

# 大跨浅埋暗挖隧道近接桥桩施工扰动影响 及控制技术研究

许桂生

(青海省公路科研勘测设计院, 青海 西宁 810000)

**摘要:** 依托某实际工程, 基于 Abaqus 软件建立桥—隧三维数值计算模型, 对城市公路隧道近接桥梁桩基段施工进行模拟, 得到大跨浅埋暗挖公路隧道施工对地层、桥梁桩基变形的影响规律, 并研究高压旋喷桩加固措施对桥梁桩基变形的影响, 结合现场实测数据, 分析加固措施对隧道施工安全的控制效果。结果表明: 软弱地层隧道施工对桥梁桩基变形影响较大, 靠近隧道两侧桩基变形明显大于中部桩基, 最大桩基差异沉降值远超规范允许值, 需采取有效变形控制措施; 增大高压旋喷桩加固参数(加固深度和宽度)对减小桥梁桩基位移效果较为明显, 但加固宽度和深度都存在“极限值”。考虑安全与经济, 得到工程合理的加固宽度为 2.5 m, 合理加固深度为 25 m; 隧道施工完成时桥梁桩基最大差异沉降约 2.2 mm, 桥梁桩基变形在安全可控范围内。

**关键词:** 公路隧道; 软弱地层; 邻近施工; 桩基础; 变形控制

## 1 引言

为了改善城市拥堵的交通状况, 城市公路隧道作为新型的城市交通方式已出现在中国很多的大中型城市当中。城市地下公路隧道修建环境相对复杂, 隧道施工往往会遇到近接桥梁桩基的情况, 特别是软弱地层下大跨浅埋暗挖隧道施工, 会引起较大地层扰动, 导致桩基发生较大沉降变形, 若桥梁基础的沉降超过容许值, 将使桥梁出现损伤或使已存在的损伤加剧, 影响桥梁的安全。因此分析隧道近接施工对桥梁桩基变形的影响, 并采取有效的防护措施保障桥梁承载状态的正常安全, 对保护既有结构安全具有十分重要的意义。

目前关于隧道近接既有桥梁结构施工的相关研究相对较多, 徐长节等、周正宇等、吴贤国等、周济民等、刘可玉、刘卫等、蒋华春等基于数值计算与现场监测, 研究了地铁盾构隧道近接桥梁基础施工对桥梁基础变形的影响, 并提出了相应的变形控制措施; 苏洁、高伟等研究了城市浅埋暗挖隧道施工对桥梁基础的影响, 基于影响规律提出了对桥梁基础的保护措施; 邓稀肥等研究富水流砂地层隧道 CRD 法施工对桥梁及燃气管线变形的影响, 并提出了相应的变形控制技术; 凌同

华等采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 分析了下穿隧道不同施工方法的施工过程对桥墩桩基变形的影响, 表明下穿隧道采用顶弧侧壁法能够有效地控制桥桩位移。已有研究大多集中于地铁暗挖隧道施工对桥梁基础变形的影响, 而对于软弱地层下大跨浅埋暗挖双线公路隧道近接桥梁桩基的工程案例研究较少, 且目前对于隧道近接桥梁施工影响控制措施偏向于定性研究, 而对于隧道近接桥桩施工安全控制措施量化的研究成果甚少, 有必要对其开展相关研究。

该文依托某实际工程, 基于 Abaqus 软件建立桥—隧三维流固耦合数值模型, 对隧道近接桥梁桩基段施工进行模拟, 得到大跨浅埋暗挖公路隧道施工对地层、桥梁桩基的影响, 并研究高压旋喷桩加固措施对桥梁桩基变形的影响。

## 2 工程概况

某隧道为双线分离式浅埋暗挖隧道, 隧道性质为城市公路隧道, 隧道单洞开挖高度 10.48 m、开挖宽度 13.53 m, 隧道采用 CRD 工法, 东西线同时侧穿桥梁桩基, 隧道拱顶最小覆土厚度 8.3 m, 桥梁采用  $\phi 1\,000$  mm 钻孔灌注桩基础, 桩基长度 26 m, 间距  $2\text{ m} \times 2$

