

不同侧覆土厚度条件下连拱隧道的偏压特性研究

张成良, 张金瑞, 曹孟潇, 王 超

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 起凤山隧道进、出口浅埋偏压严重, 上覆土层较薄, 稳定性差, 开挖扰动后上部土层易发生滑动. 后行洞开挖时常会出现围岩变形过大、坍塌、失稳等安全事故. 本文结合现场连拱隧道的地质条件和围岩的力学特点, 采用理论分析和数值模拟方法对开挖后连拱隧道埋深、侧覆土层厚度与围岩应力和位移的变形规律展开研究, 研究表明: 隧道在竖向方向受到的偏压应力随着埋深的增加而减小, 埋深越浅其偏压作用越明显, 当埋深超过 20 m 后偏压作用的偏压应力增加量逐渐减小. 对不同侧覆土层厚度的隧道开挖引起的岩体竖向变形特性进行分析, 结果表明: 竖向位移随侧覆土层厚度的增加逐步减小, 当侧覆土厚度超过 21 m 时, 竖向位移受侧覆土厚度的影响较小, 基本只受围岩本身岩土性质的影响.

关键词: 连拱隧道; 浅埋偏压; 侧覆土厚度; 偏压特性

中图分类号: TU4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)06-0839-07

Study on bias characteristics of multi arch tunnel under different side overburden thickness

ZHANG Chengliang, ZHANG Jinrui, CAO Mengxiao, WANG Chao

(Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The Qi Feng tunnel entrance and exit shallow buried bias is serious, the overlying soil layer is thin, and the stability is poor. After the excavation disturbance, the upper soil layer tends to slide. The excavation of back holes often causes large deformation, collapse and instability of surrounding rock. In this paper, combined with the geological conditions of the multi arch tunnel and the mechanical characteristics of surrounding rock, the theoretical analysis and numerical simulation are used to study the deformation law of the buried depth, side cover soil thickness and the stress and displacement of the surrounding rock after excavation. The results show that the bias stress of the tunnel under the vertical direction increases with the depth of the buried tunnel. The bias stress of the tunnel in the vertical direction decreases with the increase of the buried depth. The more shallow the buried depth is, the more obvious the bias effect is. When the depth of burial exceeds 20m, the increased amount of bias stress is gradually reduced after the bias is applied. The vertical deformation characteristics of the rock mass caused by tunnel excavation with different thickness of the tunnel are analyzed. The vertical displacement is gradually reduced with the increase of the thickness of the side covering layer. When the thickness of the overlying soil is more than 21m, the vertical displacement is less affected by the thickness of the side cladding soil, basically only by the surrounding rock itself.

Key words: multi arch tunnel; shallow buried bias; side overburden thickness; bias characteristic

目前, 隧道形式主要三种: 分离式、小净距和连拱隧道^[1]. 在实际公路建设过程中, 修建隧道时经常会遇到地形陡峭、脊骨相间的“鸡爪”地带. 这时连拱隧道就会因其双洞轴线间距小、节约面积、便于洞内外路线衔接等优点而广泛采用. 根据许多学者的理论研究和实际工程表明: 在隧道开挖前, 岩土体处于应力平衡状态. 因此, 提倡采用“自然进洞法”^[3], 即在隧道进洞前先采取超前大管棚、挡土墙、洞内外注浆等一些围岩加固措施, 在不破坏原有山体的情况下, 实现顺利进洞.

如果安全处置措施不妥当, 就很有可能发生洞口坍塌、边仰滑坡等病害, 使工期延误, 造成不必要的经济损失^[4-7]. 刘小军、张永兴^[8]通过 FLAC3D 软件对浅埋偏压隧道进行数值模拟研究, 对采用环形导坑预留核心土法对隧道开挖施工时, 分析先开挖浅埋侧和先开挖深埋侧两种不同施工工序, 得到了最优方案; Schumacher 等^[9]结合某高速公路偏压连拱隧道进行模型实验, 表明一定的材料配比能较好的对围岩力学特性进行模拟研究; 段海澎等^[10]以富溪偏压连拱隧道为研究对象,

收稿日期: 2018-09-10

修改稿日期: 2019-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774020)

第一作者: 张成良(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、爆破工程方面研究. E-mail: 694095317@qq.com

