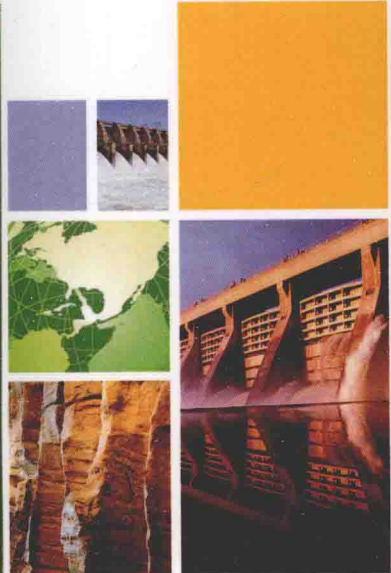




大型地下洞室群 动力时程分析方法 研究与应用

张志国 陈俊涛 牟春来 邵 年◎著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

大型地下洞室群 动力时程分析方法 研究与应用

张志国 陈俊涛 牟春来 邵 年◎著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目(CIP)数据

大型地下洞室群动力时程分析方法研究与应用/张志国等著.

—北京:知识产权出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-5130-2436-5

I. ①大… II. ①张… III. ①水电站厂房—地下洞室—结构动力
分析—研究 IV. ①TV731.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 274979 号

内容提要

本书系统介绍了大型地下洞室群采用动力时程方法进行地震响应分析的理论及具体应用。全书分为八章,第一章概述地下洞室群抗震计算的现状及本书的总体研究思路;第二章介绍显式有限元求解方法在三维波动场求解中的理论及编程解决方案;第三章介绍动力时程分析中洞室群模型人工边界的设置理论和计算方法;第四章介绍显式动力有限元计算中锚杆、锚索的模拟理论;第五章介绍地下洞室动力计算中前处理的相关技术;第六章介绍动力有限元计算前后处理软件的设计开发;第七章结合实际工程介绍动力时程法计算中洞室群围岩稳定的评判理论;第八章得出结论。

责任编辑:李 瑾 责任出版:刘译文

大型地下洞室群动力时程分析方法研究与应用

张志国 陈俊涛 牟春来 邵年 著

出版发行:知识产权出版社有限责任公司

网 址: <http://www.ipph.cn>

社 址:北京市海淀区马甸南村1号

邮 编:100088

责编电话:010-82000860 转 8392

责编邮箱:lijin.cn@163.com

发行电话:010-82000860 转 8101/8102

发行传真:010-82000893/82005070/82000270

印 刷:北京中献拓方科技发展有限公司

经 销:各大网上书店、新华书店及相关专业书店

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:16.75

版 次:2014年4月第1版

印 次:2014年4月第1次印刷

字 数:270千字

定 价:49.00元

ISBN 978-7-5130-2436-5

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。

前 言

随着我国水电建设事业的发展,我国西南山区规划兴建了一批大型水电站地下厂房洞室群。该地区位于板块交界处,地震频发。地下洞室群的抗震特性直接关系到电站结构的正常运行和生产人员的生命安全,受到国内外工程师和学者的普遍关注。我国地震工程学发展相对较晚,相关规范并未对地下洞室群地震响应问题分析给出指导性方法。目前各设计院、科研所在地下洞室群抗震设计计算中,一般沿用地面结构的分析思路,多采用拟静力法、反应谱法或时程法。拟静力法和反应谱法在地下洞室群地震响应分析中均存在一些理论上的局限性。时程法在理论上是一种有效途径,但在实际工程中应用相对较少,尚处于理论探索和实践经验积累阶段。目前国内相关研究多是在 FLAC3D、ABAQUS、ANSYS 等国外商业软件的平台上进行的。其软件功能、二次开发接口和知识产权的制约,使得我们在研究地下洞室群地震响应的某些特定问题时很难求解,迫使我们有必要开发针对地下洞室群抗震稳定动力时程分析的拥有自主知识产权的计算程序。

本书针对地下洞室群抗震安全问题,以地震灾变中洞室群岩体的动力响应机理为基础,以地下洞室群动力时程分析方法为核心,以开发大型地下洞室群地震灾变模拟系统为途径,以地震灾变中地下洞室群围岩稳定优化控制为目标,通过紧密围绕三维动力时程分析方法和地下洞室群地震响应机理这一研究主线,开展了系统性的研究工作。具体内容如下:

