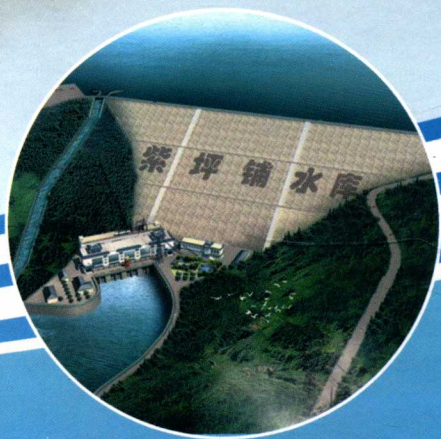


土石坝地震安全问题研究

陈生水 著



科学出版社

土石坝地震安全问题研究

陈生水 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书搜集了国内外多次大地震后土石坝工程的震损情况,分析了各类土石坝工程的地震震损模式和破坏机理。研发了高土石坝堆石料抗震特性多功能试验仪,针对多种筑坝堆石料开展了大型三轴试验研究,揭示了筑坝材料在静动力荷载作用下的颗粒破碎规律、强度与剪胀规律、残余变形与循环硬化规律以及振动液化规律等,并提出了堆石料的黏弹性本构模型和弹塑性本构模型。开发了我国首台离心机振动台模型试验系统,并提出了高土石坝地震动力离心模型试验外延分析方法,实现了大体积土石构筑物动态响应的离心模拟。利用离心机振动台研究了高面板坝和高心墙坝的地震加速度反应特性、大坝残余变形分布规律以及高土石坝地震破坏机理。在震害资料和离心模型试验结果基础上提出了高土石坝地震安全评价标准和极限抗震能力分析方法,并研发了基于黏弹塑性模型和弹塑性模型的计算分析软件,分析了典型高面板坝和高心墙坝的极限抗震能力及其影响因素。

本书可供高等院校水利水电工程专业师生、水利水电行业科研院所科研人员、岩土工程抗震从业人员等参考。

图书在版编目(CIP)数据

土石坝地震安全问题研究/陈生水著. —北京:科学出版社,2015.3

ISBN 978-7-03-043747-1

I. ①土… II. ①陈… III. ①土石坝-抗震性能-研究 IV. ①TV641

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第051500号

责任编辑:杨 琪 周 丹 程心珂/责任校对:胡小洁

责任印制:李 利/封面设计:许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:250 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

我国已建成各类土石坝近 9 万座，同时我国又是地震灾害频发的国家，因此土石坝地震安全问题一直广受政府与公众关注。随着水资源开发利用进程的推进，一批 200m 级甚至 300m 级的高土石坝正在建设或即将开工建设，这些高坝大库大多位于高地震烈度区，一旦因地震出险甚至发生溃决，后果将是灾难性的。因此深入研究土石坝地震破坏机理，进一步提升土石坝的地震安全评价、灾害预测与防控水平很有必要。

《土石坝地震安全问题研究》一书较为全面系统地介绍了作者及其研究团队近年来在高土石坝筑坝堆石料静动强度与变形特性试验、土石坝地震响应与破坏机理试验、土石坝地震安全评价理论与标准以及极限抗震能力计算分析方法等方面的最新研究成果，这些研究成果已成功应用于吉林台、紫坪铺、马来西亚巴贡、大石峡等重要高面板堆石坝，双江口、糯扎渡、长河坝、瀑布沟等重要高心墙堆石坝的地震安全评价与抗震设计方案优化，为有力提升土石坝的地震安全评价、灾害预测与防控水平提供了重要的理论与技术支撑。

作者及其研究团队长期从事土石坝地震安全评价、灾害预测与防控理论与技术研究，工作勤奋、学风严谨，在该研究领域具有较为深厚的理论基础和丰富的工程实践经验，我相信该书的出版对土石坝工程学科的发展将起到积极的推动作用。

我担任水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室学术委员会主任，多次负责作者研究团队相关科技成果鉴定审查，对其研究成果有所了解，因此乐于为序。

中国工程院院士



2015 年 1 月 28 日

前 言

我国已建成水库大坝 9.8 万多座，其中土石坝近 9 万座，是世界上土石坝数量最多的国家。随着水资源开发利用进程的推进和南水北调西线工程的实施，我国还将兴建一批高土石坝，其中双江口、两河口、大石峡、古水以及如美水电站坝高都将接近或超过 300m（可见正文表 1.1）。这些高坝大库多位于高地震烈度区，一旦因地震失事，后果将是灾难性的。因此，加强土石坝地震安全问题研究具有十分重要的意义。

