

DOI: 10.11779/CJGE20220995

含闪长岩地层盾构开挖面失稳判定及施工监测分析

刘凤洲^{1,2}, 徐前卫³, 种记鑫², 贺翔³, 王旌¹, 来守玺⁴

(1. 山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250002; 2. 济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南 250014; 3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 4. 中铁十局集团第一工程有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 开挖面稳定与否直接关系到隧道围岩的稳定性以及地层扰动变形的影响程度, 是盾构施工技术的关键。对于在闪长岩地层中掘进的盾构而言, 由于岩体自身风化程度不一, 使得开挖面稳定性判断与控制变得更为困难。依托山东济南轨道交通 R2 号线长途汽车站—生产路区间隧道工程, 针对闪长岩风化不均导致的地层性状差异, 借助数值分析和现场实测, 研究了不同岩性赋存条件下开挖面支护压力的主要影响参数以及开挖面判定失稳的影响范围, 并得出如下 3 点结论: ①对于单一地层, 内摩擦角对极限支护压力影响最为显著, 其次为弹性模量和黏聚力, 而泊松比和重度的影响最小; ②对于复合地层, 当自稳性越差的地层在竖向占隧道开挖面的比例越大, 极限支护压力受到的影响就越明显; ③当极限支护压力只与开挖面范围内的土层参数相关, 无论开挖面以外的土层参数怎么变化, 极限支护压力受到的影响均很小。上述成果对于风化不均闪长岩地层或类似地层盾构隧道设计与施工具有较好的指导作用或是参考价值。

关键词: 盾构隧道; 开挖面; 稳定性分析; 闪长岩; 施工监测

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)11-2327-09

作者简介: 刘凤洲(1982—), 男, 山东济南人, 高级工程师, 主要从事隧道与地下工程等领域的建设与研究工作。E-mail: 741055568@qq.com。

Instability determination and construction monitoring analysis of shield excavation face in diorite-bearing strata

LIU Fengzhou^{1,2}, XU Qianwei³, ZHONG Jixin², HE Xiang³, WANG Jing¹, LAI Shouxi⁴

(1. Qilu Jiaotong College, Shandong University, Jinan 250002, China; 2. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan 250014, China; 3. Key

Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 4. China Railway Tenth

Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: The stability of the excavation surface is directly related to that of the surrounding rock of tunnels and the influence level of disturbance deformation of strata, which is the key issue to the shield construction technology. For the shield tunnels excavated in diorite strata, due to different weathering degrees of the rock mass, it is more difficult to judge and control the stability of the excavation surface. Relying on the tunnel project between the Long-Distance Bus Station and Shengchan Road Station of Jinan Rail Transit Line R2, and aiming at the difference of stratum properties caused by the uneven weathering of diorite, the main influence parameters of support pressure of the excavation face under different lithology occurrence conditions and the influence range of its determination instability are studied through numerical analysis and field measurement. The following conclusions are drawn: (1) For the single stratum, the internal friction angle has the most significant effects on the ultimate support pressure, followed by elastic modulus and cohesion, while the Poisson's ratio and unit weight have the least effects. (2) For the composite stratum, if the stratum with poor self-stability accounts for a larger proportion of the tunnel excavation face in the vertical direction, the limit support pressure will be affected more obviously. (3) The limit support pressure is only related to the stratum parameters within the excavation face. No matter how the stratum parameters outside the excavation face change, the limit support pressure is little affected. The above results have a good guiding role and reference value for the design and construction of shield tunnels in

weathered uneven diorite strata or similar strata.

Key words: shield tunnel; excavation face; stability analysis; diorite; construction monitoring

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672360); 山东省自然科学基金项目(ZR2020ME258); 住房和城乡建设部研究开发计划项目(K2019208); 山东省住房和城乡建设科技计划项目(2018-K5-02, 2019-K6-1)

收稿日期: 2022-08-15

0 引 言

随着中国城市轨道交通规划建设不断发展,盾构法隧道持续保持着强劲十足的应用势头,然而推广至不同城市所遇到的地质条件和周边环境愈发复杂,加之盾构机常常在密集城区和城市交通路网下通过,开挖面支护稳定性仍然是盾构法施工必须考虑的关键技术问题之一。就济南地区而言,城区建筑密集,闪长岩作为当地分布相当广泛的典型地层,常作为盾构隧道下部基岩,在部分区段也会分布于盾构开挖面,不同风化程度的闪长岩性质迥异,全、强风化闪长岩属于岩土混合介质,而中风化闪长岩强度高,对盾构刀具磨损影响显著。

截至 2022 年 4 月, 济南已开通运营 84 km 的轨道交通线路, 包括 3 线 42 座车站, 一些工程师对这些已建盾构施工案例进行了总结归纳, 研究主要集中在风化闪长岩的力学性质和盾构刀盘机具选型方面, 相关试验方法和建议指标具有参考价值和指导意义^[1-3]。但从目前掌握的施工情况来看, 当开挖面稳定性控制不当或掘进参数设定不合理时, 土压平衡盾构在济南地区含闪长岩地层中掘进相比于在其他地层中可能导致更显著的施工风险和隆沉变形。所以针对含闪长岩地层开展盾构开挖面稳定性研究和施工监测效果分析是十分必要的。

盾构开挖面稳定性理论研究主要是通过极限平衡法和极限分析法开展的。Leca 等^[4]最早将开挖面失稳破坏的块体假定为一个或相接的两个圆台体,破坏区在开挖面和地表表现为一个椭圆形区域。之后越来越多的学者针对特定工程地质条件和岩土体物理力学性质提出了不同的破坏模型。刘文洁等^[5]借助 Casagrande 各向异性强度公式、推导出支护压力的极限平衡解,改进了楔形体组合棱柱体的极限平衡模型。Qarmout 等^[6]提出了一种计算开挖面支护压力的三维运动单元法模型,该模型由下部四面体楔形块和上部棱柱块两部分组成,能够较好地描述浅埋隧道开挖面最小支护压力。齐永洁等^[7]考虑了层状地层对地表位移的影响,对传统的随机介质理论进行了简化,推导了复合地层中盾构施工引起的地表位移计算公式。黎春林等^[8]考虑了主应力偏转引起的侧压力系数变化,推导了滑裂面为空间曲面时土拱效应下土中竖向应力的解析解。极限平衡法和极限分析法虽然提供了较为直接的公式来计算开挖面上的极限支护压力,但都需要人为假定开挖面的破坏形式,在破坏范围内的岩土体也被视为刚体,使计算结果存在一定的局限性。

