

连续梁桥上非标准板厚无砟轨道受力及变形分析

武钰斌

中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2021年11月27日; 录用日期: 2021年12月11日; 发布日期: 2021年12月29日

摘要

本文基于西安地铁5号线工程桥梁地段桥面标高存在超限较大或低于设计标高情况, 提出了轨道结构加强措施, 通过建立桥梁-轨道系统静力分析模型, 分析了列车荷载、温度荷载作用下连续梁桥上全断面道床和加厚道床两种无砟轨道的受力和变形特征。研究表明: 本文提出的轨道设计方案在解决标高问题的同时, 可满足轨道结构耐久性要求, 应力水平平均小于混凝土抗拉强度; 温度荷载作用下部分区域存在应力集中现象, 施工中应严格控制道床板温度, 确保施工质量。

关键词

铁道工程, 无砟轨道, 受力, 变形

Analysis of Stress and Deformation of Non-Standard Thickness of Ballastless Track Slab on Continuous Beam Bridge

Yubin Wu

China Railway First Survey & Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Nov. 27th, 2021; accepted: Dec. 11th, 2021; published: Dec. 29th, 2021

Abstract

The track structure strengthening measures were proposed based on the fact that the bridge elevation exceeded the limit or was lower than the design elevation in Xi'an Metro Line 5 project, so a static analysis model of bridge-track system was established to analyze the force and

deformation characteristics of two ballastless tracks concluding full-section ballast bed and thicker ballast bed on continuous beam bridges under the train and temperature load. The research results show that the track design proposed in this paper can not only solve the elevation problem, but also meet the durability requirements of the track structure. The stress level is less than the tensile strength of concrete; there is stress concentration in some areas under the action of temperature load. The temperature of the track building should be strictly controlled to ensure the quality of construction.

Keywords

Railway Engineering, Ballastless Track, Stress, Deformation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市轨道交通高架线路跨越宽度较大的河流或道路时，一般采用多跨连续梁桥作为主要桥梁形式，但由于支座沉降、自重挠曲和施工误差等因素影响，桥梁限界核查时难免出现侵界较大或未达设计标高的情况，此时，道床板须采取局部减薄或加厚措施，以保证轨面平顺性。道床板过厚，在温度荷载作用下道床板易产生翘曲变形；道床板过薄，承载力小，难以满足正常的行车荷载要求。

西安地铁5号线是西安市城市轨道交通网络中一条重要的东西交通大动脉，全长45.37千米，其中，丝路小镇站至西马坊站区间全长864 m，桥梁结构采用简支梁和连续梁形式，轨道采用承轨台式整体道床。但由于桥梁施工误差影响，DK6+241.679至DK6+358.274区间(32+50+3) m连续梁桥面标高存在超限较大或低于设计标高情况，超限值达到87 mm，低于设计标高值达到186 mm，桥面标高超限情况见图1。

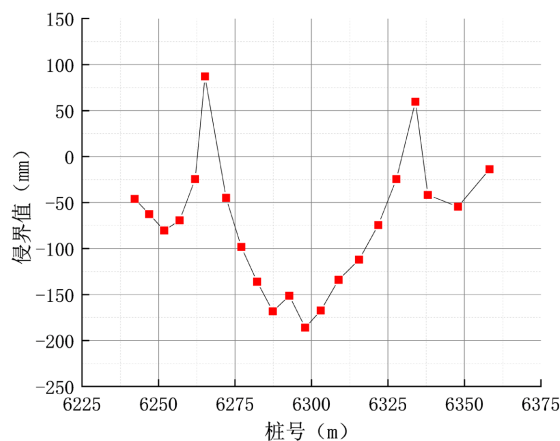


Figure 1. The intrusion boundary value diagram of (32 + 50 + 33) m continuous beam

图 1. (32 + 50 + 33) m 连续梁侵界值示意图

目前，国内外诸多学者对铁路线下基础不均匀变形问题进行了大量研究。文献[1] [2] [3]通过建立有限元模型，分析了路基冻胀变形与高速无砟轨道结构的关联关系，对路基冻胀变形管理限值初步讨论。

文献[4]通过建立混凝土塑性损伤模型模拟轨道结构的力学行为,分析路基不均匀沉降条件下 CRTSII 型板式无砟轨道结构的损伤和变形规律。文献[5] [6] [7]通过建立轨道与线下基础耦合动力模型,结合既有线实际工程情况,分析路基在不同沉降波长和沉降幅值时,不同形式的无砟轨道结构的受力状态及振动特征。文献[8]通过对厚度、弹性模量及分层填充的适用性进行研究,优化了地铁沉降地段板式无砟轨道结构中维修用填充层的关键参数。文献[9]通过研究桥墩沉降导致轨道底座板与桥面脱空的机理,对不同沉降量导致的脱空区域面积及脱空距离进行了对比分析。文献[10]通过研究桥墩沉降引起的无砟轨道受力及变形问题,建立桥体-轨道空间耦合模型,研究不同沉降条件下,无砟轨道结构受力及变形规律。由此可见,现有研究多针对基础不均匀变形对轨道结构受力及变形的影响。对桥梁梁面偏差条件下,轨道结构铺设及施工缺少深入的研究。

