

# 简支变连续法加固双 T 形铁路桥梁的力学性能

周长东, 马欣, 张许, 田苗旺, 王朋国

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 针对既有铁路桥梁承载力以及横向刚度不足造成的振动响应过大问题, 提出一种联合使用改变结构支承体系、体外预应力和增加横隔板的加固方法。采用有限元软件 ANSYS 和多体动力学软件 Universal Mechanism 对加固前后的桥梁进行数值模拟和动力分析。研究表明: 重力式桥墩对于梁体性能的影响很小, 因此可以建立无桥墩的桥梁有限元模型以提高计算效率; 增设预制横隔板可以增加梁体的刚度和承载力, 但数量和厚度超过一定程度则会削弱加固效果; 简支变连续的纵向加固法对提高刚度和承载力效果显著, 而纵向和横向联合加固效果更佳; 联合加固方案可以有效减小横向振幅, 这与梁体刚度的增加程度密切相关。

**关键词:** 双 T 形铁路桥梁; 简支变连续; 体外预应力; 预制横隔板; 车桥耦合分析; 振幅; 加速度

中图分类号: U445.72

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)03-0703-08

## Mechanical properties of double-T railway bridges by transforming simply supported into continuous system

ZHOU Changdong, MA Xin, ZHANG Xu, TIAN Miaowang, WANG Pengguo

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing100044, China)

**Abstract:** To solve the problems such as the weak transverse stiffness, excessive deflection and so on, one composite strengthening method for railway bridges was proposed which includes changing the support system, adding external pre-stressed strands and precast concrete transverse diaphragms. The finite element software ANSYS and the multi body dynamic software UM were used for numerical simulation and dynamic analysis. The results show that solid gravity piers have little influence on performance of bridge. To increase computational efficiency, the analytical model of bridge without piers should be taken. Adding precast concrete transverse diaphragms can improve stiffness and bearing capacity of bridge, but they also have a negative effect when the number and thickness exceed some certain extent. The method transforming simply supported into continuous system shows beneficial to increase stiffness and bearing capacity, and a combination of transverse and vertical strengthening method is more prominent. The transverse amplitude of bridge is decreased more obviously than that of vertical when using proposed composite strengthening method, because it is directly related to the extent of the stiffness increase.

**Key words:** double-T railway bridge; transforming simply supported into continuous system; external pre-stress; precast concrete transverse diaphragm; vehicle-bridge interaction analysis; amplitude; acceleration

考虑到架设、预制等因素, 我国 20 世纪六七十年代建造的铁路桥梁, 大多数采用了双片式预应力混凝土 T 型梁。这种双片式的结构横向连接较弱, 整体性

差, 加上设计承载力较低, 老龄化严重等原因, 导致

收稿日期: 2017-03-01; 修回日期: 2017-06-04

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51478033, 51678039) (Projects(51478033, 51678039) supported by the National Natural Science Foundation of China)

通信作者: 周长东, 教授, 博士生导师, 从事工程结构鉴定加固与抗震防灾研究; E-mail: zhouchangdong@163.com

运营过程中这类桥梁出现振动响应过大的问题<sup>[1-4]</sup>, 不满足《铁路桥梁检定规范》<sup>[5]</sup>的要求, 从而严重威胁铁路运输的安全。目前, 铁路桥梁主要加固方法<sup>[1-4, 6-9]</sup>有体外预应力加固、增大构件截面加固、粘贴钢板加固以及增加受力构件加固。改变结构支承体系多用于公路桥梁中, 在铁路桥梁中的应用很少。本文作者根据双 T 形铁路桥梁的特点以及各加固方法的优缺点<sup>[10-11]</sup>提出了采用简支变连续、体外预应力和增设横隔板的复合加固方法, 并对 4 种组合加固方案进行了优化分析。

## 1 桥梁概况

本文研究图号为专桥 2059 的四跨双片式预应力混凝土 T 型简支梁, 采用重力式钢筋混凝土桥墩。2 片 T 梁之间仅仅通过横隔板连接, 具体参数如表 1 所示。目前出现的主要问题是横向振幅和挠跨比过大, 不满足《铁路桥梁检定规范》<sup>[5]</sup>中通常值和安全限值的要求。

## 2 加固方案初选

本文提出了 4 种纵横向不同组合初步加固方案。

方案 1 如图 1 所示, 对桥梁全长进行纵向加固, 采用简支变连续的加固方法对桥梁全长加固, 并在 2 片 T 梁腹板的两侧各设置 2 根低松弛, 1860 级无黏结钢绞线。其中在腹板两侧距离梁端部 4.4 m 和 0.4 m 处各有 1 个转向装置, 预应力钢绞线呈折线布置并通

