

分类号:
学号: 20222110035

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



软硬互层裂隙类岩石力学特性研究

学位申请人	胡琪
指导教师	刘星炎 副教授 严新江 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	建筑与土木工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2025年05月

分类号:
学号: 20222110035

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



软硬互层裂隙类岩石力学特性研究

学位申请人	胡琪
指导教师	刘星炎 副教授 严新江 高级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	土木水利
研究领域	建筑与土木工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2025年05月

**Mechanical Behavior of Fractured Rock-like Materials with
Alternating Soft-Hard Layered Structures**

A Dissertation Submitted to
Shihezi University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Municipal and Hydraulic Engineering

By
Hu Qi
(Architecture and Civil Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Liu Xingyan
Prof senior engineer. Yan Xinjiang

May, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：胡琪

时间：2025 年 5 月 16 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：胡琪

时间：2025 年 5 月 16 日

导师签名：刘墨岩

时间：2025 年 5 月 16 日

摘要

地质构造作用形成的非连续结构网络导致天然岩体呈现显著异质性、结构不连续及力学各向异性特征。研究表明, 80%以上岩体失稳由结构面控制型破坏引发, 主要表现为弱面剪切滑移与层间错动, 其力学行为受结构面空间展布特征(倾角、连通率、粗糙度)和赋存应力环境共同控制。针对厚薄层比为 1:1 的特殊层状岩体, 系统揭示其力学特性与渐进破坏机制, 对提升相关工程灾害防控具有重要意义。综上, 本文对不同连通率互层裂隙岩样进行了单轴和三轴压缩试验, 对岩样的峰值强度、弹性模量、应力-应变曲线、裂纹萌生、扩展及延伸过程进行了详细的分析, 研究了不同连通率、不同倾角软硬互层岩样的力学特性和变形破坏机理。主要研究工作及结论如下:

(1) 通过单轴抗压试验结合数字图像相关(DIC)技术, 对两种风积沙(0.075~0.18、0.22~0.5mm)和一种石英砂(0.22~0.5mm)粒径的试样, 在压样法和击样法下的力学特性、破坏模式、表面变形场等应变演化过程进行研究。试验结果表明: 同密度压样法小粒径风积沙试样的弹性模量和峰值强度均大于击样法下制备的试样, 而对大粒径风积沙和石英砂制备的试样则呈现相反规律; 压样法下试样破坏模式为拉伸劈裂破坏, 击样法下试样破坏模式是以剪切破坏为主; 与真岩石结构及岩石形貌进行对比和分类总结, 论证了两种制样方法的适用性。

(2) 首先对十几种软硬岩配比方案进行试验探究, 最终选择最为合适的材料及配比。制备了结构面倾角为 15°、30°、45°、60°和连通率为 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 的裂隙岩样, 结合数字图像相关技术进行单轴压缩试验。试验结果表明: 岩样峰值强度排序为: 完整样 > 30° > 15° > 45° > 60°; 当 $\beta=15^\circ$ 时, 岩样的破坏部位主要为下方的软岩; $\beta=30^\circ$ 、 $k=0.8$ 时, 主裂痕位于结构倾角连通与未连通部分的交界处, $\beta=60^\circ$ 、 $k=1$ 时, 岩样的破坏状态完全由连通率控制, 只发生滑移破坏; 通过 DIC 观察了裂隙扩展全过程, 对破坏模式进行了详细分析。

(3) 制备了结构面倾角为 15°、30°、45°和连通率为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 的弱结构面软硬互层裂隙岩样, 在 2 个围压 0.3MPa、0.6MPa 下进行一系列的三轴压缩试验。分析了各围压下不同连通率对岩样峰值强度、应力-应变曲线和破裂模式的影响。试验结果表明: 岩样峰值强度排序为: 30° > 15° > 45°; $\sigma_3=0.3\text{MPa}$ 、 $\beta=15^\circ$ 时各连通率岩样曲线均表现为先应变硬化, 再应变软化的趋势; 而对于 $\beta=30^\circ$ 、 $k=1$ 的岩样, 曲线转变为应变硬化状态; 结构倾角 $\beta=15^\circ$ 时, 破坏模式为软岩处产生了类似水平横向的张拉裂隙; $\beta=30^\circ$ 、 $k=0.4\sim 1$ 的岩样软岩部分以剪切破坏为主, $\beta=45^\circ$ 时, $k=0.2\sim 0.8$ 的岩样破坏起点为结构倾角连通与未连通部位的交界处, 其余部分未见明显裂隙, $k=1$ 的岩样破坏状态完全由连通率控制, 发生最为严重的滑移破坏。

