

波纹板加固重载铁路涵洞动力性能分析与试验*

陈树礼¹, 崔春锴², 杜明康², 许宏伟²

(1. 石家庄铁道大学安全工程与应急管理学院 石家庄, 050043)

(2. 石家庄铁道大学土木工程学院 石家庄, 050043)

摘要 为研究波纹板技术在重载铁路盖板涵加固应用中的动力适应性问题,以某既有铁路涵洞重载扩能改造为背景,采用现场试验和数值模拟相结合的方法,开展大轴重重载列车条件下波纹板加固既有铁路盖板涵动力性能分析与试验研究。结果表明:采用波纹板加固后,盖板涵顶板受力和变形显著降低,实测动挠度和动应变最大值较加固前降低近 50%,波纹板加固提高了涵洞整体刚度。列车正常运营条件下,数值模拟和现场实测结果数据吻合程度较好,各关键点动力响应曲线基本一致。列车提速及提轴列车条件下,盖板涵顶板跨中横向加速度、竖向加速度与速度、轴重基本呈线性变化规律,跨中横向振幅及竖向振幅与速度关系则不明显,加固后的盖板涵动力性能满足 35.0 t 轴重列车 80 km/h 的通行要求。

关键词 波纹板;重载铁路;盖板涵;动力性能;现场试验;数值模拟

中图分类号 U24;TH123

引言

因具有构造简单、施工便捷等优点,盖板涵在中国既有铁路中得到广泛应用。随着大轴重、高密度和长编组的重载列车常态化开行,荷载效应与冲击作用显著增大,既有铁路盖板涵易出现开裂、掉块、漏筋、锈蚀、变形和下沉等系列病害,严重影响了列车安全运营。目前,波纹板加固已成为加固改造重载铁路涵洞的主要方法之一^[1-2]。采用波纹板加固后,既有涵洞和新增波纹板组合为整体结构而共同受力,但加固后涵洞的动力性能是否满足大轴重运输要求仍需重点关注。

围绕波纹板加固技术及其在重载铁路中的应用问题,国内外学者开展了深入研究并取得丰富成果。在病害成因研究方面,于本田等^[3]从运行荷载、设计和施工方面分析了重载铁路涵洞病害成因。在加固方法研究方面,杨心怡等^[4]分析了粘贴钢板、增大截面、局部改建框构等方法的加固效果。在波纹板加固病害涵洞研究方面,针对出现掉块、漏筋及腐蚀等病害的重载铁路涵洞,田英等^[5]提出了波纹板加固技术并进行了实际工程应用。在有关国外波纹板加固涵洞研究方面,Heo 等^[6]研究了圆形延展性地下钢波纹管涵垂直土压力的分布情况;Guo 等^[7]采用

对既有病害涵洞进行现场监测与数值模拟相结合的方法,研究了钢波纹板加固病害盖板涵受力状态。

在重载铁路加固体系振动方面,杨静静等^[8]采用平面车辆模型过桥的方式,研究了车辆通过加固体系时的动力响应状态及加速度。文献[9-10]重点研究了适用于结构动力性能领域的动态测试方法和数据分析技术。然而,以上研究主要集中在波纹板加固机理和施工技术方面,涉及波纹板加固涵洞前后动力特性的研究较少。此外,重载运输条件下的盖板涵加固动力特性分析与试验基本处于空白。

笔者以某既有重载铁路涵洞扩能改造为背景,开展正常运营列车条件下波纹板加固涵洞动力性能试验,以及提速、提轴作用下的盖板涵动力适应性研究,探索轴重、速度等参数差异对波纹板加固效果的影响规律,以期后续类似工程提供技术参考。

1 波纹板加固涵洞受力机理

盖板涵是既有铁路涵洞中最常见的结构类型,主要由侧墙、盖板两部分组成,其中盖板属于最基本的简支结构体系,主要承受弯矩和剪力作用。对于既有铁路中跨度为 5.0 m 及以下的涵洞,结构受力和变形主要受轴重和轴距控制,大轴重运输条件对

* 国家自然科学基金资助项目(52008272);河北省重点研发资助项目(20375410D);河北省省级科技计划资助项目(22A0802D)

