

表 18 (表)

围堰名称	项 目 名 称			
	设计挡水位 /m	过水围堰顶高程 /m	子堰顶高程 /m	子堰高度 /m
喜河水电站下游土石过水围堰	337.8	335.5	340.0	4.5
锦屏二级水电站上游土石过水围堰	1644.98	1642.0	1645.5	3.5
滩坑水电站上游土石过水围堰	—	—	—	5.5
蒲石河抽水蓄能电站下水库大坝上游土石过水围堰	52.9	52.4	53.4	1.0

2.4.22 水利水电工程施工工期长，施工期每年汛期都会遭遇洪水，甚至超标准洪水的袭击，度汛贯穿施工全过程。对于特别重要或围堰失事后果严重的工程，为了增加围堰的安全度，需考虑遭遇超标准洪水的应急措施和预案，主要包括洪水预报、围堰的加高加固、基坑充水及有关防汛管理等，提出应急措施和预案的目的是降低围堰漫顶破坏的风险，提高围堰的安全度。

2.5 导流泄水建筑物

2.5.1~2.5.3 对导流明渠的布置原则提出了要求。导流明渠应力求水力条件良好，需不恶化施工条件，并能减少工程量，尤其是施工较困难的水下开挖量。导流明渠运行期属于人工河槽，进出口高程的选择尽可能维持原河流的自然比降，否则会产生进口淤积和下游冲刷等问题。明渠上、下游水流衔接条件以及出口消能设计对运行安全影响甚大。

避免泄洪时对上下游沿岸及施工设施产生冲刷，同时为消除回流、涡流，有利于通航，减小明渠冲淤变化的影响，明渠进出口的方向与河道主流方向夹角一般小于 30°，转弯半径一般不小

于 3 倍明渠底宽。

大型工程或有通航要求的导流明渠，需满足通航时的水深、水面宽度、比降、流速和转弯半径的要求，并需通过水工模型试验验证其水力学条件。

2.5.4 常用的导流明渠渠道断面形式有梯形、矩形、多边形和复式断面。

梯形断面适用于大、中、小型渠道，其优点是施工简单，边坡稳定，便于应用混凝土薄板衬砌；矩形断面适用于坚固岩石中开挖的明渠；多边形断面适用于在粉质砂土地区修建的渠道，当渠床位于不同土质的大型渠道，也采用多边形断面；复式断面适用于深挖渠道，复式断面有利于调整明渠弯道水流的流速分布及流态，改善明渠通航条件。

国内部分水利水电工程导流明渠设计过流情况统计见表 19。

表 19 国内部分水利水电工程导流明渠设计过流情况统计表

工程名称	明渠宽度 /m	设计过流流量 /(m³/s)	单宽流量 /[m³/(s·m)]
映秀湾	14	620	44.3
柘溪	16	1300	81.3
白山	20	2910	145.5
池潭	8	1020	127.5
龚嘴	35	9560	276.1
铜街子	54	9200	170.4
水口	75	28400	378.7
观音岩	45	14200	315.6
喜河	25.5	3380	132.5
蜀河	148	19700	133.1
沙坪二级	55	7490	136.2
尼尔基	190	9880	52
岩滩	51	15100	396.1
陆水	17.5	3000	171.4
黄龙滩	8	800	100



表 19 (续)

工程名称	明渠宽度 /m	设计过流流量 /(m <sup>3</sup> /s)	单宽流量 /[m <sup>3</sup> / (s·m)]
新丰江	8	1000	125
飞来峡	300	15500	51.7
宝珠寺	35	9570	237.4
大峡	40	5000	125
三峡	350	79000	225.7
龙开口	40	10800	270
银盘	90	20800	231.1
枕头坝一级	30.4	6600	217.1
沙坡头	40	5860	146.5
藏木	35	8870	253.4
安康	40	4700	117.5

**2.5.5** 本条为导流隧洞布置的原则，具体布置时需符合 SL 279 关于导流隧洞的有关规定。导流隧洞布置必须适应地形和地质条件，并力求临时建筑物与永久建筑结合，水力学条件良好，工程量省。隧洞线路选择是导流隧洞设计最重要的环节，洞线的选择需通过地质、地形、施工布置、交通条件、施工程序，以及下游的冲刷、干扰等条件经技术经济综合比较后选定。

**2.5.6** 导流隧洞进出口高程的选择需满足运行期间施工导流、截流、排冰等要求，同时尚需考虑施工方便、通航、泥沙淤积以及封堵条件等综合因素，并满足泄流及出口消能防冲要求。对于和高围堰配套布置的多条导流隧洞，其中部分导流隧洞的进口高程布置需满足截流要求，其余导流隧洞从方便施工、降低闸门水头、满足下闸后向下游供水等因素考虑，可适当抬高进口高程。在导流隧洞结构设计时，需重视其出口明渠体型和消能防冲设计。

导流隧洞无论是有压还是无压，设置反坡时不但影响过水水流，还存在淤积和排水问题，尤其是对水中泥沙含量较大和存在

遇水易软化的岩层时影响更大，故不要设置平坡和反坡。

**2.5.7** 导流隧洞断面选择是一个安全、经济和施工进度综合比较的问题。从工程实际应用情况来看，采用方圆型（圆拱直墙式）断面的工程较多，而采用圆形和马蹄形断面的工程相对较少。但随着施工技术的进步，马蹄形断面和方圆型（圆拱直墙式）断面的施工难易程度无明显的差别，因受力条件较好，马蹄形断面在工程中的应用越来越多，尤其是国外类似工程，一般均采用马蹄形断面。

**2.5.8** 导流隧洞垂直和侧向最小覆盖层厚度，需根据地质条件、隧洞断面形状及尺寸、施工成洞条件、内外水压力、支护（衬砌）结构型式、围岩渗透特性等因素，经综合分析后确定。由于导流隧洞系临时性建筑物，可根据具体工程实际情况，因地制宜适当降低标准。

**2.5.9** 导流隧洞平面布置采用曲线时，其弯道的缓急对隧洞的流态、压力分布、水头损失和施工难易都有影响，具体体现为弯道的转角和弯道的半径。目前国内外的规范大都规定，在低流速隧洞内弯道的转角不要大于 60°，弯曲半径一般不小于 5.0 倍洞径（或洞宽）。而洞线转角越小其损失系数越小。结合工程实际运行经验，规定低流速无压隧洞转弯曲线的几何参数限定为“转角不要大于 60°，弯曲半径不要小于 5.0 倍洞径（或洞宽）”。对于高流速隧洞主要是考虑隧洞抗冲耐磨、避免产生负压引起的空蚀破坏，往往需要通过水工模型试验进行验证其转弯曲线的几何参数选择的合理性。

**2.5.10** 对导流隧洞进口平台型式及进口断面设计的要求。

(1) 岸塔式背靠岸坡布置，闸门设在塔形结构中，可兼做岸坡支挡结构，是最常采用的形式。

斜坡式进口使闸门尺寸偏大（大于隧洞断面），一般适用于进口易于布置斜坡滑道的小型隧洞。

竖井式闸门井适用于隧洞沿线（大坝帷幕上游）存在沟谷地形，便于布置竖井的工程。



闸井式进口的闸门布置在竖井中，竖井上部洞室内布置启闭机的操作室，启闭机室通过廊道进出。闸井式适用于高山峡谷地区，可以避免进口高边坡的大开挖，目前我国西南地区采用较多。

另外，对于规模较小的导流隧洞工程，可采用临时起吊设备下闸封堵，可不设置启闭机平台。

(2) 当进水口布置不当时，会产生偏流、回流、漩涡等现象，影响隧洞泄流能力，也容易使隧洞发生气蚀破坏。在进口断面设计中，需保证进口喇叭口水流顺畅，尽量避免出现负压、气泡等不利流态。顶拱曲线一般为椭圆曲线，或椭圆和斜线的组合线，设计时先根据工程类比选择一个曲线，必要时通过水工模型试验验证和优化。

**2.5.11** 本条为导流隧洞进出口设置渐变段的设计基本规定。

**2.5.12** 结合国内工程经验，导流隧洞进口高程一般较低，下游水位变化较大，消能防冲型式多采用挑流消能和底流消能。挑流消能多用于高水头隧洞，底流消能多用于中低水头隧洞，隧洞出口一般都进行扩散，以减少单宽流量，消减水流的冲击力。若下游水位比较稳定，且水深比较适宜时，采用适当的护岸工程后也可采用面流消能。

**2.5.15** 在混凝土坝中预留导流底孔单独担负导流泄洪，或与其他泄水建筑物组合导流，是经济可行的导流设施。在采用单独底孔导流的布置中，一般为满足二期导流时泄洪，尽量布置在近主流河道处。当布置大尺寸底孔时，尽可能跨坝缝布置，以节约配筋量。在两岸陡峻的大江大河上采用坝体导流底孔进行导流时，由于混凝土坝的永久孔洞布置已较紧凑，再布置数量较多的导流底孔时，虽然对于坝体结构的影响不是制约因素，但是由于各孔洞是上下左右错综布置，设计导流底孔进口闸门平台和封堵施工的难度可能较大，故需考虑施工方便的因素。

**2.5.16** 底孔尺寸，除在满足各项综合要求之外，尚需根据坝体应力、封堵底孔闸门的钢结构允许应力等综合选定，除特殊要求

外，尽可能采用窄、高形式。

**2.5.17** 在坝体布置临时底孔或缺口（包括梳齿段），下部布置临时底孔同时泄洪时，为避免发生空蚀破坏，需重视水力学条件研究。可通过水工模型试验确定这种布置方式的出口水流对下游坝基的冲刷影响。

**2.5.18** 对于土石坝工程，导流涵管埋在当地材料坝底部，已构成坝体的一部分，如果开裂漏水，极易沿管外壁发生集中渗流，引起土石坝不均匀沉陷或失事。因此，当涵管建在土基上时，地基需经过特殊处理。如某些软基上的涵管，平面采用格型钢板桩加固，在板桩间开挖基础土层，回填土料，压实后再将涵管置于其上。

**2.5.19** 利用混凝土坝实体结构预留缺口单独导流或与其他导流设施组合导流，是重力坝和拱坝在施工过程中经常采用的导流泄水方式。

**2.5.20** 当临时过水坝面前沿过长时，因通气不畅可能引起负压过大，必要时采取增加隔墩掺气等措施。水流对坝后基础的冲刷破坏往往超过坝建成后的设计或校核洪水泄洪时的影响，故需通过水工模型试验提出防止冲刷破坏的保护措施。

**2.5.21** 由于厂房结构复杂，既有土建施工又有机电安装，工期较长，一般情况下，不要通过厂房过流。经论证厂房必须过流时，则需在不影响按期发电情况下，经过水工模型试验，确定过流方式、部位及泄流能力，并确认不会发生气蚀和振动破坏。关于厂房过流方式，富春江电站及西津和沙溪口电站的3号、4号机组段在尾水的肘管顶部临时封盖后泄流，大化电站及西津电站的2号机组段利用未完建的蜗壳和尾水管泄流。未完建的蜗壳和尾水管泄流流态复杂，发生涌浪及漩涡，厂房泄流一般要避免采用这种方式。

由于厂房结构相对较为单薄，当泄流流态不稳时，易引起结构振动破坏或空蚀，且对工程加快工期尽早受益不利，故一般尽可能不采用未完建厂房泄流。



## 2.6 河道截流

**2.6.1** 截流在水利水电工程中是重要的关键项目和里程碑目标之一，也是影响整个工程施工进度的一个控制项目。如果截流不能按时完成，将制约围堰施工，直接影响围堰度汛的安全，并将延误永久建筑物的施工工期；若不能按时截流，失去了枯水期的良好截流时机，将延误工程总工期；对于通航河道，还可能造成断航的严重后果。因此，一定要综合慎重分析研究，提出切实可行的截流方案，保障截流顺利进行。

为确保截流成功，必须精心组织施工，包括：截流备料堆场、截流交通道路布置、截流设备选型及配套数量、截流施工管理、截流施工控制性进度等。

**2.6.2** 截流方式需综合分析水力学参数、施工条件和截流难度、抛投材料数量和性质等因素，经技术经济比较后确定。河道截流一般有立堵、平堵，以及较特殊的定向爆破、截流闸等方式。目前国内外应用较多的方法为戗堤法，并以戗堤立堵为多，该方法简单易行。尤其是在大吨位汽车迅速发展的今天，更适应戗堤法对大强度进占、合龙的要求。据此，本条提出在拟定截流方案时，需优先考虑戗堤立堵。

苏联在 20 世纪 50 年代用浮桥平堵截流例子较多，20 世纪 60 年代逐步减少，20 世纪 70 年代后期基本不再采用，主要是浮桥价格昂贵，架设和运用技术条件复杂。20 世纪 60 年代后期罗马尼亚与南斯拉夫合建的铁门电站和苏联的布拉茨格电站，用立堵与平堵相结合的方案。平堵部分是修筑栈桥。栈桥价格很贵，施工技术条件也很复杂，故架桥平堵截流方法目前已不常采用。当水力学条件允许和已具有设备的情况下，可以研究采用船只平抛作为截流的辅助措施。

在特殊的情况下，截流方式也可采用定向爆破、建闸或浮运结构法。

**2.6.3** 单戗立堵是较为常用的截流方法，简单易行，截流辅助

措施少，比较经济。但当落差大于 4m（一般指截流进占期间，而非最终合龙时的落差）时，合龙时非常困难，因此，本条以 4m 为控制指标，一般情况下，单戗立堵一般在 4m 落差以下时采用。

近 20 年来，随着大型施工机械制造水平的提高，截流一般以大型机械化作业程度高的立堵为主。选择单戗还是双戗截流，实质上是个施工难易问题。有关研究成果认为，选择双戗堤截流需掌握下列 3 条原则：

(1) 截流过程中，上、下戗堤各自的截流难度，都必须小于单戗立堵的难度。

(2) 下戗堤在截流过程中，除进占难度小以外，还必须对上戗堤有显著的壅水作用。

(3) 两戗堤之间的距离要满足有关水力条件。

葛洲坝和三峡工程是双戗立堵截流的成功范例。目前，对于落差 4m 的截流已不存在技术难度。根据统计情况分析，对于落差大于 4m，且合龙流量大于  $1000\text{m}^3/\text{s}$  的情况，需考虑采用双戗截流。为了改善截流水力学条件，对于截流落差大于 4m 的情况，部分工程采用宽戗截流也取得了较好的效果，一般情况下戗堤宽度大于 30m 称为宽戗。

国内若干水利水电工程截流指标见表 20。

**2.6.4** 在河道水深流急，立堵十分困难时可考虑平、立堵结合的方案，但需研究平堵的可能性，造桥费用高是平堵截流的主要缺点，但其截流水力条件好。因此，有架设浮桥或栈桥的条件时，亦需进行平堵截流方案与平、立堵截流方案的技术经济比较。

在深水河道截流中，一般采用平抛垫底等防止堤头坍塌措施，通过平抛垫底使河床地基挤压加密，坡度变缓，水深变浅，可有效减少堤头坍塌。

**2.6.5** 导流泄水建筑物的泄流能力是影响截流难度的重要因素，导流泄水建筑物的进出口围堰在截流前往往由于水下拆除和时间

表 20 国内若干水电工程截流指标

序号	工程名称	河流	截流时间 (年-月)	截流流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )		截流方法 与特点	龙口 宽度 (m)	最大 落差 (m)	最大 流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )	主坝 坝顶宽 (m)	截流 历时 (m)	抛投强度 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	主要截流材料		主要机械设备	
				设计	实际								一般材料	合龙用特殊材料	运输机械	其他机械
1	三门峡	黄河	1958-11	1000	2030	单坝 一岸 立堵	56	2.97	6.75	25	133	>7000 (294)	石渣 0.1 ~1.0m	3~5t 大块石, 15t 混凝土四面 体, 铅丝石笼	12.5~25t 自 卸汽车	推土机、起重 机、挖掘机
2	盐锅峡	黄河	1959-04	—	—	单坝 一岸 立堵	55	4.43	5.2	10	36	(190)	石渣	3~5t 大块 石, 15t 混凝土 四面体	10~25t 自卸 汽车 23 辆	5~15t 起重 机 5 台, 3 台 D80 推土机
3	丹江口	汉江		640	310	立堵		2.84	6.88				石渣	15t 混凝土四 面体		
4	刘家峡	黄河			210	立堵		5.97	5.0				石渣			
5	青铜峡	黄河			325	立堵	40	1.49	4.65				石渣			
6	西津	郁江		1300	534	立堵		1.75	4.70				石渣			
7	贵嘴	大渡河			448	立堵		4.0	7.0			(287)	石渣	9~15t 混凝土 四面体		
8	天桥	黄河			690	立堵		3.10	6.0			(3000)	石渣	6t 混凝土四 面体		
9	白山	二松 花江		440~ 260	126	立堵		1.48	4.80			(5270)	石渣			

表 20 (续)

序号	工程名称	河流	截流时间 (年-月)	截流流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )		截流方法 与特点	龙口 宽度 (m)	最大 落差 (m)	最大 流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )	主坝 坝顶宽 (m)	截流 历时 (m)	抛投强度 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	主要截流材料		主要机械设备	
				设计	实际								一般材料	合龙用特殊材料	运输机械	其他机械
10	龙羊峡	黄河	1979-12	800	170	单坝 立堵	40	1.4	3.0	8~10	4	(800)	石渣	大石、钢筋石 笼、四面体	10~25t 自卸 汽车 55 辆	挖掘机、装 载机、推土机、起 重机
11	大化	红水河	1980-10	1500	1390	单坝 一岸 立堵 预平 抛	53.4	2.32	4.2	16	24	12686 (654)	粒径 0.4~ 1.0m 大石为 主, 少量石渣	粒径 1m 以上 大块石, 竹笼, 石串、铅丝石 笼, 10t 四面体	20t, 15t, 12t 自卸汽车 75 辆	挖掘机 7 台、 推土机 8 台、起 重机 14 台
12	葛洲坝	长江	1981-01	5200	4720	单坝 两岸 立堵 经石 坎护 底	203	3.23	7.5	25	36	70000	石渣, 粒径 为 0.4~0.7m 的块石	粒径 1m 以上 大块石, 15~ 25t 四面体钢梁 石笼	20~45t 自卸 汽车 417 辆, 20t 为主	推土机、起重 机、挖掘机、装 载机、开底取
13	安康	汉江	1983-12	300	180	单坝 立堵	36.2	1.2	3.9	9	1.3	(858)	石渣	铅丝石笼	20t 自卸汽车 85 辆	挖掘设备 4 台, 推土机 10 台, 起重设备 2 台
14	铜街子	大渡河	1986-11	750	850	单坝 单向 立堵	80	2.4	5.4	22	19	23000	粒径不超过 0.7m 石渣	粒径 1m 大块 石, 15t 四面 体、铅丝石笼、 异形体	20t, 15t 自卸 汽车 80 辆	挖掘机 11 台、 推土机 15 台、 汽车起重设备 6 辆



表 20 (续)

