

工程岩体物理模型中结构面 预制方法的综述与展望



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

苏占东^{1, 2)}, 李昆泽¹⁾, 孙进忠³⁾, 刘晓丽⁴⁾, 李小瑞^{1, 2)}, 牛耀¹⁾,
曾扬农¹⁾, 李梦园¹⁾, 王懿文¹⁾

- 1) 防灾科技学院地质工程学院, 河北三河, 065201;
- 2) 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室, 河北三河, 065201;
- 3) 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京, 100083;
- 4) 清华大学水圈科学与水利工程全国重点试验室, 北京, 100084

内容提要:在岩体中, 结构面的存在会弱化岩体的力学性能, 使其在受到扰动时更容易发生失稳破坏。对于工程岩体稳定性的研究, 还原自然岩体结构、体现原位岩体本质特征至关重要。物理模拟实验因可控性强、成本较低、结果连续性好、可模拟复杂工况等优势被广泛应用于含结构面的工程岩体研究中。因此笔者等主要对目前工程岩体物理模拟实验中结构面预制方法进行总结, 分析各方法的优缺点以及适用的工程背景, 为进行含结构面工程岩体的物理模拟实验提供思路。笔者等主要对平直无填充型结构面、粗糙起伏无填充型结构面和有填充型软弱结构面这三类工程岩体中常见结构面的预制方法进行了总结和介绍, 根据预制结构面岩体的不同将方法分类为适用于天然岩石的传统方法和适用于类岩石的创新方法, 传统方法工艺成熟, 目前仍受到众多学者的青睐。创新方法可以根据实验条件进行灵活调整, 以适应不同的研究需求, 从而衍生出更多的技术路径, 具备持续演进的潜力。在进行方法选择时, 要结合相应工程背景以及场地特征来进行选择, 确保试验结果的可参考性。创新方法中的3D打印技术在模拟复杂结构面岩体中具有很强优势, 但目前3D打印制得的试件受制于打印材料的限制, 在力学性质上和真实岩石仍有一定差距, 这是在未来需要突破的技术点。

关键词:工程岩体; 物理模型实验; 结构面; 预制方法

岩体是自然历史的形成物, 是赋存于地质环境中、经历过变形及破坏改造、并且具有一定岩石成分及结构的地质体。因此岩体与其他工程材料的差异主要在于地质体本身的不连续性——岩体中存在诸如节理、层面、页理和裂隙等结构面(Kawamoto et al., 1988)。结构面对于岩体自身力学性能的影响已被学术界广泛认可。早期, 人们对含结构面岩体的研究是对结构面表面形态进行量化表述以及建立结构面表面形态参数与岩体力学指标之间的关系(Barton, 1973; Barton and Choubey, 1977; Tse and Cruden, 1979), 但由于监测设备和材料技术的局限性, 对结构面表面形态参数的量测受人因素为影响很大。随着技术水平的不断提高, 人们对结构面表面形态参数有了更加量化的表述, 对不同形态结构面在岩体变形破坏过程中的影响认识更加深入。

结构面依赖于岩体而存在, 因此对于结构面的研究不能离开岩体介质。

在工程建设中, 无论是地下工程还是地表工程都难以避免含结构面工程岩体(譬如, 节理岩体)的工程地质问题, 对含结构面工程岩体变形特性和强度特性的研究对工程建设和安全防护具有重要意义(李小彤等, 2017; 赵茂春等, 2017; 赵敬波等, 2023)。国内外学者对含结构面岩体进行了大量研究, 按针对的岩石介质材料和手段, 这些研究可以分为3类: 天然岩石材料的实验研究(Yang Shengqi et al., 2012; Yin Peng et al., 2014)、类岩石材料的实验研究(张平等, 2006; Huang Yanhua et al., 2016; 孙冰等, 2018)以及岩体模型的数值模拟研究(Wu Zhijun and Wong, 2013; Huang Da et al., 2016)。迄今为止, 大量的工程岩体研究主要针对的是含结

注: 本文为地震科技星火计划项目(编号: XH24060A)和国家自然科学基金资助项目(编号: 42372322)的成果。

收稿日期: 2024-04-30; 改回日期: 2024-12-26; 网络首发: 2025-01-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.01.021

作者简介: 苏占东, 男, 1987年生, 副教授, 主要从事构造应力场与断裂活动性以及岩土工程抗震等研究工作; Email: szdchris@163.com。

构面岩体的力学特性,但对不同类型结构面岩体中结构面信息的获取方法论述很少,对岩体模型结构面的预制方法也鲜有专门系统介绍。

研究结构面岩体的前提是获得能够反映岩体力学性质的含结构面的试件。岩体物理模型结构面预制方法的选择关系到岩体模型试件是否符合实验要求以及实验能否成功。因此,笔者等在归纳总结大量岩体物理模型预制结构面制作案例的基础上,对不同类型结构面的制作方法进行较为系统地比较分析。

1 工程岩体结构面的制作方法

由于结构面参数的复杂性以及工程作用特点的多变性,很难对工程岩体中所有类型的结构面进行归纳(盛建龙, 2002)。笔者等以结构面的形态、填充情况以及连续性等为基本线索,对平直无填充型结构面、粗糙起伏无填充型结构面和有填充型软弱结构面三类结构面的制作方法进行归纳介绍,以期对含结构面岩体的物理模拟研究提供思路。

1.1 平直无填充型结构面的制作

平直无填充型结构面大多是在剪应力作用下形成的剪切破坏面,譬如,剪节理、剪裂隙、层间滑动面(发育较好的层理面与片理面)等,一般表现为平直、光滑、无充填的紧闭(或者张开度不大,张开度存在是由于后期构造应力叠加变动所致)结构面,表面常具有微弱的风化蚀变薄层。平直无填充结构面的制作方法可以分为两类:一类是针对天然岩体试件的切割法(王辉等, 2020; 王强和冯强, 2020; Gong Chuangeng et al., 2021; 董星辰, 2022);另一类是针对类岩体试件的薄片抽条法(李明田和邵东亮, 2012; Zhang Yuanchao et al., 2020; Lei Guangfeng et al., 2020; 郭婧宇等, 2020; Li Mengyuan et al., 2024)。

切割法是利用高速切割机从岩石试样表面由外至内切割,制作出平直光滑的结构面。目前,依据所用的切割机类型主要分为圆盘切割法、线锯切割法和水力切割法(Yin Peng et al., 2014; Yin Zhiming et al., 2020; Yu Liqiang et al., 2020)。按实验目的不同可以选择不同的切割机类型。

圆盘切割法采用的圆盘锯石材切割机,设备主要组成为圆盘锯、控制台、操作台和电机组成,机器启动和试件加工通过控制台和操作台进行,岩石试件加工过程中圆盘锯在与电流值相适应的锯切量和进刀速度下运转可制得具有一定开度的平直无填充

型裂隙(陈冀渝, 2015)。郭彦双等利用圆盘切割机在辉长岩表面预制开型裂隙,研究岩石在单轴加载下试样的破裂模式(郭彦双等, 2007),试样制作如图1所示。Yin Peng等(2014)采用圆盘切割机在花岗岩试样表面以定向走刀切槽的方式预制出两条具有一定深度的平行开型裂隙,用以研究裂隙之间的贯通机制。利用圆盘切割机进行结构面预制可以快速高效地制得实验所需试样,但此方法只能预制表面开型裂隙,制作岩石试件内部的裂隙,预制结构面的宽度取决于切割刀片的厚度,结构面的深度受切割刀盘半径的控制;另外,切割加工过程中,切割刀盘与岩石试件之间的摩擦会生热,造成局部温度升高,这可能会导致岩石内部矿物的性质及结构发生改变(李力等, 1990; 姜广辉, 2018),从而对岩石试件的力学性能产生一定影响。

线锯切割法采用的线锯切割设备分为电动和手动两种,电动设备包括线锯、收放线轮、导向轮、电机和定位夹具,通过电机控制收放线轮高速转动进行切割;手动设备则是金刚砂线锯,依据划定裂隙走向和长度进行手动切割。线锯切割可以制得开度较小的裂隙,且裂隙位置可在试件的中间或两端。鲁祖德等在红砂岩圆柱试样上先钻取稍大于裂隙尺寸的圆孔,之后利用线锯切割进行裂隙的预制(鲁祖德等, 2008),如图2所示。王强等利用金刚石线锯对辉绿岩长方体试件进行切割,制成具有不同倾角结构面的非贯通试件进行单轴压缩实验,实验中辅以声发射监测,研究不同倾角结构面对其声发射信号特征的影响(王强等, 2021)。线锯切割减小了在切割过程中预制结构面与切割刀具的接触面积,从而大大降低了切割摩擦导致的高温。对于硬度较高且脆性较大的岩石试件,金刚石线锯更可以保证预制结构面的加工质量(周世威等, 2012),但线锯切割

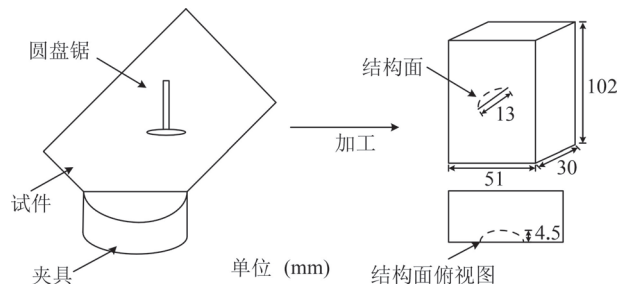


图1 裂隙切割与含裂隙试样示意图

(据郭彦双等, 2007 修改)

Fig. 1 Crack cutting and fracture containing specimens (modified after Guo Yanshuang et al., 2007&)

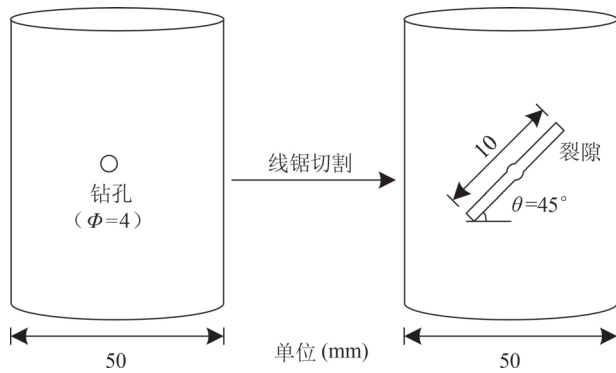


图2 线锯切割预制裂隙
(据鲁祖德等,2008 修改)

Fig. 2 Wire cutting prefabricated cracks
(modified after Lu Zude et al. , 2008&)

也存在切割表面粗糙的问题。

水力切割法基本原理是利用高速水柱作为能量载体,在喷射到加工试件表面时,产生强大冲击力,当冲击力大于试件强度时,材料被分割开,水力切割主要是高速水柱对材料表面的侵蚀、剪切和局部所产生的高频应力变化造成的(方逸瞳,1990)。裂隙的预制位置和尺寸是采用水力切割机的运动控制系统来完成的,运动控制系统可分为手动控制和自动编程控制,前者是通过移动切割头来完成裂隙预制;后者是通过机器抓持切割头来完成裂隙预制,通过控制系统可以对裂隙位置、尺寸和数目等进行预制,但自动编程控制进行裂隙预制的精度更高。对于不同坚硬程度的岩石试件,可通过在水流当中添加磨料来增大水流切割的动能。水力切割的优点在于切割过程中无热量产生且岩石试件受力很小,对于切割材料的适用性也更加广泛(张学俊,1989)。付红亮采用水力切割在砂质泥岩圆柱试样上预制不同数量的贯穿—开放型裂隙,用以研究裂隙数量对低强度岩体的力学特性及破坏模式的影响(付红亮,2019)。

虽然采用天然岩石试件进行含结构面岩体变形及破坏特性的研究获得的结果具有说服力,但因岩石内部原有的微结构面影响可能会使实验结果离散性增大。有学者通过对试样进行波速和密度测定来选择性质较为接近的试件进行实验(王乐华等,2015)。这样做虽然可以减小误差,但需要制作大量岩石试件,因此并不经济,且若实验所需试件尺寸较大,那么选取难度将大大增加。已有大量研究表明,岩石材料与类岩石材料的力学参数与研究成果

