

紫坪铺面板堆石坝 震害分析与数值模拟

孔宪京 邹德高/著



科学出版社

紫坪铺面板堆石坝震害分析 与数值模拟

孔宪京 邹德高 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系面板堆石坝抗震研究方面的专著,主要介绍“5·12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板堆石坝造成的震害及其数值模拟成果。

本书共分7章,内容包括:紫坪铺面板堆石坝震害;汶川地震紫坪铺面板堆石坝的地震动输入;面板堆石坝静、动力分析方法;土石坝等土工构筑物的有限元软件开发;紫坪铺面板堆石坝筑坝材料大型三轴试验及参数标定;紫坪铺面板堆石坝施工过程的三维弹塑性有限元模拟;紫坪铺面板堆石坝的三维弹塑性地震反应分析。

本书可作为水工结构工程、防灾减灾工程、岩土工程专业的研究生教材和教学参考书,也可以作为水利水电工程、土木工程及相关专业的设计、施工和科研的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

紫坪铺面板堆石坝震害分析与数值模拟/孔宪京,邹德高著. —北京:科学出版社,2014.6

ISBN 978-7-03-040634-7

I. ①紫… II. ①孔…②邹… III. ①堆石坝-地震灾害-数值模拟-研究-都江堰市 IV. ①TV641.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 098876 号

责任编辑:吴凡洁 / 责任校对:张凤琴

责任印制:阎磊 / 封面设计:无极书装

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年6月第 一 版 开本:(720×1000) B5

2014年6月第一次印刷 印张:13

字数:238 000

定价:65.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

地震是自然界中机理最复杂、作用最强烈的外荷载之一,其突发性、难以预测性和灾害严重性是对水工建筑物安全最为严峻的考验,修建于复杂地质条件下的高坝大库,其地震风险指数会进一步增高。

2008年5月12日,汶川发生了8.0级大地震。紫坪铺面板堆石坝距汶川地震震源约17km,坝址区震感强烈,是目前为止世界上唯一的一座遭遇强震并且坝高超过150m的混凝土面板堆石坝,因此其抗震安全性令世界瞩目。

尽管紫坪铺面板堆石坝经受住了这次超常地震的考验,但也发生了明显的震害,包括:发生了明显的地震永久变形;面板二、三期施工缝发生错台;面板结构缝遭挤压破坏;靠近坝顶附近的下游坡面砌石松动、翻起,并伴有向下滑移乃至滚落等。然而,到目前为止紫坪铺面板堆石坝的震害机理却尚未完全阐明。

长期以来,由于缺乏强震情况下的震害资料,高面板堆石坝震害机理的深入研究也因此受到限制,其分析方法得不到有效验证。目前,面板堆石坝动力分析广泛采用的等效线性分析方法适应于中、低强度地震的加速度反应,不能满足大坝在强震环境中可能出现的强非线性乃至破坏过程分析要求。紫坪铺面板堆石坝面板出现的挤压破坏和施工缝错台等破坏形式,在以往分析中均没有被充分考虑。因此,从等效线性分析转向强非线性和弹塑性分析是十分必要的。紫坪铺面板堆石坝在汶川地震中的震害资料为深入研究高土石坝地震破坏机理和数值模拟方法提供了一个不可多得的契机。在此基础上,发展先进的高混凝土面板堆石坝地震破坏分析方法,对揭示紫坪铺面板堆石坝震害机理,进一步类比评价我国多座待建的300m级面板堆石坝的抗震安全性是非常重要的,也有助于正确评估大坝的极限抗震能力、建议有效的抗震减灾方法及其加固措施。

本书作者多年来一直致力于地震时土石坝破坏机理及其抗震对策的研究。汶川地震后,在多项国家自然科学基金的资助下,开展了紫坪铺面板堆石坝震害调查、紫坪铺面板堆石坝筑坝材料特性、混凝土面板堆石坝动力弹塑性分析方法和软件开发、紫坪铺面板堆石坝施工和震害模拟等方面的研究。本书的主要目的是介绍这些研究成果,希望能够抛砖引玉,对国内同行的教学、

科研和高土石坝的抗震设计起到借鉴和帮助的作用。

在编写过程中,大连理工大学工程抗震研究所徐斌博士、周扬博士以及博士研究生周晨光、刘京茂等在这方面给予了大力支持和帮助。在此,作者对他们深表感谢!

