

高速铁路小半径曲线 T 形刚构桥设计

王建圣

济青高速铁路有限公司, 山东 济南 250014

摘要:为减小某高速铁路连接线施工时对其小角度交叉的运营高速铁路的影响,采用大跨度小半径曲线 T 形刚构桥转体桥梁施工方案,设计曲线 T 形刚构桥主梁和主墩的结构形式,采用有限元软件 MIDAS Civil 和 BSAS 计算分析曲线 T 形刚构桥在施工阶段、运营阶段及地震等工况下的结构应力、挠度和支反力等,采用 MIDAS Civil 计算分析成桥阶段小半径曲线 T 形刚构桥的动力特性。结果表明:曲线 T 形刚构桥主梁及主墩结构的应力、挠度、自振频率等控制性指标均符合设计要求。

关键词:高速铁路;小半径曲线;T 形刚构桥;结构设计;动力特性

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2023)03-0093-08

引用格式:王建圣. 高速铁路小半径曲线 T 形刚构桥设计[J]. 山东交通学院学报,2023,31(3):93-100.

WANG Jiansheng. Design of T-shaped rigid frame bridge with small radius curve for high speed railway[J].

Journal of Shandong Jiaotong University,2023,31(3):93-100.

0 引言

T 形刚构桥因主墩处梁体与桥墩固结,墩顶的前后方向外侧伸展的悬臂梁形似英文大写字母 T 而得名。T 形刚构桥的竖向刚度大、造型优美、受力明确、施工便捷,尤其适用于跨越沟谷地形、公路铁路立体交叉等复杂施工情况^[1-3]。

在 T 形刚构桥的结构设计、结构计算及转体施工技术等方面,孙大斌^[4]以桥梁刚度和经济性为控制因素,分析并确定客专无砟轨道 T 形刚构桥的合理跨径;寇延春^[5]研究福厦高速铁路 T 形刚构桥设计,发现不同跨度 T 形刚构桥梁体的结构高度基本与跨度成线性关系;陶玉莲^[6]通过铁路高墩大跨 T 形刚构桥设计的结构应力、挠度及动力特性等控制因素,分析 T 形刚构桥结构的静力和动力特性,通过局部构造处理、施工加载、龄期调整等确保 T 形刚构桥结构满足要求;刘文聪^[7]以城际铁路连续刚构桥为实例对结构受力特性进行数值计算和对比分析,发现小半径曲线桥直线梁模型的计算结果与曲线梁模型相差不大,都满足工程实际要求;马明路等^[8]研究 T 形刚构桥跨越高铁的施工关键技术,采用旁位现浇、无合龙段水平转体等技术可大大降低 T 形刚构桥施工对运营高铁的影响;左家强^[9]以客货共线双线铁路大跨度 T 形刚构桥为例,介绍刚构桥的结构、钢束布置及动力仿真等,提出大跨度 T 形刚构桥的设计要点。目前已建成的铁路 T 形刚构桥一般位于直线或大半径曲线上,在小半径曲线上应用大跨度 T 形刚构桥较少。

本文以结构强度、刚度和位移等参数为控制要素,设计某高速铁路小半径曲线 T 形刚构桥的结构,对结构静力和动力特性进行数值计算分析,以为小半径曲线 T 形刚构桥大跨度跨越高铁工程提供参考。

1 工程概况

某高铁连接线工程上跨运营高铁,二者夹角为 153.37°。高铁连接线为单线铁路,设计速度为 80 km/h,有砟轨道,ZK 活载(中国客运专线标准活载)。连接线跨越高铁后尽快与在建高铁正线接轨,

收稿日期:2023-03-30

基金项目:济青高速铁路科研计划项目(JQKJ2022-09)

