

考虑黏聚力与内摩擦角的变坡面 浅埋偏压隧道围岩压力计算方法

杜建明, 房倩[†]

(隧道及地下工程教育部工程研究中心(北京交通大学), 北京 100044)

摘要:为了研究变坡面浅埋偏压隧道中黏聚力与内摩擦角对围岩压力的影响规律,基于极限平衡法求解变坡面浅埋偏压隧道深、浅埋侧推力,进而推导出变坡面下独立考虑黏聚力与内摩擦角的围岩压力计算方法,通过与规范公式以及既有文献对比分析,验证了文章所提方法的合理性,并探讨了深埋侧水平侧压力系数的影响因素.结果表明:水平侧压力系数随地面坡角的增加逐渐增大,随夹角(岩土体)的增加呈现先减小后增大的趋势,随黏聚力与内摩擦角的增加逐渐减小.此外,黏聚力的分算有利于考虑环境因素(如降雨)引起的岩土体力学参数(黏聚力)急剧变化带来的不利影响;而内摩擦角对隧道深埋侧水平侧压力系数影响较大,表明将内摩擦角进行分算对围岩压力计算具有重要意义.相关研究成果可为类似变坡面浅埋偏压隧道结构设计提供理论依据.

关键词:浅埋偏压隧道;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

Calculation Method of Surrounding Rock Pressure of Shallow-buried and Asymmetrical Pressure Tunnel under Variable Slopes Considering Cohesion and Internal Friction Angle

DU Jianming, FANG Qian[†]

(Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry
of Education(Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China)

Abstract: To examine the influence of cohesion and internal friction angle on surrounding rock pressure of shallow-buried and asymmetrical load tunnel under variable slopes, the thrusts on both deep and shallow sides of shallow-buried and asymmetrical load tunnel under variable slopes are obtained using limit equilibrium theory, and then the calculation methods are derived for surrounding rock pressure under variable slopes independently considering cohesion and internal friction angle. The rationality of the proposed calculation methods in this paper is verified by comparison with the normative formula and existing literature. The influencing factors on the horizontal lateral pressure coefficient of the deeply buried side of the tunnel are discussed. The results show that the horizontal lateral pressure coefficient increases with the increase of the slope of the ground surface, decreases and then increases with

* 收稿日期:2020-11-17

基金项目:国家自然科学基金高铁联合基金重点支持项目(U1934210), High-speed Rail Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (U1934210);北京市自然科学基金资助项目(8202037), Natural Science Foundation of Beijing(8202037)

作者简介:杜建明(1989—),男,山西交城人,北京交通大学博士研究生

[†]通信联系人, E-mail: qfang@bjtu.edu.cn

the increase of the angle of the rock-soil, and decreases with the increase of the cohesion and internal friction angle. Besides, the split calculation of the cohesion is helpful to consider the adverse effects of the rapid changes of the mechanical parameters (cohesion) of rock soil caused by environmental factors (such as rainfall). The internal friction angle has a greater influence on the horizontal lateral pressure coefficient of the deeply buried side of the tunnel, which shows that the split calculation of the internal friction angle is of great significance to the calculation of surrounding rock pressure. The relevant research results can provide a theoretical basis for the structural design of similar shallow-buried and asymmetrical pressure tunnels under variable slopes.

Key words: shallow-buried tunnel under asymmetrical pressure; variable slope; cohesion; internal friction angle; surrounding rock pressure

偏压隧道是指由于地形条件不对称或者地质岩层差异等因素导致结构承受显著偏压荷载的隧道^[1]。相比于无偏压隧道,偏压隧道结构受力更复杂、施工风险更高,如隧道结构设计或施工方案不合理,则极易诱发安全事故,尤其在埋深较浅的洞口段。因为围岩压力的合理计算是浅埋偏压隧道结构与施工方案编制的基础,所以对浅埋偏压隧道围岩压力计算方法开展深入研究具有重要的科学价值与工程意义。

目前,众多学者通过现场实测^[2-4]、模型试验^[5-9]、数值计算^[10-11]以及理论分析^[12-16]等手段对浅埋偏压隧道围岩压力分布特征以及计算方法进行了系统研究。在现场实测方面,高杰^[2]通过对鹤大高速公路回头沟隧道围岩压力分布特征进行持续现场监测,分析了偏压隧道围岩压力的动态演化过程。苏运基^[4]对贵州黔春大道七冲村二号浅埋偏压隧道围岩压力变化规律进行了现场监测,分析了浅埋偏压大跨度隧道围岩压力的分布特性。在模型试验方面,雷明峰等^[5-6]利用室内相似物理模型试验对地表偏压角对浅埋偏压隧道围岩压力的影响规律进行了系统研究。辛毓龙^[7]根据相似物理模型试验对不同地形偏压条件下围岩压力分布特征进行了研究分析,并利用隧道各对称位置的围岩径向应力定义偏压系数来衡量隧道的偏压程度,通过大量物理模型试验给出了地形偏压隧道偏压程度判定表。在数值计算方面,王传智^[10]利用有限差分数值软件对十堰至天水联络线高速公路新安岭隧道不同施工工法下围岩压力分布特点进行了数值分析。李建鹏^[11]通过数值计算对三种不同施工工法(单侧壁导坑法、三台阶临时仰拱法以及交叉中隔壁法)下浅埋偏压隧道围岩压力分布特性进行了研究分析。在理论分析方面,邱业建