本书的研究工作得到国家自然科学基金重点项目(51138001)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51121005)、国家自然科学基金重大计划集成项目(91215301)、国家自然科学基金面上项目(51279025)的资助,在此表示感谢!

由于作者水平和经验所限,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请同行和读者批评指正。

作 者

2013年5月

目 录

前言

第 1 章 紫坪铺面板堆石坝震害	1
1.1 工程概况	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 水文气象	3
1.1.3 地形地质条件	4
1.2 大坝震害	4
1.2.1 大坝变形	6
1.2.2 大坝防渗系统	7
参考文献	12
第 2 章 汶川地震紫坪铺面板堆石坝的地震动输入	13
2.1 地震动记录	13
2.1.1 紫坪铺观测台阵的主震记录	13
2.1.2 紫坪铺观测台阵余震记录	17
2.2 汶川地震紫坪铺面板堆石坝的地震动输入	30
2.2.1 地震动时程	31
2.2.2 坝顶的地震加速度反应谱对比	35
参考文献	37
第 3 章 面板堆石坝静、动力分析方法	38
3.1 筑坝堆石料的本构模型	38
3.1.1 静力本构模型	38
3.1.2 动力本构模型	46
3.1.3 残余变形模型	50
3.1.4 广义塑性静、动力本构模型	52
3.2 筑坝堆石料接触面本构模型	63
3.2.1 Clough-Duncan 双曲线模型	63
3.2.2 理想弹塑性接触面模型	63

3.2.3 弹塑性损伤接触面模型	64
3.2.4 广义塑性接触面模型	65
3.3 面板堆石坝静、动力分析方法	91
3.3.1 面板堆石坝非线性分析方法	91
3.3.2 面板堆石坝残余变形分析方法	97
参考文献	99
第4章 土石坝等土工构筑物的有限元软件开发	104
4.1 软件开发的有限元分析理论	105
4.1.1 控制方程	105
4.1.2 有限元离散和求解	107
4.2 软件的开发技术	110
4.2.1 开发的操作系统平台	110
4.2.2 开发的环境和语言	110
4.2.3 面向对象设计	110
4.2.4 并行计算	117
4.2.5 命令行式的数据输入	120
4.3 有限元类库	122
4.3.1 单元类型库	122
4.3.2 荷载类型库	126
4.3.3 本构模型库	127
4.4 软件的前后处理模块	128
4.4.1 前处理模块	128
4.4.2 后处理模块	130
4.5 软件计算功能	132
4.6 软件可靠性验证	138
4.6.1 静力问题	138
4.6.2 固结问题	142
4.6.3 动力问题	144
4.7 软件工程应用	153
参考文献	154
第5章 紫坪铺面板堆石坝筑坝材料大型三轴试验及参数标定	156
5.1 大型三轴仪介绍	156

5.1.1 设备构成和性能指标	156
5.1.2 主要特色及其精度	160
5.1.3 代表性试验成果	162
5.2 紫坪铺面板堆石坝筑坝材料的基本物理特性	163
5.2.1 颗粒材料的基本物性	164
5.2.2 颗粒级配	164
5.3 单调加载下的应力和变形特性	165
5.3.1 试验过程	165
5.3.2 试验结果	165
5.4 循环加载下的应力和变形特性	167
5.4.1 循环试验	167
5.4.2 循环荷载试验结果	167
5.5 广义塑性模型参数标定	169
参考文献	170
第 6 章 紫坪铺面板堆石坝施工过程的三维弹塑性有限元模拟	171
6.1 紫坪铺设计断面	171
6.2 大坝的填筑和蓄水进度	174
6.3 有限元网格	175
6.4 材料参数	176
6.5 大坝应力和变形分析	178
6.5.1 测点位移	178
6.5.2 大坝整体变形	179
6.5.3 面板变形与应力	180
参考文献	182
第 7 章 紫坪铺面板堆石坝的三维弹塑性地震反应分析	183
7.1 地震动输入	183
7.2 动水压力	184
7.3 边界条件和材料参数	184
7.4 计算控制参数	186
7.5 动力反应结果分析	186

