

穿堤管道流激振动传递路径模型试验研究*

张建伟¹, 杨 灿^{1,2}, 黄锦林³, 叶合欣⁴, 邢 帅¹

(1. 华北水利水电大学水利学院 郑州, 450046) (2. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司 北京, 100024)
(3. 广东省水利水电科学研究院 广州, 510635) (4. 广东省水利水电技术中心 广州, 510635)

摘要 为解决穿堤管道工程在长期运行中由振动导致的管道破坏、堤防渗漏等现象,开展振动在管道及土体内的传递路径分析并进行减振试验。首先,以广东省某穿堤管道工程为原型,采用量纲分析法确定模型试验相似比,得到穿堤管道各个结构设计尺寸、管道与土体的材质,并铺设模型堤防;其次,通过传递熵与信息传递率理论,研究振动沿穿堤管道及堤防土体的传递路径;最后,分别采用粗砂、聚氯乙烯(polyvinyl chloride,简称PVC)塑料和橡胶材料分析各材料对穿堤管道结构的减振效果。结果表明:振动在管道中心及堤防出口产生逆水流方向振动;在堤防水平方向,振动由两侧向中间传递;在堤防垂直方向,振动由管身向堤防上下传递;管道振动主频为9.89、12.29、17.53和21.18 Hz,3种减振材料对振动峰值、均方差、主频能量均有削弱作用;主频为9.89 Hz与17.53 Hz的振动经粗砂与橡胶材料减振后均未出现,说明粗砂与橡胶能够有效改变振动主频,避免与管道发生共振。

关键词 振动;模型试验;穿堤管道;传递路径;传递熵;减振

中图分类号 TV32;TB53

引 言

近年来,供水管道建设项目急剧增加,复杂的管网建设不可避免需要穿越堤防^[1-2]。穿堤管道结构经常出现由振动导致的管道破坏、堤防地基弱化以及管道与堤防接触不稳定等问题,导致堤防失事破坏,造成经济损失甚至人员伤亡。因此,研究穿堤管道振动传递路径,降低穿堤管道工程破坏风险,并提出减振措施,保证穿堤管道工程长期处于稳定、安全的状态,是相关工程研究的重点^[3-4]。

目前,关于水电站厂房、水轮机等大型结构的振动传递路径研究备受关注,多聚焦于大型结构整体间的振动传递。王海军等^[5]利用结构声强理论对ANSYS软件进行二次开发,得出振动在水电站厂房各整体结构间的传递路径。职保平等^[6]从振动基础理论出发,得到振动在轴流式水轮机各结构间的传递路径。侯慧敏等^[7]将原型信息与数值模拟相结合,得到振动在高扬程压力管道各个结构之间的传递路径。

原型工程限制较多,导致许多试验难以开展,模型试验则可以通过建立模型进行多工况研究,扩展研究的范围和深度。王德洋等^[8]建立相似模型试验

分析管道受力特征,试验结果与理论计算值的一致性较好。韩俊艳等^[9]通过缩尺试验开展了埋地管道的三台阵振动台试验,探讨了不同激励源作用下管道、土体的应力应变影响。

上述研究主要针对结构整体之间的振动传递路径,并未分析振动在结构内部的传递规律。此外,穿堤管道结构振动传递路径及减振措施的研究成果较少,穿堤管道结构破坏成因尚不明确。因此,本研究采用室内模型试验分析振动在穿堤管道结构内部的传递路径,准确模拟复杂结构,并进行多工况试验,使结果更加准确可靠。

1 模型试验设计

1.1 相似关系的确定

穿堤管道模型试验参数主要考虑:①土体参数包括含水率 w 、土体厚度 H 、压缩模量 M 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和重度 γ ;②管道参数包括直径 D 、水流速度 v 、壁厚 t 、刚度 I 和竖向变形 δ 。

表1为量纲矩阵。试验相似比通过量纲分析法推导,以力的单位N、长度的单位m和时间的单位s为基本物理量作出量纲矩阵,表中数字代表该参数

* 国家自然科学基金资助项目(52279133);广东省水利科技创新资助项目(2024-07,2025-17);广东省水利水电技术中心委托资助项目(JSZXWT202525)

收稿日期:2023-05-15;修回日期:2023-06-07

具有上述基本量纲的幂次,即 $a_1 \sim a_{11}$ 分别代表参数 w 、 M 、 c 、 \dots 、 δ 的指数。

表1 量纲矩阵

Tab.1 Dimensional matrix

参数	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}
	w	M	c	φ	γ	D	H	v	t	I	δ
力	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
长度	0	0	-2	-2	0	-3	1	1	1	2	1
时间	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

