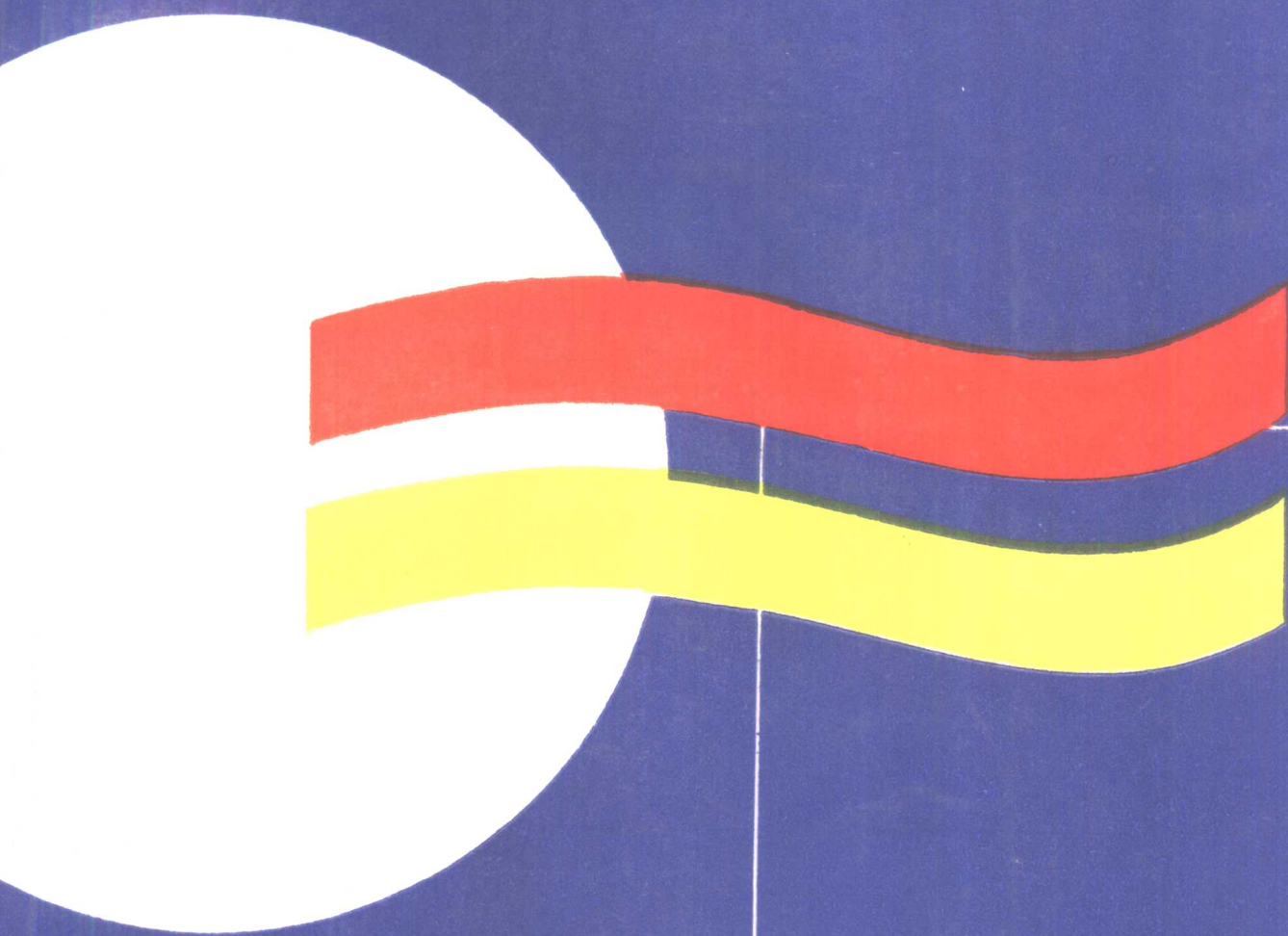


# 水工结构工程 理论与实践



科学技术文献出版社

# 水工结构工程理论与实践

—第一届水工结构青年学术论文汇编

科学技术文献出版社

## 内 容 简 介

水利是国民经济的命脉，尤其是我国有近12亿人口，开展水利建设、优先开发水电是个至关重要的问题。

近几年来在教授、专家的指导、启发下，以一批青年科技研究人员为主力，对水工结构工程的新理论、新设计、新材料进行了研究与探讨，取得了一批最新科研成果，本书精选汇编了这些新成果奉献给广大水利水电工作者。

