

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221231001

# 边墩沉降致连续简支桥段纵连线桥系统层间 联结劣化规律\*

冯玉林<sup>1,2,3</sup>, 何 帅<sup>1,2</sup>, 蒋丽忠<sup>3</sup>, 周旺保<sup>3</sup>, 颜建伟<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点  
实验室, 江西 南昌 330013; 3. 中南大学高速铁路建造技术国家工程研究中心, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 为研究边墩沉降致纵连板式无砟轨道-连续梁桥系统(纵连线桥系统)层间联结劣化状态, 在考虑边墩沉降与层间接触不连续影响的基础上, 建立纵连线桥系统非线性空间模型, 采用前期提出的理论模型对其进行验证, 据此分析边墩沉降下纵连线桥系统典型变形模式, 层间联结失效的演化过程、发展规律及出现位置等。结果表明: 建立的空间模型准确可靠; 边墩沉降下, 线桥系统会产生跟随变形、自重变形和悬停分离三种变形模式; 沉降墩、与沉降墩临近的简支梁墩及连续梁桥另一侧边墩上方会出现层间联结失效, 与沉降墩临近的简支梁墩、连续梁桥全部桥墩上的支座均会发生破坏; 边墩沉降处板底脱空高度可用边墩沉降值减去连续梁桥变形限值进行描述; 各脱空区长度均随边墩沉降幅值增加而增大, 与沉降墩临近的简支梁墩左、右两侧区域脱空长度成正对称分布, 连续梁另一侧边墩处脱空长度值只与连续梁变形有关, 始终维持在2.56 m。

**关键词:** 高速铁路; 桥墩沉降; 损伤演化; 悬停分离; 连续梁桥

**中图分类号:** U213.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0623-09

## Deterioration Patterns of Interlayer Connections in Longitudinally Connected Line Bridge Systems on Continuous Simply Supported Beam Bridge Sections Induced by Side Pier Settlement

FENG Yulin<sup>1,2,3</sup>, HE Shuai<sup>1,2</sup>, JIANG Lizhong<sup>3</sup>, ZHOU Wangbao<sup>3</sup>, YAN Jianwei<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;  
2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong  
University, Nanchang 330013, China; 3. National Engineering Research Center of High-speed Railway Construction  
Technology, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** This study delves into the degradation of interlayer connections within longitudinally connected slab ballastless track-continuous beam line bridge systems (LCLBS) caused by side pier settle-

\* 收稿日期: 2022-12-31; 修回日期: 2023-04-10

**基金项目:** 国家自然科学基金(52268074, U1934207)、湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ40724)、江西省自然科学基金资助项目(20224BAB214073, 20232BAB204081)、高速铁路建造技术国家工程研究中心开放基金(HSR202202)、轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室开放课题(HJGZ2022106)资助

**作者简介:** 冯玉林(1990—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事高速铁路映射、行车安全研究。

E-mail: fengyulin@ecjtu.edu.cn

**通信作者:** 蒋丽忠(1971—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事工程结构抗震方面的研究。E-mail: lzjiang@csu.edu.cn

ment. Incorporating the effects of side pier settlement and discontinuous contact between layers, a non-linear spatial model of LCLBS was developed and validated against a previously established theoretical model. Subsequently, the typical deformation modes of the LCLBS under side pier settlement, along with the evolution process, development trends, and locations of interlayer connection failure were thoroughly analyzed. The findings underscore the accuracy and reliability of the spatial model. Under side pier settlement, LCLBS manifested three distinct deformation modes: follow deformation, self-weight deformation, and hovering separation. Interlayer connection failure occurred above the settlement pier, the simply supported beam piers adjacent to the settlement pier, and the opposite side pier of the continuous beam bridge. Bearings on the simply supported beam piers adjacent to the settlement pier and on all piers of the continuous beam bridge were damaged. The clearance height at the slab bottom near the settlement pier was quantifiable by subtracting the deformation limit of the continuous beam bridge from the settlement value of the side pier. Furthermore, the length of each clearance zone expanded with the amplitude of the side pier settlement, exhibiting symmetrically distributed clearance lengths on both sides of the simply supported beam piers adjoining the settlement pier. Conversely, the clearance length at the pier on the opposite side of the continuous beam was solely dictated by the continuous beam's deformation, consistently maintained at 2.56 meters.

**Keywords:** high-speed railway; pier settlement; damage evolution; hovering separation; continuous girder bridge

## 0 引言

在高铁长期服役过程中,受列车循环加载、紧邻既有桥梁施工、周边堆卸载等因素作用下,一些位于软土地基或复杂地质的桥墩、台不可避免地产生沉降。以京沪线 K1308+733.919~K1309+159.714 段为例,该区段内桥墩发生了 8~84 mm 的工后非均匀沉降,已经超出了规范规定的 5 mm 限值,广深港客运专一桥墩由于基础下沉导致底座严重开裂出现沉降(图 1),严重影响了轨道-桥梁系统的动态服役性能、乘车舒适性和行车平稳性,是危及列车长期安全运行的一大隐患<sup>[1,2]</sup>。