过转向装置和锚固端将预应力传至梁体。

方案 2 如图 2 所示, 每跨梁体全长范围内原有 8 道横隔板, 在每 2 个横隔板之间增设 1 道预制混凝土横隔板, 板内预留有 4 个孔洞, 布置 4 根横向的预应力钢绞线于 4 个预留的孔洞内。对于原有横隔板同样需要预应力加固, 采用在其两侧的位置分别布置 2 根预应力钢绞线。同时纵向按照方案 1 的方法进行加固。

方案 3 为每跨梁体中对桥梁靠近支座的 1/4 跨范围内的每 2 个原有横隔板之间增设 1 道预制横隔板, 并按照方案 2 对预制横隔板和原有横隔板布置横向的预应力钢筋。同时按照方案 1 的方法进行纵向加固。

方案 4 为对桥梁靠近支座的 1/8 跨范围内的每 2 个原有横隔板之间增设 1 道预制横隔板, 并按照方案 2 对预制横隔板和原有横隔板布置横向预应力钢筋。同时按照方案 1 的方法进行纵向加固。

## 3 加固方案优化

采用 ANSYS 软件进行模拟分析, 选用 SOLID65 模拟钢筋混凝土实体结构, 弹性模量取为  $3.5 \times 10^4$  MPa, 密度为  $25 \text{ kg/m}^3$ 。选用 LINK10 单元模拟预应力钢筋, 原有预应力筋的模拟采用实体筋法, 体外预应力钢索采用节点耦合方法。加固前桥梁模型的支座形式, 进桥端设定为固定铰支座, 出桥端设定为滑动铰支座, 通过节点耦合的方法与桥墩连接在一起; 加固后将中间支座设定为固定铰支座, 两边支座设定为滑动铰支座; 桥墩与地基相连接处近似认为是固结。

在 ANSYS 中进行静力分析时, 桥梁的二期荷载取为  $42 \text{ kN/m}$ , 4 种列车活荷载分别为: ICE3 列车活

表 1 32 m 双片式 T 梁参数

Table 1 Parameters of 32 m double-T beam

梁长/m	跨度/m	梁高/m	梁质量/t	底宽/cm	下缘高/cm	下八字高/cm
32.6	32.0	2.5	112.0	88	25	36
腹板厚/cm	横隔板厚度/cm	腹板中心距/m	面积/m <sup>2</sup>	竖向惯性矩/m <sup>4</sup>	横向惯性矩/m <sup>4</sup>	静活载挠跨比
16	14-26	1.8	1.089 4	1.002 4	0.123 3	1/179 1

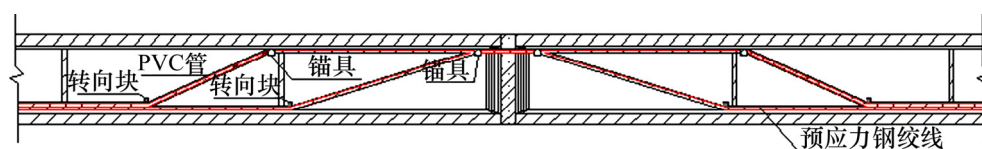


图 1 方案 1 纵向加固示意图

Fig. 1 Schematic diagram of strengthening method 1 along longitudinal direction

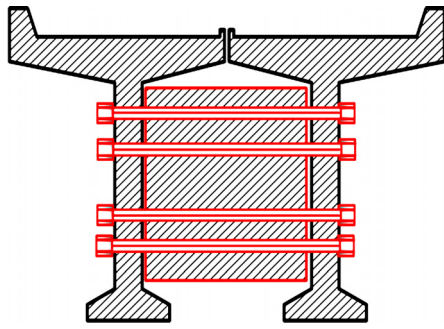


图 2 横向加固结构加固示意图

Fig. 2 Schematic diagram of strengthening along transverse direction

载 20.79 kN/m; ZK 活载 86.67 kN/m; TGV 列车活载 20.48 kN/m; 轴重 30 t 重载列车活载 110 kN/m。

3.1 桥墩对梁体分析的影响

分别建立有桥墩桥梁模型和无桥墩的桥梁模型, 2 种模型的模态分析结果见表 2。从表 2 可见: 2 种模型的最大差值仅为 1.9%。

表 2 自振频率对比

Table 2 Comparison of natural frequency			Hz
模型	一阶横向	一阶竖向	
有桥墩	3.27	3.74	
无桥墩	3.24	3.81	
差值/%	0.9	1.9	

由式(1)可以计算梁体的各阶自振频率。

$$f_n \approx \frac{n^2 \pi}{2L} \sqrt{\frac{EI}{m}} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{n\pi r}{L} \right)^2 \left( 1 + \frac{E}{kG} \right) \right] \quad (1)$$

式中:  $f_n$  为桥梁的  $n$  阶自振频率;  $L$  为桥梁的跨度;  $EI$  为截面刚度;  $m$  为桥梁单位长度的质量和二期恒载;  $r$  为桥梁截面惯性矩半径;  $G$  为剪切刚度。