等^[12]结合模型试验结果与相关联流动法则,构建了浅埋偏压隧道破坏模型及其对应的速度场,然后根据虚功原理推导出浅埋偏压隧道围岩压力的极限上限解。严涛等^[13]运用极限平衡法推导了邻路基变坡条件下浅埋偏压隧道围岩压力解析解。张治国等^[14-15]采用拟静力法,通过极限受力分析,在考虑水平地震力与竖向地震力的综合作用后,将岩土体黏聚力作为独立参数进行考虑,进而得出地震作用力下考虑黏聚力的浅埋偏压隧道围岩压力解析解。上述研究成果极大地丰富了浅埋偏压隧道围岩压力分布特征及计算方法的研究内容。

然而,这些研究内容均假设隧道拱顶地表为一条斜直面,这种假设与现实中不规则变坡面的地形地质条件存在一定差异。为此,刘翔等^[16]基于极限平衡法提出了变坡面条件下浅埋偏压隧道松动围岩压力的计算方法,并分析了地表坡度变化对水平侧压力系数的影响规律。但是,刘翔等^[16]所提方法未对黏聚力及内摩擦角影响下水平侧压力系数的变化规律进行深入研究,也未把黏聚力与内摩擦角作为独立参数进行公式推导,从而使得其所提方法不能对环境变化引起岩土体黏聚力突变时围岩压力的变化规律进行研究,导致该方法应用依然存在一定的局限性。

为此,本文基于极限平衡法原理,在公式推导过程中加入黏聚力与内摩擦角分算方法,从而将岩土体黏聚力与内摩擦角转变为独立变量,进而得出独立考虑黏聚力与内摩擦角的变坡面浅埋偏压隧道围岩压力计算方法;然后,通过与规范和刘翔等^[16]所提方法进行对比分析验证了本文所提方法的合理性;最后,利用算例分析变坡面浅埋偏压隧道深埋侧水平侧压力系数的影响因素。

1 围岩压力计算公式推导

1.1 计算模型

图 1 为考虑黏聚力与内摩擦角的变坡面浅埋偏压隧道围岩压力荷载计算示意图. 为了便于后文计算公式推导, 将围岩压力计算模型简化为平面应变问题, 现取纵向长度 1 m 的隧道作为研究对象, 从而将三维模型转化为二维模型进行研究. 其中, EFG_1G_n 为不规则变坡面的地面线型; AF (浅埋) 与 BG_1 (深埋) 分别为隧道两侧底部距地面的埋深; CF 与 DG_1 所在平面为隧道两侧楔形体 (AFE 与 BG_1G_n) 与隧道拱顶上覆岩土体 (CDG_1F) 之间的接触平面; AE 与 BG_n 所在平面为隧道两侧楔形体 (AFE 与 BG_1G_n) 假定滑动破裂面.

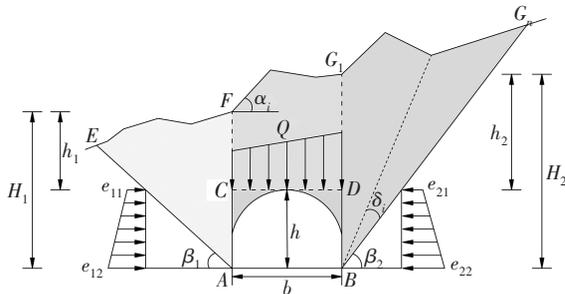


图 1 围岩压力荷载计算示意图

Fig. 1 Sketch of load calculation diagram for surrounding rock pressure

1.2 计算假设

为了便于后文计算公式推导, 进行如下假设:

1) 隧道周边岩土体为均匀连续、各向同性体, 且服从摩尔-库伦屈服准则. 选择隧道埋深大于等效荷载高度且小于等效荷载高度 (2.0~2.5) 倍作为隧道浅埋判定准则^[17];

2) 隧道拱顶上覆岩土体 CDG_1F 下沉过程中, 带动隧道两侧楔形体 AFE 与 BG_1G_n 分别沿各自的假定破裂面 AE 与 BG_n 滑动, 与此同时, 隧道两侧楔形体 AFE 与 BG_1G_n 对拱顶上覆岩土体 CDG_1F 施加阻力作用;

3) 滑动破裂面为平面, 破裂角 $\beta=45^\circ+\varphi/2$, 且浅埋情况下滑动破裂面能够发展至地表.

1.3 计算公式

1.3.1 隧道周边岩土体自重

图 2 为隧道右侧楔形体 BG_1G_n 截面示意图. 其中, $G_1, G_2, G_3, \dots, G_i, \dots, G_n$ 依次为变坡面 G_1G_n 段变坡

点; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n$ 依次为变坡面 G_1G_n 段与水平面之间的坡角 (地面); $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_i$ 依次为变坡面 G_1G_n 段相邻变坡点与隧道右侧底角 B 点连线的夹角 (岩土体). 当楔形体位于隧道右侧时, 夹角 δ_i 为正值; 反之, 当楔形体位于隧道左侧时, 夹角 δ_i 为负值. 其中, W 表示隧道顶部四棱体 CDG_1F 自重, W_1 表示隧道左侧楔形体 AFE 自重, W_2 表示隧道右侧楔形体 BG_1G_n 自重. 由图 2 可得:

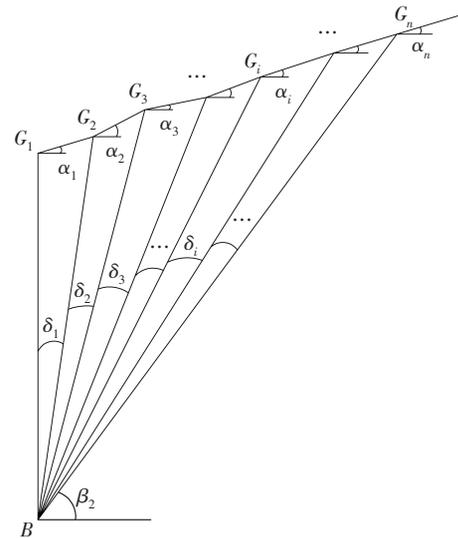


图 2 右侧楔形体截面示意图

Fig. 2 Sketch of cross section of right wedge

$$\left\{ \begin{aligned} \overline{BG}_1 &= H_2 \\ \overline{BG}_2 &= \frac{\cos(\alpha_1)}{\cos(\alpha_1 + \delta_1)} \overline{BG}_1 \\ \overline{BG}_3 &= \frac{\cos(\alpha_2 + \delta_1)}{\cos(\alpha_2 + \delta_1 + \delta_2)} \overline{BG}_2 \\ \overline{BG}_4 &= \frac{\cos(\alpha_3 + \delta_1 + \delta_2)}{\cos(\alpha_3 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3)} \overline{BG}_3 \\ &\dots \\ \overline{BG}_i &= \frac{\cos(\alpha_{i-1} + \sum \delta_{i-2})}{\cos(\alpha_{i-1} + \sum \delta_{i-1})} \overline{BG}_{i-1}, i \geq 2 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

右侧楔形体 BG_1G_n 截面积 S_r 的计算公式可表示为:

$$S_r = \sum_{i=2}^n S_i = \sum_{i=2}^n \left(\frac{1}{2} \overline{BG}_{i-1} \overline{BG}_i \sin \delta_{i-1} \right) = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n \left(\frac{\overline{BG}_{i-1}^2 \cos(\alpha_{i-1} + \sum \delta_{i-2})}{\cos(\alpha_{i-1} + \sum \delta_{i-1})} \sin \delta_{i-1} \right) \quad (2)$$

右侧楔形体 BG_1G_n 自重 W_2 的计算公式可表示为:

$$W_2 = \frac{1}{2} \gamma H_2^2 \left[\frac{\cos \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \delta_1)} \sin \delta_1 + \frac{\cos \alpha_1 \cos(\alpha_2 + \delta_1)}{\cos(\alpha_1 + \delta_1) \cos(\alpha_2 + \delta_1 + \delta_2)} \sin \delta_2 + \dots + \frac{\prod_{i=2}^n \cos(\alpha_{i-1} + \sum \delta_{i-2})}{\prod_{i=2}^n \cos(\alpha_{i-1} + \sum \delta_{i-1})} \sin \delta_{i-1} \right] \quad (3)$$

令 α_i 和 δ_i 的函数为 K_2 , 即 K_2 的表达式可表示为:

$$K_2 = \frac{\cos \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \delta_1)} \sin \delta_1 + \frac{\cos \alpha_1 \cos(\alpha_2 + \delta_1)}{\cos(\alpha_1 + \delta_1) \cos(\alpha_2 + \delta_1 + \delta_2)} \sin \delta_2 + \dots + \frac{\prod_{i=2}^n \cos(\alpha_{i-1} + \sum \delta_{i-2})}{\prod_{i=2}^n \cos(\alpha_{i-1} + \sum \delta_{i-1})} \sin \delta_{i-1} \quad (4)$$

则右侧楔形体 BG_1G_n 自重 W_2 的计算公式可简化表示为:

$$W_2 = \frac{1}{2} \gamma H_2^2 K_2 \quad (5)$$

式中: γ 为岩土体重度.

同理可求得左侧楔形体 AFE 自重 W_1 的计算公式与右侧楔形体 BG_1G_n 自重 W_2 的计算公式相同, 只是左侧变坡面处夹角 δ_i 为负值, 因为左侧与右侧楔形体截面示意图形式相反.

图3为隧道顶部四棱体 CDG_1F 截面示意图. 参数 F_i 和 α_{i1} 含义与图2中 G_i 和 α_i 相类似. 由图3可知,

$$\begin{cases} \overline{FC} = \overline{F_0C_0} = h_1 \\ \overline{F_1C_1} = \overline{F_0C_0} + \overline{C_0C_1} \tan \alpha_{10} \\ \overline{F_2C_2} = \overline{F_1C_1} + \overline{C_1C_2} \tan \alpha_{11} \\ \overline{F_3C_3} = \overline{F_2C_2} + \overline{C_2C_3} \tan \alpha_{12} \\ \dots \\ \overline{F_iC_i} = \overline{F_{i-1}C_{i-1}} + \overline{C_{i-1}C_i} \tan \alpha_{1(i-1)}, i \geq 1 \\ \dots \\ \overline{F_{n+1}C_{n+1}} = \overline{G_1D} \end{cases} \quad (6)$$

各分块面积的计算公式可表示为:

$$\begin{cases} S_0 = 0.5(\overline{F_0C_0} + \overline{F_1C_1}) \overline{C_0C_1} \\ S_1 = 0.5(\overline{F_1C_1} + \overline{F_2C_2}) \overline{C_1C_2} \\ S_2 = 0.5(\overline{F_2C_2} + \overline{F_3C_3}) \overline{C_2C_3} \\ \dots \\ S_i = 0.5(\overline{F_iC_i} + \overline{F_{i+1}C_{i+1}}) \overline{C_iC_{i+1}} \\ \dots \\ S_n = 0.5(\overline{F_nC_n} + \overline{F_{n+1}C_{n+1}}) \overline{C_nC_{n+1}} \end{cases} \quad (7)$$

