

DOI: 10.3901/JME.2022.06.177

CRTS II 型轨道砂浆脱空对车辆-轨道系统动力性能的影响^{*}

辛 欣 任尊松 魏 雪

(北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要: 为研究 CRTS II 型板式无砟轨道砂浆层与轨道板脱离对车辆和轨道结构动态响应的影响, 利用有限元分析软件 ANSYS 结合动力学仿真软件 SIMPACK 建立了 CRH2 型车辆-弹性轨道耦合动力学模型。分析板端砂浆横向完全脱空时, 不同脱空位置和脱空长度对轮轨垂向力、轮重减载率、车体垂向加速度、轨道垂向位移和轨道板拉应力的影响。结果表明: 轨道板垂向位移和拉应力受砂浆脱空影响最大, 可作为砂浆脱空时, 轮轨系统是否满足安全要求的衡量指标。车辆和轨道位移响应受板端单侧脱空和板端对称脱空影响基本相同, 但相邻板端脱空对其影响更加显著; 板端单侧脱空和相邻板端脱空对轨道板拉应力影响较为一致, 但其影响力度小于板端对称脱空。板端单侧脱空长度达 1.95 m、板端对称脱空和相邻板端脱空长度达 1.3 m 时, 车辆或轨道结构响应将接近或超出安全限值。通过分析砂浆不同脱空工况下轮轨系统动力学响应, 可为砂浆脱空维修提供依据。从而减少轨道维修次数、节约维修成本, 同时延长轨道系统寿命、保证行车安全。

关键词: 无砟轨道; 砂浆脱空; 动力响应; 联合仿真

中图分类号: TG156

Effects of Mortar Void of CRTS II Slab Track on the Dynamic Performances of Vehicle-track System

XIN Xin REN Zunsong WEI Xue

(College of Mechanical and Electronic Control, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: In order to study the effect of the mortar void of CRTS II slab ballastless track system on the dynamic responses of the vehicle and track structures, a CRH2 vehicle-flexible track coupled dynamics model is established by the finite element software ANSYS and dynamics simulation software SIMPACK. Under the conditions of through-transverse mortar void, the influences of different positions and longitudinal lengths of mortar void on the vertical wheel-rail contact force, wheel load reduction rate, vertical acceleration of the car body, vertical displacements of track structures and tensile stress of slab are analyzed. The results show that the vertical displacement and tensile stress of the slab are most affected by the mortar void, which can be used as a measure of whether the wheel-rail system meets the safety requirements when the mortar void occurs. The vehicle responses and track displacements are basically the same as the impact of the unilateral and symmetric void of the same slab ends, but the impact of the void of the adjacent slab ends is more significant; The unilateral void of the slab end and the void of the adjacent slab ends have a relatively consistent effect on the tensile stress of the track slab, but the influence is less than the that of the symmetrical void of the same slab ends. When the length of the unilateral void of the slab end reaches 1.95 m as well as the void length of the symmetrical and adjacent slab ends reaches 1.3 m, the responses of the vehicle or track structures will approach or exceed the safety limit. By analyzing the dynamic responses of the wheel-rail system under different mortar void conditions, a reference for the maintenance of mortar void can be provided. Thereby reducing the times of track maintenance and saving maintenance costs, while prolonging the life of the track

^{*} 国家自然科学基金资助项目(11790281)。20210722 收到初稿, 20211225 收到修改稿

system and ensuring operation safety.

Key words: ballastless slab track; mortar void; dynamic responses; co-simulation

0 前言

板式无砟轨道随列车高速发展得以广泛应用,其主要优点是具有强稳定性、高平顺性以及维修周期长;缺点是初期造价成本高,振动、噪声吸收率低,且难以维修和调整^[1]。板式无砟轨道主要包括钢轨、扣件、轨道板、砂浆层、混凝土底座和路基等结构。砂浆层为作为有机-无机非金属材料,经常暴露于空气之中极易发生老化伤损。同时,日夜温差引起的温度荷载以及列车高速通过产生的高频动载,使砂浆层与轨道板间常出现间隙^[2]。轨道板与砂浆结构在间隙位置处始终不发生接触的现象即为砂浆脱空,如图 1 所示。砂浆脱空导致轨道板底部受力不均,使其易产生裂纹、断裂和板边翘曲;脱空处轨道板下沉位移增大,轨道板与钢轨间距增大,扣件所受拉力增大,钢轨垂向位移增大、受力失衡;最终影响列车运行安全性和平稳性^[3-4]。研究不同位置、不同尺寸砂浆脱空对车辆和轨道系统动力特性的影响,可确定最大允许脱空长度,从而避免因过度维修引起的经济损失和维修不足造成的安全事故。

