

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.03.046

TBM 开挖隧洞管片衬砌结构 三维有限元分析及配筋计算

王小军

(水利部新疆维吾尔自治区水利水电勘测设计研究院, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 研究在高内水压力下, TBM 开挖隧洞中管片衬砌能否承担内水压力作用且结构强度满足设计要求的问题, 主要针对管片衬砌结构接缝对衬砌整体应力的影响。以某水电站长距离引水隧洞为例, 采用有限元法建立三维模型, 计算发现在内水压力作用下, 管片分块衬砌受力规律不同于常规现浇混凝土衬砌, 管片之间螺栓连接受力集中, 接缝处产生了应力释放, 使得管片其他部位应力降低, 而且配筋量较同水头下整体现浇混凝土配筋量大大减少。

关键词: 引水隧洞; 管片衬砌; 弹塑性模型; 有限元

中图分类号: TV 332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0606-03

Three dimensional finite element analysis and reinforcement calculation of segment lining structure of TBM excavation tunnel

WANG Xiaojun

(Xinjiang Scientific Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi 830000, China)

Abstract: In this paper, the problems whether the segment lining of TBM excavation tunnel can sustain the internal pressure and structure strength can meet the design requirements under high internal water pressure were investigated, and the effects of segment lining structure joint on the overall stress of lining were analyzed. Finite element method was used to develop the three dimensional model of a long distance tunnel at a hydropower station. The results showed that under the internal water pressure, the stress of block segment lining is different from that of conventional cast concrete lining, stress is concentrated at the bolt connection of segment, stress releases at the seam to cause the decreasing stress in other parts of segment, and the reinforcement concrete volume is greatly reduced compared with that of the overall cast in place concrete.

Key words: diversion tunnel; lining; elastoplastic model; finite element

1 工程基本资料

新疆某水电站发电引水隧洞采用有压方式向下游输水, 输水隧洞长 39.53 km, 圆形断面, 管径 5.2 m, 设计输水流量 51.5 m³/s。根据地形及地质条件, 输水隧洞进口前段 7.9 km 和出口末端 2.0 km 采用钻爆法施工, 其它洞段均采用开敞式 TBM 掘进机施工。本文仅对 TBM 开挖段进行分析。引水隧洞穿越的岩性较复杂, 主要有灰岩、花岗岩、凝灰岩、砂岩、凝灰质粉砂岩、钙质粉砂岩和泥质粉砂岩等。根据前期地质资料, 输水隧洞围岩类别以 $\bar{0}$ 和 $\bar{1}$ 类为主, 部分地段为 $\bar{2}$ 类, 穿断层和构造段为 $\bar{3}$ 类, 其中 $\bar{0}$ 类围岩约占隧洞总长 70.0%, $\bar{1}$ 类围岩约占 8%, $\bar{2}$ 类围岩约占 16%, $\bar{3}$ 类围岩约占 6%。

引水隧洞管片厚度取 30 cm。为缩短施工工期, 加快安装进度, 管片选用六边形(蜂窝状)^[1]。由于该工程为有压隧洞, 管片之间采用 M27 螺栓连接。管片宽为 1400 mm, 每环采用等分的 4 片管片, 每环 4 片包括: 仰拱, 侧板(两块)和顶拱。单块管片弧长为 4.32 m, 体积为 1.813 m³, 重量为 4.533 t。管片混凝土强度为 C40、W10。在管片接头处设两道防水, 第一道为氯丁橡胶遇水膨胀止水条, 位于管片中间; 第二道为聚硫密封胶, 位于迎水面。

2 有限元模型

衬砌管片混凝土结构采用弹性介质以三维实体单元模拟, 围岩采用弹塑性 D-P 准则模拟其屈服状态, 接缝处以接缝单元折减模进行模拟, 螺栓连接采用杆单元模拟, 喷混

收稿日期: 2014-08-24 修回日期: 2015-04-05 网络出版时间: 2015-05-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150514.0830.002.html>

