

DOI: 10.20174/j.juse.2026.02.23

盾构切桩后水泥土桩复合地基试验与模拟分析

郭院成, 刘煜, 陶伟

(郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001)

摘要:为探讨盾构穿切水泥土桩复合地基对地基承载性能的影响,基于郑州地铁5号线某区间盾构切削水泥土桩复合地基工程,依据相似原理设计开展了室内水泥土桩复合地基缩尺模型试验,并以此为基础建立相应的有限元分析模型。通过缩尺模型试验和数值模拟结果,分析水泥土桩复合地基桩体变化时水泥土桩复合地基中桩侧阻力和桩端阻力的变化规律。研究表明:水泥土桩复合地基在上部竖向荷载保持不变情况下经历盾构下部穿切施工后主要在单桩内产生应力重分配,同时水泥土桩复合地基桩侧阻力中性点向下移动;盾构下部穿切桩体长度的变化会对桩侧阻力和桩端阻力发挥程度存在较大影响,桩侧阻力贡献度会随切桩长度的增加有所下降,桩端阻力发挥程度会随着持力层的改善稍有增加。

关键词:水泥土桩复合地基;盾构切桩;工作性状;模型试验;数值分析

中图分类号: TU449

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0611-11

Test and Simulation Analysis of Cement Soil Pile Composite Foundation after Shield Tunneling Pile Cutting

Guo Yuancheng, Liu Yu, Tao Wei

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China)

Abstract: To investigate the impact of changes in end-bearing conditions, resulting from shield tunneling, on the bearing capacity of an upper cement-soil pile composite foundation, this study is conducted based on a specific section of the Zhengzhou Metro Line 5 where shield machines cut through cement-soil piles. According to the principle of similarity, a reduced-scale model test of a single cement-soil pile within a composite foundation was designed for laboratory testing. Based on this, a corresponding finite element analysis model was established. By comparing the results from the reduced-scale model test and numerical simulations, the variation patterns of side resistance and end-bearing resistance of the cement-soil pile composite foundation were analyzed as the pile characteristics changed. Studies indicate after the lower part of the cement-soil pile composite foundation undergoes shield tunneling while maintaining a constant vertical load above, there is primarily a redistribution of stress within individual piles, characterized by a transformation between side resistance and end-bearing resistance to balance the upper load. Simultaneously, the neutral point of the side resistance of the cement-soil pile composite foundation moves downward, and its position relative to the pile length is less than that observed in the case where only the pile length is shortened. The change in the length of the cut pile significantly influences the development of side and end-bearing resistances; the contribution of side resistance decreases with an increase in the cut length, whereas the extent to which end-bearing resistance is mobilized slightly increases as the cut length grows.

Keywords: cement-soil pile composite foundation; shield tunneling cutting; performance characteristics; model experiment; numerical analysis

收稿日期: 2025-05-21 (修改稿)

作者简介: 郭院成(1965—),男,河南辉县人,博士,教授,主要从事复合地基、基坑支护等领域的教学与科研工作。

E-mail: guoyuancheng@163.com

基金项目: 河南省重点研发专项(231111322100); 河南省自然科学基金面上项目(222300420555)

0 引言

随着城市地下空间的深入开发和轨道交通网络的日益扩展,城市地铁建设中穿越现有建筑物地基基础的情况日益增多。在此背景下,盾构技术和设备的持续创新使得盾构直接切削桩体成为提高施工效率、降低施工成本的有效途径。然而,盾构施工过后对水泥土桩复合地基原有形态和受力状态的破坏可能引发承载力的不可逆变化,从而对上部建筑物的稳定性构成潜在威胁。因此,深入研究盾构施工后桩体形态变化对复合地基承载性能的影响,对确保工程安全、推动城市可持续发展具有深远的实践意义。

目前,国内外学者在关于盾构下部穿切水泥土桩复合地基的研究中,对盾构机构件设计和掘进姿态控制方面获得了大量的研究成果,许华国等^[1]通过对 6 组不同刀型的切削方案进行模型试验研究,得出了滚刀和撕裂刀切削混凝土桩基的优缺点。王哲等^[2]从贝壳刀角度出发,提出了采用同心圆三段高差立体刀具布置切削桩基可以达到最佳效果。李宏波^[3]在此基础上研究得出滚刀主要破坏形式为碾压破坏且施工参数波动较大,而撕裂刀主要为剪切破坏。廖秋林等^[4]进一步分析了撕裂刀在切削过程中钢筋主要缠绕在中心区孔洞处和 $R \leq 2025 \text{ mm}$ 范围内,均以弯拉为主要破坏形式。Wang 等^[5]对于盾构直接切割新隧道开挖路径上大直径钢筋混凝土群桩进行了重点分析,研究了撕裂器的平均磨损量以及不同高度切割器对盾构切桩施工的累计作用。在数值模拟和室内试验方面,杜闯东等^[6]利用土压盾构掘进模态综合试验台模拟了不同刀具布置和多种掘进工况,发现盾构掘进过程中存在最佳推进切削速度、刀盘转速和最佳转矩。梅君等^[7]基于 RHT 和 J-C 本构模型,建立弧形撕裂刀切削钢筋混凝土耦合体数值模型,通过分析得出调整切削速度可以降低对切削力的影响同时提升贯入度,有利于避免刀具断裂。汪卫军等^[8]重点分析了盾构刀盘系统、推进系统以及排渣系统对再制造盾构切桩工程的适用性,并针对性的对各系统进行了改造。韩旭^[9]利用 FLAC3D 软件模拟盾构接收掘进过程中围护桩和盾构周围土体的受力状态,建立了盾构切削 GFRP 筋混凝土围护桩模型,并为工程施工提供合理的掘进参数范围。随着人工智能和大数据的不断发展,Chen 等^[10]率先将此技术应用于盾构机开挖钢筋混凝土桩的实际工程案例中,通过构建最大信息系数(MIC)、 k 中值和长短期记忆(LSTM)网络相结

