

上游式尾矿坝地震响应实例分析

张修照^{1 2 3} 巫尚蔚⁴ 张超^{1 2} 杨春和^{1 2 3}

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所,湖北武汉430071;2.岩土力学与工程国家重点实验室,湖北武汉430071;
3.中冶长天国际工程有限责任公司,湖南长沙410007;4.煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆400044)

摘要 1976年7月28日发生的唐山大地震对区域内的多个尾矿坝造成了不同程度的破坏。为研究地震作用下尾矿坝体的响应特征,以唐山地震前后某尾矿坝勘察成果为依据,分析了地震对尾矿粒度分布、抗剪强度及尾矿压缩特性的影响。研究结果表明:①地震后,尾矿坝上层(埋深 ≤ 12 m范围)细粒尾矿增加,下层(埋深12~25 m范围)细粒尾矿减少。②地震对尾矿坝的影响具有区域性。地震后靠近下游坝坡区域尾砂内摩擦角总体降低,上层尾矿变松散,下层尾矿变密实;靠近库内水边线区域,上层尾矿变密实,下层尾矿变松散。③地震作用下尾矿的压缩特性基本不受影响。研究成果可以为地震区上游式尾矿坝的抗震设计提供参考。

关键词 上游式尾矿坝 粒度分布 抗剪强度 地震响应

中图分类号 TU413.9 文献标志码 A 文章编号 1001-1250(2017)-02-145-06

Case Study of Seismic Response of Upstream Tailings Dam

Zhang Xiuzhao^{1 2 3} Wu Shangwei⁴ Zhang Chao^{1 2} Yang Chunhe^{1 2 3}

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, China;

3. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410007, China;

4. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing 400044, China)

Abstract The various tailing ponds in the vicinity of Tangshan were damaged seriously affected by the Tangshan earthquake ($M_s=7.8$, 28-July-1976). In order to study the seismic response characteristics of the tailings dam, influences of Tangshan earthquake on tailings particle size distribution, shear strength and compressibility were analyzed based on geological explorations before and after the earthquake. The results presented that: ① After the Tangshan earthquake, the content of fine grain increases in superstratum of the tailings dam (buried depth ≤ 12 m), decreases in lower stratum (12~25 m depth range). ② The influence of earthquake on the tailings dam characterize as region. The internal friction angle becomes smaller, the tailings get looser in superstratum and more dense in lower stratum in the area close to the downstream dam slope, while the tailings are getting looser in lower stratum and more dense in superstratum in the area near waterline in reservoir. ③ Compression properties of tailings are almost not influenced in the Tangshan earthquake action. The research achievements can provide reference for seismic design of upstream tailings dam in earthquake area.

Keywords Upstream tailings dam, Tailings particle size distribution, Shear strength, Seismic response

尾矿坝是一个高势能的危险源,尾矿坝一旦失事,将会对当地人民造成重大的生命及财产损失。上游式尾矿坝利用了尾矿的水力分级特性,运行成本低,管理便利,因此国内大部分尾矿坝均采用上游式尾矿筑坝方式。但是,上游式尾矿坝也存在浸润线偏高的缺点,在强地震发生时,容易出现坝体破坏情况,

影响坝体安全。

政府和企业对尾矿坝的抗震稳定性问题日益重视,学界对地震条件下尾矿坝安全性的研究也日益增多。关于此方面的研究已有很多,大部分以理论分析、室内试验或数值模拟为主。张超^[1]将可靠度理论与传统安全系数分析方法结合起来研究尾矿坝体

收稿日期 2016-10-24

基金项目 国家自然科学基金重点项目(编号:51234004),国家自然科学基金项目(编号:51004099),国家自然科学基金青年项目(编号:51304088)。