纵连板式无砟轨道-桥梁系统具有较高的整体性和平顺性,在我国高铁线路中应用广泛。其最大

的特点是轨道板/底座板沿纵连为一整体,减少了板间接缝所导致的轨道不平顺,同时自由端的减少也提高了轨道力学性能。但其纵连特性导致其对桥墩沉降的抵抗性较差,一旦桥墩发生沉降,梁体会随之发生竖向位移,铺设在梁体上的无砟轨道也会发生弯曲变形及桥轨界面接触不连续。

目前,已有部分专家学者对桥梁沉降下无砟轨道结构间脱空产生机理及损伤变化规律开展了研究<sup>[3-7]</sup>。冯玉林等<sup>[8-13]</sup>推导了连续梁桥墩不均匀沉降差与轨道几何形位改变的层间变形协调关系的定量函数表达式等,分析了桥墩不均匀沉降引起线桥系统层间界面联结失效的发展规律及地震作用下轨道结构的残余变形;Z. W. Chen 等<sup>[14]</sup>推导了板式无砟轨道系统的桥墩沉降与轨道变形的映射关系,发现多墩沉降轨道变形是单墩沉降轨道变形的叠加,并研究了 CRTS II 型板式无砟轨道与桥梁的动态非线性接触行为;勾红叶等<sup>[15]</sup>推导了适用于多种桥梁竖向变形模式的钢轨变形解析表达式,分析了简支梁竖向变形致钢轨变形影响机理;L. Z. Jiang 等<sup>[16-18]</sup>推导了高速铁路 CRTS I 型、CRTS II 型和 CRTS III 型板式无砟轨道桥梁变形与轨道几何形状之间的解析关系,发现当扣件刚度较小时,钢轨变形曲线变化更平缓,而剪力齿槽的刚度对轨道变

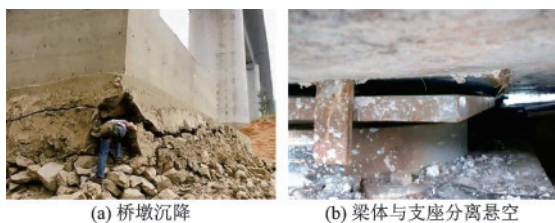


图 1 高速铁路桥轨系统病害

Fig.1 Defects in high speed railway bridge track systems

形有显著影响;娄平等<sup>[19]</sup>考虑了混凝土损伤特性建立了路桥过渡段无砟轨道有限元模型,研究了不同荷载工况和底座板厚度对轨道受力变形的影响。

综上所述,关于高铁路基、桥墩沉降对轨道-桥梁系统服役性能的影响研究一直是一个热点问题,但大多为简支梁桥-轨道系统,而桥墩沉降致连续梁桥-轨道系统的层间力与变形协调交互机理的研究较少见;作为高铁线路中的重要组成部分,连续梁桥边墩上同时支撑着超静定连续梁桥和静定简支梁桥两种不同结构,边墩沉降下两种结构的力学行为截然不同;边墩发生沉降后,其上简支梁始终发生跟随变形,而连续梁则先发生跟随变形,再发生自重变形,由于连续梁的特点,最终悬停边墩上方,或在制动墩支座的位置处发生梁上表面开裂。本文与以往多跨简支梁桥墩沉降对桥轨界面接触性状态影响的研究相比,研究对象具有鲜明的特色。

鉴于此,本文建立考虑边墩沉降与层间接触不连续影响的纵连线桥系统非线性空间耦合模型,采用笔者前期提出的解析模型对其进行验证,分析边墩沉降下纵连线桥系统典型变形模式、层间联结失效演化过程、发展规律及出现位置等变化规律。所得结论为今后构建高速铁路线路连续梁桥与简支梁桥过渡段处的轨道层间接触联结状态的服役形态诊断与预测增添理论依据。

# 1 考虑边墩沉降与层间接触不连续影响的纵连线桥系统非线性空间模型

## 1.1 模型建立

基于ABAQUS有限元软件,建立存在初始边界位移,考虑3#边墩沉降下层间接触不连续影响的纵连板式线桥系统非线性空间模型(图2)。桥墩混凝土强度等级为C35,桥梁混凝土等级为C50;连续梁采用48 m+80 m+48 m跨度尺寸,宽度为12 m,两端各加两跨32 m简支梁,并设置0.1 m梁缝,线路总长304.4 m;梁体中植入预应力钢筋束;在距离梁端1.5 m剪力齿槽处设置双排共计14根剪力钉,贯穿桥梁与底座板;轨道结构类型采用CRTS II型板式无砟轨道,钢轨类型采用CHN60轨,技术参数为60 kg/m,扣件类型采用WJ-8型,扣件间距为0.64 m;由于滑动层由“两部一膜”构成,在实际工程中上下两层土工布为土工膜保护层并与混凝土面粘结,因此只建立中间土工膜参数模型。混凝土密度取值2 500 kg/m<sup>3</sup>,钢筋与钢轨密度取值7 800 kg/m<sup>3</sup>,其余各结构材料参数见文献[6]。

