

① 沥青混凝土心墙堆石坝 挪威

# 挪威的沥青混凝土心墙堆石坝(二)

李子铮 编译

(四川省电力工业局、成都, 610061)

TV 641.41

## 5 斯陶瓦津坝的典型研究

斯陶瓦津坝位于挪威西南部, 东距斯塔凡格城 60km, 于 1987 年建成。

### 5.1 坝的设计

5.1.1 方案选择 该坝原设计采用冰碛土修建心墙, 由于坝高达 90m, 总体积  $10^6\text{m}^3$ , 堆石体虽可在现场开采, 但冰碛土与滤层材料运距分别为 42km 与 28km, 如此远的运距, 加上修建运料公路的高额费用促使设计者寻求其他代替方案。计有:

1. 混凝土面板坝与沥青混凝土面板坝;
2. 沥青混凝土心墙坝;
3. 用级配与冰碛土相近的人工碎石材料修建心墙。

三种方案就造价、蓄水工期、对气候条件的适应性和已建坝的运用情况等进行比较, 结果认为: 面板坝因不能充分利用溢流提早蓄水首先被排除, 第三种方案, 由于心墙体积过大, 要把  $75\text{万 m}^3$  的石料破碎成近似冰碛土级配的料物, 其费用之大, 难以想象; 沥青混凝土心墙方案不但可节约工料、且施工受恶劣天气干扰较小, 故最终被选用。

### 5.1.2 坝轴线选定(略)

5.1.3 坝的断面设计与碾压要求 坝体设计的指导思想是: 在经济与实际操作允许范围, 使坝体的沉陷与变形为最小。斯陶瓦津坝的设计断面如图 4 所示。图中心墙以  $1:0.2(V:H)$  坡位于坝中心稍前一些部位, 其意图是更好的传递水压力于下游庞大的堆石体和基础。

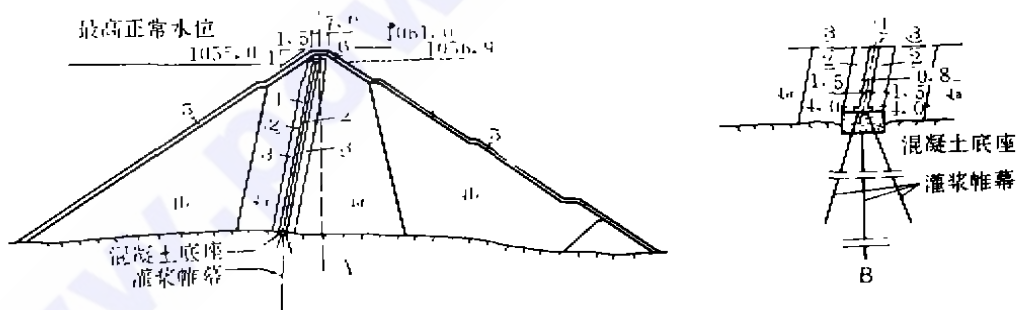


图 4 斯陶瓦津坝的设计 (单位:m)

A 主要断面, B 心墙底板与混凝土底座细部结构。图中所注符号与图 1 相同。

心墙底部座于 1.5m 宽的沥青混凝土底板上心墙两侧滤层为 1.5m 宽, 材料为粒径 0~60mm 人工碎石, 铺料厚与心墙相当(碾后 20cm), 其他各区料物粒径, 层厚与碾压工艺要求均已见于第 3 章, 兹略。

设计中采用有限元法计算坝体的沉陷与变形分布, 以确定心墙的应变能否容受, 并复核地震条件下的安全(详见本章第 4 节)。

沥青混凝土配比设计主要项目为:

- a. 骨料的质量与粒径分布;

- b. 沥青的质量与用量;
- c. 沥青混凝土拌合与震碾的适宜温度;
- d. 碾压后空隙率 $<3\%$ 。

以下略。

### 5.2 沥青混凝土心墙的施工与监控措施

斯陶瓦津施工季节限于5月中旬至10月中旬,此后大雪封山直至次年5月方可复工,夏季多雨,年均降雨量达2500~3000mm。

5.2.1 施工措施 拌合厂布置在坝下游东侧,距坝2km左右,采石场与碎石系统均在附近。心墙施工要求满足以下要求:

- a. 施工要风雨无阻;
- b. 心墙中心偏移要尽可能小;
- c. 层间覆盖间隔时间要尽可能短。

5.2.2 质量保证与监控 要实施自原材料生产检测直至碾后钻心取样的全过程质量监督体系。

为保证拌合物的质量,拌合工厂要通过计算机进行管理,每盘拌合物都应有打印记录,通过屏幕定期显示骨料粒径分布曲线,并与标准曲线相比照(参见图5)。每日要对沥青混凝土的特性做出鉴定,如发现问题立即停工处理。每铺筑200m长心墙或填筑5层需取样一次,心样直径0.1m,长400mm。目检发现异常则随时取样检查。心样的基本检查项目是要求空隙率 $<3\%$ ,取样长0.4m,目的是显示两层接合面的粘结好坏。

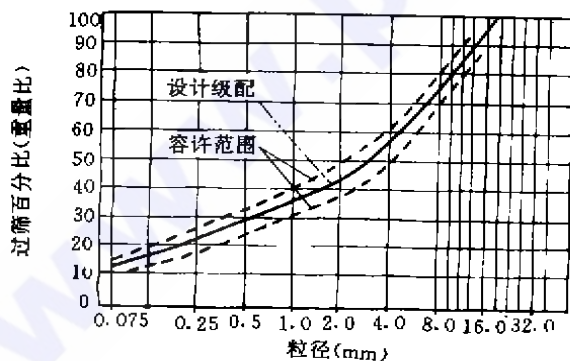


图5 沥青混凝土心墙骨料(包括填料)规定的粒径分布(福勒曲线)

曾在本工程中研制过原子频率反射仪适时检测填筑质量(碾后10min即可用),但作者认为精度欠佳,迄今尚未见可信的产品。

### 5.3 坝的观测

斯陶瓦津坝的观测仪器集中埋设在0+610.0+730和0+940三个断面上,共计12组三向应变计(观测坝体变形)和28个拉伸仪(观测心墙变形),坝顶与坡面不同高程上布置284个位移观测点。

坝趾渗漏分8个区域在下游10~20m处拦截后自动遥测计量。实测最大渗漏量为10.2l/s,有些渗水并非源于水库而是两岸泉水外溢,实际渗漏量是很低的,说明沥青混凝土心墙的防渗能力是很高的。

