

# 小浪底排沙洞后张无粘结 预应力混凝土衬砌生产试验

黎海宁

## 一、前言

小浪底排沙洞后张无粘结预应力混凝土衬砌结构是经过设计院与承包商的大量工作与分析比较,并通过有粘结结构方案与无粘结结构方案模型张拉试验对比,最后由有关专家评定选取的。由于排沙洞采用的是世界首例双圈环绕后张无粘结预应力混凝土衬砌结构,虽然其在技术上是可行的,但在实际工程实施中的应力分布、应力损失状况以及洞径位移等没有定量数据资料,在施工上也没有一套成熟的方法,为了获得更多的混凝土应变状况的资料,掌握预应力施工方法,发现并研究解决设计时难以预见的一些施工的问题,保证正常施工,决定在1#排沙洞帷幕上游进行两个衬砌块(B9、B10块)的生产性试验段,桩号为0+179.11~0+203.21m。

## 二、试验目的

- 1、对预应力锚索施加应力后,检测混凝土衬砌所产生的应力效果。
- 2、观测混凝土衬砌在应力施加前后的洞径位移量。
- 3、观测混凝土衬砌在应力施加前后以及施加过程裂缝变化的状况。
- 4、测定锚索在施加设计应力后的伸张值以及锚具的位移量。
- 5、对预应力施工人员进行岗位培训,使其熟悉预应力工序施工操作。
- 6、发现并解决设计时料想不到的实际施工中的问题,使正式生产施工时避免再次发生。
- 7、研究解决锚具及锚索防腐施工切实可行

的方法。

8、验证所应用的预应力系统的锚具及张拉设备等的有关性能。

## 三、混凝土衬砌结构特点

试验段分两个混凝土衬砌块,每个衬砌块长12.05m,混凝土衬砌设计厚0.65m,衬砌内径为6.5m,每块衬砌安装24束锚索,锚索间距0.5m,施工所预留的24个锚具槽间隔布置于衬砌下半圆周的两侧,其几何尺寸为:长×宽×深=154cm×32cm×25cm,锚具槽中心线与洞的铅垂半径分别成45°(B9块)和60°(B10块)夹角,如图1。

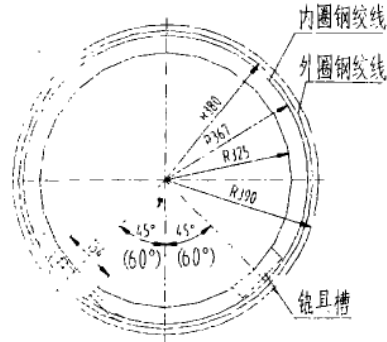


图1 衬砌钢绞线布置截面简图

每束锚索由8根公称直径为 $\phi 15.7\text{mm}$ ,标准强度为 $f_{pk}=1860\text{MPa}$ 的无粘结钢绞线构成,每两根钢绞线绕两圈后分成内外两层安装,钢绞线两端交汇于锚具槽内,每束锚索设计控制张拉荷载为1674kN,即75% $f_{pk}$ 。

## 四、试验检测仪器的布置

为了更好地测量该预应力混凝土衬砌方案中的有关应力、应变等分布与变化状况,衬砌中埋设了大量的钢筋计、混凝土应变计、应力计、测缝计、收敛计、锚具测力计和钢筋应变片,仪器观测断面如图2、图3。

