

DOI: 10.7672/sgjs2025070137

软土盾构隧道三轴搅拌桩加固效果及 地层变形规律分析*

张 扬¹, 曹 雄^{2,3}, 陈理堃⁴, 谭毅俊⁵

(1. 中铁十五局集团有限公司, 上海 200070; 2. 珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519000; 3. 广东省滨海地区
防灾减灾工程技术研究中心, 广东 珠海 519000; 4. 珠海红宝石建设开发集团有限公司, 广东 珠海 519000;
5. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060)

[摘要] 滨海软土区盾构隧道浅覆土段地层稳定性差, 为保障盾构施工安全, 需对软土地层进行加固处理。聚焦软土地层盾构隧道三轴搅拌桩加固效果, 考虑地层未加固及格栅加固两种工况, 通过数值计算对比分析盾构隧道开挖面主动、被动受荷变形和破坏规律以及对地表位移的影响。结果表明: 软土盾构隧道浅覆土段经三轴搅拌桩加固后, 相同支护压力下开挖面水平位移及地表竖向位移显著减小, 变形控制效果显著; 格栅加固地层与天然未加固地层的开挖面受荷变形演化过程存在较大差异, 主要表现为开挖面水平位移分布、地表竖向位移随支护压力的变化规律以及极限破坏形态的不同。

[关键词] 隧道; 盾构; 地基; 软土; 变形; 水泥土搅拌桩

[中图分类号] U455

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0137-07

Analysis of Stratum Deformation Law and Reinforcement Effect of Three-axis Mixing Piles of Soft Soil Shield Tunnels

ZHANG Yang¹, CAO Xiong^{2,3}, CHEN Likun⁴, TAN Yijun⁵

(1. China Railway 15th Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China; 2. Zhuhai Institute of Urban
Planning & Design, Zhuhai, Guangdong 519000, China; 3. Guangdong Coastal Area Disaster Prevention
and Mitigation Engineering Technology Research Center, Zhuhai, Guangdong 519000, China;

4. Zhuhai Ruby Construction and Development Group Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000, China;

5. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: The stability of the shallow overburden soil section of the shield tunnel in the coastal soft soil area is poor. To ensure the safety of shield construction, it is necessary to reinforce the soft soil layer. Focusing on the reinforcement effect of the three-axis mixing piles in the shield tunnels in the soft soil layer, considering two working conditions of unreinforced strata and grid reinforcement, the deformation and failure law of active and passive loadings of the shield tunnel excavation face and its influence on surface displacement were compared and analyzed through numerical calculation. The results indicate that the horizontal displacement of the excavation surface and the vertical displacement of the surface are significantly reduced under the same support pressure after the shallow overburden section of the soft soil shield tunnel is reinforced by the triaxial mixing piles, and the deformation control effect is remarkable. There is a great difference in the evolution process of the excavation face under load between the grid reinforced strata and the natural unreinforced strata, which is mainly manifested in the distribution of horizontal displacement of the excavation face, the variation law of surface vertical displacement with support pressure, and the different ultimate failure modes.

* 广东省住房和城乡建设厅科技创新计划(2022-K4-065552, 2022-K4-231814); 中铁十五局科研项目(CR15CG-ZH-HQMZSD-2021-00001(KJ))

[作者简介] 张 扬, 工程师, E-mail: 358213820@qq.com

[通信作者] 曹 雄, 硕士, 工程师, E-mail: xcao43@126.com

[收稿日期] 2024-08-20

Keywords:tunnels; shields; foundations; soft soil; deformation; cement soil mixing pile

0 引言

粤港澳大湾区滨海深厚软土分布广泛且具有含水率与压缩性高、抗剪强度低等不良工程特性^[1],极大制约湾区工程建设的发展。同时湾区水系密布,交通干线多以桥梁或水下隧道形式穿江越海。水下隧道常采用盾构法施工,软土地层的存在给盾构隧道的施工和运营带来了一系列挑战^[2-4],如开挖面支护压力控制不当引发的地表变形、开挖面失稳^[5-6],不均匀沉降造成的隧道接缝错开、开裂渗漏等。因此,需对软土地层进行加固,以确保隧道及周边的安全和稳定。

