

ICS 91. 080. 10

P 25

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL 228—2013

替代 SL 228—98

混凝土面板堆石坝设计规范

Design code for concrete face rockfill dams

2013-01-22 发布

2013-04-22 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
(混凝土面板堆石坝设计规范)

2013 年第 11 号

中华人民共和国水利部批准《混凝土面板堆石坝设计规范》
(SL 228—2013)标准为水利行业标准，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 | 混凝土面板堆石坝设计规范 | SL 228—2013 | SL 228—98 | 2013. 1. 22 | 2013. 4. 22 |

水利部
2013 年 1 月 22 日

前 言

根据水利部水利行业标准制修订计划，按照《水利技术标准编写规定》(SL 1—2002)的要求，对《混凝土面板堆石坝设计规范》(SL 228—98)进行修订。

本标准主要包括下列技术内容：

- 混凝土面板堆石坝及有关的泄、放水等建筑物布置；
- 坝体堆石或砂砾石材料详细分区；
- 坝体材料特性和填筑质量标准；
- 坝体设计和计算；
- 坝基及岸坡开挖与处理；
- 混凝土趾板与面板设计；
- 周边缝及垂直缝等各种接缝止水设计；
- 分期施工与已建坝加高；
- 安全监测设计。

本次修订的主要技术内容如下：

- 增加了根据坝高进行堆石料填筑标准分类的有关内容；
- 增加了在高趾墙附近设低压缩区和对趾墙进行稳定和应力分析的有关内容；
- 增加了150m以上高坝和地形地质条件复杂的坝应进行面板应力和变形有限元计算的有关内容；
- 增加了面板配置双层双向钢筋的有关内容；
- 增加了混凝土挤压边墙的有关内容；
- 增加了分期面板浇筑对坝体填筑高差和预沉降期的有关内容；
- 将原“砂砾石坝体渗流控制”一节名称改为“坝体渗流控制”，增加了堆石坝体渗流控制的有关内容；
- 将原“地震区坝体的抗震措施”一节名称改为“抗震措

施”，增加了面板水平施工缝的抗震措施和对于设计烈度为 8 度、9 度时，建在覆盖层地基上的面板堆石坝应进行专门论证的有关内容；

——将原“分期施工与坝体加高”一章名称改为“分期施工与已建坝加高”，将分期施工一节调整为分期施工和分期完建两节，增加了分期完建面板堆石坝的有关内容；

——将原“原型观测”一章名称改为“安全监测”，调整了监测设施布置原则，增加了 1 级、2 级坝及 150m 以上高坝的监测项目；

——接缝止水结构和材料已制定专门的技术标准，本标准不包含该部分内容。

本标准中的强制性条文有：3.1.6 条 3 款、3.1.6 条 4 款、8.2.1 条。以黑体字标示，必须严格执行。

本标准所替代标准的历次版本为：

——SL 228—98

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管理局

本标准解释单位：水利部水利水电规划设计总局

本标准主编单位：长江水利委员会长江勘测规划设计研究院

本标准参编单位：长江水利委员会长江科学院

中国水利水电科学研究院

河海大学

西安理工大学

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：杨启贵 廖仁强 熊泽斌 程展林

雷长海 陈勇伦 曹艳辉 贾金生

孔凡辉 张运建 王瑞骏 朱 晟

郝巨涛 赵剑明 张家发 段国学

本标准审查会议技术负责人：刘志明

本标准体例格式审查人：陈 昊

目 次

| | | |
|-----|-----------|----|
| 1 | 总则 | 1 |
| 2 | 术语和符号 | 3 |
| 2.1 | 术语 | 3 |
| 2.2 | 符号 | 5 |
| 3 | 坝的布置和坝体分区 | 6 |
| 3.1 | 坝的布置 | 6 |
| 3.2 | 坝体分区 | 7 |
| 4 | 筑坝材料和填筑标准 | 11 |
| 4.1 | 筑坝材料 | 11 |
| 4.2 | 填筑标准 | 12 |
| 5 | 坝体设计 | 14 |
| 5.1 | 坝顶结构 | 14 |
| 5.2 | 坝坡 | 14 |
| 5.3 | 稳定分析 | 15 |
| 5.4 | 应力和变形分析 | 15 |
| 5.5 | 坝体渗流控制 | 16 |
| 5.6 | 抗震措施 | 17 |
| 6 | 坝基处理 | 18 |
| 6.1 | 坝基及岸坡开挖 | 18 |
| 6.2 | 基础处理 | 18 |
| 7 | 混凝土趾板 | 20 |
| 8 | 混凝土面板 | 22 |
| 8.1 | 面板的分缝分块 | 22 |
| 8.2 | 面板厚度 | 22 |
| 8.3 | 面板混凝土 | 23 |
| 8.4 | 钢筋布置 | 24 |

| | |
|---------------------|----|
| 8.5 面板防裂措施 | 24 |
| 9 接缝止水 | 26 |
| 10 分期施工与已建坝加高 | 28 |
| 10.1 分期施工 | 28 |
| 10.2 分期完建 | 28 |
| 10.3 已建坝加高 | 29 |
| 11 安全监测 | 30 |
| 标准用词说明 | 32 |
| 条文说明 | 33 |

1 总 则

1.0.1 为适应混凝土面板堆石坝建设发展的需要，规范混凝土面板堆石坝的设计，使其达到安全适用、经济合理、技术先进和保证质量，制定本标准。

1.0.2 本标准主要适用于水利水电工程中1级、2级、3级坝及3级以下的高坝设计；4级、5级中、低坝的设计可参照使用；对于200m以上高坝及特别重要的和复杂的工程，应进行专门研究。

1.0.3 混凝土面板堆石坝的级别，应根据《防洪标准》（GB 50201）及《水利水电工程等级划分及设计标准》（SL 252）中的有关规定确定。

1.0.4 混凝土面板堆石坝高、中、低坝的高度范围根据《碾压式土石坝设计规范》（SL 274）的规定划分。

1.0.5 混凝土面板堆石坝属于土石坝范畴，对于本标准未作规定的问题，应按SL 274的规定执行。

1.0.6 本标准引用的主要标准有：

《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB/T 1596）

《防洪标准》（GB 50201）

《水工建筑物抗冰冻设计规范》（GB/T 50662）

《水工建筑物抗震设计规范》（SL 203）

《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）

《水利水电工程等级划分及洪水标准》（SL 252）

《水利水电工程岩石试验规程》（SL 264）

《碾压式土石坝设计规范》（SL 274）

《土石坝安全监测技术规范》（SL 551）

《水工混凝土施工规范》（SDJ 207）

《水工建筑物塑性嵌缝密封材料技术标准》(DL/T 949)

《混凝土面板堆石坝接缝止水设计规范》(DL/T 5115)

《水工建筑物止水带技术规范》(DL/T 5215)

1.0.7 混凝土面板堆石坝的设计除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 混凝土面板堆石坝 concrete face rockfill dam (CFRD)

用堆石或砂砾石分层碾压填筑成坝体，并用混凝土面板作防渗体的坝的统称。坝体主要用砂砾石填筑的坝也可称为混凝土面板砂砾石坝。

2.1.2 坝高 dam height

从趾板清基后的建基面算到坝顶路面的高度，对于修建于斜坡地基上的坝，可从坝轴线处最低的建基高程起算，并加以注明。

2.1.3 堆石坝体 rockfill embankment

面板下游的填筑体。

2.1.4 垫层区 cushion zone

面板的直接支承体，向堆石体均匀传递水压力，并起辅助渗流控制作用。

2.1.5 特殊垫层区 special cushion zone

位于周边缝下游侧垫层区内，对周边缝及其附近面板上铺设的堵缝材料及水库泥沙起反滤作用。

2.1.6 过渡区 transition zone

位于垫层区和主堆石区之间，保护垫层并起过渡作用。

2.1.7 主堆石区 main rockfill zone

承受水荷载的主要支撑体。

2.1.8 下游堆石区 downstream rockfill zone

位于坝体下游区，与主堆石区共同保持坝体稳定。

2.1.9 排水区 drainage zone

位于砂砾石或软岩主堆石区内及坝体底部的强透水排水区，分为竖向排水区和水平向排水区。

2.1.10 抛石区 riprap zone

在下游坝趾，由硬岩大块石卸料形成的抛石区。

2.1.11 下游护坡 downstream slope protection

保护坝体下游坡面，用大块石堆、砌形成的块石护坡。

2.1.12 上游铺盖区 upstream blanket zone

覆盖在下部面板及周边缝表面，起辅助防渗或自愈作用。

2.1.13 盖重区 weighted cover zone

覆盖在上游铺盖区上的石渣料，维持上游铺盖区的稳定，并起保护作用。

2.1.14 趾板 plinth (toe plate)

连接地基防渗体与面板的混凝土板。

2.1.15 趾板基准线 (“X”线) plinth line (“X” line)

面板底面延长面与趾板设计建基面的交线，见图 2.1.15。

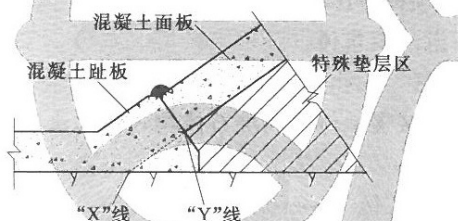


图 2.1.15 趾板基准线示意图

2.1.16 趾板基准线 (“Y”线) plinth line (“Y” line)

面板底面与趾板下游面的交线，见图 2.1.15。

2.1.17 趾墙 toe wall

布置在趾板线上和面板连接的混凝土挡墙。

2.1.18 混凝土防渗板 concrete antiseepage plate

趾板下游坝基表面用于延长渗径、减小地基水力比降的混凝土或喷混凝土板。

2.1.19 混凝土连接板 concrete connecting plate

软基上为适应坝基变形，在趾板与防渗墙之间设置的混凝土

结构。

2.1.20 混凝土面板 concrete face slab

位于堆石坝体上游面起防渗作用的混凝土主体结构。

2.1.21 防浪墙 wave wall

位于坝顶上游侧与面板顶部连接的混凝土防浪结构。

2.1.22 周边缝 perimetric joint

面板与趾板或趾墙间的接缝。

2.1.23 垂直缝 vertical joint

面板条块间的竖向接缝。

2.1.24 水平缝 horizontal joint

面板与防浪墙接缝及面板分期施工的水平接缝。

2.1.25 柔性填料 plastic sealant filler

在水压力作用下，由嵌填位置流入接缝发挥止水作用的嵌缝密封材料。

2.2 符 号

1A——上游铺盖区；

1B——盖重区；

2A——垫层区；

2B——特殊垫层区；

3A——过渡区；

3B——主堆石区；

3C——下游堆石区；

3D——排水区；

3E——排水棱体（或抛石区）；

P——下游护坡；

F——混凝土面板；

T——混凝土趾板；

“X”线、“Y”线——趾板基准线。

3 坝的布置和坝体分区

3.1 坝的布置

3.1.1 坝轴线选择应根据坝址区的地形、地质条件，有利于趾板和枢纽布置，并结合施工条件等，经技术经济综合比较后选定。

3.1.2 堆石坝体可建在密实的河床覆盖层上。当覆盖层内有粉细砂层、黏性土层等地质条件时，应对坝体及覆盖层进行稳定和变形分析，论证坝体建在河床覆盖层上的安全性和经济合理性。

3.1.3 趾板线的选择应按照下列要求进行：

1 趾板建基面宜置于坚硬的基岩上；风化岩石地基采取工程措施后，也可作为趾板地基。

2 趾板线宜选择有利的地形，使其尽可能平直和顺坡布置；趾板线下游的岸坡不宜过陡。

3 趾板线宜避开断裂发育、强烈风化、夹泥以及岩溶等不利地质条件的地基，并使趾板地基的开挖和处理工作量较少。

4 在深覆盖层上建坝布置趾板时，应根据地基地质特性进行地基防渗结构及与趾板以及两岸连接的布置设计；对于深覆盖层的地基防渗处理及趾板布置，经详细论证后也可采用混凝土防渗墙防渗，将趾板置于覆盖层上。

5 在施工初期，趾板地基覆盖层开挖后，可根据具体地形地质条件进行二次定线，调整趾板线位置。

3.1.4 坝址地形地质条件有缺陷时，可用趾墙（挡墙）进行人工改造，使趾墙与面板连接。

3.1.5 当在坝肩布置溢洪道时，应做好面板和溢洪道边墙或导墙的连接布置及连接周边缝设计。

3.1.6 混凝土面板堆石坝的泄水、放水建筑物布置，应考虑下列要求：

1 泄水建筑物应满足规定的使用条件和要求，建筑物运用应灵活可靠；应具备安全泄放一般洪水、设计洪水和校核洪水的泄水能力。

2 泄水建筑物的布置和型式应根据枢纽条件综合比较后确定。在地形条件有利的坝址，宜以开敞式溢洪道为主要泄水建筑物。当布置开敞式溢洪道确有困难时，也可采用泄洪隧洞，但宜采用开敞式进水口，下接泄洪洞。对于100m以上高坝，采用单一泄洪隧洞应详细比较论证；当溢洪道紧邻混凝土面板堆石坝布置时，应论证溢洪道泄洪时对坝体安全性的影响。

3 对于高坝、中坝和地震设计烈度为8度、9度的坝，不应采用布置在软基上的坝下埋管型式。低坝采用软基上的坝下埋管时，应有充分的技术论证。

4 高坝、重要工程、地震设计烈度为8度、9度的混凝土面板堆石坝，应设置放空设施。

5 岸边溢洪道布置困难，河床基岩坚硬，泄洪单宽流量不大的中、低混凝土面板堆石坝，经论证，可在坝顶设置溢洪道。

6 大坝和坝肩溢洪道以及其他有关建筑物，其地基防渗结构应相互连接，形成完整的防渗体系。

3.1.7 混凝土面板堆石坝工程，应分析研究枢纽建筑物布置与开挖，尽可能为大坝提供料源，就开挖量和填筑量的平衡进行综合比较。

3.2 坝体分区

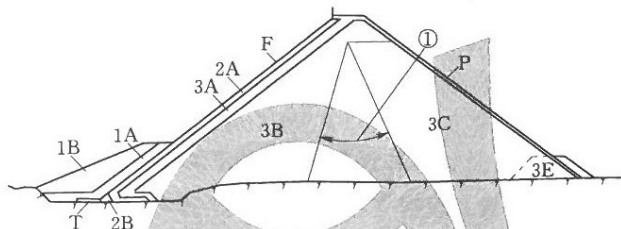
3.2.1 坝体应根据料源及对坝料强度、渗透性、压缩性、施工方便和经济合理等要求进行分区，并相应确定填筑标准。从上游向下游宜分为垫层区、过渡区、主堆石区、下游堆石区；宜在周边缝下游侧设置特殊垫层区；100m以上高坝，宜在面板上游面低部位设置上游铺盖区及盖重区。

各区坝料的渗透性宜从上游向下游增大，并应满足水力过渡

要求。下游干燥区的坝料可不受此限制。

3.2.2 用硬岩堆石料填筑的坝体可按照图 3.2.2 进行分区。设计中可结合枢纽建筑物开挖石料和近坝区可用料源，增加坝体其他分区。

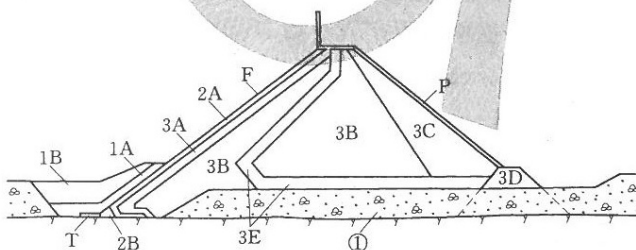
坝高 150m 以上的高坝，主堆石区与下游堆石区的分界面宜倾向下游。



1A—上游铺盖区；1B—盖重区；2A—垫层区；2B—特殊垫层区；3A—过渡区；3B—主堆石区；3C—下游堆石区；3E—排水棱体（或抛石区）；P—下游护坡；F—混凝土面板；T—混凝土趾板；①—可变动的主堆石区与下游堆石区界面，角度依坝料特性及坝高而定

图 3.2.2 硬岩堆石体主要分区示意图

3.2.3 用砂砾石填筑的坝体可参照图 3.2.3 进行分区。并根据



1A—上游铺盖区；1B—盖重区；2A—垫层区；2B—特殊垫层区；3A—过渡区；3B—主堆石（砂砾石）区；3C—下游堆石（砂砾石）区；3D—排水区；3E—排水棱体（或抛石区）；P—下游护坡；F—混凝土面板；T—混凝土趾板；①—坝基覆盖层

图 3.2.3 砂砾石坝体材料主要分区示意图

需要增减分区。

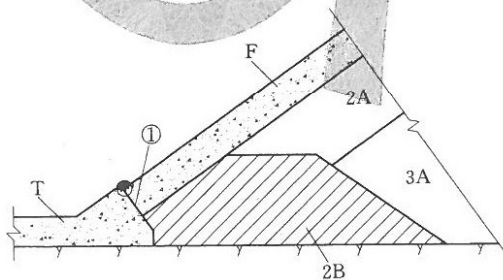
3.2.4 对渗透性不满足自由排水要求的砂砾石、软岩坝体，应在坝体上游区内设置竖向排水区，并与坝底水平排水区连接，将可能的渗水排至坝外，保持下游区坝体的干燥。竖向排水区也可与过渡区结合。

必要时可设置下游坝趾大块石棱体，起到反滤排水作用。

3.2.5 坝基为砂砾石层，或岩基中有可冲蚀的夹层，且与坝体材料的层间关系不满足反滤要求时，应在地基表面设置水平反滤过渡层。

3.2.6 坝体材料分区可通过工程类比确定。100m 以上高坝，应在坝料试验的基础上，通过技术经济比较确定。

3.2.7 垫层区的水平宽度应由坝高、地形、施工工艺和经济比较确定。当采用汽车直接卸料、推土机平料的机械化施工时，垫层水平宽度宜不小于 3m。如采用反铲、装载机等及配合人工铺料时，其水平宽度可适当减小，并相应增大过渡区宽度。垫层区可采用上下等宽布置；垫层区宜沿基岩接触面向下游适当扩大，延伸长度视岸坡地形、地质条件及坝高确定。应对垫层区的上游坡面提出平整度要求。在周边缝下游侧应设置薄层碾压的特殊垫层区，见图 3.2.7。



2A—垫层区；2B—特殊垫层区；3A—过渡区；T—混凝土趾板；
F—混凝土面板；①—周边缝

图 3.2.7 特殊垫层区示意图

3.2.8 过渡区的水平宽度不应小于 3m，且不应小于垫层区宽度。对于砂砾石坝，当设计的垫层区和主堆石（砂砾石）区之间满足水力过渡要求时，也可不设专门过渡区。

4 筑坝材料和填筑标准

4.1 筑坝材料

4.1.1 各种料物的料场勘察，应按照 SL 251 进行，查明其储量、质量及开采条件；当利用枢纽建筑物区的开挖石料时，应按料场要求对开挖区进行建筑材料方面的勘察工作。筑坝材料应按照 SL 264 和 SL 237 进行室内物理力学性质试验。

4.1.2 1 级、2 级坝的岩石室内试验，主要应包括相对密度、密度、吸水率、抗压强度和弹性模量等；100m 以上高坝，宜进行岩石矿物成分和岩矿化学分析。

1 级、2 级高坝坝料的室内试验应包括级配、孔隙率、相对密度、抗剪强度和压缩模量等；垫层、砂砾料还应进行渗透试验和渗透变形试验。100m 以上高坝或地震设计烈度为 8 度、9 度的高坝，还应进行应力应变本构模型参数试验。

