

强震作用下泵站出水塔结构损伤开裂分析*

张翌娜¹, 黄锦林², 程梦然³, 张建伟³, 付杰³

(1. 黄河水利职业技术学院土木与交通工程学院 开封, 475004)

(2. 广东省水利水电科学研究院 广州, 510635)

(3. 华北水利水电大学水利学院 郑州, 450046)

摘要 结合某提灌工程的地域特点及运行情况,以泵站出水塔为研究对象,建立了水体-结构-地基耦联的有限元模型,对泵站出水塔结构的动力特性及损伤模式规律进行研究。结果表明:泵站出水塔在地震作用下易在底部排架-镇墩、中部环形梁-隔板接触位置出现损伤,且随着惯性力作用的增加(峰值加速度为0.4g),该部位开始发生损伤破坏,且损伤沿排架向上发展;当峰值加速度达到0.6g时,损伤范围增加,在塔体结构2层排架与隔板等位置均发生损伤破坏,损伤值达到0.970,压缩损伤为0.506 8。该研究可为类似结构的动力损伤分析提供参考。

关键词 泵站出水塔; 振动特性; 水体-结构-地基; 损伤开裂

中图分类号 TV675; TV32⁺3; TH113

引言

泵站出水塔作为塔式输水建筑物,在提水灌区发挥着至关重要的作用;然而在地震作用下,极易出现由局部损伤导致的结构异常运行,甚至出现整体破坏。此外,早年修建泵站出水塔结构时采用的抗震设计标准有些已无法满足现有的抗震规范要求,需要对其实施加固或拆除重建。因此,研究强震作用下泵站出水塔结构的损伤破坏规律,对泵站出水塔结构的抗震设计、运行期间的抗震安全评价以及后续的安全加固具有重要的指导意义^[1-3]。

Fenves等^[4]所建立的塑性损伤模型能够模拟混凝土或者岩石在复杂循环荷载作用下的材料塑性损伤,其采用两个损伤变量分别考虑材料的拉伸和压缩损伤,是当前应用较为广泛的混凝土塑性损伤模型。Oliver等^[5]建立了一个混凝土弹性损伤本构模型,并将其应用于拱坝在地震下的损伤开裂研究。柳国环等^[6]基于损伤力学模型,研究了风机结构的地震响应与破坏损伤模式。刘军^[7]对混凝土本构模型与数值实现方法进行总结,认为适合分析混凝土破坏机理的是损伤力学模型。张建伟等^[8]根据不同库水模型对拱坝结构动力特性的影响,比较分析了拱坝结构在不同模拟方法下结构的振动响应差异。

杜荣强等^[9]建立了反映多轴损伤破坏特性的各向异性弹塑性损伤模型,并进行拱坝地震响应分析。李火坤等^[10]研究了闸墩泄洪振动时的流固耦合效应,并用粒子群优化算法对整体动位移场进行反演,从而对泄洪闸闸墩进行全面振动危害评价。马斌等^[11]对碾压混凝土坝流激振动问题进行精细化模拟研究,分析了土体-结构相互作用,总结了碾压混凝土坝成层结构的特性。

以上研究大多针对大坝、风机等结构,而对于类似灌区出水塔输水建筑物所做的强震损伤分析较少。因此,笔者考虑流固耦合效应、土体-结构相互作用,建立泵站出水塔有限元模型,进行不同峰值加速度(0.2g, 0.4g, 0.6g)的地震动响应分析,研究泵站出水塔的损伤破坏规律。

1 基本原理

1.1 塑性损伤原理

Lee等^[12]提出的塑性损伤模型(concrete damage plastic,简称CDP)采用各向同性的弹性损伤理论,结合各向同性拉伸、压缩塑性理论来表征混凝土的非弹性行为,用非关联多重硬化塑性和各向同性弹性损伤理论来表征材料破坏过程发生的不可逆损

* 国家自然科学基金资助项目(51679091);广东省水利科技创新资助项目(2020-18);广州市科技计划资助项目(2020-ky34)

收稿日期:2019-05-08;修回日期:2019-07-04

伤行为。

弹塑性增量理论根据应力应变相关准则将应变率视为弹性和塑性两部分相加之和

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^{el} + \dot{\epsilon}^{pl} \quad (1)$$

其中： $\dot{\epsilon}$ 为总应变； $\dot{\epsilon}^{el}$ 为弹性应变； $\dot{\epsilon}^{pl}$ 为塑性应变。

