

文章编号: 1673-9469 (2017) 04-0032-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.04.008

钻孔灌注桩施工过程对邻近隧洞影响数值分析

马文琪^{1, 2}, 朱珍德^{1, 2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对单排钻孔灌注桩施工过程对邻近隧洞的影响问题, 运用 FLAC3D 建立三维简化模型, 分析隧洞与桩间距 S 、桩长 L 对既有隧洞变形的影响规律。研究结果表明: 隧洞竖向位移与 S 大致呈分段线性变化规律; 为保证桩基施工过程中的隧洞结构稳定, S 不宜小于 6 m; 桩长改变了桩底与隧洞在水平位置的关系, 对既有隧洞的位移影响表现为有峰顶的双段线, 桩底高程宜避免位于隧洞拱顶和拱底之间。

关键词: 钻孔灌注桩; 邻近隧洞; FLAC3D; 竖向位移

中图分类号: TU473

文献标志码: A

Numerical analysis on bored pile construction for adjacent existing tunnel

MA Wenqi^{1, 2}, ZHU Zhende^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on a cross-tunnel bridge construction project, the effects of two factors —the distance between tunnel and pile (S) and the length of the pile (L) on the tunnel deformation are analyzed in the FLAC3D model. The results show that the vertical displacement of the tunnel and S are approximately piecewise linear. In order to ensure the stability of the tunnel structure during the construction of the pile foundation, S should not be less than 6m; Relative position between pile and the tunnel is determined by the length of pile, the bottom of the pile should be avoided at the arch of the tunnel.

Key words: bored pile; adjacent existing tunnel; FLAC3D; vertical deformation

地上大型构筑物的天然地基满足不了承载力要求, 桩基础被广泛使用, 桩基施工对邻近隧洞扰动过大则易导致安全事故, 产生严重经济损失, 有必要研究桩基施工全过程对邻近隧洞的影响^[1-3]。国外学者就桩基础施工对邻近隧洞的影响较早地展开了相关研究^[4-6]。国内对于桩对隧洞稳定性影响的问题源于上海软土地基上高层建筑的兴建^[7-12]。以上研究中, 或将桩基础简化为桩墙, 或建立三维模型仅计算群桩施工对隧洞的影响, 对于三维条件下桥梁单排桩基施工工况鲜有探究。本文依托深圳市沙荷-盐排高速立交(一期)跨既有引水隧洞工程, 用

三维快速拉格朗日分析程序 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 建立三维模型, 探究单排钻孔灌注桩施工过程中桩基础与隧洞净距 S 与桩长 L 变化对隧洞稳定的影响, 并验证数值分析结果的合理性。

1 数值模型建立与参数分析

1.1 工程概况

沙荷-盐排高速公路立交工程(一期)拟建线路在东江源网络干线碧岭隧洞 170 m 位置横跨碧岭隧洞, 隧洞底埋深 -35.6 m, 道路路面高程为 0 m, 拟

收稿日期: 2017-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579081, 51379065)

作者简介: 马文琪(1993-), 女, 山东聊城人, 硕士, 从事岩石力学与地下工程的研究。

建道路路面高程与隧洞底高程垂直间距小于 80 m, 为避免荷载直接作用于隧洞正上方, 采用新建桥梁的方式跨越该隧洞, 桥梁采用桩基础。桩基础采用钻孔灌注桩, 桩径为 1.5 m, 桩间距为 2 m。为保证隧洞在桩基施工及道路运行期的正常使用同时降低桥梁造价, 需建立合理模型进行分析, 确定桩与隧洞间距、桩长等桩基参数。

