

# 马蹄形引水隧洞的断面优化研究

魏振荣

(新疆吐鲁番市水利水电勘测设计研究院, 新疆 吐鲁番 838000)

**摘要:** 高水头是引水隧洞设计中的难点之一, 容易造成隧洞的衬砌破坏等问题。针对马蹄形隧洞结构内力偏大的问题, 结合理正软件和有限元分析软件两者的优势, 采用两种形式, 即: 侧弧段渐变衬砌厚度优化和断面尖角的“倒角”优化, 对该隧洞进行了优化设计, 得到经济可行的隧洞优化断面形式。研究发现: 与原设计断面相比, 这两种优化断面均可有效地提高结构的承载能力; 相比渐变侧弧衬砌厚度优化, “倒角”优化更加经济可行。提出的优化设计方法与结论可为其他工程提供借鉴经验。

**关键词:** 引水隧洞; 马蹄形隧洞; 优化设计; 有限元; 倒角优化; 断面优化

中图分类号: TV672.1; TV222 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)04-0177-05

## Study on section optimization of horseshoe hydraulic tunnel

WEI Zhenrong

(Turpan water conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Turpan 838000, China)

**Abstract:** High water pressure is one of the difficulties of hydraulic tunnel design, which may cause the lining of the tunnel to be damaged. Aiming at solving the problem that the internal force of the horseshoe tunnel is too large, the optimal design of the tunnel, including the gradient thickness of the side arc and the chamfering of the cutting angle, is optimized by combining the advantages of both the Lizeheng software and the finite element analysis software, which is considered to be an economical way. Compared with the original design, the results show that the two optimization methods can effectively improve the capacity of the structure, which meets the engineering requirements. Compared with the gradient side of the arc thickness optimization, chamfering to optimize the construction is more economical. The optimal design of the project can provide a reference for other projects.

**Key words:** hydraulic tunnel; horseshoe tunnel; optimization design; finite element; chamfer optimization; section optimization

根据地质、水压等条件的不同, 引水隧洞可采取不同的断面形式。隧洞形状与当地实际条件密不可分, 不同的地质条件会直接影响隧洞的形状<sup>[1-3]</sup>, 现有工程中采用的断面形式主要有城门洞形、圆形和马蹄形断面。不同形式的断面各有优劣<sup>[4]</sup>。在高水头作用下, 选择受力结构最优的圆形断面是最好的, 但是圆形断面不易施工。马蹄形较城门洞形断面结构形式好, 较圆形差, 但马蹄形断面施工较为方便。所以, 工程上采用最多的是马蹄形结构断面。

例证工程是一引水工程所有隧洞中施工难度最大的工程。在比较了各种不同断面的优劣<sup>[2]</sup>之后, 结合当地的地质条件, 初步设计该隧洞断面为马蹄形。地质勘查与实际开挖表明, 隧洞的大部分洞段

均处于顺层破碎断裂带, 围岩破碎, 涌水量大, 外水头较高。由于外水压力较高, 设计断面的初设断面应力验算不能满足设计要求, 需要对断面进行优化。

对相同的力学模型, 理正软件和有限元计算可以得出相符的结果, 两者均可以作为隧洞衬砌结构内力分析的有效工具。但是理正软件存在断面形状无法修改, 衬砌厚度不能渐变等缺点。有限元法具有灵活考虑复杂形状和不同衬砌厚度等优点, 其缺点在于无法依据规范进行截面验算。用有限元法计算衬砌结构内力, 然后采用理正软件的结构工具箱进行截面配筋验算是解决以上问题的有效方法。该方法兼有了有限元和理正软件两者的优势, 故本文结合两者进行断面优化。

