

# 流激振动对穿管堤防稳定性影响分析<sup>\*</sup>

张建伟<sup>1</sup>, 侯 福<sup>1,2</sup>, 江 琦<sup>1</sup>, 黄锦林<sup>3</sup>, 叶合欣<sup>4</sup>

(1. 华北水利水电大学水利学院 郑州, 450046)

(2. 雅砻江流域水电开发有限公司 成都, 610051)

(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** 为研究管道过流产生的流激振动对穿管堤防稳定性的影响,以广东省某穿管堤防为例,首先,建立管道-堤防三维有限元模型,依据渗流计算确定最不利穿管工况,得到穿管堤防最大渗透力;其次,根据实测振动响应反演流激振动荷载,结合有限元动力法与强度折减法进行边坡动力稳定性分析;最后,采用间接耦合实现渗透力-流激振动多荷载耦合,研究渗流与流激振动对边坡稳定性的影响。结果表明:在仅考虑渗流作用下,穿管堤防上、中、下3种穿管工况安全系数分别降低15.0%、5.4%和16.5%;在渗透力-流激振动耦合作用下,其安全系数分别降低了23.9%、36.5%和36.8%,说明流激振动对边坡稳定性影响更为显著;随着流激振动的强度提升及其对土体扰动范围的扩大,堤防安全系数呈减小趋势。

**关键词** 流激振动;穿管堤防;渗流;堤防稳定性;安全系数  
**中图分类号** TH825;TV641.2+1

## 引 言

随着工业、农业和生活用水需求量的不断增加,穿堤管道作为一种输调水方式,已成为引调水工程中不可或缺的部分,在黄河、荆江、北江等重要流域的堤防工程中均有布置。穿堤管道在服役期不可避免地会产生水流-管道流激振动<sup>[1-4]</sup>,对堤防稳定性造成一定影响。此外,渗流也威胁着堤防安全<sup>[5]</sup>。

目前,诸多学者在堤防稳定性领域开展了大量研究。吕雪超<sup>[6]</sup>基于仿真软件COMSOL进行了渗流场与应力场耦合分析,结果表明,非稳定渗流作用下堤防岸坡的塑性应变区集中在坡脚部位置,边坡沉降变形的最大值出现在堤顶。赖杰等<sup>[7]</sup>采用有限元法分析了自重、渗流及地震耦合作用下人工岛的动力稳定性,发现地震的最终破裂面由抗剪强度较低的土层构成,且岛内侧土体更易液化。陈宏任等<sup>[8]</sup>采用有限元软件分析了穿江管道对堤防渗流场的影响,发现最大渗透坡降易出现在渗透系数差别较大及2种材料接触的位置。李姝昱等<sup>[9]</sup>结合工程实例,提出了穿堤管线在施工期、运行期以及废弃期对工程可能造成的危害。

虽然学者们对堤防渗流和稳定性开展了一定研究,但大多集中于未穿管堤防渗流稳定性分析或地

震动响应分析。同时,部分学者开展了穿管堤防二维稳定性分析,但仅考虑了渗流对穿管堤防的稳定性影响,均未考虑管道流激振动对堤防的稳定性影响,且忽略了渗流-流激振动耦合作用。因此,开展穿管堤防三维数值计算,综合考虑渗流-流激振动耦合作用,在渗流作用下开展穿管管道流激振动对管道和堤防结构的稳定性研究显得尤为迫切,对保障穿管堤防稳定运行具有重要的现实意义。

综上,笔者基于三维有限元模型,研究流激振动对穿管堤防稳定性的作用,分析不同穿管位置对堤防渗流的影响,确定最不利穿管工况的最大渗透力。此外,根据实测振动数据反演流激振动荷载,采用间接耦合方法,建立渗透力和流激振动多荷载耦合作用机制,计算穿管堤防在渗透力-流激振动耦合作用下的堤防边坡安全系数。本研究不仅为保障穿管堤防稳定运行奠定理论基础,也可为穿管堤防安全评判、防洪评价和穿管防渗措施等方面提供参考。

## 1 基本原理

### 1.1 流激振动耦合方程

针对穿堤管道,取管道截面和流体微元 $\delta x$ ,结

<sup>\*</sup> 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);华北水利水电大学研究生教育创新计划资助项目(YK-2021-63)

