大跨小净距隧道侧穿既有桥梁桩基影响研究

乔素云[1,2] 王少华[2] 尹金涛[2]
1 宜昌富强工程有限责任公司，湖北 宜昌 443000
2 湖北三峡职业技术学院，湖北 宜昌 443000

[摘要]随着交通建设的进一步发展，大量的隧道不断修建，其在施工的过程中很可能对近接的既有建筑物产生影响。研究隧道施工对近接既有桥梁桩基础力学性能的影响，以某大垮小净距隧道侧穿既有桥梁桩基工程为对象，开展了三维数值模拟分析。结果表明：采用 CRD 方法可以较好的控制隧道开挖对桩基础的影响，无论产生的位移还是应力都处于安全范围内。通过不同开挖顺序的对比，发现先开挖左幅即靠近桩基础一侧的隧道优于先开挖右侧隧道，且按左幅隧道左侧上部→右侧上部→左侧下部→右侧下部的开挖顺序为最优开挖顺序。所得结论可为类似工程提供一定参考和借鉴。

[关键词]隧道工程；桩基础；近接工程；数值计算
DOI：10.33142/ec.v5i4.5841 中图分类号：U231 文献标识码：A

Study on the Influence of Long-span and Small Clear Distance Tunnel on the Pile Foundation of Existing Bridge

QIAO Suyun[1,2], WANG Shaohua[2], YIN Jintao[2]
1 Yichang Fuqiang Engineering Co., Ltd., Yichang, Hubei, 443000, China
2 Hubei Three Gorges Polytechnic, Yichang, Hubei, 443000, China

Abstract: With the further development of traffic construction, a large number of tunnels are continuously built, which is likely to have an impact on the adjacent existing buildings in the process of construction. The influence of tunnel construction on the mechanical properties of pile foundation close to the existing bridge is studied. Taking a large collapse and small clear distance tunnel side crossing the existing bridge pile foundation project as the object, the three-dimensional numerical simulation analysis is carried out. The results show that CRD method can better control the influence of tunnel excavation on pile foundation, and the displacement and stress are in a safe range. Through the comparison of different excavation sequences, it is found that the left tunnel, that is, the tunnel close to the pile foundation side, is better than the right tunnel, and the excavation sequence of the left tunnel is the optimal excavation sequence: Upper left → upper right → lower left → lower right. The conclusions can provide some reference for similar projects.

Keywords: tunnel engineering; pile foundation; proximity works; numerical calculation

引言

随着我国交通事业的发展，大量的地下道路不断修建，其不可避免的将穿越各种既有建筑物。由于隧道开挖卸荷引起周围岩体的应力重分布，既有建筑物基础和地基的原应力状态发生改变，从而对基础的承载性能产生不利影响。除了房屋建筑外，地下道路修建过程中最容易遇到的就是近接既有桥梁工程[1-5]，其开挖和施工很可能对近接的桥梁桩基础产生不良影响。目前，已有较多关于隧道施工对既有桥梁基础影响的研究，如刘景盼[6]分析了隧道下穿高架桥施工队桥墩基础的影响；宗振宇[7]分析了北京地铁车站施工队邻近桥梁桩基础的影响；闫琪[8]对某隧道下穿立交桥工程进行了分析，探索了隧道施工对桩基和地面变形的影响规律。郭孝坤[9]分析研究了郑州地铁盾构对既有建筑桩基承载力的影响。贾小伟[10]对地铁开挖对邻近建筑物桩基影响进行了分析研究。从目前已有研究的相关报道来看，大部分集中在单个隧道开挖对桥梁桩基础的影响上，对大跨小净距隧道近接桥梁工程的相关报道还相对较少。而小净距隧道本身在开挖的过程中会互相影响，因此如何选取最优的开挖方法来尽量减弱其对桥梁桩基础的影响则显得十分重要。鉴于此，本文以某工程为对象，通过三维数值计算模拟分析，分析了隧道开挖对桥梁基础的影响特征，并通过不同的开挖对比方案研究，提出了最优的隧道开挖顺序。