对围岩和支护结构的变形及受力特征进行分析;刘文彬^[11]结合某双连拱隧道进口偏压段,对其管棚预支护进行分析;赵乐之^[12]以头道穴隧道为研究对象,对进口偏压段进行分析计算,得出能够保证隧道施工时安全进洞的加固方案;熊良宵^[13]采用 FLAC3D 软件,对黄草坪隧道进行地震响应的数值模拟研究;江学良等^[14]采用动力模型相似理论,以设计的偏压隧道模型为研究对象,进行了大型振动台试验,研究偏压隧道在不同激振条件下的地震动力响应特性;Kamata^[15]通过有限元分析和现场监测,对偏压连拱隧道施工中出现的受力非对称问题进行了研究.连拱隧道侧覆土层厚度在开挖过程中的竖向围岩变形特性的研究,对于保证隧道稳定具有重要的研究意义.本文采

用理论分析和数值模拟分析并结合现场监测对连拱隧道的变形特性展开研究.

1 工程概况

起凤山隧道位于大理海东新城中心片区双月路,其左、右幅起止里程 K4+915~K5+290,分界段里程长 375 m;隧道最大埋深约 48 m;隧道所在路段纵坡为-0.617%.起凤山隧道出口位于浅埋偏压段,隧道上覆土层风化严重,岩体破碎,围岩完整性差,隧址区设计围岩以 V 级为主.隧道为双车道,其开挖跨度为 15.23 m,高度为 7.65 m.该隧道采用分幅开挖,取消中隔墙,左幅先行开挖、支护、衬砌完成后,再进行浅埋侧后行洞开挖.隧道的地质纵断面图如下图 1.

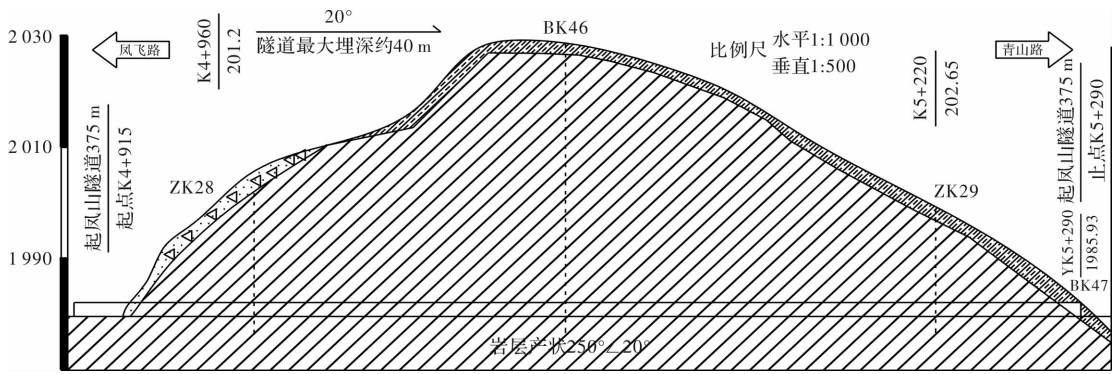


图 1 隧道地质纵断面图

Fig. 1 Tunnel geological profile

根据相关规范,对于连拱隧道浅埋及深埋的分界,可结合地形地质条件、施工工法、荷载等效高度值等综合判定^[10].通过对起凤山隧道的纵断面设计图纸的分析、现场调查,并结合偏压埋深临界值得出该隧道浅埋与深埋的里程长度如表 1 所示;浅埋段的埋深与横坡坡度之间的关系如表 2 所示.

表 1 浅埋与深埋的段里程段落的划分

Tab. 1 Division of section of shallow and deep buried section

| 隧道名称 | 埋深 | 位置 | 长度/m |
|-----------|-----|-----------------------|------|
| 起凤山 隧道 | 浅埋段 | 进口段 K4+915~ K5+020 | 105 |
| | | 出口段 K5+165~ K5+290 | 125 |
| | 深埋段 | 洞身段 K5+020~ K5+165 | 145 |
| | | | |

表 2 浅埋段的埋深与横坡坡度之间的关系

Tab. 2 The relationship between the depth of the shallow buried section and the slope of the horizontal slope

| 浅埋段 | 桩号 | 横坡坡度/° | 埋深/m |
|--------|-------------------|--------|------|
| 进口段 | K4+940 | 18 | 8 |
| | K4+960 | 23 | 18 |
| | K4+980 | 30 | 23 |
| | K4+915~ K5+000 | 26 | 25 |
| | K5+020 | 35 | 29 |
| 出口段 | K5+045 | 38 | 35 |
| | K5+275 | 20 | 10 |
| | K5+255 | 24 | 12 |
| | K5+235 | 26 | 20 |
| | K5+165~ K5+215 | 31 | 22 |
| K5+290 | K5+195 | 29 | 29 |
| | K5+175 | 35 | 32 |
| | K5+160 | 37 | 35 |