根据式(1)计算刚度时, 横向刚度按全截面计算结果是 3.937 Hz; 按单片梁体横向刚度的 2 倍取值是 2.882 Hz, 计算结果偏低。竖向刚度按照单片梁体竖向刚度的 2 倍取值是 4.364 Hz。有限元计算和理论计算结果吻合较好, 证明了所建模型的合理性。

自重作用和 30t 重载列车作用下的跨中竖向位移见表 3。从表 3 可知: 2 种模型的计算相对误差在 3% 以内。

在动力分析中, 桥梁的动力响应主要取决于梁体本身的刚度, 即车桥系统的振动响应跟桥梁梁体的现状紧密相连, 可以忽略桥墩的影响。因此, 综合以上分析可知: 在结构分析时可以采用无桥墩模型。

表 3 跨中竖向位移对比

Table 3 Comparison of vertical displacement of mid-span mm

模型	自重作用	30 t 重载列车
有桥墩	4.36	22.10
无桥墩	4.45	22.44
相对误差/%	2.1	1.54

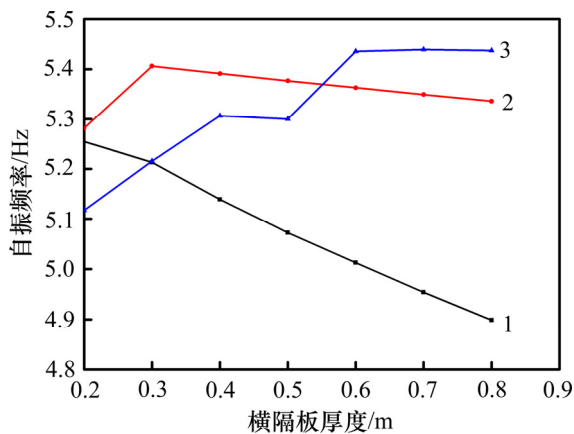
3.2 方案比选

4 种加固方案都采用了简支变连续加固法和体外预应力加固法, 不同之处在于横隔板的设置。为了选择最为合适的横隔板厚度, 达到最佳加固效果, 对 0.2~0.8 m 间不同厚度的预制混凝土横隔板进行了模拟分析, 将 4 种加固方案细分后的 22 种加固情况模态分析结果列于表 4, 采用不同方案加固后桥梁的横向自振频率随横隔板厚度的变化见图 3。

表 4 不同方案桥梁自振频率

Table 4 Natural frequency of bridge with different methods

加固方案	横隔板厚度/mm	桥梁自振频率/Hz	
		一阶横向	一阶竖向
原桥	—	3.270 3	3.810 0
方案 1	—	4.907 5	5.188 6
	0.2	5.254 7	5.415 2
	0.3	5.212 9	5.447 9
	0.4	5.139 1	5.445 7
	0.5	5.072 3	5.443 7
	0.6	5.012 6	5.442 7
	0.7	4.953 9	5.487 2
	0.8	4.898 5	5.529 6
方案 2	0.2	5.281 8	5.421 9
	0.3	5.406 2	5.484 4
	0.4	5.391 2	5.659 6
	0.5	5.376 6	5.793 9
	0.6	5.363 0	5.879 2
	0.7	5.349 3	5.954 0
	0.8	5.335 9	6.012 5
	方案 3	0.2	5.117 3
0.3		5.215 4	5.446 1
0.4		5.306 7	5.586 4
0.5		5.299 8	5.675 0
0.6		5.435 7	5.707 7
0.7		5.439 2	5.727 4
0.8		5.437 3	5.730 5
方案 4		0.2	5.117 3
	0.3	5.215 4	5.446 1
	0.4	5.306 7	5.586 4
	0.5	5.299 8	5.675 0
	0.6	5.435 7	5.707 7
	0.7	5.439 2	5.727 4
	0.8	5.437 3	5.730 5



1—方案 2; 2—方案 3; 3—方案 4。

图 3 加固后桥梁自振频率

Fig. 3 Natural vibration frequency of bridge after strengthening

从表 4 可以看出: 加固后梁体的刚度有了明显的提高。以一阶横向自振频率为例, 采用方案 1 加固后, 自振频率由原桥的 3.27 Hz 增加到 4.91 Hz, 说明简支变连续加固法对提高梁体的刚度方面效果显著。采用方案 2, 3, 4 加固后梁体的自振频率有了进一步提高, 说明纵横向联合加固可以取得更好的加固效果。

从图 3 可以看出: 方案 2 使用的横隔板个数最多, 在预制横隔板厚度相同的情况下, 桥梁整体质量要比其他方案的大, 质量过度增加导致加固后的梁体一阶自振频率随着横隔板厚度的增加而降低; 横向刚度提高最大的是方案 3 中横隔板厚度为 0.3 m 时以及方案 4 中横隔板厚度为 0.7 m 时, 分别提高了 65.44% 和 67.36%。但是方案 4 增设的横隔板比较集中, 而且所用预制横隔板总质量也比方案 3 的略大, 因此方案 3 中横隔板厚度为 0.3 m 的情况较为合理。

