

基于 ANSYS 的隧洞衬砌有限元分析配筋法研究

邵潮鑫, 沈振中

(河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: 水工隧洞衬砌承受水压力、围岩压力、弹性抗力等作用, 常需要配筋。应用有限元法, 提出了基于 ANSYS 二次开发的水工隧洞衬砌有限元分析配筋法。通过建立衬砌和围岩的整体有限元模型, 计算分析了衬砌的应力分布, 利用 ANSYS 软件的后处理功能, 得到控制断面的应力分布和断面的内力值, 据此进行配筋计算。经分析比较, 该方法得到的配筋量与规范中给出的公式法所得配筋量接近。最后, 在伊泰兹水电站引水隧洞的衬砌配筋设计中对该方法进行了实际应用, 证明其合理可行。

关键词: 水工隧洞; 衬砌; ANSYS; 有限元分析配筋法; 应力分析; 数值计算; 伊泰兹水电站

中图分类号: TV 672.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0116-04

Research on FEM Analysis Reinforcement Method for Tunnel Lining Based on ANSYS

SHAO Chaixin, SHEN Zhenzhong

(National Engineering Research Center of Water Resources

Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Hydraulic tunnel bears loads such as water pressure, rock pressure, and elastic resistance, so reinforcement is often needed. In this paper, a FEM analysis reinforcement method was proposed based on FEM and secondary development of ANSYS. A whole FEM model of concrete lining and its surrounding rock mass was developed to analyze the stress distribution of the lining. With the post processing function of ANSYS, the stress distribution and tensile force of the controlling sections can be obtained and reinforcement calculation was then performed. The reinforcement quantity determined by this method was similar to that obtained from the standard method. The FEM analysis reinforcement method was applied to the reinforcement design for the headrace tunnel lining of the ITAZHI hydropower station, which indicated that the method is reasonable and feasible.

Key words: headrace tunnel; concrete lining; ANSYS; FEM analysis reinforcement method; stress analysis; numerical calculation; ITAZHI power station

水工隧洞是水利工程中普遍采用的一种设施。根据 DL/T 5195-2004《水工隧洞设计规范》, 通常采用“公式法”和“边值法”进行隧洞衬砌的内力计算和配筋^[1]。随着有限元法(FEM)的发展, 该方法已大量应用于水工隧洞工程的应力和稳定分析中^[2-4], 但水工隧洞衬砌的配筋仍大量采用规范方法, 有限元分析配筋法尚不成熟。本文利用有限元软件 ANSYS 建立水工隧洞衬砌与围岩的数值计算模型, 分析衬砌的受力状态及应力分布, 并探讨了基于 ANSYS 有限元分析的配筋法, 为水工隧洞的衬砌设计与配筋计算提供依据。

1 基于 ANSYS 的有限元分析配筋法

根据 DL/T 5195-2004《水工隧洞设计规范》以及 DL/T

5057-1996《水工混凝土结构设计规范》的相关要求, 结合有限元软件 ANSYS 的自身特点, 基于 ANSYS 的衬砌有限元分析配筋方法具体步骤如下。

(1) 在 ANSYS 中建立有限元模型。有限元模型包括隧洞衬砌以及山体围岩, 围岩边界取至隧洞中心线的距离约为 3~5 倍洞径。衬砌的外围通常采用弹簧单元模拟, 但这一方法不能准确地体现实际工程中岩体的状况, 因此, 本文采用实体单元模拟围岩。

(2) 在 ANSYS 中加载计算。根据规范要求, 施加各运行状态下的荷载, 通常包括衬砌自重、静水压力以及山岩压力等。继而施加边界条件后进行有限元计算, 得到应力成果。

收稿日期: 2014-03-31 修回日期: 2014-04-10 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.04.001.html>

作者简介: 邵潮鑫(1989-), 男, 江苏宜兴人, 硕士研究生, 主要从事水工数值仿真方面研究。E-mail: 773690638@qq.com

通讯作者: 沈振中(1968-), 男, 江苏吴江人, 教授, 博导, 主要从事水工结构设计研究。E-mail: zhzhshen@mailsvr.hhu.edu.cn

