

考虑循环进尺的隧道掌子面稳定性上限分析

李龙喜¹, 蒋建荣¹, 王树英², 江锡山¹, 杨峰^{2*}, 贾英凯¹

(1. 中交第三航务工程局有限公司 南京分公司, 江苏 南京 210011; 2. 中南大学 土木工程学院)

摘要:浅埋隧道循环进尺长度对掌子面稳定性有较大影响, 该文利用刚体平动运动单元上限有限元方法及程序对此开展计算分析, 获得了循环进尺长度 L 、隧道高度 D 、隧道埋深 H 、围岩内摩擦角 φ 与剪胀角 ψ 等综合因素影响下的掌子面稳定系数 N_{cr} 上限解图表, 揭示了临界状态下有效间断线网破坏模式特征及其演变规律。研究表明: ① 循环进尺长度 L 对稳定系数 N_{cr} 及破坏形态影响显著: N_{cr} 随着 L/D 增加基本呈线性减小, 随 φ 增加而线性增加; H/D 增加使得 N_{cr} 增加但临界重度 γ_{cr} 有所减小, 隧道上下方沉区与交错滑移线构成的扇形区域范围增加; ② 当 φ 较小时, 隧道埋深 H 增加使得破坏范围有所增加, 而当 φ 较大时, “土拱效应”将破坏区域限制在掌子面与拱顶未支护段附近, 速度间断线更为集中。

关键词:隧道掌子面; 循环进尺; 上限有限元; 稳定系数; 破坏模式

对于浅埋钻爆法施工隧道工程, 初期支护施作稍滞后于掌子面。为发挥围岩自承能力、保证隧道稳定、方便施工进度, 开挖过程需选择合适的循环进尺。进尺较小时工效较低, 而进尺过大易降低掌子面稳定性甚至引起局部坍塌。考虑地质条件、施工工艺等因素, 探讨隧道循环进尺对施工期间隧道稳定性的影响, 是值得研究的问题。当前, 借助模型试验、理论分析、数值模拟、现场监测等方法, 已有不少文献报道。

在理论计算方面, 岩土极限分析方法是研究隧道掌子面稳定性的有效手段。现有研究多假定支护结构紧跟隧道掌子面且具有足够的刚度和承载力。而考虑循环进尺中的未支护段对于隧道稳定性影响的报道较少, 其中梁桥等提出了隧道掌子面与循环进尺相结合的两种破坏模式, 采用极限平衡法与上限法推导了循环进尺计算公式。该文利用刚体平动运动单元上限有限元, 在文献[19]研究工作的基础上, 开展考虑循环进尺条件下的隧道掌子面稳定性分析, 以期获取极限状态下稳定系数上限解图表和破坏形态特征及其演变规律, 为现场工程应用提供理论支持。

1 考虑循环进尺掌子面稳定性问题

隧道施工过程中掌子面底部受到核心土约束, 稳定性稍好, 分析时将底部简化为刚性约束。隧道循环进尺长度设为 L , 如图 1 所示, 其稳定性分析简化为二维平

面应变模型。这种简化仍可获得破坏演变规律等信息, 对于隧道断面跨度大的情况(如连拱隧道等)更为合适。

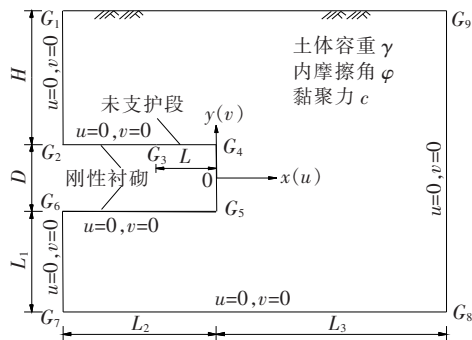


图1 考虑循环进尺的隧道掌子面稳定性分析模型

如图 1 所示, 隧道高度为 D , 埋深为 H , 土体重度为 γ , 内摩擦角为 φ , 黏聚力为 c 。假定隧道掌子面失稳破坏主要由围岩自重作用引发, 且未作用支护力。对于循环进尺条件下的掌子面稳定性指标, 参考 Bro-ms 等提出的稳定系数 $N = (\sigma_s - \gamma H - \sigma_T) / S_u$ 公式, 不考虑 σ_s 和 σ_T , 引入无量纲稳定系数 $N_{cr} = \gamma_{cr} \times H / c$ 评价不同循环进尺条件下掌子面的稳定性。

