钢混加强圈对钢波纹板裸拱涵动力特性的影响研究*

毛军喜[1]，欧立新[1]，孔德睿[2]，陈　韬[2]，张　迅[2]

（1.中交第三航务工程局有限公司，上海　200032；2.西南交通大学土木工程学院，四川　成都　610031）

[摘要] 基于现场试验和数值仿真手段研究了设置钢混加强圈的钢波纹板拱涵的动力特性。首先，采用锤击试验原理，测试了某实际钢波纹板裸拱的轴向、环向及局部振动传递特性。然后，采用有限元法计算了结构振动，并与试验结果对比验证其可靠性。在此基础上，分析了有无加强圈、加强圈间距、加强圈填充混凝土的影响规律。结果表明：钢混加强圈能有效提高钢波纹板拱涵结构的整体刚度，并起到显著的阻振隔振效果；与不设置加强圈相比，设置加强圈时相同距离测点的加速度频响衰减量增大约 30dB；空心钢板加强圈和钢混加强圈均能对振动衰减起积极作用，但钢混加强圈的隔振效果远好于空心钢板加强圈。

[关键词] 拱涵；波纹钢板拱涵；加强圈；动力特性；锤击；试验

[中图分类号]　U449.5　　[文献标识码]　A　　[文章编号]

Influence of Steel-concrete Reinforcing Ring on Dynamic Characteristics of an Exposed Corrugated Steel Arch Culvert

MAO Junxi[1], OU Lixin[1], KONG Derui[2], CHEN Tao[2], ZHANG Xun[2]

(1. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai　200032, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The dynamic characteristics of a corrugated steel arch culvert with steel-concrete reinforcing rings are analyzed by hammering test and numerical simulation. Firstly, the longitudinal, transverse, and local vibration transmission characteristics are tested based on hammering test. Then, a finite element model is used to calculate structural vibration and its reliability is verified. The influence of the structure with or without reinforcing ribs, the spacing of reinforcing ribs, and the filling of concrete with reinforcing ribs is then numerically analyzed. Results show that the particle damping method is effective in controlling vibration and noise within a wide frequency range. The integrity and overall stiffness of the structure are significantly improved by the reinforcing rings. The vibration isolation capability is significantly improved. Compared with the cases with or without the reinforcing rings, the acceleration frequency response attenuation at the same distance from the measuring point is increased by about 30dB. Both the hollow steel reinforcing ring and the steel-concrete reinforcing ring play a positive role in vibration attenuation, the vibration isolation effect of the steel-concrete reinforcing ring is significantly better than that of the hollow steel reinforcing ring.

Keywords: arch culvert; corrugated steel arch culvert; reinforcing ring; dynamic characteristics; hammering; testing

0 引言

钢波纹板拱桥涵因变形适应能力强、性价比高、施工便捷等优势[1-3]，在国内外高速公路建设中具有广泛的应用前景[4]。学者对钢波纹板桥涵的静力性能已进行较多理论和试验研究。例如，Gajdzicki 等[3]以正交壳理论为基础，将钢波纹板通过平均刚度等效为连续结构，分析了双向波纹板在压剪作用下的稳定性。Zhang 等[5]通过模型试验研究了不同板厚、剪力连接件类型和数量对波纹钢板-混凝土组合结构力学性能的影响。魏瑞等[6-7]推导计算了高填方钢波纹管涵的垂直土压力，并与现场试验相对照，研究了土压力和管涵变形的变化规律。研究表明，3~25m 跨度是钢波纹板拱涵较理想的应用范围。当钢波纹板拱涵的跨度＞12m 时，钢波纹板易屈曲、变形显著等问题凸显，需采取加强措施[8]。为此，混凝土-钢波纹板叠合梁（简称加强圈）、多层钢波纹板、钢管混凝土加强肋被设计用于全截面加固[9-11]。刘海洋等[12]对 4 孔跨度 9m 钢波纹板拱涵开展现场试验研究，对比了拱背浇筑泡沫混凝土和拱顶回填土体施工过程中不同拱跨、有无加强圈对其受力和变形特征的影响。

