

纵向倾斜地表盾构隧道掌子面 三维挤出破坏分析*

贺志军,陈运鹏,李得建,赵炼恒[†]

(中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075)

摘要:为完善隧道掌子面稳定性评价体系,基于极限分析上限法,考虑倾斜地表及掘进深度的影响,推导浅埋隧道掌子面三维被动支护力的上限表达式,并进一步采用规划程序优化计算获得了极限支护力最优上限解.研究表明:掌子面支护力与土体黏聚力比随无量纲参数 $\gamma D/c$ (γ 为土体容重, D 为隧道断面直径, c 为土体黏聚力)、掘进深度与隧道埋深比、地面超载与黏聚力比大致呈线性变化趋势,而与隧道埋深与断面直径比、地表倾斜角度、内摩擦角呈非线性变化趋势.内摩擦角、地表倾斜角度、隧道埋深与断面直径比和掘进深度与隧道埋深比对被动破坏模式影响显著,而无量纲参数 $\gamma D/c$ 和地面超载与黏聚力比对被动破坏模式影响较小.

关键词:浅埋隧道掌子面;破坏分析;极限分析上限法;纵向倾斜地表;掘进深度

中图分类号:TU443

文献标志码:A

Analysis on Three-dimensional Extrusion Failure of Shield Tunnel Face with Longitudinal Declined Ground

HE Zhijun, CHEN Yunpeng, LI Dejian, ZHAO Lianheng[†]

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to improve the stability evaluation system of tunnel face, considering the effects of declined ground and tunneling footage, the upper bound expression of supporting force for three-dimensional shallow tunnel face was derived and the optimal upper bound solution of supporting force was obtained by further using the planning procedure. The results show that the ratio of supporting force of tunnel face to soil cohesion is linearly affected by the dimensionless parameter $\gamma D/c$ (γ is soil bulk density, D is tunnel section diameter, c is soil cohesion), ratio of tunnel footage to tunnel depth, and ratio of ground overload to soil cohesion, whereas it is nonlinearly affected by the ratio of tunnel depth to tunnel section diameter, inclined ground surface angle, and internal friction angle. The internal friction angle, inclined ground surface angle, ratio of tunnel depth to tunnel section diameter, and ratio of tunneling footage to tunnel depth have a significant effect on the passive failure mode, while the dimensionless parameter $\gamma D/c$ and ratio of ground overload to soil cohesion have less effect on it.

Key words: shallow tunnel face; failure analysis; upper bound limit analysis method; longitudinal in-

* 收稿日期:2016-09-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478477), National Natural Science Foundation of China(51478477);贵州省交通运输厅科技项目(2014122006), Guizhou Provincial Department of Transportation Foundation(2014122006)

作者简介:贺志军(1965-),男,江西永新人,中南大学研究员,硕士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: zlh8076@163.com

clined ground surface; tunneling footage

在浅埋隧道顶管及泥水盾构施工中,由于顶推压力过大,掌子面可能发生被动破坏.工程实际中,隧道洞口上方地表通常存在一定倾斜角度,纵向倾斜的地表会对掌子面产生较大影响,且掌子面处支护力是随着掘进深度变化的,不利于隧道结构及开挖面的稳定.此前国内外已有较多针对水平地表下浅埋隧道掌子面稳定性的研究,但同时考虑地表倾斜角度以及由掘进深度改变对掌子面被动稳定性影响的研究较少.

掌子面稳定性分析中,基于浅埋隧道掌子面破坏模式及极限分析上限法,Leca等^[1]首次构建了单锥体滑块破坏机制,并通过严格的理论和模型试验证明其合理性,但由于破坏模式较简单,计算结果准确性较低.此后,不少学者基于此破坏机制进行了更加细致的研究,Soubra等^[2],Mollon等^[3-4],刘志^[5]和张箭等^[6]分别构建了多个刚性锥体滑块体系的破坏模式,一定程度上提高了该破坏机制的精度.Mollon等^[7]假定掌子面破坏以圆形形态发生,采用“空间离散化点生点技术”,构建了掌子面三维旋转破坏机制,基于上限定理及锥体滑块破坏机制,较为精确地分析了掌子面三维被动破坏稳定性.康石磊等^[8]将强度折减法引入刚体平动运动单元上限有限元并编制计算程序,针对椭圆形毛洞隧道围岩稳定性和破坏模式开展计算分析.赵明华等^[9]对上硬下软地层中盾构隧道开挖面极限支护力展开了研究.工程实际中隧道侧壁对掌子面存在一定的约束,掌子面破坏区域一般不会以完整的圆形发生,而以椭圆形态进行研究更符合实际情况.Mair等^[10-11]在黏土地层中进行了相关离心模型试验研究,并提出了砂土和黏土地层中开挖面的2种不同破坏模式.Takemura等^[12]构建了五刚性块体浅埋隧道破坏机制,分析了土体强度随深度变化和土体各向异性条件下的浅埋隧道极限支护力,计算结果与模型试验值吻合良好.Subrin等^[13-14]也采用上限法研究浅埋隧道掌子面三维稳定性问题,并提出一种有别于Soubra的破坏模式,其形状类似于“牛角状”,掌子面前方破坏范围内的土体均绕着隧道顶部上方的某点发生转动.Subrin将上限解与数值模拟和模型试验结果进行对比分析,说明了该破坏模式的有效性.同时,考虑倾斜地表的影响,严中^[15]基于数值模拟手段探究了倾斜地表对掌子面稳定性的影响,

倾角的存在可能会对洞口结构和开挖面产生较大的纵向推力,不利于掌子面的主动稳定性.

以上文献在隧道开挖面稳定性研究中已取得较大进展,但依然存在以下不足:1)浅埋隧道洞口段地表常为倾斜状态,而现有研究少有针对浅埋隧道倾斜地表条件下洞口段开挖面被动稳定的研究;2)隧道掘进深度对开挖面的稳定性具有重要影响,而目前少有此方面的研究;3)工程实际中,由于隧道侧壁对掌子面存在约束作用,掌子面破坏区域一般不会以完整的圆形发生,而以椭圆形态进行研究可能更符合实际情况.

