

重载铁路双柱式桥墩加固技术优化研究

陈树礼^{1,2}, 李夷豪³, 张建功³, 王泽涛³, 祁鉴全³

(1. 石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室, 河北 石家庄 050043;

3. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:为探索基于性能提升的桥墩加固优化设计方法,以重载铁路中数量较多的分离式双柱式桥墩为对象,基于数值模拟分析和桥墩加固运营性能试验,开展 3 种常用方法加固条件下的桥墩静力性能对比分析和动力性能对比试验研究,并进行加固技术优化研究。结果表明,设计荷载作用下,墩身外包加固抑制墩顶水平位移效果较好,而“增大基础和增补桩基”组合加固则能有效减少基底截面应力;运营列车作用下,3 种方法加固条件的墩顶横向振幅较加固前均有不同程度降低,但也有部分桥墩受施工等因素影响出现振幅增大的情况。采用优化提出的“增大基础+增补桩基+墩身外包”三重加固法,墩顶横向振幅降低幅度超过 50%,能够很好地满足重载铁路双柱式桥墩强化改造需求。

关键词:重载铁路;双柱式桥墩;加固技术;数值模拟;现场试验;优化设计

中图分类号: U239.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)01-0001-08

0 引言

双柱式桥墩因其造型美观、圻工量小、施工便捷等特点,在中国 20 世纪的铁路桥梁建设中广泛应用。但随着目前大轴重、高密度和长编组的重载列车快速发展,此类桥墩刚度小、稳定性差和振动过大的不足更加突出,影响列车安全运营,而对其加固改造则是保障安全的重要手段。

围绕双柱式桥墩加固问题,国内外专家学者提出了多种加固方法并开展了深入研究。其中应用较广泛的有,在墩柱间或者周围浇筑混凝土,新增混凝土与原桥墩采用植筋连接的加固方法等。黄先国^[1]、黄洪猛等^[2]通过数值模拟和现场试验,研究了墩身外包加固和墩身连接加固对桥墩动力响应的影响;陈树礼等^[3]针对双柱式桥墩水冲受损,提出一种组合加固技术,分析了该方法对桥墩刚度和承载能力的影响;陈令坤等^[4]、肖祥淋等^[5]还提出了在墩柱之间增设钢结构剪力撑、连接型钢和对墩柱及基础同时加固等多种加固改造方法。总体来说,重载铁路桥墩加固方法比较多样化,缺乏统一标准,也缺少相应的优化设计研究。

据此,以常用方法加固重载铁路双柱式桥墩为工程背景,采取有限元分析和现场试验等手段,分析不同加固方法对桥墩静、动力性能的影响,探索基于性能提升的桥墩优化加固设计方法,以期以后同类桥墩加固提供借鉴。

1 重载铁路双柱式桥墩常见加固技术

1.1 桥墩简介

重载铁路双柱式桥墩多采用分离式桥墩,共用基础,桥墩分离,柱身多为矩形和圆端形,共用盖梁;基

收稿日期:2023-11-22 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20230317

基金项目:国家自然科学基金(52008272);河北省重点研发计划项目(20375410D);河北省自然科学基金(E2022210046);河北省省级科技计划资助(21567625H)

作者简介:陈树礼(1978—),男,副教授,研究方向为桥梁检测、评定与加固。E-mail:chensl@stdu.edu.cn

陈树礼,李夷豪,张建功,等.重载铁路双柱式桥墩加固技术优化研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2024,37(1):1-8.

础类型有明挖扩大基础和桩基础,多用于双线、直、曲线钢筋混凝土梁和预应力混凝土梁。典型双柱式桥墩见图 1。

1.2 常见加固技术

双柱式桥墩常见的加固技术主要有以下 3 种:

墩身连接加固是双柱式桥墩加固最常用方法之一,其基本思路是在 2 个墩柱之间增设结构剪力撑、连接型钢或钢筋混凝土构件,连 2 个墩柱形成一整体结构,以提高整体刚度。

墩身外包加固是增大截面法的一种,在既有结构周围植筋、浇筑混凝土,通过增大截面惯性矩,来提高桥墩刚度、承载力和稳定性。加固厚度一般取包裹住现有桥墩 10~20 cm 为宜,高度各有不同。

“增大基础和增补桩基”组合加固根据桩基础的受力原理,在原有承台四周新增桩基,之后通过植筋、浇筑混凝土将承台扩大,新增桩基与承台连在一起,使新增桩基与原有结构共同受力,限制基础横向转动,提高刚度和稳定性。