桥梁在加固前后的跨中竖向位移见表 5。从表 5 可以看出: 3 种方案加固后, 跨中竖向位移都有了不同程度的减小, 其中方案 3 和方案 4 的加固效果比方案 2 更加明显, 且二者相差不大, 因此结合模态分析结果选定方案 3 横隔板厚度为 0.3 m 的情况为最终加固方案。

## 4 车桥耦合动力分析

本文采用多体动力学软件 UM(Universal Mechanism)来进行桥梁结构的动力分析。根据本文的研究背景, 在车桥耦合分析中列车类型选用了重载列车 C80 和高速列车 CRH2。

表 5 不同加固方案桥梁竖向挠度

Table 5 Vertical displacement of bridge with different strengthening methods

方案	横隔板厚度/mm	跨中竖向挠度幅值/mm			
		TGV 活载	ICE3 列车活载	ZK 标准活载	30 t 轴重列车活载
原桥	—	5.17	5.25	20.72	26.21
方案 2	0.2	4.32	4.34	12.65	15.48
	0.3	4.31	4.32	12.58	15.39
	0.4	4.31	4.33	12.59	15.39
	0.5	4.33	4.34	12.63	15.42
	0.6	4.36	4.38	12.75	15.52
	0.7	4.38	4.39	12.83	15.59
	0.8	4.40	4.41	12.91	15.66
	方案 3	0.2	3.86	3.87	11.75
0.3		3.71	3.74	11.30	14.56
0.4		3.92	3.94	11.74	14.55
0.5		3.93	3.94	11.73	14.53
0.6		3.89	3.90	11.71	14.50
0.7		3.87	3.89	11.69	14.48
0.8		3.86	3.87	11.67	14.45
方案 4		0.2	3.92	3.93	11.95
	0.3	3.88	3.92	11.65	14.47
	0.4	3.89	3.90	11.63	14.44
	0.5	3.86	3.87	11.63	14.44
	0.6	3.85	3.86	11.57	14.37
	0.7	3.83	3.84	11.54	14.34
	0.8	3.81	3.82	11.46	14.30

### 4.1 车桥耦合分析原理

车桥耦合是一个动力学分析问题, 包括车辆、轨道和桥梁 3 个子系统, 而且这三者之间相互影响, 其相互关系随着列车的进行而发生变化, 因而具有时变性<sup>[12-13]</sup>。作为弹性结构的桥梁模型应用有限元方法来分析, 列车在运行过程中的各种动力学响应则是应用多体动力学的方法来分析, 两者之间用轨道子系统来完成数据的交换, 从而实现桥梁与列车的耦合振动分析<sup>[14-16]</sup>。在车桥耦合动力分析过程中, 各个部分之间的原理关系如图 4 所示。

车桥耦合动力分析中, 可以根据车桥耦合分析原理, 将 3 个子系统写成形式统一的动力学方程:

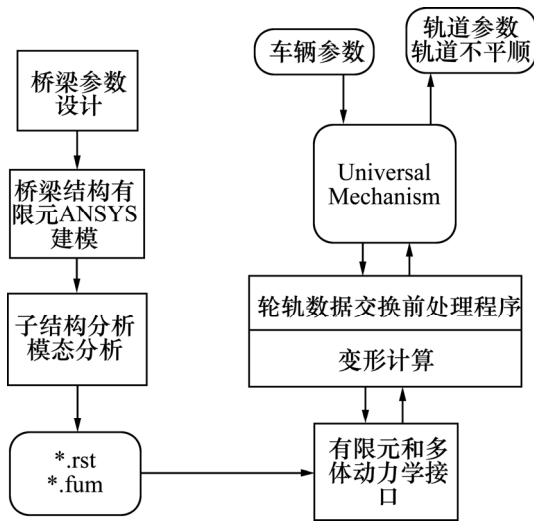


图 4 车桥耦合动力分析原理示意

Fig. 4 Principle of vehicle-bridge coupled dynamic analysis

$$M_v \ddot{u}_v + C_v \dot{u}_v + K_v u_v = R_v \quad (2)$$

$$M_t \ddot{u}_t + C_t \dot{u}_t + K_t u_t = R_t \quad (3)$$

$$M_b \ddot{u}_b + C_b \dot{u}_b + K_b u_b = R_b \quad (4)$$

式中:  $M_v$ ,  $M_t$ ,  $M_b$  分别为列车、轨道和桥梁子系统的质量矩阵;  $C_v$ ,  $C_t$ ,  $C_b$  分别为列车、轨道和桥梁子系统的阻尼矩阵;  $K_v$ ,  $K_t$ ,  $K_b$  分别为列车、轨道和桥梁子系统的刚度矩阵;  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_b$  分别为列车、轨道和桥梁子系统的广义荷载向量;  $u_v$ ,  $u_t$ ,  $u_b$  分别为列车、轨道和桥梁子系统的广义位移向量;  $\dot{u}_v$ ,  $\dot{u}_t$ ,  $\dot{u}_b$  分别为列车、轨道和桥梁子系统的广义速度向量;  $\ddot{u}_v$ ,  $\ddot{u}_t$ ,  $\ddot{u}_b$  分别为列车、轨道和桥梁各子系统的广义加速度向量。

