

碾压混凝土坝

第十六届国际大坝会议论文译文集

沈崇刚 陈宗樑 姜福田 张进平 译



水利电力出版社

译 者 的 话

第16届国际大坝会议(1988年,旧金山)第62题“混凝土坝施工中的新进展”,收到论文43篇,来自20个国家。43篇论文中有22篇涉及到碾压混凝土筑坝问题,比上届大会(第57题)仅有9篇论文要多出近1.5倍。可见3年来碾压混凝土筑坝技术有了飞速发展。

根据大会统计资料截至1987年底,全世界已建成或在建碾压混凝土坝已有50座,其中最高的坝是日本坝高155m的宫瀨重力坝。南非正在设计两座碾压混凝土重力拱坝和两座碾压混凝土双曲拱坝。

本届大会论文的特点是总结性论文占篇幅较多,讨论的问题集中,对造价、工期和运行都结合实际工程进行了分析,提出建设性的结论,是碾压混凝土坝的重要技术文献。我们从22篇论文中筛选了17篇专门讨论和研究碾压混凝土筑坝技术的论文,其中除我国“坑口碾压混凝土坝”未译外,其余全部译出。

本译文集由沈崇刚、陈宗樑、姜福田和张进平翻译。每篇论文的译者在文末注明,全集由陈宗樑、姜福田审校。

译 者

1988年7月15日

目 录

译者的话

碾压混凝土坝设计和施工的经验(南非).....	(1)
澳大利亚碾压混凝土坝的发展和试验(澳大利亚).....	(11)
大型碾压混凝土坝温度裂缝控制的研究(日本).....	(27)
玉川碾压混凝土坝的施工、质量和温控(日本).....	(36)
碾压混凝土坝内埋设的各类设备(日本).....	(47)
碾压混凝土坝的运行(美国).....	(58)
碾压混凝土坝滑模浇筑混凝土坝面(美国).....	(73)
碾压混凝土坝设计和施工考虑的问题(英国).....	(82)
碾压混凝土在大坝非主体水工建筑物上的应用(南斯拉夫).....	(89)
卡斯蒂洛勃朗柯坝采用碾压混凝土的施工和控制(西班牙).....	(99)
碾压混凝土坝的施工与检查(法国).....	(107)
安阿尔柯莱玛坝天然骨料碾压混凝土的设计和配合比(摩洛哥).....	(119)
碾压混凝土用于尔韦达坝小型工程施工(摩洛哥).....	(129)
山达欧捷尼坝采用碾压混凝土(西班牙).....	(137)
对碾压混凝土的评论(西班牙).....	(147)
苏联混凝土坝施工(苏联).....	(152)
第62题“混凝土坝施工中的新进展”总报告——有关碾压混凝土 筑坝的摘要.....	(157)
文献目录.....	(177)

碾压混凝土坝设计和施工的经验*(南非)

[南非] F·HOLLINGWORTH, F·H·W·M·

DRUYTS, W·W·MAATENS

1. 前 言

南非水务局, 通过一个坝段第一次对碾压混凝土进行了试验, 该试验坝段布置在位于东德兰士瓦省的布拉姆罗本海梅尔 (Bram Raubenheimer) 坝内。这是第15届国际大坝会议 (瑞士洛桑, 1985年6月) 一篇论文的主题, 在该论文中做了详细介绍。相继而来的是两座重力坝施工: 位于小鱼河 (Little Fish River) 的德米斯特克拉尔 (De Mist Kraal) 引水坝和位于斯兰格河 (Slang River) 的扎豪克 (Zaai Hoek) 坝, 见图1。

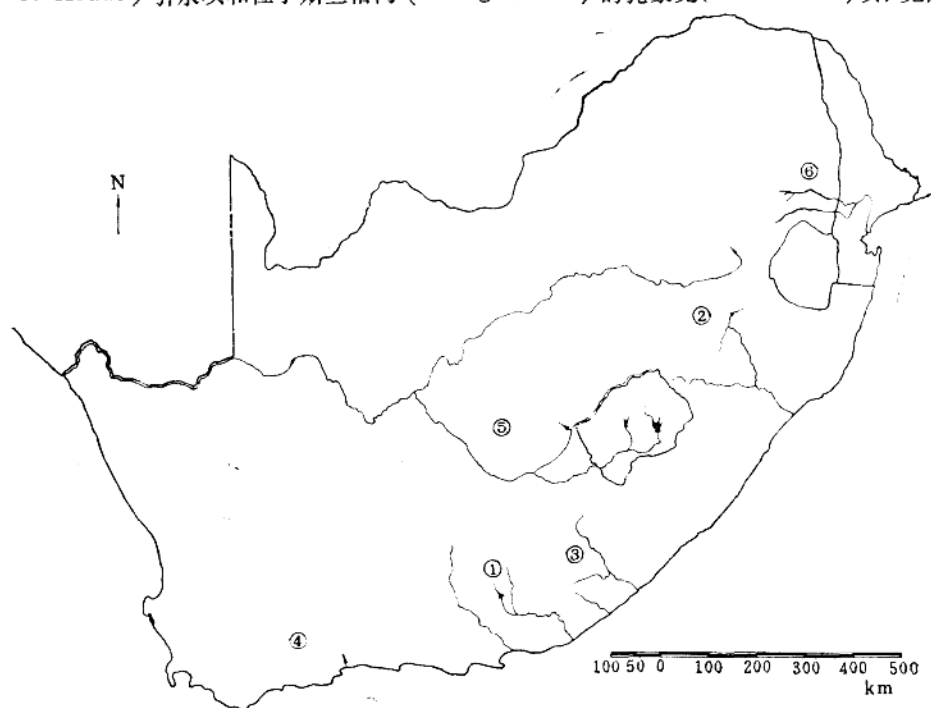


图 1 坝的位置

①—德米斯特克拉尔; ②—扎豪克; ③—莱格尔斯安德; ④—俄尔威坦斯; ⑤—克烈布特;
⑥—克鲁哥公园坝

* 第62题报告3 (Q.62-R.3)。

德米斯特克拉尔引水坝最大坝高30m，坝顶长300m。该坝混凝土方量 65000m^3 ，其中 35000m^3 是碾压混凝土，碾压混凝土浇筑用了26d。建坝的目的是引小鱼河水 $22\text{m}^3/\text{s}$ 到一个渠道，以便调小鱼河水到瑞克曼斯（Lake Mentz）和星期日河（Sundays River）水系。坝址处地质上是不好的，基础岩石是有粘土夹层的粉质砂岩。由坝的岸边向河床覆盖加深，深达10m，这表明为减少开挖需有压实段，而这一段非常适宜于采用碾压混凝土方法，见图2。

