

# 浅埋偏压小净距隧道围岩压力分布与围岩控制\*

腾俊洋<sup>1,2</sup>, 唐建新<sup>1,2</sup>, 张闯<sup>1,2</sup>, 张宇宁<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044)

**摘要:**根据浅埋偏压小净距隧道受力特点, 研究推导了考虑施工工序及地形坡度的浅埋偏压小净距隧道围岩压力计算公式。分析了考虑不同地形坡度及同一坡度不同埋深2种工况下地形坡度及埋深对围岩破裂范围、水平侧应力、拱顶压力的影响规律, 并指出了浅埋偏压小净距隧道围岩压力在考虑地形坡度下与水平地表下分布规律的差异, 建立了3DEC数值模型以对上述理论规律进行验证, 结果表明, 数值分析规律与理论推导计算规律相吻合。将理论计算公式应用于马嘴隧道出口浅埋段隧道稳定性计算, 由计算所得围岩稳定性系数及现场隧道变形监测结果提出隧道围岩及地表稳定性处理措施。

**关键词:**偏压; 小净距隧道; 围岩稳定; 理论计算; 监测

中图分类号: U456

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)03-0761-09

## Distribution and Control of Surrounding Rock Pressure of Shallow Buried Tunnel under the Condition of Terrain Bias

Teng Junyang<sup>1,2</sup>, Tang Jianxin<sup>1,2</sup>, Zhang Chuang<sup>1,2</sup>, Zhang Yuning<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R. China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R. China)

**Abstract:** According to the stress characteristics of the small space tunnel under the bias voltage, the calculation method of the surrounding rock pressure considering the construction process and the terrain slope of shallow-buried bias tunnel were studied. The influence of the surrounding rock failure range, the horizontal and roof stress by the terrain slope and buried depth were analyzed under two conditions of different topographic gradients and different depth of the same slope, then the differences of surrounding rock pressure distribution between the small spacing tunnel that consider the topographic slope angle and the small spacing tunnel with horizontal surface is pointed out. The 3DEC numerical model is established to verify the above theoretical rules, the results show that the numerical analysis is in agreement with the theoretical analysis. Then, the theoretical calculation formula is applied to the stability calculation of Mazui tunnel. The stability of tunnel surrounding rock and surface treatment measures proposed by the calculated coefficient of surrounding rock stability and deformation monitoring results of field tunnel.

**Keywords:** unsymmetrical pressure; small spacing tunnels; surrounding rock stability; theoretical calculation; monitoring

\* 收稿日期: 2017-12-17(修改稿)

作者简介: 腾俊洋(1989-), 男, 河南驻马店人, 博士生, 主要从事隧道及地下空间稳定性研究。

E-mail: jteng89@hotmail.com

基金项目: 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主课题重点项目(2011DA105287-ZD201504)

## 0 引言

小净距隧道是双洞最小净距小于正常使用规定范围的隧道,因其中间岩柱较薄、双洞净距小、对施工相互影响大,而不宜应用于长、特长的隧道<sup>[1]</sup>。但小净距隧道能够满足特定的地质地形条件及线桥隧衔接的需要,当长、特长隧道需要洞口局部压缩净距时可以考虑使用。

许多学者以公路隧道设计规范<sup>[1]</sup>为基础对小净距隧道围岩压力计算方法和理论进行了研究,并取得了一定的成果<sup>[2-8]</sup>。肖明清、舒志乐和彭琦等<sup>[2-4]</sup>分别研究了浅埋小净距隧道及存在地形偏压的小净距隧道的围岩压力计算方法,但未考虑隧道施工顺序的影响。龚建伍等<sup>[5-6]</sup>研究了考虑双洞施工顺序影响情况下的小净距隧道的围岩压力计算方法,计算中未考虑地形偏压的影响。张建等<sup>[7]</sup>分析了双侧偏压小净距隧道的围岩破裂模式,提出了考虑左右洞施工顺序的双侧偏压小净距隧道的围岩压力计算方法。但他在进行后行洞内侧面侧压力系数及破裂角计算中未能有效考虑地形坡角的影响,而实际地形坡角度对小净距隧道围岩分布有着不可忽视的影响。吕小龙<sup>[8]</sup>通过FLAC<sup>3D</sup>数值模拟分析了地形坡度对小净距隧道围岩压力的影响,并通过MATLAB拟合出了围岩压力与地形坡度的简化公式,得出地表坡度越大,偏压程度也较大,隧道在开挖支护中应力场耦合程度也将增大的结论。Lei等<sup>[9]</sup>借助模型试验分析了偏压状态下地形坡度对围岩应力的影响,发现浅埋与深埋隧道的围岩应力差异性将随着角度的增加而增加。

针对以上研究的不足,本文不仅考虑小净距隧道左右洞先后施工的相互影响,同时考虑地形偏压的影响,推导了浅埋偏压小净距隧道围岩压力计算公式,并根据计算结果分析了考虑不同地形坡度及同一地形坡度不同埋深两种工况下地形坡度及埋

深对先行洞和后行洞内外侧围岩破裂范围和两侧及拱顶围岩大小的影响规律,并应用3DEC数值计算对理论规律进行验证。最后将计算公式应用于马嘴隧道出口围岩压力计算分析,结合现场监测数据分析出口浅埋段隧道围岩稳定性,为浅埋偏压小净距公隧道结构支护参数的合理设计及开挖工序提供借鉴与参考。

