尾矿库排水井的振动台试验研究*

朱佳妮[1,2],王瑶[1,2],魏作安[1,2],路停[1,2],杨永浩[3],张雪怡[1,2]

(1.重庆大学 煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室, 重庆 400044;
2.重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044;
3.重庆交通大学 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074)

摘要:排水井作为尾矿库的重要安全设施,其结构稳定性直接关系到尾矿库的整体安全。基于相似性原理,采用振动台试验系统地研究尾矿库排水井在不同地震加速度和不同埋置深度工况下的动力响应特性和变化规律。研究结果表明:地震加速度峰值从0.315g增大到1.5g的过程中,排水井筒中的加速度放大系数呈先增大后减小的趋势,井壁由弹性逐渐向弹塑性转变,且刚度逐渐衰减;在1.5g地震加速度峰值作用下,排水井在全埋工况下的最大相对位移为0.967 mm,远小于不埋工况下排水井的最大相对位移5.295 mm,说明在地震作用下,排水井周围的尾矿对排水井筒起到稳固作用,排水井的抗震性能提高;地震加速度峰值从0.315g增大到1.5g的过程中,排水井在不埋、半埋和全埋工况下的一阶频率较初始自振频率分别下降了29.17%、27.05%、22.74%,排水井的刚度在不埋工况下退化最快;在地震作用下,井筒中不同位置的应变峰值与地震加速度峰值成正相关,最大应变值出现在排水井的底部,说明此处最易被震动破坏,在设计中应该提高排水井的底部抗震性能。

关键词:尾矿库;排水井;振动台试验;动力响应特征;地震加速度;相似原理

中图分类号:TD744 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)05-0175-09

Study on Shaking Table Test of Drainage Well in Tailings Pond

ZHU Jiani[1,2], *WANG Yao*[1,2], *WEI Zuoan*[1,2], *LU Ting*[1,2], *YANG Yonghao*[3], *ZHANG Xueyi*[1,2]

(1.State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2.School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
3.State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Drainage well is an important safety facility in tailings pond, its stability is related to the safety of tailings pond. Based on the similarity principle, the dynamic response characteristics and variation law of the drainage wells in tailings pond under different seismic accelerations and different buried depths were systematically studied by shaking table test. The results show that when the peak seismic acceleration increases from 0.315g to 1.5g, the acceleration amplification coefficient in the drainage wellbore increases first and then decreases, and the well wall gradually changes from elasticity to elastoplasticity, and the stiffness gradually decays. Under the action of 1.5g peak seismic acceleration, the maximum relative displacement of the drainage well under the full-buried condition is 0.967 mm, which is much smaller than that under the non-buried condition of 5.295 mm, indicating that under the action of seismic, the tailings around the drainage well play a stabilizing role in the drainage wellbore, and the seismic performance of the drainage well is improved. In the process of increasing the peak seismic acceleration from 0.315g to 1.5g, the first-order frequency of the drainage well under the non-buried, semi-buried and full-buried conditions decreases by 29.17%, 27.05% and 22.74%, respectively compared with the initial natural frequency, and the stiffness of the drainage well degrades fastest under the non-buried condition. Under the action of seismic, the strain peaks at different positions in the wellbore are positively correlated with the peak seismic acceleration. The maximum strain value appears at the bottom of the drainage well, indicating that it is most vulnerable to vibration damage. The seismic performance of the bottom of the drainage well should be enhanced in the design.

Key words: Tailings pond, Drainage well, Shaking table test, Dynamic response characteristic, Seismic acceleration, Similarity principle

---

* **收稿日期**:2024-07-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52304124);重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX0497)
作者简介:朱佳妮(2000—),女,湖南湘潭人,硕士研究生,主要研究方向为矿山安全。E-mail:zhujn@stu.cqu.edu.cn
通信作者:魏作安(1965—),男,江西安义人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为金属矿山开采、尾矿库治理等。E-mail:weiza@cqu.edu.cn

0 引言

我国现有尾矿库约 8 000 座,总量居世界第一[1]。尾矿库事故在世界 93 种灾害中排第 18 位[2]。尾矿库溃坝是导致尾矿库灾害事故的主要原因,其次为排水系统破损导致的事故,占比约为 18%[3]。例如,2020 年 3 月 28 日,黑龙江省伊春鹿鸣矿尾矿库 4 号排水井倒塌,导致尾矿和尾水通过排水隧道泄漏进入下游河道,造成了下游河流和周边土壤严重污染,有约 6.8 万人的用水受到了影响[4];2021 年 4 月 16 日,乌拉特前旗西沙德盖钼业有限责任公司尾矿库排水井拱板脱落,导致约 30 万 m^3 尾砂和尾水外泄[5]。据统计,尾矿库失事的各种诱发因素中,地震破坏高居第二位[6]。地震不仅会导致尾矿库溃坝失稳,还会造成尾矿库内的排水构筑物产生裂缝、错动、倒塌等破坏[7]。因此,对尾矿库排水井在地震作用下的稳定状态进行分析具有重要意义[8-10]。

针对尾矿库排水构筑物的设计,国家有相应的技术规范。针对尾矿库排水构筑物的稳定性研究,甘海阔等[11]利用受力模型分析了典型事故案例中排水井的受力状态以及构筑物的承载情况,得出了加强拱板填缝质量可以有效改善构筑物的稳定性。戴海旭[12]对排水井所受风荷载进行计算和分析,为排水井结构的设计提供了依据。LIU 等[13]设计了一种新型排水井模型,该模型能有效降低渗流压力、减小潜流面等,能改善尾矿库的渗流稳定性。

