

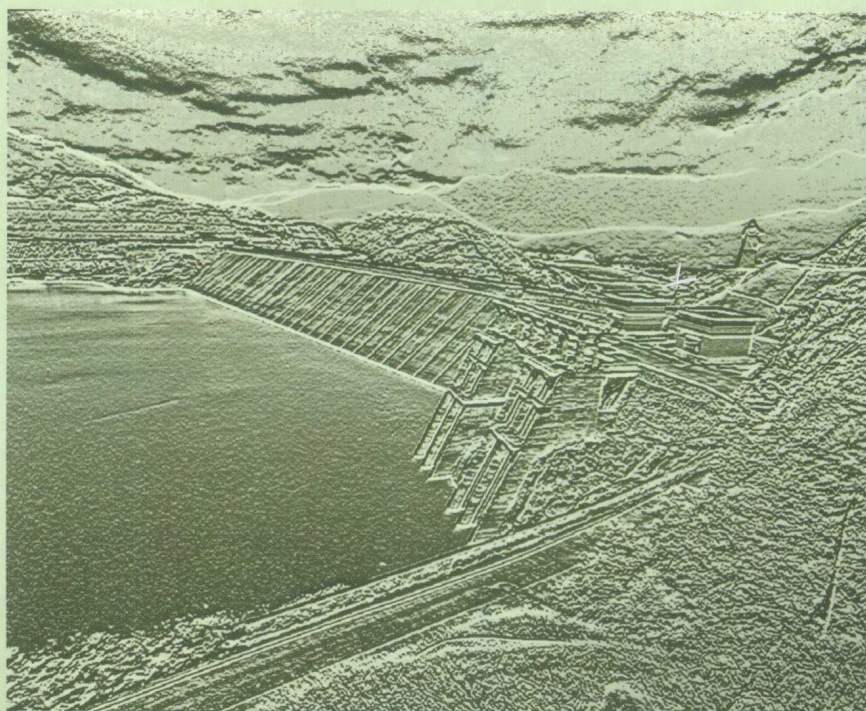
土石坝技术

Technology for Earth-Rockfill Dam

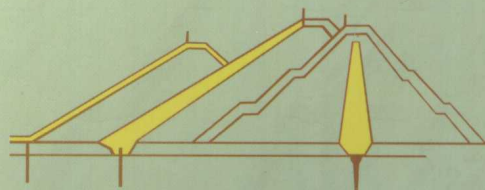
2010年论文集

水电水利规划设计总院
中国水电顾问集团华东勘测设计研究院
水利水电土石坝工程信息网

组编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



www.sstsbw.com

土石坝技术

Technology for Earth-Rockfill Dam

2010年论文集

水电水利规划设计总院
中国水电顾问集团华东勘测设计研究院 组编
水利水电土石坝工程信息网



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

土石坝技术. 2010 年论文集/水电水利规划设计总院, 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 水利水电土石坝工程信息网组编. —北京: 中国电力出版社, 2010

ISBN 978-7-5123-0821-3

I. ①土… II. ①水…②中…③水… III. ①土石坝—文集 IV. ①TV641-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 169271 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 10 月第一版 2010 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 28.75 印张 651 千字

定价 90.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本书编委会

顾 问	潘家铮	曹克明	林 昭	周建平
	彭 程	刘志明	关志诚	张春生
	陈祖煜	蒋国澄	蒋效忠	
委 员	陈振文	陈绍松	陈松滨	蔡昌光
	蔡正银	程展林	樊路琦	费京伟
	何定恩	黄晓辉	李秋生	李庆云
	吕明治	刘斯宏	毛文然	孙永娟
	汤 旻	徐泽平	杨泽艳	翁新雄
	王金锋	王君利	吴关叶	吴晓铭
	吴高见	杨西林	张宗亮	张顺高
	张沁成	湛正刚	周才全	

一、地震研究

黄土动力特性试验及深厚黄土地基上土石坝抗震分析研究

- 岑威钧 顾淦臣 闵家驹 隋世军 (1)
- 汶川地震中水电工程安全监测设施的震损与分析..... 吴毅瑾 杨泽艳 李福云 (10)
- 糯扎渡水电站高心墙堆石坝抗震研究..... 刘兴宁 冯业林 (23)
- 地震力作用下软基土石坝的动力响应分析..... 杨秀竹 李花珍 王星华 (30)
- 小浪底大坝抗震措施..... 韩秋茸 (35)
- 土石坝抗震设防标准探讨及其在苗尾水电工程中的应用
- 赵川 吴敏 陈江 叶永年 (41)
- 新疆某混凝土面板堆石坝抗震设计..... 刘万新 吕中维 (50)
- 分布式地震监测系统在苏丹麦洛维大坝中的运用..... 杨耀明 张志芳 (55)

二、设计

- 西龙池抽水蓄能电站枢纽总布置..... 邱彬如 张沁成 周长兴 王晓春 (59)
- 西龙池抽水蓄能电站上、下水库沥青混凝土防渗面板设计
- 与特点..... 沈安琪 孟凡珍 邓明基 (67)
- 西龙池蓄能电站下水库堆石坝覆盖层基础处理研究
- 刘凤成 郭生萍 周志刚 钱能尊 (79)
- 其宗水电站心墙堆石坝设计研究..... 张宗亮 董绍尧 刘强 (85)
- 巴山水电站工程设计..... 陈振文 齐立景 (92)
- 土石坝三维渗流有限元计算若干问题及其工程应用研究..... 刘斯宏 严俊 (108)
- 混凝土面板堆石坝潜没式混凝土高趾墙设计..... 安盛勋 (116)
- 溧阳抽水蓄能电站上水库面板堆石坝设计..... 石含鑫 宁永升 常姗姗 (123)
- 溧阳抽水蓄能电站上水库库底防渗设计..... 宁永升 石含鑫 (130)
- 土石坝无基坑筑坝技术..... 陈松滨 陈共建 (134)
- 混凝土面板堆石坝面板裂缝防裂措施
- 从宜兴抽水蓄能电站上水库面板混合堆石坝谈面板混凝土
- 裂缝..... 蔡育 朱冬舟 (140)

