

变坡面浅埋偏压小净距隧道围岩压力计算方法

Calculation Method of Surrounding Rock Pressure of Variable Slope Surface Shallow Buried Bias and Small Clear Distance Tunnel

陈家征^{1,2}, 李忠^{1,2}, 韩炆^{1,2}, 袁文佳^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 土木学院, 河北 石家庄 050043;
2. 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要: 为研究在考虑黏聚力和内摩擦角作用下对变坡面浅埋偏压小净距隧道围岩压力的影响, 本文利用极限平衡法来求解变坡面浅埋偏压小净距隧道深、浅埋侧压力系数、围岩拱顶垂直压力和围岩两侧水平压力, 推导出考虑黏聚力和内摩擦角的围岩压力计算方法, 通过简单算例与已有规范公式和既有文献进行对比, 验证本文公式的合理性, 并探讨了深埋侧隧道水平侧压力系数影响因素。结果表明: 水平侧压力系数随坡角的增加而逐渐增大, 随夹角的增加而呈现不同的变化趋势, 随黏聚力和内摩擦角的增加而逐渐减小, 随埋深的增加而逐渐增加。在考虑黏聚力和内摩擦角的作用下, 本文公式有利于考虑降雨等环境因素引起的岩土体力学参数的变化带来的对围岩不利影响, 可为类似变坡面浅埋偏压小净距隧道结构设计和支护参数优化提供理论依据。

关键词: 小净距隧道; 浅埋偏压; 变坡面; 黏聚力; 内摩擦角; 围岩压力

中图分类号: U451.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 03-0054-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.012

CHEN Jiazheng^{1,2}, LI Zhong^{1,2}, HAN Yang^{1,2}, YUAN Wenjia^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. The Ministry of Education jointly established the Key Laboratory of Road and Railway Engineering Safety and Security, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to study the influence of cohesion and internal friction angle on the pressure of the surrounding rock of the shallow buried bias and small clearance tunnel of variable slope surface, the limit equilibrium method is used to solve the problem of shallow buried bias and small clear distance tunnel depth, shallow buried side pressure coefficient, The vertical pressure of the surrounding rock vault and the horizontal pressure on both sides of the surrounding rock are deduced, and the calculation method of the surrounding rock pressure considering the cohesion and internal friction angle is derived, and the rationality of the formula is verified by a simple example compared with the existing standard formula and the existing literature, and the influencing factors of the horizontal lateral pressure coefficient of the deep buried tunnel are discussed. The results show that the horizontal lateral pressure coefficient increases gradually with the increase of slope angle, shows different trends with the increase of the included angle, decreases with the increase of cohesion and internal friction angle, and gradually increases with the increase of burial depth. Considering the action of cohesion and internal friction angle, the formula proposed in this paper is conducive to considering the adverse effects of the changes in the mechanical parameters of the rock and soil bodies caused by rainfall and

other environmental factors on the surrounding rock, which can provide a theoretical basis for the structural design and optimization of supporting parameters of the shallow buried bias and small clearance tunnel with similar variable slope surface.

Keywords: cohesion; internal friction angle; variable slope surface; small clear distance; shallow buried unsymmetrical tunnel; surrounding rock pressure

0 引言

当隧道净距小于分离式独立双洞隧道最小净距时,此时我们称其为小净距隧道。而在山岭地貌修建隧道时,隧道洞口段常常处于浅埋傍山地段,由于穿越的山体地表坡度较陡,上覆岩土体较少,容易产生地形偏压。在地形偏压中,隧道所处的围岩会产生不平衡力,深埋侧隧道对衬砌产生压力较大的主动土压力,浅埋侧隧道对衬砌产生压力较小的被动土压力,因此衬砌两侧受到不平衡力的作用,容易产生裂缝,导致渗漏水现象发生。所以当小净距隧道处于地形偏压时,隧道结构复杂且施工风险较高。因此,在隧道设计施工前,合理计算围岩压力尤其重要,这是隧道结构设计施工的基础^[1],对保证浅埋偏压小净距隧道围岩稳定性具有重大意义。

