

# 小浪底排沙洞混凝土衬砌不同阶段 预应力变化实测分析

亢景付<sup>1</sup> 胡玉明<sup>2</sup> 侯新华<sup>3</sup>

(1.天津大学建工学院 天津 300072 2.黄委会勘测设计研究院 郑州 3.小浪底建管局 洛阳)

**摘要:**小浪底排沙洞是我国首例采用双圈环绕无粘结预应力混凝土衬砌的水工隧洞,本文对这一新型结构形式和特点进行了简单介绍,并根据观测仪器所获得的大量实测数据,对不同阶段(预应力施加、回填灌浆和过水运行)混凝土衬砌和锚索中的有效预应力变化及混凝土徐变变化规律进行了探讨。实测资料表明,采用双圈环绕无粘结预应力技术,可实现理想的预应力效果和均匀的环向应力分布。围岩开挖的质量对环向预应力分布的均匀性具有重要影响;对预应力施加需时较长的实际结构,混凝土的徐变应变在观测仪器的总应变变化中占有不容忽视的比例,其大小与预压应力和持荷时间成线性关系,可按 $\epsilon_{\text{总}} = \alpha \sum \sigma_{\text{it}}$ 进行计算。过水运行阶段的实测数据表明,该工程混凝土衬砌中所建立的预压应力足以抵抗最高设计运行水位下的内水压力而实现不裂不渗。

**关键词:**水工结构 无粘结预应力 观测仪器 隧洞衬砌 混凝土的徐变

## 1. 基本情况

小浪底排沙洞是我国首例采用无粘结预应力混凝土衬砌的水工隧洞,为了更深入研究这一新型结构形式在预应力施加过程及正常运行期衬砌混凝土有效应力的变化规律,有针对性地选择3个浇筑块作为仪器观测段。其中2#排沙洞仪器观测段设在地质断层区的衬砌加强段,混凝土衬砌由普通钢筋混凝土和无粘结预应力混凝土双层衬砌组成,普通钢筋混凝土衬

砌的平均壁厚约为0.60m,预应力混凝土衬砌壁厚0.65m,3#排沙洞在靠近上游进口部位和下游出口部位各设置一个仪器观测段,衬砌设计厚度为0.65m,衬砌实际厚度受岩石超挖影响为0.90m左右,最大处厚1.20m。结构形式和典型观测仪器布置如图1所示。观测仪器为弦式钢筋计和弦式混凝土应变计,在图中分别用R和S表示。其中钢筋计安装在衬砌外侧非预应力结构钢筋上,内侧混凝土应变计距衬砌内侧表面