作者简介 张修照(1979—),男,高级工程师,博士研究生。

的稳定性;杜艳强^[2]通过室内动三轴试验研究了动荷载振次对尾矿动剪应力的影响;辛鸿博^[3]采用数值方法模拟了大石河尾矿坝在 1976 年唐山地震中的地震反应过程并与现场搜集的数据进行比较。这些研究分别从不同侧面研究了尾矿坝体或尾矿材料的动力特性,但尾矿坝现场环境更为复杂多变,且地震载荷的大小、方向及作用位置均随时间而具有不确定性,不易在实验室内模拟,因此对尾矿坝在地震情况下的现场研究具有特殊意义。然而对在地震中受到破坏的尾矿坝的研究不多见。王余庆^[4]搜集了唐山地震时新水尾矿坝、大石河尾矿坝及邻近村庄的震害资料,为地震前后对比分析研究提供了素材。还有一些文献^[5-8]搜集了岩土工程中的实际震害资料并研究分析,这些资料及分析对尾矿坝的地震影响研究有很大的参考价值,也很珍贵。然而通过地震前后尾矿坝的现场勘察资料研究尾矿坝的地震响应特性则很罕见,这种资料也将更为弥足珍贵。

本研究以尾矿坝地震前后的现场勘查资料为依据,结合室内颗粒分析试验、三轴剪切试验和侧限压缩试验,分析了地震条件下尾矿坝体的结构演化规律,以及地震动荷载对尾矿强度、变形特征的影响。所得数据及规律可以为地震工况下尾矿坝的抗震设计及危险性评估提供参考。

1 尾矿坝及勘察布置

尾矿坝位于河北省唐山地区迁安市境内,初期坝为碾压黏土坝,坝高 21 m。后期在坝前放矿,采用上游法取坝前粗尾矿堆子坝,最终尾矿堆积高度 120 m,堆积坝平均下游坡比 1:5。入库尾矿平均粒径约为 0.2 mm,属于粗粒尾矿。

尾矿坝于 1970 年建成投产,1974 年发现坝坡出现渗水情况,需采取加固措施,于是业主委托勘察单位进行前期勘察。至 1976 年 7 月下旬,野外勘察作业基本完成,勘察人员准备撤离。恰在此时,1976 年 7 月 28 日,唐山发生 7.8 级大地震,震中烈度 11 度,主震后余震不断,最大强余震震级 7.1 级,震中烈度 9 度。尾矿坝距主震震中约 65 km,距最大余震震中约 32 km,根据唐山地震烈度分布图,尾矿坝区域地震烈度为 7 度。尾矿坝受此地震影响而遭到一定程度的破坏,但未造成垮坝事故。主震和最大余震发生时,尾矿坝工作人员均目睹库内喷砂、冒水,喷出物高达数米,继之库内水位暴涨,向堆积坝顶方向推移达数 10 米。为研究地震对尾矿坝体的影响程度,勘察人员重新进场,进行尾矿坝震后勘察。地震前后 2 次勘察的时间间隔短,最能反映地震对尾矿坝的影响情况。此次勘察收集了关于尾矿坝震害的难得的一手

资料,填补了尾矿坝关于地震响应现场对比资料的空白,对尾矿坝抗震特性研究具有非常重要的参考意义。

尾矿坝勘察钻孔平面布置如图 1 所示,在坝体中间部位垂直坝轴线方向布设 3 条勘察剖面,勘察剖面间距 40 m,堆积坝体上平行坝轴线方向钻孔间距为 50 m,共布设勘察钻孔 39 个。地震前勘察钻孔深度达到原地面。考虑到一般基础或坝体的地震液化深度不会超过 25 m,因此地震后的勘察钻孔深度取 20~25 m。

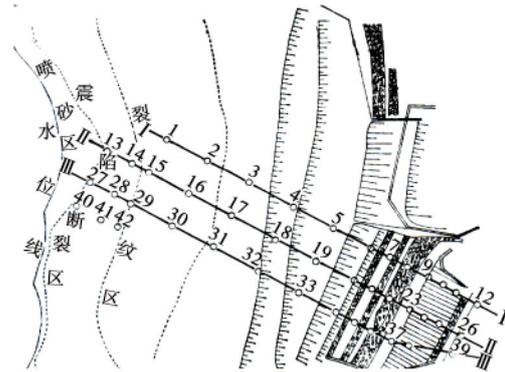


图 1 尾矿库勘察钻孔平面布置
Fig.1 Layout of borehole for geological exploration in the tailings dam

