第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0118-05

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ 2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:方　辉, 赵　科, 朱晟毅, 等. 收缩徐变对高速列车-轨道-桥梁系统动态特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 118—122
Fang Hui, Zhao Ke, Zhu Shengyi, et al. Influence of shrinkage and creep on the dynamic performance of high-speed train-track-bridge system [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 118—122

交通运输

收缩徐变对高速列车-轨道-桥梁系统动态特性的影响

方　辉　赵　科　朱晟毅　付　昂　董光德　马　兴
(国网重庆市电力公司电力科学研究院,重庆 401120)

摘　要　收缩徐变效应在高速铁路混凝土桥梁的施工和建造过程中是不可避免的,其会引起桥梁的变形,诱发高速列车运行安全平稳性受到影响。针对该问题,首先选取中国高速铁路中大量采用的 32 m 简支箱梁桥结构,考虑结构配筋及施工步骤,建立有限元模型,采用 JTG2012 标准中的收缩徐变模型,分析收缩徐变引起的桥面变形。在此基础上,基于列车-轨道-桥梁动力相互作用理论,将收缩徐变导致的桥面变形视为边界条件,建立考虑收缩徐变的高速列车-轨道-桥梁耦合动力学模型。最后,借助该模型,研究收缩徐变效应对高速列车乘坐舒适性和运行安全性的影响规律。研究结果表明:收缩徐变效应主要影响高速列车的动态特性,而对轨道和桥梁结构的动力学行为影响较小;在收缩徐变效应下,高速列车运行安全性和乘坐舒适性可以得到保证。

关键词　收缩徐变　　车轨桥动力相互作用　　桥梁动力学　　运行安全性　　高速铁路
中图法分类号　U271;　　**文献标志码**　A

自 2008 年京津高速铁路开通运营以来,中国高速铁路得到了迅猛发展,桥梁结构也得到了大量采用[1]。对于混凝土桥梁结构,收缩徐变所造成的桥面变形是不可避免的,进而导致轨道结构的变形,诱发高速列车通过该区域时轮轨接触关系的改变,并最终威胁到高速列车的运行安全性和乘坐舒适性。

到目前为止,已有大量学者对混凝土收缩徐变效应开展了深入研究,也获得了很多有意义的结论。既有研究中绝大多数工作均主要集中在三个方面:①混凝土收缩徐变效应的观测与预测[2—4];②收缩徐变效应的发展演化以及其模型的构建[5—7];③收缩徐变效应对结构变形的影响[8,9]。既有研究极大地推动了收缩徐变理论及分析方法的发展,并且很多重要的结论也写入了相关规范中,比如 ACI209 模型、CEB-FIP 模型、JTG 模型等。由既有文献可以看出,收缩徐变效应会引起混凝土桥梁的变形,这种现象会对高速列车的正常运行造成不可忽视的影响。然而目前针对该问题的研究还较少,杨宏印等曾对徐变作用下的车轨桥系统动态特性进行了研究,指出徐变对系统的动力学行为有明显的影响[10],但是在该研究中未考虑轮轨非线性,其研究结果与实际情况有一定误差。

针对收缩徐变对高速铁路中列车-轨道-桥梁耦合动力学系统的影响问题,现选取中国高速铁路中大量采用的 32 m 简支箱梁桥结构,考虑结构配筋及施工步骤,采用 JTG 收缩徐变模型,分析收缩徐变引起的桥面变形。然后,基于列车-轨道-桥梁动力相互作用理论,建立考虑收缩徐变的高速列车-轨道-桥梁耦合动力学模型,并在此基础上研究收缩徐变效应对高速列车乘坐舒适性和运行安全性的影响规律。

1　考虑混凝土收缩徐变的高速列车-轨道-桥梁耦合动力学模型

混凝土收缩徐变效应会导致桥梁结构的变形,进而引起轨道结构的变形,当高速列车通过时,其轮轨接触关系会由于钢轨的变形而发生改变,并最终导致列车运行性能的劣化。因此,为了准确研究收缩徐变对高速铁路车轨桥系统的影响,基于列车-轨道-桥梁动力相互作用理论[11],建立考虑混凝土收缩徐变的高速列车-轨道-桥梁耦合动力学模型。