具有高度相似性(周维垣和杨延毅,1990;Reyes and Einstein, 1991; Shen Baotang et al. , 1995; Wong and Chau, 1998),因此,可采用类岩石材料进行含结构面试件的制作。类岩石材料是选择合适的原材料并按一定配比制得的与岩石材料性质十分接近、且能够满足天然岩石材料力学性能研究的人工材料(黄凯珠等,2002;Zhang Yuanchao et al. , 2020; 苏占东等,2023)。这种方法的优势在于可以在保证内部均一性前提下,展开更为复杂的岩体物理模拟研究。类岩体材料模型制作过程类似于水泥浇筑工程构件的过程,这为类岩体模型试件中结构面的制作提供了便捷和更多选择。

类岩体模型试件中平直无填充型结构面的制作通常采用薄片抽条法,即在制作模具中预定位置固定好与预制结构面尺度相同的薄片,试件材料浇筑完成后试件达到初凝时抽出薄片,从而在类岩体模型中形成平直无填充结构面。薄片抽条法所用的薄片可选用薄钢片、薄铝片以及薄塑料板等材料按结构面尺度要求加工制成。Kawamoto 等(1988)采用石膏砂浆和水泥砂浆材料浇筑模型试件,浇筑后插入薄钢片,制作与实验压力方向具有不同夹角且裂纹排列不同的含开型裂隙的类岩体试件(图3),用以研究非连续岩体变形破裂行为。利用薄片抽条法可以便捷地改变结构面几何特性、空间位置和裂隙数量甚至模型尺寸,从而研究外力作用导致的岩体变形破坏模式(Jing Hongwen et al. , 2014; 赵程等,2016;易婷等,2021;刘阳等,2022)。有学者通过改

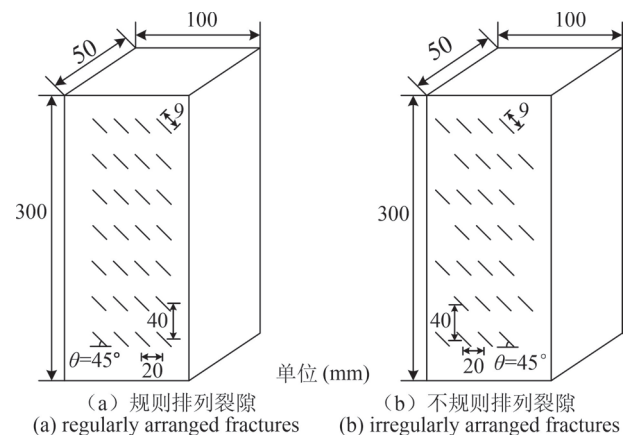


图3 不同夹角且裂纹排列不同的含开型裂隙的类岩体试件(据 Kawamoto et al. , 1988 修改)

Fig. 3 Rock-like specimens with open cracks of different angles and varying crack arrangements (modified from Kawamoto et al. , 1988)

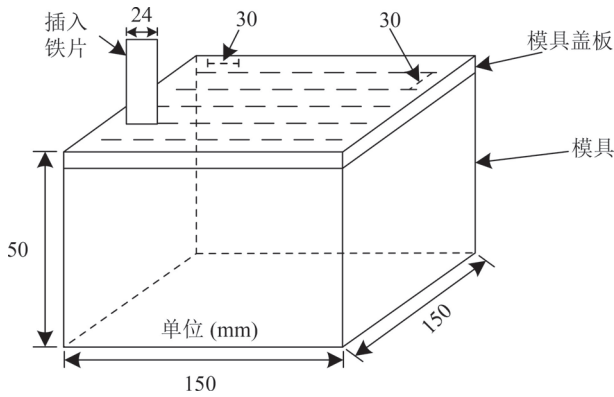


图4 多组节理试件制作(据陈新等,2011 修改)

Fig. 4 Preparation of multiple sets of joint specimens
(modified from Chen Xin et al. , 2011&)

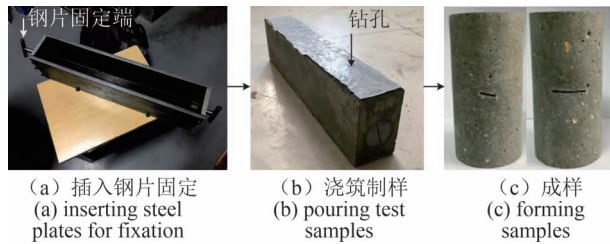


图5 制备节理砂浆试样(据陈超等,2022 修改)

Fig. 5 Preparation of joint mortar specimens
(modified from Chen Chao et al. , 2022&)

变金属片固定方式或制样流程对薄片抽条法加以改进,以满足不同的实验目的。陈新等利用特制盖板与薄片抽条法配合,制作含多组裂隙的类岩体模型试件(图4),通过改变盖板上裂隙的长度和倾角制作含有不同倾角、不同连通率的类岩体模型试件(陈新等,2011)。陈超等先采用薄片抽条法制作含平直无填充结构面的长方体试件,之后再硬化的长方体试件上钻孔取样,制成含结构面的标准圆柱试件,如图5所示(陈超等,2022)。

1.2 粗糙起伏无填充型结构面的制作

粗糙起伏无填充型结构面的基本特点是具有明显的粗糙起伏度,这是影响结构面抗剪强度的一个重要因素。粗糙起伏无填充型结构面的粗糙度可以通过表面形貌参数(如面粗糙度、起伏度、峰谷间距等)来描述,这些参数反映了结构面表面的不规则程度和起伏程度。粗糙度的增加会增强结构面的咬合效应,剪应力作用过程中在起伏不平的咬合部位产生应力集中,咬合部位啃断是起伏不平结构面剪切破坏的基本方式。因此,粗糙度是粗糙起伏无填

充型结构面研究的重点和热点。

粗糙起伏无填充型结构面的预制主要有劈裂法和倒模法(Lin Chong et al. , 2022; 卢海峰等,2021; 蒋宇静等,2022; Li Su et al. , 2022)。劈裂法通过对试件施加点荷载导致试件劈裂,从而获得粗糙起伏无填充的结构面。大量测试表明,同一岩体的结构面粗糙度系数具有可重复性(Zong Yijiang et al. , 2011)。Morrow 等(2001)在圆柱试件轴向施加点荷载,从而获得试件沿轴向的劈裂,从而获得具有粗糙起伏无填充结构面试件,用以研究水热环境中花岗岩渗透率的变化。盛金昌等(2012)采用劈裂法获得了含粗糙起伏无填充结构面的石灰岩圆柱试件,用以研究渗流-应力-化学耦合环境中岩石裂隙的渗透特性。黄帆利用巴西劈裂法获得砂岩和花岗岩粗糙无填充结构面,用以研究裂隙岩体渗流传热耦合演化机理(黄帆,2021)。李宏哲等(2008)将锦屏二级水电站高地应力区岩体圆柱试件沿节理面拆分再拼合成强化节理影响的岩体试件,并采用三轴实验揭示这种岩石试件的强度性质和破坏类型。虽然采用劈裂法制得粗糙无填充结构面具有一定的可重复性,但所生成的结构面表面粗糙度系数的变化仍然具有一定的随机性,从而导致实验结果具有显著的不稳定性。

倒模法可在一定程度上控制预制结构面的粗糙度,从而减小结构面粗糙度系数变化随机性对实验结果的影响。倒模法采用类岩石材料浇筑试件,并采用一定的方法控制结构面的粗糙度。控制类岩体模型结构面粗糙度的方法主要分两种:一种是粗糙模板提拉法;另一种是两盘预制砌合法。

Wong 等(1998, 2001)采用粗糙模板提拉法进

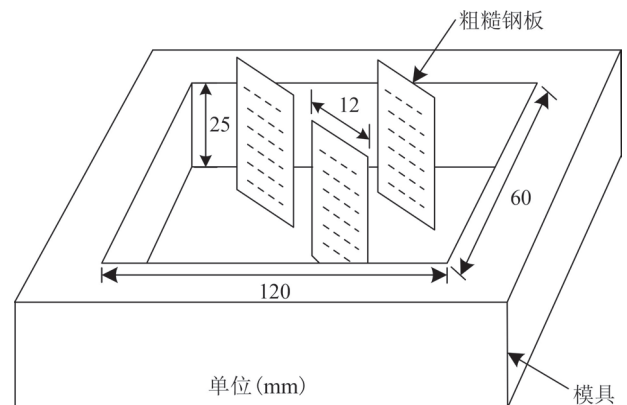
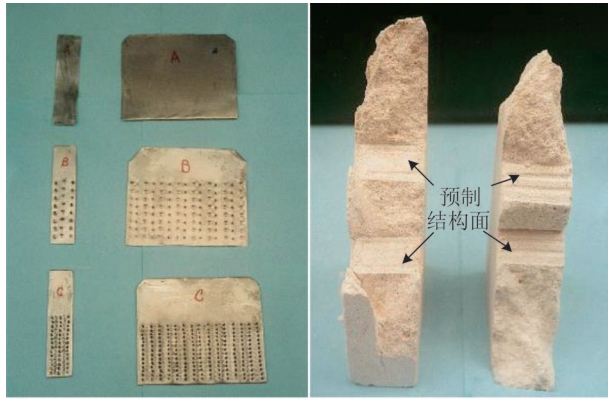


图6 试验模具示意图(据 Wong et al. , 2001 修改)

Fig. 6 Schematic diagram of the test mold
(modified from Wong et al. , 2001)



(a) 三种粗糙度钢板
(a) three types of steel plates with different roughness

(b) 预制结构面效果图
(b) rendering of prefabricated structural surface

图7 粗糙度一致的结构面预制

(据 Wong et al., 1998, 2001 修改)

Fig. 7 Prefabrication of structural surfaces with consistent roughness (modified from Wong et al., 1998, 2001)

行类岩体粗糙起伏无填充结构面试件的制作,试件浇筑模具示意图如图6所示,在浇筑前将粗糙钢板安装在预定位置,当试件浇筑初凝时抽出钢板,抽出过程中成行排列的突起部分会在初凝的类岩体模型中拉出具有平行凹凸结构(沟槽)的起伏结构面。钢板表面突起越高、越密集,预制结构面粗糙度越大。预制结构面的钢板如图7a所示,最终效果如图7b所示。

两盘预制砌合法将类岩石材料浇筑在具有预定结构面形态的模具中(结构面两盘起伏咬合模具可以进行精心设计),试件凝固后就得到预制结构面的两盘类岩体模型,将结构两盘类模型体对接砌合,从而形成具有复杂起伏形态结构面的类岩体模型。Wei Jinhong 等(2018)利用如图8所示的模具按两盘预制砌合法制作了具有与天然岩体相同粗糙度结构面的类岩体模型:首先将含有粗糙结构面的天然岩体试件(样品)沿结构面剥离,得到同一结构面两个表面的原始印模;将两盘原始印模放置于模具两端,并在印模的结构面表层贴(或涂抹)上隔离层,以防止随后浇筑的混凝土与印模粘结;在模具内部浇筑混凝土,混凝土凝固后即得到了制作结构面两盘类岩体模型体的中间印模(图8中标注有“预制混凝土”的部分);中间印模留置原处,将原始印模取出,然后在原始印模位置浇筑类岩体材料,从而制得含天然结构面的两盘模型体;进一步将两盘模型体在有结构面表面的侧面对接砌合,最后得到与天

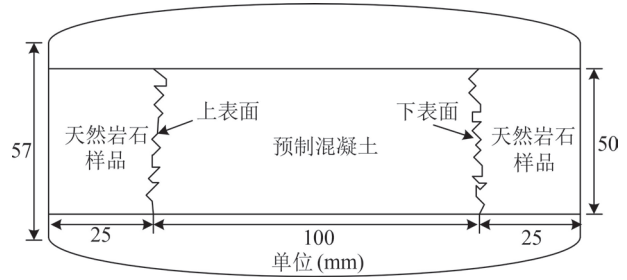


图8 天然粗糙岩石节理面模型的模具结构

(据 Wei Jihong et al., 2018 修改)

Fig. 8 Mold structure of natural rough rock joint surface model (modified from Wei Jihong et al., 2018)

然岩体结构面形态相同的类岩体模型试件。Fardin 等(2001)采用柔韧性良好的硅胶材料对野外节理岩体结构面进行现场复制,在所选择复制区域设置框架,将拟复制的原位岩体结构面围限在框架内,在框架内浇筑硅胶,待硅胶凝固后将硅胶和结构面分离便得到了结构面的复制品,经扫描测量对比确认,复制的结构面与原结构面粗糙度一致。