I~III—勘察剖面线;1~42—勘察点编号;○—钻孔

1976 年 7 月 28 日唐山地震前勘察测得的尾矿坝坝高 54 m,尾矿堆积高度 33 m,干滩长度约 250 m,平均坡度 2.5%。地震后测得水下冲积坡比 10%,震前水下坡度比震后稍大,但未测得具体数字。震前测得的地下水位线表明,靠库内水边线约 50 m 范围浸润线埋深最大 1.15 m,距水边线 60~100 m 范围浸润线埋深 1.15~5 m,距水边线 100~250 m 范围浸润线埋深均大于 5 m。浸润线埋深情况见图 2 所示,其中 ZK13 地震前后浸润线埋深分别为 1.47 m 和 0.64 m,ZK16 地震前后浸润线埋深分别为 9.5 m 和 9.07 m。

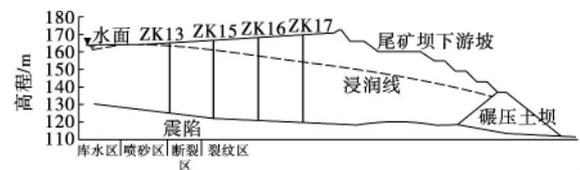


图 2 II-II 勘察剖面示意

Fig.2 Section II-II for geological exploration

因勘察资料较多,限于篇幅,本研究采用最大坝高剖面(II-II 勘察剖面)最具代表性的 ZK16 钻孔的勘察数据进行分析,当需要数据比较或 ZK16 孔数据不全时则采用 ZK13 钻孔的勘察数据。勘察剖面如图 2 所示。其中,ZK13、ZK15、ZK16 和 ZK17 距离库

内水边线分别为 55 m、105 m、155 m 和 205 m。

2 尾矿坝地震破坏型式

地震后的勘察发现,在唐山地震作用下,尾矿坝不同区域具有不同的破坏型式。从上游往下游方向,尾矿坝沉积滩可分为以下破坏区域:喷砂冒水区、震陷断裂区、裂纹区,下游坝坡则以开裂变形为主,区域范围如图 1~图 2 所示。

(1) 喷砂冒水区。沿库内水边线一带,在地下水位埋深小于 1.15 m 的沉积滩面上,有宽约 30 m 的喷砂冒水区,此区域喷口遍布,喷砂后形成的喷砂锥体大小不一,大者 1.2 m,小的仅几厘米。喷出物中值粒径 0.131 mm,这一区域地面下沉 0.3~1.2 m。

(2) 震陷断裂区。从喷砂冒水区向堆积坝顶方向前进,现场可以看到地面明显裂缝和下陷。此区域宽 60 余 m,长达 300 m。震陷带地下水位埋深 1.15~5.0 m,震陷裂缝方向与坝轴线基本一致,平行于水边线,每一震陷裂缝长 50 m 左右。一般裂缝宽 10~20 cm,最宽的 3 条裂缝宽度达 50~60 cm,呈阶梯状。地面下沉 0.25~0.36 m。

(3) 裂纹区。在地下水位埋深大于 5 m 的沉积滩上,从 28 号勘察点起,向坝顶方向至 17 号勘察点一带的滩面,出现了很多大小不同的裂纹,该区域长度与当时坝顶长度相当,宽度接近 100 m。裂纹方向与水边线基本平行,裂缝宽度一般小于 1 cm,大者可达 2~3 cm,距水边线越远,裂缝越小,间距越大。

(4) 下游坝坡。靠初期坝上部子坝的第 2 层台阶上,沿坝轴方向长 35~40 m 的局部滑塌陷裂,可见深度 0.5~0.8 m,最深达 1 m,宽 15~20 cm。

(5) 坝体变形。沉积滩面最大下沉 1.2 m,接近澄清水边的沉积滩向库内滑移,尾矿堆积体的外坡面向外移动并升高,最大达 0.82 m。

3 地震对尾矿物理力学特性的影响

3.1 地震后尾矿粒度变化

图 3 为 II-II 勘察剖面 ZK16 钻孔地震前后粒径小于 0.25 mm 尾矿颗粒质量分数变化情况比较。图 4 为地震前后尾砂平均粒径变化情况比较。图 3 和图 4 所示地震前后尾矿粒度对比曲线虽然整体上有波动,但总体上仍呈现出较明显的规律性,尾矿坝体上层(埋深 0~12 m 范围)地震后粒径小于 0.25 mm 的尾矿颗粒含量增多,而平均粒径减小,表明坝体上层受地震影响导致细粒尾矿增多。尾矿坝体下层(埋深 12~25 m 范围)粒径小于 0.25 mm 的颗粒含量减少,而平均粒径则呈现变大的趋势。

