

文章编号:1673-9469(2025)02-0028-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.02.004

基质和块石强度对 bimrocks 类岩石力学特性影响

赵博涵¹, 魏继红^{1*}, 曹曜², 靳春林¹, 黄佳豪¹, 禹克强¹

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018)

摘要: 为研究基质和块石强度对 bimrocks 类岩石力学特性的影响, 以不同配比的水泥、石英砂混合制作块石及基质, 制成两种基质配比、四种含石量的试样, 开展室内单轴试验和直剪试验。试验结果表明: 单轴压缩试验条件下, 当含石量为 50% 时基质配比 1:3 和 3:1 的试样单轴抗压强度和弹性模量达到最大值, 试样破坏类型均属于剪切破坏。直剪试验条件下, 低强度组(水泥:砂为 1:3)在各法向应力下都呈现出随含石量增加抗剪强度下降的趋势。高强度组(水泥:砂为 3:1)也基本符合随含石量增加抗剪强度下降的趋势。两种基质配比试样都呈现出随含石量的增加黏聚力先增加后减小的趋势, 内摩擦角整体呈现下降趋势。在相同含石量下, 高强度组比低强度组黏聚力分别提高 222.86%、200.36%、784.86%、383.14%; 内摩擦角分别降低了 25.29%、22.35%、26.43%、24.26%。

关键词: bimrocks; 力学特性; 单轴压缩试验; 直剪试验; 破坏特征

中图分类号: TU452

文献标识码: A

Influence of Matrix and Boulder Strength on Mechanical Properties of Bimrocks Type Rocks

ZHAO Bohan¹, WEI Jihong^{1*}, CAO Yao², JIN Chunlin¹, HUANG Jiahao¹, YU Keqiang¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

2. Jiangsu Geological Survey Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210018, China)

Abstract: To study the influence of the strength of the matrix and the block stones on the mechanical properties of bimrocks, block stones and matrix were prepared with different ratios of cement and quartz sand. Two matrix ratios and four stone contents were used to make specimens for indoor uniaxial tests and direct shear tests. The test results show that under uniaxial compression conditions, when the stone content is 50%, the specimens with matrix ratios of 1:3 and 3:1 have reached the maximum values of uniaxial compressive strength and elastic modulus, and the failure types of the specimens are all shear failure. Under direct shear conditions, the low-strength group (cement:sand ratio of 1:3) shows a trend of decreasing shear strength with the increase of stone content under all normal forces. The high-strength group (cement:sand ratio of 3:1) also basically conforms to this trend. Both matrix ratio specimens show a trend of increasing cohesion first and then decreasing with the increase of stone content, and the internal friction angle shows an overall decreasing trend. Under the same stone content, the cohesion of the high-strength group is respectively increased by 222.86%, 200.36%, 784.86%, and 383.14% compared with the low-strength group; the internal friction angle is reduced by 25.29%, 22.35%, 26.43%, and 24.26%, respectively.

Key words: bimrocks; mechanical properties; uniaxial test; direct shear test; failure characteristic

收稿日期: 2024-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41672258)

第一作者: 赵博涵(1999—), 男, 河北石家庄人, 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。

* 通信作者: 魏继红(1976—), 女, 吉林长春人, 博士, 教授, 主要从事岩土体稳定性方面的研究工作。

bimrocks (block-in-matrix rocks) 一般是指高强度块石镶嵌在低强度细粒基质中的复杂岩土体材料^[1],而在风化等自然条件下,也会出现块石强度小于基质强度的情况。通常情况下,bimrocks 物理力学性质受块石含量、块石形状、粒径、含水率等影响^[2],bimrocks 岩体为非均质、各向异性结构。地下工程、水利工程、交通工程、建筑工程等领域都与这种特殊地质体有联系^[3]。我国各类工程建设规模日益扩大,对 bimrocks 的研究也愈发受到重视,研究成果为相关工程灾害防治和建设施工提供了重要的理论支撑^[4-5]。

