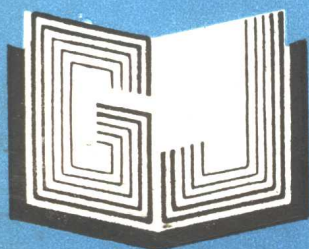


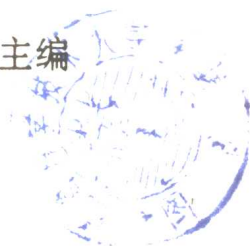
989447



高等学校教材

碾压混凝土坝施工

武汉水利电力大学 杨康宁 主编



2.2



989447

高等学校教材

碾压混凝土坝施工

武汉水利电力大学 杨康宁 主编

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书除绪论外共有 11 章:碾压混凝土的组成材料及配合比设计、碾压混凝土的主要技术性质、碾压混凝土的拌和、碾压混凝土的运输、碾压混凝土的摊铺与碾压、其它坝面作业与特殊气象条件下的施工、模板、碾压混凝土坝防渗结构的施工、碾压混凝土坝施工过程中的质量控制、碾压混凝土用于坝的修复、碾压混凝土坝实例。

本书除作为高等学校水利水电工程施工的选修教材外,也可供从事水利水电工程的有关技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

碾压混凝土坝施工/杨康宁主编. —北京:中国水利水电出版社, 1996
高等学校教材

ISBN 7-80124-144-4

I. 碾… I. 杨… II. 碾压混凝土坝:混凝土坝-工程施工-高等学校-教材 IV.TV642.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 05113 号

书 名	高等学校教材 碾压混凝土坝施工
作 者	武汉水利电力大学 杨康宁 主编
出 版	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	北京市京建照排厂
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 9 印张 206 千字
版 次	1997 年 6 月第一版 1997 年 6 月北京第一次印刷
印 数	0001—1520 册
定 价	7.20 元

前 言

本书是水利水电工程施工方面的选修教材。全书除绪论外共 11 章。在广泛搜集国内外碾压混凝土筑坝资料的基础上,从材料到施工,全面介绍了碾压混凝土筑坝技术的发展过程、当前水平、存在问题及今后的发展趋向。

参加本书编写的有:

武汉水利电力大学方坤河教授(第 1、2 章);

中国人民武装警察水电部队杨运祥教授级高工(第 4 章);

武汉水利电力大学杨康宁教授编写其余各章并负责全书统稿。

本书主审由水利部水利水电规划设计总院蒋元骧教授级高工担任。

主审所提宝贵意见、出版社编辑及有关同志付出的辛勤劳动,对本书的出版起了很大作用,我们表示衷心感谢!

热忱欢迎对本书提出批评、指正。

编 者

1993 年 4 月

3AE06/174 07

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 碾压混凝土的组成材料及配合比设计	7
第一节 碾压混凝土的组成材料	7
第二节 碾压混凝土的配合比设计	17
第二章 碾压混凝土的主要技术性质	29
第一节 碾压混凝土拌和物的工作性	29
第二节 硬化后碾压混凝土的结构与性能	39
第三章 碾压混凝土的拌和	57
第一节 自落式拌和机与强制式拌和机	57
第二节 连续式拌和机与剖分式拌和机	59
第四章 碾压混凝土的运输	61
第一节 自卸卡车	61
第二节 皮带机	63
第三节 斜坡道	66
第四节 斜坡真空溜管	68
第五章 碾压混凝土的摊铺与碾压	72
第一节 摊铺(平仓)	72
第二节 碾压	73
第三节 影响振动压实效果的因素	75
第四节 坝体上升方式	78
第六章 其它坝面作业与特殊气象条件下的施工	81
第一节 缝面处理	81
第二节 造缝	82
第三节 仪器埋设	84
第四节 特殊气象条件下的施工	86
第七章 模板	90
第一节 模板型式	90
第二节 碾压混凝土的侧压力	93
第三节 锚筋的锚固强度	95
第八章 碾压混凝土坝防渗结构的施工	97
第一节 碾压混凝土坝防渗结构类型	97
第二节 碾压混凝土坝防渗结构施工	98
第九章 碾压混凝土坝施工过程中的质量控制	103
第一节 原材料的质量控制	103

第二节	拌和生产过程的质量控制	105
第三节	仓面的质量控制	108
第四节	质量评定与验收	119
第十章	碾压混凝土用于坝的修复	122
第一节	土石坝加固	122
第二节	改善土石坝的水力条件	122
第三节	置换原有的坝	125
第四节	加固混凝土坝和砌石坝	127
第五节	碾压混凝土修复工程的特点	128
第十一章	碾压混凝土坝实例	129
第一节	日本岛地川坝	129
第二节	美国柳溪坝	131
第三节	美国上静水坝	132
第四节	日本玉川坝	133
第五节	中国坑口坝	134
第六节	其它碾压混凝土坝	135
参考文献		138

绪 论

一、发展概况

碾压混凝土是用振动碾压实的超干硬性混凝土。碾压混凝土坝是在常态混凝土坝与土石坝激烈竞争中产生出来的。由于土力学理论的发展,放宽了土石坝对于建筑材料的限制,增大了利用当地材料筑坝的可能性;由于大型土石方施工机械的使用,加快了土石坝的施工速度;使得土石坝的造价降低、在经济上占了优势,从而获得了蓬勃的发展。世界上15 m及其以上高度的坝中,混凝土坝所占比例,截至1950年为38%;从1951年至1977年跌至25%;从1978年至1982年则进一步减少到16.5%。然而,在上述时期内,在狭窄河谷地区建造混凝土拱坝的数量是增加的。因此混凝土重力坝数量减少的比例,比上述数字所反映的还要大。