地震前,尾矿坝体内尾砂颗粒受周围颗粒约束,除随整体有固结沉降外,相对位置基本不会变动。但

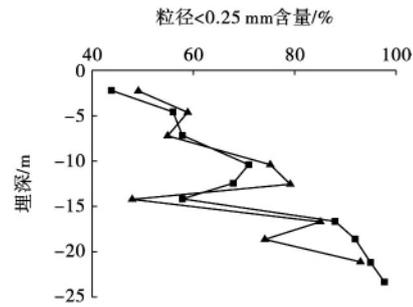


图 3 地震前后尾矿粒径<0.25 mm 颗粒含量比较
Fig.3 Comparison of the grain (particle size<0.25 mm) content before and after the Tangshan earthquake

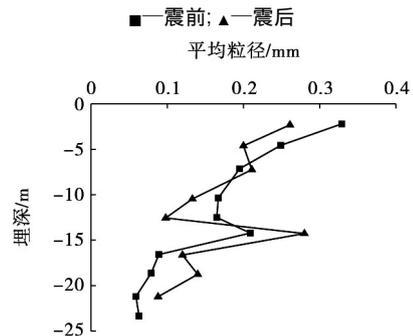


图 4 地震前后尾矿平均粒径比较
Fig.4 Comparison of average particle size before and after the Tangshan earthquake

在地震过程中,由于地下水位的存在,将在坝体尾砂内产生动孔隙水压力,地下水在孔压作用下穿过尾砂内孔隙上升,当孔压足够大时还会冲出地表,形成喷砂冒水现象。堆积坝体内的地下水对粗粒尾矿的携砂能力差,对细粒尾矿的携砂能力则相对较强。当孔压水上升时,尾矿中细小颗粒被孔隙水携带也跟随上升。若孔压较小,地下水不会冲出地表,地震停止后,孔压消散,这些细小颗粒将滞留于尾矿坝体上部。若孔压较大,则细小颗粒随孔隙水冲出地表,还会在喷水口附近形成火山口式的喷砂锥体。

3.2 地震前后物性指标变化

图 5 为 II-II 勘察剖面 ZK13 和 ZK16 钻孔地震前后尾矿孔隙比比较。图 6 为地震前后尾砂干密度比较。从图 5 和图 6 可以看出,由于尾矿堆积体的不均匀性,孔隙比和干密度随深度均存在波动现象。但总体来说,地震前的孔隙比随深度增加有减小的趋势,符合尾矿堆积的一般规律,即随着固结压力和渗透压力的增加,下层尾矿趋于密实,上层新近堆积尾矿则较为松散。但由于固结时间不长,这种规律性还不够显著,如图 6 所示,地震前尾矿砂干密度随深度增加未呈现出明显的增大趋势。从图 5、图 6 还可以看出,对于靠近库内水边线的 ZK13 钻孔,地震后,尾矿坝体上层(埋深 0~12 m 范围)孔隙比总体上比地