收稿日期:2022-09-26;修回日期:2022-12-05

其影响最为显著。随着荷载或轴重逐渐增加,其荷载效应逐渐增大,且活载储备量明显降低,加固涵洞的基本原则是通过加固措施实现荷载分担而减小结构受力和变形。对盖板涵采用波纹板进行加固,是在既有涵洞侧墙和盖板的内轮廓处增设波纹板,并采用砂浆将既有涵洞结构和增设波纹板复合为一个整体,在既有涵洞内嵌入一套波纹板拼装组成的框架结构,实现共同受力。

拼装波纹板结构是将不同厚度的金属板材沿受力方向加工成波纹形状,通过螺栓连接,并沿非受力方向加工成圆形、拱形或矩形的承载结构。不同材质板材压制成波纹板结构后,其环向抗弯刚度、抗弯承载能力、抗剪能力和抗压强度较平板结构显著增强,受力面积增大,因而结构受力得到大大优化。采用波纹板加固涵洞后,拼装波纹板和既有涵洞共同受力。图 1 为波纹板加固涵洞受力传递机理。

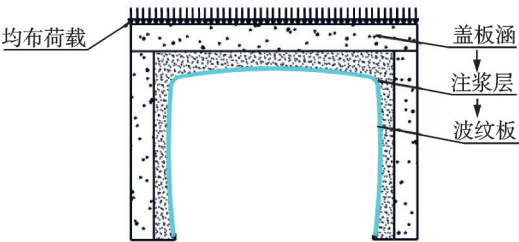


图 1 波纹板加固涵洞受力传递机理
Fig.1 Force transmission mechanism of corrugated plate reinforced culvert

2 波纹板加固涵洞动力试验

2.1 工程概况

某重载铁路为中国重要的运煤专线,5.0 m 跨度盖板涵类型的涵洞较多,针对其中 4 座 5.0 m 跨度盖板涵开展加固施工和动力试验。根据现场调研资料,4 座涵洞均为双线盖板涵,填土厚度为 0.60~0.70 m,顶部盖板宽为 2.5 m、长为 5.5 m、厚度为 0.50 m,沿横向布置(数量以实际设计为准),为 C40 混凝土材质;涵洞侧墙为钢筋混凝土结构,厚度为 0.68 m,为 C35 混凝土材质;在 25.0 t 及以上轴重列车作用下,涵洞顶板相继出现了开裂、掉块和渗水等病害。为处治既有病害并提高承载力,采用波纹板加固技术对涵洞进行加固。

4 座加固涵洞参数见表 1,其中 K276+230 表示 276 km+230 m 位置的涵洞,其他参数含义同理。图 2 为既有涵洞波纹板加固前后图。在具体加固时,波纹板选用(波距×波高)200 mm×55 mm 圆弧

波形,材质为 Q345,厚度为 8 mm。波纹板之间采用 M20 纳米复合粉末镀锌高强螺栓连接,并通过纳米复合粉末渗锌处理进行防腐。波纹板与盖板涵之间注入厚度约 10 cm 的微膨胀 M10 级水泥砂浆,并分别预留直径为 50 mm 镀锌注浆管与排气管。新做波纹板基础为 C30 混凝土,与既有涵基础植筋时采用 HRB400 纳米复合粉末渗锌钢筋。

表 1 加固涵洞参数
Tab.1 Parameters of reinforcement culvert

涵洞	跨径/m	波纹板类型	涵长/m	里程/km
A	5	圆弧形	13.09	K276+230
B	5	圆弧形	13.36	K278+983
C	5	圆弧形	12.12	K303+309
D	5	圆弧形	12.09	K309+883



图 2 既有涵洞波纹板加固前后图
Fig.2 Before and after corrugated plate reinforcement of existing culvert

2.2 试验内容与方法

加固前,在涵洞顶板跨中钢筋上粘贴应变片,实现加固前后涵洞混凝土顶板动应变测试。同时在涵洞顶板跨中布置挠度测点,实现加固前动挠度测试。加固后,在加固前涵洞顶板钢筋应变下方波纹板对应位置布置应变测点,实现加固后波纹板动应力测试。同时在加固前挠度测点位置下方波纹板上布置挠度测点,实现加固后涵洞整体动挠度测试。当测点布置完成后,对各测点进行调试、校对。其中 4 个涵洞测试应变片及挠度检测仪器规格相同,加固前测点布置与加固后测点布置见图 3 和图 4。