3 种常见加固技术具体示意图 2。

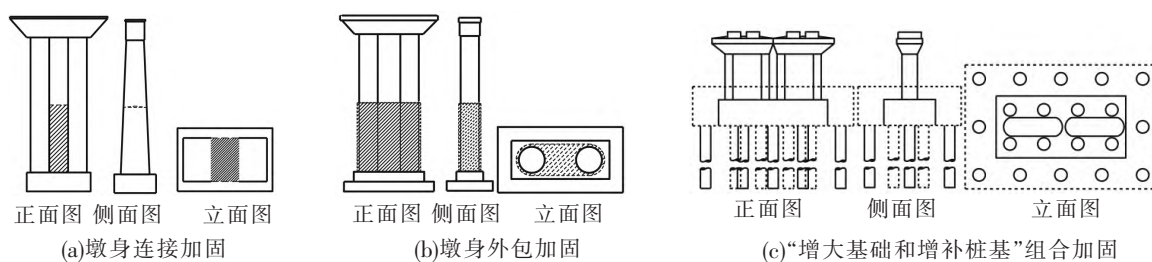


图 2 常见加固技术示意

2 不同加固条件下桥墩静力性能对比分析

对不同加固条件下的桥墩进行静力计算,对比分析 3 种不同加固方法对桥墩静力性能的影响规律。

2.1 模型建立

采用有限元软件 ANSYS 建立双柱式桥墩模型,加固前桥墩尺寸及桩基布置如图 3 所示,参照图号为肆桥 4023,墩身采用 SOLID65 单元模拟,混凝土强度等级为 C20;基础为桩基础(8 根桩径 0.8 m,桩长 18 m 的钢筋混凝土钻孔灌注桩),承台混凝土强度等级为 C20,钻孔灌注桩采用 BEAM188 单元模拟,混凝土强度等级为 C35。

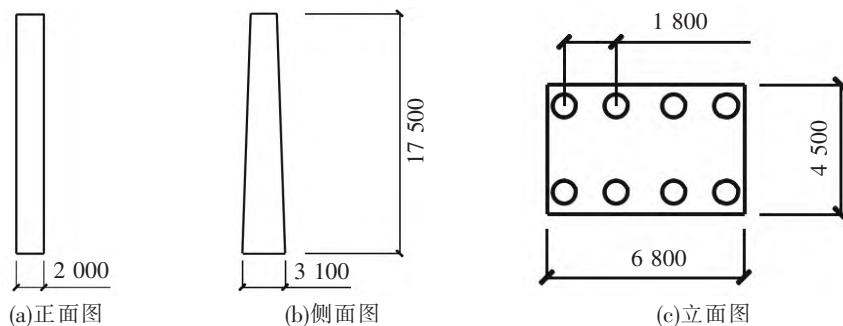


图 3 桥墩尺寸及桩基布置(单位:mm)

基于桩-土-承台相互作用原理^[6-7]在 ANSYS 中建立的加固前和 3 种方法加固后的桥墩模型见图 4,分别为模型 1,桥墩原型;模型 2,墩身连接加固(高度 9 m,连接混凝土强度等级为 C40);模型 3,墩身外包加固(高度 9 m,外包厚度 20 cm,外包混凝土强度等级为 C40);模型 4,“增大基础和增补桩基”组合加固(桩基总数 20 根,增补桩桩长为 24 m,桩径 0.8 m,新增钻孔桩与承台混凝土强度等级均为 C35)。