## 1 围岩压力计算与分析

### 1.1 计算模型

浅埋偏压小净距隧道假定滑动破坏模式及计算荷载如图1所示。地形坡度为 $\alpha$ ,隧道高为 $H$ ,跨度为 $B$ ,隧洞间距为 $a$ 。两隧洞破裂面与水平方向夹角为 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 。先行洞上覆岩土体BCFG下沉,带动两侧土体ABH、CDEI下沉,整个土体AHID下沉时,又要受到未扰动土体的阻力(即 $F_1, F_2$ )。同理,后行洞开挖时整个土体A'T'H'D受未扰动土体的阻力为 $F_3, F_4$ 。岩土体ABH、BCFG、CDEI、C'DEH'、B'C'G'F'、A'B'T'的重力分别为 $W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6$ 。先行洞与后行洞内外侧顶部距地表的距离分别为 $h_1, h_2, h_3, h_4$ 。 $\varphi_c$ 为计算内摩擦角, $\theta$ 值参照规范<sup>[1]</sup>选用。

计算时假定岩(土)体为连续均匀介质,各向同性,且不考虑仰拱对隧道的影响。

### 1.2 公式推导

#### 1.2.1 先行洞开挖

先行洞开挖时,内外侧围岩压力计算采用单洞偏压隧道围岩压力计算方法。可直接参照文献4中的计算公式。

先行洞外侧、内侧水平压力为:

$$\begin{aligned} e_1 &= \lambda_1 \gamma h_i \\ e_2 &= \lambda_2 \gamma h_j \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $h_i, h_j$ 为计算点至地表的垂直距离; $\lambda_1, \lambda_2$ 为外侧及内侧侧压力系数。

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{1}{\tan(\beta_1) + \tan(\alpha)} \times \frac{\tan(\beta_2) - \tan(\alpha)}{1 + \tan(\beta_1) [\tan(\varphi_c) - \tan(\theta)] + \tan(\varphi_c) \tan(\theta)} \\ \lambda_2 &= \frac{1}{\tan(\beta_2) + \tan(\alpha)} \times \frac{\tan(\beta_1) - \tan(\alpha)}{1 + \tan(\beta_2) [\tan(\varphi_c) - \tan(\theta)] + \tan(\varphi_c) \tan(\theta)} \\ \tan(\beta_1) &= \tan(\varphi_c) + \sqrt{\frac{[\tan^2(\varphi_c) + 1] [\tan(\varphi_c) + \tan(\alpha)]}{\tan(\varphi_c) - \tan(\theta)}} \\ \tan(\beta_2) &= \tan(\varphi_c) + \sqrt{\frac{[\tan^2(\varphi_c) + 1] [\tan(\varphi_c) - \tan(\alpha)]}{\tan(\varphi_c) - \tan(\theta)}} \end{aligned} \quad (2)$$

先行洞拱顶垂直压力

$$Q = \frac{\gamma}{2} [(h_1 + h_2)B - (\lambda_1 h_1^2 + \lambda_2 h_2^2) \tan(\theta)] \quad (3)$$

作用在支护结构上的均布荷载

$$q = \frac{Q}{B} = \frac{\gamma}{2} \left[ (h_1 + h_2) - (\lambda_1 h_1^2 + \lambda_2 h_2^2) \frac{\tan(\theta)}{B} \right] \quad (4)$$

由几何关系得:

$$\begin{aligned} q_1 &= q + \frac{B}{2} \tan(\alpha) \\ q_2 &= q - \frac{B}{2} \tan(\alpha) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $h_1$ 、 $h_2$  为先行洞外、内侧有拱顶至地面的高度, m。

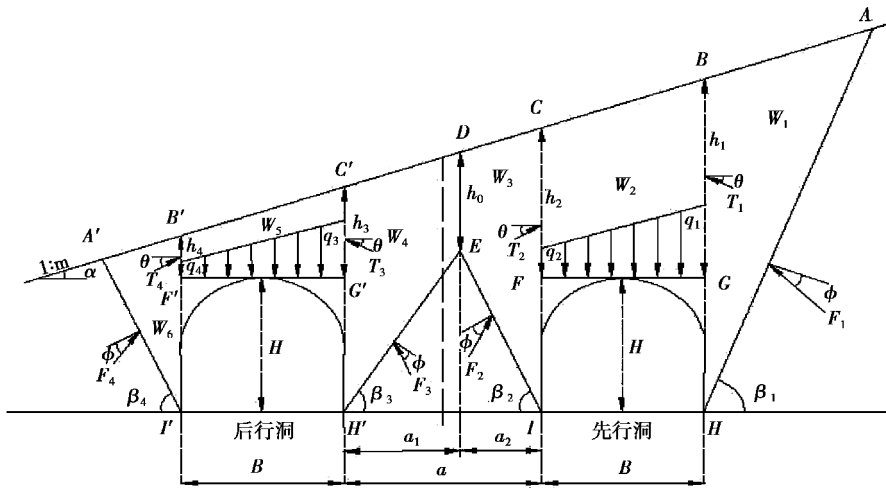


图 1 浅埋偏压小净距隧道滑裂模式示意图

Fig. 1 Sketch of slip mode of shallow-buried bias tunnel with small spacing

1.2.2 后行洞开挖

(1)后行洞侧向水平压力:后行洞开挖时,其外侧水平压力计算与先行洞外侧水平压力计算原理相同,二者计算公式相同,所不同的是内侧侧向水平压力要受先行洞的影响。侧应力的求解主要是对侧应力系数及破裂角的求解,浅埋隧道围岩压力计算的已有研究计算流程均为借鉴规范内容,但由于其求解的复杂性,得出的侧应力系数及破裂角正切公式各有差异。文献[10]在后行洞内侧侧向水平压力及破裂角求解时未考虑地形坡度的影响。本文借助 matlab 的符号计算功能编程对公式进行推导。

