

ICS 27.140

P 59

备案号: J910—2009

DL

中华人民共和国电力行业标准

P

DL/T 5411—2009

**土石坝沥青混凝土面板
和心墙设计规范**

**Design specification of asphalt concrete facings
and cores for embankment dams**



2009-07-22 发布

2009-12-01 实施

中华人民共和国国家能源局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	2
3 术语和定义	3
4 总则	7
5 沥青混凝土原材料的技术要求	9
6 沥青混凝土的技术要求及配合比	13
7 碾压式沥青混凝土面板设计	17
8 碾压式沥青混凝土心墙设计	20
9 浇筑式沥青混凝土心墙设计	22
10 安全监测	23
附录 A (规范性附录) 水工沥青混凝土配合比选择	24
附录 B (资料性附录) 碾压式沥青混凝土面板厚度计算	28
附录 C (资料性附录) 沥青混凝土防渗体与基础、岸坡和 刚性建筑物的连接	31
附录 D (资料性附录) 浇筑式沥青混凝土心墙的流变计算	56
附录 E (资料性附录) 浇筑式沥青混凝土面板设计	59
附录 F (资料性附录) 监测仪器布置实例	60
条文说明	67

前 言

本标准是根据《国家发展改革委办公厅关于印发 2005 年行业标准项目计划的通知》(发改办工业[2005] 739 号)的要求制定的。

本标准制定工作自 2005 年启动以来,编制组收集了大量国内外工程资料,结合我国已建和在建工程沥青混凝土面板和心墙的新材料、新技术、新工艺,进行了综合分析研究,为制定工作奠定了坚实的基础。

本标准的附录 A 为规范性附录。

本标准的附录 B、附录 C、附录 D、附录 E 和附录 F 为资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业水电规划设计标准化技术委员会归口并负责解释。

本标准起草单位:中国水电顾问集团华东勘测设计研究院、西安理工大学。

本标准主要起草人:张春生、姜忠见、孙振天、王为标、李金荣、王玉洁、杨全民。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化中心(北京市白广路二条一号,100761)。

1 范 围

本标准规定了水电水利工程沥青混凝土防渗设计的材料和结构设计要求，提出了配合比设计原则。

本标准适用范围如下：

坝高大于 30m、小于 100m 的土石坝碾压式沥青混凝土面板设计、水库库盆沥青混凝土面板设计。当坝高超过 100m 时，应作专门论证。

坝高大于 30m、小于 150m 的土石坝碾压式沥青混凝土心墙设计。当坝高超过 150m 时，应作专门论证。

寒冷和严寒地区坝高大于 30m、小于 50m 的土石坝浇筑式沥青混凝土心墙设计。当坝高超过 50m 时，应作专门论证。

其他沥青混凝土防渗工程的设计可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准。然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB 50092 沥青路面施工及验收规范
- GB 50199 水利水电工程结构可靠度设计统一标准
- GB 50201 防洪标准
- DL/T 5016 混凝土面板堆石坝设计规范
- DL/T 5057 水工混凝土结构设计规范
- DL 5073 水工建筑物抗震设计规范
- DL 5077 水工建筑物荷载设计规范
- DL 5108 混凝土重力坝设计规范
- DL 5180 水电枢纽工程等级划分及设计安全标准
- DL/T 5362 水工沥青混凝土试验规程
- DL/T 5363 水工碾压式沥青混凝土施工规范
- DL/T 5395 碾压式土石坝设计规范
- JTG E42 公路工程集料试验规程
- JTJ 052 公路工程沥青及沥青混合料试验规程
- SL/T 235 土工合成材料测试规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.0.1

粗骨料 coarse aggregate

粒径大于 2.36mm (方孔筛) 的石料。

3.0.2

细骨料 fine aggregate

粒径 2.36mm~0.075mm (方孔筛) 的石料。

3.0.3

填料 filler

在沥青混合料中起充填作用的粒径小于 0.075mm 的矿物质粉末, 也称矿粉。通常由石灰岩等碱性石料加工磨细得到, 水泥、消石灰、粉煤灰等材料有时也可作为填料使用。

3.0.4

矿料 mineral materials

粗骨料、细骨料和填料的总称。

3.0.5

掺料 additional material

为改善沥青混凝土性能而在沥青或矿料中掺加的物料。

3.0.6

黏附性 adhesiveness

沥青与矿料的黏结性能。因矿料粒径大小不同而采用不同的测试方法, 沥青与粗骨料的黏结性能称为黏附性, 与细骨料的黏结性能称为水稳定性, 与填料的黏结性能称为亲水性。

3.0.7

矿料的酸碱性 acidity and alkaline of mineral materials

矿料中酸碱矿物成分的含量。

3.0.8

沥青 bitumen, asphalt

水工沥青混凝土防渗体所用的沥青是石油沥青，它是由原油炼制各种燃料油及润滑油后加工得到的一种石油产品。

3.0.9

改性沥青 modified bitumen

采用专用工艺，将高分子材料掺入沥青后使其性能得到改善的沥青。SBS 改性沥青是目前最常用的一种聚合物改性沥青，SBS 是苯乙烯（S）-丁二烯（B）-苯乙烯（S）嵌段共聚物的缩写。

3.0.10

沥青涂料 bitumen coat

喷涂于层面或接缝面、使沥青混凝土连接面黏结良好的沥青材料，常用的有：

1 乳化沥青 emulsified bitumen

沥青热熔后经机械作用，以细小的微滴状态分散于含有乳化剂的水溶液中，形成水包油的沥青乳液。因乳化剂电离子的不同，有阳离子、阴离子和非离子乳化沥青之别。

2 稀释沥青 dilute bitumen

由沥青与汽油、煤油或其他沥青溶剂配制而成。

3 热沥青 hot bitumen

加热熔化的沥青。

3.0.11

塑性止水材料 plastic sealer

由沥青或橡胶和填充料配制而成，具有适应沥青混凝土高温施工、高延展能力的塑性止水材料。

3.0.12

加筋网 reinforcement mesh

为提高沥青混凝土适应变形和抗裂能力而加设于沥青混凝土面板中的聚酯类材料网。

3.0.13

沥青含量 bitumen content

沥青混合料中沥青质量与沥青混合料总质量的比值，以百分数计。

3.0.14

油石比 bitumen aggregate ratio

沥青混合料中沥青质量与沥青混合料中矿料质量的比值，以百分数计。

3.0.15

沥青混合料 asphalt mixture

沥青与矿料经拌和尚未凝固的混合物。

3.0.16

沥青混凝土 asphalt concrete

沥青混合料经压实后冷却凝固的混合物。

3.0.17

沥青砂浆 asphalt mortar

沥青与细骨料及填料拌和冷却凝固的混合物。

3.0.18

沥青玛蹄脂 asphalt mastic

由沥青和填料配制而成的沥青混合物。

3.0.19

开级配沥青混凝土 open-graded asphalt concrete

用粒径较大、含量较多的粗骨料、少量填料和沥青制备成渗透系数较大的沥青混凝土。

3.0.20

密级配沥青混凝土 **dense-graded asphalt concrete**

用粒径较小的粗骨料和含量较多的细骨料、填料和沥青制备成渗透系数很小的沥青混凝土。

3.0.21

沥青混凝土面板 **asphalt concrete facing**

设置在堆石坝、砌石坝、蓄水库（池）、渠道等水工建筑物表面的沥青混凝土防渗结构。

3.0.22

沥青混凝土心墙 **asphalt concrete core**

设置在土石坝坝体内部的沥青混凝土防渗结构。

3.0.23

沥青混凝土水稳定系数 **immersion coefficient of asphalt concrete**

沥青混凝土在高温（60℃）水中浸泡规定时间以后在常温（20℃）的抗压强度与沥青混凝土在常温（20℃）下不经水中浸泡的抗压强度之比，是一种评定沥青混凝土抗水剥离性能的指标。

3.0.24

热稳定系数 **coefficient of thermal stability**

沥青混凝土在温度 20℃时的抗压强度与温度 50℃时的抗压强度之比。

3.0.25

斜坡流淌值 **slope flow**

沥青混凝土标准试件在规定的斜坡、温度和历时条件下的流淌变形值。

3.0.26

流变 **rheology of asphalt concrete**

沥青混凝土在平行板中随时间变化的剪切变形。

4 总 则

4.0.1 为规范水电工程沥青混凝土面板和心墙防渗结构设计,使其符合工程安全、经济合理、技术先进、质量达标的要求,特制定本标准。

4.0.2 采用沥青混凝土面板和心墙防渗的土石坝,其填筑体和基础的设计、地基的处理、坝坡的稳定、坝体的应力应变、坝基及坝壳的渗流和沉降等计算,应按 DL/T 5016 和 DL/T 5395 的有关规定执行。

4.0.3 沥青混凝土面板和心墙应具有工程所要求的防渗性、抗裂性、稳定性和耐久性,做到技术先进,经济合理,运行安全。

4.0.4 沥青混凝土防渗结构类型的选择应根据坝型、坝高、坝址区的气候、地形、地质、地震裂度、施工技术、材料供应和坝的运行要求等条件,经技术经济比较选定。

4.0.5 土石坝沥青混凝土防渗体的结构类型分为碾压式沥青混凝土面板、碾压式沥青混凝土心墙和浇筑式沥青混凝土心墙三种。

其中碾压式沥青混凝土面板和心墙、浇筑式沥青混凝土心墙适用于土石坝防渗;碾压式沥青混凝土面板还适用于水库库盆和渠道等防渗。浇筑式沥青混凝土面板也适用于碾压混凝土坝、混凝土坝上游面的防渗。

4.0.6 沥青混凝土防渗体应与坝基和岸坡防渗设施共同组成水工建筑物的完整防渗体系。沥青混凝土面板或心墙与基础、岸坡及刚性建筑物的连接结构,可参考已建类似工程经验设计,为保证防渗的可靠性,关键部位应进行必要的试验研究。

4.0.7 沥青混凝土面板和心墙使用的沥青混凝土,其性能和各项技术指标应根据工程的具体条件确定。沥青混凝土的原材料和配合比可根据技术指标要求,通过试验选定。对某些有特殊要求的

性能，应进行专门的研究。

4.0.8 在地震设计烈度Ⅷ度及Ⅷ度以上地区，碾压式土石坝沥青混凝土面板和心墙除应进行静力计算外，还应进行动力分析。地震荷载和内力计算按照 DL 5073 的相关要求进行。

4.0.9 本标准的试验方法除有特别说明外，均采用 DL/T 5362 中的试验方法。

4.0.10 沥青混凝土面板或心墙设计中有关施工技术要求和质量控制标准，除应遵照本标准外，还应参照 DL/T 5363 的有关规定。

5 沥青混凝土原材料的技术要求

5.0.1 水工沥青混凝土原材料包括沥青、骨料、填料和掺料等。沥青应采用石油沥青，其品种和标号应根据工程类别、结构性能要求、当地气温、使用条件和原油性质、运距、施工要求等进行选择。

碾压式水工防渗沥青混凝土可选用水工沥青、道路石油沥青或国外沥青。对沥青混凝土性能有特别要求的沥青混凝土面板防渗层，可专门提出沥青质量技术要求。

5.0.2 水工沥青混凝土所用沥青的技术标准应满足表 5.0.2 的要求。

表 5.0.2 水工沥青混凝土所用沥青的技术要求

项 目		单位	质量指标			试验方法
			SG90	SG70	SG50	
针入度 (25℃, 100g, 5s)		1/10mm	80~100	60~80	40~60	GB/T 4509
延度 (5cm/min, 15℃)		cm	≥150	≥150	≥100	GB/T 4508
延度 (1cm/min, 4℃)		cm	≥20	≥10	—	GB/T 4508
软化点 (环球法)		℃	45~52	48~55	53~60	GB/T 4507
溶解度 (三氯乙烯)		%	≥99.0	≥99.0	≥99.0	GB/T 11148
脆点		℃	≤-12	≤-10	≤-8	GB/T 4510
闪点 (开口法)		℃	230	260	260	GB/T 267
密度 (25℃)		g/cm ³	实测	实测	实测	GB/T 8928
含蜡量 (裂解法)		%	≤2	≤2	≤2	
薄膜烘箱后	质量损失	%	≤0.3	≤0.2	≤0.1	GB/T 5304
	针入度比	%	≥70	≥68	≥68	GB/T 4509
	延度 (5cm/min, 15℃)	cm	≥100	≥80	≥10	GB/T 4508
	延度 (1cm/min, 4℃)	cm	≥8	≥4	—	GB/T 4508
	软化点升高	℃	≤5	≤5	—	GB/T 4507
注: SG90 沥青主要适用于寒冷地区碾压式沥青混凝土面板防渗层, SG70 沥青主要适用于碾压式沥青混凝土心墙和碾压式沥青混凝土面板, SG50 沥青主要适用于碾压式沥青混凝土面板封闭层和浇筑式沥青混凝土。						

5.0.3 浇筑式沥青混凝土宜选用针入度较小、针入度指数较大的水工沥青、道路沥青或与其与建筑沥青掺配的沥青。

5.0.4 粗骨料宜采用碱性岩石（石灰岩、白云岩等）破碎的碎石。当采用未经破碎的天然卵砾石时，其用量不宜超过粗骨料用量的一半；当采用酸性碎石时，应采取增强骨料与沥青黏附性的措施，并经试验研究论证。

粗骨料应质地坚硬、新鲜，不因加热而引起性质变化，其技术标准应满足表 5.0.4 的要求。

表 5.0.4 粗 骨 料 的 技 术 要 求

序号	项 目	单位	指标	说 明
1	表观密度	g/cm ³	≥2.6	
2	与沥青黏附性	级	≥4	水煮法
3	针片状颗粒含量	%	≤25	颗粒最大、最小尺寸比>3
4	压碎值	%	≤30	压力 400kN
5	吸水率	%	≤2	
6	含泥量	%	≤0.5	
7	耐久性	%	≤12	硫酸钠干湿循环 5 次的质量损失

5.0.5 细骨料可选用人工砂、天然砂等。人工砂可单独使用或与天然砂混合使用。

细骨料应质地坚硬、新鲜，不因加热而引起性质变化，其技术标准应满足表 5.0.5 的要求。

表 5.0.5 细 骨 料 的 技 术 要 求

序号	项 目	单位	指标	说 明
1	表观密度	g/cm ³	≥2.55	
2	吸水率	%	≤2	
3	水稳定等级	级	≥6	碳酸钠溶液煮沸 1min
4	耐久性	%	≤15	硫酸钠干湿循环 5 次的重量损失
5	有机质及泥土含量	%	≤2	

5.0.6 填料应采用石灰岩粉、白云岩粉等碱性岩石加工的石粉。滑石粉、普通硅酸盐水泥、粉煤灰等粉状矿质材料也可用作填料，但需经试验研究论证。

！ 填料应不结团块、不含有机质及泥土，其技术标准应满足表 5.0.6 的要求。

表 5.0.6 填料的技术要求

序号	项 目	单位	指 标	说 明
1	表观密度	g/cm ³	≥2.5	
2	亲水系数		≤1.0	煤油与水沉淀法
3	含水性	%	≤0.5	
4	细 度	<0.6mm	100	
		<0.15mm	>90	
		<0.075mm	>85	

5.0.7 为改善沥青混凝土的物理力学性能，可掺入合适的掺料。掺料品种及用量应通过试验确定。

5.0.8 沥青混凝土面板加筋网的技术标准应满足表 5.0.8 的要求。

表 5.0.8 加筋网的技术要求

序号	项 目	单位	技术指标	试验方法及说明
1	单位面积质量	g/m ²	>260	
2	网孔尺寸	mm	约 30	
3	拉伸强度	kN/m	>50	纵、横向
4	断裂伸长率	%	>5	纵、横向
5	耐热性	℃	>190	材料性质稳定
6	收缩性	%	约 1	15min., 190℃

5.0.9 用作沥青涂料的乳化沥青宜采用阳离子乳化沥青，其技术标准应满足表 5.0.9 的要求。

表 5.0.9 阳离子乳化沥青的技术要求

序号	项 目		单位	品种和技术指标		
				PC-1	PC-2	PC-3
1	破乳速度			快裂	慢裂	快裂或中裂
2	筛上残留物 (1.18mm 筛)		%	≤0.1	≤0.1	0.1
3	黏度	恩格拉黏度计 E25		2~10	1~6	1~6
		道路标准黏度计 C25.3	s	10~25	8~20	8~20
4	蒸发残留物	残留物含量	%	≥50	≥50	≥50
		溶解度	%	≥97.5	≥97.5	≥97.5
		针入度 (25℃)	0.1mm	50~200	50~300	45~150
		延度 (15℃)	cm	≥40	≥40	≥40
5	与粗骨料的黏附性, 剥附面积占总面积			≥2/3	≥2/3	≥2/3
6	常温储存稳定性	1d	%	≤1	≤1	≤1
		5d	%	≤5	≤5	≤5

注: PC 为喷洒型阳离子乳化沥青。

6 沥青混凝土的技术要求及配合比

6.0.1 碾压式沥青混凝土面板防渗层沥青混凝土的主要技术指标应满足表 6.0.1 的要求。

表 6.0.1 碾压式沥青混凝土面板防渗层的技术要求

序号	项 目	单位	指 标	说 明
1	孔隙率	%	≤ 3	芯样
			≤ 2	马歇尔试件
2	渗透系数	cm/s	$\leq 1 \times 10^{-8}$	
3	水稳定系数		≥ 0.90	
4	斜坡流淌值	mm	≤ 0.8	马歇尔试件 (1:1.7 坡或按设计坡度, 70℃, 48h)
5	冻断温度	℃	按当地最低气温确定	
6	弯曲或拉、压强度与应变		根据温度、工程特点和运用条件等通过计算提出要求	

6.0.2 碾压式沥青混凝土面板整平胶结层沥青混凝土的主要技术指标应满足表 6.0.2 的要求。

表 6.0.2 碾压式沥青混凝土面板整平胶结层的技术要求

序号	项 目	单位	指 标	说 明
1	孔隙率	%	10~15	
2	热稳定系数		≤ 4.5	20℃与 50℃时的抗压强度之比
3	水稳定系数		≥ 0.85	

6.0.3 碾压式沥青混凝土面板排水层沥青混凝土的主要技术指标应满足表 6.0.3 的要求。

表 6.0.3 碾压式沥青混凝土面板排水层的技术要求

序号	项 目	单位	指标	说 明
1	渗透系数	cm/s	$\geq 1 \times 10^{-2}$	
2	热稳定系数		≤ 4.5	20℃与 50℃时的抗压强度之比
3	水稳定系数		≥ 0.85	

6.0.4 碾压式沥青混凝土面板封闭层使用的沥青玛蹄脂、改性沥青玛蹄脂或其他防水材料，应与防渗层面黏结牢固，高温不流淌、低温不脆裂，并易于涂刷和喷洒。其主要技术指标应满足表 6.0.4 的要求。

表 6.0.4 封闭层技术要求

序号	项 目	指标	试验方法及说明
1	斜坡热稳定性	不流淌	在沥青混凝土防渗层 20cm×30cm 面上涂 2mm 厚封闭层，在 1:1.7 坡度或按设计坡度，70℃，48h
2	低温脆裂	无裂纹	按当地最低气温进行二维冻裂试验
3	柔性	无裂纹	0.5mm 厚涂层，180°对折，5℃

6.0.5 沥青混凝土面板与岸边基岩或与混凝土结构连接处的楔形体沥青砂浆或细粒沥青混凝土应保证连接部位黏结牢固、稳定、防渗、变形均匀协调。其材料和配合比应结合工程条件通过试验确定，必要时应进行模型试验论证。其主要技术指标应满足表 6.0.5 的要求。

表 6.0.5 楔形体沥青砂浆或细粒沥青混凝土主要技术要求

序号	项 目	单位	指标	说 明
1	孔隙率	%	≤ 2	
2	小梁弯曲应变	%	≥ 4	
3	施工黏度	Pa·s	$\geq 10^3 \sim 10^4$	试验方法见条文说明
4	分离度		≤ 1.05	试验方法见条文说明

6.0.6 碾压式沥青混凝土心墙的沥青混凝土的主要技术要求应满足表 6.0.6 的要求。

表 6.0.6 碾压式沥青混凝土心墙沥青混凝土主要技术要求

序号	项 目	单位	指 标	说 明
1	孔隙率	%	≤ 3	芯样
		%	≤ 2	马歇尔试件
2	渗透系数	cm/s	$\leq 1 \times 10^{-8}$	
3	水稳定系数		≥ 0.90	
4	弯曲强度	kPa	≥ 400	
5	弯曲应变	%	≥ 1	
6	内摩擦角	(°)	≥ 25	
7	黏结力	kPa	≥ 300	
8	抗拉、抗压、变形模量等力学性能		根据当地地质、工程特点和运用条件等通过计算提出要求	

6.0.7 浇筑式沥青混凝土心墙沥青混凝土的主要技术标准应满足表 6.0.7 的要求。

表 6.0.7 浇筑式沥青混凝土的主要技术要求

序号	项目	单位	指 标	说 明
1	孔隙率	%	≤ 3	
2	渗透系数	cm/s	$\leq 1 \times 10^{-8}$	
3	水稳定系数		≥ 0.90	
4	分离度		≤ 1.05	试验方法见条文说明
5	施工黏度	Pa·s	$1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^4$	试验方法见条文说明
6	流变结构黏度、异变指数		根据温度、工程特点和运用条件通过流变计算进行选择	

6.0.8 沥青混凝土配合比应根据各种沥青混凝土的各项技术要求进行设计, 通过室内试验和现场摊铺试验确定。

沥青混凝土配合比选择试验包括各种原材料的选择与质量检

验，选择合理的骨料级配和沥青与填料的用量，进行沥青混凝土各项性能的试验验证，从多种配合比中选出最优的配合比。配合比的初步选择见附录 A 或按工程类比进行。

沥青混凝土室内试验的温度、加荷速度等试验条件，应根据工程区的气温、工程特点和运用条件等确定。

在没有条件做试验的情况下，可按附录 A 初步选择沥青混凝土配合比，用作初步估算成本和进行施工准备。

7 碾压式沥青混凝土面板设计

7.0.1 沥青混凝土面板的坡度，应满足填筑体自身稳定的要求，不宜陡于 1:1.7。

7.0.2 在沥青混凝土面板斜坡平面转弯处、斜坡与库底连接处，应设置弧面过渡区与平面相切连接，其弧面过渡区的曲率应满足应力应变要求，并使摊铺机能顺利施工。

7.0.3 在沥青混凝土面板与填筑体或基础之间应设置垫层。垫层料可采用碎石或卵砾石，垫层压实后应具有渗透稳定性、低压缩性、高抗剪强度，碾压后的垫层料表面应平顺、变形模量宜大于 40MPa。

7.0.4 垫层料最大粒径不宜超过 80mm，小于 5mm 粒径含量宜为 25%~40%，小于 0.075mm 粒径含量不宜超过 5%。

7.0.5 中等高度的土石坝的垫层厚度宜大于 50cm（垂直坡面），重要工程和高坝应适当加厚。

7.0.6 垫层料的土质基础表面宜喷洒除草剂，垫层表面上应喷洒乳化沥青，其用量可为 $0.5\text{kg/m}^2 \sim 2.0\text{kg/m}^2$ 。

7.0.7 沥青混凝土面板宜采用简式断面，对防渗有特殊要求的工程可采用复式断面，断面形式见图 7.0.7。

7.0.8 简式断面的沥青混凝土面板下面应设排水系统。

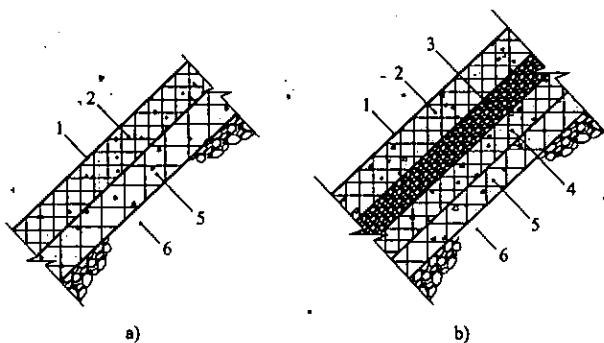
7.0.9 简式断面各层的要求如下：

封闭层应满足斜坡热稳定性和低温抗裂性的要求，其厚度宜为 2mm。

防渗层厚度为 6cm~10cm，宜单层施工。

整平胶结层厚度为 5cm~10cm，宜单层施工。

7.0.10 复式断面排水层的厚度可为 6cm~10cm，宜单层施工。



a) 简式断面; b) 7.0.7-2 复式断面

1—封闭层; 2—防渗(面)层; 3—排水层; 4—防渗底层; 5—整平胶结层; 6—垫层

图 7.0.7 沥青混凝土面板断面形式

排水层沿轴线方向可每隔 20m~50m 设置防渗沥青混凝土隔水带, 隔水带宽度为 1m 或摊铺机一次摊铺的宽度。

防渗底层厚度为 5cm~8cm, 宜单层施工。防渗底层也可以与整平胶结层合并为一层。

7.0.11 沥青混凝土面板各层厚度应根据荷载、填筑体的特征、施工技术水平、运行条件等, 参考附录 B 的方法进行验算。

7.0.12 高温地区沥青混凝土面板宜设置防止沥青混凝土发生流淌的降温设施。

7.0.13 严寒地区的沥青混凝土面板应进行低温抗裂试验及计算分析研究。当常规沥青混凝土不能满足低温抗裂要求时, 宜采用改性沥青混凝土。

7.0.14 重要工程的沥青混凝土面板土石坝, 应结合坝体、基础进行面板的变形及应力应变计算。

7.0.15 应对沥青混凝土面板与基础、岸坡和刚性建筑物的连接结构进行设计, 使其具有一定的相对变形能力并满足在最大水头运行条件下的防渗性和不出现开裂。连接结构的型式可参考附录 C。对重要的工程, 连接结构宜进行结构模型试验。

7.0.16 沥青混凝土面板拉应变或弯曲应变比较大的部位, 如面

板与刚性结构连接处、反弧段、基础挖填交界处和不均匀沉陷较大部位宜铺设加筋网和加厚层。

7.0.17 与沥青混凝土面板连接部位的混凝土齿墙或岸墩，其尺寸和基础处理应满足抗滑稳定和基础防渗的要求。

7.0.18 沥青混凝土面板靠齿墙、岸墩及其他刚性建筑物连接处的垫层，应采取提高防渗面板适应变形能力的措施。

7.0.19 沥青混凝土面板防渗工程初次蓄水时间，宜选在气温较高的季节，并应控制库水位上升和下降速度，蓄水初期应加强对面板的监测。

8 碾压式沥青混凝土心墙设计

8.0.1 沥青混凝土心墙轴线宜选择在坝轴线上游一侧，方便与坝顶防浪墙的连接。

心墙宜采用垂直布置型式。也可根据地形、地质等条件以及坝体应力应变情况，选择倾斜或下部垂直、上部倾斜等布置型式。倾斜心墙的坡度宜为 $1:0.2 \sim 1:0.4$ （垂直：水平）；下部垂直上部倾斜的心墙折坡点宜选在坝高的 $2/3 \sim 3/4$ 处。

