

基于波动理论的穿堤管道振动影响范围研究*

张建伟¹, 邢帅^{1,4}, 黄锦林², 江琦¹, 叶合欣³

(1. 华北水利水电大学水利学院 郑州, 450046) (2. 广东省水利水电科学研究院 广州, 510635)
(3. 广东省水利水电技术中心 广州, 510635) (4. 中国水利水电科学研究院 北京, 100048)

摘要 针对供排水穿堤管道不规则振动影响堤防安全运行的问题,提出了将波动理论和振动传递特性相结合的方法。首先,建立堤防、穿堤管道、镇墩、支墩以及无限半空间的有限元-无限元耦合模型,研究穿堤管道振动诱发堤防的振动传递问题;其次,引入排列熵量化振动指标,构建特征点间频谱相关关系;最后,综合确定管道振动对堤防的影响范围。研究表明:采用无限元处理堤防边界条件,数值计算结果与原型观测相比,振动强度平均误差为 4.38%,模态最大误差为 4.9%;管道振动主频为 23.8 Hz 和 74.3 Hz;水平方向上,不规则振动以管轴线为中心向四周对称传递,其影响范围为 10 m,振动能量和熵值随着传递距离的增加逐渐变小,管道主频与优势频率逐渐消失,堤防自振频率凸显,振动能量在沿管轴线方向上呈现先增大后减小的趋势;在竖直方向上,管道不规则振动的影响范围为 7.5 m,振动能量随着深度的增加呈现先增大后减小的趋势。该研究成果可为穿管堤防后续建设以及稳定运行提供参考。

关键词 流激振动;穿管堤防;振动影响范围;有限元-无限元

中图分类号 TV31;TH17

引言

为缓解水资源短缺、紧张的局面,满足不同流域调水的需求,穿堤管道已成为引调水工程中不可或缺的部分。由于穿堤管道爬坡较高,需要大功率泵站机组作为动力源,在供水过程中管道产生不规则振动沿堤防土体向四周传递,影响堤防安全与稳定性,因此研究穿堤管道振动对堤防的影响范围十分必要。

穿堤管道诱发堤防场地响应问题实质上是水流激励与管道相互作用产生的流激振动,以振动波的形式向堤防四周传播的过程。在管道振动方面,张鹏等^[1]研究了在流固耦合作用下脉动幅值与频率对管道振动的影响,发现管道响应与脉动幅值成正比,耦合作用下管道固有频率会降低。肖斌等^[2]建立泵站管道流固耦合仿真模型,发现管道变形主要发生在弯管段及连接管段。朱竑祯等^[3]发现低频荷载更容易引发管道的疲劳损伤。Xu等^[4]采用模型试验研究海底管道振动对周围粉质土体超静孔隙水压力的影响,发现土体的液化速率与管道振幅成正比。

在堤防安全稳定方面,Teng等^[5]分析了跨河桥梁对堤防安全稳定的影响。Su等^[6]以实际工程为例,结合堤防渗流破坏以及失稳破坏机理,提出堤防危险阈值水位判别法。蔡新等^[7]分析了地震对堤防的安全稳定影响,并模拟了溃堤后洪水的淹没范围。甘磊等^[8]计算了长江大堤在历史最高水位条件下,不同深度裂缝堤防的渗流稳定以及边坡安全稳定性。胡峰强等^[9]分析了堤防上主桥墩对堤防安全稳定的影响,表明大桥建成初期时的桥梁荷载对堤防安全最不利。目前,对于单一的管道振动或者堤防渗流稳定性研究相对成熟,但鲜有对穿堤管道振动机理及振动传播规律的研究。

笔者通过引入有限元-无限元理论,施加无限元边界,建立管道、堤防、镇墩、支墩、地基以及无限半空间有限元-无限元耦合模型,利用荷载反演理论根据实测数据确定激励荷载,分析穿管堤防流激振动诱发场地响应问题。从振动量级、振动特性 2 个角度结合排列熵理论,确定穿堤管道对堤防的振动影响范围。

* 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);华北水利水电大学研究生教育创新计划资助项目(NCWUYC-2023005)

收稿日期:2023-05-19;修回日期:2023-08-14

1 基本原理

1.1 波动问题无限单元法

运用有限元进行动力分析时,存在固定边界无法模拟真实的无限场域问题,会导致应力波发生反射回弹,造成一定区域内波动的叠加与抵消,进而影响分析结果的准确性。因此,笔者引入无限单元法,设置阻尼吸收能量,从而实现无限场域的精准模拟。

振动波 $Z_0(x, y, t)$ 在有限元以及无限元交界面上产生的动应力响应 $\sigma_{ij}^z(x, y, t)$ 由2部分组成,即振动波动在有限元节点上产生的自由场应力以及在无限元节点之上产生的阻尼力,且满足关系

$$\sigma_{ij}^z(x, y, t) = \sigma_{ij}^{z_0}(x, y, t) + \sigma_{ij}(x, y, t) \quad (1)$$

其中: $\sigma_{ij}(x, y, t)$ 为阻尼力; $\sigma_{ij}^{z_0}(x, y, t)$ 为自由场应力。

根据半无限场空间波动理论,振动波在有限元节点处产生的自由场节点应力在切向以及法向上的投影为

$$\begin{cases} \sigma(x, y, t) = \rho c_s z_s(x, y, t) \\ \tau(x, y, t) = \rho c_p z_p(x, y, t) \end{cases} \quad (2)$$

其中: ρ 、 c_s 、 z_s 分别为材料密度、材料剪切波速以及材料压缩波速; σ 、 τ 分别为有限元节点上的切向及法向应力。

结合有限元阻尼器材料力学特性方程,当有应力波传递时,无限元边界处的切向以及法向应力表示为

$$\begin{cases} \sigma_v(x, y, t) = 2\rho c_s Z_0(x, y, t) \\ \tau_v(x, y, t) = 2\rho c_p Z_0(x, y, t) \end{cases} \quad (3)$$