隧道顶部四棱体 CDG_1F 截面积 S_i 的计算公式可表示为:

$$S_t = \sum_{i=0}^n S_i \quad (8)$$

隧道顶部四棱体 CDG_1F 自重 W 的计算公式可简化表示为:

$$W = \gamma S_t \quad (9)$$

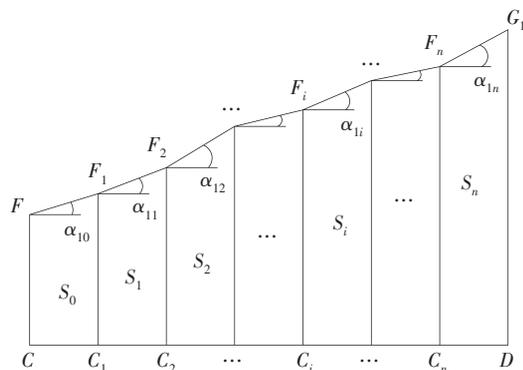


图3 四棱体 CDG_1F 截面示意图

Fig. 3 Sketch of cross section of quadrangular CDG_1F

1.3.2 隧道两侧楔形体推力

图4为隧道右侧楔形体 BG_1G_n 受力分析示意图, 取水平方向为 X 轴, 竖直方向为 Y 轴. 其中, W_2 为楔形体 BG_1G_n 自重; T_2 与 τ_{21} 分别为隧道拱顶岩土体下沉时施加在楔形体 BG_1G_n 上的推力与抗剪力, 且 $\tau_{21} = c_1 H_2$; F_2 与 τ_{22} 分别为右侧滑动破裂面 BG_n 下部静止岩土体施加在楔形体 BG_1G_n 上的摩擦阻力与抗剪力, 且 $\tau_{22} = c_2 L_2$; q 与 P 分别为作用在隧道拱顶地表的均布荷载与集中荷载, 令 $F_0 = qd_0 + P$, d_0 为楔形体 BG_1G_n 上侧 G_1G_n 边的水平距离; c_1 与 c_2 分别为楔形体 BG_1G_n 左侧与右侧黏聚力; θ 与 φ 分别为楔形体 BG_1G_n 左侧与右侧内摩擦角; L_2 为楔形体 BG_1G_n 右侧 BG_n 边长度. 因为面 BG_n 为假定滑动破裂面, 而面 BG_1 为非假定滑动破裂面, 所以面 BG_1 上的滑动阻力要小于面 BG_n , 故假设:

$$\tan \theta = \tan(\xi \theta) = \eta \tan \varphi; c_1 = \eta c_2 \quad (10)$$

式中: ξ 的取值参考文献[18]; η 为比例系数, 且 $0 <$

$\eta < 1$.

根据图 4 中楔形体受力平衡,可得:

$$\left. \begin{aligned} T_2 \cos\theta + \tau_{22} \cos\beta_2 &= F_2 \sin(\beta_2 - \varphi) \\ F_0 + W_2 + \tau_{21} + T_2 \sin\theta &= F_2 \cos(\beta_2 - \varphi) + \tau_{22} \sin\beta_2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由式(11)可得:

$$T_2 = \frac{1}{2} \gamma H_2^2 \frac{\lambda_2}{\cos\theta} \quad (12)$$

其中:

$$\lambda_2 = \left[1 + \frac{2(P + c_1 H_2)}{\gamma H_2^2 K} + \frac{2q \overline{BG}_n \cos\beta_2}{\gamma H_2^2 K} - \frac{2c_2 \overline{BG}_n \cos\varphi}{\gamma H_2^2 K \sin(\beta_2 - \varphi)} \right] \times \frac{K_2 (\tan\beta_2 - \tan\varphi)}{1 + \tan\beta_2 (\tan\varphi - \tan\theta) + \tan\varphi \tan\theta} \quad (13)$$

式中: λ_2 为隧道右侧水平侧压力系数.

同理可求得左侧楔形体 AFE 所受推力 T_1 与水平侧压力系数 λ_1 的计算公式与右侧楔形体相同,只是左侧变坡面处夹角 δ_i 为负值,因为左侧与右侧楔形体截面示意图形式相反.根据普氏理论^[19],可假设滑动破裂角 $\beta=45+\varphi/2$.根据公式(12)可分别求出隧道右侧与左侧所提供的推力 T_2 与 T_1 ,进而就可对隧道周边围岩压力进行求解.

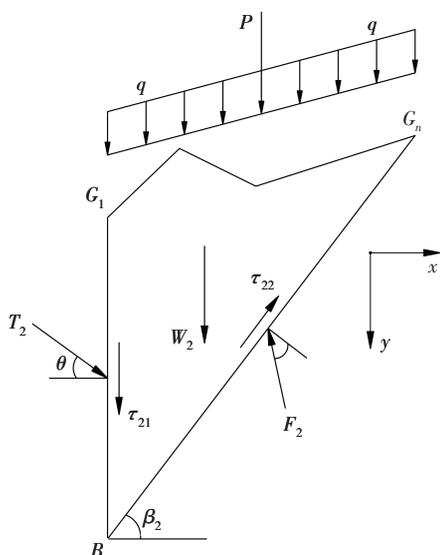


图 4 右侧楔形体受力示意图

Fig. 4 Sketch of force analysis of right wedge

1.3.3 隧道周边围岩压力

图 5 为隧道顶部四棱体 CDG_1F 受力分析示意

图. T'_1 与 T'_2 分别为隧道两侧岩土体施加在隧道顶部四棱体 CDG_1F 上的推力; τ'_{11} 与 τ'_{21} 分别为隧道两侧岩土体施加在隧道顶部四棱体 CDG_1F 上的抗剪力,其余符号意义同前.由图 5 可知,隧道拱顶围岩压力 Q 的计算公式可表示为:

$$Q = P + qb + \gamma S_1 - c_1 (h_1 + h_2) - \left[T_1 \left(\frac{h_1}{H_1} \right)^2 + T_2 \left(\frac{h_2}{H_2} \right)^2 \right] \sin\theta \quad (14)$$