第一章绪论,主要由张志国、牟春来、邵年编写。首先简要介绍了我国目前地下洞室群抗震计算中的常用方法及其优缺点,然后从三维地震波动场的求解、人工边界的设置、抗震支护措施的作用机理及模拟、地震灾变过程中洞室群围岩稳定评判准则等四方面详细论述了地下洞室群动力时程法的研究现状。

第二章三维地震波动场的有限元求解,主要由张志国编写。详细推导了显式有限元数值积分过程,并给出主要方程的矩阵表达及数值求解,构建了显式动力有限元求解的基本框架;在讨论地震灾变中岩体材料在高应变率下的材料强化特性和循环荷载作用下材料的疲劳损伤劣化特性的基础上,推导了考虑应变率的摩尔库伦准则,并建立了三维弹塑性损伤非线性动力本构模型,阐述了该本构模型

在显式有限元计算中的应力修正方法,为地下洞室岩体抗震分析提供了一种新的本构模型;针对显式有限元动力时程计算中耗时长的问题,本书提出“开源节流”的方法以加快求解速度。以该思路进行程序优化后,百万单元的20 s持时动力时程计算在小型工作站上可在3天之内完成求解,大大提高了求解速度,满足工程设计的时效要求。

第三章动力时程分析中地下洞室群的人工边界,主要由张志国编写。针对竖向和斜向入射情况下地下洞室群地震波动场的分布特性,提出了动力时程分析中洞室群模型人工边界的设置理论和计算方法,确保了有限元模型人工边界处计算波场的精度。

第四章动力时程分析中地下洞室支护分析方法,主要由张志国、陈俊涛编写。针对显式有限元计算中锚杆、锚索等支护措施求解速度慢,计算耗时长的问题,根据地震过程中柔性支护措施的作用机理,建立了显式动力有限元计算中锚杆、锚索等支护措施的快速计算模型,合理反映了锚固支护措施在围岩抗震中的作用;针对拟静力法、反应谱法和动力时程法的理论特性,研究各种计算方法在地下结构抗震计算中的适用性,并建议在地下厂房结构抗震计算中采用时程法。

第五章动力时程分析中地下洞室群前处理技术探讨,主要由张志国、牟春来、邵年编写。探讨了地下洞室群动力时程计算前处理技术,并针对复杂地质模型网格划分技术,将隐含断层数学模型引入到显式有限元动力时程计算,阐述了其在显式有限元中的计算理论,为复杂断层的动力时程计算提供了一种有效途径。

第六章地下洞室群动力时程计算前后处理软件设计,由陈俊涛编写。针对地下洞室群有限元建模的特点,提出了地下洞室三维有限元系统的面向对象的设计与实现。主要包括在OpenGL函数库的基础上开发的前处理和后处理模块。

第七章工程应用及围岩稳定评价,主要由张志国、牟春来、邵年编写。针对地下洞室地震灾变分析中的特定问题,基于上述系列研究成果,采用FORTRAN90程序语言,开发了大型地下洞室群地震灾变模拟系统SUCED(Simulation of Underground Caverns in Earthquake Disaster),并详细介绍了该程序在我国西南某大型水利枢纽左右岸地下厂房及进出口边坡抗震计算中的应用情况。

在本书的编写过程中,参与具体工作的还有刘嫦娥、杨阳、张雨霆。

由于时间仓促,作者水平有限,书中错误、纰漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作者

2013年4月

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 研究现状	(4)
1.2.1 三维地震波动场的求解	(4)
1.2.2 人工边界的设置	(9)
1.2.3 抗震支护措施模拟	(10)
1.2.4 地震灾变过程中洞室群围岩稳定评判准则	(11)
1.3 研究内容	(12)
第二章 三维地震波动场的有限元求解	(14)
2.1 有限元积分格式的选择	(15)
2.1.1 网格坐标描述选择	(15)
2.1.2 求解方式选择	(16)
2.1.3 拉格朗日法选择	(18)
2.2 更新拉格朗日显式有限元程序设计	(18)
2.2.1 波动微分方程显式求解	(18)
2.2.2 率本构积分算法	(20)
2.2.3 主要变量求解	(22)
2.2.4 更新拉格朗日显式有限元程序实现	(26)
2.2.5 程序验证	(27)
2.3 工程岩体动力弹塑性损伤本构模型	(28)
2.3.1 地震动荷载作用下围岩特性	(28)
2.3.2 地震动荷载作用下围岩弹塑性损伤本构的建立	(31)

