

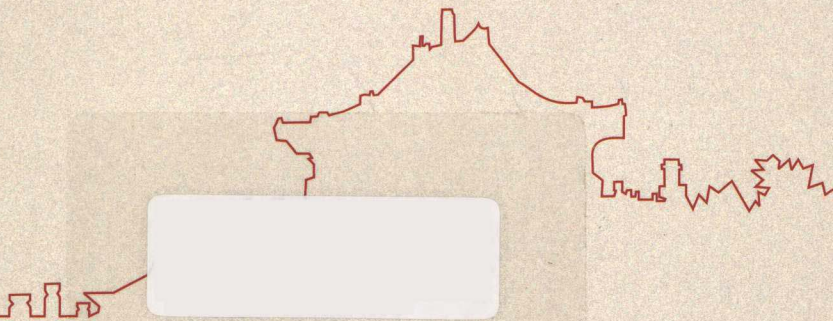
武汉大学优秀博士学位论文文库



# 大型地下洞室群地震响应与 结构面控制型围岩稳定研究

Study on Seismic Response Analysis and Structural Plane-Controlled Stability  
of Surrounding Rock for Large Scale Underground Cavern Complexes

张雨霆 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

武汉大学优秀博士学位论文文库

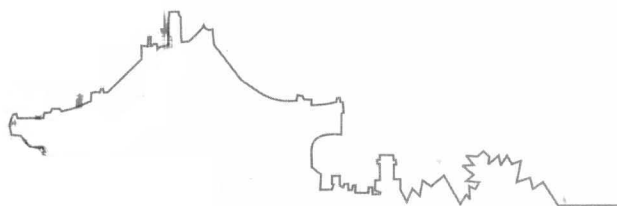


# 大型地下洞室群地震响应与 结构面控制型围岩稳定研究

Study on Seismic Response Analysis and Structural Plane-Controlled Stability  
of Surrounding Rock for Large Scale Underground Cavern Complexes

张雨霆 著

---



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

大型地下洞室群地震响应与结构面控制型围岩稳定研究/张雨霆著. —武汉: 武汉大学出版社, 2014. 1

武汉大学优秀博士学位论文文库

ISBN 978-7-307-12375-5

I. 大… II. 张… III. 水电站厂房—地下洞室—围岩稳定性—研究  
IV. TV731.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 313640 号



责任编辑:谢文涛

责任校对:汪欣怡

版式设计:马佳

---

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:湖北恒泰印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 19.5 字数: 276 千字 插页: 2

版次: 2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-12375-5 定价: 42.00 元

---

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

# 总 序

创新是一个民族进步的灵魂，也是中国未来发展的核心驱动力。研究生教育作为教育的最高层次，在培养创新人才中具有决定意义，是国家核心竞争力的重要支撑，是提升国家软实力的重要依托，也是国家综合国力和科学文化水平的重要标志。

武汉大学是一所崇尚学术、自由探索、追求卓越的大学。美丽的珞珈山水不仅可以诗意栖居，更可以陶冶性情、激发灵感。更为重要的是，这里名师荟萃、英才云集，一批又一批优秀学人在这里砥砺学术、传播真理、探索新知。一流的教育资源，先进的教育制度，为优秀博士学位论文的产生提供了肥沃的土壤和适宜的气候条件。

致力于建设高水平的研究型大学，武汉大学素来重视研究生培养，是我国首批成立有研究生院的大学之一，不仅为国家培育了一大批高层次拔尖创新人才，而且产出了一大批高水平科研成果。近年来，学校明确将“质量是生命线”和“创新是主旋律”作为指导研究生教育工作的基本方针，在稳定研究生教育规模的同时，不断推进和深化研究生教育教学改革，使学校的研究生教育质量和知名度不断提升。

