

# CD 法开挖隧道的顶板破坏机理分析

韩 林

[上海城投公路投资(集团)有限公司,上海市 200336]

**摘 要:**在隧道修建过程中,CD 法被广泛用于软弱围岩隧道和大断面隧道的修建。工程经验表明,CD 法比全断面法更能够减少对隧道的扰动,降低顶部围岩塌陷的可能性,但目前对该经验的认识仍缺乏足够深入的了解。比如,CD 法隧道顶部的塌陷机理,相比全断面法的定量优势比较等。为此,提出了一种预测 CD 法开挖隧道顶板破坏机理的运动学方法。推导了确定塌块形状的理论解。所提出的方法与全开挖方法进行了比较,证明了方法的合理性和 CD 法开挖的优越性。研究发现,与全断面开挖的结果相比,CD 法开挖可以显著降低顶板坍塌的高度,提高顶板稳定性的安全系数。

**关键词:**CD 法;软弱围岩隧道;大断面隧道;坍塌机理

**中图分类号:**U452.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-7716(2023)05-0223-05

## 0 引 言

对于软弱围岩隧道或者大断面隧道,通常将隧道面水平或垂直地分为若干块,以提供临时支撑。最常用的就是中隔壁(CD)法,工程经验证实,它可以保持开挖稳定并尽量减少沉降<sup>[1-3]</sup>。除了 CD 法开挖以外,其他更复杂的分步开挖设计也被用于软弱围岩隧道或者大断面隧道,如横隔板(CRD)法<sup>[4]</sup>、双侧壁导坑(SD)法<sup>[1,3]</sup>、上半垂直细分法<sup>[5]</sup>和三台阶七步开挖法等。

在岩土工程中,研究人员和工程师普遍认为,CD 开挖工法比全开挖法更能有效地保持软弱围岩中隧道的稳定性。因为,在 CD 开挖工法中,衬砌可以在每个开挖步骤后快速充当支承环,隧道的整体沉降和水平收敛更容易得到控制。进而减少对围岩的过多扰动,这是 CD 法开挖隧道的最主要优势。在 CD 法中,隧道开挖引起的沉降风险和隧道稳定性会受到设计的几何参数的影响。因此,对 CD 法开挖的理论分析显得十分重要和迫切。

虽然 CD 开挖工法相比全断面法可以更好地控制围岩变形,但其实施步骤较为繁琐。因此,通常需要对 CD 法和全断面法进行比较。为了选择合适的

隧道开挖方法,许多文献对 CD 法开挖的力学机制进行了数值研究<sup>[1-4]</sup>。数值研究揭示了,CD 法在控制围岩沉降和增强隧道稳定性方面,有着明显的优势。然而,其有效性的论证在很大程度上取决于采用的本构模型和模型输入参数。因此,数值方法通常实施复杂且繁琐。

为了考虑隧道在 CD 法施工中的稳定性,必须对顶板坍塌的潜在范围进行理论分析。极限分析是寻求解决隧道拱顶坍塌问题的最常用理论方法,不必考虑太多的参数输入问题和复杂的本构模型,也不需要建立过于复杂的精细数值模型,因而得到大量应用。例如,Fraldi 和 Guaracino<sup>[6]</sup>通过使用极限分析上限定理和变分法构建了一种新的弯曲破坏机制,并推导了坍塌块体形状和尺寸的精确解。

由于该失效机制的简洁表达形式,该方法引起了许多学者的关注。它已用于解释浅层隧道<sup>[7]</sup>、地下水变化<sup>[8]</sup>、层状土壤<sup>[9]</sup>等影响的应用场景。但这些分析的一个缺点是,隧道开挖面均被认为是一步开挖完成的,由此产生的顶板破坏机制完全不同于 CD 法开挖。因此,已有研究的结论可能不能适用于 CD 法开挖的隧道。

本文采用极限分析上限法对 CD 法开挖隧道引起的顶板破坏机理进行了理论分析,以揭示 CD 法开挖引起的隧道围岩失效机制和对隧道稳定性的影响。为此,从隧道顶部坍塌块体形状和隧道安全系数两个方面进行了理论分析,并与全断面开挖法进行了比较。