作者及其研究团队 20 多年来一直致力于土石坝地震安全问题研究，近年来在国家自然科学基金重大研究计划集成项目“高土石坝地震灾变过程模拟与集成研究”（91215301），国家自然科学基金项目（51209141 & 51379129 & 51379130）以及水利部公益性行业科研专项经费项目“高土石坝极限抗震能力分析方法与工程应用（201501035）”的资助下，围绕土石坝筑坝材料静动力学特性和土石坝地震破坏机理试验技术与分析方法、土石坝地震安全评价理论和极限抗震能力分析方法与工程应用等方面开展了较为深入系统的研究，取得了一系列创新成果，这些成果已成功应用于吉林台、紫坪铺、马来西亚巴贡、大石峡、玛尔挡等高面板堆石坝，以及双江口、两河口、糯扎渡、长河坝、瀑布沟等高心墙堆石坝的抗震设计，为上述高土石坝的地震安全评价和抗震设计方案优化提供了重要技术支撑。本书是上述部分研究成果的总结。

全书共分五章，分别介绍了国内外部分典型土石坝的震害调查资料、高土石坝筑坝堆石料静动力强度与变形特性、土石坝地震响应与破坏机理离心模型试验方法与应用、土石坝地震安全计算理论与应用以及土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力分析方法及其工程应用。全书由陈生水主笔编写，傅中志、钟启明参与了第 2 章至第 5 章的编写工作，李国英、任强参与了第 1 章和第 5 章的编写工作，韩华强参与了第 2 章和第 4 章的编写工作。书中引用了国内外多位专家学者的成果，已在每章的参考文献中列出；本书的出版得到了南京水利科学出版社出版基金资助；中国工程院马洪琪院士为本书作序，使作者深受鼓舞，在此一并表示衷心感谢与敬意。

本书可供从事土石坝工程研究与安全管理人员参考，希望本书的出版有助于进一步提高我国土石坝的地震安全评价、灾害预测与防控的理论与技术水平。

土石坝地震安全问题涉及岩土力学、地震工程学、材料力学等多个学科，受作者学识水平与工程实践经验所限，书中难免存在许多不足甚至错误之处，恳请读者不吝指教。

作 者

2014 年 12 月 20 日

目 录

序

前言

第 1 章 土石坝震害调查分析	1
1.1 概述	1
1.2 混凝土面板堆石坝震害调查	2
1.2.1 紫坪铺混凝土面板堆石坝	2
1.2.2 智利 Cogoti 混凝土面板堆石坝	10
1.3 心墙堆石坝震害调查	12
1.3.1 碧口壤土心墙坝	12
1.3.2 水牛家心墙堆石坝	16
1.3.3 墨西哥 El Infiernillo 心墙堆石坝	17
1.3.4 墨西哥 La Villita 心墙堆石坝	18
1.3.5 美国 Anderson 心墙堆石坝	19
1.3.6 日本 Takami 心墙堆石坝	19
1.3.7 日本 Makio 心墙堆石坝	20
1.4 土坝震害调查	20
1.4.1 陡河水库土坝	20
1.4.2 密云水库白河主坝	22
1.4.3 马凤庵水库土坝	23
1.4.4 吴家大堰水库土坝	24
1.4.5 石道角水库土坝	26
1.4.6 美国 Austrian 土坝	27
1.4.7 美国 Hebgen 土坝	28
1.4.8 印度 Tapar 土坝	29
1.4.9 印度 Fategadth 土坝	30
1.5 土石坝震害及其原因分析	30
1.5.1 土石坝地震残余变形	31
1.5.2 坝体裂缝	37
1.5.3 坝体滑坡	37
1.5.4 地震液化	38