实际工程中, 地质条件复杂是隧洞设计施工时

的难题,此时既有针对隧洞做出的调整优化<sup>[5]</sup>,也可在施工过程中将危险体去除,再对隧洞进行加固设计<sup>[6]</sup>,还有一些会在设计初期列举多种方案,然后依据开挖情况进行方案论证,最终选择优化方案<sup>[7]</sup>。同时,针对隧洞断面本身,优化既有对隧洞形状的择优选择<sup>[8]</sup>,也有对隧洞本身的加固优化<sup>[9]</sup>,通过特定的力学模型,利用设计变量和目标函数之间的相互制约完成优化,还有在择优选择隧洞断面形状之后对断面进行局部再优化的<sup>[10]</sup>,前期隧洞形状为圆形,最终优化为施工空间较大的马蹄形断面,同时,对断面的局部线型进行修改以便于施

工。借鉴相关隧洞优化的思想,对该隧洞进行优化,优化时主要考虑两个方面:一是衬砌厚度的优化;二是在隧洞断面形状上进行优化。

## 1 荷载条件与有限元模型建立

### 1.1 隧洞断面形状和荷载

该隧洞的初设断面为马蹄形结构断面,衬砌厚度初设为 300 mm,底部为了施工方便和过水通畅采用平底形式。为了直观地对比本文最终优化结果,在图 1 中将不同优化情况下的隧洞断面图一并列出。具体的断面尺寸如图 1 所示。

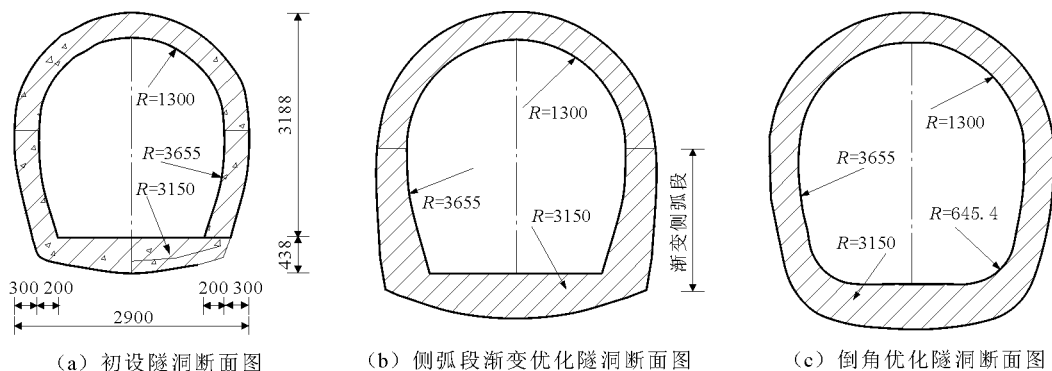


图 1 隧洞断面图(单位:mm)

地质勘察与实际开挖表明,隧洞的大部分洞段均处于顺层破碎断裂带,围岩破碎,涌水量大,隧洞外水压力达 100 m。依据水工隧洞设计规范<sup>[11-12]</sup>对隧洞外水压力水头进行折减后,得到该隧洞运行期最大外水压力水头为 100 m。

按照工程实际情况及水工隧洞设计规范,确定该隧洞运行期所承受的山岩压力、衬砌结构重度、内水压力和外水压力值,见表 1。

表 1 计算荷载

侧向山岩压力/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	顶部山岩压力/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	外水压 力/m	内水压 力/m	衬砌体重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )
8.16	23.04	100	1.9	25

### 1.2 计算模型

为了与理正软件计算结果进行对比,有限元计算中将隧洞抽象简化为沿中轴线分布的单宽梁,而梁支撑在与围岩弹性抗力系数相同的单宽弹性体上。山岩压力、内外水压力和隧洞衬砌自重直接施加到梁上。

