用三维计算方法设计出比较瘦的坝体剖面(下游面为1:0.65和1:0.697),这种计算方法为节省工程量和降低造价,提高坝体的稳定性提供了有利的理论依据。

台阶式溢流坝面在水东碾压混凝土重力坝设计中突破国外通常单宽流量不大于 $20\text{ m}^3/\text{s}$ 的惯例,采用了高达 $120\text{ m}^3/\text{s}$ 的单宽流量,并设计成复合式台阶型结构,经过实际达 $75\text{ m}^3/\text{s}$ 单宽流量的泄流考验,溢流消能效果和抗冲刷能力都比较好,表面完好无损,这样高的单宽流量是目前碾压混凝土台阶溢流设计中最大的,它的成功将为碾压混凝土重力坝的溢流结构设计提供新的途径,可以大量取消传统平滑式的泄槽和相应的二期常态混凝土。百龙滩已采用,百色坝也将采用。

在坝体上游面区采用二级富浆浆材碾压混凝土作防渗结构,结果证明是有效的,防渗标号一般可达S8至S12(约相当于渗透系数 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-10}\text{ cm/s}$)。这

作者简介:王松春(1964—),男,福建漳州人,高级工程师,主要从事水利水电工程施工与管理工程。

种防渗形式比钢筋混凝土面板 PVC 膜防渗表面涂喷层及常态混凝土防渗性能更好,便于施工,工作仓面干扰小,还有利于混凝土表面防裂,是一种很有推广前景的防渗结构方式。江垱坝、棉花滩坝均采用这种防渗方式,保证防渗效果的关键除选好混凝土配合比使其含有较富的胶浆利于层面结合外,更重要的是层面处理要严格,每个碾压层面均喷洒同水胶比的灰浆 1.0~1.5 mm,加强层间和粘结效果,这种防渗模式已完全可以代替 RCD 的防渗形式。

通过对碾压混凝土拱坝所特有的分缝方式、成缝结构、温度应力和坝体整体应力特性进行了大量的研究和试验,认为普定坝和温泉堡坝采用可灌式诱导成缝结构,具有良好成缝和防缝灌浆功效,使坝体应力能保持在设计规定的范围内。溪枋坝为目前世界上最薄的(厚高比仅 1:0.195)碾压混凝土拱坝,为保持结构的整体性,坝体内没有设横缝和诱导缝,而在靠坝肩区上游面采用周边式应力释放缝,这种结构模式明显改善了坝体应力状况和方便施工,溪枋拱坝的成功,对薄拱坝不能采用碾压混凝土技术的断言是一个有力的反证,进一步为碾压混凝土在拱坝工程中的应用拓宽了道路。毫无疑问,我国碾压混凝土拱坝技术无论是试验研究还是工程建设与开发,在世界上都是领先的。

1.2 混凝土材料

碾压混凝土坝广泛采用中胶凝材、高掺粉煤灰混凝土。胶凝材料一般在 150 kg/m³ 左右,粉煤灰的掺用量占总胶凝材料的 50%~70%。而且选用的粉煤灰要求Ⅱ级以上,由于高等级粉煤灰中含大量的圆珠形玻璃晶体,对混凝土有改性作用。混凝土的施工性能得到较大的改善,同时可提高混凝土的抗冻性、抗渗性、抗裂性等耐久性综合指标。中胶凝材用量使得层面泛浆较多,有利于改善层面自我结合。但对于较低重力坝而言,可能会造成混凝土强度的过度富裕,可以考虑使用较低的胶材混凝土。

大量研究和实用结果进一步加深了对混凝土中掺用石粉的认识,优质的石粉可大大改善混凝土的稠度和可碾性,增强混凝土层面的胶结性能,提高混凝土的密实性和抗渗性。目前几个在建的百米级的高坝,人工砂中的石粉含量均控制在 22% 以下,超出现行规范规定的,不大于 17%。

采用低热微膨胀水泥拌制混凝土是碾压混凝土原材料的一个发展新方向,微膨胀水泥的膨胀性能可部分抵消混凝土的收缩应力,从而进一步增强混凝土的抗裂性能,为碾压混凝土坝设置更大的横缝间距创造可能性。