黄河海勃湾水利枢纽土石坝混凝土防渗墙应力

及变形分析	阮建飞	翟兴无	陈海峰	(145)
瀑布沟心墙堆石坝应力场与渗流场耦合计算分析	刘斯宏	顾唯星	王柳江	(151)
高坝土料击实功能和压实标准探讨			黄泰仁	(161)
高面板堆石坝变形控制			杨世源	(166)
去学水电站沥青混凝土心墙堆石坝设计	吴浩	赵轶		(173)
潘口水电站面板堆石坝防渗系统设计	郭卫平	张军		(179)
仙游抽水蓄能电站上水库设计特点			王樱峻	(186)
水库坝顶超高计算			张爱华	(192)
渗流计算在土石坝设计中的应用			刘兰勤	(194)
三座店水利枢纽工程主坝基础处理			董晓燕	(196)
天荒坪抽水蓄能电站上水库截水墙基础二次补强处理			王樱峻	(200)
深弧型防浪墙在堤防工程中的应用	高占学	王芳		(205)
土石坝渗流与治理	张文倬	张云生		(211)
采兔沟水库沙坝设计			屈艳妮	(217)
土石坝与导流建筑物的结合	张文倬	梁礼绘	张云生	(222)
英布鲁水电工程当地材料坝的关键工程				
地质问题	袁宏利	乔东玉	韩治国	胡宁 (227)
溢流土石围堰设计流量选择			晋国辉	张文倬 (233)
三板溪主坝面板破损前后应变应力分析	朱锦杰	李涛	杜雪珍	(238)
三板溪混凝土面板坝面板破损原因分析	王玉洁	朱锦杰	李涛	(243)

三、施 工 技 术

新型旋喷技术在湖后水库大坝加固中的应用			黄院生	(249)
挤压式混凝土边墙施工技术关键问题分析	任智锋	鲁永华	迟守旭	(253)
马鹿塘二期电站大坝面板混凝土裂缝控制技术			邓仁杰	(257)
石垭子水电站高水头过水围堰防冲设计与施工	黄厚农	费洪武		(268)
新疆下坂地水利枢纽坝基防渗墙施工			王学良	(278)
响水涧蓄能电站上水库南副坝反向排水处理施工			潘福营	(282)
宜兴抽水蓄能电站上水库库盆钢筋混凝土面板质量控制			罗群	(285)
高压喷射灌浆在新疆某水库除险加固中的应用			张爱华	(291)
154m 深防渗墙施工试验研究				
.....	韩伟	孔祥生	张聚生	杨伟 毛鸿飞 (296)
海涂泥在土坝坝体劈裂灌浆中的应用			许启云	(302)
积石峡水电站大坝泡水施工方法			李平平	(306)

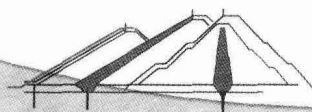
HT-7 养护液在响水涧抽水蓄能电站面板混凝土施工中的应用	陈张华	(309)
涧峪水库钢筋混凝土面板施工中有关技术问题的处理方案	朱嘉伟	(314)
黄河三盛公水利枢纽北岸总干渠进水闸基础围封 及闸底板补强灌浆试验	李京京	(318)
固定测斜仪在面板堆石坝中的应用实例	张玉龙 张绍春 董泽荣	(324)
HDPE 防渗膜在自凝灰浆防渗墙中的应用	孟建勇	(331)
强夯工艺在苗家坝坝基处理过程中的应用	仇玉生	(336)
PE 复合土工膜防渗技术在大哈门水库除险加固工程中的应用	潘文国 王 韬 曹增强	(349)

四、实 验 研 究

糯扎渡心墙堆石坝防渗土料工程特性研究	张宗亮 冯业林 袁友仁 邓建霞	(355)
西龙池下水库坝基覆盖层料蠕变模型研究	李海芳 张沁成 温彦锋 陈 宁	(365)
渗流自由面分析的改进单元传导矩阵法及其在 ANSYS 中的实现	陈 江 李 琦	(373)
ADINA 在威远江水电站心墙堆石坝渗流分析中的运用	孔令学 张宗亮	(383)
老君山水库心墙堆石坝二维数值分析	施瑞庭 卢剑梅 相 彪	(388)
堆石坝填筑试验检测	赵可新	(395)
云南省某心墙堆石坝坝料压实标准及检测方法	王艳芳 宁占金	(400)
冶勒大坝沥青混凝土心墙工作性态研究	郑培溪 汪洵波	(406)

五、检 测 与 分 析

西龙池蓄能电站上水库安全监测布置及施工期成果分析	胡五星 刘凤成 仇水波 吴元辉	(413)
土坝与混凝土建筑物连接部位沉降变形监测探讨	李海河	(420)
三板溪面板堆石坝渗流监测资料分析	李 涛 王玉洁 朱锦杰	(424)
紫坪铺面板堆石坝高强度填筑施工期沉降监测与分析	吴成根	(432)
基于 FBG 的高土石坝集中渗漏监测方案及数值仿真.....	陈 江 赵云川	(440)



一、地震研究

黄土动力特性试验及深厚黄土地基上 土石坝抗震分析研究

岑威钧¹ 顾淦臣¹ 闵家驹² 隋世军²

(1 河海大学 2 中水北方勘测设计研究有限责任公司)

