ICS 93. 160
P 55

SL

中华人民共和国水利行业标准

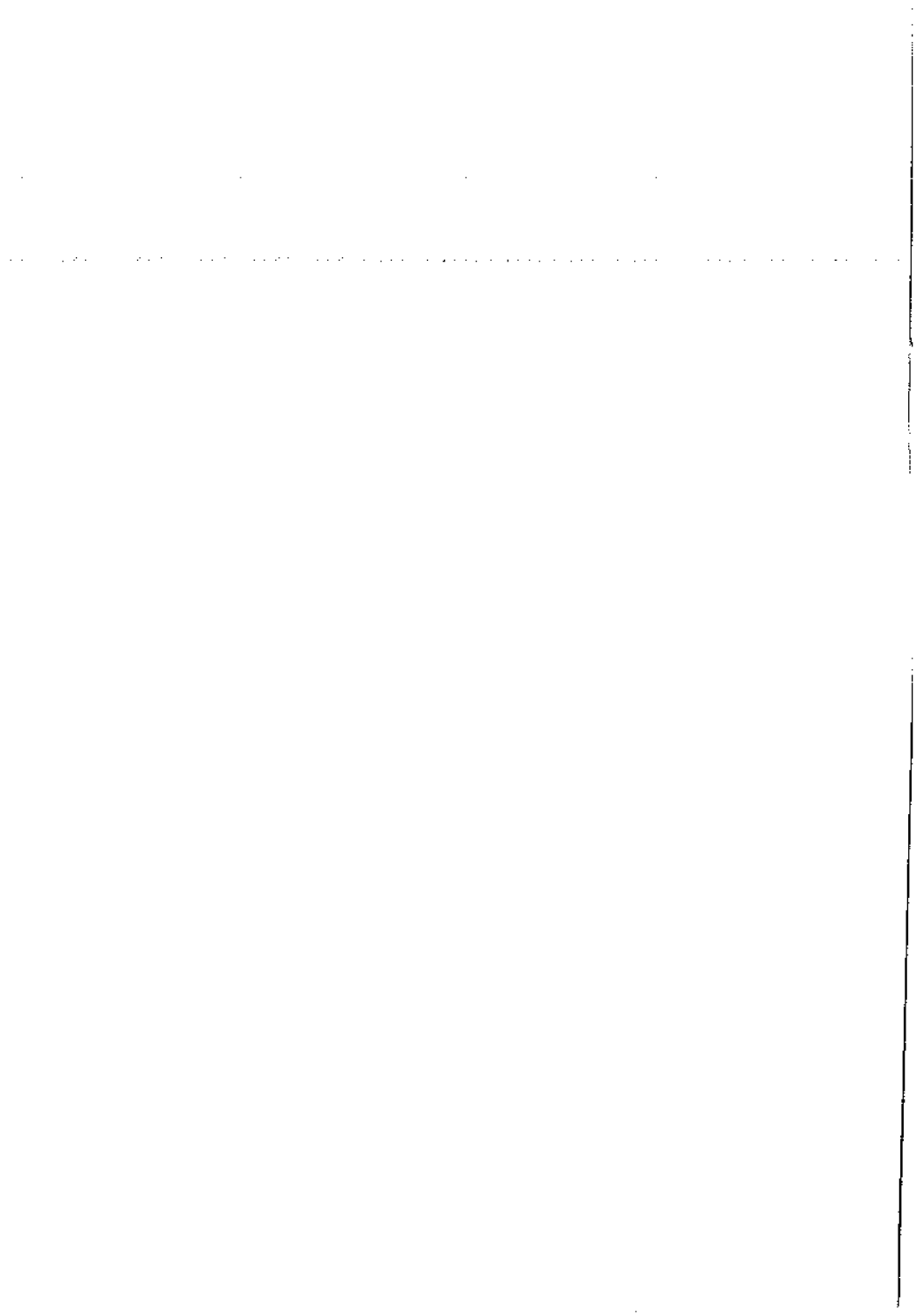
SL 648—2013

土石坝施工组织设计规范

Specifications for construction planning of earth-rockfill dam

2013-11-20 发布　　2014-02-20 实施

中华人民共和国水利部　发布



中华人民共和国水利部

关于批准发布水利行业标准的公告
（土石坝施工组织设计规范）

2013 年第 68 号

中华人民共和国水利部批准《土石坝施工组织设计规范》(SL 648—2013)为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	土石坝施工组织设计规范	SL 648—2013		2013.11.20	2014.2.20

水 利 部

2013 年 11 月 20 日

前　言

根据水利部标准化工作安排以及《水利技术标准编写规定》（SL 1—2002）的要求，编制本标准。

本标准共10章和2个附录，主要技术内容有：

——总则；

——基本规定；

——施工导流与度汛；

——筑坝材料开采、加工设计；

——坝区施工布置；

——坝基处理；

——坝体填筑；

——防渗体施工；

——施工进度计划及资源配置。

本标准中的强制性条文有：3.0.4条。以黑体字标识，必须严格执行。

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部水利水电规划设计总院

本标准解释单位：水利部水利水电规划设计总院

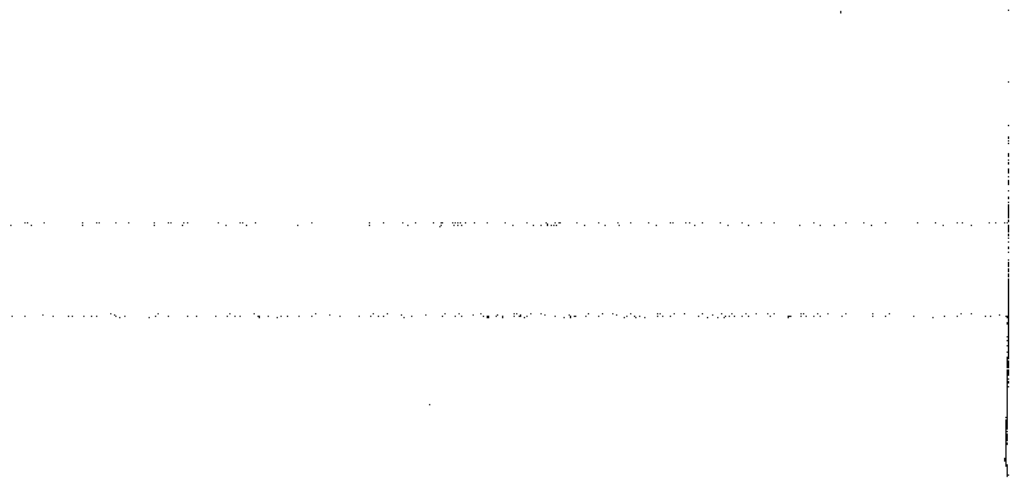
本标准主编单位：黄河勘测规划设计有限公司

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：李惠安　蔡仲银　王亚春　竹怀水
尤尊贤　杨恩文　翟　建　尹　赜
汪雪英　熊建清　张春生　孙鹏辉
龚　燕　曾桂平　张　平　樊建华
王永新

本标准审查会议技术负责人：马毓淦

本标准体例格式审查人：牟广丞



目　次

1　总则 …… 1
2　基本规定 …… 2
2.1　设计依据 …… 2
2.2　施工条件 …… 2
2.3　施工布置及施工方案比选 …… 2
3　施工导流与度汛 …… 4
4　筑坝材料开采、加工设计 …… 5
4.1　料源规划 …… 5
4.2　料场选择、开挖料利用及土石方平衡 …… 5
4.3　筑坝材料开采 …… 6
4.4　坝料加工设计 …… 8
4.5　料区布置 …… 8
5　坝区施工布置 …… 10
5.1　坝区施工布置原则 …… 10
5.2　坝区运输线路 …… 10
5.3　坝料转运与堆存 …… 12
5.4　坝区供电和供水 …… 12
6　坝基处理 …… 14
6.1　一般规定 …… 14
6.2　坝基及岸坡开挖 …… 14
6.3　固结灌浆及帷幕灌浆 …… 14
6.4　混凝土防渗墙、高喷墙 …… 15
6.5　软基处理 …… 16
7　坝体填筑 …… 18
7.1　填筑分期 …… 18
7.2　坝面填筑作业规划 …… 18

7.3 坝壳料 …… 19
7.4 垫层料 …… 20
7.5 反滤料 …… 21
7.6 过渡料 …… 21
7.7 护坡 …… 21
7.8 雨季及负温条件坝体填筑 …… 22
8 防渗体施工 …… 23
8.1 土料防渗体 …… 23
8.2 混凝土面板防渗体 …… 24
8.3 沥青混凝土防渗体 …… 25
8.4 土工膜防渗体 …… 26
9 施工进度计划 …… 27
9.1 施工程序与控制进度 …… 27
9.2 施工进度计划 …… 27
10 资源配置 …… 30
10.1 施工机械 …… 30
10.2 劳动力 …… 30
10.3 主要建筑材料 …… 31
附录A 折方系数 …… 32
附录B 土石坝工程采取一般防护措施的停工标准 …… 33
标准用词说明 …… 36
条文说明 …… 37

1 总　　则

1.0.1 为明确土石坝施工组织设计要求，做到安全可靠、技术先进、经济合理、适用性强，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于水利水电工程中1级、2级、3级和高度超过30m的3级以下碾压式土石坝的施工组织设计，对200m以上的高坝应作专门研究。

1.0.3 土石坝施工组织设计应做到因地、因时制宜，统筹安排、综合平衡。积极推广经过试验论证和通过技术鉴定的新技术、新材料、新工艺和新设备。

1.0.4 本标准的引用标准主要有以下标准：

《爆破安全规程》(GB 6722)

《混凝土面板堆石坝设计规范》(SL 228)

《土工试验规程》(SL 237)

《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》(SL 251)

《水利水电工程施工组织设计规范》(SL 303)

《水利水电工程施工机械设备选择设计导则》(SL 484)

《碾压式土石坝施工技术规范》(SDJ 213)

1.0.5 土石坝施工组织设计除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 基本规定

2.1 设计依据

2.1.1 土石坝施工组织设计应遵循基本建设的法规和条例，符合国家有关部门和地方政府对工程建设的要求及上一阶段的有关设计和审批文件。

2.1.2 设计应明确工程所在地区的交通、防洪、灌溉、航运、供水等现状和近期发展规划。

2.1.3 设计应明确枢纽布置、建筑物结构和对施工的要求等。

2.2 施工条件

2.2.1 设计应研究工程所在地点、对外交通运输条件、可利用的场地面积及其利用条件。

2.2.2 设计应分析工程所在河流的水文、气象条件，以及冬季冰凌情况、开河特性对本工程施工的影响。

2.2.3 设计应提出坝址区地形、地质条件以及天然建筑材料分布情况。

2.2.4 设计应明确工程施工用水、用电条件及建筑材料等社会经济条件。

2.3 施工布置及施工方案比选

2.3.1 施工布置应遵循下列原则：

1 满足施工总体布置和总进度计划的要求。

2 运输线路布置满足运输量和运输强度的要求，并结合施工分期综合考虑，充分发挥运输效率。

3 生产、生活设施布置应与土石坝的规模和施工现场条件相适应，遵循有利施工、方便生活的原则。

4 遵守国家和地方相关规定，节约用地，少占农田。

2.3.2 施工方案比选应遵循下列原则：

1 施工程序和施工进度可靠，坝体施工方法合理，施工强度均衡。

2 筑坝材料的开采、加工和运输条件良好。

3 坝区和料场的施工布置条件良好，施工临建工程规模合理。

4 水库蓄水和初期运行安全可靠。

5 采用的新技术、新材料和新工艺应经技术论证、试验验证及技术鉴定。

3 施工导流与度汛

3.0.1 土石坝应根据坝址的地形地质条件、河道水文特性、大坝结构特点、施工程序和进度要求选择导流方式，确定是采用一次拦断还是分期导流，全年导流还是枯水期导流。

3.0.2 土石坝宜采用一次拦断河床、隧洞泄流的导流方式。除面板堆石坝外，上游围堰宜与坝体相结合，采取以坝体拦挡第一个汛期洪水的导流方式。面板堆石坝采取分期导流时，应进行充分论证。

3.0.3 坝体临时度汛可采用挡水或过水方式。坝体采用临时断面挡水，在汛前应达到度汛高程。临时断面应满足安全稳定及临时抢险度汛需要。土石坝施工期间，在无可靠保护措施时，不应漫顶过水。堆石坝体采用坝面过水时，临时断面的坝面、坝坡应做相应的防护。坝体度汛防护结构型式与过水轮廓及其保护措施应按 SL 228 及 SDJ 213 的规定执行。

3.0.4 **由坝体拦洪度汛时，应根据当年坝体设计填筑高程所形成的坝前拦洪库容，按表 3.0.4 确定度汛标准。**

表 3.0.4 坝体施工期临时度汛设计洪水标准

拦洪库容（亿 m^3）	≥1.0	1.0～0.1	<0.1
重现期（年）	≥100	100～50	50～20

3.0.5 导流建筑物封堵后，如永久泄水建筑物尚未具备设计泄流能力，坝体度汛应按 SL 303 的有关规定确定度汛标准。

3.0.6 面板堆石坝未浇筑混凝土面板前，利用坝体临时挡水度汛时，应对坝体上游坡面采取相应的防护。

4 筑坝材料开采、加工设计

4.1 料源规划

4.1.1 筑坝土石料调查和土工试验应按 SL 251 和 SL 237 的有关规定，明确坝址附近各种天然土石料的性质、储量和分布，以及枢纽建筑物开挖料的性质和可利用的数量。

4.1.2 筑坝土石料应就近或就地取材，充分利用建筑物的开挖料，减少弃渣对环境的影响。

4.1.3 主要筑坝材料应有两个或两个以上满足要求的料场。宜选用距坝址较近、采运条件较好、覆盖层剥离量少、施工干扰小的料场。

4.1.4 反滤料、垫层料及过渡料等有特殊级配要求的坝料，应考虑料场的选择和开采加工要求。

4.1.5 料场可开采量应考虑料场开采、加工、运输等各种损失量，留有足够的储备。

4.1.6 料场应与大坝和其他建筑物保持必要的安全距离，不应影响居民点和工程设施的安全，避免与工程施工相互干扰；料场开采后不应影响山体稳定和地基渗流稳定。

4.1.7 料场应不占或少占耕地、林地，不拆迁或少拆迁居民点和工程设施，满足水土保持和环境保护的要求；宜选择库区内料场。

4.2 料场选择、开挖料利用及土石方平衡

4.2.1 料场选择应遵循下列原则：

1 料场的质量和数量应满足设计要求。

2 宜选择运距较短、储量较大和便于高强度开采的料场。

3 覆盖层薄、剥离量少，岩性均一，开采获得率高，开采料级配易于控制。

4 土料场天然含水率宜接近最优含水率。

5 砂石料场分布集中、质量均一、级配良好，受河道水情影响小。

4.2.2 建筑物开挖料作为填筑料使用时，质量应满足 SL 251 的有关规定，可利用量应根据质量要求分区利用，并纳入料场规划中。

4.2.3 可利用料开挖时宜直接上坝，不能直接上坝时应分类堆存。

4.2.4 土石方平衡规划应根据施工进度计划，合理安排开挖料运输流向，减少料物堆存和中转，做到综合运输费用最小。必要时应采用计算机仿真方法进行分析。

4.2.5 折方计算应根据坝料的自然方、松方、填筑方的干密度计算折方系数。当无具体试验资料时，折方系数可按附录 A 中 A.0.1 条选取。

4.3 筑坝材料开采

4.3.1 料场开采规划应遵循下列原则：

1 应根据料场所在地区的水文、气象、地形地质条件以及对外交通现状，研究料场开采的道路布置、开采顺序，并合理选择采、挖、运设备，满足高峰期采运强度要求。

2 料场的规划开采量应结合料场特性和施工因素，按附录 A 中 A.0.2 条选取。

3 有多个料场时，库区内料场宜用于早期施工，近距离料场宜作为调剂高峰料场。

4 拟定分期开采计划，并能连续均衡开采。

5 开采工作面规划应与料场道路规划相结合，并应满足不同施工时段填筑强度需要。

6 料场的开采运输方案，应根据地形条件、开采方案、料物特性、运输量、运输强度、运输运距和运输设备配置等因素，经技术经济比较后确定。

7　受洪水或冰冻影响的料场应有保证料源供应的措施。

8　料场开挖边坡应保持稳定，或采取保证边坡稳定的安全措施。

9　料场规划及开采中应满足环境保护和水土保持要求。

10　必要时，应进行碾压试验。

4.3.2　土料开采应符合下列规定：

1　应根据土层厚度、土料物理力学特性、施工特性和天然含水率的分布规律等选择开采方式。

2　开采能力应满足坝体填筑强度要求。

3　土料开采时，应做好表土的存放和保护。

4.3.3　砂石料开采应符合下列规定：

1　天然砂砾料料场宜根据各种坝料的要求统一进行开采规划，提高料场开采利用率。应根据料场的水文特性、地形条件、天然级配分布状况、料场级配平衡要求等因素，确定料场开采时段、开采分层、开采程序，选择开采、运输、加工设备。

2　开采分层和开采程序应根据料场天然级配在深度和平面上的分布状况、河床水位变化、料物级配平衡要求确定。料场开采期间，应考虑河道水流条件发生改变，造成料场储量、砂石料级配以及开采运输条件变化的情况，并采取相应措施。

3　开采范围应根据需要量、砂砾料场有用层的储量、分布和开采条件等因素确定，可采储量应满足需要。

4　开采强度应根据施工时段和上坝强度、开采获得率、折方系数、工艺损耗和储存条件确定。

4.3.4　石料开采应符合下列规定：

1　开采范围应根据需要量、料场储量、分布、无用层影响和开采条件等因素确定，可采储量应满足需要。

2　石料的开采规划应结合填筑部位对材料的要求进行分区规划，爆破设计应满足材料最大粒径及级配的要求。开采石料应按坝料设计要求，根据岩性、风化程度、粒径和级配要求的不同分区开采。

3 石料开采宜采用梯段爆破法开采，采用洞室爆破法应进行专门论证。

4.4 坝料加工设计

4.4.1 土料加工应符合下列规定：

1 应分析料场土料在不同季节、不同土层深度的天然含水率变化规律，提出含水率控制措施。

2 当土料的颗粒特性和施工特性不能满足设计要求时，可采用不同性质的材料掺合或剔除超径粒级的方法处理；材料的掺合应力求工艺简单、设备通用、费用低廉、掺合均匀，宜选用水平互层铺料、立采掺拌混合等工艺。

3 若料场土料天然含水率偏高、偏低或物理力学特性不能满足设计及施工要求，可通过技术经济比较选择具体措施进行调整。

4 土料加工强度应满足坝体填筑强度要求。

4.4.2 反滤料、垫层料加工应符合以下规定：

1 反滤料、垫层料宜选择天然砂石料，采用破碎、筛分、掺合等加工工艺满足设计级配要求。当天然料含泥量超标时，可采用冲洗法或其他措施减少含泥量；软弱颗粒超标时，可采用加入人工骨料的方法。

2 采用石料破碎制备反滤料、垫层料时，加工系统可与混凝土骨料加工系统一并考虑。

4.4.3 过渡料宜直接采用控制爆破技术进行开采，不宜采取二次加工。

4.4.4 从石料场取料和利用工程开挖料作为堆石料时，应采取控制爆破技术开采，石料应满足设计级配要求。

4.5 料区布置

4.5.1 料区布置应包括采料场场内运输线路、坝料加工场、堆弃渣场、防洪排水设施以及供电、供水、供风和通信线路、生产

和生活用房等。

4.5.2 料区布置应遵循下列原则：

1 根据施工总进度计划、施工高峰强度、料场特性、地形条件等合理布置料场开采工作面、运输线路及坝料加工场地。

2 料场开采工作面和场内运输线路应根据场地条件、机械作业范围布置，有利于工作面转移和线路搬迁。

3 根据施工场地条件和施工要求做好料区防洪、排水以及供电、供水、供风、通信等设施的布置。

4 距主体工程较近的料场，料区布置应与主体工程施工总布置统一考虑。远离主体工程的料区应考虑生活区布置。

5 坝区施工布置

5.1 坝区施工布置原则

5.1.1 坝区施工布置应结合工程施工总布置规划，坝区施工布置宜包含下列内容：

1 筑坝材料的上坝运输线路。

2 坝区内供应、加工料物的有关设施。

3 筑坝材料贮存、转运、弃料堆放场地。

4 供电、供水、供风和防洪、排水以及通信等设施。

5 各种生产设施及占用场地。

6 现场施工指挥管理系统和坝区其他设施。

5.1.2 坝区施工布置应满足施工总体布置和坝体施工进度计划要求，做好与相关施工项目的协调配合，避免相互干扰。

5.1.3 坝区布置应满足工程施工和分区规划的要求，避免在易受不良地质危害的区域，以及受爆破或其他因素影响严重的地区布置场地。

5.1.4 坝区施工道路布置应满足运输量和运输强度的要求，并结合施工分期综合考虑。

5.1.5 施工工厂设施、各种站场、仓库等临时设施的规模应适应坝体施工强度要求和施工现场情况。

5.1.6 堆渣场的选择应便于回采和运输上坝，运距近。

5.2 坝区运输线路

5.2.1 坝区运输线路布置应遵循下列原则：

1 坝区运输线路布置前应选定坝料运输方式。宜采用自卸汽车直接上坝，选用其他运输方式时应作充分论证。采用多种运输方式时，应统筹规划、合理布置，做好各运输方式之间的衔接。

2 坝区运输线路布置应充分利用地形条件。在河床狭窄、岸坡陡峻、穿越困难等条件下，坝区运输线路宜选用隧道方式。

3 应充分利用坝面和坝内临时道路上坝，减少修建岸坡公路。每个施工时段应有相应的运输线路，与坝面填筑和料物开采状况相适应。运输线路宜自成系统，并宜与工程永久交通线路相结合。

5.2.2 线路布置及技术标准应符合下列规定：

1 汽车运输应符合下列规定：

1）线路布置应考虑坝区地形、料场分布及运输机具配备等因素。应减少线路平面交叉，陡坡段的上下层道路应留有足够的安全距离，或采取其他挡护措施。交叉路口、急弯、陡坡处应设置安全设施。

2）连接坝体的上下游交通干线，应避免跨越坝面。运输道路通过原有桥涵时，应事先验算，并在必要时采取加固措施。

3）坝区运输道路技术标准应根据各路段的总运输量、运输高峰强度、使用时间、选用车型、行车密度等因素确定。

2 带式输送机运输应符合下列规定：

1）上坝带式输送机线路的布置，应考虑地形、坝长、施工现场条件和运输强度以及施工分期等因素。最大纵坡的选取应考虑停机的方便和运输料物的下滑特性，上坡时应考虑满载启动的可能性。

