

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20231061

考虑管—土耦合的穿管堤防地震动力响应分析

刘喜珠¹, 江琦^{1,2}, 张健¹, 张建伟², 侯福², 陈磊²

(1. 山东省水利勘测设计院有限公司济南市数字孪生与智慧水利重点实验室, 山东 济南 250013; 2. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046)

摘要:以广东省某穿管堤防为例,考虑管道与土体间的相互作用,建立管道—堤防三维数值仿真模型,通过二次开发实现地基边界弹簧—阻尼器的模拟,探究地震作用下堤防与管道的动力响应规律。结果表明,在0.1g地震加速度作用下,堤防竖向位移沿堤防高度的增加而增大,沿轴线方向逐渐减小;管道顶部及底部位移最大值均大于左右两端;管道应力分布规律与位移变化相似,穿堤管道中部断面的各点Mises应力最大,管道应力最大值与土体覆盖层厚度成正比,说明堤防和管道中间段位置抗震能力较弱,后续穿堤工程的抗震设计中应重点监测堤内管道中部断面附近应力和位移,为保障穿堤工程安全稳定运行有重要的现实意义。

关键词:穿管堤防;穿堤管道;粘弹性边界;地震响应

中图分类号: TV641.2⁺1; TV312

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0129-05

1 引言

地震荷载导致穿堤管道振动异常,引起堤防土体松动,对堤防及管道的安全性能构成一定威胁^[1],现阶段对于地震引发穿堤管道和堤防土体的振动响应等一系列问题的研究尚不充分。因此,开展穿管堤防的地震响应研究对于穿堤管道结构的抗震设计、安全运行具有重要的工程实践意义^[2-3]。LEE D H等^[4-5]开展了埋地输油管道地震荷载作用下管径、壁厚、内压等因素对管道Mises应力峰值的影响;李立云等^[6-7]利用粘弹性人工边界进行地基边界模拟,研究了管—土相互作用对管道应变的影响;张顺福等^[8]提出粘性边界单元的概念,高效模拟地基边界辐射阻尼效应且施加过程更为简便;靳聪聪等^[9]将坝顶沉降最大值和坝顶横向水平位移最大值作为抗震性能参数,利用地震易损性和地震危险性曲线评价堤坝的抗震安全性。然而,已有研究多集中边界条件约束、输入方式和管道的参数敏感性分析,并未考虑管道与堤防土体相互作用的影响,对于穿堤管道这一新型的管—土耦合结构的抗震研究更少。

鉴此,本文以广东省某穿管堤防为例,考虑堤防与管道“管—土”耦合作用,采用粘弹性边界对堤防地基进行模拟,开展地震荷载作用下穿堤管道和穿管堤防动力响应规律研究,确定了穿堤工程抗震薄弱位置,以期为类似工程的抗震设计提供依据。

2 基本理论

2.1 管—土耦合模型

穿堤管道不仅受管内流激振动荷载作用,还受管周土体压力荷载作用,在分析管—土相互作用规律时,首先对管—土模型进行详细受力分析。穿堤管道结构中土体对管道作用远大于管道对土体的作用,主要考虑管道所受的竖向向和水平向压力,模型见图1。图1中, D 为管道外半径; P_h 为埋深为 H 处的土体竖向压力; q 为水平向主动土压力; d_z 为 Z 方向土体单元的微分; P_f 为土体微分单元竖直向下的摩擦阻力; H_0 为等沉降面高度; d_p 为内土柱单元微分土压力; τ 为微元土体的切向应力。

(1) 竖向土压力。由图1可得土柱微元体受力平衡方程为:

收稿日期: 2023-05-27, **修回日期:** 2023-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279133);济南市数字孪生与智慧水利重点实验室开放研究基金(37H2022KY040110);华北水利水电大学高层次人才启动资助项目(202110001)