针对该区间桥梁限界不满足要求的情况,轨道结构需要采取加强措施,在不影响轨道结构本身服役性能的同时,消除梁面高程偏差以满足轨面平顺性。桥梁侵限地段需减薄道床厚度,为提高道床承载能力,将承轨台式整体道床优化为全断面道床;针对梁面高程不足地段道床加厚。加强地段范围及措施,详见表 1。

Table 1. The mileages and measures of strengthen area

表 1. 加强地段里程及措施

序号	起点里程	终点里程	道床加强措施
1	DK6+261.239	DK6+273.139	全断面道床 + 薄轨枕
2	DK6+279.089	DK6+320.739	底层钢筋加密 + 普通轨枕
3	DK6+326.686	DK6+338.589	全断面道床 + 薄轨枕

2. 有限元模型建立

2.1. 无砟轨道有限元模型

桥梁上承轨台式整体道床无砟轨道由钢轨、扣件系统和支承块轨枕等组成。钢轨选取为标准 60 kg/m 型钢轨,弹性模量 $E = 210 \text{ Gpa}$;钢轨和支承块轨枕间通过弹簧单元来模拟扣件的支承和约束作用,考虑其垂向、横向和纵向刚度,刚度取值分别为 30 kN/mm、15 kN/mm 和 50 kN/mm,扣件间距按实际扣件间距取值;整体道床为单元结构,缝宽 100 mm,采用实体单元模拟,普通轨枕尺寸为 575 mm × 250 mm × 150 mm,薄型轨枕尺寸为 575 mm × 250 mm × 140 mm。所建立的有限元模型如图 2、图 3 所示。

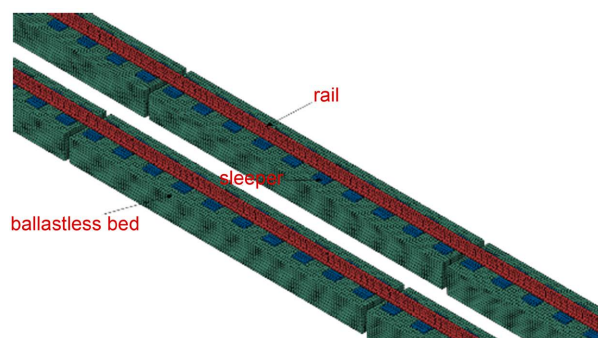


Figure 2. Finite element model of monolithic track with supporting rail

图 2. 承轨台式整体道床有限元模型

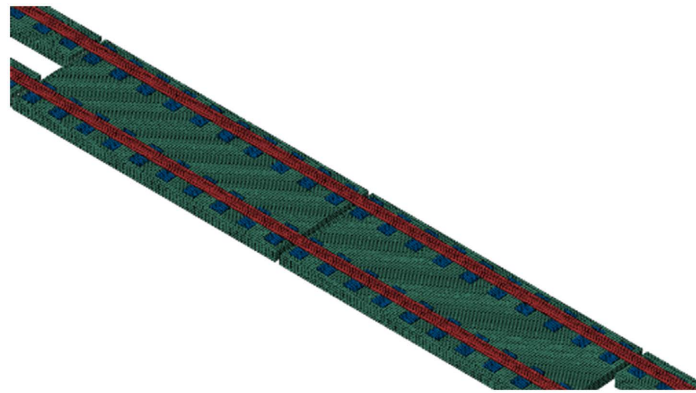


Figure 3. Finite element model of cross-section monolithic track
图 3. 全断面整体道床有限元模型