2 循环进尺稳定性上限有限元分析

2.1 刚体平动运动单元上限有限元计算模型

图 1 中, 坐标原点取为掌子面中点, x 和 y 正方向

收稿日期: 2020-09-26(修改稿)

作者简介: 李龙喜, 男, 大学本科, 高级工程师, E-mail: 15851898867@139.com

* 通信作者: 杨峰, 男, 副教授, E-mail: yf5754@126.com

分别为向右和向上,极限状态下的塑流速度正方向与此一致。

模型只承受围岩自重荷载,施加体力约束如下:

$$\sum_{i=1}^{n_e} A_i v_i = -1; -A_i < 0 (i=1, \cdots, n_e) \tag{1}$$

式中: A_i 为模型中第 i 个单元的面积; v_i 为第 i 个单元的节点竖向速度。

考虑采用刚体平动运动单元,依上限定理,将间断线耗散能最小化,可得到上限有限元非线性规划目标函数,即为临界重度 γ_{cr} :

$$\gamma_{cr} = \sum_{i=1}^{n_d} P_{d,i} = c \sum_{i=1}^{n_d} \xi'_i \tag{2}$$

式中: $P_{d,i}$ 为第 i 条速度间断线上耗散能; n_d 为间断线总数;黏聚力 c 在计算中取单位值。

对速度间断线施加约束如下:

$$-\xi''_i - \xi'_i \leq 0; \xi''_i - \xi'_i \leq 0; (i=1, \cdots, n_d) \tag{3}$$

式中: ξ'_i, ξ''_i 为第 i 条速度间断线的过程变量。

除地表、隧道掌子面和未支护段外,模型其余边界均施加速度约束 $u_i = 0, v_i = 0$ 。

模型边界还需施加几何约束以保证节点的移动限制范围:

$$\begin{aligned} &[G_1 G_2: x_j = -L_2, D/2 \leq y_j \leq H + D/2; \\ &\quad (j=1, \cdots, n_{g1}) \\ &G_2 G_3: -L_2 \leq x_j \leq -L, y_j = D/2; (j=1, \cdots, n_{g2}) \\ &G_3 G_4: -L \leq x_j \leq 0, y_j = D/2; (j=1, \cdots, n_{g3}) \\ &G_4 G_5: x_j = 0, -D/2 \leq y_j \leq D/2; (j=1, \cdots, n_{g4}) \\ &G_5 G_6: -L_2 \leq x_j \leq 0, y_j = -D/2; (j=1, \cdots, n_{g5}) \\ &\{G_6 G_7: x_j = -L_2, -L_1 - D/2 \leq y_j \leq -D/2; \\ &\quad (j=1, \cdots, n_{g6}) \\ &G_7 G_8: -L_2 \leq x_j \leq L_3, y_j = -L_1 - D/2; \\ &\quad (j=1, \cdots, n_{g7}) \\ &G_8 G_9: x_j = L_3, -L_1 - D/2 \leq y_j \leq H + D/2; \\ &\quad (j=1, \cdots, n_{g8}) \\ &[G_1 G_9: -L_2 \leq x_j \leq L_3, y_j = H + D/2; (j=1, \cdots, n_{g9}) \end{aligned} \tag{4}$$

