高速车辆动载下双块式无砟轨道离缝积水动水压力时空变化特性

王明晨, 蔡成标, 朱胜阳^{*}, 何庆烈, 张嘉伟

西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031

^{*} E-mail: syzhu@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2018-08-02; 接受日期: 2018-09-27; 网络版发表日期: 2018-11-27

国家自然科学基金(批准号: 51708457, 11790283, 51778194)和四川省科技计划项目(编号: 2017GZ0088, 2017JY0215)资助

摘要 本文结合车辆-轨道耦合动力学方法与流固耦合方法, 建立了双块式无砟轨道离缝积水动水压力计算模型, 分析了离缝形态及积水状态对动水压力的影响规律、车辆荷载作用下离缝积水动水压力的时空分布特点以及考虑动水压力时空变化的参数影响规律. 结果表明: 高速车辆通过计算截面时, 动水压力将达到最大正、负压值, 离缝动水压力沿轨道横向的分布较为复杂, 不同深度处离缝积水动水压力变化并不一致, 采用单点动水压力变化难以表征整个离缝区域积水动水压力特性, 可采用分区域加载的方法; 将动水压力向离缝尖端点简化, 得到的主矢和主矩可描述空间分布的动水压力整体的力学作用, 同时主矢和主矩随时间的变化也反映了动水压力作用的时变特点; 当离缝渐深、离缝高度渐小以及列车运行速度渐增时, 动水压力主矢和主矩逐渐增大; 离缝深度超过 0.9 m 时, 动水压力对道床板向上的作用将超过钢轨支点压力对道床板向下的作用, 将加速无砟轨道层间损伤.

关键词 高速铁路, 双块式无砟轨道, 流固耦合, 动水压力, 层间离缝, 时空变化

1 引言

双块式无砟轨道结构简单可靠、便于施工、建设成本较低, 在我国范围内大规模运用. 受车辆荷载、环境条件等多种因素长期复杂作用的影响, 实际运营中发现道床板与支承层间离缝已在较多线路出现^[1], 双块式无砟轨道层间离缝引起了学术界和工程界的广泛关注^[2,3]. 离缝中存在积水时, 将加速无砟轨道层间损伤. 离缝积水与道床板之间的耦合作用包括两方面: 一方面, 车辆荷载下道床板运动将挤压离缝积水, 产生动

水压力; 另一方面, 动水压力反作用于道床板, 道床板承受向上荷载产生法向界面张力.

无砟轨道层间含水离缝的破坏与混凝土、岩石等脆性材料含水裂隙的劈裂破坏相似, Qian 等人^[4]、Sengura 和 Carol^[5]均认为裂隙内水压力 and 水的流动满足达西定律; 王海龙和李庆斌^[6]从细观角度进行研究, 发现湿态混凝土抗压强度降低, 孔隙水压力将加速混凝土内部微裂纹扩展. 针对无砟轨道含水离缝的研究较少, 徐桂弘等人^[7]使用正弦荷载模拟车辆荷载, 开展了含水离缝内动水压力试验, 获得了荷载幅值对动水压力

引用格式: 王明晨, 蔡成标, 朱胜阳, 等. 高速车辆动载下双块式无砟轨道离缝积水动水压力时空变化特性. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 725–732
Wang M Z, Cai C B, Zhu S Y, et al. Temporal-spatial variation of dynamic water pressure at interface crack of double-block ballastless track under high-speed vehicle dynamic loads (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 725–732, doi: 10.1360/N092018-00259

的影响规律。杨荣山等人^[8]采用流固耦合方法分析了单轮载作用下CRTS II型板式轨道层间含水离缝动水压力随不同因素的变化规律。现有研究较多关注于岩石及混凝土的水力劈裂破坏, 针对无砟轨道含水离缝的研究大幅简化无砟轨道所受车辆荷载, 无法较好地描述高速车辆荷载下无砟轨道含水离缝动水压力变化过程及规律, 对车辆荷载-动水压力耦合作用导致无砟轨道层间界面损伤开裂的机理缺乏较好的阐述。

