

47-52

第20卷 第3期
1992年8月西北农业大学学报
Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalisVol.20 No.3
Aug. 1992

U型薄壳渡槽短壳槽身应力的 三维模型光弹性试验研究

李良晨

(西北农业大学水利与建筑工程系, 陕西杨陵·712100)

摘要 通过三维模型光弹性试验, 研究了短壳槽身的应力状态。得到了分别在自重、半槽水、设计水、满槽水荷载及在自重与上述几种荷载共同作用下槽壳、端肋、横杆上的表面应力以及在设计水荷载下端肋的主拉应力轨迹线和在设计水与自重共同作用下槽壳表面的主拉应力等值线图详细结果。

关键词 短壳槽, 光弹性力学, 应力弯矩, 边界条件, 薄壳结构, 渡槽

中图分类号 Q348.1, TV321, TV672.3

U型薄壳渡槽由于水力条件好、纵向刚度大、横向内力小以及施工简便等优点, 近年来得到广泛应用。但对边界条件复杂, 且跨宽比小于1的短壳槽, 用解析方法求解槽身应力将遇到很大困难, 而且未见到对短壳槽身应力的试验研究报告。作者受河南省水利厅设计院委托, 针对河南陆浑灌区许营渡槽, 通过三维模型光弹性试验, 研究短壳槽身在各种不同荷载作用下的应力分布规律, 并与电算成果比较, 验证了按有限单元法计算理论对短壳槽的适用性^[1]。

1 试验对象及方法

1.1 U型槽身的形式、尺寸及各种试验水深

本试验对象为许营渡槽拱上部分的U型槽身。每段槽身总长527 cm, 两端简支, 截面形式如图1。具体尺寸为: $R_{内}=250$ cm, $R_{外}=266$ cm, 壳厚 $t=16$ cm, 垂直段 $F=100$ cm; 侧梁尺寸: $a=24$ cm, $c=25$ cm, $d=24$ cm; 横杆截面尺寸: 宽 $b=20$ cm, 高 $\delta=20$ cm, 横杆间距169 cm。端肋在其本身平面内尺寸见图1。

试验水深为340 cm, 设计水深322 cm, 半槽水深164.5 cm。

1.2 试验方法

1.2.1 光弹性模型 模型采用精密铸造法^[2], 与原形几何相似。考虑到足够的测试精度, 采用几何比例系数为20和32两种模型。其中自重加载采用两种模型各作一组试验; 水荷载采用第2种模型分别在满槽水, 设计水, 半槽水情况下各作一组试验。

1.2.2 模型加载 各种荷载都是在陕西机械学院水利系的大型离心机内施加的。其中液体采用甘油。装甘油的胶囊按模型尺寸精心设计后由西安乳胶厂制造。对于第2种模型采用模化比 $K=20$ 进行自重加载, 对于第1种模型采用模化比 $K=12.5$ 进行自重加载。由此加载结果可使测量时得到自重情况下模型的光弹性测试条纹(可换算为应

力)。对于第 2 种模型分别施加自重+满槽水荷载, 自重+设计水荷载, 采用模化比均为 $K=18.1$; 对于第 2 种模型施加自重+半槽水荷载, 模化比 $K=20$ 。上述共加载 5 个光弹模型。卸载后所有信息已“冻结”在模型中。

1.2.3 边界条件 为了使模型不产生另外的约束作用, 专门模仿邻跨作了两个延伸段, 在加载安装时使延伸段和模型间保持 1.5~2 mm 的空隙, 空隙中用薄层乳胶隔开, 装液体的胶囊长度布满模型及两端延伸段。支座形式采用平板支座。

1.2.4 测点及测读方法 根据要求, 在槽壳上共取了 4 个截面, 每个截面上按每 15° 取一对(内外表面各 1)测点, 垂直加高段取两对测点(计算中点与计算顶点)。横杆测中部 4 个表面(上表面、下表面、跨外、跨内表面), 测点分布见图 2。在加载后的模型上按所测截面位置取 4 个横向切片(5 组荷载共取 20 个切片), 切片厚度 3~5 mm, 对高应力区采用逐次磨薄, 多次测试以保证可靠性。

