

文章编号: 1674—8247(2024)02—0010—07

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 02. 002

32 m T 型梁梁端变形对无砟轨道扣件受力规律研究

付琪璋¹ 安 震² 李佳静¹ 万廷聪³

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043; 2. 中国铁路沈阳局集团有限公司, 沈阳 110001;
3. 鲁南高速铁路有限公司, 济南 250000)

摘 要:无砟轨道扣件实现了钢轨与混凝土道床、下部基础的连接。扣件受力除轮轨作用下的正常服役工作状态外,还包括桥梁地段梁端变形诱发扣件受力状态变化。为保障桥梁地段无砟轨道扣件正常服役状态,本文以 32 m T 型梁为载体,通过分析梁端转角、垂向位移、预留梁缝及扣件安装位置等变量,研究了 T 型梁梁端变形及接口构造对无砟轨道扣件受力的影响。结果表明:梁端变形引起的扣件上拔力与梁端转角、垂向位移及转角位移组合变形线性相关,提出了不同构造变量与扣件上拔力的线性表达式。研究成果可为客货共线桥梁铺设无砟轨道梁端变形控制及构造设计提供参考。

关键词:无砟轨道; T 型梁; 梁端变形; 扣件; 上拔力

中图分类号: U213. 5⁺3 文献标志码: A

Study on Effect of Deformations at the Ends of 32 m T-girder on Stress Distribution of Ballastless Track Fasteners

FU Qizhang¹ AN Zhen² LI Jiajing¹ WAN Tingcong³

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China;
2. China Railway Shenyang Bureau Group Co., Ltd., Shenyang 110001, China;
3. Lunan High Speed Railway Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: For ballastless track, fasteners are used to connect the steel rails with the concrete track bed and the underlying foundation. In addition to the load under the normal service conditions of wheel-rail interaction, the fasteners also encompasses stress variations due to deformation at the ends of girders in bridge sections. To ensure the normal service state of the ballastless track fasteners in bridge sections, this paper took 32 m T-girder as the example, to analyze variables such as rotation angle at girder end, vertical displacement, reserved girder gaps, and fastener installation position, and assess the impact of T-girder end deformations and joint structure on the force exerted on ballastless track fasteners. The results show that the uplift force on the fasteners caused by girder-end deformation is linearly related to the rotation angle at girder end, the vertical displacement, and the combined deformation of rotation and displacement. Linear expressions between different structural variables and the uplift force on the fasteners are proposed. The findings can provide a reference for controlling end deformations of T-girders and for the structural design in the construction of ballastless tracks on bridges of mixed passenger and freight railway.

Key words: ballastless track; T-girder; girder-end deformation; fasteners; uplift force

收稿日期: 2023-12-07

作者简介: 付琪璋(1985-), 男, 高级工程师。

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2022SF-452)

引文格式: 付琪璋, 安震, 李佳静, 等. 32 m T 型梁梁端变形对无砟轨道扣件受力规律研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(2): 10-16.

FU Qizhang, AN Zhen, LI Jiajing, et al. Study on Effect of Deformations at the Ends of 32 m T-girder on Stress Distribution of Ballastless Track Fasteners [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2): 10-16.

桥梁承受荷载作用后,梁端会产生转角以及位移。在有砟轨道中,桥梁遭受荷载梁端产生的转角及位移时,因道砟流动一般不会对桥上轨道结构产生影响;在无砟轨道中,钢轨通过扣件与混凝土道床及桥梁直接相接,梁端转角及位移直接通过道床板反映至扣件处,在扣件处产生过大的上拔力或下压力^[1]。当扣件上拔力超过扣件系统扣压力,钢轨就会与轨道板脱离;当扣件下压力超过垫板疲劳强度,扣件垫板会发生疲劳破坏^[2]。无砟轨道的几何精度依靠扣件维持,弹性也要依靠扣件^[3]。国内对无砟轨道扣件的研究有很多成果^[4-10],田春香^[11]发现桥梁存在坡度时,坡度对梁缝附近扣件上拔力的影响大于温度、跨度以及温度跨度的组合,得到了桥梁坡度在温度、跨度作用下的适应值;冯玉林^[12]发现连续梁的变形(包括桥墩沉降、梁体错台及梁端转角)使得扣件内力集中在梁缝处;易南福^[13]提出桥梁出现梁端位移时,扣件会承担很大作用力;蔡小培^[14]提出扣件纵向阻力取值对于无砟轨道无缝线路的变形几乎无影响,但考虑到钢轨爬行,其取值应满足最小限值;李志红^[15]提出桥梁发生位移时,严格限制梁端两侧的非对称转动;马战国^[16]提出梁端位移影响范围一般不超过6组扣件;申磊^[17]提出在桥梁无砟轨道系统中,影响扣件系统最为明显的是梁端转角以及错台。扣件与轨道板刚性连接,扣件上拔力超过限值时,会引起弹条断裂、列车运行动态响应不良等情况,严重情况下出现道床板上抬或与底座脱离,影响轨道系统稳定性与列车运行安全性。扣件与轨道板连接是梁端桥梁与轨道系统设计的重点工作之一。