锯齿状无充填型结构面是粗糙起伏无填充结构面的理想化模型,含锯齿状结构面岩体的剪切力学行为对边坡稳定性分析具有特殊的理论意义。刘新荣等(刘新荣等,2022)利用相似材料制作不同起伏度锯齿状结构面的边坡模型(图9):首先将原料分若干次缓慢添至模型箱内,再使用小型击实锤锤压材料至设计位置,保证密实度;随后采用手工抹刀等工具对锯齿状层面进行修整,完成模型砌筑。

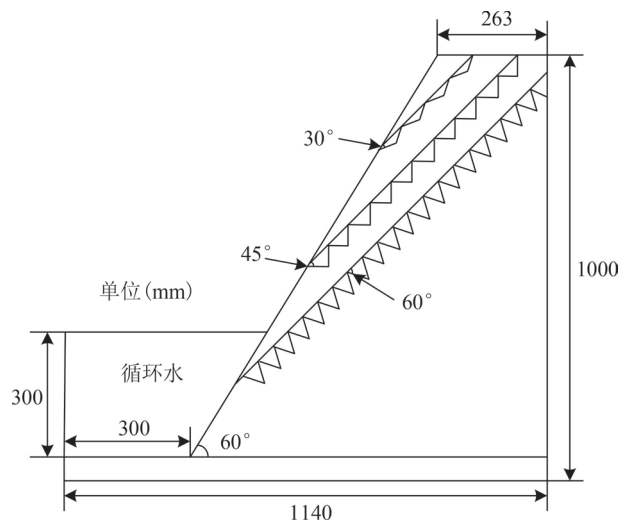


图9 锯齿结构面边坡模型设计(据刘新荣等,2022 修改)

Fig. 9 Design of serrated structural plane slope model (modified from Liu Xinrong et al., 2018&)

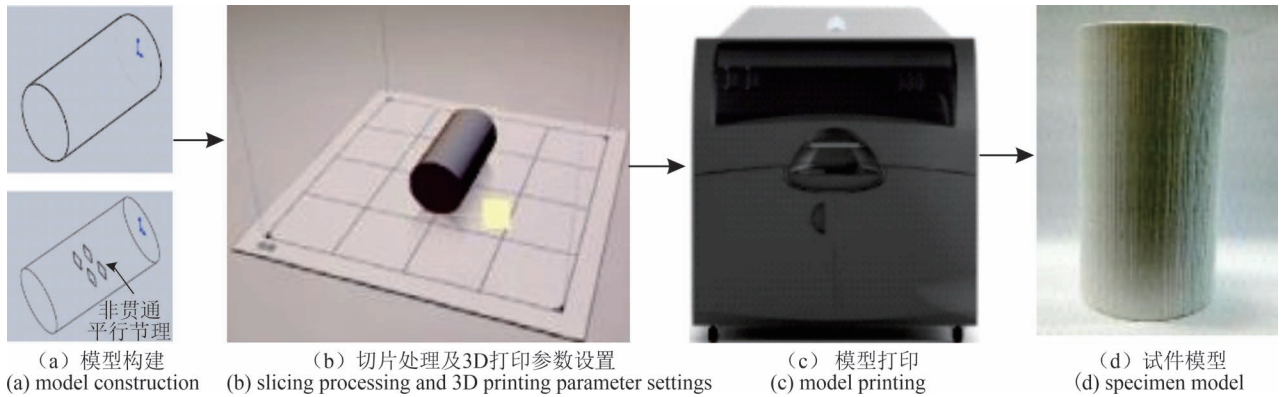


图 10 3D 打印试件的制作流程(据王本鑫等,2019 修改)

Fig. 10 The production process of 3D printed specimens (modified from Wang Benxin et al. , 2019&)

须注意,倒模法在进行粗糙起伏无填充结构面预制时,若倒模材料和被倒模材料性能有差异会造成试件表面粗糙度系数改变(刘溪鸽等,2017)。

随着数字扫描技术和 3D 打印(3DP)技术的发展,结构面粗糙系数控制问题得到了有效解决。3D 打印是在传统二维平面印刷打印技术的基础上,通过逐层二维打印的迭加,利用喷头的三维运动实现曲面打印,逐层增加材料生成三维实体(商明慧和于帆,2016)。3D 打印制作含结构面的岩体试件流程如图 10 所示。Guo Yingtong 等(2022)利用 Python 软件建立砂岩断层表面的 3D 模型,将构建的模型在 STL 文件中输出,驱动数控岩石雕刻机对完整的岩石样品进行雕刻,最终得到不同起伏形态的粗糙结构面。Python 的精确建模和高精度雕刻机的精细雕刻确保了结构表面的起伏形态完全符合设计要求。通过改变打印材料可以实现不同性质物品的制作。Jiang Chao 等(2015,2016)将高分子材料与粉末印刷材料应用到力学模型中,用粉末状石膏材料打印出内含裂隙的类岩石试件,通过实验发现,打印石膏试件的破坏模式与含相同预制裂隙混凝土试件的破坏模式相同,证明了这一技术的可行性。Li Su 等(2022)利用 3D 打印技术,采用灰度图像处理方法对裂隙粗糙系数 JRC (Barton and Choubey, 1977)进行数字化后导入 3D 打印机中制作树脂板,然后将树脂板放置于钢模的中间,固定好位置后先浇筑一半,浇筑完成后再浇筑另一半,制得具有不同粗糙度结构面的试件。杨志东采用三维扫描粗糙无填充结构面,之后将扫描信息导入 3D 打印机进行粗糙无填充结构面模具打印,然后再用类岩体材料浇筑制成类岩体试件(杨志东,2020)。采用 3D 打

印技术制作粗糙结构面模具,再利用模具浇筑制成类岩体试件,此方法对结构面细节的模拟具有十分的显著效果。目前,已在岩体力学试验当中应用的 3D 打印技术类型有光固化技术(Ju Yang et al. , 2014;肖维民等,2018)、选择性激光烧结技术(王培涛等,2018;裴志茹,2019;王本鑫等,2019;陆家伟,2019;金爱兵等,2020)和三维印刷技术(Sharafisafa et al. , 2018, 2019)。采用三维印刷技术制得的试样和天然岩石的抗压和抗拉曲线更为相似(田威等,2021),而其他三维打印技术制得试件力学性质和天然岩石试件仍有差别。

1.3 有填充型软弱结构面制作

具有填充物的软弱结构面包括泥化夹层和各种类型的夹泥层,其形成多与水的作用和各类滑错作用有关,这类结构面的力学性质主要取决于断层泥的组成成分、厚度和含水率(刘彬和聂德新,2006;杨阳等,2016;柴少波等,2020)。

迄今为止,已有研究中的有填充的软弱结构面的岩体试件或类岩体试件所采用的充填物模拟材料主要为岩屑、黄泥或是按一定组份配比的石英砂、蒙脱石和高岭石混合物(谢礼焕和刘贺娟等,2023),也有研究将云母片等材料预埋在类岩体试件中模拟有充填的软弱结构面(黄达等,2011)。许江等(2019)采用倒模法以水泥砂浆作为类岩体材料的结构面上、下盘模型体,采用筛分为 0.125~0.150 mm 的石膏、岩屑和黄泥 3 种材料,按材料:水=3:1 的比例,分别制成石膏、岩屑和黄泥充填物,制作成对应 3 种充填物的结构面模型试件,与无充填物模型试件展开对比研究(图 11)。黄达等(2011)在重晶石、石英砂、水泥、石膏和水作为原料制成的类

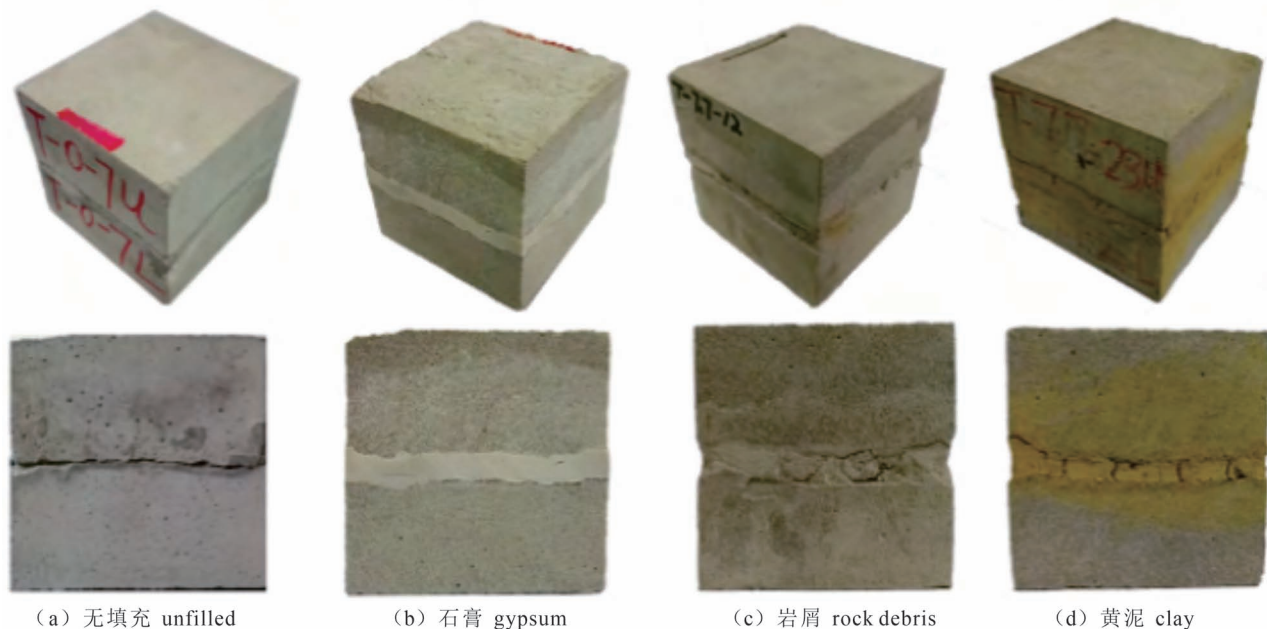


图 11 充填结构面试件(据许江等,2019)

Fig. 11 Filling structure interview piece (from Xu Jiang et al. , 2019&)

岩体模型内部安置 0.5mm 厚的白云母片模拟含有充填物的软弱结构面。

大量工程实践表明,出露结构面对于工程岩体稳定性和工程作业的安全性具有显著影响。然而,在地下作业过程中,隐伏于岩体内部的结构面(因其隐蔽性和不确定性)会对安全生产构成更大的潜在威胁,特别是在地震或工程爆破等强力扰动的影响下,可能导致严重的安全事故(Li Jianchun et al. , 2019)。不少学者对岩体中隐伏结构面对岩体工程稳定性的影响开展了理论和数值模拟分析(刘婷婷等,2016;Aziznejad et al. , 2018;张更鑫等,2023)。也有学者对隐伏结构面影响展开了物理模型实验研究。杨砚等(2022)用石膏作为填充物制成与主应力方向夹角不同的隐伏结构面类岩体模型,用以研究冲击荷载下模型的力学特性和破坏规律。殷志强等选择水泥砂浆作为红砂岩结构面填充物,对含隐伏结构面红砂岩试件进行冲击荷载实验,揭示应力波在充填节理岩体中的传播规律,为围岩支护和爆破扰动提供理论参考(殷志强等,2024)。

2 综合分析

岩体中不连续结构面的存在大大弱化了岩体的力学强度,工程活动又对原本存在缺陷的岩体产生扰动,进一步诱发了工程岩体的稳定性问题,从而对

工程安全构成威胁(Chai Shaobo et al. , 2020)。对于岩体力学特性的研究目前主要是原位试验和室内模型试验两种方法,原位试验采集结果有时较离散,不易发现有关因素的影响规律;对比而言,室内模型试验可重复性强,变量易于控制,因而在岩体力学研究中被广为采纳(侯迪,2016;胡建华等,2017;Tang Yi et al. , 2023; Lei Daxing et al. , 2023; Wang Tianlong et al. , 2023)。在实际工程中,不同工程背景的岩体工程问题虽然各有差异,但都难以避免含结构面的工程岩体问题。通过物理模型研究含结构面岩体力学性能以及变形破坏特征已成为岩土工程领域的重要课题。随着学科间的不断交叉融合,越来越多的新技术和方法被应用于物理模型实验中。这些技术的引入促进了结构面预制方法的多样化发展,当前工程岩体物理模拟试验中针对不同类型的结构面存在多种预制方法,各种方法的优缺点如表 1 所示。图 12 统计了目前不同结构面预制方法在岩体物理模型实验中的应用情况。总体来看,传统方法的使用以机械切割为主,技术成熟,但可能在精细化模拟和高效性方面有一定局限。相比之下,创新方法具有精确、灵活和前沿的特点,两种类别方法相比,传统方法因其具有高效、经济、可重复性以及可操作性强等优点,在基础实验中仍具优势(杨圣奇等,2009;杨圣奇,2013;付红亮,2019;谭皓等,