依据量纲均衡性原则,将各个参数的指数列为矩阵方程,即

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & -2 & 0 & -3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} a_2 + a_3 + a_5 + a_{10} = 0 \\ -2a_2 - 2a_3 - 3a_5 + a_6 + a_7 + a_8 + a_9 + 2a_{10} + a_{11} = 0 \\ -a_8 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)得出 $a_8=0$,但此矩阵中仍有10个未知数,无法求解。因此,假设2个量未知,其余8个量用这2个未知量代表。假定 a_5 、 a_6 为未知量,则有

$$\begin{cases} a_5 = -a_2 - a_3 - a_{10} \\ a_6 = -a_2 - a_3 - a_7 - a_8 - a_9 - 5a_{10} - a_{11} \\ a_8 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,存在8个相似准则($\pi_1 \sim \pi_8$)。为方便求解,在分别计算 a_1 、 a_2 、 \dots 、 a_8 时,将其中1个值赋为1,其余值赋为0,并将8个相似准则对应幂指数构建为 π 矩阵。计算得到的 π 矩阵见表2。

表2 π 矩阵Tab.2 π matrix

无量纲因子 π	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}
	w	M	c	φ	γ	D	H	v	t	I	δ
π_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
π_2	0	1	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0
π_3	0	0	1	0	-1	-1	0	0	0	0	0
π_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
π_5	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0
π_6	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0
π_7	0	0	0	0	-1	0	-5	0	0	1	0
π_8	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1

根据白金汉定理^[10],穿堤管道模型试验主要考虑的参数共涉及变量11个,即 $n=11$;并以力、长度和时间作为3个基本物理量,即 $m=3$ 。 $n-m=8$,得出8个无量纲因子,即本次模型试验的8个相似准则: $\pi_1=w$ 、 $\pi_2=M/\gamma D$ 、 $\pi_3=c/\gamma D$ 、 $\pi_4=\varphi$ 、 $\pi_5=H/D$ 、 $\pi_6=t/D$ 、 $\pi_7=I/\gamma H^5$ 、 $\pi_8=\delta/H$ 。依据相似理论,则有

$$(\pi_i)_p = (\pi_i)_m \quad (i=1, 2, \dots, 8) \quad (4)$$

其中: $(\pi_i)_p$ 为原型; $(\pi_i)_m$ 为模型。

由式(4)可得 $w_p=w_m$ 、 $(M/\gamma D)_p=(M/rD)_m$ 、 \dots 、 $(\delta/H)_p=(\delta/H)_m$ 。将 C 作为相似常数,上述相似关系可转化为 $C_w=1$ 、 $C_M=CC_H$ 、 $C_c=CC_H$ 、 $C_\varphi=1$ 、 $C_H=C_D$ 、 $C_t=C_H$ 、 $C_I=CC_H^5$ 、 $C_\delta=C_H$ 。

模型相似考虑工程实际尺寸、材料等因素,将几何相似比1:10、土体重度相似比1:1作为穿堤管道模型试验的相似比,并代入上述相似关系得出其余物理量的相似比,即

$$\begin{cases} C_D = C_H = C_{E_i} = C_c = C_t = 1:10 \\ C_r = C_w = C_\varphi = C_\delta = 1 \\ C_{E_p I_p} = 1/10^5 \end{cases} \quad (5)$$

1.2 传递熵及信息传递率理论

传递熵由信息熵理论发展而来,Schreiber^[11]将 x 与 y 之间的影响率定义为 p ,并总结为

$$T_{y \rightarrow x}(x(1)|x^{(k)}, y^{(l)}(\tau)) = \int p(x(1), x^{(k)}, y^{(l)}(\tau)) \times \log_2 \left\{ \frac{p(x(1)|x^{(k)}, y^{(l)}(\tau))}{p(x(1)|x^{(k)})} \right\} dx(1) dx^{(k)} dy^{(l)} \quad (6)$$

文献[12]将 x 和 y 假设为一阶,即 $k=l=1$,则式(6)可化简为

$$T_{y \rightarrow x}(x(1)|x, y(\tau)) = \frac{1}{2} \log_2 \left\{ \frac{(\rho_{xy}^2(\tau)-1)(\hat{R}_{xx}(1)-1)}{2\rho_{xy}(\tau-1)\hat{R}_{xx}(1)\rho_{xy}(\tau)-\rho_{xy}^2(\tau-1)-\hat{R}_{xx}(1)-\rho_{xy}^2(\tau)+1} \right\} \quad (7)$$