不过在造价降低的同时,土石坝的安全性较混凝土坝为低的特性并没有改变。在美国,自从1928年62 m高的圣弗伦西斯(St. Francis)曲线重力坝由于基础不良而失事以来,没有任何一座高于15 m的混凝土坝失事。世界上最近的一次混凝土坝失事是1959年法国的马尔帕塞坝(Malpasset),61 m高的混凝土薄拱坝沿着左岸软弱夹层滑动而失事。而在过去的60年里,数百座各种规模的土石坝失事了,主要原因是洪水漫顶和筑坝材料的内部侵蚀。

此外,土石坝的泄洪建筑物不能与坝体结合,需要在坝外另行布置专门的溢洪道;大规模开采当地材料对周围环境的破坏相当大;这都是土石坝不如混凝土坝的方面。

注意到土石坝和混凝土坝各自具有的特点,人们努力寻求一种新的坝型,以便把混凝土坝的安全和土石坝的高效率施工结合起来。

在60年代有几个工程就是按照这一想法进行的。意大利于1965年完成的172 m高的阿尔佩盖拉坝(Alpa Gera)是最著名的一个。它用自卸卡车从拌和厂运输混凝土并直接在坝面卸料,用推土机平仓,像土石坝施工一样,坝体从河床一岸到另一岸全线同时浇筑上升,用悬挂于推土机后部的插入式振捣器进行振捣,用切缝机切割振捣后的混凝土、在坝体规定位置形成横缝。1965年加拿大魁北克曼尼科甘一号坝(Manicougan I)建造了两座18 m高的重力式翼墙。贫混凝土用于内部,以推土机铺筑,插入式振捣器振捣;富混凝土用于上游面,以垂直滑模形成上游面;下游面使用预制混凝土块。这些工程都取得了快速而经济的效果。

1970年在美国的加州召开了“混凝土快速施工会议”。拉费尔(J. M. Raphael)提交会议的论文叫“最优重力坝”。他建议使用水泥砂砾石材料筑坝并用高效率的土石方运输机械和压实机械施工。由于水泥的稳固作用而增大了材料的抗剪强度,从而可以缩小坝的断面;因使用类似于土石坝施工的连续浇筑方法又可能缩短施工时间和减少施工费用。

1972年在同一地点又召开了“混凝土坝经济施工会议”。坎农(R. W. Cannon)的论文“用土料压实方法建造混凝土坝”,进一步发展了拉费尔的设想。坎农介绍了无坍落度的贫混凝土用自卸卡车运输、前端装载机铺筑、振动碾压实的试验结果。他建议上、下游坝

面用富混凝土并用水平滑模形成。他还认为用自卸卡车运输混凝土不一定是最合适的方式。

1973年在第11届国际大坝会议上莫法特(A. I. B. Moffat)提出题为“适用于重力坝施工的干贫混凝土研究”的论文。他推荐将早在50年代英国路基上使用的干贫混凝土用于修筑混凝土坝,用筑路机械将其压实。他预计,坝高40 m以上的坝,造价可减少15%。

对于碾压混凝土坝的发展产生过强烈影响的是巴基斯坦塔贝拉坝(Tarbela)的隧洞修复工程。1974年,该坝的泄洪隧洞出水口被洪水冲垮,修复工作必须在春季融雪之前完成,要求的施工速度必须极其快速。于是采用碾压混凝土进行修复,在42天时间里浇筑了35万 m^3 碾压混凝土。日平均浇筑强度为8400 m^3 ,最大日浇筑强度达1.8万 m^3 ,这是迄今世界上最高的碾压混凝土浇筑强度。

碾压混凝土坝从设想到成为现实,历时十分短暂。1980年出现了世界上第一座碾压混凝土坝——日本岛地川重力坝。该坝高89 m,上游面用3 m厚的常态混凝土起防渗作用,坝体碾压混凝土的胶凝材料用量为120 kg/m^3 ,其中粉煤灰占30%。压实层厚度50 cm和70 cm。每一压实层碾压完毕后,停歇1~3天再继续浇筑上升。以切缝机形成坝体横缝。

1982年美国建成了世界上第一座全碾压混凝土重力坝——柳溪坝(Willow Creek)。该坝高52 m,坝轴线长543 m,不设纵横缝。内部碾压混凝土的胶凝材料用量仅66 kg/m^3 。压实层厚度30 cm,连续浇筑上升。33.1万 m^3 碾压混凝土在不到5个月时间内完成。比常态混凝土坝缩短工期1~1.5年。造价只有常态混凝土重力坝的40%左右和堆石坝的60%左右。柳溪坝充分显示了碾压混凝土坝所具有的快速和经济的巨大优势。它的建成大大推动了碾压混凝土坝在美国和世界各国的迅速发展。

截至1991年底,全世界已建成75座碾压混凝土坝,有17座正在施工。正在施工中的碾压混凝土重力坝最大高度已达155 m(日本宫濑坝)。除了重力坝以外,已建成两座重力拱坝:南非50 m高的尼尔普特坝(Knellpoort)和70 m高的沃尔韦丹坝(Wolwedans)。我国贵州省75 m高的普定碾压混凝土拱坝正在施工中。

