

基于ZC荷载的市域铁路标准简支梁设计研究

周逊泉

浙江省轨道交通建设管理集团 浙江 杭州 310000

摘 要：市域铁路是交通四网融合的重要组成部分，近年来发展迅速。为了适应不同制式列车的跨线运营，市域铁路桥梁需要良好的荷载适应性。本文以某市域铁路为例，研究了预制标准跨度简支箱梁的设计。分析了项目特点、结构形式、荷载效应、荷载检算、车桥耦合分析等方面，重点探讨了动车组列车简支箱梁的ZC荷载适用性。研究结果表明，预制标准跨度单箱单室简支箱梁结构能满足技术要求，ZC荷载设计适应性良好，车桥耦合分析证明了桥梁动力性能满足行车安全性和舒适性。

关键词：市域铁路；简支箱梁；ZC荷载；车桥动力效应

引言：市域铁路连接中心城区与周边城镇，服务于规律性客流，设计时速100-160km/h，提供快速通勤服务。某市域铁路设计规划要求与国铁互联互通，满足市域铁路规范同时，进行国铁技术标准的适应性调整。本线预制标准跨度简支梁采用预制架设施工，主要讨论31.5m跨度，一般为双线梁，特殊情况为单线梁。本文针对本线预制标准跨度简支梁设计进行研究，重点探讨ZC荷载适用性及车桥耦合动力效应。

1 技术标准

- 第一、铁路等级：市域铁路；
- 第二、正线数目：双线；
- 第三、设计行车速度：160km/h，单线80km/h；
- 第四、设计活载：ZC荷载；
- 第五、轨道结构：无砟轨道；
- 第六、设计正常使用年限：正常使用条件下梁体结构设计使用寿命为100年；
- 第七、地震动参数：地震动峰值加速度 $A_g \leq 0.1g$ 。

2 简支箱梁构造

2.1 截面形式选择

综合分析国内外市域与城际铁路简支梁截面，主要类型包括简支箱梁、连续箱梁、U梁、连续钢构和PC轨道梁等。考虑结构特性、景观功能和施工难度，简支箱梁以其强整体性、大刚度、良好耐久性、减振降噪和环保优势脱颖而出。故本次设计选用单箱单室箱梁作为标准简支梁^[1]。

2.2 截面尺寸确定

线桥配置包括轨道板、防护墙、电力电缆槽、通信信号合槽和边墙。桥面顶板宽度为12.1m以适应5.0m线间距。梁高2.2m，底板宽4.6m，腹板斜率1:2.68，顶板厚度0.27m至0.45m，底板厚度0.26m至0.6m，腹板厚度0.35m至0.9m。跨径为31.5m或23.5m。单线桥面宽7.1m，梁高2.2m，底板宽2.8m，腹板斜率1:2.68，顶板厚度0.25m，底板厚度0.25m至0.3m（如图1、图2）。

