



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401748

引用格式:刘聪,罗震,杨帆,等.两类计算模型下浅埋软土地铁隧道下穿城市道路关键影响参数匹配性分析[J].科学技术与工程,2025,25(4):1676-1687.

Liu Cong, Luo Zhen, Yang Fan, et al. Matching analysis of key influencing parameters for shallow buried soft soil subway tunnels crossing urban roads under two types of calculation models[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1676-1687.

# 两类计算模型下浅埋软土地铁隧道下穿城市道路 关键影响参数匹配性分析

刘聪,罗震,杨帆,徐世祥,龚志彪

(东华理工大学土木与建筑工程学院,南昌 330013)

**摘要** 为探讨车辆荷载下浅埋软土暗挖通道合理的衬砌断面厚度,采用荷载-结构法和地层-结构法分别建立二维有限元模型,量化了不同埋深、车辆荷载以及衬砌厚度下地铁暗挖通道的受力特性及安全系数。结果表明:无论有无车辆荷载,隧道弯矩最大值均位于拱脚或拱肩处,安全系数最小值则位于拱顶。按原设计配筋,无论是否有车辆荷载,安全系数随埋深增大而减小,随二次衬砌厚度增大而增大。浅埋工况下,荷载-结构法计算的安全系数均比地层-结构法计算的安全系数小。荷载-结构法计算结果表明:在车辆荷载与围岩压力下,二次衬砌厚依次为 60、90、100 cm 时,埋深分别不超过 8、12、14.6 m 时满足规范安全系数要求;地层-结构法计算结果表明:在车辆荷载与围岩压力下,二次衬砌厚依次为 60、80、100 cm 时,其埋深分别不超过 12、15.5、19 m 能满足规范安全系数要求。

**关键词** 地铁隧道;二次衬砌;车辆荷载;安全系数

**中图分类号** U452; **文献标志码** A

## Matching Analysis of Key Influencing Parameters for Shallow Buried Soft Soil Subway Tunnels Crossing Urban Roads under Two Types of Calculation Models

LIU Cong, LUO Zhen, YANG Fan, XU Shi-xiang, GONG Zhi-biao

(Department of Civil and Architecture Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**[Abstract]** To explore the reasonable lining section thickness of shallow buried soft soil excavation channels under vehicle loads, two-dimensional finite element models were established using load structure method and strata structure method, respectively. The stress characteristics and safety factors of subway excavation channels under different burial depths, vehicle loads, and lining thicknesses were quantified. The research results indicate that regardless of the presence or absence of vehicle loads, the maximum bending moment of the tunnel is located at the arch foot or arch shoulder, and the minimum safety factor is located at the arch crown. According to the original design reinforcement, regardless of whether there is vehicle load, the safety factor decreases with increasing burial depth and increases with increasing secondary lining. Under shallow burial conditions, the safety factors calculated by the load structure method are smaller than those calculated by the stratum structure method. The calculation results of load structure method show that under vehicle load and surrounding rock pressure, the secondary lining thickness is 60, 90, 100 cm respectively, and the burial depth does not exceed 8, 12, 14.6 m respectively, meeting the safety factor requirements of the specifications. The calculation results of the stratum structure method show that under vehicle load and surrounding rock pressure, when the thickness of the secondary lining is 60, 80, 100 cm respectively, its burial depth does not exceed 12, 15.5, 19 m, which can meet the safety factor requirements of the specifications.

**[Keywords]** subway tunnels; secondary lining; vehicle load; safety factor

城市核心城区道路交通压力大,地铁出入口及风道等多采用浅埋暗挖法开挖。然而,在某些超浅埋软土地区,暗挖地铁通道自身稳定性差,且受地面交通荷载扰动,开挖稳定性面临着更为严峻的挑战。

在交通荷载下浅埋暗挖地铁通道稳定性研究方面,董建松<sup>[1]</sup>运用三维有限差分软件建立半空间隧道动荷载计算模型,研究复杂交通荷载作用下中隔墙(center diaphragm, CD)法隧道上覆地层位移、速度和支护结构动力响应,揭示了交通荷载的影响

收稿日期:2024-03-12; 修订日期:2024-11-21

基金项目:中国博士后科学基金(2022M711429);江西省自然科学基金(20224BAB204058)

第一作者:刘聪(1986—),男,湖南益阳人,博士,讲师。研究方向:隧道工程。E-mail:liucong731@ecut.edu.cn。

范围及规律。李珏池<sup>[2]</sup>研究发现,暗挖隧道对上部既有轨道结构主要影响部位在拱顶斜向 $45^\circ$ 及墙脚位置。张川<sup>[3]</sup>以重庆轨道交通4号线一期唐栋桥站—唐家沱站区间及出入线暗挖段为依托,运用ANSYS软件建立有限元模型,利用蒙特卡罗法及拉丁方抽样原理对衬砌的可靠性进行了研究,结果表明,衬砌的可靠性受砂岩和衬砌参数影响较大。段雨彤等<sup>[4]</sup>通过建立三维数值仿真模型,计算了埋深为1、3、5 m时隧道沉降,发现隧道沉降增加值随埋深增大而减小。基于其推导的围岩压力与位移解析解,赵何霖等<sup>[5]</sup>对支护结构厚度和弹性模量进行了参数分析,发现隧道结构弯矩与支护厚度、弹性模量呈正相关关系,且弹性模量影响更大,初期支护参数比二次衬砌参数变化影响更大。以某膨胀岩浅埋隧道为工程背景,运用荷载结构计算方法,运凯等<sup>[6]</sup>对膨胀位置、仰拱矢跨比、仰拱厚度等指标进行了参数影响分析,发现在隧道仰拱和边墙处产生局部膨胀时,仰拱及拱脚处的内力最大,仰拱隆起变形最大,对结构的危害也最大。邓来等<sup>[7]</sup>以峨汉高速豹狸岗隧道工程为依托,运用现场实测和数值仿真,研究富水隧道二次衬砌结构的受力特性,确定了高水压下二次衬砌的合理设计参数。陈炳光等<sup>[8]</sup>对峨汉高速豹狸岗隧道IV级围岩段进行了围岩压力、围岩-结构间接触压力、支护结构内力测试,得到荷载分布规律及结构受力特征。彭学军等<sup>[9]</sup>采用FLAC3D有限差分法建立三维隧道模型,研究鹅岭隧道在4种开挖方案下隧道的安全系数,分析隧道围岩潜在的破坏形式,确定了三台阶法合理的开挖参数。孙迪<sup>[10]</sup>运用数值仿真,分析了在有仰拱情况下隧道衬砌的安全系数,结果表明,无仰拱时,结构的弯矩会显著增大,安全系数比有仰拱时会大幅降低,仰拱结构封闭成环对于提升隧道结构的承载能力具有重要意义。杨朝帅等<sup>[11]</sup>通过数值模拟分析了不同病害条件下隧道的安全系数,得到了衬砌开裂、衬砌渗漏水、衬砌背后空洞对隧道安全性有不利影响,如轴力、弯矩、剪力增加,安全系数下降。应国刚等<sup>[12]</sup>对荷载调节控制技术在超大断面隧道中的应用进行了研究,发现通过调整拱架受载水平,能使弯矩峰值大幅度降低,提升安全系数。基于弹性地基曲梁理论和空间状态法,刘新荣等<sup>[13]</sup>建立隧道衬砌受力二维解析解模型,采用Laplace变换求解得到了衬砌内力与位移,并与数值模拟结果对比,发现二次衬砌劣化后,劣化厚度较小时,劣化处弯矩及安全系数均随衬砌有效承载厚度减小而减小,当劣化厚度超过一定值后,轴力偏心距将减小,此时安全系数反而有所增加。向龙

