

重力坝水力劈裂破坏结构变形分析

胡少伟, 王洋, 孙岳阳, 陆俊

(南京水利科学研究所, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098)

摘要: 混凝土重力坝变形特性分析对大坝结构安全评价具有重要的工程意义。为了分析水力劈裂对重力坝结构变形的影响, 采用缩尺模型试验方法, 构建大坝水力劈裂模型试验, 研究了不同水压力分布状态和不同初始缝长的大坝水力劈裂变形特性。总结大坝水力劈裂全过程的结构变形规律得到: 随着裂缝中水压力增加和结构初始缝长的增加, 大坝的位移变形增大, 位移全过程曲线转异特征点提前, 大坝结构的破坏过程加速, 大坝安全性能显著降低。

关键词: 重力坝; 水力劈裂; 缩尺模型; 变形位移; 转异分析

中图分类号: TV642.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)04-0234-08

Analysis of Structure Deformation of Gravity Dam Under Hydraulic Fracturing

HU Shaowei, WANG Yang, SUN Yueyang, LU Jun

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The analysis of deformation characteristics of concrete gravity dam is of great engineering significance to the safety evaluation of the dam structure. In order to analyze the influences of hydraulic fracturing on gravity dam, gravity dam model tests with hydraulic fracturing were carried out. The characteristics of deformations of the dam with different water pressure distributions and different initial crack lengths were analyzed. It is concluded that with the increase of water pressure in the crack and the increase of the initial crack length, the deformation of the dam increases, the transfer points of the whole displacement curve was appeared earlier, the damage process of the dam structure accelerated, and the dam safety was significantly reduced.

Keywords: gravity dam; hydraulic fracturing; scale model; deformation displacement; transfer analysis

混凝土重力坝在其施工和运营期间会发生不同程度的形变位移, 工程中及时掌握大坝的变形演变规律并做出准确预报, 对大坝的结构安全分析起到了至关重要的作用^[1-3]。工程实践中, 大坝的变形位移安全监测是大坝管理的重要内容, 对大坝监测变形位移的数据资料进行综合分析是评判大坝安全状况的有效方法^[4-6]。大坝受载后结构的变形位移全过程分析, 结合大坝结构关键测点变形位移的特征规律分析, 对大坝的结构安全评价和其灾害预警具有重要意义。

大坝的变形位移充分反映了大坝坝体及坝基的

结构工作性态, 由于几何变形位移易于测量, 是综合分析、评价和监控大坝运行安全状态的主要依据。当变形位移监测值在安全监控指标的某一范围时, 立即可以对大坝的安全状况作出诊断^[7-10]。混凝土重力坝缩尺模型试验是一种可靠的分析大坝结构安全的试验手段, 利用大坝缩尺模型研究大坝结构在不同受载条件下的变形位移规律, 通过分析结构变形规律特征可总结获得真实大坝结构的变形位移指标阈值。目前, 重力坝模型试验结果被引用频率较高的是由 Carpinteri 等^[11]和 Valente 等^[12]先后在意大利都灵大学结构材料实验室完成, 后者的模型

试验常被一些学者^[13-15]作为数值计算准确性的验证数据。荣华等^[16-17]改进了前人的重力坝模型试验,并利用该方法研究了重力坝断裂过程中断裂过程区对结构变形的影响效应。重力坝模型不仅可用于模拟重力坝结构的安全问题,也可以用于研究大坝地基稳定性^[18-20]。本文基于前人的研究方法,建立了重力坝模型水力劈裂物理模型试验,并利用该试验研究了不同工况下混凝土重力坝的变形特性规律。

1 重力坝缩尺模型试验

1.1 试验概况

重力坝变形分析以重力坝缩尺模型超载变形试验为基础,试验中监测大坝坡面水平变形位移值,分别沿垂直方向等间距设置监测点。大坝模型的浇筑采用混凝土浇筑,大坝设置水平裂缝,大坝的结构尺寸如图 1 所示,大坝模型浇筑的混凝土配合比及力学性能参数值分别列于表 1 和表 2。

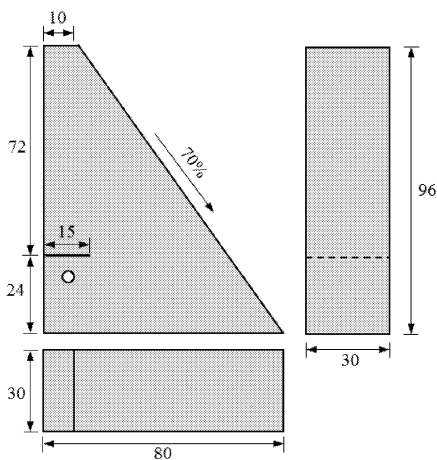


图 1 重力坝模型试件尺寸图(单位:cm)

表 1 试验混凝土材料配合比

材料类型	水	水泥	河沙	小砾石 (5 ~ 12.5mm)	大砾石 (12.5 ~ 25mm)
用量 /(kg · m ⁻³)	182	350	761	614	538

