

双块式无砟轨道开裂机理及防裂优化设计研究综述

马水生

昌九城际铁路股份有限公司

摘要: 本文在介绍双块式无砟轨道应用现状的基础上,从轨道开裂形态及混凝土开裂机理、不同因素对轨道抗裂性能的影响规律和典型轨道防裂优化设计方案等方面,深入分析国内外轨道抗裂研究相关理论与技术发展动态,为今后双块式无砟轨道抗裂性能研究提供理论参考。

关键词: 双块式无砟轨道; 受力特性; 抗裂性能; 防裂优化设计

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.06.049

引言

双块式无砟轨道以其整体性良好、结构稳定和便于养护等优势,已成为我国高速铁路轨道的主要结构形式。然而,由于温度梯度、列车动荷载作用及新旧混凝土黏结不良等原因,双块式无砟轨道常处于带裂缝工作状态,易导致钢筋的锈蚀和轨道结构耐久性及承载能力的退化。本文在介绍双块式无砟轨道应用现状的基础上,从轨道开裂形态及混凝土开裂机理、不同因素对轨道抗裂性能的影响规律和典型轨道防裂优化设计方案等方面,深入分析国内外轨道抗裂研究相关理论与技术发展动态,为今后双块式无砟轨道抗裂性能研究提供理论参考。

一、双块式无砟轨道研究现状

(一) 双块式无砟轨道发展现状

作为轨道结构的一种,双块式无砟轨道结构体系起源于20世纪70年代的德国。以其在稳定性和耐久性等方面的巨大优势,一经推出,便得到人们的广泛关注,并被广泛应用于国内外铁道线路。其中,较为典型的双块式无砟轨道结构有Rheda2000型无砟轨道、Züblin型无砟轨道结构和我国的CRTS I型和CRTS II型双块式无砟轨道。

Rheda型无砟轨道由德国慕尼黑大学的学者设计而来,由于该型轨道最早应用于德国Rheda车站轨道,故名Rheda型无砟轨道。之后,相关学者及工程技术人员基于工程实际对Rheda型无砟轨道设计方案进行多次改进和完善,并推出具有广泛适用性的Rheda 2000型无砟轨道。Rheda 2000型轨道体系具有系统配置简单、安装精度易控制及施工便利性高等优势。

为解决Rheda型无砟轨道施工周期较长等不足,德国Züblin建筑公司于1974年推出Züblin型无砟轨道体系。相较于Rheda型轨道体系,Züblin型轨道体系在施工中预先浇筑道床板混凝土,之后基于振动法将双块式轨枕嵌入道床混凝土内部。

在国内,铁道部于2004年在遂渝铁路首次试点使用双块式无砟轨道体系。之后,我国引入Rheda型双块式

无砟轨道和Züblin型双块式无砟轨道,并基于工程实践与试验研究推出CRTS I型和CRTS II型双块式无砟轨道且将其广泛应用于新建客运专线。

(二) 双块式无砟轨道受力特性

为拓展双块式无砟轨道在实际工程方面的应用范围,国内外众多学者围绕双块式无砟轨道的受力特性开展了相关研究^[1-4]。

张鲁顺^[1]等基于数值模拟分析方法,综合考虑列车运行速度、轨道结构尺寸和层间接触状态等因素影响,对车辆荷载下轨道内动力响应进行分析。结果表明:列车运行速度和层间接触状态对轨道动态受力和振动特性有较大相关性,且轨道内动力响应随列车行车速度的降低和接触状态的改善而衰减。此外,轨道结构尺寸对结构动力特性影响较小。

为精确表征温度荷载下轨道结构的动力特性,曾志平^[2]等学者基于非线性有限元软件对三维温度下轨道动力响应展开分析,探明了各级温度梯度下的轨道结构的动力响应。此外,针对大温差等恶劣条件对轨道结构受力特性影响较大的问题,杨斌^[3]等学者对双块式无砟轨道在温度荷载下的受力特性展开数值模拟和理论分析。结果表明:道床板间设置伸缩缝可有效分散板内部应力;合理设置凸台结构可有效抑制道床板的变形。

