

钻孔灌注桩施工对邻近既有隧道影响数值分析

杨平¹,周志良¹,黄晓东²,杜平²

(1.南京林业大学土木工程学院,江苏南京210037;2.南京市市政设计研究院有限责任公司,江苏南京210037)

摘要 目的 研究单桩和群桩施工对地层位移场和邻近既有隧道结构变形的影响规律,为后续类似工程施工提供技术参考.方法 以南京龙津桥改建项目桩基工程为背景,通过现场实测验证数值模拟,并进行数值模拟参数敏感性分析.结果 桩基尺寸越大、桩基重心与隧道间距越近均会加剧施工变形;坍塌区域变形急速发展,而套筒能有效约束变形;桩基施工影响深度可划分为强影响区、一般影响区、弱影响区;群桩中的已存在桩对挤土效应具有阻挡效应.结论 建议近隧桩基施工采用全套管灌注桩施工工艺,配合梅花型布置方式,单桩最小安全施工距离为3倍桩径,群桩最小安全施工距离为6倍桩径.

关键词 钻孔灌注桩;单桩;群桩;邻近运营隧道;地层位移;隧道变形

中图分类号 TU473

文献标志码 A

Numerical Analysis on Influence of Adjacent Operated Tunnel Caused by Bored Pile Construction

YANG Ping¹, ZHOU Zhiliang¹, HUANG Xiaodong², DU Ping²

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, China, 210037; 2. Nanjing Municipal Design and Research Institute Co. Ltd., Nanjing, China, 210037)

Abstract: This paper aims at investigating the impact of single pile and pile group construction on the ground displacement and structural deformation of adjacent existing tunnel. The findings in this paper provide guidelines for similar construction projects. Based on a reconstruction project for Nanjing Longjin Bridge, numerical simulations were verified by in-situ measurement results. A sensitivity analysis was also performed to evaluate the sensitivity of parameters required for simulation. The simulation revealed that greater deformation could be a direct result of a bigger pile foundation or smaller spacing between the pile and existing tunnel. The deformation in the collapsed area developed rapidly while the sleeve of the benoto pile could effectively restrain the deformation. The depth under the influence of pile foundation construction can be divided into three zones: strong, average, and weak zone. The existing piles in the pile group would weaken the soil squeezing effect. It is suggested that with a nearby existing tunnel, benoto pile should be

收稿日期:2020-05-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51709088)

作者简介:杨平(1964—),男,教授,博士研究生导师,主要从事岩土与地下工程方面研究.

adopted to reduce the impact on the tunnel and the setup of piles should be quincuncially distributed. The minimum spacing of single piles is 3 times of the pile diameter while the minimum spacing of group pile is 6 times of the pile diameter.

Key words: bored pile construction; single pile; pile group; adjacent existing tunnel; ground displacement; tunnel deformation

随着城市轨道交通快速发展,桩隧相互作用问题也越发凸显.该问题分为两类:第1类是隧道建设对既有桩基影响;第2类是桩基施工对既有隧道影响^[1].国内外关于第1类问题的研究成果较为丰富^[2-7],而有关第2类问题的研究则相对较少,常用方法有4类:理论分析^[8-10]、模型试验^[11-12]、现场实测^[13-15]和数值模拟^[16-18].近隧桩基施工易扰动地层,进而引发邻近隧道产生较大附加变形和内力,造成环缝错台、管片破损、渗透漏水等危害,可能影响地铁长期正常运营.且地铁隧道对变形要求极高^[19-20].因此,掌握近隧桩基施工引起隧道结构变形规律具有重要意义.

目前,研究者通过上述方法就桩基施工对隧道影响问题取得了一些成果,但有关钻孔灌注桩群桩施工对邻近隧道影响研究还有待深入,特别是单桩和群桩基础参数敏感性分析.因此有必要针对该问题进行研究,以验

证或拓展现有理论成果,指导工程设计与施工.基于此,笔者依托紧邻运营地铁S8线的南京龙津桥改建工程,通过数值模拟近隧钻孔灌注桩施工,研究各参数条件下近隧单桩或群桩施工引起的隧道结构变形规律,为今后在轨道交通区间隧道周边进行桩基施工和保护隧道结构提供技术参考.

1 工程背景与实测概况

1.1 工程概况

新建桥梁北侧桥台0#墩距地铁S8线左线结构边线最小净距离为5.60 m.地铁S8线隧道内径5.5 m,外径6.2 m,埋深19.4 m,衬砌厚度0.35 m.施工场地隶属滁河漫滩地貌单元,土层具体物理力学参数指标见表1.施工桩型为钻孔灌注桩,桩径1.5 m,采用全套管全回转钢护筒护壁成孔灌注桩工艺,成孔采用钢套管边跟进边取土的工法.

