

碾压混凝土坝成层软弱结构水弹性试验模拟^{*}

马 斌¹, 赵 钊¹, 胡剑超²

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点试验室 天津, 300350)

(2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司 天津, 300222)

摘要 面向碾压混凝土坝流激振动问题精细化模拟研究的需要,总结了碾压混凝土坝成层结构的特性,并基于水弹性模型试验,对碾压混凝土坝的成层软弱结构模拟方法进行了研究,提出了带碾压成层结构水弹模型模拟的 6 条相似准则和 3 种碾压成层结构水弹模型的黏合模拟方式。基于频响函数原理,对 5 组模拟试件的冲击振动信号及频响函数进行分析,评估了不同模拟方式下试件的动力响应特性。结果表明:混凝土成层软弱结构采用由下至上分别为下层铕厚橡胶、硫化型橡胶黏合剂、低弹模薄层橡胶、硫化型橡胶黏合剂、上层铕厚橡胶的模拟方式,模拟结果符合理论规律。

关键词 碾压混凝土坝;成层结构;水弹性模型;频响函数;动力特性

中图分类号 TV642.2;TV131.6;TH145.4⁺1

引 言

碾压混凝土坝是近 30 年来发展起来的一项筑坝技术,其主要特点是含有大量的碾压铺筑层面,这也是碾压混凝土坝坝体的薄弱环节。文献[1-2]对有厚度施工层面的碾压混凝土坝的力学行为规律做了大量研究并取得了一定的成果。为了研究带碾压成层结构的坝在流激振动下的结构响应机理,既要依托水弹性模型特性,模拟水流-坝体-地基-库水相互作用;又要根据碾压成层物理力学特性,模拟碾压层面影响带结构,最终反映碾压成层对坝体流激振动的影响。

水弹性模型的特点是可以同时满足水力学相似和结构静动力学相似原理,实现对“结构-水体-地基-动荷载”四位一体的流固振动系统的模拟。文献[3]采用可以满足密度相似和弹性模量相似的加重橡胶作为模型材料,第 1 次建立了比尺为 1:200 的二滩高拱坝泄洪振动的大型水弹性试验模型。采用了当时先进的测试手段进行了泄洪振动的测试,通过试验手段分析了震源,验证了二滩拱坝的泄洪安全性,这是流固耦合研究的突破性进展,随后又进行了小湾、构皮滩、溪洛渡及拉西瓦等高拱坝的水弹性模型

的试验研究^[4-7]。目前,碾压混凝土物理力学参数试验的对象多是试件或者大坝芯样,而按照一定比尺制作大坝模型进行研究的却很少。例如:文献[8]制作 1:80 的沙牌拱坝模型,进行水压力下坝体应力、变形及开裂研究。文献[9]制作 1:112 的沙牌拱坝模型,研究地震作用下坝体开裂。以上模型材料皆为碾压混凝土。

笔者提出 3 种碾压成层结构的模拟方案,采用水弹橡胶制作 5 种模拟试件,通过制作测量 5 种模拟试件的冲击振动信号,基于频响函数原理计算其幅频-相频曲线,进行不同模拟方式的动力特性评估,研究利用水弹橡胶进行碾压混凝土成层软弱结构模拟的合理方式。

1 水弹性模型模拟原理

碾压混凝土坝泄洪激振的水弹性试验模拟是对“结构-水体-地基-动荷载”四位一体的流固振动系统的模拟,要满足水力学条件、结构动力学条件以及边界条件相似。按重力相似律模拟动荷载,要求结构模型材料满足密度大($\lambda_\rho = 1$)、弹性模量小($\lambda_E = \lambda_L$)、等阻尼比($\lambda_\zeta = 1$)、等泊松比($\lambda_\mu = 1$),同时合理计算基模拟范围,保证动力响应系统相似^[4-7]。

^{*} 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2013CB035905);国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51621092);国家自然科学基金资助项目(51579173);高等学校学科创新引智计划资助项目(B14012)
收稿日期:2017-03-31;修回日期:2017-05-15

2 成层软弱结构水弹性模拟方案设计

2.1 碾压混凝土坝的成层结构的特性

碾压混凝土坝的主要特点是含有大量的碾压铺筑层面,层面间不良处理不利于坝身整体强度和防渗效果,抗剪强度过低也会影响大坝安全。研究表明^[7],碾压混凝土内部黏结力约为 1.60MPa,不作任何处理的层面黏结力仅有 0.8 MPa,为层面内部的 50%。若铺水泥砂浆,层面黏结力可达到 1.25 MPa,占到内部黏结力的 78%。

2.1.1 碾压混凝土坝的层间间隔

碾压混凝土层间厚度即为冷缝间的高度。现有的物理模型中,文献[8]的沙牌碾压混凝土模型间隔为 0.1 m,比尺为 1:80,换算后为约 8.0 m。文献[9]沙牌拱坝碾压混凝土的地震台测试模型共分 7 层碾压层,换算后每层间隔约为 16.0 m。

对已经终凝或层面间隔时间超过的层面,即冷缝,一般规定的处理工艺^[10-11]为:a.先对结合层面刷毛处理,刷毛后砼表面约有 0.5~1.0cm 左右的不平整度,同时骨料表面本身也具有 0.5~1.0cm 的不平整度,之后铺一层水泥砂浆;b.刷毛处理后层面铺厚度为 1.5~2.0cm、强度高一个等级的砂浆层;c.层面冲毛或刷毛,清水冲洗,铺水泥砂浆或者 5cm 厚垫层混凝土。综上所述,实际工程中的碾压层厚度约在 5~10cm 之间。