心墙轴线宜采用直线布置。狭窄河谷中的坝，心墙轴线可布置成凸向上游的弧线。

8.0.2 沥青混凝土心墙顶部的厚度不宜小于 40cm，心墙底部的厚度宜为坝高的 $1/70 \sim 1/130$ 。

8.0.3 沥青混凝土心墙土石坝，应进行应力应变分析，宜采用有限元法计算。

8.0.4 应力应变计算参数应通过试验确定。试验温度、试验加荷速度等试验条件应根据当地多年平均气温、心墙的施工速度、水库的运行条件等选择。对中小型工程，计算参数也可用工程类比法进行选择。

8.0.5 沥青混凝土心墙两侧与坝壳之间应设置过渡层。过渡材料宜采用碎石或砂砾石，要求质密、坚硬、抗风化、耐侵蚀，颗粒级配宜连续，最大粒径不宜超过 80mm，小于 5mm 粒径的含量宜为 25%~40%，小于 0.075mm 粒径含量不宜超过 5%。过渡层应满足心墙与坝壳料之间变形的过渡要求，且具有良好的排水性和渗透稳定性，具有满足施工要求的承载力。

上下游过渡料宜采用同一种级配，过渡层厚度宜为 1.5m~3.0m，具体厚度值可根据坝壳材料、坝高和所处部位而定，堆石坝和高坝取大值。地震区和岸坡坡度有明显变化部位的过渡层应

适当加厚。

8.0.6 心墙与基岩、混凝土防渗墙、岸坡的连接应设置混凝土基座。

沥青混凝土心墙与基础、岸坡及混凝土等刚性建筑物连接部位设计应满足变形及防渗要求，必要时可设置金属止水片。

心墙与岸坡基座及刚性建筑物连接部位坡度不宜陡于 1:0.25（垂直:水平）。

与基础和岸坡的基座及刚性建筑物连接处的沥青混凝土心墙，应采用厚度逐渐扩大的形式连接。

心墙与基座及刚性建筑物连接处的混凝土表面应凿毛，喷涂 $0.15\text{kg/m}^2 \sim 0.2\text{kg/m}^2$ 阳离子乳化沥青或稀释沥青，待充分干燥后，再涂一层厚度为 1cm~2cm 的沥青砂浆。

沥青混凝土心墙与基础、岸坡及刚性建筑物的连接形式可参考附录 C。

9 浇筑式沥青混凝土心墙设计

9.0.1 沥青混凝土心墙应采用垂直形式布置，心墙轴线宜选择在坝轴线上游一侧，并与坝顶防浪墙连接。

9.0.2 沥青混凝土心墙的厚度可根据坝高、工程等级、沥青混凝土的流变特性、施工要求、当地气温和抗震要求等条件选定，宜为坝高的 1/100，最小厚度不宜小于 20cm。

9.0.3 沥青混凝土心墙两侧应设置过渡层，其厚度宜为 1m~3m。过渡层材料要求，同 8.0.5。

9.0.4 浇筑式沥青混凝土心墙及其混凝土配合比设计应考虑心墙的流变速度和流变侧压力，工程蓄水后第一年的心墙顶部垂直流变速度宜控制在 10mm/a 以内。流变速度的计算可参考附录 D。

9.0.5 浇筑式沥青混凝土心墙与基础和岸坡的连接要求同 8.0.6。

9.0.6 用于上游坝坡较为陡的砌石坝、碾压混凝土坝、混凝土坝的防渗或老坝防渗加固的浇筑式沥青混凝土面板的设计可参考附录 E。

10 安 全 监 测

10.0.1 土石坝沥青混凝土面板或心墙应按照土石坝安全监测技术要求, 根据工程的重要性、坝高和结构特点, 设置必要的监测设施进行系统的监测, 并及时整理分析监测资料。

10.0.2 埋设在沥青混凝土中及其周边的监测仪器应具有耐高温的性能, 埋设前应进行检验和率定。

10.0.3 监测设计应针对沥青混凝土高温施工的特点, 采取相应措施, 并提出具体的埋设施工要求。

10.0.4 1、2 级土石坝沥青混凝土面板应设置下列监测项目, 对 3 级及 3 级以下土石坝沥青混凝土面板的监测项目可适当减少:

1 面板的变形监测, 面板的变形监测包括面板的水平和垂直位移、面板挠度、面板与岸坡和刚性结构接缝处的位移等。

2 渗流监测, 包括面板背后的渗透压力。

3 温度监测, 包括面板表面及内部的温度。

4 面板外观检查, 包括斜坡流淌、裂缝、接缝、鼓包等。

特殊重要工程的沥青混凝土面板, 可根据工程具体情况, 设置专门性监测项目, 如面板应力应变、日照辐射热等。

10.0.5 1、2 级土石坝沥青混凝土心墙应设置下列监测项目, 对 3 级及 3 级以下土石坝的沥青混凝土心墙的监测项目可适当减少:

1 心墙的变形监测, 包括心墙本身的水平位移、垂直位移、心墙与过渡料的错位变形、心墙与混凝土基座接触面的相对位移、心墙与岸坡和刚性结构接缝处的位移等。

2 渗流监测, 包括心墙与混凝土基座结合部位和墙后的渗透压力等。

3 心墙内部温度监测。

特殊重要工程的沥青混凝土心墙, 可根据工程具体情况, 设置专门性监测项目, 如心墙内部的应力应变等。

附 录 A

(规范性附录)

水工沥青混凝土配合比选择

A.1 水工沥青混凝土配合比选择方法

水工沥青混凝土配合比选择,目前主要是参考类似工程经验通过试验方法进行选择。

影响沥青混凝土配合比选择的因素很多,主要有当地的气温、工程的运用条件、选用的原材料种类、性能、施工条件等。配合比选择可按以下方法进行。

A.1.1 选择原材料并进行质量鉴定。

A.1.2 选择矿料级配。目前水工沥青混凝土矿料级配选择基本沿用富勒(Fuller)级配公式:

$$p_i = \left(\frac{d_i}{D_{\max}} \right)^r \quad (\text{A.1})$$

或采用丁朴荣教授基于富勒公式提出的矿料级配公式:

$$p_i = p_{0.075} + (100 - p_{0.075}) \frac{d_i^r - 0.075^r}{D_{\max}^r - 0.075^r} \quad (\text{A.2})$$

式中:

p_i ——孔径为 d_i 筛的总通过率, %;

$p_{0.075}$ ——填料用量, %;

r ——级配指数;

d_i ——某一筛孔尺寸, mm;

D_{\max} ——矿料最大粒径, mm。

A.1.3 选择沥青用量、填料用量和级配指数等配合比参数进行试验。可按 4~5 种沥青用量、3~4 种填料用量、2~3 种级配指数

和不同材料种类组成不同配合比，进行关键性能试验，从中选择出满足要求的较优的 2~3 种配合比，再进行全面的性能试验验证，选出最优配合比。

A.2 碾压式沥青混凝土面板

A.2.1 沥青混凝土面板防渗层配合比

沥青混凝土面板防渗层的配合比参数范围可为：沥青占沥青混合料总重的 7%~8.5%，填料占矿料总重的 10%~16%，骨料的最大粒径 16mm~19mm，级配指数 0.24~0.28。沥青采用低温不裂、高温不流、高质量的 70 号或 90 号水工沥青、道路沥青或改性沥青。

A.2.2 沥青混凝土面板整平胶结层配合比

沥青混凝土面板整平胶结层的配合比参数范围可为：沥青占沥青混合料总重的 4%~5%，填料占矿料总重的 6%~10%，骨料的最大粒径不大于 19mm，级配指数 0.7~0.9。沥青可采用 70 号或 90 号道路沥青、水工沥青。

A.2.3 沥青混凝土面板排水层配合比

沥青混凝土面板排水层的配合比参数范围可为：沥青占沥青混合料总重的 3%~4%，填料占矿料总重的 3%~3.5%，骨料的最大粒径不大于 26.5mm，级配指数 0.8~1.0。沥青可采用 70 号或 90 号道路沥青、水工沥青。

A.2.4 封闭层配合比

沥青混凝土面板封闭层宜采用沥青玛蹄脂，配合比可为：沥青:填料=(30~40):(60~70)。沥青采用 50 号水工沥青或改性沥青。

A.2.5 沥青砂浆或细粒沥青混凝土配合比

沥青砂浆或细粒沥青混凝土配合比参数范围可为：沥青占混合料总重的 12%~16%，填料占矿料总重的 15%~20%，骨料占 64%~73%，骨料最大粒径为 2.36mm 或 4.75mm。

碾压式沥青混凝土面板配合比选择参考范围见表 A.1。

表 A.1 碾压式沥青混凝土面板配合比选择参考范围

序号	种类	沥青含量 %	填料用量 %	骨料最大 直径 mm	级配 指数	沥青质量
1	防渗层	7~8.5	10~16	16~19	0.24~ 0.28	70号或90号水工沥青、道路沥青或改性沥青
2	整平胶 结层	4~5	6~10	19	0.7~ 0.9	70号或90号道路沥青、水工沥青
3	排水层	3~4	3~3.5	26.5	0.8~1	70号或90号道路沥青、水工沥青
4	封闭层	沥青:填料=(30~40):(60~70)				50号水工沥青或改性沥青
5	沥青 砂浆	12~16	15~20	2.36或 4.75	—	70号或90号道路沥青、水工沥青

A.3 碾压式沥青混凝土心墙

土石坝碾压式沥青混凝土心墙，在上下游过渡层和坝壳的保护下随坝体的变形而变形。心墙沥青混凝土应以适应坝体变形而保持防渗性为原则进行材料和配合比参数选择。

沥青混凝土配合比参数范围可为：沥青占沥青混合料总重的6%~7.5%，填料占矿料总重的10%~14%，骨料的粒径不宜大于19mm，级配指数0.35~0.44。沥青宜采用70号或90号水工沥青或道路沥青。

A.4 浇筑式沥青混凝土心墙

土石坝浇筑式沥青混凝土心墙是在钢模板内浇筑热沥青混合料经自重压密而形成的沥青混凝土防渗墙，处于上下游过渡层和坝壳的保护下随坝体的变形而变形。因此，心墙沥青混凝土配合比的设计，应以适应坝体变形而保持防渗性为原则进行材料和配合比参数选择。

浇筑式沥青混凝土心墙配合比参数范围可为：沥青占沥青混合料总重的 10%~15%，填料占矿料总重的 12%~18%，骨料的
最大粒径为 16mm~19mm，级配指数 0.3~0.36。沥青可采用 50
号水工沥青、道路沥青或掺配沥青。

附录 B

(资料性附录)

碾压式沥青混凝土面板厚度计算

B.1 防渗层厚度计算经验公式

B.1.1 按照水库水头确定厚度

$$h=c+H/25 \quad (\text{B.1})$$

式中:

h ——防渗层厚度, cm;

c ——与骨料质量与形状有关的常数, 一般取 $c=6\text{cm}\sim 7\text{cm}$;

H ——防渗层承受的最大水头, m。

例如: 某抽水蓄能电站上水库沥青混凝土面板承受的最大水头为 45.2m, 其防渗层厚度即为 $h=7+45.2/25=8.8\text{cm}$ 。式 (B.1) 计算防渗层厚度对较好的材料和施工工艺可视为最小值; 对复杂情况, 特别是对运行条件较复杂的抽水蓄能电站, 因其日水位变幅大, 面板经常承受重复荷载的作用, 选取防渗层厚度时应留有余地。

B.1.2 按水库允许日渗透量确定

对全库盆防渗的抽水蓄能水库, 按水库允许日渗漏量不超过库容的某一标准来复核防渗层的厚度。水库允许日渗透量根据水库的类型、重要性、库容大小等由设计确定, 对大中型水库可取总库容的 $1/2000\sim 1/5000$, 对抽水蓄能水库可取总库容的 $1/5000\sim 1/10\,000$ 。

$$Q=AtkH/h \quad (\text{B.2})$$

式中:

Q ——防渗层总渗漏量, m^3 ;

A ——防渗层防渗面积, m^2 ;

t ——时间, s, 这里取 86 400;

k ——防渗层渗透系数, m/s;

H ——防渗层承受的平均水头, m;

h ——防渗层厚度, m;

例如: 某抽水蓄能电站上水库的总库容 $8.85 \times 10^6 \text{ m}^3$, 沥青混凝土防渗层面积库底为 $1 \times 10^5 \text{ m}^2$, 岸坡为 $1.85 \times 10^5 \text{ m}^2$, 平均渗透系数取 $k=1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$, 作用水头 45.2m, 当防渗层厚度取 10cm 时, 总渗漏量近似为 $Q=185\,000 \times 86\,400 \times 10^{-10} \times 45.2/2/0.1 + 100\,000 \times 86\,400 \times 10^{-10} \times 45.2/0.1 = 752 \text{ m}^3/\text{d}$; 约为总库容的 1/11 800, 满足 1/10 000 标准的要求。

B.2 复式断面的排水层厚度计算

排水层厚度 δ 由防渗面层的渗水量作为排水层的排水量确定 (图 B.1)。单位坝长通过防渗面层的渗水量 q_f 由下式求得:

$$q_f = \frac{k_f}{2\delta_f} \sqrt{1+m^2} H^2 \quad (\text{B.3})$$

式中:

q_f ——单位坝长通过防渗面层的渗水量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$;

k_f ——防渗面层沥青混凝土渗透系数, m/s;

m ——面板坡比;

δ_f ——防渗面层厚度, m;

H ——最大水深, m。

排水层的排水量 q_p 由下式计算:

$$q_p = k_p i A \psi \quad (\text{B.4})$$

式中:

q_p ——每米坝长排水量, 即防渗面层每米坝长的渗水量 q_f , $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$;

k_p ——排水层沥青混凝土渗透系数, m/s;

i ——排水层的渗透坡降, $i = \frac{1}{\sqrt{1+m^2}}$;

A ——排水层断面积, m^2 , 当取 1m 坝长时, 即为排水层厚度;

ψ ——试验系数, 取 $\psi=1.0$ 。

则排水层厚度 δ 由下式计算:

$$\delta = \frac{q_p}{k_p i \psi} F_s = \frac{q_f \sqrt{1+m^2}}{k_p} F_s \quad (\text{B.5})$$

F_s ——安全系数, 一般取 $1.0 \sim 1.3$ 。

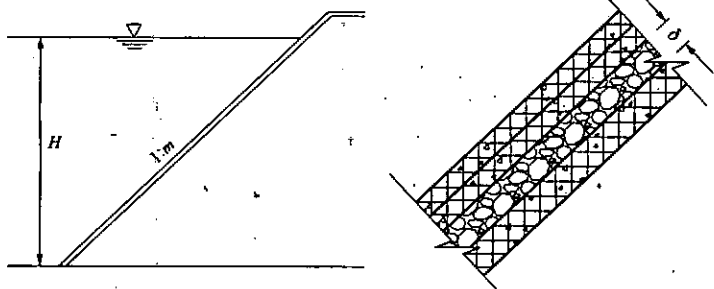


图 B.1

例如: 某复式断面沥青混凝土面板堆石坝, 上游坡 $1:1.9$, 最大水头 70m , 防渗面层厚度 10cm , 防渗面层沥青混凝土渗透系数 $k_f=1 \times 10^{-10}\text{m/s}$, 排水层沥青混凝土渗透系数 $k_p=2 \times 10^{-4}\text{m/s}$, 安全系数 F 取 1.20 , 求排水层厚度。

解: 由式 (B.3) 求出防渗面层渗水量:

$$\begin{aligned} q_f &= \frac{k_f}{2\delta_f} \sqrt{1+m^2} H^2 = \frac{1 \times 10^{-10} \times \sqrt{1+1.9^2}}{2 \times 0.1} \times 70^2 \\ &= 5.26 \times 10^{-6} [\text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})]。 \end{aligned}$$

由式 (B.5) 求得排水层厚度:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{q_f \sqrt{1+m^2}}{k_p} F_s = \frac{5.26 \times 10^{-6} \times \sqrt{1+1.9^2}}{2 \times 10^{-4}} \times 1.2 \\ &= 0.068 (\text{m}) = 6.8 (\text{cm})。 \end{aligned}$$

附录 C

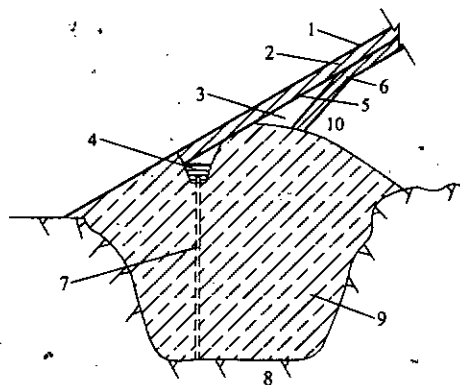
(资料性附录)

沥青混凝土防渗体与基础、岸坡和刚性建筑物的连接

C.1 碾压式沥青混凝土面板与基础、岸坡和刚性建筑物的连接

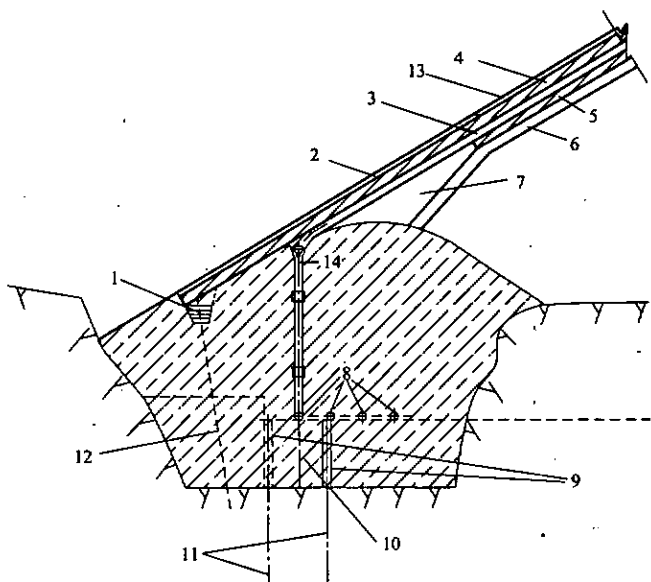
C.1.1 沥青混凝土面板与基础齿墙的连接

当河床基岩外露或覆盖层较薄时，可修建混凝土齿墙与沥青混凝土面板连接。图 C.1 和图 C.2 为无廊道的齿墙。前者适用于简式断面沥青混凝土面板；后者适用于复式断面沥青混凝土面板，可分段观测渗水。齿墙嵌入基岩内，顶部修成与沥青混凝土面板相同的坡度，顶部内侧修成圆弧状与沥青混凝土面板扩大部分连接。齿墙沿轴线方向设伸缩缝，伸缩缝用金属片或塑料止水带止水。



- 1—沥青玛蹄脂封闭层；2—沥青混凝土防渗面板；3—细粒沥青混凝土楔形体；
4—砂质沥青玛蹄脂回填；5—加筋网；6—整平胶结层；7—齿墙伸缩缝止水带；
8—岩石；9—混凝土齿墙；10—坝体

图 C.1 简式断面沥青混凝土面板与齿墙的连接



1—砂质沥青玛蹄脂回填；2—沥青混凝土加强层；3—排水层；4—防渗面层；
5—防渗底层；6—整平胶结层；7—细粒沥青混凝土楔形体；
8—可分段观测的排水管；9—灌浆管；10—齿墙；11—灌浆轴线；
12—伸缩缝止水带；13—封闭层；14—排水口

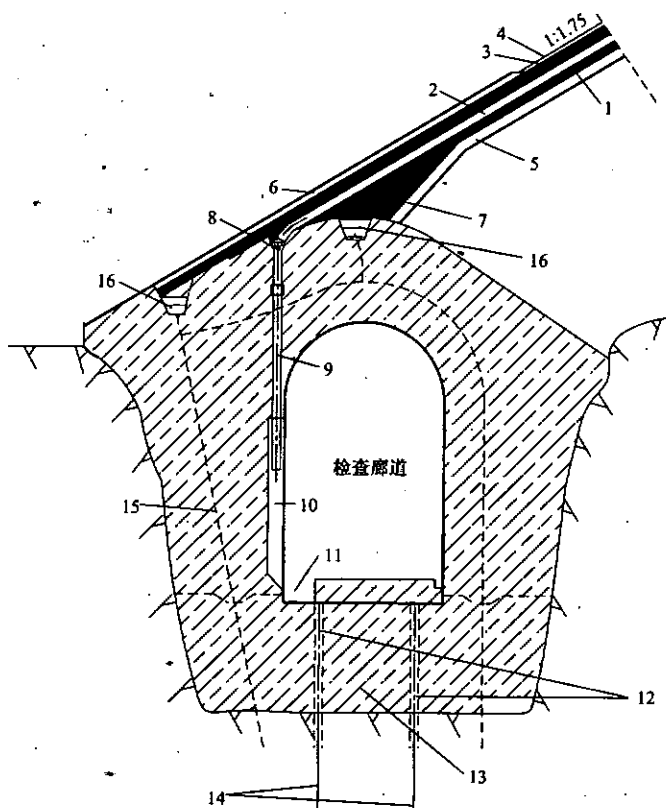
图 C.2 可分段观测的复式断面沥青混凝土面板与齿墙的连接

图 C.3 为有廊道的齿墙，适用于复式断面沥青混凝土面板和有渗水观测、排除渗水、在廊道内进行帷幕灌浆要求的中等高度以上的土石坝。

图 C.4 为日本八汐 90.5m 高沥青混凝土面板坝的面板与齿墙的连接。

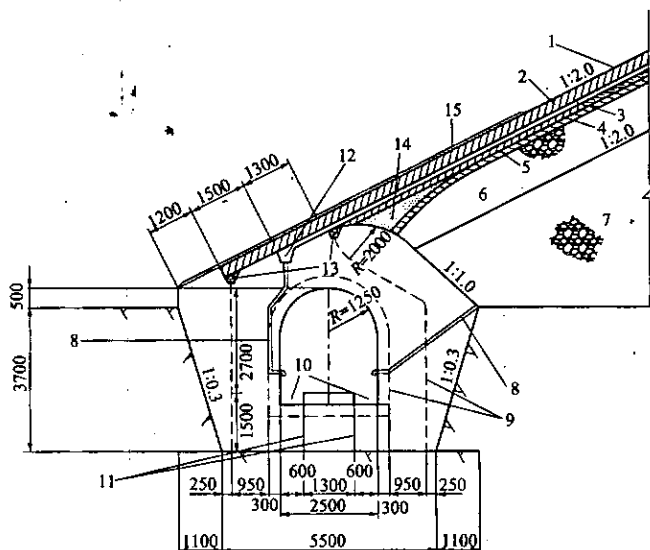
C.1.2 沥青混凝土面板与基础防渗墙的连接

沥青混凝土面板与基础混凝土防渗墙的连接如图 C.5 所示。它适用于坐落在深覆盖层上中等高度的简式断面沥青混凝土面板土石坝。



- 1—防渗底层；2—排水层；3—防渗面层；4—封闭层；
 5—整平胶结层；6—沥青混凝土加强层；
 7—细粒沥青混凝土楔形体；8—排水口；
 9—排水管 10mm；10—排水管壁龛；
 11—汇水槽；12—灌浆管；13—齿墙；
 14—灌浆轴线；15—伸缩缝止水带；
 16—砂质沥青玛蹄脂回填

图 C.3 复式断面沥青混凝土面板与有观测廊道齿墙的连接



1—封闭层；2—防渗面层；3—排水层；4—防渗底层；5—整平胶结层；6—垫层；
7—堆石；8—排水管（ $\phi 10\text{mm}$ ）；9—伸缩缝止水带；10—汇水槽；11—灌浆轴线；
12—排水口；13—砂质沥青玛蹄脂回填；14—细粒沥青混凝土楔形体；15—沥青混凝土加强层
尺寸单位：mm

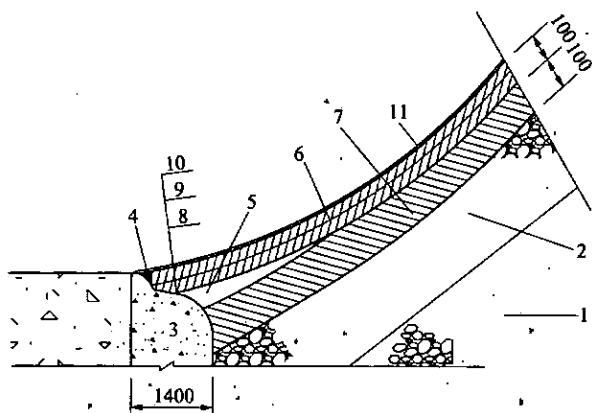
图 C.4 复式断面沥青混凝土面板与有观测排水廊道齿墙的连接

C.1.3 沥青混凝土面板与基础板桩灌注防渗墙的连接

沥青混凝土面板与基础板桩灌注防渗墙的连接，如图 C.6 所示。它适用于中等高度以下的筒式断面沥青混凝土面板土石坝。

C.1.4 沥青混凝土面板与岸坡的连接

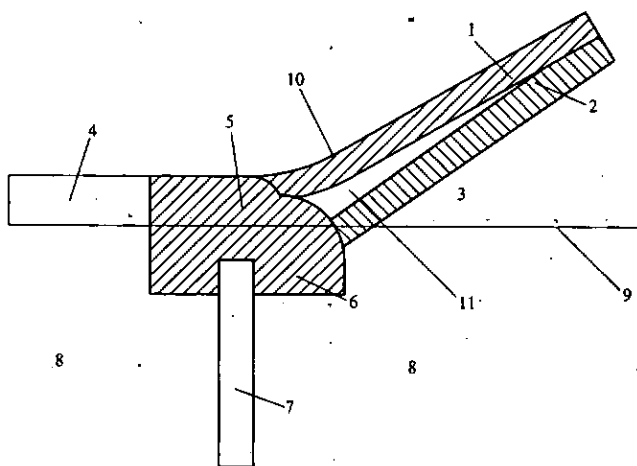
当两岸岸坡较陡，可能发生较大集中沉陷时，沥青混凝土面板与岸坡的连接可参考图 C.7 所示结构（1978 年修建的、坝高 85m 的陕西石砭峪定向爆破堆石沥青混凝土面板坝，面板分多层铺筑），主要是利用混凝土岸墩与沥青混凝土防渗层之间设置的橡胶沥青玛蹄脂滑动层和防渗层上的加强层，以适应较大变形的特性，防止集中沉陷变形而导致防渗层被拉裂，同时在防渗层底部增设聚酯网格，提高沥青混凝土的抗裂能力。



- 1—过渡料；2—垫层；3—混凝土防渗墙；4—封头；5—沥青砂浆楔形体；
6—防渗层（分二层铺筑）；7—整平胶结层（分二层铺筑）；8—冷底子油涂层；
9—沥青玛蹄脂层；10—橡胶沥青滑动层；11—封闭层

