

贵州典型砂岩组构特征对抗压性的影响

秦能旭^{1, 2}, 钱 焕^{1, 2}, 蒋 玺^{1, 3*}, 杨根兰^{1, 3}, 陈 华^{1, 2}

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学研究生院, 贵州 贵阳 550025;
3. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 砂岩是沉积岩区最常见的地质工程基础材料之一。文中通过显微岩相分析和单轴抗压实验, 研究了贵州海相和陆相砂岩的组构特征以和层理构造对砂岩抗压性质的影响。结果显示, 海相和陆相砂岩不同层理方向抗压强度和弹性模量分存在差异, 表明受层理构造控制砂岩显示出明显的抗压各向异性。岩石组构与抗压相关性分析表明, 钙质和硅质胶结砂岩的强度明显高于泥质胶结砂岩。

关键词: 砂岩; 抗压强度; 弹性模量; 各向异性; 岩石组构

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0110-03

引言

受沉积环境影响, 不同区域和层位的砂岩具有明显差异, 从而工程力学性质差异显著。围绕砂岩结构构造特征与岩石力学性质的相关性, 前人开展了丰富的实验研究。层理是砂岩重要的构造之一, 学者多通过不同层理角度的力学实验研究其工程性质各向异性^[1]。裂隙和节理岩石组成成分也会显著影响岩石的力学性质^[2, 3]。但上述研究多通过单一因素探讨结构构造对力学性质的约束, 而系统的分析不同成因砂岩力学性质的研究较少见。文中以贵州海相砂岩和陆相砂岩为对象, 开展岩相学和单轴压缩试验, 分析砂岩成分、结构及沉积构造对抗压性的影响, 为工程地质设计和研究提供参考。

一、样品采集与制备

海相沉积砂岩采自贵阳市乌当区, 地层为奥陶系湄潭组 (O_{1m}) 下段土黄色厚层细粒石英砂岩。陆相沉积砂岩采自贵阳市花溪区, 地层为河湖相沉积的侏罗系自流井组 (J_{1zl}) 四段紫红色块状细-中粒石英砂岩。根据国际岩石力学学会 (ISRM) 标准, 抗压实验采用标准圆柱样。加工时, 首先将采集的岩块沿不同方向钻芯取样, 制成不同层理角度的试样, 然后将端面打磨平整, 试样端面平行度误差 <0.05 mm, 高度与直径误差 <0.3 mm。试验前剔除表面有明显裂隙及非均质性较大的试样。

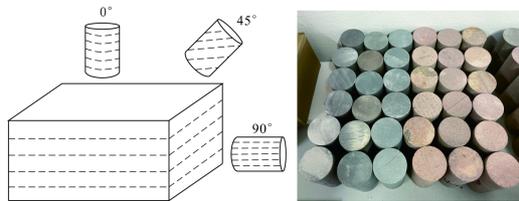


图 1 岩样加工示意图

收稿日期: 2022-08-24

作者简介: 秦能旭 (1999-), 女, 贵州大学资源与环境工程学院; 贵州大学研究生院, 硕士生, 主要从事地质工程研究。

通讯作者: 蒋 玺 (1977-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩石学及第四纪地质研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (42061002); 贵州省科技支撑计划 (黔科合支撑[2019]2852); 贵州省科学技术基金 ([2020]1Y164)

二、岩石组构分析

1. 组构分析

岩石组构分析主要通过岩石样品显微薄片观测和分析岩石的矿物组成、碎屑粒度、胶结物和胶结方式等。薄片特征观测在贵州大学资源与环境工程学院实验中心完成。岩石组构统计如图 1, 样品中碎屑以石英颗粒为主, 湄潭组海相砂岩中含少量斜长石和云母类矿物, 自流井组陆相砂岩中含部分燧石岩屑。不同类型砂岩中碎屑含量变化较大, 整体上海相砂岩 (XGL-1、XGL-2、XGL-3) 碎屑含量低于陆相砂岩 (HX-1、HX-2)。海相砂岩以钙质和粉砂质胶结为主, 陆相砂岩以泥质胶结为主。胶结方式海相砂岩以接触式胶结为主, 并存在次生加大边。陆相砂岩以接触式胶结为主。