2）带式输送机穿越防渗体应制定合理的措施，减少对防渗体施工的影响。

3 铲运机运输应符合下列规定：

1）线路布置应选择平坦、有利重载下坡的地形，减少转弯次数。

2）铲运机上坝运输应采用两岸不同高程的上坝路线。

4 有轨运输应符合下列规定：

1）有轨运输方式应与其他运输方式充分比较，慎重选择。有轨运输可用于场地开阔、运距较长、运输量大的工程，应采用复线及环线布置方式。限制坡度应根据运输量、机车车辆类型和地形条件等因素，经技术经济比较确定。

2）站场线路布置应避免平面交叉。

5.3 坝料转运与堆存

5.3.1 坝料转运应做到统筹规划，兼顾转料场地布置、转料台及转料设备升高等要求，转运方式应根据坝区施工条件和料物性质合理选择。

5.3.2 带式装卸机转料场地的布置应符合下列规定：

1 宜选在坝体占压范围以外，高度适宜。

2 转料场地应轮换、交替使用，并应提前修筑。

3 场地面积应大于 40m×50m。

5.3.3 带式输送机—汽车转料可直接装料或通过料斗（料仓）转料。

5.3.4 坝料堆存应满足下列要求：

1 堆料场及运输道路的布置应考虑挖装条件，避免产生料物离析。

2 堆料场面积应满足堆料要求，距填筑面近。

5.4 坝区供电和供水

5.4.1 坝区供电设施应结合工程施工供电规划。应根据施工分区提出分区高峰用电负荷、电压等级和负荷类别。

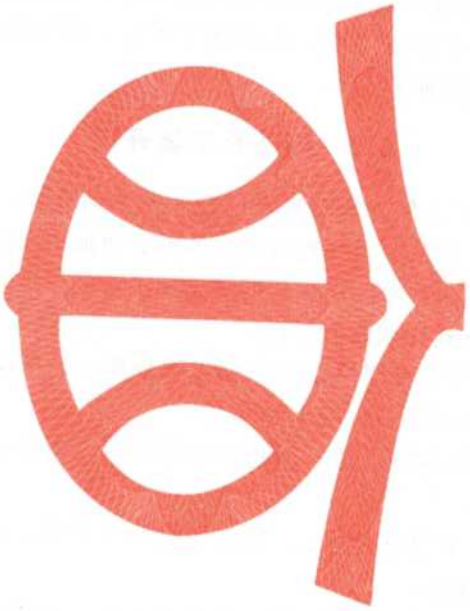
5.4.2 坝区供水应符合下列规定：

1 坝区供水设施应结合工程施工供水系统规划。

2 应根据工程进度确定用水项目及相应时段，推求各阶段用水量；根据坝体填筑强度估算加水量，提出高峰用水量。

3 选定施工供水水源。水源水量应满足需要，水质应符合设计要求。

4 坝区施工用水管路宜设专管，管道布置不应影响坝体施工，不宜与生活用水管道合并使用。



6 坝基处理

6.1 一般规定

6.1.1 坝基处理应根据设计方案提出的要求，分别采用开挖、回填、夯实、灌浆、桩基础、防渗墙等坝基防渗和加固的施工方法等。

6.1.2 坝基处理应根据大坝对地基的要求，分析水文、地质等条件，进行技术经济比较，选择技术可行、效果可靠、工期较短、经济合理的施工方案。

6.2 坝基及岸坡开挖

6.2.1 岸坡水上部分的坝基开挖宜在截流前完成，并应自上而下分层进行。开挖分界高程可根据地形、河流水文特性等因素分析确定。对河床狭窄、岸坡陡峻等出渣困难的岸坡开挖，也可采用基坑出渣方式在截流后进行。

6.2.2 岸坡开挖分层厚度应根据工程规模、地质条件、开挖断面特征及施工机具特性等分析确定。

6.2.3 岸坡轮廓面开挖宜采用预裂爆破、光面爆破或预留保护层等方法。

6.2.4 岸坡采用喷混凝土、锚杆等临时支护时，应在每层开挖完成后及时实施。

6.2.5 岩石开挖宜采用分层梯段爆破方法；接近建基面，应预留保护层。

6.2.6 坝基岩石开挖不应采用集中药包法爆破；在新浇筑或正在浇筑混凝土和灌浆区等部位附近进行爆破作业，应控制爆破质点振动速度不大于 GB 6722 规定的安全允许标准。

6.3 固结灌浆及帷幕灌浆

6.3.1 灌浆采用的水泥品种，应根据灌浆目的和环境水的侵蚀

作用等确定。根据灌浆需要，可在水泥浆中加入砂、膨润土或黏性土、粉煤灰和水玻璃等掺合料。

6.3.2 同一地段的基岩灌浆应按先固结灌浆、后帷幕灌浆，分序加密原则进行，可分为二序或三序施工。

6.3.3 有盖重混凝土的条件下灌浆，应在混凝土强度达到50%设计强度后进行。

6.3.4 无盖重混凝土的条件下灌浆，根据基础岩面表层裂隙情况，可采用裸岩固结灌浆法或薄层混凝土表面封闭式固结灌浆法。

6.3.5 灌浆泵的技术性能应与所灌注的浆液的类型、浓度相适应。灌浆机械的额定工作压力应大于最大灌浆压力的1.5倍，排浆量应满足灌浆最大注入率的要求。

6.3.6 帷幕灌浆的施工顺序，多排孔应按下游排、上游排、中间排的顺序，按序逐渐加密进行。

6.3.7 帷幕灌浆应在蓄水前完成相应蓄水位以下部分。

6.4 混凝土防渗墙、高喷墙

6.4.1 混凝土防渗墙施工平台高程，不应低于施工时段设计最高水位2.0m，并高于地下水位1.5m以上；平台尺寸应满足造孔、清渣、混凝土浇筑和交通等要求。

6.4.2 防渗墙槽段划分应综合考虑施工工期要求、地基的工程地质及水文地质条件、施工部位、造孔方法、机具性能、造孔深度和混凝土供应强度等因素确定。

6.4.3 混凝土防渗墙造孔工艺和设备的选择应根据地层情况、墙深、墙厚及其他施工条件等确定。

6.4.4 混凝土防渗墙施工所用的固壁土料宜选用膨润土；采用黏土时，黏粒含量应大于50%，塑性指数应大于20，含砂量应小于5%。

6.4.5 高压喷射灌浆应根据工程需要和地层条件，可采用单管法、双管法和三管法等。

6.4.6 多排孔高喷墙宜先施工下游排，再施工上游排，后施工
中间排；同一排内的高喷灌浆孔宜分两序施工。

6.4.7 高喷灌浆浆液宜使用普通硅酸盐水泥浆液，制浆所用水
泥的强度等级不应低于 42.5 级。

6.5 软 基 处 理

6.5.1 碎石土、砂土、低饱和度的粉土和黏性土、湿陷性黄土
杂填土、素填土和砂砾石等地基宜采用强夯法处理。采用强夯法
处理的地基，应进行现场强夯试验。

6.5.2 根据设计要求的强夯能级，夯锤重可取 10～20t，选用
带有自动脱钩的履带式起重机或其他专用设备；当地下水位较高
时，应铺设硬质粗骨料垫层或采用人工降低地下水位，使其低于
坑底面以下 2.5m。

6.5.3 强夯施工振动对周围建筑物和环境的影响，以及安全施
工距离，应通过现场试夯振动测试确定。

6.5.4 排水固结可用于处理各类淤泥、淤泥质土及其他饱和软
黏土，对渗透性极低的泥炭土应慎重对待。采用堆载预压、真空
预压、真空—堆载联合预压排水固结方法时，应符合下列规定：

1 采用堆载预压法时，塑料排水板的性能应符合设计要求。
施工所用套管应保证插入地基中的带子不扭曲；砂井的灌砂量应
按井孔的体积和砂在中密状态时的干密度计算，实际灌砂量不应
小于计算值的 95%。

2 采用真空预压法时，抽气设备宜采用射流真空泵，空抽
时应达到 95kPa 以上的真空吸力。密封膜应采用抗老化性能好、
韧性好、抗穿刺性能强的不透气材料。

3 采用真空—堆载联合预压时，应先抽真空，当真空压力
达到设计要求并稳定后，再堆载，并继续抽气，堆载时应在膜上
铺设土工编织袋保护材料。

6.5.5 振冲法可用于处理砂土、粉土、粉质黏土、素填土和杂
填土等地基。

7 坝体填筑

7.1 填筑分期

7.1.1 填筑期超过一个水文年的土石坝，应进行坝体分期填筑。

7.1.2 填筑分期应满足坝体防洪度汛要求，宜均衡安排各期填筑量、填筑强度。

7.1.3 填筑分期应考虑填筑材料分区的设计要求，避免对坝体质量产生不利影响。填筑分期应满足各期断面纵横高差及坡度要求。

7.2 坝面填筑作业规划

7.2.1 坝面填筑作业包括铺料、加水、碾压、取样检查等主要工序，各工序应按流水作业法连续进行。

7.2.2 坝面填筑作业规划应遵循下列原则：

1 同一期填筑坝面宜按主要工序数目划分为若干个面积大致相等的填筑区段。

2 土质防渗体应与其上下游反滤料及部分坝壳料平起填筑。

3 垫层料、过渡料和一定宽度主堆石料的填筑应平起填筑，跨缝碾压，均衡上升；当反滤料或垫层料填筑滞后于坝壳料时应预留施工场地。

4 面板堆石坝的面板施工应在坝面上留有足够的施工场地。

5 运输车辆不宜穿越心墙、斜墙和趾板；若需穿越时应提出专门的施工措施。

6 坝体填筑时，宜平起填筑、均衡上升。当采用临时断面度汛时，临时拦洪断面应满足临时挡水的整体稳定、边坡稳定和渗流稳定要求，顶宽应满足施工及防洪抢险要求，并考虑后期形成大坝设计断面时，不影响大坝的整体性。斜墙坝、窄心墙坝不宜划分临时断面。

7 应分析工程所在地区降雨、气温、蒸发、霜冻、积雪等各种气象要素的长期观测资料，统计各种气象要素不同量级出现天数，确定对各种坝料的影响程度。

7.3 坝 壳 料

7.3.1 坝壳料填筑机械选择应符合下列规定：

1 上坝运输宜选用自卸汽车运输方式。自卸汽车载重量应结合场内交通条件，与坝体填筑工程量和高峰填筑强度相适应。

2 坝面填筑料宜选用推土机摊铺、平料。推土机动力应与填筑料最大粒径、级配相适应。

3 填筑料压实宜选用振动碾碾压。振动碾型号、规格应与填筑料的铺料厚度、压实要求相适应。大型工程或有特殊要求的工程施工机械选型应通过生产性试验验证。

7.3.2 坝壳料铺填应符合下列规定：

1 堆石料宜选用进占法铺料。

2 对于级配较好的石料、砂砾（卵）石料等，宜选用后退法铺料。

3 对于铺料层厚度大于 1.0m 的堆石料，应选用混合法铺料。

7.3.3 坝壳料压实应符合下列规定：

1 堆石与含有漂石的砂卵石、砂砾石和砾质土应优先用振动碾压实，砂、砂砾料、砾质土可选用气胎碾压实。

2 除坝面特殊部位外，碾压方向应沿坝轴线方向进行。

3 坝面碾压宜采用进退错距法作业，碾压前宜适当加水。

7.3.4 坝壳料接缝处理应符合下列规定：

1 坝壳与岸坡结合填筑带的填筑宜采用下列施工技术措施：

1）与岸坡结合处 2m 宽范围内，可沿岸坡方向碾压。

2）不易压实的边角部位应减薄铺料厚度，用轻型振动碾或平板振动器等小型压实机具压实。

3）坝壳料与岸坡结合部位，在结合部位可先填 1～2m 宽

表 B.0.1（续）

序号	施工项目	停工标准											
		法定假日	日降水量（mm）					日蒸发量小于4mm	日平均气温（℃）				
			0～0.5	0.5～5	5～10	10～30	>30		>5	5～0	0～−5	−5～−10	<−10
3	砾质土、掺合土、风化土填筑	停工	照常施工	照常施工	雨日停工	雨日停工，雨后停工半日	雨日停工，雨后停工一日	—	照常施工	照常施工	防护施工	防护施工	停工
4	反滤料、垫层料填筑	停工	照常施工	照常施工	照常施工	雨日停工	雨日停工	—	照常施工	照常施工	防护施工	防护施工	停工
5	石料填筑	停工	照常施工	照常施工	照常施工	照常施工	雨日停工	—	照常施工	照常施工	防护施工	防护施工	停工

注 1：表列停工标准是设计阶段统计有效工日的标准，不作施工停工标准。

注 2：反滤料、垫层料填筑施工若与防渗料同时施工时，其有效施工天数同防渗料。

注 3：当日平均气温在 0℃以下且风速大于 10m/s 时，停止土料施工。

注 4：多雾地区施工天数尚需考虑雾天影响。

注 5：法定节假日停工，但不包括周六、周日。

B.0.2 碾压式沥青混凝土施工受气象因素影响的停工标准见表 B.0.2。

表 B.0.2 碾压式沥青混凝土施工受气象因素影响的停工标准

日降雨量 (mm)		日平均气温 (℃)			
≤5	>5	<−5	−5～5	5～15	>15
正常施工	雨日停工	停工	防护施工	风速大于四级停工，风速小于等于四级施工	照常施工

注 1：表列停工标准，是设计阶段统计有效工日的标准，不作施工停工标准。
注 2：多雾地区施工天数尚需考虑雾天影响。

标 准 用 词 说 明

标准用词	在特殊情况下的等效表述	要求严格程度
应	有必要、要求、要、只有……才允许	要　求
不应	不允许、不许可、不要	
宜	推荐、建议	推　荐
不宜	不推荐、不建议	
可	允许、许可、准许	允　许
不必	不需要、不要求	

中华人民共和国水利行业标准

土石坝施工组织设计规范

SL 648—2013

条 文 说 明

目　次

1　总则…… 39
2　基本规定…… 42
3　施工导流与度汛…… 43
4　筑坝材料开采、加工设计…… 55
5　坝区施工布置…… 67
6　坝基处理…… 76
7　坝体填筑…… 95
8　防渗体施工 …… 112
9　施工进度计划 …… 121
10　资源配置…… 128

1 总　　则

1.0.1 我国大规模修建土石坝从20世纪50年代开始，随着水电建设的不断发展及水利水电建设者对以往施工经验的不断分析和总结，于20世纪80年代，首次编制完成了《水利水电工程施工组织设计手册》等施工设计方面的参考资料。该手册既总结了以往较为成熟的经验和先进施工技术成果，同时也阐述了编制水利水电工程施工组织设计的原则、内容、方法和步骤，在很长一段时间内，这部工具书对土石坝施工设计起着指导作用。20世纪80年代末，随着《水利水电工程施工组织设计规范》（SDJ 338—89）的编制完成，结束了施工组织设计无章可循、无据可依的局面，并在2004年初进行了修订。20多年来，我国水电建设迅猛发展，土石坝新坝型、新技术和新经验不断涌现，一批大型、特大型水利水电枢纽工程的建设，在爆破开挖技术、基础处理工艺及坝体填筑方法上取得了许多成功的经验，需要进行总结和归纳，并进行规范化。近年来，大型装载运输设备、新型基础处理设备及坝体（心墙）碾压设备的陆续投入使用，使土石坝施工速度越来越快，这样对土石坝如何科学组织施工，提出了更高的要求。如今，我国土石坝建设规模和建设速度举世瞩目，但已开发的水力资源也仅占总资源的20%左右。随着西部大开发的不断深入，许多技术难度大的水利水电工程建设陆续启动，编制《土石坝施工组织设计规范》十分必要。该标准将作为土石坝施工组织设计的主要依据，同时也是继续研究、开发、更新施工技术和施工工艺的基础。

1.0.2 土石坝的级别，应根据《防洪标准》（GB 50201—94）及《水利水电工程等级划分及洪水标准》（SL 252—2000）中的有关规定划分。

土石坝按其高度划分为高、中、低坝，应符合《碾压式土石

坝设计规范》（SL 274）的规定，即最大坝高 30m 以下为低坝，30～70m 为中坝，70m 以上为高坝。这也是我国各类坝型的通用分类标准。

近年来，随着水利水电工程的快速发展，高土石坝日益增多，国内目前部分已建、在建高度大于 150m 的土石坝见表 1。

表 1　部分坝高大于 150m 的碾压式土石坝特性

（2012 年 6 月不完全统计资料）

序号	工程名称	地点	坝高（m）	坝　型	坝顶长（m）	总库容（亿 m^3）	装机容量（MW）	坝体积（万 m^3）	建设情况
1	水布垭	湖北	233	面板堆石坝	584	45.8	1600	1660	建成
2	瀑布沟	四川	186	砾石土心墙堆石坝	573	53.9	3300	2400	建成
3	三板溪	贵州	185.5	面板堆石坝	423.75	37.5	1000	830	建成
4	洪家渡	贵州	179.5	面板堆石坝	427.79	49.47	600	901	建成
5	天生桥一级	贵州	178	面板堆石坝	1104	102.75	1200	1800	建成
6	滩坑	浙江	171	面板堆石坝	—	41.5	600	—	建成
7	小浪底	河南	160	土心墙堆石坝	1667	126.5	1800	5185	建成
8	吉林台一级	新疆	157	面板砂砾石坝	445	25.3	460	900	建成
9	紫坪铺	四川	156	面板堆石坝	—	11.12	760	—	建成
10	巴山	重庆	155	面板堆石坝	477	3.15	140	550	建成
11	马鹿塘二期	云南	154	面板堆石坝	493	5.46	240	—	建成
12	董箐	贵州	150	面板堆石坝	679	9.55	880	890	建成
13	双江口	四川	314	土心墙堆石坝	—	29	2000	—	在建
14	两河口	四川	305	土心墙堆石坝	650	120.31	3000	—	在建
15	糯扎渡	云南	261.5	土心墙堆石坝	608	237	5850	3495	在建
16	长河坝	四川	240	砾石土心墙堆石坝	502.85	10.75	2600	3300	在建
17	猴子岩	四川	223.5	面板堆石坝	283	7.06	1700	—	在建
18	江坪河	湖北	219	面板堆石坝	414	13.66	450	260	在建
19	卡基娃	四川	171	面板堆石坝	323	3.745	452.4	600	在建
20	黔中	贵州	162.7	面板堆石坝	363	10.89	136	—	在建
21	龙背湾	湖北	158.3	面板堆石坝	465	8.3	180	700	在建

本标准所提出的碾压式土石坝包括各种防渗形式，坝型包括均质土坝，土质心墙堆石坝，土质斜墙堆石坝，钢筋混凝土面板堆石坝，沥青面板堆石坝，碾压式沥青心墙堆石坝，浇筑式沥青心墙堆石坝，土工膜心墙堆石坝，土工膜斜墙堆石坝等。

本标准适用于水利水电工程中1级、2级、3级和3级以下高度超过30m的碾压式土石坝初步设计阶段施工组织设计的编制。1级、2级、3级和3级以下高度超过30m的碾压式土石坝工程编制项目建议书、可行性研究报告和招、投标文件，及3级以下高度小于30m的碾压式土石坝工程编制施工组织设计文件，可参照执行。

对于坝高200m以上的坝，现有经验还不足以涵盖，为此规定200m以上高坝要进行专门研究。

1.0.3 本条所列的各项原则，是针对整个施工组织设计而言，对各章节普遍适用。对仅适合特定章节的具体原则，则分别列入各章节中。本条提出应合理推广新技术、新材料、新工艺和新设备，其中经实践证明技术成熟、技术经济效益显著的科研成果应推广使用。

2 基本规定

2.1 设计依据

强调设计应收集的基本资料，也是需进行调查研究的主要内容。包括法律法规、工程条件、自然条件、工程区近期发展规划以及对施工条件的分析。

2.2 施工条件

强调工程施工设计应收集的基本资料，也是需进行调查研究的主要内容。包括场地条件、对外交通条件、水文气象条件、地形地质条件、天然建筑材料、施工供水、供电条件和建筑材料等社会经济条件。在特殊地区还需收集分析社会政治因素对工程施工的潜在影响。

2.3 施工布置及施工方案比选

2.3.1 施工布置与相关的施工项目协调配合，避免互相干扰。同时使料场、坝面、运输干线、仓库、渣场、油料供应点连接合理。生活设施尽量远离噪音、振动、飞尘、交通量大的现场。充分利用弃渣场地，布置后期使用的施工工厂、安装作业、停车、堆料场地等。

2.3.2 土石坝施工方案的研究和选择，旨在进一步论证施工进度计划的可行性和合理性，其主要内容包括坝体施工分期、施工综合机械化、料场开采规划、运输线路布置以及坝面作业分段流水作业方案等。对所拟定的施工分期方案、整个施工过程综合机械化方案，通过技术经济比较选出最优方案。

3 施工导流与度汛

3.0.1、3.0.2 施工导流与度汛贯穿土石坝施工全过程，应进行系统分析、全面规划、统筹安排、妥善处理施工与洪水的关系。土石坝的施工导流设计不仅要解决初期导流问题，而且要妥善解决施工全过程的挡、泄、蓄水问题，既要重视初期导流也要重视中后期导流。

关于土石坝的初期导流方式，在设计中把握好三点：

（1）流量较小的河流，从方便坝体填筑出发，一般选用围堰全年挡水的导流方式。

（2）对于流量较大的河流，经过分析地形地质条件可选用坝体临时断面临时挡水度汛的导流方式。

（3）对于流量很大的河流，经方案比较，面板堆石坝可选用汛期基坑过水的导流方式。例如天生桥一期、珊溪和滩坑等工程。

而中后期导流设计涉及的内容往往随工程情况不同而异，对于大中型拦河坝一般包括坝体施工期临时挡水、导流泄水建筑物封堵和水库蓄水等阶段，而且初期、后期导流密切相关，是一个不可分割的有机整体，设计中要统筹规划、合理安排。一般来说，施工导流方式的选取应该从地形、地质条件、水文特性、流冰、枢纽布置以及航运等要求综合比选，但对于其他条件都相同的情况下，土石坝型与混凝土坝型有一定的差别。相同河槽宽度的情况下，混凝土坝采用分期导流时，二期纵向混凝土围堰可以与坝体结合，坝体底孔泄洪，一期、二期坝段之间可以留横缝连接。而土石坝型采用分期导流时，坝体无法泄洪，一期坝体填筑时，在坝轴线方向需留 1∶3 的坡度衔接，使一期填筑量受到限制，一期导流虽然可以河床泄流，二期还需其他泄流工程导流；混凝土面板堆石坝若采用河床分期导流，一期、二期坝体沉降时间及沉降量不同，对上游混凝土面板施工有一定影响，上游混凝

土面板由于坝体的沉降不同易产生开裂。国内部分土石坝型导流方式分类见表 2。一般来说，分期导流的土石坝工程一般坝轴线较长，泄洪系统一般为拦洪重力坝或闸坝式结构，泄洪系统一侧或两侧布置土石坝段。

