

# 软土地区市政道路并行及下穿在建城际铁路桥梁的影响分析

陈刚

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

**摘要:**结合珠三角软土地区市政道路并行及下穿在建广佛环城际铁路高架桥的影响分析,确定了道路工程涉铁范围内的设计方案和控制目标,并采用有限单元法分析了道路设计方案在实施过程中对城际铁路桥梁的影响。结果表明:道路需在无砟轨道工程施工前实施,在无砟轨道施工时需结合现场监测数据对下部结构非弹性变形进行补偿。对高填路堤段提出两项补充措施:并行侧路基采用挡墙收坡,避免路基本体土压覆桥梁承台;为减小路基填土荷载,路基填土采用轻质泡沫混凝土。施工期间对铁路线下工程等实施全过程监控,分析监测数据,预测变形趋势,指导施工。

**关键词:**软土;并行及下穿工程;城际铁路;桥梁;桩板结构

随着中国社会经济和新型城镇化发展,交通事业得到快速发展,新建或改建公路和市政工程并行及下穿城际铁路的数量日益增多,尤其在软土地区后建并行及下穿道路工程对高速铁路的安全影响是道路工程设计方案的主要控制因素之一,由于道路设计方案和施工方案未充分考虑对高速铁路的影响,也发生过对既有铁路运营安全产生影响的工程事例。杨贵永等分析研究了地铁区间隧道下穿对桥梁的影响,文献[7]数值模拟研究了梁桥结构下穿软土区高铁桥梁;邓会元对不同平衡堆载条件下桩基承载特性进行了原位试验研究。

该文依托珠三角地区某市政道路并行及下穿在建广佛环城际铁路高架桥工程,通过数值模拟分析软土地区后建道路对广佛环城际铁路高架桥的影响,以确定合理的道路路基地基处理方案,对道路设计方案及实施提出合理化建议。

## 1 地质条件及工程概况

### 1.1 地质条件

桥址区上部为第四系全新统人工填筑、第四系全新统海陆交互沉积的粉质黏土、淤泥质土、淤泥、粉土及砂类土,下伏下第三系始新统砂岩、泥岩。不良地基主要为:场地地表普遍分布人工填土,成分主要为建筑垃圾,含有少量的粉质黏土,其性状不均,结构松散;场

地内广泛分布有淤泥、淤泥质土,层厚1~18.1 m,呈流塑状,具有高孔隙度、高压缩性、高富水性、低透水性和富含有机质等特征,以及触变性、流变性等工程性能,属强度低、抗滑及稳定性差、变形量大、承载力低的软弱地基土。

### 1.2 工程概况

广(州)佛(山)环城际铁路为在建双线城际铁路,速度目标值为200 km/h,道床结构为无砟轨道。市政道路工程西侧道路路基与广佛环城际铁路高架桥(1<sup>#</sup>墩~12<sup>#</sup>墩)单侧并行,规划五路及规划三路路基分别下穿广佛环城际铁路高架桥1<sup>#</sup>~2<sup>#</sup>墩和8<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>墩。西侧并行道路为双向两车道,城市支路。两处下穿道路为双向四车道,城市次干道。拟建市政道路工程实施时,广佛环城际铁路已完成主体结构的施工,无砟轨道工程还未实施。

西侧并行道路红线与广佛环城际铁路高架桥承台的净距约为2 m,填土高度1~4 m。规划五路斜交下穿广佛环线,道路中心与广佛环线法向夹角为1°;下穿规划五路行车道边与广佛环线承台的最小净距:与1<sup>#</sup>墩承台临近,距2<sup>#</sup>墩3.52 m。规划三路斜交下穿广佛环线,道路中心与广佛环线法向夹角为17°;规划三路行车道边与广佛环线承台的最小净距距8<sup>#</sup>墩2.0 m、距9<sup>#</sup>墩2.08 m。下穿处桥下净空约为20 m。

广佛环城际铁路高架桥1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>墩、5<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>墩桥

梁上部结构为(4×32) m 双线预应力混凝土连续梁结构,采用支架现浇施工;墩身结构采用矩形钢筋混凝土桥墩;基础采用钻孔桩基础,摩擦桩(桩径:边墩  $\phi 125$  cm、主墩  $\phi 150$  cm)。广佛环城际铁路高架桥 9<sup>#</sup>~12<sup>#</sup>墩上部结构为(32+56+32) m 双线预应力混凝土

