

中国文化遗产研究院
文物保护工程与规划系列
2017年

α

石窟保护技术概论

张兵峰 著

h_0

H

文物出版社

中国文化遗产研究院·文物保护工程与规划系列·2017年

石窟保护技术概论

张兵峰 著



 文物出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

石窟保护技术概论 / 张兵峰著. —北京:
文物出版社, 2017. 6

ISBN 978 - 7 - 5010 - 5121 - 2

I. ①石… II. ①张… III. ①石窟 - 文物
保护 - 概论 - 中国 IV. ①K879. 29

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 139337 号

石窟保护技术概论

著 者 张兵峰

责任编辑 吕 游 王 戈

封面设计 刘 远

责任印制 梁秋卉

出版发行 文物出版社

地 址 北京市东直门内北小街 2 号楼

邮政编码 100007

<http://www.wenwu.com>

web@wenwu.com

经 销 新华书店

印 刷 北京京都六环印刷厂

开 本 787mm × 1092mm 1/16 插页 1

印 张 18

版 次 2017 年 6 月第 1 版

印 次 2017 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5010 - 5121 - 2

定 价 248.00 元

序 一

中国文化遗产研究院院长



中国石窟的开凿源远流长，至迟始于汉代，北魏至隋唐时期最为兴盛，一直延续到16世纪。中国石窟在一千多年的发展过程中不仅融合了古印度、波斯和西域的特点，而且禅宗、密宗并存及释、道、儒三教相结合也成为其显著特点。其中的雕塑、壁画是我国古代艺术家把传统的艺术和外来的影响密切汇合起来而创造的珍品，其内容和形式十分丰富，具有独特的风格和鲜明的民族特色，更有极高的文物和研究价值。石窟雕塑和绘画虽都以佛教故事作题材，但其中也有反映各个时代人间现实生活的情景，是研究中国古代史的宝贵资料。丰富多彩的石窟文化，为研究我国古代的历史、宗教、艺术、民俗、社会、政治和经济的变革等提供了珍贵的实物资料，是不可再生的文物资源。

近年来，国家不断加大石窟寺文物的保护力度，逐步形成了具有中国特色的石窟寺保护管理体系。据不完全统计，“十二五”期间中央财政累积安排专项资金十多亿元，集中投入四百多个文物保护工程项目，有效改善了石窟寺及石刻类文物的保存现状。同时，结合工程项目实施，开展了大量跨学科、跨领域、多维度、多命题的联合攻关，在石质文物保护技术研发、石窟寺考古研究、预防性监测保护等方面取得了显著成果。由中国文化遗产研究院负责主持的大足宝顶千手观音抢救加固保护项目历时8年，首次将工业X射线探伤、红外热像探测、三维视频显微镜观察等高科技运用于保护工作中，除了完成佛像的830只手、227件法器修复，还解决了高温潮湿环境下的彩绘造像保护问题。云冈石窟研究院联合国内多家单位开展的“石质文物保护关键技术研究”项目，探索建立起适用于石窟寺的现代监测检测分析技术体系、文物风险评估关键技术体系、文物保护综合关键技术体系，促使我国砂岩类石质文物保护的关键技术取得突破性进展；敦煌研究院、中国科学院西北生态环境资源研究院、美国盖蒂保护所共同完成的“敦煌莫高窟风沙灾害预防性保护体系构建与示范”项目，为干旱区生态恢复、文化遗产地的预防性保护和旅游可持续发展提供了技术支撑。

石窟文物保护工作历来是中国文化遗产研究院的传统优势领域。以黄克忠为代表

的老一辈专家，以王金华、李宏松等为代表的中坚力量，几十年来一直奋斗在石窟保护一线，为我国石窟文物保护作出了卓越的贡献。在这些前辈和兄长的熏陶和教诲下，本书编著者张兵峰同志继承了中国文化遗产研究院不怕苦、不怕累、肯钻研、善总结的优良传统，近年来主动承担和参与多项国家文物局委托项目、自然科学基金课题和院自主课题，主持多项石窟类全国重点文物保护单位的勘察设计工作。通过这些实践和研究工作，在干中学，学中干，及时总结归纳石窟保护工作中的经验与教训，积累起一定的解决石窟寺保护实际困难和问题的理论功底与基础，并进行科学的归纳和整理。本书是他和他的伙伴们实践心得的归纳与总结，从石窟保护勘察的基本方法、如何进行病害调查、多种物理探测到保护工程主要技术、设计要求、石窟保护工程监测等方面对石窟保护技术进行了较全面系统的总结、探讨，可供石窟保护专业人员参考，也可作为教科书使用。