其中: σ_v 、 τ_v 分别为无限元节点上的切向应力与法向应力。

1.2 有限元-无限元耦合理论

根据有限元与无限元交界面上的应力位移的一致性,建立平衡方程,求解未知场域之内任意节点的应力以及位移分量,耦合过程如下。

1) 分别针对于临近域与远距域建立运动方程

$$\begin{cases} L_1(\{X^1\}, \{F^1\}) = 0 \\ L_2(\{X^2\}, \{F^2\}) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中: L_1 、 L_2 分别为临近域与远距域相关函数关系; X 为待求解变量; F 为交界面上的相互作用力; 角标 1、2 分别代表临界域与远距域。

2) 建立交界面位移方程

$$\begin{cases} \{U^1\} = f_1(\{X^1\}, \{F^1\}) \\ \{U^2\} = f_2(\{X^2\}, \{F^2\}) \end{cases} \quad (5)$$

其中: U 为位移; f 为位移与应力及求解变量之间的相关函数关系。

3) 建立交界面连续方程

$$\begin{cases} \{U^1\} = \{U^2\} \\ \{F^1\} + \{F^2\} = \{0\} \end{cases} \quad (6)$$

4) 求解式(4)~(6),得到临近域与远距域的应力、应变和位移等未知变量。

1.3 排列熵理论

现有一时间序列 $\{X(i), i=1, 2, \dots, N\}$, 其序列长度为 N , 对序列中的每一个元素进行相空间重构,得到的空间矩阵为

$$\begin{pmatrix} x(1) & x(1+\tau) & \dots & x(1+(m-1)\tau) \\ x(2) & x(2+\tau) & \dots & x(2+(m-1)\tau) \\ x(j) & x(j+\tau) & \dots & x(j+(m-1)\tau) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(K) & x(K+\tau) & \dots & x(K+(m-1)\tau) \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中: $j=1, 2, \dots, K$; τ 为延迟时间; m 为嵌入维数; K 为矩阵行数。

假设经过重构得到的相空间矩阵中第 j 个重构向量 $X(j)$ 为 $\{x(j), x(j+\tau), \dots, x(j+(m-1)\tau)\}$, 将其按照内部元素的大小进行升序排列,即

$$x(i+(j_1-1)\tau) \leq \dots \leq x(i+(j_m-1)\tau) \quad (8)$$

其中: j_1, j_2, \dots, j_m 为向量 $X(j)$ 中每个元素排序前所在列的索引。

假设符号序列 $S(l)$ 出现的概率为 P_k , 则对于一维时间序列 $X(i)$ 的 k 个重构向量对应的符号序列, 排列熵可表示为

$$H(m) = - \sum_{j=1}^k P_j \ln(P_j) \quad (9)$$

2 工程简介及模型的建立

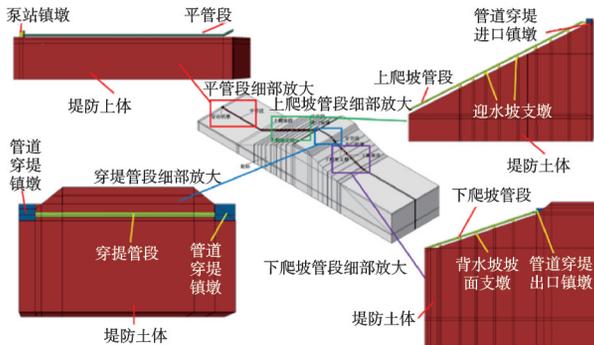
2.1 工程简介

北江大堤是广州市防御西江和北江洪水的重要屏障,国家一级堤防,全长为 63.35 km,堤身宽度为 8~12 m,安全超高为 1.5 m,堤顶宽度为 6~7 m,堤

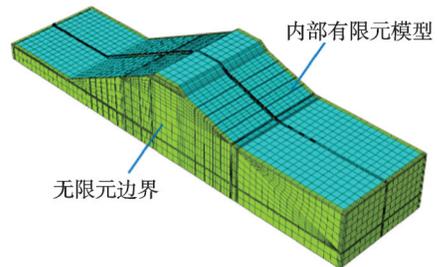
外坡坡比为1:3,内坡坡比为1:2。以北江大堤桩号29+450~29+500段的某供排水穿堤管道为研究对象,水流以堤外坡泵站机组为开端,历经平管段、上爬坡管段、穿堤管段和下爬坡管段到达堤内坡。管道上爬坡段设有8个支墩,下爬坡段设有4个支墩,并在管道穿堤段进出口位置设有混凝土镇墩。

2.2 有限元-无限元耦合模型

有限元数值模型宽度为60 m,以管轴线为中心,左右延伸各30 m,数值模型包括管道、堤防、镇墩和支墩。计算时将整体模型视为理想的弹性体,不考虑相关材料的塑性变形。图1为穿管堤防有限元-无限元模型示意图。



(a) Enlarged view of the structural details of each section of the pipeline embankment



(b) Grid diagram of pipeline embankment model

图1 穿管堤防有限元-无限元模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of finite element infinite element model for pipeline embankment

依据地层实际勘探资料,有限元模型土层分布自上而下依次为素填土层、粉质黏土层、淤泥质土层和深层砂砾层。深层砂砾底部以及整个堤防模型的

4个侧面均设置为CIN3D8无限元单元。将内部有限单元与边界无限单元绑定,实现有限元模型与无限元边界耦联。堤防地层参数取值如表1所示。

表1 堤防地层参数取值

Tab.1 Parameters for Embankment Strata

层数	类型	厚度/m	剪切波速/(m·s ⁻¹)	压缩波速/(m·s ⁻¹)	动弹性模量/kPa	动泊松比	ρ /(kg·m ⁻³)	阻尼比
1	素填土	3	172.3	310.7	135 200	0.330	1 898	0.057
2	粉质黏土	8	246.5	443.1	324 000	0.318	1 929	0.042
3	淤泥质土	3	302.6	198.7	126 300	0.251	1 796	0.028
4	深层砂砾	5	380.8	598.4	682 460	0.325	2 167	0.013

