

文章编号:1005-0523(2017)05-0012-09

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

杨 菲

(山西省交通科学研究院,山西 太原 030006)

摘要:道路下穿高铁桥梁施工会使高铁桥梁桥墩产生过大位移,可能会影响铁路的安全。针对道路下穿高铁桥梁施工对高速铁路的影响,以丹阳市区至滨江新城快速通道下穿京沪高速铁路张巷特大桥工程为背景,利用 Plaxis 岩土工程有限元软件进行三维施工模拟,并将计算结果输入利用 ABAQUS 通用有限元软件建立的高速铁路桥上无砟轨道精细化模型,从而评估新建桩板及空心板梁桥下穿高铁桥梁方案施工对京沪高铁桥上无砟轨道的影响。计算结果表明,桩板结构与空心板梁桥方案对高铁的影响均满足结构保护及运营安全要求。

关键词:道路;市政工程;下穿施工;高铁桥梁;数值分析

中图分类号:U213

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.05.003

随着高速铁路网络的完善,城市道路下穿高铁桥梁的情况也越来越多。新建道路施工会改变高铁桥梁周边土体的应力场,造成周围土体的扰动,从而使高铁桥梁桥墩产生过大位移,鉴于高速铁路对线路平顺性要求较高,过大的位移可能会影响铁路的运营安全^[1-4]。基于规范及铁路相关保护部门规定,为保证高铁桥梁的运营安全,新建道路须尽量下穿高铁桥梁,新施工钻孔桩距既有高铁桥梁钻孔桩间距大于6倍桩径,道路边缘距离高铁桥墩的净距不得小于2.5 m,同时须设SS级防撞墙,高速铁路桥下通行净空原则上大于5 m^[5]。目前,新建道路下穿高铁桥梁主要有路基方案、“U”形槽方案、桩板结构方案、桥梁方案等^[1,2,4,6]。桩板结构方案、桥梁方案对高铁桥梁影响较小,因而在软土地区使用较多。

为了保障高铁运营安全,极有必要对道路下穿高铁桥梁方案进行安全评估,选择合理的施工方案及措施,从而减小道路下穿施工对高铁桥梁的影响。本文以江苏省丹阳市区至滨江新城快速通道下穿京沪高速铁路张巷特大桥工程为例,采用三维有限元数值模拟方法,对新建道路的桩板及空心板梁结构下穿高铁桥梁方案进行施工安全研究。

1 工程概况

丹阳市区至滨江新城快速通道起自丹桂路东延段与站前路交叉处,止于南环路与丹东公路交叉处,路线全长15.271 km。根据规划方案,丹阳市区至滨江新城快速通道(以下简称“滨江快速通道”)下穿京沪高速铁路张巷特大桥37#~39#桥墩,滨江快速通道大致于京沪高速铁路DK1120+213.70里程处与高铁线路相交,下穿段为双向六车道,设计速度100 km/h。京沪高铁设计速度为380 km/h,既有京沪高铁张巷特大桥桥址位于坳谷地貌,地面平坦,地势开阔,桥梁全长1 330.96 m。京沪高铁张巷特大桥为32 m后张法预应力混凝土双线简支箱梁,双柱墩,空心台,基础采用桩径为1 m的钻孔灌注桩基础,轨道结构型式为无缝线路的无砟轨道,线间距为5 m。滨江快速通道下穿京沪高铁张巷特大桥位置实景图见图1,下穿处京沪高铁墩台基本情况见表1。

收稿日期:2017-03-31

作者简介:杨菲(1980—),男,高级工程师,硕士,研究方向为交通运输。



图 1 下穿位置实景

Fig.1 The real scene of the construction location

表 1 桥梁墩台基本情况

Tab.1 Basic information of the bridge piers

墩号	墩顶标高/m	厚度/m	桩基
37#	14.348	2	8φ100 cm 钻孔灌注桩 49 m 长
38#	14.348	2	8φ100 cm 钻孔灌注桩 47.5 m 长
39#	14.348	2	8φ100 cm 钻孔灌注桩 48 m 长