博士研究生教育位于研究生教育的最顶端，博士研究生也是学校科学研究的重要力量。一大批优秀博士研究生，在他们学术创作最激情的时期，来到珞珈山下、东湖之滨。珞珈山的浑厚，奠定了他们学术研究的坚实基础；东湖水的灵动，激发了他们学术创新的无限灵感。在每一篇优秀博士学位论文的背后，都有博士研究生们刻苦钻研的身影，更有他们的导师的辛勤汗水。年轻的学者们，犹如在海边拾贝，面对知识与真理的浩瀚海洋，他们在导师的循循善

诱下，细心找寻着、收集着一片片靓丽的贝壳，最终把它们连成一串串闪闪夺目的项链。阳光下的汗水，是他们砥砺创新的注脚；面向太阳的远方，是他们奔跑的方向；导师们的悉心指点，则是他们最值得依赖的臂膀！

博士学位论文是博士生学习活动和研究工作的主要成果，也是学校研究生教育质量的凝结，具有很强的学术性、创造性、规范性和专业性。博士学位论文是一个学者特别是年轻学者踏进学术之门的标志，很多博士学位论文开辟了学术领域的新思想、新观念、新视阈和新境界。

据统计，近几年我校博士研究生所发表的高质量论文占全校高水平论文的一半以上。至今，武汉大学已经培育出 18 篇“全国百篇优秀博士学位论文”，还有数十篇论文获“全国百篇优秀博士学位论文提名奖”，数百篇论文被评为“湖北省优秀博士学位论文”。优秀博士结出的累累硕果，无疑应该为我们好好珍藏，装入思想的宝库，供后学者慢慢汲取其养分，吸收其精华。编辑出版优秀博士学位论文文库，即是这一工作的具体表现。这项工作既是一种文化积累，又能助推这批青年学者更快地成长，更可以为后来者提供一种可资借鉴的范式亦或努力的方向，以鼓励他们勤于学习，善于思考，勇于创新，争取产生数量更多、创新性更强的博士学位论文。

武汉大学即将迎来双甲华诞，学校编辑出版该文库，不仅仅是为百廿武大增光添彩，更重要的是，当岁月无声地滑过 120 个春秋，当我们正大踏步地迈向前方时，我们有必要回首来时的路，我们有必要清晰地审视我们走过的每一个脚印。因为，铭记过去，才能开拓未来。武汉大学深厚的历史底蕴，不仅仅在于珞珈山的一草一木，也不仅仅在于屋檐上那一片片琉璃瓦，更在于珞珈山下的每一位学者和学生。而本文库收录的每一篇优秀博士学位论文，无疑又给珞珈山注入了新鲜的活力。不知不觉地，你看那珞珈山上的树木，仿佛又茂盛了许多！

李晓红

2013 年 10 月于武昌珞珈山

## 摘 要

水力发电是我国能源供给的重要组成部分。我国西南地区是高地震烈度区，目前在建和待建的大型水电站多分布于西南地区的金沙江、雅砻江、澜沧江和大渡河等流域，且多采用地下式厂房。大型地下洞室群规模大，空间分布和洞室所赋存的地质条件都很复杂，一旦发生地震灾变，将严重影响国家的能源安全。目前，大型地下洞室群的地震响应分析方法和安全评判准则研究还很不充分，且缺乏系统性，因此研究大型地下洞室群的地震响应分析和围岩稳定评判方法具有重大的现实意义，有利于为实际工程提供智力支持。

本文围绕大型地下洞室群地震响应分析和围岩稳定评判中的几个关键问题，即大型地下洞室群的地震响应分析方法、动力计算的多尺度优化方法、结构面控制型围岩破坏分析方法和地震作用下地下洞室群围岩稳定评判方法展开了研究和探讨，提出了一系列方法，并编制了相应的计算分析程序，通过算例验证和实例应用证明了所提方法的有效性和可靠性，取得了良好的应用效果。本书主要包括以下几个方面的研究内容：