收稿日期:2022-10-12;修回日期:2023-01-18

构在竖直方向做小变形运动时,管道与流体微元体受力示意图如图1所示。

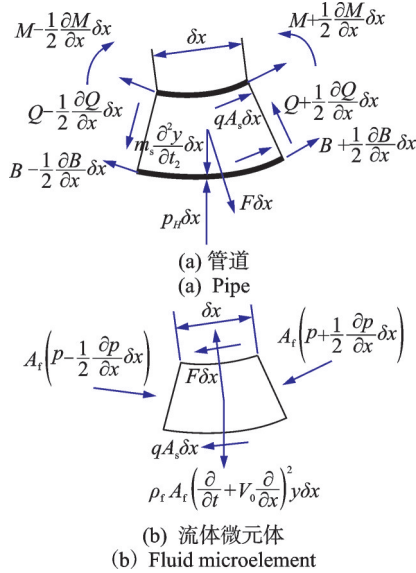


图1 管道与流体微元体受力示意图

Fig.1 Schematic diagrams of forces acting on pipe and fluid microelement

管内流体微元平衡方程<sup>[10]</sup>为

$$F - pA_f \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \rho_f A_f \left( \frac{\partial}{\partial t} + V_0 \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 y \quad (1)$$

$$A_f \frac{\partial p}{\partial x} + qA_s = 0 \quad (2)$$

其中: $F$ 为单位管长的流体力; $p$ 为流体内部压力; $A_f$ 为管道过流面积; $\rho_f$ 为流体密度; $V_0$ 为流体速度; $q$ 为切向应力; $A_s$ 为管道截面面积。

管道结构微元平衡方程为

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - F - m_s \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} + qA_s - Q \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

其中: $Q$ 为管道横向剪切应力; $B$ 为纵向拉应力; $m_s$ 单位管长的质量。

由式(1)~(4)可得流激振动耦合方程,即

$$EI_s \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho_f A_f V_0^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + 2\rho_f A_f V_0 \frac{\partial^4 y}{\partial x \partial t} + W' \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

其中: $EI_s$ 为管道弯曲刚度; $W'$ 为单位长度的管道与流体质量之和。

## 1.2 流激振动荷载反演理论

对于 $N$ 自由度、具有比例阻尼的线性系统运动方程<sup>[11-12]</sup>为

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = H(t) \quad (6)$$

其中: $M$ 、 $C$ 、 $K$ 分别为 $N \times N$ 阶的系统质量、阻尼和刚度的矩阵; $X(t)$ 、 $\dot{X}(t)$ 、 $\ddot{X}(t)$ 分别为 $N \times 1$ 阶的位移、速度及加速度的向量; $H(t)$ 为 $N \times 1$ 阶的随机荷载向量。

引入广义小波离散正交算子 $D$ ,对系统坐标进行坐标变换,即

$$X(t) = DY(t) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得

$$\tilde{M}\ddot{Y}(t) + \tilde{C}\dot{Y}(t) + \tilde{K}Y(t) = \tilde{H}(t) \quad (8)$$

其中: $\tilde{M}$ 、 $\tilde{C}$ 、 $\tilde{K}$ 分别为 $M$ 、 $C$ 、 $K$ 映射到正交域中的矩阵; $Y(t)$ 、 $\dot{Y}(t)$ 、 $\ddot{Y}(t)$ 分别为 $N \times 1$ 阶的位移、速度及加速度的向量; $\tilde{H}(t)$ 为 $N \times 1$ 阶的随机荷载向量。

通过有限元模型提取该系统的 $M$ 、 $C$ 、 $K$ ,经过广义小波离散正交算子变换,得到信息凝缩后的 $\tilde{M}$ 、 $\tilde{C}$ 、 $\tilde{K}$ ,随后得到系统的模态参数:模态频率 $\omega_r$ 、模态阻尼比 $\xi_r$ 、模态向量 $\varphi_r$ 、模态质量 $m_r$ 、模态刚度 $k_r$ 以及各阶模态组成 $N \times N$ 阶模态矩阵 $\Phi$ ,即

$$\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N] \quad (9)$$

通过模态坐标变换,得到第 $r$ 阶以模态坐标描述微分方程为

$$m_r \ddot{q}_r(t) + c_r \dot{q}_r(t) + k_r q_r(t) = p_r(t) \quad (10)$$

其中: $r=1, 2, \dots, N$ 。

求解式(10)时,假设在微小时间段 $\Delta t$ 内, $p_r(t)$ 为一阶跃函数,在时间区域 $t_{j-1} \sim t_j$ 内的模态力为 $p_{rj}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ )。根据该时间区域内的响应得到 $p_{rj}$ ,再逐个时间区域进行计算,最后得到模态力的时间序列 $P_{rj}$ 为

$$P_{rj} = [p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{Nj}]^T \quad (11)$$