2017年5月22日

序 二

敦煌研究院研究员

李景邵

石窟寺作为我国最重要且精美的不可移动文物之一，有分布地域广、岩石类型各异、赋存环境差别大等特点。长期受自然营力和人类活动的影响，几乎所有石窟寺的文物本体和载体均遭受了不同程度的劣化，产生了坍塌、开裂、渗水、盐害、表面风化等大量病害。随着城乡建设、旅游开发等人类活动的加剧，石窟寺面临的自然侵蚀和人为损害日趋加剧，保存状况不容乐观。

自20世纪50年代起，我国逐步开始了全面、系统、科学的石窟保护研究与工程实践，相继实施了大足石刻北山摩崖造像保护长廊建设、敦煌莫高窟南区崖体加固工程、麦积山石窟岩体加固工程、克孜尔千佛洞第1、2期加固工程、大足石刻北山治水工程和宝顶山观经变崖壁岩体加固工程等具有代表性的石窟保护工程实践，不仅最大限度地保护了这些石窟寺及石刻，同时针对石质文物保护的特点和要求，逐渐形成了一套科学的工作程序和规范要求，为建立以石窟寺保护为主的岩土类遗址保护学科体系打下了坚实的基础。

石窟文物保护是一门综合性学科，涉及岩土工程、地质工程、水文地质、环境学、材料科学、物理、化学、测绘等相关技术领域。研究尺度从宏观到微观，如石窟造像的表面风化问题，要研究表面几厘米甚至几毫米的微观变化；石窟渗水和水盐运移等问题，既要在区域地质背景下开展水盐来源研究，又要从细微裂隙中准确判断渗流途径。在研究和工程实践中，我们不但要考虑当前的保护效果以及保护措施可能对文物造成的伤害，还要考虑保护措施的长期耐久性等问题。这些问题均使得石窟保护工作难度极大，任重道远。

石窟寺保护技术与保护理念密不可分，只有在正确的保护理念指导下，保护技术才能达到有效保护文物的目的。非常可喜的是年轻一代的石窟保护者已经深刻地认识到这一点，石窟文物本体及载体均要尽可能减少干预，实施保护工程和日常保养与维护并重。当必须实施工程干预时，附加的手段只用在最必要的部分，采用的保护措施，应以延续现状，缓解损伤为主要目标。石窟造像区的保护工程应强调综合治理，在保

护文物主体的同时，注重文物赋存自然和人文环境的保护。

我国石窟保护工程已走过半个多世纪，受保护理念和技术发展限制，既有许多成功的案例，也有许多失败的反思。作为年轻一代的文物工作者，张兵峰副研究员不仅谦虚好学、勤恳踏实，具备扎实的基本功和良好的科研素养，还敢于挑重担，对我国石窟保护加固技术进行系统的梳理和凝练，完成了《石窟保护技术概论》一书。本书涉及石窟赋存环境、病害常见类型及成因分析、石窟保护中常用的地学基础知识、石窟测绘与勘察、保护加固技术、工程设计、石窟监测技术及设备等，较全面阐述与梳理了我国石窟寺保护的基础知识和保护技术，并辅以典型的工程案例进行保护技术和理念的进一步阐释，既是对我国石窟保护工程的总结和回顾，也是他十多年从事石窟寺保护研究、勘察、设计成果的全面总结，不乏是一部具有较高学术价值和工程实践参考价值的著作。相信该书的出版，将会对我国石窟保护工程研究与实践起到积极的促进作用。

