

蓄水期面板堆石坝动力特性研究^{*}

李俊杰 马恒春
(大连理工大学土木工程系, 116024)

文 摘 本文根据现场动力试验结果, 分析并总结了面板堆石坝蓄水期堆石体的动力性质及坝体的自振特性变化规律。首次在面板上测出动水压力的分布, 完善了面板堆石坝抗震性能研究。

关键词 面板堆石坝, 动水压力, 剪切波速。

1 前 言

80年代以来面板堆石坝在我国得到较为迅速的发展。但是, 目前这种坝型的建设主要依据经验, 设计理论还不成熟。尤其是已建成的面板堆石坝遭遇地震的还很少, 所以开展面板堆石坝抗震研究, 掌握面板堆石坝的自振特性和动力反应特性是十分重要的。

关于面板堆石坝的抗震数值计算方法研究, 国内外已广泛开展起来, 提出了一些计算模型和方法, 但普遍有几个问题未得到很好解决: ①竣工期和蓄水期坝体自振频率的变化。一种观点认为面板堆石坝在蓄水后由于上游库水产生了附加质量而使坝体的自振频率有所降低^[1]; 另一种观点认为尽管增加了坝体上游面的附加质量, 但由于库水压力的作用, 坝内堆石体的有效应力也会增大, 从而使坝体刚度增加, 所以面板堆石坝蓄水前后的自振频率应基本不变^[2]。②蓄水期坝体动剪切模量的变化量和分布规律。在数值计算中考虑蓄水后堆石体动剪切模量的变化一般是将静水压力作为外荷载增大了上游侧堆石体的模量, 或通过静力计算得到堆石体蓄水后的模量分布。③地震情况下面板所承受的动水压力。土石坝一般不考虑动水压力的作用, 而混凝土坝的动水压力则按着韦斯特伽德 (Westergard) 给出的公式进行计算。面板堆石坝可称为介于土石坝和混凝土坝之间的坝型, 它具有两类坝型的一些特点: 首先它上游面不透水, 并且水压力和动水压力直接作用在面板上, 通过面板再传递到坝体中, 这与混凝土坝十分相似; 其次坝体又不能认为是刚性的, 在地震作用下, 堆石体会产生一定的永久变形, 这一点又是土石坝所具有的特性。所以对于面板堆石坝动水压力既不能忽略, 同时又不宜于用韦斯特伽德公式简单模拟。而解决上述问题的有效途径是根据地震实测记录或进行现场动力试验。

本文以关门山面板堆石坝为研究对象, 对该坝进行现场弹性试验, 通过对测试结果的分析 and 计算, 给出面板堆石坝蓄水前后的动力性质变化的某些规律。

2 试验概况

2.1 工程简介

关门山面板堆石坝坝高 58.5m, 坝顶长 183.6m, 正常高水位 372.1m。大坝的平面和断

^{*} 国家自然科学基金 (青年) 基金资助项目。

面图见图 1, 图 2 所示。1988 年 3 月施工期(面板未施工, 坝高约 53.5m)时进行了现场弹性波试验^[3], 该坝年末竣工; 1990 年 9 月, 库水位达到 363.5m 时, 又重复了前回试验内容^[4]。本次试验是 1994 年 10 月进行的, 库水位为 371.6m, 接近于正常高水位。