关键词: 互层岩体; 节理倾角; 连通率; 力学特性; 裂纹演化

Abstract

The discontinuous structural networks formed by geological tectonic processes endow natural rock masses with significant heterogeneity, structural discontinuity, and mechanical anisotropy characteristics. Studies indicate that over 80% of rock mass instabilities are triggered by structural plane-controlled failures, primarily manifested as weak-plane shear slippage and interlayer dislocation. These mechanical behaviors are jointly governed by the spatial distribution characteristics of structural planes (dip angle, connectivity rate, roughness) and in-situ stress environments. For special layered rock masses with a thickness ratio of 1:1 between thick and thin layers, systematically revealing their mechanical properties and progressive failure mechanisms holds significant importance for enhancing disaster prevention and control in related engineering projects. Therefore, this study conducted uniaxial and triaxial compression tests on interbedded fractured rock specimens with varying connectivity rates. Detailed analyses were performed on the specimens' peak strength, elastic modulus, stress-strain curves, as well as crack initiation, propagation, and extension processes. The mechanical properties and deformation-failure mechanisms of soft-hard interbedded rock specimens with different connectivity rates and dip angles were systematically investigated. The main research work and conclusions are as follows:

(1) Uniaxial compression tests combined with digital image correlation (DIC) technology were conducted to study the mechanical properties, failure modes, and strain evolution processes (e.g., surface deformation fields) of specimens made from two types of aeolian sand (0.075–0.18 mm and 0.22–0.5 mm) and one type of quartz sand (0.22–0.5 mm) under static compression and dynamic compaction methods. The experimental results indicate that: For specimens with the same density, the elastic modulus and peak strength of small-particle-size aeolian sand prepared by static compression are higher than those prepared by dynamic compaction, while the opposite trend is observed for large-particle-size aeolian sand and quartz sand; Specimens prepared by static compression exhibit tensile-splitting failure modes, whereas those prepared by dynamic compaction predominantly fail via shear-dominated mechanisms; Comparative analysis and classification with natural rock structures and morphologies validate the applicability of these two specimen preparation methods for simulating specific rock types.

(2) First, experimental investigations were conducted on dozens of soft-hard rock ratio schemes to select the most suitable materials and proportions. Fractured rock samples with structural plane dip angles of 15°, 30°, 45°, 60° and connectivity rates of 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 were prepared. Uniaxial compression tests were performed combined with digital image correlation (DIC) technology. The experimental results indicate that: The peak strength of rock samples follows the order: intact samples > 30° > 15° > 45° > 60°; When $\beta = 15^\circ$, failure primarily occurs in the lower soft rock; at $\beta = 30^\circ$ and $k = 0.8$, main fractures develop

at the boundary between connected and unconnected parts of the structural plane; at $\beta = 60^\circ$ and $k = 1.0$, failure is entirely controlled by connectivity rate, resulting in pure sliding failure; The full-process crack propagation was observed via DIC, and detailed failure mode analyses were conducted.

(3) Soft-hard interbedded fractured rock samples with weak structural planes (dip angles $\beta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; connectivity rates $k = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$) were prepared, and a series of triaxial compression tests were conducted under confining pressures of 0.3 MPa and 0.6 MPa. The effects of different connectivity rates on peak strength, stress-strain curves, and failure modes under each confining pressure were analyzed. The experimental results show that: The peak strength of rock samples follows the order: $\beta = 30^\circ > 15^\circ > 45^\circ$; At $\sigma_3 = 0.3$ MPa and $\beta = 15^\circ$, stress-strain curves of all k values exhibit initial strain hardening followed by strain softening. However, for samples with $\beta = 30^\circ$ and $k = 1.0$, the curves transition to a strain hardening state; For $\beta = 15^\circ$, failure modes involve horizontal tensile cracks in the soft rock layer. For $\beta = 30^\circ$ and $k = 0.4-1.0$, shear-dominated failure dominates in the soft rock. For $\beta = 45^\circ$ and $k = 0.2-0.8$, failure initiates at the boundary between connected and unconnected parts of the structural plane, with no visible cracks elsewhere. For $k = 1.0$, failure is entirely connectivity-controlled, resulting in severe sliding failure.

