

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.02.008

天荒坪抽水蓄能电站高压隧洞充水试验实测资料分析

侯 靖

(华东勘测设计研究院 浙江 杭州 310014)

摘要 分析天荒坪抽水蓄能电站上游高压隧洞观测仪器在充排水试验过程中所记录的实测资料,讨论高压隧洞围岩承载、衬砌构造配筋、衬砌与围岩之间缝隙随内水压力增加而增加等隧洞渗透体积力理论概念,期望通过实测资料来进一步理解和说明高压隧洞渗透体积力理论,以便更好地指导设计。
关键词 天荒坪抽水蓄能电站;高压隧洞;充排水试验;内水压力;渗透体积力;构造配筋
中图分类号 :TV672+.1 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2009)02-0027-05

Observed data analysis of water filling test of the high-pressure tunnel in Tianhuangping Pumped-Storage Power Station//
HOU Jing (East China Investigation and Design Institute , Hangzhou 310014 , China)
Abstract : Observed data from a water filling and drainage test in the upper stream high-pressure tunnel of the Tianhuangping pumped-storage power station are analyzed. Several theoretical concept of tunnel permeation volume strength are discussed , such as the the surrounding rock bearing strength , the constructional reinforcement of the tunnel liner , and the increase of the gap between the liner and the tunnel with internal water pressure . The goal is to explain the theory of permeation volume strength in a high-pressure tunnel with observed data , so as to provide better guidance for tunnel design .
Key words : Tianhuangping Pumped-Storage Power Station ; high-pressure tunnel ; water filling and drainage test ; internal water pressure ; permeation volume strength ; constructional reinforcement

天荒坪抽水蓄能电站位于浙江省安吉县天荒坪镇境内,电站枢纽由上水库、下水库、输水系统、地下厂房洞室群和开关站组成,电站安装了 6 台单机容量为 300 MW 的可逆式水泵水轮发电机,总装机容量为 1 800 MW。

机组上游的输水系统为一洞三机,有 2 个相同的水力单元,由上库进/出水口、引水斜井、引水下平段、引水岔管和高压钢管段组成,全长 1 199 m,布设在大溪左岸山体内部,线路走向大致与大溪河道垂直。该地段山体雄厚,基岩主要为流纹质熔凝灰岩,坚硬完整、耐风化,后期有规模较大的花岗斑岩和一些小的基性岩脉侵入,新鲜坚硬,与围岩接触良好,从钻孔资料 and 实际施工开挖情况来看,输水系统所处的基岩属Ⅰ、Ⅱ类优质围岩。设计确定的上游引水隧洞洞径为 7.0 m,承受的最大静水水头为 680 m,隧洞采用钢筋混凝土衬砌。工程布置见图 1。

1 实测内容和方法

天荒坪工程是一个高水头的大型抽水蓄能电站,建成后将在华东电网中起调峰、填谷、事故备用

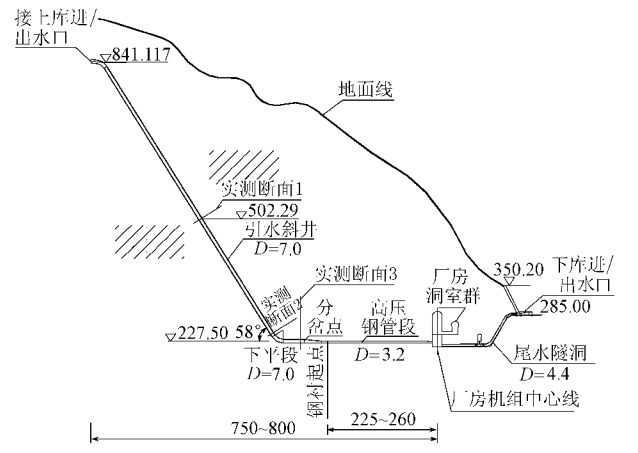


图 1 天荒坪工程输水道系统纵剖面布置(单位:m)及调相等重要作用,鉴于工程的重要性和设计、运行需要,在整个工程中布置了许多观测仪器,收集实测数据,以供决策和分析探讨时用,其中在输水道系统中的钢筋混凝土高压隧洞 1 号斜井布置了 3 个观测断面(图 1),每个断面都布置有渗压计、测缝计和钢筋计,分别观测衬砌外层压力、衬砌与围岩的缝隙以及衬砌钢筋应力。3 个观测断面的特性参数见表 1。