等<sup>[14]</sup>运用数值仿真方法评价了施工质量因素对隧道结构安全性的影响,确定隧道拱顶和拱脚弯矩大,安全系数最低,宜对拱顶及拱脚进行加强支护,并增加钢筋及抗拉锚杆等措施优化结构受力。

前人研究主要以地层结构法研究新建暗挖地铁通道施工力学特性及安全性,而运用荷载-结构法开展浅埋软土隧道安全性及车辆荷载影响方面的研究积累相对较少。地层-结构法与荷载-结构法各有优缺点及适用范围,地层-结构法具有较为完备的理论依据,能较好地模拟浅埋隧道的荷载及地层与结构之间的相互作用,但对于深埋隧道的成拱效应和围岩自承载模拟存在缺陷,无法区分深埋、浅埋隧道外荷载差异。荷载-结构法属于经验性计算模型,对深、浅埋隧道进行了界定,并确定了深、浅埋隧洞外荷载计算公式,但对地层与结构之间的相互作用模拟较为简单,围岩自承载估计不准等缺陷。

为此,拟建立数值仿真模型,采用两种方法分别计算车辆荷载扰动下浅埋软土暗挖通道施工力学特性,揭示埋深、车辆荷载的影响规律,进一步确定不同埋深条件下暗挖通道的合理衬砌厚度,以期对浅埋软土暗挖地铁通道断面设计确定提供有益参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

南昌地铁3号线邓埠站位于南昌县迎宾中大道与开发路交界处,邓埠站1号出入口暗挖段横跨道路。通道设计宽度为8.3 m,高度为5.8 m,初期支护厚30 cm,二次衬砌厚60 cm,暗挖段总长23 m。通道结构位于粉质黏土中,由附属明挖段向车站主体方向开挖。隧道横断面图如图1所示。

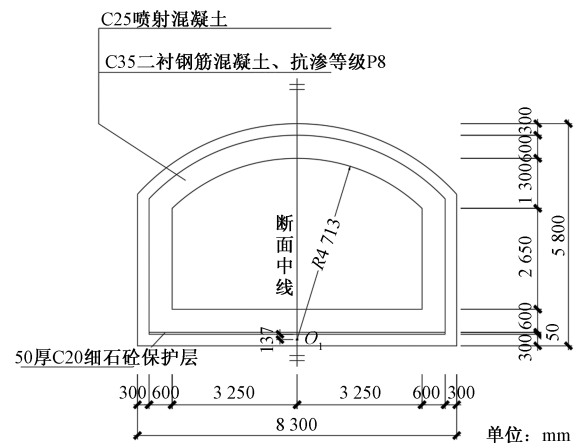


图1 隧道横断面图

Fig. 1 Cross section view of tunnel



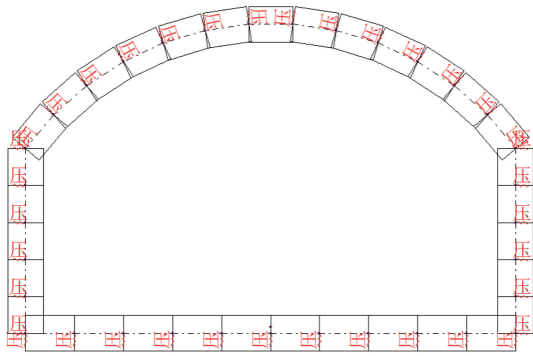


图4 荷载-结构计算有限元模型及接地弹簧设置图  
Fig. 4 Load structure calculation finite element model and grounding spring setting diagram

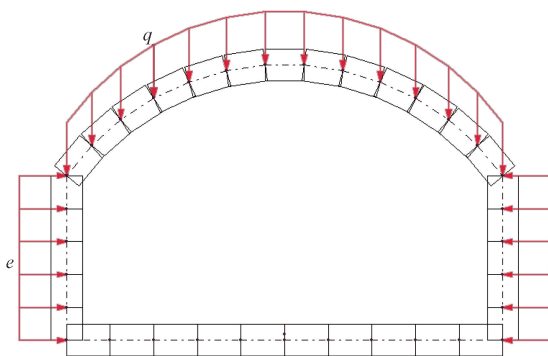


图5 荷载-结构计算模型荷载布置图  
Fig. 5 Load structure calculation model load layout diagram

岩重度,  $kN/m^3$ ;  $H$  为隧道埋深, 指隧道顶至地面的距离,  $m$ 。

侧向围岩压力为

$$e = \gamma \left( H + \frac{1}{2} H_1 \right) \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi_c}{2} \right) \quad (3)$$

式(3)中:  $e$  为侧向均布压力,  $kN/m^2$ ;  $H_1$  为隧道高度,  $m$ 。

### 2.3 “地层-结构”模型建立

采用“地层-结构”模型, 该模型是一种常见且成熟的理论计算模型。采用 ABAQUS 有限元软件建立二维模型尺寸为  $80\text{ m} \times 80\text{ m}$ 。土体、初期支护和二次衬砌均设置为二维壳单元。隧道宽  $8.3\text{ m}$ , 高  $5.8\text{ m}$ , 初期支护厚度为  $0.3\text{ m}$ , 二次衬砌厚度为  $0.6\text{ m}$ 。隧道模型如图 6 所示。

模型整体施加重力荷载。模型上表面自由, 前后及底部施加法向位移约束。土体与初期支护和初期支护与二次衬砌之间设置绑定关系。如图 7 所示。

### 2.4 “地层-结构”模型参数

根据隧道所在地的地质资料可判断隧道所在土层为 VI 级围岩。按照《公路隧道设计规范第一册

土建工程》(JTG 3370.1—2018)<sup>[16]</sup> 选取 6 级围岩物理力学参数, 如表 1 所示。

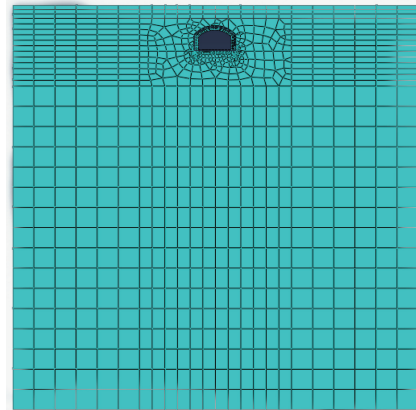


图6 地层-结构计算模型有限元模型图  
Fig. 6 Finite element model diagram of geological structure calculation model

