

# 重力坝

## 地震损伤可靠度分析

——强震随机性统计·方法·程序

何金文 李同春 刘晓青 著

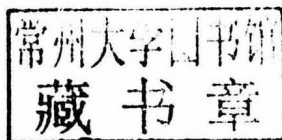


河海大学出版社  
HOHAI UNIVERSITY PRESS

# 重力坝地震损伤可靠度分析

——强震随机性统计·方法·程序

何金文 李同春 刘晓青 著



河海大学出版社  
HOHAI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书系统介绍了重力坝地震损伤可靠度分析中涉及的强震随机性统计、方法和程序。全书分四篇 13 章,第一篇抗震设计反应谱特征参数的随机性统计,包括强震数据来源与统计数据基础、抗震设计反应谱特征参数标定方法、水平向和竖向抗震设计反应谱统计、抗震设计反应谱衰减指数研究;第二篇可靠度分析方法,涵盖可靠度基本概念、正交试验低阶响应面法、高阶随机响应面法;第三篇重力坝坝头地震损伤可靠度分析模型与案例;第四篇程序开发与说明,包括反应谱特征参数标定程序、相关非正态随机数序列生成程序和高阶随机响应面可靠度程序的开发。本书理论和方法实施并重,并给出了相应的计算机程序,旨在为水工建筑物抗震提供一套既能反映地震动力特性又能反映结构动力特性的非确定性分析方法。

本书可供高等院校有关专业教师、研究生、高年级本科生使用,也可供工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

重力坝地震损伤可靠度分析:强震随机性统计·方法·程序 / 何金文, 李同春, 刘晓青著. -- 南京: 河海大学出版社, 2019.4(2019.5 重印)

ISBN 978-7-5630-5893-8

I. ①重… II. ①何… ②李… ③刘… III. ①重力坝—地震反应分析 IV. ①TV649

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 031969 号

- |      |   |
|------|---|
| 书 名  | 重力坝地震损伤可靠度分析——强震随机性统计·方法·程序                           |
| 书 号  | ISBN 978-7-5630-5893-8                                |
| 责任编辑 | 金 怡   |
| 特约校对 | 郑 森 杨大山   |
| 封面设计 | 徐娟娟   |
| 出版发行 | 河海大学出版社   |
| 网 址  | <a href="http://www.hhup.com">http://www.hhup.com</a> |
| 地 址  | 南京市西康路 1 号(邮编:210098)                                 |
| 电 话  | (025)83737852(总编室) (025)83722833(营销部)                 |
| 经 销  | 江苏省新华发行集团有限公司   |
| 排 版  | 南京新翰博图文制作有限公司   |
| 印 刷  | 虎彩印艺股份有限公司  |
| 开 本  | 787 毫米×1092 毫米 1/16                                   |
| 印 张  | 14.5  |
| 字 数  | 273 千字  |
| 版 次  | 2019 年 4 月第 1 版                                       |
| 印 次  | 2019 年 5 月第 2 次印刷                                     |
| 定 价  | 79.00 元   |

# 前 言

我国在建和已建装机容量超过 15 MW 的混凝土重力坝多达 149 座,其中装机容量超过 250 MW 的有 50 座。已建或即将开建的一批高坝大库难以避让西部强震区,这些高坝大库中不乏重力坝,比如宝珠寺、向家坝、观音岩、鲁地拉、龙开口、金安桥、阿海、官地等。地震作用下重力坝坝头损伤破坏是重力坝最可能的动力失效模式,大坝在地震作用下一旦损毁,将丧失蓄水功能、危及人身安全,吞噬经济成果。随着经济社会的发展,人们对地震作用下重力坝地震损伤动力校核的准确性提出了更高的要求。目前,重力坝地震损伤评价大多基于确定性分析方法,确定性分析方法存在对参数随机性估计不足的现象,如何恰当地考虑参数的未知和不定性,将单纯的“工程安全与否”转换到“承担适度风险”是安全评价的新趋势。