作为老一代的文物保护工作者，很欣慰看到年轻一代的成长和进步，以此为序，并致祝贺。

2017年7月于兰州

目 录

第一章 中国石窟概况	3
第一节 石窟寺考古	3
第二节 石窟地理分布及自然环境条件	6
第三节 石窟保护工作概况	11
第四节 重点石窟简介	12
第二章 石窟文物病害	25
第一节 病害类型	25
第二节 石窟常见病害成因分析	32
第三节 重点石窟病害介绍	38
第三章 石窟保护地质学基础	57
第一节 地质构造	57
第二节 岩石的地质特征	67
第三节 地下水	76
第四节 地震	78
第五节 石窟保护中常见的不良地质现象	79
第四章 石窟测绘技术应用简述	94
第一节 地形图	94
第二节 测图技术及要求	97
第五章 地质勘察技术	109
第一节 地质勘察阶段及基本方法	109
第二节 石窟病害调查方法	114

第三节	工程地质测绘	118
第四节	工程地质勘探	119
第五节	工程地质测试与试验	126
第六节	勘察报告的编写要求	145
第六章	石窟保护加固技术	150
第一节	岩体稳定性分析	150
第二节	石窟岩体治理加固技术	164
第三节	石窟防渗治理技术	185
第四节	造像岩体表面防风化加固技术	196
第七章	石窟保护工程设计要求	218
第一节	设计说明	218
第二节	设计图纸	220
第三节	危岩体加固设计	223
第四节	石窟防渗治理设计	233
第五节	工程概预算	238
第八章	监测技术	240
参考文献	251
后 记	258

目 录

第一章 中国石窟概况	3
第一节 石窟寺考古	3
第二节 石窟地理分布及自然环境条件	6
第三节 石窟保护工作概况	11
第四节 重点石窟简介	12
第二章 石窟文物病害	25
第一节 病害类型	25
第二节 石窟常见病害成因分析	32
第三节 重点石窟病害介绍	38
第三章 石窟保护地质学基础	57
第一节 地质构造	57
第二节 岩石的地质特征	67
第三节 地下水	76
第四节 地震	78
第五节 石窟保护中常见的不良地质现象	79
第四章 石窟测绘技术应用简述	94
第一节 地形图	94
第二节 测图技术及要求	97
第五章 地质勘察技术	109
第一节 地质勘察阶段及基本方法	109
第二节 石窟病害调查方法	114

第三节	工程地质测绘	118
第四节	工程地质勘探	119
第五节	工程地质测试与试验	126
第六节	勘察报告的编写要求	145
第六章	石窟保护加固技术	150
第一节	岩体稳定性分析	150
第二节	石窟岩体治理加固技术	164
第三节	石窟防渗治理技术	185
第四节	造像岩体表面防风化加固技术	196
第七章	石窟保护工程设计要求	218
第一节	设计说明	218
第二节	设计图纸	220
第三节	危岩体加固设计	223
第四节	石窟防渗治理设计	233
第五节	工程概预算	238
第八章	监测技术	240
参考文献	251
后 记	258

第一章 中国石窟概况

石窟寺是指依山势，从山崖壁面向内部纵深开凿的古代庙宇建筑，里面有宗教造像或宗教故事壁画。石窟艺术是一种宗教文化，取材于佛教故事，兴于魏晋，盛于隋唐，吸收了印度犍陀罗艺术精华，融汇了中国绘画和雕塑的传统技法和审美情趣，反映了佛教思想及其汉化过程，是研究中国社会史、佛教史、艺术史及中外文化交流史的珍贵资料。享誉中外的敦煌莫高窟、大足石刻、龙门石窟、云冈石窟和乐山大佛、彬县大佛寺、麦积山石窟、炳灵寺石窟、克孜尔石窟被列入世界文化遗产清单。

第一节 石窟寺考古^{〔1〕}

中国石窟的开凿最早始于汉代（约3世纪），北魏至隋唐时期（约5~8世纪）为盛期，最晚的可到16世纪。中国的石窟可分七类，①窟内立中心塔柱的塔庙窟；②无中心塔柱的佛殿窟；③主要为僧人生活起居和禅行的僧房窟；④塔庙窟和佛殿窟中雕塑大型佛像的大像窟；⑤佛殿窟内设坛置像的佛坛窟；⑥僧房窟中专为禅行的小型禅窟（罗汉窟）；⑦小型禅窟成组的禅窟群。根据洞窟形制和主要造像的差异可分为新疆地区、中原北方地区、南方地区和西藏地区等四大地区（图1）。

