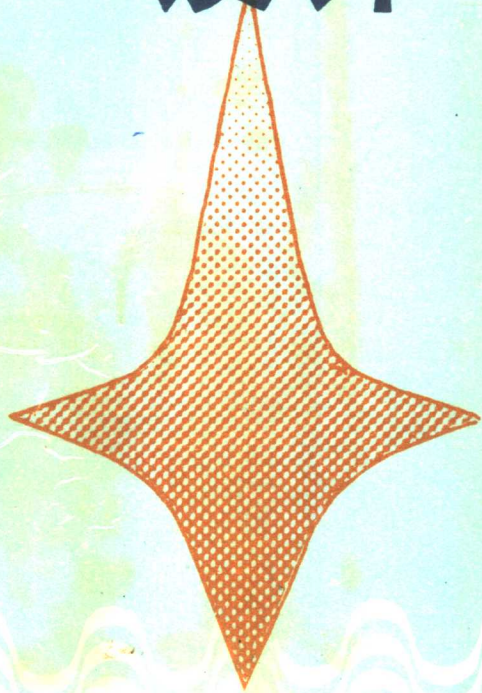


陆文海 编著

水工新技术 设计



成都科技大学出版社

水工新技术设计

8

陆文海

7
32.1

91-4
选修

成都科技大学出版社

(川)新登字015号

责任编辑：宗 年

封面设计：光 光

内 容 提 要

本书是高等学校水利工程类专业的选修课教材。内容包括碾压混凝土筑坝技术、拱座稳定分析及双支传力墩的应用、环氧材料与抗冲耐磨材料的应用、混凝土坝的预锚加固和化学灌浆技术、混凝土面板堆石坝、砂砾石坝基与土石坝坝体渗漏处理技术，以及近代土基合成材料在水工设计中的应用等。书中着重阐述各项新技术的设计和施工的基本理论与具体措施，并列举了部分国内外工程实例，以利于学习掌握。

本书也可供有关工程技术人员学习与设计参考。

水工新技术设计

陆文海 编著

成都科技大学出版社出版、发行

四川省新华书店经销

成都科技大学印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 1/32 印张：6.4375

1992年10月第一版 1992年10月第一次印刷

印数：1—1000 字数：139千字

ISBN7-5616-1591-4/TV·16

定价：1.88元

前 言

建国以来，我国进行了大规模的水利水电工程建设。经大量的设计研究，并吸取国外的先进经验，在坝工建筑、坝基处理和新材料的应用等方面，成功地采用了许多近代水工新技术，在降低工程造价、缩短建设周期方面取得了显著的效果。为了介绍我国水利水电工程设计中采用的水工新技术，反映当今世界水工设计的先进技术水平，谨在编者历年教学讲授内容的基础上，编写本书作为大专院校水利系各有关专业的选修课教材，希望能对拓宽同学的知识面，帮助同学了解和掌握近代水工新技术有所裨益，同时供从事水利水电建设工作的工程技术人员参考。

本书编写过程中得到成都科技大学水电学院和水利系的教师与同志们的大力支持和指导帮助；熊达成教授对本书作了全面认真的审阅，提出了许多宝贵的意见和建议，谨在此一并表示衷心的感谢。

水工新技术涉及的学科领域十分广阔，但限于能力和篇幅，仅能选择其中部分内容加以介绍。由于编者水平有限，书中可能有错误和不妥之处，敬希广大读者批评指正。

编者

1992年7月

目 录

第一章 碾压混凝土筑坝技术	(1)
第一节 碾压混凝土筑坝技术的发展	(1)
第二节 碾压混凝土的特点和性能	(5)
第三节 碾压混凝土坝的枢纽布置与坝体剖面设计	(10)
第四节 碾压混凝土的原材料与配合比	(24)
第五节 碾压混凝土坝的施工	(32)
第二章 拱座稳定分析及双支传力墩的应用	(42)
第一节 拱座抗滑稳定计算	(42)
第二节 拱座稳定性分析	(48)
第三节 双支传力墩的应用	(57)
第三章 环氧材料与抗冲耐磨材料的应用	(67)
第一节 环氧材料的应用	(67)
第二节 抗冲耐磨材料的应用	(73)
第四章 混凝土坝的预锚加固和化学灌浆技术	(85)
第一节 预锚加固技术	(85)
第二节 化学灌浆技术	(95)

