



工程岩体物理模拟研究中实验材料的选择与应用

苏占东^{1,2)}, 周思哲¹⁾, 王成虎³⁾, 孙进忠⁴⁾, 曾扬农¹⁾, 张建勇^{1,2)},
张明磊^{1,2)}, 王磊^{1,2)}, 朱卓辉^{1,2)}, 李小瑞^{1,2)}

1) 防灾科技学院地质工程学院, 河北廊坊, 065201;

2) 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室, 河北廊坊, 065201;

3) 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 地壳动力学重点实验室, 北京, 100085;

4) 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京, 100083

内容提要: 工程岩体物理模拟实验是岩体工程问题研究的重要方法, 其中物理模型材料的选择对于实验成功与否至关重要。为了提高岩体物理模拟的选材效率及实验准确性, 在总结前人大量工程岩体(边坡工程、地下工程和地基工程)物理模拟研究进展的基础上, 对不同类型的物理模拟模型材料应用情况进行综合分析。结果表明: 传统相似材料模拟软岩骨料最常用的是河砂和石英砂, 模拟硬岩骨料则是在河砂和石英砂的基础上进一步掺入重晶石粉用以调节级配及强度, 胶结剂通常都是水泥、石膏或者两者混合的复合材料; 新型相似材料的选用更多是根据所需解决的问题进行设计, 常采用铁粉、熔融石英砂及陶瓷等作为骨料, 高分子聚合物、酒精和松香等作为胶结剂。整体而言物理模拟实验材料的骨料粒径越大, 强度也越大, 但是相似模拟中不能使用粒径过大的骨料; 材料的强度随着砂胶比的增大而减小。研究不同工程对象时还需根据其自身特点进行实验设计, 在研究显著节理裂隙等对岩体破坏机制的影响时, 需掺加煤粉、云母碎、珍珠岩以及发泡剂等辅助材料, 以控制试样的节理、微裂隙、结构面和孔洞等。笔者等对工程岩体物理模拟实验材料的分析综述可为相关工程岩体物理模拟研究提供实验参考。

关键词: 工程岩体; 物理模拟; 相似性准则; 实验材料

岩体是指由不同岩性的岩块和不同规模、不同类型的结构面组成的地质体(刘佑荣等, 2018)。在岩体表面或其内部进行任何工程活动, 都须符合安全、经济和正常运营的原则。研究岩体工程施工、运营中的安全稳定性及其破坏模式是高边坡、地基及地下洞室等各类复杂岩体工程研究的重要任务, 需要通过各种方法准确地预测工程岩体的变形, 评价其稳定性(杨旭等, 2016; 史新帅等, 2021)。

目前, 岩体工程问题研究主要采用数值模拟仿真和物理模拟实验等研究方法。其中, 数值模拟仿真是利用有限元、有限差分以及离散元等数值模拟软件对具体工程进行模拟, 可以直观地模拟裂纹扩展及岩体破坏过程, 适合从细观力学角度研究岩体力学行为。但由于在处理复杂岩体工程问题时只能考虑理想的边界条件且设置了很多的假设和简化,

在数值模型细观参数或物理力学参数的输入过程中存在太多主观性且只捕捉研究者规定的特定物理过程, 从而难以真实、完整地反映工程岩体力学特性的变化规律(Paola et al., 2009; Reber et al., 2020; 刘绍兴等, 2021; 杨兆中等, 2021)。而物理模拟实验以模型与原型之间的物理量相似为基础, 将实际工程按相似比缩放为物理模型, 抓住工程岩体的主要问题, 剔除无关紧要的影响因素, 通过模型实验获得其物理力学参数间的关系及变化规律, 从而获得对原型工程特性的认识。与数值模拟仿真相比, 物理模拟实验给出的结果形象、直观, 直击问题要害, 能给人以更深刻的印象。物理模拟实验可以对岩体二维、三维甚至四维(时间)的变形进行模拟原位观察, 可以较好地模拟复杂工程的施工工艺、荷载的作用方式及时间效应等, 能研究工程的受力全过程, 既

注: 本文为中央高校基本科研业务费专题研究重点项目(编号: ZY20215113)和国家自然科学基金资助项目(编号: 41807270)的成果。

收稿日期: 2022-07-07; 改回日期: 2022-09-10; 网络首发: 2022-11-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.11.011

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方面的研究工作; Email: szdchris@163.com。

能直观地模拟复杂地质工程与工程岩体的组合关系,又能反映工程岩体的力学特性和破坏特征。此外,物理模拟实验不仅可以研究工程的正常受力状态,还可以研究工程的极限荷载及破坏形态(陈陆望,2006;王汉鹏等,2006;Reber et al., 2020)。对地质条件复杂的岩体工程开展物理模拟,特别是三维条件下的物理模拟,能够较真实地反映实际地质体的变形发展和破坏过程,具有重要的理论意义和实用价值(Anhnan et al., 2005;陈陆望,2006;赵洪宝等,2016;谢晋谊等,2017)。长期以来,物理模拟实验一直是解决复杂工程课题的重要手段,在岩土工程研究中已得到广泛应用(林韵梅,1984;陈安敏等,2004)。

物理模拟实验的基础是相似理论,要求模型能够反映原型的主要特征和实际情况,确保模型中的物理力学过程与原型中物理力学过程的相似性,其中相似材料的选择及其对比对模拟实验的成功与否起着关键性作用(王汉鹏等,2006;Zhou Chuanbo, 2001)。针对具体岩体工程问题物理模拟设计,需首先对物理模拟实验材料进行大量的遴选和配比实验,这给岩体工程问题的物理模拟研究工作带来了极大的困扰和不便。因此,在调研工程岩体物理模拟相似材料应用研究现状和进展的基础上,以相似原则为基础,系统梳理分析工程岩体物理模拟中实验材料的选择和应用情况,以期对相关工程岩体物理模拟实验研究提供参考。

1 物理模拟实验材料的选用原则

物理模拟研究中大多依据相似性理论将研究对象原型按相似比缩放到实验室环境中,其技术关键在于模型与原型之间的相似性。相似理论是研究自然现象工程问题中个性与共性(或特殊与一般)的关系以及内部矛盾与外部条件之间关系的理论,正确地模拟工程岩体受力变形的物理过程和现象一般应遵从描述模型和原型中物理过程的方程相同、模型与原型的空间条件(几何尺度、边界条件等)相似以及模型与原型的时间条件相似等原则(Brown, 1970;赵仕俊等,2005;王汉鹏等,2006;车平等,2007)。物理模拟研究根据合理的相似比,在实验室内即可模拟原位岩体的应力、变形、渗流等物理力学过程的相关特性及规律,可以弥补岩体工程中现场实测困难等诸多不足,已在土木、矿业和水利等学科得到了广泛应用。

相似理论的理论基础是相似三定理,其中相似

第一定理可表述为“对相似的现象,其相似准则的数值相同”;相似第二定理,又称“ π 定理”,可表述为“设一物理系统有 n 个物理量,其中有 k 个物理量的量纲是相互独立的,那么这 n 个物理量可表示成相似准则(相似参数) $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-k}$ 之间的函数关系”;相似第三定理可以表述为“对于同一类物理现象,如果单值量相似,而且由单值量所组成的相似准则在数值上相等,则现象相似”(徐挺,1982)。根据相似三定理,可以将岩体模拟的相似分析抽象为动力相似问题通过量纲分析法进行讨论,动力相似现象的物理量函数为:

$$f(\sigma, \delta, P, t, \mu, \rho, L, E) = 0 \tag{1}$$

式中: σ —应力, δ —挠度, P —集中荷载, t —时间, μ —摩擦系数, ρ —密度, L —任一线性长度, E —弹性模量。列出量纲矩阵并联立方程组求解,可得到动力相似问题的 5 个相似准则:

$$\begin{cases} \Pi_1 = \frac{\sigma}{E}, \\ \Pi_2 = \frac{\delta}{L}, \\ \Pi_3 = \frac{P}{EL^2} \\ \Pi_4 = \frac{t}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \\ \Pi_5 = \mu \end{cases} \tag{2}$$

由式(2)所示的动力相似问题的基本相似准则可以导出一系列相似准则。由模型的几何相似、时间相似、运动相似和材料相似等相似准则、原型和模型的平衡方程、几何方程、物理方程、应力边界条件和位移边界条件推导出岩体物理模型实验的相似关系(Zhou Chuanbo, 2001;王凯等,2016;张宁等,2009):

$$\frac{C_\sigma}{C_L C_\rho} = \frac{C_\delta}{C_E C_L} = \frac{C_P C_E}{C_\sigma} = \frac{C_S}{C_\sigma} = C_\mu = 1 \tag{3}$$

这里 C_σ 、 C_L 、 C_S 、 C_ρ 、 C_δ 、 C_E 、 C_P 和 C_μ 分别为应力、几何、面力、体力、位移、应变、弹性模量和泊松比的相似常数,在岩体工程的相似模拟中,还需满足应变的相似常数为 1,即要求物理模型与原型的应力应变关系和摩尔强度包络线相似(沈泰,2001)。然而在许多岩体工程问题模拟中都很难做到各参数均满足相似关系所推导的理论值,只能在诸多材料配比中选择较为接近理论值的材料。部分工程问题可以依据具体工程性质,简化相似关系,比如在爆破振动的模拟中也可遵循 Froude 比例法,保持原型与模型的重力加速度之比为 1,在实验中不必改变重力

加速度数值,但须保持应力比例系数与密度比例系数、几何比例系数满足 $\sigma = \rho l$ (穆朝民等,2012)。除此之外,进行物理模型实验时,出于简化模型和实际工程中各物理参数间换算的考虑,同时为了更真实地模拟自重应力场,应尽量让相似材料与实际岩体材料的容重相同,模型材料选用尚需遵循材料的物理、力学性能稳定且与原型岩体物理力学特性相似的原则,材料无毒无害、物美价廉等也是模型材料选择要考虑的原则(王汉鹏等,2006;刘钦,2011)。

2 岩体工程问题物理模拟材料

目前,岩体工程问题的研究主要集中于边坡工程、地下工程和地基工程(蔡美峰,2002)。在岩体工程相关物理模拟实验设计中很难完全遵循相似准则,对不同工程的物理模型的简化和各物理参数间相似比的换算也有所不同。因此,为了便于相关研究人员的对照参考,着重从上述三大岩体工程问题的研究现状进行总结分析。

2.1 边坡工程岩体物理模拟材料

边坡是人类工程开挖形成的斜坡。与天然斜坡相比,工程边坡形成过程相对短暂,人类工程活动改变了原有斜坡的应力场,处理不当会诱发边坡岩体附加变形乃至破坏,甚至酿成灾害。边坡灾害类型与天然斜坡类似,主要有滑坡和崩塌两种(刘东燕,2013;任广丽等,2021)。滑坡是地质灾害中最为常见的灾害类型,其中大型滑坡和巨型滑坡影响最为深远,尤其在我国的中西部地区,大型滑坡更是以其数量多、危害大、机制复杂以及防治困难等特点著称(宋娅芬等,2015;刘金水,2020;熊凯伟,2020)。

对于研究边坡稳定性相关的物理模拟而言,模型材料及其配比选择首先要满足模型边坡与原型边坡抗剪强度指标(粘聚力、内摩擦角)的相似关系。一般情况下,模型材料的内摩擦角由骨料控制,模型材料的粘聚力由胶结物控制(刘东燕,2013)。大型岩质斜坡渐进破坏模式表现为蠕滑、过渡和剪切,而剪切破坏阶段发生在对岩体稳定性起关键作用的锁固段部位(赵建军等,2016;吴锦华等,2019)。岩质滑坡中锁固段为岩体中沿潜在滑动面断续出现、与滑动面两侧岩体连为一体的部分,具有较大强度并控制着边坡稳定性,如岩桥、挡土墙和支撑拱等(秦四清等,2010; Huang Da et al., 2014)。Tang Huiming 等(2015)认为锁固段的承载能力一方面取决于锁固段的尺度(在相似模型中可以采用锁固段与滑动面的相对比例控制),也取决于锁固段材料