Key words: interbedded rock mass; joint dip angle; connectivity rate; mechanical properties; crack evolution

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 软硬复合岩体研究现状	3
1.2.2 层状岩体力学特性研究现状	6
1.2.3 层状复合岩体裂纹扩展规律研究现状	8
1.3 主要研究思路和内容	9
第 2 章 击样法与压样法制备不同粒径类岩石材料力学特性和裂纹演化研究	12
2.1 试验目的	12
2.2 试验材料及方案	12
2.2.1 试验材料与制备	12
2.2.2 数字图像相关方法原理	14
2.2.3 试验流程及设备	16
2.3 力学和破坏特征分析	17
2.3.1 弹性模量和强度特性	17
2.3.2 不同制样方法下应力-应变特征分析	20
2.3.3 不同制样方法下破坏模式分析	21
2.4 基于 DIC 视角-不同制样方法下应变场演化及裂纹扩展机理分析	22
2.4.1 不同制样方法下裂隙演化分析	22
2.4.2 不同制样方法下裂纹类型的判别	25
2.4.3 不同制样方法下特征点应变演化过程分析	29
2.5 微观结构特性	31
2.5.1 不同制样方法下岩样的微观结构分析	31
2.5.2 不同制样方法制备岩样所代表的真岩石类型	34
2.6 本章小结	36
第 3 章 软硬互层弱面岩样单轴压缩试验研究-基于 DIC 视角	38
3.1 试样制备与试验方案	38
3.1.1 相似材料的选取	38
3.1.2 配比摸索与选择	39
3.1.3 软硬互层岩石试样的制作	41

3.1.4 试验设备与方案	43
3.2 试验结果分析	45
3.2.1 软硬互层裂隙面连通率对峰值强度的影响	45
3.2.2 软硬互层裂隙面连通率对应力-应变的影响	47
3.2.3 软硬互层裂隙面连通率对弹性模量的影响	51
3.2.4 软硬互层裂隙面连通率对破坏模式的影响	53
3.3 软硬互层弱面岩样裂隙扩展过程与机理分析	57
3.4 能量演化分析	66
3.5 本章小结	70
第4章 含弱面（节理）软硬互层岩样三轴力学特性研究	71
4.1 试样制备与试验方案	71
4.1.1 试样制备	71
4.1.2 试验设备与方案	72
4.2 试验结果分析	73
4.2.1 软硬互层裂隙面连通率对峰值强度的影响分析	73
4.2.2 各连通率不同围压偏应力-轴向应变分析	75
4.2.3 各围压下不同连通率偏应力-轴向应变分析	79
4.3 破坏模式特征分析	82
4.4 能量演化分析	84
4.5 本章小结	87
第5章 结论与展望	88
5.1 主要工作及结论	88
5.2 展望	89
参考文献	90
致谢	97
作者简介	99

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

在我国经济高质量发展背景下，交通基础设施与岩土工程建设项目呈现快速增长态势。根据工程地质调查数据显示，西南、西北和华南地区均广泛分布软硬交替层状岩体^[1]。依据《岩土工程勘察规范》技术条款，当层状岩体的厚薄层比超过 1:3 时，即可界定为互层结构^[2]。此类特殊地质体（图 1-1）具有显著层状异质性特征：其内部发育密集的面弱化结构面，软岩与硬岩呈周期性交替分布，在强度梯度、弹性模量差异、层厚比例及产状变化等方面均表现出复杂各向异性特征^[3]，这与均质岩体的力学行为存在本质区别。值得注意的是，水-岩相互作用会显著加剧此类岩体的工程地质问题。当遭遇降水入渗或地下水活动时，软弱夹层的物理力学参数将发生急剧劣化，导致岩体变形模量衰减和整体失稳风险骤增。这种力学性能的时空演变不仅可能诱发滑坡、塌方等次生地质灾害^[4]，更会对工程结构安全及施工时序产生重大威胁。基于此，对层状厚薄层比为 1:1 的特殊岩体进行针对性研究，系统揭示其渐进破坏机制，已成为提升此类特殊地质条件下工程灾害防控效能的关键科学问题。