坝体变形计算与监控。用连续加载法进行线性与非线性二维有限元计算、分析坝体的变形,并用三维线性分析复核二维模型的精度。外壳材料的应力应变参数是通过室内试验与现场平板加荷试验确定的。室内试验包括14个三轴试验和6个抗剪试验,三轴试验中的5个是在挪威地学协会的大型真空三轴试验机上,用 $\phi 625\text{mm} \times 1250\text{mm}$ 的大试件作的。其他9组试件尺寸为 $\phi 102\text{mm} \times 200\text{mm}$ 。抗剪试验定环尺寸为 $\phi 500\text{mm} \times 250\text{mm}$ 。

由试验取得的参数作第一阶段的有限元分析,所得的变形量再与施工现场实测变形量进行比照,进而修正原试验参数,重新进行有限元分析;此时得出的变形分布即做为大坝蓄水监控变形的依据。

图6为本坝最大断面上经有限元分析得出的垂直向和水平向变形分布图。

图7系在1986年10月(译者注:初期蓄水、尚未达到最高蓄水位)坝体实测变形值。

由图可见,由于坝体材质与施工工艺良好,总体沉陷量是不大的,与有限元计算成果基本符合,与在奥地利修建的芬斯特图坝(沥青混凝土斜墙,100m高)的实测坝体变形分布也是相近的。心墙的最大变形(1986年10

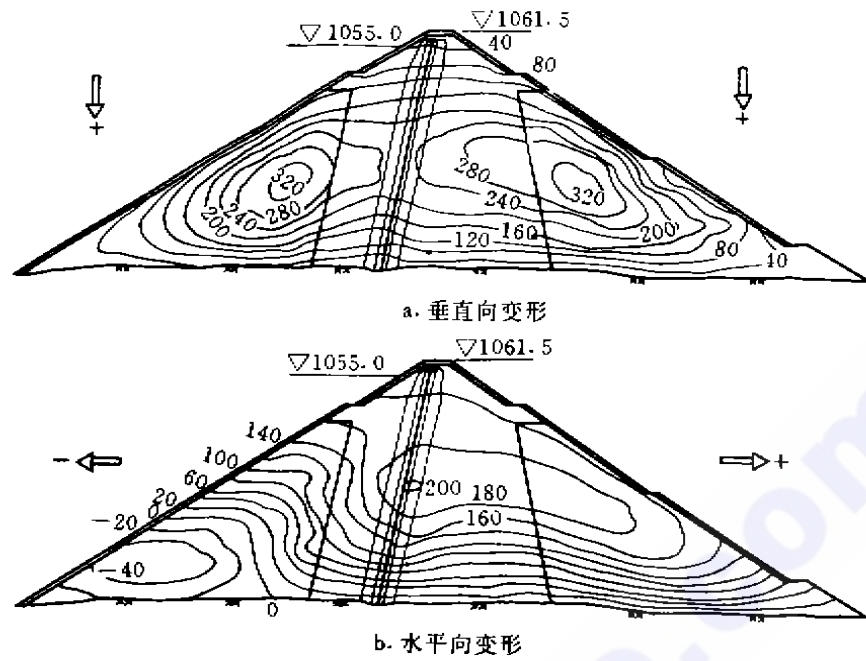


图6 满蓄时,最大断面上计算所得水平向与垂直向变位值(mm);(高程单位:m)

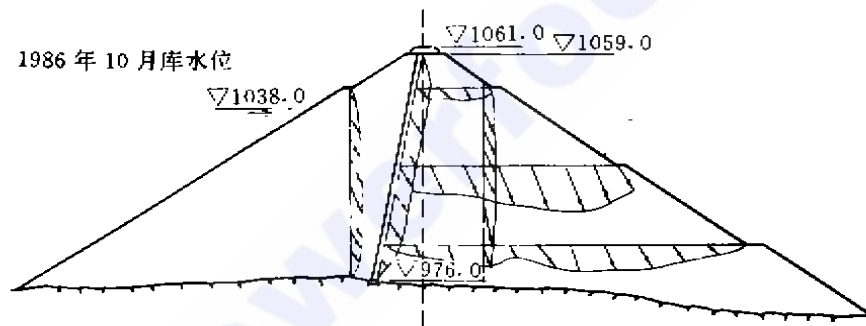


图7 1986年10月在最大断面上实测变位值(高程单位,m)

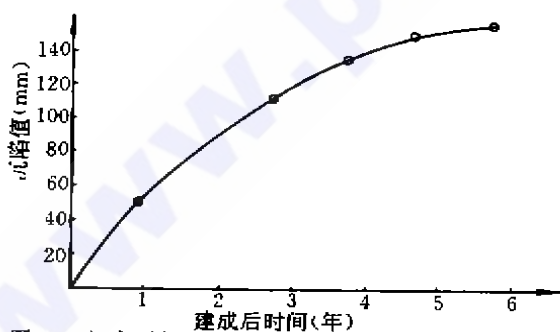


图8 心墙顶部沉降观测与时间的关系曲线

月)发生在墙高中部,垂直向0.18m,水平向0.12m,此时,坝体的最大垂直沉降为

0.35m,发生于距坝轴下游40m的中部高程。同断面,坝的最大水平位移0.14m发生在距坝轴50m处。1989年9月水库蓄水至最高水位,此时上述断面上最大垂直变形为0.5m,水平位移为0.20m。

心墙顶部沉降观测与时间(年)的关系曲线见图8。作者认为起初几年的沉降,主要源于坝体的蠕变作用,但也存在1986~1989三年初期蓄水(水头17m)的影响。(译者注:该坝建成后6年,即1992年沉降停止。)

#### 5.4 地震影响分析

斯陶瓦津坝坝址区属中等烈度地震区

域,本不需作地震复核,但为了鉴定这种坝型在遭遇较大震级时的抗震能力以及剧烈震动时可能产生永久的(残余的)变形量级乃做了以下分析研究。

按照美国大坝安全委员会(1985)的规定,地震荷载条件分运行期安全地震 OSE (Operational Safe Earthquake)与最大可能地震 MCE(Max Credible Earthquake)两种震级进行分析;前者(OSE)只考虑在大坝经济运行期内可能遭遇的地震级别,出现机率为  $5 \times 10^{-3}$ 年(重现期 200 年),此时坝址可能出现里氏 6.5 级地震,区域内可能出现里氏 7.5 级地震;后者(MCE)出现机率为  $10^{-4}$ 年(重现期为万年),此时坝址可出现里氏 7.5 级地震;区域内震级为 8.25 级。委员会要求在 OSE 情况下,坝体应无明显破坏,震后仍能安全运行;在 MCE 情况下,坝体将可能出现局部破坏,但不致因无控制的库水漫溢造成大坝溃决。

具体计算略。

通过地震影响的分析,可得出以下结论:斯陶瓦津坝的设计断面在中等程度的地震条件下,仍具有相当大的安全裕度,在较强地震发生时,仅需将原上、下游边坡(1:1.5 和 1:1.4)分别放缓到 1:1.85 和 1:1.5(心墙及两侧滤层断面不变),坝体仍是安全的。