对于客货共线铁路梁端转角, TB 10002-2017《铁路桥涵设计规范》中未提及客货共线桥梁范围铺设无砟轨道或明桥面结构竖向转角相关指标,过往学者的研究中对此方面涉及较少。本文分析客货共线桥梁结构发生竖向转角时,梁端无砟轨道结构和扣件系统的受力情况,以32 m T型梁为载体,开展梁端变形及梁轨接口构造对扣件上拔力影响研究。

1 梁端转角及位移引起扣件上拔力机理分析

无砟轨道结构与梁端转角及悬出长度的相关限制主要是:由于无砟轨道结构钢轨通过扣件与混凝土道床及桥梁刚性连接,当桥梁端部转动过大且悬臂较长时,将造成梁缝两侧产生较大竖向位移差,并由于钢轨的前后牵制作用引起梁缝一侧扣件受压、另一侧扣件受拉的情况,如图1所示。位移差过大会使受拉

侧扣件的拉力超出扣件节点的设计扣压力,导致扣件弹条破坏。因此,扣件承受拉力的大小主要与梁端转角大小和梁端悬出长度有关,随着梁端转角和悬出长度的增大而增大。

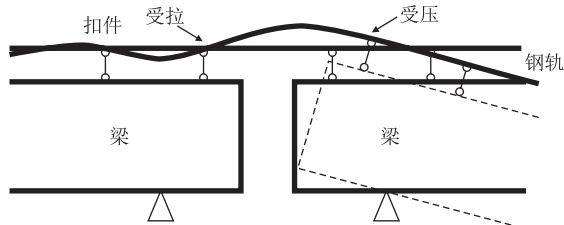


图1 梁端转角影响图

桥梁梁端转角叠加梁面竖向位移会引起车体振动加速度、轮轨力、扣件受力状态及无砟轨道等结构受力状态变化。其中,扣件受力状态指标较为敏感,一般需结合工点特征开展扣件上拔力检算。

2 梁端结构变形分析有限元模型

根据桥上32 m T型梁无缝线路固定区特征及双块式无砟轨道与桥梁变形协调关系,在分析梁端变形及扣件受力时,将道床板、底座和桥梁作为一个整体结构,且仅考虑扣件垂向荷载与受力,建立符合本文计算要求的轨道-桥梁力学模型,如图2所示。图中, n 为扣件节点数量; a 为扣件节点间距; L 为支座至梁缝距离, $L=0.3\text{ m}$; H_1 为轨枕承轨面至桥梁梁面距离; H_b 为桥梁支座处截面高度。

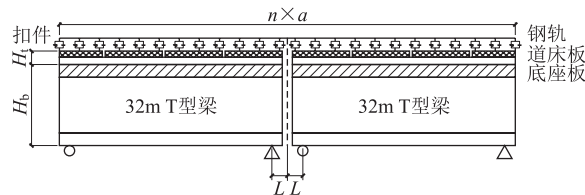


图2 梁端结构变形分析模型图

通过有限元软件 ANSYS-APDL 建立轨桥系统模型,其中钢轨、道床、底座板以及梁体均为弹性体,采用实体单元 SOLID185 建模;扣件部分采用非线性弹簧单元来模拟。钢轨为有限长梁,约束钢轨端部的纵向和垂向位移,道床、底座以及梁体进行绑定,钢轨与梁体之间通过扣件连接,模型参数选取如表1所示。

3 梁端结构变形对扣件上拔力规律分析

3.1 转角影响分析

《铁路桥涵设计规范》规定:对于无砟轨道,当

表 1 有限元模型几何参数及变形参数表		
结构	项目	取值
双块式无砟轨道	钢轨	60N U75 V
	扣件	WJ-12小阻力扣件: 支承间距 600 mm
	道床	C40钢筋混凝土结构: 6 m × 2.8 m × 0.26 m(长 × 宽 × 厚)
	底座	C40钢筋混凝土结构: 6 m × 2.8 m × 0.2 m(长 × 宽 × 厚)
32 m T 型梁 (单线、两片梁)	T 型梁跨度/m	32
	T 型梁高度/m	2.742
	支座与梁端距离/m	0.3
	截面积/m ²	3.181
	惯性矩/m ⁴	3.65