1.5.5 结构破坏	38
参考文献	39
第2章 高土石坝筑坝堆石料静动力强度与变形特性	41
2.1 概述	41
2.2 堆石料静动力学试验仪器	41
2.2.1 围压稳定技术	42
2.2.2 动态应变测量技术	44
2.2.3 长期保载技术	44
2.2.4 外体变量测技术	45
2.3 堆石料强度与变形特性试验研究	46
2.3.1 堆石料的强度与剪胀特性	46
2.3.2 堆石料的循环硬化特性	48
2.3.3 堆石料的应力应变滞回特性	49
2.3.4 堆石料的残余变形特性	54
2.4 堆石料的颗粒破碎特性及其影响因素研究	58
2.4.1 颗粒破碎的度量指标	58
2.4.2 静、动力条件下颗粒破碎试验	60
2.4.3 颗粒破碎的影响因素研究	64
2.5 砂砾石料抗震液化能力试验研究	66
2.5.1 试验过程与试验结果	68
2.5.2 Seed 地震液化判别方法对砂砾石料的适用性	69
2.5.3 砂砾石料地震液化简化判别方法	72
2.6 先期振动对堆石料变形特性的影响	75
2.6.1 试验材料与试验过程	76
2.6.2 试验结果分析	77
2.6.3 先期振动作用后粗粒土石料的变形规律	79
参考文献	80
第3章 土石坝地震响应与破坏机理离心模型试验方法与应用	83
3.1 概述	83
3.2 土石坝地震响应与破坏机理离心模型试验技术	84
3.2.1 国内外离心模型试验技术的发展概况	84
3.2.2 NHRI-400gt 大型离心机振动台模型试验系统	88
3.2.3 离心机振动台模型试验外延分析方法	89
3.3 离心模型试验的相似准则	92
3.3.1 静力学问题的相似准则	92

3.3.2 动力学问题的相似准则	94
3.3.3 薄板结构物的模拟	96
3.4 高土石坝地震响应的振动台离心模型试验研究	98
3.4.1 高混凝土面板堆石坝地震响应与破坏机理研究	98
3.4.2 高心墙堆石坝地震响应与破坏机理研究	106
参考文献	126
第4章 土石坝地震安全计算理论与应用	128
4.1 动力方程及其解法	128
4.1.1 动力平衡方程	128
4.1.2 动力方程隐式解法	130
4.1.3 动力方程显式解法	132
4.2 筑坝堆石材料本构模型	132
4.2.1 “南水”双屈服面弹塑性模型	132
4.2.2 广义塑性本构模型	138
4.2.3 考虑循环加载的弹塑性本构模型	141
4.2.4 动力黏弹性模型	150
4.3 高面板堆石坝的动力响应计算分析	151
4.3.1 工程概况	151
4.3.2 模型与参数	152
4.3.3 加载过程	153
4.3.4 主要计算结果	154
4.4 高心墙堆石坝的动力响应计算分析	162
4.4.1 工程概况	162
4.4.2 模型与参数	163
4.4.3 加载过程	164
4.4.4 主要计算结果	165
参考文献	169
第5章 土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力分析	172
5.1 概述	172
5.2 坝坡地震稳定安全控制标准	173
5.2.1 心墙堆石坝地震稳定安全控制标准	174
5.2.2 面板堆石坝地震稳定安全控制标准	175
5.3 坝体地震残余变形安全控制标准	175
5.4 面板接缝变形安全控制标准	176
5.5 土石坝极限抗震能力计算分析方法	178

5.5.1 土石坝黏弹性动力分析模型	179
5.5.2 土石坝弹塑性静力分析模型	180
5.6 高心墙堆石坝极限抗震能力计算分析案例	181
5.7 高面板堆石坝的极限抗震能力计算分析案例	184
5.8 结论与建议	186
参考文献.....	187

第 1 章 土石坝震害调查分析

1.1 概 述

地震灾害作为一种严重的自然灾害，能在瞬间成灾，使人的生命和财产遭受巨大损失。由于我国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带的交汇部位，受太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块的挤压，地震活动频度高、强度大、分布广，是一个地震灾害严重的国家（图 1.1）。最近几十年，我国已发生过多次灾害性的大地震，如 1966 年邢台地震、1970 年通海地震、1975 年海城地震、1976 年唐山地震、1996 年丽江地震、1997 年新疆喀什—阿图什地震、2008 年汶川地震以及 2013 年雅安芦山地震等^[1]。需要指出的是，我国是世界上土石坝数量最多的国家，各类土石坝总数近 9 万座。随着我国水资源开发利用进程的推进和南水北调西线工程的实施，还将兴建一批高土石坝，其中双江口、两河口、大石峡、古水以及如美水电站坝高都将接近或超过 300m（表 1.1）。这些