7.5.1	加速度反应	186
7.5.2	大坝变形	187
7.5.3	面板应力	194
7.5.4	施工缝错台	196
参考文献		199

第 1 章 紫坪铺面板堆石坝震害

2008 年 5 月 12 日,我国四川省汶川县发生了 8.0 级大地震。这是新中国成立以来影响最大的一次地震,震级是自 2001 年昆仑山大地震(8.1 级)后的第二大地震,直接严重受灾地区达 10 万 km^2 。汶川地震强度大、持续时间长、影响范围广,其破坏性巨大(陈厚群等,2008;孔宪京等,2009)。紫坪铺面板堆石坝坝址距汶川地震震源约 17km,坝址区震感强烈。紫坪铺面板堆石坝是目前为止世界上唯一一座遭遇强震并且坝高超过 150m 的混凝土面板堆石坝,因此系统地分析、总结大坝的震害,对指导高土石坝工程的安全性评价具有十分重要的意义。

1.1 工程概况

1.1.1 概述

紫坪铺水利枢纽工程(见图 1.1)位于四川省成都市西北 60 余公里的岷江上游麻溪乡(由水利部四川水利水电勘测设计研究院设计),距都江堰市 9km,是一座以灌溉和供水为主,兼有发电、防洪、环境保护和旅游等综合效益的大型水利枢纽工程,也是都江堰灌区和成都市的水源调节工程。

紫坪铺水利枢纽工程的主要建筑物,包括混凝土面板堆石坝、溢洪道、引水发电系统、冲砂放空洞、1[#]泄洪排砂洞和 2[#]泄洪排砂洞。水库校核洪水位 883.10m,相应洪水标准为可能最大洪水,流量 $12700\text{m}^3/\text{s}$;设计洪水位 871.20m,相应洪水标准为千年一遇($P=0.1\%$),流量为 $8300\text{m}^3/\text{s}$;正常蓄水位 877.00m,汛限水位 850.00m,死水位 817.00m,总库容 11.12 亿 m^3 ,正常水位库容 9.98 亿 m^3 ,电站装机 $4\times 190\text{MW}$,保证出力 168MW,多年平均发电量 34.17 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。该工程等别为一等,主要建筑物等别为 I 级。其中,混凝土面板堆石坝坝顶长度 663.77m,坝高 156m,坝顶高程为 884.00m,上游坝坡 1:1.4,面板趾板最低建基高程 728.00m。面板分三期施工,其中一、二期面板浇筑顶高程分别为 796.00m 和 845.00m。汶川地震时库水位为 828.7m。大坝的平面布置和典型断面分别如图 1.2 和图 1.3 所示。