梁端悬出长度 $l \leq 0.55$ m 时,桥台与桥梁之间梁端转角 $\theta \leq 1.5\text{‰}$,相邻两孔梁之间梁端组合转角 $\theta_1 + \theta_2 \leq 3\text{‰}$;当梁端悬出长度 $0.55 \text{ m} < l \leq 0.75$ m,桥台与桥梁之间梁端转角 $\theta \leq 1.0\text{‰}$,相邻两孔梁之间组合转角 $\theta_1 + \theta_2 \leq 2\text{‰}$ 。不同扣件位置处扣件上拔力如图 3 所示。梁缝为 300 mm、扣件支承间距为 600 mm、梁端发生单侧 1.5‰ 转角工况下,扣件上拔力在梁端转角位置处最大,达到 8.13 kN,两侧扣件为扣压力;梁缝与扣件支承间距不变,在组合转角 3.0‰ 工况下,在梁端两侧位置分别发生扣件扣压力和上拔力峰值,峰值水平相当,达到 9.425 kN。

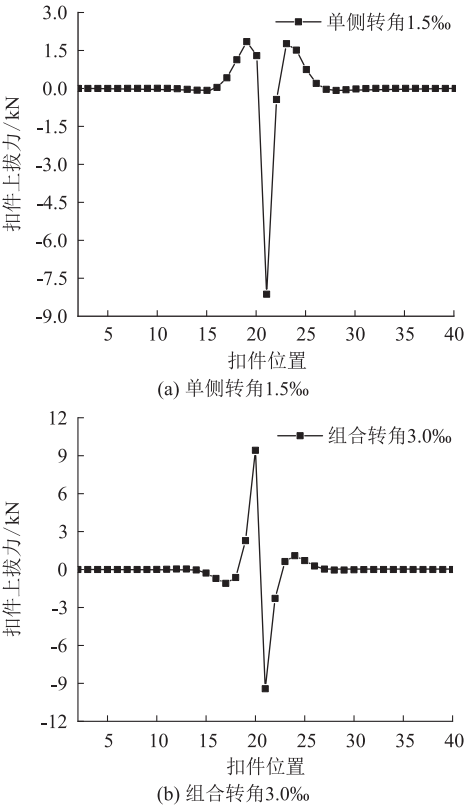


图 3 不同扣件位置处扣件上拔力图

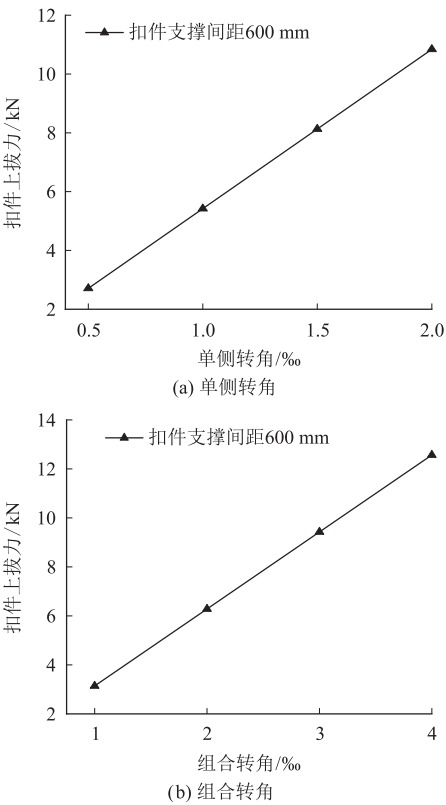


图 4 梁缝 300 mm 处各转角扣件上拔力图

桥梁梁缝 300 mm 时,单侧及组合转角不同工况下的扣件上拔力峰值如图 4 所示。随着转角荷载增大,上拔力随之增加,基本呈线性增大趋势。通过拟合方程,得到在梁缝 300 mm、扣件间距 600 mm 下的单侧转角与扣件上拔力的关系式: $F = 5.42 \varphi \times 10^6$;组合转角与扣件上拔力的关系式为: $F = 3.142 \varphi \times 10^6$ 。

