

高速铁路PC槽形连续梁结构设计与分析研究

赵天翔, 龙俊廷, 谢海清

(中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 漳汕高铁韩江特大桥桥梁与路基交界处需跨越市政道路, 因此主梁采用了对于桥下净空具有优势的32 m+48 m+32 m 预应力混凝土槽形连续梁。介绍了槽形梁断面设计、构造细节, 对比了单梁模型、梁格法模型、环框模型、板单元模型、实体模型分析结果。结果表明: 单梁模型能较好地反映结构在自重作用下的受力和变形; 环框+梁格模型无法进行横向设计分析; 设计荷载作用下, 槽形梁能满足列车行驶的安全性和平稳性要求; 横梁处应力集中较为明显, 宜采用实体模型进行分析。

关键词: 高速铁路; 槽形梁; 结构设计; 有限元计算模型; 静力分析

中图分类号: U238; U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0101-05

Structural Design and Analysis of PC Trough Continuous Beam for High-speed Railway

ZHAO Tianxiang, LONG Juntong, XIE Haiqing

(China Railway Second Institute Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The Hanjiang Bridge of Zhangshan High-speed Railway crosses the municipal road near the junction of the bridge and the roadbed. Therefore, the main beam adopts 32 m+48 m+32 m prestressed concrete trough continuous beam, which has advantages for the headroom under the bridge. The section design and structural details of the trough beam are introduced. The results of the single beam model, grillage model, ring frame model, plate element model and solid model are compared. The results show that the single beam model can better reflect the stress and deformation of the structure under the action of self-weight. The ring frame model + grillage model cannot be used for transverse design analysis. Under the design load, the trough beam can meet the running safety and stability requirements of the train. The stress concentration at the cross beam is more obvious, and the use of solid model is suitable for analysis.

Keywords: high-speed railway; trough beam; structural design; finite element calculation model; static analysis

0 引言

槽形梁主要由两侧主梁和行车道板两部分组成, 主梁的形式有T形和箱形等。与传统的T梁和箱梁相比, 槽形梁桥面至梁底的结构高度低, 常在高速铁路跨越城市道路桥下净空受限时采用。另一方面, 槽形梁能有效降低列车噪声, 在城市轨道高架结构中应用较为广泛^[1-2]。但由于槽形梁为开口截面, 其抗扭性能较差, 同时随着桥梁宽度增加, 两侧腹板横向距离增加, 剪力滞效应明显^[3-4]。

我国第1座单线铁路连续槽形梁桥——葛水河铁路桥于1995年建成, 意味着槽形梁的应用在铁路工程中取得重要进步。1999年, 槽形梁首次在广州

被用于城市轨道交通。随着城市的发展, 槽形梁对于桥下净空的优势得到体现, 因此被频繁应用于城市轨道交通之中。2009年上海地铁6号线、2011年重庆地铁1号线、2017年青岛地铁13号线均有槽形梁的应用^[5]。在铁路工程上槽型连续梁的应用也逐渐增多, 2015年宁启铁路复线电气化改造建成的双线40 m+64 m+40 m槽型连续梁桥^[6], 2018年建成的济青高速铁路双线40 m+70 m+70 m+40 m槽型连续梁桥, 都体现出槽型连续梁的应用趋于成熟。

由于槽形梁主梁截面不同于箱梁和T梁截面, 针对其受力特性的研究十分重要。王旭飞等^[7]运用势能驻值原理, 深入研究了双线混凝土槽形梁的剪力滞效应, 并成功推导出了在不同荷载条件下(包括均布荷载和集中荷载), 双线混凝土槽形梁的剪力滞系数解析表达式。梁岩等^[8]以30 m跨径的城市轨道槽形梁为基础, 用有限元法分析了梁高、道床板厚和