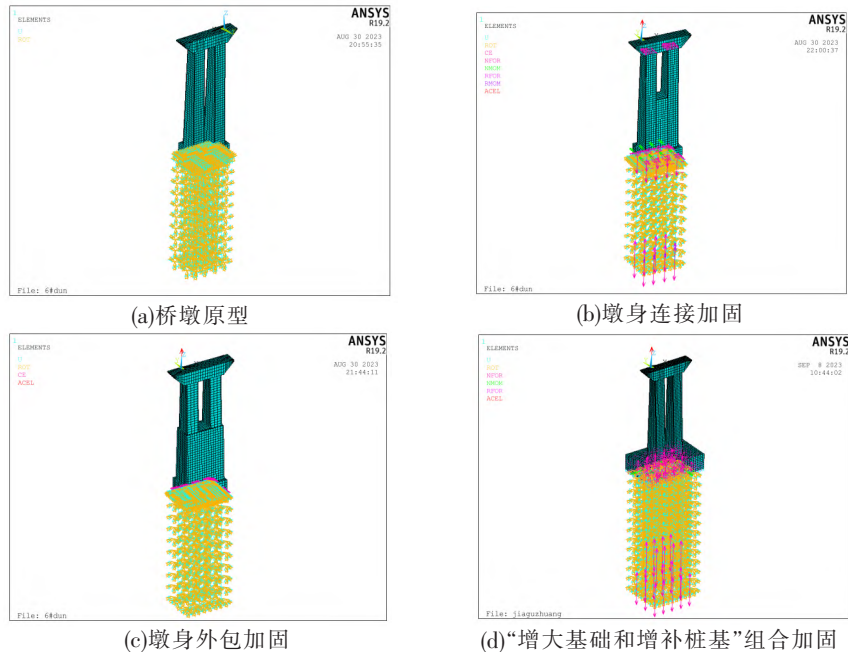


图 4 桥墩模型

2.2 计算工况

工况 1,主力;工况 2,主力+横向附加力。

主力取恒载+列车竖向静活载+列车竖向动力作用,其中恒载包括桥跨传给桥墩的压力(包括 T 梁自重,以及道砟、枕木、轨道和人行踏板共计 48.0 kN/m)和桥墩自重;列车竖向静活载考虑双线单孔重载的活载布置形式^[8],布置图示见图 5;列车竖向活荷载作用由列车竖向静活载乘以动力系数得到,动力系数取 1.2。横向附加力取列车横向摇摆力,取 120 kN 作用于桥墩顶面。

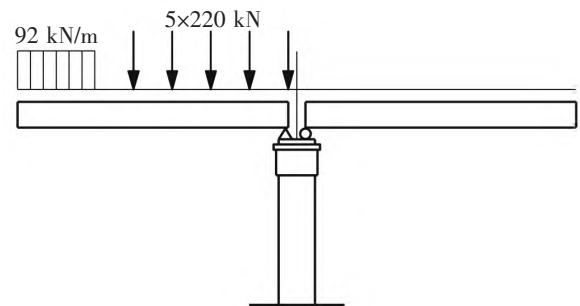


图 5 单孔重载布置形式

2.3 结果与分析

桥墩原型以及在墩身连接加固(简称连接加固),墩身外包加固(简称外包加固),“增大基础和增补桩基”组合加固(简称组合加固)不同加固条件下桥墩静力性能对比见图 6。

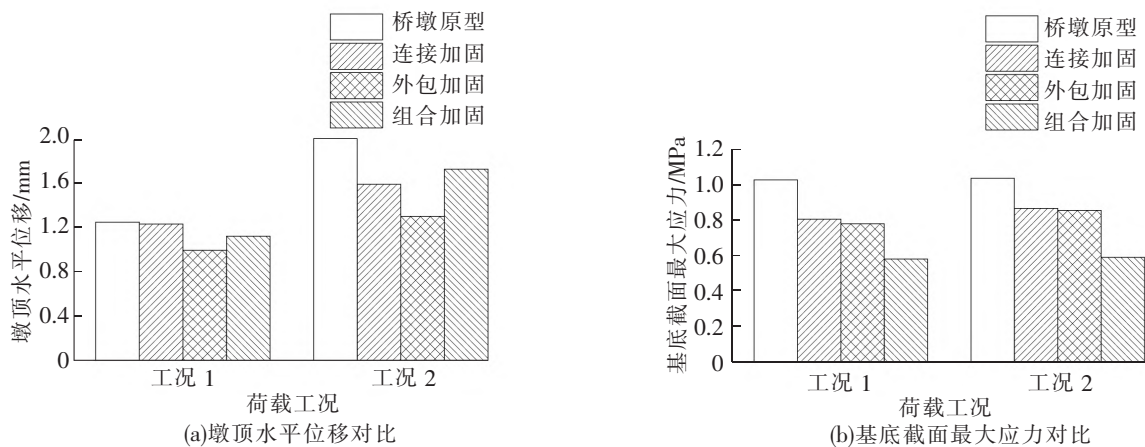


图 6 不同加固条件下桥墩静力性能对比

由图 6 可得,在工况 1 下,墩身连接加固、墩身外包加固和“增大基础和增补桩基”组合加固相比桥墩原型,墩顶水平位移分别减少了 1.27%,20.27%,10.05%,基底截面最大应力分别减少了 21.57%,24.10%,43.44%;在工况 2 下,墩身连接加固、墩身外包加固和“增大基础和增补桩基”组合加固相比桥墩原型,墩顶水平位移分别减少了 20.55%,34.99%,13.73%,基底截面最大应力分别减少了 16.37%,17.43%,42.96%。

