

Study on Characteristic of Flow for Non-Ballasted Track Crack under the High Speed Railway Action*

Guihong Xu, Xueyi Liu, Rongshan Yang, Yong Peng

MOE Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu
Email: smileanne@163.com

Received: Dec. 18th, 2012; revised: Jan. 21st, 2013; accepted: Feb. 3rd, 2013

Copyright © 2013 Guihong Xu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The non-ballasted track had been widely used with the massive construction of the high-speed railway in China. The damage issue of non-ballasted track mainly based on the flaw was becoming gradually evident, especially the influence of rainwater to the damages. Nowadays there was a lack of the systematic research on the relevant problems at home and abroad. This paper focuses on the flow characteristics of CRTSII non-ballasted track interlayer crack. Unified governing equation and mathematical model were established in solid and fluid domain, based on the two-way coupled field computation, at the high speed train loads action. The water flow characteristics had been simulated in CRTSII non-ballasted track Interlayer crack. Analysis shows that: 1) At the high-speed train loads action, crack surface pressure of every monitor is linear increased with the crack length, the more close the crack tip, the more pressure; 2) with crack length increased the water velocity of crack internal reduce.

Keywords: Non-Ballasted Track; Fluid-Structure Interaction; Flow Characteristics

高速列车荷载下无砟轨道裂纹内水流特性研究*

徐桂弘, 刘学毅, 杨荣山, 彭勇

西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都
Email: smileanne@163.com

收稿日期: 2012年12月18日; 修回日期: 2013年1月21日; 录用日期: 2013年2月3日

摘要: 无砟轨道伴随我国高速铁路大规模修建得到了广泛应用, 但以裂纹为主要形式的伤损问题也逐步凸显, 特别是雨水对伤损的影响尤为突出。本文针对 CRTSII 型无砟轨道层间裂纹中水流特性问题, 应用流固耦合理论及其统一控制方程, 基于双向二维流固耦合场计算原理, 建立了高频列车荷载作用下 CRTSII 型板式轨道砂浆层下裂纹中水流特性模拟, 结果表明: 1) 当高频荷载作用于下, 随着裂纹长度的增加, 裂纹内部各计算点压强与裂纹的长度基本呈线性变化, 越是靠近裂纹尖端, 压强越大。2) 裂纹内部水流速度, 随着裂纹深度的增加而减少, 在裂纹的尖端时最小。

关键词: 无砟轨道; 流固耦合; 运动特性

1. 引言

无砟轨道以其高平顺、高稳定和少维修的特点成

为高速铁路上的主要轨道结构型式, 随着我国客运专线的大规模兴建并投入运营, 无砟轨道得到了快速发展与广泛应用。

目前, 通过对全国各地的无砟轨道服役情况调研

*基金项目: 国家自然科学基金(51278431)。

发现, 各型无砟轨道均出现了不同程度的伤损, 其中以轨道板/道床板开裂、层间连接破坏和填充层破损等伤损最为普遍。在降雨量丰富的地区或排水不畅地段, 无砟轨道破损速率较干燥地区快得多。以双块式无砟轨道为例, 在武广、郑西、遂渝等线路均发现预制轨枕与现浇道床板间出现裂纹的现象(如图 1 所示), 在遂渝线和武广线, 同样的病害, 道床板裂纹发展较快, 在病害严重地段, 裂纹宽度增加, 预制轨枕松动下雨后, 经列车荷载的作用, 在裂纹处有白浆冒出, 进一步加剧了轨枕松动(如图 2 所示)。对于北方干旱地区, 层间离缝基本不发展, 但在南方多雨地区, 凡离缝处均发现有冒浆现象发生, 在排水不良地段, 列车经过时, 离缝处的冒浆现象非常明显, 且病害发展迅速。可见, 列车荷载与水的耦合作用对无砟轨道病害发展起着极为关键的作用, 高频荷载作用下, 裂纹内部水流的运动形态, 是影响轨道水至伤损的关键性问题。