有效应力 $\bar{\sigma}$ 的表达式为

$$\bar{\sigma} = E_0 : (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^{pl}) \quad (2)$$

其中： E_0 为初始弹性刚度。

为了对应混凝土出现软化现象后呈现的非线性，应力可表示为

$$\sigma = (1 - d) \bar{\sigma} = (1 - d) E_0 : (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^{pl}) \quad (3)$$

其中： d 为损伤因子变量 d_t 和 d_c 的函数； d_c 为混凝土受压损伤引起的刚度退化； d_t 为混凝土受拉损伤引起的刚度退化。

混凝土受单轴循环力作用下， d 可视为混凝土损伤变量。 $d = 0$ 表示混凝土表现为直线形态的线弹性阶段，混凝土未发生破坏； $d = 1$ 表示混凝土完全损伤破坏，生成贯穿裂缝。故可引入以下假定

$$1 - d = (1 - s_t d_c)(1 - s_c d_t) \quad (4)$$

与应力反向相关的刚度复原应力状态的函数分别用 s_t 和 s_c 表示，其方程表示为

$$\begin{cases} s_t = 1 - \omega_t r^*(\sigma_{11}) & (0 \leq \omega_t \leq 1) \\ s_c = 1 - \omega_c [1 - r^*(\sigma_{11})] & (0 \leq \omega_c \leq 1) \end{cases} \quad (5)$$

其中，标量刚度退化损伤有如下假设

$$D_c = (1 - d_c) E_0 \quad (6)$$

$$D_t = (1 - d_t) E_0 \quad (7)$$

材料在单轴受拉和受压状态下的应力应变曲线如图 1 所示。

针对混凝土在单轴状态下破坏时呈现的体积膨胀现象，选用塑性流动势函数，其表达式为

$$G = \sqrt{(\xi \sigma_0 \tan \varphi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \varphi \quad (8)$$

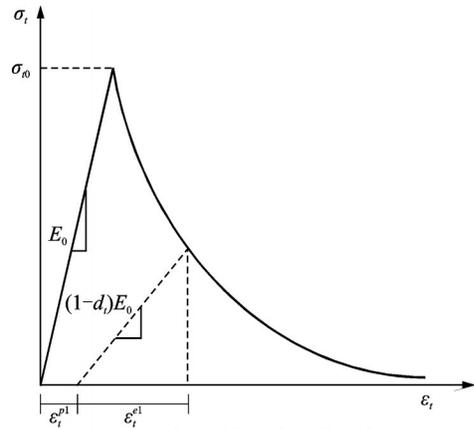
其中： $\bar{p} = -\frac{1}{3} \bar{\sigma} : I$ ， $I = \text{diag}(111)$ ； $\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2} s : s}$ ， s 为有效应力偏量； φ 为高强度围压情况下 p - q 平面的膨胀角； σ_0 为混凝土单轴拉伸时达到破坏时的拉力值； ξ 为双曲函数逼近渐近线时的偏心度。

通过塑性流动法则控制的塑性势函数，可用来表示有效应力空间上的塑性应变

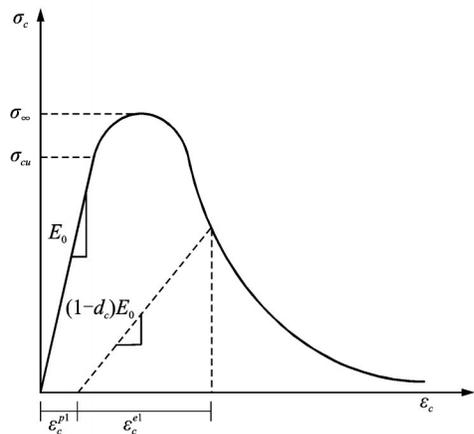
$$\dot{\epsilon}^{pl} = \lambda \partial G(\bar{\sigma}) / \partial \bar{\sigma} \quad (9)$$

其中： λ 为塑性一致性参数。

CDP模型遵从不同拉、压条件下屈服强度也互不相同的准则，经过Lee等进一步优化后，采用有效



(a) 混凝土受拉刚度退化示意图
(a) Stiffness degradation of concrete under tension



(b) 混凝土受压刚度退化示意图
(b) Stiffness degradation of concrete under compression

图 1 混凝土的刚度退化示意图

Fig.1 Stiffness degradation of concrete under tension and compression conditions

应力、内部状态变量为自变量函数的表达式为

$$F(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^{pl}) = \frac{1}{1 - \alpha} [\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\bar{\epsilon}^{pl}) < \hat{\sigma}_{\max} > - \gamma < -\hat{\sigma}_{\max} >] - c(\bar{\epsilon}^{pl}) \leq 0 \quad (10)$$