表1 各地层物理参数表
Table 1 Physical parameter list of layers

编号	名称	厚度/m	重力密度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa
①	杂填土	7.1	18.8	0.824	25.8	9.6	4.9
②	淤泥质粉质黏土	6.4	18.2	0.984	18.2	7.9	3.9
③	粉质黏土	22.6	19.5	0.711	46.5	12.9	7.6
④	黏土	2.7	19.6	0.709	51.9	13.7	8.6
⑤	中粗砂	4.8	20.5	0.412	8.0	25.0	12.6
⑥	卵石	4.0	—	—	8.0	30.0	20.0
⑦	风化砂岩	22.6	—	—	54	27.5	27.5

保证工期内地铁S8线安全,在0#墩10号桩和1#梯道桩与左线隧道结构之间各布置1个测斜兼分层沉降孔,编号分别为CX-1

和CX-2,期间对测点位移场持续进行现场实测(见图1).

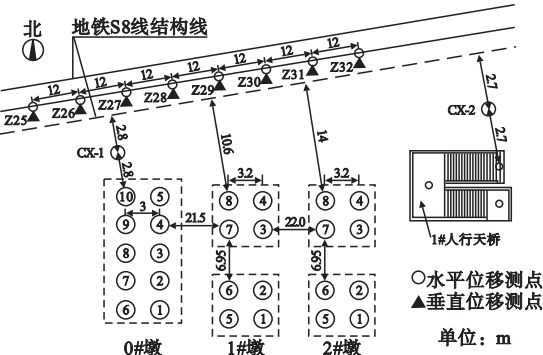


图1 桩基平面布置示意图

Fig.1 Layout of pile foundation

1.2 测点布置

(1) 地层水平位移和沉降测点布置

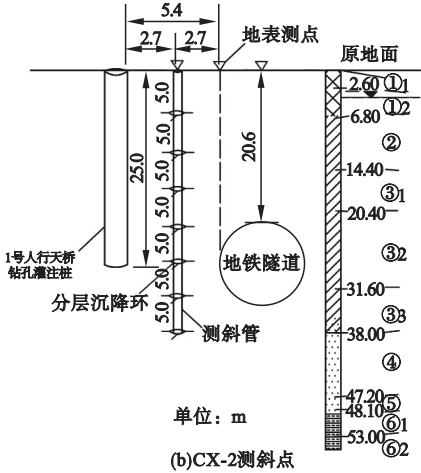
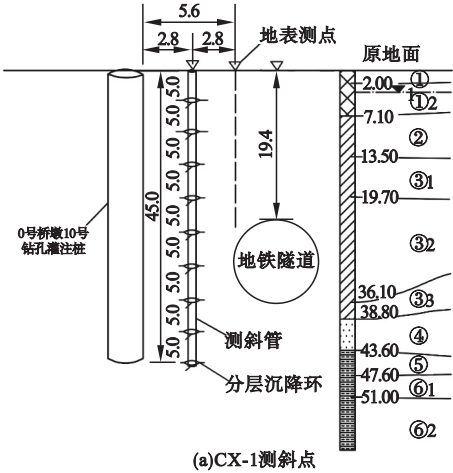


图2 测点布置图

Fig.2 Schematic diagram of monitoring layout

2 数值模拟

2.1 模型尺寸及参数

模型 x 方向(既有隧道运营方向)取 120 m, y 方向取 120 m, z 方向取 70 m,地下水位线位于 -1.5 m 处.模型四周侧面及底面固定,顶面为自由边界.假定土层是均质等厚、各向同性连续体.桩基混凝土以及钢套管的物理力学参数分别如表 2、表 3 所示.模型网格划分后如图 3 所示.

表2 桩基混凝土参数

Table 2 Concrete parameters of pile foundation		
强度等级	弹性模量/ 10^4 MPa	泊松比
C30	3.0	0.20

表3 钢套管参数

Table 3 Steel casing parameters		
重力密度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/ 10^6 MPa	泊松比
78.5	2.06	0.35

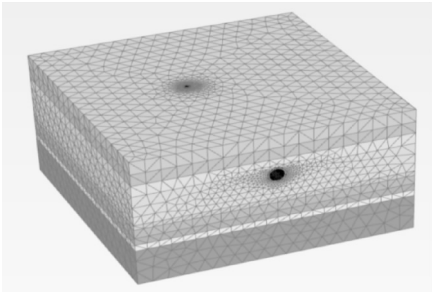


图3 有限元模型网格划分

Fig.3 Grid partition of the finite element model

CX-1 测斜点孔深 45 m,CX-2 测斜点孔深 35 m,均从埋深 5 m 处开始,每隔 5 m 布设一个分层沉降环,直至孔底,具体测点布置见图 2,各地层的物理参数如表 1 所示.

(2)隧道变形测点布置

沿隧道轴线方向布置 8 个管片断面进行隧道垂直位移、水平位移实测.以正对 10 号桩的隧道断面 Z27 为起点,左侧沿线布设隧道断面 Z25、Z26,右侧沿线布设隧道断面 Z28~Z32.相邻断面间距 12 m,各断面于隧道管片两侧壁上各布设 1 个测点(见图 1).

2.2 模型建立及模拟过程

为了简化计算,模拟时,隧道管片采用板单元;桩采用实体单元;钢套管采用板单元;土体采用摩尔-库伦模型.桩-隧道相互作用及隧道开挖过程中土体收缩和相对位移可通过设置界面单元及面收缩来模拟实现.激活塌孔区及接触单元模拟塌孔过程,塌孔区设置在桩底,简化为圆柱体,直径为 $1.5D$,塌孔区内土体失效,区域外土质良好.

