

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220809006

空腹混凝土坝振动响应试验研究*

杨 贵^{1,2}, 陈转转^{1,2}, 吴杰鑫^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024;
2. 河海大学安全与防灾工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 针对平原地区土层条件较差和地形条件有限的情况, 提出一种新型坝——空腹混凝土坝。采用振动台模型试验技术, 研究加速度峰值、库水位及防渗墙对该新型坝动力响应的影响。结果表明: (1) 在自由场坝基中设置结构可以降低坝基的超孔压响应, 削减坝基液化程度。(2) 非自由场工况中, 加速度峰值的增大加强了坝基的振动幅度, 加剧液化程度; 坝体上游库水位的存在增加了坝基的有效应力从而降低液化程度; 坝基中防渗墙的存在增加了孔压的消散从而降低液化程度。总体来说, 加速度峰值对液化程度影响最大, 库水位影响次之, 防渗墙影响最小。(3) 库水位的存在增加了坝体的受力程度导致坝体水平位移响应大于空库工况, 防渗墙的存在降低了坝基中的水力梯度导致坝体响应低于无防渗墙工况。但在试验过程中坝体并没出现明显的水平位移变化。

关键词: 空腹混凝土坝; 振动台模型试验; 防渗墙; 动力响应; 砂土液化

中图分类号: TV641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0234-09

Experimental Study on Vibration Response of Hollow Concrete Dam

YANG Gui^{1,2}, CHEN Zhuanzhuan^{1,2}, WU Jiexin^{1,2}

(1. Key Laboratory for Geomechanics and Embankment Engineering of Education Ministry, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Engineering Safety and Disaster Prevention Institute, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: In view of the poor soil conditions and limited topographic conditions in plain areas, a new type of dam, hollow concrete dam, is proposed. The shaking table model test technology was used to study the effects of acceleration peak, water level and impermeable wall on the dynamic response of the new dam. The results show that: (1) structures in the free field dam foundation can reduce the excess pore pressure response and the degree of liquefaction of the dam foundation. (2) In the non-free field working condition, the increase of the acceleration peak strengthens the vibration amplitude of the dam foundation and intensifies the degree of liquefaction; The presence of the reservoir water level in the upstream reservoir of the dam body increases the effective stress of the dam foundation, thereby reducing the degree of liquefaction; The presence of an impermeable wall in the dam foundation facilitates the dissipation of pore pressure and thus reduces the degree of liquefaction. In general, the acceleration peak has the greatest influence on the degree of liquefaction, followed by the reservoir water

* 收稿日期: 2022-08-09; 修回日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479059)资助

作者简介: 杨贵(1975—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事土石坝与堤防工程, 土动力学方面的研究。

E-mail: ygheitu@163.com

level, and the impermeable wall has the least impact. (3) The existence of the reservoir water level increases the stress level of the dam body, resulting in a greater horizontal displacement response of the dam body compared to the empty reservoir condition, and the presence of the impermeable wall reduces the hydraulic gradient in the dam foundation, resulting in a lower response of the dam compared to that of without the impermeable wall. However, during the experiment, there was no significant horizontal displacement change in the dam body.

Keywords: hollow concrete dam; shaking table model test; cut-off wall; dynamic response; sand liquefaction

0 引言

在水利工程建设中,以放坡式为主的心墙坝、面板坝等传统坝型被广泛应用^[1]。这些坝型具有一定的优越性,但并不适用地质条件较差、地形条件有限的平原地区。据记载平原地区水库多被修建于低洼处^[2]、平原河道的一部分^[3]、甚至滞洪区的边界^[4],这些地区土层结构松散,强度低,压缩性高,透水性较强,多存在坝基稳定、坝基渗漏、坝基地震液化等主要工程地质问题^[5]。针对这种情况,本文提出一种新坝型——空腹混凝土坝。该坝型内部为空腹结构,空腹结构的存在最大化降低坝体自重及混凝土用量;且为了减轻混凝土面板的受力情况,上游坝坡设置一定角度。

物理模拟是研究坝体破坏机理不可或缺的重要途径^[6]。目前,国内外很多学者采用振动台试验对动力作用下混凝土坝的响应情况进行研究^[7-9]。在试验过程中,模型材料的选择是影响试验结果可靠性的因素之一。王建新等^[10]在新坝型混凝土-堆石组合坝振动台试验中,将混凝土面板用有机玻璃模拟;朱彤等^[11]根据弹性-重力相似理论对某重力坝进行缩尺试验,考虑到振动台尺寸的限制,坝体材料选用特制的仿真混凝土进行模拟;Q. S. Li等^[12]对三峡大坝进行1:100缩尺,考虑到相似比及大坝实际场地情况,坝体材料采用混合材料模拟,坝体坝基采用刚性连接;S. Mridha等^[13]对Koyna大坝进行 $n=150$ 的缩尺试验,并将多种材料进行适当比例混合模拟混凝土从而使其参数达到对应的相似比;B. Phansri等^[14]对两种配比的仿真混凝土缩尺坝进行振动台试验,得到不同配比下坝体响应的异同。基于此,选用有机玻璃作为坝体材料并对其进行小型振动台模型试验——模型坝高度140 mm,研究该新型坝在不同加速度峰值、库水位及防渗墙下的动力响应情况及变形规律,为其可行性提供一

