

文章编号: 1006 - 2106(2011) 03 - 0046 - 06

高速铁路长大桥梁 CRTS I 型双块式 无砟轨道无缝线路影响因素分析*

曲村** 高亮 乔神路 蔡小培

(北京交通大学, 北京 100044)

摘要: 研究目的: 当大跨度连续梁桥上铺设了 CRTS I 型双块式无砟轨道结构之后, 其梁轨相互作用机理更加复杂, 原有的计算方法、计算模型及设计参数可能不再适用。针对既有研究的不足, 本文基于有限元方法建立纵横垂向空间耦合模型, 对道床板和底座板年温差、扣件纵向阻力、橡胶垫板弹性模量和隔离层摩擦系数等设计因素的影响规律进行计算与分析, 为高速铁路长大桥梁 CRTS I 型双块式无砟轨道无缝线路的设计参数的选择提供参考。

研究结论: 在进行设计与检算时, 应根据不同地区的实际情况分别选取当地不同的年温差作为道床板和底座板的温差取值; 通过在桥上采用小阻力扣件, 可以明显降低钢轨最大纵向附加力及轨道结构的受力, 但当扣件纵向阻力较小时, 在长大桥梁的梁端处, 扣件的爬行量较大, 需要重点加以关注; 在限位凹槽周围侧面应设置高弹橡胶垫板; 道床板和底座板之间应尽量采用较小摩擦系数的隔离层。

关键词: 长大桥梁; CRTS I 型; 双块式无砟轨道; 道床板和底座板年温差; 扣件纵向阻力; 橡胶垫板弹性模量; 隔离层摩擦系数

中图分类号: U238; U213. 244 文献标识码: A

Analysis of Influence Factors on CRTS I Double - block Ballastless Track CWR on Long - span Bridge of High - speed Railway

QU Cun, GAO Liang, QIAO Shen - lu, CAI Xiao - pei

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Research purposes: When the CRTS I double - block ballastless track is laid out on long - span continuous bridge, the principle of interaction between bridge and rail is more complicated, and the traditional calculated method, calculated model and design parameters are unavailable. With the finite element method, the longitudinal - transverse - vertical spatial coupled model is established to calculate and analyze the influencing laws of design factors, such as the annual temperature difference between the track bed slab and bed plate, fastening longitudinal resistance, elastic modulus of rubber pad and friction coefficient of isolation layer, and the advices are given on the selection of design parameters of CRTS I double - block ballastless track CWR on long - span bridge of high - speed railway.

Research conclusions: In the process of design and check, the temperature difference between the track bed slab and bed plate should be selected as different annual temperature difference according to actual situation of different regions. Application of small resistance fastenings on bridge would reduce the maximum additional longitudinal rail force and track structure stress obviously, but the creeping amount of fastening on the beam end of long - span bridge would be big

* 收稿日期: 2011 - 01 - 15

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(2008G031 - D); 铁道部科技研究开发计划项目(2010G002 - B); 北京交通大学基本科研业务费专题(2009JBZ014)

** 作者简介: 曲村, 1983 年出生, 男, 在读博士研究生。

and should be paid attention to. The high - elastic rubber pad should be installed around the positive stop groove. The isolation layer with friction coefficient should be installed between track bed slab and bed plate.

Key words: long - span bridge; CRTS I type; double - block ballastless track; annual temperature difference between track bed slab and bed plate; fastening longitudinal resistance; elastic modulus of rubber pad; friction coefficient of isolation layer

我国部分高速铁路线的桥上铺设了 CRTS I 型双块式无砟轨道。当大跨度连续梁桥上铺设了 CRTS I 型双块式无砟轨道结构之后,其梁轨相互作用机理更加复杂,原有的计算方法、计算模型及设计参数可能不再适用。国内对于 CRTS I 型双块式无砟轨道的生产、施工、测量和调整进行了一定的研究^[1-10],但针对长大桥梁上铺设的 CRTS I 型双块式无砟轨道无缝线路的理论研究相对较少,在设计 and 参数的选择上面临着新的难题。