2.3.3 弹塑性损伤本构的显式有限元计算方法	(39)
2.3.4 程序验证	(41)
2.4 显式动力有限元计算机高效求解	(43)
2.4.1 显式动力有限元的并行计算	(44)
2.4.2 单多高斯点混合积分	(54)
2.5 本章小结	(63)

第三章 动力时程分析中地下洞室群的人工边界

3.1 人工边界概述	(65)
3.1.1 全局人工边界	(66)
3.1.2 局部人工边界	(66)
3.2 地下洞室群人工边界的有限元实现	(68)
3.2.1 粘弹性人工边界	(69)
3.2.2 自由场人工边界	(76)
3.3 地下洞室群人工边界的设置	(82)
3.3.1 竖直入射时人工边界的设置	(83)
3.3.2 斜入射时人工边界的设置	(91)
3.4 本章小结	(100)

第四章 动力时程分析中地下洞室支护分析方法

4.1 锚杆支护模拟	(101)
4.1.1 锚杆作用机理及力学模型	(102)
4.1.2 锚固单元动力显式有限元计算方法	(106)
4.1.3 工程实例	(110)
4.1.4 小结	(114)
4.2 地下厂房结构的抗震计算	(115)
4.2.1 三种抗震设计方法介绍	(116)
4.2.2 映秀湾地下厂房结构震害调查	(119)
4.2.3 计算分析及比较	(122)

4.2.4 小结	(127)
4.3 本章小结	(128)

第五章 动力时程分析中地下洞室群前处理技术探讨..... (129)

5.1 地震动荷载	(129)
5.1.1 地震动三要素	(130)
5.1.2 设计地震动	(134)
5.1.3 地下洞室群输入地震波时程	(137)
5.2 有限元建模	(140)
5.2.1 显式动力有限元网格的尺寸要求	(140)
5.2.2 显式有限元计算中隐含断层模拟	(144)
5.3 本章小结	(153)

第六章 地下洞室群动力时程计算前后处理软件设计..... (154)

6.1 有限元系统基础类库的设计	(154)
6.1.1 动态链接库的概念	(155)
6.1.2 地下洞室三维有限元系统基础类库的内容	(155)
6.1.3 基础类的设计	(157)
6.2 地下洞室面向对象的前处理程序设计	(172)
6.2.1 地下洞室三维有限元的可视化快速建模	(172)
6.2.2 锚杆锚索信息的组织	(178)
6.2.3 OpenGL 平台下的网格显示	(181)
6.3 有限元后处理的面向对象设计	(188)
6.3.1 地下洞室三维有限元后处理的内容	(188)
6.3.2 光滑空间等值线的绘制	(188)
6.3.3 空间矢量图的绘制	(195)
6.3.4 塑性开裂区的绘制	(195)
6.3.5 应力分布图的绘制	(196)
6.3.6 变形示意图的绘制	(197)

6.4 本章小结	(198)
第七章 工程应用及围岩稳定评价	(200)
7.1 工程区地震波荷载确定	(200)
7.1.1 地震波的选取	(201)
7.1.2 阻尼设定	(202)
7.1.3 滤波及基线校正	(203)
7.1.4 入射时程荷载	(204)
7.2 右岸地下厂房洞室群抗震围岩稳定分析	(204)
7.2.1 工程概况	(205)
7.2.2 围岩抗震稳定分析	(208)
7.3 左岸进水口边坡抗震稳定分析	(225)
7.3.1 工程概况	(226)
7.3.2 围岩抗震稳定分析	(227)
7.4 小结	(235)
第八章 结 论	(236)
参考文献	(239)