定的依据。

1 试验概况

1.1 试验设备与边界处理

本次试验采用河海大学土木与交通学院的小型振动台仪器:台面尺寸为50 cm×50 cm,最大负荷为200 kg,最大激振力为5.88 kN,最大加速度为1.0g,振动频率在5~5 000 Hz,振动方向水平向,最大水平位移为±51 mm。在试验时层状柔性模型箱固定在台面上,模型箱尺寸为50 cm(长)×30 cm(宽)×50 cm(高)。小型振动台和层状柔性剪切箱如图1所示。



图1 小型振动台和层状柔性剪切箱

Fig.1 Small shaking table and layered flexible shear box

由于层状柔性剪切箱可以在水平方向发生水平剪切,对土体的剪切变形约束很小,模型箱的阻尼对模型坝动力响应的影响可以很小,因此在试验过程中模型箱采用层状柔性剪切箱。为了减小模型箱边界对模型坝的影响和防止试验过程中出现漏水现象,在模型箱内壁加三层3 mm厚的塑料薄膜,并在塑料薄膜与层状柔性剪切箱之间均匀地涂抹一层润滑油。

1.2 试验材料的选取

由于该坝型为一种新型结构,故本次试验可以

看做与实际工程中采用类似材料的比例模拟试验而非模型试验,因此试验研究结果可作为揭示空腹混凝土坝一般性规律研究分析。在前文中提到该新型坝主要适用于软弱地基,故在试验过程中,坝基选用易液化、易获取的标准砂模拟,其厚度为310 mm;并将厚度为20 mm的碎石设置在砂土层下部以模拟较硬土层,桩端嵌入碎石层深度为10 mm(主要模拟端承桩)。

对于饱和砂土坝基来说,填筑密度对液化程度的影响很大^[15]。目前振动台试验中砂土地基的填筑密度 Dr 多取 $1/3\sim 2/3$ ^[16-17],本试验中坝基土层参数如下:碎石最大干密度 ρ_{max} 为 1.71 g/cm^3 ,最小干密度 ρ_{min} 为 1.43 g/cm^3 ,试验填筑密度为 1.64 g/cm^3 ,相对密实度80%,分1层填筑,高度为20 mm;砂土最大干密度 ρ_{max} 为 1.90 g/cm^3 ,最小干密度 ρ_{min} 为 1.50 g/cm^3 ,试验填筑密度为 1.72 g/cm^3 ,相对密实度60%,分5层填筑,每层高度为62 mm,砂土质量根据相对密实度求出。

在实际工程中,坝基中的桩结构和混凝土结构均采用混凝土材料。考虑到振动台尺寸及试验的可重复性,选用混凝土材料进行模型试验很难实现,故在试验过程中将上述结构及空腹混凝土坝均采用有机玻璃进行模拟:弹性模量 $E=3.0\text{ GPa}$,密度 $\rho=1.4\text{ g/cm}^3$ 。在试验过程中以重力—弹性相似理论^[18]为基准,拟定结构几何比尺(原型长度与模型长度之比)为35/3,并将几何、密度和弹性模量比尺作为试验的控制量。

1.3 模型设计与传感器布置

模型坝由四块有机玻璃板用502胶粘连而成,

其尺寸参数如下:坝体总高度为140 mm,其中底板厚度为20 mm。在底板底部提前预留了桩结构及防渗墙结构的孔位:孔位深度为10 mm,尺寸分别为桩结构的直径及防渗墙结构的厚度。模型坝上游面坡度比为1:0.84,宽度为15 mm;下游面垂直,宽度为10 mm。坝体中的空腹结构高度为115 mm,空腹上部坝体厚度为5 mm。试验过程中坝段分为三部分:一个主要坝段,长度为200 mm;两个次要坝段,长度为43 mm。

对于桩及防渗墙等小型结构而言,其尺寸的确定主要是根据抗弯刚度(式(1))相同求得^[19]。经过计算确定桩结构选用外直径为20 mm,内直径为16 mm的空心有机玻璃管模拟,防渗墙结构选用厚度为10 mm的有机玻璃板模拟。考虑到坝基深度,拟定防渗墙长度为100 mm,桩长度为300 mm,桩间距为 $600\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 。且防渗墙结构、桩结构顶部嵌入模型坝底板10 mm,并用AB胶粘接固接在一起。

$$t_m = \sqrt[3]{\frac{E_p}{E_m} \frac{t_p}{N}} \quad (1)$$

式中, E_p 、 E_m 、 t_p 、 N 分别为原型的弹性模量、模型的弹性模量、原型的材料厚度和相似比(结构的几何比尺)。

试验过程中采集仪采样频率为200 Hz,布置加速度传感器A1~A6(6个),孔压传感器W1~W6(6个),拉力式位移计U1~U3(3个)。为了避免孔压传感器由于小巧导致其位置发生改变对试验结果造成影响,将孔压传感器固定在固定物上。振动台模型振动台模型试验传感器布置及结构布置如图2所示。