软土地层加固能够增强地层的强度和稳定性,减少盾构隧道的变形与沉降。目前,常用的盾构隧道软土地层加固技术有三轴搅拌桩加固、高压旋喷桩加固、水下深层搅拌桩加固等。李遵豪等^[7]详细对比了各类软土加固方案的特点和优缺点。黄昌富等^[8]、宋棋龙等^[9]、谭毅俊等^[10]将盾构隧道加固范围以环形加固圈表示,通过数值计算分别研究了加固圈厚度对软土浅埋超大直径盾构掘进地表沉降、开挖面破坏机理和隧道抗浮变形的影响。朱建峰^[11]对三轴深层水泥搅拌桩加固布置方案进行数值计算分析,给出了加固宽度、深度建议取值。

综上所述,软土地层加固对盾构隧道安全及变形控制尤为重要,目前研究地层加固对隧道变形及破坏机理的影响时,多基于简化手段将加固区假定为环形加固圈或等效为均质加固体。鉴于此,本文通过分析场地地质条件及相应的三轴搅拌桩加固方案,还原格栅式非均质地层条件,建立三维数值计算模型,对比研究软土地层三轴搅拌桩格栅加固与未加固条件下隧道的主动与被动破坏规律及地表变形特征,评判加固效果,为同类工程提供参考。

1 工程概况

横琴杧洲隧道位于珠江三角洲南部,珠江入海口西江流域,穿越马骝洲水道,北接珠海保税区环港东路与洪湾大道交叉口,南接横琴岛西北部厚朴道。盾构隧道段总长约 1.74km,采用 15.01m 超大直径泥水平衡盾构机施工,管片外径 14.5m,内径 1.3m,厚 0.6m。

1.1 工程地质条件

隧道区属海陆交互相-滨海沉积地貌单元,沿线第四系覆盖层较厚,主要分布有人工填土、淤泥、黏土、粉质黏土、淤泥质黏土、粗砂、砂岩残积土和下伏的全风化~中风化岩层。

隧道纵断面如图 1 所示,隧道南北两岸盾构段主要位于第四系海陆交互相沉积层淤泥,淤泥压缩性高、强度和承载力低,且厚度大,平均厚度 25.69m,最大达 50.70m。在北岸附近,淤泥埋藏深度极浅,最小埋藏深度仅 0.7m,盾构掘进中易扰动,开挖面稳定性低,隧道施工风险高。

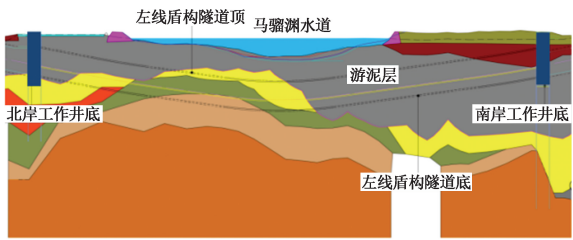


图 1 杧洲隧道工程纵断面

Fig. 1 Longitudinal section of the Mangzhou Tunnel

1.2 隧道浅覆土段加固方案

在隧道埋深小于 0.7D 的陆域浅覆土段,为保障隧道掘进安全及地层稳定,对软弱地层采用三轴搅拌桩加固,桩径 850mm、间距 600mm。加固平面、横截面如图 2 所示,隧道拱顶上方采用满堂加固,其中拱顶以上 3m 内为强加固,水泥掺量不小于 20%,28d 无侧限抗压强度标准值不小于 0.8MPa,渗透系数小于 $1.0\times10^{-7}\text{cm/s}$;拱顶以上 3m 至地面为弱加固,水泥掺量 5%。隧道拱顶往下至淤泥层底不小于 1m 范围进行格栅强加固,纵向支撑间距 2.4m,加固区横向范围由隧道外边线向两侧各拓宽 1.575m。

2 数值计算模型

2.1 模型概况

本文所分析的盾构隧道软土地层加固问题为平面对称问题,故沿隧道中轴线取一半建模分析,建立三维数值模型如图 3 所示,隧道拱顶以下软土地层为三轴搅拌桩格栅式加固,拱顶以上为满堂加固。加固土区域根据图 2 进行几何建模,搅拌桩弧边区域平直化处理,格栅加固肋墙宽度按搅拌桩直径取 0.85m,未加固土体单孔边长取 1.55m,外边缘 3 排搅拌桩墙宽度取 2.05m。模型所取分析原型区段为北岸陆域浅覆土段,地层分布按照钻孔 ZK38 取值,各土层自上而下参数如表 1 所示,模型竖向高度为 37.5m。模型在盾构掘进方向上长度取 40m,宽度方向上取 30m,隧道拱顶埋深 7m,盾构隧道外径 D 为 15m。模型底部设为固定边界,四周约束法向位移,顶部为自由边界。原型盾构区段位于陆