作者简介: 刘喜珠(1982-),女,博士、教高、硕导,研究方向为水利水电工程安全信息化,E-mail:39176204@qq.com

通讯作者: 江琦(1991-),女,博士、讲师,研究方向为水利工程结构振动与安全,E-mail:jiangqi_tju@163.com

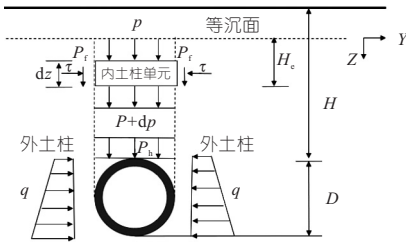


图 1 穿堤管道微元土压力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microelement earth pressure of dike-crossing pipeline

$$Dp + Ddp = Dp + \gamma D dz + 2Kfp dz \quad (1)$$

式中, K 为土压力系数, $K = 1 - \sin\varphi$ (φ 为土体内摩擦角); f 为土体摩擦系数, $f = \tan\varphi$ 。

根据土柱滑动模型计算管道土压力, 基于马斯顿理论, 对式(1)积分得到管周土体竖向土压力 P_h :

$$P_h = \frac{\gamma D}{2Kf} \left[\exp \frac{2KHf}{D} - 1 \right] \quad (2)$$

式中, γ 为土体重度。

(2)水平向土压力。水平向主动土压力 q 的计算方法为:

$$q = \eta\gamma H \quad (3)$$

其中 $\eta = \tan^2(45 - \varphi/2)$ (4)

式中, η 为侧压系数。

为了描述管-土相互作用, 将管周土体抽象为一系列线性弹簧单元, 其中管周土弹簧示意图见图 2。

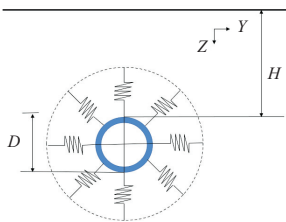


图 2 土弹簧模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of soil spring model

根据胡克定律可得:

$$p = K_{\Delta} \Delta x \quad (5)$$

式中, p 为土体压力; K_{Δ} 为土弹簧弹性系数; Δx 为土体位移。

土弹簧的刚度系数和自由度由土质和土体运动形式决定, 土弹簧参数计算方法为:

$$K_{\Delta} = f_s / Z_u \quad (6)$$

$$f_s = 0.075\pi DH\gamma f \quad (7)$$

$$Z_u = 0.00254 \sim 0.00508 \quad (8)$$

式中, f_s 为管土最大滑动力; Z_u 为土体屈服位移。

2.2 地震波选取

根据工程所属场地类别、分组等影响因素, 从太平洋地震工程研究中心中选取已记录相似场地

的地震加速度作为所施加的地震加速度, 此方法优点为可从多条实测地震波中选择最符合实际工程的地震波。穿堤管道工程所在地的抗震设防烈度为 7 度、设计基本地震加速度为 $0.1g$, 地震波 X、Y、Z 方向加速度时程曲线见图 3。

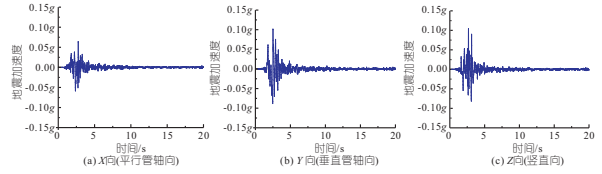


图 3 三向加速度时程曲线

Fig. 3 Three-way acceleration time-history curve

2.3 粘弹性边界

粘弹性边界即在模型地基的边界施加弹簧-阻尼器, 主要通过对软件进行二次开发来实现弹簧-阻尼器的模拟, 该方法能有效模拟地基边界的辐射阻尼效应^[10]。

粘弹性边界的法向刚度 K_{BN} 、切向刚度 K_{BT} 分别为:

$$K_{BN} = \alpha_N G / R \quad (9)$$

$$K_{BT} = \alpha_T G / R \quad (10)$$

粘弹性边界的法向阻尼系数 C_{BN} 、切向阻尼系数 C_{BT} 分别为:

$$C_{BN} = \rho c_P \quad (11)$$

$$C_{BT} = \rho c_S \quad (12)$$

$$c_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2u}{\rho}} = \sqrt{\frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\rho}} \quad (13)$$

$$c_S = \sqrt{\frac{u}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1 + \nu)\rho}} \quad (14)$$