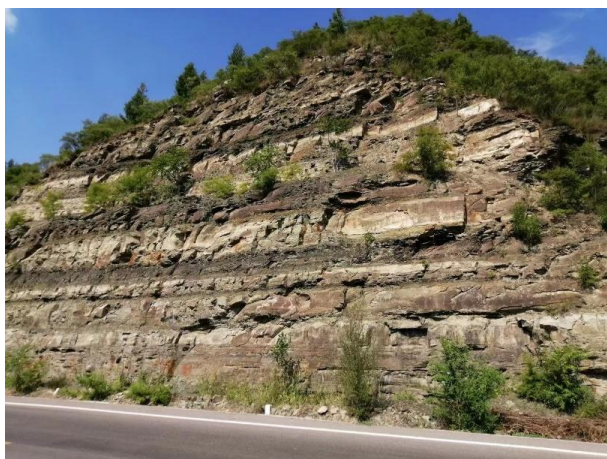


图 1-1 软硬交替层状岩体

Fig.1-1 Layered rock mass with alternating hard and soft layers

我国具有层状构造的沉积岩分布面积占比超过 77%。工程实践表明，层状地质体的各向异性特征显著影响着地下空间开发的安全稳定性，由此引发的工程失稳现象已成为深部岩体工程领域的关键技术挑战。对于软硬互层岩体，软岩与硬岩之间显著的强度梯度易引发薄弱地质界面的形成，在构造应力驱动下诱发围岩失稳，进而导致重大地质灾

害并伴随严重经济损失。由于层状复合岩体（如图 1-2 所示）内部含层理、节理等不连续面，因此具有显著各向异性力学响应^[5]，其失效机理与均质岩体更是存在本质差异，主要表现为三类特征破坏模式：(1) 沿着结构面的渐进滑移破坏模式；(2) 沿斜交层理面的剪切贯通破坏模式；(3) 软岩部分的张拉-剪切复合劈裂破坏模式^[6]。随着隧道工程向深部复杂地层延伸，穿越红层、变质岩等软硬互层区域的概率显著提升。此类地质条件下，围岩变形控制与长期稳定性保障已成为制约隧道安全建造的核心技术阻碍。



图 1-2 层状复合裂隙岩体

Fig.1-2 Layered composite fractured rock mass

在层状异质岩体研究领域，传统方法面临显著的技术瓶颈：首先，基于野外调查与监测数据分析的研究多停留于定性描述层面，其结论往往缺乏系统性定量验证支撑。其次，数值模拟的方法在建模时需简化岩体参数设定，特别是在弱面本构模型选取与界面过渡区表征方面存在理论不确定性，导致数值模拟结果的精确度受限。再者，原位试验虽能反映真实工况，但受限于软岩层力学性能弱化特征，常伴随高昂的经济成本与技术障碍。相较而言，室内试验在参数可控性与过程可视化方面具有显著优势，但受制于层状岩体的空间异质性特征，取样过程易损伤结构完整性。现有制样技术体系存在明显缺陷：物理重构法涉及复杂浇筑工艺（如文献[7]所述），易引入气泡缺陷与几何偏差；岩块拼合法虽可保留原生岩性特征（见研究[8]），但人工切割形成的理想化界面难以真实复现天然层理面的形态特征。

综上，本文先对击样法与压样法下不同材料粒径（风积沙：0.075~0.18mm、0.22~0.5mm，石英砂：0.22~0.5mm）的类岩石材料力学特性与裂隙演化过程进行分析。最终选择模拟软硬互层裂隙类岩石最为合理的制样方法和材料类型，这部分研究内容为制作软硬互层岩体试样带来了极大的便利，同时为岩石力学试验方法标准的完善提供一种新的思路。之后本文以新疆地区工程地质软硬层状岩体为背景，在实验室内通过调整材料间的配比，以自制软硬互层裂隙岩体的单、三轴力学特性为基础，结合数字图像相

关技术进一步探究软硬互层裂隙类岩石的变形破坏机理和裂隙扩展过程。以上研究对于提升此类特殊地质条件下工程灾害防控效能、帮助隧道工程向深部复杂地层延伸、穿越变质岩等软硬互层区域以及对软硬互层岩体灾变破裂的准确预报具有重要指导意义。