2 偏压隧道的力学特性分析

2.1 连拱隧道偏压临界埋深的界定

关于偏压隧道的临界埋深的界定，采用普氏理论计算隧道的自然拱。自然拱的形状、高度和跨度都与岩石的坚固性系数有关。自然拱的抛物线方程为

$$y = -\frac{x^2}{bf} \tag{1}$$

式中： b 为自然拱跨度的一半， $b=B/2$ ，m； f 为围岩坚固系数(即普氏系数)，由查表得出，或 $f=\tan\Phi_0$ ， Φ_0 为计算摩擦角。

在坚硬的岩体中，因为隧道岩体本身具有良好的自稳能力，自然拱的跨度与隧道的跨度一致。在软弱风化破碎的岩体中，隧道岩体稳定性差，隧道拱墙由于受到开挖扰动的影响，致使产生滑移，导致自然拱的跨度有所增大。如图 2 所示。

此时隧道自然拱的跨度 B 为

$$\begin{aligned} B &= B_t + 2H_t \tan\beta \\ &= B_t + 2H_t \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi_0}{2}\right) \end{aligned} \tag{2}$$

式中： B 为自然拱的跨度，m； H_t 为隧道的净高，m； B_t 为隧道的净宽，m； β 为破裂角， $^\circ$ 。

根据以上理论分三步来计算临界埋深：

第一步，以围岩的内摩擦角和隧道宽度为条件，

计算出自然拱的半跨度 b 和围岩坚固性系数 f ；

第二步，将上一步解出的结果带入式 1 计算，并根据曲线方程绘制出自然拱的曲线；

第三步，根据不同的地表坡度与自然拱相切，切线与隧道中轴线的交点至隧道拱顶的距离即为临界埋深。

起凤山隧道为双车道，其开挖跨度为 15.23 m，高度为 7.65 m。不同围岩级别的参数如表 3。根据横坡坡度下理论计算的临界埋深如表 4 所示。

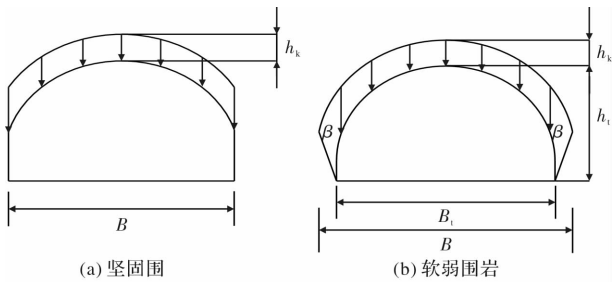


图 2 坍塌拱示意图
Fig. 2 A schematic diagram of a slump arch

表 3 计算摩擦角取值

| Tab. 3 Calculation of the value of friction angle | | | | |
|---|----|----------------|----------------|----|
| 围岩级别 | Ⅲ | Ⅳ _石 | Ⅳ _± | V |
| 计算摩擦角/ $^\circ$ | 65 | 60 | 50 | 45 |

表 4 偏压临界深度和横坡坡度之间的关系(m)

| Tab. 4 The relationship between the critical depth of bias and the slope of the cross slope /m | | | | |
|--|----------|------------------------|------------------------|----------|
| 坡度 | 围岩级别 | | | |
| | Ⅲ级围岩临界深度 | Ⅳ _石 级围岩临界深度 | Ⅳ _± 级围岩临界深度 | V级围岩临界深度 |
| 1: 0.75(倾角 53.0 $^\circ$) | 12.2 | 13.9 | 15.4 | 16.7 |
| 1: 1.00(倾角 45.0 $^\circ$) | 9.6 | 11.6 | 13.5 | 15.8 |
| 1: 1.25(倾角 38.7 $^\circ$) | 7.9 | 9.9 | 11.6 | 13.3 |
| 1: 1.50(倾角 33.7 $^\circ$) | 6.8 | 8.5 | 10.3 | 12.4 |
| 1: 2.00(倾角 26.6 $^\circ$) | 5.4 | 6.9 | 9.4 | 10.7 |
| 1: 2.50(倾角 21.8 $^\circ$) | 4.9 | 6.0 | 8.5 | 9.7 |

