

# 浅埋偏压单心圆隧道衬砌结构有限元计算研究

杨苗苗 谢宜静

中水东北勘测设计研究有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v8i7.5617

**[摘要]** 隧道施工中洞口段,节理、断层及破碎带多且存在严重的浅埋偏压情况,该部位是隧道工程施工中的重难点之一。以山西某抽水蓄能电站对外交通公路隧道V类围岩偏心受压段为例,本文采用迈达斯有限元软件对浅埋单心圆曲墙式隧洞衬砌结构进行计算,得出隧洞二次衬砌的应力分布、变形情况,并采用材料力学与结构力学方法计算其截面安全系数,为隧洞衬砌结构设计提供了有力支撑。

**[关键词]** 浅埋偏压; 有限元; 隧道; 衬砌

**中图分类号:** U45 **文献标识码:** A

## Study on finite element calculation of lining structure of shallow-buried eccentric single-core circular tunnel

Miaomiao Yang Yijing Xie

Zhongshui Northeast Survey and Design Research Co., Ltd

**[Abstract]** In tunnel construction, joints, faults and fracture zones often occur and there is serious shallow-buried eccentric pressure, which is one of the important and difficult points in tunnel engineering. Taking a pumped storage power station in Shanxi as an example, this paper uses MIDAS finite element software to calculate the lining structure of the shallow single-core circular curved wall tunnel, and obtains the stress distribution and deformation of the secondary lining of the tunnel, and uses the methods of material mechanics and structural mechanics to calculate the safety factor of its section, which provides a strong support for the design of the tunnel lining structure.

**[Key words]** Shallow buried bias; Finite element method; Tunnel; liner

### 1 引言: 工程概况

山西某抽水蓄能电站对外交通公路总长度15.99km,本段公路设计等级为公路三级,设计行车速度30km/h,交通荷载分级为重交通等级,桥涵荷载为公路-II级荷载。沿线根据地形布置两条隧道,其中1#隧道长约807m,属于中隧道,为独立单洞隧道。

### 2 地质条件

1#隧道桩号K3+173m~K3+273m段(下文对该部位均简称“浅埋偏压段”)长度100m,隧洞埋深一般9~55m,覆盖层为混合土碎石,厚1~2m,下部为岩性为震旦系下统马家河组安山岩,岩石多呈弱风化状态。该段开挖揭露2条断层,其中f1、f2两条断层规模较小,出露宽度1.4~2.0m。断层和节理相互切割,洞室局部存在结构面不利组合,该洞段围岩不稳定,属IV类围岩。

### 3 设计方案

#### 3.1 1#隧道布置

1#隧道布置情况具体见下表:

表1 隧道设置一览表

序号	隧道名称	起讫桩号		起讫高程		长度	洞门型式	隧道类别
1	1#隧道	K3+173	K3+980	813.00	822.69	807	端墙式	中隧道

#### 3.2 1#隧道断面尺寸

浅埋偏压段隧道选择采用设双侧检修道的单心圆曲墙式衬砌断面。内轮廓拱墙半径为4.80m,仰拱半径为12m。建筑限界尺寸为8.5m(宽)×4.5m(高),其中两侧检修道宽度为0.75m,两侧路缘带宽度为0.25m,行车道宽度为2×3.25=6.5m。

#### 3.3 1#隧道衬砌设计

根据1#隧道地质条件,对浅埋偏压段采用新奥法原理设计,采用柔性支护体系的复合式衬砌,即以喷、锚、网、拱架等为初期支护,以钢筋混凝土为二次衬砌。

初期支护: 工字钢拱架(或格栅钢架)、径向锚杆、钢筋网及喷射混凝土(钢拱架之间用纵向钢筋连接)。

二次衬砌: 50cm厚C30钢筋混凝土。

表2 浅埋偏压段衬砌支护参数表

衬砌类型	初期支护锚杆长度 (cm)	锚杆间距及类型 (cm)	喷射层位置厚度 (cm)	钢筋网 (cm)	二次衬砌及仰拱混凝土厚度 (cm)	预支护措施
初期支护+二次衬砌	300	Φ25@100×100 (中空注浆锚杆)	拱、墙、仰拱 26	Φ8@20×20 双层	钢筋混凝土 50	I20型钢拱架配合小导管注浆, 钢管间距 75cm; 根据需要设长管棚