其中： $\hat{\sigma}_{\max}$ 为主应力的最大值； α 为由屈服函数起始形状决定的参数； γ 为材料常数； c 为内聚力参数； β 为屈服函数的演化。

1.2 模型损伤因子 d 的取值

在混凝土结构设计规范^[13]阐述的混凝土应力与应变关系的机理上，通过介入损伤因子，说明应力卸载时物体刚度退化的现象，结合混凝土非弹性阶段的应力、应变关系，压缩或拉伸时的损伤因子为

$$d_k = 1 - \frac{\sigma_k E_0^{-1}}{\epsilon_k^{pl} (1/b_k - 1) + \sigma_k E_0^{-1}} \quad (k = c, t) \quad (11)$$

其中： $k = c, t$ 表示参数 k 可用 c 和 t 在压缩或拉伸状况下分别统一进行替换，分别代表单轴的压缩和拉伸的状态； E_0 为初始弹性刚度； $\epsilon_c^{pl}, \epsilon_t^{pl}$ 分别为本构模

型进入塑性阶段受压和受拉情况下的形变; b_c, b_t 由循环荷载应力路径来标定,根据 Birtel 等^[14]建议, b_c 取值 0.7, b_t 取值 0.1。

1.3 地震动输入方式与附加质量法

在进行仿真计算时,地震波传播过程会产生放大现象,为了避免此种情况,Clough^[15]提出了无质量地基模型,因其良好的模拟效果而被广泛应用。附加质量法是一种考虑水体对结构作用的简化方法,它将动水压力等效为质量附加在结构上,达到等效的动力响应。考虑流体对结构附加质量的系统振动物元方程为

$$(M_e^s + M_a)\ddot{u} + (C_e^s + C_a)\dot{u} + (K_e^s + K_a)u = F_e^s \quad (13)$$

其中: M_a, C_a, K_a 分别为由于流体作用引起的附加质量矩阵、附加阻尼矩阵、附加刚度矩阵; F_e^s 为结构所受的外荷载。

参考水工建筑物抗震规范中的一般性附加质量方法,运用 Westergaard 公式计算出水塔内蓄水池及压力管道内附加的水体质量,其表达式为

$$M_0(Z) = \frac{7}{8} \rho \eta \beta \sqrt{HZ} \quad (14)$$

其中: $M_0(Z)$ 为距水面附加质量; η 为折减系数; β 为水面宽度; H 为水体深度; Z 为计算点与水面的距离; ρ 为水体密度。

基于 Westergaard 推导的动水压力公式,并考虑当前水工建筑物抗震规范规定采用动力法分析时,可将水平向单位加速度作用下的地震动水压力值折算为相应的蓄水池表面径向附加质量,泵站出水塔水平向地震动水压力代表值按 1/2 取值,不同水深的单位面积的附加质量公式为

$$m_a(h) = \frac{7}{16} \rho_w \sqrt{H_0 h} \quad (15)$$

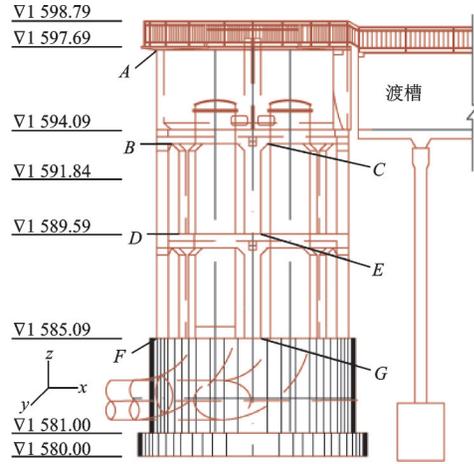
其中: $m_a(h)$ 为距水面附加质量; H_0 为水体深度; h 为计算点与水面的距离; ρ_w 为水体密度。