右侧水平侧压力的计算公式可表示为:

$$\left. \begin{aligned} e_{21} &= \frac{2T_2 h_2 \cos\theta}{H_2^2} - q\lambda_2 \left(\frac{2h_2}{H_2} - 1 \right) \\ e_{22} &= \frac{2T_2 \cos\theta}{H_2} - q\lambda_2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

同理可求得左侧水平侧压力 e_{11} 、 e_{12} 的计算公式与右侧 e_{21} 、 e_{22} 相同,原因同前.故只需将右侧水平侧压力计算公式中的参数 λ_2 、 h_2 和 H_2 替换为左侧水平侧压力系数计算参数 λ_1 、 h_1 和 H_1 即可.

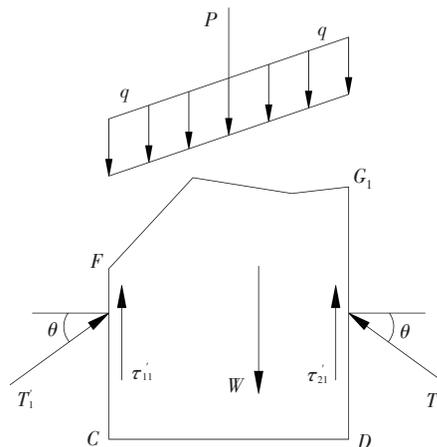


图 5 四棱体 CDG_1F 受力示意图

Fig. 5 Sketch of force analysis of quadrangular CDG_1F

2 对比与验证

如果令 $c_1=c_2=c$,即比例系数 $\eta=1$,则式(12)与式(13)的简化形式与刘翔等^[16]所推公式形式相同.进一步假设岩土体黏聚力为零(令 $c_1=0, c_2=0$),拱顶地面集中荷载与均布荷载为零(令 $P=0, q=0$),拱顶地面为一个斜直线时(令 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_i=\alpha_n=0$),当采用计算内摩擦角代替摩擦角时($\varphi=\varphi_c, \theta=\theta_c$),则式(4)可简化为:

$$K_2 = \frac{\cos\alpha_1 \sin(90^\circ - \beta_2)}{\cos(90^\circ + \alpha_1 - \beta_2)} = \frac{\cos\alpha_1 \cos\beta_2}{-\sin(\alpha_1 - \beta_2)} = \frac{1}{\tan\beta_2 - \tan\alpha_1} \quad (16)$$

同时可将式(13)简化为:

$$\lambda_2 = \frac{1}{\tan\beta_2 - \tan\alpha_1} \times \frac{1}{(\tan\beta_2 - \tan\varphi)} \quad (17)$$

$$1 + \tan\beta_2(\tan\varphi - \tan\theta) + \tan\varphi \tan\theta$$

简化后的式(17)与规范公式相同^[17]. 因此,刘翔等^[16]方法与规范方法实际上都可看成是文章的一个特例.

为了进一步验证文章所推公式的合理性及准确性,现通过一个简单算例对文章计算结果与刘翔等^[16]方法计算结果进行对比分析. 所用算例参数如下:隧道几何参数取 $b=15\text{ m}$, $h=10\text{ m}$, $h_1=12\text{ m}$, $h_2=18\text{ m}$, $\alpha_1=30^\circ$, $\alpha_2=30^\circ$; 力学参数参考文献[20]取值如表1所示,破裂角 $\beta_2=45^\circ+\varphi/2$, 则 $\delta_1+\delta_2=90^\circ-\beta_2=45^\circ-\varphi/2$. 采用文章分开考虑黏聚力 c_2 与内摩擦角 φ 的计算方法与刘翔等^[16]未分开考虑的计算方法进行对比分析,计算所得隧道深埋侧水平侧压力系数 λ_2 与推力 T_2 ,如表2所示. 可知,文章计算方法所得水平侧压力系数 λ_2 比刘翔等^[16]方法计算所得结果小0.08~0.14,推力 T_2 比其小0.21~7.80 MPa;在围岩等级较低时,如IV级围岩,文章计算方法与刘翔等^[16]方法计算所得结果较为相近, λ_2 的差异仅为0.08, T_2 的差异仅为3.1%;随着围岩级别提高,两者误差逐渐增大,文章计算结果显著低于刘翔等^[16]方法计算所得结果,其主要原因是文章计算方法中将黏聚力 c_2 与内摩擦角 φ 两个力学参数作为独立变量进行考虑. 需要说明的是, λ_2 与 T_2 存在差异还可能受夹角 δ_1 与 δ_2 取值影响.

表1 岩土体力学参数

Tab.1 Mechanical parameter of rock/soil mass

围岩级别	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c_2/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	比例系数 η
IV	23	50	31	0.8
V	20	45	30	0.6
VI	16	30	17	0.4

表2 文章方法与刘翔等^[16]公式计算结果对比

Tab.2 Calculated results comparison of paper and the formula of Liu et al^[16]

围岩级别	深埋侧水平侧压力系数 λ_2		深埋侧推力 T_2/MPa	
	本文方法	刘翔等 ^[16] 方法	本文方法	刘翔等 ^[16] 方法
IV	0.54	0.62	6.88	6.67
V	0.51	0.65	7.58	6.32
VI	0.51	0.64	16.4	8.51

通过与规范法或基于规范法的计算公式对比可知,文章推导的水平侧压力系数(式(13))相当于对规范计算公式进行了综合修正,即通过参数 P 与 q 来考虑隧道拱顶地面集中荷载与均布荷载的影响;通过参数 c_1/θ 与 c_2/φ 将黏聚力和内摩擦角作为独立因素来考虑,能够更为准确地计算浅埋隧道围岩压力^[20],同时还可以考虑环境因素(如降雨等)影响下黏聚力急剧变化带来的影响;通过参数 K 来考虑隧道拱顶地面为变坡面的情况,因为 K 是隧道拱顶地面变坡段与水平面之间夹角 α_i 以及相邻变坡点与隧道底角 A/B 点连线夹角 δ_i 的函数. 因此,文章所推公式比规范法或基于规范法的计算公式更能反映变坡面浅埋偏压隧道围岩压力分布特征的真实情况.