拟建场地地面平坦、地势开阔,周边土地尚未开发。施工场地地层从上自下主要为粉质黏土、粉土、淤泥质粉质黏土、含砾粉质黏土及泥质粉砂岩等;地层物理力学指标见表 2。

表 2 土层物理力学性质指标表

Tab.2 Physical and mechanical properties of soil

土层名称	内摩擦角 $\Phi/$ ($^{\circ}$)	黏聚力 $C/$ kPa	压缩模量 $Es/$ MPa	泊松比 μ
① 粉质黏土	10	10	10	0.25
①-1 粉土	10	7	12	0.28
②-1 淤泥质粉质黏土	10	15	9	0.3
②-3 粉质黏土	15	10	13	0.25
③-2 黏土	20	25	15	0.25
③-3 含砾粉质黏土	25	10	25	0.25
④-1 全风化泥质粉砂岩	38	2	80	0.22
④-2 强风化泥质粉砂岩	38	2	240	0.20
④-3 弱风化泥质粉砂岩	38	2	340	0.18

2 道路下穿高铁方案

根据规划,丹阳市区至滨江新城快速通道下穿京沪高铁张巷特大桥 37#~39# 桥墩段为双向六车道,设计速度 100 km/h,设计荷载为公路 Ⅰ级。根据平面线位走向,滨江快速通道在京沪高速铁路张巷特大桥 37#~39# 桥墩之间下穿。根据下穿张巷特大桥形式不同,拟建设计方案为新建桩板结构下穿方案及新建空心板梁桥下穿方案。

2.1 桩板结构下穿方案

桩板结构下穿方案见图 2,在原地面上新建混凝土桩板结构,分两幅布置,左、右幅桩板均宽 20 m。右幅公路防撞墙外侧与 38# 墩台最小距离为 2.08 m,与 38# 墩台上桥墩最小距离为 3.70 m;左幅公路防撞墙外侧与 38# 墩台最小距离为 1.88 m,与 38# 桥墩台上桥墩最小距离为 3.50 m。公路防撞墙外侧与桥墩墩身距离均大于 2.5 m,桩板结构桩基与高铁桥 38# 墩既有桩的最小距离为 6.17 m。

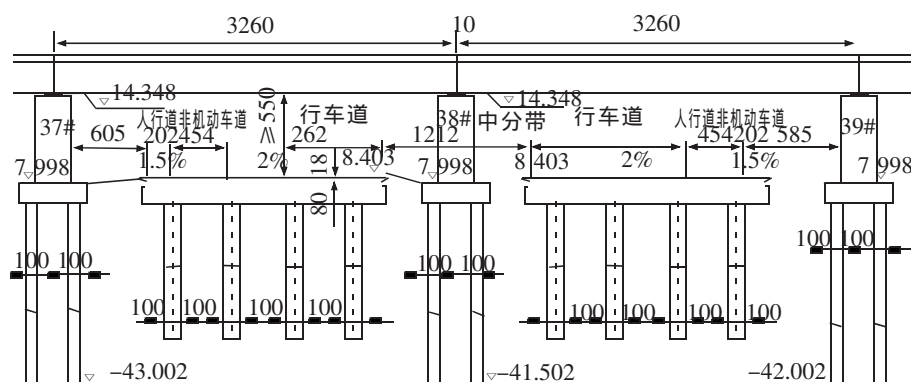


图 2 桩板结构下穿方案

Fig.2 Traversing construction plan with pile-plank structure

公路路面至梁底最小净高约为 $6\text{ m} \geq 5.5\text{ m}$,公路从设计起点以 0.35% 下坡下穿京沪高速铁路。桩板结构下穿段左、右幅跨度均为 $(8+13+13+13+8)\text{ m}$,总长度均为 60 m。板采用 C40 钢筋混凝土,桩基为 $\phi 1\text{ m}$ 钻孔灌注桩,桩长 35 m,采用 C35 钢筋混凝土。桩板结构板底标高为 7.423 m,原地面标高 6.587 m。