根据模态坐标变换,得到实际荷载向量 $H_j(t)$ 的时间序列为

$$H_j = [h_{1j}, h_{2j}, \dots, h_{Nj}]^T = D^{-T} \Phi^{-T} P_{rj} \quad (12)$$

## 1.3 边坡稳定性基本理论

### 1.3.1 有限元强度折减法

假定边坡内所有土体抗剪强度的发挥程度相同,对应的强度折减系数即为边坡的安全系数,折减后的抗剪强度参数为

$$c_m = c/J \quad (13)$$

$$\eta_m = \arctan(\tan \eta/J) \quad (14)$$

其中: $c_m$ 、 $\eta_m$ 分别对应折减后的抗剪强度指标; $c$ 为材料粘聚力; $\eta$ 为材料内摩擦角; $J$ 为安全系数。

1.3.2 强度折减动力分析法

郑颖人等<sup>[13]</sup>采用强度折减动力分析法对土体抗拉强度、摩擦角、黏聚力等参数进行折减,研究了地震作用对边坡稳定性的影响。笔者主要研究流激振动对穿管堤防稳定性的影响,由于堤防边坡土体抗拉强度较低,因此土体抗拉强度不纳入考量范围。在强度折减动力分析法中,考虑流激振动作用下土体的剪切破坏特征,仅对土体黏聚力与内摩擦角进行折减。强度折减方法采用温控强度参数折减法,内摩擦角与黏聚力的关系为

$$c'_m(\theta)=(1-0.9\theta)c' \tag{15}$$

$$\eta'_m(\theta)=\arctan[(1-0.9\theta)\tan\eta'] \tag{16}$$

$$J=1/1-0.9u \tag{17}$$

其中: $\theta$ 为场变量,取值范围为0~1; $u$ 为产生临界失稳的时刻。

2 计算模型及荷载工况

2.1 计算模型及参数

以广东省某穿管堤防工程为例,堤顶高程为8.49 m,上游地基与下游回填坝基面高程分别为3.50与4.00 m,堤防设计防洪水位7.00 m,堤防高4.99 m,堤顶宽16.00 m,堤顶长87.70 m,上下游坡比均为1:3,穿管长度为74.44 m,上下游和地基模拟范围为3倍堤防高度。地基地面为固定约束,其余断面为法向约束,管道与土体采用主从面接触关系,计算模型如图2所示。计算分析时所选取的材料参数见表1。

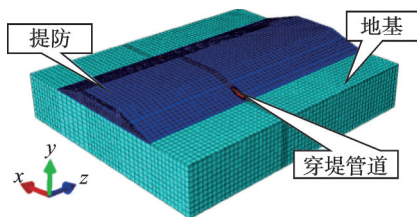


图2 计算模型图  
Fig.2 Diagram of calculation model

表 1 材料参数

| 参数                                   | 地基土体             | 堤防土体             | 钢管                  |
|--------------------------------------|------------------|------------------|---------------------|
| $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 1 500            | 2 000            | 7 850               |
| 弹性模量/Pa                              | $5\times10^6$    | $1\times10^7$    | $2.06\times10^{11}$ |
| 泊松比                                  | 0.25             | 0.25             | 0.3                 |
| 渗透系数/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | $1\times10^{-5}$ | $1\times10^{-7}$ | 0                   |
| 黏聚力/Pa                               | 12 380           | 20 000           | 0                   |
| 内摩擦角/ $(^\circ)$                     | 32               | 40               | 0                   |

2.2 流激振动荷载反演

根据实测结构振动响应,利用荷载反演方法反分析流激振动等效荷载的时程,穿堤管道测点布置如图3所示。

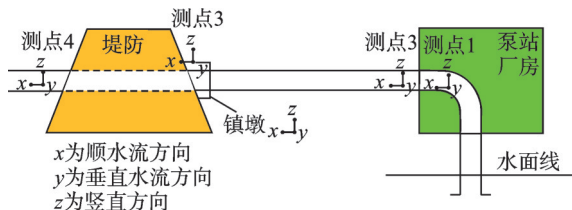


图3 穿堤管道测点布置示意图  
Fig.3 Schematic diagram of measuring point layout of dike-crossing pipe