3 水平侧压力系数敏感性分析

水平侧压力系数与围岩压力密切相关,当水平侧压力系数增加时,隧道两侧岩土体对拱顶上覆岩土体施加的推力增大,水平侧压力随之增大,拱顶围岩压力随之减小;反之亦然. 所以水平侧压力系数的变化趋势在一定程度上能够反映围岩压力的变化规律,故对水平侧压力系数的影响因素进行敏感性分析.

假设隧道拱顶地面集中荷载 P 与均布荷载 q 均不存在,即 $P=0, q=0$,结合式(10)对式(13)进行分析可知,影响隧道右侧水平侧压力系数 λ_2 的因素主要是假定滑动破裂面 BC_n 上的内摩擦角 φ 以及黏聚力 c_2 、参数 K_2 ,而影响参数 K_2 的因素主要是坡角 α_i 与夹角 δ_i ,故内摩擦角 φ 、黏聚力 c_2 、坡角 α_i 以及夹角 δ_i 对水平侧压力系数 λ_2 产生影响. 假设隧道右侧存在2个变坡面时,即坡角 α_i 与夹角 δ_i 只有 α_1, α_2 与 δ_1, δ_2 的

情况进行研究分析.隧道几何参数、围岩力学参数取值同第 2 节中简单算例取值,围岩级别选择 V 级围岩.

3.1 坡角 α_i 敏感性分析

令坡角 α_2 分别取 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 以及 30° , 计算并绘制隧道右侧水平侧压力系数 λ_2 分别随坡角 α_1 变化的影响规律曲线,如图 6 所示.可知,水平侧压力系数 λ_2 随坡角 α_1 的增加呈现出逐渐增大的趋势,以 $\alpha_2=10^\circ$ 为例,当坡角 α_1 由 5° 增加至 30° 时,水平侧压力系数 λ_2 由 0.406 0 增加至 0.459 9,增幅达 13.28%;以 $\alpha_1=10^\circ$ 为例,当坡角 α_2 由 5° 增加至 30° 时,水平侧压力系数 λ_2 由 0.404 3 增加至 0.459 9,增幅达 13.75%,表明在参数取值相同的情况下,坡角 α_2 对水平侧压力系数 λ_2 的影响程度要略大于坡角 α_1 ,其主要原因是坡角 α_2 所影响的岩土体范围较大.

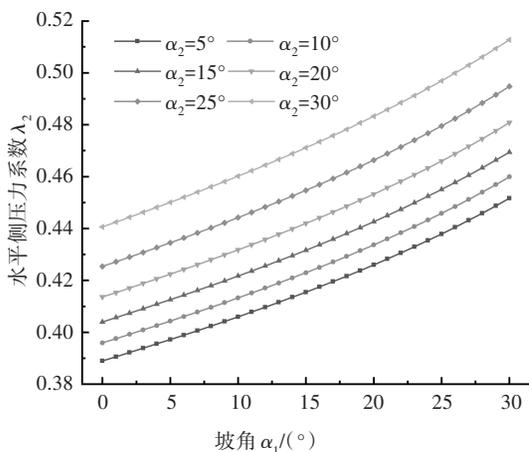


图 6 坡角 α_i 敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity analysis for slope α_i

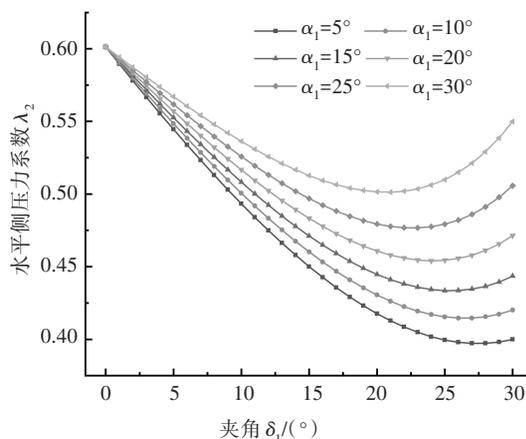
3.2 夹角 δ_i 敏感性分析

令坡角 α_1/α_2 分别取 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 以及 30° , 计算并绘制隧道右侧水平侧压力系数 λ_2 随夹角 δ_1 变化的影响规律曲线,如图 7 所示.可知,水平侧压力系数 λ_2 随夹角 δ_1 的增加 ($\delta_1+\delta_2$ 为定值) 呈现出先减小后增大的二次型变化趋势.当夹角 δ_1 为定值时,水平侧压力系数 λ_2 随着坡角 α_1/α_2 的增大而增大(除 $\delta_1=0^\circ/30^\circ$); 当 $\delta_1=0^\circ$ 、 $\delta_2=30^\circ$, $\delta_1=30^\circ$ 、 $\delta_2=0^\circ$ 时,地表变坡面无变坡点,简化为一个斜直面,故 $\delta_1=0^\circ/30^\circ$ 时,水平侧压力系数 λ_2 为一定值.