2 实例分析

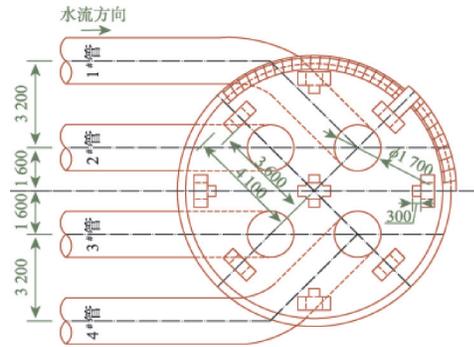
2.1 泵站出水塔仿真模型

以某灌区泵站出水塔为研究对象,塔顶出口用渡槽断面与渡槽相接,塔体上部为储水池,壁厚为 30 cm,塔身周围均匀设截面宽度×高度为 50 cm×60 cm 的排架柱 8 个。在泵站出水塔中层,设有环形梁和 20 cm 厚的隔板作为通水压力管道横向水平支撑,并于隔板中间部位上下浇筑 2 根混凝土柱体连

接,增强结构稳定性及整体性。泵站出水塔底部为改善地基应力,分别设置渡槽第 1 个排架基础与泵站出水塔基础,使排架柱中心与水塔出口相距 3 m,结构形式如图 2 所示,模型材料参数如表 1 所示。



(a) 主体结构形式及控制节点位置图
(a) Main structure and control nodes layout



(b) 镇墩结构形式尺寸(单位: mm)
(b) The form and size of anchor block (unit:mm)

图 2 泵站出水塔结构实体与布置形式图

Fig.2 Entity diagram and layout form of outlet tower

表 1 模型材料参数

Tab.1 Material parameters of the model

部位	单元类型	弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比
塔体	C3D8	30.0	2 500	0.167
钢管	S4R	206.0	7 850	0.237
地基	C3D8	0.7	2 000	0.250

采用 ABAQUS 有限元软件建立无质量地基的泵站出水塔三维有限元模型(比尺 1:1),以泵站出水塔底座几何中心为坐标原点, x 轴为压力管道径向, y 轴为压力管道法向, z 轴为竖直方向,创建笛卡尔坐标系。塔体采用 SOLID65 离散,压力管道采用壳体单元 SHELL63 离散,地基采用 SOLID45 离散,压力管道及储水池内水体采用 APDL 编程语言输入质量单元 MASS21 离散,近域地基范围为 52.5 m

(水平方向)×52.5 m(水平方向)×26.25 m(竖直方向),该模型共划分 43 313 个单元。根据设计资料,对压力管道模拟至支座处,压力管道长度为 2.1 m,并对该处进行固结约束。根据水工建筑物抗震设计规范,对塔体结构的阻尼比按照 0.07 取值,出水塔有限元模型如图 3 所示。