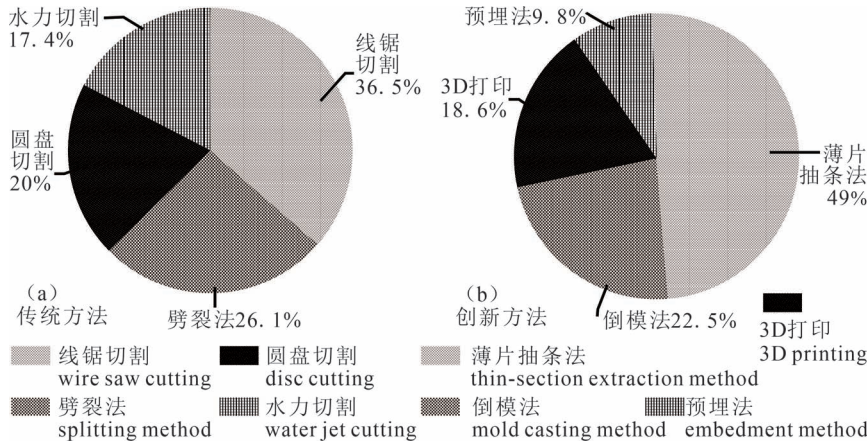


图 12 结构面预制方法在岩体物理模型实验中应用情况的统计

Fig. 12 Statistics on the application of structural plane prefabrication method in rock physics model experiments

2022; Teng Mingyang et al., 2023), 而创新方法则在复杂性和精准性需求较高的实验中更具潜力。

岩体工程建设中, 需要监测岩体稳定性并评估施工安全性, 这要求研究岩体在不同地质和施工条件下的破裂机理、裂纹扩展机制及力学特性。常用

的研究方法包括理论分析、数值模拟和物理模拟试验。然而, 由于岩体的复杂性和不均一性, 传统理论和数值模拟中模型简化和假设可能导致模拟结果与实际情况存在差异 (Paola et al., 2009; Reber et al., 2020), 同时裂隙扩展和滑移的模拟是数值模拟中的一大挑战。因此采用物理模拟的方法来研究含缺陷岩体有助于更深入理解岩体在不同环境和加载条件下的反应, 同时为理论模型提供验证和校准。

目前, 许多学者已经开展了大量含结构面工程岩体的物理模拟研究, 通过实验手段探讨结构面特性对岩体力学行为和破裂机制的影响, 为解决工程实践中的复杂问题提供了科学依据。对于平直无填充型结构面的预制方法, 适用于矿山开采和隧道施工、施工区内断层滑移以及滑坡的成灾机理研

表 1 不同类型结构面预制方法及其优缺点

Table 1 Different types of structural surface prefabrication methods and the merits and demerits

结构面类型	预制方法	方法介绍	优点	缺点
平直无填充型	圆盘切割法	通过圆盘锯切割天然岩石或类岩石边缘来预制结构面	快速高效; 适用于多种岩石	易产生热损伤, 造成局部矿物性质及结构发生改变
	线锯切割法	通过金刚砂线锯切割岩样的边缘或内部, 预制结构面	降低切割摩擦导致的局部高温; 可预制非贯通结构面	线锯自身柔性会导致切割轨迹轻微波动造成预制结构面粗糙
	水力切割法	利用高压水射流对岩石进行切割或蚀刻	预制精度高, 冷却效果较好; 有效避免过热损伤	成本较高; 磨水处理不当会造成环境污染; 不适宜较软岩石
	薄片抽条法	在模具中插入裂隙板, 类岩体材料初凝后抽出, 形成预定结构面	操作可重复, 控制精确, 适用于复杂结构面制作	抽片时需精确控制操作参数(时间、力度), 可能导致局部损伤或偏离预期
粗糙起伏无填充结构面	劈裂法	通过对真实岩石试样进行巴西劈裂预制结构面	可真实再现天然状态下结构面几何和力学特性	难以在大尺度模型中直接应用
	倒模法	拓印制备含有结构面特征的模具, 然后在模具中浇筑形成带有结构面的试样	精准复制结构面特征; 结构面一致性较好	依赖模具精度; 浇筑材料会影响结构面的力学特性
	薄片抽条法	通过点阵排列预设裂隙板, 在初凝时抽出裂隙板形成粗糙结构面	可对结构面粗糙度进行量化设计	需对裂隙板拔出时间进行控制, 拔出太早会导致结构面过早闭合
	3D打印法	利用计算机建模生成特定粗糙度的结构面	可精准控制粗糙度, 预制复杂结构面, 具有可重复性和高效率	设计成本较高; 制成的试件力学特性与真实岩石存在一定差距
填充型软弱结构面	胶凝材料填充法	在结构面填充胶凝材料并固化, 形成特定强度的软弱结构面	高度可控性; 易于操作; 适应复杂结构面填充	与岩体的结合性较差, 容易出现剥落现象
	软化材料填充法	在裂隙中填充可软化材料, 通过受力或水化使其力学性能衰减	可以较好模拟软弱结构面的力学特性	填充材料易受水分影响, 材料黏度大, 均匀填充困难
	预埋岩石板法	在类岩体浇筑过程中嵌入天然或类岩体岩石板, 形成结构面	操作简单; 结构面形态自然; 可模拟隐伏结构面	嵌入结构面过程中停滞试件过长可能会出现分层现象
	3D打印法	计算机建模完成后, 打印过程中通过改变打印材料填充结构面	试件一次成型完整性好	试样力学特性与真实岩石存在差异, 打印材料选择范围有限

究。张宁博等通过采用光弹性材料,对义马矿区南边界的逆冲断层进行了物理模拟,采用切割法预制断层,研究其在应力扰动下逆冲断层的失稳机理,对断层灾害防治具有指导意义(张宁博等,2024)。有学者采用相似材料制作类岩体,通过制作多个表面平滑光滑的块体模型,以堆砌块体的光滑表面作为岩体内部裂隙研究岩质滑坡的变形破坏过程,潘浩楠和Lai等通过此方法分别研究了白格滑坡(潘浩楠等,2024)和马达岭采空区滑坡的成灾机制(Lai Qiyi et al., 2023),对于滑坡预警具有重要意义。还有学者通过采用薄片抽条法预制未贯通结构面来研究断裂局部应力场和变形场的相互关系及其对断裂活动性的表征(Niu Yao et al., 2023; Su Zhandong et al., 2024)。目前关于结构面粗糙度的表征尚未得到充分研究和明确阐述。

采用物理模拟获得粗糙起伏型结构面并研究其特性,成为加深对其认识的有效方法(Lee et al., 1990; Maerz et al., 1990; 刘松玉,1993;王金安和谢和平,1998; Fardin et al., 2004; 陈世江等,2015)。对于含粗糙型结构面的研究有助于理解天然状态下含结构面岩体的力学特性、渗流特性与岩体转移特性。曹秋菊和王金安(2012)通过选取山西某矿山砂岩,分别通过纯剪破坏方式和巴西劈裂拉破坏方式,制作出2类存在粗糙面的试件,进行剪切蠕变试验,研究其破裂过程。李宏哲等(2008)通过对处于高地应力区的锦屏二级水电站岩体进行采样,利用天然岩石制作含粗糙度和倾斜角度的试样进行三轴加载试验,分析天然状态下含结构面岩体在开挖卸荷过程中的破裂特性,为工程安全提供借鉴。施炎等(2024)以乌东德库区三台危岩体白云岩为对象,通过劈裂法获得具有一定粗糙度的结构面,开展水—岩作用条件下的渗流特性。徐树媛等

(2022)以潞安集团常村煤矿为背景通过相似材料配比来研究裂隙对岩体渗流特征的影响,为含水层开采评估提供参考。在自然条件下,节理裂隙通常具有一定的开度,并可能在长期的地质演化过程中被矿物沉积物或其他介质填充,这些填充物对岩体的力学性质和破裂行为具有重要影响。填充物的性质(如强度、黏结力、渗透性等)将直接影响结构面的刚度和滑移特性。李鹏等(2018)以凤凰山铁矿为研究背景,通过预埋岩石板法来分析爆破应力波在层状节理岩体中的传播规律,为矿山开采以及巷道支护提供了重要的理论依据。舒付军等(2018)通过采用相似材料,以砂岩模拟填充物来研究部分填充裂隙岩体的等效渗透试验。齐群等(2019)对神道沟断裂带中断层泥力学性质进行了研究。综上,表2针对这些预制方法适用的工程类型及其优缺点进行了汇总,这些研究方法各有其优势和局限,选择合适的预制方法应基于具体的工程背景和研究目标。在实际应用中,需综合考虑模型的可操作性、实验的现实性以及结果的可靠性,以确保研究能够准确反映真实工程中岩体的力学行为,为相关工程设计与优化提供科学参考。

在结构面预制方法中,3D打印技术作为一种新兴方法,在物理模拟实验中的应用展现出良好的前景,具有重要的研究与实践价值。3D打印技术可以实现喷涂材料的交替打印,这使得3D打印制作的模型试件介质组成与天然岩体更为接近(江权和宋磊博,2018;王本鑫等,2019)。随着图像采集技术的不断发展,3D打印技术可以与许多数据采集系统(如CT扫描、DIC技术、三维扫描技术或变形测量技术等)相结合,在物理模型结构面精确预制、模型介质变形、裂隙扩展及其力学演化特征的监测等方面具有明显优势(熊祖强等,2015;Sharafisafa et al.,

表2 结构面预制方法适用范围汇总

Table 2 Summary of the applicable scope of prefabricated structural plane methods

结构面类型	适用研究范围	优点	缺点	参考文献
平直无填充型结构面	矿山开采;隧道施工;断层滑移;滑坡灾害	模型简单易控制;便于理论分析和数值模拟;突出结构面特性对岩体力学行为的影响	模型进行了理想化,得到结果可能与实际有偏差	Zhang Yuanchao et al., 2020; 王辉等, 2020; 谢璨等, 2020; 谭皓等, 2022; Teng Mingyang et al., 2023
粗糙起伏无填充型结构面	边坡稳定性;裂隙岩体渗流特性;岩体接触面力学特性	接近自然状态的裂隙或断层面,能够更真实地模拟岩体的力学行为	模型制作复杂,粗糙度的控制和重复性难度较大	Johansson, 2016; 刘溪鸽等, 2017; Singh and Basu, 2018; 周辉等, 2019; 徐树媛等, 2022
填充型软弱结构面	裂隙岩体渗流特性;断层力学特性	适合研究多物理场耦合作用;可调节填充物的强度、黏结性、厚度等参数	依赖填充物的性质,实验结果可能与实际工程存在偏差	齐群等, 2019; 王本鑫等, 2019; Du Yiteng et al., 2023

2018, 2019; 金爱兵等, 2020; 苏占东等, 2024)。然而, 3D 打印技术的应用仍受到打印材料和打印工艺研发两方面的制约。打印材料的性能需要与打印工艺高度匹配, 才能实现理想的打印效果并满足物理模拟实验需求。目前, 3D 打印直接进行岩体模型试件制作所采用的打印材料主要有光敏树脂、粉末状材料和水泥基材料, 他们分别对应的技术是光固化技术、三维印刷技术和水泥基材料打印技术(王乐华等, 2023)。光固化技术对含缺陷类岩石试件制作精度高, 另外, 光敏树脂材料的透明性为试件受力破坏过程中模型介质中裂纹发展情况的可视化提供了便利, 但所采用的打印材料(光敏树脂)有毒性, 对防毒工作环境要求较高。三维印刷技术在进行一些缺陷岩石力学性能研究中发挥了重要作用, 但是, 三维印刷技术制得的岩石试件在力学性能上和天然岩石试件有一定的差距, 强度普遍较低, 因此只适用于软岩模拟。图 13 所示为采用三维印刷技术制得试件与天然岩石试件力学性能的对比, 力学性能基本吻合。水泥基材料打印技术目前在岩石力学试验中应用较少, 对此方法的应用尚未开展深入研究。