在 2 种荷载工况下,墩身外包加固的墩顶水平位移都是最小的,且相较桥墩原型减小幅度都是最大的,因此判断墩身外包加固可以更加有效地抑制墩顶水平位移;在 2 种荷载工况下,“增大基础和增补桩基”组合加固的基底截面最大应力都是最小的,且相较桥墩原型减小幅度都是最大的,因此判断“增大基础和增补桩基”组合加固可以有效减少基底截面应力。

3 不同加固条件下桥墩动力性能对比试验

因条件限制,实际工程中无法在同一桥墩上进行加固方法对比试验。因此,现场选择桥墩类型相近的 3 座桥梁进行不同加固方法的应用对比,基于运营性能试验,探索不同加固方法对桥墩动力性能的影响。

3.1 工程概况

具体桥墩及加固情况如下:1 号桥为双线桥,钢筋混凝土双柱式矩形桥墩,扩大基础,桥墩采用墩身连接加固;2 号桥为双线桥,钢筋混凝土双柱式圆端形板式桥墩,钻孔灌注桩基础,桥墩采用“增大基础和增补桩基”组合加固;3 号桥为双线桥,钢筋混凝土双圆柱桥墩,扩大基础,桥墩采用墩身外包加固。加固桥梁概况见图 7。



图 7 加固桥梁概况

3.2 试验内容与方法

运营性能试验采用正常运营列车作为加载列车,实时监测加固前后桥墩及桥跨控制参数的变化规律,包括墩顶横向振幅和跨中横向振幅 2 个参数。每个桥墩墩顶上方布置 2 个测点,桥梁跨中布置 1 个测点。现场监测采用 891-II 型拾振器、INV 系列数据采集仪及相关设备组成桥梁无线监测系统,采样频率 256.0 Hz,数据采集由列车到达信号自动触发,实时预警。

3.3 结果与分析

1、2、3 号桥加固前后墩顶、跨中横向振幅最大值和平均值对比见表 1。

表 1 不同加固条件下桥跨动力性能对比

桥梁	参数	加固前/mm		加固后/mm		抑制比/%	
		最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
1 号桥	6 号墩顶横向振幅	0.40	0.17	0.36	0.22	10.00	—
	7 号墩顶横向振幅	0.70	0.17	1.11	0.29	—	—
	8 号墩顶横向振幅	0.35	0.15	0.39	0.19	—	—
	7 孔跨中横向振幅	0.43	0.15	0.39	0.23	9.30	—
2 号桥	1 号墩顶横向振幅	0.11	0.04	0.15	0.07	—	—
	5 号墩顶横向振幅	0.17	0.09	0.12	0.07	29.41	22.22
	12 号墩顶横向振幅	0.12	0.06	0.14	0.08	—	—
	5 孔跨中横向振幅	0.75	0.33	0.41	0.18	45.33	45.45
3 号桥	1 号墩顶横向振幅	0.79	0.56	0.32	0.21	59.49	62.50
	2 号墩顶横向振幅	0.49	0.33	0.25	0.15	48.97	54.54
	3 号墩顶横向振幅	0.53	0.27	0.33	0.12	37.73	55.55
	4 号墩顶横向振幅	0.75	0.31	0.19	0.11	74.66	64.51
	1 孔跨中横向振幅	0.96	0.66	0.95	0.40	1.00	39.39

由表 1 可得,1 号桥加固后,7 号墩、8 号墩墩顶横向振幅最大值和平均值分别由 0.70、0.17 mm 和 0.35、0.15 mm,变化至 1.11、0.29 mm 和 0.39、0.19 mm,最大值和平均值均有所增加,加固后 6 号墩墩顶横向振幅最大值和平均值由 0.40、0.17 mm 变化至 0.36、0.22 mm,最大值略有下降,降低幅度为 10.00%,平均值则有所增加。加固后第 7 孔跨中横向振幅最大值和平均值由 0.43、0.15 mm 变化至 0.39、0.23 mm,最大值略有下降,降低幅度为 9.30%,平均值有所增加。

