

双孔平行地铁顺穿桥梁对桥梁桩基础影响研究

钱浩, 王琦

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300074)

摘要: 利用有限元分析软件建立桥梁基础及双孔地铁的模型, 模拟地铁盾构的施工工况。研究盾构施工前后地铁隧道、周边土体变形趋势及其对地铁顺穿桥梁的桩基础轴力、弯矩、水平变形及沉降的影响。分析结果表明: 隧道施工造成隧道上部土体沉降, 下部土体隆起, 隧道呈现椭圆形; 其顺穿桥梁桩基轴力、弯矩增加幅度较大, 桩基在地铁隧道深度以上竖向沉降, 在隧道深度下局部桩体隆起, 桩身位移呈现“3”字形, 最大位移位于隧道中心标高与隧道底标高之间。

关键词: 桥梁; 地铁; 盾构施工; 沉降; 应力; 弯矩; 位移
中图分类号: U445.55+1 **文献标志码:** B

文章编号: 1009-7716(2021)01-0146-05

0 引言

目前, 国内大中型城市多存在地铁顺穿桥梁基础的现象, 地铁盾构施工对桥梁基础具有较大影响, 甚至会威胁桥梁基础安全^[1-4], 因此桥梁设计需要考虑规划地铁的实施因素。

目前, 国内外基于实体项目对桥隧交叉进行了广泛研究, 如 Yong-Joo Lee 等人研究了桩基地铁变形相互作用及分析方法^[4], 章维明讨论了不同桩基深度对地铁及周边土体变形影响^[5]; 孔滨讨论了哈尔滨远期地铁明挖施工对桥梁基础的影响^[6], 陈聪研究了武汉地铁施工对周边铁路桥桩基横、纵向变形的影响^[7]; 张月东从工艺角度提出了地铁施工对既有桥梁变形的控制措施^[8]。

目前, 国内外研究主要集中在盾构施工对既有桥梁变形的影响及处理工艺上。由于工程地域及工况差异, 现有分析数据对其它工程的指导具有局限性。本文以杭州市某桥梁工程为背景, 提出在桥梁桩基设计时考虑远期地铁建设因素, 通过有限元分析盾构施工前后地铁隧道、周边土体的变形趋势及其对地铁顺穿的桥梁桩基础轴力、弯矩、水平变形、沉降的影响, 寻求远期地铁施工时桥梁基础正常运营的最经济设计方案。研究为该工程的合理性及经济性提供理论依据。

1 工程概况

工程桥梁总长度 84 m, 总宽度 33.6 m。上部结

构采用(22+30+22)m V 型刚构箱梁; 下部采用 U 形桥台, 实体式桥墩, 摩擦灌注桩。桥梁工程地点规划下穿地铁, 隧道外径 6.2 m, 厚度 350 mm, 轨道底距离桩顶 11.5 m。基础设计考虑远期地铁下穿因素, 1、2 号墩采用 8Φ1.8 m 钻孔灌注桩上接 34.9 m × 16.5 m × 3 m 承台, 上接墩柱。0、3 号桥台采用 7Φ1.5 m 钻孔灌注桩, 上接 36.7 m × 10 m × 3 m 承台, 上接 U 形桥台。桥梁总体布置如图 1 和图 2 所示。

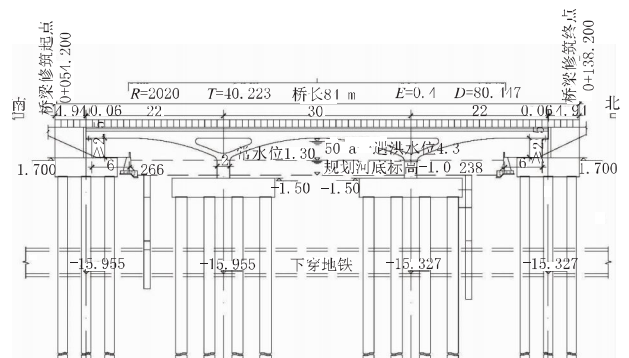


图 1 桥位图(单位:m)

