

基于谢家杰公式的浅埋隧道开挖进尺计算方法研究

李 辉^{1,2}, 田小旭^{1,2}, 宋战平^{2,3}, 王娟娟^{1,2}, 周冠南³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 隧道与地下结构工程研究所, 陕西 西安 710055;
3. 中铁建大桥工程局集团第三工程有限公司 天津 300000)

摘要: 选择合理的开挖进尺是实现隧道安全施工的重要环节, 当开挖进尺选择不当时, 在软质地层中修建隧道常常会导致掌子面失稳和拱顶塌落。从保证掌子面不失稳和拱顶不塌落的角度, 基于谢家杰浅埋隧道围岩压力推导了软岩浅埋隧道开挖进尺的计算公式。并利用该公式计算了天恒山隧道台阶法和 CRD 法两种工法的开挖进尺, 结果表明当采用台阶法施工时, 隧道的开挖进尺由掌子面的稳定性控制, 而当采用 CRD 法施工时, 隧道的开挖进尺由拱顶的稳定性控制, 这说明隧道的开挖进尺不能单独由拱顶稳定性或者掌子面稳定性确定, 而是由二者共同确定, 从而验证了该公式计算隧道开挖进尺的合理性。

关键词: 浅埋隧道; 开挖进尺; 计算方法; 掌子面稳定; 拱顶稳定

中图分类号: U455.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)05-0662-06

Study on calculation method of digging length for shallow tunnel based on Xie Jiajie's Surrounding Rock Pressure Formula

LI Hui^{1,2}, TIAN Xiaoxu^{1,2}, SONG Zhanping^{2,3}, WANG Juanjuan^{1,2}, ZHOU Guannan³

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Tunnel and Underground Structure Engineering Research Institute, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. China Railway Construction Engineering Group Third Engineering Co. Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: Choosing a reasonable digging length is an important link to realize the safe construction of the tunnel. When the digging length is not selected properly, the construction of the tunnel in the soft stratum formation often leads to the instability of the tunnel face and the collapse of the vault. Based on the theory of the surrounding rock of Xie jiajie shallow tunnel, the formula for calculating the digging length of soft rock tunnel is deduced from the point of view that the surface of the tunnel face is stable and the vault does not collapse. And using this formula to calculate the digging length of bench cut method and CRD method, the results show that when the bench cut method is adopted, the bench cut method is controlled by the stability of the tunnel face. And when the CRD method is used, the digging that length is controlled by the stability of the vault, which indicates the digging that length can not be determined by the stability of the vault alone or the stability of the tunnel face, but by the two together. This verifies the formula to calculate the rationality of the digging length.

Key words: shallow tunnel; digging length; calculation method; stability of tunnel face; stability of vault

隧道开挖进尺对隧道的稳定性至关重要^[1-2], 为解决大开挖进尺造成的安全性差, 开挖进尺小的不经济问题, 许多学者对隧道开挖进尺的确定进行了探究。惠丽萍和王良^[3]假定隧道开挖时, 拱顶部沿纵向会形成一定长度的承载拱, 再利用平衡条件推导了浅埋暗挖土质隧道的开挖进尺的计算公式。王志达和龚晓南^[4]基于太沙基松散体理论和摩尔库伦强度准则, 在保证拱顶不坍塌的前提

下, 推导了浅埋暗挖人行地道开挖进尺的计算公式。陈树汪和蒋树屏^[5]根据杨森筒仓理论和摩尔库伦强度准则, 以掌子面保持稳定为前提, 推导了隧道开挖进尺的计算公式。石先火^[6]等基于筒仓理论, 提出了岩堆体隧道洞口浅埋段开挖进尺的计算公式。许金华^[7]等运用数值模拟和现场监测对比分析的方法对杜家山隧道采取的三台阶+预留核心土方法的开挖进尺进行优化, 得到了隧道的最

收稿日期: 2017-05-17

修改稿日期: 2017-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578447), 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2017-K4-032); 陕西省教育厅专项科研计划项目(16JK1448)

第一作者: 李 辉(1963—), 女, 副教授, 主要从事岩土工程领域的教学与科研工作. E-mail: 16978670@qq.com

通讯作者: 宋战平(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程领域的教学与科研工作. E-mail: songzhp@xauat.edu.cn.

