

小净距盾构隧道开挖面稳定性研究

高 琪

(中铁十二局集团有限公司第四工程有限公司, 710016, 西安)

摘 要 [目的] 确定双线小净距盾构隧道施工过程中维持掌子面稳定所需极限支护压力。[方法] 综合利用数值模拟、理论解析和工程验证的方法对双线小净距盾构隧道开挖面稳定性开展研究。采用数值模拟对双线小净距盾构隧道掌子面失稳模式和极限支护压力进行分析, 基于数值模拟结果提出了双线盾构隧道开挖面失稳解析模型, 并利用极限平衡理论推导出了维持掌子面稳定所需的极限支护压力。[结果及结论] 小净距盾构隧道在施工过程中会形成联合土拱, 联合土拱作用下, 维持双线小净距隧道开挖面稳定所需的极限支护压力会显著增加。理论解析表明, 当净距小于 $0.5D$ (D 为隧道直径) 时, 极限支护压力随着净距增大而增大; 当净距超过 $0.5D$ 时, 极限支护压力随着净距的增大而减小; 当净距超过 $2.0D$ 时, 联合土拱无法形成, 此时破坏模式与单洞隧道破坏模式相同, 净距对极限支护压力不再产生影响。

关键词 地铁; 双线隧道; 小净距; 开挖面稳定性; 极限支护压力

中图分类号 U455.43

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.01.018

Study on Stability of Small Clearance Shield Tunnel Excavation Face

GAO Qi

(The 4th engineering Co., Ltd., China Railway 12th Bureau Group Co., Ltd., 710016, Xi'an, China)

Abstract [Objective] Determine the limit support pressure required to maintain tunnel face stability during the construction of double-line small clearance shield tunnel. [Method] The excavation stability of double-line small clearance shield tunnel is studied by using a combination of numerical simulation, theoretical analysis and engineering verification. Numerical simulation is used to analyze the instability mode and limiting support pressure of double-line small clearance shield tunnel face. Based on the numerical simulation results, an analytical model for the instability of a double-line shield tunnel excavation face is proposed, and the limit support pressure required to maintain the tunnel face stability is derived by using the limit equilibrium theory. [Result & Conclusion] During the construction process of the small-clearance shield tunnel, a combined soil

arch will be formed. Under the action of the combined soil arch, the limit support pressure required to maintain the stability of the double-line small-clearance tunnel excavation surface will increase significantly. Theoretical analysis shows that when the clearance is less than $0.5D$ (D is the tunnel diameter), the limit support pressure increases with the increase of the clearance; when the clearance exceeds $0.5D$, the limit support pressure decreases with the increase of the clearance; when the clearance exceeds $2.0D$, the combined soil arch cannot be formed, and the failure mode in this case is the same as that of the single-hole tunnel, and the clearance no longer affects the limit support pressure.

Key words metro; double-line tunnel; small clearance; excavation face stability; limit support pressure

地铁隧道建设施工过程中, 相较于单洞隧道, 双线隧道存在先行隧道施工扰动, 因此隧道掌子面稳定性更差^[1]。因此, 合理确定双线隧道支护压力具有重要工程意义。

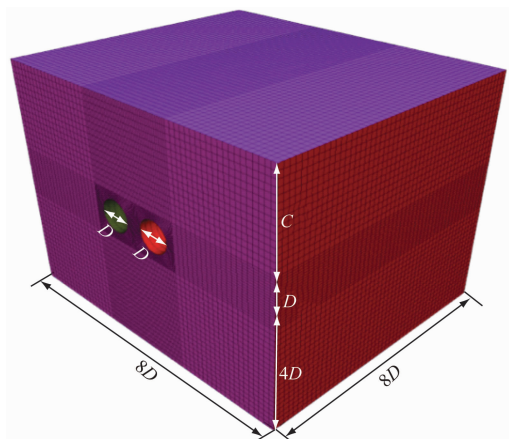
对于单洞隧道开挖面支护压力求解方法, 文献[2]通过模型试验得到了隧道掌子面失稳模式; 文献[3]通过数值模拟探究了隧道参数和土体参数对极限支护力的影响规律; [4-5] 基于模型试验和数值模拟结果提出了隧道开挖面的解析模型, 文献[4]利用极限平衡法求解支护压力, 文献[5]利用极限分析法求解支护压力。对于双线隧道的研究主要集中在双线隧道联合土拱形成机理^[6]、双线隧洞围岩压力确定方法^[7]和双线隧道施工引起的地面沉降规律, 对双线盾构隧道开挖面稳定性研究较少。