振动台模型试验是目前研究构筑物抗震性能最直接、准确的试验手段。云高杰等[14]建立了 1∶220 全桥结构试验模型,揭示了流水压力对桥梁动力特性的影响。安军海等[15]开展了近远场地震动作用下盾构扩挖地铁车站结构的振动台试验,给出了砂土地基中盾构扩挖车站结构的地震损伤演化机制。ZHANG 等[16]开展了 1∶40 的新型斜拱弯梁异形拱桥振动台模型试验,探明了其在 El-Centro 波、Taft 波和人工波激励下的地震响应特征。KIM 等[17]采用振动台试验研究了石塔结构的抗震性能,揭示了柱基类型对结构响应的影响。

目前,有关尾矿坝稳定性分析及灾变防治技术的研究已较为成熟,且形成了一套有效的尾矿坝隐患防治技术[18-19]。尾矿库排水构筑物主要侧重于泄流能力的计算分析,但对于其稳定性的研究较少[20-21]。我国位于世界两大主要地震带——亚欧地震带和环太平洋地震带的交汇处,地震风险较高,有关地震作用下尾矿库排水构筑物的受力状态及抗震性能的研究比较缺乏。本文以小打鹅尾矿库排水井为工程背景,探究不同地震加速度和埋置深度下排水井的动力响应特性及变化规律。研究成果可为尾矿库排水井的抗震设计及日常安全生产管理提供借鉴。

1 振动台模型试验设计

1.1 相似关系分析与模型制作

1.1.1 相似关系分析

尾矿库排水井受力较为复杂,依据参考文献[22],采用以量纲和谐为核心的量纲分析法,选取 3 个可控相似常数,进而确定其余主要物理量的相似常数。采用低弹性模量以及高密度材料作为制作排水井模型的材料,采用添加适量配重的人工质量模型,基于 Buckingham π 定理,选取长度 L、弹性模量 E、密度 ρ 3 个物理量作为可控相似常数。例如,原型排水井高 25 m,则排水井模型根据相似比 1/30 可得模型排水井高度为 0.83 m。根据量纲分析法确定排水井在地震作用下的动力特性。主要物理量在质量系统中对应的量纲以及相关相似关系表达式见表 1。

表 1 主要物理量在质量系统中对应的量纲及相似关系表达式

Table 1 Dimensions and similarity relation expressions of main physical quantities in the quality system

物理量	量纲	相似关系表达式	相似比
长度 L	[L]	S_l	1/30
位移 D	[L]	S_l	1/30
应变 ε	[1]	1	1
弹性模量 E	$[ML^{-1}T^{-2}]$	S_σ	1/4
应力 σ	$[ML^{-1}T^{-2}]$	S_σ	1/4
泊松比 μ	[1]	无量纲常量	1
质量密度 ρ	$[ML^{-3}]$	S_ρ	2
质量 m	[M]	$S_\rho S_l^3$	1/13 500
力 F	$[MLT^{-2}]$	$S_\sigma S_l^2$	1/3 600
弯矩 M	$[ML^2T^{-2}]$	$S_\sigma S_l^3$	1/108 000
速度 $\dot{x}$	$[LT^{-1}]$	$S_\sigma^{1/2}S_\rho^{-1/2}$	0.35
加速度 $\ddot{x}$	$[LT^{-2}]$	$S_\sigma(S_\rho S_l)^{-1}$	3.75
周期 T	[T]	$S_\rho^{1/2}S_\sigma^{-1/2}S_l$	0.094

1.1.2 排水井模型制作

本次振动台试验的几何相似比为 1∶30。可确定排水井模型的高度为 0.83 m,外径为 0.117 m,内径为 0.093 m。根据表 1 中长度相似比和密度相似比,选用微粒混凝土以及 20 号和 30 号镀锌铁丝制

作排水井模型,微粒混凝土的配比为 PC42.5 水泥∶重晶石砂粗骨料∶重晶石砂细骨料∶水=1∶2.43∶4∶1.3,锯末尾矿中锯末与尾矿的质量比为 1∶8。为使排水井模型能够固定在振动台台面上,且能充分还原原型排水井插入基岩的作用,排水井模型的制作分为井身和底座两个部分,且均使用相同的材料和配比。

排水井模型制作流程如图 1 所示。在制作排水井井身时,使用透明亚克力圆管作为外模,高密度圆柱体聚苯乙烯泡沫作为内膜,在浇筑微粒混凝土之前,先把泡沫内膜切割成合适的尺寸,绑扎排水井模型内部的钢筋笼,分别将内模、外模和钢筋笼固定好,用配置好设定配比的微粒混凝土进行分层浇筑,浇筑时用橡皮锤敲击,振捣密实,直到浇筑达到目标高度。静置 24 h 后进行脱模,并恒温恒湿养护 28 d。