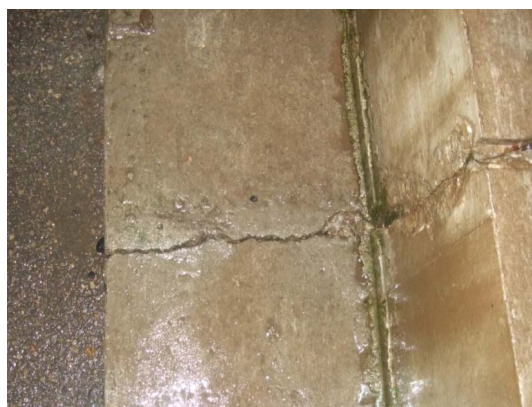


Figure 1. Non-ballasted track plate injury of SUI-YU line
图 1. 遂渝线无砟轨道道床板伤损



Figure 2. Sleeper loose of SUI-YU line
图 2. 遂渝线无砟轨道轨枕松动

水泥混凝土路面与无砟轨道的工作条件类似, 公路路面的研究成果对于无砟轨道的研究具有积极的借鉴意义。相关研究表明, 在交通荷载和水的共同作用下, 水泥混凝土路面普遍出现挤浆、板底脱空等现象, 进一步引起路面板的断板、裂缝等早期损坏严重^[1,2]。国内外的道路工作者普遍认为这种现象主要是由路面基层材料抗冲刷性能差和较大的动水压力造成的, 并相继展开了对基层材料性能和动水压力的研究^[3,4]。20 世纪 70 年代起, 王先俊、黄仰贤、姚祖康、唐伯明等人应用有限元方法先后分析了地基部分脱空状态下的水泥混凝土路面结构受力^[5,6]。20 世纪 80~90 年代, 美国的研究人员采用现场试验的方法, 对脱空区滞留水的水压力进行了一定的研究^[7,8]。目前, 我国对水泥混凝土路面动水压力的形成和数值计算开展了一定的理论研究工作^[9,10]。在试验研究方面, 采用室内试验的方法建立了水泥混凝土路面脱空处动水压力试验模型, 测定了基层脱空处的动水压力, 并分析了脱空面积、荷载位置、荷载大小和荷载速度等因素对脱空处动水压力的影响^[11]。为合理进行路面板脱空的预防和治理提供了参考依据。

目前, 国内外对于高频列车荷载作用下, 水在裂纹中运动的状态, 未进行系统深入的研究^[12,13]。虽然各领域在混凝土本构关系、流固耦合及水害作用机理方面做了大量理论和试验研究, 但这些研究均未考虑列车荷载轴重大、速度快的作用特点, 其研究成果不能照搬到无砟轨道的相关研究领域。

本文针对典型无砟轨道裂纹中水流特性问题, 应用流固耦合理论及其统一控制方程, 基于双向二维流固耦合场计算原理, 建立了高频列车荷载作用下 CRTSII 型板式轨道砂浆层下裂纹中水流动特性的模拟, 详细探讨了高频列车荷载作用下裂纹内部水的流动特性及运动规律。分析结果为无砟轨道裂纹伤损的发展机理提供理论参考。

2. 计算模型

直线路基上 II 型板式无砟轨道由钢轨、弹性扣件、预制轨道板、砂浆调整层及支承层等组成^[14], 轨道板尺寸为 $200 \times 2550 \text{ mm}$, 砂浆调整层尺寸为: $30 \times 2550 \text{ mm}$, 轨道板底座尺寸为: $300 \times 2950 \text{ mm}$ ^[15,16]。因为裂纹一般始发于新老混凝土的交界面处, 计算假定裂纹在砂浆调整层与支承层交接位置。

模拟高速列车荷载作用下裂纹内部水流特性可分如下步骤, 首先高速列车荷载传递给轨道板, 轨道板传递给裂纹内部水, 水反过来把荷载传递给轨道板, 属于双向流固耦合问题。考虑高速列车荷载幅值高、加载速度快频率高等特点。研究其内部水流特性, 可采用双向瞬态流固耦合模型如图 3 所示。

3. 流固耦合基本原理、计算方法及参数

3.1. 流固耦合的基本原理及控制方程

ALE 方法将固体中常用的拉氏系与流体中常用的欧拉系相联系。ALE 描述下的不可压流体的 Navier-Stokes 方程组包括流体力学基本方程、有限元数值离散方程及耦合系统方程^[17,18]。