1.2 国内外研究现状

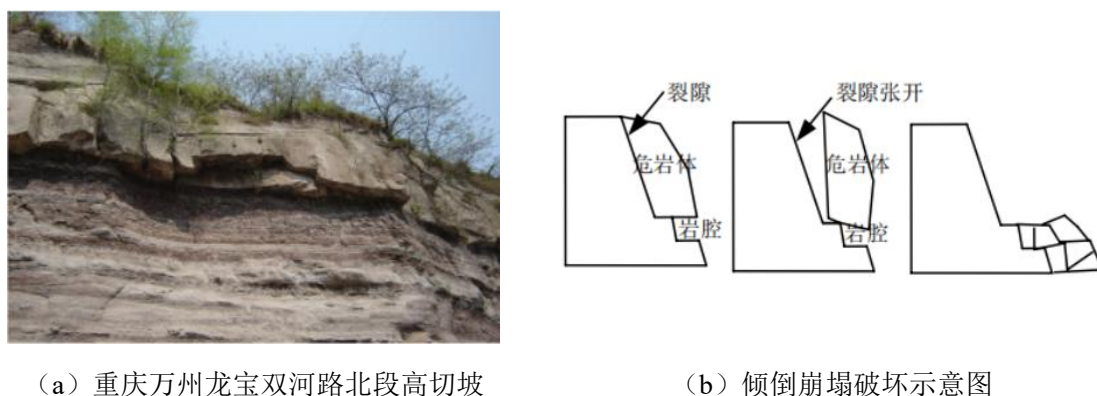
1.2.1 软硬复合岩体研究现状

层状复合地质体由多组平行界面构成，其层间距的非均匀分布与矿物组分的周期性变化导致岩层呈现软硬交替的典型特征。此类岩体因力学性能的层间梯度差异，展现出显著的各向异性响应与多因素耦合的损伤演化特性。最新研究进展表明，通过系统解析层理倾角、层厚比及界面连接状态等关键参数，已逐步建立起涵盖本构关系、损伤传播路径及强度预测模型的理论框架。邓荣贵等^[9]借助模型试验深入探讨了层状岩体的变形与强度特性，明确了模型试验中节理数量、轴向应力与节理面之间的角度，以及围压等因素对变形模量和强度的影响关系，当最大主应力与节理面间的夹角变化时，试样的应力-应变曲线、变形模量和强度均呈现明显差异。余永强等^[10]进行室内单轴和双轴压缩试验，分析了层状复合岩体的强度和变形特性受加载方向和层理结构的显著影响，破坏模式主要包括拉伸破坏、剪切破坏和复合破坏。吴渤等^[11]采用模型试验和数值模拟相结合的方法，深入研究软硬互层岩体的力学性能，分析互层倾角变化对岩体变形和破损的影响。梁正召等^[12]通过数值模拟和室内试验，深入研究了单轴压缩下横观各向同性岩体的破裂过程，分析了岩层与最大主应力之间的夹角对岩体的强度和破裂模式的显著影响，还揭示了不同岩层倾角下的破裂模式，包括沿面破坏、转动块体破坏、台阶状破坏和混合破坏等。陈宇龙等^[13]使用离散元软件对单轴压缩条件下不同岩层倾角的软硬互层岩体破坏过程进行了模拟，分析了不同倾角条件下，软硬互层岩体的破坏模式和黏结应力分布存在显著差异，并求解了交界面上的黏结应力。针对层状地质体的方向依赖性研究，郑蕾等^[14]通过实验研究与理论建模相结合的方法，系统解析了层状岩石各向异性及横向均质特性的形成机制，构建了主应力-层理夹角变化条件下的变形解析模型与破坏判据理论框架，并通过页岩试样的单轴与三轴加载测试，量化了不同空间方位条件下层状岩体变形模式与力学参数的演化规律。

在地质构造中，软硬互层岩体的特性差异主要源于岩层倾角、软硬层厚度及其比例、强度与弹性模量的比值以及层理弱面力学性质等诸多因素。这些差异不仅体现在岩石的产出状态上，还深刻影响着其力学性质。长期受复杂环境因素作用，不同类型的软硬互层岩体会呈现出多样化的破坏形式。许多研究人员已针对软硬互层岩体的破坏模式、机

