

# 深厚软土地段施工便道及堆载对高铁桥墩 桩基安全性影响分析

贺坤龙<sup>1</sup>, 李聪林<sup>2</sup>, 许伟<sup>1</sup>, 户东阳<sup>2</sup>

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410000; 2. 中铁二院昆明勘察设计院有限责任公司)

**摘要:**为保证高速列车行驶的平稳性和安全性,高铁桥梁对桥墩墩顶位移等限值有严格规定。深厚软土地段,在施工便道及填土堆载两种情况下,对上述参数产生的影响进入深入研究十分必要。该文结合某实际高速铁路项目,通过选定合理位移限值,并结合 Midas GTS 三维实体软件模拟上述两种工况,从理论上评估其对高铁桥墩、桩基础安全稳定性的影响,为实际工程提供参考。

**关键词:**深厚软土; 施工便道; 堆载; 位移限值

## 1 工程概况

某高速铁路项目,桥址位于深厚软土地段,且桥梁需从大型国际物流园中间穿越,物流园仓储、货物运输及施工过程中公路便道等作业环境将对高铁桥墩、桩基础的安全性产生一定影响。如何较准确地评估此危害成为了非常关键的难题。若影响危及桥梁安全,则需铁路改线绕行,从而无法实现高铁车站和机场站点“零换乘”之理念。目前国内外对深厚软土段高铁桥梁附近堆载的相关报道较少,该文引入 Midas GTS 实体岩土软件进行三维仿真分析。通过确定合理的位移限值,并结合桥址附近情况,模拟桥墩范围施工便道及运营阶段存在的仓储堆载情况,从理论上判断上述工况

对高铁桥墩及桩基安全稳定性的影响,为实际工程提供参考。

高速铁路设计速度为 350 km/h,桥梁位于 0.3g 高烈度地震区,且桥址位于地震活动断裂带影响范围内,因此,该桥梁上部轨道采用有砟轨道设计。该桥长达 1 km 桥址范围地质较差,存在深厚软土,27# 桥墩前、后侧均为 1×32 m 预应力混凝土筒支梁,其桥墩断面软土厚度达 73 m(中间夹 16 m 厚膨胀土及细圆砾土)。

由于堆载情况的存在,土体原有的受力平衡被打破,土体将产生应力重分布现象,将在原有桥墩基础范围产生附加水平力及附加竖向力作用,受力状态见图 1。深厚软土地区,桩基相对较长,水平力将使桩基产生较大的侧向转动变形甚至发生折断的可能。同时,桩基侧向变形将带动桥墩向一侧偏移,墩顶位移过大

\*\*\*\*\*

[2] 谭杰. 富水软弱地层隧道预加固技术与开挖方法研究[J]. 中外公路,2017(2).

[3] 赵志刚,吴忠仕,王伟,等. 大断面浅埋黄土隧道大变形控制技术及其效果分析[J]. 科学技术与工程,2020(6).

[4] 戴永浩,陈卫忠,田洪铭,等. 大梁隧道软岩大变形及其支护方案研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015(S2).

[5] 张龙生,翁贤杰. 富水软弱围岩隧道塌方机理及治理技术研究[J]. 中外公路,2017(1).

[6] 赵伟,雷升祥,肖清华,等. 让压预应力锚索在软岩隧道大变形控制中的作用机制研究[J]. 隧道建设,2019(7).

[7] 李贤,蔡林真. 某软岩隧道变形规律和二衬最佳支护时机选择研究[J]. 中外公路,2019(3).

[8] 中交第一公路勘察设计院有限公司. 云南省文山至麻栗坡高速公路 TJ-3-2 合同段大法郎隧道进口补充地质调查报告[R],2019.

[9] 孙铁军,王伟,罗明睿,等. 不同衬砌结构缺陷对隧道结构整体安全性的影响[J]. 建筑科学与工程学报,2017(3).

[10] 扈世民,张顶立,郭婷,等. 大断面黄土隧道变形特征分析[J]. 铁道学报,2012(8).

[11] 袁晔. 兰新二线大梁隧道高地应力软岩大变形控制技术研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文,2016.