2.2 空心板梁桥下穿方案

空心板梁桥下穿方案见图 3,在原地面上新建空心板梁桥,分两幅布置,左、右幅桩板均宽 20 m。右幅公路防撞墙外侧与 38# 桥墩墩台最小距离为 2.08 m,与 38# 墩台上桥墩最小距离为 3.70 m;左幅公路防撞墙外侧与 38# 桥墩墩台最小距离为 1.88 m(不在同一高度,墩台顶面标高 7.998 m,路面标高 8.403 m),与 38# 墩台上桥墩最小距离为 3.50 m。公路防撞墙外侧与桥墩墩身距离均大于 2.5 m。新建空心板梁桩与高铁桥 38# 墩既有桩基的最小距离为 8.62 m。

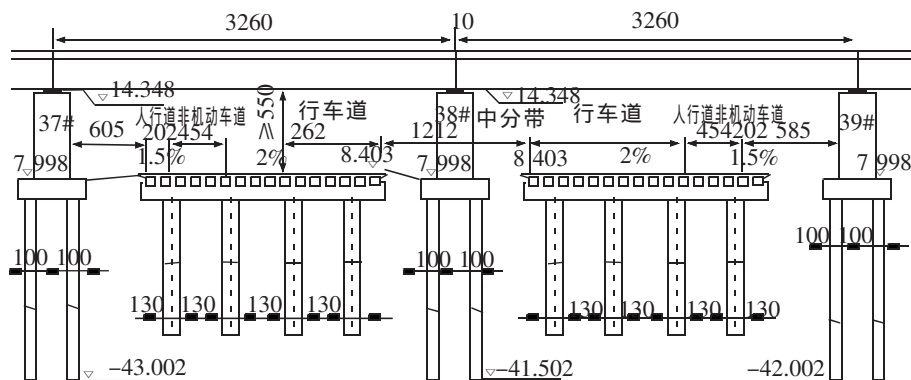


图 3 空心板梁桥下穿方案

Fig.3 Traversing construction plan with hollow board beam bridge

公路路面至梁底最小净高约为 6 m,公路从设计起点以 0.35%下坡下穿京沪高速铁路。预应力混凝土空心板梁桥为两幅桥,每幅桥宽 20 m,每幅设三跨,跨径分别为 (20+25+20) m,桥梁上部结构采用 20 m 及 25 m 预应力混凝土空心板梁。每幅桥横向设置 19 片梁,梁高 1.1 m,预制空心板梁采用 C50 混凝土。

空心板梁桥桥梁下部结构采用桩柱式墩台,桥墩盖梁高度 1.3 m,墩柱及基础为 $\phi 1.3$ m 钻孔灌注桩。桥台盖梁高度 1.2 m,基础为 $\phi 1.3$ m 钻孔灌注桩。钻孔灌注桩桩长均为 35 m。桥梁中跨梁底标高 7.103 m,原地面标高 6.587 m,梁底离地面高度 0.516 m。

3 设计方案数值模拟分析

3.1 施工过程模拟与计算结果分析

3.1.1 施工过程模拟

采用 Plaxis 岩土工程有限元分析计算软件建立三维模型,对新建桩板结构及新建空心板梁桥方案道路施工、运营对现有正在运营的京沪高铁桥墩的影响进行施工安全分析。Plaxis 三维有限元模型中,土体采用小应变土体硬化模型。土层参数参考表 2,模型计算暂不考虑地下水影响。

工程施工中土层的大致应变小于 10^{-3} ,因而模型中的土体本构模型选用小应变土体硬化模型 Hardening soil small-strain model(简称为 HSS 模型)^[7-8],该模型由学者 Benz(2007)将小应变范围内土体剪切刚度与应变的非线关系考虑进 HS 模型而提出,可有效模拟软粘土的剪切硬化和体积硬化过程,也可考虑砂土的膨胀性,同时可以反映出不同应变水平下的刚度衰减规律。