作者简介:王建圣(1978—),男,山东商河人,高级工程师,主要研究方向为铁路建设,E-mail:18805318253@163.com。

浇节段,共52个悬浇节段,每个悬浇段长约3.0 m。截面形式为单箱单室直腹板箱梁,顶板宽7.3 m、底板宽5.7 m。参照文献[4-5]的设计原则,考虑小半径曲线对T形刚构桥结构受力的影响,拟定主梁截面梁高,中支点梁高12.80 m,端部梁高5.25 m,梁高变化曲线为二次抛物线。顶板厚40~52 cm,底板厚40~145 cm,腹板厚50~120 cm。主梁边支点设1道厚1.5 m的横隔板,中支点设2道厚1.1 m的横隔板,横隔板上设进人洞。主梁截面示意图如图3所示。

主墩为普通钢筋混凝土结构,墩高24.0 m,截面为空心矩形,顺桥向长8.0 m,横桥向宽6.7 m,壁厚1.1 m,墩底设置厚4.0 m的实心段。边墩为圆端形空心墩,墩顶尺寸为4.4 m×8.0 m,墩底设置4.0 m实体段,空心墩外侧坡比为40:1,内侧坡比为70:1,壁厚由0.4 m按坡比逐渐增大,采用桩基础。此桥梁处于曲线地段,且曲线半径较小。为改善桥墩横向受力的状况,确保转体时T形刚构桥处于平衡状态,运营后各桩基受力基本均衡,主墩中心相对上转盘中心、下承台及桩基中心向曲线内侧设置横向偏心参数^[12-14]。主墩设计示意图如图4所示。

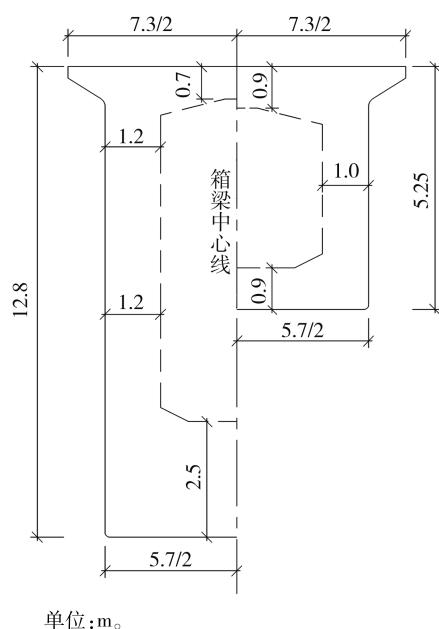


图3 主梁截面示意图

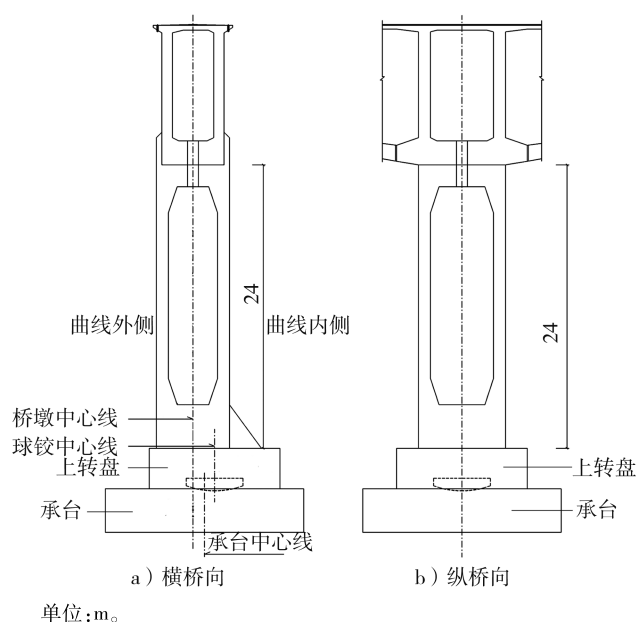


图4 主墩设计示意图

3 主梁结构计算

3.1 设计荷载

主梁结构所受主力包括恒载、活载、横向摇摆力和离心力,所受附加力包括制动力、离心力、列车竖向动力和温度荷载等,根据文献[15]计算各荷载。悬臂浇筑时施工挂篮、机具(绑扎钢筋、浇筑混凝土等工序使用的机具)及人群等所受荷载按共计1 200 kN计算。主梁结构所受特殊荷载包括运梁车荷载和架桥机荷载。