表 2　国内部分土石坝型导流方式分类

基本分类	工　程　实　例
围堰一次拦断河床的导流方式	官厅、大伙房、岗南、升钟、毛家村、碧口、察尔深、鲁布革、小浪底、莲花、天生桥一级、糯扎渡、水布垭、小山、珊溪、滩坑、引子渡、洪家渡、三板溪、公伯峡、察汗乌苏、梨园、两河口、瀑布沟、双江口、卡基娃、乌鲁瓦提、龙背湾、马鹿塘二期、江坪河、黔中、董箐、狮子坪、金盆、那兰、水牛家、九甸峡、老渡口、龙马、巴山、晃桥、东津、河口村、查龙、恰甫其海、崖羊山、牛栏江—滇池补水工程、关门山、成屏、西北口、龙溪、株树桥、白溪、松涛、六都寨等
围堰分期拦断河床的导流方式	西霞院、石头河、观音岩、尼尔基、铜街子等

土石坝型无论是心墙或是斜墙防渗的形式，均应考虑围堰与坝体结合的可能，这样除节省临建费用外，还可使枢纽总布置更紧凑、更合理。如：糯扎渡 261.5m 高的黏土心墙堆石坝，其上游土石围堰高 74m，下游土石围堰高 42m，上、下游围堰与坝体结合布置。水布垭 233m 高的混凝土面板堆石坝，其下游 RCC 过水围堰高 33m，下游围堰与坝体结合布置。小浪底 160m 高的黏土斜心墙堆石坝，其上游土石围堰高 57m，上游围堰与坝体结合布置。

随着大型施工机械的发展，土石坝建设速度明显加快，在截流后的第一个汛期到来之前可将坝体抢筑至拦挡大汛水位。三板溪 185.5m 高的混凝土面板堆石坝，采用枯水期围堰断流，在第一个汛期之前将坝体临时断面抢填到拦挡 100 年一遇洪水位高程，三板溪大坝于 2003 年 12 月 17 日正式开始坝体填筑，至 2004 年 4 月 30 日，坝体临时断面填筑到 390m 高程，可以拦挡

100年一遇的洪水，确保坝体安全度汛。在4、5个月的坝体填筑施工中，坝体临时断面上升93m，平均月上升20.7m，最高月上升25m，坝体堆石填筑230.7万m^3，平均月填筑51.3万m^3，最大月填筑71.7万m^3。88.5m高的东津、129.5m高的引子渡和179.5m高的洪家渡混凝土面板堆石坝，也都采用枯水期围堰断流，在第一个汛期之前抢填坝体临时断面拦洪度汛。国内一些土石坝工程第一个汛前坝体抢筑至拦洪标准的实例见表3，故在土石坝的导流设计中，尽量做到由坝体拦挡大汛，以降低围堰的规模。

表3　国内部分土石坝第一个汛前坝体度汛施工特性

工程名称	总工程量（万m^3）	最大坝高（m）	设计拦洪标准		开工至拦洪日期（年．月．日）	拦洪坝高/填筑量（m/万m^3）
			重现期（年）	流量（m^3/s）		
岗南	1447	63.0	100	6260	1958.3～1959.7	51.0/
清河	773.5	39.4	100	5944	1958.5～1959.7	28.5/
王快	861.4	52	100	7860	1958.6～1959.6	35.0/
西大洋	1198.3	54.8	100	6490	1958.7～1959.7	35.8/
松涛	447.1	80.1	100	7100	1958.7～1959.8	55.0/
密云	1105	66.0	100	8910	1958.9～1959.8	49.0/
黄壁庄	1930.1	30.7	100	9050	1958.10～1959.7	—
山美	154	74.5		—	1971.10～1972.7	74.0/
察尔森	621.6	40.0	100	2280	1988.9～1989.6	28.0/
东津	170	88.5	100	3630	1992.12.30～1993.4.27	57/70
小浪底	5585	160	100	18010	1994.4～1998.7.1	/212.6
引子渡	310	129.5	50	5780	2001.12.3～2002.5.20	70/87
洪家渡	902.6	179.5	100	5210	2003.1.26～2003.5.26	55/120
三板溪	871.4	185.5	100	12600	2003.12.17～2004.4.30	93/230.7

3.0.3 坝体临时度汛方式可采用挡水或过水方式。大坝施工期间，要保证按照施工进度要求，达到度汛的形象面貌，不应降低安全度汛标准，坝体填筑一般全断面均衡上升。当无法全断面填筑到拦洪高程时，可采用临时断面防洪。抢截流后的第一年度汛高程时，需迅速填筑上游临时断面，但上、下游填方高差应予限制，不宜超过 20～30m，满足安全稳定要求，必要时下游填方还可以分为两个或多个台阶。

汛前坝体临时断面所能达到的填筑高度主要从填筑工期、上坝道路布置情况和料场布置情况等三个方面进行论证。根据以往工程的经验，对于面板堆石坝来说，坝体的开始填筑时间主要受 3 个因素的制约：

（1）河床覆盖层的薄厚及围堰的防渗设计特点。

（2）截流前两岸趾板的开挖情况和基坑抽水结束后趾板线的调整幅度。

（3）基坑内趾板混凝土的开始浇筑时间等。

而砂砾石填筑的坝体未经论证，不宜采用过水度汛方案。面板堆石坝可以在有保护的条件下，利用堆石坝体挡水甚至过水度汛，以减少导流建筑物的规模。

对堆石坝体预留部位及坝坡采用防护措施后，可用坝体过流，此时可降低导流设施规模。

采用临时坝面过水时，应根据坝面过流条件，合理选择坝面保护型式，防止淤积物渗入坝体，应特别注意防渗体、反滤层的保护。国内外均有土石坝施工期过水的工程，但坝面受冲毁的工程也较多，见表 4。如有计划的采取土石坝体过水度汛，则应在汛前采取坝面加固保护措施，但所设计的某重现期标准的坝面过水流量又不一定发生或时间不确定，则在汛期中是等待洪水过坝，还是坝体继续加高填筑，便举棋不定，延误工期。如水布垭 233m 高的混凝土面板堆石坝设计第一个汛期采用坝面过水度汛，2003 年 4 月底做好坝面过水保护，在汛期中等待洪水过坝，

表 4　国内外部分土石坝过水情况

工程名称	国家	坝型	过水时坝高（m）	坝面防冲措施	坝面过流量（m^3/s）	坝面水深（m）	坝面过水影响
龙凤山	中国	土坝	7	砌石护面	140	1.3	安全度汛
毛家村	中国	土坝	9	干砌石与木框填石	40	—	木框有冲坏，其余无损坏
富昌	中国	土石坝	12.5	条石护面，混凝土护脚	117	—	堆石下沉 3cm，运行良好
百花	中国	堆石坝	28	未护面	1300	6	超标洪水冲失剥离堆石 10 余万 m^3
升钟	中国	土坝	9	干砌条块石护面	620	3	安全度汛
双里	中国	土石坝	12	25kg 块石护面	57	—	黏土稍有冲刷，其余完好
琴源	中国	土石坝	11	下游用 30～40cm 块石护坡	160		冲失土石 14000m^3
水布垭	中国	混凝土面板堆石坝	32	大块石钢筋网加固、钢筋笼保护	—	—	实际未过水
天生桥一级	中国	混凝土面板堆石坝	29	坝面上、下游采用钢筋笼保护，坝面采用粒径大于 20cm 的块石和钢筋铅丝网护面，下游坡面及 635m 和 630m 平台采用大块石护面，两岸已填筑堆石体坡面为与水平锚筋相连接的钢筋铅丝网护面至 658m 高程	1290	—	坝面平均流速 10.32m/s，坝面泄水槽受水流破坏程度较轻，裹头保护段钢筋网格局部被掀起破坏，坝下游坡的钢筋笼因坡面流速较大破坏较严重

表 4（续）

工程名称	国家	坝型	过水时坝高（m）	坝面防冲措施	坝面过流量（m^3/s）	坝面水深（m）	坝面过水影响
珊溪	中国	混凝土面板堆石坝	25	大坝上游左岸坝坡采用 7cm 厚碾压 50 号水泥砂浆固坡保护，即与坝面斜坡垫层固坡一致；坝面一般采用粒径大于 0.5m 大块石护坡，后缘坝面及下游坝坡采用超径大块石保护	设计：6500 实际：1195	—	经历了 1998 年 6 月 21 日长达 28h 的过坝洪水考验，实测最大流量为 $2295m^3/s$，推算导流洞流量 $1100m^3/s$，坝面流量 $1195m^3/s$，坝面平均流速 2.43m/s，对过流后坝面情况进行了检查，发现除残留薄薄的 1～2mm 厚淤泥外，坝面无冲蚀现象
滩坑	中国	混凝土面板堆石坝	28	坝面一般采用粒径大于 0.5m 大块石整平保护，后缘坝面及下游坝坡采用超径大块石保护	设计：7901 实际：2100	—	坝面共过流 6 次，坝面最大过流量 $2100m^3/s$，相应坝轴线处平均流速约 3.51m/s。前 4 次过流坝面未损坏，后 2 次过流后靠坝右岸侧存在两条冲刷槽，一条宽 10～20m，深 2m 左右；另一条宽 5～30m，呈扇形分布，深 2m 左右

表 4（续）

工程名称	国家	坝型	过水时坝高（m）	坝面防冲措施	坝面过流量（m^3/s）	坝面水深（m）	坝面过水影响
努列克	苏联	土石坝	20	大块混凝土护面	1860	5	坝面降低 1m，混凝土板下局部冲深 2m
伍斯特汉泰斯克	苏联	土石坝	16	木笼及 15～18t 巨石串钢筋	7000	9	下游冲出 10m 冲坑
奥德	澳大利亚	堆石坝	28.8	钢筋网加固	5600	10.5	钢筋有破坏，堆石体下陷 3cm
勃雷特尔屈福特	南非	堆石坝	18.5	ϕ21mm 钢筋网加固	1134	3.7	未加固的左端冲出 30m×10m 的缺口，损失石方 7.7%
波罗那	澳大利亚	堆石坝	10	钢筋网加固	850	3.9	安全度汛
圣伊狄方索	墨西哥	混凝土面板堆石坝	11	上游钢筋混凝土面板，下游 ϕ19mm 钢筋网加固	184	2	前 2 次过水未损坏，后因拆除钢筋网冲失块石 $7000m^3$
根米湖	芬兰	堆石坝	17	沿坝轴线设一行钢筋桩其后用 1.5～3.0t 块石护面	—	3.25	安全度汛

坝体停止施工，但当年汛期由于来流量偏小，实际坝面未过水，汛后坝体继续填筑。天生桥一期、珊溪和滩坑混凝土面板堆石坝采用坝面过水度汛施工方案。坝面过水重点保护部位：泄水槽、泄水槽进/出口裹头、坝下游坡面。

天生桥一级坝面过水断面在泄水槽进、出口采用钢筋笼保护，上游进口钢筋笼横向布置，间距 6.5m，底部采用 ϕ20mm 的钢筋与堆石体连接，钢筋间距 2.0m，中间部位填以块石，顶部用钢筋铅丝网封闭并固定在钢筋笼上，上游加放一排钢筋笼，总宽度 43.0m。下游出口钢筋笼亦横向布置，间距 4.5m，钢筋笼布置总宽度 15.0m。下游坡面及两平台采用粒径 0.5～1.5m 的大块石保护。泄水槽中部 642m 高程平台用粒径大于 0.2m 的块石填筑保护，坝下游坡脚采用大块石保护。

泄洪槽进口裹头部位采用钢筋笼保护，大坝堆石体与岸坡相接处用钢筋笼压脚保护；泄水槽出口裹头亦布置钢筋笼间隔保护；泄水槽两岸坡脚的钢筋网，一端与岸坡钢筋相连；另一端连同铅丝网压入泄水槽底部，两岸坡脚保护带宽度 3.0m。

泄水槽两岸边坡用钢筋铅丝网保护至 658m 高程，坝轴线上下分别用 8.0m 和 5.2m 长的锚筋与两岸已填筑堆石体连接锚固。锚筋规格：ϕ20mm 呈梅花形布置，间排距 1.6m×1.6m；钢筋网骨架筋焊接在锚筋上，骨架筋规格：ϕ20mm 间排距 1.0m×1.0m；钢丝网规格：8 号钢丝，网眼尺寸 0.1m×0.1m，绑扎在骨架筋上，其上再用附加钢筋网固定，附加钢筋网规格同骨架筋。

1996 年汛期坝面过 4 次水，洪水历时 348h，河道最大来流量 3790m^3/s，坝面分流 1290m^3/s，其平均流速 10.32m/s。1 号、2 号导流洞分流 2500m^3/s。

1996 年汛期坝面过水，汛后检查坝面保护形态较好，坝面泄水槽受水流破坏程度较轻，其淤积厚度约 0.2～0.3m；泄水槽进口处（包括 635m 平台）淤泥厚约 1m；靠左岸趾板沿线淤泥厚约 0.6～0.9m，其裹头保护段钢筋网格局部被掀起破坏；坝下游坡的钢筋笼因坡面流速较大破坏较严重，经检查有两钢筋

网移位和变形；两岸裹头及坝面保护基本未受破坏。

滩坑水电站面板堆石坝2006年坝面共过水6次，6月17日前共过水4次，过流后对坝面冲刷情况进行了检查，检查结果表明，坝轴线以上坝面平整，没有明显的冲刷坑、沟；坝轴线以下局部表面存在细颗粒流逝、块石外露现象。坝体过流量最大是在8月11日受8号台风“桑美”的影响，洪峰流量达到3400m³/s，其中河床泄流2100m³/s，相应坝轴线处平均流速3.51m/s。过流后经检查坝轴线以上局部细颗粒被冲走；坝下桩号0+00～0-100区域平台表面细颗粒被冲走，局部地段存在细颗粒集中现象；坝下桩号0-100至坝脚段，靠坝右岸侧存在两条冲刷槽，一条宽10～20m，深2m左右；另一条宽5～30m，呈扇形分布，深2m左右。造成局部冲刷严重的原因主要是“7.14”洪水坝面过流后，坝面冲刷槽未作处理，再过流时冲刷更严重，其次是坝面填筑面的不平整和超径石防护码砌不够平顺，导致冲刷加刷。

采用坝面过水度汛施工方案一般延长大坝施工工期，对夏季在3个月以上较长时段的情况下一般不采用坝面过水度汛为宜。

3.0.4 近年来部分堆石坝采用临时断面挡水。施工期土石坝的最高度汛标准当满足大于100年一遇标准时，可根据拦蓄库容选定最高度汛标准。部分工程实例见表5，供设计时参考。

表5 部分堆石坝坝体临时度汛设计断面挡水情况

工程名称	大坝设计指标	临时度汛断面设计指标	度汛标准
东津	坝高：88.5m 库容：7.98亿m³ 2级建筑物	临时度汛断面高度：56.7m 拦蓄库容：大于1亿m³ 填筑时间：1992年12月20日至1993年4月27日 填筑量：70万m³	P=1% Q=3630m³/s
天生桥一级	坝高：178m 库容：102.57亿m³ 1级建筑物	一期临时度汛断面高度：111m 拦蓄库容：大于20亿m³ 填筑时间：1995年5月21日至1996年5月20日 填筑量：761万m³	P=0.33% Q=17400m³/s

表 5（续）

工程名称	大坝设计指标	临时度汛断面设计指标	度汛标准
天生桥一级	坝高：178m 库容：102.57 亿 m^3 1 级建筑物	二期临时度汛断面高度：121m 拦蓄库容：大于 20 亿 m^3 填筑时间：1995 年 6 月 21 日至 1996 年 11 月 10 日 填筑量：1154 万 m^3	$P=0.2\%$ $Q=18800m^3/s$
珊溪	坝高：132.5m 库容：18.24 亿 m^3 1 级建筑物 500 年一遇洪水设计	临时度汛断面高度：78m 填筑时间：1998 年 1 月至 1999 年 6 月 填筑量：570 万 m^3	$P=1\%$ $Q=11500m^3/s$
引子渡	坝高：129.5m 库容：5.31 亿 m^3 1 级建筑物 100 年一遇洪水设计	临时度汛断面高度：70m 拦蓄库容：0.5 亿 m^3 填筑时间：2001 年 12 月 3 日至 2002 年 5 月 20 日 填筑量：87 万 m^3	$P=2\%$ $Q=5780m^3/s$
洪家渡	坝高：179.5m 库容：49.47 亿 m^3 1 级建筑物 500 年一遇洪水设计	临时度汛断面高度：55m 拦蓄库容：1.5 亿 m^3 填筑时间：2003 年 1 月 16 日至 2003 年 5 月 26 日 填筑量：120 万 m^3	$P=1\%$ $Q=5210m^3/s$
公伯峡	坝高：132.2m 库容：6.3 亿 m^3 1 级建筑物 500 年一遇洪水设计	临时度汛断面高度：86.5m 填筑时间：2003 年 8 月至 2004 年 5 月	$P=2\%$ $Q=2500m^3/s$
		第二汛期	$P=0.5\%$ $Q=3770m^3/s$
三板溪	坝高：185.5m 库容：37.48 亿 m^3 1 级建筑物 500 年一遇洪水设计	临时度汛断面高度：93m 拦蓄库容：3.7 亿 m^3 填筑时间：2003 年 12 月 30 日至 2004 年 4 月 30 日 填筑量：230.7 万 m^3	$P=0.5\%\sim1\%$ $Q=12600m^3/s$
察汗乌苏	坝高：110m 库容：1.25 亿 m^3 2 级建筑物 500 年一遇洪水设计	临时度汛断面高度：80m 拦蓄库容：0.5 亿 m^3 填筑时间：2005 年 3 月至 2006 年 6 月 填筑量：344 万 m^3	$P=2\%$ $Q=1390m^3/s$

表 5（续）

工程名称	大坝设计指标	临时度汛断面设计指标	度汛标准
滩坑	坝高：162m 库容：41.55 亿 m^3 1 级建筑物 500 年一遇洪水设计	临时度汛断面高度：89m 拦蓄库容：6.32 亿 m^3 填筑时间：2006 年 1 月至 2007 年 6 月 填筑量：405 万 m^3	$P=2\%$ $Q=17500m^3/s$
糯扎渡	坝高：261.5m 库容：227.41 亿 m^3 1 级建筑物 1000 年一遇洪水设计	临时度汛断面高度：115m 拦蓄库容：12.83 亿 m^3 填筑时间：第 4 年 10 月至第 6 年 5 月（设计） 填筑量：1168.66 万 m^3	$P=0.5\%$ $Q=22000m^3/s$
梨园	坝高：155m 库容：7.27 亿 m^3 1 级建筑物 500 年一遇洪水设计	临时度汛断面高度：85m 拦蓄库容：1.0 亿 m^3 填筑时间：第 3 年 5 月至第 5 年 5 月（设计） 填筑量：431.8 万 m^3	$P=1\%$ $Q=10400m^3/s$

3.0.5 水库蓄水阶段或大坝施工期运用阶段的度汛标准，因导流泄水建筑物已经封堵、永久泄洪建筑物已基本建成或具有临时泄洪能力，此阶段的库容比封堵前临时度汛库容要大，一旦失事，对下游影响也大，其标准要高一些。故这个标准比建成后的大坝正常运用洪水标准低，用正常运用时的下限值作施工期运用的上限值。

3.0.6 混凝土面板堆石坝可提前挡水和施工期坝面过流度汛，是此类土石坝的显著特点，临时度汛坝体的防渗方式可采用在垫层料上喷混凝土或水泥砂浆、喷乳化沥青、碾压砂浆等都是可行的。可采用人工铺设或机械摊铺低标号碾压水泥砂浆的防渗方式，砂浆标号为 M7.5，厚度 5～8cm，在垫层面进行斜坡碾压后，摊铺 5～8cm 厚的水泥砂浆，用振动碾压实，在垫层表面形成一层砂浆与过渡料混合的胶结层，使两者结合紧密，防渗效果好，而且速度快，造价低。喷射混凝土固坡，在碾压后的垫层表面喷 5～8cm 厚的混凝土，以起到防渗固坡作用。喷洒阳离子乳

化沥青固坡，在压实后的垫层表面，喷洒 2～3 层乳化沥青，各层间并撒以河沙，进行碾压，形成坚实表层。成屏、关门山、小干沟、株树桥工程均用碾压砂浆固坡后提前挡水度汛；引子渡大坝在坝坡上游面垫层料表面喷 5～8cm 厚混凝土或乳化沥青固坡后挡水度汛；洪家渡大坝在坝坡上游面垫层料表面喷 10cm 厚聚丙烯纤维混凝土固坡后挡水度汛；关门山工程还在坝下游坡用 1m 直径大块石护面后自坝面过流安全度汛。

4 筑坝材料开采、加工设计

4.1 料 源 规 划

4.1.1 查明筑坝材料的性质、储量和分布是土石坝设计的首要工作，是经济合理地选择筑坝材料，确定合适的坝型和断面结构，并保证顺利施工的前提。料源规划首先应满足工程对筑坝材料质量、数量的要求。本条将枢纽建筑物开挖料提到与天然筑坝材料同等重要的地位，旨在引起设计者对开挖料应用的重视。

4.1.2 本条主要说明了料场的选择原则。随着国家对环保、水保监管力度的增大，渣料水保、环保处理费用上升，利用建筑物开挖料能够减小渣场规模，从而能够达到国家要求的标准。利用枢纽建筑物开挖料不仅有利于降低工程造价，也有利于减少环境污染，理应引起重视。近年来修建的很多土石坝均较重视开挖料的应用，否则很难通过水保、环保专项审查。

4.1.3 料场选择的基本原则是能满足坝料的质量要求、数量要求，开采条件好、开采成本低。同时，勘察、设计时应避免单一料场的现象发生，以利于料场的选择与开采，避免影响施工强度，造成工期延长。料源选择有主料场和备用料场之分，主料场应质优、量大、运距近，且有利于常年开采；备用料场通常在淹没区外，作主料场之备用。

料场是工程能否顺利进行的生命线，近年来，部分工程出现料场选择后，在施工期出现不能完全满足工程要求的情况，致使工程投资及工期出现重大变化，所以料场问题（特别是石料场）应引起高度重视。石料场地质条件比较复杂，断层、节理较发育，处理地质问题需要很长时间，所以石料场是工程能否顺利进行的制约因素，两个料场（或施工作业面）同时开采，则能够有力地保证工程的顺利实施。提出本条旨在强调前期规划期间料场规划的重要性，以减少后期可能出现的失误。

4.1.4 《碾压式土石坝设计规范》(SL 274) 中对反滤料、垫层料等的要求比较严格，与主要筑坝材料的质量要求有一定差异，并要求有着特殊级配，与主要筑坝材料一同生产时将产生互相干扰，影响主要筑坝材料的生产率。

4.1.5 目前国内工程施工经验，料场可开采量与坝体填筑量的比值一般为：堆石料为 1.2～1.5；砂石料，水上为 1.5～2.0，水下为 2.0～2.5，土料为 2.0～2.5。

4.2 料场选择、开挖料利用及土石方平衡

4.2.2、4.2.3 这两条主要说明了开挖料利用的一般原则。建筑物开挖料做为填筑料的一部分，其勘探、试验深度除应满足建筑物设计对其的基本要求外，理应按料场勘探深度要求对开挖料区进行勘探、试验，并按料场开采规划要求对开挖料的利用进行详细规划。

