

跨座式单轨钢-混组合梁桥力学性能研究

周业超¹ 周云强¹ 冯闯²

1. 中车城市交通规划设计研究院有限公司, 中国·江苏 南京 210000

2. 南京工业大学土木工程学院, 中国·江苏 南京 210000

摘要: 跨座式单轨轨道系统中钢混组合梁长期的疲劳荷载会导致梁体内部的疲劳损伤累积, 影响结构安全性。对于采用高性能混凝土和新型设计的哑铃型连接件的钢混组合轨道梁的整体工作性能和疲劳性能的研究对于结构的安全性至关重要。钢混组合梁的受力机理复杂, 涉及材料非线性、剪力钉受力特性及长期荷载作用下的耦合效应等多重因素, 对比分析采用原有传统方案和提出的新的设计方案, 研究其整体工作性能和疲劳性能对于项目的评估和实施具有重要参考价值和工程指导意义。

关键词: 轨道交通; 钢混组合梁; 力学性能; 疲劳性能

Study on the Mechanical Properties of Steel-mixed Composite Beam Bridge with Crossed Track

Zhou Yechao¹, Zhou Yunqiang¹, Feng Chuang²

1. CRRC Urban Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., China Jiangsu Nanjing 210000

2. School of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, China Jiangsu Nanjing 210000

Abstract: In crossed monorail systems, long-term fatigue loads on reinforced concrete composite beams lead to internal damage accumulation, compromising structural safety. Research on the overall performance and fatigue characteristics of these composite beams—featuring high-performance concrete and innovative dumbbell-shaped connectors—is critical for structural reliability. The complex stress mechanisms involve multiple factors, including material nonlinearity, shear pin behavior, and coupled effects under prolonged loading. By comparing traditional approaches with the proposed design, this study provides valuable insights for project evaluation and engineering implementation.

Keywords: Rail transit; Steel-concrete composite beam; Mechanical properties; Fatigue properties

0 引言

钢混组合轨道梁在实际应用中常受到重复列车荷载的作用, 长期的疲劳荷载会导致梁体内部的疲劳损伤累积, 影响结构安全性。目前对于项目中低运量钢混组合轨道梁采用研配的高性能混凝土和新型哑铃型连接件在载荷作用下的力学性能(包括整体工作和疲劳性能), 目前并没有相关的系统研究和参数化分析。目前的主要实验和理论研究仍然主要集中在采用普通混凝土的钢混组合梁结构, 对于钢-UHPC 组合梁的研究仍然较为有限, 处于初级阶段, 有待进一步研究与探索。对于钢-UHPC 组合梁的相关研究目前主要集中在试验及施工优化等方面, 对于其整体工作性能与疲劳性能的研究较为欠缺, 缺少定性的、较为系统化的研究。特别是与采用普通混凝土情况下的对比,

以及从全寿命周期对其性能和经济与社会效益的评价, 从而为工程提供指导与依据。钢梁与混凝土板的连接直接关系到结构的协同工作性能, 目前的钢混组合结构的连接件存在缺陷与材料使用不合理的问题, 目前相关工作对于连接件的设计与优化较少, 从而影响钢混组合梁的整体工作与疲劳性能。

1 理论与仿真模拟方法

有限元分析将复杂的结构分解为较小的、易于管理的部分, 即有限元, 通过对每个有限元进行分析, 最终合成整个结构的响应。其在土木工程及交通运输领域有广泛的应用, 用于评估和优化交通基础设施的性能和安全性, 具体为桥梁结构性能评估、道路结构分析、隧道稳定性分析以及交通枢纽结构分析。此外可以将有限元分析与建筑信

息模型相结合，实现基础设施的精细化建模和性能分析，提高设计和施工效率。有限元分析首先进行几何建模，利用软件配套的建模工具建立钢混组合梁的三维模型。对于混凝土，要采用适当的本构模型，如混凝土损伤塑性模型，定义混凝土的弹性模量、泊松比和抗压强度等参数。最关键的步骤就是网格划分，要确定单元类型，选择适合的有限单元，如梁单元、壳单元或实体单元，进行划分，根据分析精度要求，合理设置网格密度，确保计算结果的准确性和收敛性。然后就是边界条件和荷载施加。最后，选择求解器，进行参数分析。分析位移、应力、应变等结果，评估钢混组合梁的承载能力、变形和疲劳性能。图1所示为采用ABAQUS建立的钢混组合梁有限元仿真几何模型如。