全书共分四部分：第一部分水工结构分析与计算，论文25篇；第二部分水工材料发展与应用，论文23篇；第三部分岩土力学及地基基础，论文20篇；第四部分综合性理论及应用，论文12篇，共80篇这些论文是理论与实践的总结，既有理论分析又有工程实例，有较高的理论水平和工程应用价值。

本书可供高等院校、科研设计单位及广大水利水电工程技术人员阅读参考。

## 水工结构工程理论与实践

\*

科学技术文献出版社出版  
(北京复兴路15号 邮政编码 100038)

通县建新印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

787×1092毫米 16开本24.25印张587千字

1991年11月第1版 1991年11月第1次印刷

印数 1—1130册

科技新书目：255—114

ISBN 7-5023-1534-9/TV·2

定 价：13.90元

朝 气 蓬 勃  
勤 奋 向 上  
努 力 攻 关  
科 技 兴 水

楊振懷

學習世界先進科學技術，美  
鍵在於研究開發，創造我國  
科學技術。青年科技工作  
者，勇於創新，為我國水  
利建設服務，前途無量。

張光斗

一九九一年五月

## 顾 问 委 员 会

名誉主任 张光斗

主 任 沈宁福

委 员

丁宝瑛	丁自强	于晓中	王建平	王志新
王宏斌	王国秉	边愷元	刘光廷	刘祖德
许可达	朱伯芳	齐超人	陈式慧	沈宁福
张镜剑	周 氏	周鸿钧	林 皋	林秀山
赵国藩	赵佩钰	赵代深	徐志美	黄 谨
黄相才	熊文林	甄永严		

## 组 织 委 员 会

名誉主任 边愷元

主 任 高丹盈

副 主 任 岳耀真

委 员

丁留谦	王战营	王其善	王复明	安玉杰
刘清朝	朱寿峰	李庆斌	李志强	李广远
李占松	李 杰	李国英	陈贻研	陈胜宏
沈凤生	吴胜兴	岳耀真	南东亚	胡润亭
张煜钦	高丹盈	柴方昆	席燕林	顾洪波
解 伟				

## 前 言

在国家自然科学基金委员会、中国水利学会、中国水力发电工程学会的倡导下，由中国水利学会水工结构专业委员会、中国水力发电工程学会水工建筑专业委员会、中国水利学会青年科技工作委员会、郑州工学院等单位共同组织的《第一届全国水工结构工程学科青年学术讨论会》于1991年11月在郑州召开。与会的青年科技人员来自全国的科研、设计、施工及高等院校等单位，提交论文近200篇，论文作者既有近年来国内外培养的博士、硕士，也有基层工作的青年科技人员。

为了促进学术交流和科研成果的推广，特出版本书。书中选编了会议采用的部分论文，另一部分论文刊登在1991年第10期的《水利学报》专辑和1991年第3期的《郑州工学院学报》专辑中，本书不再重登，仅在书附录列举目录。书的内容主要包括水工结构、水工材料、岩土力学和地基基础等。所采用的论文经两名以上有关专家、学者评审，都给予较高的评价，认为具有较高的学术水平和实用价值，有的已经达到国内、国际先进水平。

本届会议的召开，得到国家自然科学基金委员会、中国水利学会、中国水力发电工程学会、中国水利学会青年科技工作委员会、河南省科学技术委员会、郑州工学院、水利水电科学研究院、河南省水利学会、天津大学、大连理工大学、河海大学、清华大学、武汉水利电力学院、水利部能源部天津勘测设计院、华北水利电力学院等单位的大力支持和赞助。科学技术文献出版社、《水利学报》编辑部、《郑州工学院学报》编辑部对出版会议论文给予了热情的支持和帮助。在此，我们谨向上述单位表示衷心的感谢。同时，也对给予我们热情指导和帮助的领导和专家表示衷心的感谢。