在遭遇特大震情时,坝顶有可能出现剪切破坏、心墙断裂以致大坝出现缺口、库水短时期外溢,此时由于下游堆石体具有迅速排泄溢水的能力,仍不致造成溃坝。

## 6 沥青混凝土心墙堆石坝的设计原则与要求

沥青混凝土心墙堆石坝的设计、执行国际大坝协会 84 号公报(1992)的规定,在 42 号补充公报(1982)中,对近期修建此类坝型的经验与发展、现场监控等作了说明。本章仅着重介绍挪威的科研部门在设计分析与材料

试验等重点课题的情况。

### 6.1 设计分析

沥青混凝土材料的性能应能适应坝体自身的沉陷、变形和因坝基的不均匀沉陷而产生的差动变形(differential displacement)。从筑坝开始直至水库蓄水运行,变形是累加的。其间,时效固结(time-dependent consolidation)和蠕变、库水位波动、地震影响和断层错动等均对坝的变形产生影响。在上述诸多因素作用下,心墙要始终保持其抗渗功能,不致因剪膨胀或开裂而产生不能允许的渗漏;一旦心墙开裂时,沥青材料本身具有的粘性蠕变(弹性流变)性能将促使裂缝闭合(自愈功能)。

岩基建坝,坝体变形大小取决于坝壳与过渡层材料的性质与碾固程度;可压缩的覆盖层上建坝,还要受到因基础不均匀沉陷而在坝体内出现的差动变形的影响,其变形沿坝轴方向和河流方向变化。

最好选择一个条件类似在运行的坝,将它的实测变形资料与拟建坝的有限元分析进行比照。设计中还要对主要参数拟定一个变动幅度作敏感性分析,因为无论坝体材料或基础的性质都存在若干不定因素。

沥青混凝土配比的室内试验项目包括:剪膨胀、抗渗、韧性(延展性)、抗裂、强度与自愈功能等。应根据有限元分析得出的心墙内可能出现的应力、应变值进行相应的试验。应注意的是,计算中采用的沥青混凝土的变形模量与实际运用时有相当的差别,这是因为该材料的时效固结与粘性流变性能无法在室内试验时模拟,且沥青材料的变模是因温度与加荷速率而异的。在室内试验时,被沥青充满孔隙的“重”沥青混凝土的单向体积变模是相当高的,实则因其粘性流变性能而具有较低的变模,故在计算时要考虑 0.5 的波松比。

6.1.1 心墙的设计标准 前面第 4 章中已谈及心墙与其两侧的滤层/过渡层的施工是同步的,每层热沥青混凝土受两侧材料支

撑,碾后呈倒梯形(参见图9),心墙与滤层的界面呈锯齿状。

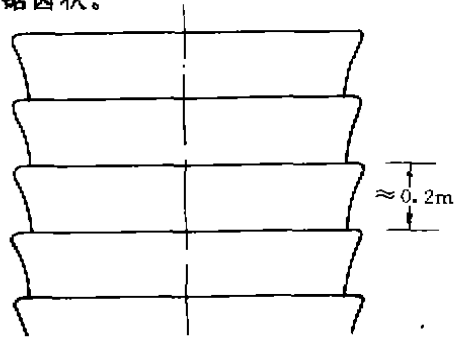


图9 铺料与碾压后的心墙断面示意图

一般心墙设计厚度的经验取值为坝上下游水位差的1%。已建的沥青混凝土心墙高坝顶部最小断面宽0.4m。香港的高岛坝,高105m,心墙底宽达1.2m,是有些保守的。挪威的心墙最小断面宽为0.5m。作者认为除非在特殊深厚的覆盖层上,强地震区建坝,底部宽1m是足够的。

国际大坝协会84号公报(1992)中不赞成采用上窄下宽的梯形断面,理由是有可能产生不利的应力条件。作者认为对特别高的坝,为了节约材料,梯形断面仍属可行,它不致影响坝的安全。

心墙轴线以处于坝的中心为宜。斯陶瓦津坝采用了1:0.2(V:H)的斜墙布置,主要是考虑有利于向下游坝壳与坝基传递水压力。但新建的斯陶勒姆瓦津坝(参见第三章)仍按直墙布置。因其考虑斜墙在安全上好处不大,反而多用材料,施工也较复杂,相比之下,直墙所受的剪应力相对要小一些,而且,一旦心墙开裂,在钻孔检查与补救上直墙比斜墙方便。

在狭而陡的V形河谷,特别是在深厚覆盖层上建坝,设计者往往选用向上游起拱的轴线布置。此时,应核查心墙水平剖面的应力,应变,避免因此而产生剪力破坏和裂缝。

6.1.2 滤层/过渡层设计 此层断面宽度应不小于1m,最好采用坚硬岩石破碎,以其颗粒有棱角,经碾固后对心墙的支撑作用优

于天然砂砾。碎石粒径分布特性为:

$$d_{\max} = 60\text{mm}, d_{50} > 10\text{mm}, d_{15} < 10\text{mm}.$$

国际大坝协会建议堆石坝各层材料间粒径分布相关特性按下式考虑:

$$d_{100} \text{ 心墙} \geq d_{10} \text{ 过渡层};$$

$$d_{100} \text{ 过渡层} \geq d_{100}/4 \text{ 坝壳}.$$

有的设计人员提出在心墙上游侧滤层中添加石粉,认为它有利于填充心墙出现的裂缝,从而增强沥青材料的自愈功能。作者从运行安全的角度考虑,则认为细颗粒材料进入心墙裂隙反而不利于裂缝闭合。不过,处于强地震区的坝,当心墙有可能出现剪切破坏突发事故。此时,两侧滤层掺入一定比例的石粉,对减免坝顶部的渗漏或许是有利的。

6.1.3 坝壳材料 杰因斯里等根据已建堆石坝的实测资料分析认为,高效能,大功率的碾压设备,适宜的层厚,土料含水最优,适宜的块石尺寸以及对外壳材料冲水碾压等措施,可使坝体在建设期的沉陷为最小。缓慢、持续的蓄水过程有利于心墙逐步适应荷载的变化,可避免运行期坝体(包括心墙在内)因荷载突变而破坏。综上所述,沥青混凝土心墙堆石坝这种坝型,因心墙是与坝体填筑同步上升的(译者注:因而,可随坝体上升而先期蓄水),是这类坝型在经济上与技术上均为有利之处。

坝壳材料设计分区料物型类、铺料厚度与震碾要求等均已见第三章,兹不赘述。对硬基来讲,填筑良好的堆石坝边坡可以陡到1:1.3至1:1.4。已建的两个100m级的坝——芬斯达特坝和斯陶瓦津坝,实测的最大沉陷均小于0.5m,心墙变形也属允许范围,坝的变形分布与有限元计算基本吻合。