的强度。锁固段是分析许多边坡岩体渐进性破坏的关键,例如,在中国西南的重庆鸡尾山滑坡中,上部岩块的运动受到下部岩块(锁固段)的限制,为研究前缘端部岩桥的裂纹扩展规律和破坏特征,秦昌安等(2019)模拟以灰岩为主的前缘锁固型端部岩桥时选用石英砂:水泥:石膏粉:水=6:3:3:2,以页岩为主的后缘蠕滑段软弱夹层时选用石英砂:水泥:石膏粉:水=1:0.5:1:1;唐鹏等(2017)选用水泥、石膏和石英砂等材料构建物理模型对三段式滑坡进行定性化模拟,通过调整配比(其中锁固段骨胶比0.56,蠕滑区骨胶比0.47)用以模拟岩质滑坡的后缘拉裂区、中部锁固段及边坡滑床及滑体受剪的变形特征。通常而言,对滑坡机理定性的研究,如果所构建模型不存在原型斜坡,则不用考虑滑坡几何相似比,一般选择采用常见的地质力学模型相似材料及配比进行模拟。

除对滑坡破坏机理的研究外,大量学者还以滑坡类型、滑动成因等作为模拟目标,从多个方面进行实验设计,开展物理模拟实验。针对破碎岩体高速远程滑坡的特性,王玉峰等(2014,2016)综合考虑相似材料的密度、颗粒粒径及原型材料与模型材料外形相似等因素,利用不同粒径的石英颗粒模拟以花岗岩碎屑为主的滑坡堆积体,用以研究高速远程滑坡裹气状态下的流态化特性;任占强等(2021)在前述研究基础上更多的考虑了原型与模型重力加速度的相似及相似材料整体力学特性,以重晶石、石英砂、石膏、羧甲基纤维素钠和甘油等为选料(羧甲基纤维素钠的添加可有效提高模型的抗压强度、弹性模量、黏聚力及脆性,甘油则用以满足模型低弹模的特性),基于控制变量法,采用重石比7:3、骨胶比30:1、羧甲基纤维素钠含量1.0‰、拌合水量22.50%、甘油0.5‰作为基础工况,进行可破碎岩石模拟材料的配比实验,确定了适用于高速远程滑坡碎屑化过程模拟的低强度高脆性岩石相似材料的配比区间。对于降雨条件下滑坡变形演化机制的研究,实验材料的选取应更多考虑材料本身的渗透系数,王如宾等(2019)将黏土、河砂及碎石以2:2:1的比例混合制得滑坡模型。胡华等(2021)利用不同含水率和密实度粘性土制作符合要求的花岗岩斜坡模型,此外部分学者还采用滑石粉、黏土、砂和水配制滑带模拟材料,用砂、黏土和水配制滑坡体模拟材料,用水泥、黏土、砂和水配制基岩模拟材料,用以模拟不同岩性的滑坡(袁智洪,2018;张少龙,2022)。

一定条件下,岩质边坡的振动台模型试验能够较为直观真实地反映边坡在动力作用下的响应规律及破坏过程(杨国香等,2012)。该类振动台模型除要求几何尺寸满足原型相似比条件外,为使模型斜坡和原型斜坡的动力响应和振动特性尽可能一致,还要求模型材料密度、振动加速度与原型相同。为研究地震作用下岩质斜坡动力累积损伤演化过程以及变形位移特征,董杉(2020)选择采用重晶石、河砂、石膏及甘油等材料以骨胶比6:1的比例制作滑坡主体,将甘油、重晶石、粘土按一定比例制作结构面;许强等(2009,2010)将斜坡材料分为软岩、硬岩及土质3类,其中软岩和土质材料选用石英砂、重晶石粉、石膏及石蜡等材料压实成型,硬岩材料选用所需模拟的天然岩块材料,将其切割成小尺寸的砌块,使用粘土砌筑成形。此外,为研究地震滑坡的形成机制及岩质边坡的动力加速度响应特征,一些学者选择以重晶石粉、铁精粉以及石英砂为主料,石膏、松香酒精溶液为黏结剂混合制成斜坡模型(图1),重晶石粉和铁精粉的掺加可 effectively 提高模型平均密度,保证此类模型可更好地模拟原始边坡的重力场影响(董金玉等,2011;叶海林等,2012;耿晓阳等,2015),同时,部分学者为满足频率、加速度等动力问题相关的物理力学参数的相似性,在以高边坡地震响应为目标的振动台模拟中,所选用的相似材料



图1 边坡模型破坏照片(据董金玉等,2011 修编)
Fig. 1 Photo of damaged slope model
(modified after Dong Jinyu et al. , 2011&)

配比存在部分难以满足静力物理模型相似条件的问题(杨国香等,2012;董金玉等,2013)。

2.2 地下工程岩体物理模拟材料

地下工程岩体主要是指深入地面以下为开发利用地下空间和资源所涉及的工程岩体。地下工程一般具有密闭性强、安全可靠和经济合理等优点,但必然会面临各种岩体工程问题(王洛锋等,2009;马玉骁,2019),与此相关的物理模拟研究主要围绕在地下储库、地下厂房、地下能源开采、巷道开挖等地下工程展开,此类物理模型相似材料及其配比的选取应首先考虑与所模拟地下工程原型容重的相似性,利用材料本身的重量模拟自重(林韵梅,1984)。在地下能源储库的研究中,张桂民等(2011,2012)选择水泥、石英砂、黄粘土和重晶石粉等实验材料,模拟研究倾角、夹层和界面对软硬互层盐岩变形破坏的影响规律,其中水泥是胶凝剂,重晶石粉和黄粘土是添加剂;同时为了模拟不同分层的工况,还选取石英砂、重晶石粉和水泥等作为模拟材料,制成如图2所示具有不同层面倾角($\varphi=0^\circ、60^\circ、90^\circ$)的交互层状标准试样;任松等(2011)针对盐岩的蠕变性质对于地下储库稳定性的影响,除考虑原型与模型几何、容重等相似性外,还单独考虑蠕变速率的相似比,采用工业盐颗粒为骨料,加入细盐粉末调节级配,粗细骨料比为6:4,以精铁粉、环氧树脂和乙二胺做黏合剂,其砂胶比为1:0.04。黄达等(2010,2011)以三峡工程右岸地下厂房岩体为原型,通过反复实验确定模型材料的质量比为重晶石:石英砂:水泥:石膏:水=50:20:5:2:6。

大多数地下工程都建造于节理岩体中,设计利用锚杆或锚索稳定裂隙岩体的物理模型并进行研究,可以得到解决裂隙岩体稳定性问题的有效方案(任伟中等,1997;程良奎,2001;Liu Shaoxing et al. , 2020;魏辉球,2021)。康天合等(2004)在研究循环

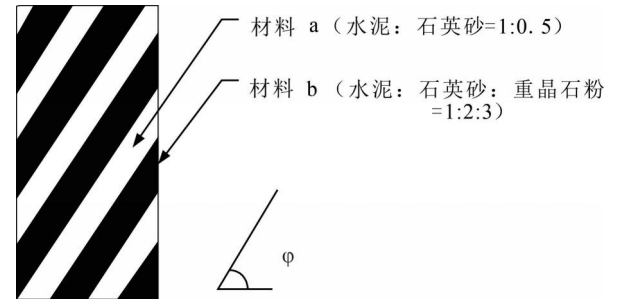


图2 不同材料配制交互层状试样(据张桂民等,2012)
Fig. 2 Preparation of interactive layered specimens from different materials(after Zhang Guimin et al. , 2012&)

荷载作用下层状节理岩体(煤、泥岩、砂质泥岩和砂岩)的锚固效果时,选用河砂、水泥和石膏,几何相似比取 6 : 1 (原型 : 模型)。辛亚军等(2014)采用河沙与石蜡作为节理岩体模拟材料,按 10 : 1 进行岩体锚固工况的模拟,研究在同一应力(加载)水平下不同锚杆支护条件对岩石蠕变变形的影响。为研究不同锚固方式失效后对软弱围岩隧道承载能力的影响,冯冀蒙等(2012)采用细砂模拟 V 级围岩,石膏作为初期支护,骨胶比最高可至 1 : 1.2。此外,部分学者将几何尺寸 L 、材料密度 ρ 、加速度 a 作为基本物理量分别设置符合实验需求的相似比,以水泥石膏砂浆体为岩体模拟材料进行爆炸荷载作用下锚杆力学特性的研究(单仁亮等,2011;周纪军等,2013)。为分析在一定地应力条件下煤岩断层的破坏过程,宋彦琦等(2019)采用骨料成分为石英砂,胶结材料为水泥和石膏的相似材料模拟包含灰岩、砂岩、泥岩和板岩的断层两盘岩体,研究不同产状的岩体在受压状态下的破坏过程以及裂隙发育规律。洛锋(2011)针对高地应力环境中巷道围岩的破坏特征,采用河砂、水泥、石膏、腻子粉及石蜡作为相似材料,研究不同实验配比情况下类岩体的力学特性,得出适用于模拟不同岩石材料的相似比(表 1)。陈志敏等(2015)为模拟隧道不同级别软弱围岩,以石英砂、黄土为骨料,水泥、石膏为胶结剂作为相似材料,并以土砂比、水泥掺量、石膏掺量和含水量为影响因素设计四因素三水平的正交实验,分析不同配比的该类相似材料的物理力学特性,为软岩隧道的模型试验研究提供参考。

在地下能源开采方面,物理模拟实验的设计应该同时满足弹塑性、破碎、垮落等各种形式采空结构的物理力学过程要求(周科,2022)。白矛等(1987)在探讨条带法开采中条带煤柱的支撑状态及地表移动问题时,采用砂与石膏模拟不同的岩层,同时掺入辅料碳酸钙降低部分模拟岩层材料强度以还原真实工况。在进行地下矿山开采的物理模拟中,常用的相似材料一般以河砂、重晶石粉、石英砂等为骨料,石膏、水泥、碳酸钙为胶结剂,通过改变水泥用料以调节相似材料模型与原型物理力学参数的相似比,一般骨胶比为 8~9,若模拟房柱法进行工程开采,还需考虑分层铺设,层间填充云母粉等材料确保隔断(翟新

献,2002;蒋军等,2016;谢晋谊等,2017;苏士龙等,2020)。针对煤柱间距对围岩稳定性的影响,王德超等(2014)以精铁粉、重晶石粉、石英砂作为骨料,松香、高纯度酒精配溶液为胶结剂,模拟细砂岩、粉细砂岩和泥岩等岩体,以石英砂为骨料,石膏、碳酸等混合物作为胶结剂模拟相应煤层。此外,煤层气或页岩气等资源的开采须对水力压裂等开采技术进行针对性研究,这对资源的高效开采和安全生产具有重要意义。许江等(2017)以煤岩为研究对象,利用水泥和石膏作为胶结材料,碎煤作为骨料,通过实验得出水力压裂过程中水压的演化与裂缝的发育、扩展有着密切联系的结论。在研究水压爆破机理的物理模拟中,一般采用河沙为骨料,水泥、石膏等为胶结剂(骨胶比在 3 左右),同时以强度、弹性模量、泊松比及密度等物理、力学参数为基准,选定煤粉、云母碎、珍珠岩、发泡剂等为辅助材料,以控制试样的节理、微裂隙、结构面及孔洞等(赵文豪,2016;蔡永乐等,2017;Peng Jianyu et al., 2020);如陈士海等(2020)根据量纲分析法得到模型几何相似系数为 1 : 25,应力相似系数为 1 : 35,选用砂浆模拟Ⅲ级围岩,配比(砂 : 水泥 : 石膏)为 8 : 0.7 : 0.3,掺加的水量占试件重量的 10%,水中硼砂浓度为 1%。刘健等(2016)以 Froude 比例法建立煤层深孔预裂爆破的实验模型,以砂子、水泥、石膏、云母碎及煤粉等相似材料按不同配比加工制备不同岩(煤)层模型(图 3),进行爆破模拟实验,其中顶板、底板岩层所选相似材料除没有煤粉外,其余与煤层一致。

2.3 地基工程岩体物理模拟材料

岩质地基具有弹性模量大、承载力高等特性。目前对于建筑岩质地基本身的物理模拟研究相对较少,一般是以素混凝土为模拟材料研究岩质地基的基础力学特性(须亚平等,2010;张开伟等,2020)。