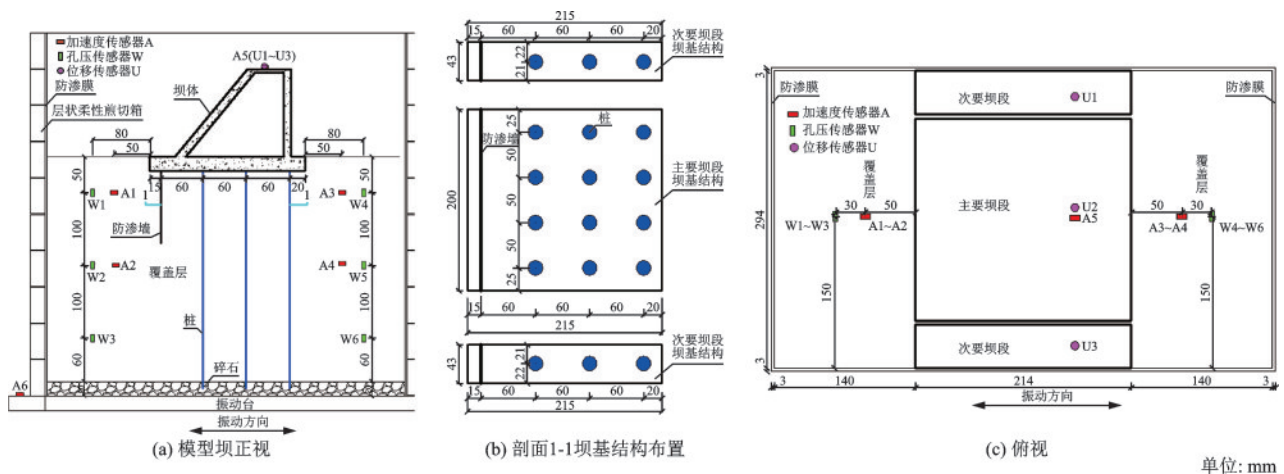


图2 振动台试验布置

Fig.2 Layout of shaking table test

1.4 地震波输入与试验方案

本试验先进行相同填筑密度的无结构的振动台试验,在此基础上再进行含有新型坝结构的振动台试验,具体工况见表1(除工况1为自由场工况,其余工况为非自由场工况)。从表中可以看到本次试验拟研究上游库水位对坝体动力响应的影响,考虑到砂土坝基的渗透性较好,故将上游库水位注入在事先铺好的塑料薄膜上,以此来研究水作用力对坝体动力响应的影响。试验过程中输入波为驻留正弦波,驻留时间20 s,频率为5 Hz,加速度时程曲线如图3所示。

表1 振动台试验工况

Table 1 Shaking table test conditions

工况序号	试验布置
1	无模型坝,峰值加速度为0.1g
2	有模型坝,库水位8 cm,有防渗墙,峰值加速度为0.1g
3	有模型坝,库水位8 cm,有防渗墙,峰值加速度为0.2g
4	有模型坝,空库,有防渗墙,峰值加速度为0.1g
5	有模型坝,库水位8 cm,无防渗墙,峰值加速度为0.1g

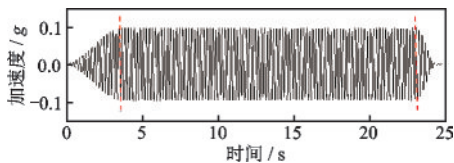


图3 输入波加速度时程曲线

Fig.3 Acceleration time-history curve of input wave

2 试验结果

2.1 试验宏观现象

随着振动时间的增长,模型箱及坝基土体的摆动不大,在边角处先出现冒水现象,之后水逐渐向中部扩散,最终坝基表面被水覆盖。图4~5给出了工况1和工况2坝基表面在不同时刻的液化现象。可以看到由于结构及库水位存在导致坝基初始涌水位置不同:工况1出现在模型箱四个角落;工况2出现在下游底板角落冒水。出现这种现象的原因是坝体结构与土体刚度差距大于剪切箱与土体间