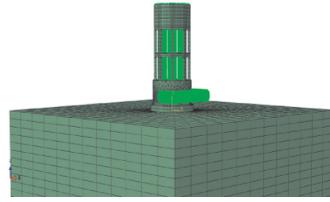


图 3 出水塔有限元模型

Fig.3 Finite element model of outlet tower

2.2 耦联体系自振特性分析

结构振动特性是研究地震响应或损伤的前提。

通过 Lanczos 方法对泵站出水塔结构进行动力特性分析^[16-17],结构前 6 阶频率及振型如图 4 所示。

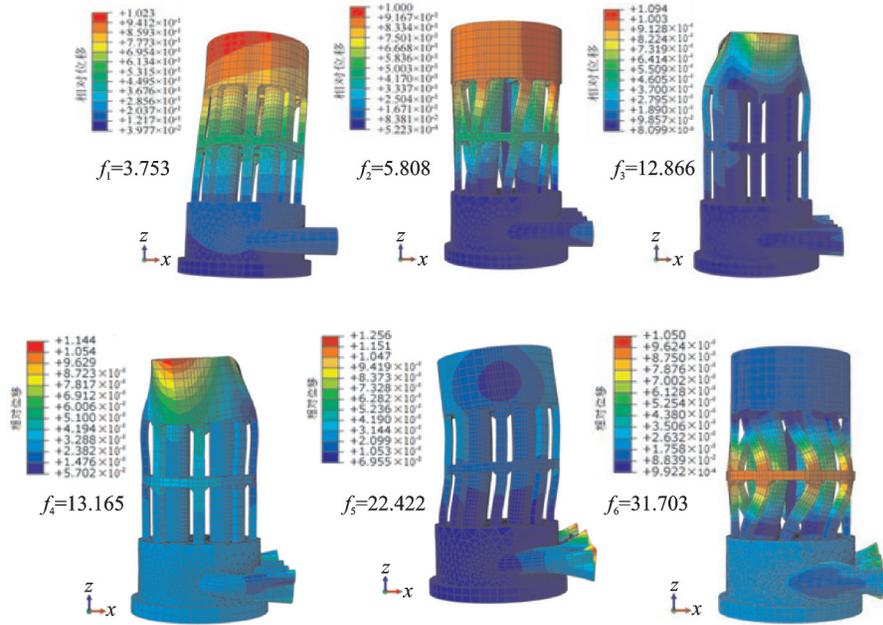


图 4 泵站出水塔振型

Fig.4 The vibration mode of outlet tower

分析可知:①ABAQUS 计算的泵站出水塔模态频率第 1 阶模态为 3.753 Hz,第 2 阶为 5.808 Hz,第 3 阶为 12.866 Hz,第 4 阶为 13.165 Hz,第 5 阶为 22.422 Hz,第 6 阶为 31.703 Hz,该模态分析的前 6 阶频率结果与文献^[17]结果基本吻合,且模态分析的振型特性基本相同,验证了 ABAQUS 软件中泵站出水塔模型的合理性,是后续的地震下损伤分析的前提与基础;②第 1,2,4,6 阶振型中泵站出水塔结构中排架部分发生了明显的平移、弯曲和扭转变形,并引起整个塔体结构发生变形,说明泵站出水塔结构的排架部分在强烈地震下易发生变形而引起塔体漏水或破坏,可在后期的工程进行加固,类似结构设计中应予以重视。

2.3 地震响应分析

根据泵站出水塔所在场地,参考《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)规范,选取地震动参

数。以兰州波作为输入的地震动数据,在有限元软件中通过 APDL 编程语言进行动力响应分析,同时对模型的地基边界输入三向时程数据,针对竖直向峰值数据按照取水平向的 2/3 进行折算选取,输入时程的步长为 0.02 s,总时长为 20 s。对地震波进行去基线操作,加速度时程如图 5 所示。

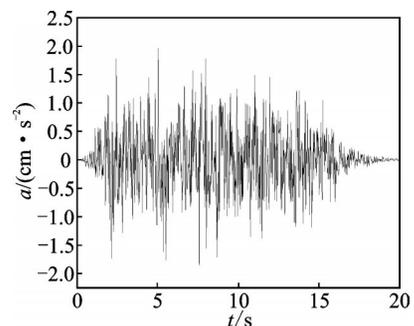


图 5 加速度时程曲线

Fig.5 Time history curve of acceleration

通过塑性损伤模型模拟出水塔塔体混凝土材料,考虑泵站出水塔模型在强震作用下进入非线性阶段,将峰值加速度分别调大至 0.4g 和 0.6g,进行 3 个峰值加速度下的出水塔地震损伤分析。

2.3.1 位移结果分析

泵站出水塔结构上部响应值最大,故选取其顶部蓄水池的外侧控制节点 A 为典型节点(见图 2),同时以出水塔下部结构镇墩与地面接触面的几何中心为基准,求解节点 A 的相对位移,进而研究泵站出水塔地震响应规律。

3 个工况的出水塔三向位移响应如图 6 所示。

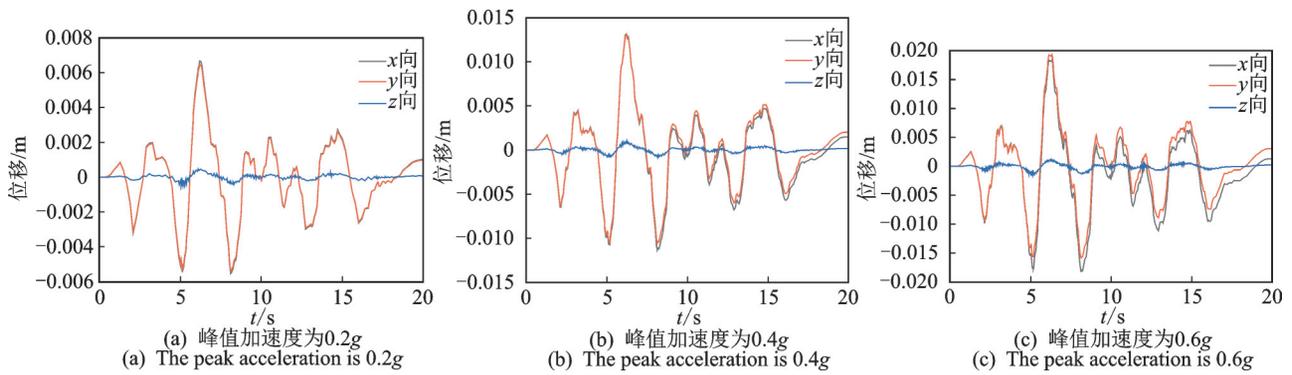


图 6 三个工况的典型节点 A 的位移响应

Fig.6 Displacement response of typical node A under three working conditions

2.3.2 应力结果分析

峰值加速度为 0.2g, 0.4g, 0.6g 时塔体应力分布分别如图 7~9 所示。由图可知,峰值加速度为 0.2g 时,第 1、第 3 主应力最大值分别为 1.966 与 2.081 MPa,应力极值所处位置均为排架与镇墩接触位置,表明该处为泵站出水塔的抗震薄弱部位;峰值加速

