淤砂对库水地震动水压力作用分析

杜修力^① 王进廷^① T. K. Hung^②

(^①中国水利水电科学研究院, 北京 100044; ^②University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA15261, USA)

摘要 通过理论模型分析和室内振动台试验验证, 揭示淤积砂层不仅有吸收库水地震反应能量的吸能作用, 而且存在惯性放大效应, 其相应频率随淤积砂层厚度变化。

关键词 库底淤砂 库水动水压力

Westergaard^[1]研究了在水平动荷载作用下, 刚性直立坝面的动水压力分布. Kármán^[2], Chopra^[3], Chwang 和 Housner^[4], Chakrabati 和 Chopra^[5, 6]等人也先后研究了上游坝面动水压力的反应. 上述研究表明: 当外界激振频率接近库水的自振频率时, 动水压力在数值上会有很大增加, 即“共振现象”. 日本学者畑野正^[7]对日本的塚原重力坝进行了原型激振试验, 但并未观测到共振现象. 畑野正认为这是由于库底边界的可压缩性, 吸收了部分入射波, 使得动水压力没有出现共振峰值. 为了证明这种看法, 畑野正^[8]进行了室内模拟试验, 观测到了淤砂层的吸能作用. Rosenbluth 考虑了地基的柔性对动水压力波的部分吸能, 建立了库底吸能边界, 获得了较小的坝面动水压力. Chopra 和 Gupta^[9]研究了重力坝-地基-可压缩库水的动力相互作用. Hall 和 Chopra^[10]将地基对库水的作用模拟为阻尼吸能边界条件, 并引入了压力波反射系数的概念. Fenves 和 Chopra^[11]在研究中考虑了库底存在淤砂层的吸能边界情况. Cheng^[12]和 Medina^[13]等人从理论上研究了淤砂层和地基联合作用的阻尼吸能边界作用. 阎承大^[1]还利用室内试验研究了压力波反射系数的取值. 这些研究工作使得淤砂层对库水动水压力反应起阻尼吸能作用的观点被学术界和工程界广为接受. 最近, Chen 和 Hung^[14]将淤积砂层模拟为多孔的液固饱和两相介质, 研究了刚性坝和刚性地基条件下淤砂层对库水反应的作用, 但其结果仅限于常加速度作用下的初始反应. 这一研究工作表明淤砂层吸能效应的这一被广为接受的观点可能是不全面的. Dominguez, Gallego 和 Japon^[15]也将淤砂层模拟为液固两相多孔介质, 并考虑有阻尼地基的影响, 计算了柔性重力坝的坝顶位移在简谐地震作用下的反应, 研究中考虑了饱和和非饱和淤砂介质情况, 计算结果观察到坝顶的位移在低频处的峰值随淤砂层厚度和饱和度的变化, 但没能解释这种低频峰值的原因和淤砂的作用机理. 本文模拟淤砂为液固两相多孔介质, 分析了淤砂层对可压缩库水地震动水压力和作用于坝面的动压力的影响.

1 试验研究

1.1 试验模型和测试系统

试验水箱长 50 cm, 宽 35 cm, 高 150 cm, 底板和四周壁墙为厚 15 mm 的优质合金钢板. 动水压力传感器 A1 ~ A5 分别离水表面深 15, 40, 80, 110 和 120 cm, 箱中水平面离底板深 130 cm. 三分向加速度传感器有 B1 和 B2 两个, B1 固定于振动台面, B2 固定于箱顶.

水箱中的淤砂层用水沉法制作. 每次在箱口高度处把砂均匀筛落到箱中, 这样可以得到较均匀又松软的沉积砂层. 每次振动试验前, 箱内砂土在自重条件下已固结 24 h. 试验中采

1) 阎成大. 水下淤砂对流体压力波的反射特性与混凝土坝动水压力问题的研究. 清华大学博士学位论文, 1989

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2000-45-18-2012>

用了平均粒径约 2 mm 左右的细砂.

试验用的振动台为电磁式双向振动台, 最大载重 500 kg, 频响范围为 0 ~ 1 200 Hz, 最大振幅为 30 mm, 重载时最大加速度 1.0 g, 台面尺寸 1 m × 1 m.

1.2 试验过程

(i) 水箱动力反应测试. 对空水箱和盛满水时的水箱测试了箱顶加速度反应. 测试结果表明, 垂直输入简谐振动时, 两种情况的箱顶加速度在 35 Hz 以下基本与台面加速度一致.

(ii) 动水压力反应测试. 对有、无淤砂情况, 量测了垂直台面简谐振动时箱体內的动水压力.

1.3 动水压力试验成果分析

图 1(a)为台面加速度幅值为 0.3 g, 输入振动频率为 10 Hz, 淤砂埋深分别为 0, 10 和 30 cm 时的动水压力沿水深的分布图. 由图可见, 动水压力沿水深的分布近似呈倒三角形, 这与忽略库水可压缩性的理论计算结果是一致的.