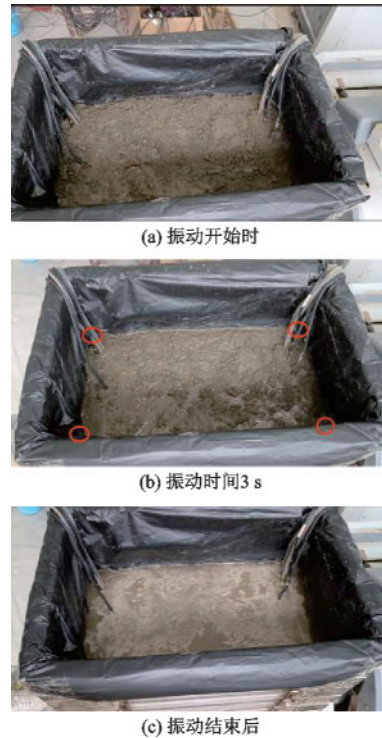


图4 工况1试验现象(圆圈最先冒水的位置)

Fig.4 Test phenomenon in working condition 1 (the position where the circle first emerges water)

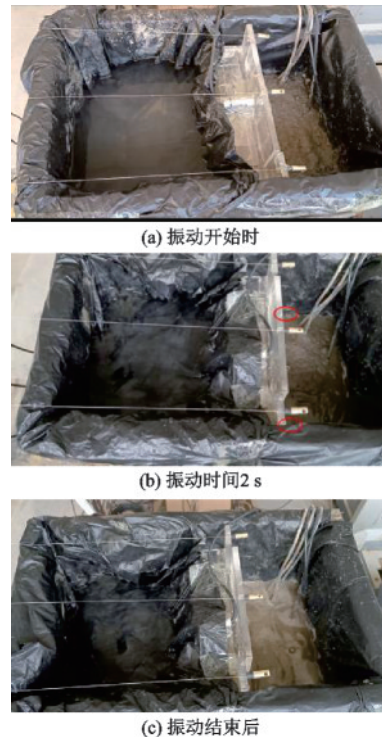


图5 工况2试验现象(圆圈最先冒水的位置)

Fig.5 Test phenomenon in working condition 2(the position where the circle first emerges water)

刚度差距(塑料袋缓冲作用)导致的应力集中现象。总体来说,虽然不同工况下坝基均表现出一定程度

的液化现象,但坝体是稳定的,并未出现明显的水平位移。

2.2 超孔压响应分析

工况1及工况2下坝基测点的超孔压和超孔压比时程曲线如图8和图9所示(其余工况孔压响应与工况1类似)。总体来说,不同工况下测点的超孔压和超孔压比变化规律类似:在0~3 s左右,各测点数值从零迅速增大至峰值;在3~20 s左右埋深较浅测点的数值几乎维持峰值不变,较深测点则出现不同程度下降。这是由于振动过程中超孔隙水压力随着深度的增加消散减慢,加上四周边界约束只能通过向上渗流来消散;在振动结束3 s左右时,孔压迅速衰减直至稳定,但数值并未为零,即存在一定的残余孔压响应。

工况1下,埋设5 cm和15 cm测点的超孔压比均大于0.8,这说明了此时坝基埋深15 cm以上的土层出现了液化现象;而埋深25 cm测点的超孔压比为0.6,即埋深15~25 cm内的土层未发生完全液化现象。工况2下,结构与水位的存在一定程度上减弱了坝基的超孔压响应。在工况2中坝基上游由于水位的存在导致其对应的超孔压响应低于下游相