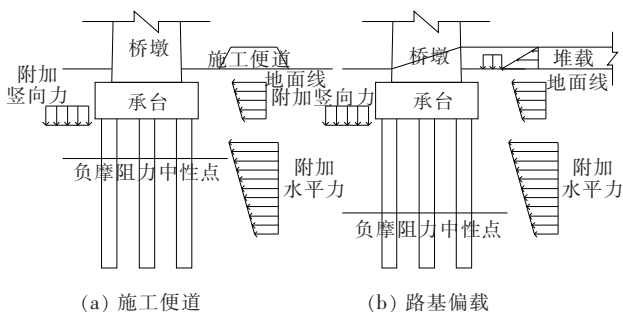


图1 两种工况作用下桥墩、桩基受力图示

将严重影响高速列车的行驶安全性;另一方面,堆载作用将使土体固结下沉,桩土相对滑移,桩基表面产生负摩阻力,进一步降低桩基承载力。

### 1.1 合理的位移限值确定

桥墩顶位移限值基于轨道方向不平顺要求,主要是轨道的静力不平衡问题。目前,国内外规范对桥墩位移限值规定如表1所示。

表1 国内外规范对桥墩位移限值规定

规范	计算项	限值/mm
公路养护技术规范	水平位移	$5\sqrt{L}$
	竖向总沉降	$20\sqrt{L}$
高速铁路设计规范	横桥向位移	0.1%(折角)
	竖向总沉降	20/30
铁路桥涵设计基本规范	横桥向位移	0.15%/0.1%
	顺桥向位移	$5\sqrt{L}$
	竖向总沉降	40/80
地铁设计规范	顺桥向位移	$5\sqrt{L}$
	竖向总沉降	50
德国规范	横桥向位移	0.1%
欧盟规范	横桥向位移	0.15%/0.2%

注: $L$ 为桥梁计算跨径,单位:mm。

由表1可知:不同规范对桥墩顶位移限值不尽相同,列车运行速度成为控制位移参数的一个极其重要指标。高铁列车运行速度极快,桥墩顶横桥向位移受单侧便道车载和堆载影响尤为突出。TB 10621—2014《高速铁路设计规范》中通过给出横桥向位移折角限值,由三角函数近似反算得到桥墩横向位移限值为:

$$\Delta = \frac{L_1 \times L_2}{L_1 + L_2} \alpha = \frac{32 \times 32}{32 + 32} \times 0.001 = 16 \text{ mm}, \text{ 计算图示见图2。}$$

一般情况下,单侧连续堆载的情况较为普遍,局

部相邻桥墩为向同一方向偏移。但由于仓储的不确定性和不规律性,必须考虑相邻桥墩不同侧偏移的不利情况。另外,由于无法准确模拟风力、温度力等工况,且根据反算法的近似性,故墩顶横桥向位移研究时按8 mm控制。该桥为有砟轨道,故竖向位移按TB 10621—2014《高速铁路设计规范》给出数值30 mm控制。由于高铁规范未给出桥墩顶纵桥向位移限值,故参考TB 10002.1—2005《铁路桥涵设计基本规范》及GB 50157—2013《地铁设计规范》,墩顶纵桥向位移按 $5\sqrt{L} = 5\sqrt{32} = 28 \text{ mm}$ 控制。

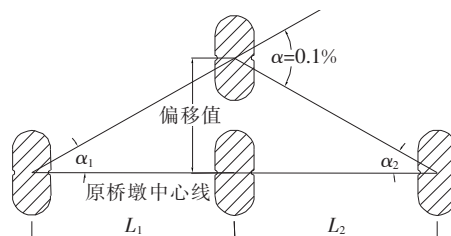


图2 桥墩横桥向位移限值计算示意图

### 1.2 桩基承载力的计算

由于外界工况产生的附加竖向力使桩土产生相对位移,产生不同步沉降,需要计入由此产生的桩侧负摩阻力。桩负摩阻力指桩周土由于自重固结、地面荷载作用等原因,产生大于基桩沉降所引起的对桩表面向下摩阻力。其表现结果为桩基础承载力进一步降低,桥墩基础进一步沉降。根据JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》,负摩阻力计算式为: $q_{si}^n = \xi_m \sigma'_i \leq q_i^n$ 。故桩基础承载力计算式为: $[P] = \frac{1}{2} U \sum q_i l_i + m_0 A [\sigma]$ 。

其中,承载力需考虑由于负摩阻力引起的折减效应。参数具体意义详见相关规范。

## 2 施工便道对桥墩桩基的影响

### 2.1 模型建立

桥址范围为多层厚度不同、性质各异的地层,根据工程地质勘探成果及现场实际情况,将研究区内地层划分为路基填土、软土、松软土、细圆粒土及膨胀土5个类型,共16个土层。地质参数详见表2。模型的空间范围取200 m×200 m×100 m(长×宽×高),桩基础采用16根 $\phi 1.5 \text{ m}$ 摩擦桩。在数值计算过程中,采用软件自带修正莫尔—库仑本构模拟土层,建立桩界面单元模拟桩和土层之间的摩擦滑移。桩、桥墩、承台按弹性本构模拟。