C40(C35)喷射混凝土26cm  
 Φ8钢筋网20cm×20cm(双层)  
 I20a型钢拱架间距100cm  
 Φ50软式透水管  
 400g/m<sup>2</sup>土工布  
 1.5mm厚EVA防水板  
 400g/m<sup>2</sup>土工布  
 50cm厚C40(C35)钢筋混凝土

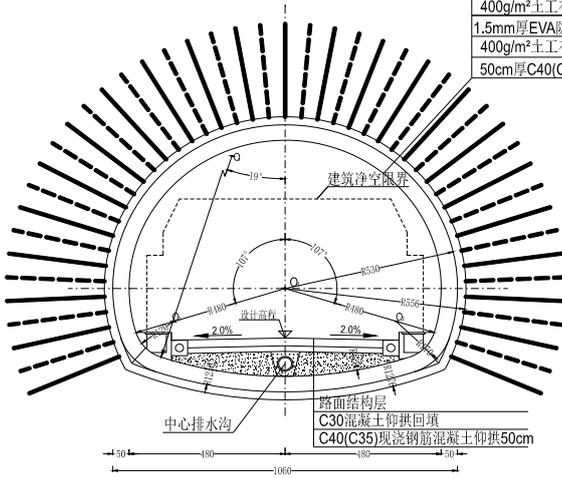


图1 浅埋偏压段衬砌典型断面图

### 4 隧洞数值模拟计算

#### 4.1 计算方法

地下结构的设计计算方法主要有两种：荷载结构法和地层结构法<sup>[1]</sup>。深埋隧道中的整体式衬砌、浅埋隧道中的整体或复合式衬砌及明洞衬砌等宜采用荷载结构法计算<sup>[2]</sup>。因此，本项目对该段衬砌采用荷载结构法进行计算。

荷载结构法将地面结构的计算方法引入隧道工程结构计算中，荷载为隧道开挖后开挖影响范围内岩体塌落或松弛产生的松散荷载，以及衬砌由于受力后变形受围岩限制而受到的被动围岩弹性抗力，受力结构为衬砌，包括初期支护与二次衬砌，为保证安全起见，一般计算时只考虑二次衬砌。在确定荷载及结构后，将隧道按照弹性地基上结构物用结构力学的方法计算衬砌内力。该方法适合于浅埋或者明挖后回填或围岩塌落等荷载明确的情况。该方法只简单的把围岩视为产生荷载的原因，而没有考虑到围岩也是承担荷载的结构，采用该方法设计较保守，但由于该方法原理简单、计算方便，且已应用时间较长，计算技术成熟，采用该方法设计时较安全，因此目前在进行二次衬砌安全性计算或者截面强度、厚度验算时仍被广泛应用<sup>[3-6]</sup>。

#### 4.2 计算过程

(1) 荷载。按照隧道设计规范附录F中偏压隧道衬砌荷载计算中的方法计算。

假定偏压荷载分布与地面坡度一致，取1:5。

取拱顶埋深H=15m，地面坡度1:5，围岩重度。

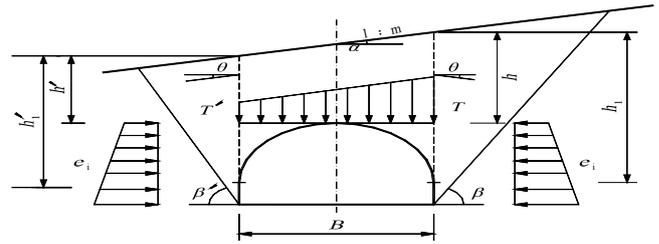


图2 偏压分布示意图

拱圈垂直围岩松散压力:  $q_i = \gamma h_i$ ;

内侧压力:  $e_i = \lambda \gamma h_i$ ;

外侧压力:  $e_i = \lambda' \gamma h_i$ ;