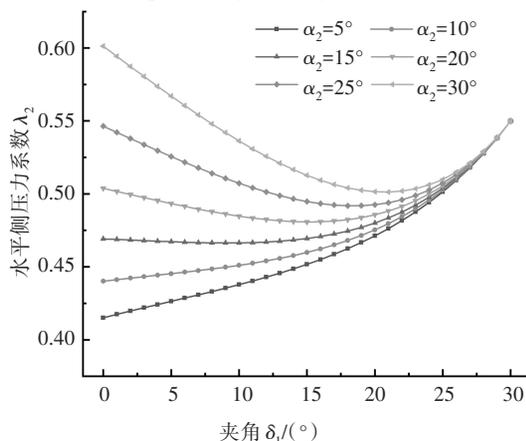
3.3 内摩擦角 φ 敏感性分析

令坡角 α_1 分别取 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 以及 30° , 计算并绘制隧道右侧水平侧压力系数 λ_2 随内摩擦角 φ 变化的影响规律曲线,如图 8 所示.可知,水平侧压

力系数 λ_2 与内摩擦角 φ 呈现线性负相关性,即水平侧压力系数 λ_2 随内摩擦角 φ 的增大逐渐减小,以 $\alpha_1=15^\circ$ 为例,当内摩擦角 φ 由 0° 增加至 30° 时,水平侧压力系数 λ_2 由 1.332 8 减小至 0.469 4,降幅达 66.48%,表明内摩擦角 φ 对水平侧压力系数 λ_2 影响较大.



(a) λ_2 随坡角 α_1 与夹角 δ_1 的变化曲线



(b) λ_2 随坡角 α_2 与夹角 δ_1 的变化曲线

图 7 夹角 δ_i 敏感性分析

Fig. 7 Sensitivity analysis for angle δ_i

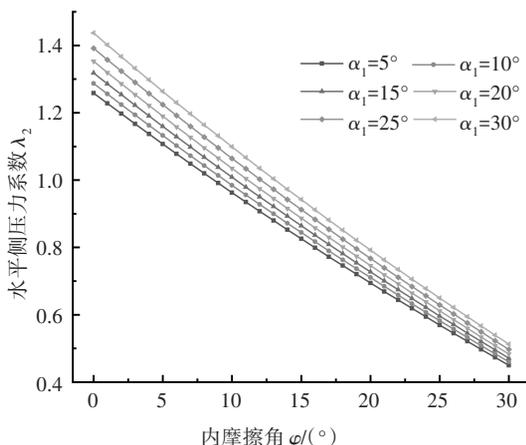


图 8 内摩擦角 φ 敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis for internal friction angle φ

3.4 黏聚力 c_2 敏感性分析

令坡角 α_1 分别取 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 以及 30° ，计算并绘制隧道右侧水平侧压力系数 λ_2 随黏聚力 c_2 变化的影响规律曲线，如图9所示。可知，水平侧压力系数 λ_2 与黏聚力 c_2 呈现线性负相关性，即水平侧压力系数 λ_2 随黏聚力 c_2 的增大逐渐减小。以 $\alpha_1=15^\circ$ 为例，当黏聚力 c_2 由 0 kPa 增加至 30 kPa 时，水平侧压力系数 λ_2 由 0.503 0 减小至 0.471 1，降幅达 6.34%，表明黏聚力 c_2 对水平侧压力系数 λ_2 影响较小。但是，将黏聚力作为独立参数能够有效考虑由于环境因素（如降雨）导致岩土体黏聚力变化带来的不利影响。

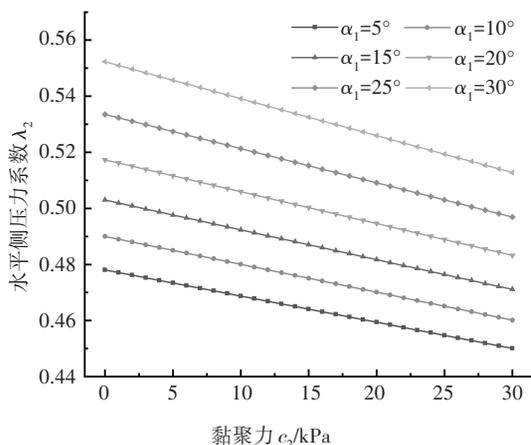


图9 黏聚力 c_2 敏感性分析

Fig. 9 Sensitivity analysis for cohesion c_2

4 结论

1) 本文采用极限平衡法推导出变坡面情况下独立考虑黏聚力与内摩擦角的浅埋偏压隧道围岩压力计算方法。其中，黏聚力的分算有利于考虑环境因素（如降雨）引起的岩土体力学参数（黏聚力）急剧变化带来的不利影响，而内摩擦角对隧道深埋侧水平侧压力系数影响较大，表明将内摩擦角进行分算对围岩压力计算具有重要意义。

2) 若令比例系数 $\eta=1.0$ ，得到的公式与刘翔等^[16]方法计算所得相同，进一步，若令滑动破裂面黏聚力 $c_1=c_2=0$ ，滑动破裂面内摩擦角 φ 取计算内摩擦角 φ_c ，得到的公式与规范方法相同，表明刘翔等^[16]方法与规范方法均可视为文章所提方法的一个特例。

3) 通过算例分析坡角 α_i 、夹角 δ_i 、黏聚力 c_2 以及内摩擦角 φ 对隧道深埋侧水平侧压力系数 λ_2 的影响规律。水平侧压力系数 λ_2 随坡角 α_i 的增加逐渐增大，