后行洞内侧水平压力计算时滑动体  $C'H'ED$  在自重  $W_4$ 、未扰动岩土体阻力  $F_3$ 、抗滑体阻力  $T_3$  作用下处于平衡状态。由正弦定理可知:

$$T_3 = \frac{\sin(\beta_3 - \varphi)}{\sin[90^\circ - (\beta_3 - \varphi + \theta)]} W_4 \quad (6)$$

$$\tan(\beta_3) = -\cot(\varphi_c - \theta) + \sqrt{\cot^2(\varphi_c - \theta) + \tan(\alpha) \cot(\varphi_c - \theta) + \frac{\sec^2(\varphi) [\tan(\varphi_c) + 2H_3]}{a_1 [\tan(\varphi_c) - \tan(\theta)]}} \quad (10)$$

后行洞内侧水平压力:

$$e_3 = \lambda_3 \gamma h_i \quad (11)$$

式中: $h_i$  为计算点至地表的垂直距离。

式中,

$$W_4 = \frac{1}{2} \gamma (h_0 + h_3 + H) a_1 \quad (7)$$

$$h_0 = h_3 + H + a_1 [\tan(\alpha) - \tan(\beta_3)]$$

令  $H_3 = h_3 + H$ , 即为后行洞内侧隧道底部至地表的距离, 则

$$T_3 = \frac{1}{2} \gamma H_3^2 \frac{\lambda_3}{\cos(\theta)} \quad (8)$$

$$\lambda_3 = \frac{2a_1 H_3 - a_1^2 [\tan(\beta_3) - \tan(\alpha)]}{H_3^2} \times \frac{\tan(\beta_3) - \tan(\varphi_c)}{1 + \tan(\beta_3) [\tan(\varphi_c) - \tan(\theta)] + \tan(\varphi_c) \tan(\theta)}$$

为求  $T_3$  极大值, 令  $\frac{d\lambda_3}{d[\tan(\beta_3)]} = 0$  推得:

(2)后行洞拱顶垂直压力:设作用于后行洞顶部的垂直压力内侧为  $q_3$ , 外侧为  $q_4$ 。作用于拱顶的垂直压力总值为:

$$Q' = W_5 - T_3 \sin(\theta) - T_4 \sin(\theta) \quad (12)$$

均布荷载计算方式与先行洞类似:

$$q' = \frac{Q'}{B} = \frac{\gamma}{2} \left[ (h_3 + h_4) - (\lambda_3 h_3^2 + \lambda_4 h_4^2) \frac{\tan(\theta)}{B} \right]$$
$$q_3 = q' + \frac{B}{2} \tan(a)$$
$$q_4 = q' - \frac{B}{2} \tan(a)$$
$$(13)$$

### 1.2.3 后行洞开挖后先行洞围岩压力

后行洞开挖后,先行洞的外侧围岩压力不变,内侧围岩压力及拱顶垂直压力发生变化,计算方式和后行洞计算方式相同,这里直接给出计算结果。

$$e'_{2'} = \lambda'_{2'} \gamma h_j$$
$$\lambda'_{2'} = \frac{2a_2 H_2 - a_2^2 [\tan(\beta'_2) - \tan(\alpha)]}{H_2^2} \times \frac{\tan(\beta'_2) - \tan(\varphi_c)}{1 + \tan(\beta'_2) [\tan(\varphi_c) - \tan(\theta)] + \tan(\varphi_c) \tan(\theta)} \tan(\beta'_2)$$
$$= -\cot(\varphi_c - \theta) + \frac{\sqrt{\cot(\varphi_c - \theta)^2 + \tan(\alpha) \cot(\varphi_c - \theta) + \frac{\sec^2(\varphi) [\tan(\varphi_c) + 2H_3]}{a_3 [\tan(\varphi_c) - \tan(\theta)]}}}{a_3 [\tan(\varphi_c) - \tan(\theta)]}$$
$$q'' = \frac{\gamma}{2} \left[ (h_1 + h_2) - (\lambda_1 h_1^2 + \lambda_2 h_2^2) \frac{\tan(\theta)}{B} \right]$$
$$q'_1 = q'' + \frac{B}{2} \tan(a)$$
$$q'_{2'} = q'' - \frac{B}{2} \tan(a)$$
$$(14)$$

式中: $H_2 = h_2 + H$ ,即为先行洞内侧隧道底部至地表的距离,其他符号意义见图 1 中标注。

由以上理论推导可得,浅埋偏压小净距隧道先行洞与后行洞开挖后围岩压力计算分布如图 2 所示。

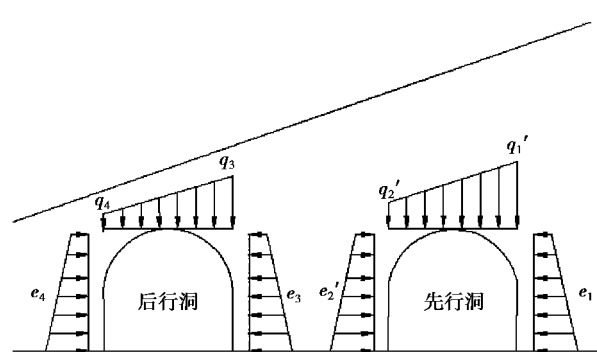


图 2 浅埋偏压小净距隧道围岩压力分布示意图

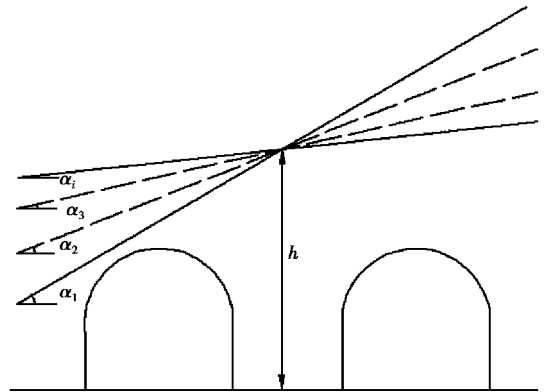
Fig. 2 Rock pressure distribution modes of shallow-buried bias tunnel with small spacing