HSS 模型的应力-应变关系见图 4,HSS 模型考虑了 E_{50} 模量和 E_{ur} 模量具有应力相关的特性,并根据 Ohde (1951)和 Janbu (1963)的指数公式计算^[9-11],其形式为

$$\begin{aligned} E_{50} &= E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cot \varphi' - \sigma_3}{c' \cot \varphi' - \sigma^{\text{ref}}} \right)^m \\ E_{ur} &= E_{ur}^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cot \varphi' - \sigma_3}{c' \cot \varphi' - \sigma^{\text{ref}}} \right)^m \end{aligned} \quad (1)$$

式中: E_{50} 为对应于 50%强度的割线模量; E_{ur} 为土体的加卸载(回弹)模量; E_{50}^{ref} 和 E_{ur}^{ref} 为对应于某参考应力 σ^{ref} 的 E_{50} 模量和 E_{ur} 模量; m 为与土性有关的参数。

下穿桥梁均为预应力混凝土连续箱梁,跨度为 32 m 的箱梁重约 900 t,将梁自重均摊到高铁墩顶;Plaxis 三维有限元模型中,既有运营京沪高铁桥墩、承台采用实体,材料为 C30 混凝土;既有高铁桩采用桩单元模拟。另外,道路运营荷载采用公路 I 级汽车荷载。

针对本工程的特点,结合工程设计及施工方案,在 Plaxis 3D 有限元软件中,方案一新建桩板结构的有限元计算共分为 7 个施工阶段:第 1 阶段,拟建工程右侧桩基钻孔;第 2 阶段,拟建工程右侧钻孔桩浇筑施工;第 3 阶段,拟建工程左侧桩基钻孔;第 4 阶段,拟建工程左侧钻孔桩浇筑施工,即新建道路基础施工完成阶段;第 5 阶段,填方土体;第 6 阶段,浇筑路面板;第 7 阶段,道路运营阶段。方案二新建空心板梁桥方案的有限元计算也分为 7 个施工阶段:第 1 阶段,拟建工程右侧桩基钻孔;第 2 阶段,拟建工程右侧钻孔桩浇筑施工;第 3 阶段,拟建工程左侧桩基钻孔;第 4 阶段,拟建工程左侧钻孔桩浇筑及盖梁浇筑施工,也即新建道路基础施工完成阶段;第 5 阶段,填方土体;第 6 阶段,路面板施工;第 7 阶段,道路运营阶段。有限元模型及施工模拟的部分计算阶段见表 3。

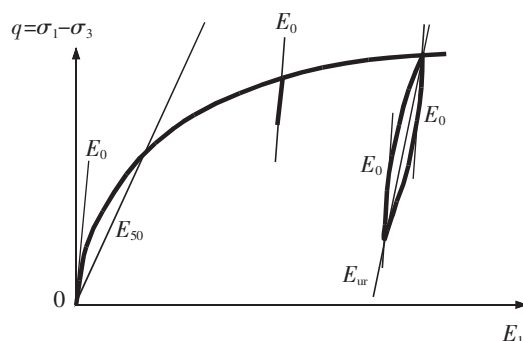
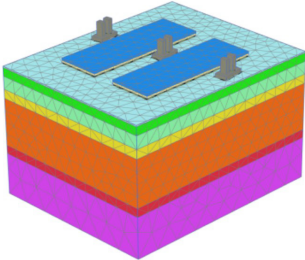
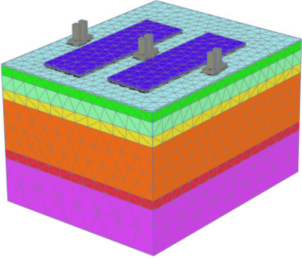
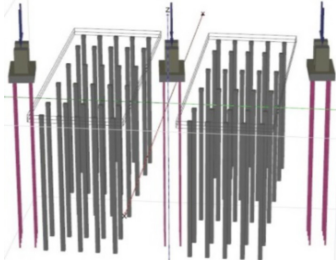
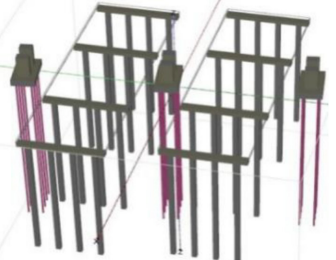
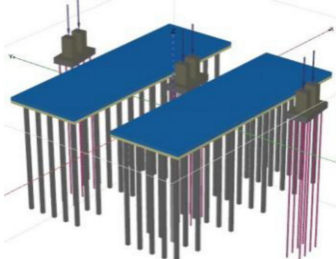
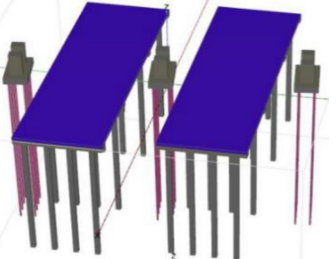


