

复杂地基上筏闸闸室实验应力分析

赵华松 李学珍 晏振贵

(水利电力部成都勘测设计院科研所)

水电工程设计中,常遇到在复杂地基上修筑水工建筑物的问题,铜街子水电站筏闸工程即是实例之一。该筏闸闸室全部位于第五层玄武岩上,中间闸首前后段有破碎带斜切通过,其物理力学性能较差,闸室底板两侧嵌固于岩石基础上,而底板与基础弹性模量相差悬殊,其比值达14倍以上,且因地形、地质构造之故,上闸室左侧底板约有50m长不能达到嵌固要求,地质和受力条件均不利。本文简要介绍这种复杂地基上筏闸结构实验研究的一些成果。

一、概 述

该筏闸为两级,系坞式整体钢筋混凝土结构,其上下闸室均为105m长,闸室内高28m、宽14m、底板厚6.5m,在两侧边墙各设一个 $2.5 \times 3.5\text{m}$ 的输水主廊道(见图1)。闸室内最大水深26m;外侧最大水深及回填土深,在正常情况时为16.5m(从底板基础算起),检修情况时为23.25m;木筏对闸室的撞击力 $P=49.03\text{ kN}$,作用点位于最大水深以上1m;闸室混凝土(250[#])容重 $\gamma=2.45\text{ t/m}^3$,弹性模量 $E=27.93\text{ GPa}$;基岩(玄武岩)变形模量 $E_0=1.96\text{ GPa}$;两侧回填土浮容重 $\gamma_B=1.1\text{ t/m}^3$,内摩擦角 $\varphi=30^\circ$,回填土与墙背摩擦角 $\varphi_0=15^\circ$ 。

实验模型与原型结构完全几何相似。比例为1:250,根据原型各部位弹模比例要求,采用环氧树脂、失水苹果酸酐和304聚酯不同配比,分别浇制出闸室和基岩材料,加工成

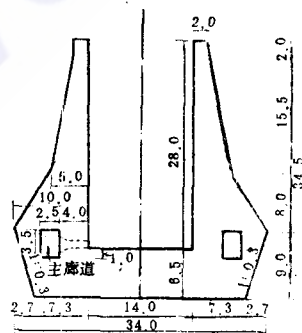


图1 闸室标准横剖面

所需形状尺寸,再将两者粘结组合成整体光弹模型,依上法制作的模型光学和力学性能符合要求,效果良好。

结构自重以离心力场模拟重力场,将模型安装在大型离心机上完成加载实验;主廊道内水压力采用特制的乳胶囊充气模拟加载,由一套自控系统保持气压稳定不变;闸室内水压力及其它荷载通过垫层、垫块引线联接滑轮砝码的组合机构施加于模型上,为保证准确可靠,设有滑轮装置的导向板和传力架,如图2所示。

模型等色线、等倾线观测分析工作由409-Ⅰ型光弹仪完成。等色线示例于图3。

*参加试验工作尚有朱琛、沈胡。

按前述方法试验得到不同荷载的应力分布, 据此求得不同组合荷载作用下的合成应力图。

二、实验成果

根据设计要求, 正常运行情况之一, 考虑底板两侧嵌固及单侧嵌固(另侧自由)两种工况; 运行情况之二及检修情况, 则仅考虑两侧嵌固一种工况, 现分述如后:

(一) 闸室正常运行情况之一, 应力状态

正常运行情况之一(室内为最大水深, 外侧无回填土、无水), 闸室承受自重、水重、内侧水压、主廊道内水压及撞击力作用。上述荷载组合下其应力如图4(a)~(b)(两侧嵌固)、5(a)~(b)(单侧嵌固)所示。

1. 由应力分布图4(a)~(b)知, 底板与通常弹性基础梁受力状态相似, 底板顶部全部受拉, 底部受压, 中和轴位于底边以上1/3板厚处, 跨中顶面与底面应力分别为 $+2.15\text{MPa}$ ($+21.9\text{kg/cm}^2$)、 -0.75MPa (-7.6kg/cm^2), 在底板与内边墙相连的角缘处拉应力上升为 $+3.49\text{MPa}$ ($+35.6\text{kg/cm}^2$), 显示出明显的应力集中现象。

边墙应力状态与偏心受压构件相当。外侧受压, 距底板基础17.0m处压应力最大, 其值为 -1.56MPa (-15.9kg/cm^2); 内侧受拉, 中、上部拉应力甚小, 愈向下增长愈快, 在距底板1m处升至 $+1.37\text{MPa}$ ($+14.0\text{kg/cm}^2$)。这不仅是