序号	工程名称	河流	截流时间 (年-月)	截流量 ( $m^3/s$ )		截流方法 与特点	龙口 宽度 (m)	最大 落差 (m)	最大 流速 ( $m/s$ )	主坝 堤顶宽 (m)	截流 历时 (m)	抛投强度 ( $m^3/h$ )	主要截流材料		主要机械设备	
				设计	实际								一般材料	合龙用特 殊材料	运输机械	其他机械
15	岩滩	红水河	1987-11	1900	1160	自右 向左 单戽 立堵	59	2.6	3.5	30	9.2	(972)	石渣	粒径 0.5m 以 上块石、4~10t 石串	20t、32t 自卸 汽车 52 辆	挖掘机 12 台、 推土机 11 台、 汽车起重 机 19 台
16	漫湾	澜沧江	1987-12	922	636	单戽 立堵	65	3.0	7.13	30	22	35000	石渣、中 小石	大石、立体 四角钢架、铜 筋铅丝石笼塔 (780m <sup>2</sup> )	20t 自卸汽车 82 辆	挖装设备 8 台、推土机 8 台、起重 机 5 台
17	隔河岩	清江	1987-12	—	—	—	15	2.7	7.0	15	3.6	(800)	石渣	大石串、四 面体	20t 自卸汽车 50 辆	挖装设备 9 台、推土机 8 台、起重 机 2 台
18	水口	闽江	1989-09	1620	1133	—	82.5	0.95	3.34	26	15.4	33700 (2200)	石渣, 粒径 为 0.45m 块石 站 20%~30%	粒径 0.9m 大 块石, 8t 以上 大石串	45t、32t、20t 自卸汽车 46 辆	装载机 10 台、 推土机 7 台
19	李家峡	黄河	1991-10	300	620	—	40	5.3	5.4	15	51	7680	石渣	15t、20t 四面 体, 0.8m×0.8m ×2m 钢筋石笼	12~20t 自卸 汽车共 30 辆	装载机 2、推 土机 2 台、起重 机 5 台
20	五强溪	沅水	1991-11	1400	613	—	85	2.56	5.56	18~20	29.8	(695)	中小石	粒径 0.5m 以 上大石、钢筋石 笼、四面体	20t、32t 自卸 汽车共 42 辆	装载机 9 台、 推土机 5 台、汽 车起重 机 6 台

表 20 (续)

序号	工程名称	河流	截流时间 (年-月)	截流量 ( $m^3/s$ )		截流方法 与特点	龙口 宽度 (m)	最大 落差 (m)	最大 流速 ( $m/s$ )	主坝 堤顶宽 (m)	截流 历时 (m)	抛投强度 ( $m^3/h$ )	主要截流材料		主要机械设备	
				设计	实际								一般材料	合龙用特 殊材料	运输机械	其他机械
21	二滩	雅砻江	1993-11	2000	1440	平、 立堵	52	3.83	7.14	—	3.4	(600)	石渣	粒 径 0.7m 石料	30t 自卸汽车 22 辆	装载机、推 土机
22	天生桥 一级	红水河	1994-12	473	428	单戽 双向 立堵	28.45	1.43	4.82	15	4.3	(834)	粒径不超过 0.8m 石渣	粒 径 0.8~ 1.6m 大石, 10t 石串	32t 自卸汽车 65 辆	装载机、推 土机
23	江厦	德水	1994-12	42.6	33	单向 单戽 立堵	25	1.89	3.67	10	3.0	(667)	石渣、一般 块石	粒 径 大于 0.7m 块石料、 钢筋石笼	20t 自卸汽车 8 辆	挖掘机、装 载机、推土机、汽 车起重 机 各 1 台
24	万家寨	黄河	—	—	510	—	—	3.49	6.75	—	—	—	石渣	18t 混凝土四 面体	—	—
25	小浪底	黄河	1997-10	—	132~ 190	—	—	3.73	4.8	—	63	(3574)	石渣	—	—	—
26	大朝山	澜沧江	1997-11	873	618	单戽 立堵	60	3.96	7.0	25	20.25	(1066)	粒 0.8~ 1.6m 大石, 10t 石串	粒 径 1.0m 以 上块石、钢筋石 笼、四面体	15t、32t 自卸 汽车共 80 辆	挖掘机、装 载机、汽车起重 机
27	瑞溪	飞云江	1997-11	80.6	—	单向 单戽 立堵	25	1.55	3.3	10	—	—	石渣及块 石料	—	—	—

表 20 (续)

序号	工程名称	河流	截流时间 /(年-月)	截流量 /(m <sup>3</sup> /s)		截流方法 与特点	龙口 宽度 /m	最大 落差 /m	最大 流速 /(m/s)	主墩 堤顶宽 /m	截流 历时 /m	抛投强度 /[m <sup>3</sup> /d (m <sup>3</sup> /h)]	主要截流材料		主要机械设备	
				设计	实际								一般材料	合龙用特 殊材料	运输机械	其他机械
28	三峡 大江	长江	1997-11	14000 ~ 19400	8480 ~ 11600	单墩 立堵 平抛 垫底	130	1	4.22	30	30	120390 (1446)	粒径 1.0m 以上大石、钢 筋石笼、四 面体	5~10t 大石	77t, 45t, 30t 自卸汽车 351 辆	10m <sup>3</sup> 挖泥设 备 66 台, 710HP 下列推土机 20 台, 平抛艇
29	引子渡	乌江	2001-10	58		单墩 单向 立堵	40	3.77	3	12	15	(600)	小石和中石 和普通石渣, 大石、中石	特大石	自卸汽车 (15~20t) 20 辆	装载机 (3~ 6m <sup>3</sup> ) 3 台, 挖 掘机 (4m <sup>3</sup> ) 3 台, 推土机 (180~320HP) 3 台, 汽车起重机 (20~40t) 2 辆, 木桩 2 艘
30	薊米坡	西水	2001-11	357	137	单墩 立堵	60	2.1	4.0	15	36	(600)	石渣	1.5m <sup>3</sup> 块石、 钢筋石笼	自卸汽车	
31	公伯峡	黄河	2002-03	360	100	单墩 立堵	30			20	24	(600)	石渣	10t 中混凝土 四面体, 1.2m <sup>3</sup> 钢筋石笼	20t 自卸汽车 30 辆	3m <sup>3</sup> 装载机 3 台, 大型推土机 2 台
32	三峡 明渠	长江	2002-11	10300 ~ 11000	7970 ~ 9050	双枪 立堵 平抛 垫底	上 150 下 125	4.11	6	30	约 120	42700 (3000)	粒径 1.0m 以上大石、钢 筋石笼、四 面体	8m <sup>3</sup> 钢筋石 笼等	77t, 45t, 30t 自卸汽车 285 辆	10m <sup>3</sup> 挖泥设 备 50 台, 710HP 推土机 20 台, 平抛艇

表 20 (续)

序号	工程名称	河流	截流时间 /(年-月)	截流量 /(m <sup>3</sup> /s)		截流方法 与特点	龙口 宽度 /m	最大 落差 /m	最大 流速 /(m/s)	主墩 堤顶宽 /m	截流 历时 /m	抛投强度 /[m <sup>3</sup> /d (m <sup>3</sup> /h)]	主要截流材料		主要机械设备	
				设计	实际								一般材料	合龙用特 殊材料	运输机械	其他机械
33	三墩溪	清水江	2003-09	394	100	单墩 立堵	65	3.12	4.3	20	24	(660)				
34	龙滩	红水河	2003-11	1570 ~ 830	1100 ~ 830	单墩 单向 立堵	70	0.7	3.8	20	48	(1060)	石渣	块石最大粒径 0.6~0.8m、少 量钢筋石笼	20t, 32t 自卸 汽车	推土机、反铲
35	拉西瓦	黄河	2004-01	20~30	20~30	单墩 立堵	35			15			石渣			
36	小湾	澜沧江	2004-10	1320	1320	单墩 单向 立堵	60	5.92	5.1	20			石渣混合 渣、石渣料、 中小石、大块 石、块石钢筋 石笼	特大块石及粗 粒土四面体	15~32t 自卸 汽车	装载机、挖掘 机和推土机
37	光照	北盘江	2004-10	433	122	单墩 单向 立堵	55	6.36	5.03	15						
38	狗皮滩	乌江	2004-11	819	577	单墩 单向 立堵	40	1.58	4.57	12		(668)	石渣、中 石、大石	特大块石及粗 粒石渣		

表 20 (续)

序号	工程名称	河流	截流时间 (年-月)	截流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )		截流方法 与特点	龙口 宽度 (m)	最大 落差 (m)	最大 流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )	主坝 坝顶宽 (m)	截流 历时 (m)	抛投强度 ( $\text{m}^3/\text{d}$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ ))	主要截流材料		主要机械设备	
				设计	实际								一般材料	合龙用特 殊材料	运输机械	其他机械
39	晏洪	泗洛江	2005-01	633		单坝 单向 立堵	50	3.14	5.33	28.5			石渣、中 石、大石	钢筋石笼、混 凝土四面体	32t、25t、20t 自卸汽车	挖掘机、装 载机、推土机、汽 车起重机械、酒 水车
40	韩坑	雁江	2005-10	114		单坝 双向 立堵	25	2.3	3.27	12			石渣料及大 块石			
41	蔡汗 乌苏	开都河	2005-11	89.5		单坝 单向 立堵	30	4.9	4.43	18	24	(800)	石渣	混凝土四面体 和钢筋石笼	45t 和 20t 自 卸汽车	4 $\text{m}^3$ 挖掘机、 1 $\text{m}^3$ 反铲
42	瀑布沟	大渡河	2005-11	1000	890	单坝 双向 立堵	40.8	4.35	8.1	20	10	(2793)	石渣	四面体、大 石串	32t、20t 自卸 汽车	推土机、起 重机
43	金安桥	金沙江	2005-11	889	829	宽坝 堤单 向力 度	50	4.72	7.15	60	45	(1785)	石渣、中 石、大块石	钢筋石笼、混 凝土四面体	32t、25t、20t、 15t 自卸汽车	挖掘机、装 载机、推土机、汽 车起重机械、酒 水车
44	土卡河	李仙江	2005-12	271	280	单坝 双向 立堵	30	4.5	6	15	9.5		石渣、中 石、大块石	钢筋石笼、大 石串	20t、15t 自卸 汽车 20 辆	推土机 3 台、 1.2 $\text{m}^3$ 反铲 5 台

表 20 (续)

序号	工程名称	河流	截流时间 (年-月)	截流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )		截流方法 与特点	龙口 宽度 (m)	最大 落差 (m)	最大 流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )	主坝 坝顶宽 (m)	截流 历时 (m)	抛投强度 ( $\text{m}^3/\text{d}$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ ))	主要截流材料		主要机械设备	
				设计	实际								一般材料	合龙用特 殊材料	运输机械	其他机械
45	锦屏 一级	雅砻江	2006-12	814	523	单坝 立堵	40	5.23	6.41	25	32.5	(1197)	石渣、中石 (0.4~0.7m)、 大块石 (0.7~ 1.1m)	5t 重钢筋石笼		推土机 10 台、 4~5.3 $\text{m}^3$ 挖装 设备 24 台和 25~ 50t 汽车起重机械 7 辆
46	溪洛渡	金沙江	2007-11	5160	3560	单坝 双向 立堵	75	4.5	9.5	30	31	(2300)	粒径不大于 0.6m, 石渣料	混凝土四面体 和钢筋石笼、块 石串	32t、20t 自卸 汽车 129 辆	推土机 10 台、 4~5.3 $\text{m}^3$ 挖装 设备 24 台和 25~ 50t 汽车起重机械 7 辆
47	糯扎渡	澜沧江	2007-11	1815	2890	单坝 双向 立堵	68.6	7.16	9.02	25	27	(3216)	石渣、大 块石	3 $\text{m}^3$ 钢筋石 笼、4.5 $\text{m}^3$ 钢 筋石笼、7~ 8.5t 混凝土四 面体块、15t 混 凝土六面体块、 25t 混凝土六面 体块	20t 与 32t 自 卸汽车 173 辆	6 $\text{m}^3$ 争产挖 掘机、4.5 $\text{m}^3$ 、 2.0 $\text{m}^3$ 、1.6 $\text{m}^3$ 反铲挖掘机和 3 $\text{m}^3$ 装载机攻 击 19 台、DL55、 320HP、D85 及 220HP 推土机 10 台、25~50t 汽车起重机械 3 台
48	蜀河	汉江	2007-12	415	133	单坝 立堵	50	2.84	4.31	15	22	(400)	石渣料	钢筋石笼与大 块石	20t 与 45t 自 卸汽车	装载机、液压 反铲、推土机、 汽车起重机械



表 20 (续)

序号	工程名称	河流	截流时间 (年-月)	截流流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )		截流方法 与特点	龙口 宽度 (m)	最大 落差 (m)	最大 流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )	主墩 堤顶宽 (m)	截流 历时 (m)	抛投强度 ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	主要截流材料		主要机械设备	
				设计	实际								一般材料	合龙材料	运输机械	其他机械
49	大岗山	大渡河	2008-01	410	272	单向 双向 立堵	40	7.2	7.65	25	24	(1483)	大、中石和 石渣	钢筋或铅丝 笼串		
50	锦屏 二级	雅砻江	2008-11	637	746	单向 单墩 立堵	40	4.6	7.4	18	36	(800)	块石串、钢筋 石笼及钢筋土四 面体	块石串、钢筋 石笼及钢筋土四 面体		
51	功界桥	澜沧江	2008-11	727	680	单墩 立堵	50	7.2	7.55	20	48	(1420)	石渣	钢筋石笼、大 块石和钢筋土四 面体	20t 和 32t 自 卸汽车	装载机、反 铲、推土机、汽 车起重机
52	阿海	金沙江	2008-12	951	650	宽墩 堤单 向立 堵	65	8.0	5.73	60			石渣、中 石、大石	钢筋石笼、混 凝土四面体	32t、25t、20t 自卸汽车	挖掘机、装 载机、推土机、汽 车起重机
53	龙开口	金沙江	2009-01	707	592	单墩 立堵	38	4.88	5.5	23~26	31	(3000)	石渣料	直径大于 0.9m 的大块石、 中 8t 以上石串	20t 与 32t 自 卸汽车 63 辆	装载机共 6 台、挖掘机 23 台、推土机 5 台、 汽车起重机 6 台
54	鲁地拉	金沙江	2009-01	654	590	单向 单墩 立堵	50	6.2	4.9	30	16.3	(1003)	石渣、中 石、大块石	特大石、钢筋 土四面体、钢筋 石笼	32t、25t 自卸 汽车	推土机、装 载机

紧迫而未能全部清除,从而使实际截流水头比设计计算值要高。因此需对影响截流时分流建筑物泄流能力的建筑清理提出具体要求,保证截流顺利进行。

**2.6.6** 涉及截流戗堤布置的因素很多,且这些因素均同截流难度有关。在进行截流布置时,需首先选定截流方案,根据选定的截流方案选择龙口位置,使之总体布置合理,创造有利的戗堤进口、龙口封堵和闭气的条件。

截流戗堤一般和上游围堰结合,但如果下游围堰地形、地质、交通更为有利,特别是龙口段地质条件良好、上下游围堰间水头差又不大时,也可比较截流戗堤和下游围堰结合方案。

截流戗堤是在水中抛投进占形成,其边坡由抛投料自然休止角和水流条件决定。根据工程经验,戗堤上游边坡一般为 1:1.2~1:1.5,下游边坡为 1:1.4~1:1.5;堤头边坡为 1:1.3~1:1.5。

**2.6.7** 本条对截流戗堤的位置选择提出了要求。截流戗堤的布置要考虑后续防渗体的施工方便因素。从以往工程情况看,单戗堤立堵截流戗堤布置在上游围堰,有利于围堰闭气后基坑抽水,大部分截流戗堤置于上游围堰轴线的下游侧,其优点是:截流戗堤兼作排水棱体,有利于围堰的渗透稳定;可减少截流过程中围堰基础的冲刷;当围堰采用防渗墙垂直防渗时,可避免截流抛投的大块体流失到防渗轴线范围内而增加防渗墙造孔难度,并影响防渗效果。

当截流流量小,龙口材料流失率小或采用上游电站关机合龙时,经分析论证,截流戗堤可置于围堰的迎水侧。

**2.6.8** 截流戗堤的顶宽须满足截流抛投料运输和回车要求,主要与抛投强度、行车密度和抛投方式有关,通常为 10~25m,有时为提高抛投强度,堤顶宽度可达 30m。

**2.6.9** 本条为有关龙口位置、宽度选择的主要考虑因素和需要遵守的原则。

1 龙口位置选择需根据工程的具体施工条件、设备水平和



水力指标等综合分析确定,龙口位置选在河床覆盖层薄处或基岩裸露处,是为避免合龙过程中,河床覆盖层冲刷,引起截流戗堤塌滑事故;选在河床深槽主航道处,是尽量减小龙口合龙前对通航的影响;龙口选在浅滩处,可减少合龙工程量、降低抛投强度。通常情况下,龙口处河床不要有顺流向陡坡和深坑,如选在基岩面突变的河床,需采取措施,确保截流戗堤稳定。

2 若龙口段河床覆盖层抗冲能力低,可预先在龙口抛石、抛钢筋笼或合金钢网兜等护底。护底范围可通过水工模型试验或参照类似工程经验拟订。立堵截流的戗堤轴线下游护底长度可按龙口平均水深的2~4倍取值,轴线以上可按最大水深的1~2倍取值。护底顶面高程在分析水力学条件及护底材料后确定。护底宽度根据最大可能冲刷宽度确定。

3 龙口宽度需综合考虑利用要求、合龙工程量和施工条件等因素,综合分析戗堤地形、地质、交通和水力条件而定,有的工程采取工程措施后还可将不利条件转化为有利条件。龙口预进占戗堤一般布置在运输抛投材料方便的河岸一侧,对于河床宽度小于80m时,可不安排预进占,不设置龙口。

**2.6.10** 通常非龙口段施工期间,分流建筑物尚未投入运用,流量全部通过戗堤束窄的口门下泄,改变了截流河道的水流流态。考虑束窄河道水力学条件变化造成两岸非龙口段戗堤稳定及覆盖层冲刷,需限制非龙口段戗堤进占施工进度。截流戗堤在满足通航等条件下,尽量提前进占,为围堰防渗体施工创造有利条件。

1 对通航河道,在非龙口段进占过程中,坝址河段的航运尚未中断,但两岸戗堤施工与船舶通航有干扰。因此,戗堤进占时需尽量减少对航道的影响。

2 两岸非龙口段戗堤施工期间,需划分若干施工时段,限制进占长度。通常,控制束窄口门流速不大于4m/s,落差不大于1m,以减少河床覆盖层冲刷,并考虑戗堤进占尽量利用石渣料。

3 在实际施工过程中,大多数工程都充分利用水情预报,确定截流戗堤顶高程,在保证截流戗堤整个进占过程中不受洪水

漫溢和冲刷情况下,尽量降低截流戗堤顶高程、减少合龙工程量。

**2.6.11** 随着截流戗堤进占,龙口逐渐束窄,落差增大,口门水流流态由淹没流变为非淹没流。最大流速出现在淹没流过渡到非淹没流的临界状态时,龙口断面束窄到三角形过水断面后,口门纵向水面线趋于平缓,流速也降低较快,龙口合龙时,流速趋于零,但落差最大。根据龙口合龙进占水力学指标将龙口分区,是为便于施工时控制抛投材料及采用适当的抛投技术。

**2.6.12** 本条对截流材料提出了要求。预进占段一般流速较低,除裹头外,开挖渣料一般均能满足要求,大量利用开挖渣料可降低截流费用。龙口段一般流速较大,重点需考虑大块石及块石串,混凝土四面体只在开采大块石有困难之处采用。关于储料备用系数,它与截流难度紧密相关,一般不要考虑太大。

截流抛投物需有较强的透水能力,使截流过程中透过戗堤的流量占较大比例,从而可降低截流难度。

**2.6.13** 截流过程中水力现象比较复杂,在理论计算时某些水力计算有局限性和近似性,需通过模型试验验证,发现问题研究对策措施。截流过程中,一般要对动态变化的水流边界条件和主要水力要素进行原型实时观测,用以指导截流施工。

**2.6.14** 导流泄水建筑物分流能力是影响截流难度的重要因素,导流围堰泄水建筑物的进出口围堰往往由于水下拆除和时间紧迫而未能全部清除,从而使实际截流水头比设计计算值高。

一般来讲,截流前工程形象面貌要求如下:

(1) 截流前需完成围堰挡水淹没范围内的水库移民搬迁和库底清理工作。

(2) 对有通航、灌溉和供水等要求的河道,在截流前后必要的通航及灌溉等建筑物能如期投入使用。

(3) 截流前需做好截流物料的合理安排,规划好堆存场地和运输道路。

**2.6.15** 通过截流水力学计算,以确定截流过程中的落差、单宽



流量、单宽能量、流速等水力学参数及变化规律，再据此拟定截流戗堤进占程序，以及不同区段的截流抛投材料尺寸规格和数量。

截流设计流量（河道来流量）在截流过程中分为四部分：龙口泄流量、分流建筑物泄流量、上游河槽调蓄流量和截流戗堤渗流量。因龙口泄流量和分流建筑物泄流量为主要下泄流量，在截流设计水力计算时，可将上游河槽调蓄流量和截流戗堤渗流量作为安全裕度，一般可不予计入。但对于截流流量较大、渗漏流量很大的特殊工程，可结合工程具体情况，酌情考虑戗堤渗漏量。

**2.6.16** 在有覆盖层的河道上截流，为了保证截流安全和减少龙口抛投量、往往采取护底措施。护底优点为：增大了龙口糙率，减少了龙口合龙时工程量、抛投材料流失量，降低了截流难度。软基河床截流，护底加糙是保证抛投料稳定，减少合龙工程量的有效手段。即使是非软基河床，加糙河床改善截流条件也是非常有利的。

## 2.7 基 坑 排 水

**2.7.1** 基坑排水是主体工程施工过程中持续时间比较长的一项重要工作。基坑排水需与围堰防渗方案同步研究，以使二者的总费用最低。基坑排水时间长、费用高，需通过调整围堰轴线布置，将较大冲沟分隔至基坑以外，如基坑内有较大溪沟时，需设置截、排水沟将溪流引至基坑以外，减小基坑降雨汇水量，节约基坑排水费用。国内几个导流工程投资与基坑排水费对比见表 21。

表 21 国内几个导流工程投资与基坑排水费对比表

工程名称	导流工程投资/万元	基坑排水费/万元	百分比/%
五强溪	6678.0	990.0	14.8
小东江	143.7	10.5	7.3
东风	1310.0	150.0	11.5
湾塘	143.0	46.0	32.2

表 21 (续)

工程名称	导流工程投资/万元	基坑排水费/万元	百分比/%
岩滩	5922.3	420.0	7.1
铜街子	8680.0	355.0	4.1
紫水滩	1341.7	49.0	3.7
大峡	1513.8	17.3	1.2
鱼子溪二级	46.0	121.0	263.0

**2.7.2** 围堰闭气时，多在旱季或枯水期，降雨和围堰渗水均是较小的时段，因此，初期排水中以基坑积水为主，基坑积水量可采用下游围堰的基础防渗施工平台洪水设计标准时的下游水位作为积水水位进行计算。渗水量同围堰和基础防渗结构型式、围堰与基础及岸坡结合部位的处理情况、覆盖层的渗透系数等密切相关，影响因素较多，渗水流量难以精确计算。故在初步设计中，初期排水总量常采用经验估算法，一般采用 3~6 倍的基坑积水计算，当覆盖层较厚，渗透系数较大时取上限。在实际施工中，制定措施计划时，还常用试抽法来确定设备容量。

**2.7.3** 计算经常性排水强度时涉及降雨量标准的采用，一种意见是用重现期概念，即按 5~10 年重现期标准，另一种意见是用实测资料，条文中采用实测资料。渗水除由围堰和基础渗透两部分组成外，还要注意基坑内是否有出露的承压水，即泉眼，此部分涌水量也需列入渗水中。施工弃水量主要包括混凝土养护用水、冲洗用水（凿毛冲洗、模板冲洗和地基冲洗等）等，其他施工废水因有时段性或数量相对有限，未被列入主要考虑范围，如灌浆排放废水虽数量较大，但时间较短，土石坝碾压渗水多被坝体吸收等。

**2.7.4** 为了避免基坑边坡因渗水压力过大，造成边坡失稳，对于土质围堰或覆盖层边坡，其基坑水位下降速度必须控制在允许范围内。一般开始排水降速以 0.5~1.0m/d 为宜，接近排干时可允许达 1.0~1.5m/d。其他型式围堰，基坑水位降速一般不是控制因素。三峡工程二期土石围堰基坑初期排水（包括限制性



排水) 日降水位不允许超过 1m, 崔家营航电枢纽工程一期土石围堰基坑, 基坑水位下降速度在前 4d 控制在 0.8m/d 左右, 后 3d 增大至 1.5m/d, 初期排水时间为 7d。

排水时间的确定, 要考虑基坑工期的紧张程度, 基坑水位允许下降速度、各期排水设备及相应用电负荷的均匀性等因素, 进行比较后选定。一般情况下, 大型基坑可采用 5~7d, 中型基坑可采用 3~5d。特大基坑初期排水时间可能较长, 如三峡工程二期基坑实际初期排水时间为 58d。

**2.7.6** 对于采用斜墙防渗的土石过水围堰或混凝土过水拱围堰, 如堰外河槽退水过快, 而堰内水位下降不能与之相适应时, 反向水压力有可能造成围堰破坏, 需经过技术经济论证后, 决定是否需要设置退水闸或止回阀。

**2.7.7** 经常性排水系统布置中必须注意研究开挖规划和建筑物施工方案, 以避免相互干扰。排水系统一般布置在基坑四周, 排水沟一般布置在建筑物轮廓线外侧, 且留有一定的安全距离, 排水泵站布置不要过于分散。

**2.7.8** 排水设备备用量见表 22。因受季节、降雨、河道水位变化的影响, 基坑渗水量是不稳定的。选用不同流量的水泵, 来适应排水量的变化, 避免过多的停顿。但泵的种类不要过多, 以免造成维修、养护困难。强调有可靠电源是为了避免停电导致基坑积水。

表 22 水泵备用量参考

水泵工作台数/台	1	2	3	4	≥5
备用水泵百分比/%	100	50	33	25	20

2.8 施工期度汛

**2.8.3** 临时断面顶部需有足够的宽度, 主要是为了在紧急情况下仍有余地抢筑子堰确保安全。临时断面的边坡需保证稳定, 为防止施工期间由于暴雨和其他原因而坍塌, 必要时要采取简便易行的防护措施和排水措施。SL 274—2001 中第 9.1.4 条规定土

质心墙、斜心墙和斜墙不允许采取分期加厚的形式, 因此斜墙坝和心墙坝的防渗体不允许采用临时断面。

小浪底大坝为壤土斜心墙堆石坝, 最大坝高 154m, 截流后的第一个汛期为围堰挡水度汛, 第二、第三个汛期为坝体挡水度汛。糯扎渡大坝为掺砾黏土心墙堆石坝, 最大坝高 261.5m, 截流后的第一、第二个汛期为围堰挡水度汛, 第三、第四、第五个汛期为坝体挡水度汛。

**2.8.4** 一般情况下土石坝不要过水, 但也有成功过水度汛的工程实例, 如黑龙江龙凤山水库土坝采用在坝身设宽 70m 的临时溢流口过流度汛, 广东省高坪水库土坝、合河水库土坝、凤溪水库土坝, 以及四川省升钟水库心墙坝均采用在下游设置壅水溢流堰过水度汛。土石坝过水断面型式及保护措施一般由水工模型试验验证, 过水防护措施可采用大块石护面、砌石护面、混凝土块面板、钢筋铅丝笼、合金网石兜或混凝土柔性排等。

二滩、小湾、构皮滩、溪洛渡、锦屏一级拱坝均在全年围堰的挡水下施工, 而隔河岩、乌江渡、采用的是坝体过水度汛方式, 前五个水电站大坝为双曲拱坝, 后两个水电站大坝为重力拱坝。混凝土拱坝采用坝面过水度汛方式时, 需经专门论证。混凝土拱坝挡水度汛时需论证封拱灌浆高程。

面板堆石坝经技术经济比较论证, 可采用下列 4 种度汛方式:

- (1) 坝体临时断面挡水度汛;
- (2) 围堰挡水基坑及坝体全年施工;
- (3) 坝体先期过流后期挡水度汛;
- (4) 坝体预留缺口过流坝体分段填筑度汛。

大桥、花山、万安溪、东津、白溪、洪家渡、鱼跳、引子渡、乌鲁瓦提、三板溪等工程采用的是第 (1) 种度汛方式; 黑泉、紫坪铺、公伯峡、巴西辛戈、缅甸道耶坎等工程采用的是第 (2) 种度汛方式; 西北口、珊溪、水布垭、芹山、大河等工程采用的是第 (3) 种度汛方式; 天生桥一级、莲花等工程采用的是第 (4) 种度汛方式。面板堆石坝采用第 (1) 种度汛方式的居多



数, 该种度汛方式充分利用了面板堆石坝施工方便、填筑上升速度快的优点, 可以减少围堰工程量。

面板堆石坝体拦洪度汛时, 垫层区上游坡面需采取固坡措施, 固坡措施可采用碾压低强度砂浆、喷射混凝土、喷洒阳离子乳化沥青或挤压式边墙。挤压式边墙施工技术始用于巴西埃塔坝, 国内已在公伯峡、水布垭、寺坪、芭蕉河、双河口、白莲河等工程面板堆石坝中应用。坝面过水保护措施一般采用加筋堆石、钢筋石笼、碾压混凝土或组合方式。需重视堆石坝体与两岸及下游坝趾附近连接部位的保护。用碾压混凝土保护下游坝坡时需作坝体排水设计。

以砂砾石填筑的面板坝体表面不要采用过水度汛方式, 采用挡水度汛时, 一般要在汛前浇筑混凝土面板, 或加强垫层上游坡面的防护措施。

2.8.5 丹江口、江垭、彭水、五强溪、皂市等工程均采用大坝预留缺口度汛方式。

2.8.7 由于导流泄水建筑物泄流能力低于永久泄洪建筑物, 造成施工期水位高于正常运行期水位, 出现施工期临时淹没问题。还有的工程, 因移民进度落后, 出现施工期临时淹没问题。

### 2.9 施工期蓄水与下游供水

2.9.1 大型水利水电工程的工程量大, 工期长, 为了提前受益, 一般都采取边施工、边蓄水发电的办法。国内已建的许多大型工程, 如新安江、拓溪、乌江渡、丹江口和葛洲坝, 均在施工期开始蓄水。影响施工期蓄水的因素很多, 起控制作用的因素是枢纽施工总进度计划和库区淹没线下的移民进度。在开始蓄水前主要单项工程需要达到规定的防洪要求。这些要求在施工总进度中需作出具体安排。大流量、低水头分期导流的大型枢纽工程, 还可以论证利用围堰挡水受益的可能性。

国内部分水利水电工程下闸蓄水及下游供水措施资料详见表 23。

表 23 国内部分水电工程下闸蓄水及下游供水措施资料统计

序号	工程名称	下闸水头	闸门最大挡水水头	下闸蓄水概况	下游供水措施
1	溪洛渡	1 号、6 号导流洞: 8.59m; 2~5 号导流洞: 21.62m; 1 号、2 号、5 号、6 号导流洞底孔: 15.54m; 3 号、4 号导流洞底孔: 55m; 7~10 号导流洞底孔: 150m (控)	1 号、6 号导流洞: 16.63m; 2~5 号导流洞: 93.89m; 1 号、2 号、5 号、6 号导流洞底孔: 51.89m; 3 号、4 号导流洞底孔: 190m; 7~10 号导流洞底孔: 150m	导流洞及导流底孔共分 5 批下闸, 依次为: 1 号、6 号导流洞→2~5 号导流洞→1 号、2 号、5 号、6 号导流洞底孔→3 号、4 号导流洞底孔→7~10 号导流洞底孔。 3 号、4 号导流洞底孔下闸水库开始蓄水, 蓄水时考虑了下泄通航流量	1 号、6 号导流洞下闸, 其他导流洞供水, 2~5 号导流洞下闸后, 水位升至导流底孔高程的过程中, 下游将断流的 12.21h, 以后由不同高程导流底孔及水工泄洪深孔接续向下游供水
2	小湾	1 号、2 号导流洞: 11.8m; 导流底孔: 79.5m; 导流中孔: 83m	1 号、2 号导流洞: 70m; 导流底孔: 135m; 导流中孔: 100m	1 号、2 号导流洞先同时下闸→导流底孔下闸→导流中孔下闸	导流洞下闸后水位升至导流底孔高程的过程中, 下游将断流 2.42d, 断流期间可由下游漫滩水库有效库容调节, 随后由设置在坝体不同高程的导流底孔、中孔及永久放空底孔接续供水

表 23 (续)

序号	工程名称	下闸水头	闸门最大挡水水头	下闸蓄水概况	下游供水措施
3	锦屏一级	1号、2号导流洞: 8.88m、 12.02m; 导流底孔: 100m (控)	1号、2号导流洞: 72.4m; 导流底孔: 105m	1号、2号导流洞同时下闸 → 导流底孔下闸。 导流洞封堵完成后水库开始蓄水, 蓄水期间下泄流量不能完全满足二滩发电用水要求, 二滩水电站在蓄水期需灵活调度	生态环保流量 720m <sup>3</sup> /s。 1号、2号导流洞下闸后, 水位升至导流底孔高程的过程中, 下游将断流 132.9h, 导流底孔在 160.78h 后即可下泄全部来水流量, 该期间下游二滩水电站利用自身的调节库容供水发电
4	水口		导流底孔: 62m		向下游供水 308m <sup>3</sup> /s。 最后一个导流底孔下闸后, 由 2 个 5×8m 永久泄水底孔宣泄
5	二滩	左导流洞: 7.7m; 右导流洞: 8m; 导流底孔: 18.5m	导流底孔: 186m	左导流洞下闸 → 右导流洞下闸 → 导流底孔 (导流隧洞封堵完毕后)	两岸导流洞封堵完毕后立即下导流底孔闸门, 导流底孔下闸约 20h 后, 库水位即上升至 1060m 二级放空孔底板高程, 对下游供水无影响

表 23 (续)

序号	工程名称	下闸水头	闸门最大挡水水头	下闸蓄水概况	下游供水措施
6	构皮滩	导流洞: 11.8m	导流底孔: 140m	导流洞下闸 → 导流底孔下闸 (导流隧洞封堵完毕后)	导流洞下闸后水位从 430m 蓄至导流底孔高程 490m; 所需时间较短 (仅 3.4d), 不考虑向下游供水, 从 490m 蓄至最低发电水位过程由永久放空孔或中孔向下游供水, 供水量 10m <sup>3</sup> /s
7	大岗山	导流洞: 9.1m; 导流底孔: 37.57m	导流洞: 65.45m; 导流底孔: 125m	导流隧洞下闸 → 左导流底孔下闸 → 右导流底孔下闸。 导流隧洞下闸后水库先不蓄水, 综合考虑来流量及下游电站调度后, 选择合理时间依次分梯段水库蓄水	导流洞下闸后水库水位蓄至左导流底孔底高程约需 11.7h, 而下游龙头石电站水库容量可满足保证出力发电 13.3h, 因此不考虑下游供水措施, 随后由左导流底孔供水, 封堵左底孔由右底孔供水, 封堵右底孔后由泄流深孔接续供水



表 23 (续)

序号	工程名称	下闸水头	闸门最大挡水水头	下闸蓄水概况	下游供水措施
8	拉西瓦	导流洞：20m	导流洞：165m； 导流底孔：120m	导流洞下闸→导流底孔下闸	导流隧洞下闸后蓄水至导流底孔过程中，下游断流 1.5d，影响较小，此后由底孔泄流，深孔关闭，控制下泄流量且 $Q=300\text{m}^3/\text{s}$ ，满足下游供水要求。导流底孔下闸封堵期由泄洪深孔向下游供水
9	龙潭	导流洞：15m	导流洞：105m	两条导流洞同时下闸，蓄水期间考虑到上游天生桥一级水库的调节影响	高程 290m 处设 2 个 $5\text{m}\times 8\text{m}$ 底孔。 水库初期蓄水期断流 15d，下游岩滩水电站依靠其自身的调节库容仍可基本满足电站保证出力发电运行的要求，相应下游其他方面用水要求亦可基本得到满足。当蓄水位超过 290.0m 后，由泄洪底孔向下游供水

表 23 (续)

序号	工程名称	下闸水头	闸门最大挡水水头	下闸蓄水概况	下游供水措施
10	金安桥	1 号导流洞右边孔：11.45m； 1 号导流洞左边孔：21m； 2 号导流洞两孔：6.35m	1 号、2 号导流洞：108m	2 号导流洞两孔下闸→1 号导流洞右边孔下闸→1 号导流洞左边孔下闸→旁通洞下闸。 通过接续下闸，最终使得水位蓄至永久冲沙泄洪孔的过程中，下游不断流，在满足下游供水要求的前提下，水库蓄水	向下供水 $350\text{m}^3/\text{s}$ 。 导流洞、冲沙底孔接力供水，2 号导流隧洞进口设置旁通洞向下游供水，通过接续以满足下游供水要求，下游不断流
11	糯扎渡	1 号导流洞：20m； 2 号导流洞：15m； 3 号导流洞：20m； 4 号导流洞：67.5m； 5 号导流洞：44.5m	1 号导流洞：119m； 2 号导流洞：114m； 3 号导流洞：119m； 4 号导流洞：89m； 5 号导流洞：150.5m	导流洞分三批下闸，依次为：1~3 号导流洞（1 号、2 号、3 号依次下闸）→4 号导流洞→5 号导流洞。 蓄水分两阶段，1~3 号封堵后第一阶段开始蓄水，5 号封堵后第二阶段开始蓄水	向下供水 $400\text{m}^3/\text{s}$ 。 考虑到下游景洪电站调节库容，分析可允许断流 2.5d，1~3 号导流洞封堵后，先断流 28.35h，水位蓄至 4 号导流洞（下游供水洞）底高程后，由供水洞泄流，65h 后下泄流量满足下游供水要求。4 号导流洞封堵后，由 5 号导流洞及泄洪洞接力供水

表 23 (续)

序号	工程名称	下闸水头	闸门最大挡水水头	下闸蓄水概况	下游供水措施
12	水布垭	1号、2号导流洞: 18m	1号、2号导流洞: 100m	2条导流洞同时下闸, 需水至永久放空洞底高程, 随后由永久放空洞控制泄水, 同时满足下游供水	导流洞下闸后蓄水至永久放空洞开始泄流前, 约断流 21d, 下游隔河岩水电站依靠水库调度方式减小影响, 坝址下游约 10km 范围为断水区域, 期间无工业, 主要为约 150 人生活用水, 采用洒水车运送生活用水结合补偿方式解决
13	天生桥 一级	导流洞: 17m	导流洞: 150m	1997 年 12 月 15 日导流洞顺利下闸后, 至 12 月 18 日放空洞开始过流, 进入水库蓄水第一阶段, 此后, 由于放空隧洞工程尾工需进行, 故至 1998 年 8 月 25 日, 放空隧洞工作弧型门开始节制, 水库水位 1998 年 9 月 10 日达 738m 高程, 至当年 12 月 28 日, 首台机组正式并网发电时, 水库蓄水位 736m 高程, 已超过水库死水位 5m, 满足首台机组发电要求, 初期蓄水任务顺利完成	向下游供水 305m <sup>3</sup> /s。 1998 年后汛期蓄水阶段由放空隧洞向下游供水

表 23 (续)