图 4 HSS 模型的应力-应变关系

Fig.4 The stress-strain relationship of the HSS model

表 3 有限元模型及施工模拟的部分计算阶段
Tab.3 Finite element model and part of the calculation phase of construction simulation

计算模型图	桩板梁	空心板梁桥
有限元模型		
第 4 阶段,新建道路 路基础施工完成		
第 6 阶段,路面板 施工		

3.1.2 下穿施工结果分析

1) 桩板结构下穿方案。提取桩板结构下穿方案分析中既有京沪高铁桥梁桥墩墩底位移计算结果,由于对称性,37# 桥墩与 39# 桥墩位移计算结果比较近似,因而只分析 38# 墩与 39# 墩位移计算结果。38# 墩与 39# 墩竖向沉降、桥梁横向位移及纵向位移分别见表 4 与表 5。

表 4 38# 墩位移计算结果
Tab.4 Calculation results of 38# bridge pier displacement

施工阶段	竖向沉降/mm	横向位移/mm	纵向位移/mm
1 右侧桩钻孔	0.183	0.005	-0.263
2 右侧桩浇筑	0.375	0.013	-0.364
3 左侧桩钻孔	0.561	0.024	-0.133
4 左侧桩浇筑	0.652	0.032	-0.032
5 填土	0.701	0.067	0.206
6 路面板浇筑	0.814	0.078	0.047
7 运营	0.871	0.095	0.051

表 5 39# 墩位移计算结果
Tab.5 Calculation results of 39# bridge pier displacement

施工阶段	竖向沉降/mm	横向位移/mm	纵向位移/mm
1 右侧桩钻孔	0.252	-0.001	-0.244
2 右侧桩浇筑	0.402	0.002	-0.375
3 左侧桩钻孔	0.415	0.004	-0.391
4 左侧桩浇筑	0.423	0.005	-0.407
5 填土	0.479	0.03	-0.439
6 路面板浇筑	0.54	0.064	-0.652
7 运营	0.613	0.069	-0.707

采用桩板结构方案,拟建丹阳市区至滨江新城快速通道施工完成并投入运营后,运营京沪高铁 38# 桥墩墩底分别产生最大竖向沉降 0.871 mm、最大纵向水平位移 0.051 mm、最大横向水平位移 0.095 mm,39# 墩底分别产生最大竖向沉降 0.613 mm、最大纵向水平位移 0.707 mm、最大横向水平位移 0.069 mm。

2) 空心板梁桥下穿方案。提取空心板梁桥下穿方案分析中既有京沪高铁桥梁桥墩墩底位移计算结果,38# 墩与 39# 墩竖向沉降、桥梁横向位移及纵向位移分别表 6 与表 7。