应根据试验成果并结合工程类比，确定坝体各分区材料的物理力学特性指标。

4.1.3 应根据工程枢纽布置及对坝料料源和质量的要求，进行开采石料（或砂砾料）及建筑物开挖石料的料场规划及填筑规划。

4.1.4 用于主堆石区的硬岩堆石料压实后应具有自由排水性能、较高的抗剪强度和较低的压缩性。

堆石料最大粒径不应超过压实层厚度，小于 5mm 颗粒含量不宜超过 20%，小于 0.075mm 颗粒含量不宜超过 5%。

4.1.5 软岩堆石料压实后应具有较低的压缩性和一定的抗剪强度，可用于下游堆石区下游水位以上的干燥区。若用于主堆石区应进行专门论证。

4.1.6 砂砾石料压实后具有较高的抗剪强度和较低的压缩性，宜用于填筑主堆石区，应按 5.5 节规定进行坝体渗流控制设计。

4.1.7 下游堆石区在坝体底部下游水位以下部分，应采用能自由排水的、抗风化能力较强的石料填筑。150m以下的坝，下游水位以上部分采用与主堆石区相同的材料时，可适当降低压实标准，也可采用质量较差的堆石料。

4.1.8 过渡料要求级配连续，最大粒径不宜超过300mm，压实后应具有低压缩性和高抗剪强度，并具有自由排水性能。

过渡区可采用专门开采的堆石料、经筛选加工的天然砂砾石料或洞挖石渣料等。

4.1.9 垫层料应具有连续级配，最大粒径为80~100mm，粒径小于5mm的颗粒含量宜为35%~55%，小于0.075mm的颗粒含量宜为4%~8%。压实后应具有内部渗透稳定性、低压缩性、高抗剪强度，并具有良好的施工特性。

垫层料可采用经筛选加工的砂砾石、人工砂石料或其掺配料。人工砂石料应采用坚硬和抗风化能力强的岩石加工。

在严寒和寒冷地区或抽水蓄能电站，垫层料应满足排水性能要求。

4.1.10 周边缝下游侧的特殊垫层区，宜采用最大粒径小于40mm且内部渗透稳定的细反滤料，薄层碾压压实，压实标准不低于垫层区，同时对缝顶粉细砂、粉煤灰等起到反滤作用。

4.1.11 混凝土面板上游铺盖区材料(1A)宜采用粉土、粉细砂、粉煤灰等低黏性料。

上游盖重区(1B)可采用石渣料。

4.1.12 下游护坡采用块石护坡时，宜选用抗风化能力强的硬岩堆石。

4.1.13 坝体内排水体应选用耐风化和耐溶蚀的块石或砾石，并具有良好的排水能力。

4.2 填筑标准

4.2.1 垫层区、过渡区、主堆石区及下游堆石区材料的填筑标准应根据坝的等级、高度、河谷形状、地震烈度及坝料特性等因

素，并参考同类工程经验，经分析论证后确定。

4.2.2 坝体填料的填筑标准应同时规定孔隙率（或相对密度）和碾压参数。

硬岩堆石料的孔隙率不应高于表 4.2.2 的要求；砂砾料的相对密度不应低于表 4.2.2 的要求；软岩堆石料的设计指标和填筑标准，应通过试验和工程类比确定。

周边缝下游侧的特殊垫层区，应适当提高填筑标准，以减少周边缝的变形量。

表 4.2.2 硬岩堆石料或砂砾料填筑标准

| 料物或分区 | 坝高 < 150m | | 150m ≤ 坝高 < 200m | |
|-------|-----------|-----------|------------------|----------|
| | 孔隙率 (%) | 相对密度 | 孔隙率 (%) | 相对密度 |
| 垫层料 | 15~20 | | 15~18 | |
| 过渡料 | 18~22 | | 18~20 | |
| 主堆石料 | 20~25 | | 18~21 | |
| 下游堆石料 | 21~26 | | 19~22 | |
| 砂砾石料 | | 0.75~0.85 | | 0.85~0.9 |

4.2.3 坝料填筑应提出加水要求，加水量可根据经验或试验确定。

软岩料加水量，应根据其天然含水率、软化性能和碾压后的渗透性综合确定。

严寒和寒冷地区冬季施工不能加水时，应采取措施减小湿化的不利影响。

4.2.4 填筑标准应通过生产性碾压试验复核和修正，并确定相应的碾压参数。

4.2.5 对重要的高坝，或性质特殊的筑坝材料，已有经验不能涵盖的情况，其填筑标准应进行专门论证。

5 坝体设计

5.1 坝顶结构

5.1.1 坝顶宽度应根据运行需要、坝顶设施布置和施工要求确定，宜为5~10m，高坝宜适当加宽。如坝顶有交通要求时，坝顶宽度应遵照有关规定选用。

5.1.2 坝顶和防浪墙顶高程的确定应符合SL 274的规定。

5.1.3 面板顶部高程不应低于正常运用的静水位。

5.1.4 坝顶上游侧应设置混凝土防浪墙，墙高宜低于6.0m，墙顶宜高出坝顶1.0~1.2m。防浪墙与面板连接的水平缝应设止水。

防浪墙上游侧宜设置宽0.8~1.0m的检查小道。

5.1.5 防浪墙应进行稳定和强度验算。防浪墙应设伸缩缝，其止水应与面板的止水或面板与防浪墙间水平接缝的止水连接。

5.1.6 坝顶应预留沉降超高，其值应经计算并参考类似工程确定。防浪墙施工宜安排在坝体沉降基本稳定后实施。

5.1.7 防浪墙底部高程以上的坝体，宜采用与过渡料级配相近的堆石料填筑，并铺设路面。

5.1.8 坝顶应布置排水和照明设施，下游侧应设置护栏或挡墙等防护设施。

5.2 坝 坡

5.2.1 当筑坝材料为硬岩堆石料时，上、下游坝坡可采用1:1.3~1:1.4；软岩堆石体的坝坡宜适当放缓，并结合坝坡稳定计算确定；当用质量良好的天然砂砾石料筑坝时，上、下游坝坡可采用1:1.5~1:1.6。

5.2.2 在下游坝坡上设有道路时，对道路之间的坝坡可作局部调整，但平均坝坡应不低于5.2.1条的要求。

5.2.3 高坝的下游坝坡可用干砌石、大块石堆砌或摆石砌护,并使坝体具有良好的外观。也可结合生态环境及美观需要采用其他型式。

5.2.4 施工期垫层区的上游坡面应及时做好固坡处理。可视具体情况选用碾压砂浆、喷乳化沥青、喷混凝土或砂浆、混凝土挤压边墙等固坡措施。

5.3 稳定分析

5.3.1 混凝土面板堆石坝坝坡宜参照已建工程选用,可不进行稳定分析。当存在下列情况之一时,应进行相应的稳定分析:

- 1 100m及以上高坝。
- 2 地震设计烈度为8度、9度的坝。
- 3 地形条件不利。
- 4 坝基有软弱夹层或坝基砂砾石层中存在细砂层、粉砂层或黏性土夹层。
- 5 坝体用软岩堆石料填筑。
- 6 施工期堆石坝体过水或堆石坝体临时断面挡水度汛时。

5.3.2 高坝的坝体填料及坝基土体的抗剪强度宜采用三轴试验测定。中、低坝的坝体填料及坝基土体的抗剪强度可由工程类比确定。

试验用模拟料应能反映坝料的力学性质,试验条件应模拟实际工况。

粗粒料的抗剪强度与法向应力呈非线性关系,确定其抗剪强度时应计及这一特性。

5.3.3 坝体稳定计算方法及最小安全系数应按SL 274执行。

5.3.4 抗震稳定计算应按SL 203执行。

5.4 应力和变形分析

5.4.1 100m及以上高坝或地形地质条件复杂的坝,坝体应力和变形宜用有限元计算。其他的坝,可用经验方法估算坝体

变形。

有限元计算参数宜由试验测定，并参照工程经验适当修正。

5.4.2 150m 以上高坝和地形地质条件复杂的坝，应进行面板应力和变形有限元计算。在有限元分析中，宜计入环境温度变化对混凝土面板应力的影响。

5.4.3 在应力和变形有限元分析中，应反映坝体与混凝土面板接触面及面板接缝的力学特性，模拟施工填筑和蓄水过程。

5.4.4 大坝动力计算分析应按 SL 203 的规定执行。

5.4.5 150m 以上高坝，在施工过程中应结合施工质量检测资料及坝体安全监测资料，及时分析、研究计算结果的合理性，校核、修正计算模型及参数，必要时应修改设计。

5.5 坝体渗流控制

5.5.1 坝体各分区之间应满足水力过渡和渗透稳定要求。

1 垫层料应具有内部渗透稳定性，并对上游铺盖料起反滤保护作用；压实后渗透系数宜为 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$ cm/s。严寒和寒冷地区的面板堆石坝垫层料压实后渗透系数宜为 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$ cm/s。

2 过渡料对垫层料应具有反滤保护作用，并满足自由排水要求。

3 主堆石区和下游堆石区在坝体底部下游水位以下部分，应具自由排水性能。

5.5.2 当坝体主要用砂砾石填筑，并设置竖向和水平向排水区时，排水区的排水能力应保证全部渗水自由地排出坝外，竖向排水区的顶部高程宜高于水库正常运用的静水位，排水区与坝体间应满足水力过渡要求。

5.5.3 混凝土面板堆石坝存在下列情况之一时，应进行相应的渗流计算分析，渗流计算分析应按 SL 274 执行。

1 坝体临时断面挡水度汛。

2 趾板建基于覆盖层上。

3 采用悬挂式防渗系统。

5.6 抗震措施

5.6.1 确定地震区坝的安全超高时，应包括地震涌浪高度。地震设计烈度为 8 度、9 度时，安全超高应计入坝体和地基在地震作用下的附加沉降。

对库区内可能因地震引起的大体积塌岸和滑坡等而形成的涌浪，应进行专门研究。

地震涌浪高度和地震附加沉降应按 SL 203 执行。

5.6.2 地震设计烈度为 8 度、9 度时，应进行专门的抗震设计。应包括以下抗震措施：

1 应加大坝顶宽度，放缓坝坡或采用上缓下陡的下游坝坡，在坝坡变化处设置马道。

2 应在下游坝坡上部采取坡面防护和坝坡加固措施。

3 应加大垫层区及其与地基、岸坡接触带的宽度。

4 应降低防浪墙的高度。

5 部分面板压性缝内应填塞沥青浸渍木板、橡胶板等具有一定强度的可压缩填充材料。

6 分期面板施工缝缝面应垂直于面板表面，并在施工缝上下一定范围内布置双层钢筋。

7 应提高坝体堆石料特别是地形突变部位的压实密度。

5.6.3 坝体用砂砾石料填筑时，应增加排水区的排水能力。下游坝坡以内一定区域宜采用堆石填筑。

5.6.4 地震设计烈度为 8 度、9 度时，应对建在覆盖层地基上的面板堆石坝进行专门论证。

6 坝基处理

6.1 坝基及岸坡开挖

6.1.1 趾板地基开挖面应平顺，不应出现陡坎和反坡，必要时可进行削坡和回填混凝土找平处理。

6.1.2 高坝趾板建基面宜开挖到弱风化层上部，中、低坝可建于强风化层下部。如因地形地质条件限制，只能建于风化破碎或软弱岩层时，应进行专门论证，并采取相应加固处理措施。

6.1.3 堆石坝体可置于风化、卸荷基岩上。趾板下游 0.3~0.5 倍坝高范围内的坝体地基应具备低压缩性。

6.1.4 坝体地基砂砾石覆盖层是否需要挖除，应经勘察、试验和论证后确定。

6.1.5 趾板上游边坡应按永久边坡设计；趾板区下游建基面以上的开挖坡度应不陡于面板底坡。

6.1.6 堆石体地基在趾板下游 0.3~0.5 倍坝高范围内的岩质岸坡，宜开挖成不陡于 1:0.5 的坡度；岸坡很陡时，可开挖成不陡于 1:0.25 的稳定坡度或回填混凝土补坡，并设置低压缩堆石区；坝轴线上游其余部位应将妨碍堆石压实的陡坎、倒悬体清除，或用贫混凝土、浆砌石等补成平顺边坡。

坝轴线下游岸坡应按满足自身稳定条件确定。

6.2 基础处理

6.2.1 坝基处理应做到减小地基变形，提高抗剪强度，防止渗漏和地基冲蚀破坏，改善地基表面的平整度，使之符合大坝正常运行和安全运行的要求。

6.2.2 趾板的岩石地基应进行固结灌浆和帷幕灌浆处理。

6.2.3 固结灌浆宜布置 2~4 排，深度应不小于 5m。

6.2.4 帷幕灌浆应布置在趾板中部，并可与固结灌浆相结合。

帷幕灌浆设计应按 SL 274 的规定执行。

6.2.5 灌浆压力的升幅、浆液配比、吸浆量等参数，应通过试验确定。灌浆设计中应制定提高灌浆帷幕耐久性和表层基岩灌浆压力的措施。

6.2.6 趾板范围内的基岩如有断层、破碎带、软弱夹层等不良地质条件时，应根据其产状、规模和组成物质，逐条进行认真处理，可用混凝土塞作置换处理，延伸到下游一定距离，上部用反滤料覆盖，并加强趾板部位的灌浆。

6.2.7 当趾板位于岩溶地基时，应查明岩溶发育情况，并对防渗处理措施进行专门论证。

6.2.8 趾板地基如遇深厚风化破碎及软弱岩层，难以开挖到弱风化岩层时，可采取如下处理措施：

- 1 延长渗径，如加宽趾板、设下游防渗板、设混凝土截水墙等。

- 2 增设伸缩缝。

- 3 下游铺设反滤料覆盖。

6.2.9 砂砾石覆盖层处理可采用如下三种形式，并经技术经济比较后选用。

- 1 全部挖除砂砾石覆盖层，将趾板和坝体建于基岩面。

- 2 将趾板及下游一定范围内的砂砾石层挖除，趾板建于基岩面。

- 3 采用混凝土防渗墙或其他垂直防渗措施对砂砾石层进行防渗处理，趾板建于覆盖层上，用连接板将混凝土防渗墙与混凝土趾板相连接。对高坝或深厚覆盖层情况，应进行专门论证。

7 混凝土趾板

7.0.1 趾板布置可在以下三种方式中选用，宜优先选用第一种方式：

- 1 趾板面等高线垂直于趾板基准线。
- 2 趾板面等高线垂直于坝轴线。
- 3 趾板面等高线适应开挖以后的岩面。

7.0.2 位于基岩上的趾板，可结合地形、地质条件，设置必要的伸缩缝，并和面板的垂直缝错开。

趾板施工缝可根据施工条件设置。

7.0.3 趾板下岩石地基的容许水力梯度，应根据地基岩石的冲蚀性及其存在的缺陷情况确定，可按表 7.0.3 选用。

表 7.0.3 岩石地基容许水力梯度

| 岩石风化程度 | 容许水力梯度 |
|--------|-----------|
| 新鲜，微风化 | ≥ 20 |
| 弱风化 | 10~20 |
| 强风化 | 5~10 |
| 全风化 | 3~5 |

7.0.4 岩石地基上的趾板宽度应按容许水力梯度确定。高坝趾板宜按水头大小分高程段采用不同宽度。趾板的宽度应满足灌浆布置的要求，最小宽度不宜小于 3m。

也可采用在趾板下游增设防渗板的方式满足趾板地基的水力梯度要求。防渗板及其下游一定范围应采用反滤料覆盖。

7.0.5 岩基上趾板厚度宜与其连接的面板厚度相当，最小设计厚度应不小于 0.3m，并可按高程分段采用不同厚度。

7.0.6 周边缝底部止水距建基面的垂直高度宜为 0.7~1.0m。当采用高趾墙时，应在高趾墙附近设低压缩区。

7.0.7 超挖 1.0m 以上的趾板地基，在浇筑趾板前，宜先用混凝土回填至趾板建基面。

7.0.8 趾板混凝土性能应与 8.3 节的规定相同，趾板的防裂要求应与 8.5 节的规定相同。

7.0.9 基岩上趾板应采用单层双向配筋，每向配筋率宜按平板段截面面积的 0.3% 采用。

非岩基上趾板宜采用顶、底双层双向配筋，每向配筋率宜采用 0.3%~0.4%。

趾板钢筋保护层厚度宜为 10~15cm。

7.0.10 趾板应采用砂浆锚杆与基岩连接。趾板建基面附近有缓倾角结构面存在时，锚杆参数应由稳定与抵抗灌浆压力确定。

7.0.11 趾板厚度超过 2m 或采用趾墙时，应进行稳定计算和应力分析。稳定计算可采用刚体极限平衡法，应力分析可采用材料力学法，必要时应采用有限元法进行应力变形分析。

7.0.12 位于砂砾石冲积层上的趾板和防渗墙，宜采用混凝土连接板连接，混凝土连接板应在防渗墙及坝体部分面板完工后施工。

8 混凝土面板

8.1 面板的分缝分块

8.1.1 应根据面板应力和变形及施工条件进行面板分缝分块。垂直缝的间距可为 8~16m, 狭窄河谷两岸部位的垂直缝间距可减小。

8.1.2 面板垂直缝应根据地形地质条件、有限元计算成果并参照工程经验设置张性垂直缝和压性垂直缝。

垂直缝在距周边缝法线方向 1.0m 左右, 应垂直于周边缝布置成折线形式。

8.1.3 对坝高 150m 以上的高坝, 可结合面板应力变形分析成果设置水平结构缝, 并设止水。

面板施工缝的设置应考虑施工条件, 满足临时挡水或分期蓄水的要求。面板钢筋应穿过缝面。

8.1.4 分期浇筑的面板, 其分期面板顶部应低于填筑体顶部高程, 高差按不同坝高宜为 5~20m, 坝高者取大值。

8.1.5 后续面板混凝土浇筑之前, 应对已浇面板进行脱空检查, 若产生脱空, 应以低强度、低压缩性材料灌注密实。

8.2 面板厚度

8.2.1 面板厚度的确定应满足下列要求:

1 应满足钢筋和止水布置要求, 顶部厚度不应小于 0.3m。150m 以上的高坝宜加大面板顶部厚度。

2 控制渗透水力梯度不应超过 200。

8.2.2 面板厚度由顶部向底部逐渐增加, 在相应高度处的厚度可按式 (8.2.2) 确定:

$$t = t_0 + (0.002 \sim 0.0035)H \quad (8.2.2)$$

式中 t ——面板厚度, m;

t_0 ——面板顶部厚度，m；

H ——计算断面至面板顶部的垂直距离，m。

中低坝可采用 0.3~0.4m 等厚面板。

8.3 面板混凝土

8.3.1 面板混凝土应具有优良的施工和易性、抗裂性和耐久性，并应满足下列要求：

- 1 强度等级不应低于 C25。
- 2 抗渗等级不应低于 W8。
- 3 抗冻等级应按照 GB/T 50662 的规定确定。

8.3.2 面板混凝土宜采用 42.5 级中热硅酸盐水泥，也可采用 42.5 级硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。当采用其他水泥品种和强度等级时，应通过试验确定。

8.3.3 面板混凝土中宜掺用具有一定活性、较小干缩性的粉煤灰或其他优质掺合料。采用掺合料的种类及掺量应根据料源并通过试验确定。

粉煤灰品质应符合 GB/T 1596 的规定，质量等级不宜低于 II 级，掺量宜为 15%~30%。

8.3.4 面板混凝土应掺用引气剂和高效减水剂，混凝土的含气量宜控制在 4%~6%。根据需要，也可掺用调节混凝土凝结时间的外加剂。

采用外加剂的种类及掺量应通过试验确定，各种外加剂间应具有相容性。

8.3.5 面板混凝土应采用二级配骨料，石料最大粒径不应大于 40mm，面板混凝土所用原材料应满足 SDJ 207 的要求。

8.3.6 面板混凝土的水灰比，温和地区应小于 0.50，严寒和寒冷地区应小于 0.45。

溜槽输送混凝土时，坍落度应满足施工要求，溜槽入口处的坍落度宜控制在 3~7cm。

8.4 钢筋布置

8.4.1 面板宜采用单层双向钢筋，钢筋可置于面板截面中部或偏上位置，每向配筋率宜为 0.3%~0.4%，水平向配筋率可小于顺坡向配筋率。

8.4.2 100m 以上的高坝在拉应力区、周边缝附近、分期施工缝一定范围内宜配置双层双向钢筋。

高坝的压性垂直缝、周边缝及临近周边缝的垂直缝两侧宜配置抗挤压钢筋。

8.4.3 面板混凝土钢筋保护层厚度不应小于 8cm。

8.5 面板防裂措施

8.5.1 面板建基面应平整，不应存在过大起伏差、局部深坑或尖角。

8.5.2 当采用碾压砂浆或喷射混凝土作垫层料的固坡保护时，其 28d 抗压强度应控制在 5MPa 左右。

当采用挤压边墙作垫层料的固坡保护时，宜采用低弹性模量的挤压边墙，并在挤压边墙表面喷涂乳化沥青。

8.5.3 面板混凝土应优选外加剂和掺合料，降低水泥用量和用水量，减少水化热温升和收缩变形，保证面板混凝土具有较高的抗拉强度和极限拉伸值。有条件时，宜优先选用热膨胀系数较低的骨料。必要时，可掺用纤维材料。

