

# 浅埋偏压隧道在变坡面下围岩压力计算分析

白岩<sup>1</sup>, 乔婷婷<sup>2</sup>, 宁晓骏<sup>1\*</sup>, 刘国坤<sup>3</sup>

(1.昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2.山西省公路局 长治分局, 山西 长治 046000;

3.湖南工程学院 建筑工程学院, 湖南 湘潭 411100)

**摘要:**为研究浅埋偏压隧道在变坡面下合理的围岩压力的计算方法,该文建立浅埋偏压隧道在变坡面下围岩压力计算模型,运用极限平衡原理推导围岩压力计算公式。引入中间变量 $\beta'$ ,将其作为选取变坡条件下的偏压隧道围岩压力计算方法的依据,并将该文推导公式对比规范公式计算值与隧道围岩压力实测值进行验证。研究结果显示:经对比验证,该文公式具有合理性与实用性。且由计算公式分析可得,当自然坡度角增大,水平侧压力系数 $\lambda_1$ 随之增大;当黏聚力增大,水平侧压力系数 $\lambda_2$ 呈先增大后减小趋势;当变坡角度增大,水平侧压力系数 $\lambda_2$ 将会减小。研究表明:偏压隧道存在变坡会影响隧道变坡段一侧的围岩压力,因此利用该文变坡条件的围岩压力计算公式是必要的。

**关键词:**隧道工程;偏压隧道;围岩压力;极限平衡原理

中图分类号:U451.2

文献标志码:A

## Calculation Analysis of the Surrounding Rock Pressure in Shallow Buried Unsymmetrical Tunnel under Variable Slope

BAI Yan<sup>1</sup>, QIAO Tingting<sup>2</sup>, NING Xiaojun<sup>1\*</sup>, LIU Guokun<sup>3</sup>

(1.Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;

2.Changzhi Branch of Shanxi Provincial Highway Bureau, Changzhi, Shanxi 046000, China; 3.School of Architectural

Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan, Hunan 411100, China)

**Abstract:** To provide a reasonable method for calculating the surrounding rock pressure in shallow buried unsymmetrical pressure tunnels under variable slope conditions for tunnel design, to establish a model for calculating the surrounding rock pressure in shallow buried unsymmetrical pressure tunnels under variable slope conditions, and to employ the principle of ultimate equilibrium to derived the formula for calculating the surrounding rock pressure. The intermediate variable  $\beta'$  is introduced as the base for selecting the unsymmetrical pressure tunnels surrounding rock pressure calculation method under variable slope conditions, and the derived formulas in this paper are verified by comparing the calculated values of the normative formulas with the measured values of the tunnel surrounding rock pressure. Results of the study: The equations in this paper are verified to be reasonable and practical by comparison. Analysis of the calculation formula shows that when the natural slope angle increases, the horizontal side pressure coefficient  $\lambda_1$  increases; when the cohesive force increases, the horizontal side pressure coefficient  $\lambda_2$  tends to increase first and then decrease; when the variable slope angle increases, the horizontal side pressure coefficient  $\lambda_2$  will decrease. Studies have shown that the presence of variable slope in a deviated tunnel will affect the surrounding rock pressure on the side of the variable slope section of the tunnel, and it is necessary to use the formula for calculating the surrounding rock pressure for the variable slope conditions in this paper.

**Keywords:** tunnel engineering; unsymmetrical pressure tunnel; surrounding rock pressure; limiting equilibrium principle

收稿日期:2024-04-28(修改稿)

基金项目:湖南省教育厅优秀青年项目(编号:22B0737)

作者简介:白岩,男,硕士研究生.E-mail:269220865@qq.com

\*通信作者:宁晓骏,男,博士,教授.E-mail:616672033@qq.com

## 0 引言

由于地形的不对称,不规则的地层压力施加在隧道结构上,这类隧道称为偏压隧道。相较于地形平坦的隧道,偏压隧道的显著特点是结构受力复杂,施工技术要点多,围岩压力的计算与分析是隧道建设的重点。

目前,学者们多采用理论分析、数值计算、模型试验等方法对围岩压力进行计算研究。张军伟等<sup>[1]</sup>利用位移反分析原理推导浅埋围岩压力计算方法,有效地规避了传统方法依赖围岩的物理学参数,并以实际工程案例进行了论证;于丽等<sup>[2]</sup>以实际浅埋黄土隧道的破坏形式,建立了隧道的破坏模式,从而运用极限平衡原理推导了黄土隧道的围岩压力计算公式;张桂华等<sup>[3]</sup>等运用极限分析法建立了非偏压与偏压隧道新的破坏模式,检验运用极限分析法上限法研究隧道围岩压力的可行性,对隧道新破坏模式的合理性进行了验证;邱业建等<sup>[4]</sup>将理论分析结合模型试验研究围岩压力计算方法与适用条件,同样检验极限上限法计算围岩压力是可行的,并给出不同偏压角度下合理的计算方法;张治国等<sup>[5-6]</sup>针对地震作用下经理论公式的相关推导,得到内摩擦角和岩土体黏聚力等因素下简化解析围岩压力的计算方法,分析了摩擦角等因素对围岩压力的影响规律。后将地震力偏角旋转,在考虑不同方向地震综合作用下,运用拟静力法提出了采用黏聚力和内摩擦角分算浅埋偏压隧道围岩压力解,通过与规范和文献进行比较,验证了计算结果的合理性,并对不同方向地震力、内摩擦角和黏聚力对围岩压力的影响进行了分析;刘翔等<sup>[7]</sup>根据不规则坡面的浅埋偏压隧道的结构建立了计算模型,利用极限平衡原理推导不规则坡面浅埋偏压隧道松动围岩压力的计算方法,分析了随地面坡度变化与水平侧压力系数之间的关系,并结合实际工程验证了公式的合理性;严涛等<sup>[8]</sup>对偏压隧道中需要变坡处理的隧道,进行围岩压力的推导,并与规范公式对比,验证了公式的合理性,利用数值模拟将有变坡与无变坡下围岩的安全性进行对比分析;陈红军等<sup>[9]</sup>研究不同的岩层倾角、地层坡度和开挖范围等因素的影响,并利用极限平衡法推导了下滑力计算公式,且根据计算下滑力判断是否滑移滑坡;杜建明等<sup>[10-11]</sup>采用极限平衡法推导了变坡条