综上所述,不同转角荷载工况下的扣件上拔力表现为:扣件支撑间距保持不变,随着转角荷载的增大,扣件上拔力基本呈线性增大趋势;单侧转角荷载作用下的扣件上拔力 > 组合转角的扣件上拔力;梁端转角最不利荷载检算应选取单侧最不利转角和组合转角最不利转角工况。

3.2 竖向变形影响分析

《铁路桥涵设计规范》规定:对于无砟轨道桥梁,应考虑梁体纵向变形导致梁缝两侧支座处竖向相对位移对轨道结构的影响。桥梁梁缝发生 0.5 mm、1 mm、2 mm 竖向位移时(梁缝左侧保持稳定,梁缝右侧向下位移),扣件上拔力如图 5 所示。

由图 5(a)可知,梁端发生竖向位移时,梁缝两侧扣件表现出同等受力水平的扣压和上拔力。在竖向位移为 0.5 mm、1.0 mm 以及 2.0 mm 工况下,扣件系统的上拔力和下压力会随着竖向位移的增大而增大。在不同竖向位移下,扣件系统最大上拔力均出现在

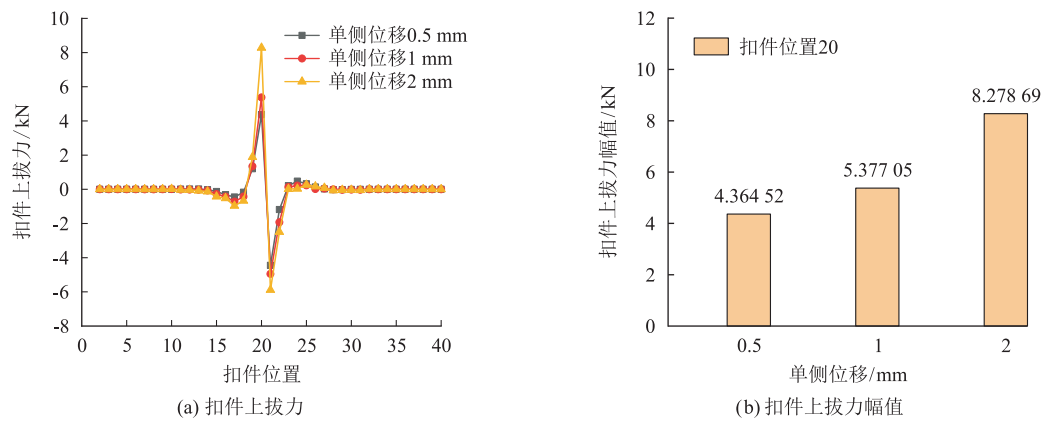


图 5 不同单侧位移下的扣件上拔力及幅值图

右侧第一组扣件,最大下压力均出现在左侧第一组扣件。由图 5(b)可知,梁端竖向位移达到 2 mm,扣件上拔力已超出设计扣压力,此时扣件处于非正常工作状态,扣件易失效。

3.3 转角、竖向位移组合变形影响分析

桥梁梁端结构变形不是单一形式,其包含梁端转角以及竖向位移的组合变形。桥梁支座单侧 0.5‰、1‰、2‰ 转角与竖向位移 0.5 mm 的荷载组合以及桥

梁支座组合转角 0.5‰、1.0‰ 以及 2.0‰ 与竖向位移 0.5 mm 的荷载组合,通过计算扣件上拔力的最不利位置即为支座邻近位置处的扣件,在梁端发生单侧转角和单侧位移时,扣件的上拔力在发生变形的支座附近右侧出现扣件上拔力峰值,在支座邻近位置的左侧扣件出现扣压力的峰值。同时单侧位移保持不变,随着单侧转角增大,左右侧扣件的扣压力与上拔力峰值均随之增加。扣件上拔力变化如图 6、图 7 所示。