(3) 后处理。根据有限元计算得到衬砌的应力分布状况,据此可以选择一个或多个最不利断面,以该断面的应力成果为依据进行衬砌配筋。然而,在 ANSYS 中衬砌作为实体单元,不能直接得到其断面拉力值,要进行相应的二次开发工作。在 ANSYS 中,利用插值运算,有限元计算所得的节点应力成果可以映射到二维或三维的路径中,并以数组或矩阵的形式储存起来,沿着这些路径可以对应应力成果进行数学运算,得到需要的计算结果。因此,将衬砌的厚度方向定义为路径,即可通过积分运算得到衬砌对应断面上的拉力值,具体的实现方法如下。

首先,定义路径(PATH)。ANSYS 中可以通过节点或者坐标来定义路径,为方便配筋计算,一般沿衬砌的厚度方向定义路径,使得路径长度即为衬砌厚度。

其次,将路径划分为 N 段进行插值映射,为保证插值精度,可将路径划分为 20~30 段;各段的端点坐标以及长度将被储存为初始数据,ANSYS 会根据路径中各端点的坐标,自动将对应点的应力结果进行插值运算,得到路径中各点的应力结果并储存;将储存结果输出即可得到衬砌断面的应力分布图形。

最后,对于得到的路径项(各点应力)进行处理。在 ANSYS 中,拉应力符号为“+”,压应力符号为“-”。对拉应力段沿路径进行积分运算,最终可以得到断面上的拉力 T。

(4) 配筋。根据 DL/T 5057-1996《水工混凝土结构设计规范》,按式(5)进行配筋计算^[15]。计算得到钢筋面积后,还应满足规范结构配筋要求,最终确定配筋方案。

$$T \leq \frac{1}{\gamma_d} (0.6T_c + f_y A_s) \quad (1)$$

式中: T 为断面总拉力(kN); T_c 为混凝土承担的拉力(kN); f_y 为钢筋抗拉强度设计值(MPa); A_s 为钢筋面积(mm²)。

2 配筋法验证

假定隧洞衬砌断面为圆形断面,采用钢筋混凝土衬砌,混凝土等级为 C25,衬砌后,隧洞内径为 9 m,衬砌厚度为 40 cm。隧洞围岩类别属 0 类。材料物理力学参数见表 1。考虑的荷载有:均布内水压力,衬砌内缘顶部压力水头为 60 m;围岩垂直松动压力,取为 25 kN/m²;衬砌自重以及洞内满水而无水头时的水压力。

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the material

材料名称	容重 /(kN·m ⁻³)	弹性模量 /GPa	泊松比	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
混凝土 C25	25.0	28.0	0.167	12.5	1.3
钢筋	/	200	/	/	310
围岩	26.0	12.5	0.21	50	5

建立隧洞有限元模型时,围岩边界至隧洞中心线的距离约为 5 倍洞径,有限元模型截取边界采用位移约束边界,即在模型底部约束 X、Y、Z 三个方向的位移,模型侧边界约束法向位移。有限元模型见图 1。加载计算后,得到衬砌的主拉应力分布见图 2。

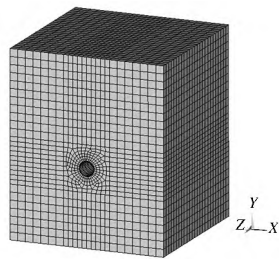


图 1 衬砌及围岩有限元模型

Fig. 1 FEM model of lining and rock mass

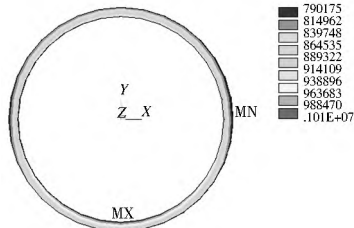


图 2 衬砌主拉应力分布(Pa)

Fig. 2 Principal stress distribution of lining (unit: Pa)

衬砌拉应力最大值为 1 010 kPa,出现在衬砌底部内缘部位;最小值为 790 kPa,出现在衬砌侧部外缘部位。根据以上计算成果,将衬砌底部截面选为配筋控制截面。利用 ANSYS 的后处理功能,获得控制截面的截面应力分布图见图 3。

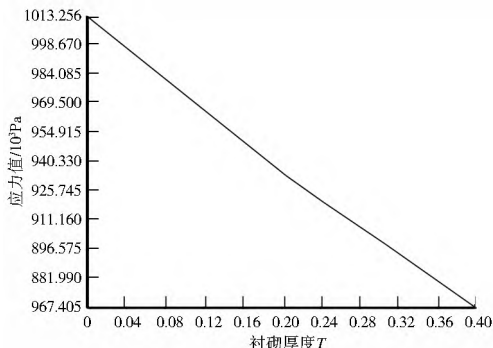


图 3 控制截面应力分布图形

Fig. 3 Stress distribution of the controlling section

由图 3 可见衬砌底部断面处于全断面受拉状态, T_c 值取为零。取单位长度(1 m)衬砌截面进行配筋,利用 ANSYS 进行拉力积分,得到断面上的拉力值为 375 kN,根据公式(1)计算得到所需钢筋面积 A_s 为 1 451 mm²。