2.2. 连续梁有限元模型

为提高计算效率，连续梁简化为等截面箱型梁，桥面宽度为 10.3 m，梁高 2.34 m，箱梁截面尺寸及桥梁模型如图 4 所示。

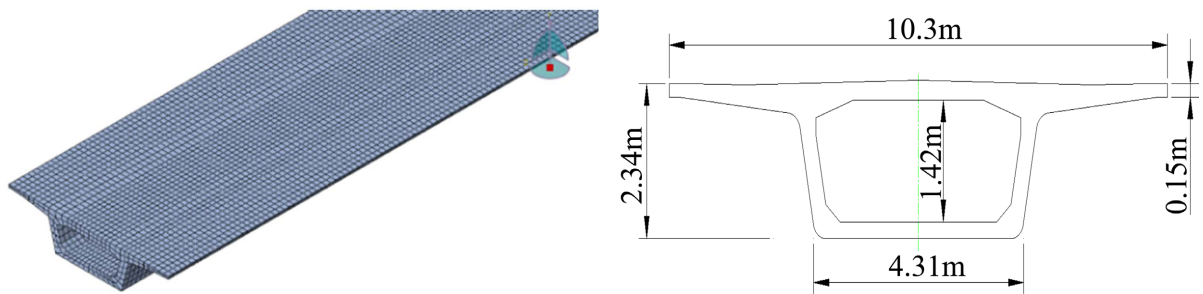


Figure 4. Continuous beam bridge model
图 4. 连续梁桥模型

连续梁桥共设 8 个支座，支座布置如下图 5 所示，其中 2、3、7 号支座仅约束 y 方向位移，1、4、8 号支座约束 z 方向位移和 y 方向位移，6 号支座约束 x 和 y 方向位移，5 号支座约束三个方向位移，各支座均不约束三个方向的旋转(x 横桥向；y 垂桥向；z 纵桥向)。

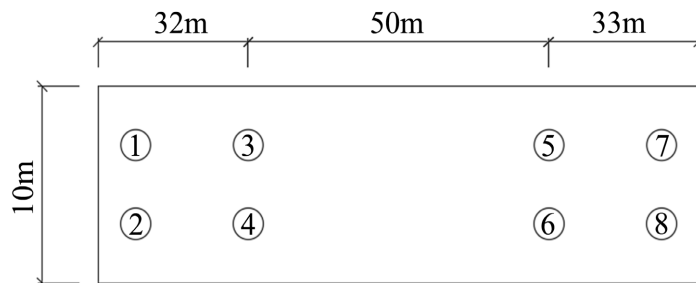


Figure 5. Continuous beam support layout drawing
图 5. 连续梁支座布置图

经结构高程计算，连续梁桥上道床及轨枕形式如下表 2 所示，所建立的无砟轨道 - 桥梁系统有限元模型如图 6 所示，各结构层基本参数如表 3 所示。

Table 2. The form of track slab and sleeper
表 2. 道床板及轨枕形式

板编号	道床厚度	道床形式	轨枕形式
1#~2#	270	3780 标准板	普通轨枕
3#~4#	270	5950 标准板	普通轨枕
5#~6#	270	5950 全断面	薄轨枕
7#	270	5950 标准板	普通轨枕
8#	387	5950 加强板	普通轨枕
9#	438	5950 加强板	普通轨枕
10#	421	5950 加强板	普通轨枕
11#	456	5950 加强板	普通轨枕
12#	437	5950 加强板	普通轨枕
13#	404	5950 加强板	普通轨枕
14#	363	5950 加强板	普通轨枕
15#	270	5950 标准板	普通轨枕
16#~17#	270	5950 全断面	薄轨枕
18#~20#	270	5950 标准板	普通轨枕
21#	270	1735 标准板	普通轨枕