2.1.2 碾压混凝土坝的弹性模量

1) 碾压混凝土本体:在垂直碾压层面方向和平行方向的弹模及泊松比,其差异性比较小,故非影响带的混凝土视为各向同性体。三级配 C30 碾压混凝土弹性模量为 30GPa,其动力弹性模量为 33GPa,比尺为 1:300,橡胶弹性模量为 110MPa。由橡胶材料制作 20mm×20mm×200mm 试件,利用动态法,通过共振频率测试材料的弹性模量值,经计算加重橡胶材料的弹模约为 110MPa。

2) 碾压层缝弹模:文献[12]认为,碾压层面弹模可根据中国建筑科学院由混凝土柱按规范方法试验总结的公式计算。 $E_0=100\ 000/(2.2+33/R)$ MPa,其中: R 为标准立方体抗压强度,数值为 20.1MPa;若比尺为 1:300,模型碾压层弹模 E_0 为 86.765MPa。

2.2 橡胶的黏合影响带特性分析

2.2.1 橡胶黏合影响带的扩散机理

扩散理论(分子渗透理论)是目前应用最广、最

成功的黏合理论。该理论指出,如果两个橡胶表面接触足够近,表面部分长分子链将扩散穿过界面层,最终界面消失,两个部分合成一个整体^[13]。

2.2.2 橡胶黏合接触面的微观特性

橡胶黏合界面不是简单的几何面,包含着两相逐步过渡区域的三维界面。界面区的化学成分、力学性质、分子排布及热力学性能都呈连续性的梯度变化,会出现热应力、界面化学效应和界面结晶效应等。这些效应引发界面微观变化,对于复合材料的宏观性能产生直接影响。由于复合材料界面复杂性,故将界面区域作为一个相或者层来表示,称为界面相或界面层^[14]。

2.2.3 橡胶黏合接触表面的粗糙度影响

为了除去橡胶表面氧化膜,增加黏合强度,制作水弹模型的第 1 步就是铣橡胶,橡胶在机床铣过后,再用电动砂纸抛光机打磨,此时橡胶板表面变得非常平整且粗糙。表面粗糙可以增大接触面积,通过挤压其粗糙表面(不平坦或者有突起)可以获得良好接触,接触面积的增加会获得黏合强度的改善。

2.2.4 橡胶黏合面破坏模式

黏合是制造界面的现象,而黏合破坏则是制造表面的现象。两者不是可逆关系,实际上黏合形成的界面很少因破坏而恢复原来的表面^[15]。黏合面破坏后变的十分粗糙。通常界面层的强度都会小于橡胶材料的强度,使得破坏常沿界面层产生。

碾压成层结构的水弹模型模拟条件如图 1 所示。

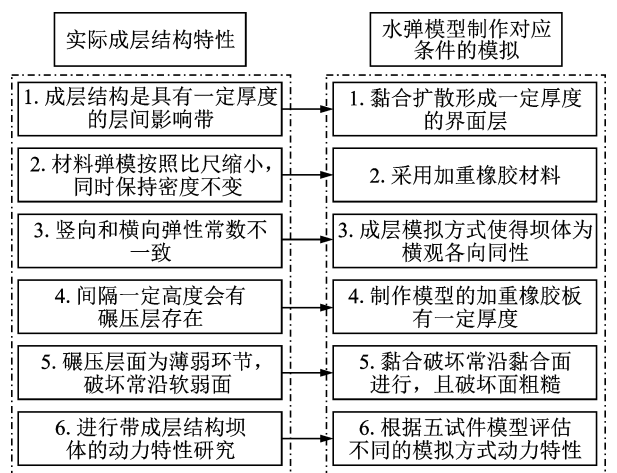


图 1 水弹模型模拟条件总结

Fig. 1 Summarization of simulation conditions for hydro-elastic model

2.3 碾压混凝土成层结构水弹模拟方案设计

依据橡胶黏合理论,结合提出的碾压混凝土坝

成层结构特性和水弹性模型模拟准则,考虑模型制作工艺,提出了 3 种碾压混凝土成层结构模拟方案。

1) 下层铣厚橡胶+硅酮密封胶(玻璃胶)+上层铣厚橡胶。其模拟优点:a. 玻璃胶可以产生一定厚度,硅酮对橡胶有一定的溶解性;b. 铣橡胶去除表面氧化膜,增加粗糙度,利于黏合;c. 硅酮黏合剂弹模较低(约 9MPa),可以模拟软弱层面,相当于弹模极限降低情况;d. 设置层间间隔即为橡胶板厚度;e. 加硅酮层面后,大坝整体为横观各向异性体;f. 制作简单。模拟缺点:a. 硅酮为非硫化胶,不能产生橡胶扩散界面层;2. 玻璃胶黏合,不会产生硫化作用,破坏面较为光滑;3. 弹模过低,不符合比尺,水弹性相似不符合。

