

DOI: 10.11779/CJGE20220634

基于界面黏附力盾构堵塞风险评判方法研究

方 勇¹, 王宇博¹, 王 凯¹, 钱聚强², 陈中天¹, 卓 彬¹

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 中铁十四局集团隧道工程有限公司, 山东 济南 250101)

摘 要: 为了准确预测盾构在高黏粒地层掘进时刀盘堵塞风险、提供刀盘泥饼防治依据, 自行设计土体-金属界面拉拔试验装置与界面直剪试验装置, 通过室内试验, 分析了不同土样在不同稠度指数下法向黏附力与切向黏附力变化规律; 基于试验结果提出了针对黏附力的五等级盾构堵塞风险分区图, 并应用于强风化混合花岗岩渣土改良效果评估。研究表明: 法向黏附力随稠度指数的增大先升高再降低, 蒙脱土含量的提高会降低法向黏附力峰值线的稠度指数; 全样品的摩擦角和切向黏附力在稠度指数小于 0.6 后稳定在低水平; 稠度指数大于 0.6 时, 纯黏土土样切向黏附力随着稠度指数的增加而增加, 含砂土样切向附着着力在稠度指数 0.9 附近有峰值, 随后降低; 针对黏附力盾构堵塞风险分区图可反映渣土改良过程中的盾构堵塞风险变化的路径, 可对渣土改良效果进行评估。

关键词: 盾构隧道; 堵塞风险; 室内试验; 渣土改良; 法向黏附力; 切向黏附力

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)09-1813-09

作者简介: 方 勇(1981—), 男, 博士, 2007 年于西南交通大学桥梁与隧道工程专业获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事隧道施工力学行为等方面的教学与研究工作。E-mail: fy980220@swjtu.cn。

Risk evaluation method for shield clogging based on interface adhesion force

FANG Yong¹, WANG Yubo¹, WANG Kai¹, QIAN Juqiang², CHEN Zhongtian¹, ZHUO Bin¹

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. China Railway 14th Bureau Group Tunnel Engineering Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: In order to accurately predict the risk of cutterhead clogging and provide the basis for preventing and controlling cutterhead mud cake in the tunneling of high clay stratum, the laboratory tests are conducted by using the self-designed soil-metal interface pull-out test device and the improved direct shear test device. The variation rules of the normal and tangential adhesion forces of different soil samples under different consistency indexes are analyzed through the laboratory tests. Based on the test results, a five-grade shield clogging risk zone map for adhesion force is proposed and used to evaluate the conditioning effects of the strongly weathered mixed granite residue. The results show that the normal adhesion first increases and then decreases with the increase of the consistency index, and the increase of the montmorillonite content decreases the peak line consistency index of the normal adhesion. The friction angle and tangential adhesion of the whole samples remain at a low level when the consistency index is less than 0.6. When the consistency index is greater than 0.6, the tangential adhesion of the pure clay sample increases with the increase of the consistency index, and the tangential adhesion of the sandy soil sample has a peak value near the consistency index of 0.9, and then decreases. The shield clogging risk zone map for adhesion force can reflect the path of the change of shield clogging risk in the process of soil conditioning, and the effects of soil conditioning can be evaluated.

Key words: shield tunnel; clogging risk; laboratory test; soil conditioning; normal adhesion; tangential adhesion

0 引 言

盾构机在黏性地层掘进的过程中刀具切削下来的渣土有时会黏附在刀盘表面, 形成固结或半固结的块状固体, 产生堵塞, 或称为结泥饼现象^[1-2]。若刀盘堵塞没有得到及时处置, 产生的泥饼进一步硬化, 将很难被去除, 常需要开仓作业, 风险很大。

盾构堵塞(泥饼)产生的首要条件为土体和刀盘

之间产生黏附, 目前一些学者常通过室内试验对土壤与金属之间的黏附力进行研究。拉拔试验常被应用于土壤-金属之间法向黏附力的测量, 其中锥体拉拔试验和金属块拉拔试验应用较为广泛。张庆建^[3]通过自制

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078428); 四川省杰出青年基金项目(2020JDJQ0032)

收稿日期: 2022-05-17

组合测盘进行室内法向黏附试验,研究了含水率对黏土法向黏附力的影响;杨益等^[4]开展锥体拉拔试验,研究了不同黏土稠度下的拉拔强度和土壤黏附量的变化规律;刘成等^[5]通过锥体拉拔试验研究了土体含水率和金属波纹表面对界面黏附力的影响;肖宇豪等^[6]研制了电渗装置,通过锥体拉拔试验探究了电渗对黏性土黏附力的影响规律。Feinendegen 等^[7]、Spagnolig 等^[8]、Basmenj 等^[9]、Sass 等^[10]先后通过拉拔试验评价黏土的黏附性。剪切试验通过测量金属与土壤之间剪切强度评价渣土的堵塞风险,旋转剪切试验通过旋转剪切仪测定金属与土壤之间的切向黏附强度^[11-13],此外,直剪试验也被应用于金属-土壤间切向黏附力的测定,Zimnik 等^[14]对现有的直剪试验装置进行改进,研究了土壤-金属界面切向黏附力的变化规律;Basmenj 等^[15]研究了多项土体物理性质对法向和切向黏附力的影响。

由于盾构结泥饼现象对隧道施工产生较大的负面影响,盾构堵塞风险的判断至关重要,合理的风险判断可为盾构的设计施工提供决策依据。袁大军等^[16]采用泥水盾构模拟试验装置,通过分析盾构在软岩地层中的掘进参数提出了一种刀盘堵塞的判断依据。Chen 等^[17]通过室内试验,结合盾构掘进过程中的速度与扭矩变化,提出了一种评价盾构堵塞风险的方法;Spa^[18]、Thewes 等^[19]、Feinendegen 等^[7]根据工程实践,基于含水率、塑性指数等地层参数提出了盾构堵塞风险判断图表;Hollmann 等^[20-21]、Khabbazi 等^[22]通过后续试验发展和补充了盾构堵塞风险的评估预测图。