其中: $T(y \rightarrow x)$ 表示 y 到 x 的传递熵; k 、 l 分别为过程 x 、 y 的阶数。

式(7)极大简化了传递熵的计算难度,并保持了传递熵分析振动传递路径的准确性。式(7)中,有

$$\hat{R}_{xx}(\tau) = \frac{R_{xx}(\tau)}{R_{xx}(0)} \quad (8)$$

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sqrt{R_{xx}(0)R_{yy}(0)}} \quad (9)$$

$$R_{xy}(\tau) = \text{EX}[x(n)y(n+\tau)] \quad (10)$$

其中： $\hat{R}_{xx}(\tau)$ 为自相关函数； $\rho_{xy}(\tau)$ 为线性互相关函数； n 与 τ 为振动信号；EX为期望。

为验证振动在穿堤管道结构内部的传递路径，通过信息传递率 (information translate rate, 简称 ITR), 从能量角度分析振动传递方向^[13]。结合传递熵对振动在穿堤管道内部的传递路径, 从两方面综合分析振动传递路径。ITR 计算过程为

$$ITR_{(y \rightarrow x)} = \frac{|T_{(y \rightarrow x)} - T_{(x \rightarrow y)}|}{T_{(y \rightarrow x)}} \quad (11)$$

其中： $ITR_{(y \rightarrow x)}$ 为 y 到 x 的传递率； $|T_{(y \rightarrow x)} - T_{(x \rightarrow y)}|$ 为 y 到 x 的振动信息净传递量, 表示 2 个方向的传递熵。

2 穿堤管道模型传递路径及减振试验

2.1 管道选取与堤防制作

根据量纲分析法原理, 模型与原型管道的管径与壁厚比例须满足 1:10, 刚度须满足 1:10⁵。根据模型管道设计管径为 60 mm, 壁厚为 1 mm, 刚度为 1.65 kN·m²。选择弹性模量为 19 GPa 的玻璃管, 计算的刚度接近模型管道刚度设计值, 可认为相似效果较好。原型管道、模型管道与有机玻璃管道参数如表 3 所示。

表 3 原型管道、模型管道与有机玻璃管道参数
Tab.3 Parameters of prototype pipeline, model pipeline, and organic glass pipeline

管线类型	直径/ m	壁厚/ mm	弹性模量/ kPa	刚度/ (kN·m ²)
原型管道	0.6	10	2.05×10 ⁸	1.65×10 ⁵
模型管道	0.06	1	2.05×10 ⁷	1.65
有机玻璃管道	0.06	1	1.9×10 ⁷	1.53

2.1.1 相似土材料及配置

堤防用土为黏土, 参数为: 含水率 $w=62.3\%$, 土体重度 $\gamma=16.14 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c=15.5 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi=15^\circ$, 压缩模量为 4.9 MPa。按照相似比换算后, 模型土体参数设计值中黏聚力为 1.55 kPa、压缩模量为 0.49 MPa, 其余参数与原型一致。

2.1.2 相似土配置

为得到满足设计参数的模型堤防用土, 参考文献[14], 采用黏土、洗衣粉、膨润土、双飞粉、重晶石粉和水, 按不同质量比例配制模型相似土, 并进行直剪试验和固结试验, 得出土体参数并与设计值进行比较, 选出一组最为接近设计值的配比, 并以此构建模型。相似土制备过程如图 1 所示。

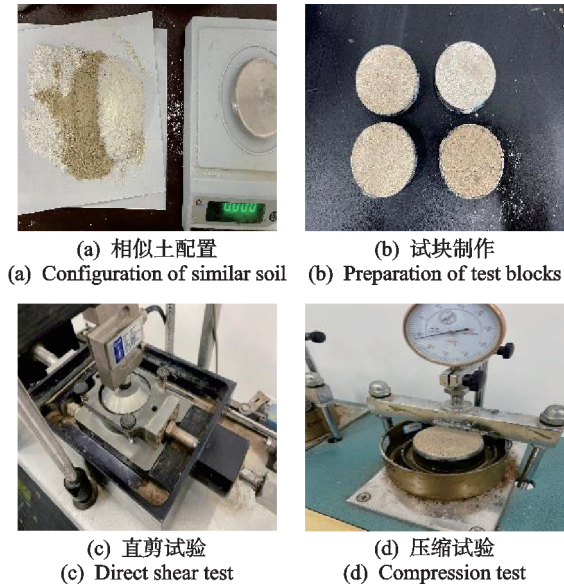


图 1 相似土制备过程

Fig.1 Preparation process of similar soil

通过试验得到符合要求的土体参数值: 含水率 $w=62\%$, 土体重度 $\gamma=16.1 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c=1.38 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi=14.2^\circ$, 压缩模量为 0.32 MPa。该组数值可满足试验要求。