表 1 1号引水隧洞实测断面参数

实测断面	断面高程/m	断面内径/m	衬砌厚度/m	混凝土强度等级	衬砌配筋	
					环向	纵向
1	502.29	7.0	0.6	C25	25@20	22@25
2	242.50	7.0	0.6	C25	28@20	22@25
3	227.50	7.0	0.6	C30	32@15	22@20

为了检验整个输水道系统的设计、施工质量和各项预埋监测仪器的运行情况以及监测成果分析，了解输水系统所处部位围岩的工程地质及水文地质变化情况，以便尽早发现问题，及时处理，为今后电站正式运行发电提供可靠的质量保证，天荒坪工程在输水道系统建成后进行了充排水试验，充水速率控制在 10 m/h 以内，并且每上升 100 m 水位稳压 48 ~ 72 h。排水速度控制在 2 ~ 3 m/h，实测要求在试验前所有观测仪器要测读 1 次以读取初值，对于高压隧洞 3 个观测断面内的仪器每天需观测 1 次。

2 实测结果和分析

2.1 各测量仪器的实测结果

2.1.1 渗压计

渗压计用来测量隧洞钢筋混凝土衬砌外侧的水压力，通过测量该数据可以了解隧洞衬砌内外水压力差，从而了解隧洞衬砌所受的内水压力情况。渗压计在实测 1 ~ 3 号断面的埋设情况见图 2，实测数据见表 2。

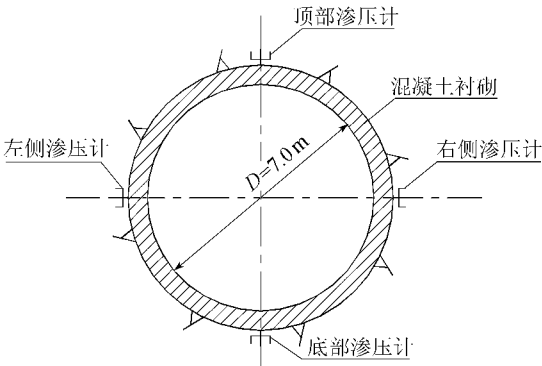


图 2 渗压计埋设示意图

2.1.2 测缝计

测缝计用来测量隧洞钢筋混凝土衬砌与围岩间缝隙的宽度，通过测量该数据，可以了解隧洞衬砌与围岩的变形协调情况。测缝计在实测 1 ~ 3 号断面的埋设情况见图 3，实测数据见表 3。

2.1.3 钢筋计

钢筋计用来测量隧洞钢筋混凝土衬砌内配筋的应力，通过测量该数据，可以了解隧洞衬砌钢筋的受力情况。钢筋计在实测 1 ~ 3 号断面的埋设情况见图 4，实测数据见表 4。