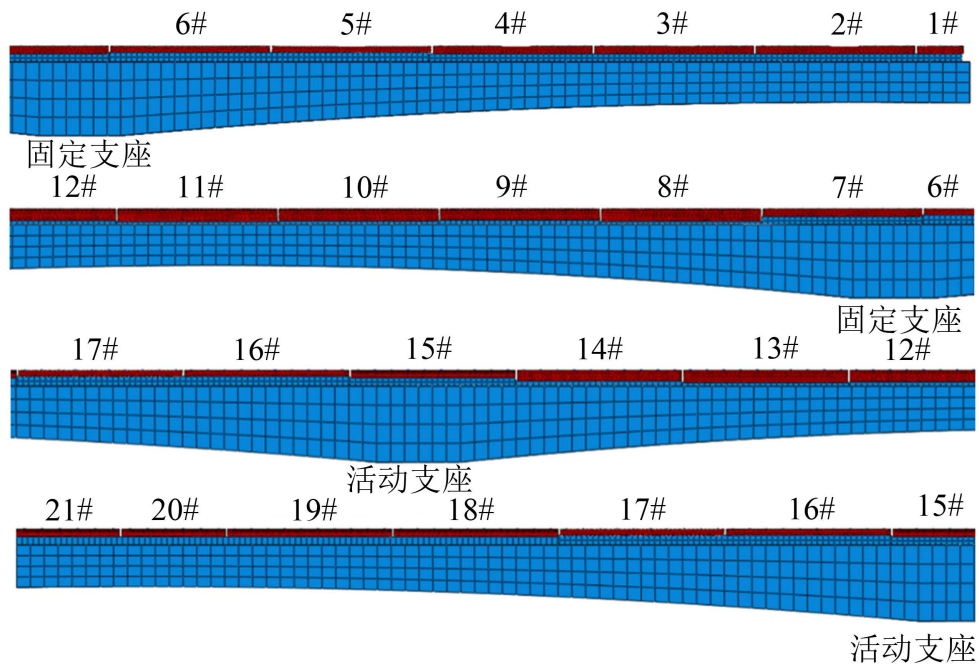


Figure 6. Static model of ballastless track-bridge system
图 6. 无砟轨道 - 桥梁系统静力模型

Table 3. Basic parameters of structure
表 3. 结构基本参数

部件	项目	单位	数值
钢轨	密度	kg/m ³	7800
	弹性模量	MPa	210,000
	泊松比	/	0.3
	热膨胀系数	/°C	1.18 × 10 ⁻⁵
轨枕	密度	kg/m ³	2500
	弹性模量	MPa	34,500
	泊松比	/	0.2
	热膨胀系数	/°C	1 × 10 ⁻⁵
道床板	密度	kg/m ³	2500
	弹性模量	MPa	32,500
	泊松比	/	0.2
	热膨胀系数	/°C	1 × 10 ⁻⁵
桥面	密度	kg/m ³	2500
	弹性模量	MPa	38,000
	泊松比	/	0.2
	热膨胀系数	/°C	1 × 10 ⁻⁵

2.3. 荷载及边界条件设置

2.3.1. 荷载说明

1) 列车荷载

列车荷载模型中采用地铁 B 型车，轴重为 14 t，转向架轴距 2.2 m，车体定距 12.6 m。列车荷载考虑 3 节编组，动力系数取值 1.8。

荷载工况共取三组，工况一至工况三荷载作用如图 7~9 所示，其中工况一中荷载沿跨中对称布置，工况二中荷载作用于板 14#中部，工况三荷载作用于板 4#中部。

2) 温度荷载

无砟轨道温度荷载作用主要分为两部分，一是整体温度荷载，二是温度梯度荷载。根据《铁路无缝线路设计规范》及《铁路桥涵基本设计规范》的规定，并结合西安市历史气温，考虑最不利温度荷载情况。钢轨、道床和轨枕整体最大升温荷载取值 40°C，最大降温荷载为-40°C；桥梁整体升温荷载为 30°C，最大降温荷载为-30°C。

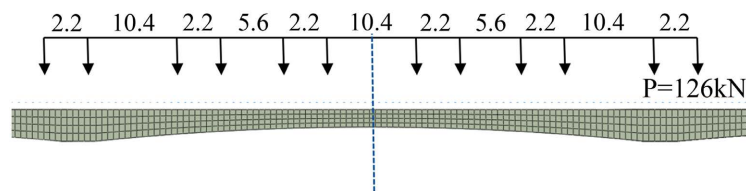


Figure 7. Schematic diagram of load condition 1
图 7. 工况一荷载示意图

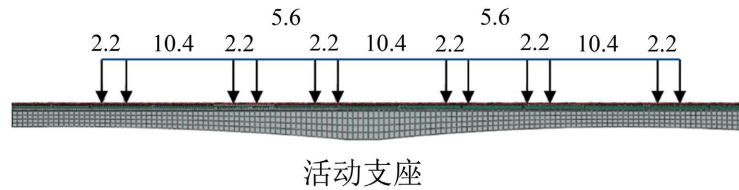


Figure 8. Schematic diagram of load condition 2
图 8. 工况二荷载示意图

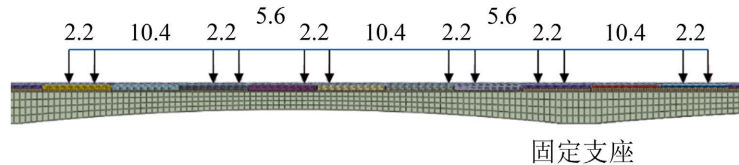


Figure 9. Schematic diagram of load condition 3
图 9. 工况三荷载示意图

2.3.2. 边界条件设置

轨枕与道床板、道床板与桥面设置为绑定约束，不考虑二者间的离缝或脱空。连续梁桥共设三跨，模型长度为 116 m，钢轨采用对称边界约束。

3. 无砟轨道力学特性分析

3.1. 列车荷载作用分析

3.1.1. 工况一条件下道床板力学特性分析

列车荷载作用下道床板纵向应力云图如图 10 所示，可以看出：道床板纵向最大拉应力位于 7#道床板中部上表面，最大拉应力为 0.51 MPa，低于 C40 混凝土抗拉强度。