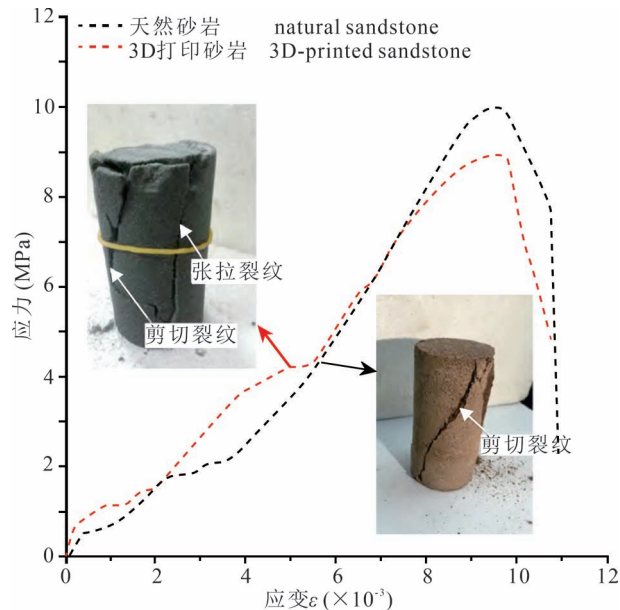


图 13 单轴压缩条件下 3D 打印砂岩和天然砂岩力学性能对比 (据田威等, 2022 修改)

Fig. 13 Comparison of mechanical properties between 3D printed sandstone and natural sandstone under uniaxial compression conditions (modified from Tian Wei et al., 2022&)

3 结论与展望

岩体结构面是控制岩体稳定性的重要因素, 在工程岩体研究中, 按岩体结构面类型选择合适的预制方法制作含结构面模型试件, 还原自然岩体结构、体现原位岩体本质特征至关重要。参考迄今为止对工程岩体结构面研究的大量文献, 从中提炼、归纳总结岩体物理模型试件中结构面的制作方法, 将岩体模型结构面预制方法分为传统方法和新型方法。传统方法包括切割法和劈裂法; 新型方法包括预埋法、薄片抽条法、3D 打印法和倒模法。切割法和薄片抽条法适用于平直无填充结构面的预制; 劈裂法、倒模法适用于粗糙起伏无填充结构面预制; 在抽条法中, 利用具有不同表面形态的薄片也可以制得粗糙起伏形态不同的结构面; 在前两种结构面预制方法基础上, 在预制结构面中填充符合研究目的的充填材料, 即可制成填充型预制结构面。3D 打印可适用于各类结构面的预制。对上述结构面预制方法总结如下:

(1) 传统结构面预制方法因其工艺成熟、可操作性强且经济成本低, 仍广泛应用于岩体宏观力学特性研究中。尽管存在结构面精度控制的局限性, 但在含缺陷岩体研究中仍具参考价值。相比之下, 创新预制方法通过提供更加灵活的实验条件, 能够更好地模拟复杂工况, 提高实验的真实性和可靠性。基于创新方法衍生的技术, 为岩体物理模拟的精确度和应用范围提供了新的可能, 逐渐成为研究中的重要方向。

(2) 在实际工程岩体物理模拟试验中, 结构面预制方法的选择对试验结果的可靠性具有重要影响。因此, 在开展试验之前, 必须明确研究目标, 并深入分析与之相关的工程背景及场地特征。基于这些分析, 合理选择适合的结构面预制方法是确保试验精度和结果代表性的关键。不同的预制方法在模拟真实岩体行为时具有不同的适应性和局限性, 因此, 必须综合考虑试验目的、工程环境、材料特性等多方面因素, 以确保所得结论对实际工程具有较高的参考价值和可操作性。

(3) 3D 打印技术在岩体力学实验中的应用为进行含缺陷岩石试件预制提供了新思路、新方法。结构面 3D 打印制作具有快速、高效和精确等优势, 特别是对于粗糙结构面的制作, 3D 打印技术优势是传统方法无法企及的。但受制于当前打印材料和打印技术水平, 3D 打印技术可以模拟的岩石类型还比

较少。寻求更为合适的打印材料将是3D打印技术在岩体力学实验领域得以更广泛应用的关键。更为先进的图像信息采集技术(譬如,CT扫描、DIC技术、三维扫描技术或变形测量技术等)与3D打印技术相结合,将会大大提高含缺陷岩体试件的预制精度和仿真度。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

曹秋菊,王金安. 2012. 断裂岩石粗糙性与岩体抗剪强度和机理的实验研究. 中国矿业, 21(5): 107~111.

柴少波,王昊,井彦林,贾能. 2020. 充填节理岩石累积损伤动力压缩特性试验研究. 岩石力学与工程学报, 39(10): 2025~2037.

陈超,王伟,许高杰,褚卫江,汪涛,朱其志. 2022. 考虑不同节理倾角和贯通率的类岩材料单轴压缩试验. 河海大学学报(自然科学版), 50(5): 124~130+146.

陈冀渝. 2015. 石材切割机的圆盘锯自控系统. 石材, (4): 30~32.

陈世江,朱万成,于庆磊,王青元. 2015. 基于多重分形特征的岩体结构面剪切强度研究. 岩土力学, 36(3): 703~710+718.

陈新,廖志红,李德建. 2011. 节理倾角及连通率对岩体强度、变形影响的单轴压缩试验研究. 岩石力学与工程学报, 30(4): 781~789.

董星辰. 2022. 岩桥角度对断续双裂隙砂岩蠕变特性影响试验研究. 导师:杨超,赵二平. 宜昌:三峡大学硕士学位论文:1~90.

方逸瞳. 1990. 含砂水力切割技术. 机床, (6): 33~36+7.

付红亮. 2019. 裂隙数量对低强度岩体力学特性及破坏模式影响的试验研究. 煤矿现代化, 28(6): 131~135.

郭婧宇,蒲成志,贺桂成,李益龙,杨少峰,曾佳君. 2020. 静态—准静态加载下含裂隙类岩材料破断试验及声发射特性分析. 黄金科学技术, 28(6): 877~884.

郭彦双,黄凯珠,朱维申,周锦添,李术才. 2007. 辉长岩中张开型表面裂隙破裂模式研究. 岩石力学与工程学报, 26(3): 525~531.

侯迪. 2016. 岩石节理抗剪强度与渗透特性试验研究. 导师:周创兵,荣冠. 武汉:武汉大学博士学位论文:1~127.

胡建华,高宏伟,薛小蒙,周科平. 2017. 岩体结构面对爆炸冲击工程响应的影响. 中南大学学报(自然科学版), 48(6): 1560~1567.

黄达,金华辉,黄润秋. 2011. 拉剪应力状态下岩体裂隙扩展的断裂力学机制及物理模型试验. 岩土力学, 32(4): 997~1002.

黄帆. 2021. 裂隙岩体渗流传热耦合演化机理及其连通性评价. 导师:周创兵,姚池. 南昌:南昌大学博士学位论文:1~187.

黄凯珠,林鹏,唐春安,周锦添. 2002. 双轴加载下断续预置裂纹贯通机理的研究. 岩石力学与工程学报, 21(6): 808~816.

江权,宋磊博. 2018. 3D打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望. 岩石力学与工程学报, 37(1): 23~37.

姜广辉. 2018. 高温处理后岩石内部结构演化及波速渗透率关系研究. 导师:黎立云. 北京:中国矿业大学(北京)博士学位论文:1~143.

蒋宇静,张孙豪,栾恒杰,王长盛,王冬,韩伟. 2022. 剪切载荷作用下岩体结构面动态接触特征数值模拟. 煤炭学报, 47(1): 233~245.

金爱兵,王树亮,王本鑫,孙浩,赵怡晴. 2020. 基于DIC技术的3D打印节理试件破裂机制研究. 岩土力学, 41(10): 3214~3224.

李宏哲,夏才初,王晓东,周济芳,张春生. 2008. 含节理大理岩变形和强度特性的试验研究. 岩石力学与工程学报, 27(10): 2118~2123.

李力,林睦曾,刘康敏,饶帮华. 1990. 岩石受热后的强度、变形破坏特性的微观研究. 岩土力学, 11(4): 51~61.

李明田,邵东亮. 2012. 裂隙制作方式及充填情况对表面裂隙扩展规律的影响. 山东交通学院学报, 20(1): 67~70+86.

李鹏,周佳,李振. 2018. 爆炸应力波在层状节理岩体中传播规律及数值模拟. 长江科学院院报, 35(5): 97~102.

李小彤,王者超,刘泉声,王秀凯,卜泽华,张诺亚. 2017. 地下水封油库地质条件适宜性标准与应用研究. 地质论评, 63(S1): 355~356.

刘彬,聂德新. 2006. 断层泥强度参数与含水率关系研究. 岩土工程学报, 28(12): 2164~2167.

刘松玉. 1993. 节理粗糙度的分维测定法. 勘察科学技术, (6): 26~29.

刘婷婷,李新平,李海波,李建春,罗忆. 2016. 应力波在充填节理岩体中传播规律的数值研究. 岩石力学与工程学报, 35(S2): 3552~3560.

刘溪鸽,朱万成,周靖人,关凯. 2017. 双粗糙结构面剪切试验与数值模拟研究. 岩石力学与工程学报, 41(12): 2377~2388.

刘新荣,王奕,许彬,周小涵,易立,黄俊辉,王子娟. 2022. 消落带劣化下含锯齿状结构面岩质边坡动力响应机制研究. 岩石力学与工程学报, 41(12): 2377~2388.

刘阳,雍睿,沈飞,田钱钱. 2022. 类岩石试件裂隙厚度和角度对其力学特性的影响研究. 绍兴文理学院学报, 42(10): 26~34.

卢海峰,朱晨东,刘泉声. 2021. 不同注浆材料作用下结构面剪切力学特性研究. 岩石力学与工程学报, 40(9): 1803~1811.

鲁祖德,丁梧秀,冯夏庭,张友良. 2008. 裂隙岩石的应力-水流-化学耦合作用试验研究. 岩石力学与工程学报, 27(4): 796~804.

陆家炜. 2019. 基于3D打印技术的节理岩石试件力学特性试验及颗粒流模拟. 导师:杨圣奇. 徐州:中国矿业大学硕士学位论文:1~128.

潘浩楠,赵建军,贺建先,史彦兵. 2024. 构造混杂岩带软弱基座型滑坡形成机制研究——以白格滑坡为例. 人民长江, 1~20. [2024-12-13]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20241126.0924.002>.

裴志茹. 2019. 基于CT扫描及3D打印技术裂隙岩体试样力学特性研究. 导师:田威. 西安:长安大学硕士毕业论文:1~74.

齐群,包含,兰恒星,晏长根,张科科. 2019. 断层泥剪切力学行为与应变软化特征研究. 工程地质学报, 27(5): 1101~1109.

高明慧,于帆帆. 2016. 3D打印技术的应用与发展探究. 价值工程, 35(7): 166~167.

盛建龙. 2002. 岩体结构面力学特征及地下工程结构稳定性的研究. 导师:朱瑞庚. 武汉:武汉理工大学博士毕业论文:1~160.

盛金昌,李凤滨,姚德生,黄青富,宋会彬,詹美礼. 2012. 渗流—应力—化学耦合作用下岩石裂隙渗透特性试验研究. 岩石力学与工程学报, 31(5): 1016~1025.

施炎,王团乐,宛良朋,孙旭曙,左小鹏,郭晓萍. 2024. 干湿循环作用下裂隙岩体渗流特性演化规律研究. 人民长江, 55(7): 198~203.

舒付军,符文熹,魏玉峰,夏伟. 2018. 部分充填周期性裂隙岩体渗流理论分析与试验. 湖南大学学报(自然科学版), 45(1): 114~120.