针对既有研究的不足,本文在已有研究的基础上^[11],基于有限元方法建立了高速铁路长大桥梁 CRTS I 型双块式无砟轨道无缝线路纵横垂向空间耦合模型。对道床板和底座板年温差、扣件纵向阻力、橡胶垫板弹性模量和隔离层摩擦系数等设计因素的影响规律进行了计算与分析。

1 模型建立

高速铁路长大桥梁 CRTS I 型双块式无砟轨道无缝线路主要由钢轨、扣件、道床板、双快式轨枕、底座板、凹槽、橡胶垫板、隔离层、水硬性支撑层和桥梁、墩台等结构组成。

(1) 钢轨选用梁单元模拟,按实际截面属性建模,考虑钢轨的截面积、惯性矩以及扭转弯矩等参数。

(2) 扣件采用非线性弹簧单元进行模拟,可全面考虑扣件的纵向阻力、横向阻力和垂向刚度。扣件的阻力和刚度均可根据实测值取值。桥上 CRTS I 型双块式无砟轨道无缝线路的扣件节点间距为 654 mm。

(3) 道床板和双块式轨枕采用实体单元进行模拟,可以全面考虑结构的几何尺寸和物理属性。在桥上采用长 6.44 m 的标准道床板,每块道床板上布置 10 个扣件。道床板宽 2.8 m,厚度为 0.21 m,道床板之间设置 100 mm 的板缝。道床板和双块式轨枕的实体单元模型如图 1 所示。

(4) 桥上采用道床板加底座板的结构,道床板与底座板之间设置隔离层,通过凹槽限位。限位凹槽周围侧面设置橡胶垫板。底座板采用实体单元进行模拟。底座板与道床板等长等宽,厚度取为 0.26 m。底座板的实体单元模型如图 2 所示。

(5) 路基上采用道床板加水硬性支撑层的结构,

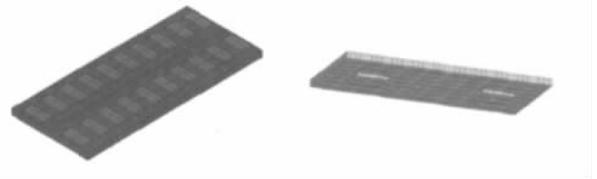


图 1 道床板和双块式轨枕实体单元模型

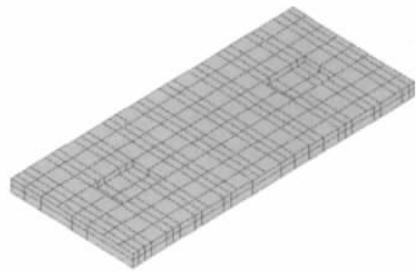


图 2 底座板实体单元模型

水硬性支撑层每隔 5.2 m 左右设置一条深度约 105 mm 的横向伸缩假缝,纵向宽度 5 mm。水硬性支撑层采用实体单元进行模拟,可以全面考虑支撑层的几何尺寸和物理属性。路基上水硬性支撑层的实体单元模型如图 3 所示。