1 工程概况

侧穿桥梁为预应力混凝土简支梁桥，近接桥梁基础为群桩基础，其相关尺寸如下：承台高 1.5m、长 10.0m、宽 5.5m；承台下设置 6 根圆桩，桩径 1.0m，桩长 30.0m，桩间距为 1.5m。新建隧道为双向两车道公路隧道，采用分幅式的方式。左右两幅隧道的净距为 9.94m，为小净距隧道。其中左幅隧道距离桩基础最近的距离为 10.39m。

整个工程沿线地貌单元属山前冲积平原上部，场地原理区域性活动断裂，场地及及其周边不存在对安全有影响的崩塌、滑坡、泥石流等不良地质作用。拟建场地位于抗震设防烈度 6 度区内。该近接区间的工程地质条件如下：

Copyright © 2022 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

洞顶围岩主要为层杂填土、层素填土、层黏土等；边墙围岩涂层主要为层粉质黏土、层黏土等；基岩为中风化石灰岩。整体围岩自稳能力较差，根据相关规范，整体围岩级别为Ⅴ级。

结合该隧道的工程地质条件，并综合道路红线宽度以及工期安排、建设成本等，最终确定采用矿山法施工。考虑到围岩级别较低，且与桥梁桩基础的距离非常近，因此在该近接段采用 CRD 法进行开挖。该方法将隧道断面分成几个部分，每个部分开挖后立即支护形成独立的闭合单元，可以较好的控制隧道开挖对整个围岩的影响。

2 三维数值计算模型

根据隧道和近接基础的相关关系，以及各结构物的尺寸及地层特征，最终建立三维数值模型如图 1 所示。数值模型中，桩基础以及隧道衬砌和围岩等材料均采用实体单元，为了消除边界条件的影响，模型的左、右边界和下边界距最近结构物的距离均取 4 倍的隧道直径，上边界为自由地面，前、后边界距承台的距离均为 30.0m（即承台长度的 3 倍距离）。最终确定的模型共有 142258 节点，614307 个单元。

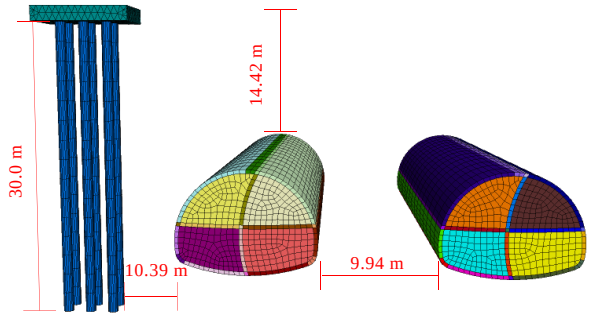


图 1 三维数值计算模型

由于整个隧道处于浅埋状态，模型初始应力仅考虑自重应力场，桥梁上部结构及运营荷载对该桩基础的荷载通过在承台施加集中荷载进行等效考虑。计算中，围岩材料采用 M-C 模型，桩基础和隧道衬砌则采用弹性模型进行模拟，隧道锚杆单元采用 cable 单元进行模拟。根据工程地质条件以及桥梁结构和隧道支护的设计情况，最终采用的计算参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 数值计算参数

材料	密度（g/cm³）	弹性模量（GPa）	粘聚力（MPa）	内摩擦角（°）	泊松比
层杂填土、素填土	1.82	0.051	0.010	8.0	0.39
粉质黏土	1.55	0.035	0.041	10.1	0.45
中风化石灰岩	2.48	2.81	2.350	40.0	0.28
C25 混凝土	2.5	28			0.167
C30 混凝土	2.5	30			0.167