当前，对于钢波纹板拱涵的研究主要集中于静力性能，对动力特性的研究较少，且以地震、车辆激励方面为主。例如，方诗圣等[13]将钢波纹板等效为平拱板，采用动态时程分析法研究了一钢波纹拱桥的抗震性能。冯晓九等[14-15]通过有限元法研究了双洞平行隧道在随机地震动激励下的动力响应，认为控制隧道净距、加强管片整体刚度等措施有利于提高抗剪能力。Maleska 等[16]研究了高覆土波纹钢板桥在地震激励下的力学性能。对于车辆激励，Beben[17]对 4 个波纹钢板涵洞进行了静载和实车动载试验，研究了涵洞的跨度、覆土深度和车速对拱体受力的影响，并给出了动态放大系数的估计值。胡滨等[18]对三孔钢波纹板拱桥结构进行了车辆荷载试验，研究了不同车速、不同车道下三孔钢波纹板拱桥动态挠度及冲击系数的变化规律。李百建等[19]基于车桥耦合模型，对一钢波纹板拱桥的动力分析方法进行了对比研究，并分析了不同车速下的结构动力性能。

不难发现，当前国内外的研究主要集中于钢波纹板拱涵的低频振动响应，对结构的中高频振动特性研究较少见，不利于减振（震）优化设计。为此，本文基于锤击试验和数值仿真手段研究设置钢混加强圈的钢波纹板拱涵的动力特性，并对比分析有无加强圈、加强圈间距和加强圈填充混凝土等参数对钢波纹板拱涵振动特性的影响。本文的分析方法和研究结论可为此类结构的优化设计提供参考。

1 现场试验

1.1 工程概况

某 1-4×ϕ9m 钢波纹板拱涵长度为 96m，拱顶填土高度 8.5m，上部结构采用 CSPSG-(9 000×4 500)-8 波纹钢板，每 12 个波纹周期增设钢混组合结构加强圈，波高 140mm，波距 381mm。其结构如图 1 所示。

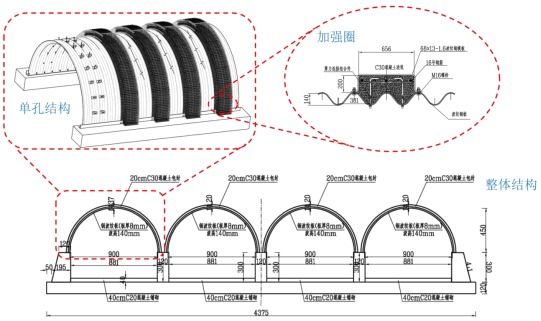


图 1 钢波纹板拱涵整体结构示意

Fig.1 Overall structure of corrugated steel arch culvert

本文基于锤击试验原理[20]，研究钢波纹板裸拱的振动传递特性，在试验和数值研究中均不考虑填土影响。采用力锤(LC1301B)对裸拱进行激励，用加速度传感器(LC0108T，LC0102T)测量其振动响应。试

*中交第三航务工程局有限公司科技研发项目（青年创新项目）(2023-18)

[作者简介] 毛军喜，高级工程师，E-mail: 40171194@qq.com

[收稿日期]2024-05-26

验分别研究钢波纹板拱的轴向、环向和局部振动传递特性。

1.2 测点布置

1) 轴向测试断面。沿拱轴线方向选取 8 个测试断面，研究钢波纹拱的轴向振动传递特性。测试断面跨越 2 个加强圈周期，其中 1～5 号断面位于 2 个加强圈之间，6 号断面位于加强圈处，7～8 号断面位于加强圈另一侧拱处。为消除边界效应，选择 2 号断面作为激励断面。具体测点及激励位置如图 2 所示，现场照片如图 3 所示。