2.2 偏压隧道中埋深对围岩压力的影响研究

(1)隧道衬砌荷载

图 3 结合围岩压力的计算给出了在对 V 级围岩、横坡坡度为 30 $^\circ$ 时，隧道在不同的埋深情况下，隧道内外侧的垂直压力的变化规律。偏压隧道围岩压力的计算公式为

$$Q = \frac{\gamma}{2}[(h+h')B - (\lambda h^2 + \lambda' h'^2)\tan\theta] \tag{3}$$

其中： h, h' 为内、外侧由拱顶水平至地面的高度，m； B 为隧道宽度，m； θ 为顶板土柱两侧摩擦角， $^\circ$ ； γ 为围岩重度，kN/m 2 ； λ, λ' 为内、外侧的侧压力系数。

(2) 荷载作用下水平侧压力的计算

$$\text{内侧压力: } e_i = \gamma \cdot h_i \lambda \quad (2)$$

$$\text{外侧压力: } e_o = \gamma \cdot h_i' \lambda' \quad (3)$$

(3) 荷载作用下垂直压力的计算

$$q_0 = \frac{Q}{B} \quad (4)$$

$$\text{左侧垂直压力: } q_1 = q_0 - \frac{B\gamma}{2} \tan \alpha \quad (5)$$

$$\text{右侧垂直压力: } q_2 = q_0 + \frac{B\gamma}{2} \tan \alpha \quad (6)$$

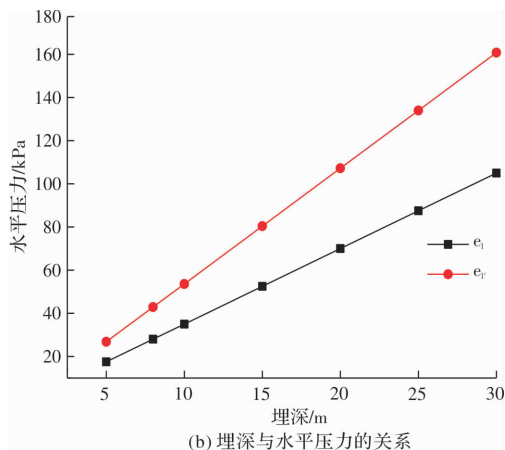
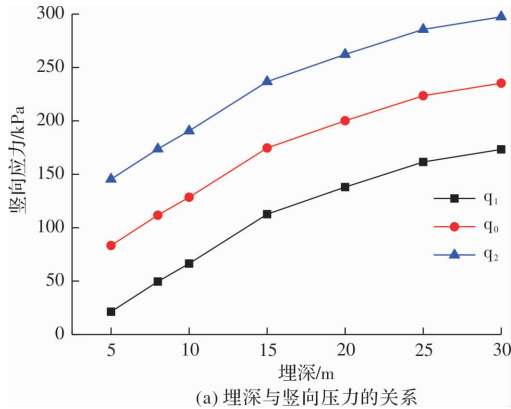


图 3 埋深与围岩压力关系

Fig. 3 Relationship between depth of buried depth and pressure of surrounding rock

由图 3 分析可以得出: 水平压力与竖向压力都随着埋深的增加而增加. 随着埋深的增加水平压力比竖向压力增量更快, 当埋深大于 20 m 以后, 竖向压力增加量迅速减小. 这说明隧道在竖向受到的偏压作用在埋深超过 20 m 以后增加量就逐渐减小了. 同样围岩横坡坡度在 20°、40°时具有相似的规律.

3 不同覆土厚度条件下连拱隧道偏压特性数值模拟分析

起凤山隧道属于埋深较浅的隧道, 对于隧道

的分析由于接近于地表, 这时构造地应力已经充分被释放. 故模型计算时只考虑自重应力, 不考虑构造应力. 基于 FLAC3D 软件进行数值模拟, 为了简化计算, 并考虑边界效应对模型计算的影响, 单幅隧道模型左边界自隧道中心线算起不少于 5D, 右边界取至自然坡面, 模型下部边界距离隧道仰拱底部不少于 3D, 隧道三维模型及开挖模型如图 4.