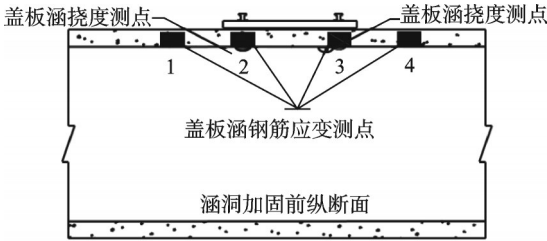


图 3 加固前测点布置
Fig.3 Layout of measuring points before reinforcement

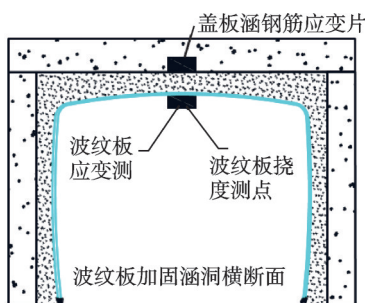


图4 加固后测点布置

Fig.4 Layout of measuring points after reinforcement

动挠度测试选择日本SDP-50系列位移计,测试精度为0.01 mm;数据采集、分析和处理采用德国IMC系列数据采集和处理系统。正式试验时,采用正常运营列车作为试验列车,车辆主要为C70型敞车。实测数据最大值是所有列车作用下的各测试参数最大值,平均值是所有测试数据的算术平均值。图5为波纹板加固前后检测仪器设备。

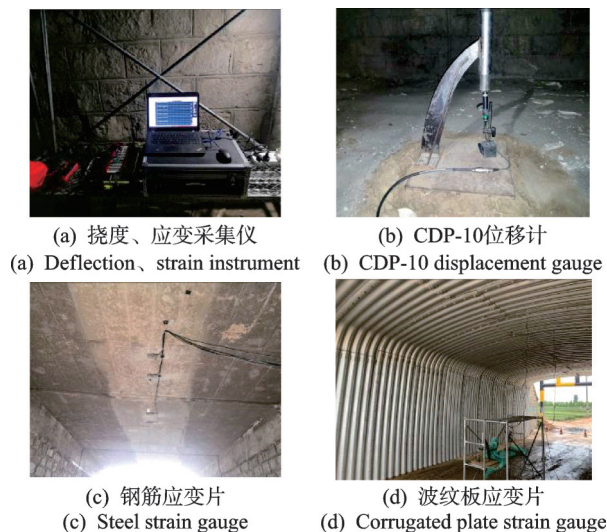


图5 波纹板加固前后检测仪器设备

Fig.5 Detection equipment before and after corrugated plate reinforcement

2.3 试验结果分析

竖向动挠度与动应变在一定程度上反映了涵洞的竖向刚度和所承受荷载的大小,与列车运行速度、轴重、结构本身有关,图6为A、B、C、D涵洞跨中重车线内4个测点加固前后测点动应变变化。正常运营列车作用下,4座涵洞经波纹板加固后钢筋动应变明显减小,且差异性较为明显。计算得到加固前后A、B、C、D涵洞跨中钢筋动应变平均减小率分别为45.1%、39.2%、33.5%、53.6%,说明波纹板加固不仅提升了涵洞刚度,也减小了涵洞顶板受力。

