裴强强,贾栋,赵建忠,等.麦积山石窟工程地质岩组划分与工程特性研究[J].地震工程学报,2026,48(6):1410-1422.DOI:10.20000/j.1000-0844.20260131001

Pei Qiangqiang, Jia Dong, Zhao Jianzhong, et al. Engineering geological rock-group division and engineering characteristics of the Maijishan Grottoes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1410-1422. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20260131001

麦积山石窟工程地质岩组划分与工程特性研究

裴强强[1,2,3,4], 贾 栋[1], 赵建忠[2,5], 李文俊[4], 岳永强[1],
吴虎成[3], Soltobaev Orozbek[2,6]

(1.敦煌研究院 麦积山石窟艺术研究所,甘肃 天水 741020;
2.中国-吉尔吉斯斯坦文化遗产保护"一带一路"联合实验室,甘肃 酒泉 736200;
3.兰州理工大学 土木与水利工程学院,甘肃 兰州 730050;
4.敦煌研究院,甘肃 酒泉 736200;
5.甘肃莫高窟文化遗产保护设计咨询有限公司,甘肃 酒泉 736200;
6.吉尔吉斯共和国文化、信息和青年政策部历史和文化古迹保护安全检测中心,吉尔吉斯斯坦 比什凯克 720004)

摘要:为明确麦积山石窟弱胶结砂砾岩崖体的工程地质岩组划分及其工程特性,采用地质钻探、岩芯编录、物理力学试验、结构特征分析和矿物成分测试等方法,对崖体工程地质特征进行系统研究。结果表明:麦积山石窟崖体依据综合岩性组合、胶结结构、软弱夹层发育、关键力学指标、洞窟分布特征及病害点位,自上而下可划分为A、B、C、D、E五个工程地质岩组。其中,洞窟集中开凿于力学性能与可加工性相对平衡的洞窟次密集区(B岩组)和洞窟密集区(C岩组),而避开了力学性能差、渗水风险高的零散洞窟区(D岩组)。各岩组垂向上存在显著的"地质岩组-力学性能-可开凿性"耦合关系,且岩体强非均质性与频繁发育的软弱夹层是控制其稳定性与渗漏水的关键因素。研究结果可为砂砾岩类石窟寺稳定性评估、渗漏水防治及保护加固优化设计提供科学依据。

关键词:麦积山石窟;砂砾岩;岩组划分;力学性能

中图分类号:TU375 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)06-1410-13

DOI:10.20000/j.1000-0844.20260131001

收稿日期:2026-01-31

基金项目:国家自然科学基金项目(U22A20599);甘肃省创新平台计划项目(26JDWF001)

第一作者简介:裴强强(1981-),男,博士,研究馆员,博士生导师,主要从事石窟寺保护及土建筑遗址保护。E-mail: peiqiangq@163.com。

通信作者:贾 栋(1999-),男,硕士,主要从事石窟寺保护研究工作。E-mail: 2401999482@qq.com。

Engineering geological rock-group division and engineering characteristics of the Maijishan Grottoes

Pei Qiangqiang[1,2,3,4], Jia Dong[1], Zhao Jianzhong[2,5], Li Wenjun[4], Yue Yongqiang[1], Wu Hucheng[3], Soltobaev Orozbek[2,6]

(*1. Maijishan Grottoes Art Research Institute, Dunhuang Academy, Tianshui 741020, Gansu, China;*
2. China-Kyrgyzstan Belt and Road Joint Laboratory for Cultural Heritage Conservation, Jiuquan 736200, Gansu, China;
3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
4. Dunhuang Academy, Jiuquan 736200, Gansu, China;
5. Gansu Mogao Grottoes Cultural Heritage Conservation Design and Consulting Co., Ltd., Jiuquan 736200, Gansu, China;
6. Republican Inspection for the Protection of Historical and Cultural Monuments of the Ministry of Culture, Information and Youth Policy of the Kyrgyz Republic, Bishkek 720004, Kyrgyzstan)

Abstract: To clarify the engineering geological rock-group division and engineering characteristics of the weakly cemented conglomeratic cliff mass at the Maijishan Grottoes, a systematic investigation was carried out using geological drilling, core logging, physical and mechanical testing, structural analysis, and mineralogical analysis. The results show that, based on lithologic assemblages, cementation characteristics, the development of weak interlayers, key mechanical indices, the distribution of caves, and the occurrence of deterioration features, the cliff mass can be divided vertically into five engineering geological rock groups, namely Groups A, B, C, D, and E. The caves are mainly concentrated in Group B (a moderately dense cave zone) and Group C (a densely distributed cave zone), where mechanical performance and workability are relatively well balanced, while Group D (a sparsely distributed cave zone) is generally characterized by relatively poor mechanical properties and a higher risk of water seepage. A significant vertical coupling relationship is observed among rock-group division, mechanical properties, and excavatability. The strong heterogeneity of the rock mass and the frequent occurrence of weak interlayers are the key factors controlling cliff stability and water seepage problems. These findings provide a scientific basis for the stability assessment, water-seepage control, and optimization of conservation and reinforcement design for grottoes excavated in conglomeratic rock masses.

Keywords: Maijishan Grottoes; sandy conglomerate; rock-group division; mechanical properties

0　引言

麦积山石窟为中国四大石窟之一，位于甘肃省天水市麦积区(106°00′10″E, 34°21′03″N)。崖体相对高度约为142 m，石窟多开凿于距地表30～80 m的陡立崖壁上，是中华文化与佛教艺术的重要遗产。麦积山地处秦岭西段北缘，位于西秦岭构造带与祁吕贺山字型构造体系复合部位。新生代以来，受青藏高原隆升影响，区内经历显著构造抬升与差异剥蚀，形成现今孤立陡峭的山体形态；区域断裂构造发育，地震活动频繁，公元734年的天水地区强震曾导致麦积山崖面中部及东上部大面积塌毁[1]。复杂的地质环境和高地震设防烈度背景，使石窟岩体稳定性长期面临严峻挑战。

近年来，石窟保护研究呈现从单一病害调查向多学科交叉融合发展的趋势，其中赋存石窟文物的岩体尤被学界所关注。针对莫高窟与榆林窟，王旭东等[2]、郭青林等[3]通过地层划分、力学试验与区域地质分析，厘清了两窟岩体的赋存地质特性、工程地质特性及岩层结构特征，为岩体稳定性分析提供了科学依据。卢斌荧等[4]结合地貌、岩性与空间分布特征，指出石窟洞窟分布与地质环境存在密切依赖关系。张虎元等[5]与王旭东等[6]从石窟岩体胶结类型入手，阐明胶结差异对围岩渗透性与稳定性的控制

作用。文献[7-10]基于北石窟寺地层划分、风化差异调查及水环境研究，发现岩性差异与结构特征是病害演化的内在控制因素，而水文、气候及微环境变化加速了病害发展。裴强强等[11]揭示了以北石窟寺为代表的沉积岩层石窟，其顶板易沿沉积原生层理面拉裂并发生局部坍塌。陈建平等[12]通过龙门石窟研究，揭示了地质风化带与文物本体病害的耦合关系。孙满利等[13]在陇东地区系统研究中，建立了基于区域环境的砂岩石窟病害演化特征。张明泉等[14]从岩层视角揭示莫高窟壁画地仗层与围岩盐害分布的层位差异，强调岩性对文物保存的核心控制作用。

麦积山石窟地质环境条件复杂、地貌特征独特，限于孤立142 m山体的特殊形态，其系统地质岩层特性研究相对较少。20世纪70年代，为防治崖面剥落曾实施喷锚加固[15]，致使现今崖面地层出露受限；后山区域多被第四系坡积物与植被覆盖，山体岩层难以直接观测，崖体内部地层结构的系统认知及工程地质岩组划分与编目均极为困难。尽管20世纪70年代的岩体加固伴随较为全面的地质勘察，后续对洞窟渗水、风化、区域坍塌特征及病害发育机理亦积累大量成果[16-23]，但既有研究多集中于局部岩体或单一病害成因分析，缺乏从工程地质学视角的系统认知；尤其对麦积山石窟岩体的地质岩层特点、物理-力学-水理性能、结构特征与成岩特性等方面，研究几乎处于空白。对麦积山地层层序与岩体性能认识的不确定性，严重制约了崖体稳定性、地震响应、渗流路径及洞窟文物威胁成因的科学评估。