2) 下层铣厚橡胶+硫化型橡胶黏合剂+8MPa 软弱橡胶+硫化型橡胶黏合剂+上层铣厚橡胶。其模拟优点:a. 橡胶薄板弹模密度可以指定,弹模模拟准确;b. 铣橡胶去除表面氧化膜,增加粗糙度,利于黏合;c. 橡胶黏合剂使上下两层橡胶硫化作用产生扩散层,并且厚度与碾压影响带厚度在同一量级;d. 黏结后,多在层面破坏,且破坏面粗糙;e. 设置层间间隔即为橡胶板厚度;f. 薄橡胶板可以满足水弹性相似;g. 加入成层后为横观各向异性体。模拟缺点:a. 橡胶板有一定的厚度(1mm),无法做的太薄;b. 加工制作,步骤较为繁琐。

3) 下层铣厚橡胶硅+橡胶表面处理剂处理+双面胶+上层铣厚橡胶。其模拟优点:a. 铣橡胶去除表面氧化膜,增加粗糙度,利于黏合;b. 双面胶厚度薄,符合几何比尺;c. 设置层间间隔即为橡胶板厚度;d. 双面胶低弹模(约 1.0MPa),可以模拟软弱层;e. 加硅酮层面后,大坝整体为横观各向异性体;f. 加工较为简单。模拟缺点:a. 双面胶黏合不能产生橡胶扩散界面层;b. 破坏面较为光滑;c. 弹模过低,不符合比尺,水弹性相似不符合。

3 成层结构水弹模型试件制作与动力特性测试

3.1 模拟成层结构的五试件模型试验设计

为了获取振动软弱层的结构动力特性,研究振动传播过软弱层后变化。制作方形截面柱试件,长宽高尺寸为 3cm×3cm×40cm,试件 20cm 与 32cm 高度处各有一层软弱结构,根据软弱结构不同,共 5 组试件。试件立在地面上,接触面固定,此时橡胶试件为接地悬臂三自由度系统,理论上共有三阶模态。为了测试试件所含两成层结构对于结构动力特性的

影响,共布置 4 个测点。采用电涡流非接触式动位移传感器,试件与测点如图 2 所示,传感器如图 3 所示。5 组试件的成层模拟方式如下。

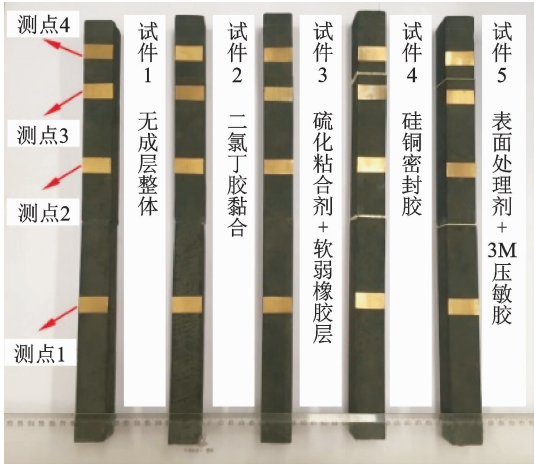


图 2 5 种不同成层结构橡胶试件

Fig. 2 Five kinds of rubber specimens with different layered structure

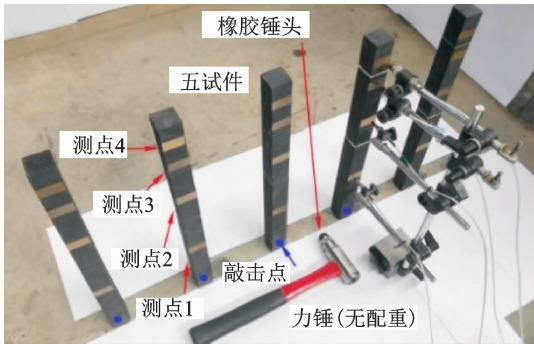


图 3 电涡流传感器及测量仪器连接图

Fig. 3 Connection diagram of eddy current sensor and measuring instrument

- 1) 无成层整体橡胶试件如图 2 中试件 1 所示。
- 2) 氯丁胶黏结试件采用 6cm 厚加重橡胶板制作模型,将两块表面用车床铣过的橡胶块用氯丁胶黏合,缝隙黏合紧密难以辨认,如图 2 中试件 2 所示。
- 3) 硫化型橡胶黏合剂+8MPa 软弱橡胶黏结试件。采用 801 氯丁型橡胶黏合剂打磨黏合面,涂胶后晾晒 10min,反复 3 次后黏合,如图 2 中试件 3 所示。
- 4) 硅酮密封胶黏结试件采用粘结力强的酸性硅酮密封胶,胶厚为 1mm,涂胶后凝固 72 h 提高到最大黏结强度,如图 2 中试件 4 所示。
- 5) 橡胶表面处理剂处理+双面胶黏结试件。选用 LHD-106 单组份橡胶表面处理剂配合 3M 泡绵双面压敏胶,使黏合度显著上升,如图 2 中试件 5 所示。

电涡流传感器的灵敏度与测定材质的表面电阻率有关,试验中橡胶试件的测点位置贴有薄铜片,作为感应介质。因此,试验前先利用小台虎钳与百分表对传感器灵敏度进行标定,如表 1 所示。灵敏度标定电阻材质为薄铜片。