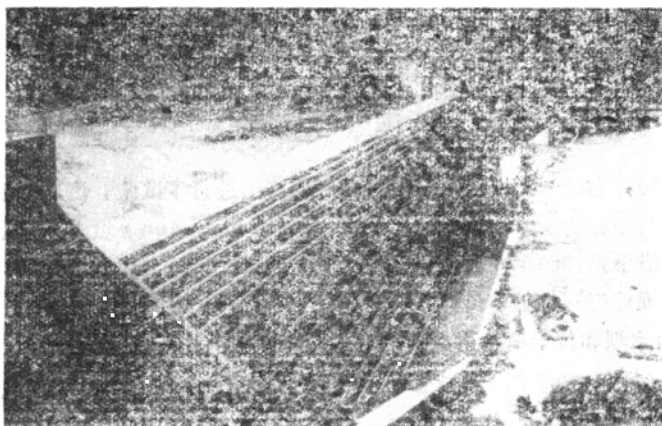


图2 德米斯特克拉尔引水坝

扎豪克坝最大坝高50m，坝顶长度为480m，修建在坚固的辉绿岩上。混凝土方量 120000m^3 ，其中碾压混凝土 100000m^3 。该坝将蓄水 193000000m^3 ，保证用水为 $64000000\text{m}^3/\text{年}$ 。它的主要目的是向麻居巴（Majuba）水电站供水，但是另外它将使 $2.25\text{m}^3/\text{s}$ 的水调入瓦尔河（Vaal River）水系和稳定斯兰格河流量，见图3。

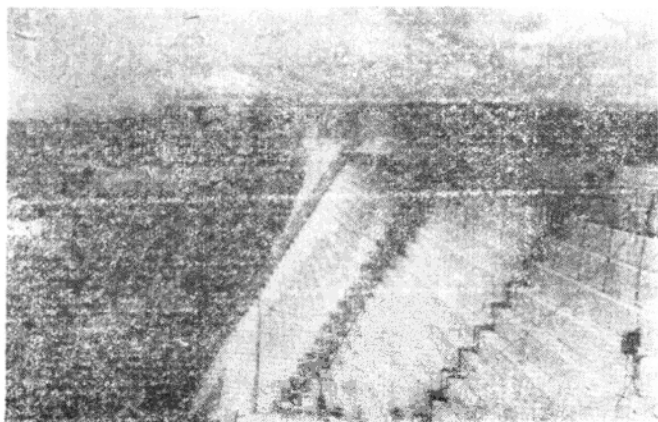


图3 扎豪克坝

一个更有兴趣的工程是在克鲁哥 (Kruger) 国家公园内设计和施工的一座小型碾压混凝土堰。该堰有3890m³混凝土,是用小型机械碾压小断面的一项实习。它几乎是以乡间面貌展现出从一个从观赏观点设计的建筑物,满足特殊环境区域的要求。

我们不久将完成另一座碾压混凝土重力坝的设计:位于苦比西河 (Kubusie River) 上的莱格尔斯委德 (Wriggleswade) 坝,该坝最大坝高37m,坝顶长860m,库容1.27亿m³,连同17m高的副坝共有23.6万m³混凝土。它的作用将是蓄水供给布法鲁河 (Buffalo River) 和增加东伦敦的供水。

我们有两座碾压混凝土重力拱坝着手设计:位于雷特斯设鲁特 (Rietspruit) 卡尔顿河上的克涅布特 (Knellpoort) 坝,河流携带大量泥沙,该坝最大坝高50m,拱弧的外曲线半径为90m,坝顶长180m,库容1.37亿m³,混凝土方量为5.5万m³;另一座坝是位于大布莱克河 (Great Brak River) 上的俄尔威坦斯 (Wolwedans) 坝,该坝最大坝高70m,坝顶长250m,库容0.24亿m³,混凝土方量16.5万m³,见图4。

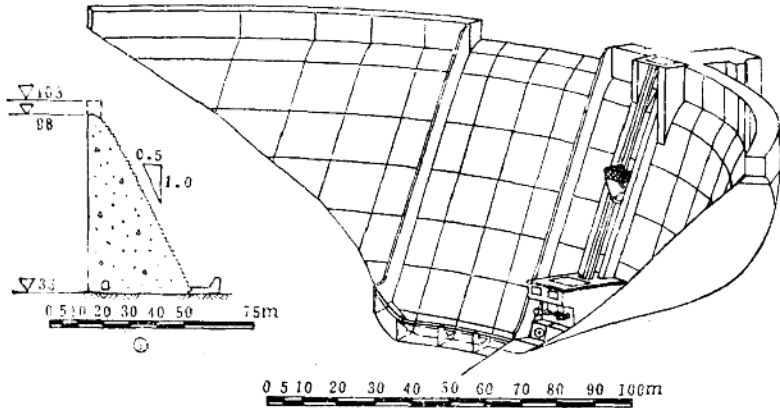


图 4 俄尔威坦斯坝
①—溢流坝断面

碾压混凝土坝的目标将是双曲拱坝,我们认为技术已经可以用来获取这个目标。这种坝型有两座坝可能是候选者,即坝高162m的莫海尔 (Mohale) 坝和坝高180m的马赛 (Mashai) 坝,这两座坝位于莱索托 (Lesotho) 高地水利工程,后者是非洲大陆上现今规划最高的坝。

