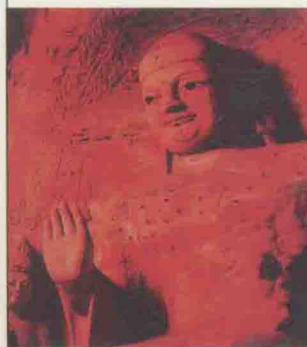


国家科技支撑项目
石质文物保护关键技术研究课题之
石窟岩体结构稳定性分析评价系统研究
编号：2009BAK53B03

Systematic
Studies on the Stability of Rock Caves



石窟岩体结构 稳定性分析评价系统研究

王金华 严绍军 任伟中 方云 著



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

国家科技支撑项目
石质文物保护关键技术研究课题之
石窟岩体结构稳定性分析评价系统研究
编号: 2009BAK53B03

Systematic
Studies on the Stability of Rock Caves

石窟岩体结构

稳定性分析评价系统研究

王金华 严绍军 任伟中 方云 著



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

图书在版编目(CIP)数据

石窟岩体结构稳定性分析评价系统研究/王金华等著. —武汉:中国地质大学出版社有限责任公司, 2013. 12

ISBN 978-7-5625-3235-4

I. ①石…

II. ①王…

III. ①云冈石窟-岩体结构面-结构稳定性-研究

IV. ①P583

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 299214 号

石窟岩体结构稳定性分析评价系统研究 王金华 严绍军 任伟中 方云 著

责任编辑:彭 琳

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮编:430074

电 话:(027)67883511 传 真:(027)67883580 E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店 Http://www.cugp.cug.edu.cn

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:378 千字 印张:14.75 彩版:29

版次:2013 年 12 月第 1 版

印次:2013 年 12 月第 1 次印刷

印刷:武汉邮科印务有限公司

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-3235-4

定价:68.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前言

2009年6月,中国文化遗产研究院联合中国地质大学(武汉)、中国科学院武汉岩土力学研究所、中国水利水电科学研究院、云冈石窟研究院共同承担“十一五”国家科技支撑计划课题《石窟岩体结构稳定性分析评价系统研究》(课题编号:2009BAK53B03)。2012年6月课题顺利通过验收。总结出版该课题的研究过程、研究内容及研究成果是课题成果的重要组成部分,既能让研究者取得学术上的收获,又能对今后的相关研究工作提供参考与借鉴。

一、课题研究单位的职责及研究任务

中国文化遗产研究院负责课题研究内容的确定、技术研究路线的制定、总体目标的制定、阶段性目标的确定、各参加单位任务分工及安排、阶段性成果的总结、总体成果的编制,以及勘察调查工作、窟形形制测绘、试验分析、建立稳定性分析评估方法,对云冈石窟的稳定性做出分析、评估和预测,并汇集成果出版等。

中国地质大学(武汉)负责云冈石窟等全国重点石窟的调研、基础资料的整理编写、地质模型的建立、云冈石窟岩石的性能指标的测试分析、环境条件检测,以及相关成果的总结。

中国科学院武汉岩土力学研究所负责云冈石窟岩石衰减长效强度的试验研究、环境模拟试验、数值模型和评估体系的建立,以及云冈石窟稳定性的评估分析、技术方法的研究。

中国水利水电科学研究院负责重点区段石窟变形监测设计、设备购置、变形监测系统的建立。

云冈石窟研究院负责石窟保存状况调研、资料收集、变形监测系统的日常监测管理。

二、课题开展的研究工作

(一)编制课题实施计划,做好协调工作

根据课题申请书计划和国家文物局课题研究工作的要求,课题组通过现场考察、研讨、征询专家意见等,编制课题实施计划,明确各课题承担单位的任务、责任、计划安排、阶段性工作成果等;明确课题开展研究工作的各项要求,包括现场调查、勘察、试验的时间、人员、工作任务、基本成果要求,及不同时期的试验成果要求;明确科研人员的研究时间和工作任务等,并通过合同书的约定明确各参加单位的任务、成果及时限。

自2010年1月至2010年12月,课题组召开了5次项目协调、研讨会(其中4次在云冈石窟召开),协调本课题各参加单位的试验研究工作,制订工作计划,明确任务,细化技术路线,协调解决课题执行过程中出现的新情况和新问题,确保课题按计划顺利开展工作。

(二)窟区地质条件及病害调查

2010年度的主要研究工作是石窟地质条件及病害的详细勘察、记录、总结。在此期间,课

课题组先后多次赴云冈石窟进行野外调查,主要完成了窟区崖壁面裂隙及危岩体的统计调查、云冈石窟岩体三维裂隙网络模型建立、云冈石窟窟区地层详细调查、危岩体分布特征研究、典型洞窟环境地质病害调查等工作。

对石窟岩体稳定性问题的内涵、概念进行了界定。结合云冈石窟岩体的特点,对地层岩性、地质构造、洞窟形制特点与石窟岩体稳定性的关系进行了深入研究,提出了云冈石窟岩体破坏模式。