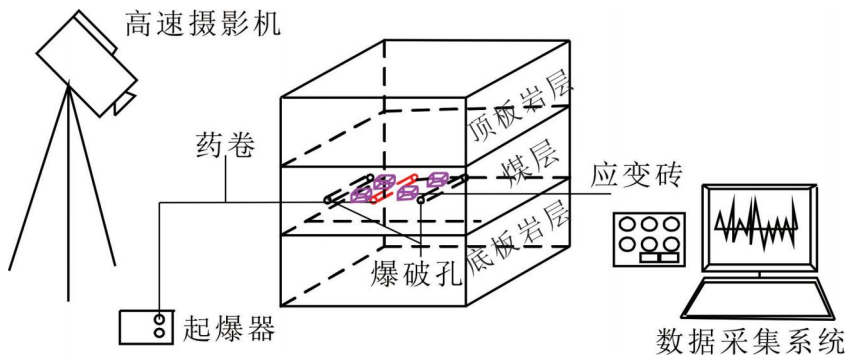


图 3 模型实验示意图(据刘健,2016 修改)

Fig. 3 Schematic diagram of model test(modified after Liu Jian,2016&)

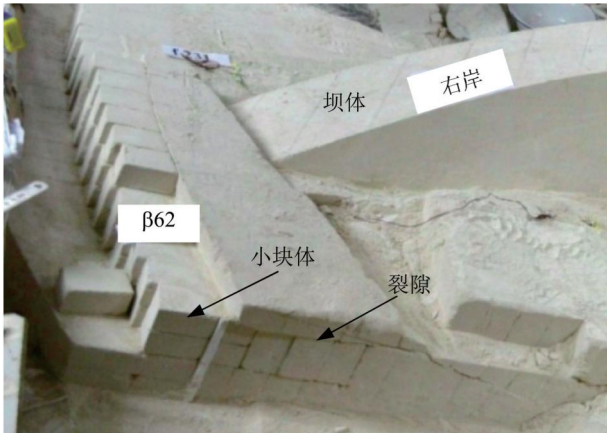


图 4 裂隙岩体坝基模拟(据 Zhang Long et al. , 2014)

Fig. 4 Simulation of jointed rock mass dam foundation
(after Zhang Long et al. , 2014)

大多学者对于岩质地基的研究多聚焦于大坝地基。大坝的安全性主要由大坝地基决定,各种不良地质条件及复杂的渗流作用等因素都有可能破坏坝基的稳定性,导致大坝出现安全隐患,因此坝基的物理模拟研究主要是针对坝基变形特性和抗滑稳定性(周维垣等,2005;孙涛等,2022)。为研究坝基与坝段闸坝的整体稳定性及变形特性,Zhang Long 等(2014)开发了一种低强度粘结剂和小砌块,通过小块砌筑的方法建立了原型:模型(几何尺寸)=250:1的地质力学模型(图4),用以模拟节理岩体和结构面的强度和变形,模型材料由重晶石粉、膨润土和低强度胶水组成,重晶石粉的掺加可增加材料的容重,膨润土性能稳定并可满足模拟材料低弹模的要求,低强度胶水则作粘结剂。孙涛等(2022)建立尺寸为2.15 m×0.303 m×1.26 m的地质力学模型进行破坏试验研究,通过取白云岩、泥岩、细砂岩等岩体密度平均值的方法,采用重晶石粉、高标号机油和膨润土混合后压制而得模型材料,采用超载和变温相结合的综合法(何显松等,2009)制备软弱夹层的模拟材料,将高分子材料添加于传统的模型材料中,通过电升温法降低材料的力学参数,此方法为模拟断层、夹层等受渗流和高压作用提供可能,部分学者还采用此法研究不利地质条件对泄水闸坝段基础的滑移破坏特性(陈建叶,2004;杨宝全等,2011;王维强,2020)。近20年来,长江科学院的相关学者采用重晶石粉、石膏、石灰粉、膨润土和机油等作为相似材料,选取不同配比构建相应的地质力学模型,开展复杂地质条件对大坝坝基破坏路径以及坝基抗滑稳定

性等问题的模拟研究,取得诸多有价值的成果(龚召熊等,1988;沈泰等,1988;姜小兰等,2010;蒋昱州等,2014)。

3 综合分析

不同岩体工程问题的工程背景各有差异,但无论是哪种工程,均可能遇到不同类型岩体,从工程岩体物理模拟材料的发展历程考察,工程岩体的物理模拟所选用的材料一般可分为传统模拟材料和新型模拟材料。

目前在岩体工程的物理模拟研究中模拟材料大多局限于选用传统材料,而传统材料一般针对具体岩体工程问题,基于相似性准则,选用不同配比的水泥、石膏及河砂、石英砂等材料为主料,再根据具体工况添加诸如石蜡、滑石粉、硅藻土及腻子粉等辅料进行模型配比实验(陈兴华等,1983;洛锋,2011;杨仁树等,2013;肖杰等,2015),部分传统岩体工程模拟材料及其基本物理力学参数如表1所示。该类研究通常以物理模拟材料的性能为目标,以各材料(骨料、胶结剂)的含量或各材料间的比值(如重石比、骨胶比等)为控制因素进行正交试验,并以此为基础进行敏感性分析,得出各因素对模拟材料物理力学指标(抗压强度、弹性模量、泊松比、内摩擦角和粘聚力等)的影响规律(Huang Chenchen et al. , 2019;吴锦华等,2019;Yang Mengze et al. , 2021;贾宝新等,2022;黄祥等,2022;宁奕冰等,2020;王鸿儒等,2022;赵明生等,2022)。如图5a所示,为解决岩质边坡模型试验中模拟材料最优配比的选择问题,一些学者选择以重晶石粉、石英砂、石膏和水为主料配置相似材料,根据所模拟工程岩体的特性添加如铁精粉、羟甲基纤维素钠、粘土等辅料,采用敏感性分析的方法研究了重晶石粉、石英砂以及石膏等材料与模拟材料基本力学指标的相互关系。就主料而言,石英砂含量控制着内摩擦角和泊松比的大小,重晶石粉对抗压强度影响最为显著,而弹性模量和黏聚力的大小则主要取决于石膏含量(吴锦华等,2019;黄祥等,2022;任旭等,2022);此外,以该类主料配置的模拟材料以试样密度不变为标志停止养护,室温养护时长一般应在7天以上(任旭等,2022)。史小萌等(2015)为给煤层开采模型实验提供模拟材料配比方案,以石英砂、重晶石粉为骨料,水泥、石膏为胶结剂,以砂胶比、水膏比和重晶石含量为控制因素进行正交试验,发现此类模拟材料抗压强度和弹性模量主要由砂胶比控制,密度则是受

表 1 部分岩体物理模拟材料及其物理力学参数
Table 1 Some rock mass analogue materials and the model physical and mechanical parameters

岩性	模型制备	密度 (g/cm ³)	抗压 强度 (MPa)	抗拉 强度 (MPa)	弹性 模量 (MPa)	泊 松 比	模拟工况
砂岩	水泥:砂=1:5,水灰比 0.8	2.14	21.1	1.36		0.2	水压法工程爆破(赵志伟等,2018)
中砂岩	以砂子、水泥、石膏、云母碎及煤粉	1.73	11.49	0.7	3159	0.2	不同装药方式爆破(刘健等,2016)
砂砾岩	砂:石灰:石膏=8.8:5:5	1.43	0.703				煤层开采(翟新献,2002)
粉细砂岩	精铁粉:重晶石粉:石英砂:碳酸钙 =1:1.2:0.38:0.6		1.8			0.2	煤层开采(蒋军等,2016)
灰岩、砂岩	水泥、石膏及石英砂	1.6~2.4	0.4~7		0.4~1.6	0.2~0.3	巷道承载(宋彦琦等,2019)
煤岩	煤粉:水泥:石膏=1:2:1		5.38		780	0.25	巷道承载(许江等,2017)
盐岩	工业盐颗粒、细盐粉末、精铁粉、环氧 树脂和乙二胺,砂胶比为 1:0.04、 粗细骨料比为 6:4	2.3	0.4	0.02	360	0.3	地下储库(张桂民等,2012)
软岩(粉砂岩)	土:砂子:水泥=6:3:1		2.8				巷道承载(赵志伟等,2018)
花岗岩	重晶石:石英砂:水泥:石膏:水 =50:20:5:2:6	2.7	4.73	0.37	3450	0.29	地下厂房(黄达等,2010)
花岗岩碎屑	石英颗粒	2.65					滑坡碎屑化运动(王玉峰等,2014)
破碎硬岩	重晶石:石英砂=7:3,骨胶(石膏、 羧甲基纤维素钠、甘油)比=30:1, 羧甲基纤维素钠占 10%	1.812	0.193		78.9		滑坡碎屑化运动(任占强等,2021)
灰岩、页岩	岩桥取石英砂:水泥:石膏粉:水 =6:3:3:2,软弱夹层节理石英砂: 水泥:石膏粉:水=1:0.5:1:1						滑坡锁固段和软弱夹层 (秦昌安等,2019)
煤、泥(页)岩、 砂质泥(页)岩 和砂岩	几何相似比取 6:1(原型:模型)	1.7	2.266	0.218	5.5	0.19	层状节理岩体锚固 (康天合等,2004)

重晶石含量、砂胶比和水膏比共同控制(图 5b);此外,还有一些学者利用这类模拟材料研究岩体渗流和节理岩体稳定性等问题(Huang Yanhua et al., 2015;Yang Mengze et al., 2021)。

总体而言,传统模拟材料可按照胶结剂划分为石膏类材料 and 水泥—石膏类复合材料两类。对石膏类模拟材料而言,所制模型的强度与砂胶比存在非线性关系,这主要是因为随着砂含量的增多及石膏含量的降低,材料的胶结力变弱。当砂胶比小于 3 时,材料可能出现结块现象,但强度依旧会逐渐增大;当砂胶比为 3~8 时,材料的强度稳步升高;当砂胶比大于 8 时,因内聚力不足导致材料试件制备困难且强度迅速降低,如砂胶比为 8 到 10 时,峰值应力下降达 52%;弹性模量变化趋势与强度相似(Prudenci et al., 2007;杨仁树等,2013;李元海等,2018;Wu Tianhua et al., 2020)。对于水泥—石膏类复合模拟材料而言,随着砂胶比的减少,抗压强度和弹性模量的增加趋势与石膏类材料相似,需要注意的是,添加重晶石粉可提高材料的抗压强度,如在控制砂胶比总量不变的前提下,掺入占骨料 10%的

重晶石粉可以有效改良级配,并将强度提升 25%左右(袁宗盼等,2014;肖杰等,2015;许锡宾等,2015;Wu Tianhua et al., 2020;蔡金龙,2020)。整体而言,物理模拟实验材料的强度随着砂胶比的增大而减小、随骨料粒径的增大而增大,但需注意,相似模拟中往往对骨料粒径大小存在一定限制。此外,类岩石材料应具有材料性质稳定、均一化程度高等特点,还要具有与岩石材料相似的脆性和剪胀特性(肖桃李等,2012;赵洪宝等,2016;宋宇等,2020;郭义等,2022)。

近年来,随着材料技术的不断发展,新型模拟材料的研制也是岩体物理模拟实验研究的一个重点。为模拟较大的容重,在较大范围调节弹性模量及抗压强度等力学指标,韩伯鲤等(1997)研制了 MSB(新型地质力学模型材料)材料,以氯丁胶加膜处理的铁粉、重晶石粉为骨料,用松香、酒精作为胶结剂压实制成模型砌块,铁粉/(铁粉+重晶石粉)决定了模拟材料的密度,重晶石粉/骨料对材料的强度(抗压、抗拉)及抗剪强度指标(黏聚力、内摩擦角)起主要控制作用,从而得到了较为理想的岩体模拟材料;