序号	工程名称	下闸水头	闸门最大挡水水头	下闸蓄水概况	下游供水措施
14	梨园		导流洞: 100.23m		向下游供水 305m <sup>3</sup> /s。 左岸泄洪冲沙洞向下游供水
15	瀑布沟	导流洞: 16.4m	导流洞: 118.5m		向下游供水 327m <sup>3</sup> /s。 利用下游深溪沟电站围堰前库容蓄水并向下游供水
16	龙开口		导流底孔: 84m		向下游供水 380m <sup>3</sup> /s。 最后一个导流底孔下闸后, 由永久泄洪中底孔和冲沙底孔宣泄下游供水流量
17	滩坑	导流洞: 6.4m	导流底孔: 89.99m		向下游供水 7m <sup>3</sup> /s。 下游有支沟天然来水
18	功果桥	导流洞: 7.5m	导流底孔: 65.5m		无专门供水设施, 采用大坝底孔泄流
19	鲁地拉	导流洞: 15m	导流洞: 85m		向下游供水 400m <sup>3</sup> /s。 坝体设放水孔
20	碗米坡	导流洞: 8.13m	导流洞: 50m		下游风滩水库水量及回水在满足自身发电需求下, 尚可满足碗米坡电站下闸断流期下游供水要求
21	向家坝	第一批底孔: 45.71m; 最后一个底孔: 72.95m	导流底孔: 100m		向下游供水 1200m <sup>3</sup> /s。 导流底孔分批下闸, 先 5 孔后 1 孔, 1 个导流底孔供水



2.9.2、2.9.3 在进行施工期蓄水历时计算时,需综合考虑下游用水要求,因为下游通航、灌溉、发电和居民生活、生态用水有时是重复利用,不要简单叠加得出,要通过综合分析,扣除合理用水量。施工期蓄水历时的计算方法常用频率法和典型年法,频率法一般偏于安全,为国内设计和施工单位常采用。施工蓄水后,要校核坝体面貌,要求各月末坝体最低坝段高程需满足下月或蓄水时段坝体度汛的最高水位,其度汛标准与同期坝体度汛标准相同。除汛期洪水不能越过坝体外,还需校核临时挡水断面的稳定和应力,混凝土坝纵缝灌浆和坝体封拱灌浆达到相应高程。施工期蓄水前,坝前水库一般具有一定库容,但枢纽尚未达到设计泄洪能力,在计算施工水位及校核防洪度汛安全时,需要考虑水库调蓄作用。

水库蓄水期的来水保证率与河流的来水特点有关,对于上游有大型水库控制、水量稳定、蓄水历时较短的情况,可选用较高的保证率。对年调节水库,一般采用保证率75%、50%年份的入库径流过程和不同用水量方案进行入库调节计算,采用丰水年份(保证率15%、10%、5%)的水库蓄水过程进行防洪安全复核。对多年调节水库,采用枯水年份入库径流计算完成初期蓄水的时间;采用平水年份入库径流计算可争取完成初期蓄水的时间;采用丰水年份的入库径流检验初期蓄水过程中水库工程的防护安全。

水库初期蓄水计划需满足大坝及库岸稳定要求,提出控制水库水位及上升速度的措施等。如小湾、溪洛渡、锦屏一级高拱坝初期蓄水采取水库分期蓄水方案,确定每期的控制水库水位及水库水位允许上升速度。

三峡工程分三期建设,受水库移民和碾压混凝土围堰高度等因素的影响,第一次库水位仅蓄至139m,利用围堰挡水发电。

二滩下闸分两次完成(第一次在1997年11月仅完成导流隧洞下闸,第二次,1998年5月1日完成临时底孔下闸),因漂木问题造成的导流隧洞闸门跨度大和因下游生活用水造成的断流时

间要求短是考虑的主要因素。

2.9.4 水库初期蓄水时可采取临时措施向下游供水。梯级开发河流上可利用上、下游水库的调节库容协助施工期蓄水和供水。如金沙江中游梨园水电站导流洞下闸蓄水期间,利用下游阿海水电站水库回水保证上游梨园水电站下闸蓄水时段下游河道不出现脱水河段。施工下闸蓄水期向下游的供水设施,需尽可能与永久泄水建筑物相结合,若不具备结合条件时可采取水泵抽水、虹吸管供水、旁通洞等措施供水。

2.9.5 对于导流隧洞工程,运行期水流流态复杂,水流泥沙和漂浮物不可控,长时间运行可能产生损坏,且缺乏检修条件,因此下闸蓄水前对隧洞进口闸门门槽、门槛等进行水下检查、修补是必要的。在下闸前要结合闸门井的施工道路布置,研究下闸后的临时抢险措施。例如:

(1) 1993年11月19日,福建某水电站下闸时,就出现过进水塔闸后顶板局部开裂的事故,后经大量抛投堵漏材料才初步切断了渗水。

(2) 20世纪60年代末黄河刘家峡水电站也出现过闸门下不到底,洞内漏水不止事件。

寒冷地区须在流冰期之前完成下闸,以免流冰卡塞,影响下闸。

## 2.10 施工期通航与排冰

2.10.1 在常年通航河道建造水利水电工程,施工期通航措施解决是否合理,不仅影响整条江河的航运事业,上下游人民生活和建设,而且直接影响到工程投资、建设工期,甚至成为能否建坝的决定因素之一,通航河道上的导流设计要妥善解决施工期通航,在调查核实施工期间各年客货运量及年内分配情况等基本资料后,结合枢纽建筑物布置,提出满足施工期通航要求的导流方案。在确定施工通航任务和规模、标准时,不能仅从施工通航设施造价考虑,全面比较因停航或断航所造成的损失,除了直接损



失外，还要注意对社会经济生活所造成的损失。

要求维持施工期不断航并非所有河道均能办到，长江是我国最重要的通航河道，葛洲坝工程截流期间也断航半年多。临时断航期间可用各种临时措施解决货运过坝问题。在通航河道上无论采用何种导流方案，均需研究施工期航运过坝方案，但经研究后认为不可能或不合理时，也可采用其他过坝措施，如客货分流、陆路转运等。

短期断航期间货运量亦可从运输管理上采取提前或滞后安排运输加以解决。即经国家有关部门总体协调，实行分流、调节、物资储备等措施。葛洲坝工程大江截流后断航期用此方式，三峡工程也用此方式减少过坝运量。

陆路转运主要指公路转运，其优点是运输线可绕坝通过，对工程施工干扰小。缺点是，需修建专用转运线和相应的码头设施，建设投资大，运输费用高，物资损耗多；常规公路运输能力小，过坝运量较大时往往不能满足要求，只能用于货运量不大的河流或作为短期停航时的临时过坝措施。

断航期间也可采用陆路翻坝，可在坝址上、下游设置临时码头，将旅客及少量必须过坝的货物经临时码头接公路翻坝运输。如三峡工程导流明渠截流至永久船闸通航前就是采用修建临时码头翻坝运输。

**2.10.2** 此条为施工期通航规划的主要内容，施工期通航规划，一般根据工程规模、航道等级、货运量大小，船舶吨位及通航水位（流量）保证率要求等，研究各种现实可行的临时通航或其他过坝方案，作技术经济比较确定。

在施工期内一般不考虑船舶吨位的发展，选择设计过坝运量需同施工期通航规划结合进行，尽可能维持原通航客、货运水平。如维持原通航水平有困难，或因耗资过大运行费用太高时，可考虑由陆路分流，以减轻临时过坝的负担。须在充分调查研究的基础上，合理安排，作出方案比较，并同有关部门协商经批准确定。

施工期各阶段的通航标准可能不尽相同，需分别拟定。定出通航标准总的要求，最高、最低的范围值。

**2.10.3** 本条所列是施工期常用的通航方式，并被一些工程所采用。例如：葛洲坝、大藤峡工程一期利用原河道通航，二期利用永久船闸通航。新安江、安康等工程采用底孔过船通航；闽江水口、长江三峡、乌江银盘和嘉陵江草街航电枢纽工程采用明渠通航。

由于施工期间通航水位随着工程施工的进展而变化，单一的通航方式难以适应自开工至蓄水发电的全过程，各施工期需要采取不同的通航措施，并能互相衔接。

对位于客货运量大、重要航道上的水利枢纽工程，施工期较长，采用单项临时通航设施，不能满足客货运量通过的需要和保证不断航的要求时，一般采用几种临时设施相结合的方式，如临时船闸与导流明渠相结合，两者相辅相成交替使用，三峡工程二期施工期即采用此种通航方式。

**2.10.5** 分期导流方式常利用束窄河床通航，束窄河床通航又分为两种情况：一是由束窄后的原主河道通航；二是对浅滩加以疏浚或开挖人工航道通航。前者按天然及渠化河流设计，后者按限制性航道设计。设计内容及方法详见 GB 50139。

分期导流施工程序，一般先围浅滩后围深水河槽，尽量推迟改变原河床主航道。如因枢纽布置或提前发电要求，需要第一期先围主河槽时，为满足通航要求，对浅滩需加以疏浚，或开挖一条人工通航渠道，疏浚要求或渠道宽度、水深、弯道等布置，可结合地形条件和当地情况参照航道等级标准确定。其比降、流速、流态均需满足安全通航要求。纵向围堰的布置需尽量保持水流顺直，减少进口、出口集中落差，避免发生跌水、回流、旋涡等不利于通航的水流状态。当地形复杂时，根据地形特点，扩挖岸坡滩边，切除突嘴，炸平礁石或修建丁坝等导流建筑物，顺正流向，减缓流速，调整比降，改善流态。

束窄河床通航需设计确定，河床束窄率、航道宽度及水深、



通航时段及相应最高、最低通航水位、通航保证率、设计最小及最大通航流量、允许通航流速、坡降、年通过能力等主要水力指标及通航特征值。

通航流量与通航水位保证率取决于河床束窄程度，在导流的其他条件允许的情况下，对不同河床束窄率选择几个流量级，分别计算其流速、比降、水深等，并统计其相应的通航天数与保证率，加以综合分析比较确定。通航流量与通航水位保证率可用历年平均通航天数占全年天数的百分率表示。确定通航流量和水位时需考虑下列因素：

(1) 通航水位保证率需满足航运能力的要求。一般保证率达到 90% 时，对通航影响较小。

(2) 一次停航天数，即一次洪水连续停航天数及其对航运的影响。

(3) 最大、最小通航流量要与上、下游滩险通航情况基本相适应。

(4) 如因河床束窄率过大，通航水位（流量）保证率不能满足要求时，可设置助航设施，以提高通航水位（流量）的保证率。

由于影响通航的因素较多，各条河流的水流条件、通航船舶大小、机动船功率等也各不相同，故通航主要水力指标无统一标准。一般认为，当流速小于  $2.0 \sim 2.5 \text{ m/s}$  时，机动木船和小马力船队可以逆水自航；大型船舶（队）自航流速可达  $3.0 \sim 4.0 \text{ m/s}$ ，横行过江允许对岸航速大于  $1.0 \text{ m/s}$ ，局部水面集中落差不大于  $0.5 \text{ m}$ 。

通航允许流速、比降的确定，需要根据河流的特性具体分析，并同航运部门协商确定。一般取决于下列因素：

(1) 船舶型式、自航推力及其技术特性，即航速与实际流速的差值大小。

(2) 航道宽度、水深及其断面流速的分布。

(3) 大流速、大比降河段的长度，考虑船舶冲程的影响，若

长度短，允许流速及比降可大一些；反之，则需小一些。

**2.10.6** 采用导流明渠通航保证率高，比其他通航措施便捷、灵活、可靠。由于明渠兼有施工期通航任务，明渠中水流流速（含横向流速）、坡降、流场分布、斜流效应及航道尺度，均需满足通航要求。

导流明渠内的施工期航道布置尽可能与天然航道平顺衔接。进出口适当扩大成喇叭口状。控制上游进口与天然河道主流方向夹角不大于  $25^\circ$ （无通航要求时，放宽为  $30^\circ$ ），使水流进入明渠前逐渐收缩，流出明渠后又能逐步扩大。明渠上下游口门不能留有子埂。

明渠轴线曲率半径  $R < 3B$ （ $B$  为明渠水面宽度）时，水流会在靠近凸岸部位产生离解，恶化流态，加大流速，一般要控制  $R > 3B$ 。明渠进出口距离上、下游土石围堰堰脚一般大于  $30 \text{ m}$ 。土质河岸及渠底在设计最高水位，基坑抽水到最低水位时，渠边与基坑边的最短距离要满足渗透稳定要求。

纵向底坡设计需保持最大通航流量时，仍为缓流状态。当渠道水深较大，远超过航深要求（如三峡工程），过水断面主要受流速控制。为减少开挖量，均衡航道流速，可采用复式断面抬高明渠流速较低部位（主要为进、出口部位）的高程，做到水流较高流速区的水面比降较小，而高比降区的流速又较小，船舶上行只须克服坡降阻力或水流阻力。

当渠道水深在枯水期仅能基本满足航深要求时，采用沿纵向平底布置形式（如飞来峡、万安工程），有利于减缓水流流速、均化水面坡降、提高河床质的抗冲稳定性。

横向断面要力求满足枯水期航深要求和大水期通航流速和流态要求，一般采用复式断面。三峡施工通航试验成果表明，左侧低渠渠底高程每降低  $1 \text{ m}$ ，可减少右侧高渠坝轴线附近流速  $0.15 \text{ m/s}$  左右，说明明渠高低渠底高差越大，调整、降低凹岸流速的效果越好；降低明渠上半段凸岸渠底高程是减少明渠凹岸坝轴线附近流速最经济、可靠的方法。因此，一般将低渠布置于



凸岸（纵向围堰侧）或航道中，高渠布置在凹岸侧。进口段凹岸及出口段凸岸（纵向围堰）采用较陡岸坡，以减少弯道分离流，弯道内至出口凹岸采用较缓岸坡，以消除反向环流。这种形式可以减少明渠开挖量，枯水期水浅流速低，船可走低渠；高水期过流断面形心偏靠凸岸，有利于减少凹岸流速，有利于高水期船走凹岸，不斜穿主流，比较安全，还有利于简化凹岸防冲设施。

导流明渠通航需设计确定：明渠全长、进口上弯道转弯半径、进口底高程、出口下弯道转弯半径、出口底高程、渠底坡、明渠断面型式、底宽、上行与下行航线、设计最大与最小通航流量、设计最高水位、最低通航水位、通航保证率、允许通航流速、坡降、船舶航行允许最小对岸航速、允许通过船舶吨级、尺度及队形、通航时段及年通过能力等主要水力指标及通航特征值。

纵向流速大，不仅船舶上水困难，即使下水也会因为船舶对水航速减小，降低舵效，操作船舶困难，增加航行危险。因此，明渠设计通航流量，按大水期船舶安全航行要求的流速控制。纵向允许流速一般按各类船舶保持上水的平均对岸航速不小于 1.0m/s、局部航段对岸航速不小于 0.5m/s 所能克服的最大流速，作为判别船舶能否通过导流明渠的依据。

相对于航线的横向流速，或出口扩散产生的斜流，会对船队产生扭矩和侧推力，对下行船队特别危险，以抵抗横向流速作用的船舶用舵量不大于 25°作为控制依据。一般控制横向流速不超过 0.2m/s。

纵向围堰上游头部产生绕流，形成局部水流跌落。一般控制局部集中落差不大于 0.5m，葛洲坝工程不同表面流速所允许水面比降见表 24。

导流明渠内需保持最大通航流量时为缓流状态，水流顺畅，不出现泡漩、剪刀水、回流等不利于通航的水流流态。各工程实际采用的导流明渠尺度及通航标准见表 25。

表 24 葛洲坝工程允许通航流速与比降

船队类别		长航船队							地方船队		木排
通航方式		白航			改队		绞滩	大马力拖轮助航	白航	大马力拖轮助航	流放
通航指标	表面流速 / (m/s)	≤4.5	≤4	≤3	≤4.5	≤3.5	≤6.0~6.2	≤5.4~5.5	平均 ≤2.0 局部 ≤2.5	≤3	≤3.5~4
	比降 / ‰	≤1	≤3	≤4	≤3	≤7	≤8	≤10		≤5	

**2.10.7 临时船闸**一般用于大、中型工程的分期导流施工期通航。当临时通航不能与永久通航建筑物结合时，可在第一期工程内修建临时船闸，以解决第二期工程施工至水库开始蓄水这一期间的施工期通航。由于临时船闸使用期较短，投资大，目前仅有五强溪水电站及三峡水利枢纽等。

**2.10.8 在沙质河床中**，采用适当的整治措施可以改变河水流向和流态，使其满足施工期通航要求。航道整治包括整治宽度、整治水深和最大整治流量。三峡工程导流明渠上、下游连接河段经整治后，提高了通航流量。

由于泥沙淤积产生边滩和散滩，影响通航，需配备疏浚船维护航道。

在束窄河床、人工航道和导流明渠内均可设置助航措施，以改善通航条件，提高通航能力。助航设施常有大马力拖轮助航和设置绞滩两种形式。大马力拖轮机动灵活，绞滩虽然投资少，见效快，但绞速慢（15~25m/min），常用于急流险滩。三峡工程明渠施工期通航的助航措施采用大马力拖轮和设置绞滩取得了成功。

大马力拖轮助航，如多瑙河上的铁门枢纽，在围堰截流戗堤进占过程中，将主河槽束窄至 70m 宽时，水面流速达 4.8m/s，局



表 25 各工程实际采用的导流明渠尺度及通航标准

工程名称	通航能力		通航方式	通航标准						通航明渠尺度			实际水深 /m	通航船舶
	年运量	等级		通航流量 /(m <sup>3</sup> /s)	纵向流速 /(m/s)	横向流速 /(m/s)	局部落差 或比降	水深 /m	长度 /m	底宽 /m	纵向底坡及高程 /m	弯曲半径 /m		
三峡 (长江)	下水货 运量 1550 万 t, 客运 250 万 人次	I	长航及 地方船队 均自航	≤10000	≤2.5	用舵量 不大于 25°	平均小于 0.4%, 最大比降 小于 1%	≥5.0	凹岸边线 长 3950, 轴长 3410	高梁 100; 低梁 250; 总宽 350	高梁 (高程 58m) 为平底, 低梁沿水流方 向依次高 58m、 50m、45m 及 53m 四级底部 高程,高低梁 连接坡为 1:1	要求不小于 750m,进口右 边线 777.6m, 出口右边线 787.5m,航道 中心线 1000m	最小 7~20m (水面高程 55m) 最大 11.5~24.5m (水面高程 69.5m)	地方船队 2× 500t+1×700t+ 800HP 长航船队 3 ×1000t+2640HP, 2×1500t+2000HP
			长航船队 均自航 减载减载 数滩及 大马力 拖轮助航	≤20000 20000~ 35000	≤4.4			≥5.0						
飞来 峡	300 万 t	II	自航	≤3000	≤3.0	≤0.2~ 0.3	局部落差 不大于 0.5m	≥1.0	轴长 1897.4	航道宽 不小于 50, 采用高梁 100, 低梁 200, 总宽 300	高梁 (高程 11m) 为平底, 低梁 (高程 9m) 为平底, 高低梁连接坡 为 1:3	要求小于 1000~1200m, 采用 1200m 及 1421m	枯水期走低 梁,最小水深 1.4m,大水走 高梁,最小水 深 3.5~5.3m	106t 机驳 (98HP) 船型尺寸 32.7m×6.2m× 0.8m,90t 货驳船 型尺寸 30.0m× 6.2m×0.8m,顶 推船队尺寸 52.17m ×6.2m×0.85m
			150~ 180kW 拖轮助航	3000~ 5000										

表 25 (续)