件下的围岩压力计算公式,运用算例与规范法的计算结果进行对比,验证公式合理性,还对变坡面公式进行了数据分析。

另外,还有众多学者从不同方面对围岩压力展开了研究<sup>[12-13]</sup>。由于偏压隧道的坡度太大或者地表太高,施工现场的隧道区域需要进行变坡处理或存在地质条件复杂的区域有变坡段,根据《公路隧道设计规范》(JTJ 70—2004)对围岩压力进行计算,不符合实际工程应用。本文将在前人研究的基础上对变坡浅埋偏压隧道围岩压力计算展开研究。

## 1 围岩压力计算公式推导

目前,通常采用《公路隧道设计规范》(JTJ D70—2004)<sup>[14]</sup>(后文简称:规范法)对自然放坡的偏压隧道围岩压力进行计算。自然放坡下的偏压隧道如图1(a)所示,当隧道区域存在或需要变坡时如图1(b)所示。隧道上方土体存在变坡,隧道结构受力会产生变化,继续采用自然放坡的规范法进行计算,得到的围岩压力将会和隧道结构实际受力产生更大误差,所以需要变坡条件下的围岩压力进行修正计算。

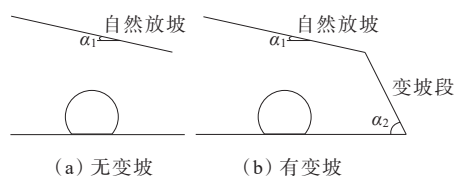


图1 偏压隧道有无变坡示意图

Figure 1 Unsymmetrically loaded tunnel with or without variable slope

### 1.1 隧道计算模型

图2为变坡条件下偏压隧道的计算模型,图中隧道上方的ABCD段为自然放坡段;DNH段为变坡段; $\alpha_1$ 为隧道自然放坡段角度; $\alpha_2$ 为隧道变坡段角度;模型左、右两侧分别为隧道的深埋侧和浅埋侧;其中隧道左、右侧的滑动破坏面的破裂角设为 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ;BJ段为深埋侧地表至拱底的距离,CK段为浅埋侧地表至拱底的距离;DM段为隧道变坡点到隧道拱底的距离;AJ段为隧道深埋侧的滑动破坏面;NK为隧道浅埋侧的滑动破坏面。

为了便于理论推导,对隧道区域作出如下基本假定:①将隧道区域看为理想弹塑性体,且满足Mohr-Coulomb屈服准则;②选取《公路隧道设计规

范》(JTG D70—2004)中的破坏模式,将隧道结构的受力分为隧道上部覆土、左侧隧道深埋侧块体和右侧隧道浅埋侧块体。上部覆土向下移动的过程中会带动隧道左、右侧块体向各自的滑动破坏面移动;  
③ 将隧道滑动破坏面视为平滑直面。

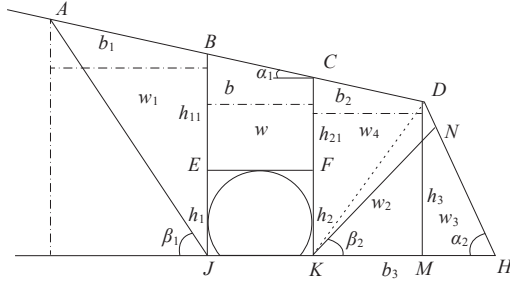


图2 偏压隧道计算模型示意图

Figure 2 Calculation model of unsymmetrically loaded tunnel

隧道左、右侧的滑动破坏面破裂角设为 $\beta_1, \beta_2$ ,并按照《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)中的方法进行计算:

$$\beta_1 = \arctan \left[ \tan \varphi + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi + 1)(\tan \varphi - \tan \alpha_1)}{\tan \varphi - \tan \theta}} \right] \quad (1)$$

$$\beta_2 = \arctan \left[ \tan \varphi + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi + 1)(\tan \varphi + \tan \alpha_1)}{\tan \varphi - \tan \theta}} \right] \quad (2)$$

式中: $\varphi$ 为岩层土体的内摩擦角; $\theta$ 拱顶岩体与两侧棱柱体岩体间摩擦角。

为了便于计算,设: $\overline{AB}$ (水平距离) $=b_1, \overline{BC}$ (水平距离) $=\overline{EF}=\overline{JK}=b, \overline{CD}$ (水平距离) $=\overline{KM}=b_2, \overline{KH}=b_3, \overline{BJ}=h_1, \overline{BE}=h_{11}, \overline{CK}=h_2, \overline{CF}=h_{21}, \overline{DM}=h_3$ 。