表 2 锚杆单元计算参数

材料	密度	弹性模量	泊松比	抗拉强度
	(g/m3)	(GPa)		(kPa)
锚杆单元	2.85	210	0.20	1000

如图 2 所示的隧道开挖分部，为了找出隧道的最优开挖顺序，一共对以下 4 种开挖顺序进行了计算：①A→B→C→D→E→F→G→H；②E→F→G→H→A→B→C→D；③B→A→D→C→F→E→H→G；④B→D→A→C→F→H→E→G。

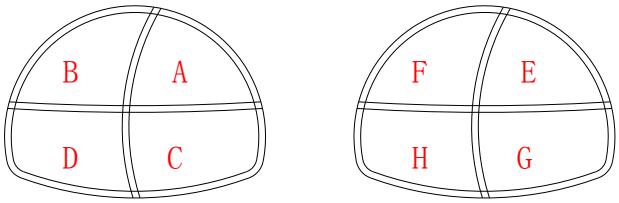


图 2 隧道分部开挖示意图

3 计算结果分析

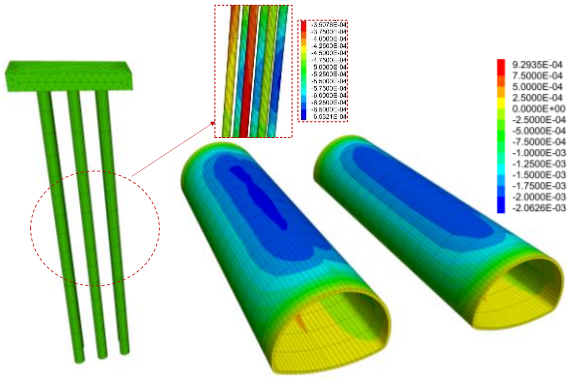
在开挖前，在地应力的作用下，桩体最大沉降点位于桩的底部，达到 4.5mm。第①种开挖方案完成后桩基础与隧道衬砌的竖向位移和最大最小主应力云图如图 3 所示。可以看出，隧道开挖完成后拱顶沉降最大位置在与桩基础最接近的断面，约为 2.06mm，隧道衬砌受到的最大压应力约为 1.84MPa，最大拉应力约为 0.84MPa。桩基础最大竖向位移位于与隧道最为接近的位置，约 0.65mm。桩基础最大拉应力同样位于位移最大的位置，值约为 0.76MPa，最大压应力位于桩底位置，约为 4.12MPa。从计算结果来看，虽然隧道侧穿桩基础，但引起的桩基础变形仍以竖向位移为主，而水平位移和竖向位移不处在一个数量级。分析桩基础因隧道开挖而引起的应力，不管是最大的压应力还是拉应力，均远小于 C30 混凝土的抗压强度和抗拉强度；而隧道开挖引起的桩基础最大位移也仅为 0.65mm。

第①种开挖方案完成后桩的轴力云图如图 4 所示，从图中可以看出，位于承台内部的桩顶部分轴力为正，即受到拉应力作用，最大值约为 0.73MPa；而在承台外的部分轴力均为负，即受到压应力作用，最大压应力位于桩底，约为 4.12MPa。开挖完成后桩体 x 方向位移如图 5 所示，从图中可以看出，越靠近隧道的桩体其径向位移更大，这是由于开挖的影响靠近隧道的土体更容易发生变形。在及时衬砌的条件下，土体的位移受到了限制，从而使得桩体仍然处于稳定，桩体的径向位移最大值约 0.06mm，与桩体直径相比，仅为直径的 0.006%，基本可以忽略不计。

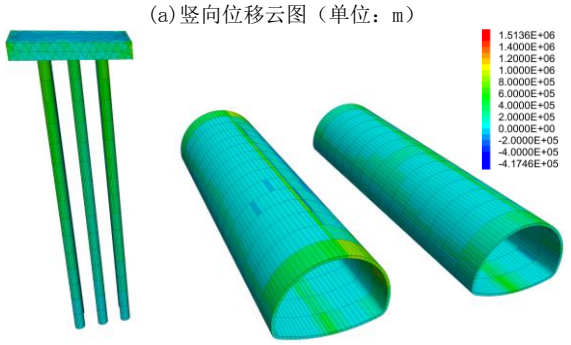
第①种开挖方案完成后隧道的 x 方向的位移云图如图 6 所示，从图中可以看出，在远离桩体的隧道拱顶左侧在 x 方向的位移明显大于靠近桩体的隧道，这是由于桩体对于土体有一定的加固效果，靠近桩体一侧的土体在变形时会受到桩的影响，而原理桩体一侧的土体在变形中受到的影响较小。