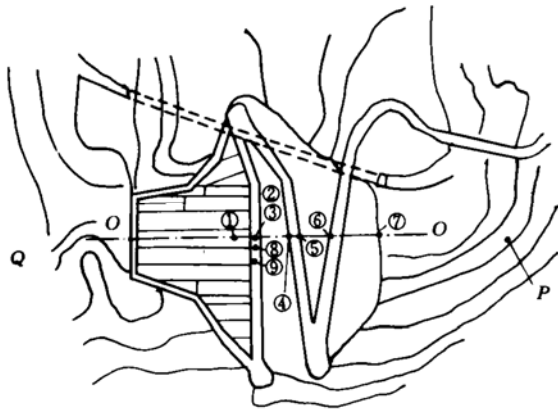


图 1 关门山面板堆石坝断面图

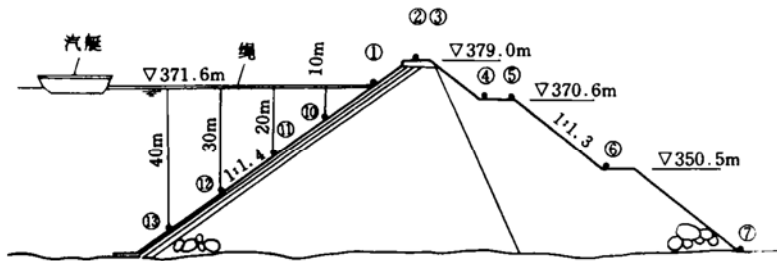


图 2 关门山面板堆石坝断面图

2.2 测点布置

图 1 中 O-O 点划线是现场试验的实测断面, ①~⑨是试验时加速度传感器测点, ③号传感器垂直坝面放置, 其余传感器根据试验方法不同水平固定在坝体上。图 2 中⑩~⑬是试验时动水压力传感器测点。动水压力传感器是根据关门山坝的特点研制的, 它的测量范围 0m~5m 水头, 精度 $\pm 0.2\%$, 测量水深 5m~60m。由于试验时库水深度达 45m 以上, 根本无法潜水将动水压力传感器固定在面板上, 因此在试验时采用如下方法: 在面板水面线处固定一点顺河向拉紧一绳(此绳浸水后伸长量很小), 在绳上一定距离系一浮子, 从浮子处垂下动水压力传感器, 保证动水压力传感器落在面板上, 参见图 2。图 1 中 P, Q 分别是上下游爆破点。下游爆破点距下游坝脚约 70m 的岩基上, 上游爆破点在坝体对面山脚岩体上与坝顶水平距离约 200m。炸药用量每次约 1000kg。

2.3 测试系统

将所有测点传感器通过电荷放大器连接到计算机上, 由计算机同时记录试验过程所有传感器的电信号。试验采用瞬态振动法(共进行 6 次), 常时微动观测(共进行 5 次)和爆破地震动观测(共进行 3 次)三种方法。计算机采样后, 经过滤波和模数转换, 进行数据处

理，直接在计算机屏幕上输出各测点传感器的波形和频谱分析图形。整个测试系统见图 3。

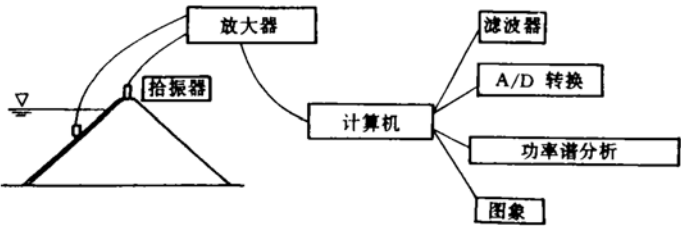


图 3 测试系统略图

3 坝体蓄水条件下的自振特性

为了掌握坝体蓄水条件下的自振特性，进行了常时微动观测和爆破地震动观测。将常时微动观测记录的波形进行功率谱分析（见图 4）。从图 4 看各测点的功率谱特性略有不同，但大体上都在 3.9Hz 和 7.1Hz 左右出现峰值。