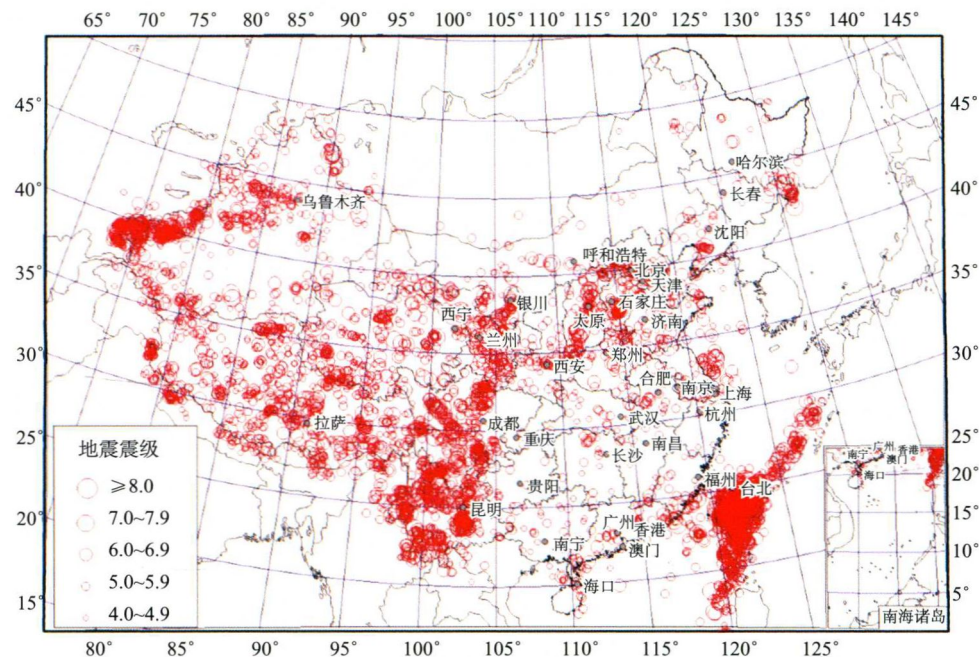


图 1.1 中国地震分布（截至 2014 年 12 月）

图片来源：由中国地震局李小军研究员提供

高坝大库多位于高地震烈度区，一旦因地震出险甚至溃决，后果将是灾难性的；因此，加强对土石坝地震安全问题的研究有十分重要的意义。本书较为系统地总结了作者研究团队近年来在土石坝筑坝堆石材料静动力强度与变形特性及其变化规律、土石坝地震响应与破坏机理试验技术、土石坝地震安全评价理论与极限抗震能力分析方法及其工程应用等方面的最新研究成果，并对该领域今后应重点开展的研究工作提出了建议。

表 1.1 国内部分超高土石坝工程一览表

省份	工程名称	河流	最大坝高/m	覆盖层深度/m	主坝坝型	设计加速度/ <i>g</i>	备注
湖北	水布垭	清江	233	—	混凝土面板堆石坝	0.1	已建
云南	糯扎渡	澜沧江	261.5	—	心墙堆石坝	0.283	已建
四川	长河坝	大渡河	240	80	心墙堆石坝	0.359	在建
四川	两河口	雅砻江	295	—	心墙堆石坝	0.288	在建
青海	茨哈峡	黄河	253	—	混凝土面板堆石坝	0.266	在建
青海	玛尔挡	黄河	211	—	混凝土面板堆石坝	0.299	在建
四川	猴子岩	大渡河	223.5	—	混凝土面板堆石坝	0.297	在建
四川	双江口	大渡河	314	60	心墙堆石坝	0.21	拟建
云南	古水	澜沧江	305	—	心墙堆石坝	0.2	拟建
新疆	大石峡	库玛拉克河	251	—	面板砂砾石坝	0.286	拟建
西藏	如美	大渡河	315	—	心墙堆石坝	0.1	拟建

1.2 混凝土面板堆石坝震害调查

1.2.1 紫坪铺混凝土面板堆石坝

紫坪铺混凝土面板堆石坝位于我国四川成都市西北 60km 都江堰市境内的岷江上游，该坝于 2005 年建成，最大坝高 156m，坝顶高程 884m，坝顶全长 664m，坝顶宽 12m，上游坝坡坡度 1：1.4，高程 840m 马道以上的下游坝坡为 1：1.5，高程 840m 马道以下的下游坝坡为 1：1.4。大坝地震设防烈度为 8 度，100 年超越频率 2% 的基岩水平峰值加速度为 260Gal^①。2008 年 5 月 12 日，距该坝以西仅 17km 的汶川县境内发生了里氏 8 级，震中烈度达 11 度的特大地震，根据安装在大坝坝顶地震加速度仪测得的峰值加速度推算，坝体基岩地震加速度