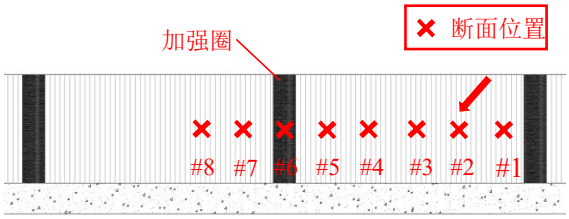


图 2 测试断面位置

Fig.2 Test section position



图 3 测试现场照片

Fig.3 Photos of the test site

2) 环向测点布置。每个测试断面的测点布置如图 4 所示，沿拱环向分别在拱脚、1/4 拱、拱腰、3/4 拱、拱顶处设置测点，测试其振动响应。激励点位于 2 号断面拱脚侧。试验中，加速度传感器均布置于钢波纹板波峰处。

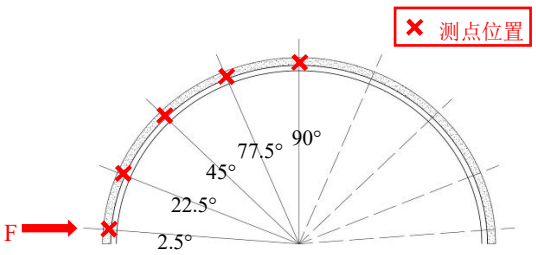


图 4 环向测点布置

Fig.4 Arrangement of circumferential measured points

3) 局部测点布置。在远离拱脚、加强圈等边界处，取 1 个波纹周期，研究该周期内钢波纹板拱不同位置振动差异。在波峰(1，5 号)、波谷(3，7 号)、波腹(2，4，6，8 号)处分别布置加速度传感器，测点如图 5 所示。激励点与测试子系统间隔 3 个波纹周期，作为远端激励，考察各点的加速度响应。

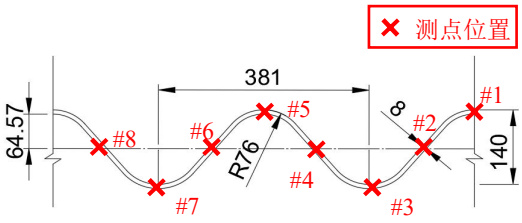


图 5 局部测点布置

Fig.5 Arrangement of local measured points

1.2 评价指标

1) 频响函数。通过力锤对裸拱进行激励，同时采集锤击力和各测点的加速度响应，分别作为输入和输出信号。由于每次锤击的激励力不同，为便于对比，采用频响函数(FRF)描述振动响应大小。频响函数由输入与输出信号的互谱及输入信号的自谱求得[21]，即

$$FRF_{\mathrm{AF}}(\omega)=\frac{S_{\mathrm{AF}}(\omega)}{S_{\mathrm{FF}}(\omega)} \tag{1}$$

式中：SAF(ω)为输入和输出信号的互谱；SFF(ω)为输入信号的自谱；ω为频率。

2) 能级差。对于周期性钢波纹板，在考察频段范围，可将每个测点布置区域视为一个子系统。若其中一个子系统被激励，子系统间的能级差可由下式确定[22]：

$$D_{E,mn}=10\lg\left(\frac{FRF_m^2(\omega)}{FRF_n^2(\omega)}\right) \tag{2}$$

式中：$D_{\mathrm{E},mn}$为激励子系统 m 和响应子系统 n 间能级差；$\mathrm{FRF}_m(\omega)$为激励子系统 m 的频响函数；$\mathrm{FRF}_n(\omega)$为响应子系统 n 的频响函数。

2 振动特性测试结果

2.1 轴向传递特性

为研究钢波纹板拱沿拱轴线方向的振动传递特性，首先考察相同测点处不同断面的振动响应规律。

总体上，各轴线处沿轴向表现出相似的振动规律。a 轴线位置的加速度频响函数如图 6 所示。对于 2 号断面，其距离激励位置最近，频响最大；3～5 号断面的频响依次递减。1 号断面因靠近加强圈，其振动较小。

跨越加强圈后，即 6～8 号断面处，振动衰减显著。与 5 号断面相比，在全频带内，其频响函数平均衰减约 15dB。振动传播到加强圈后，衰减至很小量级，因此，6～8 号断面间的振动差异可忽略。