针对 bimrocks 的物理性质研究,国内外学者开展了一系列的室内试验^[6-7]、原位试验^[8]和数值模拟^[9]。Lindquist^[10]用水泥、砂制作块体,以黏土-水泥作为基质模拟胶结土石混合物,开展三轴压缩试验,得到其摩尔-库伦强度参数和应力-应变特性。高玮等^[11]对不同胶结程度和含石量的土石混合物进行三轴剪切试验,探究胶结作用对土石混合物破坏的影响。苏阳^[3]开展室内试验、原位试验和数值模拟,分析了胶结材料、含水率、块石粒径、水胶比、土胶比、石胶比等因素对胶结土石混合体的力学特性和破坏机理的影响。金磊等^[12]对比了胶结土石混合物和未胶结土石混合体的强度,并针对含石量和块石形状对胶结土石混合物力学特性的影响进行分析。Hu 等^[13]在不同块石粒径和胶结物掺量下制作了水泥和石膏两种胶结类型的土石混合物,通过直剪试验分析其物理力学性质,建立离散元模型进行数值模拟,以分析 bimrocks 的破坏特征。Afifipour 等^[14]对高含石量(含石量大于 70%)的 bimrocks 试样进行单轴压缩试验,得到其单轴抗压强度、杨氏模量、应力-应变曲线等力学参数变化规律。Avsar^[15]对 bimrocks 试样进行直剪试验,试验结果表明,随着含石量的增加,试样的内摩擦角增大,黏聚力减小,并通过数字图像处理分析和分形维数计算 bimrocks 的几何和结构特性。Mahdevari 等^[16]制备 bimrocks 试样开展无侧限压缩试验,研究含石量、最大块石粒径和分布函数对 bimrocks 抗压强度和破坏特征的影响。Lin 等^[17]对高含石量胶结土石混合物开展单轴压缩试验并研究其力学性能,提出一种神经网络算法预测模型。Napoli 等^[18]用有限元法和极限平衡法研究含石量为 0%~70%的 bimrocks 边坡模型的稳定性。

前期研究大多聚焦于 bimrocks 中基质或块石

的物理性质。通过改变含石量、粒径、块石形状、胶结程度等方面进行室内室外试验分析,得到其物理力学性质。而关于探究基质和块石强度差异对 bimrocks 力学特性影响的研究较少。为研究基质与块石强度差异对其力学性质的影响,本文采用水泥、石英砂材料,通过改变水泥和砂的配比来制备 bimrocks 试样,进行室内单轴压缩试验和直剪试验,分析 bimrocks 类岩石的力学特性和破坏特征。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验制备按水泥与石英砂 1:1、1:3、3:1 配比的试验材料,分别对其进行单轴压缩试验。通过平行试验得到三种配比试样的单轴抗压强度分别为 32.7、14.2、41.2 MPa,符合试验需求。以上述三种配比材料作为 bimrocks 类岩石试样的块石和基质,块石配比为水泥:砂=1:1;基质的配比为水泥:砂=1:3(低强度组)和水泥:砂=3:1(高强度组)。设置 4 种含石量,分别为 30%、40%、50%、60%。

在制样过程中,先进行块石的制备。将水泥和砂按确定比例混合,搅拌均匀,加入预定质量的水搅拌均匀,混合物分层装入模具内,分层压实,模具采用与 bimrocks 试样一致的 7 cm×7 cm×14 cm 的单轴压缩试验模具。将制备好的块石试样放在室内自然条件下 24 h 后脱模,然后进行 14 d 的养护^[19]。随后对块石试样进行破碎、过筛,考虑尺寸效应^[20],本研究选取粒径为 6~12 mm 的块石。随机选取部分块石进行点荷载试验,确保块石强度与破碎前试样强度不发生明显变化。

bimrocks 试样制备,将水泥和砂按确定比例混合,搅拌均匀,称取并加入确定质量的块石后搅拌均匀,再加入预定质量的水搅拌均匀,混合物分层装入模具内,分层压实,直剪试验模具规格为 7 cm×7 cm×7 cm。单轴试验模具规格为 7 cm×7 cm×14 cm。脱模及养护条件与块石试样制备一致,见图 1。

1.2 试验方法

单轴压缩试验和直剪试验所使用的仪器为 YZW50-SL 型室内岩体直剪仪,其法向最大压力为 500 kN,最大剪切力为 500 kN,加载方式为电动液压力式,具备恒应力控制和位移控制。试验过程中,在直剪仪前后两侧架设摄像机以观察、记录试样破坏形态。