2. 设计

碾压混凝土的设计通常是相同于其他任何混凝土坝,但是个别不同处是碾压混凝土坝设计应与碾压混凝土施工方法相一致。碾压混凝土获得的节省投资主要由于混凝土浇筑速率而实质上是缩短施工工期,有以下各项受益:后期资金的保证,较早回收资金,降低总管理费用,年施工最好时间的选择等。额外节省材料费用,较省的胶凝材料,在某些情况下使用便宜的骨料,主要取决于碾压混凝土的类型;但是主要的节省通常是工期。因此设

计必须认识这点,安排碾压混凝土施工进度要尽可能少受阻碍。这导致进水口和泄水工程分开修筑,通常在坝的主体之前和同碾压混凝土浇筑的主体结合起来。廊道布置离开上游面,通常容许有效的施工碾压所要求最小宽度为5 m。

台阶型溢洪道,除水力学上效率外,与碾压混凝土方法很一致,这种型式的溢洪道用于德米斯特克拉尔坝和扎豪克坝(图2和图3)。下游台阶面有两个目的:它有效地消除溢洪能量的70%多和它也简化碾压混凝土和面部混凝土的浇筑。

德米斯特克拉尔坝溢洪道水力学曲线设计200年一遇洪水 $2000\text{m}^3/\text{s}$,单宽流量 $10.26\text{m}^3/\text{s}$,溢洪道堰顶水头3 m。流域最大洪水(RMF)为 $5650\text{m}^3/\text{s}$,单宽流量 $28.97\text{m}^3/\text{s}$,通过溢洪道堰顶水头5.7 m,在溢洪道界限内。可能的最大洪水(PMF)为 $6870\text{m}^3/\text{s}$,超出溢洪道界限和从非溢流坝顶漫顶,但是水头不超过0.5 m。我们洪水设计准则是在非常洪水情况下破坏是容许的,但是建筑物必须是安全的。

德米斯特克拉尔坝溢洪道在小比尺模型(1:75)上做过常规的水力学模型试验,台阶比例用大比尺模型(1:20)。高1 m×宽0.6 m的台阶对要求的流量范围测定是最优的和有必要降低接近堰顶台阶的高度,以阻止在较低流量时自由挑流。用短护坦和有槛的溢洪道布置能很好地下泄200年一遇的洪水,超过此洪水冲刷的可能性认为是容许的。扎豪克坝也采取相同的布置,德米斯特克拉尔坝因为地质上指定要开挖相当深并且限定开挖程度,所以特别慎重地选择短护坦。然而扎豪克坝,水力学试验表明,相同的这样设计是可以利用的和适合于那个坝址条件,短护坦和有槛的溢洪道防止坝址下的回流冲刷是有效的,这个坝址是坚固的辉绿岩提供了这一切。扎豪克坝200年一遇洪水、流域最大洪水和可能最大洪水分别为 $820\text{m}^3/\text{s}$ 、 $2500\text{m}^3/\text{s}$ 和 $3120\text{m}^3/\text{s}$,溢洪道长160 m。

当目标转向碾压混凝土重力拱坝和拱坝时深入研究变得很有必要。在这种型式的结构中混凝土应力越高,抗剪强度和拉应力变得越关键。这需要较好质量的混凝土和特别是层间坚固的粘结。至今碾压混凝土坝层间坚固粘结总是不易获得。我们的观点将得出含有较高胶凝材料用量和较高的质量和较好级配的拌和物。然而,为了不引入因水化热增高升温问题,增加的胶凝材料必需是粉磨粉煤灰(PFA)或磨细粒状高炉矿渣(MGBS),我们认为这些材料应占这些拌和物胶凝材料用量的50%~80%。

碾压混凝土重力拱坝和拱坝将不分缝,任何缝都应全部灌浆以保证拱作用的连续性,因此裂缝应维持到最少或是可能完全消除是重要的。这必需特别注意配合比设计和施工多半限制在一年较冷月份施工,和(或)利用冷却剂生产较低浇筑温度的混凝土。另外,要求设计应注意配合和方便碾压混凝土施工方法和碾压混凝土浇筑特色,这将要最确切地指定断面宽度和形状,特别是双曲拱坝。我们重视这种坝型碾压混凝土将限于较厚断面的拱坝和特别适用于较宽峡谷的高拱坝。我们考虑莫海尔坝和马赛坝,提议的两座坝是如上所述的位于莱哨朱高地水利工程,是宽峡谷中的高坝和有坚固的基础。

3. 原材料和混凝土

自从我们首次开始试验碾压混凝土浇筑技术时,我们就坚决主张必须精心控制质量和

材料级配。这样做的目的是保证能够执行混凝土拌和物的正确质量控制和能够获得均匀的生产。

德米斯特克拉尔和扎豪克两座坝的粗骨料由轧碎的辉绿岩组成，粒径分级为4.75~19.0mm、19.0~37.5mm和37.5~75mm，每一级内的级配按常规大体积混凝土的规定。两座坝的细骨料由人工砂和天然砂混合组成，以获得要求的级配，它依次来保证最好的和易性。