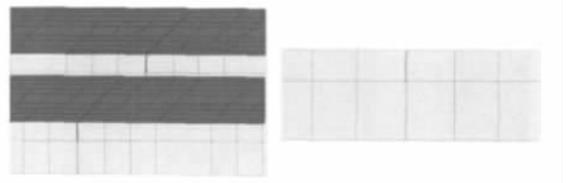


图 3 路基上水硬性支撑层实体单元模型

(6) 桥梁采用实体单元进行模拟,可以全面考虑桥梁结构的几何尺寸和物理属性。简支梁和连续梁实体单元模型如图 4 所示。



图 4 简支梁和连续梁实体单元模型

(7) 桥梁墩台顶纵向刚度采用线性弹簧单元进行模拟。简支梁桥墩纵向刚度取 400 kN/cm, 连续梁桥墩纵向刚度取 1 500 kN/cm。

(8) 由以上各部分组成的高速铁路长大桥梁 CRTS I 型双块式无砟轨道无缝线路的整体计算模型如图 5 和图 6 所示。

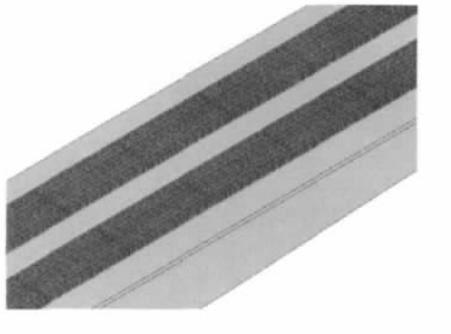


图 5 高速铁路长大桥梁 CRTS I 型双块式无砟轨道无缝线路整体计算模型局部图



图 6 高速铁路长大桥梁 CRTS I 型双块式无砟轨道无缝线路整体计算模型

2 影响因素分析

2.1 道床板和底座板年温差影响分析

本部分比较分析道床板和底座板年温差分别取为 30 ℃、35 ℃ 和 40 ℃ 时的主要温度力和位移计算结果, 桥梁日温差取 20 ℃。不同的道床板和底座板年温差条件下的钢轨受力和钢轨位移比较如图 7 和图 8 所示。横坐标 0 点为桥梁与一侧路基相交的位置, 下同。不同道床板和底座板年温差条件下的主要温度力和位移计算结果比较如表 1 和表 2 所示。

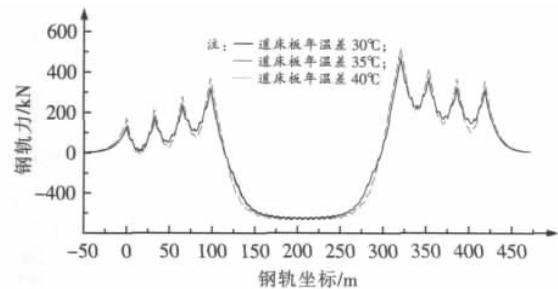


图 7 不同道床板和底座板年温差条件下钢轨力比较

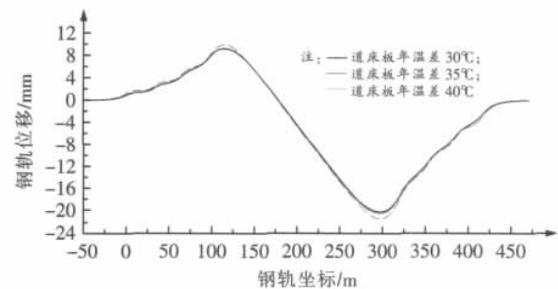


图 8 不同道床板和底座板年温差条件下钢轨位移比较

表 1 不同道床板和底座板年温差条件下主要受力计算结果比较

道床板和底座板年温差 / ℃	钢轨最大纵向力 / kN	道床板最大应力 / MPa	底座板最大应力 / MPa	简支梁桥墩最大纵向力 / kN	连续梁桥墩最大纵向力 / kN
30	468.117	1.231	5.527	385.460	590.240
35	473.700	1.308	8.204	386.770	598.950
40	519.156	1.574	10.885	395.780	604.200

表 2 不同道床板和底座板年温差条件下主要位移计算结果比较

道床板和底座板年温差 / ℃	钢轨最大纵向位移 / mm	道床板最大纵向位移 / mm	底座板最大纵向位移 / mm	简支梁端最大纵向位移 / mm	连续梁端最大纵向位移 / mm
30	20.097	23.091	28.881	16.567	28.801
35	20.350	23.817	29.508	16.728	29.384
40	21.339	27.531	30.093	17.072	29.928

由以上图表对比可知, 随着道床板和底座板年温差由 30 ℃、35 ℃ 到 40 ℃ 逐渐增大, 在受力方面: 钢轨纵向力逐渐变大, 道床板和底座板最大应力以及简支梁和连续梁的桥墩最大纵向力也有明显增大; 在位移