轨枕与道床板作为双块式无砟轨道的重要组成构件,针对二者界面处受力特性的研究同样备受关注。其中,霍春阳^[4]等学者基于非线性有限元软件ABAQUS对轨枕与道床板间的界面力学性能进行数值模拟,结果表明:降温条件下,结构受力薄弱位置位于轨枕与道床板交界长边处;升温条件下,结构受力薄弱位置位于轨枕四角及接触面长边中上部区域。

二、双块式无砟轨道开裂模式及机理

(一) 双块式无砟轨道开裂模式

双块式无砟轨道其开裂模式主要有以下五种:道床板表面龟裂缝、道床板表面贯通裂缝、轨枕四周离缝、轨枕斜向八字裂缝和其他类型的裂缝等。双块式无砟轨道开裂示意如图1所示。

(1) 道床板表面龟裂缝:此类开裂形态主要出现于道床板混凝土表面,其裂缝宽度较小且分布规律性较差。

(2) 道床板表面贯通裂缝:该型裂缝宽度较大且贯穿道床板,常分布于与铁道线路垂直方向。

(3) 轨枕四周离缝:此类裂缝主要分布于轨枕与道床板交界界面处且裂缝宽度较大。

(4) 轨枕斜向八字裂缝:八字裂缝为双块式无砟轨道主要开裂形态。八字裂缝多出现于轨枕与道床板四角道床板一侧,呈八字形。

(5) 其他类型裂缝：路基支撑层裂缝、施工缝/伸缩缝处裂缝等。

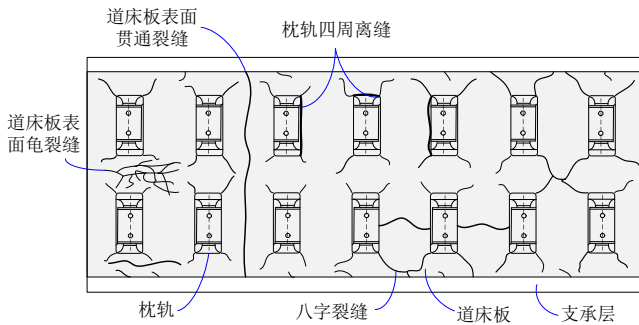


图1 双块式无砟轨道典型开裂形态

(二) 双块式无砟轨道开裂机理

为确定体系受力薄弱环节并优化结构体系设计，首先需对双块式无砟轨道的开裂机理进行分析。结合双块式无砟轨道工程实例及相关试验研究结果分析，导致双块式无砟轨道的开裂的原由主要以下六部分组成：道床板混凝土收缩、钢轨伸长、基础沉降、新旧混凝土黏结不良、列车荷载作用和施工原因引起的裂缝等。

(1) 道床板混凝土收缩：对于双块式无砟轨道结构，混凝土的收缩可分为混凝土的塑性收缩和温度收缩。其中，塑性收缩为道床板混凝土凝结硬化前出现的收缩，温度收缩为由于混凝土热胀冷缩而产生的收缩。混凝土收缩对裂缝的影响表现为：当道床板混凝土抗拉强度低于收缩受限所引起的主拉应力后，混凝土表面开裂。

(2) 钢轨伸长：当温度出现较大突变时，钢轨与混凝土由于热胀冷缩产生的变形将不再协调。此时，道床板混凝土为约束钢轨伸长而产生主拉应力，当该主拉应力高于混凝土抗拉强度后，由第一强度理论可知，道床板混凝土将出现脆性开裂现象。

(3) 基础沉降：相较于有砟轨道，双块式无砟轨道对基础沉降变形的约束能力有限。因此，对于易发出基础沉降的地段，荷载作用下，道床基础易出现不均匀沉降进而导致轨道床板混凝土开裂。

(4) 新旧混凝土黏结不良：对于双块式无砟轨道结构，轨枕为预制构件，道床板为现浇混凝土。对于轨枕与道床板黏结界面较为光滑的构件，若新旧混凝土间的界面黏结力低于外荷载或混凝土收缩产生的界面荷载，轨枕四周将产生离缝。