德米斯特克拉尔坝碾压混凝土胶凝材料是50:50的普通波特兰水泥（OPC）和粉磨粉煤灰（PFA）混合；扎豪克坝是30:70的普通波特兰水泥（OPC）和磨细粒状高炉矿渣（MGBS）混合。两座坝总胶凝材料用量都是 116kg/m^3 。当实践中比较拌和物时，明显的差别是用于德米斯特克拉尔坝的拌和物有较好的和易性。应该指出，虽然用于扎豪克坝的细天然砂级配不如德米斯特克拉尔坝用的天然砂好，最大的改善和易性应归功于粉磨粉煤灰（PFA）。用两种拌和物有一种倾向是较大粗骨料粒径趋向于分离，特别注意摊铺工艺使较大骨料重新混合到拌和物中。

克鲁哥公园堰粗骨料最大粒径限制到37.5mm，这是从附近商业轧石厂能够使用的最大骨料粒径和对使用的机械设备和工程规模也是适宜的粒径尺寸。

施工工艺也缩小为小容量的拌和、浇筑和碾压设备。这需要更好和易性的拌和物，随同用较小的骨料而导致较高的胶凝材料用量。决定采用30:70（OPE:PFA）的胶凝材料混合和总胶凝材料用量增加到 160kg/m^3 。

在碾压混凝土配合比设计中用以下参数进行控制：

1）规定强度是28d龄期10MPa。这个强度是实际要求的强度和建筑物估计承受荷载龄期重新考虑的结果。这个重新考虑在配合比设计中总胶凝材料用量的降低提供了一个目标。

2）德米斯特克拉尔坝和扎豪克坝是位于水源不足地区，在该地区的坝是不允许漏水的。因此，拌和物必须设计成不透水的碾压混凝土和特别要保证层间良好粘结。

3）对在碾压混凝土部位内设横缝或诱导缝无条文规定，虽然在扎豪克坝以试验为目的引入一些诱导缝。我们的论点主要是混凝土必须有足够的强度抵抗预期的干缩开裂。这个问题是用胶凝材料用量和粗骨料用量的平衡来解决。

4）在常规大体积混凝土中，如果大体积内外温差超过 $15\sim 20^\circ\text{C}$ 将出现裂缝通常是被人们所接受的。因此维持碾压混凝土最小温升是重要的。这种情况需要降低总胶凝材料用量或需要合适品种或需要生产最可能低的水化热胶凝材料的混合物。

以一种尝试设计的拌和物满足上述条件列于表1。为比较常规混凝土和碾压混凝土，我们的布拉姆罗本海梅尔坝试验段采用的配合比也列于表1中。

在德米斯特克拉尔和扎豪克两座坝配合比设计中，我们试图将尽可能多的粗骨料加入到拌和物中。与布拉姆罗本海梅尔坝试验配合比比较，降低了总胶凝材料用量。这是可能的的主要由于降低可容许的强度要求。不打算将总胶凝材料用量降低到低于 100kg/m^3 ，因为不能获得碾压混凝土层间足够粘结的可能性；也曾在试验室测定过降到 100kg/m^3 以下会损害和易性和导致水与胶凝材料之比超过1.0。

表 1

常规混凝土和碾压混凝土

项 目	常规大体积混凝土		碾 压 混 凝 土		
	外 部	心 部	布拉姆罗本 海梅尔坝	扎豪克坝	德米斯特 克拉尔坝
水/胶凝材料	0.52	0.62	0.65	0.89	0.86
用水量(l/m^3)	136	131	99	106	100
总胶凝材料用量(kg/m^3)	262	212	153	120	116
OPC/MGBS	40:60	30:70	30:70	30:70	
OPC/PFA					50:50
砂用量(kg/m^3)	631	690	714	640	735
天然砂/人工砂	85:15	50:50	50:50	85:15	40:60
各级粗骨料用量(kg/m^3)					
37.5~75.0mm	636	744	801	840	805
19.0~37.5mm	515	496	534	530	537
4.75~19.0mm	343	322	347	365	389
粗骨料用量(kg/m^3)	1489	1562	1682	1735	1731
粗骨料(绝对体积,%)	52	53	57	60	59
胶凝材料(体积计,%)	10.4	8.2	5.8	4.6	4.5
砂/粗骨料(体积计)	0.42	0.44	0.42	0.37	0.43
砂浆/粗骨料(体积计)	0.60	0.58	0.52	0.44	0.49

注 OPC——普通波特兰水泥；MGBS——磨细粒状高炉矿渣；PFA——粉磨粉煤灰。

相当低的碾压混凝土用水量使施工期间质量控制困难。由于拌和物干硬，坍落度试验是不实用的，维勃（Vebe）稠度仪实质上是唯一的可用于监测碾压混凝土拌和物的仪器。不同学者曾提出改良维勃仪报告以效仿振实效应传入碾压混凝土为目标。所有这些方法共同点基本上是一个能使施工人员相当容易地操作和易性试验的步骤。试验无论怎样发展，主要目的必须是对现场人员能够由现场实验室的试验结果与坝体上实际发生的情况有相互关系。

德米斯特克拉尔坝和扎豪克坝采用的试验步骤如下：

1) 将碾压混凝土拌和物装入标准圆柱体容器填到漫边。

2) 塑料圆盘置于碾压混凝土表面和圆柱体振动直到圆盘整个下面都能看到砂浆为止，测定出现这种情形的时间（以秒计），与在实验室确定拌和物的最优时间范围比较。

为检测硬化混凝土的质量定期成型规定数量的300mm立方体试件。象做维勃试验那样，振实立方体试件受拌和物稠度妨碍，但是一个十分有效的振实方法是用冲击锤。为了得到立方体容重与坝体中碾压混凝土容重相同量级，坝体中湿碾压混凝土容重用核子密度计测定，并且与从试验堤钻取芯样的平均容重一起用来控制立方体的振实。