1.3 碾压混凝土施工技术

碾压混凝土的施工主要采用薄层连续碾压施工。碾压层厚一般为 30 cm,薄层铺筑是碾压混凝土取得快速施工的基础。采用低工作度碾压混凝土是当前的发展趋势,碾压混凝土的工作度 V_c 值是施工现场质量控制的重要指标之一。80 年代初,日本在岛地川坝上采用的 V_c 值为 (20±10) s,我国的碾压混凝土施工规范中规定 V_c 值在 5~35 s 范围内,当前施工的几座碾压混凝土坝中的 V_c 值均控制在 (10±5) s 内,而实际采用的 V_c 值在仓面上一般为 5~8 s,机口为 3~5 s,较低的 V_c 值对于方便施工、层间结合抗剪指标和防渗性能都有明显的改善。

尽量缩短层间覆盖时间是提高碾压混凝土筑坝质量的关键。碾压混凝土筑坝保证施工质量的首要问题是快速施工,特别是在改善层间抗剪断性上,层间铺料的间歇时间是主要的敏感指标之一,间歇时间越短,层间结合越好,防渗性能越好。我国以初凝时间作为施工铺筑间歇控制时间,一般以 6~8 h 进行控制,以 4~6 h 为好,快速短间歇是碾压混凝土筑坝技术核心,没有快速施工就没有碾压混凝土的筑坝技术。斜层平推碾压施工是碾压混凝土快速施工的有效方法,江垱坝首次使用该技术,取得显著成效;棉花滩大坝广泛使用该技术亦取得良好的效果。

全断面采用碾压混凝土。目前在建的碾压混凝土坝绝大多数取消碾压混凝土外包常态混凝土的形式,而采用全断面碾压混凝土结构形式,以二级配富胶凝材料混凝土本身作为主防渗体,采取其它形式作为辅助防渗,并在建筑物周边、廊道、竖井、岸坡等部位采用变态混凝土。变态混凝土的应用,使碾压混凝土筑坝施工程序进一步简化,为碾压混凝土的快速施工提供了另一条新途径。棉花滩坝大量使用变态混凝土,效果良好。

负压溜槽应用于碾压混凝土的垂直运输,对于狭窄河谷碾压混凝土坝施工是十分有效的方法,能较好地避免混凝土在垂直输送过程中的分离。同负压溜槽配套的水平运输在作业面上一般采用自卸汽车。在拌和楼和溜槽之间根据拌和楼位置不同,可以采用汽车运输,也可以采用快速深槽皮带输送机。

翻升悬臂模板是当前碾压混凝土筑坝采用较多的一种模板形式,它为碾压混凝土连续上升浇筑实现更快施工创造条件。普定拱坝施工达到连续浇筑 15 m 没有停顿,既节省了间歇时间,又减少了层面工作缝处理,且改善了层间的结合质量。棉花滩大坝的翻升悬臂模板不仅应用于上游直立面,而且在国内首次应用于下游斜坡面上,效果颇佳。

2 碾压混凝土施工工艺和工法

碾压混凝土施工工艺由“工法”来说明和规范,工法作为技术方法使现场工作人员对技术措施与技术要求都有明确的要求、目标和依据;作为法规,使人们能严格遵循,自我约束,充分调动各方面的积极因素,自觉进入角色,自我投入。碾压混凝土施工一般包括以下工艺过程:

a. 模板施工。碾压混凝土施工模板可采用翻升模板、预制混凝土模板、自升模板或其它形式模板,所采用的模板应能承受碾压产生的侧压力,且不影响碾压混凝土施工质量和干扰其它施工作业。模板在使用时必须进行清洗上油,以使混凝土的外表清洁光滑。

b. 混凝土拌制。碾压混凝土拌制可采用强制式或自落式搅拌设备。拌制时各种材料的投料顺序和搅拌时间必须通过拌和物的均匀性实验来确定。拌和物在卸入运输工具时,卸料出口与运输工具之间的自由落差应小于2m。

c. 混凝土运输。碾压运输可采用自卸汽车、皮带输送机、真空溜槽、混凝土吊罐等机具。自卸汽车运料直接进入仓面时,在入仓前应対轮胎进行清理冲洗并防止污水带入仓面。真空溜槽垂直输送混凝土应保证溜槽的真空度,定期更换橡胶皮,严格控制溜槽的下料速度。仓面上的运输汽车应保持清洁,加强保养维修,保持车况良好,无漏油、漏水现象。汽车在仓面上行驶时,应严格控制行驶速度,避免急刹车、急转弯等有损混凝土质量的操作。