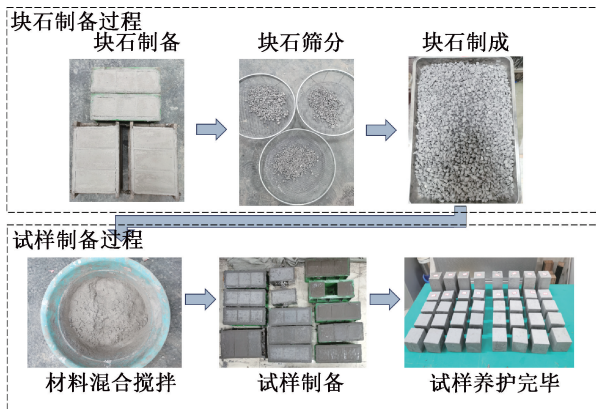


图1 试样制备流程

Fig. 1 Sample preparation process

单轴压缩试验中块石试样、低强度组和高强度组试样加载速率均为 0.3 kN/s , 直至破坏。直剪试验法向力依据同一基质的试样单轴压缩试验中峰值法向力的 10% 、 20% 、 30% 、 40% 设置^[21], 低强度组法向力为 6 、 12 、 18 、 24 kN ; 高强度组法向力为 19.8 、 39.6 、 59.4 、 79.2 kN 。所有试样剪切速率均为 0.02 mm/s , 直至剪切位移达到 4 mm 或剪破后保持稳定。

2 试验结果分析

2.1 bimrocks 单轴压缩试验结果

2.1.1 单轴压缩试验力学参数

单轴压缩试验结果如表 1 所示。高强度组的单轴抗压强度比低强度组高约 30 MPa 。4 种含石量试样高强度组比低强度组的单轴抗压强度分别增加 198.5% 、 239.6% 、 182.8% 、 266.7% , 弹性模量分别增加 94.7% 、 90.9% 、 160% 、 298.6% 。高强度组刚性、硬度较大。高强度组和低强度组都在含石量 50% 处达到最大单轴抗压强度和弹性模量,

表 1 单轴压缩试验结果

Tab. 1 Uniaxial compression test results

基质配比	含石量 /%	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	峰值应变 /%
1 : 3	30	13.63	1.13	1.24
	40	11.96	1.10	1.11
	50	15.34	1.25	1.23
	60	10.10	0.74	1.62
3 : 1	30	40.69	2.20	1.64
	40	40.61	2.10	1.76
	50	43.41	3.25	1.36
	60	37.04	2.95	1.22

其单轴抗压强度分别为 15.34 、 43.41 MPa , 弹性模量分别为 1.25 、 3.25 GPa 。由图 2 可见, 两组试样均在 50% 含石量达到单轴抗压条件下的最优含石量。原因是块石在试样中充当骨架作用, 含石量较低时, 胶结物得到充分利用, 胶结物可以充分包裹块石, 提供一定的抗压作用。当含石量超过 50% 后, 胶结物含量不足以为所有块石提供充分的胶结作用, 使得试样胶结程度降低, 块石易发生翻滚滑移。

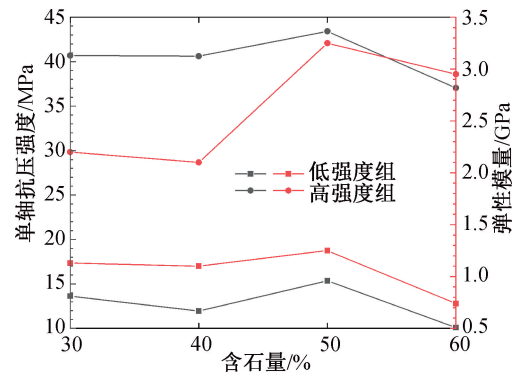


图 2 两种基质配比下不同含石量试样的峰值抗压强度和弹性模量

Fig. 2 Peak compressive strength and elastic modulus of samples with different block contents under two kinds of matrix ratio

两种基质配比中, 石英砂材料对试样的单轴抗压强度影响较大, 是由于石英砂含量的增大使得基质中砂和胶结物的交界面增多, 基质连续性降低, 胶结程度下降。在应力加载过程中, 试样易沿其结构松散处产生裂隙, 进而使试样抗压强度降低。

由弹性模量的变化规律可见: 同一基质配比下, 随含石量的增大试样抵抗弹性变形的能力升高; 在含石量达到 50% 后, 基质颗粒无法充满块石间的空隙, 试样胶结程度降低, 颗粒间胶结强度下降, 弹性模量下降。两种基质配比试样弹性模量的差距呈现随含石量增大而增大的趋势。是由于在块石空隙程度高、胶结程度较差的条件下高强度组的基质材料配比对胶结的影响更大, 且基质含量越少影响越显著。