第五章 混凝土面板堆石坝	(107)
第一节 概述.....	(107)
第二节 堆石坝体设计.....	(109)
第三节 面板设计.....	(112)
第四节 底座设计.....	(117)
第五节 面板堆石坝的施工技术.....	(118)
第六章 砂砾石坝基与土石坝坝体渗漏处理技术 ...	(123)
第一节 混凝土防渗墙建筑技术.....	(123)
第二节 高压喷射灌浆地基防渗加固技术	(143)
第三节 砂浆板桩防渗技术.....	(151)
第四节 土石坝坝体劈裂灌浆加固技术	(156)
第七章 近代土工合成材料在水工设计中的应用 ...	(165)
第一节 土工薄膜防渗技术.....	(165)
第二节 土工织物的应用.....	(174)

第一章 碾压混凝土筑坝技术

第一节 概 述

一、碾压混凝土筑坝技术的发展

碾压混凝土筑坝技术是混凝土坝建筑技术的重要发展，也是混凝土坝降低工程造价、缩短建设周期的有效途径。

在50~70年代，土石坝由于采用大型运输工具上坝和振动碾压压实等先进的施工技术，使土石坝得到了迅速的发展。从而造成每方坝体的造价，仅为混凝土坝的 $1/10\sim 1/20$ ，使混凝土坝在坝型选择时处于不利的地位。要发展混凝土坝，非采用先进的施工技术、取得筑坝技术上的突破不可，而借鉴土石坝的施工技术，实为一条现实可行的途径，于是从70年代开始，各国均先后进行了碾压混凝土筑坝技术的研究与应用。

国外于1974年，首次在巴基斯坦塔贝拉Tarbela工程发电引水隧洞的修复工程中，应用碾压混凝土取得成功。日本也于1974年开始进行碾压混凝土筑坝技术的研究，并于1980年5月建成了世界上第一座碾压混凝土坝—岛地川坝。该坝高89m，混凝土浇筑量 32万m^3 。此后又相继建成了大川坝、玉川坝等五座重力坝。与此同时，美国也于1982年底在俄勒冈州建成了著名的柳溪坝，该坝高52m，长543m，碾压混凝土量 33.1万m^3 ，工期仅为堆石坝方案的 $1/3$ ，造价则为其52%。目前美国已建成7座碾压混凝土重力坝，另有3座正在施工之中。此外，英国和原苏联等也都进行了相应的研究和实

践。目前全世界已建和在建的碾压混凝土坝已达30余座，其中日本的宫濑坝高达155m。

我国对碾压混凝土筑坝技术的研究始于1978年。1983年水电七局在1500t水泥罐混凝土施工中进行了工业性试验。同年，闽江水电工程局在厦门机场进行了大型现场试验。1984年水电七局建成了铜街子工程左岸1号副坝。1985年闽江局在沙溪口水电站开关站挡墙工程中应用此技术，并于1986年建成了我国第一座全碾压混凝土坝—坑口重力坝（图1-1）。

坑口重力坝坝高56.8m，坝顶长122.5m，混凝土总量60600m³，其中碾压混凝土42000m³，相应水泥用量为60~65kg/m³，粉煤灰60~120kg/m³。大坝上游面设有6cm厚的沥青砂浆防渗层，外部用6cm厚混凝土预制件做模板。下游坝面模板为素混凝土预制块。该坝设计为不分缝的整体式重力坝，采用薄层通仓连续铺筑，汽车运输混凝土直接入仓。碾压混凝土铺筑层厚为33cm和50cm两种，坝体月平均上升10m，最大为13m。大坝自1985年11月开盘碾压，1986年6月基本建成，7月底水库蓄水，迄今运行情况良好。坑口坝的施工工艺，反映了我国碾压混凝土筑坝技术的特色。