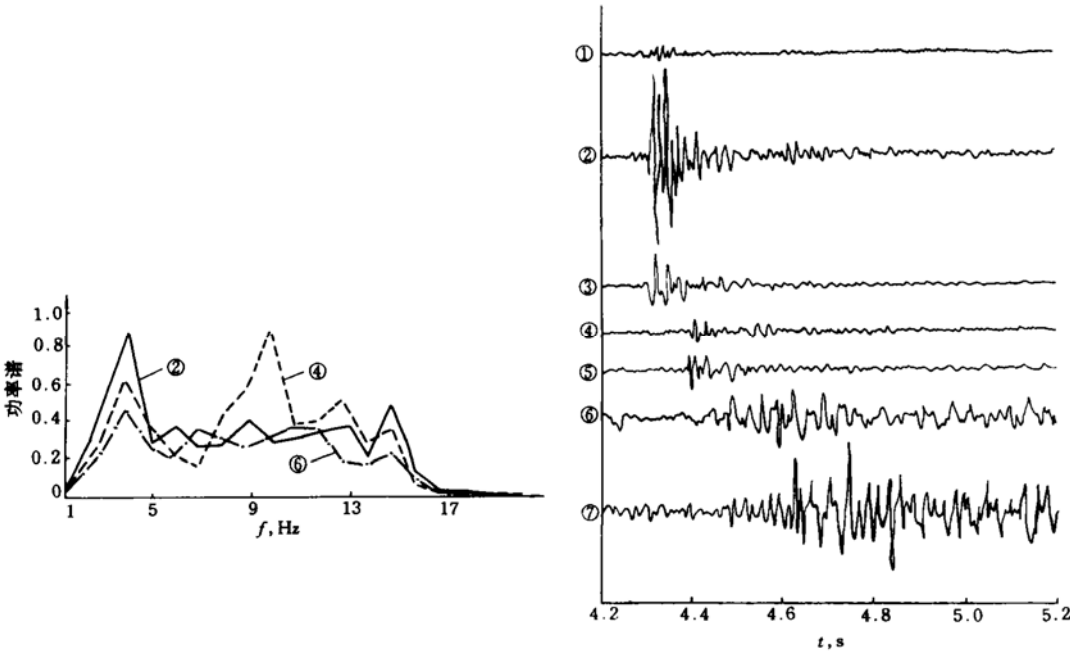


图 4 常时微动观测各测点的功率谱

图 5 上游侧 Q 点爆破地震动各测点波形

图 5 为上游爆破试验实测记录，几次爆破观测得到的波形基本相似。图 6 是图 5 波形的功率谱，从图 6 可以看出，坝体各测点的功率谱与常时微动观测功率谱非常相近，也分别在 4.9Hz 和 7.9Hz 左右出现最大峰值。由于爆破地震动历时很短，因而各测点反应的高频分量较多，相对谱分析得到的坝体自振频率会偏高。

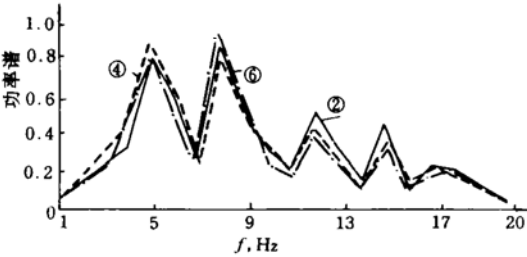


图 6 爆破地震动各测点的功率谱

根据功率谱计算结果,表明两种试验方法所得结果比较接近。正常高水位情况下坝体的前两阶自振频率为 4.2Hz 和 7.4Hz。与前两回 (1988 年和 1990 年)^[3,4]试验结果进行比较 (见表 1),可以得出如下结论:

- (1) 面板堆石坝的自振频率是随着时间的推移而增加的;
- (2) 蓄水后堆石体刚度的增加超过动水压力附加质量的增加;
- (3) 在进行地震反应分析时空库和满库情况下的自振频率选取应分别用竣工期和蓄水期的值;
- (4) 不同频谱特性的地震波对面板堆石坝的作用可诱发坝体不同的自振频率。