① 1Gal=1cm/s²

峰值超过 500Gal，地震烈度超过 9 度，持续时间约 120s。地震时的水库水位在 830m 高程左右，位于正常蓄水位以下 47m。作者在震后第一时间赶赴现场，通过原位测量与计算分析获得了该大坝较为详细的震害资料。

“5·12”汶川地震导致紫坪铺面板堆石坝发生明显损伤，主要表现为^[2-5]：

(1) 大坝产生了明显的地震残余变形。震后坝顶防浪墙中部测点 Y7（位于河谷坝体最大断面附近）的最大沉降量为 683.9mm；由于余震和大坝应力变形重分布，2008 年 5 月 17 日沉降量增大到 744.3mm（图 1.2）；45 天后沉降量最大值为 760.0mm，并趋于稳定。坝体内部水管式沉降仪观测到的地震引起的坝体沉降量分布如图 1.3 所示，从图中可以看出，坝体沉降量（H）随高程（EL）的增加而增大，且坝轴线下游坝体的沉降量明显大于坝轴线上游坝体的沉降量。5 月 17 日测得 850m 高程处坝体最大沉降量为 810.3mm，按照土石坝坝体地震残余变形的分布规律，位于该高程 34m 以上坝顶的震陷量应大于该值。右岸坝顶路面与岸坡（开敞式溢洪道边墙）出现 150~200mm 的错台沉降，如图 1.4 所示。图 1.5 与图 1.6 分别给出了大坝最大断面 820m 和 850m 高程处水管式沉降仪观测到的地震前后坝体沉降量变化过程。从图中可以看出，地震之前，大坝