式(4)中变量含义见文献[19, 21];求解非线性规划的过程从略。

2.2 参数选取

计算分析考虑的隧道埋深、循环进尺、内摩擦角等参数取值见表 1。

为考虑剪胀效应,沿用文献[22]方法,将剪胀角 ψ 代入式(5),得到内摩擦角 φ 和黏聚力 c 对应的等效参

表 1 隧道几何参数及土体参数

H/D	L/D	$\varphi/(^\circ)$	ψ/φ
1, 2, 3, 4, 5	0.2, 0.4, 0.6,	15, 20, 25,	0.1
	0.8, 1.0	30, 35	

注:表中 ψ 为剪胀角。

数 φ^* 和 c^* :

$$\begin{cases} \tan \varphi^* = \tan \varphi \frac{\cos \psi \cos \varphi}{(1 - \sin \psi \sin \varphi)} \\ c^* = c \frac{\cos \psi \cos \varphi}{(1 - \sin \psi \sin \varphi)} \end{cases} \tag{5}$$

具体分析中,考虑 $\psi/\varphi=1$ 和 $\psi/\varphi=0$ 两种情况。

3 稳定系数 N_{cr} 分析

采用刚体平动运动单元上限有限元程序,按表 1 参数的正交组合进行系列计算分析,得到稳定系数 N_{cr} 结果如表 2 所示。由表 2 可以看出:① N_{cr} 随着 L/D 增加而减小,即隧道掌子面后方存在未支护段时自稳能力降低,说明对于软弱地层隧道开挖后及时支护的重要性;② H/D 增加稳定系数 N_{cr} 线性增加,但临界重度 γ_{cr} 实际呈一定的减小趋势,表明浅埋隧道覆盖层厚度增加与未支护段的存在会削弱隧道稳定性;③ 随着 φ 增加, N_{cr} 将增大,因 φ 值较大时“土拱效应”使得破坏范围减小,掌子面稳定性较好,值得注意的是, L/D 较大时(如 $L/D>0.6$), N_{cr} 增加的幅度较小,表明循环进尺长度仍是隧道失稳破坏的主控因素。

上述分析针对 $\psi/\varphi=1$ 的情况,而 $\psi/\varphi=0$ 时相应规律类似,因为等效参数 φ^* 和 c^* 相当于对围岩强度参数 φ 和 c 作了适当折减。由表 2 可以看出, $\psi/\varphi=0$ 在 φ 较大时($\varphi \geq 25^\circ$) N_{cr} 增长明显放缓,即 φ 越大,考虑剪胀效应对结果影响越明显。如 $\varphi=35^\circ, H/D=5, L/D=0.6$ 时, $\psi/\varphi=1$ 与 $\psi/\varphi=0$ 对应结果相差达 30.12%。当 $\varphi, H/D$ 均较小时,计算结果差异不大,如 $\varphi=15^\circ, H/D=1, L/D=0.6$ 时, N_{cr} 结果相差 4.95%。这表明 φ 较大且边界约束较强时,按相关关联流动法则将高估剪胀效应。从保守角度考虑可选取 $\psi/\varphi=0$ 计算稳定系数 N_{cr} 值。