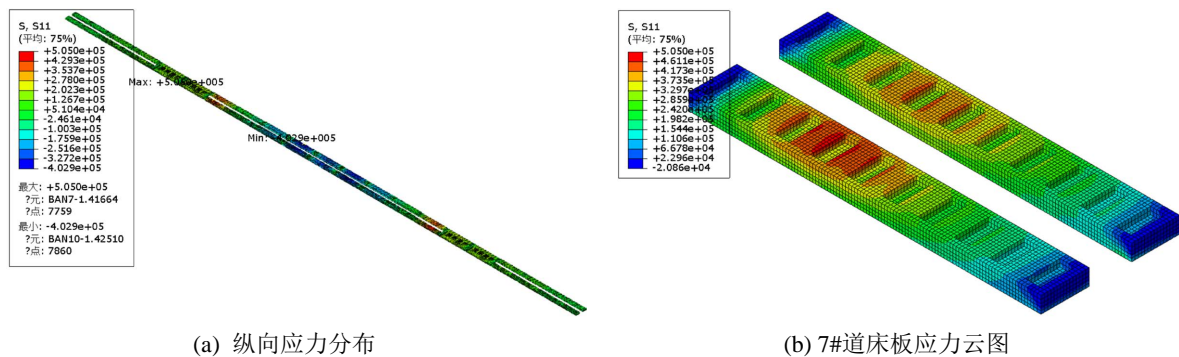


Figure 10. Stress cloud diagram of track slab on load condition 1 (Pa)

图 10. 工况一道床板应力云图(Pa)

3.1.2. 工况二条件下道床板力学特性分析

列车荷载作用下道床板纵向应力云图如图 11 所示，可以看出：道床板纵向最大拉应力位于 8#道床板上表面，原因主要在于 8#道床板位于支座附近，列车荷载作用下承受负弯矩所致，纵向最大拉应力为 0.50 MPa，低于 C40 混凝土抗拉强度。

3.1.3. 工况三条件下道床板力学特性分析

列车荷载作用下道床板纵向应力云图如图 12 所示，可以看出：最大拉应力出现在 6#道床板及 15#

道床板，最大拉应力为 0.56 MPa，低于 C40 混凝土抗拉强度。

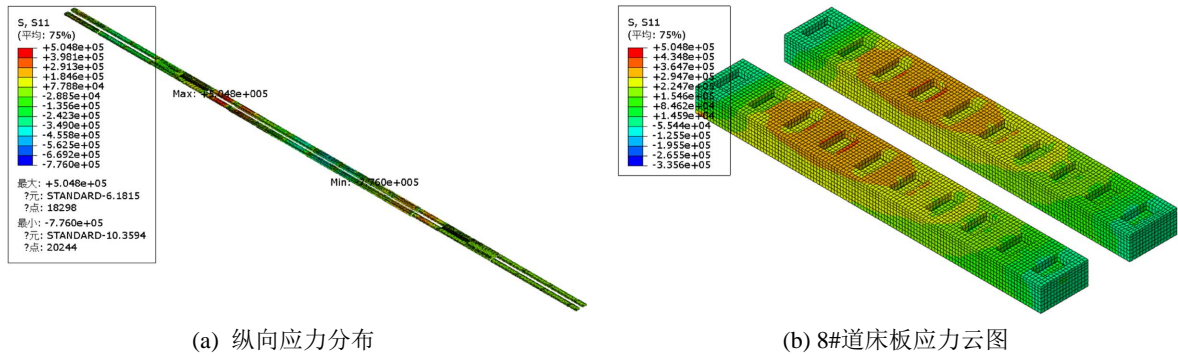


Figure 11. Stress cloud diagram of track slab on load condition 2 (Pa)
图 11. 工况二道床板应力云图(Pa)