其中:

$$\lambda = \frac{1}{\tan \beta - \tan \alpha} \times \frac{\tan \beta - \tan \varphi_c}{\tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \varphi_c - \tan \theta) + \tan \varphi_c \tan \theta]} = 0.18$$

$$\lambda' = \frac{1}{\tan \beta' - \tan \alpha} \times \frac{\tan \beta' - \tan \varphi_c}{\tan \beta' [1 + \tan \beta (\tan \varphi_c - \tan \theta) + \tan \varphi_c \tan \theta]} = 0.30$$

式中,  $\tan \beta = \tan \varphi_c + \frac{(\tan^2 \varphi_c + 1)(\tan \varphi_c - \tan \alpha)}{\tan \varphi_c - \tan \theta} = 2.81$

$$\tan \beta' = \tan \varphi_c + \frac{(\tan^2 \varphi_c + 1)(\tan \varphi_c + \tan \alpha)}{\tan \varphi_c - \tan \theta} = 3.21$$

$$\beta = \tan^{-1} 2.81 = 70^\circ$$

$$\beta' = \tan^{-1} 3.21 = 73^\circ$$

经过计算，V级浅埋偏压段荷载分布如下图。

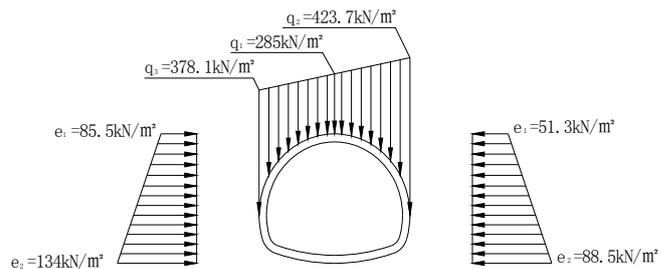


图3 浅埋偏压荷载分布图

(2) 约束。计算时边界条件：两侧边界约束水平方向位移，底部边界约束竖向位移。

(3) 计算假定。①所有材料均为均质、连续、各向同性的；②围岩采用莫尔-库仑本构模型，初期支护、二次衬砌采用梁单元模拟；③不考虑空间效应，采用二维平面计算模型。

(4) 材料参数。混凝土强度等级C30，弹性模量、泊松比、重度分别为： $E = 31 \text{ GPa}$ ， $\mu = 0.2$ ， $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ 。围岩重度  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ；围岩弹性抗力系数  $300 \text{ MPa/m}$ 。

(5) 计算模型。衬砌结构简化为作用在弹性支撑上的闭合框架, 钢筋混凝土衬砌采用梁单元模拟; 采用径向弹簧单元模拟围岩与衬砌的相互作用, 弹簧单元只受压<sup>[1]</sup>。衬砌共划分单元56个, 设置径向弹簧单元56个。

荷载为填土压力, 结构自重, 考虑混凝土收缩徐变及温度荷载, 按整体升温10℃、降温25℃计算, 二次衬砌结构承担全部荷载。

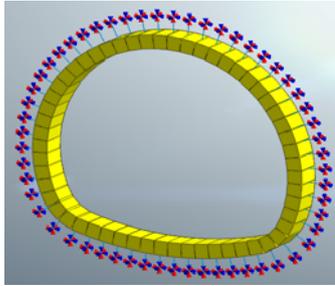


图4 计算模型图

### 5 计算结果及分析

#### 5.1 内力计算结果

通过迭代计算, 二次衬砌内力计算结果分布如下: 弯矩在拱顶右侧、右侧拱腰达到最大值, 拱顶右侧弯矩最大为221.9kN·m, 内侧受拉; 右侧拱腰最大弯矩为228.1kN·m, 外侧受拉。整个衬砌截面受压, 最大轴力发生在仰拱中心处, 最大值为2369.6kN, 最小值发生在拱顶, 为1326.4kN。剪力在边墙与拱脚连接处达到最大值, 为308.1kN。

#### 5.2 变形计算结果

由图5、图6看出, 最大沉降发生在拱顶, 为7.09mm, 最小沉降发生在仰拱中心, 为0.21mm, 由于隧道浅埋偏压, 支护结构受到左小右大的不对称围岩松散压力, 右侧边墙竖向位移较左侧大, 约为4.4mm, 比左侧大3.1mm。最大沉降小于设计规范中要求的埋深小于50m时允许拱顶下沉值为0.20%~0.80%的开挖高度, 约为30mm~120mm。