(5) 列车荷载作用：当列车荷载所产生的拉应力高于混凝土的抗拉强度后，混凝土将开裂。

(6) 施工原因引起的裂缝：对于混凝土未振捣充分的轨道，由于先天缺陷，此类轨道床板混凝土易产生开裂等病害。

三、双块式无砟轨道抗裂性能影响因素

研究表明：确定合理的道床板配筋率，选用适当的混凝土配合比，可有效提升无砟轨道的抗裂性能，显著降低轨道产生开裂等病害的可能性。为此，国内外学者

针对混凝土配合比、混凝土坍落度、钢筋配筋率及钢筋直径及道床板尺寸等因素对双块式无砟轨道抗裂性能的影响规律进行深入分析^[5-7]。

(一) 混凝土强度配合比影响分析

为探明混凝土配合比对无砟轨道道床板抗裂性能的影响规律，谭盐宾、任娟娟等学者分别基于试验研究与数值模拟分析方法对不同配合比混凝土的无砟轨道裂性能展开了深入研究^[5-6]。其中，图2为谭盐宾等^[5]基于试验研究所得的混凝土配合比与轨道抗裂性能关系曲线（其中，配合比1、2、3分别为常规C40混凝土配合比、基于低胶凝材料用量与低用水量的技术路线设计的配合比、掺入6%防裂材料的配合比）。由图2可知，双块式无砟轨道的抗裂性能与其所用混凝土配方相关性较大。其中，选用配合比2的道床表面最大裂缝宽度与单位面积内开裂面积较选用配合比1的构件分别减少了约55.6%和51.4%；选用配合比3的构件其道床表面最大裂缝宽度与单位面积内开裂面积较选用配合比1的构件分别减少了约72.2%和72.0%。从上述分析可看出，改良混凝土配合比或掺入防裂材料均可显著改善轨道的抗裂性能，且掺入防裂材料显著性更高。分析原因：对于配合比2，材料内部浆体及胶凝材料总量均有不同程度减少，故轨道开裂敏感性较配合比1显著降低。对于配合比3，防裂材料的掺入可显著改善道床混凝土的抗裂性能，故轨道整体抗裂性能亦有所提升。综上所述，对于无砟轨道结构，工程中宜基于实际工况合理选择混凝土配合比。

(二) 混凝土坍落度影响分析

为确定混凝土坍落度对无砟轨道道床板抗裂性能的影响规律，谭盐宾等学者亦基于试验研究方法对不同坍落度混凝土的无砟轨道板抗裂性能进行相关研究^[5]。其中，图3为混凝土坍落度与轨道抗裂性能关系曲线。

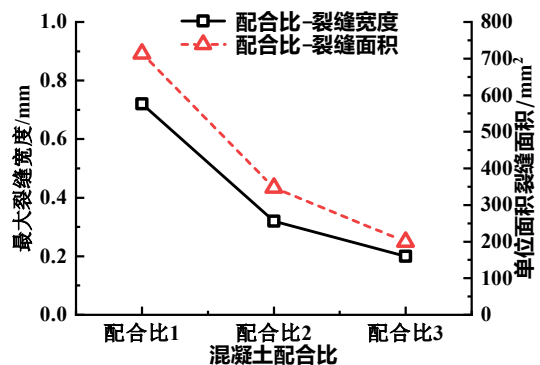


图2 混凝土配合比与轨道抗裂性能关系图

由图3可知，对于不同坍落度的混凝土，无砟轨道抗裂性能差异性较大。其中，当混凝土坍落度由50-80mm增至170-190mm后，构件表面最大裂缝宽度与单位面积内开裂面积分别增大44%和50.4%。上述分析表明：轨道所用混凝土坍落度对无砟轨道的抗裂性能有较大影响，且轨道抗裂性能随混凝土坍落度的降低而改善。因此，工程中宜优先选用坍落度较小的混凝土进行施工。

