

核电厂泵房直立墙振动台模型试验研究

孔宪京^{*1,2}, 张争超¹, 邹德高^{1,2}, 骆巍¹

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 开展了某核电厂泵房直立墙结构振动台模型试验, 采用粒子图像测试技术(PIV技术)测量了直立墙和墙后块石的变形过程, 详细分析了直立墙结构在地震作用下的地震响应和破坏模式. 研究表明位于抛石基床上的直立墙结构变形过程为当输入加速度较小时, 直立墙处于稳定状态; 随着输入加速度逐渐增大, 直立墙在自身地震惯性力和墙后回填块石的动土压力作用下缓慢向外海侧水平滑移、倾斜和竖向沉降, 墙后回填块石出现沉陷, 但变形较小; 当加速度达到一定值时, 直立墙向外海侧移动和回填块石沉陷速率急剧增加, 变形较大.

关键词: 核电厂; 直立墙; 振动台; 破坏模式

中图分类号: TU4

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201401013

0 引言

近年来, 核电作为新兴能源得到了长足的发展, 我国已建和在建的核电厂主要分布在经济发达、人口密集的沿海地区. 核电站海域工程主要由核电站的循环冷却水和核安全用水的取排水设施及海工防护建筑物构成, 是保障核电站安全运行的重要组成部分之一^[1]. 海域工程的取排水设施一旦在地震中发生破坏, 会造成无法弥补的损失, 如日本福岛核电站事故. 核电厂中的取排水工程广泛采用直立墙作为挡土结构, 直立墙在保护核电厂主体建筑安全方面发挥着巨大的作用. 由于核电设施的重要性高于一般建筑物, 核电厂泵房直立墙的抗震稳定性要求也比一般挡土墙要高. 因此, 深入研究核电厂泵房直立墙结构在地震荷载下的破坏模式具有重要的现实意义.

由于缺少核电厂泵房直立墙震害的观测结果, 其地震破坏模式还不清楚. 振动台模型试验为定性解释这一现象提供了一种可行的手段. 振动台模型试验由于其灵活性、便利性, 能直观地观测到结构破坏过程, 而得到了广泛的研究与应用^[2-5]. 振动台模型试验也成为研究土工构筑物破坏机理, 预测土石结构地震变形和破坏, 以及检验

数值计算方法的重要手段.

本文针对核电厂泵房直立墙的工程特性, 结合某实际工程, 借助振动台模型试验, 采用粒子图像测试(PIV)技术对直立墙和墙后块石的变形发展过程^[6]进行全程捕捉, 研究地震荷载下核电厂泵房直立墙结构的变形模式, 以期为核电厂泵房前直立墙的结构设计和抗震措施的提出提供依据.

1 振动台模型试验设计

某核电厂泵房直立墙采用沉箱式结构, 直立墙高 16.75 m, 宽 11.9 m, 直接坐落在 4.1 m 厚的抛石基床上, 直立墙内和墙后均为回填块石, 墙后地基残积土开挖边坡为 1:2, 距离墙踵 7.5 m. 回填块石和残积土的干密度分别为 1 800 kg/m³ 和 1 616 kg/m³, 固结排水剪试验强度参数分别为摩擦角 45°、黏聚力 5 kPa 和摩擦角 29°、黏聚力 24 kPa. 直立墙结构断面如图 1 所示.

1.1 激振设备

激振设备为大连理工大学工程抗震实验室的水平与垂直两向激励的水下振动台, 如图 2 所示, 该振动台台面尺寸为 4 m×3 m, 水平向最大加速度为 1g, 垂直向最大加速度为 0.7g, 最大荷载为

10×10^4 N, 工作频率为 0.1~50 Hz.