根据线桥系统层间实际联结特征和接触关系,由于轨枕与轨道板采用整体浇筑的方式,两者连接紧密,故在有限元软件中轨枕与轨道板约束采用面-

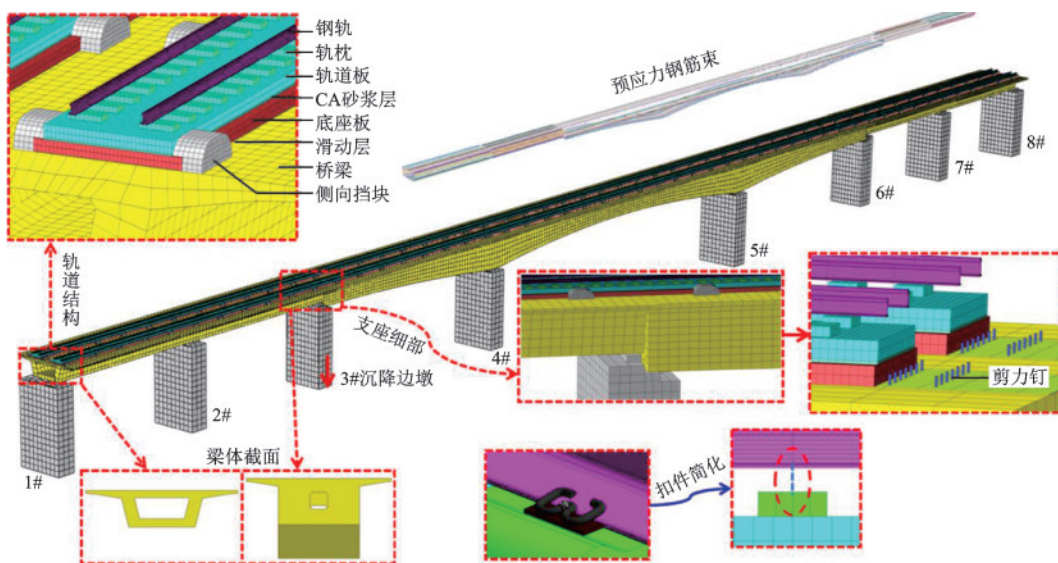


图2 考虑3#边墩沉降与层间接触不连续影响的纵连线桥系统非线性空间模型

Fig.2 Nonlinear spatial model of longitudinally connected line bridge system considering the influence of side pier settlement and interlayer contact discontinuity

面 TIE 接触;CA 砂浆层与钢轨扣件系统采用线性弹簧模拟<sup>[20]</sup>;底座板与滑动层接触考虑层间脱空的影响,故采用只受压不受拉的非线性弹簧模拟;滑动层与桥面采用面-面 TIE 接触。为限制桥梁及轨道两端的自由度,在非沉降区域的桥梁及轨道端部位置施加固结约束,桥墩与梁体间支座采用弹簧模拟;桥墩与地基基础相连,在非沉降墩底部节点施加平动自由度约束,为实现沉降墩的竖向位移变化,通过在不同分析步中改变节点的竖向自由度约束<sup>[21]</sup>;预应力钢筋束与剪力钉均采用 B31 梁单元模拟,轨道系统及桥梁采用八节点六面体单元 C3D8R 模拟。

## 1.2 模型验证

基于前期开发的高铁基础变形诱发轨道结构变形与层间接触性状演变的通用表征模型<sup>[22]</sup>,与本文模型分别计算边墩沉降线桥系统变形与受力。并进行相互验证,如下式所示:

$$\begin{cases} V_r = AF + BQ_r \\ V_s = C_1F + C_2P + DQ_s \\ V_p = H_1P + H_2N + IQ_p \end{cases} \quad (1)$$

式中, $V_r$ 、 $V_s$ 、 $V_p$  分别代表钢轨、轨道板和底座板的变形矩阵; $A$ 、 $B$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $I$  分别代表轨道各层结构位移的影响矩阵; $Q_r$ 、 $Q_s$ 、 $Q_p$  分别代表轨道各层结构的自重矩阵; $F$ 、 $P$ 、 $N$  分别代表轨道各层间弹簧力矩阵,可以表示为下式:

$$\begin{cases} F = k_c(V_s - V_r) \\ P = k_{ca}(V_p - V_s) \\ N = k_p(V_b - V_p) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $k_c$ 、 $k_{ca}$ 、 $k_p$  分别代表扣件弹簧、砂浆弹簧及接触弹簧刚度矩阵; $V_b$  代表桥墩沉降位移矩阵。

联立求解式(1)~(2),轨道各层结构变形可以表示式(3):

$$\begin{bmatrix} V_r \\ V_s \\ V_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E + k_c A & -k_c A & 0 \\ k_c C_1 & E - k_c C_1 + k_{ca} C_2 & -k_{ca} C_2 \\ 0 & k_{ca} H_1 & E - k_{ca} H_1 + k_p H_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} BQ_r \\ DQ_s \\ k_p H_2 V_b + IQ_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于线桥系统界面间存在接触非线性,利用渐进性接近法求解,具体求解步骤参考文献[22]。