1.2 模型及计算参数分析

根据工程实际情况, 利用 FLAC3D 软件建立三维简化模型, 如图 1 所示。模型尺寸为 76 m × 70 m × 50 m, 采用右手笛卡尔坐标系, 沿隧洞走向为 y 向, 平行于桩长方向为 z 向。隧洞中心点为坐标原点, 桩基顶部 z 向坐标为 35 m, 隧洞左右两侧桩根数分别为 10 根, 桩基施工区域为隧洞沿 y 轴走向 14 ~ 50 m 处。采用控制变量法分别改变桩基与隧洞间距 S 、桩长 L 的值。隧洞及桩基参数见表 1, 模型地层分布及主要物理力学指标见表 2。

隧洞衬砌结构依据工程实际, 衬砌厚度为 0.35 m, 采用 C30 混凝土材料, 钻孔灌注桩的混凝土强度等级为 C30。衬砌结构和桩基础采用各向同性弹性模型, 岩土体为弹塑性材料, 采用摩尔-库伦塑性模型。桩土界面用接触面单元模拟^[13-15], 不考虑桩对土体的软化作用。模型边界采用底边固定、两侧边界水平位移约束的条件。

根据实际工况, 模拟分 4 个阶段进行。初始地应力平衡后用空模型模拟隧洞开挖, 开挖完成后进行隧洞衬砌, 以模拟桩基础施工前的场地应力状态; 模拟钻孔灌注桩成孔过程; 模拟桩基浇筑过程, 浇

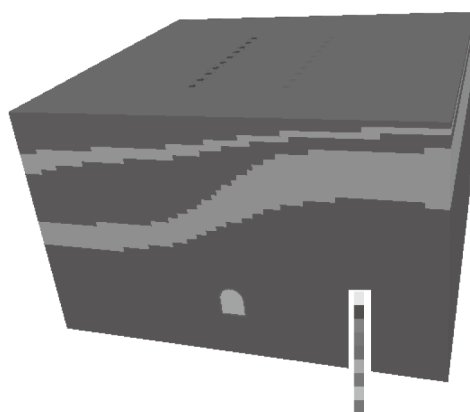


图 1 三维整体模型图

Fig.1 Three-dimensional model diagram

筑分三次完成, 考虑桩基施工浇筑振捣, 用 FISH 函数定义动荷载, 施加向下的作用力; 进行桩基加载, 模拟上部结构物的修建及运行。

2 桩基施工对隧洞影响因素分析

2.1 桩与隧洞间距 S 对隧洞影响分析

保持桩基长度 $L=20$ m 与桩间距 $i=2$ m 不变, 改变桩基础与隧洞间距 S , 计算 $S=2$ 、4、6、8、10、12 m 时隧洞应力与位移变化。

桩基钻孔阶段桩基周围土体开挖, 隧洞两侧岩土体卸荷, 隧洞周围约束降低, 隧洞侧壁产生向桩基方向的变形, 隧洞拱顶和底部向上变形, 隧洞衬砌结构变形大致呈倒 U 型。由于桩基长度较短, 计算过程中隧洞基本保持稳定, 隧洞围岩未发生剪切破坏。

由图 2 可知, 桩基施工使隧洞衬砌结构及围岩

表 1 隧洞及桩基参数表

Tab.1 Parameter list of tunnel and pile foundation

不变参数			变化参数	
隧洞尺寸 /m	衬砌厚度 /m	桩尺寸 /m	S /m	L /m
$5.1 \times 6.1 \times 70$	0.35	$1.5 \times L @ 2$	2, 4, 6, 8, 10, 12	20, 26, 29, 32, 35, 38, 40

表 2 各地层物理参数表

Tab.2 Physical parameter list of layers

编号	材料名称	密度 ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	变形模量 G /MPa	剪切模量 K /MPa	粘聚力 c /MPa	内摩擦角 / $^\circ$	泊松比 μ
1	素填土	1.75	5.6	1.9	12	12	0.3
2	全风化砂岩	1.95	41.7	19.2	12	24	0.35
3	强风化砂岩	2.00	66.7	30.8	22	30	0.35
4	块状强风化砂岩	2.15	83.3	38.5	25	35	0.35
5	中风化砂岩	2.35	112.5	52	25	45	0.35
/	隧洞衬砌	2.60	20 000	12 000	/	/	0.25
/	桩基础	2.60	20 000	12 000	/	/	0.25