收稿日期:2023-02-23

基金资助:上海城投(集团)有限公司科技创新计划项目(CTKY-PTRC-2022-002-001)

作者简介:韩林(1993—),男,博士,工程师,从事隧道及地下建筑工程建设管理工作。

## 1 CD 法开挖下隧道顶部坍塌机制

### 1.1 Hoek-Brown 破坏标准

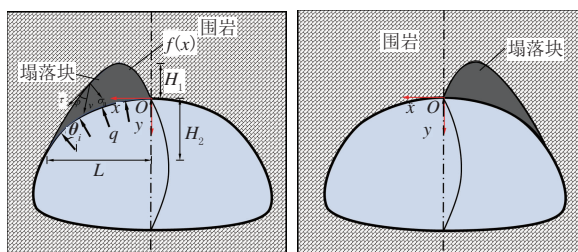
鉴于缺乏合适的系统来评估地下工程中的岩体质量, Hoek 和 Brown 在 20 世纪 80 年代提出了一个使用不同地质参数的无量纲方程, 以评估临界破坏状态下岩体的三个主应力之间的关系。随后, Hoek 及其合作者修改了最初的强度标准<sup>[10]</sup>。这些修正主要针对岩体参数  $m$ 、 $s$ 、 $a$  和 GSI 之间的推导关系, 并引入了一个新的参数: 扰动因子  $D$ 。另一方面, 为了便于 Hoek-Brown 破坏准则的应用, 通常将其定义为主应力 - 主应变的形式, 即:

$$\tau = A \sigma_c \left( \frac{\sigma_n - \sigma_t}{\sigma_c} \right)^B \quad (1)$$

式中:  $\sigma_n$  和  $\tau$  表示法向应力和剪应力;  $\sigma_c$  和  $\sigma_t$  表示完整岩石的单轴抗压强度和抗拉强度;  $A$  和  $B$  分别为岩石材料常数。文献[10]中给出了从参数  $m$ 、GSI 和  $D$  到拟合系数  $A$  和  $B$  的转换过程。

### 1.2 坍塌机制分析

CD 开挖引起的破坏机制见图 1。开挖面分为两块, 代表两个连续的开挖步骤。CD 法开挖的两个步骤中, 将掌子面分成了两块。在大多数情况下, 两块交叉点可以被认为位于隧道顶部和底部表面的中心轴上, 因此, 在步骤 1 和步骤 2 中, 坍塌的拱可以被认为是的。假设塌陷曲面  $f(x)$  和塑性面重合, 受到开挖面几何结构的限制, 其形成将不同于全断面法的情况。由于第一和第二开挖步骤被视为彼此独立, 从而产生两个单独的位移增量场。



(a) CD 开挖的第 1 步

(b) CD 法开挖的第 2 步

图 1 CD 开挖的洞室顶板破坏机理

采用 CD 法的开挖步骤 1 (见图 1(a)) 进行分析。根据 Fraldi 和 Guaracino 的研究, 可通过切向应力和法向应力产生的耗散功率的叠加获得分离曲线  $f(x)$  上任任意点的内部耗散功率, 如下所示:

$$D = (\sigma_n \varepsilon + \tau \gamma) = \{-\sigma_t + \sigma_c(1-B^{-1})[ABf'(x)]^{\frac{1}{1-B}}\} \frac{v}{\sqrt{1+f'(x)^2}} \quad (2)$$

通过沿塑性屈服面  $f(x)$  积分, 可以获得由内能

耗散完成的功率, 如下所示:

$$W_{int} = \int_0^L \{-\sigma_t + \sigma_c(1-B^{-1})[ABf'(x)]^{\frac{1}{1-B}}\} v dx \quad (3)$$