表 2 渗压计实测数据

试验阶段	隧洞斜井水位/m	实测断面Ⅰ(断面高程 502.29 m)				
		衬砌内水压力/MPa	衬砌外水压力实测值/MPa			
			顶部	右侧	底部	左侧
隧洞充水阶段	407.0	0.00	0.03	0.02	0.00	0.02
	570.0	0.68	0.75	0.75	0.72	0.74
	660.0	1.58	1.39	1.42	1.40	1.42
	712.0	2.10	1.79	1.84	1.83	1.84
	745.0	2.43	1.77	2.11	2.11	2.04
	788.0	2.86	2.47	2.52	2.52	2.52
	831.0	3.29	2.86	2.93	2.92	2.92
隧洞排水阶段	776.0	2.74	2.38	2.43	2.43	2.44
	720.0	2.18	1.95	2.00	1.99	2.00
	700.0	1.98	1.72	1.76	1.75	1.76
	657.0	1.55	1.40	1.46	1.43	1.42
	620.0	1.18	1.05	1.06	1.03	1.06
	553.0	0.51	0.53	0.51	0.46	0.52
	502.0	0.00	0.20	0.17	0.12	0.17
	464.0	0.00	0.20	0.17	0.12	0.17
	404.0	0.00	0.13	0.10	0.05	0.10
	341.0	0.00	0.13	0.10	0.06	0.10
	284.0	0.00	0.13	0.10	0.06	0.10
试验阶段	隧洞斜井水位/m	衬砌内水压力/MPa	实测断面Ⅱ(断面高程 242.50 m)			
			顶部	右侧	底部	左侧
			顶部	右侧	底部	左侧
隧洞充水阶段	407.0	1.65	1.24	1.23	1.18	1.20
	570.0	3.28	2.79	2.75	2.72	2.76
	660.0	4.18	3.50	3.45	3.42	3.48
	712.0	4.70	3.93	3.88	3.85	3.91
	745.0	5.03	4.21	4.16	4.13	4.19
	788.0	5.46	4.65	4.60	4.57	4.63
	831.0	5.89	5.07	5.02	4.99	5.06
隧洞排水阶段	776.0	5.34	4.54	4.50	4.47	4.54
	720.0	4.78	3.99	3.96	3.91	3.98
	700.0	4.58	3.81	3.77	3.73	3.80
	657.0	4.15	3.40	3.38	3.33	3.37
	620.0	3.78	3.00	2.98	2.92	2.99
	553.0	3.11	2.38	2.39	2.31	2.37
	502.0	2.60	2.00	2.03	1.94	1.99
	464.0	2.22	1.47	1.53	1.42	1.45
	404.0	1.62	0.99	1.06	0.94	0.95
	341.0	0.99	0.45	0.55	0.41	0.40
	284.0	0.42	0.00	-0.02	-0.03	-0.06
试验阶段	隧洞斜井水位/m	衬砌内水压力/MPa	实测断面Ⅲ(断面高程 227.50 m)			
			顶部	右侧	底部	左侧
			顶部	右侧	底部	左侧
隧洞充水阶段	407.0	1.80	1.79	1.83	1.79	1.85
	570.0	3.47	3.44	3.47	3.39	3.31
	660.0	4.33	4.19	4.20	4.13	4.21
	712.0	4.85	4.63	4.64	4.57	4.65
	745.0	5.18	*	4.91	4.85	4.94
	788.0	5.61	*	5.38	5.30	5.39
	831.0	6.04	*	5.80	5.72	5.81
隧洞排水阶段	776.0	5.49	*	5.28	5.19	5.28
	720.0	4.93	*	4.71	4.64	4.73
	700.0	4.73	*	4.53	4.44	4.53
	657.0	4.30	*	4.11	4.02	4.12
	620.0	3.93	*	3.71	3.61	3.71
	553.0	3.26	*	3.07	2.97	3.06
	502.0	2.75	*	2.68	2.58	2.66
	464.0	2.37	*	2.12	2.03	2.11
	404.0	1.77	*	2.08	1.52	1.58
	341.0	1.14	*	1.03	0.96	0.99
	284.0	0.57	*	0.50	0.48	0.48

