

解仁伟. 水平层状岩隧道荷载计算公式修正方法及其应用. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(3): 943–953. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230334.  
Xie Renwei. Revised Method and Application of Load Calculation Formula of Horizontal Stratified Rock Tunnel. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(3): 943–953. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230334.

# 水平层状岩隧道荷载计算公式修正方法及其应用

解仁伟

中铁建大桥工程局集团第三工程有限公司, 天津 300300

**摘要:**为研究适用于水平层状围岩隧道的围岩荷载计算方法,指导实际隧道工程施工,采用理论推导的方式,结合数值模拟荷载-结构法计算模型,对水平层状围岩隧道的开挖工法和初期支护参数进行了优化。结果表明:1)水平层状围岩隧道塌落拱顶形成岩梁结构,基于此提出了针对水平层状岩隧道的围岩竖向荷载计算公式修正方法。2)基于掌子面力学平衡稳定分析模型,考虑塌落拱顶岩梁作用效应,通过计算得到了铜川隧道一号斜井工区水平层状砂岩、泥岩的岩梁极限厚度分别为1.7和2.3 m,当岩层厚度大于极限厚度时,岩梁可代替超前支护起到拱顶加固作用;同时计算表明Ⅲ、Ⅳ级围岩采用全断面法代替原来的台阶法施工,掌子面稳定系数满足规范要求。3)铜川隧道一号斜井工区Ⅲb型、Ⅳa型和Ⅳb型初期支护参数优化后,钢支撑最大间距分别为1.8、1.6、1.6 m,相应的截面最小安全系数分别为1.65、1.63、1.57,均满足规范中的安全系数控制基准要求。

**关键词:**水平层状岩;荷载计算;施工工法;初期支护;参数优化

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230334

中图分类号:U452.11

文献标志码:A

## Revised Method and Application of Load Calculation Formula of Horizontal Stratified Rock Tunnel

Xie Renwei

The 3rd Engineering Co., Ltd. of China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group, Tianjin 300300, China

**Abstract:** In order to study the surrounding rock load calculation method suitable for horizontal layered surrounding rock tunnel and guide the actual tunnel construction, the paper adopts the method of theoretical derivation and the numerical simulation load-structure calculation model to optimize the excavation method and the initial supporting parameters of horizontal layered surrounding rock tunnel. The results show that: 1) Rock beam structure will be formed when the vault of horizontal layered rock tunnel collapses. Based on this, a revised method for the calculation formula of vertical load in horizontal layered rock tunnel is proposed. 2) Based on the mechanical balance and stability analysis model of the face and taking into account the effect of collapsing vault rock beams, the ultimate thickness of

收稿日期:2023-10-07

作者简介:解仁伟(1972—),男,高级工程师,主要从事高速铁路工程方面的研究,E-mail:479376258@qq.com

基金项目:中国国家铁路集团有限公司系统性重大项目(P2018G048)

Supported by the Systematic Major Project of China National Railway Group Corporation Limited (P2018G048)

horizontal layered sandstone and mudstone rock beams in the working area of inclined shaft No. 1 of Tongchuan tunnel is calculated to be 1.7 and 2.3 m, respectively. When the rock layer thickness is greater than the ultimate thickness, the rock beams can replace the advance support to strengthen the vault; At the same time, the construction method of surrounding rock III and IV is calculated and analyzed, and the results show that the stability coefficient of the face of the whole section method instead of the original step method still meets the standard requirements. 3) After optimizing the initial supporting parameters of IIIb, IVa and IVb types in the inclined shaft working area of Tongchuan tunnel No. 1, the maximum spacing of steel supports is 1.8, 1.6 and 1.6 m, respectively, and the corresponding safety factors of the most unfavorable section are 1.65, 1.63 and 1.57, which are all greater than the safety factor control standard in the code.

**Key words:** horizontal stratified rock; load calculation; construction method; initial support; parameter optimization

## 0 引言

随着越来越多的铁路隧道穿越复杂地层,软弱相间的水平层状岩地区隧道的围岩荷载计算成为亟待解决的难题之一<sup>[1-5]</sup>。当隧道穿越水平层状围岩时,施工所带来的扰动可能会导致拱顶发生离层、断裂和弯曲等现象,甚至可能导致隧道塌方。针对上述问题,众多学者开展了大量研究工作,如:涂翰<sup>[6]</sup>通过考虑不同的影响因素,研究了水平层状砂质板岩围岩隧道的稳定性和破坏机理;王亚琼等<sup>[7]</sup>基于现场监测数据,采用 3DEC 进行数值分析,研究了水平层状隧道围岩在不同岩层厚度、地应力水平和侧荷载系数下的变形和破坏规律;资晓鱼等<sup>[8]</sup>针对成兰铁路杨家坪隧道,建立了宏观层理分布模型,研究了层状千枚岩隧道的形变破坏规律和支护措施;路军富等<sup>[9]</sup>针对缓倾层状泥岩铁路隧道底鼓病害问题,通过长期底鼓变形监测和理论分析,研究了缓倾层状泥岩铁路隧道底鼓的特征和机理;朱麟晨<sup>[10]</sup>通过现场调查、测试及数值计算的方式研究了水平层状围岩隧道变护结构变形机理及其控制措施;陈红军等<sup>[11]</sup>采用 UDEC 软件,模拟了不同岩层倾角条件下的浅埋层状岩体偏压隧道的破坏过程,并确定了浅埋层状岩体偏压隧道滑移破坏的机理和判定方法;熊良宵等<sup>[12]</sup>研究了层状岩随着夹层倾角的增加,轴向和侧向的应变绝对值均呈先增大后减小的变化规律;黄达等<sup>[13]</sup>以离心试验为原型,通过离散元数值模拟,研究了层状岩质反倾边坡的变形机理与影响因素;张以晨等<sup>[14]</sup>利用弯曲-拉裂模型研究了反倾层状岩质边坡倾倒破坏力学模型;赵建军等<sup>[15]</sup>研究了多层开采和单层开采对缓倾层状结构斜

坡变形的影响,揭示了采空区宽度、深度和深厚比等参数对斜坡变形特征的影响;穆成林等<sup>[16]</sup>研究了不同工况下的开挖对多层软弱夹层围岩的影响,分析了其变形破坏模型和形成机理,确定了失稳破坏范围。