主梁所受荷载组合类型包括主力、主力-附加力、运梁和架梁等4种工况。

3.2 主梁纵向计算

3.2.1 计算方法

曲线梁桥结构的数值计算方法包括以直代曲法、单梁法和梁格法等。本桥的梁长与桥宽之比为13.74,曲线半径与梁宽之比为68.49,梁长与曲率半径之比为0.2。本桥曲线半径与梁宽之比较大,曲线对结构计算结果的影响基本可忽略不计,可采用以直代曲法计算。采用软件MIDAS Civil建立曲线单梁模型,采用软件BSAS建立直线单梁模型,进行计算分析,对比二者差异。2个模型的主梁均划分为66个单元,桥墩均划分为9个单元,如图5所示。

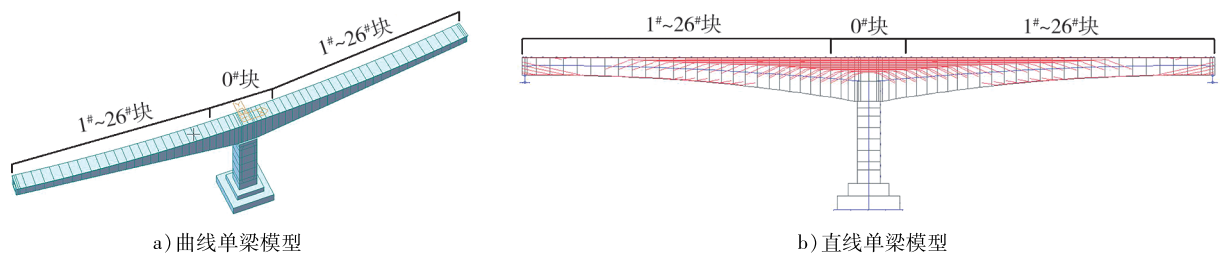


图 5 2 种计算模型

3.2.2 计算结果及分析

直线单梁模型的最大竖向挠度为 18.6 mm(挠度与跨径之比为 1/5 392),容许竖向挠度为 84.3 mm;梁体下挠产生的梁端竖向转角为 0.58‰;最大残余徐变为 12.6 mm(向下)。以上计算结果均满足文献[15]要求。

2 种模型的主梁应力及安全系数的计算结果如表 1 所示,2 种模型的支反力计算结果如表 2 所示。根据文献[16-19],在弯扭耦合作用下此类曲线桥梁横截面上的应力分布基本均匀,可忽略扭矩对桥梁结构纵向计算的影响。

表 1 2 种模型的主梁应力及安全系数的计算结果

荷载组合	结构模型	最大正应力/MPa		最小正应力/MPa		最大主压应力/MPa	最小主拉应力/MPa	最大剪应力/MPa	抗裂安全因数	强度安全因数
		上缘	下缘	上缘	下缘					
主力	曲线单梁	13.12	10.99	2.54	1.68	13.38	-1.28	2.92	1.33	2.41
	直线单梁	13.77	10.48	2.70	1.58	14.13	-1.32	3.07	1.27	2.34
	许用应力	18.50		无拉应力		22.20	-3.33	6.29	1.20	2.20
主力-附加力	曲线单梁	16.90	11.41	1.08	1.20	16.90	-2.35	2.93	1.21	2.38
	直线单梁	17.21	12.07	0.98	1.13	15.90	-2.27	3.09	1.28	2.30
	许用应力	20.35		无拉应力		24.42	-3.30	6.29	1.20	1.98
运梁	曲线单梁	19.73	11.06	0.89	1.55				1.14	2.60
	直线单梁	19.85	13.88	0.94	1.64				1.17	2.26
	许用应力	29.60		2.64					1.10	1.80
架梁	曲线单梁	17.34	10.26	-0.42	2.67				1.14	2.58
	直线单梁	16.09	12.54	-0.16	3.00				1.24	2.41
	许用应力	29.60		2.64					1.10	1.80