2.1.3 堤防模型制作

原型堤防高为 10 m, 坡比为 1:1.5, 输流管道管径为 600 mm, 埋深为 5 m, 几何相似比为 1:10, 因此模型设计值中高为 1 m, 坡比为 1:1.5, 输流管道管径为 60 mm, 埋深为 0.5 m。原型与模型堤防见图 2。

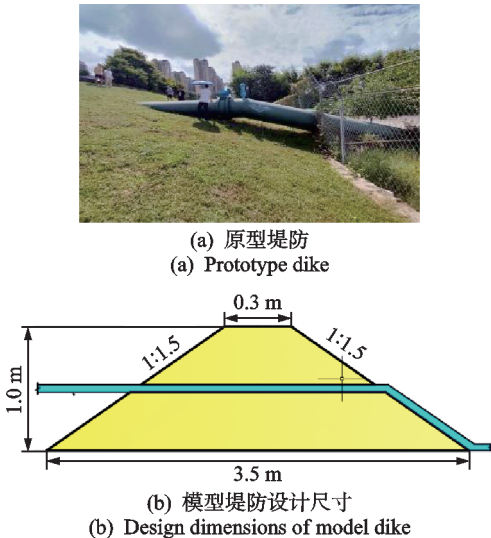


图 2 原型与模型堤防

Fig.2 Prototype and model dike

图 3 为模型试验准备过程。将相似土混合均匀并烘干, 再粉碎并过 2 mm 土壤筛; 加入所需水量均匀搅拌后密封并静置, 直到土体含水率基本均匀; 将相似土分层铺设, 每铺设 50 mm 压实 1 次, 通过环刀采样保证每层的压实度约为 90% (与现场 89% 的压实度接



图3 模型试验准备过程

Fig.3 Preparation process of model test

近)后继续铺设,并将管道平稳埋设在所需高度,直至填土高度达到模型设计高度时完成铺设过程。

2.1.4 振动采集系统与拾振器

试验采用DASP振动采集系统采集数据。采集仪型号为INV3062T,拾振器型号为INV982X,所用设备性能稳定,灵敏度较高。

2.2 管道振动传递路径分析

图4为拾振器测点序号布置。编号1*~12*拾振器分别铺设在管道上方、下方、侧面紧贴管道(6*、9*、12*铺设在管道侧面拾振器);编号13*~15*、17*~19*拾振器铺设在堤防土体内部;编号16*拾振器铺设在堤顶,管道上方与管道下方的拾振器均距管道25 cm。

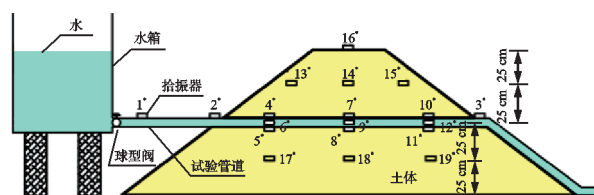


图4 拾振器测点序号布置

Fig.4 Layout of vibration pickup measurement points numbers

堤防外各测点传递熵如图5所示。由图可知, $T_{(1^* \rightarrow 2^*)} > T_{(2^* \rightarrow 1^*)}$ 、 $T_{(3^* \rightarrow 2^*)} > T_{(2^* \rightarrow 3^*)}$,表明振动由管道出水口传递到管道进入堤防处,但管道穿出堤防处振动强于管道进入堤防处,振动在此处逆水流方向传递;同理, $T_{(7^* \rightarrow 4^*)} > T_{(4^* \rightarrow 7^*)}$ 、 $T_{(7^* \rightarrow 10^*)} > T_{(10^* \rightarrow 7^*)}$,表明管道中心位置受土压力变形最大,故产生较大振动并向管道两端传递; $T_{(7^* \rightarrow 14^*)} > T_{(14^* \rightarrow 7^*)}$ 、 $T_{(8^* \rightarrow 18^*)} >$