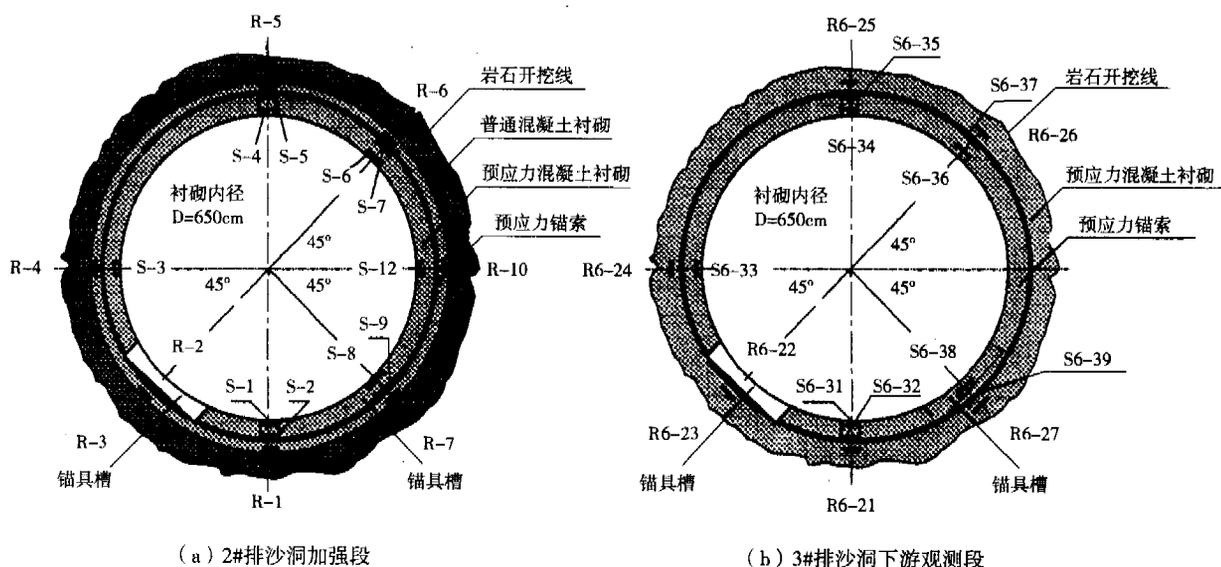


图1 衬砌结构及观测仪器布置

的距离为5cm, 中间混凝土应变计则安装在衬砌厚度的中间位置。

无粘结预应力混凝土衬砌内径6.50m, 混凝土28d设计强度为C40, 最大骨料粒径40mm。泵送混凝土浇筑; 每束锚索由8根7×φ5的无粘结高强低松弛钢绞线组成, 钢绞线在衬砌内双圈环

绕布置, 在锚具槽内锁定, 锚索间距为50cm。锚具槽沿隧洞轴线方向分两排对称布置在隧洞衬砌的下半部, 相邻两个锚具槽的圆心夹角为90°, 锚具槽尺寸为154cm×30cm×25cm。锚具槽及钢绞线布置如图2所示。龄期28d后开始张拉预应力锚索, 其时混凝土弹性模量为 $3.25 \times 10^4 \text{MPa}$ 。

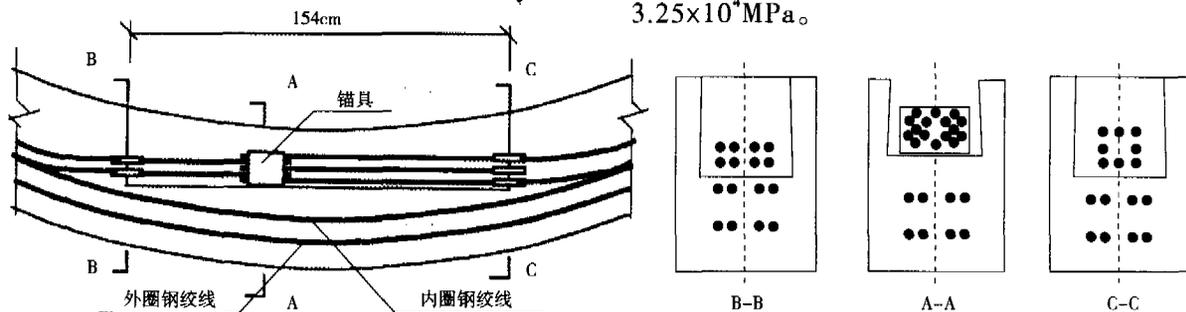


图2 锚具槽及钢绞线布置

## 2. 锚索张拉阶段

### 2.1 锚索张拉程序

在结构模型试验中发现, 若将预应力荷载一次性施加到位, 衬砌混凝土内侧表面会因轴向拉应力梯度过大而出现环向裂缝, 因此在实际施工时根据衬砌厚度的不同采用了预应力分级施加法。对于超挖较多、衬砌厚度较大的浇筑块, 预应力荷载分两次施加, 即先张拉左边一排锚具槽中的锚索, 锁定荷载为设计张拉力的50%, 再张拉右边一排锚具槽中的锚索, 锁定荷载为设计张拉力的100%, 然后再张拉左边一排锚具槽中的锚索, 锁定荷载为设计张拉力的100%; 对于超挖较少、衬砌厚度较薄的浇筑块, 预应力荷载分三次施加, 每次的锁定荷载分别为设计张拉力的50%, 77%和100%。采用如此的张拉程序后, 2160m长的衬砌在张拉过程中没有出现环向张拉裂缝。为了研究衬砌混凝土在张拉过程中的徐变变化, 仪器观测段的预应力荷载均采用了三级施加法。