## 1.2 围岩块体自重

如图2所示,将隧道左侧的ABJ块体的自重定为 $w_1$ ;隧道拱顶上方的BCFE块体的自重定为 $w$ ,隧道右侧块体分为3个部分,其中CDHK块体的自重为 $w_2$ ;NKH块体的自重为 $w_3$ ;滑动破裂面上方块体CDNK的自重为 $w_4$ 。故根据图2计算模型可计算出各部分的自重:

$$w = \frac{\gamma b (h_{11} + h_{21})}{2} \quad (3)$$

$$w_1 = \frac{\gamma h_1^2 \sin(90^\circ + \alpha_1) \sin(90^\circ - \beta_1)}{2 \sin(\beta_1 - \alpha_1)} \quad (4)$$

$$w_2 = \frac{\gamma [(b_2 + b_3) h_3 + (h_2 - h_3) b_2]}{2} \quad (5)$$

$$w_3 = \frac{\gamma b_3^2 \sin \alpha_2 \sin \beta_2}{2 \sin(180^\circ - \beta_2 + \alpha_2)} \quad (6)$$

$$w_4 = \frac{\gamma [(b_2 + b_3) h_3 + (h_2 - h_3) b_2]}{2} - \frac{\gamma b_3^2 \sin \alpha_2 \sin \beta_2}{2 \sin(180^\circ - \beta_2 + \alpha_2)} \quad (7)$$

式中: $\gamma$ 为围岩岩体的重度。

## 1.3 隧道滑动阻力计算

### 1.3.1 自然放坡段滑动阻力计算

取隧道自然放坡段块体ABJ作为计算模型,图3为隧道左侧滑动块体的受力示意图,岩土块体上方受集中荷载 $Q$ 和均布荷载 $q$ ;  $\tau_{11}, \tau_{12}$ 为ABJ块体下滑过程中岩土体内黏聚力引起的抗剪力,其中 $\tau_{11} = cL_{AJ}, \tau_{12} = cL_{BJ}, L_{AJ}$ 与 $L_{BJ}(h_1)$ 分别是隧道两侧的滑动破裂面的长度,即AJ截面与BJ截面长度; $T_1$ 为隧道自然放坡段块体的滑动阻力; $F_1$ 为隧道侧压力。

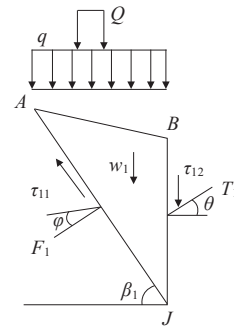


图3 深埋侧滑动块体ABJ受力示意图

Figure 3 Stress of sliding block ABJ on deeply buried side

根据极限平衡原理推导<sup>[14]</sup>可得:

$$T_1 = \frac{\lambda_1}{\cos \theta} \left[ \frac{\gamma h_1^2}{2} + (Q + qb_1 + ch_1)(\tan \beta_1 - \tan \alpha_1) - \frac{cL_{AJ} \cos \varphi (\tan \beta_1 - \tan \alpha_1)}{\sin(\beta_1 - \varphi)} \right] \quad (8)$$

$$\lambda_1 = \left[ \frac{1}{1 + \tan \beta_1 (\tan \varphi - \tan \theta) + \tan \varphi \tan \theta} \right] \cdot \left( \frac{\tan \beta_1 - \tan \varphi}{\tan \beta_1 - \tan \alpha_1} \right) \quad (9)$$

式中:  $\lambda_1$  为隧道左侧的水平侧压力系数, 可采用《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004) 计算;  $c$  为隧道岩土体的黏聚力。

在实际工程中, 隧道岩土体上方的集中荷载  $Q$  和均布荷载  $q$ , 由于现场环境因素的制约, 通常不作考虑, 岩土体的黏聚力是岩土材料中的重点, 且容易受外界自然条件影响, 故在这里保留在计算公式内: 令  $Q=0$ 、 $q=0$ ,  $c$  为常数。简化计算得到:

$$T_1 = \frac{\lambda_1}{\cos \theta} \left[ \frac{\frac{\gamma h_1^2}{2} + ch_1(\tan \beta_1 - \tan \alpha_1)}{-\frac{cL_{AJ} \cos \varphi (\tan \beta_1 - \tan \alpha_1)}{\sin(\beta_1 - \varphi)}} \right] \quad (10)$$

### 1.3.2 变坡段滑动阻力计算

图4为隧道右侧块体  $CDNK$  的受力示意图, 从图示分析可得: 当  $N$  点与  $D$  点重合时隧道右侧的滑动块体将与《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004) 中的计算模型一致, 故变坡段不会对隧道造成影响, 由此为了方便判别隧道变坡是否会对隧道造成影响, 本文将研究隧道滑动面破裂角  $\beta_2$  的数值关系。

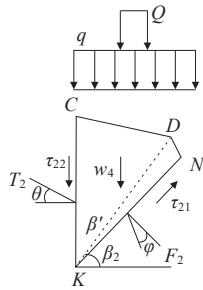


图4 浅埋侧滑动块体  $CDNK$  受力示意图

Figure 4 Stress of sliding  $CDNK$  block on shallowly buried side

经普式理论<sup>[15]</sup>, 滑动面破裂角应满足  $\beta = 45^\circ + \varphi/2$ , 即破裂角  $\beta > 45^\circ$ 。由变坡偏压隧道计算模型可知, 当滑动破坏面存在  $N$  点与  $D$  点重合, 引入中间量  $\beta'$ , 此时  $\beta_2 = \arctan(h_3/b_2) = \beta'$ 。结合普式理论推导, 当变坡段的滑动面破裂角满足  $45^\circ < \beta_2 < \beta' = \arctan(h_3/b_2)$  时, 即满足变坡条件下的本文计算公式; 当  $\beta_2 > \beta' = \arctan(h_3/b_2)$  时, 即隧道变坡段不对隧道区域产生影响, 应采用《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004) 中公式进行计算。

当变坡段滑动面破裂角满足  $45^\circ < \beta_2 < \beta' = \arctan(h_3/b_2)$  时, 采用极限平衡原理进行计算。取隧