地震过程中重力坝损伤破坏失效概率估算是目前坝工抗震的一大难题,主要表现在以下几个方面:(1)抗震设计反应谱特征周期、放大系数和衰减指数等特征参数的随机统计特性缺失,地震随机性如何体现;(2)坝头动力损伤响应与随机变量之间没有明确的显式表达式;(3)同一套抗震设计反应谱特征参数有无穷多条地震波与之对应,每条地震波计算得到的动力损伤响应不完全一致。本书着重解决以上 3 个问题,旨在为水工建筑物抗震提供一套既能反映结构动力特性又能反映地震动力特性的非确定性分析方法。目前水工建筑物动力可靠度方面的专著稀少,因此本书在水工结构抗震非确定性分析方法方面具有一定的理论及工程应用价值。

本书共分为四篇 13 章。第一篇抗震设计反应谱特征参数的随机性统计。介绍了 NGA-West2 数据库的使用方法;抗震设计反应谱特征参数的标定方法;水平向和竖向抗震设计反应谱特征参数和特征参数  $V/H$  的统计及随影响因素的变化规律;探讨了反应谱下降段的不同处理方式对统计结果的影响。着重解决抗震设计反应谱的统计特性问题,为动力可靠度分析提供参数基础。

第二篇可靠度分析方法。首先普及可靠度的基本概念,介绍了正交试验低阶响应面法的流程、高阶响应面法随机变量阶数识别及多项式具体形式的确定

方法、Monte carlo 法中相关非正态随机数序列的生成方法。重点在于利用高阶响应面法估算具有相关或非相关、正态或非正态随机变量工程问题的失效概率，解决坝头动力损伤响应与随机变量之间没有明确的显式表达式时可靠度计算的方法问题。

第三篇重力坝坝头地震损伤动力可靠度模型与案例。结合抗震设计反应谱特征参数的统计特性，将高阶响应面法应用于重力坝坝头地震损伤动力可靠度的计算中，着重解决如何通过同一套抗震设计反应谱特征参数生成的多条人工波获取相对稳定动力响应的问题，构建动力可靠度的分析模型。

第四篇程序开发与说明。给出了抗震设计反应谱标定程序、相关非正态随机数序列的生成程序、高阶响应面多项式的确定程序、Monte Carlo 计算失效概率程序，并给出了程序流程图和算例。

本书得到了防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金(2016KJZ07)、国家重点研发计划(2017YFC1501103,2018YFC0407102)、三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)开放基金(2017KDZ09)和三峡大学高层次人才科研启动基金(20160905)等项目的资助。如果没有这些项目的资助，作者将无法开展相关研究工作。除此之外，还要感谢三峡大学水利与环境学院田斌教授、童富果教授、卢晓春副教授、张萍副教授，福州大学土木工程学院刘国明教授，河海大学 HSTAR 课题组姚纬明教授、赵兰浩教授、戴妙林副教授、牛志伟副研究员、程井副教授的培养、关心和帮助。感谢西安理工大学李晓娜讲师、河海大学齐慧君博士在本书成稿过程中给予的帮助。