第一章 绪 论

1.1 研究背景

随着国家“西部大开发”、“西电东送”和“南水北调”等战略的实施,我国西部水电开发强度前所未有,在建和即将兴建的一批大型、特大型水电工程都处在西南、西北地区的崇山峻岭中,均需在复杂地质条件下开挖岩质高边坡、建设大规模地下洞室群或超长深埋隧洞。例如,目前世界最大的地下洞室群——溪洛渡地下洞室,主厂房尺寸达到 $443.34\text{ m} \times 75.6\text{ m} \times 28.4\text{ m}$ (下部尺寸),最大埋深约为 550 m 。另外,高放射性核废物的深部地质处置工程、交通和深部采矿等都涉及地下洞室群建设。西南地区水电资源丰富,但地处板块交接处,地震频发。西藏、四川、重庆、云南、贵州等西南地区地震基本烈度大多在 VII 度以上,而水利枢纽所在的高山峡谷地带,地震烈度多在 VIII 度以上。地下洞室工程的抗震特性直接关系到建筑物的正常运行和生产人员的生命安全,受到国内外工程师和学者的普遍关注。尤其是“5.12”汶川大地震^[1,2]造成震中区域的映秀湾、渔子溪和耿达等水电站地下厂房严重受损,洞室局部垮塌,尾水洞错动塌方,更加表明地下洞室的抗震安全问题不容忽视。

我国地震工程学发展较晚,相关规范并未对地下洞室群地震响应问题分析给出指导性方法。目前各设计院、科研院所在地下洞室群抗震设计计算中,一般沿用地面结构的分析思路,多采用拟静力法、反应谱法或时程法^[3-5]。但将地面结构的分析方法用之于地下洞室群,存在着众多的难点和不合理之处。

(1) 拟静力法,又称波动场应力法,考虑了地震动荷载最大加速度和卓越周期对洞室围岩稳定的影响。但该方法将整个洞室群工程区看做质点,认为整个工程区处于同一波动状态,而未考虑洞室群工程区内地震波动场的分布规律及洞壁

■ 大型地下洞室群动力时程分析方法研究与应用

的相对变形。而对于大型地下洞室群来讲,这种相对变形恰恰是地震灾变中洞室围岩失稳的主要原因。如,汶川地震中的映秀湾水电站地下厂房洞室群灾后调查表明,其主厂房整体抬升 0.725 m,但由于其蜗壳层以上洞室高度最大仅有 15.3 m,且有机墩及梁系结构支撑,相对变形较小,地震中未出现围岩失稳(图 1.1-1)。但进场交通洞距离较长,沿轴向相对变形较大,边墙衬砌出现明显的错动裂缝,局部围岩失稳(图 1.1-2)。可见,拟静力法并未能反映造成地震灾变中洞室围岩失稳的主要因素,在地下洞室群地震响应计算中存在理论上的局限性。

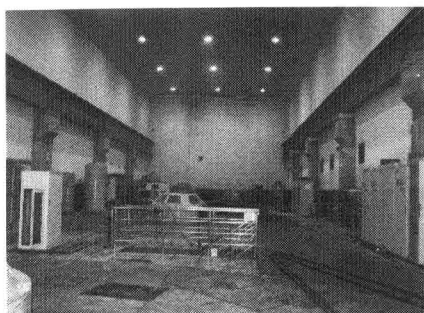


图 1.1-1 映秀湾地下洞室群主厂房

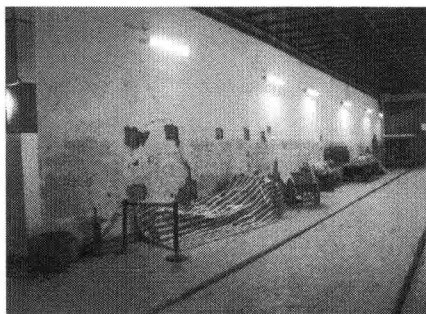


图 1.1-2 映秀湾地下洞室群交通洞

(2)反应谱法是在拟静力法基础上发展起来的一种频域分析方法,有多种计算形式。目前应用较广的主要是振型分解反应谱法。它通过反应谱考虑了地震动荷载的幅值(最大加速度)、频谱等特性,通过振型分解考虑了结构的自振频率、振型和阻尼等结构的动力特性。其在分析地面弹性结构地震响应方面具有成熟的理论体系,是我国地面结构抗震计算的主要方法之一。但地下洞室群赋存于山体之中,属于半无限域介质体,没有自振频率或振型等有形结构体的动力特性。这失去了反应谱法应用的基本条件,或者说,反应谱法适用于求解结构的振动问题,而地震灾变中地下洞室群的动力特性表现为地震波在半无限域中的传播,属于近场波动问题。因此,地下洞室群的地震响应问题不满足反应谱法应用的基本条件,不能采用反应谱法求解。