表 2 试验混凝土材料力学参数

名义强度 /MPa	弹性模量/GPa		抗拉强度/MPa		抗压强度/MPa	
	样本值	平均值	样本值	平均值	样本值	平均值
	35.3		3.18		32.5	
30	31.1	32.4	3.43	3.12	31.9	33.2
	30.8		2.74		35.2	

1.2 大坝水力劈裂试验方法

在已有重力坝失事事例中,几乎很少发生过沿坝体发生水力劈裂产生结构失事的现象,这主要是因为坝体结构中出现完全由水力劈裂导致结构失事时,其内部裂缝的扩展极其极端,实际工程中这种极端的现象基本可以被杜绝。然而,重力坝结构迎水面裂缝中含水压力对坝体结构的变形性能会产生重大影响。图 2 为重力坝结构中迎水面裂缝中含水压力下结构的变形示意图。由图 2 可知,水力劈裂作用下坝体的变形主要由静水压力 P 和裂缝中水压力 P_c 引起的,由于工程中裂缝比较大坝结构存在尺寸上的巨大差异,因此,为了突出迎水面裂缝中水力劈裂的影响效应,本文设计的裂缝结构尺寸与大坝尺寸为同一级别。

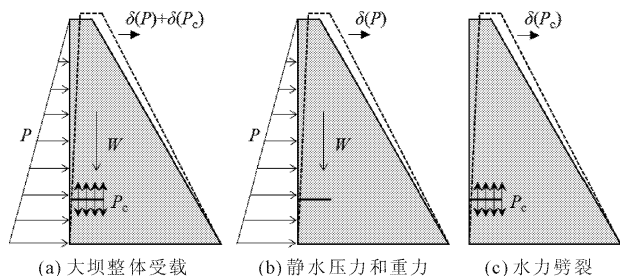


图 2 重力坝模型受载变形位移图

重力坝模型受载示意图如图 3(a)所示,该受载模式模拟大坝在实际运行中承受上游面静水压力的状态,设该静水压力总和为 P 。同时,大坝上游面设置的水平裂缝中,由于压力水的存在产生了作用于裂缝表面的水压力。试验中利用两个水平作用于大坝的机械荷载力代替上游面的静水压力(如图 3(b)所示),利用砝码重力模拟裂缝中的水力劈裂力(如图 3(c)所示)。其中,作用的水平集中荷载由液压千斤顶提供并通过刚度较大的分配梁作用于大坝裂缝上下两部分。

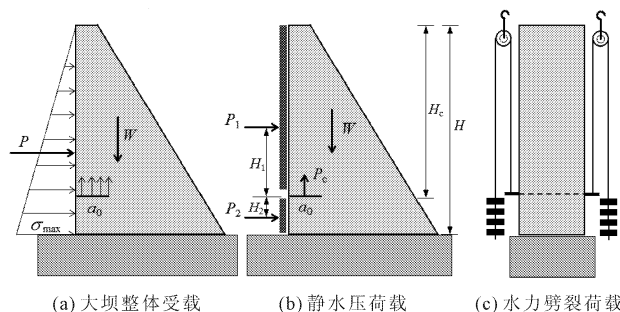


图 3 重力坝模型加载示意图

两个集中荷载的值 P_1 、 P_2 和相应的荷载作用点

计算公式为:

$$\begin{cases} P_1 = P \times \left(\frac{H_c}{H}\right)^2 \\ H_1 = \frac{H_c}{3} \\ P_2 = P \times \left(1 - \left(\frac{H_c}{H}\right)^2\right) \\ H_2 = \frac{3H^2H_c - 2H^3 - H_c^2}{3(H^2 - H_c^2)} \end{cases} \quad (1)$$

大坝模型的裂缝起裂前,裂缝中水压力为均匀分布且保持恒定。因此,大坝裂缝起裂前,裂缝中水压力 P_c 为恒定值与裂缝的纵向位置相关,其计算公式为:

$$P_c = 2P \times \frac{H_c}{H^2} a_0 \quad (2)$$

1.3 大坝变形监测方法

重力坝模型变形位移的监测分别采用高精度和棱镜进行监测,关键点的位置布置如图 4 所示,实验中高精度位移计与棱镜同时布置于关键监测点处。图 5(a)为坝体模型的高精度位移计布设示意图,图 5(b)为坝体模型棱镜布设示意图。监测点的布置为坝顶和距坝顶分别 15 cm、30 cm、45 cm、60 cm 位置处的坝体坡面上,其中坝顶位置处监测内容为水平位移和垂直位移,其他监测点处为水平位移。监测位移的数据参量命名为:坝顶水平位移 HD-1、距坝顶 15 cm 处坡面水平位移 HD-2、距坝顶 30 cm 处坡面水平位移 HD-3、距坝顶 45 cm 处坡面水平位移 HD-4、距坝顶 60 cm 处坡面水平位移 HD-5、坝顶垂直位移 VD-1。