由于作者水平有限，难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

何金文 三峡大学水利与环境学院

李同春 河海大学农业工程学院

刘晓青 河海大学水利水电学院

2018年10月

# 目 录

## 第一篇 抗震设计反应谱特征参数的随机性统计

|  |     |
|--|-----|
| <b>第 1 章 强震数据来源与统计数据基础</b> .....       | 003 |
| 1.1 NGA 数据库简介 .....                    | 003 |
| 1.2 利用 PEER NGA-West2 地震数据库获取地震记录..... | 004 |
| 1.3 中美场地划分与换算 .....                    | 006 |
| 1.4 统计数据基础 .....                       | 008 |
| <b>第 2 章 抗震设计反应谱特征参数的标定方法</b> .....    | 019 |
| 2.1 引言 .....                           | 019 |
| 2.2 双参数标定法 .....                       | 021 |
| 2.3 最小二乘分段拟合法 .....                    | 022 |
| 2.4 智能寻优算法 .....                       | 024 |
| 2.5 改进的最小二乘分段拟合法 .....                 | 024 |
| 2.5.1 改进方法基本原理 .....                   | 025 |
| 2.5.2 改进方法的实施步骤 .....                  | 025 |
| 2.5.3 方法误差对比.....                      | 027 |
| <b>第 3 章 水平向抗震设计反应谱特征参数统计</b> .....    | 029 |
| 3.1 引言 .....                           | 029 |
| 3.2 场地对水平向设计反应谱特征参数的影响 .....           | 030 |
| 3.3 震级对水平向设计反应谱特征参数的影响 .....           | 031 |
| 3.4 震中距对水平向设计反应谱特征参数的影响 .....          | 033 |
| 3.5 震级、震中距联合对水平向设计反应谱特征参数的影响 .....     | 036 |
| 3.6 设计地震分组水平向设计反应谱参数统计特性 .....         | 043 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>第4章 竖向抗震设计反应谱特征参数统计</b> .....         | 047 |
| 4.1 引言 .....                             | 047 |
| 4.2 场地对竖向设计反应谱特征参数及特征参数 $V/H$ 的影响.....   | 048 |
| 4.3 震级对竖向设计反应谱特征参数及特征参数 $V/H$ 的影响.....   | 049 |
| 4.4 震中距对竖向设计反应谱特征参数及特征参数 $V/H$ 的影响.....  | 054 |
| 4.5 震级震中距联合对竖向设计反应谱特征参数及参数 $V/H$ 的影响 ... | 058 |
| 4.6 设计地震分组竖向设计反应谱及特征参数 $V/H$ 统计特性.....   | 072 |
| <b>第5章 抗震设计反应谱衰减指数研究</b> .....           | 073 |
| 5.1 引言 .....                             | 073 |
| 5.2 反应谱均值谱与标定统计均值谱 .....                 | 073 |
| 5.3 反应谱均值谱的衰减指数 .....                    | 074 |
| 5.3.1 设计地震分组水平向反应谱均值谱衰减指数 .....          | 075 |
| 5.3.2 设计地震分组竖向反应谱均值谱衰减指数 .....           | 076 |
| 5.4 下降段不同处理方式对标定统计结果的影响 .....            | 077 |
| 5.4.1 下降段的5种处理方式 .....                   | 077 |
| 5.4.2 5种方法标定统计结果对比.....                  | 078 |
| 5.5 标定统计均值谱的衰减指数 .....                   | 079 |
| 5.5.1 按设计地震分组水平向设计反应谱标定衰减指数 .....        | 079 |
| 5.5.2 按设计地震分组竖向设计反应谱标定衰减指数.....          | 082 |
| 5.6 反应谱均值谱与标定统计均值谱衰减指数统计结果对比 .....       | 084 |