道变坡段块体  $CDNK$  作为计算模型, 隧道右侧变坡段块体  $CDNK$  的受力示意图如图4所示。同样  $\tau_{21}$ 、 $\tau_{22}$  分别为  $CDNK$  块体下滑过程中岩土体内部黏聚力引起的抗剪力,  $\tau_{21} = cL_{NK}$ ,  $\tau_{22} = cL_{CK}$ , 其中  $L_{NK}$ 、 $L_{CK}$  为  $NK$  截面与  $CK$  截面长度;  $T_2$  为隧道变坡段块体的滑动阻力。

根据极限平衡原理和土力学理论推导可得:

$$T_2 = \frac{\sin(\beta_2 - \varphi)}{\sin[90^\circ - (\beta_2 - \varphi + \theta)]} \cdot \left[ w_4 + Q + qb_2 + ch_2 - \frac{cL_{DK} \cos \varphi}{\sin(\beta_2 - \varphi)} \right] \quad (11)$$

$$\lambda_2 = \frac{2T_2 \cos \theta}{\gamma h_2^2} \quad (12)$$

同理, 不考虑集中荷载与均布荷载, 令  $Q=0$ 、 $q=0$ 。简化计算, 得出:

$$T_2 = \frac{\sin(\beta_2 - \varphi)}{\sin[90^\circ - (\beta_2 - \varphi + \theta)]} \cdot \left[ w_4 + ch_2 - \frac{cL_{DK} \cos \varphi}{\sin(\beta_2 - \varphi)} \right] \quad (13)$$

$$\lambda_2 = \frac{2 \cos \theta}{\gamma h_2^2} \cdot \frac{\sin(\beta_2 - \varphi)}{\sin[90^\circ - (\beta_2 - \varphi + \theta)]} \cdot \left[ w_4 + ch_2 - \frac{cL_{DK} \cos \varphi}{\sin(\beta_2 - \varphi)} \right] \quad (14)$$

### 1.4 围岩垂直压力及水平侧压力计算

关于围岩垂直压力计算, 采用极限平衡法, 取隧道上方的块体  $BCFE$  为主要计算模型, 其受力示意图如图5所示。其中, 主要包含块体  $BCFE$  的自重  $w$ , 块体上方均布荷载  $q$  与集中荷载  $Q$ , 截面  $BE$  与截面  $CF$  所产生的抗剪力的反作用力  $\tau_{12}'$ 、 $\tau_{22}'$ , 隧道左、右侧面滑动块体产生的滑动阻力的反作用力  $T_1'$ 、 $T_2'$ 。隧道围岩压力示意图见图6。

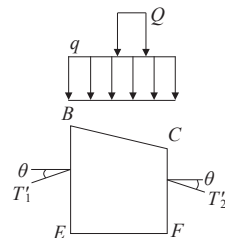


图5 隧道上方块体  $BCFE$  受力示意图

Figure 5 Stress of  $BCFE$  block above tunnel



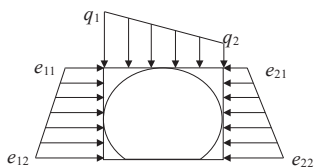


图6 隧道围岩压力示意图

Figure 6 Surrounding rock pressure in tunnel

利用围岩压力公式<sup>[14]</sup>:

$$N = w + Q + qb - (\tau_{12}' + \tau_{22}') - (T_1' + T_2') \sin \theta \quad (15)$$

运用力学关系可以分别计算出隧道上方左、右侧的围岩压力:

$$q_1 = \frac{N}{b} + \frac{\gamma b \tan \alpha}{2} = \frac{\gamma b (h_{11} + h_{21}) + 2Q}{2b} + q + \frac{\gamma b \tan \alpha_1 - (\tau_{12}' + \tau_{22}') + (T_1' + T_2') \sin \theta}{b} \quad (16)$$

$$q_2 = \frac{N}{b} + \frac{\gamma b \tan \alpha}{2} = \frac{\gamma b (h_{11} + h_{21}) + 2Q}{2b} - q - \frac{\gamma b \tan \alpha_1 - (\tau_{12}' + \tau_{22}') + (T_1' + T_2') \sin \theta}{b} \quad (17)$$

不考虑集中荷载与均布荷载,得到简化公式:

$$q_1 = \frac{\gamma (h_{11} + h_{21})}{2} + \frac{\gamma b \tan \alpha_1}{2} - \frac{(\tau_{12}' + \tau_{22}') + (T_1' + T_2') \sin \theta}{b} \quad (18)$$

$$q_2 = \frac{\gamma (h_{11} + h_{21})}{2} - \frac{\gamma b \tan \alpha_1}{2} - \frac{(\tau_{12}' + \tau_{22}') + (T_1' + T_2') \sin \theta}{b} \quad (19)$$

式中:  $q_1$  为隧道深埋侧垂直压力;  $q_2$  为隧道浅埋侧垂直压力。

围岩水平压力可根据规范法计算:

$$e_{1i} = \gamma h_{1i} \lambda_1 \quad (20)$$

$$e_{2i} = \gamma h_{2i} \lambda_2 \quad (21)$$

式中:  $h_{1i}$ 、 $h_{2i}$  分别为隧道左、右侧任意一点至岩土体地表的距离; 深埋侧水平压力:  $e_{11} = \gamma h_{11} \lambda_1$ ,  $e_{12} = \gamma h_{12} \lambda_1$ ; 浅埋侧水平压力:  $e_{21} = \gamma h_{21} \lambda_2$ ,  $e_{22} = \gamma h_{22} \lambda_2$ 。