3.ZC 荷载适用性分析

3.1 荷载效应分析

本市域铁路与金山铁路贯通运营，采用CRH6列车。施工涉及钢轨运输车、打磨车、焊轨车等荷载，针对本线特点，比较了ZS和ZC荷载详见表1。

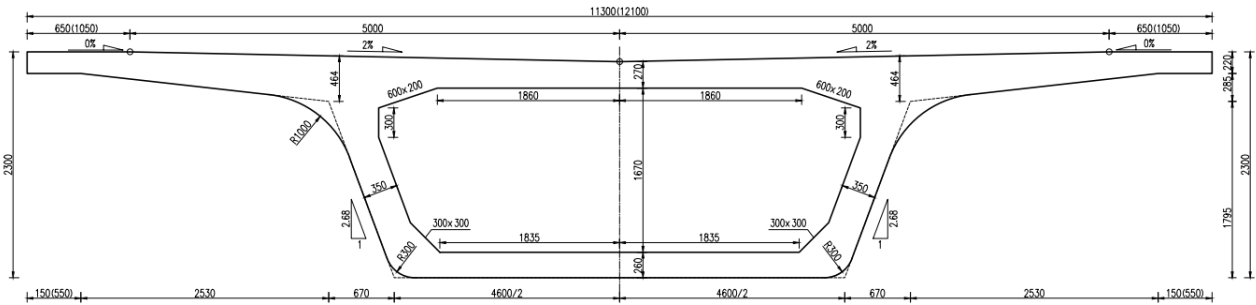


图1 双线简支箱梁跨中截面图（单位：mm）

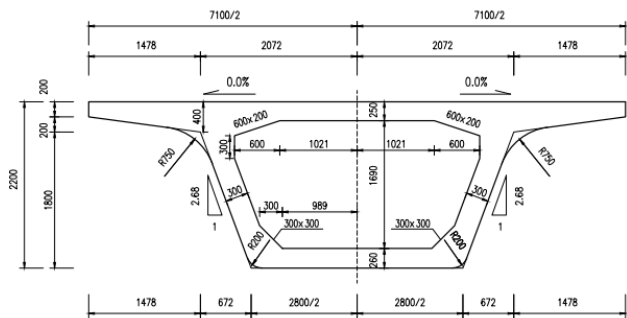


图2 单线简支箱梁跨中截面图 (单位: mm)

表1 荷载图示比较表

荷载分类		荷载对比
1、运营荷载		
1) ZC荷载		> ZS荷载
2) 市域列车	市域A型车	< ZS荷载
	市域D型车	< ZS荷载
3) 城轨列车	城轨A型车	< ZS荷载
	城轨B型车	< ZS荷载
3) CRH列车	CRH1-6型车	> ZS荷载（10-18m跨度）
		< ZS荷载
2、施工车辆荷载		
1) 钢轨运输车	两节SS3牵引36节NX17型平车	> ZS荷载
2) 道岔打磨车	CMC-20道岔打磨车	< ZS荷载
3) 焊轨车	YHG-1200k焊轨车	< ZS荷载

表中显示,对于31.5m和23.5m跨度的梁,CRH6列车荷载小于ZS和ZC荷载。然而,钢轨运输车荷载在施工荷载中较大,可能超过桥梁承载极限,因此需检算施工荷载以确定列车荷载形式。

3.2 荷载检算

施工荷载主要由钢轨运输车荷载和ZS荷载构成。钢轨铺轨车包括牵引车、推送车首车和36节钢轨运输锁轨车。牵引车长10.3m,胶轮轴距6.23m,钢轮轴距4m,自重18t。推送车首车和钢轨运输锁轨车均使用N17平车,车长13.938m,定距9m,底架长13m,转向架轴距1.75m,自重20.8t。推送车设备重10t,锁轨支架重1.046t,钢轨重60kg/m,满载48根钢轨。

第一、依据N17平车计算,车辆长13938mm,定距9000mm,底架长13000mm。推送车重10000kg,装载后重心在两转向架中间,距一位端转向架2400mm;分轨支架重1000kg,重心在2位转向架中心;锁轨支架重2046kg,每车装载48根钢轨,总重40128kg,牵引车自重18000kg。