- 苏占东, 王鸷文, 孙进忠, 张建勇, 梁金平, 牛耀, 张之泰, 曾扬农, 李梦园. 2024. 地质力学模型实验中变形量测方法的应用研究. 地质论评, 70(1): 287~308.
- 苏占东, 周思哲, 王成虎, 孙进忠, 曾扬农, 张建勇, 张明磊, 王磊, 朱卓辉, 李小瑞. 2023. 工程岩体物理模拟研究中实验材料的选择与应用. 地质论评, 69(3): 1133~1149.
- 孙冰, 邹春海, 曾晟, 方耀楚, 王富林. 2018. 不同裂隙形式类岩体单轴压缩破坏特征研究. 防灾减灾工程学报, 38(6): 959~966.
- 谭皓, 宋勇军, 郭玺玺, 孟凡栋, 韩冬阳, 孙银伟. 2022. 冻融裂隙砂岩细观损伤与应变局部化研究. 岩石力学与工程学报, 41(12): 2485~2496.
- 田威, 余宸, 王肖辉, 吴鹏飞. 2022. 3D打印裂隙岩体动态力学性能及能量耗散规律初探. 岩石力学与工程学报, 41(3): 446~456.
- 田威, 余宸, 张丽. 2021. 3D打印技术在岩石力学中的应用. 力学与实践, 43(2): 181~189.
- 王本鑫, 金爱兵, 赵怡晴, 王贺, 孙浩, 刘佳伟, 魏余栋. 2019. 基于CT扫描的含非贯通节理3D打印试件破裂规律试验研究. 岩土力学, 40(10): 3920~3927+3936.
- 王辉, 李勇, 曹树刚, 潘瑞凯, 杨红运, 张克文, 刘延保. 2020. 含预制裂隙黑色页岩裂纹扩展过程及宏观破坏模式巴西劈裂试验研究. 岩石力学与工程学报, 39(5): 912~926.
- 王金安, 谢和平. 1998. 岩石断裂面的各向异性分形和多重分形研究. 岩土工程学报, 20(6): 16~21.
- 王乐华, 柏俊磊, 孙旭曙, 李建林, 汤开宇, 邓华锋. 2015. 不同连通率节理岩体三轴加卸荷力学特性试验研究. 岩石力学与工程学报, 34(12): 2500~2508.
- 王乐华, 胡永搏, 付寅韬, 李建林, 许晓亮. 2023. 3D打印技术在岩石力学试验中的应用与展望. 土木工程学报, 56(11): 137~154.
- 王培涛, 刘雨, 章亮, 黄正均, 蔡美峰. 2018. 基于3D打印技术的裂隙岩体单轴压缩特性试验初探. 岩石力学与工程学报, 37(2): 364~373.
- 王强, 冯强. 2020. 采用预制结构面试件模拟含天然结构面辉绿岩的实验. 现代矿业, 36(12): 72~76.
- 王强, 赵鑫, 王继野. 2021. 含不同角度预制结构面试件声发射信号特征与规律. 中国矿业, 30(10): 168~174.
- 肖维民, 黄巍, 丁蜜, 李志坚. 2018. 基于3D打印技术的模拟柱状节理岩体试样制备方法. 岩土工程学报, 40(S2): 256~260.
- 谢璨, 高有湖, 李树忱, 陈元培. 2020. 预制裂隙岩石渐进破坏特性的光弹性试验研究. 实验力学, 35(5): 935~942.
- 谢礼焕, 刘贺娟, 班胜男, 冒海军, 夏德斌, 宋宇家, 童荣琛, 应琪祺. 2023. 不同组分断层层的剪切特性试验研究. 岩土力学, 44(9): 2545~2554.
- 熊祖强, 江权, 龚彦华, 宋磊博, 崔洁. 2015. 基于三维扫描与打印的岩体自然结构面试样制作方法与剪切试验验证. 岩土力学, 36(6): 1557~1565.
- 徐树媛, 张永波, 相兴华, 陈佩, 吴艾静. 2022. 采空区裂隙岩体渗流特征及渗透性试验研究. 煤矿安全, 53(4): 36~44.
- 许江, 雷娇, 刘义鑫, 郭宇宇. 2019. 充填物性质影响结构面剪切特性试验研究. 岩土力学, 40(11): 4129~4137.
- 杨圣奇, 戴永浩, 韩立军, 贺永年, 李玉寿. 2009. 断续预制裂隙脆性大理岩变形破坏特性单轴压缩试验研究. 岩石力学与工程学报, 28(12): 2391~2404.
- 杨圣奇. 2013. 断续三裂隙砂岩强度破坏和裂纹扩展特征研究. 岩土力学, 34(1): 31~39.
- 杨阳, 杨仁树, 王建国. 2016. 节理厚度对岩石动力特性影响的模拟试验. 中国矿业大学学报, 45(2): 211~216+309.
- 杨志东. 2020. 基于3D打印技术类岩石结构面剪切强度的研究. 导师: 陈世江. 包头: 内蒙古科技大学硕士毕业论文: 1~70.
- 易婷, 唐建新, 王艳磊. 2021. 裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响. 地下空间与工程学报, 17(1): 98~106+134.
- 殷志强, 马凯莉, 吴昊原, 刘贤, 高路路, 王超. 2024. 动静载作用下充填节理砂岩应力波传播特性研究. 应用力学学报, 41(2): 432~442.
- 张更鑫, 康天合, 刘云飞. 2023. 填充节理对爆炸应力波传播的影响规律研究. 矿业研究与开发, 43(12): 40~46.
- 张宁博, 许乾海, 欧阳振华, 李一哲, 史庆稳, 秦洪岩, 易海洋. 2024. 煤矿开采激发应力波扰动下逆冲断层失稳机理. 煤田地质与勘探, 52(10): 36~46.
- 张平, 李宁, 贺若兰, 徐建光. 2006. 动载下两条断续预制裂隙贯通机制研究. 岩石力学与工程学报, 25(6): 1210~1217.
- 张学俊. 1989. 水切割技术. 焊接技术, (4): 44~45.
- 赵程, 刘丰铭, 田加深, 松田浩, 森田千寻. 2016. 基于单轴压缩试验的岩石单裂纹扩展及损伤演化规律研究. 岩石力学与工程学报, 35(S2): 3626~3632.
- 赵敬波, 周志超, 潘跃龙, 叶浩, 吴群, 郭永海, 李杰彪, 付馨雨. 2023. 基于NSMC方法的某核工程场地裂隙地下水数值模拟不确定分析. 地质论评, 69(2): 625~638.
- 赵茂春, 余先川, 王泽传, 朱延浙, 常开永, 姚金昌, 杨柳扬. 2017. 地质体组合构造分析方法与找矿. 地质论评, 63(6): 1535~1548.
- 周辉, 程广坦, 朱勇, 张春生, 卢景景, 张传庆, 章颖辉. 2019. 基于3D雕刻技术的岩体结构面剪切各向异性研究. 岩土力学, 40(1): 118~126.
- 周世威, 郑超, 刘莹, 王进保, 苏钰, 程煜. 2012. 金刚石线锯切割设备现状分析. 超硬材料工程, 24(3): 49~52.
- 周维垣, 杨延毅. 1990. 节理岩体的损伤断裂力学模型及其在坝基稳定分析中的应用. 水利学报, 21(11): 48~54.
- Aziznejad S, Esmaili K, Hadjigeorgiou J, Labrie D. 2018. Responses of jointed rock masses subjected to impact loading. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 10(4): 624~634.
- Barton N, Choubey V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics, 10(1): 1~54.
- Barton N. 1973. Review of a new shear-strength criterion for rock joints. Engineering Geology, 7(4): 287~332.
- Cao Qiuju, Wang Jin'an. 2012. Experimental study on roughness and long shear strength of fracture rock. China Mining Magazine, 21(5): 107~111.
- Chai Shaobo, Tian Wei, Yu Liyuan, Wang Hao. 2020. Numerical study of ground vibrations caused by cylindrical wave propagation in a rock mass with a structural plane. Shock and Vibration, 2020(1): 4681932.
- Chai Shaobo, Wang Hao, Jing Yanlin, Jia Neng. 2020. Experimental study on dynamic compression characteristics of rock with filled joints after cumulative damage. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(10): 2025~2037.
- Chen Chao, Wang Wei, Xu Gaojie, Chu Weijiang, Wang Tao, Zhu Qizhi. 2022. Uniaxial compression test of rock-like material considering different joint inclinations and penetration rates. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 50(5): 124~130+146.
- Chen Jiyu. 2015. Automatic control system of circular saw for stone cutting machine. Stone, (4): 30~32.
- Chen Shijiang, Zhu Wancheng, Yu Qinglei, Wang Qingyuan. 2015. Shear strength research on rock joint surfaces based on multifractal

- theory. *Rock and Soil Mechanics*, 36(3): 703~710+718.
- Chen Xin, Liao Zhihong, Li Dejian. 2011&. Experimental study of effects of joint inclination angle and connectivity rate on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(4): 781~789.
- Dong Xinchun. 2022&. Experimental Study on influence of rock bridge angle on creep characteristics of discontinuous double fissure sandstone. Supervisor: Yang Chao, Zhao Erping, Yichang: China Three Gorges University: 1~90.
- Du Yiteng, Li Tingchun, Wang Binxu, Zhang Shilin, Li Hui, Zhang Hao, Zhu Qingwen. 2023. Experimental study on mechanical characteristics and permeability evolution during the coupled hydromechanical failure of sandstone containing a filled fissure. *Acta Geotechnica*, 18(8): 4055~4075.
- Fang Yitong. 1990#. Sand containing hydraulic cutting technology. *Machine Tool*, (6): 33~36+7.
- Fardin N, Feng Q, Stephansson O. 2004. Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(2): 329~335.
- Fardin N, Stephansson O, Jing Lanru. 2001. The scale dependence of rock joint surface roughness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(5): 659~669.
- Fu Hongliang. 2019&. Experimental study on the effect of fracture number on mechanical properties and failure modes of low-strength rock mass. *Coal Mine Modernization*, 28(6): 131~135.
- Gong Chuangen, Wang Wei, Shao Jianfu, Wang Rubin, Feng Xiaowei. 2021. Effect of water chemical corrosion on mechanical properties and failure modes of pre-fissured sandstone under uniaxial compression. *Acta Geotechnica*, 16(4): 1083~1099.
- Guo Jingyu, Pu Chengzhi, He Guicheng, Li Yilong, Yang Shaofeng, Zeng Jiajun. 2020&. Fracture test of rock-like materials with cracks and analysis of acoustic emission characteristics at static—quasi-static loading rates. *Gold Science and Technology*, 28(6): 877~884.
- Guo Yanshuang, Huang Kaizhu, Zhu Weishen, Zhou Jintian, Li Shucui. 2007&. Study on fracture pattern of open surface-flaw in gabbro. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 525~531.
- Guo Yintong, Ying Qiqi, Wang Duocai, Zhang Hong, Huang Famu, Guo Haitao, Hou Lei, Xu Mingnan, Liu Hejuan, Xia Debin. 2022. Experimental study on shear characteristics of structural plane with different fluctuation characteristics. *Energies*, 15(20): 7563.
- Hou Di. 2016&. Experimental study on shear strength and permeability characteristics of rock joints. Supervisor: Zhou Chuangbing, Rong Guan. Wuhan: Wuhan University Doctoral Dissertation: 1~127.
- Hu Jianhua, Gao Hongwei, Xue Xiaomeng, Zhou Keping. 2017&. Influence of structural planes on response of explosion shock engineering. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 48(6): 1560~1567.
- Huang Da, Gu Dongming, Yang Chao, Huang Runqiu, Fu Guoyang. 2016. Investigation on mechanical behaviors of sandstone with two preexisting flaws under triaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(2): 375~399.
- Huang Da, Jin Huahui, Huang Runqiu. 2011&. Mechanism of fracture mechanics and physical model test of rocks crack expanding under tension—shear stress. *Rock and Soil Mechanics*, 32(4): 997~1002.
- Huang Fan. 2021&. Coupling evolution mechanism of seepage and heat transfer in fractured rock mass and its connectivity evaluation. Supervisor: Zhou Chuangbing, Yao Chi. Nanchang: Nanchang University Doctoral Dissertation: 1~187.
- Huang Kaizhu, Lin Peng, Tang Chun'an, Zhou Jintian. 2002&. Mechanisms of crack coalescence of pre-existing flaws under biaxial compression. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(6): 808~816.
- Huang Runqiu. 2011. Mechanism of fracture mechanics and physical model test of rocks crack expanding under tension—shear stress. *Rock and Soil Mechanics*, 32(4): 997~1002.
- Huang Yanhua, Yang Shengqi, Tian Wenling, Zeng Wei, Yu Liyuan. 2016. An experimental study on fracture mechanical behavior of rock-like materials containing two unparallel fissures under uniaxial compression. *Acta Mechanica Sinica*, 32(3): 442~455.
- Jiang Chao, Zhao Gaofeng, Zhu Jianbo, Zhao Yixin, Shen Luming. 2016. Investigation of dynamic crack coalescence using a gypsum-like 3D printing material. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(10): 3983~3998.
- Jiang Chao, Zhao Gaofeng. 2015. A preliminary study of 3D printing on rock mechanics. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(3): 1041~1050.
- Jiang Guanghui. 2018&. Study on the relationship between internal structure evolution and wave velocity permeability of rock after high temperature treatment. Supervisor: Li Liyun. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing Doctoral Dissertation: 1~143.
- Jiang Quan, Song Leibo. 2018&. Application and prospect of 3D printing technology to physical modeling in rock mechanics. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(1): 23~37.
- Jiang Yujing, Zhang Sunhao, Luan Hengjie, Wang Changsheng, Wang Dong, Han Wei. 2022&. Numerical simulation on the 3D surface dynamic contact characteristics of rock discontinuity subject to shear loading. *Journal of China Coal Society*, 47(1): 233~245.
- Jin Aibing, Wang Shuliang, Wang Benxin, Sun Hao, Zhao Yiqing. 2020&. Study on the fracture mechanism of 3D-printed-joint specimens based on DIC technology. *Rock and Soil Mechanics*, 41(10): 3214~3224.
- Jing Hongwen, Yang Shengqi, Zhang Maolin, Xu Guo'an, Cheng Kunfu. 2014. An experimental study on anchorage strength and deformation behavior of large-scale jointed rock mass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43: 184~197.
- Johansson F. 2016. Influence of scale and matedness on the peak shear strength of fresh, unweathered rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 82: 36~47.
- Ju Yang, Xie Heping, Zheng Zemin, Lu Jinbo, Mao Lingtao, Gao Feng, Peng Ruidong. 2014. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology. *Chinese Science Bulletin*, 59(36): 5354~5365.
- Kawamoto T, Ichikawa Y, Kyoya T. 1988. Deformation and fracturing behaviour of discontinuous rock mass and damage mechanics theory. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 12(1): 1~30.
- Lai Qiyi, Zhao Jianjun, Shi Bin, Liu Haofang, Ji Lan, Li Qingmiao, Huang Runqiu. 2023. Deformation evolution of landslides induced by coal mining in mountainous areas: Case study of the Madaling landslide, Guizhou, China. *Landslides*, 20(9): 2003~2016.