连续梁结构,采用悬臂浇筑施工;墩身结构采用矩形钢筋混凝土桥墩;基础采用钻孔桩基础,摩擦桩(9<sup>#</sup>边墩桩径  $\phi 125$  cm、主墩桩径  $\phi 150$  cm,12<sup>#</sup>边墩顺接斜拉桥,桩径  $\phi 200$  cm)。平面位置关系见图 1,桥梁立面见图 2。

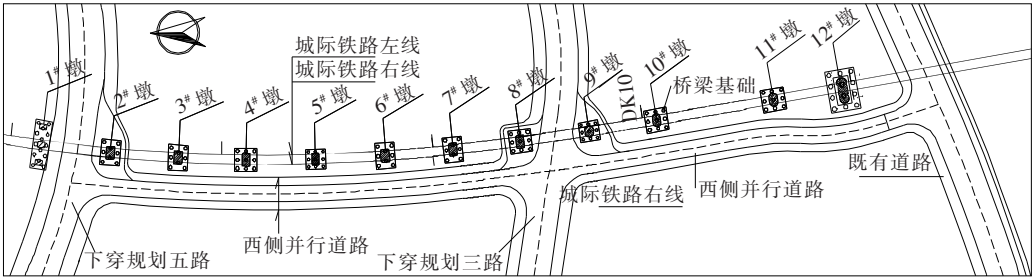


图 1 平面位置关系图

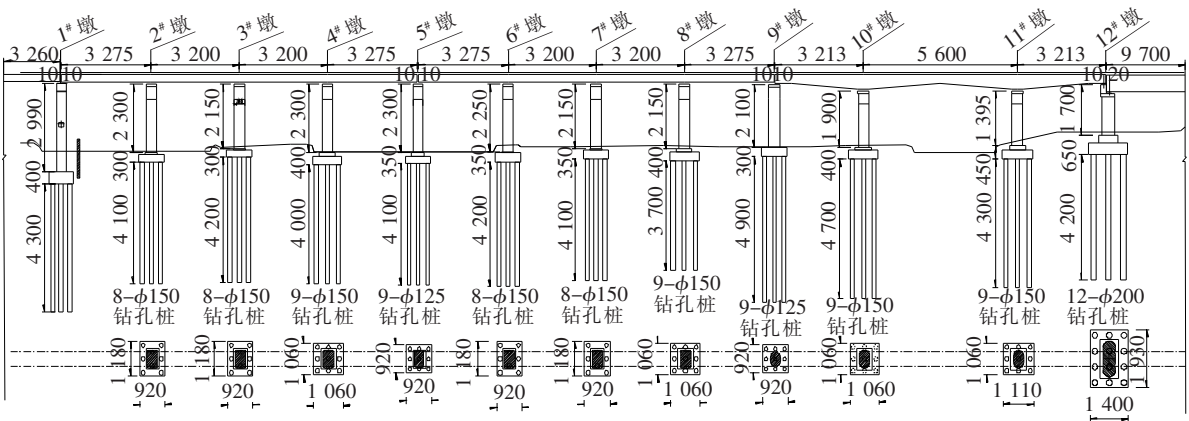


图 2 道路影响段桥梁立面图(单位:cm)

2 拟定道路路基设计方案

2.1 控制标准及主要影响因素

广佛环城际铁路最高设计时速 200 km/h,铺设无砟轨道,运营期间高速行车时对轨道平顺性有较高要求,因而对结构受力、沉降及变形要求较高。桥梁结构弹性变形、强度等需满足铁路行业相关规范规定的要求;新建道路对广佛环城际铁路运营期的影响需满足 TB 10182—2017《公路与市政工程下穿高速铁路技术规程》的要求。拟建道路桥梁结构的影响主要有以下 3 个方面。

2.1.1 桥梁结构弹性变形满足规范要求

- (1) 墩顶弹性横向水平位移:当设计速度为 200 km/h 时,梁端水平折角不应大于 1.0‰rad。
- (2) 墩台均匀沉降≤20 mm,相邻墩台沉降差≤10 mm(简支梁),连续梁相邻墩台沉降差≤5 mm(连