目前,已有大量学者对浅埋偏压隧道围岩压力分布特征和计算公式进行了研究。在理论研究方面,肖明清等^[2-4]提出了浅埋小净距隧道围岩压力计算公式,然而他们均假设左右洞隧道同时开挖,未考虑左右洞隧道分开施工后对各自围岩压力所带来的影响;龚建伍^[5]等虽然在小净距隧道围岩压力的研究中考虑施工顺序,但同时并未考虑地表偏压给隧道带来的影响;赖慧丰^[6]在运用围岩压力理论,分析了地形偏压角度、隧道埋深和隧道净距对围岩压力的影响规律,并结合实际监测值对围岩和结构力学特征进行研究;张云鹏^[7]推导了左右洞先后施工相互扰动下的围岩压力计算公式,并对其适用性进行研究;张永新^[8]基于极限平衡法原理,在考虑施工顺序的前提下,推导出浅埋小净距隧道开挖后围岩水平与垂直压力的计算公式;文胜^[9]利用极限分析上限定理和相关流动法则,构造浅埋小净距隧道的多刚性块破坏模式和其相对应的速度场,推导出围岩压力的半解析解表达式,并分析了不同参数对围岩压力分布的影响。在模型试验方面,雷明峰等^[10]运用相似理论和基本力学公式,推导出模型试验的

相似准则,并对模型方法不断优化。通过开挖模拟三种角度偏压隧道,了解浅埋偏压隧道衬砌的受力特征;Lei等^[11]通过模型试验分析了地表偏压角度对围岩应力的影响,发现围岩应力随偏压角度的增大而增大;辛毓龙^[12]通过隧道模型试验,研究不同地形偏压下围岩压力分布特征,并通过大量物理模型试验确定地形偏压隧道的偏压程度。在数值模拟方面,王传智^[13]利用FLAC 3D软件对新安岭隧道的三种工况进行模拟,分析不同工况下围岩压力的分布特性;李建鹏^[14]采用三种工法进行开挖模拟,研究不同工况下围岩变形规律;吕小龙^[15]通过有限差分FLAC 3D模拟分析了地表坡度对小净距隧道围岩压力的影响,并推导出围岩压力公式。

但目前的研究大多存在以下不足:未考虑小净距隧道左右洞施工顺序对围岩压力的影响;当隧道处于偏压时常假设拱顶地表为一条倾斜直线,这种假设与现实中的复杂地表坡面存在差异;目前已有的围岩压力理论计算方法均未考虑黏聚力和内摩擦角的共同影响,也未将两者作为单独变量进行研究。

因此,运用极限平衡原理,将以上因素综合考虑在内,推导浅埋偏压小净距隧道围岩压力计算公式,并对侧压力系数的影响因素进行敏感性分析,以得到围岩压力的变化规律。

1 围岩压力计算公式推导

1.1 模型建立

图1中ADEF'OF'E'D'A'连续折线段表示地表坡面;BD(左洞左侧)、CE(左洞右侧)、C'E'(右洞左侧)、B'D'(右洞右侧)表示隧道底端到地表坡面的埋深;GD、HE表示左洞隧道两侧滑动体与隧道上覆岩土体ABD、ECK之间的接触面;H'E'、G'D'表示右洞隧道两侧滑动体FC'E'、D'B'A'与隧道上覆岩土体E'H'G'D'之间的接触面;BA、B'A'、CO'O、C'O'O分别表示为隧道两侧滑动体ABD、D'B'A'、ECO'O、E'C'O'O的假定滑动破裂面。

