

基于正交试验的不同胶结强度Bimrock岩体力学特性试验研究

吴 迁, 魏继红, 刘 刚, 施 威, 李 凯

An experimental study of the mechanical properties of the Bimrock rock mass with different cementing strength based on orthogonal tests

WU Qian, WEI Jihong, LIU Gang, SHI Wei, and LI Kai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210014>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含裂隙膨胀土无侧限抗压强度特征试验研究

An experimental study of the unconfined compressive strength characteristics of the expansive soil with cracks

李关洋, 顾凯, 王翔, 施斌 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 62-70

土工格室加筋垫层路堤破坏模式和稳定性评价

Failure mode and stability evaluation of geocell-reinforced cushion embankment

金家庆, 徐超, 梁程, 刘若桐 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 86-86

正反粒序结构条件下滑坡堰塞坝破坏模式研究

A study of the failure mode of landslide dam under the structural conditions of positive and reverse grain sequences

吴茂林, 罗刚, 高延超, 陈西南, 翟新乐 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 124-132

不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究

A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness

陈林万, 裴向军, 张晓超, 张硕, 钟玉健, 罗欣 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 137-147

降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验

Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall

陈林万, 张晓超, 裴向军, 张硕, 龚伟翔, 钟玉健 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 151-160

冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究

Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109-115



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210014

吴迁, 魏继红, 刘刚, 等. 基于正交试验的不同胶结强度 Bimrock 岩体力学特性试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 120-128.

WU Qian, WEI Jihong, LIU Gang, *et al.* An experimental study of the mechanical properties of the Bimrock rock mass with different cementing strength based on orthogonal tests[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 120-128.

基于正交试验的不同胶结强度 Bimrock 岩体力学特性试验研究

吴 迁¹, 魏继红¹, 刘 刚², 施 威², 李 凯¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100;

2. 江苏省地质矿产局第一地质大队, 江苏 南京 210041)

摘要: Bimrock 在不同胶结强度下的力学特性鲜有研究, 而胶结强度对 Bimrock 力学特性和变形破坏特征有着重要影响。为探究不同胶结强度对 Bimrock 力学特性的影响规律, 通过正交试验设计法, 开展 Bimrock 基质配比试验, 对不同配比基质试样的强度力学参数进行参数敏感性分析, 基于正交试验结果, 制作不同胶结强度的 Bimrock 试样, 通过单轴压缩试验, 分析不同胶结强度对 Bimrock 力学特性的影响。结果表明: Bimrock 试样的单轴抗压强度和弹性模量与其胶结强度呈正相关, 从弱胶结到强胶结, 单轴抗压强度从 11.02 MPa 增加到 34.21 MPa, 弹性模量从 2.11 GPa 增加到 5.57 GPa; 随着胶结强度的增加, 试样在变形至破坏的各阶段表面裂纹数量均减少; 强胶结试样的压缩破坏模式表现为单条主裂纹的贯通破坏, 破坏时间较短, 脆性破坏明显; 中等胶结试样发生整体与局部剪切破坏, 表现为一条明显贯穿整个试样和一条仅贯穿试样下半部分的剪切破坏面; 弱胶结试样发生横向拉张破坏, 可见多条沿竖直方向的张拉裂纹, 局部出现张剪破坏并存的破坏特征, 从变形到破坏产生的裂纹较多且较为破碎, 破坏时间相对较长。Bimrock 岩体工程问题复杂而且较难处理, 针对 Bimrock 力学特性与变形破坏特征的研究对工程建设以及地质灾害防治有重要意义。

关键词: Bimrock; 胶结强度; 破坏模式; 单轴抗压强度

中图分类号: TU458; P642.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0120-09

An experimental study of the mechanical properties of the Bimrock rock mass with different cementing strength based on orthogonal tests

WU Qian¹, WEI Jihong¹, LIU Gang², SHI Wei², LI Kai¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China; 2. The First Brigade of Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources, Nanjing, Jiangsu 210041, China)

Abstract: The mechanical properties of Bimrock under different cementation strength are rarely studied, and the cementation strength has an important influence on the mechanical properties and deformation and failure characteristics of Bimrock. In order to explore the influence of different cementation strength on the mechanical

收稿日期: 2022-10-09; 修订日期: 2023-01-04

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41672258)

第一作者: 吴迁 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土体结构特征及稳定性方面的研究工作。E-mail: wu_qian@hhu.edu.cn