有限元计算软件选用 ADINA 进行。结构计算中分析了结构的内力包括弯矩、轴力和剪力<sup>[13]</sup>。

有限元计算模型如图 2(a)所示。模型共计两个

单元组,一个是梁单元,另外一个为 2D 固体单元,共计 946 个节点。模型中采用梁单元模拟衬砌结构,梁单元轴线设置与衬砌体中轴线相同,将轴线分为相互连接的多个线段,每个线段划分为多个梁单元,而线段之间设置刚性连接以模拟梁段之间的连接。为了模拟衬砌结构与围岩之间的接触关系,在梁单元外侧设置 1.0 m 厚的实体单元,作为衬砌结构的支撑体,其弹抗系数与围岩的弹抗系数一致,围岩外侧设置固定支撑支座,限制其位移为 0。围岩压力采用规范的方法直接施加在衬砌结构之上,模型中的围岩只是为了模拟衬砌结构受围岩接触支撑作用,而非实际的围岩。对应的梁单元(衬砌体)如图 2(b)所示。图中粗线部分表示两个单元之间的刚性连接。

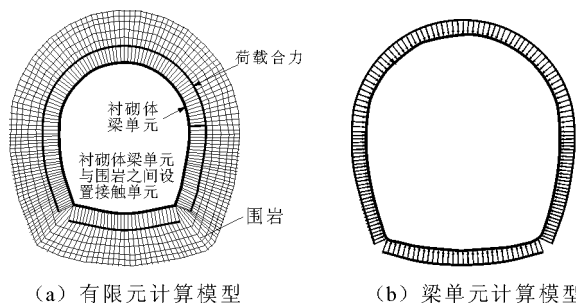


图 2 计算模型

衬砌结构与支撑体的弹性抗力系数等参数均由试验得到,具体参数见表2。

表2 计算参数表

材料名称	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	弹抗系数/ ( $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3}$ )
衬砌混凝土	25.0	28.0	0.167	0.0
支撑围岩	0.0	0.0	0.0	200

## 2 原断面内力计算

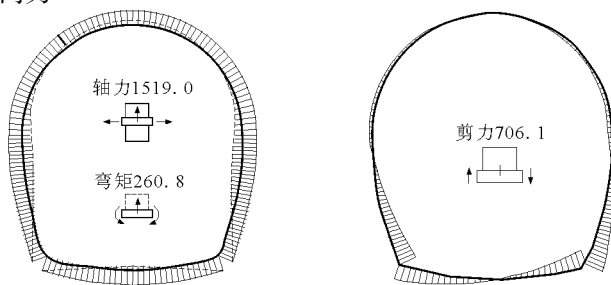
采用理正软件和有限元法进行了原设计断面的内力和应力计算。一方面分析原设计断面的内力情况,另外一方面分析两者的符合程度,验证有限元计算结果的正确性。

在衬砌厚度 300 mm,外水压力水头为 100 m (标准值)时,计算得到的断面内力分布图如图3所示。从图3(a)、图3(b)中发现,两种方法计算所得内力最大值的出现位置相同,数值也相差不多,说明有限元计算模型正确。其内力

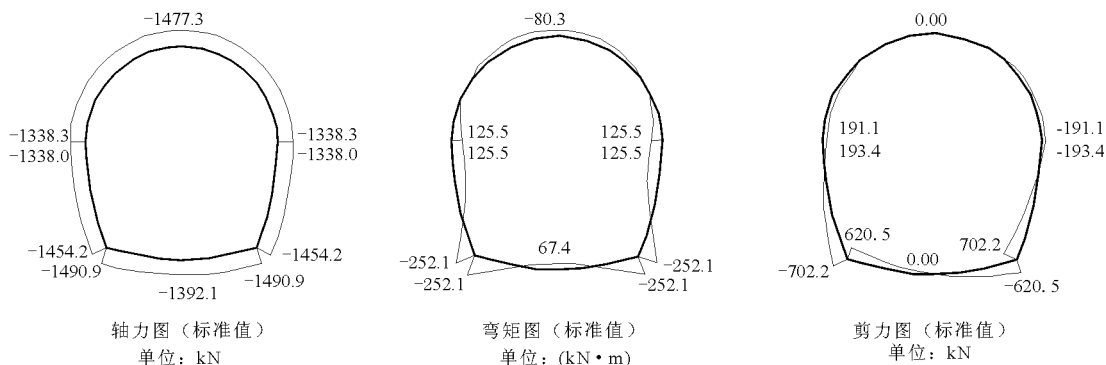
结果偏差主要是由于两者节点位置、受力简化方式不同导致的,但从整体来看,底拱和侧拱交点处内力出现最大值,受力集中,应做重点复核。

