

泥浆渗透对盾构开挖面稳定性的影响研究

李 昀^{1, 2}, 张子新^{1, 2}

(1. 同济大学 岩土工程重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 泥水平衡盾构开挖时, 泥浆与开挖面上的土体会形成一层不透水的泥膜, 以便泥浆压力有效地作用在开挖面上。但由于刀盘的不断切削, 泥膜并不能完全地阻止泥浆对前方土体的渗透, 特别是在渗透性较大的砂性土体, 或在特殊地质条件下出现泥浆与土体性质不匹配的时候。这种渗透将会减小泥浆对开挖面的支撑作用, 过剩泥浆压力将以渗透力的形式作用于开挖面土体。为了定量考虑渗透对开挖面稳定性的削弱, 提出了针对泥水平衡盾构开挖面稳定性的泥浆渗透模型。结合极限平衡法的村山公式, 考虑泥水的渗透区域与滑动面之间的几何关系对泥水压力进行折减, 得到了泥浆渗透模型的开挖面稳定性安全系数, 并采用此渗透模型探讨了泥浆渗透对开挖面稳定性的影响。通过与工程算例对比分析表明, 实际工程中所需的泥浆压力明显大于“薄膜模型”的计算结果。因此, 采用渗透模型进行开挖面稳定性分析是合理、有效的。

关 键 词: 泥水平衡盾构; 渗透模型; 开挖面稳定性; 泥水渗透; 安全系数

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Influence of slurry infiltration model on face stability mechanism

LI Yun^{1, 2}, ZHANG Zi-xin^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: During the excavation of tunnels in saturated soft soils, pressurized bentonite slurry is often used to support the tunnel face. The slurry should form a filter cake, which is used to transfer the support pressure onto the soil. This filter cake is constantly removed by the cutter head of the slurry shield and slurry will infiltrate into the soil while the filter cake rebuilds. This results in a decreasing of the support effectiveness of the slurry. To quantify the influence of these decreasing of the face stability, an infiltration model has been incorporated in a limit equilibrium analysis. The decreasing of safety factor of face stability according to the permeability of the soil in front is analyzed. The slurry pressure calculated with this model has been compared with field measurements. It is shown that the slurry pressure needed is significantly higher, compared with full-membrane calculations.

Key words: slurry shield; slurry infiltration model; face stability; slurry infiltration; safety factor

1 引 言

泥水平衡盾构工法以其施工质量好、效率高、技术先进、安全可靠等优点, 近年来已经得到了广泛的使用, 特别是存在大量含水砂砾层, 地质条件复杂, 无凝聚力、极不稳定土层和覆土浅的工程, 以及超大直径盾构和对地面变形要求特别高的地区施工的工程中, 更能体现它独有的优越性。但是在这样复杂艰难的地质条件下施工, 风险之大也给泥水平衡盾构工法提出了更高的要求。如在高水压、

砂砾地层或者不稳定地层中泥水平衡盾构工法开挖面的稳定性问题, 近年来得到了工程界较为广泛的关注。

在开挖面稳定性研究理论方面, 主要有极限平衡法、上下限法和有限元分析方法。但现阶段工程中, 对泥水盾构开挖面稳定性的估算不管是采用上下限解、极限平衡法, 或者有限元分析方法, 都采用的是薄膜模型, 泥浆压力以面力的形式作用于开挖面。

但是在实际工程中, 特别是在砂砾地层中, 泥

浆将会渗透到地层中一定距离, 这时采用薄膜模型并不合理。泥浆向开挖面渗透将会减小泥浆压力的有效性, 从而影响开挖面的稳定性。Anagnostou 和 Kovari 在 1994 年提出了考虑泥浆渗透的楔形体渗透模型^[1], 并提出在砂性土中掘进时盾构所提供的支护力可以采用薄膜模型进行计算; 而在盾构停止开挖的静止状态, 泥浆渗透将会大大影响开挖面的稳定性。另外, 由于实际地质条件的复杂性, 在盾构推进中如果遇到特殊地质情况, 如透镜体或局部砂层时, 由于没有及时调整泥浆参数而不能形成高质量的泥膜, 泥浆渗透将不可避免, 此时应该采用渗透模型来分析这种开挖面的稳定情况。本文将结合极限平衡法中的村山公式, 分析泥浆渗透模型中开挖面的稳定机理, 以及泥浆渗透对开挖面稳定性安全系数的影响, 以期在遇到复杂地质条件的情况下, 能够更准确地判断开挖面的稳定性, 并给出合理的泥浆压力设定值。

