

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.001

土石坝高聚物防渗墙离心机振动台模型试验研究*

王博¹, 闫林², 徐建国¹

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450000; 2. 国家金属制品质量监督检验中心, 河南 郑州 450000)

摘要: 为研究高聚物防渗墙的抗震性能, 开展了土石坝高聚物防渗墙和混凝土防渗墙离心机振动台模型试验研究。在调幅分别为0.2g和0.4g El-Centro地震波输入条件下, 通过对墙体动应力、超孔隙水压力、动土压力、坝体加速度、坝顶沉降等数据的采集分析以及试验后的开挖验证, 结果发现: 强震下高聚物防渗墙的动应力远小于混凝土防渗墙, 与坝体加速度响应较为一致, 但对动力的传递作用使得下游坝坡承受较大的水平土压力作用。研究表明高聚物防渗墙具有较好的变形协调性及良好的抗震性能, 但选用高聚物防渗墙的土石坝应注意下游坝坡的加固处理。

关键词: 土石坝; 高聚物防渗墙; 离心机振动台试验; 墙体动应力; 动力响应

中图分类号: TV641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0001-11

Centrifuge Shaking Table Testing of Earth-rock Dam with Polymer Diaphragm Wall

WANG Bo¹, YAN Lin², XU Jianguo¹

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China;

2. National Quality Supervision and Inspection Center for Metal Products, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to study the seismic response of polymer diaphragm walls, centrifuge shaking table tests of earth-rock dams with polymer and concrete diaphragm walls were carried out. Under the condition of El-Centro seismic wave input with the amplitude modulation of 0.2 g and 0.4 g, the dynamic stress of the wall, excess pore water pressure, dynamic earth pressure, acceleration of the dam body, and settlement at the dam crest were collected, analyzed and verified by excavation. The results show that the dynamic stress of the polymer diaphragm wall under strong earthquake is much smaller than that of the concrete diaphragm wall, and the dynamic response is consistent with the acceleration response of the dam body. However, the transfer of dynamic forces brings more lateral earth pressure on the downstream slope of the dam. The study shows that the polymer diaphragm wall has superior deformation coordination and seismic performance, but for earth-rock dams with polymer diaphragm walls, more attention should be paid to the reinforcement treatment of downstream slopes.

Keywords: earth-rock dam; polymer diaphragm wall; centrifuge shaking table test; dynamic stress of the wall; dynamic response

* 收稿日期: 2019-02-13; 修回日期: 2019-04-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52079128)、河南省科技攻关项目(182102210013)资助

作者简介: 王博(1957—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事水工抗震等方面的研究。E-mail: wangbo@zzu.edu.cn

通讯作者: 闫林(1992—), 男, 硕士。主要从事结构抗震研究。E-mail: 742235212@qq.com

引言

近年来,非水反应高分子注浆材料逐渐应用于土质堤坝防渗加固中。实践证明,非水反应类聚氨酯,具有重量轻、早强、膨胀力大、无污染、防渗性能好、耐久性和力学性能优良等诸多优点,与其他防渗加固材料相比具有显著的优势^[1]。该技术具有极高的推广价值,然而在实际应用到位于震区的土质堤坝时,会面临地震这一特殊荷载的考验。地震具有突发性和不确定性,突如其来的地震荷载将引发坝坡的瞬间失稳和坝体的突发变形(坝体沉降、接缝张开、施工缝错台、面板挤压破坏等),进而可能导致坝体严重破坏(特别是大坝防渗功能的丧失),导致其安全难以控制^[2]。因此,研究土石坝高聚物防渗墙的地震动力响应尤为迫切和重要。目前,高聚物防渗墙地震动力响应的研究相对较少。徐建国等^[3]通过建立有限元分析模型,说明在静动力荷载下,高聚物防渗墙相比塑性混凝土和普通混凝土防渗墙,均表现出较好的变形协调能力和抗震效果。

离心机振动台模型试验^[4-8]是目前土木水利工程模型试验研究的一个重要手段,在土木水利工程领域得到了广泛应用。离心机试验模型使用与原型一致的材料,控制相同的原型应力,从而保证模型变形和失效过程与原型一致。离心机振动台试验可以通过搭配机载振动台系统模拟原型应力状态下,结构物或构筑物在地震动力荷载下的动力反

效应。为了进一步研究高聚物防渗墙地震荷载下的动态响应,本文采用离心机振动台试验的方法,输入加速度幅值0.2g、0.4g的El-Centro地震波,分别模拟烈度为8度、9度的强烈地震,测试对比高聚物防渗墙土石坝和传统混凝土防渗墙土石坝的动力响应,以期高聚物防渗墙的抗震应用提供试验依据。

1 试验设备和模型设计

1.1 试验设备

本次试验采用的离心设备主要包括ZJU400土工离心机、液压伺服振动台、刚性模型箱和测量传感器。

1.1.1 ZJU400土工离心机

ZJU400离心机最大有效转动半径为4.5 m;最大设计加速度为150g;有效荷载容量为400 gt;静力试验中负载不大于2 500 kg离心加速度可以达到150g;用振动台进行动力试验时离心加速度可以达到100g;配备有静态、动态工作吊篮,其吊篮尺寸为1.5 m×1.2 m×1.5 m。

1.1.2 液压伺服振动台

振动台由日本Solution公司和浙江大学联合研究制作,可以施加单一方向的水平振动。主要组成部分包括高压油源、蓄能器、管路系统、控制系统和测试系统等。振动台技术参数见表1。

表1 振动台技术参数

Table 1 Technical parameters of the shaking table

离心加速度/g	质量/kg	工作台尺寸/mm	振动频率/Hz	最大振幅/mm	振动时间/s	激振力/kN	振动加速度/g	振动质量/kg
100	2 426	900×800	10~200	6	>4	20	40	500

1.1.3 刚性模型箱

本试验采用刚性模型箱,在模型箱边界设置油泥板以避免产生地震反射波。模型箱内部净尺寸为770 mm×400 mm×530 mm(长×宽×高),为了便于观测,模型箱的侧面采用透明的有机玻璃板,尺寸为650 mm×300 mm(长×高)。图1为模型箱示意。

1.1.4 测量传感器

离心机动力试验测试数据的可靠性与试验中测量传感器布置的位置有很大关系。传感器统计见表2,主要包括应变片、加速度计、激光位移传感器、孔压计、土压力盒,以及摄像头等。

1.2 模型制作基本原理

将离心机模型模拟的原工程结构称为原型,则在半无限空间中,土体原型自重应力的计算公式可以用土体重度 γ 和深度 H 表示:

$$(\sigma_z)_p = \gamma H = \rho g H \quad (1)$$

式中, ρ 为土体密度; g 为重力加速度。

离心振动台试验模型按照1:n的比例制作,置于离心机加速度场中,则模型自重应力的表达式为:

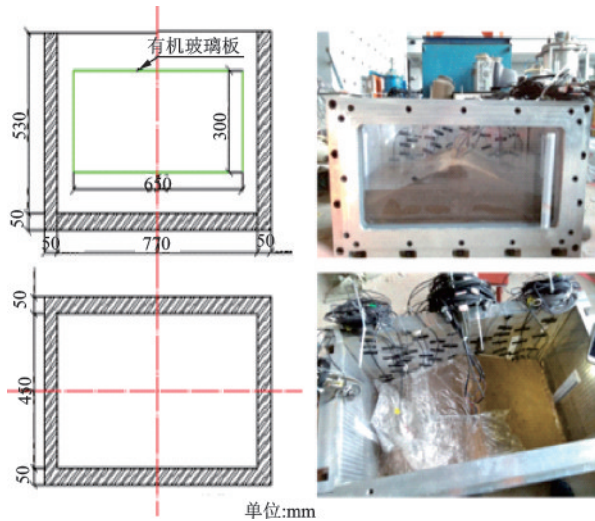


图1 离心机振动台刚性模型箱示意

Fig.1 Rigid model box of the centrifuge shaking table

表2 传感器统计

Table 2 List of the sensors

传感器类型	代号	型号	数量	用途
三向加速度计	acc	AS-100TA	1个	监测振动台台面地震动的输出
水平向加速度计	acc	AS-100TA	7个	监测坝体水平向加速度
孔隙水压力计	cppt	PDCR81	3个	监测坝体超孔隙水压力
土压力盒	p	CXD	6个	监测坝体动土压力
应变片	S	BF350	5对	监测防渗墙体动应变
激光位移传感器	cd	YP05M GVL80	1个	监测坝顶沉降

$$(\sigma_z)_m = \rho a H_m = \rho a \frac{H}{n} \quad (2)$$

式中, a 为离心加速度。

$$\text{如果: } (\sigma_z)_p = (\sigma_z)_m \quad (3)$$

$$\text{则: } a = ng \quad (4)$$

由以上分析可知,若离心试验的模型尺寸为原

型的 $1/n$, 离心加速度设定为重力加速度 g 的 n 倍, 则模型在离心加速场中的应力状态就同原型相同, 因此可以产生同原型相同的变形和破坏, 模型所得结论同样适用于原型。本次离心试验设计最大加速度为 $50g$, 受试验空间尺寸限制, 若将几何比尺 C_l 设为 $1/50$, 则模型尺寸过大, 可设定几何比尺 C_l 为 $1/100$, 即采用小比尺离心试验方法模拟^[9]。计算模型试验各相似常数见表3。

表3 小比尺离心模型相似常数

Table 3 Similarity coefficients of the small-scale centrifuge model

物理量	相似常数	数值
长度 l	C_l	0.01
重力加速度 g	C_g	50
质量密度 ρ	C_ρ	1
动弹性模量 E	C_E	1
力 F	$C_F = C_\rho C_l^3 C_a$	7.07×10^{-5}
输入振动加速度 a	$C_a = (C_g/C_l)^{1/2}$	70.7
输入振动时间 t	$C_t = (C_l/C_a)^{1/2}$	1.19×10^{-2}
振动频率 f	$C_f = (C_a/C_l)^{1/2}$	84.09
动力反应加速度 A	$C_A = C_a$	70.7
动力反应应力 σ	$C_\sigma = C_\rho C_l C_a$	0.71
动力反应应变 ϵ	$C_\epsilon = C_\rho C_l C_a / C_E$	0.71
动力反应变形 d	$C_d = C_l$	0.01

1.2.1 试验原型及模型设计

试验原型是某座小(1)型水库, 具备防洪、灌溉功能, 工程等级为IV等, 主要建筑物为4级。主坝为均质土质堤坝, 坝顶长为240 m, 上、下游坝坡为1:2.73, 坝顶宽度3.00~7.50 m, 坝顶高程77.15 m, 坝基高程62.15 m, 高聚物防渗墙深入地基2 m, 防渗墙高度17 m, 沿坝轴线总长215 m。主坝、坝基由重粉质壤土、细砂及云母石英片岩组成, 工程地质条件较好(图2)。

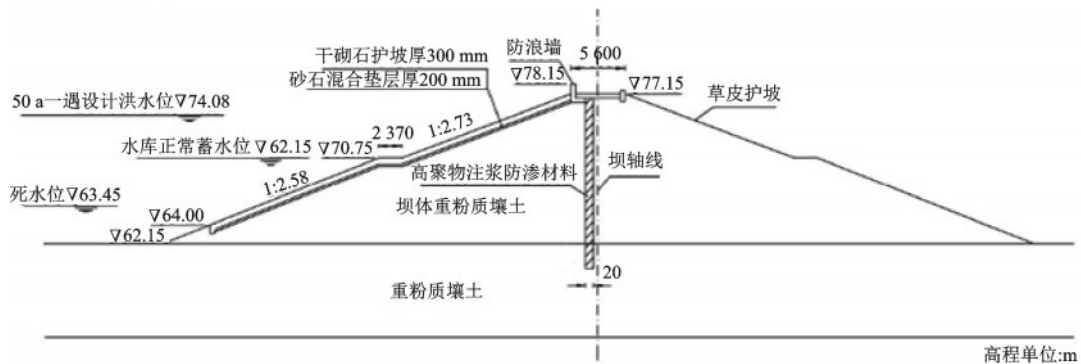


图2 土石坝高聚物防渗墙设计示意

Fig.2 Prototype of the earth-rock dam with a polymer diaphragm wall

按照几何相似比 1/100 缩尺后的模型尺寸:设计坝高为 15 cm,坝基深 15 cm,坝顶宽 5 cm,坝底宽 73 cm,上、下游坝坡 1:2.3,防渗墙高 17 cm,深入坝

基 2 cm。两组防渗墙土质堤坝模型如图 3 所示。

1.2.2 材料参数

土石坝各主要部分材料参数见表 4。

表 4 土石坝材料力学参数

Table 4 Material mechanical parameters of the earth-rock dam

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	动弹性模量 E / MPa	黏聚力 c / kPa	泊松比 ν	渗透系数 k / ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
坝体	1 900	—	—	37.20	22.2	0.35	2.3×10^{-5}
高聚物	260	2.47	3.05	89.22	—	0.20	1×10^{-8}
混凝土	2 100	0.45	16.48	2 600	—	0.30	2.6×10^{-8}