或许是对碾压混凝土最重要的质量检测是从浇筑后的碾压混凝土钻取芯样。在德米斯特克拉尔坝和扎豪克坝坝基2m的碾压混凝土龄期达到28d时立即钻取芯样。较早龄期钻

取芯样是尝试,但是由于初期强度低证明是不能满意的。在碾压混凝土浇筑完成进行了全比尺芯样钻取计划。

立方体和芯样试验结果分别列于表 2 和表 3。

表 2 芯 样 性 能

坝 名	胶凝材料比	龄 期 (d)	容 重 (kg/m ³)	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	渗透性 (m/s)
扎豪克坝	(OPC:MGBS) 30:70	50	2650	20	2.6	2.2×10^{-9}
德米斯特克拉尔坝	(OPC:PFA) 50:50	50	2700	21	3.3	6.2×10^{-8}

表 3 立方体试件的性能

坝 名	龄 期 (d)	容 重 (kg/m ³)	抗压强度 (MPa)
扎豪克坝	28	2650	14
德米斯特克拉尔坝	28	2750	10.2

在两座坝内埋设了温度测量装置。

从两座坝获得的抗压强度比较并表明,只是从强度的观点对将来的工程可以预计进一步降低碾压混凝土拌和物总胶凝材料用量。然而灰浆需要量对层间足够的粘结和灰浆减少对和易性的影响以及分离问题也必须考虑。抗拉强度大小预计与抗压强度有关。

在两座坝上获得相当高的容重,大约2600kg/m³以上。这归属于两座坝使用的辉绿岩粗骨料有2.95数量级较高的比重测值。然而有一个提示,碾压混凝土工艺传播较高的振实效应,比常规混凝土浇筑将产生较高的容重,这将导致重力结构的经济断面。

当与常规大体积混凝土比较时渗透率稍高,但是从土石坝的不透水区设想是属于同一量级。德米斯特克拉尔坝碾压混凝土的渗透率一般高于扎豪克坝。这有点令人失望,因为粉磨粉煤灰(PFA)的比重比磨细粒状高炉矿渣低和较大的胶凝材料体积用于PFA拌和物。因此预计空隙填充度较大,所以渗透率低。

关于不透水性,以下事实加以考虑是重要的。在坝体遭受侵蚀水的地方,有一个可能性是混凝土由于胶凝材料的胶结剂受侵蚀而破坏。当打算进一步降低胶凝材料用量时,对这一点应着重考虑。

就降低水化热产生的大体积温升而言,碾压混凝土拌和物表现了明显的改进而超过了常规大体积混凝土拌和物。德米斯特克拉尔坝温升决不会超过8℃,图5表示了这个坝的一个典型温度记录。

在克鲁哥公园堰我们的小型碾压混凝土施工试验的结果是十分值得注意的。从建筑物上钻取混凝土芯样的平均容重是 2426kg/m^3 ，较低的容量预计是由于使用较小的骨料之

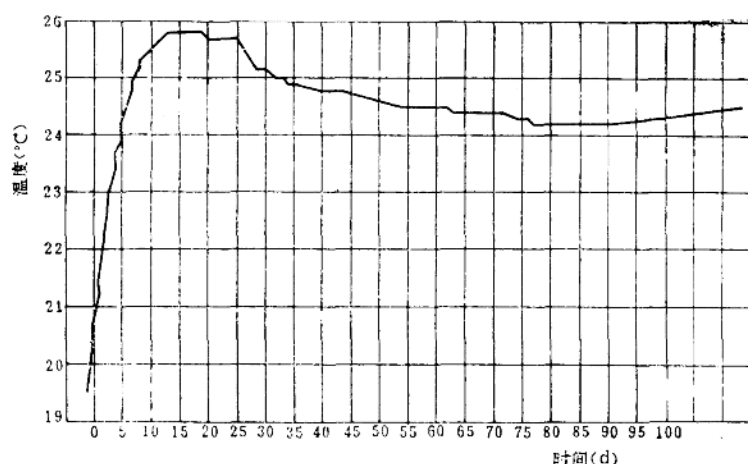


图 5 德米斯特克拉尔坝观测的混凝土温度

故，然而，50d龄期强度，平均值为 29.9MPa ，均方差为 6.9MPa 。碾压混凝土渗透率平均为 $9.6 \times 10^{-10}\text{m/s}$ ，比德米斯特克拉尔坝和扎豪克坝测得值都好（表2）。

在原材料和混凝土方面目前我们是向着高质量碾压混凝土生产的目标，并将其用于重力拱坝和拱坝的观点。这其中包括，产生低水化热的混凝土配合比设计和有较高的徐变能力以及徐变在减小混凝土开裂影响趋向的研究。

4. 施 工

碾压混凝土坝施工是特种后勤训练，人员编制、材料和机械是实施成功的关键。进度是快的，如果要获得施工方法的全部效益的话，每一件事必须在准确的时间准确的就位。任何混凝土施工，原材料的准备计划、配料、拌和、运输、模板和劳力承担了主要角色，但是常态混凝土如果这些工序中有一项中断，一般有时间去纠正，而碾压混凝土的施工是一个连续的施工过程，一个工序中断意味着整个施工过程中断。

搅拌站的布置要有充足的骨料储存空间和胶凝材料罐，这是很重要的。浇筑速度和空间利用率将确定堆料场的规模和罐的容量，但是一般地说需要定期更换这些材料，这个管理机构的可靠性是运行成功的根本。

拌和物从搅拌机转运到浇筑仓面，用汽车、带式输送系统或其他方法需要慎重的考虑，必须与坝体上的浇筑和振实机械相配合。德米斯特克拉尔坝，运送拌和物上浇筑面采用卡车，高程以每周 6m 的速率上升。用汽车直接上坝要特别注意通道的路线布置。扎豪克坝，拌和物由带式输送系统喂料给仓面上的卡车，因为卡车不离开工作面，所以免除卡车轮胎对工作面的污染，这种施工方法证明是非常有效的。