2 大坝变形全过程及其转异特征分析

2.1 大坝变形全过程分析及转异点判定

混凝土重力坝的典型超载变形全过程曲线如图 6 所示。大坝的 $P-\delta$ 曲线可将结构变形过程分为三个阶段:(1) 线弹性阶段,即图中 OA 段,该阶段内坝体的变形属于弹性变形,并且坝体中任意部位的应力均未超过材料的比例极限,重力坝的坝踵受压,卸载后坝体变形将完全恢复且加、卸载的曲线将完全重合;(2) 屈服变形阶段,即图中 AB 段,该状态下大坝处于弹塑性工作状态,外加荷载 P 继续增大导致重力坝的局部区域将出现拉伸或者压剪破坏的现象,并且,超载导致的重力坝结构变形显著增大;(3) 破坏阶段,即图中 BC 段,该状态下即使外加荷载增加的很小也会导致坝体结构的变形迅速增

加,并且,达到 C 点后重力坝将会丧失其承载能力,继续加载将导致大坝于 CD 段某一点突然坍塌,运行中的混凝土重力坝结构绝对不允许出现处于破坏阶段的状态。

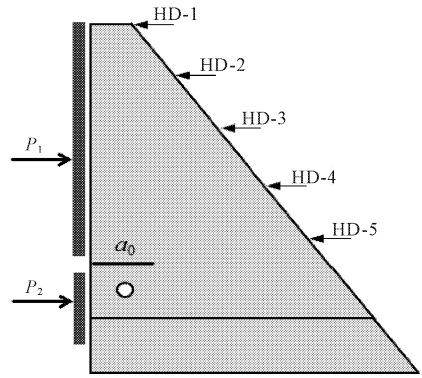


图 4 重力坝模型变形位移监测点

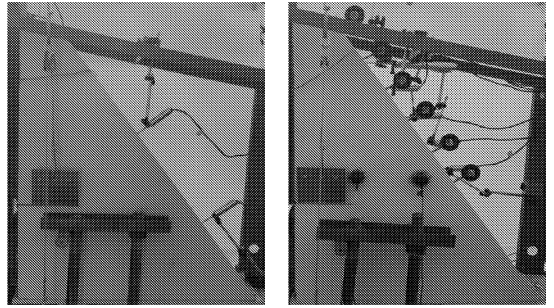


图 5 重力坝模型变形位移监测仪器

图 5 重力坝模型变形位移监测仪器

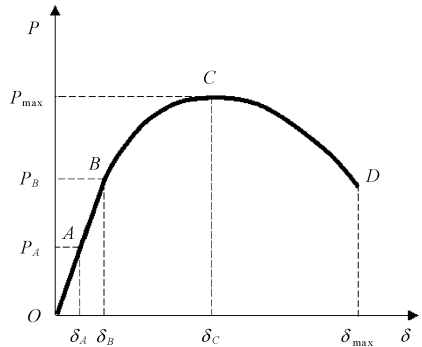


图 6 混凝土重力坝变形转异全过程曲线

大坝变形转异特征点的确定方法应该结合其特征状态,即确定 A 点应考虑处于线弹性阶段与屈服变形阶段大坝的状态差异,确定 B 点应考虑处于屈服变形阶段与破坏阶段坝体的状态差异,确定 C 点应考虑大坝的最大承载极限。

2.2 不同水压力大坝模型变形全过程分析

为了分析不同水压力下大坝模型的变形全过程,试验中在大坝的预制缝内分别设定了四种不同

的水压力分析状态,试验获得了不同状态下大坝的断裂变形全过程曲线。工程中大坝内部会设有排水系统,这会改变裂缝中原有的水压力分布,因此本文设定了四种水压力分布状态。试验中在 10 cm 长预设裂缝中设定的水压力分布分别为无水压力、三角形分布、梯形分布、矩形分布四种状态。各水压力分布状态示意图如图 7 所示,相应的大坝模型分别命名为: Dam0 - 10、Dam1 - 10、Dam2 - 10、Dam3 - 10。