[摘要] 对某深厚黄土地基上土石坝的坝基黄土和筑坝黄土进行动三轴和共振柱等动力试验,求得其动强度、动应力—应变关系,以及用于计算动孔压的动孔压特性曲线及其他动参数。在静力分析的基础上,对大坝连同地基进行了三维有效应力动力分析。计算表明,Ⅶ度地震下黄土坝基会出现液化,危及大坝安全。为此,建议采取在距上、下游坝脚一定范围内对坝基进行填土压重的经济、便利的大坝抗震措施,并对填土压重的抗液化效果进行了优化分析,最终得到了经济、合理的填土压重范围和压重厚度。

[关键词] 黄土 土石坝 动力特性 裂缝 动孔隙水压力 液化 抗震

1 引言

某水库位于山西省朔州市,水库主要建筑物为心墙土石坝,坝高为33.0m,坝顶宽为8m。上游坝壳为砂砾石,心墙和下游坝壳为黄土。心墙上、下游侧设有反滤层,其中下游加设水平反滤,并与竖向反滤连通。大坝地基为湿陷性黄土,其中较软土层的厚度约40m。地基表层 Q_3^{eol+dl} 黄土土质疏松、孔隙比大、干密度小,属强湿陷性土。下层地基 Q_2 黄土为中等压缩、弱湿陷和非湿陷性黄土。为了减小初次蓄水引起的湿陷变形对大坝的不利影响,设计时在黄土心墙底部用碾压黄土截水槽置换原强湿陷性地基土。截水槽底部设有高喷防渗墙,主要用于切断下层地基中的砂卵石强透水层。大坝最大剖面结构见图1。

黄土是一种多孔隙、弱胶结的第四纪沉积物,因其独特的亚稳定结构具有极强的易损性,所以常引发滑坡、液化和震陷等工程地质灾害。很多震害实例和室内试验都已证实,饱和黄土具有很高的液化势,在Ⅶ度地震下可发生液化和震陷。针对该大坝心墙、下游坝壳和坝基均为黄土,且地基黄土承载力较低、深度大于坝高、强湿陷性及坝址地震烈度Ⅶ度等特点,对该坝地基饱和黄土和坝体黄土进行了动力特性试验,研究其动强度、动应力—应变关系及液化特性,在试验的基础上对大坝进行了三维非线性有效应力动力分析,重点分析大坝在Ⅶ度地震作用下是否出现液化等震害问题。对于可能出现的震害问题,建议采取相应的工程措施并进行抗震效果分析。

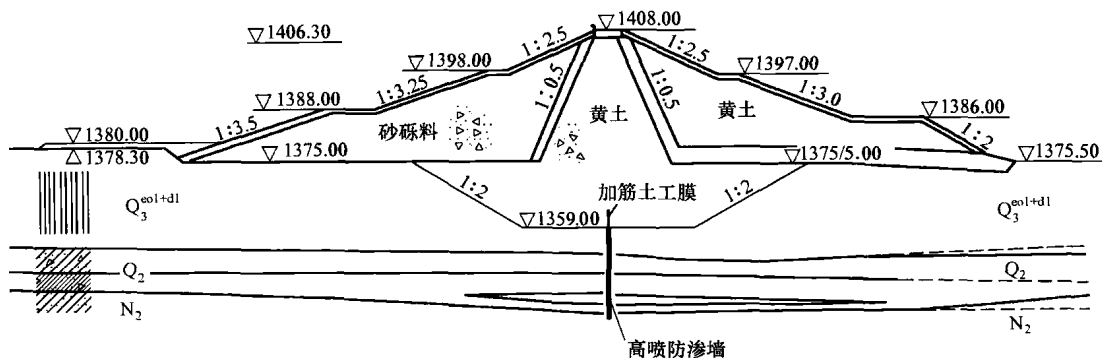


图1 大坝最大剖面结构 (单位: m)

2 黄土的动力特性试验

2.1 动强度

取3种黄土样,即坝基 Q_3 和 Q_2 黄土的原状样及心墙碾压黄土,测试其塑限 W_p 等物理特性指标,测试结果见表1。试样采用抽真空法进行饱和。动三轴试验固结压力 σ_3 分别取100、200kPa和300kPa,固结比 K_c 分别取1.0、1.5和2.0。限于篇幅,本文主要给出坝基 Q_3 黄土和 Q_2 黄土的试验成果。

由动三轴试验得到土样在 $K_c=1.0$ 、1.5和2.0时的动强度 τ_d 与振动次数 N 的关系。图2给出了坝基 Q_3 黄土和 Q_2 黄土在 $K_c=1.5$ 时的 $N-\tau_d$ 关系曲线。同时,经回归分析可整理出 $N=3$ 、5、8、10、12等不同振次下平均应力 σ_m 与动强度 τ_d 之间的关系曲线。图3所示为坝基 Q_3 黄土和 Q_2 黄土在振动次数 $N=5$ 时的 $\sigma_m-\tau_d$ 关系曲线。

表1 土样的几个特性指标

土样名称	W_p	W_L	I_p	γ_d	d_{max} (mm)	d_{60} (mm)	d_{50} (mm)	d_{10} (mm)	d_{min} (mm)
坝基 Q_3 黄土	16.3	27.4	11	1.35	0.1	0.057	0.044	0.004	0.002
坝基 Q_2 黄土	15.7	28.2	13	1.48	0.1	0.060	0.045	0.035	0.002
心墙碾压黄土	16.8	31	14	1.60	0.1	0.035	0.026	0.030	0.002