图 4 为测试方案。将地面视作一静止坐标系,将制作完成后的试件用 502 胶黏结于地面,经多次预敲击试验,选用带橡胶锤头无配重的 LC-04A 冲击力锤敲击试件底部,采用触发采样方式,测点响应信号由数据采集和信号处理仪(data acquisition & signal processing, 简称 DASP)进行采集,采样频率

表 1 电涡流位移传感器灵敏度标定
Tab. 1 Sensitivity calibration of eddy current displacement sensor

项目	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
编号	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
传感器型号	CWY-O-501	CWY-DO-501	CWY-DO-502	CWY-DO-502
灵敏度/ (mV·μm ⁻¹)	6.11	6.01	2.46	2.59

为 200Hz,采样时间为 10s,每组采样 10 次。试件 3 的 4 个测点的振动位移时程线如图 5~8 所示。

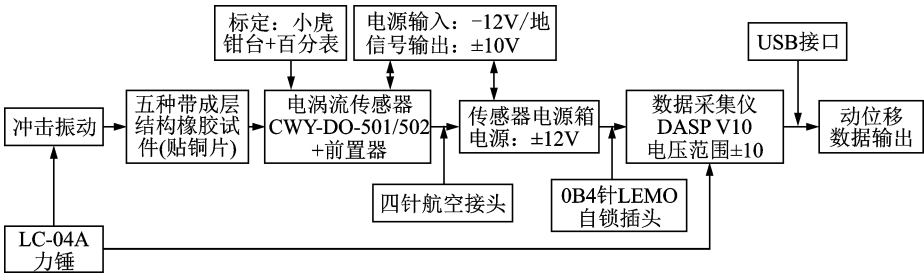


图 4 成层结构动力特性测试试验步骤图
Fig. 4 Test step diagram of the dynamic characteristics for the layered structure

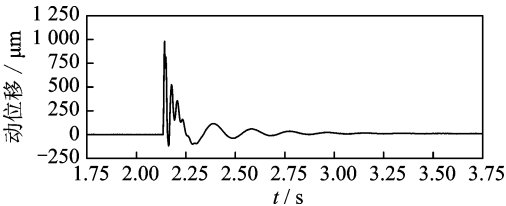


图 5 试件 3 测点 1 冲击振动时程线
Fig. 5 Time history curve of impact vibration on measuring point 1 in the third simulated sample

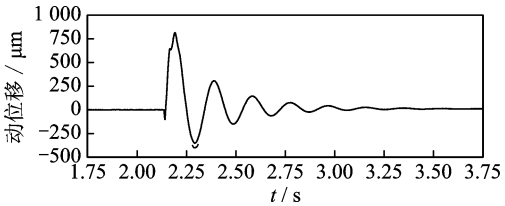


图 7 试件 3 测点 3 冲击振动时程线
Fig. 7 Time history curve of impact vibration on measuring point 3 in the third simulated sample

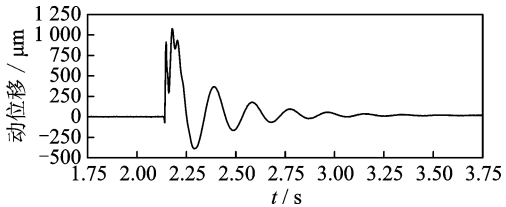


图 6 试件 3 测点 2 冲击振动时程线
Fig. 6 Time history curve of impact vibration on measuring point 2 in the third simulated sample

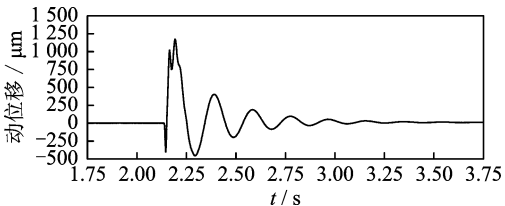


图 8 试件 3 测点 4 冲击振动时程线
Fig. 8 Time history curve of impact vibration on measuring point 4 in the third simulated sample

3.2 五橡胶试件的频响函数及动力特性分析

频响函数是观测结构的动力特征在频域范围的描述,也是结构自身对输入信号在频域中传递特性的反映^[16-18],是描述动态系统特征的一种非参数估计模型。当已知系统输入参考信号与测量响应信号时,即可用频响函数描述不同成层结构橡胶试件在

频域范围的动力学特征。
无损试件的简化学模型以及理论计算频响函数如图 9~12 所示,其参考信号为力信号 F_1 。
对各试件进行频响函数计算时,以各试件振动最下端测点 1 的振动信号作为参考输入信号,以测点 1,2,4 的振动信号作为测量响应信号,采用 Log-Log 双对数坐标,作出 5 个试件频响函数的幅频特

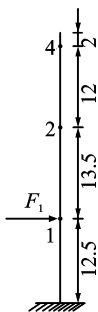


图 9 试件简化力学模型(单位:cm)

Fig. 9 Simplify mechanical model of the simulated sample (unit:cm)