注:截面应力中拉应力为负,压应力为正。

表 2 2 种模型的支反力计算结果

单位:kN

工况	曲线单梁模型的支反力						直线单梁模型的支反力					
	小里程边墩		小里程边墩		大里程边墩		大里程边墩		小里程边墩		大里程边墩	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
恒载	4 035	4 035	4 574	4 574	4 034	4 034	4 580	4 580	8 881	8 881	8 886	8 886
主力	4 920	3 662	6 585	4 084	4 919	3 661	6 591	4 090	12 720	8 105	12 725	8 110
主力-附加力	5 211	3 355	7 143	3 659	5 210	3 354	7 149	3 665	13 127	7 902	13 132	7 907

由表 1 可知:2 种模型的应力计算结果均满足文献[15]的要求,表明设计结构合理;2 种模型的计算结果接近,最大相对应力差小于 5%。因此,按直线单梁建模进行计算分析的结果可信,满足工程建设要求。

由表 2 可知:按曲线单梁模型计算支反力,考虑荷载对曲线梁的影响,曲线外侧支座的支反力明显大于曲线内侧支座^[20],但 1 个桥墩上 2 个支座反力的总和与直线单梁模型的计算结果接近。因梁长小于曲线半径,偏心荷载对 T 形刚构桥的影响相对较小,边墩支座未出现拉应力,不必考虑设置受拉支座。为避免边墩支座安装错误,偏于安全考虑,需按曲线单梁模型计算的较大支反力结果选择边墩支座型号。

3.3 主梁横向计算

为计算主梁横向结构尺寸,核验钢筋配置是否合理,通常将箱梁简化为平面框架结构。沿桥纵向取 1 m 宽板,建立有限元模型进行主梁横向计算,计算截面分别取顶板、底板、腹板的最薄处^[21]。

桥梁运营阶段恒载包括梁自重、二期恒载和钢束径向荷载,主力组合包括恒载、活载、离心力、横向摇摆力等,附加力组合包括温度荷载和风荷载。运梁、架梁阶段恒载包括梁自重和遮板、栏杆、保护层及防水层所受重力。运梁工况荷载组合包括恒载、运梁车荷载、温度荷载(升温间隔 20 ℃,降温间隔-10 ℃)、基础沉降(按运营阶段基础沉降的 50%)。架梁工况荷载组合包括恒载、架桥机荷载、温度荷载(升温间隔 20 ℃,降温间隔-10 ℃)、基础沉降(按运营阶段基础沉降的 50%)。

各荷载工况下梁各结构的弯矩包络图如图 6。由图 6 可知:箱梁顶板、腹板顶部由架梁荷载组合控制结构设计,箱梁底板、腹板底部由主力-附加力组合控制结构设计。根据图 6 计算结果设计截面钢筋并计算截面应力,结果如表 3 所示。由表 3 可知:在各荷载工况下,混凝土、钢筋应力及混凝土裂缝宽度均满足文献[15]的要求,安全储备较大,拟定的截面尺寸及配筋均满足受力要求。