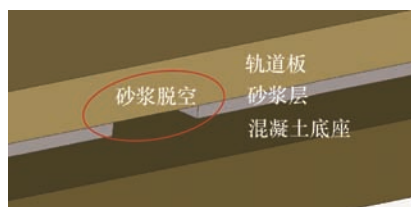


图 1 砂浆脱空示意图

关于砂浆脱空对车辆-轨道系统动力响应的影响,国内外诸多学者进行了研究。REN 等^[5-7]基于损伤力学理论建立了 CRTS I 型三维轨道模型,研究砂浆脱空对轨道板损伤分布和力学响应的影响,并对损伤修复准则进行了探讨。ZHU 等^[8]基于可靠度概念,分析了轨道层间损伤对轨道长期动力性能的影响,提出板式轨道损伤评估准则和安全阈值。郭利康等^[9]建立了 I 型轨道系统梁体模型,基于模态分析理论,研究不同砂浆脱空长度对轨道结构模态特征的影响。李潇等^[10-13]建立了车辆-I 型轨道耦合动力学模型,分析砂浆离缝高度和离缝长度对轨道

及车辆部分指标振动特性的影响。杨荣山等^[14, 14]通过理论研究结合现场试验数据,分析了 I 型轨道砂浆不同脱空工况下车辆及轨道系统的振动特性。ZHU 等^[15]建立了 II 型轨道三维有限元模型,分析温度和车辆荷载作用下,轨道板与砂浆层间损伤演化过程以及层间损伤对轨道动力特性的影响。刘钰等^[16]利用有限元分析方法研究实测温度梯度下, II 型轨道结构温度翘曲变形、应力以及早期离缝。赵国堂等^[17]建立了车辆-II 型轨道耦合模型,分析不同砂浆离缝程度和不同车辆运行速度对车辆和轨道系统动力学响应的影响,提出不同砂浆离缝工况下车辆运行速度的安全限值。曾志平等^[18-19]研究了 III 型轨道砂浆不同离缝长度和高度对轨道及路基结构动态响应的影响。

目前为止,关于 I 型板式轨道砂浆离缝影响的研究较为全面和具体,而 II 型轨道砂浆不同脱空位置及尺寸对车辆-轨道系统动力学响应影响的研究较少,且鲜有文章探讨砂浆脱空对轨道板应力状态的影响。由于 II 型轨道砂浆弹性模量远大于 I 型轨道^[20],即 II 型砂浆等效刚度大于 I 型,因此, II 型与 I 型轨道砂浆脱空对车辆及轨道系统动态响应或有差异。本文利用有限元分析软件 ANSYS 结合动力学分析软件 SIMPACK,建立了带有砂浆脱空的车辆-弹性轨道耦合动力学模型,分析了砂浆不同脱空位置及纵向脱空长度对轮轨垂向力、轮重减载率、车体垂向加速度、轨道结构垂向位移和轨道板拉应力的影响。

1 含砂浆脱空的车辆-轨道耦合动力学模型

1.1 仿真模型

基于车辆-轨道耦合动力学理论,建立带有砂浆脱空的仿真模型,如图 2 所示。车辆系统为多刚体模型,包含一节车体,两个转向架和四个轮对。车体和转向架均考虑伸缩、横摆、浮沉、侧滚、点头和摇头 6 个自由度,轮对考虑其横摆、浮沉、旋转、摇头 4 个自由度。车体和转向架之间的二系悬挂系统以及转向架和轮对之间的一系悬挂系统简化为线