- 续梁)。
- 2.1.2 受下穿工程影响的高速铁路桥墩墩顶位移限值(运营)  
轨道结构为无砟轨道,受下穿工程影响的高速铁路桥梁墩台顶位移限值:墩顶横向水平位移≤2 mm、墩顶纵向水平位移≤2 mm、墩顶竖向位移≤2 mm。
- 2.1.3 桥梁结构强度满足规范要求  
路堤形式修建的道路,对铁路桥梁影响为软弱土层在路堤填土荷载作用下产生沉降和侧向挤压变形,这两种影响同时发生、相互影响,见图 3。  
(1) 软土地区大面积填土作用下,桩周土沉降使铁路桥梁桩基上部承受负摩阻作用,使桩基产生非均匀沉降。  
(2) 单侧偏载作用下,桥梁桩基在两侧土压力差作用下产生远离道路方向的水平位移。
- 2.2 拟定道路路基并行及下穿城际铁路方案  
淤泥及淤泥质土,抗剪强度低、灵敏度高、压缩性

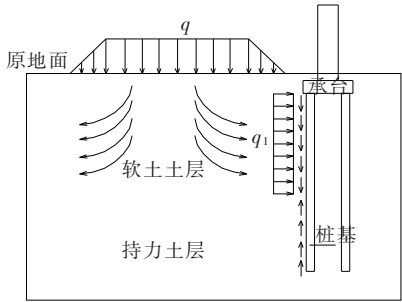
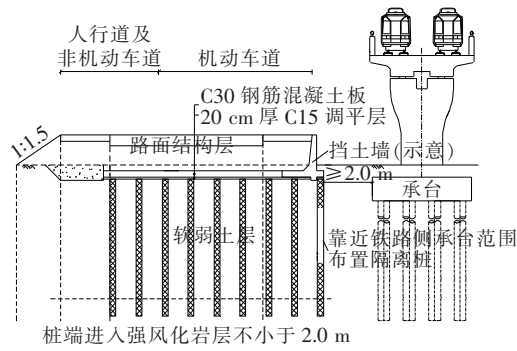


图 3 路堤填土荷载作用下桩土相互作用示意图

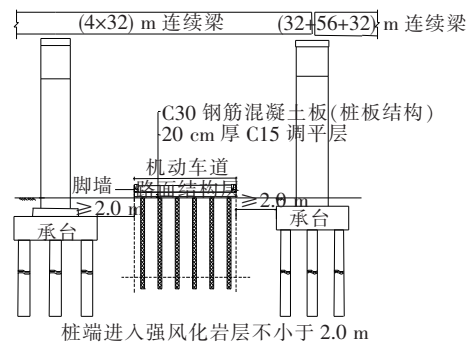
大,颗粒间的结构受到扰动会使土体抗剪强度降低,压缩性增大,从而使土层发生滑移,引起较大沉降,发生“触变现象”,故临近工程需采用对地基土扰动较小的地基处理措施。结合工程场地地质条件、相互平面位置关系、高程关系、施工条件、规划要求等,提出了 3 种道路设计方案(主要针对地基处理措施)见图 4,并进行了综合比选,见表 1。

综合规划、施工净空、施工场地、水文、地质条件等边界条件,为减小道路单侧并行及下穿对广佛环城际铁路高架桥的影响,推荐采用“方案 1”。该方案拟建道路地基处理措施采用桩板结构形式,桩基伸入持力层。该结构通过板结构将路基填土荷载及道路运营期活载传递到桩体,桩体把荷载扩散到桩间土及持力层,

可减小路基填土压力和土体变形对广佛环城际铁路下部结构的影响。



(a) 并行段地基处理示意图



(b) 下穿段地基处理示意图

图 4 临近城际铁路道路设计方案

表 1 道路设计方案综合比选

方案 编号	道路设计方案			方案说明	存在问题
	平面关系	道路地基处理方案	道路临近铁 路侧防护		
1	道路西侧单侧并行 城际铁路	桩板结构施工	高填段:挡墙收 坡	经桩板结构将路基本体 及活载传到桩体,桩体 把荷载扩散到桩间土及 持力层,减小路基填土 压力和土体变形对城际 铁路桥墩的影响	道路单侧偏载影响较大,需采取 较强的工程措施
2	道路西侧单侧并行 城际铁路,东侧采用 填土与西侧道路等 高	城际铁路承台 及两侧一定范 围采用搅拌桩, 其余采用换填	高填段:城际铁 路承台周围采 用隔离桩	减小了道路单侧偏载 作用	为避免偏载,两侧填土工程需同 步实施,由于规划原因无法保证 两侧工程同步实施;道路相邻段 采用刚度差异较大的两种地基 处理措施,对道路运营不利
3	道路西侧单侧并行 城际铁路,东侧采用 填土与西侧道路等 高	换填	铁路承台周围 设置隔离桩	减小了道路单侧偏载 作用;道路沉降较大; 隔离桩作为被动保护 措施	为避免偏载,两侧填土工程需同 步实施,但由于规划原因无法保 证两侧工程同步实施;临近高架 基础进行大量的隔离桩施工,施 工过程需进行严格的风险控制

