

DOI: 10.11779/CJGE201907024

# 隧道工作面稳定性与滑移线网破坏模式研究

孙雁军<sup>1,2</sup>, 阳军生<sup>1,3</sup>, 罗静静<sup>1</sup>, 郑响凑<sup>4</sup>, 杨 峰<sup>\*1,3</sup>

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南省高速公路建设开发有限公司, 湖南 长沙 410001;  
3. 重载铁路工程结构教育部重点实验室, 湖南 长沙 410075; 4. 代尔夫特理工大学土木工程和地球科学学院, 荷兰 代尔夫特)

**摘要:** 针对隧道工作面稳定性和破坏模式问题, 从保守角度将其假定为沿隧道纵向中线剖开的二维平面应变模型, 采用刚体平动运动单元上限有限元法(UBFEM-RTME)开展分析研究, 绘制了土体自重作用下地层临界失稳状态对应的隧道工作面稳定系数  $N_{cr}$  图表和有效间断线网(近似滑移线网)破坏模式, 探讨了埋深比  $H/D$ 、内摩擦角  $\varphi$  和剪胀角  $\psi$  等参数影响规律, 给出了  $N_{cr}$  与  $H/D$  和  $\varphi$  影响因素的拟合公式, 进一步揭示了有效间断线数目及位置分布等网格参数对计算精度的影响程度。研究表明 UBFEM-RTME 数值计算配合网格更新策略并保证合理充足的网格密度, 能提高  $N_{cr}$  上限解精度并捕获高密度有效间断线网破坏模式, 其分析结果可用于评价隧道工作面稳定性、揭示极限失稳破坏形态的主要特征, 为地层预加固方案制定等工作提供一定理论支撑。

**关键词:** 工作面稳定性; 上限有限元; 剪胀效应; 稳定系数; 破坏模式

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)07-1374-07

作者简介: 孙雁军(1974—), 男, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程方面的研究工作。E-mail: syj369058@163.com。

## Stability and mesh-like collapse mechanism of tunnel face

SUN Yan-jun<sup>1,2</sup>, YANG Jun-sheng<sup>1,3</sup>, LUO Jing-jing<sup>1</sup>, ZHENG Xiang-cou<sup>4</sup>, YANG Feng<sup>1,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Hunan Expressway Construction and Development Co., Ltd., Changsha 410001, China; 3. Key Laboratory of Engineering Structure of Heavy Railway, Ministry of Education, Changsha 410075, China; 4. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, Netherlands)

**Abstract:** The stability and collapse mechanism of tunnel faces are simplified conservatively to two-dimensional plane strain models along the longitudinal middle line of tunnel. Using the upper bound finite element method with rigid translatory moving element (UBFEM-RTME), a series of stability factors  $N_{cr}$  and collapse mechanisms displayed with active discontinuities are deduced. The influences of dimensionless buried depth ratio  $H/D$ , internal friction angle  $\varphi$  and dilatancy angle  $\psi$  on the variations of  $N_{cr}$  and mesh-like collapse mechanisms that are identical to the form of slip lines are discussed. A fitting formula of  $N_{cr}$  for the influence factors  $H/D$  and  $\varphi$  is deduced, and the effects of numbers and locations of active discontinuities are also investigated. This study illustrates that the UBFEM-RTME with combination of mesh adaptive updating strategies and reasonable and sufficient mesh density can improve the accuracy of the obtained  $N_{cr}$  values and the refinement of mesh-like collapse mechanism. The results reveal the main characteristics of the ultimate collapse mechanisms of tunnel faces, and they can provide theoretical supports for the stability evaluations of tunnel faces and pre-reinforcement scheme of soil strata.

**Key words:** stability of tunnel face; upper bound finite element method; dilatancy effect; stability factor; collapse mechanism

## 0 引言

隧道工作面稳定性和破坏模式课题是工程界、学界普遍关注的经典问题。国内外学者采用模型试验<sup>[1-2]</sup>、数值模拟<sup>[3-6]</sup>及理论分析<sup>[7-9]</sup>等手段对其进行了大量的研究。

在理论计算方面, 塑性极限分析方法逐渐成为研究隧道工作面稳定性和破坏模式的特色手段<sup>[10-22]</sup>。目前有不少文献报道, Davis 等<sup>[10]</sup>针对黏土不排水条件下浅埋隧道, 假定了 3 种不同破坏模式, 利用极限分析上、下限理论对隧道工作面失稳破坏进行分析;

Sloan 等<sup>[11]</sup>运用极限分析方法研究了不排水条件下隧道工作面稳定性和支护反力上下限值; Augarde 等<sup>[12]</sup>采用极限分析上下限有限元法和刚性块体上限法对均质和非均质黏土隧道工作面稳定性进行了研究; Klar 等<sup>[13]</sup>利用上限法建立了隧道工作面三维塑性破坏速度场和破坏模式; Huang 等<sup>[14]</sup>运用多刚性块体上限法研究了非均质黏土隧道工作面稳定性问题。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878669)

收稿日期: 2018-05-02

\*通讯作者 (E-mail: yf5754@126.com)