- Lee Y H, Carr J R, Barr D J, Haas C J. 1990. The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 27(6): 453~464.
- Lei Daxing, Hu Haixiang, Chen Yifan, Lin Hang, Zhang Chaomei, Wang Guangli, Lu Zhigang, Zhang Yaoping. 2023. Study on the damage model of non-persistent jointed rock mass under the coupling of freeze—thaw and shear. *Materials*, 16(8): 3041.
- Lei Guangfeng, Liu Quansheng, Peng Xingxin, Wei Lai. 2020. Experimental study on mechanical properties of fractured rock mass under different anchoring modes. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(7): 931~948.
- Li Hongzhe, Xia Caichu, Wang Xiaodong, Zhou Jifang, Zhang Chunsheng. 2008&. Experimental study on deformation and strength properties of jointed marble specimens. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(10): 2118~2123.
- Li Jianchun, Rong Lifan, Li Haibo, Hong Shuna. 2019. An SHPB test study on stress wave energy attenuation in jointed rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(2): 403~420.
- Li Li, Lin Muzeng, Liu Kangmin, Rao Banghua. 1990&. Microscopic study on the strength, deformation and fracture characteristics of rocks after heated. *Rock and Soil Mechanics*, 11(4): 51~61.
- Li Mengyuan, Su Zhandong, Zang Mingdong, Liu Xiaoli, Wang Yu, Wang Zhiwen, Lu Xianxiu. 2024. Effect of loading rate on local deformation of rock-like models with locked segment. *Journal of Materials Research and Technology*, 33: 2868~2878.
- Li Mingtian, Shao Dongliang. 2012&. The influence of crack making modes and fillings on crack propagation. *Journal of Shandong Jiaotong University*, 20(1): 67~70+86.
- Li Peng, Zhou Jia, Li Zhe. 2018&. Blasting stress wave in layered jointed rock mass; Propagation law and numerical simulation. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 35(5): 97~102.
- Li Su, Lin Hang, Feng Jingjing, Cao Rihong, Hu Huihua. 2022. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of anchored structure plane with different JRC under direct shear test. *Materials*, 15(12): 4169.
- Li Xiaotong, Wang Zhechao, Liu Quansheng, Wang Xiukai, Bu Zehua, Zhang Nuoya. 2017&. Study on suitability standard and application of geological conditions for underground water-sealed oil depot. *Geological Review*, 63(S1): 355~356.
- Lin Chong, Mao Jinhua, Mao Jincheng, Yang Xiaojiang, Chen An, Zhao Jinzhou. 2022. Experimental study on the strength and failure mechanism of hollow hot dry rocks under Brazilian splitting tests. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(9): 11125~11134.
- Liu Bin, Nie Dexin. 2006&. Study on relation between strength parameter and water content of gouge. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 28(12): 2164~2167.
- Liu Songyu. 1993&. Fractional dimension method of jrc measurement. *Site Investigation Science and Technology*, (6): 26~29.
- Liu Tingting, Li Xinping, Li Haibo, Li Jianchun, Luo Yi. 2016&. Numerical study on propagation law of stress wave in jointed rock mass. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(S2): 3552~3560.
- Liu Xige, Zhu Wancheng, Zhou Jingren, Guan Kai. 2017&. Direct shear tests and numerical simulation of double rough joints. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(12): 2377~2388.
- Liu Xinrong, Xu Bin, Zhou Xiaohan, Yi Li, Huang Junhui, Wang Zijuan. 2022&. Investigation on dynamic response mechanism of slopes with serrated structural planes under degradation of rock mass in hydro-fluctuation belt. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(12): 2377~2388.
- Liu Yang, Yong Rui, Shen Fei, Tian Qianqian. 2022&. Influence of crack thickness and angles on mechanical properties of rock-like specimens. *Journal of Shaoying University*, 42(10): 26~34.
- Lu Haifeng, Zhu Chendong, Liu Quansheng. 2021&. Study on shear mechanical properties of structural planes grouted with different materials. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(9): 1803~1811.
- Lu Jiawei. 2019&. Mechanical properties test and particle flow simulation of jointed rock samples based on 3D printing technology. Supervisor: Yang Shengqi. Xuzhou: China University of Mining and Technology Master Thesis: 1~128.
- Lu Zude, Ding Wuxiu, Feng Xiating, Zhang Youliang. 2008&. Experimental study on mechano—hydro—chemical coupling process in cracked rocks. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(4): 796~804.
- Maerz N H, Franklin J A, Bennett C P. 1990. Joint roughness measurement using shadow profilometry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 27(5): 329~343.
- Morrow C A, Moore D E, Lockner D A. 2001. Permeability reduction in granite under hydrothermal conditions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B12): 30551~30560.
- Niu Yao, Su Zhandong, Sun Jinzhong, Zhang Hao, Zhang Minglei, Wang Lei, Zhang Jianyong. 2023. Influence of the strength of rock-like models on the local deformation field and acoustic emission characteristics. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(8): 334.
- Pan Haonan, Zhao Jianjun, He Jianxian, Shi Yanbing. 2024&. Study on the formation mechanism of soft base landslide in tectonic melange zone—A case study of Baige landslide. *China Industrial Economics*, 1~20. [2024-12-13]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20241126.0924.002>.
- Paola C, Straub K, Mohrig D, Reinhardt L. 2009. The “unreasonable effectiveness” of stratigraphic and geomorphic experiments. *Earth-Science Reviews*, 97(1~4): 1~43.
- Pei Zhiru. 2019&. Mechanical characteristic experiment and particle flow code of jointed rock samples based on 3D printing technology. Supervisor: Tian Wei. Xi'an: Master's thesis from Chang'an University: 1~74.
- Qi Qun, Bao Han, Lan Hengxing, Yan Changgen, Zhang Keke. 2019&. Behavior of shearing mechanics and characteristics of strain softening of fault gouge. *Journal of Engineering Geology*, 27(5): 1101~1109.
- Reber J E, Cooke M L, Dooley T P. 2020. What model material to use? A review on rock analogs for structural geology and tectonics. *Earth-Science Reviews*, 202: 103107.
- Reyes O, Einstein H H. 1991. Failure mechanisms of fractured rock—A fracture coalescence model. *ISRMCONGRESS-1991-066*. DOI:<http://dx.doi.org/>.
- Shang Minghui, Yu Fanfan. 2016&. On the application and development of 3D printing technology. *Value Engineering*, 35(7): 166~167.
- Sharafisafa M, Shen Luming, Xu Qingfeng. 2018. Characterisation of mechanical behaviour of 3D printed rock-like material with digital

- image correlation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 112: 122~138.
- Sharafisafa M, Shen Luming, Zheng Yonggang, Xiao Jianzhuang. 2019. The effect of flaw filling material on the compressive behaviour of 3D printed rock-like discs. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 117: 105~117.
- Shen Baotang, Stephansson O, Einstein H H, Ghahreman B. 1995. Coalescence of fractures under shear stresses in experiments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B4): 5975~5990.
- Sheng Jianlong. 2002&. Study of mechanical properties of rock mass structural plane and structural stability of underground construction. Supervisor: Zhu Ruigeng. Wuhan: Doctoral dissertation from Wuhan University of Technology: 1~160
- Sheng Jinchang, Li Fengbin, Yao Desheng, Huang Qingfu, Song Huibin, Zhan Meili. 2012. Experimental study of seepage properties in rocks fracture under coupled hydro-mechanochemical process. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(5): 1016~1025.
- Shi Yan, Wang Tuanle, Wan Liangpeng, Sun Xushu, Zuo Xiaopeng, Guo Xiaoping. 2024&. Seepage characteristics of fractured rock mass under dry—wet cycling action. *Yangtze River*, 55(7): 198~203.
- Shu Fujun, Fu Wenxi, Wei Yufeng, Xia Wei. 2018&. Theoretical analysis and experiment on seepage of rock mass containing periodic fractures with partial filling. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 45(1): 114~120.
- Singh H K, Basu A. 2018. Evaluation of existing criteria in estimating shear strength of natural rock discontinuities. *Engineering Geology*, 232: 171~181.
- Su Zhandong, Wang Zhiwen, Sun Jinzhong, Zhang Jianyong, Liang Jinping, Niu Yao, Zhang Zhitai, Zeng Yangnong, Li Mengyuan. 2024&. A review of the application of deformation measurement methods in geomechanical model experiments. *Geological Review*, 70(1): 287~308.
- Su Zhandong, Zhou Sizhe, Wang Chenghu, Sun Jinzhong, Zeng Yangnong, Zhang Jianyong, Zhang Minglei, Wang Lei, Zhu Zhuohui, Li Xiaorui. 2023&. A review of the selection and application of experimental materials in the study of physical simulation of engineering rock masses. *Geological Review*, 69(3): 1133~1149.
- Su Zhandong, Zhou Sizhe, Zang A, Sun Jinzhong, Zhang Tao, Niu Yao, Zhang Jianyong, Liang Jinping. 2024. Analysis of near-field stresses in an analogue strike-slip fault model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(4): 2739~2754.
- Sun Bing, Zou Chunhai, Zeng Sheng, Fang Yaochu, Wang Fulin. 2018&. Failure characteristics of rock-like mass with different fracture types under uniaxial compression. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 38(6): 959~966.
- Tan Hao, Song Yongjun, Guo Xixi, Meng Fandong, Han Dongyang, Sun Yinwei. 2022&. Research on meso-damage and strain localization of fractured sandstone after freeze—thaw cycles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(12): 2485~2496.
- Tang Yi, Lin Hang, Cao Rihong, Sun Shuwei, Zha Wenhua. 2023. Role of rock sections in intermittent joints in controlling rock mass strength and failure modes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56(7): 5203~5221.
- Teng Mingyang, Bi Jing, Zhao Yu, Wang Chaolin. 2023. Experimental study on shear failure modes and acoustic emission characteristics of rock-like materials containing embedded 3D flaw. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 124: 103750.
- Tian Wei, Yu Chen, Wang Xiaohui, Wu Pengfei. 2022&. A preliminary research on dynamic mechanical properties and energy dissipation rule of 3D printed fractured rock. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(3): 446~456.
- Tian Wei, Yu Chen, Zhang Li. 2021&. Applications of 3d printing technology in rock mechanics. *Mechanics in Engineering*, 43(2): 181~189.
- Tse R, Cruden D M. 1979. Estimating joint roughness coefficients. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 16(5): 303~307.
- Wang Benxin, Jin Aibing, Zhao Yiqing, Wang He, Sun Hao, Liu Jiawei, Wei Yudong. 2019&. Fracture law of 3D printing specimen with non-consecutive joints based on CT scanning. *Rock and Soil Mechanics*, 40(10): 3920~3927+3936.
- Wang Hui, Li Yong, Cao Shugang, Pan Ruikai, Yang Hongyun, Zhang Kewen, Liu Yanbao. 2020&. Brazilian splitting test study on crack propagation process and macroscopic failure mode of pre-cracked black shale. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(5): 912~926.
- Wang Jin'an, Xie Heping. 1998&. On anisotropic fractal and multi fractal properties of rock fracture surfaces. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 20(6): 19~24.
- Wang Lehua, Bai Junlei, Sun Xushu, Li Jianlin, Tang Kaiyu, Deng Huafeng. 2015&. The triaxial loading and unloading mechanical properties of jointed rock masses with different joint connectivities. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(12): 2500~2508.
- Wang Lehua, Hu Yongbo, Fu Yintao, Li Jianlin, Xu Xiaoliang. 2023&. Application and prospect of 3D printing technology in rock mechanics test. *China Civil Engineering Journal*, 56(11): 137~154.
- Wang Peitao, Liu Yu, Zhang Liang, Huang Zhengjun, Cai Meifeng. 2018&. Preliminary experimental study on uniaxial compressive properties of 3D printed fractured rock models. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(2): 364~373.
- Wang Qiang, Feng Qiang. 2020&. Experimental study on diabase with natural structural plane based on prefabricated specimen. *Modern Mining*, 36(12): 72~76.
- Wang Qiang, Zhao Xin, Wang Jiye. 2021&. Characteristics and rules of acoustic emission signal of prefabricated structure with different angles. *China Mining Magazine*, 30(10): 168~174.
- Wang Tianlong, Chen Congxin, Xia Kaizong, Shao Yong, Liu Xuanting, Yang Kuoyu. 2023. Ground movement in the hanging wall of underground iron mines with steeply dipping discontinuities: A case study. *Arabian Journal for Science and Engineering*: 1~24.
- Wei Jihong, Men Yan, Sun Shaorui, Le Huilin, Zhu Feng. 2018. Experimental study on 3D roughness and shear failure mechanism of rock mass discontinuity. *Advances in Civil Engineering*, 2018(1): 7358205.
- Wong R H C, Chau K T, Tang C A, Lin P. 2001. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws: Part I: Experimental approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7): 909~924.
- Wong R H C, Chau K T. 1998. Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(2): 147~164.