收稿日期: 2024-09-20

作者简介: 赵天翔(1983—), 男, 学士, 高级工程师, 从事高速铁路桥梁设计工作。

角隅斜率对梁力学性能的影响。薛嵩等^[9]基于沪昆高铁槽形梁斜拉桥,构建槽形梁横断面热力学模型,分析其内部温度分布,并探讨参数影响,提出了日照下横断面温度分布模式。齐春雨^[10]针对 70 m 主跨槽形连续梁,建立了列车-轨道-梁动力模型,开发了铁路列车-轨道-桥梁耦合动力仿真软件,并采用实测数据验证后用于评估列车过桥动力响应。董旭等^[11]基于青岛地区某无砟轨道交通槽形梁,运用有限元仿真技术,探究其底板横向抗裂性能与应力分布特征,进而提出了一种横向预应力布置方案。王起才等^[12]首次在国内开展槽形梁大规模实桥静载试验,针对 16 m 跨度的高速铁路无砟轨道预应力混凝土简支槽形梁 1:1 模型,研究其裂缝发展、变形、支座沉降及应力变化等受力性能。

本文以漳汕高铁韩江特大桥 32 m+48 m+32 m 槽形梁为工程背景,对槽形梁的结构设计、计算模型的选择、整体和局部静力进行分析研究。

1 工程概况

漳州至汕头高速铁路设计速度为 350 km/h, 线路为双线, 线间距 5 m, 设计荷载为 ZK 活载。在桥梁与路基交界处跨越市政道路时, 由于桥下净空受限, 采用 32 m + 48 m + 32 m 槽形连续梁。本桥位于直线上, 梁部采用桥址高位支架现浇再落架成形, 其总布置图见图 1。

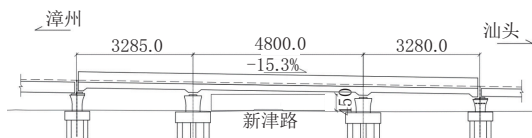


图1 总布置图(单位:cm)

桥上小里程至跨中范围内设置全封闭声屏障。声屏障荷载达 34.3 kN/m , 桥上铺设 CRTSIII 型板式无砟轨道。桥址区地震基本烈度 VII 度, 设计地震动峰值加速度为 $0.2g$, 场地土类别为 IV 类, 特征周期分区为三区, 地震动反应谱特征周期为 0.75 s 。

2 结构设计

城市轨道交通单线槽形梁多采用实心边箱^[5],而双线铁路为保证梁体刚度则普遍采用箱型边箱^[13-14]。本梁体为双边箱槽形梁,边箱梁高为4.5 m,桥面至梁底高度1.615 m。梁体全宽15.4 m,防护墙内侧净宽9.0 m,梁体全长113.5 m,边支座中心线至梁端0.75 m,支座横桥向中心距12.0 m。

主梁横断面见图2。

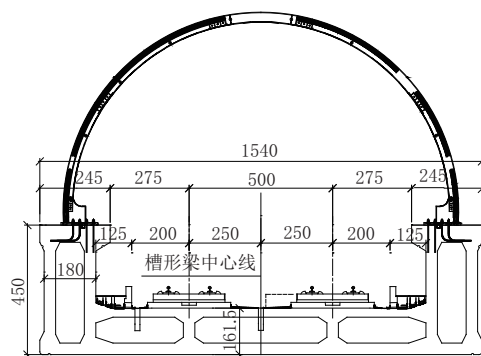


图2 主梁横断面(单位:cm)

边箱箱宽 1.8 m, 顶宽 2.45 m, 腹板宽度 0.4 ~ 0.45 m, 边箱两侧腹板与底板相交处均采用圆弧过渡。边箱顶板标准厚度 0.6 m, 在支点倒角位置线性变化至 0.7 m; 中箱顶板厚度 0.3 m, 在支点倒角位置线性变化至 0.4 m; 底板厚度 0.4 m, 在支点倒角位置线性变化至 0.5 m。

支点处设置横隔板,端支点处横隔板高4.5 m,宽度1.5 m;中支点处横隔板高4.5 m,宽度2.0 m。端支座处共设置2个横隔板;中支座处共设置2个横隔板。中跨跨中设跨中横隔板,板厚0.5 m,全桥共1处。

3 计算模型对比与选择

槽形梁为开口截面,受力较为复杂,进行有限元分析时常采用单梁模型或梁格模型。对于主梁纵向的静力计算,采用单梁模型操作简单方便,计算效率高,但其计算精度是否能够满足设计要求需要进一步对比分析。为此,本文采用单梁模型、梁格模型、环框+梁格混合模型、板单元模型和实体模型,分别对槽形梁在自重作用下的结构应力进行对比分析。

