

盾构掘进掌子面失稳风险及控制方法

薛立兴

中电建铁路建设投资集团有限公司 北京 100070

摘要: 在盾构掘进过程中, 掌子面经常发生坍塌事故, 造成盾构机“卡死”, 这不仅严重影响施工进度, 还有可能造成地面塌陷而引起重大安全事故。因此, 维持隧道掌子面稳定性是盾构安全施工的关键, 也是现阶段工程师们研究的重点和难点。

关键词: 掌子面; 失稳; 风险; 控制。

Risk of shield tunneling palm surface instability and control method

Xue Lixing

Power China Railway Construction Investment Group Co., LTD. Beijing 100070

Abstract: In the process of shield tunneling, the palm surface often collapses, resulting in the shield machine "stuck", which not only seriously affects the construction progress, but also may cause the ground collapse and cause major safety accidents.

Key words: palm surface; instability; risk; control.

1 工程概况

郑州地铁 8 号线郑州大学站~银屏路站区间全长 1307m, 采用盾构法施工, 混凝土管片外径 6200mm, 厚度 350mm, 线间距 13~16.2m, 隧道埋深 11.5~25.8m, V 坡, 纵坡 25.228‰。

2 地质情况

- (1) 2-4-5 (泥质) 粉砂: 呈深灰色, 局部松散或中密, 饱和。
- (2) 2-6 粉质黏土: 呈灰白、灰黄色, 可塑-硬塑状态, 很湿。
- (3) 3-1-1 粉质黏土: 呈灰绿、灰黄色等色, 可塑-硬塑。

3 土压平衡盾构掘进面支护压力分析

在土压平衡盾构的掘进过程中, 掘进面上土体受到刀盘的挤压、切削作用, 处于一种半流塑性状态。但是在掘进面的前方, 刀盘的旋转切削作用影响迅速降低, 盾构机的推进对垂直于掘进面的支护压力产生影响, 并在前方形成挤压扰动区。故在理论上分析掘进面前方土体应力状态时, 可以认为理想支护压力作用下的土体应力状态为:

$$\sigma_1 = \gamma h \quad (3.1)$$

$$\sigma_2 = P_s = \sigma_3 = \lambda \sigma_1 = \lambda \gamma h \quad (3.2)$$

式中 γ 为土体重度, h 为隧道中心点的深度; λ 为侧压力系数; P_s 为支护压力。事实上, 掘进面支护压力是很难控制在理想状态下, 根据支护压力的从小到大的变化, 可将前方土体的应力状态依次分为 5 类, 对应的应力摩尔圆如图 1.1 所示。若 P_s 、 P_p 分别为掘进面发生主动破坏和被动破坏的支护压力; σ_v 为土体竖向应力, $\sigma_h =$

γh 存在以下 5 种状态:

- (1) $P_s < P_s$, 支护压力过小, 掘进面发生主动破坏;
- (2) $P_s < P_s < \lambda \sigma_v$, 掘进面发生卸载, 应力摩尔圆半径减小, 圆心右移, 应力状态为 $\sigma_1 = \sigma_v$, $\sigma_2 = \lambda \sigma_v$, $\sigma_3 = P_s$ 。
- (3) $\lambda \sigma_v < P_s < \sigma_v$, 应力摩尔圆不变, 主应力次序发生改变, 应力状态为 $\sigma_1 = \sigma_v$, $\sigma_2 = P_s$, $\sigma_3 = \lambda \sigma_v$ 。
- (4) $\sigma_v < P_s < P_p$, 掘进面发生卸载, 应力摩尔圆半径增大, 圆心右移, 应力状态为 $\sigma_1 = P_s$, $\sigma_2 = \sigma_v$, $\sigma_3 = \lambda \sigma_v$ 。
- (5) $P_s > P_p$, 支护压力过大, 掘进面发生被动破坏。

盾构隧道掘进时掘进面前方土体最理想的应力状态为第 3 类, 此时前方土体具有较强的稳定性。

根据土力学强度理论可知, 当土体处于极限平衡状态(主动破坏或被动破坏)时, 最大与最小主应力存在以下关系式:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi/2) + 2c \tan(45^\circ + \phi/2) \quad (3.3)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2(45^\circ - \phi/2) - 2c \tan(45^\circ - \phi/2) \quad (3.4)$$

c 、 ϕ 分别为土体凝聚力和内摩擦角。此时, 最小与最大主应力之比;

$$\sigma_1 / \sigma_3 = \tan(45^\circ - \phi/2) - 2c \tan(45^\circ - \phi/2) / \sigma_1 \quad (3.5)$$

通过数值模拟计算和离心实验, 盾构掘进平衡土压力控制与掘进面土体变形分为三个阶段:

第一阶段, 正面平衡土压力满足极限支护应力要求。此时, 平衡土压力变化引起开挖面的变形在一定可控范围内, 平衡土压力的

波动对掘进面土体变形发展没有较大影响。

第二阶段，掘进面平衡土压力临近极限支护压力。此时，掘进面平衡压力的微小变化将导致掘进面发生明显的位移，掘进面的变形对支护应力的变化非常敏感。

第三阶段，掘进面平衡土压力低于临界值，掘进面没有得到有效支护，发生失稳滑动，其破坏发展在平衡土压力不变化的条件下还会持续发展，此时正面土压力对掘进面变形的失效阶段，最终掘进面破坏。