性弹簧单元, 考虑其纵向、横向和垂向三向刚度和阻尼特性。

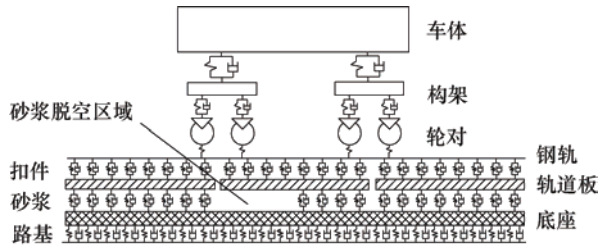


图2 车辆-弹性轨道模型示意图

轨道建立为弹性模型, 依据文献[21]结合仿真计算时间, 本文将弹性轨道模型设置为 25.95 m。钢轨、轨道板和底座利用 ANSYS 建为三维有限元模型, 并基于 Guyan 缩减理论进行子结构和缩减自由度分析以提高计算效率。弹性钢轨利用“Flextrack”模式导入 SIMPACK。为获取轨道板应力结果, 轨道板及底座弹性体利用“Linear flexible”类型导入 SIMPACK。扣件、砂浆和路基等效为弹簧-阻尼单元, 利用 SIMPACK 力元模拟; 砂浆脱空处将对应力元刚度和阻尼值赋为 0。忽略了轨道板间纵向连接装置对耦合系统响应的影响。将 ANSYS 建立的弹性体导入 SIMPACK 并实现连接后, 通过 Hertz 非线性接触理论定义轮轨约束关系, 使车辆子系统和轨道子系统联结成一个有机整体, 最终在 SIMPACK 中完成仿真计算。具体建模流程可参考文献[22], 此处不再赘述。

1.2 模型验证

CRH2 型车辆和 CRTS II 型轨道参数可参照文献[23-24]。此外, 每块轨道板长 6.45 m, 板间间隙为 0.05 m。为验证模型的正确性, 计算无砂浆脱空条件下, 车辆和轨道结构动力学响应。其中, 本文模型均采用德国低干扰轨道不平顺, 车辆运行速度设置为 300 km/h。将仿真结果与文献[2-25]结果进行对比, 如表 1 所示。可见, 本文所建模型与对比文献结果虽存在差异, 但整体具有较好一致性, 故本模型可用于砂浆脱空对车辆-轨道系统动力性能影响的研究。

表1 本文仿真结果与其他文献结果对比

	钢轨位移/mm	轨道板位移/mm	轨下支反力/kN	轮轨力/kN
本文	0.82	0.43	31.24	134.28
文献[2]	0.78	0.30	33.43	111.20
文献[25]	0.66~1.32	0.16~0.37	47.8~49.2	109.2~120.5

2 砂浆脱空工况设置及轮轨系统动力学评价标准

此处定义沿钢轨长度方向为纵向, 水平垂直于钢轨方向为横向。据现场调查结果, 板式轨道砂浆脱空普遍集中于轨道板板端(横向)位置和板边(纵向)位置^[26]。由于板边砂浆脱空对系统响应影响较小, 故本文主要研究板端砂浆横向完全脱空时, 不同纵向脱空长度下, 车辆及轨道结构动力响应的变化情况。图 3 为轨道板下砂浆脱空示意图, 阴影部分表示砂浆完好, 空白区域表示砂浆脱空。砂浆脱空工况主要设置为三类, 即板端单侧脱空(仅 S1 区域脱空)、板端对称脱空(S1 和 S2 同时脱空)以及相邻板端脱空(S1 和 S3 同时脱空)。A 点为砂浆脱空区域节点, 用于获取砂浆脱空时脱空处轨道结构位移; B 点为未脱空且距砂浆脱空区域最近的节点, 所在区域定义为砂浆脱空与未脱空连接区域, 用于获得轨道板拉应力。为使脱空与未脱空条件下, 节点位移和应力响应对比清晰, A、B 两点均位于钢轨正下方。

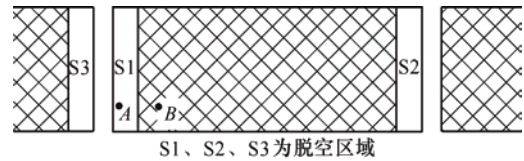


图3 轨道板下砂浆脱空示意图

由于模型已设定板端砂浆横向完全脱空, 故利用砂浆纵向脱空长度来描述砂浆脱空大小。砂浆脱空长度规定为轨道板板端至未损伤砂浆等效支撑力元间的纵向距离, 由 l 表示。板端对称脱空和相邻板端脱空时, S1 和 S2 以及 S1 和 S3 面积相等, 即两端脱空距离相同。本文 l 取值分别 0.30 m、0.65 m、0.95 m、1.30 m、1.60 m、1.95 m 和 2.25 m。砂浆纵向脱空长度及单侧纵向力元失效个数如表 2 所示。