基于以上考虑,本文采用三维多椭圆锥体滑块破坏机制,并引入圆锥椭圆截交线计算公式计算锥底椭圆几何参数.通过极限分析上限法,获得外力做功及内部能耗,推导出掌子面三维被动破坏极限支护力计算解析式,并通过序列二次规划法求其最优上限解.本文分析了无量纲参数($\gamma D/c, L/C, \sigma_s/c$)及超负荷比(隧道埋深与隧道断面直径比值) C/D ,倾斜角度 δ ,内摩擦角 φ 对掌子面三维被动破坏极限支护力及破坏模式的影响.

1 浅埋隧道掌子面三维被动破坏多椭圆锥体破坏机制与稳定性分析

1.1 被动破坏模式图

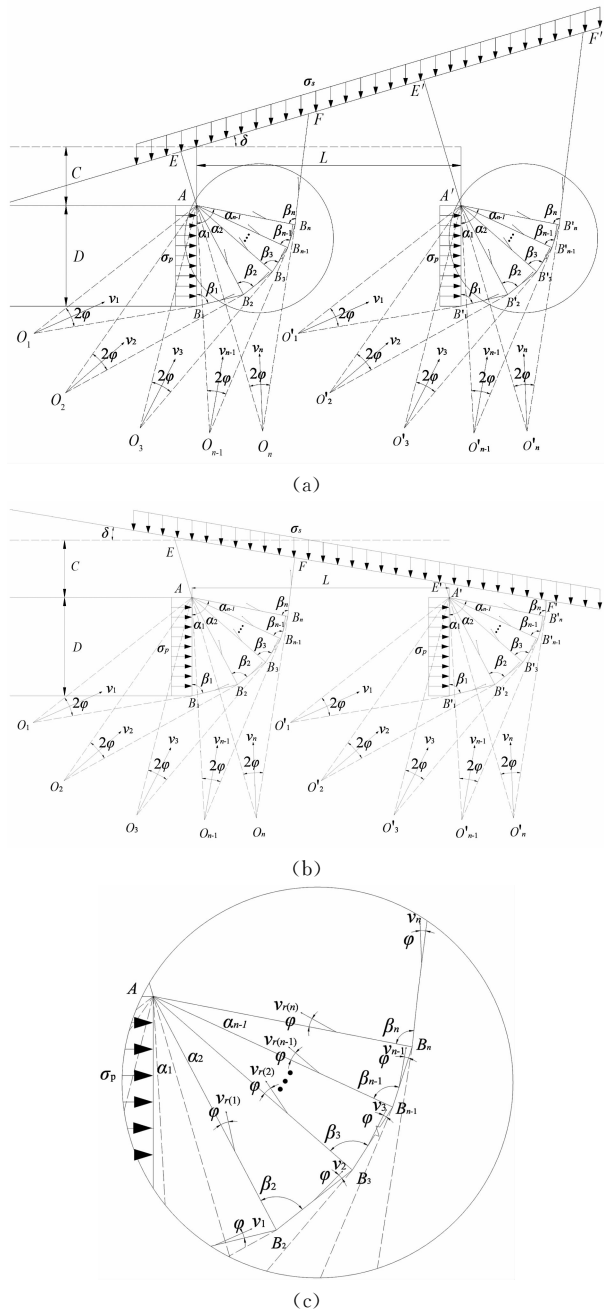
隧道掌子面三维多滑块被动破坏模式如图1所示:破坏模型采用多椭圆锥体滑块破坏机制,并考虑倾斜地表(地表倾斜角度 δ 为正和负)的影响.根据极限上限法,外力做功包括3部分:土体重力做功、地面超载做功以及掌子面支护力做功,内部能耗发生在速度间断面上.

1.2 三维椭圆锥体滑块几何特性分析

圆锥截平面不过锥体顶点截切圆锥形成的截交线分别为圆、椭圆、双曲线和抛物线^[16]4种,基于隧道掌子面三维多椭圆锥体滑块的破坏模式,圆锥截交线为椭圆.文献^[16-17]已对圆锥椭圆截交线计算公式进行了细致推导,由文献^[17]得知圆锥椭圆截交线计算公式见式(1).

$$\frac{\sin \theta}{\cos \varphi} = e. \quad (1)$$

式中: θ 为椭圆锥体的特征参数; φ 为土体内摩擦角; e 为椭圆离心率.



注:1. 特写图为(a)图 $AB_n B_{n-1} B_3 B_2 B_1$ 处放大图; 2. 特写图 B 点处 v_1 与(a)图 O_1 点处 v_1 均代表第1个滑块的速度.

图1 三维多滑块被动破坏模式图

Fig.1 Multi-slider block passive failure mode of three-dimensional tunnel face

由锥底椭圆长半轴 a 和离心率 e 可求得锥底椭圆短半轴:

$$b = a \sqrt{1 - e^2} \quad (2)$$

通过建立锥底椭圆短半轴和长半轴的联系,圆锥体的几何参数将容易获得,进而使得求解支护力过程更加简化,求解结果更易实现程序化.

1.3 三维被动破坏椭圆锥滑块计算参数及公式

1.3.1 滑块角度变量参数

三维空间模式下,圆锥经过椭圆截交线截得的几何体是斜圆锥.假设共有 n 个滑块,其中第 n 个滑块是个倒置斜圆锥台(图1中 $AB_n FE$).第 i 个滑块在 A 点的夹角是 $\alpha_i (i=1, 2, \dots, n-1)$, 在 B_i 点的夹角是 $\beta_i (i=1, 2, \dots, n)$, 它们满足下面的递推公式:

$$\beta_i = \pi - \alpha_{i-1} - \beta_{i-1} + 2\varphi, i=2, 3, \dots, n. \quad (3)$$

根据式(3),可以将空间问题转化为平面问题,并通过平面问题中圆锥体几何参数的求解方法求解三维圆锥体几何参数.