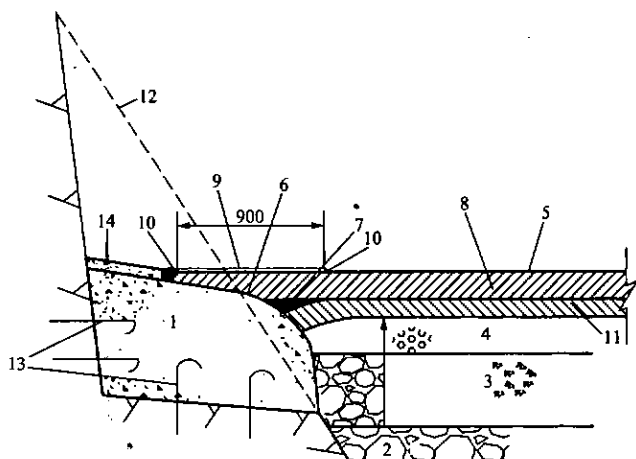
尺寸单位：mm

图 C.5 沥青混凝土面板与基础防渗墙的连接



- 1—防渗层；2—整平胶结层；3—砾石填筑体；4—回填土；5—沥青混凝土盖板；
6—沥青混凝土止水顶盖（特种沥青）；7—板桩灌注防渗墙；8—砂砾石覆盖层；
9—原河床线；10—封闭层；11—沥青混凝土楔形体

图 C.6 沥青混凝土面板与基础板桩灌注防渗墙的连接



- 1—混凝土岸墩；2—堆石；3—碎石；4—小砾石；5—封闭层；
 6—橡胶沥青玛蹄脂滑动层；7—细粒沥青混凝土楔形体；
 8—防渗层；9—玻璃丝布油毡加强层；
 10—橡胶沥青玛蹄脂封头；11—整平胶结层；
 12—原岸坡线；13—锚筋；14—常规混凝土

尺寸单位：mm

图 C.7 沥青混凝土面板与岸坡的连接

C.1.5 沥青混凝土面板与混凝土等刚性建筑物的连接

图 C.8 为沥青混凝土面板与混凝土重力墩的连接。

图 C.9 和图 C.10 为浙江天荒坪抽水蓄能电站上库沥青混凝土面板与进水口混凝土截水墙的连接。

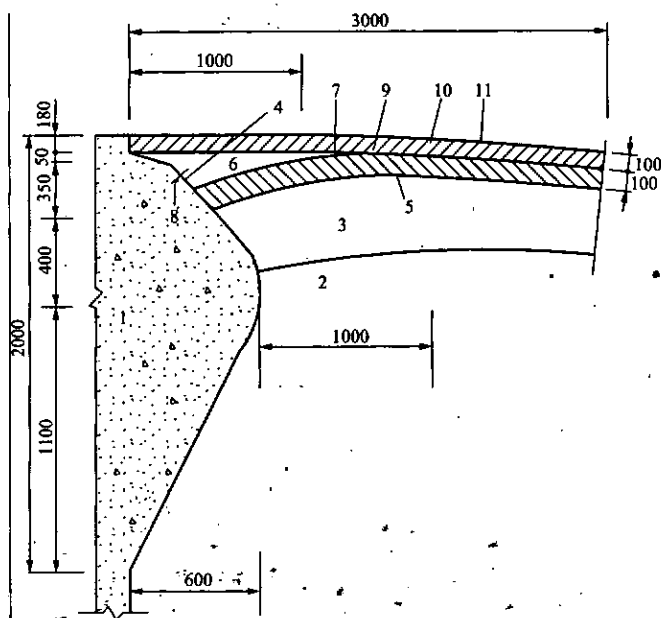
图 C.11 和图 C.12 为河南宝泉抽水蓄能电站上库沥青混凝土面板与副坝及库底廊道的连接结构。

图 C.13 和图 C.14 为河北张河湾抽水蓄能电站上水库复式断面沥青混凝土面板与廊道和进水塔的连接。

图 C.15 和图 C.16 为山西西龙池抽水蓄能电站下库库底沥青混凝土面板与库坡混凝土面板及廊道的连接。

C.1.6 沥青混凝土面板与坝顶的连接

图 C.17 为复式断面沥青混凝土面板与坝顶防浪墙的连接。



1—混凝土重力墩；2—堆石；3—碎石垫层；

4—乳化沥青涂层；5—整平胶结层；

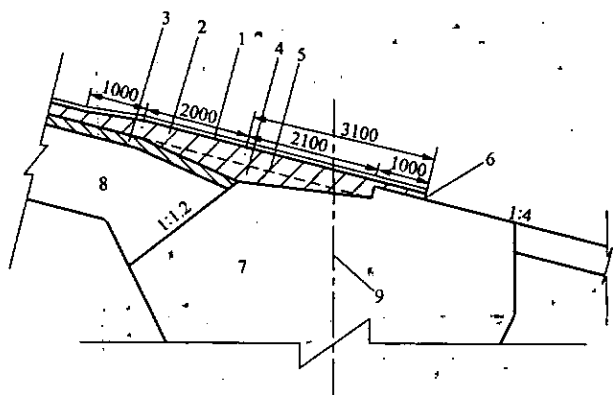
6—沥青砂浆楔形体；7—加筋层；

8—止水铜片；9—防渗面层；

10—氯丁橡胶尼龙层；11—封闭层

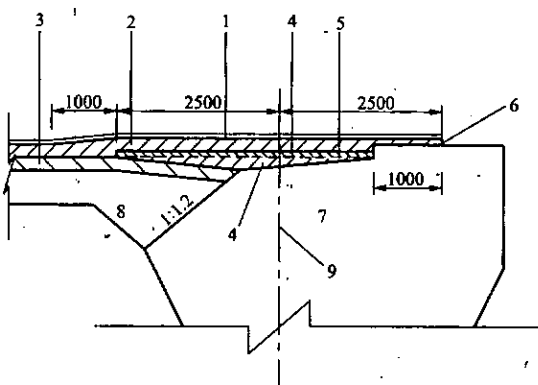
尺寸单位：mm

图 C.8 沥青混凝土面板与混凝土重力墩的连接



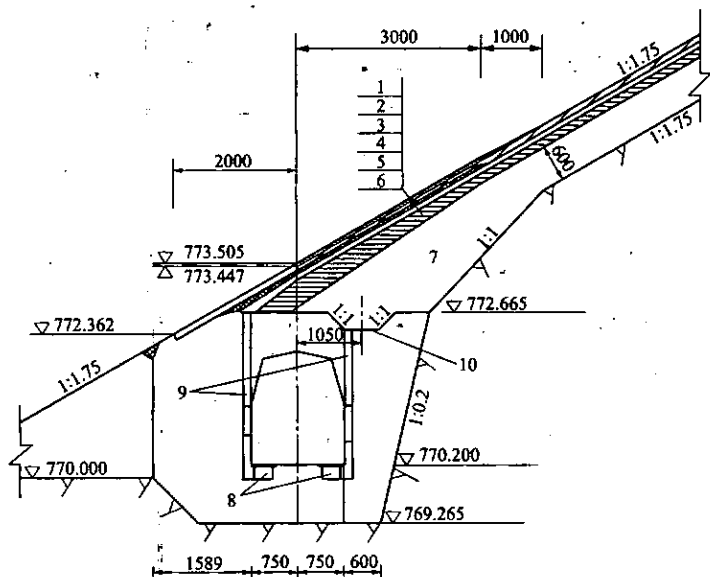
1—玛蹄脂封闭层(2mm); 2—防渗层(100mm); 3—整平胶结层(80mm);
4—加厚层; 5—加筋网; 6—角钢; 7—混凝土截水墙; 8—垫层; 9—截水墙中心线
尺寸单位: mm

图 C.9 沥青混凝土面板与斜坡截水墙连接



1—玛蹄脂封闭层(2mm); 2—防渗层(100mm); 3—整平胶结层(100mm);
4—加厚层(50mm); 5—加筋网; 6—角钢; 7—混凝土截水墙;
8—垫层; 9—截水墙中心线
尺寸单位: mm

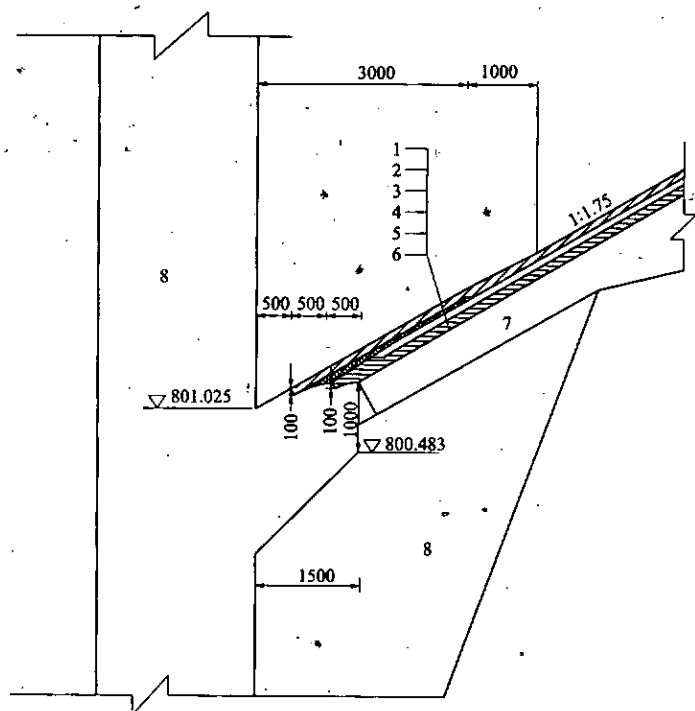
图 C.10 沥青混凝土面板与进水口前水平截水墙的连接



- 1—沥青玛蹄脂封闭层；2—防渗面层；3—加筋网；4—加厚层；
 5—排水层；6—整平胶结防渗层；7—碎石垫层；8—排水沟；
 9—塑料排水管（ $\phi 100$ ，间距 3m）；10—集水沟

高程单位：m，尺寸单位：mm

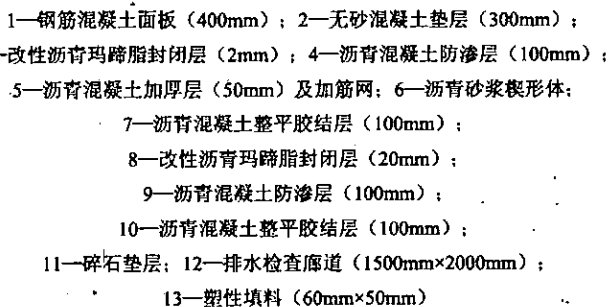
图 C.13 复式断面沥青混凝土面板与进水口上部廊道的连接



- 1—沥青玛蹄脂封闭层；2—防渗面层；3—加筋网；4—加强层；
5—排水层；6—整平胶结防渗层；7—碎石垫层；8—紫混凝土

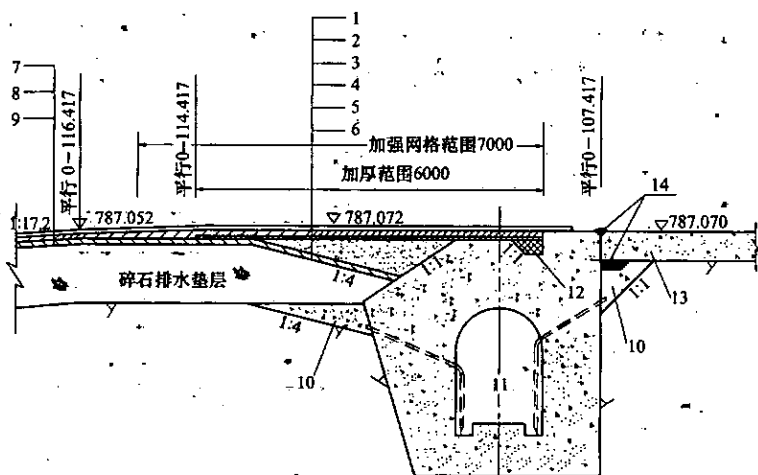
高程单位：m，尺寸单位：mm

图 C.14 复式断面沥青混凝土
面板与进水塔的连接



尺寸单位: mm

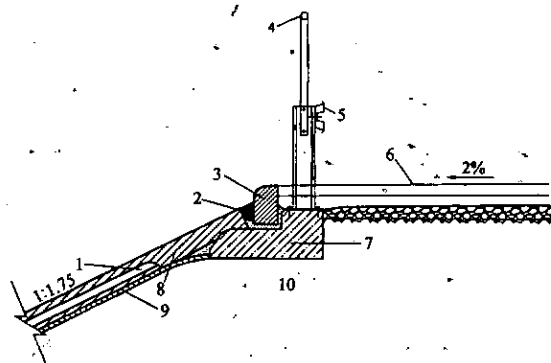
图 C.15 西龙池下库库底沥青混凝土面板与库坡混凝土面板的连接



- 1—沥青玛蹄脂封闭层 (2mm)；2—沥青混凝土防渗层 (100mm)；
 3—沥青混凝土加厚层 (50mm)；4—加筋网；5—沥青砂浆楔形体；
 6—沥青混凝土整平胶结层 (100mm)；7—沥青玛蹄脂封闭层 (2mm)；
 8—沥青混凝土防渗层 (100mm)；9—沥青混凝土整平胶结层 (100mm)；
 10—回填 C10 无砂混凝土；11—排水检查廊道 (1500mm×2000mm)；
 12—塑性填料 (60mm×50mm)；13—进出水口底板

高程单位：m，尺寸单位：mm

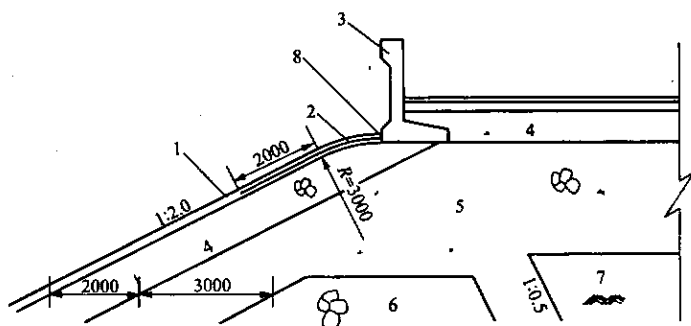
图 C.16 西龙池下库库底沥青混凝土面板与进出水口混凝土底板的连接



- 1—排水层；2—封头；3—路缘石；4—栏杆；5—扶手；6—路面；
 7—现浇混凝土；8—防渗层；9—整平胶结层；10—坝体

图 C.17 沥青混凝土面板与坝顶的连接

图 C.18、图 C.19、图 C.20、图 C.21 为三座抽水蓄能电站沥青混凝土面板与坝顶防浪墙的连接。



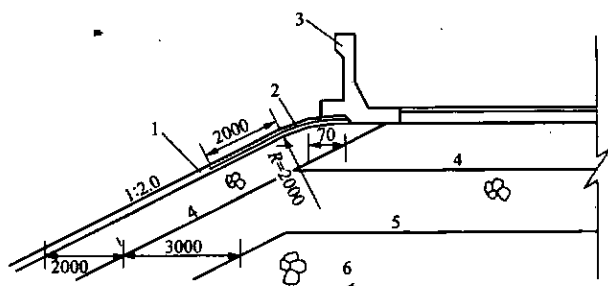
1—沥青混凝土面板 (202mm)；2—加筋网；3—防浪墙；

4—垫层料；5—过渡料；6—主堆石；

7—全强风化土石料；8—沥青玛蹄脂

尺寸单位：mm

图 C.18 天荒坪沥青混凝土面板与主坝防浪墙的连接

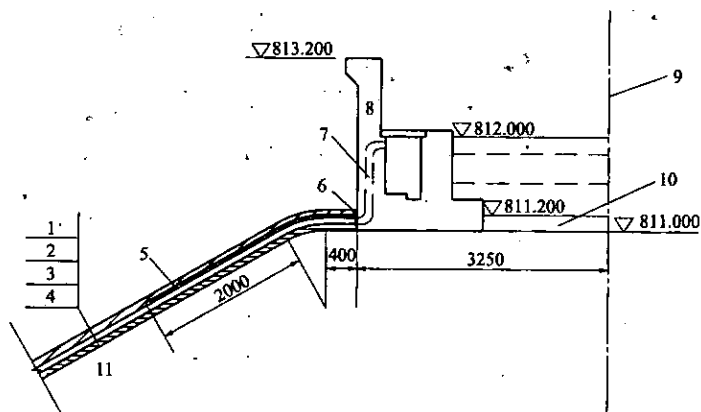


1—沥青混凝土面板 (202mm)；2—加筋网；3—防浪墙；

4—碎石垫层；5—堆石过渡层；6—主堆石

尺寸单位：mm

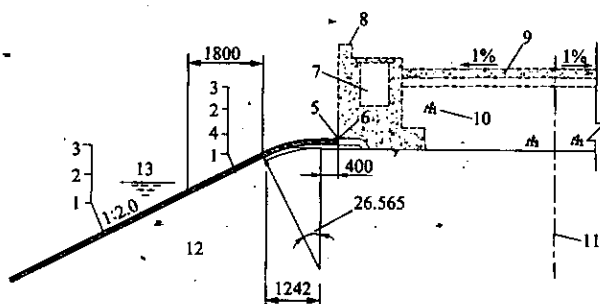
图 C.19 天荒坪沥青混凝土面板与东副坝防浪墙的连接



- 1—沥青玛蹄脂封闭层；2—防渗面层；3—排水层；4—整平胶结防渗层；
5—有聚酯网范围；6—沥青玛蹄脂填缝；7—通气管（ $\phi 70\text{mm}$ ）；8—防浪墙；
9—坝轴线；10—临时碎石路面；11—碎石垫层

高程单位：m，尺寸单位：mm

图 C.20 张河湾复式断面沥青混凝土面板与坝顶的连接



- 1—整平胶结层；2—防渗层；3—封闭层；4—加筋网；5—改性沥青玛蹄脂封缝；
6—止水带；7—电缆沟；8—栏杆基础；9—混凝土路面；10—回填碎石；
11—坝轴线；12—碎石填层；13—正常水位

尺寸单位：mm

图 C.21 西龙池下库沥青混凝土面板与坝顶的连接

C.2 碾压式沥青混凝土心墙与基础、岸坡和刚性建筑物的连接

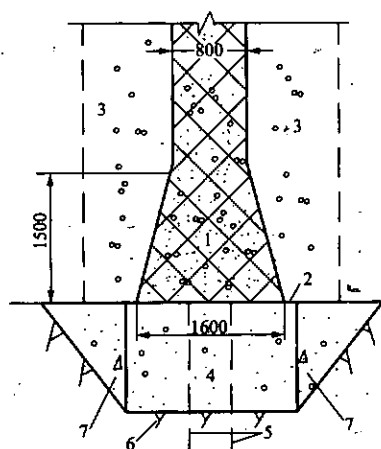
C.2.1 沥青混凝土心墙与岩基的连接

沥青混凝土心墙在底部设置混凝土基座与基岩连接。心墙在接近基座时应适当加厚。心墙与基座的连接面宜做成平面，也可做成弧面。连接面上可设或不设止水槽或金属止水带。基座内可设或不设廊道。混凝土基座可作为基础帷幕灌浆的盖重和工作平台。

图 C.22 为不设廊道和渗漏监测系统的心墙与基座的连接，适用于河床无覆盖层或覆盖层很薄的高、中、低坝。图 C.23 为挪威 90m 高的 Storvatn 斜心墙坝心墙与基座的连接。

图 C.24 为设有渗漏监测系统的心墙与基座的连接。

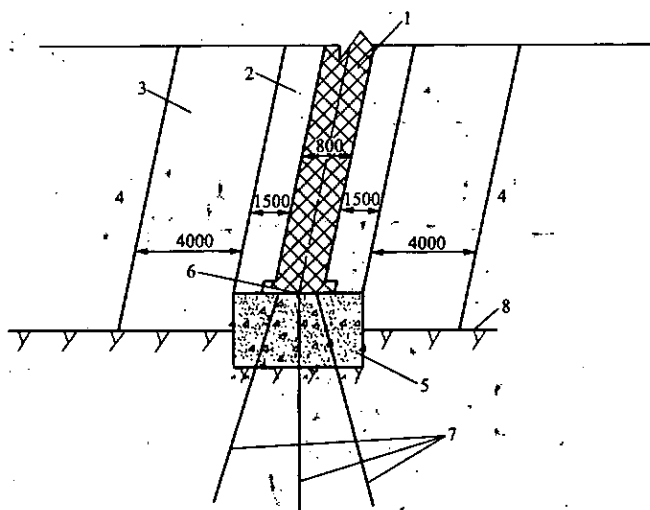
图 C.25 所示的心墙与基座的连接，适用于河床有覆盖层的中等高度的坝。



1—沥青混凝土心墙；2—砂质沥青玛蹄脂；3—过渡层；
4—混凝土基座；5—灌浆帷幕；6—基岩；7—回填砂卵石

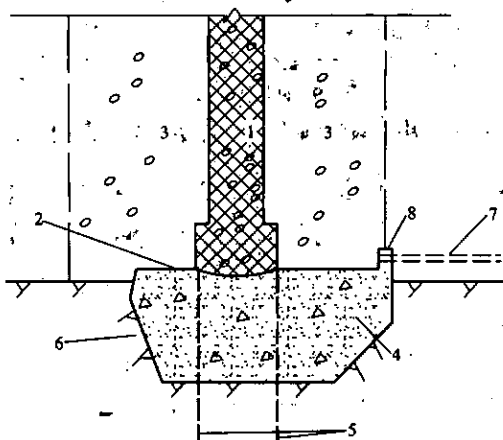
尺寸单位：mm

图 C.22 沥青混凝土心墙与基座的平面连接



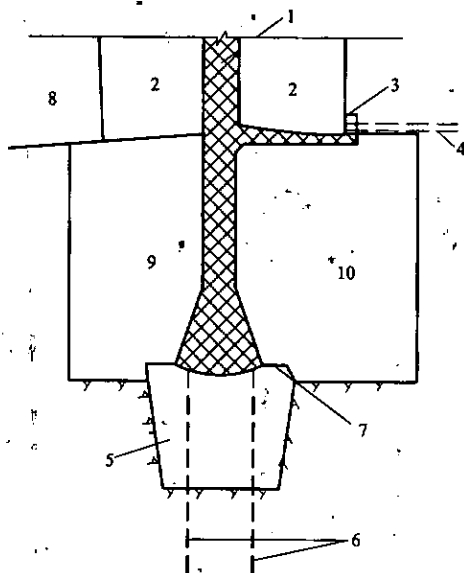
1—沥青混凝土心墙；2—过渡层1；3—过渡层2；4—坝壳；5—混凝土基座；
6—砂质沥青玛蹄脂；7—帷幕灌浆；8—基岩面
尺寸单位：mm

图 C.23 沥青混凝土斜心墙与基座的连接



1—沥青混凝土心墙；2—砂质沥青玛蹄脂层；3—过渡层；
4—混凝土基座；5—帷幕灌浆；6—基岩；7—排水管；8—导墙

图 C.24 底部设渗漏监测系统的沥青混凝土心墙与基座的连接



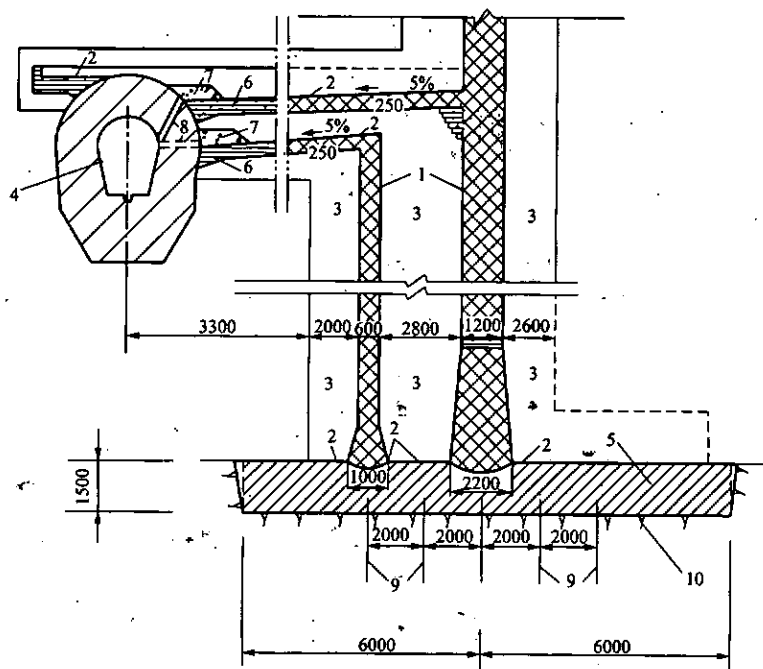
1—沥青混凝土心墙；2—过渡层；3—截水槽；4—排水管；
5—混凝土基座；6—灌浆帷幕；7—砂质沥青玛蹄脂；
8—堆石；9—回填黏土；10—砂卵石

图 C.25 中部设渗漏监测系统的心墙与基座的连接

图 C.26 所示为香港高岛沥青混凝土心墙及其监测廊道的布置。有两道心墙，下游侧心墙挡海水的渗漏，廊道布置在基座以上，监测上下游渗漏情况。这种布置适用于河床覆盖层较厚，下游侧水位较高的坝基。

图 C.27 为奥地利 Finstertal 斜心墙坝（心墙高 96m）沥青混凝土心墙与廊道基座的连接。廊道内可进行渗漏监测和帷幕灌浆。

图 C.28 为三峡茅坪防护坝沥青混凝土心墙与廊道基座的连接。适用于河床覆盖层较薄、中等高度以上的坝。

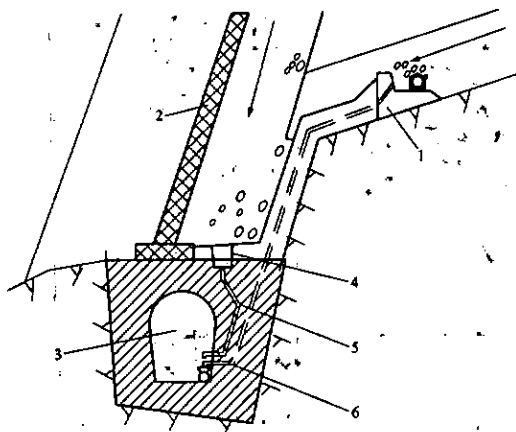


1—沥青混凝土心墙；2—砂质沥青玛蹄脂；3—过渡层；4—检测廊道；
5—混凝土基座板；6—上、下沥青混凝土防渗盖板；7—反滤料；
8—上、下排水管；9—帷幕灌浆；10—基岩
尺寸单位：mm

图 C.26 两道沥青混凝土心墙与混凝土基座及廊道的连接

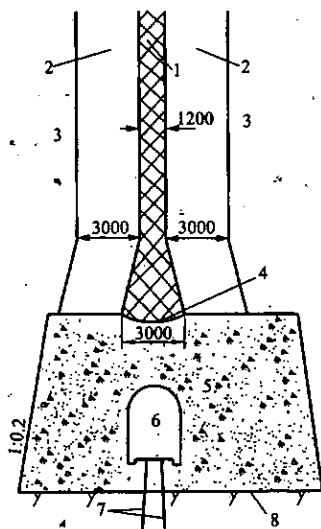
C.2.2 沥青混凝土心墙与基础防渗墙的连接

沥青混凝土心墙与基础混凝土防渗墙的连接如图 C.29、图 C.30 和图 C.31 所示，适用于覆盖层较厚的中等高度以上的坝。图 C.29 为茅坪防护坝岸坡坝段沥青混凝土心墙与混凝土防渗墙的连接，图 C.30 为 125.5m 高的四川冶勒坝沥青混凝土心墙与深混凝土防渗墙的连接。