坍塌砌块重量产生的功率如下:

$$W_\gamma = \int_0^L \gamma[f(x) - c(x)] v dx \quad (4)$$

式中:  $\gamma$  为岩石的单位重量;  $c(x)$  为隧道顶部曲线。

假设支护应力均匀地施加在隧道顶面内, 从而其做功功率表示为:

$$W_q = \int_0^L qv \cos \pi ds = qv \int_0^L \sqrt{1+[c'(x)]^2} dx \quad (5)$$

因此, 构造了一个目标函数, 通过平衡外力所做的功率和速度不连续性上的内能耗散所做的功率来求解上解:

$$\begin{aligned} \Omega[x, f(x)f'(x)] &= W_{int} - W_\gamma - W_q \\ &= \int_0^L \psi[x, f(x)f'(x)] v dx + \int_0^L \gamma c(x) v dx \\ &\quad - qv \int_0^L \sqrt{1+[c'(x)]^2} dx \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $\psi[x, f(x)f'(x)]$  是泛函, 写为:

$$\begin{aligned} [\psi[x, f(x), f'(x)]] &= \\ &= -\sigma_t + \sigma_c(1-B^{-1})[ABf'(x)]^{\frac{1}{1-B}} - \gamma f(x) \end{aligned} \quad (7)$$

泛函的解析公式通过变分原理求解:

$$\frac{\partial \psi}{\partial f(x)} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial \psi}{\partial f'(x)} \right] = 0 \quad (8)$$

$f(x)$  的表达式如下:

$$f(x) = A^{-1/B} \gamma^{(1-B)/B} \sigma_c^{(B-1)/B} (x - m/\gamma)^{1/B} + n \quad (9)$$

其中  $m$  和  $n$  是待定常数。几何关系满足以下方程:

$$\begin{cases} f(0) = c(0) = 0 \\ f(L) = c(L) = H_2 \end{cases} \quad (10)$$

由等式(10), 可以注意到  $f(x)$  的几何结构是对称的。因此, 导出另一个方程式:

$$f(m/\gamma) = n = -H_1 \quad (11)$$

参数  $m$  和  $n$  可通过求解下式得到:

$$\begin{cases} n = -H_1 \\ m = AH_1^B \gamma^B \sigma_c^{1-B} = H_2 \end{cases} \quad (12)$$

然后, 可以推导出泛函的表达式, 代入式(6), 可以获得上理论框架内的一个控制方程:

$$\begin{aligned} \Omega[x, f(x)f'(x)] &= \\ &= -(-\sigma_t - \gamma H_1)L - (1+B)^{-1} \gamma^{1-B} \sigma_c^{(B-1)/B} A^{-1/B} v \cdot \\ &\quad [(L - AH_1^B \gamma^B \sigma_c^{1-B})^{(1+B)/B} - A^{(1+B)/B} H_1^{1+B} \gamma^{B^2-1/B} \sigma_c^{(1-B^2)/B}] + \\ &\quad \int_0^L \gamma c(x) v dx - qv \int_0^L \sqrt{1+[c'(x)]^2} dx = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

由几何条件(11)可以得到另一个控制方程:

$$A^{-1/B} \gamma^{(1-B)/B} \sigma_c^{(B-1)/B} (L - A H_1^B \gamma^{B-1} \sigma_c^{1-B})^{1/B} - H_1 = c(L) \quad (14)$$

式(13)和式(14)可通过线性规划求解, 以下几何参数应满足:

$$0 < L \leq b \quad (15)$$

其中  $2b$  是开挖面的宽度。

1.3 安全系数

为了评估岩体的稳定性, 本文引入 CD 法开挖隧道的安全系数  $F_s$ , 并将其与全断面法进行比较。它定义为耗散能与外力的做功之比:

$$F_s = \frac{W_{int}}{W_\gamma} = \frac{\int_0^b \{-\sigma_t + \sigma_c(1-B^{-1}) [ABf'(x)]^{\frac{1}{1-B}}\} v dx}{\int_0^b \gamma [f(x) - c(x)] v dx} \quad (16)$$

2 全断面法开挖下隧道顶部坍塌机制

全断面开挖法<sup>[6]</sup>隧道开挖的破坏机理见图 2。

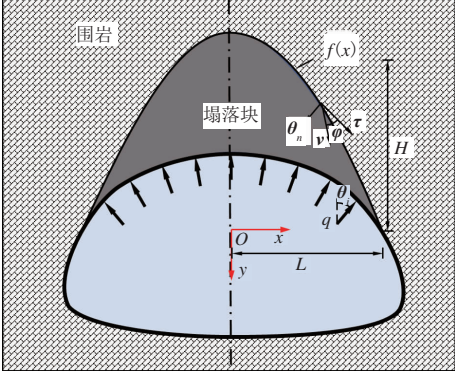


图 2 全断面法开挖的洞室顶板破坏机理

类似地, 两个控制方程可导出为:

$$\Omega[x, f(x)f'(x)] = -(-\sigma_t - \gamma H)L_v - (1+B)^{-1} A^{-1/B} \gamma^{1-B} \sigma_c^{(B-1)/B} L^{(1+B)/B} v + \gamma v \left[ L \sqrt{R^2 - L^2} - \frac{R^2}{2} \left( \arcsin \frac{L}{R} + \frac{L}{R} \frac{\sqrt{R^2 - L^2}}{R} \right) \right] \quad (17)$$

$$-qRv \operatorname{arcsin} \frac{L}{R} = 0$$

$$L = A \gamma^{B-1} \sigma_c^{B-1} H^B \quad (18)$$

3 计算结果比较

为了分析 CD 法开挖的优越性, 我们根据以下两个方面: 坍塌形状和安全系数, 比较了 CD 法和全断面法开挖的洞室的计算结果。默认情况下, 岩体参数如下  $\gamma=25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $A=0.2$ ,  $B=0.7$ ,  $\sigma_c=8 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_t=0.02 \text{ MPa}$ , 无支撑压力  $q=0 \text{ kPa}$ , 隧道拱顶弧半径  $R=12 \text{ m}$ 。

3.1 坍塌曲面

图 3 给出了不同参数对坍塌曲面的影响, 并比较了 CD 法和全断面法的坍塌曲面结果。总体而言,

在所有条件下, CD 法开挖的坍塌面范围均明显小于全断面法开挖的坍塌面范围。CD 开挖时的顶板坍塌高度约为全断面法的  $1/3$ , 而左右两侧的宽度几乎相同, 偏差百分比为  $5\% \sim 15\%$ , 可忽略不计。很明显, 开挖面的几何形状对 CD 法开挖的坍塌块体形状起到了限制作用。尽管宽度几乎相等, 但其高度受到严重限制。