1.3.2 锥体几何尺寸参数

滑块在平面上的投影为三角形,可根据正弦定理求得三角形三边之间的关系,具体关系式如下:

$$AB_1 = D; \quad (4)$$

$$AB_i = \frac{\sin(\beta_{i-1})}{\sin(\alpha_{i-1} + \beta_{i-1})} AB_{i-1}, i=2, 3, \dots, n; \quad (5)$$

$$AO_i = \frac{\sin(\beta_i)}{\sin(2\varphi)} AB_i, i=1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

1.3.3 圆锥体几何特征参数

各个圆锥体的特征参数 θ_i :

$$\theta_1 = \pi/2 - \beta_1 + \varphi; \quad (7)$$

$$\theta_i = \alpha_{i-1} + \beta_{i-1} - \pi/2 - \varphi, i=2, 3, \dots, n; \quad (8)$$

$$\theta_{n+1} = \beta_n - \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i - \varphi + \delta. \quad (9)$$

各个圆锥体高度 h_i :

$$h_i = AO_i \sin(\beta_i - 2\varphi), i=1, 2, 3, \dots, n; \quad (10)$$

$$h_{n+1} = AO_n \times \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta_n - \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i - 2\varphi + \delta\right) + C \times \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right). \quad (11)$$

1.3.4 绝对速度与相对速度的递推关系

由图2所示的速度矢量图,易知破坏机构刚性块体间绝对速度与相对速度的递推关系如下:

$$v_{i+1} = v_i \frac{\sin(\alpha_i + \beta_i - 2\varphi)}{\sin(\beta_{i+1} - 2\varphi)}, \quad i=1, 2, \dots, n-1; \quad (12)$$

$$v_{r(i)} = v_i \frac{\sin(\alpha_i + \beta_i - \beta_{i+1})}{\sin(\beta_{i+1} - 2\varphi)}, \quad i=1, 2, \dots, n-1; \quad (13)$$

$$v_{r(n)} = 0. \quad (14)$$

ψ_i 为速度 v_i 与竖直方向的夹角:

$$\psi_1 = \beta_1 - \varphi, \quad (15)$$

$$\psi_i = \beta_i - \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j - \varphi, i=2, 3, \dots, n. \quad (16)$$

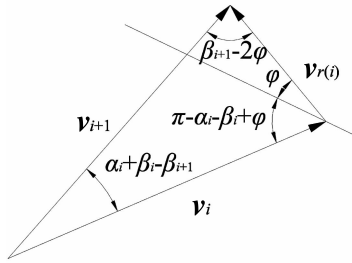


图 2 被动破坏速度矢量图
Fig.2 Velocity vector of passive failure mode

1.3.5 椭圆锥体体积和侧面积

1)前 $n-1$ 个滑块体积和侧面积的相关求法:

$$a_i = AB_i/2, i=1,2,\dots,n-1; \quad (17)$$

$$e_i = \frac{\sin \theta_i}{\cos \varphi}, i=1,2,\dots,n-1; \quad (18)$$

$$b_i = a_i \times \sqrt{(1 - e_i^2)}, i=1,2,\dots,n-1; \quad (19)$$

$$A_i = \pi \times a_i \times b_i, i=1,2,\dots,n-1. \quad (20)$$

参考文献[1]和[3]中椭圆锥体侧面积与底面积的计算关系,基于本文改进算法的椭圆锥体侧面积与体积的计算如下:

$$S_i = A_i \times \frac{\cos \theta_i}{\sin \varphi}, i=1,2,\dots,n-1; \quad (21)$$

$$V_i = \frac{1}{3} \times A_i \times h_i, i=1,2,\dots,n-1. \quad (22)$$

2)第 n 个滑块体积和侧面积:如图 3 和图 4 所示,倾斜地表 $\delta > 0$ 和 $\delta < 0$ 时,随着 L 的增大隧道埋深相应分别增大和减小,而倒置斜椭圆锥台几何参数计算公式一致,故选取图 3 中第 n 个滑块体积和侧面积计算公式.每幅图中左右 2 个单元分别表示不同掘进深度所对应的掌子面,每个单元中第 n 个滑块所对应的速度均为 v_n .倒置斜椭圆锥台几何参数计算如下:

$$AE = \frac{(C + L \cdot \tan \delta) \cdot \sin(\frac{\pi}{2} - \delta)}{\sin(\frac{\pi}{2} - \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i + \beta_n - 2\varphi + \delta)}; \quad (23)$$

$$EO_n = AO_n + AE; \quad (24)$$

$$EF = \frac{EO_n \cdot \sin 2\varphi}{\sin(\frac{\pi}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i - \beta_n - \delta)}; \quad (25)$$

$$a_{n+1} = EF/2; \quad (26)$$

$$e_{n+1} = \frac{\sin \theta_{n+1}}{\cos \varphi}; \quad (27)$$

$$b_{n+1} = a_{n+1} \times \sqrt{(1 - e_{n+1}^2)}; \quad (28)$$

$$A_{n+1} = \pi \times a_{n+1} \times b_{n+1}; \quad (29)$$

$$S_{n+1} = A_{n+1} \times \frac{\cos \theta_{n+1}}{\sin \varphi}; \quad (30)$$

$$S_{n,n+1} = A_{n+1} \times \frac{\cos \theta_{n+1}}{\sin \varphi} - A_n \times \frac{\cos \theta_n}{\sin \varphi}; \quad (31)$$

$$V_{n+1} = \frac{1}{3} \times A_{n+1} \times h_{n+1}; \quad (32)$$

$$V_{n,n+1} = \frac{1}{3} \times (A_{n+1} \times h_{n+1} - A_n \times h_n). \quad (33)$$

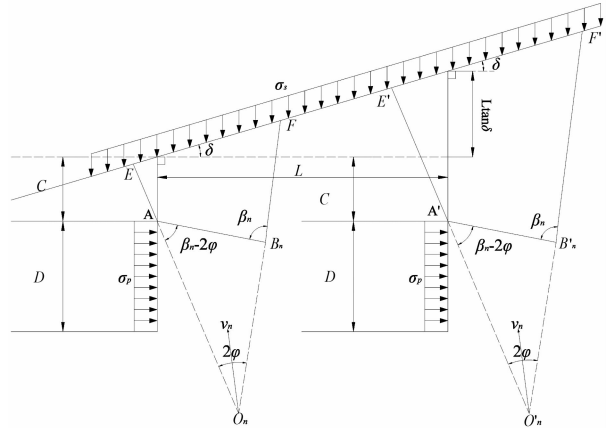


图 3 倾斜角度 $\delta > 0$ 时破坏模式图
Fig.3 Failure mode of inclination angle $\delta > 0$

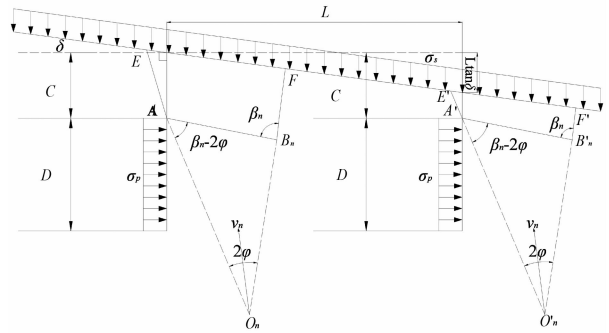


图 4 倾斜角度 $\delta < 0$ 时破坏模式图
Fig.4 Failure mode of inclination angle $\delta < 0$