表 2 研究区地层物理力学参数

岩土名称	状态	天然密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	天然快剪		钻孔灌注桩 桩周极限摩 阻力/kPa	基底摩 擦系数	基本承 载力/ kPa	压缩 模量/ MPa
			黏聚力/ kPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )				
软土	软塑	1.68	21.52	9.24	20	—	60	3.22
松软土	软塑	1.87	18.53	9.18	25	0.25	100	5.48
松软土	硬塑	1.66	37.36	12.24	25	0.25	100	3.08
膨胀土	硬塑	1.84	44.73	14.52	50	0.30	150	6.2
细圆砾土	稍密	2.05	—	35.00	70	0.35	200	—

### 2.1.1 施加荷载

恒载: 27<sup>#</sup>墩恒载工况作用下承台底外力为 41 552 kN, 反算至桥墩顶, 以 3D 面单元方式施加。

施工便道荷载: 考虑 1 m 高填方, 路基宽度取 7 m; 便道上方考虑 55 t 重车荷载; 按两个车道满载布置。

### 2.1.2 工况分析

考虑施工便道边缘距离承台边缘 5、10 m 两种工况对桥墩、桩基进行分析。

### 2.2 分析结果

在施工便道距承台边缘 5、10 m 两种工况下计算结果见表 3、图 3。

表 3 施工便道距承台边缘 5、10 m 两种工况下桥墩墩顶位移及限值 mm

项目	工况 1(5 m)			工况 2(10 m)		
	墩顶竖向	墩顶顺桥向	墩顶横桥向	墩顶竖向	墩顶顺桥向	墩顶横桥向
计算位移值	20.5	3.2	-2.5	20.1	3.3	-1.1
限值	30.0	28.0	8.0	30.0	28.0	8.0
是否满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足

注: 表中顺桥向正号为向大里程方向偏, 横桥向正号为远离施工便道偏。

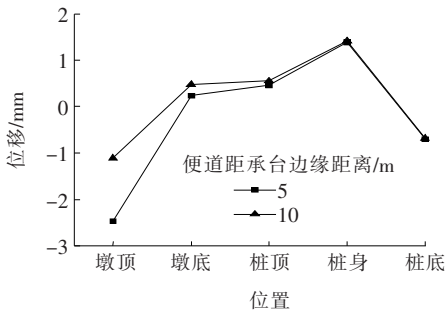


图 3 桥墩、桩基础横桥向位移图

由表 3、图 3 可得到如下结论:

(1) 横桥向位移数值呈递减趋势, 桥墩、桩基础整体横向位移在桩身处为正值 (远离施工便道侧偏), 墩顶、桩底为负值, 桥墩及桩基横桥向整体弯曲弧度呈递减趋势。

(2) 桥墩最大沉降为 20.5 mm 小于有砟轨道规范限值 30 mm; 桥墩顶顺桥向最大位移为 3.3 mm 小于规范限值 28 mm; 桥墩顶横桥向最大位移为 2.5 mm 小于限值 8.0 mm, 满足要求。