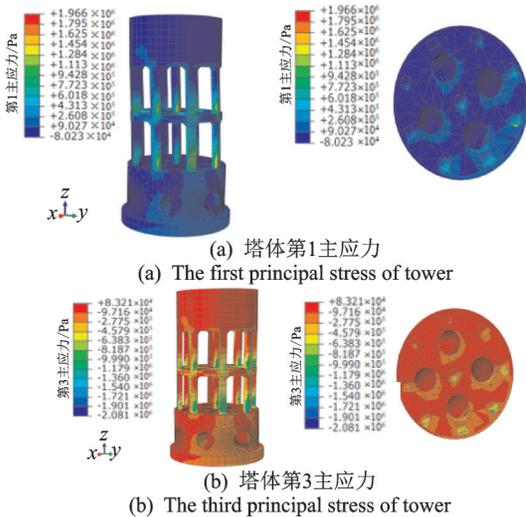


图 7 塔体上下游面应力图(0.2g 工况)

Fig.7 Stress envelope diagram at upstream and downstream surfaces of the tower (0.2g)

分析可知:①0.2g 的 A 点位移幅值为 0.007 m 左右,与文献[17]中线弹性地震响应分析结果相差甚微,0.4g 的 A 点位移幅值为 0.012 5 m 左右,0.6g 的 A 点位移幅值为 0.02 m 左右,出水塔在地震下的位移响应随着峰值加速度的增大而增加;②3 种工况下 20 s 处的位移响应均未回归平衡位置,并且随着峰值加速度的增大,其偏离平衡位置越远,分析可知,该节点因塔体出现塑性变形而使得位移的平衡位置发生变化;③相较水平 x, y 方向的位移响应,竖直 z 向的位移响应结果较小,这是由于出水塔本身的竖向刚度较大,符合结构特点。

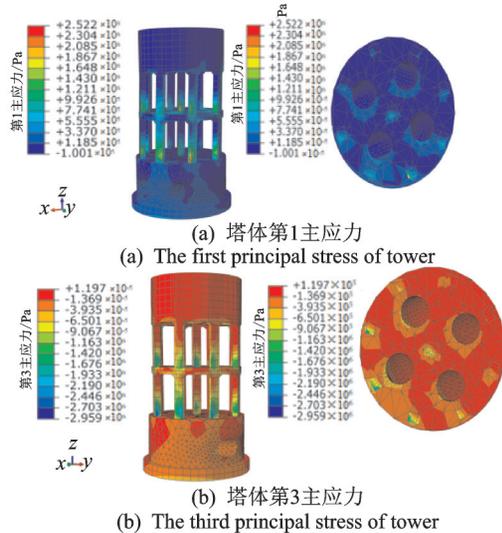


图 8 塔体上下游面应力(0.4g 工况)

Fig.8 Stress envelope diagram at upstream and downstream surfaces of the tower (0.4g)

度为 0.4g 时,出水塔塔体的第 1、第 3 主应力最大值分别为 2.522 与 2.959 MPa,应力极值所处位置均为排架与镇墩接触位置;峰值加速度为 0.6g 时,塔体的第 1、第 3 主应力最大值分别为 3.411 与 3.675 MPa,拉压应力最大值部位均位于排架与镇墩接触部位,并有向上发展的趋势,且应力数值上超过我国

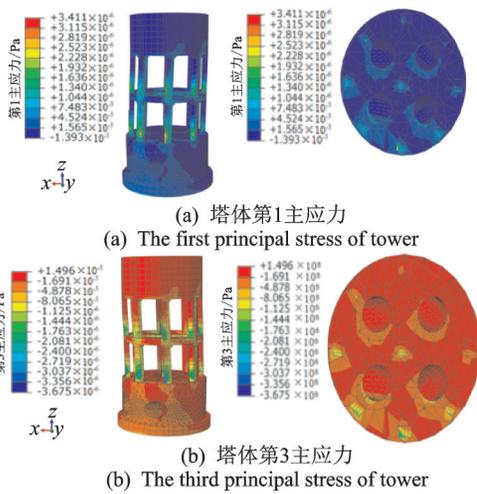


图 9 塔体上下游面应力图 (0.6g 工况)
Fig.9 Stress envelope diagram at upstream and downstream surfaces of the tower (0.6g)