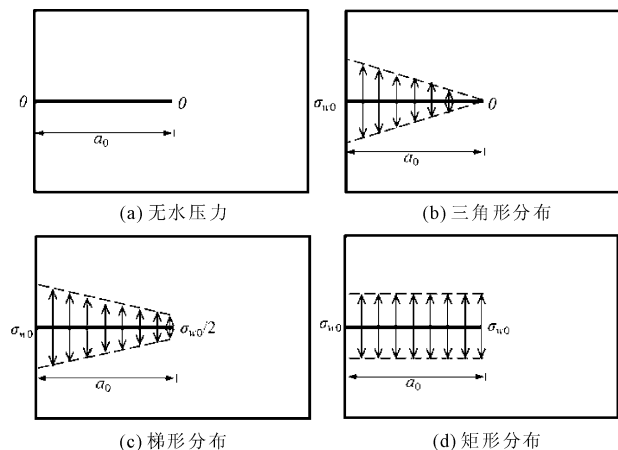


图 7 不同水压力分布模型状态示意图

图 8 为重力坝模型迎水面裂缝中含不同比例系数的 HD - 1 水力劈裂试验变形全过程曲线图。由图 8 可知,随着裂缝中水力劈裂效应的增强模型的承载力显著降低,且模型极限承载点的位移变形量随着水力劈裂系数增大而增大。这表明随着坝体结构中水力劈裂效应的增加结构的抵挡水压能力降低,结构的变形位移增大。同时,对比超载试验中坝体结构的前期变形趋势可知,随着裂缝中水力劈裂系数的增大结构的刚性降低,结构承载后变形能力增大。通过裂缝中水力劈裂的这种影响效果可以反映出结构中不同的水压分布模型对判定坝体结构中水力劈裂的影响效果具有十分重要的影响。反应较小水力劈裂效应的水压分布模型不能准确的描述重力坝中水力劈裂对结构安全性能的影响效果,特别是当结构中水压力较大时的安全状态。反应较大水力劈裂效应的水压分布模型会却会使得对结构安全评价过程中放大水力劈裂效应,从而在评价中对结构的承载性能产生浪费。合理的裂缝中水压分布模型是准确指导构建结构水力劈裂影响效应的重要依据,然而,目前还没有对大结构体裂缝中水压分布合理预测的模型,这也是目前众多学者研究工作的重点。

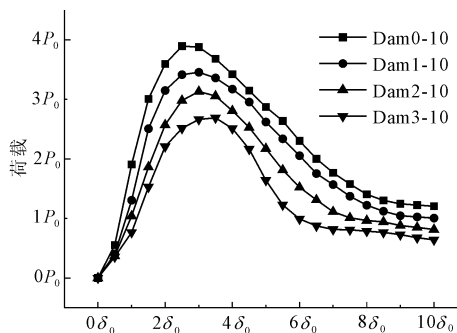


图 8 不同水力劈裂比例系数重力坝模型变形全过程曲线(HD - 1)

为了更准确对比裂缝中水力劈裂效应对坝体结构超载全过程曲线的影响效果,通过上文提到的转异特征点计算方法计算所有坝体模型的变形转异特征点并列于表 3 中。由表可知,随着裂缝中水力劈裂比例系数的增大,坝体结构变形转异点 A 越来越靠近起点,这表明结构的线弹性阶段减小,结构裂缝中的水压力使得坝踵位置处由重力引起的压应力减小,重力坝安全性能降低。同时,随着水力劈裂系数的增大,变形转异点 B 点与 A 点距离增大而与 C 点相接近,这表明结构的屈服阶段加长且破坏阶段提前。由此可知,坝体结构中水平裂缝的水力劈裂效应会使得结构受载后提前进入屈服阶段且结构的破坏过程加快,即结构达到承载极限后随即坍塌。

表 3 重力坝模型超载变形转异特征点

坝体模型特征	水力劈裂比例	P_A/P_0	δ_A/δ_0	P_B/P_0	δ_B/δ_0	P_C/P_0	δ_C/δ_0
$a_0 = 10$ cm	0	2.1	1.2	2.8	1.7	3.9	3.1
$a_0 = 10$ cm	1	2.0	1.2	2.1	1.6	3.5	3.1
$a_0 = 10$ cm	2	1.9	1.1	1.6	1.6	3.0	3.0
$a_0 = 10$ cm	3	1.9	1.1	1.2	1.6	2.5	3.3

2.3 不同长度初始缝长大坝变形全过程分析

为了研究初始缝长对大坝变形全过程的影响特性,试验中建立了初始缝长分别为 10 cm、15 cm、20 cm、25 cm 的大坝模型,并对大坝分别进行了裂缝中有、无水压力下的断裂试验,并得到不同初始缝长对大坝变形全过程的影响规律。

图 9 为 HD - 1 含不同长度初始裂缝的混凝土重力坝模型超载试验坝体变形转异特征曲线图。由图可知,随着静水压力荷载的不断增大,大坝发生转动变形,坝顶水平向位移不断增大。同时,可以看出荷载的增加速率随着变形量增大而变缓,当靠近峰