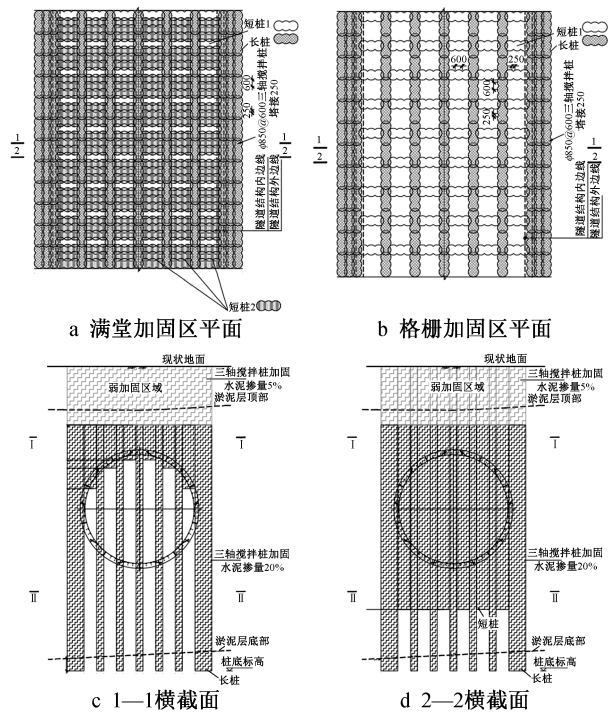


图 2 陆域浅覆土段软土加固

Fig. 2 Soft soil reinforcement of shallow cover soil in land area

域,且经加固后土体渗透系数极小,故在计算过程中不考虑地下水渗流的影响。

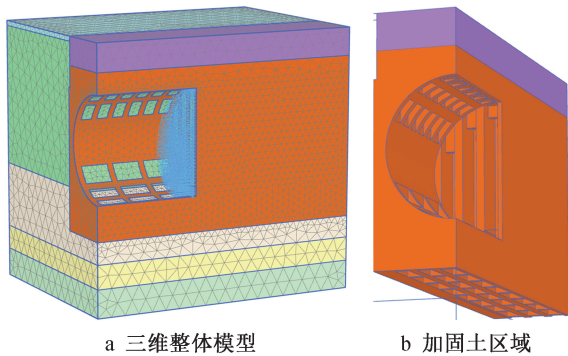


图3 数值分析模型

Fig. 3 Numerical analysis model

2.2 模型材料参数

软土地层力学行为需选择合适的本构模型和参数模拟,本模型中各层软土采用小应变硬化模型(HS-Small),参数取值结合工程勘察资料及顾晓强等^[12]总结的经验关系进行确定,如表1所示。对于加固土则采用莫尔-库伦理想弹塑性模型,加固土各项参数取值如表2所示,软土强加固水泥土弹性模量根据 DBJ/T 15—38—2019《建筑地基处理技术规范》取 100~120 倍 90d 无侧限抗压强度,参考工程桩无侧限抗压强度设计值,本模型软土强加固水泥土弹性模量取值为 100MPa;软土弱加固水泥土水泥掺量仅 5%,其弹性模量取压缩模量的 2~5 倍,在本模型中取值为 15MPa。

表 2 加固土物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of reinforced soil

加固土类型	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	黏聚力 c'/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
软土强加固水泥土	18.0	100	100	25
软土弱加固水泥土	17.0	15	25	15

2.3 主、被动受荷状态模拟

本文重点研究软土地层采用三轴搅拌桩格栅加固及未加固条件下盾构开挖面主动、被动变形以及对地表位移的影响,故忽略盾构逐环掘进过程,一次性沿掘进方向开挖至模型中部刚越过搅拌桩长桩的断面(进尺 15.25m 处),格栅加固地层开挖面处加固土与未加固土呈条带状间隔分布。根据土层重度、侧压力系数计算开挖面静止土压力,并施加相等的梯形分布支护压力模拟泥水盾构开挖面平衡状态。开挖面主、被动受荷的模拟基于对支护压力成倍减小或增大实现,倍数值为一位小数或 0 时,代表支护压力以开挖面顶部压力值为基础进行折减或放大,此时支护压力沿深度的增长幅度不