我国对碾压混凝土筑坝技术的研究开始于1978年。在进行了大量室内研究以后,1981年在四川省龚咀水电站的混凝土路面工程中、1983年在福建省厦门机场工地,进行了大型试验块的野外碾压试验。在最后一次试验中,混凝土胶凝材料152 kg/m^3 中掺用了50%的粉煤灰。混凝土的可碾压性明显改善,密实性与均匀性大有提高,抗压强度普遍达到设计要求,有的试样抗压强度甚至超过24 MPa。它显示了大掺量粉煤灰碾压混凝土的优越性。1984年和1985年进一步扩大试验规模,几座水电站工程的非主体工程或非主要部位应用了碾压混凝土,它们是:铜街子水泥罐基础和牛日溪沟副坝,沙溪口纵向围堰和开关站挡墙以及葛洲坝船闸下导墙等。这些半生产性试验对大体积碾压混凝土施工进行了较全面的实际演练,锻炼了队伍,提高了施工技术和施工管理水平,为采用碾压混凝土筑坝技术打下了基础。

为了将取得的技术成果应用于混凝土坝中,选定了福建省坑口重力坝作为碾压混凝土筑坝技术工业性试验工程。根据前几年试验研究成果并参考当时国外已建碾压混凝土坝的实践经验,确定坑口坝按照以下原则进行,这就是:“高掺粉煤灰、低水泥用量、坝体不设纵横缝、低温季节施工、全断面分层碾压、连续浇筑上升和沥青砂浆防渗。”经过6个多月碾压施工,高56.8 m的我国第一座碾压混凝土坝于1986年5月建成。

在筑坝试验过程中,对于碾压混凝土的稠度控制、压实规律、混凝土初凝及层面间隔时间、施工组织管理、仓面异种混凝土施工、下游面模板简化、坝体温度变化特性等问题展开了专题研究和现场观测,为提高碾压混凝土筑坝技术积累了可贵的经验。

坑口坝试验成功为我国快速建坝开创了新途径。自坑口坝建成以后,碾压混凝土坝在我国获得了迅速发展。一些已经设计的甚至已经施工的工程改用碾压混凝土。许多新工程更是积极采用碾压混凝土。截至1991年底,全国共建成7座碾压混凝土重力坝,正在施工的有8座,近期内施工及设计中的有十余座。拟建规模最大的坝为广西红水河上的龙滩坝。我国碾压混凝土坝情况详见表0-1和表0-2。

表 0-1 我国已建、在建与待建的碾压混凝土坝

坝 名	地 址	坝 型	采用碾压混凝土部位	坝 高 (m)	坝顶长 (m)	碾压混凝土量 (万 m ³)	注
坑口	福建	重力坝	整体坝	56.8	122	4.2	已竣工
天生桥二级	广西	重力坝	溢流及挡水坝段	58.7	470	7.8	已竣工
龙门滩	福建	重力坝	整体坝	57.5	149	7.3	已竣工
潘家口下池	河北	重力坝	溢流及挡水坝段	28.8	277	1.5	已竣工
荣地	广西	重力坝	整体坝	56.3	136	6.0	已竣工
万安	江西	重力坝	溢流及挡水坝段	45.0	160	7.0	已竣工
马回	四川	重力坝	溢流及挡水坝段	24.0	605	10.0	已竣工
岩滩	广西	重力坝	溢流及挡水坝段	110.0	498	32.5	施工中
铜街子	四川	重力坝	溢流及挡水坝段	82.0	513	41.0	施工中
水口	福建	重力坝	溢流及挡水坝段	100.0	791	45.0	施工中
广蓄下库	广东	重力坝	整体坝	43.5	130	4.2	施工中
观音阁	辽宁	重力坝	溢流及挡水坝段	82.0	1040	123.0	施工中
锦江	广东	重力坝	整体坝	60.4	157	18.2	施工中
大广坝	海南	重力坝	溢流及挡水坝段	57.0	659	48.5	施工中
普定	贵州	拱 坝	整体坝	75.0	195	10.3	施工中
温泉堡	河北	拱 坝	整体坝	48.5		5.6	以下各坝或
宝珠寺	四川	重力坝	溢流及挡水坝段	132.0	524	50.0	即将施工或
水东	福建	重力坝	整体坝	63.0	140	8.0	在设计中
山仔	福建	重力坝	整体坝	65.0	320	18.0	
桃林口	河北	重力坝	部分坝段	81.5	537	75	
棉花滩	福建	重力坝	整体坝	111	303	54.8	
临江	辽宁	重力坝	部分坝段	104.0	531	142	
大朝山	云南	重力坝	整体坝	120.0	480	85	
碗窑	浙江	重力坝	整体坝	83.0		32	
江垭	湖南	重力坝	整体坝	128.0		105.6	
思林	贵州	重力坝	整体坝	84.0		62	
长顺	湖北	重力坝	整体坝	83.0		14.0	
石板水	四川	重力坝	整体坝	84.0		44.4	
龙滩	广西	重力坝	部分坝体	216/192*		353/270	

* 后期/初期。

表 0-2 我国已建碾压混凝土围堰

工 程 名 称	坝 型	采用碾压混凝土部位	坝 高 (m)	坝顶长 (m)	碾压混凝土量 (万 m ³)
岩滩上游围堰	重力坝	全 部	52	278	17.2
岩滩下游围堰	重力坝	全 部	42	260	11.3
隔河岩围堰	重力坝	全 部	40	291	10.0
万安围堰	重力坝	全 部	24	234	5.4
水口导流明渠导墙	重力坝	全 部	49.5	523	29