当网格划分满足在一个最小波长之内至少存在8个单元时,有限元的计算结果与实测数据吻合较好^[10-11]。结合管道振动主频分布,在保证计算结果精度的前提下,确定网格单元尺寸为0.2 m。穿管堤防模型网格图1(b)所示。

布设在管道进出口混凝土镇墩上;D测点位于堤顶道路上。同时,为了使模型整体响应更贴合实际情况,依据荷载反演基本理论^[12-13]得到3个方向的等效荷载,并将其施加于有限元模型。

3 有限元-无限元耦合模型准确性验证

3.1 振动响应验证

3.1.1 振动量级合理性验证

依据原型观测位置分布情况,在数值模型对应位置选取观测点,图2为穿管堤防测点布置位置示意图。其中:A、B、F测点布设在管道上;C、E测点

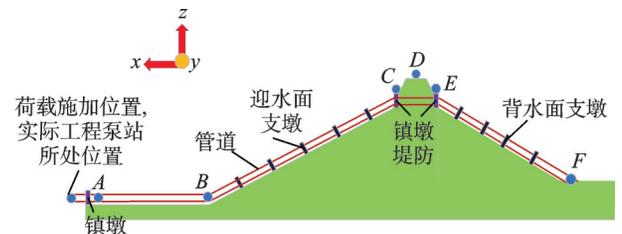


图2 穿管堤防测点布置位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the layout and location of measurement points for pipeline embankments

图 3 为 3 个方向荷载激励反演时程图。提取测点 A 至测点 F 的响应数据,并与各测点的实测数据进行对比。不同测点各方向振动强度变化如图 4 所示。可见,有限元-无限元耦合模型能够总体反映不同测点

在 3 个方向的振动响应特性,且管道测点的振动量级大于堤防测点振动量级。耦合模型计算的测点各向的振动加速度标准差整体略大于实测数值,整体平均误差仅为 4.38%,验证了耦合模型的准确性。

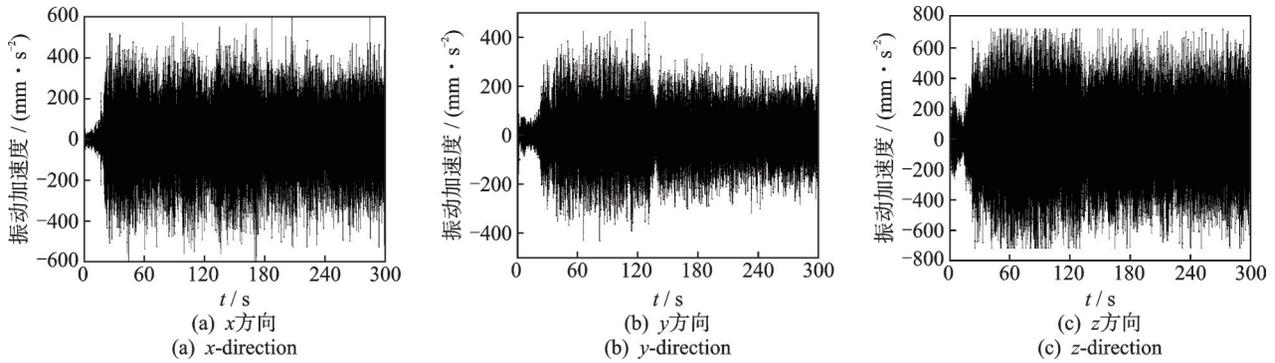


图 3 3 个方向荷载激励反演时程图

Fig.3 Time history of load excitation inversion in three directions

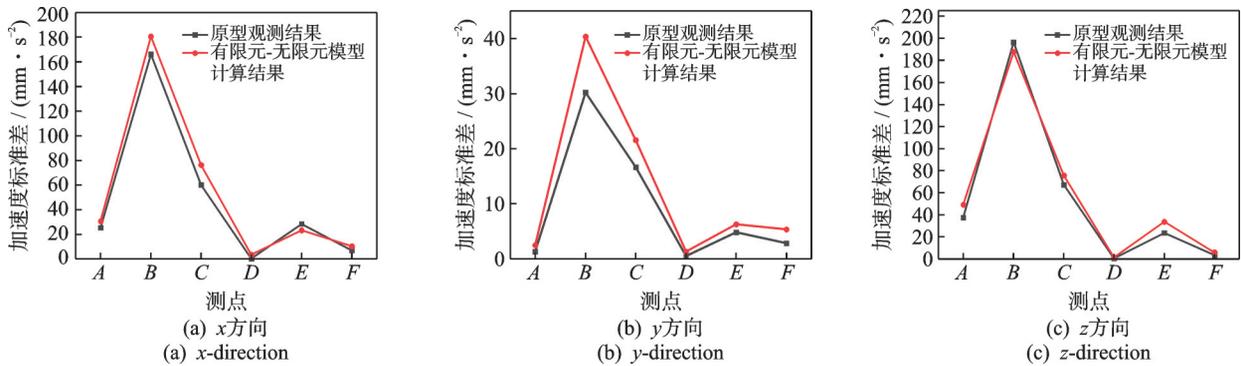


图 4 不同测点各方向振动强度变化

Fig.4 Changes in vibration intensity in different directions at different measurement points

3.1.2 振动特性合理性验证

以 B 测点为例,通过对比原型观测与有限元-无限元耦合模型计算得到的场地振动响应功率谱相关性,进一步验证模型的准确性。

B 测点各方向振动加速度功率谱密度如图 5 所示。可见,B 测点的多数能量集中在一个或多个频率区间内,具有明显的高频白噪声频率区间带。x 方向的优势频率为 6.2、23.8 和 74.3 Hz,振动能量主

要集中在 22~26 Hz 和 74~78 Hz 这 2 个频率区间。y 方向的优势频率为 51.4 Hz 和 74.3 Hz,能量主要集中在 48~80 Hz 频率区间。z 方向的优势频率为 9.1、25.4 和 74.3 Hz,能量集中在 8~14 Hz、24~30 Hz 和 72~78 Hz 这 3 个优势频率区间。从耦合模型计算结果看,3 个方向的振动主频与能量集中区间变化不大,与原型数据一致,模型合理性得到进一步验证。