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

土层	厚度/ m	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 e	$E_{50}^{\text{ref}}/$ MPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/$ MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/$ MPa	$G_0^{\text{ref}}/$ MPa	$p^{\text{ref}}/$ kPa	$\gamma_{0.7}$	m	抗剪强度	
											黏聚力 c'/kPa	内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$
冲填土	0.7	16.7	1.65	2.1	1.7	15	35	100	2×10^{-4}	0.8	14.0	15.3
淤泥	20.1	16.5	1.52	2.3	1.9	16	37	100	2×10^{-4}	0.8	13.1	13.3
黏土	9.3	18.55	0.97	4.8	4.1	27	78	100	2×10^{-4}	0.7	27.0	12.0
粉质黏土	3.4	18.8	0.86	5.2	4.5	30	85	100	2×10^{-4}	0.7	30.3	15.1
碎石质 粉质黏土	4.0	19.2	0.72	5.6	4.8	32	102	100	2×10^{-4}	0.7	29.3	17.1

注: E_{50}^{ref} 为三轴固结排水试验参考割线模量; $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 为固结试验参考切线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为三轴固结排水试验参考卸载再加载模量; G_0^{ref} 为参考初始剪切模量; p^{ref} 为参考应力; $\gamma_{0.7}$ 为割线剪切模量衰减为 0.7 倍初始剪切模量时对应的剪切应变; m 为模量应力水平相关的幂指数

变;当开挖面顶部压力折减为 0 后,倍数值为两位小数时对支护压力沿深度的增长幅度进行折减。作用于开挖面的梯形支护压力或三角形支护压力(倍数值为两位小数时)为便于表述,下文中以隧道中心点处的压力值集度代指开挖面支护压力大小。

3 开挖面主动受荷变形分析

当盾构机支护压力小于开挖面静止土压力时,开挖面前方土体产生向隧道内涌入变形,变形量过大时塑性区将贯通至地表引起地表沉陷,威胁隧道周边地层的稳定。

开挖面主动受荷时最大水平位移及中心点水平位移随支护压力的变化曲线如图 4 所示,位移符号为负仅代表位移方向为盾构掘进的负方向。由图 4 可见,随着支护压力的减小,开挖面向盾构掘进负方向的水平位移逐渐增大,尤其当地层未加固时,支护压力减小到 0.4 倍静止土压力(133.6kPa)后,开挖面水平位移值迅速增大;支护压力下降到 0.06 倍静止土压力(57.5kPa)时,开挖面中心点水平位移超过 0.4m,土体发生难以计算收敛的塑性变形。当地层采用三轴搅拌桩格栅加固后,开挖面变形得到有效控制,支护压力接近 0 时,其水平位移大小在 0.2m 以内,且地层加固后的开挖面最大水平位移与中心点水平位移差值相较于未加固时小。

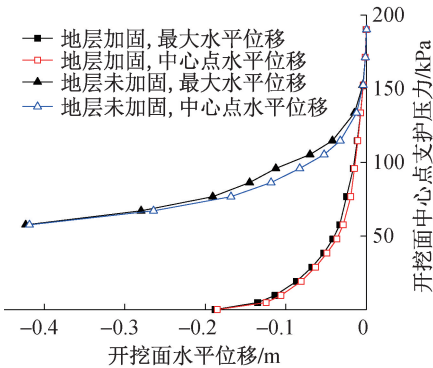


图 4 开挖面主动受荷水平位移曲线

Fig. 4 Horizontal displacement curve of excavation face under active loading

开挖面主动受荷水平位移发展云图如图 5 所示(图 5a~5c 为地层未加固,图 5d~5f 为地层加固)。由图 5 可知,软土地层未加固时,开挖面最大水平位移首先发生在面中上部,随着支护压力的减小,最大水平位移位置有所下移,但不低于开挖面中部,直至如图 4 中最大水平位移后半段与中心点水平位移接近。当地层经三轴搅拌桩格栅加固后,最大水平位移首先分布在面中部偏上,随着支护压力的减小,最大水平位移点逐渐下移,甚至发展到面中下