2 号桥加固后,1 号墩、12 号墩墩顶横向振幅最大值和平均值分别由 0.11、0.04 mm 和 0.12、0.06 mm 变化至 0.15、0.07 mm 和 0.14、0.08 mm,最大值和平均值均有所增加;加固后 5 号墩墩顶横向振幅的最大值和平均值分别由 0.17、0.09 mm 降低至 0.12、0.07 mm,最大值降低幅度为 29.41%,平均值降低幅度为 22.22%。加固后第 5 孔跨中横向振幅最大值和平均值分别由 0.75、0.33 mm 降低至 0.41、0.18 mm,最大值降低幅度为 45.33%,平均值降低幅度为 45.45%。

3 号桥加固前,2 号墩、3 号墩墩顶横向振幅最大值和平均值分别为 0.49、0.33 mm 和 0.53、0.27 mm;1 号墩、4 号墩墩顶横向振幅最大值和平均值分别为 0.79、0.56 mm 和 0.75、0.31 mm,且 1 号墩墩顶横向振幅平均值与最大值较为接近。加固后,1 号至 4 号墩墩顶横向振幅最大值依次为 0.32、0.25、0.33、0.19 mm,均在 0.4 mm 以下,相较加固前,最大降低幅度为 74.66%,平均降低幅度为 55.21%;墩顶横向振幅平均值依次为 0.21、0.15、0.12、0.11 mm,均在 0.3 mm 以下,相较加固前,最大降低幅度为 64.51%,平均降低幅度为 59.28%。加固后第 1 孔跨中横向振幅最大值和平均值分别由 0.96 mm 和 0.66 mm 降低至 0.95 mm 和 0.40 mm,最大值变化并不明显,平均值降低幅度为 39.39%。

对比 3 座桥梁在不同桥墩加固条件下的动力性能可以得到,加固后,3 号桥 1 号墩至 4 号墩墩顶横向振幅最大值抑制比介于 30%~75%之间,平均值抑制比介于 50%~70%之间;2 号桥 5 号墩墩顶横向振幅最大值和平均值抑制比均介于 20%~30%之间;1 号桥 6 号墩墩顶横向振幅最大值抑制比为 10%,平均值在加固后则有所增加。加固后,3 号桥 1 孔跨中横向振幅最大值与加固前相差不大,平均值抑制比为 39.39%;2 号桥 5 孔跨中横向振幅最大值和平均值的抑制比分别为 45.33%和 45.45%;1 号桥 7 孔跨中横向振幅最大值抑制比为 9.30%,平均值在加固后有所增加。

1 号桥和 2 号桥在分别进行墩身连接加固和“增大基础和增补桩基”组合加固后,出现部分振幅增大的情况,由相关施工资料可知,1、2 号桥加固施工包括基础开挖、钻孔、植筋、浇筑混凝土等工作,分析振幅增大原因可能是由于施工中基础开挖、钻孔等对基础周围土层和基底持力层产生干扰,影响基础稳定性,从而引起部分振幅增大,但 1 号桥和 2 号桥墩顶横向振幅和跨中横向振幅均未超过规范和相关研究成果规定^[9-10],可以认为桥跨结构比较稳定。

4 基于性能提升的桥墩加固技术优化研究

4.1 优化设计原则及方法

基于保障结构安全和重载列车运营安全原则,桥墩加固设计应从提高桥墩刚度、基础稳定性和承载能力等方面综合考虑,以达到减振抑振,保障安全目的。提出“增大基础+增补桩基+墩身外包”三重加固方法。加固设计示意图 8。

具体加固设计如下:①在既有承台四周增加一定数量的桩基;②将既有承台长、宽、高各方向尺寸进行加大,新增桩基和承台连接在一起共同受力,提高基础承载能力和稳定性,同时也降低了墩身高度;③将原桥墩采用墩身外包加固成圆端形板式墩,进一步提高墩身刚度和稳定性。