合的方式,提出了一种新的模型 MK-LSTM,用于分析盾构掘进过程中各参数之间的相关性,并且预测上部结构的变形。还有部分研究聚焦于切桩引起的地表沉降以及控制措施方面:白东锋等^[11]对盾构切除桥梁桩基后残桩对管片的竖向荷载及残桩的承载力进行了计算分析,并根据理论和实际工程案例,提出了减小施工扰动、加强管片配筋和螺栓强度可以降低残桩对管片的受力影响;庄欠伟等^[12]利用 Autodyn 显示分析软件以及 SPH 磨料水射流粒子建模软件进行研究发现,随着横移速度的提升,切割深度呈现出相应的下降趋势;刘军等^[13]通过 PFC 颗粒流有限元软件建立盾构切割 GFRP 筋混凝土围护桩分析模型,得到了盾构切刀前半行程为剪压破坏,后半行程为剪切破坏;唐仁等^[14]针对盾构穿越后剩余基桩的沉降及承载力问题进行了数值仿真模拟,发现盾构切桩后隧道拱顶沉降大于桩端沉降;曾力等^[15]依托实际工程背景,在现场试验分析的基础上采用 MIDAS GTS 有限元软件对盾构切桩施工后桩身轴力和桩侧阻力进行补充运算,分析了盾构切桩全过程中地表沉降,桩间土压力以及桩身应力的变化规律。部分学者通过深入探讨切桩过程中的力学机制,优化刀具设计和掘削参数选取,以提高盾构切桩技术的效率和安全性。Liu 等^[16]基于北京地铁 12 号线既有桥桩侵切过程进行了数值分析,建立了 DEM-连续介质力学耦合模型,研究了不同推进参数对盾构机所接触桩底位移、推力和扭矩的影响;Liu 等^[17]还在 2023 年采用基于有限元法的 p - γ 曲线分析了盾构机切割过程中桩的结构响应,得出了盾构推力是影响桩侧移和弯矩的主要因素。随着桩截面积的减小,最大负弯矩增大,最大正弯矩减小,而土体加固可以有效地减小桩顶的侧向位移。

综上所述,盾构切桩方面的研究主要集中在通过模型试验和数值模拟来分析盾构施工过程参数,而对于盾构完成切削桩体后,桩体本身的变化及其对复合地基承载能力影响的深入探讨却相对匮乏。本文以盾构下部穿切水泥土桩复合地基工程为背景,采用室内模型试验和数值模拟相结合研究方法,针对盾构穿切水泥土桩复合地基导致上部水泥土桩桩长和桩端条件改变工况,研究了施工产生多桩型水泥土桩复合地基承载性能的变化规律。

1 室内模型试验设计

1.1 模型试验装置

模型试验系统设计如图 1 所示,模型箱尺寸为 2 m (长) $\times 2 \text{ m}$ (宽) $\times 4 \text{ m}$ (高)。模型箱的侧壁通过

5 mm 厚的钢板与外钢框架结构相连接,在箱体后侧设计有 10 块便于拆装的钢板,以便于箱内土体的填装与移除。

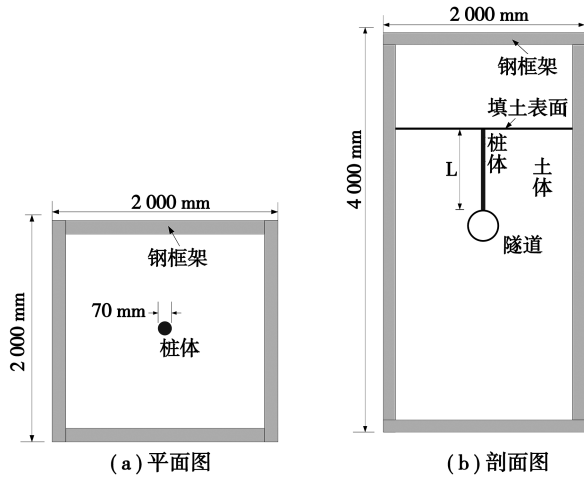


图 1 模型箱示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model box

1.2 相似比的确定

基于实际工程背景,综合考虑模型箱尺寸和加载条件,选取相似比为 1:15(模型:原型)进行室内模型试验。基本物理量选择长度 l 、密度 ρ 和弹性模量 E ,在计算其他物理量的相似比时采用量纲分析法。最终求得各物理量的相似比见表 1 所示。

1.3 模型隧道的设计与选取

隧道原型材料采用 C50 级混凝土,弹性模量为 34.5 GPa,盾构隧道外径与内径分别为 6 m、5.4 m。隧道模型材料采用有机玻璃,并通过万能材料试验机对该材料进行弹性模量测试,测试结果如图 2 所示。根据应力-应变曲线可得,该有机玻璃的弹性模量约为 2.78 GPa,近似满足弹性模量相似比为 15 的要求。

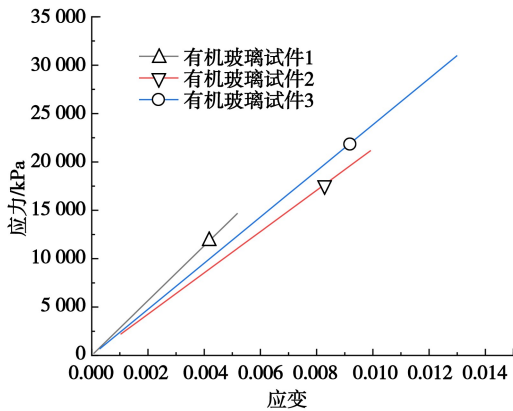


图 2 有机玻璃应力-应变曲线

Fig. 2 Plexiglass stress-strain curves

根据相似比得到,本试验中隧道模型的尺寸为外径 0.4 m、内径 0.36 m、长度 1 m。土压力测量

点位布置在距隧道中心线两侧 100 mm 位置,各设置 4 个测量点位,共 8 个,点位间隔为 45°,隧道效果图及具体实物布置图如图 3、图 4 所示。

表 1 各物理量的相似比

Table 1 The similarity ratio of each physical quantity

物理量	量纲	相似关系	相似比	
			隧道/桩体	土体
长度, l	$[L]$	C_l	15	15
位移, u	$[L]$	$C_u = C_l$	15	15
面积, A	$[L]^2$	$C_A = C_l^2$	225	225
应力, σ	$[M][L]^{-1}[T]^{-2}$	$C_\sigma = C_E$	15	1
应变, ϵ	—	$C_\epsilon = 1$	1	1
弹性模量, E	$[M][L]^{-1}[T]^{-2}$	C_E	15	1
泊松比, ν	—	$C_\nu = 1$	1	1
密度, ρ	$[M][L]^{-3}$	C_ρ	0.48	1
黏聚力, C	$[M][L]^{-1}[T]^{-2}$	$C_c = C_E$	—	1
摩擦系数, μ	—	$C_\mu = 1$	1	1
集中荷载, F	$[M][L][T]^{-2}$	$C_F = C_E C_l^2$	3 375	3 375
面荷载, P	$[M][L]^{-1}[T]^{-2}$	$C_p = C_E$	15	15
时间, T	$[T]$	$C_t = C_l C_p^{1/2}$ $C_E^{-1/2}$	3.873	3.873
质量, M	$[M]$	$C_M = C_\rho C_l^3$	15	15