作者简介: 王小军(1984), 男, 甘肃天水人, 工程师, 主要从事水工结构研究。E-mail: xjywxj2012@sina.cn

凝土及豆粒石回填混凝土均采用实体单元模拟^[2,3]。

垂直界面为链杆约束,即左、右边界采用水平向单链杆约束,沿隧洞线路方向也用水平向链杆约束;底面垂直向约束;在隧洞上方的边界按自由边界考虑,但考虑其上部岩体的压力作用,其压力值根据隧洞埋深情况确定^[4]。有限元模型及管片衬砌网格模型见图1、图2。

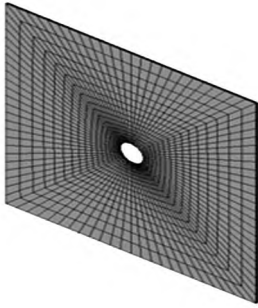


图1 整体有限元网格
Fig.1 Finite element grids

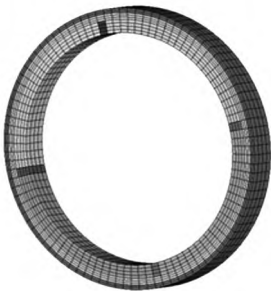


图2 管片衬砌有限元模型
Fig.2 Finite element model of lining

3 计算断面

按围岩类别及内、外水分布情况,选择典型的断面计算,见表1。

表1 典型计算断面
Tab.1 Calculation section

断面序号	桩号 /m	围岩类别	内水头/m	外水头/m	永久衬砌方式
F1	11+ 791.294	0	91.5	91.5	管片 30 cm 厚
2-2	18+ 600.000	0	75	80	管片 30 cm 厚
3-3	20+ 600.000	0	80	150	管片 30 cm 厚
4-4	25+ 054.766	0	90	131	管片 30 cm 厚
5-5	30+ 424.795	0	101	101	管片 30 cm 厚
6-6	39+ 135.232	0	120	120	管片 30 cm 厚

4 计算参数

各断面围岩计算参数见表2,衬砌混凝土计算参数见表3。

5 计算成果及分析

5.1 衬砌管片结构应力分析

内水压力下管片衬砌配筋主要由环向正应力控制^[5]。通过计算可知,管片衬砌接缝处应力发生释放,因此管片内

表2 围岩计算参数

Tab.2 Calculation parameters of surrounding rock

桩号	容重 / (kN·m ³)	围岩类别	弹性模量 / 10 ⁹ Pa	泊松比	c / MPa	φ (°)	弹性抗力 / (MN·m ³)	
11+	791.294	27.8	0	6.5	0.26	0.75	38.66	3 500
18+	600.000	27.5	0	6.5	0.26	0.75	38.66	3 500
20+	600.000	22.0	0	2.5	0.33	0.45	28.81	2 250
25+	054.766	20.0	0	0.75	0.45	0.15	19.29	400
30+	424.795	26.5	0	6.5	0.26	0.75	38.66	4 500
39+	135.232	22.0	0	2.5	0.33	0.45	28.81	2 250

表3 衬砌计算参数

Tab.3 Calculation parameters of lining

桩号	混凝土标号	弹性模量 10 ¹⁰ Pa	泊松比	抗拉强度 / MPa	抗压强度 / MPa	
11+	791.294	C40	3.25	0.167	1.71	19.1
18+	600.000	C40	3.25	0.167	1.71	19.1
20+	600.000	C40	3.25	0.167	1.71	19.1
25+	054.766	C40	3.25	0.167	1.71	19.1
30+	424.795	C40	3.25	0.167	1.71	19.1
39+	135.232	C40	3.25	0.167	1.71	19.1

应力值较低。4-4 断面 0 类围岩条件下内侧拉应力最大值 5.66 MPa,外侧 0.45 MPa,应力值分布不均匀,这与接缝弹模降低程度有关。各断面环向应力分布见图3至图8。