#### 4.2 加固前后车桥耦合分析

在 UM 软件中进行车桥耦合的仿真分析时, 重载列车的分析速度等级分别是 60, 80 和 100 km/h, 轨道不平顺谱选择美国 5 级谱作为车桥系统的激励源; CRH2 高速列车的分析速度等级分别是 200, 250, 300

和 320 km/h, 选择德国低干扰轨道不平顺作为车桥系统的激励源。

采用所选方案加固前后的 C80 重载列车在不同速度等级下桥梁的动力性能指标最大值如表 6 所示, 速度为 100 km/h 时的梁体动力响应曲线如图 5 所示。

由表 6 可知: 加固前当重载列车以 60, 80 和 100 km/h 的速度运行时, 桥梁的挠跨比分别为 1/1 598, 1/1 275 和 1/1 154, 只有速度为 60 km/h 时不超过规定的通常值 1/1 300<sup>[5]</sup>。加固后分别减小了 35.4%, 37.9% 和 32.3%, 满足不超过通常值<sup>[5]</sup>的要求。

加固前桥梁在 100 km/h 速度下的横向振幅超过了通常值<sup>[5]</sup>, 加固后桥梁在 3 种速度等级下的横向振幅分别减小了 38.6%, 43.8% 和 39.8%, 满足不超过通常值的要求。

加固前桥梁的竖向振动加速度均满足规定<sup>[5]</sup>, 加固后分别减小了 13.3%, 29.4% 和 45.9%。

跨中横向振动加速度在列车速度为 100 km/h 时超过了安全限值<sup>[5]</sup>, 其余 2 种速度状态下虽然满足要求但与安全限值较为接近。加固后横向振动加速度分别减小了 28.3%, 33.1% 和 28.7%, 都在安全限值以内。

从图 5(c)可见: 加固前只有向下的位移变形, 而加固后跨中出现向上的位移。这是由简直变连续的加固方案所决定的。加固后简支梁变为连续梁, 当列车运行于邻跨时, 由于连续梁的结构特征, 分析跨出现上拱现象, 表现在跨中竖向出现向上的位移。

采用所选方案加固前后的高速列车 CRH2 在不同速度等级下桥梁的动力性能指标最大值如表 7 所示, 速度为 320 km/h 时的梁体动力响应曲线如图 6 所示。

从表 7 可知: 当列车时速为 200, 250, 300 和 320 km/h 时, 桥梁在加固前的最大挠跨比分别是 1/7 127, 1/6 987, 1/6 557 和 1/6 882, 4 种情况下的挠跨比均满足规定的不超过通常值 1/1 300<sup>[5]</sup>和 1/2 500 的要求<sup>[17]</sup>, 加固后的桥梁最大挠跨比分别减小了 32.3%, 18.8%, 19.1% 和 12.0%。

表 6 重载列车不同速度等级下桥梁加固前后动力特性

Table 6 Dynamic characteristics of bridge with heavy train at different speeds

速度等级/ (km·h <sup>-1</sup> )	跨中振幅/mm				跨中振动加速度/(m·s <sup>-2</sup> )			
	加固前 横向	加固后 横向	加固前 竖向	加固后 竖向	加固前 横向	加固后 横向	加固前 竖向	加固后 竖向
60	2.33	1.43	20.02	12.94	0.99	0.71	0.90	0.78
80	2.38	1.31	25.10	15.58	1.3	0.87	1.09	0.77
100	2.84	1.71	27.72	18.76	1.64	1.17	1.59	0.86