新疆地区 分布在自喀什向东的塔里木盆地北沿路线上，集中的地点有三区。①古龟兹区。分布在今库车、拜城一带。主要石窟有拜城境内的克孜尔石窟，库车境内的克孜尔尕哈石窟、库木吐喇石窟和森木塞姆石窟。其中，克孜尔石窟规模最大，开凿时间最早，大约开凿于3世纪，4~5世纪是其盛期，最晚的洞窟大约开凿于8世纪。其他三处，开凿时间都比克孜尔石窟晚，衰落的时间可能迟到11世纪。②古焉耆区。在今焉耆回族自治县七格星一带。开凿时间约在5世纪以后。③古高昌

〔1〕 宿白·中国石窟寺研究·北京：文物出版社，1989：16-20。

区。在今吐鲁番附近。主要石窟有吐峪沟石窟和柏孜克里克石窟。吐峪沟早期石窟开凿约在5世纪。柏孜克里克主要石窟是9世纪以后，回鹘高昌时期的遗迹，最晚的洞窟有可能迟到13世纪。

新疆的石窟多塔庙窟、大像窟、僧房窟、禅窟以及由不同形制洞窟组成的洞窟组合，也有少量的禅窟群。5世纪以后，方形佛殿窟数量增多，出现了佛坛窟。焉耆、吐鲁番一带还有洞窟前面接砌土坯前堂和用土坯砌建的洞窟。这些不同形制的洞窟，除一般僧房窟外，窟内都绘壁画，绝大部分原来还置有塑像。绘塑内容，在6世纪以前，主要有释迦、交脚弥勒和表现释迦的本生、佛传、因缘等图像。6世纪出现了千佛。8世纪以来，中原北方地区盛行的阿弥陀和阿弥陀净土以及其他净土，还有一些密教形象，都逐渐传播到这里，壁画布局和绘画技法也较显著地受到中原北方石窟的影响。

中原北方地区 指新疆以东、淮河流域以北，以及长城内外的广大地区。这个地区石窟数量多，内容复杂，是中国石窟遗迹中的主要部分，可细分为四区。

① 河西区。甘肃黄河以西各县沿南山的地段，大都分布有数量不等的石窟。其中，敦煌莫高窟延续时间长、洞窟数量多。莫高窟是现存最早的洞窟，开凿于5世纪，陆续兴建到14世纪。莫高窟以东的重要石窟有安西榆林窟和东千佛洞、玉门昌马石窟、酒泉文殊山石窟、肃南金塔寺石窟和武威天梯山石窟等。

② 甘宁黄河以东区。主要石窟有永靖炳灵寺石窟、天水麦积山石窟、固原须弥山石窟、庆阳莲花寺石窟、庆阳南北石窟寺。固原须弥山石窟、庆阳莲花寺石窟始凿于6世纪；永靖炳灵寺石窟、天水麦积山石窟始凿于5世纪，其中永靖炳灵寺石窟第169窟无量寿佛龕有420年的题记，是中国现存窟龕中有明确纪年最早的一处。

③ 陕西区。少数窟龕开凿于6世纪，主要石窟开凿于6世纪以后，如7世纪开凿的彬县大佛寺石窟等。陕西区石窟是中原北方地区晚期石窟较集中的一处。

④ 晋豫及其以东区。以5~6世纪北魏皇室开凿的大同云冈石窟和洛阳龙门石窟、巩县石窟为主流，延续此主流的重要石窟有6世纪中期开凿的邯郸响堂山石窟和6~7世纪开凿的太原天龙山石窟。此外，5~6世纪开凿的义县万佛堂石窟、浞池鸿庆寺石窟、济南黄花岗石窟和7世纪初开凿的安阳宝山石窟，也都与上述这批主流石窟有密切关系，充分表现了佛教石窟逐步东方化的过程。在中原北方石窟中，河西和甘宁黄河以东两区多塑像壁画，陕晋豫及其以东两区多雕刻。