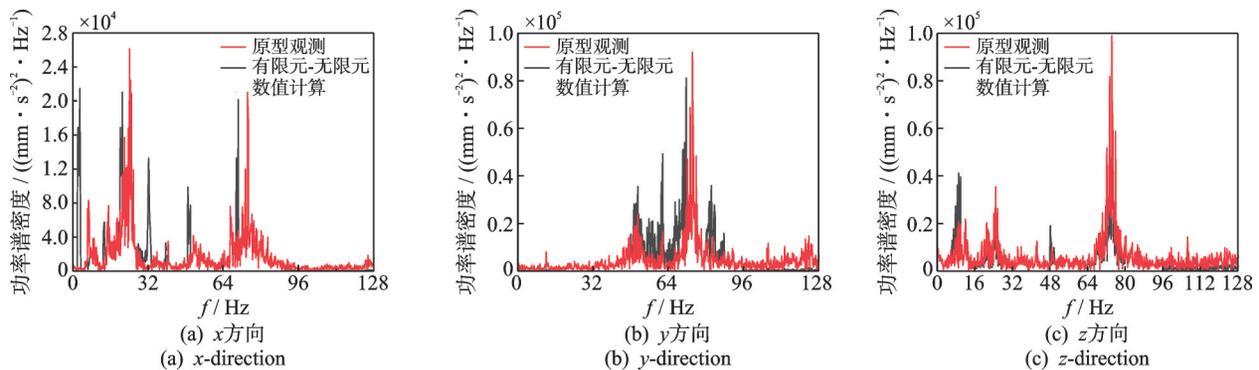


图 5 B 测点各方向振动加速度功率谱密度

Fig.5 Spectral density diagram of vibration acceleration power in all directions of measuring point B

3.2 自振特性验证

特征系统实现算法(eigensystem realization algorithm,简称ERA)可以快速求得结构模态参数,且具有计算量小、精度高等特点^[14-15]。根据文献[16-17],对泵站运行时管道测点以及堤防测点的实际振动信号进行模态参数识别,得到管道前5阶的自振频率,并与耦合模型计算结果进行对比。表2为管道模态参数识别结果。

表2 管道模态参数识别结果

Tab.2 Pipeline modal parameter identification results			
模态阶次	ERA 模态参数识别	耦合模型计算	误差
	结果/Hz	结果/Hz	
1	1.477	1.499	0.015
2	3.955	4.039	0.021
3	7.953	8.323	0.046
4	13.553	14.242	0.048
5	17.563	16.706	0.049

由表2可知,有限元-无限元耦合模型的计算结果与采用特征系统实现算法计算的前5阶结果比较接近,数据误差不超过5%。因此,有限元-无限元耦合模型可以有效模拟穿管堤防结构的真实运行状况。

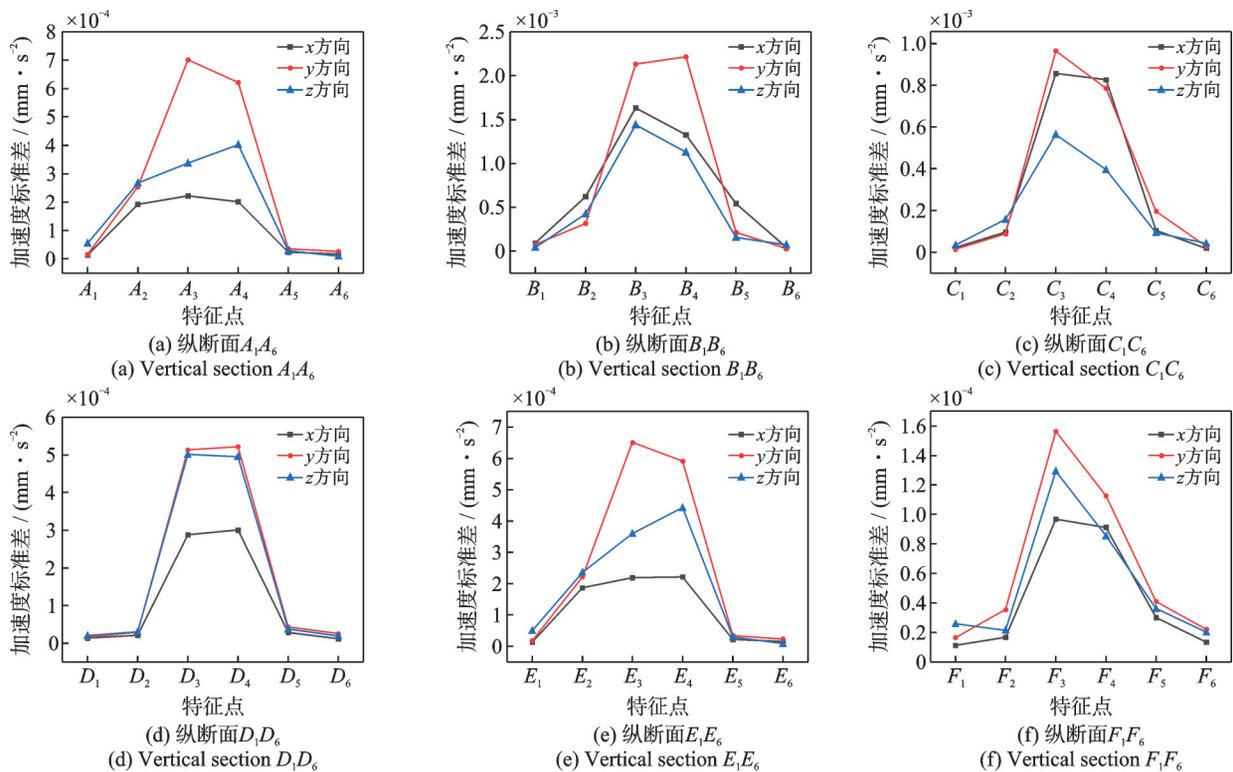


图7 各纵断面特征点振动加速度分布示意图

Fig.7 Distribution diagram of vibration acceleration at characteristic points of each vertical section