注：“*”表示测量仪器失效，无法测量数据；“+”表示正压；“-”表示负压。

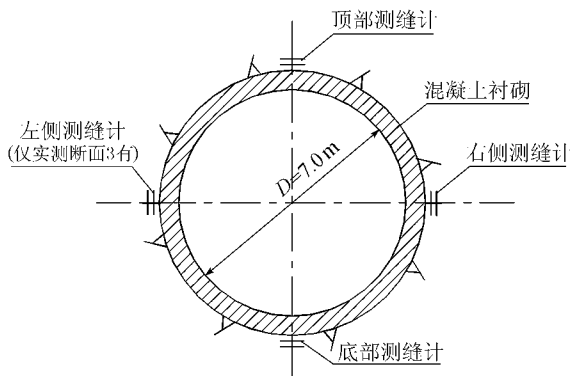


图3 测缝计埋设示意图

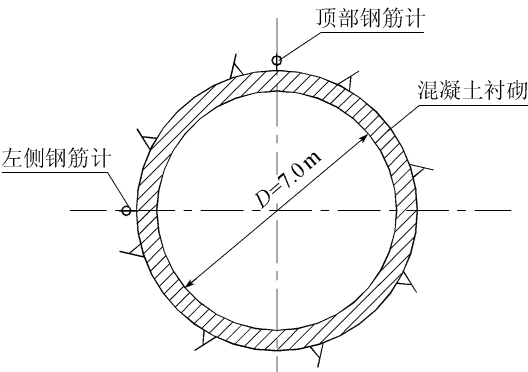


图4 钢筋计埋设示意图

2.2 对实测资料成果的认识

- 表2的渗压数据表明了隧洞钢筋混凝土衬砌外侧的水压力随内水压力的增加而增加,随内水压力的降低而降低,并且接近于内水压力。
- 由表3可以看出,实测的3个断面衬砌与围岩要脱开产生缝隙,而且从总体上讲,衬砌与围岩之间的缝隙宽度随内水压力的增大而增大,随内水压力的减小而减小。

c. 由表4可以看出,实测的3个断面衬砌内钢筋的拉应力都不大,有的还呈压应力状态,衬砌里的钢筋远没有发挥其强度,这表明衬砌内只需构造配筋即可。

2.3 分析讨论

- 由于实测数据都是在库水位为407.0m的情况下开始读取记录的,此时对于断面2和断面3而言,它们的内水压力分别为1.65MPa和1.80MPa,已经大于混凝土衬砌开裂的理论内水压力(1.425MPa),即开始读录数据时,混凝土衬砌已经开裂,使之不能有效地隔水,内水外渗连通,使得衬砌外侧水压力接近于衬砌内侧水压力,并且随内水压力的增加而增加,随内水压力的降低而降低。
- 从表2可以看出,对于断面1而言,虽然有几组数据是在内水压力小于理论衬砌开裂值的条件下实测的,但它们的衬砌外侧水压力依然接近于衬砌内侧水压力,并且随着内水压力的改变而改变。

表3 测缝计实测数据

试验阶段	隧洞斜井 水位/ m	实测断面Ⅰ(断面高程 502.29 m)			
		衬砌内水 压力/MPa	衬砌与围岩间缝宽实测值/mm		
			顶部	右侧	底部
隧洞充水阶段	407.0	0.00	0.05	0.00	-0.01
	570.0	0.68	0.14	-0.01	-0.01
	660.0	1.58	0.27	-0.01	-0.01
	712.0	2.10	0.39	0.00	0.00
	745.0	2.43	0.48	0.03	0.01
	788.0	2.86	0.66	0.06	0.01
	831.0	3.29	0.90	0.23	0.00
隧洞排水阶段	776.0	2.74	0.80	0.22	-0.01
	720.0	2.18	0.69	0.21	-0.01
	700.0	1.98	0.64	0.21	0.00
	657.0	1.55	0.63	0.21	0.00
	620.0	1.18	0.51	0.16	-0.01
	553.0	0.51	0.45	0.15	0.00
	502.0	0.00	0.42	0.14	-0.01
	464.0	0.00	0.43	0.16	0.00
	404.0	0.00	0.42	0.14	-0.02
	341.0	0.00	0.41	0.14	-0.02
	284.0	0.00	0.41	0.14	-0.02