目前我国已经成为世界上建造碾压混凝土坝的主要国家。1991年11月在北京召开了碾压混凝土坝技术国际学术讨论会。这是世界性的第一次碾压混凝土学术会议。参加会议的有来自13个国家的150余位专家、学者和工程师。提交会议的论文有67篇。在碾压混凝土坝的规划、设计、材料、施工技术、质量控制、防渗结构、运行、监测以及维修等各个方面充分交流了经验。对推动碾压混凝土坝技术的进一步发展作出了贡献。

二、碾压混凝土坝的优越性

碾压混凝土坝综合了混凝土坝运行安全和土石坝施工快速的特性，具有快速与经济两大优越性。

(一) 快速

碾压混凝土坝断面尺寸与常态混凝土坝相似，但混凝土水泥用量少、坝体结构简单、不设纵缝、不以模板形成横缝、使用土石坝施工机械，所以浇筑速度比常态混凝土坝大为加快。日本玉川坝采用自卸卡车运输混凝土至坝址附近，经斜坡道入仓，用21个月时间浇筑了100万 m^3 混凝土，比用吊罐入仓缩短工期5~7个月。该坝冬季5个月不施工，因此实际缩短工期约1年左右。美国盖勒斯维勒坝(Galesville)，坝高51m，只用2个多月时间就浇完。美国麋鹿溪坝(Elk Creek)最高日浇筑强度达9474 m^3 。我国岩滩水电站主坝于1989年11月10日创造了10681 m^3/d 的最高日浇筑强度。

和土石坝相比，碾压混凝土坝断面小、工程量小，又采用与土石坝相同的施工机械，所以碾压混凝土坝比土石坝工期短。美国芒克斯维勒坝(Monksville)设计比较了4种坝型，认为采用碾压混凝土坝方案，工期只有土石坝工期的一半。法国奥利弗特坝(Olivettes)，全部施工用了18个月，比堆石坝方案少10个月。表0-3中列出了几座已建工程的浇筑强度和浇筑工期。

表 0-3

几座已建碾压混凝土坝的施工速度

坝 名	坝体混凝土量 (万 m^3)	碾压混凝土施工期	最大日浇筑量 (m^3)
柳溪	33.10	<5 个月	4460
中叉 (Middle Fork)	4.21	45 天	1530
盖勒斯维勒	16.00	70 天	5700
芒克斯维勒	22.10	<5 个月	5960
铜田 (Copper field)	14.00	<4 个月	2600
隔河岩围堰	12.00	35 天	7930
麋鹿溪	76.50	中途因故停工	9474
岩滩围堰	30.50	97 天	8189
岩滩主坝	32.50		10681

(二) 经济

和常态混凝土相比，碾压混凝土坝节约了模板工程量，根据玉川坝估算，可节约模板费用30%；同时节省了冷却、接缝灌浆费用。碾压混凝土水泥用量少，从而节约能源和投资。玉川坝节省水泥11%，混凝土单价降低10%左右。坑口坝碾压混凝土单价为同标号常态混凝土单价的88%。天生桥二级碾压混凝土单价为常态混凝土单价的77%。

和土石坝相比，碾压混凝土坝体积小、建筑材料省；坝基宽度小，减少了开挖和基础处理范围，施工导流及泄洪建筑物的长度缩短；而且可把泄洪建筑物布置在河床内，不必

像土石坝那样在河床外另设溢洪道。由于中小型碾压混凝土坝可在几个月内碾压完毕，允许大大降低施工导流标准。盖勒斯维勒坝采用多年平均流量而不采用 5 年或 10 年一遇的洪水设计，设计施工导流流量从 $170 \text{ m}^3/\text{s}$ 降到 $34 \text{ m}^3/\text{s}$ ，简化了导流设施，降低了导流费用。碾压混凝土坝施工期间如果洪水漫顶，造成的损失也相对较小，如澳大利亚克赖格本坝 (Craigbourne)，施工期洪水漫过正在施工的碾压混凝土坝体，洪水过后见到只有 2 天龄期的混凝土表面遭到损坏，只花了 5 天时间又恢复了施工。岩滩围堰和隔河岩围堰都曾在建成当年漫顶过水，均未发现明显破坏。碾压混凝土坝的高度只需达到校核洪水位即可，用防浪墙抵挡波浪涌高。而土石坝需要考虑超高和沉陷，其高度需高于混凝土坝高度。由于选用碾压混凝土坝方案而使原来土石坝方案的坝高大大减低的实例是中叉坝。该坝原设计为一座 61 m 高的土石坝。当开挖、灌浆和基础处理工作已经完成时，业主又重新审查了坝的功能、规模和费用。结果发现如果修建碾压混凝土坝，坝高可以大大降低，这是因为低坝已能满足防洪要求（按宣泄 500 年一遇洪水流量考虑）的情况下，对稀遇洪水，混凝土坝能够允许漫顶而不致造成事故。修建碾压混凝土坝既可简化泄水工程、又能缩短工期，从而大大节省工程费用，因此决定改用碾压混凝土坝，坝高只有 37.8 m。总之，由于前述一系列特点，碾压混凝土坝比土石坝更为经济。表 0-4 是几个工程不同坝型的经济比较。

表 0-4 不同坝型经济比较 (百万美元)

坝 名	预 算 造 价				碾压混凝土坝 决算造价
	碾压混凝土坝	土石坝	常态混凝土坝	堆石坝	
柳 溪	17.3		39.1	25.1	14.1
盖勒斯维勒	14.7	15.3	17.3		12.7
芒克斯维勒	18.1	20.5	33.6	25.6	17
上静水 (Upper still water)	75.9			82	60.6