(1) 在查阅大量岩体动态响应特性文献的基础上，总结了岩体在地震荷载作用下的动态响应规律，并以地下洞室为研究对象，通过数值计算，研究了地下洞室赋存岩体在地下荷载作用下的应变率分布规律，为动力分析时岩体物理力学参数的取值提供依据。在总结归纳岩体在地震荷载作用下的动态响应规律基础上，提出地下洞室地震响应分析的三维弹塑性损伤动力有限元方法，并将该方法应用于汶川地震震中映秀湾水电站地下洞室的震损分析。工程应用实例表明，数值计算成果的围岩拉裂区、地震过程中岩体的位移总体

变化规律、洞室围岩特征部位的变形规律、围岩应力分布等指标,都与现场调查结论较为一致,可以大致解释在震害调查中所发现的各种震损现象。数值分析成果可信度高,且具备一定的代表性,为震后的加固和修复工作提供了参考。采用三维弹塑性损伤动力有限元方法对地下洞室地震响应问题进行概化和分析是合理可行的。

(2) 针对大型复杂结构动力分析计算量大、耗时长的问题,提出了大型地下洞室群地震响应的多尺度优化分析方法。在时域尺度优化方面,提出了结构动力分析中实测强震加速度时域选取的优化算法,能够有效缩短计算采用的实测地震波持时,显著缩短动力计算时间;在空间尺度优化方面,提出了大型地下洞室群地震响应的动力子模型法和动力计算模型及合理截取范围的确定方法,使得洞室结构动力计算模型能够不建至地表,并缩减模型覆盖范围,有效地压缩了动力分析计算量。实例分析不仅验证了算法的有效性,也证明了算法的可靠性,为大型地下洞室群的地震响应提供了一个显著提升分析效率的实现途径。

(3) 针对有限元方法尚不能有效地分析地质断层滑移、块体失稳等结构面控制型的围岩破坏问题,提出了基于有限元方法的结构面控制型围岩破坏分析方法。该方法由结构面建模、断层结构计算、块体识别和块体稳定评价4部分组成。首先,提出了基于单元重构的岩土工程复杂地质断层建模方法,实现了任意分布的复杂地质结构面的有限元快速建模;其次,提出了基于复合强度准则的薄层单元地质断层结构计算方法,实现了含地质断层结构的地下洞室围岩稳定性分析,能够通过计算得到的层面张开、滑移状态和层面滑动安全系数,评价地质断层对地下洞室的影响;然后,提出了基于有限元网格的地下洞室群三维复杂块体系统识别算法,能够在考虑地下洞室群复杂临空面组合的基础上,实现对洞周块体的搜索和不稳定块体的识别;最后,提出了考虑层面应力作用的块体稳定性分析方法,能够使块体的稳定性评价考虑周边围岩对其的挤压和剪切作用的影响,更符合地下洞室块体的实际情况。该基于有限元的结构面控制型围岩破坏分析可概括为“结构面建模—薄层单元计算—洞周块体搜索—考虑层面应力的块体稳定性评价”四个步骤,

这些工作均在有限元模型基础上完成,形成了一套完整的分析地下洞室结构面控制型围岩破坏的方法。算例验证和与实际工程监测资料对比表明:这一套方法较为有效地实现了有限元方法对地质断层滑移和块体失稳评价等结构面控制型围岩破坏分析,为地下洞室围岩稳定分析提供一个新的思路。

(4) 针对地震作用下地下洞室围岩稳定评价的问题,提出了基于弹塑性损伤动力有限元的围岩稳定地震响应松动判据。采用围岩松动的概念,推导了围岩出现松动时的损伤系数阈值,可采用弹塑性损伤动力有限元分析计算成果来评价围岩在地震作用后的松动程度。然后,基于围岩地震响应分析的波动解法,探讨了地震作用下地下洞室群的整体稳定性评判方法,并对提出了震后加固措施效果的评价方法;结合结构面控制型围岩破坏的有限元分析方法,研究了地震作用对地下洞室地震断层结构和块体稳定的影响。