(3)时程法是随着计算机积分求解技术的发展而广泛推广的一种时域分析方法。该方法通过计算机数值积分算法完成对洞室群工程区地震波动场微分方

程的求解,真实模拟地震灾变中洞室群的地震响应过程。该方法考虑了地震动荷载的幅值、频谱、持时等三大特性,适于求解近场波动问题,是近几年地下洞室群地震响应分析中最为流行的方法。但其在实际工程应用中依然存在很多问题和难点,归纳起来有:①由于地震发生的时间、地点、强度的难以精确预测性,致使工程分析地震波时程曲线难以合理确定;②深埋洞室赋存的岩体介质非常复杂,尚未有普遍认同的岩体本构和力学模型用于波动场的数值求解;③地下洞室群抗震支护措施的作用机理和抗震设计理念尚未有普遍认识;④由于其人工边界、支护模拟等较为复杂,不同的研究人员采用不同的程序(如 FLAC3D、ABAQUS、ANSYS 等)可能得到差异很大的计算结果。总体看来,时程法是解决地下洞室群地震响应问题分析的有效途径之一,但其众多理论尚处于研究阶段,在实际工程中应用时间较短,工程设计实践经验较少。

目前,我国很多实际工程的动力时程抗震分析主要是在 FLAC3D、ABAQUS 等商业软件的平台上进行。这些软件为工程分析提供了统一、快捷、方便的计算平台,但在大型地下洞室的地震灾变过程精细化模拟中,依然存在很多的问题。有些可以通过以上商业软件的二次开发平台弥补,而有些个别问题则很难通过商业软件解决。如,百万级单元的大型机群并行计算、不同入射条件下人工边界的设置、锚杆锚索等柔性支护措施的模拟和快速求解、复杂断层的模拟等。

综上所述,地下洞室群的抗震问题关系到我国众多大型工程的安全运行,研究意义非常重大。拟静力法、反应谱法等结构抗震计算方法在地下洞室群地震响应问题分析中具有理论上的局限性。时程法在理论上是一种有效途径,但在实际洞室群工程应用中存在很多问题和难点,尚处于理论探索 and 实践经验积累阶段。目前国内相关研究多是在 FLAC3D、ABAQUS、ANSYS 等国外商业软件的平台上进行的。其软件功能、二次开发接口和知识产权的制约,使得我们在研究地下洞室群地震响应的某些特定问题时很难求解。为此,本书针对地下洞室群地震响应问题,以地下洞室群动力时程分析方法为核心,从波动场的有限元求解、人工边界设置、支护措施模拟、地震波荷载确定、围岩抗震稳定评价等五方面进行了系统研究,开发了大型地下洞室群地震灾变模拟系统 SUCED(Simulation of Underground Caverns in Earthquake Disaster),并在国内众多工程实践中试应用,以期对我国地下洞室群的地震响应计算方法和抗震设计理论做出贡献。

1.2 研究现状

为解决动力时程法在地下洞室群地震响应分析中的难题,开发大型地下洞室群地震灾变数值模拟平台,需要解决的关键科学问题和技术主要表现在以下几个方面:①三维地震波动场的求解;②人工边界的设置;③抗震支护措施的作用机理及模拟;④地震灾变过程中洞室群围岩稳定评判准则。