根据文献[8]研究发现, 先行隧道会对后行隧道开挖面的稳定性产生显著影响。本文首先利用数值模拟研究了双线隧道掌子面失稳模式, 基于失稳模式提出了双线隧道掌子面失稳解析模型并利用极限平衡理论推导解析解。本研究可为双线小净距盾构隧道施工提供理论基础。

1 数值模拟

1.1 数值模型

为研究两隧道净距 W 和洞径 D 对深埋双线盾构隧道开挖面稳定性的影响,本文采用数值模拟方法进行分析。数值模型如图 1 所示。



注: C —隧道埋深。

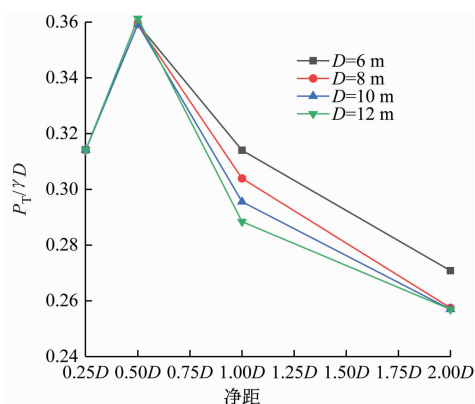
图 1 数值模型

Fig. 1 Numerical model

1.2 数值模拟结果分析

1.2.1 极限支护压力比

不同洞径条件下,极限支护压力比随净距的变化规律如图 2 所示。由图 2 可知:极限支护压力比值随着净距的增大先增大后减小,当净距为 $0.5D$ 时,极限支护压力比值最大;当净距超过 $0.5D$ 后,极限支护压力比值随着净距的增大逐渐减小。



注: P_T —极限支护压力; γ —土体重度。

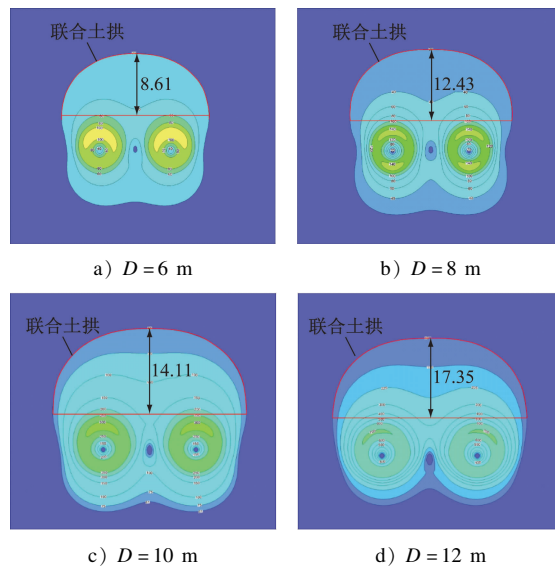
图 2 极限支护压力比与净距的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between limit support pressure ratio and clearance

1.2.2 联合土拱形状

内摩擦角为 25° 、净距为 $0.5D$ 时,不同洞径下

双线隧道掌子面失稳时的位移云图如图 3 所示。将位移突变处作为破坏区边界,可以得到联合土拱形状。当洞径 D 为 6 m 时,联合土拱高度为 8.61 m;洞径 D 为 8 m 时,联合土拱高度为 12.43 m;洞径 D 为 10 m 时,联合土拱高度为 14.11 m;洞径 D 为 12 m 时,联合土拱高度为 17.35 m。