第二、推送车组首车

推送车车长13938mm,车辆定距9000mm,从左至右轴重分别为8867kg、8867kg、7033kg、7033kg。

第三、钢轨运输锁轨车受力分析

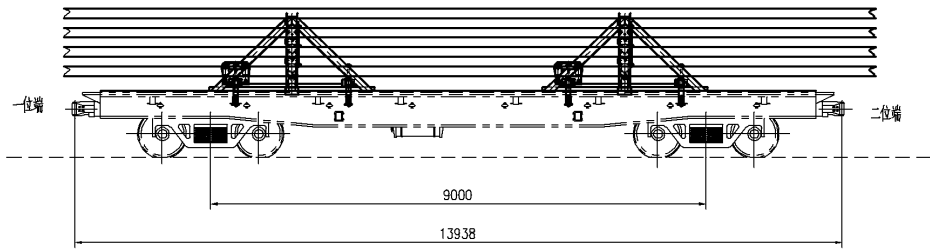


图3 钢轨运输锁轨车图示

钢轨运输锁轨车车长13938mm,车辆定距9000mm,轴重均为16255Kg (如图3)。

第四、牵引车钢轮受力分析

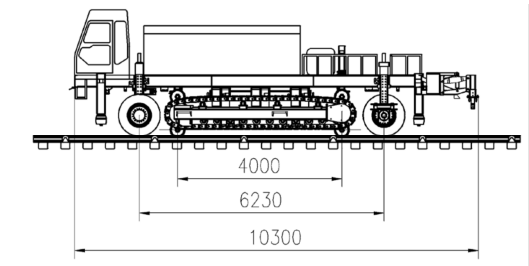


图4 牵引车图示

牵引车车长10300mm，胶轮轴距6230mm，钢轮轴距4000mm轴重均为16255Kg。牵引车胶轮走行时左轴轴重4500Kg、右轴轴重4781Kg（如图4）。

考虑钢轨运输车荷载，采用CRH6运营列车荷载、铺轨荷载、ZS荷载图和ZC荷载图对单线和双线31.5m简支梁进行加载计算，比较最不利情况，结果详见表2：

表2 荷载图示效应比较表

线型	计算跨径	效应	ZS荷载	CRH6F荷载	ZC荷载	铺轨荷载	CRH6F	ZS/ CRH6F	ZC/ CRH6F	铺轨/ CRH6F	铺轨/ZC	铺轨/ZS
双线	31.5	支反力（kN）	1877	1653	2624	1116	1	1.14	1.59	0.68	0.43	0.59
		跨中弯矩（Kn.m）	11957	10008	19218	7067	1	1.19	1.92	0.71	0.37	0.59
单线	31.5	支反力（kN）	938	831	1311	1119	1	1.13	1.58	1.35	0.85	1.19
		跨中弯矩（Kn.m）	5978	4053	9609	7097	1	1.47	2.37	1.75	0.74	1.19

钢轨运输车检算显示，双线31.5m简支梁铺轨荷载与ZS荷载比值最高为0.59，单线为1.19；双线铺轨荷载与ZC荷载比值最高为0.43，单线为0.85。这表明ZC荷载图示能满足施工需求，并提供额外安全储备，更适合本线使用。

CRH6荷载检算显示，双线31.5m简支梁ZS荷载效应比值最小为1.14，单线为1.13；双线ZC荷载效应比值最小为1.59，单线也为1.59。这表明使用ZC荷载图示在运营荷载下具有较高的安全储备，并且由于线路与国铁相连，未来可能引入其他列车型号，ZC荷载图示提供了更大的发展潜力。

3.3 荷载标准选择

使用ZC荷载设计，材料用量适度增加，能有效代表运营和施工荷载，具有较高的荷载储备和远期发展系数。此外，本线与国铁贯通，由于铁路桥涵设计规范尚未包含ZS荷载，采用ZC荷载能更好地符合国铁技术标准^[2]。

4 车桥耦合动力分析

4.1 分析模型

采用车辆-轨道-桥梁耦合动力仿真分析模型，考虑CRH6型动车组通过桥梁时的空间耦合振动动力响应。计算工况包括24m、32m单、双线简支箱梁桥在不同速度下的动力响应。采用美国五级谱进行检算。

4.2 动力特性

32m单线简支梁对称竖弯自振频率3.442Hz，对称横弯自振频率7.457Hz，32m双线简支梁对称竖弯自振频率3.575Hz，对称横弯自振频率11.472Hz，详见表3。

表3 简支梁自振特性计算结果

桥式方案	对称竖弯自振频率(Hz)	对称横弯自振频率(Hz)
32m单线	3.442	7.457
32m双线	3.575	11.472

4.3 动力响应

表4 简支梁桥动力响应

桥式方案	车速	跨中动挠度(mm)	跨中横移(mm)	墩顶横移(mm)	跨中垂向加速度(m/s ²)	跨中横向加速度(m/s ²)	墩顶横向加速度(m/s ²)
32m单线	40	4.770	0.282	0.284	0.158	0.027	0.026
	50	4.723	0.286	0.273	0.207	0.028	0.031
	60	4.600	0.341	0.296	0.152	0.061	0.035
	70	4.616	0.372	0.401	0.179	0.057	0.048
	80	5.040	0.403	0.485	0.257	0.073	0.068
32m双线	60	3.388	2.809	2.687	0.114	0.019	0.041
	80	3.654	3.093	2.954	0.234	0.049	0.042
	100	3.844	4.051	3.785	0.272	0.096	0.094
	120	3.552	3.492	3.337	0.339	0.104	0.102
	140	3.446	3.091	3.126	0.293	0.092	0.116
	160	3.544	2.889	2.945	0.467	0.114	0.129