理及其力学特性展开深入探讨，旨在揭示其内在规律，为相关工程应用提供理论依据。

软硬互层岩体在自然地质环境中普遍存在。董金玉等^[15]通过实地勘察，针对软硬互层高边坡失稳机制研究（如图 1-3 所示），采用多尺度分析方法，系统解析了地质地形要素、岩体结构特征、环境动力因子等关键控制要素，并结合三峡库区工程地质特征，采用离散元数值重构技术，对泥岩-砂岩互层地质体的渐进式失稳演化进行数值模拟，创新性提出分级防控体系。殷跃平^[16]研究针对三峡库区斜坡地质结构开展系统解析，构建了多因子控制的斜坡分类体系，主要包括：(1) 顺层地质结构斜坡；(2) 缓倾软硬互层地质体；(3) 滑移-崩塌复合堆积体；(4) 岩溶塌陷角砾岩体；(5) 层状碎裂岩质斜坡五类典型地质模型，并创新性提出基于地质适应性设计的边坡防护-利用协同技术体系。石林等^[17]采用野外调查、数值模拟和监测分析等方法，对软硬互层反倾高边坡的破坏模式和变形机制进行了研究，特别关注了库水位升降对边坡稳定性的影响。王祖玉等^[18]对水库地区的软硬互层岩质边坡进行了详细的现场调研，并利用 FLAC3D 软件对该类边坡的变形特性和稳定性进行了数值分析研究。



(a) 重庆万州龙宝双河路北段高切坡

(b) 倾倒崩塌破坏示意图

图 1-3 高切坡倾倒破坏^[19]

Fig.1-3 Toppling failure of high cutting slope

野外调查为研究岩体破坏过程提供了直观的观察窗口，该研究方法为学者提供了原位观测岩体损伤累积过程瞬态特征的直接途径。地质原位观测数据虽能支撑岩体劣化阶段的理论推演，并与数值重构技术形成方法互补，但仍存在双重局限：其一，缺乏控制性试验条件下的系统化验证；其二，难以完整捕捉岩体从微裂纹萌生至宏观断裂的全周期损伤演化轨迹。因此，在研究岩石破坏机制时，除了野外调查，还需要结合室内试验和数值模拟等多种方法，以更全面地理解和揭示岩石破坏的复杂过程和内在机理。

针对层状复合地质体原位取样面临的技术挑战，研究者提出采用人工合成试样模拟软硬交替岩层结构。通过系统开展模拟材料的制备与力学特性测试，现有研究进展可归纳如下：(1) 开发出界面参数可控的层状试样制备工艺；(2) 建立考虑层间接触特性的本构模型；(3) 揭示岩层强度差异对整体破坏模式的调控机制。张桂民等^[19]开发了一种能够有效模拟互层岩体的模型制作装置和方法，研究了不同层理倾角的软硬互层盐岩的

破坏模式和变形损伤规律。吴渤等^[20]主要使用有限元数值模拟,探讨了互层倾角对岩体变形和破坏的影响规律,并讨论了软硬分层薄弱面对破坏过程的影响。李昂等^[21]通过分别取样并拼接的方法制作了锦屏软硬互层岩体的“拼接”岩样,研究了单轴压缩下软弱层的分布、数量和体积占比对软硬互层岩体力学特性的影响。姚池等^[22]在细观层次上采用改进的刚体弹簧方法,模拟了互层岩体中裂隙的起裂和扩展过程。丁恩理等^[23]通过相似材料制作了类岩石试样,利用三轴试验研究了不同软硬层厚度及围压下软硬互层岩体的破坏模式和强度变化规律。刘新荣等^[24]进行了室内直剪试验,针对软硬互层岩体层理面这一结构,并使用 PFC2D 进行模拟试验,从宏细观的角度分析了软硬互层岩体在不同变量条件下结构面的剪切力学特性。