方面: 钢轨纵向位移逐渐变大, 道床板、底座板以及简支梁和连续梁端的最大纵向位移也都有所增大。

由以上计算结果分析得出, 在温度变化的条件下, 当桥梁日温差保持不变时, 随着道床板和底座板年温

差取值的增大,钢轨、道床板、底座板与桥墩受力及轨道和桥梁结构的变形都有明显增大。因此,在进行设计与检算时应根据不同地区的实际情况分别选取当地不同的年温差,特别是在严寒地区等年温差较大的地区更应严格进行计算与检算,以保证轨道和桥梁结构的安全使用。

2.2 扣件纵向阻力影响分析

当铺设无缝线路的桥梁长度较长时,钢轨所受到的伸缩附加力较大,适当降低扣件纵向阻力可以有效的减少钢轨受力。本部分比较分析扣件纵向阻力分别为 15.0 kN/组(常阻力)、9.0 kN/组、6.5 kN/组和 4.0 kN/组(小阻力)时的主要温度力和位移计算结果。不同的扣件纵向阻力条件下的钢轨受力和钢轨位移比较如图 9 和图 10 所示。不同扣件纵向阻力条件下的主要温度力和位移计算结果比较如表 3 和表 4 所示。

由以上图表对比可知,随着桥上扣件纵向阻力由 15.0 kN/组、9.0 kN/组、6.5 kN/组到 4.0 kN/组逐渐减小,在受力方面:钢轨纵向力逐渐变小,道床板和底座板最大应力以及简支梁和连续梁桥墩最大纵向力也都有所减小;在位移方面:钢轨纵向位移逐渐变小,简

支梁端的最大纵向位移也有所减小,而道床板、底座板和连续梁端的最大纵向位移则有所增大。

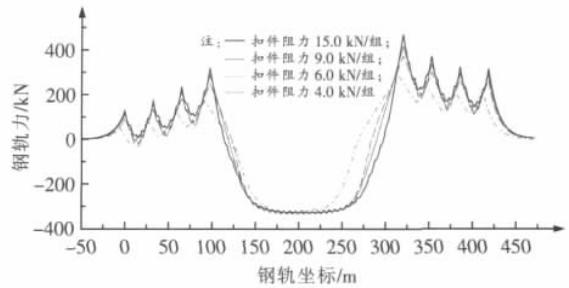


图9 不同扣件纵向阻力条件下钢轨力比较

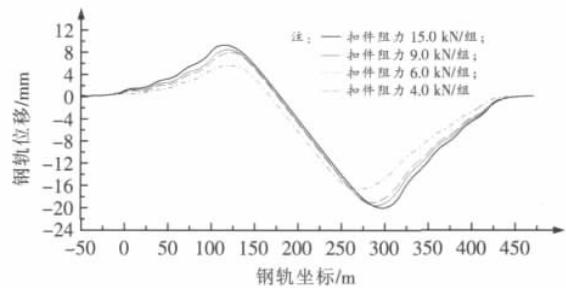


图10 不同扣件纵向阻力条件下钢轨位移比较

表3 不同扣件纵向阻力条件下主要受力计算结果比较

扣件纵向阻力 /kN/组	钢轨最大纵向力 /kN	道床板最大应力 /MPa	底座板最大应力 /MPa	简支梁桥墩最大纵向力/kN	连续梁桥墩最大纵向力/kN
15.0	468.117	1.231	5.527	385.460	590.240
9.0	417.782	0.892	5.524	331.240	513.970
6.5	373.352	0.847	5.516	291.240	493.090
4.0	323.103	0.800	5.512	218.100	461.910

表4 不同扣件纵向阻力条件下主要位移计算结果比较

扣件纵向阻力 /kN/组	钢轨最大纵向位移/mm	道床板最大纵向位移/mm	底座板最大纵向位移/mm	简支梁端最大纵向位移/mm	连续梁端最大纵向位移/mm
15.0	20.097	23.091	28.881	16.567	28.801
9.0	19.654	26.711	29.498	15.208	29.415
6.5	19.173	28.170	29.706	14.207	29.622
4.0	16.781	30.036	30.068	12.378	29.983