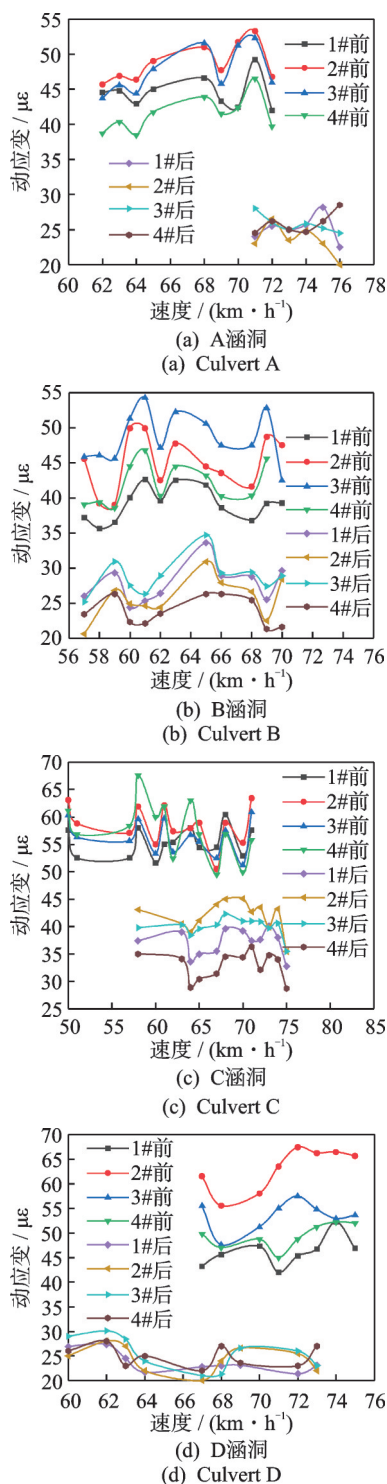


图6 加固前后测点动应变变化

Fig.6 Dynamic strain changes of measuring points before and after reinforcement

表2为涵洞加固前后测试数据对比,4座重载铁路盖板涵经钢波纹板加固后,跨中动应变与动挠度较加固前显著降低,且动挠度减小幅度略大于动应变,实测平均值与最大值均体现了这一规律。在不同速度列车作用下,4座盖板涵加固前后平均动挠度分别介于0.64~1.27 mm和0.35~0.51 mm之间,

平均减小率为 46.5%;动挠度最大值分别介于 0.66~1.4 mm 和 0.40~0.61 mm 之间,平均减小率为 44.6%;加固后涵洞动挠度减小幅度较大,且挠跨比均小于 1/4 000。4 座盖板涵经波纹板加固后,动应变平均减小率介于 36.4%~60.8% 之间,最大值动应变平均减小率介于 31.1%~58.1% 之间。由实测结果可知,4 座涵洞经波纹板加固后,涵洞刚度和稳定性得到明显提高,加固效果显著。

表 2 涵洞加固前后测试数据对比

Tab.2 Comparison of test data before and after culvert reinforcement

参数	工况	A	B	C	D
挠度平均值	加固前/mm	0.64	0.58	0.80	1.27
	加固后/mm	0.38	0.41	0.35	0.51
	减小率/%	40.6	29.3	56.3	59.8
挠度最大值	加固前/mm	0.66	0.69	0.84	1.40
	加固后/mm	0.42	0.46	0.40	0.61
	减小率/%	36.4	33.3	52.4	56.4
应变平均值	加固前/ $\mu\epsilon$	57.0	55.0	60.0	69.0
	加固后/ $\mu\epsilon$	36.0	35.0	30.0	27.0
	减小率/%	36.8	36.4	50.0	60.8
应变最大值	加固前/ $\mu\epsilon$	61.0	79.0	65.0	74.0
	加固后/ $\mu\epsilon$	42.0	41.0	36.0	31.0
	减小率/%	31.1	48.1	44.6	58.1

3 运营条件下涵洞动力特性分析

3.1 模型及分析方法

为更好地模拟波纹板加固涵洞的动力性能,采用 ANSYS 建立瞬态动力模型,研究钢波纹板结构在不同速度条件下,立柱中部横向动挠度、加速度及跨中竖向振幅、动应变、Mises 应力随时间的变化规律,并以此评判波纹板对涵洞加固效果的影响。

波纹板加固涵洞模型长为 8.8 m,宽为 16.0 m,在主力组合荷载作用下,钢波纹板选择壳单元 SHELL63,实体单元为 SOLID45、SOLID65。为进一步提高力的传递效率,采用多点约束(Multi-point constraints,简称 MPC)耦合方法,在 SHELL63 与 SOLID45 之间设置接触单元 CONTA175 和 TARGE170,以此实现壳与实体之间的连接,并设置弹性地基,波纹板及波纹板加固涵洞的有限元模型见图 7。