以上研究均考虑地层为纯黏性土且  $\varphi=0^\circ$ , 而针对砂土地层, Leca 等<sup>[15]</sup>构造了含刚性锥体滑块的破坏模式, Soubra<sup>[16]</sup>在此基础上将该破坏模式进行了改进; 国内方面, 杨峰等<sup>[17-18]</sup>构造了浅埋隧道工作面破坏模式以求解极限支护反力, 随后应用塑性变形单元和刚体平动运动单元上限有限元研究了地表超载作用下隧道工作面稳定性<sup>[19]</sup>; 阳军生等<sup>[20]</sup>应用六节点三角形单元以网格加密方式得到隧道工作面稳定性临界值上限解; 王金麒等<sup>[21]</sup>建立分层土体破坏模式并推导了浅埋隧道工作面极限支护压力。

上述浅埋隧道工作面稳定性理论与数值计算研究多侧重于极限支护反力的确定。在某些情况下, 工作面提供的支护反力很小, 此时, 评价土体自重作用下工作面稳定性并研究该临界失稳状态下的精细破坏模式变得更为重要。同时, 考虑极限状态下土体剪胀效应对稳定性的影响也是必要的。

基于此, 本文针对浅埋隧道工作面稳定性和失稳破坏模式问题, 采用刚体平动运动单元上限有限元法(UBFEM-RTME)开展大量计算分析。考虑土体剪胀效应的影响, 计算获取无量纲稳定系数图表和高密度有效间断线网(近似滑移线网)破坏模式及其演变规律, 进一步探讨有效间断线数目及位置分布对结果的影响。尽管本研究限于二维平面应变条件, 但从保守角度得到的结论仍可为隧道工作面稳定性评价、合理预加固方案的制定等提供一定理论支撑。

## 1 隧道工作面稳定性分析模型

### 1.1 问题描述与基本假定

浅埋隧道工作面稳定性实际上是复杂的三维问题。从保守角度出发, 将其简化为沿隧道纵向中心线剖切的二维平面应变问题(图 1), 仍可获得如破坏演变规律等诸多有益信息<sup>[14, 17-20]</sup>。

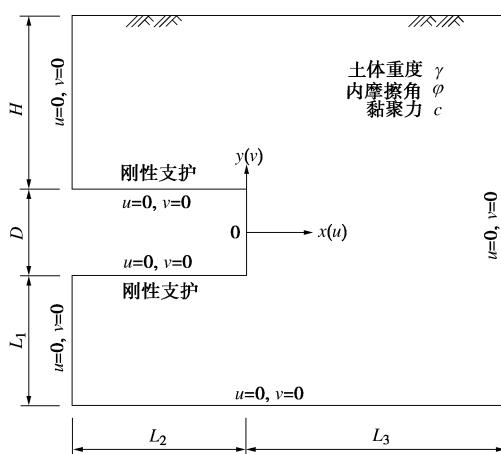


图 1 隧道工作面稳定性上限有限元分析模型

Fig. 1 Upper bound finite element model for stability analysis of tunnel faces

为使研究更具针对性, 进一步作出如下简化: ①隧道高度为  $D$ , 埋深为  $H$ , 地表为水平自由表面; ②地层为均质土体, 服从相关联流动法则的莫尔-库仑材料, 内摩擦角为  $\varphi$ , 黏聚力为  $c$ , 重度为  $\gamma$ ; ③隧道工作面为竖直自由表面, 其后方均为紧跟的刚性支护; ④隧道工作面仅在土体自重作用下发生失稳破坏, 不考虑地下水的作用。这些简化虽与实际工程存在差异, 但从理论计算方面, 系统开展隧道工作面稳定性特别是极限状态下破坏模式的研究仍是有意义的。

### 1.2 上限有限元分析模型

浅埋隧道工作面稳定性上限有限元分析模型如图 1 所示, 模型水平和竖直方向延伸范围分别取  $L_2+L_3$  和  $H+D+L_1$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  和  $L_3$  数值的确定与隧道埋深  $H$  相关, 旨在消除边界效应的影响。除隧道工作面和地表为自由面外, 模型其余边界均约束  $x$  和  $y$  方向的速度, 即  $u=0$ ,  $v=0$ 。模型的坐标原点取为工作面中点,  $x$  和  $y$  正方向分别为向右和向上, 速度正方向与此一致。

由于模型只承受地层自重荷载, 按重度增加的稳定性分析思路, 对模型施加自重体力约束如下:

$$\sum_{i=1}^{n_e} A_i v_i = -1, \quad -A_i < 0 \quad (i=1, 2, 3, \dots, n_e), \quad (1)$$

式中,  $A_i$  为单元  $i$  的面积, 需始终大于零,  $v_i$  为单元  $i$  的竖向速度分量,  $n_e$  为单元总数。

按上限定理, 将模型中所有间断线耗散能最小化, 可得到 UBFEM-RTME 的非线性规划目标函数, 即极限状态下的土体临界重度  $\gamma_{cr}$ :