综上所述,目前针对水平层状围岩隧道的研究主要集中在围岩的变形破坏机理上,而对围岩荷载的计算并没有进行详细的分析。本文以铜川隧道一号斜井工区为依托,针对水平层状围岩荷载计算问题,通过理论分析与推导,提出了水平层状岩隧道竖向荷载计算公式修正方法,并将其应用到实际工程中,对隧道的开挖工法和初期支护参数进行了优化分析,以期类似隧道工程的荷载计算及参数优化提供依据。

## 1 依托工程概况

西延高铁铜川隧道位于陕西省铜川市境内,为一座单洞双线高速铁路隧道,隧道共设置 2 座斜井辅助施工。其中一号斜井工区西安方向段为本文依托工程,采用智能机械化配套施工,起止里程分别为 DK96+500、DK93+170,全长 3 330 m。隧址区属陕北台坳三级构造单元,降水较丰。隧道所通过的主要地层为石炭系上统泥岩、砂岩,总体岩层产状多为水平岩层,Ⅲ级围岩长 770 m,Ⅳ级围岩长 955 m。隧道最大埋深约 185 m,开挖断面方量为 143.2~148.91 m<sup>3</sup>。铜川隧道工程地理位置如图 1 所示。

## 2 水平层状岩隧道竖向荷载计算方法

通常可以将隧道施工过程中常见的水平层状围岩的工程特点总结为以下几点:

①岩层倾角一般在 5°~10°之间;

②岩体受地质构造作用影响程度不同,节理较

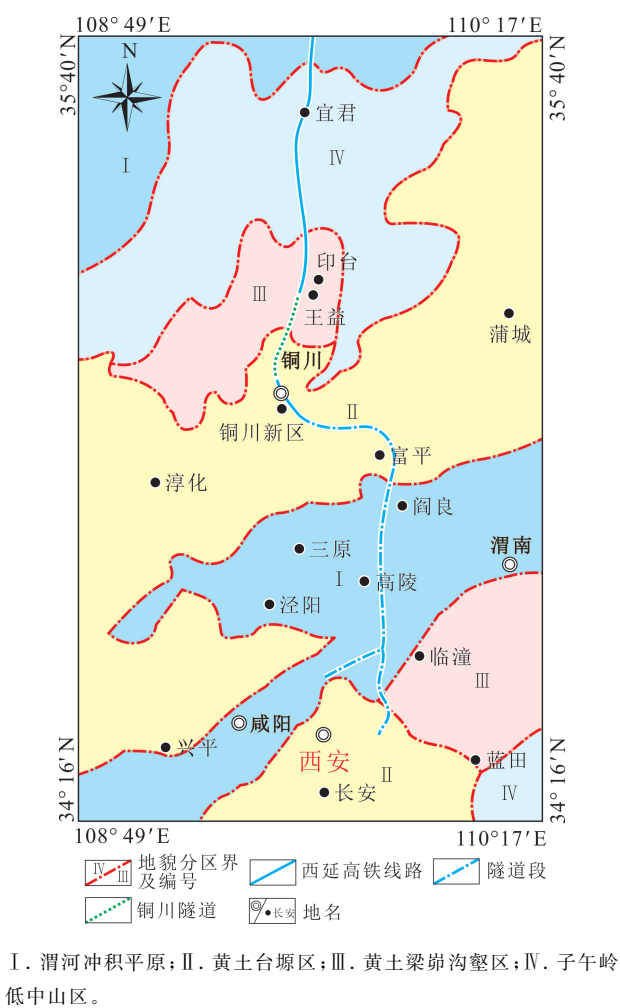


图 1 铜川隧道工程地理位置图

Fig.1 Tongchuan tunnel engineering geographical location map

为发育,通常有 1~2 组节理,但是其优势结构面是层理面;

③围岩的物理力学性质呈现明显的成层性,即平行层面内围岩的物理力学参数相近,而与平行层面垂直的方向上,围岩的物理力学参数则有较大差异。

基于此,下面推导水平层状岩隧道竖向荷载的计算方法。

2.1 规范推荐隧道荷载计算公式

根据现行《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)<sup>[17]</sup>,深埋隧道围岩竖向荷载  $q$  可按式(1)计算确定。

$$\begin{cases} q = \gamma h ; \\ h = 0.45 \times 2^{s-1} \omega . \end{cases} \quad (1)$$

式中: $q$  为围岩竖向荷载,kPa; $\gamma$  为围岩重度,kN/ $\text{m}^3$ ; $h$  为塌落拱计算高度,m; $s$  为围岩级别; $\omega$  为宽度影响系数, $\omega = 1 + (B - 5)i$ ,其中  $B$  为隧道宽度,m, $i$  为围岩荷载增减率,当  $B \leq 5$  m 时,取  $i = 0.2$ ,

$B > 5$  m 时,可取  $i = 0.1$ 。

水平均布荷载确定方法为:围岩级别为 I—II 级,水平荷载为 0;围岩级别为 III 级,水平荷载  $< 0.15q$ ;围岩级别为 IV 级,水平荷载为  $(0.15 \sim 0.30)q$ ;围岩级别为 V 级,水平荷载为  $(0.30 \sim 0.50)q$ 。

2.2 水平层状岩隧道荷载计算公式修正

2.2.1 塌落拱顶岩梁稳定性

由于水平层状岩中存在软弱层理面,而该层理面的强度低于围岩的强度,因此在结构面附近会出现应力场不连续的情况,导致两侧应力发生突变<sup>[18-19]</sup>。在深埋情况下,隧道拱顶会形成塌落拱顶,而被水平层状岩结构面切割的岩体则会形成岩梁,如图 2 所示。