基于上述现状，本研究以麦积山石窟崖体为对象，通过系统地质钻探、岩芯精细编录、室内岩石物理力学试验、矿物成分分析及结构面调查，旨在厘清其工程地质岩层格架，揭示岩组垂向分布与力学性能、可开凿性之间的耦合规律，阐明控制崖体稳定性与洞窟渗漏水发育的关键地质因素及其作用机制。研究成果可为砂砾岩类石窟寺文物稳定性评估、渗漏水防治及保护加固优化设计提供科学依据。

1 麦积山赋存环境

1.1 地形地貌

麦积山石窟位于甘肃省天水市麦积镇麦积村，地处秦岭西端北麓，位于秦岭、贺兰山、岷山三大山系交汇地带。麦积山地貌单元属西秦岭构造剥蚀低山丘陵区，因山体形似麦垛而得名；山顶高程为1 671.5 m，相对高差约142 m，陡立岩壁呈约85°倒坡[24]。

1.2 气候特征

麦积山属半湿润季风气候，年平均气温11.7 ℃，年平均降水量503.2 mm，相对湿度约70%。其中，5—9月降水量约占全年的70%，强降雨过程频发，对崖体渗漏水及风化病害发育具有重要影响。

1.3 区域地质构造

麦积山石窟位于西秦岭构造带西段与贺兰—川滇构造带的复合交汇部位。尽管石窟本体10 km范围内未发现活动断裂，但其外围100 km范围内分布有4条晚更新世以来活动的深大断裂：陇县—岐山断裂、固关—虢镇断裂、山丹—固城断裂及礼县—罗家堡断裂[1]。

如图1所示，麦积山位于天水地震带内，地震作用对崖体稳定性的影响不可忽视。有历史地震记载以来，麦积山石窟150 km范围内共记录到5级以上破坏性地震32次，其中8级以上地震1次、7.0～7.9级地震2次、6.0～6.9级地震12次、5.0～5.9级地震17次。对石窟影响较大的地震包括：734年天水7.0级、1654年天水南8.0级、1879年武都8.0级地震及1920年海原8.5级。其中，734年地震造成麦积山崖面中部塌毁，使窟群分为东崖和西崖两部分，影响烈度达Ⅹ度[25]。

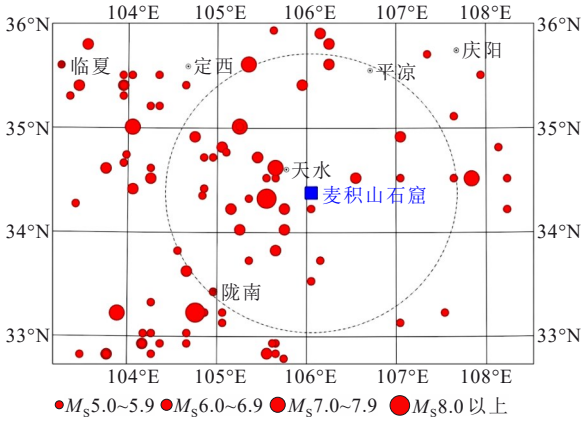


图1 麦积山石窟150 km范围内5.0级以上地震震中分布[25]

Fig. 1 Epicenter distribution of $M\geqslant5.0$ earthquakes within 150 km of the Maijishan Grottoes[25]

在当前构造与地震活动背景下，弱胶结砂砾岩崖体在强非均质结构控制下的稳定性与渗漏水问题依然严峻。

2　地层划分

2.1　钻孔位置及取样

为查明崖体地层的垂向分布特征，在麦积山山体西侧和北侧共布置 4 个竖向钻孔（ZK1～ZK4），钻孔位置见图 2 和表 1。其中，ZK1～ZK3 位于主峰西崖根部，平均孔深约 32 m；ZK4 位于主峰北侧，孔深约 110 m。基于本次钻探建立了麦积山石窟工程地质岩芯样本库（图 3）。由于钻孔孔口位于后山试验区，且起始段 0～7.5 m 为坡积物覆盖层，本次钻探对崖体基岩的有效揭示相当于自距山顶约 84 m 处开始向下延伸（图 4）；距山顶 0～84 m 范围内的崖体岩层仍缺乏钻孔资料，尚待进一步查明。

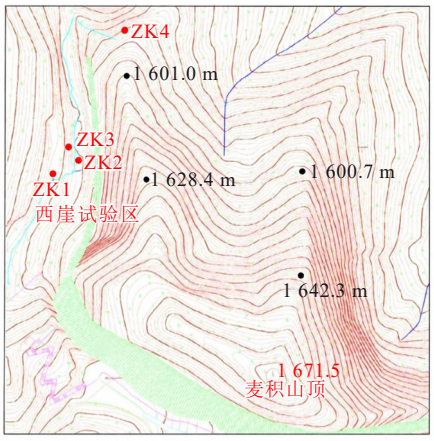


图 2　钻孔平面布置图

Fig. 2　Layout of boreholes

取样发现，麦积山岩体样品岩芯大多呈紫红色，由磨圆度中等偏好的砾石、卵石、砂及泥质成分胶结而成，具胶结砂砾状结构、中厚层状构造（图 5）。其中，泥质约占 10%，砂约占 25%，砾石约占 55%，卵石约占 10%；颗粒呈次棱角至次圆状，分选差，杂乱排列，砾卵石之间由砂和泥质成分充填并胶结。

表 1　钻孔基本信息

Table 1　Basic information of boreholes

钻孔编号	经度（E）	纬度（N）	海拔标高/m	孔深/m	孔径/mm
ZK1	106°00′10.84″	34°21′10.11″	1 562.00	33.00	130
ZK2	106°00′11.27″	34°21′10.27″	1 565.30	31.00	130
ZK3	106°00′11.13″	34°21′10.46″	1 565.80	31.00	130
ZK4	106°00′12.10″	34°21′12.10″	1 595.00	110.10	130



图 3　麦积山石窟岩体样本库

Fig. 3　Rock sample library of the Maijishan Grottoes

2.2　划分方法

遵循“组内相对一致、组间差异显著”的工程单元划分原则，采用“岩性—结构—成分—力学—保存状态响应”多指标联合判别方法，对崖体进行工程地质岩组划分。首先，以地层年代和岩芯编录确定崖体层序特征，将软弱夹层发育带和胶结方式突变带作为岩组划分的主要边界依据；其次，利用单轴抗压强度、劈裂抗拉强度、直剪参数及弹性模量等力学指标进行校核；最后，结合洞窟分布和病害点位对边界进行修正，形成面向稳定性评价与渗漏水防治的岩层划分结果。

3　崖体工程地质特征及划分结果

3.1　岩石矿物学性质

3.1.1　薄片鉴定

如表 2 所列，麦积山砂砾岩样品均以颗粒支撑结构为主，主要矿物成分为石英、长石及岩屑，粒径分布较广，接触方式以点-线接触为主。不同组别在矿物含量、粒径范围、磨圆度及胶结方式上存在一