1—有排水管的混凝土导墙；2—沥青混凝土心墙；3—监测廊道；4—排水口；
5—心墙渗水的排水管；6—雨水及地下渗水的排水管

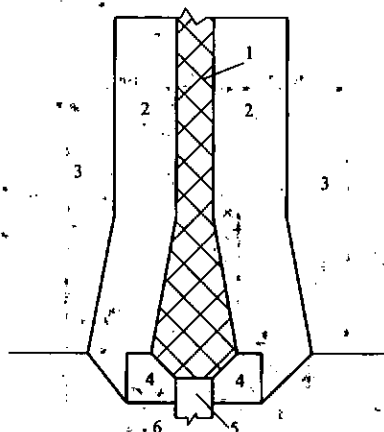
图 C.27 沥青混凝土斜心墙与混凝土廊道基座的连接



1—沥青混凝土心墙；2—过渡层；3—坝壳；4—砂质沥青玛蹄脂；
5—混凝土廊道基座；6—廊道；7—帷幕灌浆；8—基岩

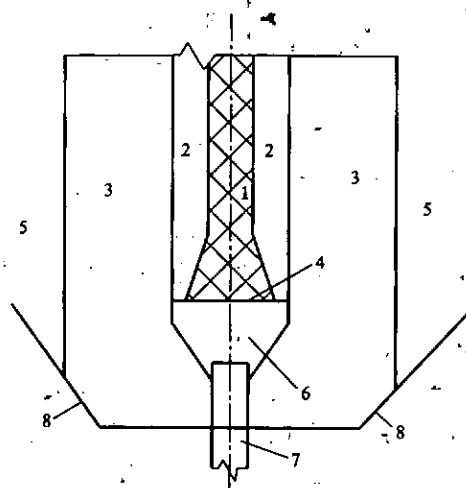
尺寸单位：mm

图 C.28 垂直沥青混凝土心墙与混凝土廊道基座的连接



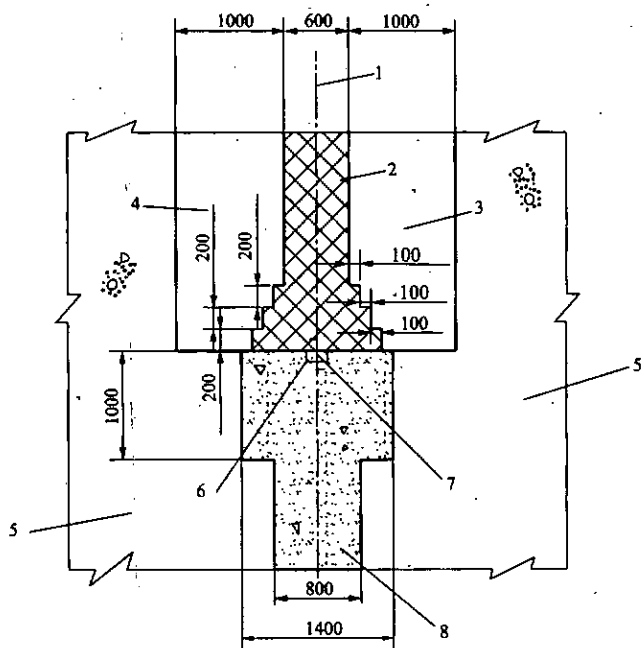
1—沥青混凝土心墙；2—过渡层；3—坝壳；4—混凝土底梁；
5—基础混凝土防渗墙；6—强风化岩

图 C.29 沥青混凝土心墙与基础混凝土防渗墙的连接



1—沥青混凝土心墙；2—过渡层 1；3—过渡层 2；4—砂质沥青玛蹄脂；
5—堆石坝壳；6—混凝土基座；7—混凝土防渗墙；8—开挖线

图 C.30 沥青混凝土心墙与基础混凝土防渗墙的连接



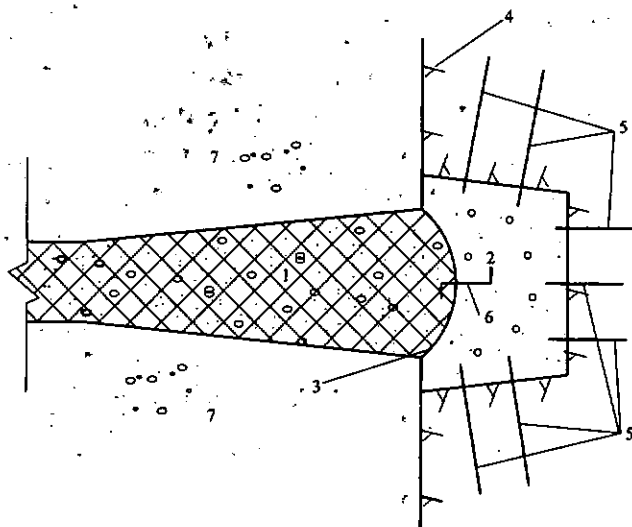
1—心墙轴线；2—沥青混凝土心墙；3—下游过渡层；4—上游过渡层；
5—坝体砂砾料；6—砂质沥青玛蹄脂槽；7—止水片；8—混凝土防渗墙

尺寸单位：mm

图 C.31 沥青混凝土心墙与混凝土防渗墙的连接

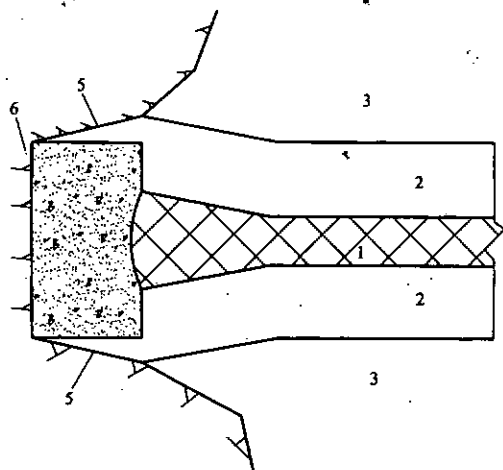
C.2.3 沥青混凝土心墙与岸坡基岩的连接

在岸坡基岩面上开挖凹槽，槽内浇筑混凝土基座。在平面上心墙厚度局部加厚与基座连接，接触面宜做成弧形，也可做成平面，在接触面上设或不设止水片。岸坡混凝土基座在立面上宜具有缓于 1:0.25（垂直：水平）的斜坡，以保持心墙与接触面为压力接缝。高、中坝、陡岸坡心墙与基座的接缝宜设止水片，如图 C.32 和图 C.33 所示。中低坝、平缓岸坡可不设止水片。



1—沥青混凝土心墙；2—混凝土基座；3—砂质沥青玛蹄脂；
4—岸坡基岩；5—锚筋；6—止水片；7—过渡层

图 C.32 沥青混凝土心墙与岸坡基座的连接平面示意图

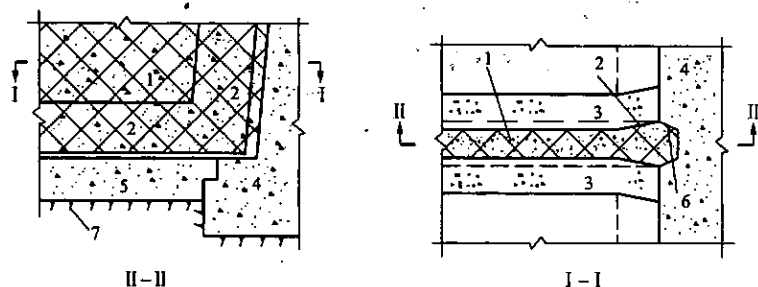


1—沥青混凝土心墙；2—过渡层；3—坝壳；4—混凝土基座；5—开挖线；6—基岩

图 C.33 沥青混凝土心墙与岸坡基座的连接平面示意图

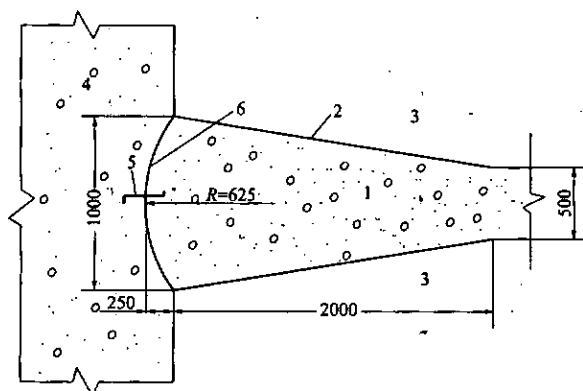
C.2.4 沥青混凝土心墙与刚性建筑物的连接

沥青混凝土心墙与混凝土边墙的连接，应在边墙的平面上设置凹槽，心墙局部加厚直接与边墙凹槽连接。边墙在立面上宜具有缓于 1:0.25（垂直:水平）的斜坡，以保持心墙与边墙为压力接缝。接缝面不设置止水片的连接如图 C.34 所示，适用于中、低坝；接缝面设置止水片的连接如图 C.35 所示。适用于中等高度以上的坝。



1—沥青混凝土心墙；2—心墙底部和侧面的加厚部分；3—过渡层；
4—混凝土建筑物；5—混凝土基座；6—砂质沥青玛蹄脂；7—基岩

图 C.34 沥青混凝土心墙与混凝土建筑物连接



1—沥青混凝土心墙；2—心墙侧面加厚部分；3—过渡层；
4—混凝土建筑物；5—止水片；6—沥青玛蹄脂。

尺寸单位: mm

图 C.35 沥青混凝土心墙与混凝土建筑物的连接

C.2.5 沥青混凝土心墙顶部与防浪墙的连接

图 C.36 为垂直沥青混凝土心墙与坝顶防浪墙的连接。

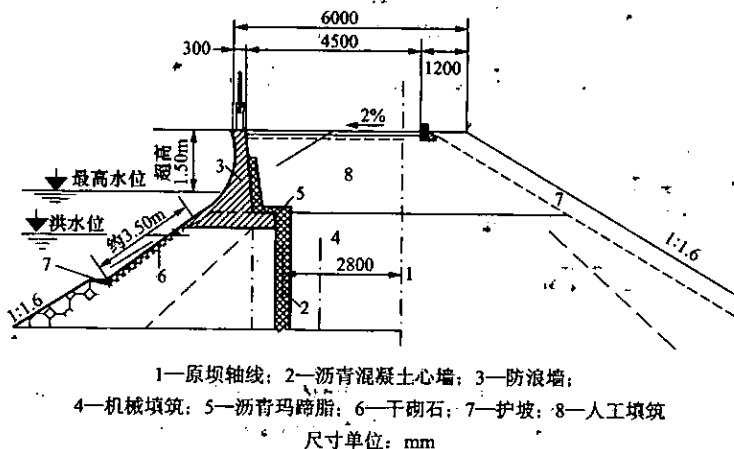


图 C.36 垂直沥青混凝土心墙与坝顶防浪墙的连接

C.3 浇筑式沥青混凝土心墙与基础和刚性建筑物的连接

浇筑式沥青混凝土心墙与基础和刚性建筑物的连接可参考碾压式沥青混凝土心墙设计。

附录 D

(资料性附录)

浇筑式沥青混凝土心墙的流变计算

D.1 流变速度

D.1.1 垂直流变速度

$$v = \frac{1}{(1-\beta)bDH^\beta} \left[(\gamma_a H - \gamma_w H - \lambda \gamma'_g H)^{1-\beta} - \frac{t}{KDH^{\beta+1}} \right]^{\frac{\beta}{1-\beta}} \quad (D.1)$$

$$\lambda = \frac{\cos^2 \theta}{\cos^2(\theta + \varphi')} \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\theta + \varphi') \sin \varphi'}{\cos \theta}} \right)^2 \quad (D.2)$$

$$D = \frac{2^{\beta+1}(\beta+2)[\eta]}{(1-\beta)b^{\beta+2}} \quad (D.3)$$

D.1.2 水平流变速度

$$u = \frac{vb}{H} \quad (D.4)$$

D.2 流变侧压力

心墙挡水以后的流变侧压力:

$$t = G[(\gamma_a H - p_w)^{(1-\beta)} - (\gamma_a H - p_t)^{(1-\beta)}] \quad (D.5)$$

$$G = \frac{2^{(\beta+1)}[\eta]K(\beta+2)H^{(\beta+1)}}{1.5^\beta(1-\beta)b^{(\beta+2)}} \quad (D.6)$$

式中:

 β ——无因次异变指数, 由流变试验确定; $[\eta]$ ——结构黏度, 由流变试验确定, $\text{Pa}^\beta \cdot \text{s}$; γ_a ——沥青混凝土容重, N/m^3 ;

γ'_s ——坝壳料的浮容重, N/m^3 ;

γ_w ——水容重, N/m^3 ;

λ ——坝壳料在饱和状态下的侧压力系数;

θ ——坝坡坡角, $(^\circ)$;

ϕ' ——坝壳料在饱和状态下的摩擦角, $(^\circ)$;

H ——坝高, m;

b ——心墙厚, m;

t ——时间, s;

K ——坝壳料的变形系数, m/Pa ;

p_w ——水压力, Pa;

p_t —— t 时间的流变侧压力, Pa。

D.3 算例

某浇筑式沥青混凝土心墙砂砾石坝, 高 50m, 心墙平均厚度 50cm, 当地年平均温度 8°C , 通过试验, 采用沥青混凝土配合比为: 沥青含量 12.5%, 矿粉含量 15.5%, 粒径小于 5mm 的细骨料含量 36%, 粒径为 5mm~20mm 粗骨料含量 36%, 容重 $\gamma = 20\text{kN/m}^3$ 。通过剪切流变试验得异变指数 $\beta = 2.2$, 结构黏度 $[\eta] = 9 \times 10^{15} \text{Pa}^\beta \cdot \text{s}$ 。坝壳料在饱和状态下的容重 $\gamma' = 12\text{kN/m}^3$, 坝壳料在饱和状态下的摩擦角 $\phi' = 30^\circ$, 坝壳料的变形系数 $K = 8 \times 10^{-9} \text{m/Pa}$, 坝坡平均坡度 1:2.5。

按以上公式计算可得:

坝壳料在水中的侧压力系数 $\lambda = 0.275$;

心墙在水库蓄水 1 年后顶部垂直流变速度 $v = 8.0097 \times 10^{-11} \text{m/s} = 2.53 \text{mm/a}$;

心墙流变引起宽度方向的扩宽速度 $u = 8.0097 \times 10^{-13} \text{m/s} = 0.0253 \text{mm/a}$;

心墙在水库蓄水 1 年后的流变侧压力, 通过试算得 0.518MPa 。

心墙在水库蓄水后各不同年限的流变速度及侧压力见表 D.1。

表 D.1 心墙在水库蓄水后各不同年限的流变速度及侧压力

年 数	1	2	5	10	50
心墙顶垂直流变速度 mm/a	2.53	2.47	2.33	2.11	1.12
心墙水平扩宽速度 mm/a	0.025 3	0.024 7	0.023 3	0.021 1	0.011 2
流变侧压力 MPa	0.518	0.535	0.579	0.635	0.815

附录 E

(资料性附录)

浇筑式沥青混凝土面板设计

E.1 浇筑式沥青混凝土面板由护面板和沥青混凝土防渗层组成。面板应满足防渗性、流变稳定性、方便施工要求。沥青混凝土面板防渗层厚度宜为 6cm~10cm。浇筑式沥青混凝土防渗面板的配合比参数范围可为：沥青占沥青混合料总重的 11%~16%，填料占矿料总重的 16%~20%，骨料的最大粒径为 4.75mm~13.2mm，级配指数 0.24~0.3。沥青采用 50 号水工沥青、道路沥青或掺配沥青。

E.2 护面板应按预制钢筋混凝土构件设计，满足沥青混凝土防渗层流变侧压力对强度和刚度的要求。护面板厚度可为 5cm~10cm，长度可为 100cm~200cm，高度可为 40cm~60cm。护面板四周应设企口，用锚筋固定于坝面。

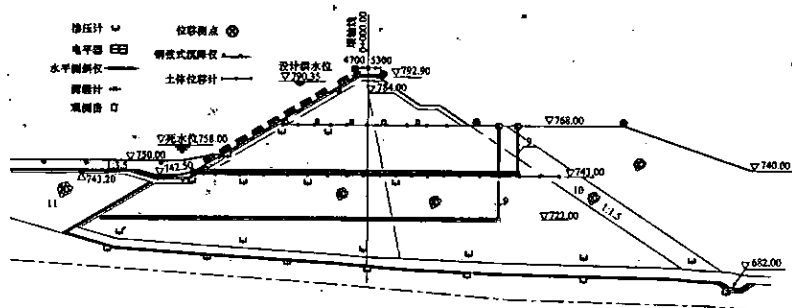
E.3 与浇筑式沥青混凝土防渗层相接触的上游坝面应进行凿平和清理；蜂窝麻面应凿去松动部分并回填水泥砂浆，坝面应烘干并喷洒或涂刷阳离子乳化沥青或稀释沥青。

E.4 护面板应平整、干燥、洁净、无缺陷，护面板内侧应均匀喷洒或涂刷阳离子乳化沥青或稀释沥青。

E.5 沥青混凝土防渗面板与基础、岸坡的连接，可设置截渗槽或在混凝土基座中加设具有耐高温（160℃~180℃）性能的止水片。

E.6 沥青混凝土防渗面板周边应可靠封闭，顶部宜用水泥砂浆封闭，临空底面和侧面宜用“L”形钢筋混凝土护面板封闭。

E.7 混凝土坝上游面防渗加固范围内的永久横缝应进行处理，可采取凿槽等方式。槽内先铺设土工膜或油毡类材料，再浇筑面板沥青混合料填充嵌缝材料。



b)

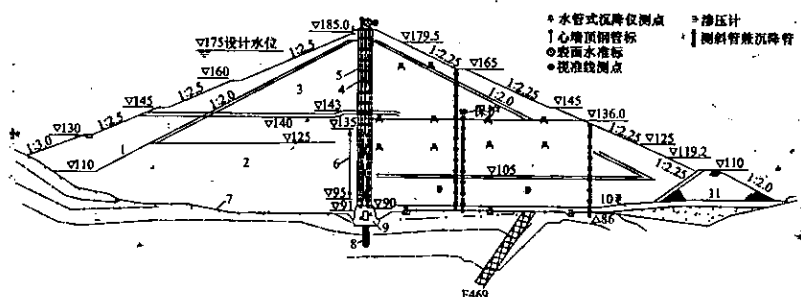
b) 剖面布置图

- 1—排水沟; 2—排水棱体轴线; 3—堆渣平台; 4—排水廊道轴线;
5—坝后堆渣范围线; 6—排水廊道轴线; 7—沥青混凝土面板; 8—黏土铺盖;
9—水平测斜仪固定端; 10—分层碾压区; 11—堆渣

图 F.1 沥青混凝土防渗面板监测布置图 (二)

F.2 沥青混凝土心墙监测布置实例

F.2.1 沥青混凝土心墙土石坝心墙监测仪器布置实例 1 (见图 F.2、表 F.1)



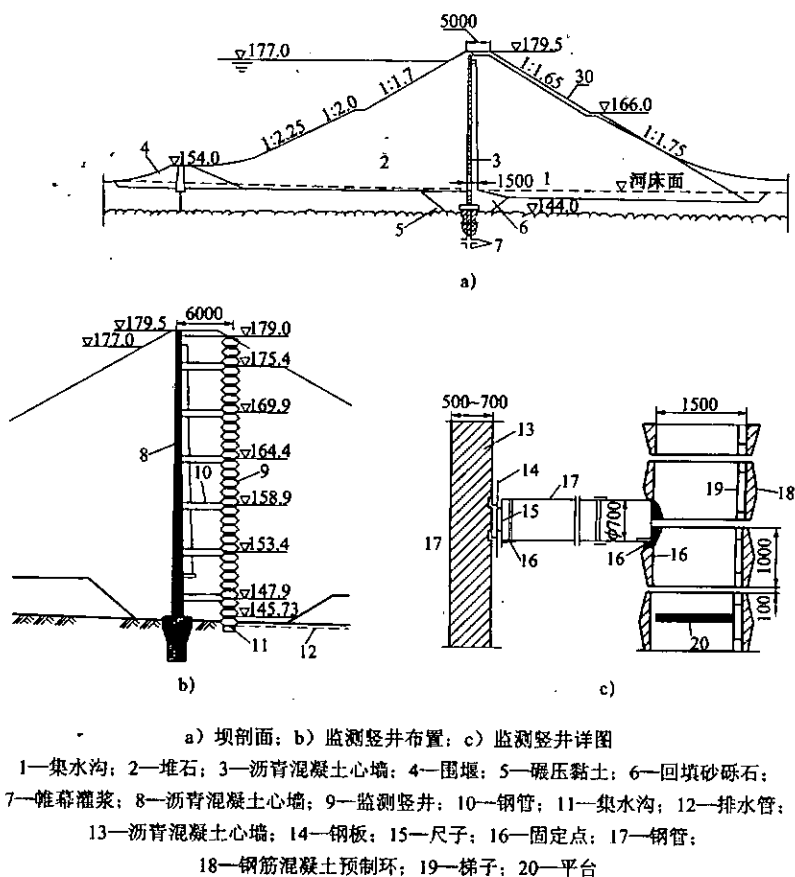
- 1—石渣料; 2—风化砂; 3—石渣混合料; 4—沥青混凝土心墙;
5—过渡层; 6—心墙应变裂缝监测区; 7—清基后地面线;
8—帷幕灌浆; 9—基座; 10—排水垫层; 11—排水水体

图 F.2 沥青混凝土心墙土石坝心墙断面监测仪器布置图

表 F.1 图 F.2 沥青混凝土心墙土石坝心墙变形监测仪器布置详细说明

位错计：（符号）JW									
水平位错计									
桩号		0+340	0+344.4	0+546	0+580	0+700	0+705	0+816	0+850
坝轴距	m	0.5	0.5	-0.7	0	0	0	0.5	0.5
高程	m	135.2	135.2	104	93.8	91.2	91.2	100.2	115
垂直位错计									
桩号		705		704					
	m	-0.6（墙前）		0.6（墙后）					
高程	m	95 100...135 140...180 185（5m 递增）							
渗压计：（符号）P									
桩号		0+580		0+700		0+850			
高程	m	94.1, 94.1		91.4, 91.4, 100.1		115.7, 115.6, 127.1			
坝轴距	m	-3, 3		-3, 3, 1		-1.0, 1.0, 1.0			
压应力计和界面土压力计：（符号）C 和 M									
桩号		0+580		0+700		0+850			
高程	m	C01, E01, E02		C02, M03, M04		C03			
坝轴距	m	0, -3, 3		0, -3, 3		0			
应变计：（符号）S									
桩号		0+700				0+701			
坝轴距	m	-0.6（1~27 奇数）				0.6（1~28 偶数）			
高程	m	95 98...131 134（3m 递增）							
温度计：（符号）T									
桩号		0+580		0+700		0+850			
高温温度计	m	103 112...139		103 112...176 185		115*121 131 139			
常温温度计	m	*在 0+850 断面高程 115 处补增的温度计							
- 钢钢水平位移计：（符号）GS									
桩号		0+580		0+700		0+850			
高程	m	137.6							
测斜兼沉降管：（符号）IN									
桩号		0+580		0+700		0+850			
坝轴距	m	-2.5, 2.5		-2, 2.5		2.5			
水管式沉降仪：（符号）WS									
桩号		0+580	0+580	0+700	0+700	0+850	0+850		
高程	m	120.6	137.6	120.6	137.6	120.6	137.6		
坝轴距	m	6	6	6	6	6	6		

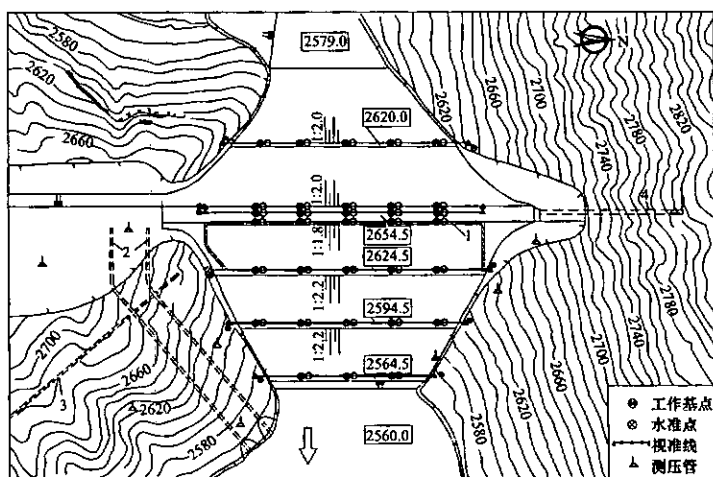
F.2.2 沥青混凝土心墙土石坝心墙变形监测仪器布置实例 2 (见图 F.3)



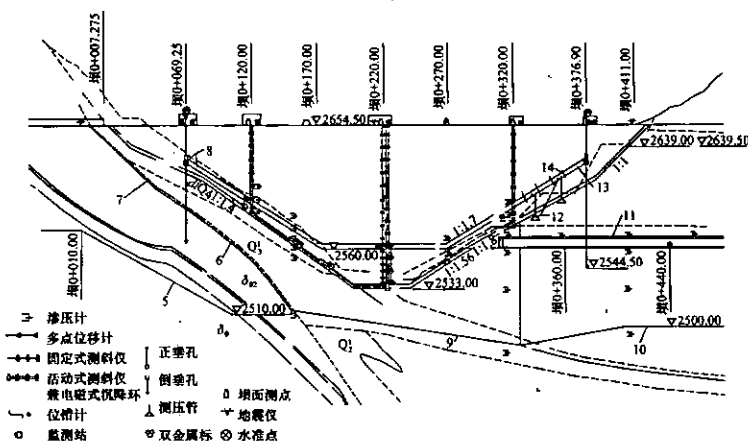
高程单位: m, 尺寸单位: mm

图 F.3 沥青混凝土心墙变形监测竖井布置图

F.2.3 沥青混凝土心墙土石坝心墙监测仪器布置实例 3 (见图 F.4)



a)



b)