## 第二篇 可靠度分析方法

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>第6章 可靠度基本概念</b> ..... | 087 |
| 6.1 引言 .....             | 087 |
| 6.2 随机变量 .....           | 088 |
| 6.3 极限状态与失效概率 .....      | 088 |
| 6.4 结构的可靠指标 .....        | 090 |
| 6.5 可靠指标与安全系数的关系 .....   | 091 |
| 6.6 目标可靠指标 .....         | 092 |
| 6.7 分项系数极限状态设计方法 .....   | 093 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>第 7 章 正交试验低阶响应面法</b> .....            | 094 |
| 7.1 引言 .....                             | 094 |
| 7.2 正交试验表低阶抽样 .....                      | 095 |
| 7.3 低阶极限状态函数的显式化 .....                   | 095 |
| 7.4 可靠指标求解方法 .....                       | 097 |
| 7.4.1 正态分布随机变量一次二阶矩法 .....               | 097 |
| 7.4.2 JC 法 .....                         | 099 |
| 7.4.3 几何法 .....                          | 101 |
| 7.5 算例 .....                             | 103 |
| 7.5.1 算例 1——指数型功能函数 .....                | 103 |
| 7.5.2 算例 2——三阶显示高度非线性极限状态函数 .....        | 104 |
| 7.5.3 算例 3——钢梁截面验算 .....                 | 105 |
| 7.5.4 算例 4——平面框架 .....                   | 106 |
| <br>                                     |     |
| <b>第 8 章 高阶随机响应面法</b> .....              | 108 |
| 8.1 引言 .....                             | 108 |
| 8.2 响应面多项式随机变量阶数的确定 .....                | 109 |
| 8.3 响应面多项式具体形式的确定 .....                  | 109 |
| 8.3.1 非重要随机变量交叉项的排除 .....                | 109 |
| 8.3.2 随机变量的无量纲化 .....                    | 110 |
| 8.3.3 高阶响应面多项式的拟合与回归 .....               | 110 |
| 8.4 正交表高次抽样选取附加样本点 .....                 | 112 |
| 8.5 Monte Carlo 法计算失效概率 .....            | 113 |
| 8.5.1 Monte Carlo 法基本原理 .....            | 113 |
| 8.5.2 正态相关随机数序列的生成 .....                 | 114 |
| 8.5.3 非正态相关随机数序列的生成 .....                | 115 |
| 8.6 Monte Carlo 法设计验算点及随机变量参数敏感性分析 ..... | 118 |
| 8.6.1 设计验算点的估计 .....                     | 118 |
| 8.6.2 随机变量的参数敏感性估计 .....                 | 118 |
| 8.7 算例 .....                             | 119 |
| 8.7.1 算例 1——三阶非线性功能函数 .....              | 119 |
| 8.7.2 算例 2——双验算点非线性函数 .....              | 121 |
| 8.7.3 算例 3——三阶显示高度非线性极限状态函数 .....        | 122 |
| 8.7.4 算例 4——四阶显式不含交叉项的极限状态函数 .....       | 123 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 8.7.5 算例 5——平面刚架梁 ..... | 124 |
| 8.8 工程案例 .....          | 125 |
| 8.8.1 工程概况 .....        | 125 |
| 8.8.2 渗流稳定可靠性分析 .....   | 127 |

### 第三篇 重力坝坝头地震损伤可靠度模型与案例

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| <b>第 9 章 重力坝坝头地震损伤可靠度分析模型</b> .....  | 135 |
| 9.1 引言 .....                         | 135 |
| 9.2 应变空间四参数动力损伤模型 .....              | 136 |
| 9.2.1 应变空间四参数破坏准则 .....              | 136 |
| 9.2.2 四参数等效应变 .....                  | 137 |
| 9.2.3 损伤变量 .....                     | 137 |
| 9.2.4 混凝土四参数动力损伤本构模型 .....           | 138 |
| 9.3 地震作用下重力坝坝头损伤破坏模式 .....           | 139 |
| 9.4 超载法中地震波来源 .....                  | 140 |
| 9.5 获取相对稳定的动力超载系数的方法 .....           | 141 |
| 9.6 重力坝地震损伤动力可靠度计算流程 .....           | 142 |
| <b>第 10 章 重力坝坝头地震损伤可靠度计算案例</b> ..... | 144 |
| 10.1 重力坝模型与计算参数 .....                | 144 |
| 10.2 随机变量阶数及重要程度的识别 .....            | 146 |
| 10.3 附加抽样及响应计算 .....                 | 149 |
| 10.4 响应面多项式的逐步回归 .....               | 152 |
| 10.5 地震作用下重力坝坝头损伤动力可靠度 .....         | 152 |
| 10.6 衰减指数最敏感的原因分析 .....              | 154 |
| 10.7 超载倍数计算附表 .....                  | 154 |

### 第四篇 程序开发与说明

|   |     |
|---|-----|
| <b>第 11 章 抗震设计反应谱特征参数的标定及统计程序开发</b> ..... | 161 |
| 11.1 程序框架 .....                           | 161 |
| 11.2 关键数组说明 .....                         | 164 |