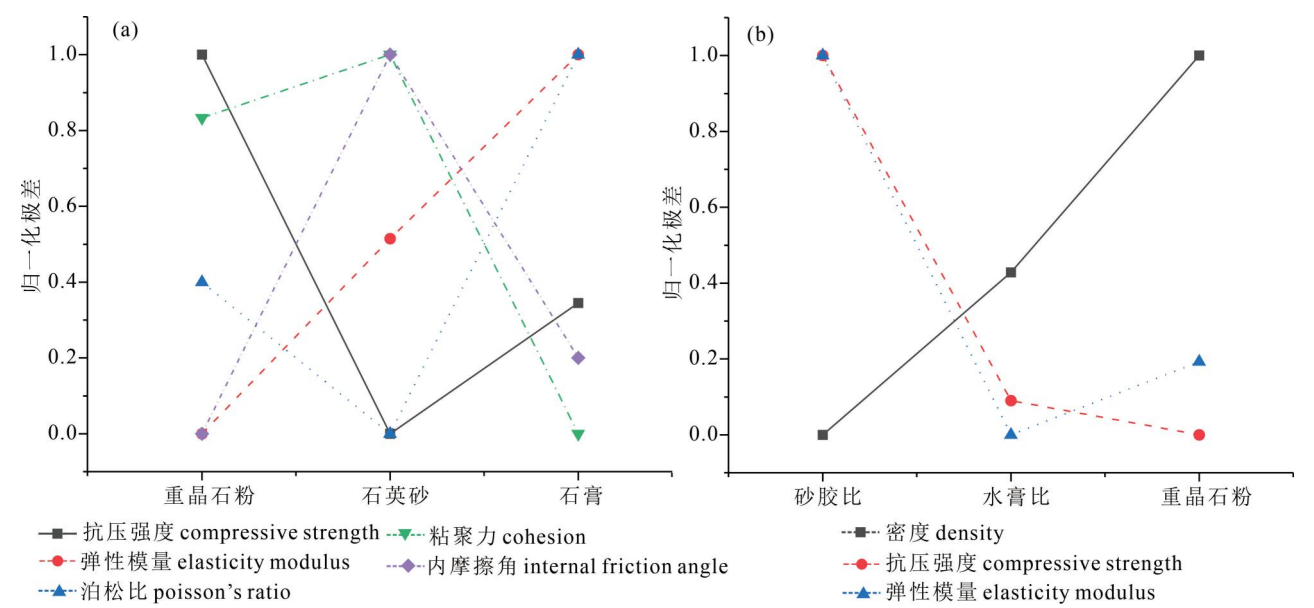


图 5 岩体模拟材料性能敏感性分析:(a) 边坡工程相似材料(据吴锦华等,2019 修改);
(b) 地下工程相似材料(据史小萌等,2015 修改)

Fig. 5 Sensitivity analysis of rock mass simulation material properties: (a) Analogue materials for slope engineering (modified after Wu Jinhua et al. , 2019&); (b) Analogue materials for underground engineering (modified after Shi Xiaomeng et al. , 2015&)

张强勇等(2008)在 MSB 材料的基础上加入石英砂调节级配,加入石膏用以调节强度,研制了一种铁晶砂胶结新型岩石模拟材料;为克服岩质边坡模型底部破坏偏脆性的缺点,宁奕冰等(2020)在铁晶砂胶结新型材料的基础上,再添加少量黏土以便增加模拟材料的塑性。为解决传统模拟材料观测模型变形、裂隙扩展及其力学演化过程研究受限的问题,李元海等(2015)以熔融石英砂(粉)、硅粉以及玻璃砂等为骨料,以溴化钙溶液以及矿物油溶液等为胶结剂,根据物质的纯度、材料内部气体含量、所选材料的稳定程度及骨料与孔隙折射率的相似程度等因素调节配比,制成透明模拟材料,尝试通过改变硅胶粉/矿物油溶液含量和固结压力来调节材料的抗压强度,试验结果表明,该类材料抗压强度与固结压力呈正相关关系。由于这种材料具有和软岩传统相似材料类似的物理力学指标和裂隙扩展过程,固此类材料可以用于软岩的物理模拟实验。该类材料混合制成的透明模拟模型常被用于地下工程相关的物理模拟实验(孙吉主等,2011;马少坤,2021)。

此外,一些研究人员还开发出类似岩石的透明 3D 打印材料以准确表征和可视化岩石的复杂内部结构和应力分布。Ju Yang 等(2014)采用透明的光致聚合物 Vero Clear 来生成基质,采用白色不透明

的光致聚合物 Vero white Plus 来生成带充填体的裂缝,无充填的裂隙采用结构松散、透明度低和强度小的 lite 型网状支撑材料 Fullcure 705 形成(图 6)。部分学者实验证明,陶瓷、石膏、PMMA、SR20(丙烯酸共聚物)和树脂这五种材料适合模拟脆性和坚硬岩石,这些材料的单轴抗压强度、弹性模量、泊松比等力学性能与原型岩石接近(Jiang Chao et al. , 2015;Zhou Tao et al. , 2018)。为研究白鹤滩水电站柱状节理岩体(CJRM)的力学效应及其稳定性,Xia Yingjie 等(2020)基于该类岩体的结构特征,利



图 6 3D 打印试样(据 Ju Yang et al. , 2014)

Fig. 6 3D printing sample(after Ju Yang et al. , 2014)

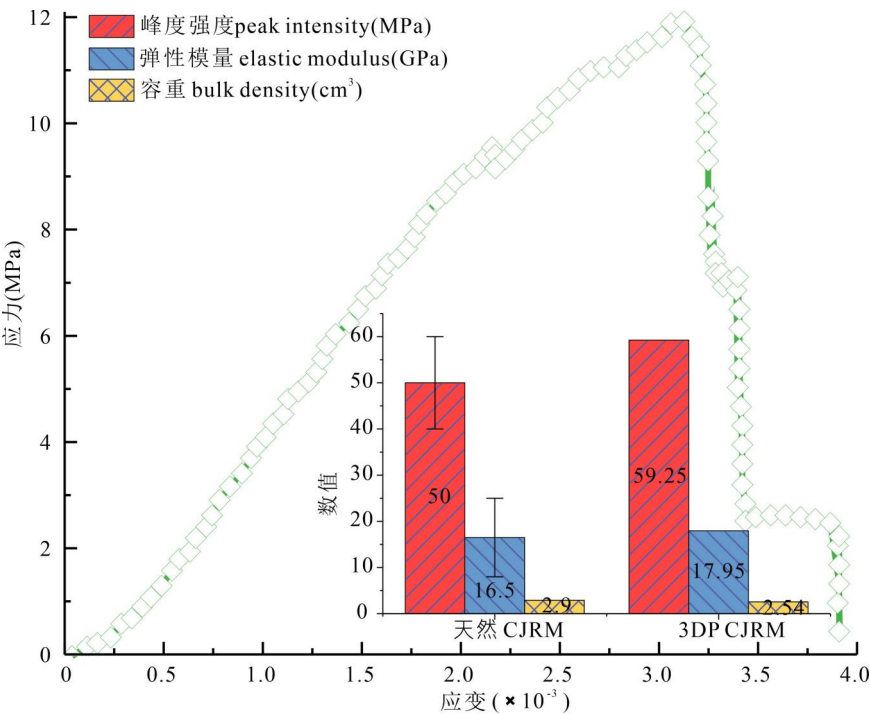


图 7 CJRM 模拟材料试件的力学特性曲线(据 Xia Yingjie et al. , 2020 修改)

Fig. 7 Mechanical property curve of specimen made from CJRM materials
(modified after Xia Yingjie et al. , 2020)

用一种光敏树脂(具有较高的强度)材料,结合 3D 打印技术精确重建了不规则的 CJRM 结构。如图 7 所示,该结构具有明显的脆性破坏特征且该材料的容重为 2.53 g/cm³,弹性模量为 3.59 GPa,峰值强度约为 50 MPa,根据相似准则将其换算为原位 CJRM 相关物理力学指标,与侯军等(2017)获得的天然 CJRM 的物理力学参数及其破坏模式高度相似,且建模过程可控、实验过程可视化。因此,通过地质调查、现场测试和三维 CT 扫描等方法获得岩体表面和内部结构的信息,对模型结构进行数字化重建,再使用 3D 打印技术输出重建模型的方法,可以制作具有和所模拟工程岩体高度一致的物理模型,然后将重建的岩体数字模型导入到数值模拟软件中进行同步模拟计算,可以达到彼此高效验证的效果。由此可见,3D 打印等相关技术和材料的出现,使得现场测试、室内物理模拟和数值模拟紧密的结合在一起,为相关工程设计提供更准确直观的分析参考。

综上所述,岩体物理模拟对于岩体工程问题的研究具有重要意义,而物理模型材料的选择对于物理模型实验的成功与否至关重要。前人就传统模拟材料选用和配比设计等相关问题开展了大量研究,

如表 1 和图 8a 所示,模拟软岩的骨料最常用的是河砂和石英砂,硬岩则在选用河砂和石英砂的基础上更多的掺入重晶石粉,胶结剂通常都是水泥、石膏或者两者混合的复合材料。新型模拟材料一般选用铁粉、熔融石英砂及陶瓷等作为骨料,高分子聚合物、酒精及松香等为胶结剂(图 8b);其选用方案相对于传统模拟材料而言,更多考虑工程岩体的特点而进行特殊设计,如铁晶砂胶结新型材料可大范围调节弹性模量和泊松比等力学指标,有利于大型地质力学模型的构建;透明类新型相似材料可与 DIC 技术结合实现立体观测模型变形、裂隙扩展及其力学演化的构想;3D 打印类新型模拟材料与三维扫描、CT 扫描、数值计算以及应力冻结等先进技术相结合,可实现复杂结构岩体的精确重建,其相对于传统模拟材料在含结构面天然岩体的室内试件制备和重复制样方面具有显著的优势。

4 结论与展望

岩体工程问题的物理模拟并不是复杂自然现象的复制,而是通过对原型抽象和简化揭示原型问题的本质,因而它不再包含原型的复杂性,但必须体现原型岩体本质性特征。通过改变材料的配比,甚至改变骨料或者胶结物,调整材料的某些性质以达到实验要求。通过对前人工程岩体物理模拟主要研究进展进行总结分析,得到以下主要结论:

(1)传统模拟材料模拟软岩的骨料最常用的是河砂和石英砂,硬岩则在选用河砂和石英砂的基础上更多的掺入重晶石粉用以调节级配及强度,胶结剂通常都是水泥、石膏或者两者混合的复合材料;重晶石粉、水泥对岩体模拟材料的抗压强度有显著影响,石膏对岩体模拟材料的弹性模量和黏聚力影响显著,而石英砂对岩体模拟材料的内摩擦角和泊松比影响较大。新型模拟材料常用铁粉、熔融石英砂及陶瓷等作为骨料,高分子聚合物、酒精及松香等为胶结剂,材料的选择和配比方案通常是根据所需解决的工程问题进行设计;

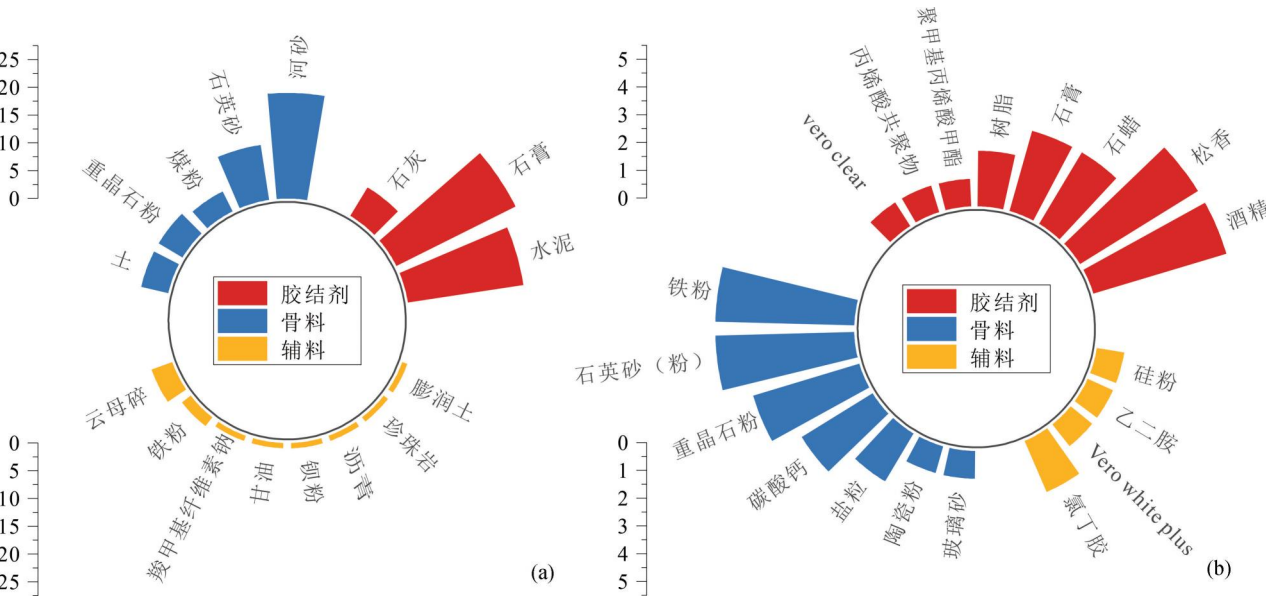


图 8 岩石传统模拟材料和新型模拟材料使用情况统计
(纵坐标数值为某类材料在文中出现的次数): (a) 传统模拟材料; (b) 新型模拟材料

Fig. 8 Statistics on the use of traditional and new rock analogue materials (the ordinate value indicates the number of times the analogue materials appear in this text): (a) traditional analogue materials; (b) new analogue materials