3 数值模拟及确定方案

拟建模型主要考虑新建道路对广佛环城际铁路桥梁结构的影响,其受力呈现出明显的空间受力特性,须进行空间结构有限元分析。模型的建立以分析结构的实际空间位置、尺寸、材料特性、连接方式、荷载条件等影响为依据,在此基础上进行大规模足尺模型分析,由此得到详尽、准确、可靠的分析结果。根据拟定道路路基并行及下穿城际铁路方案,分类整理各工点类型、填土高度及相互影响程度,分别选取高填下穿段和高填并行段进行检算。

3.1 计算参数

计算分析采用大型有限元通用分析软件 Midas GTS 程序,空间分析模型的建立主要考虑如下原则:

- (1) 尽量按结构实际状态模拟,如实反映结构形状和尺寸的变化。
- (2) 单元类型:结构和土体采用实体单元,桩基采用桩单元。
- (3) 本构关系:计算过程中,土体应力应变的本构理论采用莫尔—库仑模型;其余构件采用线弹性模型;桩基采用桩单元模拟。
- (4) 约束条件:地表面为自由面,模型四周约束法向水平位移,底面约束 3 个方向位移。
- (5) 保证求解精度和速度的前提下,取用适当简化的模型(公路及填土荷载采用面荷载)。
- (6) 分析中未考虑混凝土的徐变因素。
- (7) 岩土参数取值见表 2。

3.2 计算模型

采用实体有限元模型分析道路施工阶段和运营荷载对城际铁路桥梁结构的影响。

表 2 岩土主要参数建议值

岩土名称	天然密	压缩	黏聚	内摩	泊松比	变形
	度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	模量/ MPa	力/ kPa	擦角/ (°)		模量/ MPa
素填土	1.89	2.6	5.0	23.0	0.33	9
粉砂	1.80	8.0		30.0	0.25	10
淤泥	1.50	1.5	5.3	4.9	0.37	5
淤泥质土	1.56	2.7	8.3	5.9	0.37	5
粉质黏土	2.00	4.5	14.4	12.4	0.29	10
全风化岩	1.90	6.8	28.0	24.0	0.30	60
强风化岩	2.43	—	50.0	26.0	0.28	120
弱风化岩	2.55	—	200.0	35.0	0.23	150

计算荷载包括桥梁相对加台顶以上路基填筑荷载,道路活载等;施工阶段主要包括道路桩板结构施工、人行道换填施工、路基本体填筑、道路活载影响等。

3.3 对城际高架桥下部结构位移影响分析

桥区淤泥软土层较厚,在后填土作用下土体会产生很大的固结沉降,使桩基产生非均匀沉降;另该桥并行段为单侧堆载,产生土拱效应,对桩基水平位移影响较大,随着堆载距离减小,桩基侧移增长幅度较大。按照道路工程拟定的设计方案和施工步骤,采用实体有限元模型进行了详细的施工阶段分析(含运营阶段)。经初步分析,道路路基高填段处桥梁结构变形较大、桥梁结构单桩承载力接近限值,故路堤高填段建议补充两项措施:① 并行侧路基采用挡墙收坡,避免路基本体土压覆桥梁承台;② 为减小路基填土荷载,路基填土采用轻质泡沫混凝土。调整模型后重新计算道路实施过程中各阶段对城际铁路桥梁下部结构产生的变形值,主要计算结果见表 3、4。

表 3 城际高架桥 8#、9# 墩下部结构位移(道路下穿)

施工阶段	墩顶位移/mm						桩底竖向	
	顺桥向水平位移		横桥向水平位移		竖向位移		位移/mm	
	8# 墩	9# 墩	8# 墩	9# 墩	8# 墩	9# 墩	8# 墩	9# 墩
桩板结构施工	0.85	-0.44	-0.43	-0.11	—	—	—	—
人行道开挖换填	2.33	-1.23	4.60	5.30	—	—	—	—
路基填土	2.70	-2.60	-2.20	-0.90	-2.20	-2.10	-2.40	-2.10
道路运营	3.40	-3.50	-3.10	-1.20	-3.00	-2.80	-3.00	-2.80



表 4 城际高架桥 11#墩下部结构位移(道路并行)