图 1.1 紫坪铺水利枢纽工程

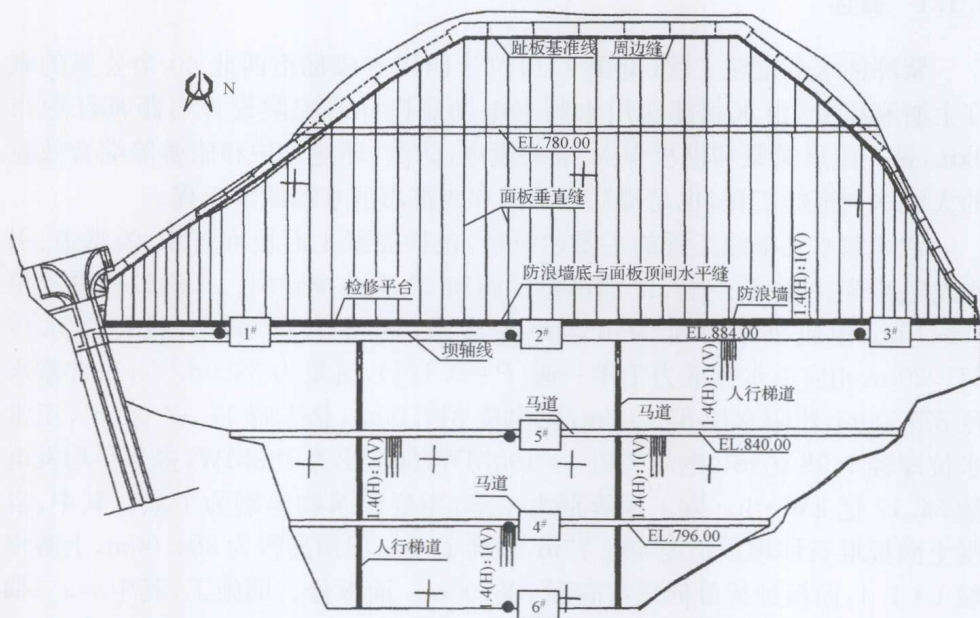


图 1.2 紫坪铺面板堆石坝平面布置

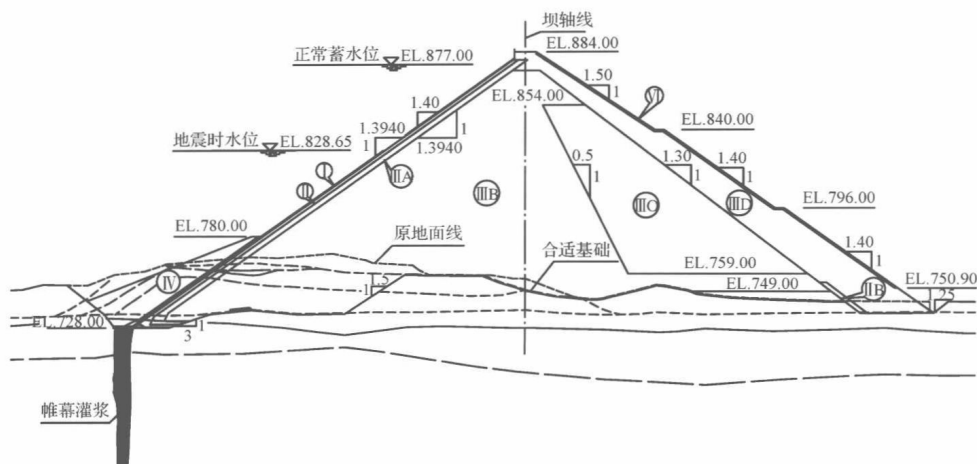


图 1.3 紫坪铺面板堆石坝典型断面

1.1.2 水文气象

紫坪铺水利枢纽坝址控制集水面积 22662km², 占岷江上游流域面积的 98%。岷江上游三面高山环绕, 高山海拔多在 4000m 以上, 上游地势西北高、东南低, 具有高山和山地地貌的特点。茂县以上为松潘平原, 海拔多在 3000~4000m, 河源至松潘西陵关之间地势平缓, 相对高差较小, 西陵关至茂县为峡谷型河道, 沿河岭谷高低悬殊, 坡陡谷深, 滩多弯急, 河床深切, 断面多呈“V”形, 河道比降在 10% 以上。茂县至汶川, 地面高程突然下降, 河谷较上游开阔, 河道比降约为 5%。汶川至映秀湾为高山峡谷, 河道比降约为 8%。映秀湾至都江堰河段, 岷江逐渐进入平原, 河道比降约为 4.9%。岷江上游地处龙门山断裂带, 茂县以上地质构造复杂, 地震活动频繁, 为四川省有名的高地震区。茂县至汶川一带, 岩石风化破碎, 植被较差, 汶川至漩口一带暴雨强度较大, 滑坡、崩塌、泥石流发生较频繁, 是岷江上游泥沙的主要来源区(高希章和杨志宏, 2002)。

岷江上游受地形变化的影响,气候在地域上差异较大,具有川西高原气候区和川东盆地亚热带气候区的特点。上游北部为寒冷高原区,多年平均气温 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$,多年平均年降雨量 $600\sim 700\text{mm}$ 。中部的沙坝、茂县、汶川一带,由于地处茶坪山的背风坡,受下沉气流的影响,呈现干旱少雨的特点,年降雨量为 $400\sim 600\text{mm}$ 。映秀湾至都江堰一带,具有盆地亚热带气候区的特点,气候温和湿润,日照少、雨水多,年降水量大,多年平均气温约 15°C ,多年平均降雨