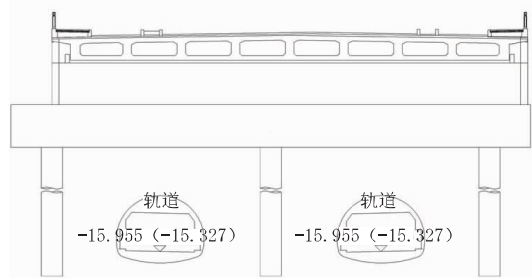


图 2 墩台基础剖面示意图

2 力学模型及参数

2.1 模型

考虑盾构机开挖前、开挖后基础应力及变形。采

收稿日期: 2020-06-23

作者简介: 钱浩(1988—), 男, 硕士, 工程师, 从事道路工程设计工作。

用有限元分析软件进行数值分析,由于地铁顺穿桥梁,建立二维平面应变计算模型。考虑土体变形的非线性特征及土体硬化阶段的特性,计算模型采用硬化土模型(HS)。土体模型参数取值见表1。

表1 硬化土模型参数

土层名称	E_{50}^{ref}/MPa	E_{0ed}^{ref}/MPa	E_{ur}^{ref}/MPa
粉质黏土	3.5	3.5	24.5
淤泥质黏土	2.5	2.5	17.5
全风化泥质粉砂岩	12.0	12.0	60.0
强风化泥质粉砂岩	20.0	20.0	100.0
中等风化泥质粉砂岩	40.0	40.0	200.0

桥梁承台、桩及隧道采用弹性板单元模拟。隧道采用均质圆环的板单元。考虑隧道实际施工过程中管片的拼接效应,以及装配式衬砌的螺栓连接刚度对隧道整体结构的影响,对隧道衬砌刚度进行折减^[9,10];考虑盾构机壳脱出后管片与土体之间的间隙,根据经验,隧道体积收缩率取值为0.2%。线弹性材料参数见表2。

表2 线弹性材料参数

名称	弹性模量/MPa	泊松比
桥梁承台	34 500	0.2
桩	30 000	0.2
隧道	25 900	0.2

根据类似工程和其他学者的研究结果,隧道周围3~5倍隧道直径以外的土体受到隧道开挖的影响较小,可以认为没有影响。因此,模型尺寸取为160 m × 160 m(X × Y)。隧道外径为6.2 m,厚度为350 mm。

该工程共4组群桩承台,两两对称。本文只列举“承台1”模型,厚度3 m,其下桩基础桩径1.8 m,桩长80 m。承台与桩基础连接为刚接。

2.2 荷载

该工程“承台1”模型顶部均布荷载为125.16 kPa,由于实际工程中上部结构相对于承台并不是对称布置,因此模型中为考虑实际情况,荷载也按工程实际情况进行非对称布置。

2.3 模型边界约束条件

如图3所示,模型左右边界约束水平向位移,底部约束水平及竖向位移,模型上表面取为自由边界。桩基础与土体的接触面采用interface单元进行模拟分析,而接触面的强度折减系数根据工程经验均取值0.7。

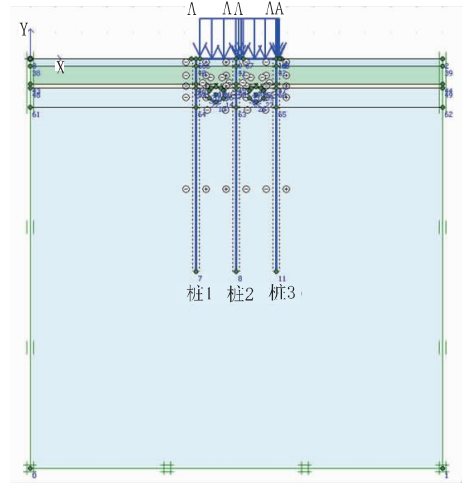


图3 模型横断面图

2.4 计算步骤

为简化计算,有限元模型计算分析主要分为以下几个步骤:

- (1)地应力平衡;
- (2)生成桥梁承台及桩;
- (3)施加上部结构荷载;
- (4)开挖隧道。

3 计算结果分析

3.1 隧道变形

隧道开挖后桥梁、隧道及其附近土体变形分别如图4和图5所示。

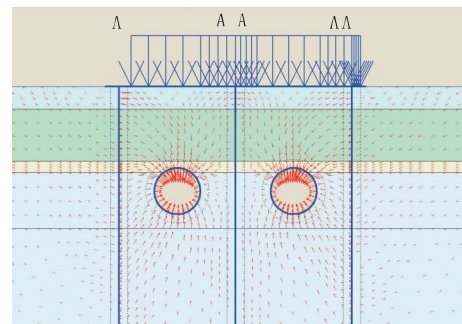


图4 隧道开挖后局部土体变形

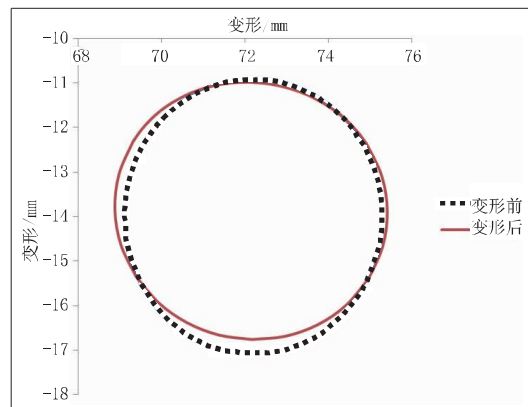


图5 隧道开挖后隧道变形(变形放大200倍)

隧道开挖后,隧道上部土体沉降,隧道下部土体隆起,隧道呈现出被压扁的椭圆形,地面土体出现沉降槽,这与已有的隧道开挖经验相吻合。说明该计算模型参数选取较为合理,可以真实反映隧道开挖后,土体、隧道、桥梁基础的受力、变形及相关位移关系。

3.2 整体沉降

3.2.1 施加上部荷载

上部结构荷载施加后,承台带动桩基础相对土体有向下移动,通过承台底面和桩侧、桩端带动周围土体移动。承台底面应力较为集中,该位置土体竖向位移最大,达到 9.68 mm,为竖向沉降。竖向位移沿桩长向下逐渐减小,至桩端位置,竖向位移约为 7.06 mm,为竖向沉降。

3.2.2 盾构施工

隧道开挖步完成后,隧道内土体被挖除,局部土体卸荷,隧道上方土体沉降,最大沉降约为 4.78 mm,隧道下方土体隆起,最大隆起值约为 3.46 mm。隧道在土体作用下出现竖向压缩、水平向拉伸的变形。隧道中心标高附近土体被隧道向外侧挤压。

3.2.3 盾构施工完成

隧道开挖完成后,由于隧道上部土体沉降与隧道开挖前该位置土体位移叠加,土体竖向沉降进一步增大,最大值达到 11.81 mm。隧道以下土体位移在隧道开挖步表现为隆起,与隧道开挖前该位置土体位移进行叠加,土体竖向仍然表现为沉降,只是沉降值减小为 6.94 mm。

3.3 桩基分析

对于隧道开挖前与隧道开挖后“承台 1”模型桩 1、桩 2、桩 3 的内力及位移进行分析。

3.3.1 轴力分析

隧道开挖前与隧道开挖后桩身最大轴力见表 3。

表 3 隧道开挖前与隧道开挖后桩身最大轴力及位置汇总表

桩号	隧道施工前		隧道施工后		轴力增加百分比/%
	桩身最大轴力/kN	最大轴力位置(距桩顶)/m	桩身最大轴力/kN	最大轴力位置(距桩顶)/m	
1号桩	5 517.4	11.5	6 695	11.5	21.34
3号桩	7 609.3	11.5	8 813.9	11.5	15.83
2号桩	5 457.8	11.5	6 810.4	11.5	24.78

如图 6 所示,该工程隧道底距离桩顶为 11.5 m,盾构隧道开挖后,隧道上部土体沉降,隧道下部土体隆起,导致桩基产生负摩阻力,负摩阻力最大值位于隧道底部附近。“桩 3”最大轴力在隧道开挖前后都大于“桩 1”最大轴力。出现此现象的原因为,上部结