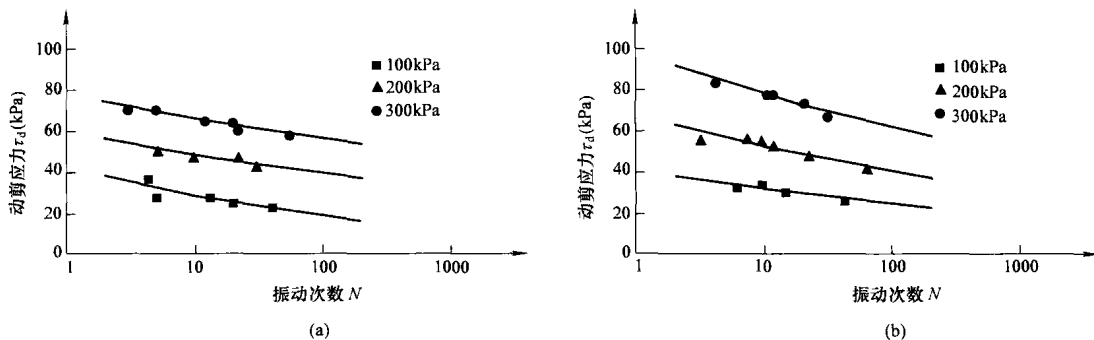
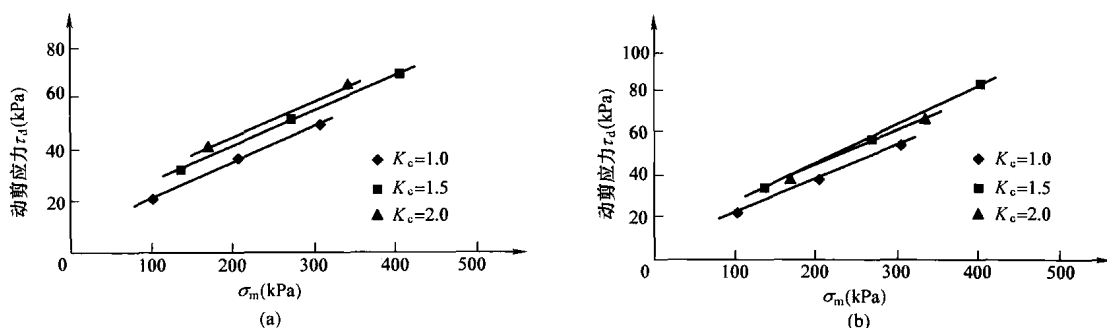
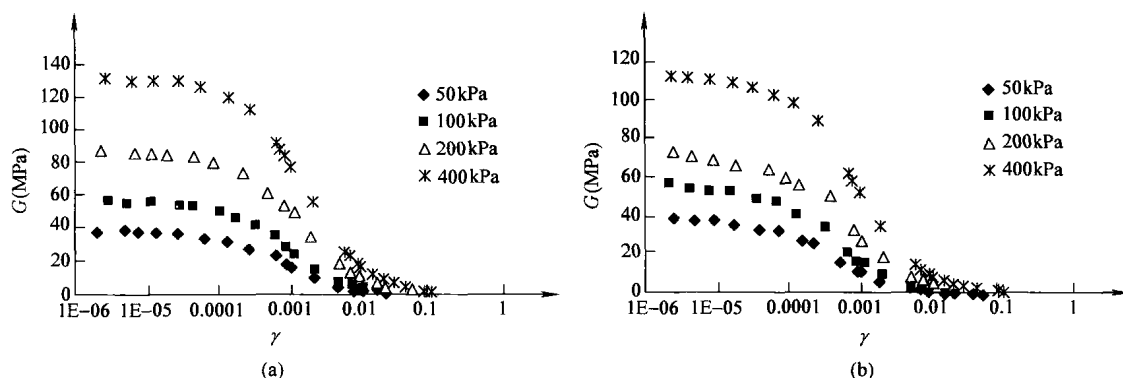


图2 坝基黄土的动剪应力 τ_d 与振动次数 N 的关系曲线 ($K_c=1.5$)

(a) Q_3 黄土; (b) Q_2 黄土

图3 坝基黄土动剪应力 τ_d 与平均压力 σ_m 的关系曲线 ($N=5$)(a) Q_3 黄土; (b) Q_2 黄土

对上述试验回归曲线分析后发现^[1]: ①坝基 Q_3 黄土和 Q_2 黄土的动强度 τ_d 随固结压力 σ_3 增大而增大, 随振动次数 N 增加而减小, 动强度 τ_d 与破坏振次 N_f 之间近似有 $\tau_d = A(N_f)^B$ 的关系, 式中 A 和 B 为拟合参数; ②动强度 τ_d 与平均应力 σ_m 之间呈很好的线性关系, 用 $M-C$ 关系拟合得到 Q_3 黄土和 Q_2 黄土的动摩擦角 φ_d 在 $7.9^\circ \sim 8.3^\circ$ 之间, 动黏聚力 C_d 在 $4.0 \sim 18.7 \text{ kPa}$ 之间, 且 φ_d 和 C_d 与固结比 K_c 基本上呈单调递增关系, 尤其是 C_d , 当 $K_c = 1.0$ 时趋于小值, 当 $K_c = 2.0$ 时趋于大值。

图4 不同固结压力下坝基黄土动剪切模量 G 和与动剪应变 γ 的关系曲线(a) Q_3 黄土; (b) Q_2 黄土

2.2 动应力—应变关系

对试样进行共振柱试验, 固结压力 σ_3 分别取 50、100、200 kPa 和 400 kPa。图 4 所示为不同固结压力下坝基黄土动剪切模量 G 与动剪应变 γ 的关系曲线, 将其归一化后即可得到动剪切模量比 $G/G_{\max}$ 与动剪应变比 γ/γ_r 的关系曲线, 见图 5。由图 5 可知, 不同固结压力下的试验点具有很好的规律性。对试验点可采用 Hardin-Drnevich 的修正双曲线模型进行拟合, 即