(三)样品采集与试验分析研究

2010年6月—9月,课题组系统采集了云冈石窟所有地层的典型岩样、风化样品。主要采集的样品有如下几类。

(1)中国地质大学根据地层的展布对外崖壁共采取了39件块状岩样或者风化粉末状样品。采样主要用于地层分类鉴定、岩石风化对比分析、风化后微观结构与矿物成分测试,并对风化样进行无损检测、力学测试,据此对危岩体的发育控制因素进行分析。

(2)对洞窟内部风化岩样和析出的盐分采样,由于洞窟内部不能进行大体积的样品采集,因此仅对第9窟、第10窟表面风化物有选择性地采取了样品,大部分为风化后的粉末样或析出的盐分样品。

(3)采取了云冈石窟大量的新鲜岩样,主要为砂岩样。泥岩样难以制样,只采取了小型块状样。对采取的样品按要求制作标准试件,用于物理力学性质测试和后期抗风化实验研究。

(4)中科院武汉岩土力学研究所加工完成150个 $\phi 50\text{h}100$ 标准岩样,6个测试热导率用的方形试件,采取了15kg水样用于水岩耦合试验。

课题组开展的试验研究工作有:云冈石窟岩石基本物理参数测试(岩石矿物学测试、水理性质测试、常规物理性质测试等),热学参数测定(导热系数、比热、线膨胀系数),基本力学参数试验(单轴抗压试验、三轴压缩试验、巴西劈裂试验)。

(四)室内环境模拟试验

研发、改进环境模拟箱,用于可溶盐、冻融、干湿为主环境因子劣化实验,取得环境因子影响下岩石性能衰减的实验参数。环境适应性试验主要包括岩石冻融实验、可溶盐的破坏实验、含可溶盐液体冻融实验、酸对岩石的破坏实验等。

(五)稳定性监测系统的开发与应用

为满足云冈石窟岩体稳定性的评估要求,开展的监测工作有:表层岩体温度梯度监测、石窟岩体的应力与应变监测、危岩体的变形监测、裂隙渗压监测等。其中浅表层岩体温度梯度的现场监测,分析得到了云冈石窟砂岩浅层温度场的分布变化规律。结合监测数据的分析与云冈石窟砂岩热物理性质试验测试,得出砂岩浅层温度场的计算条件,为岩体的热-力耦合分析提供基础数据和科学依据。

(六)三维岩体稳定性数值模拟及多场耦合分析

借助有限元等数值分析方法,分析计算不同工况下岩体中的应力状态、多场耦合作用下的岩体稳定性。采用数值模拟方法对地质原型进行概化;对建立起的三维数值模型,进行静力、

动力模拟计算;对第9窟、第10窟岩体的稳定性状态进行分析评估,并根据强度折减法确定稳定性系数,对洞室整体稳定性做出了合理的评价。特别是对小震、中震和罕遇地震(大震)不同工况下石窟廊柱岩体的动力稳定性进行了分析评价。

结合石窟表层岩体的环境特征,建立了单重介质有限元模型,包括单重介质的热-水-力的耦合模型,建立双重孔隙-裂隙介质热-水-应力耦合模型,并推导建立了应力平衡、水连续性及能量守恒三大控制方程,全耦合求解。热力耦合数值模拟包括温度梯度热力耦合模拟、岩石材料的非均质性温度应力模拟等。采用热-水-力多场耦合分析方法对表层岩体风化破坏机理进行了定性和定量的分析评估。

(七)建立分析评价系统

从云冈石窟稳定性问题的类型、特点和识别方法入手,建立了稳定性问题评价内容、评价方法、评价结论及预测分析为框架的相对完整的评价系统。

三、课题的主要成果及创新点

(1)第一次明确石窟岩体稳定性问题的类型。明确了石窟岩体破坏模式、变形特征,以及与石窟形制特点、岩性结构特征的关系;明确了石窟岩体破坏模式和稳定状态评价标准,以及加固设计安全标准。

(2)第一次开展了浅层岩体温度场监测与研究,并以此为依据,开展了多场耦合(热-力耦合)岩石劣化机理研究,并获得两项专利。

(3)根据建立的稳定性分析评价系统,对云冈石窟岩体稳定性进行了分析评估、岩体危险性分区、稳定性级别划分,对稳定性演化做出了预测分析。

本书由王金华、严绍军、任伟中主笔,由方云审核统编。

主要参加专著编写的人员有:姜云辉、张玉军、贾洪彪、刘积魁、刘建辉、李黎、闫宏斌、黄诚等。

参与课题研究的人员有:王金华、方云、严绍军、任伟中、姜云辉、闫宏斌、刘建辉、张兵峰、李黎、吴玉华、黄玉琴、胡学军、贾洪彪、马淑芝、黄诚、周伟强、刘积魁、伏学智、陈星、刘俊红、张傲、陈勋、苏美亮、肖涉恒、温晓龙、康文友、宁波、方堃、皮雷、谭松娥、黄璇、张俊建、余志杰、夏国正、陈浩、刘斌、宋东日、张军等。