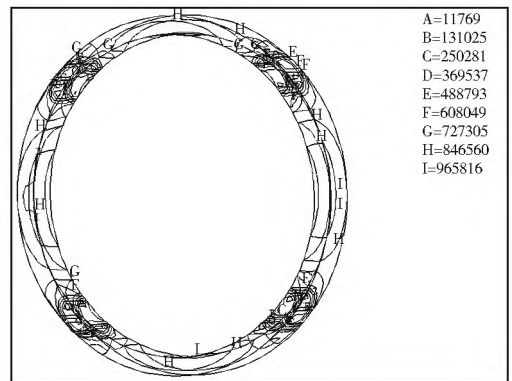


图3 F1 剖面环向应力等值线

Fig.3 Stress contour of F1 circumferential section

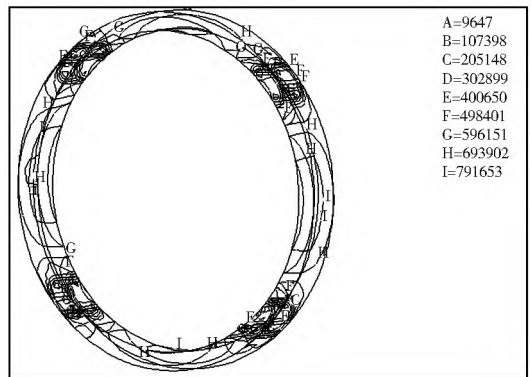


图4 2-2 剖面环向应力等值线

Fig.4 Stress contour of 2-2 circumferential section

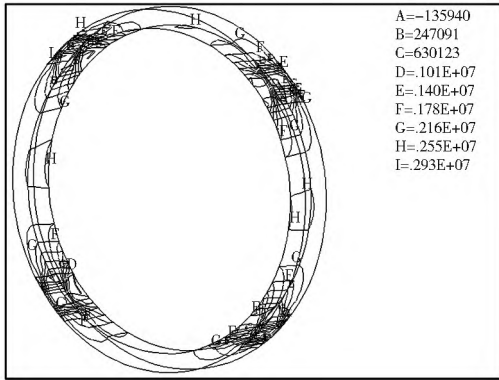


图 5 3-3 剖面环向应力等值线

Fig. 5 Stress contour of 3-3 circumferential section

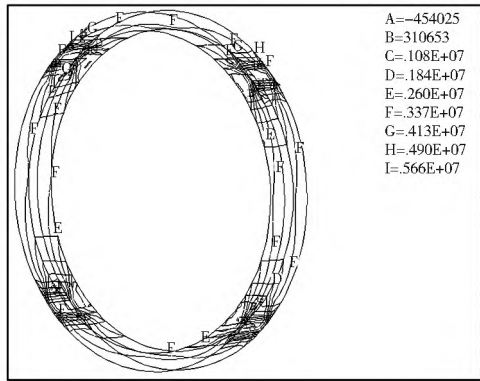


图 6 4-4 剖面环向应力等值线

Fig. 6 Stress contour of 4-4 circumferential section

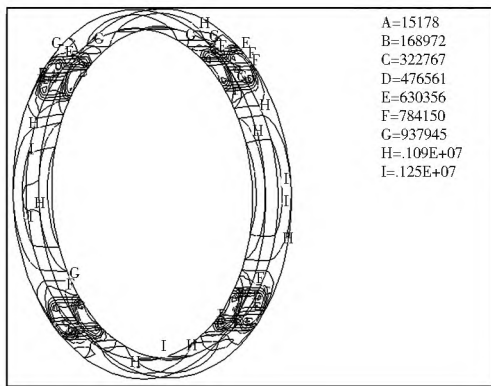


图 7 5-5 剖面环向应力等值线

Fig. 7 Stress contour of 5-5 circumferential section

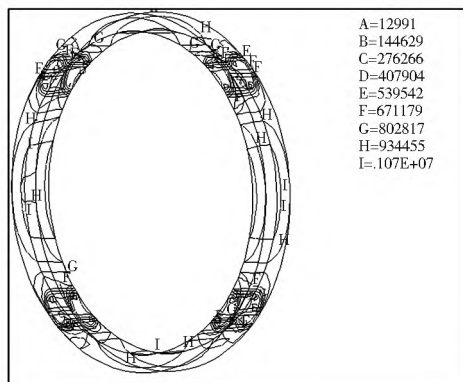


图 8 6-6 剖面环向应力等值线

Fig. 8 Stress contour of 6-6 circumferential section

5.2 衬砌管片结构配筋计算

各断面配筋计算成果见表 4。

以内侧及外侧节点应力极值沿衬厚按直线分布计算内力。衬砌结构内水工况下为小偏心受拉构件,由《水工混凝土结构设计规范》(SL 191-2008)小偏心受拉构件计算。由表 4 看出,管片整体配筋直径最大为 22 mm,含筋率 144.76 kg/m³。

表 4 配筋计算成果

Tab. 4 Reinforcement calculation results

桩号	内侧受力钢筋	外侧受力钢筋	分布钢筋	含筋率 / (kg·m ⁻³)
11+ 791. 294	φ12@ 100	φ12@ 100	φ10@ 200	74. 65
18+ 600. 000	φ12@ 100	φ12@ 100	φ10@ 200	74. 65
20+ 600. 000	φ18@ 100	φ12@ 100	φ10@ 200	106. 45
25+ 054. 766	φ22@ 100	φ14@ 100	φ10@ 200	144. 76
30+ 424. 795	φ12@ 100	φ12@ 100	φ10@ 200	74. 65
39+ 135. 232	φ14@ 100	φ12@ 100	φ10@ 200	83. 82

6 结语