笔者研究桩基施工对既有隧道变形影响,故不考虑隧道开挖变形,需清除置零.具体施工模拟步骤:①计算初始应力场,让模型在自重应力下平衡;②激活隧道板单元,形成既有隧道;③重置位移为 0 mm ,分3步钻孔,下压钢套管后分步取土,每步取土高度为 3 m ;④浇筑混凝土,采用流体静压分布模拟液态混凝土对孔壁产生的侧压力;⑤混凝土硬化,采用实体单元模拟成桩;⑥模型计算.

2.3 实测验证

为验证模拟结果可靠性,以距隧道 5.6 m 的0#墩10号桩为研究对象,分析其实际施工与模拟施工对隧道变形影响.比较隧道左拱处(深度 22.5 m)各工况最大水平和垂直位移实测值和模拟值,结果见图4.由图4可知,各工况隧道最大水平和垂直位移模拟值与实测值基本吻合,实测值略高于模拟

值.说明有限元模型吻合度较好,模拟结果可靠.

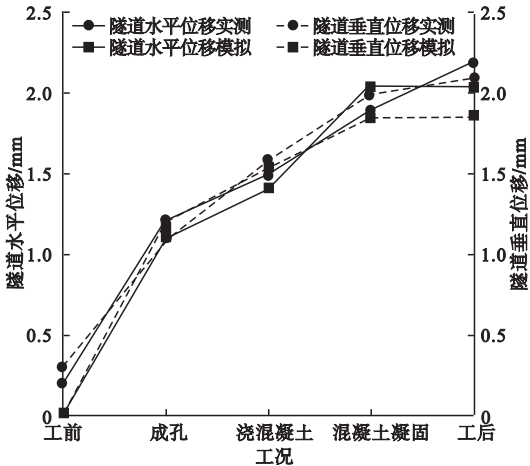


图4 模拟与实测对比

Fig. 4 Comparison between simulation and measurement

3 数值模拟敏感性分析

3.1 敏感性分析因素与规划

比较分析不同单桩和群桩工况下邻近既有隧道位移场变化规律,选取距离地铁隧道轴线 3.1 m (左拱中心)处土体,分析钻孔灌注桩施工对隧道附近土体造成的影响;选取隧道左拱处管片,分析钻孔灌注桩施工对隧道结构造成的影响,单桩和群桩计算工况分别如表4、表5所示.

表4 单桩计算工况

Table 4 Single pile calculation condition

工况	桩长/m	桩径/m	桩隧间距/m	塌孔范围/m	钢套管
B-1	12、24、36、45	1.5	3D	无	有
B-2	45	1.0、1.2、1.5、1.8、2.1、2.4	3D	无	有
B-3	45	1.5	2D、3D、4D、5D、6D、7D	无	有
B-4	45	1.5	3D	0、3、6、9	有
B-5	45	1.5	3D	无	有、无

注: D 表示桩径, $D=1.5\text{ m}$.

3.2 单桩施工对邻近隧道的影响

(1) 桩长对邻近隧道的影响

桩长对邻近隧道影响如图5、图6所示.图6中,隧道轴向(模型 x 方向)一端记为隧

道起始位置 0 m ,另一端记为隧道终止位置 120 m .可见,以隧道中心线为界,桩底位于其上,地层位移分快速发展和稳定发展两个阶段;桩底位于其下,地层位移分快速发展、

缓慢发展、稳定发展三个阶段;隧道总位移随桩长增加近似呈线性增长.原因是下部新增段离地表远,影响小,同时其变形传递会受到

上部隧道约束.因此对影响深度进行划区,记隧道埋深为 H , $0 \sim H$ 为强影响区, $H \sim 1.5 H$ 为一般影响区,深度 $1.5 H$ 上为弱影响区.

表5 群桩计算工况

工况	桩隧净距 S_1/m	桩间距 S_2/m	桩间距 S_3/m	布桩形式	桩列排数	群桩类型
Q-1	3D、4D、5D、6D	3D	3D	方形	3	1×3
Q-2	3D	3D、4D、5D、6D	3D	方形	3	1×3
Q-3	3D	3D	3D、4D、5D、6D	方形	3	3×1
Q-4	3D	3D	3D、4D、5D、6D	方形、梅花形	3	3×3
Q-5	3D	3D	3D	方形	1、2、3	3×1

注: D 表示桩径, $D=1.5\text{m}$;平行于隧道方向的桩间距为 S_2 ,垂直于隧道方向的桩间距为 S_3 .