3.1 各模型主梁自重作用结果对比

单梁模型、梁格模型、环框+梁格混合模型、板单元模型均采用MIDAS Civil进行分析计算。其中梁格模型将主梁断面分为4个纵梁,横向采用无重量的虚拟梁进行串连;虚拟梁的抗弯、剪切、扭转刚度均基于梁格法理论进行等效模拟计算,全桥模型共940个单元。环框+梁格混合模型以梁格模型为基础,在跨中处取消1节梁格虚拟梁单元,然后建立横向环框梁单元进行替代;纵梁连接处则采用共节点。该混合模型的研究重点在于能否有效模拟每道腹板下的竖向刚度,从而进一步优化横向环框计算。板单元模型将主梁纵向截面和隔板划分成板单元并赋予不同厚度,以模拟结构刚度和受力;纵向板单元划分

间隔为 2 m,横向单元划分间隔为 1.2 m,全桥共 1 900 个单元。实体模型采用 ABAQUS 进行计算,网格划分时使用四面体加六面体混合网格划分技术,结点总数为 336 853;单元总数为 249 381。各分析模型见图 3 至图 6。

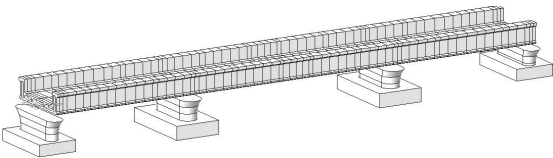


图3 单梁模型

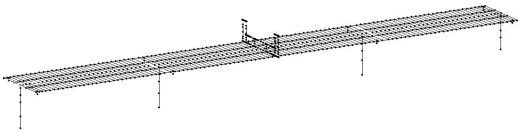


图4 环框+梁格混合模型

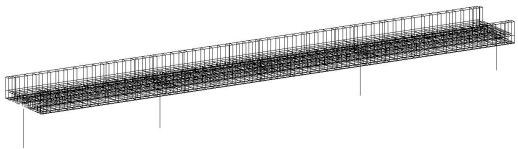


图5 板单元模型

模型计算结果见表 1,由表 1 可知,梁格模型与实体模型的纵桥向变形和应力较为相似,说明梁格法能较好模拟纵桥向计算结果。但在横桥向,梁格



图6 实体模型

模型与实体模型、环框+梁格混合模型差异较大,这主要是由于横向虚拟梁离散后,截面特性按照梁格法理论均有修正,同时纵向剪应力对离散后的横梁存在一个附加弯矩,导致其横向计算不准确。这一问题同样存在于环框+梁格混合模型,致使其横向计算结果与实际结果相差较大,因此横向设计分析时不宜采用梁格模型和环框+梁格混合模型。梁格模型中的横向虚拟梁仅能用于传递横向荷载和模拟截面抗扭、剪切刚度,其构件本身无法用于横向设计。单梁模型能够较好地反映结构在自重作用下的内力和变形,采用该模型计算得到的主梁在自重作用下的挠度和跨中截面应力与全桥实体模型、梁格模型基本一致;支点截面应力的误差主要因单梁模型中无法考虑横梁对支点应力的改善所致。

表 1 自重作用下主梁应力变形对比表

主要计算结果	单梁模型	环框+梁格混合模型	板单元模型	实体模型		梁格模型	
				边梁	中梁	边梁	中梁
纵向	跨中挠度/mm	9.1	10.2	8.1	8.7	8.0	8.9
	跨中梁底应力/MPa	2.4	3.4	2.8	2.4	3.1	1.4
	跨中梁顶应力/MPa	-4.3	-4.5	-4.4	-0.5	-3.4	-0.7
	支点梁底应力/MPa	-4.0	-4.7	-4.7	-1.6	-5.2	-2.1
	支点梁顶应力/MPa	6.7	4.8	4.7	1.2	4.5	1.8
横向	底板跨中与边箱底						
	相对位移/mm		2.2	1.2	1.3		1.2
	底板下缘应力/MPa		1.9	2.0	1.4		4.2
	底板上缘应力/MPa		-1.8	-1.6	-1.1		