继坑口坝之后，1986~1989年，铜街子水电站主坝的部分重力坝段、溢流坝段和护坦，也完成了碾压混凝土铺筑。1988年1~5月，广西红水河岩滩水电站完成了拱形碾压混凝土围堰工程，并经受了超标准洪水漫顶的考验，最大漫顶水头达2m，无任何冲毁现象，该围堰为今后三峡工程碾压混凝土围堰的修筑提供了可靠的资料。此外还应提到，1989年四川马回水电站也成功地采用碾压混凝土，建成了溢洪排沙

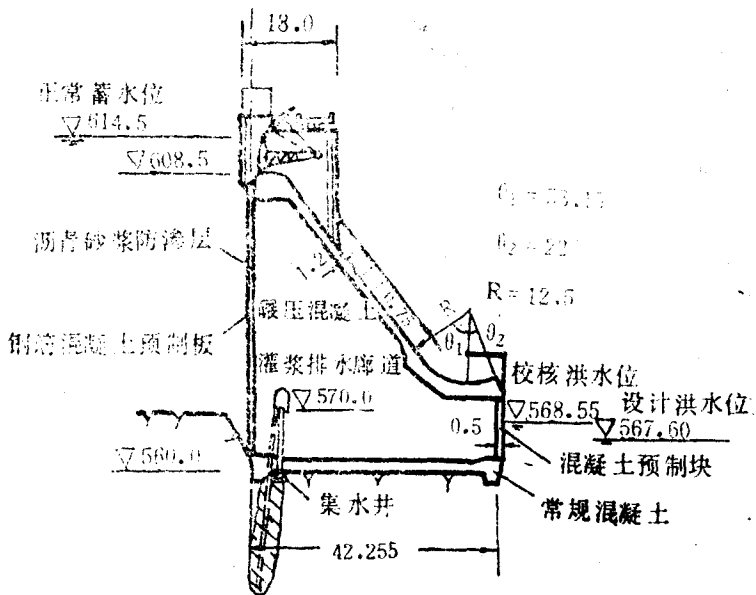


图 1-1 坑口碾压混凝土坝溢流段剖面图 单位米。

间，这表明碾压混凝土筑坝技术对我国一些地方性工程，也同样具有很高的实用价值。据统计，目前我国采用此技术的工程已达20余处，碾压混凝土筑坝技术正在我国迅速发展。

二、碾压混凝土筑坝技术的优越性

碾压混凝土筑坝技术与常规混凝土建坝的施工方法相比，具有以下优越性：

1. 降低造价

工程投资额与使用劳动力的数量、原材料消耗量以及作业效率有关。

碾压混凝土的施工，从拌和楼到浇筑仓的运输，一般采

用汽车、缆机或斜坡道卷扬机。也可采用自卸汽车直接入仓或皮带输送机入仓。平仓和碾压均采用机械作业，从而减少了大量手工劳动，提高了劳动生产率。

碾压混凝土的水泥用量由常规内部混凝土的 $160\text{kg}/\text{m}^3$ 减少至 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 以下，可节约大量水泥。

碾压混凝土坝一般不设纵缝。横缝可不设也可于平仓后或振动碾压后用切缝机切割，可节约大量模板。

由于水泥用量减少，降低了混凝土发热量，从而极大地简化了温控措施，降低了冷却费用。

综上所述，碾压混凝土较常规混凝土筑坝可降低工程造价 $15\% \sim 30\%$ 。

2. 缩短工期

碾压混凝土刚拌好的混合料具有足够的承载能力，可供汽车进仓和振动碾压，利于通仓连续浇筑，从而改变了常规的柱状浇筑、间歇施工工艺，极大地加速施工，缩短工期。目前，碾压混凝土坝施工的日最大上升高度已达 1.5m （岩滩），日最大填筑量已达 $9474\text{m}^3/\text{d}(2 \times 10\text{h})$ 。岩滩围堰月平均上升 25.3m ，因此，一般中型工程可在一个枯水期内完成，较常规混凝土施工缩短工期 $1/5 \sim 1/3$ 。美国1985年建成的盖尔斯维尔坝 Galesville Dam，坝高 51.5m ，混凝土量 16.6万m^3 ，工期仅43天。