收稿日期: 2018-05-20

作者简介: 许桂生, 男, 硕士, 工程师. E-mail: 745298012@qq.com

m,西线隧道距离最近桩基仅 5.8 m,东线隧道距离最近桩基仅 5.85 m。桥梁桩基段地层构造由上至下依次为粉质黏土和粉质黏土混碎石、强风化凝灰质粉砂岩,含水量较高,围岩等级为 V 级,地下水位距地表以下 7 m。隧道与桥梁桩基位置图见图 1。

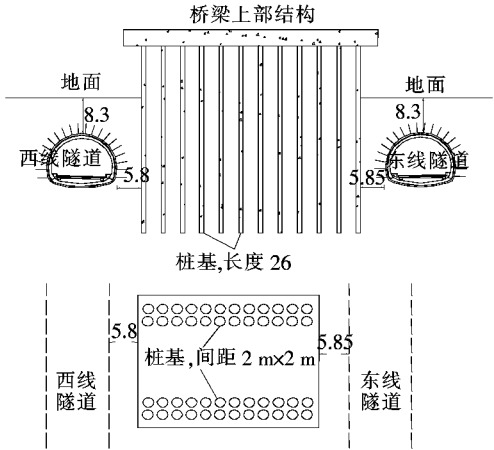


图 1 隧道与桥梁桩基位置图(单位:m)

3 隧道近接桥桩施工模拟

3.1 计算模型建立

该隧道模型横截面方向横向为 150 m,竖向上部取至地表面,竖向总高度 50 m,沿隧道纵向深度为 60 m。土体选用弹塑性本构模型,初期支护、桩基计算中设置为弹性材料。土体、初衬均采用实体单元模拟,锚杆采用杆单元模拟,模型共划分 105 300 个单元。模型两侧及底部为不透水边界,计算时地下水位取自地表以下 7 m,初期支护的渗透系数较小,可近似于不排水界面;隧道正常掘进状态下,开挖面设为透水边界。各岩土层及衬砌材料物理力学参数取值见表 1。

3.2 计算结果分析

重点分析隧道掘进通过桥梁段的最终累积变形,此处只对最后的计算结果进行相应的研究分析。提取开挖后围岩体竖向位移,隧道掌子面的纵向挤出位移与桥梁桩基位移结果如图 2~4 所示。

表 1 材料物理力学参数

材料名称	厚度/ m	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	泊松比	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	黏聚力/ kPa
粉质黏土	8	1 940	15	0.31	19.1	15.4
含砾粉质黏土	9	1 980	20	0.31	20.4	20.1
粉质黏土混碎石	12	1 980	28	0.29	22.7	24.0
强风化凝灰质粉砂岩	10	1 970	45	0.25	30.1	25.5
二次衬砌	0.45	2 300	32 000	0.2		
锚杆		7 800	210 000	0.3		
C20 喷射混凝土	0.26	2 300	21 000	0.2		
C50 钢筋混凝土桩		2 500	34 500	0.2		

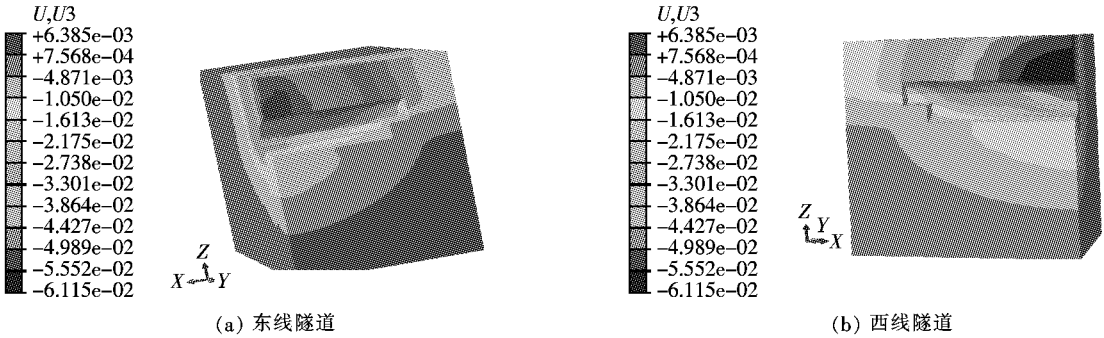


图 2 围岩竖向位移分布(单位:m)