(3) 27<sup>#</sup>墩桩基配筋在施工便道距承台边缘 5、10

m 两种工况下, 桩长范围内无负摩阻力出现, 桩基承载力未降低; 桩基截面均处于受压状态, 桩身未出现裂缝; 桩基安全性满足规范要求。

综上, 施工便道距承台边缘 5、10 m 两种工况下, 桥墩墩顶位移及桩基安全性均满足有砟轨道规范限值要求。

## 3 填土堆载对桥墩桩基的影响

### 3.1 模型建立

模型参数同施工便道方案。

#### 3.1.1 荷载

恒载: RBDS 软件计算结果下 27<sup>#</sup>墩主力+附加力工况作用承台底外力为 46 477 kN。反算至桥墩顶, 以 3D 面单元方式施加。

填土堆载: 分别考虑 3、5 m 高填方两种堆载情况。

填土重度按 19 kN/m<sup>3</sup> 计算。

#### 3.1.2 工况分析

(1) 分别考虑填土堆载高度为 3、5 m 两种情况对

桥墩桩基进行计算分析。

(2) 分别考虑堆载边缘距桥墩边缘 0 m(工况 1), 距承台边缘 0、5、10、30、50、70 m(工况 2~7)共 7 种情况对桥墩桩基进行计算分析。

### 3.2 分析结果

限于篇幅,仅列出部分工况下位移数据(图 4~6、表 4~6)。

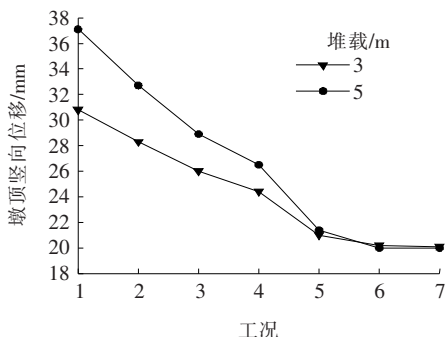


图 4 桥墩顶 Z 向位移图

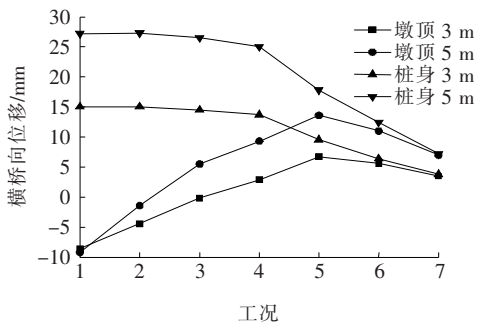


图 5 桥墩顶、桩身横桥向位移图

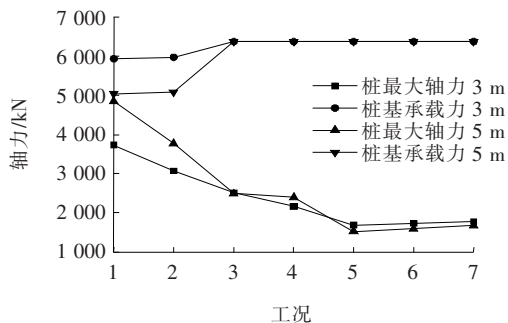


图 6 桩最大轴力和桩基承载力图

由表 4~6、图 4~6 可得到如下结论:

(1) 墩顶竖向位移,由于土层压缩性低,形成墩顶

表 4 堆载 3、5 m 距离桥墩边 0 m 工况下桥墩墩顶位移及限值 mm

项目	距桥墩边缘 0 m—堆载 3 m			距桥墩边缘 0 m—堆载 5 m		
	墩顶竖向	墩顶顺桥向	墩顶横桥向	墩顶竖向	墩顶顺桥向	墩顶横桥向
计算位移值	30.8	3.92	-8.58	37.1	4.6	-9.2
限值	30.0	28.00	8.00	30.0	28.0	8.0
是否满足	不满足	满足	不满足	不满足	满足	不满足

注:表中顺桥向正号为向大里程方向偏,横桥向正号为远离堆载方便偏。下同。

表 5 堆载 3、5 m 距离承台边 30 m 工况下桥墩墩顶位移及限值 mm

项目	距承台边缘 30 m—堆载 3 m			距承台边缘 30 m—堆载 5 m		
	墩顶竖向	墩顶顺桥向	墩顶横桥向	墩顶竖向	墩顶顺桥向	墩顶横桥向
计算位移值	21.0	3.46	6.72	21.4	3.70	13.6
限值	30.0	28.00	8.00	30.0	28.00	8.0
是否满足	满足	满足	满足	满足	满足	不满足

表 6 堆载 3、5 m 距离承台边 70 m 工况下桥墩墩顶位移及限值 mm

项目	距承台边缘 70 m—堆载 3 m			距承台边缘 70 m—堆载 5 m		
	墩顶竖向	墩顶顺桥向	墩顶横桥向	墩顶竖向	墩顶顺桥向	墩顶横桥向
计算位移值	20.1	3.26	3.50	20.0	3.25	6.98
限值	30.0	28.00	8.00	30.0	28.00	8.00
是否满足	满足	满足	满足	满足	满足	满足

位移大于桩底位移的情况。当堆载 3 m 时,距桥墩边缘 0 m 工况墩顶竖向位移为 30.8 mm,已超过有砟轨道规范限值 30.0 mm 要求;堆载 5 m 时,距桥墩边缘 0 m、承台边缘 0 m 工况墩顶竖向位移分别为 37.1、32.7 mm,已超过有砟轨道规范限值 30.0 mm 要求。

(2) 墩顶横桥向位移,为控制设计的一个最重要指标。桥墩、基础横向偏移量随着堆载距离递增从相反方向弯折转化为向同一个方向偏移。当堆载 3 m 时,距承台边缘 30 m 工况墩顶横桥向位移为 6.72 mm,小于限值 8.0 mm;堆载 5 m 时,距承台边缘 70 m 工况墩顶横桥向位移为 6.98 mm,小于限值 8.0 mm。故当填土堆载 3 m 时,应远离承台边缘 30 m 以外,当填土堆载 5 m 时,应远离承台边缘 70 m 以外。