4.2.4 土石方平衡的原则就是充分而合理地利用建筑物开挖料。根据建筑物开挖料和料场开采料的料种与品质，安排开采、供应、堆弃规划，优料优用，劣料劣用，保证工程质量，便于管理和施工。充分考虑挖填进度要求、料物储存条件，且留有余地。妥善安排弃料，做好环境保护和水土保持设计。土石方平衡应主要考虑以下方面：填挖料平衡计算；土石方调度优化；弃料处理。

(1) 土石方平衡计算的一般步骤为：

①根据坝体材料分区设计，分析计算各种材料的设计需要量，然后分类统计汇总各种天然建筑材料需要量。

②根据主体工程、大型临建工程设计开挖量、有关地质勘探资料、有关质量标准，计算工程开挖料的可用量和弃渣量。

③按各种材料自开挖至使用的各工序，考虑各种损耗系数和折方系数，计算出开挖料可用量。可用量计算应考虑其储存、调度要求和回采及运输条件，以确定工程开挖料的合理利用率。

④根据各种天然建筑材料设计需要量，扣除工程开挖料使用

量后，计算尚需从料场开采的数量和无用层剥离量，力求开采和使用平衡，使弃渣量最小。

⑤根据施工总进度计划，分析计算可利用料的直接利用量和需储存转动量。

⑥按各种材料用途和使用部位，进行坝料调度计算，安排各种料物流向。

⑦料物供应调度采用线性规划方法进行优化处理，对于大型工程，进行料物调度施工模拟计算，并优化调度方案。

（2）土石方调度优化。

土石方调度优化的目的，就是找出总运输量最小的调度方案，从而达到运输费用最低，降低工程造价的目的。土石方调度是一个物资调动问题，可用线性规划方法进行优化处理。对于大型工程，有条件时最好进行料场调度施工模拟计算机动态优化，论证调度方案的可靠性。调度优化应从主体工程开挖开始，至坝体填筑结束止，逐项逐条安排土石方调度计划。

（3）弃料处理。

开挖渣料的弃料和各类可利用料应分别堆弃和堆存，防止混杂。存、弃渣场尽量靠近开挖区，存料场还要靠近上坝线路，顺流通畅，运输距离短，存、弃渣场尽量利用荒地、永久征地，少占或不占耕地，注意场地防洪排水和地基稳定条件。根据存料场的地形条件，确定渣场平整或填垫废渣形成存料场地，布置进出料道路。存料场要分层堆料，分层取料，堆料、取料厚度建议一致。

4.3 筑坝材料开采

4.3.1 本条阐明料场开采规划，主要分析所在地的水文气象和地理条件，确定施工交通方案、施工征地范围，有用料和无用层的堆存，施工设施布置等；结合施工进度确定料场开采规模和施工强度、施工设备数量、施工辅助作业设施规模，同时决定料场的开采次序和防护措施。

4.3.2 土料场的开采规划，除要保证上坝所要求的强度外，在许多情况下，还需要对土料进行处理，主要是调整含水率，有时也要求改良土料的物理力学特性。这些处理工作应在料场或合适的场地进行。无论采用何种开采方式均应在料场进行质量控制，检查土料性质及含水率是否合乎设计规定，不合规定的土料不应上坝。

土料场一般土层较厚，地形比较平缓，开采条件较好，一般为农业用地。我国耕地有限，在设计中作好还耕规划，保护土地资源。

土料开采方式一般分为立面开采及平面开采。土层较厚，天然含水率接近填筑含水率，土料层次较多，各层土质差异较大时，一般采用立面开采方式，开采规划中确定开采方向、掌子面尺寸、先锋槽位置、开采条带布置和开采顺序等。土层较薄、土料层次少且相对、天然含水率偏高需翻晒减水时，一般采用平面开采方式，规划中根据供料要求、开采和处理工艺，将料场进行分区、流水作业。两种开采施工特点及适用条件可见表6。

表6 土料立面开采及平面开采施工特点及适用条件

开采方式	立面开采	平面开采
料场条件	土层较厚，料场分布不均	地形平坦，适应薄层开挖
含水率	损失小	损失大，适应于有降低含水率要求的土层
冬季施工	土温损失小	土温易散失，不宜在负温下施工
雨季施工	不利因素影响小	不利因素影响大
适用机械	正铲、反铲、装载机	推土机、铲运机或推土机配合装载机

4.3.3 砂石料场一般位于河岸或水下，受季节、河道水位和水流速度影响较大，所以，要分析工程自然条件，选择适宜的时间进行开采，以降低工程成本。

砂石料的开采，主要有水上开采和水下开采两种方式。水上开采可参考土料开采方式，一般采用挖掘机立面开采方式，施工时尽可能创造水上开采条件。水下开采一般采用采砂船开采和拉

铲开采，在水位不高时也可采用反铲混合开采，条件合适时，可以采用围堰挡水，尽量创造混合开采方式。两种开采方式的施工特点及适用条件见表7。

表7 砂石料两种开采方式的施工特点及适用条件

开采方式	水上开采	水下开采（含混合开采）
料场条件	阶地或水上砂砾石	水下砂砾料，无坚硬胶结或大漂石
适用机械	正铲、反铲、推土机	采砂船、索铲、反铲
冬季施工	不影响	若结冰厚，不宜施工
雨季施工	一般不影响	要有安全措施，汛期一般停产

4.3.4 坝体堆石料多采用深孔梯段微差爆破。一定条件下，洞室爆破也可以获取合格的堆石料，并能加快施工速度。用作护坡及排水棱体的块石料，块体尺寸要求较高，且数量不大，多采用潜孔爆破法开采，也有从一般爆破堆石料（侧重获取大块石进行爆破设计）筛分获得。按填筑要求石料允许的最大块度一般为填筑层厚的0.8～0.9倍，特殊情况下不允许超过层厚，主堆石区从严要求。当有超径石时可采用钻孔爆破法或机械破碎法，一般在料场解小，不在坝面进行。

采用深孔梯段微差爆破开采石料时，深入细致研究石料场岩性及储量、开采道路布置、开采方法和爆破参数，如小浪底工程石门沟石料场为大坝填筑4A区、4B区石料和6A区、6B区、7区护坡堆石料提供料源。料场位于坝址右岸石门沟右侧，南北长1km，东西宽0.5km，距坝址直线距离2.5km，2号公路从旁边经过，交通十分便利。

(1) 石料场岩性及储量。石门沟石料场岩石为三迭系刘家沟T_1^{3-1}、T_1^{3-2}和T_1^4岩组，上覆黄土厚10～30m，为寺院坡土料场的一部分。T_1^4岩性为巨厚层硅质石英细砂岩，层厚60m；T_1^{3-2}岩性以厚层泥钙质粉细砂岩为主，夹厚层、中厚层硅钙质细砂岩，层厚30m；T_1^{3-1}岩性为巨厚层硅质、钙质石英细砂岩，层厚28～31m。各岩层中夹有少量黏土岩。硅质、钙质石英细砂岩饱

和单轴抗压强度大于200MPa，泥钙质粉细砂岩饱和单轴抗压强度大于100MPa。T_1^4岩石勘探储量为2000万m^3，T_1^3岩石勘探储量为1462万m^3，为大坝填筑量的1.73倍。

（2）道路布置。利用石料场北侧和东侧的2号公路，从2号公路350m高程处修筑一条干线道路，再接支线分别至高程300m、310m、320m、330m、340m、350m等作业面，随着开采作业的进一步深入，又在2号公路处相继修筑了进入360m、370m、380m三条运输道路。

（3）开采方法。石料开采采用台阶爆破法施工，爆破方法采用深孔梯段松动爆破。由Tamrock CHA1100C型液压履带钻机钻爆破孔，Hitachi EX1800型正铲挖掘机和Cat 992D型轮式装载机挖装爆破石渣，Perlini DP755型自卸汽车运输直接上坝。

（4）爆破参数。根据料场区地形情况和石料开采强度的要求，石料开采共开辟了310m、320m、330m、340m、350m、360m、370m、380m及380m以上等九个台阶，除380m以上台阶的台阶高度随地形变化，高度在10～16m变化外，其余台阶的台阶高度均为10m左右。依据台阶高度、岩性和上坝块石粒径的要求，确定爆破参数。其爆破参数见表8。

表8　小浪底采石场爆破参数

类　别	准备工作和小规模台阶爆破		常规台阶爆破	
孔径（mm）	76	89	102	107
最小抵抗线（m）	2～3	3～3.5	3.5～4.5	4.5～6
孔距（m）	2～3	3～3.5	3.5～4.5	4.5～6
孔深（m）	3～10	3～12	9～12	9～12
单位药量（kg/m³）	0.250～0.350	0.250～0.350	0.250～0.350	0.250～0.350
填塞长度（m）	2.5～3.5	3～4	3.5～4.5	4.5～6
孔斜（°）	5～15	5～15	5～15	5～15
底部超钻（m）	0.5～1	0.5～1	1～1.5	1～1.5

4.4 坝料加工设计

4.4.1 土料的加工包括调整土料含水率、为改变土料物理力学性能掺合、超径料处理和某些特殊的处理要求。降低土料含水率的方法有挖装运卸过程中的自然蒸发、翻晒、掺料、烘烤等。提高土料含水率的方法有在料场加工、料堆加水及在开挖、装料、运输过程中加水等。糯扎渡水电站及毛尔盖水电站等工程的大坝心墙土料都进行了掺合及加水处理。

(1) 糯扎渡水电站大坝为土质心墙堆石坝，最大高度261.5m，为改变土质心墙力学性能大坝心墙高程720m以下为掺砾土料，总填筑量约300万m^3，高程720m以上为不掺砾的天然混合土料，填筑量约165万m^3。砾石土料由天然的混合土料与人工加工系统生产的砾石料按重量比掺合而成，掺合比例为：土料：砾石料＝65：35。大坝掺砾土料在掺合场制备成品回采上坝。掺合场设置4个料仓，保证2个储料、1个备料、1个开采，料仓总储量约14万m^3，可满足最大上坝月强度约15d的用量。掺砾石土料掺合工艺为：

①掺砾石土料在砾石土料掺合场摊铺及掺拌。铺料方法为：先铺一层50cm厚砾石料，再铺一层110cm厚土料，如此相间铺料3个互层。

②掺砾石料采用进占法卸料，并用推土机及时平整，土料采用后退法卸料。

③砾石料与土料3个互层铺好后用4m^3正铲混合掺拌，即每个料仓备料完成后，在挖装运输上坝前，先掺拌均匀。掺拌方法为：正铲从底部装料，斗举到空中把料自然抛落，重复3次。

④掺拌后的合格料采用4m^3的正铲装料，由20～32t自卸汽车运输至坝体填筑作业面。

同时心墙土料在进行开采及掺合过程中对土料含水率进行控制：

①土料在开采之前，通过取样试验先行测定土料的含水率。

土料在开采时的含水率一般比上坝控制含水率大2%～4%为最优。通过装车、运输、卸车等多道工序的含水率损失后，控制土料大坝填筑时的含水率在规定范围内。混合土料挖运过程中，一旦出现现场土料含水率偏高较多，且土层地下水位线较高且丰富时，避开该开采区域，并通过挖沟降低水位线，待其含水率在适合范围后再进行开采。如由于下雨或地下水影响导致天然土料含水率超标，则需在料场先行对含水率进行调整，以减少土料的处理时间和工序。

②在料场一般是对含水率超过上坝含水率控制上限的土料进行调整，当开采区域混合土料含水率较小时，避开该区域，待降雨后天晴，含水率合适时再开采。混合土料含水率稍偏低时，在掺合场备料过程中，对砾石料层适当洒水，这样可以减少砾石料对混合土料水含份的吸收量，且能达到对混合土料层的补水作用。当风力和日照较强时，运输车辆设置遮阳棚。

③如果料场土料含水率大面积过高，可在土料开采前，采用井点法降低料场地下水位，为调整土料含水率创造条件。先将采区划分为多个小区，分小区降低地下水水位。抽水井沿小区周围布置，初定每15m×15m凿一个ϕ150mm的大口径的抽水钻孔，井内埋设ϕ125mm的PVC花管，抽水钻孔内放置ϕ100mm深井潜水泵，将水抽到采区外排水沟排走，使地下水位降至开采底面以下。同时还可进行土料翻晒以降低土料中的含水率。

(2) 毛尔盖水电站拦河大坝为砾石土心墙堆石坝，坝顶宽12m，坝顶长513.77m，最大坝高为147m，防渗土料采用团结桥料场土料，料场内有用层的颗粒级配组成中，粒径大于200mm块石含量平均值为6.45%；粒径100～200mm块石含量平均值为5.4%。有用料中需要剔除粒径大于150mm块石含量不小于9.15%。最优含水率为8.6%～18.3%，天然含水率平均为3%～9.8%，天然含水率低于最优含水率。

团结桥土料场有用层的地质状况大体可分为以下三种：第一种，其表层为碎石土层（第③－1层）出露，未见黏土层（第③

-2层)；第二种，表层为黏土层，其下部为基岩；第三种占大多数，表层为黏土层，其下部为碎石土层，黏土层的厚度从0～20.11m不等，总体呈下游薄、上游厚，上部薄、下部厚的趋势，若直接实施立采方式，料源质量无法得到保证且不满足设计要求指标，因此，为了确保料源的开采质量，在料场内开采的全部料源运输至在大坝附近建立的专门掺配场进行掺配后上坝填筑。通过掺配实验确定碎石土和黏土的掺配比例为5.5：4.5。

①确定掺配方案：

a. 团结桥土料场的碎石土和黏土两种土料中粒径小于5mm、0.075mm和0.005mm的含量变化幅度较大。尤其是碎石土，上述三种含量中的最大值分别是其最小值的2.89倍、5.89倍和3.4倍。说明在开采生产砾石土防渗料时，土料的开采范围和掺配的规模越小，其控制粒径含量的离差系数就越大，合格率就越低，质量将难以保证。反之，开采范围和掺配的规模越大，土料的控制粒径含量越接近其平均值，故其掺配料的合格率越高。

b. 采取一层黏土、一层碎石土按比例逐层大面积摊铺、多层高堆筑的大规模的土料掺配为符合客观实际的、既能确保砾石土心墙防渗料质量、又能保证上坝施工强度且较为经济适用的掺配方案。

②含水量调整：

a. 加水方法。从施工水池接钢管（或加强PVC管）明铺至上料马道顶端。为便于操作，掺配场内采用装卸方便的消防水带输水，现场人工洒水。

b. 加水量计算。碎石土防渗料天然含水率平均值约为6%，最优含水率平均值约为12%，则加水量为6%。按掺配强度为10万m^3/月（堆方）计算，则每日掺配3334m^3（约合5000t），须加水300t。每天加水时间按12h计，则每小时平均须加水25t。

c. 水池以下管道设计。干（支）管口径80mm，长度在现

表 14　坝区施工照明标准

序号	地点	照度(lx)	单位面积照明功率	说　明
1	坝面填筑区	15～20	0.8～1.2W/m²	最暗处照度不低于7lx；土料填筑区和截流龙口提高照明标准
2	装载作业	15～20	0.8～1.2W/m²	—
3	石料场	10～15	人工作业 0.8W/m²	—
4	土料场	5～10	人工作业 0.5W/m²；机械作业 0.8W/m²	—
5	弃料场	5～15	0.5～1.0	—
6	主要运输道路	7～10	5000W/km	可不开车灯行驶，道路交叉处适当提高标准
7	其他运输道路	3～7	2500W/km	
8	一般交通路	0.3～1.5	—	—
9	砖石砌体人工作业		1.2W/m²	—

注 1：混凝土及沥青混凝土防渗体施工，全面照明可参考坝面填筑区，局部照明最低在 100lx 以上。
注 2：小型机械施工工地，标准可适当降低。
注 3：多雾地区照明标准适当提高。

5.4.2　坝区用水量包括施工机械设备、坝面用水、现场生活及消防用水。确定用水量，首先根据工程进度确定用水项目及相应时段，然后推算各阶段用水量。坝区的总用水量一般多在 30～100L/s 左右。部分工程坝料填筑加水量实际资料见表 15。砂砾料的加水量一般宜为填筑方量的 20%～40%；碾压堆石的加水量以其岩性、细粒含量而异，一般为填筑方量的 30%～50%。

坝区施工供水水源要有足够的水量，且水质符合使用要求，多采用集中供水系统。系统由供水站（包括取水、净水、抽水设施）、贮水构筑物（水塔及蓄水池）、输水管和配水管组成。坝区施工贮水池多设置在高于坝顶 20～40m 的两岸山顶、山坡，并

尽量避免施工干扰和搬迁。坝料加水常为无压洒水，用喷洒设备时要考虑设备本身的压力要求。

表 15　坝料填筑加水量实际资料

坝名	坝料类别	耗水定额	填筑层厚（m）	备　注
碧口	开挖石料	0.50t/m³（洒水）	1.1～1.5	振动碾碾压
升钟	砂滤料	0.25～0.30t/m³（洒水）	0.30	洒水至饱和状态，平板振捣器振捣
	砂砾料	0.35～0.45t/m³（洒水）	0.8～1.0	振动碾碾压，配合加水
	老风化砂岩石料	0.20～0.25t/m³（洒水）	—	振动碾碾压
	强风化砂岩石料	0.15～0.20t/m³（洒水）	—	振动碾碾压
畚布革	开挖石料	0.50t/m³（洒水）	1.0～1.2	振动碾碾压，碾前洒水
大伙房	砂砾料	0.38t/m³（洒水）	—	碾压加水试验确定，实际加水量为 0.25t/m³
石头河	砂卵石	0t/m³	1.2～1.5	振动碾碾压
小浪底	开挖石料	0t/m³	1.0～1.2	振动碾碾压
丹江口（副坝）	砂砾料	0.30t/m³（洒水）	1.0～1.2	夯板夯实，认为应充分洒水
	风化石料	控制含水率 9%～12%	0.8～1.2	夯板夯实
南湾	砂料	0.30t/m³（洒水）	0.4	试验洒水量 0.213，实际曾达到 0.308
瓦屋山	开挖石料	控制含水率 20%	1.0～1.2	振动碾碾压，在料场喷洒 3%～5%；在加水站加水 5%～7%；在填筑作业面补充洒水 8%～12%
盘石头	开挖石料	灰岩堆石料加水 15%； 页岩主堆石料加水 10%； 砂卵石料 10%	0.80 0.60 0.80	振动碾碾压

表 15（续）

坝名	坝料类别	耗水定额	填筑层厚（m）	备　注
洪家渡	开挖石料	主堆石加水 15%～20%；次堆石加水 15%	主堆石 0.80；次堆石 1.20	振动碾碾压
水布垭	开挖石料	加水 10%	0.80	振动碾碾压
三板溪	开挖石料	主、次堆石加水 20%	0.80	振动碾碾压
天生桥一级	开挖石料	加水 10%～20%	主堆石 0.80；次堆石 1.20	振动碾碾压
糯扎渡	开挖石料	坝Ⅰ料加水 5%（体积比）；坝Ⅱ料加水 6%（体积比）；细堆石料加水 3%（体积比）	0.90	振动碾碾压
河口村	开挖石料	加水 10%～15%	0.80	振动碾碾压

6 坝基处理

6.1 一般规定

6.1.2 根据建筑物的类型及对地基的不同要求，覆盖层地基和岩基各自不同的特点，确定如何合理选择最优地基处理施工方案。

6.2 坝基及岸坡开挖

6.2.1 截流前完成两岸岸坡水上部分的坝基开挖，以减少截流后开挖工程量和与河床开挖的干扰。开挖顺序的规定，目的是保证施工安全，上下同时开挖，易造成施工安全事故，在较狭窄河床地段施工时尤为突出。对于较宽阔且岸坡较缓的施工场地，以及可以避开施工干扰的施工部位。可以采用上下同时开挖，但要有技术及安全保障措施。而自下而上开挖，极易造成施工安全事故，不应采用。

6.2.2 岸坡分层厚度需考虑地质条件、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。开挖深度大于4m，一般采用分层开挖。开挖方式有自上而下逐层开挖，台阶式分层开挖。竖向分层开挖，深孔与洞室组合爆破开挖及洞室爆破开挖等。分层开挖中，关键是如何选择合理的分层厚度，随着大型先进设备的广泛应用，分层的厚度越来越大。分层厚度主要考虑以下因素：

（1）地质地形条件。在河床狭窄两岸陡峭的坝址上，进行土石方开挖，选择深孔爆破，开挖分层厚度较大。但是对于较缓边坡的开挖选择分层厚度更加自由；对呈近水平层分布的岩层，特别有夹泥层时，开挖分层厚度受岩层变化的影响很大。

（2）道路布置。道路布置与地形条件有关，岸坡较缓的条件下，道路容易布置，分层厚度相对自由。

（3）设计结构尺寸。两层马道间的高差整分成几个开挖层，一层为一个开挖梯段。如马道间高差 20m，可以分成 2 层或 4 层，即 10m 或 5m 一个开挖梯段。一般大坝岸坡开挖都设有马道，宜采用预裂爆破或光面爆破措施以保证马道的成型。

（4）钻孔机械规格、类型及钻孔直径、钻孔深度。设备的类型有潜孔钻机、液压钻机和手风钻机等，液压钻机的钻杆长一般为 3.6m，潜孔钻机的钻杆长一般有 1.5m 和 3m 两种规格。划分开挖层高要尽量为整根钻杆的整数倍，以方便装卸钻杆。

（5）挖掘装载机械装渣作业的适应性和爆破作业的技术要求，见表 16。

表 16　爆破方法适用条件及施工要点

爆破方法	适 用 条 件	施 工 要 点
自上而下逐层爆破开挖	开挖深度大于 4m 的基坑，需要有专用深孔钻机和大斗容、大吨位的出渣机械	先在中间开挖先锋槽（槽宽应大于或等于挖掘机回转半径），然后向两侧扩大开挖
台阶式分层爆破开挖	挖方量大、边坡较缓的岸坡；开挖断面需满足大型施工机械联合作业的空间要求	在坡顶平整场地和在边坡上沿每层开辟施工道路；上下多层同时作业时，应予错开和进行必要的保护
竖向分段爆破开挖	边坡较高、较陡的岸坡	有边坡表面向里，竖向分段钻爆；爆破后的石渣翻至坡脚处
深孔与药室组合爆破开挖	分层高度大于钻机正常钻孔深度的岸坡	梯段上部布置深孔，梯段下部布置药室
药室爆破开挖	平整施工场地和开辟施工道路，为机械施工创造场地条件	开挖导洞，在洞内开凿药室

6.2.3　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。

6.2.5 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、起爆药量和开挖边坡便于控制等优点。

6.2.6 因新浇筑混凝土的强度低，与基岩接触面的黏结强度更低，极易受到爆破破坏。

6.3 固结灌浆及帷幕灌浆

6.3.1 本条主要对灌浆材料提出一些要求。试验表明，矿渣硅酸盐水泥和火山灰质硅酸盐水泥比硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥抗侵蚀更好，但因其含有矿渣或火山灰，浆液过稀时易于离析。