4 穿管堤防场地振动特性分析

为了研究流激振动作用下堤防的响应特性,额外选取36个特征点及若干特征断面进行分析。特征点及特征断面位置如图6所示。断面分为2类:①与管轴线平行的横断面,如断面 A_1F_1 ;②与管轴线垂直的纵断面,如断面 A_1A_6 。纵断面相邻特征点之间的距离为5m。为了方便对比分析,后续将6个原始测点和额外选取的36个特征点统一称为特征点。

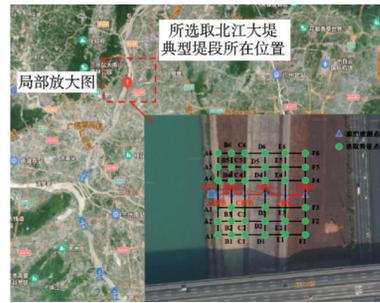


图6 特征点及特征断面位置

Fig.6 Location map of feature points and feature sections

4.1 穿管堤防振动强度分布规律

4.1.1 穿管堤防场地平面振动强度变化规律

图7为穿管堤防各纵断面特征点振动加速度分布示意图。可见,纵断面振动强度以管轴线为中心,呈对称分布规律;特征点距离管轴线距离越远,振动

强度越小;在振动传播初期,振动衰减速度较快,当振动传递到横断面 A_2F_2 与 A_3F_3 后,振动能量虽然继续衰减,但幅度不大。

在 3 个方向的振动中,y 方向振动响应最大,z 方向次之,x 方向最小。得益于混凝土镇墩的固定作用,断面 A_1A_6 各特征点振动强度并不大;断面 B_1B_6 各特征点的振动强度变化规律与断面 A_1A_6 类似,但整体振动强度大于断面 A_1A_6 。由于穿堤管段上部覆土对管道振动的约束及对振动能量的吸收作用,断面 D_1D_6 的振动强度远低于其他断面。断面 E_1E_6 特征点振动强度分布与断面 D_1D_6 类似,但其与激励源距离较远,整体振动强度不大,呈现出以特征点

F_3 为振动强度最大点,向两侧逐渐衰减的规律。

图 8 为穿管堤防各横断面特征点振动加速度分布示意图。由图可知:由于测点 B 处无固定措施,多数横断面 3 个方向的振动在纵断面 B_1B_6 处存在不同程度的放大现象;断面与管道距离越近,管道振动对特征点的影响就越大;断面 A_1F_1 、 A_3F_3 、 A_4F_4 和 A_5F_5 振动强度的衰减规律相似,都遵循随着泵站(振源)距离的增加,振动强度逐渐衰减的规律;横断面 A_2F_2 在特征点 E_2 处有明显的振动放大现象;横断面 A_1F_1 、 A_2F_2 在 x 方向振动强度最大,在 y 方向振动强度最小; A_3F_3 和 A_4F_4 断面在 y 方向的振动能量最为集中,在 z 方向的能量较为发散。

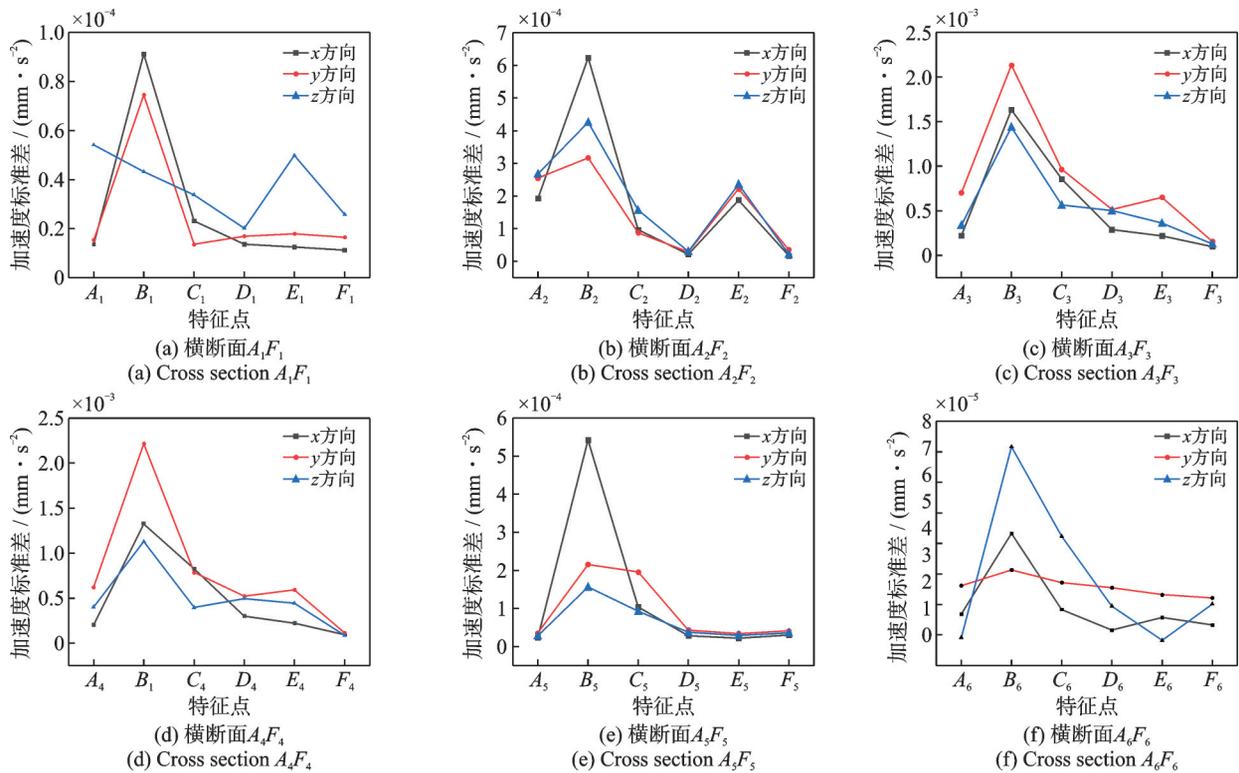


图 8 各横断面特征点振动加速度分布示意图

Fig.8 Distribution diagram of vibration acceleration at characteristic points of each cross section