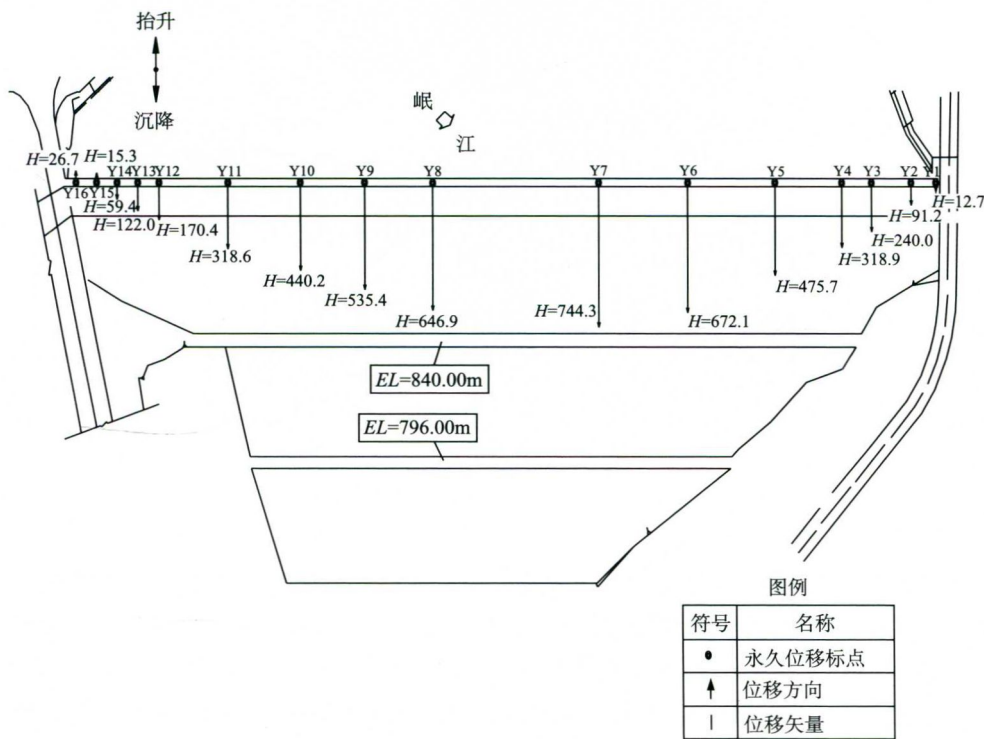


图 1.2 2008 年 5 月 17 日坝顶防浪墙测点沉降分布（mm）

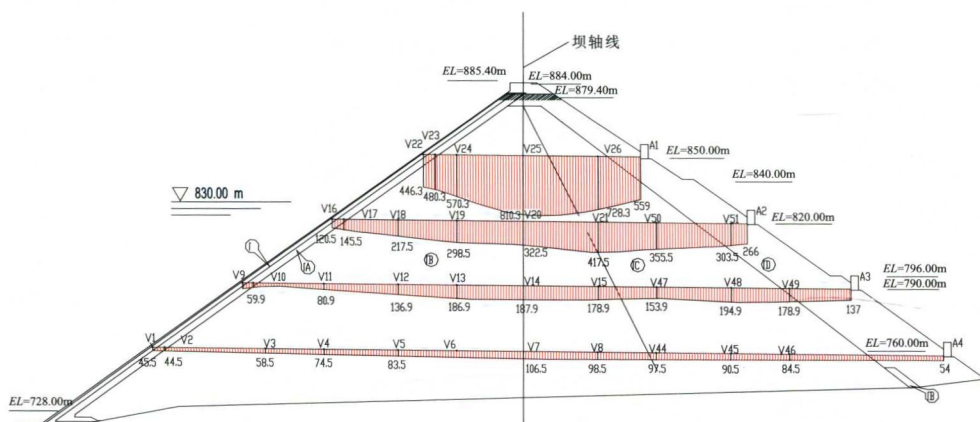


图 1.3 地震引起的坝体沉降量分布 (mm)



图 1.4 坝顶与右岸边坡间的错台沉降

内部沉降基本稳定, 各测点月沉降量在 5mm 左右, 沉降量与库水位有明显的相关性。比较地震前后沉降观测数据可发现, 地震前后坝体沉降过程线产生明显错台, 地震后各测点沉降量变化趋于稳定, 恢复到震前的变化规律。至 2009 年 8 月底, 各测点中的最大沉降值为 857.05mm, 发生在 850m 高程坝轴线附近的 V25 测点。