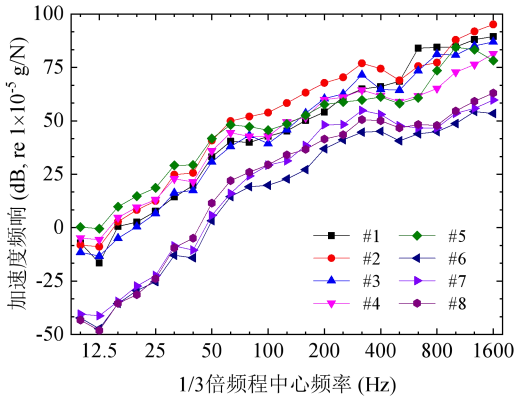


图 6 a 轴线处不同断面的加速度频响

Fig.6 Acceleration FRFs of different cross sections at axis a

进一步，对比了不同断面处的能级差，如图 7 所示。能级差越大，表示振动衰减越显著。总体上，6～8 号断面与激励子系统(2 号)的能级差显著大于 3～5 号断面。该规律在 50Hz 处最显著，最大差异可达 2dB。

综合上述对比，对于裸拱，总体上振动随着与激励点距离的增大而递减；当振动经过加强圈时，其衰减非常显著，其中以 50Hz 附近最突出。

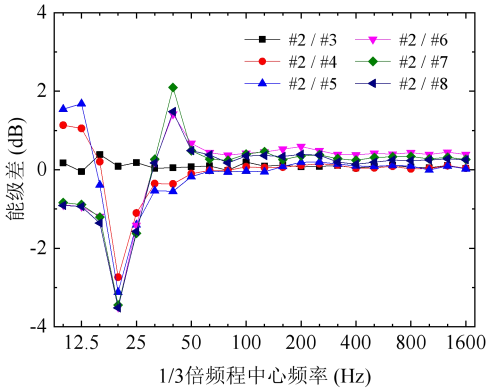
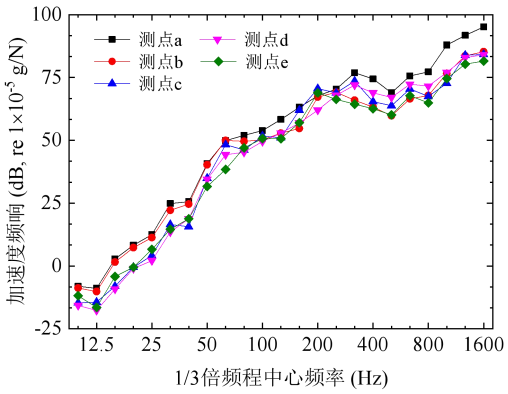


图 7 c 轴线各测点与 2 号断面测点的能级差

Fig.7 The energy level difference between the measuring points of the c axis and the measuring points of the No.2 section

2.2 环向传递特性

以 2 号断面为例，研究振动沿钢波纹板拱环向传递的规律。2 号断面不同测点的加速度频响如图 8a 所示。在全频段内，测点 a 位于激励点处，故频响最大；测点 b～e 处的频响依次递减，与轴向的振动衰减规律相似。因此，对于裸拱的轴向与环向，其振动传递均呈现随着与激励点距离的增大而递减规律，同时加强圈对其振动可起到显著的衰减和阻断作用。

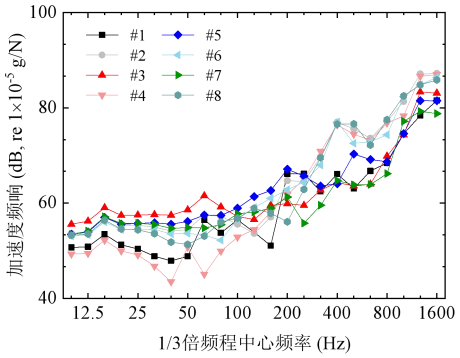


a 2 号断面测点

2.3 局部振动特性

波腹处测点和波谷处测点的加速度频响如图 8b 所示，其中奇数测点为波谷测点，偶数测点为波腹测点。对于波腹，各点在全频段的频响都较接近，表现出一致的振动规律。对比波谷和波腹处的频响，在低频范围(＜315Hz)，波谷处表现出较大振动；在高频范围(315~1 600Hz)，波腹处频响显著大于波谷处，其与波谷处频响的最大差值出现在