构荷载为非对称荷载,且荷载偏向“桩 3”一侧,造成“桩 3”轴力较大。

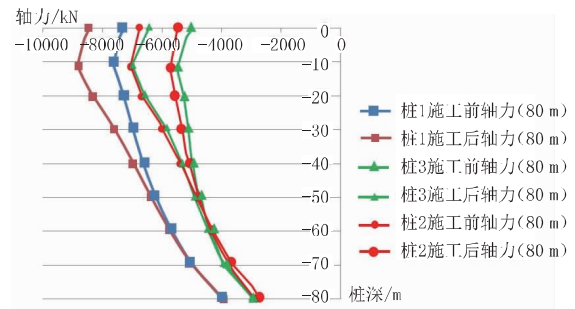


图 6 隧道开挖前、后桩基轴力分布图

3.3.2 弯矩分析

隧道开挖前与隧道开挖后桩身最大弯矩见表 4。

表 4 隧道开挖前与隧道开挖后桩身最大弯矩汇总表

桩号	隧道施工前桩身最大弯矩/(kN·m)	隧道施工后桩身最大弯矩/(kN·m)	弯矩增加百分比/%
1号桩	2 240.72	4 340.94	93.73
3号桩	2 128.96	4 215.95	98.03
2号桩	72.35	74.52	-3.00

如图 7 所示,隧道开挖前,“桩 1”最大弯矩约为 2 240.72 kN/m,最大弯矩出现在桩顶。隧道开挖后,桩身最大弯矩约为 4 340.94 kN/m,最大弯矩也出现在桩顶。最大弯矩增长了 93.73%。隧道开挖前,“桩 3”最大弯矩约为 2 128.96 kN/m,最大弯矩出现在桩顶。隧道开挖后,桩身最大弯矩约为 4 215.95 kN/m,最大弯矩也出现在桩顶。最大弯矩增长了 98.03%。

如图 8 所示,隧道开挖前,“桩 2”最大弯矩约为 72.35 kN/m,最大弯矩出现在桩顶。隧道开挖后,桩身最大弯矩约为 74.52 kN/m,最大弯矩也出现在桩顶。最大弯矩增长了 3.00%。“桩 2”弯矩明显小于“桩 1”和“桩 3”,造成这种现象的原因在于“桩 2”水平方向两侧都有隧道开挖,同时造成两侧土体卸荷,叠加后对“桩 2”弯矩影响很小。

3.3.3 位移分析

隧道开挖后桩身位移变化见表 5。

如图 9 所示,隧道开挖后,“桩 1”、“桩 3”水平呈现“3”字型变形,“桩 1”最大水平位移约为 0.93 mm,出现在桩顶以下 9.1 m,桩身水平位移两峰值间的最小水平位移约为 0.79 mm,出现在桩顶以下 15.25 m,此高度处于隧道中心标高与隧道底标高之间。“桩 3”最大水平位移约为 1.032 mm,出现在桩顶以下 9.1 m,桩身水平位移两峰值间的最小水平位移约为 0.79 mm,出现在桩顶以下 16.19 m,此高度处于隧道中心标高与隧道底标高之间。出现“3”字型变形的