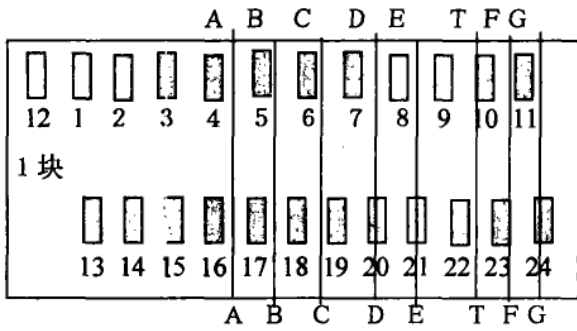


图2 仪器布置断面

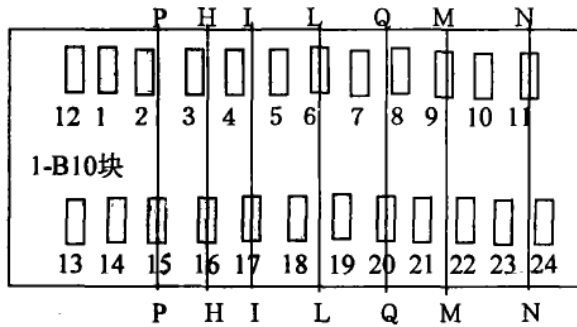


图3 张拉顺序与仪器布置断面

五、锚索应力施加步骤

根据计算机仿真模型的计算分析与方案选择时的1:1模型试验结果,在应力施加过程中,混凝土衬砌内侧会产生局部拉应力。为避免与减少因此而产生的裂缝或裂缝扩展现象,锚索张拉施工顺序按图3进行。锚索张拉时还需配合有关仪器进行测量。

六、锚索伸长值与锚具位移量的计算以及有关实测值的结果分析

1、无粘结预应力锚索在混凝土衬砌中的伸长值计算公式为

$$\Delta L_1 = \frac{P_j}{A_p \cdot E_s} \int_0^{L_T} e^{-(kx+\mu\theta)} dx$$

(注:  $\theta = x/R$ )

综合钢绞线抽样母材试验结果与厂家提供的

有关参数以及锚索安装结构参数和张拉控制应力,锚索伸长量可分为三部分计算:

(1) 工具锚到工作锚板间钢绞线的伸长值:

$$\Delta L_1 = (1380.9 + 1282.01) / 2 \times 0.91 / 185000 = 6.55 \text{mm}$$

(2) 工作锚板张拉端到锚索2π处的锚索伸长值:

$$\Delta L_2 = 1 / 185000 \int_{0.91}^{24.4} 1282.01 e^{-(\mu/R+k)(x-0.91)} dx = 146.43 \text{mm}$$

(3) 锚索2π处到工作锚板固定端的锚索伸长值:

$$\Delta L_3 = 1 / 185000 \int_{24.4}^{47.9} 1282.01 e^{-(\mu/R+k)(47.9-x)} dx = 146.43 \text{mm}$$

锚索总伸长值:

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 = 299.4 \text{mm}$$

在该环锚系统中,环锚锚板只受到两端锚索的拉力,其位移量ΔS为衬砌内锚索伸长值的一半,故ΔS=ΔL<sub>2</sub>=ΔL<sub>3</sub>=146.43mm。

2、张拉试验实测结果:

(1) B9块锚索最大伸长值ΔL<sub>max</sub>=311.7mm,最小伸长值ΔL<sub>min</sub>=287.7mm,平均值ΔL<sub>平均</sub>=301.7mm。

(2) B10块锚索最大伸长值ΔL<sub>max</sub>=307.1mm,最小伸长值ΔL<sub>min</sub>=285.4mm,平均值ΔL<sub>平均</sub>=297.2mm。

(3) 相应的锚板位移量: B9块ΔS<sub>max</sub>=158mm,ΔS<sub>min</sub>=137.4mm,ΔS<sub>平均</sub>=149.65mm, B10块为ΔS<sub>max</sub>=152.8mm,ΔS<sub>min</sub>=141.3mm,ΔS<sub>平均</sub>=145.65mm。