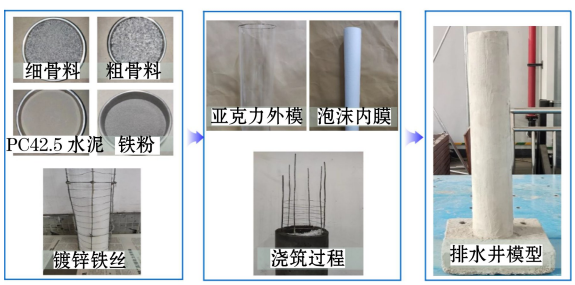


图 1 排水井模型制作过程

Fig.1 Model making process of drainage well

1.2 试验装置与测点布置

1.2.1 振动台

采用 R148a 水平单向电液伺服振动台系统,台面尺寸为 3 m×3 m,额定载重为 10 t,加载频段为 0~50 Hz,沿水平向空台最大驱动加速度可达 2.4g,在额定试件质量下的最大驱动加速度为 1.5g,水平向最大驱动速度为 1.0 m/s,倾覆力矩为 300 kN/m。

1.2.2 振动台模型箱及边界设计

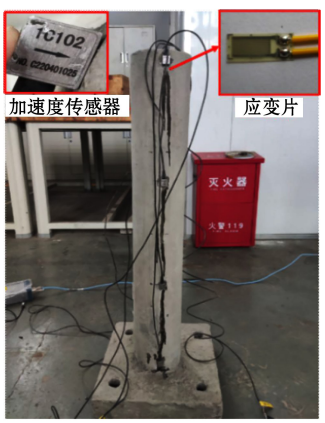
在振动台试验中,模型箱是研究地震作用下埋地构筑物动力特性和地震响应的主要试验装置。本文选用刚性模型箱,根据排水井模型尺寸、振动台输入加速度大小及振动台台面大小,设计的模型箱尺寸为长×宽×高=40 cm×40 cm×100 cm。模型箱整体采用 Q235 钢材,刚度和稳定性符合要求,通过底面预留的螺栓孔与振动台固定。

刚性模型箱的箱体边界会对输入地震波产生反射,从而引发边界效应[23]。因此,设置了 3 种边界处理措施来改善模型箱的边界效应。第一种是设置滑动边界,在平行于振动方向(沿模型箱长度方向)两侧铺上聚氯乙烯薄膜,并涂润滑油,以减小锯末尾矿与侧壁的摩擦力;第二种是设置摩擦边界,为使模型箱中的锯末尾矿底部与振动台台面同步振动,在模型箱底面铺设一层砂纸,增大锯末尾矿与模型箱底面之间的摩擦力;第三种是在垂直于振动方向的两侧铺设一定厚度的聚苯乙烯泡沫板,以改善模型箱侧壁对地震波的反射作用,且泡沫消能系数 β 为 2%~4%时,对边界效应的影响最小。本文采用的聚苯乙烯泡沫板内衬的厚度为 1.6 cm。

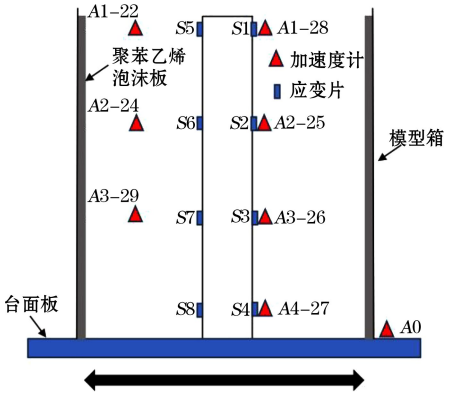
1.2.3 测点布置

为得到地震作用下排水井的动力响应特征,选用电容式单向加速度传感器(量程 10g)和电阻应变片(尺寸为 5 mm×3 mm)作为量测元器件来获取振动台试验过程中需要的各物理量数值。

考虑到排水井模型破坏时可能出现的薄弱位置,振动台试验共布置了 8 个加速度传感器和 8 个应变片测点(见图 2(a)),各测点布置及编号的具体情况如图 2(b)所示,其中加速度测点 $A1$-28、$A2$-25、$A3$-26、$A4$-27 沿排水井高度均匀布置,分别位于排水井模型 0 cm、28 cm、56 cm、83 cm 高度处,为了修正振动台台面实际输出地震波加速度与振动台输入地震波加速度之间的误差,在振动台台面布置了一个加速度测点 $A0$,用来测量台面加速度响应值。$A1$-22、$A2$-24、$A3$-29 是埋设于锯末尾矿中的加速度测点,与 $A1$-28、$A2$-25、$A3$-26 三个加速度测点分别对应于同一水平面。在排水井模型外壁的左右两侧分别布置了 8 个测点(编号为 $S1$~$S8$),沿振动方向两侧均匀布置,与加速度测点分别位于同一水平位置处。