4 破坏模式讨论

4.1 掌子面破坏模式形态特征

除稳定系数 N_{cr} 外,上限有限元可获得隧道掌子

表 2 掌子面稳定系数 N_{cr} 计算结果

$\varphi/$ (°)	H/D	不同 L/D 时的 N_{cr}				
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
15	1	4.28 (4.06)	3.72 (3.53)	3.23 (3.07)	2.83 (2.70)	2.50 (2.39)
	2	7.59 (7.16)	6.60(6.25)	5.77 (5.47)	5.08 (4.82)	4.5 (4.28)
	3	10.42 (9.79)	9.06 (8.54)	7.94 (7.50)	7.02 (6.65)	6.26 (5.94)
	4	12.97 (12.15)	11.26 (10.57)	9.87 (9.30)	8.76 (8.27)	7.84 (7.42)
	5	15.34 (14.32)	13.30 (12.45)	11.67 (10.96)	10.37 (9.76)	9.30 (8.78)
20	1	5.14 (4.64)	4.41 (3.99)	3.76 (3.42)	3.23 (2.94)	2.80 (2.57)
	2	9.58 (8.55)	8.19 (7.34)	7.01 (6.31)	6.04 (5.46)	5.25 (4.77)
	3	13.73 (12.14)	11.68 (10.37)	9.98 (8.91)	8.62 (7.74)	7.53 (6.79)
	4	17.73 (15.55)	15.01 (13.22)	12.80 (11.35)	11.06 (9.86)	9.68 (8.68)
	5	21.64 (18.86)	18.25 (15.99)	15.54 (13.70)	13.43 (11.91)	11.76 (10.49)
25	1	6.17 (5.18)	5.26 (4.43)	4.41 (3.74)	3.70 (3.17)	3.14 (2.71)
	2	11.99 (9.93)	10.16 (8.42)	8.51 (7.12)	7.17 (6.06)	6.11 (5.21)
	3	17.72 (14.50)	14.95 (12.25)	12.48 (10.32)	10.51 (8.87)	8.97 (7.58)
	4	23.44 (19.02)	19.70 (16.00)	16.41 (13.45)	13.80 (11.44)	11.78 (9.87)
	5	29.22 (23.67)	24.43 (19.71)	20.34 (16.55)	17.09 (14.06)	14.59 (12.13)
30	1	7.33 (5.65)	6.26 (4.81)	5.14 (4.01)	4.20 (3.34)	3.47 (2.81)
	2	14.56 (11.08)	12.39 (9.38)	10.18 (7.82)	8.34 (6.53)	6.94 (5.52)
	3	21.82 (16.48)	18.54 (13.91)	15.21 (11.54)	12.44 (9.63)	10.36 (8.17)
	4	29.13 (21.92)	24.66 (18.42)	20.23 (15.26)	16.54 (12.72)	13.77 (10.78)
	5	36.42 (27.34)	30.82 (22.91)	25.28 (18.98)	20.65 (15.81)	17.19 (13.39)
35	1	8.57 (5.97)	7.37 (5.10)	5.89 (4.19)	4.63 (3.42)	3.74 (2.83)
	2	17.14 (11.86)	14.73 (10.09)	11.79 (8.30)	9.29 (6.80)	7.54 (5.66)
	3	25.72 (17.76)	22.09 (15.09)	17.66 (12.39)	13.95 (10.14)	11.32 (8.45)
	4	34.32 (23.69)	29.44 (20.07)	23.56 (16.47)	18.58 (13.48)	15.08 (11.23)
	5	42.85 (29.66)	36.85 (25.07)	29.45 (20.58)	23.22 (16.83)	18.85 (14.02)

注:括号内数据表示 $\psi/\varphi=0$ 对应的结果。

面临失稳破坏模式。选取 $H/D=3$ 、 $L/D=0.4$ 、 $\varphi=25^\circ$ 时,考虑循环进尺对应的掌子面破坏模式如图 2 所示。

图 2(a)为单元速度矢量值云图及有效间断线网,横坐标 x/D 表示模型中某点至隧道开挖面水平距离 x 与隧道直径 D 的比值,纵坐标 y/D 表示模型中某点至隧道中线竖向距离 y 与隧道直径 D 的比值;速度矢量值进行了归一化处理,即破坏范围最大的速度矢量值为单位值。由图 2(a)可以看出:隧道掌子面及未支护段上方局部区域速度值较大。图中白线示意了有效

间断线网,用以表征岩土塑性破坏区域的形态和范围。图 2(b)为模型速度场分布矢量图(同样归一化处理),每条线段反映了对应的有效间断线两侧单元相对速度,与图 2(a)有效间断线一一对应。图 2(b)中原点 $(0,0)$ 与任意交叉点的连线代表图 2(a)中某一对应单元的速度矢量。图 3(b)横坐标 u/V 表示单元速度的水平分量值 u 与合速度 V 的比值,纵坐标 v/V 表示单元速度的竖向分量值 v 与合速度 V 的比值,如原点与最下方交叉点的连线,对应于未支护段正上方三角形刚性块体的速度,反映此处速度值较大且方向接近竖向。