通讯作者: 魏继红 (1976-), 女, 博士, 教授, 主要从事岩土体稳定性工作。E-mail: wjhfish@hhu.edu.cn

properties of Bimrock, the proportion test of Bimrock cementation matrix was conducted by using the orthogonal test design method, and the parameter sensitivity analysis was carried out on the strength mechanical parameters of the samples with different proportions of matrix. Based on the orthogonal test results, the Bimrock samples with different cementation strength were made, and the influence of different cementation strength on the mechanical properties of Bimrock was analyzed through the uniaxial compression test. The results show that the uniaxial compressive strength and elastic modulus of the Bimrock specimens are positively correlated with their cementation strength. From weak cementation to strong cementation, the peak uniaxial compressive strength increases from 11.02 MPa to 34.21 MPa, and the elastic modulus increases from 2.11 GPa to 5.57 GPa, respectively. With the increasing bonding strength, the number of surface cracks in each stage from deformation to failure decreases. The compression failure mode of the strongly bonded specimen is the through failure of a single main crack, with short failure time and obvious brittle failure. The overall and local shear failure occurred in the moderately cemented specimen, which is represented by a shear failure surface that obviously penetrates the whole specimen and a shear failure surface that only penetrates the lower part of the specimen. The weak cementation sample is subject to transverse tensile failure. A number of tensile cracks parallel to the vertical direction can be seen, and the failure characteristics of coexistence of tensile and shear failure can be seen locally. From deformation to failure, there are many cracks that are relatively broken, and the failure time is relatively long. The engineering problems of Bimrock are complex and difficult to deal with. The research on the mechanical properties and deformation and failure characteristics of Bimrock is of great significance for engineering construction and geological disaster prevention.

Keywords: Bimrock; strength of cementation; failure mode; uniaxial compressive strength

Block-in-matrix rock(Bimrock)是一种由块石和胶结物质组成的,且前者与后者的强度比大于2的非连续、非均质地体,力学性质主要受基质、块石以及二者接触面共同控制^[1-2]。从工程角度出发,只要是相对软弱的基质材料中镶嵌有硬质岩块,即使形成时的地质作用、成岩作用以及过程迥异,在工程力学性状的分析模式上都是相似的^[3],因此,Medley^[1]刻意摒弃地质学上的定义,将类地质体定义为Block-in-matrix rock。砾岩^[4]、角砾岩^[5-7]和混杂岩^[8-9]是此类地质体的典型代表。Bimrock力学特性受多种因素影响,包括块石的含量、种类、级配、形状以及胶结物材料的含量、种类、胶结强度等^[10],工程中遇到此类地质体往往较难正确分析其力学特性。大量的工程实践也证明,Bimrock岩体工程问题复杂而且较难处理,其引起的破坏形式多样,包括滑坡、崩塌等^[6,11-12],错误的处理方式会对工程造成严重的破坏,甚至影响人民的生命财产安全。因此,针对Bimrock力学特性与变形破坏特征的研究对工程建设以及地质灾害防治有重要意义。

国内外已有许多学者对Bimrock进行研究,且大多从块石的角度分析其力学特性以及变形破坏特

征。Lindquist^[13]对块石体积含量(volumetric block proportion, VBP)为30%~75%的Bimrock试样进行单轴压缩试验,结果表明,试样破裂面一般会绕过其内部块石,且随着试样VBP的增加,试样弹性模量和摩擦角增加,而单轴抗压强度(uniaxial compressive strength, UCS)和黏聚力减小。Afifipour等^[14-15]制备了块石质量含量(rock block proportions, RBP)为70%~90%的Bimrock试样,研究高RBP对Bimrock破坏模式的影响,结果表明RBP在Bimrock的破坏模式中起着重要作用,试样的UCS和破坏应变均随RBP的增加呈指数下降趋势。Afifipour等^[10]研究了Bimrock压缩应力-应变曲线的峰后行为,结果表明,当RBP较高时,试样的峰后应力随应变增加小幅下降,而较低RBP的试样其峰后应力随应变增加急剧下降。Medley^[16]通过单轴压缩试验观察Bimrock的破裂面,发现高RBP导致Bimrock黏聚力降低的原因是Bimrock内部块石和基质的接触比会随着RBP的增加而增加,而二者的接触面通常是Bimrock中强度最薄弱的部位。Sonmez等^[2,17]对安卡拉地区的火山凝灰岩进行单轴压缩试验,建立了试样UCS与RBP之间的试验相关性,以此估测火山爆发产生的岩石碎片与火山灰混合形

成的 Bimrock 的单轴抗压强度, 结果表明, Bimrock 试样的 UCS 取决于其 RBP 以及块石与基质之间的强度比。Coli 等^[18]通过大型原位直剪试验对 Bimrock 进行力学特性分析, 发现随着 VBP 的增加, 试样内摩擦角随之增加, 而黏聚力随之减小。Kahraman 等^[16-7]通过室内试验研究了断层角砾岩的力学特性, 结果表明, 断层角砾岩等非均质 Bimrock 的强度取决于 RBP、块石与基质的强度比以及试样的尺寸。Sonmez 等^[19]用石膏、膨胀土和水泥配比不同强度的 Bimrock 基质, 研究了块石和基质的强度比对 Bimrock 力学特性的影响。Akram 等^[4]用钢球代替块石, 用水泥作为胶结物制备了 Bimrock 模型试样, 发现试样的破坏机理很大程度上受胶结物水泥的强度控制。油新华^[20]分析了土石混合体内部结构特点, 将土石混合体分为均质连续体、等效均质连续体、非均质不连续体和结构面控制非连续体 4 种情况来处理, 并通过野外水平推剪试验, 对土石混合体的强度变化特征及破坏面形态进行研究。杨忠平等^[21]通过室内大型直剪试验, 研究了土石混合体剪切变形特征和抗剪强度与块石自身强度的关系, 结果表明, 随着块石强度的增大, 试样破坏时的裂隙密度、抗剪强度以及内摩擦角随之变大。胡峰等^[22]通过大型直剪试验, 研究了土石混合体在剪切过程中的剪应力跌落现象, 发现高含石量和尺寸大于砂土剪切带厚度的块石组成的土石混合体在较大垂直应力(大于 200 kPa)作用下易出现剪应力跌落。