从目前研究现状可以看出,关于盾构堵塞风险的评估方法基本是根据原始地层参数进行判断,包括天然含水率、液塑限、稠度指数等,不适用于进行过渣土改良后地层的堵塞风险评估,且目前针对泡沫剂、分散剂改良后渣土堵塞风险评估研究较少。本文以土壤-金属界面黏附(包括法向黏附、切向黏附)为切入点,通过自行设计的室内试验研究土壤-金属界面黏附力的变化规律,基于试验结果提出一种盾构堵塞风险综合评判方法并对改良后渣土进行效果评估。

1 界面黏附机理

关于土壤与界面的黏附,Fountaine^[23]提出了水膜理论,认为水的张力决定黏附强度,如图1所示,在粗糙干燥土壤与金属界面通过小水环黏附;在相对潮湿的土壤中,金属与土体的接触转化为水膜。

水膜毛细管力在水环或水膜接触中对黏附力起决定性作用,如图2所示,其大小可根据拉普拉斯力计算获得,见下式:

$$F = \gamma \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

式中: γ 为液面张力; R_1 为弯月面半径; R_2 为整体水膜半径。

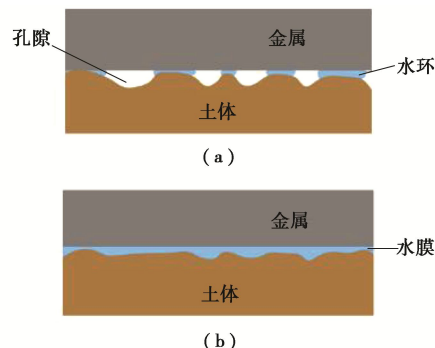


图1 界面黏附中水的作用模型

Fig. 1 Model for water action in interface adhesion

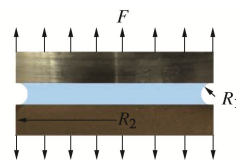


图2 黏附力计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of force calculation of adhesion

由式(1)可以看出,黏附力随曲面液面张力 γ 增大、弯月面半径 R_1 减小、整体水膜半径 R_2 增加而增大。

当土壤的含水率增大时,与金属的接触状态由“水环”向“水膜”发展,导致了黏附力 F 增大。当土壤含水率继续增大,水膜面积会不再变化,张力减小,黏附力开始下降。水膜的发展主要取决于土壤的水分张力和土壤渗透性^[1],水分张力影响土壤内部基质吸引表面水分的能力,渗透性体现土内水的转移速度。

盾构泥饼形成发展至堵塞的首要条件就是土壤和金属界面之间产生黏附作用^[24],盾构隧道施工时,金属刀盘与开挖土体之间的界面黏附可以分为法向黏附和切向黏附,根据金属与土壤之间的界面法向黏附力与切向黏附力可以对盾构的堵塞风险进行判断。

2 试验介绍

2.1 法向黏附力试验

(1) 法向黏附力

将土壤对金属之间接触面垂直方向上的抗拉强度定义为法向黏附力,如图3所示,并用 F 表示为

$$F = \frac{P}{A} \quad (2)$$

式中: P 为使土壤与金属接触面垂直方向分开的拉脱力; A 是垂直方向接触面积。

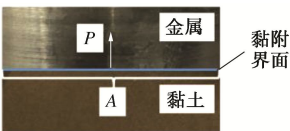


图 3 法向黏附力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of normal adhesion force

(2) 试验设备

试验采用自主研发的界面黏附拉拔试验装置^[25], 如图 4 所示。

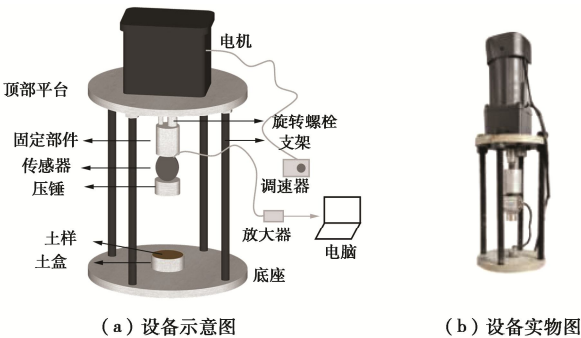


图 4 界面黏附拉拔试验装置

Fig. 4 Interface adhesion pull-out test device

设备以电机提供动力, 实现金属压锤以一定速度向下运动, 压锤直径 30 mm, 表面粗糙度为 10 μm。在压锤上方布置应力传感器, 最大量程为 5 kg, 精度为 3%, 配合数据处理软件可以测得金属压锤从土壤表面拉起时产生的黏附力。土盒内径为 60 mm, 高 20 mm, 由下方螺栓固定在底座上。

(3) 试验土样

研究表明^[26], 当地层中的黏土矿物含量超过 25% 时, 若处置不当, 发生盾构堵塞现象的概率较大。本文的试验土样有常见的黏土矿物, 包括高岭土、蒙脱土和高蒙混合土 (80%高岭土+20%蒙脱土)。为探究粗颗粒的影响, 另配制了含砂混合土 (高蒙混合土添加一定比例的砂), 砂的粒径为 0.1~0.25 mm, 符合标准^[27]试验要求。试验土样参数见表 1。