搅拌碾压混凝土的最好设备无疑是连续式搅拌厂并随工程的规模而定,容量为200~500m³/h是对中型坝而言。德米斯特克拉尔坝和扎豪克坝搅拌厂容量分别为160m³/h和120m³/h,但是分离式鼓筒型搅拌机定额是对普通有坍落度的拌和物,对碾压混凝土要求干硬无坍落度的拌和物搅拌时间大约增加50%和容量降到定额的2/3。外部混凝土在较小的设备配料和喂料给机动搅拌车转运到浇筑仓面。

我们第一次施工的碾压混凝土是布拉姆罗本海梅尔坝试验段,在那里采用预制墙板为模板。虽然这种方法是成功的,我们认为预制墙板有它的局限性和从审美角度或是坝施工的其他方面考虑不是完全适合的。德米斯特克拉尔坝和扎豪克坝我们选择常用的或特制的模板。

扎豪克坝上游面采用常用的由2.4×2.5m钢镶板组成的模板。德米斯特克拉尔坝上游模板是在现场采用新方法由50×250mm木横梁组成用槽钢和角钢连接和定位;横梁锚固到碾压混凝土中用普通钢丝扎在混凝土锚固块上。这种方法的优点是模板脱模和重新安装速度快,能够容易地手工操作——不需要起重机;脱模后的表面离要求差些,在通常坝的隐蔽的上游面还是可以接受,但是这个方法能够修改成产生完全容许的表面。两座坝的下游面采用L型模板以形成台阶,模板在德米斯特克拉尔坝继续使用中得到完善。在那里1m长模板分成4段(各250mm),允许靠底部3段脱掉上升方向的顶段用锚固螺栓保留,这样当模板重新安装时防止碾压混凝土顶部250mm层的任何下陷。

我们浇筑碾压混凝土的方法如下。在岩石地基或过去已浇过的混凝土上首先将75mm厚垫层拌和物铺盖在工作面上。该层混凝土为和易性非常好的最大骨料粒径为37.5mm的常规混凝土。接着摊铺剔除大于37.5mm粒径骨料的碾压混凝土。随后卸下的是正常碾压混凝土,倾倒在推进面后约1.5m和推平盖过边棱。继续摊铺造成约300mm厚平坦的无碾压实层。当完成大约5m宽和30~50m长的条带时,开始碾压和摊铺移到临界的区带。碾压用7.5t自进式振动碾,开始时无振碾压一遍,再有振3~4遍,直到用核子密度计测定得到满意的振实度。碾压层的最终厚度大约250mm。随后铺碾压混凝土层不再用垫层拌和物,多长时间碾压混凝土层而不允许再铺料。如果温度时间因素以摄氏度小时表示不超过250,在这种情况下允许铺料。此温度是指老层振实的时间和新层浇筑的时间之间最高周围空气温度,在南非常用暴露时间不大于6h或7h;我们允许最大为20h。暴露时间继续延长和接受层面允许铺料,则需要将这层表面刷掉和铺垫层拌和物重新开始碾压混凝土浇筑循环。

廊道是碾压混凝土麻烦的事——廊道是进出的通道,但是在混凝土坝中担负着灌浆、排水和检测多种任务,因此必须设法使其在碾压混凝土坝中形成。它可以用常规混凝土修筑,我们在布拉姆罗本海梅尔坝和德米斯特克拉尔坝是这样做的。扎豪克坝廊道在碾压混凝土层内用铺筑无胶结的骨料形成,事后挖出这些无胶结骨料以形成廊道。挖出工作,实践证明是一项劳动强度很高的作业,且这样形成的廊道有一个非常粗糙的饰面和离要求相差太多——我们认为不是一种满意的方法。

5. 结 论

紧接着布拉姆罗本海梅尔坝试验段的成功试验, 水务局修建了两座碾压混凝土重力坝: 德米斯特克拉尔坝和扎豪克坝。从目前这些主要建成的工程中学习得到很多经验。

在布拉姆罗本海梅尔坝我们采用了预制墙板形成坝面和发现预制墙板有局限性——从美学和其他方面对大型坝施工不完全适用。德米斯特克拉尔坝和扎豪克坝有台阶的下游面采用了常用的悬臂模板和这个方法在德米斯特克拉尔坝继续浇筑中得到完善。普通模板用于扎豪克坝上游面; 德米斯特克拉尔坝成功地采用了室内制做 $50 \times 250\text{mm}$ 木横梁、槽钢和角钢的改革模板, 能够用人工操作的这种方法表明修改后是有前途的, 它能够产生一个完全容许的外表饰面。我们曾考虑采用滑动模板联锁成面方法, 可以用于形成垂直、斜坡和台阶的表面, 但是发现这种模板对大型坝似乎是合适的方法, 而对至今我们修建的中型碾压混凝土坝不是一个经济的方案。

在一个环境保护区的堰, 我们采用非模板形成坝面, 包括一个台阶的下游面, 一个小型碾压混凝土施工, 建成了一个自然观赏建筑物, 满足了严格的环境要求。在这个建筑物上的台阶型溢流坝坝面是非常有效的消能工。

廊道, 虽然是碾压混凝土施工的麻烦事, 但是它担负重要任务, 关系到灌浆、排水和检查, 因此应该规定在坝内的廊道要合并。我们曾用常规混凝土和无胶结骨料做成廊道, 但是我们确信会有更好的方法, 可能是用预制墙板。

从德米斯特克拉尔坝和扎豪克坝我们的经验表明仍有几个实际问题要在未来的工程上进行工作。主要问题是骨料粒径越大趋向于越分离, 这个问题妨碍施工, 反过来影响碾压混凝土质量和建筑物的均匀性。为了抵销这个影响, 降低最大骨料粒径到 60mm 或甚至 53mm 有明显优点。然而这样降低将增加拌和物中细骨料用量, 因此也增加胶凝材料用量。为了不超过大体积温升 10°C 的限制, 拌和物中混合材料的百分率可以增加, 这样还会得到降低渗透率额外的好处。