### 2.2 混凝土衬砌中形成的预压应力分布规律

锚索张拉在混凝土衬砌中所建立的预压应力的大小和环向分布的均匀性是评价预应力效果的两项主要指标。表1和图3是预应力锚索张拉完毕后在典型观测断面所建立的压应力环向

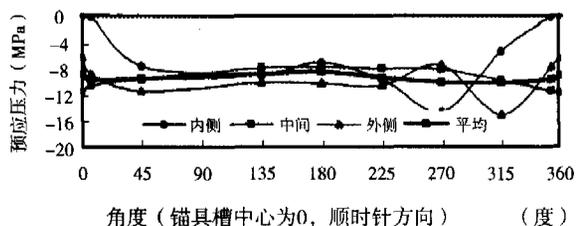
分布及其展开图。其中测点位置对应的角度是以锚具槽中心为0°的顺时针转角。图4是根据三维有限元计算的轴向、环向应力分布等值线图(负值为压应力, 下同)。

表1 不同观测断面混凝土衬砌中所建立的环向压应力(单位:MPa)

观测断面	0°	45°	135°	180°	225°	270°	315°	360°	平均
A	-8.78	-9.36	-8.69	-8.13	-9.13	-9.84	-9.84	-8.78	-9.14
B	-5.29	-6.67	-6.87	-4.99	-4.56	-6.99	-10.29	-5.29	-6.40
C	-4.41	-3.88	-4.32	-4.28	-4.23	-3.66	-6.45	-4.41	-4.51

注: 观测断面A位于2#排沙洞加强段浇筑块的中部, B和C分别位于3#排沙洞下游普通浇筑块的中部和端部。

2#排沙洞仪器观测断面A



3#排沙洞仪器观测断面B

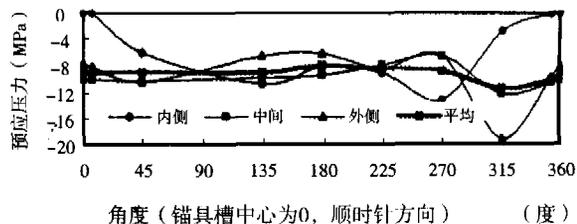


图3 现场实测结果—环向压应力分布展开图

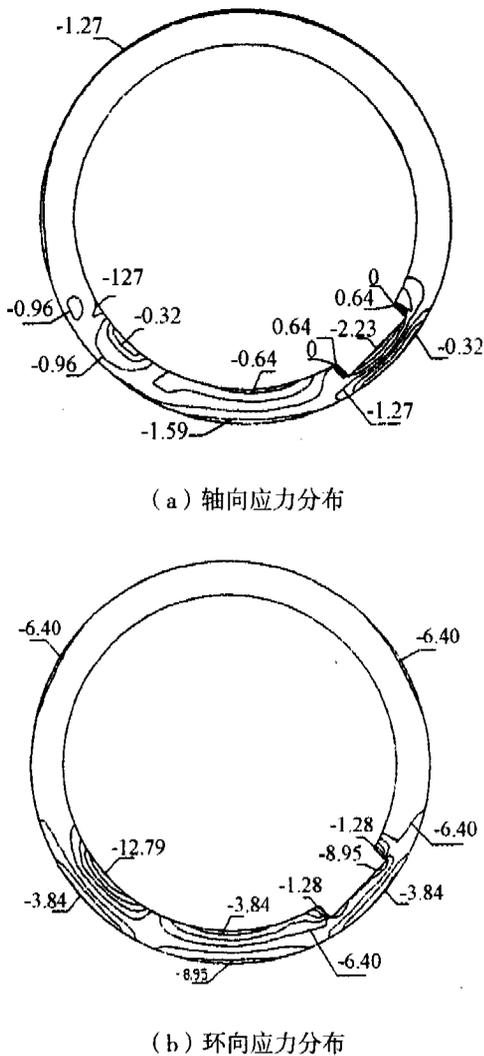


图4 有限元计算成果—预应力等值线分布(单位:MPa)

对图表进行简单分析不难看出:

1) 混凝土衬砌中产生的环向平均预压应力分布是比较均匀的,特别是2#排沙洞地质断层区加强段(观测断面A)。相对而言,3#排沙洞普通段(仪器观测断面B和C)环向平均预压应力分布均匀性稍差些,可见预压应力环向分布的均匀性和衬砌厚度分布的均匀性有关,2#排沙洞断层区加强段预应力混凝土衬砌厚度为固定的65cm,而3#排沙洞的仪器观测断面由于受开挖影响,各个部位的衬砌厚度都很难相同,因此其预压应力环向分布的均匀性较差。这表明,严格控制开挖施工中的超挖和欠挖,对保证环向预压应力分布的均匀性具有重要意义。