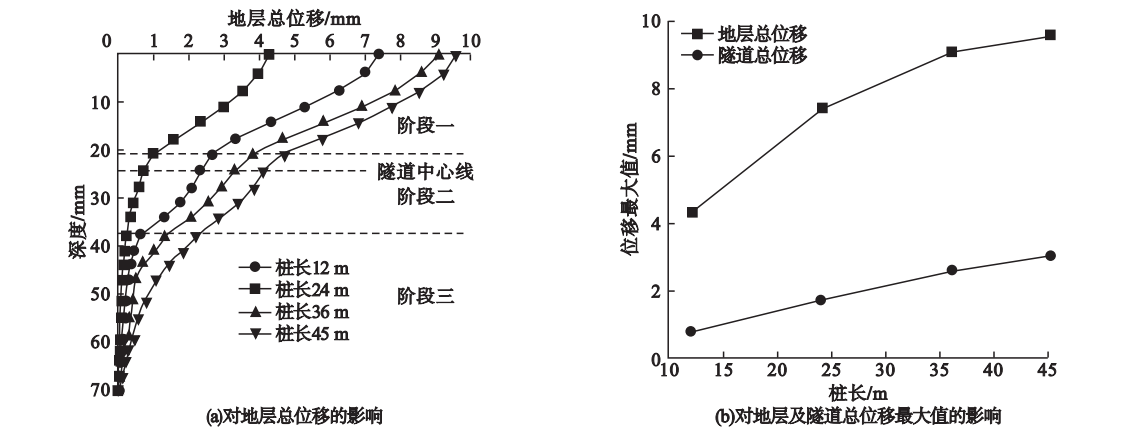


图5 桩长对隧道及地层变形的影响

Fig. 5 The effect of pile length on ground and tunnel deformation

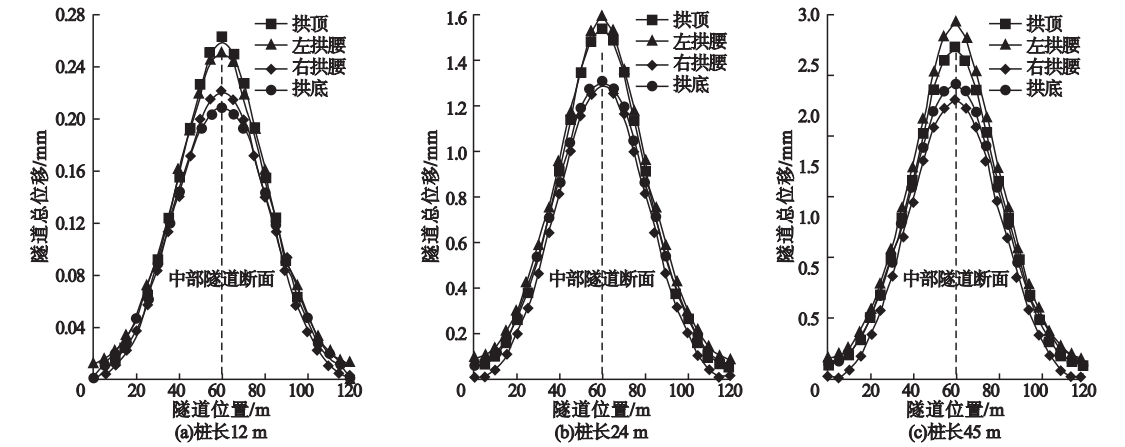


图6 不同桩长下隧道最大位移沿轴线方向变化

Fig. 6 The maximal tunnel deformation varies along the axial under different pile lengths

由图6可知:隧道纵向最大位移发生在中部,并向两端消散.拱顶、左拱腰位移大于拱底、右拱腰,隧道最大位移发生在近桩一侧

中部区域的左拱腰-拱顶之间.原因是桩位于隧道左侧,桩底集中应力及挤土效应共同作用导致隧道左拱腰-拱顶区域挤压效果显

著,而右拱腰由于左拱腰的遮拦作用,受影响最小.建议施工时应重点关注隧道左拱腰—拱顶区域的监测.

(2) 桩径对邻近隧道变形影响

桩径对邻近隧道影响如图 7 所示.桩径对隧道中心线以下地层的影响地层影响很小.隧道最大位移均近似呈现抛物线递增减

长.原因是桩径越大,桩土接触面越大,成孔时挤土效应更明显.相较于地层变形,桩径对隧道位移影响明显较弱,位移变化很小.因此对于近距离施工,综合考虑各方面因素后,尽量采用小直径桩,以免对地层及近距运营隧道产生较大的影响.