试验阶段	隧洞斜井 水位/ m	衬砌内水 压力/MPa	实测断面Ⅱ(断面高程 242.50 m)			
			衬砌与围岩间缝宽实测值/mm			
			顶部	右侧	底部	
隧洞充水阶段	407.0	1.65	-0.02	*	0.33	
	570.0	3.28	0.00	*	0.02	
	660.0	4.18	0.02	*	0.07	
	712.0	4.70	0.00	*	-0.03	
	745.0	5.03	0.03	*	-0.02	
	788.0	5.46	0.02	*	-0.04	
	831.0	5.89	0.02	*	-0.05	
隧洞排水阶段	776.0	5.34	0.01	*	-0.04	
	720.0	4.78	0.04	*	-0.03	
	700.0	4.58	0.04	*	-0.01	
	657.0	4.15	0.01	*	-0.05	
	620.0	3.78	0.01	*	-0.06	
	553.0	3.11	0.00	*	-0.04	
	502.0	2.60	0.00	*	-0.05	
	464.0	2.22	0.04	*	-0.01	
	404.0	1.62	0.01	*	-0.03	
	341.0	0.99	0.03	*	-0.02	
	284.0	0.42	0.01	*	-0.01	

试验阶段	隧洞斜井 水位/ m	衬砌内水 压力/MPa	实测断面Ⅲ(断面高程 227.50 m)			
			衬砌与围岩间缝宽实测值/mm			
			顶部	右侧	底部	左侧
隧洞充水阶段	407.0	1.80	0.01	-0.01	-0.02	-0.01
	570.0	3.43	0.04	0.04	-0.01	0.01
	660.0	4.33	0.06	0.02	-0.02	0.00
	712.0	4.85	0.06	0.02	-0.01	0.00
	745.0	5.18	0.06	0.03	-0.02	0.00
	788.0	5.61	0.06	0.04	-0.02	0.02
	831.0	6.04	0.05	0.03	-0.01	0.02
隧洞排水阶段	776.0	5.49	0.06	0.02	-0.04	0.03
	720.0	4.93	0.05	0.02	-0.02	0.01
	700.0	4.73	0.02	0.00	-0.06	-0.02
	657.0	4.30	0.03	0.00	-0.04	-0.02
	620.0	3.93	0.07	0.03	-0.02	0.01
	553.0	3.26	0.05	0.03	-0.02	0.00
	502.0	2.75	0.05	0.03	0.00	0.01
	464.0	2.37	0.02	0.00	-0.04	-0.02
	404.0	1.77	0.03	0.03	0.00	0.01
	341.0	1.14	0.02	0.01	-0.04	-0.02
	284.0	0.57	0.04	0.04	0.00	0.01