2) 所用无粘结钢绞线外覆内充油脂的塑料

套管,除了可像普通钢筋那样预先绑扎定位,省去预留孔道和回填灌浆等复杂施工工序外,其最大的特点是摩擦损失远远小于有粘结钢绞线(有粘结钢绞线的滑动摩擦系数和摆动摩擦系数分别为 $L=0.15\sim 0.25$ , $k=0.0015$ ,无粘结钢绞线的实测值为 $L=0.032$ , $k=0.0007$ ),采用无粘结钢绞线双圈环绕布置,使摩擦损失对环向应力分布的影响减小到了最低程度。

3) 对比有限元计算结果和现场实测结果,可见预应力分布的规律是非常相近的,锚具槽附近是应力变化最复杂的部位,但计算结果的预压应力小于实测结果,其原因可能与计算参数的选择有关。3#排沙洞普通段(B、C断面)的预压应力数值较小,主要是由于围岩超挖使衬砌实际厚度远大于设计厚度所致。

### 2.3 预应力施加过程中锚具槽周围的应力状态

在有限元分析和结构模型试验中发现,锚具槽是整个衬砌结构的薄弱部位。张拉过程中锚具槽周围的应力状态非常复杂,张拉程序控制不当,个别边角部位将会因拉应力过大而产生裂缝。预应力锚索在进入锚具槽口时要通过一小段小半径圆弧段向内侧弯曲并与大半径圆及连接锚具的直线段相切,在锚具槽两端长度方向的一定范围内将因应力集中而沿厚度方向产生较大的拉应力。为此施工时在2#排沙洞仪器观测段的4个锚具槽周围按图5所示位置的衬砌混凝土内侧表面粘贴了电阻应变片,在锚具槽两端20cm处沿隧洞轴向埋设了混凝土应变计,并在锚具槽两端衬砌厚度方向的U形加强钢筋上粘贴了电阻应变片。

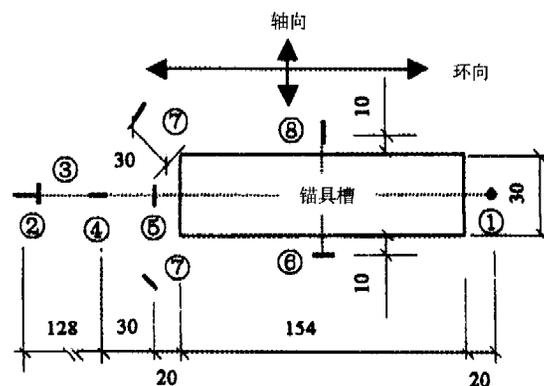


图5 锚具槽周围的电阻应变片布置

电阻应变片的测试结果如表2所示, 锚具槽两端的轴向应变在张拉过程中的变化如图6所示。

表2 电阻应变片的测试结果

测点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
压力/MPa	0.96	-7.34	1.85	-5.23	0.96	-15.85	-10.0	1.39