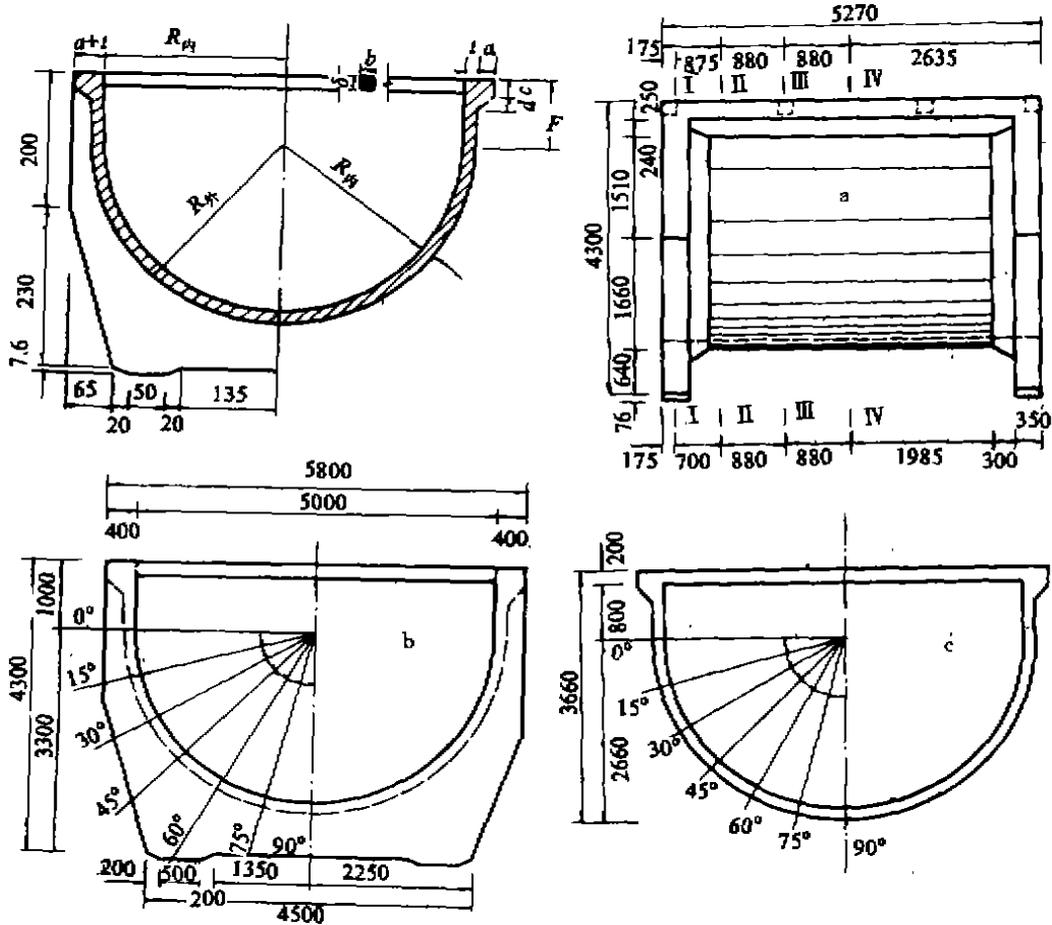


图 1 U 型槽身截面(左上图)

图 2 U 型槽身应力光弹性模型试验测点布置 单位: mm

a. 截面位置; b. I-I 截面测点; c. II-II、III-III、IV-IV 截面测点

测读用主机为国产 409-II 型光测弹性仪, 主要附件用航天部 602 所产光弹性全场斜射装置和清华大学力学系产螺旋鼓轮式石英补偿器。测读方法采用一次正射, 二次斜

射。由于采用了精密的全视场斜射装置并用石英补偿器测读小数级条纹,从而提高了试验精度和准确性。

1.2.5 应力计算公式

模型内外表面应力:

$$\text{横向正应力 } \sigma_{\theta} = n_2 \cdot \frac{f}{d} + q$$

$$\text{纵向正应力 } \sigma_z = \frac{f}{d} \cdot \left[\frac{(n_1 + n_3) \cos \varphi - 2n_2 \cos^2 \varphi}{1 - \cos 2\varphi} \right] + q$$

$$\text{相应的剪应力 } \tau = \frac{f}{d} \left[\frac{n_3 - n_1}{4 \sin \varphi} \right]$$