因此,许多研究者更倾向于使用数值分析方法进行极限支护压力计算,这使得有限单元法和有限差分法得到了充分的应用,并且这两种数值模拟方法不仅可以根据支护压力与前方水平位移之间的关系来判定开挖面的稳定性,还可以进一步研究地层、隧道的物理力学指标以及隧道施工工况等因素对开挖面稳定影响的显著程度。例如,白永学等^[9]结合成都地铁2号线砂卵石地层盾构开挖面失稳工程案例,采用有限差分法模拟得到内摩擦角和地下水位是该案例中影响开挖面稳定性最显著的因素。Zamora等^[10]采用ABAQUS分析软件对不同埋深和不同地质条件开展了相关数值模拟研究。Kavvas等^[11]采用ABAQUS对土压平衡盾构掘进开挖面支护、刀盘切削、盾构锥度、管片安装、同步注浆和二次注浆进行了全过程数值仿真。

针对风化不均闪长岩地层, 本文依托济南轨道交通 R2 线长一生区间盾构隧道工程, 利用有限差分法研究不同岩土参数指标组合与开挖面失稳的联系, 确定不同地质条件下影响开挖面支护压力的主要影响参数和影响范围, 然后结合实际监测结果对数值仿真方法的可靠性和掘进参数控制的合理性进行验证总结。

1 工程概况

济南轨道交通R2线一期工程建设范围西起王府庄,东至彭家庄,全线长约36.4 km,包括地下线34.8 km和高架线1.6 km。本研究主要针对R2线长一生区间隧道,该区段沿城市主干路北园大街地下通过,无较大曲线段,单线隧道总长度约1674 m,线路纵向最大坡度为26%,线路走向如图1所示。



图 1 济南轨道交通 R2 线一期工程线路走向示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 1st stage route of Jinan Rail Transit Line R2

长一生区间隧道开挖直径为6680 mm,采用30 cm厚C50预制混凝土管片衬砌,隧道顶埋深9.7~21.9 m,区间左右线间距为10~16 m,地下水埋深1.5~4.3 m,主要穿过10-1可塑黏土、10-2硬塑黏土、16-1硬塑粉质

黏土、16-2硬塑坚硬黏土、16-4密实卵石、19-2强风化闪长岩、19-3中风化闪长岩等岩土地层, 其中闪长岩风化层厚度变化显著, 全风化层厚度0.40~10.3 m, 强风化层厚度0.6~19.7 m, 盾构开挖面穿越地层连续变化, 地质剖面见图2。选取济南轨道交通R2线长—生区间左线430环—480环和左线1000环—1050环两个施工段作为分析对象, 盾构分别穿越两种典型地质条件, 即黏土与风化闪长岩复合地层、全断面风化闪长岩地层。

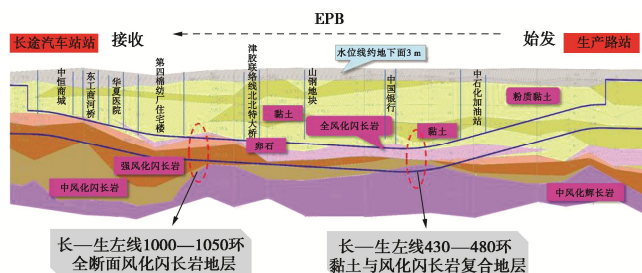


图 2 长—生区间地质剖面

Fig. 2 Geological section between Long-Distance Bus Station and Shengchan Toad Station

2 数值仿真说明

2.1 模型建立

本文建立盾构开挖的半空间对称模型, 以提高数值模拟的计算速度, 计算模型边界到隧道中心的距离不小于隧道半径的5倍, 三维计算模型的尺寸如图3所示。

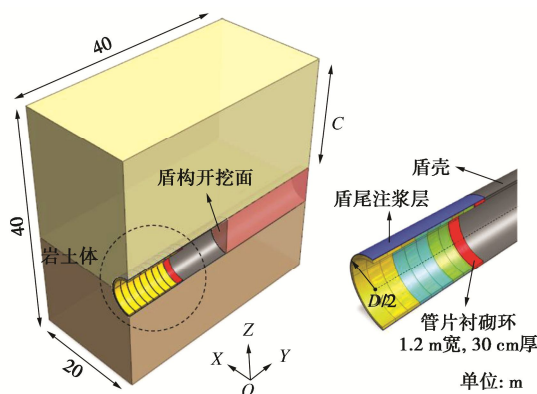


图 3 三维数值模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 3D numerical model

图 3 中, 盾构刀盘开挖直径 D 近似为 6.6 m, 以隧道横截面水平方向为 X 方向, 取 20 m (约 $3D$); 以隧道纵截面掘进方向为 Y 方向, 取 40 m (约 $6D$); 以隧道竖直方向为 Z 方向, 隧道顶部覆土厚度 C 根据实际地质情况取值。模型的上表面模拟地面, 为无约束的自由边界, 底部施加 X , Y , Z 三向约束; 模型关

于 YZ 面对称, 在模型的左侧边界施加 X 向约束; 在模型隧道开挖的前、后边界施加 Y 向位移约束。

由于国内普通地铁隧道除进出洞范围外, 区间埋深普遍大于 1.5 倍隧道直径, 而一般 C/D 大于 1~1.5 时, 失稳破坏时的破坏机构不会贯通至地表^[12], 故本研究不考虑隧道埋深对开挖面稳定性的影响。