如图3所示,无论是简支梁桥段,还是连续梁桥段,本文模型与提出的解析模型计算的桥墩沉降致钢轨变形与扣件力曲线均吻合良好,扣件力局部突变与钢轨位移相契合,且误差不超过5%,验证了本文模型的正确性。鉴于解析模型是基于杆系结构力学理论建立的,其无法直观地从界面损伤演化云图的角度反映层间劣化状态,因此,下文选用建立的非线性空间耦合模型开展层间联结劣化顺序、联结劣化发展规律及轨道结构应力分布。

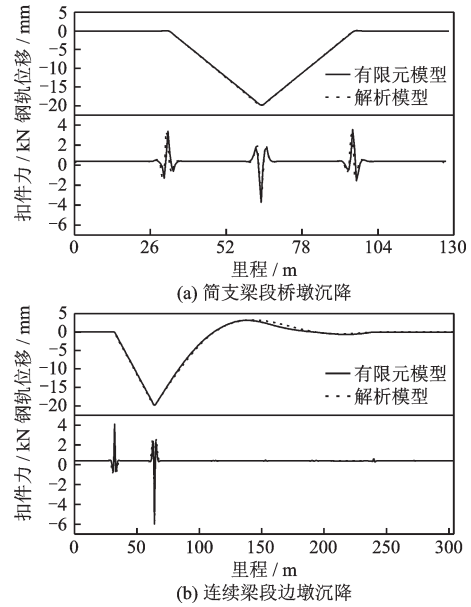


图3 本文模型与提出的解析模型对比验证

Fig.3 Validation of the established model compared to the analytical model

## 2 边墩沉降下纵连线桥系统层间联结劣化状态分析

### 2.1 纵连线桥系统典型变形模式

设置每一分析步的沉降增量为 0.01 mm,建立多重分析步下的微小变形模型,详细地研究线桥系统层间非线性接触随桥墩沉降的动态演化过程。根据《高速铁路设计规范》<sup>[23]</sup>中对预应力混凝土梁的竖向残余徐变变形限值的规定,取连续梁桥自重下竖向变形最大值不超过 10 mm。如图4所示,边墩沉降下,该墩上的超静定连续梁和静定简支梁可能存在三种变形模式,即:

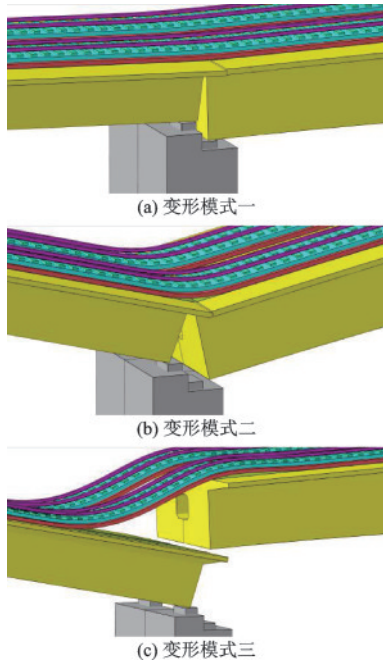


图4 边墩沉降下纵连线桥系统典型变形模式

Fig.4 Typical deformation modes of longitudinally connected line bridge system under side pier settlement

变形模式一:连续梁和简支梁桥跟随边墩沉降发生变形;变形模式二:连续梁桥自重下的变形和简支梁桥跟随边墩沉降变形;变形模式三:连续梁桥悬停在支座上方仅简支梁发生桥变形。

## 2.2 纵连线桥系统层间联结失效演化过程

根据上述三种变形模式将边墩沉降下线桥系统层间联结失效演化过程总结为以下三个阶段,如图5所示:

(1) 阶段1(连续梁和简支梁桥跟随边墩沉降发生变形)。3#墩开始沉降时,其上支座率先出现损伤,进一步随着沉降值的增加,达到0.35 mm,损伤逐层向上传递到轨道结构上,由于梁端下凹变形将滑动层向梁缝处挤压,因此滑动层出现损伤。而后,2#墩右侧简支梁产生折角致支座出现损伤,继而上传至梁端上表面上翘使简支梁左端底座板与桥面分离,从而出现板底脱空。此阶段连续梁和简支梁桥跟随边墩沉降发生变形。

(2) 阶段2(连续梁桥自重下的变形和简支梁桥跟随边墩沉降变形)。随着边墩沉降增大,3#墩支座首先发生部分破坏,当连续梁变形等于桥墩沉降值时,两端梁体发生跟随性变形瞬间导致底座板到梁体表面的投影长度与梁体表面长度不相等而出现相对运动,左右梁端同时脱空,且脱空区域关于