震前变小,干密度变大。而对于坝体下层(埋深 12~25 m 范围)孔隙比总体上比地震后变大,干密度则变小。

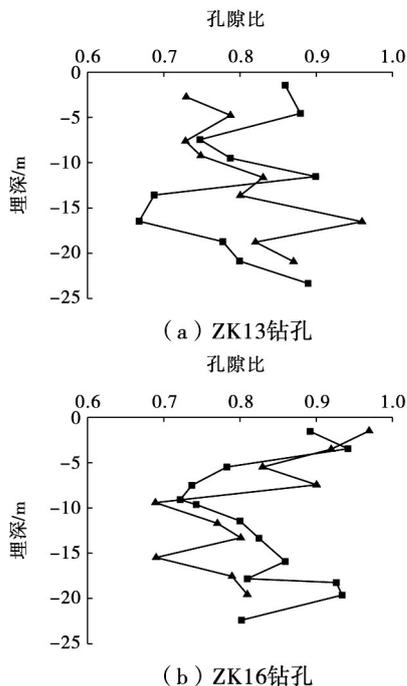


图 5 地震前后尾矿孔隙比比较

Fig.5 Comparison of void ratio before and after the Tangshan earthquake

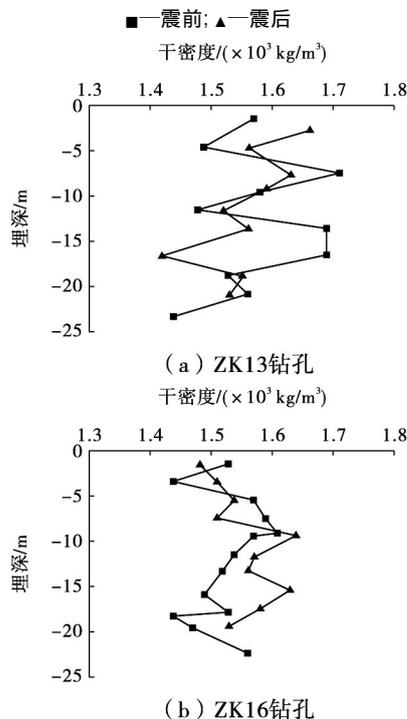


图 6 地震前后尾矿干密度比较

Fig.6 Comparison of dry density before and after the Tangshan earthquake

对于靠近尾矿坝下游坡的 ZK16 钻孔,规律刚好与 ZK13 钻孔相反。即地震后,尾矿坝体上层(埋深 0

~12 m 范围)孔隙比总体上比地震前变大,干密度变化不明显。而对于坝体下层(埋深 12~25 m 范围)孔隙比总体上比地震后变小,干密度则变大。

对于尾矿坝靠近库内水边线区域,由于尾矿充填完成时间短,因此上层新近堆积的松散尾矿在地震的振动作用下变得密实,孔隙比减小,而中下层已固结较为密实的尾矿在振动作用下则变得松散,孔隙比因此变大,同时干密度变小。

对于靠近下游坡区域,由于尾矿颗粒较粗,且浸润线埋藏较深,因此尾矿固结情况较好。但是尾矿上层区域外侧为临空面,在地震振动作用下则变得松散,孔隙比增大。中下层细粒尾矿被孔隙水携带至上层后,这些细粒尾矿留下的孔隙在振动作用下由于上覆压力作用而压密,因此孔隙比会变小而干密度变大。

3.3 地震前后力学指标变化

尾矿砂的黏聚力一般都比较小,内摩擦角是对其力学性质起关键作用的指标。此处仅分析地震前后尾矿内摩擦角的变化,如图 7 所示,为地震前后尾矿内摩擦角比较。

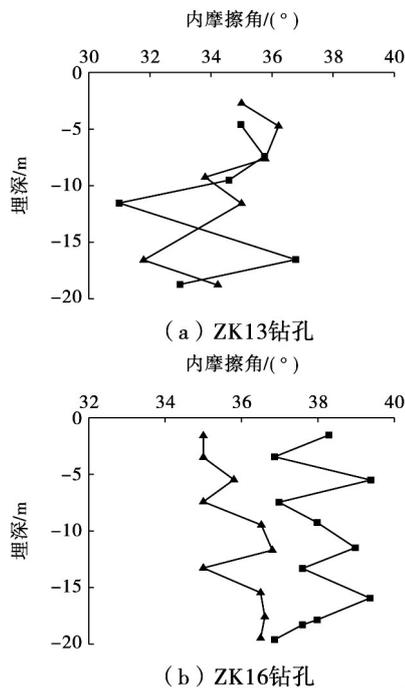


图 7 地震前后尾矿内摩擦角比较

Fig.7 Comparison of internal friction angle before and after the Tangshan earthquake

从图 7 可以看出,靠近尾矿坝下游坡的 ZK16 钻孔尾砂的内摩擦角地震后比地震前降低明显,降低幅度在 1°~10°之间波动。ZK17 钻孔内摩擦角变化情况与之类似。靠近库内水边线的 ZK13 钻孔尾砂内摩擦角地震前后波动较多,规律性不明显。ZK15 钻孔内

摩擦角变化情况与 ZK13 孔类似。

图 7 所示规律表明地震动力荷载对于靠近下游坝坡段的尾矿堆积体强度影响较大,该区为较粗粒尾矿堆积形成的干滩区域,固结状态相对较好,地震时振动荷载破坏了原尾矿的堆积结构,因此导致尾矿强度不同程度的降低。靠近库内水边线的较细粒尾矿堆积区域由于固结程度较低或尚未固结,地震时的振动荷载对尾矿原有状态影响不大,因此其对尾矿堆积体的强度影响也相对较小。

