

文章编号:0559-9342(2003)04-0063-04

# 我国水利水电工程土石方 施工技术综述

梅锦煜, 郑桂斌

(中国安能建设总公司, 北京 100055)

**关键词:** 水利水电工程; 土石方; 施工技术

**摘要:** 随着我国水利水电科技的巨大进步, 土石方工程施工技术得到了快速发展, 在施工规模、施工机械化水平、施工强度等诸方面都与当前国际水平基本同步; 在应对地形险峻、地质复杂、施工要求高的工程中也取得了令人瞩目的成就。

**Summary on the earth-rock engineering construction techniques for hydro-engineering projects in China**

MEI Jin-yu, ZHENG Gui-bin

(China Anneng Construction Corporation, Beijing 10005)

**Key Words:** hydro-engineering project, earth-rock engineering, construction techniques

**Abstract:** With the huge progress of science and technology for hydropower engineering in our country, the construction techniques of earthwork and rockwork have been developed in high speed. Many respects such as construction scale, level of mechanized construction and construction intensity have been reached the international level. The satisfactory achievements have been acquired in the projects with precipitous topography, complex geological conditions, high construction requirements.

**中图分类号:** TV52      **文献标识码:** B

土石方工程施工是水利水电工程施工的重要组成部分。我国自 20 世纪 50 年代开始逐步实施机械化施工, 至 80 年代以后, 土石方工程施工得到快速发展, 在工程规模、机械化水平、施工技术等各方面取得了很大的成就, 解决了一系列复杂地质、地形条件下的施工难题, 如深厚覆盖层的坝基处理、筑坝材料、坝体填筑、混凝土面板防裂、沥青混凝土防渗等施工技术问题; 其中在工程爆破技术、土石方工程机械化施工等方面已处于国际先进水平。

## 1 工程爆破技术

炸药与起爆器材的日益更新, 施工机械化水平的不断提高, 为爆破技术的发展创造了重要条件。多年来, 爆破施工从手风钻为主发展到潜孔钻, 并由低风压向中高风压发展, 为加大钻孔直径和速度创造了条件; 引进的液压钻机, 进一步提高了钻孔效率和精度; 多臂钻机及反井钻机的采用, 使地下工程的钻孔爆破进入了新阶段。近年来, 引进开发混装

炸药车, 实现了现场连续式自动化合成炸药生产工艺和装药机械化, 进一步稳定了产品质量, 改善了生产条件, 提高了装药水平和爆破效果。如三峡永久船闸 170 m 高边坡开挖中, 船闸直立边坡最高为 68.5 m, 采取新的爆破技术成功地满足了爆破对岩体影响、开挖精度等特殊要求。葛洲坝大江上游围堰混凝土防渗墙水下爆破拆除, 采用复式交叉连接的非电起爆网络, 3 548 个炮孔分为 324 段, 总延时 8.1 s, 总装药 47.70 t 一次起爆。三峡二期工程大江围堰拆除时, 对埋有灌浆钢管的厚 80 cm 的混凝土防渗墙实施爆破拆除, 其中上横围堰, 长 623 m, 总装药 16.2 t, 分为 423 段, 总延时 17.8 s—

收稿日期: 2003-01-26

作者简介: 梅锦煜(1945—), 男, 江苏张家港人, 教授级高工, 中国安能建设总公司总工程师, 主要从事水电工程施工和管理; 郑桂斌(1963—), 男, 福建福州人, 高级工程师, 主要从事水电工程施工和管理。

次爆破;下横围堰长 980 m,总装药 91.5 t,分为 327 段,总延时 9.5 s,一次起爆。广东珠海炮台山移山填海洞室大爆破,总装药量 1.2 万 t,爆破总量达 1 085 万 m<sup>3</sup>。此外深孔梯段爆破、洞室爆破开采坝体堆石料技术也日臻完善,既满足了坝料的级配要求,又加快了坝料的开挖速度。