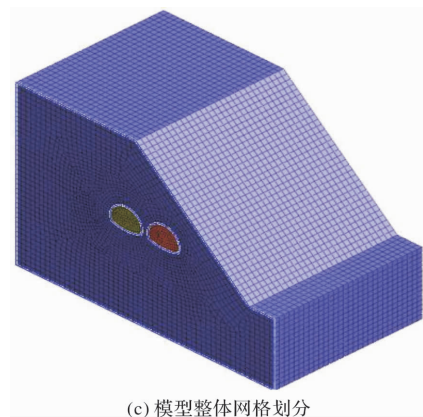
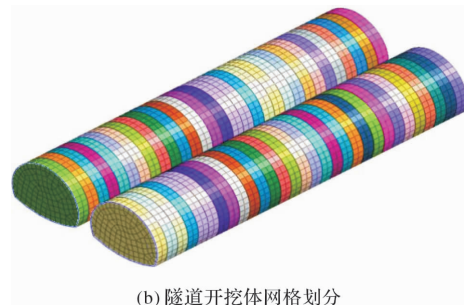
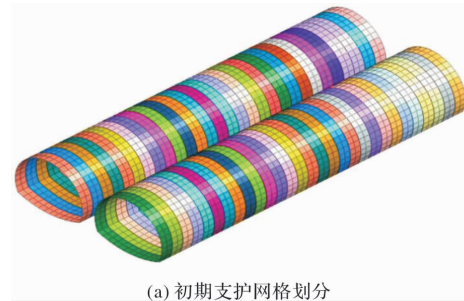


图 4 隧道三维模型网格划分示意图

Fig. 4 A sketch map of 3D model meshing in tunnel

根据现场调查的偏压角度, 针对不同侧覆土层厚度隧道开挖变形特征进行研究, 围岩级别选取 V 级, 对于横坡的坡度, 选取为 25°、35°、45°, 最大埋深取 36 m, 侧覆土层厚度取 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、6 m、7 m、8 m、9 m、11 m、13 m、15 m、17 m、19 m、21 m 等工况进行研究, 相关计算材料的物理力学参数取值见表 5.

表 5 材料物理力学参数

Tab. 5 Material and material are physical and mechanical parameters

| 材料 | 弹性模量 E/MPa | 泊松比 μ | 容重 $\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ | 内摩擦角 $\varphi/^\circ$ | 黏聚力 C/MPa |
|------|---------------------|-----------|---|-----------------------|--------------------|
| IV | 300 | 0.33 | 22 | 40 | 0.70 |
| V | 200 | 0.35 | 20 | 27 | 0.30 |
| VI | 100 | 0.40 | 17 | 20 | 0.09 |
| 初期支护 | 25 000 | 0.30 | 25 | — | — |

3.1 浅埋偏压段应力分析

在隧道应力分析中以拉应力为正、压应力为负，隧道开挖后主要是受拉应力，在模拟分析中压应力取负值。隧道的最大剪切增量云图反映了隧道开挖最容易受到破坏的地方。典型的隧道开挖后围岩的应力云图和剪应力云图见图 5。

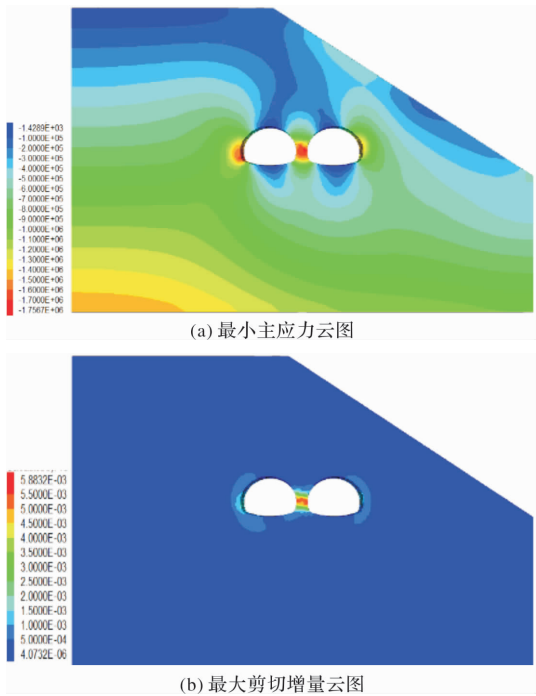


图 5 35°埋深 13 m 隧道开挖后围岩最小主应力云图和最大剪切增量云图

Fig. 5 Minimum principal stress cloud map and maximum shear increment cloud map of surrounding rock after excavation of 15m tunnel with 35 degree depth