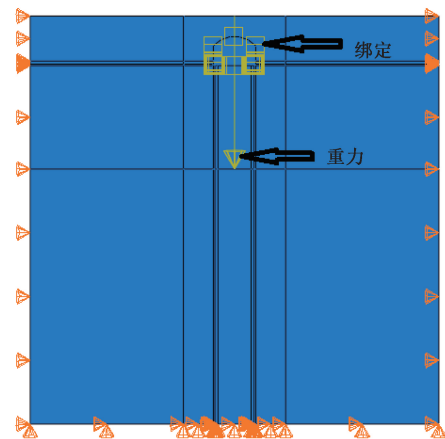


图7 地层-结构计算模型边界和荷载图  
Fig. 7 Boundary and load diagram of geological structure calculation model

表1 地层-结构计算模型有限元模型物理力学参数  
Table 1 Stratigraphic structural calculation model, finite element model, physical and mechanical parameters

材料单元	模型	密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	泊松 比	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/( $^\circ$ )
VI级围岩	摩尔-库伦	1 500	14	0.29	10	18.85
初期支护	弹性	2 400	28 000	0.20	—	—
二次衬砌		2 400	31 500	0.20	—	—

### 2.5 计算工况

为研究不同埋深的围岩压力、车辆荷载对浅埋地铁隧道安全系数的影响, 设置工况如表 2 所示。

### 2.6 模型验证

为了验证模型的准确性, 用荷载结构计算模型中隧道模型的变形和地层结构计算模型中地表沉降与实际监测的地表沉降进行对比, 如图 8 所示。荷

表 2 计算工况  
Table 2 Calculation cases

工况	埋深/m	车辆荷载/(kN·m <sup>-1</sup> )	二次衬砌厚度/cm	工况	埋深/m	车辆荷载/(kN·m <sup>-1</sup> )	二次衬砌厚度/cm
1	4	0	60	26	4	15.225	80
2	8	0	60	27	8	15.225	80
3	12	0	60	28	12	15.225	80
4	16	0	60	29	16	15.225	80
5	19	0	60	30	19	15.225	80
6	4	15.225	60	31	4	0	90
7	8	15.225	60	32	8	0	90
8	12	15.225	60	33	12	0	90
9	16	15.225	60	34	16	0	90
10	19	15.225	60	35	19	0	90
11	4	0	70	36	4	15.225	90
12	8	0	70	37	8	15.225	90
13	12	0	70	38	12	15.225	90
14	16	0	70	39	16	15.225	90
15	19	0	70	40	19	15.225	90
16	4	15.225	70	41	4	0	100
17	8	15.225	70	42	8	0	100
18	12	15.225	70	43	12	0	100
19	16	15.225	70	44	16	0	100
20	19	15.225	70	45	19	0	100
21	4	0	80	46	4	15.225	100
22	8	0	80	47	8	15.225	100
23	12	0	80	48	12	15.225	100
24	16	0	80	49	16	15.225	100
25	19	0	80	50	19	15.225	100

载结构计算模型中隧道模型的最大变形为 14.1 mm,实际监测的地表最大沉降为 12.7 mm。隧道模型变形大于实际监测地表沉降,两者误差为 11.02%。地层结构计算模型中地表最大沉降为 13.43 mm,实际监测的地表最大沉降为 12.7 mm。地层结构计算模型中地表沉降大于实际监测地表沉降,两者误差为 5.75%。隧道模型的变形和地表沉降与实际地表沉降的趋势基本相同。这表明两个模型是可靠的。

### 3 模型计算结果

#### 3.1 “荷载-结构”模型计算弯矩

用 SAP84 有限元软件,建立各工况隧道模型对其进行受力计算。模型主要讨论隧道上部结构安全。各工况中除底板外拱脚或拱肩为弯矩最大值处。在当隧道二次衬砌厚度为 100 cm 时,有车辆荷载,埋深为 19 m 时模型拱肩处弯矩最大,其值为 971 kN·m。其中衬砌厚度为 60、100 cm 隧道弯矩图如图 9 所示。

由图 9 可知,在埋深和二次衬砌厚度相同的情况下,有车辆荷载时衬砌所受弯矩均高于无车辆荷载;在同等埋深下,无论有无车辆荷载,弯矩随二次衬砌厚度增大而增大;在二次衬砌厚度、车辆荷载

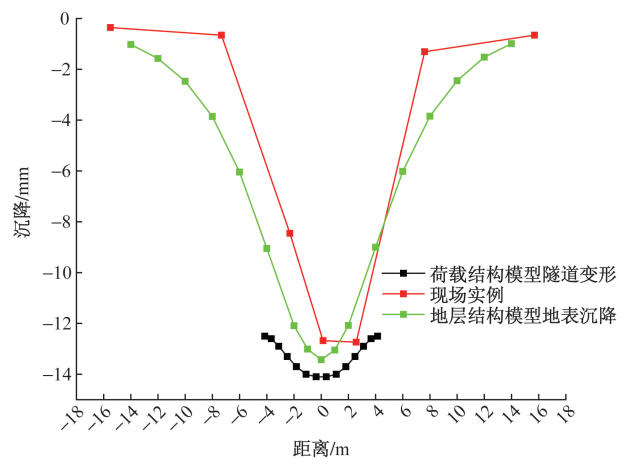
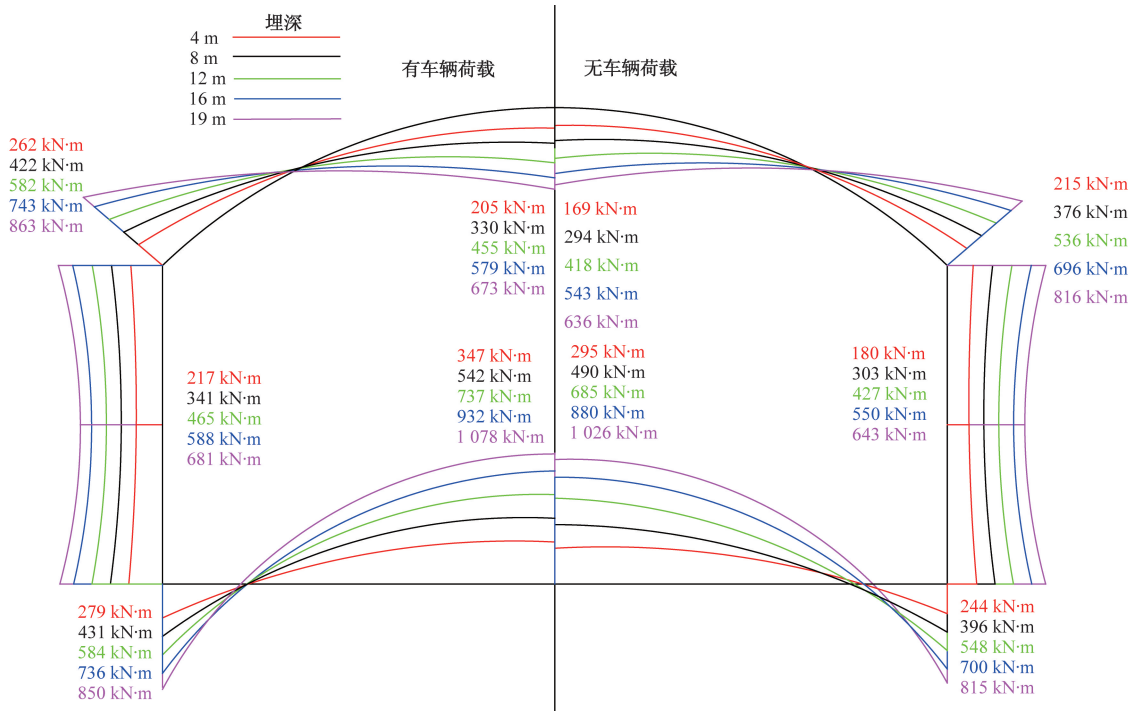