(a) 测量元器件及其在模型中的布置



(b) 传感器布置示意

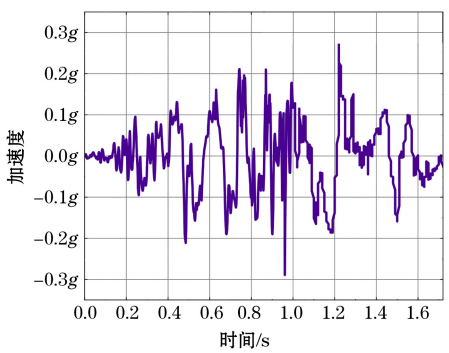
图 2 排水井模型测点布置

Fig.2 Measuring points layout of drainage well model

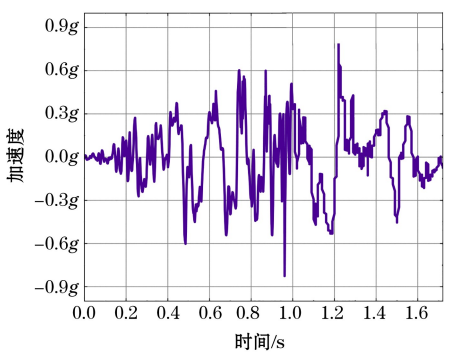
1.3 试验工况

1.3.1 地震波的选取

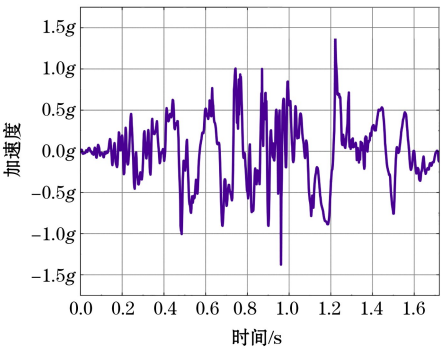
选择发生在小打鹅尾矿库所在地区附近的鲁甸地震的地震波(简称为鲁甸波)作为本次振动台试验的输入地震波,地震波持续时间为 20 s。库区地震设防烈度为 8 度,根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)[24],8 度设防烈度的库区多遇地震、设防地震和罕遇地震加速度峰值分别为 0.07g、0.20g、0.40g。根据相似关系计算,得到加速度峰值(PGA)为 0.315g、0.9g 和 1.5g,持时调整为 1.72 s。调整后鲁甸波加速度时程曲线如图 3 所示。



(a) PGA=0.315g



(b) PGA=0.9g



(c) PGA=1.5g

图 3 调整后鲁甸波加速度时程曲线

Fig.3 Acceleration time history curves of Ludian wave after adjustment

1.3.2 埋置方案

振动台试验是一个损伤积累不可逆的过程。依据排水井在尾矿库中实际的存在情况(见图 4),考虑 3 种埋置工况,分别为不埋(井身不被尾矿覆盖)、半埋(井身一半被尾矿覆盖)和全埋(井身全部被尾矿覆盖)。试验布置情况如图 5 所示,排水井安装于振动台台面中心位置,使其质心位于振动台台面中心,分别依次施加加速度峰值为 0.315g、0.9g 和1.5g 的地震波。

整个排水井振动台的试验方案见表 2,振动台试验过程按照 1～21 依次进行编号。每次加载前输入 0.075g 大小的白噪声进行扫频,从而获得排水井模型的自振频率,以便观察排水井模型在试验过程的刚度退化情况。

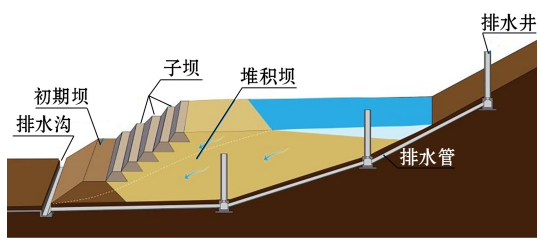


图 4 尾矿库排水井布置示意

Fig.4 Schematic diagram of drainage well layout of tailings pond



(a) 不埋工况 (b) 半埋工况 (c) 全埋工况

图 5 3 种埋置工况下的排水井模型

Fig.5 Drainage well model under three embedding conditions

表 2 排水井振动台试验加载方案

Table 2 Loading schemes of shaking table test of drainage well

试验编号	位置情况	地震影响	调整前加速度峰值	调整后加速度峰值
1		白噪声	0.075g	0.075g
2		多遇地震	0.07g	0.315g
3		白噪声	0.075g	0.075g
4	不埋	设防地震	0.2g	0.9g
5		白噪声	0.075g	0.075g
6		罕遇地震	0.4g	1.5g
7		白噪声	0.075g	0.075g
8		白噪声	0.075g	0.075g
9		多遇地震	0.07g	0.315g
10		白噪声	0.075g	0.075g
11	半埋	设防地震	0.2g	0.9g
12		白噪声	0.075g	0.075g
13		罕遇地震	0.4g	1.5g
14		白噪声	0.075g	0.075g
15		白噪声	0.075g	0.075g
16		多遇地震	0.07g	0.315g
17		白噪声	0.075g	0.075g
18	全埋	设防地震	0.2g	0.9g
19		白噪声	0.075g	0.075g
20		罕遇地震	0.4g	1.5g
21		白噪声	0.075g	0.075g

2 振动台模型试验结果及分析

2.1 加速度分析

采用 DHDAS 动态信号采集分析系统得到排水井模型在各个测点和振动台台面的加速度响应信号,经过处理得到 3 种埋置工况下排水井模型各测点的加速度放大系数,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,无论哪种埋置方式,加速度放大系数皆随着排水井高度的增加呈现出非线性增大的变化趋势,且增加幅度与地震加速度峰值呈现正相关的变化趋势。排水井模型底部测点 $A4\text{-}27$ 的加速度放大系数最小,表明加速度响应信号十分微弱,这是因为模型底部测点附近土体的上覆土层和周围土层压力较大,受到的约束作用大。加速度峰值由 0.315g 增大到 0.9g 时,排水井整体的加速度放大系数增大,但此过程中排水井筒处于弹性阶段,加速度放大系数随着地震加速度峰值的增大而不断增大;当加速度继续由 0.9g 增大到 1.5g 时,加速度放大系数开始减小。究其原因,是因为排水井出现损伤,且损伤逐渐积累,刚度退化,排水井筒由弹性阶段转为弹塑性阶段。