2.2 施工工序模拟

盾构隧道开挖包括工作面开挖、管片拼装支护和盾尾同步注浆, 其推进是一个以管片长度为一个进尺的连续循环过程。而本研究的重点是地层参数对隧道开挖面支护稳定的影响, 故无需完全复现盾构每环施工步的连续推进过程, 这在运算时间上不可取。

因此, 本研究在模型里预设好隧道开挖单元、盾壳实体单元、管片衬砌壳单元后, 简化模拟盾构一次性开挖一定的长度, 并假设盾构跳跃式向前推进至该位置, 然后同步生成盾壳和管片网格。数值模拟试验按照两步进行: ①先开挖至模型 Y 向中部位置, 激活盾壳单元和后续管片单元, 在掘进工作面施加一定的侧向压力; ②移除第一步开挖时引起围岩的累积变形等状态, 然后将掘进工作面施加的支护压力由静止土压力值逐渐减小至掘进工作面失稳破坏的极限支护压力。

2.3 判定准则和模拟试验设计要点

根据相关文献和试验分析可知^[13], 当研究对象为砂土或卵石 (即黏聚力 c 基本为零) 时, 随着盾构前方支护压力逐渐减小, 开挖面中心节点的水平位移会在支护压力减小到某一时刻时发生较为显著的突变, 可以此为判断依据来确定极限支护压力, 反映在支护压力相关单元水平位移的曲线上为切线斜率的突变, 可以采用累积和控制图 (CUSUM) 来检测曲线变点的位置。CUSUM 是通过不断累积偏差, 并将微小异动不断放大, 从而对系统偏离稳态的情况进行判定的一种变点检测方法^[14]。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

$$S_i = S_{i-1} + (\bar{X} - X_i) \quad (2)$$

式中: \bar{X} 为变量 X 的平均值; S_i 为变量 X 的累积偏差, $S_0=0$ 。

采用“水平位移突变法”确定开挖面极限支护压力是直观有效的。当研究对象为黏土或岩石 (即黏聚力 c 较大) 时, 随着盾构前方支护压力逐渐减小, 开挖面中心节点的水平位移虽然在不断增大, 但很难定位到数值突变点。观察开挖面中心位置的节点水平速度和单元剪切应变增量关于支护压力的曲线, 也会发现切线斜率平滑过渡, 没有突变。因此, 本研究为了

确定开挖面支护压力的主要影响因素和影响范围,在数值模拟试验设计时选取的黏聚力 c 不能过大,否则“水平位移突变法”将无法直观判断失稳时刻和对应的极限支护压力。

3 盾构开挖面失稳判定的影响因素

假定数值模型地层定义为单一均质分布状态,分析研究在同一隧道埋深 (C/D 恒定) 情况下,黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、弹性模量 E 、泊松比 ν 、重度 γ 在不同的数值组合情况下的开挖面支护状态。将支护压力 σ 和水平静止土压力 σ_0 相除得到支护压力比 λ ,利用这一无量纲的变量来表征开挖面稳定性:

$$\lambda = \sigma / \sigma_0 \quad (3)$$

当开挖面水平位移发展急剧变化,认为此时的支护压力达到了极限值,对应的支护压力比即为极限支护压力比 λ_{cr} 。按照第 2 节确定的盾构开挖工况进行模拟,绘制如图 4 所示不同参数与极限支护压力比 λ_{cr} 的关系曲线。

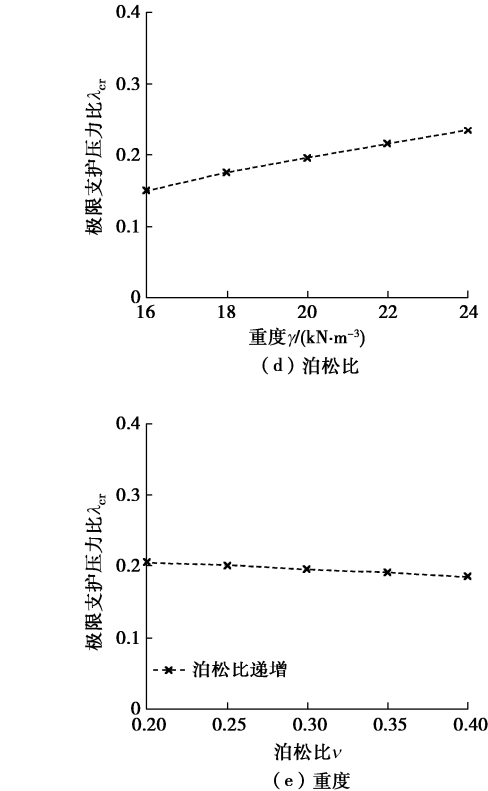
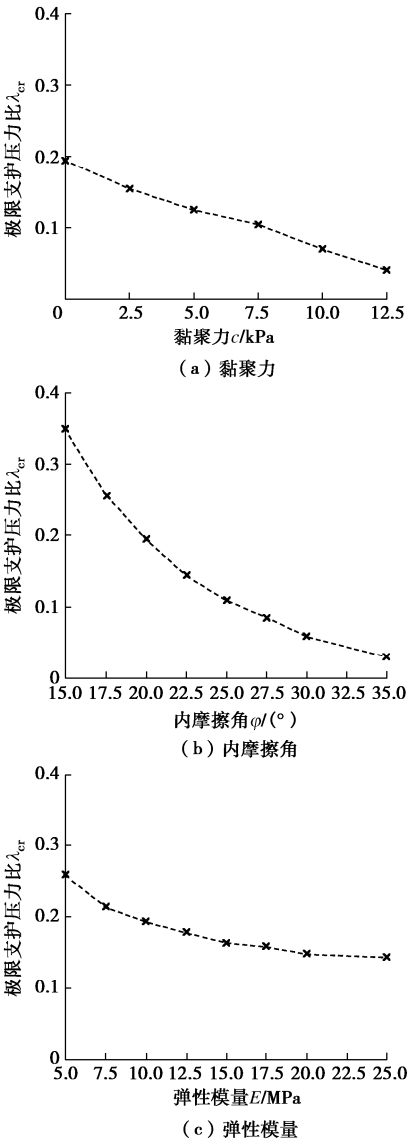