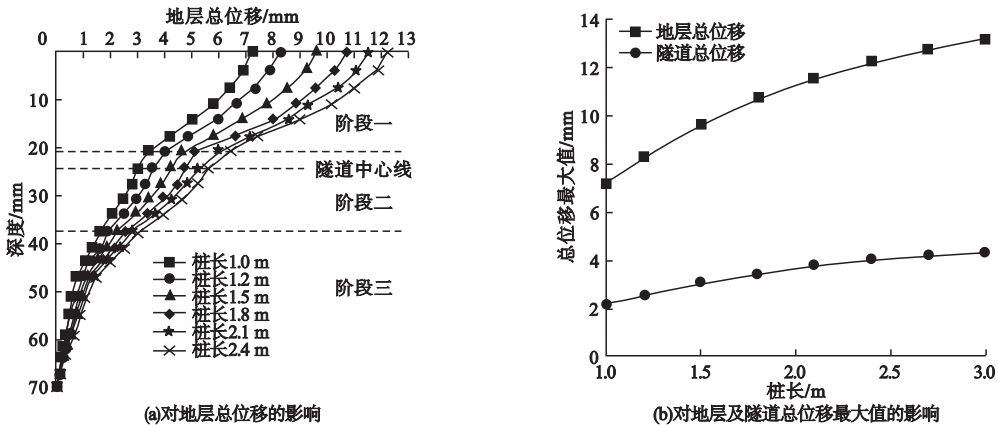


图 7 桩径对隧道及地层变形的影响

Fig. 7 The effect of pile diameter on ground and tunnel deformation

(3) 桩隧间距对邻近隧道的影响

桩隧间距对邻近隧道影响如图 8 所示.从图中可见,桩隧间距对隧道变形影响较小,隧道最大位移近似呈现线性递减.原因是钢套管能有效约束施工变形,产生的地层最大

位移不是特别大,而地层易受扰动,地铁管道变形模量远大于地层,综合作用导致隧道最大位移变化幅度很小,地层更易受桩隧间距影响.

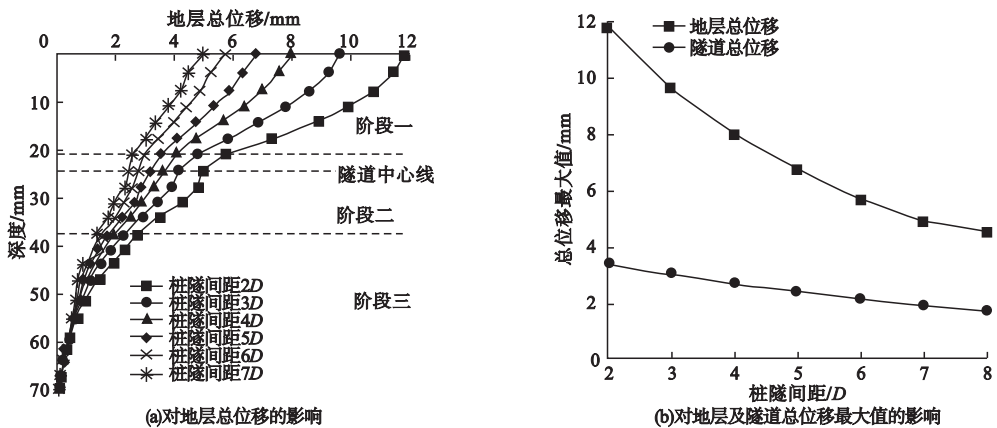


图 8 桩隧间距对隧道及地层变形的影响

Fig. 8 The effect of distance between pile foundation and tunnel on ground and tunnel deformation

桩隧间距 3 倍桩径时,地层最大变形为 9.62 mm,隧道位移为 3.05 mm,接近隧道变

形控制值 3 mm,地表变形控制值 10 mm.而虑到模拟值偏于安全性,因此,出于安全考

考虑,最小桩隧间距应保持在3倍桩径以上。

(4) 塌孔范围对邻近隧道的影响

塌孔范围对邻近隧道影响如图9所示。由图可知,孔壁坍塌严重影响地层和结构位移。塌孔影响区域约为3倍坍塌长度,在该

区域内,地层位移出现急速增长,塌孔范围越大,影响越恶劣。原因是塌孔导致土层应力重分布,引起附加变形。建议采取跳钻法施工,避免扰动周边已成型孔,并在成孔期间实时监控,预防塌孔。

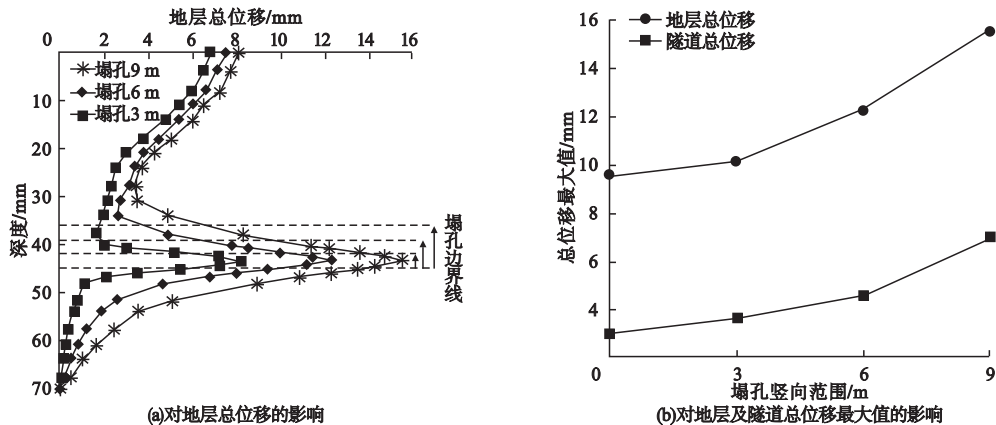


图9 塌孔范围对隧道及地层变形的影响

Fig. 9 The effect of hole collapse range on ground and tunnel deformation

(5) 套筒对邻近隧道的影响

套筒对邻近隧道影响如图10所示。从图中可见,使用套筒能有效减小施工对加固区内土体影响,其效果延至桩底以下5m内。这是因为套筒能隔绝挖土过程中的扰动,约束施工变形。对于泥浆护壁钻孔灌注桩,地层位