图 3 隧道模型立体效果图

Fig. 3 Stereoscopic rendering of tunnel model



图 4 隧道模型布置图

Fig. 4 Tunnel model layout

1.4 模型桩设计

冯国杰^[18]在变刚度复合地基模型试验研究中采用聚氨酯橡胶来模拟柔性桩,本文在其基础上进

行桩体材料的选择。根据侯思强^[19]在刚性长短桩复合地基传力机制及设计理论研究中有桩侧阻力的理论推导,本试验对于桩体材料的设计采用弹性模量的相似比。

根据相似原理按 1:15 相似比设计,试验选用聚氨酯橡胶作为桩身材料,选取在盾构施工完成阶段最具代表性的两根桩进行模型试验,模型桩直径为 70 mm,长度分别为 1 m 和 0.8 m。经实验室测试,桩体的弹性模量为 60 MPa,符合缩尺试验相似比要求。

缩尺模型试验模型桩的制作,采用 502 胶水将一层试验用砂^[20]粘贴于橡胶桩表面,并对隧道与桩体接触部位进行了修整,以保证接触界面的紧密性,如图 5 所示。



图 5 试验桩体处理对比图

Fig. 5 Comparison diagram of treated test pile body

1.5 试验用土的选择

模型试验用土选择郑州地区典型地层细砂,经晾晒得到干砂。对在试验箱中静置 7 d 的土体进行取样,并在实验室中配置相同密度土样进行直剪试验,测得该砂土 $c = 3.47 \text{ kPa}$, $\varphi = 30.42^\circ$;试验砂土颗粒级配曲线如图 6 所示。褥垫层用砂颗粒的平均粒径为 0.75 mm,厚度为 1/2 桩径,取为 35 mm。

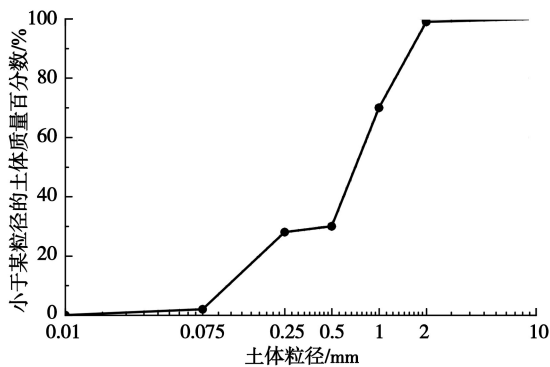


图 6 砂土颗粒级配图

Fig. 6 Grading characteristics of sand and soil particles

1.6 试验量测原件布设方案

试验中需要对桩间土、桩顶及桩端位置的土压力进行测量。桩间土的土压力盒直径为 35 mm,高度为 7 mm,量程为 100 kPa;桩顶和桩端的土压力盒直径均为 30 mm,高度为 10 mm,量程为 2 MPa。

在单桩加载模型试验中,于填土表面均匀布置了 4 个土压力盒,这些土压力盒对称分布在桩体四周。具体的布置方案如图 7 所示。

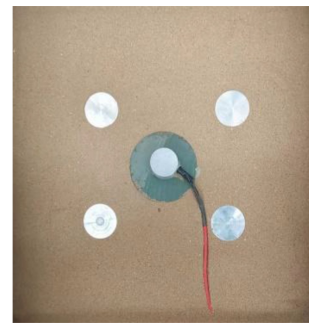
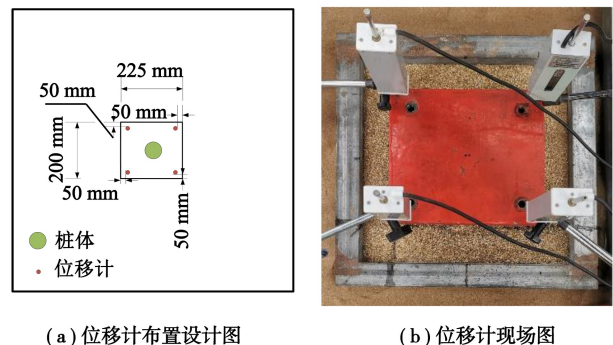


图 7 土压力盒布置图

Fig. 7 Layout of earth pressure box

在本模型试验中,采用 YHD 系列半桥接电子应变式位移传感器进行测量。该传感器的量程为 100 mm,测量精度达到 0.01 mm。试验配置了 4 个位移计,用于监测复合地基顶部的沉降。这些位移计均匀布置于加载板中心位置,距加载板边缘均为 50 mm。图 8 为加载板上位移计的具体布置情况。在整个试验过程中,定期检查位移计,确保其始终垂直于加载板,以保证监测数据的准确性和可靠性。



(a) 位移计布置设计图

(b) 位移计现场图

图 8 位移计布置示意图

Fig. 8 Layout of displacement meters

1.7 试验方案

采用位移控制方法进行加载,确定复合地基试验加载量为 10 mm,分 10 次加载,每次控制加载板沉降为 1 mm。具体加载形式如图 9 所示。

本试验中,为方便数据分析,取竖向位移中 1、4、7、10 mm 时对应的竖向荷载作为相关图中的荷载变化值。

2 试验结果分析

2.1 试验分组情况

根据模型试验目的,本次试验的具体分组如表 2 所示。



图 9 加载试验现场布设图

Fig. 9 Layout of the loading test site

表 2 模型试验方案分组

Table 2 Grouping of model test plans

工况编号	桩径/mm	桩长/mm	土体范围/m	承压板尺寸/m	有无隧道存在
1	70	800			无
2	70	1 000	2×2×4	0.225×0.2 ×0.05	无
3	70	800			有

2.2 桩长改变对桩侧阻力影响分析

短桩复合地基和长桩复合地基荷载试验的桩侧阻力曲线如图 10、图 11 所示。由图可知,桩侧阻力在桩顶附近为负值,随深度的不断增加,逐渐从负值转变为正值并逐渐增大,在经过极值后逐渐减小。随着深度的不断增加,桩、土的相对位移越来越小,直至中性点的出现。随着深度继续增加,桩土之间位移由相对向下转变为相对向上,桩侧阻力出现正阻力区并不断增大至极值点,荷载通过桩体传递至深层土体并不断减小,经过极值点后桩侧阻力变小,最终达到平衡。

对比图 10、图 11 可以看出,短桩复合地基中性点的位置大约在 0.18 m(0.225 倍桩长)附近,长桩中性点位置大约在 0.13 m(0.13 倍桩长)附近,水泥土桩复合地基的中性点位置靠近桩体上部,说明随着桩体长度增加,中性点向上移动,桩土的相对位移较大,桩侧阻力的分布更加集中在桩体的上部分。同时还发现,桩侧阻力曲线的正阻力最大值点向下发生移动。分析原因为施加均匀竖向荷载作用下,桩长变长,负阻力区的相对位移减小,桩土之间更快的达到了相对位移为零的状态,在中性点以下,由于桩长增加带来的桩侧阻力发挥程度提高,桩体承担了更多的竖向荷载,桩土间的相对位移变大,需要更多桩侧阻力的发挥,此部分侧阻力主要由桩体下部提供,导致桩侧阻力曲线的正阻力最大值点向下移动。