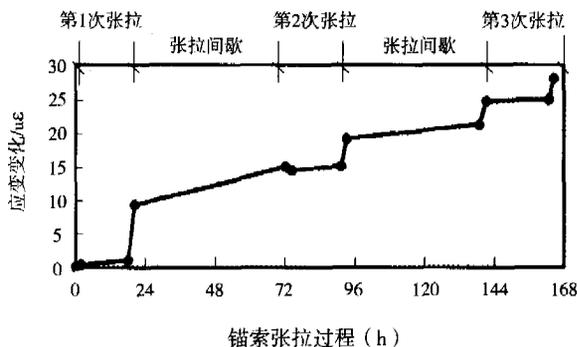


图6 锚具槽两端的轴向应变变化

测点①位于U形加强筋的中部, 其大小反映了锚具槽两端混凝土衬砌中产生的径向拉应力。实测结果为0.96MPa, 小于混凝土的标准轴心抗拉强度。说明无粘结预应力筋双圈环绕布置显著改善了锚具槽口混凝土衬砌的径向受拉状态。测点②和测点③位于锚具槽上方腰线部位混凝土的内侧表面, 测点②环向布置, 实测应力为-7.34MPa, 与埋设在该部位内侧混凝土应变计的结果-7.44MPa非常接近, 测点③沿隧洞轴线方向, 实测应力为1.85MPa, 表明该部位处于轴向受拉状态, 但拉应力小于混凝土的标准轴心抗拉强度。测点④位于距锚具槽端部50cm处, 环向布置, 实测应力为-5.23MPa, 与测点②相比, 表明由于锚具槽端部临空面的影响, 使预应力有所降低。测点⑤距锚具槽边缘20cm, 轴线方向布置, 其位置与该处内埋的混凝土应变计相对应, 两者的实测结果几乎相同, 拉应力小于1.0MPa, 远小于混凝土的标准轴心抗拉强度2.45MPa, 不致产生开裂。测点⑥位于两排锚具槽中间位置, 实测应力为-15.85MPa, 由于锚具槽对受压面的削弱, 使该处衬砌的预压应力约为平均值的两倍, 与预料结果是一致的。测点⑦位于锚具槽的角部, 距角点30cm,

原来曾担心该部位会因角点应力集中产生过大拉应力, 实测结果表明, 在距角点30cm远的地方是处于受压而不是受拉状态; 测点⑧位于两排锚具槽中间的轴线方向, 实测结果为拉应力1.39MPa, 小于混凝土的标准轴心抗拉强度。

实测结果和有限元计算结果都表明, 锚具槽周围是整个衬砌结构应力状态最为复杂的部位, 在锚索张拉过程中不仅锚具槽周围的衬砌混凝土沿隧洞轴向和径向有拉应力产生, 而且环向预压应力沿衬砌厚度方向分布最不均匀。特别是衬砌底部受两侧锚具槽临空面的影响, 衬砌外侧(靠近岩石面)预压应力远大于内侧预压应力, 使底部混凝土衬砌有反拱趋势。

将上述应变片测试结果与有限元计算结果进行对比还可发现, 衬砌混凝土沿隧洞轴线方向的受力状态从锚索张拉过程中的受拉变成了全部锚索张拉完毕后的受压, 锚具槽周围的应力状态也得到了改善。这表明轴向拉应力是由于单根锚索张拉而产生的“暂时应力”, 全部锚索张拉完毕后这种“暂时应力”将不复存在。只要在锚索张拉过程中控制“暂时应力”不超过混凝土的抗拉强度, 就能避免环向张拉裂缝的出现。

#### 2.4 混凝土徐变和锚索应力松弛对有效预应力的影响

有效预应力的及其变化规律是预应力结构中备受关注的內容, 由于施工环境的温湿度变化很小, 实测数据表明, 张拉期间的干缩变形和温度变形约为零, 混凝土徐变和锚索应力松弛是导致有效预应力降低的主要因素, 为此我们通过分级施加预应力荷载并记录施加每级荷载前后观测仪器的应变变化, 来探讨预应力施加过程中混凝土的徐变变化规律。表3是仪器观测断面C的应变变化观测结果, 其中 $\Delta \varepsilon_i$ 和 $\Delta \varepsilon_{0i}$ 分别代表锚索张拉和张拉停置期间的应变变化,  $i=1, 2, 3$ , 分别对应于每一级预应力荷载。

表3 预应力施加过程中的应变变化 (单位:με)

预应力施加	第一级0-50%		第二级50%-70%		第三级70%-100%		应变变化		
	张拉/停置时间 (h)		4.1/62.4		4.3/44		με		
应变变化	Δε <sub>1</sub>	Δε <sub>01</sub>	Δε <sub>2</sub>	Δε <sub>02</sub>	Δε <sub>3</sub>	Δε <sub>03</sub>	Δε	Δε <sub>0</sub>	%
衬砌内侧	-107.5	-7.6	-67.2	-15.1	-69.3	-32.7	-244.0	-55.4	18.5
衬砌中间	-111.4	-20.4	-69.2	-19.4	-67.6	-20.6	-248.2	-60.4	19.6
衬砌外侧	-115.9	-21.3	-66.9	-21.0	-71.4	-22.4	-254.2	-64.7	20.3
平均应变	-111.6	-16.4	-67.8	-18.5	-69.4	-25.2	-248.8	-60.1	19.5
锚索测力计	-268.3	-7.0	-136.6	-10.3	-143.1	-19.8	-548.0	-37.1	-7.26