图 8 隧道模型变形与实际监测地表沉降对比图  
Fig. 8 Comparison between tunnel model deformation and actual monitoring of surface settlement

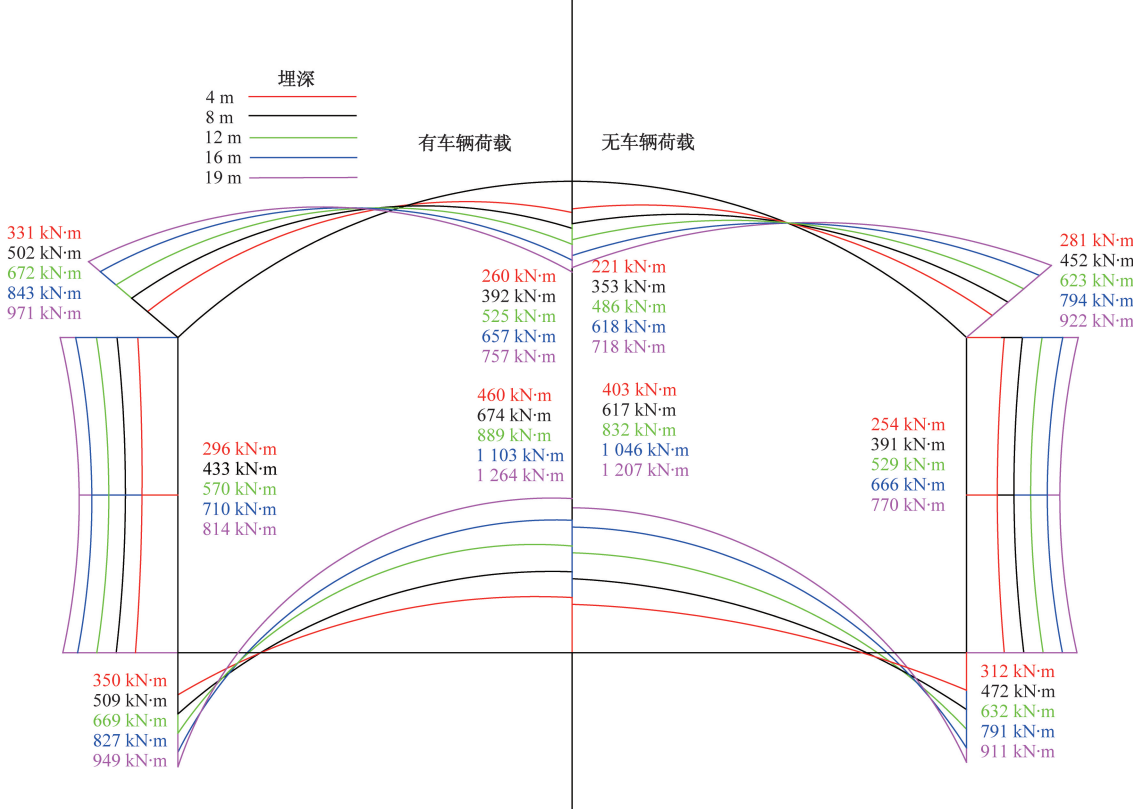
相同时,隧道最大弯矩值随埋深增加而增大,弯矩最大值处由拱脚变成拱肩。

#### 3.2 “荷载-结构”模型计算轴力

用 SAP84 有限元软件,建立各工况隧道模型对其进行受力计算。模型主要讨论隧道上部结构安全。各工况中拱脚均为轴力最大值处。在当隧道二次衬砌厚度为 100 cm,有车辆荷载且埋深为 19 m 时,模型拱脚处轴力最大,其值为 1 210 kN。其中衬