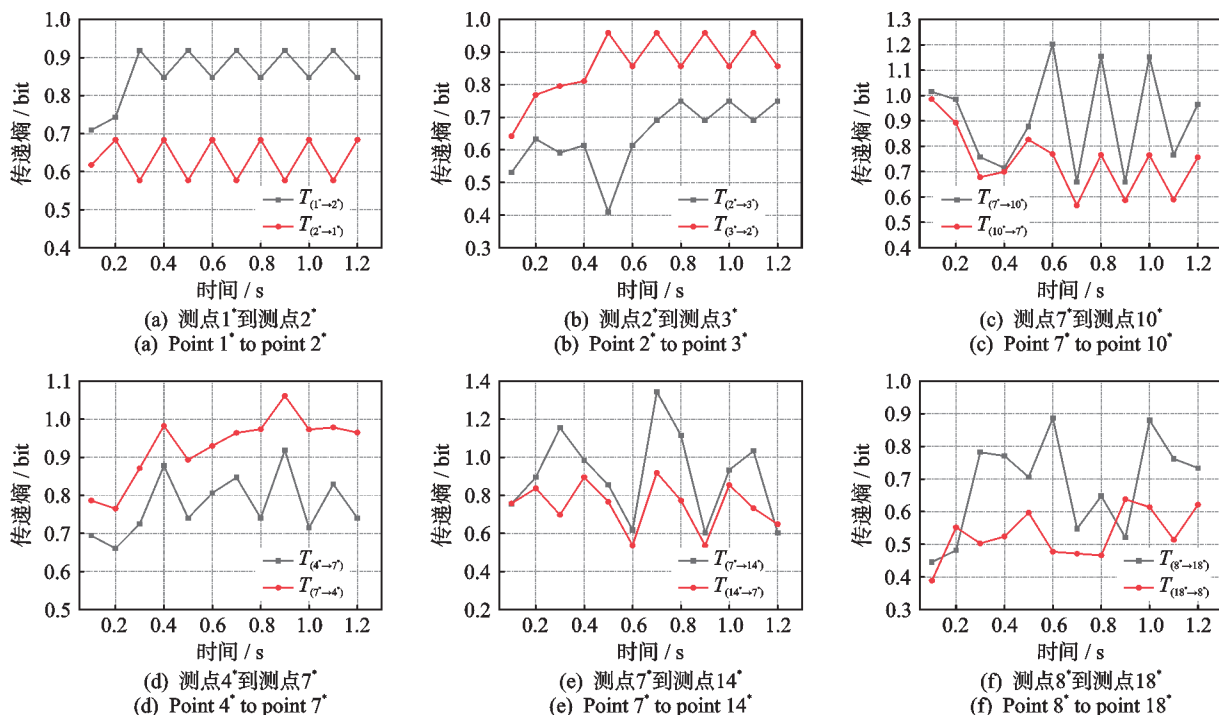


图5 堤防外各测点间传递熵

Fig.5 Transfer entropy between measurement points outside the dike

$T_{(18^{\circ} \rightarrow 8^{\circ})}$,说明振动由管身向土体上下传递,振动较强位置在管周附近。受篇幅限制,各测点传递熵不再逐一列出,模型堤防土体内部各测点间的 ITR 如表 4 所示。

表 4 模型堤防土体内部各测点间 ITR
Tab.4 ITR between measuring points inside the model dike soil mass %

测点	ITR	测点	ITR	测点	ITR	测点	ITR
1°→2°	36.92	13°→16°	50.22	15°→16°	68.29	8°→18°	28.11
2°→3°	28.97	7°→14°	66.70	13°→14°	69.11	11°→19°	30.47
3°→10°	48.56	14°→16°	75.66	14°→15°	50.00	17°→18°	33.41
4°→13°	60.81	10°→15°	47.87	5°→17°	34.36	18°→19°	30.63

从 ITR 角度定量分析穿堤管道振动传递路径与传递熵分析结果一致,说明 2 种方法均能够有效识别穿堤管道振动传递路径。堤防内振动传递路径如图 6 所示。

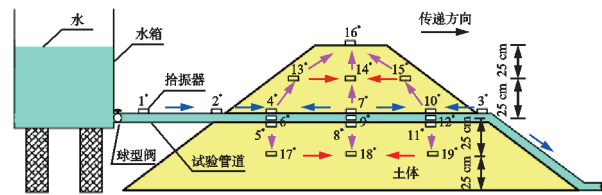


图 6 堤防内振动传递路径
Fig.6 Vibration transmission path inside the dike

振动在管道上主要沿顺水流传递,管道中心位置(7°~9°)振动向 2 个方向传递(此处管道由于受压变形产生较强振动);水流经过堤防内复杂的耦合作用在管道出堤处(3°)形成强烈振动,振动向 2 个方向传递;堤防内部水平方向,振动由堤防两端向中心传递;堤防内部垂直方向,振动由管身向堤防顶部与底部传递。此外,7°→14°、14°→16°和 8°→18°的 ITR 分别为 66.70%、75.66% 和 28.11%,管道振动向上传递能量是向下传递的 2 倍以上,说明穿堤管道上方的振动较强。