400Hz 处，增大约 10dB。



b 波腹、波谷处测点

图 8 2 号断面与波腹、波谷处测点的加速度频响

Fig.8 Acceleration FRFs of each measured point at No.2 cross section and wave belly and trough location

3 加强圈参数影响分析

3.1 有限元模型

为研究加强圈参数对钢波纹拱动力特性的影响，采用有限元法进行动力分析。首先，在现场试验的基础上，根据实际结构尺寸，采用 ANSYS 软件建立有限元模型。然后，计算其频响函数，将数值计算结果与实测结果作对比，验证仿真方法的可靠性。

有限元模型如图 9 所示，其中钢波纹板及加强圈外壳采用 shell63 单元模拟，混凝土加强圈采用 solid65 单元模拟，二者间的连接均采用共节点方式模拟。模型选取 2 个加强圈节段进行分析，为保证计算精度，拱圈轴向和环向的网格尺寸分别为 0.12，0.15m；划分后，模型共包含约 42 万个单元和 43 万个结点。在拱涵两端及拱脚底面位置（含加强圈底部节点）施加约束，因实际工程中钢波纹板间、拱脚处均采用螺栓连接，故边界处均采用三向平动约束（U*x*，U*y*，U*z* 方向），不对转角进行约束。同时，对钢材和混凝土分别设置 0.005 与 0.02 的材料阻尼，具体材料参数如图 9 所示。

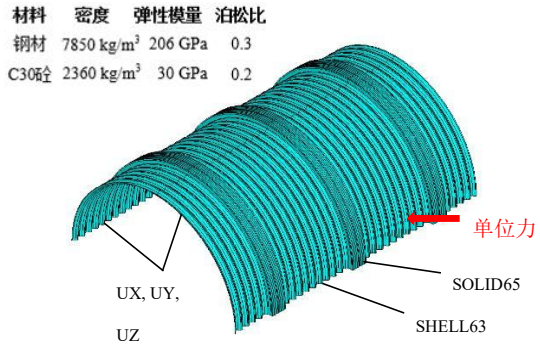


图 9 钢波纹板拱涵有限元模型

Fig.9 Finite element model of the corrugated steel arch culvert

仿真与实测结果对比如图 10 所示。结果表明：总体上仿真值与实测值吻合较好，二者的频谱特性一致，验证了有限元分析模拟这一过程的准确性。但在个别频率点，实测值与计算值存在一定差异，这可能是由于频响测量误差、边界条件简化等原因引起。

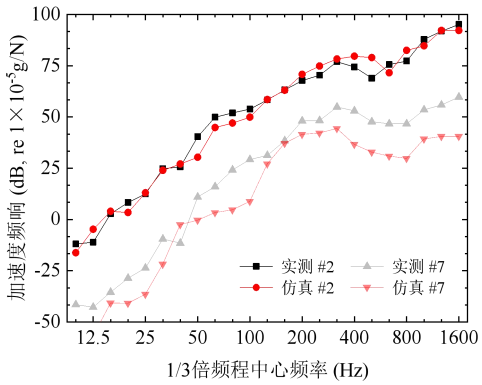
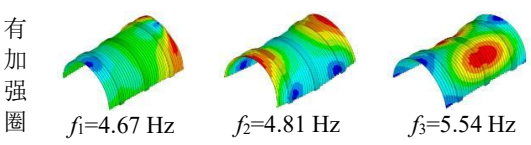


图 10 计算值与实测值对比

Fig.10 Comparison of calculated and measured results

3.2 有无加强圈影响

有无加强圈 2 种情况下钢波纹拱的低阶自振模态如图 11 所示。未设加强圈时结构的第一阶模态为面外振动，设置加强圈后该振型偏移至第三阶出现，且对应频率有所升高，说明加强圈提高了结构整体性和刚度。