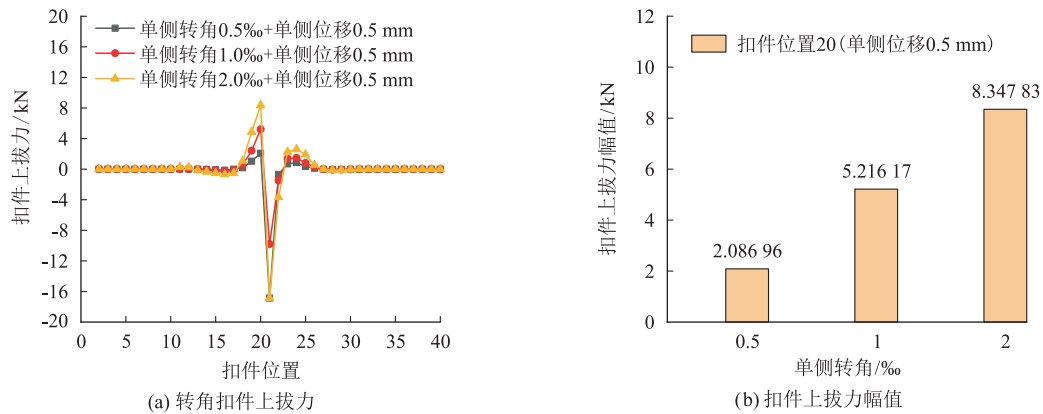


图 6 单侧位移 0.5 mm 下不同单侧转角扣件上拔力及其幅值图

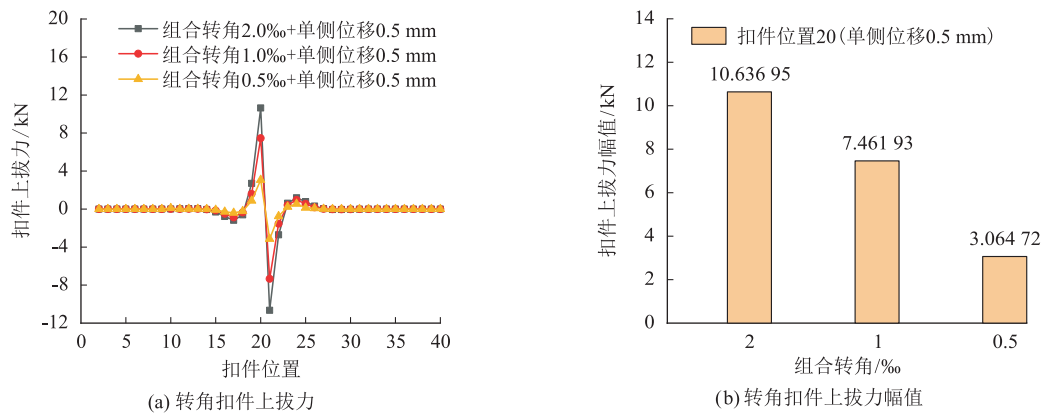


图 7 单侧位移 0.5 mm 下不同组合转角扣件上拔力及其幅值图

通过比较图 6(b) 和图 7(b) 看出,在单侧位移 0.5 mm 与单侧转角 1‰ 的荷载作用下,扣件上拔力小于其设计扣压力 6 kN,处于正常工作状态,而单侧位移 0.5 mm 与组合转角 1‰ 的荷载作用得出的扣件上拔力超过其设计扣压力,相同条件下组合转角对扣件上拔力的影响超过单侧转角的影响。

4 梁轨构造对扣件上拔力规律分析

在特定梁端转角位移的基础上,通过改变预留梁缝、扣件支撑间距以及扣件安装位置,对扣件上拔力变化规律进行分析。

4.1 预留梁缝影响分析

梁端转角 1.5‰ 时不同梁缝下扣件上拔力如图 8 所示。在梁端转角为 1.5‰、梁缝为 100 mm 时,扣件间距从 568 mm 增加到 650 mm 时,扣件上拔力从 7.121 kN 下降到 6.908 kN;当扣件间距保持不变时,预留梁缝宽度增加,对应的扣件上拔力也会随之增加,预留梁缝宽度会影响扣件受力状态。

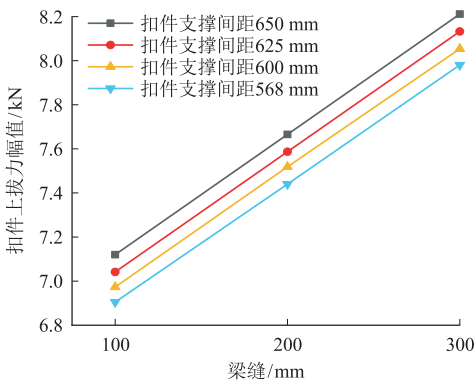


图 8 梁端转角 1.5‰ 时不同梁缝下扣件上拔力图

在梁端转角 1.5‰,不同扣件间距工况下,扣件上拔力与梁缝宽度线性相关,可归纳为: $F=aL_c+b$,具体参数如表 2 所示。

表 2 不同扣件间距下扣件上拔力与梁缝宽度关系表

序号	扣件间距/mm	a	b
1	568	0.005 48	6.573
2	600	0.005 44	6.50
3	625	0.005 4	6.438
4	650	0.005 35	6.373