围绕上述关键科学问题,国内外研究人员进行了大量的研究工作,分述如下。

1.2.1 三维地震波动场的求解

1.2.1.1 波动微分方程的数值求解

地下洞室群地震响应问题属于近场波动问题,其工程区波动场的时域求解是围岩抗震稳定分析的基础。对于不同的介质假定,工程区波动场的运动微分方程有不同的表达形式和求解方法。若假定洞室群赋存岩体为非连续介质,整个工程区离散为有限个刚性块体,并且各块体的运动状态遵循牛顿运动学定律和能量守恒原理。对于非连续介质的波动求解,其代表性方法是 DDA^[6]。张瑞青^[7]等采用 DDA 算法模拟了 1975 年海城和 1999 年岫岩地震的发生过程;陈祖安^[8]等模拟了 1997 年玛尼地震对青藏川滇地区构造块体系统稳定性的影响。这些研究均是采用 DDA 程序研究地震的震源机理和发震过程,而采用 DDA 研究边坡、洞室群等岩体工程的地震响应则较少。中科院岩土所张勇慧研究员在完成“大型地下洞室群地震灾变机理与过程研究”国家重点基金时,对采用 DDA 求解地下洞室群地震波动场进行了系统研究,提出了与 DDA 算法相结合的人工边界设置及地震波入射方法。若假定洞室群赋存岩体为连续介质,整个工程区波动场可用波动学基本微分方程描述。对于连续介质体的微分方程求解,其代表性方法是有限元法^[9](FEM)。近几十年中有限元法在世界范围内得到广泛的研究和应用,其中动力求解部分更是成果丰硕。从波动微分方程积分求解的途径来看,动力有限元求解的研究主要可分为两大类:显式求解和隐式求解。这两种算法显著区别在于是否形成刚度矩阵并对其进行求逆运算。显式求解代表性算法是中心差分法,代表

性商业软件有 LS-DYNA^[10]、FLAC^[11]、ABAQUS/Explicit^[12]等;隐式求解代表性算法有 Houbolt 法、Newmark 法、Wilson θ 法等,代表性商业软件有 ANSYS^[13]、ADINA^[14]、ABAQUS/Standard^[12]等。从这些商业软件的核心求解器看,其在数值稳定、计算精度、求解效率等方面均已达到很高的水平。但商业软件要考虑客户群体的广泛性,使其很难针对地下洞室群工程的动力响应问题提供特定性功能。而其提供的二次开发接口为保障与核心求解器的一致性,往往做出众多繁杂的限制,使我们针对具体问题的二次开发实现较为困难,甚至有些问题根本无法通过二次开发求解。为突破国外大型商业有限元软件的制约,我国众多学者研究开发了自主的有限元程序。其中动力有限元方面代表性的有:国家地震局工程力学研究所杨柏坡、廖振鹏^[15]、李小军^[16]、杜修力^[17]、刘晶波^[18]等研究开发并各自发展的二维显式有限元计算程序,清华大学张雄^[19]编写的 EFEP90 三维显式有限元计算程序等。其中地震工程力学研究所的程序主要用于波动场求解,研究地壳中地震波的传播规律,并未考虑锚杆等工程支护措施的模拟;张雄的 EFEP90 程序主要借鉴 DYNA 的初期版本编写,采用单高斯点积分,主要求解碰撞、爆破等大变形动力问题。

总体看来,对于波动微分方程的数值求解问题,基于非连续介质假定的 DDA 算法处于研究阶段,尚未有成熟的三维 DDA 动力响应计算程序;基于连续介质假定的 FEM 算法发展较为成熟,但通用商业有限元程序在分析地下洞室群地震响应具体问题时尚有众多不合理之处,且很难通过二次开发解决;国内众多学者编写的显式动力程序均是针对特定的问题,尚没有针对地下洞室群三维地震波动场求解的拥有自主知识产权的程序。

1.2.1.2 岩体非线性动力本构

地震灾变过程中地下洞室群赋存岩体处于循环加卸载状态,岩体的非线性动力本构模型是地震波动场精确模拟的核心。这需要在理论研究的基础上,结合大量的室内、室外试验,建立科学实用的岩石动力本构模型。众多国内外研究人员在该领域进行了卓有成效的探索。