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \alpha \gamma / \gamma_r} \quad (1)$$

其中

$$\gamma_r = \tau_{\max} / G_{\max}$$

式中 G ——动剪切模量;

$G_{\max}$ ——最大动剪切模量;
 γ ——动剪应变;
 γ_r ——参考剪应变;
 $\tau_{\max}$ ——最大剪应力;
 α ——拟合参数。

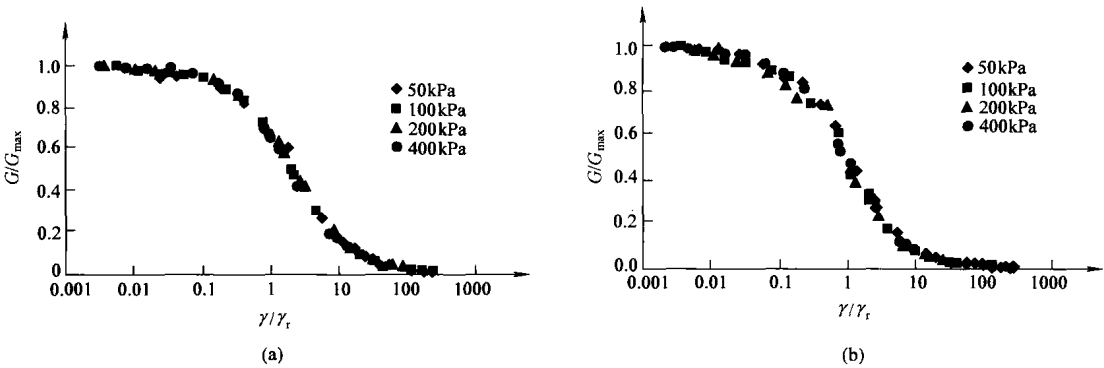


图5 坝基黄土动剪切模量比 $G/G_{\max}$ 和与动剪应变比 γ/γ_r 的关系曲线
(a) Q_3 黄土; (b) Q_2 黄土

对于最大动剪切模量 $G_{\max}$ ，以平均压力 σ_m 为横坐标， $G_{\max}$ 为纵坐标，在双对数纸上绘制 $G_{\max} - \sigma_m$ 试验点，经回归分析后发现试验点具有以下关系

$$G_{\max} = K p_a \left(\frac{\sigma_m}{p_a} \right)^n \tag{2}$$

式中 K —— $\sigma_m/p_a = 1$ 时的 $G_{\max}$ 值;
 n ——直线斜率;
 p_a ——大气压。

表2 给出了几类试验黄土的 K 值与 n 值。

表2 几类试验黄土的 K 值与 n 值

参 数	坝基 Q_3 黄土	坝基 Q_2 黄土	心墙碾压黄土
K	585.8	536.9	816
n	0.579	0.508	0.422

同样，对土样的阻尼比 λ 进行类似动剪切模量 G 的整理，其试验点具有如下关系

$$\frac{\lambda}{\lambda_{\max}} = \frac{\alpha \gamma / \gamma_r}{1 + \alpha \gamma / \gamma_r} \tag{3}$$

式中 $\lambda_{\max}$ ——最大阻尼比;
 α ——拟合参数，见表3。

表 3

不同固结压力下的 α

σ_3 (kPa)	坝基 Q ₃ 黄土	坝基 Q ₂ 黄土	心墙碾压黄土
50	0.49	0.94	0.32
100	0.54	1.09	0.40
200	0.46	1.19	0.39
400	0.58	1.11	0.49

2.3 动孔隙水压力

动孔隙水压力（简称动孔压）的增长、扩散和耗散是一个非常复杂的过程^[2,3]，不仅受土体的物理特性、颗粒级配、填筑的密实程度、透水性能、初始应力等内部因素的影响，还与地震级别、震中距离的远近、振动持续时间长短等外部条件有关，很难采用一个计算式对各种影响因素进行综合考虑。笔者认为，最直接、最可靠的方法就是利用试验数据进行动孔压计算。顾淦臣^[4]曾提出利用动孔压比 u_d/σ_3 与动剪应力比 τ_d/σ'_m 的试验曲线计算动孔压的方法，并在实际工程中进行了应用，效果良好^[5,6]。图 6 所示为振动次数 $N=5$ 时坝基 Q₃ 黄土和 Q₂ 黄土的 $u_d/\sigma_3 - \tau_d/\sigma'_m$ 关系曲线。

3 大坝地震反应非线性有效应力分析

3.1 有限元建模及参数取值

选取大坝和坝基（最大厚度为 40m）作为三维计算域进行有限元网格剖分。剖分后的有限元网格见图 7，其中结点 5505 个，单元 4916 个。

土石料静力本构模型采用邓肯 $E-\mu$ 模型。静力计算模拟坝基截水槽回填及坝体分层碾压等分级施工情况，并且考虑水库初次蓄水引起的大坝和黄土地基的湿陷变形。以静力计算得到的应力场作为动力计算的初始应力场。土石料动力本构模型采用 2.2 节中修正的 Hardin-Drnevich 模型。动力计算参数由试验确定。动孔压计算模式采用 3.2 节所述的动孔压试验曲线法。

坝址设计烈度为Ⅶ度，动力计算采用的地震曲线取距坝址不远的册田水库土坝动力分析时所采用的Ⅶ度近震人工合成加速度过程线，其中顺河向峰值加速度为 1.355m/s^2 ，竖