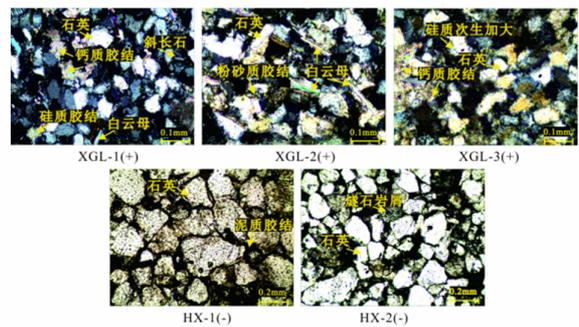


图 2 试样显微照片

三、砂岩抗压实验

本次 5 个砂岩样品的单轴抗压强度实验在贵州大学资源与环境工程学院 WAW-1000KN 型压力试验机上完成。如图 3 所示, 实验样品不同层理角度的应力-应变曲线形态基本一致。曲线可分为压密阶段、弹性变形阶段、屈服阶段和破裂阶段。陆相砂岩的曲线上凹程度明显大于三个海相砂岩样品。

岩样出现锯齿状波动表明加载过程中层理弱面会发生局部剪切滑移^[4]。从抗压实验结果看，海相砂岩不同层理角度方向平均抗压强度从 58.75MPa 到 85.26MPa，弹性模量从 6.14GPa 到 13.29GPa，明显高于陆相砂岩。

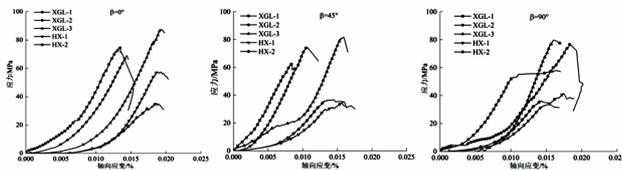


图 3 不同层理角度砂岩试样应力-应变曲线图

四、岩石力学性质影响分析

1. 沉积构造

本次 5 个砂岩样品层理构造均较发育，试样在 $\beta=0^\circ$ 时抗压强度最大，随层理角度增大又呈先减小后增大趋势（图 4a）。与抗压强度不同，岩石弹性模量则随层理角度呈现出递增趋势，其中 XGL-2 最明显，层理角度从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 样品弹性模量从 6.38GPa 递增到 13.29GPa（图 4b）。这种岩石抗压性随层理角度的变化趋势在层理发育的各类沉积岩中均有发现，其机制可归纳为当主应力方向与砂岩层理面垂直时（即 $\beta=0^\circ$ ），岩石力学强度主要由基质决定，导致抗压强度大，而层理弱面又控制了岩石的轴向压缩变形，因而弹性模量小；当 $\beta=45^\circ$ 时，试样受力会沿层理弱面发生局部滑移破坏，引起抗压强度的降低。但在基质和层理弱面的共同影响下，岩石的轴向变形会较 $\beta=0^\circ$ 小，从而导致更大的弹性模量；当 $\beta=90^\circ$ 时，岩石层理与应力方向平行，刚度较大的基质承担了大部分载荷，并进一步降低轴向压缩变形，因而抗压强度回升，弹性模量则达到最大。

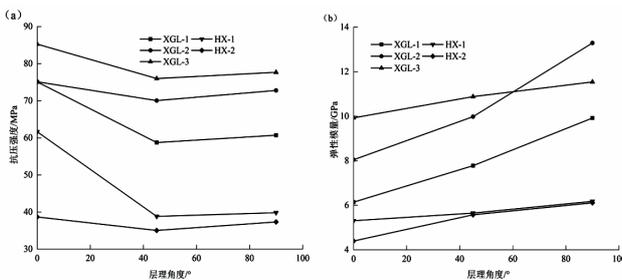


图 4 不同层理角度砂岩单轴抗压力学特性

沉积岩力学性质各向异性主要受岩石不均匀沉积过程中形成的层理构造控制。不同类型的沉积岩不仅抗压强度和弹性模量变化较大，而且都显示出明显的各向异性（如表 1）。与前人的砂岩抗压性研究相比，本次测定的两类砂岩抗压强度和弹性模量略低。但从表中实验结果看，同类型沉积岩由于成分、结构、构造不同，抗压性会显示出十分显著的差异。整体上，本次砂岩的抗压性实验结果与前人对其他陆源碎屑岩（砂岩、页岩、粉砂质页岩等）的实验结果范围相当，相比高于化学沉积岩（石灰岩和白云岩）。岩石力学性质各向异性上，本次实验也与其他陆源碎屑岩相近，明显低于化学沉积岩。从成因上分析，砂岩、粉砂岩、页岩等沉积岩主要通过陆源碎屑的机械式沉积和压实作用形成，各向异性主要受

沉积物的粒度差异等影响，所以变化相比较小。而碳酸盐岩主要通过方解石（石灰岩）或白云石（白云岩）的化学沉淀和胶结形成，但沉淀过程中受沉积环境影响常含不同程度的陆源碎屑或粘土矿物，这种刚性的碳酸盐矿物与低强度的粘土或粉砂质形成的层理构造导致了碳酸盐岩不同层理方向具有较大的力学性质差异，因而显示出更大的抗压各向异性。