由于我们经验不足，水平有限，书中的缺点、错误之处在所难免，欢迎批评指正。

编委会

1991年10月

# 目 录

## 第一部分 水工结构分析与计算

灰坝有效应力地震反应及稳定性分析·····	章为民 沈珠江 ( 1 )
用固定界面法分析拱坝的动力特性·····	金 峰 张楚汉 ( 5 )
坝内廊道抗裂和配筋计算研究·····	刘 幸 ( 10 )
二滩水电站水垫塘护坦板稳定性的动力计算研究·····	张青玉 李鉴初 ( 15 )
压力隧洞衬砌和围岩相互作用的全强度模型试验研究·····	谢谟文 杨淑清 ( 19 )
用拱梁分载法计算拱坝应力时合理选择拱梁间距的探讨·····	李守义 ( 24 )
坝后式厂房重力坝坝段几种动力试验及参数识别·····	胡 晓 祁建华 ( 29 )
坝内圆孔受力分析和配筋计算·····	吴晓林 何少溪 李传才 ( 34 )
重力式挡土墙优化设计初探·····	邹亚洲 ( 39 )
拱坝三维无限域库水的边界元动力分析·····	李笃权 ( 44 )
平面钢闸门结构优化设计·····	朱召泉 ( 49 )
非对称荷载作用下钢衬——钢筋混凝土管道结构分析·····	鲁一晖 董毓新 路振刚 ( 53 )
双坝式消力池设计·····	李占松 ( 58 )
飞行场盖板沟结构计算的三维有限元方法及试验验证·····	桑玉书 余定选 ( 62 )
拱坝模糊优化设计·····	吴正易 王毓泰 ( 68 )
重力坝深层抗滑稳定可靠度分析·····	高延伟 黎保琨 ( 73 )
响洪甸蓄能电站工程试验爆破震动效应研究·····	刘超英 陆英超 曾小平 张群 ( 78 )
重力坝可靠度分析中的随机有限元法·····	李志强 方洁灵 ( 83 )
拱坝的整体安全度及其控制标准初探·····	王仁坤 计家荣 ( 88 )
工程结构抗震分析的地面运动转动输入的研究·····	李宏男 ( 93 )
拱坝开裂的三维有限元断裂分析·····	赵在望 ( 98 )
尾矿坝溃坝砂流二维数学模型研究·····	韩国其 汪德燿 ( 103 )
重力坝抗震可靠度分析·····	张社荣 李振富 郭怀志 ( 107 )
下游坝面压力管道仿真模型的结构试验研究·····	杜振坤 ( 112 )
混凝土浇筑块采用水管冷却时的温度应力分析·····	黄淑萍 ( 117 )

## 第二部分 水工材料发展与应用

水工结构可靠度计算中随机变量概型的模糊数学分析·····	解 伟 程学文 ( 122 )
部分预应力砼受弯构件正截面简化设计方法的探讨·····	王瑞敏 赵国藩 ( 127 )
混凝土断裂能 $G_F$ 的尺寸效应·····	高 泉 赵国藩 徐世烺 ( 132 )
混凝土破坏准则的探讨与建议·····	王宗敏 周鸿钧 ( 137 )
高掺量粉煤灰砼在坝工中的应用研究·····	赵 瑜 吴本陵 邢振贤 勒 彩 ( 141 )
预应力混凝土结构设计中的几个问题·····	陈文义 刘之汉 ( 146 )



钢纤维混凝土的 J—积分研究	李书进 徐礼华 (150)
配筋钢纤维混凝土矩形截面梁的抗扭刚度	李其廉 (155)
水工钢筋混凝土保护层最小厚度的取值	吴胜兴 (160)
受循环载荷的混凝土三点弯曲梁 P- $\delta$ 曲线试验和计算分析	周家聪 于晓中 (165)
钢纤维混凝土抗裂强度的研究	高丹盈 胡占国 (170)
摩擦材料本构关系的探讨	陈进 (175)
静力作用下拱坝砼允许应力采用值研究	蒋林华 (179)
碎石料的抗剪强度及影响因素的试验研究	侯献华 (183)
混凝土断裂能的尺寸效应	牛焱洲 涂传林 (187)
YJ-1型引气减水剂在水电站大坝混凝土中的应用	李 燕 (190)
新型混凝土掺合料的研究与应用	王德库 (195)
土工膜防渗技术	刘育红 (200)
碾压混凝土配合比设计的简化方法	刘晓燕 (205)
水工混凝土的碳化及其模糊综合评价	杨勇新 丁自强 (208)
钢纤维的掺入对钢筋混凝土梁最大最小配筋率的影响	安玉杰 赵国藩 (213)
基于 D-B 模型的应力强度因子 $K_I$ 的塑性修正	南东亚 (217)
养护龄期对粉煤灰混凝土抗压强度和抗冻性的影响	范沈抚 (221)