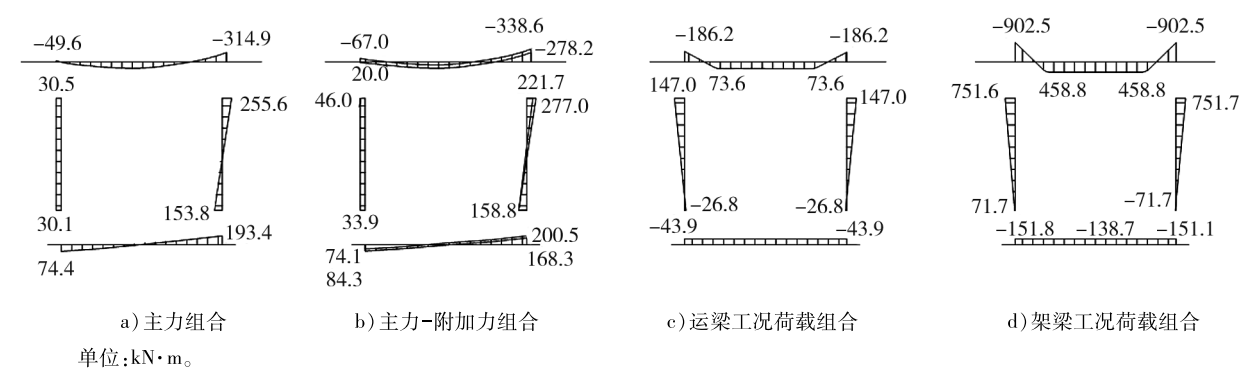


图 6 各荷载工况下梁各结构的弯矩包络图

表 3 截面应力计算结果

荷载工况	混凝土正应力/MPa	钢筋压应力/MPa	钢筋拉应力/MPa	混凝土裂缝宽度/mm
主力	7.63	59.13	152.02	0.16
主力-附加力	8.24	63.57	168.23	0.17
运梁	4.73	34.49	75.71	0.09
架梁	10.81	91.74	175.83	0.17
限值 ^[15]	≤26.46	≤297.00	≤297.00	≤0.24

4 主墩结构计算

采用直径为 25 mm 的钢筋为主墩墩身钢筋,按 2 根一束设置,横桥向设置 44 根,纵桥向设置 52 根,墩顶截面采用 C55 混凝土,其余截面采用 C40 混凝土。各荷载工况下,主墩控制截面的应力计算结果如表 4 所示。由表 4 可知:施工阶段与运营阶段主墩各截面混凝土应力均满足文献[15]的要求。

表 4 主墩控制截面的应力计算结果

工况	单位:MPa			
	墩顶截面应力	顶部变截面应力	底部变截面应力	墩底截面应力
施工阶段荷载	7.9	9.5	9.7	6.0
主力	5.0	7.5	7.7	4.9
主力-横向附加力	5.2	7.6	8.1	5.4
主力-纵向附加力	5.1	7.6	7.8	5.0
运梁	4.6	7.0	7.4	4.9
架梁	4.5	6.9	7.3	4.8

注:主墩横向、纵向附加力主要为风荷载。

考虑地震对桥墩的影响,在多遇地震条件下,主墩的最大混凝土压应力为 9.6 MPa,钢筋的最大压应力为 75.9 MPa,最大混凝土裂缝宽度为 0.03 mm;在罕遇地震条件下,主墩各截面的屈服弯矩均大于地震作用下产生的弯矩,桥墩未进入塑性工作状态。2 种条件下的计算结果均满足规范[15]的要求。

T 形刚构桥位于小半径曲线上,曲线内外侧将产生较大的不平衡弯矩,给桥墩及基础带来不利影响。计算墩底的横向偏心,在桥墩与上转盘、承台间预设横向不利偏心抵消不平衡弯矩的影响。各荷载工况下,主墩横向偏心的计算结果如表 5 所示。

表 5 各荷载工况下主墩横向偏心的计算结果

荷载工况	横桥向弯矩/(MN·m)		竖向轴力/MN		横向偏心/m	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小
最大悬臂施工阶段	257.487	257.487	129.627	129.627	1.986	1.986
主力	153.183	136.223	133.335	143.711	1.149	0.948
主力-横向附加力	181.658	107.259	132.648	144.164	1.369	0.744
主力-纵向附加力	158.558	130.358	132.686	144.126	1.195	0.904