优开挖进尺。黄蜂和朱合华^[8]采用数值模拟的方法研究了隧道全断面施工在不同的开挖进尺下围岩变形规律。满帅等^[9]采用 Winkler 弹性地基梁模型,以管棚钢管挠度为控制条件对隧道洞口浅埋段管棚超前支护开挖进尺进行优化研究。以上的研究中有针对土质和软岩隧道推导开挖进尺的计算公式,但均是以单一的承载拱、拱顶不坍塌和掌子面不失稳为前提条件;由于浅埋地层地质特性复杂,在计算开挖进尺时不仅要考虑拱顶的稳定性,也要考虑掌子面的稳定性。针对浅埋隧道顶部拱效应问题,1961 年 horn 实验证明,杨森筒仓理论可以解释隧道顶部的拱效应和开挖面掌子面的失稳机理;但根据近几年的理论和试验的分析^[10-12],开挖面实际破坏形态呈烟囱状,这与杨森筒仓理论分析中假设的模型差别比较大。论文立足于开挖面的实际破坏形态,以谢家杰浅埋隧道围岩压力理论为背景,在保证掌子面和拱顶稳定的前提下,推导了浅埋隧道开挖进尺的计算公式,以天恒山浅埋土质隧道为例,对采用不同开挖方式的隧道开挖进行进行实例验证;并就不同围岩参数对进行的影响进行了参数的敏感性分析。

1 开挖进尺的计算方法

对于软质地层中的浅埋隧道而言,开挖的影响将被波及到地表而不能形成“自然拱”,隧道开挖后岩土体就会大量塌落移动,这种移动最终会影响到地表并形成一个塌落区域,此时岩土体将会形成滑动面,并最终形成如图 1 所示破坏形态。谢家杰将这一破坏形态进行简化,提出了浅埋偏压隧道的围岩压力计算模型^[13](图 2),并推导了围岩压力计算公式。本文根据谢家杰这一破坏形态的简化模型,推导软质地层隧道开挖进尺计算公式。

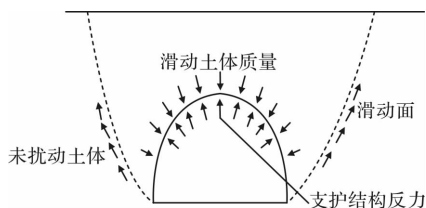


图 1 隧道开挖面破坏形态

Fig. 1 Failure shape of the tunnel face

1.1 计算模型

(1)计算假定:①土体服从 Mohr - Coulomb 准则;②隧道拱顶围岩压力按谢家杰理论计算;

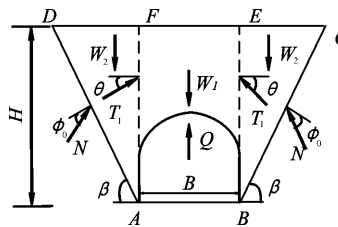


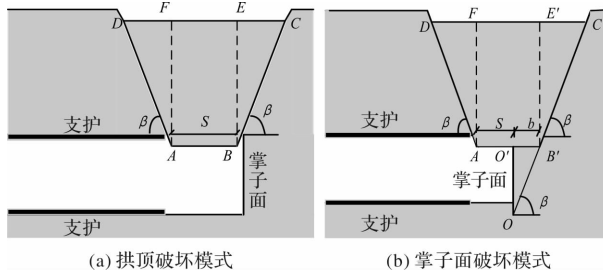
图 2 谢家杰围岩压力示意图

Fig. 2 Model of Xie Jiajie surrounding rock pressure

③不考虑渗流作用。

(2)破坏模式

根据谢家杰得出的开挖面破坏形态简化模型以及谢家杰围岩压力理论,提出软岩地层隧道开挖进尺计算模型,①岩土体中形成的破裂面是一个与水平成 β 角的斜直面;②当洞顶上覆盖岩体 ABEF(ABE'F')下沉时受到两侧岩体的夹持,反过来它又带动两侧三棱岩体 AFD 和 BCE(B'C'E)的下滑,而当整个下滑体 ABCEFD(AB'C'E'FD)下滑时,又受到两侧未扰动岩体的阻力,且当 AB'C'E'FD 下滑体下滑时,还受到掌子面前方岩土体 OB'B 的阻力,如图 3 所示。