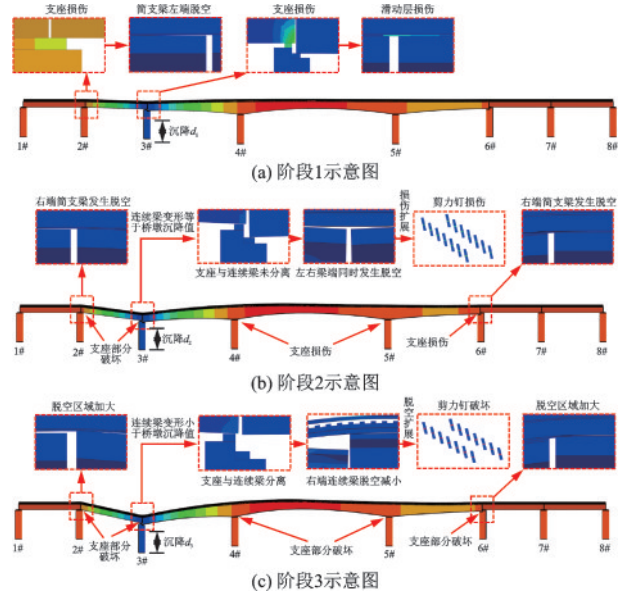


图5 边墩沉降下纵连线桥系统层间联结失效演化过程

Fig.5 Evolution process of interlayer connection failure in the longitudinally connected line bridge system under side pier settlement

梁缝对称,更进一步损伤由梁缝处扩展至剪力齿槽处,导致剪力钉由于底座板与梁体错位移动而出现剪切损伤。2#墩支座后发生部分破坏(破坏),左端简支梁区域脱空增大的同时右端简支梁区域也出现脱空,4#、5#、6#墩支座由于连续梁变形而产生损伤,6#墩右端简支梁由于5#~6#墩间连续梁下凹而产生脱空变形。

(3) 阶段3(连续梁桥悬停在支座上方仅简支梁桥发生变形)。当桥墩沉降到达一定程度时,3#墩处桥墩沉降值大于连续梁变形,轨道结构变形逐渐由下凹变成上拱,3#墩处简支梁端脱空幅值随桥墩沉降迅速增加,这主要是由于连续梁底部与支座发生分离,而简支梁底部与支座产生跟随性变形。随着支座与连续梁分离高度加大,右端连续梁也发生脱空变形,梁上剪力钉因脱空长、高度增大而产生受拉破坏。而2#墩左右两端脱空区域继续增大,4#、5#、6#墩支座由于连续梁变形增大而部分破坏,且6#墩右端简支梁脱空区域持续增大。

## 2.3 纵连线桥系统层间联结失效发展规律

根据《高速铁路设计规范》<sup>[23]</sup>取连续梁桥自重下挠度值为10 mm,对应10、20、30、40 mm的边墩沉降值。如图6所示,随着边墩沉降值加大,轨道结构脱空高度及脱空长度相应增大,当边墩沉降值等

于连续梁变形值时,沉降值越大,2#、3#与6#墩区域脱空越明显,继而向两端延伸越长;当边墩沉降值大于连续梁变形值时,3#墩连续梁端停止跟随变形,呈悬空分离状态;而其上简支梁端继续发生跟随性变形,由于轨道结构的纵连特性,简支梁端桥面下沉而出现桥梁与底座板接触分离,连续梁端对轨道结构支撑作用使轨面上拱而形成巨大脱空,列车经过时,该位置处的巨大脱空会造成轨道刚度不平顺,影响行车走行姿态。由于连续梁变形导致5#墩与6#墩中间跨出现“凹陷”,而简支梁端对轨道结构支撑使得右端同样出现少量脱空。

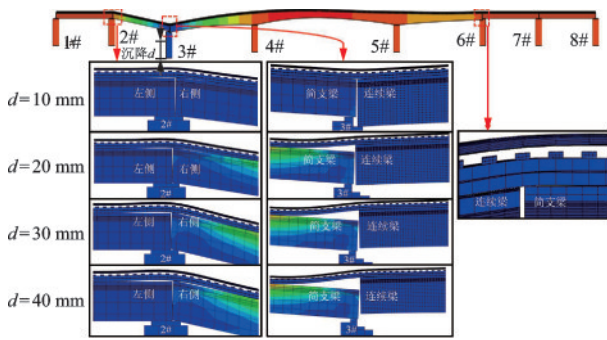


图6 边墩沉降下纵连线桥系统层间联结失效发展

Fig.6 Development of interlayer connection failure in the longitudinally connected line bridge system under side pier settlement

#### 2.4 边墩沉降下纵连线桥系统层间联结失效位置

根据上述边墩沉降下线桥系统层间联结失效演化过程的分析结果,边墩沉降下纵连线桥系统层间联结失效位置总结如图7所示。

连续梁边墩沉降下,沉降墩、与沉降墩临近的简支梁墩及连续梁另一个边墩上方会层间联结失效;由图7可以得到支座沿顺桥向的位移,且2#墩与3#墩支座顺桥向位移最大,其原因为当桥墩沉降大于连续梁变形时,左端简支梁纵向位移大于连续梁。依据活动支座在顺桥向的实际位移达到3~60 mm时发生部分破坏<sup>[24]</sup>,固定支座设计位移限值为1 mm,在边墩沉降演化过程中,与沉降墩临近的简支梁墩上的支座、连续梁桥的全部支座均会发生部分破坏。