1.3.6 各部分功率计算

1)重力做功:

$$R_\gamma = -\gamma \left[\sum_{i=1}^{n-1} v_{i+1} (V_{i+1} - V_i) \cos \psi_{i+1} + v_n V_{n,n+1} \cos \psi_n \right]. \quad (34)$$

式中: γ 为土体容重; v_{i+1}, v_n 分别为第 i 个和第 n 个滑块速度; V_i, V_{i+1} 分别为第 i 个和第 $i+1$ 个椭圆锥体体积; $V_{n,n+1}$ 为第 n 个与第 $n+1$ 个椭圆锥体体积之差,即第 n 个滑块体积; ψ_i 和 ψ_n 分别为第 i 个和第 n 个滑块速度与竖直方向夹角.

2)地面超载做功:地面超载直接作用于第 n 个滑块上,如图 5 所示,针对倾斜角度正负 2 种情况,第 n 个滑块速度与力的夹角分别为 $\psi_n + \delta$ 与 $\psi_n - \delta$,而地面超载功率计算公式是一致的,计算如下:

$$P_\sigma = -\sigma_s \cdot A_{n+1} \cdot v_n \cdot \cos(\psi_n + \delta) \cdot \cos \delta. \quad (35)$$

式中: A_{n+1} 为第 $n+1$ 个圆锥体底面积.

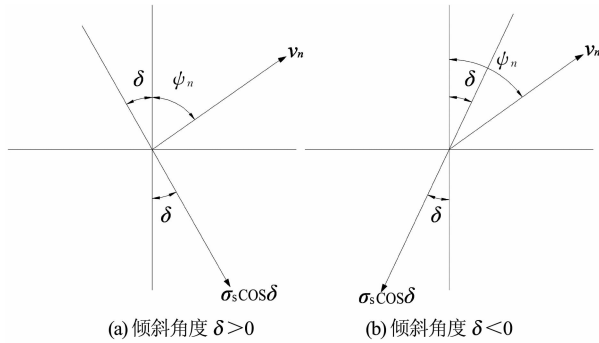


图5 地面超载功率分析图

Fig.5 Analysis of ground overload power

3) 掌子面支护力做功:

$$P_p = \sigma_p \cdot A_1 \cdot v_1 \cdot \sin(\beta_1 - \varphi). \quad (36)$$

式中: A_1 为第 1 个圆锥体底面积; v_1 为第 1 个滑块速度.

4) 速度间断面能耗计算:

$$P_c = c \cdot \left[\sum_{i=1}^{n-1} (S_{i+1} - S_i) \cdot v_{i+1} + v_n \cdot S_{n,n+1} + \sum_{i=1}^{n-1} A_{i+1} \cdot v_{r(i)} \right] \cdot \cos \varphi. \quad (37)$$

式中: A_{i+1} 为第 $i+1$ 个圆锥体底面积; $v_{r(i)}$ 为第 $i+1$ 个滑块相对于第 i 个滑块相对速度; S_i 和 S_{i+1} 分别为第 i 个和第 $i+1$ 个圆锥体侧面积; $S_{n,n+1}$ 为第 n 个与第 $n+1$ 个圆锥体侧面积之差, 即第 n 个滑块侧面积.

1.3.7 隧道掌子面被动破坏极限支护力计算

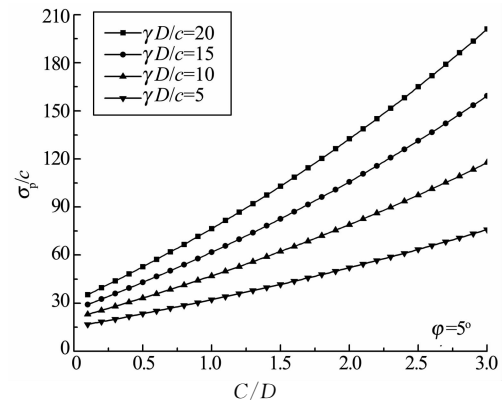
当机动许可速度场满足位移边界条件时, 根据外力功率与内部耗散功率相等原则, 即 $P_\gamma + P_\sigma + P_p = P_c$, 得到纵向地表倾斜隧道掌子面三维被动破坏极限支护力目标函数为:

$$\sigma_p = \frac{P_c - P_\gamma - P_\sigma}{A_1 \cdot v_1 \cdot \sin(\beta_1 - \varphi)}. \quad (38)$$

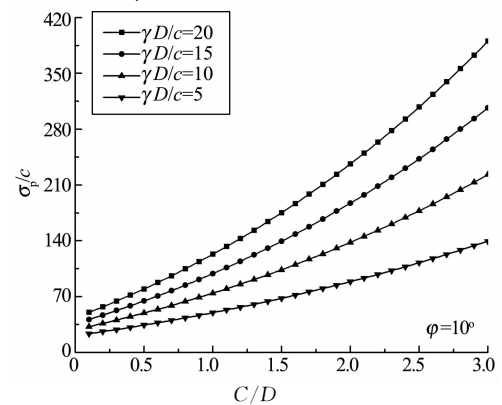
2 浅埋隧道倾斜地表及掘进深度条件下掌子面三维被动破坏无量纲参数分析

下面分析超负荷比 C/D , 无量纲参数 $\gamma D/c$, 内摩擦角 φ , 无量纲参数 σ_s/c , 地表倾斜角度 δ 和无量纲参数 L/C 对浅埋隧道掌子面三维被动稳定性影响规律.

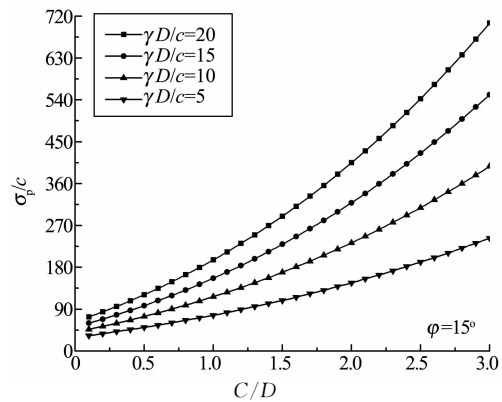
1) 图 6 是内摩擦角 $\varphi = 5^\circ \sim 20^\circ$ 时, 无量纲参数 σ_p/c 随超负荷比 $C/D = 0.1 \sim 3.0$ 时的变化曲线. 其他参数取值情况为: $\gamma D/c = 5, 10, 15, 20$; $\sigma_s/c = 2$, $\delta = 10^\circ$, $L/D = 1$.