因下部水压增大, 更主要的是位于底部的大孔洞(主廊道)削弱了该处的抗弯刚度所致。

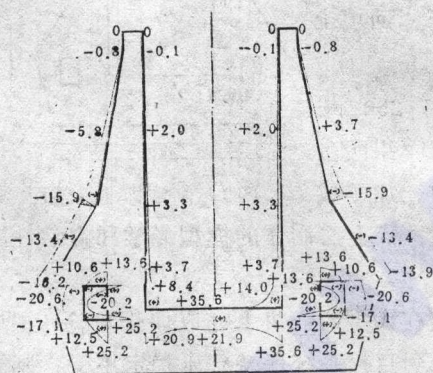


图4(a) 正常运行情况之一合成边缘(切向)应力图(两侧嵌固)

2. 由图5(a)~(b)知, 单侧嵌固时闸室应力形态与两侧嵌固基本相似, 底板跨中的上、下边缘拉、压应力分别为 $+2.37\text{MPa}$ ($+24.2\text{kg/cm}^2$)、 -0.48MPa (-4.9kg/cm^2), 中和轴位于底边以上1/4板厚附近, 自由端底板应力比嵌固端稍大, 与内边墙连接处角缘应力集中比对应点为大, 其值为 $+4.21\text{MPa}$ ($+42.9\text{kg/cm}^2$)。

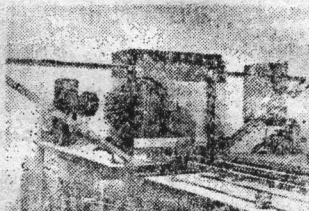


图2 加载试验装置

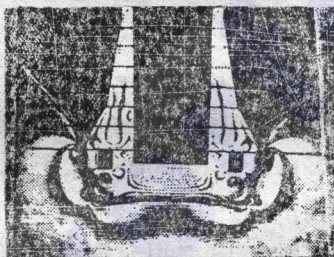


图3 内侧水压试验等色线(两侧嵌固)

主廊道孔口顶、底部大部份受拉, 底部跨中拉应力为 $+1.23\text{MPa}$ ($+12.5\text{kg/cm}^2$) 在靠近闸室下角隅拉应力增大为 $+2.47\text{MPa}$ ($+25.2\text{kg/cm}^2$), 此处出现应力集中与转角型式有关。底部拉力区内伸长度约为1倍孔口高度, 顶部拉应力值和拉力区长度均较底部为小, 孔口两侧壁基本受压, 最大压应力为 -2.02MPa (-20.6kg/cm^2)。

由上可见, 闸室两端应力分布有着十分良好的对称性和规律性, 这表明闸室应力状态是正常的, 显现了受力状态的真实性的。

自由端边墙,内、外侧拉、压应力与嵌固端对应值十分接近,内边墙距底板1m处拉应力为+2.17MPa(+22.1kg/cm²),外侧最大压应力为-3.03MPa(-30.9kg/cm²),点位距底板基础2.5m处。

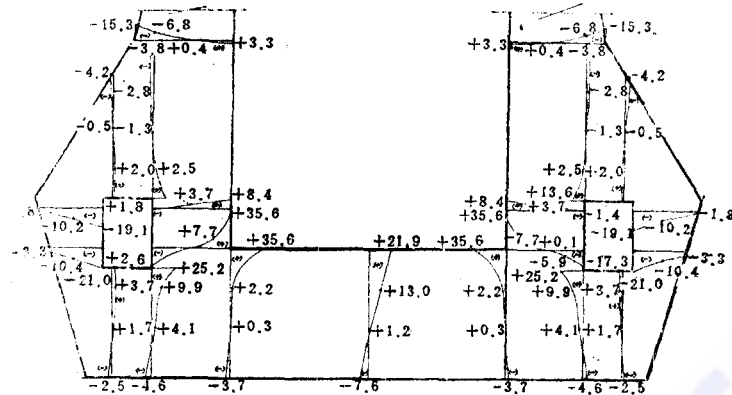


图4(b) 正常运行情况之一合成断面(法向)应力图(两侧嵌固)

自由端主廊道孔口应力一般比嵌固端孔口对应值稍大,该端廊道底部跨中拉应力为+1.60MPa(+16.3kg/cm²),角缘拉应力+2.79MPa(+28.5kg/cm²),拉力区内伸长度约为1倍孔口高度,孔口侧壁最大压应力为-2.68MPa(-27.3kg/cm²)。

由此可见,自由端各部位边缘应力和断面应力变化趋向与嵌固端大同小异,在应力数值上前者一般较后者为大,此种差别正是对称结构物在非对称边界条件下应力状态的客观反映。简言之,这体现了嵌固条件不对称性对闸室应力的影响。