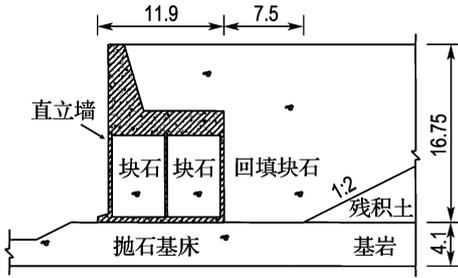


图1 直立墙结构断面(单位:m)

Fig. 1 Section of upright wall structure (unit:m)

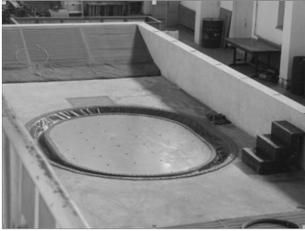


图2 振动台

Fig. 2 The shaking table

1.2 模型尺寸及布置

综合考虑振动台尺寸和承载能力等控制要素,选定试验模型几何比尺为 1/16,根据几何相似得到的直立墙试验模型尺寸如图 3 所示。

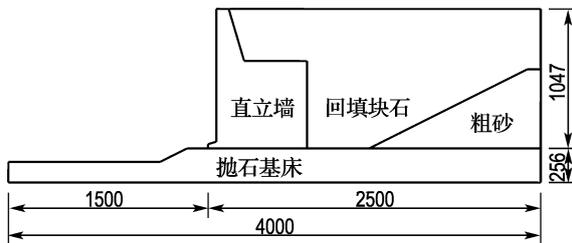


图3 试验模型尺寸(单位:mm)

Fig. 3 Size of the test model (unit:mm)

试验时泵房直立墙试验模型安置在钢槽内,钢槽长 4 m,宽 0.8 m,高 1.5 m,钢槽的正面采用高强度透明有机玻璃材料,以便于利用 PIV 技术精准测量直立墙和墙后块石的变形过程,其他三面则采用钢板.为了消除槽体与台面的可能相对滑移及由此产生的噪声干扰信号,钢槽与振动台之间用 24 个高强螺栓固定。

1.3 试验材料

在散粒体结构遭受到强震破坏时,由于结构内部各点加速度响应分布接近均化,此时弹性相似(如弹性模量相似)的要求并不重要,主要考虑

材料的摩擦角 ϕ 和黏聚力 c 等强度指标,以及原、模型在重力场中其重力加速度比尺应保持为 1 这样的事实,土工建筑物的振动破坏特性,主要取决于材料的强度,模量的影响可以忽略,从而应该按照重力相似关系考虑进行结构模型设计^[7-9].作者曾做过大量堆石体模型试验,结果表明:虽然选取不同粒径堆石料堆筑的模型所测得的加速度反应不同,但是其变形模式并没有本质的区别^[10].

回填块石和抛石基床采用开山石模拟,根据以往模型试验粒径的选取经验以及开山石材料三轴试验设备的尺寸,选取最大粒径为 20 mm,级配采用实际材料级配缩尺以后的级配,如图 4 所示,纵坐标为小于某粒径的开山石质量分数.开山石堆筑时干密度控制在实际密度,即 1800 kg/m^3 .将试验开山石材料在大型三轴剪切仪上进行固结排水剪试验,得到材料的摩擦角 $\phi = 46^\circ$,黏聚力 $c = 4 \text{ kPa}$,与实际材料的摩擦角 45° 和黏聚力 5 kPa 接近.残积土采用粗砂模拟,粗砂材料平均粒径 $d_{50} = 0.48 \text{ mm}$,不均匀系数 $C_u = 5$,在模型槽中堆筑时控制干密度在 1650 kg/m^3 ,相对密度为 72.2%,固结排水剪试验摩擦角 $\phi = 32^\circ$,与实际材料的摩擦角 29° 接近.开山石和粗砂材料基本满足重力相似关系和强度指标。