量 1000~1600mm。

紫坪铺水利枢纽所在地多年平均气温为 15.2℃,极端高温天气 34.0℃,极端最低气温 -5.0℃。多年平均降水量 1246.8mm,最大年降水量 1605.4mm,最小年降水量 713.5mm。年平均蒸发量 921.5mm,多年平均风速 1.3m/s,最大风速 17m/s,多年平均相对湿度 80.7%,多年平均日照时数 1030h。

1.1.3 地形地质条件

岷江在坝址区沙金坝河段形成 180°的转弯河曲,使右岸形成长约 1000m、底宽 400~650m 的右岸条形山脊。河谷呈不对称“V”形谷,左岸以基岩斜坡为主,自然坡度 40°~50°,右岸条形山脊地表多为覆盖层,自然坡度 20°~25°。

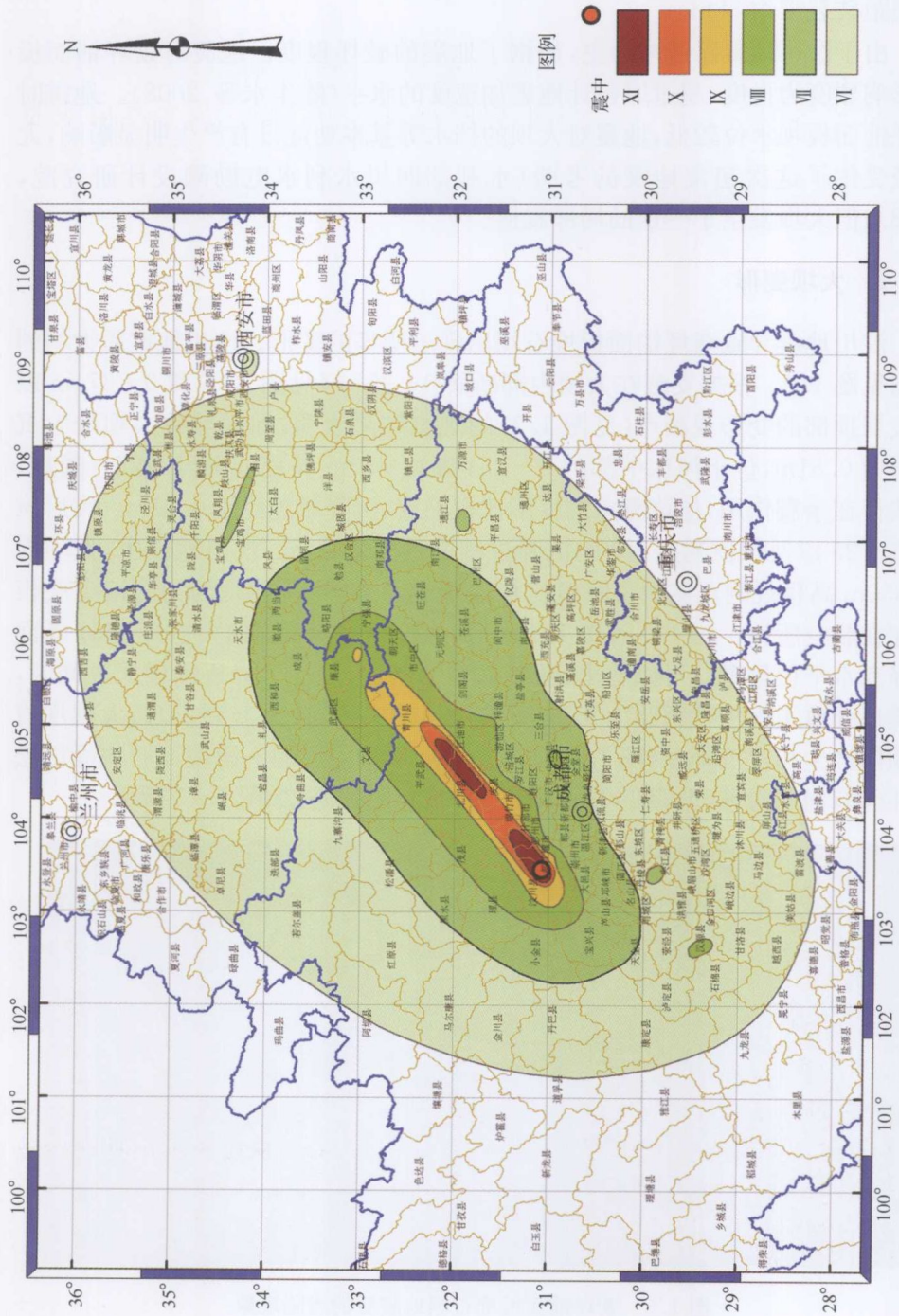
坝址位于四川盆地西北侧,坝址以上水库回水长度 24.6km。水库以北出露地层为元古界澄江—晋宁期岩浆岩、震旦系喷出岩,水库和坝址区及以南由泥盆系—二叠系碳酸盐岩(飞来峰)和三叠系上统砂页岩组成,这些地层多数被断层所切割(宋彦刚等,2009)。