计算时采用主力组合,考虑结构自重,进一步对模型进行简化。钢轨、轨枕、道砟等恒载根据《铁路

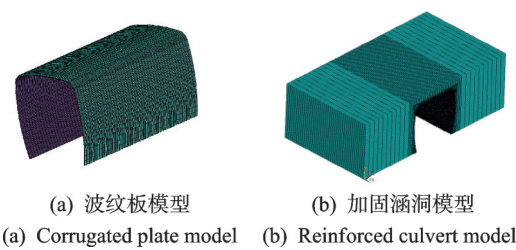
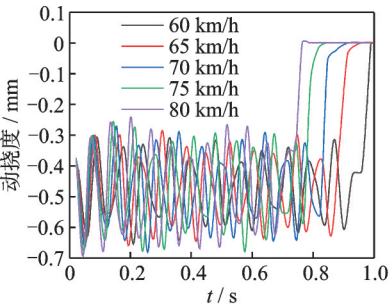


图 7 有限元模型
Fig.7 Finite element model

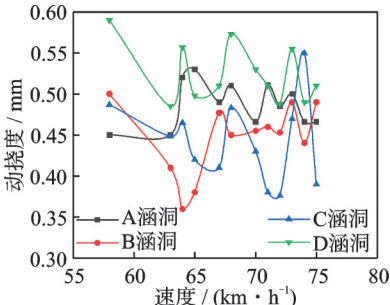
桥涵设计规范》TB 10002—2017 进行取值计算,采用 ZH 活载(重载铁路列车荷载)施加在作用面上。考虑动力试验中测试车辆多为 C70 型,因此在动力数值模拟过程中以 C70-23 t 为移动荷载列,并以 60、65、70、75 和 80 km/h 共 5 种速度通过涵洞。

3.2 模型验证

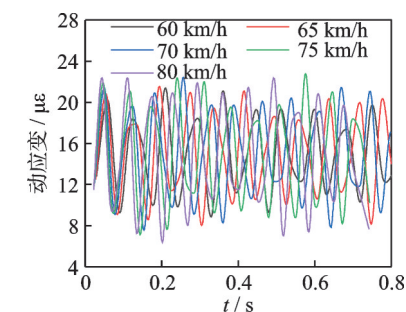
波纹板跨中动挠度与动应变是检验加固效果的关键指标,其数值在一定程度上反映了结构整体的刚度和稳定性。图 8 为波纹板跨中动挠度和动应变对比分析。通过图 8 可知,移动列车荷载作用下,波纹板动力模拟跨中动挠度介于 0.2~0.7 mm 之间,平均动挠度为 0.473 mm;与此对应的 4 座涵洞动力试验跨中平均动挠度介于 0.44~0.52 mm 范围内,平均动挠度为 0.475 mm,挠跨比均小于 1/4 000,可以认为有限元模型和分析方法较为合理。此外,数



(a) 数值模拟跨中竖向动挠度
(a) Numerical simulation of mid-span vertical dynamic deflection

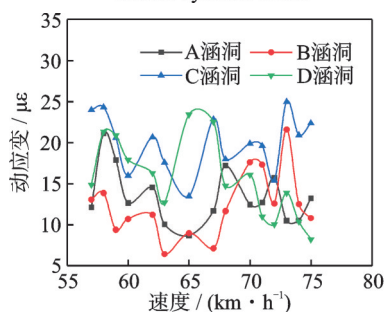


(b) 动力试验跨中同车速平均动挠度
(b) Average dynamic deflection of the same vehicle speed in the dynamic test span



(c) 数值模拟跨中竖向动应变

(c) Numerical simulation of mid-span vertical dynamic strain



(d) 动力试验跨中车速平均动应变

(d) Average dynamic strain at the same vehicle speed in the dynamic test span

图8 波纹板跨中动挠度和动应变对比分析

Fig.8 Comparative analysis of dynamic deflection and

dynamic strain in the span of corrugated plate

值模拟跨中竖向平均动应变为 $14.82 \mu\epsilon$, 动力试验跨中平均动应变为 $15.32 \mu\epsilon$, 动力模拟较动力试验平均动应变减小 3.26% , 可以认为有限元模型和分析方法较为合理。

3.3 振动频率

采用德国 IMC 数据采集系统对 4 座盖板涵进行振动数据采集, 并利用 ANSYS 软件进行模态分析, 表 3 为涵洞加固前后自振频率。通过 Coinv DRSP 软件自谱分析得到 4 座盖板涵加固前后的一阶频率, 代表涵洞整体竖弯。由表 3 可知, 4 座涵洞加固前的自振频率均小于加固后的自振频率, 且加固后自振频率达到加固前的 3 倍以上, 说明盖板涵经波纹板加固后, 其竖向刚度得到明显改善。