对比排水井在 3 种工况下的测试结果,当加速度峰值由 0.315g 增大至 1.5g 时,全埋工况下整体加速度放大系数变化幅值最小,半埋工况次之,不埋工况最大。由此可知,尾矿能减缓地震对排水井的不利影响,其稳固性主要体现在以下两个方面:一是减少了排水井的惯性作用;二是有效降低了排水井的加速度反应。

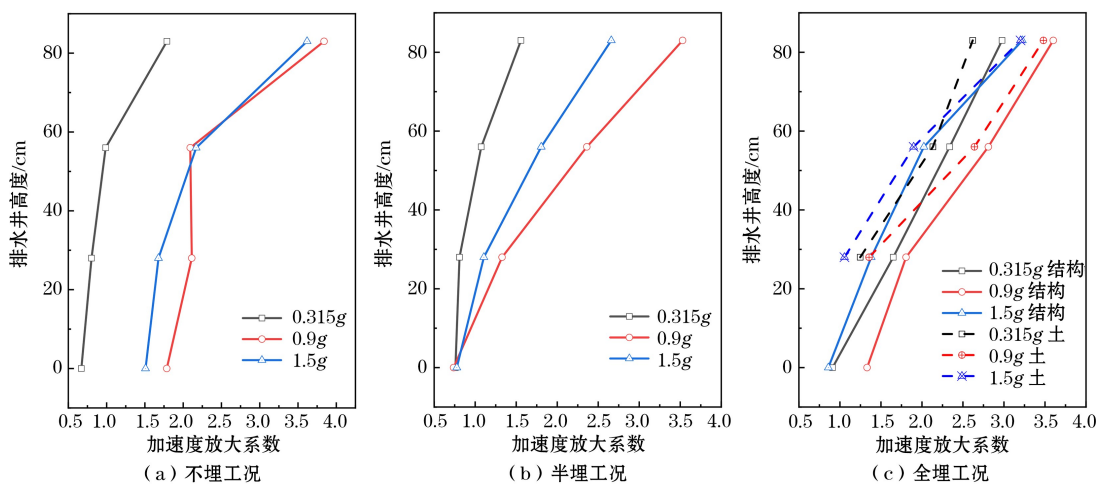


图 6 3 种埋置工况下排水井模型各测点的加速度放大系数

Fig.6 Acceleration amplification factor of each measuring point of drainage well model under three embedding conditions

2.2 位移分析

2.2.1 排水井模型位移分析

排水井不同位置的位移是由加速度传感器得到的加速度数据二次积分求得。通过二次积分后得到的位移减去振动台台面的位移,求出排水井的相对位移,更能直观地分析排水井的位移响应。图 7 为排水井分别在 3 种工况及 3 个不同地震加速度峰值作用下各加速度测量点的相对位移。

随着地震加速度峰值的增大,排水井的相对位移响应逐渐增大,但在不同埋置工况下的增大程度存在差异。在不埋工况下,排水井在 0.315g 地震加速度峰值作用时整体相对位移由图 7 可知,仅为0.441 mm。在 0.9g 和 1.5g 地震加速度峰值作用下位移增幅加大,排水井最高点的相对位移较0.315g 分别增加了 183.76%和 1 100.68%,且排水井在 1.5g 地震加速度峰值作用下,其最大相对位移达到了 5.295 mm,此时排水井出现了较大的结构损伤;在 1.5g 地震加速度峰值作用下,半埋工况和全埋工况下排水井的最大相对位移分别为 2.270 mm 和0.967 mm,远小于不埋工况下排水井的最大相对位移,因此,排水井在周围锯末尾矿的作用下位移响应会减弱,这是因为尾矿对排水井有固定作用,限制了排水井的移动。

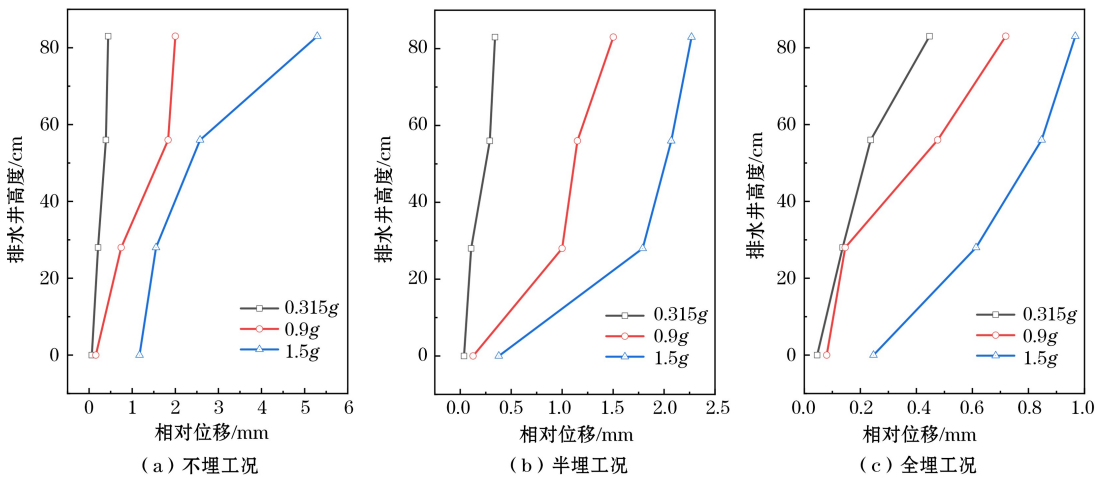


图 7 3 种埋置工况下排水井各测点的相对位移

Fig.7 Relative displacement of each measuring point of drainage well under three embedding conditions