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

式中  $P_{d,i}$  为第  $i$  条速度间断线上耗散能;  $c$  为土体黏聚力, 在计算中取单位值;  $n_d$  为间断线总数;  $\xi'_i$  为第  $i$  条速度间断线的过程变量,

$$\xi'_i = 1/\tan \varphi [u_{r,i}(y_{f,i} - y_{s,i}) + v_{r,i}(x_{s,i} - x_{f,i}) + u_{l,i}(y_{s,i} - y_{f,i}) + v_{l,i}(x_{f,i} - x_{s,i})] \quad (3)$$

式中  $u_{r,i}$  和  $v_{r,i}$  为第  $i$  条速度间断线顺时针方向一侧单元速度分量;  $u_{l,i}$  和  $v_{l,i}$  即为逆时针方向一侧单元速度分量;  $x_{s,i}$  和  $y_{s,i}$  为第  $i$  条速度间断线起点坐标;  $x_{f,i}$  和  $y_{f,i}$  即为终点坐标。其余符号说明可参考图 2。

速度间断线的另一个过程变量  $\xi''_i$  表达如下:

$$\xi''_i = u_{r,i}(x_{s,i} - x_{f,i}) + v_{r,i}(y_{s,i} - y_{f,i}) + u_{l,i}(x_{f,i} - x_{s,i}) + v_{l,i}(y_{f,i} - y_{s,i}), \quad (4)$$

式中, 变量含义同式(3)。对两个过程变量施加如下不等式约束:

$$-\xi''_i - \xi'_i \leq 0, \quad \xi''_i - \xi'_i \leq 0 \quad (i=1, 2, 3, \dots, n_d) \quad (5)$$

则式(5)相当于非线性规划计算中对间断线施加相关联流动法则约束  $\Delta \bar{v}_i = |\Delta \bar{u}_i| \cdot \tan \varphi$ 。而  $\Delta \bar{v}_i$  为第  $i$  条

速度间断线两侧单元在其法向速度分量差值,  $\Delta\bar{u}_i$  为速度切向分量差值。

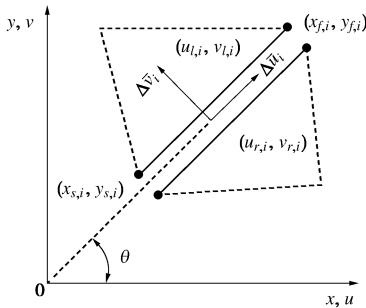


图 2 刚体平动运动单元上限有限元速度间断线说明

Fig. 2 Illustration of UBFEM-RTME discontinuity

此外, 还应施加模型各边界上的速度和几何约束, 几何约束应保证各边界上的节点均仅在该边界上移动。UBFEM-RTME 具体求解过程可参见文献[22]。

### 1.3 稳定系数 $N_{cr}$ 定义

Broms 等<sup>[23]</sup>提出黏土不排水条件下隧道工作面稳定系数:

$$N = (\sigma_s - \gamma H - \sigma_T) / S_u , \quad (6)$$

式中,  $N$  为工作面稳定系数,  $\sigma_s$  为地表超载,  $\sigma_T$  为工作面均布荷载,  $H$  为隧道埋深,  $\gamma$  为黏土重度,  $S_u$  为隧道开挖面中心处土体的不排水抗剪强度。

当土体内摩擦角  $\varphi$  不为 0 时, 上述公式不再合适。基于此, 本文引入无量纲稳定系数  $N_{cr} = \gamma_{cr} H / c$  定义土体自重作用下浅埋隧道工作面稳定性; 当埋深  $H$  和黏结力  $c$  为定值时,  $N_{cr}$  反映了维持稳定对应的地层最大容许重度  $\gamma_{max}$ 。

### 1.4 土体剪胀效应的考虑

为保证极限荷载的唯一性, 极限分析上限定理假定土体服从相关联流动法则。当内摩擦角  $\varphi$  较大时, 将高估土体破坏发生时的剪胀效应。为考虑非关联流动条件下的剪胀效应, 引入剪胀角  $\psi$  并采用 Drescher 与 Detournay 等<sup>[24]</sup>提出的方法将土体内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$  置换为其等效参数  $\varphi^*$  和  $c^*$ ,

$$\left. \begin{aligned} \tan \varphi^* &= \tan \varphi \cdot \frac{\cos \psi \cos \varphi}{1 - \sin \psi \sin \varphi} , \\ c^* &= c \cdot \frac{\cos \psi \cos \varphi}{1 - \sin \psi \sin \varphi} . \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

本文考虑  $\psi / \varphi$  和  $\psi / \varphi = 0$  两种情况, 计算等效参数  $\varphi^*$  和  $c^*$  用于上限有限元分析。

## 2 稳定系数分析

### 2.1 稳定系数 $N_{cr}$ 对比

为验证结果的可靠性, 应用 UBFEM-RTME 计算  $\varphi=0^\circ$ ,  $H/D=1 \sim 10$  对应的隧道工作面稳定系数  $N_{cr}$ ,