值时,较小的荷载增加量依然引起坝体结构较大的变形。并且,当荷载超过峰值后,结构变形增加的趋势加快,结构破坏后的卸荷过程较快,最终滞留的残

余重力坝结构抵抗部分静水压力荷载,大坝变形转异曲线表征出坝体结构依然拥有残余承载能力。

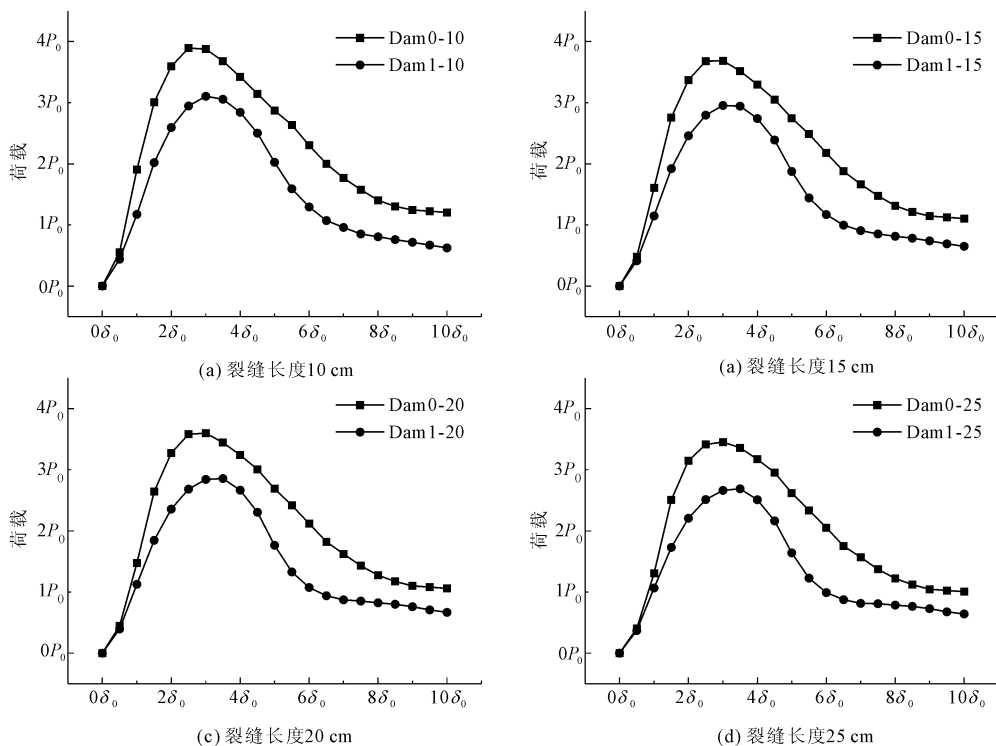


图 9 不同初始裂缝长度重力坝模型变形转异特征曲线(HD-1)

对比相同模型有、无水力劈裂的试验曲线可知,裂缝中含水力劈裂的模型结构承载力小于不含水力劈裂的情况,且含水力劈裂模型的结构变形在加载初始阶段大于不含水力劈裂模型,但是,当坝体结构处于破坏阶段后,含水力劈裂的大坝模型的结构水平位移增加量小于不含水力劈裂的坝体结构模型。这表明水力劈裂的模型结构破坏过程较无水力劈裂模型破坏快,试验测试中模型结构的坍塌效应也更加剧烈。

对比不同初始裂缝长度模型的超载变形转异全过程曲线,可知模型全过程曲线都表征出相似的变化规律。同时,随着裂缝长度的增加,曲线的峰值不断降低,表明结构的承载能力随迎水面初始裂缝长度的增加而降低。并且,分析坝体结构迎水面裂缝含水力劈裂的全过程曲线可知,裂缝长度增加结构中水力劈裂导致的结构承载力下降和结构变形位移效应增大,这种现象表明,坝体结构迎水面的裂缝越长结构受水力劈裂的影响越大。水工结构工程中,裂缝会随着混凝土结构的老龄化及材料性能降低而进一步向结构内部延伸扩展,结构裂缝内部的水力劈

裂效应将会随着裂缝的扩展而进一步加重,因此,混凝土坝体受水力劈裂导致的结构性能降低若不进行合理的控制将会愈发剧烈。

为了更加准确的判定坝体结构模型的变形转异特性,现将坝体模型变形转异特征点结果列于表 4 中。由表 4 可知,坝体结构变形转异点 A 点随着裂缝初始长度增加而越发接近 O 点,这表明大坝结构中含有的裂缝长度越长,结构的弹性变形阶段越短,超载后坝体进入屈服阶段加快,大坝更易发生失稳断裂。

表 4 大坝模型超载变形转异特征点

坝体模型特征	有无水压	P_A/P_0	δ_A/δ_0	P_B/P_0	δ_B/δ_0	P_C/P_0	δ_C/δ_0
$a_0 = 10\text{cm}$	无水压	2.1	1.2	2.8	1.7	3.9	3.1
	有水压	2.0	1.2	2.1	1.6	3.5	3.1
$a_0 = 15\text{cm}$	无水压	1.9	1.1	2.6	1.5	3.8	2.9
	有水压	1.8	1.3	2.4	1.5	2.9	3.3
$a_0 = 20\text{cm}$	无水压	1.9	1.2	2.3	1.6	3.5	3.0
	有水压	1.8	1.2	2.1	1.5	2.6	3.2
$a_0 = 25\text{cm}$	无水压	1.8	1.1	2.0	1.7	3.4	2.9
	有水压	1.7	1.2	1.9	1.6	2.4	3.1

3 大坝模型超载变形安全评价

3.1 重力坝模型变形位移分析

试验中大坝模型的位移监测结果如图10所示。可以看到,坝体的变形主要表现为水平方向上的挠曲、位移的最大值发生于坝顶处。同时,坝体迎水面在垂直方向上产生了微量的张拉变形,说明这里出现了拉应力。由于受到水力劈裂的作用,重力坝坝体结构有绕坝趾转动的趋势,当坝体坡面的变形水平位移沿垂直深度方向呈斜直线,其表征坝体变形依然维持线弹性状态,结构的主要变形区域集中于原点附近。当坝体坡面变形水平位移出现折点,表明在该点表征的深度出结构出现了裂缝,坝体转动中心由坝趾转向该转折点对应坝高的位置。