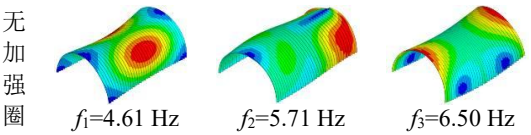
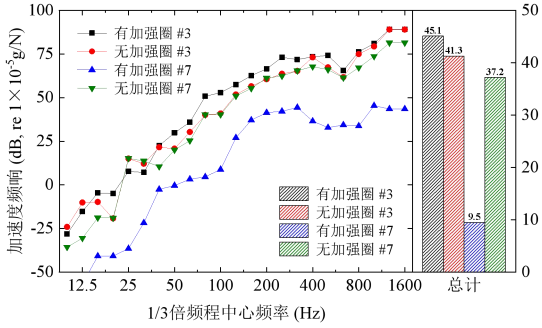


图 11 有无加强圈下自振模态

Fig.11 Natural vibration mode with or without reinforcing rings

有无加强圈下钢波纹拱涵 3，7 号测点加速度频响函数如图 12a 所示。对于 3 号测点，设加强圈时的振动略大于未设时，各频段的平均加速度频响增大 3.8dB。对于 7 号测点，振动波穿过加强圈后，设加强圈时的振动显著减小，比未设时平均减小 27.7dB，隔振效果显著。

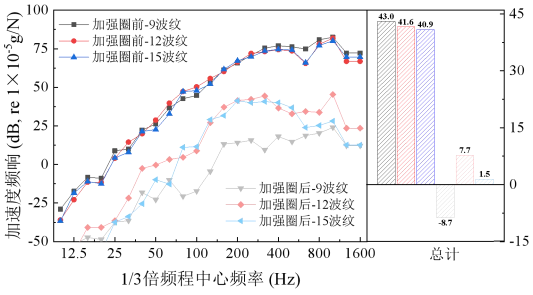
对比 3，7 号测点，未设加强圈时，7，3 号测点的平均频响函数差值为 4.1dB；设加强圈后，该差值达到 35.6dB，说明加强圈对振动起到显著的阻隔作用。另外，未经过加强圈部分的振动略有增大，这是由于设加强圈后激励处的局部振动模态更易激发造成。



a 有无加强圈

3.3 加强圈间距影响

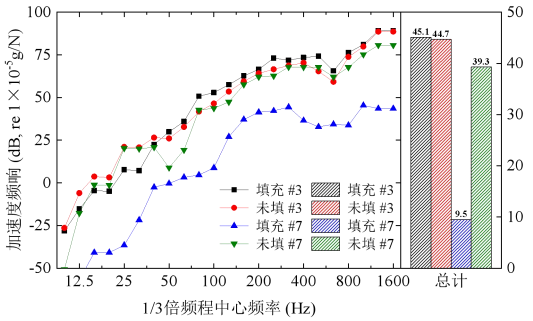
不同加强圈间距下钢波纹拱的振动响应如图 12b 所示，其中加强圈间距分别为 9，12，15 个波纹周期。因钢波纹板拱涵为连续结构，为考察加强圈间距对其整体振动的影响，计算了各节段的平均振动响应。图中“加强圈前”表示激励节段全部测点的平均频响，“加强圈后”表示振动穿过 1 个加强圈后节段全部测点的平均频响。结果表明：对于激励节段，加强圈间距的改变对钢波纹板拱涵的振动影响不显著。随着加强圈间距增大，各频段平均加速度频响值略微减小，增加 3 个波纹周期，频响约减小 1dB。这是由于加强圈间距减小，激励区间包含的测点数减少，远距离测点被忽略，导致激励节段振动偏大。对于振动经过加强圈后的节段，3 种间距的加速度频响均显著减小，间距为 9 个波纹周期时减小最显著，达到 51.7dB。