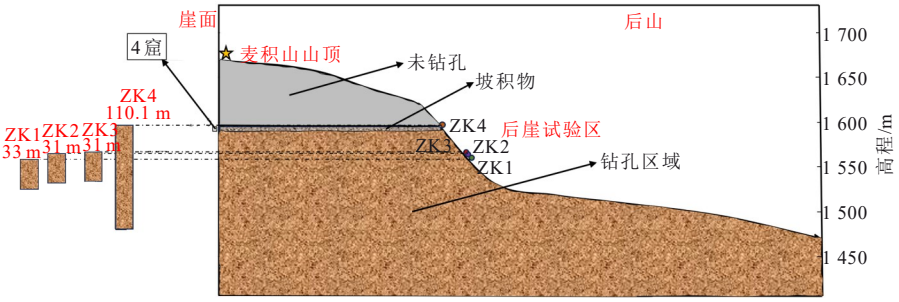


图 4　孔口高程剖面示意图

Fig. 4　Schematic section of borehole collar elevations



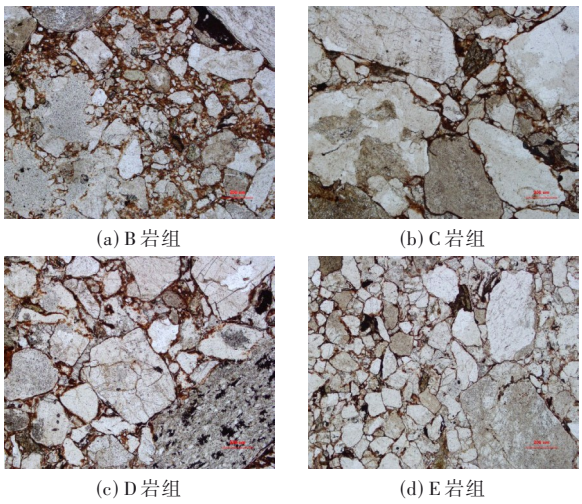
(a) B 岩组 (b) C 岩组

(c) D 岩组 (d) E 岩组

图 5 各岩组典型岩芯照片

Fig. 5 Photographs of typical cores from each rock group

定差异,体现了砂砾岩在成因及风化程度上的多样性(图 6)。其中,石英含量普遍较高,磨圆度从棱角状至次圆状不等。胶结方式主要为孔隙式、环边式及孔隙-环边式,不同岩组对应的岩体在结构稳定性和力学性能方面可能存在显著差异。基于垂向胶结方式及地层年代的差异,本文对样品进行微观特征的初步分组,以便后续对比分析(表 2)。本节涉及的各层位置信息均以崖顶为零点基准。



(a) B 岩组 (b) C 岩组

(c) D 岩组 (d) E 岩组

图 6 薄片鉴定照片

Fig. 6 Thin-section photomicrographs

表 2 各岩组颗粒组成与胶结结构特征汇总表

Table 2 Summary of grain composition and cementation structure of each rock group

岩组	钻孔名称	取样深度/m	石英/%	长石/%	岩屑/%	粒径区间/mm	支撑类型	接触方式	磨圆度	胶结方式
A	ZK1～ZK4	[76.5,84.0)	37～39	7～9	22～24	0.35～5.0	颗粒支撑	点-线	棱角-次棱角状	孔隙-环边式
B	ZK1～ZK4	[84.0,105.5)	29～31	8～9	40～42	0.2～8.5	颗粒支撑	点-线	棱角-次棱角状	孔隙-环边式
C	ZK4	[105.5,125.5)	22～23	16～17	43～44	0.2～6.5	颗粒支撑	点-线	次棱角-次圆状	环边式
D	ZK4	[125.5,149.1)	33～34	4～5	38～40	0.25～10	颗粒支撑	点-线	次圆状	孔隙式
E	ZK4	[149.1,186.6)	35～37	5～6	47～49	0.25～15	颗粒支撑	点-线	棱角状-次圆状	孔隙式

3.1.2 微观测试

(1) 取样说明

麦积山石窟垂向跨度大,对所有钻孔(ZK1～ZK4)样品进行 X 射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)和扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)分析难度较大,故选取各岩组典型样品进行测试。

(2) XRD 分析

为确定岩样的矿物组成与含量,选取表 3 中四个麦积山典型砂砾岩样品(BY-1、CY-1、DY-1 及 EY-1),采用日本理学(Rigaku)D/MAX-2400 型 X 射线衍射仪进行物相定量分析,结果如图 7 所示。

XRD 结果表明,样品以石英为主要矿物,方解石为主要胶结矿物;长石及少量黏土矿物的存在会影响岩体长期稳定性。

(3) X 射线荧光光谱(X-ray Fluorescence,XRF)分析

采用 XRF 分析样品 BY-1、CY-1、DY-1 的元素组成,结果如图 8 所示。由图可知,XRF 结果与 XRD 相互印证,表明样品以 SiO_2 为主,CaO 反映碳

表 3 各岩组抗压试验样品基础信息汇总表

Table 3 Summary of basic information for compressive test samples of each rock group

岩组	样品编号	钻孔名称	取样深度/m	直径/cm	高度/cm	质量/g
B	BY-1	ZK4	[99.1,99.5)	8.46	14.52	2 020.45
	BY-2	ZK3	[97.0,97.5)	8.52	14.60	2 061.87
	BY-3	ZK1	[102.2,102.7)	8.4	14.36	1 980
C	CY-1	ZK2	[110.5,111.0)	8.45	16.85	2 320.86
	CY-2	ZK4	[113.0,113.5)	8.78	13.27	1 812.7
	CY-3	ZK3	[109.5,110.0)	8.4	13.13	2 145.13
D	DY-1	ZK4	[127.3,127.5)	8.55	15.51	2 063.76
	DY-2	ZK4	[132.5,133.3)	8.60	14.25	2 235.21
	DY-3	ZK4	[137.6,138.0)	8.54	15.89	2 002.27
E	EY-1	ZK4	[174.8,175.3)	6.05	12.04	806.43
	EY-2	ZK4	[169.7,170.3)	6.55	12.12	900.49
	EY-3	ZK4	[177.3,177.7)	6.12	12.09	873.58

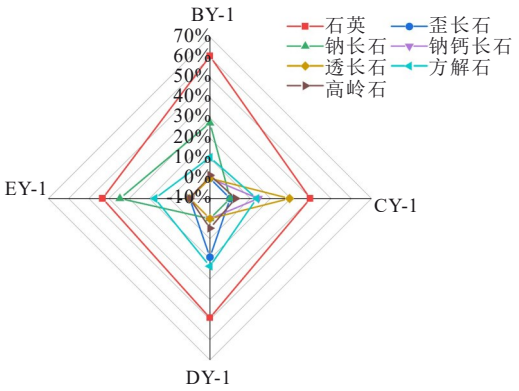


图 7　样品的 XRD 半定量分析结果

Fig. 7　Semi-quantitative XRD analysis results of samples

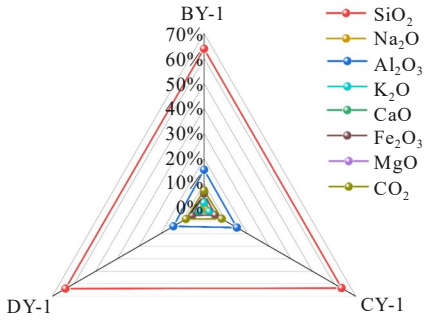


图 8　样品的 XRF 分析结果

Fig. 8　XRF analysis results of samples

酸盐胶结的存在，说明麦积山砂砾岩具有明显的骨架矿物-胶结矿物组合特征。

（4）SEM 分析

采用扫描电子显微镜对 BY-1、CY-1、DY-1 和 EY-1 四个典型样品进行观察。如图 9 所示，麦积山砂砾岩样品的微观形貌以片层结构和颗粒结构为主，颗粒形态不规则，局部区域可见孔洞和微裂隙等结构缺陷。这些孔隙和裂隙为水分迁移提供了通道，并可能对岩体耐久性和渗流行为产生影响。

3.2　岩石的物理力学性质

后文图表中涉及的主要力学参数包括单轴抗压强度 σ_c、弹性模量 E、劈裂抗拉强度 σ_t、剪应力 τ、法向应力 σ、黏聚力 c 和内摩擦角 φ。

3.2.1　密度

采用量积法测定 24 个麦积山石窟窟区砂砾岩样品的密度，结果列于表 4。

3.2.2　单轴压缩实验

（1）设备与方法

采用 ROCK 600-50 型万能试验机对 B、C、D、E 岩组代表性样品开展单轴压缩试验，试样加工满足试验要求，结果如表 3 和图 10 所示。

（2）力学特征

①试验结果分析

因钻孔起始段 0～7.5 m 为坡积物，所取样品干燥后呈碎屑状，无法进行试件加工，故仅在 B、C、D、E 四个岩组中选取三个岩石样品开展单轴压缩实验。如图 10 所示，B、C、D 岩组的平均抗压强度和平均弹性模量依次减小，E 岩组相较于 D 岩组有所回升；泊松比主要分布在 0.3～0.31 之间。