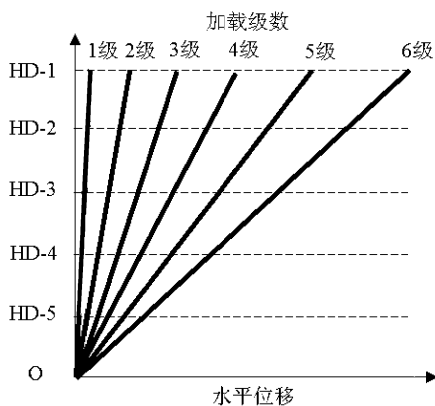


图10 不同级荷载下坝体水平位移沿纵向分布规律曲线

3.2 棱镜监测误差分析

图11为混凝土重力坝模型坝顶水平位移的棱镜监测结果与高精度位移计监测结果的对比图。由图可知,初始阶段二者的监测结果保持一致,但是,随着超载系数增大,棱镜监测结果出现略大于高精度位移计的现象。这是由于加载初期结构处于弹性变形阶段,分级加至目的荷载后结构的应力分布规律未发生明显改变,结构变形位移为弹性位移且较为稳定。随着超载系数增大,坝体结构模型出现微裂缝,结构出现塑性变形,且裂缝尖端出现起裂现象,由于试验中裂缝扩展过程未间断式,故棱镜采集数据略延迟于高精度位移计。通过观察发现,棱镜与高精度位移计监测结果在坝体模型超载破坏全过程中监测结果规律一致,仅仅出现加载后期的棱镜数据微滞后现象,该现象对试验结果影响很弱。

综上所述,重力坝模型结构超载破坏试验中利用棱镜监测技术监测坝体结构位移是可行的,且监测精度满足结果要求。

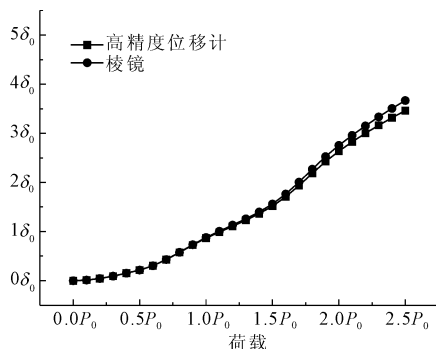


图11 棱镜与高精度位移计测量结果对比

3.3 不同水力劈裂比大坝变形分析

图12为不同水压力分布状态大坝结构受载关键点水平位移沿深度方向的分布曲线图,图13为不同超载下重力坝坝顶垂直位移变化曲线图。

由图12可知,随着超载系数的增加,重力坝坝体结构水平位移不断增大,且由坝顶向下水平位移逐渐减小。同时,对比不同深度坝体坡面位置水平位移可知,坝顶的水平位移增量随超载系数增大最大并且沿深度方向逐渐降低,位于裂缝水平位置处的监测点水平位移基本未发生改变,这说明带裂缝的混凝土重力坝模型超载破坏过程中主要的变形部位为裂缝上端重力坝坝体部分,而裂缝的下半部分坝体的变形水平位移较小。由此可知,坝体迎水面的水平裂缝扩展对坝体结构变形水平位移影响较大,坝体结构中水平裂缝的扩展会引起坝体结构整体的位移变化十分明显,可以推断坝体结构的外部变形位移突变式的增加极有可能是结构内部裂缝的扩展延伸引起的。同时,由曲线规律可以得到水力劈裂效应对坝体结构变形水平位移的影响较小,因此,在分析水力劈裂导致结构外部变形时与裂缝扩展方向上的位移反映水力劈裂的影响效果不明显。

由图13可知,重力坝坝顶垂直位移随着外加荷载的增加而不断增大且其增大的趋势也随着荷载增加而加快。对比不同水压力比例系数下的坝顶垂直位移变化可知,裂缝内水压力越大,结构垂直位移越大,且位移增大的趋势也越快。由此可知,重力坝迎水面裂缝水力劈裂会对坝体垂直位移产生重大影响,且裂缝内部不同的水压力也会对坝体结构的垂直位移产生不同的影响,过于保守的水压力分布模型会使得预测坝体的变形位移过大,这样对设定坝体变形临界位移会产生偏差,因此,获得坝体结构中合理的水压分布模型具有重要的安全评价意义。