- Wu Zhijun, Wong L N Y. 2013. Elastic - plastic cracking analysis for brittle - ductile rocks using manifold method. *International Journal of Fracture*, 180(1) : 71~91.
- Xiao Weimin, Huang Wei, Ding Mi, Li Zhijian. 2018&. Method for preparing artificial columnar jointed rock mass specimens by using 3D printing technology. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 40(S2) : 256~260.
- Xie Can, Gao Youhu, Li Shuchen, Chen Yuanpei. 2020&. Photoelastic experimental study on progressive failure characteristics of fractured rock. *Journal of Experimental Mechanics*, 35(5) : 935~942.
- Xie Lihuan, Liu Hejuan, Ban Shengnan, Mao Haijun, Xia Debin, Song Yujia, Tong Rongchen, Ying Qiqi. 2023&. Experimental study on shear properties of fault gouge with different mineral compositions. *Rock and Soil Mechanics*, 44(9) : 2545~2554.
- Xiong Zuqiang, Jiang Quan, Gong Yanhua, Song Leibo, Cui Jie. 2015&. A method for preparing natural joints of rock mass based on 3D scanning and printing techniques and its experimental validation. *Rock and Soil Mechanics*, 36(6) : 1557~1565.
- Xu Jiang, Lei Jiao, Liu Yixin, Wu Junyu. 2019&. Experimental study on shear behavior of joints filled with different materials. *Rock and Soil Mechanics*, 40(11) : 4129~4137.
- Xu Shuyuan, Zhang Yongbo, Xiang Xinghua, Chen Pei, Wu Aijing. 2022&. Experimental study on seepage characteristics and permeability of fractured rock mass in goaf. *Safety in Coal Mines*, 53(4) : 36~44.
- Yan Shengqi. 2024. Study of strength failure and crack coalescence behavior of sandstone containing three pre-existing fissures. *Rock and Soil Mechanics*, .
- Yang Shengqi, Dai Yonghao, Han Lijun, He Yongnian, Li Yushou. 2009&. Uniaxial compression experimental research on deformation and failure properties of brittle marble specimen with pre-existing fissures. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(12) : 2391~2404.
- Yang Shengqi, Yang Diansen, Jing Honwen, Li Yihang, Wang S Y. 2012. An experimental study of the fracture coalescence behaviour of brittle sandstone specimens containing three fissures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(4) : 563~582.
- Yang Shengqi. 2013&. Study of strength failure and crack coalescence behavior of sandstone containing three pre-existing fissures. *Rock and Soil Mechanics*, 34(1) : 31~39.
- Yang Yang, Yang Renshu, Wang Jianguo. 2016&. Simulation material experiment on dynamic mechanical properties of jointed rock affected by joint thickness. *Journal of China University of Mining & Technology*, 45(2) : 211~216+309.
- Yang Zhidong. 2020&. Study on shear strength of rock-like structural planes based on 3D printing technology. Supervisor: Chen Shijiang. Baotou: Master's thesis from Inner Mongolia University of Science & Technology: 1~70.
- Yi Ting, Tang Jianxin, Wang Yanlei. 2021&. Effect of fracture dip angle and number on mechanical properties and failure modes of rock mass. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 17(1) : 98~106+134.
- Yin Peng, Wong R H C, Chau K T. 2014. Coalescence of two parallel pre-existing surface cracks in granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 68; 66~84.
- Yin Zhiming, Liu Xinrong, Yang Zhongping, Jiang Yuanwen, Zhao Yalong, Li Shiqi. 2020. Shear characteristics and failure mode of hard brittle marl with parallel discontinuous structural plane. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(10) : 8219~8229.
- Yin Zhiqiang, Ma Kaili, Wu Haoyuan, Liu Xian, Gao Lulu, Wang Chao. 2024&. Study on stress wave propagation characteristics of filled jointed sandstone under dynamic and static loading. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 41(2) : 432~442.
- Yu Liqiang, Yao Qiangling, Li Xuehua, Wang Weinan, Han Hao, Zhang Mengting. 2020. Experimental study of failure characteristics and fissure propagation in hydrous siltstone. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(13) : 527.
- Zhang Gengxin, Kang Tianhe, Liu Yunfei. 2023&. Study on the influence of filled joints on the propagation of explosion stress wave. *Mining Research and Development*, 43(12) : 40~46.
- Zhang Ningbo, Xu Qianhai, Ouyang Zhenhua, Li Yizhe, Shi Qingwen, Qin Hongyan, Yi Haiyang. 2024&. Mechanism of thrust fault slip under the disturbance of stress waves induced by coal mining. *Coal Geology & Exploration*, 52(10) : 36~46.
- Zhang Ping, Li Ning, Heruo Lan, Xu Jianguang. 2006&. Mechanism of fracture coalescence between two pre-existing flaws under dynamic loading. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(6) : 1210~1217.
- Zhang Xuejun. 1989#. *Waterjet Cutting*. *Welding Technology*, (4) : 44~45.
- Zhang Yuanchao, Jiang Yujing, Asahina D, Wang Changsheng. 2020. Experimental and numerical investigation on shear failure behavior of rock-like samples containing multiple non-persistent joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(10) : 4717~4744.
- Zhao Cheng, Liu Fengming, Tian Jiashen, Song Tianhao, Sen Tianqianxun. 2016&. Study on single crack propagation and damage evolution mechanism of rock-like materials under uniaxial compression. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(S2) : 3626~3632.
- Zhao Jingbo, Zhou Zhichao, Pan Yuelong, Ye Hao, Wu Qun, Guo Yonghai, Li Jiebiao, Fu Xinyu. 2023&. Uncertainty analysis for groundwater modeling in fracture rocks for the nuclear facility site based on null space Monte Carlo method. *Geological Review*, 69(2) : 625~638.
- Zhao Maochun, Yu Xianchuan, Wang Zechuan, Zhu Yanzhe, Chang Kaiyong, Yao Jinchang, Yang Liuyang. 2017&. Structural analysis method of geological body combination and mineral prospecting. *Geological Review*, 63(6) : 1535~1548.
- Zhou Hui, Cheng Guangtan, Zhu Yong, Zhang Chunsheng, Lu Jingjing, Zhang Chuanqing, Zhang Yinghui. 2019&. Anisotropy of shear characteristics of rock joint based on 3D carving technique. *Rock and Soil Mechanics*, 40(1) : 118~126.
- Zhou Shiwei, Zheng Chao, Liu Ying, Wang Jinbao, Su Yu, Cheng Yu. 2012&. The status analysis of diamond wire saw cutting equipment. *Superhard Material Engineering*, 24(3) : 49~52.
- Zhou Weiyuan, Yang Yanyi. 1990#. Damage and fracture mechanics model of jointed rock mass and its application in dam foundation stability analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 21(11) : 48~54.
- Zong Yijiang, Han Lijun, Han Guilei. 2011. Study on shear properties of rock structural plane by grouting reinforcement. *Advanced Materials Research*, 250~253: 1520~1526.

Review and prospect of prefabrication methods for structural planes in engineering rock mass physical models

SU Zhandong^{1, 2)}, LI Kunze¹⁾, SUN Jinzhong³⁾, LIU Xiaoli⁴⁾, LI Xiaorui^{1, 2)}, NIU Yao¹⁾, ZENG Yangnong¹⁾, LI Mengyuan¹⁾, WANG Zhiwen¹⁾

1) *Department of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe, Hebei, 065201;*

2) *Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe, Hebei, 065201;*

3) *School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing, 100083;*

4) *State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084*

Abstract: The presence of structural planes in rock masses weakens their mechanical properties, making them more prone to instability and failure under disturbances. In the study of the stability of engineering rock masses, it is crucial to restore the natural structure of rock masses and reflect the essential characteristics of in-situ rock masses. Physical simulation experiments, with advantages such as strong controllability, low cost, good continuity of results, and the ability to simulate complex working conditions, are widely used in the study of engineering rock masses containing structural planes. Therefore, this paper primarily summarizes the current methods for prefabricating structural planes in physical simulation experiments of engineering rock masses, analyzes the advantages and disadvantages of each method and their applicable engineering contexts, and provides insights for conducting physical simulation experiments on engineering rock masses with structural planes. This paper focuses on three common types of structural planes in engineering rock masses: planar, unfilled structural planes; rough, undulating, unfilled structural planes; and filled weak structural planes. Based on the types of rock masses with prefabricated structural planes, the methods are classified into traditional methods suitable for natural rocks and innovative methods suitable for rock-like materials. Traditional methods, being mature in process, remain favored by many researchers. Innovative methods, on the other hand, can be flexibly adjusted according to experimental conditions to meet various research needs, thereby leading to more technical pathways and holding potential for continuous evolution. When selecting a method, it is essential to consider the relevant engineering context and site characteristics to ensure the reliability of the experimental results. Among innovative methods, 3D printing technology demonstrates significant advantages in simulating complex structural planes in rock masses. However, the mechanical properties of specimens produced by 3D printing are still limited by the printing materials, resulting in certain discrepancies compared to real rocks. This limitation represents a technical challenge that needs to be addressed in the future.

Keywords: rock mass engineering; physical models test; structural plane; prefabrication method

Acknowledgements: This work was supported by the Spark Programs of China Earthquake Administration (No. XH24060A) and National Natural Science Foundation of China (No. 42372322)

First author and corresponding author: SU Zhandong, male, born in 1987, Ph. D., associate professor, is mainly engaged in tectonic stress field, fault activity and seismic resistance of geotechnical engineering; Email: szdchris@163.com

Manuscript received on: 2024-04-30; Accepted on: 2024-12-26; Published online on: 2025-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.01.021

Edited by: LIU Zhiqiang