3.4 地震前后压缩性变化

图 8 为 II-II 勘察剖面 ZK13 钻孔地震前后尾矿压缩模量比较。图 9 为 ZK13 钻孔地震前后尾砂压缩系数比较。

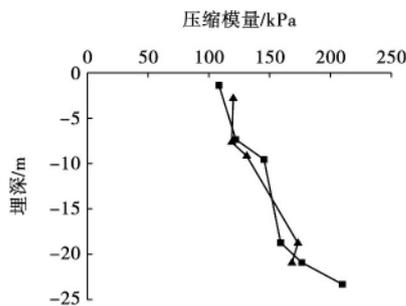


图 8 地震前后尾矿压缩模量比较

Fig.8 Comparison of compression modulus before and after the Tangshan earthquake

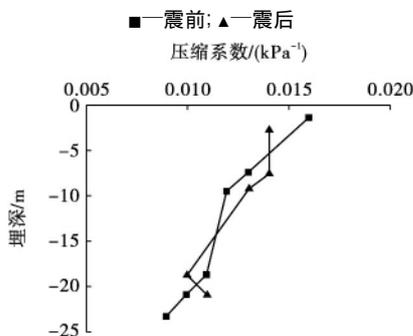


图 9 地震前后尾矿压缩系数比较

Fig.9 Comparison of compressibility before and after the Tangshan earthquake

从图 8、图 9 可以看出,尾矿的压缩模量随深度增加而增加,压缩系数随深度的增加而减小,表明尾矿的压缩性随尾矿埋深的增加而降低,符合尾矿堆积坝体上松下密的一般规律。

地震前后,压缩模量及压缩系数的变化均较小,且未呈现出明显的规律性,表明地震振动荷载对尾矿堆积体的压缩性质影响不大。

4 尾矿坝的地震破坏特征

通过对尾矿坝地震破坏现场的实地勘察,发现尾矿坝的抗震特性与其他工程构筑物相比有较大的不

同,表现出尾矿坝特有的地震破坏特征。

(1) 尾矿坝具有柔性失稳特征。从细观角度来看,尾矿坝是由尾矿颗粒堆积而成的柔性散粒体结构,因此其适应变形的能力相对较强,一般情况下不会出现常见构筑物发生的刚性破坏,即使在地震作用下,尾矿坝体内部还会出现一定的压缩变形和横向变形,因此其能够适应地基一定程度的变形。但尾矿坝都具有一定的堆积高度,坝体下游坡具有大面积的连续临空面,因而过度的变形也可能会造成坝坡失稳,进而溃坝。

(2) 尾矿坝具有三相耦合特征。尾矿坝是一个由固体、液体和气体三相组成的复杂综合体。固相以尾矿颗粒为主,是尾矿坝的主要组成部分,固相尾矿颗粒的粒径、强度等物理力学指标直接影响着尾矿坝的地震稳定性。液相分为渗流水和库内蓄水 2 部分,渗流水主要集中于坝体浸润线以下,充填于尾矿颗粒之间的孔隙内,浸润线以上尾矿为非饱和体,仅含少部分孔隙水。库内蓄水为大气降水和尾矿水力充填时流入库内尚未通过排洪系统排出库外的水。气相为大气,集中于浸润线以上的非饱和尾矿体内,浸润线以下尾砂封闭孔隙内也存在少量气体。尾矿坝的地震响应特性,如地震前后尾矿粒度、孔隙比、力学指标和压缩性等的变化实际上就是尾砂、水和气三相耦合体相互作用的综合反映。

(3) 尾矿坝受地震影响具有区域性特征。由于上游式尾矿坝是由水力分级形成的尾矿颗粒堆积而成,因此,上游式尾矿坝本身就有坝前颗粒粗、坝内颗粒细,表层颗粒粗、深层颗粒细的区域特征。同时,尾矿坝体内地下水位自坝内向坝前逐渐降低。这两方面因素决定了尾矿坝受地震动荷载影响时也将呈现出区域性特征。