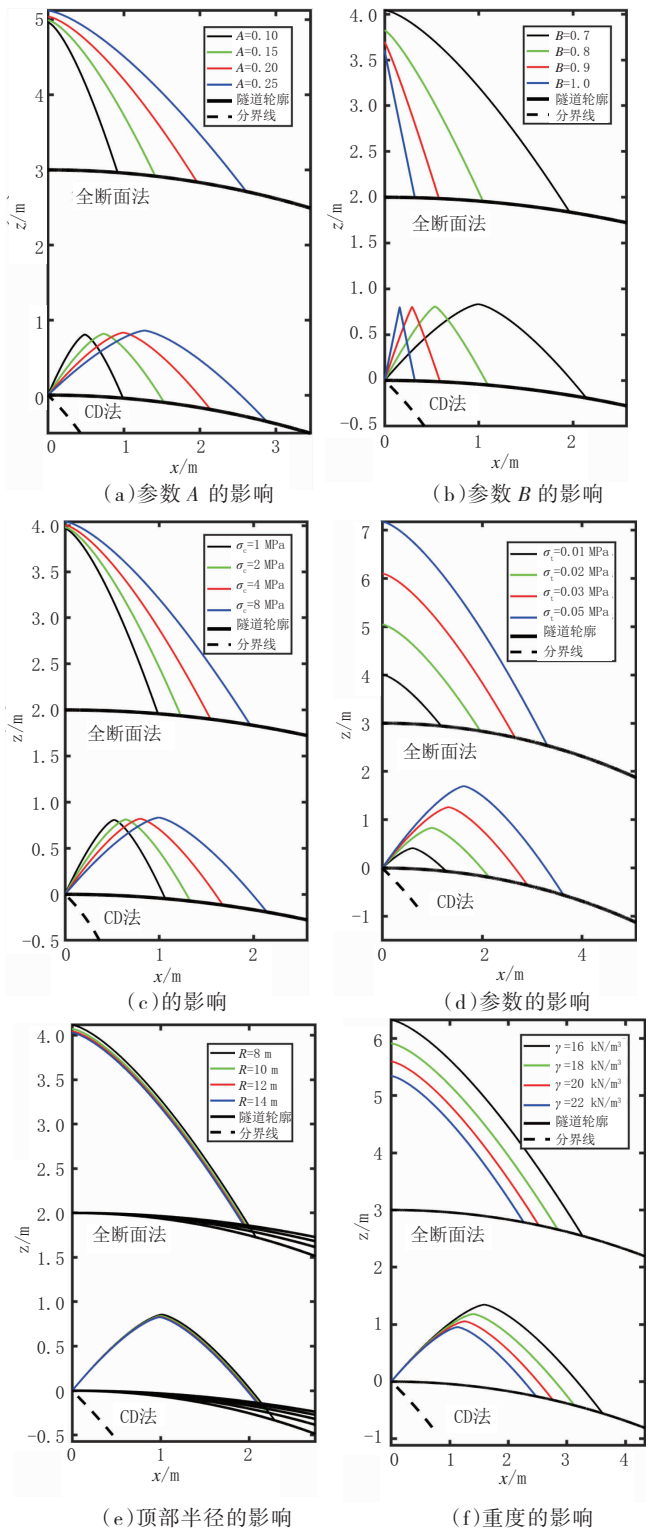


图 3 CD 法和全断面法开挖下参数对坍塌面的影响分析



从图 3(a)、图 3(b)中可以看出参数  $A$  和  $B$  对坍塌曲面的影响。随着参数  $A$  从 0.1 增加到 0.3, CD 方法的坍塌高度几乎恒定 (小于 0.1 m), 宽度急剧扩大; 而全断面开挖时的坍塌高度略微增加, 宽度也迅速扩大。当系数  $B$  从 0.7 增加到 1.0 时, 坍塌曲面变得更陡。CD 法开挖对应的曲面高度几乎不随  $B$  变化 (小于 0.04 m), 但宽度减少; 相比之下, 全断面开挖对应的高度和宽度均不同程度减少。

或值越大表示岩体质量更好。然而, 如图 3(c)和图 3(d)所示, 两个参数对坍塌曲面的影响完全相反。在图 3(c)中岩体的主要导致两种开挖方法的坍塌曲面宽度增加, 而高度的变化可以忽略不计。另一方面, 图 3(d)表明, 促进了两种开挖方法坍塌曲面高度和宽度的同步扩展。

图 3(e)的结果表明, 不同半径的隧道拱顶引起的坍塌曲面几乎相同, 仅在两种开挖方法中表现出很细微的差别。图 3(f)显示了坍塌面范围与岩体重度之间存在反相关的关系。随着岩体重量从  $16 \text{ kN/m}^3$  增加  $22 \text{ kN/m}^3$ , CD 开挖和全断面开挖的曲面高度和宽度分别减少 28% 和 29%。

### 3.2 安全系数

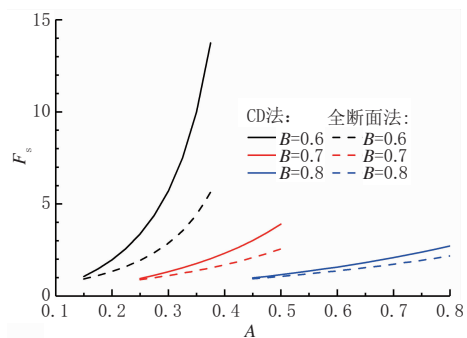
为了比较两种方法的安全性能, 并强调 CD 法开挖在大断面砌隧道或软岩隧道中的强大实用性, 图 4 给出了参数对安全系数的影响。图 4(a)显示了  $F_s$  随  $A$  和  $B$  的变化。随着  $A$  的增加,  $F_s$  呈指数增长, 但当  $B$  的值越大时, 该趋势就越不明显。值得注意的是, CD 法开挖的  $F_s$  值高于全断面法, 尤其是在较大的  $A$  或较小的  $B$  时。

图 4(b)说明了  $F_s$  随岩石质量的变化。  $F_s$  随线性增加, 更大的值同样可以提高开挖的安全性。与全断面开挖法相比, CD 法大大提高了隧道开挖的安全性。在图 4(c)中, 我们可以观察到, 随着隧道半宽的增加,  $F_s$  迅速减小。说明较大的顶部半径可能会导致隧道安全性降低。