由以上计算结果分析得出,在温度变化的条件下,通过在桥上采用小阻力扣件即减小桥上扣件的纵向阻力,可以明显降低钢轨最大纵向附加力及轨道结构的受力,保证轨道和桥梁结构的安全使用。但为了防止钢轨爬行或者在低温断轨时钢轨断缝值过大,扣件纵向阻力也不宜太小。当扣件纵向阻力较小时,在长大桥梁的梁端处,扣件的爬行量较大,需要重点加以关注。

2.3 橡胶垫板弹性模量影响分析

本部分比较分析限位凹槽周围侧面橡胶垫板弹性模量分别为 1 倍设计值、5 倍设计值和 10 倍设计值时的主要温度力和位移计算结果。不同的橡胶垫板弹性模量条件下的钢轨受力和钢轨位移比较如图 11 和图 12 所示。不同橡胶垫板弹性模量条件下的主要温度力和位移计算结果比较如表 5 和表 6 所示。

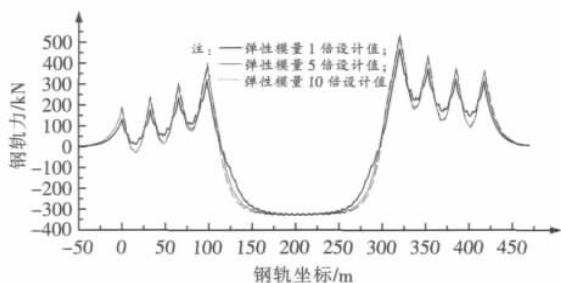


图 11 不同橡胶垫板弹性模量条件下钢轨力比较

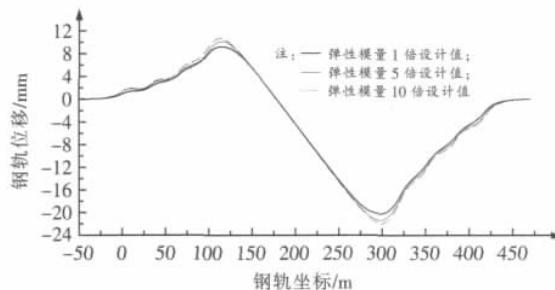


图 12 不同橡胶垫板弹性模量条件下钢轨位移比较

表 5 不同橡胶垫板弹性模量条件下主要受力计算结果比较

橡胶垫板弹性模量	钢轨最大纵向力 / kN	道床板最大应力 / MPa	底座板最大应力 / MPa	简支梁桥墩最大纵向力 / kN	连续梁桥墩最大纵向力 / kN
1 倍设计值	468.117	1.231	5.527	385.460	590.240
5 倍设计值	524.501	1.246	5.540	396.440	567.300
10 倍设计值	540.859	1.255	5.549	420.120	557.150

表 6 不同橡胶垫板弹性模量条件下主要位移计算结果比较

橡胶垫板弹性模量	钢轨最大纵向位移 / mm	道床板最大纵向位移 / mm	底座板最大纵向位移 / mm	简支梁端最大纵向位移 / mm	连续梁端最大纵向位移 / mm
1 倍设计值	20.097	23.091	28.881	16.567	28.801
5 倍设计值	21.243	28.096	28.957	16.829	28.878
10 倍设计值	21.794	28.948	29.004	17.425	28.926

由以上图表对比可知,随着橡胶垫板弹性模量由 1 倍设计值、5 倍设计值到 10 倍设计值逐渐增大,在受力方面:钢轨纵向力逐渐变大,道床板和底座板最大应力以及简支梁桥墩最大纵向力也有明显增大,而连续梁桥墩最大纵向力则有所减小;在位移方面:钢轨纵向位移逐渐变大,道床板、底座板以及简支梁和连续梁端的最大纵向位移也都有所增大。