表 1 常见沉积岩抗压性及其各向异性

岩性	抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	R σ	R ϵ	实验方法
砂岩（海相）	58.75-85.26	6.14-13.29	1.07-1.28	1.57-2.08	单轴抗压实验
砂岩（陆相）	35.04-61.64	4.40-6.18	1.10-1.59	1.16-1.39	单轴抗压实验
层状砂岩	90.00-130.00	24.00-28.00	1.34	1.48	单轴抗压实验
砂岩	84.66-128.47		1.51		单轴抗压实验
砂板岩	86.90-182.30	44.70-113.70	2.10	2.54	单轴和三轴压缩试验
粉砂质板岩	41.13-76.95	9.97-17.32	1.87	1.74	单轴抗压实验
页岩	54.21-118.43	14.10-24.90	2.18	1.77	单轴和三轴压缩实验
页岩	75.00-125.00	14.50-25.00	1.67	1.72	单轴抗压实验
粉页岩	18.93-70.08	4.17-8.16	3.70	3.01	单轴抗压实验
泥页岩	18.75-56.44	4.15-7.14	2.06	1.72	单轴抗压实验
黑色页岩	100.00-160.00		1.60		三轴压缩实验
石灰岩	27.00-138.00	1.90-7.30	5.11	3.84	单轴抗压实验
白云岩	22.02-92.09	5.32-13.05	4.18	2.45	单轴抗压实验

2. 岩石组构

本次工作主要开展了海相和陆相（河湖沉积）两类砂岩的抗压实验研究。结果显示同类砂岩受岩石组构影响呈现出不同的强度特征，而不同类别砂岩的抗压性质差异则更为显著。不论是抗压强度还是弹性模量，陆相砂岩样品（HX-1 和 HX-2）都明显低于海相砂岩（XGL-1、XGL-2 和 XGL-3）。图 5 显示陆相砂岩的抗压强度与弹性模量都明显低于海相砂岩。成因上，砂岩中的碎屑是风化残留的刚性矿物，对岩石结构起支撑作用。故碎屑含量越高，抗压强度和弹性模量增大^[5]。随碎屑含量增加，海相砂岩的抗压强度和弹性模量略增大，陆相砂岩变化不大，同成因砂岩粒度对力学性质影响不明显。但是，对于不同成因的砂岩，强度与碎屑含量和粒径之间没有直接相关性。文中认为对于不同的砂岩，碎屑含量和粒度不是影响岩石力学性质差异的主要因素。从样品的岩相分析结果看，陆相砂岩碎屑多通过泥质（即粘土矿物）胶结，而海相砂岩碎屑间则出现更多的钙质和硅质胶结物。泥质胶结是一种机械式的充填胶结，砂岩受力后易于沿强度较低的薄弱面导致岩石破坏。海相砂岩的钙质和硅质胶结是具有明显矿物生长结构的化学式胶结，对碎屑产生化学固结作用进而显著提高岩石强度。综上，文中认为对砂岩抗压性影响最大的因素是岩石的胶结作用。

海相砂岩沉积水动力弱，成岩环境稳定，以钙质和硅质等化学胶结为主，岩石强度大。陆相砂岩沉积速率快、分选较差，碎屑多通过机械混入的泥质胶结，由于沉积环境不稳定，粉砂质填隙物较少，因而岩石整体上胶结程度低，导致岩石强度明显低于海相砂岩。对于同类砂岩，岩石中石英碎屑的含量和粒径可能是影响岩石强度的重要因素。（下转第 144 页）

9 步时, 之前的应力集中导致交界面处的单元出现损伤形成了宽度较小的裂纹; 之后伴随着加载位移的增加, 其裂纹在交界面处不断扩展并增加宽度, 到最后形成了贯穿整个模型的倾斜裂纹。

四个模型的单轴抗压强度见表 2, 可知在堆石混凝土中随着堆石率增加, 其抗压强度也会增加。

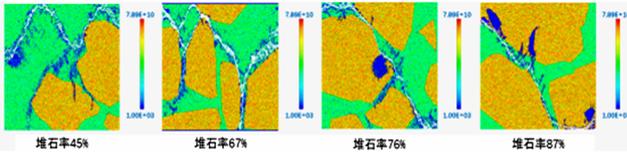


图 2 加载后的弹性模量分布云图

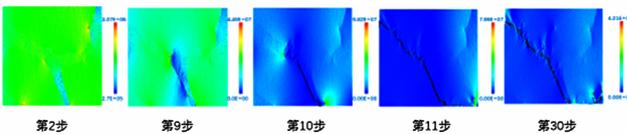


图 3 加载过程第一主应力云图

表 2 单轴抗压峰值强度

堆石率	45%	67%	76%	87%
峰值强度/Mpa	12.3	14.1	14.2	15.1

四、结语

文中以切割的堆石混凝土试件为样本, 选取不同堆石率的四个切割面, 基于图像生成数值模型并进行了单轴压缩数值模拟计算。结果表明:

(1) 堆石混凝土在单轴压缩荷载下的破坏形态与堆石骨料的形状、堆石骨料的位置分布存在较大的联系。

(2) 在堆石混凝土单轴压缩的情况下, 裂纹主要在堆石骨料与自密实混凝土的交界面处扩张。

(3) 堆石率对堆石混凝土的抗压强度起积极作用。

参考文献

[1] 金峰, 安雪晖, 石建军等. 堆石混凝土及堆石混凝土大坝[J]. 水利学报, 2005, 36 (11): 78-83.
 [2] 何世钦, 陈宸, 周虎等. 堆石混凝土综合性能的研究现状[J]. 水力发电学报, 2017, 36 (5): 10-18.
 [3] 金峰, 周虎, 李玲玉等. 堆石混凝土系列技术在西部水电工程中的应用[J]. 水电与抽水蓄能, 2021, 7 (1): 16-22.
 [4] 唐春安, 赵文. 岩石破裂全过程分析软件系统 RFPA^{2D}[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, (5): 109-110.
 [5] 李友彬, 朱柏松, 唐晓玲等. 绿塘水库堆石混凝土大试件力学性能试验研究[J]. 水利规划与设计, 2020, (4): 142-147+163.

(上接第 111 页)

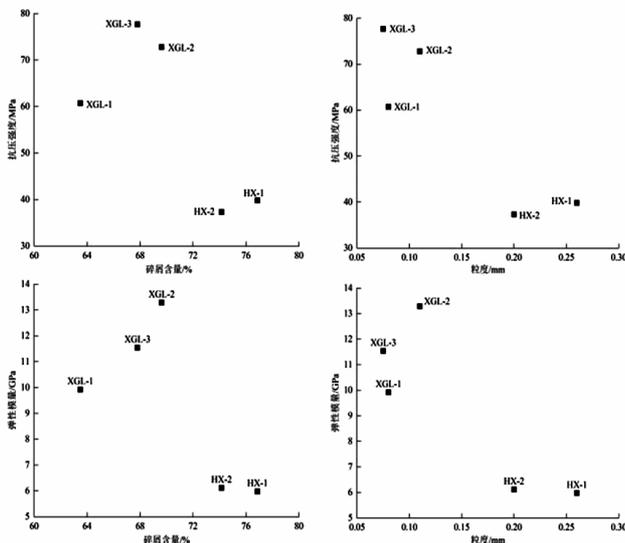


图 5 砂岩结构特征与力学性质

五、结论

砂岩有海相沉积和陆相沉积两种成因, 沉积环境的差异导致其工程力学性质的差异。海相砂岩碎屑以石英为主, 含少量白云母和斜长石, 碎屑通过钙质、粉砂质和硅质胶结, 胶结方式以接触式和缝合式为主, 陆相砂岩碎屑由石英和燧石岩屑为主, 胶结方式以泥质的接触式胶结为主。结合砂岩

成岩过程和岩石力学实验结果, 认为胶结方式是影响两类砂岩抗压性质的主要原因。岩石力学性质受其成分、结构、构造等多种因素影响, 工程活动中可通过砂岩成岩环境和岩石组构的系统分析, 对岩石的抗压性进行初步分析, 从而为进一步工程试验和设计提供参考。

参考文献

[1] Lv H, Peng K, Shang X, et al. Experimental research on the mechanical and acoustic emission properties of layered sandstone during tensile failure[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 118: 103225.
 [2] Su Q, Ma Q, Ma D, et al. Dynamic mechanical characteristic and fracture evolution mechanism of deep roadway sandstone containing weakly filled joints with various angles[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 137: 104552.
 [3] 胡杰, 何满潮, 李兆华等. 各向异性层状砂岩应变岩爆试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48 (4): 735-741.
 [4] 赵文瑞. 泥质粉砂岩各向异性强度特征[J]. 岩土工程学报, 1984, (1): 32-37.
 [5] 姜彤, 尹纯阳, 王江锋等. 裂隙位置和开度对岩体抗剪强度影响的试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022: 1-9.