表2 工况说明表

工况	1	2	3	4	5	6	7
脱空长度/m	0.30	0.65	0.95	1.30	1.60	1.95	2.25
纵向力元失效数	1	2	3	4	5	6	7

砂浆脱空引起轨道局部刚度不均, 形成动态不平顺, 影响轨道结构变形和受力以及车辆运行安全性和乘坐舒适性。轮轨垂向力、轮重减载率和车体

垂向振动加速度常用以评估车辆运行性能;轨道结构垂向位移以及轨道板拉应力是评估轨道振动特性的重要指标。根据文献[4]可知,轮轨垂向力最大值应小于 170 kN,轮重减载率安全限值取 0.8,车体垂向加速度舒适性标准为 $0.13g$ ($g=9.8 \text{ m/s}^2$),钢轨垂向位移合理取值范围为 2 mm 以内。根据《客运专线铁路 CRTS II 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆暂行技术条件》可知,轨道板拉应力最大值不得超过 3.5 MPa。

3 砂浆脱空对车辆-轨道结构动力学性能影响

3.1 砂浆脱空对车辆系统性能影响

图 4 为不同砂浆脱空工况下,脱空区段轮轨垂向力最值变化图。由图可见,三类脱空工况下,轮轨力最大(小)值均随砂浆纵向脱空长度的增加而增大(减小)。其中,板端单侧脱空时,轮轨力最值随脱空长度的增加变化幅度最小,砂浆脱空 1.95 m,轮轨力最大值接近安全限值 170 kN。砂浆脱空长度不超过 1.6 m 时,板端对称脱空较相邻板端脱空对轮轨垂向力最值影响更加明显,即相同脱空长度下,前者轮轨垂向力最大值更大,最小值更小。板端对称脱空长度为 1.3 m,相邻板端脱空 1.6 m 时,轮轨垂向力最大值无法满足车辆安全性要求。

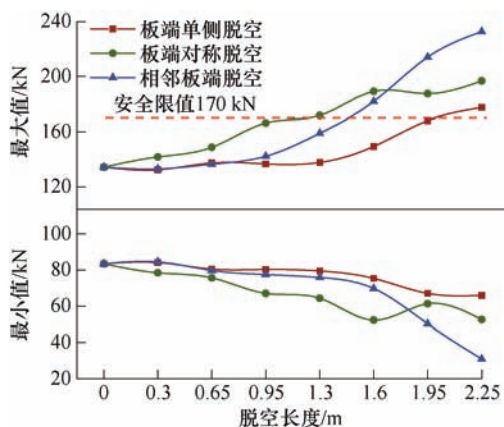


图4 轮轨垂向力最值图

砂浆脱空长度大于或小于 1.6 m 时,板端对称脱空和相邻板端脱空对轮轨垂向力最值影响程度不同。其主要原因是,当砂浆脱空小于 1.6 m 时,板端对称脱空总量为 2 倍脱空长度,使该板所受垂向约束减小量多,整块轨道板支撑刚度降低,造成轮对通过时该段区域对轮轨冲击力增大,最终导致轮轨垂向力响应加剧。而单板总脱空量小于 1.6 m 对

轨道系统刚度影响甚微,此时,脱空位置对轮轨垂向力幅值起主要作用。当砂浆脱空长度大于 1.6 m 时,相邻板端同时脱空,砂浆连续脱空达 3.2 m,为轨道板长度的一半,单板砂浆脱空量引起轨道板刚度变化对轮轨力最值影响较砂浆连续脱空总长度影响小。此时,砂浆连续脱空总长度对轮轨垂向力响应占主导地位。