4.2 静力性能对比

利用 ANSYS 建立桥墩优化加固模型,桥

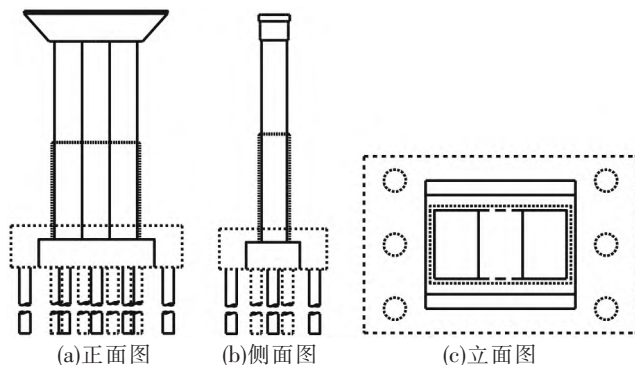


图 8 加固方法优化设计

墩外包混凝土高度为 9 m, 厚度 20 cm, 强度等级为 C40; 原承台横、纵向尺寸同时增加 4 m, 高度增加 1 m, 加固后承台尺寸为 10.8 m×8.5 m×3 m; 增补钻孔灌注桩 12 根, 桩长为 24 m, 桩径 0.8 m, 新增承台和钻孔桩混凝土强度等级均为 C35。按照 2.2 节中荷载工况对采用“增大基础+增补桩基+墩身外包”三重加固(简称三重加固)后的桥墩进行静力性能分析, 计算结果见表 2。

表 2 三重加固静力计算结果

荷载工况	墩顶水平位移		基底截面最大应力	
	位移/mm	降低率/%	应力/MPa	降低率/%
工况 1	0.901	28.09	0.462	52.56
工况 2	1.149	42.80	0.482	53.56

由静力计算结果可得, 采用“增大基础+增补桩基+墩身外包”三重加固后, 在 2 种荷载工况下, 相较于桥墩原型, 墩顶水平位移降低幅度分别为 28.09% 和 42.80%, 基底截面最大应力降低幅度分别为 52.56% 和 53.56%; 相较于墩身连接加固, 墩身外包加固, “增大基础和增补桩基”组合加固, 墩顶水平位移降低幅度分别为 26.82%、7.82%、18.04% 和 22.25%、7.81%、29.07%; 基底截面最大应力降低幅度分别为 30.99%、28.46%、9.12% 和 37.19%、36.13%、10.60%。采用该方法加固后, 桥墩刚度显著提高。

4.3 动力响应对比

采用 ANSYS 分别建立不同加固方法的全桥模型, 见图 9。桥跨为 2 孔 32 m 预应力混凝土简支 T 梁, 梁体混凝土强度等级为 C50; 单孔 T 梁布置 20 束 24Φ5 mm 钢丝束, 采用 LINK8 单元模拟, 通过初应变法实现预应力的模拟。