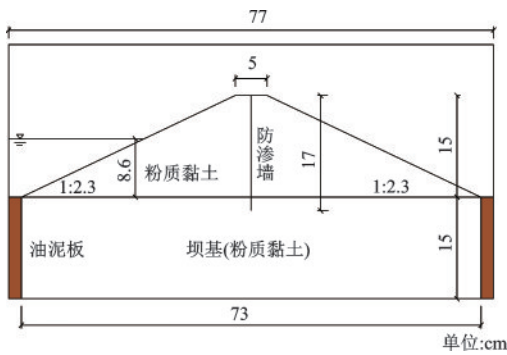


图 3 防渗墙土石坝模型示意

Fig.3 Diagram of the earth-rock dam model with a diaphragm wall

甲基硅油无色、无味、无毒、不挥发、不溶于水,具有优异的电绝缘性、耐候性和低黏度系数,且常温下其密度与水相近,约为 0.96 g/cm^3 ,被广泛用于离心机试验中。甲基硅油有不同的粘度可供选择,由于本次动力离心试验 C_g 为 50,故选用粘滞度是水 50 倍的甲基硅油作为渗透液体。

1.2.3 传感器布设

防渗墙墙体应变片布置如图 4 所示,坝体中传感器布置如图 5 所示。

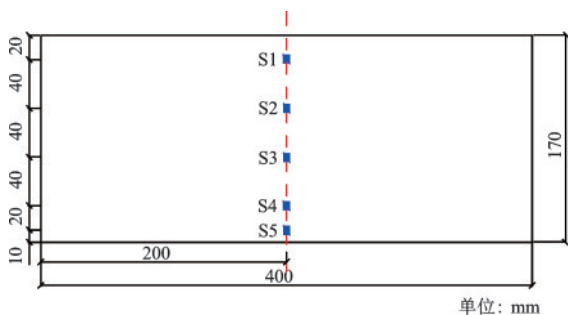


图 4 防渗墙墙体应变片布置示意

Fig.4 Arrangement of stress sensors on the diaphragm wall

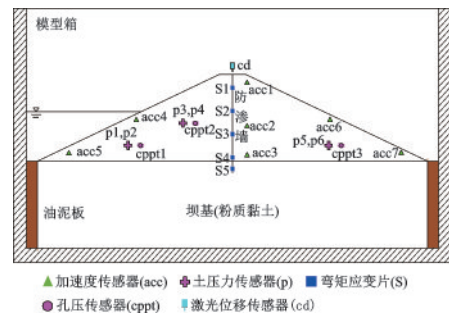


图 5 模型传感器布置示意

Fig.5 Arrangement of sensors on the model

2 静力试验过程

为了完成土石坝的固结和实现甲基硅油对土体渗透作用,对土石坝进行静力离心试验。离心加速度分三级加载完成,模型设计加速度分别为 10g, 30g, 50g,根据角加速度与臂长的关系,通过计算得离心机运转加速度分别为 11g, 33g, 55g。中间间歇时间为模型补充甲基硅油,使之充分渗透。高聚物防渗墙土石坝模型静力离心加载过程如图 6(a)所示。通过改进试验方法,减少停机补油次数,混凝土防渗墙土石坝模型静力离心加载过程如图 6(b)所示。

3 动力试验结果分析

通过试验数据的采集,本文对两类模型的防渗墙墙体动应力、超静孔隙水压力、动土压力、坝体加速度、坝顶沉降等作了动力对比分析。

3.1 防渗墙墙体动应力对比分析

提取高聚物防渗墙在两种工况下的墙体动应力时程曲线(图 7),混凝土防渗墙在两种工况下的墙体动应力时程曲线(图 8)。

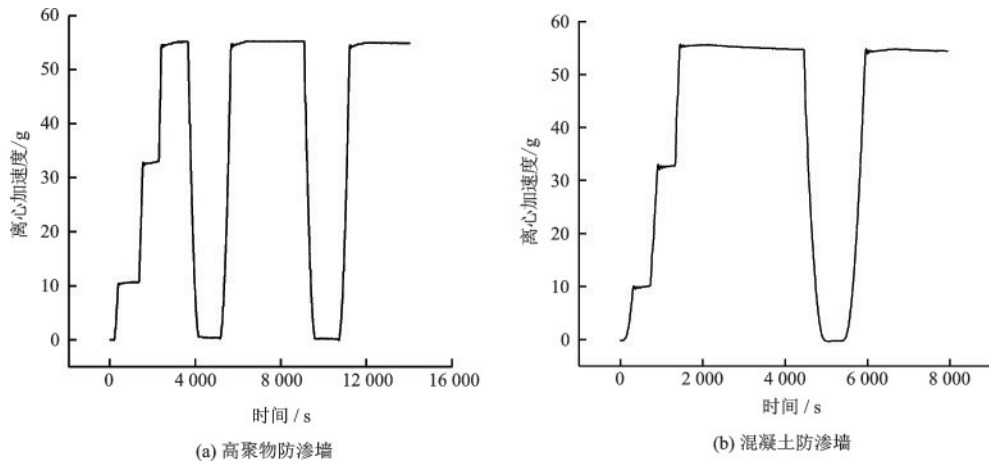


图6 防渗墙土石坝离心试验加载过程

Fig.6 Loading process of earth-rock dams with diaphragm walls

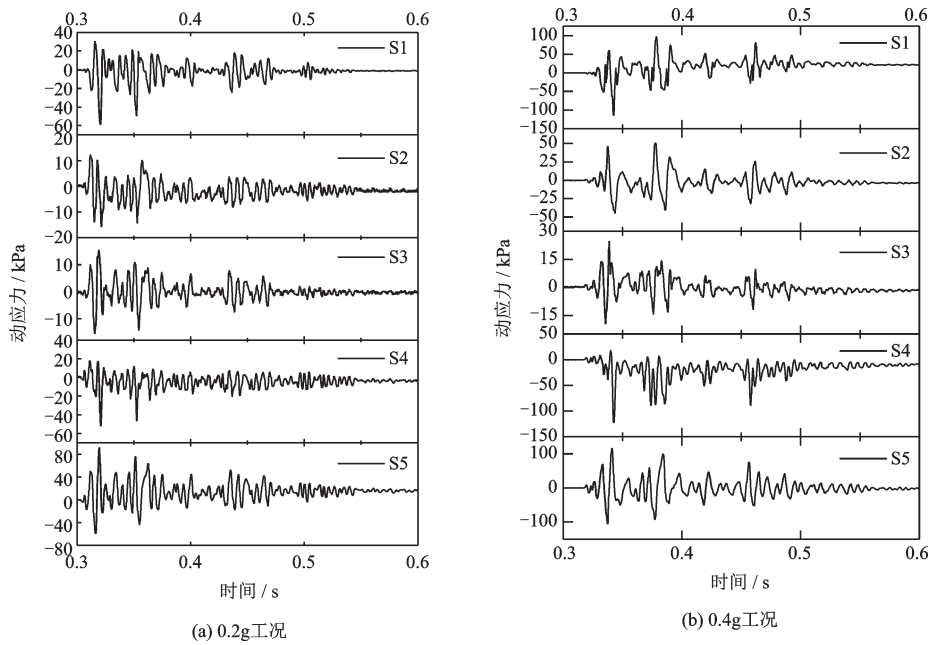


图7 高聚物防渗墙墙体动应力时程曲线(0.2g和0.4g)