综上所述, 国内外学者对 Bimrock 进行了大量研究, 但国外学者大多从块石的角度去分析, 而国内学者则是着重于其形成原因及全球板块构造学说上的意义探讨, 以及将胶结基质概化为土的土石混合体研究, 国内外对不同胶结强度的 Bimrock 力学特性的研究比较少, 而胶结强度对其力学特性和变形破坏特征有着重要的影响, 针对不同胶结强度导致 Bimrock 力学特性变化的研究具有重要理论意义和工程意义。因此, 本文基于正交试验敏感性分析结果, 通过室内单轴压缩试验, 研究不同胶结强度对 Bimrock 强度特性和破坏特征的影响。

1 Bimrock 基质配比试验

为研究胶结强度对 Bimrock 强度特性和破坏特征的影响, 采用正交试验设计法, 以单轴抗压强度(σ_c)、弹性模量(E)、黏聚力(c)和内摩擦角(φ)作为力学强度评价指标, 配制不同胶结强度的 Bimrock 基质试样, 为后续试验提供基础数据。

1.1 配比材料

为配制不同胶结强度 Bimrock 试样基质, 以细度为 80~120 目的石英砂作为配重骨料, 以细度为 1 500 目的 α 型超硬高强石膏和普通硅酸盐水泥作为胶结物。由于 α 型超硬高强石膏凝固很快, 每次制样需添加 0.5% 石膏质量的缓凝剂, 如图 1 所示。

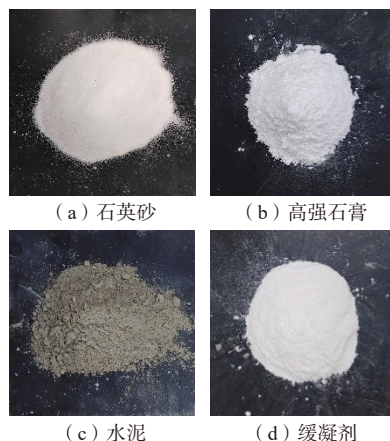


图 1 试验材料

Fig. 1 Test materials

1.2 正交试验设计

选择石英砂含量(石英砂与固体颗粒总质量之比)、水泥与高强石膏质量比、水含量作为影响因素, 每种因素设计 3 种正交水平, 其中, 水含量为水质量与固体颗粒总质量的百分比。通过前期预试验确定各因素对应的正交水平值, 见表 1。表 2 为 9 组正交配比方案, 分别记为 J1—J9。

表 1 各因素水平值
Table 1 Level of the factors

水平组数	石英砂/%	水泥: 石膏	水含量/%
水平 1	30	1.8 : 1	19
水平 2	45	2.4 : 1	20
水平 3	60	3.0 : 1	21

1.3 试验过程及敏感性分析

1.3.1 试验过程

试样制作流程如图 2 所示。按 9 种不同配比方案称取各组材料, 将所有材料混合均匀后加入含有 0.5% 石膏质量的缓凝剂的水, 快速搅拌, 将混合料分 3 次注入涂有润滑油的模具中(图 2c), 将注满混合料的试样盒放在振动器上充分排出气泡(图 2d)。在室内常温下养护 20 h 后脱模(直剪试样盒脱模采用图 2e 所示空气压缩机), 脱模后继续在室内常温环境下养护 21 d, 制作完成后的试样见图 3。

表 2 正交配比方案
Table 2 Orthogonal matching schemes

方案	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
石英砂/%	30	30	30	45	45	45	60	60	60
水泥:石膏	1.8:1	2.4:1	3.0:1	1.8:1	2.4:1	3.0:1	1.8:1	2.4:1	3.0:1
水含量/%	19	20	21	20	21	19	21	19	20

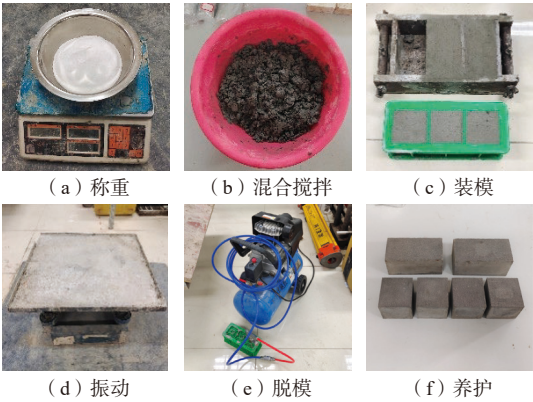


图 2 制样流程
Fig. 2 Process of specimen production

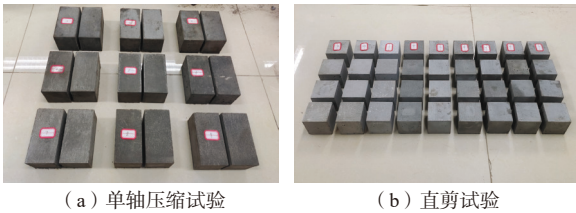


图 3 不同配比的 Bimrock 基质试样
Fig. 3 Bimrock matrix samples with different proportions

1.3.2 敏感性分析

通过室内单轴压缩试验和直剪试验,测得试样 σ_c 、 E 、 c 以及 φ ,试验结果见表3。

根据正交试验理论,由正交设计得到的试验数据常通过敏感性分析进行数据处理,敏感性分析可以通过对每一因素求其极差来分析问题,即由平均试验值中最大值和最小值的差来找到影响指标的主要因素,极差(R)的计算表达式为:

$$R = X_{\max} - X_{\min} \tag{1}$$

表 4 各因素敏感性分析表
Table 4 Sensitivity analysis of the factors

水平组数	单轴抗压强度/MPa			弹性模量/GPa			黏聚力/MPa			内摩擦角/(°)		
	A因素	B因素	C因素	A因素	B因素	C因素	A因素	B因素	C因素	A因素	B因素	C因素
水平1	24.43	14.79	18.94	4.04	2.91	3.48	2.62	1.33	1.70	41.20	35.80	41.10
水平2	20.67	19.51	18.24	3.75	3.36	3.60	1.79	1.73	1.75	42.80	44.60	40.20
水平3	11.77	22.57	19.96	2.87	4.40	3.59	0.80	2.15	1.76	34.10	37.70	36.80
极差	12.66	7.78	1.72	1.17	1.49	0.12	1.82	0.82	0.06	8.70	8.80	4.30

表 3 各配比方案试样结果

方案	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
σ_c /MPa	20.21	23.96	29.12	16.13	21.92	23.96	8.04	12.64	14.62
E /GPa	3.24	3.86	5.01	3.25	3.51	4.50	2.24	2.70	3.68
c /MPa	2.18	2.61	3.08	1.42	1.79	2.15	0.40	0.78	1.22
φ /(°)	42.5	46.7	34.4	37.6	48.5	42.3	27.4	38.6	36.4

其中, $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 为各因素各相同水平下的最大值和最小值,其大小反映各因素对指标值的影响程度,极差越大表明该因素的不同水平对指标值产生的差异越大^[23]。

将石英砂含量、水泥与石膏质量比和水含量分别记为A因素、B因素和C因素,通过对每一因素求其极差来进行敏感性分析,根据试验结果,分析各因素对试样强度参数的影响,如表4所示。

由表4可知,试样单轴抗压强度随A因素的增大而减小,随B因素的增大而增大,C因素的变化对单轴抗压强度影响较小;石英砂含量对试样单轴抗压强度影响最大,极差为12.66;其次是水泥与石膏质量比,极差为7.78;水含量影响最小,极差为1.72。3个因素对单轴抗压强度的敏感性从大到小为:A>B>C,其中,石英砂含量对试样单轴抗压强度起控制作用。试样弹性模量随A因素的增大而减小,随B因素的增大而增大,C因素的变化对其影响较小;水泥与石膏质量比对试样弹性模量影响最大,极差为1.49;其次是石英砂含量,极差为1.17;水含量影响最小,极差为0.12。3个因素对弹性模量的敏感性从大到小为:B>A>C,其中,水泥与石膏质量比对试样弹性模量起控制作用。

试样黏聚力随 A 因素的增大而减少, 随 B 因素的增加而增加, C 因素的变化对黏聚力影响较小; 石英砂含量对试样黏聚力影响最大, 极差值为 1.82, 其次是水泥与石膏质量比, 极差为 0.82; 水含量影响最小, 极差为 0.06。3 个因素对黏聚力敏感性从大到小为: $A > B > C$, 其中, 石英砂含量对试样黏聚力起控制作用。试样内摩擦角随 C 因素的增大而减小, 与 A 因素和 B 因素没有明显单调相关关系; 水泥与石膏质量比和石英砂含量对内摩擦角影响均较大, 极差分别为 8.8 和 8.7; 水含量影响最小, 极差为 4.3。3 个因素对内摩擦角敏感性从大到小为: $B > A > C$, 水泥与石膏质量比、石英砂含量对试样内摩擦角起控制作用。

通过上述敏感性分析, 得到 3 个影响因素对试样单轴抗压强度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角的影响规律。试验结果表明, 试样各力学参数变化范围大, 规律明显。可以看出, 水泥与石膏质量比、石英砂含量对 Bimrock 基质试样的力学特性起主要控制作用。其中, 水泥与石膏质量比对试样弹性模量起主要控制作用, 这是由于水泥硬度相对较高, 而石膏具有水化膨胀性特点, 随着水泥与石膏质量比的增加, 试样的弹性模量随之增加。石英砂含量对试样单轴抗压强度和黏聚力起主要控制作用, 虽然石英砂在纯基质试样中发挥着一定的骨架作用, 但纯基质试样的强度主要由胶结物承担, 石英砂含量的增加会增加砂胶二者的交界面, 破坏纯基质试样的连续性, 导致其胶凝性能变差, 结构松散, 裂隙很容易沿着弱面发展贯通, 从而导致试样整体强度降低。

2 Bimrock 模型试样制作及试验方案

为研究不同胶结强度对 Bimrock 强度特性和变形破坏特征的影响, 基于正交试验敏感性分析获得的 3 种不同胶结强度的 Bimrock 基质配比方案, 制作 3 组块石含量比相同 (RBP 为 60%) 而胶结强度不同的 Bimrock 试样, 通过单轴压缩试验分析其强度特性和变形破坏特征。