## 2 隧道计算对比分析

### 2.1 规范法计算对比分析

采用规范法中的围岩压力计算公式与本文变坡

公式进行对比分析,为计算模型选取如下的计算参数:  $\overline{AB} = b_1$ ,  $\overline{BC} = \overline{EF} = \overline{JK} = b = 10$  m,  $\overline{CD} = \overline{KM} = b_2 = 5$  m,  $\overline{KH} = b_3$ ,  $\overline{BJ} = h_1 = 20$  m,  $\overline{BE} = h_{11} = 8$  m,  $\overline{CK} = h_2 = 18$  m,  $\overline{CF} = h_{21} = 6$  m,  $\alpha_1 = 10^\circ$ ,  $\alpha_2 = 55^\circ$ 。由于  $\overline{AB} = b_1$ ,  $\overline{DM} = h_3$ ,  $\overline{KH} = b_3$  与隧道的自然坡度  $\alpha_1$ 、变坡角度  $\alpha_2$  和隧道岩土体的破裂角  $\beta$  有关,所以不对其赋值,采用公式计算得出。其他力学参数,取  $\varphi = 30^\circ$ ,  $\theta = 15^\circ$ ,  $\gamma = 16$  kN/m<sup>3</sup>。

$$b_1 = \cos \alpha_1 \sqrt{\frac{2w_1 \sin(90^\circ - \beta_1)}{\gamma \sin(\beta_1 - \alpha_1) \sin(90^\circ + \alpha_1)}} \quad (22)$$

$$h_3 = h_2 - b_2 \tan \alpha_1 \quad (23)$$

$$b_3 = b_2 + \frac{h_3}{\tan \alpha_2} \quad (24)$$

分别采用本文公式与规范公式计算围岩压力,对比结果见表1。由于隧道地表的偏压效应,隧道左右侧所受的垂直压力不同,其中深埋侧、浅埋侧部分,本文公式计算垂直压力值均大于规范公式计算结果,分别存在13.67%、25.69%的相对误差。对比隧道水平压力计算值可以看出,隧道深埋侧的水平压力本文公式计算结果与规范公式计算结果一致,不存在相对误差;隧道浅埋侧的水平压力本文公式计算结果小于规范公式计算结果,存在34.89%的相对误差。隧道浅埋侧所计算出的相对误差较大,这也验证了在变坡条件下的围岩受力将会改变。隧道的偏压效应对隧道浅埋侧即变坡段产生较大的影响。

定义隧道偏压率( $f_{偏} = F_1/F_2$ ),其中隧道深埋侧压力为  $F_1$ ; 隧道浅埋侧压力为  $F_2$ 。

将本文公式与规范公式计算隧道偏压率进行对比,见表2。由表2可知:①关于垂直压力的偏压率,本文公式计算值小于规范公式计算值,但两种方式计算结果相差不大,说明偏压隧道存在变坡段对垂直偏压率影响较小;②关于水平压力的偏压率本文公式与规范公式计算结果相差较大,可以看出偏压隧道存在变坡段对隧道水平偏压率影响较大,偏压隧道存在变坡段会使得隧道水平偏压率增大。

### 2.2 实测压力对比分析

选取刘翔等<sup>[7]</sup>在贵广高铁贺街隧道项目的实测围岩压力值与本文推导公式的理论值进行对比。实测段处于隧道进口段,具有明显的变坡偏压特征。隧道高度为12.5 m,开挖面积为150 m<sup>2</sup>。隧道围岩主要

表 1 围岩压力计算对比

Table 1 Comparison of surrounding rock pressure calculation results

围岩压力	隧道深埋侧			隧道浅埋侧		
	本文公式计算	规范公式计算	相对误差/	本文公式计算	规范公式计算	相对误差/
	所得压力/kPa	所得压力/kPa	%	所得压力/kPa	所得压力/kPa	%
$q$	68.43	60.20	13.67	40.22	32.00	25.69
$e_1$	56.37	56.37	0.00	27.04	41.53	34.89
$e_2$	140.91	140.91	0.00	81.11	124.58	34.89

表 2 隧道偏压率计算对比

Table 2 Comparison of calculation results of unsymmetrical load ratio of tunnel

围岩压力	本文公式			规范公式		
	深埋侧压力/	浅埋侧压力/	偏压率	深埋侧压力/	浅埋侧压力/	偏压率
	kPa	kPa		kPa	kPa	
$q$	68.43	40.22	1.70	60.20	32.00	1.88
$e_1$	56.37	27.04	2.08	56.37	41.53	1.35
$e_2$	140.91	81.11	1.73	140.91	124.58	1.13

为全风化泥质砂岩和粉砂岩夹炭质页岩。岩体的力学参数为 $\gamma=19.8\text{ kN/m}^3$ 、 $\varphi=26^\circ$ 、 $c=24\text{ kPa}$ 、 $\theta=16^\circ$ 。

隧道区域示意图 7, 计算参数为  $b=14.7\text{ m}$ ,  $h_{11}=13\text{ m}$ ,  $h_1=25.5\text{ m}$ ,  $h_{21}=10\text{ m}$ ,  $h_2=22.5\text{ m}$ ,  $\varphi=26^\circ$ ,  $\alpha_1=10^\circ$ ,  $\alpha_2=25^\circ$ ,  $b_2=4.5$ 。经计算得到  $\beta'$ 、 $\beta_2$ , 结果满足  $45^\circ<\beta_2<\beta'$ , 图 8 为监测点布置示意图。