两组单轴压缩试验所得应力-应变曲线如图 3 所示。低强度组各含石量试样在应力加载初期, 曲线上凹段(孔隙裂隙压密阶段)和曲线近似直线段(弹性变形阶段)曲线形状基本一致, 4 种含石量试样裂隙程度相近。含石量为 30% 、 40% 、 50% 的试样弹性模量和峰值应变相近, 60% 含石量试样峰

值应变较大,低强度组弹性模量变化趋势与抗压强度变化趋势一致。50%含石量试样应力-应变曲线峰值后(破坏后阶段)曲线形状较陡。4种含石量试样均存在一定残余强度。

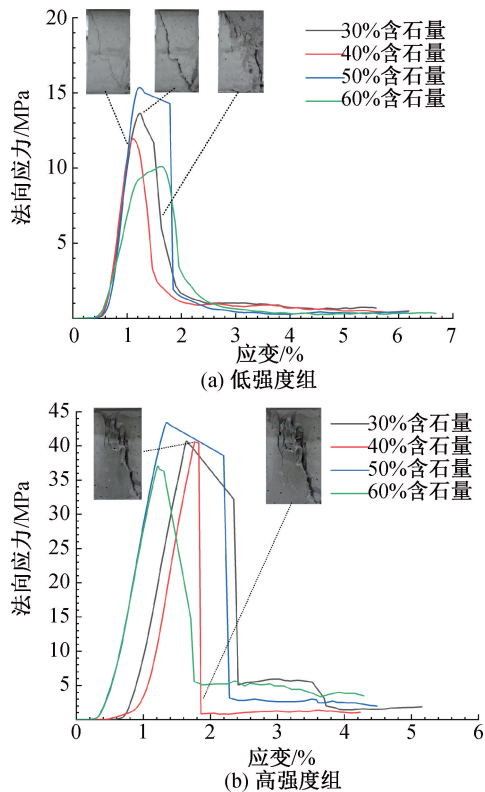


图3 两种基质配比的不同含石量试样法向应力-应变曲线
Fig. 3 Normal stress-strain curves of samples with different block contents under two kinds of matrix ratios

高强度组中,含石量为30%、50%、60%的试样孔隙裂隙压密阶段不明显,没有明显的上凹型非线性变形,说明其裂隙发育程度不高。含石量为40%的试样裂隙化明显。含石量为30%、40%的试样和含石量为50%、60%试样的弹性模量和峰值应变出现较明显的差异,低含石量试样弹性模量较小、峰值应变较大;相反,高含石量试样弹性模量较大、峰值应变较小。高强度组相较于低强度组塑性变形不明显,是由于低强度组基质相较于块石强度低,先达到塑性状态引起破坏,后随着轴向荷载增加块石发生破坏。而高强度组强度主要受基质强度控制,其峰前曲线较陡,当基质破坏时试样也发生破坏。

法向应力加载初期,试样无明显变化。应力-应变曲线呈非线性,随着轴向荷载增加,曲线斜率增大,试样变形模量增大,试样内部微裂隙的闭合由快变慢。试样表面出现垂直方向裂缝,裂缝沿对角方向发育,并伴随有表层脱落。裂缝逐渐向