南方地区 指淮河以南地区。这个地区石窟数量不多，布局分散，除个别地点外，摩崖龕像多于洞窟。凿于5~6世纪的南京栖霞山龕像和新昌剡溪大佛，原都前接木构殿阁。广元一带6世纪的石窟，形制多为佛殿窟，有少量的塔庙窟。这时期的主要造像除释迦外，多有无量寿（阿弥陀）和弥勒倚坐像，还有释迦多宝对坐像。自8世纪

以后,四川岷江、嘉陵江流域诸窟龕盛行倚坐弥勒、净土变相和各种观世音造像。10~11世纪多雕地藏和罗汉群像。11世纪,大足石篆山出现了最早的儒、释、道三教石窟。12世纪,大足大佛湾造像内容更为广杂,除佛传、经变、观世音等形象外,还有祖师像和藏传佛教形象。杭州西湖沿岸的窟龕开凿于10~14世纪,13世纪末以前多雕阿弥陀、观世音和罗汉像,13世纪以后多雕藏传密教形象。开凿于9~13世纪的大理剑川石钟山石窟都是佛殿窟,9世纪的造像主要有弥勒和阿弥陀,10世纪以后主要造像有观世音、毗沙门天王和密教的八大明王,最具地方特色的是以南诏王及其眷属为主像的窟龕。

西藏地区 该地区石窟多见不具造像的禅窟和僧房窟。摩崖龕像分布较广,题材多为释迦、弥勒、千佛、十一面观音和各种护法形象,并大多附刻六字真言。以上石窟像的雕凿时间大都在10世纪以后,即藏传佛教所谓的后弘期。拉萨药王山是西藏窟龕较集中的一处,山南侧密布摩崖龕像;东麓的札拉鲁普石窟是现知西藏唯一一座吐蕃时期开凿的塔庙窟,塔柱四面各开一坐佛龕,窟壁雕像多后世补镌。该窟右上方凿出附有石床的僧房窟。山南扎囊、乃东等地的天然溶洞,有不少相传是吐蕃时期高僧的禅窟。扎囊查央宗山溶洞内,后世建有经堂和带有左转礼拜道的佛殿,殿内奉莲花生塑像。传说该洞原是莲花生的禅窟。后弘期这类禅窟窟前有的连接木结构,如萨迦北寺夏尔拉康。窟形规整,四壁满绘佛像的佛殿窟,似多见于西部的阿里地区。

上述四个地区的石窟寺,各具特点,又互相影响。5世纪60年代,云冈最初开凿的大像窟——昙曜五窟应和新疆古龟兹石窟有一定的关系,河西现存的早期洞窟塑绘也受到了新疆的影响。5世纪晚期,南方造像明显影响了中原北方,江南无量寿佛的崇奉传播到中原西部的时间可能更早。6世纪中期以后,中原西部的石窟龕像又影响到四川北部。7~8世纪的隋唐盛世,中原窟龕典型所在——各种净土变和密教形象已南遍四川,西及新疆。11世纪以后,罗汉群像既盛于中原北方,也流行于江南。13~14世纪,西藏藏传佛教形象不仅出现在中原北方,还出现在南方。从以上各地区相互影响的复杂现象可看出,5世纪晚期以前,中原北方受到新疆的影响,这显然是和佛教艺术自西向东传播的情况有关;5世纪晚期以后,佛教窟龕在新疆以东逐渐形成自己的特点。中国各地石窟龕像的发展演变,尽管都还具有地方特征,但却都不同程度地受到全国主要的政治中心或文化中心所盛行的内容的影响。

丰富多彩的石窟文化,为研究我国古代的历史、宗教、艺术、民俗、社会、政治和经济的变革等提供了丰富珍贵的实物资料,是不可再生的文物资源,具有重要的历史及文化研究价值。