Copyright © 2022 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

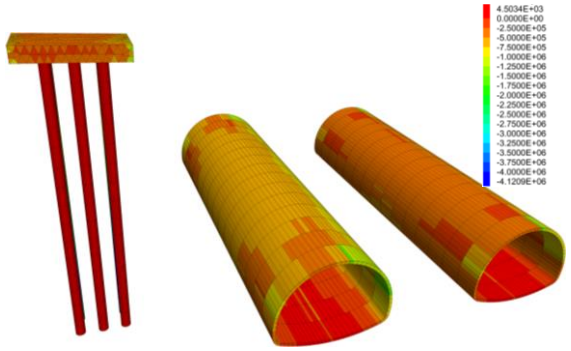
与开挖前相比，桩体最大沉降仅增加 0.65mm，约为开挖前最大沉降的 14.4%，综上计算结果表明，在本文开挖和支护的情况下，隧道对既有桩基础的影响较小。



(a)竖向位移云图（单位：m）



(b)最小主应力云图（单位：Pa）



(c)最大主应力云图（单位：Pa）

图 3　第①开挖方案完成后隧道与桩基计算结果

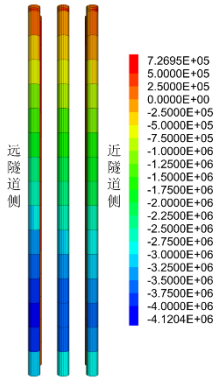


图 4　第①开挖方案完成后桩体轴力计算结果

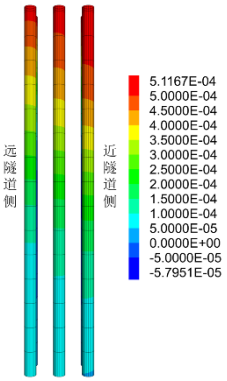


图 5　第①开挖方案完成后桩体 x 方向位移计算结果

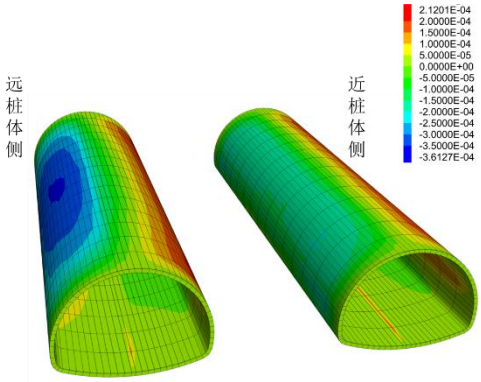


图 6　第①开挖方案完成后隧道 x 方向位移计算结果

为了优化隧道的开挖顺序，分别对开挖方案①、②、③和④进行模拟计算，最终得到的隧道和桩基础结构的应力和变形如表 3 所示。

表 3　不同开挖方案下桩基础和隧道产生的位移和变形

开挖方案	①	②	③	④
隧道拱顶位移(mm)	2.06	2.15	2.01	2.03
桩基最大竖向位移(mm)	0.65	0.71	0.59	0.62
衬砌最大压应力(MPa)	1.842	1.751	2.327	2.358
衬砌最大拉应力(MPa)	0.844	0.754	0.843	0.863
桩基最大压应力(MPa)	4.121	4.130	4.119	4.118
桩基最大拉应力(MPa)	0.759	0.776	0.781	0.773