出现应力集中现象,拱顶和拱底承受约为 0.2 MPa 的竖向拉应力,侧壁承受约为 0.01 MPa 的水平拉应力,可见隧洞拱顶和拱底是保证隧洞稳定的关键。隧洞拱顶和拱底以竖向变形为主, $y=15$ 、19、22、30 m 截面处拱顶拱底竖向位移变化曲线如图 2、图 3 所示。

由图 2 可知,钻孔阶段隧洞拱顶和拱底竖向位移与 S 的关系曲线大致分为 3 个阶段。 S 小于 6 m 时,隧洞竖向位移随 S 减小呈线性增加,拟合斜率为 -0.025,相关系数为 0.92,隧洞底部变化趋势较拱顶更明显,原因是隧洞为马蹄形,顶部为弧形而底部为直角边,隧洞顶部受力优于底部;当 S 在 6 ~ 8 m 之间时,隧洞竖向位移曲线变化趋于平缓,说明当 S 大于 6 m 时桩基钻孔对隧洞的影响逐渐减小;当 S 大于 8 m 时,隧道竖向位移随着 S 的增加大致呈线性变化递减,递减速率较快,当 S 约为 10 m 时,钻孔开挖引起的拱顶和拱底隆起位移最大约为 0.1 mm,对隧洞的影响可基本忽略。

由图 3 可知,桩基浇筑阶段,由于桩体自重和振捣冲击作用,隧洞拱顶和拱底产生整体向下的位

移。桩基施工对隧洞的影响最终表现为整体沉降,拱底沉降量高于拱顶。

隧洞拱顶和拱底竖向位移与 S 关系曲线变化趋势与钻孔阶段大致相同,在 S 为 6 m 时出现拐点;当 S 小于 6 m 时,线性拟合斜率为 0.042,当 S 大于 6 m 时,斜率为 0.034,当 S 为 12 m 时,隧洞拱底下沉量最大为 0.4 mm。

2.2 桩长 L 对隧洞的影响分析

保持桩基础与隧洞间距 $S=2$ m 及桩间距 $i=2$ m 不变,改变桩长 L ,计算 $L=20$ 、26、29、32、35、38、40 m 时隧洞衬砌结构位移变化规律。

由图 2、图 3 可知,隧道在 $y=30$ m 截面处位移最大,桩施工所产生的周围岩土体位移从中间向两侧逐渐减小。故取 $y=30$ m 截面,拱顶、拱底竖向位移与桩长 L 关系曲线如图 4、图 5 所示。

由图 4、图 5 可知,桩长对隧洞影响趋势表现为先增大后减小。拱顶和底部竖向位移与 L 关系曲线可分为 2 个阶段,分别在 $L=32$ m ($z=3$)、 $L=39$ m ($z=-3$) 时出现拐点。桩长为 32 m 即桩底与隧洞拱