## 2 土石方明挖

凿岩机具和爆破器材的创新,极大地促进了梯段爆破及控制爆破技术的进步,使原有的微差爆破、预裂爆破、光面爆破等技术更趋完善;施工机具的大型化、系统化、自动化使得施工工艺、施工方法取得重大变革。统计已建和在建的 51 座大型水电站(≥250 MW),各种土石方开挖约 4.45 亿 m<sup>3</sup>,其中开挖量在 500 万 m<sup>3</sup> 以上的有 23 座,在 1 000 万 m<sup>3</sup> 以上的有 7 座(参见表 1)。长江三峡工程土石方开挖量逾 12 145 万 m<sup>3</sup>,年开挖最高强度达到 4 400 万 m<sup>3</sup>,居当前世界首位。

表 1 已建和在建大型水电工程主体土石方开挖一览

序号	工程名称	坝高 /m	开挖量 /万 m <sup>3</sup>	年强度 /万 m <sup>3</sup>	开工时间
1	新安江	105	586		1957
2	刘家峡	147	811	110	1958
3	青铜峡	42.7	692		1958
4	碧口	101.8	531		1969
5	葛洲坝	53.8	7 464	1 259	1971
6	白山	149.5	501		1975
7	大化	78.5	747		1975
8	安康	147	793	83	1978
9	潘家口	107.5	539	78	1975
10	天生桥二级	58.7	546	180	1982
11	岩滩	110	1 058		1985
12	五强溪	87.5	555		1986
13	隔河岩	151	588		1987
14	水口	101	879		1987
15	李家峡	165	575	178	1988
16	天生桥一级	178	2 116	408	1991
17	二滩	240	814	370	1991
18	莲花	71.8	624	350	1992
19	三峡	183	12 145	4 400	1994
20	小浪底	154	3 625	1 440	1994
21	洪家渡	179.5	560		1999
22	龙滩	216.5	1 775		2001
23	水布垭	233	1 208		2001

(1)施工机械。我国土石方明挖施工机械化起步较晚,解放初期兴建的一些大型水电站除黄河三门峡工程外,都经历了从半机械化逐步向机械化施工发展的过程。直到 60 年代末,土石方开挖才形成低水平的机械化施工能力。主要设备为:手风钻、1~3 m<sup>3</sup> 斗容的挖掘机和 5~12t 的自卸汽车。在此阶段主要依靠进口设备,可供选择的机械类型很少,谈不上选型配套。70 年代后期,施工机械化得到迅速的发展,在 80 年代中期以后发展尤为迅速。常用的机械设备有:钻孔机械、挖装机械、运输机械和辅助机械等四大类,形成配套的开挖设备。

(2)控制爆破技术。基岩保护层原为分层开挖,经多个工程试验研究和推广应用,发展到水平预裂(或光面)爆破法和孔底设柔性垫层的小梯段爆破法一次爆破,确保了开挖质量,加快了施工进度。特殊部位的控制爆破技术解决了在新浇混凝土结构、基岩灌浆区、锚喷支护区附近进行开挖爆破的难题。

(3)高陡边坡开挖。近年来开工兴建的大型水电站开挖的高陡边坡较多,100 m 以上的高边坡有 10 多座,最大边坡高度已达 380 m。尤为突出的是长江三峡工程双线永久船闸闸室直立墙高 68.5 m,中间保留有岩石隔墩,既要保证开挖精度,又要确保边坡稳定,对开挖技术提出了极高的要求。

(4)土石方平衡。大型水电工程施工中,十分重视开挖料利用,力求挖填平衡。开挖料用作坝(堰)体填筑料、截流用料和加工制作混凝土砂石骨料等。如长江三峡工程利用开挖料进行大江截流、围堰填筑和人工骨料等;葛洲坝工程开挖土石方 7464 万 m<sup>3</sup>,用于工程填筑、混凝土砂石骨料、填筑滩地等,其开挖料总利用率达 93%;天生桥一级面板堆石坝利用溢洪道开挖料 1400 万 m<sup>3</sup> 作为坝体填筑料,占总填筑量的 75%。