岩土力学

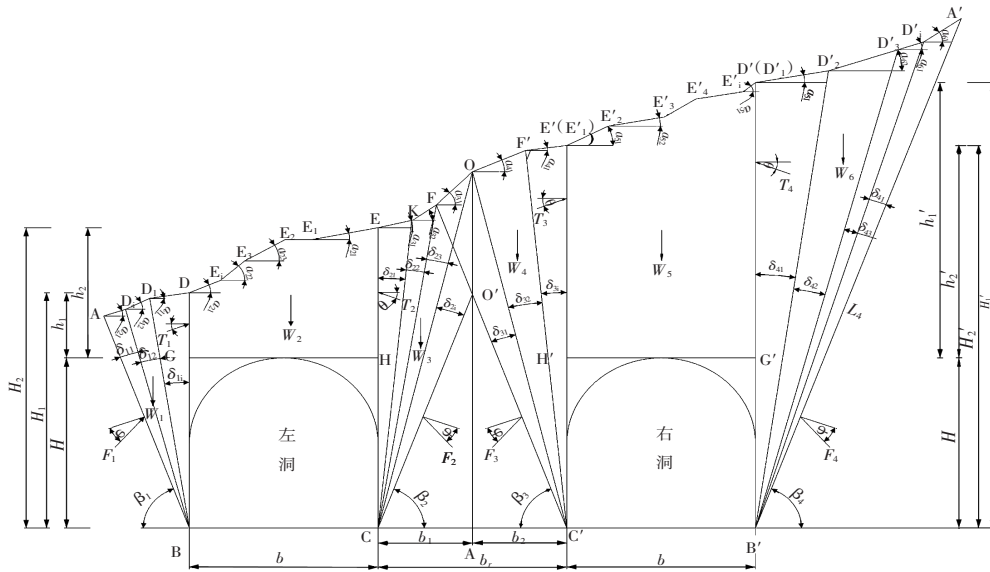


图1 变坡面浅埋偏压小净距隧道围岩压力荷载计算示意图
Fig. 1 Schematic diagram of calculation of pressure load of surrounding rock of shallow buried bias and small net distance tunnel with variable breaking surface

1.2 基本假设

(1) 岩土体性质单一均匀, 采用 M - C 本构;
 (2) 隧道拱顶上覆岩土体下沉时, 两侧的岩土体被带动沿着假定破裂面滑动, 并对拱顶上覆岩土体施加摩擦阻力; (3) 假定岩土体内侧的共同滑裂面法向作用力 $E = 0$; (4) 取隧道纵向长度为单位长度, 研究平面应变问题, 隧道破裂角 $\beta = 45^\circ + \varphi/2$, 左右隧道内侧滑动破裂面交点交于地表下方; (5) 考虑左右洞施工顺序的影响, 左右洞分开施工, 深埋侧隧道先行, 浅埋侧隧道后行。

1.3 右洞开挖计算公式

(1) 右洞右侧周边岩土体自重

图1中 $D'_1, D'_2, \dots, D'_i, \dots, A'$ 表示为复杂坡面连续折线 $D'A'$ 段变化点; $\alpha_{61}, \alpha_{62}, \dots, \alpha_{6i}, \dots, \alpha_{6n}$ 表示为 $D'A'$ 段和水平面之间的坡角; $\delta_{41}, \delta_{42}, \delta_{43}, \dots, \delta_{4i}$ 表示为 $D'A'$ 段相邻变化点与隧道右侧点连线的夹角, 则计算可得:

$$\begin{cases} \overline{B'D'_1} = H'_1 \\ \overline{B'D'_i} = \overline{B'D'_{i-1}} \frac{\cos\left(\alpha_{6(i-1)} + \sum_{j=2}^i \delta_{4(j-2)}\right)}{\cos\left(\alpha_{6(i-1)} + \sum_{j=2}^i \delta_{4(i-1)}\right)} \end{cases} \quad (1)$$

右洞右侧滑动体 $D'B'A'$ 截面 $S_{D'B'A'}$:

$$\begin{aligned} S_{D'B'A'} &= \sum_{i=2}^n S_i = \sum_{i=2}^n \left(\frac{1}{2} \overline{B'D'_{i-1}} \overline{B'D'_i} \sin \delta_{4(i-1)} \right) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n \left(\left(\overline{B'D'_{i-1}} \right)^2 \frac{\cos\left(\alpha_{6(i-1)} + \sum_{j=2}^i \delta_{4(i-2)}\right)}{\cos\left(\alpha_{6(i-1)} + \sum_{j=2}^i \delta_{4(i-1)}\right)} \sin \delta_{4(i-1)} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

右洞隧道右侧滑动体 $D'B'A'$ 自重 $W_{D'B'A'}$ 计算为:

$$W_{D'B'A'} = \frac{1}{2} \gamma (H'_1)^2 \left[\frac{\cos(\alpha_{61})}{\cos(\alpha_{61} + \delta_{41})} \sin \delta_{41} + \sum_{i=2}^n \frac{\cos\left(\alpha_{6i} + \sum_{j=2}^i \delta_{4(i-1)}\right)}{\cos\left(\alpha_{6i} + \sum_{j=2}^i \delta_{4i}\right)} \sin \delta_{4i} \right] \quad (3)$$