Fig.7 Time-history curves of dynamic stress of the polymer diaphragm wall (0.2g and 0.4g)

分别提取两类防渗墙墙体应力时程曲线中的最大值(表5)。

绘制防渗墙墙体最大主应力沿墙高分布折线(图9),其中 $h/H=0$ 为墙顶, $h/H=1.0$ 为墙底,可以看出:两种工况下高聚物防渗墙墙体动应力沿坝体高度有所变化,但变化幅度不大(如0.4g时最大值在墙体底部为116.17 kPa,较墙体中部24.74 kPa增大大约3.7倍);混凝土防渗墙动应力较相同工况下高聚物防渗墙相应部位动应力显著增大(如0.4g时混凝土防渗墙最大值在墙体底部为6496.11 kPa,较高聚物防渗墙相应部位116.17 kPa增大大约54.9倍);混凝土防渗墙墙体动应力沿高度分布差异很大,墙

体下部动应力明显增大(如0.4g时最大值在墙体底部为6496.11 kPa,较墙体上部880.11 kPa增大大约6.4倍),S5传感器显示该处墙体混凝土发生了破坏。与混凝土材料相比,选用高聚物作为防渗墙材料,其较好的柔韧性可以避免地震荷载下的大变形引发应力破坏,更容易恢复形变,抗震性能更佳。

3.2 土石坝孔隙水压力对比分析

根据太沙基提出的有效应力原理可知,地震作用下超静孔隙水压力突增,会使土体有效应力迅速降低,极易发生失稳破坏。为研究强震下高聚物防渗墙土石坝坝体超静孔隙水压力的变化情况,在上

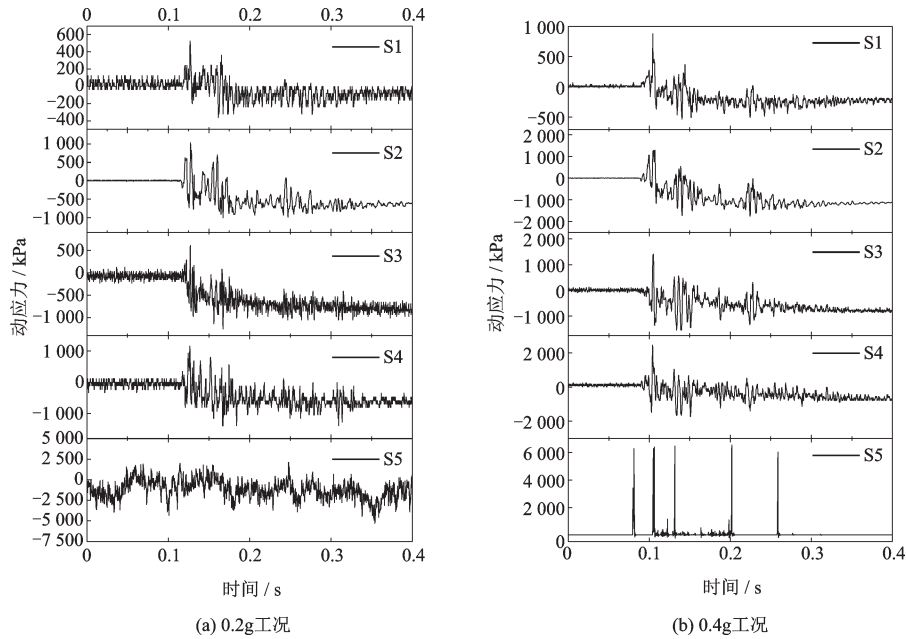


图8 混凝土防渗墙墙体动应力时程曲线(0.2g和0.4g)

Fig.8 Time-history curves of dynamic stress of the concrete diaphragm wall (0.2g and 0.4g)

表5 防渗墙墙体各测点最大主应力

Table 5 Maximum principal stress of measurement points on the diaphragm wall

单位:kPa

墙体类型	工况	应力传感器				
		S1	S2	S3	S4	S5
高聚物防渗墙	0.2g	59.23	15.34	14.73	51.96	88.10
高聚物防渗墙	0.4g	96.17	50.92	24.74	122.13	116.17
混凝土防渗墙	0.2g	490.48	962.96	1257.01	1376.59	5218.25
混凝土防渗墙	0.4g	880.11	1749.24	1565.01	2370.97	6496.11

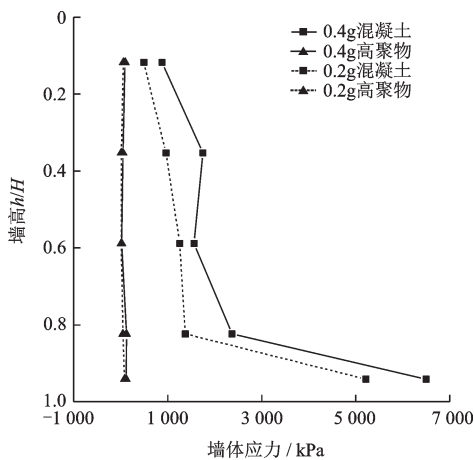


图9 防渗墙墙体最大主应力沿墙高分布折线

Fig.9 Distribution of maximum principal stress of the diaphragm wall along dam height

游布设孔压传感器 cppt1、cppt2,在下游布设 cppt3 (图5)。其中 cppt2埋深大于 cppt1, cppt3和 cppt2

处于同样的坝高位置上,埋深相同。提取高聚物防渗墙土石坝在两种工况下的超孔隙水压力时程曲线(图10),混凝土防渗墙土石坝在两种工况下的超孔隙水压力时程曲线(图11)。

通过比较两种工况下高聚物防渗墙土石坝和混凝土防渗墙土石坝各测点峰值孔隙水压力(表6),可以发现:随着地震动输入的增强,坝坡同一位置的超静孔隙水压力明显增大(如0.4g混凝土防渗墙坝体上游孔隙水压力4.50 kPa明显高于同一位置0.2g工况下的超静孔隙水压力3.10 kPa);地震作用下,同一埋深处,坝坡上游受振时激发的超静孔隙水压力明显高于坝坡下游(如0.4g高聚物防渗墙坝