1.1　收缩徐变模型

由于收缩徐变效应的复杂性,在不同的国家/地

2018 年 7 月 26 日收到　　国网重庆市电力公司科技项目(522023170015)资助

第一作者简介:方　辉(1988—),女,汉族,重庆人,博士,工程师。E-mail: fanghui99@126.com。

区采用了不用的收缩徐变模型。目前常用的有 CEB-FIP 1990 模型、ACI 209 模型、BS 5400 模型、BS EN 1992 模型以及 JTG 2012 模型等。不同模型中的收缩应变及徐变系数也不同,为了更贴近中国实际情况,现采用了《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵土桥涵设计规范》JTG D62—2012 中所规定了 JTG 2012 模型。

收缩应变 strain $\varepsilon_{sc}(t,t_s)$ 定义为

$$\varepsilon_{cs}(t,t_s) = \varepsilon_{cso}\beta_s(t-t_s) \tag{1}$$

$$\beta_s(t-t_s) = \left[\frac{(t-t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2+(t-t_s)/t_1}\right]^{0.5} \tag{2}$$

式中:t 和 t_s 表示计算考虑时刻的混凝土龄期和收缩开始时的混凝土龄期;ε_{sco} 为名义收缩系数;$\beta_s(t-t_s)$为收缩随时间发展的系数;h 为构件理论厚度;h_0、t_1 分别取 100 mm 和 1 d。基于该模型,收缩应变如图 1 所示。

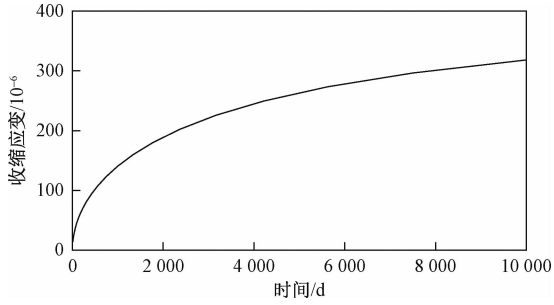

图 1　收缩应变

Fig. 1　Shrinkage strain

同时,根据 JTG2012 模型,徐变系数 $\varphi(t,t_0)$ 可以表示为

$$\varphi(t,t_0) = \varphi_0\beta_c(t-t_0) \tag{3}$$

$$\beta_c(t-t_0) = \left[\frac{(t-t_0)/t}{\beta_H+(t-t_0)/t_1}\right]^{0.3} \tag{4}$$

式中:φ_0 为名义徐变系数;$\beta_c(t-t_s)$是加载后徐变随时间发展的系数。根据式(3)和式(4),徐变系数见图 2。

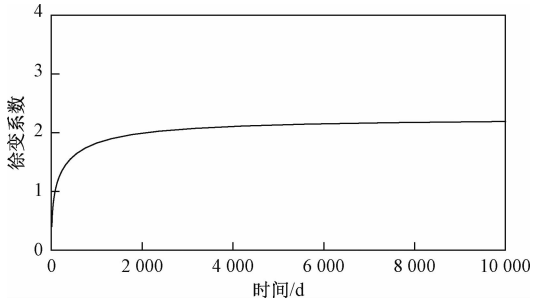

图 2　徐变系数

Fig. 2　Creep coefficient

1.2　考虑混凝土收缩徐变的高速列车-轨道-桥梁耦合动力学模型

基于列车-轨道-桥梁动力相互作用力量,图 3

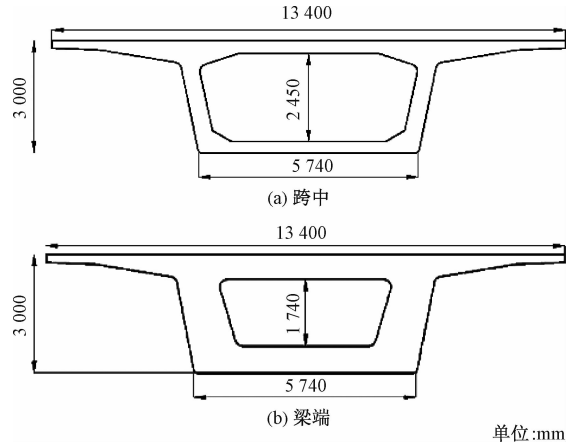

图 3　考虑混凝土收缩徐变的高速列车-轨道-桥梁耦合动力学模型

Fig. 3　Coupled dynamic model of train-track-bridge system considering shrinkage and creep effect of concrete