由图 2~4 可知:

- (1) 隧道开挖后拱部上方一定区域内围岩产生向下的位移,最大沉降值发生在拱顶处,约为 -61.1

mm,远超过设计要求的 30 mm。由于穿越桥梁段地层含水率高,隧道开挖施工对地层扰动大,引起较大地层变形,在施工过程中需采取合适的工程措施来控制

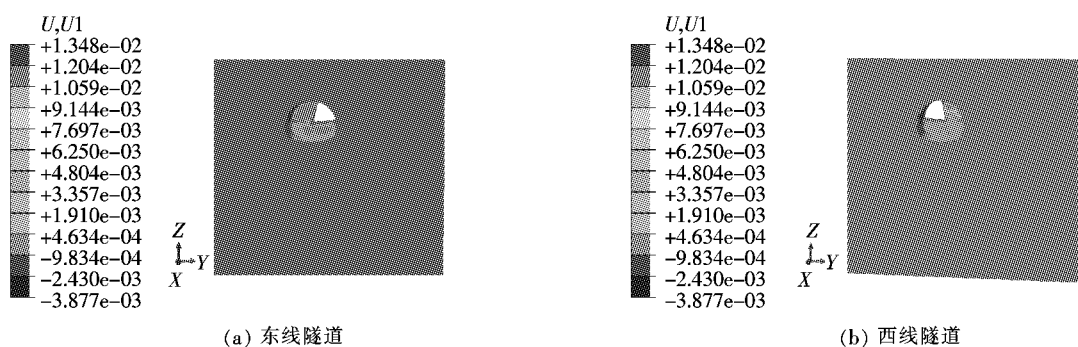


图 3 隧道掌子面挤出位移分布(单位:m)

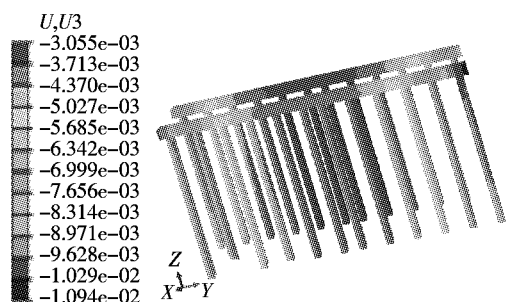


图 4 桥梁桩基沉降变形(单位:m)

地层变形的发展,避免地层变形造成过大的桩基差异沉降,影响桥梁的安全使用。

(2) 在隧道掘进施工过程中,东西线隧道掌子面围岩均产生较大挤出位移,最大挤出位移出现在掌子面核心部位,约为 13.5 mm,挤出位移值较大。因此,在施工过程中,应注意控制掌子面的变形,维持掌子面的稳定,防止出现掌子面失稳坍塌的情况。

(3) 桩基沉降变形在靠近隧道两侧达到最大,向内侧逐渐减小,两侧桩基沉降明显大于中部桩基,最大沉降为-10.9 mm,桩间最大差异沉降为 7.8 mm,大于 4 mm,不满足规范要求,桥梁桩基间差异沉降较大,有可能使桥梁上部结构产生过大结构附加应力,给上部结构的安全使用带来风险。

综上所述,隧道近接桥梁施工过程中应采取适宜的变形控制方案,减小隧道施工地层变形对桥梁桩基的影响,保证桥梁的正常使用,降低施工风险。

#### 4 隧道近接桥桩施工影响控制措施

基于上文数值计算围岩及桥梁桩基变形规律,结合工程地质特点,从隧道地层变形控制及桩基变形控制角度出发,现场拟采用如下施工技术措施:

(1) 为保证桥梁安全,在桥桩与隧道之间布置 2 排直径  $\phi 1\ 000$  mm 高压旋喷桩,加固深度 30 m,加固

宽度 3 m,以隔离阻断隧道施工引起的地层变形向桥桩传播,保证桥桩的摩擦力不受损失,确保桥梁安全。

(2) 在洞内采用超前小导管( $\phi 42$  mm)及超前中管棚( $\phi 89$  mm)对软弱围岩进行加固处理,隧道洞周加固圈厚度为 2 m,以改善围岩质量在隧道拱部形成大刚度的承载拱,从源头上抑制地层变形的发展。