d. 卸料。碾压混凝土施工采用大仓面薄层连续铺筑,汽车进仓卸料时,宜采用退铺法依次卸料,且宜按梅花型依次堆放,先卸1/3,移动1m左右位置,再卸2/3,卸料应尽可能均匀,堆旁出现的分离骨料应由人工或其它机械将其均匀摊铺到未碾压的混凝土面上。仓面的卸料位置一般应由专人负责,控制卸料的密度,卸料堆的边缘与模板的距离不应小于1.2m。

e. 平仓。碾压混凝土平仓一般采用湿地推土机,湿地推土机在运行时履带不得破坏已碾压的混凝土层面,人工操作用于辅助边缘区域或其它被指定或认可部位的平仓作业;平仓过程中不得发生混凝土离析现象,推土机的平仓方向一般应与坝轴线平行,分条带平仓,摊铺要均匀,每碾压层平仓1~2层次,每层平仓厚度为34~36cm或17~18cm,当仓面内混凝土具有一定数量时,应及时平仓。平仓过的混凝土表面应平整,无凹坑,不允许出现向下游倾斜的平仓面。平仓过程中,在两侧出现集中骨料,由人工

均匀分散于条带上。

f. 碾压。碾压混凝土碾压一般采用双钢轮振动碾压机。碾压机的振动力是一个重要指标,在正式使用之前,碾压机应通过碾压试验来检验其碾压性能,确定碾压的遍数及行走的速度。对特殊部位,可采用小型振动碾或振动夯板等压实。混凝土拌和物从投料拌和到在仓面上碾压结束历时一般应小于2h。碾压密实度由核子密度仪进行检测。碾压机在碾压过程中,如碾压层面由于水分蒸发而导致混凝土 V_c 值偏大,发生久压不会泛浆时,应利用碾压机上自带水箱在碾压混凝土表面进行喷水补偿碾压,以达到碾压表面充分泛浆。

g. 造缝及层间处理。碾压混凝土施工通常采用大面积通仓浇筑,坝体的横向伸缩缝可采用切缝机造缝或其它方法形成。造缝一般采用“先切后碾”的施工方法,成缝面积不应小于设计面积的60%。填缝材料一般采用塑料膜、铁片或干砂。每个碾压层面均要求在混凝土初凝之前加上层碾压覆盖。超过初凝时间未加覆盖的层面应进行刮摊水泥砂浆或喷洒水泥浆层面处理。超过终凝时间的层面应进行冲毛、刮摊砂浆层面处理。特别在坝体防渗部位,要求在每一个碾压层面均进行喷洒净浆处理。

h. 变态混凝土及常态混凝土施工。基础找平层的常态混凝土在浇筑完毕后3~7d方可在其上铺筑碾压混凝土,但应避免长期间歇,最长的间歇时间以不超过15d为宜。岸坡部位的常态混凝土应与碾压混凝土同步施工。变态混凝土是在碾压混凝土拌和物铺料前后和中间喷洒同水灰比的水泥粉煤灰净浆,采用插入式振捣器将其振捣密实。目前,大部分碾压混凝土坝的岸坡常态混凝土均改用变态混凝土。模板周边、坝体孔洞周边或其它曾采用常态混凝土的部位也均有采用变态混凝土的。

i. 养护。碾压混凝土的龄期一般较长,最长达到180d。因此,加强混凝土的养护工作是保证混凝土施工质量的重要因素。晴天对混凝土应加强喷水养护,可采用自动喷水设施进行养护。冬天应对混凝土的外露面进行保温养护,特别在温度骤降的时候,更应加强混凝土的保温措施。

3 碾压混凝土的施工材料

a. 水泥。一般采用普通硅酸盐水泥,425号、525号水泥均可;采用低热具有微膨胀性能的硅酸盐水泥是当前使用水泥的新趋势。

b. 粉煤灰。碾压混凝土中的粉煤灰具有很大的掺用量,一般可达总胶凝材料的50%~70%,掺用的粉煤灰要求达Ⅰ、Ⅱ级灰的标准。(下转第22页)