本文首先建立双块式无砟轨道离缝积水动水压力计算模型, 采用车辆-轨道耦合动力学方法获得高速车辆动荷载, 随后运用流固耦合方法计算高速车辆动荷载作用下离缝积水动水压力, 并分析其时空变化特性。研究结果有助于解释双块式无砟轨道层间离缝积水动水压力导致轨道结构层间失效破坏的机理, 对轨道设计、运营维护及轨道结构改进有参考价值。

2 计算模型

2.1 无砟轨道离缝积水动水压力计算模型

将离缝横截面简化为矩形, 建立二维的无砟轨道离缝积水动水压力计算模型。采用分离式解法求解流固耦合问题, 需要分别求解固体区域、流体区域, 以及进行流固耦合交界面的数据交换。对于一般的可压缩牛顿流体要遵循的物理守恒定律包括质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。流体、固体的控制方程以及流固耦合方程参考文献^[9]。

在道床板顶部扣件处施加钢轨支点压力时程曲线, 对支承层底部施加固定约束, 将离缝的上下表面和端面设置为流固耦合界面。无砟轨道模型的单元尺寸不大于5 mm, 单元总数约7.6万个。车辆荷载频率较高, 离缝积水的流动较为复杂, 因此应该考虑湍流的影响。 $k-\varepsilon$ 湍流模型系列当中, 标准 $k-\varepsilon$ 模型鲁棒性较好, 适用于一般情况下的流场模拟。RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型可考虑分

离流动和涡旋流动效应, 而且可较准确地预测近壁区的流动, 虽然湍流的RNG分析未借助任何经验, 完全基于理论推导, 但由此得到的某些常数与试验结果吻合得相当好^[10]。Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型, 适用于自由射流情况^[11], 与本文流场情况不符。因此本文选择RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行计算。离缝积水与无砟轨道离缝接触的壁面同样设置为流固耦合界面, 这样在联合仿真时计算软件会在该区域进行数据交换。离缝积水模型沿离缝高度方向划分有8层单元, 离缝积水开口端压力值设置为0。水的动力黏度取 $1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

计算时采用固定时间步长, 无砟轨道模型和离缝积水模型需采用相同的积分步长, 通过试算发现 $\Delta t = 2 \times 10^{-5} \text{ s}$ 时可忽略因积分步长而带来的计算误差, 可选此为积分步长。无砟轨道离缝积水动水压力计算模型如图1所示。

2.2 高速车辆-双块式无砟轨道耦合动力学模型

为了获得高速车辆作用下钢轨支点压力, 基于车辆-轨道耦合动力学理论^[12], 将高速车辆视为由车体、转向架构架及轮对组成的多刚体系统, 一、二系悬挂构件视为弹簧阻尼元件, 考虑车体、前后转向架构架的沉浮和点头运动, 以及4个轮对的垂向振动, 共10个自由度; 基于模态叠加法建立双块式无砟轨道结构动力学模型, 将钢轨视为弹性离散点支承基础上的欧拉梁, 考虑钢轨的垂向自由度; 扣件则视为弹簧阻尼元件; 由于道床板和支承层黏结为一体, 将其等效为单一材料的整体梁并支承在线性弹簧阻尼上, 考虑整体梁的垂向自由度, 线性弹簧阻尼模拟路基弹性作用。应用赫兹非线性弹性接触理论确定轮轨垂向作用力。高速车辆-双块式无砟轨道耦合动力学模型, 如图2所示。

2.3 动水压力试验验证

建立同文献^[13]试验条件一致的动水压力计算模

图1 (网络版彩图)无砟轨道离缝积水动水压力计算模型

图2 高速车辆-双块式无砟轨道耦合动力学模型

图3 (网络版彩图)动水压力仿真与试验结果

型, 计算所得动水压力和试验所得动水压力对比如图3所示, 可以看出仿真和试验结果吻合较好, 验证了离缝积水动水压力建模方法可行。因此, 通过该方法建立的双块式无砟轨道离缝积水动水压力计算模型可用于分析动水压力变化规律。