表 6 38# 墩位移计算结果
Tab.6 Calculation results of 38# bridge pier displacement

施工阶段	竖向沉降/mm	横向位移/mm	纵向位移/mm
1 右侧桩钻孔	0.173	0.01	-0.199
2 右侧桩浇筑	0.287	0.016	-0.274
3 左侧桩钻孔	0.474	0.021	-0.092
4 左侧桩浇筑	0.581	0.041	-0.016
5 填土	0.62	0.047	-0.008
6 路面板浇筑	0.712	0.056	-0.013
7 运营	0.896	0.062	-0.015

表 7 39# 墩位移计算结果
Tab.7 Calculation results of 39# bridge pier displacement

施工阶段	竖向沉降/mm	横向位移/mm	纵向位移/mm
1 右侧桩钻孔	0.275	0.009	-0.211
2 右侧桩浇筑	0.365	0.012	-0.324
3 左侧桩钻孔	0.407	0.014	-0.371
4 左侧桩浇筑	0.476	0.021	-0.411
5 填土	0.489	0.027	-0.439
6 路面板浇筑	0.501	0.037	-0.453
7 运营	0.623	0.042	-0.471

采用空心板梁桥下穿方案,拟建丹阳市区至滨江新城快速通道施工完成并投入运营后,运营京沪高铁桥墩 38# 墩底分别产生最大竖向沉降 0.896 mm、最大纵向水平位移 -0.015 mm、最大横向水平位移 0.062 mm,39# 墩底分别产生最大竖向沉降 0.623 mm、最大纵向水平位移 0.471 mm、最大横向水平位移 0.042 mm。

3.2 桥梁及轨道结构安全分析

3.2.1 桥梁及轨道结构精细有限元模型

如图 5,高速铁路桥上 CRTS 型板式轨道结构主要由钢轨、扣件、预制轨道板、CA 砂浆填充层、混凝土底座板、“两布一膜”滑动层、L 型侧向挡块等组成^[12]。

利用通用有限元软件 ABAQUS 建立桥梁及轨道结构精细化有限元模型,见图 6。

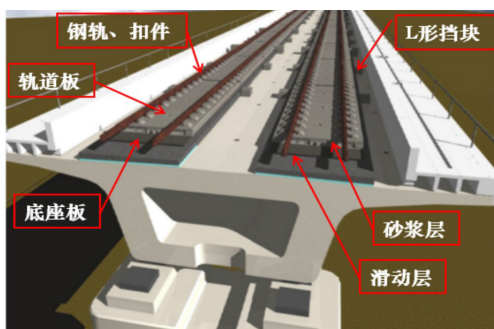


图 5 高速铁路桥上 CRTS 型板式轨道结构
Fig.5 CRTS slab ballastless track structure on high-speed railway bridge

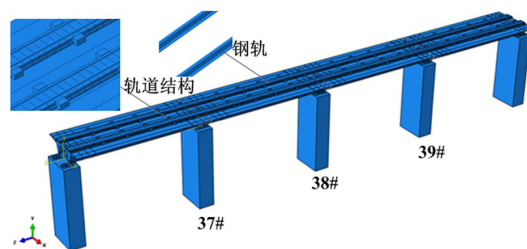


图 6 高速铁路桥上 CRTS 型板式轨道简支梁空间精细有限元模型
Fig.6 Fine finite element model of simply supported beam for CRTS slab ballastless track