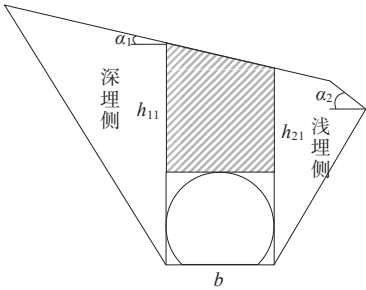


图 7 隧道区域示意图

Figure 7 Tunnel area

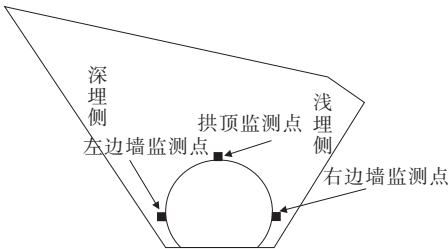


图 8 监测点布置示意图

Figure 8 Monitoring point layout

运用规范公式与本文计算公式计算隧道区域的围

岩压力理论值与实测值的对比结果见表 3。由表 3 可得:运用本文变坡条件下的围岩压力公式计算出的围岩压力值比规范计算的结果更贴近隧道围岩压力的实测值。说明在变坡偏压的隧道围岩压力计算中,采用本文公式比规范公式的计算结果更具有实用性。

表 3 围岩压力计算值与实测值对比

Table 3 Comparison between calculated and measured values of surrounding rock pressure

方法	拱顶垂直压	左边墙水平侧	右边墙水平侧
	力/kPa	压力/kPa	压力/kPa
实测值	214.0	205.0	117.6
规范公式	202.1	233.5	140.8
本文公式	211.7	216.4	102.0

3 影响因素分析

3.1 自然坡度的影响分析

水平侧压力系数与隧道滑动块体的阻力相关,所以研究水平侧压力系数是研究围岩压力的重点。由式(1)、(9)可以发现:隧道深埋侧滑动面破裂角 $\beta_1$ 与隧道岩土体的内摩擦角 $\varphi$ 、隧道拱顶岩体与两侧棱柱体岩体间摩擦角 $\theta$ 和隧道自然放坡段的坡度角 $\alpha_1$ 有关。其中,破裂角 $\beta_1$ 与 $\varphi$ 和 $\theta$ 成正比,与 $\alpha_1$ 成反比;深埋侧的水平侧压力系数 $\lambda_1$ 同样与 $\beta_1$ 、 $\varphi$ 、 $\theta$ 、 $\alpha_1$ 有关。分析可得:水平侧压力系数 $\lambda_1$ 与破裂角 $\beta_1$ 成反比关系,故可以分析出与其他因素的相关性。浅埋侧变坡段的水平侧压力系数由式(14)得到,与隧道

右侧的滑动面破裂角 $\beta_2$ 成反比关系。由于 $\varphi$ 、 $\theta$ 与隧道围岩级别有关,可以测定,所以在这里不做分析研究。而地面坡度受自然环境位置条件的影响,自然坡度呈多变的状态,故在这里采用控制变量法( $\varphi=36^\circ$ , $\theta=15^\circ$ ),分析水平侧压力系数与自然坡度的关系(图9)。

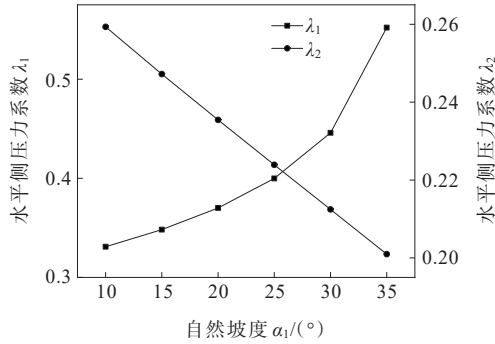


图9 水平侧压力系数随自然坡度变化图  
Figure 9 Variation of horizontal lateral pressure coefficient with natural slope

由图9可知:深埋侧的水平侧压力系数 $\lambda_1$ 与自然坡度 $\alpha_1$ 成正比关系,明显看到随着自然坡度 $\alpha_1$ 的不断增大水平侧压力系数 $\lambda_1$ 也随着增长,当自然坡度从 $30^\circ$ 到 $35^\circ$ 时 $\lambda_1$ 出现了骤然的生长。由式(10)可知:水平侧压力系数 $\lambda_1$ 与块体ABJ的滑动阻力 $T_1$ 成正比,所以当水平侧压力系数 $\lambda_1$ 增大时会导致滑动阻力 $T_1$ 增大。而浅埋侧变坡段的水平侧压力系数 $\lambda_2$ 与自然坡度 $\alpha_1$ 成反比关系,图9中 $\lambda_2$ 随 $\alpha_1$ 的增大呈线性减小。同样从公式(12)发现:水平侧压力系数 $\lambda_2$ 与块体CDNK的滑动阻力 $T_2$ 成正比关系,随自然坡度 $\alpha_1$ 的增大滑动阻力 $T_2$ 会减小。

### 3.2 黏聚力的影响分析

本文公式计算围岩压力时不考虑集中荷载 $Q$ 和均布荷载 $q$ 的影响。由式(14)可知:隧道岩土体黏聚力 $c$ 为水平侧压力系数 $\lambda_2$ 的影响因数,采用 $\varphi=36^\circ$ , $\theta=15^\circ$ 的固定参数,分别取黏聚力 $c=0.1$  MPa、 $0.2$  MPa、 $0.3$  MPa、 $0.4$  MPa、 $0.5$  MPa,在不同的自然坡度与变坡角度的情况下分析 $c$ 值变化对水平侧压力系数的影响,结果如图10、11所示。

由图10可见:在不同的自然坡度下,水平侧压力系数随着黏聚力的增大,呈现先增大后减小的趋势。当黏聚力达到 $0.4$  MPa后,水平侧压力系数开始减小。随着自然坡度 $\alpha_1$ 的不断增大,水平侧压力系数在