(a) 拱顶破坏模式

(b) 掌子面破坏模式

图 3 开挖进尺计算模型

Fig. 3 Calculation model of the digging length

隧道开挖进尺 s 按不利情况分析,原有掌子面开挖后初支滞后 s 。开挖后隧道上方土体产生松动,隧道上方松动土体高度为 H ,隧道上方纵向松动土体长度 $l = s + b$,其中 b 为开挖时掌子面前方松动土体长度, $b = h / \tan \beta$ 。开挖进尺 s 由两个条件控制:开挖后要使松动范围内隧道顶部围岩不坍塌,则围岩自重应小于摩阻力;掌子面不发生失稳破坏。

1.2 拱顶稳定性分析

开挖后要使松动范围内隧道顶部围岩不坍塌,围岩自重应小于四侧摩阻力,取极限情况建立平衡方程,计算简图 4 如下所示,则有

$$W_1 - 2T_1 \sin \theta - 2T_2 \sin \theta = 0 \quad (1)$$

式中: $W_1 = sdH\gamma$, $T_1 = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\lambda}{\cos \theta} s$,

$$T_2 = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\lambda}{\cos \theta} d.$$

带入式(1)中得:

$$s = \frac{dH\lambda \tan\theta}{d - H\lambda \tan\theta} \quad (2)$$

式中: $\tan\beta = \tan\varphi_0 + \sqrt{\frac{(\tan^2\varphi_0 + 1)\tan\varphi_0}{\tan\varphi_0 - \tan\theta}}$;

$$\lambda = \frac{\tan\beta - \tan\varphi_0}{\tan\beta[1 + \tan\beta(\tan\varphi_0 - \tan\theta) + \tan\varphi_0 \tan\theta]} \cdot s$$

为开挖进尺; d 为隧道宽度或者直径; H 为土层覆盖厚度; φ_0 为摩擦角。

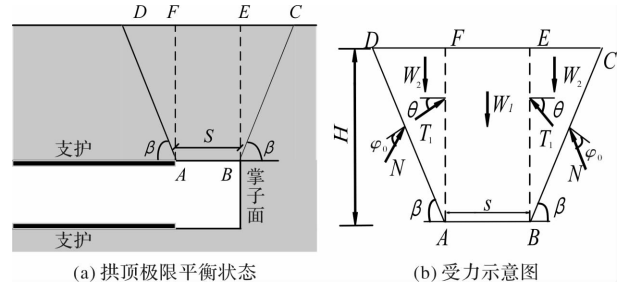


图4 计算简图

Fig. 4 Calculation diagram

表1 各级围岩的 θ 与 Φ_0 值

Tab. 1 θ and Φ_0 value of all grades of surrounding rock

围岩级别	I	II	III	IV	V	VI
θ	$0.9\varphi_0$	$0.9\varphi_0$	$0.9\varphi_0$	$(0.7 \sim 0.9)\varphi_0$	$(0.5 \sim 0.7)\varphi_0$	$(0.3 \sim 0.5)\varphi_0$
φ_0	>78	$70 \sim 78$	$60 \sim 70$	$50 \sim 60$	$40 \sim 50$	$30 \sim 40$

2.3 掌子面稳定性分析

掌子面处于极限平衡状态时, 计算简图如下所示, 则有

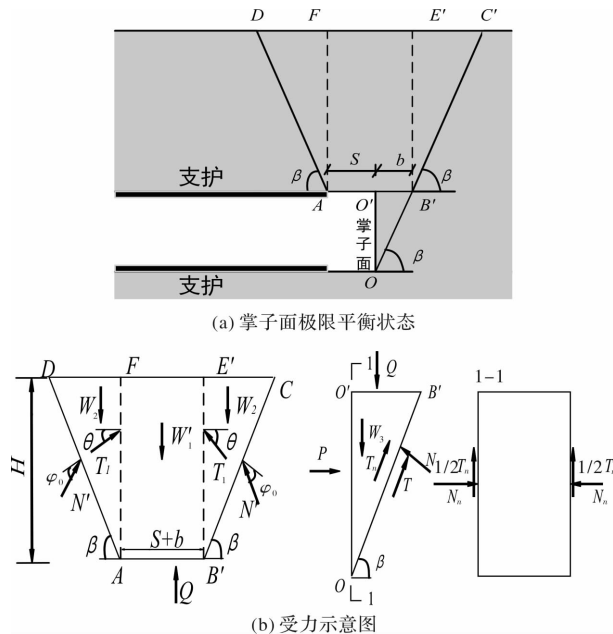


图5 计算简图

Fig. 5 Calculation diagram

$$Q = W_1' - 2T_1' \sin\theta - 2T_2' \sin\theta \quad (3)$$

沿破裂面 OB' 的切向与向建立极限平衡方程:

$$\begin{cases} T + T_n - (Q + W_3) \sin\beta + P \cos\beta = 0 \\ N - (Q + W_3) \cos\beta - P \sin\beta = 0 \end{cases} \quad (4)$$