其中 q 为模型表面法向分布荷载,对于水荷载, q 取负值. $f=0.320 \text{ kg/cm} \cdot \text{条}$, 是实测模型材料的条纹值. n_2 是测点正射条纹级数, n_1, n_3 为两次斜射的条纹级数. d 为切片在测点处厚度. φ 为斜射角度. $q = -\gamma \cdot h \cdot k$. γ 是甘油比重, h 是计算点以上甘油深度, k 是离心机模化比, 等于 $\omega^2 R / g$ (离心机的向心加速度与重力加速度之比).

$$\text{模型横杆轴力计算: } N_1 = \frac{\sigma_{\text{上}} + \sigma_{\text{下}}}{2} \cdot F; N_2 = \frac{\sigma_{\text{外}} + \sigma_{\text{内}}}{2} \cdot F; N = \frac{N_1 + N_2}{2}$$

其中 F 为横杆的横截面积, $\sigma_{\text{上}}, \sigma_{\text{下}}, \sigma_{\text{外}}, \sigma_{\text{内}}$ 分别为横杆中部上表面、下表面、跨外侧面、跨内侧面的实测应力. N 为横杆轴力.

$$\text{模型应力换算为原型应力}^{(2)}: \sigma_H = \left(K_e \cdot K_l \cdot \frac{1}{K} \right) \cdot \sigma_M$$

式中 σ_H, σ_M 分别是原型应力与模型应力, K_e 是原型与模型的几何比例系数, K_l 对于自重的原型材料与模型材料的容重之比, 对于水荷载是水与甘油的容重之比.

2 结果与分析

2.1 边界条件对壳槽应力分布的影响

试验的 U 型薄壳渡槽, 其槽身跨宽比为 $527 / 580 = 0.908$, 属于短壳槽. 边界条件对壳槽应力分布的影响是显著的. 表 1~4 列出了试验的一部分主要结果.

由表 1、表 2 可以看出, 在设计水作用下, 因受支座、端拉杆及水荷的影响, 端肋底部内压外拉, 侧面变为内拉外压, 上部又变为内压外拉. 靠近端肋附近的 II-II 截面受端肋变形的影响比较明显, 主要表现在: ① II-II 截面槽底内外侧的横向应力虽然全为拉应力, 但外侧拉应力比内侧拉应力大, 横向弯矩与 I-I 截面一样仍为负值; ② II-II 截面槽底内侧拉应力比跨中截面减小很多; ③ II-II 截面 $45^\circ \sim 60^\circ$ 左右内侧横向拉应力出现极大值, 外侧拉应力出现极小值, 同时内侧纵向也出现了微小的拉应力.

另外, 在 II-II 截面, 槽底纵向弯矩比同点横向弯矩大得多, 而且也比槽壳其它截面任何点的横向弯矩大, 因此对短壳槽, 不适用半有矩理论(即忽略纵向弯矩、保留横向弯矩的理论). 满槽水作用下的应力规律与设计水时相同.

表 1 设计水作用下各截面应力

			10 ⁵ Pa									
应力	截面		内 侧				外 侧					
			90°	60°	30°	0°	90°	60°	30°	0°		
纵向应力	I	实测	0.42	1.12	0.97	0.54						
		电算	-1.18	-0.21	-1.03	-2.56	2.71	2.48	1.87	0.68		
	II	实测	2.09	-1.36	-1.92	-2.38	3.41	3.40	2.76	1.32		
		电算	1.22	1.81	-0.84	-1.81	1.91	1.99	1.72	-0.37		
	III	实测	1.94	2.01	1.01	-1.62	1.71	2.09	1.31	-0.25		
		电算	1.48	1.62	0.90	-1.34	1.48	1.76	1.27	-0.49		
	横向应力	I	实测	-4.13	2.48	-1.75	-4.11	0.42	-3.92	-7.11	3.78	
			电算	-5.29	0.57	-1.26	-6.37	0.20	-2.87	-9.73	2.61	
II		实测	2.01	4.15	1.45	-2.15	4.17	3.09	2.29	1.72		
		电算	3.20	3.75	2.83	-2.28	5.42	3.91	2.07	1.96		
III		实测	4.63	3.45	7.66	-1.22	5.82	5.17	3.61	1.48		
		电算	5.28	4.89	2.58	-1.25	4.81	3.80	2.66	3.08		
IV		实测	4.89	4.85	2.94	-1.23	5.11	4.20	3.06	3.43		
		电算										