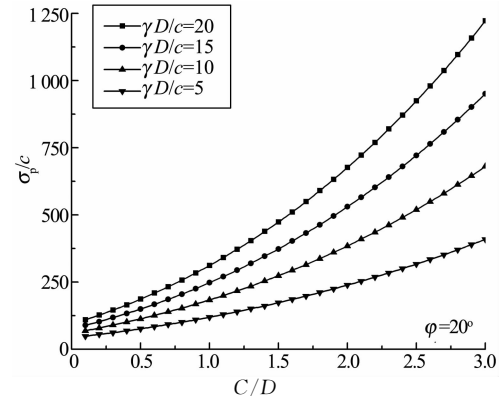
(a) $\varphi = 5^\circ$ 时 σ_p/c 随 C/D 变化曲线



(b) $\varphi = 10^\circ$ 时 σ_p/c 随 C/D 变化曲线



(c) $\varphi = 15^\circ$ 时 σ_p/c 随 C/D 变化曲线



(d) $\varphi = 20^\circ$ 时 σ_p/c 随 C/D 变化曲线

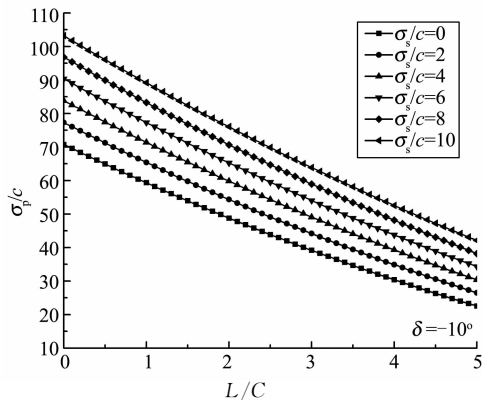
图6 内摩擦角 $\varphi = 5^\circ \sim 20^\circ$ 时 σ_p/c 随超负荷比 C/D 变化曲线

Fig.6 Change curves of σ_p/c with change of C/D as φ from 5° to 20°

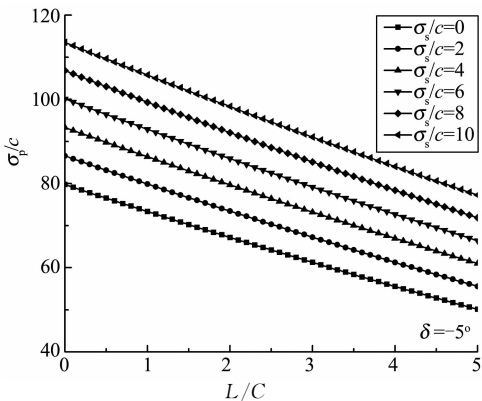
由图 6 可知,破坏模式及埋深范围内地层容重影响显著。 σ_p/c 随 C/D 的增大呈增大趋势,且曲线越来越陡.究其原因,在于随着 C/D 的增大,隧道埋深与断面直径之比增大,即隧道埋深相对于断面直径增加,此时土体破坏区域由下向上逐渐扩展,破坏土体体积不断增加,且由此产生的土压力非线性增加。 σ_p/c 随 $\gamma D/c$ 的增大而大致呈线性增大趋势,且 $\gamma D/c$ 影响愈加明显, σ_p/c 增幅越来越大.原因在于 C/D 为定值时,隧道埋深与断面直径之比一定,即隧道埋深相对于断面直径不变,破坏土体体积相对不变,此时土体压力与 $\gamma D/c$ 大致呈线性增大趋势.

2)图 7 是地表倾斜角度 $\delta = -10^\circ \sim 10^\circ$ 时,无量纲数 σ_p/c 随无量纲参数 $L/C = 0 \sim 5$ 时的变化曲线.其他参数取值情况为: $\sigma_s/c = 0, 2, 4, 6, 8, 10$; $\varphi = 10^\circ$, $\gamma D/c = 20$, $C/D = 1.0$.

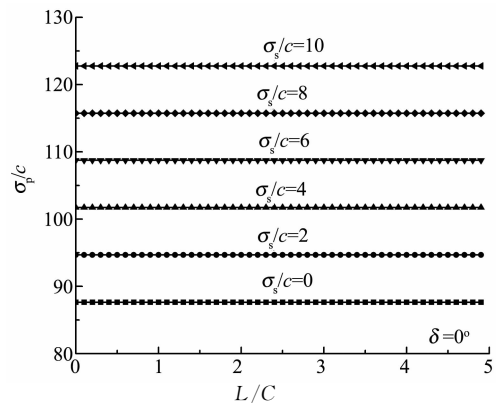
由图 7 可知,当 δ 位于 $-10^\circ \sim 0^\circ$ 之间,且 δ 一定时,随着 L/C 的增大,即掘进深度与隧道埋深之比增大,隧道埋深相对逐渐变小,破坏区域范围相应逐渐减小, σ_p/c 呈减小趋势.当 L/C 取定值时,随着 σ_s/c 的增大,地面超载逐渐增大,做功增加, σ_p/c 呈增大趋势.随着 δ 增大,地表逐渐趋向水平,随着 L/C 的增大曲线逐渐变缓.当 $\delta = 0^\circ$ 时,地表为水平状态,随着 L/C 的增大,隧道埋深不再相对变化,



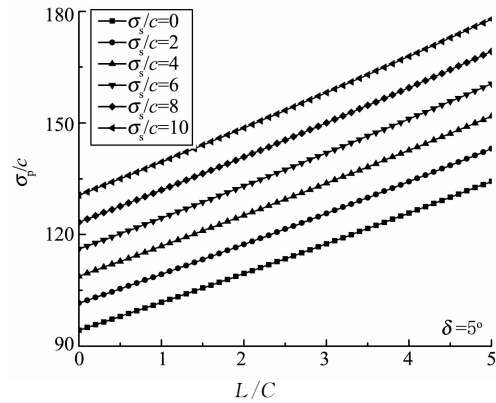
(a) $\delta = -10^\circ$ 时 σ_p/c 随 L/C 变化曲线