## 3 高边坡加固技术

我国正在建设和即将建设的一批大型骨干水电站,如三峡、龙滩、洪家渡、李家峡、小湾、拉西瓦和锦屏等工程都存在着严重的高边坡稳定问题。其中三峡工程库区中存在十几处近亿立方米的滑坡体,拉西瓦水电站下游左岸存在着高达 700 m<sup>3</sup> 的巨型潜在不稳定山体,龙滩水电站左岸存在总方量 1 000 万 m<sup>3</sup> 的倾倒蠕变体等。这些工程的规模和所包含的技术难度都是空前的。表 2 为部分工程的高边坡治理情况,高边坡常用的处理方法有抗滑结构、锚固以及减载、排水等综合措施。

表 2 部分高边坡治理一览

序号	工程名称	高度/m	治理手段
1	天生桥二级厂房边坡	380	减载、表面排水、抗滑桩、排水洞、预应力锚索(杆)、护坡
2	洪家渡左岸边坡	330	喷护、挂网、锚杆、回填混凝土、固结灌浆
3	三峡船闸工程边坡	170	锚杆、预应力锚索、挂网、喷混凝土、排水洞、排水孔
4	安康坝区边坡	200	抗滑桩、锚固洞、钢筋桩、排水洞、预应力锚索
5	小浪底工程出口边坡	70	排水廊道、预应力锚索、抗滑桩
6	漫湾水电站左岸高边坡	131	抗滑桩、锚固洞、预应力锚索、喷护、排水、混凝土挡墙

### 3.1 混凝土抗滑结构

(1)抗滑桩。抗滑桩能有效而经济地治理滑坡,尤其是滑动面倾角较缓时,效果更好。如天生桥二级水电站因施工诱发厂房顶部总滑动量约 140 万 m<sup>3</sup> 的大型滑坡体。在 18 根抗滑桩(3 m×4 m,桩深 25~39 m)全部建成后,可以承受滑

坡体总滑动推力 218 280 kN,起到了有效的阻滑作用。

(2)沉井。沉井在滑坡工程中既起抗滑桩的作用,有时也具备挡土墙的作用。天生桥二级水电站首部枢纽左坝肩下游边坡采用“田”字形沉井,沉井深 11 m。

(3)挡墙。混凝土挡墙能有效地从局部改变滑坡体的受力平衡,阻止滑坡体变形的延展。在漫湾水电站边坡工程中采取了混凝土挡墙、浆砌石挡墙、混凝土防掏槽等措施综合治理措施。

(4)锚固洞。漫湾水电站边坡工程,在左岸边坡滑坡以前,已完成 2 m × 2 m 断面锚固洞 18 个,每个洞可承受剪力 9 000 kN,滑坡后,各种不同断面的锚固洞增加到 64 个,形成较大的抗剪力。

(5)框架、喷护。混凝土框架对滑坡体表层坡体起保护作用并增强坡体的整体性,防止地表水渗入和坡体的风化。框架护坡具有结构物轻、用料省、施工方便、适用面广、便于排水等优点,并可与其他措施结合使用。另外,耕植草本植被也是治理永久边坡的常用措施。

### 3.2 锚固技术

预应力锚索具有不破坏岩体结构、施工灵活、速度快、干扰小、受力可靠、主动承载等优点,在边坡治理中大量应用。在小浪底工程中大规模采用可以重复张拉的无粘结锚索;在三峡永久船闸工程南北坡直立墙和中隔墩闸首及上下相邻段,设置了无粘结和有粘结两种形式的对穿锚束。