由表 5 可知:转体施工前,T 形刚构桥在最大悬臂施工阶段的横桥向弯矩最大,为优化 T 形刚构桥转体过程中球铰及上转盘的受力性能,保证 T 形刚构桥转体的稳定性,上转盘中心、球铰中心相对主墩中心向曲线内侧设置横向偏心,使转体过程中横向偏心距为 0。球铰中心相对主墩中心向曲线内侧设置横向偏心后,T 形刚构桥主墩及 0#块混凝土浇筑阶段,横桥向将产生最大不平衡弯矩,为 56.756 MN·m,转盘临时固结结构最大可承受横桥向不平衡弯矩为 164.595 MN·m,横桥向不平衡弯矩安全系数为 2.9,故施工阶段 T 形刚构桥满足抗倾覆要求。

为安全考虑,承台及桩基中心相对主墩中心向曲线内侧设置平均横向偏心为 1.050 m。运营阶段,横桥向弯矩由主力-横向附加力控制,墩顶最大横向位移为 22.8 mm,满足墩顶位移不大于 50 mm 的要求^[15]。

5 T 形刚构桥结构动力分析

桥梁结构的自振频率和振型等动力特性是桥梁动力性能的重要体现,桥梁的结构体系、刚度、质量分布及边界条件等对动力特性均有较大影响^[22]。T 形刚构桥在 1~6 阶的自振频率分别为 1.072、1.112、1.231、1.928、2.152、2.435 Hz,1~6 阶振型如图 7 所示。

由图 7 可知:1 阶振型为主梁反对称横向弯曲,2 阶振型为桥墩横向弯曲-主梁对称横向弯曲,3 阶振型为桥墩纵向弯曲-主梁反对称竖向弯曲,4 阶振型为桥墩纵向弯曲-主梁二阶反对称竖向弯曲,5 阶振

型为桥墩横向弯曲-主梁二阶对称横向弯曲,6阶振型为主梁二阶对称竖向弯曲。主梁竖向弯曲出现较晚,表明T形刚构桥的横桥向刚度相对较小,原因是单桥的横向宽度较小。本桥主墩高度较小,主墩刚度比主梁大,桥墩振型出现晚于主梁振型。第1阶振型的自振周期按 $T_1 \leq 1.7$ s进行控制,本桥第1阶振型的自振周期为0.932 8 s,满足文献[23]要求。