4.2 扣件支承间距影响分析

扣件支承间距大小对扣件系统自身受力情况产生影响,控制梁缝为 100 mm 时,随着扣件间距的增大,在单侧位移、单侧转角、组合转角、单侧转角+位移、组合转角+位移工况下,扣件上拔力如图 9 所示。

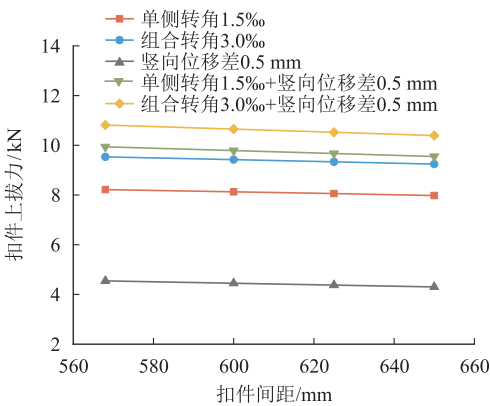


图 9 梁缝 100 mm 不同扣件间距不同荷载组合工况下的扣件上拔力变化图

由图 9 可知,扣件上拔力与扣件间距线性相关,随着扣件间距增加,扣件上拔力相应减小。在梁缝 100 mm、不同单变量因子下,扣件上拔力与扣件间距的线性关系可归纳为: $F=mB_0+n$,具体参数如表 3 所示。

表 3 不同单变量扣件上拔力与扣件间距关系表

序号	变量因子	m	n
1	单侧转角 1.5‰	-0.002 9	9.866
2	组合转角 3.0‰	-0.003 56	11.557
3	单侧位移 0.5 mm	-0.002 96	6.229
4	单侧转角 1‰+位移差 0.5 mm	-0.004 72	12.619
5	组合转角 2‰+位移差 0.5 mm	-0.005 17	13.750

4.3 扣件安装位置分析

以梁缝 100 mm、组合转角 3.0‰、扣件支承 625 mm 为背景,在桥梁上拱(梁体向上拱起)、桥梁下凹(梁体受荷跨中向下位移)两种工况下,分析扣件与桥梁支座和梁端不同距离时扣件上拔力的变化规律,距离支座和梁端不同距离扣件上拔力曲线如图 10 所示。

由图 10 可知,扣件安装在 20 和 21 处位置时,无论是桥梁上拱还是下凹,这两处扣件上拔力呈现峰值。随着距支座距离的增加,扣件上拔力随之减小,基本呈线性减小趋势。

扣件安装位置对扣件上拔力的影响如图 11 所示。扣件距梁端的距离与扣件上拔力的关系式为: $F=-0.709x+3.341$;随着距桥梁支座距离的增加,扣件上拔力随之增大,基本呈线性增大趋势,扣件距离梁端距离与扣件上拔力的关系式为: $F=0.709x+1.213$ 。