有的设计人员选用高沥青含量,超饱和的“软”沥青混凝土作大变形量的心墙材料(参见本章6.2节内容)。对此,作者不以为然,认为增大沥青用量会降低心墙的抗剪能力,势必需放缓坝体的边坡。

此外,在砂土层上建坝,要注意因地震而

使地层孔隙压力增大,因而承载能力降低的不利影响。

## 6.2 沥青混凝土配比试验及其特性

6.2.1 沥青混凝土心墙配比设计 已趋标准化,各方的配比几无甚差别。总的原则是:骨料级配应符合或接近福勒级配曲线(Fuller's gradation curve),并需添加部分粒径 $<0.075\text{mm}$ 的石粉填料(参见图10)。包括石粉在内的粒径分布范围在 $0\sim 16\text{mm}$ 或 $18\text{mm}$ 之间。为了改善工作度与可碾性,最好掺入一定比例的天然砂砾,以更好地符合福勒曲线。此曲线亦可用下式表示之:

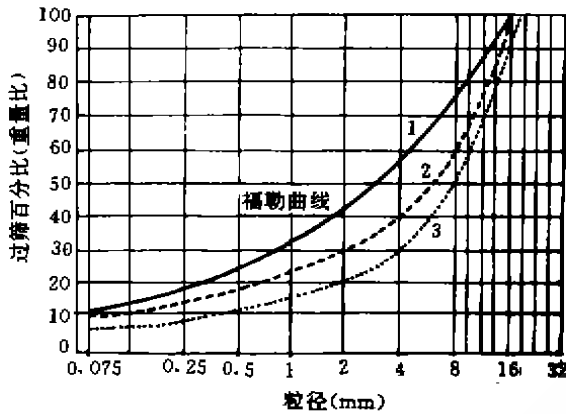


图10 福勒沥青混凝土骨料级配曲线

$$P_i = [d_i/d_{\max}]^{0.41} \times 100\%$$

式中  $P_i$ ——小于  $d_i$  的重量百分比。

配比中沥青用量往往略高于理论上的骨料孔隙率,以便于震碾与获得最大密度。实际

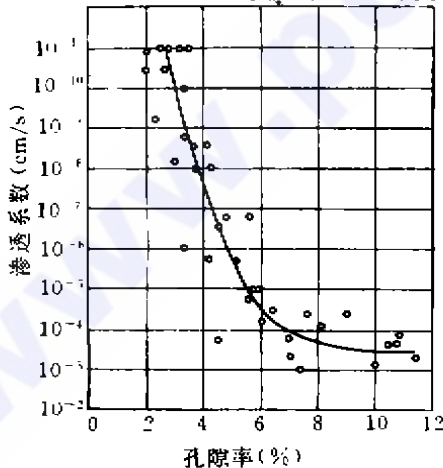


图11 沥青混凝土孔隙率与渗透系数关系曲线

用量在 $5.5\%\sim 6.5\%$ 之间。按此标准配制的沥青混凝土很容易达到孔隙率 $<3\%$ 的碾压要求,其抗渗性能可以达到 $10^{-11}\text{cm/s}$ 。从图11可以看出随着沥青材料的孔隙率增大,抗渗性能也急骤降低,当孔隙率为 $6\%$ 时,抗渗标号为 $10^{-6}\text{cm/s}$ 。由于室内试验与现场碾压固结程度不尽相同,在试验室内作马绍尔捣固试验时要达到孔隙率 $<2\%$ 才好。

试验表明:同样的沥青含量( $6.2\%$ ),由于骨料的颗粒级配曲线的不同,沥青混凝土抗渗性能与强度均相应变化。图10所示第3号骨料,其级配曲线距福勒曲线较远,配制成的沥青混凝土始终难以捣固到孔隙率 $<3\%$ 的要求,且试件的抗渗与强度标准也较低,最后不得不加大沥青用量以求降低孔隙率。

6.2.2 骨料与填料 骨料的质量分析采用沥青协会(Asphalt Institute)1979年制订的标准检验片状与针状物的含量。其方法是将料物由一标准高度自由坠落后,分析其片状物体与针状物体的含量增加程度,(试验时只用骨料中 $8\sim 16\text{mm}$ 粒径部分)。片状物的增加以大于1的指数显示,针状物的增多以捣固值(Impact Value)的增加显示。图12中示出这两种参数构成的框图上骨料分级标准。这个标准本来是应用于沥青混凝土路面工程

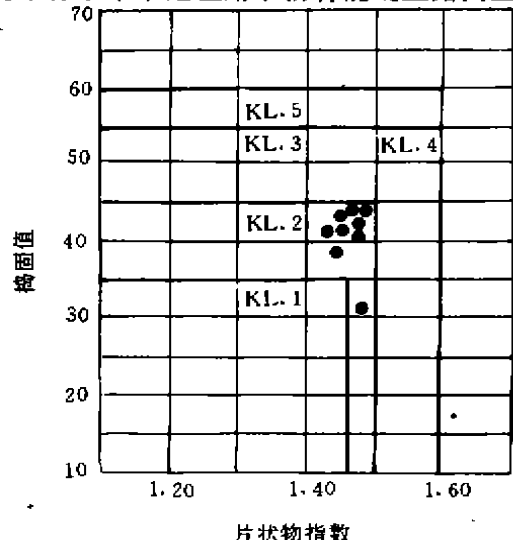


图12 骨料质量分级框图

的,用于心墙设计有些苛求;因为心墙并非暴露于外界,也不像公路路面那样遭受严重磨损、风化与气候变化。不过对高坝来讲,心墙内部应力相对较高,沥青含量低的混凝土(比如5%)骨料间粘结力也低,因而易于开裂而致渗漏,如果把沥青含量增大至7%,达到超饱和程度,骨料与骨料间直接接触的机会反而减少,即使骨料质量稍差也无妨碍。

近年来,挪威地学协会(NGI 1992)对沥青混凝土的应力、应变性能、针对高坝心墙的高应力条件,进行了大量的试验研究。试验采用  $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  试件,分别在围压  $\sigma_3 = 0.5, 1.0, 2.0\text{MPa}$  时,进行三轴抗压试验,轴向加压应变速率限制为每小时2%,温度保持在5℃。试件所用骨料的岩性与岩质由优到劣,依次为人工破碎的辉长岩、片麻岩和石灰岩,所有试验组号、项目与成果见表1。

表1 不同沥青混凝土配比三轴抗压试验成果表  
(轴向应变速率2%/h,试件温度5℃)