表6 土石坝各测点峰值孔隙水压力

Table 6 Peak pore water pressure of measurement points on the earth-rock dam

单位:kPa

防渗墙类型	工况	传感器部位		
		cppt1 上游 坝坡	cppt2 上游坝坡靠近 坝轴线	cppt3 下游 坝坡
高聚物防渗墙	0.2g	2.03	2.59	1.95
	0.4g	4.46	6.35	3.48
混凝土防渗墙	0.2g	3.10	2.81	1.08
	0.4g	4.50	3.96	1.71

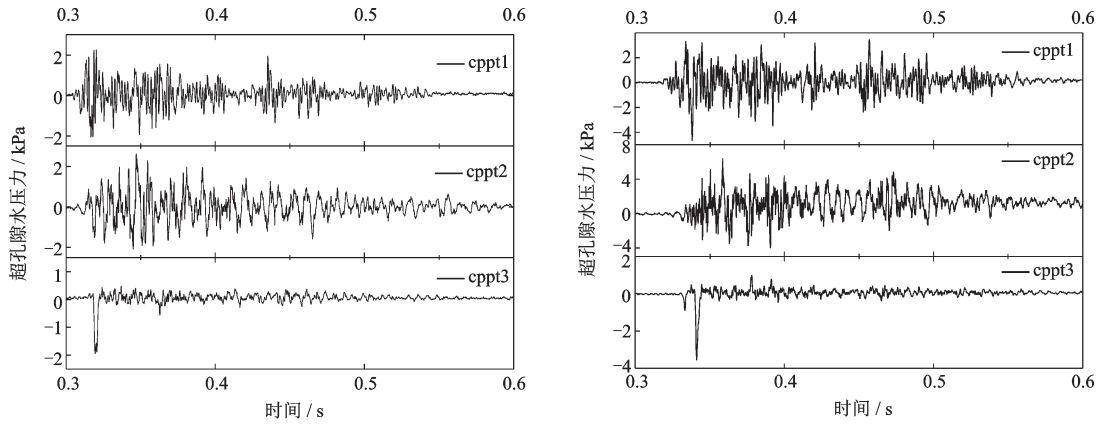


图 10 高聚物防渗墙土石坝超孔隙水压力时程曲线(0.2g和0.4g)

Fig.10 Time-history curves of excess pore water pressure of the earth-rock dam with a polymer diaphragm wall (0.2g and 0.4g)

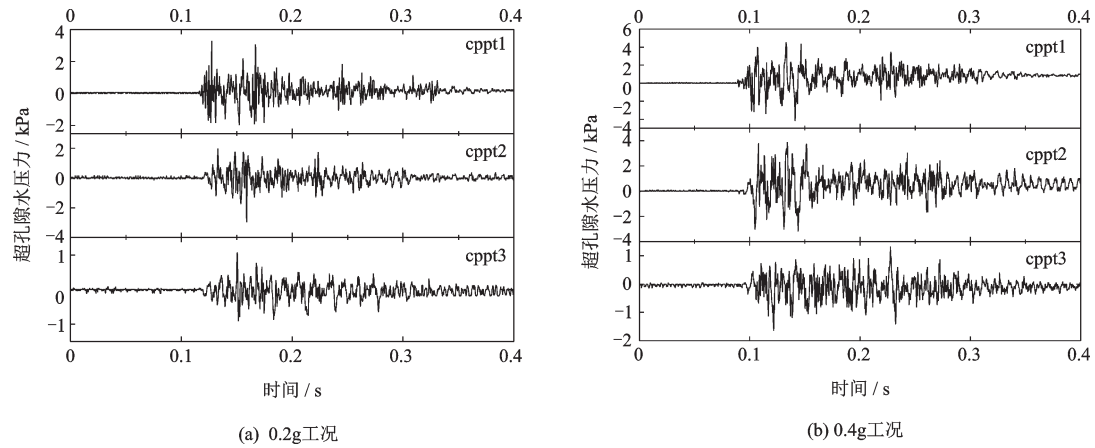


图 11 混凝土防渗墙土石坝超孔隙水压力时程曲线(0.2g和0.4g)

Fig.11 Time-history curves of excess pore water pressure of the earth-rock dam with a concrete diaphragm wall (0.2g and 0.4g)

体上游孔隙水压力 4.46 kPa 远远大于坝体下游同高度孔隙水压力 3.48 kPa),这与上下游水位差异有关,说明高聚物防渗墙具有良好的防渗效果。

3.3 土石坝动土压力增量对比分析

试验中建立了 3 个土压力监测点(图 5)。其中测点 1 的竖向土压力 p_1 ,侧向土压力 p_2 ;测点 2 的竖向土压力 p_3 ,侧向土压力 p_4 ;测点 3 的竖向土压力 p_5 ,侧向土压力 p_6 。提取高聚物防渗墙土石坝在两种工况下的动土压力增量时程曲线(图 12),混凝土防渗墙土石坝在两种工况下的动土压力增量时程曲线(图 13)。

对比两类防渗墙土石坝最大动土压力增量(表 7),可以发现:强震作用下上游坝坡测点处两类防渗墙土石坝的动土压力相差不大;而下游坝坡测点处存在较大差异,其中高聚物防渗墙土石坝的竖向土压力较小,而水平向土压力较大。考虑高聚物防

渗墙随同土体产生了协调变形,将侧向土压力传递至下游坝坡,造成下游坝坡应力重新分布,水平动土压力明显增大(如 0.4g 下游坝坡水平动土压力为 43.47 kPa,较竖直动土压力 6.47 kPa 增大 5.7 倍);而混凝土防渗墙由于自身较大的质量和刚度,未造成下游坝坡水平土压力突增,但墙体自身在强震作用下承载了较大的动土压力,有可能使墙体发生破坏,引发渗漏问题。

3.4 土石坝坝体加速度对比分析

提取高聚物防渗墙土石坝在两种工况下的加速度时程曲线(图 14),混凝土防渗墙土石坝在两种工况下的加速度时程曲线(图 15)。

通过比较两类防渗墙土石坝各测点峰值加速度(表 8)和最大峰值加速度放大系数(表 9),可以发现:坝轴线防渗墙位置处峰值加速度明显高于坝体,其中高聚物防渗墙集中在中上部(0.4g 墙体中部