为考虑混凝土收缩徐变的高速列车-轨道-桥梁耦合动力学模型,该模型包含列车子模型、轨道子模型和桥梁子模型,各模型之间采用轮轨动力相互作用和桥轨相互作用进行连接。

基于车辆-轨道耦合动力学理论,车辆系统可以考虑为多刚体系统,共包含 1 个车体、2 个构架和 4 个轮对,各刚体之间采用悬挂系统连接。车体和构架考虑沉浮和点头两个自由度,轮对考虑沉浮自由度,因此该车辆模型共包括 10 个自由度。一系悬挂和二系悬挂考虑为弹簧阻尼系统。轨道和桥梁则采用有限元方法进行建模。模型的详细动力学方程参见文献[12]。

轮轨相互作用关系采用 Hertz 非线性接触理论确定,可表示为

$$p(t) = \left[\frac{1}{G}\delta Z(t)\right]^{3/2} \tag{5}$$

式(5)中:G 为轮轨接触常数,$m/N^{2/3}$;$\delta Z(t)$ 为轮轨间的弹性压缩量,m,公式如下:

$$\delta Z(t) = Z_w(t) - Z_r(t) - Z_0(t) - Z_{sc}(t) \tag{6}$$

式(6)中:$Z_w(t)$为 t 时刻车轮的位移,m;$Z_r(t)$为 t 时刻钢轨的位移,m;$Z_0(t)$为该时刻的轨道随机不平顺;$Z_{sc}(t)$为由混凝土收缩徐变导致的桥面变形,可由徐变系数和收缩应变得到,具体计算过程见文献[13]。

2　收缩徐变对轨道-桥梁静变形的影响

现选取的桥梁结构为中国高铁中应用最广泛的 32 m 简支箱梁桥,其截面见图 4。轨道结构选取中国高速铁路线路中常用双块式无砟轨道。

需要说明的是,收缩徐变效应是从梁体浇筑时就开始了,但是由于桥梁和轨道结构铺设完成后,会

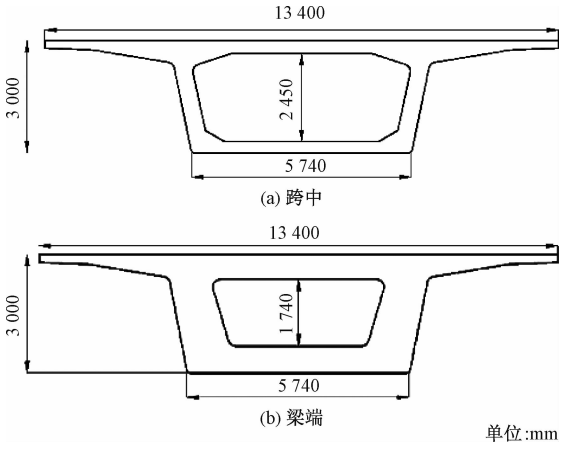

图 4 桥梁截面

Fig. 4 Cross sections of the beam

通过调平消除前期收缩徐变带来的影响。也就是说,在二期恒载铺设之前,桥面的变形并不会对列车的正常运行产生影响。因此在讨论收缩徐变效应时,是以二期恒载铺设完成时作为时间原点的。根据第 1 节中的动力学模型,收缩徐变效应引起的桥梁跨中变形如图 5 所示。

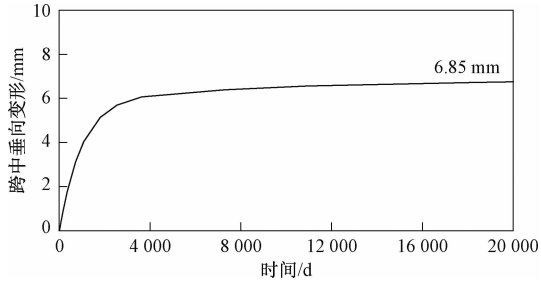

图 5 收缩徐变引起的桥梁跨中垂向残余变形

Fig. 5 Vertical residual deformation of the mid-span bridge caused by shrinkage and creep

由图 5 可知,桥梁跨中最终残余变形为 6.85 mm,该数值已经大于中国高速铁路无砟轨道平均谱中规定的轨道随机不平顺数值[12],这意味着由收缩徐变产生的桥梁变形很有可能会对高速列车的正常运行产生不可忽视的影响。

基于图 5 中的桥梁变形,结合有限元手段,由收缩徐变所引起的桥梁变形及钢轨变形如图 6 所示。从图 6 可以清楚地看出,钢轨变形量和波形与桥梁变形相近,不过其中最大的区别在于:由于钢轨是连续体,在梁端位置处钢轨有明显的缓和过度区域,这种弯曲变形会降低高速列车通过时的冲击效应。