b 不同加强圈间距

3.4 加强圈填充混凝土影响

空心钢板加强圈与填充混凝土加强圈的加速度频响如图 12c 所示。振动未经过加强圈时，有无填充混凝土的振动差异较小，平均频响函数分别为 45.1，44.7dB。振动经过加强圈后，2 种工况的振动均有所衰减，有无填充混凝土的平均加速度频响分别衰减 35.6，5.4dB。可见，2 种加强圈形式均能起到一定程度的隔振效果，但钢混加强圈形式的隔振效果远好于空心钢板加强圈。



c 加强圈填充/不填充混凝土

图 12 有无加强圈、不同加强圈间距、加强圈有无填充混凝土的频响函数对比

Fig.12 FRFs comparison with or without reinforcing rings,different distance of reinforcing rings and between hollow reinforcing rings and concrete reinforcing rings

4 结语

1)对于钢波纹板拱结构，其振动随着与激励点距离的增大而递减。加强圈对振动可起到显著衰减作用，当振动经过加强圈后，其频响函数降低约 15dB，且减振作用在低

频 50Hz 处最显著。

2)对于钢波纹板局部，波腹处振动规律与峰谷处存在一定差异。在高频范围(315~1600Hz)，波腹处频响显著大于峰谷处，其与峰谷处频响的最大差值出现在 400Hz 处，可增大约 10dB。

3)钢混加强圈能有效提高钢波纹板拱涵结构的整体性和刚度，并起到显著的隔振效果。与不设加强圈相比，设加强圈时，相同距离测点的加速度频响衰减量增大约 30dB。

4)对于激励节段，加强圈间距的改变对钢波纹板拱涵的振动影响不显著，但在考察的 3 种加强圈间距中，9 个波纹周期的间距可起到最好的隔振效果。

5)空心钢板加强圈和钢混加强圈均能对振动衰减起到积极作用，但钢混加强圈形式的隔振效果远好于空心钢板加强圈。

参考文献：

[1] 李祝龙. 公路波纹钢管涵洞设计与施工技术[M]. 北京：人民交通出版社, 2007.

LI Z L. Highway corrugated steel pipe culvert design and construction technology [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.

[2] 陈昌伟.波形钢板结构及其在公路工程中的应用[J].公路,2000(7):48-54.

CHEN C W. Corrugated steel plate structures and their application in highway engineering [J]. Highway, 2000(7): 48-54.

[3] GAJDZICKI M, PERLINSKI W, MICHALAK B. Stability analysis of bi-directionally corrugated steel plates with orthotropic plate model[J]. Engineering structures, 2018, 160: 519-534.

[4] 潘青,张清照,周圆媛,等.钢波纹管涵代替钢筋混凝土管涵的可行性探究[J]. 现代隧道技术,2018,55(S2):1051-1057.

PAN Q, ZHANG Q Z, ZHOU Y Y, et al. Feasibility study of corrugated steel pipe culvert replacing reinforced concrete pipe culvert [J]. Modern tunnelling technology, 2018, 55(S2): 1051-1057.

[5] ZHANG J, LIU B, LIU R. Behavior of sinusoidal-corrugated-steel-plate-concrete composite slabs: experimental investigation and theoretical model development[J]. Journal of constructional steel research, 2021, 187: 106958.

[6] 魏瑞,曹周阳,顾安全,等.高填方钢波纹管涵垂直土压力计算[J].交通运输工程学报,2018,18(3):74-83.

WEI R, CAO Z Y, GU A Q, et al. Calculation of vertical earth pressure of high-fill steel corrugated pipe culvert [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2018, 18(3): 74-83.

[7] 魏瑞,曹周阳,顾安全.高填方大直径钢波纹管涵减荷试验[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(3):1-9.

WEI R, CAO Z Y, GU A Q. Load reduction experimental of high fill soil large diameter corrugated steel pipe culvert [J]. Journal of Chang'an University (natural science edition), 2018, 38(3): 1-9.

[8] MALESKA T, BEBEN D. Numerical analysis of a soil-steel bridge during backfilling using various shell models[J]. Engineering structures, 2019, 196: 109358.

