

输水隧洞主支洞交叉口隧洞衬砌结构有限元分析

吕昀龙

水利部新疆维吾尔自治区水利水电勘测设计研究院

DOI:10.12238/hwr.v5i3.3691

[摘要] 基于有限元分析法对输水隧洞主支洞交叉口开展了设计研究,结合工程的实际特点以及使用功能和建设条件等要求,对隧洞的衬砌等进行了综合设计,通过有限元分析软件Midas GTS NX,创建了隧洞主支洞交叉口空间三维分析模型,对隧洞衬砌结构在不同工况荷载作用下的受力情况进行了重点分析,得到结构变形及内力分布的规律。分析结果显示:隧洞主支洞交叉口连接处拱顶和侧墙变形量较大,内力最大值位于底板与侧墙连接处。施工时可利用固结灌浆提升围岩自稳性,加密钢拱架提高一次支护强度,加强侧墙与底板连接处局部配筋,从而达到结构设计优化的目的。

[关键词] 输水隧洞; 三维模型; 衬砌结构; 有限元分析

中图分类号: TV4 文献标识码: A

Finite Element Analysis of Tunnel Lining Structure at the Main Branch Intersection of Water Transmission Tunnel

Yunlong Lv

Xinjiang Uygur Autonomous Region Water Resources and Hydropower Survey and Design and Research Institute of the Ministry of Water Resources

[Abstract] Based on the design research of the water transmission tunnel main branch intersection Combined with the actual characteristics of the project and the use function and construction conditions, the three-dimensional analysis model of the main branch tunnel intersection was created by the finite element analysis software Midas GTS NX, which mainly analyzed the stress of the tunnel lining structure under the load of different working conditions, and obtained the structural deformation and internal force distribution. The analysis results show that the vault and side wall at the junction of the main branch intersection of the tunnel are greatly deformed, and the maximum internal force is located at the connection between the bottom plate and the side wall. During construction, consolidation grouting can be used to enhance the self-stability of the surrounding rock, encrypted steel arch frame to improve the primary support strength, and strengthen the local reinforcement between the side wall and the bottom plate, so as to achieve the purpose of structural design optimization.

[Key words] water transport tunnel; 3 D model; lining structure; finite element analysis

1 工程概况

某长距离输水隧洞采用TBM与钻爆法相结合的施工方法,隧洞平均埋深224m,纵剖1/2500,辅助洞室与支洞相交于43+000处,由通过洞、拌合辅助洞、交叉洞、检修洞、连接洞、步进洞和始发洞组成,全长590m。根据现场施工布置,隧洞连接洞段与施工支洞垂直相交。隧洞主洞为城门洞型,尺寸为12.3m×16.2m(宽度×高度),隧洞侧墙及顶拱衬砌厚度为600mm,底板厚度为1100mm。

施工支洞断面为城门洞型,尺寸为10.1m×10.2m(宽度×高度),为方便现场施工组织,增大车辆转弯半径,距离主洞边墙5m开始断面不断扩大,到主洞边墙断面扩大为17.2m×10.2m(宽度×高度),该段设置为喇叭口断面。支洞侧墙及顶拱衬砌厚度为600mm,底板厚度为1100mm。本文取主洞计算长度为40m,支洞标准断面长度18.8m,支洞喇叭口断面长度5m范围为研究对象,采用荷载-结构法,即认为围岩对衬砌结构的作用以荷载的形式

施加于衬砌表面,同时考虑围岩与衬砌之间存在弹性抗力,从而计算衬砌结构的变形和分布规律^[1]。

该段隧洞发育1条次级断层(f72),产状290° NE∠68°,断层走向与洞线方向夹角60°,破碎带宽度80m,断层带内以泥盆系凝灰岩、糜棱岩及碎裂岩为主,岩体稳定性差,为IV~V类围岩。隧洞主支洞交叉口处于泥盆系凝灰岩,围岩整体稳定性较差,地质提供资料判定此处为IV类围岩。