部;支护压力变化过程中,格栅加固区与桩间未加固土区域的水平位移差值相对较小,相互协调变形,桩间未加固区土体稳定性和抵抗变形能力得到提升。

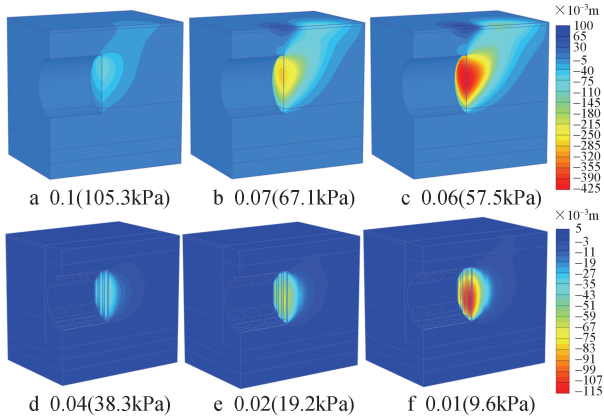


图 5 开挖面主动受荷水平位移发展云图

Fig. 5 Cloud map of the development of horizontal displacement under active loading on the excavation surface

开挖面主动受荷时隧道中轴线地表竖向位移分布曲线如图 6 所示,位移符号为负仅代表位移方向竖直向下。由图 6 可见,随着支护压力的减小,地表沉降逐渐增大且影响范围扩大,最大沉降位置逐渐远离开挖面,直至距开挖面 0.43D(未加固)、0.48D(加固)处趋于稳定。地层未加固时的地表沉降显著大于加固后,同为 0.08 倍静止土压力(76.7kPa)时,未加固地层地表最大沉降是加固后的 65 倍。开挖面主动受荷破坏状态的竖向位移云图如图 7 所示,由图 7 可见,地层未加固时开挖面主动受荷破坏形态呈常见的“烟囱”形^[9],最大竖向位移发生在“烟囱”核部;而地层加固后,竖向位移分布形态虽也类似“烟囱”形,但大小分布有所不同,较大的竖向位移主要分布在开挖面前方一格格栅体区域,而后因搅拌桩墙的隔断作用,竖向位移明显减小,最大竖向位移发生在开挖面中下部。

4 开挖面被动受荷变形分析

当盾构机支护压力大于开挖面静止土压力时,盾构机挤压前方土体,变形量超过一定程度后塑性区将贯通至地表,引起地表隆起。

开挖面被动受荷时最大水平位移及中心点水平位移随支护压力的变化曲线如图 8 所示。由图 8 可见,随着支护压力的增大,开挖面朝掘进前方的水平位移逐渐增大,尤其当地层未加固时,支护压力增加到 2.0 倍静止土压力(284.4kPa)后即出现拐点,开挖面水平位移增长速率骤增。当软土地层

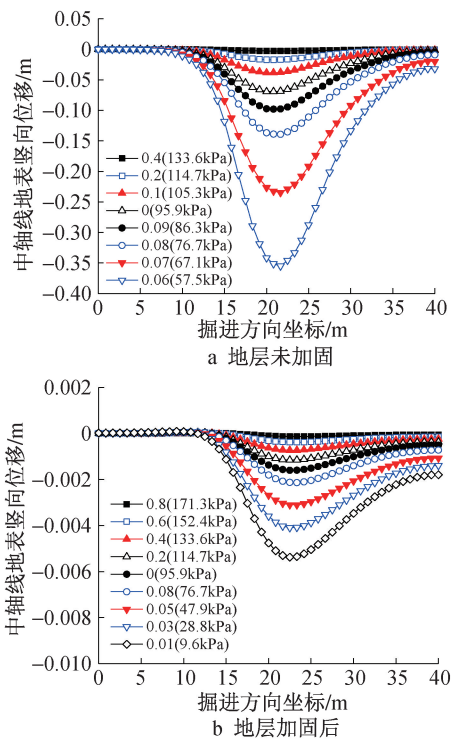


图 6 开挖面主动受荷时隧道中轴线地表竖向位移分布
Fig. 6 Vertical displacement distribution of the tunnel axis surface under active loading on the excavation surface

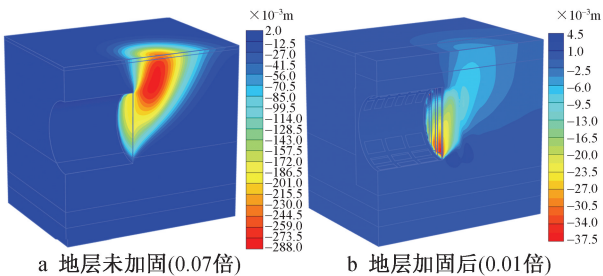


图 7 开挖面主动受荷破坏状态竖向位移云图
Fig. 7 Vertical displacement cloud map of excavation face under active load failure state