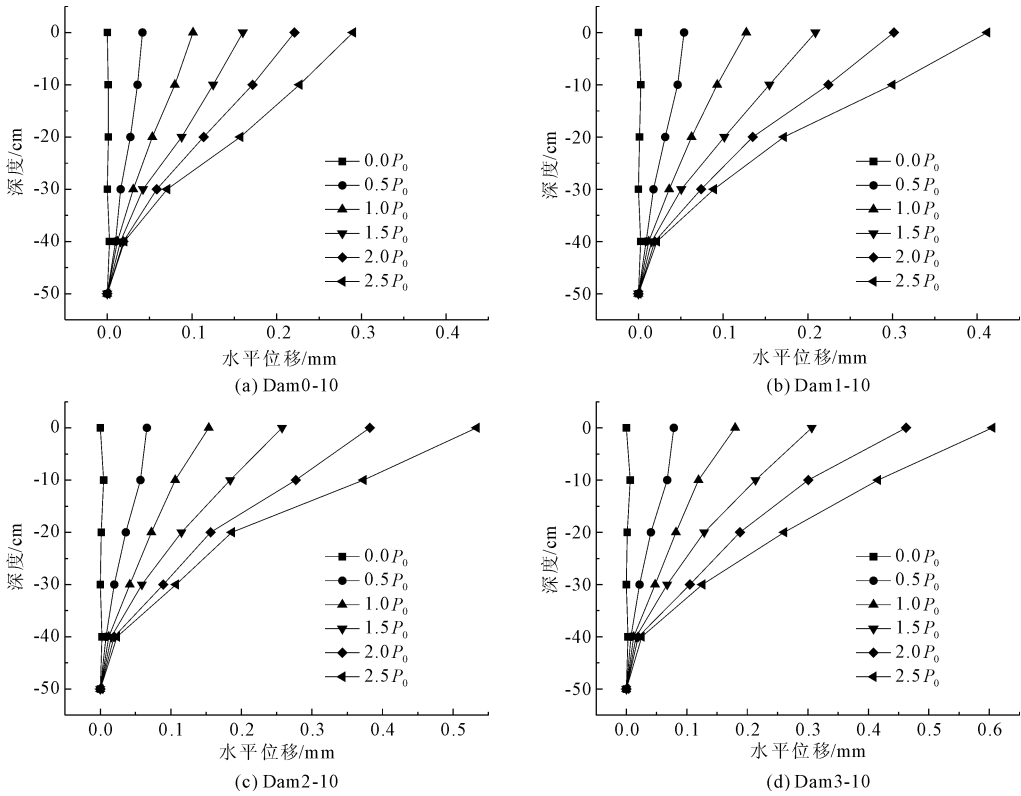


图 12 不同超载下坝体水平位移沿深度分布曲线

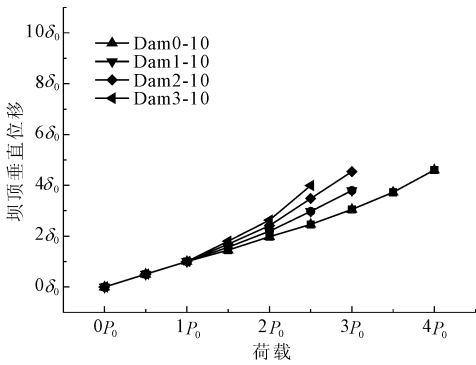


图 13 不同超载下重力坝坝顶垂直位移变化曲线

3.4 不同初始缝长大坝变形分析

通过分析不同初始缝长大坝结构受载关键点水平位移沿深度方向的分布规律和不同初始缝长大坝结构受载关键段垂直位移沿深度方向的分布规律,随着混凝土重力坝模型结构承载的静水压力值增大,坝体下游坡面的水平位移不断增大,且通过分析水平位移可以发现坝体变形的转折点逐渐由距坝顶 50 cm 深度位置上移至 10 cm,代表坝体的转动中心位置上移了。该种现象是由于坝体模型的转动中心由预设的固定底座支撑转变为由裂缝起裂导致的坝体上部绕裂尖转动。对比有无水力劈裂坝体模型的水平位移分布曲线可知,含水力劈裂模型的水平位

移略大于不含水力劈裂的重力坝模型,但是这种差异性随着裂缝长度增加逐渐减小。这表明裂缝中水力劈裂的作用对坝体的水平位移影响较静水压力的作用效果弱,同时,坝体结构的水平变形作用主要来源于水平方向的静水压力,结构裂缝加长导致其弹性变形阶段变短结构承载力下降。对比不同初始裂缝长度的重力坝模型变形水平位移变化规律可知,重力坝模型的水平位移不断增大,坝体模型的水平位移随着荷载超载系数的增大而增加量也不断增大,这表明在坝体处于接近屈服阶段过程中裂缝的扩展加速使得结构变形加大。因此,坝体迎水面结构水平裂缝对结构的变形影响十分巨大,该种裂缝不仅在结构承载能力上起到严重的削弱作用,也会使得结构的变形量产生较大的增幅。

随着水平荷载增加模型坝顶的垂直位移不断增大,且该种增大趋势随着荷载的增加不断加大而变快。这种现象是由于坝体模型的裂缝扩展张开导致结构的垂直位移加大,同时由于裂缝扩展张开速度随着超载系数增大而加快的效应使得结构的垂直位移增加速率加快。对比不同长度初始裂缝的重力坝模型垂直变形位移的变化曲线可知,随着裂缝长度增大,模型的垂直变形位移增大,这表明重力坝结构中水平裂缝长度增加将会导致其纵向变形能力的增