相较于后续的劈裂抗拉与直剪试验，单轴压缩试验对试样的长径比与端面加工更为敏感，且砂砾岩的非均质性与局部缺陷会放大峰值强度，导致数据离散。当采用劈裂法测定抗拉强度时，破坏往往沿最薄弱界面（如砾石边缘的原生微裂隙）发生。对于 BL-1、BL-2、BL-3 三个样品，尽管胶结程度存在差异，但其砾石边缘的界面强度均相对较弱且数量级相近，导致宏观抗拉强度差别不大。而抗剪试验的剪切强度主要取决于基本摩擦角及粗颗粒的咬合作用，只要岩样中含有粗颗粒，其剪胀效应和咬合力便趋于一致，从而掩盖了胶结物含量的细微差异。

如图 10 所示，抗压强度整体随钻孔深度增加而显著降低；从 B 岩组到 E 岩组，抗压强度降低约 55%，弹性模量降低 35%，表明在该深度范围内成岩作用随深度增加而减弱。B 岩组的高抗压强度（29.8 MPa）和弹性模量（2 480 MPa）有利于形成稳定的坡肩。

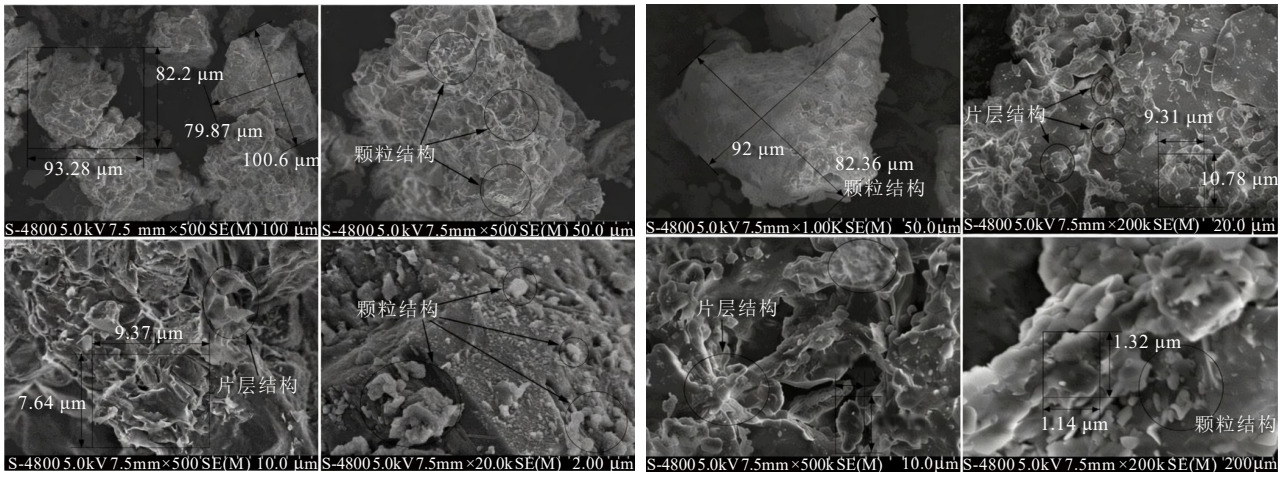
②破坏特征

如图 11 所示，麦积山砂砾岩单轴压缩试验中，试样主要表现为单斜裂缝和 V 字形裂缝两种破坏模式。前者以单侧倾斜裂缝为主，后者表现为两侧裂缝交汇形成“V”形破坏。总体来看，两类破坏模式均反映了砂砾岩在非均质结构条件下的剪-压复合破坏特征。如图 10 所示，从应力-应变曲线可以看出，麦积山砂砾岩整体胶结较弱、结构相对松散，峰后未出现典型脆性岩石的断崖式强度突降，而是表现出一定的残余强度和应力缓慢释放特征。这表明其破坏过程中存在颗粒滑移、局部压碎和结构重排等过程，反映出非均质砂砾岩在加载条件下具有一定的渐进破坏特征。

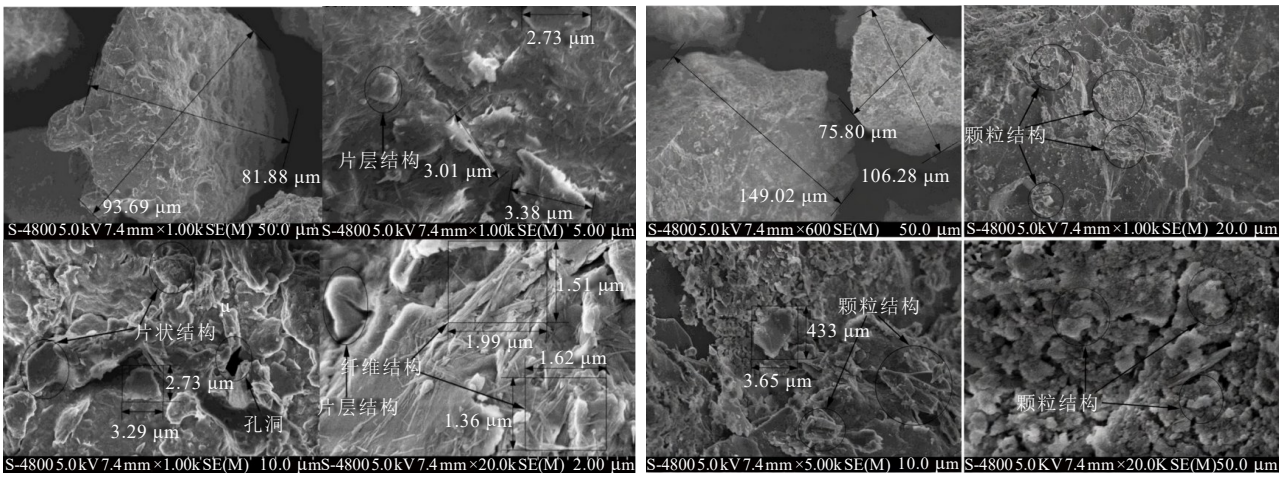
3.2.3　巴西劈裂试验

（1）设备与方法

试验设备与单轴压缩试验一致，加载速率控制



(a) BY-1 (b) CY-1



(c) DY-1 (d) EY-1

图 9 麦积山样品的 SEM 图片

Fig. 9 SEM images of samples from the Maijishan Grottoes

表 4 各岩组平均天然密度

Table 4 Average natural density of each rock group

岩组	B	C	D	E
平均天然密度/(g/cm^3)	2.47	2.51	2.37	2.42

在 0.3～0.5 MPa/s。

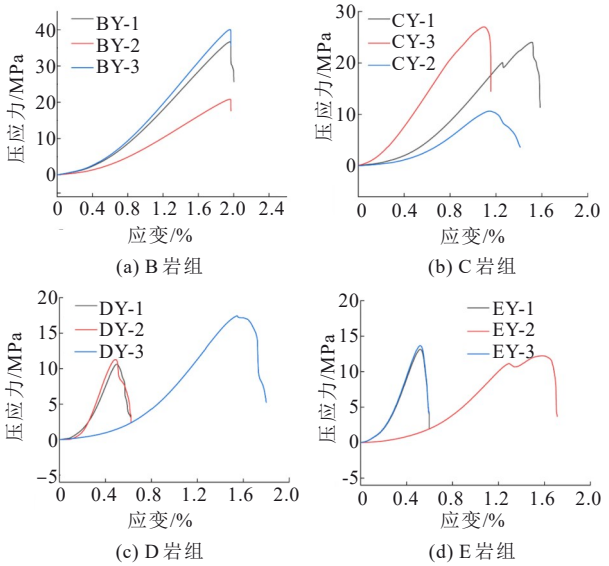
（2）力学性质

①试验结果分析

如图 12 所示，B 岩组平均抗拉强度最高，C、D 岩组依次减小，整体表现出由上部向下部逐渐降低的趋势。各岩组抗拉强度总体偏低，反映出麦积山砂砾岩整体抗拉能力较弱，其中 D 岩组强度相对最低，为潜在拉裂破坏的薄弱岩组。