## 2 围岩压力规律分析

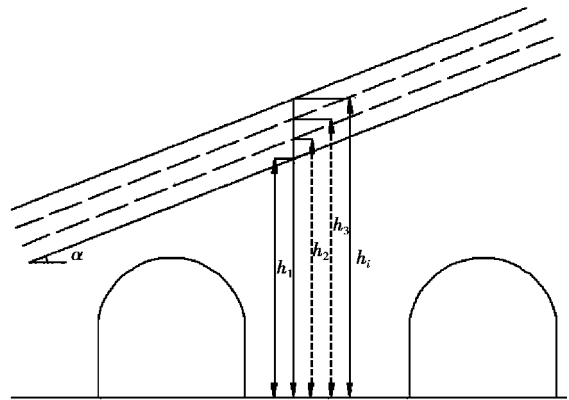
关于浅埋小净距隧道围岩压力与隧道净距、埋深、围岩级别的关系,以及小净距隧道的施工力学行为,已有较多研究<sup>[11-16]</sup>,但关于地形坡角度对浅埋小净距隧道围岩压力分布的影响研究较少。下面根据上述理论公式给定特定隧道设计参数来分析地形坡角对破裂角、水平侧压力、拱顶垂直压力的影响。

某浅埋偏压小净距隧道,洞口浅埋段参数为:隧道跨度  $B = 11.8 \text{ m}$ ,高度  $H = 9.3 \text{ m}$ ,净距  $a = 7.5 \text{ m}$ ,围岩重度  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ,计算内摩擦角  $\varphi_c = 45^\circ$ ,  $\theta = 27^\circ$ 。计算隧道滑裂模式如图 1。

计算分两种情况考虑:①分析在埋深一定时不同地形坡角度下隧道围岩压力的分布特征;②分析在一给定地形坡角度下不同埋深的隧道围岩压力分布特征,如图 3 所示。



(a) 不同地形破角度



(b) 不同埋深

图 3 计算模型分类示意图

Fig. 3 Sketch of calculation model classification

### 2.1 不同地形坡角度下隧道围岩压力分布

破裂面交点距后行洞内侧的距离取为  $0.6a$ ,埋深  $h = 20 \text{ m}$ 。根据上述计算公式,代入浅埋段计算

参数,可得破裂角、水平侧压力、拱顶垂直压力随地形坡角的变化曲线图,如图4所示。

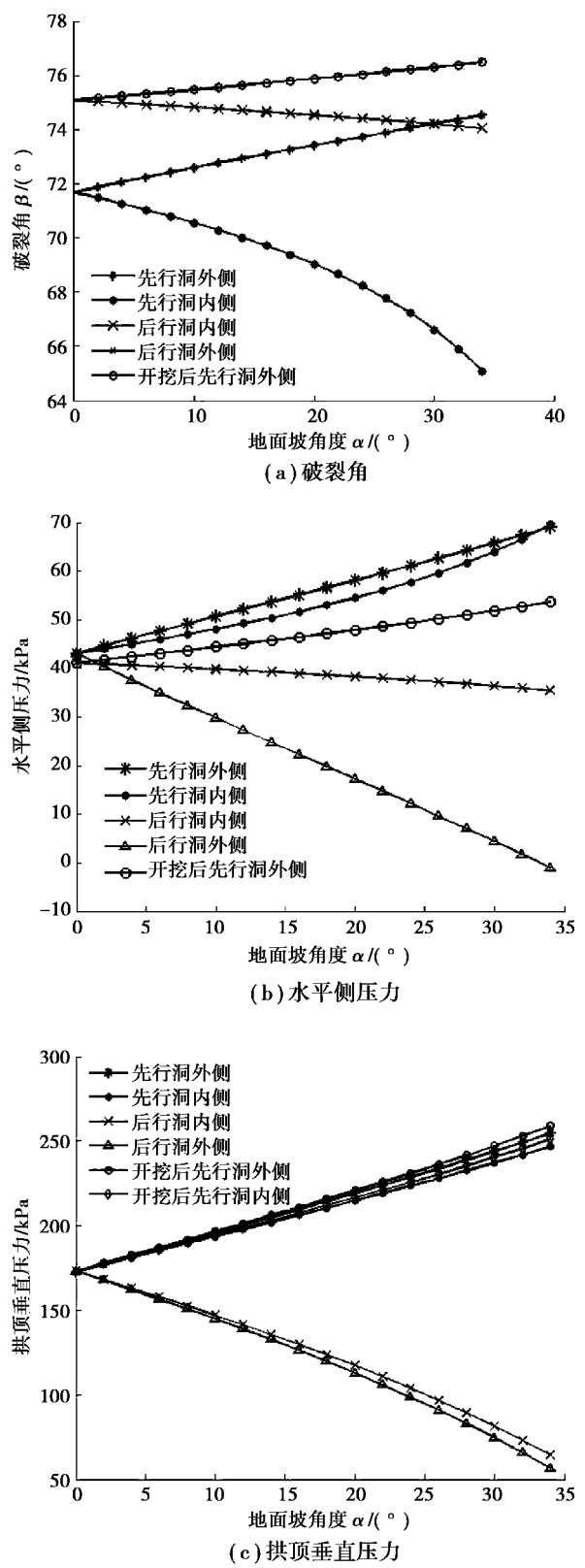


图4 围岩压力分布与地面坡角度变化曲线  
Fig. 4 Relation curves of rock pressure distribution and slope angle