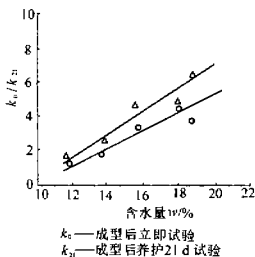


图7 龄期对渗透性的影响

实粘土失水干燥引起的收缩会导致衬垫干裂^[1,10],从而不能发挥正常的防渗功能。许多现场和室内试验均表明冻融循环会使压实细粒土的 k 值增大 1~2 个数量级^[11],其原因是冻融过程中形成的冰透镜体产生裂缝网,形成渗透通道,使 k 值增大。

4 结 语

对填埋场压实粘土衬垫而言,其渗透系数是衬垫发挥防渗功能的关键所在。事实上,影响压实粘土衬垫渗透系数的因素有很多,还有许多因素没有考虑到,或因条件限制无法开展研究。本文只是对国内外已有的研究成果作出了部分列举,影响压实粘土衬垫渗透系数的其它因素有待进一步研究,尤其是在以试验研究为主要方法的前提下加以开展。

(上接第 18 页)

等级越高的粉煤灰对混凝土的性能的改善效果越好。

c. 粗细骨料。碾压混凝土的粗细骨料最大的粒径:三级配不大于 80mm;二级配不大于 40mm;骨料应满足 SDJ207-82《水工混凝土规范》的相关要求。细骨料的细度模数一般要求控制在 2.2~2.8 范围内。砂中的石粉($d < 0.16\text{mm}$ 的颗粒)含量(占细骨料的重量比)以 12%~17% 为宜,但目前在建的几个大型工程均控制在 12%~22% 之间。碾压混凝土的粗细骨料均要求不能发生碱性反应。

d. 外加剂。碾压混凝土的外加剂具有十分重要的作用,外加剂的性能主要以缓凝作用为主,减水作用为次。碾压混凝土的初凝时间一般要求大于 12h,减水效果一般要求在 12%~20% 范围内。

e. 水。普通饮用水可作为混凝土拌和用水。

4 施工机具

a. 搅拌设备。碾压混凝土的拌和楼可以是强制式,也可以是自落式;拌和楼的搅拌性能必须经试验

参考文献:

- [1] Daniel D V. Predicting hydraulic conductivity of clay liners[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(2): 285~300.
- [2] Dunn R J, Mitchell J K. Fluid conductivity testing of fine-grained soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1984, 110(11): 1648~1665.
- [3] Benson C H, Daniel D V. Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1990, 116(8): 1231~1248.
- [4] Elsbury B R, et al. Lessons learned from compacted clay liner[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1990, 116(11): 1641~1660.
- [5] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [6] Lambe T W. The structure of compacted clay[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1958, 84(2): 1~35.
- [7] Olsen H W. Hydraulic flow through saturated clays[J]. Clays and Clay Minerals, 1962, 9(2): 131~161.
- [8] Mitchell J K, Hopper D R, Campanella R G. Permeability of compacted clay[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1965, 91(4): 41~65.
- [9] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [10] Daniel D V, Wu Y K. Compacted clay liners and covers for arid sites[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, 119(2): 223~237.
- [11] Benson C H, Odman M A. Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, 119(2): 276~294.

(收稿日期: 1999-07-08 编辑: 张志琴)

检测后方可投入正式使用。变态混凝土的制浆机可以采用灌浆用的低速搅拌机,也可用自制的搅拌桶进行制浆。

b. 运输设备。水平运输设备可以用自卸汽车,也可以用快速深槽皮带机。垂直运输设备可以用负压溜槽、限速溜槽、塔机、吊罐等。

c. 平仓设备。一般采用湿地推土机进行平仓作业,也可用改造后的普通轻型推土机进行平仓。

d. 碾压设备。碾压设备一般采用双钢轮振动碾压。

e. 切缝设备。切缝可采用简易的人工切缝,即用高频振捣机或蛙式夯机进行加装刀片改造用于切缝,也可用振动切缝机。振动切缝机是由小型液压挖掘机进行改装而成。

f. 层面处理设备。高压冲毛机、刷毛机是常用的层面处理设备,高压冲毛机的水压力一般可达 0.3~0.5 MPa。以混凝土终凝后进行混凝土层面处理,能够达到良好的处理效果。局部层面冲毛机难处理到的部位可以采用电动刷毛机进行层面补充刷毛处理。

(收稿日期: 1999-10-10 编辑: 张志琴)