由前面的试验可知, 40 Hz 时水箱动力特性和横向效应的影响显著, 箱内水体的动水压力反应不能与水箱刚性假定时的一致. 此时, 若增加的淤砂层改变了水箱的动力特性, 则难以识别淤砂对水体动力反应的真实作用机理. 实际上, 水箱底部放置 10 cm 厚淤砂时对水箱的动力特性几乎不产生影响, 实测也证实了这一点. 这表明当放置 10 cm 厚淤砂时, 观测箱内水体的动水压力反应与无淤砂时水体的动水压力反应变化是可以说明淤砂的作用机理的. 图 1(b)所示为垂直输入加速度幅值 0.3 g, 频率 40 Hz 时箱内水体动水压力分布, 由图可见, 淤砂层的作用明显加大了箱内水体的动水压力反应.

图 1 沿水箱深度分布的动水压力 P
(a) 10 Hz, (b) 40 Hz

2 理论分析

2.1 淤砂介质模型

本文采用 Biot^[16]理论来模拟淤砂介质, 液固两相饱和和多孔介质的运动方程按 Biot 理论可为

$$N \nabla^2 \mathbf{u} + \nabla [(A + N)e + Qe] = \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\mathbf{r}_{11} \mathbf{u} + \mathbf{r}_{12} \mathbf{U}) + b \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{u} - \mathbf{U}), \quad (1)$$

$$\nabla [Qe + Re] = \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\mathbf{r}_{12} \mathbf{u} + \mathbf{r}_{22} \mathbf{U}) - b \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{u} - \mathbf{U}), \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{u}$ 为土体位移向量; $\boldsymbol{U}$ 为平均孔隙流体位移向量; $\boldsymbol{e}=\nabla\cdot\boldsymbol{u}$; $\boldsymbol{e}=\nabla\cdot\boldsymbol{U}$; N 和 A 与固相骨架 Láme 常数 $\boldsymbol{m}$ 和 $\boldsymbol{l}$ 有关; R 为保持多孔介质的总体积不变时, 压入一定体积的流体时所需要的力; Q 表示液相体积变化与固相体积变化之间的耦合关系; $\boldsymbol{r}_{11}=(1-n)\boldsymbol{r}_s+\boldsymbol{r}_a$; $\boldsymbol{r}_{12}=-\boldsymbol{r}_a$; $\boldsymbol{r}_{22}=n\boldsymbol{r}_f+\boldsymbol{r}_a$; 耗散常数 $b=\boldsymbol{m}^2/k$; 其中 $\boldsymbol{r}_s, \boldsymbol{r}_f$ 和 $\boldsymbol{r}_a$ 分别为固相密度、液相密度和附加视质量(很难测定, 一般取 $\boldsymbol{r}_a=0$), n 为孔隙率系数, k 为 Darcy 渗透系数, ν 为流体黏性系数 (当取 $n=0$ 时, 方程变为不考虑能量耗散的弹性波动力方程); N, A, R 和 Q 由实验测定, Biot 和 Willis^[17] 给出了测定方法. 当假定骨架颗粒不可压缩时, $R=n\boldsymbol{b}'_L, Q=(1-n)\boldsymbol{b}'_L, N=\boldsymbol{m}$, 其中, $\boldsymbol{b}'_L$ 为孔隙水体积模量.

2.2 刚性水箱计算模型

2.2.1 材料参数 取振动台模型水箱工况作为计算模型, 假定箱壁是刚性的. 计算中取库水的密度 $\boldsymbol{r}_L=1\,000\text{ kg/m}^3$, 库水体积模量 $\boldsymbol{b}_L=2.0\times10^9\text{ Pa}$, 库水中取 Rayleigh 阻尼 $C_L=0.0005K_L, K_L$ 为库水的刚度阵. 淤砂层模拟为液固两相介质并假定骨架颗粒不可压缩, 其中孔隙水压缩模量 $\boldsymbol{b}'_L=2.60\times10^8\text{ Pa}$ (对应于饱和度 99.5%), 其他计算参数见表 1.

表 1 淤砂层材料参数

组别	固相密度 $\boldsymbol{r}_s$	液相密度 $\boldsymbol{r}_L$	孔隙率 n	耗散常数 b	A	N	R	Q
I	2 100	1 000	0.5	2.5×10^4	1.361×10^8	0.914×10^7	1.30×10^8	1.30×10^2
II			0.6	3.6×10^4	0.746×10^8	0.782×10^7	1.56×10^8	1.04×10^2

2.2.2 计算结果及其分析 图 2 为淤砂层取表 1 中第 I 和 II 组参数, 振动频率为 40 Hz, 淤砂层为 0, 10 和 30 cm 时, 动水压力沿水箱深度的分布图. 从图中可见, 无淤砂时, 沿着水箱的深度, 动水压力分布呈倒三角形分布, 这与试验结果和假设水为不可压缩时动水压力的分布相一致. 40 Hz 时, 淤砂层的存在, 明显改变了动水压力反应.