移近似单调递增,在深度约13m处出现小突变,原因是处于上下层交界,地层属性差异导致。最大位移发生在桩底以上5~7m处,并在桩底以下5m内急剧减小。因此针对地质不良地区钻孔施工,应视工况考虑是否使用套筒,并重视桩底以上5m范围内位移场监测。

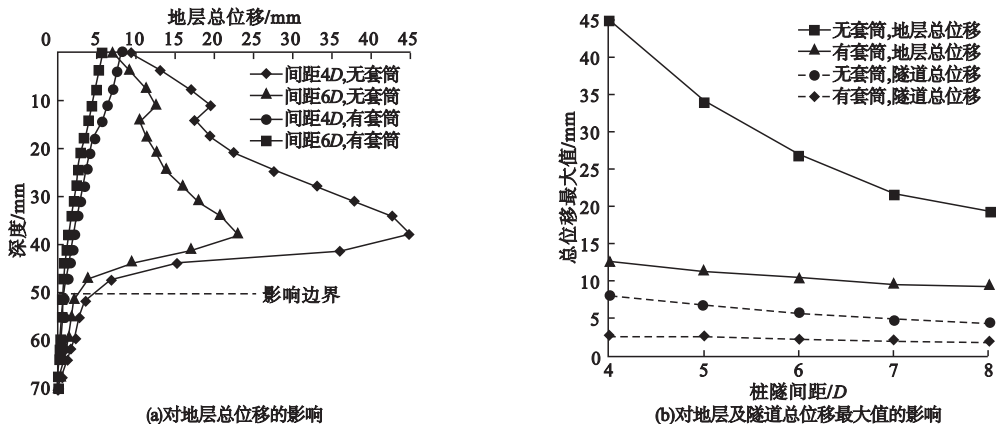


图10 套筒对隧道及地层变形的影响

Fig. 10 The effect of pile casing on ground and tunnel deformation

3.3 群桩施工对邻近隧道的影响

实际工程中单桩基础很少,桩基一般以群桩形式出现,因此有必要研究群桩对隧道影响。

(1) 地层总位移变化规律

选取工况 B-2、Q-1、Q-2、Q-3 进行地层位移分析,如图11所示。从图中可知,群桩和单桩地层位移变化规律相一致,也存在差异

性;由图 11(b)可发现, S_1 (桩隧间距)、 S_3 (垂直于隧道方向的桩间距)变化较对地层位移场影响较 S_2 (平行于隧道方向的桩间距)要大得多.原因是 S_1 、 S_3 本质是改变桩基重心

与隧道距离,使其背离隧道方向偏移,位移传递路径变长,能明显减小地层最大位移.因此,群桩设计时应尽可能考虑其重心远离隧道.

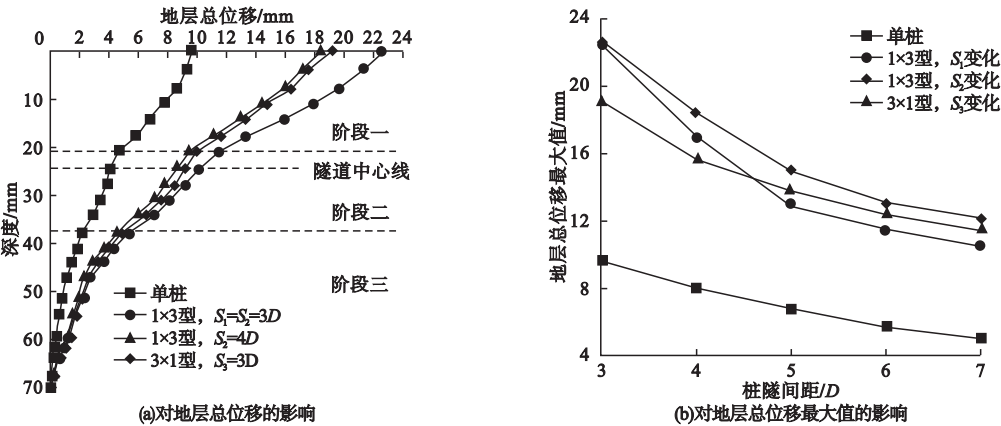


图 11 群桩与单桩对地层最大位移影响比较

Fig. 11 Comparison of the influence of pile group and single pile on the maximal ground displacement

(2)隧道总位移变化规律

选取工况 B-2、Q-1、Q-2、Q-3 进行隧道位移分析,如图 12 所示.由图 12 可知,群桩施工引起的隧道最大位移也均发生在隧道中

部.以预警值为界,不同群桩之间在隧道轴线方向的影响范围差别很小,而和单桩相比,群桩影响范围出现明显扩大.