2 计算模型

根据工程布置,选取主洞计算长度为40m,支洞标准断面长度18.8m,支洞喇叭口断面长度5m范围为研究对象并建模计算。利用MidasGTS NX中2D壳单元模拟隧洞衬砌结构,通过软件中曲面弹簧功能模拟围岩与衬砌结构之间的弹性抗力。在施加荷载时,将作用在衬砌上的围岩压力和水压力等荷载转化为2D单元面力,分别按水平和垂直方向的分力施加在单元面上,同时施加重力加速度来模拟衬砌结构自重。由于围岩和衬砌之间的不承受拉力,在建立曲面弹簧时需要设置曲面弹簧为弹性连接且仅受压,从而得到最终结果。

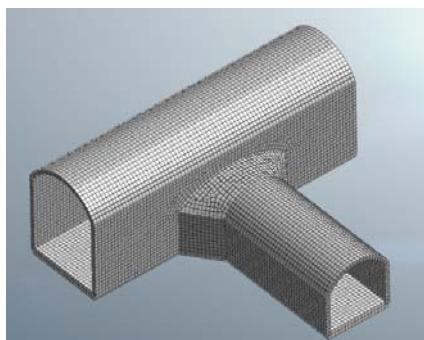


图1 主支洞空间位置示意图

3 计算参数及工况

3.1 力学参数

表1 衬砌材料参数

材料	弹性模量 (MPa)	厚度 (mm)	容重 (MPa)	泊松比
C35 混凝土	3.15×10^4	600/1100	24	0.167

表2 围岩力学参数

围岩类别	重度 (KN/m ³)	泊松比	弹性模量 (Gpa)	内摩擦角 φ (°)	粘聚力 c (MPa)
IV	24	0.32	5	33	0.65

3.2 荷载计算

3.2.1 围岩荷载计算

围岩压力:围岩压力是隧洞衬砌设计中起重要作用的荷载,影响围岩压力的因素有:岩石的物理力学性质、岩石强度、岩石的完整性、节理裂隙的发育情况、地下水的影响、隧洞断面型式、施工方法、支护方式等。

围岩洞段山岩压力:对于IV、V岩

洞,可按松动介质平衡理论估算围岩压力,采用普氏理论、太沙基、铁路、水工公式计算,本阶段按照《水工隧洞设计规范》第6.2.4条规定计算。

按照《水工隧洞设计规范》^[2]第9.2.4条规定,薄层状及碎裂散体结构围岩,山岩压力按下列公式计算:

$$\text{垂直方向: } q_v = (0.2 \sim 0.3) \gamma_r \cdot B$$

$$\text{水平方向: } q_h = (0.05 \sim 0.10) \gamma_r \cdot H$$

式中: q_v — 垂直均布围岩压力, kN/m²; q_h — 水平均布围岩压力, kN/m³; γ_r — 岩体重度, kN/m³; B — 隧洞开挖宽度; H — 隧洞开挖高度, m。垂直方向中0.2~0.3系数,本文IV类围岩取值0.25,水平方向中0.05~0.10系数,本文IV类围岩取值0.075。

3.2.2 其他荷载计算

(1) 自重:按设计厚度计算自重荷载,必要时将超挖部分回填混凝土一并计算。混凝土容重按 $24 \text{ kN} / \text{m}^3$; 钢筋

混凝土按 $25 \text{ kN} / \text{m}^3$ 计。

(2) 内水压力:无压洞按静水压力分布计算,水深按隧洞最大过水流量对应水深加一定超高考虑。本文隧洞段内水头统一采用3.5m。

(3) 外水压力:根据地勘资料,本工程地下水在洞顶线以上20m的洞段,外水对衬砌的作用力按设排水孔考虑。由于作用到衬砌上的外水压力除与围岩渗透条件有关外,还与衬砌本身的渗透性关系密切。本文中隧洞埋深大、渗径长,经计算在有排水孔条件下作用到衬砌上的外水压力较小,本隧洞外水采用4.0m。

(4) 灌浆压力:指回填灌浆压力,灌浆施工中灌浆压力一般按钢筋砼衬砌结构取0.3~0.5Mpa压力控制。结构计算中一般取0.1~0.2Mpa,本阶段隧洞灌浆压力取0.2Mpa。