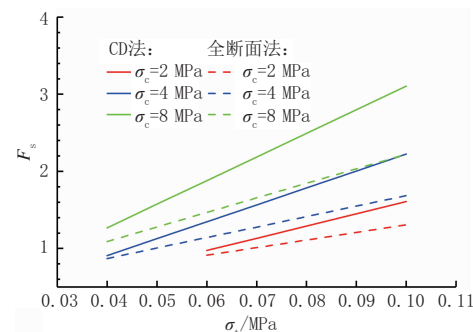
通过总结上述趋势, 可以得出结论, CD 开挖法的安全性明显优于全断面开挖法。基于这些理由, 设计者可以在施工复杂性和安全性之间进行优化, 并根据不同的地质条件比较开挖方案。

## 4 数值分析验证

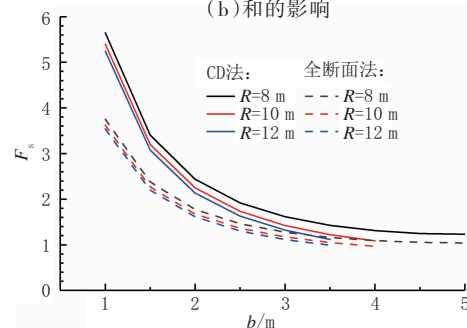
在本节中, 进行了有限差分分析, 以证明本文提出的理论方法的可行性。数值结果见图 5, 其中模型的总尺寸为  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ ; 空腔的半宽为  $10 \text{ m}$ ; 顶



(a) 参数  $A$  和  $B$  的影响



(b)  $\sigma_c$  的影响



(c) 顶部半径和隧道宽度的影响

图 4 参数对安全系数的影响

冠为半径  $10 \text{ m}$  的半圆弧, 埋深  $60 \text{ m}$ 。岩石的力学参数如下  $\sigma_c = 5 \text{ MPa}$ ,  $m_i = 5.0$ ,  $\text{GSI} = 30$ ,  $D = 0.6$ , 拟合常数  $A = 0.1921$ ,  $B = 0.6743$ ,  $\sigma_i = 0.0021 \text{ MPa}$ 。CD 开挖分为两个步骤, 其中左侧部分与步骤 1 相对应, 右侧部分与步骤 2 相对应。每个开挖块的宽度仅为整个工作面宽度的一半; 因此, 坍塌块可以被视为对称的。为了帮助判断坍塌块体, 图 5 显示了 CD 法引起的垂直位移的云图分布。但为了突出结果, 隧道仰拱处的向上位移被屏蔽。黑色粗实线表示本工作中描述的理论坍塌曲线。

由于 CD 开挖的顺序补片在开挖面的对称轴上相交, 因此理论坍塌面是完全对称的。虽然可以观察到预测坍塌曲线与云图分布之间的一些偏差, 但高度和宽度非常一致, 证明了上述失效机制的有效性。CD 开挖坍塌块体的估计相对高度为  $5.15 \text{ m}$ ; 相比之下, 预计全开挖高度为  $17.18 \text{ m}$ , 是前者的 3.34 倍。对比表明, CD 开挖可以更好地限制顶板坍塌块的范