|               |                               |            |
|---------------|-------------------------------|------------|
| 11.3          | 反应谱标定子程序 .....                | 165        |
| 11.4          | 抗震设计反应谱标定算例 .....             | 178        |
| <b>第 12 章</b> | <b>相关非正态随机数序列生成程序开发 .....</b> | <b>183</b> |
| 12.1          | 程序框架 .....                    | 183        |
| 12.2          | 关键数组说明 .....                  | 184        |
| 12.3          | 相关非正态随机数生成子程序 .....           | 184        |
| 12.4          | 相关随机数序列生成算例 .....             | 189        |
| <b>第 13 章</b> | <b>高阶随机响应面法可靠度程序开发 .....</b>  | <b>191</b> |
| 13.1          | 程序框架 .....                    | 191        |
| 13.2          | 关键数组说明 .....                  | 193        |
| 13.2.1        | nn 及 jr 数组的形成 .....           | 193        |
| 13.2.2        | nnn, jrr 及 maa 数组 .....       | 193        |
| 13.2.3        | 几个关键参数 .....                  | 194        |
| 13.2.4        | 回归优选数组 .....                  | 194        |
| 13.3          | 高阶随机响应面多项式确定程序 .....          | 194        |
| 13.4          | Monte Carlo 模拟程序 .....        | 203        |
| 13.5          | 响应面多项式及可靠度计算算例 .....          | 211        |
| 13.6          | 高阶响应面法可靠度计算注意事项 .....         | 212        |
| <b>参考文献</b>   | .....                         | <b>214</b> |

# 第一篇

## 抗震设计反应谱特征参数的随机性统计

反应谱用来描述地震及其对结构的效应已有 86 年历史,某个反应量的峰值与固有振动周期之间的函数图形称为该反应量的反应谱。反应谱提供了一种实用的方法将结构动力学知识应用于结构设计中地震惯性力的相关条文的制定。同一场地的不同地震、不同场地的不同地震的反应谱参差不齐,因此单条地震记录的反应谱用于结构抗震设计是不合适的[图 0-1(左)]。如图 0-1(右)所示抗震设计反应谱包括 5 个特征参数,分别是平台段的起始周期  $T_0$ 、平台段的结束周期  $T_g$  (特征周期)、放大系数  $\beta_{\max}$ 、下降段衰减指数  $\gamma$  和反应谱的结束周期  $T_m$ 。建筑抗震设计反应谱应该是某一场地地面运动记录的代表,是基于一组地面运动反应谱统计得到的。

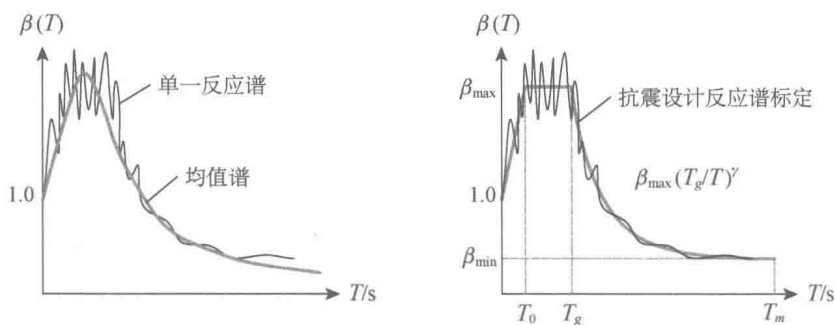


图 0-1 单条地震记录反应谱、均值谱和抗震设计反应谱的标定

抗震设计反应谱特征参数的统计方法主要有两类,一类是多条归一化反应谱求平均[图 0-1(左)],再提取特征参数;另一类是先对每条地面运动的反应谱标定出特征参数,然后将特征参数进行统计。目前,各类抗震设计反应谱的特征参数是以上 2 种方法结合的产物,特征周期采用方法 2 获取,放大系数和衰减指数利用方法 1 的结果进行修正。显然,规范中抗震设计反应谱无法给出特征参数的均值和变异系数,而可靠度计算恰恰需要这些特征参数的统计特性。

本篇的主要目的是获取抗震设计反应谱特征参数的统计特性,为结构的动

力可靠度计算奠定参数基础。本篇首先介绍了 NGA 数据库及本次统计的数据基础;然后改进了抗震设计反应谱特征参数的标定方法;接着分别对水平向、竖向抗震设计反应谱特征参数、竖向与水平向特征参数比值按场地、场地-震级、场地-震中距、场地-震级-震中距联合、按规范特征周期分区分别进行统计,获取各因素对抗震设计反应谱特征参数的影响规律及统计特性;最后对抗震设计反应谱特征参数标定过程中反应谱下降段的处理方式进行讨论,分析 5 种处理方式对衰减指数标定的影响及对统计结果的影响规律。