采用三轴搅拌桩格栅加固后,相同支护压力下开挖面水平位移显著减小,当支护压力超过 2.5 倍静止土压力(331.5kPa)后,由于格栅加固区域和桩间未加固区域强度指标的差异,桩间未加固区域土体先于加固区域发生开挖面顶部的局部塑性破坏,未加固区域的变形增大,最大水平位移和中心点水平位移出现突变式差异。

开挖面被动受荷水平位移发展云图如图 9 所示(图 9a~9c 为地层未加固,图 9d~9f 为地层加固),软土地层未加固时,开挖面最大水平位移发生在面上部,随着支护压力的增大,开挖面最大水平位移与中心点水平位移大小差异逐渐增大,但最大水平

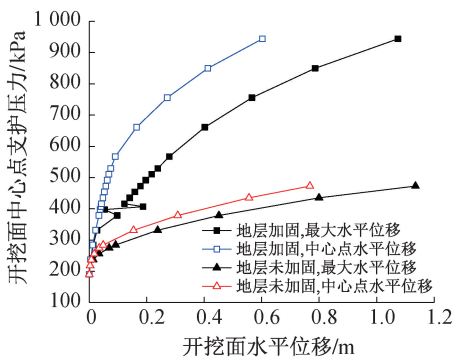


图 8 开挖面被动受荷水平位移曲线
Fig. 8 Horizontal displacement curve of passive load on excavation face

位移发生的位置改变不大。当地层经三轴搅拌桩格栅加固后,开挖面位移分布随支护压力的变化规律有所不同,最大水平位移首先出现在面中部,加固土与未加固土变形相对协调,对应图 8 中支护压力小于 2.5 倍静止土压力(331.5kPa)时最大水平位移与中心点水平位移初始同步增长段;随着支护压力增至图 8 中地层加固条件下最大水平位移突变段,最大水平位移在桩间未加固土顶部显著增大,从而表现为加固区域与未加固区域水平位移突变式差异产生。随着开挖面支护压力的进一步增大,前方土体严重压缩,其范围集中在开挖面前方半球形区域,影响深度随压力增大而逐渐扩大,而在满堂加固与格栅加固的拱顶界面处,水平位移会出现一次骤减,破坏形态类似于沿隧道轮廓延伸面的冲切破坏,传递至地表的水平位移显著减小。

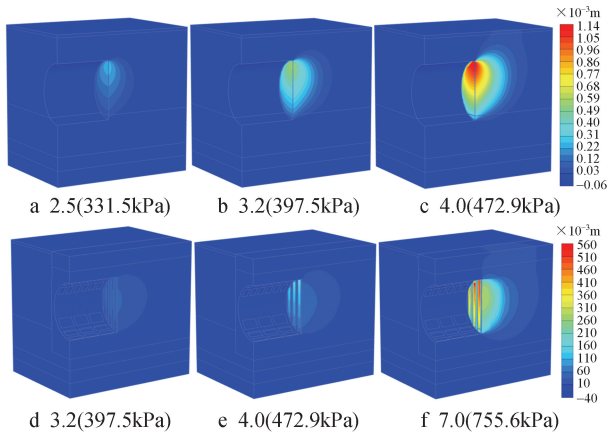


图 9 开挖面被动受荷水平位移发展云图
Fig. 9 Cloud map of horizontal displacement development under passive loading on excavation face