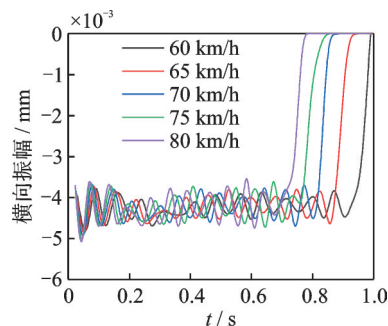
表 3 涵洞加固前后自振频率

Tab.3 Self-vibration frequency before and after culvert reinforcement			
涵洞	加固前实测值	加固后实测值	加固后计算值
A	1.36	5.21	4.83
B	1.65	5.43	
C	1.66	5.12	
D	1.47	5.36	

3.4 跨中振动结果与分析

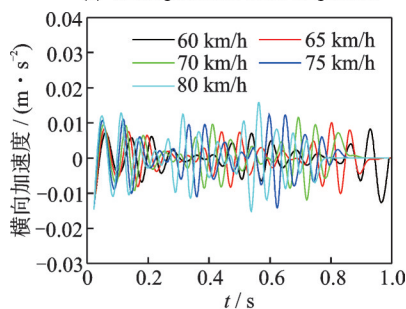
采用 ANSYS 软件建立波纹板加固涵洞瞬态动力模型, 模拟在 C70 型 (23.0 t 轴重) 正常运行列车动力荷载作用下的振动结果, 不同速度列车对加固涵洞波纹板振动与受力结果分析如图 9 所示。

分析图 9 可知, 波纹板在动力荷载作用下, 不同



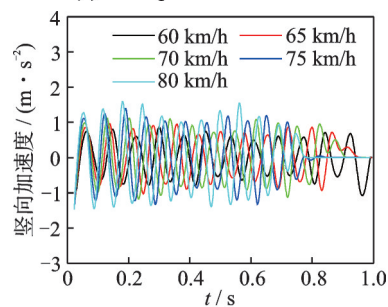
(a) 跨中横向振幅

(a) Mid-span transverse amplitude



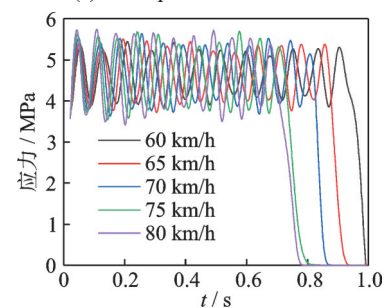
(b) 跨中横向加速度

(b) Mid-span transverse acceleration



(c) 跨中竖向加速度

(c) Mid-span vertical acceleration



(d) 跨中Mises应力

(d) Mid-span Mises stress

图9 波纹板振动与受力结果分析

Fig.9 Vibration and force analysis of corrugated plate

速度的动力响应曲线差异较为明显。跨中横向振幅随着速度增大而增大,说明列车速度影响涵洞的振动幅度;波纹板跨中横向振幅对加固涵洞影响较小,考虑盖板涵经波纹板加固后由静定结构转化为超静定结构,横向刚度增大;跨中横、竖向加速度也表现为随着速度增大而增大的特点,说明列车速度也影响涵洞横、竖向加速度的大小;在图 9(d)中,Mises 应力时程曲线 5 种时速波纹板跨中 Mises 应力最大值分别为 5.63、5.67、5.85、5.91 和 5.92 MPa,均小于 Q345 钢材容许应力的 120 MPa,满足设计和检定要求,安全储备充足。

4 提速、提轴条件下涵洞动力特性

4.1 计算工况

鉴于现行运营列车对远期提速和提高轴重的运输需求,本节开展提速、提轴条件下的波纹板加固盖板涵动力性能分析研究,并在计算时考虑不同列车轴重和速度组合。在具体计算时,仍以 5.0 m 跨径加固盖板涵为例,采用 ANSYS 软件建立差异化的动力组合分析模型,车辆选择 C64 (21.0 t 轴重)、C70 (23.0 t 轴重)、C80 (25.0 t 轴重和 27.0 t 轴重)与 KM98 (30.0 t 轴重)共 5 种类型,并考虑更大的 32.0 t 轴重和 35.0 t 轴重列车;考虑速度范围为 60~100 km/h,级差 5 km/h,共 9 种速度。