对于特征点的振动响应来说,熵值越大,代表该点的响应幅值越大,受到管道振动的影响也就越

大。为科学量化管道振动传播规律,借助排列熵理论,计算得到各特征点熵值。表 3 为特征点振动响

表 3 特征点振动响应熵值

Tab.3 Entropy values of vibration response at measurement points and characteristic points

特征点	熵值								
A_6	0.054	B_6	0.058	C_6	0.054	D_6	0.053	E_6	0.052
A_5	0.055	B_5	0.059	C_5	0.055	D_5	0.054	E_5	0.053
A_4	0.142	B_4	0.246	C_4	0.184	D_4	0.092	E_4	0.087
A	0.884	B	0.973	C	0.833	D	0.755	E	0.774
A_3	0.174	B_3	0.183	C_3	0.153	D_3	0.103	E_3	0.074
A_2	0.054	B_2	0.061	C_2	0.056	D_2	0.055	E_2	0.051
A_1	0.052	B_1	0.059	C_1	0.055	D_1	0.051	E_1	0.050
								F_6	0.050
								F_5	0.051
								F_4	0.061
								F	0.688
								F_3	0.054
								F_2	0.051
								F_1	0.050

应熵值。由表3可知,特征点熵值随着与管轴线距离的增加而逐渐减小,与特征点振动强度的变化规律相似,但在过程中呈现出衰减幅度逐渐减小的趋势。当振动传递至 A_5F_5 、 A_2F_2 断面时,熵值处于0.05量级,往后衰减趋于稳定,大多数特征点在此断面熵值变化幅度小于4%。因此,可以认为振动能量衰减在上述2个断面已达到临界值。

4.1.2 穿管堤防场地竖向振动强度变化规律

为研究穿堤管道振动引起场地响应竖向变化规律,以测点4为基准,在下方每隔2.5 m取一个特征点,编号依次为 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 和 G_6 。图9为竖向特征点位示意图。

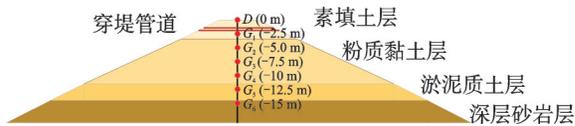


图9 竖向特征点位示意图

Fig.9 Schematic diagram of vertical feature points

竖向特征点振动响应变化如图10所示。可知,除特征点 G_1 距离管轴线较近、振动强度较大之外,其余特征点在3个方向的振动强度随着测点深度的增加而减小,但衰减速度逐渐变小;3个方向的振动强度衰减均在特征点 G_3 时达到临界值,往后

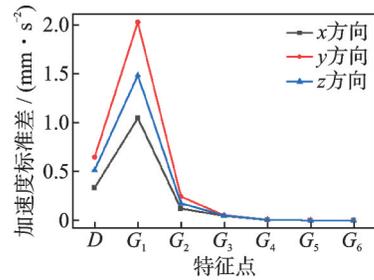


图10 竖向特征点振动响应变化

Fig.10 Vertical characteristic point vibration response distribution diagram

振动强度变化不明显。因此,竖向振动影响范围为堤顶以下7.5 m区域。

4.2 穿管堤防振动频率分布特性

以纵断面 B_1B_6 , 横断面 A_5F_5 为例,研究特征点的频谱变化规律。

图11为纵断面 B_1B_6 各特征点响应功率谱示意图。由图可知:各特征点在 x 方向和 z 方向的振动频谱分布和变化规律较为一致,距离管道较近的特征点,振动能量主要集中于16~82 Hz,结构自身的振动特性主要为低频,表现不明显;随着特征点与管道距离的增加,高频能量集中区间逐渐消失,振动能量越来越集中(主要能量频带变窄),结构的自振特性