工程名称	通航能力		通航方式	通航标准						通航明渠尺度			实际水深 /m	通航船舶
	年运量	等级		通航流量 /(m <sup>3</sup> /s)	纵向流速 /(m/s)	横向流速 /(m/s)	局部落差 或比降	水深 /m	长度 /m	底宽 /m	纵向底坡及高程 /m	弯曲半径 /m		
万安 (赣江)	设计 100 万 t, 实际 124 万 t	II	自航	≤2000	≤2.0		局部落差 不大于 0.5m	≥0.9	轴长 1530	航道宽 50, 总宽 170~ 180	航道 (高程 55m) 为平底, 其他高程 57~ 68m,高低梁 连接坡为 1:3	船不小于 1200m,木排 不小于 1400m, 采用 3000m	枯水期走航 道,最小水深 1.5m,大水时 水深 5.3~7.3m	100~200t 铁驳 船,50~79t 铁驳 船,设计水位通航 保证率为 95%,相 应流量 175m <sup>3</sup> /s, 所对应水位 57.5m
			176.5kW 拖轮 助航	2000~ 4000	≤3.5									
银盘 (乌江)	100 万 t	V	自航	400~ 3500	≤2.8		小于 3%	≥2.6	轴长 789.06	90	明渠进口底 板高程 177.0m, 出口底板高程 176.0m,在坝 轴线上,下游 各设一段长 100m 变坡段, 坡比为 5%			300~500t 机驳 船型尺寸 46.8m× 8.8m×2.2m
			绞滩助航	4000~ 6000	≤4.4									



部比降达 5%，采用 2400HP 拖轮助航，仍能维持通航。我国乌江、川江上的急流滩险，使用出力 7tf (1tf=9.8kN) 的绞滩机助航，能克服 6~7m/s 流速。当航道流速超过船舶安全通航流速标准时，采用助航措施。

绞滩机助航的最大允许流速，不仅决定于绞机的牵引力，还取决于被绞船的类型与结构。木质船的坚固性差，强行牵引将导致船舶破坏，钢驳结构坚固，能承受较大牵引力，但也要加固系缆部位。按绞滩的动力分类，有人力绞滩、水力绞滩和机械绞滩。人力绞滩已较少采用，水力绞滩常用于小河流，船舶吨位一般在 30t 以下，流速不大于 3.0m/s；机械绞滩广泛应用于主要河流的急流滩险，其动力有电动机、柴油机、蒸汽机等型式。

**2.10.9 天然河道开江排冰的冰块尺寸具有很大的随机性，武开江河道尤甚。**导流建筑物的孔口尺寸难以满足所有冰块通过的要求，必要时，要采取限制冰块尺寸的措施。如桓仁工程，开江前在上游 2km 范围内，用撒砂将冰面分割成 2m×3m 的方法，开江时，撒砂部位冰体变薄，开江时沿变薄部位开裂，以此来控制流冰冰块尺寸。

在流冰河道上、下游已建水库的末端，由于流速降低，入库冰花或冰块堆积形成冰塞或冰坝，造成壅水，给在上游的水利枢纽、围堰和施工带来威胁和危害。

下游有水库壅水的排冰，可研究采取下列措施：

(1) 加高围堰。在确定围堰高程时，考虑下游水库末端形成冰塞冰坝的最高壅水值。

(2) 河道整治。河流上流速较大的不封冻的敞露水面是产生冰花的场所。据国内外实测资料可知，当平均流速小于 0.7m/s 时，流冰可插堵形成冰盖。为消除冰花，可扩大河道过水断面，降低流速，使其形成冰盖，避免产生冰塞堆积体和冰塞壅水。

(3) 拦冰河埂。在地形不规则或呈喇叭形或有岛可作支撑的条件，且平均流速在 0.7m/s 以下，布置河埂拦冰，使流冰插堵

形成冰盖。

(4) 在条件允许时，开河前夕，下游水库加大下泄量，将有利于上游水利枢纽顺利地度过凌汛。

上游有水库进行水量调节的排冰：

(1) 上游水库较近，泄水温度较高，使河段在一定距离内不结成冰盖或仅有少量冰盖，从而简化了下游枢纽的施工期排冰。有时正在蓄水的上游水库可完全把开河期的冰块蓄在库内，使其下游水利枢纽的施工解除冰情的危害。

(2) 上游水库较远时，则可根据水文冰情预报，利用水库闸门控制凌汛期下泄流量，为下游河道文开江创造条件，以解决施工排冰问题。

流冰河道上施工导流的几个典型工程实例如下：

(1) 桓仁工程 1959 年春截流后，排冰仅限于 4 个宽 9m 的坝体缺口，由于上游混凝土围堰炸除后留下间距为 7m 的 4 个支墩，故实际过冰为支墩所形成的缺口控制。为保证顺利排泄冰凌，开江前夕在坝前 2km 的范围内进行人工撒砂，形成 2m×3m 的长方格子，使之连成网状。1959 年春为典型文开江，最大冰厚仅 0.54m，开江前夕减为 0.3m 左右，整个江面已有 1/3 以上面积扩为清沟。3 月 23 日开江时，冰盖被分割为 2m×3m 小块，顺利过坝下泄，个别较大冰块因其厚度薄，在缺口破碎后下泄。

(2) 1977 年春，白山工程截流后在明渠上、下游 1.5~2.5km 范围内破冰，目的是使冰盖破成小于 6m×6m 的小块（根据模型试验结果，对于 9m 宽的底孔，6m×6m 以下冰块基本上能顺利地通过），下游破冰是为流冰开出一条畅通水道，以防下游产生冰坝壅水，并对下游河段堆积严重处进行了重点破冰。底孔经历 4 次流冰未被堵塞，安全度凌。该工程围堰堰前库容 3500 万 m<sup>3</sup>，开江的洪水过程线呈尖瘦型，水库有一定的调蓄作用，故对流冰采用排蓄结合的方法。

(3) 青铜峡大坝梳齿在 1966—1967 年冬季封堵时，主体工



程已基本完工,采用排蓄结合方式解决流冰问题,即用电站7条泄水管排冰,当堰前水位较围堰顶高出约0.5m,堰顶流速接近1.0m/s,具备排冰的条件;利用峡谷以上开阔段蓄冰,该库距坝8km河段为峡谷弯道(水面宽300m左右),弯道以上河宽一般为2.0~3.0km,在峡谷弯道处设置障碍物,使冰凌停留封冻,并大量蓄在上游开阔河段内,而下游基本无冰凌流出,工程安全度凌。

**2.10.10** 寒冷地区的河道施工期流冰问题需予充分重视,尤其武开江的河道,流冰不畅极易形成冰塞、冰坝,或流冰壅塞基坑,因处理积冰而影响工期。

## 2.11 导流建筑物封堵

**2.11.1** 汛后下闸封堵导流泄水建筑物,水位上升慢,利于下闸封堵工程施工。

**2.11.2** 根据我国几十年来的水利水电建设经验,大部分隧洞封堵体是水工结构的组成部分,均设在地质条件较好的洞段,其标准按永久建筑物设计。施工支洞的封堵体按其功能设计,主要由运行情况决定。输水发电洞和泄洪洞等永久建筑物的施工支洞封堵体主要充当围岩作用,需要按永久建筑物设计。导流隧洞的施工支洞封堵体主要起临时挡水作用,需要按临时建筑物设计。

**2.11.3** 封堵体布置需注意地质条件、前期支护、相邻建筑物的布置。封堵前需对支护进行认真的清理、检查,以保证封堵的安全进行。封堵体与相邻建筑物的防渗需有较好联系,以保证枢纽防渗要求。当洞轴线穿过坝体防渗帷幕线时,封堵体要设置在防渗帷幕线上,与其成为整体,满足坝体防渗要求。

**2.11.4** 等断面封堵体长度可按式(1)~式(3)计算:

$$KS \leq R \quad (1)$$

$$S = \sum P \quad (2)$$

$$R = f' \sum W + C' \sum \lambda_i A_i \quad (3)$$

式中  $K$ ——按抗剪断强度计算的抗滑稳定安全系数;

$S$ ——荷载效应设计值;

$R$ ——封堵体的承载力设计值;

$\sum P$ ——封堵体承受的全部荷载效应对滑动面的最大切向分力,荷载效应计算需符合SL191规定,kN;

$\sum W$ ——封堵体承受的全部荷载效应对滑动面的法向分力,向下为正,荷载效应计算需符合SL191规定,kN;

$f'$ ——混凝土与围岩或混凝土与混凝土的抗剪断摩擦系数;

$C'$ ——混凝土与围岩或混凝土与混凝土的抗剪断凝聚力,kPa;

$A_i$ ——除顶拱部位外,封堵体底面、侧面与围岩或混凝土接触面的面积, $m^2$ ;

$\lambda_i$ ——除顶拱部位外,封堵体底面、侧面与围岩或混凝土接触面的有效面积系数,底面 $\lambda=1$ ,侧面 $\lambda$ 值根据工程具体情况确定。

封堵体与围岩或混凝土的接触面包括顶面、底面和侧面。即使通过灌浆顶部接触面也不可避免地出现脱空或脱离,因此,封堵体稳定计算中,不计顶拱凝聚力。由于重力作用,封堵混凝土底部接触面能够保证接触密实,故底面接触面有效面积系数 $\lambda$ 取1。

侧向接触面受封堵混凝土的断面形状、浇筑质量、收缩性能、接触面条件(如岩石开挖面、混凝土衬砌的凿毛情况等)、接触灌浆及接缝灌浆质量等影响较大,因此,侧向接触面有效面积系数 $\lambda$ 要根据工程具体情况确定。不同工程的封堵体稳定计算时,侧向接触面有效面积系数 $\lambda$ 取值也不尽相同,如隔河岩水电站工程导流洞临时封堵体侧向接触面有效面积系数 $\lambda$ 取0.3,水布垭水电站导流洞封堵体侧向接触面有效面积系数 $\lambda$ 取0.8,芹山水电站导流洞封堵体侧向接触面有效面积系数 $\lambda$ 取0.8。

**2.11.5** 为了减小封堵体周边的缝隙,封堵混凝土可采用微膨胀

混凝土。大体积封堵体混凝土建议采取有效的温控措施，如控制入仓温度、低温浇筑、合理分层分块、减少水泥用量、采用低热水泥、掺粉煤灰、设循环水降温等。

### 3 料源选择与料场开采

#### 3.1 一般规定

**3.1.1** 天然建筑材料一般包括工程开挖料和土料场、天然砂砾料场及石料场的开采料或商品料。

**3.1.2** 本条是对天然建筑材料料源的储量要求。勘察储量是指料场圈定范围内的有用层的总储量，已扣除上覆无用层及不可用夹层等的体积。

根据 SL 251《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》规定：“各类天然建筑材料的初查储量应不小于设计需要量的 2.5 倍，详查储量应不小于设计需要量的 1.5 倍。”考虑到勘察储量并非可采储量，没有充分考虑施工程序、工艺和设备技术性能对开采的影响，容易造成料场的勘察储量不足，所以设计需要量的计算就显得尤为重要，另外原规范并没有定义设计需要量，各有关标准、规范、手册对天然建筑材料的需要量界定内涵也不统一，故本次规范修编重新定义了设计需要量，明确了料物的开采、加工、运输以及储存等各种损耗。设计需要量在各种损耗基础上考虑 1.2 倍的扩大系数，主要是与 SL 251《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》衔接，提高料场保证率，为料场开采规划留有余地。

**3.1.3** 本条是对天然建筑材料料源的质量要求。大型工程天然建筑材料的专项试验，主要包括：混凝土人工骨料生产性试验、不同岩性骨料掺混对混凝土性能影响试验、土石坝坝体堆石料爆破试验、坝体防渗料加工试验、现场碾压工艺、防渗料原位或原状样载荷（包括压缩、直剪）等专项试验。

**3.1.4** 本条主要提出工程建筑物开挖料作为料源时，建筑物的勘探深度除要满足建筑物设计要求外，还要满足天然建筑材料的勘探要求。



## 3.2 料源选择

**3.2.2** 本条对混凝土骨料料源作出解释,并对料源选择原则作出说明。对于天然砂砾料源与人工砂石料源的比较,需结合工程具体用料要求进行选择。一般碾压混凝土坝倾向于首选人工砂石料,因天然砂砾料缺乏石粉,对碾压混凝土施工不利;而对于常态混凝土坝,一般要首选条件较好的天然砂砾料源,因其开采及加工均较简便,工程费用较低。

**3.2.3** 线膨胀系数小的料源如石灰岩骨料需水量较小,加工成骨料配制的混凝土抗裂性能优于其他种类岩石,有条件时一般要优先选用。本条还强调对某些质量指标不符规定的料源,应有试验论证后予以采用。

**3.2.4** 不同类别的骨料料源配置的混凝土性能有可能差异较大,通过混凝土配合比及性能试验可以了解差异性,并采取相应措施。

**3.2.5** 混凝土骨料碱活性问题对工程影响甚大,需予以高度重视。混凝土骨料碱活性试验方法的适用范围和判定标准需符合SL 251的相关规定。如从成本考虑或料源困难需使用碱活性骨料,要经过专门论证,否则禁止使用碱活性骨料。

**3.2.6** 本条规定了沥青混凝土人工骨料的质量技术要求,主要依据SL 251的规定。由于碱性岩石制作的骨料与沥青黏附性能好,且有比较成熟的工程经验,因此需优先采用。目前工程多采用灰岩等碳酸盐岩制作沥青混凝土骨料。

**3.2.7** 天然砂砾料场河滩料开挖采用水上开采方法,开挖方法简单、费用低,如开采水下砂砾料,开采方法复杂、费用高。一般选择砂砾料场时,若有质量、储量满足要求的河滩料,要优先选择。如确需选择水下砂砾料时,需要考虑料场储量、级配和开采运输条件受河道水流影响,综合考虑开采和运输方案。天然砂砾料场若位于通航河段或取水口处,料源的选用或对河道通航、取水等产生影响,故需要与相关部门充分沟通后,在提出可行的对环境影响降到最低或零影响的措施或方案后,方可选用此料场。

**3.2.8** 土料场一般土层较厚,则所需料场占地面积相对较小;同时选择工程开挖区和水库淹没区范围内的土料场,也主要为了减少施工征地,减少土料场开挖对耕地的影响。

**3.2.9、3.2.10** 主要根据不同料物的粒径要求提出不同的料源选择。充分利用工程开挖料上坝,主要是为了减少工程投资和施工征地。

## 3.3 料场开采规划

**3.3.1** 在进行料场开采规划时,要综合分析开采、运输及边坡支护方案,既要考虑设计开采的料场部位料源质量好、数量满足要求,同时也要做到运输方案、边坡支护经济合理,必要时需进行方案比较。

**3.3.2** 针对一个工程选用多个料场的情况,提出各料场的使用顺序。

**3.3.3** 进行料场开采规划设计时,要按料场规划开采量进行开采规划。料场规划开采量按设计需要量的1.05~1.25倍选取。设计需要量是指考虑料物的开采、加工、运输以及储存等各种损耗后的计算开采量基础上,再考虑1.20倍的扩大系数的可用料总量。由于原规范中,对设计需要量和料场规划开采量的关系没有明确规定,有些工程直接以设计需要量作为规划开采量,实施过程中容易受到地质条件和施工工艺等不可预见因素的影响,导致开采量不足,需要二次征地或重新选择料场,从而影响工程施工。所以本次对设计需要量进行明确规定,并提出需按料场规划开采量进行开采规划设计的要求。有关工程在初步设计阶段的料场规划开采量备用系数统计见表26。

在进行各种料物的料场规划开采量计算时,1.05~1.25倍的备用系数取值遵循下列原则综合考虑选取:

(1) 石料场料地形完整、岩性单一、地质条件较清楚时取低限;石料场地形陡峻凌乱、地质条件复杂时取高限。

(2) 土料场地形平缓完整、土层厚度大、地质条件明朗时取



表 26 有关工程料场规划开采量备用系数统计表

工程名称	料场简况	料场提供	备用系数
丰满水电站全面治理(重建)工程	腰屯石料场为条形山脊,山体较单薄,植被发育,林木茂密。料场按岩性可分为花岗岩、凝灰岩两区。料场地形坡度一般 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ,山体比高一般 100~250m。高程 370m 以上基岩多裸露,高程 370m 以下基岩露头则较少。料场基岩为华力西晚期仰长花岗岩和二叠系凝灰岩,花岗岩分布于料场主山体及其两侧沟谷,凝灰岩则分布于料场西侧山体坡脚。两者呈接触式接触关系,接触带岩石多较破碎	骨料	1.05
文得根水利枢纽工程	坝下缓坡土料场长约 0.85km,宽 0.08km,面积约 0.068km <sup>2</sup> ,地形呈 $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$ ,由西南向东北方向倾斜,地面高程 350~360m。表部无土层较薄,一般小于 0.2m,其下土料由黏土组成,底部为含砾黏土。有用层厚度一般 3~6m,最大厚度约 10m	黏土心墙料	1.05
	砂砾石料场位于坝址下游右岸一级阶地及漫滩上,地形较平坦,高出河水面 1~3m,地面高程 332~335m。表部为 0.5~3m 厚的腐殖土及低液限黏土,其下为级配不良砾、黏土质砾。该料场无土层平均厚度 1.27m,有用层平均厚度水上 1.39m,水下 4.46m,该料场砾石储量大部分在水下	坝料和骨料	1.05
荒沟抽水蓄能电站	库盆石料场地面自然坡度一般为 $10^{\circ} \sim 18^{\circ}$ ,第四系覆盖层普遍存在于岸坡表部,由碎、块石及孤石组成,厚度一般为 1~3m。基岩为白岗花岗岩,弱风化以下岩石坚硬,抗压强度较高。开挖底高程 634m 时有土层平均厚度 23.32m,当开挖底高程为 630m 时有土层平均厚度 24.12m。该料场靠近沟底部位无土层变厚,有用层变薄	坝料和骨料	1.05
梨园水电站	上咱日沟石料场灰岩呈厚层块状,岩石强度较高,岩体较完整,构造、喀斯特等发育程度较弱;大部分基岩裸露,地表岩石多呈弱风化状,部分为强风化,岩石基岩本为弱风化至微风化一新鲜	坝料和骨料	1.05

表 26 (续)

工程名称	料场简况	料场提供	备用系数
观音岩水电站	龙洞石料场大地料区料源为二叠系下统茅口组 (P1m) 灰岩,料区位于龙洞背斜的南西翼,构造简单,岩层呈缓倾斜的单斜层产出,产状总体较稳定,一般倾向在 $16^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。基岩强风化层厚 0~5m,弱风化层厚 8~40m;岩体完整性较好	骨料	1.17
阿海水电站	新源沟石料场的地层为志留系中上统 (S2+3),岩性为灰、浅灰色中厚层夹厚层状和部分薄层状灰岩,其中分布一层厚为 4~6m 的灰黑色灰岩,主要矿物为方解石。料场浅表部所分布零星覆盖层和强风化岩石为无用料,弱风化及以下岩石均为有用料,岩体多为中厚层状,完整性较好	骨料	1.17
黄登水电站	石料场为两座孤立的山峰,山峰为裸露基岩,料源分布高程 1950~2240m。石料场地层为灰色、深灰色厚层—巨厚层状生物碎屑灰岩夹少量条带状方解石脉,岩层产状不明显,块状构造,岩体完整,局部受构造影响,挤压呈板状构造,地表露头均呈弱风化,岩体中喀斯特不发育,仅局部见有少量的溶隙或规模较小的溶穴	骨料	1.21
南鹏江六级水电站	拉哈石料场主要提供工程混凝土骨料及坝体填筑所需砂岩用料。料场出露地层为石炭系下统 (C1) 和第四系坡积层 (Q)。石炭系下统岩性为灰黑色钙质板岩及变质钙质长石细砂岩,料场范围内呈互层状,板岩单层厚为 20~30m,变质细砂岩单层厚为 8~20m。第四系覆盖层、全强风化岩体和板岩作为无用料,变质钙质长石细砂岩为有用层	坝料和骨料	1.08
三岔河水电站	清水河石料场料源岩性为喜山期粗粒钾长花岗岩,坡积层及全、强风化花岗岩为剥离层,一般厚度为 5~35m,平均厚度约 15m;弱风化及以下花岗岩为可用层,弱风化以下岩体完整性较好,岩性均一。石料场开采提供混凝土骨料加工料源、坝体部分主堆石料、部分次堆石料和垫层料	坝料和骨料	1.08
瑞丽江二级水电站	左岸下游石料场石料岩性主要为寒武系第六段 ( $\epsilon_6$ ) 大理岩,以大理岩为主,夹斜长花岗岩片麻岩、二云片岩,适于加工混凝土细骨料及用于大坝填筑料。料场弱、微风化岩层强度能满足混凝土骨料要求,为有用层		1.08