式中, G 为工程所在场地的剪切模量; R 为波源到边界的距离, 波源一般为地基结构的几何中心; ρ 为工程所在场地的质量密度; c_P 、 c_S 分别为纵波、横波波速; α_N 、 α_T 分别为法向、切向粘弹性人工边界修正系数, 建议取值 1.33、0.67; λ 、 u 分别为纵波、横波速度模量; ν 为泊松比; E 为工程所在场地的弹性模量。

3 穿管堤防地震动力响应分析

3.1 工程概况

以广东省某穿管堤防为例, 该工程主要任务为供应南城、万江等十余地基本用水。堤顶高程为 8.49 m, 上游地基面高程为 3.5 m, 下游回填坝基面高程 4.0 m, 堤防正常蓄水位 3.5 m, 堤防高 4.99 m, 堤顶宽 16 m, 堤顶长 87.7 m, 上下游边坡坡比均为 1:3, 管道穿越堤防下游面坡脚位置处的管顶埋深约 0.99 m, 穿管长度为 74.44 m, 堤防断面见图 4。

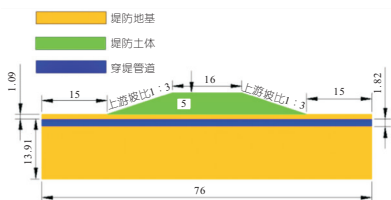


图 4 穿管堤防断面示意图(单位:m)

Fig. 4 Schematic diagram of cross section of pipe-piercing dike

3.2 仿真模型建立

为保证仿真计算精度,模型的各种材料参数以实际工程案例及资料为基础进行选取,堤防土体及管道参数见表 1。

表 1 堤防土体力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of dike soil

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/Pa	泊松比
地基土体	1 500	5.00×10 ⁶	0.25
堤防土体	2 000	1.00×10 ⁷	0.25
钢管	7 850	2.06×10 ¹¹	0.30

通过有限元软件建立穿管管道三维模型,上下游和地基模拟范围均为 3 倍堤防高度,采用实体单元法来实现粘弹性人工边界,对模型周围和地基表面创建一层实体单元,对实体单元赋予刚度及阻尼属性,从而实现弹簧-阻尼模拟,地基粘弹性边界弹簧模型见图 5。为考虑管道内水流激励的影响,采用间接耦合方式将极端的流体振动加速度施加于管道内壁,进行流体与管道的地震响应分析。

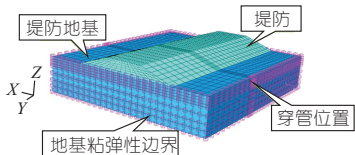


图 5 地基粘弹性边界图

Fig. 5 Viscoelastic boundary diagram of foundation

为明确地震荷载对穿管堤防的影响,仅考虑地震波作用对穿管堤防结构的位移和应力响应变化规律,粘弹性边界条件采用有限元二次开发方式施加在有限元模型中,从而阐释地震荷载对穿管堤防结构的动力响应规律。

3.3 堤防及管道应力响应分析

强度失效可分类为断裂失效和屈服失效,针对土体一般常用屈服失效理论来判别土体的强度,本文通过有限元软件算得 Mises 应力、最大主应力、剪应力,从而进行土体强度分析。针对穿管堤防的抗震研究^[11],应力是评判结构受力状态的重要参数,为了分析管道结构不同位置应力状态,计算得到穿管管道在 0.1g 地震加速度下的最大

第一、第三主应力包络图,见图 6。由图 6 可知,穿管管道在 0.1g 地震荷载作用下的最大第一主应力为 77 MPa,即管道最大拉应力,穿管管道最大第三主应力为 78 MPa,即管道最大压应力,最大拉压应力出现位置均位于穿管管道中间段,穿管堤防中间段位置抗震能力较薄弱,应进行适当的加固处理。