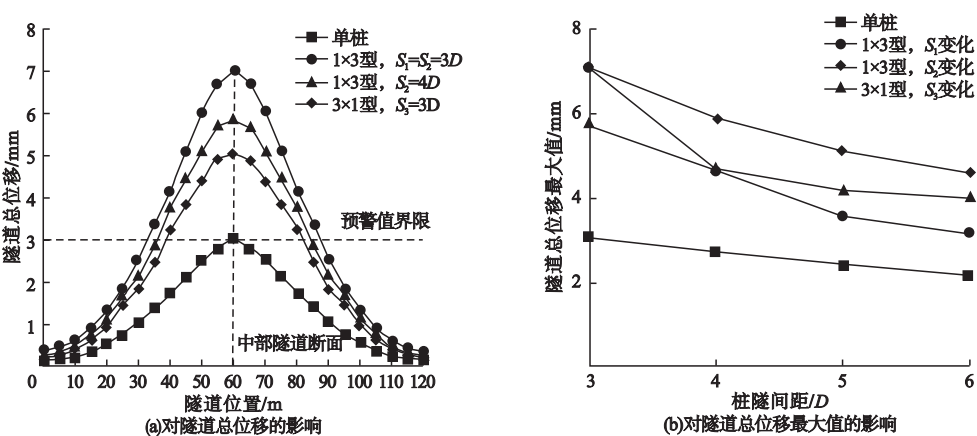


图 12 群桩与单桩对隧道最大位移影响比较

Fig. 12 Comparison of the influence of pile group and single pile on the maximal tunnel deformation

梅花桩与方格桩位移比值与桩隧间距的关系如图 13 所示.由图 13 可知,相比于方形桩,桩隧越近,梅花桩对施工产生的挤土效应减弱效果越好.原因是梅花桩内部单桩最小传递路径上有 2 根桩,三桩单元体对挤土位移的阻挡效应比方形桩两桩单元体更大.因此,建议群桩布置采用梅花形.

(3)群桩阻挡效应
群桩中已存在桩对挤土效应具有阻挡效应.分析工况 Q-5,结果如表 6 所示.从表中可知,第 1 排桩(首桩)产生的位移最大.桩列越多,群桩位移和同数量单桩累计位移差越大,说明群桩间存在变形削弱作用,且削弱效果随群桩规模增大越发明显.原因是由近

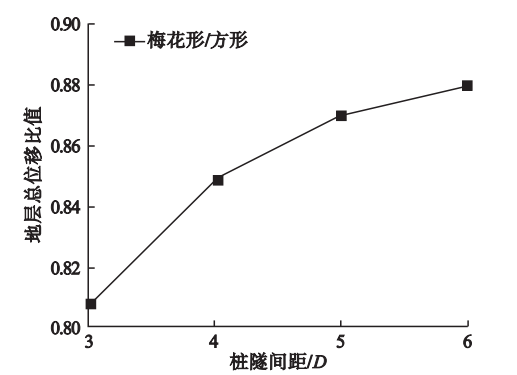


图 13 梅花桩与方格桩位移比值

Fig. 13 Displacement ratio of quincuncial pile to square pile

表 6 群桩遮挡影响工况

Table 6 Working conditions affected by shelter of group pile

工况	桩径/m	桩间距/m	桩列排数	最大变形/mm		相对变形	
				单桩	群桩	前后工况位移差/mm	与单桩累计位移差/mm
Q-5-1	1.5	3D	1	9.62	9.62	0	0
Q-5-2	1.5	3D	2	8.01	15.01	5.39	2.53
Q-5-3	1.5	3D	3	6.76	19.14	4.17	5.25
Q-5-4	1.5	3D	4	5.71	22.51	3.37	7.59

4 结 论

(1)桩基尺寸越大、桩基重心与隧道间距越近以及塌孔均会加剧地层及隧道变形,故单桩最小安全施工距离为3倍桩径,群桩最小安全施工距离为6倍桩径,并严格做好防塌孔措施.

(2)根据桩隧位置不同,对施工影响深度进行划区,0~H为强影响区,H~1.5H为一般影响区,1.5H上为弱影响区,实际工程应加强对该区域监测和安防防控.

(3)群桩中已存在桩对挤土效应具有阻挡效应.故应重点关注首桩施工所产生的土体变形.

(4)采用钢套管逐节旋压并利用抓斗将套管中土体取出的施工方法,对周围土体扰动影响程度较小.因此,对于近隧灌注桩施工,建议采用全套管灌注桩的施工方法,并配合梅花型布置方式.

及远施工时,成桩与桩周土形成整体,起到类似挡土墙的作用,导致新桩挤土效应被旧桩遮拦,抵消或限制部分变形传递.所以实际群桩工程应注重监测前1排桩,特别是首桩施工时的土体变形.

综上所述,对于1×3型群桩,桩隧间距6D时,地层最大位移接近10mm,隧道结构变形超过3mm,而实际工况会更严重.因此,建议群桩安全施工最小桩隧间距应保持在6D以上.

参考文献

[1] 张伟,查正刚,汪亦显,等.桩基施工及承载阶段对运营盾构隧道的影响[J].隧道建设(中英文),2019,39(增刊1):202-211.
(ZHANG Wei,ZHA Zhenggang,WANG Yixian, et al. Influence of construction and loading stage of overpass pile foundation on existing running shield tunnels[J]. Tunnel construction, 2019, 39 (S1): 202-211.)

[2] FRANZA A, MARSHALL A M, HAJI T, et al. A simplified elastic analysis of tunnel-piled structure interaction[J]. Tunnelling and underground space technology, 2017, 61 (1): 104-121.