3.2 单梁模型与梁格模型结果对比

为了进一步验证单梁模型纵向计算的准确性,采用单梁模型和梁格模型,计算两者的主梁自振频率、主力和主+附作用下的截面应力、活载作用下变形,并进行对比,结果见表 2、表 3。

由表 2 可知,2 种模型竖弯和横弯频率误差在 5% 左右,但扭转频率差异较大。说明梁格模型和单梁模型都能有效模拟结构的竖向和横向刚度,但在扭转刚度模拟上有一定误差。

由表 3 可知,单梁模型活载变形位于梁格模型的边梁和中梁变形之间。由于横向变形,中梁的竖向

表 2 单梁模型与梁格模型自振频率对比表

振型对比	频率/Hz		误差/%
	单梁模型	梁格模型	
1 阶竖弯	4.186	4.210	-0.576
2 阶竖弯	6.996	6.614	5.784
1 阶横弯	3.225	3.082	4.642
2 阶横弯	3.424	3.284	4.251
1 阶扭转	11.114	6.476	71.621
2 阶扭转	14.452	9.146	58.008

挠度大于边梁。单梁模型的应力除主拉应力外,其余均介于梁格模型的中梁和边梁应力之间。梁格模型中,跨中点处中梁应力水平大于边梁,支点处边梁

表3 单梁模型与梁格模型变形和应力对比表

纵向验算		单梁模型	梁格模型	
			边梁	中梁
主力	活载跨中挠度/mm	4.2	3.7	4.7
	跨中梁底应力/MPa	-7.3	-7.1	-7.7
	跨中梁顶应力/MPa	-5.4	-4.8	-8.9
	支点梁底应力/MPa	-14.6	-17.7	-11.3
	支点梁顶应力/MPa	-14.3	-14.5	-9.9
	主压应力/MPa	-16.6	-18.8	-12.6
	主拉应力/MPa	1.3	0.7	0.8
主+附	跨中梁底应力/MPa	-7.7	-6.5	-8.2
	跨中梁顶应力/MPa	-4.7	-2.8	-7.2
	支点梁底应力/MPa	-14.7	-17.8	-12.9
	支点梁顶应力/MPa	-18.6	-19.0	-13.0
	主压应力/MPa	-20.0	-20.9	-13.4
	主拉应力/MPa	1.5	0.7	1.0

应力水平大于中梁,这主要是由于跨中轴力水平较小,应力变化主要由竖向弯矩引起,而边梁处于整体截面底部,主要承担压应力。而在支点位置处,由于边梁为主要荷载传递构件,类似于桁架桥中主桁的作用,整座桥梁的荷载均传递至边梁,再由边梁传递至支点位置,因此导致支点位置处边梁应力水平较高。

综上所述,单梁模型在主力和主+附作用下,能够较好地反映结构纵桥向刚度和应力。

4 结构静力分析

采用MIDAS Civil 2021建立杆系模型。

单梁模型示意图见图3。主梁采用C55混凝土,弹性模量 $E_c=3.60\times10^4$ MPa,重度 $\gamma=26.5$ kN/m³;预应力钢束采用1 860 MPa钢绞线,纵向及横向预应力钢绞线锚头变形、钢筋回缩(考虑反摩阻) $\Delta L=6$ mm,预应力管道摩阻按圆形镀锌金属波纹管成孔计算,管道摩擦系数取0.26,管道偏差系数取0.003/m;松弛损失、收缩徐变及其他各项损失按《铁路桥涵混凝土结构设计规范》(TB 10092—2017)计算;二期恒载重量包括钢轨、扣件、轨道板、砂浆垫层、混凝土基座等线路设备重量,以及防水层、保护层、人行道栏杆或声屏障、防护墙、全封闭式声屏障、电缆槽盖板和竖墙等附属设施重量,设声屏障段二期恒载为159.28 kN/m,无声屏障段二期恒载为131.08 kN/m;基础不均匀沉降按相邻两支点不均匀沉降差 $\Delta\leq10$ mm计;列车竖向活载纵向计算采用ZK标准活载;风力根据《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)第4.4.1条计算。