2.1 试样制作

基于正交试验敏感性分析结果, 选择表 2 中的强胶结配比 J3、中等胶结配比 J5 和弱胶结配比 J7 这 3 种不同胶结强度配分别制作强胶结、中等胶结以及弱胶结的 Bimrock 试样, 并分别记为 B3、B5 和 B7。为避免尺寸效应对试验的影响, 且满足 Bimrock 块石和基质的强度比至少为 2 的条件^[2], 本次试验选用图 4 所示的强度大于 100 MPa、粒径大小为 0.3 ~ 0.6 cm 的

棱状石灰岩块。将制作好的 Bimrock 试样养护 20 h 后脱模, 再将其放置在室内常温环境下养护 21 d, 制作好的试样见图 5。



图 4 棱状石灰岩块

Fig. 4 Prismatic limestone block

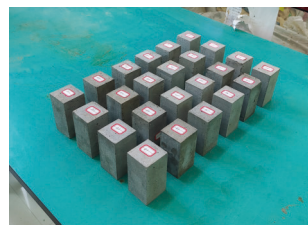


图 5 Bimrock 试样

Fig. 5 Bimrock specimens

2.2 试验方案

按 3 种胶结程度将试样分为 3 组, 每组均设置 8 个相同的试样作为对比, 单轴压缩试验仪器为 YAW-2000 B 微机控制岩石单轴试验仪。可施加的最大法向压力为 2 000 kN, 仪器活塞行程为 0 ~ 50 mm, 可支持 0 ~ 25 kN/s 的加载速度, 加载全过程均由微机自动控制, 试验方法和步骤按《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)^[24] 执行。

3 胶结强度对 Bimrock 力学特性影响

3.1 胶结强度对 Bimrock 强度特征影响分析

3.1.1 胶结强度对 Bimrock 单轴压缩过程的影响

将 B3、B5 和 B7 试样的单轴压缩试验数据进行处理, 得到其轴向应力-轴向应变关系曲线 (图 6)。

B3、B5 和 B7 的轴向应力-轴向应变曲线形态一致, 均为应变软化型, 峰前曲线段均成“S”型, 结合文献 [25—27], 可将 Bimrock 试样单轴压缩试验轴向应力-轴向应变关系曲线分为孔隙裂隙压密、弹性变形至微破裂稳定发展、非稳定破裂发展以及破坏后 4 个阶段。

孔隙裂隙压密阶段: 试验开始, 试样进入压密阶段, 试样中原有的微裂隙随应力的增加逐渐闭合, 产生早期的非线性变形, 在此阶段, 轴向应力-轴向应变曲线均呈上凹型; 随着应力的增加, 曲线逐渐变陡, 试

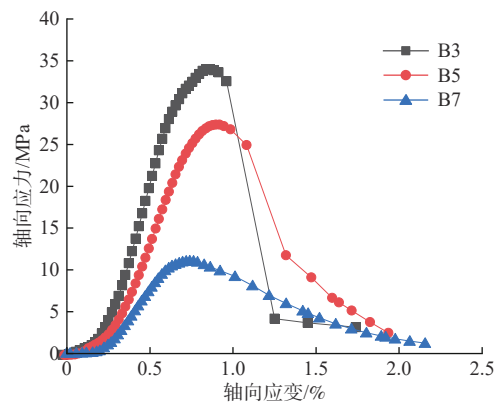


图 6 单轴压缩试验轴向应力-轴向应变关系曲线

Fig. 6 Axial stress-axial strain relation curve of the uniaxial compression test

样变形模量逐渐增大,表明微裂隙的闭合由快到慢;随着应力的进一步增加,曲线依次进入线弹性变形阶段,这是因为试样内部微裂隙数量随胶结强度的降低而逐渐增加,微裂隙张开度也逐渐变大,延长了试样的压密阶段。

弹性变形至微破裂稳定发展阶段:经过压密阶段后,Bimrock 试样内部的微裂隙在轴向力的作用下逐渐闭合完毕,试样进入弹性变形至微破裂稳定发展阶段,轴向应力-轴向应变曲线呈近似直线关系,随着胶结强度的增加,同一轴向应力下不同胶结强度 Bimrock 试样的曲线斜率逐渐增加。

非稳定破裂发展:当应力值大于屈服极限后,试样进入非稳定破裂发展阶段,此阶段微裂隙的发展产生了质的变化,随着应力的增加,曲线呈上凸型,试样发生不可逆的塑性变形,直到达到强度极限,强胶结试样对应的峰值应变明显高于弱胶结试样。

破坏后阶段:当轴向应力达到峰值后,试样内部裂隙快速发展并贯通,其内部结构完全破坏,峰值后曲线呈应变软化型,轴向应力随轴向应变增大迅速下降,强胶结试样在峰后随应变增加,应力急剧下降,峰后曲线较陡,试样脆性破坏较为明显,而弱胶结试样的峰后应力随应变增加缓慢下降,峰后曲线也较为平缓。