令 α_{6i} 和 δ_{4i} 的函数为 K_4 , 则 K_4 表达式为:

$$K_4 = \left[\frac{\cos(\alpha_{61})}{\cos(\alpha_{61} + \delta_{41})} \sin \delta_{41} + \sum_{i=2}^n \frac{\cos\left(\alpha_{6i} + \sum_{j=2}^i \delta_{4(i-1)}\right)}{\cos\left(\alpha_{6i} + \sum_{j=2}^i \delta_{4i}\right)} \sin \delta_{4i} \right] \quad (4)$$

右洞右侧滑动体 $D'B'A'$ 自重 $W_{D'B'A'}$:

$$W_{D'B'A'} = \frac{1}{2} \gamma (H'_1)^2 K_4 \quad (5)$$

(2) 右洞右侧侧压力系数计算

图 1 中 W_6 为滑动体 $D'_1B'A'$ 自重; T_4 、 τ_{41} 为 $D'_1B'A'$ 滑动体所受右洞拱顶岩土体下沉时施加的抗滑力和抗剪力; F_4 、 τ_{42} 为滑动体 $D'_1B'A'$ 所受右洞右侧滑动破裂面 $B'A'$ 下沉时岩土体施加的摩擦阻力和抗剪力; q 、 P 为均布线性荷载和集中荷载; c_1 为滑动体 $D'_1B'A'$ 左侧黏聚力; c_2 为滑动体 $D'_1B'A'$ 右侧黏聚力; L_4 为滑动体 $D'_1B'A'$ 右侧 $B'A'$ 边长度; d_0 为滑动体 $D'_1B'A'$ 复杂坡面连续折线 D'_1A' 段的水平距离。有

$$\tau_{41} = c_1 H'_1 \quad (6)$$

$$\tau_{42} = c_2 L_4 \quad (7)$$

$$F_0 = qd_0 + P \quad (8)$$

根据滑动体 $D'_1B'A'$ 水平与竖直方向受力平衡,

可得:

$$T_4 \cos \theta + \tau_{42} \cos \beta_4 = F_4 \sin(\beta_4 - \varphi) \quad (9)$$

$$F_0 + W_6 + \tau_{41} + T_4 \sin \theta = F_4 \cos(\beta_4 - \varphi) + \tau_{42} \sin \beta_4 \quad (10)$$

由上式计算可得:

$$T_4 = \frac{1}{2} \gamma (H'_1)^2 \frac{\lambda_4}{\cos \theta} \quad (11)$$

$$\lambda_4 = \frac{2 \cos \theta [(F_0 + W_6 + \tau_{41}) \sin(\beta_4 - \varphi) - \tau_{42} \cos \varphi]}{\gamma (H'_1)^2 \cos(\theta + \beta_4 + \varphi)} \quad (12)$$

同理, 可计算出右洞左侧侧压力系数:

$$\lambda_3 = \frac{2 \cos \theta [(F_0 + W_{E'CF} + \tau_{31}) \sin(\beta_3 - \varphi) - \tau_{32} \cos \varphi]}{\gamma (H'_2)^2 \cos(\theta + \beta_3 - \varphi)} \quad (13)$$

(3) 右洞顶部岩土体自重计算

图 2 中 E'_1 、 E'_2 、 \dots 、 E'_i 、 \dots 、 D' 表示为复杂坡面连续折线 $E'D'$ 段变化点; α_{51} 、 α_{52} 、 \dots 、 α_{5i} 表示为复杂坡面连续折线 $E'D'$ 段与水平面之间的坡角; S_1 、 S_2 、 \dots 、 S_i 表示为四棱体 $E'_1H'_1H'_2E'_2$ 、 $E'_2H'_2H'_3E'_3$ 、 $E'_3H'_3H'_4E'_4$ 、 $E'_{i-1}H'_{i-1}H'_iE'_i$ 、 \dots 、 $E'_iH'_iG'D'$ 的截面积。则有

$$\begin{cases} \overline{E'_1H'_1} = \overline{E'H'} = h'_2 \\ \vdots \\ \overline{E'_iH'_i} = \overline{E'_{i-1}H'_{i-1}} + \overline{H'_{i-1}H'_i} \tan \alpha_{5(i-1)} \\ \vdots \\ \overline{D'G'} = h'_1 \end{cases} \quad i \geq 2 \quad (14)$$