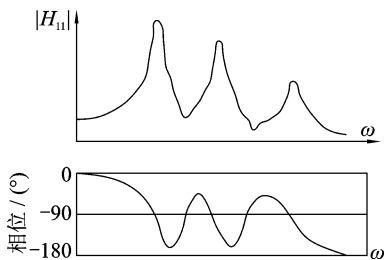


图 10 测点 1 频响应函数

Fig. 10 Frequency response function of measuring point 1

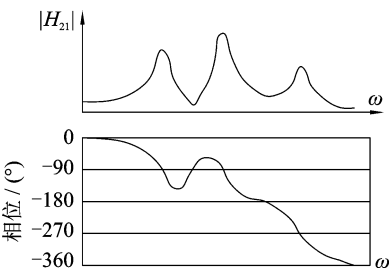


图 11 测点 2 频响应函数

Fig. 11 Frequency response function of measuring point 2

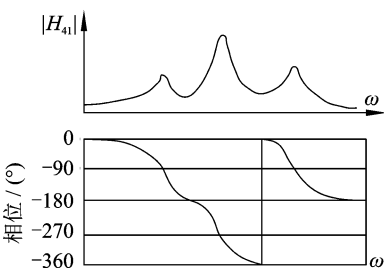


图 12 测点 4 的频响应函数

Fig. 12 Frequency response function of measuring point 4

性曲线、相频特性曲线图。根据试件 5 的实测信号计算测点 1,2,4 的频响应函数的幅值-频率与相位-频率曲线,下面仅列出典型测点的幅频、相频曲线,如图 13~18 所示。

分析各试件各测点幅频曲线,作出其弹簧线及质量线,可以明显区分出试件三阶模态。由于采用

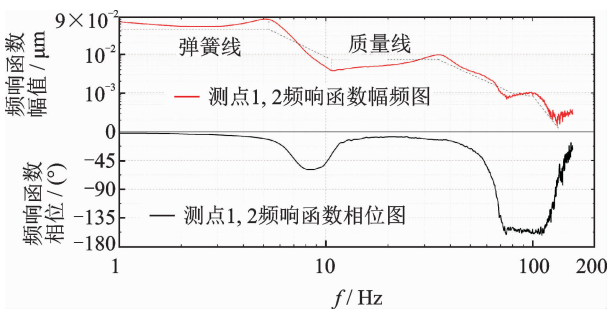


图 13 试件 1 测点 2 的幅频、相频曲线

Fig. 13 The amplitude-frequency and phase-frequency curves of measuring point 2 in the first simulated sample

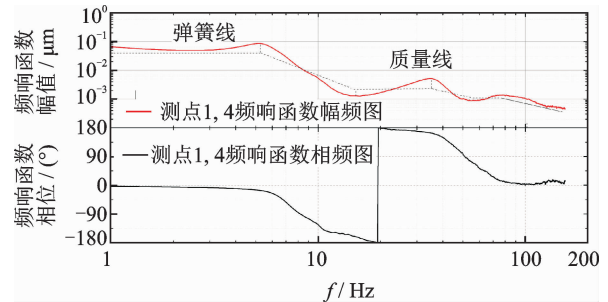


图 14 试件 1 测点 4 的幅频、相频曲线

Fig. 14 The amplitude-frequency and phase-frequency curves of measuring point 4 in the first simulated sample

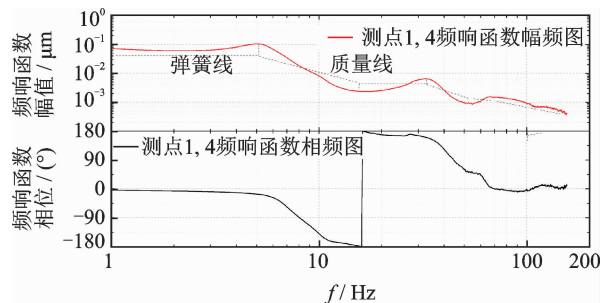


图 15 试件 2 测点 4 的幅频、相频曲线

Fig. 15 The amplitude-frequency and phase-frequency curves of measuring point 4 in the second simulated sample

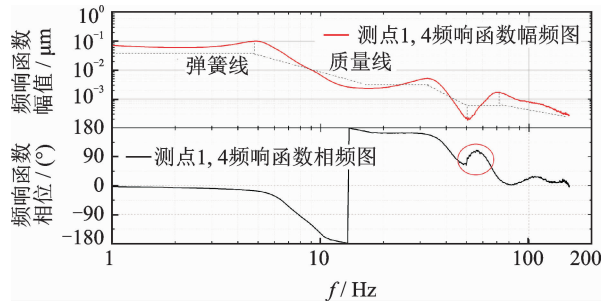


图 16 试件 3 测点 4 的幅频、相频曲线

Fig. 16 The amplitude-frequency and phase-frequency curves of measuring point 4 in the third simulated sample

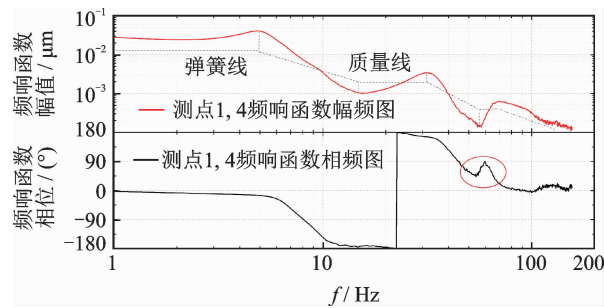


图 17 试件 4 测点 4 的幅频、相频曲线

Fig. 17 The amplitude-frequency and phase-frequency curves of measuring point 4 in the fourth simulated sample