钢轨选用梁单元进行模拟,扣件采用弹簧单元进行模拟。CRTS 型轨道板采用预应力混凝土结构,混凝土强度等级为 C55,标准轨道板长度为 6 450 mm,宽度为 2 550 mm,厚度为 200 mm。每块标准轨道板设置 10 对承轨台,扣件节点间距为 650 mm,轨道板采用实体单元进行模拟。CA 砂浆厚度为 50 mm,弹性模量取 500 MPa,亦采用实体单元进行模拟。桥上 CRTS 型无砟轨道底座板采用钢筋混凝土结构,混凝土强度等级为 C30。底座板宽度为 2 950 mm,厚度为 190 mm,采用实体单元模拟。桥梁地段 CRTS 型板式无砟轨道在底座板宽度范围内,梁面连续设置“两布一膜”滑动层,使底座板与桥梁保持滑动状态,“两布一膜”滑动层采用面接触关系进行模拟,滑动层摩擦系数取为 0.3。L 型侧向挡块标准尺寸为长度 800 mm,顶宽 590 mm,底宽 400 mm,高度为 459 mm,混凝土强度等级为 C35,L 型侧向挡块及橡胶垫板均采用实体单元进行模拟。

箱梁混凝土强度等级为 C50,变截面箱梁采用实体单元进行模拟。为分析桥墩变形对钢轨的影响,考虑边界效应的影响,拟建立四跨简支梁 4×32 m 进行模拟;箱梁支座采用弹簧单元模拟支座;桥墩混凝土强度等级取 C30,采用实体单元进行模拟。

3.2.2 桥梁及轨道结构安全分析

提取施工完成后 37#、38# 和 39# 桥墩墩底位移计算结果,将其作为强制位移边界条件施加于桥梁结构计算模型上,进而分别分析桩板结构及空心板梁桥方案下穿高铁桥梁对桥梁结构及桥上无砟轨道结构的影响。高铁桥梁 38# 桥墩箱梁位移云图见图 7,箱梁位移计算结果见表 8,轨

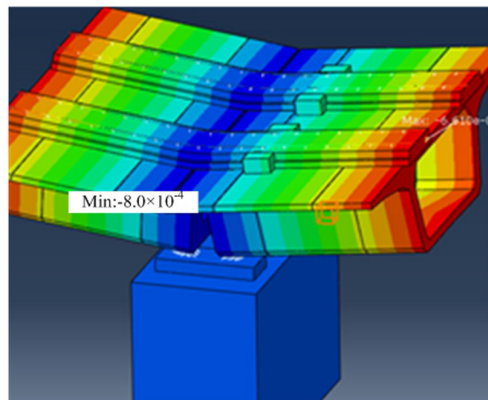


图 7 高铁桥梁 38# 墩箱梁位移云图
Fig.7 38# pier displacement cloud scheme of high-speed railway bridge

道结构内力及位移计算结果见表 9。

如表 8 所示,道路施工完成后,采用桩板结构方案,京沪高铁桥梁箱梁将产生最大竖向位移 0.764 mm、最大横向位移 0.034 mm、最大纵向位移 0.548 mm;而采用空心板梁桥方案,箱梁将产生最大竖向位移 0.786 mm、最大横向位移 0.017 mm、最大纵向位移 0.312 mm。

表 8 高铁桥梁箱梁位移计算结果
Tab.8 Displacement calculation results of high-speed railway bridge

方案	竖向位移/mm	横向位移/mm	纵向位移/mm
桩板结构	0.764	0.034	0.548
空心板梁桥	0.786	0.017	0.312

如表 9 所示,道路施工完成后,采用桩板结构方案,京沪高铁桥上无砟轨道轨道板将产生最大拉应力 1.54 MPa,桥上钢轨将产生最大竖向位移 0.761 mm、最大横向位移 0.021 mm、最大纵向位移 0.331 mm;而采用空心板梁桥方案,轨道板将产生最大拉应力 1.78 MPa,桥上钢轨将产生最大竖向位移 0.776 mm、最大横向位移 0.013 mm、最大纵向位移 0.187 mm。桩板结构与空心板梁桥方案轨道板最大拉应力均小于混凝土的抗拉强度,不至于结构出现裂缝等病害;钢轨位移也均满足高铁安全保护限值 1 mm 的要求,桩板结构方案与空心板梁桥方案均满足铁路安全保护的要求。

表 9 高铁桥梁轨道结构内力及位移计算结果
Tab.9 Calculation results of internal force and displacement of track structure for high-speed railway bridge