(5) 温度应力:现浇混凝土段衬砌较

薄、内外表面温差较小,温度应力可通过隧洞衬砌分缝和施工措施来消除,可不考虑温度荷载。

(6) 地应力荷载:本次结构计算均针对岩石较破碎的IV、V围岩进行,较破碎围岩中不易形成水平地应力的积聚,因此本阶段不考虑地应力。

(7) 地震荷载:本隧洞为1级建筑物,设防烈度为7度,依据《水工建筑物抗震设计规范》9.1.1条说明“设计烈度为9度的地下结构或设计烈度为8度的1级地下结构,均应验算建筑物和围岩的抗震强度和稳定性”,本隧洞可不验算隧洞洞身段的抗震强度和稳定性。

(8) 弹性抗力:隧洞围岩的抗力,习惯上多采用弹性抗力系数k来表征,其意义是圆形断面的隧洞受到均匀内水压力使隧洞半径增长一个单位距离时,岩壁上受到的压力强度。当隧洞半径为1m时,k用k₀表示,成为单位弹性抗力系数。

$$k_0 = \frac{E}{1 + \mu} \quad k = \frac{k_0}{r}$$

式中 k / k_0 — 围岩的弹性抗力系

数,单位弹性抗力系数, MPa/m;

E — 围岩的弹性模量, MPa;

μ — 围岩的泊松比;

r — 隧洞衬砌外半径,及开挖半径(开挖宽度的一半), m;

IV 围岩弹性抗力系数 k_0 取值为 5MPa/cm。

3.3 隧洞计算荷载组合

根据《水工隧洞设计规范》附录I,对于承载能力极限状态需考虑持久状况、短暂工况及偶然状况,但是本工程不存在校核洪水位,属于无压隧洞,可以不考虑偶然工况。正常使用极限状态需按持久状况进行考虑,以最不利荷载组合作为计算工况荷载条件进行计算^[3]。根据实际计算分析的需求,计算施工期、完建期及运行期3种工况,如表3所示。

表3 荷载组合表

工况	荷载	山岩压力	结构自重	内水压力		外水压力		灌浆压力	弹性抗力	施工荷载
				有外水段	无外水段	有外水段	无外水段			
钻爆法	施工期	√	√			√		√	√	√
	完建期	√	√			√			√	
运行期		√	√	√	√				√	

4 计算分析

根据计算对比,本结构控制工况为施工期工况,施工期工况计算结果如下所示:

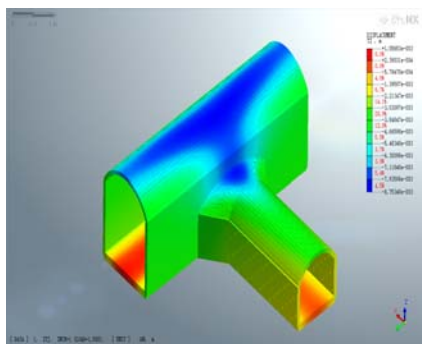


图2 竖向位移图

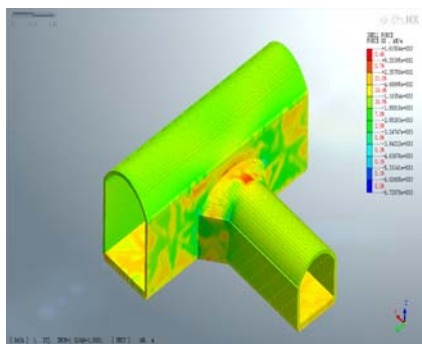


图3 轴力图

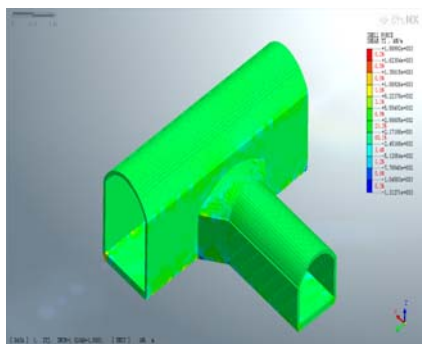


图4 YZ平面剪力图

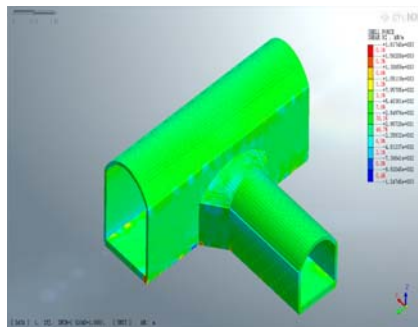


图5 XZ平面剪力图

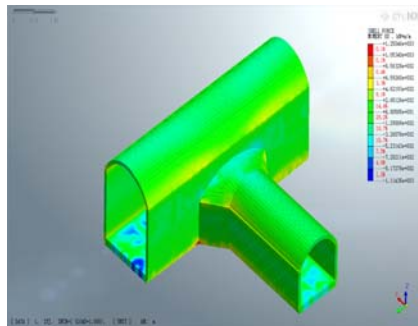


图6 弯矩图

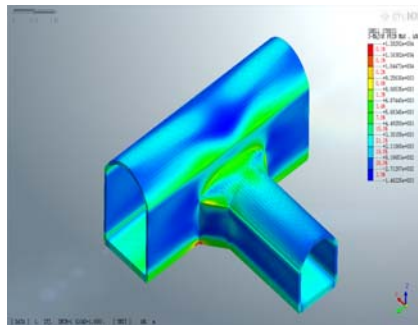


图7 最大主应力图

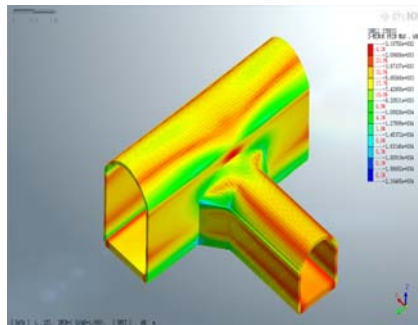


图8 最小主应力图

根据图2-图8可知,隧洞衬砌最大沉降位移分布于主洞顶部及主支洞交叉口隧洞顶部位置,位移为8.75mm,满足设计要求。从衬砌应力云图可看出,结构最大拉应力出现在主支洞交叉口底板位置,最大拉应

力12.8MPa。但拉应力分布范围较小,结构配筋时可采用局部设置加强钢筋。隧洞衬砌结构弯矩最大值位于侧墙与底板连接处,轴力最大值位于侧墙底部,剪力最大值位于底板端部,其中喇叭口端部大断面处侧墙与底板连接处有部分内力集中区域,需局部加强配筋。施工工况各项内力值最大,喇叭口端部侧墙与底板连接处弯矩值达到1250.46kN·m,但作用范围较小,加强钢筋设置范围相应可减小。根据计算结果,本隧洞主支洞正常段衬砌配筋内外侧设置E28@200。主支洞交叉口处衬砌配筋为内外侧设置E28@150,底板外侧钢筋和侧墙外侧钢筋应互锚2.5m,从而达到局部加强配筋效果,最终优化结构配筋。

5 结束语

本文采用Midas GTS NX软件引水隧洞主支洞交叉口有限元模型,利用荷载-结构法对衬砌结构进行有限元分析,得出了衬砌结构在不同工况下的变形、应力以及内力分布规律,根据控制工况结果,由此判断衬砌结构的安全稳定性,并提出合理的建议措施。隧洞主支洞交叉口接口处顶拱变形量较大,建议此处应加强固结灌浆措施,提升围岩自稳性,减小钢拱架间距以提高一次支护强度。结构侧墙与底板连接处内力值最大,其中主支洞交叉口连接处内力集中尤为明显,可适当局部加强配筋以增强结构强度。

[参考文献]

[1]赵晓红,王海军,张军,等.某引水隧洞工程衬砌结构分析[J].水电能源科学,2016(7):104-107.
 [2]金正浩,宋守平,范景春,等.SL279—2016水工隧洞设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2016.
 [3]谭智天,刘超.基于ANSYS的引水隧洞衬砌结构有限元分析[J].科技与创新,2018(21):79-80+82.

作者简介:

吕昀龙(1990—),男,汉族,四川南充人,大学本科,助理工程师,主要从事水利工程设计工作。