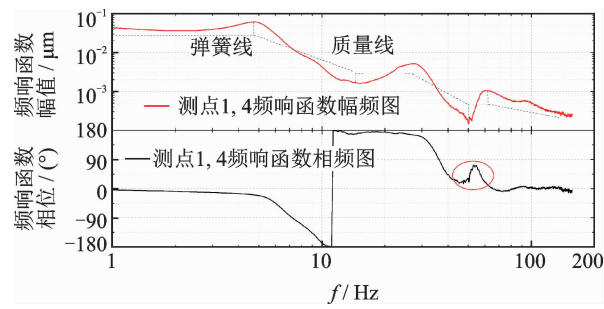


图 18 试件 5 测点 4 的幅频、相频曲线

Fig. 18 The amplitude-frequency and phase-frequency curves of measuring point 5 in the fourth simulated sample

测点 1 动位移作为参考信号,故各试件测点 1 相频曲线表现为一条直线,这是因为信号自身进行频响计算无相位变化。理论计算如图 10 所示,以力信号为参考信号,故表现有相位变化。试件 2,3,4,5 的测点 2 的频响函数与无成层试件 1 是具有一致性的。将各试件测点的频响曲线与图 10(12 理论频响图对比,可知较为相符,验证实测频响函数正确性。对比各试件的测点 4 相频曲线发现,试件 3,4,5 的第 3 阶模态对应相频,出现一个相位波动,推测应是由于软弱层造成的,以下给与验证。

测点 3 与测点 4 分别位于试件成层结构的上下位置,振动从测点 3 经过成层结构后传播到测点 4。因此,做出由各试件实测信号计算的测点 3,4 的频响函数的幅值-频率与相位-频率曲线,下面仅列出试件 2 和试件 3 的频响曲线,如图 19~20 所示。

由各试件各测点的频响可知,试件 1,2 的频响函数十分接近,与此对应,试件 3,4,5 的频响函数也很一致。说明试件 1 与试件 2 动力特性接近,而试件 3,4,5 表现为相近的动力特性。对比试件 1,2 与试件 3,4,5 的测点 4 频响函数可知,有成层结构的后 3 个试件,振动经过成层结构后,前两阶模态相位并未有明显变化,但是第 3 阶幅频对应的相频出现

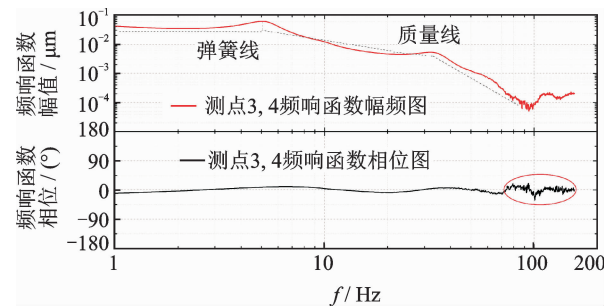


图 19 试件 2 测点 3,4 的幅频与相频曲线

Fig. 19 The amplitude-frequency and phase-frequency curves of measuring point 3,4 in the second simulated sample

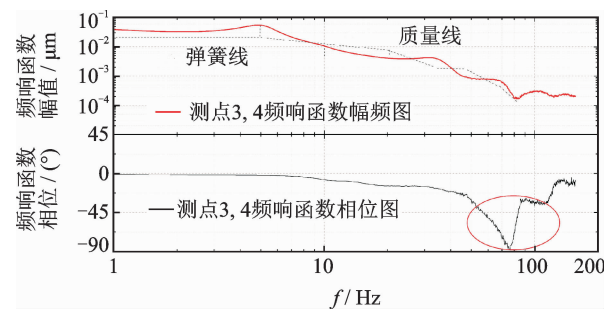


图 20 试件 3 测点 3,4 的幅频与相频曲线

Fig. 20 The amplitude-frequency and phase-frequency curves of measuring point 3,4 in the third simulated sample

相位变化,并且对应以上分析中测点 4 相频曲线波动,而理论曲线并无该变化。证明该相位变化确实是由成层造成的,即成层结构使得至少三阶以上模态(高频模态)出现了相位的变化。

3.3 数值模拟与试验结果对比

利用数值模拟的方式模拟两种有限元试件:a. 无损伤数值模型试件,尺寸与物模相同,弹性模量为 110MPa,试件底端全约束,材料阻尼比为 0.15(硬橡胶材料),采用 QR 阻尼法,编制 Ansys 参数化设计语言(Ansys parametric design language, 简称 APDL)提取各阶模态阻尼比,振型归一化计算便于对比;b. 进行数值模拟碾压成层结构,成层位置与物模试件相同。

已知频响函数后,可根据频响函数与实模态参数的关系,作出其矢端轨迹 Nyquist 图(频响实部-虚部),计算频响函数的留数 R 后,采用 Levy 法利用频响函数的有理分式模型进行多模态参数识别。理论证明,该方法精度较高。通过对比两种数模计算的模态参数,分析 5 种试件的动力特性。各试件的三阶模态识别如表 2 所示,其中: f 为频率; ξ 为阻尼比。振型图如图 21 所示(振型归一化方式)。

表 2 有限元模型与试件识别的频率(Hz)和阻尼比(%)对比

Tab. 2 Comparison of frequency(Hz) and damping ratio(%) of finite element model and simulated sample