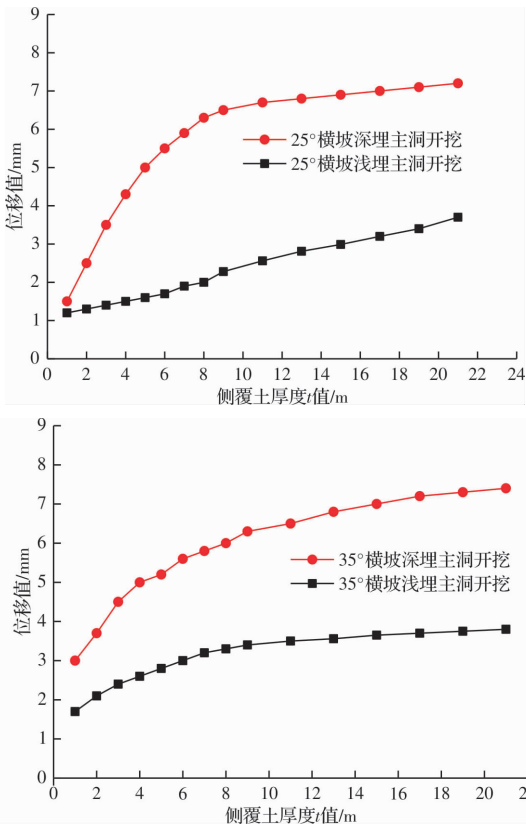
根据不同工况下隧道开挖后围岩的应力云图和最大剪切增量云图分析可以得出：(1)隧道开挖完成后，偏压连拱隧道左、右幅均存在应力集中现象，主要发生在两侧的拱脚和拱底、中隔墙位置处，在施工过程中要特别引起注意；其次由于中隔墙构造上的特殊和隧道开挖扰动后的影响，使隧道中隔墙受剪切破坏严重，偏压连拱隧道在施工中隔墙时应防止其受剪切产生破坏。(2)在相同的横坡坡度下，最大剪应力随侧覆土厚度的增

加而增加。随着侧覆土厚度的增加，在隧道的拱脚处应力集中有所改善。

3.2 浅埋偏压段关键点位移分析

取拱顶沉降、左侧拱肩水平位移作为关键点进行分析，并绘制不同工况下隧道开挖后随侧覆土厚度的变化拱顶沉降、左侧拱肩水平位移曲线图见图 6、图 7。

根据图 6、图 7 分析可以得出：(1)隧道洞身开挖时，竖向位移值总体上都随着侧覆土厚度 t 值的增加而增加；在侧覆土的厚度 t 值很小时，偏压隧道洞身的开挖对竖向位移影响较大；随着侧覆土厚度的增加，隧道洞身的竖向位移增加量逐渐减小，当侧覆土厚度 $t=21\text{ m}$ 时，竖向位移受侧覆土厚度 t 值影响较小，只受围岩本身岩土性质的影响。(2)深埋主洞开挖会造成浅埋侧主洞拱顶沉降量的大幅增加，是因为随着深埋主洞开挖，支撑两洞拱顶土层重力的中隔墙反复受到扰动，且中



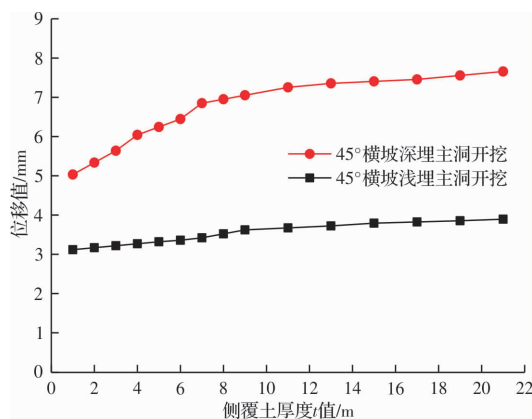


图6 侧覆土与拱顶位移关系图

Fig. 6 The relationship between the overlying soil and the displacement of the vault conditions

隔墙本身厚度较小,使得承载能力减小,造成拱顶沉降量增大。(3)在同一工况下,对于拱顶沉降量,深埋侧主洞总是大于浅埋侧主洞的沉降量,这是因为深埋侧主洞上覆土层较浅埋侧厚所造成的。(4)在相同的横坡坡度下,左侧拱肩水平位移值总体上随侧覆土厚度 t 值的增大而减小,但是随着侧覆土厚度 t 值的增加,左侧拱肩的水平位移值减小的速度越来越慢。