表 1 关门山面板堆石坝自振频率 (Hz) 比较

阶数	常时微动观测			爆破地震动观测			有限元数值计算 ^[5]		
	蓄水前	水位 363.5m	水位 371.6m	蓄水前	水位 363.5m	水位 371.6m	蓄水前	水位 363.5m	水位 371.6m
1	2.8~3.12	3.36~3.68	3.91	3.0	3.5~3.65	4.88	2.98	3.60	3.41
2	—	5.44	7.12	—	5.48	7.91	4.92	5.83	4.34
3	—	—	—	—	—	—	5.31	6.31	5.39

4 堆石体动剪切模量分布

为掌握堆石体动剪切模量分布规律,试验中采用瞬态振动法和爆破地震动观测两种方法。在坝顶采用瞬态振动法 (即用一 7kg 的木锤在②测点旁敲击坝顶) 产生震源,利用表面剪切波来推求坝内堆石体 S 波波速。从瞬态振动法试验记录结果看,各次试验测点的波形再现性非常好。图 7 给出一组试验测点的波形。图 7 中⑧,⑨测点在测到第一次冲击波后,又记录到 2.2s 以后的反射波;①,②,④测点的反射波不明显。对⑧,⑨测点,由于在坝顶上铺设的是混凝土路面,所以由 2.1s 左右测到的波换算出来的 S 波波速只是混凝土的传播速度,只有通过反射波来求堆石体的平均 S 波波速,根据计算堆石体的平均 S 波波速约为 640m/s。由①,②测点求出上游侧靠近坝表面的 S 波波速约为 290m/s,②,④测点下游侧靠近坝表面的 S 波波速约为 250m/s。由于 P 波的传播速度快,幅值小,各测点的 P 波不明显。

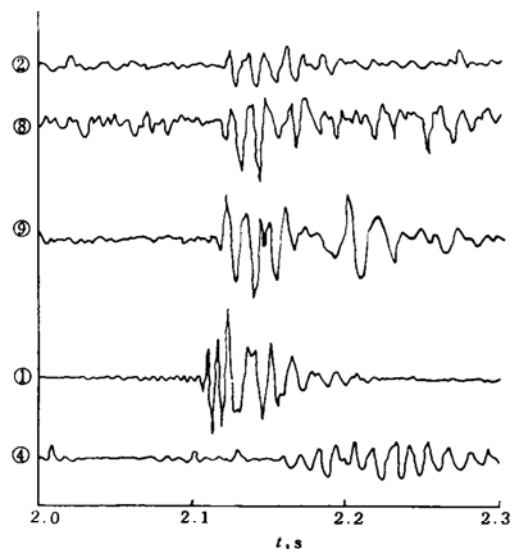


图7 瞬态振动法测点波形

由前两回试验结果, 已知基岩的 S 波波速为 1980m/s , 则可求出 S 波从爆破点传播到上下游坝脚所需要的时间, 根据爆破地震动的观测结果 (参见图 5), 可以得到爆破产生的冲击波到达各测点的时间, 进而换算出由坝脚到各测点传播的时间差, 按直线传播路线计算求出在堆石体内传播的各不同区域 S 波波速。以图 5 为例, 爆破地震动产生的冲击波传播到各测点的时间都不相同, ①~⑦测点 S 波初至时间分别为 4.28s , 4.33s , 4.33s , 4.37s , 4.37s , 4.45s , 4.49s 。经反复计算得出由上游坝脚传播到各测点的平均 S 波波速为 290m/s , 294m/s , 294m/s , 423m/s , 444m/s , 575m/s , 590m/s 。与上游爆破地震动不同, 在下游进行爆破地震动试验, 各测点到 S 波的初至时间基本相同, 说明震源不同剪切波的传播途径也不相同。综合瞬态振动法和爆破地震动观测各次试验结果, 最后给出坝体剪切模量分区, 见图 8。堆石体层厚和 S 波及剪切模量值如表 2 所示。

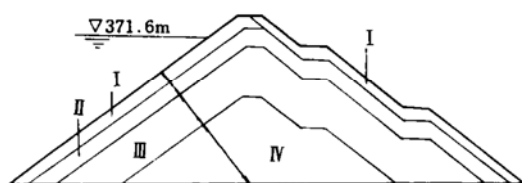


图8 堆石体剪切模量分区

通过试验和计算分析可以认为:

(1) 面板堆石坝从竣工到蓄水期, 坝体的动力特性是一个变化的过程, 这一过程可能不仅是以往所说达到坝体沉降和变形基本平稳的一至两年时间, 而需要更长一段时间;

- (2) 从测试结果及分析看, 由于面板蓄水与下游侧堆石相比相对增加上游侧堆石的密实度, 而使上游侧的剪切模量有所提高;
- (3) 在坝址区, 地震震源发生在库区和在坝体下游, 地震动对大坝的作用是不相同的。

表 2 坝体内部 S 波波速及剪切模量比较

层号	层 厚 (m)			S 波速度 (m/s)			剪切模量 (MPa)		
	蓄水前	水位 363.5m	水位 371.6m	蓄水前	水位 363.5m	水位 371.6m	蓄水前	水位 363.5m	水位 371.6m
I	4.3 (上游)	4.0	4.5 (上游)	257	248	291	141	132	182
	3.6 (下游)		3.5 (下游)	242		250	125		134
II	6.0	6.0	6.0	383	390	448	309	325	431
III	13.0	12.0	14.0	485	535	612	504	614	805
IV	25.5	26.0	23.5	609	695	753	794	1034	1219

5 面板动水压力的分布规律

面板动水压力分布是进行地震反应不可忽略的重要因素。以往研究表明坝体蓄水条件下面板的动应力要比空库情况下面板的动应力增加 40% 左右^[6]。本次试验所得出的成果可以