**关键词:** 地下洞室群; 地震响应; 动力分析; 优化方法; 结构面; 围岩稳定



## Abstract

The hydropower industry plays an important role in the energy industry of China. The southwestern region of China is high seismic intensity zone. Currently there are many large scale hydropower plants distributing widely on the reaches of Jinshajiang River, Yalongjiang River, Lancangjiang River and Daduhe River, etc. Most of these plants, either under construction or scheduled to build, adopt underground-typed powerhouse. The large scale underground cavern complexes are characterized by their huge dimension, complex spatial layout and geological conditions. Once the underground caverns suffer earthquake disasters, the national energy security will be severely affected. At present, the study regarding to seismic response analysis methodology and relevant safety criterion is not sufficient and also lacks comprehensiveness. Therefore, the study of seismic response analysis as well as assessment of surrounding rock stability is attached with critical and practical significance. It also helps to provide actual projects with intellectual support.

This dissertation takes several critical issues, which constitute the study of seismic response analysis and assessment of surrounding rock stability in large scale underground cavern complexes, as the object of research. These issues are the seismic analysis methodology of large scale underground cavern complexes, the optimization of dynamic analysis in multi-aspect, the approach for analyzing structural plane-controlled stability of surrounding rock and its assessment method when underground cavern complexes are subjected to earthquakes. A series of methods are proposed and corresponding computational codes are pro-

grammed. The effectiveness and reliability of these proposed methods and developed codes are demonstrated by several validation examples and engineering cases, indicating that the application effects are favorable. The main contents of this dissertation are described as follows:

(1) Based on extensive reading of research findings in terms of dynamic response features of rock masses, the dynamic response laws of rock masses subjected to seismic load are summarized. Moreover, the underground caverns are specially taken as the research object to numerically investigate the distribution laws of strain rate under seismic impact. The numerical findings provide the dynamic analysis with valuing basis of mechanical parameters of rock masses. Based on the summary of dynamic response features of rock masses subjected to seismic load, the three-dimensional elasto-plastic damage dynamic finite element method (3D-EPD-DFEM) is proposed. This method is further applied to the seismic damage analysis of Yingxiuwan hydropower plant, which is in the epicenter area of Wenchuan M8.0 earthquake. The numerical results, including the tensile-crack area, the general variation law of surrounding rock displacement during earthquake process, the deformation features at typical area of surrounding rock, the stress distribution of surrounding rock, are all in favorable agreement with the in-situ investigation findings. Therefore, the numerical results help to explain many kinds of seismic damage appearances discovered in post-earthquake investigations. It is thus concluded that the analysis results derived from numerical approach is reliable and also typical for same projects. It provides the post-earthquake reinforcement and restoration with references. In a word, the application of 3D-EPD-DFEM in the generalization and analysis of seismic response of underground cavern complexes subjected to earthquake impact is rational.

(2) With focus on the issue of large amount of computation and considerable time-consuming expense, optimization algorithms in multi-aspect are presented for the seismic response analysis of large scale un-

derground cavern complexes. With respect to optimization of time domain aspect, the optimization algorithm for time domain selection of measured strong motion acceleration used in structural dynamic analysis is proposed. It is able to shorten the duration of measured strong motion data and therefore lower the computing time considerably. As for the optimization of spatial domain aspect, dynamic sub-model method and determination procedure of proper intercepted range of dynamic model is proposed for the seismic response analysis of large scale underground cavern complexes. It not only ensures that the earth's surface needs not to be modeled but also reduces the covering range of model, which greatly cuts down the computing amount of dynamic analysis. The case study validates the effectiveness and reliability of the proposed methodologies, thus providing the seismic response of large scale underground cavern complexes with a practical approach to enhance the efficiency of analysis.