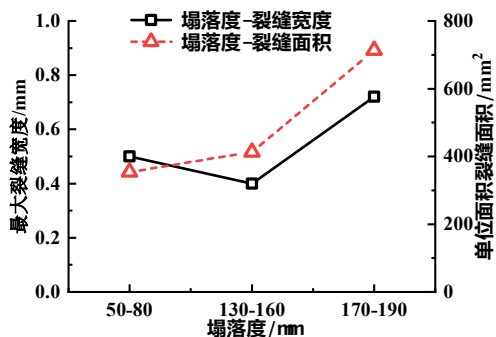


图3 混凝土坍落度与轨道抗裂性能关系图

(三) 钢筋配筋率影响分析

国内外研究表明：钢筋配筋率对RC构件抗裂性能影响较大。为此，车晓娟、任娟娟等学者围绕配筋率对轨道抗裂性能的影响规律展开广泛研究^[6]。其中，图4和图5分别为车晓娟等学者基于数值模拟分析所得的道床板钢筋配筋率与裂缝宽度关系曲线和道床板钢筋配筋率与平均裂缝间距关系曲线^[6]。由图4可知，相同强度等级混凝土条件下（混凝土单轴抗拉强度为2.51MPa），道床板钢筋配筋率由0.7%升至0.8%后，道床板表面平均裂缝宽度由1.17mm降至0.91mm，减少了约22.2%。由图5可知，相同强度等级混凝土和钢筋直径条件下（钢筋直径为20mm），当道床板钢筋配筋率由0.7%升至0.8%后，道床板表面平均裂缝间距约由123.16mm降至110.53mm，减少了约11.4%。从上述分析可以看出，道床板表面平均裂缝宽度和平均裂缝间距均与钢筋配筋率呈负相关，即随着钢筋配筋率的增加，道床板表面平均裂缝宽度变小，且裂缝更为密集。分析原因：相同荷载水平下，随道床板配筋率的增大，道床板内钢筋的应力水平有所降低，且其约束裂缝发展的能力有所提升。另外，RC构件的裂缝间距与配筋率呈负相关，即配筋率约大，裂缝越为密集。故在相同荷载水平下，道床板裂缝宽度和裂缝间距均随钢筋配筋率的增大而减小。综上所述，道床板钢筋配筋率与其抗裂性能存在一定相关性，且抗裂性能随配筋率的增大而改善。

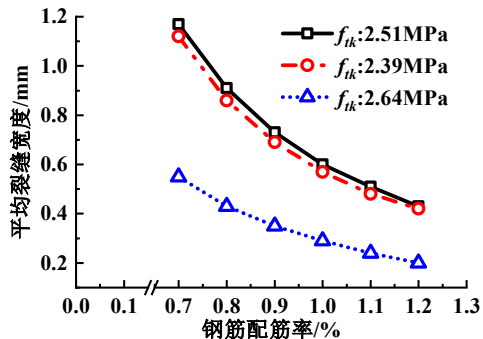


图4 配筋率与平均裂缝宽度关系

(四) 钢筋直径影响分析

为确定钢筋直径与双块式无砟轨道道床抗裂性能间的相关性，国内外学者亦围绕不同钢筋直径的无砟轨道板的抗裂性能展开了相关研究^[6]。图6为钢筋直径与平

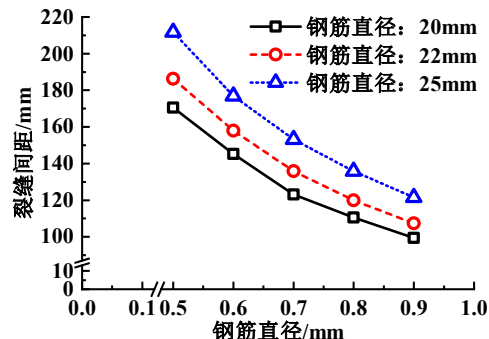


图5 配筋率与平均裂缝间距关系

均裂缝间距关系曲线。由图6可知，当钢筋配筋率均为0.6%时，钢筋直径由20mm增大至25mm后，道床板表面平均裂缝间距约由145.26mm增至176.84mm，增加了约21.7%；当钢筋配筋率均为0.8%时，钢筋直径由20mm增大至25mm后，道床板表面平均裂缝间距约由110.53mm增至135.79mm，增加了约22.9%；从上述分析可以看出，随着道床板内钢筋直径的增加，平均裂缝间距有所增大。分析原因：相同配筋率情况下，钢筋与混凝土间的握裹面积随钢筋直径的增大而减少，即钢筋与混凝土间的黏结作用随钢筋直径的增大而降低。则由黏结滑移理论可知，轨道道床板平均裂缝间距随钢筋直径的增大而增大。综上所述，双块式无砟轨道的抗裂性能受钢筋直径影响较大，且当钢筋直径更小时轨道抗裂性能更优。