方案	轨道板拉应力/MPa	钢轨竖向位移/mm	钢轨横向位移/mm	钢轨纵向位移/mm
桩板结构	1.54	0.761	0.021	0.331
空心板梁桥	1.78	0.776	0.013	0.187

4 结论

主要结论如下:

- 1) 采用桩板结构下穿方案,拟建丹阳市区至滨江新城快速通道施工完成并投入运营后,运营京沪高铁桥上无砟轨道轨道板将产生最大拉应力 1.54 MPa,桥上钢轨将产生最大竖向位移 0.761 mm、最大横向位移 0.021 mm、最大纵向位移 0.331 mm;
- 2) 采用空心板梁桥下穿方案,京沪高铁桥上无砟轨道轨道板将产生最大拉应力 1.78 MPa,桥上钢轨将产生最大竖向位移 0.776 mm、最大横向位移 0.013 mm、最大纵向位移 0.187 mm;
- 3) 桩板结构方案与空心板梁桥方案对高铁的影响均满足高速铁路结构保护及运营安全要求,但采用桩板结构,整体性较好,养护维修工作量少,新建空心板梁桥方案整体性不及方案一桩板结构,其桥下净空还需满足其日后养护维修的要求。

参考文献:

[1] 张文斌. 某新建轨道交通工程下穿既有高速铁路桥梁方案研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(5): 82-85.
[2] 夏春燕. 道路下穿段对高铁桥基础的影响性研究[J]. 公路工程, 2015, 40(1): 126-132.
[3] 陈海丰, 袁大军, 王飞, 等. 软弱地层地铁盾构下穿高铁的安全控制技术研究[J]. 土木工程学报, 2015(S1): 256-260.

- [4] 杨红春. 新建道路下穿高速铁路桥梁对高铁桥墩和桩基影响的分析[J]. 中国市政工程, 2016(2):7-9.
- [5] TB10621-2014 高速铁路设计规范[M]. 中国铁道出版社, 2014:12.
- [6] 张俭. 新建道路下穿运营高速铁路桥梁的设计方案[J]. 中外公路, 2014, 34(2):185-188.
- [7] 管飞. 基于 HSS 本构模型的软土超大型深基坑 3D 数值分析[J]. 岩土工程学报, 2010(S1):177-180.
- [8] 尹骥. 小应变硬化土模型在上海地区深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010(S1):166-172.
- [9] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Geotechnical Special Publication, 1972, 98(118).
- [10] BURLAND J B. Small is beautiful—the stiffness of soils at small strains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26:499-516.
- [11] ATKINSON J H. Non-linear soil stiffness in routine design[J]. Géotechnique, 2000, 50(5):487-508.
- [12] 李中华. CRTS Ⅱ型与 CRTS Ⅰ型板式无砟轨道结构特点分析[J]. 华东交通大学学报, 2010, 27(1):22-28.

Numerical Simulation of Pile-plank Structure and Hollow Board Beam Bridge Structure Traversing Construction under High-speed Railway Bridge

Yang Fei

(Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The traversing construction under high-speed railway bridge can cause excessive displacement for high-speed railway bridge piers, which may affect the safety of railway. Aiming at the impact of traversing construction under high-speed railway bridge, taking Danyang Downtown-Riverside New City Expressway traversing under the Beijing-Shanghai high-speed railway Zhangxiang Bridge as the object, this study conducted a three-dimensional construction simulation with Plaxis geotechnical engineering finite element software. The calculation results were input into the fine-grained model of the ballastless track on the high-speed railway bridge established by ABAQUS finite element software to evaluate the influence of the pile-plank structure and hollow board beam bridge traversing construction on high-speed railway bridge. Relevant calculation results show that the influence of the pile-plank structure and hollow board beam bridge on high-speed railway meets the requirements of structural protection and operation safety.

Key words: expressway; municipal engineering; traversing construction; high-speed railway bridge; numerical analysis

(责任编辑 王建华)