大吨位岩体预应力锚固吨位已提高到 6 167 kN,张拉设备出力提高到 6 000 kN,锚索长度达到 61.6 m,可加固坝体、坝基、岩体边坡、地下洞室围岩等,达到了国际先进水平。如漫湾、铜街子、丰满水电站等均采用了大吨位锚索。

预应力锚杆及高强锚杆也是常见的一种加固形式。如天生桥二级水电站厂房高边坡工程中实施了减载、排水、抗滑桩等技术后,滑坡位移速度虽有明显减小,但未能完全停止,为了确保雨季在滑坡体前方的施工安全,稳定抗滑桩至滑坡体前缘的 20~40 m 长、10 余万 m<sup>3</sup> 的滑坡体,设置了 300 kN 预应力锚杆 152 根,保证了边坡的安全。另外,一些工程也采用由数根锚杆组成的锚筋桩形式。

### 3.3 减载、排水

(1)减载、压坡。在有条件的情况下,减载压坡应是优先考虑的加固措施。如天生桥二级水电站厂房高边坡稳定分析,在滑坡体后缘覆盖层最厚的部位,减载 26 万 m<sup>3</sup>,滑坡抗滑稳定安全系数提高约 10%;乌江渡水电站库区小黄崖处理不稳定岩体爆破石方 20.8 万 m<sup>3</sup>。

(2)排水、截水。天生桥二级水电站厂房边坡工程治理中总共修建拦水沟、排水沟近 10 km;在滑坡体的后缘开挖总长 384 m 的两条排水洞(距滑动面以下 5~10 m),相互联通形成一个 U 形环,在排水洞内再设排水孔,把滑动体内地下水引入排水洞。三峡船闸高边坡稳定分析表明,地下水是影响边坡稳定的主要因素之一。为此,三峡船闸高边坡采用以地下排水为主,地表截、防排水为辅的综合排水方案,有机结合,降低岩体地下水位,减小渗水压力,改善边坡稳定条件,

提高边坡稳定性。

## 4 地下工程施工

近几年大型水电站及抽水蓄能电站的建设发展迅速,地下洞室的规模也随之不断增大。二滩水电站、广州抽水蓄能电站、小浪底水利枢纽等,其地下工程规模、施工难度、施工技术水平及施工速度已达到世界先进水平。

60 年代以前,地下工程开挖以手风钻钻孔爆破为主,机械化程度低,施工速度慢。1963 年陆浑水库增建泄洪洞,首先采用锚杆支护,效果很好。1985 年鲁布革水电站引水隧洞开挖,创平均月进尺 231 m,最高月进尺 373.5 m 的纪录,其施工技术相继在漫湾、广州抽水蓄能电站等工程的隧洞开挖中推广。全断面隧洞掘进机在我国地下工程中也有一定规模的应用,天生桥二级水电站引水隧洞引进 2 台美国 φ10.8 m 掘进机,累计掘进 7.4 km;引大入秦工程掘进机施工开挖洞径 φ4.92 m,创下了月最高进尺 1 821 m 的国内最好成绩。

我国已建和在建的地下厂房约 60 余座。在已建的地下工程中,最长的引水隧洞为引大入秦盘道岭隧洞,长达 15 728 m;最大的导流隧洞为二滩两条导流隧洞,开挖断面为 20.5 m × 25.5 m(宽 × 高),断面面积达 490 m<sup>2</sup>;最大的地下厂房为二滩水电站地下厂房,尺寸为 280.29 m × 25.5 m × 65.5 m(长 × 宽 × 高),地下工程开挖量 32.3 万 m<sup>3</sup>;小浪底工程左岸集中布置 19 条大断面隧洞、1 座地下厂房,共计 106 个洞室群,地下开挖量达 266 万 m<sup>3</sup>;在建的龙滩水电站地下厂房 380 m × 28 m × 74 m(长 × 宽 × 高),横断面达 2 200 m<sup>2</sup>,位居世界前列;龙滩水电站在不到 0.5 km<sup>2</sup> 的范围内共布置有 100 余条洞室,这些洞室以平、斜、竖的形式相贯形成庞大的地下厂房洞室群。目前,洞室开挖已向全断面(特大断面除外)开挖方向发展。各种不同断面、不同形式(平洞、竖井、斜井、大洞室等)的洞室,均有配套的机械化施工设备。