3. 施工安全

采用通仓浇筑，仓面大而平坦，作业安全性增大。

如上所述，碾压混凝土技术具有降低造价、缩短工期和施工安全等优越性，故这类重力坝在坝型比较中重新具有了竞争力。并且可用于公路、机场以及石油基地等作业面宽阔

的工程。

但是，碾压混凝土技术也受某些条件的制约。不同断面的河谷对碾压法的适宜程度是不同的，U形河谷的施工面宽阔，更适宜碾压法施工。当坝体的泄洪设施、坝内廊道和埋管等使坝体结构复杂时，由于施工面受到约束，采用碾压混凝土筑坝较为困难。另外，体积太小的坝，施工面小，多不适宜采用碾压混凝土修筑。

第二节 碾压混凝土的特点和性能

一、碾压混凝土的特点

1. 采用干硬性混凝土

为了减少水泥用量，并承受施工时较强的振捣作用，碾压混凝土应采用干硬性混凝土。干硬性混凝土拌合物的坍落度为零，其流动性不能用坍落度表示，而应利用工作度测定仪测定其VC值，即以拌合物在仪器内摊平振实所需时间的秒数表示其流动性。

大量试验表明：在VC值小于10秒的混凝土表面，8吨振动碾行走无困难。VC值大于10~15秒时，混凝土表面有水泥浆析出，但VC值大于50秒后，则无水泥浆析出。由此可见，碾压混凝土的VC值应在10~50秒之间。此外，由碾压混凝土的强度试验得知，当VC值在40秒以下时，混凝土的抗压强度随VC值的增大而提高，但VC值大于40秒以后，混凝土强度又将随VC值的增大而降低，如图1-2所示，因此，一般碾压混凝土的VC值应以20~30秒为宜。

2. 混凝土的单位水泥用量少

碾压混凝土掺水量低，水泥用量也减少，均远小于常规混凝土的用量，这是碾压混凝土与常规混凝土的主要区别。

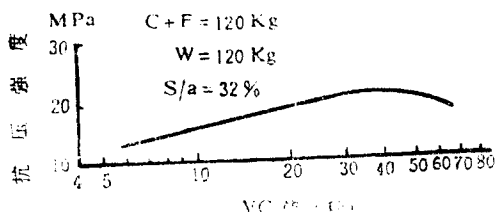


图 1-2 VC值与抗压强度关系曲线(岛地川试验资料)

此外，尽管碾压混凝土可以不掺粉煤灰，但实际上均掺入一定的粉煤灰代替部分水泥，以进一步减少混凝土中的水泥用量。研究表明，粉煤灰可与水泥中的游离石灰起化学反应，提高混凝土的后期强度，改善混凝土的性能。同时，粉煤灰的颗粒变幅与水泥大体相同，其颗粒形状也较水泥颗粒圆，因此，用粉煤灰代替部分水泥，虽然进一步减少混凝土的用水量，但仍能取得较好的和易性。

鉴于粉煤灰的上述优点，碾压混凝土中粉煤灰的用量有日益增加的趋势，已由初期的30%增加至50%以上。新近的研究表明，最优的粉煤灰用量占胶凝材料用量的60%~80%。表1-1表明各工程碾压混凝土的单位水泥用量及粉煤灰的掺量。

二、碾压混凝土的性能

1. 碾压混凝土的强度

(1) 抗压强度。试验表明，当水胶比 $W/(C+F)$ 为0.5~0.9，粉煤灰掺量在50%以上时，碾压混凝土的抗压强度

表1—1 国内外部分工程碾压混凝土配比表

工程名称	水胶比	粉煤灰		每立方米混凝土材料用量(kg)				外加剂
		掺量 (%)	砂率	水	水泥+粉煤灰	砂	石	
大川坝	0.85	20	32	102	96+24	691	1490	0.3kg
岛地川坝	0.81	30	34	105	91+39	749	1477	0.325kg
铜街子	0.8	42	31	97	85+36	702	1660	0.25%(木钙)
坑口	0.7	57	37	98	60+80	798	1370	0.28%(木钙)

与水胶比的关系，仍符合水灰比定则，即其抗压强度主要取决于水胶比和粉煤灰掺量。图1—3是粉煤灰掺量为55%（重量比）的关系曲线。由图可见，高粉煤灰掺量的碾压混凝土的90天抗压强度仍可达150号以上。