与已有文献[10, 12, 14, 19]数据对比如图 3 所示。需要指出的是, 图 3 对比数据分别由 Davis 等<sup>[10]</sup>极限分析下限法结果、Augarde 等<sup>[12]</sup>极限分析上、下限有限元法结果、Huang 等<sup>[14]</sup>多刚性块体上限法结果、Yang 等<sup>[19]</sup>刚体平动运动单元上限有限元法结果通过线性插值并转换为本文所定义的稳定系数  $N_{cr}$  而来。

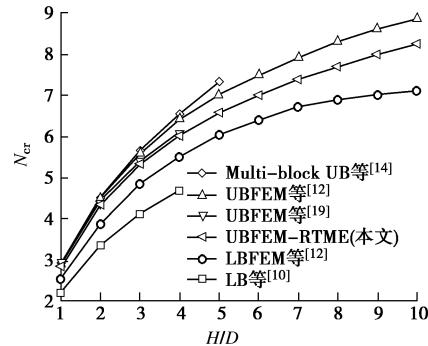


图 3 稳定系数  $N_{cr}$  上限解与数据对比 ( $\varphi = 0^\circ$ )

Fig. 3 Upper bound solutions of stability factor  $N_{cr}$  and comparison of data ( $\varphi = 0^\circ$ )

从图 3 可知, 本文稳定系数  $N_{cr}$  均大于  $H/D$  相同情况下 Davis 等<sup>[10]</sup>下限解, 处于 Augarde 等<sup>[12]</sup>上、下限解之间, 小于 Huang 等<sup>[14]</sup>上限解, 并与 Yang 等<sup>[19]</sup>上限解接近。由于 UBFEM-RTME 方法遵循上限定理要求, 获得的稳定系数  $N_{cr}$  为严格上限解, 对比可知本文上限解较 Augarde 等<sup>[12]</sup>和 Huang 等<sup>[14]</sup>的上限解精度更高。例如当  $H/D=1$  时, 本文结果较之 Augarde 等<sup>[12]</sup>上限解小 3.78%, 比 Huang 等<sup>[14]</sup>上限解小 3.76%。随着  $H/D$  增加至 5, 本文上限解结果相比 Augarde 等<sup>[12]</sup>上限解小 6.54%, 比 Huang 等<sup>[14]</sup>上限解小 11.54%, 表明应用 UBFEM-RTME 方法能够获得较优的浅埋隧道工作面稳定性系数  $N_{cr}$  上限解。

### 2.2 稳定系数 $N_{cr}$ 变化规律

针对浅埋隧道工作面稳定性开展系列计算分析, 所获稳定系数  $N_{cr}$  结果如表 1 所示。表中  $H/D=1 \sim 10$ ,  $\varphi=0 \sim 30^\circ$ , 括号内数据表示  $\psi / \varphi = 0$  对应的结果。此外, 绘制  $H/D=1 \sim 5$ 、 $\varphi=0 \sim 30^\circ$  对应的稳定系数  $N_{cr}$  曲线如图 4。

由表 1 和图 4 可知, 随着  $\varphi$  增加,  $N_{cr}$  逐渐增大, 表明  $\varphi$  值较大时地层稳定性更好。当  $\varphi$  相同时,  $N_{cr}$  随着  $H/D$  的增加近似为线性增长。需要指出的是,  $\varphi$  较小时, 临界重度  $\gamma_{cr}$  随着  $H/D$  增加而逐渐减小, 表明隧道工作面上覆土层厚度增加更倾向于以荷载作用的形式, 对工作面稳定性不利。而  $\varphi$  较大时,  $\gamma_{cr}$  随着  $H/D$  增加而减小到某一值后便不再变化, 说明  $\varphi$  较大时“土拱效应”将破坏区域限制在隧道工作面附近, 埋深影响不再明显。

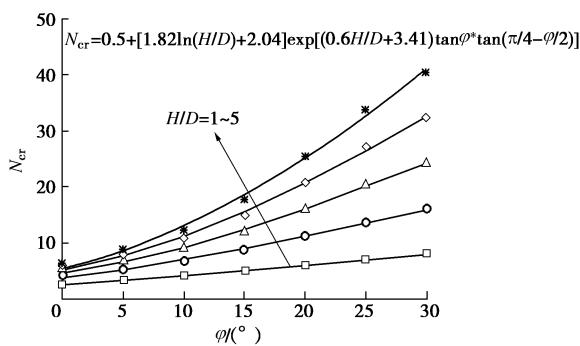


表1 隧道工作面稳定性系数  $N_{cr}$  计算结果Table 1 Results of stability factor  $N_{cr}$  of tunnel face