图 4 均匀地层各参数与极限支护应力比 λ_{cr} 的关系曲线
Fig. 4 Relationship between parameters of homogeneous formation and ultimate support stress ratio λ_{cr}

对图 4 结果分析,可以发现:

- (1) 随着黏聚力逐渐增大,开挖面极限支护压力比呈现不断减小的趋势,意味着当地层黏聚力越小,开挖面中心水平位移越大。
- (2) 随着内摩擦角逐渐增大,开挖面极限支护压力比呈现不断减小的趋势,说明其稳定性越来越好,极限支护压力比的减小差值并不随着内摩擦角线性变化,内摩擦角在 $15^{\circ} \sim 22.5^{\circ}$ 时显然要比内摩擦角在 $22.5^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 时变化显著。和黏聚力相比,内摩擦角对极限支护压力的影响程度明显更大。
- (3) 随着弹性模量逐渐增大,开挖面极限支护压力比呈现不断减小的趋势,说明其稳定性越来越好,极限支护压力比的减小差值同样并不随着弹性模量线性变化,弹性模量小于 10 MPa 时要比弹性模量大于 10 MPa 时变化显著。和内摩擦角相比,弹性模量对极限支护压力的影响程度明显较小。
- (4) 随着泊松比逐渐增大,开挖面极限支护压力比线性减小、但变化非常小,在实际分析中基本可以忽略泊松比对极限支护压力的影响。
- (5) 随着重度逐渐增大,开挖面极限支护压力比线性增大、但变化也很小,在实际分析中,除非有土层特殊,也可以简化重度对极限支护压力的影响。

综上所述, 各参数中以内摩擦角对极限支护压力影响最为显著, 其次为弹性模量和黏聚力, 而泊松比和重度影响相对最小。换言之, 对于抗剪强度指标即黏聚力、内摩擦角越大的地层, 其对应的保持掘进面支护稳定所需的压力越小, 施工安全空间就越大。

4 复合地层开挖面失稳的参数影响分析

如图 5 所示, 在同一隧道埋深 (C/D 恒定) 情况下, 定义盾构隧道穿越两种岩性差异较大的复合地层在竖直方向上占掘进工作面的不同比例为 $\eta=H/D$, 其中, H , D 分别为开挖面内上层地层厚度、盾构直径。分别取 η 为 1/4, 1/2, 3/4, 研究两种地层的强度参数 c_u , φ_u , c_l , φ_l 对掘进工作面稳定性的影响, 考虑到实际施工中常出现开挖面单一地层的情况, 此时开挖面上并无不同地层之分, 但依据面内上、下部分所占比例不同, 可分为 $\eta=0$ 和 $\eta=1$ 两种。

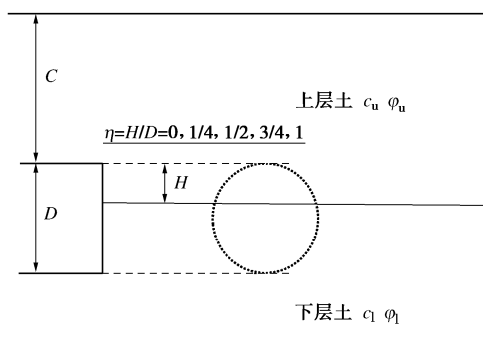


图 5 上下两层土中隧道分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of distribution of tunnels in upper and lower soil layers

当上、下层内摩擦角 φ 均为 20° 时, 综合考虑不同地层占比 η 的影响, 如图 6~9 所示, 可以看出: ① 经过平均量化处理后可以发现, η 越大, 其 λ_{cr} 越接近。当上下层黏聚力上大下小时, λ_{cr} 取平均后总体上呈正增长, 而上下层黏聚力上小下大时, λ_{cr} 取平均后总体上呈负增长。② 将 $\eta=0$ 和 $\eta=1$ 这两种极端情况的计算结果与均匀地层对应黏聚力参数计算结果进行对比, 会发现 λ_{cr} 只与开挖面范围内的土层黏聚力参数相关, 无论开挖面以外的黏聚力怎么变化, λ_{cr} 受到的影响均很小。

综上所述, 当自稳性越差即黏聚力 c 较小的地层在竖向占隧道开挖面的比例越大, λ_{cr} 受其影响变化趋势也就越明显, 对应的 σ_{cr} 越大, 盾构掘进开挖也就越不利。