王金华

2013年12月于北京

目 录

第 1 章 石窟寺及其稳定性问题	(1)
1.1 中国石窟及主要病害问题	(1)
1.1.1 敦煌石窟	(2)
1.1.2 龙门石窟	(3)
1.1.3 大足石刻	(3)
1.1.4 乐山大佛	(4)
1.1.5 中国石窟稳定性问题	(4)
1.2 研究对象	(5)
1.2.1 石窟危岩体	(5)
1.2.2 风化岩石与危岩体	(6)
1.3 石窟岩体稳定性问题的类型	(7)
1.3.1 崖壁岩体稳定性问题	(7)
1.3.2 局部岩体稳定性问题	(8)
1.3.3 石窟顶板岩体稳定性问题	(8)
1.3.4 廊柱岩体稳定性问题	(8)
1.4 研究意义	(9)
1.5 国内外研究现状	(9)
1.5.1 危岩体研究共性	(10)
1.5.2 石窟危岩体稳定性特性研究	(11)
1.6 主要研究内容与技术路线	(14)
第 2 章 云冈石窟与云冈石窟保护	(16)
2.1 世界文化遗产——云冈石窟	(16)
2.1.1 云冈石窟简介	(16)
2.1.2 云冈石窟的气候与环境条件	(16)
2.2 云冈石窟稳定性问题及治理	(17)
2.2.1 20 世纪 50 年代前的历史维修	(17)
2.2.2 1949 年以来云冈石窟的保护维修	(18)
第 3 章 云冈石窟地质环境条件	(22)
3.1 区域地质背景	(22)
3.2 云冈石窟区的地质构造	(22)
3.3 云冈石窟区的地层条件	(25)

3.3.1 云冈地区侏罗系砂岩·····	(25)
3.3.2 云冈石窟砂岩岩性特征·····	(26)
3.3.3 云冈石窟砂岩沉积构造特征·····	(27)
3.4 云冈石窟摩崖微观地貌特征·····	(31)
3.5 石窟地层与石窟稳定性·····	(32)

第4章 云冈石窟砂岩特性研究 ····· (33)

4.1 微观结构及组分研究·····	(33)
4.1.1 砂岩微观结构及成分组成研究·····	(33)
4.1.2 风化岩样的X射线衍射物相分析·····	(38)
4.2 物理力学性质研究·····	(40)
4.2.1 密度及孔隙率·····	(40)
4.2.2 变形及抗压强度·····	(41)
4.3 水理性质研究·····	(45)
4.3.1 吸水率·····	(45)
4.3.2 渗透系数·····	(45)
4.3.3 膨胀系数·····	(46)
4.3.4 岩石抗冻性·····	(48)
4.4 热学性质研究·····	(50)
4.4.1 导热系数·····	(50)
4.4.2 比热·····	(50)
4.4.3 线膨胀系数·····	(50)
4.5 岩石的蠕变特性研究·····	(52)
4.6 小结·····	(54)

第5章 云冈石窟结构面与危岩体 ····· (55)

5.1 石窟崖壁表面裂隙的分布规律·····	(55)
5.2 石窟内部裂隙分布规律·····	(56)
5.3 云冈石窟裂隙网络模型·····	(57)
5.3.1 原理与方法·····	(57)
5.3.2 结果分析·····	(59)
5.4 崖壁危岩体的分布规律研究·····	(60)
5.5 小结·····	(63)

第6章 砂岩劣化影响因素研究 ····· (64)

6.1 酸对云冈石窟砂岩的破坏·····	(64)
6.1.1 试验方案·····	(64)
6.1.2 试验结果分析·····	(65)
6.1.3 酸对岩石的破坏分析·····	(69)
6.2 可溶盐对云冈石窟砂岩的劣化·····	(71)

6.2.1	可溶盐的发育现状及其对云冈石窟文物的破坏	(71)
6.2.2	试验方案	(72)
6.2.3	试验结果分析	(73)
6.2.4	可溶盐破坏试验结论	(81)
6.3	冻融循环劣化试验	(81)
6.3.1	试验方法	(81)
6.3.2	冻融试验成果分析	(83)
6.3.3	温度劣化机理与结论	(93)
6.4	干湿循环试验	(96)
6.5	小结	(96)
第7章	环境影响因素的监测与分析	(98)
7.1	云冈石窟监测工作布置	(98)
7.1.1	龙王沟危岩体的变形与裂隙水压力监测	(98)
7.1.2	第3窟小型危岩体的张拉、倾斜及温度监测	(100)
7.1.3	山体稳定性多点位移计布设	(101)
7.1.4	石窟西侧崖壁表层温度场监测	(101)
7.2	仪器选型与数据传输系统	(101)
7.3	危岩体监测结果分析	(103)
7.3.1	龙王沟1#危岩体的监测结果分析	(103)
7.3.2	小型片状危岩体的变形监测结果分析	(105)
7.3.3	第3窟小型危岩体变形破坏监测结果分析	(107)
7.4	多点位移计变形曲线	(109)
7.5	云冈石窟浅层温度场监测分析	(110)
7.5.1	岩体表面温度及环境温度对比分析	(110)
7.5.2	岩体钻孔温度随深度变化规律分析	(111)
7.5.3	岩体钻孔各深度的温度梯度变化规律分析	(114)
7.5.4	不同时间段的温度比较及破坏模式分析	(116)
7.6	小结	(119)
第8章	云冈石窟崖壁小型开裂体发育特征及评估	(121)
8.1	调查对象及调查方案	(121)
8.2	红外热成像对云冈石窟危岩体的识别效果分析	(121)
8.2.1	红外热成像应用基础	(121)
8.2.2	云冈石窟岩体热成像某一时刻温度场分析	(123)
8.2.3	红外热成像温度变化过程及危岩体识别研究	(124)
8.3	第11~13窟摩崖危岩体的调查评价分析	(126)
8.4	摩崖危岩体稳定性计算	(131)
8.4.1	滑塌式危岩稳定性计算方法	(131)
8.4.2	倾倒式危岩稳定性计算方法	(131)