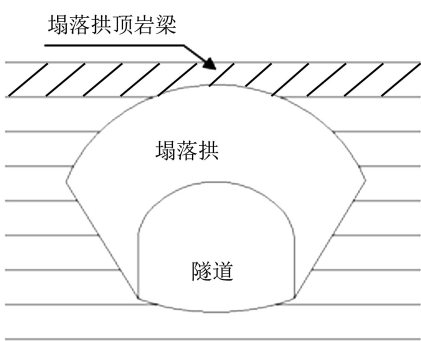


图 2 水平层状围岩隧道岩梁形成示意图

Fig.2 Horizontal stratified wall rock tunnel rock beam formation diagram

为了研究原塌落拱曲线顶点所切层状岩的稳定性问题,将该层岩体简化为岩梁并进行分析,如图 3 所示。下面根据材料力学计算  $A$  点所受拉应力。

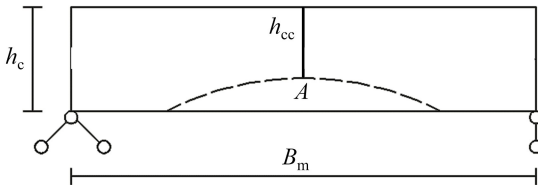


图 3 塌落拱顶岩梁示意图

Fig.3 Schematic diagram of rock beam of collapsed vault

岩梁跨中截面弯矩  $M_{\max}$  和惯性矩  $I_z$  分别为:

$$M_{\max} = qB_m^2/8 ; \quad (2)$$

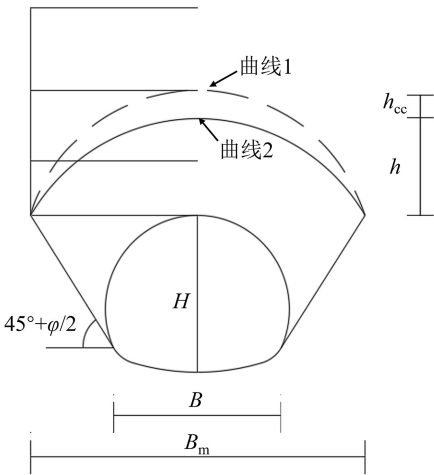
$$I_z = bh^3_{cc}/12。$$
 (3)

式中,  $b$  为岩梁纵向计算长度, m;

沿纵向方向取 1 m 进行计算, 则 A 点所受拉应力  $\sigma_{t, \max}$  为

$$\sigma_{t, \max} = 3qB_m^2/2h_{cc}^2。$$
 (4)

岩梁稳定性判据为: 当  $\sigma_{t, \max}$  大于等于层状岩的抗拉强度  $\sigma_t$  时, 认为塌落拱曲线所切层状岩体是不稳定的, 会发生破坏, 此时的塌落拱顶曲线如图 4 中曲线 1 所示; 反之, 如果  $\sigma_{t, \max} < \sigma_t$ , 则该层状岩体不会破坏, 此时的塌落拱顶曲线如图 4 中曲线 2 所示。



$\varphi$ . 围岩内摩擦角, (°);  $H$ . 隧道高度, m。

图 4 塌落拱示意图

Fig.4 Schematic diagram of collapsed arch

2.2.2 修正后深埋隧道荷载计算公式

根据上述判据, 修正后的围岩塌落拱高度  $h'$  计算公式为

$$h' = 0.45 \times 2^{s-1} \omega + nh_{cc}。$$
 (5)

式中,  $n$  为层状岩破坏系数。如果原塌落拱曲线顶点所切层状岩剩余部分不发生破坏,  $n$  取 0; 若发生破坏, 则  $n$  取 1。

因此, 修正后的水平层状岩条件下深埋隧道竖向荷载  $q'$  计算公式为

$$q' = \gamma h'。$$
 (6)

3 工程应用

3.1 现场施工工法及支护参数

3.1.1 原设计施工工法及支护参数适应性

铜川隧道一号斜井正洞Ⅲ级围岩原设计施工工法为台阶法。但实际施工采用三臂凿岩台车钻孔开

挖时, 由于台车运作仅限于上台阶, 而不适用于下台阶, 浪费了机械的功效; 因此需对Ⅲ级围岩原台阶法进行优化。

正洞Ⅳ(Ⅳa、Ⅳb)级围岩原设计施工工法为三台阶法(图 5), 其上、中台阶长度总和  $\geq 10$  m。采用三臂凿岩台车(图 6)在下台阶施工时, 由于推进梁长度约为 5 m, 导致凿岩台车有效作业范围仅能覆盖中、下台阶作业面, 上台阶作业面无法进行钻孔作业; 再者因铜川隧道一号斜井西安方向Ⅲ级、Ⅳ级围岩频繁交替更换, 来回调整施工工法会影响智能机械化施工功效。因此需对Ⅳ级围岩原设计施工工法进行优化。

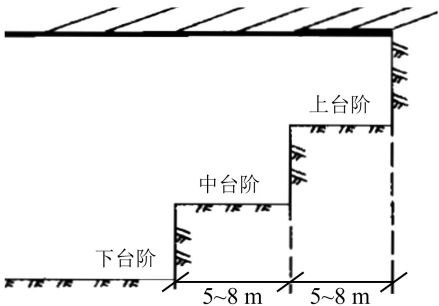
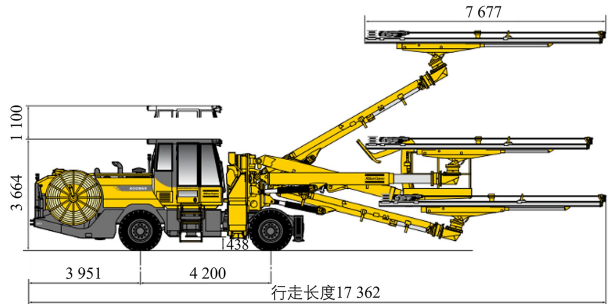


图 5 三台阶法施工示意图

Fig.5 Construction diagram of the three-step method



单位为 mm。

图 6 三臂凿岩台车外形尺寸

Fig.6 Dimensions of three-arm drilling rig

当进行水平层状岩隧道的拱部水平岩层开挖时, 岩体容易出现松弛现象, 在进行初期支护施工后, 拱顶荷载会比较大。而格栅钢架在架设后, 需要等待喷射混凝土达到一定的强度后, 才能一同承受荷载。如果前期变形过大, 可能会导致初期支护混凝土脱落掉块, 格栅钢架弯曲或扭曲变形。因此, 需对原设计洞身支护参数进行调整。

3.1.2 现场施工工法及支护参数调整

现场施工时, Ⅲ(Ⅲb)级围岩、Ⅳ(Ⅳa、Ⅳb)级围

岩采用全断面法,施工安全步距为:Ⅲ级围岩仰拱初支封闭成环距离掌子面不大于 120 m,拱墙衬砌距离掌子面不大于 180 m;Ⅳ级围岩仰拱初支封闭成环距离掌子面不大于 90 m,仰拱距离掌子面不大于 120 m,拱墙衬砌距离掌子面不大于 160 m。