阶数	无损伤数值模型		试件 1		试件 2		成层损伤数值模型		试件 3		试件 4		试件 5	
	f/Hz	ξ/%	f/Hz	ξ/%	f/Hz	ξ/%	f/Hz	ξ/%	f/Hz	ξ/%	f/Hz	ξ/%	f/Hz	ξ/%
1	6.449	7.032	6.473	6.797	6.408	6.336	6.060	2.031	6.078	2.773	5.883	3.443	5.688	2.773
2	38.967	17.428	38.375	18.734	38.194	14.594	36.838	12.418	36.813	15.813	35.008	13.008	33.125	15.125
3	95.289	45.484	95.539	46.974	94.773	48.984	92.361	33.593	91.930	38.352	88.336	35.091	83.797	35.117

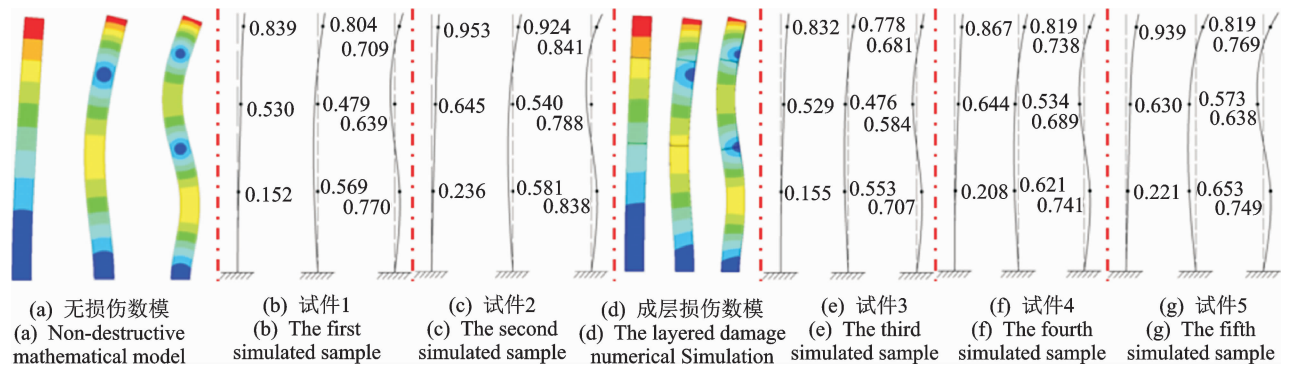


图 21 无损伤数模、试件 1、试件 2、成层损伤数模、试件 3、试件 4 及试件 5 的前三阶振型图

Fig. 21 Third modal vibration of the no damage numerical Simulation, the first and the second simulated sample, the layered damage numerical simulation the third, the fourth and the fifth simulated sample

可见,试件 1(无损伤模型)与试件 2(纯氯丁胶黏结模型)的幅频曲线、相频曲线接近,频响函数一致,振动在两试件中传播特性相同,说明使用氯丁胶黏结的橡胶结构其动力特性与完整一体橡胶制作的 结构相同。因此,在橡胶水弹模型制作中,受氯丁胶黏结处理的影响较小,模型能够准确反映原型的动力特性。两试件识别前三阶频率与无损伤数值模拟的计算频率一致,验证了试件模态识别的正确性。

成层损伤数值模拟模型,其计算三阶频率与试件 3 识别模态频率相同,且小于无损伤试件频率。碾压混凝土竖向弹模降低会使坝体自振频率减小,但对振型顺序和形状影响不大,计算结果与实际规律吻合。振型图与无损伤模型振型图区别不大。

试件 4 使用硅酮密封胶模拟成层结构,其基频接近成层损伤试件 3,而二三阶模态频率则偏小,考虑到玻璃胶固化后弹模与橡胶板接近,认为基频接近是合理的,其幅频与试件 3 幅频曲线也接近,但在相频图上相位与试件 3 不同,可能是因为材料的不同造成的。试件 5 的幅频与相频曲线都与试件 3 接近,但是三阶模态比试件 3 更小,原因是泡棉双面胶的弹模更小,使其模态频率进一步下降,但其幅频与相频曲线都与试件 3 相一致。

成层结构是碾压混凝土-碾压软弱层(影响带)-碾压混凝土的 3 层式结构。在总结碾压层间隔高度、碾压层厚度及碾压层弹性模量等性质后,提出带碾压成层结构水弹模型模需要满足的 6 项条件分别为:成层结构是具有一定厚度的层间影响带;材料弹模按照比尺缩小,同时保持密度不变;竖向和横向弹性常数不一致;间隔一定高度会有碾压层存在;碾压层面为薄弱环节,破坏常沿软弱面发生;进行带成层结构坝体动力特性的研究。

2) 通过试验及数值模拟对比,试件 1(无损伤)与试件 2(纯氯丁胶黏结)的幅频相频曲线以及模态参数基本一致,说明氯丁胶黏结试件并不影响动力特性的模拟。试件 3, 4, 5 随着成层弹模的降低,相频曲线上出现明显的波动变化,频率随之降低、振型增大,符合规律。成层损伤数值模拟模型计算得到的三阶频率与试件 3 识别模态频率相同,且小于无损伤试件频率。试件 4 的基频接近成层损伤试件 3,而二三阶模态频率则偏小,试件 5 的三阶模态更小于试件 3。因此,利用试件 3,下层铕厚橡胶+硫化型橡胶黏合剂+低弹模薄层橡胶+硫化型橡胶黏合剂+上层铕厚橡胶进行碾压成层结构模拟是合理的。