第二节 石窟地理分布及自然环境条件

1. 地理分布

中国石窟中许多著名的大型石窟群比较集中地分布在丝绸之路上，如拜城克孜尔石窟、库车克孜尔尕哈石窟、库木吐喇石窟、森木塞姆石窟；吐鲁番地区的吐峪沟石窟、柏孜克里克石窟；河西区的敦煌莫高窟、安西榆林窟、玉门昌马石窟、酒泉文殊山石窟、武威天梯山石窟；甘、宁黄河以东地区的永靖炳灵寺石窟、天水麦积山石窟、固原须弥山石窟、庆阳莲花寺石窟、庆阳北石窟寺；陕西的彬县大佛寺石窟、耀县药王山石窟；晋豫及其以东地区的大同云冈石窟、洛阳龙门石窟、巩县石窟、邯郸响堂山石窟、太原天龙山石窟、安阳宝山石窟、益都云门山石窟、驼山石窟^{〔2〕}；川渝地区大足石刻、安岳石窟、皇泽寺摩崖造像、乐山大佛、潼南大佛寺摩崖造像、浦江石窟、邛崃石窟等。

从地理环境上看，我国可以分为北方地区（东北三省、黄河中下游各省的全部或大部，以及甘肃东南部和江苏、安徽的北部）；南方地区（长江中下游、南部沿海和西南各省）；西北地区（大兴安岭以西，长城和昆仑山—阿尔金山以北，包括内蒙古、新疆、宁夏和甘肃西北部）和青藏地区（西藏、青海和四川的西部）。

经统计，在这四大片区中，我国石窟主要分布在南方地区（川渝一带）和北方地区，分别占总数的42.9%和31%，而西北一带（甘肃、内蒙古和青海及新疆）数目也不少，约占25%，青藏高原一带数目很少（图2）。

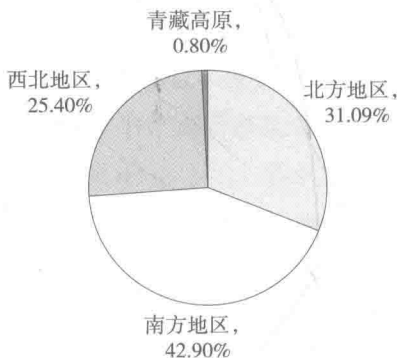


图2 石窟分布地理位置比例图

〔2〕 中国文化遗产研究院. 中国文物保护与修复技术. 北京: 科学出版社, 2009.

目前,我国 18 个省、自治区、直辖市分布有重要的石窟,且集中于河南、陕西、山西及甘肃南部北方地区及川渝为主的南方地区,西北地区主要分布于新疆龟兹石窟片区。

2. 地形、地貌特征

石窟作为一种独特的寺庙与洞窟文化,其开凿必然选择陡直断崖。这种陡崖主要是通过水流顺构造裂隙、断层切割而成。西北地区的部分洞窟开凿于风蚀作用形成的陡坎上,但主要成因还是河流切割,如龙门石窟、云冈石窟、敦煌石窟、库木吐喇石窟、克孜尔石窟、大足石刻、乐山大佛等等。因此,从石窟地形、地貌上看,基本上为阶地、陡坎地貌和侵蚀、剥蚀低山丘陵地貌。

这种陡坎及剥蚀丘陵地貌,从地质看成熟度较低,将不断演化。同时,此类崖壁在石窟(摩崖造像)开凿过程中,受人类活动影响非常明显。早期以洞窟形式为主,如云冈石窟,洞窟开凿严重影响崖壁地形特征,形成非常特殊的大型洞窟地貌环境条件。摩崖造像虽然开凿深度低,但摩崖崖顶往往形成凸出的悬臂状。石窟区除了大型洞窟、摩崖造像外,崖壁表面往往分布大量的小型洞窟和佛龛,进一步改造了天然的地形、地貌环境条件。

受局部地形、地貌影响,洞窟区一般具有相对独特的气候环境条件。首先,这种崖壁的形成应与水或者风的地质营力有关。目前,这种地质营力对石窟崖壁作用仍旧非常明显。如乐山大佛开凿于岷江、青衣江和大渡河三江汇流处,江水的冲刷为崖壁及后期佛像开凿提供了天然条件,同时也是影响大佛稳定性、完整性的主要因素。其二,这种崖壁地段对局部地表风流影响非常严重,最为典型的是狭窄的崖口一般有利于风力增强,如龙门石窟、克孜尔石窟、敦煌石窟等。当然位于背风地段崖壁虽然有利于降低风蚀作用,但常形成粉尘、风沙堆积等破坏作用。其三,朝南、朝西等崖壁受太阳辐射造成温度升高,形成局部高温区。最后,这种临河崖壁湿度较大,形成局部高湿度洞窟环境,如麦积山石窟、龙门石窟。而大足石刻宝顶山这种四周封闭的环境,更有利于形成潮湿的气候环境。