2.3 减振措施对穿堤管道振动的影响

在实际工程中,管道进出堤防处经常设置镇墩、支墩等接触类约束,可降低管道部分振动^[15]。但从各种穿堤管道破坏事故可知,目前常见的减振措施仍不能保证管道的安全。因此,从工程实际、安全稳定、经济合理角度出发,选用砂石、PVC 塑料、橡胶等 3 种常见材料,研究不同材料对穿堤管道的减振效果^[16-17]。堤防减振材料铺设如图 7 所示。

图 8 为 3 种材料对堤防内管道减振效果,展示了 3 种减振措施与无减振措施对照组在减振前后的振动加速度峰值、平均值、均方差等参数差异。由图可

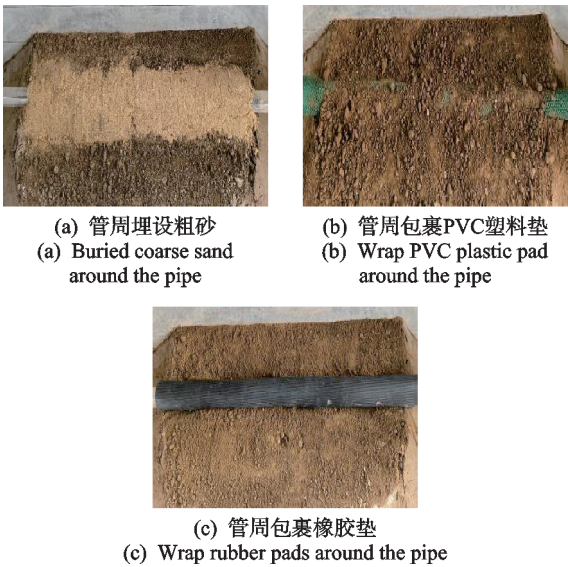
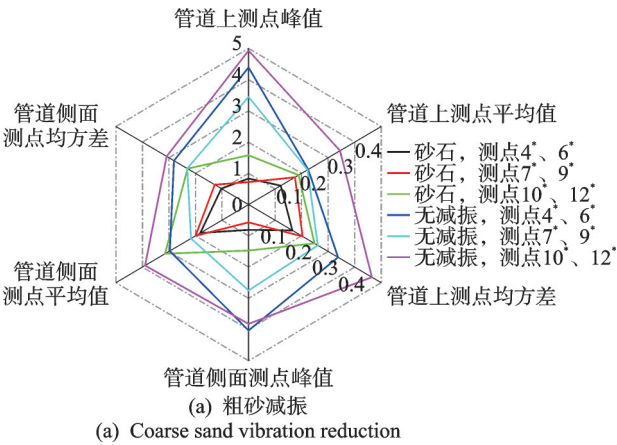


图 7 堤防减振材料铺设
Fig.7 Laying of vibration reduction materials on dike

知,与无减振措施相比,通过在管周铺设砂石填料、管周包裹 PVC 塑料、管周包裹橡胶,均能使管道振动加速度峰值、均值、均方差显著减小。这说明 3 种材料不仅有效降低了管道振动,还能提高管道运行时的稳定性。其中,管周包裹橡胶降低管道峰值与方差的效果在 3 种材料中最为显著,管周包裹 PVC 塑料的管道中部部分测点振动平均值略有上升,说明 PVC 塑料的减振效果不如砂石与橡胶材料。



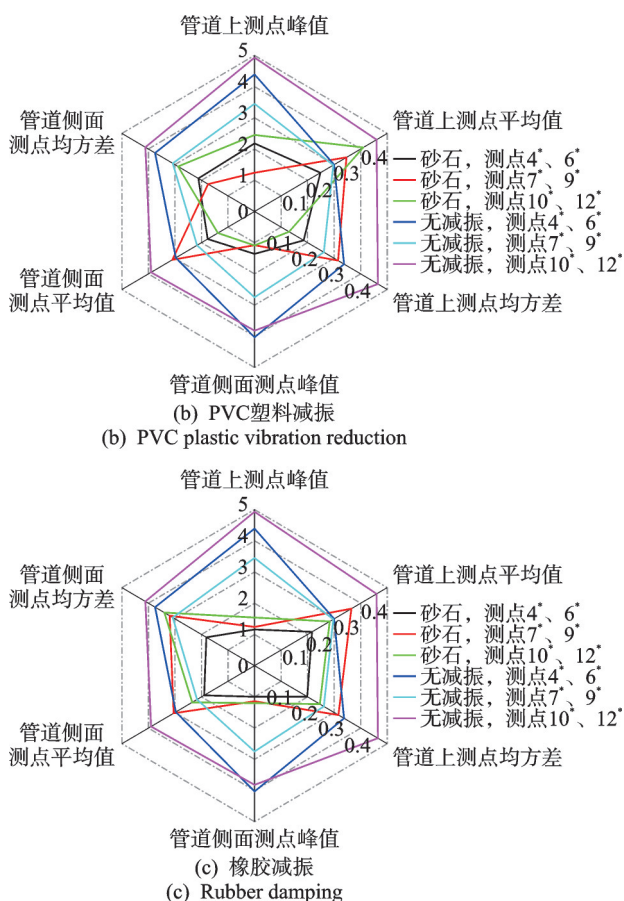
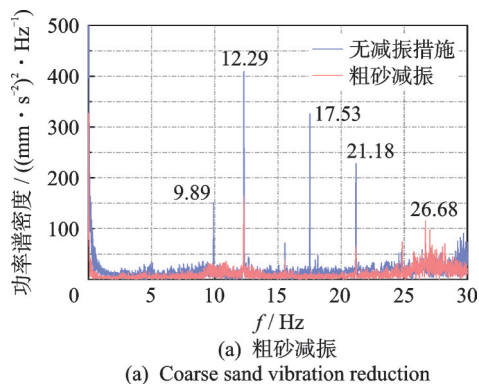