注：*表示测量仪器失效,无法测量数据；+表示张开；-表示闭合。

表 4 钢筋计实测数据

试验阶段	隧洞斜井 水位/ m	实测断面Ⅰ(断面高程 502.29 m)			
		衬砌内水 压力/MPa	衬砌内配筋应力实测值/MPa		
			顶部环向	顶部轴向	左侧环向
隧洞 充水阶段	407.0	0.00	1.00	-2.00	1.00
	570.0	0.68	-1.00	1.00	-1.00
	660.0	1.58	-2.00	11.00	-3.00
	712.0	2.10	-2.00	25.00	-3.00
	745.0	2.43	-5.00	35.00	-4.00
	788.0	2.86	-5.00	35.00	-4.00
	831.0	3.29	-9.00	78.00	-4.00
隧洞 排水阶段	776.0	2.74	-8.00	64.00	-2.00
	720.0	2.18	-7.00	46.00	-1.00
	700.0	1.98	-7.00	37.00	-1.00
	657.0	1.55	-8.00	35.00	-2.00
	620.0	1.18	-7.00	10.00	-1.00
	553.0	0.51	-7.00	0.00	-1.00
	502.0	0.00	-8.00	-8.00	-1.00
	464.0	0.00	-8.00	-9.00	-1.00
	404.0	0.00	-7.00	-9.00	0.00
	341.0	0.00	-7.00	-9.00	0.00
	284.0	0.00	-6.00	-10.00	0.00
试验阶段	隧洞斜井 水位/ m	实测断面Ⅱ(断面高程 242.50 m)			
		衬砌内水 压力/MPa	衬砌内配筋应力实测值/MPa		
			顶部环向	顶部轴向	左侧轴向
隧洞 充水阶段	407.0	1.65	13.00	-1.00	-8.00
	570.0	3.28	13.00	-1.00	-13.00
	660.0	4.18	12.00	-2.00	-16.00
	712.0	4.70	9.00	-4.00	-20.00
	745.0	5.03	10.00	-2.00	-22.00
	788.0	5.46	7.00	-4.00	-27.00
	831.0	5.89	4.00	-3.00	-27.00
隧洞 排水阶段	776.0	5.34	7.00	-2.00	-20.00
	720.0	4.78	9.00	0.00	-18.00
	700.0	4.58	10.00	1.00	-16.00
	657.0	4.15	9.00	-1.00	-17.00
	620.0	3.78	9.00	-1.00	-16.00
	553.0	3.11	9.00	0.00	-14.00
	502.0	2.60	8.00	-1.00	-14.00
	464.0	2.22	10.00	1.00	-12.00
	404.0	1.62	8.00	-1.00	-13.00
	341.0	0.99	9.00	1.00	-11.00
	284.0	0.42	5.00	-2.00	-12.00
试验阶段	隧洞斜井 水位/ m	实测断面Ⅲ(断面高程 227.50 m)			
		衬砌内水 压力/MPa	衬砌内配筋应力实测值/MPa		
			顶部环向	顶部轴向	左侧轴向
隧洞 充水阶段	407.0	1.80	8.00	1.00	77.00
	570.0	3.43	8.00	1.00	148.00
	660.0	4.33	1.00	1.00	184.00
	712.0	4.85	2.00	1.00	236.00
	745.0	5.18	-1.00	4.00	260.00
	788.0	5.61	1.00	3.00	228.00
	831.0	6.04	0.00	3.00	172.00
隧洞 排水阶段	776.0	5.49	0.00	2.00	150.00
	720.0	4.93	4.00	2.00	136.00
	700.0	4.73	2.00	1.00	128.00
	657.0	4.30	4.00	0.00	123.00
	620.0	3.93	7.00	3.00	118.00
	553.0	3.26	7.00	1.00	114.00
	502.0	2.75	7.00	-2.00	101.00
	464.0	2.37	5.00	-3.00	92.00
	404.0	1.77	7.00	-3.00	85.00
	341.0	1.14	6.00	-5.00	74.00
	284.0	0.57	8.00	-2.00	67.00

注：+ '表示受拉；- '表示受压。

究其原因 ,可能是因为隧洞混凝土衬砌浇筑施工困难 ,浇筑完成后由于混凝土干缩、水化热和围岩开挖面粗糙不平等原因使得衬砌本身以及衬砌与围岩之间不可避免地存在缝隙 ;另外近层松动圈围岩虽经固结灌浆但没有完全密实 ,造成断面 1 衬砌内水沿衬砌本身缝隙渗到衬砌外层 ,或是断面 1 以下隧洞的衬砌段开裂 ,内水外渗沿衬砌与围岩缝隙以及围岩缝隙连通过断面 1。

c. 由表 2 中的数据还可以看出衬砌内外水之间还是存在着一定的水压差 ,这说明衬砌虽开裂但裂缝的宽度是被限制住的 ,没有完全连通 ,衬砌本身还承受一定的内水压力。