在试验方面,W. F. Brace 等^[20]对花岗岩、辉绿岩、白云岩、斑岩、橄榄岩和砂岩等六种岩石材料进行了动三轴压缩实验,结果表明六种岩石材料的破坏强度

I 大型地下洞室群动力时程分析方法研究与应用

都随着应变速率的增加而增加。K. P. Chong 等^[21,22]对含油页岩,鞠庆海等^[23]对凝灰岩,Yang C H 等^[24]对大理岩进行了不同应变率范围内不同围压下的三轴动加载试验,均得出相似的结论;刘剑飞等^[25]对花岗岩材料实施了高应变率动态实验,发现花岗岩材料有很明显的应变率硬化效应和损伤软化效应;我国的李海波^[26,27]研究员针对花岗岩进行了单轴压缩、三轴压缩、单轴拉伸和直剪等系列试验,并进行了深入的理论探讨,研究结果表明:①花岗岩的抗压强度随围压的增加明显增加,并且其增加幅度不受应变率的影响;②花岗岩的弹性模型、泊松比与应变率没有明确的关系;③抗压强度随应变率增加主要是因为粘聚力的增加,而内摩擦角基本不受应变率影响。

在理论研究方面:Zhao J 等^[28]通过粘弹性模型来解释页岩在压缩载荷作用下应变速率与岩体强度的相关特性;D. E. Grady^[29]认为,岩体内部的裂纹发展是影响岩体强度的内在因素,而裂纹是否扩展与应变率有直接关系。在静力(或低应变率)情况下,岩体内部低应变率水平下被激活的裂纹和高应变率水平下被激活的裂纹会依次扩展、破坏,而在动力(或高应变率)情况下,岩体内部不同应变率水平下被激活的裂纹会同时扩展、破坏,这样就需要消耗外力功,来促使高应变率水平的裂纹破坏,从而表现为岩体材料强度的增加。K. Masuda^[30]、G. Swan^[31]通过对动态加载后花岗岩和页岩试件裂纹的电镜观察证实了 D. E. Grady 的假定。李夕兵等^[32]将统计损伤模型和粘弹性模型相结合,建立了中应变率下岩石三维动力本构模型;钱七虎等^[33]探究了岩体强度与应变率相互影响的物理机理,认为在不同应变率阶段,不同的机制起主导作用。如图 1.2-1 所示,在 I 阶段变形的热活化机制为主导;在 II 阶段粘性阻尼机制起主导作用;在 III 阶段热活化机制又重新出现,惯性效应起主导作用。该机制与 D. E. Grady^[29]对花岗闪长岩和白云石的加载试验结果较为吻合(图 1.2-2)。在对强度与应变率相互影响机制的认识基础上,钱七虎院士提出了复杂应力状态下考虑强度应变率效应的莫尔库仑本构模型,表达式如下:

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \sigma_3 + \left[\sigma_{ys}^c + \frac{b \left(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s \right)^n}{\left(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s \right)^n + 1} \right] e^{A\alpha} \quad \text{式(1.2-1)}$$

其中, σ_1 和 σ_3 为第一、三主应力, φ 为内摩擦角, σ_{ys}^c 为单轴抗压强度, b 、 n 、 A

为材料常数, $\alpha = \mu/1 - \mu$, μ 为泊松比。

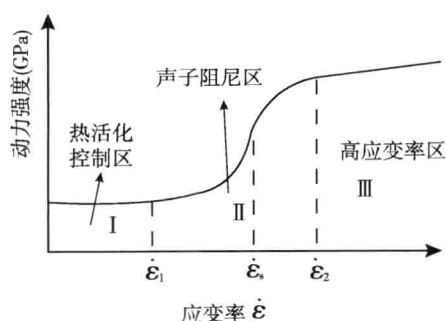


图 1.2-1 强度对于应变率依赖机理^[33]

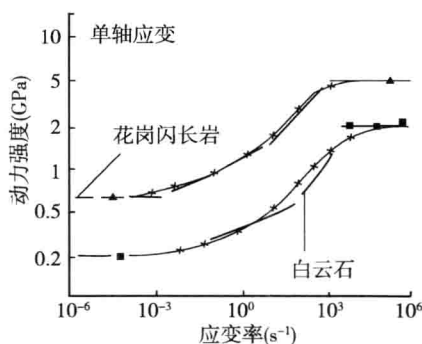


图 1.2-2 岩样的抗压强度试验数据^[29]