5 结论

本文分析了无砟轨道地段 32 m T 型梁梁端形变

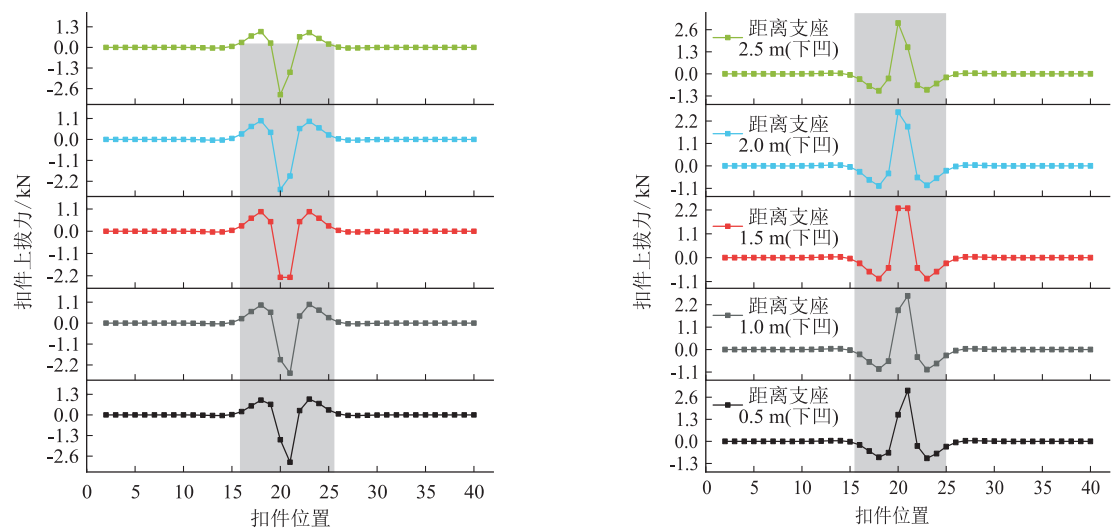


图 10 扣件不同安装位置上拔力变化规律图

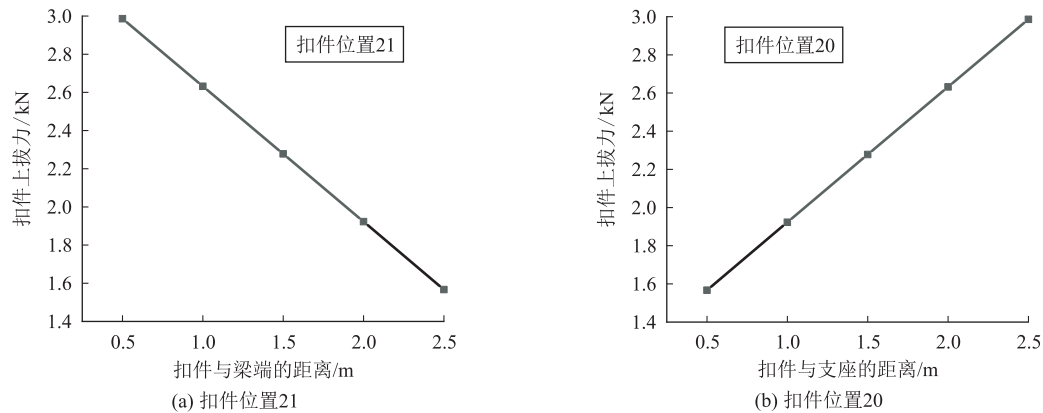


图 11 扣件安装位置对扣件上拔力的影响图

对扣件受力的影响,得到桥梁受荷载作用后引起的梁端转角与梁面竖向位移引起的扣件受力的变化,得到主要结论如下:

- (1) 当梁端发生单侧转角、组合转角或转角与竖向位移结合的结构变形时,随着转角、竖向位移的增大,扣件上拔力相应增加,二者线性相关,并且扣件扣压力与上拔力的峰值均出现在支座左侧与右侧的扣件处。当扣件上拔力超过设计限制时,扣件处于非正常工作状态易引起扣件破坏,威胁行车安全。
- (2) 在特定梁端转角、竖向位移的工况下,梁轨构造的变化(包括预留梁缝、扣件支撑间距及扣件安装位置)与扣件上拔力变化线性相关,并根据不同类型的梁轨构造,提出扣件上拔力与其对应线性表达式。
- (3) 通过分析不同位置处扣件上拔力,在梁端结构变形单独作用或梁端结构变形与梁轨构造共同作用的条件下,支座左右侧扣件力受其影响较为显著,

安装扣件时需考虑支座处扣件与支座位置的协调。

参考文献:

[1] 赵坪锐,肖杰灵,刘学毅. 梁端位移对无砟轨道扣件系统的影响分析[J]. 铁道学报, 2008, 30(5): 68 – 73.
ZHAO Pingrui, XIAO Jieling, LIU Xueyi. The Influence of the Displacement at Bridge Ends to the Fastening Systems Used on Ballastless Tracks [J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(5): 68 – 73.

[2] 丁敏旭. 客运专线无砟轨道梁端扣件上拔力研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(16): 3709 – 3713, 3724.
DING Minxu. Study on Uplift Force of the Fasteners for Bridge Ends of the Unballast Track on Passenger Dedicated Line [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(16): 3709 – 3713, 3724.

[3] 王其昌. 无砟轨道钢轨扣件[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.
WANG Qichang. Ballastless Track Rail Fastener [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006.