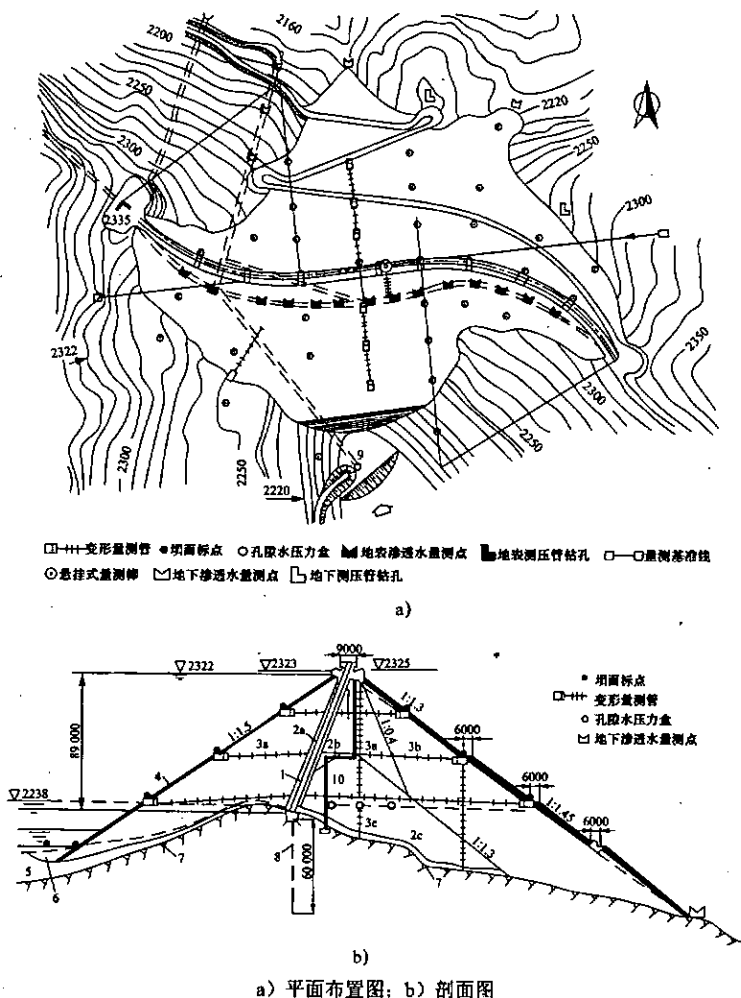
a) 平面布置图; b) 剖面图

- 1—监测廊道; 2—交通廊道; 3—排水廊道; 4—灌浆廊道; 5—帷幕灌浆底线;
6—防渗墙底线; 7—基岩表面线; 8—监测廊道; 9—防渗墙底线;
10—廊道防渗墙底线; 11—防渗墙与廊道接头灌浆; 12—测压管、
沉陷标点间隔布; 13—监测廊道; 14—沉降缝、沿廊道全线布置

高程单位: m, 尺寸单位: mm

图 F.4 沥青混凝土心墙土石坝心墙监测仪器布置实例 3

F.2.4 沥青混凝土心墙土石坝心墙监测仪器布置实例4 (见图 F5)



- 1—沥青混凝土心墙, 厚 500mm, 600mm, 700mm; 2a、2b—过渡层; 2c—排水层;
3a、3b、3c—坝壳区; 4—块石护坡; 5—覆盖层; 6—上游坝趾; 7—基岩;
8—帷幕灌浆; 9—水电站进水口与泄水底孔进水口; 10—监测井

高程单位: m, 尺寸单位: mm

图 F.5 沥青混凝土心墙土石坝心墙监测仪器布置实例 4

土石坝沥青混凝土 面板和心墙设计规范

条文说明

目 录

1 范围	69
4 总则	71
5 沥青混凝土原材料的技术要求	72
6 沥青混凝土的技术要求及配合比	84
7 碾压式沥青混凝土面板设计	92
8 碾压式沥青混凝土心墙设计	108
9 浇筑式沥青混凝土心墙设计	118
10 安全监测	127

1 范 围

从已建成的工程统计来看，沥青混凝土面板坝的适用坝高，绝大多数在 70m 以下，奥地利奥申尼可（Oshenik）坝，最大填筑高度 108m，面板最大高度 81m，分四期建成。日本八沙面板坝高 90.5m。根据国际大坝委员会对近 300 座沥青混凝土面板坝工程的统计资料，坝高在 70m 以下的占了 90% 以上。表 1 为坝高统计表，可供参考。

表 1 沥青混凝土面板坝坝高统计表

坝高 m	数目 座	所占比例 %	累计所占比例 %
<15	62	22.14	22.14
15~30	94	33.57	55.71
31~50	66	23.57	79.29
51~70	42	15.00	94.29
71~99	15	5.36	99.64
>100	1	0.36	100.00
总 计	280	100	

目前世界上已建成的沥青混凝土心墙坝，最高的是奥地利的 Finstertal 坝，坝高 149m，但它的心墙垂直高度仅 96m。挪威的 Storglomvatn 坝，高 125m。我国冶勒沥青混凝土心墙坝高 124.5m。土耳其已设计了一座高 139m 的 Kopru 坝，我国正在设计的有 170m 高的去学坝，德国 Strabag 公司和 Breth 教授也曾为我国珊溪坝论证过 150m 高沥青混凝土心墙坝的方案。1988 年第 16 届国际大坝会议上曾提出沥青混凝土心墙坝是今后高土石坝建设最有竞争力的坝型之一。故规定本标准适用于高度 150m 以下的心墙

土石坝，超过 150m 以上的坝应专门论证。

我国在东北、新疆地区已建成浇筑式沥青混凝土心墙砂砾石坝、堆石坝或围堰近 20 座，高 50m 以上的有 3 座，其他多为 20m~40m 高。浇筑式沥青混凝土心墙使用的沥青，我国早期多采用低延度、低针入度、高含蜡量的掺配沥青或渣油。近期随石油工业的发展和炼油技术的提高，则多采用中、轻交通道路沥青或重交通道路沥青，沥青针入度多为 40~70 (1/10mm)，针入度指数在 -2~+2 之间，沥青含量较高，一般在 11%~15% 之间。根据已建工程实践表明，浇筑式沥青混凝土心墙在低温下的弯曲应变在 1% 以上，可以适应土石坝的变形，流变变形和流变压力也可以保证土石坝的稳定，可以人工浇筑，不需机械碾压，可以在 -20℃~-30℃ 气温情况下浇筑。所以这种坝型多在寒冷地区、又需冬季施工、坝体变形较大的情况下采用。据文献报道，前苏联曾拟建 70m、100m 和 140m 高的浇筑式沥青混凝土心墙坝。目前国内对高土石坝浇筑式沥青混凝土心墙缺乏工程实践经验，故规定用于中、低高度的土石坝。

4 总 则

4.0.2 本标准规定了沥青混凝土面板和心墙防渗结构的设计要求。沥青混凝土防渗体只是土石坝等水工建筑物的一个组成部分。整个建筑物的防渗体系，还应包括坝基和岸坡的防渗。土石坝等水工建筑物的设计应遵循有关国家、电力行业等标准。

4.0.5 沥青混凝土的三种防渗结构类型，应根据工程的具体条件和已建工程的经验，通过技术经济比较进行选择。

4.0.6 沥青混凝土面板或心墙与基础、岸坡及刚性建筑物的连接部位是沥青混凝土防渗结构的薄弱环节，不均匀变形大，适应变形的能力较差，很易开裂，必须慎重设计，保证防渗的可靠性。设计中，除参考已建类似工程经验外，还可进行必要的计算和试验研究。

4.0.7 沥青混凝土的原材料和配合比可根据其技术指标的要求，在工程预可行性设计阶段可根据本标准附录 A 或已建工程通过工程类比拟定，在工程可行性和技施设计阶段应通过试验选定。

4.0.8 在抗震计算中，应对地震动参数进行分析，选取合适的动峰值加速度。面板设计计算工况，温度宜取面板可能遇到的最低温度，地震荷载作用于面板时的最大拉应变；心墙设计时，温度可取多年平均气温。

4.0.9 本标准的试验方法除有特别说明外，均采用已经颁布的 DL/T 5362 《水工沥青混凝土试验规程》。

5 沥青混凝土原材料的技术要求

5.0.2 沥青材料的品种和标号选择除要考虑工程类别、当地气温、运用条件和施工要求外，更要考虑沥青混凝土的结构性能要求。

我国沥青品种和质量近 20 年已有很大的提高和发展，原道路沥青质量标准已经不再使用。2004 年交通部行业标准 JTGF40《公路沥青路面施工技术规范》中提出了新的“道路石油沥青技术要求”，但是国家标准 GB 50092《沥青路面施工及验收规范》将道路沥青依旧分为重交通道路沥青和中、轻交通道路沥青。由于水电水利工程中应用沥青的量不大，目前我国还没有正式颁布水工沥青国家标准，工程中多采用目前已有的水工沥青行业标准和企业标准，或采用道路沥青标准。

本标准提出了水工沥青的技术要求，可作为水电工程选择沥青的依据。选择沥青时可参考重交通道路石油沥青及中、轻道路石油沥青的国家标准，也可参考我国目前已有的水工沥青行业标准和企业标准，亦可参考 2004 年交通部行业标准《公路沥青路面施工技术规范》中提出的“道路石油沥青技术要求”，或可采用国外沥青及相应的标准。对于沥青混凝土性能要求特别严格的沥青混凝土面板防渗层，可根据某些工程沥青混凝土的特殊性能要求提出专门的沥青质量指标要求，由沥青厂家专门生产；也可采用改性沥青。我国三峡茅坪溪和四川冶勒土石坝沥青混凝土心墙采用了与 AH-70 号重交通道路相似的水工沥青；山西西龙池抽水蓄能电站上水库库坡沥青混凝土面板防渗层和封闭层采用了 AH-90 号重交通道路沥青作为基质的 SBS 改性沥青，其他层采用 AH-90 号沥青；浙江天荒坪抽水蓄能电站上水库沥青混凝土面板采用中东进口的 B80 号沥青。

我国可供参考的几种沥青的标准如下：

(1) 国家标准 GB 50092《沥青路面施工及验收规范》中关于道路石油沥青质量技术要求见表 2。

表 2 重交通道路石油沥青质量要求

试验项目		单位	重交通道路石油沥青质量要求					试验方法
			AH-130	AH-110	AH-90	AH-70	AH-50	
针入度 (25℃, 100g, 5s)		1/10mm	120~140	100~120	80~100	60~80	40~60	GB/T 4509
延度 (5cm/min, 15℃)		cm	≥100	≥100	≥100	≥100	≥80	GB/T 4508
软化点 (环球法)		℃	40~50	41~51	42~52	44~54	45~55	GB/T 4507
闪点 (开口法)		℃	≥230					GB/T 267
含蜡量 (蒸馏法)		%	≤3					SH/T 0425
密度 (15℃)		g/cm ³	实测记录					GB/T 8928
溶解度 (三氯乙烯)		%	≥99.0					GB/T 11148
薄膜加热 试验 163℃ 5h	质量损失	%	≤1.3	≤1.2	≤1.0	≤0.8	≤0.6	GB/T 5304
	针入度比	%	≥45	≥48	≥50	≥55	≥58	GB/T 4509
	延度 (25℃)	cm	≥75	≥75	≥75	≥50	≥40	GB/T 4508
	延度 (15℃)	cm	实测记录					GB/T 4508

(2) 交通部行业标准 JTG F40《公路沥青路面施工技术规范》中关于道路石油沥青技术要求见表 3。

表3 道路石油沥青技术要求

指标	单位	等级 ^s	沥 青 标 号												试验方法 ^a				
			160 ^d	130 ^d	110	90	70 ^e				50 ^e	30 ^d							
针入度 (25℃, 5s, 100g)	0.1mm		140 ~ 200	120 ~ 140	100~120		80~100		60~80				40~ 60	20~ 40	T0604				
适用的 气候 分区 ^f			d	d	2-1	2-2	3-2	1-1	1-2	1-3	2-2	2-3	1-3	1-4	2-4	1-4	d	r	
针入度 指数 PI ^h		A	-1.5~+1.0															T0604	
		B	-1.8~+1.0																
软化点 (R&B)	℃	A	≥38	≥40	≥43	≥45	≥44	≥46	≥45	≥49	≥55								T0606
		B	≥36	≥39	≥42	≥43	≥42	≥44	≥43	≥46	≥53								
		C	≥35	≥37	≥41	≥42	≥42	≥44	≥43	≥45	≥50								
60℃ 动力 黏度 ^b	Pa·s	A		≥60	≥120	≥160	≥140	≥180	≥160	≥200	≥260						T0620		
10℃ 延度 ^b	cm	A	≥50	≥50	≥40	≥30	≥45	≥30	≥20	≥20	≥15	≥25	≥20	≥15	≥10	≥8	T0605		
		B	≥30	≥30	≥30	≥20	≥30	≥20	≥15	≥10	≥20	≥15	≥10	≥10	≥8				

表 3 (续)

指标	单位	等级 ^a	沥 青 标 号						试验方法 ^a	
			160 ^d	130 ^d	110	90	70 ^e	50 ^e	30 ^d	
15℃ 延度	cm	A、B	≥100						≥50	
		C	≥80	≥80	≥60	≥50	≥40	≥30	≥20	
含蜡量 (蒸馏 法)	%	A	≤2.2						TO615	
		B	≤3.0							
		C	≤4.5							
闪点	℃		≥230		≥245		≥260		TO611	
溶解度	%		≥99.5						TO607	
密度 (15℃)	g/cm ³		实 测 记 录						TO603	
TFOT (或 RTFOT) 后 ^a										TO610 或 TO609
质量 变化	%		-0.8~0.8							
残留针 入度比 (25℃)	%	A	≥48	≥54	≥55	≥57	≥61	≥63	≥65	TO604
		B	≥45	≥50	≥52	≥54	≥58	≥60	≥62	
		C	≥40	≥45	≥48	≥50	≥54	≥58	≥60	
残留 延度 (10℃)	cm	* A	≥12	≥12	≥10	≥8	≥6	≥4		TO605
		B	≥10	≥10	≥8	≥6	≥4	≥2		

表 3 (续)

指标	单位	等级 ^g	沥 青 标 号					试验方法 ^a
			160 ^d	130 ^d	110	90	70 ^e	
残留 延度 (15℃)	cm	C	≥40	≥35	≥30	≥20	≥15	≥10
<p>a 试验方法按照现行《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052)规定的方法执行。用于仲裁试验求取 PI 时的 5 个温度的针入度关系的相关系数不得小于 0.997。</p> <p>b 经建设单位同意,表中 PI 值、60℃动力黏度、10℃延度可作为选择性指标,也可不作为施工质量控制指标。</p> <p>c 70 号沥青可根据需要要求供应商提供针入度范围为 60~70 或 70~80 的沥青, 50 号沥青可要求提供针入度范围为 40~50 或 50~60 的沥青。</p> <p>d 30 号沥青仅适用于沥青稳定基层。130 号和 160 号沥青除寒冷地区可直接在中低级公路上直接应用外,通常用作乳化沥青、稀释放青、改性沥青的基质沥青。</p> <p>e 老化试验以 TFOT 为准,也可以 RTFOT 代替。</p> <p>f 气候分区见表 4。</p> <p>g 道路沥青适用范围: A 级沥青适用于各个等级的公路和任何场合和层次; B 级沥青适用于高速公路、一级公路沥青下面层及以下的层次,二级及以下公路的各个层次;也适用于做改性沥青、乳化沥青、改性乳化沥青、稀释放青的基质沥青; C 级沥青适用于三级及三级以下公路的各个层次。</p>								
								TO605

表4 气候分区表

气候区名		最热月平均最高气温 ℃	年极端最低气温 ℃	备注
1-1	夏炎热冬严寒	>30	<-37	
1-2	夏炎热冬寒		-37~-21.5	
1-3	夏炎热冬冷		-21.5~-9.0	
1-4	夏炎热冬温		>-9.0	
2-1	夏热冬严寒	20~30	<-37	
2-2	夏热冬寒		-37~-21.5	
2-3	夏热冬冷		-21.5~-9.0	
2-4	夏热冬温		>-9.0	
3-1	夏凉冬严寒	<20	<-37	不存在
3-2	夏凉冬寒		-37~-21.5	
3-3	夏凉冬冷		-21.5~-9.0	不存在
3-4	夏凉冬温		>-9.0	不存在

(3) 石化行业标准 SH/T 0799《水工石油沥青》，见表5。

表5 水工石油沥青技术要求及试验方法

项 目	单位	质 量 指 标			试验方法
		1号	2号	3号	
针入度(25℃, 100g, 5s)	1/10mm	70~90	60~80	40~60	GB/T 4509
延度(15℃, 5cm/min)	cm	≥150	≥150	≥80	GB/T 4508
延度(4℃, 1cm/min)	cm	≥20	≥15	—	GB/T 4508
软化点(环球法)	℃	44~52	46~55	48~60	GB/T 4507
溶解度(三氯乙烯)	%	≥99.0	≥99.0	≥99.0	GB/T 11148
脆点	℃	≤-12	≤-10	≤-8	GB/T 4510
闪点(开口杯法)	℃	≥230	≥230	≥230	GB/T 267
含蜡量(蒸馏法)	%	≤2.2	≤2.2	≤2.2	SH/T 0425
灰分	%	≤0.5	≤0.5	≤0.5	SH/T 0422
密度(25℃)	g/cm ³	报告	报告	报告	GB/T 8928

表 5 (续)

项 目		单位	质 量 指 标			试验方法
			1 号	2 号	3 号	
薄膜 烘箱 试验 (163℃, 5h)	质量变化	%	≤0.6	≤0.5	≤0.4	GB/T 5304
	针入度比	%	≥65	≥65	≥65	GB/T 4509
	延度 (15℃, 5cm/min)	cm	≥100	≥80	≥10	GB/T 4508
	延度 (4℃, 1cm/min)	cm	≥6	≥4	—	GB/T 4508
	脆点	℃	≤-8	≤-6	≤-5	GB/T 4510
	软化点升高	℃	≤6.5	≤6.5	≤6.5	GB/T 4507

5.0.4 碱性岩石粗骨料与沥青黏附性能好, 应尽量采用。与沥青黏附性好的天然卵砾石料也可用作沥青混凝土粗骨料, 在我国和伊朗已有工程应用的实践。但从骨料洁净性和沥青混凝土的力学性能考虑, 参考挪威有关工程的规范要求, 宜限定其用量不超过粗骨料用量的一半, 并应经试验研究论证。对破碎的碱性卵砾石, 用量可不受此限制。在坝址附近如没有碱性岩石粗骨料或运距较远时, 可考虑采用酸性碎石料, 在我国、挪威已有 20 或 30 多年的应用实例。但从骨料与沥青的黏附性考虑, 宜采取增强骨料与沥青黏附性的措施并经试验研究论证。公路沥青混凝土路面工程采用酸性碎石料并采取增强骨料与沥青黏附性的措施的工程已相当普遍。水工沥青工程采用酸性碎石料在北欧几个国家也有, 我国党河水库砂砾坝沥青混凝土心墙也采用戈壁酸性砂砾石料, 已运行 30 多年。

我国比较重视骨料与沥青黏附性的要求, 国外一般只要求满足沥青混凝土水稳定性指标即可。骨料与沥青的黏附性试验方法有很多种, 在国内外还没有非常成熟和公认的方法。我国目前采用的试验方法是水煮法, 其级别判定受经验和主观性的影响大, 不易确切判定。在沥青路面工程中, 黏附性为 3 级和 4 级的骨料

比较常用，在水工沥青工程中黏附性一般为 4 级或 4 级以上的骨料。因而，本次标准制定时明确 4 级及 4 级以上骨料都可采用。酸性骨料本身黏附性达不到 4 级，可通过采取技术措施，如在沥青中加入抗剥落剂等，使其与沥青的黏附性达到 4 级，并对沥青混凝土性能进行试验验证。

判别骨料酸碱性有多种方法，最简单的方法是用稀盐酸滴在岩石上，能发生气泡的就是碱性岩石；还可用矿物分析的方法，当 SiO_2 含量 $<45\%$ 时为超碱性， SiO_2 含量为 $45\% \sim 52\%$ 时为碱性， SiO_2 含量为 $52\% \sim 65\%$ 时为中性， SiO_2 含量 $>65\%$ 时为酸性岩石；还有一种按计算碱度模数 M 的方法， $M = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO}) / \text{SiO}_2$ ，当 $M > 1$ 时为碱性， $M = 0.6 \sim 1$ 时为中性， $M < 0.6$ 时为酸性；此外，近来还用碱值试验的方法来判别岩石的酸碱性。这种试验方法已列入电力行业标准 DL/T 5362 《水工沥青混凝土试验方法》，例如 SiO_2 含量为 1% 的石灰岩，碱值 $\text{Ca} = 0.97$ ， SiO_2 含量为 69% 的片麻岩， $\text{Ca} = 0.62$ ， SiO_2 含量为 72% 的花岗岩， $\text{Ca} = 0.57$ 。有人提出，沥青混凝土宜选用 $\text{Ca} > 0.85$ 的岩石作为骨料。但是这种碱值试验的方法在水电工程中应用经验还不多，本标准暂时不作为酸碱性指标列入矿料的技术要求。

本标准规定骨料针片状含量不大于 25%，检测方法是沥青混凝土工程中常用的骨料最大尺寸与最小尺寸之比大于 3，即长厚比大于 3。这与 DL/T 5151 《水工混凝土砂石骨料试验规程》对骨料针片状颗粒的检测方法不同，它是将骨料的长宽比大于 3 的定义为针状，宽厚比大于 3 的定义为片状，两者合起来总的含量为骨料的针片状。水工混凝土对骨料的针片状含量要求不超过 10%。根据两种不同检测方法对比试验表明，结果要相差 2 倍~3 倍（见表 6）。因此本标准对骨料针片状含量的要求实际上与混凝土骨料对针片状含量的要求基本相同。

针片状颗粒会对沥青混凝土的性能产生一定的影响。针片状颗粒可使骨料表面积增大、受力条件变差、变形能力降低等（见

表 7)，故限制针片状颗粒含量是必要的。但对针片状颗粒含量的控制要求过高，会使骨料不合格率上升，弃料量增大，导致单价上升。

表 6 骨料针片状颗粒含量不同检测方法对比

混合料编号	单位	A	B	C	D	E	F
最大、最小尺寸比大于 3 的方法检测结果 (细长颗粒含量)	%	0	25	35	45	55	65
水工混凝土方法检测结果(针状+片状颗粒总含量)	%	0	9	14	19.1	24.3	29.7

表 7 不同针片状颗粒含量的沥青混凝土性能试验结果

编号	针片状含量 %	沥青含量 %	最大密度 g/cm ³	平均密度 g/cm ³	孔隙率 %	马歇尔试验		弯曲试验 5℃, 2mm/min		轴拉试验 5℃, 0.5mm/min	
						稳定度 kN	流值 1/100cm	抗弯强度 MPa	挠跨比 %	轴拉强度 MPa	轴拉应变 10 ⁻³
A	0	6.8	2.409	2.366	1.8	5.2	46	3.22	1.65	1.00	11.6
B	25	6.8	2.409	2.366	1.8	5.3	45	3.37	1.61	1.12	11.2
C	35	6.8	2.409	2.366	1.8	5.1	45	3.3	1.59	1.15	9.1
D	45	6.8	2.409	2.366	1.8	5.4	41	3.45	1.57	1.13	8.5
E	55	6.8	2.409	2.366	1.8	5.6	37	3.75	1.41	1.23	7.0
F	65	6.8	2.409	2.356	2.2	4.8	45	5.04	1.01	1.39	6.6
E'	55	7.3	2.390	2.352	1.6	5.3	52	3.55	1.45	1.37	9.8
F'	65	7.3	2.390	2.352	2.0	4.2	50	4.40	1.12	1.36	9.1

粗骨料的抗破碎能力是骨料力学性质的一项指标，近年来在骨料选择中已作为一项参考指标，故本标准制定时对粗骨料压碎值进行了规定。

骨料压碎值的试验方法有两种。一种是水工混凝土的试验方法，要求压碎值不大于 20%；另一种是道路沥青混凝土的骨料试

验方法。根据两种压碎值试验方法测定结果的相关关系，沥青混凝土粗骨料压碎值 30% 相当于水工混凝土粗骨料压碎值 20%，两者要求相当。但道路沥青混凝土的骨料试验方法操作比较简单，测出的压碎值大，便于区分石料的抗压碎性能，因此 DL/T 5362《水工沥青混凝土试验规程》和本标准都采用这种方法。

作为防渗和适应坝体变形的水工沥青混凝土，各种骨料的强度一般可满足要求，因此仅提出了压碎值的要求。但对于高坝或在地震作用下，沥青混凝土可能会承受较大的应力，对骨料强度可提出附加要求。

对骨料要求的洛杉矶磨耗损失、软弱颗粒含量等指标，没有列入本标准，但必要时可参考道路工程提出附加要求。

5.0.5 沥青混凝土细骨料目前主要采用人工砂和天然砂。人工砂洁净、有棱角，对沥青混凝土的强度和稳定性有利，因而把人工砂放在首选位置。天然砂一般级配良好，含酸性矿物和泥质较多，符合要求的天然砂和人工砂掺配使用可改善沥青混凝土的级配和施工压实性，用量不宜超过 50%。完全使用天然砂作细骨料，在少数工程中也有实践经验，但一般宜经试验论证。加工碎石筛余的石屑一般针片状多、级配不好，可加以利用，但其级配应符合要求。

人工砂中对小于 0.075mm 的料叫“含泥量”，一直是有争论的。在沥青路面工程中，人工砂中小于 0.075mm 的量要求小于 10% 或 15%，这部分料是石粉而非泥土。因而对含泥量的要求应仅针对天然砂，对人工砂的洁净性要求已包含在“不含有机质和其他杂质”中。

国外一般不测细骨料的水稳定等级，也没有较好的测定方法。我国 20 年来测细骨料水稳定等级的方法有时难以明显区别碱性骨料（石灰岩、白云岩等）、酸性骨料（花岗岩、石英岩等）和天然砂，而且水稳定等级一般在 6~8 级以上，原规定不小于 4 级的要求显然偏低，故这次改为不小于 6 级的要求比较稳妥。

5.0.6 填料主要用石灰岩粉、白云岩粉。普通硅酸盐水泥、粉煤灰等粉状矿质材料也可作填料，但需经试验研究论证。

目前大、小水泥厂生产的岩粉和水泥，其在 0.075mm 筛孔上的通过率普遍在 90% 以上，因而填料细度在 0.075mm 筛孔上的通过率可要求不小于 85%。试验研究表明，填料的细粒多，对沥青混凝土力学性能有利。对填料细粒含量有特殊要求的工程，可用激光分析的方法，检测 0.075mm~0.02mm 不同粒径的含量。

5.0.7 沥青混凝土水稳定性的提高主要通过提高骨料与沥青的黏附性。目前对于黏附性等级不合要求的骨料，多采用在沥青中掺加抗剥落剂，掺量为沥青用量的 0.3%~0.5%。传统的抗剥落剂为消石灰、普通硅酸盐水泥等，已有 30 多年的实践经验。

为提高沥青混凝土的低温抗裂性，可采用 SBS 或其他高分子改性沥青。SBS 的改性沥青，冻断温度可达 -35℃ 以下，优质材料可达 -40℃。西龙池抽水蓄能电站上水库斜坡部位防渗层采用 AH-90 号沥青作为基质沥青的 SBS 改性沥青，其沥青混凝土冻断温度可低至 -38℃。西龙池 SBS 改性沥青的性能指标见表 8。