2 村山公式基本原理及其不足

1966 年村山氏等学者根据二维试验及施工时的塌方状况提出了二维法村山公式^[2]。其基本原理如图 1 所示。该模型考虑开挖面前方土体的平衡, 作为滑动力有开挖面前方的滑动土块重量 W_f 和它上部的松动土压 Q ; 作为阻力有泥水过剩压力 (也就是泥水压力和地下水压的压差 ΔP), 将以上 3 个力对滑动中心点 O 点的力矩平衡。因此, 根据设定的泥水压力可以求出开挖面稳定的安全系数 F_s 。

图 1 中, 开挖面前方的滑动面形状为对数螺线, 若认为该对数螺线在盾构顶端高度形成竖直方向、在下端部形成水平 ($\pi/4 + \phi/2$) 角, 那么滑动面形状基本上可由盾构直径 D 和土的内摩擦角 ϕ 来决定。这样, 村山公式得到了一定的简化, 可以不必用试算法直接求出滑动面的形状。

通过上述简化, 求出对数螺线形状 3 个力对滑动中心 O 点的力矩, 则开挖面稳定的安全系数 F_s 可以通过下式求出:

$$F_s = \frac{M_1}{M_w + M_Q} = \frac{M_1}{W_f l_w + Q l_a} \quad (1)$$

式中 M_1 为泥水压力产生的阻力力矩; M_w 为开挖面前方滑动土体自重产生的力矩; M_Q 为松动土压产生的力矩。

如同其他现有的开挖面稳定计算方法, 村山公式在计算开挖面稳定时, 采用的是传统的薄膜模型。由于泥浆的渗透, 会导致泥浆压力的损失, 减小开

挖面的稳定性, 如果能够定量地确定这种渗透作用的影响, 并且将这种影响直观地表现在开挖面稳定性安全系数上, 将会弥补现有开挖面稳定计算方法的不足。

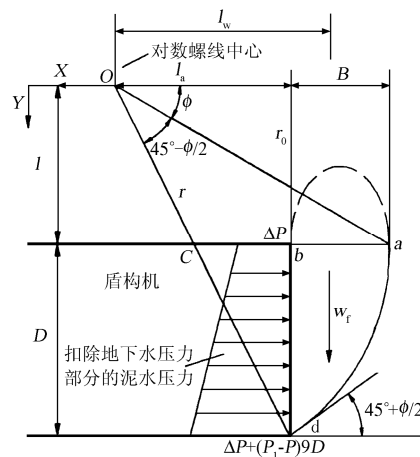


图 1 村山公式的基本原理

Fig.1 The theory of Murayama method

3 泥浆渗透模型

3.1 泥浆渗透机理和渗透模型

在泥水与开挖面地层接触时, 由于作用在开挖面上的泥水压力大于开挖面地层的孔隙水压力 (即地下水压), 泥水中的细粒成分及水通过地层间隙流入开挖面地层。其中, 细粒成分填充地层间隙, 使地层的渗透系数变小, 形成泥膜 (filtercake), 而泥水中更加细粒的成分和水通过间隙流入地层。