为了讨论现有加固设计方案在设计上是否存在优化的可行性,进一步研究高压旋喷桩加固对桥梁桩基稳定性的影响规律,优化加固参数,以上述仿真模型为基础,在原加固方案基础上(加固宽度 3 m,加固深度 30 m),首先在原方案加固深度不变的情况下,研究加固宽度分别取 1、1.5、2、2.5、3 m 时对桩基变形稳定性的影响(图 5),结合安全性对注浆加固宽度进行优化,得到合理的加固宽度值,然后控制优化后的加固宽度不变,进一步研究加固深度分别取 5、10、15、25、30 m 时对桥梁桩基变形的影响规律(图 6),从经济上 and 安全性考虑对加固深度进行优化。

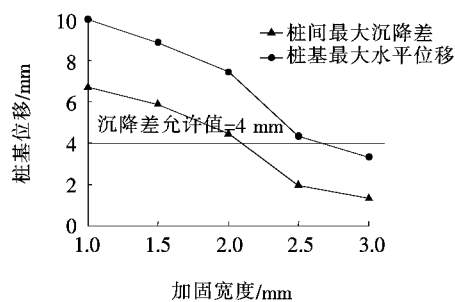


图 5 加固宽度对桩基位移影响

由图 5、6 可知:

(1) 桩基最大沉降差和水平位移随着加固宽度增加而减小,桩基水平位移普遍小于桥梁桩基水平位移允许值(10 mm),因此分析桥梁安全性时主要以桩基沉降差值为依据,桩基水平位移值为辅助依据。隧道开挖完成后,加固宽度为 1、1.5、2、2.5、3 m 下的桩基最大沉降差为 6.5 mm,超过桥梁桩基沉降差允许值 4

mm,加固宽度为 2~2.5 m 时,桩基最大沉降差和水平位移下降最为明显,且在加固宽度为 2 m 时,桩基最大沉降差为 4.5 mm,超过桥梁桩基沉降差允许值 4 mm。随着加固宽度继续增加,桩基最大沉降差和水平位移减小幅度逐渐变小,由 2.5 m 增加到 3 m 变化幅度微小。考虑加固宽度对桩基最大沉降差和水平位移的影响,2.5 m 的加固宽度为加固“极限值”。

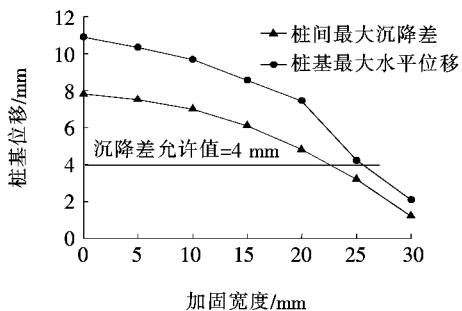


图 6 加固深度对桩基位移影响

(2) 桩基最大沉降差和水平位移随着加固深度增加而减小。隧道开挖完成后,加固深度为 5、10、15、25、30 m 下的桩基最大沉降差为 7.6 mm,最大水平位移为 -10.8 mm。加固深度为 20~25 m 变化时,桩基最大沉降差和水平位移下降最为明显,且在加固深度为 20 m 时,桩基最大沉降差为 5.2 mm,超过桥梁桩基沉降差允许值 4 mm。随着加固深度的继续增加,桩基最大沉降差和水平位移减小幅度逐渐变小,由 25 m 增加到 30 m 变化幅度微小。考虑加固深度对桩基最大沉降差和水平位移的影响,25 m 的加固深度为加固“极限值”。加固宽度的合理取值为 2.5 m 左右,加固深度合理取值为 25 m 左右。

## 5 基于现场实测的施工安全控制效果分析

采用优化后的加固参数应用于实际工程加固,现场对隧道洞周进行加固,隧道洞周加固圈厚度为 2 m,隧道与桥梁桩基之间采用高压旋喷桩加固(加固宽度为 2.5 m,加固深度为 25 m)。