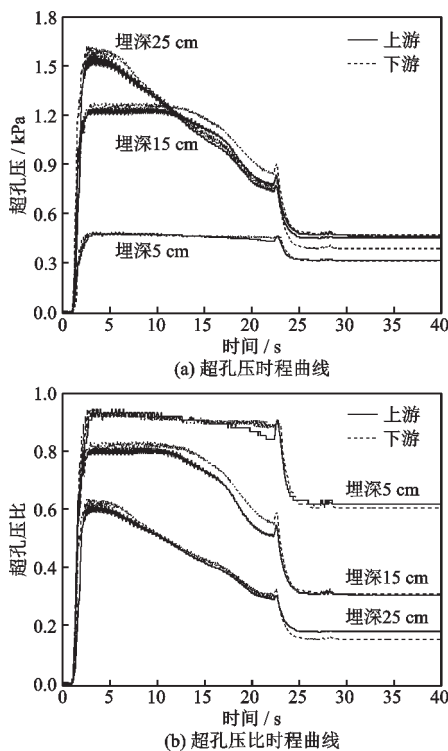


图6 工况1坝基测点超孔压响应情况

Fig.6 Excess pressure response of dam foundation under condition 1

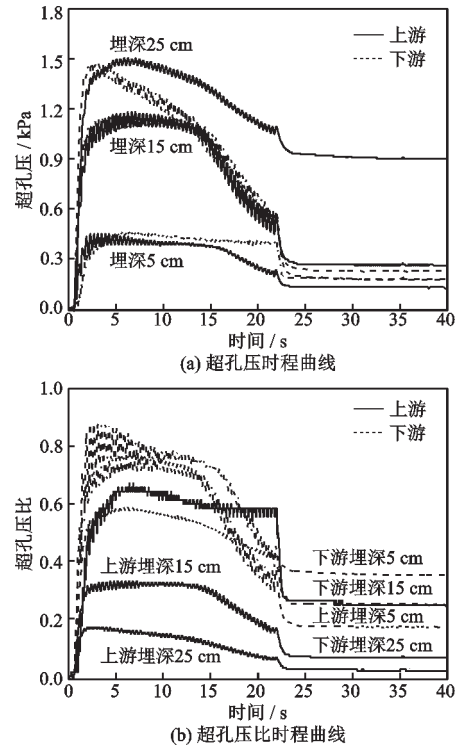


图7 工况2坝基测点超孔压响应情况

Fig.7 Excess pressure response of dam foundation under condition 2

同埋深测点的响应,尤其是超孔压比数值,如埋深5 cm上游测点的超孔压比较下游减小了0.54,且超孔压比减小的程度随着测点埋深的增大而减小。这是由于随着坝基深度的增大,土体的自重应力逐渐强于水位压重导致的。除此之外可以注意到工况2中埋深25 cm的测点存在较大的残余超孔压,这可能是由于埋深较大时上游结构及水位的存在阻碍了超孔压的消散路径。

图8可以看到不同位置处超孔压比峰值与埋深的变化规律有所不同:对于上游测点来说,当水位存在时,埋深15 cm测点的超孔压比峰值与埋深5 cm测点的超孔压比峰值相差较大;当水位不存在时,埋深25 cm测点的超孔压比峰值与埋深15 cm测点的超孔压比峰值相差较大。说明水位对上游表层测点的超孔压数值影响较大;对于下游测点来说,上游水位存在与否对其几乎无影响,但测点的超孔压比峰值与埋深的关系是反相关的,且埋深5 cm处的数值均大于0.8,即下游坝基表面出现液化现象。此时非自由场工况埋深5 cm测点的超孔压比较自由场工况相同测点数值下降了6.4%。当加速度峰值增大时,埋深5 cm测点的超孔压比增大了10.2%;当水位不存在时,埋深5 cm测点的超孔

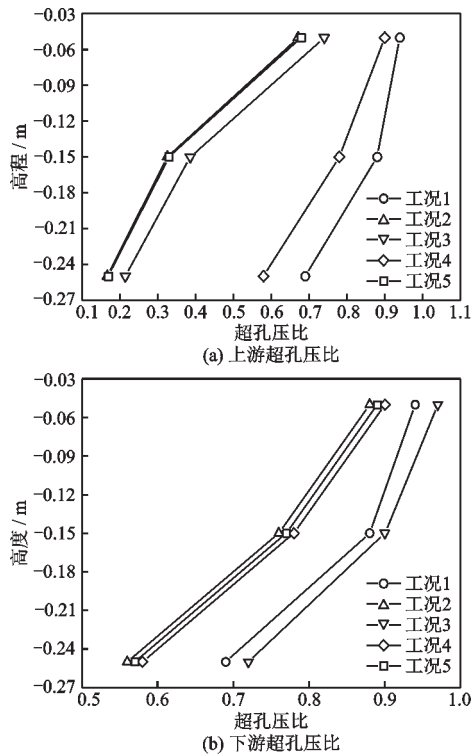


图8 不同工况超孔压比

Fig.8 Excess pore pressure ratio under different working conditions

压比增大了2.3%；当防渗墙不存在时,埋深5 cm测点的超孔压比增大了1.1%；从变化程度可知加速度峰值对坝基液化程度影响最大,水位次之,防渗墙最小。

2.3 加速度响应分析

当土体受到振动时,有效应力会减弱,阻尼变大,对波的传播起到抑制作用,从而使土层的加速度响应受到削弱^[16]。图9和图10给出了工况1上游测点的加速度响应情况。从中可以看到测点加速度响应在3 s左右达到峰值后便出现较快速率的衰减,且测点埋深越浅,加速度衰减程度就越大:埋深5 cm的测点从0.25g衰减至0.05g,衰减程度为80.0%；埋深15 cm和25 cm测点衰减程度则分别在55.1%和33.3%,说明该模型表层液化比较严重,底部液化比较轻微。随着振动时间的增长,超孔压逐渐消散,土体有效应力逐渐恢复,对应测点加速度逐渐变大并趋于稳定,尤其是表层测点。总体来说,加速度的变化趋势与孔压响应变化情况对应。在非自由场工况中,加速度传感器分别位于上下游埋深5 cm及15 cm处,坝顶及剪切箱外。图12给出了工况2下测点的加速度时程曲线。可以看到坝基