3 收缩徐变效应对高速列车-轨道-桥梁系统动态特性的影响规律

在动力学分析中,高速列车选取为 CRH2C,其动力学参数见表 1,轨道随机不平顺选取中国高速

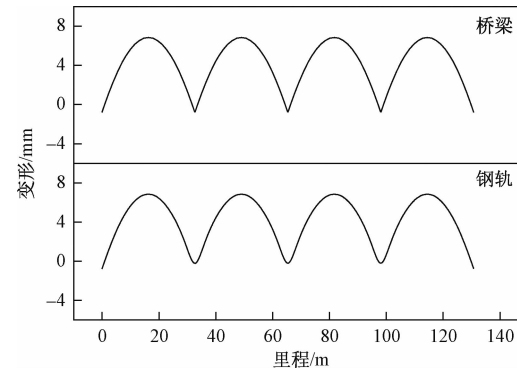

图 6 收缩徐变引起的桥梁和钢轨变形

Fig. 6 Bridge and rail deformations caused by SCE

铁路无砟轨道平均谱[13]。采用建立的列车-轨道-桥梁耦合动力学模型,收缩徐变引起的系统动力学响应见图 7。需要说明的是,为了更清晰显示收缩徐变对系统的影响,图 7 中的结果并未考虑轨道随机不平顺。从该结果中可以看出,混凝土收缩徐变效应对车体加速度和轮重减载率影响很大,特别是轮重减载率,在考虑收缩徐变时其数值变成了原来的 10 倍。相比之下,收缩徐变对桥梁动力学性能几乎没有影响。该结果说明收缩徐变主要影响高速列车的动态特性,而对下部结构影响较小。

表 1 列车关键参数

Table 1 Parameters of the train

参数	数值
定距/m	17.5
轴距/m	2.5
名义滚动圆直径/m	0.86
车体质量/t	33.766
构架质量/kg	2 400
轮对质量/kg	1 850
车体惯量/(t·m^2)	1 654
构架惯量/(kg·m^2)	1 314
轮对惯量/(kg·m^2)	123
一系弹簧刚度/(MN·m^{-1})	1.18
二系弹簧刚度/(MN·m^{-1})	0.19

综合考虑混凝土收缩徐变效应和轨道随机不平顺,车体加速度和轮重减载率随行驶速度变化规律见图 8,可以清晰地看出当列车行驶速度从 200 km/h 增大到 400 km/h 时,轮重减载率有了剧烈的增加,而车体加速度变化量相对较小。同时,这两个指标均未超出《高速铁路设计规范》中所规定的数值,表明高速列车的运行安全性和乘坐舒适性在收缩徐变条件下仍然可以得到保证。