根据摩尔库伦准则:

$$T = N \tan\varphi_0 + Cd \frac{h}{\sin\beta} \quad (5)$$

T_n 为楔块 $OB'B$ 侧面所受的剪力, 根据文献[3]的推可得:

$$T_n = h^2 \tan\beta \left(C + k_a \tan\varphi_0 \frac{2\sigma_v + \gamma h}{3} \right) \quad (6)$$

$$\text{式中, } \sigma_v = \frac{Q}{bd}.$$

将式(5)带入式(4)中, 得

$$Cd \frac{h}{\sin\beta} + T_n - (Q + W_3) \sin\beta + P \cos\beta + (Q + W_3) \cos\beta \tan\varphi_0 + P \sin\beta \tan\varphi_0 = 0 \quad (7)$$

将式(3)、(6)带入式(7)得

$$s = \frac{k_3}{(dH\gamma - \gamma H^2 \lambda \tan\theta) \left(k_2 - \frac{2h^2}{3bd} k_a k_1 \right)} p + \frac{(b+d)H\lambda \tan\theta - bd}{d - H\lambda \tan\theta} + \frac{Ch \left(\frac{d}{\sin\beta} + h \tan\beta \right) + \frac{1}{3} \gamma h^3 k_a k_1 - k_2 W_3}{(dH\gamma - \gamma H^2 \lambda \tan\theta) \left(k_2 - \frac{2h^2}{3bd} k_a k_1 \right)} \quad (8)$$

式中: $k_1 = \tan\beta \tan\varphi_0$; $k_2 = \sin\beta - \cos\beta \tan\varphi_0$; $k_3 = \cos\beta + \sin\beta \tan\varphi_0$; k_a 为主动土侧压力系数 p 为掌子面支护压力、掌子面喷层作用和核心土对掌子面的支护作用。

公式适用于浅埋隧道, 隧道埋深 H 应满足, $h_a < H \leq (2 - 2.5)h_a$, h_a 为等效荷载高度。开挖进尺 s 应同时保证掌子面稳定和拱顶稳定, 即 s 取式(2)和式(8)的最小值。

2 工程实例及参数敏感性分析

2.1 工程概况

天恒山隧道是哈尔滨绕城高速公路东北段的重点控制工程。隧道采用双线分离式, 上行线长 1 660 m, 下行线长 1 690 m。隧道穿越天恒山, 围岩大部分为粘性土, 局部有砂层, 围岩类别 V~VI 级。隧道采用新奥法施工, 埋深 28~40 m, 属典型的浅埋土质隧道^[14]。断面洞高 10~13 m, 洞

径12~16 m,断面面积126 m²时,采用台阶法施工,断面面积163 m²时,采用双侧壁导坑法或CD、CRD法施工,计算参数如下表2.

表2 计算参数

Tab. 2 Calculation parameters

重度 γ /kN·m ⁻³	粘聚力 c /kPa	摩擦角 φ_0 /°	侧压力 系数 K_a
20	50	22	0.67

2.2 开挖进尺的计算

(1)采用本文推导的公式计算

采用台阶法施工时,隧道埋深 $H=28$ m,开挖高度 $h=5$ m,开挖宽度 $d=12$ m

由式(2)可得 $s=3.8$ m;

由式(8)可得 $s=0.0003p+2.1$, 没有预留核心土,令 $p=0$ 得, $s=2.1$ m. 最后取 $s=2.1$ m.

采用CRD法施工时,隧道埋深 $H=28$ m,开挖高度 $h=5.1$ m,开挖宽度 $d=6$ m.

由式(2)式可得 $s=5.6$ m;

由式(8)可得 $s=0.0008p+4.8$, 令 $p=0$ 得, $s=4.8$ m. 最后取 $s=4.8$ m.