### 第三部分 岩土力学及地基基础

损伤力学在土力学中的应用	章为民 (226)
石砾露天矿边坡滑动机制及刚塑性分析	王其善 吴玉山 (231)
爆破堆石坝新型防渗结构设想	朱建华 (236)
辽河土工织物护岸工程技术	王殿武 (241)
贵州方竹电站岩体力学设计参数建议值的试验研究	徐 平 夏熙伦 (246)
土工设计方法的新进展——基于可靠性的概率设计	李清富 李平先 丁自强 (251)
岩体真实抗剪断强度的有限元法反演分析	段亚辉 (256)
锤击法测定单桩承载力试验研究	蔡润生 (261)
桩基模型试验中显微镜位移跟踪法的应用及计算机处理分析	魏 杰 (266)
万安水电站二期主体工程溢流坝碾压混凝土的性能研究	杨华全 (271)
场地随机力学参数对土层地震反应的影响	李 天 李 杰 (276)
轻亚粘土液化的模糊综合评判方法	阮永芬 巫志辉 (280)
瓦层岩体屈曲稳定性理论分析	杜新喜 陶震宇 (285)
抗滑刚架桩的差分矩阵分析法	洪永文 (289)
在大孔洞、动水条件下形成灌浆帷幕的经济措施	张金接 (294)
帷幕防渗性能衰减过程的影响因素	陈宛平 (298)
土石坝下埋管荷载设计方法研究	关志诚 刘长欣 (302)
云纹法测量离心模型试验中的位移与变形	周晓雁 (307)
土工布在水井过滤器中的应用	张崇山 幸选民 淮占科 (312)
饱和软粘土弱化动力性质的研究	王建华 聂栓林 (316)

#### 第四部分 综合性理论及应用

水利水电枢纽工程等别的模糊评定·····	李庆斌 张楚汉 王光纶	(321)
弯道环流输沙强度判别及人工弯道水力设计准则的研究·····	马有国 周素真	(326)
乍浦港海堤水损分析·····	刘世明 吴樟才 傅晓蓉	(331)
浅桁架的弹塑性动力失稳问题·····	徐新生 余同希	(334)
水泥裹砂泵送混凝土在天生桥水电站的试验与应用·····	韩文根 孙景进	(338)
水轮发电机定子机座的自振特性·····	钱学智 董毓新	(343)
水陆两栖工程的设计与施工·····	万卷 崔步红	(348)
任意荷载作用下带形牛腿轮压分布宽度计算方法·····	汪基伟 刘瑞	(352)
孔板洞出口体型对其水力特性的影响·····	刘海凌 赵慧琴	(357)
囤船对称空间锚系结构静力分析方法探讨·····	方育平	(361)
二滩工程坝下水垫塘抗浮可靠性分析·····	徐祖信	(366)
地下水动态系统多输入传递函数模型·····	成韶华	(370)
《水利学报》1991年第10期《岩土与结构专辑》·····		(374)
《郑州工学院学报》1991年第3期专刊·····		(375)

# 第一部分 水工结构分析与计算

## 灰坝有效应力地震反应及稳定性分析

章为民 沈珠江

(南京水利科学研究院)

### 一、前言

国内某灰坝已堆高33米(见图1),拟于近期继续堆高9米,由于该坝的边坡较陡,坝内的浸润线太高,加高后能否在地震时或在静力条件保持稳定,实属疑问。为此本文用有效应力地震反应分析法结合Bishop滑弧稳定分析研究了该坝在7°地震作用下的稳定性。

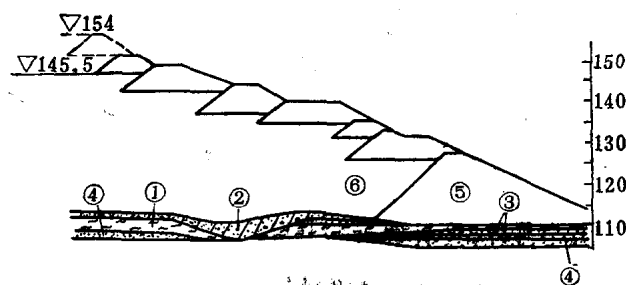


图1 主坝断面

① 游泥 ② 砾砂混粘土 ③ 砾砂 ④ 砂 ⑤ 填料 ⑥ 灰渣

### 二、计算方法

#### 1. 震前的静力计算

震前的静力计算主要是模拟初级坝、各级子坝的填筑及灰场的贮灰过程,以求得地震前坝的静应力及孔隙压力分布。基本方程(Biot理论)为:

$$d_{11} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + d_{33} \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + (d_{12} + d_{33}) \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} - \gamma_w \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$d_{22} \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + d_{33} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + (d_{21} + d_{33}) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} - \gamma_w \frac{\partial H}{\partial y} = \gamma_s - \gamma_w \quad (2)$$

$$K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} - \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