8.5.4 面板压性缝顶部的 V 形切口深度不宜大于 5cm，底部砂浆垫不应侵占面板有效厚度，压性缝铜止水应降低鼻子高度。

8.5.5 面板混凝土宜避开在高温或负温季节施工，并应根据需要控制混凝土入仓温度。

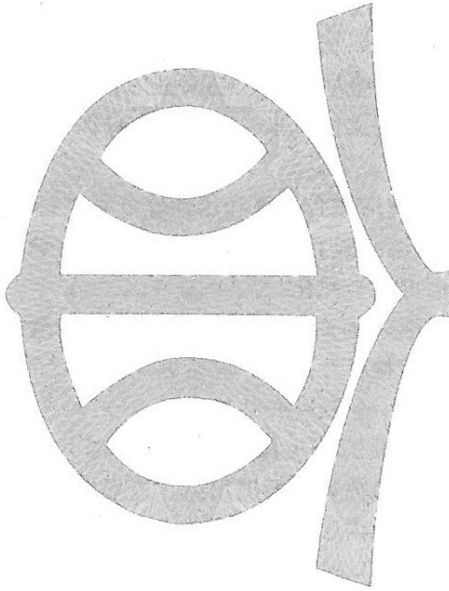
8.5.6 面板混凝土浇筑时宜按 8.1.4 条规定预留填筑面与面板顶部的高差，并设置预沉降期；对于坝高 150m 以上的高坝，宜加大分期面板顶部的填筑超高，并延长预沉降期。

8.5.7 混凝土面板表面应采取保湿和保温养护措施，直到蓄水

为止，或至少 90d。

8.5.8 面板混凝土浇筑至坝顶后，宜至少间隔 28d 再浇筑防浪墙混凝土；对于 150m 以上的高坝，间隔时间应延长。

8.5.9 当面板裂缝宽度大于 0.2mm 或判定为贯穿性裂缝时，应采取专门措施进行处理。严寒和寒冷地区及抽水蓄能电站的混凝土面板堆石坝，宜提高裂缝处理标准。



9 接缝止水

9.0.1 周边缝应按坝高设置一道或多道止水，50m 以下的坝应设置底部一道止水；也可设顶、底部两道止水，顶部止水可适当简化。50~150m 的坝宜设底、顶部两道止水。150m 以上的坝应设底、顶部两道止水，也可设底、中、顶部三道止水。

底部止水应为金属止水，宜为铜片止水。

中部止水可选用金属止水、PVC 止水等。

顶部止水可选用柔性止水、无黏性自愈性止水、或两者相结合的形式。

9.0.2 面板垂直缝应按张性缝和压性缝分别进行止水设计。

1 面板垂直缝宜设顶、底两道止水。硬拼缝和中、低坝的垂直缝顶部止水可适当简化。

2 150m 以下坝的面板压性缝可采用硬拼缝结构，地形地质条件复杂或筑坝材料特殊时，应研究面板设置部分压缩缝的必要性。

3 150m 以上坝的面板压性缝应设置部分压缩缝，其余可设为硬拼缝。压缩缝数量应根据坝高、地形地质条件及有限元计算成果确定。压缩缝内应设置具有一定强度、可压缩的填充板。

9.0.3 趾板伸缩缝可采用铜片、PVC 或橡胶片止水，应与周边缝止水构成封闭系统。

9.0.4 防浪墙与面板的水平接缝，应设置底、顶部两道止水。

9.0.5 各道止水应自成封闭的止水系统，周边缝顶部柔性填料应与垂直缝的顶部柔性填料连接，或与垂直缝的底部止水连接。

9.0.6 寒冷地区在水位变动区不应采用角钢、膨胀螺栓作为柔性填料面膜的止水固定件，宜采用沉头螺栓方法加粘结方法固定。

9.0.7 混凝土防渗墙与连接板之间的连接，面板与其他混凝土

建筑物的连接，其接缝止水应按周边缝止水设计。

9.0.8 接缝止水的构造、材料要求与施工期保护要求应按 DL/T 5115、DL/T 949 和 DL/T 5215 的规定执行。

10 分期施工与已建坝加高

10.1 分期施工

10.1.1 应根据坝址的地形条件、施工进度、导流及度汛、水库蓄水等要求，制定坝体填筑及面板浇筑的分期施工规划。

10.1.2 堆石坝体分期填筑规划应遵循下述原则：

1 垫层料、过渡料应和相邻部位的堆石料平起填筑。

2 堆石料之间的接合坡度应不陡于 $1:1.3$ ，天然砾石料应不陡于 $1:1.5$ 。

3 可在堆石区内设置运输坝料用的临时坡道。

4 坝体填筑宜平齐上升。采用临时断面挡水或度汛时，填筑高差不宜大于 40m 。

5 后续填筑时，应清除结合面的松散填料，避免大块石集中，加强结合部位的碾压。

10.1.3 坝体临时断面挡水度汛时，应满足抗滑稳定和渗透稳定要求。垫层区的上游坡面应予保护。

10.1.4 施工期堆石坝体表面过水度汛时，应满足抗滑稳定及渗透稳定要求。坝体过流表面、下游坡面和坡脚应进行保护；保护措施应根据过流面体型和水流流速、被保护材料性质等条件综合确定，必要时应进行水力学模型试验。

10.1.5 周边缝止水在施工期应设置保护措施。

10.1.6 坝体内水位高于趾板建基面高程时，应复核垫层料的反向渗透稳定，必要时应设置通向上游的临时排水系统，并适时封堵。

10.2 分期完建

10.2.1 分期完建的混凝土面板堆石坝，应按最终规模的等级和标准进行设计。

10.2.2 后期建设的坝体采用从下游面加高的方式时，应分析后期施工对已建坝体应力变形的影响，提出处理措施。

10.2.3 分期建设的混凝土面板堆石坝，应统筹各分期施工阶段的施工规划，后期无法实施或不易实施的部分，应在先期施工时按最终规模实施。

10.3 已建坝加高

10.3.1 已建混凝土面板堆石坝加高设计中，应充分论证已建坝体、坝基及防渗工程和已有止水系统的适应性，保证加高后坝体的正常运行。

在坝体加高时，原混凝土面板与坝体之间如因坝体沉降而有空隙时，应按 8.1.5 条的规定妥善处理，充填密实，保证其良好结合。

10.3.2 土质防渗体堆石坝采用混凝土面板堆石坝从下游面加高时，应研究以下问题：

1 对原坝基及坝体防渗设施的适应性及可靠性应进行论证，必要时应进行补强处理。

2 对原土质防渗体与混凝土面板之间的连接和止水应进行专门设计。

3 对加高后的坝体应进行坝坡抗滑稳定分析。

10.3.3 重力式混凝土坝或砌石坝可用混凝土面板堆石坝从下游面加高时，应研究以下问题：

1 对原坝基及坝体防渗设施的适应性及可靠性应进行论证，必要时应进行补强处理。

2 应考虑堆石压力和水压力，对原混凝土坝进行稳定和应力分析，确定混凝土面板在原坝体上支撑点的高度。

3 对原混凝土坝体与混凝土面板接合处周边缝的止水结构应进行专门设计。

11 安全监测

11.0.1 混凝土面板堆石坝的安全监测应按 SL 551 的有关规定, 根据坝的等级、坝高、坝的结构型式及地形地质条件, 遵循少而精的原则设置必要的监测设备, 对大坝施工期及运行期进行系统监测。

11.0.2 安全监测设计应满足施工期监测的需要, 取得早期监测资料, 指导施工, 优化设计。

11.0.3 监测设施的选择应符合可靠、耐久、经济、实用的原则, 力求先进, 有条件时宜实行监测自动化, 严寒和寒冷地区监测设施应采取防冻措施。监测设施应按下列原则布置:

1 内部变形监测应与外部变形监测结合布置, 全面反映大坝的工作状态。

2 外部表面位移观测点可按等距离布置。

3 内部监测至少应在最大坝高处布置一个监测横断面, 1 级、2 级坝应增加监测横断面, 并宜布置沿坝轴线的监测纵断面。

4 内部监测设施宜避免施工干扰, 并便于监测作业, 保证在恶劣气候条件下仍能进行必要项目的监测。

5 应突出变形、渗流等监测内容, 重点监测混凝土面板变形、周边缝三向变位、坝体位移、渗流量等项目。

11.0.4 应根据设计计算结果, 并参照类似工程的监测成果, 确定监测值的预计范围, 选择监测仪器的型式及量程范围。

11.0.5 1 级、2 级坝及 100m 以上高坝应设置下列监测项目, 其他的坝可适当简化。

1 坝面垂直位移和水平位移。

2 坝体内部垂直位移、顺河向水平位移和坝轴向水平位移。

3 接缝位移。

- 4 面板变形、应变。
 - 5 如果坝基有覆盖层时，应设置坝基覆盖层的沉降监测项目。
 - 6 渗流量。
- 11.0.6** 必要时可增设下列监测项目：
- 1 坝基及坝体渗透压力、坝肩绕渗。
 - 2 严寒和寒冷地区冰层对面板的推力。
 - 3 混凝土面板裂缝监测。
 - 4 土压力及接触压力。
 - 5 混凝土防渗墙的监测。
 - 6 趾墙或挡墙监测。
 - 7 地震反应。
 - 8 面板脱空监测。
 - 9 面板温度和钢筋应力。
- 11.0.7** 大坝监测资料的整编分析应按 SL 551 执行。

标准用词说明

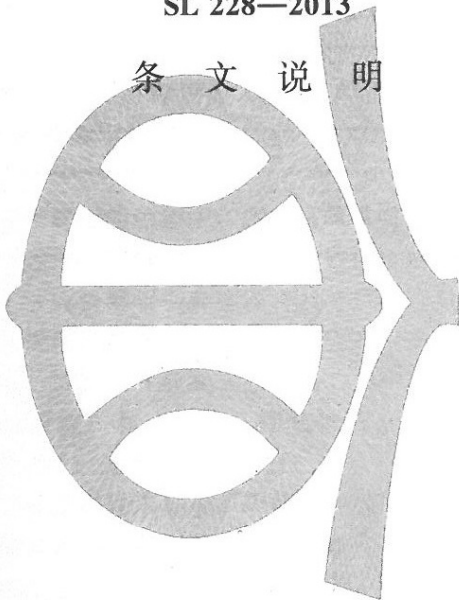
| 标准用词 | 在特殊情况下的等效表述 | 要求严格程度 |
|------|------------------|--------|
| 应 | 有必要、要求、要、只有……才允许 | 要 求 |
| 不应 | 不允许、不许可、不要 | |
| 宜 | 推荐、建议 | 推 荐 |
| 不宜 | 不推荐、不建议 | |
| 可 | 允许、许可、准许 | 允 许 |
| 不必 | 不需要、不要求 | |

中华人民共和国水利行业标准

混凝土面板堆石坝设计规范

SL 228—2013

条文说明



目 次

| | | |
|----|------------|----|
| 1 | 总则 | 35 |
| 3 | 坝的布置和坝体分区 | 37 |
| 4 | 筑坝材料和填筑标准 | 46 |
| 5 | 坝体设计 | 52 |
| 6 | 坝基处理 | 63 |
| 7 | 混凝土趾板 | 68 |
| 8 | 混凝土面板 | 71 |
| 9 | 接缝止水 | 78 |
| 10 | 分期施工与已建坝加高 | 85 |
| 11 | 安全监测 | 89 |

1 总 则

1.0.1 原标准于1998年颁布实施。近年来,随着中国水利水电建设的发展,已兴建大量混凝土面板堆石坝,并建成一批200m级的混凝土面板堆石坝,在混凝土面板堆石坝坝体布置、筑坝材料、止水结构、混凝土面板与趾板设计、坝基处理、施工方法、安全监测与质量控制等方面的关键技术都有了长足进步。为及时反映新的建设经验和成熟的技术研究成果,按照《水利技术标准编写规定》(SL 1—2002)的要求,对原标准进行修订。

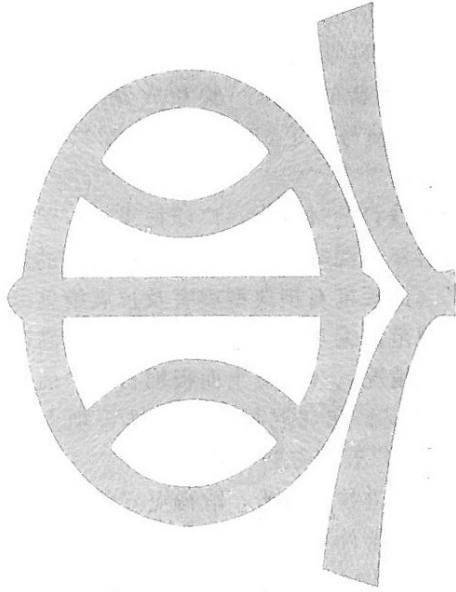
本标准在修订的过程中,广泛征求各有关单位对原标准的意见,总结了近年来混凝土面板堆石坝建设中的经验教训,对重要问题开展了《面板堆石坝典型震害及抗震措施分析研究》、《面板堆石坝设计规范修编几个基本问题研究》、《高混凝土面板砂砾石坝设计及运行情况》、《混凝土面板堆石坝中面板应力性状及其评估模式分析研究》和《混凝土面板堆石坝主要设计技术进展》(1999~2010年)五个专题研究。

为了不断推进技术进步,取得更好的安全经济效果,设计中可根据坝址具体条件和坝的特点,对某些专题进行深入论证或试验研究,提出成果,报上级主管部门审定后采用。

1.0.2 混凝土面板堆石坝级别按《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL 252)进行划分。本标准主要是在总结国内外200m级高度及以下同类坝经验的基础上编制的,主要适用于1级、2级、3级及3级以下高坝的设计;对于坝高200m以上的坝,已经建成的国内仅有水布垭工程,其经验尚不足以涵盖各种地形地质条件、筑坝材料特性与施工条件。因此,对于200m以上高坝及特别重要和复杂的工程,仍应对坝料分区、面板的应变和堆石坝体变形控制、面板混凝土的耐久性、接缝止水结构设计及坝基

处理等问题，依其特点专门论证。

1.0.6 考虑到本标准所引用的标准都会修订，在列举引用标准时删去了年号，保证所引用标准为最新版本。



3 坝的布置和坝体分区

3.1 坝的布置

3.1.1 混凝土面板堆石坝对坝基适应性强，但由于趾板宽度窄，地基承受的水力梯度较大，坝基渗控线沿趾板线布置，因此，坝体布置重点考虑趾板的要求；此外，由于坝的平面尺寸较大，而泄水、引水发电建筑物对地质条件要求较高，若坝轴线有利于泄水和引水发电建筑物的布置，将节省混凝土用量，降低工程造价，因此，坝轴线应经技术经济综合比较后选定。

河道型水库面板堆石坝轴线一般布置为直线，根据地形地质条件，在两坝肩也可采用折线或曲线连接，如巴山坝（坝高155m）坝轴线为折线；抽水蓄能电站水库面板堆石坝轴线根据需要多采用转折直线或弧线连接（如十三陵、琅琊山、大坳等），对转折处面板、趾板、接缝止水等的连接过渡要进行专门设计。

3.1.2 河床覆盖层的变形模量一般比碾压堆石体的变形模量大，只要覆盖层密实，将堆石坝体建在覆盖层上是经济合理的。覆盖层内有粉细砂层和黏土层时，应进行稳定和变形分析，必要时可调整坝坡，论证堆石坝体建在覆盖层上的经济合理性。

3.1.3 近几年来，国内外面板堆石坝工程对趾板地基要求有所放宽，为趾板线的选择留有了较大余地。例如，哥伦比亚的萨尔瓦兴娜坝（Salvajina，坝高148m，1983年建成）的部分残积土地基，澳大利亚的里斯坝（Reece，坝高122m，1986年建成）的坝肩强风化岩石地基，中国的株树桥坝（坝高78m，1990年建成）河床部分趾板的风化板岩地基及白云坝（坝高120m，1998年建成）两岸坝段部分强风化岩石地基等。

随着在深厚砂砾石覆盖层上修建面板堆石坝的发展，一些高坝把趾板置于砂砾石层上，采用混凝土防渗墙对地基作防渗处理，用趾板和连接板将坝体面板及地基防渗墙连接起来，连同面

板接缝止水和基岩帷幕灌浆,构成完整的防渗系统。例如,摩洛哥的本·穆罕默德坝(Mohammed Ben,坝高40m,砂砾石地基,1981年建成),智利的圣塔扬那坝(Santa,坝高110m,坝基砂砾石层厚30m,防渗墙插入基岩,1995年建成);中国的柯柯亚坝(坝高41.5m,坝基砂砾石层厚37.5m,1982年建成),梅溪坝(坝高40m,覆盖层30m,1997年建成),梁辉坝(坝高35.4m,覆盖层26m,1997年建成),岑港坝(坝高27.6m,覆盖层39m,1997年建成),九甸峡坝(坝高136.5m,覆盖层深56m,2008年建成),那兰坝(坝高109m,覆盖层深20.3m),察汗乌苏坝(坝高107.6m,覆盖层深40m),多诺坝(坝高108.5m,覆盖层厚41.7m),达拉河坝(坝高65m,覆盖层深30m),汉坪嘴坝(坝高58m,覆盖层深46m)等。在覆盖层上采用防渗墙对地基进行防渗处理的高面板堆石坝,其技术还有待进一步提高和发展。

在各种不同的河谷地形的坝址,均可修建面板堆石坝,多数坝河谷宽度与坝高的宽高为2~3;部分工程位于宽阔河谷,例如泰国的考兰坝(Khao Leam,坝高130m,1984年建成)为7.7,巴西的阿里亚坝(Foz do Areia,坝高160m,1980年建成)为5,中国的天生桥一级坝(坝高178m,1999年建成)为6.5;也有工程位于狭谷坝址,例如哥伦比亚的格里拉斯坝(Golillas,坝高125m,1978年建成)为0.86,中国的龙首二级(坝高147m)为1.3,白云(坝高120m)为1.66,古洞口一级(坝高118m)为1.64。当然,有条件时,选择两岸比较对称,并且两岸岸坡地形较为平顺的坝址,有利于施工碾压的质量控制和坝的变形安全。

3.1.4、3.1.5 当坝址地形地质条件受到限制,存在缺陷时,可采用趾墙(挡墙)进行改造,使面板堆石坝布置合理、安全可靠。例如委内瑞拉的雅肯布坝(Yacambu,坝高162m,1996年建成),中国的小干沟坝(坝高55m,1990年建成),公伯峡坝(坝高132.2m,2004年建成),设置了趾墙改造地形,均取得了

良好的效果。利用坝肩溢洪道或电站进水渠的导墙（或边墙）作为岸边趾墙，设置周边缝，与面板连接，已在一些面板堆石坝工程中采用，如三板溪面板堆石坝（坝高 185.5m，2006 年建成），坝轴线上游面板与左岸高趾墙周边缝下最大堆石高度为 39.175m；公伯峡面板堆石坝（坝高 132.2m），左岸坝肩与溢洪道间趾墙高 38m，右岸坝肩与电站引水渠间趾墙高 50m。

3.1.6 澳大利亚塔斯马尼亚水电局已修建 13 座面板堆石坝，漏水量都很小，从来没有放空水库检修，但设计仍利用导流洞堵头设置放空管，万一使用时可炸开连接螺丝，打开钢闷盖放水，称可爆堵头。