图4为不同工况下泵站内管道测点1加速度时程图。由图可知,测点1在关机工况下振动较大。因此,选取关机工况垂直管轴向加速度进行荷载反分析,得到测点1垂直管轴向的关机工况下识别的流激振动荷载时程见图5。

为验证反演荷载的准确性,通过泵站内管道压

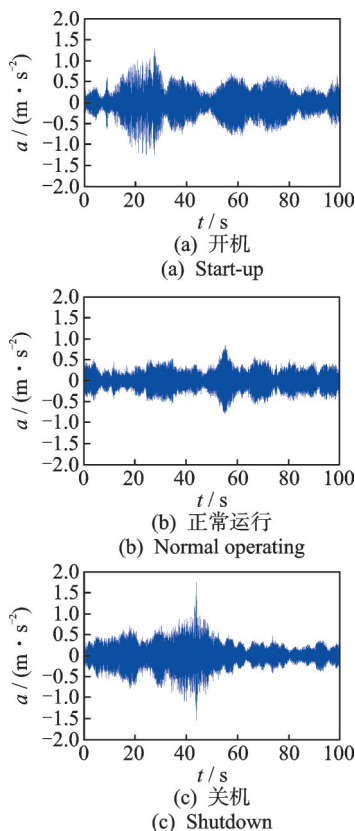


图4 不同工况下泵站内管道测点1加速度时程图  
Fig.4 Acceleration time history diagrams of pipe measuring point 1 in pumping station under different working conditions

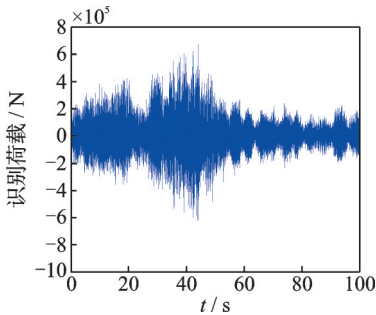


图5 关机工况下识别的流激振动荷载时程图  
Fig.5 Time history diagram of flow-induced vibration load identified under shutdown condition

力表检测管道所受荷载大小,关机过程中最大压力对应压力表如图 6 所示。观测压力表可知,关机过程中测点 1 最大压力 $p=1.1\times10^5\text{ Pa}$ ,结合管道截面积 $A=0.62\text{ m}^2$ ,计算可得最大理论荷载 $H_1=68\,200\text{ N}$ ,反演得到最大识别荷载 $H_2=66\,140\text{ N}$ ,二者间偏差仅为 3.02%,验证了反演荷载的合理性与可靠性。



图6 关机过程中最大压力对应压力表(单位:Pa)  
Fig.6 Maximum pressure corresponding to pressure gauge during shutdown (unit: Pa)

2.3 堤防渗透力

采用有限元法对上、中、下 3 种穿管工况进行渗流计算,对应的管轴线高程分别为 6.69、5.50 和 2.10 m,渗透力计算结果如表 2 所示。

| 表 2 渗流计算结果<br>Tab. 2 Calculation results of seepage |                                       |         |                                       |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|---------|---------------------------------------|
| 工况                                                  | 最大流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 最大比降    | 渗透力/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |
| 未穿管                                                 | $5.831\times10^{-7}$                  | 0.058 3 | 0.57                                  |
| 底部穿管                                                | $1.080\times10^{-6}$                  | 0.108 0 | 1.06                                  |
| 中部穿管                                                | $1.309\times10^{-6}$                  | 0.130 9 | 1.28                                  |
| 顶部穿管                                                | $1.139\times10^{-6}$                  | 0.113 9 | 1.12                                  |