3.1.2 胶结强度对 Bimrock 强度参数的影响

胶结强度对 Bimrock 力学特性最直观的影响表现为其强度的变化,而强度参数是表征 Bimrock 强度变化的指标(表 5)。Bimrock 试样的单轴抗压强度和弹性模量与其胶结强度呈正相关,从弱胶结(B7)到强胶结(B3),单轴抗压强度从 11.02 MPa 增加到 34.21 MPa,增量百分比为 210.44%,弹性模量从 2.11 GPa 增加到 5.57 GPa,增量百分比为 163.98%。

表 5 不同胶结强度 Bimrock 及纯基质的强度参数

Table 5 Strength parameters of Bimrock and pure matrix with different bonding strengths

试样编号	σ_c /MPa	E /GPa	峰值应变 /%	σ_c 增量 百分比/%	E 增量 百分比/%
B7	11.02	2.11	0.76		
B5	27.18	4.19	0.96	146.64	98.58
B3	34.21	5.57	0.95	210.44	163.98
J7	8.04	2.24			
J5	21.92	3.51			
J3	29.12	5.01			

图 7 为纯基质试样和 Bimrock 试样强度参数随胶结强度变化的关系曲线,可以看出,随着胶结强度的增加,Bimrock 单轴抗压强度和弹性模量随之增加,Bimrock 强度参数与纯基质强度参数呈正相关。在进行单轴压缩试验时,试样的抗压强度主要受基质、块石以及二者的接触面三者共同控制,随着胶结强度的增加,Bimrock 基质本身的强度、块石和基质之间黏聚力、块石与块石之间摩擦力也随之增加,因此,Bimrock 整体的强度也增加。

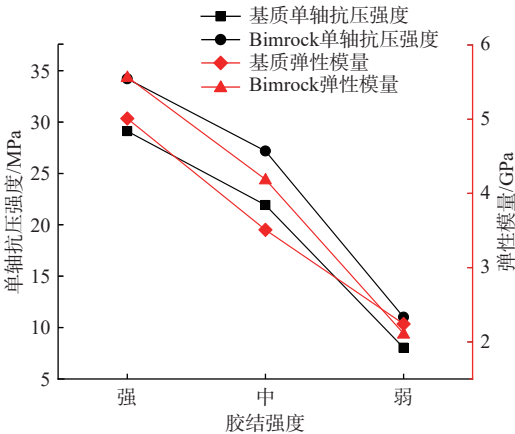


图 7 单轴抗压强度和弹性模量与胶结强度关系曲线

Fig. 7 Curves between the uniaxial compressive strength, elastic modulus and cementation strength

3.2 胶结强度对 Bimrock 变形破坏特征影响

观察 Bimrock 试样在设定的单轴加载条件下裂纹扩展到破坏的过程,发现从裂纹产生到失稳破坏是一个非常快速的过程,从破坏过程图上逐帧观察试样变形破坏过程,其变形到破坏的压缩裂纹扩展过程如图 8 所示。

试样 B3 破坏模式为整体剪切滑移破坏,表现为一条主裂纹贯通破坏,破坏时间极短,脆性破坏明显,如图 8(a)所示。B3-a 属于弹性变形阶段,B3-b 承载能力达到最大,在此之前,试样表面出现沿剪切面发

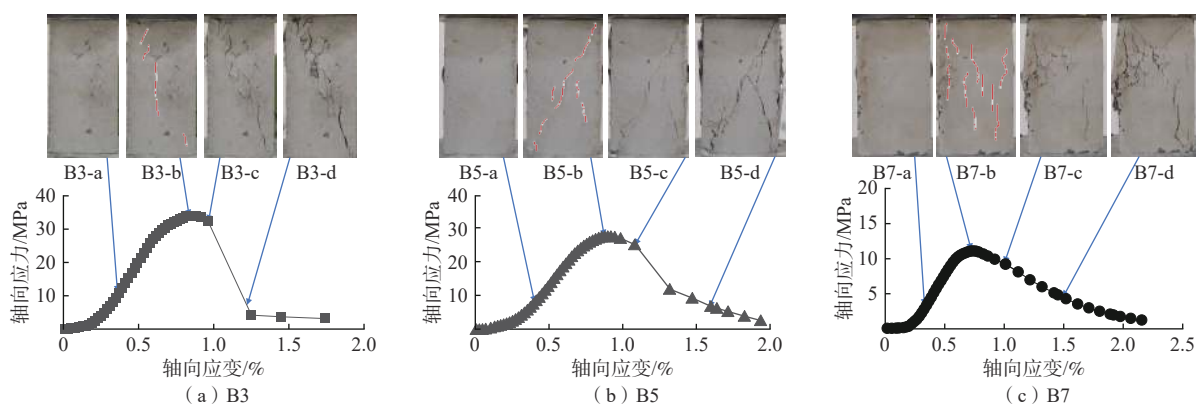


图 8 Bimrock 试样压缩裂纹扩展过程

Fig. 8 Compression crack propagation process of Bimrock specimens

展的微小裂纹,可见试样内部同样产生稳定发展的裂纹,随着应力的增加,裂纹之间相互贯通,形成最终的剪切破坏面。

试样 B5 破坏模式为“y”型剪切破坏,试样发生整体伴随局部的剪切破坏,有一条明显贯穿整个试样和一条仅贯穿试样下半部分的剪切破坏面,如图 8(b)所示。B5-a 属于弹性变形阶段, B5-b 承载能力达到最大, B5-d 属于破坏后阶段。