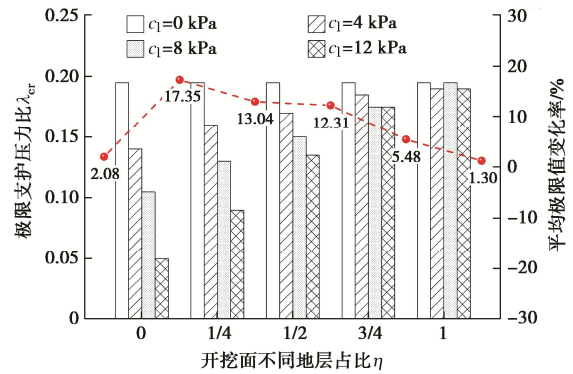


图 6 $c_u=0$ kPa 时不同 η 对 λ_{cr} 的影响

Fig. 6 Effects of different η on λ_{cr} when $c_u=0$ kPa

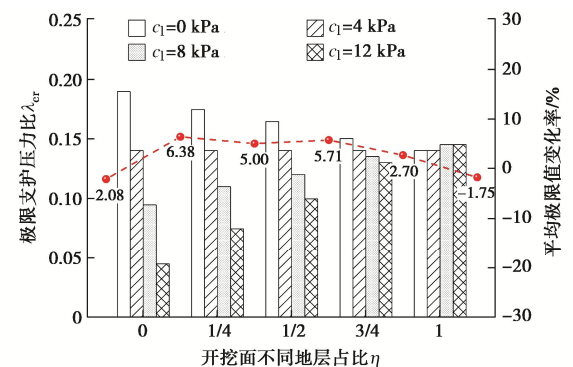


图 7 $c_u=4$ kPa 时不同 η 对 λ_{cr} 的影响

Fig. 7 Effects of different η on λ_{cr} when $c_u=4$ kPa

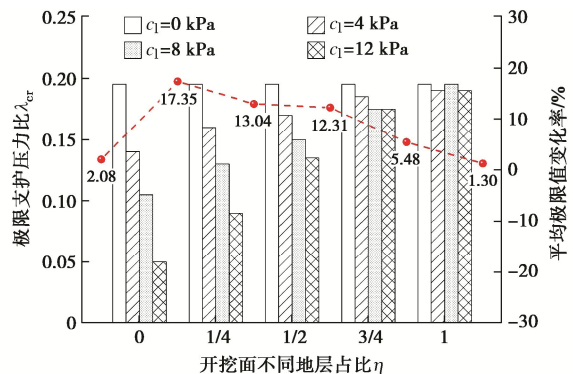


图 8 $c_u=8$ kPa 时不同 η 对 λ_{cr} 的影响

Fig. 8 Effects of different η on λ_{cr} when $c_u=8$ kPa

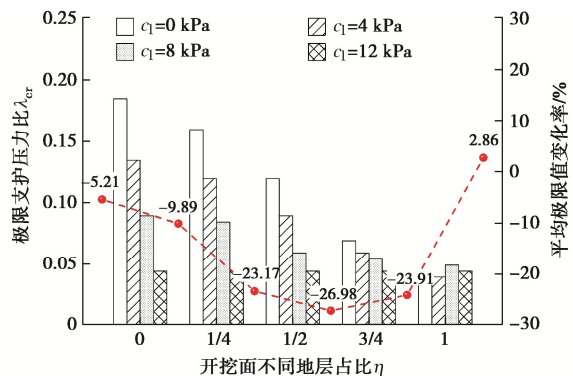


图 9 $c_u=12$ kPa 时不同 η 对 λ_{cr} 的影响

Fig. 9 Effect of different η on λ_{cr} when $c_u=12$ kPa

当上、下层黏聚力 c 均为 0 kPa 时, 综合考虑不同地层占比 η 的影响, 如图 10~13 所示。由此可知: ①经过平均量化处理后可以发现, η 值越大, λ_{cr} 越接近。当上下层内摩擦角上大下小时, λ_{cr} 取平均后总体上呈正增长, 而上下层摩擦角上小下大时, λ_{cr} 取平均后总体上呈负增长。②将 $\eta=0$ 和 $\eta=1$ 这两种极端情况的计算结果与均匀地层对应内摩擦角参数计算结果进行对比, 会发现 λ_{cr} 只与开挖面范围内的土层内摩擦角参数相关, 无论开挖面以外的内摩擦角怎么变化, λ_{cr} 受到的影响均很小。