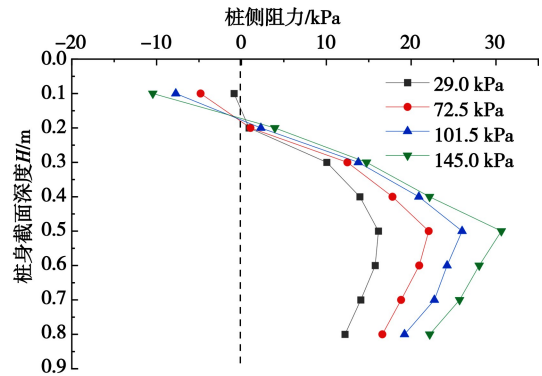


图 10 短桩复合地基桩侧阻力曲线

Fig. 10 Lateral resistance curves for short pile composite foundation

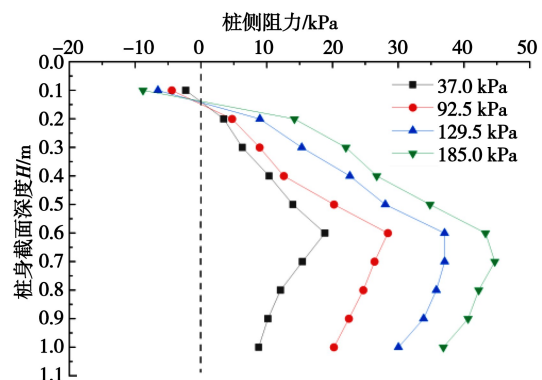


图 11 长桩复合地基桩侧阻力曲线

Fig. 11 Lateral resistance curves for long pile composite foundation

2.3 桩长改变对桩端阻力影响分析

如图 12 为短桩复合地基和长桩复合地基桩端阻力曲线。由图 12 可以看出,短桩复合地基桩端阻力由零逐步增长到 93.38 N,而长桩复合地基从零一直增大到 130.5 N。随着荷载的不断增大,短桩复合地基的桩端阻力在位移 4 mm 后呈急剧上升的趋势,长桩复合地基的桩端阻力在位移 5 mm 后呈急剧上升的趋势。这一现象的原因在于,在加载初期,上部施加的荷载主要依靠桩间土体及桩侧摩擦力来承担,传递给桩身的荷载相对较小。但当荷载进一步加大时,桩体开始分担更多的荷载,导致桩体产生向下的位移,从而引起桩端土体的压缩。此时,桩侧摩擦力与桩端阻力共同作用以支撑上部竖向荷载,使得桩端阻力持续提升。

对比长桩与短桩复合地基的变化曲线发现,在大多数情况下长桩的桩端阻力略低于短桩,但在加载中后期长桩的桩端阻力超越短桩。这主要是由于桩长增加导致长桩的长细比变大,相对刚度较小,荷载分担比降低,进而使得短桩的桩端阻力稍微高于长桩,但在加载后期随着荷载不断变大,短

桩复合地基率先达到极限状态,长桩桩端阻力超越短桩。此外,由于桩长的差异,在上部作用效果相同的情况下,长桩桩端阻力发挥的时间出现了滞后性。随着外加荷载的不断累积,桩上部区域的侧摩擦力会迅速达到极限值。此后,若继续增大荷载,桩端将快速增强其阻力,以补偿侧摩擦力不足的情况。

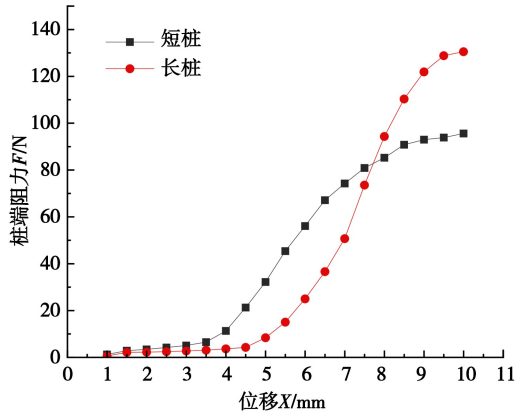


图 12 不同桩长条件下桩端阻力曲线

Fig. 12 Pile tip resistance curves under different pile lengths

2.4 端承条件改变下的荷载-沉降曲线分析

图 13 为不同端承条件下复合地基荷载-沉降曲线,从图中可以看出,短桩隧道复合地基的荷载-沉降曲线表现为缓降型。通过对比两者的荷载-沉降关系观察到,盾构切桩之后,由于端承条件得到显著改善,复合地基在相同沉降量下的所需荷载有所增加。具体而言,在端承条件大幅优化的情况下,达到同等沉降所需的荷载增加了 26.67%,这表明强化端承条件能够有效提升复合地基的承载力。分析其原因在于,盾构施工后,桩端位于更加稳固的地层之中,从而更好地限制了桩体末端的位移。这使得桩体能够承受更大的上部荷载。此外,桩体与周围土体之间的协调作用也得到了加强,提高了桩侧阻力的有效发挥程度。综合这些因素,不仅提升了单个桩体的承载能力,还减少了整个复合地基的沉降。

2.5 端承条件改变对桩侧阻力影响分析

图 14 为短桩隧道复合地基桩侧阻力曲线。通过比较图 10(短桩复合地基)和图 14(短桩隧道复合地基),发现短桩隧道复合地基的正向桩侧阻力峰值并未显著提高,而负向桩侧阻力峰值则有一定程度的下降;此外,中性点的位置变化也并不明显。对这一现象的原因进行分析:由于荷载传递路径是从桩体上部逐渐向下部转移,并且在这一过程中,桩侧阻力比桩端阻力更早发挥作用。因此,即便是在盾构切桩后桩体下部的端承条件得到了改善,这

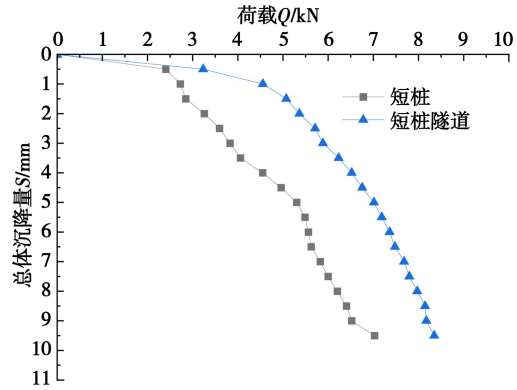


图 13 不同端承条件下复合地基荷载沉降曲线

Fig. 13 Load settlement curves of composite foundation under different end bearing conditions