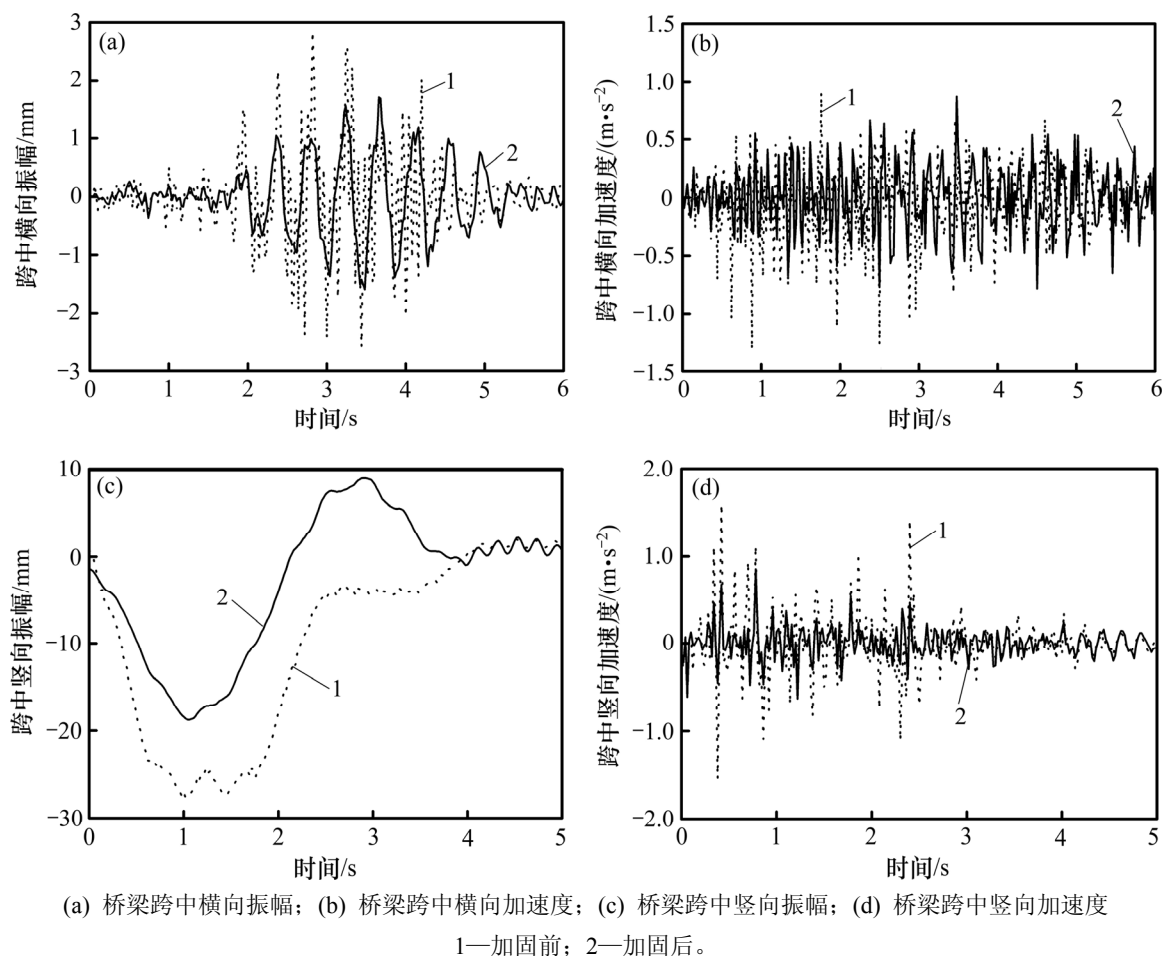


图 5 100 km/h 重载列车作用下桥梁动力响应

Fig. 5 Dynamic response of bridge with heavy train at 100 km/h

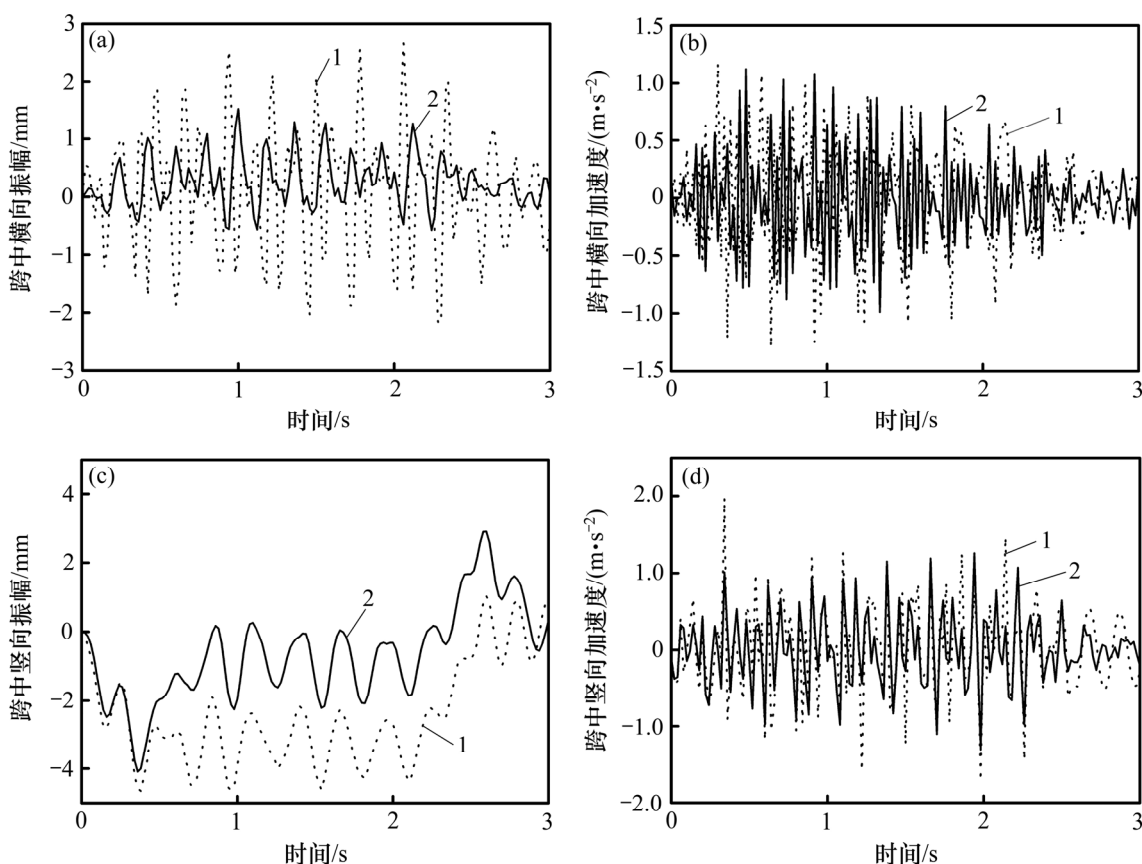
表 7 CRH2 列车不同速度等级下桥梁加固前后动力特性

Table 7 Dynamic characteristics of bridge with CRH2 at different speeds

速度等级/ (km·h <sup>-1</sup> )	跨中振动位移/mm				跨中振动加速度/(m·s <sup>-2</sup> )			
	加固前 横向	加固后 横向	加固前 竖向	加固后 竖向	加固前 横向	加固后 横向	加固前 竖向	加固后 竖向
200	2.24	1.23	4.49	3.04	0.88	0.66	0.97	0.68
250	2.37	1.44	4.58	3.72	1.08	0.77	1.26	0.85
300	2.56	1.36	4.88	3.95	1.25	0.93	1.81	1.23
320	2.66	1.52	4.65	4.09	1.28	1.13	1.97	1.31

根据规定,在列车横向摇摆力、风力、离心力和温度作用下,梁体的水平挠度不应大于梁体计算跨度的  $1/4\ 000$ <sup>[17]</sup>。加固前桥梁在 4 种速度等级下的横向振幅均大于通常值且小于安全限值<sup>[5]</sup>,同时也小于规定值  $8.15\ \text{mm}$ <sup>[17]</sup>。加固后横向振幅分别减小了 45.1%, 39.2%, 46.9%和 42.9%,且数值均已接近于通常值。