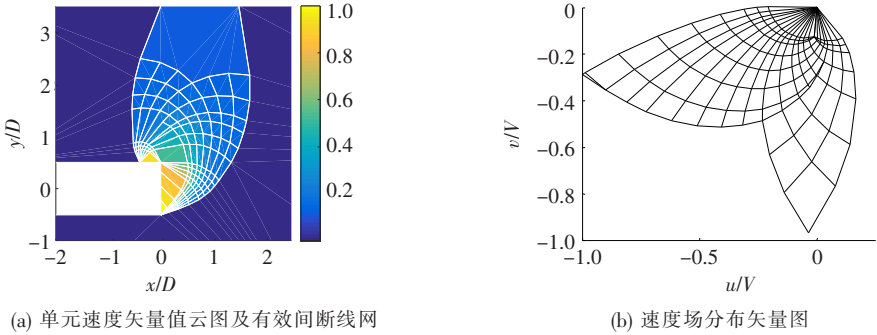


图 2 考虑循环进尺的隧道掌子面破坏模式($H/D=3, L/D=0.4, \varphi=15^\circ, N_{cr}=9.06$)

4.2 滑移线网破坏模式演化规律

循环进尺比 L/D 、埋深比 H/D 、内摩擦角 φ 等因素对掌子面破坏模式的形式和尺度有不小的影响,下面讨论其演变规律。

当 $H/D=2, \varphi=20^\circ$ 时,不同 L/D 对应的掌子面失稳破坏模式分别如图 3(a)~(c) 所示。由图 3(a)~(c) 可知: L/D 对破坏模式影响明显。掌子面后方存在未支护段 L/D 时,对应破坏模式主要由掌子面前方和未支护段上方楔形块体、靠近地表的刚性下沉区以及交错滑移线构成的扇形区组成,破坏范围延伸至地表。随着 L/D 增加,未支护段上方扇形塑性区增加,稳定系数 N_{cr} 降低。图 3(d) 为 $\psi/\varphi=0$ 对应的破坏形态,与图 3(c) 比照形态差异不大,稳定系数 N_{cr} 降低了 9.14%。

图 4(a)~(c) 为 $L/D=0.8, H/D=2$ 时,不同 φ 对应的掌子面破坏模式。由图 4(a)~(c) 可以看出: 随着 φ 增加,“土拱效应”将破坏区域限制在隧道掌子面与拱顶未支护段附近,地表破坏宽度减小, N_{cr} 逐渐增大。图 4(d) 为 $\psi/\varphi=0$ 对应的破坏形态,与图 4(c) 差异不大,但稳定系数 N_{cr} 降低达 26.8%。

图 5(a)~(c) 为 $L/D=0.6, \varphi=35^\circ$ 时,不同 H/D 对应的掌子面破坏模式。此时隧道失稳破坏形态大体一致,随着 H/D 增加,围岩破坏范围略有增加,速度间断线更为集中,稳定系数 N_{cr} 增大但临界重度 γ_{cr} 有所减小,表明埋深增加不利于浅埋隧道掌子面维持稳定。图 5(d) 为 $\psi/\varphi=0$ 对应的破坏形态,对比图 5(c) 可知, φ 较大时 $\psi/\varphi=0$ 对应的破坏范围有所增加,且与 $\psi/\varphi=1$ 的稳定系数 N_{cr} 数值相比减小了 29.84%。