我国西南地区具有丰富的水力资源而又属岩溶发育的不良地质地区,在上述地区天生桥二级、二滩水电站等工程的施工中发展了不良地质洞段施工技术。积累了在软弱、松散破碎带、岩溶地段、岩爆地段、膨胀性围岩地段、瓦斯地段的地下工程施工经验。

## 5 土石坝施工技术

在我国已建的坝高 30 m 以上各种坝型中,土石坝约占 80%。90 年代以来,在建的高土石坝日益增多,待建工程更多,其中不少是大型工程,显示出我国修建高土石坝的良好势头,同时我国土石坝工程施工技术也得到了很大的发展。

尤其是 70 年代后期至 80 年代,随着大型、新型施工机械的出现,推动了高土石坝建设的迅速发展,心墙土石坝、混凝土面板堆石坝及沥青混凝土面板堆石坝造价低、工期短的特点也得到了肯定。目前高 154 m 的小浪底斜心墙堆石坝是我国最高的土石坝。三峡茅坪溪沥青混凝土心墙土石坝坝高 104 m,坝轴线全长 1 840 m,土石方填筑 1 180 万 m<sup>3</sup>,沥青混凝土 4.8 万 m<sup>3</sup>,于 1997 年 7 月开始铺筑沥青混凝土心墙,

其规模在我国的沥青混凝土心墙坝中名列前茅。

## 6 混凝土面板堆石坝

混凝土面板堆石坝在我国起步虽较晚,但发展很快,已成为世界上修建面板坝较多的国家。我国混凝土面板堆石坝技术发展特点有:

(1)向高坝发展。我国的面板堆石坝建设从关门山、西北口(坝高 95 m)开始,目前已建成坝高 178 m 的天生桥一级水电站,在建的还有洪家渡水电站(坝高 179.5 m),水布垭水电站(坝高 233 m)。面板坝坝高的增加,对导流度汛、坝体过水,以及分期施工等,都提出了更高的要求。

(2)滑模技术。在混凝土面板施工中,广泛采用无轨滑模技术并扩展面板浇筑宽度,面板宽度已由初期的 12 m 扩展至 16 m,从而减少了接缝,加快了施工进度,该项技术还在堤防工程中得到推广。趾板施工中也开始使用滑模技术,如天生桥一级混凝土面板堆石坝,趾板全长 1 262.4 m。趾板混凝土除水平段和连接过渡段采用常规模板施工外,其余全部采用有轨异型滑模施工,节省了人工、材料,缩短了工期,保证了混凝土的密实性。

(3)优化混凝土配比。为提高面板混凝土抗渗、抗裂、抗冻等性能,不断优化混凝土配合比,在混凝土中掺加复合外加剂、粉煤灰、聚丙烯纤维等,在浇筑中注意改善混凝土性能和工艺措施,重视面板的养护,从而有效地控制了面板裂缝。

(4)固坡技术(ITA 工法)。针对垫层料坡面在大雨或汛期过流时产生外部冲蚀问题,在巴西南部的 ITA 面板堆石坝

的施工中,开发应用了上游坡面保护的新方法(ITA 工法),即在铺设过渡料的同时修建挤压式混凝土边墙。目前,国外已有十余座工程采用挤压式边墙作为上游边坡保护措施,我国部分工程如公伯峡水电站等已开始研究应用这一技术。