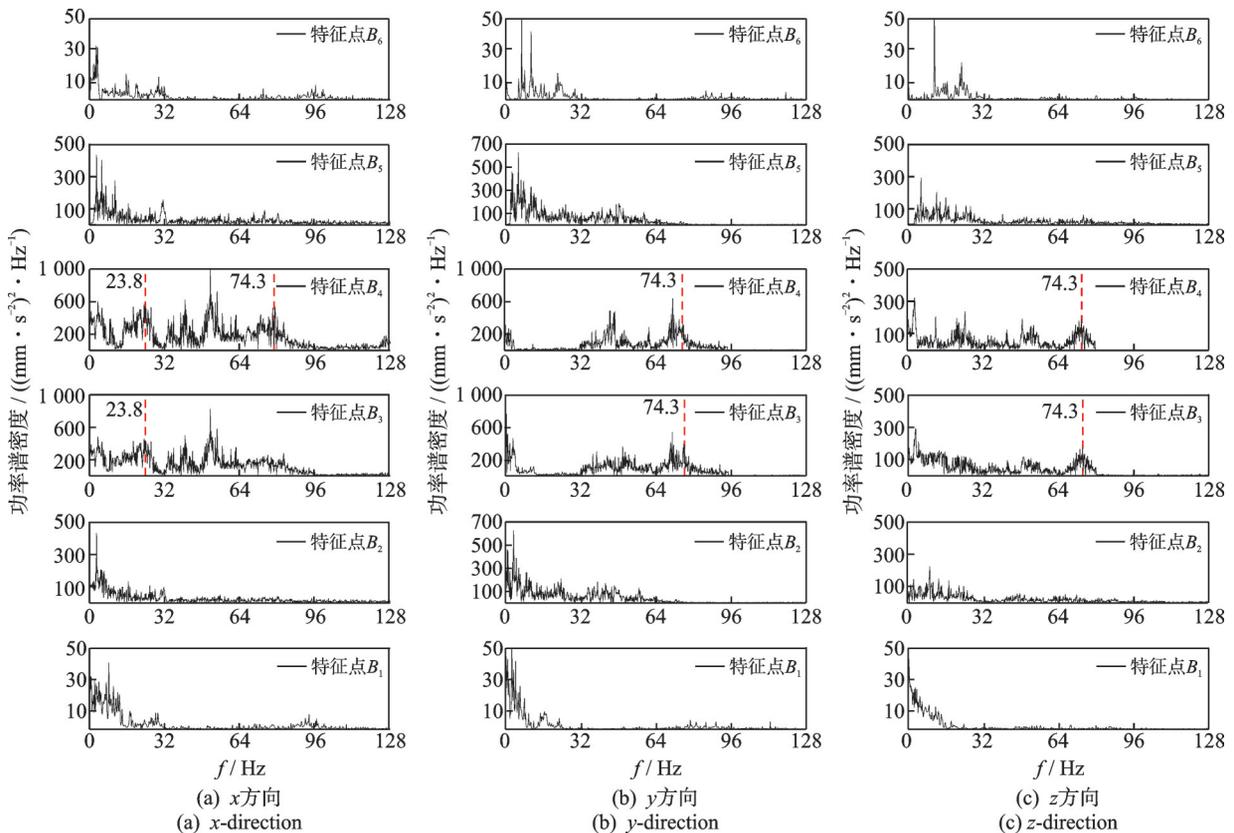


图11 纵断面 B_1B_6 各特征点响应功率谱示意图

Fig.11 Schematic diagram of response power spectrum of each characteristic point in vertical section B_1B_6

得以体现,主要集中在2~10 Hz。总体来看,纵断面特征点在各方向的振动能量随着管道距离的增加而逐渐衰减,且高频能量集中区间逐渐消失,能量有向低频集中的趋势。可见,管道振动在向两侧传递的过程中,管道高频振动能量逐渐衰减,到特征点 B_2 、 B_5 处时,管道高频振动能量完全消失,土体低频自振特性得以凸显。结合该断面各点振动加速度强度变化规律可知,管道不规则振动所产生的能量传递到

特征点 B_2 、 B_5 时已消散,穿堤管道水平向振动影响范围为管轴线左右各10 m区域。

图12为横断面 A_5F_5 各特征点响应功率谱示意图。可见,特征点振动能量变化与振动加速度变化规律相同,均有随着与泵站距离的增加,出现先增大后减小的现象。除特征点 F_5 外, y 方向与 z 方向的振动能量主要集中在2.3~10 Hz和32~64 Hz这2个能量区间,且在3.5 Hz处有一振动能量峰值。

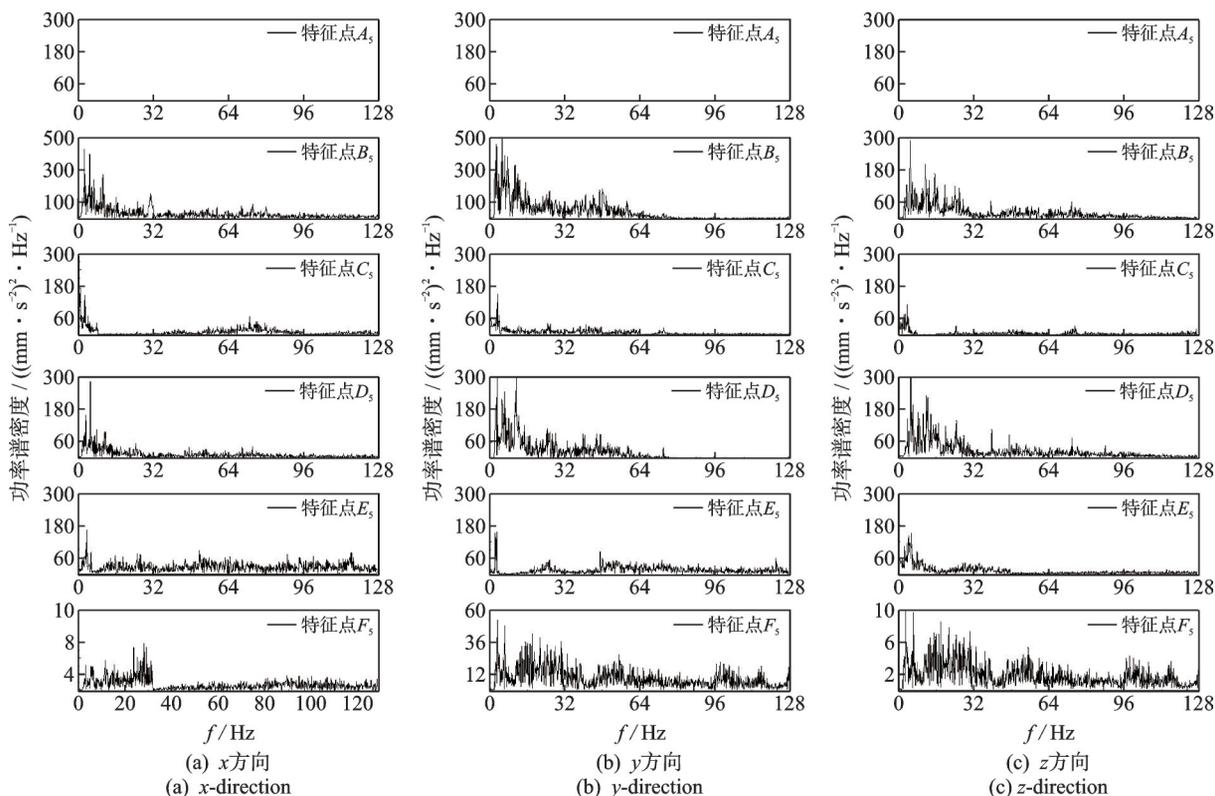


图12 横断面 A_5F_5 各特征点响应功率谱示意图

Fig.12 Schematic diagram of response power spectrum of each characteristic point in cross section A_5F_5

5 结论

1) 有限元-无限元耦合模型可以较为精确地模拟穿管堤防半无限场域在荷载激励下的响应,穿堤管道的振动主频为23.8 Hz和72.3 Hz, z 方向(竖向)振动能量最大, x 方向(顺水流方向)次之, y 方向(垂直水流方向)最小。