表 1 试验土样参数

Table 1 Parameters of test soil samples

土样名称	塑限/%	液限/%
高岭土	23.90	46.17
蒙脱土	58.99	180.00
高蒙混合土 (80%高+20%蒙)	41.13	106.90
砂黏混合土 (75%混+25%砂)	30.33	83.96
砂黏混合土 (50%混+50%砂)	26.43	65.43
砂黏混合土 (25%混+75%砂)	19.42	46.00
强风化混合花岗岩	21.67	38.25

此外, 取深圳地铁某盾构区间的强风化混合花岗

岩作为试验土样, 黏土矿物含量高, 盾构在该区间掘进过程中出现了掘进参数异常现象, 体现在速度骤降、刀盘扭矩增大, 开仓发现产生严重的结泥饼现象。

针对每种土样配制 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1 共 5 种稠度指数分别进行试验。

(4) 试验步骤

根据设定的稠度指数制备试验土样, 在土样制备完成后进行试验, 试验的步骤如下:

- a) 将土样粉碎后烘烤干燥。
- b) 混合土样在干燥状态下将烘烤过的土壤按比例混合, 土样添加水至预定含水率后密封 24 h。
- c) 将制备好的土样分 3 次填入土盒中并压出空气, 抹平表面。
- d) 将应力传感器连接电脑, 打开监测软件, 进行数值初始调零。
- e) 开始记录应力值的变化, 启动电机, 使金属压锤向下移动直至达到设定接触面压力 16 N (22.6 kPa), 并保持稳压 1 min。
- f) 改变电机方向后启动, 使金属压锤以 5 mm/min^[10, 15]上移, 直至脱离土样表面, 监测数据不再变化后关闭电机。
- g) 重复步骤 a) ~e), 取得 3 次测试数据。

2.2 切向黏附力试验

将土样与非土固体界面切向相对运动的阻力定义为土壤阻力 τ , 如图 5 所示, 计算方法如下:

$$\tau = C_a + N \tan \varphi \quad (3)$$

式中: C_a 为切向黏附力; N 为接触单位面积上的法向正压力; φ 为土壤与该非土固体材料之间的摩擦角。

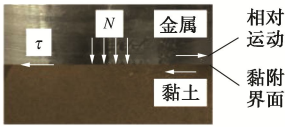


图 5 切向黏附力示意图

Fig. 5 Schematic diagram of tangential adhesion force

(1) 试验设备

对传统的直剪仪进行改装, 具体为将剪切面下部剪切盒放置金属块, 如图 6 所示^[24]。

(2) 试验步骤

土样制备完成后正式开始试验, 试验过程与直剪试验类似, 具体步骤如下:

- a) 对准剪切盒后插入固定销, 剪切容器下盒放置金属块, 环刀取土样后缓慢压入剪切容器上盒, 并在试样上依次放置滤纸、透水板、压板和加压框架。
- b) 进行初始位移量调零。
- c) 对垂直压力进行分级施加, 并观察垂直变形,

直至试样固结变形稳定(垂直变形每小时不大于 0.005 mm)。

d) 拔去固定销, 匀速转动手轮, 以 0.8 mm/min 的剪切速率施加水平推力, 记录破坏值。

e) 剪切结束后退去剪切力和垂直压力, 取出试样, 观测接触界面黏附情况。

f) 进行不同垂直压力下的剪切试验, 根据土壤阻力 τ 计算出切向黏附力 C_a 。

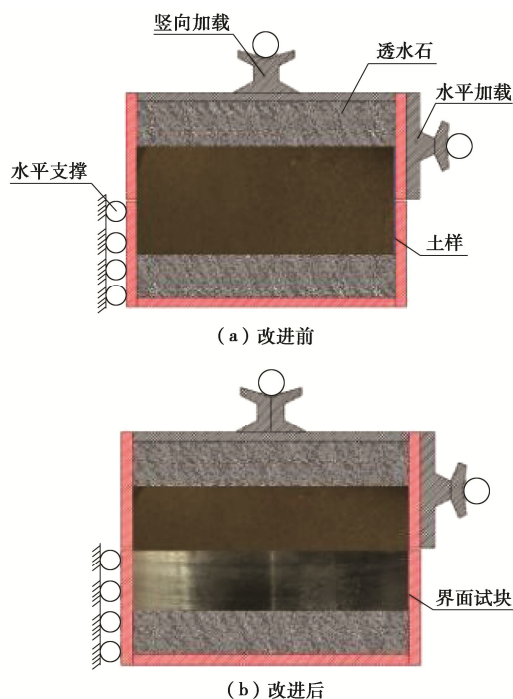


图6 直剪装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of improved direct shear device

3 试验结果与分析

3.1 法向黏附力试验结果分析

对于不同类型的土样, 法向黏附力对稠度指数的响应是不同的, 因此对 7 个土样的测试结果进行对比分析, 如图 7 所示。

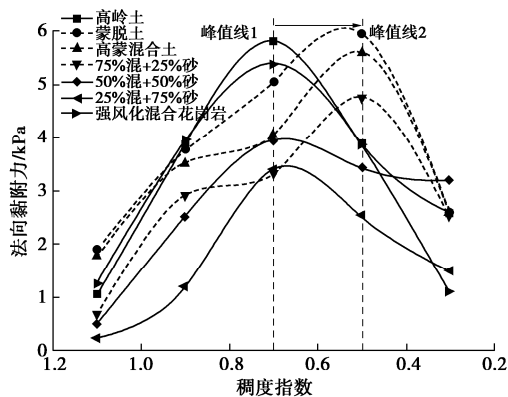


图7 不同稠度指数下的法向黏附力变化曲线

Fig. 7 Relationship between normal adhesion and consistency index

各试验土样法向黏附力与稠度指数的关系具有相似性, 所有样品的黏附力首先随着稠度指数的增加而增加到一个峰值, 然后下降到一个较低的值。土壤样品表面的水膜对黏附应力有很大影响, 随着含水率的增加, 界面接触状态逐渐由点接触发展至完整的水膜, 达到黏附力的峰值。蒙脱土和混有蒙脱土的土样在较低的稠度指数下到达了峰值, 峰值线的稠度指数约为 0.5, 而蒙脱土含量较少的土样峰值线稠度指数约为 0.7, 这是由于蒙脱土具有亲水性, 颗粒会吸收更多的水, 需要更多的水才能达到临界水膜厚度, 而且黏粒含量的增加会减小土样的渗透性, 减缓水膜的形成速度。