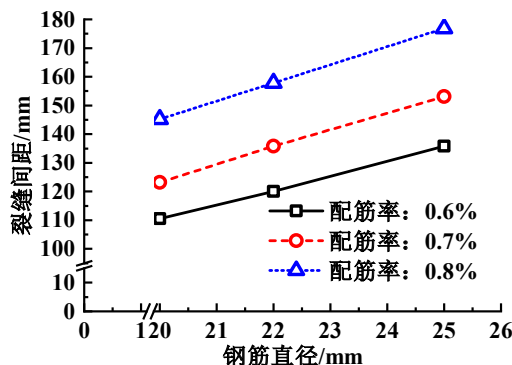


图6 钢筋直径与平均裂缝间距关系

(五) 道床板尺寸影响分析

为探明轨道道床板尺寸对其抗裂性能的影响规律，韦有信等学者分别基于试验研究数值模拟分析方法对不同尺寸的无砟轨道抗裂性能进行了系列研究^[7]。图7为基于数值模拟分析所得的道床板长度与裂缝宽度关系曲线^[7]。由图7可知，当均降温30℃时，道床板长度由3.9m增大至19.5m后，道床板表面最大裂缝宽度约由0.075mm增大至0.28mm，增长了约2.73倍；当均降温40℃时，道床板长度由3.9m增大至19.5m后，道床板表面最大裂缝宽度约由0.075mm增大至0.37mm，增长了约3.93倍。上述结论表面：道床板表面最大裂缝宽度与道床板长度呈较大相关性，且随着道床板长度的增加，道床板表面最大裂缝宽度亦有所增长。分析原因：由于混凝土收缩产生的应力随着构件尺寸的增加而增大，故尺寸较小的构

件其抗裂性能更优。综上所述,道床板尺寸对无砟轨道的抗裂性能有显著影响,且轨道抗裂性能随道床板尺寸的增大而劣化。

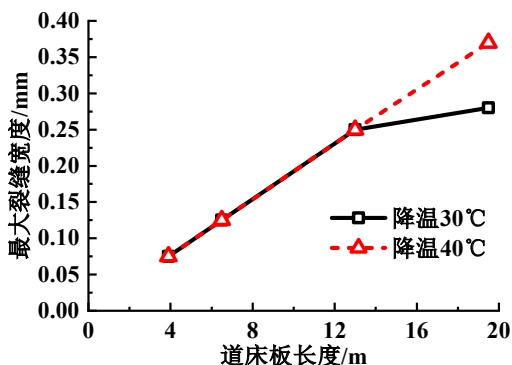


图7 道床板长度与裂缝宽度关系

四、双块式无砟轨道防裂优化设计方案

国内外学者围绕双块式无砟轨道防裂优化设计方案展开了系列研究,并提出多种不同优化方案。其中,较为典型的优化方案有:优选混凝土配合比、优化结构布置方案、改善施工工艺、适当增大道床板钢筋配筋率或选用直径较小的钢筋、加强早期养护和适时拆除工装等。

(1) 优选混凝土配合比:由混凝土配合比对无砟轨道抗裂性能影响分析知,选用低胶凝材料用量与低用水或掺入防裂材料的混凝土作为轨道板混凝土后,构件开裂性能有明显改善;低坍落度混凝土作为道床板混凝土后,结构抗裂性能亦有所改善。故对于实际工程,宜基于施工场地气候条件适当选择混凝土配合比,且应遵循“低胶材用量、低用水量、低坍落度、高含气量”的“三低一高”原则。