本桥桥址处基本风压为1 200 Pa;列车横向摇摆力、气动力、列车制动力、温度变化影响力均按《铁路桥涵设计规范》计算,桥位处最低月平均温度为14.2℃,最高月平均温度为28.6℃,极端最高温度为39.8℃,极端最低温度为0.1℃,年平均温度为21.9℃;设计合龙基准温度取年平均温度22℃,均匀温差按梁体升降温20℃考虑。槽形梁桥面宽15.4 m,剪力滞效应明显,有效宽度系数按《铁路桥涵设计规范》计算。

结构主要计算结果见表4。由表4可知,桥梁设计安全系数、应力水平、变形均满足《铁路桥涵设计规范》要求。

表4 结构主要计算结果表

检算内容		计算结果	容许值
设计安全系数	强度安全系数	主力 2.926 主+附 3.024	≥ 2.2 ≥ 1.98
	抗裂安全系数	主力 1.698 主+附 1.591	≥ 1.2
运营阶段混凝土应力/MPa	混凝土正截面最大压应力	主力 14.6 主+附 18.6	$\leq 0.50f_c$ $\leq 0.55f_c$
	混凝土正截面最小压应力	主力 5.4 主+附 4.7	不允许出现拉应力
梁体横向变形/mm		0.832	$\leq 1/4\ 000$
竖向静活载作用下挠度/mm		-4.165	$\leq 1.1L/1\ 600$
竖向静活载作用下梁端转角/‰		0.126	≤ 1.0
长3 m线路,1线2根钢轨竖向相对位移/mm		0.971	≤ 1.5
轨道铺设后梁体竖向残余变形/mm		0.639	≤ 10

注: f_c 为梁体混凝土极限抗压强度,MPa; L 为主梁中跨计算跨度,mm。

5 横向局部预应力分析

由于槽形梁横向宽度大,为防止梁体底部横向开裂,通常都需要配置横向预应力筋^[15]。支点处横梁的设置能有效增加槽形梁的横向刚度,同时改善支点处梁底受力,而槽形梁横向宽度大,因此对其进行横向设计尤为重要^[16-17]。支点处横梁承担着将所有横向荷载传递至支座处的功能,其横向受力最大。设计中在支点处对横梁进行了局部加高,以优化横梁受力,同时在横梁设置了横向预应力,防止其开裂。由于这一位置受力情况复杂,普通的环框模型无法满足要求,因此采用基于MIDAS FEA的实体模型,对中支点和端支点处的横梁局部预应力效应进行分析。

基于全桥实体模型,对横梁处、横梁10 m范围内的主梁网格进行加密,并建立了横梁处的预应力钢

束。同时施加的荷载包括自重、二期恒载、声屏障荷载、整体温度和梯度温度。整体升降温 20 ℃,日照顶板梯度升温 10 ℃,寒潮顶板梯度降温-5 ℃。当支反力最大时,横梁受力最为不利,因此活载以横梁支反力最大工况加载,按双线局部 64 kN/m 加载于中跨和单侧边跨。横梁处网格划分及预应力钢束示意图见图 7、图 8。



图 7 横梁网格划分示意图(实体模型)

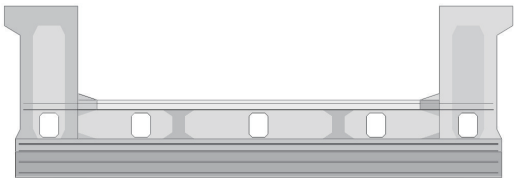


图 8 横梁处预应力钢束示意图(实体模型)

主力+温度荷载作用下中横梁、端横梁 S-YY 应力(横向应力)分布图见图 9、图 10。

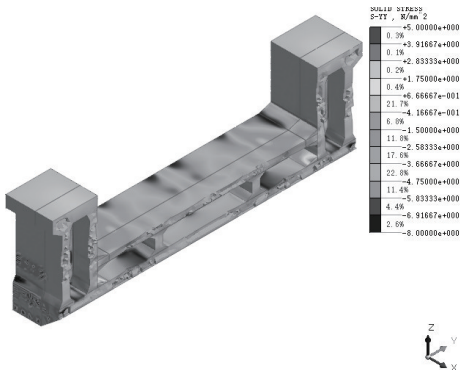


图 9 主力+温度荷载作用下中横梁 S-YY 应力(横向应力)分布图
(单位:MPa)