图 5 为不同砂浆脱空工况下,脱空段轮重减载率最大值对比图。轮重减载率是表示轮重减少程度的重要指标,由式(1)定义,其实质上也是对轮轨垂向力的反映。由图 5 可知,在不同砂浆脱空工况下,轮重减载率与轮轨垂向力最值变化规律基本相同,即随砂浆脱空长度的增加而逐渐增加。在本文研究工况中,仅当相邻板端脱空长度达 1.95 m 时,轮重减载率最大值超出安全限值。

$$W = \frac{\Delta P}{P} = \frac{P_d - P_s}{P_s} = \frac{P_d}{P_s} - 1 \quad (1)$$

式中, W 为轮重减载率, ΔP 为轮重减载量, P 为左右侧车轮的平均轮重, P_d 和 P_s 分别为车轮动载和静载。

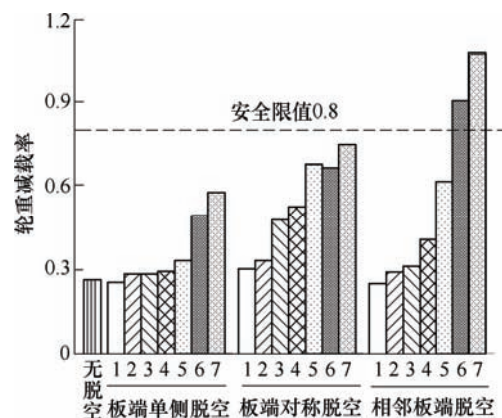


图5 轮重减载率最值图

图 6 为砂浆板端单侧脱空、板端对称脱空以及相邻板端脱空工况下,车体垂向加速度最大值随脱空长度变化图。经过一、二系悬挂系统的衰减作用,仅当相邻板端脱空长度大于 1.95 m 时,最大车体垂向加速度增幅明显,较无脱空时增大近 2 倍;当脱空长度车体垂向加速度当脱空长度达到 2.25 m,加速度最大值为 0.90 m/s^2 ,为无脱空条件下的 3.65 倍,但仍未超过车体垂向振动加速度舒适度标准值 $0.13g$ 。而在板端单侧脱空和板端对称脱空条件下,脱空长度小于 1.6 m 时,车体垂向加速度略有减小,随后逐渐增大。

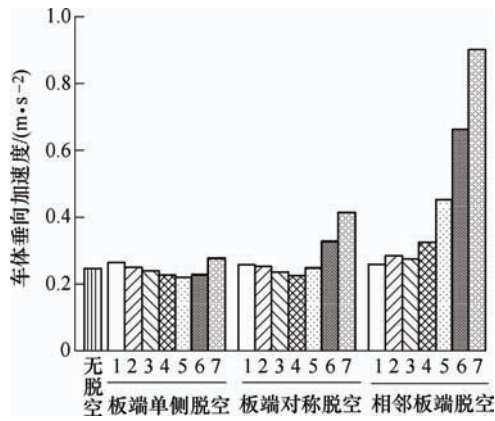


图6 车体垂向加速度最大值图

3.2 砂浆脱空对轨道系统性能影响

本节主要分析不同砂浆脱空工况下，轨道结构垂向位移随砂浆脱空长度的变化情况。图7为钢轨、轨道板和底座在脱空位置(图3中A点)垂向位移最大值及其相应变化率。其中，位移变化率由式(2)定义