8.4.3 坠落式危岩稳定性计算方法	(133)
8.4.4 摩崖危岩体稳定性计算结果	(133)
8.5 小结	(140)
第9章 石窟摩崖危岩体多层次评价系统	(141)
9.1 稳定性及其变化规律	(141)
9.2 评估因子分析	(143)
9.2.1 危岩体的位置高度	(143)
9.2.2 危岩体的体积	(144)
9.2.3 危岩体与文物本体的关系	(144)
9.3 评估权重设定	(144)
9.4 评价结果分析	(145)
9.5 小结	(148)
第10章 云冈石窟顶板稳定性问题	(149)
10.1 顶板梁折式危岩稳定性计算方法	(149)
10.2 第3窟顶板稳定性分析	(150)
10.3 第11窟顶板稳定性分析	(154)
10.4 小结	(160)
第11章 云冈石窟整体稳定性数值分析	(161)
11.1 整体稳定性三维分析理论与方法	(161)
11.1.1 数值分析塑性理论的增量形式	(161)
11.1.2 弹性各向同性体	(162)
11.1.3 弹塑性岩体本构模型	(162)
11.1.4 基于强度折减法的稳定性分析	(166)
11.1.5 三维模型的建立	(167)
11.2 云冈第9窟、第10窟稳定性三维数值模拟分析	(167)
11.2.1 几何模型的建立与边界条件	(167)
11.2.2 计算参数确定	(168)
11.2.3 整体位移分析	(169)
11.2.4 整体应力分析	(169)
11.2.5 剖面的位移和应力分析	(169)
11.2.6 廊柱的位移和应力分析	(171)
11.2.7 强度折减法计算石窟的稳定性	(171)
11.3 第3窟稳定性分析	(172)
11.3.1 模型的建立与边界条件	(172)
11.3.2 整体位移分析	(172)
11.3.3 整体应力分析	(173)
11.3.4 洞窟外崖壁面的塑性区分布	(173)

11.3.5 剖面的应力、位移及破坏分析	(173)
11.4 结论	(175)
第 12 章 云冈石窟第 9 窟、第 10 窟廊柱地震动力学分析	(176)
12.1 模型动力参数选取	(176)
12.1.1 地震波的选取	(177)
12.1.2 动力阻尼设定	(178)
12.1.3 动力边界设定	(178)
12.2 小震动力响应	(179)
12.2.1 应力分析	(179)
12.2.2 位移响应	(179)
12.2.3 速度响应	(181)
12.2.4 加速度响应	(182)
12.3 中震动力响应	(184)
12.3.1 应力分析	(184)
12.3.2 位移响应	(184)
12.3.3 速度响应	(186)
12.3.4 加速度响应	(187)
12.4 大震动力响应	(189)
12.4.1 应力分析	(189)
12.4.2 位移响应	(189)
12.4.3 速度响应	(190)
12.4.4 加速度响应	(192)
12.5 三种工况下动力响应对比	(194)
第 13 章 云冈石窟廊柱及崖壁 T-M 多场耦合分析	(197)
13.1 热-水-力三场耦合模拟基本理论	(197)
13.1.1 单重介质热-水-力耦合控制方程	(197)
13.1.2 有限元格式	(198)
13.2 廊柱多场耦合分析	(199)
13.2.1 有限元模型的建立	(199)
13.2.2 廊柱计算结果分析	(199)
13.3 典型崖壁多场耦合分析	(206)
13.3.1 有限元模型建立	(206)
13.3.2 计算结果分析	(209)
13.4 小结	(215)
第 14 章 结 论	(217)
主要参考文献	(219)
附 图	(225)

第 1 章 石窟寺及其稳定性问题

1.1 中国石窟及主要病害问题

我国是历史悠久的世界文明古国,在漫长的历史长河中,留下了大量弥足珍贵的文化遗产。石窟寺遗存是其中的优秀代表之一。国务院公布的全国重点文物保护单位有 4 295 处,其中石窟寺与石刻有 188 处,属于世界文化遗产(含文化、自然双遗产)的有 31 处。在这 31 处世界文化遗产中,敦煌石窟、云冈石窟、龙门石窟、大足石刻及乐山大佛均属于石窟寺范畴,占了我国世界文化遗产的 1/8 强。