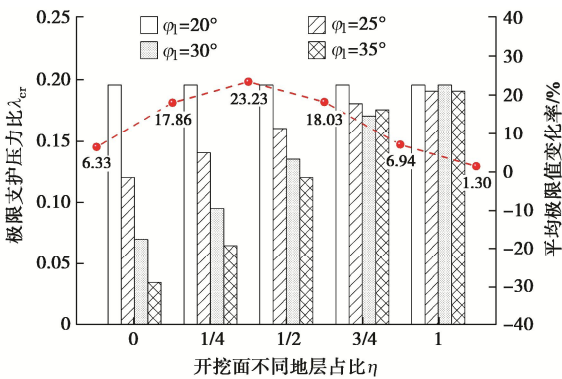


图 10 $\varphi_u=20^\circ$ 时不同 η 对 λ_{cr} 的影响

Fig. 10 Effect of different η on λ_{cr} when $\varphi_u=20^\circ$

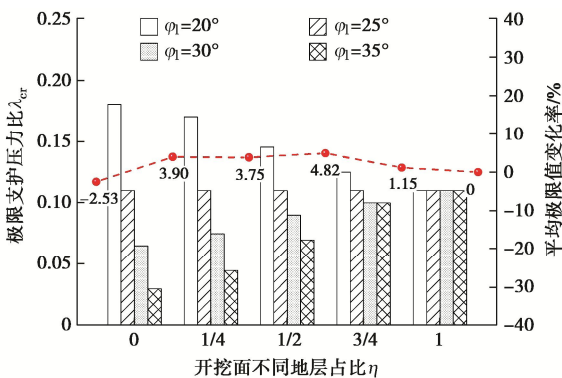


图 11 $\varphi_u=25^\circ$ 时不同 η 对 λ_{cr} 的影响

Fig. 11 Effects of different η on λ_{cr} when $\varphi_u=25^\circ$

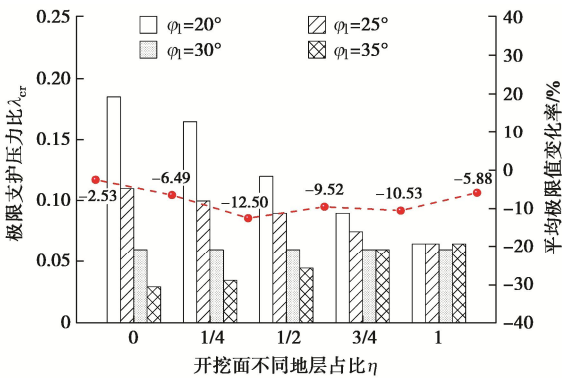


图 12 $\varphi_u=30^\circ$ 时不同 η 对 λ_{cr} 的影响

Fig. 12 Effects of different η on λ_{cr} when $\varphi_u=30^\circ$

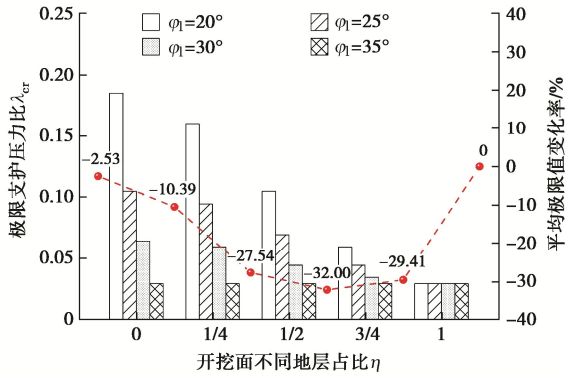


图 13 $\varphi_u=35^\circ$ 时不同 η 对 λ_{cr} 的影响

Fig. 13 Effects of different η on λ_{cr} when $\varphi_u=35^\circ$

5 施工监测数据分析

5.1 监测点布置

长—生区间左线 430 环—480 环和左线 1000 环—1050 环两个施工段为盾构穿越全断面风化闪长岩地层和黏土与风化闪长岩复合地层两种典型工况代表, 在隧道中线 440 环、480 环、1010 环、1050 环上方地表横向布设竖向变形监测点, 相关测点布置和地质剖面如图 14, 15 所示。

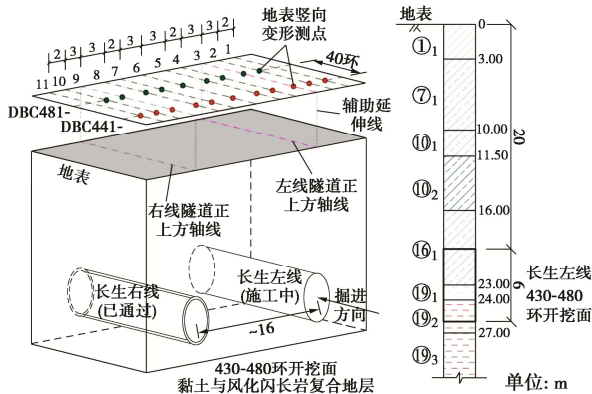


图 14 左线 DBC430 环—480 环施工段地表测点布置图

Fig. 14 Layout of surface survey points in construction section of

DBC430—480 ring on left line

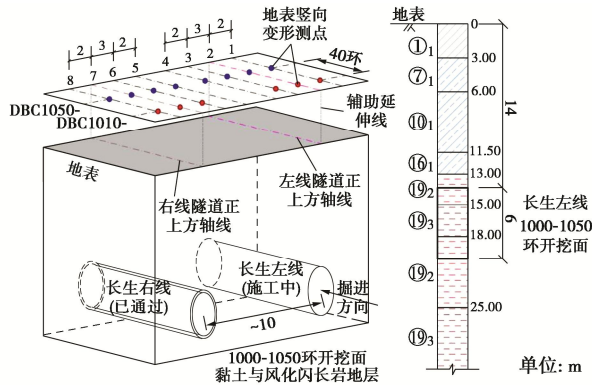


图 15 左线 1000 环—1050 环施工段地表测点布图

Fig. 15 Curves of surface vertical deformation at DBC1000—1050 section of left-line tunnel

长—生区间左线 430 环—480 环隧道中心平均埋深约-23 m, 右线隧道在左线隧道前方保持约 100 环—120 环的间隔。该段竖向地层厚度变化不大, 开挖面主要穿越粉质黏土⑩₁、全风化闪长岩⑪₁、强风化闪长岩⑪₂、中风化闪长岩⑪₃, 即黏土与风化闪长岩复合地层。

长—生区间左线 1000 环—1050 环隧道中心平均埋深约-17 m, 右线隧道在左线隧道前方 50 环—70 环间隔。该段地层竖向总体过渡平稳, 闪长岩各层分布厚度有差异, 开挖面不涉及除闪长岩外其它岩土体, 中风化闪长岩⑪₃和强风化闪长岩⑪₂交叠, 即全断面风化闪长岩地层。

5.2 土舱压力

土舱压力直接关系到开挖面的稳定与否。图 16 为两种含闪长岩地层中土舱压力稳定段历时分布曲线, 表 1 为土舱压力指标的统计结果。可以发现: ①该土压平衡盾构机最大设计压力 5 bar, 而穿越以上两类地层时土舱压力最大值为 3.11 bar, 未达到设定阈值, 说明开挖面处于稳定状态。②盾构穿越两类含闪长岩地层时的土舱压力中位数与平均数基本相同, 说明数据结构合理。从偏度和峰度角度来看, 数据近似符合正态分布。③总体而言, 盾构穿越全断面闪长岩的土舱压力较穿越黏土闪长岩复合地层时更小, 数值上表现为 0.7 bar 的差异, 符合上节相关论述。

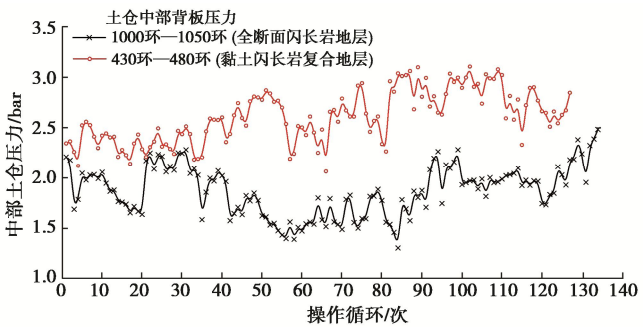


图 16 土舱压力稳定段历时分布曲线

Fig. 16 Distribution curves of duration of soil chamber pressure

表 1 盾构穿越不同地层土舱压力指标统计结果

Table 1 Statistical results of earth chamber pressure for shield

tunnel through different strata (单位: bar)		
统计指标	全断面闪长岩地层	黏土闪长岩复合地层
最大值	2.48	3.11
最小值	1.30	2.06
中位数	1.88	2.60
平均数	1.87	2.61
标准差	0.25	0.26
偏度	0.01	0.05
峰度	-0.74	-0.92