4 结论

系统研究了混凝土收缩徐变对高速列车-轨道-

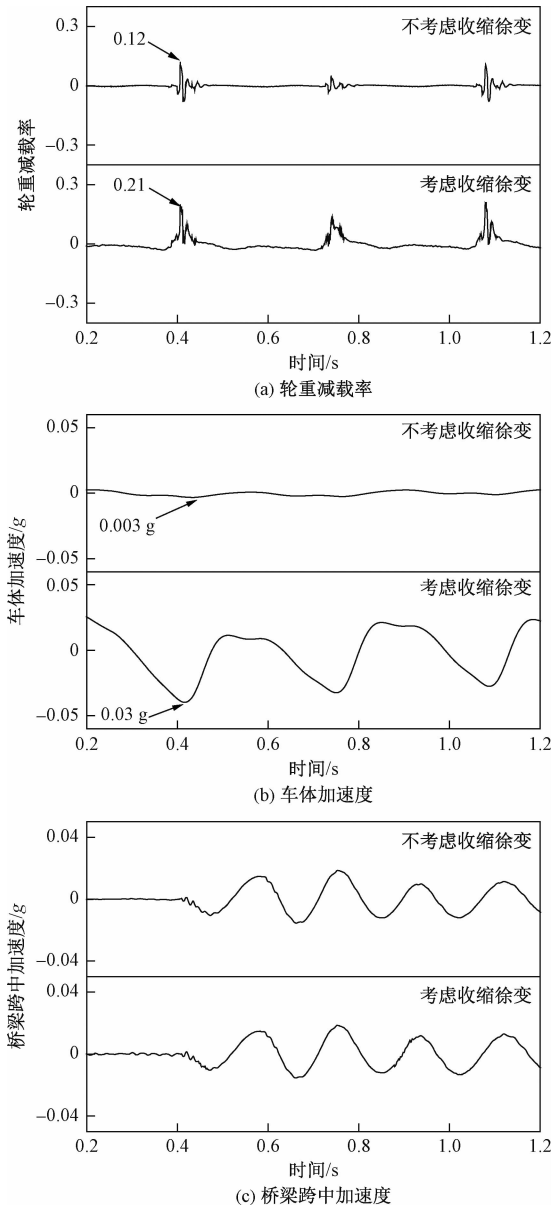

图 7　收缩徐变引起的车轨桥系统动力响应

Fig. 7　Dynamic responses of the train-track-bridge system caused by shrinkage and creep

桥梁耦合系统的影响。首先选取中国高速铁路中大量采用的32 m 简支箱梁桥结构,采用 JTG 收缩徐变模型,分析收缩徐变引起的桥面变形。然后,基于列车-轨道-桥梁动力相互作用理论,建立考虑收缩徐变的高速列车-轨道-桥梁耦合动力学模型,并在此基础上研究收缩徐变效应对高速列车乘坐舒适性和运行安全性的影响规律,得出以下结论。

(1)在收缩徐变效应下,轨道结构变形可以减小高速列车通过时的冲击效应。

(2)混凝土收缩徐变主要影响列车动态特性,而对下部结构的动力学行为影响较小。

(3)高速列车的运行安全性和乘坐舒适性在收缩徐变条件下仍然可以得到保证。

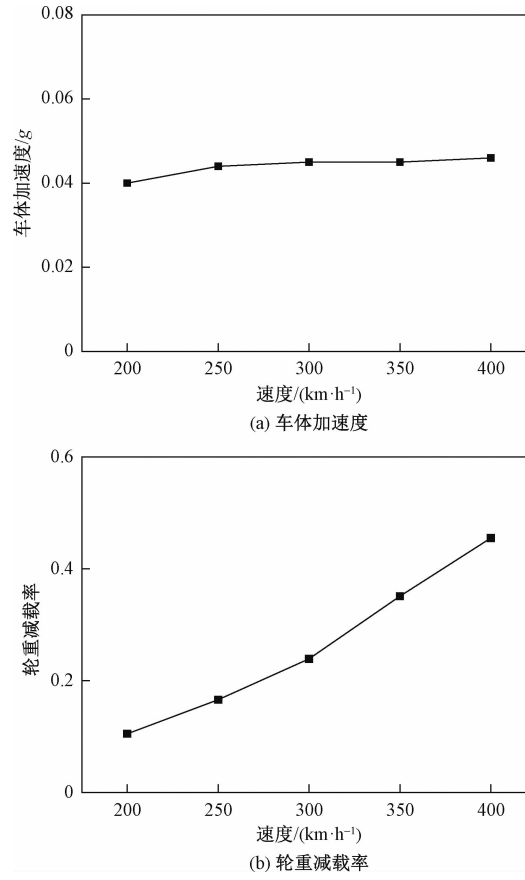

图 8　列车动力学指标随运行速度的变化规律

Fig. 8　Variation rules of train dynamics indices with running speeds

参　考　文　献

1　Chen Z, Zhai W, Yin Q. Analysis of structural stresses of tracks and vehicle dynamic responses in train-track-bridge system with pier settlement. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018; 232(2): 421—434

2　张志林, 袁俊桃, 王卫锋. 大跨度预应力混凝土连续刚构桥施工监测仿真分析. 科学技术与工程, 2010; 10(29): 7190—7195
Zhang Zhilin, Yuan Juntao, Wang Weifeng. The construction monitoring simulation analysis of great span pre-stressed concrete continual rigid frame bridge. Science Technology and Engineering, 2010; 10(29): 7190—7195

3　孟　江, 赵宝俊, 刘建梅. 混凝土收缩徐变效应预测模型及影响因素. 长安大学学报(自然科学版), 2013; 33(2): 56—62
Meng Jiang, Zhao Baojun, Liu Jianmei. Prediction model and influencing factors for concrete shrinkage and creep effects. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010; 10(29): 7190—7195

4　汪　剑, 方　志. 大跨预应力混凝土箱梁桥收缩徐变效应测试与分析. 土木工程学报, 2008;(1): 70—81
Wang Jian, Fang Zhi. Analysis and field measurement of concrete box girder bridges for shrinkage and creep effects. China Civil Engineering Journal, 2008;(1): 70—81