所有用过的碾压混凝土拌和物有一个宽的范围, 拌和物和施工工艺受到坝址特征的制约和工程的需要——碾压混凝土有现场特点。

我们认为碾压混凝土适用于大量混凝土浇筑和特别适于快速浇筑, 应该指出格框式加固模板能够容易地组合。在水利工程中——灌渠、陡槽、河渡口、隧洞泄洪和保护工程应维护——甚至对土石坝的保护。

到现在我们正完成另一座碾压混凝土重力坝的设计——莱格斯委德坝和正设计两座碾压混凝土重力拱坝——布涅布特坝和俄尔威坦斯坝。碾压混凝土坝的最终目标将是双曲拱坝, 我们认为技术上已经成熟。这种坝型将特别适合于宽峡谷中的高坝。

参考文献(略)

(姜福田 译)

澳大利亚碾压混凝土坝的发展 和试验*(澳大利亚)

[澳大利亚] B·A·FORBES

1. 前言

本文论述碾压混凝土(RCC)配合比设计和施工质量控制。以澳大利亚初期建设3个碾压混凝土建筑物进行的工作为基础,即铜田(Copperfield)坝、克莱布尼(Craigburne)坝和布卡(Bucca)堰。

铜田坝于1984年9月建成。大坝有14万 m^3 碾压混凝土,设计和施工用了10个月。该坝为中北昆斯兰德(Central north Queensland)省的遥远地区一个新矿供水。克莱布尼坝位于泰斯曼尼(Tasmania)省。该坝有2.2万 m^3 碾压混凝土,为灌溉提供用水,1986年8月建成。布卡堰有2.4万 m^3 碾压混凝土,建设该堰是为了扩大中昆斯兰德省沿海地区已有的灌溉,工程于1987年3月按期完成。图1是三个工程的地理位置图。

每个工程开工前着手进行了详细的配合比设计以确定最优碾压混凝土拌和物。施工期

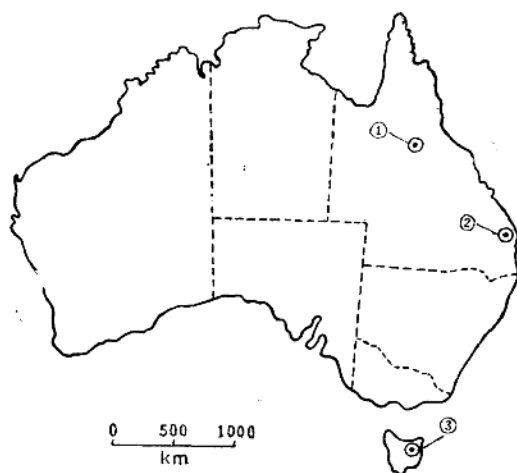


图1 三个工程位置图
①—铜田坝, ②—克莱布尼坝, ③—布卡堰

* 第62届报告6(Q.62-R.6)。

间建立现场实验室以监测和控制搅拌和压实工序中的碾压混凝土质量。每一个工程试验采用的方法和技术有所发展和改进。本文将介绍和提出试验结果。

2. 坝 的 描 述

2.1 铜田坝

铜田坝的设计、施工和运行曾在其他文章中介绍过。它是一个重力坝，主溢洪道为坝体中间的溢流坝段（图 2）。穿过坝上游鞍形地形布置一个自溃堤以满足 500 年一遇的洪水。

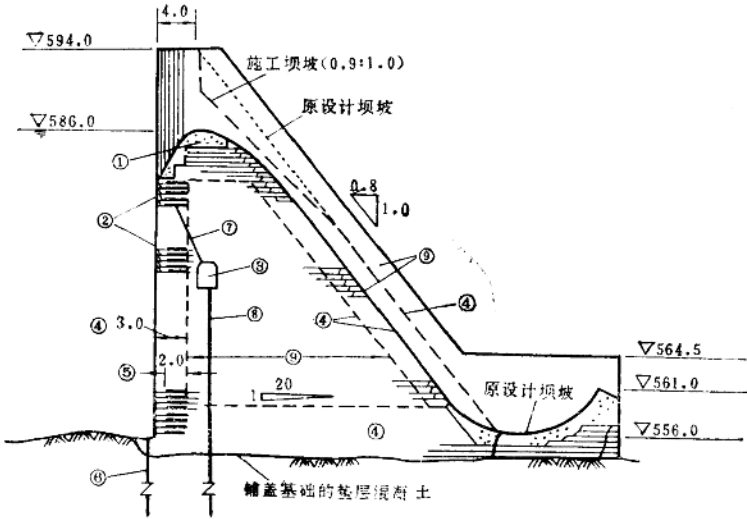


图 2 铜田坝的溢流坝段

- ①—常规混凝土坝顶；②—常规混凝土面；③—排水廊道；④—碾压混凝土外部拌合物 110+0；
⑤—碾压混凝土层间垫层混凝土；⑥—灌浆帷幕；⑦—排水孔；⑧—碾压混凝土心部拌合物 80+30；
⑨—常规混凝土溢流坝段衬砌

坝的主要指标为：

最大高度	40m
坝顶全长	340m
库容	$20.6 \times 10^6 \text{ m}^3$
主溢流坝段顶长	100m
总超高	8 m
主溢流坝段容量	$4700 \text{ m}^3/\text{s}$
自溃堤容量	$3800 \text{ m}^3/\text{s}$
碾压混凝土体积	140000 m^3
常规混凝土体积	16800 m^3

坝上游面垂直和直接靠着普通墙板式模板浇筑碾压混凝土。模板固定靠钢竖桩就位用连杆锚固返回下层碾压混凝土。为提供一个较耐久的“表皮”和改善碾压混凝土沿模板分离，在摊铺碾压混凝土前直接靠着模板浇筑常规混凝土楔。混凝土楔永远不能浇筑高到盖过碾压混凝土浇筑层层厚300mm，从而碾压混凝土盖在浇筑层上部。虽然表面上有分离，在上游面100~150mm多范围内的碾压混凝土变得很密实。