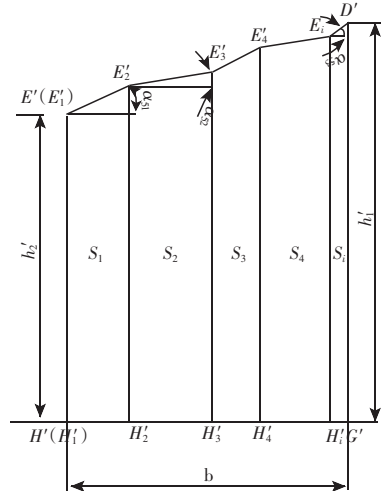


图 2 右洞隧道顶部四棱体截面示意图
Fig. 2 Schematic view of the four-sided ribbed section at the top of the tunnel in the right cave

各四棱体分块面积计算公式为:

$$S_i = \frac{1}{2} \left(\overline{E'_iH'_i} + \overline{E'_{i+1}H'_{i+1}} \right) \overline{H'_iH'_{i+1}} \quad i \geq 1 \quad (15)$$

右洞顶部四棱体 $E'H'G'D'$ 截面积 $S_{E'H'G'D'}$ 计算公式为:

$$S_{E'H'G'D'} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (16)$$

右洞拱顶四棱体 $E'H'G'D'$ 自重 $W_{E'H'G'D'}$ 计算公式为:

$$W_{E'H'G'D'} = \gamma S_{E'H'G'D'} \quad (17)$$

(4) 右洞拱顶垂直压力计算

图 3 中 T_3 和 T_4 表示右洞顶部四棱体 $E'H'G'D'$ 所受两侧岩土体作用的抗滑力; τ'_{32} 和 τ'_{41} 表示右洞顶部四棱体 $E'H'G'D'$ 的所受两侧岩土体作用的抗剪力, 其他符号意义见前, 不再赘述。计算得到右洞拱顶均布荷载计算式:

$$q = \left[P + qb + W_{E'H'G'D'} - \tau'_{32} - \tau'_{41} - T_3 \left(\frac{h'_2}{H'_2} \right)^2 \sin \theta - T_4 \left(\frac{h'_1}{H'_1} \right)^2 \sin \theta \right] / b \quad (18)$$

其中, $W_{E'H'G'D'} = \gamma S_{E'H'G'D'}$, $\tau'_{32} = c_1 h'_2$, $\tau'_{41} = c_1 h'_1$,

$$T_3 = \frac{1}{2} \gamma (H'_2)^2 \frac{\lambda_3}{\cos \theta}, \quad T_4 = \frac{1}{2} \gamma (H'_1)^2 \frac{\lambda_4}{\cos \theta}。$$

右洞左、右侧水平压力为:

$$e_{31} = \lambda_3 \gamma h'_2 \quad (19)$$

$$e_{32} = \lambda_3 \gamma H'_2 \quad (20)$$

表 4 围岩拱顶内外侧垂直压力结果对比
Table 4 Comparison of vertical pressure results on the inside and outside of the surrounding rock vault /kPa

计算方法	q_4	q_3	q_2	q_1	q'_4	q'_3
规范公式	30.74	25.65	14.66	9.566	—	—
腾俊洋公式	0.74	25.65	14.69	9.59	30.96	25.86
本文公式	31.69	27.65	18.50	12.96	33.35	29.31

表 5 围岩水平压力结果对比
Table 5 Comparison of horizontal pressure results of surrounding rocks /kPa

计算方法	e_{41}/e_{42}	e_{31}/e_{32}	e_{21}/e_{22}	e_{11}/e_{12}	e'_{31}/e'_{32}
规范公式	8.73/13.40	6.66/11.58	4.15/9.07	1.55/6.22	—
腾俊洋公式	8.73/13.40	6.66/11.58	4.07/8.90	1.55/6.22	6.19/10.76
本文公式	9.24/14.87	4.90/8.23	3.94/8.24	1.11/4.10	4.38/7.73

表 6 围岩两侧抗滑阻力结果对比
Table 6 The anti-slip resistance results on both sides of the surrounding rock were compared /kN

计算方法	T_4/T_3	T_2/T_1	T'_3
规范公式	234.58/166.38	102.02/50.62	—
腾俊洋公式	234.58/166.31	100.11/50.62	154.46
本文公式	248.44/123.97	96.39/34.33	111.41