破裂角反映了受开挖扰动围岩的破裂范围,其值越小则表示破裂范围越大,值越大则表示破裂范围越小。由图4可知,两洞外侧破裂角相同,随地形坡角度增加而线性增加,后行洞内侧随地形坡角增加而减小。先行洞内侧随地形坡角度增加而减小,即地形越陡,先行洞内侧围岩破裂范围越大。后行洞开挖后,先行洞内侧围岩破裂范围受地形坡角度影响不大。

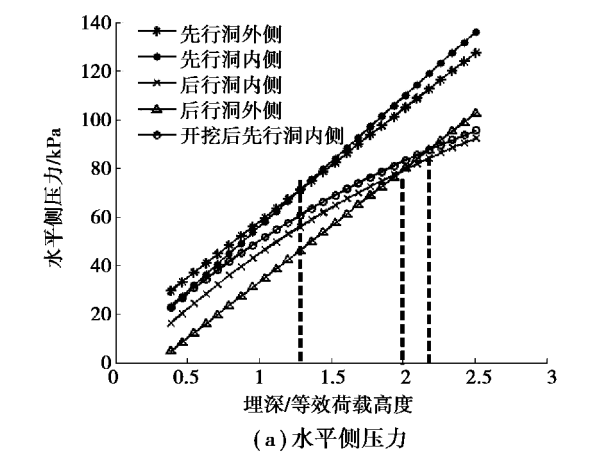
由水平侧压力与地形坡角度的变化曲线可知,先行洞侧向应力与地形坡角度成正比,后行洞内侧与地形坡角度成反比,后行洞开挖后先行洞内侧水平压力有所降低,且受地形角度影响不如开挖前强烈。

由拱顶垂直压力与地形坡角度变化曲线可知,先行洞拱顶垂直压力大于后行洞,这是因为拱顶垂直压力大小与埋深成正比<sup>[6,15]</sup>,而本计算案例中先行洞埋深大于后行洞的缘故。先行洞拱顶垂直压力随坡角增加而线性增加,后行洞拱顶垂直压力随坡角增加而线性减小。

## 2.2 给定地形坡度下隧道围岩压力分布

设地形坡角 $\alpha=12^\circ$ ,洞口围岩级别V级荷载等效高度按规范<sup>[1]</sup>定义公式计算, $h_q=12.24\text{ m}$ 。由上述理论计算公式得隧道侧压力、拱顶垂直压力随隧道埋深与等效荷载比的变化曲线如图5所示。

由图5可知,水平侧压力与拱顶垂直压力随隧道埋深增大而近似呈线性增加。先行洞侧压力大于后行洞,即有地形坡角时深埋侧隧洞侧压力大于浅埋侧。



(a) 水平侧压力



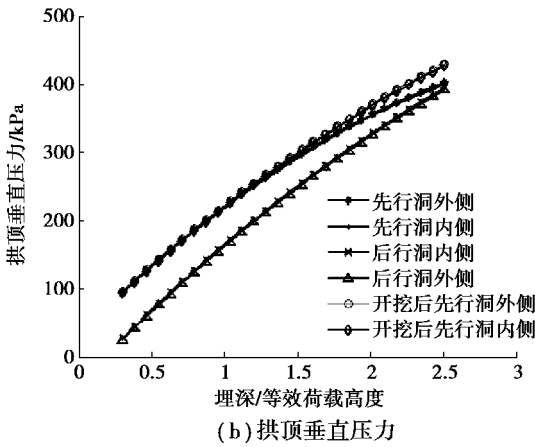


图 5 围岩压力随埋深与等效高度之比关系曲线

Fig. 5 Relation curves of rock pressure and ratio of tunnel buried depth to equivalent loading height

先行洞两侧压力分布特点受埋深及开挖影响,当 $h \leq 1.3h_q$ 时,其外侧压力大于内侧; $h > 1.3h_q$ 时,内侧压力大于外侧。两洞开挖完毕后,先行洞内侧压力显著小于其外侧压力,且当 $h > 2.2h_q$ 时,其值将小于后行洞外侧压力。后行洞两侧压力分布表现为随着埋深增加两侧压力均增大,但隧道内侧压力增长速率低于外侧。 $h \leq 2.0h_q$ 时,内侧水平压力大于外侧; $h > 2.0h_q$ 时,外侧水平压力大于内侧。

由拱顶垂直压力随隧道埋深与等效荷载高度比值变化曲线可以看出,先行洞拱顶垂直压力大于后行洞,先行洞与后行洞的拱顶垂直压力内外侧基本相等,大小分布依次为开挖后先行洞内外侧、先行洞内外侧、后行洞内外侧。

为进一步分析地形坡角度及隧道埋深对浅埋偏压小净距隧道的围岩稳定性影响,建立了 3DEC (3 Dimension Distinct Element Code) 模型,横向方向取 80 m,隧道轴向方向取 30 m,竖直方向向下取自隧道下方 50 m,向上取自地表。计算模型如图 6 所示。