(2)采用文献[4]提供的公式计算台阶法

$$2l_2 = 2l + h \tan(45 - \varphi/2) = 18.7 \text{ m}$$

$$b = h \tan(45 - \varphi/2) = 3.4 \text{ m}$$

将结果带入下式中

$$\frac{qs' - 2\gamma l_2 h}{2l_2 + s'} \leq \left(\frac{\gamma l_2 - c}{k \tan \varphi} - q \right) (e^{-k \tan \varphi \frac{h}{l_2}} - 1)$$

得: $d \leq 6.9$ m

实际开挖进尺 $d = 6.9/K$, K 为安全系数,当 $K=2$ 时, $d \leq 3.4$ m.

CRD法

$$l' = l + h \tan(45 - \varphi/2) = 14.7 \text{ m}$$

$$b = h \tan(45 - \varphi/2) = 3.4 \text{ m}$$

将结果带入下式中

$$\frac{(q - \gamma h)s' - 2\gamma l' h}{2l' + s'} \leq \left(\frac{\gamma l' - c}{k \tan \varphi} - q \right) (e^{-k \tan \varphi \frac{h}{l'}} - 1)$$

得 $d + 14.2 \geq 0$

(3)采用文献[6]提供的公式验算

文献[6]式基于掌子面稳定推导的公式,且不能直接计算隧道开挖进尺,只能进行开挖进尺的验算,这里只对按本文公式(8)计算出来的开挖进尺进行验算.

台阶法 $s = 2$ m

$$A_1 = \tan(45 - \varphi/2) = 1.5$$

$$A_2 = \frac{cbh}{\cos(45 - \varphi/2)} = 3618.7$$

$$A_3 = \sin(45 - \varphi/2) + \cos(45 - \varphi/2) \tan \varphi = 0.9$$

将上面的结果带入

$$\left(\frac{T_s + A_2}{A_3} + S \right) / \left(\frac{G + V}{A_1} \right) \geq K$$

得 $3.8 \geq K$ (取 $K=2$), 满足要求.

CRD法, $s = 10.5$ m;

$$A_1 = \tan(45 - \varphi/2) = 1.5;$$

$$A_2 = \frac{cbh}{\cos(45 - \varphi/2)} = 1809.4;$$

$$A_3 = \sin(45 - \varphi/2) + \cos(45 - \varphi/2) \tan \varphi = 0.9.$$

将上面的结果带入下式.

$$\left(\frac{T_s + A_2}{A_3} + S \right) / \left(\frac{G + V}{A_1} \right) \geq K$$

得 $4.6 \geq K$ (取 $K=2$), 满足要求.

根据以上的计算结果可知,无论是采用台阶法还是CRD法施工,仅从拱顶稳定或者掌子面稳定角度出发,本文的开挖进尺的计算结果都要小于文献[4]和文献[6],说明本文的开挖进尺的计算结果都能满足文献[4]和文献[6]的要求,这也就证明了本文提出的隧道开挖进尺的计算公式的合理性.采用CRD法施工时,文献[4]得到 $d + 14.2 \geq 0$,由此可知,此时开挖进尺已经不受拱顶稳定性控制,可以任意选定开挖进尺,在这种情况下文献[4]无法通过计算得到隧道开挖进尺,这显然没有达到文献[4]的目的,说明单独以拱顶稳定性建立隧道开挖进尺的计算公式时,有可能得不出结果.文献[4]提供的公式不能直接计算隧道开挖进尺,只能事先拟定一系列开挖尺寸,然后验证是否满足掌子面稳定,最后选择最优尺寸,仍然不能直接计算隧道开挖进尺.文献[4]和文献[6]提供的公式是单一以拱顶稳定或者掌子面稳定条件建立的,但是实际工程中隧道的开挖进尺应该是由二者共同决定的.

由本文提供的公式计算可知,当采用台阶法施工时,隧道的开挖进尺由掌子面的稳定性控制,而当采用CRD法施工时,隧道的开挖进尺由拱顶的稳定性控制,这也就证明了隧道的开挖进尺不能单独由拱顶稳定性或者掌子面稳定性确定,而是由二者共同确定.