图8 3种材料对堤防内管道减振效果

Fig.8 Vibration reduction effect of 3 materials on pipelines inside the dike

图9为3种材料减振前后管道振动主频变化。由图可知,无减振措施时,管道振动主频主要为9.89、12.29、17.53、21.18 Hz。相较于无减振措施,管周铺设砂石填料、管周包裹PVC塑料、管周包裹橡胶均可大幅减小各主频峰值。管周铺设砂石填料与橡胶材料后,主频9.89、17.53 Hz不再出现(试验管道自振频率约为18 Hz),说明砂石材料与橡胶材料可有效避免结构振动与管道本身形成共振。管周包裹PVC塑料后,管道振动主频仅有9.89 Hz不再出现,说明PVC塑料仅对削弱管道振动主频能量具有较好效果。



(a) Coarse sand vibration reduction

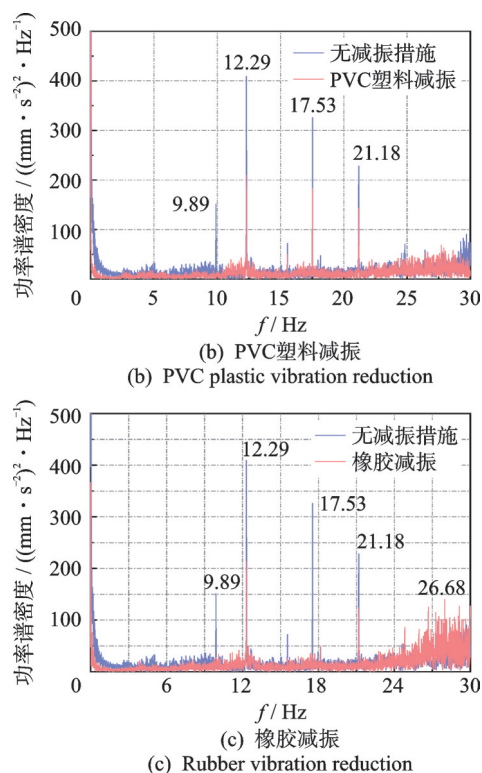


图9 3种材料减振前后管道振动主频变化

Fig.9 Changes in main frequency of pipeline vibration before and after vibration reduction using 3 materials

3 结论

1) 通过传递熵与 ITR 可以得出:振动从阀门内传出,沿管道方向顺水流传递,在管道出堤处存在逆水流方向振动传递;在堤防土体水平方向,堤防中心振动最弱,堤防两端振动较强;在堤防土体垂直方向,振动由管身向堤防顶部与底部传递;振动向堤防上方传递能量大于向下方传递,且多处达到2倍以上,说明穿堤管结构堤防上方振动比下方振动更强。

2) 与无减振措施相比,铺设砂石与橡胶后,管道振动加速度峰值、均值与均方差均有显著降低;管道振动主频9.89、17.53 Hz不再出现,有效避免了与管道本身形成共振。PVC塑料减振虽不能改变管道主频,但与无减振措施相比,对削弱穿堤管道振动能量仍具有较好效果。

参考文献

- [1] BAI T, SUN X G, WEI J, et al. Hydrological response and ecological flow optimization in water diversion area of inter-basin water diversion project[J]. Water Resources Management, 2022, 36(15): 5839-5865.
- [2] 张建伟,程梦然,马晓君,等.基于递归理论的泵站压力管道运行状态监测[J]. 振动、测试与诊断, 2020,