区域构造部位位于北东向龙门山构造带的中南段,基本构造主要是由平武—茂汶断裂、北川—映秀断裂、安县—灌县断裂、彭灌复背斜和懒板凳—白石飞来峰构造所组成。坝址区即位于北川—映秀与安县—灌县断裂所挟持的断块上,三条主干断裂的地震活动均具有分段性,但历史上在不同地段发生的中强地震对坝址区最大影响烈度均未超过Ⅶ度(中国水利水电科学研究院等,2012)。经中国地震局分析预报中心复核鉴定确认,坝址场地地震基本烈度为Ⅶ度,50 年超越概率 10% 和 100 年超越概率 2% 的基岩水平向峰值加速度分别为 120.2gal^① 和 259.6gal。

1.2 大坝震害

汶川地震是由青藏高原东面、向四川盆地过渡区的龙门山断裂带中,北川—映秀断裂突然发生错动引发的(徐锡伟等,2008)。从震中汶川县开始破裂,以平均 3km/s 的破裂速率向北偏东方向传播,破裂长度约 300km,北川南的地表右旋位移 6.4m,垂直位移 5.6m,破裂过程总持续时间长达 120s,震中最大烈度高达Ⅺ度(见图 1.4)。按照断层破裂的发展方向看,紫坪铺面板堆

^① 1gal=0.01m/s²。



石坝距破裂带约 8km。

由于汶川地震以逆冲为主,加剧了地震的破坏程度。地震对紫坪铺面板坝影响烈度为Ⅷ度,超过原设计地震加速度的水平(陈生水等,2008)。地震时紫坪铺面板坝水位较低,地震对大坝的挡水等基本功能没有产生明显影响,大坝经受住了这次超常地震的考验(水利部四川水利水电勘测设计研究院,2008),但大坝发生了一定的局部震损。

1.2.1 大坝变形

汶川地震导致紫坪铺面板堆石坝出现了明显的变形。汶川地震后大坝的震陷见图 1.5。根据安装在大坝内部断面 0+251m(见图 1.6)和 0+371m 以及大坝顶部的变形观测点(见图 1.7)的观测结果表明,地震导致大坝最大沉降值为 0.81m,位于河床中部的 0+251 断面 850m 高程处测点 V25。随后,虽然存在余震作用,但该测点的变形比较稳定,沉降量趋稳于 0.81m。震后该测点 V25 以及坝顶测点 Y7 的沉降过程曲线见图 1.8。汶川地震中,大坝内部 850m 高程观测点实测沉降值比坝顶观测点大,这可能是因为防浪墙底板下存在脱空所致。图 1.9 和图 1.10 分别为汶川地震引起的大坝 0+251 断面沉降和水平位移图。可以看出,随着高程的增加,坝体沉降逐渐增大。同时,地震还导致了大坝坝顶路面开裂,下游坝顶护栏倒塌(图 1.11(a));大坝坝肩与坝体产生相对沉降差(图 1.11(b))。靠近坝顶附近的下游坡面石块局部松动并伴有向下滑移,但靠近坝顶浆砌石护坡相对完好,如图 1.12 所示。