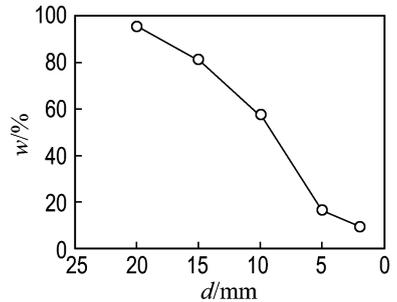


图4 开山石级配曲线

Fig. 4 Grading curve of the gravel

沉箱模型长 751 mm,宽 744 mm,高 1047 mm,如图 5 所示.沉箱材料采用与实际相同的混凝土材料,内部采用块石回填,空箱质量为 530 kg.浇筑完成的沉箱下半部分和整体如图 6 所示.沉箱模型满足重力相似和几何相似。

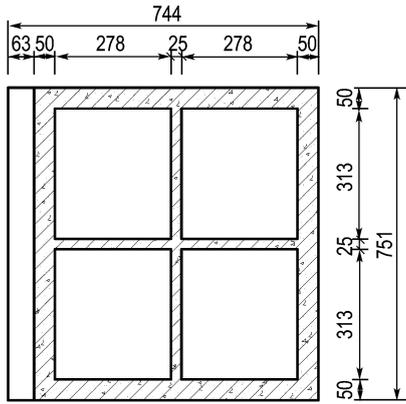
1.4 直立墙与基床的摩擦因数测定

采用千斤顶、测力计、位移计和自锁设备设计了摩擦因数测量装置(如图 7 所示),以测定直立墙底面与块石之间的摩擦因数 μ .测量结果见图 8,得到直立墙底面与块石之间的摩擦因数为

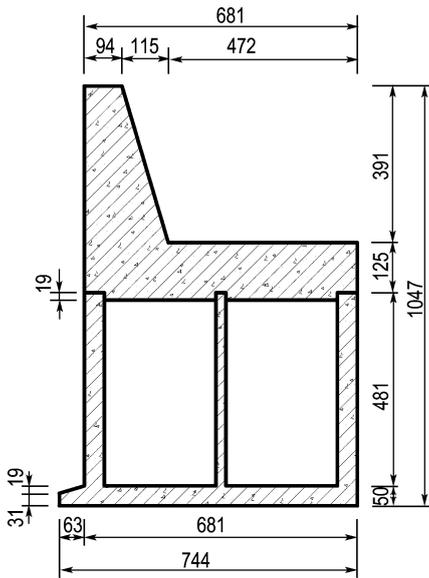
0.58,与港工码头设计规范中规定的混凝土和抛石基床之间摩擦因数0.6接近.

1.5 模型填筑

试验模型制作流程如下:先在模型箱底分两层填筑厚25.6 cm的块石基床,然后将混凝土直



(a) 沉箱平面图



(b) 沉箱断面图

图5 沉箱模型形状及尺寸(单位:mm)

Fig.5 Shape and size of the caisson (unit:mm)

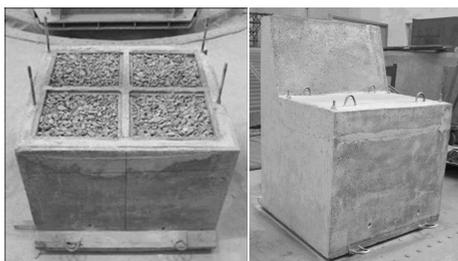


图6 浇筑完成的沉箱模型下半部分和整体

Fig.6 Lower part and whole of the casted caisson

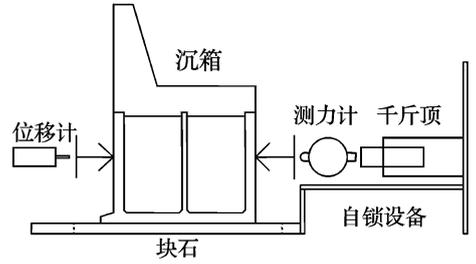


图7 摩擦因数测定装置示意图

Fig.7 Schematic diagram of friction coefficient measurement device

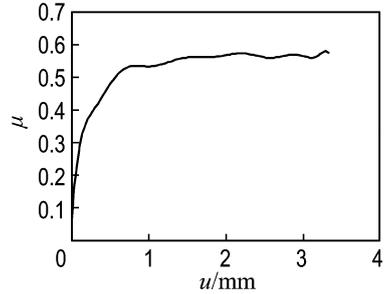


图8 直立墙底面与块石之间摩擦因数位移曲线

Fig.8 The displacement curve of friction coefficient between upright wall and gravel

立墙吊入模型箱内指定位置,最后在直立墙后方分层填筑块石和粗砂,每层高约10 cm.填筑完毕的直立墙振动台试验模型如图9所示.