水平向位移最大值发生在右侧拱腰处, 为2.58mm, 最大洞周水平相对收敛1.7mm, 收敛值为0.03%, 小于设计规范中要求的埋深小于50m时允许洞周水平相对收敛值为0.20%~0.80%。变形后明洞结构仍满足净空要求。

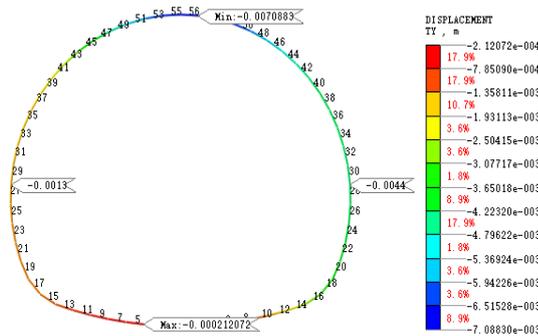


图5 二次衬砌竖向变形图

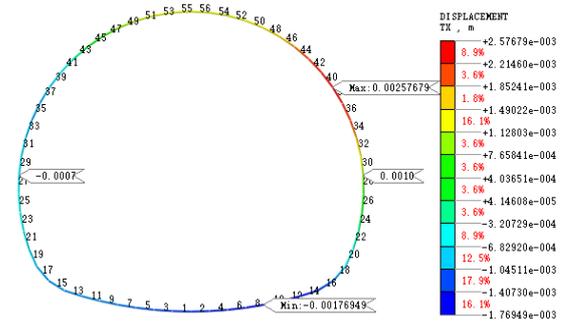


图6 二次衬砌水平变形图

#### 5.2 截面安全系数验算

采用材料力学与结构力学方法, 在算得结构内力的基础上, 按钢筋混凝土构件计算二次衬砌结构安全系数, 同时结合隧道的变形等来综合评价衬砌的支护效果。

表3 浅埋偏压段二次衬砌单元安全系数统计表

单元	弯矩 M(N·m)	轴力 N(N)	偏心距 e0(m)	厚度 h(m)	安全系数 K
53	252199	1276659	0.198	0.5	3.90
54	240178	1293247	0.186	0.5	4.12
55	270175	1264708	0.214	0.5	3.57
56	266871	1269831	0.210	0.5	3.63

根据以上计算结果, 二次衬砌最小安全系数为3.57, 发生在拱顶位置, 二次衬砌的强度安全系数大于最小安全系数2.0<sup>[2]</sup>。

### 6 结语

在本抽水蓄能电站工程公路隧道设计中, 对1#隧道浅埋偏压段隧道采用迈达斯有限元程序进行隧洞衬砌结构计算, 复核了隧洞截面安全系数, 解决了浅埋单心圆曲墙式隧洞不宜手动计算的问题, 同时, 也为该类型结构分析设计提供了有价值的参考和借鉴经验。

#### 【参考文献】

- [1]王力达.隧道荷载结构法在有限元软件中的实现[J].水利与建筑工程学报,2012,10(02):105-107.
- [2]JTJ 3370.1-2018,公路隧道设计规范[S].
- [3]肖明清,王少锋,陈立保,等.基于荷载结构法的隧道初期支护设计方法研究[J].铁道工程学报,2018,35(04):60-64.
- [4]梁璋彬,赵其华.基于FLAC的荷载结构法在衬砌验算中的应用[J].山西建筑,2007,(26):316-317.
- [5]邓文龙,王飞.隧道复合式衬砌荷载结构法计算方法的探讨[J].山西建筑,2012,38(07):175-177.
- [6]鲁得文,丁冬冬.基于荷载结构法的某隧道衬砌结构受力特性分析[J].四川水泥,2016,(09):39.

#### 作者简介:

杨苗苗(1991--),女,汉族,吉林省长春市人,硕士研究生,工程师,从事水利水电工程设计工作。

谢宜静(1991--),女,汉族,辽宁省盖州市人,硕士研究生,工程师,从事水利水电工程设计工作。