$$R_x = \frac{D_x - D_0}{D_0} \quad (2)$$

式中， R_x 为位移变化率； D_x 和 D_0 分别为有、无砂浆脱空工况下轨道结构垂向位移最大值。

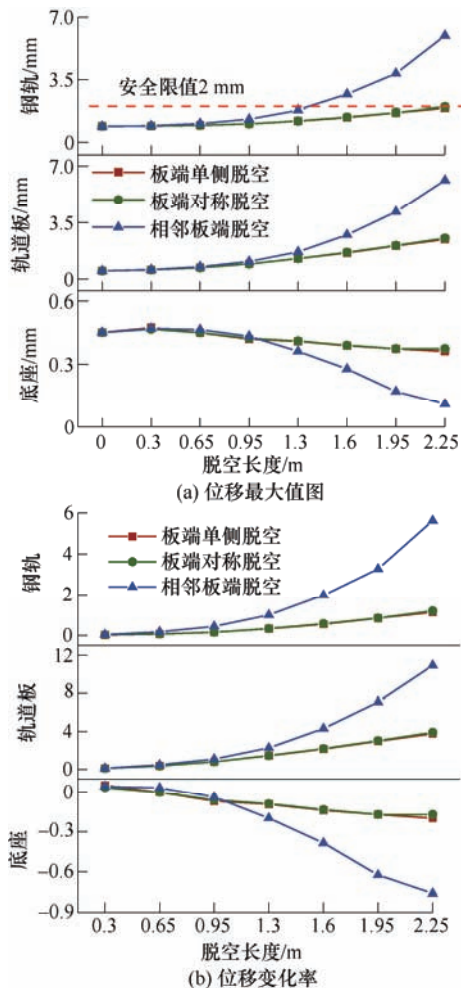


图7 轨道位移最值及其变化率

由图7a可知，随着砂浆脱空长度的增加，脱空处轨道板底部支撑不足，钢轨和轨道板节点垂向位移增大；轨道板与底座连接强度降低，底座垂向位移减小。板端单侧脱空和板端对称脱空工况下，轨道结构观测点垂向位移最大值基本相同，均未超过安全限值2 mm，且响应最大值与脱空长度基本呈线性递增关系。相邻板端脱空工况下，当脱空长度大于0.95 m时，轨道节点位移最大值增幅变大；脱空长度1.6 m时，钢轨节点位移最大值达2.68 mm，超过安全阈值。由图7b知，相邻板端脱空长度达2.25 m时，底座位移最大值较无脱空时减小90%，钢轨位移增加约6倍，而轨道板位移增加近12倍。故同等砂浆脱空工况下，底座垂向位移所受影响最小，钢轨次之，轨道板位移所受影响最为显著。

3.3 砂浆脱空对轨道板应力影响

砂浆脱空使脱空处轨道板所受支撑减弱、变形量增加，脱空与未脱空连接区域(图3中B点所在区域)轨道板应力增加。因此，该区域轨道板极易产生裂纹和断裂。图8为未脱空和相邻板端脱空1.30 m时，轨道板某时刻拉应力云图。由图可见，未发生砂浆脱空时，轨道板应力分布较均匀，最大拉应力为0.56 MPa，远小于轨道板许用拉应力3.5 MPa。相邻板端砂浆脱空1.30 m时，未脱空处轨道板拉应力整体较脱空处明显增大，且轨道板拉应力幅值增加，最大值达2.3 MPa。

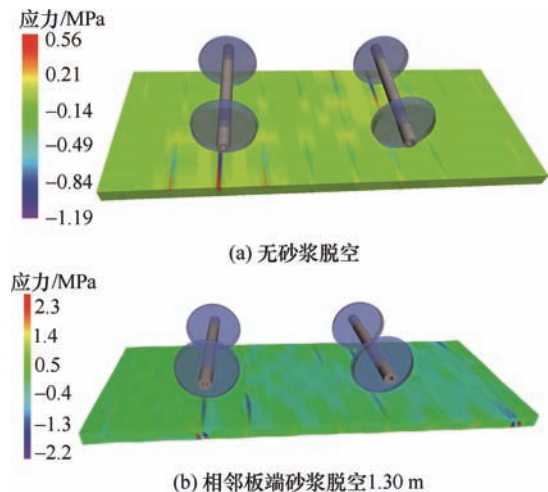


图8 轨道板拉应力云图

表3列出了本文计算工况中，板端单侧脱空、板端对称脱空以及相邻板端脱空时，轨道板拉应力超过许用应力3.5 MPa时，最小砂浆脱空长度和最

大轨道板拉应力。由表 3 可知, 板端单侧脱空和相邻板端脱空工况下, 砂浆脱空长度为 1.95 m 时, 轨道板拉应力最大值分别为 3.95 MPa 和 3.94 MPa, 已超过轨道板应力限值 3.5 MPa。事实上, 经计算发现, 在板端单侧脱空和相邻板端脱空工况下, 未脱空处轨道板拉应力值近似相同。其主要原因是砂浆板端单侧脱空和相邻板端脱空时, 每块轨道板的有效承载面积相同, 因此其应力变化规律相似。板端对称脱空工况下, 砂浆脱空长度为 1.30 m 时, 轨道板拉应力最大值为 3.81 MPa, 接近板端单侧脱空和相邻板端脱空长度 1.95 m 时轨道板最大拉应力。由此可见, 对于连接区域轨道板拉应力而言, 板端对称脱空更易导致其超出安全限值。砂浆板端对称脱空时, 该轨道板有效承载面积减小量是板端单侧脱空和相邻板端脱空单块轨道板承载面积减少量的 2 倍, 故轨道板拉应力增加更为显著。