2) 不同断面场地振动水平传播规律并不一致,纵断面各特征点随着与管道距离的增加,高频能量区间逐渐消失,振动能量集中在2~10 Hz;横断面除特征点 F_5 外, y 方向与 z 方向的振动能量主要集中在2.3~10 Hz和32~64 Hz。

3) 穿堤管道水平向振动影响范围为管轴线左右各10 m区域;竖向振动影响范围为堤顶以下7.5 m区域。

参 考 文 献

- [1] 张鹏,姚正学,刘思铭.双弯头天然气管道流固耦合振动特性分析[J].安全与环境学报,2022,22(1):115-122. ZHANG Peng, YAO Zhengxue, LIU Siming. Vibration characteristic analysis of double-elbow natural gas pipeline with fluid-solid interaction[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(1): 115-122. (in Chinese)
- [2] 肖斌,周玉龙,高超,等.考虑流体附加质量的输流管道振动特性分析[J].振动与冲击,2021,40(15):182-188. XIAO Bin, ZHOU Yulong, GAO Chao, et al. Analysis of vibration characteristics of pipeline with fluid added mass [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(15): 182-188. (in Chinese)
- [3] 朱竑祯,王纬波,殷学文,等.基于分层模型的功能梯度输流管道耦合振动[J].振动与冲击,2019,38(20):203-209,259.

- ZHU Hongzhen, WANG Weibo, YIN Xuewen, et al. Coupled vibration of functionally gradient fluid transport pipeline based on layered model [J]. *Vibration and Shock*, 2019, 38(20): 203-209, 259. (in Chinese)
- [4] XU J S, XU X Y, ZHANG Y Q, et al. Experimental study on the influence of pipeline vibration on silty seabed liquefaction[J]. *Water*, 2022, 14(11): 1782.
- [5] TENG H, WANG L R, YAN B, et al. Analysis of impacts of crossing bridges on flood control and dike safety [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 780(6): 062058.
- [6] SU H Z, BIN O, ZHENG F, et al. Dual criterion-based dynamic evaluation approach for dike safety[J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(5/6): 1761-1777.
- [7] 蔡新, 李益, 吴威, 等. 地震作用下堤防风险分析研究 [J]. *水力发电学报*, 2011, 30(6): 75-79.
CAI Xin, LI Yi, WU Wei, et al. Study on risk analysis of embankment under earthquake[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(6): 75-79. (in Chinese)
- [8] 甘磊, 吴健, 戴寿晔, 等. 含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(1): 85-90, 101.
GAN Lei, WU Jian, DAI Shouye, et al. Seepage and stability analysis of embankment with construction cracks in tunnel crossing section [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(1): 85-90, 101. (in Chinese)
- [9] 胡峰强, 陈育民, 吕黎明. 临堤基础施工对长江堤防稳定性影响的数值模拟[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2013(6): 594-600.
HU Fengqiang, CHEN Yumin, LÜ Liming. Numerical simulation analysis of the embankment stability of Yangtze river near the foundation construction[J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2013(6): 594-600. (in Chinese)
- [10] DAVIS R N, NEELY A M, JONES S E. Mass loss and blunting during high-speed penetration[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Journal of Mechanical Engineering Science*, 2004, 218(9): 1053-1062.
- [11] 陈小伟, 杨世全, 何丽灵. 动能侵彻弹体的质量侵蚀模型分析[J]. *力学学报*, 2009, 41(5): 739-747.
CHEN Xiaowei, YANG Shiquan, HE Liling. Modeling on mass abrasion of kinetic energy penetrator [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2009, 41(5): 739-747. (in Chinese)
- [12] 张建伟, 崔广涛, 马斌, 等. 基于泄流响应的高拱坝振源时域识别[J]. *天津大学学报*, 2008, 41(9): 1124-1129.
ZHANG Jianwei, CUI Guangtao, MA Bin, et al. Time domain identification of excitation source for high arc dam based on discharge flow vibration response [J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(9): 1124-1129. (in Chinese)
- [13] 李火坤, 王刚, 魏博文, 等. 基于敏感性分析与粒子群算法的拱坝原型动弹性模量反演方法[J]. *水利学报*, 2020, 51(11): 1401-1411.
LI Huokun, WANG Gang, WEI Bowen, et al. Inversion of prototype dynamic elastic modulus of arch dam based on sensitivity analysis and particle swarm optimization[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(11): 1401-1411. (in Chinese)
- [14] 蒲黔辉, 洪彧, 王高新, 等. 快速特征系统实现算法用于环境激励下的结构模态参数识别[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(6): 55-60.
PU Qianhui, HONG Yu, WANG Gaoxin, et al. Fast eigensystem realization algorithm based structural modal parameters identification for ambient tests[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(6): 55-60. (in Chinese)
- [15] 崔定宇, 辛克贵, 祁泉泉. 扩展特征系统实现算法的模态参数识别特性研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(8): 49-53.
CUI Dingyu, XIN Kegui, QI Quanquan. Modal parameter identification research for the extended eigensystem realization algorithm[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(8): 49-53. (in Chinese)
- [16] 张建伟, 康迎宾, 张翌娜, 等. 基于泄流响应的高拱坝模态参数辨识与动态监测[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(9): 146-150, 249.
ZHANG Jianwei, KANG Yingbin, ZHANG Yina, et al. Modal parameter identification and dynamic monitoring of high arch dams based on discharge response[J]. *Vibration and Shock*, 2010, 29(9): 146-150, 249. (in Chinese)
- [17] 张建伟, 李火坤, 练继建, 等. 基于环境激励的厂房结构损伤诊断与安全评价[J]. *振动、测试与诊断*, 2012, 32(4): 670-674.
ZHANG Jianwei, LI Huokun, LIAN Jijian, et al. Damage diagnosis and safety evaluation of factory building structures based on environmental excitation [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(4): 670-674. (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, No.11)等论文。
E-mail: zjwcivil@126.com

通信作者简介:黄锦林,男,1971年6月生,博士、教授级高级工程师。主要研究方向为水工结构流固耦合振动与水利工程安全评估。
E-mail: 1657826640@qq.com