由以上计算结果分析得出,在温度变化的条件下,随着限位凹槽周围侧面橡胶垫板弹性模量的增大,钢轨以及部分轨道和桥梁结构的受力与变形都有明显增大。因此,在限位凹槽周围垂直侧面应优先设置高弹橡胶垫板,以降低由于温度和收缩而产生的约束应力。值得注意的是,随着长大桥梁 CRTS I 型双块式无砟轨道无缝线路的投入使用,橡胶垫板的弹性在反复挤压和材料老化的影响下可能有所下降,这一因素在设计中应该予以考虑。

2.4 隔离层摩擦系数影响分析

本部分比较分析隔离层摩擦系数分别为 0.50、0.65 和 0.80 时的主要温度力和位移计算结果。不同的隔离层摩擦系数条件下的钢轨受力和钢轨位移比较如图 13 和图 14 所示。不同隔离层摩擦系数条件下的主要温度力和位移计算结果比较如表 7 和表 8 所示。

由以上图表对比可知,随着隔离层摩擦系数由 0.50、0.65 到 0.80 逐渐增大,在受力方面:钢轨纵向

力逐渐变大,底座板最大应力和简支梁桥墩最大纵向力也有所增大,而道床板最大应力和连续梁桥墩最大纵向力则有所减小;在位移方面:钢轨纵向位移逐渐变大,道床板、底座板以及简支梁和连续梁端的最大纵向位移也都有所增大。

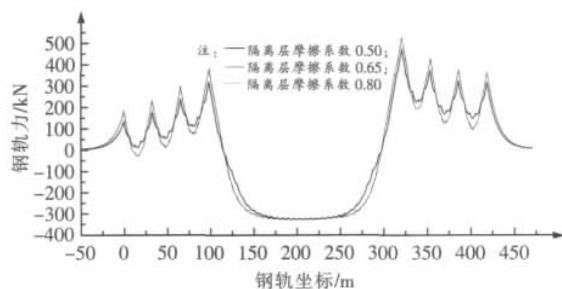


图 13 不同隔离层摩擦系数条件下钢轨力比较

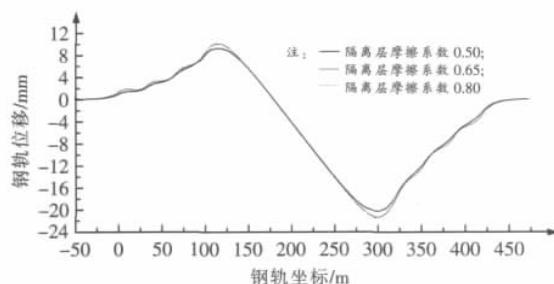


图 14 不同隔离层摩擦系数条件下钢轨位移比较

表7 不同隔离层摩擦系数条件下主要受力计算结果比较

隔离层摩擦系数	钢轨最大纵向力 / kN	道床板最大应力 / MPa	底座板最大应力 / MPa	简支梁桥墩最大纵向力 / kN	连续梁桥墩最大纵向力 / kN
0.50	468.117	1.231	5.527	385.460	590.240
0.65	521.812	1.065	5.539	392.030	568.440
0.80	525.536	0.809	5.546	395.850	565.160

表8 不同隔离层摩擦系数条件下主要位移计算结果比较

隔离层摩擦系数	钢轨最大纵向位移 / mm	道床板最大纵向位移 / mm	底座板最大纵向位移 / mm	简支梁端最大纵向位移 / mm	连续梁端最大纵向位移 / mm
0.50	20.097	23.091	28.881	16.567	28.801
0.65	21.198	27.351	28.937	16.715	28.861
0.80	21.275	28.223	28.955	16.811	28.880