基本方程包括流体连续性方程、运动方程、本构方程, 利用连续方程推导出压力和速度的计算公式:

$$\frac{\partial^2 p^{n+1}}{\partial x_i^2} = \frac{\rho}{\Delta t} \frac{\partial \bar{u}^{n+1}}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 p^n}{\partial x_i^2} \quad (1)$$

$$u_i^{n+1} = \bar{u}_i^{n+1} - \frac{\Delta t}{\rho} \left(\frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} - \frac{\partial p^n}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

有限元数值离散方程中, 对于有限元分步法, 速度和压力由相互独立的方程以解耦的形式求解。利用 Galerkin 加权余量方法可推导出有限元数值离散方程。对整个单元进行集合, 得到耦合系统方程, 写成矩阵形式:

$$M^{n+1} \bar{u}_i^n = M^n u_i^n - \Delta t \left[B^n (\delta_{ij} + D_{ij}) u_j^n - \frac{1}{\rho} C_i p^n - E_i \right] \quad (3)$$

$$M^{n+1} p^{n+1} = -\frac{\rho}{\Delta t} C_i^{n+1} \bar{u}_i^{n+1} + A^n p^n + Q^{n+1} - Q^n \quad (4)$$

$$M^{n+1} \bar{u}_i^{n+1} = M^{n+1} \bar{u}_i^{n+1} - \frac{\Delta t}{\rho} (C_i^{n+1} p^{n+1} - C_i^n p^n) \quad (5)$$

在计算速度时, 在流固耦合边界面上应考虑速度耦合边界条件:

$$u = T^T v \quad (6)$$

其中, v 为耦合边界上的结构运动速度, T^T 为几何关系矩阵。

结构的运动方程可写为:

$$m\dot{v} + cv + k\delta = X \quad (7)$$

在流固耦合界面上可推导出:

$$X = -TF = -\int_s n \cdot (\varphi) ds \cdot p \quad (8)$$

式(8)中: $n = \{n_1, n_2, n_3\}^T$ 为壁面法向矢量, F 为等效结点力, (φ) 为插值函数矩阵。

在耦合界面上, 由方程(8)式可求得:

$$p^{n+1} = (M^{n+1})^{-1} \left[-\frac{\rho}{\Delta t} C_i^{n+1} \bar{u}_i^{n+1} + A^n p^n + Q^{n+1} - Q^n \right] \quad (9)$$

耦合界面上有:

$$Q^{n+1} = \int_s \rho (\varphi)^T n^T ds \cdot \dot{v} = \rho T^T \cdot \dot{v} \quad (10)$$

将(8), (9), (10)式代入结构运动方程(7)式并整理得:

$$\left[m + \rho T (M^{n+1})^{-1} T^T \right] \dot{v} + cv + k\delta = - \left[(M^{n+1})^{-1} - \left(\frac{\rho}{\Delta t} C_i^{n+1} \bar{u}_i^{n+1} + M^n p^n - Q^n \right) \right] \quad (11)$$

结构运动方程用 Newmark 方法求解。系统耦合方程(11)利用迭代方法求解。

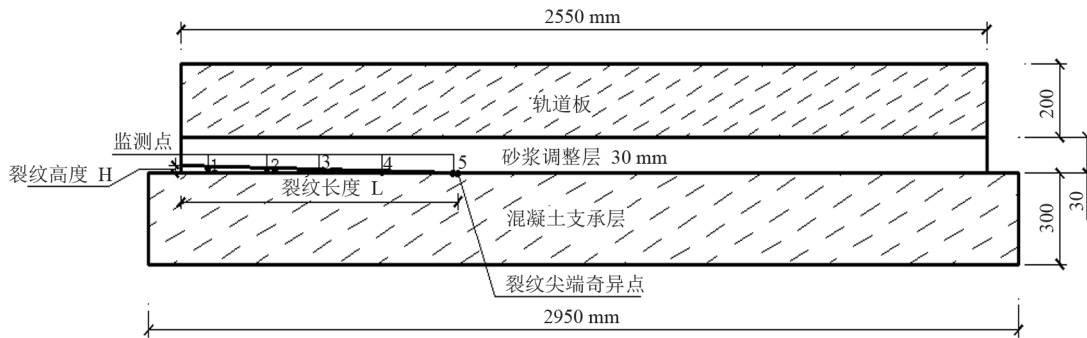


Figure 3. Two-way transient fluid-structure coupling computation model
图 3. 双向瞬态流固耦合计算模型