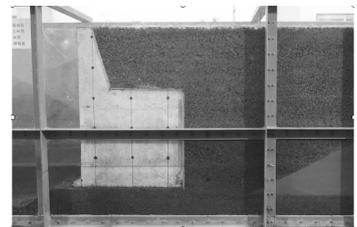


图9 直立墙振动台试验模型

Fig.9 Shaking table test model of upright wall

1.6 量测设备

试验中采用了先进的测试技术来监测模型结构的动力响应和变形.包括高速摄影、颗粒图像速度识别系统和加速度传感器.

(1)加速度传感器

加速度传感器的布置原则为尽量能够测得直立墙结构关键部位的加速度反应,共布置了8个高精度加速度传感器,基本布置如图10所示.

(2)图像采集设备

对于土石等散粒体材料,动态位移量测是非常困难的,图像识别技术可以解决这一问题.通过

放在模型正对面的高速高清摄像头采集照片并辅助 PIV 技术完成直立墙、抛石基床、回填块石在地震作用下的动态位移变形测量^[6]。高速高清摄像头的采样频率为 25 Hz, 图像分辨率为 4 096 pixel×3 072 pixel(1 200 万像素), 照片采集存储设备如图 11 所示。

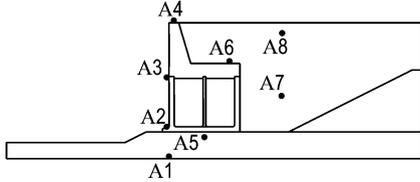


图 10 加速度传感器布置示意图

Fig. 10 Arrangement plan of acceleration sensor



1 高速高清摄像头; 2 图像采集及存储工作站

图 11 高清照片采集设备

Fig. 11 Equipment of collection of HD pictures

1.7 地震波输入

输入地震波采用频率为 10 Hz 的正弦增幅波, 60 s 时达到峰值加速度 1g, 地震波水平向施加在模型槽底部, 直至模型发生较大变形为止。输入地震波加速度时程如图 12 所示。

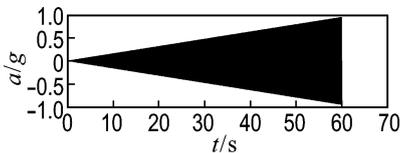


图 12 输入地震波加速度时程

Fig. 12 Acceleration time history of input seismic waves

2 试验结果分析

2.1 模型加速度反应

直立墙顶部 A4 和墙后回填块石顶部 A8 处加速度峰值 a_p 和加速度放大倍数 β 随输入加速度峰值 a_{in} 的变化分别见图 13 和 14。直立墙加速度放大倍数沿高度的变化(A1~A4)与输入加速度峰值 a_{in} 的关系如图 15(a) 所示。墙后回填块石

加速度放大倍数沿高度的变化(A1、A7 和 A8)与输入加速度峰值的关系如图 15(b) 所示。

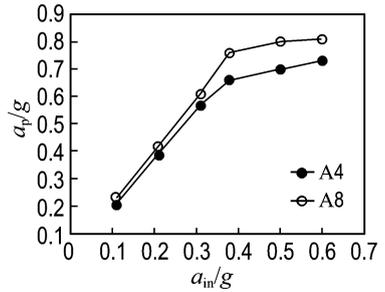


图 13 A4、A8 加速度峰值与输入加速度峰值关系

Fig. 13 Relationship of A4, A8 peak accelerations and input peak acceleration

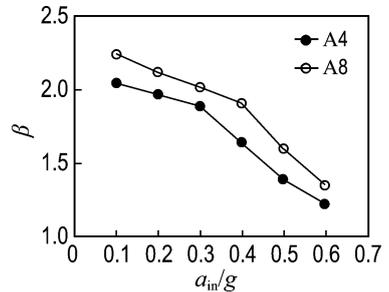


图 14 A4、A8 加速度放大倍数与输入加速度峰值关系

Fig. 14 Relationship of A4, A8 acceleration amplification and input peak acceleration