Ⅲ(Ⅲb)级围岩初期支护参数按原设计要求选择,Ⅳ(Ⅳa、Ⅳb)级围岩初期支护钢支撑由原设计的Φ18 四肢箍筋、Φ22 格栅钢架均改为 I18 型钢,间距不变。

3.2 基于监控量测数据的安全性

采用位移控制基准,以一号斜井工区现场收集的监控量测实测数据为基础,对研究区Ⅲ、Ⅳ级围岩段隧道拱顶沉降和水平收敛变形的安全性进行分析,数据统计结果如图 7 所示。

Ⅲ、Ⅳ级围岩段隧道变形量实测数据统计结果如文献[16]所示。依据《铁路隧道监控量测技术规范》(Q/CR 9218—2015)[20]对隧道拱顶沉降和水平收敛变形的安全性进行检验,结果如表 1 所示。

由表 1 可知,Ⅲ、Ⅳ级围岩段隧道变形值均处在

规范控制范围内,并且还存在较大的允许变形空间。因此,有必要对现场采用的施工工法及支护体系参数进行进一步优化分析,以达到提升施工功效和降低成本的目的。

3.3 施工工法优化

基于经典棱柱-楔形体模型[21-22],并结合当前研究成果[23-26],假设全断面法施工掌子面会发生整体破坏,而台阶法施工上台阶掌子面会发生局部破坏,建立掌子面力学平衡稳定分析模型,如图 8 所示。

根据楔形体水平、竖向静力平衡条件得

$$N = F_f \sin \theta_0 + (F_q + F_w) \cos \theta_0 \quad (7)$$

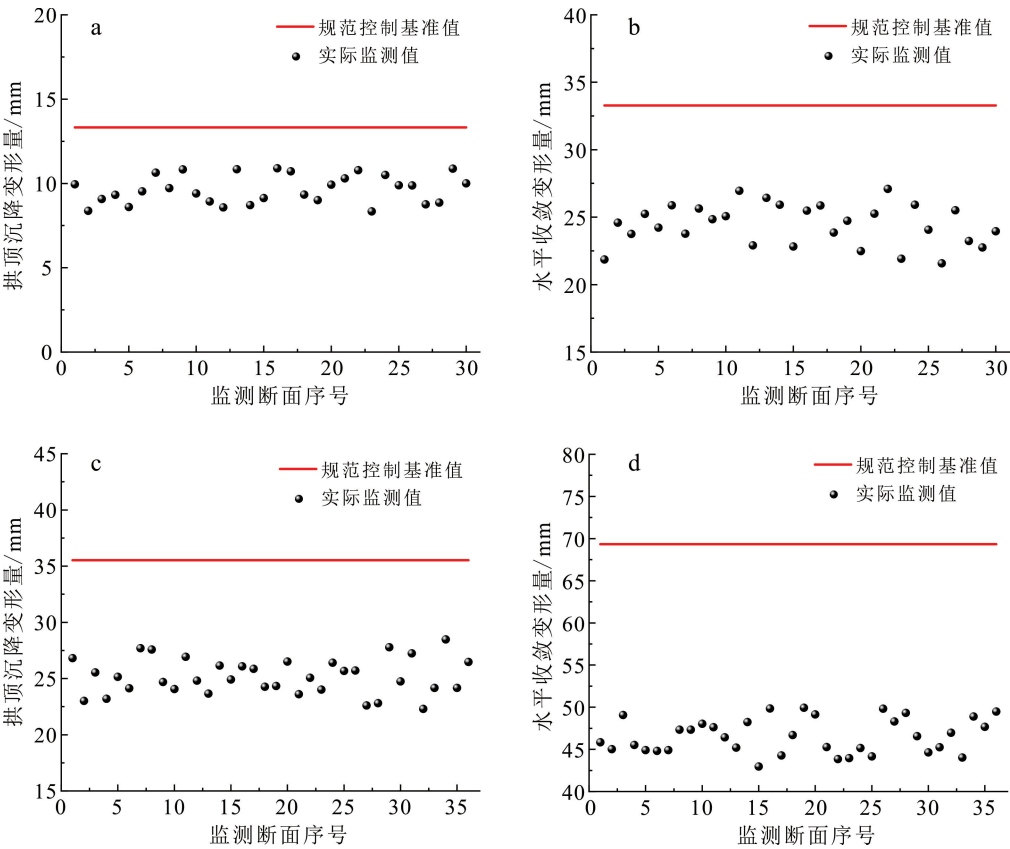
式中: $F_w$ 、 $F_q$ 、 $F_f$ 可根据楔形体几何参数求得; $\theta_0$ 取  $\pi/4 + \varphi/2$ ( $\varphi$  为围岩内摩擦角)。

沿滑动面切向分解各力得:

$$F_1 = N \tan \varphi + F_f \cos \theta_0 \quad (8)$$

$$F_2 = (F_q + F_w) \sin \theta_0 \quad (9)$$

式中, $F_1$ 、 $F_2$ 分别为沿破坏面的抗滑力和下滑力, kN。



a. Ⅲ级围岩段隧道拱顶沉降变形;b. Ⅲ级围岩段隧道水平收敛变形;c. Ⅳ级围岩段隧道拱顶沉降变形;d. Ⅳ级围岩段隧道水平收敛变形。

图 7 研究区Ⅲ级、Ⅳ级围岩段隧道变形实测数据统计结果

Fig.7 Measured tunnel deformation data of Class Ⅲ and Class Ⅳ surrounding rock section in the study area

表 1 隧道变形安全性检验

Table 1 Tunnel deformation safety test

| 围岩级别 | 拱顶沉降变形量/mm |         | 安全性  | 水平收敛变形量/mm |         | 安全性  |
|------|------------|---------|------|------------|---------|------|
|      | 现场实测最大值    | 规范控制基准值 |      | 现场实测最大值    | 规范控制基准值 |      |
| Ⅲ级   | 8.3~10.9   | 13.3    | 满足规范 | 20.6~27.3  | 33.3    | 满足规范 |
| Ⅳ级   | 22.0~29.1  | 35.5    | 满足规范 | 43.0~51.6  | 69.3    | 满足规范 |