注:锚索测力计的应变变化在数值上不等于锚索的应变变化,但变化率相同。

若令混凝土的总应变为ε,张拉期间应变为ε\*,张拉期间的徐变应变为ε<sub>0</sub>\*\*,张拉停置期间的徐变应变为ε<sub>0</sub>\*,预应力损失导致混凝土的应变变化为ε<sub>0</sub>\*\*\*,混凝土的弹性应变为ε<sub>c</sub>,总徐变应变为ε<sub>0</sub>,假定温湿度变化引起的收缩应变为零,则有:

$$\begin{aligned} \epsilon &= \epsilon^* + \epsilon_0^* = \epsilon_c + \epsilon_0, \quad \epsilon_c = \epsilon^* - \epsilon_0^{**} - \epsilon_0^{***}, \\ \epsilon_0 &= \epsilon_0^* + \epsilon_0^{**} + \epsilon_0^{***} \end{aligned}$$

根据锚索预应力损失的比例计算混凝土中的应力损失,根据张拉时间与张拉停置时间的比例计算张拉期间的徐变应变,设λ=c/R,得出上述各项应变的计算结果如表4所示。

表4 张拉过程中分项应变变化情况 (单位:με)

分项应变	λ	ε*	ε <sub>0</sub> *	ε <sub>0</sub> **	ε <sub>0</sub> ***	ε	ε <sub>c</sub>	ε <sub>0</sub>	累计徐变量	计算徐变量
第一级荷载	0.09	-111.6	-16.4	-1.0	-2.9	-128.0	-107.7	-20.3	-20.3	-19.4
第二级荷载	0.14	-67.8	-18.5	-1.2	-4.6	-86.3	-62.0	-24.3	-44.6	-49.3
第三级荷载	0.185	-69.4	-25.2	-2.5	-9.2	-94.6	-57.7	-36.9	-81.5	-81.4
合计	0.185	-248.8	-60.1	-4.7	-16.7	-308.9	-227.4	-81.5	-81.5	-81.4

当预压应力不超过混凝土标准抗压强度之半时,徐变变形与混凝土的应力和时间t的关系为直线变化规律<sup>[3,5]</sup>,即ε<sub>0</sub>=αΣσ<sub>i</sub>t<sub>i</sub>,其中α是根据第一级荷载的应变变化确定的系数。每级预应力荷载施加后的计算徐变量如表4最后一栏所示。张拉过程中混凝土衬砌和锚索测力计的应变变化情况如图7所示。

对上述图表进行简单分析,可以看出:

1) 该浇筑块从开始张拉到张拉完毕经过了186.9小时,其中锚索张拉时间为12.6小时,每一级荷载锁定后到下一级荷载施加前,衬砌混凝土的应变都有一定增加,而锚索测力计的应变有所降低。混凝土的应变增加量可视为混凝土徐变的结果,而锚索测力计的应变减小量则是混凝土徐变和锚索松弛共同作用的结果。从

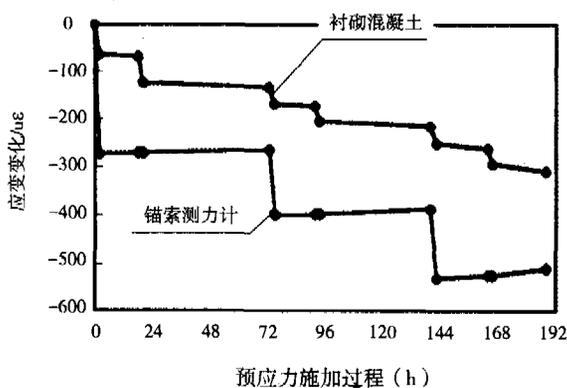


图7 张拉过程中混凝土衬砌和锚索测力计的应变变化数值上看,若把张拉过程混凝土的总应变变化分成弹性应变和徐变应变两部分,则徐变应变占有不容忽视的比例。锚索张拉引起的混凝土平均弹性应变为-227.4μμε,徐变应变为-81.5μμε,总应变为-308.9μμε,徐变应变为