低限；土料场地形陡峻、土层厚度小、地质条件复杂时取高限。

(3) 天然砂砾料场陆上开采量大、天然级配较好时取低限；天然砂砾料场陆上开采量小、需进行水下开采、天然级配较差时取高限。

(4) 设计需要开采量大时取低限；设计需要开采量小时取高限。

(5) 料源用于坝料填筑时取低限；料源用于加工混凝土骨料时取高限。

(6) 选定料场为单一料场时取低限；选定料场为两个及以上时取高限。

**3.3.4** 有的土料场位于坝址上游库区，有的距离江边较近，需在受水库蓄水或洪水影响前将其开采并堆存，确保土料的合理利用。在土料可采时段内需要有足够的开采强度，除满足高峰时段土料需求强度外，同时开采期末的开采存量需满足停采期的施工要求，且保证 1.2 倍的备料量。土料存储期间需加以覆盖保护，保证合格土料及时供应。

**3.3.5** 天然砂砾料开采受河水和地下水位影响较大。洪水季节河道水位升高，两岸滩地一般被淹没，陆上开采无法进行；河床部位水位升高，流速增大，采砂船作业安全风险大，开采困难，汛期一般需停采。寒冷地区，冬季冻深较大，冻结后的砂砾石料使用机械开采难度较大，而且开采砂砾料含水量较高，不利于冬季施工压实。各工程砂砾料场开采时段需根据气象、水文特性及料场地形等综合确定。开采期末的开采存量需满足停采期的施工要求，且保证 1.2 倍的备料量。

**3.3.9** 石料场开采爆破，要控制石料的粒径，用于混凝土骨料的石料粒径主要考虑破碎设备的能力，最大粒径不大于粗碎设备进料口的 0.85 倍；用于堆石料填筑的石料，主要考虑坝体填筑分区的要求。

**3.3.11** 料场开挖边坡包括开采过程中和开采完成后所形成的边坡。

## 4 主体工程施工

### 4.1 一般规定

**4.1.1、4.1.2** 由于整个工程中的各个施工项目施工难易程度不一，对工程建设工期、投资、工程质量和施工安全等各方面的影响程度也有所差别，施工的方法存在轻重、主次之别。某些简易工程项目或是某些显然可用常规方法施工的项目无需进行施工方案比较；但施工难度大、对工程建设影响较大的项目，需分项在设计中作多方案比较。确保工程质量和施工安全是选择施工方案的一项基本原则，特予以强调。

**4.1.3** 选择施工方案的原则既要有定量指标，也要进行定性分析。各种定量指标说明各比较方案的优劣程度，在比较过程中当然是必不可少的，但某些内容很难定量体现，则只能定性分析。使用本条时还需注意符合本标准 1.0.3 条和 1.0.4 条的规定。

**4.1.4** 计算机施工仿真技术的应用，可有效地分析各种施工过程，为施工组织设计提供理论依据。应用程序时需注意，各种参数需与现行标准相适应。

### 4.2 土石方明挖

**4.2.1** 岩土开挖级别是确定岩石钻孔、爆破难易程度的定量指标，是合理选择开挖方法、爆破参数、生产定额和计算开挖单价的主要依据。岩土开挖级别参照附录 D.1 确定（我国目前水利水电工程概预算编制中使用的分级法）。

开挖区内岩土级别确定正确与否对开挖单价和材料、设备、劳动力的数量均有较大影响，故需慎重。通常按岩石容重、可钻性和抗压强度来选定岩石级别。

**4.2.2** 开挖分层厚度经综合研究确定的内涵是指考虑地质条件、出渣道路、施工部位、开挖规模、开挖断面特征、爆破方式、开



挖运输设备性能及有关规范要求等因素。

有些工程为了减少前期工程量，只重视导流工程，放松了坝肩开挖，结果河床截流后不能进行基坑施工，只好回过头来再挖坝肩，延误了工期。考虑到坝肩、基坑上下交叉作业容易发生安全事故，所以规定截流前一般要完成或基本完成水上坝肩开挖；同时也考虑到小湾电站、拉西瓦电站和锦屏一级电站等由于坝址两岸地形陡峻，坝肩开挖出渣困难，采用截流后将坝肩开挖出渣推至河床、从基坑运出渣的施工方法，另外也确有少数工程（如葛洲坝）岸坡平缓，与基坑同时开挖不会影响直线工期和施工安全，故对截流前完成或基本完成水上坝肩开挖未作严格限制。

**4.2.3** 梯段爆破是成熟的先进钻爆技术，具有爆破自由面多、爆破药量分散、单位耗药量小、起爆药量便于控制等优点。使用本条时需注意下列几点：

（1）梯段爆破采用毫秒爆破具有降低地震强度、减少单位耗药量、改善爆破质量（渣堆集中，渣粒均匀）、减少后冲破坏和飞石等优点，故一般要采用。毫秒爆破包括微差挤压爆破与微差爆破，前者虽有炸药单耗较高和后冲力较大的缺点，但钻孔与出渣可以完全平行，出渣经常在渣堆较高的条件下进行，因而生产率较高。

（2）深孔梯段爆破垂直钻孔容易，装药方便，但大块率高，易留垠坎，后冲破坏严重，梯段坡面稳定性差，而且梯段高度受炸药包直径限制，因此在实际工程中多采用斜孔方式。

（3）对基础岩石采用分层的梯段爆破方法开挖，层厚（梯段高度）是梯段爆破的重要参数，它对爆破效果、劳动工效和爆破施工安全等都有影响。层厚主要根据基础岩石开挖高度、地质条件、岩体特性、施工进度、钻孔机械和挖掘机械性能等因素确定。

**4.2.4** 设计边坡轮廓面的开挖，关系到边坡轮廓面的成型和保留岩体的开挖质量。预裂爆破或光面爆破是成熟的先进钻爆技

术，绝大多数情况下能形成质量好的边坡轮廓面，可减少超欠挖，减小梯段爆破的有害效应对边坡保留岩体的作用。

紧邻水平建基面的开挖，预留保护层是为了防止其上部梯段爆破对水平建基面岩体造成破坏或不利影响，预留保护层厚度需由爆破试验确定，若无条件进行试验，可采用工程类比法确定，或按上一层台阶爆破药卷直径的 25~40 倍考虑。预留保护层的开挖常采用水平预裂爆破。

**4.2.5** 洞室法爆破、药壶法爆破、蛇穴法爆破等集中药包法虽具有一次爆破量大、需要机械设备简单、可缩短工期、适于交通困难和人烟稀少地区施工等许多优点，但由于装药集中引起的地震较大，因而对基岩破坏大，对边坡稳定及周围的地面地下建筑物的保护不利，正常情况不得在大坝及其邻近的水工建筑物地基开挖中使用，SL 47—94 中 1.0.8 条也有明确的规定。至于在留有足够的保护层，采取减震措施，经过论证可以保证坝基岩基的质量，而在个别情况采用集中药包法进行爆破属于特例，不提倡采用。

**4.2.6** 本条主要根据 SL 47 提出。爆破安全允许标准需由爆破试验确定，若难以获得试验成果，可参照 GB 6722 的相关规定确定。

**4.2.7** 对高边坡开挖规定需采用预裂爆破或光面爆破，是从边坡稳定、施工安全和减少超欠挖等方面考虑，这在国内外施工中都有丰富的经验。

每层开挖后及时支护，其中锚杆、喷混凝土支护在每层开挖后立即进行，锚索支护可滞后 1~2 层。尽快支护不仅是为了边坡稳定、安全，也是为了方便施工，锚喷作业点距平台过高则施工困难，尤其是台车钻孔需在台车工作高度范围内。

**4.2.9** 土石方开挖工程中，往往有大量可利用料，如不按要求开挖会造成很大浪费。可利用料的开挖方法可参考料场开采方法。

**4.2.10** 施工组织设计中要避免二次倒渣，但有时倒渣反而是合



理的。鲁布革引水隧洞系日本大成公司施工，隧洞出渣时先将石渣暂时堆存于洞口，每排炮石渣出完进行钻孔作业时，利用洞内装运的同一机械将洞口堆存的石渣运至渣场，这样使用机械效率能得到较充分的利用，比直接从洞内运至渣场更为经济合理。因此，条文规定对开挖石渣需合理安排减少二次倒运。

**4.2.11** 在大坝、厂房基坑开挖中，开挖深度有时很大，出渣道路布置非常困难。例如，二滩电站下游围堰顶高程 1029.0m，基坑最低开挖高程 965.0m，高差达 64m，下基坑道路平均坡度每增加 1%，基坑长度即可缩短约 50m，两岸导流隧洞长度可相应各缩短 50 余米，导流隧洞投资约可减少 4%，效果十分显著。况且有时基坑受地形、地质条件限制，长度很难增加，所以需允许采用超限标准。

没有条件或难以布置基坑出渣道路情况下的特殊出渣方法，可以研究选用竖井溜渣、卷扬机牵引、起重设备吊运、挖掘机倒运等方式。

出渣道路一般要采用双车道循环线，当出渣强度低、仅一台挖掘机开挖，且地形陡峻、修建双车道工程量过大时，可以采用单车道。

### 4.3 地基处理

**4.3.1** 为增强固结灌浆效果，一般要在混凝土盖重情况下施灌。特殊情况下，亦可在基岩施灌，但混凝土与岩石接触面是否需要补灌及如何补灌问题，方案选择时需综合考虑研究确定。

**4.3.4** 根据国内各个工程实践，膨润土泥浆性能优于黏土泥浆，如采用循环出渣、回收净化再使用的工艺，其耗量和成本将大幅下降，因此需优先考虑选用膨润土泥浆。

### 4.4 土石方填筑

**4.4.1** 对条文的使用说明如下：

(1) 认真分析工程所在地区气象台（站）的观测资料，这对

于气象条件比较复杂的地区是必要的。这类地区，有些气象台（站）虽然距工程所在地比较近，但并不属同一气象分区，条件差别较大，不要选用。

(2) 各种气象要素对填筑料施工的影响程度分为两类：第一类是对填筑料施工有显著影响，设计工作中需用其具体数据，如降水、气温和蒸发等，需根据各种量级对施工影响的程度，制表统计分月出现的天数。第二类是对填筑料施工有影响，但不使用具体数据，如相对湿度、日照、云量、风力、风向等气象资料，也需统计作定性分析用。

(3) 近年来，随着水利水电工程的快速发展，我国的土石坝建设取得了举世瞩目的成就，修建了大量高土石坝，其中有许多坝高超过 100m，仅坝高超过 150m 的已建和在建高土石坝就有几十座，水布垭、糯扎渡、长河坝、猴子岩、江坪河等工程土石坝坝高超过了 200m，而双江口、两河口两座 300m 级超高土石坝也已开工建设。我国用现代技术修筑土石坝已有 60 多年，尤其是在最近 30 多年土石坝建设快速发展中，施工技术水平不断进步，对坝高 200m 以下的土石坝建设积累了丰富的经验，但对于坝高 200m 以上的高土石坝，现有施工经验相对较少，故其施工方案需做专门研究。

**4.4.3** 本条强调布置运输道路首要问题是正确确定道路标准。这是保证汽车正常使用、减少轮胎消耗、提高运输能力的基本条件。

条文中还强调了道路布置需兼顾周围建筑物施工通道要求、施工期过填筑体运输要求、沟通两岸交通要求，一般和永久公路结合。道路布置需统筹规划，使整个工程的交通网趋于合理。

道路修建费用较高，修建时间较长，布置又常受地形条件的限制。因此需根据各段道路的任务，确定各自的标准，以期达到既能满足要求，又能节约费用的目的。

目前，在土石坝等土石方填筑施工中，自卸汽车运输占主导地位，为提高汽车运输效率，其主要措施是建好场内外道路。由



于工程规模、地形条件、汽车型号等的差异，当前国内土石坝修筑道路采用（或参考）的技术标准尚不一致。国内几个土石坝工程施工道路技术参数见表 27。

表 27 部分土石坝工程施工道路技术参数

序号	项 目	单位	工 程				
			小浪底	黑河	鲁布革	碧口	天生桥
1	坝体总填筑量	万 m <sup>3</sup>	5185	820	222	397	1800
2	坝体填筑高峰强度	万 m <sup>3</sup> /月	158	57	22.3	27.7	118
3	行车密度	车次/h	30~85	26~68	—	—	—
4	汽车载重量	t	65	45	10~20	12.5	32
5	采用标准	—	露天矿山道路Ⅱ级	露天矿山道路Ⅱ级	—	—	露天矿山道路Ⅱ、Ⅲ级
6	路面宽度	m	16.5	12	10	8	11~13
7	最大纵坡	%	8	8	6	11	—
8	最小转弯半径	m	30	15	—	10	—
9	路面结构	—	泥结碎石	泥结碎石	—	土路	混凝土

4.4.4 碾压式土石坝坝面施工是多料种、多工序共同作业，施工作业集中，彼此关系密切，需协调相互间的关系，条文中提出了一些坝面作业规划需遵守的原则。

关于沿坝轴线方向分段（设置横缝）施工问题，DL/T 5129—2013《碾压式土石坝施工规范》中 9.1.4 条规定“不影响行洪的坝体部位可先行填筑，横向接坡坡度需符合设计要求”，9.2.4 条第 2 款中要求“防渗体及均质坝的横向接坡不要陡于 1：3，需采用更陡接坡时，应论证后实施”。从目前国内工程实施看，小浪底工程采用了分段填筑施工。但考虑到防渗体横向接坡是坝体施工的薄弱环节，不均匀沉陷、缝面处理措施、填筑高度的影响极为明显，缝面处理不妥，极易形成贯穿上下游的渗流通道，埋下隐患，不仅影响坝体的安全运行，甚至给工程带来

危害。因此，土质防渗体需尽量减少横向接坡。在高山峡谷地区，河道狭窄，不要采用分段施工；在宽泛河道上，若施工程序需要采用分段施工时，需加强对缝面处理措施研究，确保工程施工质量和安全。

根据国内外土石坝施工经验，由于截流后需要基坑抽水、坝基开挖处理，在截流后第一个汛前坝体很难全断面达到拦洪度汛高程，需要采用临时断面度汛，有时也采用临时断面挡水，来满足提前蓄水、提前或临时发挥效益等方面的需要。临时断面的设置，不仅要考虑安全和质量要求，还需要为后续项目施工创造条件，使后续项目施工能够顺利进行。

4.4.7 使用本条时需注意下列几点：

(1) 过渡料填筑时自卸汽车将料直接卸入工作面，倒料顺序可从两岸向中间进行，以利流水作业。

(2) 对于碾压式沥青心墙堆石坝，每层心墙沥青混合料与两侧过渡料一般要采用专用摊铺机同时铺筑、碾压。沥青心墙摊铺宽度按设计要求从下而上变化，一般为 1.2~1.6m。过渡料宽度一般为 2~4m，随摊铺机摊铺的过渡料宽度取决于摊铺机宽度，不随摊铺机摊铺的过渡料则采用其他设备摊铺。如：尼尔基水利枢纽碾压式沥青心墙坝沥青心墙设计厚度 0.5~0.7m，摊铺机最大摊铺宽度 3.5m；四川冶勒水电站碾压式沥青心墙坝沥青心墙设计厚度 0.6~1.2m，摊铺机最大摊铺宽度 1.2m。

(3) 对于浇筑式沥青心墙堆石坝，一般要先安装、固定沥青混凝土心墙模板，然后铺筑、碾压两侧过渡料，再进行同层的沥青混凝土心墙浇筑。为防止模板的变形、移位，要利用小型振动碾同时对两侧的过渡料进行铺筑及压实，过渡料与堆石体结合部位利用大型振动碾压实。

4.4.8 对条文的使用说明如下：

(1) 关于挤压式边墙技术。

挤压式边墙施工法是在混凝土面板堆石坝施工中，每填筑一层垫层料之前，用挤压式边墙机制作出一个低强度、低弹模的半



透水混凝土边墙，然后在其下游面按设计铺填垫层料，碾压合格后重复以上程序。挤压式边墙一般为梯形断面，选用专用混凝土边墙挤压机施工，挤压式边墙施工结束 2h 后铺筑垫层料。

挤压式边墙是垫层料上游坡面保护的一种形式，以垫层料的垂直碾压代替传统施工工艺的削坡及坡面斜坡碾压，与传统垫层料上游坡面防护形式比较，简化了坡面的施工工艺，增加了垫层料的密实度，有利于保证施工质量及安全、加快施工进度和节约工程费用，近年来在我国混凝土面板堆石坝工程建设中得到广泛应用，截至 2011 年底我国已有 90 多座面板堆石坝使用了挤压式边墙技术，国内部分使用挤压式边墙技术的混凝土面板堆石坝见表 28。

表 28 国内部分使用挤压式边墙技术的混凝土面板堆石坝资料

序号	工程名称	地点	所属流域	坝高/m	完成年份
1	公伯峡	青海循化	黄河	132.2	2004
2	龙首二级	甘肃张掖	黑河	146.5	2004
3	多尔	甘肃迭部	白龙江	83	2005
4	那兰	云南金平	藤条江	108.7	2005
5	鄂坪	湖北竹溪	汇湾河	124.3	2005
6	鹤峰一级	湖北鹤峰	芭蕉河	115	2006
7	美岱	内蒙古	大黑河	93.2	2006
8	双河口	贵州	蒙江	99	2006
9	盘石头	河南鹤壁	淇河	102.2	2006
10	崖羊山	云南普洱	李仙江	88	2006
11	洞巴	广西田林	西洋江	105	2006
12	润峪	陕西华县	润峪河	81	2007
13	鲤鱼塘	重庆开县	桃溪河	103.8	2007
14	水布垭	湖北巴东	清江	233	2007
15	龙马	云南	李仙江	130	2007
16	九甸峡	甘肃	洮河	136.5	2007

表 28 (续)

序号	工程名称	地点	所属流域	坝高/m	完成年份
17	汉坪咀	甘肃文县	白龙江	108.7	2007
18	街面	福建尤溪	尤溪	126	2007
19	泗南江	云南墨江	泗南江	115	2007
20	老鹰岩	四川武胜	吉安河	66.1	2007
21	林口	云南镇雄	林口河	79	2008
22	鱼泉	湖北	龙潭河	65	2008
23	老虎潭	浙江湖州	康溪	35.5	2008
24	瓦屋山	四川洪雅	周公河	138.8	2009
25	白莲河	湖北	浠水	64.4	2009
26	沐尘	浙江龙游	灵山港	55.9	2009
27	郑家湾	安徽霍山	太阳河	51.5	2009
28	南山	广西	南山江	63	2010
29	苏家河口	云南	槟榔江	130	2010
30	积石峡	青海	黄河	103	2011
31	苗家坝	甘肃文县	白龙江	111	2011
32	柏叶口	山西吕梁	文峪河	88	2011
33	佃石	浙江三门	亭旁溪	53.6	2011
34	杨东河	湖北利川	磨刀溪	88	2011
35	永德大雪山	云南永德	忙令河	78.5	2011
36	唐河	山西灵丘	唐河	30.4	2011
37	泽城西安	山西	清漳河	46.8	2011
38	潘口	湖北竹山	堵河	114	2012
39	毛家河	湖北兴山	毛家河	100	2012
40	黔中枢纽	贵州	三岔河	162.7	2015
41	牛栏江—滇池补水工程	云南	牛栏江	142	2013
42	河口村	河南济源	沁河	122.5	2015
43	中葛根	新疆奇台	中葛根河	81	2012
44	黄连山	云南	茶卡河	70.1	—