本文结合长距离深埋 TBM 开挖、管片衬砌隧洞工程实例,采用三维有限元建模方法建立管片及围岩整体结构模型,分析计算了典型断面衬砌结构应力以及配筋量,通过计算发现,由于管片衬砌存在接缝,在高内水压力下,接缝处应力水平较高,而管片内部整体应力水平较低,原因是在接缝处应力发生释放,部分由连接螺栓传递为衬砌中的压应力。

由于运输设备条件限制,管片厚度较厚安装困难,因此管片衬砌厚度采用 30 cm,对应含筋率在 74.65 ~ 144.76 kg/m³ 范围,较现浇混凝土衬砌配筋量大大降低,符合配筋要求,说明有限元计算模型充分考虑了围岩承担内水压力的能力以及管片衬砌结构接缝应力释放的特殊性,为衬砌厚度的减薄和降低配筋量提供了较为合理的依据。

参考文献(References):

- [1] 王勛成,邵敏.有限元法的基本原理和数值方法[M].北京:清华大学出版社,1997:25-37.(WANG Maor cheng, SHAO M in. The basic principle of finite element method and numerical method[M]. Beijing: Tsinghua university press, 1997: 25-37. (in Chinese))
- [2] 谢贻权,何福保.弹性和塑性力学中的有限单元法[M].北京:机械工业出版社,1983:117-191.(XIE Yi quan, HE Fu bao. The finite method in elastic and plastic mechanics[M]. Beijing: Mechanical industry press, 1983: 117-191. (in Chinese))
- [3] 林继铺.水工建筑物[M].北京:中国水利水电出版社,2006:418-422.(LIN Ji yong. The hydraulic structures[M]. Beijing: Press of water conservancy and hydropower in China, 2006: 418-422. (in Chinese))
- [4] 周维垣,杨强.岩石力学数值计算方法[M].北京:中国电力出版社,2005.(ZHOU Wei heng, YANG Qiang. Numerical method rock mechanics[M]. Beijing: China's power press, 2005. (in Chinese))
- [5] 顾慰慈.水工隧洞的设计理论和计算[M].北京:水利电力出版社,1990.(GU Wei ci, Design theory and calculating of hydraulic tunnel[M]. Beijing: Hydraulic power press, 1990. (in Chinese))