##### (1) 脱空高度发展

如图8所示,2#墩左侧端部与底座板接触的成因是3#墩沉降致桥梁发生转动上抬所致,并将脱空

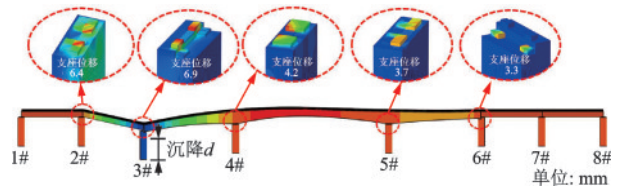


图7 边墩沉降下纵连线桥系统层间联结失效位置

Fig.7 Failure position of interlayer connection in the longitudinally connecting bridge system under side pier settlement

区域划分为左、右两侧区域。在相同边墩沉降幅值下,2#墩左侧区域板底脱空高度大于右侧区域,2#墩左右两侧区域脱空高度均以最大值为中心随桥墩沉降幅值的增加向两端发展。当边墩沉降值等于连续梁变形值时,3#墩处脱空区域以3#墩为中心向两侧对称发展;当边墩沉降值大于连续梁变形值时,由于连续梁端的支撑作用,该区域的脱空趋势为先缓慢增加到最大值后突变为0,最后再小幅度增加,边墩沉降40 mm时,脱空高度可达30.04 mm,对列车走行安全极为不利,需要重点关注该位置。而6#墩位置由于远离沉降区域且在连续梁端沉降10 mm时产生变形,其脱空高度相对2#、3#墩来说较小且固定,最大值为0.001 47 mm。

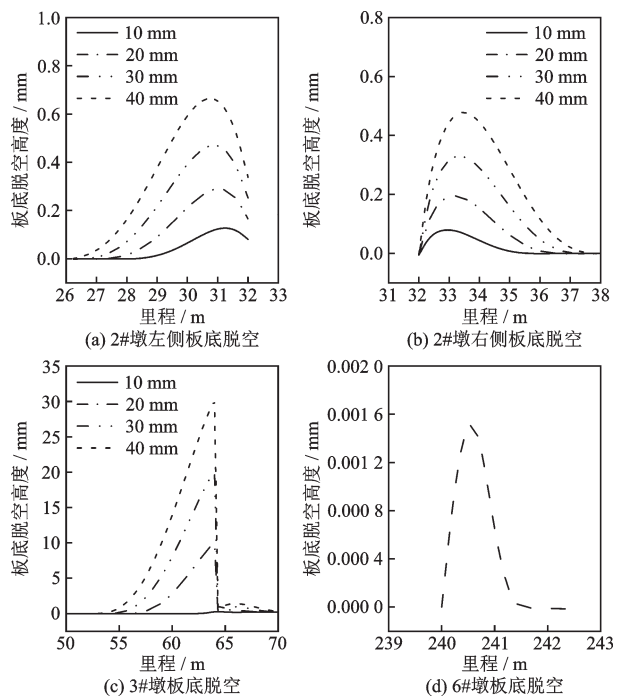


图8 不同边墩沉降下各失效位置处层间联结失效发展规律

Fig.8 Development pattern of interlayer connection failure at each failure position under different side pier settlements

通过观察分析,3#墩沉降值与该位置处的脱空高度存在比较明确的相关关系,为找出该关系,本文选取了连续梁变形限值为2、5、8、10 mm,分别对应不同的边墩沉降幅值,开展大量计算,最终提出如下边墩沉降与该位置脱空高度的相关关系表达式:

$$H_p = d - w_c \quad (4)$$

式中, $H_p$ 代表底座板与桥面间脱空高度, $d$ 代表边墩沉降值, $w_c$ 规范规定的连续梁桥自重下竖向变形限值。

### (2) 脱空长度发展

由表1可知,各脱空区脱空长度均随桥墩沉降幅值一起增加,2#墩左、右两侧区域脱空长度基本相当,当边墩沉降大于连续梁变形后,3#沉降墩区域脱空长度远大于边墩沉降等于连续梁变形下的脱空长度,其原因为连续梁与简支梁的变形不一致将底座板与桥面垂向错开分离。而6#墩脱空长度值只跟连续梁变形有关,与桥墩沉降大小无关,因此始终维持在2.56 m。

**表1 边墩沉降下纵连线桥系统各失效位置处脱空长度**  
**Table 1 Clearance lengths at each failure position of the longitudinally connected line bridge system under side pier settlement**

连续梁 变形值/ mm	桥墩 沉降值/ mm	脱空长度/m			
		2#墩左侧 区域	2#墩右侧 区域	3#墩 区域	6#墩 区域
10	10	2.61	2.91	6.72	2.56
	20	3.16	3.42	13.34	
	30	3.77	3.86	15.76	
	40	4.42	4.64	17.04	

## 3 结 论

本文基于建立的考虑边墩沉降与层间接触不连续影响的纵连线桥系统非线性空间模型,分析了边墩沉降下线桥系统变形模式,层间联结失效演化过程、发展规律、出现位置及桥轨结构应力分布等线桥系统劣化规律,并得出以下几点结论:

(1)边墩沉降下,线桥系统会产生跟随变形、自重变形和悬停分离三种变形模式。

(2)边墩沉降下线桥系统层间联结失效经历三个阶段,第一阶段,边墩沉降时支座开始出现损伤

并向上传递至轨道系统;第二阶段随边墩沉降幅值的增大,线桥系统多处出现脱空,层间损伤扩展至剪力齿槽处,造成剪力钉损伤;第三阶段当边墩沉降达到一定程度时,边墩支座与连续梁分离,脱空持续增大致剪力钉出现破坏。

(3)边墩沉降处板底脱空高度可用边墩沉降值减去连续梁桥变形限值进行描述;各脱空区长度均随边墩沉降幅值增加而增大,与沉降墩临近的简支梁墩左、右两侧区域脱空长度成正对称分布,连续梁另一边墩处脱空长度值只与连续梁变形有关,始终维持在2.56 m。

高铁线路连续-简支桥梁段这一特殊位置的轨道层间运维动态需重点关注。

## 参考文献:

- [1] 吴楠,肖军华,陈建国,等.高速铁路无砟轨道桥梁基础变形对行车的影响[J].铁道工程学报,2017,34(9):58-63.  
Wu N, Xiao J H, Chen J G, et al. Effect of bridge pier deformation for high speed railway with ballastless track on train running safety and comfort[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(9): 58-63. (in Chinese)
- [2] 李岩,赵春发,朱胜阳.温度荷载和车辆荷载作用下CRTS III无砟轨道板损伤分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(6):956-961.  
Li Y, Zhao C F, Zhu S Y. Damage analysis of the CRTS III ballastless track slab under temperature load and vehicle load [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science &. Engineering), 2018, 42(6): 956-961. (in Chinese)
- [3] 郭宇,高建敏,孙宇,等.板式无砟轨道轨面变形与路基沉降的映射关系[J].西南交通大学学报,2017,52(6):1139-1147.  
Guo Y, Gao J M, Sun Y, et al. Mapping relationship between rail deflection of slab track and subgrade settlement [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(6): 1139-1147. (in Chinese)
- [4] 张乾,蔡小培,钟阳龙,等.路基沉降区双块式无砟轨道损伤行为与轨面不平顺分析[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(7):2573-2581.  
Zhang Q, Cai X P, Zhong Y L, et al. Analysis of damage and rail irregularity of double-block ballastless track

- in subgrade settlement area [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(7):2573-2581. (in Chinese)
- [5] 肖威, 郭宇, 高建敏, 等. 高速铁路路基不均匀沉降对CRTS III板式轨道受力变形的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(4):724-730.  
Xiao W, Guo Y, Gao J M, et al. Effect of uneven subgrade settlement on the CRTS III slab track stress and deformation of high-speed railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(4):724-730. (in Chinese)
- [6] 崔旭浩, 杨怀志, 杜博文, 等. 路基不均匀沉降对CRTS II型板式无砟轨道损伤和变形影响分析[J]. 铁道学报, 2021, 43(10):91-97.  
Cui X H, Yang H Z, Du B W, et al. Analysis of effects of differential subgrade settlement on damage and deformation of CRTS II slab track [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(10):91-97. (in Chinese)
- [7] 陈天浩, 杨建伟, 王金海, 等. 多桥墩沉降下轨道底座板与桥面板间脱空区域的研究分析[J]. 北京建筑大学学报, 2021, 37(2):54-62.  
Chen T H, Yang J W, Wang J H, et al. Research and analysis of the void area between base plate and bridge plate under the settlement of multiple pier [J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021, 37(2):54-62. (in Chinese)
- [8] 冯玉林, 蒋丽忠, 陈梦成, 等. 连续梁桥边墩不均匀沉降下轨道层间变形协调关系及动力学应用[J]. 工程力学, 2021, 38(4):179-190.  
Feng Y L, Jiang L Z, Chen M C, et al. Deformation compatibility relationship of track interlayer with uneven settlement of side pier of continuous girder bridge and its dynamic application [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(4):179-190. (in Chinese)
- [9] Feng Y L, Li H Y, Yu J, et al. Applicability of existing CRTS II ballastless track-continuous girder bridge system under near-field transverse rare earthquake [J]. Engineering Structures, 2022, 273: 115076.
- [10] Feng Y L, Hou Y, Jiang L Z, et al. Failure mode of interlayer connection of longitudinally-connected ballastless track-bridge system under uneven pier settlement [J]. Construction and Building Materials, 2022, 351: 128805.
- [11] Feng Y L, Jiang L Z, Zhou W B, et al. An analytical solution to the mapping relationship between bridge structures vertical deformation and rail deformation of high-speed railway [J]. Steel and Composite Structures, 2019, 33(2):209-224.
- [12] 冯玉林, 蒋丽忠, 陈梦成, 等. 地震作用下轨道-桥梁系统损伤与轨道不平顺的对应关系[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3):203-214.  
Feng Y L, Jiang L Z, Chen M C, et al. Corresponding relationship between track-bridge system damage and track irregularity under seismic action [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3):203-214. (in Chinese)
- [13] Feng Y, He S, Jiang L, et al. Uneven settlement threshold of continuous beam pier based on analytic mapping relationship [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2023, 19(9):1190-1204.
- [14] Chen Z W, Bi L, Zhao J W. Comparison of single-pier settlement model and multi-pier settlement model in solving train-track-bridge interaction [J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(10):1484-1508.
- [15] 勾红叶, 冉智文, 蒲黔辉, 等. 高速铁路桥梁竖向变形与轨面几何形态的通用映射解析模型研究[J]. 工程力学, 2019, 36(6):227-238.  
Gou H Y, Ran Z W, Pu Q H, et al. Study on mapping relationship between bridge vertical deformation and track geometry of high-speed railway [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6):227-238. (in Chinese)
- [16] Jiang L Z, Zheng L, Feng Y L, et al. Mapping the relationship between the structural deformation of a simply supported beam bridge and rail deformation in high-speed railways [J]. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail and Rapid Transit, 2020, 234(10):1081-1092.
- [17] Jiang L Z, Liu L L, Zhou W B, et al. Mapped relationships between pier settlement and rail deformation of bridges with CRTS III SBT [J]. Steel and Composite Structures, 2020, 36(4):481-492.
- [18] Lai Z P, Jiang L Z, Liu X, et al. Analytical investigation on the geometry of longitudinal continuous track in high-speed rail corresponding to lateral bridge deformation [J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121064.
- [19] 娄平, 黄港归. 路桥过渡段折角型沉降致CRTS III型无砟轨道效应研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(4):1292-1303.  
Lou P, Huang G G. Study on the effect of CRTS III ballastless track caused by angular settlement in transition section between bridge and subgrade [J]. Journal of