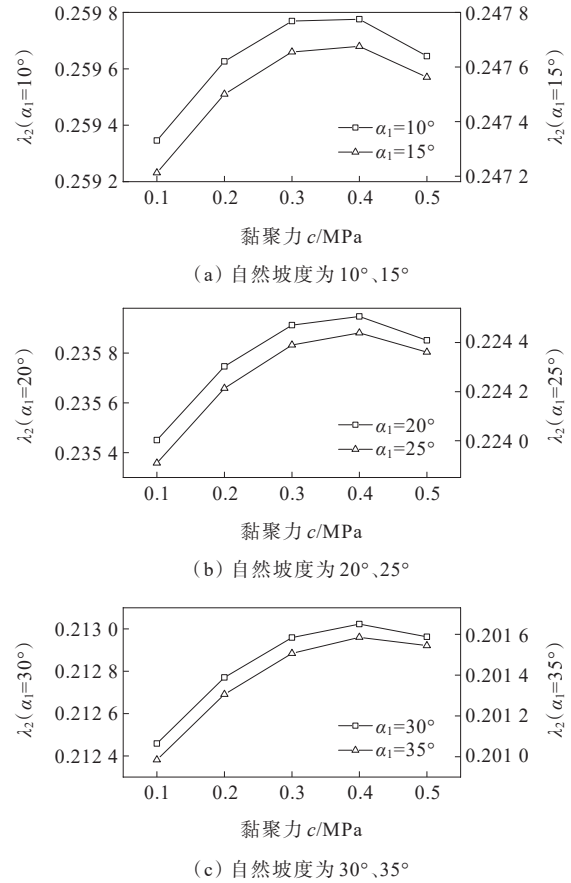


图10 水平侧压力系数随黏聚力在自然坡度下的变化  
Figure 10 Variation of horizontal pressure coefficient with cohesive force under natural slope angle

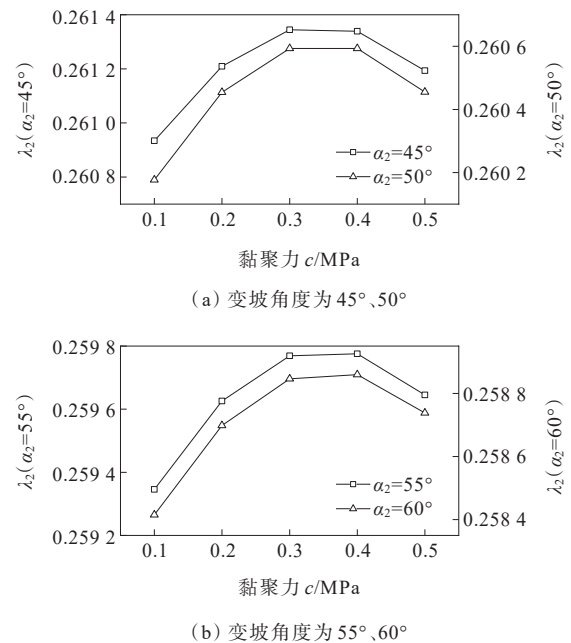


图11 水平侧压力系数随黏聚力在变坡角度下的变化  
Figure 11 Variation of horizontal pressure coefficient with cohesive force under variable slope angle

黏聚力为 0.4 MPa 后的减小幅度逐步减缓。当自然坡度  $\alpha_1$  从  $10^\circ$  变化至  $15^\circ$  时,水平侧压力系数的降幅为 0.012 1;  $\alpha_1$  为  $20^\circ \sim 25^\circ$  时,水平侧压力系数的降幅为 0.011 4。从而得出,随着自然坡度的增大,水平侧压力系数随黏聚力的增大呈先增大后减小的趋势将会被延缓。由式(12)可知:块体 CDNK 的滑动阻力  $T_2$  与水平侧压力系数  $\lambda_2$  成正比关系,故随着黏聚力的增大滑动阻力也会呈先增大后减小的趋势。由图 11 可知:在不同的变坡角度下,水平侧压力系数随着黏聚力的增大同样呈先增大后减小的趋势,与自然坡度中不同的是,在  $c=0.4$  MPa 之后并没有减缓变小趋势。

### 3.3 变坡角度的影响分析

变坡条件下的偏压隧道,是在隧道的浅埋侧存在着变坡,由式(7)可得,变坡角度影响隧道浅埋侧滑动块体的自重,从而影响隧道的垂直压力与水平压力。所以采用控制变量法,研究水平侧压力系数与变坡坡度的关系,结果如图 12 所示。

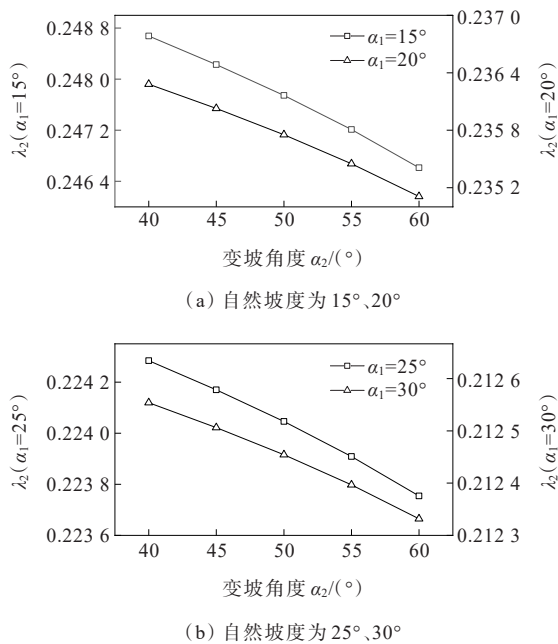


图 12 水平侧压力系数随变坡角度变化图

Figure 12 Variation of horizontal lateral pressure coefficient with variable slope angle