目前改善沥青混凝土斜坡热稳定性多在混合料中加入聚酯纤维、木质纤维、矿物纤维等掺料。西龙池上水库斜坡防渗层和封闭层就是在改性沥青中分别加木质纤维和矿物纤维提高抗裂性和热稳定性的。石棉对人体有害，现已不再使用。

表 8 西龙池上水库（低温地区）采用的 SBS 改性沥青性能

项 目	单位	性能测定值	试验方法
针入度 (25℃, 100g, 5s)	1/10mm	84	GB/T 4509
针入度指数	PI	0.15	GB/T 4509
软化点 (环球法)	℃	74.3	GB/T 4507
延度 (5℃, 5cm/min)	cm	59	GB/T 4508
黏度 (135℃)	Pa·s	1.1	T 0620 ^a

表 8 (续)

项 目	单位	性能测定值	试验方法
弹性恢复 (25℃)	m%	94	T 0662 ^a
溶解度 (三氯乙烯)	%	99.5	GB/T 11148
闪点 (开口)	℃	300	GB/T 267
离析试验 (163℃, 48h), 软化点差	℃	0.6	T 0661 ^a
薄膜烘箱试验 (163℃, 5h) 后			
质量损失	%	0.25	GB/T 5304
针入度比 (25℃)	%	97.4	GB/T 4509
延度 (5℃, 5cm/min)	cm	81	GB/T 4508
a 交通部行业标准《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052—2000)。			

5.0.9 阳离子乳化沥青在水工中得到广泛应用,特别是与潮湿的骨料有良好的黏附性,故本标准推荐使用。但在有些情况下,经过试验论证也可采用阴离子乳化沥青或非离子乳化沥青。

6 沥青混凝土的技术要求及配合比

6.0.1 目前国内外工程经验表明，防渗沥青混凝土的孔隙率小于3%，其防渗性是有保证的。经验表明，在室内试验中，用马歇尔方法成型的沥青混凝土标准试件，孔隙率控制在小于2%，这样才能保证现场施工沥青混凝土的孔隙率小于3%。

目前的试验设备和方法较难测准沥青混凝土的渗透系数，大多数试样不漏水，算不出渗透系数。在防渗性质量控制方面可主要控制孔隙率小于3%。鉴于渗透系数在工程界作为指标使用比较广泛，沥青混凝土的渗透系数指标，可作为参考性指标，但防渗沥青混凝土的渗透系数本标准规定为小于 $1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 。也有的工程对防渗沥青混凝土不做渗透系数测试，而改作抗渗性试验，即在设计水压力下，保持一定时间，试样没有渗水即为合格。

斜坡流淌值只采用马歇尔试件，没有要求采用现场芯样进行试验，原因是工程实际操作中现场芯样斜坡流淌值离散性较大，难以明确规定。斜坡流淌值反映沥青混凝土的斜坡稳定性，与柔性要求是矛盾的，沥青混凝土的斜坡稳定性越好，变形性能就越差，因此对斜坡流淌值的要求不能过高。目前试验方法中采用“1:1.7 坡或按设计坡度，70℃，48h”的试验条件是较为苛刻的，实际工程中不但70℃的温度较难达到，更不会有持续48h的高温。且沥青混凝土随着运行时间越久，表面老化变硬，将难以发生表面流淌变形，沥青混凝土面板浇筑完成蓄水前的夏季是最危险的，只要度过这一阶段，沥青混凝土的斜坡稳定性将不再是大问题。

由于摊铺设备和碾压设备20多年来已有很大发展，面板防渗层等可一层铺设，不再分层铺筑，因而不介绍分层铺筑的内容。骨料最大粒径也可不再考虑铺筑层厚度的因素。

由于沥青混凝土不存在渗流破坏的问题，故对沥青混凝土不

提允许水力坡降的性能要求。

表 9 列出我国部分已建碾压式沥青混凝土面板工程防渗层的配合比, 可供参考。

表 9 已建碾压式沥青混凝土面板工程的防渗层配合比

工程名称	最大粒径 mm	配合比 %			沥青 ^a %
		碎 石	人工砂和河砂	填 料	
正 岔	15	32~40	49~55	10.9~12.5	7.8~8.2
半城子	15	44.2	45	10.8	7.2
横 冲	30	55.1	35.2	9.7	8.5
里册峪	20, 15	27~35	53~60	12~13	7.0~8.5
红 江	15	39~45	44~50	11	8.0~8.5
石砭峪	20, 15	19.4~28.6	61.6~70	9.8~10.6	7.7~8.8
南谷洞加固	20	38	51	11	7.5
峡 口	15	38.3	46.7	15	8.0
天荒坪	16	48.3	36.7	15	7.3
西龙池	16	43	45	12	7.5~7.8
张河湾	16	41.7	46.2	12.1	7.7
宝泉	16	46.2	40.8	13	7.0
a 沥青与矿料之比, 即油石比。					

6.0.2 根据国内外目前的工程经验, 面板整平胶结层的沥青混凝土孔隙率的要求为 10%~15%。根据天荒坪等沥青面板工程经验, 渗透系数与孔隙率难以相匹配, 后来把渗透系数调整为 $5 \times 10^{-2} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 。故本标准只要求控制孔隙率, 不要求同时控制渗透系数。整平胶结层沥青混凝土的渗透系数可作为参考指标, 范围为 $1 \times 10^{-2} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 。

表 10 列出我国部分已建碾压式沥青混凝土面板工程的整平胶结层配合比供参考。

表 10 已建碾压式沥青混凝土面板工程的整平胶结层配合比

工程名称	最大粒径 mm	配合比 %			沥青 ^a %
		碎石	人工砂和河砂	填料	
里册峪	25, 40	60~70	24~36	4~6	3.0~5.5
红江	25	57	38	5	4.3
南谷洞	25	72	23	5.0	3.5
石砭峪	25, 30	48~84	14~47	2.0~4.0	3.0~5.8
坑口	25, 30	54~81	16~41	3.0~5.0	4.5~6.0
车坝	20	63	32	5.0	4.5
峡口	25	66	28	6.0	4.0
天荒坪	22.4	73.9	19.4	6.7	4.3
西龙池	19	83	13.5	3.5	4
张河湾 (整平防渗层)	16	45.9	43.9	10.2	5
宝泉	19	82.2	12.8	5	4
a 沥青与矿料之比, 即油石比。					

6.0.3 为了保证沥青混凝土的均匀性, 骨料最大粒径有减小的趋势, 按目前国内外广泛采用的方孔筛尺寸, 排水层骨料最大粒径为 19mm~31.5mm。

表 11 列出我国部分已建碾压式沥青混凝土面板工程的排水层配合比, 可供参考。

表 11 已建碾压式沥青混凝土面板工程的排水层配合比

工程名称	最大粒径 mm	配合比 %			沥青 %
		碎石	人工砂和河砂	填料	
石砭峪	30	91.8	5	3.2	3.5
牛头山	20~30	93.8	3	3.2	3.0
张河湾	19	88	9	3	3.5

6.0.4 坡面上的沥青混凝土面板封闭层沥青玛蹄脂，在温带地区多采用低标号沥青，保证热稳定性，防止流淌。也可采用浅色涂层增加热稳定性。我国南谷洞水库沥青面板修复工程采用白色封闭层，提高了热稳定性。在国外已有工程采用浅白色沥青混凝土作面板，斜坡热稳定性好。

封闭层沥青玛蹄脂的技术要求有的工程还增加了密度、软化点（ $>70^{\circ}\text{C}$ ）、渗透系数等指标，因考虑现有指标已可反映这些性能，故未列入本标准。

在寒冷地区，采用改性沥青玛蹄脂作封闭层，可提高低温抗裂性能。

表 12 列出我国部分已建碾压式沥青混凝土面板工程的封闭层配合比，可供参考。

表 12 已建碾压式沥青混凝土面板工程的封闭层配合比

工程名称	配合比 %		
	填料	沥 青	掺 料
峡口	44	54.5 (60%B70, 40%B10)	1.5 (丁苯橡胶)
天荒坪	70	30 (坡面 B45, 库底 B80)	—
西龙池 (库底)	62	30 (普通沥青)	8 (矿物纤维)
西龙池 (库坡)	63	30 (改性沥青)	7 (矿物纤维)
张河湾	70	30 (改性沥青)	

6.0.5 楔形体沥青砂浆或细粒沥青混凝土的技术要求中，柔性指标以小梁弯曲应变表示。此应变指标宜按当地水下最低温度时的应变值为准，如山西西龙池工程采用 2°C 、南方地区采用 5°C 或 10°C 。

采用细粒沥青混凝土时，骨料最大粒径宜为 4.75mm 。

部分已建碾压式沥青混凝土面板工程的沥青砂浆或细粒沥青混凝土配合比见表 13，可供参考。

表 13 已建碾压式沥青混凝土面板工程的沥青砂浆配合比

工程名称	配合比 %		
	人工砂和河砂	填 料	沥 青
南谷洞 (岸坡接头)	5.5	2.5	1
南谷洞 (基础接头)	5	1	1
坑 口	5	1	1
车坝 (岸坡接头)	10.7	2.6	1
车坝 (基础接头)	9	2.5	1
牛头山	4~5	1	1
西龙池	60	25	15

6.0.6 心墙的沥青混凝土技术要求以往多有马歇尔稳定性和流值这两个指标。根据近年来的大量实践表明,这两个指标往往不能很好反映沥青混凝土的力学性能,故本标准制定时对这两个指标不作要求,而对弯曲强度、弯曲应变、三轴试验所得内摩擦角和黏结力作了规定。由于三轴试验所得模量数 K 和模量指数 n 规律性较差,故不列入必须的技术要求。

从保证防渗性、增加抗震性和耐久性考虑,沥青含量有增加的趋势,因而在附录 A 中略抬高了沥青含量。

表 14 列出国内外部分已建碾压式沥青混凝土心墙配合比可供参考。

表 14 已建碾压式沥青混凝土心墙配合比

工程名称	最大粒径 mm	配合比 %			沥青 %
		碎 石	人工砂和河砂	填 料	
麦盖特 Megget (英)	20	45	44	11	6.3
芬斯特塔爾 Finstertal (奥)	18	64	27.5	8.5	6.0 (B65)
高岛 (香港)	18	63	24	13	6.3 (B100)

表 14 (续)

工程名称	最大粒径 mm	配合比 %			沥青 ^a %
		碎 石	人工砂和河砂	填 料	
斯图瓦特恩 Storvatn (挪威)	16	56	32	12	6.3 (B100)
斯图格勒姆瓦特恩 Storglomvatn (挪威)	18	59	28	13	7.2 (B180)
丢恩 Dhuenn (G) (德)	25	65	27	8	6.5
武利 (日)	25	57.6	30.8	11.6	6.4
八王子 (日)	25	58	29	13	6.6
辽宁碧流河	25	58.5	28.5	13	6.5
新疆坎尔其	20	40.3	49.7	10	6.3
湖北三峡茅坪溪	20	47.4	40.6	12	6.4
四川冷勒	20	59.6	28.4	12	6.7
黑龙江尼尔基	20	62.6	25.2	12.2	6.6
新疆照碧山	20	42.4	44.6	13	6.8
a 沥青与矿料之比, 即油石比。					

6.0.7 浇筑式沥青混凝土心墙沥青含量高, 水渗入不到沥青混凝土内部, 更难测出渗透系数, 故渗透系数和水稳定系数实际上无多大意义, 但技术要求中仍列出相关指标以供参考。

浇筑式沥青混凝土的施工黏度试验和分离度试验方法如下:

施工黏度, 也称施工流动性, 它是以浇筑温度下的黏度 η 值作为指标, 用图 1 所示容器进行测定。试验时先将沥青混合料按规定的配合比拌和均匀, 拌和温度控制在 $180^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。将试样装满容器, 测定流出 1L 试样所需的时间, 按下式计算沥青混合料的黏度:

$$\eta = 43.5 \rho g t \times 10^{-5} \quad (1)$$

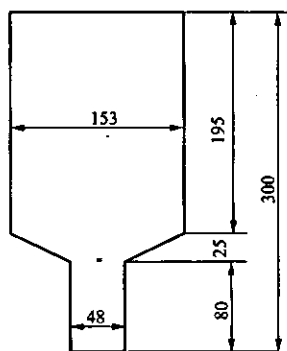
式中:

η ——沥青混合料黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

ρ ——沥青混合料密度, g/m^3 ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

t ——1L 试样流出的时间, s 。



尺寸单位: mm

图1 浇筑式沥青混合料施工流动性黏度测定容器

若沥青混合料在 180°C 条件下的黏度为 $10^2 \text{Pa} \cdot \text{s} \sim 10^4 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 时, 可认为施工流动性合格。实际工作中也可直接按试样流出的时间作为控制标准。

分离度检验是用测定沥青混凝土密度的方法, 即将热沥青混合料浇入 $\phi 100 \text{mm} \times 100 \text{mm}$ 的试模内, 不加捣实, 在自重下密实, 待试件自然降温到 15°C 以下, 将试件切割成上下两部分, 然后在 20°C 温度下测定两部分试件的密度。若下半部分试件的密度与上半部分的密度之比小于 1.05 时, 可认为均质性合格。

已建浇筑式沥青混凝土心墙的配合比分别见表 15, 可供参考。

表 15 已建浇筑式沥青混凝土心墙配合比

工程名称	最大粒径 mm	配合比 %				沥青 ^a %
		碎石	人工砂和 河砂	填料	石棉	
西沟		41	51	8		12
宝山		42	43.2	12.5	2.3	10.6 (4 沥青, 8 渣油)
象山		43	43	14		12 (4 沥青, 8 渣油)
恰甫其海围堰	20	41.2	41.2	17.6		10.2
喀腊塑克围堰	20	48.2	36.2	15.6		9.6
a 沥青与矿料之比, 即油石比。						

6.0.8 目前还没有一套公认的简捷方法和步骤来进行沥青混凝土配合比设计, 主要还是根据上述各种沥青混凝土的技术要求和已建工程经验, 通过室内试验和场外摊铺试验进行比较和选择, 所以试验的工作量较大。

根据国内大量的工程经验, 附录 A 推荐了各种沥青混凝土配合比参数, 可供初选配合比参考。有的小型工程, 没有试验条件下, 也可按此配合比参数初步选择沥青混凝土配合比, 进行场外摊铺试验。

对初选的配合比进行比较试验时, 为减少试验工作量, 不必作全部性能的试验, 可根据工程特点, 选择关键的性能进行试验。如北方寒冷地区的面板工程, 关键性能是抗冻裂的性能和变形性能; 南方炎热地区的面板工程, 关键性能是抗流淌性能和变形性能; 深覆盖层地震地区的心墙工程, 关键性能是变形性能等。根据关键性能试验结果, 优选出少数几种配合比, 再进行全面的性能试验验证, 从中选出最优的配合比。

7 碾压式沥青混凝土面板设计

7.0.1 沥青混凝土面板堆石坝的上游坡度，根据国内外工程经验，多是从施工人员的工作安全和碾压效果考虑，以缓于 1:1.7 为宜。根据国际大坝委员会对已建近 300 座沥青混凝土面板坝工程的统计资料，坡度缓于 1:1.7 的工程占了 80% 以上。表 16 中的统计可作为参考。国内最近完成几座沥青混凝土面板工程的坡度均缓于 1:1.7，如天荒坪、宝泉、西龙池和张河湾等。

表 16 沥青混凝土面板坝坡度统计表

边坡坡度	数 目	所占比例 %	累计所占比例 %
缓于 1:2.5	44	15.44	15.44
1:2.0~1:2.4	9	3.16	18.60
1:2.0	82	28.77	47.37
1:1.7~1:1.95	107	37.54	84.91
1:1.5~1:1.67	40	14.04	98.95
陡于 1:1.5	3	1.05	100.00
总 数	285	100.00	/

7.0.2 沥青混凝土面板土石坝的上游坡一般都是采用一坡到底，这样受力条件好，施工也方便。变坡段应采用弧线连接，形成缓变的过渡段。

库盆沥青混凝土面板防渗工程，库底到斜坡的过渡段（反弧段）曲率半径的设计应考虑应力应变的要求，还应使摊铺机能比较均匀地摊铺。从已建成的工程看，该曲率半径有 25m、30m、50m 等。从摊铺机均匀摊铺要求考虑，轮式摊铺机较履带式摊铺

机适应的曲率半径较小。国内近年几项水电工程用于斜坡面上的沥青混凝土面板摊铺机，最小曲率半径常采用 20m~30m。国产专用的 LXT-7 型水工沥青混凝土面板轮式斜坡摊铺机，适用曲率半径为 30m，而用于峡口、南谷洞等面板工程施工的轻型沥青混凝土面板斜坡摊铺机，摊铺宽度 3m，可适应最小曲率半径 5m。加大曲率半径可改善反弧段的应变，天荒坪工程反弧段曲率半径采用 30m 时，计算最大应变接近沥青混凝土的极限拉伸值，设计采用的曲率半径为 50m。

对于边坡平面转弯处的连接弧线的曲率半径，也应考虑摊铺机变宽度摊铺的要求。

7.0.3 在国内早期兴建的沥青混凝土面板有采用干砌石、无砂水泥混凝土等类型垫层。随着机械化施工的发展，20 世纪 80 年代后国外多数工程采用碎石或卵砾石垫层。碎石或卵砾石垫层可调整坝体不均匀沉陷，便于机械化施工，施工速度较快，我国近期修建的沥青混凝土面板工程均采用碎石或卵砾石垫层。填筑体与基础的结合部位，如坝体与坝基的连接部位的垫层应适当加厚使变形平缓过渡。

垫层表面平整度要求采用 3m 直尺测量凹凸度不大于 30mm 为基本要求，垫层表面平整度的要求应与面板各层平整度的要求和厚度允许误差相匹配。

碎石或卵砾石垫层因为能适合现代机械化施工的要求，在一定的级配条件下，也可满足强度、稳定性和排水性的要求，所以使用得最多。垫层的填筑要求采用振动碾压实，并达到设计要求的变形模量、透水性和平整度要求。碎石或卵砾石垫层作为沥青混凝土防渗体的基础时，其施工压实后的变形模量应满足大型摊铺碾压设备所需 35MPa 的要求，近期国内所建工程如天荒坪、宝泉、西龙池、张河湾等均按此控制，宝泉工程按 45MPa 控制。实际变形模量一般可达 50MPa 以上。垫层表面的变形模量与垫层下部的的基础有关，天荒坪工程试验结果为，当下部基础表面的变形

模量大于 20MPa 时, 铺设 60cm 碎石垫层压实后表面的变形模量不小于 35MPa。但实际变形模量一般可达 50MPa 以上。对沥青混凝土防渗体来说关键在于基础变形模量变化的均匀性, 因此对基础有突变的部位需进行处理, 处理的要求也是使相邻部位的变形模量尽可能接近。对于承受较高水头的沥青混凝土面板垫层, 其施工压实后的变形模量宜适当提高要求。

7.0.4 碎石或卵砾石垫层的最大粒径, 按照《混凝土面板堆石设计规范》(DL/T 5016) 要求, 对混凝土面板堆石坝垫层料的最大粒径规定为 80mm~100mm, 但沥青混凝土面板的碎石或卵砾石垫层料的要求不同, 本标准规定了最大粒径为 80mm, 小于 5mm 和小于 0.075mm 的细粒含量也作了规定。

垫层应充分考虑排水的要求。沥青混凝土面板下面如排水不畅通, 当库水位骤降时, 面板后的水位有可能高于库水位而对面板产生反向水压力, 导致面板的鼓包破坏。我国陕西石砭峪水库沥青混凝土面板就曾发生这种面板鼓包破坏的事故, 据现场调查的结果, 板后水位仅高于库水位约 3.7m, 在坡脚附近的面板发生多个鼓包。但要考虑非正常运用情况, 如面板开裂、库水集中渗漏等情况, 垫层的透水性要满足集中渗漏的要求是困难的, 在这种工况下主要考虑垫层不要遭受大面积破坏。这需要垫层的渗透稳定性要好, 能承受全水头的作用而不破坏。

较为平坦的沥青混凝土面板的基础垫层, 不仅要求有良好的透水性, 而且还应在垫层中设置排水管、排水暗沟。排水管主要是将面板的渗水引到填筑体外或排水廊道中去, 排水暗沟主要是将地下泉水引出到排水廊道中去。天荒坪上水库库底运行初期曾出现裂缝并漏水, 虽然漏水量较大, 但由于基础垫层具有良好的透水性, 且布置了排水花管, 漏水并没有引起面板鼓包等破坏现象。

7.0.5 碎石或卵砾石垫层的厚度目前尚无理论方法计算, 但与填筑体(或基础)的变形大小、排水要求、施工方法、冻结深度等

因素有关。根据国内外工程的经验,对于中等高度的堆石坝垫层厚度应不小于 50cm,对于重要工程和高坝应适当加厚。如天荒坪工程,承受水头变幅 42.2m, 1:2.0 的坝坡垫层水平宽度为 2m, 1:2.0~1:2.4 的岸坡垫层厚度为 90cm,库底垫层厚度为 60cm。

当垫层基础为土质材料时应设置反滤层。根据工程经验,土质基础的变形模量不宜小于 20MPa,如变形模量低于 20MPa 或与相邻基础变形模量相差 2 倍以上时应加大垫层厚度。

表 17 列出了部分国内外部分沥青混凝土面板基础垫层的厚度情况,设计时可供参考。

7.0.6 在土质基础上是否喷洒除草剂及除草剂类型可根据工程具体情况确定,主要是确保不会因为有害性植物破坏沥青混凝土面板。在垫层表面应喷洒乳化沥青或稀释沥青,一方面有利于面板与垫层的结合,另一方面是为了保护垫层免受雨水冲蚀。施工经验表明,坡面上过量喷洒乳化沥青反而会在层面结合处形成薄弱面,所以其用量不宜太大。

7.0.7~7.0.10 沥青混凝土面板的两种断面型式,各有优缺点,但从沥青混凝土的发展历程来看,复式断面在早期建成的工程中用得较多,而近期建成的工程采用简式断面的居多。复式断面的形式结构层次多,施工复杂,造价高,用于有特殊要求的工程,如垃圾填埋场的防渗等。简式断面结构层次简化,施工方便,造价低于复式断面。国外工程中,日本复式断面用得较多,而西欧则以简式断面为主。我国早期建成的面板工程仅红江水库、坑口水库、南谷洞水库曾采用复式断面,还有三座面板工程由于科研需要而作了复式断面试验段,其余均为简式断面;近期建成的 5 座面板工程除张河湾外,均为简式断面。

自 20 世纪 80 年代后,国外简式断面防渗层较多地采用单层铺设,我国 1981 年在坑口水库进行单层铺设工艺的试验研究。观测资料表明,单层铺设的试验运用情况良好,达到设计对防渗层提出的要求,防渗效果与分层错缝铺设在同一量级水平上。采用

表 17 国内外部分沥青混凝土面板工程垫层实例

序号	电站名称	国家	建成年份	电站水头 m	坝高 m	上(下) 游坝坡比	面板厚度 cm	过渡层/垫层
1	蒙哥马利 Montgomery	英国	1957	/	34	1:1.7	/	S: 碎石层水平宽 300cm (d : 76~610)
2	盖斯特赫特 Geestacht	德国	1958	80	17~26	1:2.5 (1:3.5)	S: 12 (7+5) B: 11 (6+5)	上游坝面铺一层 30cm 厚砂砾石
3	菲安登 Vianden	卢森堡	1963	280	19	1:1.75 (1:1.5)	S: 19 (7+9) B: 10 (73)	S: 整平层, 水平宽度 2.5m, B: 高炉炉渣 (16cm, d : 40~60 和 60~100)
4	格兰姆斯 Glens	德国	1964	292	21	1:1.75 (1:2.5)	S: 21~22 (7+6+5+3~4) B: 21~22 (6+7+5+3~4)	S: 排水层, 水平宽度 1m~3m; B: 堆石层, 约 2m 厚
5	埃尔茨豪森 Erzhausen	德国	1964	298	17	1:2.0 (1:1.5~ 1:2.0)	S: 20.5~24.5 (9.5+6~ 10+3+3)	S: 砾石层, 15cm~20cm
6	萨欣根 Sackingen	德国	1967	408	30	1:1.75 (1:2.0)	S: 10 (6+4) B: 8~10 (5+3~5)	S: (1) 反滤层 (50cm, d : 40), (2) 碎石层 (200cm, d : 300), B: 反滤层 (10cm, d : 15~50)
7	霍姆斯托柯 Homesfake	英国	1967	/	69	/	/	S: 碎石层水平宽 60cm 垂直坡面厚 30.5cm

表 17 (续)

序号	电站名称	国家	建成年份	电站水头 m	坝高 m	上(下)游坝坡比	面板厚度 cm	过渡层/垫层
8	大津岐	日本	1968	/	52	1:1.7 (1:1.6)	S:30 (10+8+5+7)	S:20cm~40cm
9	伦克豪森 Ronkhausen	德国	1968	266	18	1:1.8 (1:1.5 ~ 1:1.65)	S:9 (6+3) B:9~11 (6+3~5)	B:砾石层 (20cm, $d \leq 25 \sim 55$)
10	圣地兰纳 Sanfilana	西班牙	1969	/	40	/	/	S:水平宽 110cm
11	阿波诺 Abono	西班牙	1969	/	22	/	/	S:水平宽 300cm (砂砾石坝)
12	科普士 Kops	奥地利	1969	/	18	1:1.7	S:14 (8+6) B:9 (6+3)	S:碎石层 (10cm, $d < 60$)
13	阿格里阿斯 特罗奥 Astro	意大利	1971	/	21 土坝	/	/	S:水平宽 450cm 垂直坡面厚 200cm
14	二仓	日本	1971	/	37 土坝	/	/	S:水平宽 220cm, 垂直坡面厚 100cm ($d: 30 \sim 80$)
15	瓜哈拉兹 Guajanz	西班牙	1971	/	48	1:1.75	12 (2×6)	水平宽 300cm, 50cm ($d: 5 \sim 20$), 垂直坡面厚 25cm (支撑面)

表 17 (续)

序号	电站名称	国家	建成年份	电站 水头 m	坝高 m	上(下) 游坝坡比	面板厚度 cm	过渡层/垫层
16	伐尔马尧 Valmayor	西班牙	1972		60	/	/	水平宽 300cm, 30cm ($d: 5 \sim 20$) 垂直坝面厚 15cm (支撑面)
17	沼原	日本	1973	500	68	1:2.5 (1:2.5)	S: 30 (10+8+4+8) B: 25 (8+7+5+5)	S: 碎石层 (60cm, $d < 80$), B: (1) 石渣 (10/20cm, $d < 200$) (2) 碎石层 (50cm, $d < 80$)
18	特罗夫山 Turlough hill	爱尔兰	1973	286	34	1:1.75 (1:1.85)	S: 9~12 (6+3~6) B: 8~10 (5+3~5)	S: 排水层 (120cm, $d: 10 \sim 200$), B: 排水层 (20cm, $d: 35 \sim 55$)
19	路丁顿 Ludington	美国	1973	110	52	1:2.5~1:5 (1:2.5)	S: 19.2 B: 0.9~1.30	B: 黏土铺盖
20	圣菲拉诺* S. Fiorano	意大利	1974	1417	<10	1:2.0 (1:2.0)	S: 18 (8+10)	S: 碎石排水层 (30cm, $d: 40 \sim 60$)
21	勒万 Revin	法国	1974	230	10~20	1:3.0 (1:2.5)	S: 19 (9+10)	S: (1) 页岩堆石层, 厚约 2.5m, (2) 反滤层 (4cm)
22	瓦尔德克 II Waldeck	德国	1974	329	42	1:1.75 (1:1.75)	S: 10 (7+3)	S: 碎石垫层 (20cm, $d: 25 \sim 55$)
23	维赫尔 Wehr	德国	1975	605		1:1.6 (1:1.6)	S: 13 (8+5) B: 9 (5+4)	S: 砾石反滤 (> 25 cm, $d < 40$) B: 排水层 (20cm, $d: 35 \sim 55$)
24	奥多良木* Okutataragi	日本	1975	400	64.5	1:1.8 (1:1.75)	S: 33 (12+8+5+8)	/