# 第1章 强震数据来源与统计数据基础

## 1.1 NGA 数据库简介

“Next Generation of Ground-Motion Attenuation Models”(NGA<sup>[1]</sup>)为跨学科的研究课题,隶属美国太平洋地震工程研究中心(PEER)、美国地质调查局(USGS)和南加州地震中心(SCEC)联合主导的生命线科研工程。该项目拟在当前国际主要强震动观测资料的基础上,建立适用于美国西部浅源地震条件的新一代地震动衰减关系。NGA 数据库包括两部分,分别是 NGA-West2 和 NGA-East, NGA-East 收集的是北美中东部地震记录,NGA-West2 收集的是环太平洋区域的浅源地震记录。其中,NGA-West2 包含了少许中国汶川地震和中国台湾集集地震及其 5 次余震的地震记录。NGA-West2 数据库于 2014 年在 NGA-West 的基础上进行了更新,由原来的 3 551 条地震记录增加到 21 540 条,基于 Web 的 PEER 地震数据库提供了搜索、选择和下载地震数据的工具。NGA-West2 数据库网址为 <https://ngaWest2.berkeley.edu>,该数据库的强震记录资料记录了每条地震记录的地震名称、发生时间、台站名称和编号、震级、断层走向、震源的经纬度、震源深度、断层长宽、发震类型、台站经纬度、台站场地的剪切波速、地震波的峰值加速度、峰值速度和峰值位移等信息。通过该数据库可获取地震记录的时程、反应谱信息等。

NGA West2 数据库强震记录丰富,强震记录的震级和震中距覆盖范围较广,地震记录的场地信息较为完善。马宗晋院士<sup>[2][3]</sup>认为:中国大陆和北美大陆在构造、地壳组成、现代应力状态及地震成因、地震活动特点等方面都有一定的相似性和可比性,两个地区地震记录的相互借用具有一定的地震成因环境构造基础。因此,在我国当前缺乏足够的强震记录或者地震台站场地信息不全的情况下,基于美国丰富强震记录的加速度反应谱统计平均衰减关系,可以作为我国高坝抗震设计中确定设计反应谱的参考依据。美国西部和中国西部都是地震高发区,鉴于地震成因类似,本书的强震记录基础来源于更新后的 NGA-West2 数据库。

## 1.2 利用 PEER NGA-West2 地震数据库获取地震记录

PEER 设立在美国的加州大学伯克利分校 (University of California, Berkeley)。由其运作的 PEER Ground Motion Database NGA-West2 地震数据库可提供地震相关数据的下载。

(1) 首先登陆数据库网址 <https://ngawest2.berkeley.edu>, 可见如图 1-1 所示的登陆界面。点击图中“SIGN\_IN”进行注册并登陆。