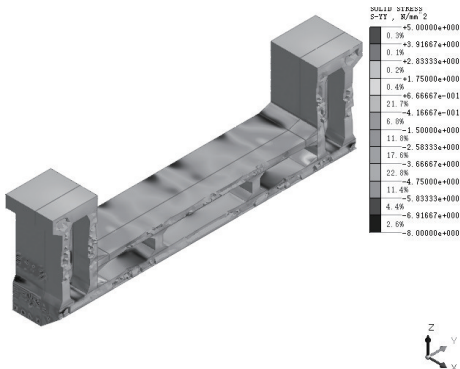


图 10 主力+温度荷载作用下端横梁 S-YY 应力(横向应力)分布图
(单位:Pa)

由图 9、图 10 可知:在主力+温度荷载作用下,支点处横梁处于整体受压状态,满足设计要求;横梁布设横向预应力是必要的,本设计横梁处预应力钢束

分布合理。另外,由于横梁上人洞的存在,导致人洞上方的横梁顶部有应力集中,这一类应力集中无法通过环框+梁格混合模型进行模拟,因此槽形梁横梁局部应力分布仅能通过有限元实体模型进行分析,无法采用单纯的单梁模型或环框+梁格混合模型代替。

6 结 语

(1)对于 32 m+48 m+32 m 槽形连续梁,几种模型的对比结果显示单梁模型能较好地反映结构在自重作用下的受力和变形。

(2)环框+梁格模型由于横向虚拟梁离散后,截面特性按照梁格法理论均有修正,同时纵向剪应力对离散后的横梁存在一个附加弯矩,因此其无法用于横向环框计算。

(3)在设计荷载作用下,槽形梁的安全系数、应力水平、变形均满足《铁路桥涵设计规范》要求。

(4)由于横梁处应力集中较为明显,宜采用实体模型对其进行分析。分析结果显示:横梁处预应力钢束分布合理;在主力+温度荷载作用下,支点处横梁处于整体受压状态。

参考文献:

[1] 张吉,陆元春,吴定俊.槽形梁结构在轨道交通中的应用与发展[J].铁道标准设计,2013(10):78-82.

[2] 聂建国,胡红松.简支槽形梁考虑空间受力的理论解[J].工程力学,2012,29(12):64-71.

[3] 徐勋,肖林,王炎,等.预应力混凝土槽形梁静力行为研究[J].铁道建筑,2013(1):1-4.

[4] 吴天群,张智凯,朱华中,等.轨道交通槽形梁桥静动力特性研究综述及展望[J].铁道标准设计,2023,67(11):76-83;99.

[5] 李美帅.城市轨道交通 U 型梁空间受力机理及实用设计方法研究[D].南京:东南大学,2021.

[6] 程正林.八百河大桥 40 m+64 m+40 m 预应力混凝土连续槽形梁设计[J].城市道桥与防洪,2014(7):174-176;179.

[7] 王旭飞,赵亚宁,冀伟.双线混凝土 U 型梁的剪力滞效应研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(1):181-190.

[8] 梁岩,毛瑞敏,李杰,等.城市轨道交通槽形梁设计参数优化研究[J].铁道标准设计,2018,62(3):49-52.

[9] 薛嵩,王文欣.高速铁路槽形梁桥竖向温度分布模式研究[J].铁道标准设计,2014,58(12):81-84.

[10] 齐春雨.高速铁路槽形连续梁车-轨-桥相互作用动力分析[J].铁道标准设计,2019,63(6):73-76.

[11] 董旭,郭剑,周海灿,等.轨道交通 U 形梁底板横向抗裂及预应力布置研究[J].山东大学学报(工学版),2019,49(4):44-50.

[12] 王起才,薛彦瑾,张戎令,等.高速铁路无砟轨道简支槽形梁静载弯曲试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2016,48(4):463-467;476.

(下转第 110 页)