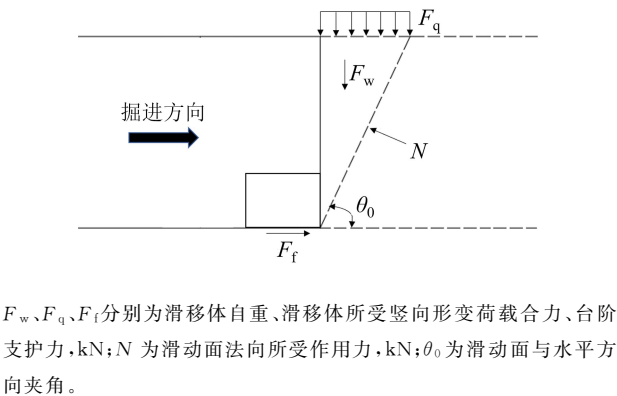


图 8 掌子面力学平衡稳定分析模型

Fig.8 Mechanical balance and stability analysis model of palm surface

定义隧道掌子面稳定系数  $K$  为

$$K = F_1 / F_2。 \tag{10}$$

根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)<sup>[27]</sup> 4.2.4,掌子面稳定系数控制值  $K_c$ 取 1.4。

本次施工工法优化分析针对铜川隧道一号斜井工区Ⅲ级围岩,考虑水平层状围岩的岩梁作用效应,当  $\sigma_{1,max} = \sigma_t$  时,可通过式(4)计算得到拱顶岩梁极限厚度  $h_{min} = h_{cc}$ ,通过比较水平层状岩厚度  $h$  与  $h_{min}$ ,来判断岩梁是否起作用。当层状岩厚度  $h > h_{min}$ 时,认为拱顶岩梁能够抵消一部分围岩荷载,这种情况下采用全断面法施工也是相对比较安全的;反之则认为岩梁不起作用,需按式(5)对掌子面竖向围岩荷载进行修正,再结合掌子面力学平衡稳定分析模型对工法进行优化。

施工工法优化流程如图 9 所示。

铜川隧道一号斜井工区Ⅲ级围岩段原施工工法为台阶法,现场施工工法为全断面法。

通过计算可知,Ⅲ级围岩段砂岩、泥岩的岩梁极限厚度  $h_{min}$  分别为 1.7、2.3 m,当岩层厚度  $h > h_{min}$ 时,可取消掌子面超前支护措施,并且采用全断面法开挖;当岩层厚度  $h \leq h_{min}$ 时,结合掌子面力学平衡稳定分析模型,计算得到各工况的安全系数如表 2 所示。

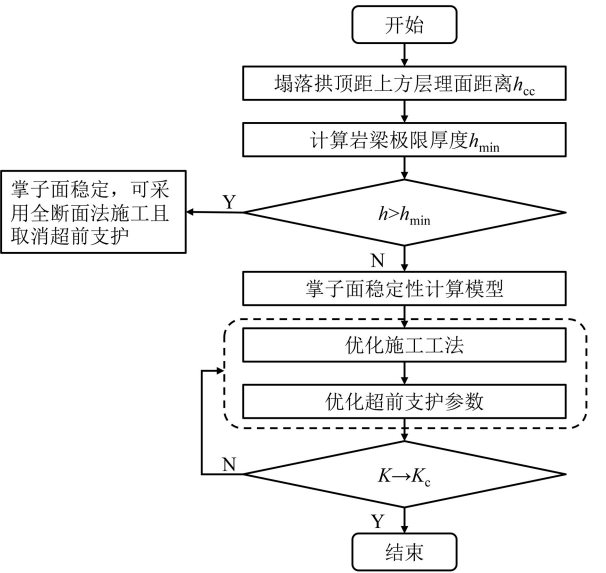


图 9 施工工法优化流程图

Fig.9 Optimization flow chart of construction method

表 2 研究区Ⅲ级围岩超前支护及施工工法优化方案

Table 2 Optimization scheme of advanced support and construction method of Class Ⅲ surrounding rock in the study area

| 岩性 | 岩梁厚度/m     | 施工工法 | 掌子面<br>稳定系数 | 备注     |
|----|------------|------|-------------|--------|
| 砂岩 | $>1.7$     | 全断面法 |             |        |
|    |            | 台阶法  | 10.91       | 原设计方案  |
|    | $\leq 1.7$ | 全断面法 | 10.70       | 建议优化方案 |
| 泥岩 | $>2.3$     | 全断面法 |             |        |
|    |            | 台阶法  | 10.87       | 原设计方案  |
|    | $\leq 2.3$ | 全断面法 | 10.56       | 建议优化方案 |

3.4 初期支护参数优化

3.4.1 初期支护参数优化方法

初期支护参数优化采用数值模拟软件。首先,通过建立荷载-结构计算模型,结合水平层状岩隧道围岩荷载计算修正公式,研究分析支护结构刚度对结构安全系数的影响规律;然后给出不同地质条件

下支护结构参数优化的建议方案。

隧道施工期间钢筋混凝土结构安全系数控制值  $K_s$  按《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)<sup>[17]</sup> 8.5.2 相关规定,见表 3。判断施工阶段结构安全性时,安全系数控制基准可采用表 3 中“主要荷载+附加荷载”对应数值乘以折减系数 0.9。

表 3 钢筋混凝土结构安全系数控制值<sup>[17]</sup>

Table 3 Safety factor of reinforced concrete structure<sup>[17]</sup>

| 荷载组合          | 钢筋或混凝土达到<br>抗压极限强度 | 混凝土达到<br>抗拉极限强度 |
|---------------|--------------------|-----------------|
| 主要荷载          | 2.0                | 2.4             |
| 主要荷载+<br>附加荷载 | 1.7                | 2.0             |