[3] 朱逢斌,杨平,林水仙.盾构隧道施工对邻近承载桩基影响研究[J].岩土力学,2010,31(12):3894-3900.
(ZHU Fengbin,YANG Ping,LIN Shuixian. Study of influence of shield tunneling on neighboring loaded piles[J]. Rock mechanics, 2010,31(12):3894-3900.)

[4] SOOMRO M A,SAMO S R,SAAND A,et al. Numerical parametric study of settlement and load transfer mechanism of pile group due to twin stacked tunnelling with different construction sequences[J]. European journal of environmental and civil engineering,2019:1-33.

[5] NG C W W,SOOMRO M A,HONG Y. Three-

- dimensional centrifuge modelling of pile group responses to side-by-side twin tunnelling [J]. Tunnelling and underground space technology, 2014, 43(7): 350 – 361.
- [6] WILLIAMSON M G. Tunnelling effects on bored piles in clay [D]. London: University of Cambridge, 2014.
- [7] 黄爱军. 北京地铁 14 号线高家园站: 望京站区间单洞双线盾构临近桩穿越群桩的响应与防护[J]. 隧道建设, 2015, 35(10): 997 – 1002.
(HUANG Aijun. Response of existing bridge piles induced by shield boring and countermeasures: case study on construction of running tunnel from Gaojiayuan station to Wangjing station on line 14 of Beijing Metro [J]. Tunnel construction, 2015, 35(10): 997 – 1002.)
- [8] ZHANG Zhiguo, ZHANG Chengping, JIANG Kangming, et al. Analytical prediction for tunnel-soil-pile interaction mechanics based on Kerr foundation model [J]. KSCE journal of civil engineering, 2019, 23(6): 2756 – 2771.
- [9] 李镜培, 王昆. 超深群桩对邻近已有隧道的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 128 – 134.
(LI Jingpei, WANG Kun. Influence of extra-deep pile groups on existing neighboring tunnels [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011, 33(2): 128 – 134.)
- [10] 项彦勇, 冯山群. 地层自重应力场中桩基荷载对隧道开挖塑性区影响的一种理论预测方法[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12): 162 – 169.
(XIANG Yanyong, FENG Shanqun. A theoretical approach for predicting the influence of pile foundation load on the potential plastic zone induced by tunnel excavation in gravitational field [J]. China civil engineering journal, 2012, 45(12): 162 – 169.)
- [11] YAO J, TAYLOR R N, MCNAMARA A M. The effects of bored pile excavation on existing tunnels [C]//Proceedings of the sixth international conference on physical modelling in geotechnics (ICPMG '06). HongKong: [s. n.], 2006: 1195 – 1200.
- [12] CHUNG K H. Effects of piles on tunnels [D]. London: University of Cambridge, 2007.
- [13] 王改, 王宏涛, 陈自海, 等. 全套管全回转钻桩基施工对运营地铁隧道的影响研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(增刊 2): 318 – 323.
(WANG Gai, WANG Hongtao, CHEN Zihai, et al. Research on influence of construction of pile foundation by full-sleeve rotary drilling rig on existing operation metro tunnel [J]. Tunnel construction, 2018, 38(S2): 318 – 323.)
- [14] 庄妍, 牟凡, 崔晓艳, 等. 全套管灌注桩在临近地铁隧道的暗桥桩基工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 2): 41 – 45.
(ZHUANG Yan, MU Fan, CUI Xiaoyan, et al. Application of Benoto pile in concealed bridge piled project near subway [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2015, 37(S2): 41 – 45.)
- [15] 丁智, 王永安, 虞兴福, 等. 近距离桥桩施工对地铁隧道影响监测分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 173 – 179.
(DING Zhi, WANG Yong'an, YU Xingfu, et al. Monitoring and analysis of the impact of adjacent bridge pile construction on subway tunnels [J]. Modern tunnelling technology, 2016, 53(1): 173 – 179.)
- [16] SCHROEDER F C, POTTS D M, ADDENBROOKE T I. The influence of pile group loading on existing tunnels [J]. Geotechnique, 2004, 54(6): 351 – 362.
- [17] LEE T K. Effects of advancing open face tunneling on an existing loaded pile [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE, 2005, 131(2): 193 – 201.
- [18] 丁智, 张霄. 桩基施工对邻近既有地铁隧道影响的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 390 – 399.
(DING Zhi, ZHANG Xiao. Numerical analysis of influence of pile foundation construction on adjacent metro tunnel [J]. Journal of central south university (science and technology), 2019, 50(2): 390 – 399.)
- [19] 吉茂杰, 刘国彬. 开挖卸荷引起地铁隧道位移的预测方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(5): 531 – 535.
(JI Maojie, LIU Guobin. Prediction method of displacement of subway tunnel due to excavation [J]. Journal of tongji university (natural science), 2001, 29(5): 531 – 535.)
- [20] 徐云福, 王立峰. 近邻桩基施工对城市地铁隧道的影响分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2): 577 – 582.
(XU Yunfu, WANG Lifeng. Analysis of effects on city metro tunnel due to adjacent pile foundation construction [J]. Rock and soil mechanics, 2015, 36(S2): 577 – 582.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)