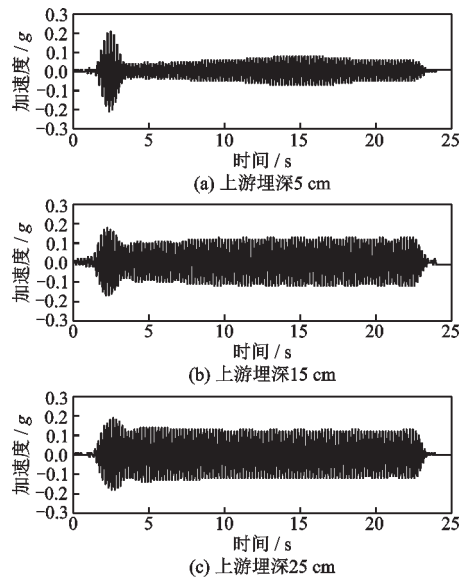


图9 工况1测点加速度时程曲线

Fig.9 Acceleration time-history curve of a measuring point in condition 1

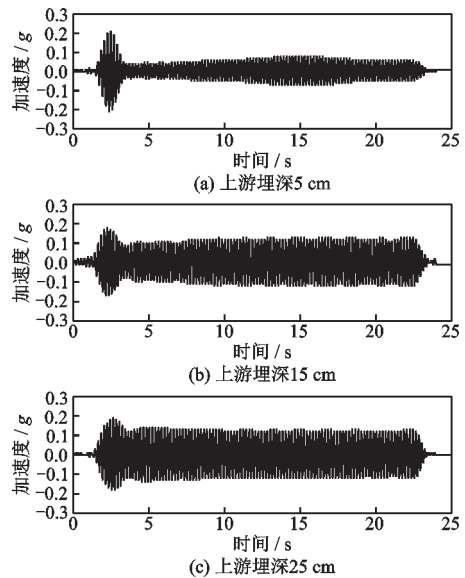


图10 工况2测点加速度时程曲线

Fig.10 Acceleration time-history curve of a measuring point in condition 2

测点的加速度响应规律与工况1类似,其中埋深5 cm和15 cm测点的加速度分别衰减了38.4%和31.8%,衰减程度较自由场工况有所减低,分别降低了41.6%和23.3%。这是由于工况2下坝基液化程度小于工况1导致的。由于坝基出现一定程度的液化导致坝顶处的加速度也出现衰减:从0.36g衰减至0.26g,衰减程度在27.8%。

图11给出了非自由场工况上游各测点的加速度放大系数情况。可以看到坝基未液化前,坝基测

点的加速度放大系数随着埋深的增大而减小,数值均大于1.0;坝基液化后,土体阻尼增大,测点加速度减小,放大系数降低。除工况3外,其余工况测点加速度放大系数与埋深仍然是反相关的,且数值仍大于1.0。而工况3中由于坝基液化程度最严重导致其对应放大系数小于1.0,数值与埋深总体是正相关的。此外,可以注意到当加速度峰值增大后对应测点放大系数变小,该结论与余挺等得出规律类似^[20]。与工况2相比,此时坝基液化前后埋深5 cm测点放大系数衰减程度增大了6.7%;相同峰值工况下,库水位的存在增大坝基有效应力导致测点的加速度及放大系数降低,与工况4相比,坝基液化前后埋深5 cm测点放大系数衰减程度减小了2.9%;防渗墙的存在增强了上游对应部分坝基的整体性和有效应力从而导致测点的加速度及放大系数也同样减弱,与工况5相比,坝基液化前后埋深5 cm测点放大系数衰减程度减小了0.7%。对于坝顶而言,库水位的存在对坝顶产生向下游的作用力,与坝顶而言是不利的,即空库对应的坝顶加速度和放大系数均小于存在库水位的工况,如未液化前工况4和工况2对应加速度分别为 3.6 m/s^2 和 3.3 m/s^2 ,放大系数分别为3.6和3.3;防渗墙的存在一定程度降低

了水力梯度,但由于振动过程中地基中的水主要是通过向表层排消散的,故其对应的加速度略小于工况5。

2.4 坝体水平位移响应分析

由于该新型坝具有较轻的自重,故对坝体水平位移的分析更重要。在试验过程中为了消除边界对坝体带来的影响,将坝体分为两个次要坝段,一个主要坝段。图12给出了工况2~工况5模型坝主要坝段测点的动位移时程曲线。可以看到随着振动时间的延长,各工况测点的动位移数值先不断增大,之后逐渐趋于稳定。且不同工况下坝体的水平位移均较小,并未发生明显的位置变化。其中工况2下,测点对应残余水平位移为3.1 mm。当加速度峰值增大时,坝基液化程度明显增大,土体有效应力减小,坝体的水平位移增加,结束时刻测点残余水平位移较工况1增大了83.8%;库水位的存在虽然一定程度抑制了坝基液化程度,但工况4下坝体上游不存在库水位从而导致其对应的残余水平位移有所降低,降低了22.5%;防渗墙的存在同样削弱坝基液化程度,且一定程度降低水力梯度,故在防渗墙不存在的工况5下坝体的水平位移略微增大,增大了3.5%。从测点水平位移变化程度可知,总体来说加速度峰值对坝体水平位移影响最大,库水位次之,防渗墙最小。