5.3 地表变形

图 17, 18 分别为刀盘抵达 DBC481 和 DBC1050

监测断面时的地表竖向历时变形, 对比地表竖向变形的最大值, 可以发现刀盘掘进长生区间左线 1000 环—1050 环比刀盘掘进长生区间左线 430 环—480 环更大, 但盾构穿越以上 4 个监测断面的地表竖向位移始终保持在控制值 (-30 mm, +10 mm) 范围内, 总体位移数值较小且变形发展趋势平稳, 说明盾构总体施工效果良好。

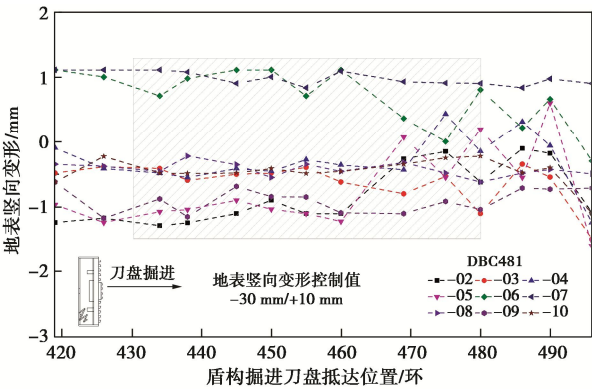


图 17 左线隧道 DBC481 断面处地表竖向变形历时曲线

Fig. 17 Curves of vertical deformation of ground surface at section DBC 481 of left tunnel

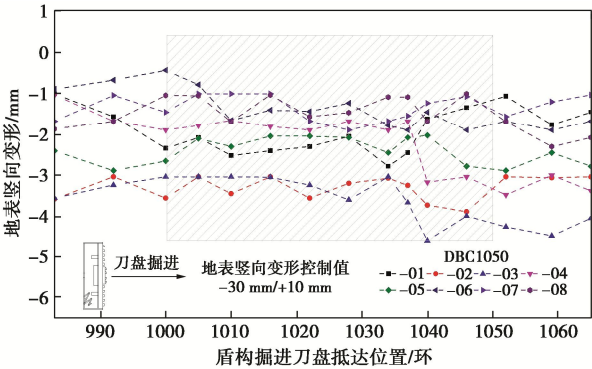


图 18 左线隧道 DBC1050 断面处地表竖向变形历时曲线

Fig. 18 Curves of vertical deformation of ground surface at DBC1050 section of left tunnel

盾构施工会持续对开挖面前后一定范围内的岩土体产生扰动引起地层变形, 进而反映为地表竖向位移的沉降槽形态, 然而由于较多的地表建筑物和岩土体介质中地下构筑物的刚度影响, 采用经典 Peck 公式计算的结果往往不能准确描述实际变形。因此, 本研究绘制了盾构刀盘抵达 4 个监测横断面基本等距的前、中、后 3 个时刻的地表竖向变形曲线, 然后进行四阶多项式拟合, 定性表达地层损失情况, 如图 19, 20 所示。

从图 17, 18 中可以看出, 4 组断面的沉降槽曲线拟合优度检验 R^2 均接近于 1, 说明四阶多项式曲线对监测值的拟合效果良好, 各监测横断面基本存在两处地表沉降槽, 槽底分别位于长—生区间左右线隧道上

方,且前、中、后 3 个时刻的地表竖向变形趋势相似无突变,已通过的区间右线上方的同测点变形值基本相同,而施工中的区间左线上方的同测点变形值较为离散。

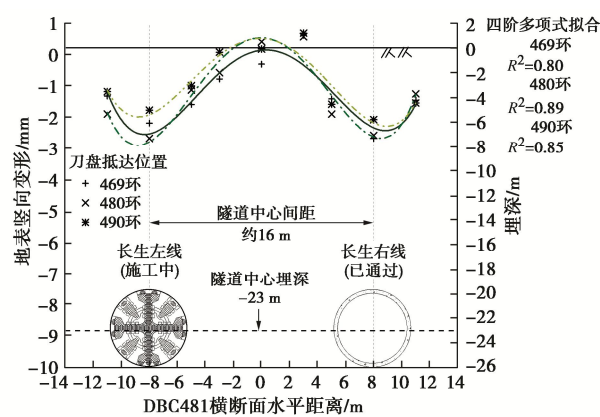


图 19 左线 DBC481 横断面地表竖向变形拟合曲线

Fig. 19 Fitting curves of transverse surface subsidence deformation at section DBC481 of left tunnel

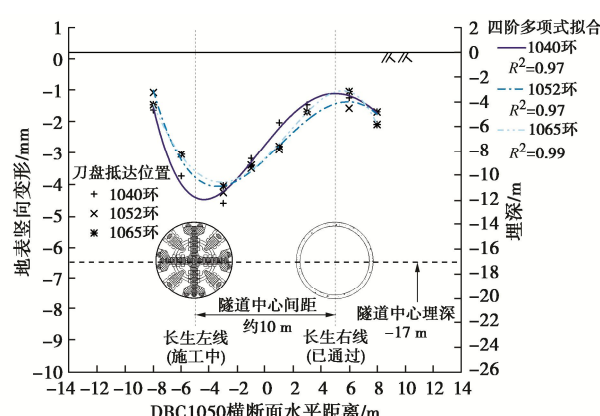


图 20 左线 DBC1050 横断面地表竖向变形拟合曲线

Fig. 20 Fitting curves of transverse surface subsidence deformation at section DBC1050 of left tunnel

6 结 论

盾构开挖面接触地层是在连续变化的,存在各种各样复杂的地质组合,考虑到盾构隧道开挖面稳定状态与地层扰动的变形响应受制于岩土体的材料参数和力学参数,本文基于有限差分法建立了半空间盾构开挖数值模型,采用合理的本构模型研究了地层参数与掘进工作面失稳破坏极限支护压力之间的关系,并结合实际监测数据对典型含闪长岩地层盾构施工地表变形进行分析评价,得到 4 点结论。