高粉煤灰掺量碾压混凝土的强度发展过程和常规混凝土不同，主要是28天以后增长幅度较大。粉煤灰掺量50%以上的碾压混凝土90天强度可以比28天强度增长70%~100%，而且90天以后还会有较大幅度的增长。试验表明，碾压混凝土一年龄期强度平均比90天强度增长40%左右。

碾压混凝土的初期强度（7天强度 R_7 ）主要取决于水泥用

量，而与粉煤灰掺量关系不大。水泥的强度和成分，以及粉煤灰的品质，对碾压混凝土强度的影响比常规混凝土更大，养护温度对强度的增长过程影响也更为显著。

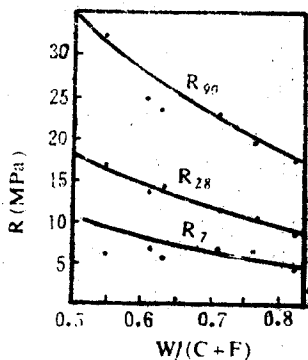


图 1-3 碾压混凝土抗压强度与水胶比的关系曲线

(2) 抗拉强度。碾压混凝土的抗拉强度主要取决于其抗压强度，而与粉煤灰掺量没有直接关系。其抗压强度与抗拉强度之比与龄期有关。初期时碾压混凝土抗拉强度较低，随着龄期的增加，压拉比减小，其抗拉强度后期增长的速率将超过抗压强度。如7天龄期碾压混凝土的压拉比为19.62，此时的抗拉强度只有抗压强度的5%左右。但180天龄期时其压拉比将减为11.19，此时的抗拉强度增加为抗压强度的9%左右。

(3) 极限拉伸值。碾压混凝土的极限拉应变与其抗拉强度有关，抗拉强度高，极限拉应变 ϵ 值相对也高。90天龄期抗拉强度大于1.2MPa的碾压混凝土，其极限拉应变 ϵ_{s0} 一般大于 60×10^{-6} 。

坑口重力坝碾压混凝土与大化常规混凝土的试验表明，在抗压强度相同的条件下，碾压混凝土的极限拉伸值并不比常规混凝土低。

(4) 弹性模量。试验结果表明，当粉煤灰掺量从50%增加到71%时，混凝土的弹模与抗压强度的比值变化在840~1200之间，平均为1043，变化不大，且14天龄期的弹压比与90天龄期的相同。因此，可以认为，碾压混凝土的弹模与抗压强度成比例，而与粉煤灰掺量和混凝土的龄期没有关系。

2. 碾压混凝土的抗渗性能

美国柳溪坝的漏水，引起人们对碾压混凝土抗渗性的怀疑。但试验证实，只要配合比合适，碾压混凝土同样可以获得很高的抗渗标号。研究表明，碾压混凝土的抗渗性能和以下因素有关：

(1) 高粉煤灰掺量碾压混凝土90天以后的抗渗标号可能有大幅度提高。室内试验28天抗渗标号仅为 S_2 、 S_4 的碾压混凝土，90天以后其抗渗标号有可能达到 S_{12} 或更大。

(2) 细骨料的品质和级配对碾压混凝土的抗渗性能有很大影响。水胶比和水泥用量相近时，用人工砂配制的抗渗标号可达 S_{12} ，但用天然砂配制的则可能只有 S_2 。显然，人工砂中粉粒的存在，对碾压混凝土的密实性和抗渗性是有利的。

(3) 水胶比和水泥用量是影响抗渗性能的主要因素。水胶比越小，则抗渗标号越高。相同的水胶比，如水泥用量下降到一定程度，则抗渗性能也会明显降低。

由上可见，碾压混凝土后期抗渗标号较高，只要适当采用混凝土的单位水泥用量和水胶比，增加细骨料中微细颗粒的成分，是可以获得很好的抗渗性能的。但应指出，施工中由于骨料分离和架空而造成的集中渗漏，仍为目前碾压混凝土存在的主要问题之一，应倍加重视。