中国万安溪面板堆石坝（坝高 93.8m，1995 年建成），施工中取消了原设计专设的放空洞，必要时利用发电引水洞上留下的施工支洞，打开闷头放水。天生桥一级面板堆石坝（坝高 178m），坝高库大，是红水河梯级的龙头电站，在右岸设置了放空洞，并参与后期导流。水布垭面板堆石坝（坝高 233m），在右岸设置了放空洞。董管坝（坝高 150m，2009 年建成），也在右岸设置了放空洞。东津（坝高 85.5m，1995 年建成），白云面板堆石坝（坝高 120m，1998 年建成）设置了放空隧洞。松江河梯级的松山（坝高 78m）、小山（坝高 85.5m，1998 年建成）两坝，采用了发电引水隧洞作为放空的后备措施。

中国株树桥面板堆石坝（坝高 76m，1990 年建成）在 2000 年放空检修时，利用发电引水洞将库水位降低，加高原上游围堰由发电引水洞导流，争取了 3 个月的检修时间。

巴西已建的面板堆石坝多是高坝大库工程，例如阿里亚坝（Foz do Areia，坝高 160m，1980 年建成），塞格雷多坝（Segredo，坝高 145m，1991 年建成），辛戈坝（Xingo，坝高 150m，1994 年建成），导流洞导流后即封堵不利用，没有专设放空水库的设施，他们认为面板堆石坝一般不会有放空水库进行处理的可能性，如有意外处理的要求，可由潜水员或采取其他措施进行检修。例如辛戈坝、塞格雷多坝，除在面板上游面底部周边缝附近

及其以下设置铺盖（采用土料或粉细砂）外，也同时在周边缝下游侧设置特殊垫层区，对万一渗漏造成粉细砂流动时起到反滤保护作用，属反滤型安全设施。

鉴于面板堆石坝坝体碾压比较密实，其变形量在施工期已大部分完成，竣工蓄水运行后剩余变形量小，且在头几年基本稳定，因此，对于80m以下坝当岸边泄洪设施难以布置，且河床基岩较好，泄洪流量不大等特定条件下，在坝顶设置正常的或非常的溢洪道是允许的，以便于枢纽整体泄洪布置，并强调要经主管部门审定，以确保安全。可资参考的工程实例，国外有印度尼西亚的巴吐皮西坝（Batubesi，坝高32m），在坝顶设置了自溃式非常溢洪道，设计最大泄流量 $800\text{m}^3/\text{s}$ ，单宽流量约 $11\sim 13\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ；澳大利亚的克罗蒂坝（Crotty，坝高82m，1990年建成），设坝顶溢洪道，过水宽度12.2m，设计最大泄流量 $245\text{m}^3/\text{s}$ ，单宽流量 $20\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ，1991年7月建成后曾溢流，尚未经设计流量检验，大坝观测表明其运行性状良好。近年来，中国已建成三座溢流混凝土面板堆石坝，分别是榆树沟坝（坝高67.5m，2001年建成），设计最大泄流量 $420\text{m}^3/\text{s}$ ，单宽流量 $21\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ；桐柏下库坝（坝高70.6m，2007年建成），设计最大泄流量 $496\text{m}^3/\text{s}$ ，单宽流量 $19.08\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ；大城水库（坝高42m，2007年建成），设计最大泄流量 $200\text{m}^3/\text{s}$ ，单宽流量 $25\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。

3.1.7 面板堆石坝工程中的土石方挖填平衡，是论证枢纽布置技术经济效果很重要的一个方面，日益为人们所重视。国外的面板堆石坝工程，很注意枢纽建筑物大开挖有效挖方的充分利用和土石方的挖填平衡，大量或全部使用枢纽建筑物开挖料筑坝，以取得更好的技术经济效果。国内工程也日益注意到这方面的特点，并在实际工程中体现。

巴西的阿里亚、塞格雷多和辛戈等3座高面板堆石坝，枢纽布置都很紧凑，都对岸边溢洪道、电站尾水渠及电厂区采用大开挖设计方案，将开挖石料直接上坝。阿里亚坝与辛戈坝都在两岸

分别布置溢洪道和引水发电建筑物，塞格雷多坝则是溢洪道和电站共用一个大进水渠，进而分成两个进水口。电站厂区都是半露天式的。阿里亚坝坝体填筑方量为 1400 万 m^3 ，其中 1250 万 m^3 来自两岸建筑物有效开挖量，平均运距不足 1.5km，坝址岩体是玄武岩，其中以块状玄武岩为主占 75%，抗压强度达 235MPa，软化系数 0.80；还有玄武角砾岩夹层占 25%，抗压强度 37MPa，软化系数 0.67。除垫层料用块状玄武岩轧制外，其他都是使用上述两者混合料。塞格雷多坝石料特点和上述类似，坝体堆石 720 万 m^3 ，其中 690 万 m^3 来自有效挖方。辛戈坝坝体 1270 万 m^3 ，也是主要利用建筑物开挖的花岗片麻岩石填筑。为了使开挖料尽量满足填筑要求，施工中和设计方面配合，还对堆石分区和施工填筑分区进行调整，取得更好的效果。中国天生桥一级水电站面板堆石坝，坝体积 1780 万 m^3 ，溢洪道布置在右岸，开挖量 1764 万 m^3 ，其中 1520 万 m^3 用于筑坝和加工混凝土用骨料，不足部分由溢洪道右侧山沟内补充料场供应，取得了良好效果。中国十三陵抽水蓄能电站上池面板堆石坝，坝体方量 255 万 m^3 ，全部用池盆开挖料填筑，其中包括大量风化安山岩石料的利用，也取得良好的技术经济效果。

3.2 坝体分区

3.2.1 坝的分区应充分利用开挖料和近坝区料源，因材设计、合理分区。对各种开挖料岩土性质及各种地形条件下，大坝运行性能的正确理解，是做好坝体分区设计的基础。从安奇卡亚坝 (Alto Anchicaya, 坝高 140m, 1994 年建成) 开始，在面板上游面下部设土质铺盖，防渗效果好，铺盖宜用无黏性或低黏性土料。

3.2.2 原标准规范列出的硬岩坝体堆石主要分区图，经近 10 余年的工程实践，该分区图已基本定型，可供设计参用，规范修编将原来的统一用语进行了增删处理。

对于坝高 150m 以下面板堆石坝，按照原标准设计，实践证

明其建设是安全的，如芹山（坝高 122m，2000 年建成）、珊溪（坝高 132.5m，2001 年建成）、白溪（坝高 124.4m，2001 年建成）、龙首二级（坝高 147m，2006 年建成）等。自天生桥一级、阿瓜密尔帕出现问题后，设计才重视下游堆石体对坝体变形的影响。萨尔瓦兴娜（Salvajina，坝高 148m，1984 年建成）的坝体分区值得借鉴。因此，总结实践经验，本条建议坝高 150m 以上的高坝，主堆石区与下游堆石区的分界面宜倾向下游，以指导后续工程设计。国内外 5 座已建坝高 150m 以上混凝土面板堆石坝的断面分区见图 1~图 5。

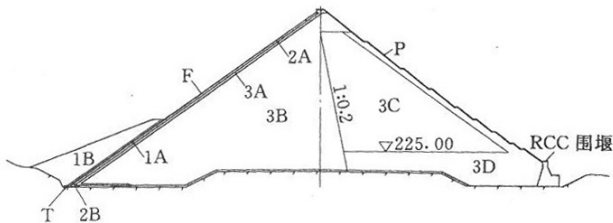


图 1 水布垭面板堆石坝断面分区图

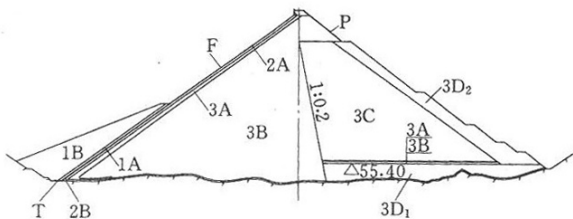


图 2 巴贡面板堆石坝断面分区图

3.2.3 混凝土面板砂砾石坝日益增加，根据 20 多年来的实践经验，在此列出了其坝体材料分区图，供设计参考用。其中竖向排水区两侧 3B 区，可以采用同一种砂砾石料，也可在下游侧采用质量较低的料，根据料源及坝的运行要求设计。

国内已建混凝土面板砂砾石坝中，砂砾石料在坝体内的使用

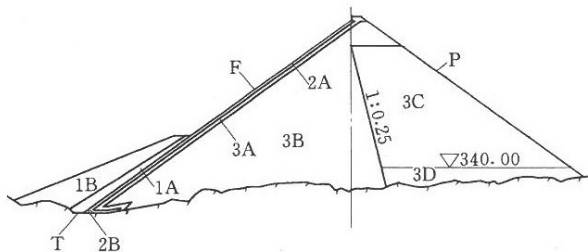


图3 三板溪面板堆石坝断面分区图

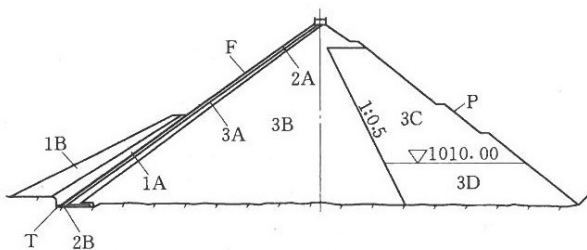


图4 洪家渡面板堆石坝断面分区图

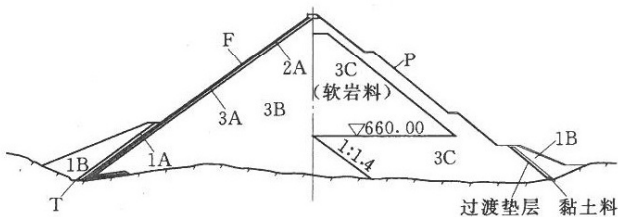


图5 天生桥一级面板堆石坝断面分区图

分区主要有以下两种：

(1) 在坝体大部或坝轴线上游一定范围使用砂砾石，根据砂砾石的透水性，设置专门的烟囱式排水区，并适当放缓上游坝坡，如黑泉（坝高124m）、乌鲁瓦提（坝高138m）、吉林台一级（坝高157m）、察汗乌苏（坝高110m）等工程。

(2) 将砂砾石坝包裹在堆石之中, 使垫层料下游侧的上游堆石区起排水作用, 而维持砂砾石料区的干燥状态, 并维持较陡的上下游坝坡, 如珊溪(坝高 132.5m)、滩坑(坝高 161m)、白水坑(坝高 101.3m)、巴山(坝高 155m) 等工程。

下游堆石 3C 区, 可结合料源条件布置, 但尽量采用堆石料。

3.2.4 砂砾石坝体或软岩坝体如不能满足自由排水要求时, 要设置坝内竖向和水平向排水区, 作为一项重要的渗流控制措施。砂砾石坝体竖向排水区可布置在主砂砾料区靠近过渡区或与过渡区结合。

在国外已建成的混凝土面板砂砾石坝中, 如委内瑞拉的雅肯布坝, 哥伦比亚的萨尔瓦兴娜坝、格里拉斯坝, 澳大利亚的克罗蒂坝设有专门的竖向和水平向排水系统, 这 4 座坝中, 克罗蒂坝的竖向排水紧靠在垫层区下游面, 而其他 3 座都处在上游坝体的偏上游部位。智利的圣塔扬娜坝、普卡罗坝 (Puclaro, 坝高 80m), 阿根廷的皮其皮克利弗坝 (Pichi PicunLeafu, 坝高 50m), 都因砂砾石料的渗透系数不小于 $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$, 可以自由排水而未设专门的坝内排水系统。墨西哥的阿瓜密尔巴坝 (Aguamilpa, 坝高 187m, 1993 年建成) 原设计有竖向排水, 因天然冲积料的最小渗透系数为 $2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 量级, 且小于 0.075mm 的细粒含量少于 2%。而在实施中予以取消, 其上游区为砂砾石, 下游区为堆石, 两区之间还设一堆石过渡区, 即堆石均为排水区。国内已建的小干沟坝, 排水区设在垫层区下游坝体内, 未设过渡区, 运行良好。由于沟后坝(坝高 70m) 的失事教训, 为慎重起见, 砂砾石为主要填筑料的坝体, 均设有内部排水系统。

下游堆石区渗透性能较差时, 可在下游堆石区底部增设排水区, 如水布垭面板堆石坝等工程。

3.2.6 由于混凝土面板堆石坝目前仍以经验性设计为主, 一般均以工程类比确定坝的结构设计, 故规定坝体分区一般通过工程类比确定, 而对 1 级、2 级 100m 以上的高坝要通过试验和应力

应变分析，料物平衡等，进行技术经济比较后确定。湖南株树桥坝，下游坝体采用坝区附近的风化板岩填筑，以代替原定采用的距坝 8km 外的灰岩料，虽然坝坡放缓到 1 : 1.7，但仍比使用远处的灰岩料经济。

3.2.7 垫层区的水平宽度，当采用反铲、装载机等或配合人工铺料条件下，可采用 1~2m。这是考虑近期国内外的实践经验而补充的。采用自卸汽车卸料，推土机铺料的施工方法，其最小水平宽度需要 3m 左右。巴西塞格雷多坝，设置了水平宽度为 0.5m 的细垫层区，而将过渡区扩大为 5m；澳大利亚的默奇松坝（Murchison，坝高 94m，1982 年建成）、巴斯塔延坝（Bastyan，坝高 75m，1983 年建成）、利斯顿等，垫层区宽度采用 1m，过渡区宽度 5m；中国的天荒坪抽水蓄能电站下库坝（坝高 95m，1998 年建成），垫层宽度也采用 1m，东津坝垫层宽度采用 2.5m，过渡区 4.0m。应根据坝料特性、施工及工程运行条件等，综合分析确定。垫层区宽度一般可采用上下等厚布置。

垫层区在与地基接触面处宜向下游适当扩大延伸，一般延伸 3~5m。当岸坡有可冲蚀性材料填充的断层裂隙等不利地质条件时，其延伸长度视地质情况而定。如澳大利亚的利斯顿，就沿断层一直铺到下游面坡脚。

3.2.8 为满足施工要求，过渡区的水平宽度不小于 3m。对垫层料、过渡料及主堆石料要求内部渗透稳定。对于有的工程砂砾石体之间能够满足水力过渡要求时，可不设专门的过渡层，但需限制界面上不能有粗颗粒集中现象。

4 筑坝材料和填筑标准

4.1 筑坝材料

4.1.1 本条是原标准 4.1.1 条的保留条文。仅将所遵循的规范《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》及《水利水电工程岩石试验规程》和《土工试验规程》修改为现行版本。

面板堆石坝是当地材料坝，料源选择关系到坝体本身的质量、安全度汛与总进度以及投资效果。一些面板堆石坝工程，由于坝料料场勘探精度不够，以致延误了工期，增加了投资，为此，必须给予高度重视，充分做好料场勘探和坝料试验工作。料场勘察辅以平洞，不仅能收集地质资料，还可取建筑物区开挖石渣料作试验。

4.1.2 本条规定了筑坝材料物理力学性质试验的试验内容，通过试验获得的成果是正确设计面板堆石坝的重要依据，但还应结合工程类比，合理确定各种坝料的设计指标。

4.1.3 面板堆石坝设计应注意在枢纽建筑物布置区内，结合研究充分利用开挖石料筑坝，尽量做到挖填平衡和提高开挖料的利用率及直接上坝率，以取得更好的技术经济效果。

4.1.4 本条为原标准 4.1.4 条和 4.1.5 条的合并条文，在文字上做了精简后修改而成。

对主堆石级配最大粒径不超过压实层厚度和小于 5mm 颗粒含量不宜大于 20% 的规定，使堆石料级配范围可以大体确定。但接近铺层厚度的大颗粒不能集中成片，以免影响压实效果。

4.1.5 软岩用于主堆石区时要作专门论证，并提出了部分要求和措施。

对软岩堆石坝，国外如美国的贝雷坝（Bailey，坝高 95m，1979 年建成）、印尼的希拉塔坝（Cirata，坝高 125m，1987 年建成）、澳大利亚的小帕拉坝（Little Para，坝高 53m，1977 年

建成)等,主堆石区用软岩填筑,在坝上游或中间部位设有内部排水系统,一般都把软岩置于下游干燥区。中国的株树桥、公伯峡、天生桥一级、十三陵上池坝(坝高70.5m,1998年建成)、大坳和鱼跳等,都是将软岩置于坝的下游区,部分工程在坝底设一水平排水层与上游堆石体连接。软岩堆石料不要求一定级配,适当加水薄层碾压,可达到高密度,并具有一定抗剪强度和较低的压缩性。

4.1.6 面板堆石坝实践中,砂砾石料的利用日益增多。国外已建成的墨西哥阿瓜密尔巴坝(Aguamilpa,坝高187m),委内瑞拉的雅肯布坝(Yacambu,坝高162m),哥伦比亚的萨尔瓦兴娜坝(Salvajina,坝高148m)、格里拉斯坝(Golillas,坝高125m)、智利的圣塔扬那坝(Santa,坝高113m)等,都是用砂砾石作坝的主体材料;澳大利亚的克罗蒂坝,在坝面修建溢洪道,也用砾石填筑。上述坝运行情况都良好。中国已建的100m以上高面板堆石坝中,有乌鲁瓦提(坝高138m)、古洞口(坝高120m)、黑泉(坝高123.5m)、珊溪(坝高132.5m)、白溪(坝高124.4m)、察汗乌苏(坝高110m)等,其坝体大部分或部分采用砂砾石筑坝,足见砂砾石也是面板堆石坝的优良筑坝材料。但是青海沟后面板砂砾石坝的失事,更加明确地表现出天然砂砾石料变异性大,渗透稳定性和抗冲蚀能力较堆石料差,以及易沿坡面滚动等特点。为此要采取有效的渗流控制措施,并对可能过流的表面作有效的防护,按本标准5.5的规定做好坝体渗流控制设计。

4.1.7 下游堆石区可以使用与主堆石区相同的材料,但采用较低的压实标准;也可使用质量比主堆石料差的料物,特别是利用各种开挖石渣料。但对于150m以上的高坝的堆石料不宜降低压实标准和采用较差的堆石料。

4.1.9 将原标准4.1.10条文中的“粒径小于5mm的颗粒含量宜为30%~50%,小于0.075mm的颗粒含量不宜小于8%”改为“粒径小于5mm的颗粒含量宜为35%~55%,小于

0.075mm 的颗粒含量宜为 4%~8%”。提高小于 5mm 颗粒含量的要求,是为了确保垫层料自身渗透稳定并起第二道防渗作用。株树桥面板堆石坝出现渗透破坏,主要原因是垫层料采用碎石掺天然砂,小于 5mm 颗粒含量为 30%,由于施工时掺和不匀,放空水库检修时,部分垫层料中小于 5mm 颗粒含量仅为 16%,加之缺乏过渡料的保护,坝体产生渗透破坏。近期修建的面板堆石坝小于 5mm 颗粒含量的要求都有所提高。如水布垭大坝的垫层料中粒径小于 5mm 颗粒含量为 35%~50%,小于 0.074mm 颗粒含量为 4%~7%;天生桥一级坝粒径小于 5mm 的颗粒含量为 35%~55%,小于 0.1mm 的颗粒含量为 4%~8%;三板溪坝粒径小于 5mm 的颗粒含量为 35%~50%,小于 0.075mm 的颗粒含量为 4%~8%;吉林台一级坝粒径小于 5mm 的颗粒含量为 35%~55%,小于 0.1mm 的颗粒含量小于 8%。引子渡坝粒径小于 5mm 的颗粒含量为 35%~55%,小于 0.075 mm 的颗粒含量小于 8%;白溪坝粒径小于 5mm 的颗粒含量为 35%~55%。

4.1.10 为减轻因周边缝变形过大,引起止水失效而大量渗水,应特别注意直接位于周边缝下游侧的特殊垫层区选料和压实。一方面碾压密实后变形较小,可减轻周边缝止水结构的负担,以保持其有效性;另一方面,对周边缝表面铺设的粉细砂、粉煤灰等低黏性材料起反滤作用,截留并淤堵于张开的接缝中,使接缝自愈而减少渗流量,为此提出的专门要求。