3.2 切向黏附力试验结果分析

以稠度指数 $I_C=0.9$ 的高岭土为例, 介绍切向黏附力的计算方法。进行 3 组切向黏附力测试, 每组 4 个试样分别施加 100, 200, 300, 400 kPa 的法向正应力, 测试结果如图 8 所示, 可见土壤阻力随法向正应力线性增加, 拟合直线相关系数在 0.95 以上。取拟合线在 τ 轴上的截距为切向黏附力 C_a , 斜率 K 为 $\tan \varphi$, 故土壤-金属摩擦角 $\varphi = \arctan K$, 计算得本例切向黏附力 $C_a=35.17$ kPa, 土壤-钢的摩擦角 $\varphi = 9.54^\circ$ 。

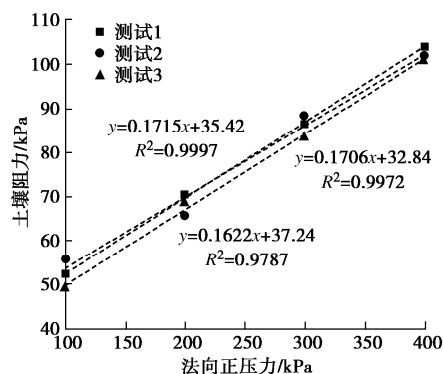


图8 稠度指数 0.9 的高岭土直剪试验结果

Fig. 8 Test data of improved direct shear test for kaolin soil with consistency index 0.9

各种土样的切向黏附力和摩擦角如图 9, 10 所示。稠度指数小于 0.6 时, 可认为土样的水膜已经完全形成, 其摩擦角和切向黏附力稳定在极小值, 抗剪能力较差, 各土样的数值差别很小。对于稠度指数大于 0.6 的情况, 可以看出纯黏土的土样和强风化花岗岩土样切向黏附力明显大于含砂土样, 而摩擦角明显小于含砂土样, 且含砂量越大, 切向黏附力越小, 摩擦角越大, 表明在含砂土样中摩擦成分占比较高, 而纯黏土摩擦成分占比较低, 切向黏附力较大。全土样的摩擦角都有随稠度指数降低即含水率增加而快速减小后稳定的趋势。不含砂的纯黏土样品和强风化花岗岩土样切向黏附力随着稠度指数的增加而明显增加,

峰值点在稠度指数 1.1 附近, 混有砂的土样切向附着力在稠度指数 0.9 附近有峰值, 随后降低, 变化曲线呈现中间大两边小的特征。

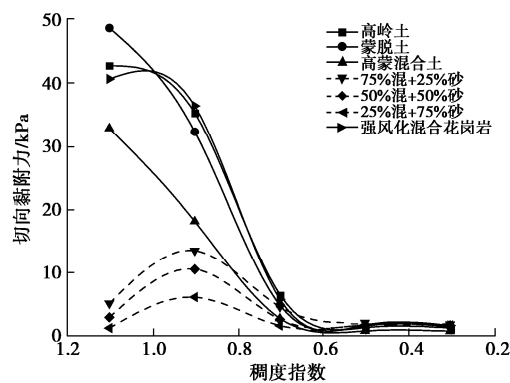


图 9 不同稠度指数下的切向黏附力变化曲线
Fig. 9 Tangential adhesion-consistency index curve

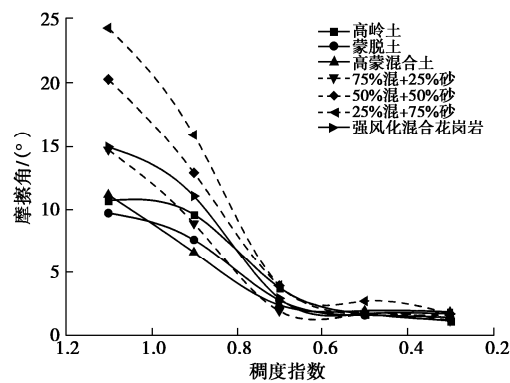


图 10 不同稠度指数下的摩擦角变化曲线
Fig. 10 Relationship between friction angle and consistency index

4 盾构堵塞风险综合评判方法

在实际的盾构掘进中, 刀盘处的土体受到盾构推进带来的法向应力的影响, 刀盘旋转带来的切向附着力的影响。法向黏附力低, 表明黏附在盾构机上的泥土就少。切向附着力低, 表明土体与金属之间的摩擦力小, 在切向力的作用下, 附着在刀盘上的土可以很容易地被清除。理想的盾构隧道渣土应该具有相对较低的法向黏附力和切向黏附力。但是法向黏附力和切向黏附力随稠度指数的变化规律可能并不一致, 如图 11 所示, 比如在稠度指数低于 0.6 时, 试验土样的切向黏附力较低, 但对应的法向黏附力可能很高。因此, 需要建立一个可以同时考虑法向黏附力和切向黏附力的盾构堵塞风险预测图。