参 考 文 献

4 结 论

1) 根据碾压混凝土成层结构的特性,认为碾压

[1] Gu Chongshi, Su Huaizhi, Zhou Hong. Study on coupling model of (seepage-field) and stress-field for

- rolled control concrete dam[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2005, 26(3): 355-363.
- [2] Gu Chongshi, Song Jingxiang, Fang Haiting. Analysis model on gradual change principle of effect zones of layer face for RCCD[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(11): 1335-1340.
- [3] 崔广涛, 林继镛, 彭新民, 等. 二滩拱坝泄洪振动水弹性模型研究[J]. 天津大学学报, 1991(1): 1-10.
Cui Guangtao, Lin Jinyong, Peng Xinmin, et al. Hydroelastic model experimental study on erdan arch dam vibration by discharge flow[J]. Journal of Tianjin University, 1991(1): 1-10. (in Chinese)
- [4] 练继建, 崔广涛. 水工结构水弹性模型模拟方法与应用[J]. 水利水电技术, 2001(12): 20-21.
Lian Jijian, Cui Guangtao. Simulation method and application of hydraulic elasticity model of hydraulic structures[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001(12): 20-21. (in Chinese)
- [5] 张林让, 吴杰芳, 曹晓丽, 等. 构皮滩拱坝坝身泄洪振动水弹性模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2009(2): 36-40.
Zhang Linrang, Wu Jiefang, Cao Xiaoli, et al. Hydroelastic model test research on releasing flood vibration of arch dam for goupitan project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009(2): 36-40. (in Chinese)
- [6] 马斌, 练继建, 杨敏. 大比尺高拱坝泄洪振动水弹性模型研究[J]. 中国工程科学, 2008(11): 23-29.
Ma Bin, Lian Jijian, Yang Min. Hydroelastic model experimental study on large scale high arch dam vibration by discharge flow[J]. Engineering Sciences, 2008(11): 23-29. (in Chinese)
- [7] 彭新民, 王富强, 杨敏, 等. 拉西瓦高拱坝水弹性模型基础确定的研究[J]. 中国农村水利水电, 2005(5): 72-74.
Peng Xinmin, Wang Fuqiang, Yang Min, et al. Research on the hydro-elastic model basis of laxiwa high arch dam[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(5): 72-74. (in Chinese)
- [8] 张仲卿. 沙牌碾压混凝土拱坝仿真结构模型试验研究[J]. 水电站设计, 2003(4): 36-40.
Zhang Zhongqing. Study of simulation structural model testing for shapai RCC arch dam[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2003(4): 36-40. (in Chinese)
- [9] 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]. 水利学报, 2015, 46(10): 1222-1232.
Zhang Yu, Feng Xin, Hou Shuang, et al. Experimental study of the impact of structural joints on seismic failure mechanism of large roller compacted concrete arch dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1222-1232. (in Chinese)
- [10] 王迎春. 碾压混凝土层面结合特性和质量标准研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [11] 武维毓. 基于碾压混凝土成层特性的弹塑性分析及数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [12] 张旭辉. 碾压层缝对碾压混凝土拱坝承载能力的影响研究[D]. 桂林: 广西大学, 2006.
- [13] 潘慧铭. (三)界面的扩散作用[J]. 黏合剂, 1988(2): 41-48.
Pan Huiming. (three) The diffusion effect of interface [J]. Adhesives, 1988(2): 41-48. (in Chinese)
- [14] 严志云, 石虹桥, 梁世强, 等. 聚合物复合材料界面黏合理论研究进展[J]. 仲恺农业技术学院报, 2007, 20(2): 62-65.
Yan Zhiyun, Shi Hongqiao, Liang Shiqiang, et al. Progress of study on the interfacial adhesion of polymer composites[J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Technology, 2007, 20(2): 62-65. (in Chinese)
- [15] 王作龄. 橡胶材料黏合的科学[J]. 世界橡胶工业, 1999(1): 24-34.
Wang Zuoling. The science of rubber material bonding [J]. World Rubbre Industry, 1999(1): 24-34. (in Chinese)
- [16] 段虎明, 秦树人, 李宁. 频率响应函数估计方法综述[J]. 振动与冲击, 2008, 27(5): 48-52.
Duan Huming, Qin Shuren, Li Ning. Measurement methods review for frequency response function [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(5): 48-52. (in Chinese)
- [17] 曹坚. 基于参数模型的频响函数估计方法[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(1): 70-73.
Cao Jian. Estimation of frequency response function using parameter model [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(1): 70-73. (in Chinese)
- [18] Dobrowiecki T P, Schoukens J, Guillaume P. Optimized excitation signals for MIMO frequency response function measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2006, 55(6): 2072-2079.



第一作者简介: 马斌,男,1979年10月生,博士、副教授。主要研究方向为泄流结构安全监测及损伤诊断,高坝泄流安全。曾发表《Optimal sensor placement for large structures using the nearest neighbour index and a hybrid swarm intelligence algorithm》(《Smart Materials and Structures》2013, Vol. 22, No. 9)等论文。
E-mail: mabin97@tju.edu.cn

通信作者简介: 赵钊,男,1990年6月生,硕士。主要研究方向为水工结构安全监测及损伤诊断。
E-mail: 1350483907@qq.com