(1) 经过多次模拟试算发现,针对定性分析参数与开挖面支护压力的关系,在试验设计时黏聚力取值最大不宜过大、否则无法利用“位移突变法”判断失稳时刻。

(2) 在均匀地层同一隧道埋深情况下进行数值模

拟试验,发现内摩擦角对极限支护压力影响最为显著,其次为弹性模量和黏聚力,而泊松比和重度影响相对最小。

(3) 在复合地层同一隧道埋深情况下进行数值模拟试验,发现当自稳性越差的地层在竖向占隧道开挖面的比例越大,极限支护压力受到的影响就越明显。另外,对比分析发现极限支护压力只与开挖面范围内的土层参数相关,无论开挖面以外的土层参数怎么变化,极限支护压力受到的影响均很小。在后续参数随机化处理时,仅需对开挖面范围内的单元进行随机赋值,开挖面外地层参数仍采用定值。

(4) 选取长生区间盾构刀盘抵达左线 430 环—480 环和左线 1000 环—1050 环两个施工段作为盾构穿越黏土—风化闪长岩复合地层和全断面风化闪长岩地层两种典型工况的代表,对比发现盾构穿越全断面闪长岩的土舱压力较穿越黏土闪长岩复合地层时更小,但开挖面均处于稳定状态,盾构穿越各监测断面的地表竖向位移始终保持在控制值(−30 mm, +10 mm)范围内,说明盾构变形控制理想、掘进参数设置合理。

参考文献:

[1] 门燕青,王永军,周建国,等. 济南复合地层土压平衡盾构掘进效能实测分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(8): 110-119. (MEN Yanqing, WANG Yongjun, ZHOU Jianguo, et al. Measurement and analysis on EPB shield machine tunneling efficiency in Jinan composite stratum[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(8): 110-119. (in Chinese))

[2] WANG L, ZHU W, QIAN Y J, et al. Phenomenon and critical conditions of chamber soil sliming during EPB shield tunneling in water-rich weathered diorite: case study of Jinan metro, China[J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 1-15.

[3] 陈正发,张 杰,闫治国,等. 富水闪长岩地层中盾构隧道水土压力作用模式研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(7): 25-30. (CHEN Zhengfa, ZHANG Jie, YAN Zhiguo, et al. Study of water and earth pressure modes on shield tunnels in water-rich diorite strata[J]. Industrial Construction, 2021, 51(7): 25-30. (in Chinese))

[4] 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.

[5] 刘文洁,王同华,肖建勋. 各向异性地基中盾构隧道开挖面稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(7): 14-19. (LIU Wenjie, WANG Tonghua, XIAO Jianxun. Analysis of shield tunnel excavation surface stability in

- anisotropic foundations[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, **37**(7): 14-19. (in Chinese))
- [6] QARMOUT M, KÖNIG D, GUSSMANN P, et al. Tunnel face stability analysis using Kinematical Element Method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **85**: 354-367.
- [7] 齐永洁, 朱建才, 周建, 等. 土岩复合地层中盾构施工引起的地表位移预测[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(5): 1054-1062. (QI Yongjie, ZHU Jiancai, ZHOU Jian, et al. Prediction of surface displacement caused by shield construction in soil-rock composite stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(5): 1054-1062. (in Chinese))
- [8] 黎春林. 盾构开挖面三维曲面体破坏模型及支护力计算方法研究[J]. 岩土力学, 2022, **43**(8): 2092-2102. (LI Chunlin. Curved solid failure model and calculation method of supporting pressure for shield tunnel excavation face[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(8): 2092-2102. (in Chinese))
- [9] 白永学, 漆泰岳, 李有道, 等. 浅埋砂卵石地层盾构开挖面稳定性影响因素研究[J]. 铁道学报, 2013, **35**(3): 115-121. (BAI Yongxue, QI Taiyue, LI Youdao, et al. Study on factors influencing face stability in shallow shield tunneling in sandy cobble strata[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, **35**(3): 115-121. (in Chinese))
- [10] ZAMORA H Y, DURAND F A, PACHECO D A A. Three-dimensional analysis of excavation face stability of shallow tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **92**: 103062.
- [11] KAVVADAS M, LITSAS D, VAZAIOS I, et al. Development of a 3D finite element model for shield EPB tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, **65**: 22-34.
- [12] 邱龔, 杨新安, 黄德中, 等. 穿越分层地层的盾构隧道开挖面稳定机理研究[J]. 中国铁道科学, 2019, **40**(2): 71-80. (QIU Yan, YANG Xinan, HUANG Dezhong, et al. Stability mechanism of excavation face of shield tunnel crossing layered strata[J]. China railway science, 2019, **40**(2): 71-80. (in Chinese))
- [13] 王尉行. 刀盘切削扰动下砂卵石颗粒空间运移传力特征研究[D]. 上海: 同济大学, 2019. (WANG Weixing. Study on the Motion and Force Characteristics of Sand and Pebble Particles under Cutting and Disturbance of Cutter Head[D]. Shanghai: Tongji University, Master's Thesis, 2019. (in Chinese))
- [14] TAYLOR W A. Change-point analysis: a powerful new tool for detecting changes[J]. Preprint, 2000.

欢迎订阅《勘察科学技术》

《勘察科学技术》是由中勘冶金勘察设计研究院有限责任公司(原冶金勘察研究总院)主办的学术—技术类双月刊,是中国科技核心期刊、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊,多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地质、环境地质、水文地质及地下水资源评价、工程测量及地理信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法。

《勘察科学技术》内容丰富,理论结合实际,适于从事岩

土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的技术人员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行,双月刊,大16开本,双月20日出版。每期定价10.0元,全年60元。邮发代号18-153。全国各地邮局均可订阅,也可随时汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告,价格适中,印制精良,注重实效。

欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址:河北省保定市东风中路1285号《勘察科学技术》编辑部,邮编:071069, Tel: 0312-3020887, 3094054, Fax: 0312-3034561, E-mail: kckxjs@163.com。