种增强并没有导致桩侧阻力发挥程度的显著提升。这说明了虽然增强了端部的支持,但对整个桩身尤其是上部区域的影响相对有限,从而未能大幅改变桩侧阻力的整体表现。

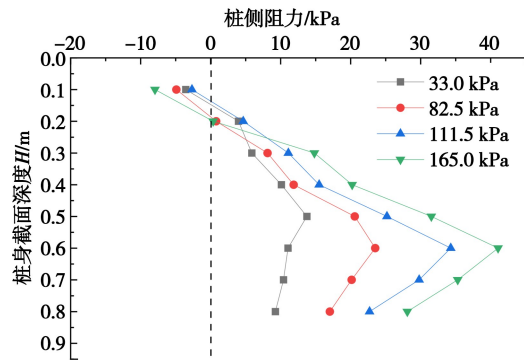


图 14 短桩隧道复合地基桩侧阻力

Fig. 14 Short-pile tunnel composite foundation's lateral pile resistance

同时还能看出,在端承条件增强的情况下,桩身负阻力区稍有减小,正阻力区稍有增加。柔性点对比短桩复合地基稍有上升,正阻力极大值有所增加但是对比桩长变化带来的影响并不显著。分析原因为盾构切桩后,端承条件增强,桩体向下位移受到约束,同时,桩端分担的荷载增多,导致桩土相对位移减小,桩土之间会更快地到达相对位移零点,中性点向上移动。由于桩端端承条件增强后,会对桩体本身和桩体下部周边土体产生一定约束,对于桩体来说,沿桩身传递过程中,桩土之间的相对位移变小,所以需要更多的桩侧阻力参与平衡上部荷载,导致了正阻力区的极大值点向下移动。

2.6 端承条件改变对桩端阻力影响分析

图 15 为不同端承条件下复合地基桩端阻力图,从图中可以看出,随着加载量的不断增大,短桩隧道桩端阻力呈现急速上升趋势,从零一直增大到

150.54 N。分析原因为:盾构切桩导致端承条件改变,在一定程度上提升了桩体的荷载分担比,但由于对桩侧阻力的提升程度并不大,所以桩端阻力随着上部荷载的不断施加而迅速增长,以平衡上部沿桩身传递下来的荷载,此外,由于端承条件的增强,使得短桩隧道复合地基的桩端阻力在加载初期就开始发挥作用,这可以说明端承条件的增加可以有效地提升水泥土桩的桩端阻力,进而提升水泥土桩复合地基的承载能力。

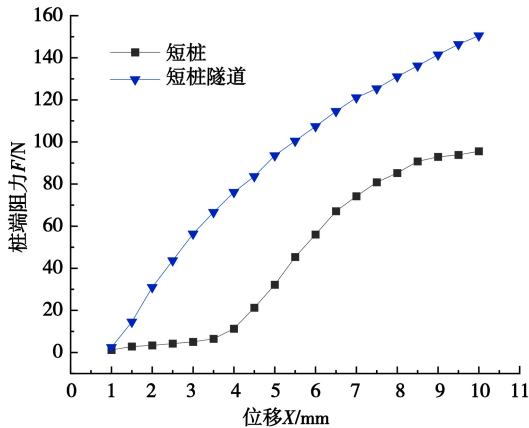


图 15 不同端承条件下复合地基桩端阻力

Fig. 15 Pile tip resistance of composite foundation under different end bearing conditions

对比短桩隧道复合地基与短桩复合地基的变化曲线发现,短桩隧道复合地基的桩端阻力显著大于短桩复合地基。此外,在荷载加载后期,短桩隧道复合地基的桩端阻力增加速度也高于短桩复合地基。分析其原因为:盾构切桩后,端承条件的增强显著提升了桩端的承载能力。这使得在上部荷载向下传递的过程中,桩端阻力分担的比例增加。同时,由于桩体下部端承条件的增强,桩体向下的位移受到限制,从而影响了桩侧阻力的有效发挥。因此,在荷载逐渐增大的过程中,桩端阻力迅速增加,以弥补桩侧阻力的不足,确保桩体的整体承载能力。

3 数值模拟分析

3.1 计算模型

本节建立了试验等比例模型,构建了不同桩长隧道刚度的数值模型,以便进一步揭示水泥土桩复合地基在盾构穿越后的承载力变化机制。计算模型土体侧向边界长度远大于 10 倍桩径,将土体底部刚性边界设置在 4 倍桩长处,保证模型不受边界效应影响。最终计算模型土体范围取为 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4\text{ m}$ 。

模型采用模量衰减方法模拟施工过程中的开

挖卸载影响,具体步骤包括:地应力平衡分析步后设置的 reduce 分析步(施工区域模量衰减 40%)、add 分析步(激活衬砌单元)和 remove 分析步(移除施工单元)。在短桩隧道复合地基下表面建模时采用曲面与隧道贴合。部件之间的接触采用面面摩擦接触,切向作用为摩擦接触,法向作用为“硬”接触,摩擦系数 μ 设置为 0.345。边界条件方面,土体模型在 X 轴和 Y 轴方向的两侧面限制相应方向上的位移,底部在 X、Y、Z 3 个方向上受到约束,顶部作为自由表面。桩体和隧道模型限制在 X 和 Y 方向上的位移。褥垫层和加载板的边界条件与土体模型相似。网格划分采用三维 8 节点实体单元(C3D8R),单元数目控制在 20 000~30 000 之间,部分有限元模型示意图如图 16—18 所示。

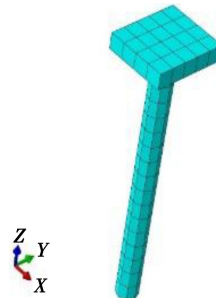


图 16 局部模型图

Fig. 16 Partial model

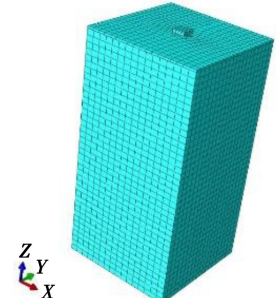


图 17 整体建模网格划分图

Fig. 17 Overall modeling grid division

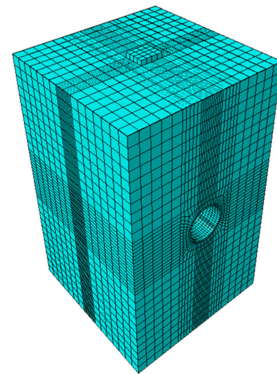


图 18 盾构切桩模型网格划分图

Fig. 18 Shield tunneling pile cutting model meshing

土体选用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型,数值模拟中土体参数根据缩尺模型试验和室内模型试验前的一系列材料取值如表 3 所示。荷载采用分级加载的方式,平均分为 10 级,每级为 1 kN。