(5)堆石料开采技术。天生桥一级面板堆石坝结合工程开挖(如溢洪道)采用控制爆破后直接取料上坝,ⅡA 垫层料直接生产上坝。主堆石区开采除采用常规的梯段爆破外,利用有利的地形条件进行洞室爆破的开采技术已逐步推广,如盘石头水库工程料场洞室爆破一次起爆药量达 500 t。

(6)利用天然材料筑坝。有些地区天然砂砾石材料丰富,砂砾石料具有压缩性低、抗剪强度和变形模量较高、施工易压实、单价低等优点。如北京十三陵抽水蓄能电站上库面板坝全部利用库盆开挖材料筑坝。另外,已建成高 131 m 的新疆乌鲁瓦提坝和高 130.8 m 的浙江珊溪坝也都采用天然材料。

(7)先进的施工机械。天生桥一级混凝土面板堆石坝使用激光导向反铲、平板振动碾对垫层料上游坡面修坡,解决大面积(坡面面积 17.3 万  $m^2$ )修坡、修坡量大及边角部位振动密实难的问题。

(8)在砂砾石地基上浇筑混凝土趾板。在砂砾石地基上修建的面板坝日益增多,覆盖层厚度在 30 m 以内时,通常开挖到基岩面浇筑趾板;但如覆盖层较深,也可以将趾板置于砂砾石层上,而以混凝土防渗墙对砂砾石地基作防渗处理,并用趾板或连接板将混凝土面板和防渗墙连接起来,构成完整的防渗系统,如浙江梅溪水库、岑港水库等。

(上接第 59 页)快。电气模拟量采集周期为 1 s,非电气模拟量采集周期为 1 s,温度量采集周期为 2 s,状态点采集周期为 1 s,报警点采集周期为 1 s,事件顺序分辨率  $\leq 2$  ms,从任意 1 个现地控制装置采集变化的状态点或报警、模拟量以及带时间的事件点的混合数据到实时数据库的时间不超过 3 s,调用新画面的响应时间不超过 2 s,动态数据刷新时间不超过 1 s,同一事件作用于报警方式的时差 1 s。

(4)系统实时控制的速度明显加快。控制命令回答响应时间为 1 s,接受控制命令到执行控制的响应时间为 1 s,主控层自动控制指令的响应时间不超过 2 s,联合控制有功功率执行周期为 2 s,联合控制无功功率执行周期为 5 s。过去监控系统对开关站完成一项操作控制的响应时间大约在 2 min 左右,现在则只要约 5 s 左右。

(5)完善的系统自诊断。系统自诊断信息的实时性,为系统可靠运行提供了有利的保证,使运行人员和维护人员能及时了解系统设备的状态、网络状态及 LCU 模块状态。

(6)配置了实时语音报警系统。从而更提高了系统的实时控制能力。

(7)强大的全厂自动控制功能。通过全厂 AGC/AVC 功能,实现了全厂的自动发电控制和自动电压控制,还实现了

中调远方控制我厂有功功率及远方自动开、停机。大大提高了我厂的全厂自动控制水平。

(8)系统具有高度的可靠性和冗余性。自身的局部故障不影响系统的正常运行,各机组 LCU 还配置 1 套机组可编程序控制装置(机组 PLC),可实现对机组自动开、停等顺序控制操作,与 LCU 工控机之间相互独立运行,增加了系统的可靠性。

但是,系统在初期运行中也存在以下一些问题:

①监控系统的全厂 AGC/AVC 功能,还需进一步完善。

②历史数据的保存和查询、报表统计功能,有待不断完善,以便更加适应生产实际。

③系统事件专家系统还应不断完善。

④各控制流程还应不断优化。

## 4 结 语

目前,漫湾发电厂计算机监控系统还处在初期运行阶段,对系统的考验才刚刚开始。但系统改造后,使我厂的全厂自动控制、自动调节水平已经有了大幅度提高,这为确保“无人值班”(少人值守)条件下的设备正常、稳定、可靠运行和进一步巩固“创一流”成果,提供了有力的保障。