6.3.2 本条主要明确固结灌浆和帷幕灌浆的施工顺序。由于固结灌浆孔浅，采用的灌浆压力较小，且布置面积大，先施工可将浅层岩石中的裂隙充填密实，从而减少了帷幕灌浆时的串、冒浆情况，也可使帷幕灌浆采用较大压力。

6.3.3、6.3.4 我国的许多工程一般采用有盖重时灌浆，但近几年也有很多工程采用了无盖重灌浆。为增强固结灌浆效果，宜在混凝土盖重情况下施灌，特殊情况下，可采用无盖重下基岩施灌，有利于缩短固结灌浆时间，减少与后续工程的施工干扰，但混凝土与岩石接触面是否需要补灌及如何补灌问题，在方案选择时应综合考虑研究确定。无盖重固结灌浆已在三峡、小浪底、构皮滩、拉西瓦、彭水、大花、龙滩等多个工程中成功使用。无盖重固结灌浆实例：

（1）彭水水电站碾压混凝土坝，基岩浅表层裂隙发育，透水性强、力学性能差，采用薄层混凝土表面封闭式无盖重固结灌浆。

（2）二滩水电站为双曲高薄拱坝，最大坝高 240m。坝基无盖重固结灌浆对表层一般采用 0.5～0.7MPa 的低压灌浆，对保证二滩工程的工期起到了积极的作用。

（3）乌江构皮滩大坝为双曲混凝土拱坝，无盖重灌浆前，采用人工封堵（表面涂抹防渗材料、高强度材料嵌槽等）表层裂隙（仅能对较宽裂隙进行封堵），被称为真正意义上的无盖重固结灌浆。

(4) 乌江大花水电站由双曲拱坝和重力坝组成，坝基岩体裂隙发育，且有断层穿过，但两岸坝肩地形较完整。重力坝左坝肩和拱坝右坝肩采用无盖重固结灌浆，经压水试验和物探测试分析，达到设计要求。

(5) 三峡水利枢纽二期工程建基面基岩条件较好，大部分为细微裂隙块状或次块状结构，固结灌浆可灌性差。部分坝块采用了无盖重固结灌浆，但是先浇筑厚 30cm 左右的混凝土（强度达到 70%以上的设计强度方可钻灌施工）找平层，以嵌堵基岩面裂隙。灌后经检查，透水率和弹性波速达到设计要求。

(6) 小浪底水利工程进水塔基础采用无盖重固结灌浆，是在特定条件下采取的赶工措施，经压水试验，固结灌浆后吕荣值小于 3 的占 89.3%，满足技术规范规定的 80%以上的要求；并为进水塔混凝土浇筑提前 60d 工期。

6.3.6 本条灌浆顺序的规定，主要为减少上游排、中间排等后期的帷幕灌浆浆液少流失，保证帷幕灌浆质量。

6.4 混凝土防渗墙、高喷墙

6.4.1 为保证防渗墙施工顺利进行，并能按计划完成，施工平台的高程、平面尺寸应使各项施工作业达到既安全又方便的目的。

6.4.2 防渗墙槽孔的划分与施工顺序、凿孔方法等有关。一般原则是尽量做到墙段接头少，有利于快速、均衡和安全施工。具体注意：

(1) 比较密实的地层，槽孔可长些；疏松、易坍塌的地层一般分短些。

(2) 深墙凿孔时间长，槽孔宜分短些；反之，可长些。

(3) 地下水位较高，渗透性较强的地层、地段，槽孔一般分短些；反之，可长些。

(4) 槽孔长度应与混凝土的生产能力相适应，保证槽孔混凝土浇筑时的上升速度大于 2m/h。

(5) 含大漂石较多的地段造孔时间长，槽孔长度要分的短

些。漂石地层大多易漏失固壁泥浆，槽段太长泥浆供应不足，不利于槽壁的稳定。

一般情况下槽段长度的划分参见表17。

表17　槽段长度的划分　　单位：m

槽孔深	槽段长度			
	地层比较稳定		地层不稳定	
	地下水深<4	地下水深≥4	地下水深<4	地下水深≥4
<10	8～10	9～12	6～8	7～9
10～30	7～9	8～10	5～7	6～8
30～50	6～8	7～9	4～6	5～7
≥50	5～7	6～8	<5	5～6

6.4.3　防渗墙的造孔机械很多，各种造孔机械适用的施工方法、地层条件和工作效率有很大不同。常用造孔机械型号、适用地层及效率如下：

（1）钢绳冲击式钻机（简称冲击钻）是通过钻头向下的冲击运动破碎地层土，形成钻孔的一种机械。它不仅适用于软弱地层，亦可适用砾石、卵石、漂石和基岩，在我国水利水电防渗墙施工中被广泛采用。已建成的混凝土防渗墙大多数是用这种机械完成的。冲击钻主要型号有CZ－20、CZ－22和CZ－30等，最大钻进深度CZ－20为120m、CZ－22为150m、CZ－30为180m；开孔宽度CZ－20为635mm、CZ－22为710mm、CZ－30为1000mm。CZ－22型冲击钻机建造混凝土防渗墙的钻进工效（墙厚0.7～0.8m，墙深60m以内）见表18。

表18　CZ－22型钻机钻进工效　　单位：m/台班

地层	黏土	砂壤土	粉细砂	砾石	卵石	漂石	基岩	混凝土接头
平均工效	2.80	3.36	1.05	1.50	1.38	1.20	0.75	2.03

（2）冲击式反循环钻机适用于软土、砂砾石、漂卵石和基岩等多种地层，原理与钢绳冲击式钻机相同，国外冲击式反循环钻

机有法国的 CIS－71 型、日本的 KPC－1200 型和意大利的 MR 型；国产冲击式反循环钻机有 CZF－1200 型、CZF－1500 型、CZF－2000 型、GCF－1500 和 CJF－15 型等。CZF－1200 型最大造孔直径 1200mm、造孔深度 80m；CZF－1500 型最大造孔直径 1500mm、造孔深度 100m；GCF－1500 型最大造孔直径 1500mm（岩）、2000mm（土）、造孔深度 50m。CZF－1200 型冲击反循环钻机造孔工效见表 19。

表 19　CZF－1200 型冲击反循环钻机造孔工效

试验或施工地点	地　层	桩（槽）孔尺寸（m）	深度（m）	纯钻效率（m/台日）	平均效率（m/台日）	功效提高倍数
天津杨村	黏土、壤土、粉砂	0.8 桩孔	51	107.9	71.3	3.4
北京顺义	砂卵砾石	0.8 桩孔	71	20.5	11.9	2.5
河南小浪底	粉细砂、漂卵石、砂岩	0.8×6.8 槽孔	68	10.02	6.38	2～3
三峡一期围堰	风化砂、粉细砂、块球体、花岗岩	0.8×(4.8～6.8) 槽孔	平均 32	11.52	7.06	1.6
		0.8 主孔和 1.2 副孔各一个	22	15.96	11.23	2.5
四川冶勒	粉质壤土、黏土、钙质胶结砾岩	1.0 桩孔	101.4	6.54	4.09	▲
		1×5.4 槽孔	100	—	4.0	▲
三峡杨家湾码头水上沉桩	粉细砂、砂加块石、斜长花岗岩	0.8 桩孔	15	26.1	20.7	3
昆明新茶花宾馆连锁支护墙	人工填土、黏土碎石土、黏性土夹粉砂	0.9 墙厚	24.5	45.2	20.0	2.7
北京地铁（东单、王府井站）灌注桩	砂卵石、亚黏土、细砂	1.25 桩孔	27	—	6.93	—

注：功效提高倍数是指 CZF－1200 钻孔比 CZ－22 钻孔提高的倍数，带▲号者是指 CZF－1500 钻机，工效提高是与 CZ－30 钻机相比较。

（3）回转式钻机包括回转正循环钻机和回转反循环钻机，它们的钻孔破岩原理都是用旋转的钻头切削、破碎岩土层。回转钻机的钻具包括钻头、加重块、导正盘和钻杆等，钻头有刮刀钻头和滚刀牙轮钻头，刮刀钻头适用于比较松软的土层，滚刀牙轮钻头主要适用于卵石、漂石和基岩等。各种型号的国产回转正循环钻机钻孔直径为600～2000mm，造孔深度40～80m。各种型号的国产回转反循环钻机钻孔直径为500～2500mm，造孔深度40～300m。

①1990年，浙江横山水库大坝防渗墙施工。黏土心墙中采用2台GPS回转正循环钻机，施工中对钻头进行了改进，采用了加重导向刮刀新型钻头，具有很好的导向和稳定性。该种钻机造孔8500m，孔斜率均小于0.4%，主孔造孔速度13～20m/台班，副孔造孔速度6～15m/台班，平均12m/台班。在钻进中还能把黏土造成泥浆使用。

②1975年，察尔森水库大坝防渗墙施工中，使用了5台ZWY－550型回转反循环钻机，采用三翼钻头，在冲积砂卵石层（5～100mm的颗粒占5%～37.8%）中完成了199个槽孔（槽长6m），造孔进尺32376m，平均工效28.15m/台日。地层中粒径小于200mm的卵石均被抽出孔外，曾在16.2m的孔深中抽出过一块10.3kg的大卵石。

（4）多头钻机（也称长墙机）是由5～7个独立旋转的钻头组合装配在一起的大型钻机。根据土质条件选用不同数目和型式的钻头，主要用于均质软土的施工，挖槽速度较快，缺点是不适用于卵石、漂石地层，更不能用于钻进基岩。各种型号的国产多头钻机成墙宽度600～800mm，一次成墙有效长度1800～2000mm，设计挖掘深度35～60m。各种型号的日本多头钻机成墙宽度400～1200mm，一次成墙有效长度2500～4000mm，设计挖掘深度50m。

①日本大成公司修建一个槽孔断面尺寸为0.8m×2.72m的连续墙，在不同土层条件的挖槽速度见表20。据日本《地下连

续墙设计与施工手册》，采用 BW 钻机在粉土和砂土地基中，施工一个 9m 深，面积 11000m² 的地下连续墙，效率为 145m²/台班；在粉土和硬黏土地基中，施工一个 8m 深，面积 1000m² 的地下连续墙，效率为 130m²/台班。

表 20 BW 钻机的挖槽速度

土层 N 值	10	20	30	40	50	60
挖槽速度（m/h）	10～17	9.5～16	8～13	6.5～10	5.5～8	4.0～6.5
挖槽速度（m²/h）	27.2～46.2	25.8～43.5	21.8～35.4	17.7～27.2	15.0～21.8	10.9～17.7

②在修建深圳水库大坝防渗墙时，采用 SF－60 型多头钻机施工了一道长 645m、墙厚 0.6m、总面积 19290m² 的防渗墙。地层为冲积砂卵石层厚 3～8.5m，含泥砂卵石层厚 2～6m，冰碛堆积层厚 1～6.5m，风化基岩厚 1～4m。冰碛层以下不透水，墙体进入风化岩 0.5m，嵌入冰碛层 4.6～5m。多头钻机钻进效率见表 21。

表 21 深圳水库大坝防渗墙 SF－60 型多头钻机钻进效率

项 目	黏土岩	砂卵石	冰碛层	土状风化岩	块状风化岩	混凝土
平均效率（m/d）	36.10	24.63	13.92	5.11	1.84	9.46
最高效率（m/班）	20.12	23.76	4.88	3.31	2.65	7.56

（5）抓斗挖槽机（简称抓斗），是建造防渗墙的一种先进设备。抓斗使用的地层比较广泛，除大块的漂卵石、基岩以外，一般的覆盖层均可。不过当地层的标准贯入度 $N>40$ 时，使用抓斗的效率很低。对含有大漂石的地层，需配合采用重锤冲击才能完成钻进。根据操作方式不同抓斗分为钢绳抓斗、液压导板抓斗和液压导杆抓斗。抓斗的起吊设备都是履带式起重机，液压抓斗还应配置液压钻。目前国内外各种抓斗挖掘宽度 30～150cm，最大深度可达 100m。

抓斗的效率随抓斗的的种类和地层的情况不同而有所不同。

①据日本《地下连续墙设计与施工手册》介绍，藤田工业株式会社用钢丝绳抓斗在砂与粉土瓦砾层中施工了一道深 21m、面积 3200m² 的地下连续墙，施工效率为 30m²/台班（7h）；另一道 25m 深（表面 4m 为黏土，其下 21m 为风化花岗岩）、4000m² 的地下连续墙，工效为 7m²/台班（7h）；用伊克斯法采用钢绳抓斗在 $N>50$ 的地层中，施工了一道深 15m、面积 3000m² 的地下连续墙，施工效率为 20m²/d。对于钢绳抓斗而言，当地层的标准贯入试验击数 $N>30$ 时，挖掘速度会急剧下降，在 $N\geqslant 50$ 时，则很难抓取。故对于 $N>40$ 的地层，使用抓斗挖槽机是不利的。

日本五十铃公司采用液压导杆式抓斗在黏土与砾石地层中施工了一道深 24m、面积 4600m²/的地下连续墙，效率为 18m²/d。同样的设备在砂砾石与硬黏土地层中完成一道深 44m、面积 18200m²/的地下连续墙，其效率为 30m²/d。

②小浪底水利枢纽主坝防渗墙，地层为砂卵砾石、漂石夹粉细砂，采用两钻一抓法，用意大利 BH－12 型液压导杆抓斗抓取 60～70m 深的副孔时，其工效为 13m²/台班。

③河北承德武烈河的砂卵砾石层中深 14.55m、长 387m 的混凝土防渗墙，采用日本 MHL－80120 型液压导板抓斗抓取副孔，其工效为 30m²/台班。同样的设备在山东青岛棘洪滩水库的均质亚黏土层施工深 7m 的固化灰浆防渗墙，其工效为 39m²/台班。

④在湖北汉江王甫洲水利枢纽围堰防渗墙施工中采用 BH－12 型、MHL－80120 型和 GSD－600 型的抓斗挖槽。其中，BH－12 型抓斗斗重和闭斗力最大，其次是 MHL－80120 型，GSD－600 型机械式抓斗最小。同样在中细砂和含小砾的砂砾石地层中，其挖槽平均效率 BH－12 型为 82.2m²/台日；MHL－80120 型为 56.4m²/台日；GSD－600 型为 36.2m²/台日。

（6）液压铣槽机。液压铣槽机适用于比较均匀的地层，包括比较坚硬的岩层。BC 型液压铣槽机铣槽长度 2200～3200mm，

铣槽宽度 50～2300mm。该机对于抗压强度 250MPa 以下的地层均可钻掘，强度为 50MPa 的石灰岩钻掘速度一般为 5m²/h，强度为 25MPa 的砂岩钻掘速度可达 8m²/h。在疏松的地层液压铣槽机的钻进速度极快，例如在砂层或砂卵石层钻掘速度一般可达 20m²/h，最快可达 40m²/h。

①在韩国首尔松坡区现代综合办公大楼工地，用 BC30 修建一道长 222m、深 29m、厚 0.8～1.0m 的地下连续墙，该工程地面以下 10m 为松散层，其次为厚 7m 的次硬花岗岩（100MPa），基岩面 7m 以下为坚硬的黑色安山岩。在松散层的钻进效率为 56m²/h，在砂砾石层中为 14～28m²/h，在安山岩中的效率为 0.96m²/h。

②在韩国釜山，用 BC30 型铣槽机为三益综合大厦修建一道长 280m、深 29m、厚 0.8m 的地下连续墙，地面以下 17m 为淤泥和黏土，17～21m 为浅色风化岩体，21m 以下进入坚硬的安山岩体，在淤泥和黏土层中钻铣工效为 15～20m/h（即 42～56m²/h），在风化岩（强度 80～100MPa）中的钻铣速度为 1m/h（即 2.8m²/h），在坚硬安山岩（强度 100～200MPa）中的钻铣速度为 0.5m/h（即 1.4m²/h）。

③在德国的布隆巴赫坝（坝长 1.7km，最大坝高 39m），坝基以下很深的范围内有渗透系数 1～230Lu 的砂岩，该工程采用液压铣槽机施工了厚 0.65m、面积 4000m² 的防渗墙，平均施工效率为 15m²/h。在钻掘石英质固结砂岩时，钻进效率达到 0.4m/h（即 1.12m²/h）。

④在日本，法国索列丹斯公司在强度为 150MPa 石灰岩中铣削出了一个长 3.2m、厚 2.4m、深 150m 的试验槽，其钻进速度为 2m/h（即 6.4m²/h）。

但是这种钻机无法适应大漂石，尤其是夹在疏松层内的大块石和大卵石，因为无法把他们固定住，铣齿不能将他们破碎，这些块石常被卡在泥浆泵的吸入口处。

（7）其他造孔机械。

①射水法造墙机。射水法造墙机为在软土地基中建造防渗墙的机具，该机建墙宽度为0.2m和0.35m，深度不超过30m，单元墙段长度为198cm和150cm。适用于均质砂性和黏性土地层，不适宜砂卵石地层中施工。适合小型和低水头工程的防渗墙施工。

②锯槽机。锯槽机是建造薄防渗墙的挖槽机械，该种机械适于含少量砾石、最大粒径不大于80mm、标准贯入击数$N \leqslant 30$的地层，适于建造对墙底高程无严格要求的悬挂式帷幕。采用气举反循环方式出渣，在浅槽及地层适宜的情况下也可采用泵吸反循环方式出渣。锯槽机适宜的施工深度为15～30m，在20m以内借助辅助的推力装置可以取得较快的锯进效果。锯槽成墙所用的材料一般为固化灰浆，便于实现连续施工。

1991年5月，在黑龙江省宝清县蛤蟆通水库用锯槽机修建了一道长450m、深45～47m、厚0.2m，总面积约2万m^2的防渗墙。坝基地层自上而下依次为黏土、砂砾、黏土加碎石、卵砾石、壤土加碎石、砾砂等。使用两台DY－40－2型锯槽机，一台扬程大于20m、流量大于30m^2/h的输浆泵，以及空压机、制浆机、供水泵等。平均成墙速度为100m^2/台日，最高400m^2/台日。墙体材料为固化灰浆。

③链斗式挖槽机。链斗式挖槽机是薄防渗墙的挖槽机械，适于在砂壤土中施工，土层中夹杂的卵石粒径应小于130mm，其最大挖槽深度12m，槽宽0.15～0.3m挖掘的槽孔宽度一致，连续性好，工效较高。平均工效150～200m^2/台班。

6.4.4 根据国内工程实践，膨润土泥浆性能优于黏土泥浆，如采用循环出渣、回收净化再重复使用的工艺，其耗量和成本将大幅度下降，因此应优先考虑选用膨润土泥浆。为满足防渗墙槽孔施工要求，给出了制浆土料的质量指标。

6.4.5 高压喷射有旋喷（固结体为圆柱状）、定喷（固结体为壁状）和摆喷（固结体为扇状）等3种基本形状，均可以采用单管法（喷射高压水泥浆一种介质）、双管法（喷射高压水泥浆液和

压缩空气二种介质）和三管法（喷射高压水流、压缩空气及水泥浆液等三种介质）实现。

各种结构形式高喷墙的结构参数和特点见表 22。

表 22　高喷墙的结构参数和特点

序号	墙体形式	孔距（m）	厚度（cm）	特　点
1	旋喷套接	0.8～1.4	20～40	单排连接的可靠性差，通常要多排
2	旋摆、旋定搭接	1.4～2.0	＞10	便于连接，结构稳定性好
3	摆喷对接或折接	1.6～2.2	20～40	便于连接
4	定喷折接	1.6～2.5	10～30	便于连接

施工工艺技术参数的选择直接影响着高压喷射灌浆的质量、工效和造价。高喷施工工艺技术参数包括水、气、浆的压力及其流量、喷嘴直径大小及数量、喷射管旋转速度、摆角及摆动频率、提升速度、浆液配比及密度、孔距与板墙的布置形式等。施工实践表明，要获得较大的防渗加固体，一般应加大泵压，但限于国内机械水平，常用的喷射水压力为 20～40MPa，最大达 70MPa。我国目前高喷灌浆常用的工艺参数见表 23。

表 23　高喷灌浆常用的工艺参数

项　目		单管法	两管法	三管法	新三管法
水	压力（MPa）	—	—	35～40	35～40
	流量（L/min）	—	—	70～80	70～100
	喷嘴（个）	—	—	2	2
	喷嘴直径（mm）	—	—	1.7～1.9	1.7～1.9
压缩空气	压力（MPa）	—	0.6～0.8	0.6～0.8	1.0～1.2
	流量（m^3/min）	—	0.8～1.2	0.8～1.2	0.8～1.5
	喷嘴（个）	—	2	2	2
	喷嘴间隙（mm）	—	1.0～1.5	1.0～1.5	1.0～1.5

表 23（续）

项目			单管法	两管法	三管法	新三管法
水泥浆	压力（MPa）		25～40	25～40	0.2～1.0	35～40
	流量（L/min）		70～100	70～100	60～80	70～110
	密度（g/cm³）		1.4～1.5	1.4～1.5	1.5～1.7	1.4～1.5
	喷嘴（出浆口）（个）		2	2	1～2	2
	喷嘴直径（mm）		2.0～3.2	2.0～3.2	6～10	2.0～3.2
	孔口回浆密度(g/cm³)		≥1.3	≥1.3	≥1.2	≥1.2
提升速度 V（cm/min）	粉土		15～25	15～25	10～15	15～30
	砂土		15～30	15～30	10～20	15～35
	砾石		10～20	10～20	8～15	10～25
	卵（碎）石		8～15	8～15	5～10	8～20
旋（摆）速度	旋喷（r/min）		宜取 V^b 值的 0.8～1.0 倍			
	摆喷（次/min）[a]		宜取 V^b 值的 0.8～1.0 倍			
	摆角（°）	粉土、砂土	15～30			
		砾石、卵（碎）石	30～90			

a 摆动一个单程为一次。
b 单喷嘴取高限，双喷嘴取低限。

由于这三种方法喷射流的结构和喷射的介质不同，有效处理长度也不同，以三管法最长，双管法次之，单管法最短。实践表明，旋喷形式可采用单管法、双管法和三管法中的任何一种方法。定喷和摆喷注浆常用双管法和三管法。旋喷和大角度摆喷适用于淤泥质土、粉质黏土、粉土、砂土、卵砾石土，定喷和小角度摆喷适用于粉土和砂土地层。

高喷墙全称为高压喷射灌浆防渗墙。多在围堰、堤防和小型水库除险加固工程上使用，如三峡三期土石围堰、二滩水电站上下游围堰、大朝山上下游围堰、龙滩上下游围堰等，最大深度 40 余 m。目前尚未发现在永久工程上使用。

(1) 浙江省温州市赵山渡引水工程，最大墙深 18m。对围堰混凝土防渗墙和高喷墙进行了经济比较，后者比前者造价低 34.6%，功效高 15 倍，但渗漏量大 3 倍，防渗效果明显较差。临时工程防渗中，一般水头在 20m 以下，运行期不宜超过 2 年的基坑防渗；对于永久工程，应慎重采用高喷墙。