(2)不同研究对象在进行模型实验时,在相似比的基础上,还需根据工程对象的特点进行特殊实验设计,如在研究存在爆炸动载的工程对象时,还需考虑重力加速度一致的情况;同时不同研究对象进行模型实验时,所需用到的材料也会有所区别,如在研究存在裂隙节理等岩体时,还需掺加煤粉、云母碎、珍珠岩、发泡剂等辅助材料,以控制试样的节理、微裂隙、结构面及孔洞等;

(3)骨料的粒径会直接影响模拟材料的强度,骨料粒径越大,强度也就越大,但是相似模拟材料的骨料粒径要受所模拟岩体微结构的制约,砂胶比(骨料质量与胶结材料质量比)也会影响模型材料的强度,模型强度随着砂胶比的增大而减小。

目前,对岩体工程问题物理模拟研究中实验材料的研究还存在以下几个难点需要解决:

(1)模拟材料的研究在大型地质模型实验中经常出现胶结材料过多导致模拟材料不能很好满足岩石自身的剪胀性、容重等条件,骨料过多则无法满足强度要求等问题,有必要对更精细化的骨料调节与胶结材料的配比展开研究;

(2)严格按相似准则要求所需要考虑的物理力学参数过多,在实验设计中很难完全遵循,不同研究对象在考虑大量物理力学参数的权重方面需要进一步提出简化实用的标准;

(3)有些模型选用的模拟材料具有低强度和低弹模的性质,由于电阻应变片的胶黏固化作用,存在测试误差较大或测试困难的情况,此外,对于工程岩体而言,选择模拟材料制作模型时,须考虑岩体中存在的不连续结构面,比如节理、裂隙、层理和断层等,不同规模的结构面的考虑原则和模拟方法需要结合具体工程问题进行针对性研究;

(4)目前对于岩石模拟材料的研究大多局限于水泥、石膏、河砂、石英砂和重晶石等传统材料,既不利于观测也不利于重复使用,虽然目前已有一定的新型材料出现,但针对各个复杂岩体工程适配的新型模拟材料研究相对较少,便于观察裂隙扩展的透明材料技术、智能化控制的 3D 打印技术及根据工程特性及参数进行个性化定制材料配比方案的人工智能技术等相关研究还有待深入开展。

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)

白矛, 刘天泉. 1987. 用相似材料模型研究条带法开采的煤柱支撑状态及覆岩和地表移动特征. 煤炭学报, 24(3): 9~14.

蔡金龙. 2020. 侏罗系弱胶结软岩巷道变形失稳机制及应用研究. 导师: 曹胜根. 淮南: 安徽理工大学博士学位论文: 1~184.

蔡美峰. 2002. 岩石力学与工程. 北京: 科学出版社: 1~491.

蔡永乐, 付宏伟. 2017. 水压爆破应力波传播及破煤岩机理实验研究. 煤炭学报, 42(4): 902~907.

车平, 黄宏伟. 2007. 相似理论在溶洞顶板稳定性数值分析中的应用. 地下空间与工程学报, 27(4): 617~622.

陈安敏, 顾金才, 沈俊, 明治清, 顾雷雨, 路则元. 2004. 地质力学模型试验技术应用研究. 岩石力学与工程学报, 23(22): 3785~3789.

陈建叶. 2004. 锦屏一级高拱坝坝肩稳定三维地质力学模型破坏试验研究. 导师: 张林. 成都: 四川大学硕士学位论文: 1~118.

陈陆望. 2006. 物理模型试验技术研究及其在岩土工程中的应用. 导师: 白世伟. 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所)博士学位论文: 1~180.

陈士海, 宫嘉辰, 胡帅伟. 2020. 爆破荷载下围岩及支护锚杆动力响应特征模型试验研究. 岩土力学, 41(12): 3910~3918.

陈兴华, 王宙. 1983. 拱坝坝肩岩体稳定地质力学模型试验. 岩土工程学报, 5(1): 77~89.

陈志敏, 冯亚松, 刘德学. 2015. 软岩隧道Ⅳ~Ⅵ级围岩相似材料正交试验研究. 兰州交通大学学报, 34(1): 12~16.

程良奎. 2001. 岩土锚固的现状与发展. 土木工程学报, 48(3): 7~12+34.

单仁亮, 周纪军, 夏宇, 孔祥松, 常力夫, 徐成. 2011. 粘结式锚杆在爆炸动载下轴向应力分布研究. 岩土力学, 32(10): 2965~2971+2976.

翟新献. 2002. 放顶煤工作面顶板岩层移动相似模拟研究. 岩石力学与工程学报, 22(11): 1667~1671.

董金玉, 杨国香, 伍法权, 祁生文. 2011. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究. 岩土力学, 32(10): 2977~2982+2988.

董金玉, 杨继红, 伍法权, 杨国香, 黄志全. 2013. 顺层岩质边坡加速度响应规律和滑动堵江机制大型振动台试验研究. 岩石力学与工程学报, 32(S2): 3861~3867.

董杉. 2020. 地震荷载作用下顺层岩质斜坡结构面剪切特性及变形位移计算方法研究. 导师: 冯文凯. 成都: 成都理工大学博士学位论文: 1~162.

冯冀蒙, 仇文革, 王航. 2012. 隧道复合式衬砌初期支护极限状态模型试验研究. 岩土力学, 33(11): 3345~3351.

耿晓阳, 张子新. 2015. 砂岩相似材料制作方法研究. 地下空间与工程学报, 11(1): 23~28+142.

龚召熊, 郭春茂, 韩世浩. 1988. 地质力学模型及其在葛洲坝工程中的应用. 水力发电, 35(3): 31~37.

郭义, 李昕昊, 王创业, 韩天宇, 游茹, 于波. 2022. 类岩石材料脆性特征与配合比方案试验研究. 金属矿山, 57(2): 48~53.

韩伯鲤, 陈霞龄, 宋一乐. 1997. 岩体相似材料的研究. 武汉水利电力大学学报, 42(2): 7~10.

何显松, 马洪琪, 张林, 陈建叶. 2009. 地质力学模型试验方法与变温相似模型材料研究. 岩石力学与工程学报, 28(5): 980~986.

侯军, 施正荣, 蒋永林. 2017. 西部水电工程脆性岩体高应力断裂问题及防治措施报告. 中国水电工程咨询总公司, 杭州.

胡华, 吴轩, 张越. 2021. 基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析. 中国地质灾害与防治学, 32(5): 92~97.

黄达, 黄润秋. 2010. 卸荷条件下裂隙岩体变形破坏及裂纹扩展演化的物理模型试验. 岩石力学与工程学报, 29(3): 502~512.

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.

黄祥, 黄健. 2022. 低强度高脆性崩塌物理模拟相似材料配比研究. 地质灾害与环境保护, 33(2): 21~26.

贾宝新, 苑文雅, 马超义, 刘丰溥, 张建俊. 2022. 白砂岩相似材料配比试验及特性分析. 地下空间与工程学报, 18(2): 503~512.

蒋军, 侯克鹏, 周杭, 谢晋谊. 2016. 倾斜层状围岩变形规律的相似模拟研究. 矿冶, 25(4): 11~14.

康天合, 郑铜鏢, 李焕群. 2004. 循环荷载作用下层状节理岩体锚固效果的物理模拟研究. 岩石力学与工程学报, 23(10): 1724~1729.

李元海, 杜建明, 刘毅. 2018. 隧道工程物理模拟试验技术现状与趋势分析. 隧道建设(中英文), 38(1): 10~21.

李元海, 林志斌. 2015. 透明岩体相似物理模拟试验新方法研究. 岩土工程学报, 37(11): 2030~2039.

林韵梅. 1984. 实验岩石力学. 北京: 煤炭工业出版社: 1~402.

刘东燕. 2013. 边坡工程. 重庆: 重庆大学出版社: 1~260.

刘健, 刘泽功, 高魁, 薛俊华, 姜亚北. 2016. 不同装药模式爆破载荷作用下煤层裂隙扩展特征试验研究. 岩石力学与工程学报, 35(4): 735~742.

刘金水. 2020. 陇南山区大型滑坡群发性规律与机理研究. 导师: 刘高. 兰州: 兰州大学硕士学位论文: 1~83.

刘钦. 2011. 炭质页岩隧道软弱破碎围岩大变形机理与控制对策及其应用研究. 导师: 李术才. 济南: 山东大学博士学位论文: 1~219.

刘绍兴, 任红磊. 2021. 非贯通平行节理对岩石力学性质影响的颗粒流分析. 水利科技与经济, 27(10): 23~27.

刘佑荣, 唐辉明. 2008. 岩体力学. 北京: 化学工业出版社: 1~254.

洛锋. 2011. 高地应力巷道围岩破坏特征及支护机理试验研究. 导师: 杨本生. 邯郸: 河北工程大学硕士学位论文: 1~137.

马少坤, 韦榕宽, 邵羽. 2021. 基于透明土的隧道开挖面稳定性三维可视化模型试验研究及应用. 岩土工程学报, 43(10): 1798~1806+1958.

马玉骁. 2019. 盐岩地下储库地面沉降动态预测及腔群优化配置研究. 导师: 贾超. 济南: 山东大学硕士学位论文: 1~79.

穆朝民, 齐娟. 2012. 爆炸荷载作用下煤体裂纹扩展机理模型实验研究. 振动与冲击, 31(13): 58~61.

宁奕冰, 唐辉明, 张勃成, 申培武, 章广成, 夏丁. 2020. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用. 岩土力学, 41(6): 2009~2020.

秦昌安, 陈国庆, 郑海君, 唐鹏. 2019. 端部岩桥直剪破坏试验及断裂条件. 岩土力学, 40(2): 642~652.

秦四清, 王媛媛, 马平. 2010. 崩滑灾害临界位移演化的指数律. 岩石力学与工程学报, 29(5): 873~880.

任广丽, 傅宇浩, 李立云. 2021. 边坡工程灾变监测预警研究述评. 防灾科技学院学报, 23(1): 6~16.

任松, 郭松涛, 姜德义. 2011. 盐岩蠕变相似模型及相似材料研究. 岩土力学, 32(S1): 106~110.

任伟中, 朱维申, 张玉军, 永井哲夫, 孙建生. 1997. 开挖条件下节理围岩特性及其锚固效应模型试验研究. 实验力学, 12(4): 29~35.

任旭, 王鸿榕, 李先恒, 徐桂弘, 杨福敏. 2022. 岩质边坡不良地质体模型试验中泥岩相似材料试验研究. 有色金属工程, 12(7): 158~162+171.

任占强, 宋章, 林棋文, 程谦恭, 刘毅, 邓凯丰, 蒙浩, 涂津. 2021. 滑坡碎屑化运动物理模型相似材料特性研究. 水文地质工程地质, 48(2): 132~142.

沈泰, 邹竹荪. 1988. 地质力学模型材料研究和若干试验技术的探讨. 长江科学院院报, 5(4): 12~23.

沈泰. 2001. 地质力学模型试验技术的进展. 长江科学院院报, 18(5): 32~36.

史小萌, 刘保国, 肖杰. 2015. 水泥和石膏胶结相似材料配比的确 定方法. 岩土力学, 36(5): 1357~1362.

宋娅芬, 陈从新, 郑允, 夏开宗, 欧哲, 夏天游, 周意超. 2015. 缓倾软硬岩互层边坡变形破坏机制模型试验研究. 岩土力学, 36(2): 487~494.