试样 B7 发生横向的拉张破坏,可见多条沿竖直方向的张拉裂纹,且局部出现张剪破坏并存的破坏特征,如图 8(c)所示。B7-a 属于弹性变形阶段, B7-b 承载力达到最大,由于基质胶结强度较弱,试样在达到峰值强度时表面出现大量沿破裂面发展的微小裂纹,裂纹数目明显多于强胶结试样。在试验过程中,弱胶结试样并不像强胶结试样那样发生突然的剪切滑移破坏,而是在表面和内部不断产生轴向的裂纹,直至破坏。

由图 8 可以看出,试样由裂纹产生、扩展到最后贯通发生失稳破坏,其变形破坏特征随胶结强度的改变有所变化。随着胶结强度的增大,试样的破坏模式由张性破坏转变为剪切破坏,试样在变形直至破坏的各个阶段,其表面裂纹数量均随胶结强度的增加而减少。强胶结试样破坏时间极短,破坏瞬间发出清脆的碎裂声,并伴随一条单斜主裂纹贯通整个试样,表现为明显的脆性破坏,弱胶结试样破坏时间相对较长,从变形到破坏产生的裂纹更多且较为破碎,脆性破坏不明显。

对试验后的破坏试样进行剥离(图 9),发现其内部的剪切破坏面均绕过石灰岩块发展,这是由于石灰岩块的强度远高于基质的强度,二者接触界面的高强度差导致在该处产生了应力集中,当应力大于该部位

的抗剪强度时,裂纹首先在该处产生,随着裂纹之间相互贯通,形成最终的破坏面。试样内部存在沿破坏面的微小劈裂面,说明试样内部在剪切破坏的过程中存在劈裂破坏。

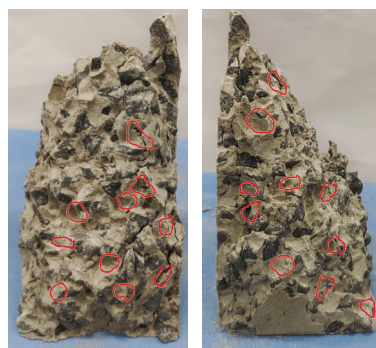


图 9 试验后的 Bimrock 破坏试样

Fig. 9 Damaged bimrock specimen after test

4 结论

(1)根据敏感性分析结果,3个因素中,石英砂含量、水泥与石膏质量比对 Bimrock 基质试样的力学特性起主要控制作用,其中,石英砂含量对试样单轴抗压强度和黏聚力起主要控制作用;水泥与石膏质量比对试样弹性模量起主要控制作用;内摩擦角则主要由二者共同控制。

(2)Bimrock 试样单轴压缩轴向应力-轴向应变曲线表现为应变软化型,试样单轴抗压强度和弹性模量与其胶结强度呈正相关,从弱胶结到强胶结,峰值强度分别从 11.02 MPa 增加到 34.21 MPa,弹性模量从 2.11 GPa 增加到 5.57 GPa。弱胶结试样内部微裂隙数量较多,压缩曲线前期出现明显的压密阶段,峰后应力随应变增加缓慢下降。强胶结试样峰后应力随应变的增加急剧减小,脆性破坏明显。

(3)强胶结试样的压缩破坏模式表现为其表面只有单条裂纹的贯通破坏,破坏时间较短,脆性破坏明显。中等胶结试样发生整体与局部剪切破坏,压缩破坏模式表现为有一条明显贯穿整个试样和一条仅贯穿试样下半部分的剪切破坏面。弱胶结试样发生横向的拉张破坏,局部出现张剪破坏并存的破坏特征。

(4)由于砾石的强度远高于基质的强度,导致Bimrock试样内部的剪切破坏面均绕过石灰岩块发展,试样内部存在沿剪切破坏面的微小劈裂面,说明试样内部在剪切破坏的过程中存在劈裂破坏。

参考文献 (References) :