3.2. 计算方法及参数选取

高频列车荷载作用下，无砟轨道结构裂纹内部水流特性的研究，采用双向瞬态流固耦合模型模拟计算。ALE 描述被用于流体域；流体域中的网格点按照自由液面的运动或结构与液体接触面的移动而不断更新，从而将运动边界的非线性效应融入计算方法中，在空间域上采用有限元离散格式；在时间域上 Navier-Stokes 方程采用分步计算格式。荷载取值按静轮载 1/2 (250 kN)取值，按 350 km/s 行车速度，荷载频率 25 Hz^[19,20]。计算相关参数如表 1 所列。

4. 计算结果及分析

通过模拟计算，当列车速度为 350 km/h，裂纹高度为 5 mm、裂纹长度为 1 m 时，得到各计算点及计算点 1 的压强变化图如图 4、图 5 所示，压强随裂纹深度的变化如图 6 所示，各计算点、计算点 1 水流速度变化如图 7、图 8 所示、裂纹内部水流速度随裂纹长度变化如图 7 所示。

由图 4、图 5、图 6 可知，当列车荷载频率不变

Table 1. Computation parameter two-way transient fluid-structure coupling model
表 1. 双向瞬态流固耦合模型计算参数

部件	项目	详细信息
	荷载频率	0.04 s
	荷载值	10×10^5 pa
固体域	(轨道板)弹性模量	36,000 Mpa
	(轨道板)泊松比	0.2
	(支承层)弹性模量	32,500
	(支承层)泊松比	0.2
	分析类型	瞬态耦合
		多场耦合
流体域	流体类型	常温水
	域类型	单区域
	时间步	0.01 s
	相对压强	1 [atm]
	耦合时间	1 s
	输出控制	计算点(如图 1 所示)
	边界条件	无滑动边界
边界条件	流固交接面：无滑动边界	