通过以上数据相比较可知,计算值与实测值是相符合的,其测量数值完全符合有关国家标准。

七、洞径位移

在B9块、B10块试验段,共有11个断面安装了收敛计,用于测定混凝土衬砌在预应力施加过

程中断面尺寸的变化情况, 收敛计安装位置如图4所示, 测量结果见表1。

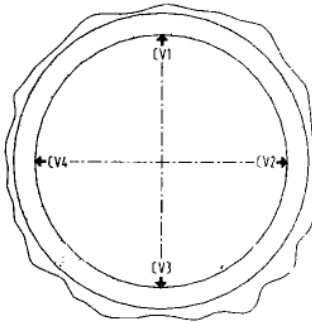


图4 收敛计布置

表1 收敛测试数据

试验段	剖面	收敛值 mm	
		CV1~CV3	CV2~CV4
第九段	A-A	2.59	0.77
	B-B	2.51	0.76
	C-C	2.34	0.65
	D-D	2.74	0.68
	E-E	2.49	0.67
	F-F	2.75	0.42
	平均值	2.57	0.66
第十段	H-H	3.75	0.67
	I-I	2.61	0.37
	L-L	3.39	0.53
	M-M	3.53	0.51
	N-N	3.00	0.76
	平均值	3.26	0.57
总平均值		2.88	0.62

从表1中数据可以看出, 由于锚具槽对衬砌的削弱作用, 使得衬砌在预应力施加后断面各位置的收敛变形不均匀, 而且垂直方向的变形远大于水平方向的变形, B9块垂直方向的平均径向收缩为2.57mm, B10块为3.26mm, 而B9块水平方向的平均径向收缩只有0.66mm, B10块的只有0.57mm。这说明衬砌断面各位置收敛变形量与锚具槽的布置有关, 即衬砌两侧锚具槽中心线在断面的投影所形成的夹角越大, 垂直径向收缩与水平径向收缩的差值就越大。

#### 八、衬砌环向预应力分布状况

在第9、第10块衬砌试验中, 主要从3个断面观测施加预应力后仪器的应变变化, 观测结果如表2。

表2 预应力环向分布测试数据表

#### C-C剖面

角度	0°	90°	180°	270°	360°
内侧钢筋计	0.0	-245.7	-224.2	-385.8	0.0
内侧混凝土应变计	0.0	-206.8	-176.7	-320.3	0.0
外侧钢筋计	-215.0	-184.4	-184.1	-188.0	-215.0
外侧混凝土应变计	-192.2	-158.4	-142.6	-181.1	-192.2

#### G-G剖面

角度	0°	90°	180°	270°	360°
内侧钢筋计	0.0	-245.5	-201.4	-360.0	0.0
内侧混凝土应变计	0.0	-196.2	-151.3	-290.4	0.0
外侧钢筋计	-165.6	-144.3	-204.2	-179.9	-165.6
外侧混凝土应变计	-128.3	-129.1	-137.1	-157.5	-128.3

#### L-L剖面

角度	0°	90°	180°	270°	360°
内侧钢筋计	0.0	-247.6	-229.8	-332.4	0.0
内侧混凝土应变	0.0	-185.3	-176.3	-253.6	0.0
外侧钢筋计	-203.9	-186.2	-242.9	-227.9	-203.9
外侧混凝土应变	-157.2	-158.7	-183.4	-174.2	-157.2

说明: 锚具处内表面和中心位置无法安装仪器, 此处应力为0。

从表2可看出, 施加预应力后, 靠近混凝土衬砌内侧表面的钢筋计产生了约275个微应变的平均压应变, 混凝土应变计产生了约220个微应变的平均压应变。靠近混凝土衬砌外侧表面产生的应变小些, 钢筋计产生了约194个微应变的平均压应变, 混凝土应变计在中间段产生了约170个微应变的平均压应变, 边缘部位产生了约138个微应变的平均压应变。由于锚具槽的影响, 衬砌内侧预应力产生的压应变沿环向分布是不均匀的, 而衬砌外侧预应力产生的压应变沿环向分布则比较均匀。在衬砌的厚度方向分布的规律为: 内侧表面较大, 外侧表面较小, 但差别不大; 从应变变化沿程分布看, 在与锚具槽相对应的另一侧即与锚具槽成270°的地方混凝土衬砌内侧的预压力最大, 约为平均值的1.3倍。