单位: m

图 3 双线隧道掌子面失稳时位移云图

Fig. 3 Displacement nephogram of double-line shield tunnel face during instability

2 联合土拱高度

文献[7]认为,联合土拱高度存在极限值并与隧道洞径之和成正比,与土体的内摩擦角的正切值成反比。联合土拱高度的试验值^[6]和数值模拟值统计如表 1 所示。通过分析发现:

$$H_{\text{arc}} = (D_L + D_R) / (3 \tan \varphi) \quad (1)$$

式中:

H_{arc} ——联合土拱高度,单位 m;

D_L ——左线隧道洞径,单位 m;

D_R ——右线隧道洞径,单位 m;

φ ——土体内摩擦角,单位($^\circ$)。

3 理论模型

3.1 破坏模式

基于数值模拟结果,建立三维楔形体模型,如图 4 所示。隧道前方的破坏区分为两部分:下方楔形体和上方土拱。楔形体倾角与水平面夹角 $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$ 。上部土拱内土体通过竖向土压力 p_v 作

表 1 联合土拱高度统计表

Tab. 1 Combined soil arch height statistical table

项目	$\varphi/(^{\circ})$	D/m	W	H_{arc}/m
文献[6]	30.6	0.12	0.25D	0.092
			0.50D	0.138
			0.75D	0.138
本文模型	25.0	6.00	0.25D	6.400
		6.00	0.50D	8.600
		6.00	1.00D	7.400
		6.00	2.00D	6.400
	30.0	10.00	0.25D	8.700
		10.00	0.50D	11.500
	30.0	10.00	1.00D	9.900
		10.00	2.00D	8.700

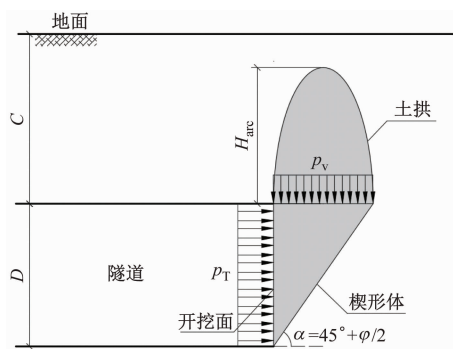


图 4 双线隧道失稳机制

Fig. 4 Instability mechanism of double-line tunnel

用于楔形体上部, p_T 作用于开挖面, 以维持开挖面稳定。

3.2 支护压力求解

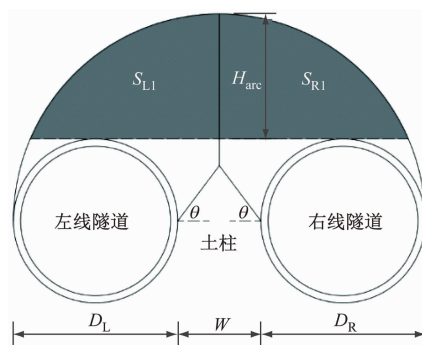
3.2.1 上部土压力计算

综合数值模拟和已有研究结果, 可得到小净距双线隧道联合土拱高度 H_{arc} 。

对于如图 5 所示极小净距隧道土拱模式, 当 $W \leq D/\tan \theta$ 时(土体破裂面与水平面夹角 $\theta = 45^\circ + \varphi/2$), 中间土柱作用很弱, 上部荷载主要由楔形体承担。左侧土拱面积 S_{L1} 和右侧土拱面积 S_{R1} 计算公式为:

$$S_{L1} = S_{R1} = \frac{(D_L + D_R + W)H_{\text{arc}}}{3} \quad (2)$$

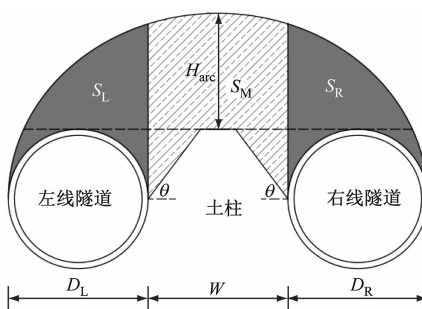
对于如图 6 所示小净距隧道土拱模式, 当 $W > D/\tan \theta$ 时, 中间土柱可以承受部分土拱传来的土压力。假设左线隧道、右线隧道以及中间土柱分别承



注: θ —土体破裂面与水平面夹角。

图 5 极小净距隧道土拱模式

Fig. 5 Soil arch mode of extremely small clearance tunnel



注: S_M —中间土拱面积。

图 6 小净距隧道土拱模式

Fig. 6 Soil arch mode of small clearance tunnel

担左侧土拱、右侧土拱和中间土拱内土体的质量, 则 S_L 计算公式可为:

$$S_L = \min \left\{ \left(H_{\text{arc}} + \frac{D_L}{2} \right) D_L - \frac{a(W_0^3 - W^3)}{24} - \frac{\pi D_L^2}{8}, \frac{2D_L H'_{\text{arc}}}{3} - \frac{\pi D_L^2}{8} \right\} \quad (3)$$

式中:

W_0 ——左、右隧道洞径和净距之和, 单位 m;

a ——中间计算参数;

H'_{arc} ——单拱高度, 单位 m。

$$a = \frac{4(H_{\text{arc}} + D_L/2)}{W_0^2} \quad (4)$$

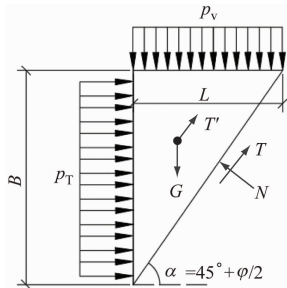
$$H'_{\text{arc}} = \frac{D_L}{2 \tan \varphi} \quad (5)$$

对于极小净距和小净距隧道, p_v 计算公式为:

$$p_v = \begin{cases} \frac{\gamma S_{L1}}{D_L}, & \text{极小净距情况} \\ \frac{\gamma S_L}{D_L}, & \text{小净距情况} \end{cases} \quad (6)$$

3.2.2 极限支护压力求解

取下部楔形体作为研究对象,如图 7 所示。根据理论分析,楔形体滑动面与水平面的夹角 $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$ 。 $B = D\sqrt{\pi}/2$ 通过面积等效求得。



注: N —楔形体滑动面法向作用力; B —开挖面等效边长; L —楔形体宽度; T —楔形体滑动面摩擦力; T' —楔形体侧面摩擦力。

图 7 楔形体极限支护压力计算简图

Fig. 7 Schematic calculation diagram of wedge-shaped body limit support pressure

根据莫尔-库伦准则,楔形体滑动面上 N 和 T 的关系为:

$$T = \frac{cB^2}{\sin \alpha} + N \tan \varphi \quad (7)$$

楔形体侧面摩擦力 T' 计算公式为:

$$T' = \frac{B^2}{2 \tan \alpha} \left[c + K_0 \tan \varphi \left(\frac{2}{3} p_v BL + \frac{B\gamma}{3} \right) \right] \quad (8)$$

式中:

K_0 ——土体侧压力系数, $K_0 = 1 - \sin \varphi$ 。

通过对楔形体水平和竖直方向平衡方程求解可得极限支护压力 p_T :

$$p_T = \left[\beta (p_v BL + M) - \left(\frac{cB^2}{\sin \alpha} + 2T' \right) \cdot (\beta \sin \alpha + \cos \alpha) \right] / B^2 \quad (9)$$

式中:

M ——楔形体自重, $M = \gamma B^3 / (2 \tan \alpha)$;