近期修建的一些坝,将周边缝铜止水片下面的沥青砂垫改为水泥砂浆垫,不需要在特殊垫层区上游坡面再设置粒径小于 20mm,加 2%~3%水泥的小区。例如国外的塞格雷多、辛戈、阿瓜密尔巴等高坝及中国的天生桥一级高坝,均未设此特殊垫层的小区,故本标准未列此项。

4.1.12 本条是原标准 4.1.13 条的保留条文,在文字上作了精简后修改而成。

4.1.13 本条是原标准 4.1.14 条的保留条文,删除了“如设置水平向和竖直向”,在文字上作了精简后修改而成。说明了坝体

内排水体的要求。

4.2 填筑标准

4.2.2 本条为原标准 4.2.2 条的修改条文。增加了对坝高的限定，并分两级制定硬岩堆石料和砂砾料填筑标准；删除原标准中“设计应同时规定坝料级配范围”的要求。

随着面板堆石坝高度的增加，下游堆石区的变形与堆石料的流变对坝体变形影响呈一定的正相关性，这一现象应引起注意。故本条以 150m 坝高为界，分两级制定坝料填筑标准。

从以往经验看，坝料级配范围与料源种类及岩性密切相关，差异很大，不宜在设计阶段作出明确规定。故删除原标准中“设计应同时规定坝料级配范围”的要求。

干密度检测值的标准差为施工质量评定标准，故不在本规范中规定标准差。

国内已建工程硬岩堆石料（或砂砾石料）岩性、密度、孔隙率、细料含量及碾压参数见表 1。

表 1 国内已建工程堆石料填筑参数表

| 工程名 | 岩性 | 干密度 (g/cm ³) | 孔隙率 (%) | 碾压参数 | | | |
|-------|---------------|-----------------------------|------------|------------|----------|------------|-----------|
| | | | | 层厚 (cm) | 碾压 遍数 | 洒水量 (%) | 碾重 (t) |
| 水布垭 | 茅口组灰岩、 开挖料 | 2.18 | 19.6 | 80 | 8 | 15 | 25 |
| | 栖霞组灰岩、 开挖料 | 2.15 | 20.7 | 80 | 8 | 10 | 25 |
| 三板溪 | 凝灰岩、 凝灰质砂岩 | 2.17 | 19.33 | 80 | 8~10 | 20 | 20~25 |
| 洪家渡 | 灰岩 | 2.22 | 20.02 | 80 | 8 | 10~20 | 25 |
| 天生桥一级 | 灰岩、砂泥岩 | 2.16 | 22 | 80 | 6 | 20 | 18 |

表 1 (续)

| 工程名 | 岩 性 | 干密度 (g/cm ³) | 孔隙率 (%) | 碾压参数 | | | |
|------|---------|-----------------------------|------------|------------|----------|------------|-----------|
| | | | | 层厚 (cm) | 碾压 遍数 | 洒水量 (%) | 碾重 (t) |
| 吉林台 | 凝灰岩、砂砾石 | 2.18 | 22~24 | 80 | 8 | | 18 |
| 紫坪铺 | 灰岩、砂卵石 | 2.16 | 20.6 | 80 | 8~10 | 10~15 | 26 |
| 乌鲁瓦提 | 砂卵石 | 2.29 | | 80~100 | 8 | | 20 |
| 公伯峡 | 花岗岩、片岩 | 2.15 | 20 | 80 | 8~10 | | 15 |
| 引子渡 | 灰岩 | 2.15 | 20 | 80 | 8 | 15~20 | |
| 白溪 | 凝灰岩 | 2.15 | 20 | 80 | 6 | 15 | 20 |
| 桐柏 | 凝灰岩、花岗岩 | >1.99 | <23 | 80~90 | 8 | 10~20 | 16~20 |

软岩堆石料根据其碾压特性和坝体变形要求，其填筑标准也有必要适当提高。对于坝高<150m的面板堆石坝，其上游区的软岩堆石料孔隙率宜为18%~22%，下游区的软岩堆石料孔隙率宜为19%~24%；对于150m≤坝高<200m的面板堆石坝，其上游堆石区不宜采用软岩堆石料，下游堆石区采用软岩堆石料时，其孔隙率宜为17%~20%。

具体的软岩堆石料设计指标和填筑标准，应通过试验和工程类比慎重确定。

4.2.3 软岩堆石压实后，渗透系数一般小于 1×10^{-3} cm/s，任意加水时，会产生孔隙水压力，不易压实，此时宜按细料最优含水量即土体压实法施工。渗透系数不小于 1×10^{-3} cm/s的堆石可按硬岩堆石施工法施工，按需要加水。

寒冷地区冬季施工加水易引结冰或冻胀现象，应注意。

4.2.4 本条为原标准4.2.4条的修改条文。删除原标准中“施工控制标准方面”的要求。

由于目前修建堆石坝已有相当多的经验，也积累了很多碾压试验及填筑质量检查资料，按经验初步选定填筑标准，并在施工前期通过碾压试验复核和必要的修正，确定填筑施工参数，一般

不会有很大出入，没有必要在设计阶段进行施工性的现场爆破和碾压试验。

4.2.5 考虑到有些重要的高坝或性质特殊的石料，已有经验不能涵盖，而各方面疑虑较多时，也可在设计阶段进行现场爆破和碾压试验，论证筑坝材料的适用性，并提供较为符合实际的设计参数。确定碾压参数时，要充分利用碾压试验得到的碾压遍数与沉降（或沉降率）关系曲线，在技术经济合理的条件下，获得更好的压实效果。

5 坝体设计

5.1 坝顶结构

5.1.1 坝顶宽度影响坝体工程量。在满足使用要求的前提下，坝顶宽度愈小愈经济。坝顶宽度应满足布置高压电缆沟或观测电缆沟、灯柱和排水沟等的需要。面板混凝土浇筑平台的最小宽度为9m或更宽，视使用的施工设备和施工布置而定。国内已建100m以下的工程，坝顶宽度一般为5~8m，150m以上的坝或有抗震要求的高坝坝顶宽度一般为10~12m，为此，对不同坝高作了规定。如天生桥一级（坝高178m）、水布垭（坝高233m）大坝坝顶宽度为12m，三板溪（坝高185.5m）、洪家渡（坝高179.5m）坝顶宽度则分别为10m、11m。建于强震区的吉林台一级（坝高157m，设计地震烈度为9度）、紫坪铺（坝高156m，设计地震烈度为8度）、乌鲁瓦提（坝高138m，设计地震烈度为8度）坝顶宽度为12m，黑泉（坝高123.5m，设计地震烈度为8.2度）坝顶宽度为10m。

如有交通要求时，坝顶宽度尚须符合道路标准。

5.1.2 坝顶高程是面板堆石坝设计的重要内容，故增加了此条文。

5.1.3 本条为新增条文，内容由原标准5.1.2条中的“防浪墙的底部高程宜高于正常蓄水位”修改而来。

根据《碾压式土石坝设计规范》（SL 274）对防渗体顶高程的规定将原标准防浪墙底部高程“宜高于水库正常蓄水位”修订为“面板顶部高程不应低于正常运用的静水位”。

5.1.4 为减少防洪超高和风浪超高所需的坝体高度，常用高度较大的防浪墙，以减少堆石的填筑量和面板的面积。防浪墙过高，墙本身和坝顶堆石料填筑的费用都将增加，要与减少堆石填筑量节省的费用比较，地震区防浪墙高度还要考虑其抗震安全，以确

定安全经济的墙高。从质量要求及安全运行考虑，防浪墙高度一般为4~6m，但考虑一些工程超高较小，不一定达到4m以上，因此修订为防浪墙的高度宜低于6m，墙顶高出坝顶1.0~1.2m。

原标准规定防浪墙上游侧底部一般留出不小于宽0.6~1.0m的人行小道，以利检查行走，必要时可在其上游侧设护栏。考虑到0.6m略显偏窄，故修订为0.8~1.0m。

5.1.5 为适应坝体变形，防浪墙应设伸缩缝，缝间埋设止水。防浪墙的止水必须与面板的止水连接，形成完整的防渗体系。

5.1.6 为保证大坝运行期沉降稳定后，坝体仍有足够的超高，坝顶需预留沉降超高，可经计算并参考类似工程确定。如果不影响工程初期蓄水安全，防浪墙的施工宜尽量后延。

5.1.7 为便于防浪墙、电缆沟和坝顶路面等施工及预留坝顶沉降超高起拱的需要，防浪墙底部高程以上的坝体宜采用过渡料填筑。

5.1.8 本条是将原标准中关于坝顶的其他功能要求集合在一起。

5.2 坝 坡

5.2.1 根据国内外已建面板堆石坝坝坡统计结果看（见表2、表3），坝壳采用堆石料的混凝土面板堆石坝上、下游坝坡大部分为1:1.3~1:1.4，下游坡总体上略缓于上游坝坡，对于坝高大于150m的高坝其上下游坝坡大多采用1:1.4；坝壳完全或部分采用砂砾料的混凝土面板堆石坝上、下游坝坡总体上缓于采用堆石料填筑的混凝土面板堆石坝，大部分上下游坝坡1:1.5~1:1.6；坝壳内的软质岩或软基、坝基软弱夹层力学性质相对较差，对坝坡稳定起控制作用，故坝坡应根据抗滑稳定计算分析确定。

5.2.2 为了在坝坡上布置道路（马道）和节省坝体工程量，可在平均坝坡不变的条件下，道路间用较陡的坝坡。如塞格雷多坝道路间实际坝坡为1:1.2，天生桥一级、水布垭等坝道路间实际坝坡为1:1.25，已被工程证明是可行的。

局部坝坡偏陡者，坡面以块石砌护为宜。

表 2 253 座面板堆石坝坝坡按坝高和坡度统计表

| 坝 高 | | 各段坝坡占统计样本数的百分比 (%) | | | |
|----------------------------------|-----|--------------------|-----------------------|--------------------|----------------|
| | | $m < 1.3$ | $1.3 \leq m \leq 1.4$ | $1.4 < m \leq 1.5$ | $1.5 < m$ |
| $H < 100m$ (样本数 170) | 上游坡 | 7.6 (13 座) | 77.7 (132 座) | 8.8 (15 座) | 5.9 (10 座) |
| | 下游坡 | 0.6 (1 座) | 71.7 (122 座) | 15.9 (27 座) | 11.8 (20 座) |
| $100m \leq H < 150m$ (样本数 58) | 上游坡 | 3.4 (2 座) | 81.0 (47 座) | 12.1 (7 座) | 3.5 (2 座) |
| | 下游坡 | 0 | 58.6 (34 座) | 29.3 (17 座) | 12.1 (7 座) |
| $150m \leq H < 200m$ (样本数 18) | 上游坡 | 0 | 88.9 (16 座) | 5.6 (1 座) | 5.5 (1 座) |
| | 下游坡 | 0 | 77.8 (14 座) | 16.7 (3 座) | 5.5 (1 座) |
| $200m \leq H$ (样本数 7) | 上游坡 | 0 | 100.0 (7 座) | 0 | 0 |
| | 下游坡 | 0 | 71.4 (5 座) | 28.6 (2 座) | 0 |
| 总计 (样本数 253) | 上游坡 | 5.9 (15 座) | 79.8 (202 座) | 9.2 (23 座) | 5.1 (13 座) |
| | 下游坡 | 0.4 (1 座) | 69.2 (175 座) | 19.3 (49 座) | 11.1 (28 座) |

表 3 64 座砂砾石面板堆石坝坝坡统计表

| 坝 高 | | 各段坝坡占统计样本数的百分比 (%) | | |
|------------------------|-----|--------------------|-----------------|--------------|
| | | $m \leq 1.3$ | $1.3 < m < 1.5$ | $1.5 \leq m$ |
| $H < 100m$ (样本数 37) | 上游坡 | 8.1 (3 座) | 24.3 (9 座) | 67.6 (25 座) |
| | 下游坡 | 5.4 (2 座) | 37.8 (14 座) | 56.8 (21 座) |

表 3 (续)

| 坝 高 | | 各段坝坡占统计样本数的百分比 (%) | | |
|-----------------------------|-----|--------------------|-----------------|--------------|
| | | $m \leq 1.3$ | $1.3 < m < 1.5$ | $1.5 \leq m$ |
| 100m ≤ H < 150m (样本数 19) | 上游坡 | 0 | 21.1 (4座) | 78.9 (15座) |
| | 下游坡 | 5.3 (1座) | 15.8 (3座) | 78.9 (15座) |
| 150m ≤ H < 200m (样本数 8) | 上游坡 | | 25.0 (2座) | 75.0 (6座) |
| | 下游坡 | 0 | 62.5 (5座) | 37.5 (3座) |
| 总计 (样本数 64) | 上游坡 | 4.7 (3座) | 23.4 (15座) | 71.9 (46座) |
| | 下游坡 | 4.7 (3座) | 34.4 (22座) | 60.9 (39座) |

5.2.3 堆石坝坡本身可以防止雨淋和人为破坏,可不做护坡,但为满足外部观测、排水、生态环境及美观等要求,一般做护坡。

5.2.4 上游坡面是垫层料,施工期为防止暴雨或波浪冲刷,并为面板混凝土施工提供坚固的作业面,需对坡面进行临时保护。坡面保护措施有喷阳离子乳化沥青、喷混凝土、碾压砂浆、挤压边墙等,可按各工程具体条件选用。因挤压边墙可加快大坝施工进度,不需进行人工修整边坡和坡面保护,近年来被广泛采用,如水布垭、公伯峡、芭蕉河、西流水、那兰、街面、寺坪等多座大坝均采用这一施工技术。

5.3 稳定分析

5.3.1 已建混凝土面板堆石坝的坝坡一般为 1 : 1.3 或 1 : 1.4,已安全运行多年,故一般不需进行坝坡稳定分析。仅在本条中列出的情况下,才需进行坝坡稳定分析。

5.3.2 原标准中规定的高坝的坝料抗剪强度宜采用三轴压缩仪测定,本次修订不变。直剪试验虽然设备简单,但试件所受主应力方向是变化的,试验成果与盒间的开度有关。

试样最小尺寸一般为试验用料最大粒径的 4~6 倍。当不满足这一要求时,试验用料必需采用模拟级配。试验用料宜参考下

述各点：

(1) 有条件时，尽可能用大尺寸的仪器，以减少缩尺的影响。

(2) 超径颗粒含量少于 40%，可用允许的最大粒组取代超径颗粒的等量替代法模拟。

(3) 堆石料经相似模拟后，小于 5mm 颗粒含量仍小于 15% 时，可用相似模拟法制备试验用料；否则，先相似模拟，再等量替代制备试验用料。即以满足相似模拟后的小于 5mm 的颗粒含量为 15% 左右，再用等量替代法解决相似模拟后的超径颗粒。

研究表明，堆石料的抗剪强度是颗粒之间滑动摩擦、咬合及颗粒破碎后重新定向排列的综合反映。剪切过程中，颗粒之间滑动摩擦力基本不变，咬合作用随粒间法向应力增加而减少，颗粒破碎随粒间法向应力增加而增加，颗粒重新定向排列需吸收部分能量，导致堆石料的抗剪强度指标随法向应力增加而减少，呈非线性关系。近年来使用非线性抗剪强度作稳定分析的工程逐渐增多，从技术发展考虑，规定取值时应计及这个因素。

5.4 应力和变形分析

5.4.1 有限元计算成果的可靠性和精度与计算参数选取有关。由于缩尺效应，室内试验成果不能完全反映坝料的应力变形特性。对重要工程或有条件的工程，计算参数要通过室内或现场专门试验并参照类似工程分析确定；其他工程，其计算参数可通过工程类比分析确定。可靠的计算参数不仅与制样条件有关，而且与试验加载的应力路径、操作方法及资料整理有关。

水库蓄水期是堆石坝体剪应力减载的过程，最好在三轴试验中近似模拟这种受力条件，以得到卸载变形模量。实测资料表明，蓄水期堆石料的变形模量为施工期的 1.5~3 倍，若不能进行三轴卸载试验，可近似取卸载模量数 K_u 等于两倍加载模量数 K ，两者模量指数相等。

堆石流变是运行期面板产生挤压破坏的主要原因，而且与施

工期面板脱空有关。水布垭、三板溪等大坝实测资料及已有研究成果表明,对坝体进行应力和变形有限元计算时,考虑堆石体的流变特性,可以更客观地反映大坝的实际变形性状。

5.4.2 本条为新增条文,明确 150m 以上高坝及地形地质条件复杂的坝需进行面板应力与变形有限元分析。

由于面板为薄壁结构,位于大坝上游面,其应力受外界环境温度变化和面板底面的约束影响较大,在较大温降时易产生裂缝,因此,本条建议在有限元分析中计入环境温度变化对混凝土面板应力的影响。

5.4.3 面板和堆石料的变形特性相差很大,面板和堆石体的变形是不连续的,需设接触面单元。有限元计算成果的可信度与坝体填筑和蓄水过程模拟也有关,需要通过施工规划和水库蓄水运行方案预先确定,再反映到计算中。

5.4.4 坝体经历烈度为 8 度、9 度的地震后,高坝地震反应强烈,需进行动力反应分析,甚至动力模型试验,以获得坝体的动变形值,并校核动力抗滑稳定,为大坝的抗震措施设计提供参考。

5.4.5 设计期间要准确地拟定堆石料的级配和填筑干密度是很困难的,即便开展了堆石爆破和碾压试验,也会与施工结果有出入。根据施工期质量检测和监测资料,结合必要的堆石料现场承载试验或大型压缩试验资料,及时分析计算成果的合理性,甚至于在必要时修改设计是很重要的。但这个工作量较大,原标准规定 100m 以上高坝才开展此项工作。近年来混凝土面板堆石坝筑坝技术日趋成熟,因此本次修订将坝高范围提高至 150m。

5.5 坝体渗流控制

5.5.2 为作好砂砾石料的渗流控制,必须根据料源进行材料分区,将细颗粒含量高的砂砾石料放在排水区的下游。排水区可以是专门设置的,如小干沟坝;也可以是下游堆石区,如墨西哥的阿瓜密巴坝。对不同的工程要作具体分析后确定。

鉴于沟后坝的教训，明确竖向排水区顶部高程宜高于水库正常运用的静水位。

竖向排水区上游设反滤层，可以阻止细颗粒流失，也可能被细颗粒淤塞，是否设反滤层，需视坝料中细颗粒含量而定。委内瑞拉的雅肯布坝排水区上游砂砾料小于 0.075mm 颗粒含量不超过 6%，采用 30~76mm 的砾石或碎石作排水料，可同时具有排水和反滤作用。中国黑泉面板堆石坝（高 123.5m）采用 40~80mm 混合料设在排水体上游侧作为保护层。应根据工程特点具体研究确定。

5.5.3 面板堆石坝一般不需进行渗流计算分析，但当坝体临时断面挡水度汛、趾板建基于覆盖层上或采用悬挂式防渗系统时，要按照 SL 274 的规定进行渗流计算分析。

5.6 抗震措施

5.6.1 地震区的安全超高尚应增加地震涌浪高度和坝体与地基在地震作用下的附加沉降。地震涌浪与地震机制、震级、坝面到对岸距离、水库面积、岸坡和坝坡坡度等因素有关。一般地震涌浪高度可根据设计烈度和坝前水深采用 0.5~1.5m。日本地震涌浪按坝高 1% 计算。坝体和地基在地震作用下的附加沉降可按《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203) 确定。

强震作用下，库区内存在可能因地震引起的大体积塌岸和滑坡，从而形成大的涌浪时，应进行专门研究。

5.6.2

1、2 面板堆石坝震害观察和振动台动力模型试验表明，面板堆石坝地震破坏始于下游坡面顶部的堆石松动、滚落，导致坝顶坍塌，面板悬空，断裂。2008 年 5 月 12 日汶川地震中，紫坪铺面板堆石坝经受了 9~10 度地震，下游坝坡上部靠近坝顶附近的下游坡面干砌石松动、翻起，并伴有向下的滑移，有个别滚落，图 6 为紫坪铺大坝下游坡面砌石松动和翻起现象。坝顶防浪墙局部发生挤压破坏和拉裂现象；坝顶下游侧交通护栏大部分遭