另外,针对趾板建在深厚覆盖层的面板堆石坝,以坝高110m的新疆察汗乌苏面板坝为代表,经试验研究,在挤压式边墙技术基础上推出了移动边墙施工技术。移动边墙技术是通过坐落在垫层料上的边墙作为垫层料的约束体,使垫层料实现水平碾压,其原理是:在每填筑一层垫层料之前,将移动边墙安装在靠近上游坡面,其稳定利用自重保持。移动边墙采用长方体钢筋混凝土预制块,高度根据垫层料每层填筑高度确定,单块移动边墙尺寸多为 $8\text{m}\times 0.6\text{m}\times 0.4\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)、重约5t,顶部设吊环,采用汽车吊吊装就位,通常当施工至第四层后,移动边墙还可实现循环使用。

## (2) 关于翻模固坡技术。

翻模固坡技术是近年新开发的一项施工新技术,是混凝土面板堆石坝垫层料填筑及固坡砂浆成形一次完成的技术,适用于混凝土面板堆石坝及其他类型面板堆石坝的垫层料填筑及垫层料上游坡面防护施工。

翻模固坡法的优点包括:

(1) 坡面平整度好,固坡砂浆厚度小且均匀,能够较好地适应坝体变形,且对面板的约束小,有利于面板混凝土防裂。

(2) 与挤压式边墙类似,以垫层料的垂直碾压代替传统施工工艺的垫层料超填、修坡、斜坡碾压等复杂施工工序,增加了垫层料的密实度,有利于保证施工质量及安全。

(3) 不占直线工期,施工速度快。

(4) 工程造价低。

(5) 施工干扰小。

(6) 大坝随时具备挡水度汛条件。

当前,翻模固坡法的缺点是机械化程度较低、用人工较多,需进一步研究改进。

应用翻模固坡技术的部分工程实例:

1) 吉林双沟水电站混凝土面板堆石坝最大坝高110m,通过试验研究,在大坝施工中成功地采用了翻模固坡技术,属国内

外首创,取得了很好的技术经济效益和社会效益。与混凝土挤压式边墙技术相比较,每平方米上游坡面可降低造价28元;与斜坡碾压固坡法相比较,可缩短大坝施工直线工期2~3个月。双沟水电站已于2010年4月投产发电,大坝运行情况良好。

2) 辽宁蒲石河抽水蓄能电站上水库混凝土面板堆石坝最大坝高78.5m。通过学习、借鉴双沟大坝施工经验,在大坝施工中采用了翻模固坡技术。该大坝坝体施工至2009年10月全部完成,运行情况良好。

3) 湖北江坪河水电站混凝土面板堆石坝最大坝高219m。参建各方通过到双沟水电站工程和蒲石河抽水蓄能电站工程调研,确定大坝施工采用翻模固坡技术,自2010年6月开始实施。

目前,混凝土面板堆石坝翻模固坡技术相关技术标准有:电力行业标准DL/T 5268—2012《混凝土面板堆石坝翻模固坡施工技术规程》。

(3) 关于不采用挤压式边墙或翻模固坡技术时垫层坡面施工。

不采用挤压式边墙技术或翻模固坡技术时,垫层坡面碾压保护施工流程为:测量放样→坡面粗修→斜坡静碾→测量放样→坡面细修→洒水碾压→测量放样检查→坡面局部修整→检查验收→碾压水泥砂浆(或喷混凝土或喷乳化沥青)固坡→养护。

碾压砂浆固坡施工较方便,护坡平整度好,对面板混凝土的约束小,有利于面板混凝土防裂。碾压水泥砂浆厚一般为5~8cm,强度等级不大于M5。水泥砂浆由人工或机械摊铺,每条幅宽度不要小于4m,砂浆初凝前需碾压完毕,终凝后洒水养护。

喷混凝土固坡法利用常规的喷护用设备和工艺,需在施工参数上做调整。喷混凝土厚度一般为5~8cm,强度等级M5左右,一般采用湿喷法施工,表面需平整、厚度均匀、密实,终凝后洒水养护。

当垫层料上游坡面保护不采用挤压式边墙技术或翻模固坡技



术时,上游坝坡的整平压实应采用振动压实设备进行斜坡碾压,多采用振动碾或液压振动平板顺坡碾压。上游坡面碾压分级长度以10~20m为宜,分级长度过大,振动碾不易控制,影响碾压质量。马来西亚的巴特埃(Batai)面板堆石坝施工时,上游坡面采用振动夯板压实(夯板装于反向铲臂端),效果甚佳,可以作为辅助压实设备。垫层料铺筑上游边线水平超宽宜为20~30cm,振动平板压实时垫层料水平超宽可适当减少;采用自行式振动碾压实时,振动碾与上游边缘的距离不宜大于40cm。垫层料每填筑升高10~20m,宜进行垫层上游坡面削坡、修整和碾压;采用反铲削坡时,宜每填高3~4.5m进行一次削坡。

**4.4.9** 土料天然含水率与最优含水率差别较大时需调整天然含水率。防渗土料含水率的调整一般在填筑区以外进行,特殊情况下可在填筑工作面调整。当土料的平均含水率需少量增加时,可采用在填筑工作面直接洒水,否则要在料场加水调节。当土料的含水率大于施工控制含水率上限时,碾压前填筑面要进行翻晒,降低土料的含水率。防渗土料接缝坡度不宜陡于1:3,高差不宜超过15m。

**4.4.10** 考虑到黏土料受降雨影响特别明显,而在雨季可施工天数较少,时停时续的施工方式层面处理工作量较大,因此在雨季不要进行大面积黏土料填筑施工。

防渗土料的雨季施工是施工的重点和难点,在降雨量充沛的地区尤其突出。切实可行的雨季施工措施和经验是保证土料防渗体雨季顺利施工的关键。

雨季施工需认真分析当地的水文气象资料,确定雨季各种填筑料的施工天数,合理选择施工机械数量,使之满足填筑强度和形象进度要求。做好必要的物资准备是顺利施工的先决条件。

雨季施工措施包括:超前安排心墙区域的填筑,缩短防渗体填筑流水作业段长度,防渗体与两岸接坡及上、下游反滤料平起施工,及时用振动平碾快速将防渗体碾压成光面,做好防渗体填筑面防护,不失时机进行雨后复工和用旋耕犁翻晒土料,加强施

工道路维护和保养等。

**4.4.11** 负温下露天填筑砂砾料与堆石,不得加水,可采取减薄层厚、增加遍数、加大压实功能等措施,以保证达到设计要求。由于冬季施工难度加大,施工质量难以控制,且降低工效增加成本,因此,如工期允许,尽量避免冬季施工。黑龙江莲花水电站大坝最大坝高71.8m,是我国在高寒地区修建的第一座面板堆石坝,其冬季施工时减小了铺料厚度,增加了碾压遍数。

负温施工是土石方填筑冬季施工中必然遇到的问题,采取有效的填筑方法、步骤和措施,是保证负温下土料填筑工程质量和顺利施工的关键。在负温下填筑土料,需采取一系列可靠的保温、防冻和保证工程质量的措施,主要包括:

- (1) 特别加强质量控制和施工前保温、防冻的准备工作。
- (2) 在冻结前完成坝基处理,并做好防冻处理。
- (3) 在负温下施工,土料含水率需控制在下限。

在严寒地区施工条件恶劣、质量保证较困难且施工工效大幅度降低时,采用冬季停工方式,实践证明是较合理的选择。

负气温下土料填筑可分为露天施工和暖棚法施工两种。暖棚法施工一般只是在小范围内进行,所需器材多,施工费用较高,生产效率低,只有在经过技术、经济论证后,方可考虑采用。露天施工可大面积进行,需要严格控制填筑质量。负温下土料填筑工作效率低,成本高,质量较难保证,如非十分必要,以停工为宜。

**4.4.12** 土工膜铺设前,基础垫层料级配需满足设计要求,并碾压密实平整,不允许有突出尖角块石,以免损坏土工膜。

土工膜防渗斜墙铺设一般有两种方式:一是平行于建筑物轴线铺设(顺铺);二是垂直于建筑物轴线铺设(横铺),采用横铺的工程较多,采取人工展铺的方式铺设在垫层上。土工膜防渗心墙要采用“之”字形布置,两侧回填料的级配、粒径、干密度需满足设计要求。

复合土工膜接缝处理有粘接法和热焊法,采用热焊法对土工



膜进行接缝施工的工程较多,就是在现场通过热合机把 PE 土工膜相接的表面加热,使之表面熔化,然后加压使之熔为一体,为了使之充分结合,搭接长度为 8~10cm,每幅焊接完毕并通过专职人员检查确认后方可缝合 PE 膜上、下的土工布。

土工膜与地基、岸坡及刚性建筑物的连接是施工的薄弱环节。

#### 4.4.13 使用本条时需注意下列几点:

(1) 对无分期、分区交工要求的工程:吹填细粒土时,要设置二个或二个以上排泥区轮流交替吹填,必要时还需采取加速排水固结的措施;其他土质吹填时,需根据现场具体情况,按照提高工效,降低消耗,方便施工的原则,选择最佳吹填顺序。

(2) 吹填厚度宜根据吹填土质经现场试验确定。在淤泥等超软地基上吹填分层不要过厚,需根据设计或经过试验确定,第一层高度要高出最高水位 0.5~1.0m,其余每层厚度要控制在 1.0m 左右。

(3) 吹填工程施工还需注意符合 SL 17 的规定。

### 4.5 混凝土施工

#### 4.5.1 本条是对混凝土原材料的选择提出的要求:

1 本条强调所选原材料的品质需符合现行国家和有关行业标准,这些标准主要包括 GB 175《通用硅酸盐水泥》、GB 200《中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥》、DL/T 5055《水工混凝土掺用粉煤灰技术规范》和 DL/T 5100《水工混凝土外加剂技术规程》等。

2 选择水泥品种的原则主要是根据工程部位、技术要求和环境条件。大体积水工混凝土需优先选用中热硅酸盐水泥,以降低混凝土发热量,减少温度裂缝。

水泥熟料中内含较多的 MgO,可使混凝土具有延滞性微膨胀性能,部分补偿混凝土后期混凝土温降收缩,已有大量的科研成果和国内工程应用实例。因此,某些大、中型工程规定水泥熟

料中 MgO 含量一般要在 3.5% 以上,但不超过国家标准规定的上限 5%。重力坝工程对内含 MgO 水泥的应用经验较多,效果可以肯定。对膨胀变形有时间限制的拱坝工程,如要求 90d 龄期不再产生膨胀变形,内含 MgO 水泥的应用还有待进一步深入研究。

水泥细度过小,混凝土早期发热快,不利于温度控制。因此,某些大、中型水利水电工程对水泥细度进行了要求,比表面积要控制在  $320\text{m}^2/\text{kg}$  以下。

3 水工混凝土中掺入适量的掺合料,具有改善混凝土性能,提高混凝土质量,减少混凝土水化热温升,抑制碱骨料反应,节约水泥,降低成本等作用。混凝土外加剂可以改善混凝土拌和物性能以及硬化混凝土性能,是水工混凝土必不可少的组分。掺入适量的掺合料和外加剂成为混凝土配合比优化设计的一项重要措施。大、中型水利水电工程已普遍掺用掺合料和外加剂。

4 选用何种水泥和掺合料,要遵循技术可靠、经济合理、就近取材的原则。水泥、掺合料、外加剂等原材料品种和掺量要通过试验确定。掺合料和外加剂品种多、质量差异大、掺量范围较宽,用于混凝土时只有通过试验验证,才能有效地实施混凝土的质量控制。为方便混凝土施工和质量管理,要求原材料供应厂家相对固定,避免影响混凝土质量的稳定性。

粉煤灰已广泛应用于水工混凝土中,I 级、II 级粉煤灰具有减水增强和改善混凝土多种性能的效果,并可降低混凝土水化热温升。因此各种混凝土需优先选用等级较高的粉煤灰,以获得更大的技术经济效益。二滩工程使用了除细度外其余各项指标均满足 I 级灰标准的 II 级灰,三峡工程使用了 I 级粉煤灰,对降低水泥用量、提高混凝土质量,起到了十分重要的作用。

4.5.2 混凝土配合比设计包括了混凝土原材料的优选和混凝土配合比选择试验两个阶段。对混凝土配合比选定提出了以技术指标、和易性和经济性三项内容进行综合比较优选。

VC 值的大小对碾压混凝土的性能影响显著,采用较小的



VC 值,使碾压混凝土入仓至碾压完毕有良好的可碾性,并且在上层碾压混凝土覆盖以前,下层碾压混凝土表面仍能保持良好塑性。VC 值的控制以碾压混凝土全面泛浆和具有“弹性”,经碾压能使上层骨料嵌入下层混凝土为宜。根据近年来大量工程实践,现场 VC 值在 2~12s 比较适宜,并根据施工现场的气候条件变化,动态选用和控制。

**4.5.4** 水工建筑物混凝土施工分期一般是根据截流、导流、拦洪、度汛、蓄水等各阶段进度要求划分。混凝土浇筑顺序一般是由低高程逐步上升,但对上部结构复杂、基岩易风化、荷载大或沉陷量较大的基础混凝土一般要先浇筑。各期具体浇筑部位和高程主要根据起重机及混凝土供料线路的布置确定。

**4.5.6** 通仓浇筑不仅能避免垂直施工缝对结构物整体性的影响,而且可以加快施工进度,减少模板工程量,降低工程造价,但对浇筑强度和温度控制要求较高。对坝高小于 70m 的坝段,按目前的机械浇筑能力和制冷措施,在低温季节通仓浇筑基础混凝土是可能的;高坝采用通仓浇筑则需有论证。

当采用平浇法浇筑、机械生产能力不能满足仓面要求时,可采用台阶法浇筑,其浇筑顺序的要求如图 1 所示。台阶法使用的基本条件是薄层,根据吊运混凝土设备的能力和混凝土散热的需要,浇筑块高一般要在 1.5m 以内。其台阶宽不小于 1.0m,斜坡坡度不小于 1:2,浇筑块前进方向卸料宽不小于 2.8m (考虑用 3m<sup>3</sup> 吊罐卸料时需要的宽度)。对于拱坝大仓面施工,一般采用平浇法施工。当采用台阶法浇筑时,需有分析论证。

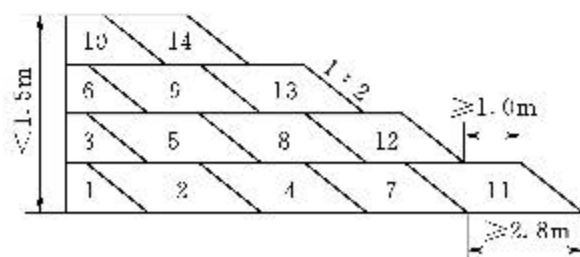


图 1 台阶浇筑法

**4.5.7** 为防止拦河坝等大体积混凝土由于温度应力而产生裂缝和坝体接缝灌浆后接缝再度拉裂,高、中拦河坝等大体积混凝土工程的施工,都需进行混凝土温度控制设计,提出温度控制标准和温控防裂措施。需根据工程所在区域的水文气象条件,坝体结构型式和材料分区,工程特定施工条件等综合因素,最终确定综合温度控制措施。

**4.5.9** 坝体的接缝灌浆对坝体的施工进度和造价影响较大,在初步设计阶段需对坝体的接缝灌浆进行认真研究。

根据 SL 62《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》,接缝灌浆灌区两侧坝块混凝土的龄期要大于 4 个月,在采取了有效冷却措施情况下,也不要少于 3 个月。根据东江水电站的试验,为满足混凝土的干缩要求,混凝土有 3 个月的龄期可满足要求。二滩水电站采用全年灌浆,灌浆区混凝土龄期均不少于 4 个月。设计时可根据具体情况选用。

**4.5.10** 根据国内外资料,碾压混凝土筑坝可较常规混凝土筑坝节约水泥,简化温度控制措施,减少模板工程量,能充分发挥机械效率,加快施工进度,降低工程造价。由于碾压混凝土多采用高块连续浇筑,虽水泥用量较少,水化热不易散发,但仍须进行温度控制设计,并有防裂措施。

斜层碾压施工的优点:浇筑作业面积比总仓面面积小,每层需要浇筑的混凝土方量比通仓平铺小;缩短了层间间隔时间,降低了高温季节条件下的预冷混凝土温度倒灌,有利于温度控制和提高混凝土层间的结合质量;对混凝土入仓强度要求较低,在混凝土入仓强度受高温环境影响较大的情况下也可以进行大仓面连续浇筑、有利于加快施工进度、减少坝体横缝模板工程量、降低施工成本等;由于仓面覆盖面积缩小,浇筑仓面具有一定的坡度,便于仓面排水,有利于雨后迅速恢复施工。

龙滩水电站针对区域夏季气温高,雨季降水频繁,混凝土浇筑量大等因素,为了达到大坝混凝土连续、快速浇筑,降低施工成本,首次在 6 号和 7 号坝段高程 323.00~326.30m 坝体碾压



混凝土浇筑中进行了斜层碾压混凝土施工生产性试验,获得了一定的施工经验。

百色水利枢纽工程,采用分区通仓薄层施工方式,仓面面积不超过  $7200\text{m}^2$  的按平层铺料平仓碾压方式施工,仓面面积超过  $7200\text{m}^2$  的则采用斜面铺料平仓碾压方式施工或分仓施工。斜面铺料碾压浇筑时由下游往上游或左右岸按  $1:10\sim 1:15$  坡度铺料平仓碾压,并逐层往前推进而后部逐层收仓的方式。

在斜层碾压浇筑混凝土时,需注意坡脚处理、坡度控制和仓面污染等问题。

**4.5.13** 当坝较高、工程量较大时,面板分期施工是必要的,否则会因为坝坡太长,给施工带来较大困难。面板分期施工,有利于防止裂缝,同时可使堆石填筑、混凝土施工在组织上更趋均衡,也为施工期度汛、提前蓄水受益等创造条件。

从已建面板堆石坝工程观测资料分析,大坝的沉降变形主要在施工期发生,特别是面板施工前的3个月最为重要。二期面板施工时,一期面板顶部容易因沉降不够而脱空,使面板受力不平衡而发生破坏。例如天生桥一级大坝面板脱空  $150\text{mm}$ ,洪家渡大坝面板脱空  $11.9\text{mm}$ ;三板溪大坝面板脱空  $13.2\text{mm}$ ;水布垭大坝面板脱空  $40\text{mm}$ 。

现行面板堆石坝设计规范从施工工艺及避免面板脱空考虑,要求“分期浇筑的面板,其顶高程要低于浇筑平台的填筑高程  $5\text{m}$  左右”。但是最后一期面板顶部为防浪墙底,一般工程填筑至此高程即停止填筑,从而使最后一期面板顶高程与堆石填筑高程齐平,一方面不便于面板混凝土施工,另一方面也不利于堆石的预压。洪家渡坝采取了提高分期面板顶部堆石填筑超高的措施,分期填筑高度较规范要求增加  $2\sim 5\text{m}$ ;坝体填筑到面板顶部高程(防浪墙底高程)后继续填筑超过防浪墙底高程  $2\text{m}$ ,浇筑防浪墙时再回挖至防浪墙底高程;同时,三期面板浇筑前从坝顶对堆石持续洒水,促进和加速堆石沉降。

采用无轨滑模浇筑面板是国内外的成功经验,无轨滑模的特

点在于:

(1) 滑动模板由侧模或已浇块混凝土和混凝土浮托力支承,取消了专用轨道。

(2) 起始三角块可以与主面板一起浇筑。

(3) 滑动模板重量轻、配套设备少,制造、安装和移动就位较为方便。

面板混凝土跳仓浇筑的目的,在于保持滑动模板均衡滑升,并使相邻已浇块有一定龄期。

面板纵缝分缝宽度需根据施工条件确定,为了便于滑模制作、操作和混凝土分料入仓浇筑,河床部位可取  $12\sim 18\text{m}$ ,两岸根据情况可取  $6\sim 9\text{m}$ 。浇筑块过大施工困难,过小则分缝太多。

滑模施工时的滑升速度,需与浇筑强度、脱模时间相适应,滑升速度一般为  $1.5\sim 2.5\text{m/h}$ 。在高、低温及干燥季节进行混凝土施工时,需有防开裂、保温、防冻及保湿措施。

面板混凝土裂缝产生的原因除一些特殊情况外,都是由温度变化和干缩引起的。由温度、湿度等环境因素变化引起混凝土收缩,受到基础约束而在混凝土内诱发拉应力,是面板产生裂缝的破坏力,这是面板裂缝的外因。混凝土的自身性能和质量决定混凝土的抗裂能力,这是内因。因此,防裂措施可归结为提高混凝土自身抗裂能力,尽量减少环境因素引发的破坏力。面板混凝土养护防裂就是要从面板混凝土裂缝破坏力方面进行研究,探讨在高、低温及干燥环境下混凝土面板裂缝发生的特点、裂缝产生的主要外部原因及其养护防裂措施。

**4.5.14** 沥青混凝土施工方案,常用的有碾压法和浇筑法两种。碾压法是将热拌沥青混合料摊铺后碾压成型的施工方法,可用于大中型土石坝的面板或心墙施工,该方法比较成熟,应用广泛。浇筑法是将热拌沥青混合料浇筑成型的施工方法,由于其热拌沥青混合料中沥青含量较多,高温时流动性较好,能靠自重压实,不需压实设备,一般适用于严寒地区的土石坝心墙施工。工程位于严寒地区且防渗体又是心墙的,可考虑采用浇筑法,否则一般



采用碾压法。

沥青混凝土面板如设水平缝，其接缝处理非常麻烦，而且还会成为防渗面板的一个薄弱环节，为了确保防渗效果，通常采用一次铺筑完成、不设水平缝。但高坝面板斜坡过长将给牵引摊铺碾压机械的卷扬设备带来困难，这不仅是因为卷扬机的钢丝绳长度有一定限度，而且还由于过长的钢丝绳在自重作用下易损坏已铺好的面板，同时牵引设备与铺压机械相距过远，操作不方便容易失控，且斜坡运距加大，施工速度降低。国内外工程实践除日本沼原抽水蓄能电站上水库沥青混凝土面板斜坡长度达 150m 外，多数斜坡长度不超过 120m。因此当斜坡长度超过 120m 或因工程施工度汛需要时，可分两期施工，但需做好接缝处理。

面板的铺筑宽度以 3~4m 为宜。加大面板摊铺宽度可减少面板施工缝、提高防渗效果和面板的整体性，国外的面板多采用铺设宽度 3~4m，我国牛头山水库铺设宽度采用 3m。根据铺设宽度单层防渗影响的初步研究，单层防渗的组合渗透系数  $k$  可按式 (4) 求得：

$$k = \frac{(b + 0.45)k_t}{b} \quad (\text{m/s}) \quad (4)$$

式中  $b$ ——条幅宽度，即一次铺设宽度，m；

$k_t$ ——条面渗透系数，m/s。

根据式 (4)，可绘得  $k-b$  关系曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出：随着铺设条幅宽度的增加， $k$  值减小很快，但超过 4m 以后， $k$  值减小缓慢、增大条幅宽度提高防渗效果不明显且施工困难，故面板的铺筑宽度一般为 3~4m。

碾压式沥青混凝土心墙每层铺设厚度与碾压机械的压实功能有关，需通过碾压试验确定。根据国内外工程实例，铺设厚度常为 25cm，故提出碾压式沥青混凝土心墙每层铺设厚度可为 20~30cm。部分工程碾压式沥青混凝土心墙铺设厚度见表 29。

根据天荒坪上水库、三峡茅坪溪、冶勒水电站、尼尔基水利枢纽等工程沥青混凝土面板及心墙的施工实际情况，施工时段平

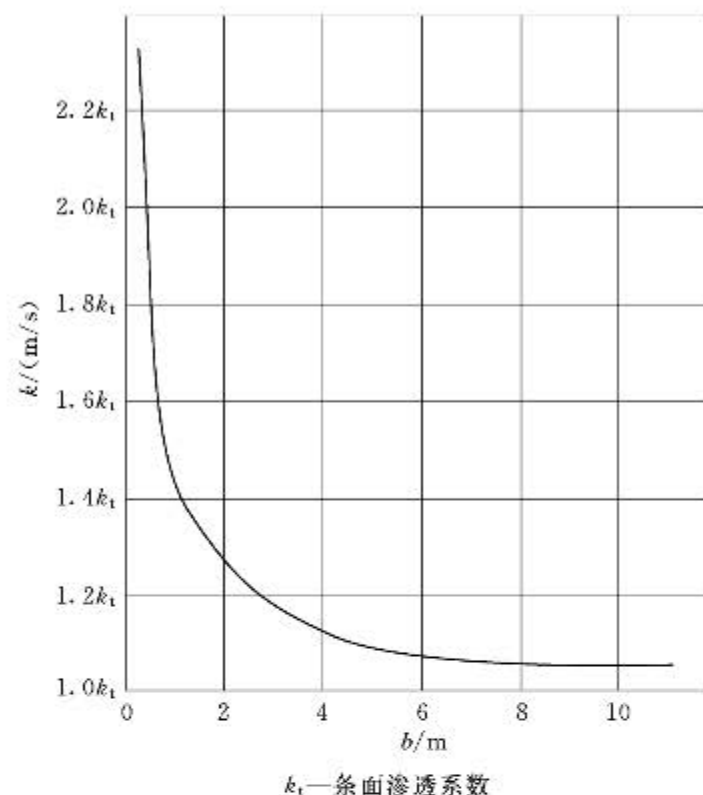


图 2  $k-b$  关系曲线

表 29 部分工程碾压式沥青混凝土心墙铺设厚度实例

工程名称	碧流河	高岛	武利	街所	三峡茅坪溪	冶勒	尼尔基
铺设厚度 /cm	20	25~30	25	25	25	30	25

均气温在 5℃ 以上，都能正常施工，但有因环境温度低于 5℃ 而停工的。国外一般也规定以 5℃ 作为确定施工与停工的分界标准。JTG F40《公路沥青路面施工技术规范》1.0.4 条规定“沥青混凝土不得在低于 10℃（高速公路和一级公路）或 5℃（其他等级公路）以及雨天潮湿情况下施工”。鉴于上述情况，本标准规定时段平均气温低于 5℃ 不要施工。如需施工，需采取专门措施，并进行模拟试验。如南桠河冶勒水电站，试验表明气温 -6~5℃ 条件下可以施工，但需采取下列措施：



(1) 调整碾压参数 (静碾 1 次, 动碾 8 次, 再静碾 8 次)。

(2) 提高初碾温度, 一般经验初碾温度为  $130^{\circ}\text{C}$ , 冷态低温条件提高至  $130\sim 155^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 严格控制终碾温度, 不得低于  $130^{\circ}\text{C}$ 。碾压后, 任何人员和设备不得在心墙上行走。

(4) 表面覆盖以降低温度损失。

沥青是一种憎水性胶结材料, 当雨 (雪) 天有水分浸入时会影响矿料之间的紧密黏结, 致使沥青混凝土质量降低。如果有水分的铺筑层面上摊铺防渗层, 也会引起沥青防渗层鼓泡和层间结合不良, 故降雨时停工, 雨后需将已铺层面烘干才能继续施工。根据国内外一些工程实例, 如日本深山坝规定日降雨量大于  $5\text{mm}$  作为因雨停工标准, 我国天荒坪、冶勒、尼尔基等工程大坝规定日降雨量大于  $0.1\text{mm}$  作为因雨停工标准, 实际施工中均因降雨降雪而停止沥青混凝土铺筑。

寒冷地区是指年度内最低月平均气温小于  $-10^{\circ}\text{C}$ 、年内日平均气温大于  $5^{\circ}\text{C}$  的天数少于 215d 的地区。越冬前采取保护措施, 可减少表面温差, 将温度应力控制在沥青混凝土抗拉强度允许的范围内, 防止产生温度裂缝。保护层厚度需根据当地的最大冻结深度而定。沥青混凝土表面用干砂覆盖, 能形成一个保温层。

**4.5.15 自密实混凝土**, 具有高流动性、均匀性和稳定性, 浇筑时无需外力振捣, 能够在自重作用下流动并充满模板空间的混凝土, 自密实性能主要包括填充性、间隙通过性和抗离析性。

自密实混凝土填充性可通过坍落度扩展和扩展时间试验方法确定; 间隙通过性可通过 J 环扩展度试验方法确定; 抗离析性可通过离析率筛析试验方法确定。

采用集中搅拌方式生产, 有利于控制自密实混凝土质量的稳定性。运输过程中, 搅拌车的滚筒保持匀速转动有利于减少自密实混凝土拌和物流动性损失, 搅拌车内加水将严重影响自密实混凝土的自密实性能, 必须严格控制。

自密实混凝土的浇筑效果主要取决于混凝土的工作性能。因

此, 保持混凝土浇筑的连续性是其关键, 停泵时间过长, 自密实混凝土的自密实性能变差。

**4.6.16 胶凝砂砾石填筑**是我国基于国内外实践提出的新的筑坝方式, 即通过合理的结构设计和便捷的施工工法, 将不受传统级配限制的砂砾石料用较少的胶凝材料胶结起来进行筑坝, 属于从散粒材料坝到混凝土坝 (碾压混凝土坝) 之间的过渡坝型 (胶结颗粒料坝) 之一, 是一种新的筑坝方式, 可充分利用当地材料, 在坝基适应性、坝型选择、结构分区中充分体现工程安全、经济合理、施工便捷、生态环保等方面的优势。使用本条时应注意下列几点:

(1) 砂砾石宜在生产场地设置一次储料堆, 存储量为  $3\sim 5\text{d}$  的使用量; 在拌和站皮带进料口附近宜设置二次储料堆, 存储量为不少于  $1\text{d}$  的使用量。

(2) 胶凝砂砾石坝施工工艺包括表观密度、密实度、力学性能等参数。

(3) 碾压条带间的搭接宽度宜为  $0.3\sim 0.4\text{m}$ , 端头搭接长度宜为  $1\text{m}$ 。碾压厚度不应小于最大石料粒径的 3 倍, 且最大厚度不宜超过  $700\text{mm}$ 。若压实厚度较大时, 每个碾压层可分  $2\sim 3$  次平仓铺筑, 但每层厚度应大于砂砾石最大粒径的 1.2 倍。

(4) 直接铺筑允许时间和加垫层铺筑允许时间, 应根据工程要求, 综合考虑拌和物初凝时间确定。

(5) 层间间隔时间超过加垫层铺筑允许时间的层面即为冷缝。施工缝和冷缝缝面处理合格后方可加垫层料继续施工。

(6) 胶凝砂砾石层边缘部位处理措施: 宜碾压成  $1:4$  的斜坡面, 恢复施工后将坡脚处厚度小于  $150\text{mm}$  的部分切除。

(7) 胶凝砂砾石坝低温条件下施工指: 日平均气温连续  $5\text{d}$  稳定在  $5^{\circ}\text{C}$  以下时或最低气温连续  $5\text{d}$  稳定在  $-3^{\circ}\text{C}$  以下时, 应采取低温施工措施; 气温骤降时, 宜对胶凝砂砾石表面进行覆盖保温; 气温在  $-10^{\circ}\text{C}$  以下时不宜施工。

(8) 胶凝砂砾石填筑施工还应注意符合 SL 678《胶结颗粒



料筑坝技术导则》的规定。

## 4.6 地下工程施工

**4.6.1** 地下工程施工组织设计是否合理,首先取决于对围岩特征的掌握程度。围岩分类是为了选择合理的设计计算理论、提供正确的设计参数、确定合理的施工方法、准确地计算施工定额、选择合适的施工机具。因此,一个合理的围岩分类,对地下工程的设计、施工均有重要意义。本标准修订后的围岩分类采用 GB 50487 的规定,作为选择开挖方法、支护型式和确定钻爆参数的依据。

**4.6.3** 本条阐明采用岩石掘进机施工的适用范围。

随着国民经济发展,兴建各种用途的长隧洞越来越多,地质条件越来越复杂,采用常规钻爆法开挖隧洞难以满足快速、安全、文明施工的需要,采用掘进机开挖技术经过近半个世纪的发展,应用已相当成熟。采用掘进机开挖除了有比常规钻爆法开挖具有掘进速度快的优势外,还为隧洞施工创造了更为安全、文明的施工条件;把由于受隧洞长度限制而设计成折线的隧洞改成直线隧洞,缩短了洞线长度,减少了施工支洞的数量和相应的临建设施;超挖小和对围岩的扰动小;带来巨大的经济效益、时间效益和社会效益。

20 世纪后期,使用掘进机开挖隧洞在我国得到普遍推广和应用。广西天生桥二级水电站发电引水隧洞使用直径 10.8m 的开敞式掘进机开挖了部分洞段;甘肃引大入秦工程、山西万家寨引黄一期工程使用双护盾掘进机开挖隧洞总长度已达 150km;全长 18.4km 秦岭铁路隧道,使用两台直径 8.8m 的开敞式掘进机开挖了约 10km;上海、广州、北京、天津等城市使用盾构式掘进机开挖了多条地铁隧道;云南昆明掌鸠河引水工程隧洞、辽宁大伙房引水隧洞和山西万家寨引黄二期工程北干线隧洞以及新疆八十一大坂隧洞工程均使用双护盾式或开敞式掘进机开挖。今后将有更多的隧洞采用掘进机开挖。对于长隧洞的开挖,需就常

规钻爆法开挖和掘进机法开挖进行技术经济比较,选择合适的施工方法。

(1) 隧洞洞径和洞长问题:

①国内外已生产岩石掘进机,其适用洞径多为 1.98~11.25m,且国外经验认为隧洞直径以 5~10m 为最佳。

②从国外 4 个主要制造公司生产 101 种不同规格的掘进机分析,掘进洞径小于 6.7m 的机种占 85%;洞径 9m 以上的机种仅占 5%左右。

③从采用掘进机施工的工程实例资料分析,使用 9m 以上直径掘进机的工程比例仅占 4%左右。

④大直径掘进机购置费用高,经济风险大。

⑤若隧洞长度太短,掘进机的制造或购置费用占施工总费用的比例大,且掘进机的安装准备时间占掘进机总工期的比例也必然较大,远不如钻爆法经济合理。从美国 35 条隧洞的施工成本曲线(钻爆法 12 条,掘进机法 23 条)分析。当隧洞长度 3~6km 时,掘进机施工成本下降最快。另据国外有关资料介绍,当隧洞长度超过洞径 600 倍且岩性在中硬范围内,掘进机施工比钻爆法施工更为经济。

根据我国国情。经研究 3km 洞长仍不能弥补掘进机法比钻爆法购置费用高和安装、施工准备时间长的不利因素,5km 洞长才能弥补其不足。至于洞长与洞径的倍数问题,从实际工程来看,变化幅度很大,看不出其中的规律性,故不作为依据条件。

(2) 隧洞断面型式:更适用于圆形隧洞,亦可施工城门洞形隧洞。

(3) 通风及出渣问题:单洞长度超过 15km 时,每隔 10km 一般布置一条永久检修、通风、补气支洞,施工期可利用支洞向洞内供电、供水、通风及出渣。

(4) 围岩地质条件:

①国内外多年的施工实践证明,掘进机对复杂地层的适应性差,尤其是在塌陷、涌水、暗河地段掘进易发生事故,掘进速度



及变换施工方法的适应性等方面远不如钻爆法。地下涌水会给掘进机施工带来不利影响,地下涌水量较小时一般采用顺坡和逆坡开挖,地下涌水量较大时一般采用逆坡开挖。

②掘进机虽可在抗压强度达 250MPa 的硬岩中掘进,但耗刀率及费用较在抗压强度为 100MPa 的中等硬岩中掘进高约 5 倍。实践证明,掘进机在岩石抗压强度 30~150MPa 范围内使用的经济效果最佳。

4.6.4 用钻爆法开挖平洞的方法甚多,方案的取舍取决于围岩类别、断面尺寸、工期要求、施工机械化程度以及施工技术水平等因素。对需支护的洞室,若断面尺寸相宜,一般要研究全断面开挖方法。

4.6.5 随着我国常规水电站和抽水蓄能电站的大量兴建,大型、特大型地下厂房得到越来越广泛的采用。为此,通过对以往工程实践的总结,介绍大型地下洞室群开挖需遵循的一些原则:

(1) 对于高边墙、大跨度的地下洞室开挖,首先需研究确定合理的开挖分层。开挖分层决定于洞室的地质条件、洞室的规模及施工通道、施工设备和工期要求等因素,分层高度一般为 6~10m,其中顶拱层开挖高度需根据开挖后底部不妨碍吊顶牛腿的锚杆施工和不影响多臂钻最佳效率发挥而确定。第 2 层一般为岩锚吊车梁所处部位,层高需考虑岩锚的造孔和安装、吊车梁混凝土浇筑以及下层开挖爆破的影响,一般在吊车梁以下不小于 2.0m 较合适。国内部分大型地下厂房的开挖分层特性见表 30、表 31。

(2) 施工通道的设置需满足分层开挖和工期要求。施工通道包括永久通道和增设的临时通道。可利用的永久道路通常有厂房通风洞,可作为厂房第 1 层和第 2 层开挖的施工通道;厂房交通洞可作为第 3 层和第 4 层开挖的施工通道。5 层及以下各层可分别通过高压管道、尾水洞等永久洞及另设的临时通道进入。临时通道可采用施工支洞、竖井和斜井等型式。对于特大型洞室,为了争取工期,可设双向通道。

表 30 国内部分地下厂房开挖分层及施工特性表

序号	工程名称	装机 容量 /MW	厂房尺寸 (长×宽×高) /(m×m×m)	开挖量 /万 m <sup>3</sup>	围岩性质	开挖 分层 /层	开挖 工期 /月	施工强度 /(m <sup>3</sup> /月)	
								平均	最高
1	白山(一期)	900	123×25×54.35	15.46	混合岩	3	43	3680	10700
2	鲁布革	600	125×15.5×32.7	7.7	白云质灰岩	5	22.5	3245	16000
3	广州抽水蓄能电站(一期)	1200	146.5×21×44.54	10.5	斑状黑云母花岗岩	5	17.5	4192	18400
4	广州抽水蓄能电站(二期)	1200	150.5×21×47.64	11.94	斑状黑云母花岗岩	6	20	5970	—
5	东风	510	105×21.7×48	8.9	石灰岩	5	26	3462	—
6	十三陵抽水蓄能电站	800	145.0×23×46.6	12.91	砾岩	7	27	6148	—
7	太平驿	260	112.2×19.7×45.3	5.7	花岗岩	6	23	8994	—
8	天荒坪抽水蓄能电站	1800	200.7×21×47.53	17.00	凝灰岩	6	22	7727	—
9	小浪底	1800	251.5×26.2×61.4	27.6	砂岩	10	—	—	—
10	大广坝	240	87×14×37.5	4.07	玄武岩、凝灰岩	5	16.5	2467	—
11	二滩	3300	280.29×30.7×65.58	40.5	正长岩、玄武岩	10	33.5	11960	—
12	大朝山	1350	233.9×26.4×67.3	27.92	玄武岩、凝灰岩	7	29	9600	—
13	棉花滩	600	129.5×21.9×52.08	12.5	花岗岩	6	16.5	11900	—
14	泰安	1200	190×24.5×52.27	21.0	花岗岩	6	26.5	7900	—