坝下游面设计成0.8(水平):1.0(垂直)坡度。除溢流坝部分外坝坡面不用模板。施工期间保持设计坝坡遇到困难，主要是碾压混凝土骨料的休止角，这些骨料由圆形天然河卵石加工的，比设计时预计轧制(有棱角的)骨料含量要少。因此，大约从坝的中间高度重新设计坡度和变缓到0.9:1.0，坡面以上4m用模板垂直浇筑。

溢流坝段包括堰奇型堰顶、直线斜槽、跨在下游坝面上的导墙和挑流鼻坎，全部用常规混凝土浇筑。600mm厚的斜槽和导墙面部混凝土随碾压混凝土同时浇筑。向搅拌机内的无坍落度混凝土掺加高效减水剂，在碾压混凝土前浇筑和内部振实混凝土是可能的，因此，碾压混凝土靠着面层混凝土浇筑后，交界面的振实用振实碾压混凝土的10t和15t光面滚筒振动碾振实。用这种方法两种材料之间能紧密粘结，取消了锚固和加筋要求。溢洪道面部混凝土用300mm高自升式钢模板浇筑，100m长的斜坡模板再分成10m一段。每一段模板支撑靠拔出预埋在前3层浇筑层内擦过油的管子。由聚丙烯纤维缠成编织物的排水条带埋入面部的上游碾压混凝土层间。这些排水条带引向拔出管留下的孔洞，因此提供任何通过碾压混凝土渗漏的排水系统。

坝按常规重力建筑物设计。与溢流坝段结合部分减轻浮托力是必要的。排水廊道用开挖出的砂和无水泥的碾压混凝土骨料随着碾压混凝土同时铺筑。过36h排水孔从廊道底板钻取通过碾压混凝土到地基岩石(花岗石)，碾压混凝土浇筑同时继续下去。上部排水孔从堰顶一直钻到廊道。地基灌浆在钻取排水孔前进行。作为坝体一部分沿上游坝趾修建碾压混凝土底座用来地基灌浆。坝施工能接着进行不妨碍灌浆程序。图3为建成的铜田坝。



图3 1984年9月建成的铜田坝

采用两种碾压混凝土拌和物，内部拌和物有 80kg/m^3 低热水泥和 30kg/m^3 粉煤灰（ $80+30$ ），而坝的外部为（ $110+0$ ）。混凝土拌和用拌土机（Pugmill）和90d龄期目标（平均）抗压强度是 15MPa 。碾压层厚是 300mm 。用“层/天数”控制，以限制发热量；用层间最大间隔时间控制，以保证碾压混凝土浇筑层间产生粘结。河卵石加工成良好级配的骨料，最大骨料粒径 50mm 含有大约 8% 小于 $75\mu\text{m}$ 的微粒（图4）。用（ $71+0$ ）拌和物浇筑在自溃堤底槛试验段的碾压混凝土浇筑层间进行了沿缝大比尺剪切试验。在最好的情况，连续浇筑层间间隔只有 $3\sim 4\text{h}$ ，试验结果表明粘聚力是不能依赖的。然而内摩擦角测得是很稳定的。

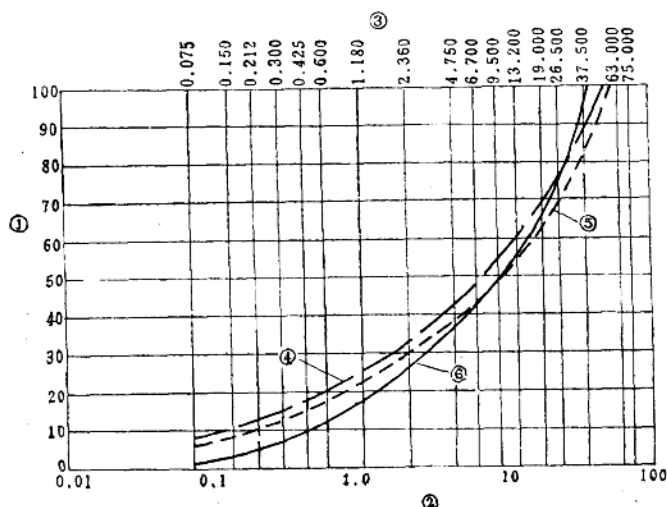


图4 碾压混凝土骨料的颗粒分布
①—通过筛百分率；②—粒径（mm）；③—澳大利亚标准筛；
④—铜田坝；⑤—克莱布尼坝；⑥—卡布坝

将碾压混凝土铺到厚 40mm 、宽 2m 常规混凝土“垫层”上使碾压混凝土层间渗漏减少到最低程度，垫层浇筑到每层之间并距上游面 1m 。

除3条垂直横缝外坝是连续的。3条横缝设在溢流坝段两端和1条在基础上出现重要垂直变化的地方。在坝的上游面止水穿过横缝布置，止水埋设在常规混凝土中。在碾压前将塑料（PVC）薄片垂直地放置在碾压混凝土中打断碾压混凝土形成横缝。

坝建成后4个月蓄水到距满库高程低 3m 。测量总渗漏量为 24l/s 。4个月以内通过碾压混凝土自身愈合，渗漏量已经降到 10l/s 。冬季中期，坝几乎是沿着溢流坝段中间发生一条垂直横向裂缝。结果渗漏量增加到 16l/s 。自身愈合继续进行和18个月后，坝蓄水比满库高程低 1.5m ，渗漏量下降到 5.5l/s 。

2.2 克莱布尼坝

克莱布尼坝的设计和施工也曾其他论文做过详细介绍。该坝与铜田坝相似，是常规重力建筑物（图5）。