(a) 荷载-结构计算模型二次衬砌为60 cm弯矩图



(b) 荷载-结构计算模型二次衬砌为100 cm弯矩图

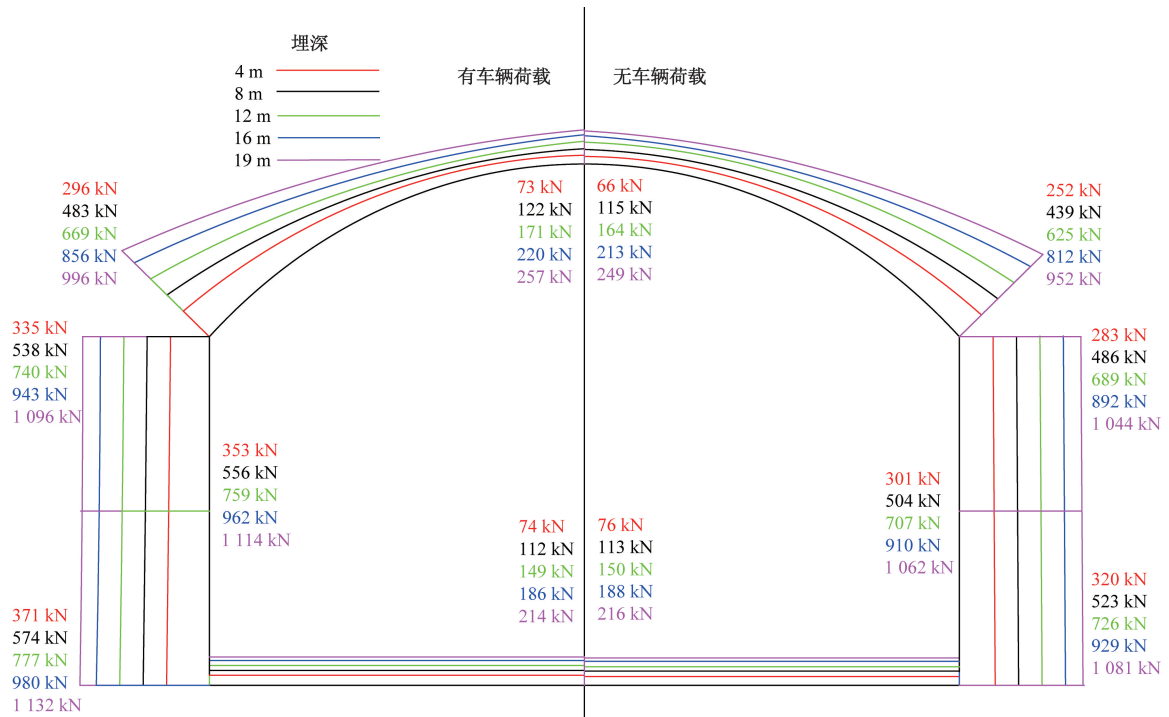
图9 荷载-结构计算模型弯矩图

Fig.9 Load structure calculation model bending moment diagram

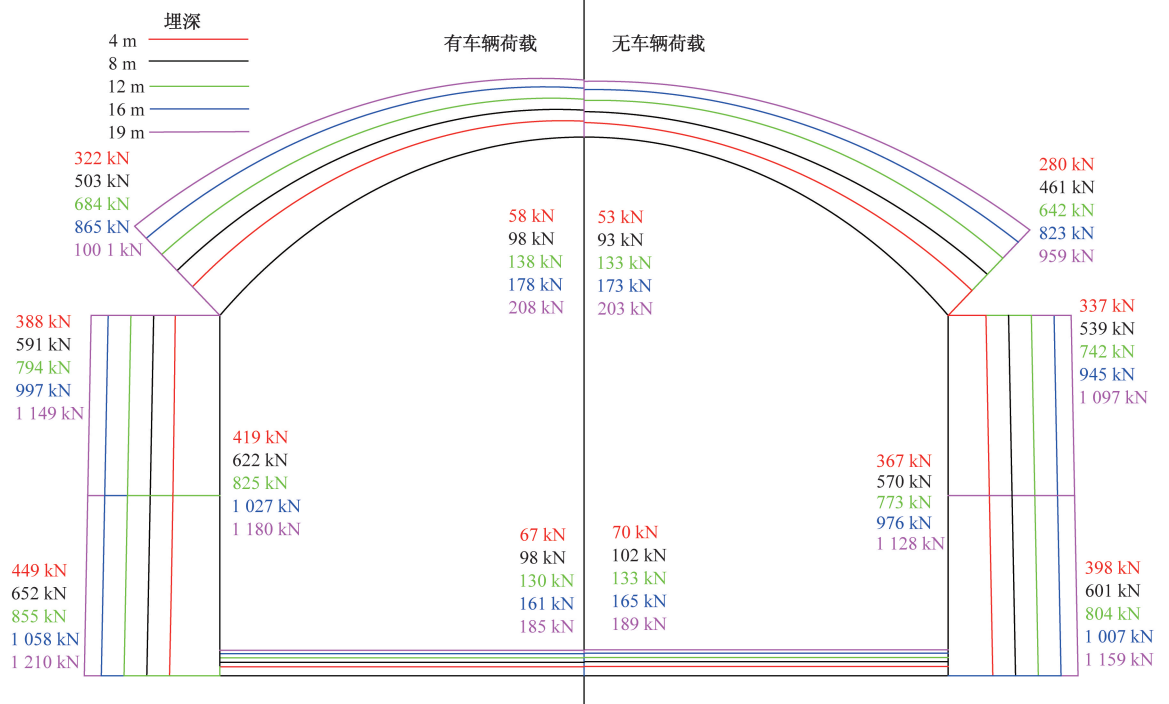
砌厚度为60、100 cm隧道轴力图如图10所示。

由图10可知,在埋深和二次衬砌厚度相同的情况下,有车辆荷载时衬砌所受轴力均高于无车辆荷载;在同等埋深下,无论有无车辆荷载,隧道的拱

肩、拱腰和拱脚的轴力随二次衬砌厚度增大而增大,隧道的拱顶的轴力随二次衬砌厚度增大而减小;在二次衬砌厚度、车辆荷载相同时,隧道最大轴力值随埋深增加而增大。



(a) 荷载-结构计算模型二次衬砌为60 cm轴力图



(b) 荷载-结构计算模型二次衬砌为100 cm轴力图

图 10 荷载-结构计算模型轴力图

Fig. 10 Load structure calculation model axial diagram

### 3.3 “地层-结构”模型计算弯矩

用 ABAQUS 有限元软件,建立各工况隧道模型对其进行受力计算。模型主要讨论隧道上部结构安全。各工况中除底板外拱脚或拱肩为弯矩最大值处。在当隧道二次衬砌厚度为 100 cm 时,无车辆