5　王玉银, 耿　悦, 张素梅. 钢管混凝土收缩徐变模型及计算方法

对比分析. 天津大学学报, 2011; 44(12): 1075—1082
Wang Yuyin, Geng Yue, Zhang Sumei. Comparison of concrete models and simplified analysis methods for concrete-filled steel tubular members. Journal of Tianjin University, 2011; 44(12): 1075—1082

6 卢 锋, 郑恒斌, 余晓琳. 大跨度连续刚构桥长期下挠影响参数分析. 科学技术与工程, 2010; 10(14): 3542—3545
Lu Feng, Zheng Hengbin, Yu Xiaolin. The analysis of the impact parameters for long-term deflection of long-span continuous rigid frame bridge. Science Technology and Engineering, 2010; 10(14): 3542—3545

7 潘钻峰, 吕志涛, 刘 钊, 等. 高强混凝土收缩徐变试验及预测模型研究. 公路交通科技, 2010; 27(12): 10—15,32
Pan Zuanfeng, Lv Zhitao, Liu Zhao, *et al*. Shrinkage and creep tests and prediction model of high-strength concrete. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010; 27(12): 10—15,32

8 赵 军, 缪昌国, 阳小超, 等. 考虑收缩徐变的施工期大跨砼结构内力分析. 科学技术与工程, 2017;17(5): 252—256
Zhao Jun, Miao Changguo, Yang Xiaochao, *et al*. A research of large span concrete structure reliability considering creep and shrinkage during construction. Science Technology and Engineering, 2017;17(5): 252—256

9 赵汉青, 贺世伟, 潘 文, 等. 高层框架-核心筒结构考虑加载方式及混凝土收缩徐变影响下的竖向位移差分析. 科学技术与工程, 2012;12(12): 3005—3009
Zhao Hanqing, He Shiwei, Pan Wen, *et al*. Vertical deformation analysis on mixed structure considering the load simulation methods and the time-varying performance of concrete. Science Technology and Engineering, 2012;12(12): 3005—3009

10 杨宏印, 张海龙, 陈志军, 等. 考虑徐变影响的车—线—桥耦合有限元分析. 中国铁道科学, 2013; 34(6): 13—20
Yang Hongyin, Zhang Hailong, Chen Zhijun, *et al*. Finite element analysis of train-track-bridge interaction system considering the influence of creep. China Railway Science, 2013; 34(6): 13—20

11 Zhai W, Xia H, Cai C, *et al*. High-speed train-track-bridge dynamic interactions—Part I: Theoretical model and numerical simulation. International Journal of Rail Transportation, 2013;(1): 3—24

12 Chen Z, Zhai W, Cai C, *et al*. Safety threshold of high-speed railway pier settlement based on train-track-bridge dynamic interaction. Science China—Technological Sciences, 2015; 58(2): 202—210

13 陈兆玮. 高速铁路桥墩沉降对行车性能影响的研究. 成都:西南交通大学,2017
Chen Zhaowei. Influence of pier settlement on dynamic performance of running trains in high-speed railways. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017

Influence of Shrinkage and Creep on the Dynamic Performance of High-speed Train-Track-Bridge System

FANG Hui, ZHAO Ke, ZHU Sheng-yi, FU Ang, DONG Guang-de, MA Xing
(Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401120, China)

[**Abstract**] Shrinkage and creep effect (SCE) is unavoidable in construction and operation of concrete bridges, which causes bridges deformed and further affects the running safety and ride comfort of high-speed running trains. A framework to establish a high-speed train-track-bridge dynamic model considering concrete SCE was presented, and influences of SCE on dynamic responses of the coupled system was analyzed. Firstly, aiming at the 32 m-long simply supported box girder bridges, which are most widely used in Chinese high-speed railways, a high-speed train-track-bridge coupled dynamic model is established based on the train-track-bridge dynamic interaction theory, including three submodels of the train, the track and the bridge. Then, adopting the JTG 2012 shrinkage and creep model, the bridge deformation and the corresponding rail deformation are calculated based on finite element method. And finally, regarding the rail deformation caused by SCE as the additional track irregularity, the influences of SCE on the dynamic responses of the train-track-bridge coupled system are investigated. Results show that SCE mainly affects the dynamic responses of the train system, while almost has no effect on other structures. Running safety and ride comfort of the high-speed trains can be guaranteed under the influence of SCE.

[**Key words**] shrinkage and creep train-track-bridge dynamic interaction bridge dynamics running safety high-speed railways