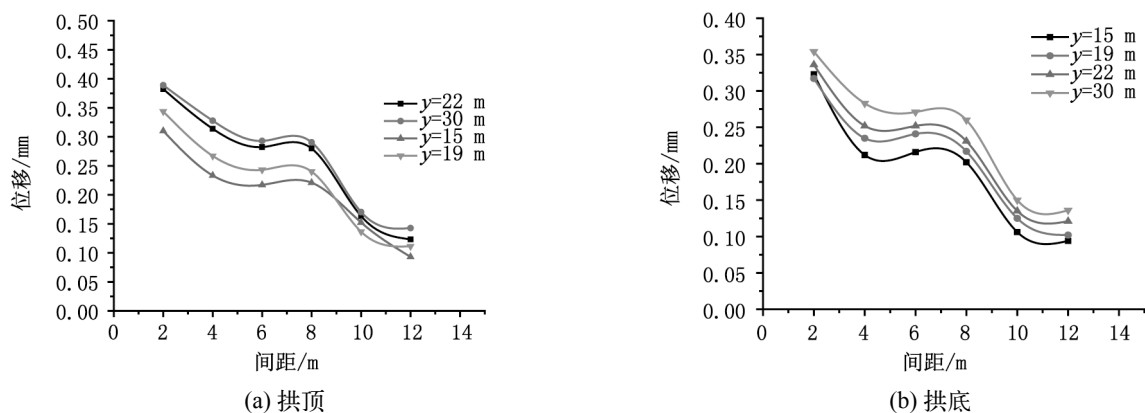


图 2 钻孔阶段隧洞竖向位移与 S 关系曲线
Fig.2 Relationship between vertical displacement of tunnel and S in drilling stage

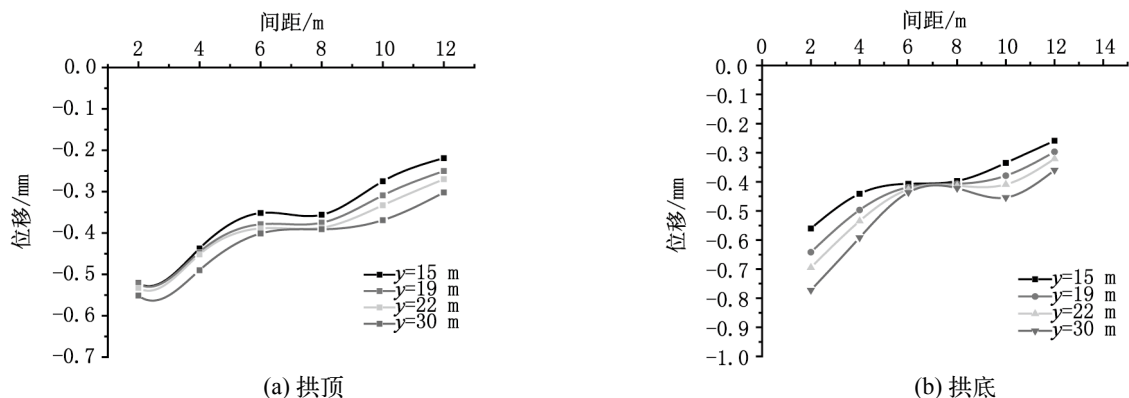


图 3 浇筑阶段隧洞竖向位移与 S 关系曲线
Fig.3 Relationship between vertical displacement of tunnel and S in pouring stage

顶在同一水平面时,拱顶在桩基施工钻孔和浇筑阶段的竖向位移最大,分别为0.8和-1.15 mm;当桩底到达隧洞拱底位置时,拱底竖向位移达到最大值,钻孔和浇筑阶段最大位移为0.85和-1.3 mm。

桩基长度对隧洞的影响主要由桩底与隧洞相对位置决定,当桩底高程位于隧洞拱顶和拱底之间时,桩基施工对隧洞影响最大。当桩位于隧洞上方时,隧洞拱顶和拱底位移随桩长增加呈线性增加,钻孔阶段和浇筑阶段线性拟合斜率分别为0.02和-0.03。

3 监测值与计算值对比分析

该工程中人工钻孔灌注桩距隧洞实际净距约为5.5 m,桩长30 m,隧洞结构施工过程中对桩基施工区域及前后10 m范围进行监测,监测区域拱底位移实测值曲线如图6所示。

由图6可得,桩基施工区域隧洞位移最大值在中间位置,最大为-1.8 mm。数值计算探究得出的位移变形规律和隧洞施工过程中的位移变化趋势大致相同,这说明用三维数值模拟计算的方法探究跨隧桥梁桩基施工对既有隧洞的影响规律是可行的。