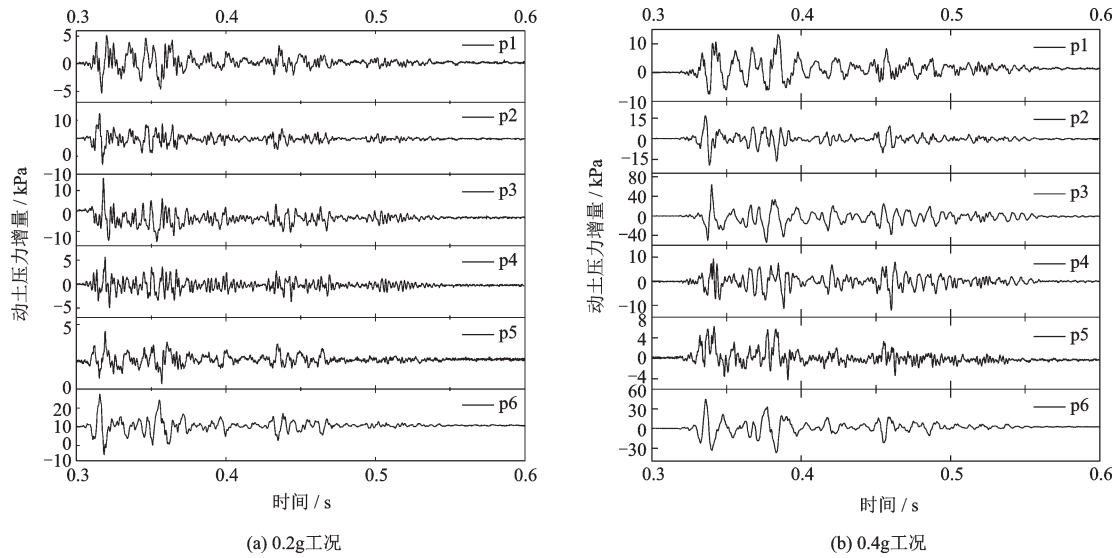


图 12 高聚物防渗墙土石坝动土压力增量时程曲线(0.2g 和 0.4g)

Fig. 12 Time-history curves of dynamic earth pressure increment of the earth-rock dam with a polymer diaphragm wall (0.2g and 0.4g)

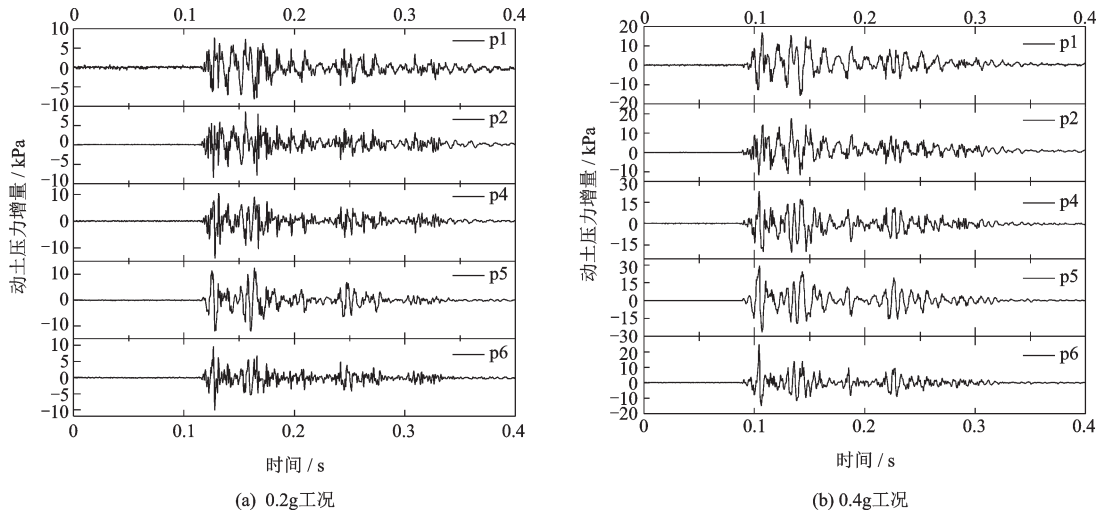


图 13 混凝土防渗墙土石坝动土压力增量时程曲线(0.2g 和 0.4g)

Fig. 13 Time-history curves of dynamic earth pressure increment of the earth-rock dam with a concrete diaphragm wall (0.2g and 0.4g)

表 7 两类防渗墙土石坝最大动土压力增量对比
Table 7 Comparison of maximum dynamic earth pressure increments between two earth-rock dams with diaphragm walls

单位: kPa

防渗墙类型	工况	测点 1 上游坝坡		测点 2 上游坝坡靠 近坝轴线		测点 3 下游坝坡	
		p1	p2	p3	p4	p5	p6
		高聚物防渗墙土石坝	0.2g	5.16	7.56	14.80	5.45
	0.4g	13.34	18.67	63.32	11.48	6.47	43.47
混凝土防渗墙土石坝	0.2g	7.66	8.33	缺失	13.05	11.85	9.87
	0.4g	18.28	17.15	缺失	22.90	26.24	24.22

峰值加速度为 0.814g, 墙体上部峰值加速度为 0.728g, 加速度放大系数 2.035), 混凝土防渗墙集中在中下部; 强震下混凝土防渗墙土石坝轴线墙体下部加速度突增明显(0.4g 墙体下部峰值加速度为 1.451g, 加速度放大系数 3.623), 判断其附近墙体可能发生了剪切损伤。而高聚物防渗墙土石坝各部位对强震的加速度响应较为均匀; 同时, 对比两种防渗墙对坝体前后边坡的影响, 高聚物防渗墙边坡对应位置加速度整体小于同工况下混凝土防渗墙边坡加速度值, 说明作为柔性防渗墙的高聚物防渗墙体同坝体其他部位的协调性要优于混凝土防渗墙。