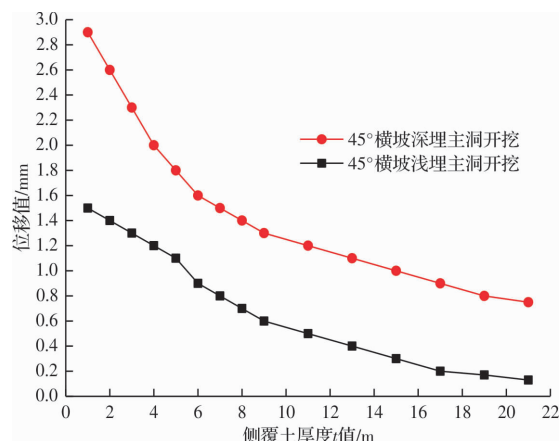
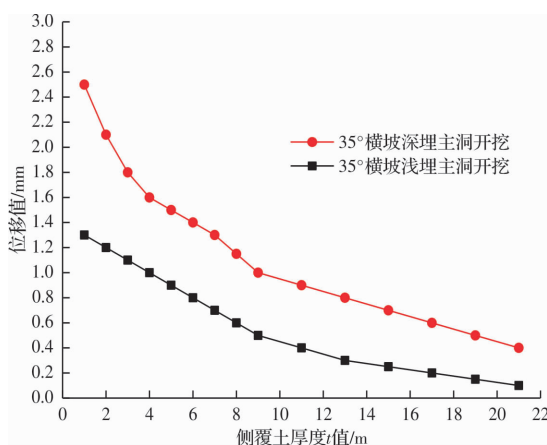
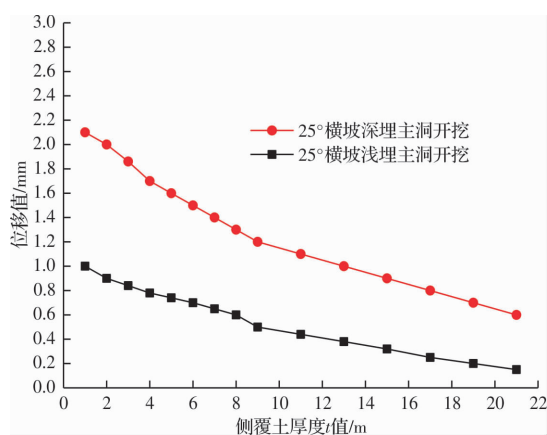


图7 侧覆土与拱肩水平位移关系图

Fig. 7 Relation diagram of horizontal displacement of overlying soil and arch shoulder

4 结论

通过对偏压连拱隧道的偏压特性进行理论与数值分析,并结合现场监测数据得出结论:

(1)围岩的水平压力和竖向压力都随着埋深的增加而增加,且随着埋深的增加水平压力比竖向压力增量更快,当埋深大于20 m以后,竖向压力增加量逐渐减小。

(2)随着侧覆土厚度的增加以及深埋主洞开挖对分隔墙的扰动,分隔墙受到了较大的剪切应力作用,受扰动后,这时需要特别注意分隔墙上方的岩土体的沉降,分隔墙斜上方的岩土体开挖扰动后向临空面移动,作用在分隔墙上,分隔墙受重复的拉、压、剪切作用,分隔墙的施工质量成为控制上覆围岩移动变形的关键。同时浅埋偏压隧道开挖时拱脚出现了较大的应力集中,隧道施工中要注意避免拱脚出现应力集中。

(3)隧道洞身开挖时,竖向位移值总体上都随着侧覆土厚度 t 值的增加而增加;当侧覆土厚度 $t=21$ m时,竖向位移与侧覆土厚度 t 值基本没有关系,基本只受围岩本身岩土性质的影响。

参考文献 References

- [1] 李奎. 水平层状隧道围岩压力拱理论[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
LI Kui. Theoretical study on pressure arch of surrounding rock in horizontal layered tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [2] 张敏. 复杂地质条件下大断面隧道“零”进洞工法技术体系及应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
ZHANG Min. Technical system and application of zero entry method for large cross section tunnel under complex geological conditions [D]. Chengdu: Chengdu U-