2.4 计算工况

为分析穿管位置对堤防稳定性影响,将穿管的

位置分为上、中、下 3 种,同时考虑到渗透力、流激振动荷载等因素对堤防稳定性的影响,结合不同荷载的耦合作用确定了 8 种计算工况,堤防稳定性分析工况如表 3 所示。

| 表 3 堤防稳定性分析工况表<br>Tab. 3 Work condition of dike stability analysis |      |      |     |        |
|--------------------------------------------------------------------|------|------|-----|--------|
| 工况                                                                 | 穿管与否 | 穿管位置 | 渗透力 | 流激振动荷载 |
| 1                                                                  | —    | 无    | —   | —      |
| 2                                                                  | —    | 无    | ✓   | —      |
| 3                                                                  | ✓    | 上    | ✓   | —      |
| 4                                                                  | ✓    | 上    | ✓   | ✓      |
| 5                                                                  | ✓    | 中    | ✓   | —      |
| 6                                                                  | ✓    | 中    | ✓   | ✓      |
| 7                                                                  | ✓    | 下    | ✓   | —      |
| 8                                                                  | ✓    | 下    | ✓   | ✓      |

3 计算结果与分析

3.1 未穿管堤防在渗流作用下稳定性分析

采用间接耦合方法分析边坡在重力与渗流耦合作用下的稳定性<sup>[14]</sup>,通过强度折减法得到工况 1、工况 2 堤防边坡顶点位移。图 7 为堤防位移等值线图。边坡中上部表面土体位移最大,边坡滑裂面呈圆弧状,在边坡滑移过程中,边坡土体推动下游地基部分土体产生滑移。图 8 为自然边坡位移随时间变化曲线,工况 1、2 的安全系数分别为 2.9 和 2.6。渗流作用导致工况 2 安全系数降低了 10.3%,说明渗流是影响堤防边坡稳定性的重要因素。

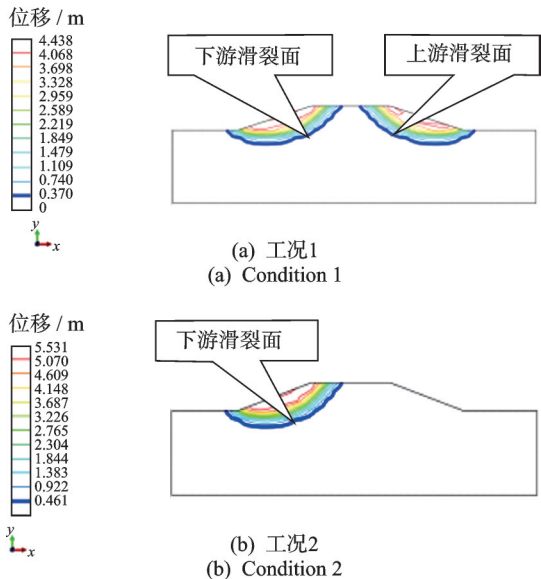


图7 堤防位移等值线图  
Fig.7 Displacement contour map of the embankment

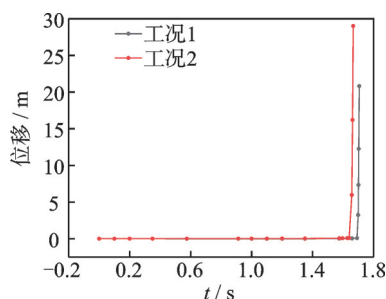


图8 自然边坡位移随时间变化曲线

Fig.8 Variation curves of natural slope displacement with time

### 3.2 穿管堤防在渗流-流激振动耦合作用下稳定性分析

#### 3.2.1 无流激振动作用堤防安全系数

为分析穿管对边坡稳定性影响,针对不同穿管位置工况进行边坡稳定性计算,图9为穿管堤防位移随时间变化曲线。工况3、5和7对应的堤防安全系数分别为2.21、2.46和2.17,相较于未穿管堤防,分别降低了15.0%、5.4%和16.5%,说明穿管对堤防稳定性具有一定削弱作用。

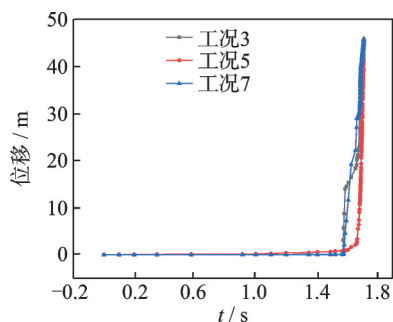


图9 穿管堤防位移随时间变化曲线

Fig.9 Variation curves of the displacement of the embankment passing through pipe with time