3 离缝形态及积水状态对动水压力的影响

通过改变离缝积水的深度 l_w 、离缝高度 h 、离缝深度 l 三个参数的取值, 分析不同离缝及积水状态对动水压力的影响。由于只需要求得动水压力的变化规律, 因此可不施加车辆荷载, 计算时在无砟轨道离缝积水动水压力计算模型的承轨台处施加 70 ± 35 kN的垂向简谐荷载, 频率为30 Hz。不同离缝积水深度、离缝高度、离缝深度时, 动水压力分布及最大值如图4所示。

结果表明离缝积水动水压力从离缝开口端面向离缝尖端(缝尖)逐渐增大, 离缝积水中任一点的动水压力与该点到缝尖距离呈非线性变化关系。图4(a)和(b)展现了离缝深度和高度一定时, 随着离缝积水深度增加, 动水压力将显著增大, 尤其离缝全部充满水时缝尖端动水压力达到最大值。当双块式无砟轨道离缝存在下倾角度时, 离缝中可能积聚较多的离缝积水, 此时应尽快排出积水以防止列车通过时产生较大的动水压力。图4(c)和(d)展现了离缝和离缝积水深度一定时, 随着离缝高度增加, 动水压力将逐渐减小, 离缝高度不足5 mm时动水压力值较大, 超过15 mm以后动水压力变化趋于平缓。图4(e)和(f)展现了离缝积水深度和离缝高度一定时, 随着离缝深度增加, 动水压力将显著增大, 可见动水压力对离缝深度的变化较为敏感。

综上所述, 离缝及离缝积水越深、离缝高度越小, 动水压力就越大。因此, 本文在计算时考虑离缝积水充满离缝区域, 计算结果为当前离缝状态下的最大动水压力。

4 车辆荷载作用下离缝积水动水压力的时空分布

以列车运行速度350 km/h, 离缝高度为2 mm, 深度为0.7 m的离缝积水为例, 分析动水压力的时间和空间分布特点。应用高速车辆-双块式无砟轨道耦合动力学模型计算得到钢轨支点压力, 如图5所示。计算结果同文献[12]中现场测试结果吻合较好。

4.1 离缝积水动水压力的时间分布特点

位于离缝积水深0.7 m处(即离缝尖端处)的动水压力时程曲线如图6所示, 图中1, 2, 3, 4分别为第1, 2, 3, 4位轮对通过计算截面的时刻。

图6为离缝尖端处的动水压力时程曲线。1位轮对接近计算截面时动水压力出现 ± 10 kPa以内小幅波动。在1位轮对接近前的0.02 s内动水压力急速上升并在轮对到达计算截面时达到极大值, 随后动水压力迅速下降并形成负压, 大约1位转向架中点到达计算截面时降至极小值, 随着2位轮对快速接近计算截面, 动水压力迅速从负压转变为正压值。1位转向架通过后动水压力出现短时间的大幅波动, 随后2位转向架通过时, 动水压力有相同的变化规律。3位轮对到达时动水压力达

图4 (网络版彩图)离缝及积水状态对动水压力的影响。(a), (b) 离缝积水深度的影响($l=0.6$ m, $h=5$ mm); (c), (d) 离缝高度的影响($l=1$ m, $l_w=0.5$ m); (e), (f) 离缝深度的影响($l_w=0.5$ m, $h=5$ mm)

到最大正压值, 约2位转向架中点到达时动水压力达到最大负压值。在车辆高速通过后约0.029 s时动水压力达到一个极大值, 随后继续振荡并迅速减小。离缝深度为其他值时也有类似分布规律。由于大气压力作用, 当动水压力为负压时, 道床板上下表面受到大气压力和动水压力的合力向下, 将阻碍道床板的向上运动。