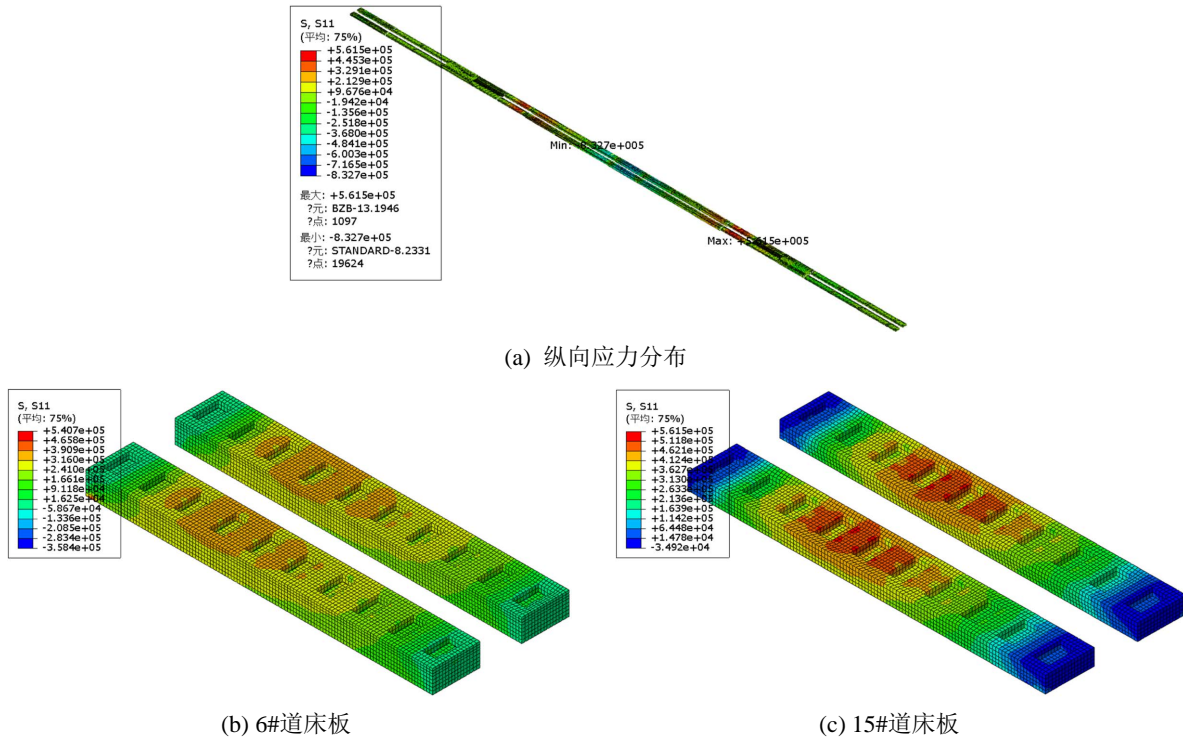


Figure 12. Stress cloud diagram of track slab on load condition 3 (Pa)
图 12. 工况三道床板应力云图(Pa)

3.2. 整体温度荷载作用分析

整体温度荷载即结构轴向温度，使轨道发生整体拉伸、收缩，由于无砟轨道支承块轨枕、道床板、桥面板等各结构层材料的热力学属性存在差异，整体温度作用下无砟轨道各结构层难以协调，容易引起轨道结构破坏。

3.2.1. 整体升温

整体升温荷载作用下，道床板的纵向最大拉应力分布如图 13 所示。可以得到以下结论。

- 1) 道床板纵向最大拉应力位于桥梁两端，最大拉应力位置位于 21#道床板端部，量值为 0.273 MPa，

最大压应力位置位于跨中的 11#道床板，量值为 3.91 MPa。

2) 加厚段道床板(7#~15#)最大拉应力约为 0.18 MPa，全断面道床板最大拉应力仅为 0.10 MPa 左右。各道床板最大纵向压应力在 2.7 MPa 至 3.9 MPa 之间，桥梁跨中道床板纵向压应力较边跨略大。

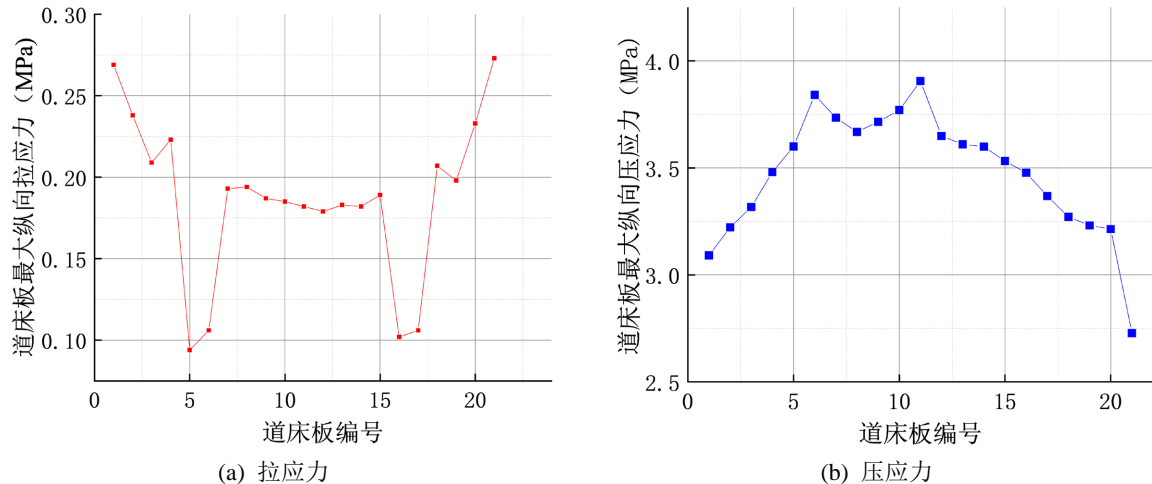


Figure 13. Stress distribution of track slab when temperature increased 40°C

图 13. 整体升温 40°C 道床板应力分布

全断面道床板(6#)和加厚道床板(8#)形成最大拉应力，两块道床板最大拉应力随整体升温的变化关系如图 14 所示。可以看出，在道床板最大拉应力与升温幅度呈线性关系；采用加厚道床形式，道床板应力较大，最大拉应力在整体升温 40°C 时达到 0.19 MPa，但仍低于 C40 混凝土的抗拉强度。