2.2.2 层间位移角

最大层间位移角可以用于研究构筑物损伤状态和抗倒塌能力。将排水井按照测点分布位置分为 3 层,第一层的高度范围为 0～28 cm,第二层的高度范围为 28～56 cm,第三层的高度范围为 56～83 cm。各级加载工况下排水井的层间位移角的倒数($\frac{1}{\theta}=h/\Delta u$)见表 3,无论排水井处于何种埋置工况,排水井的层间位移角均随着地震加速度峰值的增加而增大,排水井的刚度随着地震加速度峰值的加大而逐渐开始退化。排水井在 0.315g 地震加速度峰值作用下,层间位移角均小于钢筋混凝土框架结构的弹性层间位移角限值 1/550,表明排水井整体完好,处于弹性状态;在 0.9g 地震加速度峰值作用下,排水井处于不埋工况时,其最大层间位移值为 1/256.4,超过弹性层间位移角限值,表明排水井开始出现塑性应变,局部出现了损伤;当加载地震加速度峰值达到 1.5g 时,处于不埋工况下的排水井层间位移角进一步增大,层间位移角的最大值为 1/100,小于规范中的弹塑性层间位移角限值,表明排水井在 1.5g 时仍具有的良好抗震性能。

表 3 排水井模型层间位移角倒数($1/\theta$)

Table 3 Reciprocal ofinterlayer displacement angle of drainage well model ($1/\theta$)

加载工况	层级	0.315g	0.9g	1.5g
不埋	第一层	1 945.5	476.2	454.5
	第二层	1 529.1	256.4	277.8
	第三层	5 291.0	8 333.3	100.0
半埋	第一层	1 960.8	1 666.7	200.0
	第二层	1 538.5	2 500.0	1 000.0
	第三层	5 555.6	1 030.9	1 369.9
全埋	第一层	3 076.9	4 255.3	769.2
	第二层	2 857.1	909.1	1 190.5
	第三层	1 282.1	1 111.1	847.4

2.3 自振频率和阻尼比分析

排水井的自振频率和阻尼比特性如图 8 所示。由图 8 可知,在 3 种工况下,排水井的自振频率均随着输入地震加速度峰值的增大而减小,而排水井的阻尼比随着输入地震加速度峰值的增大而增大,说明排水井在地震作用下产生了一定程度的变形与损伤。在地震加速度峰值从 0.315g 增大到 1.5g 的过程中,排水井在 3 种埋置工况下的一阶频率较初始自振频率分别下降了 29.17%、27.05%、22.74%,排水井在不埋工况下的自振频率减小程度最大,刚度

退化更快,损伤积累程度更严重,破坏的可能性最大,这与排水井的位移变化规律相一致。

相同工况下,排水井的一阶自振频率均小于二阶频率。相同地震加速度峰值下不同埋置工况的排水井自振频率存在差异,全埋工况下,排水井的自振频率最大,这是因为在全埋工况下,周围锯末尾矿对排水井具有完全嵌固作用,提高了排水井的抗弯刚度,导致排水井在地震波作用下的振动周期缩短,自振频率变大。

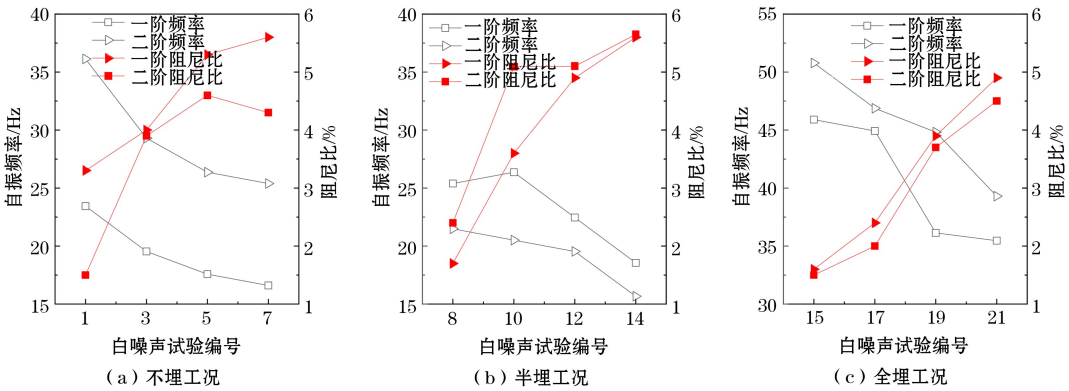


图 8 排水井模型各阶段自振频率和阻尼比

Fig.8 Natural vibration frequency and damping ratio of drainage well model in different stages