不同离缝深度时, 离缝尖端处动水压力在其时间历程中的最大正压、负压值, 如图7所示。

从图7可见, 离缝深度小于0.3 m时动水压力很小,

可忽略不计。离缝深度从0.3 m增加到0.8 m时, 最大正压、负压值均平缓上升, 当离缝深度超过0.8 m后最大正压、负压值迅速上升。当离缝深度达到0.9 m时, 最大负压值将超过20℃的饱和水蒸气压力。此时, 液体的水将迅速气化为水蒸气, 这些气泡混在水中, 即“空泡”^[14]。从图6可以看出, 车辆荷载作用下动水压力变化过程十分剧烈, 较大的正压和负压值短时间内交替出现, 使得空泡迅速地产生和破灭, 空泡破灭时对无砟轨道离缝处混凝土造成冲击和剥蚀, 即“汽蚀”^[14]。

图5 钢轨支点压力

图6 离缝深度为0.7 m处动水压力

图7 (网络版彩图)不同深度离缝尖端处积水最大正压、负压值

后续可开展对该方面的研究,将有助于解释无砟轨道离缝沿垂向的扩张。

4.2 离缝积水动水压力的空间分布特点

不同时刻离缝积水的动水压力空间分布如图8

图8 (网络版彩图)不同时刻离缝积水的动水压力空间分布

所示。

由图8可见,3位轮对到达计算截面时,距离缝开口约0.05~0.1 m范围为负压值,到开口距离约大于0.1 m后,随着深度逐渐增加动水压力缓慢上升,整个离缝积水中动水压力分布以正压为主,道床板上下表面存在压力差,承受向上的动水作用力;2位转向架中点通过时整个离缝积水中动水压力均为负压,道床板承受向下的大气压力与动水作用力的合力;4位轮对通过时动水压力主要为负压,距离缝开口约0.43~0.64 m范围压力约为0,道床板承受向下的大气压力与动水作用力的合力。图8中3条曲线之间动水压力变化的时间均约为0.014 s,动水压力短时间内大幅变化的宏观表现即为道床板受到频率较高的动水作用力,且短时间内发生反向。

同时,离缝积水动水压力沿轨道横向的分布相当复杂,并可能同时存在正压和负压,即不同深度处离缝积水动水压力变化并不一致。因此,采用一个点的动水压力变化来代替整个离缝积水动水压力变化的方法是不准确的。本文将动水压力施加于轨道模型时采用按离缝深度分区域加载的方法,沿横向选取多个点(至少5个点)的动水压力值施加于道床板底部,可以反映动水压力的空间分布特点。

5 考虑动水压力时空变化的参数影响分析

为了有效地评价层间离缝动水压力的时空分布特性,根据平面力系简化原则,将任一时刻空间分布的动水压力向离缝尖端处简化,得到该时刻的主矢和主矩,如图9所示。图中, p_w 为动水压力, $p_w \Delta l$ 为长度 Δl 的动水压力合力, O_1 为离缝尖端, F_R 为主矢, M_0 为主矩。由于动水压力计算模型为二维模型,主矢 F_R 和主矩 M_0 均代

图9 (网络版彩图)动水压力简化方法

表单位长度离缝积水动水压力简化值。

车辆动载作用下, 简化后的离缝高度为2 mm, 深度0.7 m的单位长度离缝积水动水压力主矢和主矩随时间变化曲线, 如图10所示。主矢向上为正值, 使道床板产生向上弯曲变形的主矩为正值。图中1, 2, 3, 4分别为第1, 2, 3, 4位轮对通过计算截面的时刻。

从图10可见, 3位轮对通过时主矢和主矩均达到最大正值, 即此时道床板承受动水压力施加的最大的向上作用, 2位转向架中点通过时主矢和主矩均达到最大负值, 即此时道床板承受最大的向下作用。通过主矢和主矩可描述空间分布的动水压力整体作用效果, 主矢和主矩随时间的变化又反映了动水压力作用的时变特点, 因此主矢和主矩能够反映动水压力的时空分布特点。本文将主矢和主矩作为不同离缝状态、列车运行速度下, 考虑动水压力时空变化特点的对比分析参数。