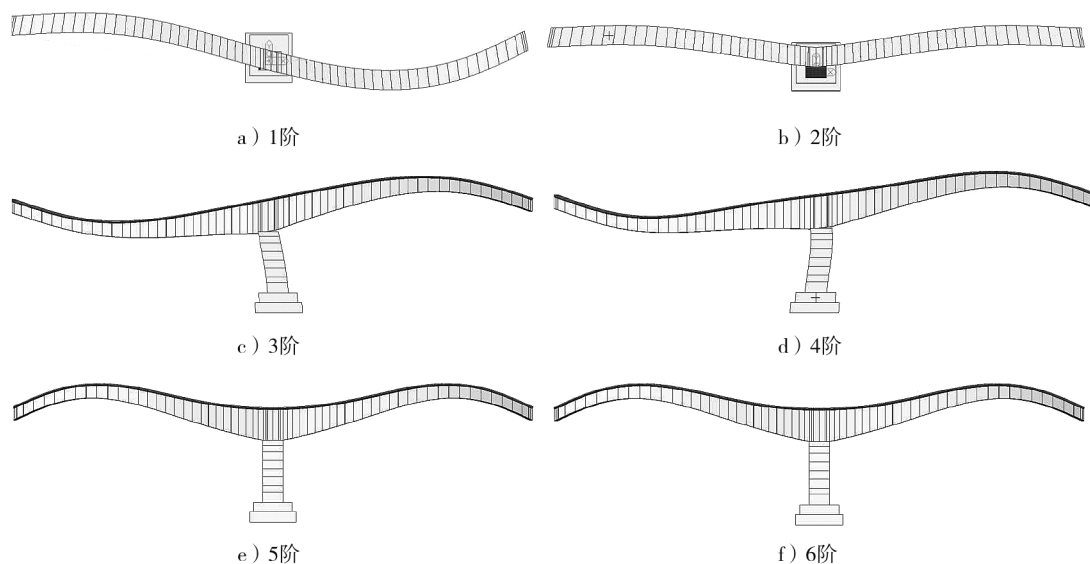


图7 T形刚构桥的1~6阶振型

6 结束语

在曲线半径为500 m的线路上采用跨径为100 m的T形刚构桥转体跨越运营高速铁路,采用软件MIDAS Civil和BSAS分别建立曲线单梁模型和直线单梁模型,对设计的T形刚构桥的主梁和主墩结构进行静力计算分析,采用软件MIDAS Civil对T形刚构桥的结构进行动力计算分析,计算结果表明T形刚构桥的结构强度、刚度、位移和动力特性等均满足设计要求,成功解决了小半径曲线大跨径跨越运营高速铁路的桥梁设计问题。

随曲线半径的减小及T形刚构桥跨径的增大,在桥梁结构计算中应进一步研究弯扭耦合作用对桥梁结构的影响,研究优化曲线桥梁的建模方法,考虑小半径曲线、大跨径T形刚构桥在列车激励下的动力响应及列车行车舒适性问题。

参考文献:

- [1] 杨光强,吴辉,韦定超.超高墩大跨连续刚构桥设计[J].交通科技,2014,22(4):1-4.
YANG Guangqiang, WU Hui, WEI Dingchao. Design of super-high pier and long span continuous rigid frame bridge[J]. Transportation Science & Technology, 2014, 22(4): 1-4.
- [2] 顾云杰.大跨连续刚构桥结构监测参数分析与评估方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.
GU Yunjie. Research on structure monitoring parameter analysis and evaluation method of long span continuous rigid frame bridge[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [3] 曲春升,陆从飞,彭运动.山区大跨连续刚构桥设计思路探讨[J].公路,2017,62(11):88-90.
- [4] 孙大斌.客运专线无砟轨道预应力混凝土T构桥设计跨径研究[J].世界桥梁,2018,46(2):6-9.
SUN Dabin. Study of design span length of passenger-dedicated railway prestressed concrete T-frame bridge with ballastless tracks[J]. World Bridge, 2018, 46(2): 6-9.
- [5] 寇延春.福厦高铁预应力混凝土T构桥设计研究[J].世界桥梁,2020,48(增刊1):80-84.
KOU Yanchun. Design and study of prestressed concrete T-frame bridge on Fuzhou-Xiamen high-speed railway[J]. World