3.2 数值模拟结果验证

通过建立水泥土桩复合地基的三维有限元数值模型,将模拟结果与室内模型试验结果进行对比,进一步分析水泥土桩复合地基承载力的变化机理。

表 3 数值模拟参数取值

Table 3 Values of the numerical simulation parameters

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松比 / ν	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$
土体	1 600	23	0.3	3.47	30.36
隧道	2 400	2 780	0.3	-	-
桩体	3 200	60	0.2	-	-

图 19、图 20 和图 21 分别展示了在相同工况下,室内模型试验与数值模拟结果的对比。从图中可以看出,室内模型试验结果与数值模拟结果的规律基本一致,说明所选参数符合要求。

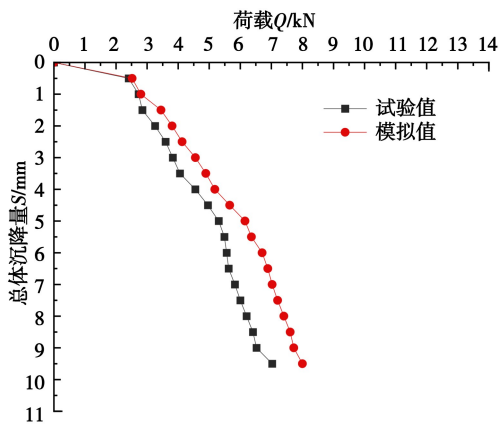


图 19 短桩复合地基

Fig. 19 Short pile composite foundation

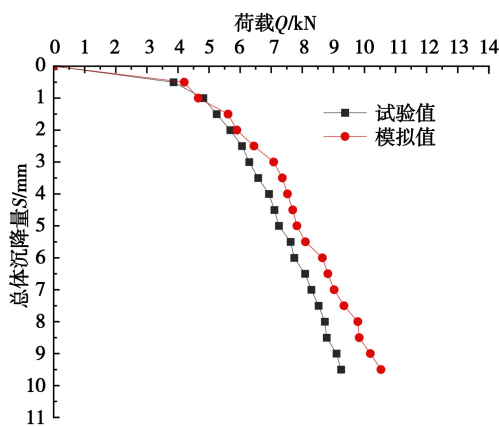


图 20 长桩复合地基

Fig. 20 Long pile composite foundation

3.3 切桩长度改变对桩侧阻力影响分析

原有水泥土桩复合地基经历盾构切桩施工后,桩体的长度和端承条件将会同时变化,如图 22 所示。工况一为盾构切桩施工后,对应水泥土桩复合地基桩长为 0.8 m,切桩长度为 0m;工况二中原有水泥土桩复合地基桩长为 1 m,将工况二变为工况一的过程定义为切桩长度为 0.2 m。本节将对不

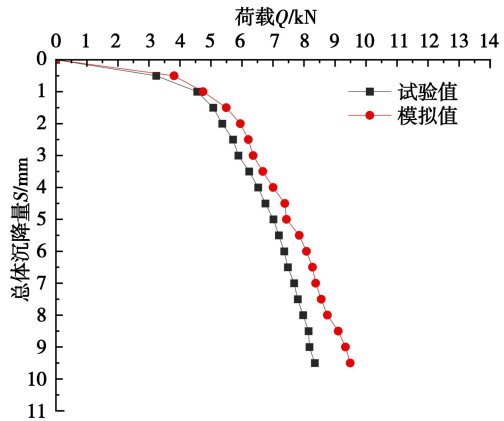


图 21 短桩隧道复合地基

Fig. 21 Short pile tunnel composite foundation

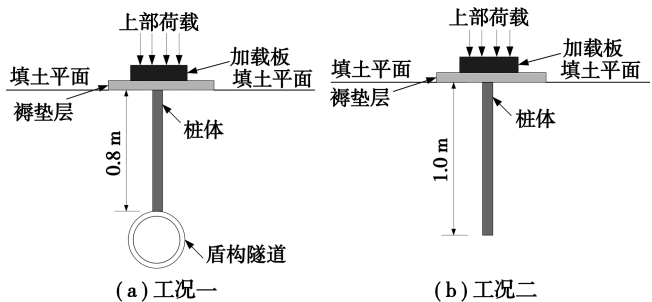


图 22 盾构切桩施工工况示意图

Fig. 22 Schematic diagram of shield tunneling pile cutting construction conditions

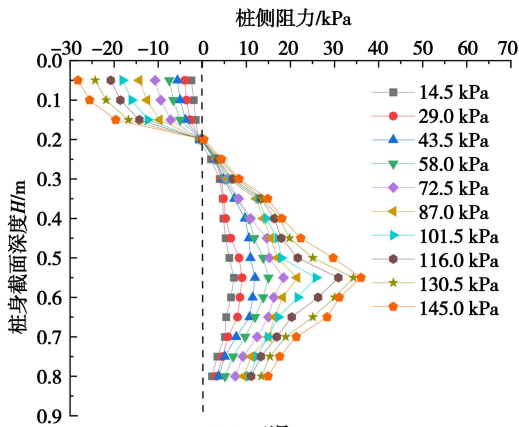
同施工工况变化过程进行对比分析,深入探讨切桩长度改变对水泥土桩复合地基的影响。

分析图 23 发现,工况一、工况二对应的桩侧正阻力峰值点位置分别为距土体表面深度 0.55 m、0.6 m,对应的桩侧正阻力峰值分别为 35.99 kPa、49.135 kPa。说明切桩后,隧道短桩的桩侧正阻力区减小,对应的峰值点向上移动,而桩端阻力相应提高。

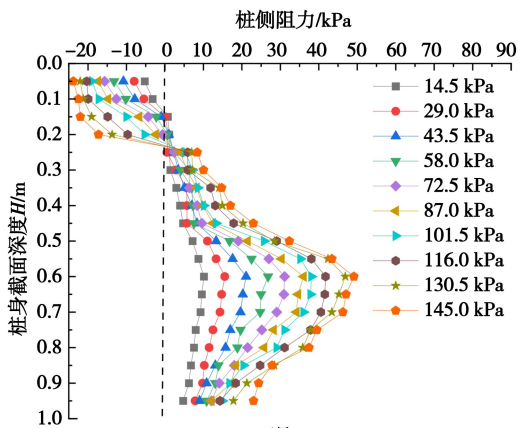
在实际工程中,需要充分考虑切桩长度对桩侧阻力的削弱作用,在盾构施工结束后应加强对上部桩土复合地基的监测,防止由于承载力不足导致建筑物失稳的情况发生。