组号	骨料类型	沥青型号	沥青含量(%)	围压 $\sigma_3$ (MPa)	轴压 $\sigma_1$ (MPa)	$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ 屈服 (MPa)	$\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$ 屈服	杨氏模量(1%轴向应变割线值) (MPa)
1	辉长岩 (优)	B60	5.6	0.5	4.7	2.10	9.4	280
2		B60	5.6	1.0	6	2.50	6.0	290
3		B60	5.6	2.0	8.6	3.30	4.3	290
4	片麻岩 (良)	B60	5.9	0.5	4.6	2.05	9.2	290
5		B60	5.9	1.0	6	2.50	6.0	300
6		B60	5.9	2.0	8.7	3.35	4.3	300
7	灰岩 (劣)	B60	6.0	0.5	4.2	1.90	8.4	250
8		B60	6.0	1.0	5.5	2.25	5.5	270
9		B60	6.0	2.0	8.5	3.25	4.3	260
10	片麻岩 (良)	B60	8.0	1.0	4.4	1.70	4.4	110
11	片麻岩 (良)	B60	8.0	2.0	6.0	2.00	3.0	110
12	片麻岩 (良)	B180	5.9	1.0	4.3	1.65	4.3	140
13	片麻岩 (良)	B180	5.9	2.0	6.0	2.00	3.0	90

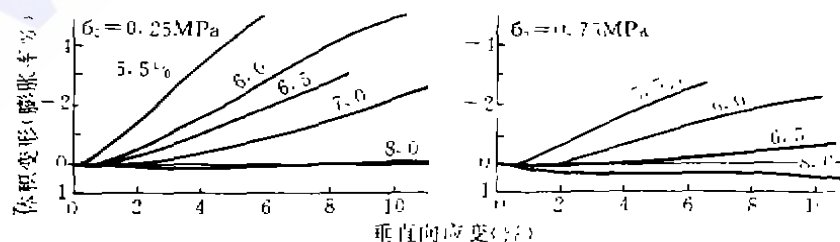


图13 不同沥青含量的沥青混凝土的膨胀率

表1中1到9行示出三种骨料9个试验的成果。所有试件都是经马绍尔室内捣固试验取得最大容重得出的最优沥青含量加0.1个百分点来拌制的,骨料级配曲线满足福勒准则。三者沥青用量稍有不同是由于骨料级配、颗粒形状以及骨料表面与沥青粘着力不同。

试验表明:不同配比的应力应变关系曲线,在不同围压下差别不大,它们都在达到最大剪应力时出现弹性屈服而无流变现象(Strain Softening),这是与过去文献所载不同之处,原因是采用围压等级较高。

在规定的轴向应变速率下,  $\sigma_3 = 2.0\text{MPa}$ ,骨料质量最优与最差的弹模(正切值)分别为290MPa与260MPa。此外,三种不同质量的骨料在相同围压下,其抗压强度的差别也是很小的。

总之,通过上述试验可得出以下结论①骨料质量的好坏对沥青混凝土的应力-应变-强度性能上没有多大影响;②骨料的片状物含量大时要求拌合物中沥青用量增大。

有关填料( $d < 0.075\text{mm}$ )的标准掺入量为12%左右(参见图10),其他要求详见第七章。

6.2.3 沥青含量与沥青的粘度 前面已谈到,沥青含量一般在5.5%到6.5%之间,因骨料的种类,针片状物含量,矿物组成和颗粒表面特性,骨料级配以及沥青的粘度等而变化。实际掺量略高于室内捣固试验求得最佳密度的掺量。

沥青含量过低则不便于操作,且抗渗性能降低;含量高,操作方便,具有显著的粘弹性性质、材料刚度与强度较低,但增强了抗渗能力。

图13中可见,随着拌合物中沥青含量的增加,试件受剪膨胀(体积膨胀)的趋势减少;含量达8%的试件将不出现剪膨胀、且断面缩小。

在出现剪膨胀的部位、虽不见明显破裂,但局部出现纤维化、抗渗性能下降。曾在三轴试验试件的剪力破坏区,截取小的试件作抗渗指标试验,发现当剪膨胀率由1%增至2%时,渗透系数由 $10^{-5}$ cm/s 骤降至 $10^{-3}$ cm/s。不过,这些指标是在剪力破坏区截取试件的,在作用力小于剪屈服限的80%的部位取样试验得出的渗透系数并无变化。

### 6.3 沥青混凝土室内试验

沥青混凝土配合比设计,在大量的路面工程科研与实践的基础上,加上沥青材料协

会1979年制订的马绍尔法补充试验项目;已经得到专家们一致的认可和已建工程安全运行的证实。以下仅对马绍尔法标准试验工作做简要的介绍。

6.3.1 马绍尔法试验 采用试件的标准尺寸是 $\phi 102\text{mm} \times 64\text{mm}$ ,拌合物按规定的温度热拌合并并在模型内捣固。主要试验项目有二;一是孔隙率,二是稳定-流变分析。孔隙率测定的程序与土工试验中普罗持(Proctor)最佳含水量捣固试验相同。

马绍尔稳定和流变试验是在一个加热到 $60^{\circ}\text{C}$ 的圆盘形试件上,通过一个半环形试验头施加径向荷载,控制其变形速率为 $51\text{mm}/\text{min}$ ,直至试件破坏。试件承受的最大荷载(单位为牛顿 N)即稳定值;在最大荷载时最大径向变形即流变值。

在图14中列出马绍尔试验法获得的4个成果图。所用的材料配比即表1中第一行所示、采用的骨料为优质辉长岩。

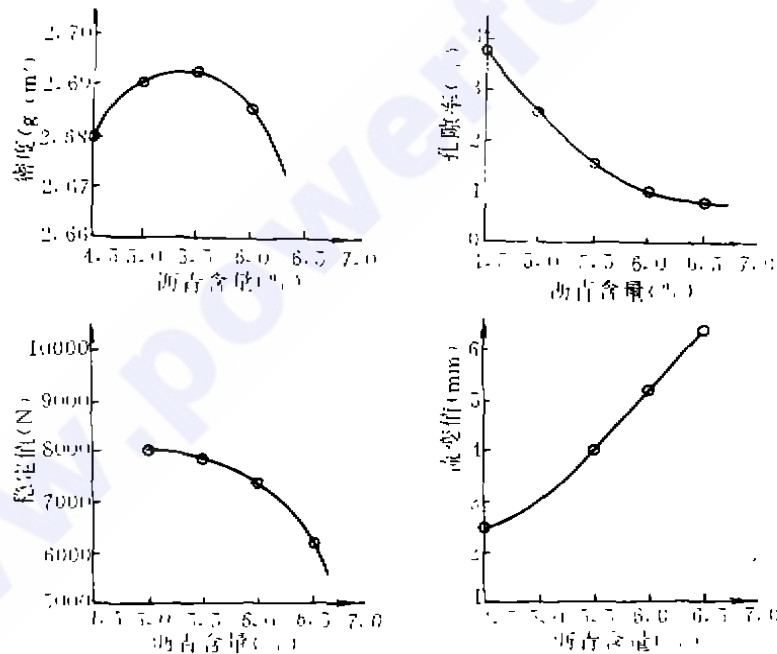


图 14 马绍尔法试验典型成果图

6.3.2 三轴试验 本试验的内容与成果均已列入6.2.1节中,兹不赘述。需加说明的是:挪威的三轴试验试件尺寸为 $\phi 100\text{mm} \times$