因此,石窟地形特征为受自然营力形成后,经人工改造的陡直成熟度较低的崖壁,并具有特殊的气候环境条件。

3. 地质条件

3.1 我国石窟主要分布地层条件

我国石窟主要分布于沉积岩中,其中以海相沉积的碳酸盐岩和陆相沉积的砂岩为主。此类岩石在沉积岩中属于强度较高的地层,在风化后极易形成碳酸盐岩

陡坎和砂岩陡坎。

我国大部分石窟分布于砂岩（砂砾岩）地层中。据统计，开凿在砂岩中的石窟和摩崖造像约占石窟、摩崖总数的60%以上。这种地层又可以分为三大类，一类为南方中生代沉积红色砂岩地层，形成年代主要为侏罗纪至白垩纪；二类为新生代沉积的欠固结砂岩（砂砾岩）；三类为北方砂岩地层。

南方川渝地区大足石刻至乐山大佛一线的石窟群均为一类砂岩地层。此类砂岩地层为河湖相沉积（河相砂岩、湖相泥岩），砂岩集中分布区风化后形成砂岩陡坎，为石窟开凿提供了条件。砂岩一般为细粒砂岩，质地细腻，地层连续性好，有利于造像的打磨，因此一般可直接在岩石上开凿造像。其强度较碳酸盐岩低很多，且一般以钙质、泥质胶结为主，除了受酸性环境的溶蚀作用外，干湿变化对其影响也非常明显。因此，岩石自身的风化一般比较严重，且容易形成大型坍塌破坏。

二类新生代主要为第三纪和第四纪沉积形成砂岩（砂砾岩）。此类岩石在南方基本没有形成大型陡坎的现象，但在西北干旱地区却大量形成砂岩（砾岩陡坎），新疆龟兹片区石窟、甘肃敦煌石窟均分布于该地层中。其属于欠胶结状态，岩石孔隙率高，结构松散，强度很低，透水透气性好。从开凿施工方面看，难度较低，但稳定性差，且不易直接在岩石上开凿造像。因此，此类洞窟开凿后对崖壁应力场影响非常严重，洞窟内文化遗存主要以壁画及泥塑为主。

三类砂岩主要分布于北方的中生代地层，比较典型的是云冈石窟。其岩性主要为侏罗纪形成的钙质胶结长石石英砂岩。此类砂岩强度较南方红层砂岩高，颗粒均匀度不如南方红层砂岩。由于以钙质胶结为主，对酸性环境同样比较敏感。

碳酸盐岩是我国洞窟开凿的另一个主要地层。此类岩石容易形成喀斯特岩溶洞穴。其强度非常高，施工难度很大，因此很多大型洞窟均依天然岩溶洞穴开凿。同时，由于岩石的硬度非常高，很多容易直接打磨成非常精细的造像。这种岩石上开凿的洞窟在没有人为破坏的情况下，一般保存良好，如河南洛阳的龙门石窟、杭州飞来峰造像等。但是，这种岩石在酸性条件下可溶，极易形成溶蚀和堆积效应，对文物本体造成不可挽回的损失。

3.2 我国石窟主要地质构造特征

除了岩性对垂直崖壁起控制性作用外，新构造运动是另外一个重要因素。

对于我国大部分地区，新构造运动体现为地壳抬升、河流下切规律。石窟崖壁一般为多级阶地连续分布地段。如龙门石窟崖壁主要为伊河一级至三级阶地、敦煌石窟为大泉河一级至三级阶地、云冈石窟为十里河一级至三级阶地（图3）、克孜尔石窟为木扎提河的二级至五级阶地等。在这种呈现上下抬升作用，而造山运动不强的地区，