当从台阶法转变为CRD法时,开挖进尺有着显著的增加,增加了1.8倍,由 $s = 0.0003p + 2.1$, $s = 0.0018p + 4.8$ 可知,掌子面作用 p 对增大CRD法的开挖进尺贡献更大.虽然开挖进尺 s 随着掌子面作用 p 的增大而线性增大,但总体来

说 p 对增大开挖进尺的贡献是很微小的, 这就是在实际工程中一般通过改变隧道施工工法来增加隧道开挖进尺的原因, 这与工程实际相符合。

2 参数敏感性分析

由式(2)和式(8)可知, 隧道的开挖进尺与围岩粘聚力 c 、内摩擦角 φ_0 、重度 γ 、覆盖土厚度 H 、以及隧道断面尺寸 d 、 h 等有关。为了更清楚的了解土体的主要力学参数和隧道埋深与开挖进尺的关系, 分别对隧道埋深 H 、粘聚力 c 、内摩擦角 φ_0 进行参数敏感性分析。研究算埋深与开挖进尺的关系时, 隧道埋深在 $h_a < H \leq (2 - 2.5)h_a$ 范围内取值, 计算结果如图 6。

研究粘聚力、内摩擦角与开挖进尺的关系时, c 、 φ_0 值在 V、VI 围岩范围内取值, 计算结果如图 7、图 8。

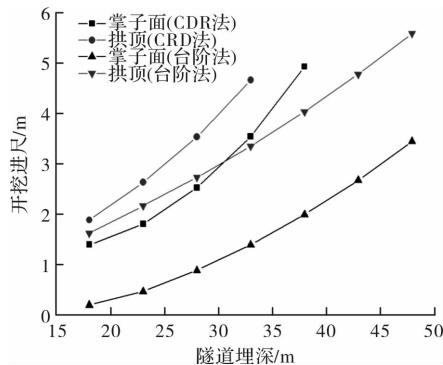


图 6 开挖进尺与埋深的关系曲线

Fig. 6 Curves of correlation between digging length and

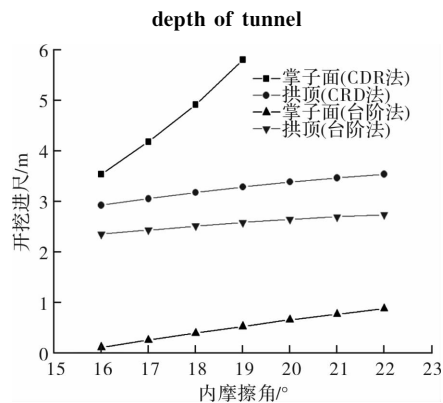


图 7 开挖进尺与内摩擦角的关系曲线

Fig. 7 Curves of correlation between digging length and internal friction angle

对于具体工程而言, 地层参数及隧道开挖尺寸是已知的, 由式(8)可知, 软岩地层浅埋隧道开挖进尺 s 是关于掌子面作用 p 的一次函数, 开挖进尺 s 随着掌子面作用 p 的增大成线性增大。对于全断面开挖隧道, 没有做超前支护和掌子面喷层时, 取 $p=0$ 。当采用预留核心土法开挖时, 将核心土

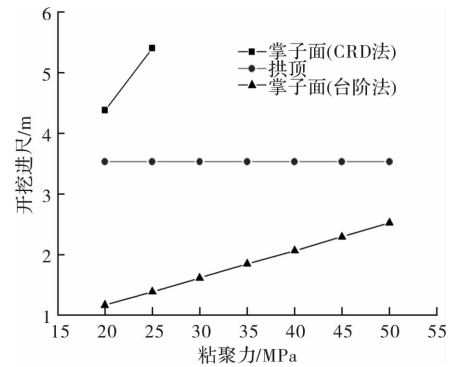


图 8 开挖进尺与粘聚力的关系曲线

Fig. 8 Curves of correlation between digging length and cohesion

的有利作用转化 p , 这时 $p=0$, 根据具体情况选取 p 值。

3 结论

论文基于谢家杰浅埋隧道围岩压力公式, 考虑掌子面和隧道拱顶的稳定性, 建立了浅埋隧道开挖进尺的理论计算公式; 以天恒山隧道为实例, 进行了工程验证及参数的敏感性分析, 研究可得如下结论:

(1) 隧道开挖进尺不是单独由拱顶稳定性或者掌子面稳定性确定, 而是由二者共同确定。

(2) 基于谢家杰围岩压力公式推导了浅埋隧道开挖进尺的理论计算公式; 基于天恒山隧道的工程实例验证了提出的理论公式的合理、可行性。

(3) 软岩地层浅埋隧道开挖进尺与掌子面作用力密切相关, 开挖进尺随掌子面作用力的增加成线性增加。

参考文献 References

- [1] 宋战平, 张丹锋, 曲建生, 等. 承压富水砂土地层桩洞法施工变形控制研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(1): 33-38.
SONG Zhanping, ZHANG Danfeng, QU Jiansheng, et al. Study on the deformation control of PBA construction method in pressure water sand stratum[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(1): 33-38.
- [2] SONG Z P, YANG T T, JIANG A N, et al. Experimental investigation and numerical simulation of surrounding rock creep for deep mining tunnels[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining & Metallurgy, 2016, 116(12): 1181-1188.
- [3] 惠丽萍, 王良. 浅埋暗挖土质隧道开挖进尺的理论探讨[J]. 铁道标准设计, 1995(11): 25-27.
HUI Liping, WANG liang. Theoretical discussion on

- excavation of foot tunnel with shallow buried and excavated Soil[J]. Railway Standard Design, 1995(11): 25-27.
- [4] 王志达, 龚晓南. 浅埋暗挖人行地道开挖进尺的计算方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2637-2641.
WANG Zhida, GONG Xiaonan. Calculation method of digging length in underpass with underground excavation under shallow cover[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2637-2641.
- [5] 陈树汪, 蒋树屏. 一个用于确定软岩隧道开挖进尺的解析模型[J]. 现代隧道技术, 2010(S): 259-264.
CHEN Shuwang, JIANG Shuping. An analytical model for determining tunnel digging length in soft rock tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2010(S): 259-264.
- [6] 石先火, 戴远全, 郭建强. 岩堆体隧道洞口浅埋段开挖进尺的计算与分析—以云南麻昭高速公路赵家屋隧道为例[J]. 隧道建设, 2015(8): 787-791.
SHI Xianhuo, DAI Yuanquan, GUO Jianqiang. Calculation and analysis on excavation cycle length of shallow portal sections of tunnels located in talus deposits; case study on zhaojiawu tunnel on Mazhao Highway in Yunnan, China[J]. Tunnel Construction, 2015(8): 787-791.
- [7] 许金华, 何川, 周艺, 等. 基于台阶法的极破碎软岩隧道开挖进尺优化研究[J]. 水文地质工程地质, 2013(40): 42-48.
XU Jinhua, HE Chuan, ZHOU Yi, et al. The research for tunnel excavation optimization in broken soft rock based on benching tunneling method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology 2013(40): 42-48.
- [8] 黄锋, 朱合华. 开挖进尺对大断面隧道变形的影响[J]. 铁道建筑, 2013(8): 56-59.
HUANG Feng, ZHU Hehua. The influence of digging length to the deformation of large cross-section tunnel[J]. Railway Engineering 2013(8): 56-59.
- [9] 满帅, 孔超, 王海彦. 隧道洞口浅埋段管棚超前支护开挖进尺优化[J]. 铁道标准设计, 2013(10): 108-111.
MAN Shuai, KONG Chao WANG Haiyan. Optimization of excavation footage of shallowly buried section of tunnel portal supported by advance pipe poul[J]. Railway Standard Design, 2013(10): 108-111.
- [10] 白永学, 漆泰岳, 吴占瑞. 砂卵石地层盾构开挖面稳定性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(6): 89-96.
BAI Yongxue, QI Taiyue, WU Zhanrui. Face stability analysis of shield tunneling in sandy cobble stratum[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2012, 34(6): 89-96.
- [11] 胡雄玉, 晏启祥, 何川, 等. 土压平衡盾构掘进对散粒体地层扰动和开挖面破坏特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1618-1627.
HU Xiongyu, YAN Qixiang, HE Chuan, et al. Study on the disturbance and excavation face failure feature of granular mixtures stratum due to EPB shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1618-1627.
- [12] 朱伟, 秦建设, 卢廷浩. 砂土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2005(8): 897-902.
ZHU Wei, QIN Jianshe, LU Tinghao. Numerical study on face movement and collapse around shield tunnels in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005(8): 897-902.
- [13] 谢家杰. 浅埋隧道的地层压力[J]. 土木工程学报, 1964(6): 58-70.
XIE Jiajie. Stratigraphic pressure of shallow tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 1964(6): 58-70.
- [14] 池春生, 宋战平. 严寒地区大断面浅埋土质隧道施工方法探讨[J]. 水利与建筑工程学报, 2008(3): 74-77.
CHI Chunsheng, SONG Zhanping. Discussion on Construction Method about Shallow Soil Tunnel With Big Cross Section in Severely Cold Region[J]. 2008(3): 74-77.

(编辑 沈 波)