(2) 龙滩电站土石围堰采用三管高喷法施工，地层主要为砂卵石层，上部与黏土斜墙搭接 3～4m，深入基岩 1.0m，孔深约 20m，钻孔总进尺为 2496m，高喷防渗面积 1851m^2。因河床架空结构未能采取有效的加密或补孔灌浆措施，导致渗水量较大，达 800m^3/h，后采取黏土铺盖将渗水量降低到 150m^3/h。

6.5 软 基 处 理

6.5.1 强夯法在工民建用的比较多，近几年在水利工程上也有使用。现有经验表明：在 1000～2000kN·m 夯实能量下，一般可获得 3～6m 的有效夯实深度。

使用强夯法处理坝基的部分工程实例如下。

(1) 西霞院。西霞院土石坝布置于混凝土建筑物坝段的两侧，为复合土工膜斜墙砂砾石坝，坝顶宽 8.0m，其中左侧土石坝长 1725.5m、右侧土石坝长 883.5m。两岸滩地基础为砂壤土、砂层。地层岩性如下。

第①层素填土：主要由黏性土组成，褐黄色，稍湿，硬塑状态，底层深度 1.00～3.50m，该层土密度 1.68g/cm^3，含水率 3.7%。

第②层粉土：褐黄色，湿，可塑—硬塑状态，层底深度 2.20～6.30m，层厚 1.20～2.80m。该层土密度 1.71g/cm^3，含水率 25.7%，孔隙比 0.97。高孔隙，松散，不均匀，土的性质很差。

第③层细砂：褐黄色，石英长石质，松散—稍密状态。底层深度 2.50～4.80m，层厚 0.10～0.65m，该层土密度 1.75g/cm^3，含水率 8.8%，相对密度 0.43。性质不均匀，工程性质较差。

第④层卵石：主要由沉积岩碎块组成，卵圆形，密实状态，一般粒径 20～80mm，最大粒径 250mm，孔隙充填砂及少量黏性土，碎块坚硬。分布均匀，地层稳定，呈密实状态。

强夯施工夯击能 2400kN·m，梅花形布点，行距 3.5m，点距 4.0m，满夯 1000kN·m，击数 2 击，夯印搭接。自进场至完工历时 184d，强夯施工面积 126845m²。施工高峰期施工人数 64 人，投入履带吊车 6 台、推土机 2 台、勘探钻机 1 台。

强夯后粉土层密度提高 17.82%，干密度提高 19.15%，孔隙比降低 28.04%，标准贯入试验实测锤击数提高 183.33%；细砂层经过强夯后密度提高 5.71%，干密度提高 4.358%，相对密度提高 81.40%，标准贯入试验实测锤击数提高 175%。

(2) 水布垭。湖北省巴东县水布垭面板堆石坝，坝高 233m。坝基覆盖层厚度最深 12m，由冲积砂卵石组成。

坝基强夯夯锤重 20.8t，直径 2.2m，底面积 3.8m²，落距为 15m，夯击能 3120kN·m，夯点间距采用 4m。强夯施工面积为 13876m²，18 天完成，强夯区场地单点平均夯沉量为 59.124cm。经强夯处理后，河床覆盖层的干密度都有 5%以上的提高。

(3) 青山嘴。云南楚雄市青山嘴水库大坝为黏土心墙坝，坝高 41.5m。上、下游坝壳建基面为 1.2～9.4m 深的砂卵石层，采用强夯法处理，面积 5.56 万 m²。

强夯机具采用带有自动脱钩装置的 QUY50A 履带式起重机，最大吊高 27m，夯锤底面积 4m²，锤重 200kN，在砂卵石最深处强夯施工参数为落距 20m，夯击数 12 次，夯击遍数为 3 遍。经强夯处理后的砂卵石层地基，相对密度大于 0.75，满足设计要求，地基压缩模量提高、孔隙率减小、压缩变形及不均匀沉降得到较大改善。

(4) 湖南临湘市团湾水库大坝为黏土心墙土石坝，最大坝高 55.35m，上游坝壳在基础未清淤的条件下进行填筑，采用强夯法进行填筑的处理方案，代替了传统意义上的清淤和填筑方法。

通过三年的蓄水和放水检测，大坝上游坝坡未发现纵横向裂

缝；通过三年的变形观测，大坝上游强夯区垂直沉降量为0.02m，符合设计要求的0.05m。

6.5.2 铺设硬质粗骨料垫层或采用人工降低地下水位，是为了在地表形成硬层，用以支撑起重设备，确保机械设备通行和施工，又可加大地下水和地表向的距离，防止夯击时夯坑积水。

6.5.3 目前国内没有专门的强夯振动安全标准，工程界一般采用《爆破安全规程》（GB 6722）的相关规定。爆破振动安全允许标准见表24。在设计时，可参照《强夯地基处理技术规程》（CECS 279：2010）选取。

表24 爆破振动安全允许标准

序号	保护对象类别	安全允许振速（cm/s）		
		<10Hz	10～50Hz	50～100Hz
1	土窑洞、土坯房、毛石房屋[a]	0.5～1.0	0.7～1.2	1.1～1.5
2	一般砖房、非抗震的大型砌块建筑物[a]	2.0～2.5	2.3～2.8	2.7～3.0
3	钢筋混凝土结构房屋[a]	3.0～4.0	3.5～4.5	4.2～5.0
4	一般古建筑与古迹[b]	0.1～0.3	0.2～0.4	0.3～0.5
5	水工隧道[c]	7～15		
6	交通隧道[c]	10～20		
7	矿山巷道[c]	15～30		
8	水电站及发电厂中心控制室设备	0.5		
9	新浇大体积混凝土[d]： 龄期：初期～3d 龄期：3～7d 龄期：7～28d	 2.0～3.0 3.0～7.0 7.0～12		

注1：表列频率为主振频率，系指最大振幅所对应波的频率。

注2：频率范围可根据类似工程或现场实测波形选取。选取频率时亦可参考下列数据：洞室爆破小于20Hz；深孔爆破10～60Hz；浅孔爆破40～100Hz。

a：选取建筑安全允许振速时，应综合考虑建筑物的重要性、建筑质量、新旧程度、自振频率、地基条件等因素。

b：省级以上（含省级）重点保护古建筑与古迹的安全允许振速，应经专家论证选取，并报相应文物管理部门批准。

c：选取隧道、巷道安全允许振速时，应综合考虑构筑物的重要性、围岩状况、断面大小、深埋大小、爆源方向、地震振动频率等因素。

d：非挡水新浇大体积混凝土的安全允许振速，可按本表给出的上限值选取。

6.5.4 排水固结法是对天然地基，或先在地基中设置砂井（袋装砂井或塑料排水带）等竖向排水体，然后利用建筑物本身重量分级逐渐加载；或在建筑物建造前在场地上先行加载预压，使土体中的孔隙水排出，逐渐固结，地基发生沉降，同时强度逐步提高的方法。

排水固结的原理是地基在荷载作用下，通过布置竖向排水井（砂井或塑料排水带等），使土中的孔隙水被慢慢排出，孔隙比减小，地基发生固结变形，地基土的强度逐渐增长。

排水固结法主要用于解决地基的沉降和稳定问题。为了加速固结，最有效的办法就是在天然土层中增加排水途径，缩短排水距离，设置竖向排水井（砂井或塑料排水带），以加速地基的固结，缩短预压工程的预压期，使其在短时期内达到较好的固结效果，使沉降提前完成；并加速地基土抗剪强度的增长，使地基承载力提高的速率始终大于施工荷载增长的速率，以保证地基的稳定性。

塑料排水带的纵向通水量除与侧压力有关外，还与排水带的平直程度有关。扭曲的排水带将使纵向通水量减小。因此施工所用套管应采用菱形断面或出口段扁矩形断面，不应全长都采用圆形断面。

排水固结法适用于处理饱和和软弱土层，但对渗透性极低的泥炭土要慎重对待。按照采用的各种排水技术措施的不同，排水固结法可分为以下几种方法。

（1）堆载预压法。在建筑场地临时堆填土石等，对地基进行加载预压，使地基沉降能够提前完成，并通过地基土固结提高地基承载力，然后卸去预压荷载建造建筑物，以消除建筑物基础的部分均匀沉降，这种方法就是堆载预压法。

一般情况是预压荷载与建筑物荷载相等，但有时为了减少再次固结产生的障碍，预压荷载也可大于建筑物荷载，一般预压荷载的大小约为建筑物荷载的 1.3 倍，特殊情况则可根据工程具体要求来确定。

为了加速堆载预压地基固结速度，常与砂井法同时使用，称为砂井堆载预压法。

砂井法适用于渗透性较差的软弱黏性土，对于渗透性良好的砂土和粉土，无需用砂井排水固结处理地基；含水平夹砂或粉砂层的饱和软土，水平向透水性良好，不用砂井处理地基也可获得良好的固结效果。

（2）真空预压法。真空预压指的是砂井真空预压。即在黏土层上铺设砂垫层，然后用薄膜密封砂垫层，用真空泵对砂垫及砂井进行抽气，使地下水位降低，同时在地下水位作用下加速地基固结。亦即真空预压是在总压力不变的条件下，使孔隙水压力减小、有效应力增加而使土体压缩和强度增长。密封膜宜铺设三层，上一层密封膜容易老化，下一层密封膜容易被刺破，中间一层是最安全、最起作用的密封膜。膜周边可采用挖沟埋设、黏土覆盖压边、膜上覆水等方法进行密封。就密封效果来说，以膜上全面覆水最好。

国内外采用排水固结法的工程实例：

（1）埃及阿斯旺大坝水下砂棱体振冲加密，坝高 111m。

（2）官厅水库，国内第一个采用，坝基砂层加固，坝高 45m。

（3）广东清远市飞来峡均质土坝（坝高 17.5m、淤泥质黏土质最大厚度 7.0m、1995 年施工），阶地淤泥质土采用砂井预压法进行排水固结，砂井直径 0.42m，间距 2.5m，等边三角形布置，设计井深 10m（实际最大井深 14m，最小井深 7m），砂井总数约 8000 口，砂垫层厚 1.0m。经蓄水运行两年多的观测，未发现坝面有明显的残余沉降现象，说明坝基软土的处理是成功的。

（4）喀麦隆拉格都水电站，坝高 40m，坝基存在淤泥质土夹层，需处理。砂井法处理范围坝上 0－57.5m 至坝下 0＋128m，砂井直径 30cm，排距 1～1.5m，孔距 1.5～2.6m，孔深 7～18m。并采用水下填砂振冲加固

（5）浙江慈溪杜湖水库，坝高 17.5m（砂井法）、阿尔伯特

一系列坝，坝高 11～43m（砂井法）、加拿大 Lornex 尾矿坝，坝高 43m（砂井法）等均在用排水固结法加固地基。

6.5.5 对于处理不排水抗剪强度小于 20kPa 的饱和黏性土和饱和黄土地基，应在施工前通过现场试验确定其适用性；不加填料振冲加密适用于处理黏粒含量不大于 10%的中砂、粗砂地基。

6.5.6 振冲法对不同性质的土层分别具有置换、挤密和振动密实等作用。对黏性土主要起到置换作用，对中细砂和粉土除置换作用外还有振实挤密作用。在以上各种土中施工都要在振冲孔内加填碎石（或卵石等）回填料，制成密实的振冲桩。在中、粗砂层中振冲，由于周围砂料能自行塌入孔内，也可以采用不加填料进行原地振冲加密的方法。一般来说，30kW 振冲器振密深度不宜大于 7m，填料粒径宜为 20～80mm；75kW 振冲器振密深度不宜大于 15m，填料粒径宜为 40～150mm。

以下为采用振冲法的工程实例：

（1）黄河西霞院水库工程泄洪闸最大高度 28m，基础采用振冲碎石桩加固，振冲碎石桩位于泄洪闸段桩号 k2＋039.8～k2＋082.8、k2＋177.50～k2＋245.00 两段，长度范围 110.5m，顺河流向位于坝上 k0－008.00～坝下 k0＋034.00 段，包括闸室及消力池部分，共 1.80 万 m，振冲碎石桩桩径 1.0m，间距 2.0m，正三角形布置，桩长 6.5～13m 不等。

（2）浙江省绍兴市汤浦水库面板堆石坝最大坝高 37m，淤泥质黏土基础加固采用振冲碎石桩法，桩长 8～10m。

（3）喀麦隆拉格都土石坝为黏土质砂心墙堆石坝，坝高 40m。坝基冲积层中右岸高漫滩阶地含淤泥质土层，河床含砾粗砂，冲积层一般厚 15～25m，最深 45m，基础处理分别采用混凝土防渗墙、振冲加固、振冲加密、砂井、镇压平台、帷幕灌浆等措施。

（4）云南华坪县务坪水库黏土心墙堆石坝，最大坝高 52m。湖积软土与滑坡堆积体基础加固采用振冲碎石桩处理，面积 1.543m^2，最大桩长 23.4m。

7 坝体填筑

7.1 填筑分期

7.1.1 水文年指与水文情况相适应的一种专用年度。水文年度的开始日期有两种不同的划分方法：

(1) 选择供给河流水源自然转变的时候，即从专靠地下水源转变到地面水源增多的时候。

(2) 根据与地面水文气象相适应的时候，即选择降水量极少，地表径流接近停止的时候。因此，每一水文年度的开始日期是不同的，但为便于整编计算起见，实际划分时仍以某一月的第一日作为年度开始日期。

水文年：按总体蓄量变化最小的原则所选的连续 12 个月，据此，跨年度的水量可减至最低限度。

7.1.2 根据工程施工总工期及拦洪度汛标准，以施工导流为主导进行坝体施工分期，并与施工场地布置、上坝道路、施工方法、土石方挖填平衡和面板分期（面板堆石坝）施工情况等统筹协调，拟定控制时段的施工强度，反复协调论证后，制定施工方案。同时，在满足度汛要求的前提下，各期填筑强度大致均衡，以降低人员数量及施工机械数量。

7.2 坝面填筑作业规划

7.2.2 土石坝坝面填筑施工是多料种、多工序共同作业，施工作业集中，彼此关系密切，应协调相互间的关系，因此本条文对坝面填筑作业规划的一般原则进行了规定。

一般来说，由于截流后需要基坑抽水、坝基开挖处理，在第二年汛前坝体很难全断面达到拦洪高程，需要采用临时断面度汛。当采用临时断面度汛时，临时断面顶宽不宜小于 35m，上下断面高差不宜大于 30m，且应满足整体稳定要求。

7.3 坝 壳 料

7.3.1 土石坝坝壳料按其材料分为堆石、风化料、砂砾（卵）石三类，不同材料由于其强度、级配、实现程度不同，施工采用的机械及工艺亦不尽相同。通过总结国内外土石坝施工经验可以得出，坝体方量在500万 m^3 以下的，若采用自卸汽车运输直接上坝，以30t级自卸汽车及以下为主，大于500万 m^3 的应以45t级自卸汽车及以上为主。坝面用以摊铺、平料的推土机，为了便于控制层厚，不影响汽车卸料作业，其动力要与石料最大块径、级配相适应，功率一般不小于200hp(1hp＝745.70W)，300hp以上也是可取的。

7.3.2 坝壳料铺料要求层厚均匀、表面平整、防止粗细颗粒分离。铺层厚度大，石料不均匀，粗细颗粒分离就严重。在铺填石料时，应边卸料边平整，尽量使粗细料掺合均匀。坝壳石料铺料方法分为进占法、后退法和混合法三种。进占法铺料推土机平料容易控制层厚，坝面平整，石料容易分离，表层细粒多，下部大块石多，有利于减少施工机械磨损，堆石料铺填厚度1.0m。后退法铺料可改善石料分离，推土机控制不便，多用于砂砾石和软岩，层厚一般小于1.0m。混合法适用铺料层厚大（1.0～2.0m）的堆石料，可改善分离，减少推土机平整工作量。

堆石料一般应用进占法铺料，堆石强度在60～80MPa的中等硬度岩石，施工可操作性好。对于特硬岩（强度大于200MPa），由于岩块边棱锋利，施工机械的轮胎、链轨节等损坏严重，同时因硬岩堆石料往往级配不良，表面不平整影响振动碾压实质量，因此施工中要采取一定的措施，如在铺层表面增铺一薄层细料，以改善平整度。级配较好的石料，如强度30MPa以下的软岩堆石料，砂砾（卵）石料等，宜用后退法铺料，以减少分离，有利于提高密度。不管用何种铺料方法，卸料时要控制好料堆分布密度，使其摊铺后厚度符合设计要求，不要因过厚而难以处理。尤以后退法铺料更需注意。

对于振动碾压实，石料允许最大粒径可取稍小于压实层厚；气胎碾可取层厚的1/2～2/3。超径石应在料场内解小，少量运至坝面的大块石或漂石，在碾压前应作处理。一般是就地用反铲挖坑将之掩埋在层面以下，或用推土机移至坝外坡附近，作护坡石料。少量超径石也可在坝面用冲击锤解小。坝壳料铺填工程实例见表25。

表25　部分土石坝坝壳料铺填实例

工程名称	坝高(m)	坝型	坝体填筑量(m^3)	料物类别	自卸汽车吨位(t)	卸料方式	铺层厚(m)	铺料推土机动力(hp[a])	振动平碾碾重(t)	完成年份
碧口	101.8	心墙	397	砂砾石堆石	12.5	进占法	1.0～1.5	120	13.5(拖)	1979
石头河	114	心墙	835(614)	砂砾(卵)石	18	后退法	1.0	100	13.5(拖)	1981
鲁布革	103.8	心墙	396	堆石	20	进占法	0.8～1.0	320	10.6(自)	1989
小浪底	160	斜心墙	4900(3163.8)	堆石	60	进占法	1.0	287	17(自)	2000
黑河	130	心墙	825(603)	砂砾(卵)石	45	后退法	1.0	520	17.5(自)	2001
菲尔泽[b]	165.6	心墙	808.6(610.9)	堆石	20～32	混合法	2.0	100	13.5(拖)	20世纪70年代
洪家渡	179.5	面板堆石坝	902	堆石	25～32	进占法	0.8～1.2	—	18	2004
河口村	122.5	面板堆石坝	570(482.2)	堆石	30～45	进占法	0.80	—	26(自)	在建

注1：坝体填筑量栏为填筑总量，括弧内为坝壳料填筑量。

注2：表中碾重对于自行式为总机重，(拖)为牵引式振动平碾，(自)为自行式振动平碾，自行式碾总重约为碾滚重的1.5倍。

a：1hp=745.70W。

b：菲尔泽坝为我国援建阿尔巴尼亚的工程。

7.3.3 坝壳透水料和半透水料的主要压实机械有振动平碾、气胎碾等。振动平碾适用于堆石与含有漂石的砂卵石、砂砾石和砾质土的压实。振动碾压实功能大，碾压遍数少（4～8遍），压实效果好，生产效率高，应优先选用。气胎碾可用于压实砂、砂砾料、砾质土。除坝面特殊部位外，碾压方向应沿轴线方向进行。一般均采用进退错距法作业。在碾压遍数较少时，也可一次压够后再行错车的方法。施工主要参数铺料厚度、碾压遍数、加水量等要严格控制；还应控制振动碾的行驶速度，符合规定要求的振动频率、振幅等参数，振动碾应定期检测和维修，始终保持在正常工作状态。分段碾压时，相邻两段交接带的碾迹应彼此搭接，垂直碾压方向，搭接宽度不应小于0.3～0.5m，顺碾压方向不应小于1.0～1.5m。

为提高堆石、砂砾石料的压实效果，减少后期沉降量，一般应适当加水，但大量加水需增加工序和设施，影响填筑进度。堆石料加水的主要作用，除在颗粒间起润滑作用以便压实外，更重要的是软化石块接触点，在施工期间造成石块尖角和边棱破坏，使堆石体更为密实，以减少坝体后期沉降量。砂砾料在洒水充分饱和条件下，才能达到有效的压实。堆石、砂砾料的加水量还不能给出一个明确的标准，一般依其岩性、细粒含量而异。对于软化系数大、吸水率低（饱和吸水率小于2%）的硬岩，加水效果不明显。经对比试验确定，也可不加水碾压。对于软岩及风化岩石，其填筑含水量应大于湿陷含水量，最好充分加水，但应视其天然含水量及降水情况而定。如加水碾压将引起泥化现象时，其加水量应通过试验确定。堆石加水量依其岩性、风化程度而异，一般约为填筑量的10%～25%；砂砾料的加水量宜为填筑量的10%～20%，对小于5mm含量大于30%及含泥量大于5%的砂砾石，其加水量宜通过试验确定。

小浪底坝上游坝壳堆石料为硅质细砂岩，平均饱和抗压强度为189MPa，饱和吸水率平均值为0.185%，软化系数0.83，为极硬岩。曾进行两次加水与不加水的碾压对比试验，结果表明，

堆石料在填筑中加水量50%左右，比不加水时干密度增加0.006%～0.013%，影响甚微。经过综合比较，采用不加水方法。

加水时一般多用供水管道人工洒水，此法费用较低，但坝面施工机械运行对管道的安装及供水干扰很大，管道损坏也比较严重，作业面大时人工洒水难以覆盖，影响加水效果。汽车洒水机动灵活，洒水方便。白溪坝采用高位水池站台用32t自卸汽车改装的水车在坝面加水，效果较好。有的工程采用在自卸汽车运输途中用水箱对车厢中的石料进行加水湿润，以减少坝面作业工序。用车载的高压水枪加水，覆盖面大，也可使用。对砂砾料或细料较多的堆石，宜在碾压前洒水一次，然后边加水、边碾压，力求加水均匀。对含细粒较少的大块堆石，宜在碾压前洒水一次，以冲掉填料层面上的细粒料，改善层间结合。但碾压前洒水，大块石裸露会给振动碾碾压带来不利。对软岩堆石，由于振动碾压后表面产生一层岩粉，碾压后也应洒水，尽量冲掉表面岩粉，以利层间结合。有些特殊料物，需进行洒水效果及洒水工艺试验。

7.3.4 坝壳靠近岸坡部位及坝壳分期分段填筑时在坝壳内形成了横向或纵向接缝，按照坝壳料接缝部位进行施工。施工坝壳靠近岸坡部位施工，用汽车卸料及推土机平料时，大粒径石料容易集中；碾压机械压实时，碾磙多不能靠近岸坡。坝壳与岸坡接合填筑带的施工措施一般有以下几点。

(1) 限制铺料层厚：在靠近岸坡一定宽度内减薄层厚，如减为坝面铺料层厚的一半。

(2) 限制粒径：设计文件未专门规定时，在接合部至少2m宽度内填筑粒径小于20cm的石料。

(3) 顺坡碾压或采用夯击式机械，如用夯板、小型压实机械靠近岸坡直接夯压。

坝壳分期分段填筑时，在坝壳内形成了横向或纵向接缝。由于接缝处坡面临空，压实机械作业距坡面边缘留有0.5～1.0m

的安全距离，坡面上存在一定厚度的松散或半压实料层。另外，铺料过程中难免有部分填料沿坡面向下溜滑，这更增加了坡面较大粒径松料层的厚度。松坡厚度与铺料层厚度、接缝高度和坡度等因素有关，铺层厚度和接缝高度愈大坡度愈缓，侧松料宽度愈大，其宽度一般为1～2.5m。坝壳内部接缝处理一般采用留台法或削坡法。