图 1.7 为 2008 年 5 月 17 日坝顶防浪墙测点水平位移分布, 从中可以看出,

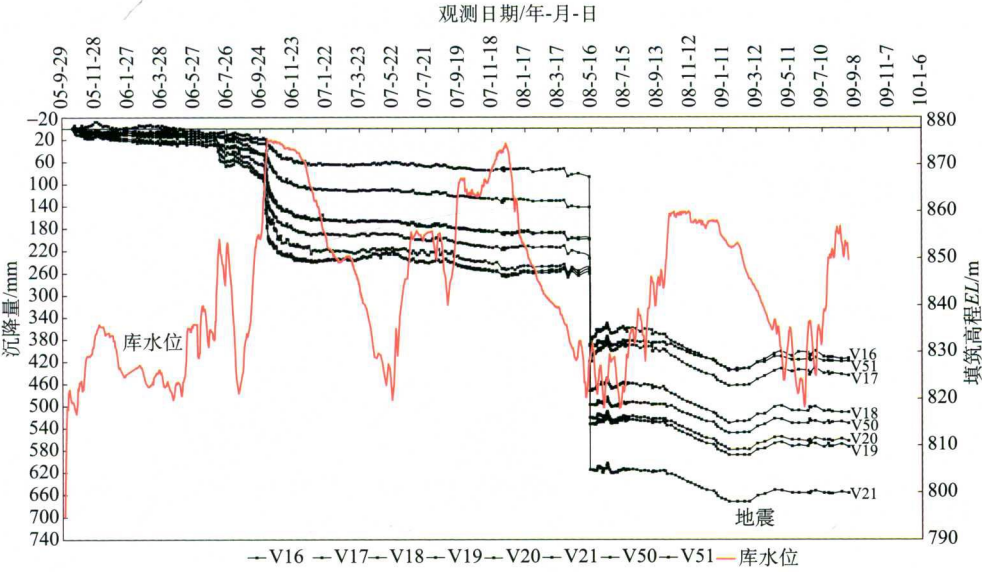


图 1.5 大坝最大断面 820m 高程地震前后坝体沉降量变化过程

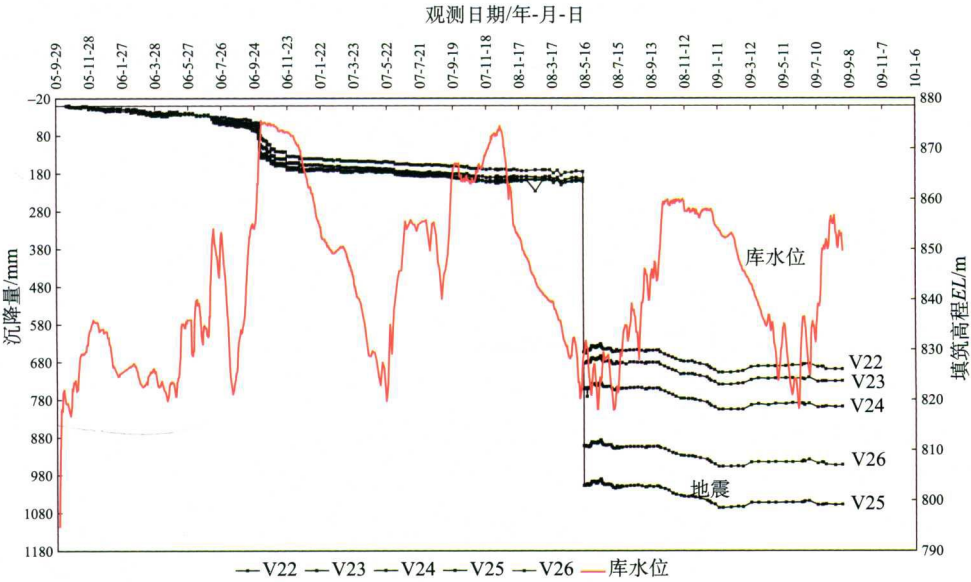


图 1.6 大坝最大断面 850m 高程地震前后坝体沉降量变化过程

坝轴线上游坝体上下游方向的地震残余水平位移均指向下游方向，最大值为 199.9mm，位于河谷坝体最大断面；坝体左右坝段坝轴线方向的水平位移均指

向河谷，岸坡较陡的左坝段地震残余水平位移的最大值大于岸坡相对缓的右坝段地震残余水平位移，其值分别为 226.1mm 和 106.8mm。图 1.8 为坝轴线下游坝体地震残余水平位移分布，从图中可以看出，随着坝体高程增加，地震残余水平位移值增大，位于 850m 高程的 Y20 观测点测得水平位移值最大，其值为 270.8mm，按照土石坝地震残余变形的分布规律，处于该高程 34m 以上下游坝体坝顶的水平位移值应更大，因此，地震产生的下游坝体的水平位移明显大于上游坝体的水平位移。图 1.9 给出了地震引起的坝顶路面和坝顶下游人行道的开裂情况，裂缝最大宽度达 630.0mm，这进一步证实了下游坝坡和坝顶交界处的水平位移将更大的推断。

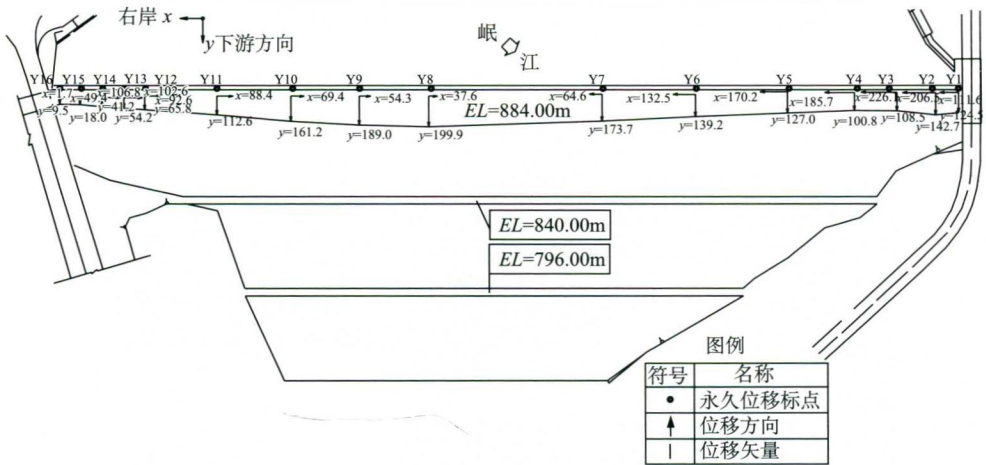


图 1.7 2008 年 5 月 17 日坝顶防浪墙测点水平位移分布 (mm)