β ——中间计算系数, $\beta = (\sin \alpha - \tan \varphi \cos \alpha) / (\cos \alpha + \tan \varphi \sin \alpha)$ 。

4 极限支护压力影响因素分析

γ 为 18 kN/m^3 时,分别讨论 W 、 D 和 φ 对极限支护压力的影响。

4.1 W 对极限支护压力影响

不同洞径下, W 对极限支护压力的影响如图 8 所示。由图 8 可知:当 $W \leq 0.5D$ 时,极限支护压力

随着净距的增大呈线性增大。当 $0.5D < W \leq 2.0D$ 时,极限支护压力随着净距的增大首先会产生 10% 左右的骤降,然后随着净距的增大逐渐呈线性减小。引起极限支护压力骤降的主要原因是,随着净距的增大,中间土柱承担了部分土重,从而减小了楔形体承担的土重。当 $W > 2.0D$ 后,联合土拱无法形成, W 对极限支护压力不再产生影响。

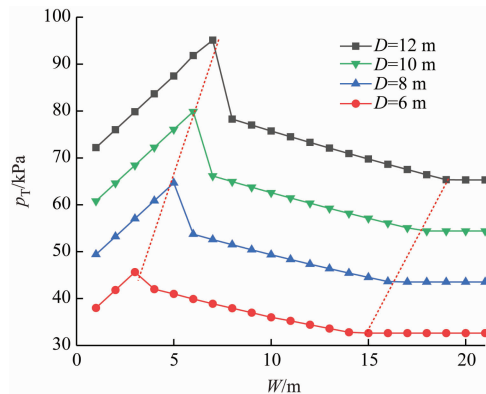


图 8 隧道净距对极限支护压力影响

Fig. 8 Influence of tunnel clearance on limit support pressure

4.2 D 对极限支护压力影响

不同净距下,洞径对极限支护压力的影响如图 9 所示。由图 9 可知:极限支护压力随着隧道洞径增大呈线性增大。当 $W = 0.5D$ 时,极限支护压力对洞径变化更敏感,主要原因为,随着洞径增大,联合土拱高度增大,导致楔形体承担的土重更大,因此极限支护压力随之增大。当 $W = 0.5D$ 时,净距较小,中间土柱发挥的作用极小,上部土重主要由下部楔形体承担。当净距超过 $1.0D$ 后,中间土柱承担部分土重。

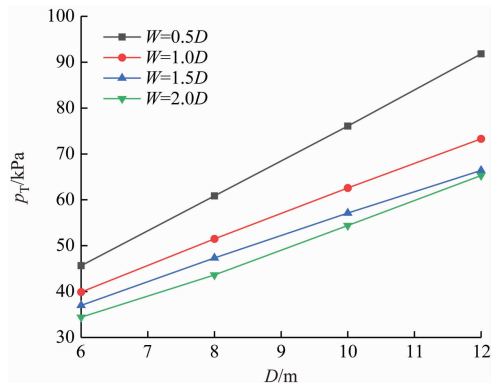


图 9 隧道直径对极限支护压力影响

Fig. 9 Influence of tunnel diameter on limit support pressure

4.3 φ 对极限支护压力的影响

不同净距下,内摩擦角对极限支护压力的影响

规律如图10所示。由图10可知,极限支护压力随着内摩擦角增大呈非线性地减小,最终趋于同一值。内摩擦角对极限支护压力的影响主要体现在两个方面:一方面,土拱高度随着内摩擦角的增大而减小,因此上部土重减小;另一方面,随着内摩擦角的增大,破坏面上的摩擦力增大,导致极限支护压力减小。