大量工程和试验结果表明, 根据不同的地层条件和泥膜形成情况, 泥水在开挖面的渗透形态可以分为以下 3 种^[3]: 类型 1 是地层的有效间隙 $L < D_{\min}$ (泥水最小粒径) 的情况, 在泥水与开挖面接触后, 很短的时间内形成渗透系数很小的泥膜, 泥膜成形后滤水量、过剩地下水压停止增加。这种情况多发生在黏粒土、粉粒土及细砂土等土层; 类型 2 是地层的有效间隙 $L > 3D_{\max}$ (泥水最大粒径) 的情况。全部泥水可以经过地层间隙流走, 无法形成泥膜, 渗流速度大、脱水量大、过剩地下水压大, 无法稳定开挖面。这种情况多发生于粗砂、砾石等地层; 类型 3 是 $3D_{\max} > L > D_{\min}$ 的情况, 该类型的特点是泥水中的颗粒成分向地层间隙渗透、填充, 最后形成泥膜, 多发生于 (中、细) 砂土地层中。

在薄膜模型中, 泥浆压力作为外力完全有效地作用于不透水的薄膜上, 如图 2 (a) 所示。薄膜模型对应于上述的第 1 种渗透类型, 而这种渗透类型在实际中仅是一种理想状况, 实际中不可能存在完

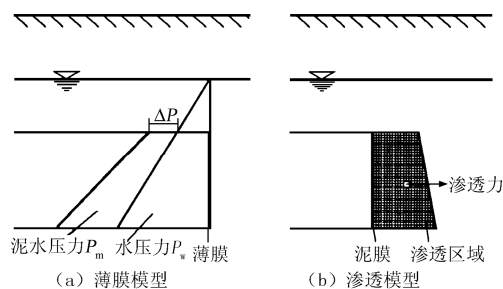
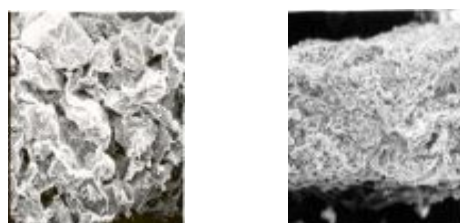


图 2 开挖面稳定的两种模型

Fig.2 Two kinds of face stability models

全不透水的泥膜；类型 2 和类型 3 是实际中广泛存在的情况，这两种类型都可以归结为更具代表性的渗透模型，如图 2 (b) 所示。有试验证明，在渗透性较好的砂土中，即使是已经形成了质量较好的泥膜，在受到刀盘切削变薄后，也会表现出完全是砂的透水性^[4]。此时，仍然采用薄膜模型计算开挖面的稳定性是不合理的，应该采用渗透模型考虑泥浆渗透对稳定性的削弱。

泥浆与土体性质直接决定了泥膜形成的质量，是决定采用何种开挖面稳定模型的关键。与土体性质配合恰当的泥水将形成有效的、致密的泥膜；反之，则形成孔隙大、疏松的泥膜。图 3 是在试验室内模拟盾构隧道开挖面工况制作的泥膜在电子显微镜 (SEM) 下的照片^[5]。



(a) 低密度、低黏度
泥浆生成的泥膜

(b) 高密度、高黏度
泥浆生成的泥膜

图 3 泥膜断面的 SEM 照片 (放大 300 倍)

Fig.3 SEM pictures of mudcakes

由于地质条件的复杂性，当遇到特殊地质情况而没有及时调整泥浆性质时，则可出现泥浆与土体配合不当的情况，很可能出现如图 3 (a) 所示的疏松泥膜，甚至不能形成泥膜，泥浆将不断向前方渗透，此时也应该采用如图 2 (b) 所示的渗透模型，考虑泥浆渗透对开挖面稳定性产生的影响。

在渗透模型中，泥浆渗到开挖面前方一定深度，渗透区域中泥水在地层中流动，受到土体颗粒对泥水的阻力，这种阻力的反作用力，即为泥水对土体颗粒的渗透力。因此，在泥水向开挖面渗透的

过程中，泥浆的有效压力实际上是以渗透力形式作用于开挖面土体，即泥浆渗透力。泥浆渗透力作用于滑动面以内的土体，可以形成阻止开挖面失稳的阻力矩；但作用于滑动面以外的部分并不能起到稳定作用。因此，在渗透模型中，过剩泥浆压力应该按照泥浆渗透力的有效性折减，薄膜模型也成为渗透模型的一种特殊情况，即泥浆渗透力不折减的情况。结合极限平衡法中的村山公式，并考虑泥水对开挖面渗透造成泥浆压力损失的机理，可以建立开挖面稳定性的渗透模型计算方法。