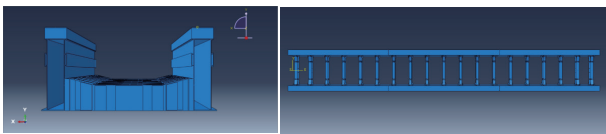


图1 钢混组合梁有限元模型

2 结果与讨论

2.1 刚度与强度校核

基于ABAQUS有限元软件对新型钢混组合梁进行强度与刚度验算，得到工况四满布荷载情况下UHPC及钢梁的应力-位移云图，见图2-图3所示。

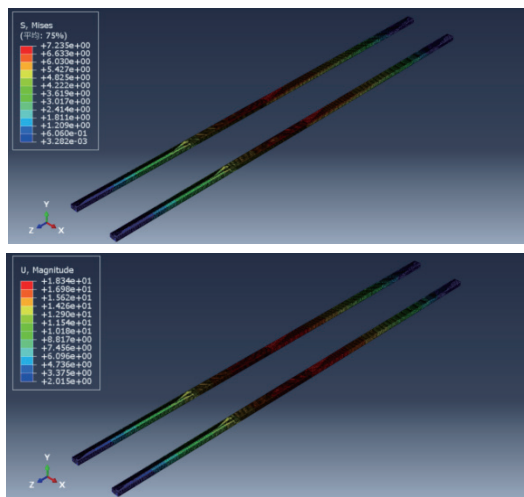


图2 混凝土桥面板应力与应变云图

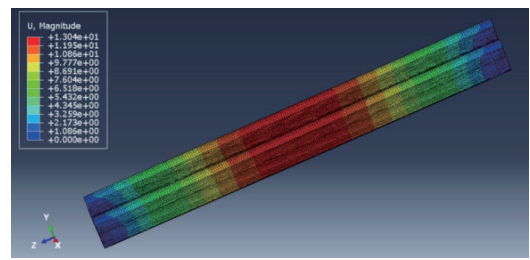
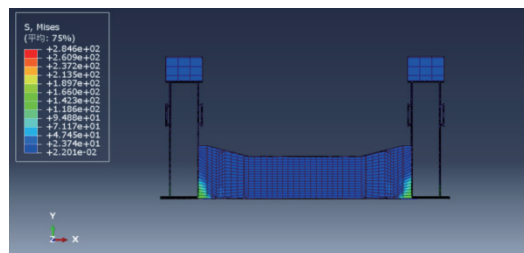


图3 钢混组合梁应力应变云图

新型哑铃型焊钉连接件的应力应变云图如图4-图5所示。

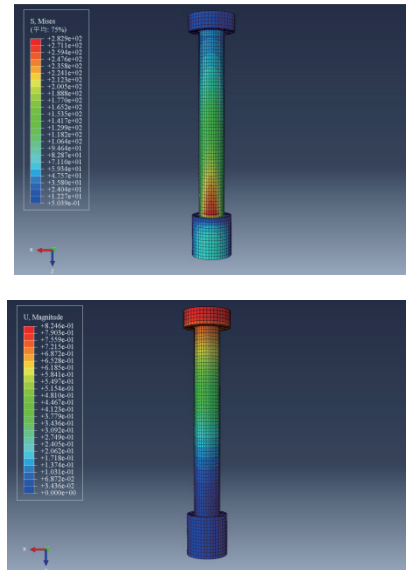


图4 哑铃型连接件应力应变云图

上述的分析表明，钢混组合梁的每部分在最不利和条件下的强度和刚度均满足设计要求。

2.2 混凝土板厚度对钢混组合梁力学性能影响

表1不同厚度下钢混组合梁的最大应力和最大位移

工况号	混凝土厚度/mm	最大应力/MPa	最大位移/mm
最不利工况	260	286.8	17.04
	310	288.1	16.27
	360	298.7	16.01
	410	290.7	14.94
	460	292.2	14.40

由不同工况下改变混凝土厚度得到钢混组合梁的应力-位移结果可知，混凝土厚度越大，应力越大，这是因为混凝土的厚度增加导致自重荷载增加，因此应力会随混凝土厚度增加而变大水胶比对UHPC抗压强度及扩展度的影响。

2.3 钢混组合梁疲劳性能

图5所示为钢混组合梁疲劳寿命云图，在钢-普通混凝土组合梁疲劳寿命评估中，结构疲劳失效呈现典型的空间-时序特性：首先在混凝土腹板中部出现初始裂纹，对应疲劳寿命为1,640,590次循环；随后钢梁支座连接区域发生疲劳破坏，其疲劳寿命达2,937,650次循环。

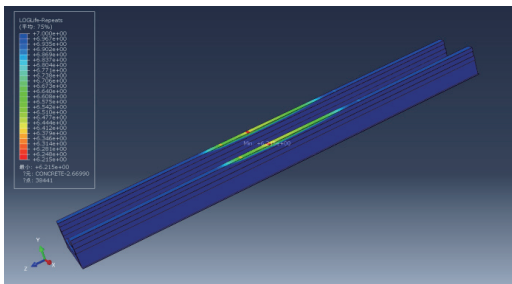


图5 钢混组合梁疲劳寿命云图

图6所示为混凝土板的疲劳寿命云图。通过对比发现,对于采用高性能抗裂混凝土的钢混组合梁,疲劳损伤仍主要集中于混凝土跨中受载区域,该区域最小疲劳寿命显著提升至 3.04×10^6 次循环,较采用普通混凝土的钢混组合梁疲劳寿命提升约 85.3%。