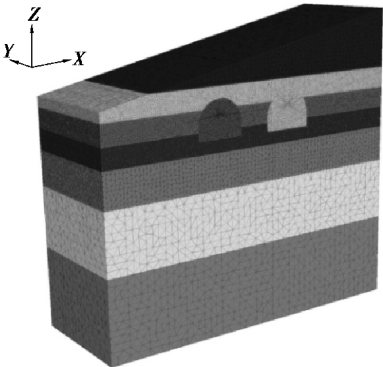


图 6 计算模型

Fig. 6 Computational model

模拟分 3 种情况:①地形坡角度  $12^\circ$ ,隧道埋深 8 m;②地形坡角度  $12^\circ$ ,隧道埋深 20 m;③地形坡角度  $24^\circ$ ,隧道埋深 20 m。对比这 3 种不同条件下围岩的塑性区变化以分析埋深、地形坡角的影响。模拟结果如图 7。

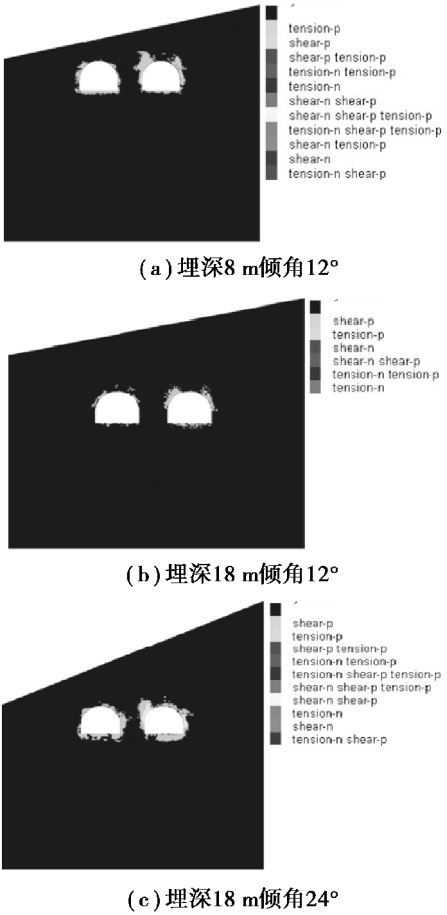


图 7 浅埋偏压小净距隧道围岩状态分布  
Fig. 7 State distribution of surrounding rock of shallow-buried bias tunnel

由图 7 可以看出,塑性区主要集中在拱肩及底板,拱肩以剪切破坏为主,底板以拉伸破坏为主。对于坡角相同、埋深不同的隧道,埋深增加 10 m,塑性区明显减少,尤以后行洞更为显著。埋深不变,坡角增加时,塑性区增加,且先行洞拱顶出现拉伸破坏。

综合上述分析可知,考虑地形坡角度的小净距隧道围岩压力分布规律与不考虑地形坡角度的围岩压力分布有所不同。在进行浅埋偏压小净距隧道围岩压力分析及支护设计时,往往进行工程类比,对于埋深相近、地形坡角不同的隧道工程,应注意分析其围岩分布规律的差异,即上述相同埋深、不同地形坡角度下围岩分布规律。对于同一隧道工程,浅埋段地形坡角度往往变化不大,埋深则有

较大差异,相对地形坡角度,设计时应重点关注围岩压力随隧道埋深的变化规律。但由上述分析可知,相对地面为水平面的隧道围岩分布<sup>[6]</sup>,在一特定地形角度下隧道围岩的侧向水平压力及拱顶垂直压力均布规律均有所不同,设计时应给予考虑。

对于相同倾角、不同埋深的浅埋隧道,埋深越大,隧道围岩稳定性越好。埋深相同时,地表越为平缓隧道围岩稳定性越好。

### 3 工程实例

#### 3.1 工程概况

马嘴隧道为双向四车道高速公路隧道,长 3 711.32 m,最大埋深为 441 m。穿越Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类围岩,主要岩性为页岩和灰岩,净跨为 11.74 m,净高为 8.83 m。马嘴隧道属洞口段小净距,洞身段分离式隧道,最小净距为 7.5 m。

出口段位于斜坡地段,地面坡脚 25°~45°山体坡度缓缓上升,各处理深不一。浅埋段洞身位于粉质黏土中,局部夹碎石块,底板为强风化页岩,属Ⅴ类围岩。地表覆盖层厚度为 1.5~22 m,最小埋深不足 2 m。隧道地形如图 8 所示。



图 8 马嘴隧道出口现场地貌图

Fig. 8 The construction site of Mazui tunnel exit

洞口浅埋段采用 CD 法施工,第一环施工辅助措施为 30 m 超前大管棚支护,其余段为超前小导管预支护。管棚采用外径  $\phi 108$  mm、壁厚 6 mm 的热轧无缝钢管,环向布置间距为 40 cm,共布置 33 根。超前小导管采用外径  $\phi 42$  mm、壁厚 3.5 mm 的热轧无缝钢管加工制成,长 3.5 m,环向间距 40 cm。

初期支护以锚杆喷混凝土、钢筋网等为主,并辅以工字钢、钢花管等支护措施<sup>[17]</sup>。

#### 3.2 稳定性分析

隧洞施工过程中洞口段围岩及地表变形破坏严重,运用上述理论计算公式分析隧洞的稳定性。

计算隧洞断面参数为:隧洞跨度  $B=11.74$  m,

高度  $H=8.83$  m,净距  $a=7.5$  m,破裂面交点距后行洞内侧的距离取为  $0.6a$ ,埋深  $h=8.5$  m。围岩级别为Ⅴ级,地形坡角  $\alpha=12^\circ$ ,围岩重度  $\gamma=18$  kN/m<sup>3</sup>,计算内摩擦角  $\varphi_c=45^\circ$ , $\theta=27^\circ$ 。根据设计要求,先开挖深埋侧隧洞,再开挖浅埋侧。即先开挖图 8 中的左洞,再开挖右洞。围岩压力计算图示仍如图 1 所示。