荷载,埋深为 19 m 时模型拱肩处弯矩最大,其值为 854.372 kN·m。其中衬砌厚度为 60 cm、100 cm 隧道弯矩图如图 11 所示。

由图 11 可知,在埋深和二次衬砌厚度相同的情况下,有车辆荷载时衬砌所受弯矩均高于无车辆荷

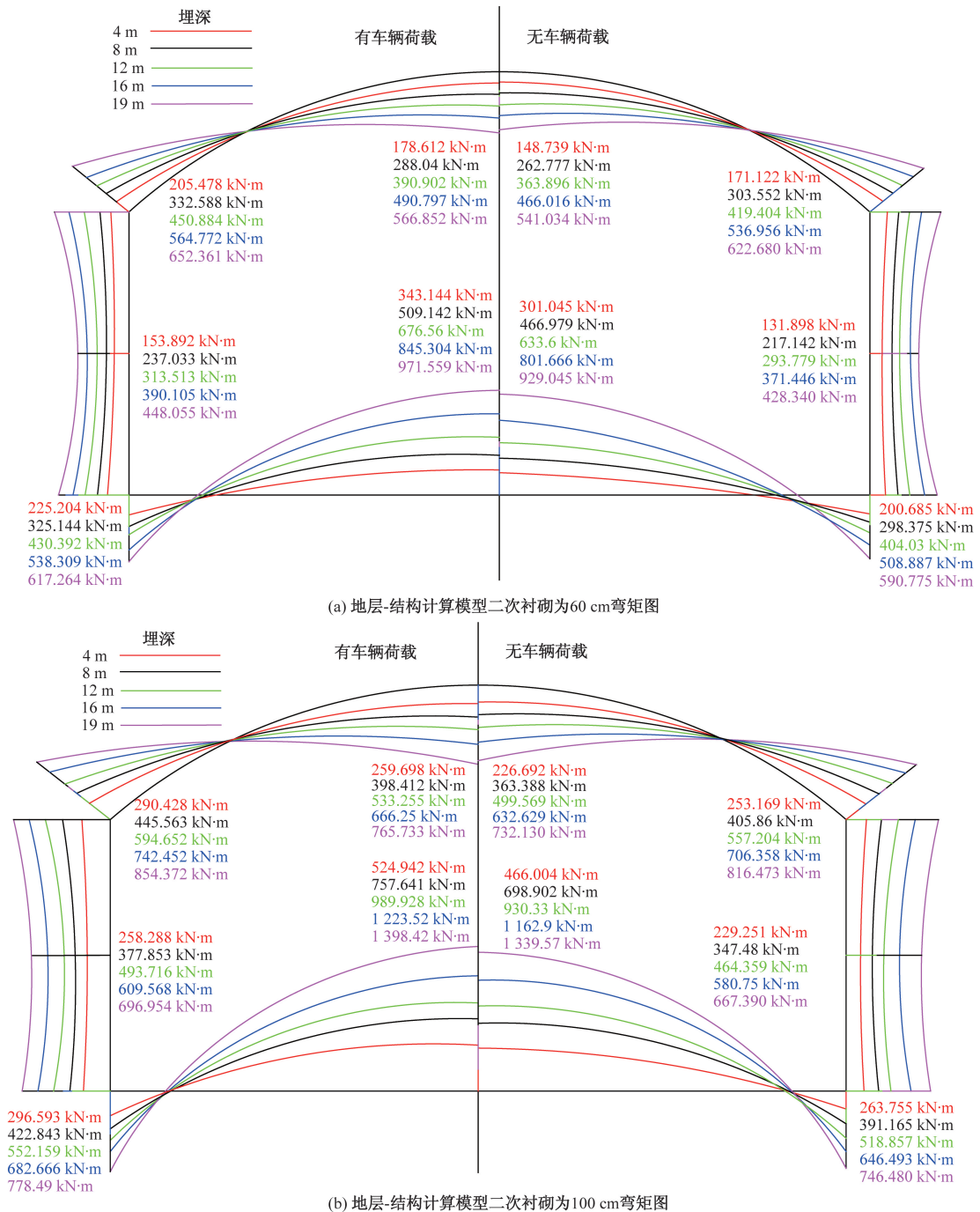


图 11 地层-结构计算模型弯矩图

Fig. 11 Moment diagram of strata structure calculation model

载;在同等埋深下,无论有无车辆荷载,弯矩随二次衬砌厚度增大而增大;在二次衬砌厚度、车辆荷载相同时,隧道最大弯矩值随埋深增加而增大,弯矩最大值处由拱脚变成拱肩。

### 3.4 “地层-结构”模型计算轴力

用 ABAQUS 有限元软件,建立各工况隧道模型对其进行受力计算。模型主要讨论隧道上部结构安全。各工况中拱腰均为轴力最大值处。在当隧道二次衬砌厚度为 100 cm,有车辆荷载且埋深为

19 m时,模型拱腰处轴力最大,其值为 1 327.46 kN。其中衬砌厚度为 60、100 cm 隧道轴力图如图 12 所示。

由图 12 可知,在埋深和二次衬砌厚度相同的情况下,有车辆荷载时衬砌所受轴力均高于无车辆荷载;在同等埋深下,无论有无车辆荷载,隧道的拱肩、拱腰和拱脚的轴力随二次衬砌厚度增大而增大,隧道的拱顶的轴力随二次衬砌厚度增大而减小;在二次衬砌厚度、车辆荷载相同时,隧道最大轴

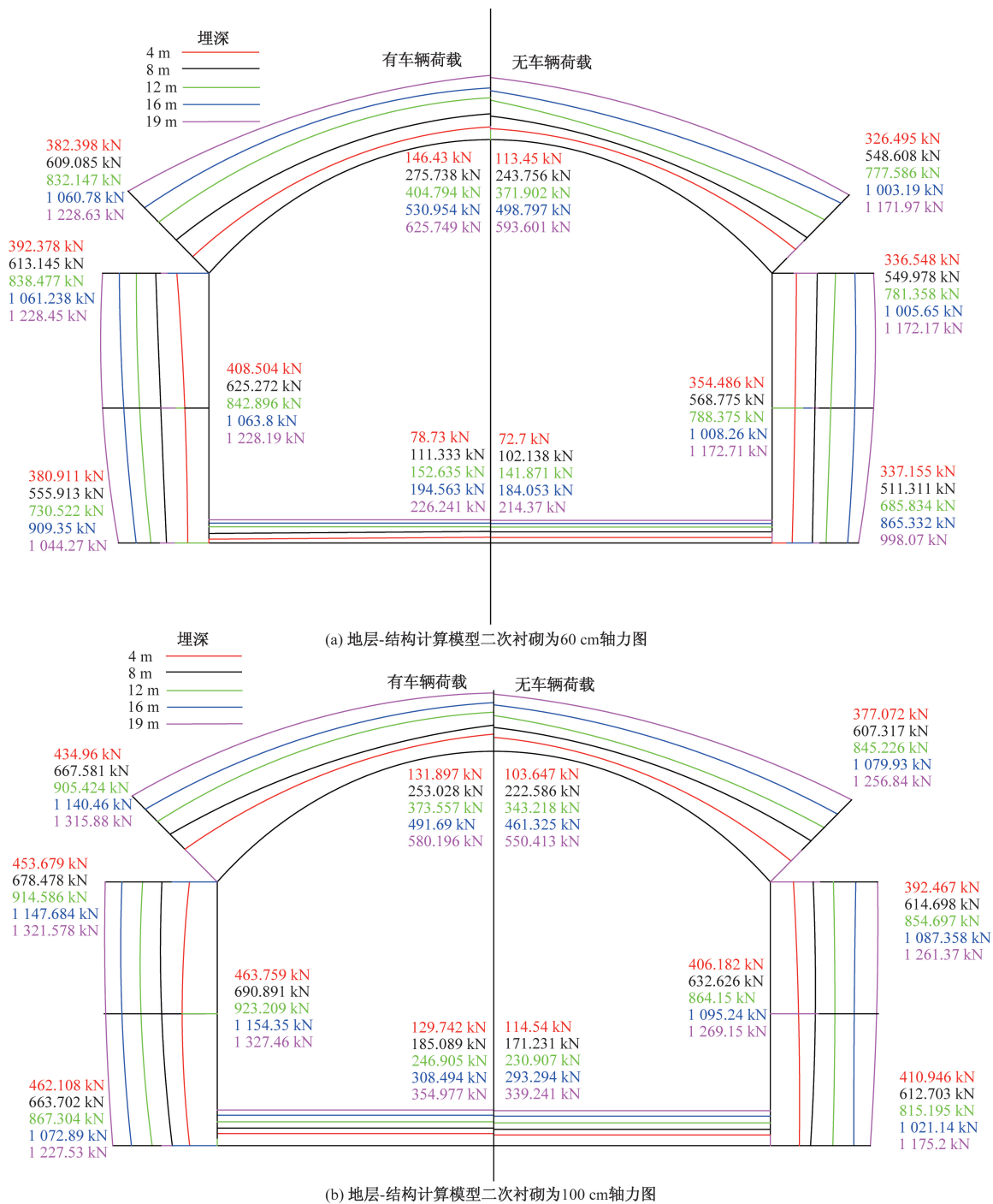


图 12 地层-结构计算模型轴力图

Fig. 12 Axis diagram of stratigraphic structural calculation model

力值随埋深增加而增大。

### 3.5 安全系数计算结果

该隧道为公路隧道,其安全系数按《公路隧道设计规范第一册土建工程》(JTG 3370.1—2018)<sup>[16]</sup>计算。在原设计中为对称配筋,用钢筋等级为HRB400 直径为 25 mm 的钢筋以 150 mm 为间隔进行配筋。具体配筋如图 13 所示。

由于模型以隧道长 1 m 进行计算,配筋总面积

为 2 945 mm<sup>2</sup>。安全系数计算公式为

$$R_g(A_g e \pm A'_g e') = R_w b x \left( e - h_0 + \frac{x}{2} \right) \quad (4)$$

式(4)中:  $R_g$  为钢筋的抗拉强度标准值;  $A_g$  和  $A'_g$  为受拉和受压区钢筋的截面面积, m<sup>2</sup>;  $e$  和  $e'$  为钢筋  $A_g$  与  $A'_g$  的重心至轴同力作用点的距离, m;  $R_w$  为混凝土弯曲抗压极限强度;  $b$  为隧道计算长度,这里取 1 m 计算;  $x$  为混凝土受压区的高度, m;  $h_0$  为截面