$H/D$	$\varphi /(^{\circ})$						
	0	5	10	15	20	25	30
1	2.82	3.36 (3.35)	4.04 (3.96)	4.88 (4.63)	5.89 (5.31)	7.01 (5.92)	8.15 (6.38)
2	4.34	5.40 (5.38)	6.82 (6.67)	8.71 (8.21)	11.09 (9.89)	13.74 (11.44)	16.23 (12.60)
3	5.32	6.83 (6.79)	8.98 (8.77)	12.02 (11.28)	16.02 (14.15)	20.42 (16.86)	24.34 (18.82)
4	6.02	7.93 (7.90)	10.79 (10.52)	15.03 (14.04)	20.81 (18.24)	27.11 (22.23)	32.45 (25.04)
5	6.57	8.84 (8.80)	12.36 (12.04)	17.83 (17.55)	25.51 (22.80)	33.79 (27.78)	40.56 (31.30)
6	7.00	9.61 (9.56)	13.77 (13.41)	20.49 (19.02)	30.15 (26.12)	40.49 (32.92)	48.67 (37.52)
7	7.39	10.29 (10.23)	15.07 (14.66)	23.03 (21.32)	34.74 (29.96)	47.19 (38.29)	56.79 (43.76)
8	7.70	10.89 (10.83)	16.26 (15.81)	25.48 (23.53)	39.30 (33.75)	53.91 (43.61)	64.90 (50.03)
9	7.99	11.43 (11.37)	17.39 (16.89)	27.86 (25.66)	43.83 (37.50)	60.54 (48.85)	73.01 (56.22)
10	8.25	11.92 (11.86)	18.43 (17.90)	30.15 (27.72)	48.33 (41.22)	67.24 (54.17)	91.12 (62.47)

注: 括号内数据为  $\psi / \varphi = 0$  对应的结果。

上述分析针对  $\psi / \varphi = 1$  的情况, 而  $\psi / \varphi = 0$  时相应参数影响规律是类似的。原因在于将  $\psi = 0^{\circ}$  代入式(7)即可得到等效参数  $\varphi^*$  和  $c^*$ , 相当于对土体强度参数  $\varphi$  和  $c$  作了折减。当  $\varphi, H/D$  都较小时,  $\psi / \varphi = 0$  对应的计算结果变化不大, 如  $\varphi = 5^{\circ}$ ,  $H/D = 1$  情况下,  $\psi / \varphi = 1$  与  $\psi / \varphi = 0$  计算结果相差 0.3%, 而  $\varphi = 30^{\circ}$ 、 $H/D = 10$  情况下,  $\psi / \varphi = 1$  与  $\psi / \varphi = 0$  计算结果则相差 45.86%。这表明服从相关联流动法则将高估土体的剪胀效应, 尤其在  $\varphi$  较大、边界条件约束较强的情况下。从保守角度考虑, 可选取  $\psi / \varphi = 0$ , 此时计算获得的稳定性系数  $N_{cr}$  数值相对较小。

图4 隧道工作面稳定性系数  $N_{cr}$ Fig. 4 Stability factor  $N_{cr}$  of tunnel working face

为了便于应用, 将图4中  $N_{cr}$  与  $\varphi$  和  $H/D$  的关系曲线进行拟合。参考太沙基土压力理论, 通过应力传递及土条极限平衡原理求解隧道工作面支护力, 再将支护力置零即可反推出稳定性系数  $N_{cr}$ , 以此作为拟合公式的大致形式。如图4, 拟合公式为

$$N_{cr} = 0.5 + [1.82 \ln(H/D)] e^{(0.6 H/D + 3.41) \tan \varphi \cdot \tan(\pi/4 - \varphi/2)} \quad (8)$$

该拟合公式对于  $\varphi \geq 20^{\circ}$  时的拟合度较好, 相对误差基本小于 2%; 当  $\varphi$  较小特别是为  $0^{\circ}$  时, 拟合相对误差较大, 最大接近于-17%。这也与内摩擦角  $\varphi$  较小时, 其对应的稳定性系数  $N_{cr}$  值较小有关系。

### 3 破坏模式讨论

#### 3.1 破坏模式对比分析

除获得稳定系数  $N_{cr}$  外, 运用 UBFEM-RTME 还可得到浅埋隧道工作面有效间断线网(近似为滑移线网)破坏模式。该破坏模式能够清晰直观揭示破坏的形态特征与尺寸范围, 为地层预加固方案制定等提供理论依据。对于  $\varphi > 0^{\circ}$  时工作面破坏模式的研究报道还较少, 本文与阳军生等<sup>[20]</sup>应用六节点三角形单元上限有限元结合网格自适应加密策略得到的加密网格形态作对比(其中  $H/D=3, \varphi = 5^{\circ}$ ), 绘图如图5所示。

如图5, 本文与阳军生等<sup>[20]</sup>获得的浅埋隧道工作面破坏模式共同点为: 工作面破坏时均形成两条主要的剪切带延伸至地表, 前方楔形区均存在两条相交的剪切带; 不同的是本文获得的破坏模式近似滑移线网, 在破坏形态、几何尺度上更为清晰直观。阳军生等<sup>[20]</sup>所得  $N_{cr}=6.84$ , 其线性规划模型六节点三角形单元总数  $n_e=5155$ ; 本文稳定性系数  $N_{cr}=6.83$ , 非线性规划模型刚性三角形单元总数  $n_e=341$ , 有效间断线总数  $n_d=550$ 。由此看出, 尽管两种方法  $N_{cr}$  上限解相差不大, 但本文模型所用单元数目不足前者十分之一。表明 UBFEM-RTME 计算可应用较少的低阶刚性单元, 配合网格更新策略充分发挥速度间断线的优势, 获得良好的上限解和滑移线网破坏模式。