总应变变化的26.4%，为弹性应变的35.8%。

2) 预应力施加过程中混凝土的徐变符合  $\epsilon_0 = \alpha \sum \sigma_i t_i$  的计算假定，停置时间越长，预应力越大，混凝土的徐变越大。从表4计算徐变量与实测徐变量的对比可见，计算结果与实测结果比较吻合。

### 3. 锚索张拉完毕后衬砌混凝土和钢绞线中有效预应力的变化

表5是C断面在张拉完毕后衬砌混凝土的徐变应变、弹性应变、徐变系数和锚索有效预应力的变化情况，根据CEB-FIP标准规范的定义，徐变系数  $\phi(t, \tau) = \epsilon_0(t, \tau) / \epsilon_\tau$ ，混凝土弹性应力和徐变系数的变化情况如图8和图9所示。

表5 预应力施加完毕后衬砌混凝土的弹性应变、徐变和有效预应力的变化情况

张拉后天数 (d)	0	1	2	3	7	18	30	37	44	58
锚索预应力损失 (%)	0.0	3.9	4.3	4.6	5.4	6.4	6.7	6.9	7.1	7.5
混凝土徐变应变 ( $\mu\epsilon$ )	0.0	-23.9	-31.5	-36.0	-53.0	-70.6	-83.1	-87.2	-90.0	-92.7
混凝土弹性应变 ( $\mu\epsilon$ )	-227.4	-218.9	-218.0	-217.4	-215.6	-213.4	-212.6	-212.5	-211.8	-211.0
混凝土徐变系数	0.000	0.105	0.138	0.158	0.233	0.310	0.365	0.383	0.396	0.408

注:表中“-”号表示压应变

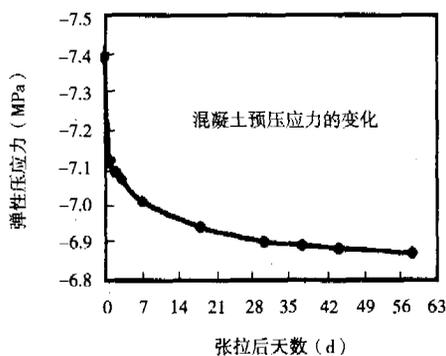


图8 张拉完毕后混凝土弹性应力的变化

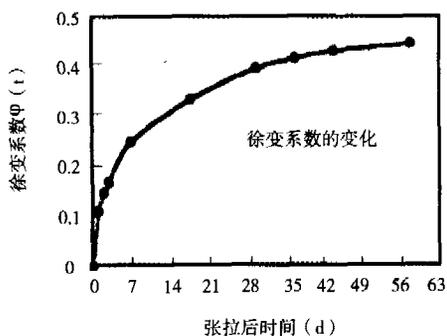


图9 张拉完毕后混凝土徐变系数的变化

可以看出，预应力施加完毕后混凝土的徐变变化规律为：徐变随着时间的延长而逐渐减小，前7天变化比较明显，一个月后逐渐趋于稳定。以观测断面C为例，张拉完毕后1天为初始弹性应变的10.5%，7天为23.3%，一个月36.5%，两个月为40.8%。

锚索有效预应力的变化与混凝土中的徐变变化具有对应关系。张拉完毕初期的几天内，混凝土的徐变较大，相应的锚索预应力的损失也较大，张拉完毕一个月后，混凝土的徐变渐趋稳定，锚索预应力也渐趋稳定。从混凝土徐变引起的锚索预应力损失数值上看，张拉完毕后第1天损失了3.9%，到第7天为5.4%，一个月时6.7%，两个月时7.5%。

### 4. 回填灌浆和过水运行期衬砌混凝土应变变化规律

预应力施加完毕后经历了停置期、回填灌浆期，然后投入过水运行等几个阶段。不同阶段混凝土和锚索测力计的平均应变变化（分别用  $\Delta\epsilon_c$  和  $\Delta\epsilon_r$  表示），如表6所示，可以看出：

表6 不同阶段混凝土和锚索测力计的应变变化

观测断面	回填灌浆阶段			过水运行阶段		
	灌浆压力	$\Delta\epsilon_c$	$\Delta\epsilon_r$	工作水头	$\Delta\epsilon_c$	$\Delta\epsilon_r$
A	0.3MPa	-38.8 $\mu\epsilon$	-	51m	59.8 $\mu\epsilon$	-
B	0.3MPa	-38.8 $\mu\epsilon$	1.8 $\mu\epsilon$	51m	54.8 $\mu\epsilon$	-34 $\mu\epsilon$