从图 13 可以看出直立墙和墙后回填块石的地震加速度峰值随着输入加速度峰值的增加而逐渐增加, 即结构顶部的加速度响应随着输入加速度峰值的增大而增大。从图 14、15 可以看出随着输入加速度峰值的增大, 直立墙顶部和墙后回填块石顶部的加速度放大倍数逐渐降低, 模型加速度沿墙高分布趋于均化, 直立墙顶部水平向加速度放大倍数由 2.05 倍逐渐降低到 1.22 倍, 墙后回填块石顶部加速度放大倍数由 2.25 倍逐渐降低到 1.35 倍, 表现出土石结构的强非线性特性; 模型底部的加速度放大较小, 而顶部的放大较大。

2.2 变形过程

在加载过程中采用高速高清摄像头采集照片并辅助 PIV 技术对直立墙以及块石的变形进行跟踪监测。直立墙试验模型变形过程如图 16 所示。模型底部实测加速度时程(A1)和直立墙位移时程分别如图 17、18 所示。根据图 17、18 得到直立墙的水平位移、竖向位移及转角位移随输入加速度峰值的变化曲线如图 19 所示。

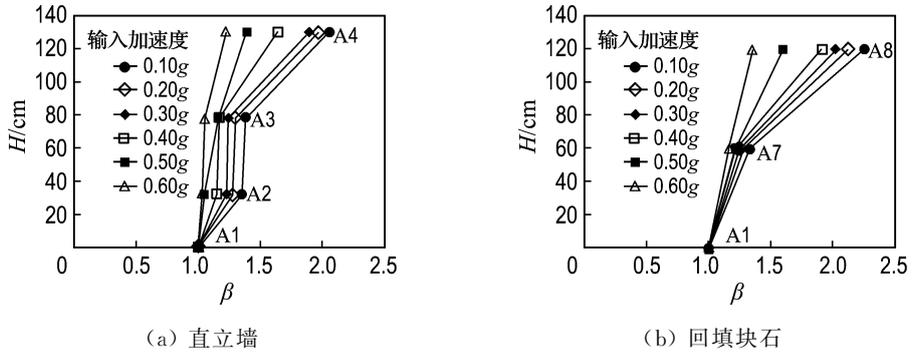
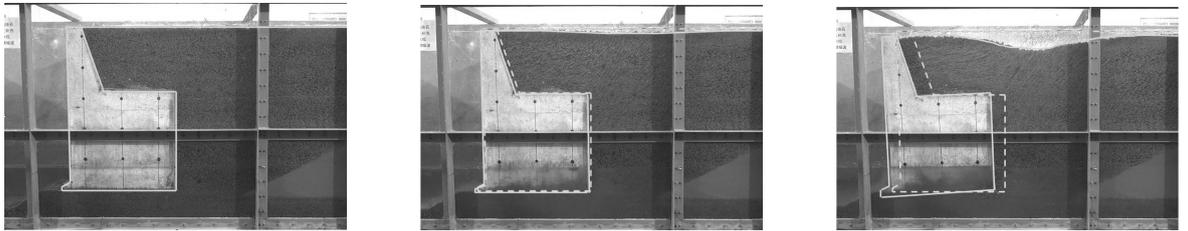


图 15 直立墙和回填块石加速度放大倍数与输入加速度峰值关系

Fig. 15 Relationship of upright wall and backfill gravel acceleration amplification and input peak acceleration