②破坏特征

如图 13 所示，麦积山砂砾岩劈裂试验后，试样总体沿加载轴垂直方向形成主裂缝，但裂缝路径并不规则，常表现为弯折、偏转和局部跳跃。这主要

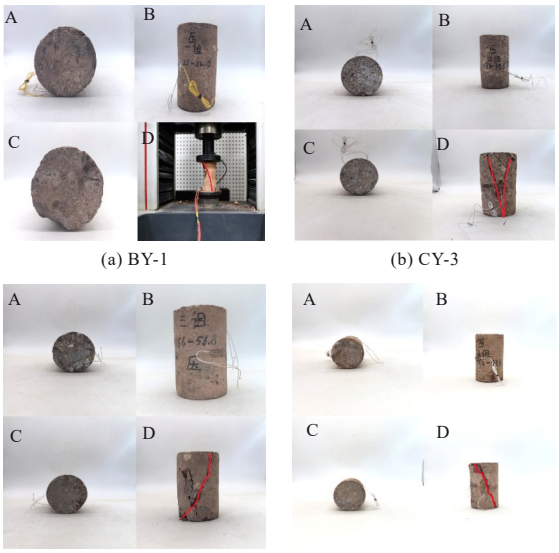


(a) B 岩组 (b) C 岩组

(c) D 岩组 (d) E 岩组

图 10 各岩组砂砾岩单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 10 Uniaxial compressive stress-strain curves of sandy conglomerate from each rock group



(a) BY-1　(b) CY-3

(c) DY-2　(d) EY-2

图 11　麦积山石窟抗压岩石样品破坏模式

Fig. 11　Failure modes of compressive rock samples from the Maijishan Grottoes

与砂砾岩内部砾石、砂质基质和胶结差异造成的结构非均质性有关，裂缝扩展过程中往往受砾石-基质界面控制。总体上，该破坏模式表现为非均质材料条件下的非理想劈裂破坏。

3.2.4　直剪实验

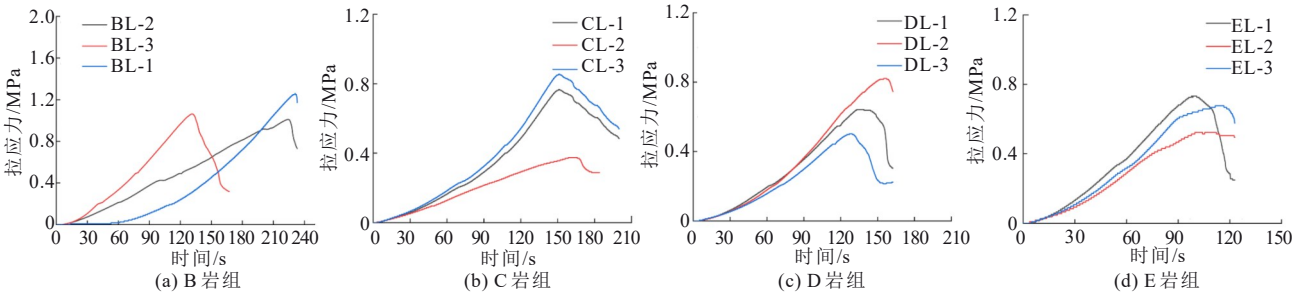
（1）设备与方法

试验设备与单轴压缩试验一致。将试样置于剪切盒中，在不同法向应力条件下开展直剪试验，获取峰值剪切力及对应位移。E岩组试样难以制备满足要求的标准样品，故未开展直剪试验。

（2）力学性质

①试验结果分析

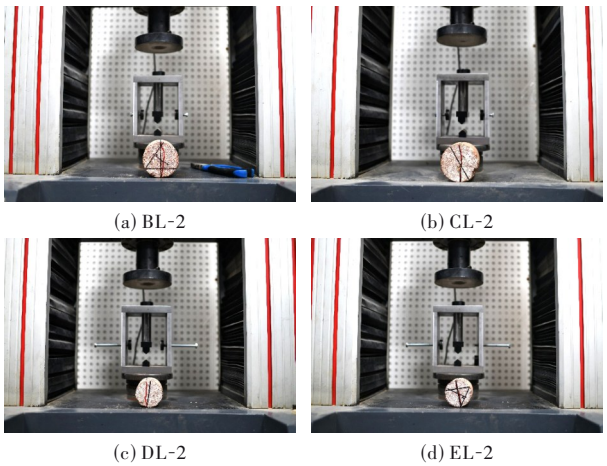
如图 14 所示，不同岩组砂砾岩的抗剪参数存在明显差异：B岩组剪切强度最高；C岩组黏聚力明显下降；D岩组进一步降低。各岩组抗剪能力变化规律与抗压、抗拉强度基本一致，表现为B岩组最强、C岩组次之、D岩组最弱。



(a) B 岩组　(b) C 岩组　(c) D 岩组　(d) E 岩组

图 12　各岩组砂砾岩劈裂抗拉试验拉应力-时间曲线

Fig. 12　Tensile stress-time curves of sandy conglomerate from each rock group in Brazilian splitting tests



(a) BL-2　(b) CL-2

(c) DL-2　(d) EL-2

图 13　劈裂试验后样品

Fig. 13　Specimens after splitting tests

②破坏特征

如图 15 所示，麦积山砂砾岩直剪破坏总体表现为剪-张复合破坏，破坏面多沿砾石-基质界面扩展，并伴有局部颗粒滑移和剪切裂缝发育。该现象反映了砂砾岩内部非均质结构对剪切破坏过程的明显控制作用。

3.3　划分结果

麦积山崖体的工程地质特征受内、外营力长期共同控制，其物质基础为白垩系麦积山组红层碎屑岩，岩层整体呈厚层状、近水平产出，倾角一般较缓，多小于 10°。区内断裂与垂向节理较为发育，为崖体分割、结构分异及软弱带形成提供了基础条件。构造抬升后的红层崖体又长期受到流水侵蚀、风化剥蚀、重力崩塌及沿节理裂隙下渗侵蚀等外营力的持续改造。节理裂隙成为降雨入渗、径流切割和局部崩落的优势通道，逐步形成现今陡立的丹霞式崖体形态[26]。由此可见，麦积山崖体在宏观层序

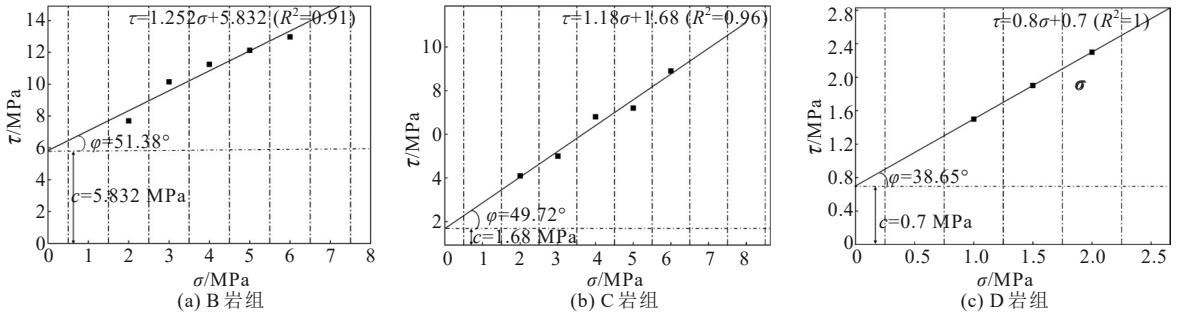


图 14 各岩组砂砾岩直剪试验 Mohr-Coulomb 强度包络线(τ-σ 关系)

Fig. 14 Mohr-Coulomb strength envelopes (τ-σ relationships) of sandy conglomerate from each rock group in direct shear tests