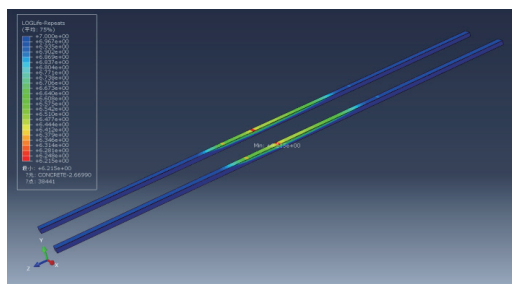


图6 混凝土板疲劳寿命云图

图7所示为新型连接件的疲劳寿命云图。新型焊钉连接件的疲劳次数为 5.75×10^6 次。观察图片中的哑铃型构造,其中部变截面处(图中黄色标注区域)因几何不连续产生应力奇点,疲劳裂纹优先在截面最小处(25厚度)萌生并沿轴向扩展。

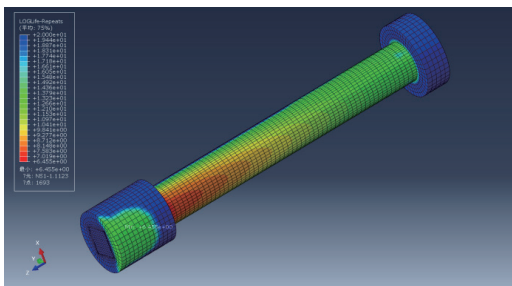


图7 新型连接件的疲劳寿命云图

3 结语

本文具体研究结果如下:(1)采用高性能抗裂混凝土作为桥面板,与钢结构形成更好的协同工作效应,在采用相同板厚度情况下,显著减小钢混组合梁在载荷作用下的变形;(2)采用高性能抗裂混凝土可大大减小混凝土板的厚度,减小整体结构自重,直接减小钢结构梁的承重需求,减少钢材的使用量;(3)采用厚度更小的高性能抗裂混凝土后,对于裂缝的宽度控制更优;(4)在成本基本保持不

变的情况下,采用的新型连接件和传统的连接件相比,可极大的减小连接件的最大应力和应变,有效提升连接件的锚固的整体工作性能和抗疲劳性能。

参考文献:

[1] 张吉仁, 卜建清, 荣学亮等. 栓钉式钢-混凝土组合梁剩余承载力有限元分析[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(02): 66-71.

[2] 王春生, 翟慕赛, 王雨竹. 钢桥疲劳研究进展 [J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(01): 9-42.

[3] 李航. 大跨径钢混组合梁桥施工关键技术研究 [J]. 交通世界, 2021, (22): 46-7.

[4] OLIVEIRA V M D, ROSSI A, FERREIRA F P V, et al. Stability behavior of steel - concrete composite cellular beams subjected to hogging moment [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 173: 108987.

[5] 王震. 钢-混组合梁桥大直径剪力钉与剪力钉群力学性能研究 [D], 2021.

[6] 孙艳华, 谭本坤, 雷顺成等. 钢-UHPC 组合结构的栓钉连接件疲劳性能分析 [J]. 公路工程, 2022, 47(02): 70-6.

[7] 苏有华, 叶肖伟, 楼威宏等. 重车荷载下钢桥结构应力分布与疲劳损伤控制 [J]. 工程力学: 1-9.

[8] 罗鑫源, 倪永军, 马观领. 疲劳荷载作用下钢-混凝土组合梁变形计算 [J]. 公路交通科技, 2022, 39(05): 85-94.

[9] 刘双, 聂玉东, 张铭等. 钢-混组合梁斜拉桥现浇混凝土桥面板关键设计技术研究 [J]. 公路, 2020, 65(07): 359-63.

[10] 姜夕伟, 胡江龙, 刘亮. 基于桥梁用高强钢的焊接接头疲劳性能研究与应用 [J]. 建筑机械, 2024, (07): 100-3.

[11] 葛楠. 桥梁设计中的安全性及桥梁耐久性问题分析 [J]. 科学技术创新, 2025, (12): 133-6.

[12] SONG Z, HAN B, ZHANG J, et al. Fatigue behavior of full-shear-connection steel - concrete composite continuous beams under high-cycle loading [J]. Structures, 2023, 56: 105036.

[13] KIR Á LY K, DUNAI L, CALADO L, et al. Experimental study on demountable steel-concrete composite beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 231: 109582.

作者简介: 周业超(1990-), 男, 汉族, 江苏南京, 本科, 研究方向: 桥梁工程。