时，裂纹表面受到的压强，随着列车荷载的变化，分别对裂纹上、下表面产生压强。随着裂纹长度的增加，

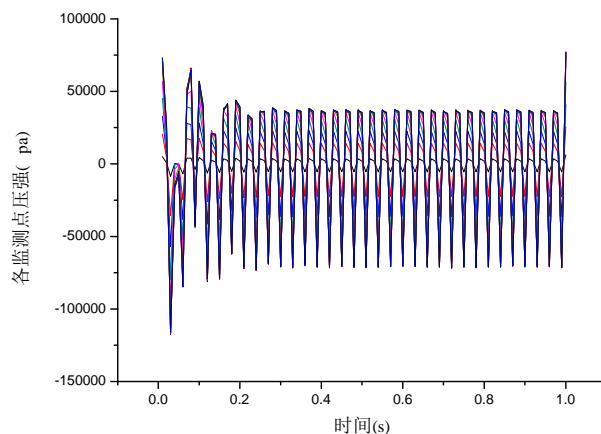


Figure 4. Relationship between time and pressure of all calculating point

图 4. 各计算点压强随时间变化

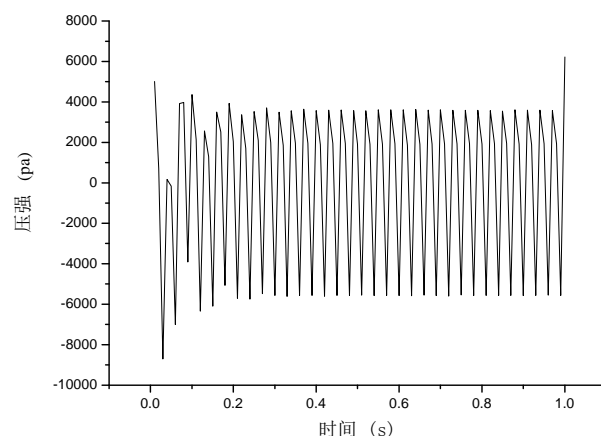


Figure 5. Relationship between time and pressure of point1

图 5. point1 随时间压强变化

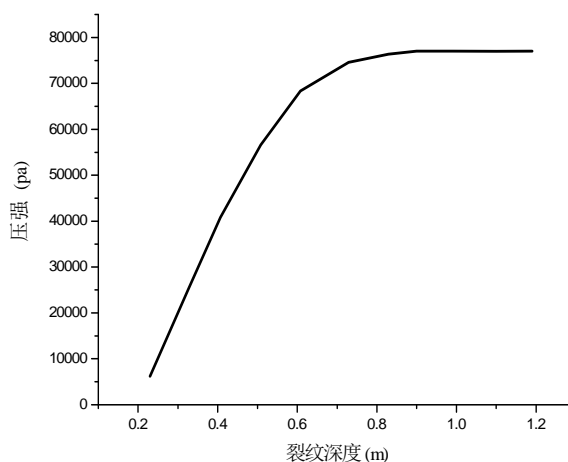


Figure 6. Relationship between pressure and crack depth

图 6. 压强随裂纹深度的变化

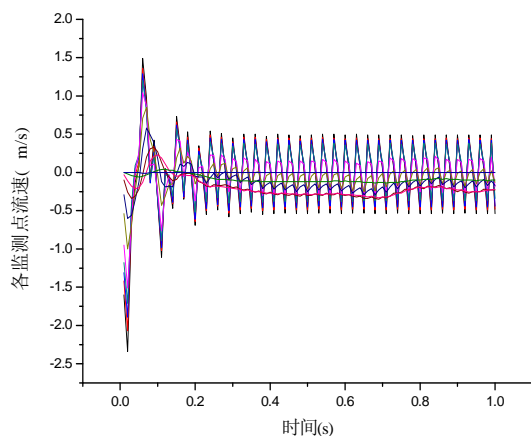


Figure 7. Relationship between time and water velocity of all calculating point
图 7. 各计算点流速随时间变化

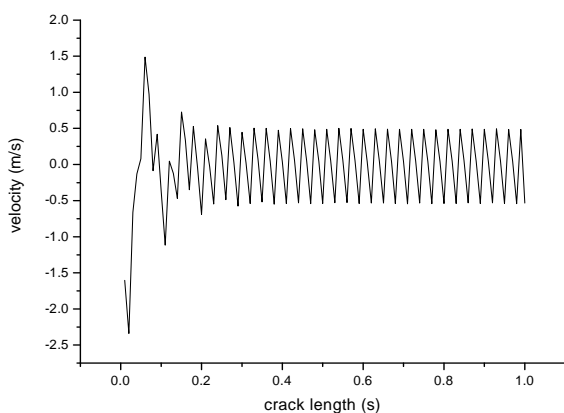


Figure 8. Relationship between time and water velocity of point 1
图 8. point 1 流速随时间变化

各计算点压强与裂纹的长度基本呈线性变化，越是靠近裂纹尖端，压强越大，最大压强在 point 11 为 116017.57 Pa。

由图 7、图 8、图 9 可知，当列车荷载频率不变时，裂纹内部各计算点流速随着列车荷载增减而变化，列车荷载减少时，水流方向为正向，列车荷载增加时，水流方向为负，数值大小相近。裂纹内部水流速度，随着裂纹深度的增加而减少，在裂纹的尖端最小为 0，裂纹的开口处达到最大为 1.39 m/s (向裂纹内流动)。

5. 结论

本文针对 CRTSII 型板式无砟轨道砂浆调整层底部水平层间裂纹，考虑高速列车荷载与水耦合作用条件，对裂纹内部水流特性进行了研究。

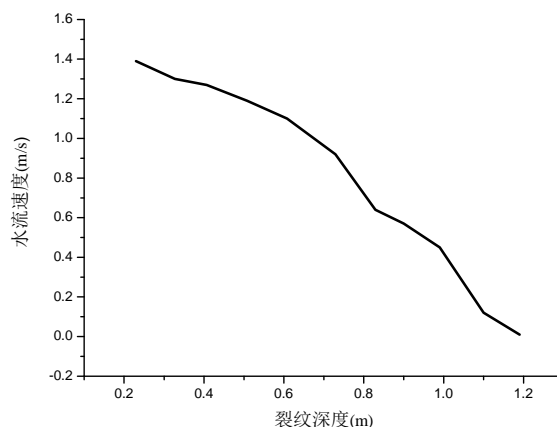


Figure 9. Relationship between water velocity and crack depth
图 9. 流速随裂纹深度变化

得到如下结论：

1) 当高频荷载作用于钢轨上时，轨道板受到强大冲击，裂纹内部水产生强大压强，可能会导致裂纹沿裂隙面发生水力断裂。随着裂纹长度的增加，裂纹内部各计算点压强与裂纹的长度基本呈线性变化，越是靠近裂纹尖端，压强越大。