3.4 切桩长度改变对桩端阻力影响分析

水泥土桩复合地基桩端阻力变化曲线如图 24 所示。从图可以看出,在荷载加载初期,长桩的桩端阻力与短桩隧道相差不大,这主要是由于桩侧阻力先于桩端阻力发挥。在荷载加载过程中,短桩隧道的桩端阻力率先迅速增加,反观长桩复合地基其增长出现滞后性,两曲线的差值呈现先增大后减小的趋势,在整个加载过程中,短桩隧道的桩端阻力一直大于长桩。出现这种情况的原因为:荷载加载初期,上部荷载主要由桩侧阻力承担,荷载沿桩身



(a) 工况一



(b) 工况二

图 23 不同工况下桩侧阻力曲线

Fig. 23 Pile side resistance curves under different working conditions

向下传递较少, 桩身下部的阻力并未完全发挥; 随着荷载不断增加, 桩身压缩量和桩顶沉降量增大, 荷载逐步向桩体下部传递, 由于隧道刚度远大于桩端土体, 会提供更大的桩端阻力, 同时桩长较长桩体桩侧阻力发挥程度更高, 桩端土体产生压缩量较小, 桩端阻力发挥程度低, 所以桩端位于隧道上的水泥土桩复合地基桩端阻力更大。

从图 24 中还发现切桩长度变大, 桩端阻力会随之减小。分析原因为: 当切桩长度增加时, 桩体的嵌固深度会随之加大, 桩体与周围土体的相互作用更加紧密, 提高了桩体稳定性, 所以导致桩端阻力减小。

综上所述, 切桩长度的改变会影响桩体稳定性, 进而对桩端阻力产生影响。因此, 在实际工程中, 需要根据地质条件, 设计要求以及施工条件等因素综合考虑, 确定合理的切桩长度, 否则可能会导致桩身出现应力集中或应力分布不均匀的现象, 对桩体的稳定性和安全性产生不利影响。

3.5 切桩长度改变对桩身应力分担比影响分析

图 25 是不同工况下的桩端阻力、桩侧阻力荷

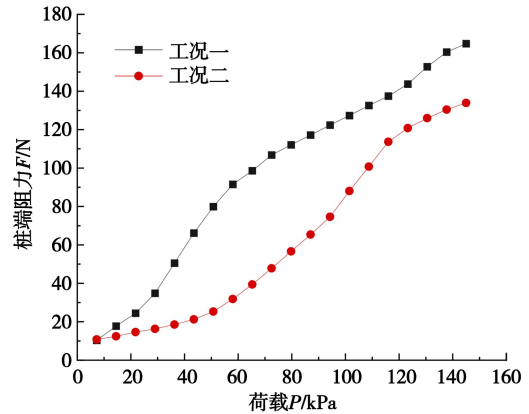


图 24 不同工况下桩端阻力曲线

Fig. 24 Pile end resistance curves under different working conditions

载分担比曲线图。由图可以看出, 在整个荷载施加的过程中, 工况一的桩侧阻力占比小于工况二。桩侧阻力和桩端阻力发挥存在先后顺序, 在上部荷载传递过程中, 上部桩侧阻力先发挥作用, 而桩长的增加可以提升桩侧阻力的发挥程度, 所以荷载施加初期长桩复合地基桩侧阻力占比要高于短桩隧道复合地基, 随着荷载不断增大, 长桩复合地基的下部桩侧阻力和桩端阻力也开始发挥作用, 但是由于下部桩体的桩侧阻力优先于桩端阻力发挥, 所以长桩复合地基桩侧阻力占比仍然高于短桩隧道复合地基。

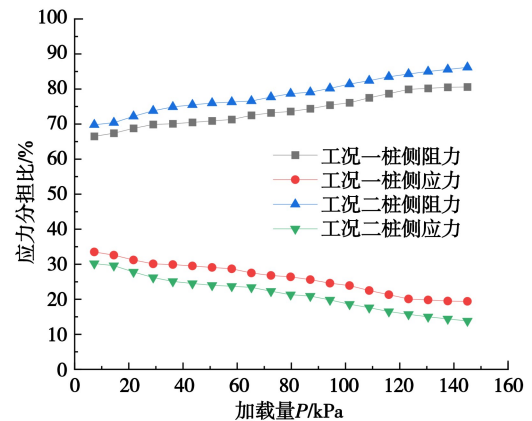


图 25 桩身应力分担比曲线

Fig. 25 Pile shaft stress sharing ratio curves under different working conditions

4 结论

(1) 盾构下部穿切施工后导致水泥土桩复合地基部分桩长变短、端承条件增强, 桩侧阻力和桩端阻力分担比变化较为显著。表明水泥土桩复合地基在上部竖向荷载保持不变情况下经历盾构下部穿切施工后主要在单桩内产生应力重分配过程,

表现为桩侧阻力和桩端阻力相互转化以平衡上部荷载。

(2)盾构下部穿切施工后导致水泥土桩复合地基桩侧阻力的正阻力区最大值减小,位置向上移动,负阻力区的最大值也会减小,桩侧阻力贡献度降低。

(3)盾构下部穿切桩体长度的改变会对桩侧阻力和桩端阻力贡献度存在较大影响,桩侧阻力发挥程度会随切桩长度的增加而显著下降,桩端阻力发挥程度会随着持力层的改善稍有增加。切桩长度越长,水泥土桩复合地基承载力对桩端持力层变化的敏感度就会越高。

参考文献(References)