图6 紫坪铺大坝下游坡面砌石松动和翻起现象

到破坏；坝顶路面与下游堆石脱开严重。表明坝顶结构和坝坡是可能产生震害的重点部位，应采取有效的抗震措施。

增加坝体抗震能力，应对坝顶结构和坝坡采取有效的抗震措施，从阻止坝体堆石松动、翻起和滚落入手。

增加坝顶宽度，放缓下游坡的上部坝坡，有助于堆石体稳定，提高坝体抗震能力。为节省工程量，下部坝坡可以较陡。上缓下陡的下游坝坡是强地震区坝坡的特点。在坝坡改变的地方设置马道，更有利于坝坡稳定。按照现有的震害现象、动力模型试验、计算分析等资料，只需将坝体上部 $1/5 \sim 1/4$ 坝高的坝坡放缓即可。紫坪铺面板堆石坝最大坝高 156m，坝顶高程 884.00m，坝顶宽度 12.0m，按 8 度地震烈度设计，下游坡分别在高程 840.00m 及 796.00m 设置宽 5m 的马道，840.00m 高程以上坝坡坡度 $1:1.5$ ，840.00m 高程以下的坝坡坡度 $1:1.4$ 。云南茄子山面板堆石坝（坝高 101m），按 8 度地震烈度设计，上部 $1/4$ 坝高的下游坝坡为 $1:1.6$ ，此高程设 2m 宽马道，其下坝坡为 $1:1.4$ ；青海黑泉面板堆石坝，按 8.3 度地震烈度设计，上部约 $1/5$ 坝高的下游坝坡为 $1:1.5$ ，设 3m 宽马道，其下坝坡为 $1:1.4$ 。

上部坝坡可采用浆砌块石护坡，表面用钢筋网加固；上部坝坡内可采用钢筋、土工合成材料或混凝土框架等加固措施。具体措施可根据设计烈度、坝坡、坝料情况及动力分析结果等具体分析确定。努列克坝按9度地震设防，在坝的上部1/5范围内设四层钢筋或钢筋混凝土梁加固，可资参考。“5·12”汶川地震中紫坪铺大坝下游坡面上部浆砌块石护坡完好，而大坝中部干砌石松动和翻起现象明显，表明浆砌块石护坡的抗震效果为好。从紫坪铺大坝震害看，浆砌块石护坡的范围宜加大到坝高的1/4。

3 强地震期间，面板发生破坏的可能性较大，严重时坝体可能开裂，应加强坝体的渗控设计。加大垫层区的宽度，严格控制垫层料级配，可使垫层区不被错开，保持挡水前缘的连续性，减少通过坝体的渗透流量。岸坡陡的条件下，为避免坝体与岸坡间发生裂缝，在与岸坡相邻处，需要用细垫层料填筑，加宽垫层区的尺寸。

4 紫坪铺等震害资料及动力分析表明，位于坝体顶部的防浪墙地震反应强烈，高防浪墙对抗震不利。在强震区宜降低防浪墙的高度，并采取适当的抗震措施。

5 地震后坝体观测资料和有限元计算表明，地震期间面板会沿纵向挤压。“5·12”汶川地震中紫坪铺面板间的多条垂直缝发生挤压破坏，其中，中部面板23~24号之间垂直缝两侧混凝土挤碎，靠左岸的5~6号面板间接缝也有挤碎。若在挤压应力大的部位的垂直缝内填易压缩材料，可以减少面板混凝土被压碎的危险和范围。鉴于紫坪铺面板垂直缝的挤压破坏不仅仅发生在面板中部，地震设计烈度为8度、9度混凝土面板堆石坝垂直缝的填充防护范围宜适当扩大。

6 研究成果及震害资料表明，在0.75~0.8倍坝高附近面板动应力最大，坝上部堆石变形、松动、滚落引起面板脱空，面板可能开裂，甚至断裂。周边缝和施工缝附近也是面板易产生破坏的区域。紫坪铺的震害现象也表明了上述现象。增加这部分面板的配筋率，可以减少面板开裂的危险和范围。

震害资料表明，强震作用下，分期面板水平施工缝很可能成为面板抗震的薄弱环节，接缝结构型式对其抗御破坏能力有重要影响。紫坪铺面板堆石坝二期、三期面板的施工缝为水平向，在强震作用下产生了严重错台（见图 7），如果做成垂直面板的施工缝，其发生错台的可能性将降低。因此，分期面板水平施工缝面宜垂直面板表面，并在施工缝上下一定范围内布置双层钢筋。

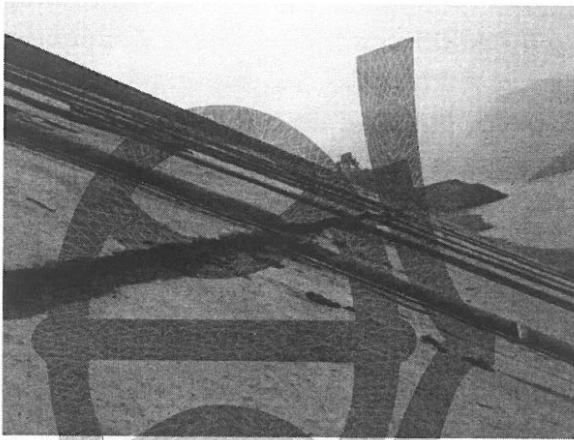


图 7 紫坪铺面板堆石坝二期、三期面板施工缝错台

7 震害资料和研究表明，地震引起的坝体残余变形是造成大坝震害的重要原因，控制坝体残余变形量值及减小变形分布的不均匀性，包括控制地震引起的面板挠度等可以提高大坝抗震能力。碾压密实的堆石体在强震作用下总体表现为振密；提高堆石体的填筑密实度，减小堆石体的孔隙率，可以减小堆石体的震缩，从而有效减小坝体地震残余变形及面板震损程度。紫坪铺面板堆石坝在超设计标准的强震作用下的地震变形相对不大，得益于坝料选择和坝料分区合理，碾压质量得到有效控制，达到了高密实度。因此，地震设计烈度为 8 度、9 度时，宜增加坝体堆石料的压实密度，特别是在地形突变处的压实密度，并做好坝料选择和坝料分区，严格控制施工质量。

5.6.3 为提高砂砾石坝体抗震的稳定性，除增加排水区的排水能力外，其竖向排水区位置宜尽量向坝体内上游布置，以增大坝体干燥区；在下游坝坡以内一定范围，尽量采用堆石料填筑。

5.6.4 土石坝的抗震能力及其安全性，主要与地基及坝体土石料的特性与密实程度、坝体与地基的防渗结构以及连接部分的牢固是否密切相关。对于建在覆盖层地基上的面板堆石坝，地震设计烈度为8度、9度时，除做好坝体本身的抗震设计和抗震措施外，还应做好地基的抗震设计和抗震措施。紫坪铺大坝在严格论证的基础上，对覆盖层地基进行了合理的处理，包括对可液化土层的处理，成功抗御强震的结果表明了合理的地基处理和抗震措施的重要性。地基的抗震设计和抗震措施按照《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203)进行，因此，对于建在覆盖层地基上的混凝土面板堆石坝，地震设计烈度为8度、9度时，应进行专门论证。

6 坝基处理

6.1 坝基及岸坡开挖

6.1.2 已建的一些高坝将趾板建基于风化岩石以至残积土上，如澳大利亚的利斯坝左侧河床及左岸为 30~50m 深的风化岩石；哥伦比亚的萨尔瓦兴娜坝部分趾板基础为残积层等。

6.1.3 按对面板变形的影响程度，根据工程经验，对位于趾板下游 0.3~0.5 倍坝高范围内的堆石坝体地基开挖提出专门要求。

6.1.4 近期修建的面板堆石坝有不少建于砂砾石层上，相应的坝基开挖处理方案一般有如下两种，且都有成功实例：一是将趾板及其下游一定范围内的砂砾石层挖除，趾板建于基岩面上，堆石坝体主体仍建基于砂砾石层上；二是将趾板和堆石坝体均建基于砂砾石层上，趾板通过连接板与混凝土防渗墙相连接。其中，将趾板和堆石坝体均建基于砂砾石层上的国外工程有：智利的斯塔扬那坝（坝高 110m，覆盖层厚 30m）、帕克拉罗坝（坝高 83m，覆盖层厚 113m）等，国内工程有：云南那兰坝（坝高 109m，覆盖层厚 24.3m）、新疆察汗乌苏坝（坝高 110m，覆盖层厚 46.8m）、甘肃九甸峡坝（坝高 136.5m，覆盖层厚 56m）、四川多诺坝（坝高 108.5m，覆盖层厚 41.7m）等。

在进行砂砾石覆盖层处理前，首先应查明覆盖层的组成和密实度情况，查清有无影响坝体稳定的不良地质条件，如细砂层、粉砂层或黏性土夹层等。对于表面松散层可以挖除，也可以用振动碾或强夯进行加密处理。除常规的勘探工作外，也可以采用旁压试验、动力触探、面波和声波等技术测试，进一步探明覆盖层的物质组成及力学特性，为基础处理提供可靠的技术资料。

6.1.5 本条为新增条文，旨在规定趾板上、下游边坡的设计应满足的基本要求。

6.1.6 如有条件，宜将坝轴线上游的堆石地基的岸壁均开挖成

不陡于 1 : 0.5 的坡度；如有困难，应至少将趾板下游 $0.3H \sim 0.5H$ 范围的岸坡开挖成不陡于 1 : 0.25 的坡度，并在岸边设置低压缩区。因为最上游的不密实的堆石将直接影响面板的受力状态及周边缝的变形。

因为在周边缝附近的堆石的沉降梯度变化最大，会产生较大的面板弯曲应力，尤其是 100m 以上高坝的坝体上游面与面板容易在周边缝附近发生平行于周边缝的结构裂缝。因此，本条根据工程经验对坝轴线上游特别是趾板下游的堆石地基岸坡开挖坡度作出相应规定，其中贫混凝土指水泥用量较低的水泥混凝土。

6.2 基础处理

6.2.2~6.2.5 趾板下岩石地基表层一般裂隙夹泥等较发育，且承受的水力梯度最大，是防渗薄弱环节，因此强调了固结灌浆的作用，并力求提高灌浆压力。阿瓜密尔巴坝为了提高固结灌浆效果，先进行 0.1MPa 压力的接触灌浆，然后在孔深 $0 \sim 2.5\text{m}$ 采用 0.5MPa 的灌浆压力，在孔深 $2.5 \sim 5\text{m}$ 采用 0.7MPa 灌浆压力，并采用 0.9 : 1 水灰比的稳定浆液。阿瓜密尔巴坝的帷幕灌浆也采用相同稠度的稳定浆液，最大灌浆压力为 4MPa，高压对提高幕体的耐久性作用很大。

趾板岩石地基的固结灌浆采用铺盖式，一般布置 2~4 排，梅花形布置。孔深应不小于 5m，可取 0.1 倍的水头，并以能穿过岩石表层的裂隙和强透水层为准。如水布垭坝趾板固结灌浆深度为 17m 和 7m 两种，三板溪坝趾板固结灌浆深度为 8~12m，洪家渡坝趾板固结灌浆深度为 8~15m，天生桥一级坝趾板固结灌浆深度为 15m、12m 和 10m 三种，乌鲁瓦提坝趾板固结灌浆深度为 5~12m。

6.2.6 趾板范围内的基岩如有不良地质条件时，必须采取有效的处理措施进行补强加固。如对倾角较陡的断层破碎带或软弱夹层，可采用掏挖置换（混凝土塞）的处理方式，即先进行断层或夹层的表层掏挖，掏挖深度一般应大于 1.5 倍的断层或夹层宽

度，且不小于1m，掏挖宽度应大于断层或夹层宽度，并延伸到下游一定距离，然后再回填混凝土，并在混凝土表面布置限裂钢筋，最后在其上部铺设反滤料；对倾角较缓、埋置较浅的断层破碎带或软弱夹层，应优先考虑在趾板范围内予以全部挖除，然后回填混凝土找平（明挖找平），若全挖确有困难时，可采取部分区域明挖找平与部分区域掏挖置换相结合的处理方式，掏挖后应保证其上覆岩体厚度不小于1.0~1.5m。

如洪家渡坝趾板基岩开挖时遇到宽40~50m、深50~60m的溶塌堆积体，形成上宽下窄的梯形溶槽，其上部为陡倾角层状灰岩夹黏土，下部为河流冲积的砂卵石及黑色有机质淤泥，将其全部挖除后，用混凝土回填修补，形成趾板和坝基基础；对趾板基岩中的断层破碎带采用掏挖置换的处理方式，掏挖深度为0.5倍破碎带宽度，开口宽度为2倍破碎带宽度，用C15混凝土回填，形成混凝土塞，并进行深15m的固结灌浆处理；在左岸近河床部位趾板基岩中有一缓倾角的断层破碎带，断层破碎带含块石夹泥层，对运行期趾板基础的受力和抗冲蚀性极为不利，因此将断层上盘岩体全部清除，沿开挖后的新建基面布置锚杆，用C15混凝土回填，与趾板混凝土同时浇筑，并在趾板靠山侧增设侧向锚杆，以保证趾板基础稳定。

6.2.7 当趾板位于岩溶地基时，在查明岩溶发育情况的条件下，对基岩溶洞可采用人工追踪开挖，清除洞内充填物，然后回填混凝土并进行回填灌浆。

6.2.8 趾板地基如遇深厚风化破碎及软弱岩层，难以开挖到弱风化岩层时，可考虑采用的主要防渗措施是延长渗径并设置下游反滤料保护。

延长渗径是为了减少水力梯度至容许值，防止渗透破坏。延长渗径的方法可以向上游延长，如铺盖（以趾板及连接板形式），或向下游延长，在趾板下游设混凝土板或喷钢筋网混凝土等方法延长渗径。以混凝土截水墙切断风化夹泥的岩层，既可延长渗径，又可截断风化岩层中的渗透水流，是一种有效的防渗措施。

如萨尔瓦兴娜坝，在残积土部位的趾板下设置宽 1m、深 3m 的截水墙，以防止松散材料的冲蚀。美国贝雷坝，在河谷的破碎砂岩地带，在趾板下设置了最小厚度为 0.3m 的钻孔式混凝土防渗墙，深度约 18.3m。国内的株树桥坝在趾板下的风化板岩中设有宽 1~2m，深 2~5m，局部深 7m 的混凝土截水墙等。智利的科拉列斯坝采用了下游防渗板（内趾板），该坝左坝肩建在风化花岗岩上，采用厚 0.2m 的下游防渗板延长渗径 6~8m。澳大利亚的利斯坝在左岸为全强风化闪长岩和片岩，深度 30~40m，节理张开达 20~100mm，其充填物为易冲蚀的粉质黏土，允许水力梯度为 2~3，为防止趾板地基发生管涌，设置下游喷射混凝土（含钢筋网）板来延长渗径，并在喷射混凝土板的上面及其下游全坝段用反滤料铺盖。中国小溪口坝采用了在趾板下游设防渗板（内趾板）来满足允许的水力梯度要求，下游混凝土防渗板厚 0.2m，宽 6~16m，并在防渗板上布设固结灌浆孔，进行浅层固结灌浆和接触灌浆。青海黑泉坝趾板基岩大部分为弱风化岩体，为满足岩体的允许渗透比降，对于局部坐落在强风化岩体上的趾板，采取在趾板下游增设宽 3~5m、厚 30cm 的混凝土防渗板（内趾板）以延长渗径。

在渗流出口设置反滤料覆盖保护是为了滤土排水。渗流破坏总是从渗流出口开始，渗流出口的反滤料保护与防止渗透破坏、延长渗径的作用是相辅相成的，甚至更为重要。

设置伸缩缝的目的是在趾板跨过岩石软硬不同的地基时，防止其不均匀变形可能引起趾板断裂的一种有效措施。如萨尔瓦琴娜坝采用向上游延长渗径方案，在风化岩层和残积层交界处设置了伸缩缝，并将残积土段的趾板用伸缩缝分割，以利用伸缩缝内止水吸收不均匀变形，效果良好。中国株树桥坝在岸坡趾板与面板之间设置两块连接板，趾板与连接板之间、连接板之间和连接板与面板之间都设置了伸缩缝，以适应沉降差异。

6.2.9 当坝址处砂砾石覆盖层厚度较大难以挖除、经论证覆盖层可以满足坝体变形及坝基渗流控制等要求时，可考虑采用将趾

板和堆石坝体均建基于砂砾石覆盖层上的坝基处理方案。此时，坝基砂砾石覆盖层的防渗措施主要有混凝土防渗墙、灌浆帷幕和混凝土沉井等三种，一般常用混凝土防渗墙进行坝基覆盖层的防渗处理。为协调变形，趾板通过连接板与防渗墙进行连接，以构成由混凝土防渗墙—连接板—趾板—面板—防浪墙及它们之间接缝止水组成的大坝完整防渗体系。根据砂砾石覆盖层的厚度、物理力学及渗流特性等条件，混凝土防渗墙一般设置一道，也可设置两道（如甘肃九甸峡坝）；连接板与趾板和防渗墙之间一般采用柔性连接方式，连接板可设置一块（如中国的多诺坝、那兰坝等），也可设置两块（如智利的帕克拉罗坝，中国的察汗乌苏坝、九甸峡坝等）。研究表明，连接板的布置型式及其宽度对于趾板和防渗墙的应力变形性状有一定的影响，实际工程应采用有限元法应力变形计算对不同方案进行比较和优化。

如甘肃九甸峡坝（坝高 136.5m，覆盖层厚 56m），经地质勘察坝基砂砾石覆盖层为中等密实，设计中对挖除覆盖层将趾板坐落在基岩上及趾板坐落在砂砾石层上、趾板与混凝土防渗墙通过连接板柔性连接等地基处理方案进行了综合比较，最终选择采用趾板坐落在砂砾石覆盖层上的处理方案。该方案将河床段平趾板基础直接置于河床覆盖层上，趾板宽度为 6m，厚度为 0.8m，坝基防渗采用两道混凝土防渗墙，墙厚 0.8m，墙净距 4.0m，趾板与两道防渗墙之间采用两块连接板柔性连接，连接板宽度分别为 2.0m、3.0m，厚度为 0.8m。

截至目前，中国建于深覆盖层上的面板堆石坝坝高一般不超过 140m，覆盖层最大厚度一般不超过 60m，深覆盖层上筑坝的工程经验还相对较少，所以本条第 3 款规定对高坝或深覆盖层情况应进行专门论证。

7 混凝土趾板

7.0.1

1 第一种方式称为平趾板，平趾板方案的优点有：提供方便施工的通道，供钻孔及灌浆作业；提供排水通道，避免造成暴雨冲刷填筑体；趾板可以采用滑模施工；趾板上游端基岩地质条件较好。其缺点是开挖量大。因此，在地形较陡时，还有可能采用其他布置方案。

7.0.2 20世纪90年代以前趾板大多设置伸缩缝，目前趾板一般少设或不设伸缩缝。不设或少设伸缩缝可以简化周边缝结构，近期一些工程的做法有：不设伸缩缝，设临时宽槽后回填；采用较长的施工缝，钢筋穿过施工缝，施工缝间距20~40m。前一种方法在洪家渡、水布垭等工程中采用，效果较好。后一种方法已为中国天生桥、天荒坪面板堆石坝等工程采用。天生桥一级坝趾板用滑模浇筑，浇筑段较长，产生的裂缝较多。万安溪坝在趾板混凝土中掺了UEA微膨胀剂，一次浇筑30m长，未发现裂缝。趾板在地形、地质条件变化较大的部位，宜设置必要的伸缩缝。

7.0.3、7.0.4 趾板宽度按容许水力梯度确定，并按不同高程分段采用不同宽度。趾板最小宽度不小于3m，是为了满足灌浆作业需要而规定的。对高坝或地质条件较差的坝，因需要趾板宽度较大而引起过大的开挖量时，也可由下游防渗板得到满足，以节省开挖量。这种做法已有很多实例。如澳大利亚的利斯坝，1986年建成，整个左岸，包括河床的左侧为30~50m深的风化岩石，开挖至新鲜岩层很不经济，故在趾板下游设置下游防渗板，用15cm厚的钢筋网喷混凝土板延长渗径，使其水力梯度减少到2。在喷混凝土板的上面及其下游全坝基用反滤料覆盖，目的是防止混凝土板开裂造成的地基管涌。利斯坝的实际漏水量左岸反比右岸小，设计是很成功的，现已被广泛采用。国内已有柴石滩、珊