由此计算最不利情况下(100 m 水头设计值)初设断面衬砌厚度为 300 mm 的结构内力。计算发现,内力最大值依然出现在底板和侧拱处,最大外水压力水头时的内力值分别为:1 822 kN (轴力)、312.7 kN·m (弯矩)、848.9 kN (剪力)。在此条件下进行截面校核,包括偏压计算、剪压计算和裂缝验算<sup>[14]</sup>,其中偏心受压验算主要决定双层纵向钢筋的面积,抗剪验算决定箍筋的面积,而裂缝校核须满足裂缝控制的要求。100 m 外水头(标准值)的截面验算均不满足规范要求。

为了得到原设计断面所能承受的最大外水压力,对外水压力进行分析试算。通过试算得到在 300 mm 衬砌厚(初设条件)时,该隧洞仅能承受最大 34 m 的外水压力水头,远小于实际的外水压力水头。所以,初设断面无法满足实际要求。



(a) 有限元计算结果



(b) 理正计算结果

图3 断面内力计算结果图

## 3 断面优化设计

### 3.1 衬砌厚度优化

基于 300 mm 衬砌厚度时该隧洞只能承受最大 34 m 的外水压力,改变隧洞衬砌的厚度进行试算。

经过试算发现,将衬砌厚度增大到 500 mm 时,可使隧洞承受的外水压力增加至 99 m。由此得到启发,通过改变侧弧段衬砌厚度来提高隧洞的外水压承载能力。依据前面的计算结果,侧弧渐变也可以提高隧洞的外水压承载能力。将衬砌结构的侧弧段划分

为8段,每一段厚度由上到下分别为325、350、375、400、425、450、475、500 mm,以此来模拟侧弧段厚度由上到下逐渐从300 mm变到500 mm的实际情况,优化后的隧洞断面图如图1(b)所示。

侧弧采用渐变厚度衬砌后计算得到的内力见表3,为方便对比,将衬砌厚度为300 mm、衬砌厚度为500 mm的内力值均列于表3。

从表3可以看出,采用侧弧段渐变厚度时,与300 mm衬砌厚相比,各内力均有不同程度的增加;与500 mm衬砌厚的内力结果相比,轴力减少了近30%,剪力减少了约19%,弯矩变化稍缓,减少了11%左右,说明了侧弧段渐变厚度的可行性。

表3 不同衬砌厚度时的结构内力计算结果

工况	衬砌厚度/mm	轴力最大值/kN	弯矩最大值/(kN·m)	剪力最大值/kN
100m	300	1822.0	312.7	848.9
外水压	500	2250.6	411.3	1081.0
设计值	渐变厚度	1858.0	363.9	876.4

对所计算工况进行截面验算,侧弧段衬砌厚度为300~500 mm渐变时,截面验算均由原来的不满

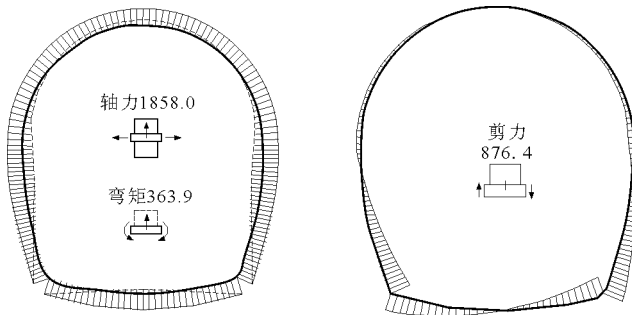


图4 侧弧段厚度渐变计算内力图(轴力及剪力单位:kN,弯矩单位:(kN·m))