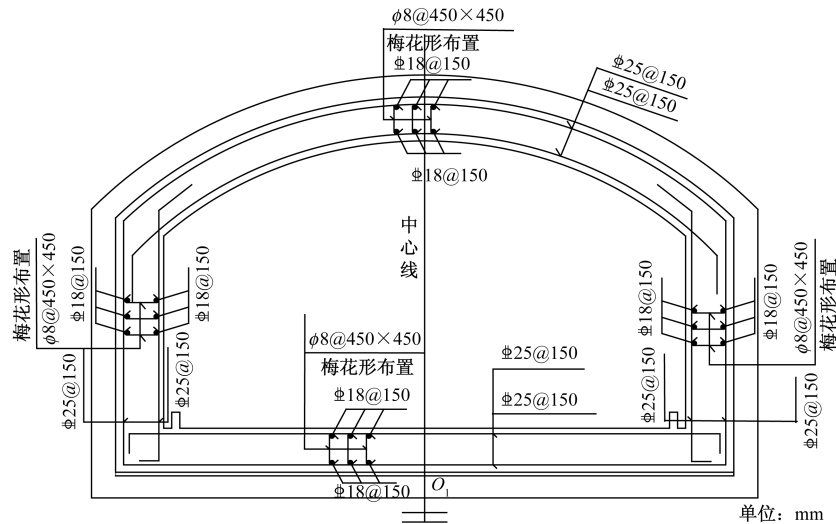


图 13 隧道配筋图

Fig. 13 Tunnel reinforcement diagram

的有效高度, m。

当模型部位为小偏心时,式(4)的左边第二项取正号;当模型部位为大偏心时,则取负号。

$$K = \frac{R_w b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + R_g A'_g (h_0 - a')}{N e} \quad (5)$$

式(5)中:  $K$  为安全系数;  $N$  为轴力;  $a'$  为自钢筋  $A'_g$  的重心分别至截面最近边缘的距离, m。

按式(4)、式(5)对各工况的拱顶、拱肩、拱腰、拱脚和底板的安全系数进行计算。两种模型所有工况均是拱顶的安全系数为最小值。《公路隧道设计规范第一册土建工程》(JTG 3370. 1—2018)<sup>[16]</sup>中规定在永久荷载或永久荷载+基本可变荷载情况下钢筋达到极限强度或混凝土达到抗压或抗剪极限强度安全系数要求为 2.0。模型安全系数最小值的变化如图 14 所示。

由图 14 可知,考虑埋深,不考虑车辆荷载时,荷载结构计算模型中埋深  $\leq 8$  m,设计采用 60 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求;埋深  $\leq 12$  m,设计采用 80 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求;埋深  $\leq 16$  m,设计采用 100 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求。地层结构计算模型中埋深  $\leq 14$  m,设计采用 60 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求;埋深  $\leq 15$  m,设计采用 70 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求;埋深  $\leq 16$  m,设计采用 80 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求;埋深  $\leq 17.5$  m,设计采用 90 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求;埋深  $\leq 19$  m,设计采用 100 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求。

考虑埋深及车辆荷载,荷载结构模型计算型中二次衬砌设计厚度为 60 cm,埋深  $\leq 8$  m 满足规范安

全系数要求;二次衬砌设计厚度为 90 cm,埋深  $\leq 12$  m 满足规范安全系数要求;二次衬砌设计厚度为 100 cm,埋深  $\leq 14.6$  m 满足规范安全系数要求。地层结构计算模型中二次衬砌设计厚度为 60 cm,埋深  $\leq 12$  m 满足规范安全系数要求;二次衬砌设计厚度为 70 cm,埋深  $\leq 14$  m 满足规范安全系数要求;二次衬砌设计厚度为 80 cm,埋深  $\leq 15.5$  m 满足规范安全系数要求;二次衬砌设计厚度为 90 cm,埋深  $\leq 18$  m 满足规范安全系数要求;二次衬砌设计厚度为 100 cm,埋深  $\leq 19$  m 满足规范安全系数要求。在本文工况下,按荷载-结构计算模型计算的安全系数均比按地层-结构计算模型计算的安全系数小。

## 4 结论

以某浅埋软土暗挖地铁通道为工程依托,分别采用“荷载-结构”法和“地层-结构”法,量化不同埋深、车辆荷载下暗挖通道结构受力及安全系数,确定车辆荷载下浅埋软土暗挖通道合理的衬砌断面厚度,得出如下结论。

(1) 无论是否有车辆荷载,在其他情况相同的条件下,隧道的拱脚或拱肩是弯矩最大值处,隧道的拱顶是结构安全系数最小值处。

(2) 按原设计配筋,无论是否有车辆荷载,安全系数随埋深增大而减小,随二次衬砌增大而增大。

(3) 考虑埋深,不考虑车辆荷载时,荷载结构模型计算型中埋深  $\leq 8$  m,设计采用 60 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求;埋深  $\leq 12$  m,设计采用 80 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求;埋深  $\leq 16$  m,设计采用 100 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数

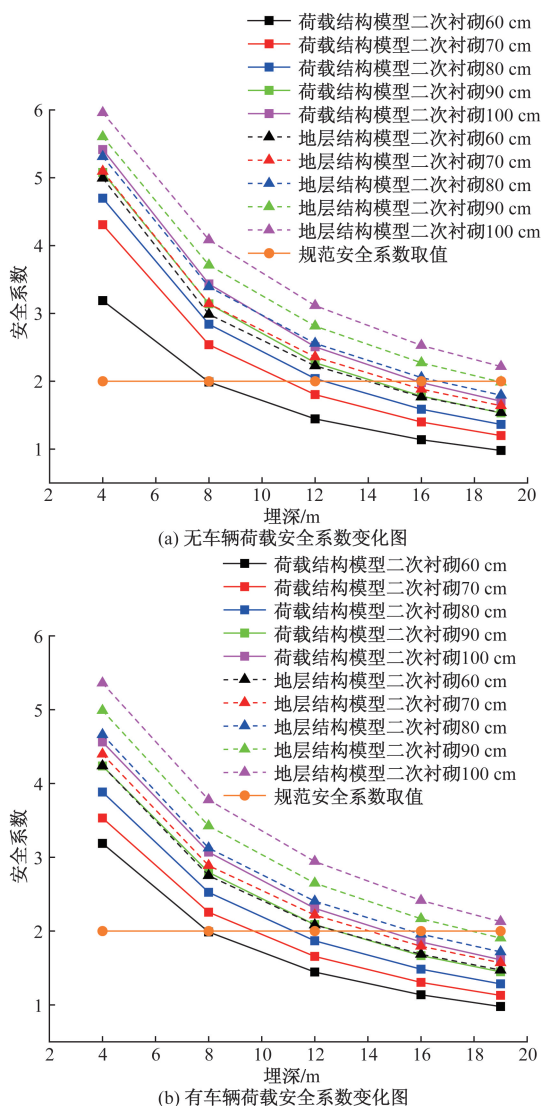


图 14 安全系数变化图

Fig. 14 Safety coefficient variation diagram

满足要求。地层结构计算模型中埋深 $\leq 14$  m,设计采用 60 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求;埋深 $\leq 15$  m,设计采用 70 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求;埋深 $\leq 16$  m,设计采用 80 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求;埋深 $\leq 18.5$  m,设计采用 90 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求;埋深 $\leq 19$  m,设计采用 100 cm 厚二次衬砌,隧道安全系数满足要求。