3.5 坝顶沉降对比分析

两种工况下, 高聚物防渗墙土石坝坝顶沉降时程曲线如图 16(a) 所示; 混凝土防渗墙土石坝坝顶

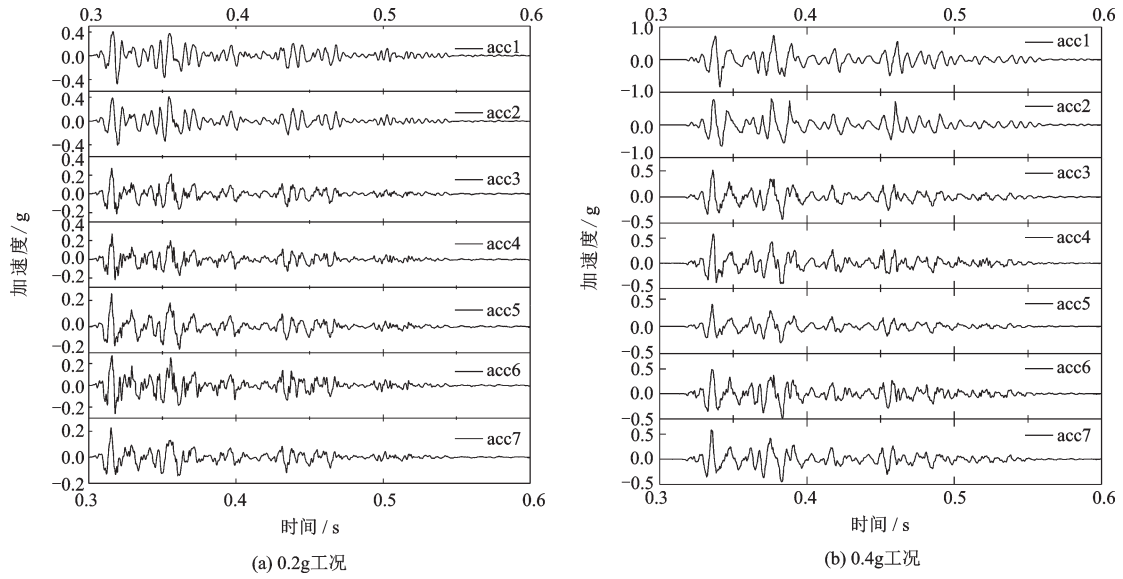


图 14 高聚物防渗墙土石坝加速度时程曲线(0.2g 和 0.4g)

Fig.14 Acceleration-time curves of the earth-rock dam with a polymer diaphragm wall (0.2g and 0.4g)

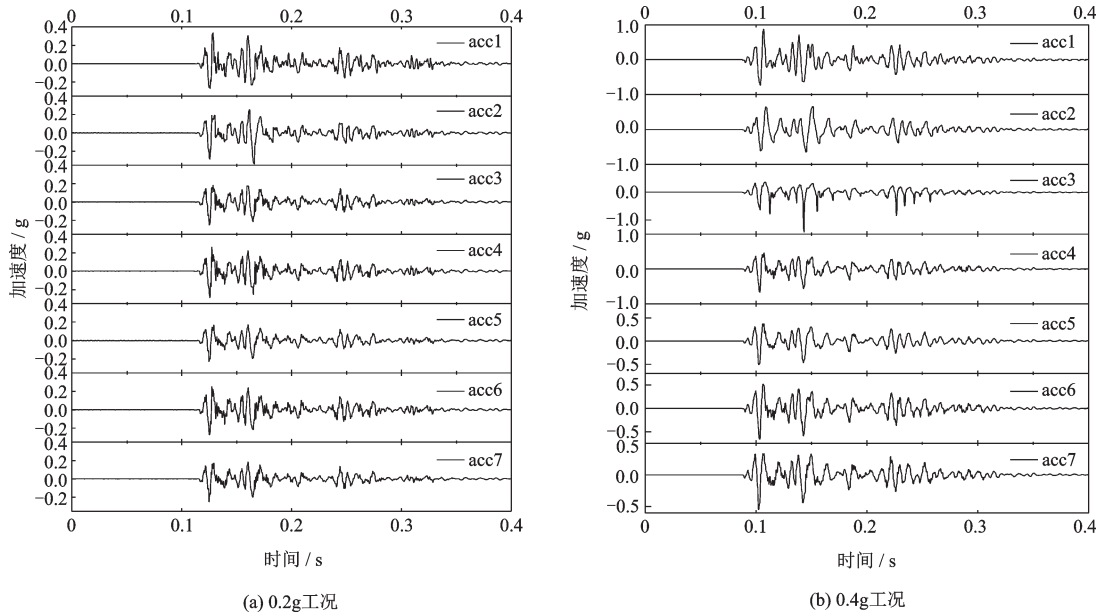


图 15 混凝土防渗墙土石坝加速度时程曲线(0.2g 和 0.4g)

Fig.15 Acceleration-time curves of the earth-rock dam with a concrete diaphragm wall (0.2g and 0.4g)

表 8 土石坝各测点峰值加速度

Table 8 Peak acceleration of measurement points on the earth-rock dam

防渗墙类型	工况	加速度峰值/g						
		acc1	acc2	acc3	acc4	acc5	acc6	acc7
高聚物防渗墙	0.2g	0.485	0.382	0.263	0.270	0.255	0.269	0.216
	0.4g	0.728	0.814	0.513	0.588	0.412	0.474	0.569
混凝土防渗墙	0.2g	0.322	0.320	0.224	0.269	0.219	0.275	0.246
	0.4g	0.878	0.661	1.451	0.661	0.501	0.664	0.555

表 9 最大峰值加速度及最大峰值加速度放大系数对比

Table 9 Comparison of peak acceleration and its amplification coefficients

防渗墙类型	工况	最大峰值加速度/g	出现部位	最大峰值加速度放大系数
高聚物防渗墙	0.2g	0.445	坝顶部位	2.225
	0.4g	0.814	轴线处坝高 1/2	2.035
混凝土防渗墙	0.2g	0.322	轴线处坝高 1/2	1.610
	0.4g	1.451	轴线处坝底	3.623

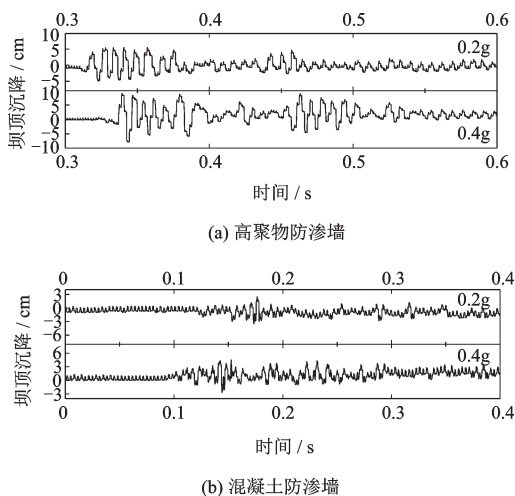


图 16 土石坝坝顶沉降时程曲线

Fig.16 Settlement-time curves of the earth-rock dam crest

沉降时程曲线如图 16(b)所示。

对比两种工况下土石坝坝顶最大实时沉降和永久沉降见表 10。可以发现:同种地震工况下,高聚物防渗墙坝顶最大实时沉降明显偏大,而坝顶永久沉降均小于混凝土防渗墙。结果表明高聚物防渗墙在强震作用下出现了较大的弹性变形,但恢复形变的能力较强,抗震性能优良。

表 10 坝顶最大实时沉降和永久沉降对比

Table 10 The contrast of maximum real-time settlement and permanent settlement

工况	高聚物防渗墙		混凝土防渗墙	
	最大实时沉降	永久沉降	最大实时沉降	永久沉降
0.2g	5.68	0.43	3.61	1.31
0.4g	9.06	1.40	4.56	1.80