表 3 轨道板拉应力最大值表

脱空类型	脱空长度/m	最大拉应力/MPa
板端单侧脱空	1.95	3.95
板端对称脱空	1.30	3.81
相邻板端脱空	1.95	3.94

4 结 论

通过建立包含砂浆脱空的 CRH2 型车辆-CRTS II 型弹性轨道耦合动力学模型, 分析了砂浆横向完全脱空条件下, 板端单侧脱空、板端对称脱空和相邻板端脱空对车辆及轨道结构动力学响应的影响。基于本文研究工况及相关动力学响应结果, 可得出以下结论。

(1) 轨道结构响应受砂浆脱空影响较车辆响应更加显著。且轨道板垂向位移和拉应力最大值增大倍数较无脱空时可达 10 倍以上, 故可将其作为砂浆脱空时, 系统是否满足安全条件的监测指标。

(2) 板端单侧脱空和板端对称脱空对车辆及轨道位移响应影响基本相同, 且相比于相邻板端脱空, 其影响较小; 轨道板拉应力受板端单侧脱空和相邻板端脱空影响一致, 但随脱空长度地增加, 其在板端对称脱空工况下最先超出安全限值 3.5 MPa。

(3) 板端单侧脱空长度增至 1.95 m 时, 轮轨垂

向力和轨道板拉应力将率先超出安全值; 为保证车辆及轨道动力学响应处于安全限值以内, 板端对称脱空和相邻板端脱空时, 脱空长度应小于 1.3 m。

参 考 文 献

- [1] AGGESTAM E, NIELSEN J C O, SVED N. Simulation of vertical dynamic vehicle-track interaction-comparison of two-and three-dimensional models[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 56(11): 1633-1657.
- [2] WANG P, XU H, CHEN R. Effect of cement asphalt mortar debonding on dynamic properties of CRTS II slab ballastless track[J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2014(2): 1-8.
- [3] 蔡世昱, 阙显廷, 杨荣山. CA 砂浆脱空对框架型轨道板翘曲的影响分析[J]. 铁道标准设计, 2013(1): 21-24.
CAI Shiyu, QUE Xianting, YANG Rongshan. Effect analysis of CA mortar disengaging on frame type track slab's warping[J]. Railway Standard Design, 2013(1): 21-24.
- [4] 杨荣山, 刘克飞, 任娟娟, 等. 砂浆伤损对轮轨系统动力特性的影响研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(7): 79-84.
YANG Rongshan, LIU Kefei, REN Juanjuan, et al. Research on effect of cement asphalt mortar damages on dynamic characteristics of wheel-rail system[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(7): 79-84.
- [5] REN J, LI X, YANG R, et al. Criteria for repairing damages of CA mortar for prefabricated framework-type slab track[J]. Construction & Building Materials, 2016, 110: 300-311.
- [6] REN J, WANG J, LI X, et al. Influence of cement asphalt mortar debonding on the damage distribution and mechanical responses of CRTS I prefabricated slab[J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 116995.
- [7] REN J, LI H, CAI X, et al. Viscoelastic deformation behavior of cement and emulsified asphalt mortar in China railway track system I prefabricated slab track[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2020, 21(4): 304-316.
- [8] ZHU S, CAI C, ZHAI W. Interface damage assessment of railway slab track based on reliability techniques and vehicle-track interactions[J]. Journal of Transportation Engineering, 2016, 142(10): 4016041.