图 15 麦积山石窟岩石样品剪切破坏形式

Fig. 15 Shear failure modes of rock samples from the Maijishan Grottoes

和总体产状上具有一定的横向延续性。

结合已有地质资料[27]和钻孔岩芯编录结果,麦积山洞窟崖体主要由第四系全新统坡积物覆盖层和上白垩统麦积山组(K_2m)基岩组成。由于后山覆盖层难以与崖面基岩直接对应,A 岩组岩性特征尚未探明。综合岩性组合及其纵向变化、软弱夹层发育、胶结结构与胶结物类型差异,以及关键物理力学指标的变化,并结合病害点位与软弱夹层密集段、界面带的空间对应关系,对岩组边界进行了校核和修正。各岩组顶、底界及厚度列于表 5。

表 5 各岩组顶、底界与厚度参数

Table 5 Top and bottom elevations and thickness of each rock group

岩组	顶界标高/m	底界标高/m	厚度/m
A	1 595.0	1 587.5	7.5
B	1 587.5	1 566.0	21.5
C	1 566.0	1 546.0	20.0
D	1 546.0	1 522.4	23.6
E	1 522.4	1 484.9	37.5

如图 16 所示,最终将崖体划分为 A、B、C、D、E 五个工程地质岩组。其中,B、C 岩组分别对应洞窟次密集与密集带;D 岩组洞窟较为零散,且结构弱面更为集中;E 岩组位于地表以下,对深部整体变形与稳定性具有控制作用。

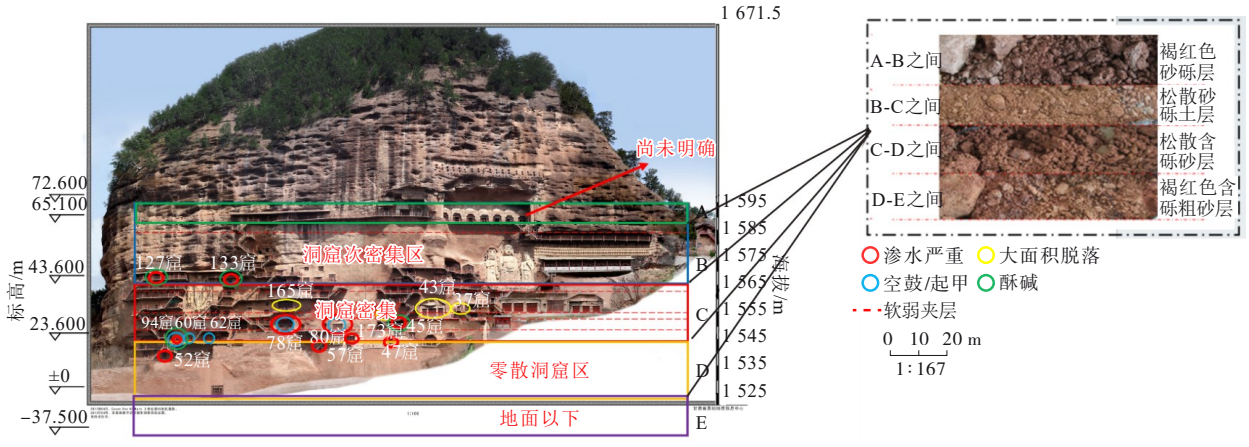


图 16 麦积山石窟正射影像图

Fig. 16 Orthophoto map of the Maijishan Grottoes

由表 6 所列,从宏观岩性与结构特征来看,各岩组砂砾岩以褐红色中-厚层中细砾岩、含砾砂岩及夹层砂岩为主,整体呈块状构造,胶结物以钙质、铁质为主。B 至 E 岩组为上白垩统麦积山组(K_2m)基岩,整体胶结程度相对较好。B、C 岩组局部发育泥质或富黏土组分的薄层夹层,其中 C 岩组夹层更为集中且连续性更强。上述多源证据相互印证,支撑了工程地质岩组划分结果。

表 6　各岩组的地质特征与胶结性质汇总表

Table 6　Summary of geological features and cementation properties of each rock group

岩组	地质年代	岩性	砾石含量/%	胶结物类型	胶结程度
B	K_2m	褐红色中-厚层中细砾岩、砂质砾岩及含有软弱夹层的砂砾岩夹含砾砂岩	45～50	钙质、铁质	较好
C	K_2m	褐红色中-厚层砾岩、含砾粗砂岩夹含有软弱夹层的砂砾层	29～31	钙质、铁质	较好
D	K_2m	褐红色中-厚层中细砾岩、含砾粗砂岩	32～33	钙质、铁质	较好
E	K_2m	褐红色中-厚层中细砾岩、含砾粗砂岩夹砂岩	42～44	钙质、铁质	较好

3.4　岩体结构特征与宏观稳定性初探

前述试验表明，麦积山石窟崖体稳定性不仅受岩石材料力学性质控制，还受岩体结构特征显著影响。钻孔编录与现场调查显示，崖体并非均一、连续的层状体，而是由弱胶结砂砾岩及其内部随机分布的软弱夹层共同构成的非均质复合结构体。崖体由 K_2m 弱胶结砂砾岩组成，砾石、砂岩和泥质夹层在垂向与横向上随机分布、相互穿插，形成明显的非均质性和各向异性。所划分的 B 至 E 工程地质岩组即反映了这种垂向上的岩组组合及工程性质差异。岩体中普遍发育的软弱夹层多对应原始沉积形成的泥质或细砂质条带，结构松散、胶结较差，并与后期节理裂隙共同构成渗流优势通道和潜在滑移面。尤其是 C 岩组内部及 C-D 岩组交界处发育的软弱夹层，易在水作用下软化并形成渗流优势通道，是 D 岩组及其附近洞窟渗水病害集中的重要控制因素[28]。在重力、地震和暴雨入渗等作用下，还可能诱发局部滑移、塑性变形及崩塌落石。总体来看，麦积山石窟崖体稳定性是由岩体强非均质性和随机分布的软弱结构面共同控制的工程地质问题，后续保护加固应重点识别并治理关键软弱带。

3.4.1　结构弱化段发育特征与集中段判别

如表 7 所列，基于钻孔岩芯编录与薄片鉴定结果，对各岩组中软弱夹层、胶结弱化带及结构弱化段的发育特征进行半定量归纳，并结合代表性薄片证据识别其集中段。B 岩组以孔隙胶结与环边胶结并存为主，整体较完整；C 岩组中部开始出现粉砂条带、杂基变化及胶结非均一性增强；C-D 界面带表现为胶结方式转折、杂基富集、漂浮状接触及脉状充填等多种弱化征象叠加，是潜在渗流通道与抗剪薄弱带最集中的部位；D 岩组整体更为疏松，界面附近及局部弱化段仍需重点关注；E 岩组深部整体相对稳定，但局部裂隙与弱化段可形成次级渗流敏感部位。

由表 7 可知，结构弱化特征在不同岩组中的发育程度存在明显差异，其中 C 岩组中部及 C 至 D 界面带最为突出。界面带内胶结方式突变、杂基富集与脉状充填叠加，表明其既是潜在渗流优势通道，也是界面抗剪能力降低的关键控制部位。

3.4.2　结构控制的失稳模式与敏感单元

如图 17 所示，综合岩芯编录、薄片特征及已揭示的渗水现象，麦积山石窟崖体的结构控制失稳模式主要包括：(1)卸荷裂隙控制的块体崩落，主要发育于洞窟口部位及陡壁凸出部位；(2)沿软弱夹层或界面弱化带的剪切滑移与渐进变形，表现为裂隙扩展、局部错动及表层剥落；(3)渗流沿弱化带汇集后引起的软化、盐害及次生损伤，进一步降低了界面抗剪能力并诱发表层病害。由此，软弱夹层密集段及界面带应作为稳定性评价与渗漏水治理的重点敏感单元。

4　讨论与分析

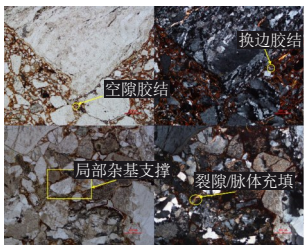
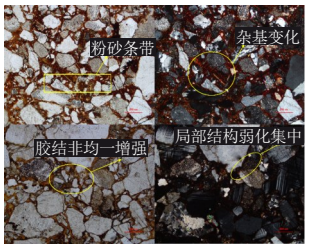
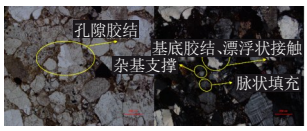
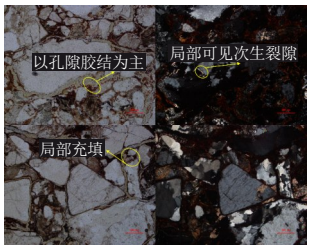
根据水文地质资料，麦积山地区地下水主要为松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水及基岩裂隙水。地下水位表现出显著的季节性波动，丰水期水位上升时，渗水问题加剧；枯水期水位下降，可能导致部分区域干裂或剥落，进一步扩展病害。因此，地下水位的变化对病害发生具有重要影响。