计算不同离缝深度、离缝高度和列车运行速度下离缝积水动水压力, 并向离缝尖端点简化得到主矢和主矩, 计算时长内主矢和主矩的最大值如图11所示。

从图11(a)可见, 随着离缝深度逐渐增加, 主矢和主矩的最大正值逐渐上升, 最大负值逐渐减小, 即动水压力对道床板的作用逐渐增大; 离缝深度超过0.8 m后, 动水压力主矢和主矩对离缝深度的增加愈加敏感。从图11(b)可见, 离缝高度在2~15 mm之间变化时, 随着离缝高度逐渐增加, 动水压力主矢和主矩最大正值逐

渐减小, 最大负值逐渐增大, 即动水压力对道床板的作用逐渐减小; 当离缝高度大于5 mm后, 动水压力主矢和主矩相对离缝高度的变化不敏感。从图11(c)可见, 随着列车运行速度提升, 动水压力主矢和主矩最大正值逐渐增大, 最大负值逐渐减小, 即动水压力对道床板的作用逐渐增大; 在160~400 km/h范围内, 动水压力主矢和主矩相对列车运行速度的变化较为敏感。

特别是当离缝深度达到0.9 m时, 主矢、主矩最大正值分别为69.7 kN/m, 24.7 kN m/m, 因此道床板在一个扣件间距长度内(即0.65 m)受到向上动水压力的主矢、主矩分别为45.3 kN, 16.1 kN m; 主矢和主矩同时达到最大正值, 动水作用力合力作用点距离缝尖端0.355 m。此时道床板受到的钢轨支点压力为42.6 kN, 作用点距离缝尖端0.253 m, 分别小于动水压力合力大小和作用点到缝尖的距离。这表明离缝深度超过0.9 m时, 动水压力对道床板向上的作用将超过钢轨支点压力对道床板向下的作用, 这将加速无砟轨道层间损伤。

6 结论

本文将双块式无砟轨道层间离缝简化为矩形, 建立了无砟轨道离缝积水动水压力计算模型, 结合车辆-轨道耦合动力学与流固耦合方法计算得到了层间离缝动水压力, 并对其时空变化特性进行了分析。主要结论如下:

(1) 离缝形态及积水状态对动水压力影响显著, 离缝深度越大, 离缝高度越小, 离缝积水深度越大, 动水压力就越大。

(2) 车辆荷载作用下, 高速车辆3位轮对通过时动水压力达到最大正值, 2位转向架中点通过时动水压力达到最大负值, 车辆通过后动水压力出现振荡; 离

图10 动水压力简化后的主矢和主矩。(a) 主矢; (b) 主矩

图 11 (网络版彩图)不同状态下的动水压力主矢和主矩. (a) 离缝深度的影响($v=350$ km/h, $h=2$ mm); (b) 离缝高度的影响($v=350$ km/h, $l=0.7$ m); (c) 列车运行速度的影响($l=0.7$ m, $h=2$ mm)

缝积水动水压力沿轨道横向的分布较为复杂, 并可能同时存在正压和负压, 因此采用一个点的动水压力变化来代替整个离缝区域积水动水压力变化的方法是不准确的, 可采用分区域加载的方法, 以体现动水压力的空间分布特点.

(3) 将动水压力向离缝尖端点简化, 得到的主矢和主矩可描述空间分布的动水压力整体的力学作用, 主

矢和主矩随时间的变化又反映了动水压力作用的时变特点, 因此主矢和主矩可反映动水压力的时空分布特点; 当离缝渐深、离缝高度渐小以及列车运行速度渐增时, 动水压力主矢和主矩逐渐增大.

(4) 离缝深度超过 0.9 m 时, 动水压力对道床板向上的作用将超过钢轨支点压力对道床板向下的作用, 将加速无砟轨道层间损伤.