石窟寺是以佛教传播、发展为主线,依山就势开凿兴建,集寺庙建筑、壁画、雕像、彩塑于一体的佛教建筑。随历史变迁,石窟寺的原有寺庙建筑基本上已荡然无存,现存以石窟为主。石窟遗产内容丰富,包括岩体洞室、雕像、壁画、彩塑、石刻、题刻碑文、贴金等。我国石窟寺的开凿延续时间长,历史悠久,自成体系,保存的历史信息真实、完整、丰富,在世界文化遗产中也是独有的。目前列入《世界遗产名录》(表 1.1)的 5 座大型石窟寺是其中的杰出代表。

表 1.1 列入《世界文化遗产》的中国大型石窟情况简表

石窟名称	地理位置	开凿及延续年代	内 容	列入《世界遗产名录》时间
敦煌石窟	甘肃省敦煌市	创建于前秦建元二年,历经十六国、北魏、西魏、北周、隋、唐、五代、宋、西夏、元 10 个朝代	洞窟 735 个,壁画 45 000m ² ,彩塑 2 000 余尊,唐宋木结构的窟檐 5 座,柱础石和铺地花砖数千块	1987 年
云冈石窟	山西省大同市	开凿于北魏(公元 460 年)	现存 252 个洞窟,雕像 5 万余尊	2001 年
龙门石窟	河南省洛阳市	始凿于公元 493 年,历经东魏、西魏、北齐、隋、唐、五代、宋、明诸朝	现存有 2 300 余座窟龕,10 万余尊造像,30 余万字碑刻题记	2000 年
大足石刻	重庆市大足区	凿于初唐(公元 7 世纪中叶),历经晚唐、五代、北宋,兴盛于南宋,延续至明、清	以佛教为主,现存造像 5 万余尊	1999 年
乐山大佛	四川省乐山市	开凿于唐开元初年(公元 713 年)	弥勒佛坐像,通高 71m,座高 59.96m	1996 年

在这五大石窟寺中,云冈石窟及其稳定性问题将在后续章节中专门叙述,现将其他四座石窟寺分述如下。

1.1.1 敦煌石窟

莫高窟保存在高 15~40m、南北长约 1 700m 的山崖上。按照石窟在崖面上的分布情况,可划分为南、北两区。南区现存 487 窟,洞窟形制有禅窟、中心塔柱窟、殿堂窟、大像窟、涅槃窟等,主要用于僧俗礼佛和做佛事活动的场所。北区现存 248 窟,主要是供僧众生活、居住、习禅,以及死后瘞埋的区域,其形制有禅窟、僧房窟、僧房附设禅窟、瘞窟、廩窟等。

在自然环境和人为因素的影响下,敦煌石窟存在以下问题:石窟壁画和塑像的起甲、地仗酥碱、空鼓、脱落、生物侵蚀病害依然大量存在;石窟崖体存在的风化、开裂、坍塌、渗水病害没有得到彻底根治;文物保护科技水平有待进一步提高,尤其是多场耦合试验、保护材料筛选试验,以及现场模拟试验等研究课题需要进一步深化。

敦煌石窟的保护一直是文物界重点关注的课题。1944 年,国立敦煌艺术研究所成立,是敦煌莫高窟保护与研究工作的开端。1950 年,该所改为敦煌文物研究所,敦煌文物的保护、维修与研究得到党和政府的高度重视。1951—1961 年的 10 年间,研究所组织陆续抢修了 5 座唐宋木构建筑,维修加固了 3 处崩塌崖面和数百个洞窟崖体。1963—1966 年,敦煌文物研究所先后分三期完成了敦煌莫高窟 576m 长崖面和 354 个洞窟的维修加固。1984 年,敦煌文物研究所改为敦煌研究院,同年完成莫高窟南区南段 26 个洞窟和 172m 长崖面的加固工程。1988 年,在国家文物局的支持下,敦煌研究院与美国盖蒂保护研究所签订了保护敦煌莫高窟国际合作项目,同年与日本东京国立文化财研究所也签订了合作保护项目,开启了国际合作保护敦煌文物的历程。

“十一五”期间,敦煌研究院继续开展中美、中日合作保护莫高窟项目,重点组织实施了由国家发改委 2007 年 12 月批准立项的敦煌莫高窟保护利用工程,完成了古代壁画保护国家文物局重点科研基地、甘肃省古代壁画与土建筑遗址保护工程技术研究中心以及国家古代壁画保护工程技术研究中心的申报、组建,并顺利运行。

目前存在的比较严重的问题包括:水害问题,虽然该石窟处于干旱地带,但是水害问题仍然比较突出,洞窟水汽形成演化机理及其诱发的盐类酥碱问题的研究,已经取得了大量的研究成果,但基础性的数据仍然需要丰富,破坏过程与机理更是今后研究的重点;壁画问题,大量壁画不同程度地发育裂隙、裂缝、空鼓、酥碱、疱疹、盐霜、起甲、脱落、变色、褪色、烟熏、微生物、动物和机械损伤等病害;塑像问题,塑像不同程度地存在倾斜、松动、开裂、断裂和残损。壁画颜料层的病害等问题也一直是敦煌石窟保护工作中面临的直接课题。