#### 3.2.2 流激振动作用下堤防安全系数及应力分析

为明晰流激振动对堤防稳定性的影响<sup>[15]</sup>,对渗流-流激振动耦合作用下堤防稳定性进行分析,得到穿管堤防位移随时间变化曲线如图10所示。工况

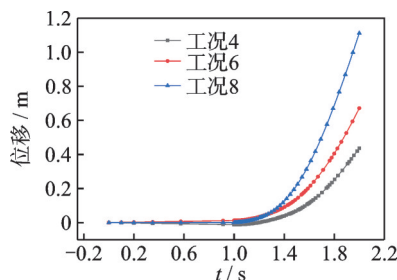


图10 穿管堤防位移随时间变化曲线

Fig.10 Variation curves of the displacement of the embankment passing through pipe with time

4、6和8在渗流-流激振动耦合作用下的边坡安全系数分别为1.68、1.56和1.37。相较于渗流作用工况,此3种安全系数分别下降了23.9%、36.5%和36.8%,说明管道流激振动相比渗流对穿管堤防边坡稳定影响更大。

为进一步研究渗流力-流激振动耦合作用对穿管堤防边坡的影响,在管周选取4个测点并分别进行管周土体的应力分析。管道外表面测点布置如图11所示,有限元计算得到不同测点在不同穿管工况下应力变化图如图12所示,纵坐标S表示土体应力。图12中,管周土体应力与边坡滑移过程规律相符,管周土体应力随位移增大而逐渐增大,到达峰值

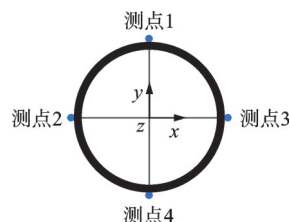
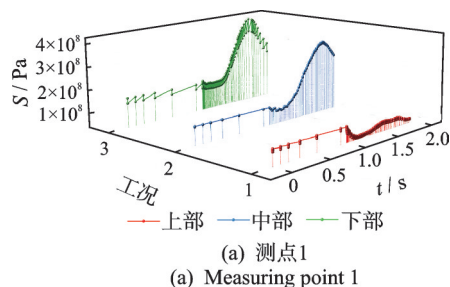
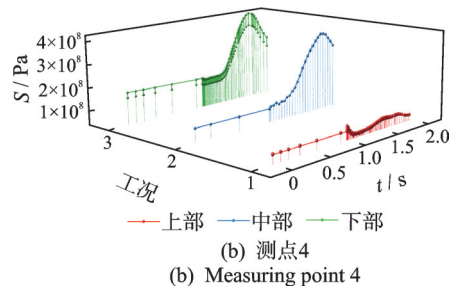


图11 管道外表面测点布置图

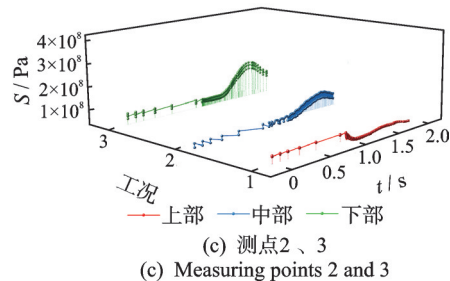
Fig.11 Layout of measuring points on the outer surface of the pipe



(a) 测点1



(b) Measuring point 4



(c) Measuring points 2 and 3

图12 不同测点在不同穿管工况下应力变化图

Fig.12 Stress variation diagrams of different measuring points under different pipe penetration conditions

后逐渐降低。在 3 种穿管工况中,下部穿管工况峰值应力最大,主要原因是该工况受到滑坡体推力作用更强。此外,管道下部测点土体应力最大,中部测点土体的应力最小,这是由于土体重力及垂直于管轴向的流激振动荷载的共同作用导致了管道底部应力较大。

### 3.2.3 流激振动量级对安全系数影响分析

为分析不同振动量级对穿管堤防边坡稳定性的弱化规律,以实测振动加速度  $a$  为基础,选取  $0.1a$ 、 $0.2a$ 、 $0.5a$ 、 $a$ 、 $2a$ 、 $5a$ 、 $10a$  等共 7 组加速度时程反演,得到不同振动量级的流激振动荷载,分别进行边坡稳定性动力计算,不同振动量级下位移随时间变化曲线如图 13 所示。边坡安全系数随着流激振动加速度的增大而减小,因此,在穿堤管道设计中须考虑流激振动对穿管堤防的影响。