由以上计算结果分析得出,在温度变化的条件下,随着隔离层摩擦系数的增大,钢轨以及部分轨道和桥梁结构的受力与变形都有明显增大。因此,道床板和底座板之间应尽量采用较小摩擦系数的隔离层,以减小轨道和桥梁结构的相互作用。值得注意的是,随着长大桥梁 CRTS I 型双块式无砟轨道无缝线路的投入使用,隔离层的摩擦系数在反复摩擦和材料老化的影响下可能有所上升,这一因素在设计中也应该予以考虑。

3 结论

基于本文的计算条件和计算参数,在温度变化的条件下,主要得出以下几点结论:

(1) 当桥梁日温差保持不变时,随着道床板和底座板年温差取值的增大,钢轨、道床板、底座板与桥墩受力及轨道和桥梁结构的变形都有明显增大。因此,在进行设计与检算时应根据不同地区的实际情况分别选取当地不同的年温差,特别是在严寒地区等年温差较大的地区更应严格进行计算与检算,以保证轨道和桥梁结构的安全使用。

(2) 通过在桥上采用小阻力扣件即减小桥上扣件的纵向阻力,可以明显降低钢轨最大纵向附加力及轨道结构的受力,保证轨道和桥梁结构的安全使用。但为了防止钢轨爬行或者在低温断轨时钢轨断缝值过大,扣件纵向阻力也不宜太小。当扣件纵向阻力较小时,在长大桥梁的梁端处,扣件的爬行量较大,需要重点加以关注。

(3) 随着限位凹槽周围侧面橡胶垫板弹性模量的增大,钢轨以及部分轨道和桥梁结构的受力与变形都有明显增大。因此,在限位凹槽周围垂直侧面应优先设置高弹橡胶垫板,以降低由于温度和收缩而产生的约束应力。值得注意的是,随着长大桥梁 CRTS I 型双块式无砟轨道无缝线路的投入使用,橡胶垫板的弹性

在反复挤压和材料老化的影响下可能有所下降,这一因素在设计中应该予以考虑。

(4) 随着道床板与底座板之间隔离层摩擦系数的增大,钢轨以及部分轨道和桥梁结构的受力与变形都有明显增大。因此,道床板和底座板之间应尽量采用较小摩擦系数的隔离层,以减小轨道和桥梁结构的相互作用。值得注意的是,随着长大桥梁 CRTS I 型双块式无砟轨道无缝线路的投入使用,隔离层的摩擦系数在反复摩擦和材料老化的影响下可能有所上升,这一因素在设计中也应该予以考虑。

参考文献:

- [1] 蒋建设,罗新南,彭仁军. 武广客运专线 CRTS I 型双块式无砟轨道施工设备配套研究 [J]. 铁道工程学报, 2009 (7): 54 - 56.
- [2] 严少发,丁立金,王善高. 隧道内 CRTS I 型双块式无砟轨道施工关键技术 [J]. 铁道工程学报, 2009 (11): 13 - 16.
- [3] 赵东田,孙晖. CRTS I 双块式无砟轨道综合整理技术 [J]. 铁道标准设计, 2009 (11): 28 - 30.
- [4] 刘彬. 武广铁路客运专线 CRTS I 型双块式无砟轨道施工工艺及质量控制 [J]. 铁道标准设计, 2010 (1): 58 - 63.

(下转第 63 页)

不损坏堤坝、封航时间短、效率高、成本低等明显的经济、技术、社会效益。

而浮托顶推法是对浮拖法的创新,即将前方拖拉改为后方顶推,设施更加简单,操作更加方便。适用于跨河或靠海潮汐水位 2 m 以上,满足浮箱组运行条件的各种大跨度桥梁的架设和更换桥梁。

参考文献:

[1] TB 10303—2009, 铁路桥涵工程施工安全技术规程 [S].
TB 10303—2009, Safety Constructional Regulations for Railway Bridge and Culvert Engineering [S].

[2] TB 10203—2002, 铁路桥涵施工规范 [S].
TB10203—2002, Code for Construction on Bridge & Culvert of Railway [S].

[3] TB 10415—2003, 铁路桥涵工程施工质量验收标准 [S].
TB10415—2003, Standard for Constructional Quality Acceptance of Railway Bridge and Culvert Engineering [S].