- [1] MEDLEY E W. The engineering characterization of mélanges and similar block-in-matrix rocks(bimrocks) [D]. CA, USA: University of California, Berkeley, 1994.
- [2] SONMEZ H, GOKCEOGLU C, MEDLEY E W, et al. Estimating the uniaxial compressive strength of a volcanic bimrock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(4): 554 – 561.
- [3] 田永铭, 郭明传, 古智君. 宏观各向同性混杂岩力学特性及性状研究 [J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(3): 363 – 371. [TIEN Yongming, KUO Mingchuan, KU Chihchun. Mechanical properties and behaviors of macroscopically isotropic mélange[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(3): 363 – 371. (in Chinese with English abstract)]
- [4] AKRAM M S, SHARROCK G B, MITRA R. Investigating mechanics of conglomeratic rocks: influence of clast size distribution, scale and properties of clast and interparticle cement[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(4): 2769 – 2788.
- [5] 郭喜峰, 吴相超, 熊诗湖. 岩溶角砾岩物理力学特性现场试验研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(10): 1447 – 1453. [GUO Xifeng, WU Xiangchao, XIONG Shihu. Field test study on the physical and mechanical characteristics of karst breccia[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(10): 1447 – 1453. (in Chinese with English abstract)]
- [6] KAHRAMAN S, ALBER M. Estimating unconfined compressive strength and elastic modulus of a fault breccia mixture of weak blocks and strong matrix[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(8): 1277 – 1287.
- [7] KAHRAMAN S, ALBER M. Triaxial strength of a fault breccia of weak rocks in a strong matrix[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2008, 67(3): 435 – 441.
- [8] 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 北山造山带古生代蛇绿混杂岩研究现状及进展 [J]. *地质通报*, 2021, 40(1): 71 – 81. [WANG Guoqiang, LI Xiangmin, XU Xueyi, et al. Research status and progress of Paleozoic ophiolites in Beishan orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(1): 71 – 81. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王军鹏, 蒋康. 混杂岩组构和运动学解析: 以华北克拉通新太古代赞皇和遵化混杂岩为例 [J]. *地质科学*, 2021, 56(2): 449 – 470. [WANG Junpeng, JIANG Kang. Kinematic analysis of mélange fabrics: Exemplified by the neoarchean Zanhuang and Zunhua mélange, North China Craton[J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 2021, 56(2): 449 – 470. (in Chinese with English abstract)]
- [10] AFIFIPOUR M, MOAREFVAND P. Experimental study of post-peak behavior of bimrocks with high rock block proportions[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(2): 761 – 767.
- [11] 铁永波, 张宪政, 龚凌枫, 等. 西南山区典型地质灾害链成灾模式研究 [J]. *地质力学学报*, 2022, 28(6): 1071 – 1080. [TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, GONG Lingfeng, et al. Research on the pattern of typical geohazard chains in the southwest mountainous region, China[J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(6): 1071 – 1080. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 范宣梅, 王欣, 戴岚欣, 等. 2022 年 M_s 6.8 级泸定地震诱发地质灾害特征与空间分布规律研究 [J]. *工程地质学报*, 2022, 30(5): 1504 – 1516. [FAN Xuanmei, WANG Xin, DAI Lanxin, et al. Characteristics and spatial distribution pattern of M_s 6.8 Luding earthquake occurred on September 5, 2022[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(5): 1504 – 1516. (in Chinese with English abstract)]
- [13] LINDQUIST E S. The strength and deformation properties of mélange[D]. Berkeley: University of California, 1995.
- [14] AFIFIPOUR M, MOAREFVAND P. Failure patterns of geomaterials with block-in-matrix texture: Experimental and numerical evaluation[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(7): 2781 – 2792.
- [15] AFIFIPOUR M, MOAREFVAND P. Mechanical behavior of bimrocks having high rock block proportion[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 65: 40 – 48.

- [16] MEDLEY E W. Observations on tortuous failure surfaces in Bimrocks[J]. Felsbau Rock Soil Eng, 2004, 22(5): 35 – 43.
- [17] SONMEZ H, TUNCAY E, GOKCEOGLU C. Models to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity for Ankara Agglomerate[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(5): 717 – 729.
- [18] COLI N, BERRY P, BOLDINI D. In situ non-conventional shear tests for the mechanical characterisation of a bimrock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(1): 95 – 102.
- [19] SONMEZ H, ALTINSOY H, GOKCEOGLU C. Considerations in developing an empirical strength criterion for Bimrock[C]//Proceedings of the fourth Asian rock mechanics symposium (ARMS), Singapore: [s.n.], 2006: 8 – 10.
- [20] 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2001. [YOU Xinhua. Stochastic structure model of soil-rock mixture and its application[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2001. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 杨忠平, 赵亚龙, 胡元鑫, 等. 块石强度对土石混合料剪切特性的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(4): 814 – 827. [YANG Zhongping, ZHAO Yalong, HU Yuanxin, et al. Effect of the strength of rock blocks on the shear characteristics of soil-rock mixtures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(4): 814 – 827. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 胡峰, 李志清, 刘琪, 等. 土石混合体的剪应力波动和跌落行为机制 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(3): 90 – 101. [HU Feng, LI Zhiqing, LIU Qi, et al. Mechanism of shear stress fluctuation and dropping of the soil-rock mixture[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3): 90 – 101. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 陈佳雨, 刘之葵, 陈永国, 等. 纤维红黏土强度的正交试验及多元非线性回归分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 117 – 124. [CHEN Jiayu, LIU Zhikui, CHEN Yongguo, et al. Orthogonal test and multivariate nonlinear regression analyses of strength of the fiber red clay[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 117 – 124. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 北京: 中国计划出版, 2013. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of engineering rock mass: GB/T 50266—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)]
- [25] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 42-44. [LIU Yourong, TANG Huiming. Rock mechanics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 胡伟, 闵弘, 陈健, 等. 碎石对土石混合体无侧限力学特性影响研究 [J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(11): 55 – 61. [HU Wei, MIN Hong, CHEN Jian, et al. Study on the effect of gravel on unconfined mechanical properties of soil-rock mixture[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(11): 55 – 61. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 李关洋, 顾凯, 王翔, 等. 含裂隙膨胀土无侧限抗压强度特征试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(4): 62 – 70. [LI Guanyang, GU Kai, WANG Xiang, et al. An experimental study of the unconfined compressive strength characteristics of the expansive soil with cracks[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4): 62 – 70. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 刘真真