下面对上述配筋结果进行校核。根据 DL/T 5195-2004《水工隧洞设计规范》,圆形有压隧洞通常采用厚壁圆筒法,即“公式法”进行衬砌内力和配筋计算。在均匀内水压力下,钢筋断面面积按照式(2)进行计算。

$$f = \frac{p r_i + \frac{1\ 000 K_0 m}{[\sigma_s]} - \frac{1\ 000 K_0 r_i}{E_s}}{1\ 000 E_c} \quad (2)$$

其中, $m = \frac{p r_i}{1\ 000 E_c}$, $\ln \frac{r_0}{r_i}$, $E_c = 0.85 E_c$ 。

式中: p 为隧洞衬砌内缘顶部的内水压力值(kN/m²); r_i 为衬砌内缘半径(mm); K₀ 为围岩单位弹性抗力系数(N/cm³); E_s 为钢筋弹性模量(MPa); E_c 为混凝土弹性模量(MPa)。

在其他荷载作用下,钢筋断面面积按式(3)进行计算。

$$f' = \frac{-\sum N h_0 + 2 \sum M}{2 h_0 [\sigma_s]} \quad (3)$$

式中: $\sum M$ 、 $\sum N$ 分别为除内水压力外的其他荷载在衬砌内引起的弯矩及轴力(N·mm); h_0 为衬砌有效厚度(mm)。

根据式(2)、式(3)将计算所得钢筋面积 f 和 f' 相加, 可以得到相关规范中“公式法”所需钢筋面积 A_s 为 1 464 mm²。

对比可知, 有限元分析配筋法与“公式法”所得的配筋面积相差较小, 可以用于实际的工程之中。

3 应用实例

伊泰兹水电站位于赞比亚南方省丘莫市伊泰兹区, 大坝位于赞比西河和凯福河交汇点上游 295 km 处, 该水电站将导流洞改建为引水隧洞, 需进行衬砌设计。导流隧洞断面为城门洞型, 断面开挖尺寸为 13.1 m × 15.2 m(宽 × 高), 断面面积约为 190 m²。隧洞拟采用钢筋混凝土衬砌, 混凝土等级为 C25, 衬砌厚度 30 cm, 总长 375 m。其断面尺寸见图 4。

南导流隧洞段取桩号 CH0+000.0 m 处衬砌底板中心为坐标零点; X 轴沿南导流隧洞轴线方向, 指向隧洞下游为

正; Z 轴为竖直方向, 向上为正, 以高程计, 下边界取至高程 918 m, 上边界至地表面; Y 轴方向与南导流隧洞轴线垂直, 其范围取为 -50~75 m。有限元模型截取边界采用位移约束, 在模型底部采用全约束, 模型侧边界采用法向约束。伊泰兹电站隧洞衬砌及围岩有限元模型见图 5, 计算参数列表见表 2, 计算工况见表 3。

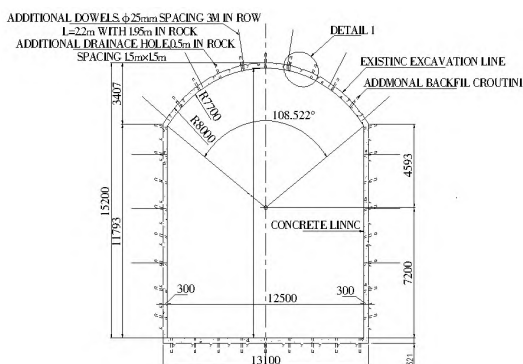


图 4 伊泰兹电站隧洞断面结构

Fig. 4 Cross section structure of ITAZHI power station

表 2 伊泰兹电站计算参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of ITAZHI power station

材料类别	弹性模量 GPa	泊松比	重度 (kN·m ⁻³)	摩擦系数	黏聚力 /MPa	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
0 类围岩(电气石花岗岩、斑状花岗岩)	5~6	0.23	26	0.80~0.60	0.40~0.30	30	3
0 类围岩(斑状花岗岩、电气石花岗岩)	10~15	0.21	26	1.00~0.9	0.80	40~60	4~6
0 类围岩(斑状花岗岩)	15~20	0.18	26.4	1.2~1.1	1.3~1.2	60~80	6~8
C25 混凝土	28.5	0.167	24	/	/	12.5	1.3