宋彦琦, 王石磊, 孙川, 郝亮钧. 2019. 断层端部裂纹扩展相似模拟试验及力学机理. 煤田地质与勘探, 47(5): 150~156.

宋宇, 刘保国, 刘浩, 孙景来, 于明圆, 任大瑞. 2020. 基于变形与脆性特性的类岩石材料配比正交试验研究. 岩土力学, 41(8): 2675~2684.

苏士龙, 顾晓伟, 张力, 史新帅. 2020. 深部层状岩体巷道承载特性的物理模拟试验研究. 中国矿业, 29(1): 123~128.

孙吉主, 肖文辉. 2011. 基于透明土的盾构隧道模型试验设计研究. 武汉理工大学学报, 33(5): 108~112.

孙涛, 陈媛, 陈建叶, 杨宝全, 谭春. 2022. 大藤峡闸坝典型坝段坝基稳定模型试验研究. 地下空间与工程学报, 18(1): 179~189.

唐鹏, 陈国庆, 黄润秋, 路晓东. 2017. 基于物理模拟试验的岩质滑坡地表位移分析. 水文地质工程地质, 44(4): 105~110.

王德超, 李术才, 王琦, 李为腾, 王富奇, 王洪涛, 彭蓬, 阮国强. 2014. 深部厚煤层综放沿空掘巷煤柱合理宽度试验研究. 岩石力学与工程学报, 33(3): 539~548.

王汉鹏, 李术才, 张强勇, 李勇, 郭小红. 2006. 新型地质力学模型试验相似材料的研制. 岩石力学与工程学报, 25(9): 1842~1847.

王鸿儒, 赵密, 钟紫蓝, 张向阳, 赵旭, 杜修力. 2022. 跨断层隧洞拟静力缩尺试验相似材料研究. 工程力学, 39(6): 21~30+145.

王凯, 李术才, 张庆松, 张霄, 李利平, 张乾青, 刘聪. 2016. 流~固耦合模型试验用的新型相似材料研制及应用. 岩土力学, 37(9): 2521~2533.

王洛锋, 姜福兴, 于正兴. 2009. 深部强冲击厚煤层开采上、下解放层卸压效果相似模拟试验研究. 岩土工程学报, 31(3): 442~446.

王如宾, 夏瑞, 徐卫亚, 王环玲, 祁健. 2019. 滑坡堆积体降雨入渗过程物理模拟试验研究. 工程科学与技术, 51(4): 47~54.

王维强. 2020. 基于地质力学模型试验的拱坝破坏过程及变形研究. 导师: 刘耀儒. 西宁: 青海大学硕士学位论文: 1~87.

王玉峰, 程谦恭, 张柯宏, 仲昱全, 罗忠旭. 2014. 高速远程滑坡裹气流态化模型试验研究. 岩土力学, 35(10): 2775~2786.

王玉峰, 许强, 程谦恭, 李艳, 张金存. 2016. 复杂三维地形条件下滑坡-碎屑流运动与堆积特征物理模拟实验研究. 岩石力学与工程学报, 35(9): 1776~1791.

魏辉球. 2021. 锚固技术在岩土工程中的应用及作用机理分析. 西部资源, 18(2): 83~85.

吴锦华, 袁智洪, 周泳峰. 2019. 古滑坡泥灰岩模拟相似材料试验研究. 重庆交通大学学报(自然科学版), 38(10): 81~86.

肖杰, 刘保国. 2015. 水泥石膏相似材料配比试验研究. 岩土工程技术, 29(2): 65~68+108.

肖桃李, 李新平, 郭运华. 2012. 三轴压缩条件下单裂隙岩石的破坏特性研究. 岩土力学, 33(11): 3251~3256.

谢晋谊, 侯克鹏, 蒋军. 2017. 层状岩体地下开采物理模型试验研究. 矿冶, 26(2): 37~40+45.

辛亚军, 勾攀峰. 2014. 锚固岩体蠕变特性的物理模拟实验研究. 岩石力学与工程学报, 33(S2): 3613~3624.

熊凯伟. 2020. 某大型滑坡地质灾害的综合治理. 住宅与房地产, 26(36): 258~260.

须亚平, 查万理, 彭煜, 曾义, 朱爱军, 王磊, 王辉刚. 2010. 置于岩石地基的独立基础力学特性研究. 建筑结构学报, 31(S2): 298~303.

徐挺. 1982. 相似分析中土壤—机器系统参数的合理选择. 农业机械学报, 26(1): 7~18.

许江, 马天宇, 彭守建, 冯丹, 张超林, 武雪锋. 2017. 煤岩体水力压裂动态演化物理模拟试验研究. 煤炭科学技术, 45(6): 9~16+42.

许强, 陈建君, 冯文凯, 肖锐铨, 左雅娅. 2009. 斜坡地震响应的物理模拟试验研究. 四川大学学报(工程科学版), 41(3): 266~272.

许强, 刘汉香, 邹威, 范宣梅, 陈建君. 2010. 斜坡加速度动力响应特性的大型振动台试验研究. 岩石力学与工程学报, 29(12): 2420~2428.

许锡宾, 张春, 涂忠仁, 利亮, 洪文强. 2015. 嵌岩桩模型试验基岩相似材料的配比试验研究. 水运工程, 40(6): 26~30.

杨宝全, 张林, 胡成秋, 陈建叶. 2011. 复杂岩基上高拱坝坝基坝肩浅层卸荷影响与稳定性研究. 四川大学学报(工程科学版), 43(5): 71~76.

杨国香, 伍法权, 董金玉, 祁生文. 2012a. 地震作用下岩质边坡动力响应特性及变形破坏机制研究. 岩石力学与工程学报, 31(4): 696~702.

杨国香, 叶海林, 伍法权, 祁生文, 董金玉. 2012b. 反倾层状结构岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究. 岩石力学与工程学报, 31(11): 2214~2221.

杨仁树, 张宇菲, 杨立云, 吴亚磊, 马佳辉. 2013. 石膏类相似材料的配比试验研究. 中国矿业, 22(10): 125~130.

杨兆中, 余秋爽, 李小刚, 何睿, 靳文博, 许国瑞. 2021. 页岩形变及破坏特征研究进展及展望. 科学技术与工程, 21(26): 11015~11022.

袁智洪. 2018. 顺层古滑坡降雨及切坡诱发复活机制模型试验研究. 导师: 王俊杰. 重庆: 重庆交通大学硕士学位论文: 1~95.

袁宗盼, 陈新民, 袁媛, 张鹏. 2014. 地质力学模型相似材料配比的正交试验研究. 防灾减灾工程学报, 34(2): 197~202.

张桂民, 李银平, 施锡林, 杨春和, 李王娟. 2011. 一种交互层状岩体模型材料制备方法及其初步试验研究. 岩土力学, 32(2): 284~289.

张桂民, 李银平, 杨长来, 刘伟, 施锡林, 杨春和. 2012. 软硬互层盐岩变形破坏物理模拟试验研究. 岩石力学与工程学报, 31(9): 1813~1820.

张开伟, 李志勇, 齐松松, 韩文永, 聂庆科. 2020. 基于地基动力测试模型基础垫层的影响分析. 工程地球物理学报, 17(5): 636~642.

张宁, 李术才, 李明田, 杨磊. 2009. 新型岩石相似材料的研制. 山东大学学报(工学版), 39(4): 149~154.

张强勇, 李术才, 郭小红, 李勇, 王汉鹏. 2008. 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用. 岩土力学, 30(8): 2126~2130.

张少龙. 2022. 基于温度和应变响应的顺层滑坡灾变试验研究. 路基工程, 40(1): 186~192.

赵洪宝, 胡桂林, 李伟, 张欢, 雷凯. 2016. 预制裂隙岩石裂纹扩展规律的研究进展与思考. 地下空间与工程学报, 12(S2): 899~906.

赵建军, 蔺冰, 马运韬, 张晓东, 兰志勇, 黄润秋. 2016. 缓倾煤层采空区上覆岩体变形特征物理模拟研究. 煤炭学报, 41(6): 1369~1374.

赵明生, 康强, 王园园. 2022. 石灰岩相似材料力学性能试验研究. 矿业研究与开发, 42(4): 85~88.

赵仕俊, 赵锡奎, 杨少春. 2005. 地质构造物理模拟实验模型的相似分析. 西北地质, 42(4): 14~18.

赵文豪. 2016. 水介质耦合装药爆破增透试验研究. 导师: 刘泽功. 淮南: 安徽理工大学硕士学位论文: 1~70.

赵志伟, 王卫军, 袁越, 肖宇, 黄聪, 王小康. 2018. 深部软岩巷道围岩变形破坏的相似模拟试验. 矿业工程研究, 33(2): 1~6.

周纪军, 单仁亮, 贾志欣, 耿慧辉, 赵宇飞, 刘立鹏. 2013. 近区锚喷结构的爆破振动特性研究. 岩土力学, 34(8): 2225~2230.

周科. 2022. 基于相似材料模拟法的煤层开采对断层影响评价. 中国煤炭地质, 34(4): 57~62.

周维垣, 杨若琼, 刘耀儒, 林鹏. 2005. 高拱坝整体稳定地质力学模型试验研究. 水力发电学报, 24(1): 53~58+64.

Anhdan L Q, Koseki J, Hayano K, Sato T. 2015. True triaxial apparatuses with two rigid boundaries [C]//Site Characterization and Modeling: 1~10.

Bai Mao, Liu Tianquan. 1987&. An approach to problems of supporting states pillpillars and characteristics of strata and surface movement in partial mining by modelling test. Journal of China Coal Society, 24(3): 9~14.

Brown E T. 1970. Strength of models of rock with intermittent joints. Journal of the Soil Mechanics Foundations Division, 96(6): 1935~1949.

Cai Jinglong. 2020&. Research on deformation and instability mechanism and application research for Jurassic weak-cemented soft rock roadways. Instructor; Cao Shenggen. Huainan: Anhui University of Technology PhD Thesis: 1~184.

Cai Meifeng. 2002&. Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press; 1~491.

Cai Yongle, Fu Hongwei. 2017&. Experimental study on hydraulic blasting stress wave propagation and coal broken mechanism. Journal of China Coal Society, 42(4): 902~907.

Che Ping, Huang Hong Wei. 2007&. Application of similarity theory to numerical analysis on roof stability of karst cave. Journal of Underground Space and Engineering, 27(4): 617~622.

Chen Anmin, Gu Jincai, Shen Jun, Ming Zhiqing, Gu Leiyu, Lu Zeyuan. 2004&. Application study on the geomechanical model experiment techniques. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(22): 3785~3789.

Chen Jianye. 2004&. Stability study of high arch dam abutment of Jingping hydro-power station by three-dimensional geomechanics breakage model test. Instructor; Zhang Lin. Sichuan University Master's thesis: 1~118.

Chen Luwang&. Research on physical model test technology and its application in geotechnical engineering. Instructor; Bai Shiwei. Ph. D. thesis of Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics): 1~180.

Chen Shihai, Gong Jiachen, Hu Shuaiwei. 2020. Model test study on dynamic response characteristics of host rockmass and supporting bolt under blasting load. Rock and Soil Mechanics, 41(12): 3910~3918.

Chen Xinghua, Wang Zhou. 1983&. A research on stability of an arch dam abutments by geomechanical model tests. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 5(1): 77~89.

Chen Zhimin, Feng Yasong, Liu Dexue. 2015&. Research on similar materials for class IV ~ VI surrounding rock of weak rock tunnel based on orthogonal experiment. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 34(1): 12~16.

Cheng Liangkui. 2001&. SPresent status and development of ground anchorages. China Civil Engineering Journal, 48(3): 7~12+34.

Dong Jinyu, Yang Guoxiang, Wu Faquan, Qi Shengwen. 2011&. The large-scale shaking table text study of dynamic response and failure modes of bedding rock slope under earthquake. Rock and Soil Mechanics, 32(10): 2977~2982+2988.

Dong Jinyu, Yang Jihong, Wu Faquan, Yang Guoxiang, Huang Zhiquan. 2013&. Large-scale shaking table text research on acceleration response rules of bedding layered rock slope and its blocking mechanism of river. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 32(S2): 3861~3867.