- Railway Science and Engineering, 2023, 20(4): 1292-1303. (in Chinese)
- [20] 陈兆玮. 桥墩沉降下纵连板式轨道与桥面间动态接触行为及其对列车动态特性的影响[J]. 土木工程学报, 2021, 54(1): 97-105.  
Chen Z W. Dynamic contact behavior between longitudinally-connected-track and bridge deck subject to pier settlement and its influence on running train [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(1): 97-105. (in Chinese)
- [21] 龙昊. 高速铁路桥梁附加变形对轨道不平顺的映射影响机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.  
Long H. Mechanism of mapping relationship between additional bridge deformation and track irregularity of high-speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [22] 冯玉林, 侯宇, 蒋丽忠, 等. 基础变形诱发无砟轨道-桥梁系统关键构件变形累积与刚度突变的轨面解析表征[J]. 土木工程学报, 2023, 56(3): 44-57.  
Feng Y L, Hou Y, Jiang L Z, et al. Rail surface analytical representation of deformation accumulation and stiffness mutation of key components in ballastless track-bridge system induced by foundation deformation [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(3): 44-57. (in Chinese)
- [23] 国家铁路局. 高速铁路设计规范[M]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2019.  
National Railway Administration of People's Republic of China. Code for design of high speed railway [M]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd. 2019. (in Chinese)
- [24] 国巍, 王阳, 葛苍瑜, 等. 近断层地震动下高速铁路多跨简支梁桥震致破坏特征[J]. 振动与冲击, 2020, 39(17): 210-218.  
Guo W, Wang Y, Ge C Y, et al. Seismic failure features of multi-span simply supported girder bridges of high-speed railway under near-fault earthquake [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(17): 210-218. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)



(上接第 622 页)

- [13] 欧智菁, 陈盛富, 吴庆雄, 等. 变截面钢管混凝土格构柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(3): 77-83.  
Ou Z J, Chen S F, Wu Q X, et al. Experimental research on seismic performance of variable cross-sectional concrete filled steel tubular laced columns [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(3): 77-83. (in Chinese)
- [14] 赵东拂, 孙菲, 孟颖, 等. 钢筋缀件格构柱抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(13): 243-248.  
Zhao D F, Sun F, Meng Y, et al. Aseismic performance of a steel lattice column with lace bar [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13): 243-248. (in Chinese)
- [15] 袁辉辉, 吴庆雄, 陈宝春, 等. 平缀管式等截面钢管混凝土格构柱抗震性能试验与有限元分析[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 226-235.  
Yuan H H, Wu Q X, Chen B C, et al. Aseismic performance test and fem analysis of uniform sectional CFST lattice column with flat lacing tubes [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 226-235. (in Chinese)
- [16] Huang Z, Jiang L Z, Zhou W B, et al. Studies on restoring force model of concrete filled steel tubular laced column to composite box-beam connections [J]. Steel and Composite Structures, 2016, 22(6): 1217-1238.
- [17] 罗瑶. 四肢钢管混凝土格构柱抗震性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.  
Luo Y. Studies on the seismic performance of four-tube concrete filled steel tubular laced columns [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [18] 季飞. 循环荷载作用下腐蚀损伤钢材本构模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.  
Ji F. Study on constitutive model of corrosion-damaged steel under cyclic loading [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [19] 丁发兴, 朱江, 罗靛, 等. 钢-混凝土组合空间框架拟动力有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(5): 18-26.  
Ding F X, Zhu J, Luo L, et al. Finite element analysis for pseudo-dynamic behavior of steel-concrete composite space frame [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5): 18-26. (in Chinese)