2.3 侧压力系数影响因素

由本文公式可知，围岩压力和侧压力系数联系紧密，侧压力系数的变化侧面可以反映出隧道围岩压力的变化。表现为当侧压力系数增大时，隧道拱顶岩土体所受的抗滑力则会变大，导致其所受的围岩压力将会减小；反之如此。因此当需要研究围岩压力变化规律时，可以反过来研究侧压力系数的变化，对侧压力系数的各影响因素采用控制变量法进行单变量分析。

假设复杂坡面浅埋偏压小净距隧道的地表坡面荷载均为 0，则结合本文公式可知，影响侧压力系数 λ 的因素主要有：内摩擦角 φ 、黏聚力 c_2 、地面坡角 α 、夹角 δ 和隧道埋深 h_2 ，假设右洞右侧复杂坡面存在 3 个连续折线段，则坡角 α 和夹角 δ 有 α_1 、 α_2 、 α_3 和 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 的情况进行研究，围岩参数见表 7。

表 7 岩土体物理力学参数
Table 7 Geotechnical and physical parameters of rock and soil

围岩级别	重度 γ / (kN · m ⁻³)	黏聚力 C_2 /kPa	内摩擦角 φ /°	比例系数 η
V	20	100	24	0.5

由图 4 可知，在其他影响因素不变时， λ_4 随坡角 α 的增加逐渐增大，且 α_1 、 α_2 对 λ_4 的影响程度均大于 α_3 ，原因在于： α_1 、 α_2 对岩土体的影响范围均大于 α_3 。可以看出：当地表复杂坡面的坡角增大时，侧压力系数同样会增大，则隧道拱顶岩土体所受抗

滑力会增大，导致拱顶的围岩压力减小，该分析与工程实际情况符合，且可以看出侧压力系数的变化呈非线性变化，但如果地表复杂坡面的坡角之间差异较大时，本文公式的计算结果则与规范法相差较大，表明了当地表坡面处于复杂情况下时，规范法有其自身局限性，也再次说明了规范法仅是本文公式的一个特例，本文公式的适用性较广。

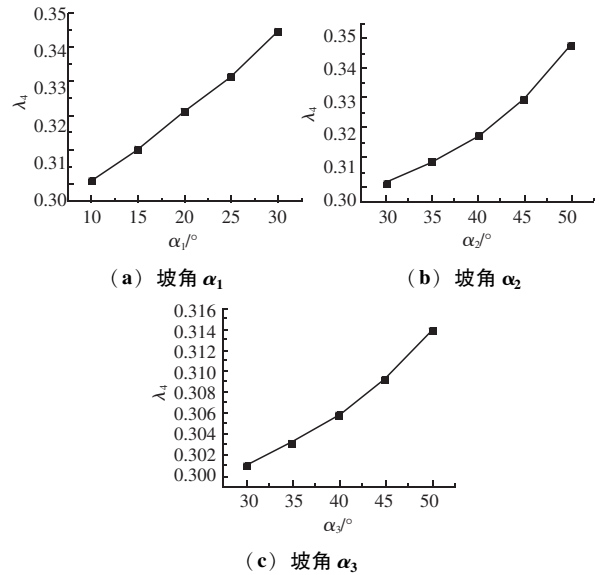


图 4 各坡角对侧压力系数的影响

Fig. 4 Effect of slope angle on lateral pressure coefficient

由图 5 可知，在 δ_3 一定时， λ_4 随 δ_1 的增大逐渐减小，随 δ_2 的增大而不断增大。由图 6 可知，在其他影响因素不变时， λ_4 与内摩擦角 φ 、黏聚力 c_2 呈负相关性，即 λ_4 随内摩擦角 φ 、黏聚力 c_2 的增大而减小，但黏聚力 c_2 对 λ_4 的影响程度较小，然而当遇到降雨等自然环境因素而导致的岩土体围岩参数发生变化时，黏聚力因素不容忽视。 λ_4 与埋深 h_2 表现为正相关性，而且埋深对水平侧压力系数的影响程度较大，主要是由于埋深的增大，增加了岩土体的影响范围。

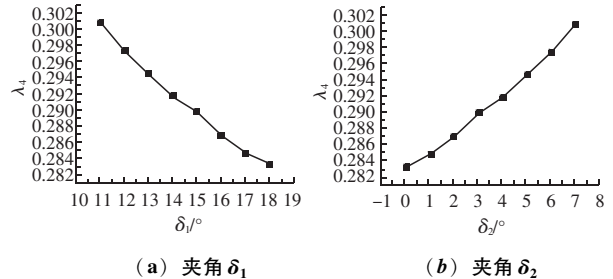


图 5 δ_3 一定， λ_4 随夹角 δ_1 、 δ_2 变化影响曲线

Fig. 5 δ_3 Surely, the curve λ_4 is affected by the change of the angle δ_1 、 δ_2