由图 12 可知:随着变坡角度  $\alpha_2$  的增大,水平侧压力系数  $\lambda_2$  随之呈线性关系减小,当自然坡度为  $\alpha_1=15^\circ$  时,水平侧压力系数  $\lambda_2$  随变坡角度  $\alpha_2$  从  $40^\circ \sim 60^\circ$  增加,降幅为 0.003 2;当自然坡度为  $\alpha_1=30^\circ$  时,水平侧压力系数  $\lambda_2$  随变坡角度  $\alpha_2$  从  $40^\circ \sim 60^\circ$  的增加,降幅为

0.000 1。所以随着自然坡度的增大,变坡角度对水平侧压力系数的影响将减小。

## 4 结论

(1) 为确定在变坡条件下的偏压隧道围岩压力计算方法的选取,引入中间量  $\beta' = \arctan(h_3/b_2)$ 。当变坡段的滑动面破裂角满足  $45^\circ < \beta_2 < \beta' = \arctan(h_3/b_2)$  时,隧道变坡段对隧道区域产生影响,应选用考虑变坡条件下的计算公式;当  $\beta_2 > \beta' = \arctan(h_3/b_2)$  时,隧道变坡段不会对隧道区域产生影响,应选用公路隧道设计规范中公式进行计算。

(2) 推导变坡条件下本文的围岩压力计算公式,与规范公式进行对比,验证公式的合理性,并分析得到偏压隧道存在变坡段对隧道垂直偏压率影响较小,对隧道水平偏压率影响较大,偏压隧道存在变坡段会使得隧道水平偏压率增大。以实际隧道围岩压力的实测值与本文公式计算的理论值进行对比,验证公式具有实用性。所以对存在变坡段的隧道应优先考虑本文公式。

(3) 随着自然坡度的增大,深埋侧的水平侧压力系数  $\lambda_1$  与滑动阻力  $T_1$  随之增大;随着岩土体黏聚力的增大,浅埋侧水平侧压力系数  $\lambda_2$  呈先增大后减小的趋势,且随着自然坡度的增大,减小趋势将会减缓;但随着变坡段角度的增大,减小趋势没有明显变化;随着变坡段角度的增大,浅埋侧水平侧压力系数  $\lambda_2$  将会减小,且随着自然坡度的增大,变坡角度对水平侧压力系数的影响将减小。

## 参考文献:

## References:

- [1] 张军伟,曹祥渊,陈拓,等.浅埋隧道围岩压力计算方法[J].地下空间与工程学报,2017,13(增刊1):28-33,134.  
ZHANG Junwei, CAO Xiangyuan, CHEN Tuo, et al. Calculation method of surrounding rock pressure in shallow tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(sup 1): 28-33, 134.
- [2] 于丽,吕城,段儒禹,等.浅埋黄土隧道围岩压力计算方法[J].中国铁道科学,2019,40(4):69-76.  
YU Li, LYU Cheng, DUAN Ruyu, et al. Calculation method for surrounding rock pressure of shallow buried loess tunnel[J]. China Railway Science, 2019, 40(4): 69-76.



- [3] 张佳华,杨小礼,梁桥,等.非偏压与偏压条件下浅埋隧道围岩压力的极限分析[J].公路交通科技,2014,31(5):115-123.  
ZHANG Jiahua, YANG Xiaoli, LIANG Qiao, et al. On limit analysis of surrounding rock pressure on shallow tunnel under non-bias and bias conditions[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(5):115-123.
- [4] 邱业建,彭立敏,雷明锋.浅埋偏压隧道围岩压力上限法解析解[J].土木工程学报,2015,48(6):106-113.  
QIU Yejian, PENG Limin, LEI Mingfeng. Upper bound solutions for surrounding rock pressure of shallow bias tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(6):106-113.
- [5] 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 Zhiguo, JIANG Yunjuan, LIU Ming, 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.
- [6] 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(增刊2):16-24.  
ZHANG Zhiguo, XU Xiaoyang, ZHAO Qihua. Simple theoretical analysis of rock pressure for shallow unsymmetrical-loading tunnels considering horizontal earthquake action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(sup 2):16-24.
- [7] 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 Xiang, FANG Qian. 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.
- [8] 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 Tao, LI Kunjie, MOU Zhiheng, 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.
- [9] 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.
- [10] 杜建明,房倩.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[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(1):165-173.  
DU Jianming, FANG Qian. Calculation method of surrounding rock pressure of shallow-buried and asymmetrical pressure tunnel under variable slopes considering cohesion and internal friction angle[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(1):165-173.
- [11] 杜建明,房倩,海路,等.地表变坡下浅埋偏压隧道围岩压力计算方法[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(11):4088-4098.  
DU Jianming, FANG Qian, HAI Lu, et al. Calculation method for surrounding rock pressure of shallow tunnel with asymmetrical pressure of variable slopes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11):4088-4098.
- [12] 刘智,李欣雨,李震,等.基于Bayes-LSTM的公路隧道围岩变形预测方法研究[J].中外公路,2024,44(1):166-176.  
LIU Zhi, LI Xinyu, LI Zhen, et al. Prediction method of surrounding rock deformation of highway tunnels based on Bayes-LSTM[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(1):166-176.
- [13] 李合银,高景明,李炎峰,等.单洞四车道超大跨度公路隧道Ⅳ级围岩合理施工方法研究[J].中外公路,2024,44(2):220-230.  
LI Heyin, GAO Jingming, LI Yanfeng, et al. Reasonable construction method for grade IV surrounding rock in single-hole four-lane super-span highway tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(2):220-230.
- [14] 重庆交通科研设计院.公路隧道设计规范:JTG D70—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.  
Chongqing Communications Research & Design Institute. Code for design of road tunnel: JTG D70—2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [15] 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.