- [4] 魏亚辉,徐鹤寿,牛斌. 梁端无砟轨道扣件力学行为室内试验研究和数值仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(6): 43–49.
WEI Yahui, XU Heshou, NIU Bin. Laboratory Test and Numerical Analysis on the Mechanical Behaviors of the Slab Track Fastener Due to the Beam-ending Deformation [J]. China Railway Science, 2010, 31(6): 43–49.
- [5] 郭恭兵,韦凯,谢朝川,等. DZ III型扣件铁垫板上横向力传递规律及影响因素分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(5): 1677–1686.
GUO Gongbing, WEI Kai, XIE Chaochuan, et al. Lateral Force Transmission Law and Influencing Factors on DZ III Fastener Iron Plate [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(5): 1677–1686.
- [6] 高亮,赵闻强,侯博文. 扣压力失效状态下 WJ-8 扣件垂向力学行为研究[J]. 工程力学, 2020, 37(11): 228–237.
GAO Liang, ZHAO Wenqiang, HOU Bowen. Research on Vertical Mechanical Behavior of WJ-8 Fastener under Clamping Force Failure [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(11): 228–237.
- [7] 齐少轩,刘学毅. 地铁弹条 II 型分开式扣件力学特性研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(9): 40–43.
QI Shaoxuan, LIU Xueyi. Research of Mechanics Characteristics of Elastic Bar II Separated Rail Fastening [J]. Railway Standard Design, 2014, 58(9): 40–43.
- [8] 申磊. 减小梁端轨道结构受力措施研究[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(8): 58–61.
SHEN Lei. Study on Measures for Decreasing Forces on Track Structure at Girder End [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(8): 58–61.
- [9] 张岷. 双块式无砟轨道桥梁梁端扣件系统力学分析[J]. 铁道工程学报, 2009, 26(2): 56–59, 63.
ZHANG Min. Mechanics Analysis of the Rail Fastening of Bi-block Ballastless Track on the Bridge Terminal [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 26(2): 56–59, 63.
- [10] 杨文茂,林红松,徐井芒,等. 客货共线铁路简支梁上无砟轨道无缝道岔纵向受力分析[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(2): 13–18, 47.
YANG Wenmao, LIN Hongsong, XU Jingmang, et al. Longitudinal Stress Analysis of Continuously Welded Rail Turnout of Ballastless Track on Simply-supported Girder of Mixed Passenger and Freight Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 13–18, 47.
- [11] 田春香. 坡度对连续梁桥梁端扣件上拔力的影响研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(11): 62–67.
TIAN Chunxiang. Research on the Influence of Bridge Slope on Uplift Force of the Fasteners at Continuous Beam Ends [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(11): 62–67.
- [12] 冯玉林,蒋丽忠,曾永平,等. 连续梁桥典型变形对轨道几何形位演变的影响[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(1): 91–96.
FENG Yulin, JIANG Lizhong, ZENG Yongping, et al. Influence of the Typical Deformation of Continuous Beam Bridge on the Track Geometry Evolution [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(1): 91–96.
- [13] 易南福,殷明旻. 梁端无砟轨道扣件系统受力分析[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(6): 40–43.
YI Nanfu, YIN Mingmin. Analysis on Fastening Force of Ballastless Track System of the Beam End [J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(6): 40–43.
- [14] 蔡小培,高亮,孙汉武,等. 桥上纵连板式无砟轨道无缝线路力学性能分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(6): 28–33.
CAI Xiaopei, GAO Liang, SUN Hanwu, et al. Analysis on the Mechanical Properties of Longitudinally Connected Ballastless Track Continuously Welded Rail on Bridge [J]. China Railway Science, 2011, 32(6): 28–33.
- [15] 李志红. 广珠城际轨道交通梁端轨道结构受力变形分析[J]. 铁道建筑技术, 2009(12): 15–17, 31.
LI Zhihong. Analysis of Stress and Deformation of Beam-end Track Structure for Guangzhou-Zhuhai Intercity Rail Transit [J]. Railway Construction Technology, 2009(12): 15–17, 31.
- [16] 马战国,许绍辉,尤瑞林. 梁端位移对明桥面桥扣件受力的影响分析[J]. 铁道建筑, 2010, 50(2): 117–120.
MA Zhanguo, XU Shaohui, YOU Ruilin. Analysis of the Influence of Beam End Displacement on the Stress of Fasteners of Open Deck Bridge [J]. Railway Engineering, 2010, 50(2): 117–120.
- [17] 申磊,刘学毅,赵坪锐. VOSSLOH 300 扣件上拔力计算方法研究[J]. 四川建筑, 2008, 28(6): 51–53, 55.
SHEN Lei, LIU Xueyi, ZHAO Pingrui. Study on Calculation Method of Pullout Force of VOSSLOH 300 Fastener [J]. Sichuan Architecture, 2008, 28(6): 51–53, 55.