[4] 徐化轩. 顶推梁桥施工中可能出现的技术问题及对策 [J]. 铁道工程学报, 2002(6): 13-16.

Xu Huaxuan. The Possible Technical Problems and Countermeasures During Construction of Launched Bridges [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2002(6): 13-16.

[5] 徐化轩, 史丰收. 基于虚拟仪器技术的桥墩顶部位移自动监控系统 [J]. 铁道工程学报, 2002(3): 30-33.
Xu Huaxuan, Shi Fengshou. The Inspecting and Control System for Deflection of Top End of Piers Based on Virtual Instrument [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2002(3): 30-33.

[6] 侯勇. 简支双线钢桁梁桥设计与施工技术研究 [J]. 铁道工程学报, 2010(10): 62-66.
Hou Yong. Design and Construction of Simply-supported Double-track Steel Truss Girder Bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(10): 62-66.

[7] 乐伟. 跨度 62.8 m 钢桁梁浮拖架设技术 [J]. 铁道标准设计, 2005(6): 47-51.
Le Wei. To Erect a Steel Girder Bridge of 62.8 m Span by Float Tow [J]. Railway Standard Design, 2005(6): 47-51.



(上接第 51 页)

Liu Bin. Construction Technology and Quality Control for CRTS I Double-block Ballastless Track on Wuhan - Guangzhou Passenger Dedicated Line [J]. Railway Standard Design, 2010(1): 58-63.

[5] 张峰. CRTS I 型双块式无砟轨道施工精度和动静态精调工作要点 [J]. 铁道标准设计, 2010(1): 69-71.
Zhang Feng. The Main Points of Construction Accuracy and Dynamic and Static Fine Tuning of CRTS I Double-block Ballastless Track [J]. Railway Standard Design, 2010(1): 69-71.

[6] 伍林. CRTS I 型双块式无砟轨道精调技术研究 [J]. 铁道标准设计, 2010(1): 74-79.
Wu Lin. Research of Accuracy Technology of CRTS I Double-block Ballastless Track [J]. Railway Standard Design, 2010(1): 74-79.

[7] 刘世海, 郭建钢, 王波. CRTS I 型双块式无砟轨道静态调整和动态调整技术 [J]. 铁道标准设计, 2010(1): 80-84.
Liu Shihai, Guo Jiangang, Wang Bo. Research of Static and Dynamic Adjustment of CRTS I Double-block Ballastless Track [J]. Railway Standard Design, 2010(1): 80-84.

[8] 李方东. 武广铁路客运专线 CRTS I 型双块式无砟轨道施工关键技术 [J]. 铁道建筑, 2010(1): 26-29.

Li Fangdong. Key Construction Technology for CRTS I Double-block Ballastless Track on Wuhan - Guangzhou Passenger Dedicated Line [J]. Railway Engineering, 2010(1): 26-29.

[9] 陈政. CRTS I 型双块式无砟轨道道床板轨排稳定控制技术 [J]. 铁道建筑, 2010(1): 30-31.
Chen Zheng. Stability Control Technology for Track Bed Slab Track Panel of CRTS I Double-block Ballastless Track [J]. Railway Engineering, 2010(1): 30-31.

[10] 姜强. 桥上 CRTS I 型双块式无砟轨道简易工装法施工技术 [J]. 铁道建筑技术, 2010(1): 67-70.
Jiang Qiang. Construction Technology for Simple Tooling Method of CRTS I Double-block Ballastless Track on Bridge [J]. Railway Construction Technology, 2010(1): 67-70.

[11] 陈鹏, 高亮, 冯雅薇, 等. 连续梁桥上无缝线路纵向附加力的变化规律 [J]. 北京交通大学学报, 2007(1): 85-88.
Chen Peng, Gao Liang, Feng Yawei, etc. Variety Rules of Additional Longitudinal Force of Continuously Welded Rails on Bridge with Continuous Beam [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007(1): 85-88.