表 17 (续)

序号	电站名称	国家	建成年份	电站水头 m	坝高 m	上(下)游坝坡比	面板厚度 cm	过渡层/垫层
25	正岔	中国	1976	/	35	/	/	干砌石垫层水平宽 200 (d :250~300)
26	埃尔西伯里奥 El Siberio	西班牙	/	/	70	1:1.75	防渗面层厚 9~12cm, 排水层厚 8cm, 防渗下层厚 6cm	水平宽 400 (d :70..10~100)
27	阿瓜尧 Aguaro	西班牙	/	/	40.7	/	/	水平宽 300 (d :500)
28	兰根普罗策尔滕 Langenproze- lten	德国	1976	315	30	1:2.0 (1:2.0)	S: 13~15 (7+6~8) B: 14 (6+8)	S: 排水砾石层 (20/40cm, d <56) B: 排水砾石层 (40cm, d <56)
29	罗东德 II Rodund	奥地利	1977	354	50	1:1.7 (1:1.5)	/	S: 碎石层 (10cm, d <50)
30	双叶坝	日本	1978	/	61.35	1:1.85 (1:1.85)	30cm (H ≤30m) (12+8+10) 40cm (H >30m) (18+12+10)	S: 20cm B: 25cm

表 17 (续)

序号	电站名称	国家	建成年份	电站水头 m	坝高 m	上(下)游坝坡比	面板厚度 cm	过渡层/垫层
31	石砭峪	中国	1978	/	85	/	/	干砌石垫层水平宽 400, (d 250~400)
32	歪头山	中国	1980	/	35.6	/	/	碎石
33	切尔内瓦 Ciermg Van	捷克 斯洛 伐克	1980	434	/	1:2.0 (1:1.35~ 1:1.75)	S: 16 (8+8) B: 16 (8+8)	S: 垫层, 40cm B: (1) 垫层 (15cm, d 16~63), (2) 混凝土层 (10cm, d 16~63)
34	库三桥 II Coo-Trois ponts	比利 时	1980	275	55	1:2.0 (1:1.6~ 1:2.4)	S: 16.5 (6+10.5) B: 9.5 (5+4.5)	B: 砾石层 (20cm, d 16~63)
35	南谷洞	中国	1981		78.5	/	/	碎石垫层上铺干砌石
36	车坝一级	中国	1982		66.6	/	/	碎石垫层上铺 10cm 混凝土
37	蒙特齐克 Montzic	法国	1982	400	30~57	1:2.0 (1:1.43 ~ 1:1.5)	S: 14 (8+6)	排水层: 40cm
38	埃多洛* Edolo	意大利	1983	1260	24	1:2.5 (1:2.0)	S: 16 (6+10) B: 相似	S: 碎石排水层 (12cm, d 40~ 60cm)

表 17 (续)

序号	电站名称	国家	建成年份	电站水头 m	坝高 m	上(下)游坝坡比	面板厚度 cm	过渡层/垫层
39	迪诺威克 Dinorwic	英国	1983	513	69	1:2.0 (1:2.0)	S: >14 (8+6)	S: 碎石垫层, 水平方向宽 7m
40	普列森扎诺* Presenzano	意大利	1987	495	20	1:2.0 (1:1.5)	S: 20 (12+8) B: 20 (12+8)	S: 排水层: 约 30cm; B: (1) 砂砾石层, 50cm (2) 排水层, 60cm
41	八沙坝	日本	1992	338	90.5	1:2.0 (1:2.0)	S: 37.2~43.2	S: 过渡层, 水平宽 2m
42	天荒坪	中国	1997	532	72	1:2.0~2.4 (1:2.0~2.2)	S: 20 (10+10) B: 18 (10+8)	S: 坝水平宽 2m, 岸坡厚度 60cm~90cm B: 0.2m 反滤+0.4m 垫层或 0.6m 垫层
43	甘肃峡口	中国	1999	34	36	1:2.25 (1:1.8)	S: 22	S: 碎石排水层厚 80cm
44	拉姆它昆 Lam Ta Khong	泰国	2001	360	50	1:2.0 (1:2.5)	S: 25 (10+8+7) B: 17 (7+10)	S: 碎石排水层厚 38cm B: 碎石排水层厚 30cm
45	金谷 Goldsthal	德国	2003	301.65	40.5	1:1.6 (1:1.6)	S: 20 (8+8+4) B: 14 (7+7)	S: 碎石排水层厚 14cm B: 碎石排水层厚 14cm

表 17 (续)

序号	电站名称	国家	建成年份	电站水头 m	坝高 m	上(下)游坝坡比	面板厚度 cm	过渡层/垫层
46	金谷* Goldisthal	德国	2003	301.65	67	1:1.6 (1:1.6)	S:35 (8+12+6+9)	S:碎石排水层厚 10cm B:碎石排水层厚 10cm
47	南谷洞 加固	中国	2004	71.5	78.5	1:1.25~3 (1:1.4~1.6)	17	/
48	京板	日本	2007	369	22.2	1:2.5 (1:2.5)	S:33 (8+5+5+15)	碎石垫层厚 45cm
49	张河湾	中国	2007	(55)	57	1:1.75 (1:1.5)	S:26 (10+8+8) B:28 (10+10+8)	碎石垫层厚 60
50	西龙池	中国	2007	(32.5)	50	1:2 (1:1.7)	S:20 (10+10) B:20 (10+10)	碎石垫层厚 60
51	西龙池*	中国	2007	(55)	97	1:2 (1:1.7)	S:20 (10+10)	碎石垫层厚 100
52	宝泉	中国	2007	532	72	1:1.7 (1:1.5)	S:20 (10+10) B:黏土铺盖	坝坡水平宽 2m 岸坡厚度 60cm

注 1: *表示是下水库, 其余均为上水库; S—边(坝)坡; B—库底; d—粒径(mm); /—不详。

注 2: 面板厚度括号中数字依次表示防渗层+整平胶结层(简式)或防渗层+排水层+下防渗层+整平胶结层(复式)。

单层铺设，减少了施工程序，取消了层间结合涂层，加快了施工进度，并可避免涂刷层间涂料不匀引起的弊病，降低了造价。1997年竣工的天荒坪上水库沥青混凝土防渗面板为简式断面，防渗层厚度10cm，全部采用单层铺设。防渗面积28.5万 m^2 ，正常情况下的渗漏量仅5L/s~6L/s（包括地下水部分），至今已安全运行10多年。张河湾、西龙池、宝泉等工程，10cm厚的整平胶结层、防渗层也都单层铺设。

防渗层的厚度近期所施工的工程多在10cm以下，故本次规定了其厚度不大于10cm，这也与目前的单层施工碾压技术相适应。超过10cm厚度的防渗层，要一次完成铺压，目前还没有实践经验。

在复式断面结构中，为简化分层及施工，并降低造价，也有把较薄的防渗底层与整平胶结层合并成一层进行施工的，如河北的张河湾上水库。

7.0.11 沥青混凝土面板的总厚度包括整平胶结层、防渗层和复式断面的排水层。原附录中提供的总厚度计算公式，采用弹性理论方法，而未考虑沥青混凝土的黏弹性性能，加上不考虑分层结构，计算结果与实际情况相差较大，故删去。目前各层厚度的确定主要是根据防渗要求，参考已建工程的经验。本次在附录B中列出了两个防渗层厚度计算的经验公式，可供防渗层厚度确定时参考使用。

式(B.1)是在国内外工程实践的基础上总结出来的，可以快速确定厚度，较为实用。

式(B.2)，通常认为大、中型水库的渗漏量小于水库总库容的1/2000是可以接受的，但对于抽水蓄能电站的上水库，渗漏量可以按库容的1/5000~1/10 000来控制。如天荒坪上水库，蓄水运行已10多年，目前上水库稳定的渗漏量为5L/s~6L/s，相当于水库总库容的1/17 000，而且这个渗漏量的绝大部分是由库底的泉眼来水及进水口侧的山体渗水组成，真正属于面板的渗水量其

实很小，只要面板不出现裂缝，沥青混凝土面板几乎是不漏水的。

7.0.12 由于沥青混凝土面板是黑色的，具有较强的吸热能力，当夏季太阳直射面板时，面板可能达到很高的温度。根据试验资料表明，沥青混凝土面板的温度约为最高气温加 30°C 。对热稳定性较差的沥青混凝土（含封闭层）轻则发生皱纹，重则大面积流淌，如南谷洞水库等沥青混凝土面板曾发生严重流淌的事故。因此必要时可进行喷水或淋水降温，以确保沥青混凝土不发生流淌等。天荒坪上水库工程沿库周顶布置了喷淋系统。

降温也可采用浅色涂层，根据国外资料介绍多采用铝粉漆，降温效果亦较显著。目前国内市场出售调和漆和铝粉漆。从正岔水库现场试验来看，刚涂上时降温效果尚好，但很短时间就发生脆裂、剥落或变黄，影响降温效果。近年完工的南谷洞沥青混凝土面板修复加固工程，采用白色涂层封闭层，初步运用表明效果良好。

从工程实践来看，封闭层在夏季施工或施工完成蓄水前经历夏季高温易发生流淌，蓄水后则不易发生流淌。封闭层由于在沥青混凝土表面，易发生老化。通常经历几个夏季后，老化后的封闭层基本不发生流淌，同时跟夏季库水位有关。因此喷淋降温设施一般可采用临时设置，无须永久性设置。

7.0.13 沥青混凝土面板的低温裂缝，在我国北方地区已建成的工程中常有发生，有的工程，如北京半城子水库还相当严重，但也有有的工程，如山西里册峪水库则几乎不见有低温裂缝的出现。影响沥青混凝土面板产生低温裂缝的因素很多，如当地的极端最低气温、降温的速度、低温的持续时间、沥青的品种、沥青混凝土的配合比、施工质量等。根据一些实际工程经验和试验研究表明，最低月平均气温在 -10°C 以下的地区，绝对最低气温可达到 -30°C 以下，这样的气温条件，一般沥青混凝土已难以抵抗温度变形而开裂。因此最低极端温度在 -30°C 以下地区的沥青混凝土面板应进行低温抗裂性的试验及计算分析研究，当一般沥青混凝土不

能满足低温抗裂要求时，可选用聚合物改性沥青混凝土。

沥青混凝土的低温抗裂计算分析方法，可采用变温度场计算和黏弹性无限嵌固板应力应变分析。这种方法曾应用于十三陵和西龙池抽水蓄能电站上库沥青混凝土面板的低温抗裂计算分析。在温度场的计算中，根据当地最低温度时的日或多日温度的变化记录，根据试验所得的沥青混凝土热工参数计算得出沥青混凝土面板各层的温度场的变化。在面板的应力应变计算分析中，主要是分析封闭层和防渗层的温度应力应变，是否有开裂的可能。为此应进行防渗层沥青混凝土的应力松弛试验，得出有关计算参数，按黏弹性理论计算防渗层的温度应力应变变化情况，判断其开裂的可能性。有关这种计算方法，可参考《水利学报》1991年第5期，陈敬文等“按黏弹性嵌固板计算沥青混凝土面板的温度应力”一文。

7.0.14 随着计算机的广泛应用和对土石料及沥青混凝土的本构关系的深入研究，利用有限元法对沥青混凝土面板和填筑体连同基础一起进行面板的应力应变计算已广为应用。其计算要求可按照《碾压式土石坝设计规范》(DL/T 5395)的有关规定进行，荷载的计算按照《水工建筑物荷载设计规范》(DL 5077)进行；坝体的抗震计算按照《水工建筑物抗震设计规范》(DL 5073)中的有关要求。近年来对沥青混凝土面板的计算模型作了多种探索，一般采用非线性双曲线模型计算或黏弹性四元流体模型或弹塑性或线弹性计算等。计算表明，由于面板相对较薄，对整个坝体或库体的变形和应力应变影响很小，为方便计，可采用与坝体相同的非线性双曲线模型进行计算。但对沥青混凝土面板来说，在坝体计算的基础上，得出面板基础的变形和应力应变后，再按黏弹性或弹塑性进一步分析沥青混凝土面板的应力应变，以应变来判断面板的安全性是比较合理的。对于大面积沉陷变形，沥青混凝土的允许应变可按弯曲受拉应变控制，对于不均匀沉陷变形，可按受拉应变控制。

7.0.15 沥青混凝土面板与基础、岸坡和刚性建筑物的连接部位，是整个面板防渗系统中的薄弱环节，设计中应特别慎重对待。

连接部位的连接型式，设计时可根据水头大小、地基的地质条件、岸坡的地形特点、填筑体的密实程度及变形大小和刚性建筑在运用中的位移情况等因素综合考虑，参考已建工程的经验或附录 C 所示形式进行选择。连接部位的设计，主要是解决由于不均匀沉陷和相对位移而导致沥青混凝土面板的开裂破坏问题。为了解决这个问题，根据已建工程经验，主要可采取以下措施：减少齿墙、基础防渗墙、岸墩、刚性建筑物对面板边界的约束，允许面板滑移而不破坏防渗结构；将集中的不均匀沉陷在一定范围内分散开，使沥青混凝土防渗层的变形与其相适应而不开裂等。由于连接部位变形复杂，其构造和材料性能也各不相同，所以对于重要工程的连接结构形式还可以通过计算和模型试验进行论证。

7.0.16 在面板与刚性建筑物的连接部位和反弧段沥青混凝土防渗层中，局部加设一层变形能力大、抗拉强度高加筋网，可以提高面板适应变形的能力和抗裂能力，国内外已有较多工程使用，收到较好的效果，国内工程如天荒坪、宝泉、西龙池、张河湾等也在类似部位增设了加厚层和加筋网，以提高连接部位和反弧段的变形适应能力。加筋网和加厚层由一层加筋网上覆 5cm 厚的防渗层组成，置于面板防渗层下面。

7.0.17 根据已建沥青混凝土面板工程经验，有些工程由于齿墙或岸坡混凝土墩的尺寸不够或基础处理不善，导致齿墙、岸墩与基岩之间被拉裂；基础渗（绕）流过大，冲刷填筑体，引起沥青混凝土面板塌陷，故规定对齿墙、岸墩尺寸和基础处理范围，应根据水压大小和地质条件按重力墩抗滑稳定和防渗要求确定。

岸坡混凝土墩一般尺寸较小，不易满足抗滑稳定要求。在这种情况下，可采取设置锚筋等措施，以提高抗滑稳定性。

7.0.18 连接部位的结构措施包括加设沥青砂浆（或细粒沥青混

凝土)楔形体、加设塑性防渗材料或止水片、加设加筋网和加厚层等。楔形体的作用是利用沥青砂浆(或细粒沥青混凝土)柔性好,适应变形能力大的特点,从而改善沥青混凝土面板的工作条件,达到适应不均匀沉陷的目的。

• 面板与岸坡连接部位的局部起拱,可将岸墩做得低于坝面面板,局部用曲面连接,如图 C.8 所示,这样,当坝体发生沉陷时,拱起部位随之下沉,使面板沥青混凝土处于受压状态,可以避免或减少连接部位的面板因变形而导致开裂。

7.0.19 尽管沥青混凝土材料具有黏弹性性质,在温度较高和缓慢加荷条件下,其变形能力较大。但由于水库初次蓄水时,填筑体可能会产生较大的沉降变形,因此初次蓄水宜选择在高温季节;并且控制水位上升速率不能过大,蓄水过程中加强监测,以免由于填筑体的沉降变形超过沥青混凝土的承受能力而出现裂缝。国内天荒坪工程经过几年的运行实践,已经在这方面积累了许多的经验。

沥青混凝土面板初期蓄水过程中,对库水位下降速度也应予以控制,特别当填筑体或基础排水不畅时,更应严格控制,以防由于库水位下降速度快,而使面板后水位高于库水位,形成反向水压力,导致面板鼓包破坏。至于库水位下降速度的控制标准,应根据面板结构,绕坝渗流和地下水补给条件及填筑体的排水能力等因素综合考虑,并参考已建工程的运用经验,通过技术论证确定。

8 碾压式沥青混凝土心墙设计

8.0.1 垂直型沥青混凝土心墙由于防渗面积小, 施工简单等优点, 在国内外已被广泛用于各类高度的沥青混凝土心墙土石坝中, 如我国的坎尔其、茅坪溪、冶勒等坝, 挪威的 Berdalsvatn、Storglomvatn 等坝, 德国的 Dhünn、Wiehl 等坝。倾斜形式沥青混凝土心墙, 虽然能很好地和坝体上部的变形矢量方向一致, 增大心墙墙后一侧的承压填筑量, 使静水荷载的合力方向处于有利的向下方向, 但防渗面积有所增加, 约增加 8%~15% 沥青混凝土工程量, 分层错台铺设上升, 增加施工难度等缺点, 故在一般地形地质条件下现在已很少采用。早期修建的如奥地利的 Finstertal 坝 (坡比 1:0.4), 挪威的 Storvatn 坝 (坡比 1:0.2) 等曾采用了倾斜形式沥青混凝土心墙。上部倾斜下部垂直的心墙, 如中国香港于 1978 建成的高岛东坝和西坝, 坝高分别为 105m 和 95m, 折点在坝高的 2/3, 坡比为 1:0.236; 德国的 Kleine Kinzig、Grosse Dhünn, 奥地利的 Feistritz 等坝。根据《The International Journal on Hydropower & Dams》年报统计 (见表 18), 已建成的和正在施工的沥青混凝土心墙共计 105 座 (截至 2009 年)。近 20 年来, 绝大多数坝采用垂直形式沥青混凝土心墙, 而我国的沥青混凝土心墙均为垂直形式。根据沥青混凝土心墙的计算成果和安全监测资料的分析结果表明, 垂直形式的心墙工作情况良好, 故在本标准中推荐垂直型心墙。在地形、地质等有特殊情况和坝体变形和应力应变有特殊要求时, 可通过技术经济比较选定倾斜的或上部倾斜下部垂直的心墙方案。

8.0.2 到目前为止, 关于沥青混凝土心墙厚度还没有一个简单的理论方法来进行计算, 多数都是根据沥青心墙运用中获得的成功经验总结出的经验公式或数据选择, 或拟定一个厚度, 通过应力

应变分析进行选择。

Feiner、Lehner 与 Löhr 于 1976 年建议，心墙厚度，中等高度坝为 60cm~80cm；高坝最多不超过 100cm。

Haug 建议心墙厚度按式 (2) 计算：

$$d=h/100 \geq 60\text{cm} \quad (2)$$

式中：

d ——心墙厚度，cm；

h ——最大水深，m。

各国部分沥青混凝土心墙坝的心墙厚度见表 18。

表 18 国内外部分沥青混凝土心墙坝的心墙厚度

工程名	国家	坝高 m	坝顶长 m	完建年份	心墙厚 m
Kleine Dhünn	德国	35	265	1962	0.7/0.6/0.5
Bremge	德国	20	125	1962	0.6
Eberlaste	奥地利	28	475	1968	0.6/0.4
Koedel	德国	17	90	1969	0.4
Legadadi	埃塞俄比亚	26	35	1969	0.6
Wichl	德国	53	360	1971	0.6/0.6/0.4
Meiswinkel	德国	22	190	1971	0.5/0.4
Finkenrath	德国	14	130	1972	0.4
Wichl, Main Outer Dam	德国	18	255	1972	0.5/0.4
白河	中国	25	250	1973	0.15
党河（一期）	中国	58	230	1974	1.5~0.5
Eixendorf	德国	28	150	1975	0.6/0.4
Eicherscheid	德国	18	175	1975	0.4
九里坑	中国	44	107	1977	0.5~0.3
郭台子	中国	21	290	1977	0.3
High Island West	香港	95	720	1977	1.2/0.8
Los Cristales	智利	31	190/140	1977	0.6

表 18 (续)

工程名	国家	坝高 m	坝顶长 m	完建年份	心墙厚 m
大厂	中国	22	180	1978	0.3
High Island East	香港	105	420	1978	1.2/0.8
Antrift	德国	20	550	1981	0.5
Breitenbach	德国	13	370	1978	0.6
Kamigazawa	日本	14	170	1978	0.6
Buri	日本	16	173	1979	0.6
Finstertal	奥地利	100	652	1980	0.7/0.6/0.5
杨家台	中国	15	135	1980	0.3
Megget	苏格兰	56	568	1980	0.7/0.6
Grosse Dhuenn	德国	63	400	1980	0.6
Vestredal	挪威	32	500	1980	0.5
Katlavatn	挪威	35	265	1980	0.5
Langevatn	挪威	26	290	1981	0.5
二斗湾	中国	30	320	1981	0.2
库尔滨	中国	23	153	1981	0.2
Dhuenn, Outer Dam	德国	12	115	1981	0.5
Sulby	英国	36	143	1982	0.75
Kleine Kinzig	德国	70	345	1982	0.7/0.5
碧流河(左坝)	中国	49	288	1983	0.8~0.5
碧流河(右坝)	中国	33	113	1983	0.5~0.4
Feldbach	德国	14	110	1984	0.4
Wiebach	德国	12	98	1985	0.5
Shichigashuko	日本	37	300	1985	0.5
Dörpe	德国	16	118	1986	0.6
Lenneper Bach	德国	11	93	1986	0.5
Wupper	德国	40	280	1986	0.6
Riskallvatn	挪威	45	600	1986	0.5
Storvatn	挪威	100	1472	1987	0.8~0.5

表 18 (续)

工程名	国家	坝高 m	坝顶长 m	完建年份	心墙厚 m
Berdalsvatn	挪威	65	465	1988	0.5
Borovitza	保加利亚	76	218	1988	0.8~0.7
Rottach	德国	38	190	1989	0.6
Styggevatn	挪威	52	880	1990	0.5
Feistritzbach	奥地利	88	380	1990	0.7/0.6/0.5
Hintermuhr	奥地利	40	270	1990	0.7/0.5
Queens Valley	英国	29	170	1991	0.6
Schmalwasser	德国	76	325	1992	0.8
Muscat	阿曼	26	110	1993	0.4
党河(二期)	中国	74	304	1994	0.5
Urar	挪威	40	151	1997	0.5
Storglomvatn	挪威	128	830	1997	0.95~0.5
Holmvatn	挪威	60	396	1997	0.5
Hatta	迪拜	45	422	1998	0.6
Greater Ceres	南非	60	280	1998	0.5
Algar	西班牙	30	485	1999	0.6
Goldistal, Outer Dam	德国	26	142	1999	0.4
洞塘	中国	48	142	2000	0.5
坎尔其	中国	51	319	2000	0.6/0.4
牙塘	中国	57	407	2003	1.0~0.5
马家沟	中国	38	264	2001	0.5
加音塔拉	中国	26	160	2003	0.4
茅坪溪	中国	104	1840	2003	1.2~0.6
New Hatta Main Dam	迪拜	37	228	2003	0.6
New Hatta Saddle Dam	迪拜	12.5	208	2003	0.6
恰普其海(围堰)	中国	50	110	2003	0.4
Meycran	伊朗	52	186	2004	1.0

表 18 (续)

工程名	国家	坝高 m	坝顶长 m	完建年份	心墙厚 m
Mora de Rubielos	西班牙	34	215	2005	0.5
Miduk Dam	伊朗	43	250	2006	0.6
冶勒	中国	124.5	411	2005	1.2~0.6
Plovdivtzi	保加利亚	48	225	U.C.	0.6~0.5
Neikovtzi	保加利亚	43	205	U.C.	0.6~0.4
尼尔基	中国	40	1829	2005	0.7~0.6
下坂地	中国	78	406	U.C.	1.2~0.6
隘口	中国	80	217	U.C.	1.2/0.6
照壁山	中国	71	121	2005	0.7/0.5
Murwani Main Dam	沙特	101	575	U.C.	1.0~0.5
Murwani Saddle Dam I	沙特	30	437	2008	0.5
Müglitz Dam	德国	43	260	2006	0.6
龙头石	中国	72.5	371	2008	1.0~0.5
喀腊塑克 (上、下游围堰)	中国	32/12	265/300	2006	0.3
黄金坪	中国	81	402	U.C.	1.0/0.6
城北	中国	47	197	2008	0.5
Kjøsnesfjorden, main dam	挪威	25	360	2008	0.4
Kjøsnesfjorden, dam	挪威	20	110	2008	0.4
Nemiscou -1 dam	加拿大	15	300	2008	0.4
Shur River main dam	伊朗	80	425	U.C.	0.6
Shur River saddle dam	伊朗	27	140	U.C.	0.6
Foz do Chapeco	巴西	48	600	U.C.	0.5
去学	中国	170	219	U.C.	0.6/1.3
二郎庙	中国	69	254	U.C.	0.5/1.1
观音洞	中国	60	350	U.C.	0.5/1.0
玉滩	中国	50	320	U.C.	0.5/0.8

表 18 (续)

工程名	国家	坝高 m	坝顶长 m	完建年份	心墙厚 m
克孜加尔	中国	63	356	U.C.	0.5/1.2
峡沟	中国	36	216	U.C.	0.5
旁多	中国	72	1052	U.C.	0.7/1.2
开普太希	中国	48	195	U.C.	0.5/0.7
注: U.C.表示正在施工中。					

由表 18 可见, 心墙厚度多数在坝高的 $1/60 \sim 1/130$ 之间, 低坝比值较大, 高坝较小。根据国内近十几年的经验, 本标准推荐沥青混凝土心墙底部最大厚度 (不包括底部扩大厚度) 为坝高的 $1/70 \sim 1/130$, 心墙顶部厚度不宜小于 40cm 。对中等高度以下的土石坝, 心墙也可采用等厚度设计。

8.0.3 由于计算机已经普及, 计算方法日趋完善, 沥青混凝土计算所需参数, 可进行试验提出, 故高于 30m 的中等高度以上的坝都应进行变形和应力应变分析, 这也是完全能做到的。

8.0.4 计算所需参数, 对于重要的工程或较高的坝, 应通过试验得到; 对于较低的坝、缺乏试验条件时, 可用工程类比法确定。由于沥青混凝土性能受温度和加荷速度的影响很敏感, 故在试验时, 其温度和加荷速度的控制, 应接近环境条件和运行工况, 试验时的温度宜采用当地的多年平均气温, 但要完全符合心墙的工作条件也很难做到。