#### 3.2 滑移线网破坏模式演化规律

为说明内摩擦角  $\varphi$  对破坏模式的影响规律, 绘制  $H/D=2, \varphi=5^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}$  时的破坏模式如图6。可以看出, 破坏模式主要由靠近地表的整体刚性下沉区、工作面顶部和底部两簇交错滑移线构成的扇形区和工作面前方呈条带状楔形块体构成, 破坏范围延伸至地表。当  $H/D$  相同时,  $\varphi$  增加使得网状破坏范围减小, 间断线更为集中, 稳定系数  $N_{cr}$  增大, 工作面稳定性增加。

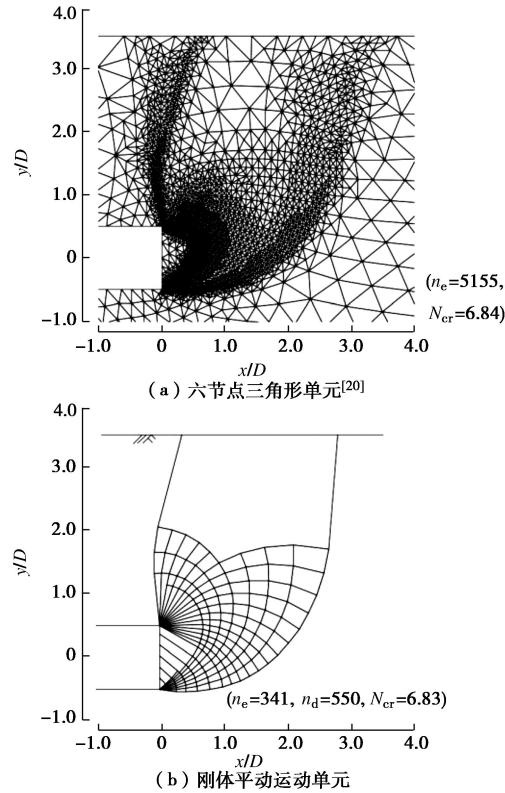


图 5 隧道工作面破坏模式对比图 ( $H/D=3$ ,  $\varphi=5^\circ$ )

Fig. 5 Comparison of failure modes of tunnel face ( $H/D=3$ ,  $\varphi=5^\circ$ )

为分析埋深比  $H/D$  对破坏模式的影响规律, 选取  $H/D$  为 1, 3, 5,  $\varphi=20^\circ$  时的破坏模式显示如图 7 所示。可以看出, 破坏模式特征与图 6 一致。随着  $H/D$  增加, 网状破坏区域范围显著增大且有向工作面后方 (即已开挖段) 延伸趋势, 稳定系数  $N_{cr}$  增大但  $\gamma_{cr}$  呈减小趋势, 表明埋深增加不利于隧道工作面维持稳定, 这可能由于土体自重荷载占地层破坏的主导作用所致。

### 3.3 有效间断线数目及分布对 $N_{cr}$ 结果影响规律

运用 UBFEM-RTME 进行非线性规划求解稳定系数  $N_{cr}$  和破坏模式时, 模型网格中的有效间断线数目、分布情况对非线性规划求解结果影响较大<sup>[22]</sup>。为分析这种影响, 选取  $H/D=2$ ,  $\varphi=20^\circ$ , 绘制叠加单元速度后的刚性块体相互错动的工作面破坏模式如图 8。

对比图 8 (a), (b) 可知, 有效间断线的位置分布对稳定系数  $N_{cr}$  和破坏形态影响较明显。图 8 (b) 较之图 8 (a), 工作面底部增加两簇滑移线延伸至拱顶上方, 有效间断线总数由 42 增加至 86, 对应稳定系数  $N_{cr}$  减小 2.9%, 破坏模式变化为: 靠近地表的整体刚性下沉区面积减小, 工作面上方破坏范围外轮廓线由两段折线构成而逐渐向光滑曲线演变。需要说明的是, Huang 等<sup>[14]</sup>多刚性块体上限法所假定的破坏模式类似于图 8 (a) 继续删除工作面底部一簇滑移线得到的有效间断线分布图。本文 UBFEM-RTME 无需预

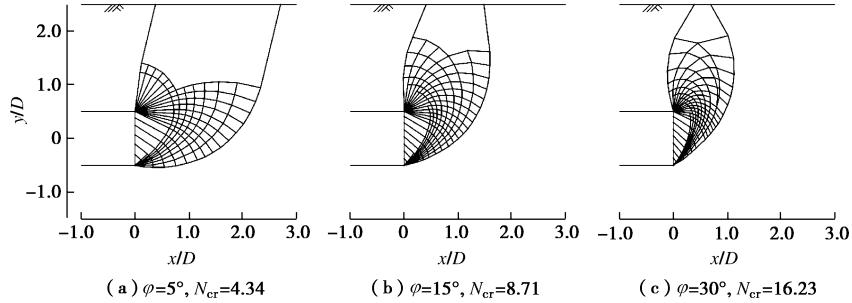


图 6 隧道工作面滑移线网破坏模式 ( $H/D=2$ )