溪、小溪口、水布垭、洪家渡等工程的部分坝基采用这种设计。如水布垭混凝土面板在高程 348.00m 以下，其趾板下游增设厚 50cm 防渗板，洪家渡混凝土面板堆石坝趾板下游采用钢筋网喷混凝土型式的防渗板。

趾板的冲蚀性地基除应加宽趾板减小梯度外，还需强调反滤的保护作用。

库克曾建议将趾板分成 4m 宽标准趾板及下游防渗板两个组成段，前段供作灌浆盖板使用，后段作为满足渗径长度的补充段，其宽度则根据需要决定，可以节省大量开挖。

7.0.5 趾板的工作条件比面板的有利，并且有地基的超挖可以利用。因此，趾板的设计厚度可以比面板薄。如辛戈坝的面板最大设计厚度为 0.7m，同水深的趾板设计厚度采用 0.5m。

7.0.6 规定周边缝底部止水以下堆石高度的目的，是保证有一定的堆石厚度起缓冲作用，避免地基对面板的端部产生硬性支承，造成过大弯曲应力。对高趾墙，为避免周边缝下的堆石体过厚产生较大的变形，因此规定应设低压缩区。

7.0.8 采用溜槽输送的混凝土，应减小坍落度和水泥用量，以有利于减少趾板的裂缝。

7.0.9 配筋的目的是为了限裂，消除由收缩及温度应力所引起的较宽的有害于耐久性的裂缝。岩基上仅需在表面配钢筋，因为混凝土与岩石的牢固结合，会使收缩裂缝均匀分布，并可消除锚固式底板的弯曲应力。因此，表层钢筋含量各向均可采用 0.3%。

非岩基上趾板可能存在正、负弯矩，宜在其顶、底面配筋。

7.0.10 只要趾板混凝土能与基岩很好粘结，灌浆时浆液是不会对趾板形成显著压力的。趾板插筋可按经验设置，一般采用直径 25~35mm 砂浆锚杆，间距 1.2~1.5m；长 3~4.5m，用 90°弯钩与面筋连接。在地基刚度发生明显变化的地方，要加强锚杆的锚固，以保证在水库水压力的作用下的趾板与地基的沉降变形协调。巴塔埃工程在趾板地基由火成岩过渡到沉积岩地段补充了间

距为 30cm 的短锚杆，可供参考。趾板一旦与地基脱开，其后果一定会是很严重的，但尚无此工程实例的报道。

7.0.11 近年来，有些工程采用了厚趾板或趾墙，如西流水面板堆石坝高趾墙最大高度 39.8m，黄河公伯峡面板堆石坝右岸重力式高趾墙最大高度 50.0m，新疆开都河察汗乌苏水电站高趾墙最大高度 25.0m 等。

趾板一般可不进行稳定计算和应力分析。趾板厚度超过 2m 或采用趾墙时，类似于混凝土挡墙，需进行稳定计算和应力分析。稳定计算可采用刚体极限平衡法。计算中不计锚筋作用（可能偏保守）及与面板之间的传力。堆石压力只考虑堆石的主动压力，或考虑面板下的堆石在面板承受水库压力后产生的侧向压力。应力分析可采用材料力学法，必要时需采用有限元法分析墙体应力、变形，并确保与之相对应的周边缝的止水安全。高趾墙的稳定、应力可参照《混凝土重力坝设计规范》（SL 319）的要求执行，其变形需满足止水的要求。

在采用刚体极限平衡法进行厚趾板或趾墙的稳定计算中，不能考虑堆石的被动压力。因为在堆石发生被动压力作用下，趾板已发生相对大的位移，趾板与地基灌浆帷幕的连接就可能遭到破坏，这是不能容许的。

7.0.12 为有利于减少趾板接缝的位移量，混凝土连接板应在防渗墙及坝体部分面板完工后再行施工。

8 混凝土面板

8.1 面板的分缝分块

8.1.1 面板分缝的目的是为了适应坝体的变形。并且设垂直缝以适应滑模施工的需要。根据目前滑模机的规格，垂直缝的间距可为8~16m，狭窄河谷中的面板堆石坝，其两侧面板的垂直缝间距可减小。面板分块时，将靠近岸坡的条块宽度减小，以更好地适应坝体的不均匀变形。也有采用等宽面板的工程实例，如澳大利亚的利斯坝、墨西哥的阿瓜密尔巴坝及中国的天荒坪坝、洪家渡（面板等宽15m）等。

8.1.2 根据面板垂直缝的变形特性，将面板垂直缝分为张性垂直缝和压性垂直缝两类。

8.1.3 对坝高150m以上的高坝，可结合面板应力变形分析成果设置水平结构缝，并设止水，但在强震区应慎用。如水布垭面板堆石坝（坝高233m），面板应力变形的计算结果表明，选择适当的位置设置永久水平缝，可减小面板拉应力，因此，经研究，在二期面板顶高程以下8.0m处（即高程332.00m）设置了一条永久水平缝。水平缝止水结构型式与垂直缝相同，设置顶、底两道止水。顶部止水为柔性填料止水，底部止水为W型铜止水。接缝处钢筋穿缝，缝中填隔缝材料。水布垭面板堆石坝永久水平缝止水结构见图8。

较长的面板需要分期浇筑，其间设水平施工缝方便施工，缩短工期，并满足坝体临时挡水或分期蓄水的要求。同时，缩短一次性浇筑面板的长度可减轻基础约束作用，减少面板混凝土产生裂缝的可能性。

除起始块，面板分期施工或在滑模过程中因故被迫中断可设施工缝外，面板宜少设施工缝。

8.1.4 分期浇筑的面板，为了施工工艺便利的需要，坝体填筑

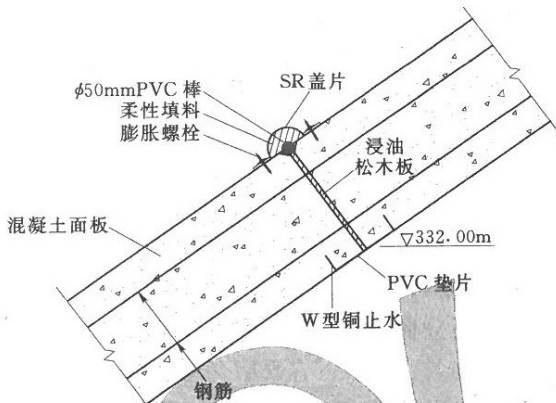


图 8 水布垭面板堆石坝永久水平缝止水结构示意图

高程应高于面板顶部高程。此外，因坝体继续填筑而增加已填筑坝体的变形，可能使已浇面板顶部与垫层面脱开，为避免发生这种现象，要求面板施工缝的高程应低于填筑体顶部高程，高差一般大于 5m，对于 150m 以上的高坝，高差一般控制在 15~20m。

8.1.5 对于面板分期工程出现面板脱空现象较为普遍，因此增加了有关面板脱空检查与处理的要求。

8.2 面板厚度

8.2.1 大多数观测资料表明，在水荷载作用下，面板的大部分区域受压，仅在坝顶和近岸边处有拉应变。面板应变和堆石体变形特性密切相关，与其厚度关系不大。可以认为混凝土面板只要抗裂性和耐久性满足要求，它的柔性越大越能适应坝体变形。确定面板厚度时，在满足上述要求的前提下，应选用较薄的面板厚度。但对于 150m 以上的高坝，挤压破坏大多发生在高程较高处的面板，因此应当加厚顶部面板的厚度。

8.2.2 高面板堆石坝在确定面板设计厚度时，以 $t=t_0+bH$ 表示。迄今为止所建的面板堆石坝，采用的 t_0 值为 0.23~0.48，

一般采用 0.30，150m 以上的坝应适当加厚。而 b 值一般采用 0.001~0.004；澳大利亚的利斯坝采用 0.001，中国已建的面板堆石坝，多数采用 0.003，仅白云坝和大桥坝（坝高 91m）采用 0.002。本标准规定 b 值为 0.002~0.0035。对于中低坝采用等厚面板也是面板堆石坝的实践经验。一般采用 0.3~0.4m。

8.3 面板混凝土

8.3.1 明确面板混凝土应具有优良的施工和易性、抗裂性和耐久性。

混凝土面板一般较薄，且承受着较大的水力梯度，因此，对面板混凝土规定较高的抗渗等级是必要的。

面板混凝土的抗冻等级是衡量其耐久性的指标之一，即使是在温和地区，也应按《水工建筑物抗冰冻设计规范》（GB/T 50662）的规定提出抗冻要求。

8.3.3 面板混凝土应使用不低于 II 级的粉煤灰，以保证面板混凝土的抗裂性和耐久性。其掺用量，严寒地区取较低值，温和地区取较高值。当采用其他品种掺合料时，应论证其是否能显著改善面板混凝土的性能。本条增加了应重视所选用的掺合料“具有一定活性、较小干缩性”。

强调掺合料选用应注意考虑料源因素。“骨料级配不良、砂料较粗时，可掺入适量粉煤灰，改善混凝土和易性；也可超量取代，以减少水泥和砂料，改善混凝土性能。”应在相应的施工规范配合比设计中考虑，故在本设计规范中予以删去。

8.3.4 强调注意外加剂间的相容性，特别是引气剂对混凝土强度的影响。

8.3.5 面板混凝土采用二级配骨料，不仅能减少溜槽入仓时骨料分离，还有利于较密钢筋情况下混凝土下料及止水处的混凝土浇筑。

根据《水工混凝土施工规范》（SDJ 207）的规定，严格控制粗、细骨料中的吸水率、含泥量，以免对面板混凝土的抗裂性及

耐久性产生不良影响。

8.3.6 从近年来已建工程中看，面板混凝土的水灰比及坍落度有越来越小的趋势，但应注意经济性、工作和易性及骨料抗分离性。

8.4 钢筋布置

8.4.1 随着面板堆石坝的技术不断进步，面板钢筋的配置率有不断减小的趋势。较早修建的面板堆石坝面板配筋一般采用0.5%。1978年哥伦比亚修建的格里拉斯坝，采用配筋率为0.4%。1985年修建的萨尔瓦兴娜坝，周边缝附近的面板配筋率为0.35%，中间面板的配筋率减少到0.32%。巴西的阿里亚坝，每向配筋率皆为0.4%，而1992年完成的塞格雷多坝，对于预计将产生压应力的中央部位的面板，水平向配筋由0.4%减为0.3%。

1994年建成的阿瓜密尔巴坝，将面板水平向和顺坡向分为12个区，每区都设计出典型的配筋量，配筋率为0.3%~0.5%较大的配筋量用于趾板与面板之间的连接板。

计算配筋率以面板混凝土的设计厚度为准。

8.4.2 计算研究表明，配筋率一定的情况下，单层钢筋网和双层配筋方式对面板的刚度影响差别很微小；在面板混凝土的受拉部位配筋对限制面板结构性裂缝的发展具有一定的效果，在混凝土面板受力条件复杂、支撑条件难以得到保证的部位，如坝顶部、邻近周边缝、分期施工缝附近等部分可能发生脱空部位的面板，存在双向受力，易产生面板裂缝，应当适当考虑限制面板结构性裂缝的措施，因此，本条提出100m以上高坝在这些部位宜配置双层双向配筋。

已有多座高面板堆石坝出现压性缝挤压破坏的实例，如天生桥一级面板坝、巴西的坎普斯诺沃斯(Campos Novos)等，故提出高坝的压性垂直缝、周边缝及临近周边缝的垂直缝两侧宜配置抗挤压钢筋。

8.4.3 本条为新增条文，旨在明确面板钢筋的最小保护层厚度。

8.5 面板防裂措施

8.5.2 本条增加了采用挤压边墙固坡方式的要求。挤压式边墙施工技术在中国应用以来，许多工程对边墙混凝土进行了大量的试验研究工作，积累了经验。部分工程挤压边墙混凝土配合比及测试结果见表4。也有工程在边墙混凝土中掺加早强剂以满足混凝土快凝的要求。

表4 部分工程挤压边墙混凝土配合比及测试结果

| 工程名称 | 坝高(m) | 混凝土配合比 | | | | | | | 测试结果 | | | |
|------|-------|--------|--------|-------|--------|-----------|--------|---------|--------------|------------------------|---------------|------------------------|
| | | 水(kg) | 水泥(kg) | 砂(kg) | 骨料(kg) | 混合料(kg) | 减水剂(%) | 速凝剂(%) | 抗压强度R28(MPa) | 密度(g/cm ³) | 弹性模量(MPa) | 渗透系数(cm/s) |
| 公伯峡 | 132.2 | 105 | 80 | 651 | 1449 | — | — | 3.2 | 4.0(3d) | 2.18 | 8624 | 2×10^{-2} |
| 芭蕉河 | 115 | 70 | 102 | 626 | 1332 | — | — | 2.1~3.5 | 5.0 | 2.14 | | 4.4×10^{-3} |
| 西流水 | 146.5 | 100 | 85 | 570 | 1395 | — | — | 3.4 | 3.4(3d) | 2.20 | 6626 | 5.35×10^{-3} |
| 水布垭 | 233 | 91 | 70 | — | — | 2144 | 0.8 | 2.8 | 4.35 | 2.13 | 2120 | 7.7×10^{-3} |
| 那兰 | 109 | 94.5 | 70 | — | — | 2115 | 0.7 | 2.8 | 3.6(7d) | | 2716 | 3.4×10^{-3} |
| 街面 | 126 | 67 | 65 | 709 | 1156 | 粉煤灰 20 | — | — | <5.0 | | <7000 | $10^{-3} \sim 10^{-4}$ |
| 寺坪 | | 117 | 90 | — | — | 2160 | — | 4.5 | <5.0 | 1.92 | 3000~ 5000 | $10^{-3} \sim 10^{-4}$ |

注：水泥一般选用低强度等级的普通硅酸盐水泥。

8.5.3 为配制出工作性能较好、抗裂性能较高的面板混凝土，已建工程中有采用羧酸类高效减水剂、防裂剂，有的甚至采用含有适量MgO的微膨胀水泥。有的工程面板混凝土掺用聚丙烯(腈)纤维、钢纤维或膨胀剂等掺合料，这些措施对防止混凝土早期温度裂缝起到一定的作用。如水布垭大坝(坝高233m)，在面板混凝土中掺加聚丙烯腈纤维，掺量 0.8kg/m^3 ，取得了较好

的防裂效果。白溪面板堆石坝（坝高124.4m），在二期面板混凝土中掺加聚丙烯纤维，掺量 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ ，明显减少了混凝土收缩和开裂，改善了混凝土的变形性能。

8.5.4 由于面板压性缝顶部的V形切口以及底部的铜止水都将减小面板的厚度。当接缝发生挤压时，这将导致接缝混凝土的压应力增大，并易于发生破坏。本条规定就是力求尽可能减小挤压应力。

8.5.5 面板混凝土表面保护是防止温度裂缝的有效温控措施。由于面板厚度很薄，当外界气温骤降、日气温变幅较大、或连接几天高温紧接几天大幅度降温等情况时，都会使混凝土温度急速降低，产生较大的拉应力，引起面板裂缝。在施工安排可能的条件下，选择日气温变幅小的低温时段浇筑混凝土较好。对于寒冷地区，应避开在负温季节浇筑。

8.5.6 保证面板混凝土浇筑前，已填筑坝体有一定的预沉降期，一般预留3~6个月，并加大分期面板浇筑顶高程与临时坝体顶部的高差，有利于防止或减小面板脱空而带来的危害。

8.5.7 经验表明，面板混凝土浇筑完毕后，应及时覆盖保温保湿材料，并进行不间断的湿润养护，防日晒、防大风、防寒潮袭击，防养护水或蓄水冷击。表面保湿养护的作用在于降低面板的热交换系数，提高表面温度，以降低混凝土表面温度冲击应力，同时减少湿度变化引起裂缝的可能性。保湿养护时间越长越好，一般地区至少要养护90d。在一般情况下，面板的保温和保湿可以结合进行。国内已建的西龙池下库沥青混凝土面板堆石坝（坝高84m，年极端最低气温 -30.4℃ ）、柯柯亚面板堆石坝（坝高41.5m），面板混凝土表层涂刷双组分弹性聚氨酯防水黏结材料，显著提高了混凝土的抗冻性能。国内在建工程中，四道沟（坝高80.16m）、西黑沟（坝高44m）、马拉台（坝高71m）均在混凝土表面涂刷弹性聚氨酯防水黏结材料，以提高混凝土的抗冻性。

8.5.8 本条为新增条文。坝体填筑完成后，由于堆石体的流变

性质，坝体变形仍在继续，一般在蓄水 3~5 年后才趋于稳定，为防止防浪墙因不均匀沉降产生裂缝，并防止防浪墙接缝止水发生破坏，特规定面板混凝土浇筑至坝顶后，宜至少间隔 28d 再浇筑防浪墙混凝土；同时，对于 150m 以上的高坝，其堆石体的流变效应更显著，因此，规定防浪墙混凝土浇筑的间隔时间应延长。

8.5.9 为限制通过裂缝渗水的流速和钙的溶出，本条规定裂缝宽度在 0.2mm 以上或判定为贯穿性的裂缝需要处理。

严寒地区和抽水蓄能电站的面板堆石坝，面板混凝土的微裂缝在严寒气候和库水位大幅度变化条件下有可能扩展，故规定应按照各工程具体条件从严确定裂缝处理标准。



9 接缝止水

9.0.1 面板接缝止水方案的选取主要取决于需要承受的水压力和接缝位移。部分已建成面板堆石坝周边缝的运行情况见表 5, 可供参考。

表 5 部分已建面板堆石坝运行情况统计表

| 工程名称 | 所在国家 | 坝高 (m) | 岩性 | 建成年份 | 周边缝最大位移量 (mm) | | | 大坝最大渗流量 (L/s) |
|-----------------------|------|--------|-------------|------|---------------|------|------|---------------|
| | | | | | 张开 | 沉陷 | 剪切 | |
| 水布垭 | 中国 | 233 | 灰岩 | 2006 | 13.0 | 45.3 | 43.7 | 66 |
| 坎普斯诺沃斯 (Campos Novos) | 巴西 | 202 | 玄武岩 | 2006 | — | — | — | 1300 |
| 卡兰尤卡尔 (Kárahnjúkar) | 冰岛 | 193 | 玄武岩 | 2006 | 20 | 16 | 11 | 60 |
| 埃尔卡洪 El Cajon | 墨西哥 | 188 | — | 2006 | 8.8 | 24.4 | 3.4 | 150 |
| 阿瓜密尔巴 (Aguamilpa) | 墨西哥 | 187 | 砾石 | 1993 | 25 | 18 | 5 | 260 |
| 三板溪 | 中国 | 185.5 | 凝灰岩层 凝灰岩 | 2006 | 8.6 | 35.3 | 14.4 | 303 |
| 巴兰格兰德 (Barra Grande) | 巴西 | 185 | 玄武岩 | 2005 | 51.7 | — | — | 1280 |
| 洪家渡 | 中国 | 179.5 | 灰岩 泥页岩 | 2004 | 13.9 | 26.6 | 34.8 | 59 |
| 天生桥一级 | 中国 | 178 | 灰岩 砂泥岩 | 1999 | 21 | 28 | 21 | 150 |
| 阿里亚 (Foz do Areia) | 巴西 | 160 | 玄武岩 | 1980 | 24 | 55 | 25 | 236 |