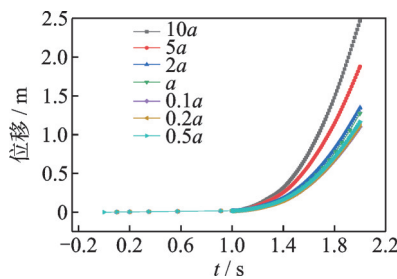


图 13 不同振动量级下位移随时间变化曲线

Fig.13 Displacement curves with time under different vibration levels

### 3.2.4 流激振动影响范围对安全系数影响分析

为分析影响范围对穿管堤防稳定性影响,分别选取 0.50、1.00、1.50 和 2.00 m 等 4 种影响范围工况,进行穿管堤防边坡稳定性计算,下游边坡堤防断面示意图如图 14 所示。

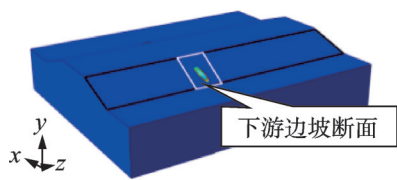


图 14 堤防断面示意图

Fig.14 Schematic diagram of the embankment section

计算得到不同影响范围下堤防位移云图、位移变化曲线分别如图 15、16 所示。在不同振动影响范围工况下,边坡位移最大点均在管道下部,边坡滑移体积随着振动影响范围的增大而增大,说明流激振动影响范围越大,其安全系数越小。因此,在实际工程中应考虑流激振动对堤防稳定性的影响。

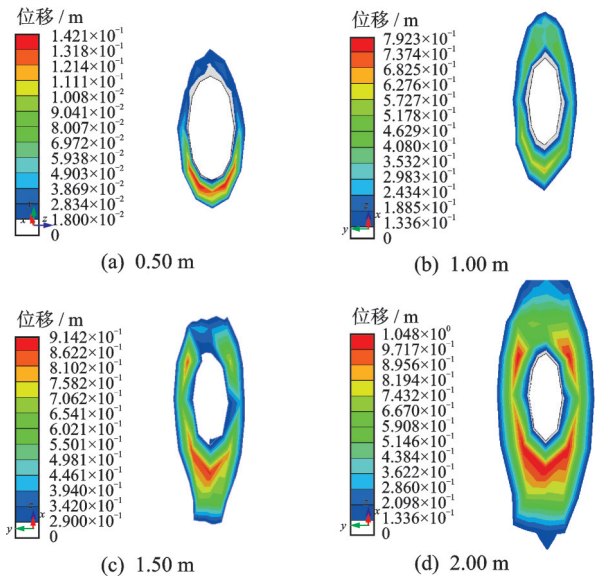


图 15 不同影响范围下穿管堤防位移云图

Fig.15 Displacement cloud maps of the embankment passing through the pipe

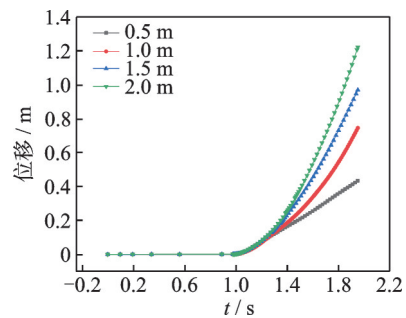


图 16 不同影响范围下边坡位移变化曲线

Fig.16 Variation curves of slope displacement under different influence ranges

## 4 结 论

1) 对于未穿管堤防,不考虑渗流作用时堤防的安全系数为 2.9,考虑渗流作用时为 2.6,安全系数降低了 10.3%,说明在堤防稳定性分析中需考虑渗流作用。

2) 在渗流作用下 3 种穿管工况的边坡安全系数分别为 2.21、2.46 和 2.17,相较于未穿管堤防,其安全系数分别降低了 15.0%、5.4% 和 16.5%,说明穿堤管道对堤防稳定性具有一定的削弱作用。

3) 在渗流-流激振动耦合作用下,3 种穿管工况的边坡安全系数分别为 1.68、1.56 和 1.37,与仅渗流工况相比,安全系数分别下降了 23.9%、36.5% 和 36.8%,说明流激振动对边坡稳定性影响较为显著。