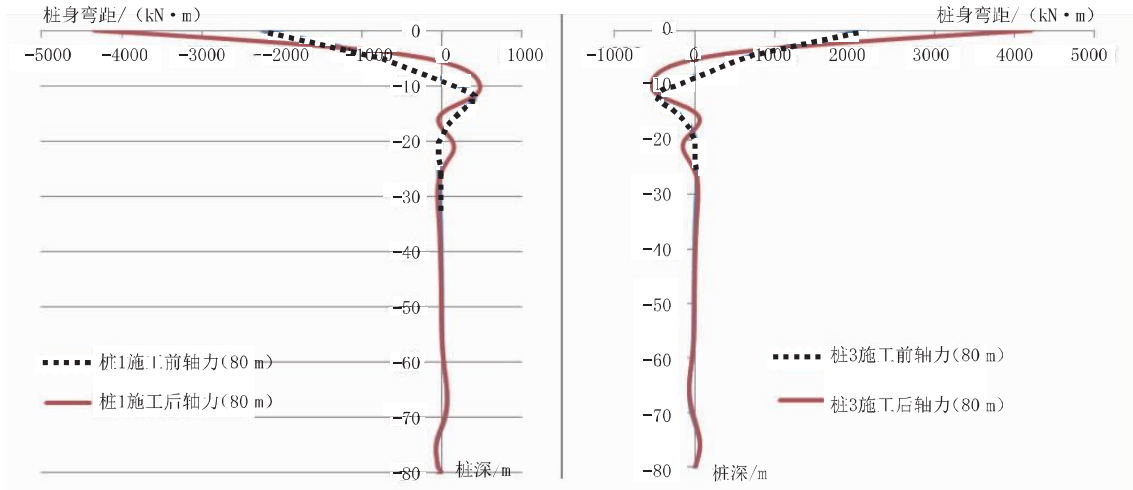


图7 隧道开挖前与隧道开挖后“桩1”“桩3”最大弯矩图

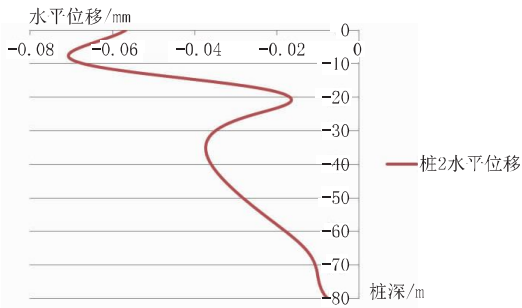


图8 隧道施工后“桩2”水平位移分布图

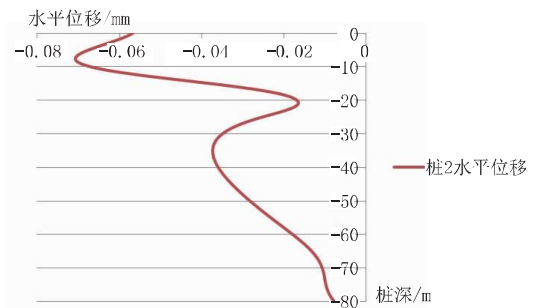


图10 隧道施工后“桩2”水平位移分布图

表5 隧道开挖后桩身位移汇总表

桩号	桩端水平位移/mm	最大水平位移/mm	最大水平位移位置(距桩顶)/m	桩端水平位移占比/%
1号桩	0.05	0.93	9.1	5.42
3号桩	0.052	1.032	9.2	5.08
2号桩	0.003 6	0.07	7.38	5.14

原因为隧道开挖后,隧道竖向压缩、横向拉伸,拉伸位置附近的土体水平向变形明显小于周边土体,造成此位置桩身水平位移明显小于附近其他位置。

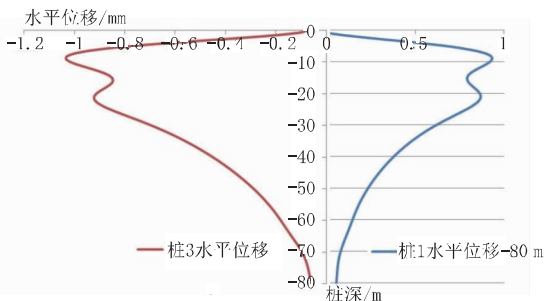


图9 隧道施工后“桩1”“桩3”水平位移分布图

如图10所示,隧道开挖后,“桩2”水平呈现“3”字型变形,最大水平位移约为0.07 mm,出现在桩顶以下7.38 m。“桩2”水平位移最大值仅相当于“桩3”水平位移最大值的6.78%。“桩2”水平位移绝对值很小,几乎可以忽略不计。

3.4 墩台沉降分析

隧道开挖后,“承台1”桥梁墩台沉降值约为0.22 mm,桥梁墩台水平位移约为0.041 mm。

4 工程优化设计

分别建立桩长为70 m、60 m、50 m模型,需求满足规范前提下设计最优方案,计算结果见表6。结果表明,不同桩长计算结果趋势一致,同时采用“承台1”桩长为50 m时,隧道开挖对该桥梁不会造成较大影响,桥梁墩台结构沉降及水平位移在安全合理的范围内。

5 结语

(1)隧道施工造成隧道上方土体沉降,隧道所在深度以上的桩体和桩顶承台竖向变形表现为沉降,而隧道附近的桩体中下部则表现为隆起。隧道上方土体沉降,引起桩身产生向下移动,而隧道开挖的卸荷作用导致下方土体隆起,带动下部的桩身向上移动。桩基产生负摩阻力,负摩阻力最大值位于隧道底部附近。

(2)桩身水平向位移主要表现为盾构隧道产生土体卸荷带动周围土体,造成桩基水平位移。特别值得注意的是,由于隧道产生的横向鸭蛋形变形,挤压周围土体,造成靠近隧道中心标高附近的桩身水平