3.2 薄膜模型的开挖面稳定性安全系数

3.2.1 渗透模型基本原理

在渗透区域内，泥水过剩压力 ΔP_f 将转化为均匀分布的体积力，即泥浆渗透力，而渗透模型中考虑了泥浆渗透力就不能重复考虑过剩泥浆压力。因此，泥水过剩压力 ΔP_f 的有效性仅决定于泥浆渗透区域的范围和滑动面之间的几何关系。

当泥水压力大于地下水压力时，泥水按达西定律渗入土壤。G. Anagnostou 和 K. Kovari 提出，泥水渗透的厚度与作用在开挖面上的泥水过剩压力 ΔP_f 成正比，关系如下^[2]：

$$e = \varepsilon \Delta P_f \quad (2)$$

式中 e 为泥浆渗透区域的厚度，即最大渗透深度； ΔP_f 为泥浆压力与地下水压力的差值，即泥水过剩压力； ε 为泥浆渗透参数，该系数也与泥浆和土体的性质有关，单位 kPa/m。

在渗透区域以内土体都受到泥浆的渗透力，而滑动土块的对数螺线之外的土体所受到的渗透力对开挖面的稳定是没有作用的，不能作为有效地支撑力。因此，有

$$P'_f = \eta \Delta P_f \quad (3)$$

式中 P'_f 为考虑渗透作用的有效泥水压力； η 为有效泥水压力的修正系数，可以根据泥浆渗透厚度与滑动面的几何关系确定。

3.2.2 对有效压力的修正及考虑渗透的稳定性安全系数计算公式

由于泥浆的重度比水的重度大，泥浆过剩压力是梯形分布，如果设定泥浆过剩压力在盾构顶部为 ΔP_f ，则盾构底部为 $\Delta P_f + D(\gamma_f - \gamma_w)$ ，泥浆的渗透区域也为梯形分布。为了计算简便，可将滑动面的对数螺线简化成直线，这种简化对修正系数 η 的影响不大，而且可以验证这样的考虑是偏安全的。因此，渗透情况可以分两种情况考虑，如图 4 所示。

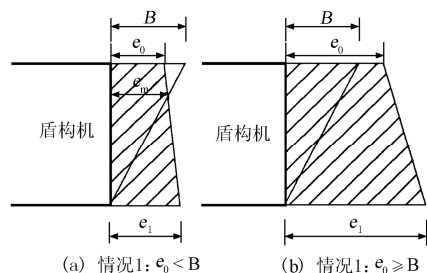


图4 考虑渗透区域的不均匀时两种渗透情况

Fig.4 Two kinds of slurry penetration states considering the non-uniform penetration area

假定 ε 在盾构穿越的地层中是恒定值, 则

$$\begin{aligned} e_0 &= \varepsilon \Delta P_f \\ e_1 &= \varepsilon [\Delta P_f + D(\gamma_f - \gamma_w)] \end{aligned} \quad (4)$$

式中 e_0 为盾构顶部的渗透区域厚度; e_1 为盾构底部的渗透区域厚度。

根据 e_0 与松动幅 B 的关系可以得出 η 值:

$$\eta = \frac{\left(1 - \frac{e_m}{B}\right)(e_0 + e_m) + \frac{e_m^2}{B}}{e_0 + e_1} \quad (e_0 < B)$$

$$\eta = \frac{B}{e_0 + e_1} \quad (e_0 \geq B)$$

式中 η 为有效泥水压力修正系数; B 为松动幅, 即盾构顶部滑动面距开挖面的距离 (如图 1); e_m 为渗透区域与滑动面交点处的渗透厚度, 计算式如下

$$e_m = \frac{e_1 B}{e_1 + B - e_0} \quad (6)$$

将式 (5) 带入式 (3), 可以得出考虑渗透区域梯形分布时候的有效泥水压力。因此, 可以计算有效泥水压力 P_f' 对开挖面产生的阻力矩 M_1' , 并代入式 (1) 得到考虑泥浆渗透的稳定性安全系数计算公式:

$$F_s' = \frac{M_1'}{M_w + M_Q} \quad (7)$$

上式各符号意义同前。

4 工程实例

于 2002 年建成的上海大连路隧道位于杨浦区、浦东新区内, 共设东、西 2 条隧道, 总长 2 565.88 m。

采用 $\phi 11.22$ m 的泥水平衡盾构掘进施工, 每环管片宽 1.5 m。本算例采用大连路隧道西线自浦东井开始前 110 环试验段的工程数据。前 110 环试验段地下水位线在地表以下 0.28 m 处。埋深为 10 m ~ 21.7 m, 推进轴线坡度为 4 %。按照大连路隧道工程实际, 主要计算参数如表 1 所示。

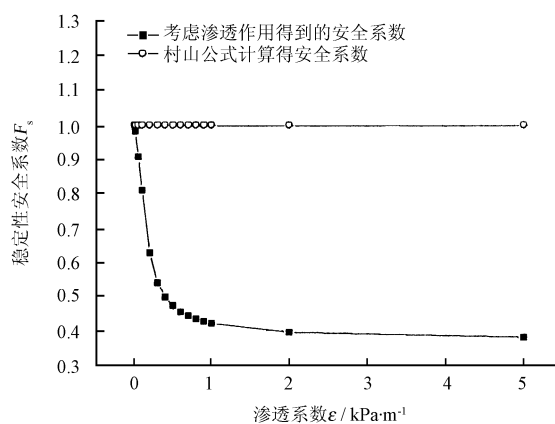
表1 算例中各项的取值表

Table 1 The values of the parameters of the case

参数	取值	参数	取值
$\gamma'_1 / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	8.0	H_1 / m	11.22
$\phi / (^\circ)$	13.49	H_2	0
K	1.0	D / m	11.22
$\gamma_f / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	12.0	$\Delta P_f / \text{kPa}$	31

ΔP_f 取为 31 kPa, 是因为按照村山公式计算所需的泥浆过剩压力为 31 kPa, 即此时安全系数为 1.00。

当考虑泥水的渗透作用, 不同的渗透参数 ε 值对 F_s 值的影响如图 5。

图5 泥浆的渗透参数 ε 值对开挖面稳定安全系数 F_s 影响Fig.5 Effect of the slurry penetration coefficient ε on the stability safety factor F_s

由图 5 可知, 泥浆的渗透参数 ε 对开挖面稳定性的影响非常大。安全系数随着 ε 值的增大而减小; 当 ε 值增大到 1 以上, 安全系数稳定在 0.4 左右, 并趋于收敛, 这是由于泥浆渗透区域增大到一定程度后, 渗透的折减作用在阻力矩公式 M_1' 中不再显著。

在不同的渗透参数 ε 值下, 隧道的直径与安全系数的相互关系, 如图 6 所示。开挖面顶端的过剩泥水压力 ΔP_f 取为 20 kPa, 其他参数与表 1 相同。

如图 6 所示, 在相同直径下, 当渗透参数 ε 比

较小的时候, 渗透模型和村山公式计算所得的安全系数相差并不大。但渗透模型计算的安全系数随着渗透参数 ε 的增大而显著减少, 特别是直径较小的时候, 安全系数的差别比较大, 随着直径的增大, 特别是直径较小的时候, 安全系数的差别比较大; 随着直径的增大, 安全系数的差别逐渐减小。