4.2 加速度和振幅结果与分析

图 10 为波纹板跨中横向与竖向振动,展示了提速、提轴列车作用下,波纹板加固涵洞跨中横向加速度、竖向加速度、横向振幅和竖向动挠度动力响应曲线。其中,挠度和加速度是评判加固涵洞振动和刚度的重要因素,其数值在一定程度上反应了结构刚度和稳定性。由图 10 可知,随着轴重增加,各动力响应逐渐增大,增长幅度与轴重增加成正比关系;在相同轴重条件下,横、竖向动力加速度随着列车速度增加而增加,跨中横、竖向动挠度随着速度增大变化不明显。可以认为,轴重是影响动挠度的关键因素。

此外,在不同轴重列车作用下,波纹板跨中横向加速度和振幅分别介于 0.000 2~0.001 2 m/s²和 0.004 0~0.005 5 mm,波纹板跨中横向动力响应较小。在相同轴重列车作用下,波纹板跨中横、竖向加速度可以分为 2 个变化趋势。列车速度在 60~80 km/h 范围内时,波纹板跨中横、竖向加速度缓慢增大,列车速度由 80 km/h 提升到 100 km/h 时,横、

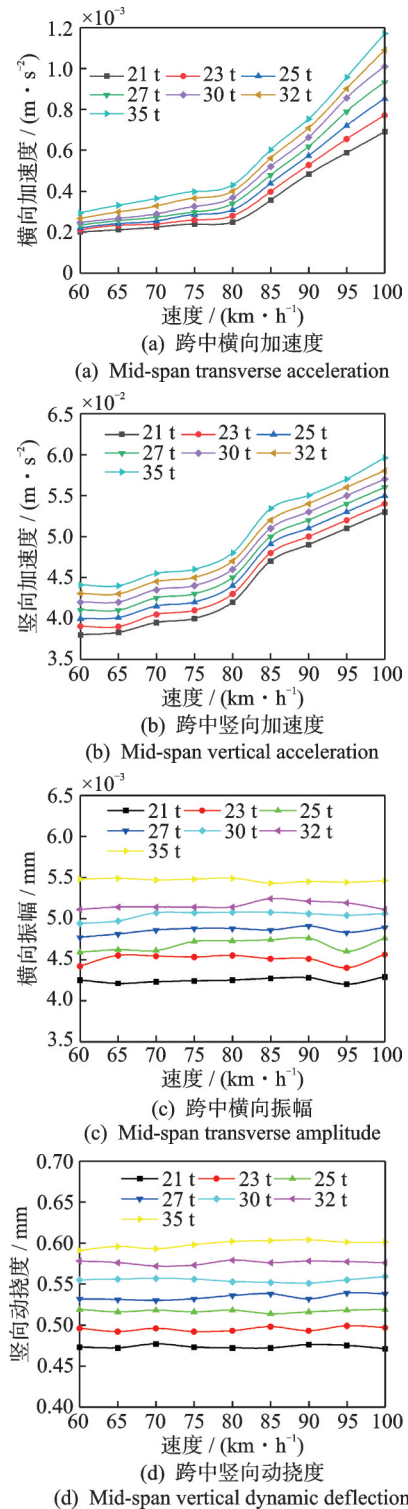


图 10 波纹板跨中横向与竖向振动

Fig.10 Transverse and vertical vibration of corrugated plate

竖向加速度快速增长。加速度在 80 km/h 以上时发生突变,考虑提速、提轴作用下,加固涵洞横、竖向加速度和动挠度所受扰动变化明显。

数值模拟结果表明,在提速及提轴条件下,重载铁路盖板涵经钢波纹板加固后,竖向动力加速度均小于 0.35g,横向加速度均小于 0.14g,满足有砟轨道

设计要求,且动挠度所对应挠跨比均小于 $1/4\ 000$,因此波纹板跨中横向与竖向变形满足 35 t 轴重列车 80 km/h 的通行要求。

5 结 论

1) 采用波纹板对既有铁路盖板涵进行加固,涵洞竖向刚度和抗剪能力得到大幅提高。试验和分析结果表明,加固后涵洞跨中挠度和应变显著减小,横、竖向振动特性也得到较为显著的改善,盖板涵刚度和稳定性得到了明显提升。