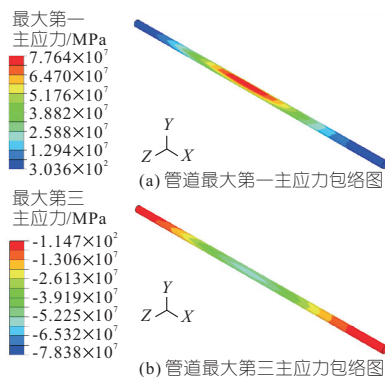


图 6 第一、第三主应力包络图

Fig. 6 Envelope diagram of the first principal stress and the third principal stress

选取堤防和管道不同断面特征点进行响应分析,共选取 3 个典型断面,每个断面选择 6 个特征点,特征点分布在堤防和管道上,其中堤防设置 2 个特征点,管道设置 4 个特征点。断面 3 无堤防斜坡面,故断面 3 特征点 1 和特征点 2 为同一特征点,穿管堤防断面和特征点布置见图 7。

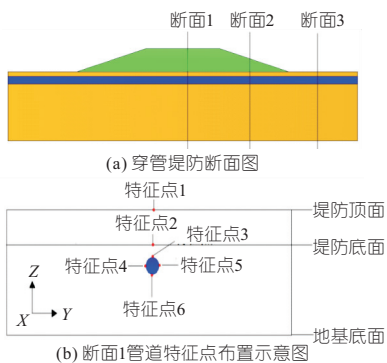


图 7 穿管堤防断面和特征点布置

Fig. 7 Cross-section view and feature point of pipe-piercing dike

为了直观分析管道在整个地震时程中的受力状态,选取了断面 1、2、3 管道不同测点进行时程分析,断面 1 各特征点的 Mises 应力时程见图 8。为便于分析堤防和管道应力变化,将 3 个断面不同特征点应力最值绘制于表 2 中。

由图 8、表 2 可知,在 0.1g 地震荷载作用下,每个断面中特征点 3、6 的 Mises 应力大小相近,特征点 4、5 应力大小相近,且每个断面中特征点 4、5 的最大应力均大于特征点 3、6 的最大应力。

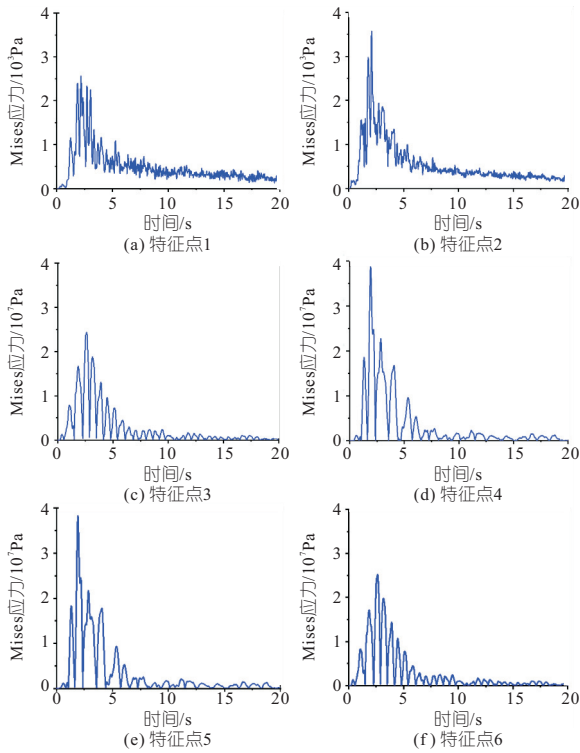


图 8 断面 1 各特征点应力时程曲线

Fig. 8 Stress time history curve of each characteristic point in section 1

表 2 不同断面对应特征点的最大应力

Tab. 2 Maximum stress of corresponding feature points in different sections Pa

特征点	断面 1	断面 2	断面 3
特征点 1	2.55×10^3	2.23×10^3	1.65×10^3
特征点 2	3.54×10^3	3.31×10^3	1.65×10^3
特征点 3	2.41×10^7	1.49×10^7	3.26×10^6
特征点 4	3.87×10^7	2.38×10^7	4.19×10^6
特征点 5	3.83×10^7	2.35×10^7	4.47×10^6
特征点 6	2.51×10^7	1.56×10^7	3.02×10^6