Fig. 6 Mesh-like collapse mechanisms of tunnel face ( $H/D=2$ )

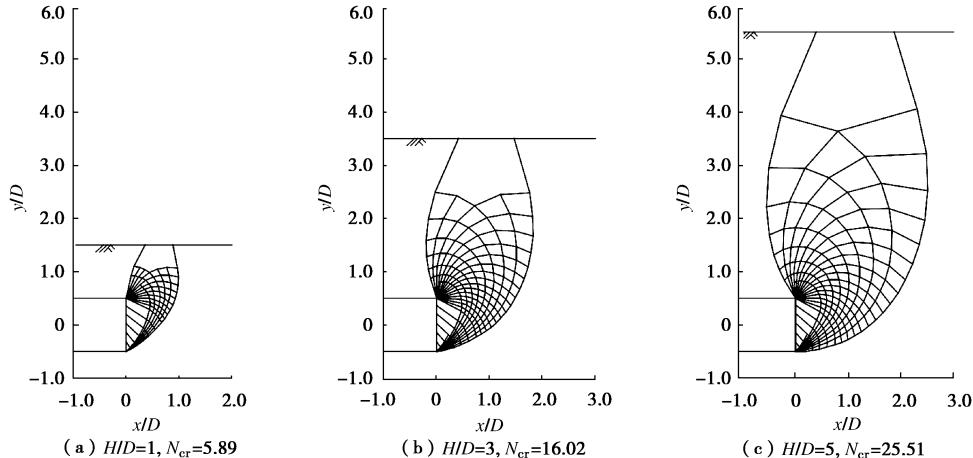
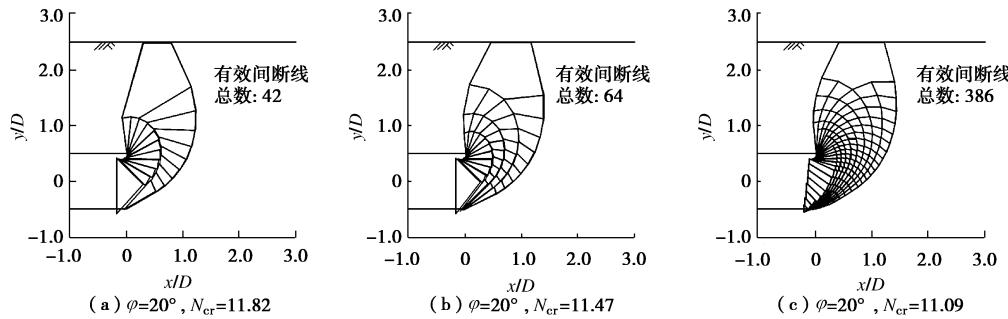


图 7 隧道工作面滑移线网破坏模式 ( $\varphi=20^\circ$ )

Fig. 7 Mesh-like collapse mechanisms of tunnel face ( $\varphi=20^\circ$ )

图 8 隧道工作面稳定性系数  $N_{cr}$  与有效间断线数目及分布关系Fig. 8 Relationship between stability factor  $N_{cr}$  of tunnel face and numbers or distributions of active discontinuities

先假定破坏形态, 通过计算过程中的网格更新, 可动态调整有效间断线数目和分布情况, 由此带来破坏模式的更新演化以及稳定性系数上限解精度的变化。

进一步对比图 8 (b), (c) 可知, 有效间断线数目增加能够较好提升上限解精度和获得更为细致的工作面失稳破坏模式。较之图 8 (b), 图 8 (c) 反映的有效间断线更加集中, 数目由 86 增加至 386, 工作面前方由一整体刚性块体细化为多个呈条带状的楔形块体, 工作面上方破坏范围外有多段间断线构成的轮廓曲线更为光滑, 对应稳定系数  $N_{cr}$  减小 3.3%, 上限解精度更高。由此说明, 保证合理充足的网格密度是非常必要的。不过, 当有效间断线数目较多时, 继续加密网格对于提升上限解精度是有限的, 且带来非线性规划求解的难度增加。

## 4 结 论

本文针对浅埋隧道工作面稳定性和失稳破坏模式问题, 采用刚体平动运动单元上限有限元法 (UBFEM-RTME) 进行分析研究, 得到以下 3 点结论。

(1) 土体内摩擦角  $\varphi$  对隧道工作面稳定系数及破坏形态影响较大。 $\varphi$  较大时, 主要破坏区域内有效间断线更为集中, 稳定系数  $N_{cr}$  较大, 地层稳定性较好。

(2) 考虑土体剪胀效应的影响, 当内摩擦角  $\varphi$ 、隧道埋深比  $H/D$  均较大时, 从保守角度考虑, 设定  $\psi/\varphi = 0$  的条件将明显降低稳定系数  $N_{cr}$ 。

(3) 有效间断线数目及分布对  $N_{cr}$  上限解精度和地层破坏形态有重要影响, 有效间断线数目增加及分布形态的优化将较好提升  $N_{cr}$  上限解精度和获得更为精细的隧道工作面滑移线破坏模式, 揭示失稳破坏机理。