4 拆模结果分析

两组试验防渗墙内部开挖状况如图 17~18 所示。高聚物防渗墙上、下游面完整性良好;上游可见混凝土防渗墙中下部出现了斜向的贯穿性裂缝,

下游可见混凝土防渗墙墙体下部出现横向贯穿性裂缝(图 19),局部放大如图 20 所示。

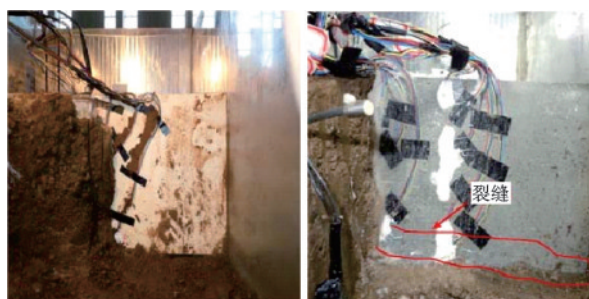
通过后期开挖验证,发现同 0.4g 工况下应力传感器和加速度传感器数据反应部位一致,混凝土防



(a) 高聚物防渗墙 (b) 混凝土防渗墙

图 17 高聚物防渗墙和混凝土防渗墙上游立视图

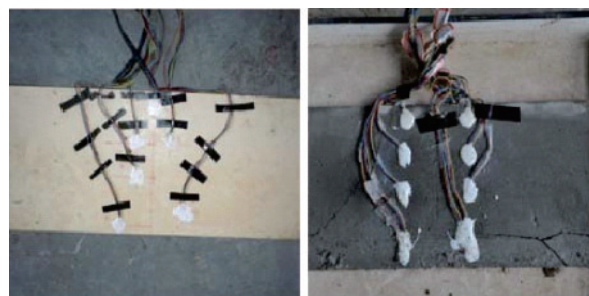
Fig.17 Upstream view of the polymer and concrete diaphragm walls



(a) 高聚物防渗墙 (b) 混凝土防渗墙

图 18 高聚物防渗墙和混凝土防渗墙下游立视图

Fig.18 Downstream view of the polymer and concrete diaphragm walls



(a) 高聚物防渗墙 (b) 混凝土防渗墙

图 19 试验后的高聚物防渗墙和混凝土防渗墙

Fig.19 Polymer and concrete diaphragm walls after testing

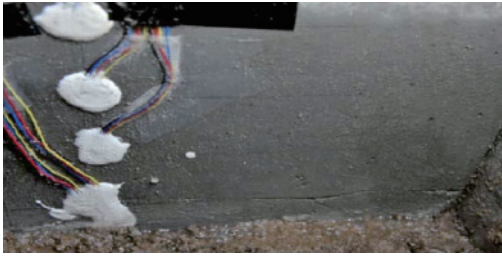


图20 混凝土防渗墙底部裂缝放大

Fig.20 Enlarged photograph of cracks at the bottom of the concrete diaphragm wall

渗墙下部发生开裂破坏,这正是造成应力传感器 S5 处发生应力突变和加速度传感器 acc3 处峰值加速度突增的原因。

5 结 论

(1)强震下高聚物防渗墙动应力沿墙高变幅不大,且远小于混凝土防渗墙,而混凝土防渗墙自重远大于高聚物防渗墙,且混凝土材料弹性模量也远大于高聚物材料的弹性模量,造成墙体下部动应力显著增大,表明强震下高聚物防渗墙墙体应力的动态响应优于混凝土防渗墙。

(2)相较于混凝土防渗墙,高聚物防渗墙具有几何尺寸小、质量轻等优点,强震下高聚物防渗墙与土体间产生弹性协调变形,将土压力传递至坝坡下游,下游坝坡水平土压力明显增大,避免了高聚物防渗墙体发生挤压破坏,同时表明,工程中采用高聚物防渗方案时,需要注意加固下游坝坡。

(3)混凝土防渗墙土石坝对强震的动力响应更为强烈,且防渗墙底部最为薄弱,加速度峰值发生明显突增,容易发生破坏。而高聚物防渗墙与坝体具有较为接近的动模量,高聚物防渗墙土石坝各部位加速度动态响应较为接近,没有明显突变。

参考文献:

[1] 王复明,徐建国,杨柳,等.堤坝高聚物防渗墙静力荷载试验与数值分析[J].建筑科学与工程学报,2015,32(2):27-34.
Wang F M, Xu J G, Y L, et al. Static load experiment and numerical analysis of polymer diaphragm wall of dam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(2): 27-34. (in Chinese)

[2] 孔宪京,邹德高,刘京茂.高土石坝抗震安全评价与抗震措施研究进展[J].水力发电学报,2016,35(7):1-14.
Kong X J, Zou D G, Liu J M. Developments in seismic

safety evaluation methods and aseismic measures for high rockfill dams [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(7): 1-14. (in Chinese)

[3] 徐建国,王复明,钟燕辉,等.静动力荷载下土石坝高聚物防渗墙受力特性分析[J].岩土工程学报,2012,34(9):1699-1704.
Xu J G, Wang F M, Zhong Y H, et al. Stress analysis of polymer diaphragm wall for earth-rock dams under static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1699-1704. (in Chinese)

[4] 陈云敏,韩超,凌道盛,等.ZJU400离心机研制及其振动台性能评价[J].岩土工程学报,2011,33(12):1887-1894.
Chen Y M, Han Ch, Ling D Sh, et al. Development of geotechnical centrifuge ZJU400 and performance assessment of its shaking table system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1887-1894. (in Chinese)

[5] 刘晶波,刘祥庆,王宗纲.地基-地下结构系统动力离心模型试验相似设计方法研究[J].后勤工程学院学报,2008,24(3):1-6.
Liu J B, Liu X Q, Wang Z G. Study on similitude theory of dynamic soil-structure interaction test on shaking table system for geotechnical centrifuge[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2008, 24(3): 1-6. (in Chinese)

[6] 杜延龄,韩连兵.土工离心模型试验技术[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
Du Y L, Han L B. Geotechnical centrifugal model test technology[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010. (in Chinese)

[7] 刘晶波,刘祥庆,王宗纲,等.土-结构动力相互作用系统离心机振动台模型试验[J].土木工程学报,2010,43(11):114-121.
Liu J B, Liu X Q, Wang Z G, et al. Dynamic centrifuge model test of a soil-structure interaction system[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11): 114-121. (in Chinese)

[8] 陈正发,于玉贞.土工动力离心模型试验研究进展[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增2):4026-4033.
Chen Zh F, Yu Y Zh. A review on development of geotechnical dynamic centrifugal model test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup 2): 4026-4033. (in Chinese)

[9] 张利民,胡定.小比尺离心模型的屈服和破坏特性[J].成都科技大学学报,1990,33(2):7-12.
Zhang L M, Hu D. Yielding and failure behavior of small scaled centrifuge models[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1990, 33(2): 7-12. (in Chinese)

(本文责编:池营营)