总体看来,随着动力加载试验设备的发展,众多学者进行了多种岩石材料的动力加载试验,并得出一些有益结论。在试验基础上,国内外研究人员试图从应变率影响机制、微观裂缝与宏观破坏、损伤及粘弹性模型等多种角度揭示应变率对岩体材料特性的影响机理,建立合理的数值本构模型。目前提出的几种动力本构,均从一定角度反映了岩体的动力特性,但在地下洞室群动力响应分析中存在一定局限性,尚未得到学术界和工程界的一致认可。如,李夕兵等提出的岩石动静组合加载动力本构模型,未能反映应变率对强度的影响;钱七虎院士提出的考虑强度应变率效应的莫尔库仑本构模型,需要大量的试验数据以便确定其特定的参数,给实际工程应用带来很大的不便。

1.2.1.3 动力计算程序的求解速度

大型地下洞室群地震响应计算中三维波动场的求解速度直接关系到动力时程法的实用性。目前波动场的求解无论是隐式算法还是显式算法,均存在计算量大,求解耗时长的问題。这不但使得动力时程分析费用非常高昂,而且也不能给工程设计提供及时的指导。该问题的症结在于计算量大。如,显式求解是有条件稳定算法,其时间步长受单元网格特征尺寸和计算精度的限制,往往取值较小,一般在 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ s 范围内。这使得在时间轴上的逐步积分的次数常常在百万次左右;隐式求解虽然是无条件稳定算法,其时间步长只需满足时间离散方面计算精度,较显式求解的时间步长要大,有时可达到 1 000 倍,这样无疑大大减少了沿时

1 大型地下洞室群动力时程分析方法研究与应用

间轴的积分次数。但在岩体的非线性本构计算时,每时步积分前需重新组装、分解刚度矩阵,而这对计算机 CPU 和内存的消耗量都是巨大的。针对动力时程计算的求解速度问题,国内外的很多学者从计算理论上和计算机技术上进行了广泛研究。

在计算理论方面:众多研究的目标是从理论上尽量减少计算量。从其解决途径上,可分为积分区域和积分算法两大类。在积分区域方面最具代表性的是动力子结构法^[31-33]。该方法的基本思想是将不同时间步长区域的单元在时间轴上进行单独离散,并在特定的时间点进行区域间信息交换。如,某模型 A 区域的时间步长为 0.01 s, B 区域的时间步长为 0.001 s,积分总时长为 1 s。则首先对 A 区域积分一次到达 0.01 s 时刻,然后对 B 区域积分十次,同样到达 0.01 s 时刻,此时对两区域边界信息进行交换,再进行下一步积分。在实际计算中,对于时间和空间离散上的不一致问题,可采用插值算法完成。动力子结构法通过对积分区域的细分,减少了部分区域的积分次数,从而降低了总的计算量;在积分算法方面,LS-DYNA^[10]采用单高斯点积分并采用沙漏阻尼力修正结点力。该方法计算量减小显著,但波动场的计算精度降低较大。FLAC3D^[11]采用高斯散度原理积分,较有限元常用的高斯点积分,计算量有所减少,计算精度基本能满足工程要求,是目前较为流行的一种显式积分格式。我国的钟万勰^[37-39]院士将 Lagrange 体系下的波动方程转入 Hamilton 体系,在时域上给出以积分形式表达的半解析解,若能合理处理其中的积分和矩阵指数函数,则可建立一种高精度、高效率的时域求解方法。

在计算机技术方面:除了 CPU、内存、总线等计算机硬件设施的快速发展外,计算机并行技术的发展也在很大程度上提高了计算效率。目前技术成熟、应用较多的并行算法主要有共享内存式 (OPENMP) 和分布存储式 (MPI)。OPENMP^[40]技术目前已嵌入到很多编译平台 (如 VS2008),该技术使得多个 CPU 同时完成计算任务,但需采用共享的内存空间,适用于细粒度问题在单台多核计算机上求解;MPI^[41]技术是一种独立的程序通信协议库,有多种程序语言形式 (如 C、fortran 等),该技术使得多台计算机或计算结点同时完成计算任务,并独立使用自己的内存空间,并通过数据总线交换数据,适用于粗粒度问题在大型机群上求解。目前的 FLAC3D、ABAQUS 等均已采用了上述并行方式,但受知识产权限制,客户一般