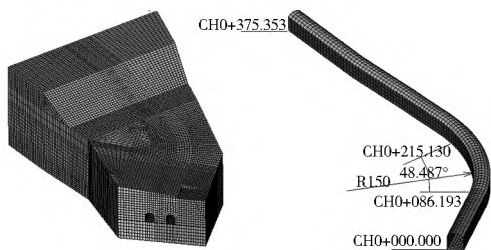


图 5 伊泰兹电站有限元模型

Fig. 5 FEM model of headrace tunnel in ITAZHI power station

表 3 工况及荷载组合

Table 3 Working conditions and load combinations

工况	工况说明	荷载组合				
		衬砌自重	山岩压力	外水压力	内水压力	灌浆压力
1	施工期工况(最大外水压力, 考虑灌浆压力)	✓	✓	✓	/	✓
2	正常运行期工况(最大库水位)	✓	✓	✓	✓	/

在表 3 中的两种工况下, 计算得到衬砌配筋控制应力分布见图 6。

可以看出, 在正常运行工况下, 衬砌的应力值较大, 故选取工况 2 为控制工况。采用有限元分析法进行配筋计算, 取单位长度(1 m)的衬砌截面进行配筋, 利用 ANSYS 的后处理得到控制断面上的拉力为 139.2 kN, 计算得到所需钢筋面积为 539 mm², 同时根据最小配筋率以及构造要求, 结合

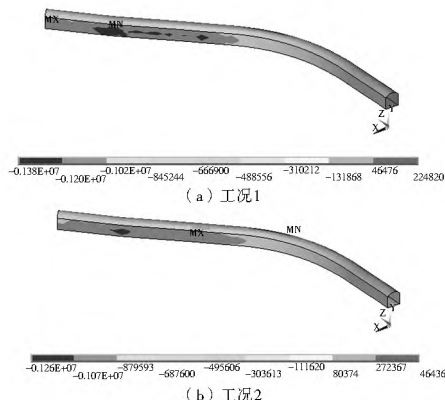


图 6 伊泰兹隧洞衬砌主应力分布(Pa)

Fig. 6 Principal stress distribution of the lining in ITAZHI power station (Pa)

当地钢材资源的实际情况, 最终采用的配筋方案为, 单层布置, 实际配筋面积为 1 256 mm², 设计配筋图见图 7。

4 结语

本文结合水工隧洞衬砌配筋设计的相关规范以及 ANSYS 软件的特点, 通过二次开发, 利用 ANSYS 的后处理功能得到衬砌断面的拉力值, 并探讨了基于 ANSYS 的有限元分析配筋法。

通过计算分析比较, 基于 ANSYS 的有限元分析配筋法与规范“公式法”计算的配筋结果比较接近, 因此有限元分析配筋法成果合理, 可以用于实际工程的配筋设计中。

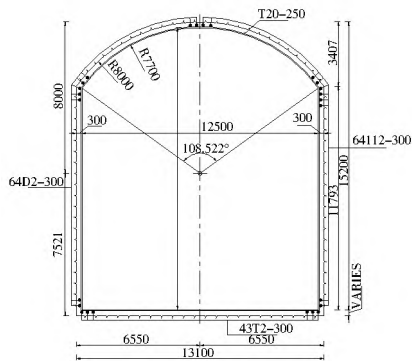


图7 伊泰兹隧洞衬砌配筋图

Fig. 7 Reinforcement of the lining in the ITAZHI power station

有限元分析配筋法可以适用于各种形态的衬砌断面配筋,并且能够考虑工程的实际地形地质条件,其计算结果更符合衬砌的实际运行状态,具有较好的实际工程意义。

参考文献(References):