- Bridge, 2020, 48(Suppl. 1): 80-84.
- [6] 陶玉莲. 2×95 m 铁路单线预应力混凝土 T 形刚构桥设计[J]. 世界桥梁, 2014, 42(3): 11-14.
TAO Yulian. Design of a 2×95 m prestressed concrete T-shaped rigid-frame bridge carrying a single track[J]. World Bridge, 2014, 42(3): 11-14.
- [7] 刘文聪. 小半径曲线大跨连续刚构桥受力特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
LIU Wencong. Study on mechanical characteristics of curved continuous rigid frame bridge with small-radius and long-span [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [8] 马明路, 彭逸群. 无合龙段 T 构桥转体施工关键技术研究[J]. 铁道创新技术, 2018(5): 56-58.
MA Minglu, PENG Yiqun. Study on key technology of non-closure T shape frame bridge swing construction[J]. Railway Technical Innovation, 2018(5): 56-58.
- [9] 左家强. 2-100 m 铁路双线预应力混凝土 T 形刚构设计[J]. 铁道标准设计, 2013(11): 51-55.
ZUO Jiaqiang. Design of (100+100)-m double-track T-shaped prestressed concrete rigid frame of a railway bridge[J]. Railway Standard Design, 2013(11): 51-55.
- [10] 尹贻新, 孙洪斌. 潍烟铁路引入潍坊枢纽线路及站场改建方案比选[J]. 交通科技与经济, 2022, 24(6): 60-66.
YIN Yixin, SUN Hongbin. Comparison on the scheme of railway line and station reconstruction of Weifang-Yantai Railway intruducting to Weifang hub[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2022, 24(6): 60-66.
- [11] 钱鸿. 无现浇段大跨转体桥施工关键技术研究[J]. 安徽建筑, 2018, 24(1): 153-154.
- [12] 林骋, 许三平. 大吨位曲线斜拉桥大偏心转体结构优化技术[J]. 桥梁建设, 2022, 52(5): 122-127.
LIN Cheng, XU Sanping. Optimization techniques for large-eccentric and large-tonnage structure rotated during construction of curved cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2022, 52(5): 122-127.
- [13] 崔斌, 胡志华, 吴洪锦. 桥梁转体不平衡偏心距对转动支撑统应力的影响分析[J]. 工程技术研究, 2020, 5(3): 22-24.
CUI Bin, HU Zhihua, WU Hongjin. Analysis of the influence of the unbalanced eccentricity of the bridge on the stress of the rotating support system[J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(3): 22-24.
- [14] 李翀. 变宽曲线转体桥重心偏心量设置研究[J]. 交通科技, 2016(4): 26-29.
LI Chong. Study on eccentric magnitude setting of center of gravity for turn bridge with v aried-width curved beam[J]. Transportation Science & Technology, 2016(4): 26-29.
- [15] 国家铁路局科技与法制司, 中铁工程设计咨询集团公司. 铁路桥涵混凝土结构设计规范: TB 10092—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [16] 李国豪. 大曲率薄壁箱梁的扭转和弯曲[J]. 土木工程学报, 1987, 20(1): 65-75.
LI Guohao. Torsion and bending of thin-walled box girder with great initial curvature[J]. China Civil Engineering Journal, 1987, 20(1): 65-75.
- [17] 郭波. 混凝土曲线梁桥建模分析方法及适用条件研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012.
GUO Bo. Study of concrete curved beam bridge modeling method and applicable conditions[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2012.
- [18] 宋泰宇. 曲线梁桥分析理论和方法研究进展[J]. 长春师范大学学报, 2021, 40(12): 187-193.
- [19] 姚剑穹, 李宁, 徐栋. 不同计算模型研究混凝土弯箱梁桥内外支座反力分布[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会. 第二十届全国桥梁学术会议论文集. 武汉: 人民交通出版社, 2012: 365-372.
- [20] 尹贻新, 叶长允. 铁路钢管混凝土系杆拱设计与计算分析[J]. 铁道标准设计, 2012(11): 38-44.
YIN Yixin, YE Changyun. Analysis on design and calculation for railway concrete-filled steel tube tied arch bridge[J]. Railway Standard Design, 2012(11): 38-44.
- [21] 李登科. 高墩大跨铁路桥梁动力特性分析[J]. 铁道建筑, 2012(7): 1-3.
LI Dengke. Analysis on dynamic performance of large-span railway bridge with high piers[J]. Railway Engineering, 2012(7): 1-3.
- [22] 铁道部. 关于南昆铁路四座大桥横向刚度的补充技术要求: 铁道部建鉴[1992]93 号文[S]. 北京: 铁道部, 1992.
- [23] 李清蒂, 康飞, 陈传勇, 等. 大跨度 PC 连续刚构桥挠度及线形控制[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2022.

(下转第 128 页)