根据 Thewes 等^[19]和 Hollmann 等^[20]结合实际工程提出的基于工程经验的盾构堵塞风险, 试验土样与上述堵塞风险评估图的关系如图 12 所示。

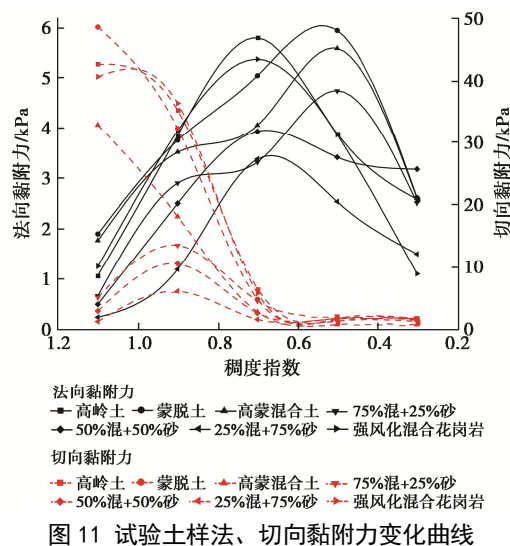


图 11 试验土样法、切向黏附力变化曲线
Fig. 11 Change curves of normal and tangential adhesions of test soil samples

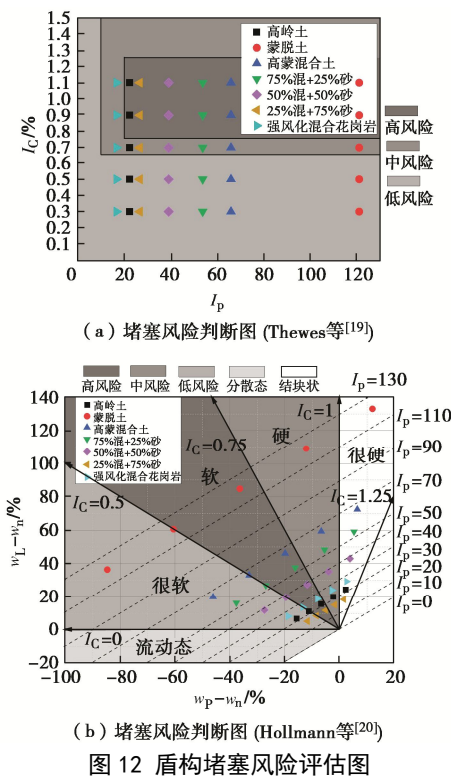


图 12 盾构堵塞风险评估图
Fig. 12 Risk assessment diagram of shield clogging
对比试验土样法向黏附力和切向黏附力的测试结果与盾构堵塞风险评估图, 由图 12 (b) 可以看出, I_c 为 0.5, 0.7 土样位于堵塞高风险区域, 与图 7 所示的法向黏附力试验结果具有较好的一致性。而切向黏附力试验结果与图 11 (b) 所反映的堵塞风险不一致, 由图 9 切向黏附力试验结果, I_c 为 0.5, 0.7 的试验土样切向黏附力处于相对较低水平, 与图 12 (a) 所示堵塞风险预测图相对一致。因此 Thewes 等^[19]提出的堵塞风险判断图与切向黏附风险存在较强的相关性, Hollmann 等^[20]提出的堵塞风险判断图与法向黏附风

险具有较强的一致性。

从法、切向黏附力变化曲线纵坐标零点起始依次增加纵轴长度的 5%，绘制高、中风险，中、低风险分界线，将汇总图分为高风险、中风险、低风险 3 个部分，得到若干风险分类图。将每种风险分类图的分界结果所对应的试验土样按照法向黏附力和切向黏附力分别绘制于 Hollmann 等^[20]、Thewes^[19]所提出的堵塞风险判断图中。当以 15%，45%，40% 的比例划分低、中、高 3 个风险区时，即法向、切向黏附力分别大于 3.75，30 kPa 的区域为高风险，法向、切向黏附力分别小于 1，7.5 kPa 的区域为低风险，其余为中风险，如图 13 所示，以堵塞高风险分类为例，试验土样的法向黏附风险和切向黏附风险与 Hollmann 等^[20]、Thewes 等^[19]所提出的堵塞风险判断图具有较强的一致性，如图 14 所示。

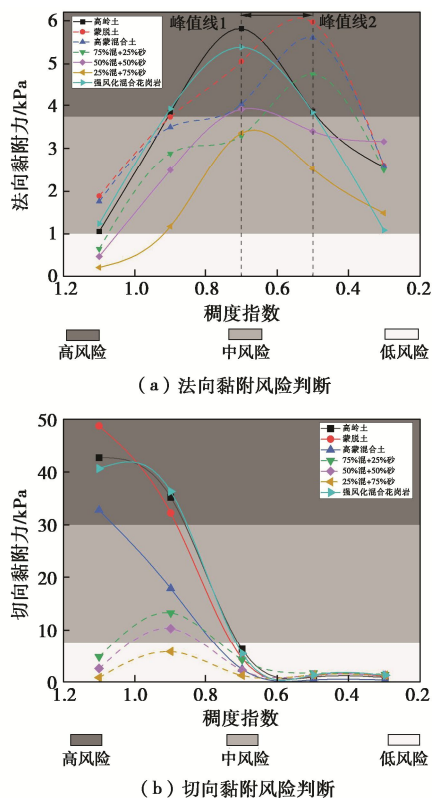
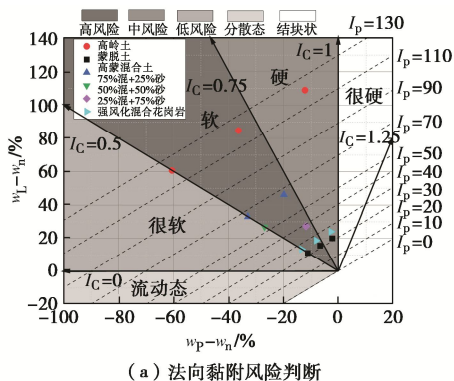
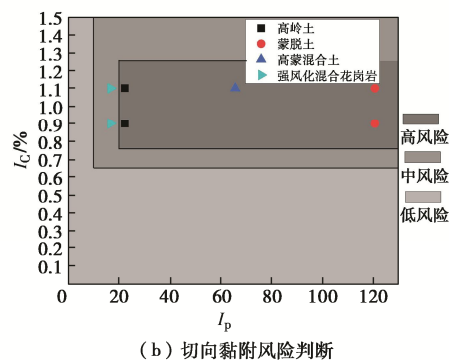