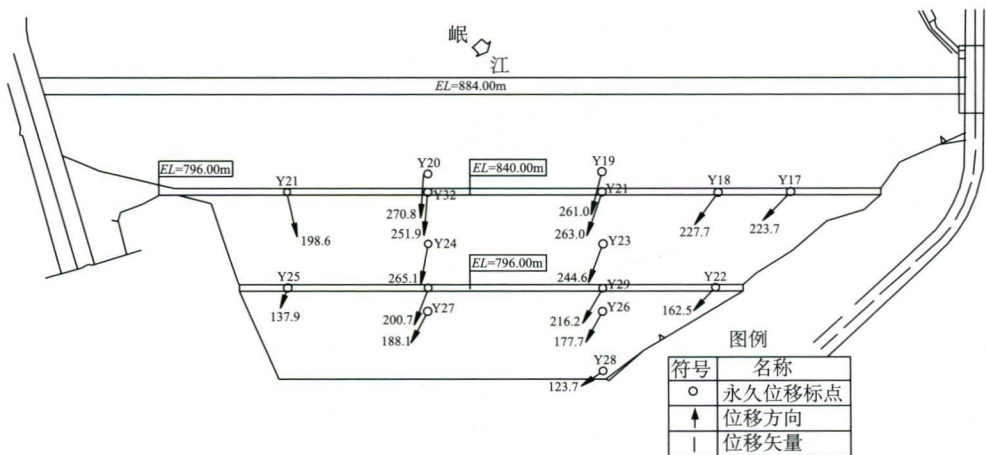


图 1.8 2008 年 5 月 17 日下游坝体水平位移分布 (mm)

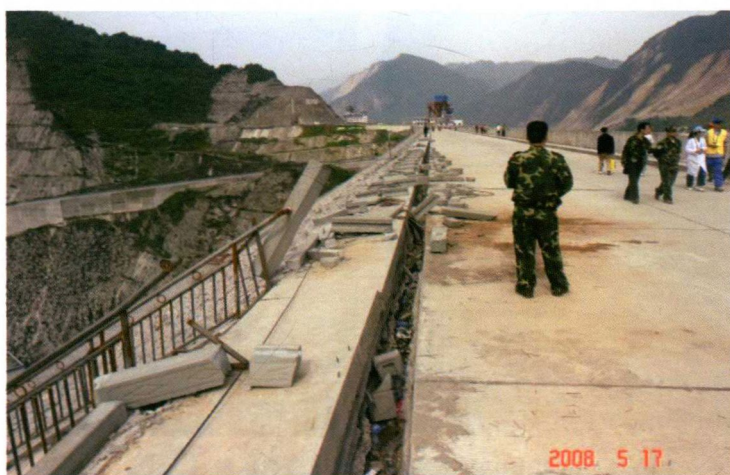


图 1.9 地震后大坝坝顶裂缝

(2) 地震造成混凝土面板周边缝发生明显变位。安装在左坝肩 833m 高程附近的 Z_2 号三向测缝计测得该处周边缝的沉降量、张开度、剪切位移分别从震前的 1.59mm、11.99mm 和 4.67mm 增加到 92.85mm、57.85mm 和 13.42mm；右坝肩靠近河床底部 745.00m 高程附近的 Z_9 三向测缝计测得的沉降量、张开度、剪切位移分别从震前的 10.82mm、6.03mm 和 9.08mm 增加到 53.86mm、34.89mm 和 58.39mm。右岸靠近坝顶附近的 Z_{12} 测点的最大剪切位移也达到了 46.00mm。

(3) 混凝土面板垂直缝挤压破坏。由于汶川地震波传播方向由西向东，与坝轴线方向大体一致，因此地震力沿坝轴向强烈地振动挤压混凝土面板，加之大坝左右坝段水平位移均指向河谷、挤压中间坝段，导致面板部分垂直缝挤压破坏，以左坝肩附近 5#~6# 面板接缝与河谷大坝最大断面附近 23#~24# 面板接缝挤压破坏最为明显。如图 1.10 所示，23# 面板 845m 高程以下结构缝附近有宽约 2m 的混凝土被挤压隆起，长度延伸至当时库水位以下的 821m 高程，这应该与该部位坝体地震残余变形不均匀且较大有关；其他部位多块混凝土面板出现宽度 0.5~2.0mm 不等的裂缝，面板接缝也有一定程度损伤，但没有 23#~24# 接缝处破坏严重。

(4) 混凝土面板发生脱空和错台。地震引起的坝体残余变形导致混凝土面板出现较大范围的脱空现象，845m 高程二、三期混凝土面板施工缝发生错台。左坝段 845m 高程以上的三期混凝土面板大多脱空，高程愈大，脱空愈明显，最大脱空量达 230mm；右坝段三期面板顶部（879.4m 高程）全部脱空，脱空值在 200mm 左右；靠近左坝肩 845m 高程以下的二期混凝土面板也出现脱空，但脱空