初期支护参数优化流程如图 10 所示。

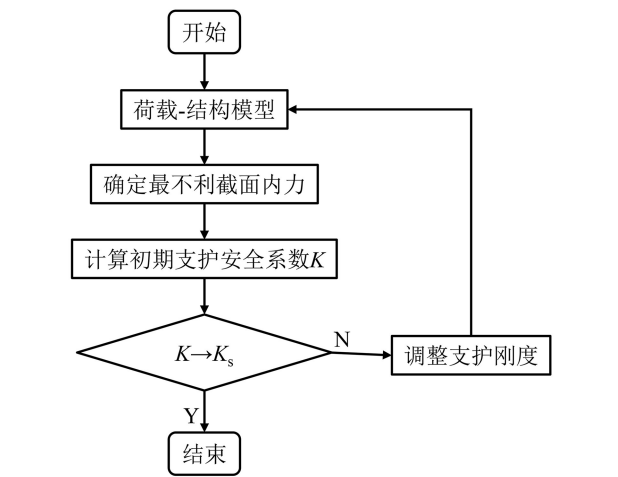


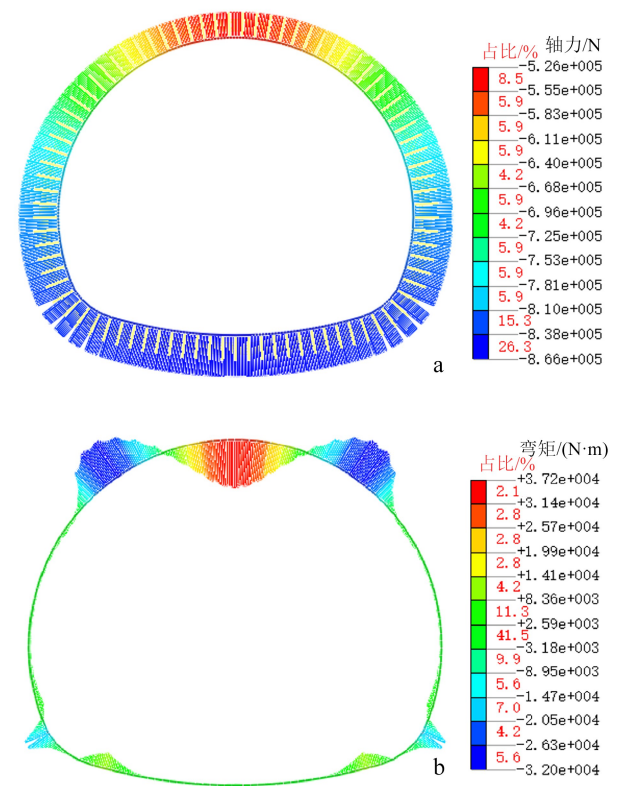
图 10 初期支护参数优化流程图

Fig.10 Optimization flow chart of initial support parameters

表 4 铜川隧道一号斜井工区初期支护结构参数

Table 4 Initial support parameters of inclined well No. 1 working area of Tongchuan tunnel

| 初期支护<br>类型 | C25 喷混凝土 |           | 钢筋网      |                  |          | 锚杆       |                     |          | 钢支撑      |                        |          |
|------------|----------|-----------|----------|------------------|----------|----------|---------------------|----------|----------|------------------------|----------|
|            | 施作<br>部位 | 厚度/<br>cm | 设置<br>部位 | 网格间距/<br>(cm×cm) | 钢筋<br>规格 | 设置<br>部位 | 间距(环向×纵向)/<br>(m×m) | 长度/<br>m | 设置<br>部位 | 钢筋<br>类型               | 间距/<br>m |
| Ⅲb 型       | 拱墙       | 23        | 拱部       | 25×25            | Φ6.5     | 拱墙       | 1.2×1.5             | 3.0      | 拱墙       | Φ16 四肢<br>箍筋,Φ22<br>格栅 | 1.2      |
| Ⅳa 型       | 拱墙<br>仰拱 | 25<br>10  | 拱墙       | 20×20            | Φ6.5     | 拱墙       | 1.2×1.2             | 3.5      | 拱墙       | I18 型钢                 | 1.2      |
| Ⅳb 型       | 拱墙<br>仰拱 | 25<br>25  | 拱墙       | 20×20            | Φ6.5     | 拱墙       | 1.2×1.2             | 3.5      | 全环       | I18 型钢                 | 1.0      |



占比表示这个颜色(即上下两个弯矩数值区间)在云图中所占的比例。

图 11 钢支撑间距 1.2 m 支护结构轴力(a)和弯矩(b)云图

Fig.11 Cloud diagram of axial force (a) and bending moment (b) of steel support structure with distance of 1.2 m

表 5 初期支护优化方案安全性计算结果

Table 5 Safety calculation results of the initial support optimization scheme

| 支护类型 | 方案说明   | 钢支撑类型 | 间距/m | 最小安全系数   | 不利部位 |
|------|--------|-------|------|----------|------|
| Ⅲb 型 | 原设计方案  |       | 1.2  | 2.54(受压) | 拱肩   |
|      | 优化方案 1 | 4Φ22  | 1.5  | 2.01(受压) | 拱肩   |
|      | 优化方案 2 | 格栅    | 1.8  | 1.65(受压) | 拱肩   |
|      | 优化方案 3 |       | 2.0  | 1.48(受压) | 拱肩   |
| Ⅳa 型 | 原设计方案  |       | 1.2  | 1.91(受压) | 拱肩   |
|      | 优化方案 1 | I18   | 1.4  | 1.75(受压) | 拱肩   |
|      | 优化方案 2 | 型钢    | 1.6  | 1.63(受压) | 拱肩   |
|      | 优化方案 3 |       | 1.8  | 1.50(受压) | 拱肩   |
| Ⅳb 型 | 原设计方案  |       | 1.0  | 2.09(受压) | 拱肩   |
|      | 优化方案 1 | I18   | 1.2  | 1.87(受压) | 拱肩   |
|      | 优化方案 2 | 型钢    | 1.6  | 1.57(受压) | 拱肩   |
|      | 优化方案 3 |       | 1.8  | 1.47(受压) | 拱肩   |

系数,得到Ⅳa 型支护刚度对安全系数的影响规律曲线如图 13 所示。

3)Ⅳb 型初期支护

Ⅳb 型初期支护采用 I18 型钢钢架,分别计算间距为 1.0、1.2、1.6 和 1.8 m 等 4 种工况下结构的安全系数,得到Ⅳb 型支护刚度对安全系数的影响规律曲线如图 14 所示。

由图 12—14 中各工况下支护结构安全系数结果(表 5)可知,Ⅲb 型、Ⅳa 型、Ⅳb 型支护在各工况下的最不利部位均为拱肩且均为受压控制;根据《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)<sup>[17]</sup>,施工阶

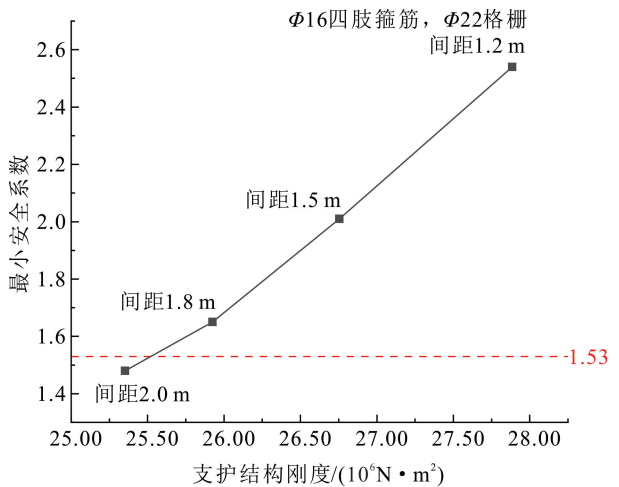


图 12 Ⅲb 型支护结构刚度对结构安全系数的影响规律

Fig.12 Influence of the rigidity of Type Ⅲb supporting structure on the safety factor of structure