三、碾压混凝土坝当前存在的主要问题

碾压混凝土坝的发展极快，数量越建越多，规模越造越大，坝型也从重力坝向重力拱坝和拱坝发展。有不少技术问题需要研究。当前存在的主要问题大致有 5 个方面。

1. 碾压层面结合质量问题

柳溪坝建成后于 1983 年春季水库第一次蓄水到 15.2 m 高度时，在排水廊道和下游坝面立即出现了大量漏水，总漏水量高达 170 l/s。据分析，漏水主要来自碾压层面。我国某工程现场抗剪断试验也表明，碾压混凝土层内粘结力 1.6 MPa，而不作任何处理的层面粘结力只有 0.8 MPa，为层内的 50%；铺水泥砂浆层面粘结力 1.25 MPa，为层内的 78%。这表明，碾压混凝土施工层面是一个薄弱环节。当坝的高度增大时，坝体应力增大，对混凝土强度，特别是抗剪强度提出了更高的要求，对于层面抗剪指标也提高了要求。如何提高碾压混凝土层面结合质量以满足高坝的需要是亟待解决的问题。

2. 碾压混凝土的防渗结构

如上所述，碾压层面结合质量不良带来漏水问题。已建碾压混凝土坝多以常态混凝土作坝的上游面以起防渗作用。有些坝采用单独的上游防渗层，少数坝以碾压混凝土本身防渗。利用碾压混凝土本身防渗应当是优先考虑的型式。其他防渗结构型式也需要继续研究

发展，以适应不同情况下对坝的防渗结构提出的不同要求。

3. 横缝设置与温度控制

随着坝的规模增大，取消横缝、仅在低温季节施工的方式已不能适应。碾压混凝土坝的夏季施工不可避免，因此温度控制问题显得比中、小型坝突出了。另一个问题是横缝合理间距的确定，应当在满足防裂要求的前提下，采用尽可能大的间距以利于快速施工。

横缝设置问题在碾压混凝土拱坝中尤其重要。什么情况下必须设置横缝？横缝的结构型式是什么？设置横缝后如何恢复拱坝的整体性？这些问题从理论到工艺，都需要研究。

4. 大型工程的快速施工

随着坝的规模增大，要求的施工强度也愈益增大。应用于中、小型工程的施工机械往往满足不了高施工强度的需要。近年来对于连续拌和及连续运输浇筑的兴趣日益增长，正是出于形势发展的需要。

5. 碾压混凝土的耐久性

低水泥用量与高粉煤灰掺量使混凝土的初期强度降低，但随着龄期增长、强度得到发展，以至后期（如 180 天、365 天）强度会高于常态混凝土的强度。然而直至目前为止，这种混凝土的长期（例如 50 年、100 年）性能到底如何还不清楚，因为最老的碾压混凝土坝才不过 10 多年。开展碾压混凝土耐久性的研究尽管是困难的，然而十分必要的。

第一章 碾压混凝土的组成材料及配合比设计

使用品质优良的原材料，可以配制出优质碾压混凝土。然而，配制满足工程技术要求且经济的混凝土，并不是非使用品质最优良的原材料不可。碾压混凝土所用的原材料必须满足技术要求。原材料经过正确、合理地配合，可以制得价格便宜、技术合理的碾压混凝土。

本章主要讲述碾压混凝土组成材料的技术要求、配合比设计的原理及方法。

第一节 碾压混凝土的组成材料

碾压混凝土是由水泥、掺合料、水、砂、石子及外加剂等六种材料所组成。水泥和掺合料统称胶凝材料。胶凝材料与水混合形成胶凝材料浆。在碾压混凝土中，它包裹砂子颗粒、填充砂子间空隙，并与砂子一起形成砂浆。砂浆包裹石子颗粒并填充石子间的空隙。在碾压混凝土拌和物中，胶凝材料浆在砂石颗粒间起“润滑”作用，使拌和物具有施工所要求的工作度。硬化后的胶凝材料浆体将骨料牢固地胶结成整体。碾压混凝土中的骨料（一般不考虑其与胶凝材料浆起化学反应）构成混凝土的“骨架”，并一定程度地改善混凝土的某些性能（如减小混凝土的体积变形、降低混凝土的温升等）。外加剂在碾压混凝土中起缓凝、减水或引气等作用，是必不可少的组成材料之一。

为了使碾压混凝土具有良好的技术性质并降低工程造价，必须合理选择碾压混凝土的各种组成材料。本节主要讲述碾压混凝土所用水泥、掺合料、粗细骨料、外加剂等组成材料的技术要求。由于粉煤灰是碾压混凝土的重要掺合料，本节将作重点介绍。

一、水泥

碾压混凝土中使用的水泥，其主要技术指标应符合现行国家标准。从原则上说，凡适用于水工常态混凝土使用的水泥均可用于配制碾压混凝土。但根据工程的重要性及混凝土所处工程部位的不同，所用水泥应该有所区别。水泥品种及标号应根据以下两方面进行选择：一方面是结构物设计的碾压混凝土强度要求及设计龄期；另一方面是碾压混凝土所处工程部位的运行条件（如抗冲磨、抗冻融）或抑制某些有害物质反应（如骨料的碱活性反应、水中有害物质的侵蚀）等特殊要求。大体积重要建筑物的内部碾压混凝土，应该使用标号不低于 425 号的低热（或中热）硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥并掺适量的掺合料。用于一般建筑物及临时建筑物内部的碾压混凝土且混凝土设计要求强度较低时，可使用掺有混合材料的 325 号或 425 号水泥。但在工地掺加掺合料时应考虑水泥中已掺有混合材料。由于我国使用的碾压混凝土多掺用较大比例的粉煤灰，故已建水工碾压混凝土工程大多使用 425 号或 525 号普通硅酸盐水泥或硅酸盐水泥。葛洲坝大江一号船闸左下导墙基础及清江隔河岩水电站围堰曾使用 425 号矿渣硅酸盐大坝水泥。美国多使用Ⅰ型水泥。日本习惯于使用粉煤灰硅酸盐水泥（其中粉煤灰占 30%），施工时不再掺用掺合料。