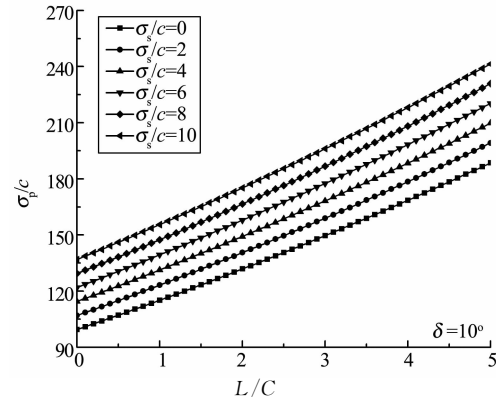
(b) $\delta = -5^\circ$ 时 σ_p/c 随 L/C 变化曲线



(c) $\delta = 0^\circ$ 时 σ_p/c 随 L/C 变化曲线



(d) $\delta = 5^\circ$ 时 σ_p/c 随 L/C 变化曲线



(e) $\delta = 10^\circ$ 时 σ_p/c 随 L/C 变化曲线

图 7 地表倾斜角度 $\delta = -10^\circ \sim 10^\circ$ 时无量纲数 σ_p/c 随无量纲参数 L/C 的变化曲线
Fig.7 Change curves of σ_p/c with change of L/C as δ from -10° to 10°

破坏区域范围不再变化,所以支护压力不变,曲线变为水平直线(如图 7(c)所示).同理,当 δ 位于 $0^\circ \sim 10^\circ$ 之间,且 δ 一定时,随着 L/C 的增大,破坏区域范围相应增大, σ_p/c 呈增大趋势;随着 σ_s/c 的增大, σ_p/c 呈增大趋势.

3)图 8 是内摩擦角 $\varphi = 5^\circ \sim 20^\circ$ 时,无量纲数 σ_p/c 随地表倾斜角度 $\delta = -10^\circ \sim 10^\circ$ 时的变化曲线.其他参数取值情况为: $\gamma D/c = 5, 10, 15, 20$; $\sigma_s/c = 2$, $L = 10$, $C/D = 1$.

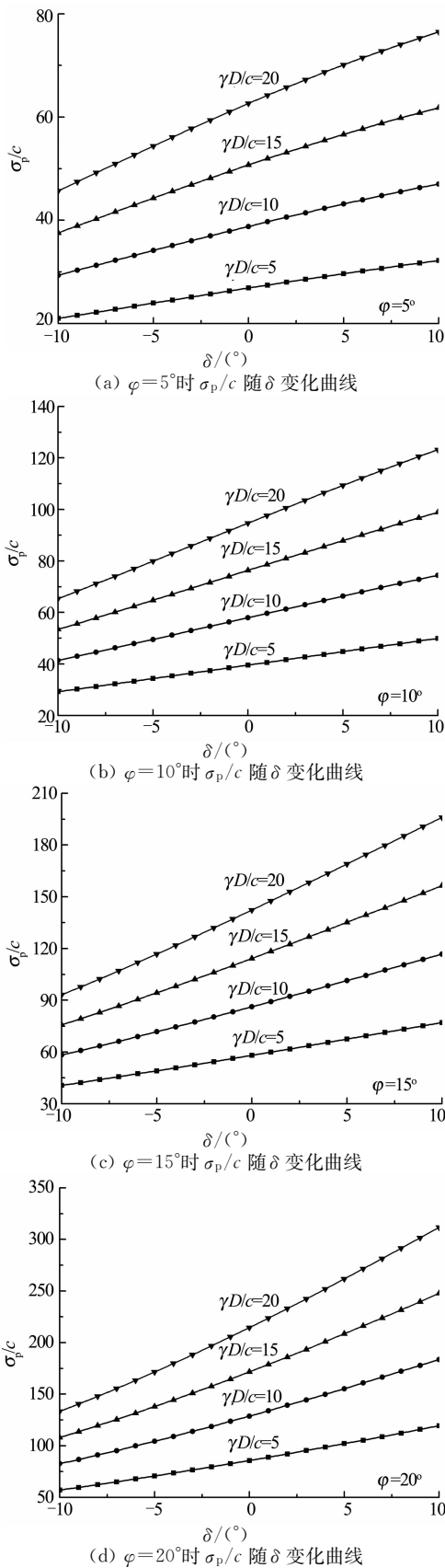


图8 内摩擦角 $\varphi=5^\circ\sim 20^\circ$ 时无量纲数 σ_p/c 随倾斜角度 δ 的变化曲线
Fig.8 Change curves of σ_p/c with change of δ as φ from 5° to 20°

由图8可知,当 φ 一定时,随着 δ 的增大,隧道埋深逐渐增大,破坏区域相应增大, σ_p/c 呈增大趋势;随着 $\gamma D/c$ 的增大, σ_p/c 大致呈线性增大.这是由于其他参数取定值时,隧道上方土体确定,土体压力与 $\gamma D/c$ 线性相关.随着内摩擦角 φ 的增大,由于机动容许速度场与破坏区域的变化,曲线相应地变陡.

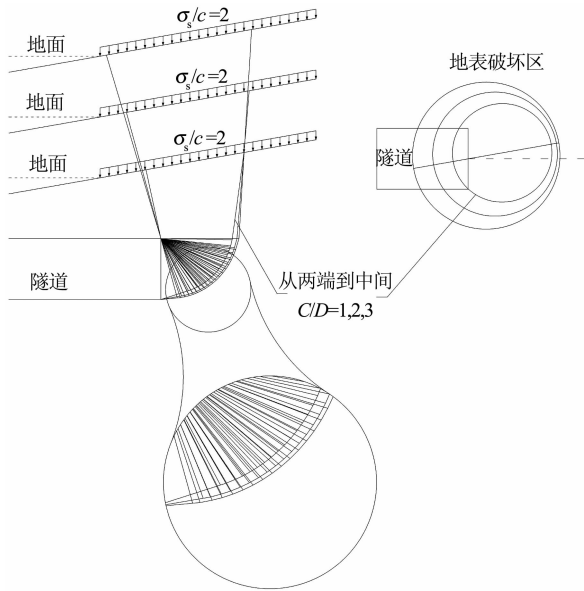
3 浅埋隧道倾斜地表及掘进深度条件下三维掌子面被动破坏模式分析

下面分析超负荷比 C/D ,无量纲参数 $\gamma D/c$,内摩擦角 φ ,无量纲参数 σ_s/c ,地表倾斜角度 δ 和无量纲参数 L/C 对隧道掌子面被动破坏模式影响规律.参数取值情况见表1.表中6种情况的被动破坏模式图分别如图9(a)~(f)所示.