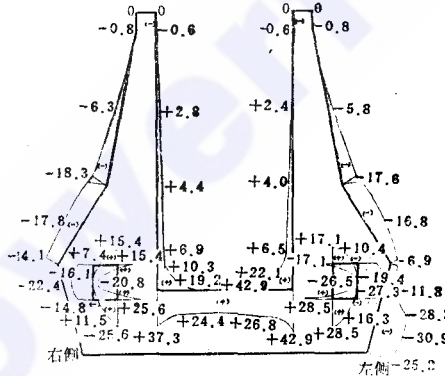


图5(a) 正常运行情况之一合成边缘(切向)应力图(右侧嵌固,左侧自由)

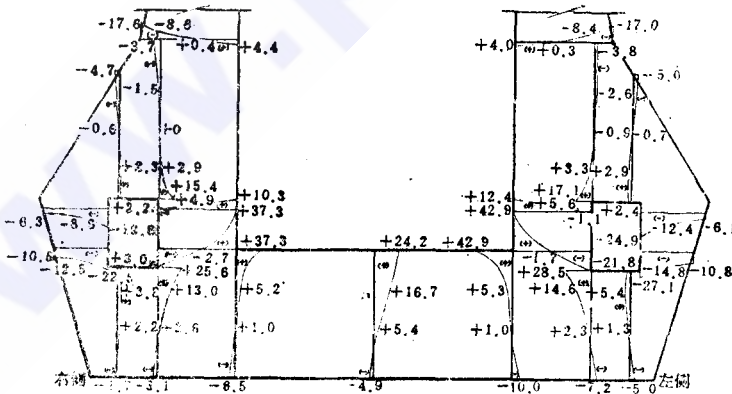


图5(b) 正常运行情况之一合成断面(法向)应力图(右侧嵌固,左侧自由)

3. 对比单侧嵌固与两侧嵌固的闸室应力情况可以看出:前者嵌固端各部位应力比

后者略有上升,自由端则有较大的提高,约在10~15%左右,这显示了同一组合荷载作用下的同一结构物,因嵌固条件不同而在结构应力分布和数值上的差异和变化,而其产生原因显然是:在两侧嵌固时,结构物两端受到相同的约束;而在单侧嵌固时结构物一端受到约束,另一端为自由(无侧向约束),随着该端约束的减弱,形变势必增大,从而导致应力的增加,而他端受其波及影响,形变和应力也相应地微有升高。

(二) 闸室正常运行情况之二应力状态

运行情况之二(室内为最大水深,外侧回填土及水深均为16.5m),闸室承受自重、水重、内侧水压、主廊道内水压、撞击力,外侧水压、土压及浮托力作用,在此种荷载组合下,其合成应力如图6(a)~(b)所示。

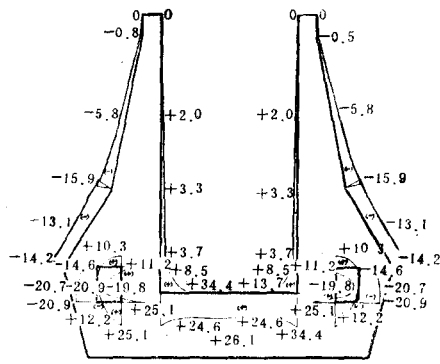


图6(a) 正常运行情况之二合成边缘(切向)应力图(两侧嵌固)

由应力图知,底板上部受拉、下部受压,在跨中的上、下边缘应力分别为 $+2.56\text{ MPa}$ ($+26.1\text{ kg/cm}^2$)、 -0.79 MPa (-8.1 kg/cm^2),中和轴位于底面以上 $1/3$ 板厚附近。底板与边墙相连处角缘应力相当集中,其值达 $+3.37\text{ MPa}$ ($+34.4\text{ kg/cm}^2$)。边墙内侧受拉,中、上部拉应力较小,向下逐渐加大,在距底板1m处为 $+1.34\text{ MPa}$ ($+13.7\text{ kg/cm}^2$);边墙外侧受压,距底板基础17m处压应力最大,其值为 -1.56 MPa (-15.9 kg/cm^2)。