断面 1 各点的 Mises 应力最大,断面 3 的各点 Mises 应力最小,主要原因是由于管道应力最大值与土体覆盖层厚度成正比关系,管道埋深越大,穿堤管道受到土体作用越强,从而导致断面 1 中各测点的应力较大,管道最大 Mises 应力为 38.7 MPa。因此,堤内管道中点断面处受地震荷载作用较强,为保证穿堤工程在地震动荷载下稳定高效运行,在后续穿管堤防的抗震设计中应对堤内管道中点断面附近应力、位移进行着重监测,可采取一定的加强措施。

3.4 堤防及管道位移响应分析

在 0.1g 地震荷载作用下,穿堤管道及堤防断面 1 各测点的位移时程见图 9。

由图 9 可知,随着地震加速度的增强,堤防和管道位移峰值逐渐产生变化,各特征点的 Y、Z 向

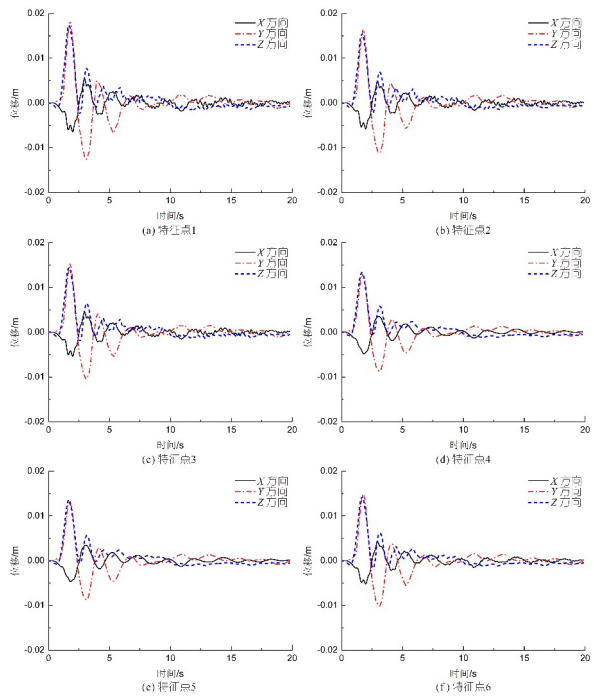


图 9 断面 1 各特征点位移时程曲线

Fig. 9 Displacement time history curve of each feature point in section 1

位移均大于 X 向位移,即管道各特征点垂直管轴向的位移与竖直向上的位移较大,沿管轴向的位移最小。

为探究地震作用下堤防和管道不同位置振动响应规律,对比 3 个断面 6 个特征点位移响应,以最大位移作为对比指标(表 3),分析地震荷载对穿管堤防的位移响应规律。

表 3 不同断面对应特征点的最大位移

Tab. 3 Maximum displacement of feature points corresponding to different sections mm

特征点	断面 1	断面 2	断面 3
特征点 1	18.1	16.4	14.4
特征点 2	16.3	15.3	14.1
特征点 3	14.4	14.1	13.0
特征点 4	13.3	13.2	12.6
特征点 5	13.4	13.3	12.8
特征点 6	15.0	14.9	13.1

由表 3 可知,在 0.1g 地震荷载作用下,3 个断面中堤防顶部测点位移最大值为 18.1 mm,堤防位移最大值沿其高度方向随堤防高度的增加而逐渐增大,沿堤防轴线方向其位移从岸边断面逐渐向堤防内部断面增大。管道各特征点的位移变化规律为管道顶部与管道底部特征点 3、6 的位移大小几乎相同,管道左、右侧的特征点 4、5 的位移大小几乎相同,且特征点 3、6 的位移最大值大于特征点 4、5 的位移最大值,管道最大位移为 15 mm。