#### 九、裂缝的产生与变化

(下转第39页)

尺寸效应, 梁越高, 强度越低。

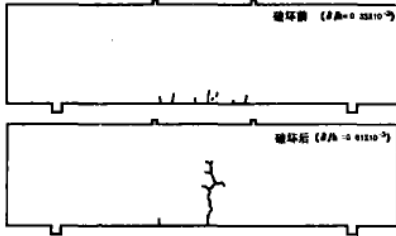


图16 简支梁的裂缝形式 (平均面积相同)

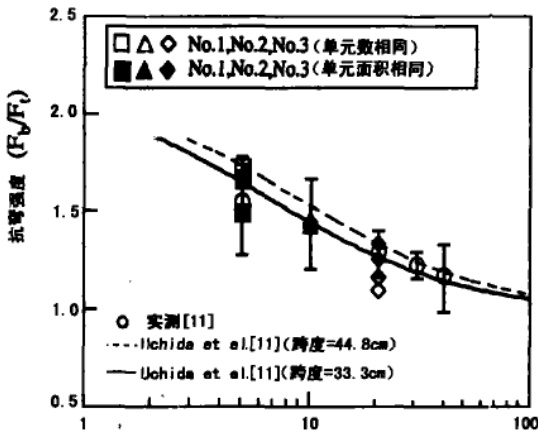


图17 梁高与抗弯强度的关系

七、结论

本文应用RBSM法进行了简支梁的破坏分析, 自动生成Voronoi多边形网格单元系统。结论如下:

1、当随机数超过500时, 可以得出由计算机按线性一致方法生成的随机数的方格, 可以类推

表3 最大荷载 (单元数量相同)

单元数	试件	最大荷载 (KN)	P/ (h <sup>2</sup> Ft)
800	No.1	4.3	0.57
	No.2	13.8	0.48
	No.3	44.7	0.39
798	No.1	4.4	0.58
	No.2	14.1	0.49
	No.3	43.3	0.37

超过500个Voronoi多边形的情况。

2、采用Voronoi单元的RBSM法进行砼破坏的非线性分析的有效性已经得到证实, 包括开裂的不连续现象, 即使在破坏模式不能假定的情况下也有效。

3、当受拉时应变缓和曲线由破坏能来定义时, 要考虑砼结构的尺寸效应。由下列原因引起的尺寸效应已得到普遍承认:

- (1) 砼不均匀时, 有强度和缺陷如何分布的问题。
- (2) 砼收缩随构件尺寸的不同而不同。

我们应该从微观的角度来研究砼, 研究当强度和缺陷按照沿Voronoi单元边界概率分布时是否能从数值上来分析尺寸效应。

注: 本文原载于日本平成8年度明星大学工学部土木工学科《计算工学研究室研究年报》, 由柳州欧维姆建筑机械有限公司专家岛山三树男译, 广州城建开发设计院有限公司李英校。

(上接第30页)

试验段第9、第10块衬砌, 预应力施加前在内侧表面出现了一些裂缝, 经观察分析, 该裂缝应为温度裂缝, 预应力施加后这些裂缝得到了闭合, 混凝土衬砌没有再次出现新的裂缝, 说明该预应力结构与预应力施加顺序对控制混凝土衬砌裂缝是很有好处的, 是合理的。

十、试验结果

该试验除了进行以上几方面的观察与测定外, 还进行了预应力随时间变化的测定; 固结灌

浆对衬砌应力的影响; 预应力施加时相邻锚索间的相互影响; 温度与混凝土徐变对衬砌应力的影响等多方面的测定。通过试验使有关人员得到了培训和锻炼, 给以后的生产施工积累了一定的经验; 验证了该系统所应用的锚具和张拉设备性能的高可靠性; 为该结构的推广应用收集了许多宝贵的资料。衬砌的应力分布、裂缝控制等效果都比较理想, 达到了预期的试验目的。