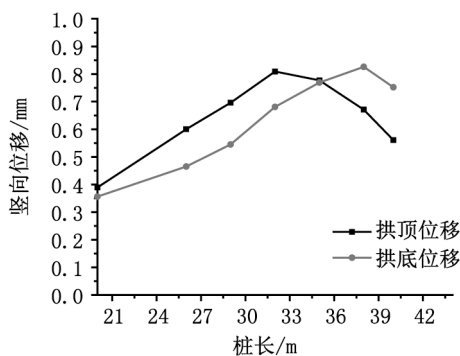


图4 钻孔阶段隧洞竖向位移与L关系曲线

Fig.4 Relationship between vertical displacement of tunnel and L in drilling stage

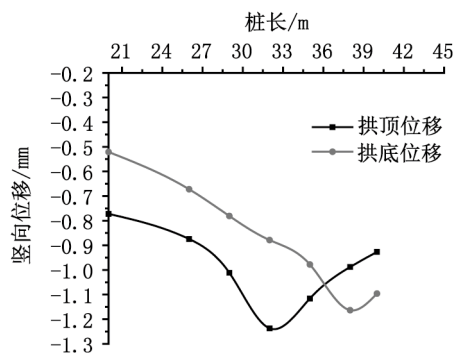


图5 浇筑阶段隧洞竖向位移与L关系曲线

Fig.5 Relationship between vertical displacement of tunnel and L in pouring stage

实测值与计算值对比,计算得出的竖向位移值偏小,这主要是因为:岩土体是复杂不均匀的各向异性介质,存在着很多结构面、节理面,而在数值计算中采用的摩尔-库伦模型没有考虑岩土体的缺陷;桩基开挖过程中会出现桩周土体软化现象,对隧洞约束力降低,造成隧洞实际变形值高于计算值;仪器精度较低及观测误差会使得监测结果出现一定偏差。

4 结论

1) 桩基施工过程中,桩孔开挖会使隧洞产生整体向上倒U形位移,桩基浇筑阶段隧洞产生整体沉降;对于马蹄形隧洞,桩基施工过程中,拱底位移变化值较大。

2) 在桩基施工全过程中,桩基与隧洞间距对隧洞的影响大致呈分段线性变化,以 $S=6$ m为界。因此,桩基与隧洞的安全距离为6 m。间距小于6 m时,隧洞位移快速增加,对隧洞稳定造成一定影响;桩基长度的变化决定了桩与隧洞在竖向位置关系,当桩底高程位于隧洞拱顶和拱底之间时,对隧洞影响最大,这种情况在实际工程中应尽量避免。

3) 通过建立三维模型模拟计算的方法分析跨隧桥梁桩基施工对既有隧洞的影响是较为合理的;将模拟结果和监测结果结合能够制定合理的隧洞加固方案,可以很好地用于类似工程施工。

参考文献:

[1] 黄国超. 某立交桥桩基基础施工对既有地铁隧道影响的数值模拟研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.

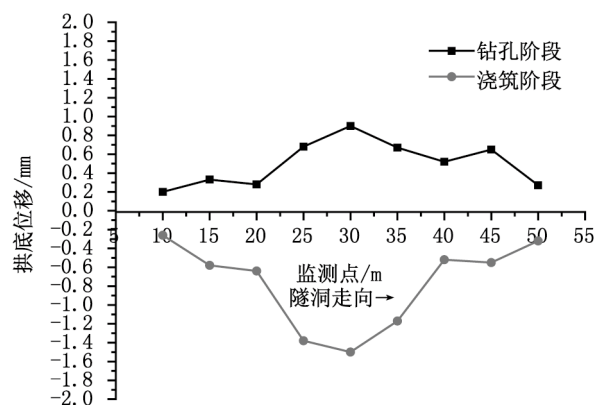


图6 监测区域隧洞拱底竖向位移实测值曲线图

Fig.6 Measured value curve of vertical displacement for tunnel arch in monitoring area