式中,  $u_x, u_y$  为位移;  $H=y+P/\gamma_w$  为水力势;  $\gamma_s$  是灰的饱和容重;  $K_x, K_y$  为渗透系数;  $d_{11}, d_{12}, d_{33}$  是灰土骨架应力应变关系矩阵元素。

## 2. 地震期的动力及静力计算

在震前静力计算的基础上, 得到了坝体的初始应力状态, 然后把地震过程分成若干个时段, 每个时段先进行动力反应计算, 得出其动力反应, 把残余孔隙压力, 剪应力变化为初应力, 再进行静力计算, 求得该时段的位移与孔压增量。把各时段连起来就得到了整个地震过程中坝体内的孔隙压力及残余变形的动态过程。动力基本方程为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (4)$$

其中,  $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$  分别为质量矩阵、阻尼矩阵、和劲度矩阵;  $\{F(t)\}$  为荷载;  $\{u\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{\ddot{u}\}$  分别为位移、速度和加速度。

计算所用的动力非线性动模量  $G$  和阻尼比  $\lambda$  按下式计算:

$$G = K_2(\sigma_0)^{1/2} / (1 + K_1\gamma_c) \quad (5)$$

$$\lambda = \lambda_{\max} \frac{K_1\gamma_c}{1 + K_1\gamma_c} \quad (6)$$

$$\gamma_c = \gamma_d^{3/4} / \sigma_0^{1/2} \quad (7)$$

式中,  $G$  动剪切模量;  $\lambda$  阻尼系数;  $\gamma_c$  动剪应变的全幅值;  $\sigma_0$  平均有效应力;  $\lambda_{\max}$ 、 $K_1$ 、 $K_2$  为计算参数, 通常  $\lambda_{\max}$  取 0.27, 而  $K_1$ 、 $K_2$  可通过动模量试验得到。

残余体变及形状应变按下式计算:

$$\Delta\varepsilon = C_1\gamma_d^{c_2} \exp(-C_3S_1^2) \frac{\Delta N}{1+N} \quad (8)$$

$$\Delta\gamma = C_4\gamma_d^{c_5} S_1^2 \frac{\Delta N}{1+N} \quad (9)$$

式中,  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  为另外 5 个计算参数<sup>[2]</sup>。

计算所用的输入地震数据为 1976 年的松潘地震记录。最大加速度调整到 0.1g, 卓越周期从 0.12 秒放长到 0.24 秒, 持续时间为 20 秒。计算所用的参数见表 1。

表 1 坝料的计算参数

土类	K	R <sub>k</sub>	$\rho$	C'	$\varphi'$	R <sub>f</sub>	k	km	kmu	n	m	$\alpha$	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
灰土	$2.5 \times 10^{-3}$	2	1.54	0	30	0.8	125	77	220	1	0.35	0.3	261	10.6	0.0056	1.1	0.1
填土	$4.9 \times 10^{-4}$	1	2.05	25	34	0.8	165	123	200	0.6	0.34	0.2	600	6	0.001	1.6	0.1
坝基砂	$4.5 \times 10^{-4}$	1	2.14	24	35	0.8	370	122	400	0.29	0.33	0.13	1000	6	0.001	1.6	0.1
坝基泥	$5 \times 10^{-6}$	1	1.90	25	28	0.7	140	56	180	1	0.4	0.2	359	7.7	0.001	2.0	0.1
加固石料	—	—	2.10	0	40	0.7	200	140	300	0.3	0.2	—	400	6	0.002	1.0	0.02

### 三、计算结果

图2为主断面单元网格，图3为灰坝填筑到最后高程154米时的应力水平等值线。可见初期坝附近有大片破坏区。预示着坝坡的稳定性较差。由于灰渣的透水性较好，静力计算无明显的超静孔隙水压力。图4为动力计算所得出的地震结束时残余孔隙水压力分布。最大值为2.18米水柱，同时上游表层一排单元发生液化。坝顶地震加速度反应 $0.64\text{m/s}^2$ ，放大系数小于1。这与坝身的自振周期远大于地震卓越周期有关。