施工阶段	墩顶位移/mm			桩底竖向位移/mm
	顺桥向水	横桥向水	竖向	
	平位移	平位移	位移	
桩板结构施工	-0.02	-2.06	-	-
人行道开挖换填	-0.01	-1.53	-	-
路基填土	0.08	-4.37	-3.80	-3.30
道路运营	0.11	-5.04	-4.40	-3.90

3.4 对城际高架桥桩基影响分析

由于淤泥软土层较厚,在后填土作用下土体会产生很大的固结沉降,需考虑负摩阻力对桥梁桩基的影响;该桥并行段为单侧堆载,对桩基水平方向产生侧向挤压作用,产生附加弯矩和剪力,并随堆载作用增大而

增大。通过实体模型分析,计算了新建道路运营期对桥梁结构基础产生的附加内力,由于各墩均采用群桩基础,角桩受力最不利,角桩附加内力汇总见表 5、6。

基础在原设计基础上考虑附加内力和负摩阻力影响下,按 TB 10093—2017《铁路桥涵地基和基础设计规范》进行基础检算,经检算单桩承载力和桩身强度均满足要求(表 7)。

3.5 确定道路路基并行及下穿方案

按照拟定的道路路基并行及下穿城际铁路方案,对城际铁路高架桥的影响进行了详细分析。根据 TB 10182—2017《公路与市政工程下穿高速铁路技术规程》要求,当轨道结构采用无砟轨道时,受下穿工程影响的高速铁路桥墩墩顶位移限值(运营)为:墩顶横向水平位移、纵向水平位移、竖向位移均≤2 mm。

表 5 城际高架桥 8#、9#墩角桩附加内力(道路下穿)

墩号	角桩桩顶最大轴向力/kN	顺桥向弯矩最大					横桥向弯矩最大				
		桩身顺桥向最大弯矩/(kN·m)	桩身顺桥向最大平力/kN	桩身横桥向最大平力/kN	桩身横桥向最大大弯矩/(kN·m)	桩身最大弯矩处相向力/kN	桩身顺桥向最大平力/kN	桩身顺桥向最大弯矩/(kN·m)	桩身横桥向最大平力/kN	桩身横桥向最大大弯矩/(kN·m)	桩身最大弯矩处相向力/kN
	桩身顺桥向水平力/kN										
8#	59.4	96.6	147.4	74.4	191.3	268.0	96.6	147.4	74.4	191.3	268.0
9#	226.0	34.0	115.0	66.0	67.6	111.6	72.2	78.5	37.7	142.6	-12.8

表 6 城际高架桥 11#墩角桩附加内力(道路并行)

角桩桩顶最大轴向力/kN	顺桥向弯矩最大					横桥向弯矩最大				
	桩身顺桥向最大弯矩/(kN·m)	桩身顺桥向最大平力/kN	桩身横桥向最大平力/kN	桩身横桥向最大大弯矩/(kN·m)	桩身最大弯矩处相向力/kN	桩身顺桥向最大平力/kN	桩身顺桥向最大弯矩/(kN·m)	桩身横桥向最大平力/kN	桩身横桥向最大大弯矩/(kN·m)	桩身最大弯矩处相向力/kN
297.1	9.3	137.9	63.2	171.4	149.5	9.3	137.9	63.2	171.4	149.5

表 7 单桩承载力检算结果(主力,控制荷载组)

设计方案	考虑附加力单桩承载力/kN	允许单桩承载	是否满足要求	考虑附加力后混凝土压应力/MPa	考虑附加力后钢筋应力/MPa	混凝土允许压应力[σ <sub>h</sub> ]/MPa	钢筋允许应力[σ <sub>g</sub> ]/MPa
道路	8#墩	6 953.7	7 134.2	满足	4.61	52.50	13.5(满足)
下穿	9#墩	5 240.0	5 502.0	满足	5.14	70.44	13.5(满足)
道路并行	11#墩	7 401.8	7 691.7	满足	4.41	55.60	13.5(满足)

由于道路设计方案确定时广佛环城际铁路高架桥已完成梁部施工,还未进行桥面无砟轨道工程施工,故道路的施工工序存在以下两种工况。

(1) 工况 1:道路工程在广佛环城际铁路无砟轨道

施工后实施。

(2) 工况 2:道路工程在广佛环城际铁路无砟轨道施工前实施。

两种工况下墩顶变形对比分析见表 8。

表8 墩顶位移对比

工况	道路下穿广佛环城际铁路			道路并行广佛环城际铁路		
	8#(9#墩)	8#(9#墩)	8#(10#墩)	11#墩墩顶顺	11#墩墩顶	11#墩墩
	墩顶顺桥向水 平位移/mm	墩顶横桥向水 平位移/mm	墩顶竖向 位移/mm	桥向水平 位移/mm	横桥向水平 位移/mm	顶竖向位 移/mm
1	3.4(-3.5)	-3.1(-1.2)	-3.0(-2.8)	0.11	-5.04	-4.4
2	0.7(0.9)	0.9(0.3)	0.8(0.7)	0.03	0.67	0.6