现有实验室力学测试体系在层状复合地质体研究中存在显著局限性:多数实验设计基于理想化层状模型,其加载条件仅能复现真实应力场的单一简化模式,导致研究成果与工程实际的匹配度不足。工程实践表明,自然地质体通常呈现大尺度层状结构特征,其复杂应力状态受多场耦合作用支配。相较而言,物理模拟技术通过地质体三维重构与多参数环境控制,能够有效复现软硬交替边坡等典型工程地质结构的原生状态,并在边界条件模拟中实现岩体赋存环境的等效还原。Dong 等^[25]依托工程实际,设计室内模型试验,成功探寻出针对软硬互层倾倒变形岩体最为适宜的锚固方式,结果显示当锚固角度为 45° 时,能实现最佳的锚固效果。Liu 等^[26]结合现场实测数据,针对软硬互层岩体中隧道开挖所引发的大变形这一现象展开深入研究,他们将大变形的灾害演化划分为前提阶段、孕育阶段、发展阶段、发生阶段以及处理阶段。宋娅芬等^[27]以实际工程为背景,对软硬岩体互层边坡的开挖和雨水侵入过程进行了模拟,探讨了边坡的变形滑移机制。吉世祖等^[28]运用监测调研、模拟试验及数值分析等方法,对典型的软硬互层滑坡展开研究,深入剖析了其变形机制。蒋金阳等^[29]运用现场调研、离心机试验和数值模拟等手段,针对某具体工程的倾倒变形及其加固支护效果展开深入探究,有力证明了加固支护措施效果显著,成功使坡体的沉降变形位移大幅降低。黄达等^[30]运用离心模型试验,深入研究了反倾软硬互层边坡的倾倒变形破坏机理,并系统分析了影响该类边坡变形的多种因素,发现各因素对边坡变形的影响程度依次为坡角、倾角、坡高、坡形、层厚比和层厚。李龙起等^[31]通过大型室内地质力学物理模型试验,对降雨条件下的软硬互层斜坡失稳过程和力学响应进行了研究。研究表明,雨水入渗软化软弱夹层是影响坡体稳定性的主要因素。特别是在不同降雨强度下,边坡的基质吸力和水的体积分数变化规律有所不同,进而影响边坡的稳定性。

现有研究成果为理解层状复合地质体的力学行为提供了重要参考,但综合文献分析表明,当前研究仍存在明显局限性:其一,研究维度集中于损伤演化阶段、失稳机理及路径识别,缺乏跨尺度的系统性解析;其二,针对岩层空间构型参数(如层理倾角与软

硬层厚比)对宏观承载特性及失稳路径的调控机制研究占主导地位。然而,对于特殊某一固定值的软硬互层裂隙类岩体力学特性的研究则相对较少。此外,关于软岩层与连通率之间如何影响互层岩体的力学特性和破坏模式的研究也不多见。

1.2.2 层状岩体力学特性研究现状

(1) 层状岩体压缩力学特性研究

层状岩体受压状态下的力学响应特性研究已形成系统性成果,其强度各向异性与变形机制研究主要基于天然层状试样的加载试验。Donath 等^[32]通过页岩单轴试验证实,层理倾角显著影响断裂强度及剪切裂隙扩展方向,后者趋向最大主应力轴向发展。McLamore^[33]基于板岩、页岩三轴试验数据,建立了考虑摩擦系数变化的强度预测模型,该模型在特定围压范围内可有效表征各向异性特征。实验研究系统揭示了多因素耦合作用规律:Behrestaghi 等^[34]的片岩试验表明,层理倾角与围压水平共同调控强度特征;Tavallali 和 Vervoort^[35]在层状砂岩单轴试验中识别出两种断裂模式—层理滑移型与垂直劈裂型。国内学者研究拓展了认知维度:刘胜利等^[36]通过拉伸试验发现片岩抗拉强度呈现显著各向异性;郝铁生等^[37]证实含软弱夹层盐岩的力学参数受界面变形差异显著影响;Song 等^[38]结合 CT 扫描技术揭示了裂隙分布特征与强度尺寸效应的内在关联。

在层状岩体力学研究中,天然试样的非均质性与结构缺陷导致试验结果呈现显著离散特征,这促使研究者转向人工胶结试样的制备技术。肖长富等^[39]采用环氧树脂胶结灰岩-泥岩-砂岩复合体系,系统研究了层理界面强度对各向异性特征的调控机制。林新^[40]基于类似制备方法,通过改变层理倾角与围压条件,揭示了复合岩样应力响应曲线的演化规律。实验研究进一步发现层间力学参数的临界控制作用:刘立等^[41]采用类岩石材料证实,随着胶结强度降低,复合试样的承载能力呈系统性衰减,且岩层厚度与围压水平共同影响破坏演化进程。Douma 等^[42]通过构建软硬交替三层结构模型,发现破坏传播遵循“弱层优先”准则—初始破坏始终产生于最薄弱岩层,其能否穿透硬岩层取决于两者的强度梯度阈值。