图 2 淤砂层厚度对沿水箱深度分布的动水压力 P 影响图
(a) 表 1 中第 I 组数据, (b) 表 1 中第 II 组数据

2.3 刚性直立坝、刚性地基计算模型

2.3.1 计算模型及参数 在该计算模型中假定坝体和地基为刚性, 坝高 170 m, 库水和淤砂深 150 m. 介质材料参数与刚性水箱计算模型中材料参数相同. 计算中考虑了无穷远域能量辐射.

2.3.2 淤砂层厚度对坝面动压力的影响 图 3 表示淤砂层分别取表 1 中第 I 和 II 组参数, 淤砂层厚度 d_s 的变化对作用在刚性坝上游坝面动压力值的影响. 图中进行了归一化, 竖直轴表示受到简谐垂直向地面加速度 $e^{i\omega t}$ 作用时上游坝面的动压力积分值的模 $|F(\omega)|$ 和作用于

图 3 淤砂层厚度对坝面动压力影响图

(a) 表 1 中第 I 组数据, (b) 表 1 中第 II 组数据

坝面静水压力积分值的比值, 水平轴为归一化频率 $a_0 = \omega/\omega_1$, 其中 $\omega_1 = C_w/4H$, C_w 为库水波速, H 为库水和淤砂深度之和. 从图中可以看出: 淤砂层的作用使得作用于坝面的动压力反应共振频率出现了向低频飘移的现象. 随着淤砂层的增厚, 这一共振反应频率逐渐减小. 因此不能简单地说明淤砂层能够起到吸能作用, 降低坝面的动压力. 针对本文计算参数, 由于淤砂层的存在引起的低频处的共振峰值, 使得在低频范围内, 某些频率处, 坝面动压力增加.

3 结论

本文的试验和理论分析研究表明: 淤砂层的存在削减了无淤砂时相应的库水共振峰值反应幅值. 但同时由于淤砂层的存在也出现了新的动水压力的共振放大效应, 其共振频率随淤砂层增厚而变化. 有关淤砂层参数变化、坝体柔性、地基柔性对坝面动压力的影响将另文讨论.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 59409001, 5973180)、“九五”国家重点科技攻关(批准号: 96-221-03-02-03)和 NSF Grand CMS-9319341 资助项目.

参 考 文 献

- Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquakes. Trans, ASCE, 1933, 98: 418 ~ 433
- Von Kármán T. Discussion of water pressures on dams during earthquakes. Trans, ASCE, 1933, 98: 434 ~ 436
- Chopra A K. Hydrodynamic pressures on dams during earthquake. J Eng Mech, ASCE, 1967, 93: 205 ~ 233
- Chwang A T, Housner G W. Hydrodynamic pressures on sloping dams during earthquake, part 1: Momentum method. J Fluid Mech, 1978, 87: 335 ~ 341
- Chakrabarti P, Chopra A K. Hydrodynamic pressures and response of gravity dams to vertical earthquake component. Earthq Eng and Struct Dyn, 1973, 1: 325 ~ 335
- Chakrabarti P, Chopra A K. Earthquake analysis of gravity dams including hydrodynamic interaction. Earthq Eng and Struct Dyn, 1973, 2: 143 ~ 160
- 畑野正. 塚原重力ダムの振動実験とその考察. 土木学会论文集, 1958, 59: 8 ~ 16
- 畑野正. 水の弾性による震動水圧力の共振に关する吟味. 土木学会论文集, 1966, 129: 1 ~ 5
- Chopra A K, Gupta S. Hydrodynamic and foundation interaction effects in earthquake response of a concrete gravity dam. J

Struct Div, ASCE, 1981, 107: 1399 ~ 1412

- 10 Hall J F, Chopra A K. Two-dimensional dynamic analysis of concrete gravity and embankment dams including hydrodynamic effects. EESD, 1982, 10: 305 ~ 332
- 11 Fenves G, Chopra A K. Earthquake analysis of concrete gravity dams including reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction. EESD, 1984, 12: 663 ~ 680
- 12 Cheng A H D. Effects of sediment on earthquake-induced reservoir hydrodynamic response. J Eng Mech, ASCE, 1986, 111: 654 ~ 663
- 13 Medina F, Dominguez J, Tassoulas J L. Response of dams to earthquake including effects of sediment. J Struct Eng, ASCE, 1990, 116(1): 3108 ~ 3121
- 14 Chen B F, Hung T K. Hydrodynamic pressure of water and sediment on rigid dam. J Eng Mech, ASCE, 1993, 119(7): 1411 ~ 1433
- 15 Dominguez J, Gallego R, Japon B R. Effects of porous sediments on seismic response of concrete gravity dams. J Eng Mech, ASCE, 1997, 123(4): 302 ~ 311
- 16 Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. J Acoust Soc of America, 1956, 28: 168 ~ 191
- 17 Biot M A, Willis D G. The elastic coefficients of the theory of consolidation. J Appl Mech, 1957, 24: 594 ~ 601

(2000-03-17 收稿, 2000-06-10 收修改稿)