（1）留台法：先期铺料时每层预留1～1.5m的平台，新填料松坡接触，然后采用碾磙骑缝碾压。这种方式不需要削坡处理，适用于填筑面积较大的工程。

（2）削坡法：采用施工机械（推土机、挖掘机或转载机）削坡，其工作面比新填料层面抬高一层，消除松坡水平宽度约为1.5～2.0m，新填料与松坡料相接，共同碾压。削坡工序可在铺料前或平行作业，施工机动灵活，能适应不同的施工条件。

7.4 垫 层 料

7.4.1 本条文第1款不适用于垫层料防护为挤压边墙的垫层料铺填与压实。

7.4.2 本条文不适用于垫层料防护为挤压边墙的垫层料铺填与压实。不采用挤压边墙保护的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→砂浆摊铺或喷乳化沥青→碾压→养护。

7.4.3 挤压式边墙施工法是在每填筑一层垫层料之前，用挤压式边墙机制作出一个半透水混凝土边墙，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。挤压式边墙是垫层料上游坡面保护的一种形式，与传统垫层料上游坡面防护形式比较，具有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，增加了垫层料的密实度，简化了坡面的施工工艺，提高了施工质量及施工安全，节约工程费用等特点。目前在我国混凝土面板堆石坝工程中得到广泛应用，尤其是近几年挤压边墙技术得到

成功应用，截至2011年12月，我国已有90多座面板堆石坝使用了挤压边墙技术，国内部分使用挤压边墙技术的混凝土面板堆石坝见表26。因此，本条款规定对于高面板堆石坝，垫层料上游坡面保护宜优先选用挤压式边墙。

表26　国内部分使用挤压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	涧峪	陕西华县	涧峪河	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	兆河	136.5	2007
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	埭溪	35.5	2008

表 26（续）

序号	工程名称	地点	所属流域	坝高（m）	完成年份
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	在建
39	毛家河	湖北兴山	毛家河	100	在建
40	黔中枢纽	贵州	三岔河	162.7	在建
41	牛栏江—滇池补水工程	云南	牛栏江	142	在建
42	河口村	河南济源	沁河	122.5	在建
43	中葛根	新疆台奇	中葛根河	81	—
44	黄连山	云南	茶卡河	70.1	—

喷混凝土固坡法利用常规的地下工程喷护用设备和工艺，只需在施工参数上稍加调整。由于垫层保护采用的在松散基面的垫层坡面上喷混凝土，与一般地下工程在坚硬的岩面上喷护不同，因此，应研究特定条件下喷混凝土的配合比与喷射工艺参数的优化问题，得到质量和厚度均匀的喷层。

7.5 反 滤 料

7.5.2 土砂平起施工法根据土料与反滤料填筑先后顺序不同，又分为先土后砂和先砂后土法。此两种方法的犬牙交错是允许的，但是反滤料设计厚度不将犬牙厚度计算在内，同时不允许过多削弱防渗体的有效断面，反滤料一般不伸入心墙内，其犬牙大小由各种材料的堆置休止角所决定。

先砂后土法。即先铺反滤料，后铺土料。当反滤层宽度较小（小于3m）时，铺1层反滤料，填2层土料，碾压反滤料并骑缝压实与土料的结合带。因先填砂层与心墙填土收坡方向相反，为减少土砂交错宽度，碧口、黑河等坝在铺第二层土料前，采用人工将砂层沿设计线补齐。对于高坝，反滤层宽度较大，机械铺设方便，反滤层铺层厚度与土料相同，平起铺料和碾压。如小浪底心墙，下游侧设两级反滤料，一级（20～0.1mm）宽6m，二级（60～5mm）宽4m，上游侧设一级反滤料（60～0.1mm），宽4m，先砂后土法由于土料填筑有侧限，施工方便，工程较多采用。

先土后砂法。即先铺土料，后铺反滤料，齐平碾压。

7.5.3 反滤料填筑分为卸料、铺料、界面处理、压实几道工序。

（1）卸料。采用自卸汽车卸料，车型的大小应与铺料宽度相适应，卸料方式尽量减少粗细料分离。当铺料宽度小于2m时，宜选用侧卸车或5t以下后卸式汽车运料。较大吨位自卸汽车运料时，可采用分次卸料或在车斗出口安装挡板，以缩窄卸料出口宽度。为了减少反滤层与土料及堆石料分区界面上粗、细料的分离，方便界面上超径石的清除，自卸汽车卸料次序应“先粗后细”，即按“堆石料—过渡料—反滤料”次序卸料。当反滤层宽度大于3m时，可沿反滤层以后退法卸料。反滤料在备料场加水保持潮湿，也是减少铺料分离的有效措施。

（2）铺料。一般较多采用小型反铲（斗容1m^3）铺料，也有使用装载机配合人工铺料，当反滤层宽度大于3m时，可采用推土机摊铺平整。

（3）界面处理。

①反滤层填筑应保证其设计宽度，填土与反滤料的“犬牙交错”带宽度不宜大于填土层厚的1.5倍。小浪底与黑河坝均规定此宽度小于30cm。

②为了保证填料层间过渡，要避免界面上的超径石集中现象。采用“先粗后细”顺序铺料时，应在清除界面上的超径石后，再铺下一级料。使用小型反铲将超径石移放至与本层相邻的粗料区或坝壳堆石区。

③反滤层填筑采用“先砂后土法”，铺一层反滤料，填筑两层土料，齐平碾压的施工方法已趋规范化。为了使第二层土界面靠近防渗体设计线，铺第二层土前可将反滤料移至设计线。

（4）反滤料压实。

①压实机械普遍采用的是振动平碾，压实效果好，效率高，与坝壳堆石料压实使用同一种机械。因反滤层施工面狭小，应优先进用自行振动碾，牵引式的拖拉机履带板易使不同料物混杂。

②当防渗体土料与反滤料，反滤料与过渡料或坝壳堆石料填筑齐平时，应用平碾骑缝碾压。跨过界面至少0.5m。反滤料压实工程实例见表27。

表27　反滤料压实工程实例

工程名称	施工年份	施工方法	压实机具	压实施工要点	土砂结合部填土质量
碧口（心墙）	1969～1976	先砂后土或先土后砂法（1砂3土）	砂：13.5t振动碾；土：16.4t羊足碾；土、砂接缝：2.5t夯板	1. 先用振动碾碾压，再用夯板夯打接缝填土； 2. 土砂混合料在上新料前要用人工进行清理并置于心墙边30cm范围内，与新料一同压实	达到1.62～1.82t/m³（设计填土密度1.7t/m³）
石头河（心墙）	1976～1982	先砂后土法（1砂2土）	砂：14.0t振动碾；土：羊足碾和气胎碾	1. 每压实一层土料后，人工挖除土砂结合部位不合格土料； 2. 振动碾碾压6～8遍，并骑缝压实土砂结合带，压实土料宽度不小于0.5m	土、砂接缝设计填土干密度1.65t/m³，合格率为70.3%

表 27（续）

工程名称	施工年份	施工方法	压实机具	压实施工要点	土砂结合部填土质量
升钟（心墙）	1977～1982	挡板法	砂：HZR250型平板振动打夯机；土：靠反滤砂0.8m宽范围内用蛙夯夯实	1. 在挡板保护下先夯实心墙土料，并给砂料洒水，洒水量为填砂量的25%～30%； 2. 拔出挡板，夯砂料7～9遍	—
鲁布革（心墙）	1982～1989	先砂后土法（1砂2土）	砂：碾重10.6t，自行振动平碾；土：碾重8.7t，自行振动凸块碾	1. 心墙土料压实厚度25cm； 2. 结合带用装载机轮胎补压	—
小浪底（斜心墙）	1994～2001	先砂后土法 先土后砂法	砂：碾重17t，自行振动平碾；土：碾重17t，自行振动凸块碾	1. 反滤料与土料铺层厚度相同（0.25m），振动平碾骑缝碾压； 2. 2层反滤料与1层过渡料齐平，2层过渡料与1层堆石齐平跨缝碾压	—

7.6 过 渡 料

7.6.1 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。倒料时过渡料不要侵占垫层料的位置，同时主堆石料也不要侵占过渡料的位置。否则需采用反铲挖除或辅以人工清除。

7.6.2 对于碾压式沥青心墙堆石坝，专用摊铺机沿坝轴线方向将沥青混合料和心墙两侧过渡料同时摊铺，由于过渡料与沥青混合料的压实性能不同，过渡料摊铺厚度较大，摊铺速度一般为1～3m/min，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，过渡料一般为2～4m宽。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宽度则采用其他设备摊铺。沥青混凝土心墙与坝体填筑均衡上升，而每层心墙与两侧过渡料需同时铺筑，在施工期间，心墙与过渡料铺筑应

在高于相邻坝体两层或低于相邻坝体两层之间，当雨季、冬季等原因造成心墙施工停工时，心墙与两侧过渡层应高于相邻坝体1～2层。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。

7.6.3 对于浇筑式沥青心墙堆石坝，一般来说，先进行沥青心墙模板的架立和固定，然后利用小型振动碾同时对两侧的过渡料进行铺筑及压实，以防止模板的变形、移位；过渡料与堆石体结合部位利用大型振动碾压实。

7.7 护　　坡

7.7.1 坝体上、下游护坡施工，一般包括坡面修整、垫层铺设、护坡施工三道主要工序，还有马道（或下游上坝道路）、排水沟等项目施工。在铺设坝体上下游垫层前，先对坡面填料进行修整。修整的任务是，削去坡面超填的不合格石料，按设计线将坡面修整平顺。修整方法分为反铲、推土机、人工作业三种。人工作业多作为辅助工作配合施工。反铲修整时，坝壳料每填筑2～4层，在坝面用白灰示放出坝坡设计线，反铲沿线行走，逐条削除设计线以外的富裕填料，将其放置在已压实合格的坝面上。反铲操作灵活，可适应各种坝料，容易与坝体填筑协调，同步上升。推土机修整时，对于黏性土料、砾质土、砂砾料，且坡度缓于1∶2.5的坝，可直接采用推土机削坡及修整。推土机作业可分为以下两种方式。一是自下而上修整。削坡料可推至坝面进行填筑。坝体每填筑到适当高度（如10～15m），即进行一次修整。二是自上而下修整。对于低坝往往采用此种方式。推土机由坝顶向坡脚修整，削坡料弃在坝脚适当部位或转运上坝填筑。推土机作业不能一次削至设计线，应分次削坡、整平，并需要人工配合修整。

堆石护坡，堆置层厚大，施工工艺简单，适于机械化作业，

护坡与坝体填筑同步上升。干（浆）砌石护坡工期安排和现场布置灵活，耗用护坡石料数量比堆石护坡少。主要为人工操作，用劳力多。有的工程从堆石料中挑选大块石，运至坡面码放，用人力或机械略加整理，效果良好。护坡与坝体同步施工时，若采用机械作业，坝体填筑每升高 2～4m，铺设垫层料前放出标明填料边界和坡度的示坡桩，每隔 10m 左右设一个。按示坡桩进行坡面修整后，先铺筑垫层料再填筑护坡石料。两种料均采用自卸汽车沿坡面卸料，用反铲摊铺。反铲能将大小块石均匀铺开、充填缝隙，并沿垂直坡面方向击打护坡料，以压实、挤密堆石。这种方法填筑护坡料密实、坡面平整、填筑偏差小。对于堆石坝坡，也可将堆石料中的超径石或大块石用推土机运至坡面，大头向外码放，辅以机械和人工整理平顺填实，形成摆石护坡与坝面填筑同步上升。近期修建的堆石坝多有应用。若采用人工作业，坝体上升一定高度后进行，其高度结合坝坡马道或下游上坝道路的设置确定，一般为 10m 左右。垫层料与块石坡面运输可采用钢板溜槽自上而下运送到填料部位。垫层料用人工铺料，人工或轻便夯机夯打，充分洒水，分层填筑；块石为人工撬移、码砌。

对于低坝或施工机械不足的情况，可采取在坝体填筑完毕后，再进行护坡施工。施工时垫层料和护坡石料在坡面运输，可采用拖拉机牵引小型自卸汽车沿坡面下放至卸料点，也可用钢板溜槽自上而下输送。垫层料的铺筑，可用推土机自下而上摊铺、压实，人工辅助作业。护坡块石采用人工砌筑。

7.7.2 现场浇筑混凝土护坡施工一般采用滑模施工。例如碧口坝，上游混凝土护坡采用滑动模板浇筑，面板厚 0.3m，分块宽度为 10m，不设水平缝，接缝填塞沥青木板条。丹江口左岸土石坝，上游护坡现场浇筑混凝土，板块厚 0.2m，分块 5m×5m，混凝土用汽车运输上坝，用滑槽入仓，平板振动器振捣及人工插钎振捣。垂直缝涂 1cm 厚黄泥浆，水平缝面涂刷沥青，为加快施工进度，水平缝采用预制混凝土板条、板面涂沥青隔块浇筑。排水孔间距 1m，孔径 6cm。排水孔曾用 3 种方法施工：一是埋

入内径为 6cm 的竹管；二是埋设有预留孔的混凝土预制块，上部尺寸 12cm×12cm，下部尺寸为 16cm×16cm，高度与板厚相同；三是护坡混凝土浇筑后用风钻打孔。黑河坝上游护坡混凝土护坡厚 0.4m，横向分块宽度为 10m，沿坡面 24.2m 设水平缝，接缝嵌置厚 15mm 的低发泡聚氯乙烯塑料板，排水管为 ϕ10cm 塑料管，其间距为 2m。垫层料为小于 80mm 的砂砾石，厚为 40cm。施工程序及方法是：坝体每填筑 3m 高，用 1m^3 反铲削坡，修整坡面→20t 自卸汽车沿坡面卸垫层料→反铲按标示桩铺料→坝体升高 10～20m（坡长 30～50m），用 10t 斜坡振动碾压实垫层料→滑动模板浇筑混凝土。混凝土用搅拌车运输，用铁溜槽沿坝坡面输送。护坡水平分缝高程根据坝体度汛高程、马道位置等因素综合分析而定。根据试验确定垫层料超铺 20cm（水平宽），作为振动碾压实余量。

预制混凝土块（板）护坡施工在坡面上用卷扬机牵引平板车向下运输，人工砌筑。升钟坝上游护坡为两层干砌混凝土块，混凝土块尺寸为 0.4m×0.4m×1.0m，预制块下部用砾石或碎石调平，预制块之间留 1～2cm 的缝隙，用细粒石填塞。

7.7.3 草皮护坡施工应在黏性土坝坡上先铺腐殖土，施肥后再撒种草籽或植草。草种应选择爬地矮草（如狗爬草、马鞭草等）。升钟坝坝壳为砂岩石渣，下游坝坡修整好后，自卸汽车将土从坝顶倾卸至下游坡面，用推土机均匀铺 20cm 厚的土层，在铺好的土层上撒种草籽。丹江口左岸土石坝下游护坡是在砂砾料坡面加铺一层约 10cm 的黏土，上面植草皮护坡。为防止暴雨对坡面的冲刷，应在坡面设置横向和纵向排水沟，排水沟用混凝土预制板干砌，断面尺寸为 30cm×30cm。

7.8 雨季及负温条件坝体填筑

7.8.1 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。填筑层面不应有积雪及冰冻层。在负气温下填筑砂、砂砾料及堆

石，冻结后压实层的干密度仍能达到设计要求，允许继续填筑。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。黑龙江省莲花水电站是我国在高寒地区修建的第一座面板堆石坝，作为主要挡水建筑物的水电站，其最大坝高 71.8m，冬季施工时减小了铺料厚度和增加了碾压遍数。如工期要求较紧，也可采用暖棚法施工，暖棚法是在日最低气温低于－10℃时，利用简易的结构和保温材料，将需要填筑的坝体工作面临时封闭起来，使之在正温条件下施工。暖棚法施工费用较高，生产效率低。只有在经过技术、经济论证以后，确认其对加快施工进度具有不可替代的效益时，方可考虑采用。暖棚内的增温，可用焦炭或锅炉管道系统等。不论采用何种供热方法，均需注意安全防火。大伙房坝在 1955 年冬和 1956 年冬，曾采用暖棚法填筑。共建暖棚 2.4 万 m^2，在暖棚内填筑土、砂料 14.42 万 m^3。大伙房坝冬季暖棚法施工与正温露天作业相比，其黏土填筑增加费用 41.8%，砂料填筑增加费用 102%。

7.8.2 如工期允许，土料尽量避免雨季施工。若雨季施工要认真分析当地的水文气象资料，做好必要的物资准备，加强气象预报，提前做好防雨准备，正确掌握雨前停工、雨后复工的时机。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，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。根据施工条件，采取适当措施，减少雨水入渗，缩短雨后停工时间。心墙坝雨季施工时，晴天抢填心墙土料，降雨及雨后填筑坝壳料，保持坝体各区均衡上升。心墙及斜墙的填筑面应稍向上游倾斜，宽心墙及均质坝填筑面可中央凸起，向上下游倾斜，以利排泄雨水和避免局部积水，倾斜坡度可取 2%～4%。降雨来临之前，应将已平整但尚未碾压的松土层，用平碾快速碾压形成光面，防止雨水渗入。土料防渗体填筑面上的施工机械，雨前应撤离填筑面，停置于坝壳区。做好坝面防护，下雨至复工前，严禁施工机械穿

越和人员践踏防渗体与反滤层。雨后复工，首先人工排除防渗体表层局部积水。并视未压实表土含水率情况，可分别采用旋耕犁、五铧犁翻松、晾晒或用推土机将其清除，至实测土料含水率不超过施工含水率上限1%即可。对多雨地区的土料施工，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，在雨季不宜进行大面积黏土料填筑施工，可适当安排施工程序。在雨季心墙停工，填筑坝壳料，旱季集中力量填筑心墙及相邻的反滤料与坝壳料，也可收到良好效果。如毛家村坝就是这样做的。

7.8.3 负温施工是土石坝冬季施工中必然遇到的问题，我国北方的广大地区，每年都有较长的负气温季节。为了争取更多的作业时间，需要根据不同地区的负气温条件，采取相应措施，进行负气温下填筑。采取有效的填筑方法、步骤和措施，是保证负温下填筑工程质量和顺利施工的关键。在负温下填筑，要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) 在负温下施工，坝料含水率控制在下限。

(3) 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。暖棚法施工所需器材多，一般只是在小范围内进行，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。负温下露天填筑黏性土的含水率应略低于塑限，一般控制不大于塑限的90%。土料不允许夹有冰雪，且不得加水。在未冻结的黏性土中，允许含有少量小于5cm的冻块。冻块在填筑土层中须均匀分布，其允许含量与土温、土料性质、压实机具及压实标准有关，需通过试验确定。负温下土料填筑要加大压实功能，采用重型碾压机械。要对填筑表面风干冻土进行清除处理。含水率合适、未风干的轻微冻土，可迅速翻耙、整平，并用凸块碾击碎

后，快速铺填。合理分区填筑，集中施工设备，搞好流水作业，做到快铺、快压、快检连续作业。大伙房坝心墙于1955年和1956年冬季，曾在负温下进行露天填筑，铺土厚25cm，用16.4t双联羊足碾碾压。共填筑黏土17000m³。在日最低气温降至－12.2℃时，黏土压实已极为困难；气温达－15℃时，露天填筑即告停止。在铺土与压实过程中，土温变化情况见表28，其碾压效果见表29。

表28　大伙房心墙铺土及压实过程不同深度土温资料

时间（h：min）	气温（℃）	施工工序	不同深度的土温（℃）				
			1cm	5cm	10cm	15cm	20cm
15：00	0.5	铺土时	4.7	3.7	3.8	4.2	4.8
17：00	0.5	碾压前	0.8	1.5	2.6	2.9	3.5
18：00	－1.4	碾压中	0.1	0.7	2.4	2.5	3.5
23：00	－4.1	碾压后	－0.5	－0.5	0.5	—	3
24：00	－6.5	铺土时	0.1	0.2	0.2	0	0
1：00	－6.5	碾压前	－2.3	－0.5	－0.5	－0.5	－0.2
4：00	－7.8	碾压后	－3.0	－0.5	－0.5	－1.0	—

表29　大伙房坝负气温下土料温度及压实效果资料

碾压过程中的气温（℃）	碾压前不同深度的土温（℃）			碾压效果				碾压遍数
	1cm	10cm	20cm	测点数（个）	含水量	干密度（g/cm³）		
						平均值	最小值	
－0.5～－4.1	－0.2	2.2	3.5	5	17.1%	1.77	1.74	24～28
－6.5～－7.8	－2.7	－0.5	－0.2	7	18.9%	1.73	1.70	28～36
－7.8～－8.0	－0.5	0	0.1	5	18.5%	1.73	1.72	28～32
－0.5～－6.0	－0.6	－0.1	－0.7	11	18.7%	1.74	1.72	28
－6.5～－7.0	－1.3	－0.5	－1.5	—	—	—	1.70	36

8 防渗体施工

8.1 土料防渗体

8.1.3 坝面的填筑压实，要按一定的次序进行，避免发生漏压与超压。防渗体土料的碾压方向，要平行坝轴线方向进行，不得垂直于坝轴线方向碾压，避免局部漏压形成横穿坝体的集中渗流带。碾压机械行驶的行与行之间要重叠 20～30cm 左右，以免产生漏压。此外，坝料分区之间的边界也容易成为漏压的薄弱带，应特别注意要互相重叠碾压。

土料的铺层厚度、碾压遍数等施工参数及碾压设备选择，要通过现场碾压试验最终确定。

8.1.4 土料天然含水率与最优含水率差别较大时应调整天然含水率，本条主要对土料含水率调整及土料填筑层面处理作出的规定。小浪底大坝防渗土料包括斜心墙 1 区土料和 1A 区高塑性土料、上游围堰 1B 区土料。1 区、1A 区土料场土料的天然含水率接近最优含水率，多数情况下略高于最优含水率，因此在料场无需进行专门的水分调节工作，只有当填筑面上防渗料的含水率偏高时，采用平地机尾部的耙子进行耙松、翻晒处理；当含水率偏底时，采用 $20m^3$ 带有雾状喷头的 IVECO 洒水车在防渗土料表面均匀洒水，再用平地机尾部耙子来回翻耙，使含水率均匀，接近最优含水率。

1B 区土料场属重粉质壤土，天然含水率只有 6%～8%左右，而最优含水率在 14%～16%左右。因此在料场进行加水调节，加水调节方法曾使用了深槽灌水法和表面洒水法。通过实践，多采用的是在土表面洒水然后用推土机把洒过水的土料堆积起来，装料时根据含水率情况再用装载机适当地翻拌，然后装车运输上坝。洒水用水管直接洒水或洒水车洒水。