二、骨料

用于碾压混凝土的骨料包括细骨料(砂子)和粗骨料(石子)。它们可以是天然的(河砂、砾石),也可以是机制的(人工砂、碎石)。碾压混凝土中骨料约占混凝土重量的85%~90%。

骨料的性状对新拌的和硬化后碾压混凝土的性能有很大的影响。骨料的质量和数量决定工程能否顺利施工及工程的经济性。因此,必须通过严密的勘探调查、系统的物理力学性能试验及经济比较,正确地选择料场。碾压混凝土施工速度快,骨料使用量大而集中,骨料选择失当或调研不够都将导致工程施工的被动局面。因此,应特别给予注意,切忌在骨料选择上出现任何差错。

(一) 粗骨料

粗骨料必须洁净、质地坚硬、具有合适的粒形和良好的级配,不含过多的有害物质。

碾压混凝土是一种超干硬的混凝土,多采用自卸卡车运输入仓。根据工程情况及施工条件,选择合适的粗骨料最大粒径,对减少施工过程中的骨料分离、降低胶凝材料用量是有意义的。同常态混凝土一样,增大粗骨料最大粒径,可以降低粗骨料的空隙率,从而减少砂浆和胶凝材料用量。但随着粗骨料最大粒径的增大,混凝土拌和物分离趋于严重。现场试验和工程施工结果表明,当骨料最大粒径超过80 mm时,施工过程中粗骨料分离严重。使用最大粒径为40 mm或更小的粗骨料时,分离现象明显减轻。但必须相应增加砂浆用量,胶凝材料需用量也随之增多。这将给温度控制带来困难。美国的一些工程使用最大粒径38 mm的粗骨料,致使胶凝材料用量增大。如上静水坝胶凝材料用量达 254 kg/m^3 。日本曾使用最大粒径150 mm的粗骨料,虽辅以严格的施工措施,但并未取得预期的解决粗骨料分离的效果。因此,国内外多数工程目前使用80 mm(或76 mm)的最大粗骨料粒径。

使用砾石可以减小空隙率。在相同砂浆用量情况下可以获得工作度较小的拌和物。但施工实践表明,用碎石拌制的碾压混凝土在出机和卸料过程中分离的程度较轻。粗骨料中针片状颗粒所占比例过大,不仅空隙率大而且用振动碾碾压时,这些颗粒易于破碎及排列成水平状态,砂浆难于包裹与填充。因此,针片状颗粒应加以限制。良好的粗骨料级配可降低碾压混凝土的胶凝材料用量、改善混凝土的性能均是有效的。国内外碾压混凝土工程都使用连续级配的粗骨料,因为间断级配混凝土的抗分离能力差。粗骨料各粒级的比例可依粗骨料振实容重试验结果并考虑抗分离能力选定。一般情况下,当最大粒径为80 mm时,使粗骨料振实容重最大(即空隙率最小)的大中小粗骨料比例为4:3:3。当比例为3:4:3时,粗骨料的振实容重稍小,但用此比例配制的拌和物抗分离能力较强。所以我国已建不少工程选用粗骨料比例为大石:中石:小石=3:4:3。骨料级配的选择还应从实际出发,考虑料场中骨料的天然级配情况,力求取得生产与使用之间的平衡,以达到经济的目的。

粗骨料中有害杂质的含量应不超过现行规范规定范围。

(二) 细骨料

碾压混凝土使用的细骨料的品质要求与常态混凝土所用的细骨料基本相同。细骨料应洁净、不含过多的有机杂质和有害物质。细度模数以2.20~3.00较为适宜。但四川蓬安县

马回电站坝体施工时由于当地无合适的砂,曾使用细度模数 0.70 的砂子,适当增加拌和物的胶凝材料用量,也取得成功。细骨料的颗粒级配和颗粒形状对碾压混凝土的性能有较大的影响。带有棱角的砂,特别是含扁片形颗粒较多或级配不良的砂子,其空隙率较大。一般混凝土用砂的空隙率为 40%~45%。级配良好的砂子空隙率可减小到 40%以下。空隙率大的砂配制的混凝土需用较多的胶凝材料。砂中微细颗粒(我国系指小于 0.16 mm 的颗粒,美国系指小于 0.075 mm 的颗粒)对碾压混凝土的性能有不可忽视的影响。非塑性到低塑性细粉掺用于碾压混凝土中能取得良好的效果。《碾压混凝土坝的设计与施工导则》(美国)中指出,塑性指数为 4 或更小的细粉用于碾压混凝土中没有出现什么问题。塑性指数为 5~7 的细粉,只有经过广泛的实验室试验证明其塑性不会粘结成团或降低拌和物的工作性以后才能使用。塑性指数大于 9 的细粉不宜用于碾压混凝土。根据中国的经验,细骨料中含有一定量的非塑性到低塑性细粉,对灰浆量少的碾压混凝土的物理力学性能的改善均有一定作用。如改善拌和物的工作性、增进混凝土的密实性、抗渗性,提高混凝土的强度、改善施工层面的胶结性能,减少胶凝材料用量等。在细骨料中,细粉的最大允许含量随着细粉性质的不同有较大的变化。使用破碎岩石制得的人工砂充当细骨料时,其中所含细粉可加以利用。美国对人工砂中细粉(小于 0.075 mm 颗粒)限制其含量不超过砂重的 15%。我国水利水电行业标准《水工碾压混凝土施工规范》限定细粉含量不超过 17%。室内试验表明,人工砂中细粉含量高达 20%,对混凝土的物理力学性能并没有不良的影响。必须指出,砂中所含细粉在混凝土拌和过程中应该是能分散的,不应以团块的形式存在,细粉的存在也不应过多地增大拌和物的需水量。因为拌和过程中成团的细粉会被水泥裹住,在混凝土中形成非胶结性的块体,导致混凝土强度的降低、增大混凝土的干缩、降低混凝土的耐久性。碾压混凝土的工作度对用水量的变化特别敏感。因此,砂子含水量(特别是当细粉含量较高时)的检测和控制应予以足够的重视。