从表 3 可以看出，4 种开挖方法整体上的差别不太大，不论从桩基础还是隧道衬砌的结构来看，隧道开挖引起的变形和应力等的影响都相对较小，处于安全的范围。而对比开挖方案①和②，方案①下隧道开挖引起的隧道和桩基的竖向位移均小于方案②，表明先开挖左幅隧道即靠近桩基础一侧隧道要优于开挖右幅隧道；对比方案①和③，方案③开挖引起的拱顶和桩基础的位移相对较小，也就是说对于左幅隧道，先开挖离桩基础近的一侧更为合适；对比方案③和④，同样是方案③开挖引起的位移小一些，即先采用先开挖上部再开挖下部的方案更优一些。综上所述，最终确定的最优开挖顺序为：靠近桩基础的隧道左上侧→

Copyright © 2022 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

右上侧→左上侧→右下侧→远离桩基础的隧道左上侧→右上侧→左上侧→右下侧。

4 结论

本文通过建立三维数值计算模型，对某大跨小净距侧穿桥梁桩基础的工程进行了分析，重点从不同开挖方法下桩基础的变形和受力进行了对比，分析了隧道开挖对既有桥梁桩基础的影响并对采用的开挖方法进行了优化。得到了以下主要结论：

（1）由于隧道近接既有桥梁桩基础，且围岩级别较低，最终采用 CRD 方法将断面分为了 4 个部分，每个部分开挖完成后立即封闭形成独立的闭合单元，因而可以较好的控制围岩的变形，以及隧道开挖对桩基础的影响。a

（2）三维数值计算结果显示，隧道开挖后桩基础产生的位移仍以竖向位移为主，横向位移较竖向位移小一个数量级。桩基础位移和最大拉应力的位置均位于与隧道最接近的位置。但整体来看，桩基础和衬砌的压应力和拉应力均未超过混凝土的强度。桩基础产生的竖向位移也仅为 0.65mm，处于较小范围。

（3）通过 4 种不同开挖方法下计算计算结果的对比发现，先开挖左幅即靠近桩基础一侧的隧道优于先开挖右侧隧道，且按左幅隧道左侧上部→右侧上部→左侧下部→右侧下部的开挖方法为最优开挖顺序。

基金项目：宜昌市自然科学研究项目《长阳清江画廊旅游码头深水基础施工研究》(项目编号 A21-3-023)；湖北省教育厅百校联百县项目（项目编号 BXLBX1329)阶段性研究成果之一。

[参考文献]

[1]宋慧林.地铁隧道侧穿既有桥梁桩基影响按研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.
[2]白雪.新建桥梁桩基施工对既有高铁箱涵附加沉降影响研究[J].天津建设科技,2021,31(5):26-30.
[3]刘旭菲.新建桥梁对邻近运营高铁桩基变形的影响研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2018.
[4]钱浩,王琦.双孔平行地铁顺穿桥梁对桥梁桩基础影响研究[J].城市道桥与防洪,2021,216(1):146-149.
[5]杨超,黄茂松,刘明蕴.隧道施工对临近桩基影响的三维数值分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):2601-2607.
[6]刘景盼.隧道下穿高架桥梁施工对桥墩基础影响分析[J].西藏科技,2019,315(6):58-60.
[7]宗振宇.地铁施工对邻近桥梁桩基影响研究[J].天津建设科技,2021,31(5):26-30.
[8]闫琪.隧道暗挖施工对临近桥梁桩基础的影响及加固[D].重庆:重庆交通大学,2018.
[9]郭孝坤.郑州地铁盾构下穿施工对既有建筑桩基承载力的影响研究[D].郑州:郑州大学,2015.
[10]贾小伟.盾构地铁开挖对邻近建筑物桩基影响的数值分析[D].山东:鲁东大学,2018.

作者简介：乔素云（1973-）男，高级工程师，主要从事路桥施工工作；通讯作者：王少华（1983-）女，硕士研究生，讲师，主要从事路桥工程专业教学；尹金涛，男，讲师，主要从事路桥工程专业教学。

Copyright © 2022 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.