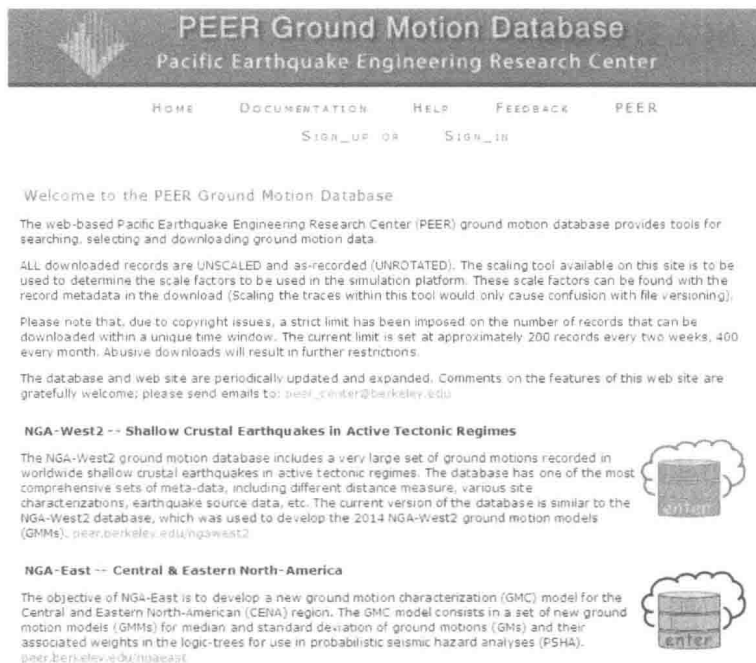


图 1-1 网页登陆界面

(2) 点击右下角“NGA West2 enter”进入如图 1-2 所示的 PEER NGA-West2 数据库界面, 点击“submit”按钮, 便进入地震信息搜索主界面, 如图 1-3 所示。

(3) 填写搜索界面中的相关参数, 点击左下角红色的“Search Records”按钮开始搜索, 可得如图 1-4 所示的输出列表。搜索界面中各项参数含义可参照“DOCUMENTATION”中“NGA West-1”中的使用手册“User Manual”和技术报告“Technical Report”。其中“RSN”为地震记录的编号, 编号可在“Updated\_NGAW2\_Flatfile\_Vertical\_5percentdamping.xlsx”中找到。此 xlsx 文件可在 <https://peer.berkeley.edu/research/NGA-West-2> 左侧“RELATED SITES”下的“Flatfiles”网页中下载, 该表详细列出了各条地震记录的震源、台站、发震机制、地震文件名和场地剪切波速等信息。

PEER Ground Motion Database *NGA-West2*  
Pacific Earthquake Engineering Research Center

HOME DOCUMENTATION HELP FEEDBACK PEER  
HEJINWEN2004@126.COM SIGN\_OUT

Target Spectrum

Select Spectrum Model

Select models to generate target spectrum  
No Scaling

Show/Hide GMM Notation  
Show/Hide GMM Regions  
Show/Hide GMM Figures

Submit

325 Davis Hall, University of California, Berkeley, CA 94720-1792 - Phone: (510) 642-3437 | Fax: (510) 642-1655 | Email: peer\_center@berkeley.edu

图 1-2 NGA-West2 登陆界面

New Search

Load Sample Input Values Clear Input Values

Search

These characteristics are defined in the NGA-West2 Flaws.  
You need to re-run Search when any of these parameters are updated.

Record Characteristics:

RSN(s) : 1 2 3 RSN1...RSNn  
Event Name :  
Station Name :  
Search Parameters:

Fault Type : All Types  
Magnitude : min,max  
R JB(km) : min,max  
R rup(km) : min,max  
Vs30(m/s) : min,max  
D5-95(sec) : min,max  
Pulse : Any Record

Additional Characteristics:

Max No. Records : (<=100)

Suite

Spectral Ordinate : SRSS  
Damping Ratio : 5%  
Suite Average : Arithmetic

Controls

Search Records

图 1-3 搜索界面

(4) 输出地震信息结果。数据库提供了两种结果输出格式,第一种是输出 CSV 格式的反应谱文件,第二种是输出 ZIP 压缩包形式的地震时程。两种格式的按钮分别对应图 1-4 底部的“download search results(metadata+spectra)”和“download time series Records(metadata+spectra+traces)”。

| Result ID | Spectral Ordinate | Record Seq. # | MSE | Scale Factor | Tp(s) | D5-75(s) | D5-95(s) | Arias Intensity (m/s) | Event                   | Year | Station            | Mag. M |
|-----------|-------------------|---------------|-----|--------------|-------|----------|----------|-----------------------|-------------------------|------|--------------------|--------|
| 1         | SRSS              | 1             | -   | 1.0          | -     | 1.2      | 2.5      | 0.1                   | Helena, Montana-1935 01 | 1935 | Carroll College    | 6.0    |
| 2         | SRSS              | 2             | -   | 1.0          | -     | 0.3      | 0.8      | 0.0                   | Helena, Montana-1935 02 | 1935 | Helena Fed Bldg    | 6.0    |
| 3         | SRSS              | 3             | -   | 1.0          | -     | 9.5      | 23.2     | 0.0                   | Humbolt Bay             | 1937 | Ferndale City Hall | 5.8    |