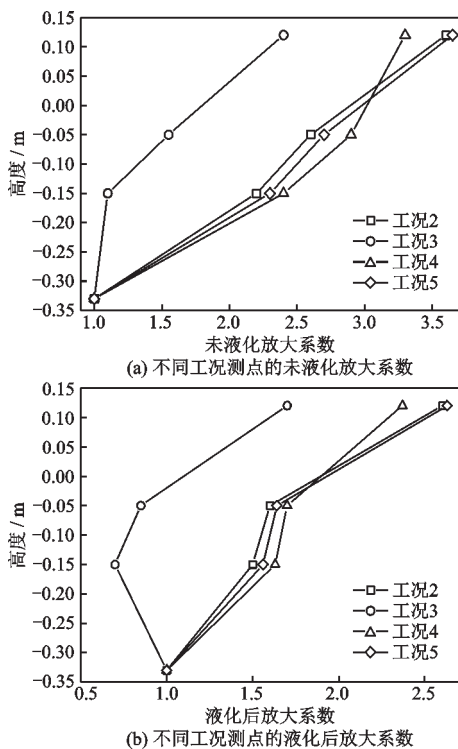


图11 不同工况加速度放大系数
Fig.11 Acceleration amplification factor under different working conditions

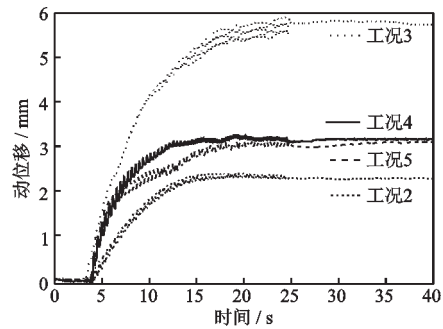


图12 非自由场工况坝顶动位移时程曲线
Fig.12 Time-history curves of dynamic displacement at dam crest for non-free field condition

3 结论

针对平原水库较差地质、有限地形条件提出一种新型坝——空腹混凝土坝。在此基础上,利用小型振动台试验,研究新型坝在可液化坝基的动力响

应。通过对宏观试验现象、超孔压加速度及水平位移等物理量分析,得出以下结论:

(1)与自由场工况相比,非自由场工况中结构及库水位的存在改变了坝基的动力响应,降低了液化程度。在振动过程中由于刚度差距导致坝基首次涌水位置出现在坝体底板角落。

(2)在非自由场工况中,输入波加速度峰值对坝基动力响应影响最大,库水位次之,防渗墙最小。其中加速度峰值越大,液化程度越高,坝基坝体动力响应越大;库水位的存在增大坝基的有效应力从而抑制坝基液化程度,但对应坝体动力响应增大;防渗墙的存在同样增大坝基的有效应力且降低水力梯度,坝基液化程度低,坝体动力响应略微降低。

(3)在非自由场工况中,输入波加速度峰值对测点的加速度放大系数影响最大,库水位次之,防渗墙最小。且坝基液化后测点的加速度放大系数均降低,其中除工况3(加速度工况)液化后测点的放大系数小于1.0外,其余工况均大于1.0。

(4)在振动过程中,加速度为0.1g工况下坝体的响应及水平位移较小,并未出现明显的破坏;而加速度峰值为0.2g时对应的响应及残余位移相对较大,可以通过增加坝基中的桩结构的数量来改善这种情况。

(5)总体来说,动力响应试验结果验证了该新型坝的可行性,但试验过程中坝基地应力情况及坝型较优性比较并未研究,从这个观点上来看,后续需要进一步通过模型试验、数值模拟等手段对其进行模拟优化,为该新型坝的适用性提供支撑。

参考文献:

[1] 周建平,杜效鹄,周兴波,等.世界高坝研究及其未来发展趋势[J].水力发电学报,2019,8(2):1-14.
Zhou J P, Du X H, Zhou X B, et al. World high dam research and its future development trend [J]. Journal of Hydroelectric Power, 2019, 8(2): 1-14. (in Chinese)

[2] 陈永春,袁亮,徐翀.淮南矿区利用采煤塌陷区建设平原水库研究[J].煤炭学报,2016,41(11):2830-2835.
Chen Y C, Yuan L, Xu C. Investigation on using mining subsidence area to build a reservoir in Huainan coal mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2830-2835. (in Chinese)

[3] 陶晓东,严志程,崔勇.滨海平原水库的主要水环境问题及对策分析[J].水利规划与设计,2012,4(4):17-18,53.