敦煌石窟崖壁在历史上曾发生过大量坍塌破坏。樊锦诗、彭金章、王旭东(2004)在对莫高窟北区研究中发现,该区域石窟在卸荷裂隙与洪水冲刷作用下,历史上发生过多处坍塌,对洞窟群造成了毁灭性破坏。同样,敦煌石窟崖壁目前的整体现状也是历史上多次失稳坍塌后残留而成的。针对敦煌石窟的稳定性问题,李最雄(20 世纪 80 年代—21 世纪前)等组织开展了详细工作,如工程地质水文地质调查、崖壁稳定性模拟分析、崖壁地震稳定性研究及裂隙灌浆材料实验等。总之,石窟稳定性问题是敦煌石窟本体保护中的一个关键问题。

1.1.2 龙门石窟

龙门石窟在我国石窟群中具有独特的地位,是我国一个典型的碳酸盐岩石窟。该类岩石具有强度高、容易发生溶蚀风化等特点。近年来的研究表明,该石窟群目前主要有如下三大问题:渗水与岩溶问题、岩石表层风化病害问题、崖壁块石及危岩体问题。

从石窟形制上看,龙门北魏石窟窟底平面近乎马蹄形。窟顶接近圆形,类似穹窿顶,古阳洞和莲花洞就属于这种类型的石窟。此后这种圆形圆顶的佛龕式石窟更趋完整,本尊靠后,前庭宽广,佛像和石窟布置均衡,宾阳三洞就属此类型石窟。再进一步,石窟形制则向中国建筑的格局发展,出现了少量的方形平顶窟,石窟的后壁设置宝坛,安放本尊、胁侍及菩萨像,左右两壁各开小龕。很明显,这类布局实为中国建筑单间房的形式。这种石窟窟型以魏字洞为代表。到了唐代,龙门圆顶圆形的佛龕式石窟还是为数不少,其中以潜溪寺、惠简洞和极南洞为代表。而平顶窟也仍然存在,万佛洞和看经寺就属此类石窟。此外,唐代石窟还有新的发展,龙门有许多造像一般只开凿一个大佛龕,龕内设置几尊大佛像或者是摩崖造像,均系半露天,如奉先寺大卢舍那佛龕和摩崖三佛龕就属此类窟龕。

在保护方面,1971年至1976年龙门文物保管所(龙门石窟研究院前身)陆续对奉先寺、伊阙佛龕的碑刻、潜溪寺和宾阳三洞实施了加固保护;1987年实施了历时5年的“龙门石窟综合治理工程”;1995年将焦枝铁路龙门隧道东迁700m另辟新隧道,减少了火车震动对石窟的影响;1999年开始实施景区综合整治;2002—2009年实施联合国教科文组织“龙门石窟保护修复工程”项目。2004年,中国和意大利合作在龙门石窟双窟洞开展保护修复工程,这是龙门石窟首次对整体洞窟的表面病害进行的全面修复实践。

通过实施一系列的保护工程及环境整治工程,确保了龙门石窟的基本安全,环境条件得到较大改善,区域二氧化硫、氮氧化物含量分别降低了15%和57%,大气总悬浮颗粒降低了25%,噪声降低了30%。

在渗水问题方面,潜溪寺、万佛洞、看经寺、擂鼓台等大型洞窟渗漏水病害依然呈愈加严重的趋势,治理需求迫在眉睫。在大量渗水的同时,岩体风化诱发产生危岩体。通过调查发现,在奉先寺顶部就存在规模较大的松动块体,其位置高,对文物和游人威胁严重。但总的说来,龙门石窟岩体性质决定了其整体稳定性是五大石窟寺中较好的一个。

1.1.3 大足石刻

大足石刻开凿于唐永徽元年(公元650年),盛于宋代。现存摩崖石刻造像5万余尊,铭文10万余字,遍布100多处。其中比较重要的北山(包括北塔)、宝顶山、南山、石门山、石篆山5处大型石刻,是大足石刻中规模最大、艺术价值最高的石刻造像代表。从石窟形制上看,大足石刻造像方式主要包括两种:一种是传统的石窟造像;一种是摩崖造像,而且后一种占据了重要地位。

建国以来,为保护大足石刻,国家文物局组织完成了岩体加固、水害治理、风化加固等为重点的文物维修保护工程百余项,并开展了造像风化机理、水体危害治理、酸雨危害治理、封护加固材料、岩体稳定性等专门保护课题的研究。

2007年,我国正式启动了与意大利合作建设重庆大足石质文物保护中心项目,中心成立

后将使大足石刻的保护科研设备在西南地区处于领先水平。

以宝顶山千手观音造像为例,目前主要存在岩体风化、雕刻品断裂垮落破坏,金箔变色、起翘、分层剥落,彩绘脱落、起甲等病害。2011年起,在国家文物局组织下,开始实施了千手观音修复保护工作。另外宝顶山摩崖及洞窟存在着比较严重的水害和岩体稳定性问题,圆觉洞洞顶因岩石层面裂隙发育,经常发生剥落掉块,若顶板长期剥层掉落,洞顶有穿孔垮塌的危险,同时也会危及游人的生命安全。大佛湾摩崖造像龕檐,在漫水和渗水、日照和温差等自然因素影响下,在不同区域段时常发生崩塌、剥块现象,危及文物和游客的安全,因而需对窟檐进行抢险维修工作。南山摩崖造像各龕石刻表层岩石结构疏松,对石刻造成极大的破坏。北山石窟群同样存在严重的稳定性问题,168窟由于空间大、平顶,长期以来顶板裂隙不断发展扩大,有垮落的危险。石篆山摩崖造像存在渗水、岩体失稳、风化等病害。重点说来,由于大足石刻岩体强度低,失稳的问题非常突出。