1) 回填灌浆是指预应力施加完毕后进行的衬砌与围岩之间的回填灌浆，灌浆压力0.3MPa。回填灌浆使混凝土衬砌中的压应力增加，锚索中的拉应力减小。2#排沙洞断面A混凝土衬砌的压应变平均增加了38.8 $\mu\epsilon$ ，相当于1.26MPa；3#排沙洞断面B平均增加了21.1 $\mu\epsilon$ ，

(下转第33页)

间动载。

## 6. 结束语

类似狗子滩特大桥独柱墩预应力盖梁的设计在地形陡峭地区将会经常出现,采取常规钢管架施工已不能满足工程要求。该桥盖梁采用托架法施工具有投入少、施工周期短、利于环保和保持周边生态平衡等特点。所积累的经

验,可为以后类似工程的设计、施工提供参考和借鉴。

## 参考文献

- [1] 路桥集团第一公路工程局,《公路桥涵施工技术规范》2000-08-24版,人民交通出版社
- [2] 杨文渊 徐森,《桥梁工程师手册》97-7版,人民交通出版社
- [3] 江正荣,《建筑施工工程师手册》,中国建筑工业出版社

(上接第15页)

相当于0.69MPa;锚索测力计变化了 $18\mu\epsilon$ ,相当于锚索中拉应力减小了3.1%。

2) 投入过水运行后,由于内水压力的作用,混凝土衬砌中的预压应力数值减小,锚索中的拉应力增大。当工作水头为51m时,锚索测力计的应变约增加了 $34\mu\epsilon$ ,相当于锚索中的拉应力增加了7.5%;内水压力在2#、3#排沙洞观测段混凝土衬砌内产生的拉应变分别为 $59.8\mu\epsilon$ 和 $54.8\mu\epsilon$ ,约相当于2MPa的拉应力;按此推算,在水库最高运行水位(水头120m),内水压力在混凝土衬砌中产生的最大拉应变应在 $150\mu\epsilon$ 左右,其数值尚小于锚索张拉产生的预压应变,混凝土衬砌仍在受压状态下工作而不致产生裂缝,说明结构设计是安全的。

## 5. 小结

通过上面的分析与讨论,可以得出以下几个结论:

1) 小浪底排沙洞为防止渗漏所采取的无粘结预应力混凝土衬砌方案,结构设计是合理的。采用预应力锚索双圈环绕布置,有效地提高了锚索预应力沿程分布的均匀性;由于无粘结锚索的摩擦系数很小,使预应力效果更为显著,即使在最高运行水位下,混凝土衬砌中的预压应力也足以抵消内水压力所产生的拉应力,使隧洞混凝土衬砌在受压状态下工作,结构设计是安全可靠的。

2) 锚具槽周围是衬砌应力状态最复杂的部位,但只要经过仔细设计并采取恰当的锚索张拉程序,可使锚具槽周围的应力状态得到改善,尽管个别部位仍有拉应力存在,但不致产生开裂。实际施工结果也表明,由于采取了合理的张拉程序,在2000多米隧洞衬砌张拉施工过程中,基本上没有产生张拉裂缝。说明排沙洞锚具槽的结构设计和施工是合理的、成功的。

3) 用钢筋计、混凝土应变计等仪器来监测预应力混凝土结构的工作状态时,必须对混凝土的徐变予以足够的重视,徐变产生的应变量在总的应变中占有不容忽视的比例。当混凝土的预压应力与其标准抗压强度相比较小时,混凝土的徐变符合 $\epsilon_s = \alpha \sum \sigma_{it}$ 的计算假定,即预应力越大,停置时间越长,混凝土的徐变越大。

## 参考文献

- [1] 林秀山等.小浪底工程后张法无粘结预应力隧洞衬砌技术研究与实践[M].郑州:黄河水利出版社,1999.
- [2] 俞祥荣等.双圈环绕无粘结预应力混凝土衬砌施工技术[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [3] 张士铎.现代混凝土基础理论[M].上海:同济大学出版社,1994.
- [4] 徐芝纶.弹性力学[M].北京:高等教育出版社,1982.
- [5] 李国平.预应力混凝土结构设计原理[M].北京:人民交通出版社,2000.