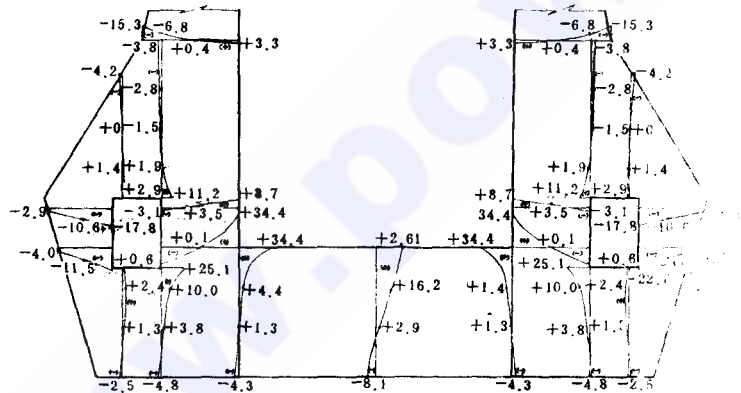


图6(b) 正常运行情况之二合成断面(法向)应力图(两侧嵌固)

主廊道拉应力主要分布在孔口顶、底部,在底部跨中处为 $+1.20\text{ MPa}$ ($+12.2\text{ kg/cm}^2$),在靠近闸室侧下角隅为 $+2.46\text{ MPa}$ ($+25.1\text{ kg/cm}^2$),底部拉力区向下内伸长度约为1.0~1.2倍孔口高度,顶部拉应力及内伸范围均较底部为小,孔口两侧基本受压,最大压应力为 -2.05 MPa (-20.9 kg/cm^2)。

由此可见,正常运行情况之二应力分布规律与情况一极为相似,应力数值除个别处相差较大外,其余一般都较接近,前者仅比后者稍大一些,其原因是组合荷载中的浮托

力较大,而外侧水压和土压荷载不足以抵消浮托力的作用,因此加高外侧回填土和减少浮托力是改善情况二受力状态的途径之一。

在两种正常运行情况(一及二)下边墙应力状态,内侧受拉、外侧受压的特性不变,应力值也较接近,在检修情形下边墙内外侧基本上均为受压,由于在上述三种情形下除内侧下部与底板相连处拉应力稍大外,一般压应力值较小,拉应数值更小,因此边墙受力状况远比底板、廊道有利。

2. 上述分析表明闸室边墙体型比较合理,不论在何种荷载组合情况,墙身上、下部应力分布都较均匀,且拉、压应力均小于允许值,基本上处于低应力工作状态,无须考虑采取其他加强措施。但应指出,在正常运行情况主廊道顶、底部拉应力较大,底板拉应力数值、分布范围和影响深度尤甚,将使底板混凝土开裂,从而削弱底板的有效工作面积,甚至可能引起应力重新分布,闸室工作状态发生变化,因此为改善结构应力状况,减少钢筋量,可考虑采取适当加大底板厚度等措施,廊道孔口也稍缩小为宜。

3. 闸室在正常运行情况下,底板中和轴位置位于底面以上 $1/3$ 板厚处附近,这与一般弹性基础梁中和轴位置随地基弹模不同而变化的规律相符合,如果地基条件改善,弹模提高,则因基础与底板共同作用的加强,底板中和轴位置势必下移,甚至离开底板达到基础之内,而底板拉应力将显著下降。因此若对闸室基础软弱区域进行固结灌浆处理,将是有利的和可取的。

4. 闸室底板与边墙相接的角缘处以及主廊道孔口的角隅附近应力相当集中,大抵由局部效应造成,这与转角构造形式有关,为缓和角缘应力比较集中的现象,建议加贴角做成折角形式,或采用圆角过渡,圆弧半径在可能的范围内越大越好。

四. 结 语

1. 从两侧嵌固闸室整体应力状况来看,结构设计比较合理,闸墙应力分布较均匀,处于较佳工作状态。廊道孔口,尤其是底板,由于基础较差,拉应力较一般为大,因此在廊道顶、底部要注意适当配筋处理,对底板则要有相当数量的配筋,以承受此部份较大的拉应力。

2. 从单侧嵌固闸室整体应力状况来看,因地形、地质条件变化,左侧不能达到嵌固要求,受力情况更加不利,各部位应力数值有所提高,靠近自由端底板、廊道拉应力一般增大 $10\sim 15\%$ 左右,此区域应引起足够重视,配筋量需相应增加,该侧基础宜采取加固措施,或在该端廊道外侧墙局部加厚,并从严要求施工质量,适当提高混凝土标号。

主要参考文献

- [1] 赵清澄主编,光测力学,上海科学技术出版社,1982年10月
- [2] 天津大学材料力学教研室光测组主编,光弹性原理及测试技术,科学出版社,1980年12月
- [3] Vlatko Brcic, Experimental Mechanics in Research and Development, Proceedings of the International Symposium on Experimental Mechanics held at the University of Waterloo, June, 1972年