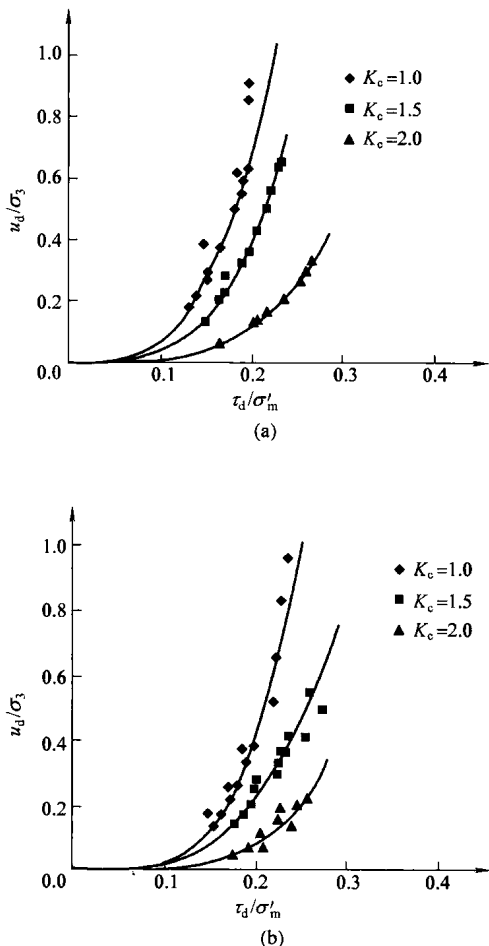


图 6 坝基黄土的动孔压比 u_d/σ_3 与动剪应力比 τ_d/σ'_m 的关系曲线 ($N=5$)

(a) Q₃ 黄土; (b) Q₂ 黄土

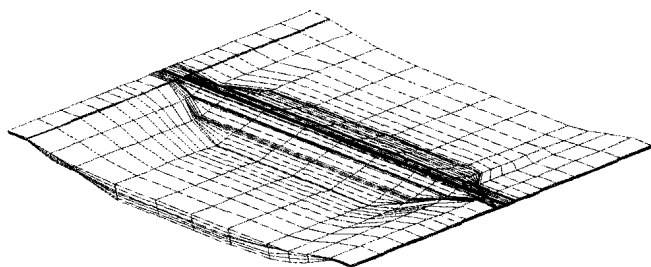


图7 大坝三维有限元计算网格

向峰值加速度为 1.160m/s^2 ，坝轴向地震加速度过程线由顺河向和竖向合成所得。

3.2 动孔压计算及液化判断方法

用有效应力法对土石坝进行动力分析的关键之一是动孔压计算及液化判断。本次动孔压计算利用 2.3 节得到的 $u_d/\sigma_3 - \tau_d/\sigma'_m$ 试

验曲线。当动孔压 u_d 与围压 σ_3 相等时判定为液化，即动孔压比（液化度） $u_d/\sigma_3 = 100\%$ 。动孔压试验曲线法的主要计算步骤如下：①按设计要求制作土样，进行动三轴液化试验，整理出如图 6 所示的不同振动次数 N 下的动孔压比 u_d/σ_3 与动剪应力比 τ_d/σ'_m 的关系曲线。②根据坝址设计震级，确定地震历时 t 和等效振动次数 N_{eq} 。将地震历时 t 分成若干时段 ΔT_i ，相应第 i 时段的振动次数为 $\Delta n_i = N_{eq} \Delta T_i / t$ ，则到第 m 时段时累计振动次数为 $n_m = \sum \Delta n_i$ 。③根据地震反应计算得到的至第 m 时段为止各单元破坏面上动剪应力时程曲线峰值 τ_{max} 的 65% 作为平均动剪应力 τ_{av} ，除以与该时段的平均有效应力 σ'_m ，得到动剪应力比 τ_{av}/σ'_m 。根据该时段累计振动次数，从相应振动次数的 $u_d/\sigma_3 - \tau_d/\sigma'_m$ 曲线查取各单元动孔压比（或从不同振动次数曲线间插值），然后乘以 σ_3 即可得该时段的动孔压 u_d 。④利用求得的动孔压 u_d ，对第 m 时段各单元的有效应力 σ'_m 进行修正，重新计算该时段的剪切模量和阻尼比，并判断是否满足收敛准则。如不满足，则迭代至满足。进入第 $m+1$ 时段动剪模量及固结应力比等的计算。重复上述过程直至地震结束，即可得到整个地震历时过程中大坝各处的动孔压时程曲线和大坝的动孔压和液化度等值线分布情况。

上述动孔压计算方法直接利用试验成果，计算过程客观简捷、概念清晰，曾应用于多个实际工程，计算结果与实际情况符合较好。

3.3 结果分析

3.3.1 大坝动力反应

对大坝中典型结点进行绝对加速度反应分析后发现，结点绝对加速度反应程度与其在大坝中所处的位置有关，坝顶部位结点的加速度反应较其他部位大。同时，绝对加速度反应也与该处筑坝材料的动力特性有关。大坝顺河向、竖向和坝轴向绝对加速度放大系数分别为 1.51、1.79 和 1.70；坝体节点的三向最大动位移均未超过 1cm；坝体各处的动应力也不大。说明坝体动力反应不是很强烈，这主要与该坝黄土坝基较为软弱和深度较大有关，对上部坝体的地震反应起到了很好的减震、隔震作用。

3.3.2 坝体裂缝

坝体裂缝是土石坝地震后的主要震害之一。土石坝可能裂缝区域通常可根据应力水平、最大拉应力等指标进行判断。本次分析采用最大静、动拉应变之和与土体的极限拉应变进行比较来判断，当前者大于后者时，即判断为可能裂缝区域。