(4) 考虑埋深及车辆荷载,荷载结构模型计算型中二次衬砌设计厚度为 60 cm,埋深 $\leq 8$  m 满足规范安全系数要求;二次衬砌设计厚度为 90 cm,埋深 $\leq 12$  m 满足规范安全系数要求;二次衬砌设计厚度为 100 cm,埋深 $\leq 14.6$  m 满足规范安全系数要求。地层结构模型计算型中二次衬砌设计厚度为 60 cm,埋深 $\leq 12$  m 满足规范安全系数要求;二次衬砌设计厚度为 70 cm,埋深 $\leq 14$  m 满足规范安全

系数要求;二次衬砌设计厚度为 80 cm,埋深 $\leq 15.5$  m 满足规范安全系数要求;二次衬砌设计厚度为 90 cm,埋深 $\leq 18$  m 满足规范安全系数要求;二次衬砌设计厚度为 100 cm,埋深 $\leq 19$  m 满足规范安全系数要求。

(5) 在所设计工况下,按荷载-结构计算模型计算的安全系数均比按地层-结构计算模型计算的安全系数小。

## 参 考 文 献

- [1] 董建松. 城市道路交通荷载对下方浅埋暗挖大断面隧道动力响应特征分析[J]. 福建交通科技, 2023(2): 58-63, 72.  
Dong Jiansong. Analysis of dynamic response characteristics of shallow buried and underground excavated large section tunnels under urban road traffic load[J]. Fujian Transportation Technology, 2023(2): 58-63, 72.
- [2] 李珏池. 通道不同开挖方式对既有隧道结构的影响研究及处理建议[J]. 江西建材, 2022(11): 193-195.  
Li Jueche. Research on the influence of different excavation methods on the structure of existing tunnels and treatment suggestions[J]. Jiangxi Building Materials, 2022(11): 193-195.
- [3] 张川. 浅埋暗挖隧道衬砌可靠性分析[J]. 四川建筑, 2023, 43(5): 161-165.  
Zhang Chuan. Reliability analysis of shallow buried and undercut tunnel lining[J]. Sichuan Architecture, 2023, 43(5): 161-165.
- [4] 段雨彤, 陈夏, 王凯. 浅埋地铁人行通道下穿挡墙公路变形控制规律研究[J]. 科学技术创新, 2021(17): 143-144.  
Duan Yutong, Chen Xia, Wang Kai. Research on deformation control law of shallow buried subway pedestrian passage under retainingwall highway[J]. Science and Technology Innovation, 2021(17): 143-144.
- [5] 赵何霖, 邱居涛, 申玉生, 等. 深埋隧道支护结构内力计算方法研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15656-15664.  
Zhao Helin, Qiu Jutao, Shen Yusheng, et al. Research on internal force calculation methods for deep buried tunnel support structures[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(36): 15656-15664.
- [6] 运凯, 朱永全, 郭小龙. 膨胀岩隧道二次衬砌结构受力特性及工程对策分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7539-7548.  
Yun Kai, Zhu Yongquan, Guo Xiaolong. Analysis of the stress characteristics and engineering countermeasures of the secondary lining structure of expansive rock tunnels[J]. Science and Technology and Engineering, 2023, 23(17): 7539-7548.
- [7] 邓来, 李化云, 雷中成, 等. 富水隧道衬砌结构受力特性与合理参数分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(14): 5878-5883.  
Deng Lai, Li Huayun, Lei Zhongcheng, et al. Analysis of the mechanical characteristics and reasonable parameters of the lining structure of the water-rich tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(14): 5878-5883.
- [8] 陈炳光, 李化云, 陈晔磊, 等. 炭质板岩地层公路隧道结构受力特征及优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(34): 14790-14797.  
Chen Bingguang, Li Huayun, Chen Yelei, et al. Structural stress

- characteristics and optimization of highway tunnels in carbonaceous shale formations[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(34): 14790-14797.
- [9] 彭学军, 张道兵, 尹华东, 等. 基于单元安全系数法的浅埋隧道三台阶法开挖进尺优化[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(31): 13973-13979.
- Peng Xuejun, Zhang Daobing, Yin Huadong, et al. Optimization of excavation depth for shallow buried tunnels using the three step method based on the unit safety factor method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(31): 13973-13979.
- [10] 孙迪. 基于仰拱缺陷及膨胀围岩作用下的运营隧道衬砌安全性评价分析[J]. *北方交通*, 2023(12): 62-65, 69.
- Sun Di. Safety evaluation analysis of operational tunnel lining based on inverted arch defects and expansive surrounding rock [J]. *Northern Transportation*, 2023(12): 62-65, 69.
- [11] 杨朝帅, 崔臻, 牛富生, 等. 隧道衬砌病害对结构安全性影响机理研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2023, 21(4): 180-186.
- Yang Chaoshuai, Cui Zhen, Niu Fusheng, et al. Research on the mechanism of the impact of tunnel lining diseases on structural safety[J]. *Journal of Water Resources and Building Engineering*, 2023, 21(4): 180-186.
- [12] 应国刚, 郑蓉军, 李小江, 等. 荷载调节控制技术在超大断面隧道中的应用研究[C]//2023世界交通运输大会(WTC2023)论文集. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2023: 7.
- Ying Guogang, Zheng Rongjun, Li Xiaojiang, et al. Research on the application of load adjustment control technology in ultra large section tunnels [C]//2023 World Transportation Congress (WTC2023) Proceedings. Beijing: People's Transportation Press Co., Ltd., 2023: 7.
- [13] 刘新荣, 周伟锋, 周小涵, 等. 考虑二次衬砌有效承载厚度的隧道结构安全系数解析模型[J]. *隧道建设*, 2022, 42(11): 1844-1852.
- Liu Xinrong, Zhou Weifeng, Zhou Xiaohan, et al. An analytical model for the safety factor of tunnel structures considering the effective bearing thickness of secondary lining[J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(11): 1844-1852.
- [14] 向龙, 田志宇, 王俊, 等. 隧道施工因素对衬砌结构安全性影响评价研究[J]. *施工技术*, 2021, 50(16): 30-33, 50.
- Xiang Long, Tian Zhiyu, Wang Jun, et al. Evaluation of the impact of tunnel construction factors on the safety of lining structures [J]. *Construction Technology*, 2021, 50(16): 30-33, 50.
- [15] 邢健, 陈小小. 基于SAP84软件的地下结构稳定分析[J]. *中华建设*, 2020(6): 152-153.
- Xing Jian, Chen Xiaoxiao. Stability analysis of underground structures based on SAP84 software[J]. *Zhonghua Construction*, 2020(6): 152-153.
- [16] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范第一册土建工程: JTG 3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design specification for highway tunnels volume 1 civil engineering: JTG 3370.1—2018[S]. Beijing: People's Transportation Press, 2019.
- [17] 中交公路规划设计院. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- China Communications Highway Planning and Design Institute. General specification for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2004[S]. Beijing: People's Transportation Press, 2004.