小震不坏的设计要求,应对该薄弱位置予以重视。

2.3.3 损伤开裂分析

峰值加速度为 0.2g 时塔体损伤如图 10 所示,无质量地基模型考虑地震作用时,在 0.2g 峰值加速度地震时塔体并未出现拉伸或压缩损伤。

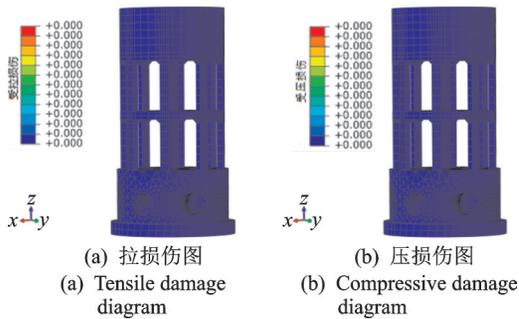


图 10 峰值加速度为 0.2g 工况的塔体损伤图
Fig.10 Tower damage map (0.2g)

峰值加速度 0.4g 时塔体损伤如图 11 所示,地震时塔体拉伸损伤达到 0.786,位置处于排架与镇墩接触位置,压缩损伤仅为 0.132。

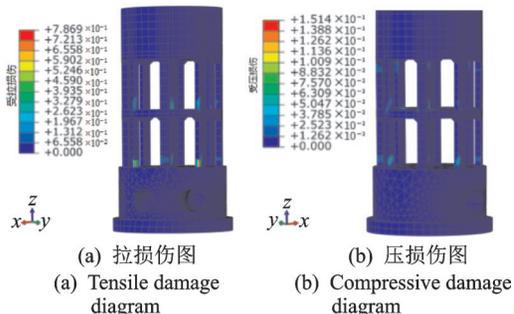


图 11 峰值加速度为 0.4g 工况的塔体损伤图
Fig.11 Tower damage map (0.4g)

峰值加速度为 0.6g 时塔体损伤如图 12 所示,塔体拉伸损伤接近 1,损伤位置范围增加,2 层排架、隔板排架与蓄水池接触等位置均发生损伤破坏。损伤达到 0.970,压缩损伤为 0.506 8。

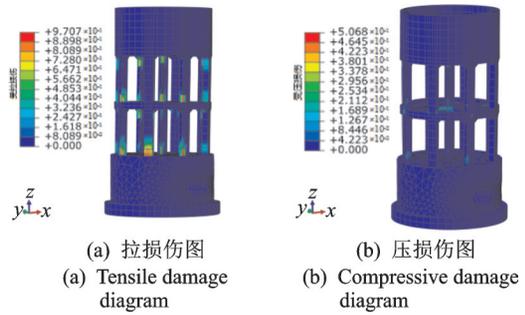


图 12 峰值加速度为 0.6g 工况的塔体损伤图
Fig.12 Tower damage map (0.6g)

从图 10~12 可知,地震作用下泵站出水塔易出现损伤的位置主要是底部排架-镇墩接触位置和中 部环形梁-隔板接触位置。在线弹性地震分析时,排架-镇墩接触部位是应力最大位置,塔体并未发生拉 压损伤,符合我国抗震规范中“小震不坏”的设计理念。随着惯性力作用的增加(峰值加速度为 0.4g), 该部位开始发生损伤破坏,且损伤沿排架向上发展。当峰值加速度达到 0.6g 时,损伤位置范围进一步 增加,在塔体结构 2 层排架与隔板等位置均发生损伤 破坏,损伤达到 0.970,压缩损伤为 0.506 8。

3 结 论

1) 泵站出水塔运行期间的主要振动频率有 3.753 和 5.808 Hz,模态振型与 ANSYS 模态分析结果一致,验证了 ABAQUS 出水塔模型的合理性。

2) 第 1, 2, 4, 6 阶振型中泵站出水塔结构中排架部分发生了明显的平移、弯曲和扭转变形,并引起整个塔体结构发生变形,说明泵站出水塔结构的排架在地震作用下易发生变形而引起塔体破坏,应予以重视。