层状岩体模拟技术发展已形成多维度研究方法体系,基于相似材料配比原理的试样制备技术因其参数可调控性成为新兴研究方向。Tien 和 Tsao^[43]开发的层状类岩石制备工艺,成功实现了强度、变形模量等关键力学参数与天然岩石的高度可类比性。程建龙团队^[44]通过分层浇筑工艺构建软硬互层模型,结合声发射监测与数字散斑技术,系统揭示了单轴加载过程中能量释放特征与应变场演化规律。实验技术创新进一步拓展了参数研究维度:黄峰等^[45]在三轴条件下系统解析了软层厚度对复合岩体破坏模式的控制机制。杨圣奇等^[46]采用 3D 打印技术构建 JRC 参数化模型,阐明层理粗糙度对强度特性与裂隙

扩展路径的调控作用。Chang 和 Deng^[47]发展的锚固-非锚固对比试验体系，揭示了岩层倾角差异下结构加固效应对破坏机制的干预规律。

现有研究成果显著深化了层状岩体损伤演化机制的理论认知，但仍存在关键理论盲区：现有理论框架尚未系统纳入岩层界面的多尺度结构特征，且对岩性组构与力学响应耦合机制的解析仍显不足。这种理论缺失导致当前对层状岩体失效模式的认知存在局限性，进而影响其力学性能预测模型的工程适用性。值得关注的是，3D 打印技术的突破为复杂岩体建模提供了创新解决方案。该技术通过高精度结构重构能力（空间分辨率达 50-200 μm ），已成功应用于人工岩体多尺度结构复现、层理面形态数字化重建及裂隙网络拓扑优化等关键领域^[48,49]，为突破传统理论局限提供了新的方法论支撑。

（2）层状岩体剪切力学特性研究

层状岩体的结构各向异性响应主要归因于其层状构造各向异性特征，这种特殊结构配置显著增强了材料的剪切破坏倾向性。尤其值得注意的是，层理面作为软弱结构面对剪切滑移的易发性，使得剪切荷载作用下的力学响应机制已成为岩石力学研究的重点领域。

层状岩体剪切力学特性研究中，结构面几何参数与力学响应的关联机制获得重要突破。肖长富等^[50]通过建立锯齿状复合界面强度预测模型，揭示了层状结构面形貌参数与抗剪强度的非线性映射关系。贺建明等^[51]研发的异性结构面制备系统证实，界面剪切强度特性受控于岩性组合、形貌参数及应力状态的协同作用。进一步研究揭示环境敏感性与理论建模的相互作用：鲁祖德等^[52]发现水-力耦合作用下结构面呈现剪切刚度弱化效应与强度时效特征；王晓毅等^[53]开发了起伏角可控的制样系统，据此构建了考虑几何形态因子的界面强度预测方程。理论创新方面，杨烜宇等^[54]基于能量耗散原理重构了结构面强度理论框架，提出了考虑实际工况的测试方法体系。值得关注的是，胡云进等^[55]将 3D 逆向工程技术应用于节理面重构，证实含水率与 JRC 值对剪切承载性能具有反向调控效应。

层状岩体剪切各向异性研究已形成多维度理论体系，其核心科学问题聚焦于层理倾角与剪切响应的耦合机制。赵平劳等^[56]通过定向剪切试验建立了层理方位-剪切方向耦合的强度预测模型，揭示了结构面空间配置对剪切承载性能的调控规律。曾纪全团队^[57]在粉砂岩-泥质灰岩对比试验中，发展了考虑层理倾角梯度的强度参数表征方法，为各向异性参数标定提供了实验基准。工程应用研究取得显著进展：李银平等^[58]通过盐岩-石膏复合体剪切试验，揭示了软弱夹层界面滑移的应力重分布效应；赵海斌等^[59]基于大型水电工程原位试验，提出了结构面产状影响系数的工程评价体系。数值模拟与物理试验的协同创新推动理论发展，Xia 等^[60]采用改进离散元方法证实，特定层理倾角下剪切裂缝扩展呈现双模态特征；程坦等^[61]通过剪胀效应解析，建立了含粗糙度因子的工程实