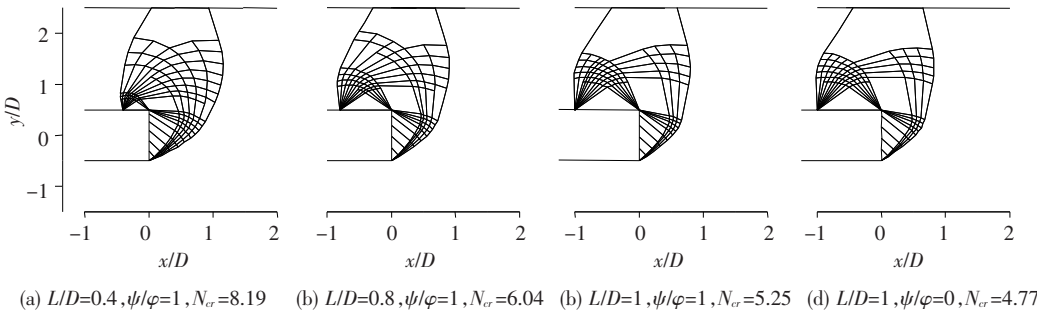


图 3 考虑循环进尺的隧道掌子面滑移线网破坏模式($\varphi=20^\circ, H/D=2$)

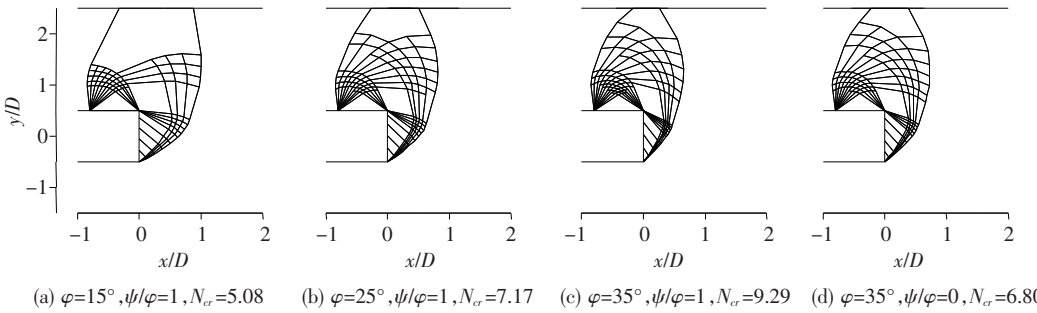


图 4 考虑循环进尺的隧道掌子面滑移线网破坏模式($L/D=0.8, H/D=2$)

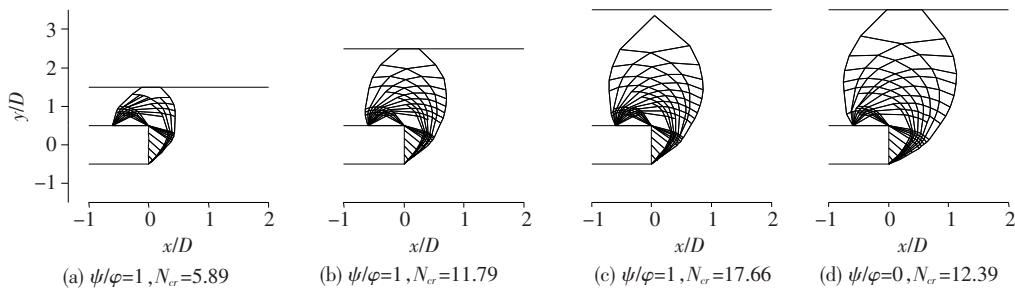


图5 考虑循环进尺的隧道掌子面滑移线网破坏模式($L/D=0.6$, $\phi=35^\circ$)

5 结论

(1) 隧道循环进尺长度 L 对掌子面稳定性及破坏模式有较大影响。 N_{cr} 随着 L/D 增加而减小,随着 φ 增加而增加; H/D 增加将使 N_{cr} 增加但临界重度 γ_{cr} 有所减小,隧道顶部未支护段上方形成刚性下沉块体与交错滑移线构成的扇形区,破坏范围明显增加。