图2 主断面单元网格

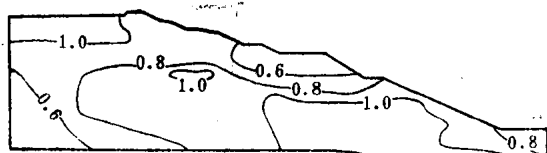


图3 现有断面震前应力水平

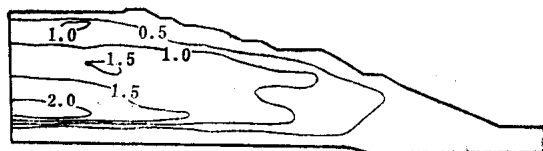


图4 现有断面地震孔隙压力(米水柱)

根据上述的静力和动力分析得出的孔隙水压力进行Bishop的简化有效应力法滑弧稳定验算。在静力条件下，现在坝高为1.02，加高后为0.88，在地震条件下，现坝高为0.86，加高后0.74。滑弧位置见图5，滑弧的大部分是通过初期坝的。现有坝坡的安全系数为1.02 刚刚能稳定，如果继续加高或遇到地震和暴雨，就有可能滑坡，因而必须加固。从滑弧的位置来看，主要问题出在初期坝上，另外浸润线的位置也太高。考虑到初期坝的坝坡较陡，故建议在现有坝坡外侧加筑保护壳，同时把外坡放缓至1:3，保护壳用碎石或堆石堆筑。加固后的单元划分见图2。

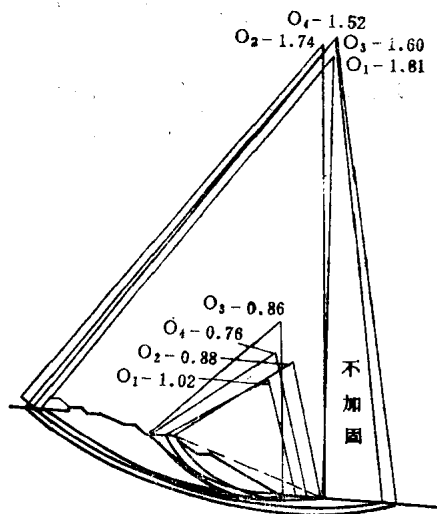


图5 危险滑弧

加固后填到154m高程的应力水平等值线如图6所示。与图3相比，坝的下部破坏区有明显的减小，应力水平也普遍降低。图7为地震结束后的残余

孔隙水压力分布，最大孔隙压力为28900Pa(相当2.89m水柱)，而顶部的液化区范围与未加固的情况基本一致，加固后的坝顶反应加速度与输入加速度示于图8中，最大值为 $0.82\text{m/s}^2$ 。加固后的稳定验算表明，保护壳起镇压层的作用，其迫使滑弧向上移动。加固后的安全系数，静力条件：现坝高——1.83m，加高后——1.74m。在地震条件下：现坝高——1.60m，加高后——1.52m。由此可见。建议的加固措施是十分有效的。

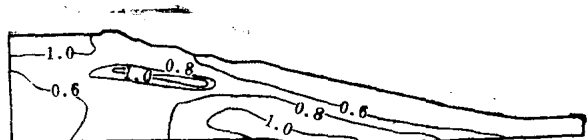


图6 加固断面震前应力水平

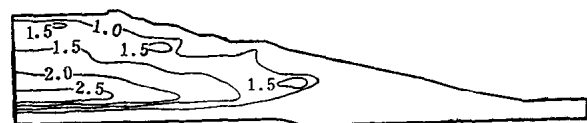


图7 加固断面地震孔隙压力(米水柱)