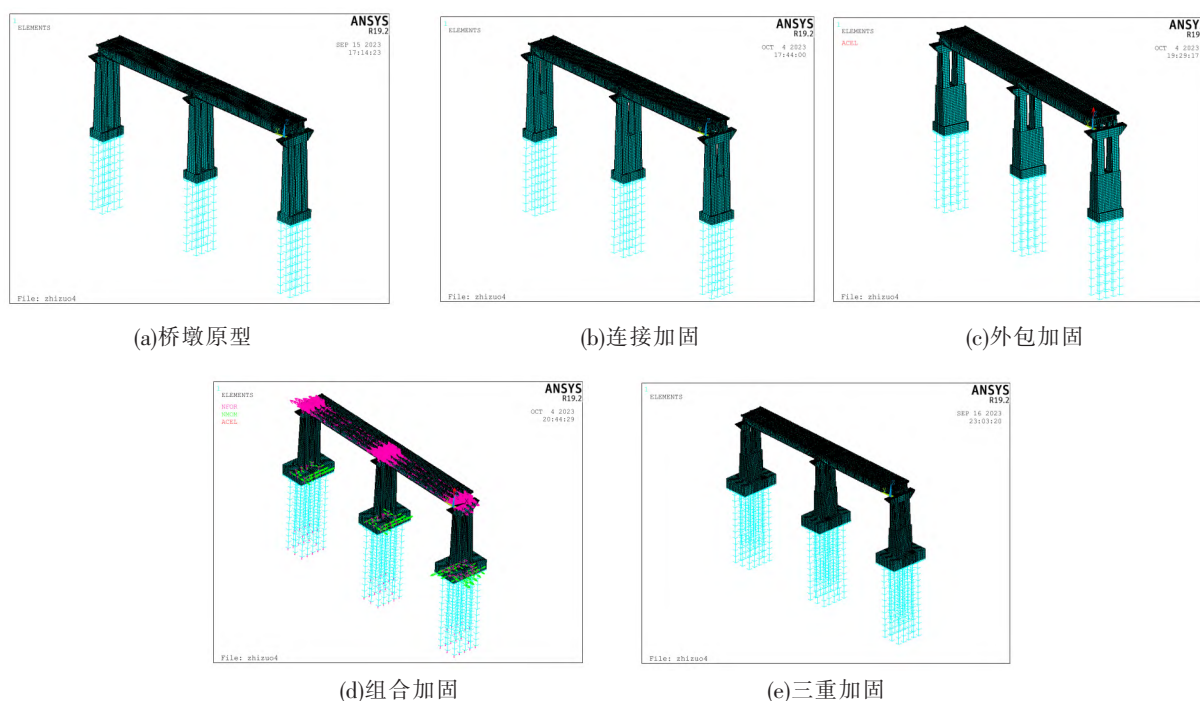


图 9 不同加固条件下全桥模型

采用移动荷载法^[11-12]计算 C80 列车以 50、60、70、80 km/h 不同速度通过桥梁时, 不同加固条件下桥梁的动力响应, 列车荷载包括竖向轴重荷载和轮对横向摇摆力。竖向荷载大小为 250 kN, 在空间位置上与 C80 列车相对应; 轮对横向摇摆力取 27.5 kN。计算结果见图 10。

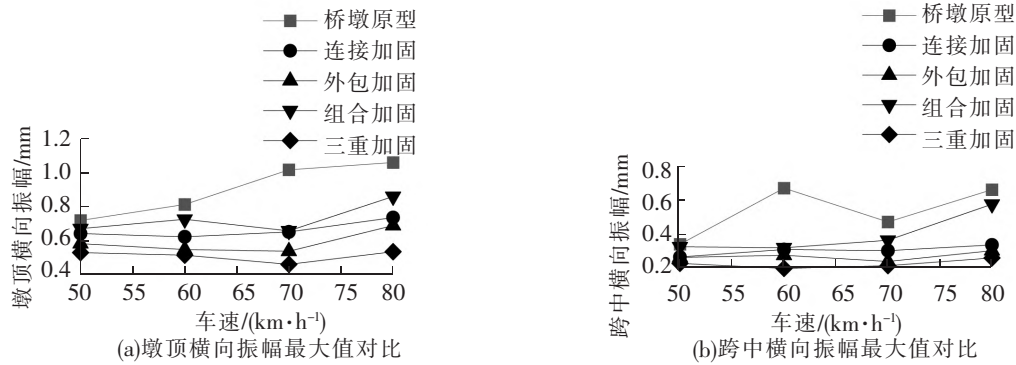


图 10 不同加固条件下桥梁动力响应对比

由图 10 可知,采用 3 种常规方法加固后,不同车速下墩顶和跨中横向振幅均有效减小。其中,墩身连接加固后,墩顶横向振幅平均降低幅度为 25.16%,最大降低幅度为 35.92%;墩身外包加固后,墩顶横向振幅平均降低幅度为 33.43%,最大降低幅度为 47.14%;“增大基础和增补桩基”组合加固后,墩顶横向振幅平均降低幅度为 17.90%,最大降低幅度为 35.33%。3 种加固方法的墩顶横向振幅平均降低幅度在 17%~34%之间,最大降低幅度在 35%~50%之间,相差不大。

墩身连接加固后,跨中横向振幅平均降低幅度为 40.42%,最大降低幅度为 54.09%;墩身外包加固后,跨中横向振幅平均降低幅度为 46.59%,最大降低幅度为 59.16%;“增大基础和增补桩基”组合加固后,跨中横向振幅平均降低幅度为 20.28%,最大降低幅度为 52.60%。3 种加固方法的跨中横向振幅平均降低幅度在 20%~50%之间,最大降低幅度均在 55%左右,相差不大。

采用“增大基础+增补桩基+墩身外包”三重加固后,墩顶横向振幅平均降低幅度为 41.83%,最大降低幅度为 54.72%;跨中横向振幅平均降低幅度为 55.03%,最大降低幅度为 70.78%。在采用该优化方法加固后,相较 3 种常规加固方法,墩顶和跨中横向振幅明显减小。

5 结论

针对 3 种双柱式桥墩加固方法,对比研究了不同加固方法对桥墩静、动力性能的影响规律,并基于桥墩性能提升需求,提出“增大基础+增补桩基+墩身外包”三重加固法,主要结论如下:

(1) 3 种常规加固方法的静力计算结果表明,墩身外包加固对墩顶水平位移的抑制最为有效,在 2 个静力荷载工况下,墩顶水平位移分别降低 20.27%、34.99%;“增大基础和增补桩基”组合加固对基底截面应力的抑制最为有效,在 2 个静力荷载工况下,基底截面最大应力分别降低 43.44%、42.96%。

(2) 3 种常规加固方法的动力计算结果表明,3 种常规加固方法均可以有效降低墩顶和跨中横向振幅,墩顶横向振幅的最大降低幅度在 35%~50%之间;跨中横向振幅的最大降低幅度均在 55%左右,加固效果相差不大。

(3) 采用优化后的“增大基础+增补桩基+墩身外包”三重加固法,在 2 个静力荷载工况下,墩顶水平位移分别降低了 28.09%、42.80%,基底截面最大应力均降低 53%左右;动力计算结果表明,墩顶横向振幅最大降低幅度超过 50%,跨中横向振幅最大降低幅度超过 70%。

(4) 相较于常规加固技术,“增大基础+增补桩基+墩身外包”三重加固法能更好地提高桥墩刚度和稳定性,降低结构动力响应。

参 考 文 献

- [1]黄先国. 重载运输条件下双线双柱式桥墩横向刚度加固方法[J]. 铁道建筑, 2016, 56(6): 15-18.
- [2]黄洪猛, 徐登云, 路隼. 既有铁路浅基桥墩的加固设计和施工技术[J]. 铁道建筑, 2019, 59(3): 26-30.
- [3]陈树礼, 柳墩利, 田波, 等. 重载铁路水冲受损桥墩组合加固技术[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(1): 42-47.
- [4]陈令坤, 曾志平, 蒋丽忠. 双柱式轻型桥墩既有线路桥梁加固方案动力分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学

版), 2010, 42(2): 211-215.

- [5]肖祥淋, 蔡超勋, 朱希同, 等. 朔黄铁路双柱式轻型桥墩动载试验与强化改造方案研究[J]. 铁道建筑, 2015, 55(2): 1-4.
- [6]符成, 朱俊, 方波. 桩-土-承台相互作用的有限元简化模型[J]. 水运工程, 2018(11): 193-198.
- [7]国家铁路局. 铁路桥涵地基和基础设计规范: TB 10093—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [8]景娅星. 地震作用下铁路简支梁桥反应与灾后承载力评定[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- [9]国家铁路局. 铁路桥梁检定规范: 铁运函 [2004] 120 号[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [10]李运生, 阎贵平, 王元清, 等. 铁路桥墩横向刚度设计标准的研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(1): 44-48.
- [11]田亚军. 重载铁路曲线高墩桥梁横向振动性能研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- [12]龙卫国. 既有重载铁路桥梁提高轴重适应性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.

Optimization Research on Reinforcement Technology of Double-column Piers of Heavy Haul Railway

CHEN Shuli^{1,2}, LI Yihao³, ZHANG Jiangong³, WANG Zetao³, QI Jianquan³

(1. School of Safety Engineering and Emergency Management,
Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of Structural Health Monitoring and Control,
Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to explore the optimal design method of bridge pier reinforcement based on performance improvement, this paper takes a large number of separated double-column piers in heavy haul railway as the object. Based on the numerical simulation analysis and the operation performance test of bridge pier reinforcement, the static performance comparison analysis and dynamic performance comparison test of bridge piers under the reinforcement conditions of three common methods are carried out, and the reinforcement technology optimization research is carried out. The results show that under the design load, the reinforcement of the pier body has a good effect on suppressing the horizontal displacement of the pier top, while the combined reinforcement of “increasing the foundation and supplementing the pile foundation” can effectively reduce the stress of the base section. Under the action of operating trains, the lateral amplitude of the pier top of the three methods of reinforcement conditions is reduced to varying degrees compared with that before reinforcement, but some piers are affected by construction and other factors, and the amplitude increases. The optimized triple reinforcement method of “increasing foundation + adding pile foundation + pier body outsourcing” is adopted, and the lateral amplitude of pier top is reduced by more than 50%, which can well meet the needs of strengthening and reconstruction of double-column piers of heavy haul railway.

Key words: heavy haul railway; double-column piers; reinforcement technology; numerical simulation; field test; optimization design