4) 在管周 4 个测点中,底部测点应力较大,在 3 种穿管位置中,底部穿管对应的峰值应力较大。随着振动量级和流激振动影响范围的增大,堤防稳定性逐渐降低。

## 参 考 文 献

- [1] 童民慧,王悦民,邱惠清.弹性体基础变形下的岸桥车梁耦合振动[J].振动、测试与诊断,2017,37(6):1136-1140.  
TONG Minhui, WANG Yuemin, QIU Huiqing. Containercrane structural elastomeric deformation under the basis of trolley boom coupling vibration response study [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(6): 1136-1140.(in Chinese)
- [2] 张建伟,张翌娜,程梦然,等.过流条件下泵站管道振动响应混沌特性分析[J].振动与冲击,2022,41(2):290-296.  
ZHANG Jianwei, ZHANG Yina, CHENG Mengran, et al. Chaotic characteristic analysis of the vibration responses of pumping station pipelines under overflow conditions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(2): 290-296.(in Chinese)
- [3] 杨秀维,练继建,王海军,等.有压管道高频挤压受迫诱发强迫振动研究[J].水力发电学报,2022,41(6):102-111.  
YANG Xiuwei, LIAN Jijian, WANG Haijun, et al. Study on forced flow vibration induced by high-frequency pipe wall vibration [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(6): 102-111.(in Chinese)
- [4] 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)
- [5] WU H G, YU J H, SHI C Z, et al. Pipe-soil interaction and sensitivity study of large-diameter buried steel pipes [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(3): 793-804.
- [6] 吕雪超.渗流作用下二元混合堤防边坡稳定性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [7] 赖杰,郑颖人,李秀地,等.自重、渗流及地震耦合作用下人工岛动力稳定性分析[J].振动与冲击,2016,35(5):175-180.  
LAI Jie, ZHENG Yingren, LI Xiudi, et al. Dynamic stability of an artificial island triggered by self weight, seepage and earthquake [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(5): 175-180.(in Chinese)
- [8] 陈宏任,张贵金,李毅,等.穿江管道对堤防渗透安全的影响研究[J].人民黄河,2017,39(2):34-37,41.  
CHEN Hongren, ZHANG Guijin, LI Yi, et al. Study on the influence of river-crossing pipeline to the permeability safety of embankment [J]. Yellow River, 2017, 39(2): 34-37, 41.(in Chinese)
- [9] 李姝昱,张清明,李延卓.穿堤管线对工程安全运行的影响分析[J].人民黄河,2019,41(supp2):117-119.  
LI Shuyu, ZHANG Qingming, LI Yanzhuo. Analysis of the influence of dike-crossing pipeline on the safe operation of the project [J]. Yellow River, 2019, 41(supp2): 117-119.(in Chinese)
- [10] 赵瑜,侯福,张建伟,等.流激振动作用下穿管堤防渗流分析[J].广东水利水电,2023(1):15-22.  
ZHAO Yu, HOU Fu, ZHANG Jianwei, et al. Seepage analysis of pipe-piercing embankment under flow-induced vibration [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2023(1): 15-22.(in Chinese)
- [11] 李火坤,杜磊,梁萱,等.基于原型振动测试的泄洪闸闸墩位移反演[J].振动、测试与诊断,2018,38(6):1122-1129.  
LI Huokun, DU Lei, LIANG Xuan, et al. Dynamic displacement inversion for sluice pier based on prototype vibration test [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1122-1129.(in Chinese)
- [12] 张建伟.基于泄流激励的水工结构动力学反问题研究[D].天津:天津大学,2008.
- [13] 郑颖人,叶海林,黄润秋,等.边坡地震稳定性分析探讨[J].地震工程与工程振动,2010,30(2):173-180.  
ZHENG Yingren, YE Hailin, HUANG Runqiu, et al. Study on the seismic stability analysis of a slope [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(2): 173-180.(in Chinese)
- [14] CONG S Y, TANG L, LING X Z, et al. Three-dimensional numerical investigation on the seepage field and stability of soil slope subjected to snowmelt infiltration [J]. Water, 2021, 13(10): 2729.
- [15] YANG K, LI Q S, ZHANG L X. Longitudinal vibration analysis of multi-span liquid-filled pipelines with rigid constraints [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 273(1/2): 125-147.



**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

**通信作者简介:**江琦,女,1991年3月生,博士、讲师。主要研究方向为水工结构振动安全与健康监测。  
E-mail: jiangqi\_tju@163.com