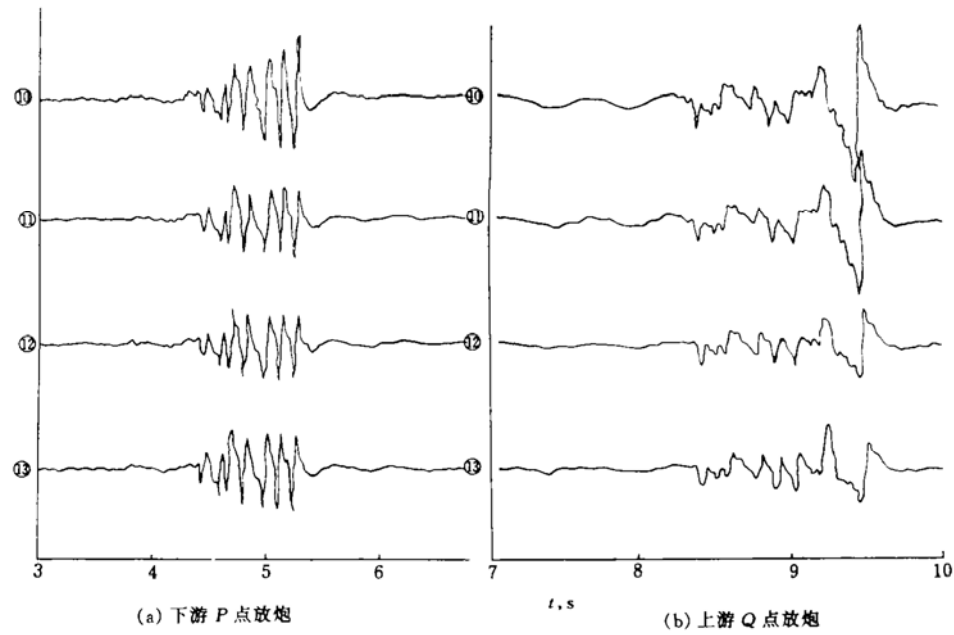


图9 爆破地震动产生的动水压力波形

为面板动水压力的分布规律提供依据。图 9 是爆破试验中测得的动水压力传感器波形。由波

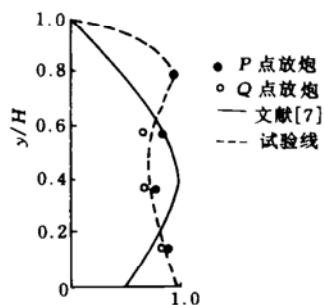


图 10 面板堆石坝动水压力归一化分布规律

形图可见, 尽管爆破过程产生的冲击波过程很短, 但动水压力传感器仍作出反应。由于波速较大, 各测点的峰值和波形基本没有滞后现象, 并且波形相似。

将一次爆破过程动水压力波形的最大最小峰值绝对值相加再进行归一, 并与面板堆石坝按混凝土坝求得动水压力分布规律^[7]比较, 给出图 10。这一结果与刚性坝体动水压力分布规律有较大差别, 动水压力最大部位不是以往认为的中下部, 而是靠近面板的上部。从而说明蓄水期面板堆石坝在地震情况下最危险的部位是面板的上部。当然上述分布规律是坝体在较小振动情况下得到的, 由于面板堆石坝属于弹塑性体, 当遇到足以使坝体产生永久变形的地震时, 它的分布规律亦会有所变化。

6 结 语

对面板堆石坝的动力特性从施工完建期到蓄水期系统的现场弹性波试验研究, 在我国还属首次。本文结合关门山面板堆石坝满库情况下的动力试验, 得到了一些有价值的结论:

(1) 面板堆石坝在蓄水后随着时间的推移, 坝体的刚度在缓慢增加, 因而坝体的自振频率是一个逐步增大的过程。对关门山面板堆石坝而言, 蓄水 2 年后, 其自振频率增加 20%, 蓄水 6 年后, 其自振频率比蓄水前增加 35% 左右;

(2) 采用瞬态振动法和爆破地震方法来推求坝体内部堆石的剪切波速是可行的。关门山面板堆石坝堆石体剪切波分区结果进一步说明蓄水后上下游侧对称部位堆石体剪切波存在差异;

(3) 由于所测得的面板动水压力分布规律与常规的大坝动水压力分布规律有较大不同, 所以在进行蓄水情况下的面板堆石坝地震反应分析时, 应对动水压力的施加形式作以论证。

试验过程中得到范垂义高级工程师, 邵龙潭付教授, 张永利工程师的帮助, 在此谨表感谢。

参 考 文 献

- 1 顾淦臣, 张振国. 钢筋混凝土面板堆石坝三维非线性有限元动力分析. 水力发电学报, 1988, (1), 26

~48.

- 2 孔宪京, 韩国城, 李俊杰, 林 皋. 防渗面板对堆石坝体自振特性的影响. 大连理工大学学报, 1989, 29 (5), 583~588.
- 3 韩国城, 田村重四郎等. 关门山面板堆石坝现场弹性波试验研究. 大连理工大学学报, 1990, 30 (5), 559~568.
- 4 韩国城, 田村重四郎等. 中国关门山ダムの筑堤. 湛水に伴う动特性と堤体物性値变化について, 大ダム, 1992, 139, 88~95.
- 5 李俊杰, 韩国城, 孔宪京. 关门山面板堆石坝三维地震反应分析和研究. 水利学报, 1994, (2), 76~84.
- 6 顾淦臣. 土石坝地震工程. 河海大学出版社, 1989, 179~183.
- 7 居荣初, 曾心传. 弹性结构与液体的藕联振动理论. 北京: 地震出版社, 1983, 198~211.

Research on the Dynamic Property of CFRD in the Period of Water Storage

Li Jun - jie Ma Heng - chun

(Dalian University of Technology)

Abstract This paper analyses and summarizes the dynamic property and the change of natural vibration characteristic of concrete faced rockfill dams (CFRD) in the period of water storage on the basis of the result of dynamic site test. For the first time, the distribution of hydrodynamic pressure on the face plate is measured. The research of the aseismic property of CFRD is being perfected.

Key words CFRD, hydrodynamic pressure, shearing wave speed.