(a) 输入 0.20g

(b) 输入 0.50g

(c) 输入 0.68g

图 16 模型变形过程

Fig. 16 Deformation process of model

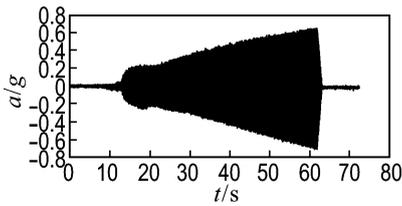


图 17 模型底部实测加速度时程(A1)

Fig. 17 Measured acceleration time history of bottom of the model (A1)

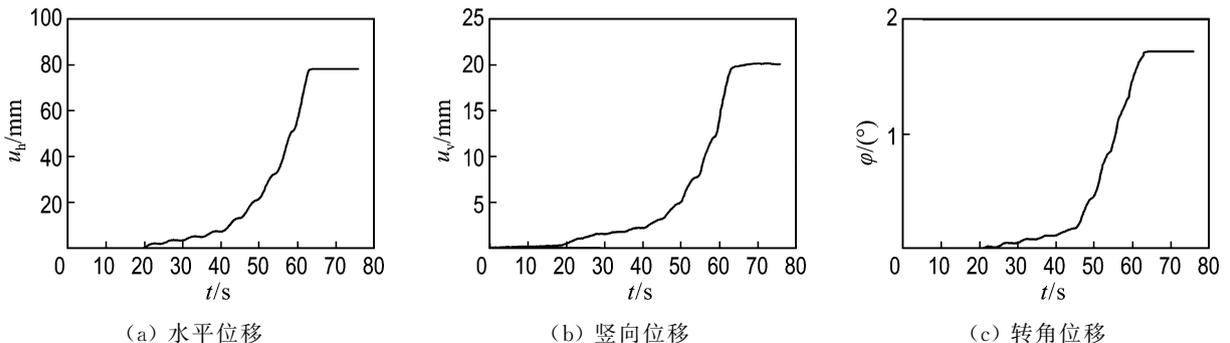
从图中可以看出,位于抛石基床上直立墙结构的变形过程可以分成 3 个阶段。

(1)稳定阶段:当输入加速度峰值小于 0.20g 时,直立墙在基础摩擦抗力的作用下处于稳定状

态,墙后回填块石没有出现沉陷的迹象,如图 16(a)和 19 所示。

(2)小变形阶段:随着输入加速度峰值的增大,直立墙在自身地震惯性力和墙后回填块石的动土压力作用下开始缓慢向外海侧水平滑动,同时由于抛石基床发生沉降和沉降不均匀性,墙体产生了微小的竖向位移和倾斜,并且随着直立墙向外海侧的移动,墙后回填块石区域开始出现沉陷,如图 16(b)和 19 所示。