有关土的极限拉应变，国内外已有不少人作过试验研究。单轴拉伸试验的结果为：国内试验塑性指数为 17~20 的黏土，极限拉应变为 0.08%~0.3%；国外试验干密度为

1.54~1.9g/cm³的黏土, 极限拉应变为0.05%~0.24%。该工程坝体和坝基以黄土为主, 其极限拉应变较小, 这里采用0.03%。因此, 当计算得到的静动力最大拉应变之和大于0.03%时, 即认为是大坝裂缝可能发生区域。

根据上述判断标准, 图8给出了地震后大坝下游(黄土填筑部位)表面可能裂缝的发生区域(阴影部分)。下游坝面裂缝主要集中在坝顶、坝脚及两岸坝肩部位, 属于浅层裂缝。

3.3.3 液化分析

液化评判标准按液化度(动孔压比 u_d/σ_3) 达到100%时认为土体发生液化。图9所示为大坝及坝基表面和3个典型剖面

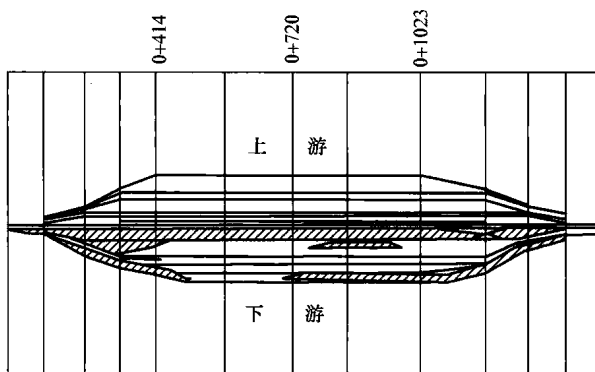


图8 地震后大坝下游表面可能裂缝的发生区域

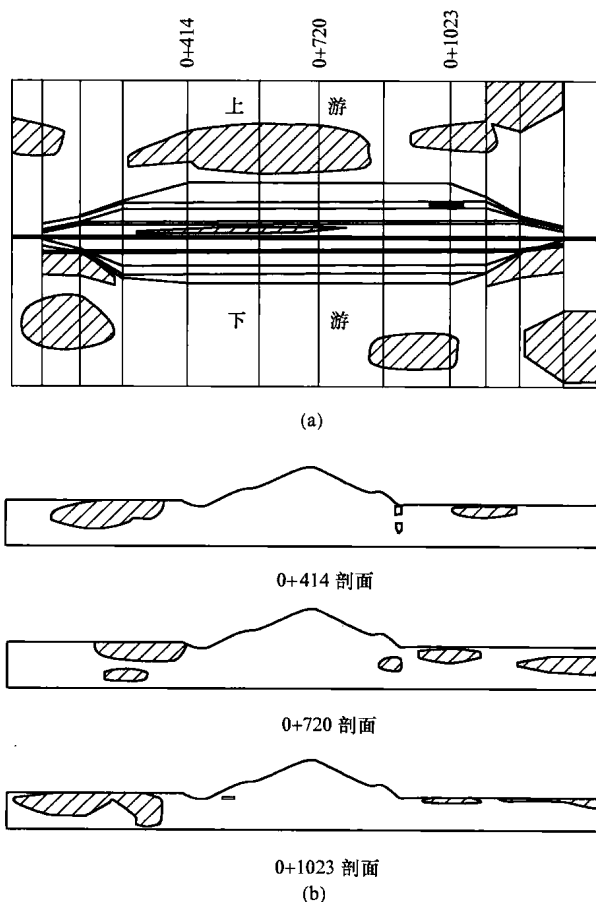


图9 大坝表面及典型剖面液化度达到100%的区域
(a) 大坝表面的液化区域; (b) 3个典型断面的液化区域

液化度达到 100% 的区域 (阴影部分)。由图可见, 大坝液化区域基本上集中在上、下游黄土地基中。计算得到的最大动孔隙水压力在 200kPa 以上, 最大液化深度约 12.5m, 位于距上游坝脚 50m 左右的上游坝基内。

4 抗震分析

4.1 抗震方案拟订

根据上述动力结构计算结果, 大坝黄土地基在地震时会发生液化现象, 因此, 需对坝基适当部位采用合适的抗液化加固措施。为此, 建议在易液化地基表面采用填土 (或堆石) 压重方案。该方案的最大特点是经济和便于施工, 曾应用于多个实际工程, 抗液化效果良好^[5,6]。针对该工程坝址附近土石料的分布情况, 建议地基上部采用碾压密实的填土进行压重。填土每铺筑层厚 80cm, 就用 13.5t 振动碾碾压; 填筑层厚 25cm, 则用 16.4t 羊足碾压实。填土的干重力密度要求达到 16.5kN/m^3 , 以保证有较高的内摩擦角和变形模量。

4.2 压重范围拟订

根据工程经验, 填土的铺设厚度和范围 (长度) 直接关系到下部地基的抗液化效果, 因此, 需要通过计算确定安全、经济的填土铺设厚度和长度。

地基发生液化时, 会出现喷沙冒水现象, 继而出现塌坑, 影响到坝体的安全。为了减少

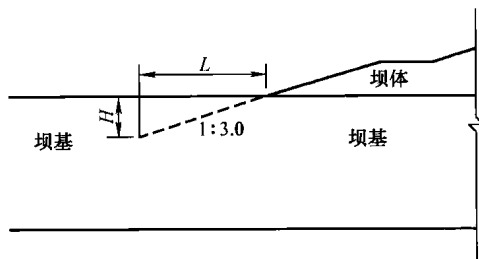


图 10 填土压重范围确定示意图

压重填土的方量, 应尽可能地使填土厚度小一些、铺设长度短一些, 但铺设长度至少应满足液化塌坑后形成的斜坡不影响到坝体安全的要求。假定塌坑的边坡为 $1:3.0$, H 为地基液化深度, L 为液化水平影响长度, 即为填土压重的最小长度 (见图 10)。通过这种方法可初步拟定填土压重的长度, 而后再进行不同填土厚度下的抗震效果分析。经多组方案的优化计