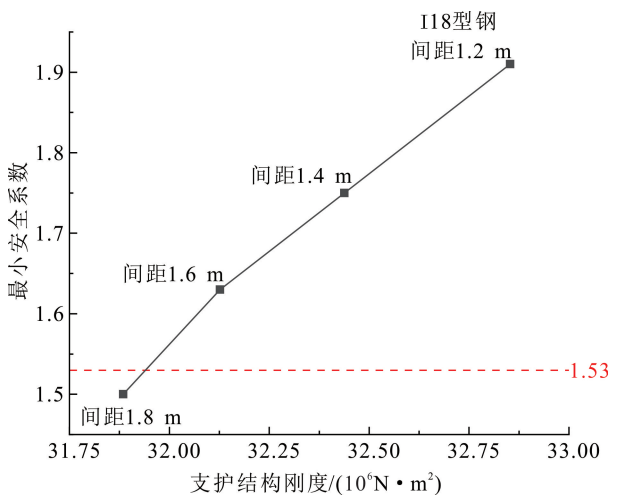


图 13 Ⅳa 型支护结构刚度对结构安全系数的影响规律

Fig.13 Influence of the rigidity of Type Ⅳa supporting structure on the safety factor of structure

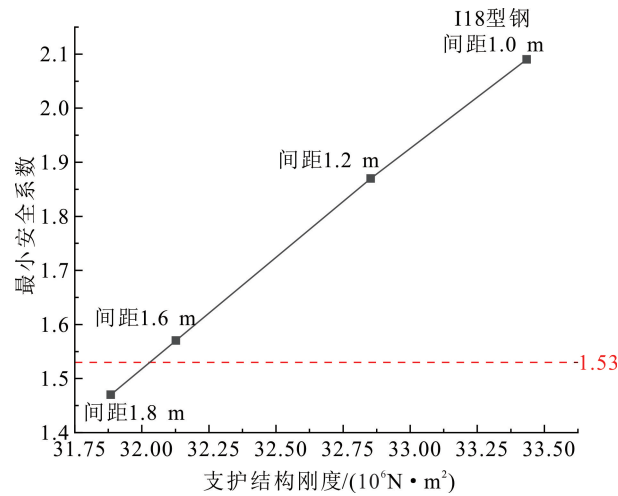


图 14 Ib 型支护结构刚度对结构安全系数的影响规律  
Fig. 14 Influence of the rigidity of Type Ib supporting structure on the safety factor of structure

段钢筋混凝土结构受压时安全系数控制基准值为 1.53,故 3 种支护类型的钢支撑最大优化间距分别为 1.8、1.6、1.6 m,相应的截面最小安全系数分别为 1.65、1.63、1.57。

4 结论

1)水平层状围岩隧道塌落拱顶将形成岩梁结构,基于此,推导得到了考虑塌落拱顶岩梁稳定性的塌落拱高度计算修正公式,进而修正得到了水平层状围岩条件下深埋隧道竖向荷载荷载计算公式。

2)在考虑塌落拱顶岩梁作用效应下,铜川隧道一号斜井工区水平层状砂岩、泥岩的岩梁极限厚度分别为 1.7、2.3 m,层状围岩岩层大于极限厚度时,岩梁可代替超前支护起到拱顶加固作用。

3)铜川隧道一号斜井工区Ⅲ、Ⅳ级围岩的施工工法均可采用全断面法且掌子面稳定系数满足规范要求。

4)铜川隧道一号斜井工区Ⅲb 型、Ⅳa 型和Ⅳb 型初期支护结构参数优化后,钢支撑最大间距分别为 1.8、1.6、1.6 m,相应的截面最小安全系数分别为 1.65、1.63、1.57,均满足规范安全系数控制基准要求。

参考文献 (References):

[1] 余龙文.层状围岩流变荷载作用下隧道二次衬砌裂损特征[J].铁道建筑,2021,61(12):127-132.

Yu Longwen. Crack Characteristics of Tunnel Secondary Lining Under Rheological Load of Layered Surrounding Rock [J]. Railway Engineering, 2021, 61 (12): 127-132.

[2] 王登科,骆建军,文绍全,等.岩层倾角对层状偏压隧道围岩稳定性影响分析[J].北京交通大学学报,2022,46 (3):95-102.

Wang Dengke, Luo Jianjun, Wen Shaoquan, et al. Influence Analysis of Rock Dip Angle on Surrounding Rock Stability of Layered Unsymmetrical-Loaded Tunnel [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(3): 95-102.

[3] 赵景彭.节理倾角对层状岩体大断面隧道稳定性研究[J].铁道建筑,2011,51(9):58-61.

Zhao Jingpeng. Study on the Stability of Large-Section Tunnel in Layered Rock Mass with Joint Inclination Angle [J]. Railway Engineering, 2011, 51 (9): 58-61.

[4] 郝广伟,张万志,李世堂,等.不同循环进尺下水平层状岩隧道爆破成型研究[J].地下空间与工程学报,2020, 16(增刊 1):316-322.

Hao Guangwei, Zhang Wanzhi, Li Shitang, et al. Research on the Shaping Effect of Horizontal Layered Rock Tunnel Under Different Blasting Cyclical Footage [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 16(Sup.1): 316-322.

[5] 黄志煌,李天斌.反倾层状岩质边坡内开挖隧道引发边坡失稳与隧道塌方的机制和治理研究[J].地质灾害与环境保护,2009,20(4):76-80.

Huang Zhihuang, Li Tianbin. Mechanism Investigation and Treatment of Slope Instability and Tunnel Collapse in Anti-Dip Within the Layered Rock Slope Excavation of the Tunnel Construction [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, 20(4): 76-80.

[6] 涂瀚.水平层状围岩隧道稳定性及破坏机理研究[J].铁道工程学报,2018,35(9):75-79,87.

Tu Han. Research on the Stability and Failure Mechanism of Horizontal Layered Surrounding Rock Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(9): 75-79, 87.

[7] 王亚琼,杨强,潘红伟,等.基于 3DEC 模拟的高地应力水平层状隧道围岩变形破坏特征分析[J].现代隧道技术,2022, 59(4): 127-136,146.