Dong Shan. 2020&. Research on structural plane shear characteristics and deformation displacement calculation method bedding rock slope under seismic load. Instructor; Feng Wenkai. Chengdu: Chengdu University of Technology PhD Thesis: 1~162.

Feng Jimeng, Qiu Wenge, Wang Hang. 2012&. Model testing research on limit state of primary support in composite lining tunnels. Rock and Soil Mechanics, 33(11): 3345~3351.

Geng Xiaoyang, Zhang Zixin. 2015&. Study on preparation methods for similar materials of sandstone. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 11(1): 23~28+142.

Gong Zhaoxiong, Guo Chunmao, Han Shihao. 1988&. Geomechanical modeling and its application in Gezhouba dam project. Hydroelectricity, 35(3): 31~37.

Guo Yi, Li Xinhao, Wang Chuangye, Han Tianyu, You Ru, Yu Bo. 2022&. Experimental study on brittleness characteristics and mix ratio scheme of rock-like materials. Metal Mine, 57(2): 48~53.

Han Boli, Chen Xialing, Song Yile, Li Hongming. 1997&. Research on similar material of rockmass. Engineering Journal of Wuhan University, 47(2): 7~10.

He Xiansong, Ma Hongqi, Zhang Lin, Chen Jianye. 2009&. Study of test method of geomechanical model and temperature analogous model material. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(5): 980~986.

Hu Hua, Wu Xuan, Zhang Yue. 2021&. Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 32(5): 92~97.

Huang Chenchen, Yang Wendong, Duan Kang, Fang Lindong, Wang Ling, Bo Chunjie. 2019. Mechanical behaviors of the brittle rock-like specimens with multi-non-persistent joints under uniaxial compression. Construction and Building Materials, 220: 426~443.

Huang Da, Cen Duofeng, Ma Guowei, Huang Runqiu. 2014. Step-path failure of rock slopes with intermittent joints. Landslides, 12(5): 911~926.

Huang Da, Huang Runqiu. 2010&. Physical model test on deformation failure and crack propagation evolvement of fissured rocks under unloading. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 29(3): 502~512.

Huang Da, Jin Huhui, 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 Xiang, Huang Jian. 2022&. Physical simulation of low-strength high-brittle collapse with similar material ratios Geological Hazards and Environmental Protection. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 33(2): 21~26.

Huang Yanhua, Yang Shengqi, Tian Wenling, Zeng Wei, Yu Liyuan. 2015. 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.

Jia Baoxin, Yuan Wenya, Ma Chaoyi, Fengpu, Zhang Jianjun. 2022&. Ratio test and characteristic analysis of similar materials in white

- sand rock. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 18(2): 503~512.
- Jiang Chao, Zhao Gaofeng. 2015. A preliminary study of 3D printing on rock mechanics. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 48(3): 1041~1050.
- Jiang Jun, Hou Kepeng, Zhou Hang, Xie Jinyi. 2016#. The analog simulation research on oblique bedded surrounding rock deformation. *Mining and Metallurgy*, 25(4): 11~14.
- 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.
- Kang Tianhe, Zheng Tongbiao, Li Huanqun. 2004#. Physical simulation of bolted effect of layered and jointed rock masses under cyclic load. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(10): 1724~1729.
- Li Yuanhai, Du Jianming, Liu Yi. 2018#. Analysis of the current status and trends of physical simulation test technology for tunnel engineering. *Tunnel Construction (in English and Chinese)*, 38(1): 10~21.
- Li Yuanhai, Lin Zhibin. 2015#. Study on a new method for similar physical simulation tests of transparent rock masses. *Journal of Geotechnical Engineering*, 37(11): 2030~2039.
- Lin Yunmei. 1984. *Experimental Rock Mechanics*. Beijing: Coal Industry Press: 1~402.
- Liu Jian, Liu Zegong, Gao Kui, Xue Junhua, Lou Yabei. 2016#. Experimental study on fracture extension characteristics of coal seams under different charging modes of blasting loads. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(4): 735~742.
- Liu Jinshui. 2020#. Study on the pattern and mechanism of mass occurrence of large landslides in Longnan Mountain. Instructor: Liu Gao. Lanzhou: Master's Thesis of Lanzhou University: 1~83.
- Liu Qin. 2011#. Mechanism and control measures for large deformation of soft and fractured surrounding rocks in carbonaceous shale tunnel and its application. Instructor: Li Shucui. Jinan: Shandong University PhD Thesis: 1~219.
- Liu Shaowei, He Deyin, Fu Mengxiong. 2020. Experimental investigation of surrounding-rock anchoring synergistic component for bolt support in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 104: 103531.
- Liu Shaoxing, Ren Honglei. 2021. Granular flow analysis of the effect of non-penetrating parallel joints on rock mechanical properties. *Water Resources Technology and Economics*, 27(10): 23~27.
- Liu Yourong, Tang Huiming. 2018#. *Rock Mechanics*. Chemical Industry Press: 1~254.
- Liu, Dongyan. 2013#. *Slope Engineering*. Chongqing: Chongqing University Press: 1~260.
- Luo Feng. 2011#. Experimental study on damage characteristics and support mechanism of high ground stress roadway rock enclosures. Instructor: Yang Bensheng. Handan: Master's Thesis of Hebei University of Engineering: 1~137.
- Ma Shaokun, Wei Rongkuan, Shao Yu. 2021#. Experimental study and application of 3D visualization model for stability of tunnel excavation surface based on transparent soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 43(10): 1798~1806+1958.
- Ma Yuxiao. 2019#. Dynamic prediction of ground settlement and optimal configuration of cavity groups in salt rock underground storage reservoirs. Instructor: Jia Chao. Jinan: Master's Thesis of Shandong University: 1~79.
- Mu Zhaomin, Qi Juan. 2012#. Experimental study on the crack expansion mechanism of coal body under explosive loading. *Vibration and Impact*, 31(13): 58~61.
- Ning Yibing, Tang Huiming, Zhang Bocheng, Shen Peiwu, Zhang Guangcheng, Xia Ding. 2020#. Experimental application of orthogonal design—based rock similar material proportioning and bottom friction physical model. *Geotechnics*, 41(6): 2009~2020.
- 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.
- Peng Jianyu, Zhang Fengpeng, Du Chuan, Yang Xiaohui. 2020. Effects of confining pressure on crater blasting in rock-like materials under electric explosion load. *International Journal of Impact Engineering*, (139): 103534.
- Prudencio M, Jan M. 2007. Strength and failure modes of rock mass models with non-persistent joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(6): 890~902.
- Qin Changan, Chen Guoqing, Zheng Haijun, Tang Peng. 2019#. Direct shear damage tests and fracture conditions of end rock bridges. *Geotechnics*, 40(2): 642~652.
- Qin Siqing, Wang Yuanyuan, Ma Ping. 2010#. Exponential laws of critical displacement evolution for landslides and avalanches. *Journal of Rock Mechanics Engineering Analysis with Boundary Elements*, 29(5): 873~880.
- 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): 103~107.
- Ren Guangli, Fu Yuhao, Li Liyun. 2021#. Review of research on disaster monitoring and early warning of slope engineering. *Journal of the Academy of Disaster Prevention Science and Technology*, 23(1): 6~16.
- Ren Song, Guo Songtao, Jiang Deyi. 2011#. Similar model and similar materials for salt rock creep. *Geotechnics*, 32(S1): 106~110.
- Ren Weizhong, Zhu Weishen, Zhang Yujun, Tetsuo Nagai, Sun Jiansheng. 1997#. Experimental study on the characteristics of jointed enclosing rocks and their anchorage effect under excavation conditions. *Journal of Experimental Mechanics*, 12(4): 29~35.
- Ren Xu, Wang Hongrong, Li Xianheng, Xu Guihong, Yang Fumin. 2022#. Experimental study on similar materials of mudstone in the model test of rocky slopes with poor geology. *Noperrous Metals Engineering*, 12(7): 158~162+171.
- Ren Zhanqiang, Song Zhang, Lin Qiwen, Cheng Qiangong, Liu Yi, Deng Kaifeng, Meng Hao, Tu Jin. 2021. Study on similar material properties in physical model of landslide debrisification movement. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(2): 132~142.
- Shan Renliang, Zhou Jijun, Xia Yu, Kong Xiangsong, Chang Lifu, Xu Cheng. 2011#. Axial stress distribution of grouted rockbolts subjected to blast loading. *Rock and Soil Mechanics*, 32(10): 2965~2971+2976.
- Shen Tai, Zou Zhusun. 1988#. Research on geomechanical model materials and discussion of several test techniques. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 5(4): 12~23.
- Shen Tai. 2001#. Progress in geomechanical model test technology. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 18(5): 32~36.
- Shi Xiaomeng, Liu Baoguo, Xiao Jie. 2015#. A method for determining the ratio of similar materials with cement and plaster as bonding