黑河大坝部分土料采用逐层翻晒法降低含水率（3%～4%），

其工艺流程为：推土机松土器松动原状土层深 30cm，每天数次用七铧犁沿纵横方向翻晒，翻晒间隔时间和遍数根据含水率和当天气温而定。土料合格后，用推土机推集待运，每层合格土料松土平均厚度 13.5cm。

黑河土料翻晒实践说明，12 月、1 月、2 月为冰冻期，平均气温低于 6℃，蒸发量小于 0.5mm/d，不适合土料翻晒；6～8 月气温高于 25℃，蒸发量大于 2.5mm/d，一天可以翻晒一层适合土料；5～9 月平均蒸发量为 2.1mm/d，两天可以翻晒一层适合土料；4～10 月平均蒸发量为 1.5mm/d，3～4d 可以翻晒一层适合土料。

干燥、高温天气下蒸发量大，对合格土料堆，应对其表面喷雾洒水养护，以免水分蒸发。

8.1.5 土石坝施工中，坝体的防渗土料不可避免地与地基、岸坡等周围其他建筑的边界相结合；由于施工导流、施工方法、分期、分段、分层填筑等的要求，还要设置纵、横向的接坡、接缝。所以这些结合部位，都是影响坝体整体性和质量的关键部位，也是施工中的薄弱环节，处理工序复杂，施工技术要求高，且多系人工操作，质量不易控制。接坡、接缝过多，还会影响到坝体填筑速度，特别是影响机械化施工。对结合部位的施工，要采取可靠的技术措施，加强质量控制和管理，确保坝体的填筑质量满足设计要求。

8.2 混凝土面板防渗体

8.2.1 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。

8.2.2、8.2.3 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，也为施工期提前蓄水受益创造条件。

面板纵缝分缝宽度应根据施工条件确定，为了便于滑模制作、操作和混凝土分料入仓浇筑，河床部位一般取 12～18m，两岸根据情况取 6～9m。浇筑块过大施工困难，过小则分缝太多。

天生桥一级电站为了度汛需要，每年枯水期均按度汛断面填筑，汛期则填两岸，于是出现了沿坝体上、下游方向及左右岸方向填筑高差过大的情况，从而产生不均匀沉降过大；施工过程中填筑强度不均衡，短期内填筑强度大，连续 4 个月坝体日平均升高 1m，造成了较大的后期变形。而洪家渡坝填筑施工分期吸取了这方面的教训，将坝体施工填筑分期与坝体变形控制结合起来。通过研究，洪家渡坝体施工分期模式有所改进，在上下游方向，除低高程因“一枯度汛抢拦洪”的需要，采取在上游超填临时断面外，坝体填筑分期尽量做到上下游面平衡上升，条件许可时让下游超高。左右岸方向填筑也保持平行上升。

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 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，使得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 150mm，洪家渡大坝面板脱空 11.9mm；三板溪大坝面板脱空 13.2mm；水布垭大坝面板脱空 40mm。

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，其顶高程宜低于浇筑平台的填筑高程 5m 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 2～5m。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 2m，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。

8.2.5 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，探讨在干旱气候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。

山口面板坝 1996 年施工时，采用混凝土脱模人工收面后用混凝土塑料薄膜覆盖保湿，混凝土初凝覆盖草帘保湿，洒水保湿，但山口面板混凝土裂缝尤其短细裂缝较多且较早发生。针对问题对面板混凝土浇筑施工日志资料如气温、风速、混凝土坍落度、入仓温度、洒水保湿等实测数据进行分析，并在坝坡砂浆护面无洒水情况下进行了不同覆盖材料养护保护实验，得出如下结论：

（1）新疆内陆干旱性气候环境下混凝土脱模后塑料薄膜覆盖保湿“温室效应”的副作用较强；

（2）对养护材料覆盖结构性能进行比较，“上层薄膜底层草帘”结构与“上层草帘底层薄膜”结构相比，一是增大日温差，二是对日最高温度的降低不及“上帘底膜”结构。

乌鲁瓦提与山口地处南北疆边缘，虽相距几千公里，但同属典型的内陆干旱性气候，干燥，风大，日温差及年温差大，养护

水温低。面板裂缝发生的主要特点有惊人相似之处，即面板裂缝短，细裂缝发生率高且呈早期性。针对这一情况，除对面板混凝土配合比性能及施工工艺等进行研究改进外，乌鲁瓦提二期面板进行现场养护对比试验取得以下成果：

（1）混凝土养护覆盖结构性能与防裂效果：

①“单层（或双层）线毯”覆盖养护效果好。

②“苯板＋线毯”覆盖结构早期散热性差，混凝土内部温升高，大于6.0m的长裂缝发生率高。

③“薄膜＋线毯”覆盖结构裂缝早期发生率及短、细裂缝发生率都较高。

（2）养护水温低与混凝土温升高之间的“骤冷”促使面板裂缝早期发生。

（3）年温差大导致面板越冬新增裂缝发生。

（4）施工工艺上割除架立筋、提高水泥砂浆护面平整度对减少面板基础约束和减少裂缝发生作用显著。

（5）内陆干旱性气候环境面板混凝土养护防裂措施：

①混凝土养护覆盖材料性能应具备以下两个特点：一是应使混凝土脱模后早期保湿防干缩性能较优且易于防风固定；二是面板混凝土一般在气温回升阶段施工，为减少混凝土内部温升增长率，养护覆盖材料在混凝土令期7d前散热性能要好。

②混凝土龄期7d内“雾化”保湿或提高洒水水温，缩小养护水温与温升阶段的混凝土温度差值。

③蓄水前实行“终生”养护。

8.3 沥青混凝土防渗体

8.3.1 强制式搅拌机是依靠固定在转动轴上的叶片对原材料进行强制拌和，其特点是拌和时间短、质量好、底开式出料、骨料不易分离，故沥青混合料拌制宜采用强制式搅拌机。

8.3.2 半固态沥青可桶装或罐装运输，前者成本高且装卸费用高，沥青用量大的工程宜采用罐车运输。沥青混凝土面板工程量

较大，采用专用机械铺筑时，沥青混合料的运输宜采用汽车配立式保温吊罐，运输中机动灵活，能有效防止骨料分离、外漏和温度损失。

沥青混凝土面板铺筑采用斜坡摊铺机施工，其优点：铺层厚度均匀、骨料不易分离、铺筑速度快、热量损失少、施工缝少、面板质量好，并从施工角度放宽对坝坡的限制，故推荐采用。专用心墙摊铺机，装有远红外线加热器，可对底层沥青混凝土加热；装在机尾的振动熨平器，对沥青混凝土进行初步压实，不仅施工速度快，且质量好。另外采用心墙摊铺机不需另配模板，可自动控制心墙的铺筑厚度和宽度，因此也推荐选用。

为了确保沥青混凝土面板的防渗效果，通常采用一次铺筑完成，不设水平缝。如设水平缝，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。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相距过远，操作不方便容易失控，而且斜坡运距加大，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需分期施工时，可分两期施工，但应做好接缝处理。

对于碾压式沥青心墙堆石坝，沥青混合料摊铺分为机械摊铺和人工摊铺。沥青混凝土心墙大部分采用专用摊铺机摊铺，摊铺不到的部位如心墙基座与岸坡连接处的扩大头部，则采用人工摊铺。专用摊铺机沿坝轴线方向将沥青混合料和心墙两侧过渡料同时摊铺，沥青混合料摊铺每层厚度约 23～25cm，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，沥青混凝土心墙与坝体填筑均衡上升，而每层心墙与两侧过渡料需同时铺筑，在施工期间，心墙与过渡料铺筑应在高于相邻坝体两层或低于相邻坝体两层之间，当雨季、冬季等原因造成心墙施工停工

时，心墙与两侧过渡层应高于相邻坝体1～2层。

一般来说，心墙的每层铺设厚度与碾压机械的压实功能有关，应通过碾压试验确定，根据国内外工程实例，铺设厚度一般为20～30cm，心墙日铺设层数不应超过2层。国内外部分工程心墙铺设厚度见表30。

表30　国内外部分工程心墙铺设厚度　　单位：cm

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	20	25～30	25	25	25	30	25

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，施工时段平均气温在5℃以上，都能正常施工，但有因环境温度低而停工的。国外一般也规定以5℃作为施工与停工的分界标准。《公路沥青路面施工技术规范》（JTGF 40—2004）第1.0.4条规定“沥青混凝土不应在低于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℃不宜施工。如需施工，应采取专门措施，并进行模拟实验。如南柯河冶勒水电站，试验表明气温5～－6℃条件下可以施工，但须采取以下措施：

（1）调整碾压参数（静碾1次，动碾8次，再静碾2次）。

（2）提高初碾温度，一般经验初碾温度为130℃，冶勒低温条件提高至130～155℃。

（3）严格控制终碾温度，不得低于130℃。碾压后，任何人员和设备不得在心墙上走。

（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。如果在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，故降雨时应停工，雨后应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

5mm 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 0.1mm 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。

8.4 土工膜防渗体

土工膜铺设前，基础垫层料级配应满足设计要求，并碾压密实平整，不应有突出尖角块石，以免损坏土工膜。土工膜防渗斜墙铺设一般有两种方式：一是平行于坝轴线铺设（顺铺）；二是垂直于坝轴线铺设（横铺）。一般来说，采用横铺的工程较多，即从坝顶向下以垂直于坝轴线的方向，采取人工展铺的方式铺设在垫层上。土工膜防渗心墙宜采用“之”字形布置，两侧回填坝料的级配、粒径、干密度应满足设计要求。复合土工膜接缝处理有粘接法和热焊法，一般来说，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，每幅焊接完毕后，并通过专职人员检查确认后方可缝合 PE 膜上、下的土工布。土工膜的焊接温度为 250～300℃，最高不要超过 350℃，焊接速度一般为 1.5～2m/min，同时每条焊缝正式施焊前，先进行膜料的试焊，还应根据气温、风速及膜料厚度来确定现场的焊接温度和焊接速度，只有在完成试焊且通过目测焊缝合格后方可正式施焊。

复合土工膜焊接时不能有熔点和漏点。焊缝质量以外观检查为主，看两条焊缝是否清晰、透明，无夹渣、气泡，无漏点、熔点或焊缝跑边等。土工膜焊接质量检查以充气法为主，注射有色水为辅（对每条焊缝都进行充气法检测）。充气法检测时在焊缝两端设置气压表，待妥善密封后，充入气压 0.2MPa，稳压保持 5min，压力无明显变化为合格；对于无法用充气法检测的部位，进行注射有色水为辅的检测方法。有色水应从大坝上游坡脚处注入，使水沿两条焊缝形成的空腔爬升，从而检测并标注出焊缝的渗漏点，进行热熔补焊，对补焊后的焊缝也要重新按照充气法进

行检测。

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，务必精心设计、施工，保证连接和伸缩的结构型式和施工质量。土工膜施工要采用专业的施工队伍，所有施工人员均需要经过培训后方可上岗施工，土工膜在施工过程中要加强质量监督和检查，一旦发现损坏、穿孔、撕裂、黏结不牢等现象，及时修补，确保土工膜施工质量。

9 施工进度计划

9.1 施工程序与控制进度

9.1.1 土石坝施工与导流程序关系密切，满足截流、拦洪度汛、下闸蓄水等要求是控制土石坝施工进度的重要目标。

9.1.2 根据施工导流、安全度汛及各施工阶段的任务，拟定施工分期方案，确定土石坝各期的填筑高程，计算各期施工强度，选择施工强度均衡、技术经济合理的施工分期控制性计划。

9.2 施工进度计划

9.2.1 施工进度编制需要对控制工程工期或受洪水威胁的工程和关键项目作重点研究，采取有效的技术和安全措施，缩短工程建设周期。采用平均先进指标，对复杂地基或受洪水制约的工程，要适当留有余地。

编制施工总进度时重点研究关键线路和次关键线路上作业的逻辑关系和工作历时，其他作业可根据其重要性在进度表中列出或不列（不需罗列的主要针对历时很短或规模较小的作业）。

9.2.2 设计者应重视水文、气象对土石坝施工进度的影响，并应分析料场开采、坝体填筑等的年、月有效施工天数及停工标准。

9.2.3 土石坝施工过程的计算机仿真，可用有限元多级随机服务系统和循环网络模拟。根据计算可得到大坝填筑工期、控制点工期、机械设备利用率、坝体上升速度、施工强度不均匀系数等指标，可对机械设备配套、坝面作业方式、土石方调配以及月有效工作时间等进行多方案的比选。

（1）土石坝填筑过程施工仿真主要用于研究堆石坝各个填筑区填筑施工上升过程，当坝体填筑工作量较大，坝高较高，坝体填筑时段和填筑区数量较多时，一般采用堆石坝填筑施工过程计

算机仿真对坝体填筑施工过程中各个填筑区的填筑进度、机械配套方案、坝面作业程序进行仿真分析计算，辅助总进度计划中坝体填筑施工各个工序逻辑关系的确定和各个工序持续时间的确定。

（2）土石坝施工过程计算机仿真模型的建立宜基于离散事件仿真系统基本原理。

（3）对受降雨影响比较大的土坝或黏土心墙（斜心墙）堆石坝工程，为了辅助总进度仿真分析，宜采用随机仿真模型，研究降雨等环境因素对坝体填筑过程的影响。

（4）心墙土料、反滤料、过渡料一般设置一定宽度的附带坝壳料作为一个填筑区，填筑区上升应考虑各种料物上升次序、骑缝碾压要求，均衡各种料物之间的上升速度。

（5）土石坝填筑过程施工仿真模型应考虑总进度计划控制性节点的实现。

9.2.4 根据以往一些工程的经验教训，坝基水上部分的岸坡开挖与导流工程施工不重视安排平行作业，以致在截流后水上部分的岸坡开挖与基坑内的施工同时进行，形成很大的干扰，影响工效，有的还会造成人身事故或工程质量事故，延误工期。所以坝基岸坡开挖与导流工程平行施工，河流截流前基本完成，为基坑全面开工做好准备，以利克服干扰，缩短工期。

9.2.6 主要提示有关地基处理应注意事项。如遇到不良地质地基处理在工期安排应有所考虑，并要求在覆盖前完成。

9.2.7 对岸坡不良地质地基处理技术复杂、处理工程量很大、牵涉到总工期问题应慎重分析工期；并提请注意，对坝基范围以外部分亦应在蓄水前完成。

9.2.8 施工期需临时过水的土石坝，一般坝体防护工作量都很大，因此要求设计者在进行工期分析时应慎重考虑。

9.2.9 土石坝上升速度和土料的性能、有效工作日、工作面条件、运输与碾压设备性能以及施工工艺有关，一般通过分析并结合经验确定，必要时可进行现场试验。黏土料填筑速度一般为

0.2～0.5m/d，3～7m/月，最高是可达10m/月以上，黑河坝曾达到14m/月。

9.2.10 本条要求主要是针对高面板堆石坝工程。根据文献，高面板堆石坝在施工及初期蓄水期间面板所出现的裂缝和超常脱空的主要原因是堆石徐变量大，面板混凝土浇筑距堆石填筑完成时间太短造成的。建议面板坝施工时坝体应自然沉降3个月以上，最好经历一个汛期。

9.2.11、9.2.12 坝体填筑强度按需要、可能和经济三原则：

（1）需要。同时满足工期和填筑断面高峰期要求。并且强度较为协调平衡，碾压式土石坝填筑期的月不均匀系数小于2.0。

（2）可能。分析本工程实际施工条件，安排的填筑强度应与出料、运料能力协调。

（3）经济。应当进行经济分析，达到经济施工的目的。

近几年，随着筑坝技术的发展，堆石坝大量采用，施工设备不断向高吨位、高容量、高功率、多种类、灵活配套方向发展，原来所要求的坝体月高峰填筑量与填筑总量比例一般取1∶20～1∶40，与实际情况多有不符。如水布垭面板堆石坝高233m，填筑总量2326万m^3，其坝体填筑施工从2003年1月31日开始，至2006年9月完成，填筑总工期40.5个月（已扣除2003年6月1日至9月20日汛期坝面过水影响时间），平均月填筑强度38.17万m^3，其坝体月高峰填筑量与填筑总量比例为1∶20.58。十三陵抽水蓄能电站上水库面板堆石坝坝高75m，填筑总量275万m^3，其坝体填筑施工从1992年4月开始至1993年9月20日完成，历时18个月，平均月填筑强度与填筑总量比例为1∶9.72。20世纪80年代末完建的鲁布革直心墙堆石坝，坝高103.5m，填筑总量222万m^3，总填筑历时26.5个月，高峰月填筑强度22.33万m^3，其总量与高峰强度之比为10。故本标准中对这一比例数据未作要求，但坝体填筑施工的各期强度要有协调均衡要求，其比值一般不超过1.3～1.6，以避免使用过多的施工机械、劳动力和临时设施。分期导流和一次拦断河床导流的

工程在选取比例时应注意其差异。

根据对近年来大中型土石坝工程坝体填筑强度及工期的统计，与水利水电工程项目建设工期定额进行比较。测算得统计平均强度比定额平均强度略高，比值为 1.2∶1。况且工期定额为 1990 年颁布定额，颁布时间较早，由于近年来水利水电工程施工技术的快速发展，大型挖装机械、运输机械及碾压机械的应用，大中型土石坝工程坝体填筑强度及工期均比定额有一定提高，近年来施工的堆石坝填筑强度统计见表 31；碾压式土石坝定额指标与统计指标见表 32。正常情况下土石坝坝体填筑工期可参照表 33 及表 34 选取。

表 31　堆石坝填筑强度统计

序号	工程名称	坝身体积（万 m^3）	平均强度（万 m^3/月）	高峰强度（万 m^3/月）
1	水泊渡	49.40	5.39	—
2	老渡口	133.84	14.90	—
3	古洞口	193.50	11.06	—
4	大桥	198.00	8.49	—
5	鲁布革	222.00	8.95	—
6	芹山	248.00	14.88	—
7	那兰	249.30	17.00	19.00
8	龙首二级	253.00	15.18	—
9	引子渡	286.00	44.40	—
10	街面	342.00	38.50	—
11	瓦屋山	350.00	21.00	—
12	升钟	357.00	14.59	—
13	公伯峡	471.00	34.20	—
14	盘石头	540.00	23.14	—
15	冶勒	670.00	24.36	—
16	乌鲁瓦提	677.00	30.09	—

表 31（续）

序号	工程名称	坝身体积（万 m^3）	平均强度（万 m^3/月）	高峰强度（万 m^3/月）
17	吉林台	836.20	40.00	69.00
18	董箐	891.00	44.55	—
19	洪家渡	906.00	29.00	33.70
20	三板溪	960.00	40.00	71.67
21	滩坑	1000.00	40.00	60.00
22	紫坪铺	1167.00	43.00	86.00
23	茅坪溪	1213.00	30.33	—
24	天生桥一级	1800.00	55.00	117.93
25	瀑布沟	2052.00	48.86	—
26	溧阳抽水蓄能	2158.00	53.00	—
27	水布垭	2326.00	38.17	—
28	糯扎渡	3591.66	73.00	—
29	小浪底	5185.00	106.11	157.97

表 32　碾压式土石坝定额指标与统计指标比较

序号	工期定额填筑量范围（万 m^3）	工期定额平均填筑量（万 m^3）	工期定额平均填筑强度（万 m^3/月）	统计填筑强度（万 m^3/月）	统计强度与定额强度比值
1	≤100	100	8.33	5.39	0.65
2	100～200	150	9.38	11.48	1.22
3	200～300	250	13.16	20.08	1.53
4	300～400	350	16.67	24.70	1.48
5	400～500	450	19.57	34.20	1.75
6	500～600	550	22.92	23.14	1.01
7	600～700	650	26.00	27.23	1.05
8	700～800	750	28.85	—	—
9	800～900	850	30.36	42.28	1.39

表 32（续）

序号	工期定额填筑量范围（万 m^3）	工期定额平均填筑量（万 m^3）	工期定额平均填筑强度（万 m^3/月）	统计填筑强度（万 m^3/月）	统计强度与定额强度比值
10	900～1000	950	31.67	36.33	1.15
11	1000～1200	1100	34.38	43.00	1.25
12	1200～1400	1300	37.14	30.33	0.82
13	1400～1600	1500	38.46	—	—
14	1600～1800	1700	39.53	55.00	1.39
15	1800～2000	1900	40.43	—	—
16	2000～2200	2100	41.18	50.93	1.24
17	2200～2400	2300	41.82	36.40	0.87
18	—	—	—	总体比值	1.20

表 33　碾压式土石坝坝体填筑工期

编号	坝体填筑量（万 m^3）	填筑工期（月）
1	≤100	10
2	100～200	13
3	200～300	16
4	300～400	18
5	400～500	19
6	500～600	20
7	600～700	21
8	700～800	22
9	800～900	23
10	900～1000	25
11	1000～1200	27
12	1200～1400	29
13	1400～1600	33
14	1600～1800	36
15	1800～2000	39
16	2000～2200	43
17	2200～2400	46

表 34　面板堆石坝填筑工期

编号	坝体填筑量（万 m^3）	填筑工期（月）
1	≤20	8
2	20～50	8
3	50～100	10
4	100～200	13
5	200～300	14
6	300～400	16
7	400～500	18
8	500～600	19
9	600～700	20
10	700～800	22
11	800～900	23
12	900～1000	23
13	1000～1200	24
14	1200～1400	26
15	1400～1600	28

9.2.13　土石坝施工强度分别对填筑、运输、开采进行计算与综合分析确定。

9.2.14　首先进行填筑强度的复核，在填筑强度满足施工进度要求情况下，进行运输、开采强度的复核。分析开采、运输规划的经济合理性，相应调整坝体填筑强度。

10 资源配置

10.2 劳动力

计算劳动力数量时，是以施工总进度为基础，而总进度表上的工程项目是各施工工序的综合项目。因此计算劳动力所需的定额应根据工程施工条件和施工方法经综合分析后拟定。直接生产人员按工作面、施工方法以混合工种配备计算，是一种较科学、能反映实际情况的计算方法。按此设计，其成果有一定的竞争力又结合实际，推荐优先采用。目前水利水电工程施工管理水平较过去有较大的提高，管理人员数量有所减少，管理人员取生产人员总数的5%～8%、缺勤人员取生产人员总数和管理人员之和的4%～6%比较合适。

10.3 主要建筑材料

水利水电工程材料品种繁多，且不同设计阶段对材料用量估算精度的要求不同，一般在可行性研究报告、初步设计阶段，仅对工程施工影响大、用量多的水泥、钢材、炸药、木材和油料等进行估算。为提高估算精度，对各单项工程分项汇总工程量，其项目划分应与水利水电工程的建设概、预算所列举项目相符合，避免漏项。不同设计阶段可采用不同的估算方法。项目建议书、可行性研究阶段采用扩大综合指标并参照已建工程的材料用量，估算钢材、水泥和木材等材料用量；初步设计阶段采用分项计算的方法。在市场经济条件下，确定材料供应渠道十分重要。应通过市场调查，在充分评价后选择可靠的供应商，并尽量争取就近供应。