(3)大变形阶段:当加速度峰值达到 0.50g 时,直立墙的移动速率急剧增加,墙后近墙区域回填块石急剧沉陷,如图 19 所示。



(a) 水平位移

(b) 竖向位移

(c) 转角位移

图 18 直立墙位移时程

Fig. 18 Upright wall displacement time history

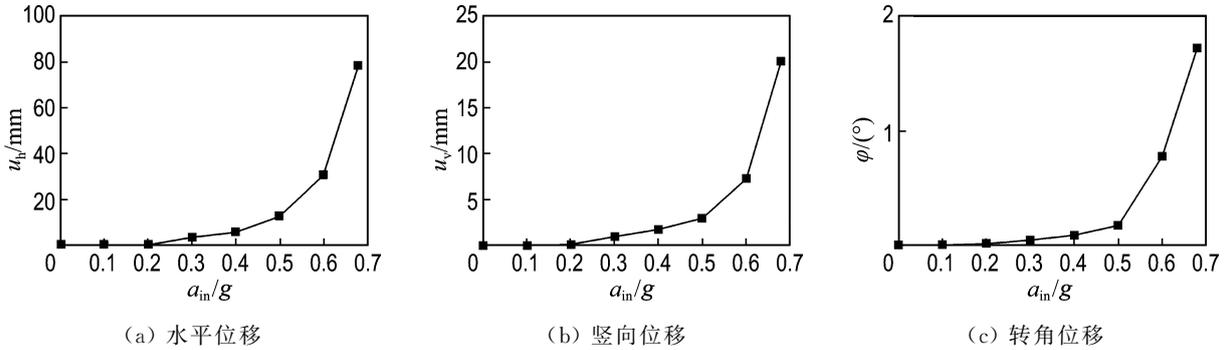
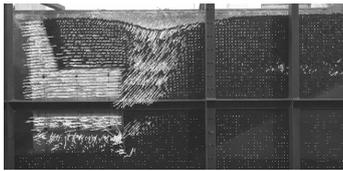


图 19 直立墙位移与输入加速度峰值关系曲线

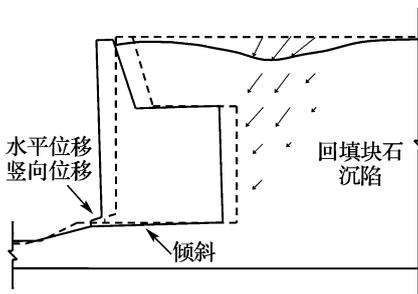
Fig. 19 Relationship curve of upright wall displacement and input peak acceleration

2.3 变形模式

模型的最终变形及其示意图如图 20 所示. 从图中可以看出, 地震过程中, 位于抛石基床上的直立墙的变形模式是直立墙向外海侧的水平位移、倾斜和竖向变形, 墙后近墙区域回填块石发生沉降. 直立墙自身地震惯性力和墙后回填块石动土压力的增大是直立墙产生变形的的主要原因, 直立墙基础的不均匀沉降是直立墙产生倾斜和竖向沉降的重要原因.



(a) 变形图, PIV 分析结果



(b) 示意图

图 20 模型的最终变形及其示意图(输入 0.68g)

Fig. 20 Final deformation of model and its schematics (0.68g)

3 结论

(1) 随着输入地震加速度的增大, 直立墙结构的加速度反应逐渐增大, 但直立墙结构的加速度放大倍数随着输入加速度的增大而逐渐降低, 并且结构加速度沿墙高分布趋于均化, 表现出土石结构的强非线性特性. 结构的加速度放大区域主

要集中在结构的顶部区域.

(2) 模型试验揭示了位于抛石基床上直立墙结构的地震变形模式, 即地震作用下直立墙在自身地震惯性力和墙后回填块石动土压力作用下向外海侧水平位移, 抛石基床的不均匀沉降导致直立墙向外海侧倾斜和竖向沉降, 墙后近墙区域回填块石发生沉降.

(3) 强震时直立墙的变形过程为当输入加速度较小时, 直立墙在基础摩擦抗力作用下处于稳定状态, 墙后回填块石没有沉降的迹象; 随着输入加速度幅值的增大, 直立墙在自身地震惯性力和墙后回填块石动土压力作用下缓慢向外海侧水平移动, 同时抛石基床发生不均匀沉降, 带动墙体产生向外海侧的倾斜和竖向位移, 并且随着直立墙向外海侧的移动, 墙后回填块石区域出现沉降, 位移较小; 当加速度达到一定值时, 直立墙移动速度和墙后回填块石沉降速度都急剧增加, 产生大的变形.

(4) 地震作用下, 直立墙自身地震惯性力和墙后回填块石动土压力的增大是直立墙产生变形的主要因素, 直立墙基础的不均匀沉降是直立墙产生倾斜和竖向沉降的重要原因. 减小墙后回填块石作用在直立墙上的动土压力和基础的沉降及不均匀沉降是提高直立墙结构抗震稳定性的重要措施.