2.4 井壁应变分析

以测点 S1、S2、S3、S4 的应变峰值来分析排水井的应变响应。排水井在各工况下沿井身高度的应变变化规律如图 9 所示。从图 9 可以看出,在地震作用下,排水井在不同埋置工况下的应变峰值呈现相似的变化规律,应变峰值在底部最大,且随着排水井的高度而减小,说明排水井模型底部属于地震作用的最强烈部位,容易发生破坏。随着地震加速度峰值的增大,排水井的应变峰值也随之增大;排水井的应变峰值在全埋和半埋工况下均小于不埋工况,说明周围尾矿的约束会减缓排水井的变形,从而增强排水井的抗震性能。

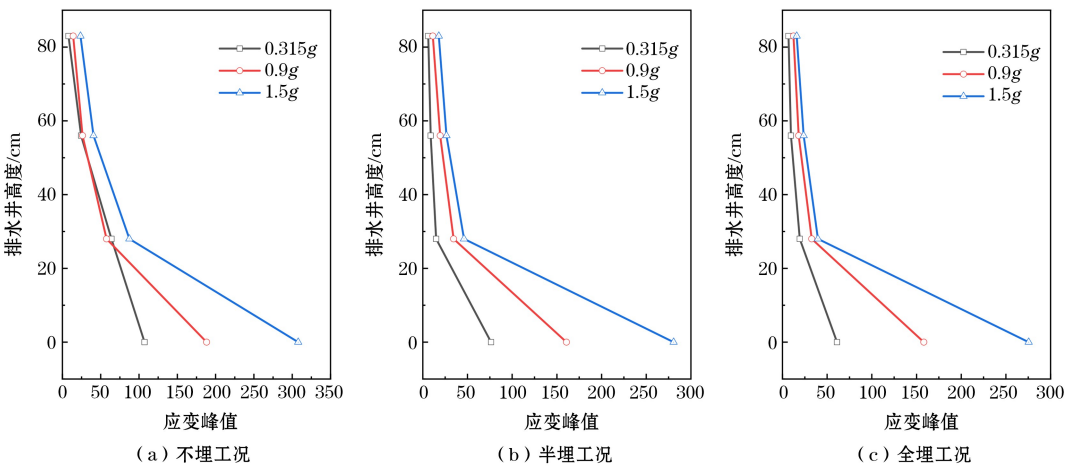


图 9 3 种埋置工况下排水井各测点的应变峰值

Fig.9 Peak strain of each measuring point of drainage well under three embedding conditions

3 结论

通过尾矿库排水井的振动台试验,探究了在不同加速度峰值、不同埋置深度工况下排水井的动力响应特征,得到以下主要结论。

(1) 排水井的加速度放大效应随着排水井高度的增加而增大,加速度放大系数随着输入加速度峰值的增加呈先增大后减小的趋势,排水井刚度则会逐渐退化。全埋工况下排水井刚度退化程度最低,具有更好的抗震性能。周围尾矿的加速度放大系数则随着地震加速度峰值的增加先增大后减小,与结构响应一致。

(2) 周围尾矿对排水井的稳固作用,使得排水井在全埋工况下的相对位移最小。层间位移角的结

果显示,排水井在 0.9g 加速度峰值作用下会逐渐发生塑性破坏。

(3) 排水井的自振频率随着输入地震加速度峰值的增大而减小;阻尼比随着地震加速度峰值的增加而增大。在不埋工况下,排水井的刚度退化较快,损伤累积的程度加剧,破坏的风险相应提高。

(4) 排水井的最大应变值与地震加速度峰值成正相关,最大应变值从排水井顶部到底部逐渐增大,说明排水井底部承受的地震作用力最大,最容易发生破坏。

参考文献(References):

[1] 张锦峰,宋志飞,耿闻泽.我国尾矿库数量事故统计分析和防范[J].现代矿业,2023,39(3):6-9.
ZHANG Jinfeng, SONG Zhifei, GENG Wenze. Statistical analysis and prevention of the tailings pond quantity accidents in China[J].Modern Mining,2023,39(3):6-9.

[2] MASCARO I, BENVENUTI B, CORSINI F, et al. Mine wastes at the polymetallic deposit of Fenice Capanne (southern Tuscany, Italy) Mineralogy, geochemistry and environmental impact[J]. Environmental Geology,2001,41(3/4):417-429.

[3] 梅国栋,王云海.我国尾矿库事故统计分析与对策研究[J].中国安全生产科学技术,2010,6(3):211-213.
MEI Guodong, WANG Yunhai. Statistic analysis and countermeasure study on tailings pond accidents in China [J]. Journal of Safety Science and Technology,2010,6(3):211-213.

[4] 罗清月,魏健,李明月,等.鹿鸣矿业尾矿库泄漏事件环境应急过程解析与总结[J].环境工程技术学报,2022,12(6):1963-1971.
LUO Qingyue, WEI Jian, LI Mingyue, et al. Analysis and summary of the environmental emergency response process of Luming mining tailings pond leakage accident[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(6):1963-1971.

[5] 王盼新,宋玉栋,吴昌永,等.关于突发水污染事件应急处置技术需求的几点思考[J].环境工程技术学报,2022,12(6):1972-1977.
WANG Panxin, SONG Yudong, WU Changyong, et al. Some thoughts on the technical needs of emergency response to water pollution emergencies[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2022,12(6):1972-1977.