[9] Corrugated Steel Pipe Institute, American Iron and Steel Institute. Handbook of steel drainage & highway construction products[M]. 2nd Canadian Edition.

[10] GOMES N, SHAHROOZ B, SANDERS D, et al. Experimental and analytical evaluation of an innovative strengthening system for long-span deep corrugated buried bridges[J]. Practice periodical on structural design and construction, 2020, 25(4):1943-5576.

[11] 李百建. 波纹钢-混凝土复合结构的强度分析与试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.

LI B J. Strength analysis and experimental study of corrugated steel-concrete composite structure [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

[12] 刘海洋,樊正,陈韬,等.带加强圈的多跨钢波纹板拱涵施工力学行为试验研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(6):155-160.

LIU H Y, FAN Z, CHEN T, et al. Field testing of mechanical behavior of multi-span steel corrugated plate with reinforcing ring arch culvert [J]. Construction technology,2024,53(6):155-160.

[13] 方诗圣,邹祥强,黄志福,等.地震作用下多孔钢波纹板拱桥力学分析[J].世界桥梁,2015,43(3):69-74.

FANG S S, ZOU X Q, HUANG Z F, et al. Analysis of mechanical behavior of arch bridge with porous corrugated steel plate under seismic action [J]. World bridges, 2015, 43(3): 69-74.

[14] 冯晓九,李其成,丁琪,等.非一致随机地震动激励下双洞平行隧道动力响应分析[J].工业安全与环保,2018,44(3):8-12.

FENG X J, LI Q C, DING Q, et al. Dynamic response analysis of double parallel tunnel under non-uniform seismic excitation [J]. Industrial safety and environmental protection, 2018, 44(3): 8-12.

[15] 冯晓九,许桦楠,李其成,等.基于随机地震动模型的双洞平行地铁隧道净距影响研究[J].工业安全与环保,2017,43(5):44-48.

FENG X J, XU H N, LI Q C, et al. Research on the influence of the distance between double-hole parallel tunnel based on stochastic earthquake ground motion model [J]. Industrial safety and environmental protection, 2017, 43(5): 44-48.

[16] MALESKA T, BEBEN D. Behaviour of corrugated steel plate bridge with high soil cover under seismic excitation[C]//MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018.

[17] BEBEN D. Dynamic amplification factors of corrugated steel plate culverts[J]. Engineering structures, 2013, 46: 193-204.

[18] 胡滨,梁养辉,李祝龙,等.多孔钢波纹板拱桥结构的稳定性及动力响应分析[J].筑路机械与施工机械化,2017,34(3):112-117.

HU B, LIANG Y H, LI Z L, et al. Analysis on structural stability and dynamic response of arch bridge with porous corrugated steel plate [J]. Road machinery & construction mechanization, 2017, 34(3): 112-117.

[19] 李百建,符锌砂,朱良生.基于车-桥耦合的钢波纹板动力分析方法对比研究[J].公路工程,2019,44(6):1-8,32..

LI B J, FU X S, ZHU L S. Contrastive research on dynamic analysis methods of CSP structure based on vehicle-bridge interaction [J]. Highway engineering, 2019, 44(6):1-8,32.

[20] International Organization for Standardization.Vibration and shock-experiment determination of mechanical mobility. Part 5: measurement using impact excitation with an exciter which is not attached to the structure: ISO 7626-5[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1994.

[21] 张迅,李茜,郝晨曦,等.现代有轨电车不同轨道的振动传递特性试验研究[J].西南交通大学学报,2021,56(1):75-83.

ZHANG X, LI X, HAO C X, et al. Experimentation on vibration transmission characteristics of modern tram tracks [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(1): 75-83.

[22] 尹剑飞,温激鸿,肖勇,等.基于高级统计能量分析的周期加筋板振动特性研究[J].物理学报,2015,64(13):190-199.

YIN J F, WEN J H, XIAO Y, et al. Study of vibration propagation in periodic rib-stiffened plates using advanced statistical energy analysis [J]. Acta physica sinica, 2015, 64(13):190-199.