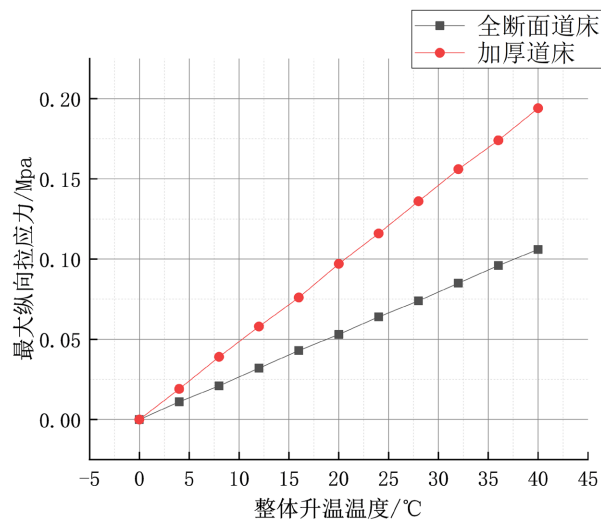


Figure 14. Maximum longitudinal tensile stress of track slab under different heating loads

图 14. 不同升温荷载下道床板最大纵向拉应力

桥梁整体升温 30°C、道床板整体升温 40°C、钢轨整体升温 40°C 情况下，道床板垂向变形如图 15 所示，整体升温荷载作用下道床板变形云图如图 16 所示。可以看出，在整体升温荷载作用下，道床板变形呈上拱特性；连续梁桥边跨变形较大，中跨变形较小；道床板最大垂向位移为 1.10 mm，最小垂向位移为 0.50 mm。

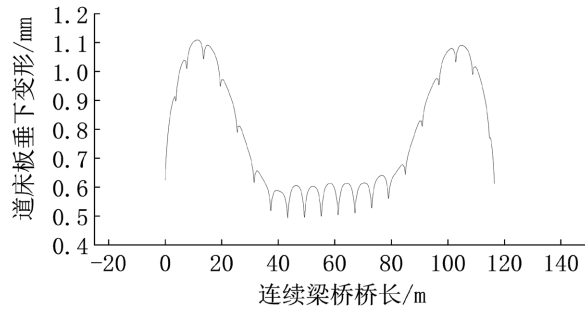


Figure 15. Vertical displacement along the bridge's longitudinal track slab
图 15. 沿桥梁纵向道床板垂向位移

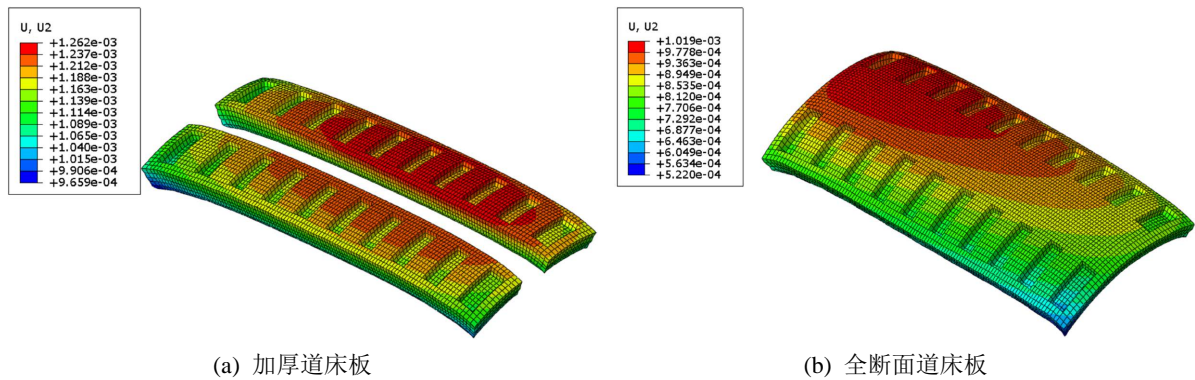


Figure 16. Deformation cloud map of track slab under overall heating load (m)
图 16. 整体升温荷载作用下道床板变形云图(m)

3.2.2. 整体降温

整体降温荷载作用下，道床板的最大拉应力分布如图 17 所示。可以得到以下结论。

- 1) 最大拉应力位于连续梁桥跨中部位，最大压应力位于梁端。
- 2) 全断面道床板地段最大纵向拉应力为 0.384 MPa (6#道床板)，加厚道床板地段最大拉应力为 0.391 MPa (11#道床板)。