Download Options:

图 1-4 搜索结果显示界面

### 1.3 中美场地划分与换算

有了地震记录,接下来便是对地震波进行分组。抗震设计反应谱特征参数的统计分析中常用的分组参数包括震级、震中矩、场地和震源深度。不同的大坝对地基的要求是不一样的。一般地,混凝土坝对地质要求较高;土石坝既可以修建在基岩,也可修建在软基上。不同地基具有不一样的阻尼,不同地基传播地震波的效率不一样。因此,抗震设计反应谱的特征参数与场地类别有很大关系,场地的划分至关重要。但是各国规范中场地类别的划分标准并不统一,我国建筑抗震设计规范<sup>[4]</sup>(简称“10 建筑抗规”)根据 20 m 深度范围内土层的等效剪切波速  $V_{s20}$  和覆盖层厚度将场地分为 I<sub>0</sub>、I<sub>1</sub>、II、III、IV 4 类。土层的等效剪切波速按式(1-1)和式(1-2)计算,场地类别的具体划分方法如表 1-1 所示。

$$v_{se} = d_0 / t \quad (1-1)$$

$$t = \sum_{i=1}^n (d_i / v_{si}) \quad (1-2)$$

式中:  $v_{se}$  ——土层等效剪切波速(m/s);

$d_0$  ——计算深度(m),取覆盖层厚度和 20 m 两者的较小值;

$t$  ——剪切波在地面至计算深度之间的传播时间;

$d_i$  ——计算深度范围内第  $i$  土层的厚度(m);

$v_{si}$  ——计算深度范围内第  $i$  土层的剪切波速(m/s);

$n$  ——计算深度范围内土层的分层数。

美国抗震设计规范<sup>[5]</sup>以地表以下 30 m 范围内的土层等效剪切波速  $V_{s30}$  将场地分为 A—E 5 类,见表 1-2。虽然两国规范将场地类别划分的等级数不同,但都采用了土层平均剪切波速这一指标。郭峰等<sup>[6]</sup>依据中美两国抗震设计规范的异同,认为我国抗震规范 I 类场地包含美国 A, B 类及部分 C 类场地, II 类场地包含部分 C, D 类场地, III 类场地包含部分 D 类和少部分 E 类场地,而 IV 类场地则大致对应 E 类场地。通过剪切波速建立起了中美两国场地分类之间的联系,提出了中美抗震设计规范场地分类的对应关系,见表 1-3 所示。有了表中的对应关系,便能通过剪切波速这一指标进行 NGA-West2 数据库强震记录的中美场地类别的换算。

表 1-1 我国《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》场地类别划分标准

| 等效剪切波速 $V_{s20}$ /(m/s) | 场地类别 |     |      |       |     |
|-------------------------|------|-----|------|-------|-----|
|                         | I 0  | I 1 | II   | III   | IV  |
| >800                    | 0    |     |      |       |     |
| 500~800                 |      | 0   |      |       |     |
| 250~500                 |      | <5  | >5   |       |     |
| 150~250                 |      | <3  | 3~50 | >50   |     |
| <150                    |      | <3  | 3~15 | 15~80 | >80 |

表 1-2 美国 ATC3-06 场地类别划分标准

| 场地类别                    | A      | B         | C       | D       | E    |
|-------------------------|--------|-----------|---------|---------|------|
| 等效剪切波速 $V_{s30}$ /(m/s) | >1 500 | 760~1 500 | 360~760 | 180~360 | ≤180 |

表 1-3  $V_{s30}$  与抗震规范场地类别换算关系

| 场地类别             | I 类场地 |         | II 类场地  | III 类场地 | IV 类场地 |
|------------------|-------|---------|---------|---------|--------|
|                  | I 0   | I 0     |         |         |        |
| $V_{s30}$ /(m/s) | >800  | 550~800 | 265~550 | 165~265 | <165   |