- [9] 郭利康, 张四放, 杨荣山, 等. CRTS I 型板式无砟轨道脱空状态对结构模态的影响[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(9): 29-32.
GUO Likang, ZHANG Sifang, YANG Rongshan, et al. The influence of CRTS I slab track disengaging on structural modal[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(9): 29-32.
- [10] 李潇, 任娟娟, 刘学毅, 等. 客货共线砂浆离缝高度对轨道结构的动力影响[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(5): 958-965.
LI Xiao, REN Juanjuan, LIU Xueyi, et al. Dynamic influence of gap height of CA mortar on track structure under mixed traffic conditions[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(5): 958-965.
- [11] 李培刚, 刘学毅, 黎国清. CA 砂浆脱空对桥上单元板式轨道动力特性的影响研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(3): 20-27.
LI Peigang, LIU Xueyi, LI Guoqing, et al. Influence of CA mortar void on dynamic characteristics of unit slab track on bridge[J]. China Railway Science, 2014, 35(3): 20-27.
- [12] 杨俊斌, 刘学毅, 刘永孝, 等. I 型轨道板端离缝对轨道结构及车辆动力特性的影响[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(3): 432-437.
YANG Junbin, LIU Xueyi, LIU Yongxiao, et al. Influence of seam in type I slab ends on dynamic characteristics of track and vehicle[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(3): 432-437.
- [13] LIU D, LIU Y, REN J, et al. Contact loss beneath track slab caused by deteriorated cement emulsified asphalt mortar: dynamic characteristics of vehicle-slab track system and prototype experiment[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016(PT.11): 1-12.
- [14] 刘丹, 苏成光, 张四放, 等. 板端脱空对 CRTS I 型板式轨道动力特性影响试验研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(2): 99-104.
LIU Dan, SU Chengguang, ZHANG Sifang, et al. Experimental study on influence of contact loss beneath track slab end on dynamic characteristics of CRTS I slab track[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(2): 99-104.
- [15] ZHU S, CAI C. Interface damage and its effect on vibrations of slab track under temperature and vehicle dynamic loads[J]. International Journal of Non Linear Mechanics, 2014, 58: 222-232.
- [16] 刘钰, 赵国堂. CRTS II 型板式无砟轨道结构层间早期离缝研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 1-7.
LIU Yu, ZHAO Guotang. Analysis of early gap between layers of CRTS II slab ballastless track structure[J]. China Railway Science, 2013, 34(4): 1-7.
- [17] 赵国堂, 高亮, 赵磊, 等. CRTS II 型板式无砟轨道板下离缝动力影响分析及运营评估[J]. 铁道学报, 2017, 39(1): 1-10.
ZHAO Guotang, GAO Liang, ZHAO Lei, et al. Analysis of dynamic effect of gap under CRTS II track slab and operation evaluation[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(1): 1-10.
- [18] 曾志平, 罗俊, 刘斌, 等. 界面离缝对 CRTS III 型板式轨道动力特性的影响[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(3): 34-38.
ZENG Zhiping, LUO Jun, LIU Bin, et al. Influence of interface bond damage on the dynamic characteristic of CRTS III slab track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(3): 34-38.
- [19] 宋小林, 吕天航, 裴承杰. 板边离缝对 CRTS III 型轨道-路基动力特性的影响[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(5): 913-920.
SONG Xiaolin, LÜ Tianhang, PEI Chengjie. Influence of interface crack on impact dynamic properties of CRTS III slab track-subgrade system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(5): 913-920.
- [20] SHAN Y, ZHENG S, ZHANG X, et al. Fatigue performance of the CA mortar used in CRTS I ballastless slab track under simulated servicing condition[J]. Materials, 2018, 11(11): 2259.
- [21] Molodova M, LI Z, Dollevoet R. Axle box acceleration: Measurement and simulation for detection of short track defects[J]. Wear, 2011, 271(1-2): 349-356.
- [22] 辛欣, 任尊松, 李响. 高速轨道结构振动及传递特性[J]. 机械工程学报, 2020, 20(56): 146-154.
XIN Xin, REN Zunsong, LI Xiang. Vibration characteristics and transmission of high-speed track structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 20(56): 146-154.
- [23] SHI H, YU Z, SHI H, et al. Recognition algorithm for the disengagement of cement asphalt mortar based on dynamic responses of vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 233: 1791372311.
- [24] ZHAI W, LIU P, LIN J, et al. Experimental investigation on vibration behaviour of a CRH train at speed of 350 km/h[J]. International Journal of Rail Transportation, 2015, 3(1): 1-16.