为提升岩组划分对石窟保护工程的适用性，将保存现状作为外部约束条件纳入讨论与边界校核。结合文献记载的典型病害洞窟号[28-29]，将空鼓/起甲(78、80、94、62、60 窟)、大面积脱落(44、43、37、165 窟)、酥碱(94、127、133、45 窟)及渗水严重洞窟(47、52、57、78、80、94、127、133、173、45 窟)等病害点位叠加于洞窟分布图，进行空间对照。如图 16 所示，病害点位在崖面上具有明显聚集性，并与软弱夹层密集段及界面弱化带具有较好的对应关系。因此，保存现状不仅是岩组划分合理性的验证依据，也应作为稳定性评价与渗漏水防治分区的重要约束条件。

由表 7 可知，薄片鉴定与力学试验表明，不同岩组在胶结方式、杂基含量与结构弱化特征上存在系

表 7 各岩组结构弱化段发育特征及集中段判别

Table 7 Development characteristics of structurally weakened intervals and identification of concentrated zones in each rock group

岩组/界面带	代表深度段/m	代表薄片样品	结构弱化特征	结构弱化等级	力学指标特征	保存现状响应	工程解释
B	[7.5,29.0)		孔隙胶结与环边胶结并存,局部杂基支撑、分选较差,局部脉体充填	Ⅱ级	σ_c=29.83 MPa, E=2.48×10³ MPa, σ_t=1.11 MPa, c=5.832 MPa, φ=51.38°	局部空鼓/脱落,可开凿性较好	强度高、整体较完整,但脆性与局部渗流仍需关注
C	[29.0,49.0) (35.0~39.0重点)		粉砂条带、杂基变化及胶结非均一增强,局部结构弱化集中	Ⅲ—Ⅳ级	σ_c=20.57 MPa, E=1.91×10³ MPa, σ_t=0.78 MPa, c=1.68 MPa, φ=49.72°	易与渗流、空鼓及脱落集中带对应	由相对稳定向弱化过渡的重要岩组
C-D界面	[49.0,52.0)		胶结方式由孔隙胶结转为基底胶结,出现杂基支撑、漂浮状接触及脉状充填	Ⅴ级	力学突变带,界面抗剪敏感	渗水/酥碱与空鼓更易集中	潜在渗流通道与抗剪薄弱带,是重点治理界面
D	[52.0,72.6)		以孔隙胶结为主,结构较疏松,界面附近弱化更明显	Ⅲ—Ⅳ级	σ_c=13.11 MPa, E=1.55×10³ MPa, σ_t=0.65 MPa, c=0.70 MPa, φ=38.65°	与渗水、剥落、裂隙敏感区更吻合	为整体最弱岩组,稳定性与治水均应重点关注
E	[72.6,110.1)		以孔隙胶结为主,局部见次生裂隙及充填,深部整体较完整	Ⅲ级	σ_c=13.36 MPa, E=1.60×10³ MPa, σ_t=0.64 MPa	深部相对稳定,局部次级渗流敏感	强度略回升,但局部裂隙和弱化段仍不可忽视



(a) 块体掉落 (b) 软化盐害 (c) 表层剥落

图 17 部分病害照片

Fig. 17 Photographs of typical deterioration features

统差异,从而控制其力学响应与病害敏感性。胶结较致密、结构相对完整的岩组,其抗压强度与弹性模量总体较高。界面弱化带及弱化段中杂基富集、胶结非均一性增强,并出现脉状充填与条带状组构等特征,易形成渗流优势通道并削弱界面抗剪能力。将典型病害洞窟点位叠加至洞窟分布图可见,渗水/酥碱与空鼓脱落点位呈集中分布,并与软弱夹层密集段及界面弱化带具有较好对应关系。

基于上述分析,本研究通过梳理“保存现状—结构弱化—力学差异—工程指向”的证据链,对岩组进行划分,并据此提出岩体工程建议。其中,B岩组可作为相对稳定且可加工性较好的基础单元,但需警惕卸荷条件下的脆性崩落;C岩组及其向D岩组过渡的界面带应作为渗漏水防治与稳定性监测的重点区域,优先开展排水、封堵与局部加固;D岩

组整体力学性能最弱，应作为结构补强与长期监测的核心敏感区；E岩组虽位于深部且整体相对稳定，但局部裂隙和弱化段仍需作为次级风险单元纳入监测体系。

5　结论

本研究通过现场调查、钻探取样、试验分析等多学科交叉方法，基本厘清了麦积山石窟崖体工程地质岩层特征与基本性质。囿于石窟岩体取样困难，麦积山石窟第4窟以上岩层均未开展钻孔取样调查。具体研究结论如下：

（1）基于地质钻探系统构建了麦积山石窟地质岩组分布特征，建立了石窟赋存岩体岩芯样本库；综合地层年代、胶结结构、软弱夹层发育及洞窟空间分布密度，将麦积山崖体自上而下划分为五个工程地质岩组，为石窟岩体稳定性和渗漏水评估提供了理论性支撑。

（2）通过系统的岩石物理力学试验，揭示了岩组间力学性能的显著差异，并验证了洞窟开凿分布的合理性。其中，洞窟集中开凿于力学性能与可加工性达到最佳平衡的洞窟次密集区（B岩组）和洞窟密集区（C岩组），避开了力学性能差、渗水风险高的零散洞窟区（D岩组）。

（3）基于岩芯编录与多参数融合分析，揭示了“地层岩组—力学性能—可开凿性”在垂向上的耦合规律，即麦积山石窟强烈的非均质性和频繁发育的软弱夹层，是控制其稳定性和渗漏水的关键内在因素。

参考文献（References）

[1] 陈永明，石玉成，王旭东．天水麦积山石窟地震构造环境评价[J]．敦煌研究，2005(5)：78-82.
Chen Yongming, Shi Yucheng, Wang Xudong. An estimate of the constitute condition of seismic zone of the Maiji mountain grottoes[J]. Dunhuang Research, 2005(5): 78-82.

[2] 王旭东，张明泉，张虎元，等．敦煌莫高窟洞窟围岩的工程特性[J]．岩石力学与工程学报，2000，19(6)：756-761.
Wang Xudong, Zhang Mingquan, Zhang Huyuan, et al. Engineering properties of surrounding rocks of Mogao Grottoes at Dunhuang[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 756-761.

[3] 郭青林，薛平，侯文芳，等．安西榆林窟环境特征[J]．敦煌研究，2002(4)：102-109.
Guo Qinglin, Xue Ping, Hou Wenfang, et al. The environmental features of the Yulin Grottoes in Anxi County[J]. Dunhuang Research, 2002(4): 102-109.

[4] 卢斌荧，高雅慧．陕西榆林石窟寺分布与地质环境关系研究[J]．科技通报，2023，39(9)：1-6.
Lu Binying, Gao Yahui. Research on the relationship between the distribution of cave temple and geological environment in Yulin City of Shaanxi Province[J]. Bulletin of Science and Technology, 2023, 39(9): 1-6.

[5] 张虎元，曾正中，张明泉，等．敦煌莫高窟围岩稳定性及环境保护[J]．中国地质灾害与防治学报，1996，7(2)：73-80.
Zhang Huyuan, Zeng Zhengzhong, Zhang Mingquan, et al. Rockmass stability and environmental protection problems at Mogao Grottoes site[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1996, 7(2): 73-80.