注：应力单位 10⁵ Pa 剪应力未列。拉为正，压为负，下同。

表 2 自重+设计水作用下各截面应力

			10 ⁵ Pa												
应力	截面		内 侧				外 侧								
			90°	75°	60°	45°	30°	0°	90°	75°	60°	45°	30°	0°	
纵向应力	I		-0.13	0.53	1.04	2.65	1.64	-0.11							
	II		-1.59	-0.83	0.41	0.57	-1.91	-3.77	4.10	4.08	4.30	3.95	3.32	1.10	
	III		2.04	2.07	2.78	1.74	-0.17	-2.29	2.70	3.36	3.25	3.60	2.68	-0.485	
	IV		2.68	2.98	3.14	2.23	1.75	-2.61	2.56	3.21	3.49	2.77	2.33	-0.78	
横向应力	I		-5.56	-1.61	3.00	3.19	-1.20	-7.11	1.09	-2.11	-4.46	-6.99	-11.06	6.05	
	II		2.62	4.05	5.95	4.58	2.50	-3.66	5.60	4.22	3.26	1.99	3.16	3.57	
	III		5.63	5.38	5.20	3.14	2.25	-2.59	6.92	6.82	6.08	6.10	5.07	3.66	
	IV		6.25	5.95	6.00	4.86	3.66	-2.84	5.89	5.20	4.72	4.49	4.07	5.21	

在半槽水作用下，(由表 3 可以看出)端肋底部内压外拉而且数值比满槽水或设计水时大，这是由于支座顶托以及水荷主要是竖向(侧向很小)压力引起的。同样，II-II 截面的应力分布受端肋变形的影响比较明显。

表 3 自重+半槽水作用下各截面应力

			10 ⁵ Pa												
应力	截面		内 侧				外 侧								
			90°	75°	60°	45°	30°	0°	90°	75°	60°	45°	30°	0°	
纵向应力	I		-0.33	0.02	0.87	1.27	0.97	-0.87							
	II		-2.23	-1.39	-0.59	0.48	-0.57	-1.09	3.94	3.83	2.87	2.09	0.86	0.11	
	III		0.63	0.34	0.27	-0.15	-0.56	-1.46	2.15	2.84	2.08	0.50	-0.14	-1.36	
	IV		2.25	2.01	1.88	1.40	0.75	-1.35	2.89	3.22	2.83	1.04	-0.81	-1.67	
横向应力	I		-7.01	-4.01	1.05	0.73	1.10	-1.15	5.32		-3.42	-5.65	-6.53	-0.43	
	II		-1.38	0.54	2.54	2.37	2.27	-0.88	4.37	3.20	2.34	1.76	1.54	1.46	
	III		0.69	0.61	1.56	2.46	3.05	-1.53	4.94	4.37	3.45	2.25	0.82	1.25	
	IV		1.67	2.02	2.40	3.83	4.08	-0.38	5.79	5.88	4.19	2.85	0.77	1.96	

2.2 试验结果与按有限单元法电算结果比较

对本试验对象,西北农业大学、华南工学院都按有限单元法程序进行了电算。

总的看来,电算成果在壳槽应力分布的规律上,甚至相当一部分数值上(主要是跨中区域)都与光弹试验符合较好。但有些地方在数值上,个别地方在分布规律上与光弹试验有偏差,具体表现在:由表4知,无论对端横杆还是中间横杆,在满槽水时,本试验实测应力组成的弯矩都是上拉下压(即横杆上弯),但上述两家电算值都相反,为上压下拉(即横杆下弯)。其原因是电算中没有考虑在满槽水时横杆所受的浮力,这个力对横杆应力影响较大,对端肋和壳槽的应力分布也有影响。另外,在I-I截面,II-II截面,电算值与实验值在应力分布规律上相符,但在数值上有一些差异,其原因主要是受到模拟边界条件的影响。

表4 在各种荷载下横杆的应力

荷载	端横杆				中间横杆				
	σ_{\perp}	σ_{F}	$\sigma_{\text{外}}$	$\sigma_{\text{内}}$	σ_{\perp}	σ_{F}	$\sigma_{\text{外}}$	$\sigma_{\text{内}}$	
应力	满槽水	2.54	-0.88	-0.017	0.88	2.29	2.13	2.35	
	设计水	-0.84	0.42	-0.41	0.35	0.28	1.31	0.69	
	半槽水	-0.317	-1.65	-0.98	-1.35	-0.71	-1.49	-1.09	
轴力	满槽水	2504.0				10246.0			
	设计水	-489.0				3937.0			
	半槽水	-4292.0				-4434.0			