算后, 可最终确定安全、经济的填土铺设厚度和长度。

4.3 抗震效果分析

不同厚度和长度的填土压重方案的抗液化效果的比较分析表明: 当采用 3m 厚的压重填土时, 自上游坝脚向上游方向的压重长 70m, 自下游坝脚向下游方向的压重长 65m; 发生Ⅶ度地震时, 靠近上、下游坝脚部位的坝基原先液化度达到 100% 的区域消失, 基本不会发生液化。上、下游压重填土下部黄土地基中的动孔隙水压力峰值及同一数值动孔压等值线所包含的区域均较无压重前有明显减小。无压重时, 地基中动孔隙水压力峰值在 200kPa 以上, 而压重后峰值降至 100kPa 左右, 其余未进行填土压重部位的地基动孔隙水压分布情况变化不明显, 说明压重填土在地震时能有效降低地基中的动孔隙水压力峰值。远离坝脚压重填土的端部及更远部位下方可能液化的黄土地基即使发生液化, 其液化破坏范围也影响不到坝体安全。因此, 地震时坝体安全是有保障的。

5 结束语

本文对坝基 Q_3 黄土、 Q_2 黄土及筑坝黄土进行了动力试验研究, 得到了其动强度参数、动应力—应变关系曲线及用于大坝有效应力动力分析时计算动孔隙水压力的动孔压比 u_d/σ_3 与动剪应力比 τ_d/σ'_m 的试验曲线。对大坝进行动力分析后发现坝基将出现液化问题, 因此, 建议采取经济便利的填土压重抗液化措施, 并通过抗震效果的优化计算, 最终确定了压重填土的厚度和范围。

参考文献

- [1] 余湘娟, 房震, 鲍陈阳, 等. 煤矸石动强度特性试验研究. 岩土力学, 2005, 26(Supp.): 102-104.
- [2] SEED H B, MARTIN. Pore water pressure changes during soil liquefaction. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1976, 102(GT4): 323-346.
- [3] 徐志英, 沈珠江. 高尾矿坝的地震液化和稳定分析. 岩土工程学报, 1981, 3(4): 22-32.
- [4] 顾淦臣. 论土石坝的地震液化验算和坝坡抗震稳定计算. 岩土工程学报, 1981, 3(4): 33-42.
- [5] 孙明权, 顾淦臣. 堤坝边坡地震液化失稳有效应力法分析研究. 水利学报, 1999, 15(3): 63-68.
- [6] 顾淦臣. 土石坝地震工程. 南京: 河海大学出版社, 1989: 115-128.

汶川地震中水电工程安全监测设施的震损与分析

吴毅瑾 杨泽艳 李福云

(水电水利规划设计总院)

[摘 要] 《汶川地震灾区大中型水电工程震损调查与分析》一书中,选择装机容量大于30MW的不同规模、不同开发方式、不同坝型的22个水电工程,对震损现象、程度和原因及安全监测状况等进行了初步分析。本文对水电工程安全监测震损情况进行了统计,对其中工程规模较大、坝体较高及震损较重的典型工程监测仪器状态和成果进行了粗浅的分析,提出了有益的建议,可供同行参考。

[关键词] 汶川地震 水电工程 监测设施 震损 分析

1 概述

2008年5月12日14时28分,我国四川省汶川县发生了震惊世界的里氏8.0级特大地震。地震震中位于北纬 31.0° 、东经 103.4° ,震源深度约15km,震中最大烈度达Ⅺ度^[1]。灾区总面积约45万 km^2 ,其中极重灾区、重灾区面积达13万 km^2 。地震灾区共有大、中、小型水利水电工程约2360座,分布在四川、甘肃、陕西、重庆、湖北、云南等6省(市)。受灾较重的水电工程主要集中在岷江上游、涪江中上游及白龙江下游,还有汉江上游部分工程。初步统计表明,地震灾害共造成800余座水电工程受损,但无一溃坝,均未造成次生灾害。

按照国家发展改革委、国家能源局的要求,水电水利规划设计总院立即联合有关省(市)发改委、发电企业、设计院、科研单位和高等院校等单位,共同开展了全面、详细的水电工程震损调查工作。震损调查选择的装机容量大于30MW的22个水电工程^[2],基本涵盖了重灾区、极重灾区已建高坝枢纽及不同坝型、不同开发方式的水电工程,具有典型意义。在大量前期准备、现场调查及工作检查协调的基础上,对震损现象、震损程度、震害原因及安全监测状况等进行了初步分析。

地震灾区水电工程安全监测设施对评价工程安全发挥了重要作用。安全监测设施在震中的震损情况、监测成果资料广受关注。

2 监测设施震损现象

在本次调查的22个水电工程中,地震烈度影响较大的映秀湾、渔子溪、耿达和草坡4座工程安全监测设施震损严重或较重;10座工程安全监测设施震损轻微,基本能发挥应有作用,包括紫坪铺、碧口、宝珠寺和水牛家等几个100m级高坝工程;4座工程的安全监测设施待评估,包括重点调查工程沙坪因缺电暂无法检测;其余4座工程没有涉及安全监测系统运行情况。值得注意的是,除紫坪铺工程获得部分强震监测成果外,其余工程均