[6] 王旭东，郭青林，李最雄，等．敦煌莫高窟洞窟围岩渗透特性研究[J]．岩土力学，2010，31(10)：3139-3144.
Wang Xudong, Guo Qinglin, Li Zuixiong, et al. Research on permeability of surrounding rock at Dunhuang Mogao Grottoes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3139-3144.

[7] 李最雄．炳灵寺、麦积山和庆阳北石窟寺石窟风化研究[J]．文博，1985(3)：66-75.
Li Zuixiong. Study on weathering of caves in Bingling Temple, Maiji Mountain and Qingyang North Cave Temple[J]. Relics and Museology, 1985(3): 66-75.

[8] 张景科，张理想，郭青林，等．庆阳北石窟寺砂岩表层风化特征与地层岩性的关系研究[J]．西北大学学报（自然科学版），2021，51(3)：344-352.
Zhang Jingke, Zhang Lixiang, Guo Qinglin, et al. The relationship between weathering characteristics of the sandstone surface and lithology of the North Grottoes at Qingyang[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 344-352.

[9] 王彦武，韩增阳，郭青林，等．甘肃庆阳北石窟寺水环境特征研究[J]．西北大学学报(自然科学版)，2021，51(3)：360-369.
Wang Yanwu, Han Zengyang, Guo Qinglin, et al. Research on the characteristics of water environment in Beishiku Temple, Qingyang City, Gansu Province[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 360-369.

[10] 王逢睿，崔惠萍，孙博，等．北石窟寺降雨与洞窟相对湿度变化规律研究[J]．科学技术与工程，2017，17(15)：176-180.
Wang Fengrui, Cui Huiping, Sun Bo, et al. Study on variation of rainfall and relative humidity of caves in the Beishiku Cave Temple[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(15): 176-180.

[11] 裴强强，白玉书，郭青林，等．北石窟寺平顶窟顶板层状剥落破坏力学机制研究[J]．工程地质学报，2024，32(6)：2041-2054.
Pei Qiangqiang, Bai Yushu, Guo Qinglin, et al. Study on the mechanical mechanism of layered spalling damage of the flat roof in Beishiku Temple Grottoes[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(6): 2041-2054.

[12] 陈建平，严绍军，陈嘉琦，等．龙门石窟地质分带及风化病害特征研究[J/OL]．重庆大学学报，2026-01-31.https://link.

cnki.net/urlid/50.1044.N.20241023.1742.002.
Chen Jianping, Yan Shaojun, Chen Jiaqi, et al. Study on the geological characteristic zones and features of weathering diseases in the Longmen Grottoes[J/OL]. Journal of Chongqing University, 2026-01-31. https://link.cnki.net/urlid/50.1044.N.20241023.1742.002..

[13] 孙满利，曹张喆，沈云霞，等. 陇东地区砂岩石窟病害区域特征研究[J]. 文物保护与考古科学，2024，36(6)：149-163.
Sun Manli, Cao Zhangzhe, Shen Yunxia, et al. Study on the regional characteristics of sandstone grotto deterioration in the Longdong area[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2024, 36(6): 149-163.

[14] 张明泉，张虎元，曾正中，等. 莫高窟壁画酥碱病害产生机理[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，1995，31(1)：96-101.
Zhang Mingquan, Zhang Huyuan, Zeng Zhengzhong, et al. The mechanisms of efflorescent disaster of wall-paintings in Mogao Grottoes[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1995, 31(1): 96-101.

[15] 申喜旺，孙博，岳永强，等. 地质雷达在麦积山石窟喷锚层加固效果评估中的应用[J]. 工程质量，2023，41(3)：66-71.
Shen Xiwang, Sun Bo, Yue Yongqiang, et al. Application of geological radar in reinforcement evaluation of shotcrete anchor layer in Maiji Mountain Grottoes[J]. Construction Quality, 2023, 41(3): 66-71.

[16] 杨鸿锐，刘平，孙博，等. 冻融循环对麦积山石窟砂砾岩微观结构损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报，2021，40(3)：545-555.
Yang Hongrui, Liu Ping, Sun Bo, et al. Study on damage mechanisms of the microstructure of sandy conglomerate at Maijishan Grottoes under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 545-555.

[17] 王逢睿，焦大丁，刘平，等. 硫酸盐对麦积山砂砾岩风化影响的试验研究[J]. 岩土力学，2020，41(7)：2199-2206.
Wang Fengrui, Jiao Dading, Liu Ping, et al. Experimental study on the effect of sulfate on glutenite weathering in Maijishan Grottoes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2199-2206.

[18] 贺东鹏，武发思，胡军舰，等. 麦积山石窟第127窟赋存环境特征及对壁画病害的影响[J]. 西北大学学报(自然科学版)，2022，52(4)：678-690.
He Dongpeng, Wu Fasi, Hu Junjian, et al. Environmental characteristics of Cave 127 in the Maijishan Grottoes and its influence on mural diseases[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(4): 678-690.

[19] 余荣光. 麦积山石窟渗水病害的机理研究[D]. 兰州：兰州大学，2020：53-54.
Yu Rongguang. Study on the mechanism of seepage disease in Maijishan Grottoes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020: 53-54.

[20] 朱建龙. BFRP锚杆在麦积山石窟岩体加固试验研究[D]. 兰州：兰州大学，2019：1-2.
Zhu Jianlong. Study of BFRP anchors on reinforcement in Maiji Mountain Grottoes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 1-2.

[21] 周宝发. 麦积山石窟自然通风特性分析研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2021：78-79.
Zhou Baofa. Study on the natural ventilation characteristics of Maiji Mountain Grottoes[D]. Xi′an: Xi′an University of Architecture and Technology, 2021: 78-79.

[22] 薛芳慧. 麦积山石窟光环境研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2018：88-89.
Xue Fanghui. Study on the lighting environment in Maiji Mountain Grottoes[D]. Xi′an: Xi′an University of Architecture and Technology, 2018: 88-89.

[23] Sheng Y M, Liu P, Shi W T, et al. Experimental study of sulfate crystallization damage to glutenite rock in the Maijishan Grottoes[J]. Heritage Science, 2024, 12: 98.

[24] 池佩红，石玉成，卢育霞，等. 麦积山石窟栈道地震动力响应分析及损伤评估研究[J]. 地震工程学报，2023，45(6)：1303-1314.
Chi Peihong, Shi Yucheng, Lu Yuxia, et al. Seismic dynamic response and damage assessment of the plank road in the Maijishan Grottoes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(6): 1303-1314.

[25] 石玉成，王爱国，裴强强，等. 天水麦积山石窟地震危险性评价研究[J]. 石窟与土遗址保护研究，2025，4(2)：9-17.
Shi Yucheng, Wang Aiguo, Pei Qiangqiang, et al. Research on seismic hazard assessment of Maijishan Grottoes in Tianshui[J]. Research on the Conservation of Cave Temples and Earthen Sites, 2025, 4(2): 9-17.

[26] 秦晓燕，王彩霞，张家峰. 麦积山国家地质公园丹霞地貌分类及形成机制探讨[J]. 甘肃地质，2015，24(4)：88-93.
Qin Xiaoyan, Wang Caixia, Zhang Jiafeng. Geomorphologic classification and formation mechanism of Danxia landform in Maijishan National Geopark, Tianshui, Gansu[J]. Gansu Geology, 2015, 24(4): 88-93.

[27] 窦贤. 麦积山独特的人文地质奇观[J]. 传承，2009(5)：48-49.
Dou Xian. Maijishan's unique human and geological wonders[J]. Inheritance & Innovation, 2009(5): 48-49.

[28] 岳永强. 麦积山石窟壁画病害现状调查及研究[J]. 遗产与保护研究，2019，4(2)：127-131.
Yue Yongqiang. Condition surveys of deterioration and research of wall paintings in Maijishan Cave-temple[J]. Research on Heritages and Preservation, 2019, 4(2): 127-131.

[29] 徐莉娜，张斌，岳永强，等. 麦积山石窟文物保护研究进展[J]. 西北师范大学学报(自然科学版)，2025，61(5)：22-35，44.
Xu Lina, Zhang Bin, Yue Yongqiang, et al. Overview of research achievements in the protection of Maijishan Grottoes[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2025, 61(5): 22-35, 44.

(本文编辑：张向红)