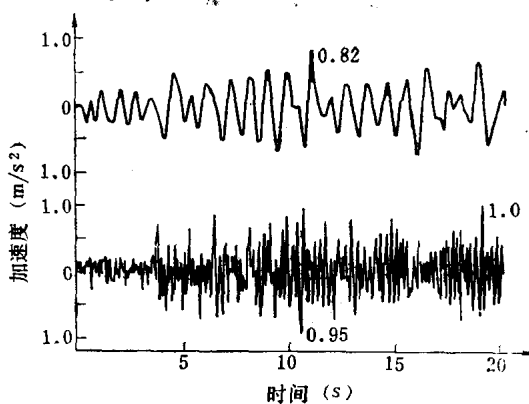


图8 输入及反应加速度

## 四、结 论

以上分析表明,有效应力地震动力反应分析可以明确定量地得出滑动面上的孔隙压力变化与抗剪强度,从而克服了总应力法只能定性估算的弱点,有效应力法使得灰坝的动力稳定分析更加接近实际。

## 参 考 文 献

- [1] 沈珠江,土工建筑物有效应力法地震反应分析程序——EFESD,南京水科院科研报告,土8804, 1988
- [2] 沈珠江,砂土动变形计算参数的室内测定,水利水运科学研究,1988年三期
- [3] 辽宁水利科学研究所,辽宁电厂一灰场土工试验报告。

# 用固定界面法分析拱坝的动力特性

金 峰 张楚汉

(清华大学)

## 一、引 言

拱坝是一种大型的复杂三维结构,用有限元模型来模拟拱坝—库水—地基系统,自由度多,计算工作量十分庞大,随着高拱坝越来越多的兴建,拱坝的动力分析费用及计算时间耗费得越来越多,因此,在保证分析精度的基础上,减少计算工作量是一个迫切的研究课题。

60年代, Hurty<sup>[1]</sup>、<sup>[2]</sup>等人提出了模态坐标的概念,奠定了模态综合法的基础。至今,已发展成各种各样的模态综合法,主要有三大类:固定界面法、自由界面法及混合法。其中, Hurty<sup>[2]</sup>、Craig<sup>[3]</sup>的固定界面法发展早,物理概念清晰,收敛性良好,精度较高。同时,他们所用的固定界面模态对于拱坝子结构就是刚性基础上的拱坝振动模态,非常直观,所以,这种固定界面法非常适合于拱坝的动力分析。

在拱坝的动力分析中,我们主要关心的是拱坝的位移及应力,同时考虑到拱坝相对于岩石地基来说,要柔软的多,可以把拱坝—库水—地基分成三个子结构,并可根据参考文献[4]谢耕提出的主副子结构的概念,把拱坝作为主子结构,地基和库水两个子结构作为副子结构。

## 二、固定界面法

Hurty<sup>[2]</sup>最早提出了固定界面法的思想,后Craig与Bampton<sup>[3]</sup>提出了重大的改进,他们的固定界面法有时被称为H-C固定界面法,有许多参考文献[2]、[3]、[4]、[5]、[6]作了详细推导。请参阅。

## 三、拱坝—库水—地基系统的固定界面法分析

对于拱坝—库水—地基系统,拱坝作为主子结构。可以按固定界面法进行分析,而库水子结构与地基子结构可以作进一步的简化。

### 1. 库水系统

库水系统对拱坝的影响较小一些,可以按广义的Westergaard公式简化成附加质量<sup>(7)</sup>。

$$M_{wi} = \sum_k \alpha_i A_i^{(k)} [\lambda_i^{(k)}]_i^T \lambda_i^{(k)} \quad (1)$$

式中,  $M_{wi}$  为第*i*节点的库水附加质量;  $\lambda_i^{(k)}$  为*K*单元中*i*节点的坝面法线方向余弦向量;  $A_i$  是与节点*i*有关的“辅助面积”。

$$\alpha_i = \frac{7}{8} \rho \sqrt{H_i(H_i - Z_i)} \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为水的质量密度;  $H_i$  是包含*i*节点的截面水深;  $Z_i$  是包含*i*节点的截面上从坝基算起的节点*i*的高度。

有了这些附加质量以后,直接将附加质量加到坝体结点上,即完成了库水子结构的动力分析。

## 2. 地基系统

对于地基系统, 有:

$$\begin{Bmatrix} x_i \\ x_c \end{Bmatrix} = [\psi \quad I]^T \{x_c\} \quad (3)$$

经过变换, 可得:

$$\tilde{m}_{cc} \ddot{x}_c + \tilde{K}_{cc} x_c = f_c + \psi^T r_i + r_c \quad (4)$$

$$\text{式中} \quad \begin{cases} \tilde{m}_{cc} = m_{cc} + \psi^T m_{ic} + m_{ci} \psi + \psi^T m_{ii} \psi \\ \tilde{K}_{cc} = K_{cc} + K_{ci} \psi \end{cases} \quad (5)$$