参考文献:

- [1] 王美茹, 谢善文, 蔡友民, 等. 岭澳核电站防波堤设计[J]. 港工技术, 1997(3):1-7.
WANG Mei-ru, XIE Shan-wen, CAI You-min, et al. Breakwater design for Lingao nuclear power plant [J]. **Port Engineering Technology**, 1997(3):1-7. (in Chinese)
- [2] 邹德高, 孔宪京, Ling H I, 等. 地震时饱和砂土地基中管线上浮机理及抗震措施试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3):323-326.
ZOU De-gao, KONG Xian-jing, Ling H I, et al.

- Experimental study on the uplift behavior of pipeline in saturated sand foundation and earthquake resistant measures during an earthquake [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, **24**(3):323-326. (in Chinese)
- [3] 孔宪京,李永胜,邹德高,等. 加筋边坡振动台模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2009, **28**(5):152-157.
KONG Xian-jing, LI Yong-sheng, ZOU De-gao, *et al.* Shaking table model tests on soil slope reinforced with geo-grid [J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2009, **28**(5):152-157. (in Chinese)
- [4] 许强,刘汉香,邹威,等. 斜坡加速度动力响应特性的大型振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(12):2420-2428.
XU Qiang, LIU Han-xiang, ZOU Wei, *et al.* Large-scale shaking table test study of acceleration dynamic responses characteristics of slopes [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, **29**(12):2420-2428. (in Chinese)
- [5] 徐光兴,姚令侃,高召宁,等. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(3):624-632.
XU Guang-xing, YAO Ling-kan, GAO Zhao-ning, *et al.* Large-scale shaking table model test on the dynamic characteristics and seismic responses of slope [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, **27**(3):624-632. (in Chinese)
- [6] 刘君,刘福海,孔宪京,等. PIV技术在大型振动台模型试验中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(3):368-374.
LIU Jun, LIU Fu-hai, KONG Xian-jing, *et al.* Application of PIV in large-scale shaking table model tests [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, **32**(3):368-374. (in Chinese)
- [7] Harder L F. Performance of earth dams during the Loma Prieta Earthquake [C] // **Proceedings of the Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics**. Rolla; University of Missouri-Rolla, 1991:1613-1629.
- [8] 林泉,朱彤,林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000, **40**(1):1-8.
LIN Gao, ZHU Tong, LIN Bei. Similarity technique for dynamic structural model test [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2000, **40**(1):1-8. (in Chinese)
- [9] 林泉. 水坝和地基的动力相互作用[C]//全国首届结构与介质相互作用学术会议论文集. 洛阳: [s n], 1991:83-88.
LIN Gao. Dynamic interaction between the dam and foundation [C] // **Proceedings of the First National Conference on Interaction between Structure and Foundation**. Luoyang: [s n], 1991: 83-88. (in Chinese)
- [10] 孔宪京. 混凝土面板堆石坝抗震性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 1990.
KONG Xian-jing. Study on seismic performance of concrete face rock-fill dam [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 1990. (in Chinese)

Shaking table model test on upright wall of nuclear power plant's pumping station

KONG Xian-jing^{*1,2}, ZHANG Zheng-chao¹, ZOU De-gao^{1,2}, LUO Wei¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Shaking table model test on upright wall of nuclear power plant's pumping station is designed according to a real project. The deformation process of upright wall and gravel behind wall during earthquake is measured by the particle image velocimetry (PIV) method. Earthquake response and failure mode of upright wall structure under earthquakes are analyzed in detail. The test results show that the failure process of upright wall structure located on rubble foundation is as follows: when the input acceleration is smaller, upright wall is in a steady state; with the gradually increase of input acceleration, upright wall starts to horizontally slip, incline and vertically settle, and backfill gravel appears to subside under the action of seismic inertia force and dynamic earth pressures, but the displacement is small; when the acceleration reaches a certain value, movement speed of upright wall and subsidence rate of backfill gravel increase dramatically and upright wall structure displaces significant deformation.

Key words: nuclear power plant; upright wall; shaking table; failure mode