(3) With focus on the issue that FEM currently lacks capacity to cope with the analysis of structural plane-controlled stability of surrounding rock, such as sliding of geological faults, instabilities of rock blocks, a set of methods are proposed to analyze surrounding rock failure, especially for the structural plane-controlled type. These sets of methods are based on FEM and have complete procedures. The proposed methods are composed by four parts. They are the modeling algorithm of structural planes, the calculation algorithm of fault structures, the identification algorithm of rock blocks and the evaluation of rock block stability. Firstly, the methodology for modeling of complex geological faults in geotechnical engineering based on element reconstruction is proposed. It provides a rapid way for FEM modeling of arbitrarily distributed complex geological planes. Secondly, the calculation algorithm of thin layer element-based geological faults structures is proposed considering composite strength criterion. It realizes the stability analysis of surrounding rock considering geological faults. It is able to obtain the state of bedding surface, such

as opening and sliding, and also employs the sliding safety factor of bedding surface to evaluate the influences of geological faults on underground caverns. Thirdly, the algorithm to identify three-dimensional complex rock block system in underground cavern complexes is proposed based on FEM mesh. It is able to take the complex combination of excavation surfaces into consideration and therefore realize the construction of rock blocks surrounding the caverns as well as the identification of unstable blocks. Finally, the calculation method of block stability considering stress of bedding surfaces is proposed. It enables the evaluation of blocks to take the compression and shear influences of surrounding rock into account, which tallies better with the real situation of blocks. In summary, the above four steps of methods can be generalized as “modeling of structural planes-calculation of thin layer elements-identification of rock blocks-evaluation of rock stability considering stress of bedding surface”. The introduced procedures constitute a complete system to analyze the structural plane-controlled stability of underground caverns. The validation examples and engineering cases prove the effectiveness of the proposed set of methodologies, providing the FEM analysis with a useful extension to cope with the structural plane-controlled surrounding rock stability.

(4) With focus on the evaluation of surrounding rock stability of underground caverns subjected to earthquake impact, the seismic response criterion of surrounding rock stability is proposed based on loosened concept and 3D-EPD-DFEM. Based on the concept of loosened surrounding rock, the threshold value of damage coefficient is deduced to determine rock loosening. It enables to take the numerical results of 3D-EPD-DFEM to evaluate the loosened range of surrounding rock after suffering the earthquake. Then, based the seismic response wave filed method, the method to evaluate the general stability of underground cavern complexes is discussed. Moreover, the assessment approach of post-earthquake reinforcement measures is proposed. Finally, based on the

proposed methods aiming to analyze the structural plane-controlled stability of surrounding rock, the influences of seismic load on geological faults and rock blocks are studied.

**Keywords:** underground cavern complex; seismic response; dynamic analysis; optimization method; structural plane; surrounding rock stability

# 目 录

第1章 绪论	1
1.1 选题背景和研究意义	1
1.1.1 地下工程的现状	1
1.1.2 地震灾害概况	2
1.1.3 问题的提出	3
1.2 主要科学问题及国内外研究进展	4
1.2.1 地下洞室群地震响应分析的研究方法	8
1.2.2 大型复杂结构动力分析高效计算的实现途径	11
1.2.3 地下洞室群围岩稳定分析方法	13
1.2.4 地震作用下洞室群围岩稳定判据研究	14
1.3 本书的研究内容与技术路线	15
第2章 三维弹性有限元动力计算平台的开发	18
2.1 概述	18
2.2 系统运动方程	18
2.2.1 动力平衡方程	18
2.2.2 单元刚度矩阵	19
2.2.3 单元质量矩阵	19
2.2.4 单元阻尼矩阵	20
2.3 人工边界条件	20
2.3.1 基本概念与分类	20
2.3.2 黏弹性人工边界原理	21
2.3.3 等效黏弹性边界单元与设置方法	22
2.4 地震荷载的输入	25