尾矿堆积坝下游坝坡区域一般采用粗颗粒尾砂碾压堆筑,固结较为充分,在地震动荷载作用下将会变得松散,导致尾矿强度降低幅度较大,内摩擦角降低最大可达 6° 以上。同时由于该区域为临空面,后期上覆压力增加有限,故地震之后尾矿坝体的固结度及强度也难以恢复。堆积坝上游库内部分由于浸润线较高,容易出现液化现象,当孔压消散后,尾砂的抗剪强度变化不大,且随着尾矿的继续堆积,其固结度和强度还会缓慢增长。

5 结论

(1) 在地震动荷载作用下,尾矿坝体内的孔隙水携带细粒尾矿自下向上流动,使得震后尾矿坝上层细粒尾矿增加,下层细粒尾矿减少。

(2) 地震对尾矿坝密实度的影响具有区域性。

靠近尾矿坝下游坡区域 地震后 ,上层尾矿变松散 孔隙比增大 ,中下层尾矿变密实 孔隙比变小;靠近库内水边线区域 ,上层尾矿变密实 孔隙比减小 ,中下层尾矿变松散 孔隙比变大。

(3) 地震对尾矿坝抗剪强度的影响具有区域性 ,地震后 ,靠近尾矿坝下游坡区域尾砂内摩擦角降低 $1^{\circ} \sim 10^{\circ}$,靠近库内水边线区域尾砂内摩擦角变化不大。

(4) 地震后 ,尾矿堆积体的压缩模量和压缩系数变化不明显 地震对尾矿压缩性质的影响不大。

参 考 文 献

[1] 张 超.尾矿动力特性及坝体稳定性分析[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2005.
Zhang Chao.Dynamic Properties of Tailings and Stability Analysis of Tailings Dam[D].Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics of the Chinese Academy of Sciences,2005.

[2] 杜艳强.细粒尾矿的工程性质及尾矿坝的动力分析[D].重庆:重庆大学,2016.
Du Yanqiang.Engineering Properties of Fine Grained Tailings and Dynamic Analysis of Tailings Dam[D].Chongqing: Chongqing University,2016.

[3] 辛鸿博.1976 年大石河尾矿坝地震反应分析[J].岩土工程学报,1996,18(4):48-56.
Xin Hongbo.Seismic response analysis of the 1976 Dashihe tailings dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1996,18(4):48-56.

[4] 王余庆,王治平,辛鸿博,等.中国尾矿坝地震安全度(1)——大

石河尾矿坝 1976 年唐山大地震震害及有关强震观测记录[J].工业建筑,1994,24(7):38-42.
Wang Yuqing,Wang Zhiping,Xin Hongbo,et al.Earthquake safety of chinese tailings dam(1): seismic behavior of Dashihe tailings dam during the 1976 Tangshan earthquake and strong earthquake records [J]. Industrial Construction,1994,24(7):38-42.

[5] 曹振中,袁晓铭,陈龙伟,等.汶川大地震液化宏观现象概述[J].岩土工程学报,2010,32(4):645-650.
Cao Zhenzhong,Yuan Xiaoming,Chen Longwei,et al.Summary of liquefaction macrophenomena in Wenchuan Earthquake[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(4):645-650.

[6] 侯龙清,徐红梅,曹振中,等.汶川地震液化土层类型验证及土性分析[J].岩土力学,2011,32(4):1119-1124.
Hou Longqing,Xu Hongmei,Cao Zhenzhong,et al.Characteristic analysis of liquefied soil in Wenchuan earthquake[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(4):1119-1124.

[7] 杨玉生,温彦锋,刘小生,等.水利工程震害中土工结构低应力破坏实例分析[J].岩土力学,2012,33(9):2729-2734.
Yang Yusheng,Wen Yanfeng,Liu Xiaosheng,et al.Case studies of earthen structures for hydraulic projects damaged under low confining stress during earthquake [J].Rock and Soil Mechanics,2012,33(9):2729-2734.

[8] 许 冲.2008 年汶川地震前的中国大陆地震单体滑坡与边坡地震响应[J].科技导报,2015,33(1):107-119.
Xu Chong,Earthquake-triggered individual landslides and slope seismic responses across mainland China before the 2008 Wenchuan earthquake[J].Science & Technology Review,2015,33(1):107-119.

(责任编辑 石海林)