3) 地震作用下泵站出水塔排架与镇墩接触部位和排架中部是损伤开裂的关键部位。排架与镇墩接触位置在动力特性分析中参与度很高,随着惯性力作用的增加(峰值加速度为 0.4g),该部位开始发生损伤破坏,且损伤沿排架向上发展。当峰值加速度达到 0.6g 时,损伤位置范围进一步增加,在塔体结构 2 层排架与隔板等位置均发生损伤破坏,损伤达到 0.970,压缩损伤为 0.506 8。

参 考 文 献

- [1] 王博,徐建国,黄亮,等.大型渡槽结构抗震分析理论及其应用[M].北京:科学出版社,2013:10-20.
- [2] SL203—2016 水工建筑物抗震设计规范[S].北京:中华人民共和国水利部,2016.
- [3] 陈厚群.水工建筑物抗震设防标准研究[J].中国水利,2010(20):4-6.
CHEN Houqun. Study on seismic fortification standard of hydraulic structures[J]. Water Conservancy in China, 2010(20):4-6.(in Chinese)
- [4] FENVES G L, MOJTAHEDI S, REIMER R B. Effect of contraction joints on earthquake response of an outlet tower [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(4):1039-1055.
- [5] OLIVER J, RUI F, CERVERA M. Modeling material failure in concrete structures under cyclic actions [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130 (12) : 1997-2005.
- [6] 柳国环,练继建,于通顺.透射边界-地基-风电结构地震响应与破坏模式[J].岩土力学,2014(9):2651-2658.
LIU Guohuan, LIAN Jijian, YU Tongshun. Research on seismic response and failure modes of system of transmitting boundary-soil-wind power structures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014 (9) : 2651-2658. (in Chinese)
- [7] 刘军.混凝土损伤本构模型研究及其数值实现[D].大连:大连理工大学,2012.
- [8] 张建伟,曹克磊,赵瑜,等.考虑不同库水耦合模式的拱坝振动特性分析[J].振动、测试与诊断,2016,36(6):1183-1189.
ZHANG Jianwei, CAO Kelei, ZHAO Yu, et al. Dynamic characteristic analysis of arch dams with different forms of reservoir water coupling[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36 (6) : 1183-1189. (in Chinese)
- [9] 杜荣强,林皋,陈士海,等.强地震作用下高拱坝的破坏分析[J].水利学报,2010,41(5):567-574.
DU Rongqiang, LIN Gao, CHEN Shihai, et al. Failure analysis of high arch dam subjected to strong earthquake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5):567-574. (in Chinese)
- [10] 李火坤,杜磊,梁莹,等.基于原型振动测试的泄洪闸闸墩动位移反演[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)
- [11] 马斌,赵钊,胡剑超.碾压混凝土坝成层软弱结构水弹性试验模拟[J].振动、测试与诊断,2019,39(1):106-113.
MA Bin, ZHAO Zhao, HU Jianchao. Hydroelastic simulation mode of roller compacted concrete dams [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(1):106-113. (in Chinese)
- [12] LEE J, FENVES L G. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(3):892-900.
- [13] GB50010—2016 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [14] BIRTEL V, MARK P. Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure [C] //2006 ABAQUS User's Conference. Taiwan, China; [s.n.], 2006: 95-108.
- [15] CLOUGH R W. Nonlinear mechanisms in the seismic response of arch dams [C] //International Research Conference on Earthquake Engineering. Skopje, Yugoslavia; [s.n.], 1980.
- [16] 钟红,林皋,李建波,等.高拱坝地震损伤破坏的数值模拟[J].水利学报,2008,39(7):316-322.
ZHONG Hong, LIN Gao, LI Jianbo, et al. Numerical simulation of damage in high arch dam due to earthquake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (7) : 316-322. (in Chinese)
- [17] 张建伟,付杰,赵瑜,等.水体-结构-地基耦联的泵站出水塔地震响应分析[J].农业工程学报,2018,34(11):128-135.
ZHANG Jianwei, FU Jie, ZHAO Yu, et al. Seismic response analysis of outlet tower based on water-structure foundation coupling system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(11):128-135. (in Chinese)



第一作者简介:张翌娜,女,1980年7月生,硕士,副教授。主要研究方向为工程结构损伤诊断与运行安全。曾发表《泄流激励下水工结构应变模态参数时域辨识研究》(《水力发电学报》2012年第31卷第3期)等论文。

E-mail: zynnn@126.com

通信作者简介:张建伟,男,1979年3月生,教授、博士生导师。主要研究方向为水工结构耦联振动与安全。

E-mail: zjwcivil@126.com