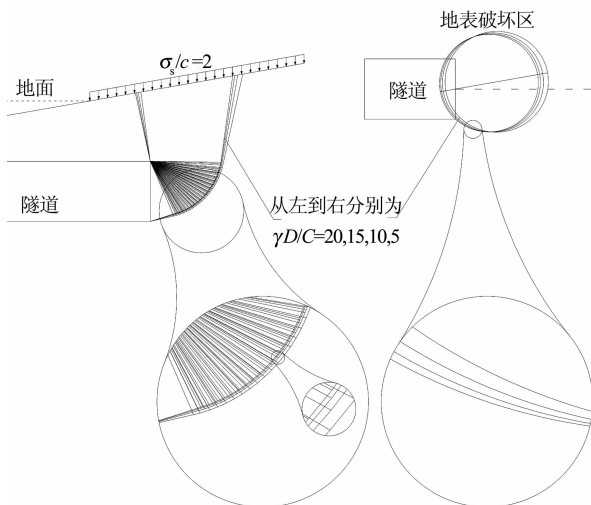
由图9可知,内摩擦角 φ 和地表倾斜角度 δ 的变化对机动容许速度场影响较为明显.地表倾斜角度 δ 的变化范围内地层容重影响较为明显,地表倾斜角度 $+\delta$ 和 $-\delta$ 对掌子面的破坏起到诱发和阻止的作用,对程序的优化起到很好的约束作用.且随着超负荷比 C/D 和无量纲参数 L/C 的增大,埋深范围内地层容重影响显著,同时考虑破坏模式本身及速度相容条件,内摩擦角 φ ,地表倾斜角度 δ ,超负荷比 C/D 和无量纲参数 L/C 对被动破坏模式影响显著.根据前面无量纲参数 $\gamma D/c$ 和无量纲参数 σ_s/c 对被动破坏极限支护力的影响规律及现象分析,无量纲参数 $\gamma D/c$ 和无量纲参数 σ_s/c 对被动破坏模式影响较小.

表1 图9计算参数
Tab.1 Calculation parameters of Fig. 9

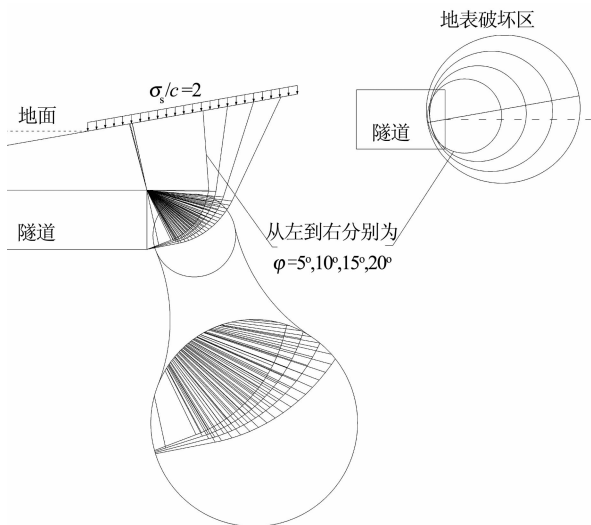
图片编号	C/D	$\varphi / (^\circ)$	$\gamma D/c$	σ_s/c	$\delta / (^\circ)$	L/C
图9(a)	1.0, 2.0, 3.0	10	20	2	10	1
图9(b)	1.0	10	5, 10, 15, 20	2	10	1
图9(c)	1.0	5, 10, 15, 20	20	2	10	1
图9(d)	1.0	10	20	0.4, 10	10	1
图9(e)	1.0	10	20	2	-10, 0, 10	1
图9(f)	1.0	10	20	2	10	1, 2, 3



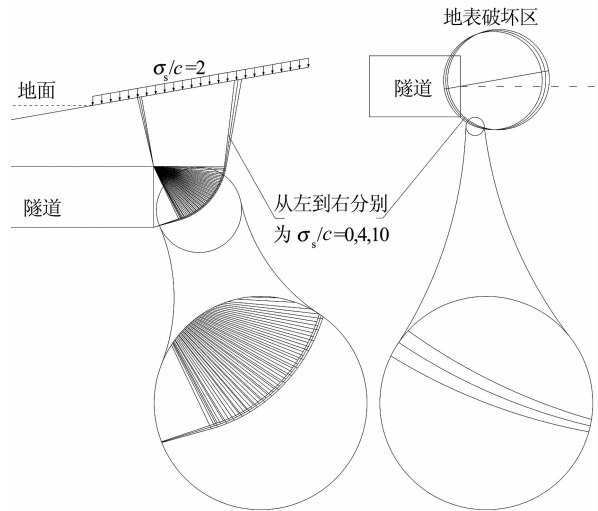
(a) $C/D=1.0\sim 3.0$ 时圆锥体滑动块被动破坏模式图



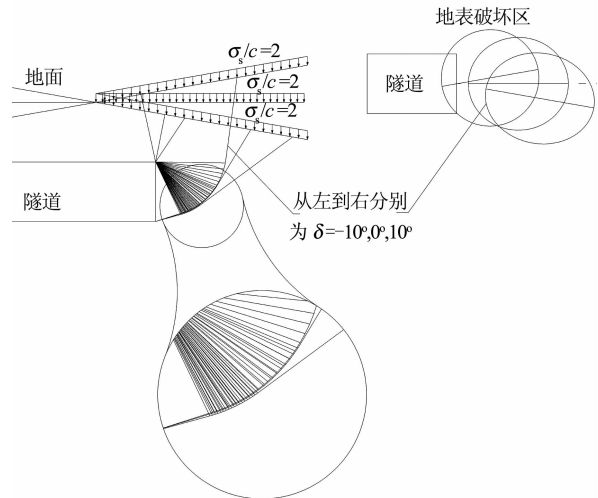
(b) $\gamma D/c=5\sim 20$ 时圆锥体滑动块被动破坏模式图