[6] RICO M, BENITO G, SALGUEIRO A R, et al. A review of the european incidents in the worldwide context [J]. Journal of Hazardous Materials,2008,152(2):846-852.

[7] 张栋,吴宗之,蔡嗣经.尾矿库地震液化机理及抗震评估指标体系研究[J].中国安全生产科学技术,2010,6(6):17-22.
ZHANG Dong, WU Zongzhi, CAI Sijing. Discussion on tailings reservoir dam failure risk assessment index system under seismic conditions[J]. Journal of Safety Science and Technology,2010,6(6):17-22.

[8] LI D D, CUI X, HUANG J Q, et al. An experimental on filtration and clogging of geotextile filters around drain pipes in fine tailings[J].KSCE Journal of Civil Engineering,2024,28(5):1767-1776.

[9] 周凯,辛明禹.尾矿库扩建安全设施设计研究[J].世界有色金属,2023(19):232-234.
ZHOU Kai, XIN Mingyu. Design and research on safety facilities for tailings pond expansion[J]. World Nonferrous Metals,2023(19):232-234.

[10] 甘海阔,周汉民,崔旋.尾矿库框架式排水井拱板管理现状及结构安全提升措施[J].有色金属(矿山部分),2023,75(4):82-87+124.
GAN Haikuo, ZHOU Hanmin, CUI Xuan. Management status and structural safety improvement measures of arch plate of frame drainage well in tailings pond[J]. Nonferrous Metals(Mining Section),2023,75(4):82-87+124.

[11] 甘海阔,胡贵生,谢胜杰.尾矿库框架式排水井拱板受力模型分析研究[J].中国矿业,2022,31(11):136-142.
GAN Haikuo, HU Guisheng, XIE Shengjie. Study on stress model of arch plate of frame drainage well in tailings pond [J]. China Mining Magazine,2022,31(11):136-142.

[12] 戴海旭.排水井结构设计中风荷载的计算[J].有色设备,2019,33(3):39-42.
DAI Haixu. Calculation of wind load in design of drainage well[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment,2019,33(3):39-42.

[13] LIU C, SHEN Z Z, GAN L, et al. The seepage and stability performance assessment of a new drainage system to increase the height of a tailings dam[J]. Applied Ences,2018,8(10):1840.

[14] 云高杰,柳春光.某深水大跨桥梁水下振动台试验研究[J].振动与冲击,2022,41(12):59-66+177.
YUN Gaojie, LIU Chunguang. A study on the underwater shaking table test of a certain deep-water long-span bridge[J]. Journal of Vibration and Shock,2022,41(12):59-66+177.

[15] 安军海,陶连金,蒋录珍.盾构扩挖地铁车站结构地震反应特性振动台试验[J].岩土力学,2022,43(5):1277-1288.
AN Junhai, TAO Lianjin, JIANG Luzhen. A shaking table-based experimental study on seismic response of a shield-enlarge-dig type subway station structure[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(5):1277-1288.

[16] ZHANG K L, LIU A R, FU J Y, et al. Shaking table test of a new special-shaped arch bridge [J]. Engineering structures,2023,286:116075.

[17] KIM H S, KIM D K, JEON G W, et al. Seismic behavior of stone pagoda structure by shaking table test [J]. Sustainability,2021,13(9):5314.

[18] 李跃强.某大型山谷型尾矿库三维渗流稳定性分析[J].现代矿业,2024,40(4):204-206.

LI Yueqiang. Three-dimensional seepage stability analysis of a large valley tailings reservoir[J]. Modern Mining,2024,40(4):204-206.

[19] 刘红岩,刘康琦,周月智,等.尾矿库渗流场及坝体稳定性的三维数值分析[J].矿业研究与开发,2023,43(11):129-136.
LIU Hongyan, LIU Kangqi, ZHOU Yuezhi, et al. Three-dimensional numerical analysis of the seepage field of the tailings reservoir and stability of the tailings dam[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):129-136.

[20] 陈战旗,解道举,邹莉清,等.物理力学性质对尾矿坝稳定性影响研究[J].地质灾害与环境保护,2023,34(2):78-85.
CHEN Zhanqi, XIE Daoju, ZOU Liqing, et al. Research on the influence of physical and mechanical properties on the stability of talings dam[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,2023,34(2):78-85.

[21] 卢建京,祝华.上游式尾矿堆积坝坝面排水系统的重要性[J].有色冶金设计与研究,2021,42(4):47-50.
LU Jianjing, ZHU Hua. Importance analysis of drainage system on upstream tailings dam surface[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research,2021,42(4):47-50.

[22] 张涛,高波,范凯祥,等.地震作用下振动台试验刚性模型箱侧壁柔性材料研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(10):2415-2424.
ZHANG Tao, GAO Bo, FAN Kaixiang, et al. Study on flexible material in the sidewall of rigid model box in shaking table test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(10):2415-2424.

[23] 周颖,吕西林.建筑结构振动台模型试验方法与技术:第2版[M].北京:科学出版社,2016.
ZHOU Ying, LYU Xilin. Shaking table model test methods and techniques for building structures:2nd ed[M]. Beijing: Science Press,2016.

[24] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings:GB 50011—2010[S]. Beijing:China Building Industry Press,2010.