这是著名的Guyan减缩公式。

## 3. 综合

将三个子结构综合起来, 构成了原系统的振动方程。在这个过程中, 进行了一次振型分析。即拱坝子结构的固定界面模态分析, 对综合后的系统方程还需要作一次模态分析, 因此, 共需两次模态分析, 但与整体有限元的一次模态分析相比, 自由度均有大量的减少, 可望节省较多的工作量。

## 四、计算实例

为了验证本文方法的精度及收敛性, 计算了二滩拱坝均匀, 顺河向、简谐自由场输入时的位移与应力, 并与整体有限元的自由场方法进行了对比。

对整体有限元的自由场方法, 采用了 ADAP-TH88 程序<sup>[8]</sup>。基岩用一类网格离散, 坝体采用四层网格。为简便起见, 库水也采用广义 Westergaard 公式计算库水附加质量, 用壳单元离散坝体, 系统总自由度数 314, 其中八结点基础单元 48 个, 坝体厚壳单元 2 个, 三维壳单元 10 个 (见图 1)。

在坝体—地基交界面输入加速度, 采用自由场输入方法。各点均输入顺河向加速度  $0.2g$  是  $18t$ , 取前十阶振型参与迭加。

模态综合法的网格, 输入模型与整体有限元法一样, 对拱坝子结构取前十阶振型, 整体分析时也取十阶振型。计算结果如下:

### 1. 自振频率

表 1 列出了两种方法算出的系统的前十阶的频率, 及模态综合法拱坝子结构的前十阶固定界面时的频率, 可以看出, 两种方法算出的结果十分接近, 特别是前五阶频率几乎相等, 说明固定界面法收敛性及精度都很好。再看模态综合法的两列数据, 可以认为拱坝子结构的低阶动力特性对系统的低阶动力特性起着决定性的作用。

### 2. 结点位移

表 2 列出了顶拱及拱冠梁各点最大顺河向位移, 各点位置见图 2。

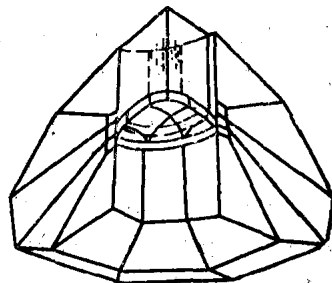


图1 拱坝—库水—地基系统



表1 系统频率

(rad/s)

频率	模态综合法		传统方法
	拱坝子结构	整体系统	
1	8.6485	0.0879	8.0873
2	9.8091	8.8316	8.8307
3	13.0509	12.0957	12.0934
4	19.3621	17.9473	17.9026
5	21.3833	19.9321	19.8521
6	25.0174	22.2905	21.7412
7	26.9772	24.0477	22.8316
8	27.7726	24.3332	23.4156
9	29.9985	26.1462	24.3594
10	30.1067	26.2838	25.9671

表2 拱顶各点最大位移

(mm)

方法	1	29	63	103	147	185	217
模态综合法	6.09	6.43	8.26	10.24	8.52	6.40	6.09
传统方法	6.08	6.32	8.30	9.17	8.68	6.29	6.08

从计算结果看，两种方法吻合良好。拱冠顶点（103）位移误差略大（10%），但从工程角度，精度是足够的。为了进一步分析各振型的影响，输出了拱冠（103）点的振型位移见表3。可以看出，吻合也较好，只是第七阶、第九阶振型要差一些。说明对地基的简化处

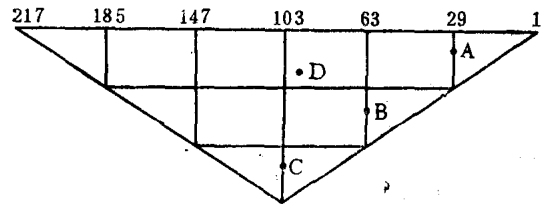


图2 位移、应力输出点

理，以及拱坝子结构固定界面模态的截断，对高阶振型是有一定影响。

表3 拱冠振型位移

(mm)

振型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
模态综合法	11.07	0.01	-3.06	-6.14	0.01	-0.01	0.00	-0.01	1.14	-0.05
传统方法	11.07	0.01	-3.10	-6.12	0.01	-0.00	-0.35	-0.01	-0.24	0.01