1.1.4 乐山大佛

乐山大佛开凿于一套强度较低的红层砂岩之上。大佛开凿于唐代开元元年(公元713年),完成于贞元十九年(公元803年),历时约90年。大佛两侧断崖和登山道上,有许多石龕造像,多是盛唐作品,属于典型的摩崖造像,形制与其他石窟具有显著差别。

建国以来,乐山大佛本体维修共有6次:1962—1963年维修重点是修补双脚;1973—1975年维修重点是大佛右手背;1990年《治理乐山大佛的前期研究》课题大规模维修乐山大佛;1994年是日常维护;1996年因乐山大佛申报世界遗产而进行大规模维修,采用与大佛岩体一致的岩石替换了大佛双腿间原用砖块砌的裂缝;2001年开展了大规模维护,对大佛头部螺髻的脱落表层进行修补,为解决大佛“鼻黑、脸花、泪痕”问题而对整个面部进行涂饰,用传统锤灰材料对大佛体表的局部进行修补。

对于乐山摩崖造像来说,崖壁自身构造与卸荷裂隙是造成破坏失稳的主要因素,特别是对于卸荷裂隙,必须进行监测、分析与计算,并提出与文物本体保护相适应的技术措施。目前,关于崖壁卸荷裂隙对大佛安全影响的监测、九曲栈道多处危岩的稳定性监测还未实施。另外,栈道、造像本体等均存在风化、岩体失稳的地质病害。

1.1.5 中国石窟稳定性问题

石窟寺一直是我国文化遗产保护工作的重点。石窟寺作为不可移动的石质文物,抵御环境侵蚀的能力差,是十分脆弱的文化遗产类型,其保护形势非常严峻。一方面,石窟寺是依托山体开凿、雕刻、塑造而成的大型野外文化遗产,长期暴露于自然环境中,其质地为各类岩石或草泥雕塑,历经千年的风霜雨雪,本体结构退化非常严重,质地疏松,强度降低,抗击外力侵蚀的能力大大减弱,导致石窟岩体失稳、雕像风化、壁画及彩塑损毁等病害。比如敦煌石窟壁画、云冈石窟壁画的开裂、起鼓、剥落问题,云冈石窟、龙门石窟的渗水对雕像的侵蚀破坏问题,大足石刻千手观音、乐山大佛的严重风化破坏问题等,对文物本体的安全构成严重威胁。石窟内外环境的恶化,加剧了它们的病变,甚至呈现几何级数加速劣化。如环绕石窟周围的酸雨、昼夜的温差、浸入岩体的毛细水和盐分等,都严重威胁着石窟的安全。此外,川流不息的游客也加重了石窟的负荷。相对于其他类型的文化遗产,加大石窟寺的保护力度已极为紧迫。

针对大型石窟寺保护,相关部门制定了“十二五”总体目标:逐步建立以预防性保护与抢救性保护相结合的世界文化遗产大型石窟寺的综合保护体系,建立五大石窟监测系统;实现规划、实施、监管、评估和反馈的循环机制;威胁石窟安全的主要病害得到有效治理;保护基础设施和技术水平得到提高;完成五大石窟寺的安全防范设施建设;实现旅游、社会发展与遗产保护和谐共处,全面提升五大石窟寺的保护、研究、管理和利用水平。

但要实现上述目标,仍然需要进行大量的研究工作。

从各洞窟的调研结果可以看出,中国石窟的稳定性问题,主要有以下3种类型。

(1)石窟崖壁整体稳定性问题。这类问题主要形成于崖壁自然形成的过程中,如第四纪新构造运动过程中的河流切割,在后期洞窟开凿及崖壁修整过程中不断加剧。因此,石窟崖壁整体稳定性问题主要受平行于崖壁的构造裂隙及卸荷裂隙控制,其失稳对石窟将造成毁灭性破坏。

(2)洞窟稳定性问题。在洞窟开凿后,洞窟受力部位,如顶板、立柱等容易失稳造成破坏。这种稳定性问题与地质条件及洞窟窟形直接相关,比较典型的有云冈石窟第3窟与五华洞、大足石刻北山168窟等。

(3)局部块体稳定性。这类稳定性主要是指一些小型的危岩体,甚至为造像本体的局部部位,如悬空的手臂、鼻子、耳朵等凸出部位,另外为崖壁上受裂隙切割形成的块体。这种危岩体在石窟中非常普遍,是日常维护治理的重点。