2) 当列车荷载频率不变时，裂纹内部各计算点流速随着列车荷载增减而变化，列车荷载减少时，水流方向为正向，列车荷载增加时，水流方向为负，速度值大小相近。裂纹内部水流速度，随着裂纹深度的增加而减少，在裂纹的尖端时最小。

本文根据实际高速铁路无砟轨道病害情况、建立相应损伤模型。根据实际高速列车荷载的大小和作用频率进行荷载取值。本文采用了商用软件 ANSYS-WORKBENCH13 中的 Transient Structural 和 cfx 软件系统进行流固耦合计算，在模型设置过程中，由 ANSYS 软件公司流体力学的专业人员进行计算过程设置。根据王海龙、李庆斌的不同加载速率下饱和混凝土的劈拉试验结果^[21]，当干燥混凝土加载速率为 2 Mpa/s 时，其劈拉强度为 1.89 Mpa；按照荷载比例，与本文计算裂纹表面受到压强值，结果相近。所以，本文计算结果具有一定的合理性。

参考文献 (References)

- [1] 曾胜 曾小军, 许佳. 水泥混凝土路面板角脱空判定指标[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(1): 248-256.
- [2] 张宁, 钱振东, 黄卫. 水泥混凝土路面板下地基脱空状况的评定与分析[J]. 公路交通科技, 2004, 1: 4-8.
- [3] 关增智. 半刚性基层材料抗冲刷性能的研究[J]. 混凝土,

- 2008, 3: 48-50.
- [4] 沙爱民. 半刚性基层的材料特性[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 1-5.
- [5] 曾胜, 张显安. 水泥混凝土板下脱空状况时接缝处弯沉的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(6): 31-36.
- [6] 程涛, 王国体. 不同脱空形式下水泥混凝土路面破坏应力分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(4): 515-518.
- [7] 周玉民, 谈至明, 刘伯莹. 水泥混凝土路面脱空状态下的荷载应力[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 341-345.
- [8] A. J. Van Wijk, J. Larralde, W. Lvelle, et al. Pumping prediction model for highway concrete pavement. *Journal of Transportation Engineering*, 1989, 115(2): 161-175.
- [9] E. Hansen, R. Jhannesen and J. Armaghani. Field effects of water pumping beneath concrete pavement slabs. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, 1991, 117(6): 679-696.
- [10] 谈至明, 谭福平. 水泥混凝土路面板底脱空区水运动规律的分析模型[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(3): 281-286.
- [11] 李少波, 张宏超, 孙立军. 动水压力的形成与模拟测量[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(7): 915-918.
- [12] 廉向东, 付其林, 陈拴发, 聂午龙, 王秉纲. 基于板底脱空的水泥混凝土路面动水压力试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(5): 100-103.
- [13] 程学武, 董敬. 隧道内整体道床的破裂原因分析及整治[J]. 铁道工程学报, 2009, 5(128): 64-68
- [14] 徐庆元, 张旭久. 高速铁路博格纵连板桥上无砟轨道纵向力学特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(2): 526-532
- [15] 卿启湘, 胡萍, 王永和, 尹汉锋, 张春顺. 高速铁路双块式无砟轨道计算模型约束方程的建立[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(4): 1360-1368
- [16] 蔡小培, 高亮, 孙汉武, 曲村. 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.
- [17] 铁道部工程管理中心, 京津城际轨道交通工程. CRTSII 型板式无砟轨道技术总结报告[M]. 2008.
- [18] 客运专线铁路无砟轨道充填层施工质量验收补充标准[S]. 铁建设[2009]90 号.
- [19] 姜涛. 基于 ANSYS 的流固耦合问题数值模拟[D]. 兰州大学硕士学位论文, 2008.
- [20] 焦宗夏, 华清, 于凯. 传输管道流固耦合振动的模态分析[J]. 航空学报, 1999, 20(4): 316-320.
- [21] 王海龙, 李庆斌. 不同加载速率下饱和混凝土的劈拉试验研究及强度变化机理[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 105-109.