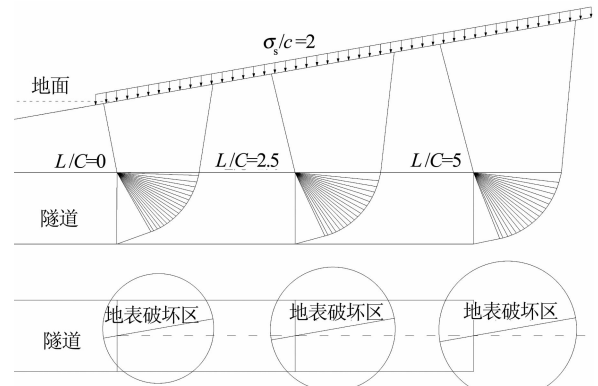
(c) $\varphi=5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时圆锥体滑动块被动破坏模式图



(d) $\sigma_s/c=0\sim 10$ 时圆锥体滑动块被动破坏模式图



(e) $\delta=-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 时圆锥体滑动块被动破坏模式图



(f) $L/C=0\sim 5$ 时圆锥体滑动块被动破坏模式图

图 9 各参数影响下圆锥体滑动块被动破坏模式图

Fig.9 Passive failure mode of elliptical vertebral sliders under the different parameters

4 结 论

通过探究无量纲参数对浅埋隧道掌子面被动破坏极限支护力及破坏模式的影响规律,获得如下结论:

1)本文较好地考虑了地表倾斜角度为正、为负及掘进深度对浅埋隧道掌子面三维被动稳定性的影响规律,使破坏机制能够更加细致地刻画真实情况下掌子面三维被动破坏形态.

2)由于机动容许速度场与破坏区域的变化以及破坏模式与埋深范围内地层容重的影响,无量纲数 σ_p/c 与超负荷比 C/D 、倾斜角度 δ 及内摩擦角 φ 呈非线性变化,而与无量纲参数 $\gamma D/c$,无量纲参数 σ_s/c 及无量纲参数 L/C 呈线性变化.

3)内摩擦角 φ ,地表倾斜角度 δ ,超负荷比 C/D 和无量纲参数 L/C 对被动破坏模式影响显著,而无量纲参数 $\gamma D/c$ 和无量纲参数 σ_s/c 对被动破坏模式影响较小.

参考文献

- [1] LECA E, DORMIEUX L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material [J]. *Geotechnique*, 1990, 40(4): 581—606.
- [2] SOUBRA A H, DIAS D, EMERIAULT F, *et al.* Three-dimensional face stability analysis of circular tunnels by a kinematical approach [J]. *Geotechnique*, 2008, 30(5): 894—901.
- [3] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H, *et al.* Probabilistic analysis and design of circular tunnels against face stability [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2009, 9(6): 237—249.
- [4] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H, *et al.* Range of the safe retaining pressures of a pressurized tunnel face by a probabilistic approach [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(11): 1954—1967.
- [5] 刘志. 浅覆地铁盾构隧道地表隆起破坏模式与开挖面极限支护力研究[D]. 长沙:中南大学土木工程学院, 2012: 30—34.
LIU Zhi. Study of blow-out failure mechanism and limit supporting force on tunnel face in shallow metro tunnel [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Central South University, 2012: 30—34. (In Chinese)
- [6] 张箭, 杨峰, 刘志, 等. 浅覆盾构隧道开挖面挤出刚性锥体破坏模式极限分析[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(7): 1344—1349.
ZHANG Jian, YANG Feng, LIU Zhi, *et al.* Three-dimensional limit analysis of blow-out failure modes of shallow shield tunnels [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(7): 1344—1349. (In Chinese)
- [7] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H, *et al.* Rotational failure mechanisms for the face stability analysis of tunnels driven by a pressurized shield [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2011, 35(12): 1363—1388.
- [8] 康石磊, 杨峰, 张箭, 等. 基于强度折减和上限有限元的椭圆形毛洞隧道围岩稳定性分析[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2015, 42(9): 104—109.
KANG Shilei, YANG Feng, ZHANG Jian, *et al.* Finite element upper bound analysis of stability of unlined elliptical tunnel based on strength reduction method [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2015, 42(9): 104—109. (In Chinese)
- [9] 赵明华, 毛韬, 牛浩懿, 等. 上硬下软地层盾构隧道开挖面极限支护力分析[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2016, 43(1): 103—109.
ZHAO Minghua, MAO Tao, NIU Haoyi, *et al.* Analysis of limit supporting force of tunnel excavation face for shield machine in upper-hard lower-soft ground [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2016, 43(1): 103—109. (In Chinese)
- [10] MAIR R J. *Centrifugal modeling of tunnel construction in soft clay*[D]. London: Cambridge University, 1979.
- [11] MAIR R J, TAYLOR R N. Theme lecture: bored tunnelling in the urban environment[C]//*Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Rotterdam: International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1997: 2353—2385.
- [12] TAKEMURA J, KIMURA T, WONG S F. Undrained stability of two-dimensional unlined tunnels in soft soil [C]//*Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. Tokyo: Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu, 1990: 267—277.
- [13] SUBRIN D, WONG H. Tunnel face stability in frictional material: a new 3D failure mechanism [J]. *Comptes Rendus Mecanique*, 2002, 330: 513—519. (In French)
- [14] SUBRIN D, BRANQUE D, BERTHOZ N, *et al.* Kinematic 3D approaches to evaluate TBM face stability: comparison with experimental laboratory observations[C]//*Proceedings of the 2nd International Conference on Computational Methods in Tunneling*. Bochum: Aedificatio Publishers, 2009: 801—808.
- [15] 严中. 倾斜地表条件下隧道开挖面稳定与地表塌陷控制研究[D]. 长沙:中南大学土木工程学院, 2011: 38—46.
YAN Zhong. Study on stability of tunnel face and control of surface subsidence under inclined ground surface [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Central South University, 2011: 38—46. (In Chinese)
- [16] 杨绪利. 圆锥截交线的形状及投影分析[J]. *东华大学学报:自然科学版*, 2005, 31(4): 76—78.
YANG Xuli. On the form and projection analysis of conic cut and hand in line [J]. *Journal of Donghua University: Natural Science*, 2005, 31(4): 76—78. (In Chinese)
- [17] 李得建, 赵炼恒, 杨峰, 等. 非线性破坏准则下浅埋隧道掌子面三维被动稳定性能耗分析改进方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(4): 743—752.
LI Dejian, ZHAO Lianheng, YANG Feng, *et al.* Three-dimensional stability analysis of passive failure on shallow tunnel face based on the nonlinear failure criterion [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(4): 743—752. (In Chinese)