$200\text{mm}$ ,骨料制配时预热 $4\text{h}$ 到 $160^{\circ}\text{C}$ ,沥青预热 $2\text{h}$ 到 $145^{\circ}\text{C}$ ,在拌合后保持温度 $150 \sim 160^{\circ}\text{C}$ ,在模型内分层铺料,每层厚 $5\text{cm}$ ,捣固



半分钟。作者指出,上述温度标准是指 B60 号沥青而言,如采用 B180 号沥青则上述温度标准要适当降低,(下文节略)

6.3.3 渗透试验 简单的渗透试验装置布置如图15。更为精确和复杂的装置是使试件处于给定的水平和垂直应力作用下进行压水试验。

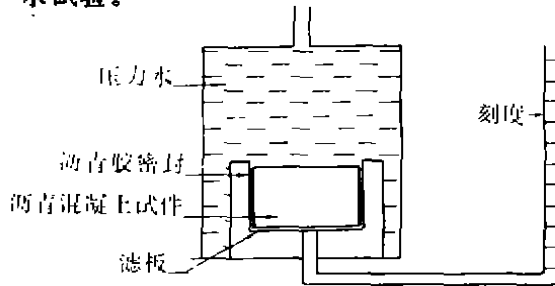


图15 渗透试验

6.3.4 受弯试件的抗裂性能 挪威还采用受弯曲的圆板形试验来研究不同配比的沥青混凝土的稳定性。试验系模拟心墙处于坝体产生差动变形或因墙下游侧支撑材料(滤层/过渡层)局部失效条件下,检测墙体受弯时的抗裂能力。图16是这个试验装置的示意,试件尺寸是60mm厚,直径300mm的圆板。

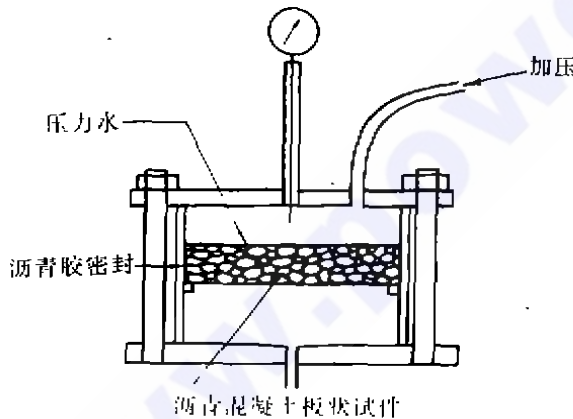


图16 渗透试验原理图(NGI)

试验是在5℃恒温下进行,通常水压保持在500kPa 衡压之下,检测板中心挠度与时间的关系。当挠度增大沥青材料呈纤维化时(译者注参见本章6.2.2内容),板中出现渗漏,随后将突然开裂(穿透)而大量漏水。通过上述试验可以获得不同配比的试件的挠度—时间

关系曲线和发生渗漏时的最大挠度。图17示出四种配比材料的试验成果。因每种配比仅作了一个试件,所得成果难以如实反映其规律,但其中用不同品质的沥青(B60与B180)拌制的沥青混凝土试件的挠度—时间关系和穿透挠度的大小是明显不同的。

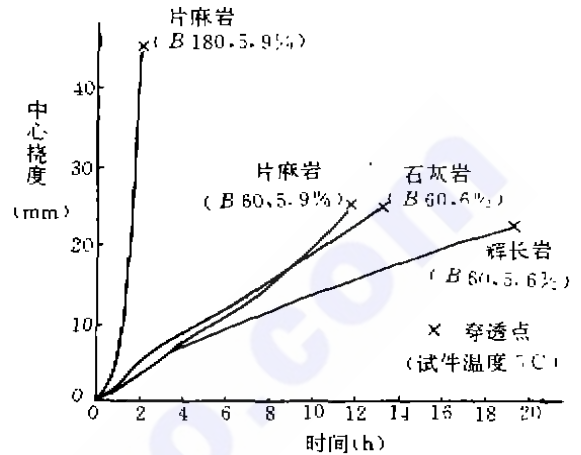


图17 板试件渗透试验成果

## 7 工程招标与规范

### 7.1 标书要求

标书内容应按 FEDIC(1992)条款编制。国际大坝协会1992年公报内也有坝工招标的有关要求。

7.1.1 编标基本考虑 挪威习惯于衡量业主(发包方)与承包方的风险分担程度来决定合同方式,其原理如图18不同承包方式的风险分担;图中自上而下为:

“交钥匙”合同;固定价总承包;可变价总承包;预算承包。

(译者注:本章下文介绍的单价总承包应包括在可变价总承包范畴,因为工程量是可变的,疑即图中虚线所示费用最小的合同方式。)

不同方式的合同;基本上有两种编标方式:一种是成品型(result-oriented model),另一种是执行型(operation-oriented contract type)。前一种文件中主要说明工程面

貌与要求(译者注,适应于总价承包);后者文件内着重说明工程项目、分类与实施要求。这样承包方可以据之编制投标的项目单价。成品型合同在执行过程中,往往在发包方意欲改变设计而影响单价时双方出现争议,或在承包方施工工艺与发包方要求不符而发生争

执。在执行型合同实施过程中,由于标书文件在工作程序,工艺与材料质量及监督方面都有详细规定,上述争议不易发生或易于协调解决。

以下具体介绍心墙及其两侧滤层这一单

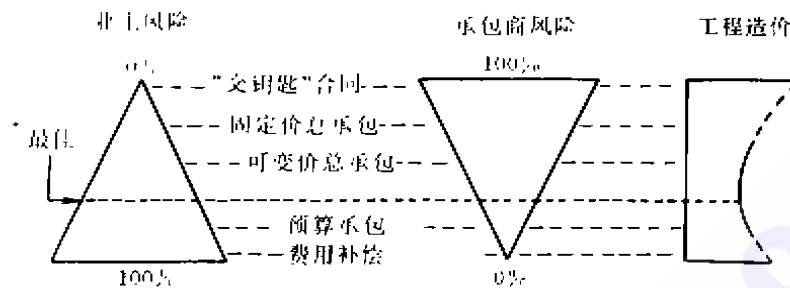


图 18 不同合同方式的风险分担及工程造价的关系

项工程的编标工作,它既可作为大坝标书的一个分项工程,也可做为单项工程发包。7.2 即是挪威某坝这一单项工程编标的实例。

7.1.2 资格预审与质量保证和监督 心墙是坝内至关重要的部位,故对承包商的资格应从严审查,要查清他们是否确有施工经验和应变能力、有无在现场领工操作的技术力量。如否,那么就应要求他们按照规定程序、作现场操作示范,以便业主甄别他们的资格与能力。