(三) 混合骨料

碾压混凝土骨料级配从按正常分级的优良骨料级配到完全不分级的混合骨料(也称统货骨料)均有使用。日本所施工的碾压混凝土坝均采用与常态混凝土一致的骨料级配。我国多数工程也如此。巴基斯坦的塔贝拉工程以及澳大利亚的一些工程使用的均为统货骨料。塔贝拉工程利用河床沉积物,剔除粒径大于 152 mm 的颗粒,然后与粒径大于 19 mm 的骨料以体积比为 1:1 混合,并无其它加工措施。我国湖北清江隔河岩水电站围堰粗骨料最大粒径 80 mm。由于拌和系统原配套的筛分能力较小无法满足碾压混凝土对骨料(特别是细骨料)含水率的要求,故曾使用未经冲洗的天然砂石料,砂和小石混合在一起,并由三级配混凝土改为二级配混凝土。

混合骨料的使用可以简化以至取消骨料筛分工艺,达到就地取材、经济的效果。混合骨料能否成功地用于工程中,取决于料场混合骨料原有级配的稳定情况。一般要求料源级配稳定或基本稳定。在此基础上,配合比设计时适当考虑使用混合骨料的特点,在选择配合比参数(如砂率、浆砂比等)时留有足够的余地,以适应骨料级配在可能范围内的波动。但一般料场混合骨料级配难于保证稳定,用增大灰浆量以保证拌和物工作性的稳定又造成不经济且可能给温控带来困难,混凝土施工质量也不易保证。因此,对于永久性重要工程不宜使用。

三、掺合料

(一) 掺合料的作用

为适应碾压混凝土的连续、快速碾压施工，一般不在混凝土中设置冷却水管以降低混凝土的温升。此外，碾压混凝土中的水泥用量也尽可能降低。但是，为了满足施工对拌和物工作度及坝体设计对混凝土提出的技术性能要求，碾压混凝土的水泥用量又不宜过少。这就存在着矛盾。解决矛盾的可行而有效的方法是在混凝土中掺用掺合料。

碾压混凝土中的掺合料一般应该是具有活性的。它可以是粉煤灰、粒化高炉矿渣，也可以是火山灰或其它火山灰质材料。这些掺合料经收集或加工，其细度与水泥细度属同一数量级，掺至混凝土中对改善拌和物的工作性起到与水泥相似的作用。此外，这些掺合料具有潜在的活性，能与水泥的水化产物——氢氧化钙发生二次水化反应，生成具有胶结性能的稳定的水化产物，从而对改善硬化混凝土的技术性能起重要的作用。掺用掺合料的碾压混凝土，后期强度增长率大，长龄期强度高，抗渗性能及变形性能等随龄期的延长明显增长。混凝土的绝热温升低，因为掺合料的水化发热量比水泥低得多。因此，国内外所施工的碾压混凝土工程多数掺用掺合料。

(二) 掺合料的特性

如前所述，碾压混凝土所用的掺合料可以是粉煤灰、粒化高炉矿渣，也可以是火山灰或其它火山灰质材料。国内外碾压混凝土施工中使用的掺合料多为粉煤灰，也有使用火山灰及凝灰岩的。

1. 掺合料的主要化学成分

高炉矿渣是炼铁时矿石中的 SiO_2 、 Al_2O_3 等杂质在高温情况下与石灰等熔剂化合而成的物质。其化学成分主要是 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 。在一般的矿渣中， CaO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 占矿渣总量的 90% 以上。热熔矿渣经过（水、压缩空气或蒸汽）急速冷却，形成以玻璃体结构为主的、活性得到提高的“粒化高炉矿渣”。

在矿渣中， CaO 的含量大则活性高。但如果 CaO 含量过高（如超过 51%），则由于熔融矿渣的粘度下降，矿渣结晶能力增大，容易结晶。此时矿渣中玻璃体成分减少，活性降低。矿渣中 Al_2O_3 含量高则活性大。 SiO_2 的存在对玻璃体结构的形成有一定的帮助，但含量过多时由于得不到足够的 CaO 、 MgO 与其化合，矿渣的活性较差。因此，矿渣中 CaO 和 Al_2O_3 含量都较高而 SiO_2 含量较低，则矿渣的活性最好。