开挖面被动受荷时隧道中轴线地表竖向位移分布如图 10 所示。由图 10 可见,地层未加固时,随

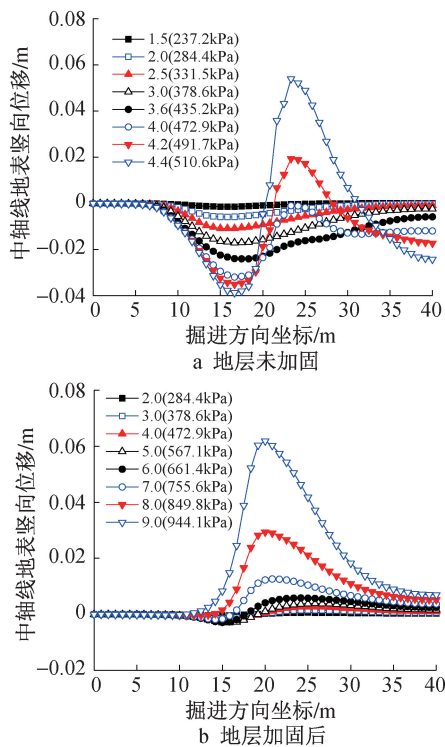


图 10 开挖面被动受荷时隧道中轴线地表竖向位移分布
Fig. 10 Vertical displacement distribution of the tunnel axis surface under passive loading on the excavation surface

着支护压力的增大,由于前方软土被压缩,地表沉降首先逐渐增大,影响范围逐渐扩大且最大沉降位置逐渐远离开挖面;当支护压力超过 4.0 倍静止土压力(472.9kPa)后,土体塑性区发展至地表,沿中轴线开始出现波浪形沉降槽,开挖面前方 $-0.92D\sim 0.53D$ 范围地表产生第 1 沉降槽,最大沉降位于开挖面前方 $0.09D$ 附近,距开挖面 $0.54D$ 开外产生第 2 沉降槽;而后随支护压力进一步增大,开挖面前方 $0.54D$ 处地表发生显著隆起, $0.09D$ 处凹陷进一步增至约 0.04m 。当地层采用三轴搅拌桩格栅加固后,地表竖向位移得到有效控制,同为 4.0 倍静止土压力(472.9kPa)时,未加固地层的地表最大沉降是加固后的 1.3 倍;地表位移表现为小于 8.0 倍静止土压力(849.8kPa)状态时“前隆后陷”、大于等于 8 倍静止土压力时的整体隆起,支护压力逐渐增大过程中,最大地表隆起点由开挖面前方 $0.65D$ 逐渐退至 $0.31D$ 附近。

两种地层条件下开挖面被动受荷破坏状态的竖向位移云图如图 11 所示。由图 11 可见,地层未加固时,开挖面被动受荷破坏状态最大竖向位移发生在开挖面顶部前方,而地层加固后,竖向位移分布形态有较大差异,主要表现为开挖面前方土体的

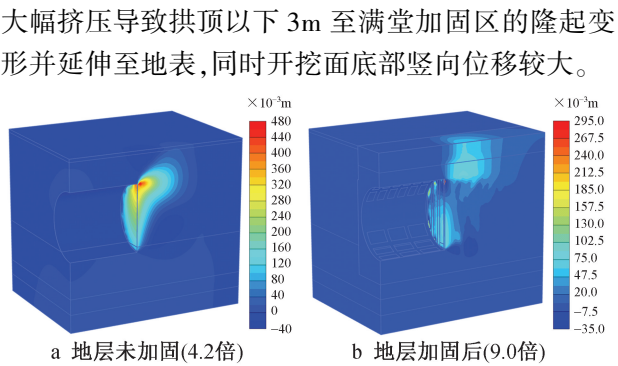


图 11 开挖面被动受荷破坏状态竖向位移云图
Fig. 11 Vertical displacement cloud map of passive load failure state on excavation face

5 结语

对软土地层盾构隧道三轴搅拌桩加固效果及地层变形规律进行了分析,得出主要结论如下。

1) 滨海软土地层性质差,盾构隧道浅覆土段施工风险高,通过三轴搅拌桩格栅加固,相同支护压力下,开挖面主动、被动变形及地表位移均有显著减小,尤其是开挖面支护压力低于 0.8 倍或超过 1.0 倍静止土压力后加固所起到的效果十分明显,主动受荷状态下以及支护压力不超过 4 倍静止土压力的被动受荷状态下,开挖面水平位移均能够控制在 0.2m 以内。

2) 盾构隧道开挖面被动受荷状态下,格栅体的非均质性对于开挖面变形的分布影响相较于主动受荷状态更为显著,被动受荷状态下最大水平位移与中心点水平位移差值以及格栅加固区域与未加固区域土体差异变形更大。被动受荷下未加固地层开挖面顶部区域变形显著大于底部,易导致盾构姿态的偏转,采用格栅加固且支护压力超过 2.5 倍静止土压力后,桩间未加固区域土体发生较大塑性变形,与格栅加固区域的差异变形显著增大。