- [2] 杨幸福. 高层建筑桩基础对既有地铁隧道的影响研究[J]. 铁道勘测与设计, 2014(2): 45-49.
- [3] 唐 健. 建筑物施工对下部高铁隧道结构变形影响分析[J]. 交通科技, 2013(3): 109-112.
- [4] POTTS D M, DAY R A. Use of sheet pile retaining walls for deep excavations in stiff clay[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part Design&Construction, 1990, 88(6): 899-927.
- [5] MORGAN H D, BARTLETT J V. The Victoria Line: tunnel design[C]//Proc.Instn Civ.Engrs, Supplement, Paper 72703, 1969: 377-395.
- [6] SCHROEDER F C. The influence of pile group loading on existing tunnels[J]. Geotechnique, 2004, 54(54): 351-362.
- [7] 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(Z2): 128-134.
- [8] 刘力英, 莫海鸿, 周汉香, 等. 桩对隧道影响的分析模型比较[J]. 广东土木与建筑, 2004(2): 18-20.
- [9] 闫静雅, 张子新, 黄宏伟, 等. 桩基础荷载对邻近已有隧道影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2508-2514.
- [10] 黄晓阳. 桩基础荷载对既有地铁隧道的受力和变形的影响分析[D]. 广州: 中南大学, 2010.
- [11] 路 平, 郑 刚. 立交桥桩基础施工及运营期对既有隧道影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(Z2): 923-927.
- [12] 邱陈瑜, 郑颖人, 宋雅坤, 等. 桩基荷载作用下隧洞破坏模式研究与安全分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 3132-3144.
- [13] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [14] 张 昊, 王 法, 韩 焯, 等. 不同本构模型下建筑荷载对近邻地铁的沉降影响分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2016, 33(4): 33-38.
- [15] 徐云飞, 张强勇, 张功实. 深基坑支护中微型桩桩土耦合作用的数值模拟[J]. 人民长江, 2012, 43(19): 60-63.
- (上接第 22 页) 报, 2005(2): 51-55.
- [5] 包伟力, 周小文. 地基强度随固结度增长规律的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2001(4): 29-31.
- [6] 汪洪星, 杨春和, 陈 锋, 等. 软土抗剪强度指标随固结度变化规律分析[J]. 岩土力学, 2014(Z1): 106-112.
- [7] 李佐良, 杨爱武, 许再良, 等. 不同固结度对软土强度及变形的影响[J]. 中国港湾建设, 2012(2): 47-50.
- [8] 张银屏, 宫全美, 董月英. 软土抗剪强度随固结度变化的试验研究[J]. 岩土工程界, 2005(2): 37-40.
- [9] 闫澍旺, 封晓伟, 侯晋芳, 等. 用十字板强度推算软黏土抗剪强度指标的方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1805-1810.
- [10] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 329-378.
- [11] 陈艺南, 潘华良, 刘松玉, 等. 连云港软土工程特性初探[J]. 路基工程, 2002(6): 1-5.
- [12] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 第 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [13] 任惠芳. 对软土抗剪强度试验的探讨[J]. 四川地质学报, 1996(3): 263-266.
- [14] 刘永胜, 肖 海, 祁丽华. 室内十字板与原位十字板差异浅析[J]. 工程地球物理学报, 2010(2): 265-268.
- [15] 王晓峰. 十字板抗剪强度的影响因素分析[J]. 勘察科学技术, 2014(5): 5-7.
- [16] 孟令福. 微型十字板的应用实践[J]. 水文地质工程地质, 2004(5): 112-114.
- [17] 倪小东, 尹学谦, 蔡 钟. 基于 PFC-COMSOL 联合开展软土团结细观机理研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2017, 34(2): 30-36.
- [18] 刘 润, 闫澍旺. 软粘土边坡稳定性分析中十字板强度取值的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(8): 1422-1426.
- [19] GB/T50123—1999, 土工试验方法标[S].
- [20] 刘红军. 寒区湿地软土地基固结沉降与稳定性研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2007.
- [21] 詹金林, 雷国辉, 施建勇, 等. 有效剪切面积对直剪试验结果的影响分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007(2): 213-216.