加固前桥梁的横向和竖向振动加速度均满足规定的安全限值<sup>[5]</sup>,其中当速度为 300 km/h 和 320 km/h 时,横向加速度与安全限值  $1.4\ \text{m/s}^2$  比较接近。加固后各个速度等级下的横向加速度分别减小了 25%, 28.7%, 25.6%和 11.7%,竖向加速度分别减小了 29.9%, 32.5%, 32%和 33.5%,均满足规范要求。



(a) 桥梁跨中横向振幅; (b) 桥梁跨中横向加速度; (c) 桥梁跨中竖向振幅; (d) 桥梁跨中竖向加速度  
1—加固前; 2—加固后。

图 6 车速 320 km/h 时 CRH2 列车作用下桥梁动力响应  
Fig. 6 Dynamic response of bridge with CRH2 at 320 km/h

### 5 结论

1) 桥墩对桥梁自振频率、承载力和横向振动的影响很小, 对竖向振动的影响虽然略大于横向振动的影响但仍可以忽略不计, 因此在建立桥梁的有限元模型时可以不考虑桥墩的影响而只建立梁体的模型, 可以有效地减小计算量。

2) 采用简支变连续和体外预应力钢筋的纵向加固方法明显地提高了梁体的自振频率和承载力, 增设横隔板增加了梁体的横向刚度, 并在一定程度上提高了竖向刚度; 但是若横隔板的数量和厚度超过了一定限度值, 质量的增大对梁体自振频率和承载力的提高反而产生不利影响。

3) 通过静力分析确定了方案 3 中预制横隔板厚度为 0.3 m 时的情况为桥梁的推荐加固方案: 加固后一阶横向自振频率提高 65.33%, 一阶竖向自振频率提

高 31.38%; 在不同荷载作用下梁体承载力提高了 28.24%~45.46%;

4) 本文推荐加固方案在减小梁体的竖向挠度和加速度方面取得了良好的效果, 并且能够有效减小小桥梁在列车运行过程中的横向振幅和加速度, 使得桥梁加固后在 C80 重载列车和 CRH2 高速列车荷载下的各项动力性能指标均控制在安全范围之内, 并具有一定的安全储备。