图 13 法、切向黏附风险判断图

Fig. 13 Risk judgment diagram of normal and tangential adhesions



(a) 法向黏附风险判断



(b) 切向黏附风险判断

图 14 法、切向黏附风险判断

Fig. 14 Risk judgment of normal and tangential adhesions

以法向黏附力为横坐标，切向黏附力为纵坐标，按照上述划分方法，绘制盾构堵塞风险分区图，将每种稠度指数下的试验土样根据法向黏附力和切向黏附力分别绘制于图中，如图 15 所示。4 条分界线将图表整体分为 9 个区域，对应有 5 个堵塞风险等级。如“中中”，即法向黏附中风险、切向黏附中风险，对应 III 级盾构堵塞风险。

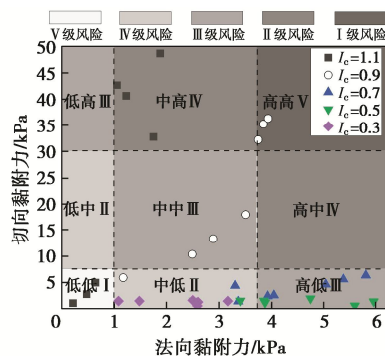


图 15 基于黏附力的盾构堵塞风险评判图

Fig. 15 Risk evaluation of shield clogging based on interface adhesion force

5 渣土改良方案评价

针对深圳强风化花岗岩地层，施工刀具易结泥饼的现象，试验土样使用稠度指数为 0.9、天然含水率为 23.33% 的强风化花岗岩，本文采用含水率优化、注入分散剂、注入泡沫剂 3 种措施进行渣土改良^[28]。

5.1 含水率优化

地层的天然含水率为 23.33%，以此为基准，分别配制含水率为 26.64%，29.96%，33.28% 的 3 种试样，进行拉拔与直剪试验，将试验结果标注在新提出的盾构堵塞风险分区图中并连线，如图 16 所示。可以看出，随着含水率的增加，盾构的堵塞风险逐渐下降，风险等级由 V 级降至 III 级，最后到达 II 级，且与 I 级接近，表明优化含水率效果良好。

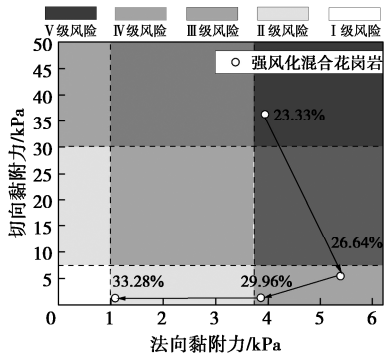


图 16 含水率优化对盾构堵塞风险的影响

Fig. 16 Effects of optimization of water content on risk of shield clogging

5.2 注入分散剂

分散剂注入地层中后,可以释放土内结合水,降低土壤颗粒与水之间的表面张力,使高黏性土的黏附性降低,流动性增加^[29]。本文选用的分散剂为六偏磷酸钠,将其制备成浓度为 10%的溶液,以 1%, 2%, 3%, 4%, 5%的添加比注入试验土样中。先测定改良后土样的液塑限,将测试结果绘于 Hollmann 和 Thewes 经验图中^[21],如图 17 所示。

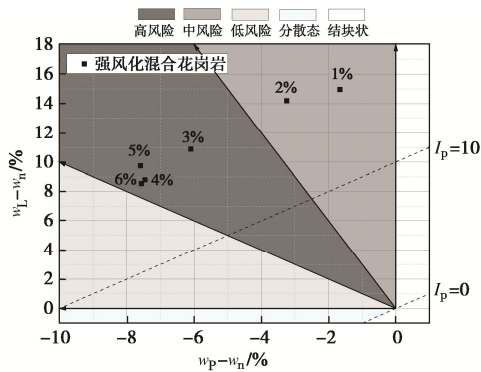


图 17 堵塞风险预测图 (Hollmann 等^[20])

Fig. 17 Prediction chart of clogging risk (Hollmann et al^[20])

进行黏附力试验并将黏附力试验结果绘于盾构堵塞风险分区图中,如图 18 所示。

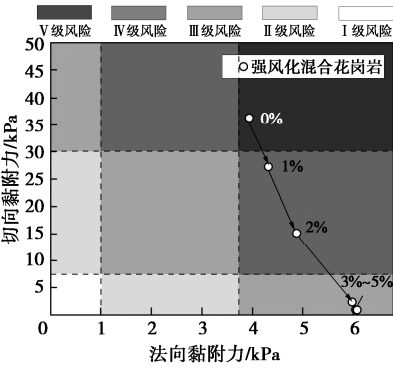


图 18 注入分散剂对盾构堵塞风险的影响

Fig. 18 Influences of dispersant injection on shield clogging risk

可以看出,分散剂可有效降低盾构堵塞风险,该图可直观反映风险变化路径。分散剂注入率增加后,预测的风险等级由V级逐渐降至III级,当注入率大于 3%后,结果变化不大。