Tao X D, Yan Z C, Cui Y. Analysis of main water environmental problems and countermeasures of reservoirs in coastal plain [J]. Water Conservancy Planning and Design, 2012, 4(4): 17-18, 53. (in Chinese)

[4] 许学工,郭洪海,彭慧芳.平原水库对周边地下水及土壤的影响——以黄河三角洲耿井水库为例[J].中国环境科学,2004,24(1):115-119.
Xu X G, Guo H H, Peng H F. Effect of plain reservoir on surrounding groundwater and soil: A case study of Gengjing Reservoir in Yellow River Delta [J]. China Environmental Science, 2004, 24(1): 115-119. (in Chinese)

[5] 李传奇,李超超,王帅,等.平原水库土工膜防渗特性分析[J].长江科学院院报,2016,33(4):135-139.
Li C Q, Li C C, Wang S, et al. Analysis of impermeable characteristics of geomembrane in plain reservoir [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(4): 135-139. (in Chinese)

[6] 张宇,冯新,侯爽,等.结构缝对高碾压混凝土拱坝地震破坏机理影响的试验研究[J].水力学报,2015,46(10):1222-1232.
Zhang Y, Feng X, Hou S, et al. Experimental study on the effect of structural joints on seismic failure mechanism of high roller compacted concrete arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1222-1232. (in Chinese)

[7] Rochon-Cyr M, Léger P. Shake table sliding response of a gravity dam model including water uplift pressure [J]. Engineering Structures, 2009, 31(8): 1625-1633.

[8] Javanmardi F, Léger P, Tinawi R. Seismic water pressure in cracked concrete gravity dams: experimental study and theoretical modeling [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(1): 139-150.

[9] 李静,陈健云,徐强,等.混凝土重力坝抗震配筋的振动台模型试验[J].振动、测试与诊断,2019,39(2):255-260.
Li J, Chen J Y, Xu Q, et al. Shaking table model test on seismic reinforcement of concrete gravity dam [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2019, 39(2): 255-260. (in Chinese)

[10] 王建新,杨贵,唐新军,等.混凝土-堆石组合坝小型振动台模型试验研究[J].防灾减灾工程学报,2016,36(6):878-883.
Wang J X, Yang G, Tang X J, et al. Experimental study on small shaking table model of concrete-rockfill combined dam [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(6): 878-883. (in Chinese)

- [11] 朱彤,王忠阳,周晶. 满足相似条件的混凝土重力坝振动台试验方法研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(10): 19-26.
Zhu T, Wang Z Y, Zhou J. Shaking table test method of concrete gravity dam meeting similar conditions [J]. Journal of Hydroelectric Power, 2017, 36(10): 19-26. (in Chinese)
- [12] Li Q S, Li Z N, Li G Q, et al. Experimental and numerical seismic investigations of the three gorges dam [J]. Engineering Structures, 2005, 27(4): 501-513.
- [13] Mridha S, Maity D. Experimental investigation on non-linear dynamic response of concrete gravity dam-reservoir system [J]. Engineering Structures, 2014, 80: 289-297.
- [14] Phansri B, Charoenwongmit S, Yooprasertchai E, et al. An experimental study on shaking table tests on models of a concrete gravity dam [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19(1): 142-150.
- [15] 任红梅,吕西林,李培振. 饱和砂土液化研究进展[J]. 地震工程与工程震动, 2007, 27(6): 166-175.
Ren H M, Lyu X L, Li P Z. Research progress on liquefaction of saturated sand [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(6): 166-175. (in Chinese)
- [16] 杨凯文,李俊超,王峰,等. 饱和砂土坝基液化超重力振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 778-786.
Yang K W, Li J C, Wang F, et al. Experimental study on liquefaction and high gravity shaking table of saturated sand dam foundation [J]. Chinese Journal of Rock and Soil Engineering, 2022, 44(4): 778-786. (in Chinese)
- [17] 梁孟根,梁甜,陈云敏. 自由场地液化响应特性的离心机振动台试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(10): 1805-1814.
Liang M G, Liang T, Chen Y M. Centrifuge shaking table test of free-field liquefaction response characteristics [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(10): 1805-1814. (in Chinese)
- [18] 范书立. 混凝土重力坝的动力模型破坏试验及可靠性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
Fan S L. Research on dynamic failure test and reliability of concrete gravity dam [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [19] 徐泽平,侯瑜京,梁建辉. 深覆盖层上混凝土面板堆石坝的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1323-1328.
Xu Z P, Hou Y J, Liang J H. Centrifugal model test of concrete face rockfill dam on deep overburden [J]. Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1323-1328. (in Chinese)
- [20] 余挺,邵磊. 含软弱土层的深厚河床覆盖层坝基动力特性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 267-277.
Yu T, Shao L. Study on dynamic characteristics of dam foundation in deep riverbed overburden with soft soil layer [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 267-277. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)