注:括号内数值为9#墩相应值。

从表8可知:

(1) 在工况1时,由于道路施工对桥梁基础产生堆载、挤压作用会使城际铁路桥墩产生非弹性变形,进而影响无砟轨道的平顺性,按规范要求,墩顶各项位移需控制在2 mm以内(非弹性变形)。表8中仅9#墩墩顶横桥向位移满足要求,其余均不满足要求。

(2) 在工况2时,道路在无砟轨道施工前实施,根据现场监测数据在无砟轨道施工时通过调整轨道板厚度进行非弹性变形补偿,此时按结构工后位移控制设计,各向位移均满足要求。

道路工程地基处理采用桩板结构等措施是合理的,可以有效控制道路在运营期对城际铁路桥梁的影响;结合数值分析结果,建议道路工程在广佛环城际铁路无砟轨道施工前实施,无砟轨道实施时根据现场监测数据进行位移补偿。

### 4 结论

(1) 道路工程并行及下穿广佛环城际铁路高架桥的设计方案确定与工程建设时序、工程特点、水文地质条件、施工方案等密切相关,尤其软土具有“触变现象”,故后实施道路工程并行及穿越广佛环城际铁路时需充分考虑其设计、施工、运营期对广佛环城际铁路安全的影响。

(2) 分别分析了道路工程在“广佛环城际铁路无砟轨道工程施工后实施”和“道路工程在广佛环城际铁路无砟轨道工程施工前实施”两种工况下结构位移对广佛环城际铁路变形的影响,提出道路需在无砟轨道工程施工前实施,并根据现场监测数据在无砟轨道施工时对下部结构非弹性变形进行补偿,此时下部结构工后位移满足规范要求。

(3) 通过数值分析,路基地基处理措施采用桩板结构方案是合理的。结合检算情况对路堤高填段建议补充采取了两项措施,即并行侧路基采用挡墙收坡,避

免路基本体土压覆桥梁承台;另外为减小路基填土荷载,路基填土采用轻质泡沫混凝土。

(4) 广佛环城际铁路该段桥梁上部结构为连续梁结构,基础非均匀沉降将使结构产生次内力。由于桥梁桩底位于弱风化泥岩,该岩层压缩变形量较大,对铁路桥梁桩基影响较小,数值计算结论与其一致。

(5) 道路实施前需编制专项监测大纲。由于理论计算与实际情况不可避免存在差异,施工期间应委托有铁路工程监测资质的第三方对铁路线下工程等实施全过程监控,进行详细准确的施工监控,及时分析监测数据,预测变形趋势。

### 参考文献:

[1] TB 10182—2017 公路与市政工程下穿高速铁路技术规范[S].

[2] 广南高工段安函〔2017〕421号. 广州高铁工务段关于肇庆市鼎湖大道公路改造施工地段广佛肇城际铁路限速运行的函[Z],2017.

[3] 杨贵永,李晓文,易领兵. 佛山市地铁区间隧道下穿施工对佛开高速桥影响的数值分析[J]. 中外公路,2018(5).

[4] TB 10092—2017 铁路桥涵混凝土结构设计规范[S].

[5] TB 10632—2014 城际铁路设计规范[S].

[6] TB 10093—2017 铁路桥涵地基和基础设计规范[S].

[7] 杨菲. 桩板及空心板梁桥结构下穿软土区高铁桥梁的数值模拟研究[J]. 公路,2017(11).

[8] 王瑗琳. 高速铁路桩板结构路基设计有关问题研究[J]. 路基工程,2016(4).

[9] 隋孝民,许志勇. 桩板结构在强发育岩溶无砟轨道中的应用研究[J]. 铁道工程学报,2015(4).

[10] 邓会元,戴国亮,等. 不同平衡堆载条件下桩基承载特性的原位试验研究[J]. 岩土力学,2015(11).

[11] 杨敏,朱碧堂. 超载软土地基被动加固控制邻近桩基侧向变形分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004(11).

[12] 张玺彦,雷胜友. 堆载滑动对桥墩与桩基础的影响分析[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2017(2).