(2) 当 φ 较小时,隧道埋深 H/D 增加,破坏区域的范围有所增加。而当 φ 较大时,“土拱效应”将破坏区域限制在隧道工作面与拱顶未支护段附近,速度间断线更为集中。 φ 越大,与剪胀角 $\psi=0^\circ$ 时对应的 N_{cr} 上限解差异越明显,不过破坏模式的形态差异不大。

参考文献:

- [1] LEE Y Z, SCHUBERT W. Determination of the Round Length for Tunnel Excavation in Weak Rock[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23(3): 221-231.
- [2] 惠丽萍,王良. 浅埋暗挖土质隧道循环进尺的理论探讨[J]. 铁道标准设计, 1995(11).
- [3] 王志达,龚晓南. 浅埋暗挖人行地道循环进尺的计算方法[J]. 岩土力学, 2010(8).
- [4] 李达,李永生,罗占夫. 复杂条件下隧道开挖循环进尺优化方法研究[J]. 岩土力学, 2013(2).
- [5] 颜杜民,何平,陈峥,等. IV级围岩隧道两台阶法循环进尺研究[J]. 铁道标准设计, 2016(9).
- [6] 李波,吴立,左清军,等. 复杂地质条件下特大断面隧道施工工法及其循环进尺参数的优化研究[J]. 安全与环境工程, 2014(4).
- [7] 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).
- [8] 凌同华,周凯,谢伟华,等. 深埋隧道断层段循环进尺优化模拟研究[J]. 交通科学与工程, 2016(2).
- [9] 刁心宏,朱陈,于洋. 不同开挖方案下隧道围岩稳定性及

变性特征分析[J]. 华东交通大学学报, 2017(1).

- [10] 许金华,何川,周艺,等. 基于台阶法的极破碎软岩隧道循环进尺优化研究[J]. 水文地质工程地质, 2013(2).
- [11] 郭骏伟. 炭质页岩隧道台阶法施工开挖进尺优化研究[J]. 兰州工业学院学报, 2015(6).
- [12] AUGARDE C E, LYAMIN A V, SLOAN S W. Stability of an Undrained Plane Strain Heading Revisited [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(5): 419-430.
- [13] HUANGM Mao-song, SONG Chun-xia. Upper-Bound Stability Analysis of a Plane Strain Heading in Non-Homogeneous Clay[J]. Tunneling and Underground Space Technology In-Corporating Trenchless Technology Research, 2013, 38(9): 213-223.
- [14] 杨峰,阳军生,赵炼恒. 浅埋隧道工作面破坏模式与支护反力研究[J]. 岩土工程学报, 2010(2).
- [15] YANG Feng, ZHANG Jian, ZHAO Lian-heng, et al. Upper-Bound Finite Element Analysis of Stability of Tunnel Face Subjected to Surcharge Loading in Cohesive-Frictional Soil[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2016, 20(6): 2270-2279.
- [16] 梁桥,孙志彬,潘秋景,等. 基于极限平衡与上限法的隧道循环进尺分析[J]. 中国公路学报, 2016(4).
- [17] 梁桥,杨小礼,陈翔. 隧道循环进尺的极限平衡分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017(5).
- [18] 杨峰,赵炼恒,张箭,等. 基于刚体平动运动单元的上限有限元研究[J]. 岩土力学, 2014(6).
- [19] 孙雁军,阳军生,罗静静,等. 隧道工作面稳定性与滑移线网破坏模式研究[J]. 岩土工程学报, 2019(7).
- [20] BROMS BB, BENNERMARK H. Stability of Clay in Vertical Openings[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1967, 193: 71-94.
- [21] 孙雁军,阳军生,杨峰,等. 对向施工隧道贯通前开挖面稳定性上限有限元分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019(7).
- [22] DRESCHER A, DETOURNAY E. Limit Load in Translational Failure Mechanisms for Associative and Non-Associative Materials [J]. Géotechnique, 1993, 43(3): 443-456.