足变为现在的满足要求,即100 m外水压设计值工况下断面验算均满足要求。

变侧弧段厚度优化虽然没有减小结构内力,但由于截面尺寸的增大,计算得到的截面验算结果均满足规范要求,可以满足实际工程需要。该方法可以作为断面优化的有效方法。

### 3.2 断面形状优化

形状优化的基本思路就是消除断面形状中的应力集中点,分散应力,从而减小结构内力,特别是弯矩和剪力。而原设计断面中应力集中点在侧拱和底拱的交点处,若将侧拱与底拱交点处的尖角改变为圆滑过渡的圆角,将一定会减小应力集中,减小结构的内力值。这个方法实质上类似于机械上的“倒角”。增设的倒角弧段保证与侧拱和底拱弧段同时相切,即在原侧拱和底拱之间各增设了1段弧,这样隧洞形状由原来的4段弧(顶拱、两侧拱和底拱弧段)变化成为6段弧。修改后衬砌结构中线性形状如图5所示。倒角弧段半径的大小是需要确定的问题,按照消除应力集中的原理,该半径越大,改善内力越好,但是半径过大,也会使得施工困难,所以倒角弧段的半径是优化的主要参数。

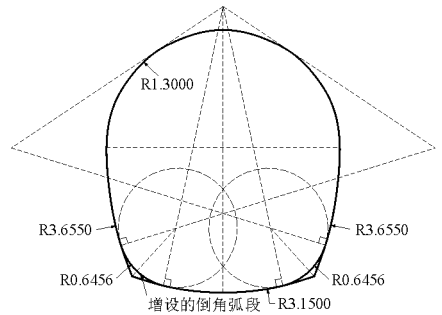


图5 侧拱和底拱交点处的倒角弧段(单位:m)

依据衬砌结构中开展分析,并将断面厚度统一设置为300 mm。选择了3组倒角弧段的半径,各组选定的原则是:从侧拱和底拱的交点到倒角弧段与侧拱切点之间的弧长占整个侧拱弧长的1/8、1/6、1/4。按照作图法作出相应的倒角圆半径分别为:0.3600、0.4623、0.6456 m。

对这3组进行了结构内力计算,所得结果如表4所示。

由表4知半径增大则轴力有所增大,但是弯矩与剪力减小很多,特别是半径为0.6456 m时,弯矩减小了43%,剪力减小了30%,效果较为明显。因此,增设倒角弧段可以达到减小结构内力的效果,推荐采用倒角半径为0.6456 m的方案。优化后隧洞

断面图如图1(c)所示。

以倒角半径为0.6456 m时的断面为最后的优化断面,优化后内力结果和优化前内力对比如图6。之后对该截面进行截面验算。

表4 不同倒角弧段半径时内力计算结果

倒角弧段半径/m	轴力最大值/kN	弯矩最大值/(kN·m)	剪力最大值/kN
原断面	1822	312.7	848.9
0.3600	1913	241.6	718.2
0.4623	1911	214.2	679.9
0.6456	1892	186.7	590.4