- [1] DL/T 5195-2004, 水工隧洞设计规范[S]. (DL/T 5195-2004, Specification for Design of Hydraulic Tunnel[S]. (in Chinese))
- [2] 孙飞合. 水工压力隧洞结构设计问题探讨[J]. 河南水利与南水北调, 2012(12): 39-40. (SUN Fei he. Discussion on Structure Design of Hydraulic Headrace Tunnel[J]. Henan Water Resources & South to North Water Diversion, 2012(12): 39-40. (in Chinese))
- [3] 钟建文, 谷兆祺, 彭守拙. 高压隧洞衬砌设计配筋研究[J]. 水力发电学报, 2007(2): 42-46. (ZHONG Jian wen, GU Zhao qi, PENG Shou zhuo. Research on The Reinforcement in The High Pressure Tunnel Lining[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, (02): 42-46. (in Chinese))
- [4] 刘波, 李宁, 郭晓刚. 水工压力隧洞钢筋混凝土衬砌配筋模型与方法探讨[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012(11): 229-234. (LIU bo, LI Ning, GUO Xiaogang. Reinforcement Model and Methods of Reinforced Concrete Lining of Hydraulic Pressure Tunnel [J]. Journal of Northwest A&F University, 2012(11): 229-234. (in Chinese))
- [5] 杨晓娟, 漆文邦, 郑俊. 中小型水电站非圆形有压隧洞衬砌配筋计算[J]. 水力发电, 2012(1): 27-29. (YANG Xiaojuan, QI Wen bang, ZHENG Jun. Lining Reinforcement Calculation of Non-circular Pressure Tunnel in Small and Medium Hydropower Station [J]. Water Power, 2012(1): 27-29. (in Chinese))
- [6] 侯建强, 李永平. 《隧洞衬砌内力及配筋计算通用程序 G-12》应用中的几个问题[J]. 山西水利科技, 2000(S2): 33-34. (HOU Jian qiang, LI Yong ping. Several Problems on Application of Inner Force and Reinforcement Calculation program G-2 [J]. Shanxi Hydropower, 2000(S2): 33-34. (in Chinese))
- [7] 谭忠盛, 王梦恕. 隧道衬砌结构可靠度分析的二次二阶矩法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(13): 2243-2247. (TAN Zhong sheng, WANG Meng shu. Second order Second moment Method for Structure Reliability Analysis of Tunnel Lining. [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2004(13): 2243-2247. (in Chinese))
- [8] 张丽, 郭菲, 董甲. 基于 CATIA 的三维配筋技术研究[J]. 人民黄河, 2013(3): 82-83. (ZHANG Li, GUO Fei, DONG Jia. Study of 3D Reinforcement Technology Based on CATIA [J]. Yellow River, 2013(3): 82-83. (in Chinese))
- [9] 罗涛, 谢红强. 某水电站引水隧洞衬砌结构特性及配筋研究[J]. 吉林水利, 2009(8): 44-48. (LUO Tao, XIE Hong qiang. The Research for The Reinforcement and Lining Structure Characteristics in The Diversion Tunnel of A Hydropower Station [J]. Jilin Water Resources, 2009(8): 44-48. (in Chinese))
- [10] 刘波. 水工压力隧洞衬砌配筋方法探讨[D]. 西安: 西安理工大学, 2010. (LIU Bo. Research of Hydraulic Pressure Tunnel Lining Reinforcement Method [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [11] 王锋. 隧道结构 ANSYS 有限元分析与研究[J]. 西部探矿工程, 2012(2): 189-191. (WANG Feng. The ANSYS Finite Element Analysis and Study of Tunnel Structure [J]. West China Exploration Engineering, 2012(2): 189-191. (in Chinese))
- [12] 张伟, 伍鹤皋. 调压井钢筋混凝土衬砌的有限元配筋法[J]. 中国农村水利水电, 2007(11): 109-111. (ZHANG Wei, WU He gao. Reinforcement Arrangement Methods of Concrete Lining Using FEM in Surge chambers [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(11): 109-111. (in Chinese))
- [13] 陈方竹, 何江达, 许有飞. 围岩变形模量对调压井衬砌结构内力及配筋的影响[J]. 水电站设计, 2005(1): 10-13. (CHEN Fang zhu, HE Jiang da, XU You fei. Influence of Surrounding Rock Deformation Modulus on Surge Shaft Lining Internal Force & Reinforcement [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2005(1): 10-13. (in Chinese))
- [14] 周乐凡. 考虑外水荷载作用的铁路隧道衬砌结构设计研究[D]. 铁道部科学研究院, 2003. (ZHOU Le fan. The Study on Lining Structure Design of Railway Tunnel Considering External Water load [D]. China Academy of Railway Sciences, 2003. (in Chinese))
- [15] DL/T 5057-1996, 水工混凝土结构设计规范[S]. (DL/T 5057-1996, Specification for Load Design of Hydraulic Structures[S]. (in Chinese))