表 5 (续)

| 工程名称 | 所在国家 | 坝高 (m) | 岩性 | 建成年份 | 周边缝最大位移量 (mm) | | | 大坝最大渗流量 (L/s) |
|-----------------------|------|--------|-------------|------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| | | | | | 张开 | 沉陷 | 剪切 | |
| 吉林台一级 | 中国 | 157 | 凝灰岩 | 2006 | 11.9 | 35.1 | 3.5 | 200 |
| 紫坪铺 | 中国 | 156 | — | 2005 | 15.2 震前 27.3 震后 | 10.8 震前 28.9 震后 | 27.4 震前 34.4 震后 | 51 |
| 辛戈 (Xingo) | 巴西 | 150 | 玄武岩 | 1994 | 30 | 29 | 45 | 160 |
| 萨尔瓦兴娜 (Salvajina) | 哥伦比亚 | 148 | 砾石 | 1983 | 15 | 19.7 | 15.4 | 60 |
| 龙首二级 | 中国 | 147 | 石英岩 砂砾岩 | 2006 | 15 | 16 | 17 | 76 |
| 莫霍尔 (Mohale) | 莱索托 | 145 | 玄武岩 | 2002 | 55 | 28 | 46 | 600 |
| 安奇卡亚 (Alto Anchicaya) | 哥伦比亚 | 140 | 角页岩 | 1974 | 125 | 106 | 15 | 1800 |
| 乌鲁瓦提 | 中国 | 138 | 砂砾石 石英片岩 | 2001 | 10 | 20 | 10 | 10 |
| 珊溪 | 中国 | 132.5 | 流纹板岩 | 2001 | 6 | 15 | 8 | — |
| 公伯峡 | 中国 | 132.2 | 花岗岩 片岩 | 2004 | 20 | — | 40 | <10 |
| 希罗罗 (Shiroro) | 尼日利亚 | 130 | 花岗岩 | 1984 | 30 | 50 | 21 | 1800 |
| 考兰 (Khao Laem) | 泰国 | 130 | 灰岩 | 1984 | 5 | 8 | 22 | 250 |
| 引子渡 | 中国 | 130 | 灰岩 | 2003 | 25 | 26 | 31 | 7 |
| 白溪 | 中国 | 124.4 | 凝灰岩 | 2001 | 11 | 29 | 13 | 4 |
| 芹山 | 中国 | 122 | 凝灰岩 熔岩 | 2000 | 7.8 | 15.0 | 11.2 | 2 |

表 5 (续)

| 工程名称 | 所在国家 | 坝高 (m) | 岩性 | 建成年份 | 周边缝最大位移量 (mm) | | | 大坝最大渗流量 (L/s) |
|-----------------|------|--------|-----------|------|---------------|------|-----|---------------|
| | | | | | 张开 | 沉陷 | 剪切 | |
| 古洞口 | 中国 | 120 | 砾石灰岩 | 1998 | 5 | 13 | 4 | 量水井无水 |
| 古洞口一级 | 中国 | 118 | 砂砾石灰岩 | 2004 | 24 | 40 | 40 | 0 |
| 芭蕉河一级 | 中国 | 113 | 砂岩 | 2005 | 8 | 14 | 7 | 15 |
| 塞沙那 (Cethana) | 澳大利亚 | 110 | 石英岩 | 1971 | 12 | 21.5 | 7.5 | 35 |
| 那兰 | 中国 | 109 | 砂岩 砂砾石 | 2006 | 0.5 | 5 | 7 | 78 |
| 柯特梅利 (Kotmale) | 斯里兰卡 | 97 | 花岗岩 | 1985 | 2 | 12 | 4 | 33 |
| 西北口 | 中国 | 95 | 灰岩 | 1990 | 13.2 | 24.3 | 7.4 | — |
| 天荒坪下库 | 中国 | 95 | 流纹岩 | 1997 | 8.5 | 6 | 6 | 23 |
| 默奇松 (Murchison) | 澳大利亚 | 94 | 流纹岩 | 1982 | 20 | 8.5 | 15 | 14 |
| 万安溪 | 中国 | 94 | 花岗岩 | 1995 | 4 | 22 | 3 | 13 |
| 崖羊山 | 中国 | 88 | 石英砂岩 | 2005 | 1.4 | 0.5 | 1.4 | 13 |
| 东津 | 中国 | 85.5 | 砂岩 | 1995 | 5 | 2 | 1 | — |
| 温尼克 (Winneke) | 澳大利亚 | 85 | 砂岩 泥岩 | 1979 | 9 | 21.5 | 24 | 58 |
| 克罗蒂 (Crotty) | 澳大利亚 | 82 | 砾石 | 1990 | 1.9 | 20 | 2.9 | 47 |
| 雅泽 | 中国 | 79 | 灰岩 板岩 | 1998 | 9 | 14 | 23 | — |

表 5 (续)

| 工程名称 | 所在国家 | 坝高 (m) | 岩性 | 建成年份 | 周边缝最大位移量 (mm) | | | 大坝最大渗流量 (L/s) |
|---------------------|------|--------|--------|------|---------------|------|-----|---------------|
| | | | | | 张开 | 沉降 | 剪切 | |
| 马肯托士 (Mackintosh) | 澳大利亚 | 75 | 玄武岩 | 1981 | 4.8 | 20 | 2.8 | 18 |
| 巴斯塔延 (Bastyan) | 澳大利亚 | 75 | 流纹岩 | 1983 | 4.8 | 21.5 | — | 7 |
| 十三陵上库 | 中国 | 75 | 安山岩 | 1995 | 13 | 5 | 5 | 15 |
| 横山 | 中国 | 70 | 凝灰岩 | 1992 | 8 | 5 | 3 | — |
| 大河 | 中国 | 70 | 变质砂岩板岩 | 1998 | 5 | 4 | 6 | 28 |
| 广蓄上库 | 中国 | 68 | 花岗岩 | 1992 | 3 | 11 | 11 | 1 |
| 琅琊山上库 | 中国 | 65 | 灰岩 | 2005 | 3 | 3 | 3 | 0.2 |
| 龙溪 | 中国 | 59 | 凝灰岩 | 1990 | 3.1 | 8.4 | 2.9 | 2.7 |
| 小干沟 | 中国 | 55 | 砾岩 | 1990 | 3.4 | 3.5 | 1.9 | 3 |
| 塔拉巴定 (Tallabardine) | 澳大利亚 | 26 | — | 1981 | — | 0.7 | 0.3 | — |

澳大利亚塔斯马尼亚水电局修建的塔拉巴定坝 (Tallabardine, 坝高 26m, 1981 年建成) 周边缝的剪切位移为 0.3mm, 马肯托士坝 (Mackintosh, 坝高 75m, 1981 年建成) 周边缝的剪切位移为 2.8mm, 这种位移量一道止水是可以适应的。澳大利亚的袋鼠溪坝 (Kangaroo, 坝高 59m) 和小帕拉坝 (Little Para, 坝高 53m) 都仅采用一道中部 PVC 止水, 并承受了 10mm 以上的剪切位移, 止水效果很好。因此当坝高低于 50m 时, 只要接缝剪切位移控制在较小的范围, 采用一道止水是可行的。

50~100m 高度的坝设置两道止水可以满足大坝运行要求。两道止水, 可在接缝顶部设置具有优异防老化性能的止水带或止

水盖板，也可在缝顶部设置柔性填料止水或无黏性低透水性料止水，并做好系统封闭。中国龙溪坝（坝高 9m）、小干沟坝（坝高 55m）及国外许多 100m 以下的坝采用了顶部柔性填料止水和底部铜止水两道止水，澳大利亚的塞沙那坝（Cethana，坝高 110m）和里斯坝（Reece，坝高 122m）采用中部止水带和底部金属片两道止水，效果良好。

坝高超过 100m 的大坝，既可采用两道止水，包括缝顶部的柔性填料或无黏性填料止水和底部铜止水，也可以设置底、中及顶部三道止水。巴西的辛戈坝（Xingo，坝高 150m）、塞格雷多坝（Segredo，坝高 145m）均采用顶部柔性填料和底部铜止水两道止水，并认为中部 PVC 止水不适宜 100m 水头以上的水压力，设置止水会削弱混凝土质量，因为止水附近混凝土不易振捣密实产生蜂窝，反而形成渗漏通道，因此不采用中部止水。基于对中部止水带的这一考虑，国内多数 100m 以上的高坝未设中部止水。而且自芹山坝（坝高 122m）开始，国内外一些高坝如水布垭坝（坝高 233m）、洪家渡坝（坝高 179.5m）、马来西亚的巴贡坝（Bakun，坝高 205m）、三板溪坝（坝高 185.5m）、紫坪铺坝（坝高 156m）、吉林台一级坝（坝高 157m）、老挝的南俄二级坝（Nam Ngum 2，坝高 182m）等，将中部止水带提至表层，并将止水带断面设计成能够吸收较大接缝位移的波形，同时为确保止水带不被高水压力破坏，在止水带下部缝口还设置了 PVC 或橡胶支撑棒，见图 9。水布垭坝在高水头部位还设置了中部铜止水，见图 10。

9.0.2 天生桥一级坝、巴兰格兰德坝（Barra Grande）、坎普斯诺沃斯坝（Campos Novos）和莫霍尔坝（Mohale）曾先后沿面板压性垂直缝发生挤压破坏，三板溪坝沿一期、二期面板施工缝也出现了横向挤压破坏。这些大坝中除天生桥一级坝外，国外的其余三座坝均发生了较大的渗漏，三板溪坝渗漏量也超过了 300 L/s。这些发生面板挤压破坏的坝中，以坝高 145m 的莫霍尔坝（Mohale）高最低。

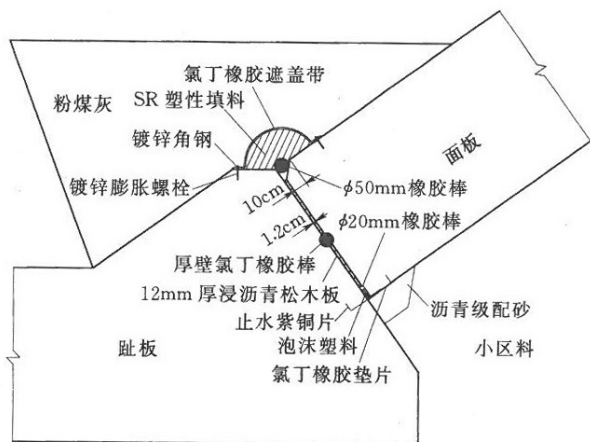


图 9 滩坑面板堆石坝周边缝止水结构



图 10 水布垭面板堆石坝周边缝止水结构

关于垂直软接缝，天生桥一级坝在进行面板挤压破坏修补时，在接缝中插入了 2cm 厚的橡胶板；坎普斯诺沃斯基坝（Campos Novos）在面板修补时，将河谷中央部位 16~20 号面板的 4 条压性缝改造成收缩缝，施工时沿压性缝切开 5cm 的接缝间隙

(受切割片大小的限制, 切开深度约为 850mm), 缝内用玛蹄脂回填, 并衬有 12mm 厚的软木板。缝口用厚 8mm 的 EPDM 橡胶板封盖。另外为防止挤压破坏, 卡兰尤卡尔坝 (Kárahnjúkar) 在施工期将中央部位的 10 条面板增厚 10cm, 并在接缝中设置 15mm 厚的沥青纤维板。巴贡坝 (Bakun) 在河床中部设置了 6 条收缩缝, 缝中设置了 50mm 宽的软木板。

张性垂直缝的止水结构应参考周边缝。所不同的是, 由于张性缝的接缝位移较小, 嵌缝填料的数量和止水带 (片) 的尺寸可适当减小。

9.0.4 本条规定主要是吸收沟后坝的经验教训。

9.0.6 冬季发生冰冻的北京十三陵上库坝及牡丹江莲花坝玛蹄脂止水面膜的部分角钢及膨胀螺栓, 在结冰后发现膨胀螺栓被拔出。中国东北莲花、松山、双沟等面板堆石坝采用沉头螺栓方法固定面膜, 经多年运行效果良好。

9.0.7 混凝土防渗墙与连接板之间、面板与其他混凝土建筑物之间的连接部位, 由于接缝位移较大, 其接缝止水应按周边缝止水设计。

10 分期施工与已建坝加高

10.1 分期施工

10.1.1 为控制堆石坝体变形和变形形态,应综合考虑分期施工的各种因素,进行合理规划,并增加浇筑平台与填筑高程的高差、配筋、选择有利的浇筑时间和环境、减少面板分期施工的次数等综合措施,可以将脱空产生的不利影响减至最小。

根据已建工程监测成果,面板堆石坝的大部分变形在施工期完成,剩余的变形则在蓄水期及运行期经过较长时间完成,后期变形与坝料压实密度、母岩特性等有关。如天生桥一级后期沉降约占总沉降量的10%~20%,水布垭和洪家渡则为10%左右。因此,面板施工时相应填筑分期的坝体应预留一定的沉降期(自然沉陷3个月以上),最好经历一个汛期,使面板浇筑时避开堆石体沉降的高峰期,以控制坝体和面板的变形协调,尽量减小面板的脱空率。

10.1.2 规定与垫层料和过渡区平起填筑的堆石体宽度至少20m,有利于不同料物的平起填筑,混合碾压,保证压实质量,同时可以避免界面附近块石分离集中,也为面板混凝土浇筑提供一个施工场地。

坝体分期填筑过多,易造成填筑强度、坝体上升速度、碾压质量不均一,从而出现坝体不均匀变形,为减小上、下游堆石区的不均匀变形,故要求坝体平衡上升。上游坝体可先于下游坝体填筑,亦可下游坝体先于上游坝体填筑,但应控制填筑高程不大于40m。

天生桥一级坝是较为典型的多期度汛断面施工方案,存在坝体临时断面填筑期次多、填筑高差较大的特点。根据天生桥一级的反馈模拟计算,对相同的计算参数组合,计算的面板脱空通常约为天生桥实际施工方案的42.6%~52.7%。因此,优化坝体

填筑施工方案（控制坝体填筑高差）可有效减少坝体不均匀变形，减小面板脱空，改善面板应力条件。

10.1.3 在利用坝体临时断面挡水时，上游垫层坡面应予保护，以免风浪或暴雨冲刷，也可作为施工期防止人为破坏的防护。固坡措施在 5.2.4 条中已有规定。喷乳化沥青可减小垫层对面板的约束，对防止面板裂缝有利，可根据工程具体情况选用。

10.1.4 坝面过水度汛时，对过流表面及下游坡面和坡脚应做好防护。防护材料一般采用填块石的钢筋笼或钢筋网用锚筋固定在堆石体上，也有在下游坡面用碾压混凝土保护的工程实例，如水布垭面板堆石坝。重要工程应进行水力学模型试验，作为选定和完善工程防护措施的依据。

目前大坝填筑工期安排较短，很多工程在大坝底部填筑时间紧，施工速度较快，且因大坝底部较窄，易形成底部拱效应，因拱效应的消除将使大坝产生不均匀沉降，且这种不均匀沉降可能会突然发生，易引起面板的结构性裂缝，进而影响到大坝的安全运行。为消除大坝底部可能存在的拱效应，加快大坝沉降速度，根据现场实际情况，部分工程在面板施工前一定时期对大坝底部进行了充水浸泡，如青海公伯峡面板堆石坝和积石峡面板堆石坝（坝高 100m）。观测数据显示，在充水浸泡过程中，大坝沉降速度明显加快，沉降收敛过程加快，对面板提前施工有利。

10.1.6 当趾板建基面低于堆石坝体基础面时，坝体施工用水或雨水可能对垫层料及上游坡面形成反向水压力。相对于过渡料和堆石料而言，垫层料不能自由排水，试验表明，垫层料在无保护的情况下破坏比降仅为 1~2，反向水压力可能破坏垫层料及上游坡面，甚至损坏已浇的面板。因此，当坝体内存在反向水压时，应复核垫层料的渗透稳定，并应重视施工期的坝体排水。可采取设水平排水管、竖井抽水等排水措施。估计反向水压力较大时，在填筑上游盖重之前，可设通向上游的水平排水管或竖井抽水，以降低坝内水位。反向排水设施应在面板被上游铺盖覆盖之前根据工程进展采取专门措施进行封堵。

10.2 分期完建

10.2.1 分期完建的面板堆石坝应按最终规模选用工程等级与设计标准。坝体分区、填料压实标准、趾板宽度、面板厚度、基础处理及接缝止水等均应按照最终规模标准进行设计。

10.2.2 采用从下游面加高的方式时，应充分考虑下游面加高坝体填筑对已建坝体及面板、接缝的影响。根据分析，若后期加高坝体对上游面板及接缝影响较大时，应采取必要的措施以减轻其影响。

10.2.3 为避免施工干扰，保证施工进度，混凝土面板堆石坝的坝肩开挖、坝基处理、水下填筑等一般要求一次性实施，因此，本条规定分期建设的混凝土面板堆石坝，应在先期施工时将后期无法或不易实施的部分按最终规模实施。

10.3 已建坝加高

10.3.1 根据国外经验，面板堆石坝加高时，发现原坝体因附加荷载而与混凝土面板间出现空隙，宜用水泥砂浆灌注密实后再浇筑加高的面板。

10.3.2 有些土质心墙堆（砾）石坝是用混凝土面板堆石坝从下游面加高的，如中国的横山水库，原黏土心墙坝高 48.6m，在不放空水库的情况下，用混凝土面板堆石坝从下游面加高到 70m，面板与心墙连接，该坝已运行 20 余年。

1 包括论证原坝基及坝体的防渗设施能否适应加高后坝体挡水的要求，是否需进行补强处理及必要时的补强处理措施。

2 对土质心墙与混凝土面板之间的连接和止水进行专门设计，以形成加高后坝体完整的防渗体系。

3 对加高后坝体的上、下游坝坡进行稳定分析，以确定上游坝坡是否需要加固及必要时的加固措施，并确定加高后坝体的下游坝坡坡比。

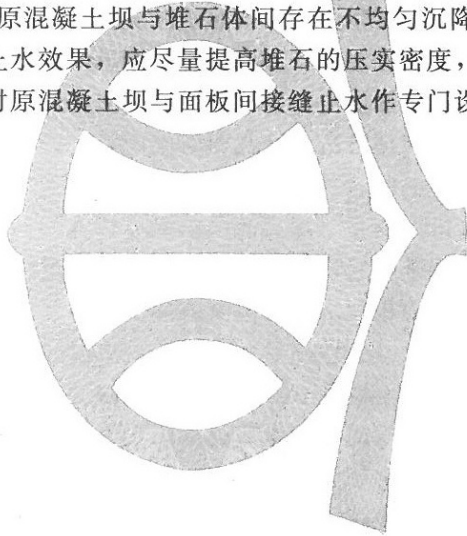
10.3.3 国外有重力拱坝从下游面用面板堆石坝加高的实例，如

美国新国库坝 (New Exchequer, 坝高 150m, 1966 年建成), 由于接缝设计不当、垫层料中无细料及坝体变形大等, 建成后最大渗漏量达 $14\text{m}^3/\text{s}$ 。

1 论证原坝基及坝体防渗设施是否适应加高后的要求, 是否需要进行补强处理及研究必要时的补强处理措施。

2 由于加高后原混凝土坝的受力条件发生变化, 因此, 应综合考虑加高后坝体所承受的堆石压力、水压力等荷载, 对原混凝土坝进行稳定和应力分析, 以确定混凝土面板在原混凝土坝体上的支撑点高度, 保证原坝体在各种荷载作用下的稳定。

3 由于原混凝土坝与堆石体间存在不均匀沉降, 为保证加高后坝体的止水效果, 应尽量提高堆石的压实密度, 以减少周边缝的变形, 对原混凝土坝与面板间接缝止水作专门设计。



11 安全监测

11.0.3 本条增加了“内部变形监测应与外部变形监测结合布置”，“突出变形、渗流等观测内容”。

11.0.4 将确定观测值的预计范围及选定仪器设备的量程分别列出。

11.0.5 本条原为“1、2级坝及100m以上高坝应设置下列观测项目，其他的坝可适当简化”，其面板堆石坝等级与对应的观测项目划分与《土石坝安全监测技术规范》(SL 551)不一致，也不够具体。为此，对各级面板堆石坝的观测项目重新进行了规定，更符合SL 551的要求。

11.0.6 将“寒冷地区冰层对面板的推力”改为在必要时可以增设的项目，并在可增设项目中增加了混凝土面板裂缝监测，土压力及接触压力监测，混凝土防渗墙监测等项目。

11.0.7 本条为新增条文，旨在规定大坝监测资料整编分析应遵照SL 551执行。