## 参考文献:

- [1] ATKINSON J H, POTTS D M. Stability of shallow tunnel in cohesionless soil[J]. Géotechnique, 1977, 27(2): 203 - 215.
- [2] 吕玺琳, 周运才, 李冯缔. 粉砂地层盾构隧道开挖面稳定

性离心试验及数值模拟[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3324 - 3328. (LÜ Xi-lin, ZHOU Yun-cai, LI Feng-di. Centrifuge model test and numerical simulation of stability of excavation face of shield tunnel in silty sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3324 - 3328. (in Chinese))

- [3] VERMEER P A, RUSE N, MARCHER T. Tunnel heading stability in drained ground[J]. Felsbau, 2002, 20(8): 8 - 18.
- [4] 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, 27(8): 897 - 902. (ZHU Wei, QIN Jian-she, LU Ting-hao. Numerical study on face movement and collapse around shield tunnels in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 897 - 902. (in Chinese))
- [5] 孙潇昊, 缪林昌, 林海山. 不同埋深盾构隧道开挖面稳定性数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(1): 164 - 169. (SUN Xiao-hao, MIAO Lin-chang, LIN Hai-shan. Numerical simulation research on excavation face stability of different depths of shield tunnel[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(1): 164 - 169. (in Chinese))
- [6] LI Y, EMERIAULT F, KASTNER R, et al. Stability analysis of large slurry shield-driven tunnel in soft clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 472 - 481.
- [7] 吕玺琳, 王浩然, 黄茂松. 盾构隧道开挖面稳定极限理论研究[J]. 岩土工程学报, 33(1): 57 - 62. (LÜ Xi-lin, WANG Hao-ran, HUANG Mao-song. Limit theoretical study on face stability of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 33(1): 57 - 62. (in Chinese))
- [8] 陈仁朋, 齐立志, 汤旅军, 等. 砂土地层盾构隧道开挖面被动破坏极限支护力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 2877 - 2882. (CHEN Ren-peng, QI Li-zhi, TANG Lü-jun, et al. Sand formation of shield tunnel excavation face passive failure limit supporting force[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 2877 - 2882. (in Chinese))

- 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 Ming-hua, MAO Tao, NIU Hao-yi. 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 Science), 2016, **43**(1): 103 – 109. (in Chinese))
- [10] DAVIS E H, GUNN M J, MAIR R J et al. The stability of shallow tunnel and underground openings in cohesive material[J]. *Géotechnique*, 1980, **30**(4): 397 – 416.
- [11] SLOAN S W, ASSADI A. Undrained stability of a plane strain heading[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, **31**: 443 – 500.
- [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] KLAR A, OSMAN A S, BOLTON M. 2D and 3D upper bound solutions for tunnel excavation using elastic flow fields[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2007, **31**: 1367 – 1374.
- [14] HUANG M S, SONG C X. Upper-bound stability analysis of a plane strain heading in non-homogeneous clay[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2013, **38**(9): 213 – 223.
- [15] LECA E, DORMIEUX L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material[J]. *Géotechnique*, 1990, **40**(4): 581 – 606.
- [16] SOUBRA A H. Three-dimensional face stability analysis of shallow circular tunnels[C]// International Conference on Geotechnical and Geological Engineering. Melbourne, 2000.
- [17] 杨 峰. 浅埋隧道围岩稳定性的极限分析上限法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009. (YANG Feng. Investigation of shallow tunnel stability using upper bound solution of limit analysis[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese))
- [18] 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, **32**(2): 279 – 284. (YANG Feng, YANG Jun-sheng, ZHAO Lian-heng. Collapse mechanism and support pressure for shallow tunnel face[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(2): 279 – 284. (in Chinese))
- [19] YANG F, ZHANG J, ZHAO L H, 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.
- [20] 阳军生, 张 箭, 杨 峰. 浅埋隧道掌子面稳定性二维自适应上限有限元分析[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(1): 257 – 264. (YANG Jun-sheng, ZHANG Jian, YANG Feng. Stability analysis of shallow tunnel face using two-dimensional finite element upper bound solution with mesh adaptation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(1): 257 – 264. (in Chinese))
- [21] 王金麒, 李林安, 陈 茜, 等. 水平分层土质条件下浅埋隧道掌子面支护稳定性研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2015, **36**(2): 196 – 204. (WANG Jin-qi, LI Lin-an, CHEN Qian, et al. Supporting security research of shallow tunnel face in horizontal layered soil conditions[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2015, **36**(2): 196 – 204. (in Chinese))
- [22] 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, **35**(6): 1782 – 1786. (YANG Feng, ZHAO Lian-heng, ZHANG Jian, et al. Investigation of finite element upper bound solution based on rigid translatory moving element[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(6): 1782 – 1786. (in Chinese))
- [23] BROMS B B, BENNERMARK H. Stability of clay in vertical openings[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1967, **193**: 71 – 94.
- [24] DRESCHER A, DETOURNAY E. Limit load in translational failure mechanisms for associative and non-associative materials[J]. *Géotechnique*, 1993, **43**(3): 443 – 456.