(2) 优化结构布置方案:有关道床板对无砟轨道抗裂性能影响分析表明:随着双块式无砟轨道板尺寸的增加,由于混凝土收缩产生的应力亦有所增大,进而导致构件的抗裂性能退化。因此,宜优先选用单元式轨道板或在轨道结构内增设收缩缝以减少由于混凝土收缩而产生的应力。

(3) 改善施工工艺:施工工艺对成型结构力学性能及抗裂性能均有较大影响。因此,为有效改善双块式无砟轨道结构的抗裂性能,需对其施工工艺进行改善。具体措施有:严格控制工程所需材料的各项指标;浇筑道床板混凝土前预先对轨枕表面进行界面处理并洒水保湿以改善新旧混凝土间的界面黏结性能;浇筑混凝土时应加强振捣以保证结构混凝土密实度;混凝土浇筑完成后,对轨道板表面应进行多次抹面收光;避免阴雨天、大风天等恶劣气候环境下施工。

(4) 适当增大道床板钢筋配筋率或选用直径较小的钢筋:有关钢筋配筋率及钢筋直径对双块式无砟轨道抗裂性能影响分析表明:轨道抗裂性能随钢筋配筋率的增加、钢筋直径的减少而改善。故对于双块式无砟轨道,宜在合理范围内设置较高的配筋率,选用直径较小的钢筋。

(5) 加强早期养护:为避免浇筑后的混凝土其表面水分的挥发,缓解混凝土内部温度变化速度,道床板混凝土浇筑完成后应及时覆盖保鲜膜或土工布并进行洒水养护。

(6) 适时拆除工装:对于双块式无砟轨道施工,应确定恰当的时机对轨道应力进行释放,以避免由于钢轨的热胀冷缩引起的轨道板裂缝。

五、结语

伴随着我国高速铁路的飞速发展,铁道线路所处的环境条件也不断趋于复杂,我们仍需进一步提升无砟轨道抗裂性能研究的基础理论与技术水平,为高铁安全稳定运行提供更为优良的基础条件。基于调研与分析,本文主要得出以下结论与建议:

(1) 混凝土配合比、混凝土坍落度、钢筋配筋率及钢筋直径及道床板尺寸等因素对双块式无砟轨道抗裂性能影响较大。且轨道抗裂性能随着混凝土配合比的优化、坍落度的降低、配筋率的增加、钢筋直径的减小和道床板长度的减少而改善。

(2) 双块式无砟轨道主要防裂优化方案有优选混凝土配合比、优化结构布置方案、改善施工工艺、适当增大道床板钢筋配筋率或选用直径较小的钢筋、加强早期养护和适时拆除工装等。

(3) 双块式无砟轨道复杂环境下的抗裂性能研究仍不够充分。目前,有关无砟轨道在严寒、海洋环境下抗裂性能相关研究的少有报道。因此,仍需对无砟轨道复杂环境下的抗裂性能展开深入研究。

(4) 已有双块式无砟轨道抗裂性能相关研究成果多基于数值模拟分析方法获得。故仍需探索新型研究量测方案,以提升双块式无砟轨道抗裂性能研究水平。

参考文献

[1] 张鲁顺, 赵国堂. 高速铁路双块式无砟轨道车辆荷载动态传递特征[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(09): 8-16.

[2] 曾志平, 叶梦旋, 王卫东, 等. 三维温度荷载下双块式无砟轨道结构动力响应[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(03): 7-12.

[3] 杨斌, 钱小益, 史青翠. 温度对双块式无砟轨道道床板及凸台结构的影响分析[J]. 铁道建筑, 2011(10): 104-107.

[4] 霍春阳. CRTS I型双块式无砟轨道轨枕与道床板界面受力状态研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.

[5] 谭盐宾, 郑永杰, 李康, 等. 双块式无砟轨道现浇混凝土的抗裂性能[J]. 铁道建筑, 2021, 61(02): 91-94.

[6] 车晓娟, 李成辉. 无砟轨道轨道板配筋对控制温度裂缝影响的研究[J]. 铁道建筑, 2007(10): 84-86.

[7] 韦有信, 秦超红, 李成辉, 等. 单元双块式无砟轨道道床板长度的确定[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(02): 297-302+309.