1.2 研究对象

中国文化遗产研究院、中国地质大学(武汉)、中国科学院武汉岩土力学研究所、中国水利水电科学研究院及云冈石窟研究院共同承担了国家科技支撑计划项目《石质文物保护关键技术研究》中的第3子课题《石窟岩体结构稳定性分析评价系统研究》(编号:2009BAK53B03)。项目指南界定本次研究主要选择云冈石窟作为研究对象,“围绕石窟岩体稳定性问题,从地质调查入手,构建砂岩石窟地质模型,确定关键性的建模指标,进行石窟稳定性仿真分析,建立石窟岩体结构稳定性分析评价系统,为石窟稳定性治理提供科学依据”。围绕这一研究目的,主要开展:云冈石窟地质条件及岩体结构特征调查,岩石性能及环境影响因素研究,云冈石窟危岩体监测系统的设置;建立起基于多场耦合理论、有限差分法、极限平衡法等云冈石窟岩体稳定性评价系统。

本课题研究的稳定性问题主要是指变形失稳的块体,也可称为危岩体,以及石窟岩体的整体稳定性,不包含滑坡、泥石流等地质灾害。

1.2.1 石窟危岩体

危岩体的定义在不同行业中内涵不同:在地质灾害研究中,一般将边坡(斜坡)崩塌体等同于危岩体,崩塌是岩体的主要破坏形式;而在隧道工程中,则将洞室内松动岩体定义为危岩体。总的来说,一般建设工程研究的危岩体其自身价值不高,更多关注的是该岩体破坏后可能造成的危险。而在文物保护中,文物本体与载体均可能发育危岩体,这些危岩体自身具有文物价值。危岩体是否是文物本体或者是否会危及文物本体是应首要关注的问题。

石窟作为野外不可移动的石质文物,其存在一般有几百年至上千年的历史,这个时间尺度与普通工程的设计使用年限(50 或 100 年)完全不同(图 1.1)。也就是说,普通工程主要解决边坡或者隧洞等前 100 年的问题,而我们现在面临的是所有工程建设中考虑时限以外的问题。以边坡为例,在开挖初期,由于应力释放,原有裂隙张开,在开挖扰动、水体浸泡等作用下,将不断坍塌、坍塌破坏数量总的说来呈前期较少(破坏滞后性)—中期增多(大量控制结构强度降低)—后期减少(破坏后形成相对稳定性的边坡)的一个过程。文物保护中的石窟寺,均为已经经过上述 3 个过程后的地质岩体。其破坏的形式将由结构面强度控制转向结构面和岩石共同控制。而在历史长河中,普通工程的偶然作用(地震、战争、火灾、洪水等),对于石窟这一特定研究对象,成为了必然作用,所以对其研究的程度必须更加深入、细微,同时,石窟危岩体的内涵也更加深入和广泛。

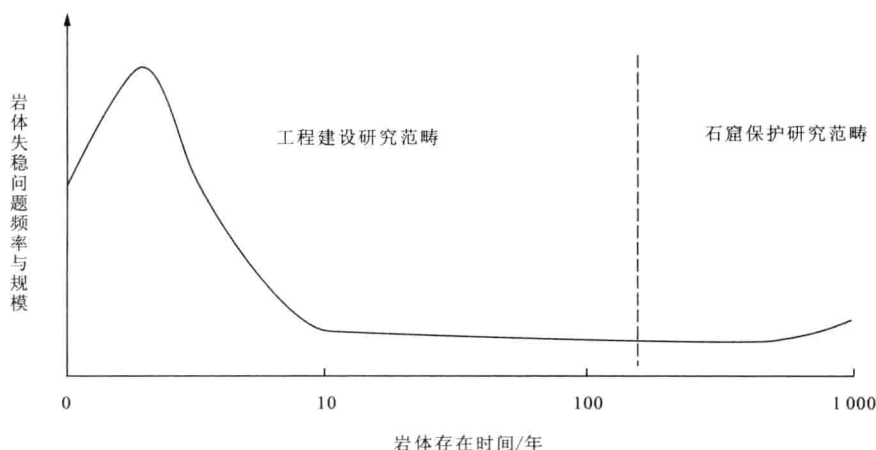


图 1.1 工程建设与石窟保护研究时间上的区别与联系

1.2.2 风化岩石与危岩体

另外,还需要界定文物保护中风化岩石与危岩体之间的关系。防风化研究是文物本体保护中的一个核心工作。本次国家科技支撑项目的研究中,多个课题直接以岩石风化为研究对象,包括无损检测、防风化加固等。一般均认为,岩石的风化可分为物理风化与化学风化,其中物理风化结果以岩石受力破坏为主,而化学风化更多地强调岩石矿物成分的改变。文物保护中关于风化的定义更多的是强调狭义的化学风化,而危岩体(dangerous rock mass)强调的是一种结构体,除了岩石自身外,还包括明确的控制危岩体发育的结构面。

从两者之间的关系上看,两者具有共性,也有一定区别。

(1)岩石风化与危岩体发育均会导致石窟岩体的破坏,但风化导致岩石的破坏以表层开裂与脱落、表面粉化等为主,危岩体的主要破坏形式为掉块、坍塌,其破坏至少受某一结构面的控制。

(2)岩石的风化将促进危岩体的发育。岩石的风化为危岩体结构面劣化提供了条件,降低了危岩体的稳定性。同时,危岩体的发育将有利于岩石的风化,如结构面的开裂加剧岩体内部