注:计算工况为压力水头100 m,运行期、设计值,断面厚度300 mm。

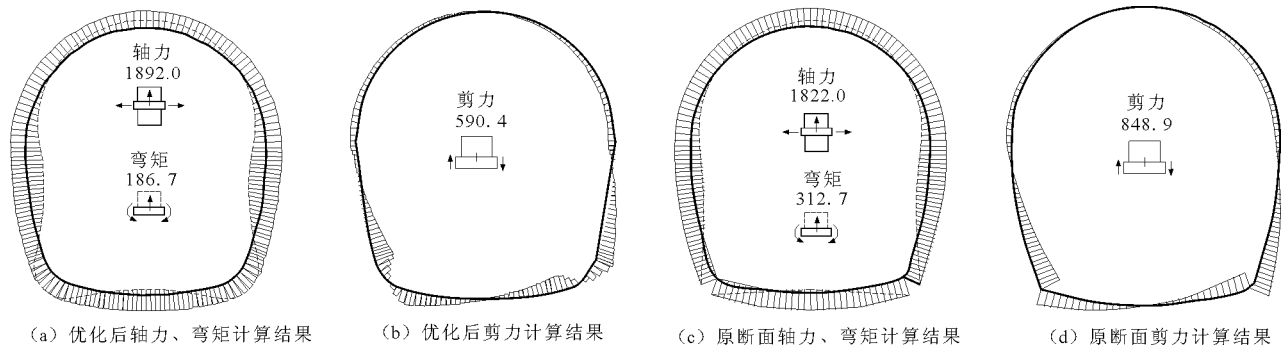


图6 优化前后内力计算结果对比图

由图6对比发现,优化方案将原来的4段弧修改为6段弧,消除了尖角,避免了应力集中。

在100m外水压力工况下,抗剪截面验算由原设计断面的不满足变成了满足,抗裂验算也是满足的。相比原设计断面,优化后的设计断面可以承受100m外水压力的作用。

断面优化大大减小了结构内力,有效解决了应力集中问题。截面验算表明,断面优化效果明显,可以满足工程需要。该方法可以作为断面优化的有效方法。

## 4 结论

本文在复核例证隧洞初设断面不符合要求的基础上,通过采用侧弧段渐变衬砌厚度的方法和用“倒角”消除原隧洞内力计算中的应力集中的方法对马蹄形隧洞进行优化,其计算结果表明:

(1)采用侧弧渐变衬砌厚度时,相比原设计断面内力有所增加但截面验算均满足条件,说明渐变衬砌厚度这一优化方法有一定的优化效果。

(2)“倒角”可以消除底拱和侧拱衔接处的尖角,避免应力集中,增大衬砌体与围岩的接触面积,从而有效减小结构内力,同时截面验算也满足要求,优化效果明显。

(3)考虑工程经济性,综合比较两种不同的优化方法,最终选择了隧洞断面形状优化,即“倒角”优化。目前该工程已建成投入使用,效果较好。

该隧洞的优化设计方法,对类似的相关隧洞设计,尤其是高水头下的引水隧洞设计,具有较好的借鉴价值。

## 参考文献:

- [1] 陈虹宇. 深埋隧洞支护断面形状优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [2] 牛 斌, 刘 宇. 青龙水电站引水隧洞优化设计[J]. 四川水力发电, 2012, 31(S1): 34-35+55.
- [3] 张 吉, 李 楠. 洞松水电站引水隧洞结构型式优化设计[J]. 水利建设与管理, 2012(6): 1-4.
- [4] 周春选. 黄土隧洞衬砌断面的优化设计[J]. 陕西水力水电技术, 2001, 17(1): 26-28.
- [5] 方卫红, 杨经会. 偏桥水电站引水隧洞衬砌结构设计与优化[J]. 西北水电, 2010(5): 21-25.
- [6] 张 丹, 李 伟. 贵州下坝水库取水兼放空隧洞优化设计[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2016, 28(1): 6-10.
- [7] 武爱玲, 宋宝生. 大型输水建筑物岗头隧洞优化设计[J]. 水科学与工程学报, 2010(2): 31-33.
- [8] 孙星亮, 李宏建, 朱永全. 大断面水工隧洞方案优化设计[J]. 石家庄铁道学院学报(自然科学版), 2005, 18(3): 5-8.
- [9] 杨万斌, 薛玺成. 南水北调双线隧洞优化设计[J]. 水利学报, 2000, 31(10): 48-51.
- [10] 虞世华. 九条岭水电站引水隧洞优化设计[J]. 水利规划与设计, 2013(4): 62-65.
- [11] 中华人民共和国水利部. SL279-2002 水工隧洞设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [12] 中华人民共和国电力工业部. DL5077-1997 水工建筑物荷载设计规范[S]. 中国电力出版社, 1997.
- [13] ADINA Theory and Modeling Guide[Z]. Watertown: ADINA R&D, 2003.
- [14] 中华人民共和国建设部. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.