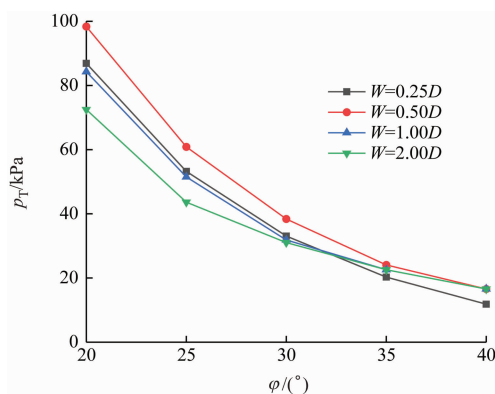


图10 土体内摩擦角对极限支护压力影响

Fig. 10 Influence of internal friction angle on limit support pressure

5 结论

1) 小净距双线隧道施工时,在掌子面的前上方会形成联合土拱,联合土拱的高度随着净距的增大而增大,但是存在极限高度。由于联合土拱的影响,极限支护压力会增加。

2) 提出了极小净距隧道和小净距隧道的联合土拱模式。基于楔形体模型提出了联合土拱+楔形体的组合破坏模式,并采用极限平衡理论得到了双线盾构隧道开挖面极限支护压力的解析解。

3) 极限支护压力随着净距的增大先增大后减小,当净距超过 $2.0D$ 时,破坏模式与单洞隧道破坏模式相同。极限支护压力随着洞径的增大呈线性增大,随着内摩擦角的增大呈非线性减小。

参考文献

- [1] DENG H, CAO P, LIU Y, et al. Numerical analysis of ground settlement patterns resulting from tunnel excavation in composite strata[J]. Applied Sciences, 2022, 12(11): 5479.
- [2] CHEN R P, LI J, KONG L G, et al. Experimental study on face instability of shield tunnel in sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 33: 12.
- [3] LI P, WEI Y, ZHANG M, et al. Influence of non-associated flow rule on passive face instability for shallow shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 119: 104202.
- [4] CHEN R P, TANG L J, YIN X S, et al. An improved 3D wedge-prism model for the face stability analysis of the shield tunnel in cohesionless soils[J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(5): 683.
- [5] LI P, ZOU H, WANG F, et al. An analytical mechanism of limit support pressure on cutting face for deep tunnels in the sand[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 119: 103372.
- [6] 晏莉, 吕超慧, 喻少华, 等. 近邻双孔隧道围岩联合压力拱试验与数值分析[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(3): 103.
YAN Li, LYU Chaohui, YU Shaohua, et al. Test and numerical analysis on combined pressure arch of surrounding rock in adjacent twin tunnels[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(3): 103.
- [7] 李鹏飞, 王帆. 深埋非对称小间距隧道围岩压力计算方法[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(4): 612.
LI Pengfei, WANG Fan. Calculation method of loosening pressure for deep-buried and non-symmetry closely-spaced tunnels[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(4): 612.
- [8] 王闯, 封坤, 戴志成, 等. 富水地层双线小净距土压平衡盾构开挖面稳定性研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(12): 112.
WANG Chuang, FENG Kun, DAI Zhicheng, et al. Study on the excavation face stability of small interval double-line earth pressure balance shield tunnel in water-rich stratum[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(12): 112.

· 收稿日期:2024-04-15 修回日期:2024-08-03 出版日期:2025-01-10

Received:2024-04-15 Revised:2024-08-03 Published:2025-01-10

· 通信作者:高琪,高级工程师,3134432501@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第102页)

ZHAO Yue, HE Yuanpeng, HAN Jian, et al. Measurements and analyses of curve squeal caused by tram[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10): 133.

[8] MATSUMOTO A, SATO Y, ONO H, et al. Creep force characteristics between rail and wheel on scaled model[J]. Foreign Rolling Stock, 2004, 253(1/2): 199.

[9] EADIE D T, SANTORO M. Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction[J]. Journal of

Sound and Vibration, 2006, 293(3/4/5): 747.

· 收稿日期:2022-08-10 修回日期:2022-11-02 出版日期:2025-01-10

Received:2022-08-10 Revised:2022-11-02 Published:2025-01-10

· 通信作者:刘宇航,工程师,632562648@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license