d. 从表 3 可以看出衬砌与围岩之间的缝隙宽度随内水压力的增加而增加 ,随内水压力的减少而减少 ,这是因为内水外渗后 ,内水压力直接作用在围岩上 ,围岩的径向变位大于衬砌的径向变位所致。文献 [1] 指出 :当衬砌与围岩的渗透系数比达到某一特定数值后 ,在内水压的渗透体积力作用下围岩将与衬砌脱开。

e. 表 4 中衬砌内钢筋的拉应力不大 ,是因为内水外渗后内水压力直接作用于围岩 ,使围岩承担了绝大部分的内水压力 ,这与渗透体积力法计算结果 [1-2] 一致。

f. 从表 2、表 3、表 4 中实测断面 3 的实测数据可以看出 ,隧洞顶部与左侧的渗压接近相等且接近内水压力 ,但顶部的衬砌与围岩缝隙比左侧的宽 ,而且顶部的环向钢筋应力比左侧的低得多。分析其原因 ,可能是 ①在高内水压力作用下 ,隧洞沿洞周产生裂缝 ,其中顶部开裂缝隙最宽 [3] ,内水外渗性好 ,直接作用于围岩的内水压力多 ,并且渗压水沿围岩与衬砌之间的初始缝隙传至隧洞全周 ,这是隧洞顶部与左侧的渗压值大致相等且接近内水压力的原因 ;②由于隧洞左侧开裂缝隙比顶部的开裂缝隙小 ,内水外渗性差 ,直接作用于围岩的内水压力相对较小 ,作用于衬砌的内水压力相对较大 ,使得左侧衬砌受力大 ,环向钢筋应力也大 ,衬砌径向变形也相对较大 ,衬砌与围岩之间的相对径向变形就小 ,所以衬砌与围岩缝隙比顶部的小。因此 ,对于同一隧洞断面而言 ,衬砌开裂后 ,衬砌和围岩受力也是不均匀的 ,顶部的围岩和侧部衬砌受力相对较大。

g. 从第 f 点分析可知 ,衬砌外接近内水压力的渗压并非都是衬砌开裂后直接传递的 ,应该也存在沿衬砌与围岩间缝隙以及围岩缝隙传递的部分。这也说明了第 b 点中分析的合理性。

h. 表 4 中实测断面 1 的实测数据显示轴向钢筋产生较大的拉应力 ,环向钢筋产生较小压应力。

分析其原因,可能是因为该断面位于引水斜井中部,由于结构布置的特殊性,内水压力沿斜井深度增加而增加,而内水压力又以渗透体积力的形式作用于衬砌,则必然会沿衬砌的轴向产生拉应力,此拉应力大部分由轴向钢筋承担。同时又因为衬砌内外水压大致平衡,而轴向钢筋是在外侧与环向钢筋正交绑扎焊接,轴向钢筋拉应力产生的拉应变压迫环向钢筋,使环向钢筋产生了小压应力。

i. 从第 h 点还可以推断出,斜井部位存在轴向钢筋受拉现象。因为混凝土衬砌与围岩之间的初始缝隙大,在内水压力作用下,衬砌向围岩传力少,衬砌容易环向和轴向受拉开裂且裂缝较大,内水外渗沿初始缝隙传递渗压,使得衬砌内外水压大致平衡,环向钢筋受力变小。如果斜井部位混凝土浇筑密实性好,衬砌与围岩之间的初始缝隙小,衬砌与围岩联合作用效果好,衬砌不易开裂,衬砌环向变形受力就相对较大,则环向钢筋也会产生拉应力。

j. 表 3 中 3 个实测断面底部的衬砌与围岩间缝隙最小,而且大多呈闭合状态,这说明由于隧洞底部混凝土依靠自重最易浇筑密实,初始缝隙很小,在内水压力作用下,衬砌与围岩联合作用效果好,衬砌不易开裂或裂缝微小,从而衬砌变形受力相对大,衬砌与围岩变形协调性相对好,使衬砌与围岩趋于紧贴。