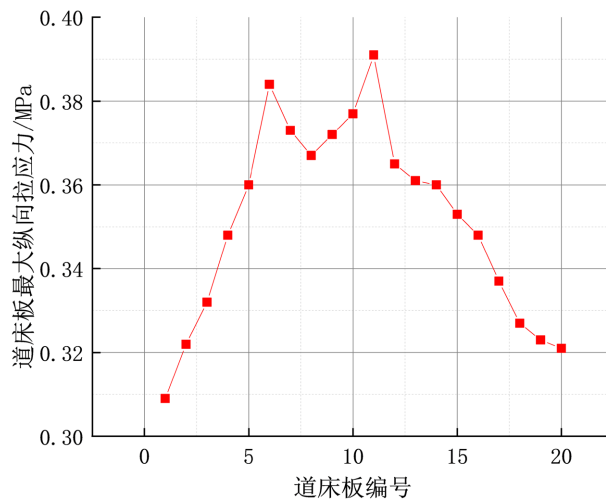


Figure 17. Longitudinal stress distribution of track slab when temperature decreased 40°C
图 17. 整体降温 40°C 道床板纵向拉应力分布

整体降温荷载作用下,桥梁垂向变形如图 18 所示。可以看到:

- 1) 连续梁桥中跨为下凹变形,边跨为上凸变形;
- 2) 道床板变形与桥面变形较为一致,从局部来看单块道床板主要呈下凹变形;
- 3) 最大垂向位移位于连续梁桥边跨中部,最大垂向位移为 1.13 mm 左右(3#道床板)。

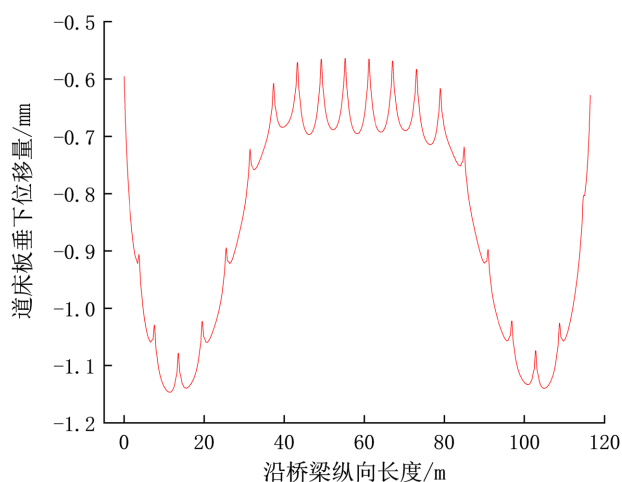


Figure 18. Vertical displacement along the bridge's longitudinal track slab
图 18. 沿桥梁纵向道床板垂向位移

4. 结论

本文通过建立连续梁桥上无砟轨道静力计算模型,分析了采用较薄的全断面道床板及加铺钢筋的加厚道床板在列车荷载、温度荷载作用下的受力特征。主要结论如下。

- 1) 本文提出的设计方案具有可行性,满足轨道结构耐久性要求。
- 2) 全断面道床及加厚道床在列车荷载及温度荷载最不利作用下,道床板的最大纵向拉应力低于混凝土抗拉强度设计值。
- 3) 在温度荷载作用下部分区域存在应力集中现象。因此,在极端条件下施工时需加强道床板的温度控制,严格控制施工温度和保证施工质量,避免道床板开裂等病害。

参考文献

- [1] 吴仲伦. 高速铁路路基冻胀对轨道不平顺的影响分析及动力响应[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [2] 张永斌. 高速铁路路基冻胀对双块式无砟轨道结构的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
- [3] 赵文博. 高速铁路 CRTS I 型板式无砟轨道路基冻胀影响规律研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2017.
- [4] 崔旭浩, 杨怀志, 杜博文, 等. 路基不均匀沉降对 CRTS II 型板式无砟轨道损伤和变形影响分析[J]. 铁道学报, 2021, 43(10): 91-97.
- [5] 程年圣. 高速铁路路基不均匀沉降对双块式无砟轨道动力特征影响研究[J]. 工程与建设, 2021, 35(4): 664-667.
- [6] 肖威. 路基不均匀沉降对 CRTS III 型板式无砟轨道力学特性的影响[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [7] 蔡成标, 翟婉明, 王开云. 遂渝线路基上板式轨道动力性能计算及评估分析[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 17-21.
- [8] 杨明辉. 地铁沉降地段板式无砟轨道填充层关键参数研究[J]. 路基工程, 2021(5): 130-135.

- [9] 陈天浩, 杨建伟, 王金海, 等. 多桥墩沉降下轨道底座板与桥面板间脱空区域的研究分析[J]. 北京建筑大学学报, 2021, 37(2): 54-62.
- [10] 张鹏飞, 连西妮, 桂昊, 等. 墩底沉降对桥上 CRTS II 型板式无砟轨道纵向力的影响[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(1): 113-119.