3. 碾压混凝土的施工特性

选择碾压混凝土配合比时，不仅要求其具有良好的物理力学性能，而且还应有利于提高施工的均匀性，并使混凝土具有良好的可碾性。

(1) 碾压混凝土的均质性。混凝土摊铺以后，骨料分布状况在很大程度上决定了混凝土的均匀程度。当用汽车运输直接卸料时，混凝土的分离常难避免。因此，应从配合比设计方面采取措施以改善混凝土的均匀性。试验表明，在满足物理力学性能要求的前提下，适当增大砂率，并减小骨料中大石($>40\text{mm}$)的比例，是提高混凝土均质性的有效

措施，这样可使混凝土的分离现象得到明显改善。

(2) 碾压混凝土的可碾性。碾压混凝土的可碾性，主要与配合比有关。尽管可碾性的好坏最终要通过现场碾压加以证实，但室内试验仍可在一定程度上反映其压实性能。可碾性好的混凝土，在工作度试验中应表面出浆均匀，从试桶中倒出后粘聚性较好，试件表面无架空现象等；而可碾性差的碾压混凝土，试验中将出现干涩架空压不实现象，或因反弹消振导致VC在10秒左右的混凝土出现架空不实情况。因此，施工前应进行室内试验，以对碾压混凝土的可碾性作出判断。

第三节 碾压混凝土坝的枢纽布置 与坝体剖面设计

一、碾压混凝土坝的枢纽布置

碾压混凝土坝是介于土石坝与混凝土坝之间的一种新坝型，其枢纽布置应尽量吸收两者的优点。土石坝枢纽的主要特征是坝体施工工艺简单，工序单一，但土石坝不能溢洪，需另设溢洪道，且坝身内一般不允许埋管、设孔或布置廊道，故其枢纽布置多为分离式，即挡水、溢洪和发电等建筑物采用分散布置。混凝土坝枢纽的主要特征是坝体施工工艺较复杂，但坝体可以溢洪，坝体内可以埋管、设孔和布置廊道，导流也较简便，故其枢纽布置多用挡水、溢洪、发电等建筑物相互结合的集中布置方式。碾压混凝土坝枢纽可吸收两者优点，在枢纽布置时多采用集中布置方式，将挡水与溢洪建筑物相结合，同时注意选择适当的施工场地，以利各种

施工机械设备的运转，并尽量简化或合并坝内埋管、孔洞和廊道的布置，或采取相应的处理措施，减少施工干扰，保证碾压混凝土的通仓连续浇筑。

碾压混凝土溢流坝可用表孔自由溢流式或带有闸门控制的表孔溢流式。美国常用前者，如柳溪坝和上静水坝等。我国和日本常用后者，如我国的坑口坝、铜街子溢流坝，以及日本的岛地川、大川、和玉川坝等。

一般具有坝后式厂房的部分坝段，均采用常规混凝土浇筑。从目前国内外已建和在建的水力枢纽看，这部分坝段尚无采用碾压混凝土修筑者，这主要是因为这部分坝段有引水钢管穿过，施工干扰过大，不便振动碾压所致。只有当坝后式厂房采用坝身背管式或坝基卧管式布置形式时(图1—4)，才有可能对这部分坝段的部分坝体采用碾压混凝土浇筑。但背管式的钢管投资较大；卧管式的进水口易淤积泥沙。

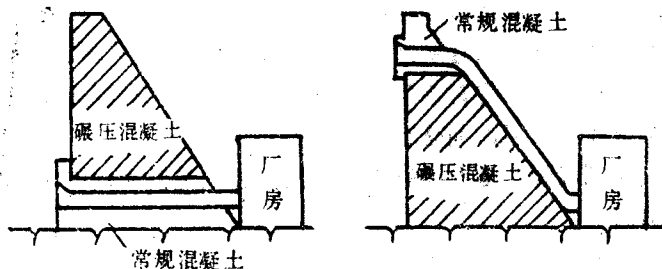


图 1—4 坝后式厂房的布置

a. 坝基卧管式布置形式 b. 坝身背管式布置形式

枢纽布置时还应注意导流方案的选择。碾压混凝土坝的施工导流，一般采用围堰将河床拦断，用隧洞或岸边坝下导