为方便分析隧道施工对桥梁桩基的影响,对桥梁桩基进行编号(图 7),对于桥梁的南北桥墩 4 排桩基,编号自北向南依次为 1~4;对于每排 12 根桩基,编号自东向西依次为 1~12。提取隧道开挖完成时桥桩桩顶沉降和桩基水平位移的监测数据进行分析。为研究方便,对南北桥墩东西最外侧桩基进行编号,南北桥墩

东侧最外侧桩基编号由北向南依次为①~④,西侧最外侧桩基编号由北向南依次为⑤~⑧,提取各桩的监测结果如图 8~10 所示。

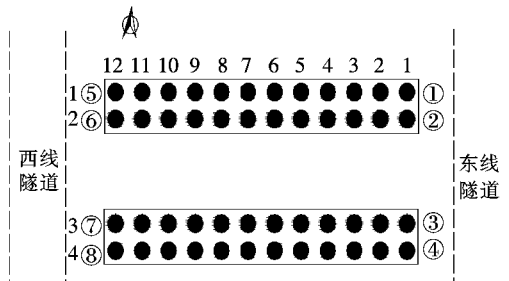


图 7 桩基编号

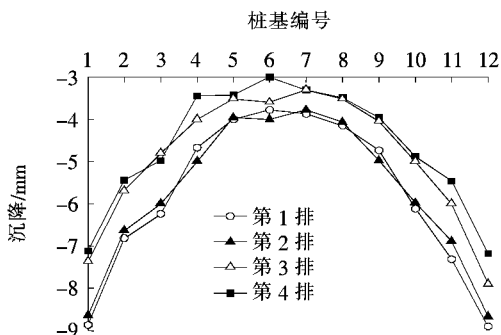


图 8 桩基沉降

由图 8~10 可知:靠近隧道两侧桩基(1、12 号桩基)的沉降值要明显大于内侧桩基的沉降值,桩基最大沉降仅为 -8.9 mm,且发生在北侧桥墩的西侧 12 号桩基。各墩桩间差异沉降由两侧向中间递减,墩桩间最大差异沉降约为 2.2 mm,小于 4 mm,满足规范要求。在隧道施工影响区域内,桩基下部(7 m 至桩底位置)朝向隧道侧水平位移较大,桩基上部几乎无水平向变形,1 号桩 19.5 m 处桩基出现最大水平位移仅为 4.6 mm,小于桥梁桩基水平位移限值 10 mm,满足规范要求。