理论计算值与工程实际监测的数据进行对比如图 7 所示。其中理论计算所需泥浆压力取安全系数为 1.0 时的值。

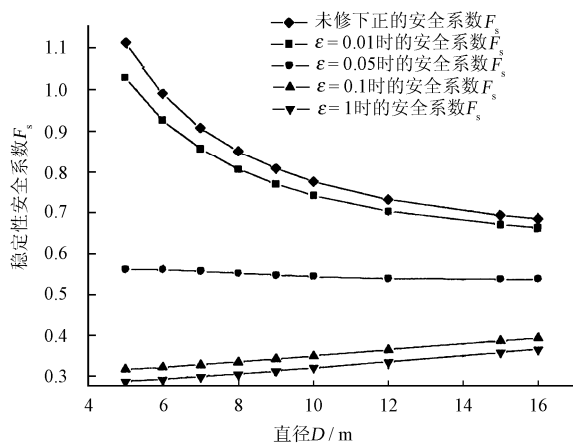


图 6 直径 D 对安全系数 F_s 的影响

Fig.6 The effect of the diameter of the shield D on the stability safety factor F_s under different ε

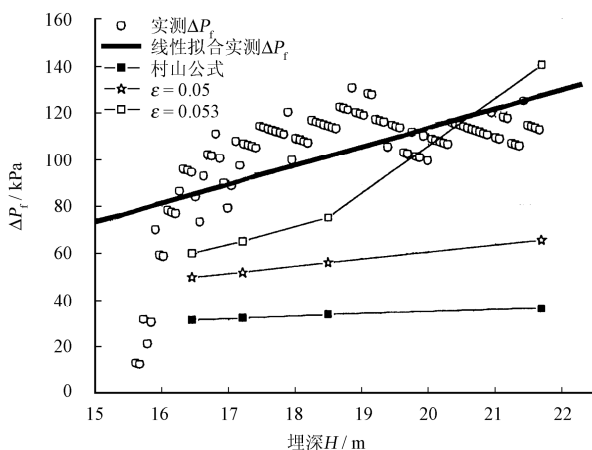


图 7 实际施加泥浆压力与理论值的对比

Fig.7 The comparison of slurry pressures used in the project and theoretical values

从图 7 中可以看出, 当采用薄膜模型, 由于没有考虑泥浆渗透造成的泥浆压力的损失, 村山公式计算所需的泥浆压力偏小。而采用渗透模型后, 所需泥浆压力会随着渗透参数 ε 的增大而增大。因此, 在实际产生泥浆渗透比较严重的情况下, 采用薄膜

模型计算所需的泥浆压力是不安全的, 采用考虑泥浆渗透的渗透模型计算开挖面稳定性是非常有必要的。

5 结 论

(1) 泥水平衡盾构推进过程中, 泥水对开挖面的渗透不可避免。此时, 传统的薄膜模型是偏于不安全的, 考虑泥水渗透的渗透模型更加适合泥水盾构开挖面稳定性的计算。

(2) 渗透模型中, 泥水压力以体力的形式作用于开挖面, 可以根据泥水的渗透区域和土体滑动面的关系对得到渗透模型的开挖面稳定性安全系数的计算方法。渗透区域相对厚度 e/B 越大, 过剩泥水压力的有效性 η 越小。

(3) 与泥浆渗透性有关的系数 ε 值的大小直接影响开挖面的稳定性。开挖面的稳定性安全系数随着 ε 值的增大而减小, 但稳定性安全系数基本稳定在 0.4 左右。

(4) 在渗透参数 ε 比较大时 ($\varepsilon > 0.1$ 时), 安全系数受盾构直径改变的影响越来越小, 但随着直径的增大安全系数受渗透参数 ε 值的影响逐渐减小。

(5) 很多情况下, 介于薄膜模型和渗透模型之间的情况广泛存在, 泥膜的有效性成为关键问题。这方面尚缺乏实测数据和理论依据, 尚待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Anagnostou G, Kovari K. The face stability of slurry-shield-driven tunnels[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1994, 9, (2): 165—174.
- [2] K Fujita, Kusakabe. Underground Construction in Soft Ground[M]. Rotterdam: Balkema A A, 1995. 337—343.
- [3] 张凤祥, 朱合华, 傅德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [4] 程展林, 吴忠明, 徐言勇. 砂基中泥浆盾构法隧道施工开挖面稳定性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2001, 18 (5): 53—55.
- [5] 邓忠义. 泥水平衡开挖面稳定性研究[硕士学位论文D]. 上海: 同济大学, 2005.