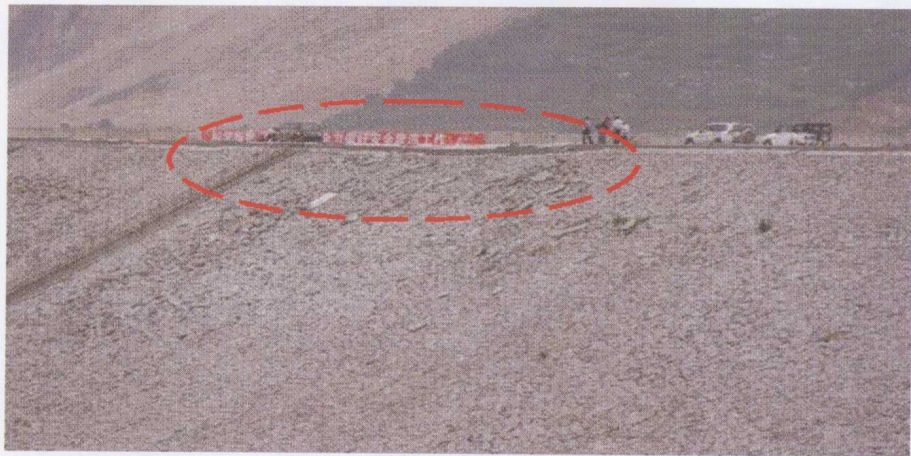


图 1.5 紫坪铺面板堆石坝地震后的震陷现象

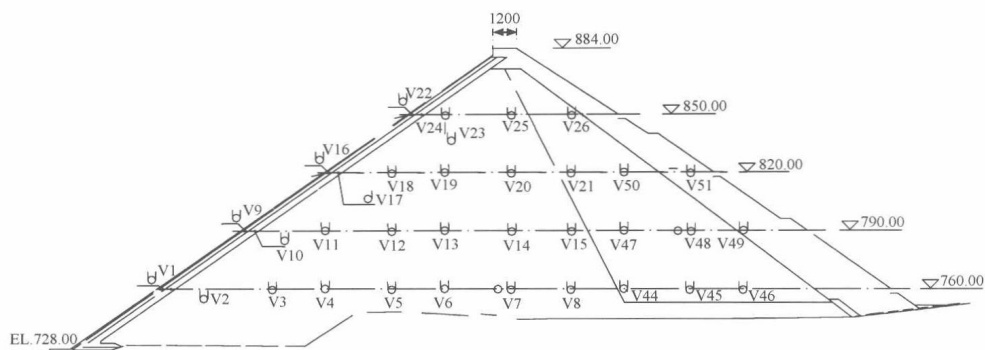


图 1.6 大坝 0+251 断面测点布置

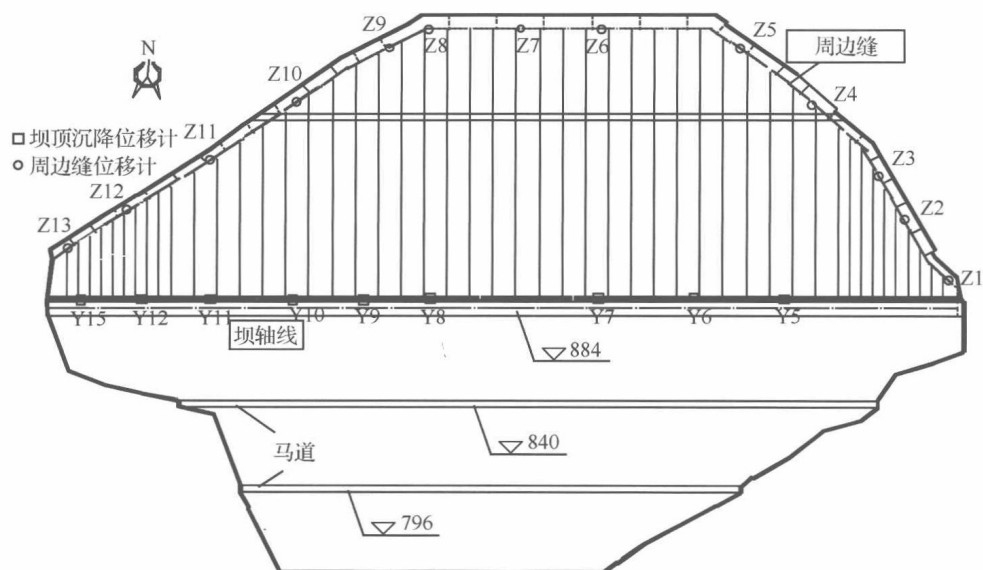


图 1.7 大坝坝顶沉降观测点及周边缝位移观测点分布

1.2.2 大坝防渗系统

汶川地震除了导致紫坪铺面板堆石坝出现明显的变形外,还使大坝的防渗系统出现了明显的破坏。主要表现为:

(1) 二期与三期面板施工缝发生了错台,如图 1.13 所示。5[#]~12[#]面板错台量为 15~17cm,14[#]~23[#]面板错台量为 12~15cm,30[#]~42[#]面板错台量为 2~9cm。图 1.14 为二期与三期面板之间错台的实拍照片,二期面板与

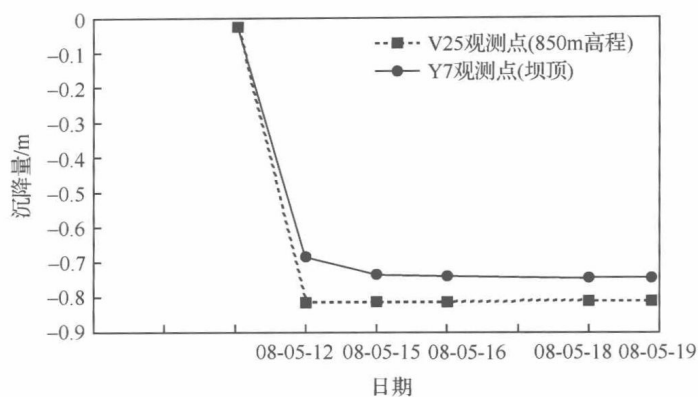


图 1.8 汶川地震紫坪铺面板堆石坝观测点沉降过程

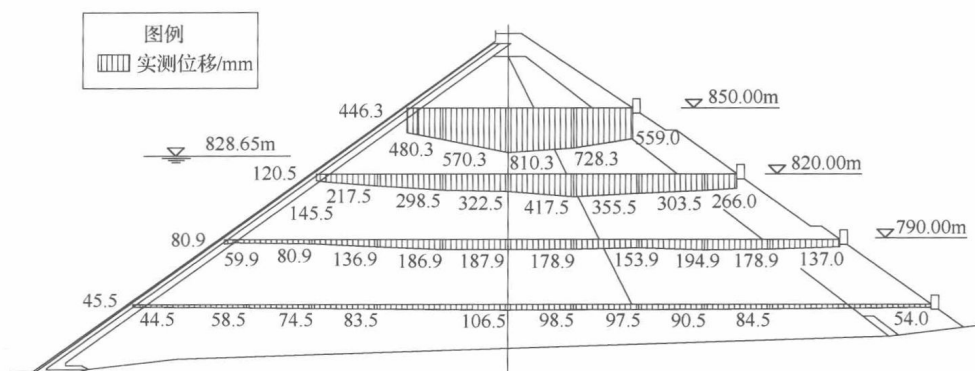


图 1.9 汶川地震紫坪铺面板堆石坝 0+251 断面沉降

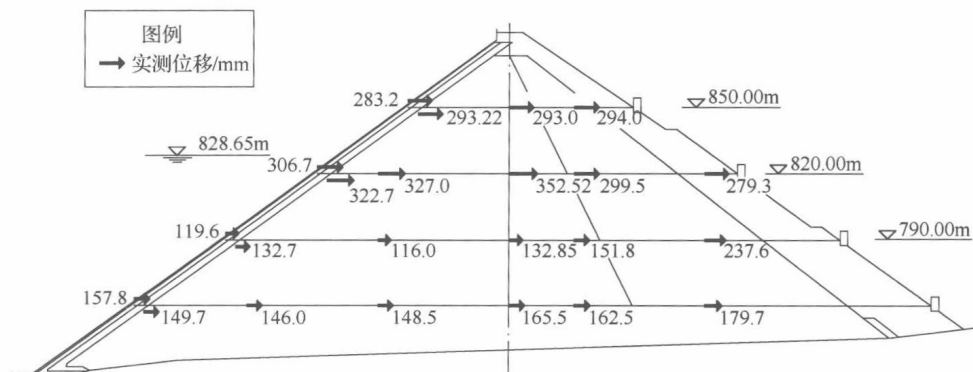


图 1.10 汶川地震紫坪铺面板堆石坝 0+251 断面水平位移