参考文献

- 西南交通大学, 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都铁路局, 等. 无砟轨道系统病害现场调查和分类. 技术报告. 2013
- 翟婉明, 赵春发, 夏禾, 等. 高速铁路基础结构动态性能演变及服役安全的基础科学问题. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 645–660
- 陈潇. 双块式无砟轨道路桥过渡段道床板与支承层离缝原因分析及处理措施研究. 铁道勘测与设计, 2012, 1: 30–34
- Qian C, Huang B, Wang Y, et al. Water seepage flow in concrete. Construct Build Mater, 2012, 35: 491–496
- Segura J M, Carol I. Numerical modelling of pressurized fracture evolution in concrete using zero-thickness interface elements. Eng Fract Mech, 2010, 77: 1386–1399
- 王海龙, 李庆斌. 湿态混凝土抗压强度与本构关系的细观力学分析. 岩石力学与工程学报, 2006, 25: 1531–1536
- 徐桂弘, 杨荣山, 刘学毅. 荷载幅值对无砟轨道结构裂纹水压力影响. 铁道工程学报, 2015, 32: 32–37
- 杨荣山, 曹世豪, 谢露, 等. 列车荷载与水耦合作用下的无砟轨道水力劈裂机理分析. 铁道学报, 2017, 39: 95–103
- 徐桂弘, 刘学毅, 杨荣山, 等. 列车荷载-水耦合作用下 CRTS II 型板式无砟轨道道床裂纹扩展研究. 铁道学报, 2014, 10: 76–80
- Rubinstein R, Barton J M. Nonlinear Reynolds stress models and the renormalization group. Phys Fluids A-Fluid Dyn, 1989, 2: 1472–1476
- 吴光中, 宋婷婷, 张毅. FLUENT 基础入门与案例精通. 北京: 电子工业出版社, 2012

- 12 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学. 第4版. 北京: 科学出版社, 2015
- 13 曹世豪, 杨荣山, 刘学毅, 等. 无砟轨道层间裂纹内动水压力特性分析. 西南交通大学学报, 2016, 51: 36–42
- 14 柯乃普 R T, 戴利 J W, 哈密脱 F G. 水利水电科学研究院, 译. 空化与空蚀. 北京: 水利出版社, 1981

Temporal-spatial variation of dynamic water pressure at interface crack of double-block ballastless track under high-speed vehicle dynamic loads

WANG MingZe, CAI ChengBiao, ZHU ShengYang, HE QingLie & ZHANG JiaWei

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

By combining the vehicle-track coupled dynamics method and the fluid-structure coupled method, an analysis model for predicting dynamic water pressure (DWP) at the interface crack of double-block ballastless track is developed in this work. The influence of the interface cracking and interface water states on the DWP, the temporal-spatial distribution characteristics due to vehicle dynamic loads, and the parameters influence law with considering the temporal-spatial variation of the DWP are analyzed in details. Results show that the DWP reaches the maximum positive and negative pressures when a high-speed vehicle passes the calculation section; the distribution of the DWP along the lateral direction is complicated, the variations of the DWP at different crack depths are different, so that it is difficult to represent the DWP characteristics by using the DWP at a single point, and the method of partition loading can be adopted; By simplifying the dynamic water pressure to the point at the interface crack tip, the obtained principal vector and principal moment can not only describe the overall mechanical behavior of the spatial distributed DWP, but also their variation with the time reflect the time-varying characteristics of the DWP; the principal vector and principal moment gradually increase with the increases the interface crack depth and the vehicle running speed, as well as the decrease of the interface crack height; the upward action of the DWP on the track slab will exceed the downward action of the bearing pressure at rail supporting point on the track slab, which would accelerate the interface damage the ballastless track.

high-speed railway, double-block ballastless track, fluid-structure interaction, dynamic water pressure, interface crack, temporal-spatial variation

doi: [10.1360/N092018-00259](https://doi.org/10.1360/N092018-00259)