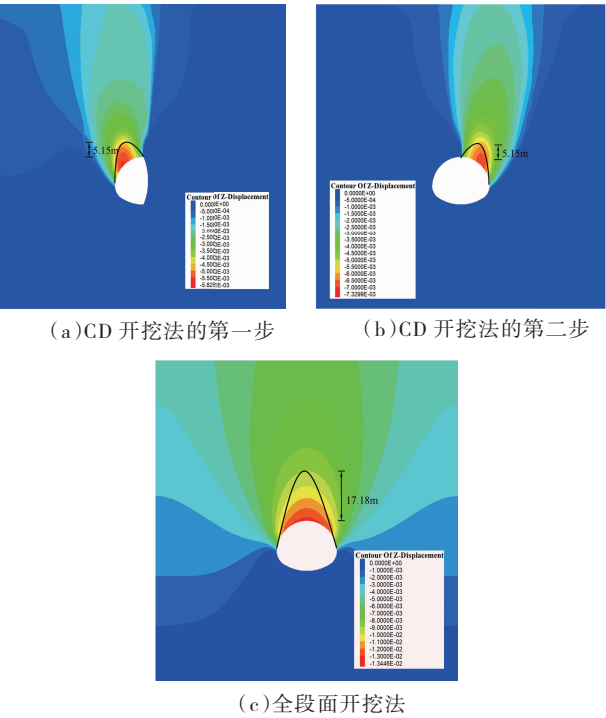


图 5 CD 法和全断面法开挖引起的隧道沉降对比

围,从而比全断面开挖法更安全。

5 结 论

在本研究中,基于极限分析的上限定理,提出了 CD 开挖工法下隧道顶部围岩的破坏机理。重点研究了由 CD 法开挖引起的隧道坍塌形状,并从坍塌形状和安全系数两个角度将结果与全断面开挖法进行了比较。根据参数分析,我们可以看出 CD 法和全开挖法的区别在于两个方面:更小的坍塌高度和更大的

安全系数。通过比较有限差分分析的结果,证实了所提出的失效机制的一致性和有效性。

参考文献:

[1] 罗彦斌,石州,陈建勋,等.超大跨度隧道上台阶 CD 法中隔壁力学计算模型及施工力学行为研究[J].中国公路学报,2020,33(12):235-248.

[2] 陈磊.软弱围岩地层 CD 法施工隧道稳定性研究[J].公路,2022,67(12):424-430.

[3] Sharifzadeh M,Kolivand F,Ghorbani M,et al. Design of sequential excavation method for large span urban tunnels in soft ground - Ni-ayesh tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013(35):178-188.

[4] 屈文彬.软弱含水砂岩隧道 CRD 法施工支护变形及受力特性研究[J].力学季刊,2022,43(4):970-981.

[5] Seki J,Okada M,Inoue H,et al.Adaptability of upper half vertical subdivision method to flat and large diameter tunnel construction[C]// Proceedings of the International Congress on Progress and Innovation in Tunnelling, 1989.

[6] Fraldi M,Guarracino F.Limit analysis of collapse mechanisms in cavities and tunnels according to the Hoek - Brown failure criterion [J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009,46(4):665-673.

[7] 黄阜.隧道围岩塌落机理与锚杆支护结构的上限分析研究[D].长沙:中南大学,2012.

[8] 于丽,吕城,夏鹏曦,等.考虑孔隙水压力作用下浅埋黄土隧道稳定性的上限分析[J].铁道学报,2021,43(11):153-159.

[9] 杨峰,何诗华,吴遥杰,等.非均质黏土地层隧道开挖面稳定运动单元上限定元分析[J].岩土力学,2020,41(4):1412-1419,1436.

[10] Hoek E,Brown E T.Practical estimates of rock mass strength[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997,34(8):1165-1186.

(上接第 217 页)

中建议控制推进速度控制在 5 mm/min 之下。

(3)贝壳刀接触面积大,切削时能将 FFU 碎渣整块排除。刮刀接触面积小,切削时碎渣更小,更容易沾附在刀具间隙和刀具表面上,致使推进速度产生更大的波动。建议在工程中选用贝壳刀对 FFU 进行切削。

(4)FFU 作为新型材料,可切削性良好,使用贝壳刀和刮刀,都能在较短的时间内将 FFU 试件切穿,但由于 FFU 试件产生的碎渣多为纤细的拉丝状,容易沾附刀盘上,导致排渣不顺,建议在施工中搭配泥水循环系统使用。

参考文献:

[1] 岳丰田,张水宾,仇培云,等.地铁联络通道冻结加固技术研究[J].地下空间与工程学报,2006,2(8):1341-1345.

[2] 杨太华.越江隧道工程联络通道冻结法施工风险分析[J].地下空间与工程学报,2010,6(6):1201-1206.

[3] 陈裕康,何立军.地铁联络通道顶管法施工技术分析及[J].岩土工程界,2007,10(12):48-51.

[4] 高波,陈裕康.顶管法在地铁盾构区间隧道联络通道中的应用[J].施工技术,2005,32(6):19-23.

[5] 吴俊,袁大军,李兴高,等.盾构刀具磨损机理及预测分析[J].中国公路学报,2017,20(8):109-116.

[6] 张军,何振华.FFU 在盾构施工中的应用[J].隧道建设,2007(6):63-65,75.