标书中很重要的一项是质量保证与监督,要使心墙施工自始至终处于严格的质量监控之中,这对发、承包双方都是十分重要与有益的。

### 7.1.3 价格的调整(略)

## 7.2 施工规范与材料规格——典型研究

本节以斯陶勒姆瓦津坝为实例介绍心墙的施工规范与材料规格。

### 7.2.1 标书中沥青混凝土配比设计内容

配制要求:柔性的,沥青含量高的沥青混凝土、能满足工程需要和心墙的功能要求。

沥青材料规格: B180; 沥青含量: 总重的 6.3%; 含量偏差: 随机检测偏差  $\geq 0.3\%$  土; 骨料来源: 来自荷姆瓦津料场的砾石(要

求其中碎石占 50%)。

骨料级配曲线满足福勒准则,其控制条件见表 2。

表 2

粒 径(mm)	重量(%)
8~18	28
4~8	18
2~4	13
0.075~2	28
0~0.075(填料)	13

随机取样检测误差标准是:  $d > 2\text{mm} \pm 6\%$ ;  $0.25\text{mm} \leq d \leq 1\text{mm} \pm 4\%$ ;  $d = 0.125\text{mm} \pm 3\%$ ;  $d = 0.075\text{mm} \pm 2\%$ 。

填料可利用碎石系统收集的粉尘,灰岩石粉,水泥以及其他经发包方批准的粉状材料。根据发包方对荷姆瓦津砾石取样分析(酸度),碎石粉尘不超过填料总量的 50%。

7.2.2 承包商对沥青混凝土基本配比的修正 前述配比是发包方委托挪威地学协会(NGI)所作室内试验成果,对承包商讲,要通过自己现场取料、破碎、筛分并进行试配,在满足标书规定的性能要求下,可对基本配比进行修正。这种修正,以及今后施工过程中配比的变更都必须经过业主同意。

### 7.2.3 现场铺料与碾压试验(译者注:原文

直译应为产品试验 test production) 在开工前,承包商应先进行现场铺料与碾压试验,试验采用经批准使用的配比,和今后将使用的设备,按照设计断面进行。试验成果要由承包商编制报告,经业主审查同意后方能正式开工,报告中要包括7.2.6中对材料检测的各种要求。

#### 7.2.4 对拌和工厂与施工装备的要求

沥青拌和工厂的生产能力要求能不间断地,在24h内铺筑两层心墙材料的供应量(译者注:即心墙最大长度 $\times 0.4\text{m}$ ),工厂应安装有检测料物自动打印的计算机监控系统,它能示出配比是否出现异常,当突破警戒线时应立即自动停机。无论何时,沥青与拌和物的温度都应能自动控制。投标文件中要有生产流程图。每年开工前,甚至每个月承包商必须对生产流程与施工设备进行全面评价。

铺料机要求(略,可参见第4章)。

在投标文件中,承包商要列出详细的设备清单与性能说明。

3台自行式,光面震动碾用以碾压心墙与相邻的滤层。心墙碾宽要等于或大于心墙宽度 $0.1\text{m}$ ;滤层碾重不小于 $1.5\text{t}$ ,心墙则采用较轻的碾重,要求碾后空隙率 $\leq 3\%$ 。

承包商要在现场装备一个试验室,在限期内完成规定的试验项目(参见7.2.5)。经协议,沥青材料本身的性能指标由供货商提供。

承包商要提出一个分项的质量保证与监控计划,包括分项负责人员名单,并需征得业主审查同意。

#### 7.2.5 QA/QC 报告主要内容

##### 1. 沥青

a. 沥青型号为 B180;  $25^\circ\text{C}$ 时,  $100\text{g}$  针重,在5s内针入度(Penetration value)在145~210之间(译者注:针入度单位为 $1/10\text{mm}$ )

b. 进场每批沥青材料必须提供以下性能指标见表3。

表 3

项 目	标 准
针入度	ASTM D5-73
粘 度	ASTM D2171-66/72
屈服点(Fraas)	DIN 1995/1960
延展度	ASTM 113-76
密 度	ASTM D70-72

##### 2. 骨料

- a. 骨料的级配要满足7.2.1节的要求;
- b. 捣固值 $< 60$ ,片状物含量 $< 1.45$ 。

承包商在施工中要在规定时间内,自动提供骨料的质量报告;

c. 有关部门已对郝姆瓦津的骨料与沥青间的粘结性能做过试验,Riedel 值为8~9,证明粘结度是好的,但承包商仍应每月自行进行此项试验,提交报告并取得业主的认可;

d. 填料的质量要求已在7.2.1中示出。其中,碎石的有机质含量每周要做出鉴定,填料的色度试验(咸性法)必须 $\leq 2$ 。骨料的贮运要注意防止污染。

##### 3. 沥青混凝土拌和工厂生产过程检测

- a. 骨料要求干燥,预热后温度 $\geq 200^\circ\text{C}$ ;
- b. 拌合物温度不得超过 $160^\circ\text{C}$ ;
- c. 在调整称量系统与温控装置时必须告知业主;
- d. 生产错误配比或温度超限的料物不得运到坝上;

##### 4. 沥青混凝土出厂检测

a. 拌合物出厂采样每日四次,检查沥青含量,骨料粒径分布等,每次取样时间间隔大致均等;

b. 每日进行捣固密度与孔隙率监测。

##### 5. 心墙现场钻孔取样试验

a. 取样时要求温度下降到可以钻孔才可进行;

b. 每铺筑4层或至少每周取样一次,心墙长 $0.4\text{m}$ ,要钻穿2层。把心墙切成 $50\text{mm}$ 长的试件,进行以下试验项目:

沥青混凝土的比重;骨料的比重;骨料级配;沥青含量;孔隙率。

取样后,钻孔必须立即用热沥青填充捣

固。此外，N. E. C. L (挪威能源公司)对本工程还特别要求承包商采用非破损性试验设备(如同位素仪)，检测碾压密度。其检测方法要经业主认可。

如果承包商发现某一监控数据异常，必须立即报告业主委派的驻场代表，并按代表提出的要求补做试验，其费用业主不另支付。

7.2.6 铺料与碾压过程的监控要求 沥青混凝土的运输、铺料与碾压需采用特定的装备。除标书规范中特别注明者外，现场作业均需执行挪威沥青协会(1980)制订的导则。

a. 碾压温度要在 $140^{\circ}\text{C}\sim 155^{\circ}\text{C}$ 范围内，如高于 $155^{\circ}\text{C}$ 需待冷却后再碾压；

b. 铺料与碾压厚度为 $0.20\text{m}$ ，水平允许误差 $\pm 0.03\text{m}$ ，碾后孔隙率 $< 3\%$ ；对碾压设备规格要求见7.2.4；

c. 心墙料物与两侧滤层的铺料要同步进行，心墙要稍前于滤层。碾压时两区料物要大致处于同一高程，同时用3个震动碾碾压；

d. 一般24h内铺料，碾压不要超过2层，在铺第3层料物前，承包商要提供已完2层的质检成果报告；

e. 心墙与滤层上升高度比相邻的过渡层不高于 $0.4\text{m}$ ，同样后者也不得超过心墙与滤层 $0.4\text{m}$ ；

f. 沥青心墙的基础板与混凝土底座间要涂 $10\text{mm}$ 厚的沥青胶油，底座表面要按规程进行处理(详见第4章)。在涂胶油前底座顶面要预热到 $150^{\circ}\text{C}$ ；胶油涂抹宽度要超出心墙基础板两边各 $0.50\text{m}$ 。底座的工作缝要用胶油充填，因此，工作缝间的止水材料应能承受胶油的高温。

g. 在河谷底部或坝肩处难以用机械操作，此时，允许用手工操作，但要搭设暖棚，确保与机械操作相同的工作温度与碾压质量要求。

h. 业主质检人员可随时检查心墙中心线是否偏移，要求两层填料间的有效接触宽

度等于心墙设计宽度，且理论中心线与心墙上下游边的距离 $\geq 1/2$ 心墙宽；

i. 为保证心墙层间结合质量，填筑上一层料物前，下层表面要求清洁、干燥并按规定预热。施工设备必须跨越心墙工作面时，应设置临时桥并做好防止污染工作面的措施；

j. 如气候条件恶劣，难以满足心墙工作要求时业主可以要求停止作业。一旦铺料，碾压不合乎上述质量标准时，承包商应立即清除已上坝的料物、并不得危及完好层面。业主不承担上述清除与返工的费用。

7.2.8 滤层质量要求 滤层材料应采自郝姆瓦津料场，粒径级配特性为： $0\sim 60\text{mm}$ ， $d_{50} > 10\text{mm}$ ， $d_{15} < 10\text{mm}$ 。此层料物的铺料，碾压应能及时的对热沥青混凝土心墙起支撑作用。要求用 $1.5\text{t}$ 震动碾碾压 $3\sim 6$ 遍，承包商应通过现场碾压试验确定具体碾压遍数。

承包商每天至少对滤层取样检测一次，每周向业主的质检人员提供质量检测报告。

7.2.9 单价 投标文件要分别对心墙与滤层提出单价分析报告。计价单位为立方米，心墙单价分析应包括所有构成产品的费用；即材料、运输、捣固、试验、质检及其表报费用，也要包括基座面的涂抹胶油与人工作业的单价。业主付费的计方依据是设计断面与底座混凝土顶面沿河谷的横剖面。

滤层的单价包括取自郝姆瓦津的原材料，破碎、筛分、运输、铺料与碾压、试验与质检及其表报费用。

#### 译者后记

感谢爱德瓦森先生不远万里寄来本书。拜读之后，受益良多。

冶勒电站施工环境与本书作者郝格先生着重介绍的坝十分相近。它的施工季节也仅能在每年5~10月之间，夏季多雨，多年平均降雨量近 $2000\text{mm}$ ，年降雨达215d，坝址区缺少土料修建心墙，可见冶勒的堆石坝采用沥青材料作心墙是极其正确的。与挪威已建高坝不同之处冶勒坝基是深逾 $400\text{m}$ 的覆盖

层,左坝肩是坚岩,右侧为同类砂石覆盖。因此,本书中谈到的坝体自建设期至蓄水运行初期这数年间,因基础的不均匀沉降而产生的差动变形是相当大的。

挪威已经在沥青混凝土心墙的科研与实践等方面给我们提供了宝贵的范例。对我们来讲,必须付出加倍的努力,精心研究,精心设计,严格执行规程规范,严密的质检与监督,以比他们更高一筹的水平,才能修建好冶勒这样具有国际罕见难度的工程。大量的占有信息、资料,广泛深入的材料试验工作和施工机械化装备研制、配套等工作。对我们来讲,时间已经不多了,不抓紧就可能冒仓促上坝的危险,不然,一旦问题出现,后果难以设想。这是译者第一个体会。

其次,心墙属关键性部位,但又与坝体的整体设计密切相关。坝体分区(层)材料的选择、设计断面的优化与精心施工,尤其是心墙两侧滤层/过渡层对心墙起的支撑与保护作用是不容忽视的。心墙这个“局部”是处于坝体这个“全局”之中,如果坝体的变形量级能降低一些,分布能均匀一些,对心墙所承担的

应力应变条件也将改善。迄今,冶勒坝的三维、静、动态应力应变分析尚在进行,是以其成果为根据来研究心墙材料性能要求与配比?还是进而采取措施优化坝体断面(包括心墙在内)的设计,从而使心墙材料的处境更为安全有利。两者之间,后者可能是更为明智与有利的。当然,实际上两者之间又是互相协调、反复优化的过程,可以指望最终的设计优化,不但坝体更为安全可靠,在造价上也会更为节约。

其三,过去我们在冶勒心墙施工工艺方面,采用碾压法还是采用浇注法,一直难以决断。本书中已详细地介绍了两种方法的优劣比较。从总体上看,碾压法更为通用,实践经验更多,在碾压施工可行的条件内,采用标号高一些的优质沥青材料,适当增大混凝土中沥青含量,优化配比,相应地提高心墙材料的应变性能以满足冶勒大坝工况要求,是我们今后努力方向。

以上愿提供大家讨论。

(续完)

(收稿日期:19940312)

### 书刊信息

## 《中国水力发电年鉴》第四卷开始预订

《中国水力发电年鉴》第四卷(1992~1994年)正在进行编纂工作,计划1995年底出版。本卷正文约120万字,彩照约100余幅,在编辑上有进一步改进,除保持第三卷篇目不变外,另新增“水电建设管理”、“水电企事业单位简介”、“国外水电发展水平”等3个篇目,覆盖面更全,资料性更强,内容更丰富,可为各级领导和广大水电工作者提供决策参考依据和大量信息资源,是水电系统和有关部门同志必备的大型文献资料工具书。

为了服务水电事业,减轻读者负担,本卷仍采取低于成本价格,每本收费55元(含邮资)。

从现在起开始预订,欢迎广大读者抓紧订购。预订办法函索即寄。联系人:安淑莲;通讯地址:北京德胜门外六铺炕水电规划设计总院内《中国水力发电年鉴》编辑部发行组;邮编:100011;电话:4011177转2723。