3 结 论

a. 钢筋混凝土衬砌在高内水压力作用下不能有效隔水,内水压力以渗透体积力的形式作用于衬砌和围岩。

b. 水工隧洞混凝土衬砌开裂后,当内水压力以渗透体积力的方式作用在混凝土衬砌与围岩中时,由于结构所受渗透压力与其渗透系数成反比,因此在围岩渗透性较小、衬砌全面开裂完全透水平压的条件下,围岩承受绝大部分渗透压力而变形大,衬砌与围岩之间变形不一致,存在相互分离脱开的趋势。

c. 在高内水压力(大于 100 m 水头)作用下,水

工压力隧洞若采用混凝土衬砌,从承载与防渗的角度出发,围岩是承载主体,衬砌的作用主要是保护围岩表面,避免水流长期冲刷使围岩表层应力状态发生恶化掉块,减少过流糙率、降低水头损失;为隧洞高压固结灌浆提供表面封闭层。因此,在高内水压力作用下,混凝土衬砌无法成为承载内水压力的结构,承载主体是围岩,要加强对围岩的固结灌浆处理,提高围岩承担内水压力的能力,衬砌只需构造配筋即可。

d. 水工隧洞充水运行,衬砌和围岩间初始缝隙是影响二者承载能力的关键。初始缝隙大,衬砌容易开裂,衬砌受力反而变小,内水压力主要由围岩承担,使之受力变形相对大;初始缝隙小,衬砌与围岩联合作用效果相对较好,衬砌不易开裂或裂缝微小,内水压力虽仍主要由围岩承担,但衬砌受力相对较大。为了尽可能发挥隧洞衬砌的承载防渗能力,特别是在低内水压力隧洞中,应减小、减少衬砌开裂缝隙,做好衬砌的浇筑施工和回填灌浆,尽可能减少衬砌和围岩间的初始缝隙。

e. 对于水平段隧洞,应该加强围岩顶部的固结灌浆和回填灌浆。对于斜井或竖井部位的隧洞段,由于内水压力随深度增加呈线性增加,使隧洞衬砌产生较大的纵向应力,纵向钢筋与环向钢筋直径应相互匹配,通过加强纵向钢筋来达到限制竖井或斜井环向裂缝宽度的目的,不能按常规平面应变概念考虑内水压力仅引起环向应力带来的纵向裂缝宽度问题。

参考文献:

[1] 曹克明,刘世明.高内水压力作用下隧洞钢筋混凝土设计理论探讨[J].华东水电技术,1991,40(3):1-13.
[2] 杨林德,丁文其.渗水高压引水隧洞衬砌的设计研究[J].岩土力学与工程学报,1997,16(2):112-117.
[3] 李青麒,何其诚.压力隧洞衬砌计算方法[J].水力发电学报,1998,6(3):24-33.

(收稿日期 2008-05-08 编辑:方宇彤)

(上接第 18 页)

②权重缺水率法使用权重作为杠杆,很好地对需水单元进行了区分,体现了用水的公平性,但各需水单元权重的获得将是一个较为复杂的问题。

参考文献:

[1] UNCED. Earth Summit '92[M]. London: The Regene Press Corporation, 1992: 157-172.
[2] 唐德善.缺水地区水资源优化分配模型研究[J].河海大学学报:自然科学版,1992,20(2):35-43.

[3] 缪.深圳市供水水量分配方法的初步研究[J].人民珠江,2003(4):40-42.
[4] 王道席,王煜.黄河下游水资源空间配置模型研究[J].人民黄河,2001,23(12):19-21.
[5] 曹小武.城市供水水量分配的“水量分摊系数法”[J].中国农村水利水电,2006(3):64-64.
[6] 王顺久,张欣莉,倪长键,等.水资源优化配置原理及方法[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
[7] 许拯民.马斯京根法应用研讨[J].华北水利水电学院学报,2005,26(4):1-3.

(收稿日期 2008-11-06 编辑:高建群)