所有工况下桥梁跨中横向位移最大为4.051mm，跨中动挠度最大为5.040mm，墩顶横向位移最大为3.785mm，

跨中竖、横向振动加速度最大值分别为0.467和0.114m/s²，均满足规范要求。简支梁桥在所有工况下，最大脱轨系数

为0.109，减载率为0.23，均远小于相应的限值0.8和0.6，满足行车安全性要求。车体垂向加速度最大值为0.991m/s²，小于1.3m/s²的限值要求，车体横向加速度最大值为0.781 m/s²，小于1.0m/s²的限值要求。乘坐竖、横向舒适度最大值为1.862和2.438，均评价为"优"，详见表4、表5。

表5 列车动力响应

桥式方案	车速	脱轨系数	减载率	横向轮轨力(kN)	车体加速度(m/s ²)		乘坐舒适度		乘坐舒适度评价	
					垂向	横向	垂向	横向	垂向	横向
32m单线简支箱梁	40	0.055	0.117	7.35	0.591	0.277	1.685	1.868	优	优
	50	0.061	0.124	7.60	0.792	0.367	1.460	1.686	优	优
	60	0.062	0.137	7.84	0.944	0.440	1.455	1.768	优	优
	70	0.064	0.141	8.34	0.977	0.480	1.457	1.956	优	优
	80	0.070	0.148	8.54	0.834	0.496	1.504	2.175	优	优
32m双线简支箱梁	60	0.078	0.141	8.38	0.991	0.440	1.529	1.834	优	优
	80	0.070	0.153	8.64	0.936	0.494	1.489	2.176	优	优
	100	0.086	0.162	9.13	0.822	0.520	1.512	2.287	优	优
	120	0.088	0.195	10.69	0.777	0.625	1.608	2.224	优	优
	140	0.098	0.215	11.93	0.786	0.683	1.670	2.438	优	优
	160	0.109	0.230	12.90	0.857	0.738	1.862	2.438	优	优

4.4 共振分析

表6 桥梁理论共振速度与仿真计算结果

桥式方案	理论共振速度			速度	桥梁跨中最大垂向位移
	一阶(km/h)	二阶(km/h)	三阶(km/h)	km/h	mm
32m单线	235.45	117.72	78.48	40	4.770
				50	4.723
				60	4.600
				70	4.616
				80	5.040
32m双线	244.54	122.27	81.51	60	3.388
				80	3.654
				100	3.844
				120	3.552
				140	3.446
				160	3.544

32m双线、32m单线简支梁一阶理论共振速度分别为244.54km/h、235.45km/h，均大于设计车速160km/h、80km/h，桥梁无共振风险。32m双线、32m单线简支梁

动力仿真分析动挠度相对于车速变化分别为0.456mm、0.44mm，变化不大^[3]，详见表6。

结论

第一、采用单箱单室简支箱梁结构能够满足市域铁路的技术要求，具有良好的结构特性和经济性。

第二、ZC荷载设计具备良好的适应性，能够满足市域铁路的运营需求。

第三、车桥耦合分析验证了桥梁的动力性能满足行车安全性和舒适性要求，桥梁无共振风险。

第四、该铁路32m单线简支箱梁桥满足车速80km/h和32m双线简支箱梁满足车速160km/h安全、平稳通行。

参考文献

[1]王建国,李明辉.基于ZC荷载的市域铁路简支梁桥设计方法研究[J].铁道工程学报, 2020, 37(5): 12-18.

[2]张伟,刘晓明. ZC荷载作用下市域铁路简支梁桥的结构性能研究[J].桥梁建设, 2019, 49(3): 45-52.

[3]李晓东,陈晓明.市域铁路简支梁桥设计规范研究—基于ZC荷载标准[J].铁道标准设计, 2021, 65(8): 23-29.