- [1] 许华国,陈馈,孙振川. 盾构刀盘切削钢筋混凝土桩基室内试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(1): 35-42. (Xu Huaguo, Chen Kui, Sun Zhenchuan. Laboratory test of reinforced concrete pile foundation cutting by shield cutterhead [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(1): 35-42. (in Chinese))
- [2] 王哲,吴淑伟,姚玉晶,等. 盾构穿越既有桥梁桩基磨桩技术的研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 117-125. (Wang Zhe, Wu Shuwei, Yao Wangjing, et al. Grinding pile technology of shield tunnels crossing pile foundation of existing bridges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 117-125. (in Chinese))
- [3] 李宏波. 盾构直接切削 $\phi 25\text{mm}$ 主筋钢筋混凝土桩基可行性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(12): 1808-1816. (Li Hongbo. Feasibility study on direct cutting of reinforced concrete pile foundation with $\phi 25\text{ mm}$ main reinforced bar by shield[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(12): 1808-1816. (in Chinese))
- [4] 廖秋林,宋跃均,方建华,等. 软流塑地层盾构切削钢筋混凝土桩基工程实践[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(5): 100-109. (Liao Qiulin, Song Yuejun, Fang Jianhua, et al. Engineering practice in shield cutting of reinforced concrete piles in soft fluid-plastic stratum[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(5): 100-109. (in Chinese))
- [5] Wang G, Qiao S, Li G, et al. Direct shield cutting of large-diameter reinforced concrete group piles: Case study on Shenyang Metro construction[J]. Case Studies In Construction Materials, 2023, 18: 1-16.
- [6] 杜闯东,张杰,唐纵雄. 盾构直接切削桩基施工关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(10): 1666-1677. (Du Chuangdong, Zhang Jie, Tang Zongxiong. Key technologies of shield direct cutting pile foundation[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(10): 1666-1677. (in Chinese))
- [7] 梅君,崔伦萌,陈裕康,等. 弧形撕裂刀切削钢筋混凝土桩基仿真与实践[J]. 铁道标准设计, 2023, 69(6): 2-12. (Mei Jun, Cui Lunmeng, Chen Yukang, et al. Simulation and practice of curved ripper cutting reinforced concrete pile foundations [J]. Railway Standard Design, 2023, 69(6): 2-12. (in Chinese))
- [8] 汪卫军,杨伟华,刘猛,等. 扩径再制造盾构穿越高架桥桩施工适应性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(4): 666-673. (Wang Weijun, Yang Weihua, Liu Meng, et al. Adaptability of remanufactured shield boring underneath piles of a viaduct[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(4): 666-673. (in Chinese))
- [9] 韩旭. 盾构接收掘进地质力学模型试验数值分析及切桩原理研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2020. (Han Xu. Numerical analysis of geomechanical model test and study of pile cutting principle for shield receiving tunneling [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020. (in Chinese))
- [10] 陈成,施培新,王占胜,等. 基于机器学习的参数相关性分析与结构变形预测模型[A]//国际机械、自动化与电气工程会议[C]. 成都, 2022. (Chen Cheng, Shi Peixin, Wang Zhansheng, et al. Parameter correlation analysis and structural deformation prediction model based on machine learning [A]// International Conference on Mechanical, Automation and Electrical Engineering [C]. Chengdu, 2022.
- [11] 白东锋,荆玉明,薛普恒. 盾构切桩后桩基对管片作用力确定及控制措施[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增2): 122-127. (Bai Dongfeng, Jing Yuming, Xue Puheng. Determination of pile foundation force on shield tunnel segments after pile cutting and control measures[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(Supp. 2): 122-127. (in Chinese))
- [12] 庄欠伟,袁一翔,徐天明,等. 射流联合盾构切削钢筋混凝土仿真与试验[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1817-1824. (Zhuang Qianwei, Yuan Yixiang, Xu Tianming, et al. Simulation and experiment on cutting reinforced concrete with jet combined shield method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1817-1824. (in Chinese))
- [13] 刘军,韩旭,金鑫. 基于颗粒流原理的盾构切割GFRP钢筋混凝土围护桩机制[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增1): 32-37. (Liu Jun, Han Xu, Jin Xin. Mechanism of shield cutting GFRP reinforced concrete pile based on particle flow principle [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(Supp. 1): 32-37. (in Chinese))

- [14] 唐仁,林本海,梁鹏. 盾构下穿住宅楼直接切桩的安全性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增 2): 878-883. (Tang Ren, Lin Benhai, Liang Peng. Study on the safety of shield passing through the residential building and directly cutting pile foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15 (Supp. 2): 878-883. (in Chinese))
- [15] 曾力,刘一帆,李明宇,等. 盾构穿切过程中单桩复合地基动态响应的研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42 (12): 2006-2014. (Zeng Li, Liu Yifan, Li Mingyu, et al. Dynamic response of single pile composite foundation during shield tunneling[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(12): 2006-2014. (in Chinese))
- [16] Liu B, Li T, Han Y, et al. DEM-continuum mechanics coupling simulation of cutting reinforced concrete pile by shield machine [J]. Computers and geotechnics, 2022, 152: 105-136.
- [17] Li T, Liu B, Han Y, et al. Structural analysis of shield machine cutting monopile using p-y curve based finite element method[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 161: 1-17.
- [18] 冯国杰. 变刚度桩复合地基模型试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (Feng Guojie. The model test research on variation rigidity composite foundation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [19] 侯思强. 刚性长短桩复合地基传力机制及设计理论研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020. (Hou Siqiang. Research on force-transferring mechanism mechanism and design calculation method of rigid long-short pile composite foundation[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020. (in Chinese))
- [20] 赵红琪. 基坑开挖对邻近柔性桩复合地基承载性状的影响研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021. (Zhao Hongqi. Study on the influence of excavation of foundation pit on bearing behavior of adjacent flexible pile composite foundation[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021. (in Chinese))

(上接第 610 页)

- [8] 王钧,苏宇,赵金友,等. 高强 H 型钢混凝土组合柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 191-200. (Wang Jun, Su Yu, Zhao Jinyou, et al. Study on axial compression performance of high strength H-section steel reinforced concrete composite columns[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43 (9): 191-200. (in Chinese))
- [9] 常亚峰,师俊平,侯亚鹏,等. 箍筋约束超高性能混凝土短柱轴压承载力试验研究[J], 复合材料学报, 2022, 39 (7): 3451-3461. (Chang Yafeng, Shi Junping, Hou Yapeng, et al. Experimental study on the axial compression capacity of ultra-high performance concrete stub columns confined with stirrups [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3451-3461. (in Chinese))
- [10] 柯晓军,伍小萍,陈宗平,等. 配矩形螺旋箍筋型钢高强混凝土短柱轴压性能试验研究[J], 实验力学, 2016, 31(5): 617-623. (Ke Xiaojun, Wu Xiaoping, Chen Zongping, et al. Experimental study of axial compression performance of SRHC short column confined by square spiral stirrup [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(5): 617-623. (in Chinese))
- [11] 董宏英,赵翊舟,曹万林,等. 配置栓钉钢板与外包高强混凝土界面黏结-滑移性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42 (2): 122-130. (Dong Hongying, Zhao Yizhou, Cao Wanlin, et al. Interfacial bond-slip behavior between steel plate with studs and coated high-strength concrete [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(2): 122-130. (in Chinese))
- [12] 王威,赵春雷,苏三庆,等. 带栓钉波形钢板混凝土组合构件粘结滑移性能与承载力试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(9): 108-119. (Wang Wei, Zhao Chunlei, Su Sanqing. et al. Experimental study on bond-slip behavior and bearing capacity of corrugated steel plate concrete composite member with stud [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36 (9): 108-119. (in Chinese))
- [13] Lu J F, Li M H, Ran X, et al. Research on the bond-slip behavior and constitutive relationship between I-shaped steel and shotcrete in tunnel. Structural Concrete. 2023, 24(5): 6011-6024.
- [14] 陈宗平 陈宇良 钟铭. 焊接栓钉型钢混凝土梁抗扭性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(6): 72-79. (Chen Zongping, Chen Yuliang, Zhong Ming. Experimental investigation on anti-torsion performance of welded stud steel reinforced concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51 (6): 72-79. (in Chinese))