- 40(3): 481-488.
- ZHANG Jianwei, CHENG Mengran, MA Xiaojun, et al. Monitoring operating condition of pipeline of pumping stations based on permutation entropy[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3): 481-488.(in Chinese)
- [3] YOU S, SUN J N. Deformation and control of super-large-diameter shield in the upper-soft and lower-hard ground crossing the embankment[J]. Applied Sciences, 2022, 12(9): 4324-4324.
- [4] BRYANSKI I A. Experimental determination of hydrodynamic resistance coefficients and the lifting force of various pipeline crossing methods[J]. Power Technology and Engineering, 2023, 56(2): 181-185.
- [5] 王海军, 涂凯, 练继建. 基于结构声强的水电站厂房振动传递路径研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1247-1252, 1260.
- WANG Haijun, TU Kai, LIAN Jijian. Research on transfer path of vibrations of hydropower house based on structural intensity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1247-1252, 1260.(in Chinese)
- [6] 职保平, 尼玛, 秦净净, 等. 轴流式水轮机组振动传递路径分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(17): 64-69, 93.
- ZHI Baoping, NI Ma, QIN Jingjing, et al. Transmission path analysis for vibration of axial flow turbine unit [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(17): 64-69, 93.(in Chinese)
- [7] 侯慧敏, 周冬蒙, 田俊姣, 等. 泵站压力管道振动特性分析及减振优化设计[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 95-99.
- HOU Huimin, ZHOU Dongmeng, TIAN Junjiao, et al. Vibration characteristics analysis and vibration reduction optimization design of pump station pressure pipeline[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(8): 95-99.(in Chinese)
- [8] 王德洋, 朱鸿鹄, 吴海颖, 等. 地层塌陷作用下埋地管道光纤监测试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1125-1131.
- WANG Deyang, ZHU Honghu, WU Haiying, et al. Experimental study on buried pipeline instrumented with fiber optic sensors under ground collapse[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1125-1131. (in Chinese)
- [9] 韩俊艳, 王小强, 郭之科, 等. 纵向非一致激励下埋地管道的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1256-1266.
- HAN Junyan, WANG Xiaoqiang, GUO Zhike, et al. Shaking table test of buried pipelines under longitudinal non-uniform excitation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1256-1266. (in Chinese)
- [10] HUERA-HUARTE F. Suppression of vortex-induced vibration in low mass-damping circular cylinders using wire meshes[J]. Marine Structures, 2017, 55: 200-213.
- [11] SCHREIBER T. Measuring information transfer[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(2): 461-464.
- [12] OVERBEY L A, TODD M D. Dynamic system change detection using a modification of the transfer entropy[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 322(1/2): 438-453.
- [13] 张建伟, 杨灿, 黄锦林, 等. 基于传递熵的泵站管道振动传递路径特性分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 47-52.
- ZHANG Jianwei, YANG Can, HUANG Jinlin, et al. Analysis of the pipeline transfer path characteristics of pumping stations based on transfer entropy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(15): 47-52.(in Chinese)
- [14] 朱叶艇, 张桓, 张子新, 等. 盾构隧道推进对邻近地下管线影响的物理模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(supp2): 151-160.
- ZHU Yeting, ZHANG Huan, ZHANG Zixin, et al. Physical model test study of influence of advance of shield tunnel on adjacent underground pipelines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(supp2): 151-160. (in Chinese)
- [15] WANG J Y, DENG C S, ZHANG S B, et al. Research on vibration control in a reciprocating compressor piping system using an orifice tube structure[C]//2019 2nd International Conference on Safety Produce Informatization (IICSPI), Chongqing, China: IEEE, 2019: 133-136.
- [16] LEE C L, CHEN Y T, CHUNG L L, et al. Optimal design theories and applications of tuned mass dampers [J]. Engineering Structures, 2006, 28(1): 43-53.
- [17] 秦红蕾, 葛学礼, 申世元, 等. 低造价天然橡胶垫隔震层抗震设计研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(2): 96-100.
- QIN Honglei, GE Xueli, SHEN Shiyuan, et al. Study on seismic design of low-cost natural rubber cushion isolation layer [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2021, 43(2): 96-100.(in Chinese)



第一作者简介: 张建伟,男,1979年3月生,博士、教授。主要研究方向为水工结构耦联振动与安全。曾发表《Numerical simulation and experimental study of fluid-structure interactions in elastic structures based on the SPH method》(《Ocean Engineering》2024, Vol.301)等论文。

E-mail: zjwcivil@126.com