大,裂缝的张开扩展将进一步增强坝体垂直位移的增加。对比有、无水力劈裂重力坝模型的垂直位移变化规律可知,含水力劈裂的重力坝模型超载垂直位移大于无水力劈裂模型,这表明重力坝模型中迎水面裂缝的水力劈裂效应会引起重力坝垂直位移的增大。通过对比分析重力坝模型的变形位移状态可知,重力坝模型裂缝中含水力劈裂的超载破坏过程中,结构的水平位移与不含水力劈裂模型试验的结果差异较小,而坝顶的垂直位移差异较大。这表明坝体迎水面裂缝中水力劈裂对结构的变形位移影响主要体现在裂缝面的垂直方向上,而沿裂缝扩展方向上的位移受水力劈裂的影响不明显。

4 结 论

本文进行了重力坝模型超载破坏试验中坝体变形位移全过程曲线转异特征分析,研究了迎水面裂缝中水力劈裂作用对坝体结构变形位移的影响特征。对不同水压力分布状态和不同初始缝长的重力坝模型进行了试验,得到了不同工况下重力坝迎水面裂缝中水力劈裂对坝体破坏的变形位移特征变化规律。对比试验结果可知,随着裂缝中水压力增加,大坝的变形位移加快,大坝的变形位移特征点提前,结构安全稳定性降低。随着裂缝初始长度增加,大坝的变形位移进一步加大,且裂缝中的水力劈裂效应也进一步增强。试验结果表明,大坝迎水面水力劈裂效应对大坝结构安全产生较大的不利影响,当结构的裂缝长度越长其水力劈裂效应越强,同时,有益的排水作用会降低水力劈裂的作用效果。

参考文献:

- [1] 吴中如,陈波. 大坝变形监控模型发展回眸[J]. 现代测绘,2016,39(5):1-3,8.
- [2] 方国宝,顾冲时,岑黛蓉. 大坝安全分析中时效模型的改进及其应用[J]. 水电自动化与大坝监测,2006(5):56-59.
- [3] 罗倩钰,杨杰,程琳,等. 混凝土坝运行初期安全监控指标拟定方法研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(2):32-36.
- [4] 余波,张国军,朱旭芬,等. 混凝土坝基础防渗帷幕体老化的基本特点及其多尺度效应[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(4):13-18.
- [5] 魏国利,冯新,张宇,等. 结构缝对高碾压混凝土拱坝抗震性能的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(3):65-71.
- [6] 张豪,许四法. 基于经验模态分解和遗传支持向量机的多尺度大坝变形预测[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(S2):3681-3688.
- [7] 黄军胜,黄良珂,刘立龙. 基于EMD-FOA-BP神经网络的大坝变形预测研究[J]. 水力发电,2019,45(2):106-110.
- [8] 胡德秀,屈旭东,杨杰. 基于M-ELM的大坝变形安全监控模型[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):75-80.
- [9] 李明超,任秋兵,孔锐. 多维复杂关联因素下的大坝变形动态建模与预测分析[J]. 水利学报,2019,50(6):687-698.
- [10] 李超. 小波神经网络在大坝变形预测中的应用研究[D]. 西安:长安大学,2012.
- [11] Carpinteri A, Valente S, Ferrara G, et al. Experimental and numerical fracture modelling of a gravity dam [C]//Fracture Mechanics of Concrete Structures, Elsevier Applied Science, New York, 1994:351-361.
- [12] Valente S, Barpi F. Experimental and numerical evaluation of gravity dam models failure lifetime[J]. Image & Vision Computing,1998,12(4):239-245.
- [13] Valente S, Barpi F. Numerical simulation of centrifuge tests on prenotched gravity dam models[J]. Journal of Engineering Mechanics,1994,17(9):175-181.
- [14] Barpi F, Valente S. Numerical simulation of prenotched gravity dam models[J]. Journal of Engineering Mechanics,2000,126(6):611-619.
- [15] Barpi F, Valente S. The cohesive frictional crack model applied to the analysis of the dam-foundation joint[J]. Engineering Fracture Mechanics,2010,77(11):2182-2191.
- [16] 荣华,董伟,吴智敏. 混凝土重力坝模型试验研究[J]. 东北水利水电,2013,31(3):4-5,71.
- [17] 荣华. 混凝土裂缝扩展过程中断裂过程区的特性研究[D]. 大连:大连理工大学,2012.
- [18] 董建华,张林,陈建叶,等. 高坝稳定模型试验中结构面相对位移测试研究及工程应用[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(6):91-95.
- [19] 丁泽霖,张林,姚小林,等. 复杂地基上高拱坝坝肩稳定破坏试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2010,42(6):25-30.
- [20] 杨宝全,张林,陈建叶,等. 复杂地质条件下拱坝坝肩稳定分析及密集节理影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(S2):3972-3978.