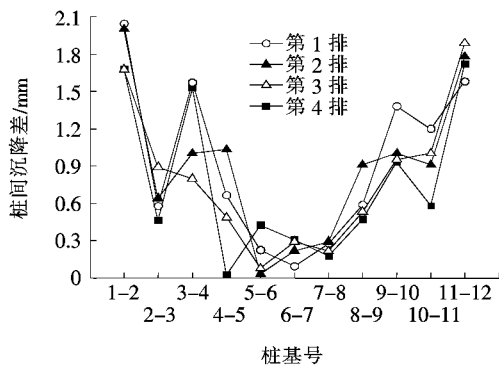


图 9 桩间差异沉降

综上所述,在整个隧道段施工过程中,现场采用的加固措施达到了预期的工程加固效果,有效地控制了

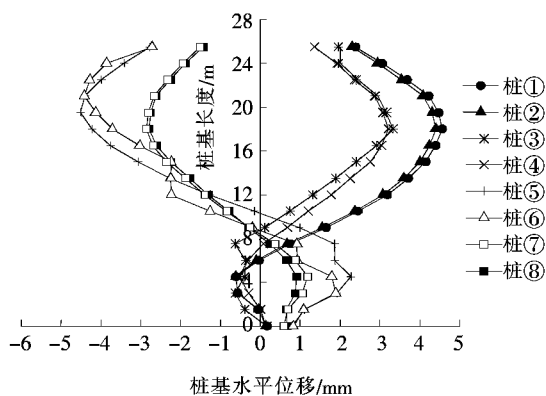


图10 桥桩基水平位移

桩基变形,桥桩变形在安全范围以内。

提取隧道穿越桥梁段施工完成时的桩基变形实测值(桩基沉降和水平位移)与数值计算值对比如图11、12所示。

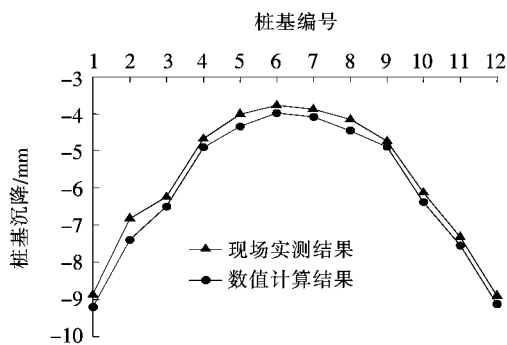


图11 桩基沉降对比

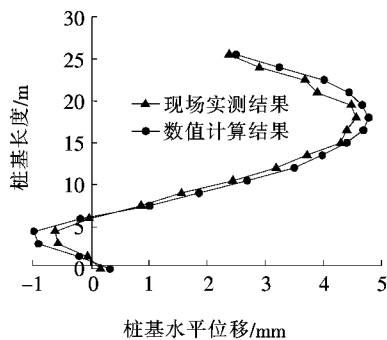


图12 桩基水平位移对比

从图11、12可得:有限元模拟计算桩基沉降值和水平位移值与监测结果比较吻合,且计算结果大于监测结果,说明计算结果较安全且合理,满足工程需要。

## 6 结论

基于Abaqus软件建立桥-隧三维数值计算模

型,对城市公路隧道近接桥梁桩基段施工进行模拟,得到大跨浅埋暗挖公路隧道施工对地层、桥梁桩基变形的影响规律,并研究了高压旋喷桩加固措施对桥梁桩基变形的影响,主要结论如下:

(1) 软弱地层隧道施工对桥梁桩基变形影响较大,靠近隧道两侧桩基变形明显大于中部桩基,且最大桩基差异沉降值远超规范允许值,需采取有效变形控制措施。

(2) 增大高压旋喷桩加固参数(加固深度和宽度)对减小桥梁桩基位移效果较为明显,但加固宽度和深度都存在“极限值”,考虑安全与经济,得到工程合理的加固宽度为2.5 m,合理加固深度为25 m。

(3) 结合现场实测数据,隧道施工完成后,桥梁墩桩间最大差异沉降约为2.2 mm,桩基最大水平位移仅为4.6 mm,桥桩变形在安全范围以内。

## 参考文献:

- [1] 徐长节,陈其志,任凌云.软土地区地铁盾构穿越对城市立交桥的影响分析[J].地下空间与工程学报,2016(3).
- [2] 周正宇.地铁邻近既有桥梁施工影响分析及主动防护研究[D].北京交通大学博士学位论文,2012.
- [3] 吴贤国,张立茂,陈跃庆.地铁施工邻近桥梁安全风险管控研究[J].铁道工程学报,2012(7).
- [4] 周济民.盾构区间隧道下穿高架桥桩基群施工技术与环境预测[J].现代隧道技术,2016(1).
- [5] 刘可玉.富水砂层盾构下穿浅基础桥梁变形规律与控制技术[J].施工技术,2015(s2).
- [6] 刘卫,郭志勇,王树英,等.盾构隧道施工对南昌彭家桥的影响及其控制技术[J].中外公路,2015(2).
- [7] 蒋华春,傅鹤林,梁新权,等.盾构隧道下穿地道桥施工扰动效应及控制对策研究[J].中外公路,2017(2).
- [8] 苏洁.浅埋暗挖法隧道施工对邻近桩基的影响及其控制[D].北京交通大学博士学位论文,2009.
- [9] 高伟,韩昌瑞,许英姿,等.浅埋暗挖隧道对桥梁基础的影响分析[J].公路,2012(11).
- [10] 邓稀肥,陈寿根,张恒,等.富水流砂地层中下穿立交桥及燃气管线隧道围岩变形控制技术[J].现代隧道技术,2010(4).
- [11] 凌同华,李升冉,张胜.偏压条件下隧道近接施工对既有桩基稳定性影响的研究[J].中外公路,2014(1).
- [12] JTG D70-2004 公路隧道设计规范[S].
- [13] JTG D63-2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [14] JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范[S].
- [15] DL/T 5200-2004 水电水利工程高压喷射灌浆技术规范[S].