5.3 注入泡沫剂

泡沫剂是常用的渣土改良剂,发泡后与土体颗粒混合,泡沫在土体单元表面形成薄膜,阻止了土体之间的黏结,具有良好的润滑和分离作用,从而降低盾构堵塞的风险。本文配制的泡沫剂浓度为 3%、发泡压力为 0.4 MPa,泡沫气液比为 10,将其按照 20%, 40%, 60%, 80%, 100%的注入率注入试验土样中。先测定改良后土样的液塑限,将测试结果绘于 Hollmann 等^[20]经验图中,如图 19 所示。

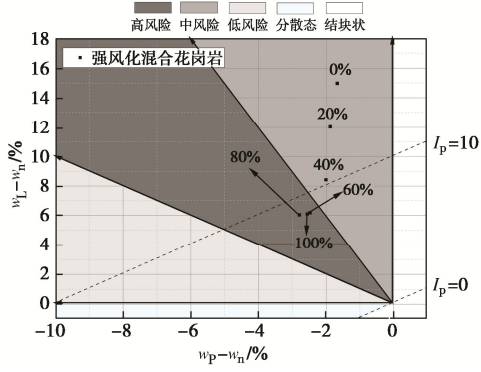


图 19 堵塞风险预测图 (Hollmann 等^[20])

Fig. 19 Prediction chart of clogging risk (Hollmann et al^[20])

进行黏附力试验并将黏附力试验结果绘于盾构堵塞风险分区图中,如图 20 所示。

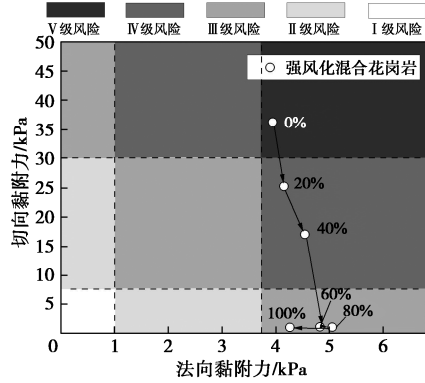


图 20 注入泡沫对盾构堵塞风险的影响

Fig. 20 Influences of foam injection on shield clogging risk

可以看出,注入泡沫后改良效果明显,随着泡沫注入率的提升,盾构堵塞风险由V级逐渐降至III级风险,当注入率大于 60%后,结果变化不大。

综上所述,对比注入分散剂与泡沫剂的 Hollmann 等^[20]经验图与基于黏附试验盾构堵塞风险综合评判图的堵塞风险变化,后者相较于前者对渣土改良后土壤堵塞风险的变化敏感。经过渣土改良后土壤的物理

特性变化相对较小,而力学行为特征的变化较为显著,既有的风险预测结果不直观,且与实际差别较大。基于黏附试验盾构堵塞风险综合评判图可以反映渣土改良过程中的盾构堵塞风险变化的路径,有效评估渣土改良的效果。

6 结 论

本文结合室内法、切向黏附力试验结果,总结出一种盾构堵塞风险综合评判新方法,得到以下5点结论。

(1) 基于界面黏附理论,通过自主设计的室内拉拔试验和界面直剪试验,探究了不同稠度指数下土壤与金属之间的法向黏附力和切向黏附力的变化规律,总结了一套重复性较强的黏附力测试方法。

(2) 法向黏附力试验中,试验土样的法向黏附力随稠度指数的增大先升高再降低,蒙脱土含量的提高会降低法向黏附力峰值线的稠度指数。

(3) 切向黏附力试验中,稠度指数小于0.6时,全样品的摩擦角和切向黏附力都稳定在低水平。稠度指数大于0.6时,纯黏土土样切向黏附力明显大于含砂土样,而摩擦角明显小于含砂土样,且含砂量越大,切向黏附力越小,摩擦角越大。纯黏土土样切向黏附力随着稠度指数的增加而增加。含砂土样切向附着力在稠度指数0.9附近有峰值,随后降低。

(4) 基于黏附力试验结果,以法向黏附力为横坐标,切向黏附力为纵坐标,共分为5个风险等级。

(5) 依托现有工程,通过对强风化花岗岩进行渣土改良,对比现有的盾构堵塞预测方法,基于黏附试验的盾构堵塞风险综合评判方法可以更有效地评估渣土改良效果。

参考文献:

- [1] 竺维彬,鞠世健,张 弥,等. 广州地铁二号线旧盾构穿越珠江的工程难题及对策[J]. 土木工程学报, 2004, 37(1): 56-60. (ZHU Weibin, JU Shijian, ZHANG Mi, et al. On the engineering poser and countermeasures of driving and crossing the Pearl River with two used tbms in Guangzhou metro line of no.2[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(1): 56-60. (in Chinese))
- [2] 方 勇,王 凯,陶力铭,等. 黏性地层面板式土压平衡盾构刀盘泥饼堵塞试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1651-1658. (FANG Yong, WANG Kai, TAO Liming, et al. Experimental study on clogging of cutterhead for panel earth-pressure-balance shield tunneling in cohesive strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1651-1658. (in Chinese))
- [3] 张庆建. 饱和黏土地基中黏附强度试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2014. (ZHANG Qingjian. Research on Adhesion in Satursted Clay Soils[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese))
- [4] 杨 益,朱文骏,李兴高,等. 老黏土地层土压盾构刀盘堵塞渣土改良效果评价方法[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(6): 43-49, 61. (YANG Yi, ZHU Wenjun, LI Xinggao, et al. Evaluation method for muck conditioning of hard clay to prevent clogging in EPB tunnelling[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(6): 43-49, 61. (in Chinese))
- [5] 刘 成,黄 琳,肖宇豪,等. 土体含水率和金属波纹状表面对界面黏附力影响[J]. 林业工程学报, 2021, 6(3): 161-165. (LIU Cheng, HUANG Lin, XIAO Yuhao, et al. Experimental study on the influence of soil moisture content and metal corrugated surface on the interfacial adhesion[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(3): 161-165. (in Chinese))
- [6] 肖宇豪,刘 成,黄 琳,等. 电渗法降低黏性土黏附力室内试验[J]. 林业工程学报, 2020, 5(4):168-173. (XIAO Yuhao, LIU Cheng, HUANG Lin, et al. Laboratory tests on adhesion reduction of clay soil by electro-osmosis method[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(4):168-173. (in Chinese))
- [7] FEINENDEGEN M, ZIEGLER M, SPAGNOLI G, et al. A new laboratory test to evaluate the problem of clogging in mechanical tunnel driving with EPB-shields[C]// ISRM EUROCK. Lausanne, Switzerland: ISRM, 2010.
- [8] SPAGNOLIG. Electro-chemo-mechanical Manipulations of Clats Regarding the Clogging During EPB-tunnel Driving [D]. Aachen: RWTH Aachen University, 2011.
- [9] BASMENJ A K, GHAFORI M, CHESHOMI A, et al. Adhesion of clay to metal surface: normal and tangential measurement[J]. Geomechanics and Engineering, 2016, 10(2): 125-135.
- [10] SASS I, BURBAUM U. A method for assessing adhesion of clays to tunneling machines[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(1): 27-34.
- [11] ZUMSTEG R, PUZIRIN A M. Stickiness and adhesion of conditioned clay pastes[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 31: 86-96.
- [12] LIU P F, WANG S Y, SHI Y F, et al. Tangential adhesion strength between clay and steel for various soil softnesses[J]. Journal of Material in Civil Engineering, 2019, 31(5): 1651-1658. (in Chinese))

- 0401948.
- [13] WANG S Y, LIU P F, HU Q X, et al. Effect of dispersant on the tangential adhesion strength between clay and metal for EPB shield tunnelling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, **95**: 103144.
- [14] ZIMNIK A R, BAALEN L R V, VERHOEF P N W, et al. The adherence of clay to steel surfaces[C]// *ISRM International Symposium*. Melbourne, Australia: ISRM, 2000.
- [15] BASMENJ A K, GHAFORI M, CHESHOMI A, et al. Adhesion of clay to metal surface; Normal and tangential measurement[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2016, **10**(2): 125-135.
- [16] 袁大军, 毛家骅, 王 将, 等. 软岩地层泥水盾构掘进刀盘堵塞现象研究[J]. *中国公路学报*, 2022, **35**(4): 177-185. (YUAN Dajun, MAO Jiahua, WANG Jiang, et al. Study on clogging phenomenon on cutterhead of slurry shield machine tunneling under soft rock[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, **35**(4): 177-185. (in Chinese))
- [17] CHEN Z T, BEZUIJEN A, FANG Y, et al. Experimental study and field validation on soil clogging of EPB shields in completely decomposed granite[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, **120**: 104300.
- [18] SPA G. Review of alternative construction methods and feasibility of proposed methods for constructing Attiko Metro Extension of Line 3 to Egaleo Attiko Metro S.A[Z]. Greece: 1995.
- [19] THEWES M, BURGER W. Clogging risks for TBM drives in clay[J]. *Tunnels & Tunnelling International*. 2005, **36**(6): 28-31.
- [20] HOLLMANN F S, THEWES M. Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, **37**: 96-106.
- [21] THEWES M, HOLLMANN F. Assessment of clay soils and clay-rich rock for clogging of TBMs[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, **57**: 122-128.
- [22] KHABBAZI A, GHAFORI M, AZALI S T, et al. Experimental and laboratory assessment of clogging potential based on adhesion[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, **78**: 605-616.
- [23] FOUNTAINE E R. Investigations into the mechanism of soil adhesion[J]. *Journal of Soil Science*, 1954, **5**(2): 251-263.
- [24] 王 凯. 盾构泥饼堵塞风险综合评判方法及防治措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021. (WANG Kai. Research on Comprehensive Evaluation Method for the Risk of Clay Clogging and Prevention Measures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese))
- [25] 陶力铭. 盾构刀盘-土壤界面黏附机理试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020. (TAO Liming. Experimental Study on the Adhesion Mechanism of Shield Cutterhead-Soil Interface[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese))
- [26] 竺维彬, 鞠世健. 盾构施工泥饼(次生岩块)的成因及对策[J]. *地下工程与隧道*, 2003(2): 25-29, 48. (ZHU Weibin, JU Shijian. Causes and Countermeasures of mud cake (secondary rock block) in shield construction[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 2003(2): 25-29, 48 (in Chinese))
- [27] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Test Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [28] 王树英, 刘朋飞, 胡钦鑫, 等. 盾构隧道渣土改良理论与技术研究综述[J]. *中国公路学报*, 2020, **33**(5): 8-34. (WANG Shuying, LIU Pengfei, HU Qinxin, et al. State-of-the-art on theories and technologies of soil conditioning for shield tunneling[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, **33**(5): 8-34. (in Chinese))
- [29] 刘朋飞, 王树英, 阳军生, 等. 渣土改良剂对黏土液塑限影响及机理分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, **50**(6): 91-96. (LIU Pengfei, WANG Shuying, YANG Junsheng, et al. Effect of soil conditioner on Atterberg limits of clays and its mechanism[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, **50**(6): 91-96. (in Chinese))