2.4.1	动力分析问题的分类	25
2.4.2	人工边界的波场分解	25
2.4.3	内行波场的计算	26
2.4.4	输入地震荷载的求解	28
2.5	运动方程的求解	31
2.6	算例验证	33
2.6.1	内源荷载输入	33
2.6.2	外源荷载输入	36
2.7	结构地震响应分析时的若干问题	37
2.7.1	地震波的选取	37
2.7.2	动力计算对模型网格尺寸的要求	38
2.7.3	强震监测数据的滤波和基线校正	38
2.7.4	地下洞室地震响应时输入地震波的折减	39
2.7.5	近场实测强震数据的方向变换	40
2.8	本章小结	46
<b>第3章</b>	<b>地下洞室三维弹塑性损伤动力有限元分析</b>	<b>48</b>
3.1	概述	48
3.2	地震荷载作用下岩体的动态响应特性	48
3.2.1	岩体在动力荷载作用下的响应特性	48
3.2.2	地震荷载作用下地下洞室的应变率分布规律	53
3.2.3	洞室地震响应分析时岩体物理力学参数的取值	59
3.2.4	本节小结	62
3.3	三维弹塑性损伤动力有限元分析	63
3.3.1	屈服准则与塑性本构关系	63
3.3.2	岩石损伤破坏的本构方程	69
3.3.3	动力弹塑性损伤有限元迭代方法	72
3.3.4	动力分析计算基本过程	76
3.4	实例分析	78
3.4.1	工程概况	78
3.4.2	震后实地震损调查	79

---

3.4.3	实测强震数据分析	86
3.4.4	地下洞室地震响应分析	87
3.4.5	本节小结	104
<b>第4章 大型地下洞室群地震响应的多尺度优化分析方法</b> ····· 106		
4.1	概述	106
4.2	结构动力分析中实测强震加速度时域选取的 优化算法	106
4.2.1	问题描述	106
4.2.2	基本思路	108
4.2.3	实测强震加速度数据能量的时域表示	108
4.2.4	瞬时能量下限值的确定	113
4.2.5	时域优化过程中的若干问题处理	115
4.2.6	优化算法的有效性验证	116
4.2.7	优化算法的可靠性验证	119
4.2.8	优化算法的实质	135
4.2.9	结论和讨论	135
4.3	大型地下洞室群地震响应分析的动力子模型法	137
4.3.1	问题描述	137
4.3.2	基本思路	137
4.3.3	基于幅值折减的地震波动场计算	139
4.3.4	动力子模型法的实现	141
4.3.5	算例验证	143
4.3.6	动态子结构法及其与动力子模型法的区别	149
4.3.7	结论和讨论	151
4.4	地下洞室地震响应计算的结构模型合理截取范围 确定方法	152
4.4.1	问题描述	152
4.4.2	基本方法	153
4.4.3	计算工况和参数设置	154
4.4.4	结构计算模型的合理截取范围分析	154



4.4.5 结论和讨论 .....	156
4.5 本章小结 .....	157
<b>第5章 地下洞室群结构面控制型围岩破坏的有限元分析</b> .....	<b>158</b>
5.1 概述 .....	158
5.2 基于单元重构的岩土工程复杂地质断层建模方法 .....	160
5.2.1 问题描述 .....	160
5.2.2 基本思路 .....	161
5.2.3 基于单元重构技术的结构面建模 .....	162
5.2.4 岩土工程中的复杂地质断层建模实例 .....	169
5.2.5 含地质断层的重构模型计算分析 .....	171
5.2.6 讨论 .....	176
5.2.7 结论 .....	177
5.3 基于薄层单元的地下洞室断层结构计算分析 .....	178
5.3.1 基于形函数通用格式的多种形态单元计算 .....	178
5.3.2 考虑复合强度准则的地质断层结构计算 .....	188
5.3.3 实例分析 .....	189
5.4 大型地下洞室群三维复杂块体系统的搜索和 稳定分析 .....	202
5.4.1 基于有限元网格的块体识别方法 .....	202
5.4.2 算例验证 .....	209
5.4.3 工程应用 .....	217
5.4.4 结论 .....	227
5.5 考虑结构面层面应力作用的块体稳定分析 .....	228
5.5.1 概述 .....	228
5.5.2 考虑结构面层面应力作用的块体稳定计算 .....	228
5.5.3 实例分析 .....	231
5.5.4 讨论 .....	234
<b>第6章 地震作用下地下洞室群围岩稳定的安全评判方法</b> .....	<b>235</b>
6.1 概述 .....	235