十几年我国已建成和正在建设的十余座高 $40\text{m} \sim 125\text{m}$ 碾压式沥青混凝土心墙堆石坝, 都用有限单元法进行了变形和应力应变分析。为提供计算参数, 同时进行了沥青混凝土和过渡料、坝壳料的三轴试验, 在这些计算和试验工作中积累了较丰富的经验。

近年来, 用有限单元法进行变形和应力应变计算分析, 一般进行了二维计算, 对坝顶长度较短的坝还进行了三维计算; 不仅

进行了静力的分析，有的还进行了动力分析；计算分析的模型，不仅用了非线性双曲线（ $E-\mu$ 模型或 $E-B$ 模型）应力应变模型，有的对沥青混凝土心墙还采用了黏弹性、弹性、弹塑性等不同的模型；不仅在前期设计阶段进行了应力应变分析，有的还利用安全监测资料进行了反演分析。经验表明，沥青混凝土心墙厚度甚薄，在整个坝体断面中所占比例很小，对坝的变形和应力应变影响较小，心墙和坝壳料一同采用非线性双曲线应力应变模型还是比较合理、简便、接近实际的。故宜采用这种方法。当然不排除其他计算模型和计算方法以及更好的新的模型和方法。对于重要的坝或高坝，可采用两种以上的方法计算，以便对比分析。

用有限元法分析沥青混凝土心墙坝的应力应变时，根据坝高的不同，自重荷载至少分 8~10 级加载，水压力荷载至少分 3~4 级加载，可以反映出坝体施工和蓄水过程中应力应变的变化过程。

安全监测表明，心墙与过渡料之间有位错存在，所以计算中宜在心墙和过渡料之间设置接触（摩擦）单元，可以反映这种位错现象。此外，心墙上游侧坝壳砂石料在初次蓄水时的浸水湿陷在分析中也应予以考虑。

碾压式沥青混凝土心墙坝的变形和应力应变分析，所得成果是否符合实际，重要的是三轴试验提供的计算参数是否正确、合理、符合实际。大量的沥青混凝土三轴试验表明，所得的非线性双曲线模型参数中，对分析成果影响很大的 K 、 n 等参数，很不稳定，有时缺乏规律性，这说明 Janbu 提出的初始切线模量与围压的关系 $E_t = KP_a(\sigma_3/P_a)^n$ ，对沥青混凝土并不完全适用。其影响因素主要有：沥青混凝土的黏-弹-塑性质、沥青等原材料性质及配合比、试件的成型和脱模方法、试验加载前的固结蠕变时间、试验采用的围压大小、加载变形速度、试验温度等，对于钻取的芯样，由于没有待沥青混凝土充分冷却就进行钻取，芯样受到不同程度的损伤，试验中更难得到真实的较有规律的初始模量值。这些问题还有待今后实践中进一步研究。目前为了获得较好的试验

成果，应统一试验方法、严格执行试验操作规程，并且在同一条件下多做一些试件的试验，以便取其较为合理的数据。近年的试验还表明，心墙沥青混凝土的 K 值大致在 200~500 范围， n 值较小，大致在 0.1~0.3 范围。而 ϕ 、 C 则较有规律。泊松比 μ 基本为一常数，约为 0.46~0.49。采用 $E-B$ 模型计算时，沥青混凝土的体变模量参数 K_b 、 m 可利用三轴试验资料按下述方法计算：在不同围压下测得的轴向应变与体应变的关系中，取体应变曲线由压缩转变到回胀时的体应变及其相对应的偏应力，计得平均应力 $\sigma_m = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 和该围压下的体变模量 $E_b = \sigma_m / \varepsilon_v$ ，根据不同围压及其相应的体变模量，用双对数回归即可得到 K_b 、 m 值。

我国冶勒、茅坪、下坂地等沥青混凝土心墙坝都进行了动力分析，在动力分析中，对心墙沥青混凝土进行了动三轴试验。

8.0.5 沥青混凝土的变形模量较小，坝壳料的变形模量较大，设置过渡层，使其变形模量介于心墙与坝壳料之间，可使心墙、过渡层、坝壳料的变形平缓过渡。

众所周知，水力劈裂问题来自土质心墙的“拱效应”，而沥青混凝土心墙不同。沥青混凝土孔隙率小，孔隙是封闭且不连通的，又无孔隙水的存在；沥青混凝土渗透系数很小，渗水进入很困难。沥青混凝土心墙中渗流和渗水压力很难形成；沥青混凝土的抗渗比降很大，Haas 试验表明，沥青在 20℃ 和 11.5MPa 压力下（相当于 1150m 水头），沥青在混凝土中没有移动；另一个试验，试件厚度 15cm，在温度 40℃ 和压力 7.5MPa（相当于 750m 水头）时，沥青对压力的反作用力才能测出。故沥青混凝土心墙虽有“拱效应”存在，垂直应力比自重应力有所减小，但心墙与过渡层之间有位错存在，一般不会出现拉应变，故沥青混凝土心墙水力劈裂可不考虑。

心墙两侧过渡层材料的质量要求与一般土质心墙过渡料不同，材料的级配应满足沥青混凝土心墙对过渡层功能的要求。根据工程实践经验和试验成果表明，当过渡层材料最大粒径小于

80mm 时,易保证过渡层非线性模量与心墙非线性模量的匹配和过渡层的匀质性。限制 5mm、0.075mm 颗粒数量目的在于提高过渡层的排水性,故过渡层骨料级配应通过试验确定。有的工程对过渡层还提出压实度(密度或相对密度)、变形模量、渗透系数等要求,这要根据各工程的具体情况确定,如有的工程规定过渡料的相对密度要比坝壳的相对密度低 0.05~0.1。

过渡层最小厚度 1.5m~3.0m,应根据坝壳材料特性、坝高和部位而定。堆石坝、高坝取大值,有的高堆石坝还设置两层过渡层。另外在施工期间,心墙和过渡料同步上升,一般情况下,坝壳料总是滞后 2 层~3 层(每层 0.2m~0.25m)填筑。因此过渡层厚度应考虑心墙施工时的稳定和心墙摊铺碾压时的安全要求。

有的沥青混凝土心墙工程,上游侧采用较细的材料、下游侧采用较粗的材料作过渡层。理由是万一心墙开裂漏水时,细料可以填塞裂缝,还可以在上游侧过渡区进行灌浆处理。但大量工程经验表明,没有一座心墙做过这种处理,反而给施工造成很多困难。两种不同的过渡料从料场运到坝面上临时堆放和摊铺时,易造成混杂,导致过渡层质量事故。故规范中规定上下游过渡层宜用一种级配材料铺压完成。

8.0.6 沥青混凝土心墙与基座连接处是防渗的关键部位,必须重视该部位的设计。

沥青混凝土心墙的混凝土基座不宜高出基岩面很多,如有廊道的基座。因混凝土与沥青混凝土两种材料刚度不同,如基座高出岩面很多,基座(廊道)将会出现应力集中现象。奥地利 Finstertal 坝等工程,有廊道的基座设置在基岩开挖的基槽内,其顶面与基岩面齐平,安全监测表明情况良好。

沥青混凝土心墙与岸坡或刚性建筑物连接的坡比,可以很陡。德国有一项工程,沥青混凝土心墙与一座 8m 高的水泥混凝土墙

连接的坡比为 8:1 (垂直:水平), 防渗情况良好。但我国对某些工程三维计算表明, 1:0.25 (垂直:水平) 的坡比连接, 连接面不会出现拉应变, 防渗是有保证的。

9 浇筑式沥青混凝土心墙设计

9.0.1 浇筑式沥青混凝土心墙靠自重流变密实，故适合垂直布置。

9.0.2 浇筑式沥青混凝土心墙的厚度从防渗考虑，只需几厘米即可满足要求，从流变变形的角度考虑，也是厚度小有利。但是考虑坝体剪切变形或受震动而发生相对错动，必须有一定防渗厚度，同时为了便于施工，保证施工质量，心墙厚度也不能过小；如果心墙厚度过大，则自重流变压力和流变量随之增大，这会导致心墙产生侧向膨胀，影响坝壳的稳定。综合考虑上述各种因素，总结已建工程经验，心墙厚度可按坝高的 $1/100$ 控制，但心墙的最小厚度不宜小于 20cm 。

9.0.3 为了保证心墙与两侧的过渡料直接接触，施工中常采用钢模板施工。近期新疆等地新建的浇筑式沥青混凝土心墙多采用钢模板施工，施工速度快，技术经济效果好。但国内东北地区早期多座浇筑式沥青混凝土心墙工程，用沥青砂浆砌块石或沥青砂浆砌水泥混凝土、沥青混凝土预制块作心墙的副墙，施工时作模板用。副墙一侧厚度为 $10\text{cm} \sim 15\text{cm}$ ，砌块尺寸为 $50\text{cm} \times 15\text{cm} \times 20\text{cm}$ （长 \times 宽 \times 高）。由于副墙对心墙的应力状态和均匀变形不利，故目前很少采用。

使心墙、过渡层、坝壳材料的变形平缓过渡，应充分考虑浇筑式沥青混凝土的变形模量较小的特性。

9.0.4 浇筑式沥青混凝土心墙对沥青混凝土的要求主要有：密实防渗，这一般不成问题；流变速度及流变压力小，这就要选用针入度较小的沥青，而且沥青用量不宜过大；流动性好便于施工，这又要求沥青用量不宜过小；质量均匀不分离，这就要求骨料粒径和骨料级配指数不能过大。所以沥青混凝土配合比应通过试验确定。这些试验有：孔隙率和渗透试验；剪切流变试验。这两种试验的试验方法见《水工沥青混凝土试验规程》（DL/T 5362）。流

动性试验、分离度试验见本标准条文说明 6.0.7。

关于浇筑式沥青混凝土心墙顶部的流变沉降速度，在 SLJ 01-1988《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计准则》编制说明中列出了三种计算式：

计算式 (3) (根据前全苏水利科学研究院文献)：

$$v = \frac{2^{(\beta+1)}(\gamma_a - \lambda\gamma'_g - \gamma_w)^{\beta+1}}{(\beta+1)(\beta+2)b^{(\beta+1)}[\eta]} H^{(\beta+2)} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\cos^2 \theta}{\cos^2(\theta + \phi')} \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\theta + \phi') \sin \phi'}{\cos \theta}} \right)^2 \quad (4)$$

计算式 (5) (根据《水工沥青与防渗技术》杂志 1987 年第 2 期，王为标等“沥青防渗结构计算公式的推导和应用”文章)：

$$v = \frac{1}{(1-\beta)bDH^\beta} \left[(\gamma_a H - \gamma_w H - \lambda\gamma'_g H)^{1-\beta} - \frac{t}{K'DH^{\beta+1}} \right]^{\frac{\beta}{1-\beta}} \quad (5)$$

$$D = \frac{2^{\beta+1}(\beta+2)[\eta]}{(1-\beta)b^{\beta+2}} \quad (6)$$

计算式 (7) (根据前水电部东北勘测设计院推导，适用于针入度指数大于+2 的沥青)：

$$v = \frac{b}{2\eta_p(\gamma_a - \gamma_w - \lambda\gamma'_g)^2(\beta+2)(\beta+1)} \left(\frac{2(\gamma_a - \gamma_w - \lambda\gamma'_g)H}{b} - 5 \right)^{\beta+2} \quad (7)$$

在附录 D 算例中，三种计算式计得的结果如下：

计算式 (3)， $v=7.86 \times 10^{10} \text{ mm/a}$ ；

计算式 (5)， $v=2.526 \text{ mm/a}$ ；

计算式 (7)， $v=336.7 \text{ mm/a}$ 。

可见相差很大。

根据近十多年的研究和实际工程的观测，结合前水电部东北

勘测设计院的试验成果，计算式（3），没有考虑时间 t 和坝壳料的变形系数 K 的因素，是不完善的，计算结果偏大，与前水电部东北勘测设计院的试验成果和实际工程观测不符；计算式（5），考虑了时间 t 和坝壳料的变形系数 K ，比较合理，量纲正确，计算结果与试验和观测比较符合；计算式（7），由于我国石油工业的发展和沥青市场供应情况，可以采用优质沥青，而不再用针入度指数大于 2 的沥青。故条文推荐采用计算式（5），同时明确规定第一年的垂直流变变形速度不大于 10mm/a。

浇筑式沥青混凝土心墙土石坝的变形和应力应变计算，所用计算参数应按浇筑式沥青混凝土通过三轴试验获得。但由于浇筑式沥青混凝土沥青含量较大，不是在低温情况下，三轴试验很难获得理想的结果。

9.0.5 浇筑式沥青混凝土心墙与基础、岸坡、刚性建筑物的连接，与碾压式沥青混凝土心墙没有什么区别，故可以参考附录 C 进行设计。

9.0.6 浇筑式沥青混凝土面板目前主要用在混凝土坝上游面的防渗加固处理，如表 19 所示。但在 1986 年中国修建的第一座全碾压混凝土坝（福建坑口水电站）上游面直接用沥青混凝土面板防渗，取得良好效果。作为 216m 高的龙滩碾压混凝土坝上游面防渗方案，对沥青混凝土面板防渗作过深入细致的研究，但由于各种原因而未能实施。此外（这种结构形式）还可用于砌石坝、岸坡的防渗。

由于工程类别和当地温度及材料的不同，面板沥青混凝土配合比须经过配合比试验确定。从防渗性考虑，沥青混凝土厚 4cm 就足够了。但考虑到坝面不平整、便于施工和结构安全储备等因素，沥青混凝土面板厚度可为 6cm~10cm。沥青的品种和含量对沥青混凝土面板流变影响最大。以往工程沥青含量 12%~18% 偏大，个别工程面板局部出现流变鼓胀现象。根据目前的施工水平，在施工上采取辅助压实沥青混合料措施，在满足防渗性条件下，

可以降低沥青含量到 11%~16%。已建浇筑式沥青混凝土面板配合比见表 19 可供参考。

表 19 已建浇筑式沥青混凝土面板配合比

工程名称	最大粒径 mm	配合比 %				沥青 ^a %	
		碎石	人工砂和 河砂	填料	石棉		
丰满	20	32	36	12	5	渣油 5	氧化沥青 10
上犹江	5	55		26	1	18	
湖南镇	5	51~55		24~26	2~4	18~20	
碧流河	15	72.6		15.9		11.5	
坑口	5	61.2		19.8	1	18	
白山	20	60		23.5	2	15	
罗湾	15	34	34	18		14	

a 沥青与矿料之比,即油石比。

在 20 世纪 50 年代曾用木板作沥青混凝土的护面板,如 1957 年江西上犹江空腹混凝土重力坝上游面是用 7.5cm 厚的松木板。但随后出于节约木材、保护环境和长期耐久性考虑,护面板都采用预制钢筋混凝土板,见表 20。

表 20 用沥青混凝土面板作混凝土坝上游面防渗的工程

序号	工程名称	完成年份	坝型	坝高 m	防渗 面积 m ²	沥青混凝土 防渗层厚度 cm	钢筋混凝土板厚 cm
1	江西上犹江	1957	空腹混凝土重力坝 坝内式厂房	68.5	2100	4 (沥青砂浆)	木板厚 7.5
2	阿格尔 (Agger) (德)	1966	混凝土重力坝	40	6000	12	28
3	凤滩	1977	混凝土空腹重力拱坝	112.5		5 (沥青砂浆)	13
4	湖南镇	1978	混凝土重力梯形支墩坝	128	6343	7 (沥青砂浆)	4 (外有纵梁)

表 20 (续)

序号	工程名称	完成年份	坝型	坝高 m	防渗 面积 m ²	沥青混凝土 防渗层厚度 cm	钢筋混凝土 板厚 cm
5	碧流河	1981	混凝土重力坝	53.5	2140	10	10
6	白山	1981	混凝土重力拱坝	149.5	800	10	6
7	福建坑口	1986	碾压混凝土坝	56.8	3100	6 (沥青砂浆)	6
8	桓仁	1989	混凝土单支墩大头坝	78.5	6700	10	6
9	丰满	1990	混凝土重力坝	90.5	16 000	10	6
10	罗湾	2002	混凝土重力坝	47	3300	10	6

护面板尺寸主要考虑沥青混凝土流变侧压力、浇筑层高和安装方便的要求。根据工程经验,护面板一般厚 5cm~10cm、长 100cm~200cm、高 40cm~60cm 比较适宜。

沥青混凝土流变侧压力的计算方法如下:

浇筑式沥青混凝土面板流变可视作两平行壁之间的流动,一侧为刚性坝面,另一侧为弹性混凝土护面板,并使护面板产生弹性变形。按非牛顿流体考虑,其剪应力和剪应变速率的关系为:

$$\tau^\beta = [\eta] \frac{dv}{dy} \quad (8)$$

式中:

τ ——剪应力, Pa;

β ——无因次异变指数, 由流变试验确定;

$[\eta]$ ——结构黏度, $\text{Pa}^\beta \cdot \text{s}$, 由流变试验确定;

v ——层间相对移动速度, m/s;

y ——层间法向距离, m。

沥青混凝土的流变作用对护面板产生的侧压力将随着时间的增

长而增大，最终趋于稳定。假设由于侧压力作用使护面板发生的侧向变形为 $\Delta\delta$ ，从防渗面板顶部至底部的侧向流变压力按三角形分布，从式(8)可推导出水库未蓄水和蓄水两种情况下的流变侧压力计算式(9)和式(10)。

未蓄水时：

$$p = \gamma H \sin \alpha - \left[(\gamma H \sin \alpha)^{1-\beta} - \frac{t}{KDH^{1+\beta}} \right]^{\frac{1}{1-\beta}} \quad (9)$$

蓄水时：

$$p = \gamma' H \sin \alpha - \left[(\gamma' H \sin \alpha)^{1-\beta} - \frac{t}{KDH^{1+\beta}} \right]^{\frac{1}{1-\beta}} \quad (10)$$

式中：

p ——沥青混凝土侧压力压强，Pa；

γ ——沥青混凝土容重， N/m^3 ；

H ——沥青混凝土防渗面板高度，m；

α ——沥青混凝土防渗面板与水平面夹角， $(^\circ)$ ；

t ——沥青混凝土防渗面板流变经历的时间，s；

γ' ——沥青混凝土浮容重， $\gamma' = \gamma - 9810$ ， N/m^3 ；

β ——无因次异变指数，由流变试验确定；

K ——护面板和锚筋的总变形系数， m/Pa ；

$$K = K_b + K_s = \left(f_1 \frac{m^4}{E_b h_b^3} + f_2 \frac{n^4}{E_b h_b^3} \right) + \frac{A\delta}{aE_s} \quad (11)$$

$$D = \frac{2^\beta [\eta] (2 + \beta)}{\delta^{2+\beta} (1 - \beta)} \quad (12)$$

式中：

D ——系数；

K_b ——护面板变形系数， m/Pa ；

K_s ——锚筋变形系数， m/Pa ；

$[\eta]$ ——结构黏度 $\text{Pa}^{\beta} \cdot \text{s}$ ，由流变试验确定；

δ ——沥青混凝土防渗面板防渗层厚度，m；

E_b ——护面板的弹性模量，Pa；

h_b ——护面板厚度，m；

m ——水平向锚筋间最大距离，m；

n ——竖向锚筋距护面板企口最大距离，m；

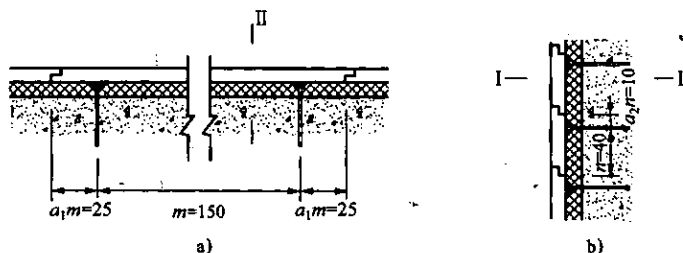
f_1 、 f_2 ——修正系数，可根据图 2 所示的结构简图，从表 21 中查取；

A ——每根锚筋所承受的护面板面积， m^2 ；

a ——锚筋的截面面积， m^2 ；

E_s ——锚筋的弹性模量，Pa；

a_1 、 a_2 ——符号意义见图 2。



a) I—I 剖面；b) II—II 剖面

单位：cm

图 2 结构简图

表 21 修正系数 f_1 、 f_2

a_1 和 a_2	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
f_1	0.156 25	0.154 38	0.148 75	0.139 375	0.126 25	0.109 375	0.088 75	0.064 4	0.036 3	0.004 4
f_2	0.156 25	0.161 3	0.154 2	0.124	0.092 1	0.068 6	0.109	0.146 8	0.222	0.300

算例

某碾压混凝土重力坝，上游面垂直坝面用沥青混凝土面板防

渗。面板高 57m, 厚 6cm。预制钢筋混凝土护面板长 200cm, 高 50cm, 厚 6cm, 每块护面板用两根 $\phi 16\text{mm}$ 锚筋固定于坝体上, 锚筋间距 150cm。根据沥青混凝土配合比选择及剪切流变试验, 沥青混凝土的容重 $\gamma = 20\text{kN/m}^3$, 异变指数 $\beta = 1.4$, 结构黏度 $[\eta] = 6 \times 10^8 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

采用护面板弹性模量 $E_b = 2 \times 10^4 \text{MPa}$, 锚筋弹性模量 $E_s = 2 \times 10^5 \text{MPa}$, 锚筋距护面板下企口的距离 $n = 40\text{mm}$, 一根锚筋承受的护面板面积 $A = 0.5\text{m}^2$, 修正系数 $f_1 = 0.13$, $f_2 = 0.068$ 。计算得到护面板和锚筋总变形系数 $1.53 \times 10^{-7} \text{m/MPa}$ 。

按以上各式可计得不同年限、未蓄水和蓄水的面板底部最大流变压力见表 22。

表 22 不同年限面板底部最大流变压力

年 限	1 年	2 年	5 年	10 年	50 年
未蓄水时流变压力 MPa	0.047 8	0.092 9	0.213 5	—	—
蓄水时流变压力 MPa	0.588 2	0.606 0	0.653 7	0.721 1	0.978 4

这一计算方法源自前苏联全苏水利科学研究院推荐的方法, 计算结果可作为沥青混凝土配合比设计和护面板设计验证。

在干燥、洁净的坝面和护面板内侧及企口涂刷阳离子乳化沥青或稀释沥青是为了增强坝面和护面板与沥青混凝土的黏结, 涂量为 $0.15\text{kg/m}^2 \sim 0.2\text{kg/m}^2$, 涂量不宜太厚, 厚了反而形成滑动层。乳化沥青含水量约 45%, 涂刷后水分挥发视气温情况需 24h 以上; 稀释沥青以汽油或柴油作稀释剂, 油分挥发需 12h 以上。

截渗槽的底部宽度应大于防渗面板厚度, 一般为面板厚度的 1.5 倍, 槽内浇筑沥青混合料。在岸坡部位槽底纵向做成斜坡, 不宜陡于 8:1。槽底纵向需变坡时, 应平缓过渡。截渗槽上游侧, 在岸坡部位应做成宽 10cm~15cm 台阶, 台阶高度根据地形条件确定, 应为护面板高度的倍数, 以便安装护面板。当沥青混凝土

防渗面板直接坐落在岩基或水泥混凝土基座上时，止水片一端埋入水泥混凝土基座内，另一端插入防渗层面板内，止水片应具有耐高温（ $160^{\circ}\text{C}\sim 180^{\circ}\text{C}$ ）性能。对于坝高较大、防渗要求较高的工程，可采用设置截渗槽和止水片的组合型式。

在顶部水泥砂浆封闭范围内坝面应凿深 $1\text{cm}\sim 1.5\text{cm}$ ，砂浆填入护面板空腔内，深度一般为 $10\text{cm}\sim 20\text{cm}$ 。有时在护面板顶向上再做一个水泥砂浆三角体，三角体坡线从护面板外缘开始以 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 坡角至坝面。

当混凝土坝面需局部防渗加固时，沥青混凝土面板和护面板须临空加设。这时，护面板之间和护面板与坝面之间的接缝，均需用水泥砂浆勾缝。角钢或外露螺栓应用砂浆封闭或作防锈处理。

混凝土坝上游面的永久横缝可凿成深度和宽度为 10cm 、表面宽 20cm 三角形缝槽。槽内先铺设土工膜或油毡类材料，再浇筑沥青混合料。

10 安 全 监 测

10.0.1 沥青混凝土面板和心墙都是土石坝的防渗结构，与土石坝一起发挥效用，因此对沥青混凝土防渗面板和心墙的监测，是土石坝施工期、运行期安全监测不可或缺的组成部分。沥青混凝土面板和心墙的土石坝监测设施的布置原则，基本上与普通混凝土面板土石坝和土质心墙土石坝监测布置相同，但要考虑沥青混凝土防渗墙的特点，应增设一些温度、变形监测项目。特殊的或复杂的地段，如坝肩断层破碎带、坝的合龙段、防渗墙与埋管或廊道的连接部位等，应增设一些必要的监测项目。

10.0.2 目前国内尚没有专用的、很好地适应沥青混凝土的高温状态和弹性模量的监测仪器。在选择监测仪器时，可结合沥青混凝土特性和施工特点选用经过改制的非沥青混凝土的监测仪器，但这些仪器须经过必要的试验研究，论证其“适用、可靠、耐久、经济、先进”性。埋设于沥青混凝土内的常用监测仪器参见表 23，但均需改装以适应沥青混凝土的弹模和施工期的高温。仪器在安装埋设前应进行高温检验、率定，检验合格的仪器才能使用。

表 23 常用监测仪器表

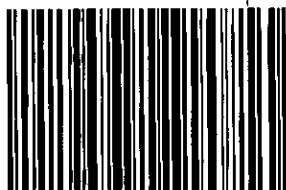
序号	项目名称	监 测 仪 器
1	温度监测	电阻式温度计、电热偶式温度计、分布式光纤
2	应力、应变监测	差阻式测缝计（CF-40）、弦式测缝计（GK-4400）
3	压应力计	差阻式压应力计、弦式压应力计
4	接缝监测	差阻式测缝计（CF-40、20）、弦式测缝计（GK-4400、4420）

10.0.3 监测仪器埋设是一个复杂的系统工程。目前沥青混凝土都是高温施工，为防止监测仪器因高温而损坏或失灵。必须采取

防护设施，并在监测设计时加以规定。

10.0.4、10.0.5 条文中列举的监测项目主要是针对沥青混凝土防渗墙的，不能因此忽略或减少土石坝整体的安全监测设计。设计中可根据工程特点进行选择，不作最低或最高要求的限制。对 2 级以下（不含 2 级）的土石坝也应设置一些最基本的监测项目，保证工程的安全运用。

所谓特殊重要工程设置的专门项目，大多作为研究沥青混凝土防渗墙的设计理论和方法从科学研究的需要提出的。



155083.2287

销售分类建议：规程规范/
水利水电工程/水利水电施工

DL/T 5411—2009

中华人民共和国电力行业标准
土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范
DL/T 5411—2009

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

2009年12月第一版 2009年12月北京第一次印刷
850毫米×1168毫米 32开本 4.125印张 105千字
印数 0001—3000册

统一书号 155083·2287 定价 18.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究