- niversity of Technology, 2009.
- [3] LI Changdong, WANG Xiaoyi, TANG Huiming, et al. A preliminary study on the location of the stabilizing piles for colluvial landslides with interbedding hard and soft bedrocks[J]. Engineering Geology, 2017, 224
- [4] 汪宏, 蒋超. 浅埋偏压隧道洞口坍方数值分析与处治[J]. 岩土力学, 2009(11): 3481-3485.
WANG Hong, JIANG Chao. Numerical analysis and treatment of collapse of shallow buried bias tunnel portal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009(11): 3481-3485.
- [5] 冯秀国. 采用地表注浆方法使隧道穿越坍塌区[J]. 铁道建筑, 1998(2): 28-30.
FENG Xiuguo. Using surface grouting method to make tunnels pass through collapsed area[J]. Railway Building, 1998(2): 28-30.
- [6] 李锦平, 黄武来. 浅埋隧道通顶坍塌整治与思考[J]. 中国铁路, 1996(7): 49-51.
LI Jinping, HUANG Wulai. Renovation and consideration of roof collapse in shallow tunnels[J]. China Railway, 1996(7): 49-51.
- [7] DAY M J. Karstic problems in the construction of Milwaukee's deep tunnels[J]. Environmental Geology, 2004, 45(6): 859-863.
- [8] 刘小军, 张永兴. 浅埋偏压隧道洞口段合理开挖工序及受力特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(S1): 3066-3073.
LIU Xiaojun, ZHANG Yongxing. Reasonable excavation procedure and stress characteristics of shallow buried bias tunnel portal section[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011(S1): 3066-3073.
- [9] SCHUMACHER Forrest P, EUNHYE Kim. Modeling the pipe umbrella roof support system in a Western US underground coal mine[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 60: 114-224.
- [10] 段海澎, 徐干成, 刘保国. 富溪偏压连拱隧道围岩与支护结构变形和受力特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 3763-3768.
DUAN Haipeng, XU Gancheng, LIU Baoguo. Analysis of deformation and stress characteristics of surrounding rock and supporting structure of Fuxi multi arch tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3763-3768.
- [11] LIU W, LIU B, WANG W. Pipe shield effect analysis of double-arched tunnel under unsymmetrical pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2007, 26: 3704-3710.
- [12] 赵乐之, 刘晓峰, 乔宁. 偏压隧道设计的数值分析[J]. 建筑结构, 2010(S1): 409-411.
ZHAO Lezhi, LIU Xiaofeng, QIAO Ning. Numerical analysis of the design of bias tunnel[J]. Journal of Architectural Structure, 2010(S1): 409-411.
- [13] 熊良宵, 李天斌, 刘勇. 隧道地震响应数值模拟研究[J]. 地质力学学报, 2007, 13(3): 255-260.
XIONG Liangxiao, LI Tianbin, LIU Yong. Numerical simulation of tunnel seismic response[J]. Chinese Journal of Geomechanics, 2007, 13(3): 255-260.
- [14] 江学良, 陈江, 杨慧, 等. 基于大型振动台试验的偏压隧道地震响应特性研究[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(5): 158-166.
JIANG Xueliang, CHEN Jiang, YANG Hui, et al. Study on seismic response characteristics of bias tunnel based on large-scale shaking table test[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(5): 158-166.
- [15] KAMATA Mashimo. Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(2/3): 205-212.

(编辑 吴海西 桂智刚)

(上接第 838 页)

- [12] 郭莹, 刘界鹏, 苗亚军, 等. 圆 CFRP-钢复合管约束混凝土短柱轴压试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(6): 41-50.
GUO Ying, LIU Jiepeng, MIAO Yajun, et al. Experimental study on axial behavior of circular CFRP-steel composite tube confined concrete stub columns[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(6): 41-50.
- [13] 周绪红, 刘界鹏, 张素梅. 圆钢管约束钢筋混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(7): 56-63.
ZHOU Xuhong, LIU Jiepeng, ZHANG Sumei. Seismic behavior of circular tubed reinforced concrete short columns[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(7): 56-63.
- [14] 周绪红, 刘界鹏. 钢管约束混凝土柱的性能与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-5.
ZHOU Xuhong, LIU Jiepeng. Performance and design of steel tube confined concrete members[M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-5.
- [15] 周绪红, 闫标, 刘界鹏, 等. 不同长径比钢管约束钢筋混凝土柱轴压承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(12): 11-21.
ZHOU Xuhong, YAN Biao, LIU Jiepeng, et al. Axial load behavior of circular tubed reinforced concrete columns with different length-to-diameter ratio[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(12): 11-21.

(编辑 吴海西 桂智刚)