因此,对于穿堤工程在地震动力荷载作用下应着重关注堤防顶部及管道顶部特征点与底部特征点的位移变化。

4 结论

a. 由于管道埋深的加大,管道应力最值与土体覆盖层厚度成正比关系。

b. 堤防位移最值在其高度方向随堤防高度的增加而增大,沿堤防轴线方向逐渐减小,管道顶部及底部特征点的位移最大值均大于左右两端特征点的位移最大值。

c. 穿管堤防中间段位置抗震能力较薄弱,后续穿堤工程的抗震设计中应对堤内管道中点断面附近应力、位移进行着重监测,并采取一定的加强措施。

参考文献:

- [1] 孔宪京,陈健云,邹德高. 高坝抗震安全理论发展趋势研究[J]. 水力发电学报,2020,39(7):1-11.
- [2] TENG Z,ZHAO Y,LIU Y,et al. Response analysis of pipeline crossing structure with earthquake[J]. IOP conference series:earth and environmental science,2020,580:012086.
- [3] LEI TANG,JUNYI FAN,MIAO MIAO,et al. Two different layouts of sensors of four-gauge borehole

strainmeter and their influence on field measurement[J]. Sensors and materials,2022,34(12):4425-4434.

- [4] LEE D H, KIM B H, LEE H,et al. Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations[J]. Engineering structures,2009,31(5):1011-1023.
- [5] 赵泽霖,焦光伟,周建庭,等. 基于土弹簧模型的埋地输油管道地震响应数值模拟[J]. 压力容器,2014,31(11):50-55.
- [6] 李立云,刘晓晓,杜修力,等. 埋地管道地震响应的数值仿真模型分析[J]. 地震工程与工程振动,2015,35(6):106-113.
- [7] 赵武胜,陈卫忠,郑朋强,等. 地下工程数值计算中地震动输入方法选择及实现[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(8):1579-1587.
- [8] 张顺福,王海波,杨会臣. 等效黏性边界单元及黏性边界波动输入方法[J]. 水利学报,2008,39(10):1248-1255.
- [9] 靳聪聪,迟世春,聂章博. 基于地震变形易损性的高土石坝抗震安全分析[J]. 岩土工程学报,2020,42(2):334-343.
- [10] 廖明菊. 土石坝饱和砂土地基地震液化及加固措施数值模拟研究[J]. 水电能源科学,2020,38(1):69-73.
- [11] 张建伟,华薇薇,王立彬. 基于流态-模态联合分析的泵站管道结构优化[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2019,40(6):89-96.

Seismic Dynamic Response Analysis of Pipe-piercing Dike Considering Pipe-soil Coupling

LIU Xi-zhu¹,JIANG Qi^{1,2},ZHANG Jian¹,ZHANG Jian-wei², HOU Fu²,CHEN Lei²

(1. Key Laboratory of Jinan Digital Twins and Intelligent Water Conservancy, Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy Co.,Ltd, Jinan 250013, China; 2. College of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to study the dynamic response of pipe-piercing dike under seismic load, taking a dike-crossing project in Guangdong Province as the research object, considering the interaction between pipeline and soil, a three-dimensional numerical simulation model of pipeline-dike was established. The simulation of foundation boundary spring-damper was realized through secondary development. The results show that under the action of 0.1g seismic acceleration, the vertical displacement of the dike increases with the increase of the height of the dike and decreases along the axis of the dike. The maximum displacement at the top of the pipeline is greater than that at the left and right ends. The stress distribution law of the pipeline is consistent with displacement, and the maximum stress of the pipeline is proportional to the thickness of the soil cover layer. The Mises stress at each point of the midpoint section of the pipeline through the dike is the largest, and the seismic capacity of the middle section of the dike is relatively weak. The stress and displacement near the midpoint section of the pipeline in the dike should be monitored in the seismic design of the subsequent dike project. This study has important practical significance to ensure the safe and stable operation of the dike-crossing project.

Key words: pipe penetration embankment; pipe-piercing dike; viscoelastic boundary; seismic response