Wang Yaqiong, Yang Qiang, Pan Hongwei, et al. Analysis on Deformation and Failure Characteristics of Surrounding Rock in Horizontal Layered Tunnels

Under High Crustal Stress Based on 3DEC Simulation [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(4): 127-136, 146.

[8] 资晓鱼,申玉生,朱双燕,等.层状千枚岩隧道形变破坏规律与支护措施研究[J].现代隧道技术,2021,58(3): 196-204.

Zi Xiaoyu, Shen Yusheng, Zhu Shuangyan, et al. Study on the Deformation Failure Laws and Support Measures for Tunnels in Layered Phyllite [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(3): 196-204.

[9] 路军富,王明胜,王奎,等.水平层状泥岩铁路隧道底鼓机理及解析方法研究[J].铁道科学与工程学报,2023, 20(5):1761-1773.

Lu Junfu, Wang Mingsheng, Wang Kui, et al. Mechanism and Analytical Method of Bottom Drum in Horizontal Layered Mudstone Railway Tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(5): 1761-1773.

[10] 朱麟晨.高地应力水平层状Ⅲ级围岩隧道支护结构变形控制措施研究与实践[J].现代隧道技术,2020,57 (增刊 1):1061-1069.

Zhu Linchen. Research and Practice on Deformation Control Measures for Tunnel Support Structure Under High Geo-stress in Horizontal Layered Surrounding Rock of Grade Ⅲ [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(Sup.1): 1061-1069.

[11] 陈红军,刘新荣,杜立兵,等.浅埋层状岩体偏压隧道滑移破坏机理及判定方法[J].地下空间与工程学报, 2021,17(6):1733-1741.

Chen Hongjun, Liu Xinrong, Du Libing, et al. Sliding Failure Mechanism and Its Criterion of Unsymmetrical Loading Shallow Buried Tunnel in Layered Rock Mass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1733-1741.

[12] 熊良宵,李天斌,杨昌斌,等.层状岩体单轴和双轴压缩蠕变特性的数值试验[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(5):1539-1548.

Xiong Liangxiao, Li Tianbin, Yang Changbin, et al. Numerical Analysis Study on Uniaxial and Biaxial Compression Creep Tests for Interlayered Rock Mass [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(5): 1539-1548.

[13] 黄达,马昊,石林.反倾层状岩质边坡倾倒变形机理与影响因素的离散元模拟[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(6):1770-1782.

Huang Da, Ma Hao, Shi Lin. Discrete Element Simulation of Toppling Mechanism and Influencing Factors of Anti-Dip Layered Rock Slope [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(6):1770-1782.

[14] 张以晨,仵磊,沈世伟,等.反倾层状岩质边坡倾倒塌坏力学模型[J].吉林大学学报(地球科学版),2011, 41(增刊 1):207-213.

Zhang Yichen, Nai Lei, Shen Shiwei, et al. Mechanical Models of Anti-Dip Layered Rock Slope Toppling Failure [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(Sup.1): 207-213.

[15] 赵建军,王子贤,严浩元,等.缓倾层状结构高陡采动斜坡变形特征研究[J].水文地质工程地质,2022,49 (2): 174-183.

Zhao Jianjun, Wang Zixian, Yan Haoyuan, et al. Deformation characteristics of a High and Steep Mining Slope with Gently-Inclined Layered Structure [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 174-183.

[16] 穆成林,裴向军,王睿,等.基于物理模型试验的含多层软弱夹层顺层开挖高边坡变形破坏特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3): 61-67.

Mu Chenglin, Pei Xiangjun, Wang Rui, et al. Analysis on Deformation Characteristics of a Cutting High Bedding Rock Slope with Multiple Weak Layers Based on Physical Model Tests [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 61-67.

[17] 铁路隧道设计规范:TB 10003—2016 [S].北京:中国铁道出版社,2017.

Code for Design of Railway Tunnel: TB 10003—2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

[18] 陈俊栋,葛修润,宋丹青,等.层状岩质边坡成洞过程中围岩变形及力学特征研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(6):149-154.

Chen Jundong, Ge Xiurun, Song Danqing, et al. Deformation and Mechanical Characteristics of Bedding Rock Slope in Tunnel Excavation [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(6): 149-154.

[19] 范宇,王明年,邹少祥,等.爆破动载下水平产状砂质板岩洞室稳定性研究[J].路基工程,2018(1):152-156.

Fan Yu, Wang Mingnian, Zou Shaoxiang, et al.

Study on Stability of Flat-lying Sandy Slate Cavern Under Blasting Load [J]. Subgrade Engineering, 2018(1): 152 - 156.

[20] 铁路隧道监控量测技术规程: Q/CR 9218—2015 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.

Technical Specification for Monitoring Measurement of Railway Tunnel: Q/CR 9218—2015 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.

[21] Horn N. Horizontal Earth Pressure on the Vertical Surfaces of the Tunnel Tubes [C]//National Conference of the Hungarian Civil Engineering Industry. Budapest: [s. n.], 1961: 7 - 16.

[22] 冉光炯,杨翹楚,王健.特长隧道隧址区三维地质模型构建方案[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(3):930 - 940.

Ran Guangjiong, Yang Qiaochu, Wang Jian. 3D Geological Modeling Scheme for Super Long Tunnel Site [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 930 - 940.

[23] 雷怡,帅飞翔,孙红月,等.边坡负压排水非稳定流研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(1):162 - 170. doi: 10.13278/j. cnki.jjuese.20200139.

Lei Yi, Shuai Feixiang, Sun Hongyue, et al. Study on Unsteady Flow of Slope Self-Starting Drainage Method [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(1): 162 - 170. doi: 10.13278/j. cnki.jjuese.20200139.

[24] Anagnostou S T G. The Contribution of Horizontal Arching to Tunnel Face Stability [J]. Geotechnik, 2012, 35(1): 34 - 44.

[25] Zhang X, Wang M N, Li J W, et al. Safety Factor Analysis of a Tunnel Face with an Unsupported Span in Cohesive-Frictional Soils [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 117: 103221.

[26] 赵明华,毛韬,牛浩懿,等.上硬下软地层盾构隧道开挖面极限支护力分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(1):103 - 109.

Zhao Minghua, Mao Tao, Niu Haoyi, et al. Analysis of Limit Supporting Force of Tunnel Excavation Face for Shield Machine in Upper-Hard Lower-Soft Ground [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2016, 43(1): 103 - 109.

[27] 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations: JGJ 120—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.