(3) 墩顶顺桥向位移,研究为在横桥向侧堆载,此参数不控制设计。当堆载 3 m 时,最大墩顶顺桥向位移为 4.05 mm,小于规范限值 28.0 mm;堆载 5 m 时,最大墩顶顺桥向位移为 4.7 mm,小于规范限值 28.0 mm,满足规范要求。

(4) 填土堆载厚度为 3 m 时,堆载距桥墩边缘 0 m、距承台边缘 0 m 两种工况下均在桩范围内产生负摩阻力,桩基承载力分别降低约 6.9%和 6.2%;填土堆载厚度为 5 m 时,桩基承载力分别降低约 21.0%和 20.0%,相应地,桥墩位移亦已超过规范限值。

(5) 填土堆载厚度为 3 m 时,桩基最大裂缝宽度为 0.002 4 mm,小于规范限值 0.2 mm;填土堆载厚度为 5 m 时,桩基最大裂缝宽度为 0.03 mm,小于规范限值 0.2 mm。满足规范要求。

综上,故当填土堆载厚度为 3 m 时,堆载边缘应远离承台边缘 30 m 以外;当填土堆载厚度为 5 m 时,堆载边缘应远离承台边缘 70 m 以外,才能满足桥墩墩顶位移限值要求,桩基安全性满足规范要求。

## 4 结论

依据现场实际情况,通过对位于深厚软土地段的高铁桥梁在施工便道和填土堆载两种工况下进行数值模拟研究,得到如下结论:

(1) 施工便道距承台边缘 5、10 m 两种工况下,桥墩墩顶位移及桩基安全性均满足有砟轨道规范限值要求;另外,由于大部分高铁桥梁采用无砟轨道设计,施

工便道距承台边缘 10 m 工况下竖向位移为 20.1 mm,略为超过规范限值 20.0 mm,超过 5‰工程可以接受。故建议软土地段高铁桥梁施工便道设置于承台边缘 10 m 以外。

(2) 根据《铁路安全管理条例》第二十七条,村镇居民区,高速铁路桥梁外侧安全保护区为 15 m。该桥桥面宽 12.6 m,软土段范围承台横向尺寸为 11.5 m,故桥梁安全保护区为距承台边缘 15.55 m。深厚软土地段,高铁桥梁安全保护区范围严禁仓储堆载,安全保护区范围以外进行仓储堆载则需进行安全论证。根据该文研究,当填土堆载厚度为 3 m 时,堆载边缘应远离承台边缘 30 m 以上;当填土堆载厚度为 5 m 时,堆载边缘应远离承台边缘 70 m 以上,才能满足桥墩墩顶位移限值要求。故建议该桥安全保护区范围考虑为桥梁外侧 70 m。

(3) 该文仅按填土重量考虑堆载高度,但由于仓储货物的复杂性,实际仓储堆载时,应根据堆载货物重量等效换算其相应堆载高度。

(4) 由于国内外对深厚软土地段施工便道及堆载对高铁桥墩、桩基安全性研究较少,该文结论可为同类桥梁设计及施工提供参考。

## 参考文献:

- [1] TB 10002—2017 铁路桥涵设计规范[S].
- [2] TB 10092—2017 铁路桥涵混凝土结构设计规范[S].
- [3] TB 10621—2014 高速铁路设计规范[S].
- [4] 张礼财. 堆载作用下既有桥梁群桩基础承载特征分析[D]. 西南交通大学硕士学位论文,2015
- [5] 黄珏鑫. 邻近堆载对深厚软土地区高速铁路桥梁桩基内力与变位影响分析[D]. 中南大学硕士学位论文,2014.
- [6] 郭新伟. 高速铁路桥墩墩顶横向水平位移控制值算法的研究[J]. 铁道标准设计,2012(3).
- [7] 高世强. 高速铁路桥梁桥下新建公路工程的安全性分析[J]. 铁道标准设计,2015(4).
- [8] 董亮,等. 大面积单侧堆载对高速铁路桥梁墩台影响的数值分析[J]. 铁道建筑,2015(1).
- [9] 朱先锋. 大面积堆载引起高铁桥基变形处理对策研究[J]. 铁道建筑技术,2015(12).
- [10] 任文峰. 深厚软土地地区高速铁路桥梁沉降规律及修正等代墩基法计算沉降[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2013(1).