- agents. *Rock and Soil Mechanics*, 36(5): 1357~1362.
- Song Yafen, Chen Congxin, Zheng Yun, Xia Kaizong, Ou Zhe, Xia You, Zhou Yichao. 2015&. Model experimental study of deformation and failure mechanism of low-angled slopes with interbedding of soft and hard rocks. *Rock and Soil Mechanics*, 36(2): 487~494.
- Song Yanqi, Wang Shilei, Sun Chuan, Hao Liangjun. 2019&. Similar model test and mechanical analysis of fault structure. *Coal Geology & exploration*, 47(5): 150~156.
- Song Yu, Liu Baoguo, Liu Hao, Sun Jinglai, Yu Mingyuan, Ren Darui. 2020&. Orthogonal test method for determination of the proportion of rock-like material based on properties of deformation and brittleness. *Rock and Soil Mechanics*, 41(8): 2675~2684.
- Su Sshilong, Gu Xiaowei, Zhang Li, Shi Xinshuai. 2020&. Physical simulation test study on bearing characteristics of deep layerde rock mass roadway. *China Mining Magazine*, 29(1): 123~128.
- Sun Ji, Xiao Wenhui. 2011#. Experimental design of shield tunnel model based on transparent soil. *Journal of Wuhan University of Technology*, 33(5): 108~112.
- Sun Tao, Chen Yuan, Chen Jianye, Yang Baoquan, Tan Chun. 2022&. Model experimental study on foundation stability of typical section of Datengxia Sluice Dam. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 18(1): 179~189.
- Tang Huiming, Zou Zongxing, Xiong Chengren, Wu Yiping, Hu Xinli, Wang Liangqing, Lu Sha, Criss, Li Changdong. 2015. An evolution model of large consequent bedding rockslides, with particular reference to the Jiweishan rockslide in Southwest China. *Engineering Geology*, (186): 17~27.
- Tang Peng, Chen Guoqing, Huang Runqiu, Lu Xiaodong. 2017&. Surface displacement analysis of rock slope based on physical simulation tests. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 44(4): 105~110.
- Wang Dechao, Li Shucai, Wang Qi, Li Weiteng, Wang Fuqi, Wang Hongtao, Peng Peng, Ruan Guoqiang. 2014&. Experimental study on the reasonable width of coal columns along the empty excavation lane in the comprehensive release of deep thick coal seams. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(3): 539~548.
- Wang Hanpeng, Li Shucai, Zhang Qiangyong, Li Yong, Guo Xiaohong. 2006&. Development of a new geomechanical similar material. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(9): 1842~1847.
- Wang Hongru, Zhao Mi, Zhong Zilan, Zhang Xiangyang, Zhao Xiao, Du Xiuli. 2022&. Similar materials for quasi-static scaled tests of fault-crossing tunnels. *Engineering Mechanics*, 39(6): 21~30+145.
- Wang Kai, Li Shshucai, Zhang Qingsong, Zhang Xiao, Li Liping, Zhang Qianqing, Liu Cong. 2016&. Development and application of new similar materials of surrounding rock for a fluid—solid coupling model test. *Rock and Soil Mechanics*, 37(9): 2521~2533.
- Wang Luofeng, Jiang Fuxing, Yu Zhengxing. 2009&. Similar material simulation experiment on destressing effects of the deep thick coal seam with high burst liability after mining upper and lower protective seams. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 31(3): 442~446.
- Wang Rubin, Xia Rui, Xu Weiya, Wang Huanling, Qi Jian. 2019&. Study on physical simulation of rainfall infiltration process of landslide accumulation body. *Advanced Engineering Sciences*, 51(4): 47~54.
- Wang Weiqiang. 2020#. Research on the failure process and deformation of arch dam based on geomechanical model test. Instructor; Liu Yaoru. Xining: Master's Thesis of Qinghai University; 1~87.
- Wang Yufeng, Cheng Qiangong, Zhang Kehong, Zhong Yiquan, Luo Zhongxu. 2014&. Study of fluidized characteristics of rock avalanches under effect of entrapped air. *Rock and Soil Mechanics*, 35(10): 2775~2786.
- Wang Yufeng, Xu Qiang, Cheng Qiangong, Li Yan, Zhang Jincun. 2016&. Experimental study on the propagation and deposit features of rock avalanche along 3D complex topography. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(9): 1776~1791.
- Wei Huiqiu. 2021&. Application and mechanism analysis of anchoring technology in geotechnical engineering. *Western Resources*, 18(2): 83~85.
- Wu Jinghua, Yuan Zhihong, Zhou Yongfeng. 2019&. Experimental study on simulated similar materials of ancient landslide marl. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 38(10): 81~86.
- Wu Tianhua, Gao Yongtao, Zhou Yu, Li Jianwang. 2020. Experimental and numerical study on the interaction between holes and fissures in rock-like materials under uniaxial compression. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, (106): 102488.
- Xia Yingjie, Zhang Chuangqing, Zhou Hui, Hou Jing, Su Gguoshao, Gao Yang, Liu Ning, Singh Hemant Kumar. 2020. Mechanical behavior of structurally reconstructed irregular columnar jointed rock mass using 3D printing. *Engineering Geology*, (268): 105509.
- Xiao Jie, Liu Baoguo. 2015&. Research on cement & plaster similar materials proportioning test. *Geotechnical Engineering Technique*, 29(2): 65~68+108.
- Xiao Taoli, Li Xinoing, Guo Yunhua. 2012&. Experimental study of failure characteristic of single jointed rock mass under triaxial compression tests. *Rock and Soil Mechanics*, 33(11): 3251~3256.
- Xie Jinyi, Hou Kepeng, Jiang Jun. 2017&. Research of model experiment in layered rock mass of underground mining. *Mining and Metallurgy*, 26(2): 37~40+45.
- Xin Yajun, Gou Panfeng. 2014&. Study on physical simulation experiment for anchorage rock creep cheep characterisitics. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(S2): 3613~3624.
- Xiong Kaiwei. 2020#. Comprehensive treatment of a large landslide geological hazard. *Housing and Real Estate*, 26(36): 258~260.
- Xu Jiang, Ma Tianyu, Peng Shoujian, Feng Dan, Zhang Chaolin, Wu Xuefeng. 2017&. Experimental study on physical simulation experiment of hydraulic fracturing dynamic evolution in coal and rock mass. *Coal Science and Technology*, 45(6): 9~16+42.
- Xu Qiang, Chen Jianjun, Feng Wenkai, Xiao Ruihua, Zuo Yaya. 2009&. Study of the seismic response of slopes by physical modeling. *Advanced Engineering Sciences*, 41(3): 266~272.
- Xu Qiang, Liu Hanxiang, Zou Wei, Fan Xuanmei, Chen Jianjun. 2010&. Large-scale table test study of acceleration dynamic responses characteristics of slopes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(12): 2420~2428.
- Xu Ting. 1982#. Reasonable selection of soil machine system parameters in similarity analysis. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 26(1): 7~18.
- Xu Xibin, Zhang Chun, Tu Zhongren, Li Liang, Hong Wenqiang. 2015&. Experimental research on similar material of bedrock proportioning test for rock-socketed pile model test. *Port & Waterway Engineering*, 40(6): 26~30.

- Xu Yaping, Cha Wanli, Peng Yu, Zeng Yi, Zhu Aijun, Wang Lei, Wang Huigang. 2010&. Study on mechanical characteristics of independent foundations on rock subgrade. *Journal of Building Structures*, 31(S2): 298~303.
- Yang Baoquan, Zhang Lin, Hu Chengqiu, Chen Jianye. 2011&. Study on influence of dam foundation shallow unloading and stability of high arch dam with complicated rock foundation. *Advanced Engineering Sciences*, 43(5): 71~76.
- Yang Guoxiang, Wu Faquan, Dong Jinyu, Qi Shengwen. 2012a&. Study of dynamic response characters and failure mechanism of rock slope under earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(4): 696~702.
- Yang Guoxiang, Ye Hailin, Wu Faquan, Qi Shengwen, Dong Jinyu. 2012b&. Shaking table test on dynamic response characteristics and failure mechanism of antidip layered rock slope. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(11): 2214~2221.
- Yang Mengze, Yang Yu, Zhao Bo, Nascimbene R. 2021. Study on the proportion of conglomerate similar materials based on the orthogonal test. *Shock and Vibration*: 1~9.
- Yang Renshu, Zhang Yufei, Yang Liyun, Wu Yalei, Ma Jiahui. 2013&. Study on the mixing proportion test of similar material gypsum. *China Mining Magazine*, 22(10): 125~130.
- Yang Zhaozhong, Yu Qiushuang, Li Xiaogang, He Rui, Jin Wenbo, Xu Guorui. 2021&. Research progress and prospect of shale deformation and failure characterist. *Science Technology and Engineering*, 21(26): 11015~11022.
- Yuan Zhihong. Experimental study on the mechanism of rainfall and cut-induced resurrection of down-layer ancient landslides. Instructor; Wang Junjie. Chongqing; Master's thesis of Chongqing Jiaotong University; 1~95.
- Yuan Zongpan, Chen Xinmin, Yuan Yuan, Zhang Peng. 2014&. Study on ratio of similar material of geomechanical model based on orthogonal test. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 34(2): 197~202.
- Zhai Xinxian. 2002&. Simulation testing study on roof strata displacement of top-coal caving face. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, (11): 1667~1671.
- Zhang Guimin, Li Yinping, Shi Xilin, Yang Chunhe, Wang Lijuan. 2011&. Research on a model material preparation method for alternate layered rock mass and preliminary experiment. *Rock and Soil Mechanics*, 32(2): 284~289.
- Zhang Guimin, Li Yinping, Yang Changlai, Liu Wei, Shi Xilin, Yang Chunhe. 2012&. Physical simulation of deformation and failure mechanism of soft and hard interbedded salt rocks. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(9): 1813~1820.
- Zhang Kaiwei, Li Zhiyong, Qi Songsong, Han Wenyong, Nie Qingke. 2020&. Analysis of influence of foundation cushion based on ground dynamic test. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 17(5): 636~642.
- Zhang Long, Liu Yaoru, Yang Qiang. 2014. Evaluation of reinforcement and analysis of stability of a high-arch dam based on geomechanical model testing. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 48(5): 803~818.
- Zhang Ning, Li Shucai, Li Mingtian, Yang Lei. 2009&. Development of a new rock similar material. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 39(4): 149~154.
- Zhang Qiangyong, Li Shucai, Guo Xiaohong, Li Yong, Wang Hanpeng. 2008&. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application. *Rock and Soil Mechanics*, 30(8): 2126~2130.
- Zhang Shaolong. 2022&. Experimental study on bedding landslide disaster based on temperature and strain response. *Subgrade Engineering*, 40(1): 186~192.
- Zhao Hongbao, Hu Guilin, Li Wei, Zhang Huan, Lei Kai. 2016&. Research progress and thinking on the crack propagation law of pre-fractured rock. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 12(S2): 899~906.
- Zhao Jianjun, Lin Bing, Ma Yuntao, Zhang Xiaodong, Lan Zhiyong, Huang Runqiu. 2016&. Physical modeling on deformation characteristics of overlying rock mass above mined-out area in gently inclined coal seam. *Journal of China Coal Society*, 41(6): 1369~1374.
- Zhao Mingsheng, Kang Qiang, Wang Yuanyuan. 2022. Experimental study on mechanical properties of similar limestone materials. *Mining Research and Development*, 42(4): 85~88.
- Zhao Shijun, Zhao Xikui, Yang Shaochun. 2005. Similar analysis of geological structure physical model. *Northwestern Geology*, 42(4): 14~18.
- Zhao Wenhao. 2016&. Experimental study on improving the penetrability of coal seam with water-coupling blasting. Instructor; Liu Zegong. Huainan; Master's Thesis of Anhui University of Science and Technology; 1~70.
- Zhao Y, He L. 2016. Nonlinear progressive failure analysis of surrounding rock system based on similarity theory [C]//MATEC Web of Conferences. EDP Sciences; 07004.
- Zhao Zhiwei, Wang Weijun, Yuan Yue, Xiao Yu, Huang Cong, Wang Xiaokang. 2018&. Similar material simulation test study of deep soft rock roadway deformation and failure. *Mineral Engineering Research*, 33(2): 1~6.
- Zhou Chuanbo. 2001. The analysis of similarity theory in the model test on field smaller bench. *Blasting*, 18(4): 4~6.
- Zhou Jijun, Shan Renliang, Jia Zhixin, Geng Huihui, Zhao Yufei, Liu Lipeng. 2013&. Study of vibration characteristics of rockbolt and shotcrete structures near the explosion source under blasting load. *Rock and Soil Mechanics*, 34(2): 2225~2230.
- Zhou Ke. 2022&. Assessment of Impact on Fault from Coal seam extraction based on similar material simulation method. *Coal Geology of China*, 34(4): 57~62.
- Zhou Tao, Zhu Jianbo. 2018. Identification of a suitable 3D printing material for mimicking brittle and hard rocks and its brittleness enhancements. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 51(3): 765~777.
- Zhou Weiyuan, Yang Ruqiong, Liu Yaoru, Lin Peng. 2005&. Research on geomechanical model of rupture tests of arch dams for their stability. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 24(1): 53~58+64.

A review of the selection and application of experimental materials in the study of physical simulation of engineering rock masses

SU Zhandong^{1, 2)}, ZHOU Sizhe¹⁾, WANG Chenghu³⁾, SUN Jinzhong⁴⁾, ZENG Yangnong¹⁾, ZHANG Jianyong^{1, 2)}, ZHANG Minglei^{1, 2)}, WANG Lei^{1, 2)}, ZHU Zhuohui^{1, 2)}, LI Xiaorui^{1, 2)}

1) *College of Geology and Engineering, Institute of Disaster Prevention, Langfang, Hebei, 065201;*

2) *Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Evaluation of Hebei Province, Langfang, Hebei, 065201;*

3) *Key Laboratory of Crustal Dynamics, National Academy of Natural Disaster Prevention, Ministry of Emergency Management, Beijing, 100085;*

4) *College of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing, 100083*

Abstract: Engineering rock mass physical modelling is an important method to study rock mass engineering problems. The selection of the model materials is essential to the quality of the experiment. Accurately determine the physical and mechanical properties of rock masses in civil engineering requires a large number of experiments to determine the types and proportions of materials. This is troublesome and inconvenience to the modelling process. Therefore, the application of experimental materials for different types of rock mass engineering problems is comprehensively evaluated. River sand and quartz sand are the most commonly used aggregate of traditional materials when modelling soft rock. On the basis of river sand and quartz sand, more barite powder is added to adjust the gradation and strength of hard rock. The cementing agent is usually cement, gypsum or a composite material mixed with both. Non-traditional materials are chosen to address the engineering problems. They include iron powder, molten quartz sand and ceramics acting as aggregate, and polymer, alcohol and rosin acting as cementing agent. In general, the larger the particle size of the aggregate, the greater the strength will be. However, aggregates with significantly large particle size are not favored in similar simulation. The strength of the material decreases with the increase in the sand—binder ratio. When studying rock mass with significant joints and fissures, auxiliary materials such as pulverized coal, crushed mica, perlite and foaming agent should be added to control the joints, micro-fissures, structural planes and holes of samples. The conclusions from this review are expected to provide reference for the physical modelling of rock mass engineering problems.

Keywords: rock mass engineering; physical modelling; similarity criterion; test materials

Acknowledgements: This work was supported by the Key Project of Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. ZY20215113), National Natural Science Foundation of China (No. 41807270).

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

Manuscript received on: 2022-07-07; Accepted on: 2022-09-10; Published online on: 2022-11-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 11. 011

Edited by: LIU Zhiqiang