3) 三轴搅拌桩格栅加固有助于隔断盾构隧道开挖面前方软土地层变形,有效减小发展到地表的位移,本工程条件下,支护压力为 0.08 倍和 4.0 倍静止土压力时,未加固地层的地表最大沉降分别是加固后的 65 倍和 1.3 倍;此外,软土地层经三轴搅拌桩格栅加固后,开挖面前方极限破坏形态与均质未加固软土有着很大的不同,如大变形范围更为集中等,相关规律可作为设置盾构施工顶进压力的参考。

参考文献:
[1] 周晖. 珠江三角洲软土分布特征及成因的地质与水文环境分析[J]. 广东土木与建筑, 2014, 21(7): 36-38, 35.
ZHOU H. Analysis of distribution characteristics and cause of the

geological and hydrological conditions of PRD's soft soil[J]. Guangdong architecture civil engineering, 2014, 21(7): 36-38, 35.

[2] 黄昌富,苏栋,胡瑶,等. 软土地层盾构隧道研究进展简述[J]. 现代隧道技术,2022,59(S1):13-21.
HUANG C F, SU D, HU Y, et al. A brief review of recent research progresses on shield tunnelling in soft soil stratum[J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(S1):13-21.

[3] 张煜,王大永,张壮壮,等. 天津滨海软土地地铁盾构隧道施工对地面结构的影响研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(21):11-16.
ZHANG Y, WANG D Y, ZHANG Z Z, et al. Influence of subway shield excavation on the mechanical performance of the ground structure in Tianjin coastal soft soil site[J]. Construction technology, 2022, 51(21):11-16.

[4] ZHANG Z X, LIU C, HUANG X. Numerical analysis of volume loss caused by tunnel face instability in soft soils [J]. Environmental earth sciences,2017,76(16):563.

[5] 朱翔宇,刘飞,李成海. 叠落盾构隧道开挖地表沉降规律研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(24):12-16,82.
ZHU X Y, LIU F, LI C H. Analysis of surface subsidence law during excavation of overlapping shield tunnel[J]. Construction technology,2023,52(24):12-16,82.

[6] ZAMORA HERNÁNDEZ Y, DURAND FARFÁN A, PACHECO DE ASSIS A. Three-dimensional analysis of excavation face stability of shallow tunnels [J]. Tunnelling and underground space technology,2019,92:103062.

[7] 李遵豪,彭元栋,曹雄. 横琴杜洲隧道深厚海相软土地层预加固方案研究[J]. 广东土木与建筑, 2022, 29(6): 5-8,12.
LI Z H, PENG Y D, CAO X. Research on pre-reinforcement scheme of marine deep soft soil ground in Hengqin Mangzhou Tunnel[J]. Guangdong architecture civil engineering, 2022, 29(6): 5-8,,2.

[8] 黄昌富,龙文,宋棋龙,等. 加固范围对软土浅埋超大直径盾构掘进地表沉降的影响[J]. 岩土工程学报,2021,43(S2): 76-79.
HUANG C F, LONG W, SONG Q L, et al. Influence of reinforcement range on ground settlement of shallow-buried super-large-diameter shield tunneling in soft soils[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2021, 43(S2): 76-79.

[9] 宋棋龙,祁文睿,李文静,等. 滨海软土地层浅埋超大直径盾构隧道开挖面破坏机理及加固范围研究[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(6):155-162.
SONG Q L, QI W R, LI W J, et al. Study on failure mechanism of excavation face and reinforcement range of shallow-buried super large diameter shield tunnel in coastal soft soil stratum[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2021, 38(6): 155-162.

[10] 谭毅俊,彭元栋,刘爽,等. 加固厚度对软土地层大直径盾构隧道抗浮的影响[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(6): 163-169.
TAN Y J, PENG Y D, LIU S, et al. Influence of reinforcement thickness on anti-floating of large diameter shield tunnel in soft soil stratum [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2021, 38(6):163-169.

[11] 朱建峰. 佛山地铁盾构隧道深厚软土地层预处理方法探究[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(8):1326-1333.
ZHU J F. Ground pretreatment method for deep soft soil of metro shield tunnel in Foshan[J]. Tunnel construction, 2019, 39(8): 1326-1333.

[12] 顾晓强,吴瑞拓,梁发云,等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 833-845.
GU X Q, WU R T, LIANG F Y, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification[J]. Rock and soil mechanics, 2021, 42(3): 833-845.