碾压混凝土中掺用的粉煤灰是从燃煤锅炉烟囱排出的飞灰（fly ash）。其化学成分随着煤种和锅炉燃烧条件的不同有较大的差别。燃煤中不燃物质的种类及含量差别是粉煤灰化学成分波动的原因。一般地说，粉煤灰的主要化学成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 CaO 。其中以 SiO_2 和 Al_2O_3 的含量最大，二者总含量一般在 60% 以上。粉煤灰的活性决定于活性 Al_2O_3 和活性 SiO_2 的含量。但 CaO 对粉煤灰的活性极其有利。某些 CaO 含量较高的粉煤灰加水后甚至能单独自行硬化。粉煤灰中的 Fe_2O_3 有熔剂作用，能促进玻璃体的形成，提高粉煤灰的活性。粉煤灰中未燃尽的碳是非活性成分。碳颗粒粗大、多孔。含碳量大的粉煤灰掺进水泥后使标准稠度需水量增大。此外，碳遇水后在粉煤灰颗粒表面形成憎水性的薄膜，阻碍水分向粉煤灰颗粒内部渗透，从而影响了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与粉煤灰中的活性氧化物的反应，降低了粉煤灰的活性。碳是粉煤灰中的有害成分。

碾压混凝土的掺合料可使用磨细的火山灰及凝灰岩等火山灰质材料。它们是火山爆发时喷到空中的灰分及岩浆经过不同程度的急速冷却后形成的。其中火山灰是火山喷出的微粒沉积在陆上或水中的生成物。凝灰岩是火山喷出的渣、砾并夹杂火山灰沉积后再经石化而成。这些掺合料的化学成分除了氧化硅外，还含有一定量的氧化铝和少量的碱性氧化物($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)。其活性决定于化学成分和从火山口喷出后的冷却速度，并与玻璃体含量有关。

不同产地的火山灰、凝灰岩的化学成分和活性差别较大。作为掺合料掺于碾压混凝土中的火山灰及凝灰岩，必须经过粉磨使其细度与水泥细度大致相当并经鉴定确认其品质合格方可使用。

2. 粉煤灰的基本特性

(1) 粉煤灰的物理特性。粉煤灰由各种形状差别很大的颗粒所组成。借助光学显微镜、扫描电子显微镜，都可以清晰地观察到粉煤灰各种颗粒的形貌。从形貌上可以将粉煤灰中的颗粒粗略地分为珠状颗粒、多孔颗粒及不规则形状颗粒三类。

珠状粉煤灰颗粒呈圆球形，表面一般比较光滑。它是粉煤灰颗粒处于锅炉高温区时间比较长，颗粒在高温情况下形成熔融体或者是由于煤粉颗粒中含有较多熔点较低的物质，在不太高的燃烧温度下变成了熔融体。这些液态的颗粒在迅速冷却过程中，由于表面张力的作用，形成了珠状颗粒。根据珠状颗粒内部的密实状态及表观密度大小，珠状颗粒又可分为漂珠、空心沉珠、复珠及密实微珠。漂珠是薄壁的空心玻璃微珠，有的壳壁上还有极小的针状洞穴。漂珠的粒径在珠状颗粒中是比较大的，直径约 $30\sim 100\ \mu\text{m}$ ，能浮在水面上。其化学成分中 SiO_2 的含量较高 ($55\%\sim 61\%$)。颗粒表观密度 $0.4\sim 0.8$ 。一般电厂粉煤灰中漂珠含量仅 $0.5\%\sim 1.5\%$ 。空心沉珠粒径 $0.5\sim 200\ \mu\text{m}$ ，珠壁密实无孔，厚度约占直径的 30% 。颗粒表观密度接近 2.0 ，不能漂浮。在粉煤灰中有一些较粗的薄壁微珠内部粘集了大量细小的玻璃微珠。在扫描电镜下可以观察到某些破口的这种微珠内部鱼卵状的细珠。这种微珠称为复珠（或子母珠）。此外还有一些珠状颗粒粘连在一起形成“珠联体”，也属复珠之列。较多电厂的粉煤灰颗粒中，主要是实心微珠。其中大多数表观密度 2.8 左右。颜色较浅的颗粒，往往含钙较多，称富钙玻璃微珠。其粒径大多在 $45\ \mu\text{m}$ 以下，多数为 $1\sim 30\ \mu\text{m}$ 。实心微珠中有一小部分含氧化铁较高（可达 50% ）、表观密度 3.4 以上，称为富铁玻璃微珠。

多孔颗粒是由于燃烧过程中颗粒内部部分气体逸出，使颗粒表面形成蜂窝状结构，部分没有逸出的气体使这些颗粒内部成为多孔结构。故这类颗粒具有开放性的孔穴和封闭性的孔穴。这种颗粒表面常粘附有很多细小的球状微珠，也粘附有部分晶体矿物。故多孔颗粒一般也呈不规则形状。多孔颗粒较大，尺寸多在几十至几百微米。多孔颗粒中还有一部分是碳粒。粉煤灰中的碳粒一般是形状不规则的多孔体。但也有一些电厂的粉煤灰的未燃尽碳粒接近球状，称为“碳珠”。碳珠内部多孔、结构疏松，孔隙吸水性高，颗粒较粗。多数颗粒粒径超过 $45\ \mu\text{m}$ 。

粉煤灰中的不规则颗粒除了一部分多孔颗粒外，还有一部分是结晶矿物的颗粒以及部分颗粒的碎屑。各种颗粒的粘聚体也属不规则体。

除了以上所述粉煤灰形貌外，粉煤灰的物理特性还包括表观密度、堆积密度、细度、颗