随夹角 δ_i 的增加呈现先减小后增加的二次型变化，随黏聚力 c_2 与内摩擦角 φ 的增加逐渐减小。

参考文献

- [1] 王梦恕. 隧道与地下工程技术及其发展[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2004: 56-78.
WANG M S. Tunnel and underground engineering technology and its development [M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2004: 56-78. (In Chinese)
- [2] 高杰. 回头沟偏压隧道围岩稳定性监测及分析[D]. 长春: 吉林大学, 2016: 48-65.
GAO J. Monitoring and analysis for surrounding rock stability of Huitougou tunnel [D]. Changchun: Jinlin University, 2016: 48-65. (In Chinese)
- [3] 侯晶石. 地形偏压隧道地表处理措施研究——以回头沟隧道为例[D]. 长春: 吉林大学, 2019: 14-17.
HOU J S. Study on ground surface treatment measures for topographically biased tunnels—taking Huitougou tunnel as an example [D]. Changchun: Jinlin University, 2019: 14-17. (In Chinese)
- [4] 苏运基. 贵阳七冲村二号浅埋偏压大跨度隧道施工力学特性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017: 49-57.
SU Y J. Research on the construction mechanics of Qichongcun No. two shallow and unsymmetrical big-span tunnel in Guiyang [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017: 49-57. (In Chinese)
- [5] 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.
LEI M F, PENG L M, SHI C H, et al. Model research on failure mechanism and lining stress characteristics of shallow buried tunnel under unsymmetrical pressure [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8): 3316-3325. (In Chinese)
- [6] 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.
- [7] 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: 22-48.
XIN Y L. Experimental study on the judgment of terrain bias tunneling and the stability analysis of econdary lining [D]. Changchun: Jinlin University, 2019: 22-48. (In Chinese)
- [8] 方勇, 姚志刚, 邓如勇, 等. 临近溶腔内压对隧道初支稳定性影响的模型试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(9): 92-102.

- FANG Y, YAO Z G, DENG R Y, *et al.* Model test of the influence of the internal pressure near karst cave on stability of tunnel primary support stability [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(9): 92-102. (In Chinese)
- [9] 傅鹤林, 张加兵, 陈伟, 等. 深埋圆形毛洞隧道围岩压力拱范围研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(7): 117-124.
- FU H L, ZHANG J B, CHEN W, *et al.* Research on pressure arch range of surrounding rock in deep unlined circular tunnel [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(7): 117-124. (In Chinese)
- [10] 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: 35-55.
- WANG C Z. Study on stability evaluation of surrounding rock of xi'an ridge shallow-buried unsymmetrical tunnel and its lining technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013: 35-55. (In Chinese)
- [11] 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: 38-64.
- LI J P. Calculation of surrounding rock pressure and stability analysis of surrounding rock in shallow buried bias tunnel [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019: 38-64. (In Chinese)
- [12] 邱业建, 彭立敏, 雷明锋. 浅埋偏压隧道围岩压力上限解析解[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(6): 106-113.
- QIU Y J, PENG L M, LEI M F. Upper bound solutions for surrounding rock pressure of shallow bias tunnel [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(6): 106-113. (In Chinese)
- [13] 严涛, 李坤杰, 牟智恒, 等. 变坡条件下浅埋偏压隧道围岩压力解析法[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(3): 531-536.
- YAN T, LI K J, MOU Z H, *et al.* Analytical method for calculation of surrounding rock pressure of shallow-buried and unsymmetrically loaded tunnel adjacent to variable slope [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(3): 531-536. (In Chinese)
- [14] 张治国, 姜蕴娟, 刘明, 等. 考虑黏聚力及地震力的浅埋偏压隧道围岩压力[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(4): 780-790.
- ZHANG Z G, JIANG Y J, LIU M, *et al.* Rock pressure of shallow unsymmetrical-loading tunnels considering the cohesion and earthquake action [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(4): 780-790. (In Chinese)
- [15] 张治国, 徐晓洋, 赵其华. 水平地震力作用下浅埋偏压隧道围岩压力的简化理论分析[J]. *岩土力学*, 2016, 37(S2): 16-24.
- ZHANG Z G, XU X Y, ZHAO Q H. Simple theoretical analysis of rock pressure for shallow unsymmetrical-loading tunnels considering horizontal earthquake action [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S2): 16-24. (In Chinese)
- [16] 刘翔, 房倩. 变坡面浅埋偏压隧道松动围岩压力计算方法[J]. *中国铁道科学*, 2017, 38(2): 64-70.
- LIU X, FANG Q. Calculation method for loose surrounding rock pressure of shallow tunnel under asymmetrical pressure on variable slope [J]. *China Railway Science*, 2017, 38(2): 64-70. (In Chinese)
- [17] 公路隧道设计规范: JTGD 70—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018: 4.
- Code for design of road tunnel: JTGD 70—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018: 4. (In Chinese)
- [18] 谢家杰. 浅埋隧道的地层压力[J]. *土木工程学报*, 1964(6): 58-70.
- XIE J J. Earth pressure on shallow burial tunnel [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1964(6): 58-70. (In Chinese)
- [19] SINGH B, GOEL R K, JETHWA J L, *et al.* Support pressure assessment in arched underground openings through poor rock masses [J]. *Engineering Geology*, 1997, 48(1/2): 59-81.
- [20] 卢钦武, 邓涛, 关振长. 水平地震作用下浅埋隧道围岩压力的计算方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(6): 1093-1100.
- LU Q W, DENG T, GUAN Z C. Ground loading of shallow tunnels under seismic scenario [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(6): 1093-1100. (In Chinese)