岩土力学

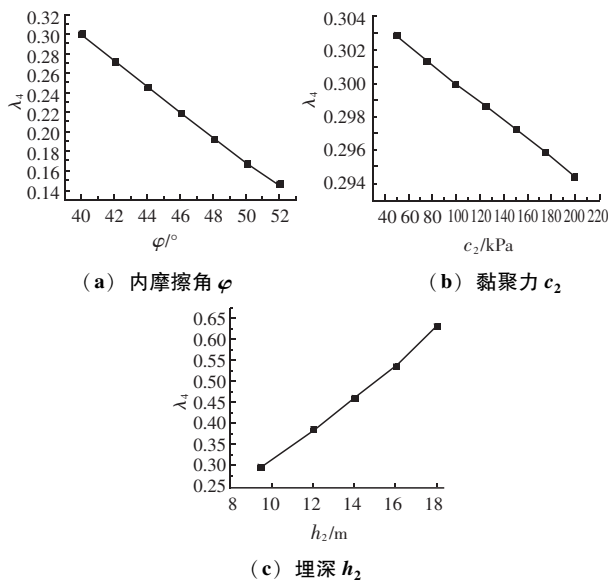


图6 其余因素随 λ_4 变化曲线
Fig. 6 Translation of the curve of other influencing factors changing with λ_4

3 结论

(1) 基于极限平衡原理, 推导变坡面浅埋偏压小净距隧道围岩压力计算公式, 该公式将隧道开挖顺序、复杂坡面的不连续性、黏聚力和内摩擦角等变量均考虑在内, 更加符合隧道实际施工情况, 同时对岩土体围岩力学参数(黏聚力和内摩擦角)的考虑, 也更符合降雨等自然环境对围岩的影响, 对实际情况下的隧道支护设计及参数优化具有重要意义。

(2) 在本文公式中, 若忽略岩土体黏聚力和内摩擦角的影响, 同时假设隧道复杂地表坡面为一条倾斜的直线, 则简化后的公式与腾俊洋法公式相同, 若同时忽略小净距隧道施工顺序对隧道开挖的影响, 则本文公式与规范法相同, 因此证明本文公式具有合理性和适用性。

(3) 通过简单算例可知, 右洞拱顶所受的围岩压力较大, 左洞则较小, 且在考虑隧道施工顺序下, 右洞所受围岩压力增大, 右洞内外侧竖向围岩压力结果较腾俊洋法偏大, 左洞则相反。在将复杂坡面的不连续性、黏聚力和内摩擦角均考虑的情况下, 计算结果更能说明右洞开挖时对围岩影响较大, 右

洞受力状态明显差于左洞。

(4) 侧压力系数与坡角、埋深呈正相关关系, 与黏聚力和内摩擦角呈负相关关系, 而与夹角间呈不同变化关系。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路隧道设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [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.
- [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.
- [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.
- [5] 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.
- [6] 赖慧丰. 浅埋偏压双线隧道围岩压力计算及监测分析 [J]. 南昌工程学院学报, 2021, 40 (6): 32-38, 68.
- [7] 张云鹏. 滑坡体偏压小净距黄土隧道洞口段力学行为研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [8] 张永新. 水平地震力作用下浅埋小净距隧道围岩压力计算方法 [J]. 交通世界, 2022 (增刊1): 36-38, 48.
- [9] 文胜. 小净距隧道围岩压力计算及参数敏感性分析 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
- [10] 雷明锋, 彭立敏, 施成华, 等. 浅埋偏压隧道衬砌受力特征及破坏机制试验研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2013, 44 (8): 3316-3325.
- [11] 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.
- [12] 辛毓龙. 地形偏压隧道判定试验研究及二衬稳定性分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [13] 王传智. 新安岭浅埋偏压隧道围岩稳定性评价及衬砌技术研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- [14] 李建鹏. 浅埋偏压隧道围岩压力计算及围岩稳定性分析 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [15] 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.
- [16] 腾俊洋, 唐建新, 张闯, 等. 浅埋偏压小净距隧道围岩压力分布与围岩控制 [J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14 (3): 761-769.