5) 对于采用简支变连续方法加固的桥梁, 梁体的应力分布和强度储备均发生了改变, 其改变规律尚需进一步的深入研究。

#### 参考文献:

[1] 颜亮亮. 既有线提速桥梁横向刚度不足的加固方法探讨[J]. 上海铁道科技, 2014(1): 94-95, 59.  
YAN Liangliang. Strengthening method of existing bridge on the lack of lateral stiffness for railway acceleration[J]. Shanghai

- Railway Science and Technology, 2014(1): 94–95, 59.
- [2] 李昊, 罗兴华. 重载铁路桥梁横向振动检测及加固研究[J]. 神华科技, 2013, 11(5): 80–83.  
LI Hao, LUO Xinghua. Transverse vibration detection and reinforcement study of heavy haul railway bridge[J]. Shenhua Science and Technology, 2013, 11(5): 80–83.
- [3] 匡希龙, 谢海涛. 旧桥加固技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.  
KUANG Xilong, XIE Haitao. Technologies of reinforcing former bridge[M]. Beijing: China Communication Press, 2010.
- [4] 王新刚, 朱德华, 闻宝联. 32 m 预应力混凝土简支双 T 梁横向加固技术研究[J]. 铁道建筑, 2009(9): 23–26.  
WANG Xingang, ZHU Dehua, WEN Baolian. Study on lateral reinforcement for 32m simply-supported PC double T-beam[J]. Railway Engineering, 2009(9): 23–26.
- [5] 铁运函 [2004] 120 号. 铁路桥梁检定规范[S].  
Rail transport letter [2004] No. 120, Railway bridge test specification[S].
- [6] 侯勇, 侯刚. 既有铁路混凝土桥梁加固技术研究[J]. 铁道工程学报, 2011(12): 54–56, 63.  
HOU Yong, HOU Gang. Research on reinforcing technology for existing railway concrete simply-supported beam bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(12): 54–56, 63.
- [7] 令狐男生. 大秦重载铁路桥梁整治技术深化研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学土木工程学院, 2014: 9–11.  
LINGHU Yongsheng. The research of the remediation technology of Da-Qin overload railway bridge[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University. School of Civil Engineering, 2014: 9–11.
- [8] 周长东, 刘斌. 快速复合方法加固铁路桥梁的力学性能研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(5): 42–48.  
ZHOU Changdong, LIU Bin. Research on the mechanical properties of railway bridge strengthened with quick-composite reinforcement methods[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(5): 42–48.
- [9] HARAJLI M, KHAIRALLAH N. External prestressed members: evaluation of second-order effects[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(10): 1151–1161.
- [10] 辛立娟, 何化南, 陈旭. 简支变连续加固旧桥前后内力分析[J]. 低温建筑技术, 2013(8): 67–69.  
XIN Lijuan, HE Huanan, CHEN Xu. The internal force research on old bridge reinforcement in transforming simply-supported beam system to continuous beam system[J]. Temperature Architecture Technology, 2013(8): 67–69.
- [11] 翟婉明, 王少林. 桥梁结构刚度对高速列车-轨道-桥梁耦合系统动力特性的影响[J]. 中国铁道科学, 2012, 22(1): 19–25.  
ZHAI Wanming, WANG Shaolin. Influence of bridge structure stiffness on the dynamic performance of high-speed train-track-bridge coupled system[J]. China Railway Science, 2012, 22(1): 19–25.
- [12] 田飞, 李慧民, 万婷婷, 等. 钢筋混凝土框架结构抗震加固方法应用研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(2): 126–130.  
TIAN Fei, LI Huimin, WAN Tingting, et al. Application and research of the seismic strengthening method for reinforced concrete structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(2): 126–130.
- [13] XIA H, ZHANG N. Dynamic analysis of railway bridges under high speed trains[J]. Computers and Structures, 2005, 83(1/2/3/4): 1891–1901.
- [14] 李慧乐, 夏禾, 张楠, 等. 基于车桥耦合动力分析的桥梁动应力计算方法[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(1): 68–74.  
LI Huile, XIA He, ZHANG Nan, et al. Calculation method for dynamic stress of bridge based on vehicle-bridge coupled dynamic analysis[J]. China Railway Science, 2015, 36(1): 68–74.
- [15] ANTOLIN P, GOICOLEA J M, OLIVA J, et al. Nonlinear train-bridge lateral interaction using a simplified wheel-rail contact method within a finite element framework[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2012, 7(4): 1028–1034.
- [16] 李慧乐. 基于车桥耦合振动的桥梁动应力分析及疲劳性能评估[D]. 北京: 北京交通大学土木工程学院, 2016: 55–59.  
LI Huile. Dynamic stress analysis and fatigue performance assessment of bridges based on vehicle-bridge coupling vibration[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University. School of Civil Engineering, 2016: 55–59.
- [17] TB 10621—2014. 高速铁路设计规范[S].  
TB 10621—2014. Code for design of high speed railway[S].

(编辑 赵俊)