左洞的平衡方程为:

$$W_2 - T_1 \sin(\theta) - T_2 \sin(\theta) = 0 \tag{15}$$

则可定义隧洞的稳定系数为:

$$F = \frac{(T_1 + T_2) \sin(\theta)}{W_2} \tag{16}$$

当  $F>1.0$  时,隧洞是稳定的;当  $F=1.0$  时,隧洞处于极限平衡状态;当  $F<1.0$  时,隧洞不稳定。

同理,右洞的安全系数也可类似式(16)定义。

由式(9)可知,抗滑体阻力  $T_i$  的计算形式为

$$T_i = \frac{1}{2} \gamma H_i^2 \frac{\lambda_i}{\sin(\theta)} \tag{17}$$

式中: $H_i$  为隧洞底部至地表的距离; $\lambda_i$  为侧压力系数。

将隧洞结构设计参数代入式(16)、式(17),可得左右隧洞的稳定系数分别为

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{(T_1 + T_2) \sin(\theta)}{W_2} = 0.68 \\ F_2 &= \frac{(T_3 + T_4) \sin(\theta)}{W_5} = 0.71 \end{aligned} \tag{18}$$

即隧洞在自然状态下均处于不稳定状态。

现场对隧道地表进行了监控量测工作,地表变形曲线如图 9。由图 9 可以看出,地表沉降曲线近

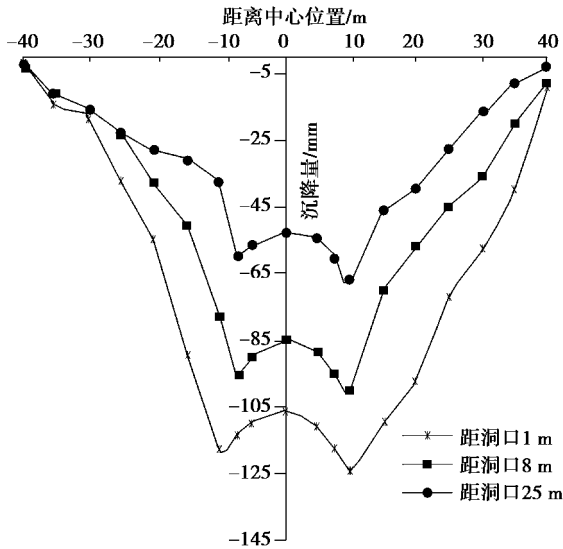


图 9 地表沉降曲线

Fig. 9 Settlement curves of surface

似呈“W”形,累积变形值较大,隧道处于不稳定状态,与理论公式计算结果一致。地表变形曲线显示,左洞上方地表沉降值大于右洞,说明隧道存在地形偏压现象。

### 3.3 处置措施

结合上述分析结果及对类似工程已有研究成果<sup>[18]</sup>,为控制地表及隧道围岩变形,保证施工安全,根据开挖隧道埋深较浅、洞身为粉质黏土、塑性较强、受降雨影响严重的特点,现场采取了如下措施:

(1)地表及边坡喷锚支护,锚杆采用长4.5 m直径42 mm、壁厚3.5 mm的钢花管。钢花管注浆采用水泥单液注浆,注浆压力为0.5~1.0 MPa,泥浆水灰 $w/c=1.0$ 。水泥采用普通硅酸盐,水泥等级42.5。

(2)工字钢间采用10 mm厚钢板连接,工字钢焊接在连接钢板上,连接钢板之间采用M16螺栓连接。架设钢板就位前清除基底废渣,必要时可先浇筑混凝土基座,以保证工字钢不下沉。

(3)严禁使用机掘,改用短进尺人工风镐开挖,以减少对土体的扰动。

## 4 结论

理论推导计算了考虑开挖顺序的浅埋偏压小净距隧道围岩压力,由推导出的计算公式重点分析了不同地形坡角和给定地形坡角两种情况下浅埋偏压小净距隧道围岩压力分布规律,并将结果应用于隧道工程稳定性分析,得出结论如下:

(1)埋深相近、地形不同的隧道工程,坡角越大,两洞内侧破裂范围越大。深埋侧侧向压力及拱顶垂直压力随坡角增加而增加,浅埋侧则随坡角增加而减小。

(2)存在地形偏压的隧道,侧压力与拱顶垂直压力随埋深增大而近似线性增加,深埋侧侧压力大于浅埋侧。两洞侧压力分布受埋深及开挖影响:对于先行洞,后行洞开挖前,其外侧压力在 $h \leq 1.3h_q$ 时大于内侧压力, $h > 1.3h_q$ 时小于内侧压力;后行洞开挖完毕后,内侧水平压力明显小于外侧。后行洞两侧压力均随埋深增加而增大,但内侧压力增长速率低于外侧。 $h \leq 2.0h_q$ 时,内侧压力大于外侧, $h > 2.0h_q$ 时,外侧压力大于内侧。

(3)浅埋偏压小净距隧道塑性破坏主要分布在拱肩及底板,拱肩以剪切破坏为主,底板以拉伸破坏为主。坡角相同的隧道,埋深越大,塑性区越少,埋深相同坡角不同的隧道,坡角越大,塑性区越多,且深埋侧隧洞拱顶拉伸破坏区域逐渐增加。