由于软土地层土体模量较小，掘进面的变形会随着掘进面平衡土压力的波动而发生显著的变化。因此，在软土地层掘进面的稳定分析中，需要结合实际地表沉降的监测数据，通过掘进面平衡土压力与地表沉降间的动态变化，来确定合理的支护压力，保证盾构掘进施工的安全性。

4 盾构掘进面扰动分区解读

当掘进面支护力大于前方土体静止土压力时，盾构前方土体挤压扰动区 1、2、3，其中 2 区和 3 区为挤压变形，2 区受力状态表现为水平应力增加，3 区水平应力、竖直应力同时增加，1 区土体应力变化复杂，既有掘进面推力的侧向挤压，又有刀盘的切削扰动，5、6 区为卸荷扰动区。

5 掌子面盾构推力解析

Jancsecz 模型计算掌子面的极限支护压力首先假设地层为理想弹塑性，土体为均质材料，以 Horn 的三维楔型体模型为基础，其是由位于隧洞掌子面前方的楔型体和上方的棱柱体两部分组成。

Horn 模型同时以 Janssen 的筒仓理论 (Silo-theory) 为基础，考虑楔型体上部的土体松动，并在隧洞埋深大于 2 倍隧洞直径的前提下，认为上方土体形成压力拱，并用 Terzaghi 公式来计算作用在楔型体上方的垂直土压力，由于成拱作用上方土体的垂直压力将减弱。

Jancsecz 模型首先依据库伦主动土压力理论，根据掌子面上方和前方土体的内摩擦角 ϕ_1 、 ϕ_2 计算了土体的侧压力系数 K_{a1} 、 K_{a2} ，其中 K_{a2} 取静止和主动侧压力系数的平均值。

$$K_{a1} = \tan^2(45^\circ - \phi_1/2) \quad (5.1)$$

$$K_{a2} = (\tan^2(45^\circ - \phi_2/2) + 1 - \sin \phi_2) / 2 \quad (5.2)$$

根据确定的滑动角 β ，掌子面空间主动土压力系数 K_{a3} 可表示为：

$$K_{a3} = [\sin \phi \cos \phi - \cos \phi^2 \tan \phi_2 - 2/3K_{a2} (1+3t/D) / (1+2t/D)] \cos$$

$$\phi \tan \phi_2]$$

$$[\cos \phi \sin \phi + \tan \phi_2 \sin^2 \phi] \quad (5.3)$$

基于隧道埋深的不同，分别给出了楔型体上方垂直土压强度的计算公式。

1) 无拱作用下 ($h < 2D$):

$$\sigma_{vps} = h_1 K_{a1} + q \quad (5.4)$$

2) 有拱作用下 ($h > 2D$):

$$\sigma_{vps} = U/F * \text{ovais} - UYL \tan(\rho; l) - e \text{katm}(\) h, -2) .] + (2Dy, + q) e - Katan(q)(h \quad (5.5)$$

$$F = D^2 * \tan \phi \quad (5.6)$$

$$U = 2D (1 + 1/\tan \phi) \quad (5.7)$$

式中： γ_1 为棱柱体的土体重度， q 为交通和建筑物荷载， F 为棱柱体底面面积； U 为棱柱体底面周长。

根据空间主动土压力测压系数 K_{a3} 和竖直土压强 σ_v 能计算掌子面上任一点的土压强度。利用隧洞顶部、底部的土压强度和隧道圆截面积导出的整个掌子面的所受的最大土压力，并将土压力和水压力分别乘以各自的安全系数：

$$E = 0.5 (e_{a3}^{\text{顶}} + e_{a3}^{\text{底}}) A \quad (5.8)$$

$$S_{\text{min}} = n_e E + n_w E_{\text{axis}} \quad (5.9)$$

6 结论

盾构掘进中掌子面稳定性与隧道埋深、地层特性以及施工扰动等因素密切相关，隧道埋深、地层特性无法改变的，在施工实践中，只能最大限度减低施工扰动影响，实现盾构安全顺利掘进。需要合理选择土仓压力、优化盾尾同步注浆参数、盾构施工参数等。

结合盾构掘进三维数值模拟分析，结合郑州地铁 8 号线施工实践，在中原地区盾构施工中，为减小盾构掘进掌子面失稳风险，盾构施工参数建议：土仓压力宜为 0.2Mpa，注浆压力宜为 0.3Mpa，千斤顶总推力宜为 2000kN，刀盘扭矩宜为 2000kN.m，推进速度 55mm/min。

参考文献

- [1]魏纲, 徐日庆.软土隧道盾构法施工引起的纵向地面变形预测[J].岩土工程学报, 2005(09): 1077-1081.
- [2]韩焯, 李宁.隧道施工引起地层位移预测模型的对比分析[J].岩石力学与工程学报, 2007(03): 594-600.
- [3]刘洪洲, 孙钧.软土隧道盾构推进中地面沉降影响因素的数值法研究[J].现代隧道技术, 2001(06): 24-28.