注:应力单位 10^5 Pa ,轴力单位 N,拉为正,压为负。

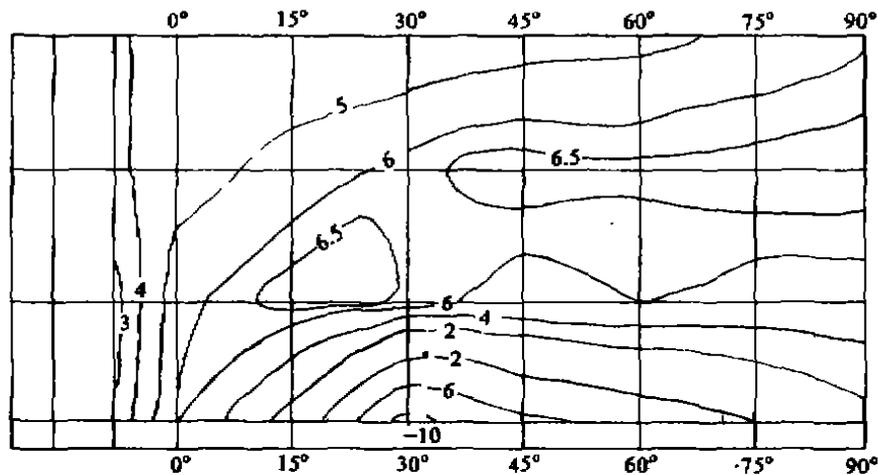


图3 设计水+自重作用下槽壳外侧主拉应力等值线 单位: 10^5 Pa

3 结论

(1) 光弹性试验与按有限单元法电算成果对比(表1),应力分布规律吻合,数值较为接近,其中设计控制截面(跨中截面)数值更为接近。以上说明有限单元法电算程序⁽¹⁾可供

设计时使用。同时建议按有限单元法电算时对边界条件的模拟进一步加以改善。

(2) 在满槽水与设计水情况下, 壳槽 1/4 跨截面(Ⅲ-Ⅲ截面)外侧大部分测点纵横向应力均大于跨中截面(Ⅳ-Ⅳ)对应点的应力值。在满槽水、设计水情况下, 1/4 跨截面外侧最大主拉应力大于跨中截面外侧主拉应力。由主拉应力等值线图(图 3)可以看出, 在壳槽外侧, 最大主拉应力区在 1/6 跨~1/4 跨之间, 建议在设计时注意。

(3) 在半槽水与自重共同作用下(表 3), I-I 截面槽底部分横向拉(外侧)压(内侧)应力都比设计水与自重共同作用时大, 建议设计时予以考虑。

(4) 在满槽水和设计水作用下, 端肋外侧斜边中点处, 主压应力很大, 所以在拟定端肋尺寸时, 45° 左右区域的厚度不能太薄。

(5) 本试验采用的支座形式接近实际情况中的钢板支座, 与电算中采用铰支处理得出的结果相比, 说明无论上述哪一种支座, 对槽壳跨中部分的影响都很小, 即使在端肋附近, 除支座附近的局部区域外, 上述几种支座形式的影响也不大。

参 考 文 献

- 1 潘光明, 陈国杰, 梁河治等. 用有限单元法计算薄壳渡槽. 全国 U 型薄壳渡槽会议文件之二, 1989, 1~9, 16~43
- 2 大连工学院数理力学系光测组. 光弹性实验. 北京: 国防工业出版社, 1978, 154~167, 343~352

Testing Study of Stress in Short U-shaped Shell Flume Using 3-Dimensional Model Photoelasticity

Li Liangchen

(Water Conservancy and Hydraulic Construction Engineering Department of Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract Stress states in the short U-shaped shell flume were studied using 3-dimensional photoelastic model tests. Detailed data of surface stresses in the shell, end ribs and over-arms loaded with deadweight, flume with half water, flume with design water and flume with full water as well as their combinations were obtained. The principal stress track curve in the end ribs under design water load and the isoline maps of principal on surface of the shell under both actions of design water load and the deadload were also gained.

Key words short shell flume, photoelastic mechanics, stress bending moment, boundary condition, thin shell structure, aqueduct