(4)理论计算公式可用于隧道洞口稳定性分析,对于地表受开挖影响较大的隧道,开挖前可对地表进行喷锚加固。洞身为粉质黏土的隧洞,为防止隧洞初期支护的整体下沉,可用10 mm厚钢板将工字钢连接在一起,必要时可先浇筑混凝土基座。

### 参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组.公路隧道设计规范 (JTG D70—2004) [S].北京:人民交通出版社,2004. (The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for design of road tunnel (JTG D70—2004) [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 肖明清.小间距浅埋隧道围岩压力的探讨[J].现代隧道技术,2004,41(3):7-10. (Xiao Mingqing. Study on the rock pressure acting on shallow tunnels with small spacing [J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41 (3): 7-10. (in Chinese))
- [3] 舒志乐,刘保县,李月.偏压小净距隧道围岩压力分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(3):430-433. (Shu Zhile, Liu Baoxian, Li Yue. Surrounding rock pressure analysis of neighborhood tunnel under unsymmetrical pressure [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3 (3): 430-433. (in Chinese))
- [4] 彭琦.浅埋偏压小净距隧道围岩压力及施工力学研究[D].长沙:中南大学,2008. (Peng Qi. Study on the surrounding rock pressure and construction mechanics of shallow buried bias tunnel [D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese))
- [5] 龚建伍.扁平大断面小净距公路隧道施工力学研究[D].上海:同济大学,2008. (Gong Jianwu. Study on construction mechanical behavior of highway tunnel with large section and small spacing [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese))
- [6] 龚建伍,夏才初,雷学文.浅埋小净距隧道围岩压力计算与监测分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29



- (2): 4139-4145. (Gong Jianwu, Xai Caichu, Lei Xuewen. Analysis of field measurement and theoretical calculation on rock pressure in shallow-buried twin tunnels with small spacing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 4139-4145. (in Chinese))
- [7] 张建. 浅埋双侧偏压小净距隧道围岩压力及施工力学效应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012. (Zhang Jian. Research on rock pressure and construction mechanical effects of shallow-buried bilateral bias neighborhood tunnel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese))
- [8] 吕小龙. 小净距隧道围岩压力确定方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. (Lü Xiaolong. Study on the Determining Method of Surrounding Rock Pressure for Small Spacing Tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [9] Lei M F, Peng L M, Shi C H. Model test to investigate the failure mechanisms and lining stress characteristics of shallow buried tunnels under unsymmetrical loading[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 46: 64-75.
- [10] 钟祖良, 刘新荣, 刘元雪, 等. 浅埋双侧偏压小净距隧道围岩压力计算与监测分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(2): 63-68. (Zhong Zhuliang, Liu Xinrong, Liu Yuanxue, et al. Theoretical calculation and monitoring on rock pressure of shallow-buried bilateral bias neighborhood tunnel[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(2): 63-68.
- [11] 肖林萍, 李永树, 赵玉光. 基于有限元法的隧道围岩压力计算与分析方法研究[J]. 地矿测绘, 2008, 24(2): 1-3. (Xiao Linping, Li Yongshu, Zhao Yuguang. The calculation and analysis method of tunnel surrounding rock pressure based on finite element method[J]. Geological mineral surveying and mapping, 2008, 24(2): 1-3 (in Chinese))
- [12] 张辉, 张子新, 黄宏伟, 等. 偏压错台小净距隧道施工力学性态相似模拟实验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 169-175. (Zhang Hui, Zhang Zixin, Huang Hongwei, et al. Mechanical behavior simulation experiment on the construction of the small spacing tunnel with bias voltage[J]. Chinese Journal of Tongji University (natural science edition), 2009, 37(2): 169-175. (in Chinese))
- [13] 刘元峰. 米家寨隧道施工力学及其空间效应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010. (Liu Yuanfeng. Research on construction mechanics and spatial effect of Mijiazai tunnel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese))
- [14] 刘学增, 叶康. 山岭公路隧道围岩压力统计规律分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 890-895. (Liu Xuezeng, Ye Kang. Statistical analysis of surrounding rock pressure of mountain road tunnels[J]. Chinese Journal of geotechnical engineering, 2011, 33(6): 890-895. (in Chinese))
- [15] 刘艳青, 钟世航, 卢汝媛, 等. 小净距并行隧道力学状态的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 590-594. (Liu Yanqing, Zhong Shihang, Lu Rusui, et al. Experimental study on mechanical characteristics of twin tunnels with small spacing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 590-594. (in Chinese))
- [16] 项永杰. 浅埋偏压隧道施工力学效应与风险评估[D]. 重庆: 重庆大学, 2011. (Xiang Yongjie. Research on construction mechanics effect and risk assessment of the shallow bias tunnel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese))
- [17] 重庆市交通规划勘察设计院. 重庆南川至贵州道真高速公路重庆段两阶段施工图设计文件[R]. 重庆: 重庆市交通规划勘察设计院, 2012. (Chongqing Communications Planning Survey and Design Institute. Two stage construction design of the highway from Nanchuan of Chongqing to Daozhen of Guizhou province[R]. Chongqing: Chongqing Communications Planning Survey and Design Institute, 2012. (in Chinese))
- [18] 陈兰云, 咎月稳, 王杰, 等. 注浆技术加固滑坡区隧道围岩的分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2761-2765. (Chen Lanyun, Zan Yuewen, Wang Jie, et al. Reinforcement of surrounding rocks of tunnel in landslide area with grouting technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2761-2765. (in Chinese))