2) 在提速、提轴列车作用下,随着轴重逐渐增加,不同轴重作用下的动力响应曲线均匀变化,且振动波形基本一致;在相同轴重条件下,加速度随着列车速度增大而增大,动挠度随着速度增大而基本保持不变,加固后的盖板涵动力性能满足 35.0 t 轴重列车 80 km/h 的通行要求。

3) 波纹板加固技术在重载铁路涵洞加固中的应用仍处于起步阶段,随着使用年限的增加和荷载变化,加固后波纹板的耐久性、波纹板与既有结构之间连接的牢固性和协调变形等问题也需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 铁道第三勘察设计院集团有限责任公司. TB 10002.1—2017 铁路桥涵设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [2] 刘吉元, 苏永华, 蔡超勋, 等. 铁路重载运输条件下钢筋混凝土涵洞受力特征试验研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(6): 45-54.
LIU Jiyuan, SU Yonghua, CAI Chaoxun, et al. Mechanical behavior of reinforced concrete culvert under railway heavy haul transport condition[J]. China Railway Science, 2015, 36(6): 45-54.(in Chinese)
- [3] 于本田, 邹花兰, 王起才. 大秦重载铁路既有盖板涵病害调查与分析[J]. 铁道建筑, 2010(7): 37-40.
YU Bentian, ZOU Hualan, WANG Qicai. Investigation and analysis of defects in existing slab-culvert on Datong-Qinhuangdao heavy haul railway[J]. Railway Engineering, 2010(7): 37-40.(in Chinese)
- [4] 杨心怡, 刘吉元, 苏永华, 等. 铁路重载运输条件下盖板涵加固技术[J]. 铁道建筑, 2015(10): 73-75.
YANG Xinyi, LIU Jiyuan, SU Yonghua, et al. Reinforcing technology of concrete slab culvert under heavy haul railway[J]. Railway Engineering, 2015(10):

73-75.(in Chinese)

- [5] 田英, 刘楠, 郭小雄. 拼装钢波纹板加固既有涵洞施工新技术[J]. 铁道建筑, 2015(8): 32-33, 34.
TIAN Ying, LIU Nan, GUO Xiaoxiong. New construction technology for existing culverts strengthened with steel corrugated plates[J]. Railway Engineering, 2015(8): 32-33, 34.(in Chinese)
- [6] HEO Y, KWON S, KIM H J, et al. Centrifugal model test on behavior of underground corrugated steel plate with compaction degree[J]. Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 2011, 12(10): 83-90.
- [7] GUO C Z, CHEN H Y, WANG H W. Study on the reinforcement of existing slab culverts by corrugated steel in permafrost regions[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Nanchang, China: IOP, 2020: 012101.
- [8] 杨静静, 张楠, 战家旺, 等. 重载铁路线路加固体系车线动力分析[J]. 振动与冲击, 2015(10): 147-151, 172.
YANG Jingjing, ZHANG Nan, ZHAN Jiawang, et al. Vehicle-line dynamic analysis for a heavy rail reinforcement system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015(10): 147-151, 172.(in Chinese)
- [9] 刘才玮, 赵元元, 黄绪宏, 等. 基于动力测试的简支梁模型修正与参数分析[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(2): 394-401.
LIU Caiwei, ZHAO Yuanyuan, HUANG Xuhong, et al. Finite element model updating and parameter analysis of simply supported beams based on dynamic test [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(2): 394-401.(in Chinese)
- [10] 冀伟, 胡世浩, 齐振峰, 等. 波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥的动力特性分析[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(5): 886-892.
JI Wei, HU Shihao, QI Zhenfeng, et al. Dynamic characteristics analysis of box girder bridges with corrugated steel webs[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(5): 886-892.(in Chinese)



第一作者简介:陈树礼,男,1978年9月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为桥梁检测、评定与加固以及桥梁结构健康监测。曾发表《重载铁路浅基高桥墩振动分析及加固技术》(《铁道工程学报》2020年第37卷第9期)等论文。

E-mail: chensl@stdu.edu.cn