内部发展,直至试样破坏,属于剪切破坏形式。低强度组和高强度组都基本符合上述描述。

2.1.2 单轴压缩试验试样破坏形态

单轴压缩试验试样破坏形态如图4所示。

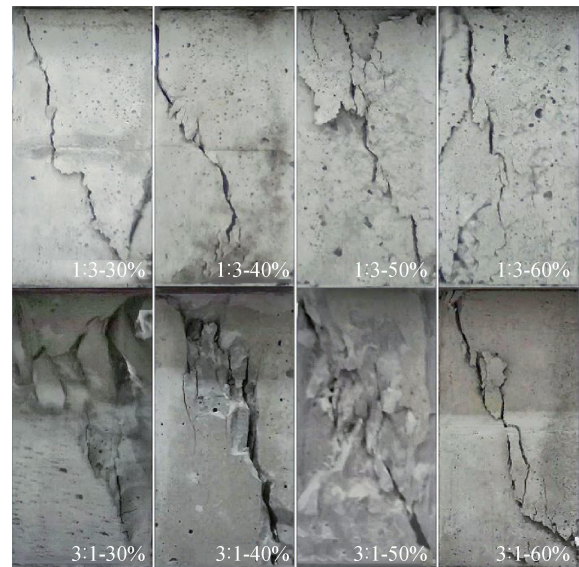


图4 单轴压缩试验试样破坏形态图

Fig. 4 Failure modes of uniaxial compression test samples

低强度组在压破过程中有明显的裂缝发展过程,试样最终形成一条贯穿试样对角的主裂缝。随着含石量的增加,裂缝由明显的对角扩展到中心部位竖向发展。低强度组试样破坏程度较低,发生断裂的两部分试样相对位移明显,破坏试样仍能较好地拼成完整整体。而高强度组由于刚性、硬度大,裂缝发展时间短,破坏迅速,有大量大块碎石脱落,且压破时伴随较大声响,两侧石块飞溅。

低强度组试样基质强度较低,受压出现微裂隙破坏时块石仍提供抗压作用。随着含石量增加,试样中基质在受压破坏时块石发生翻滚滑移现象增加,使试样内部应力分布复杂,60%含石量试样形成劈裂破坏。高强度组基质强度大于块石强度,块石难以提供基质破坏后的抗压作用,故其受压破坏发展迅速。

两组试样外部都有不同程度的表皮脱落,原因是试样外部基质无法与块石形成包裹的胶结体,导致试样外部强度较低。

选取低强度组和高强度组代表性试样分析其破坏面,由图5、图6可以看出,两组试样中块石均被切断。低强度组由于胶结程度较差,胶结力不足,基质较松散;块石与基质接触面清晰,部分接触面可见微小缝隙,胶结物未能严密包裹块石;破坏面粗糙,碎屑较多,有部分块石脱落,为基质与

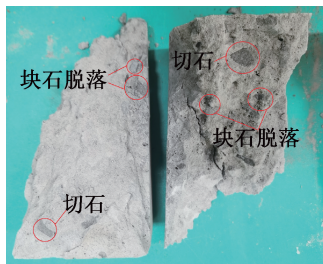


图5 低强度组 40%含石量试样破坏面
Fig. 5 Failure surface of 40% block content samples in low strength group



图6 高强度组 60%含石量试样破坏面
Fig. 6 Failure surface of 60% block content samples in high strength group

块石间的胶结破坏。高强度组基质强度远高于块石强度,试样强度主要受基质控制;压破时块石均被切开,破坏面表面光滑,且较为平整,表面擦痕明显,几乎不可见块石脱落,块石与基质胶结极严密。

2.2 bimrocks 直剪试验结果

2.2.1 直剪试验力学参数

各试样直剪试验所得剪切应力-位移曲线如图7所示。剪切过程大致可分为以下阶段:

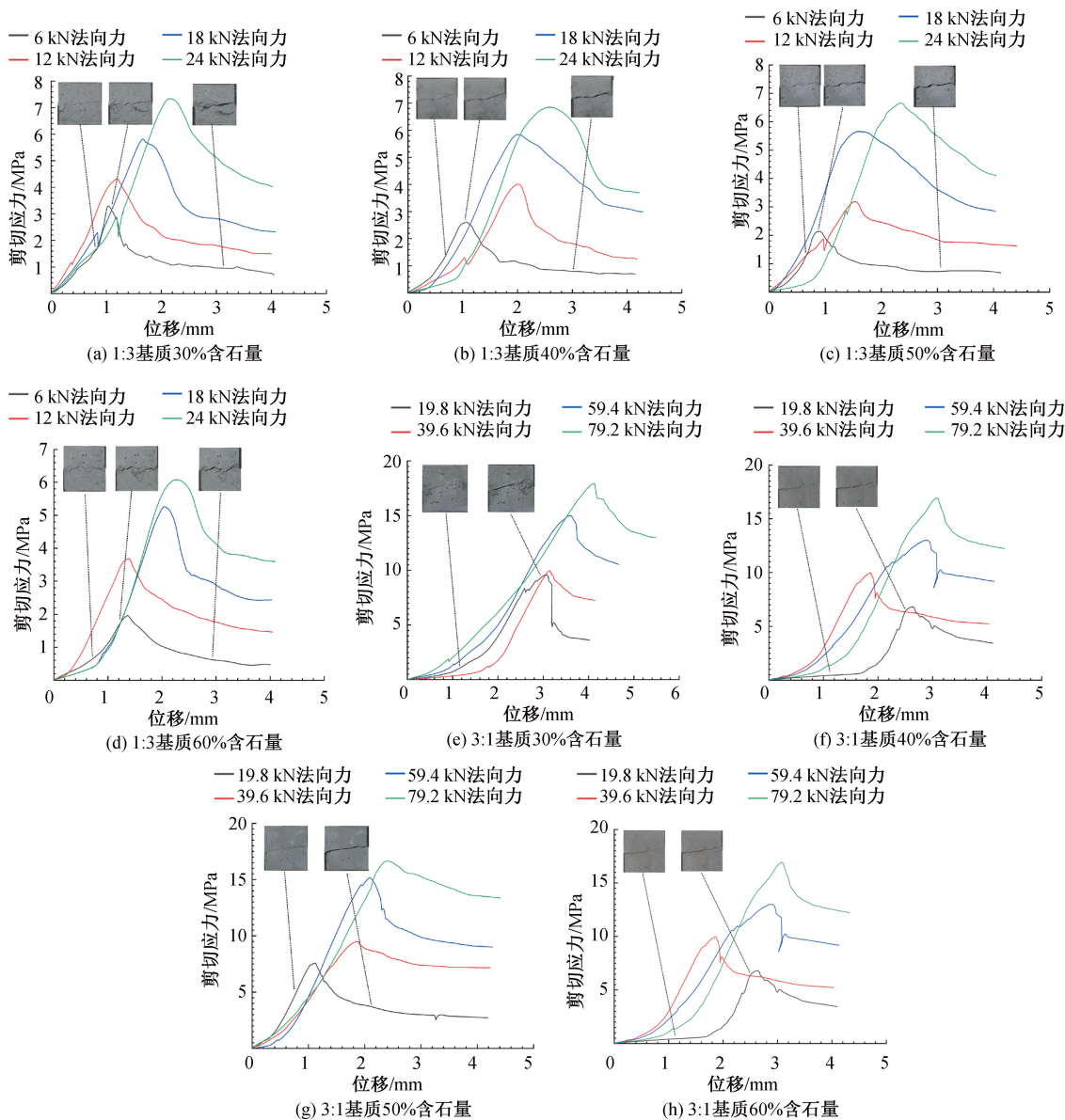


图7 各试样剪切应力-位移图
Fig. 7 Shear stress-displacement curves of each sample

(1)弹性变形阶段:试样中微裂隙和孔隙在剪切过程中被压密,曲线斜率近似直线。

(2)屈服阶段:弹性变形结束,试样发生塑性变形。强度较小的胶结物部分先发生屈服破坏,各裂隙发展连接、贯通形成破裂面。

(3)应变软化阶段:试样达到峰值强度后,试样剪切应力迅速下降,剪切面上剪切应力依靠胶结强度和未剪破的块石维持,对于高强度组,峰后脆性阶段明显。

(4)参与强度阶段:试样剪破后,形成较平整的剪切面。试样受法向应力的压紧作用,剪切面上被剪破的块石及胶结物等随位移的增加发生摩擦咬合,剪切应力迅速下降后趋于稳定,形成一定的残余强度。

将各试样所加载的法向应力和所得到的剪切应力绘制黏聚力和内摩擦角拟合曲线,见图 8,进行线性拟合得到试样的剪切强度参数黏聚力和内摩擦角,如表 2 所示。

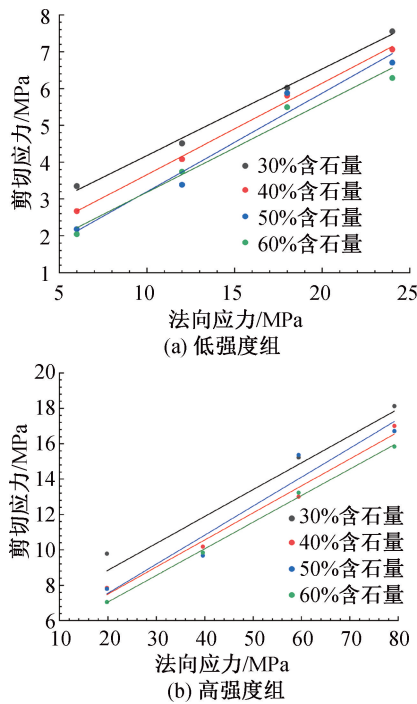


图 8 两种基质配比下不同含石量试样黏聚力和内摩擦角拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of cohesion and internal friction angle of samples with different block contents under two kinds of matrix ratios

由图 9 可知,低强度组和高强度组试样都呈现出随含石量增加黏聚力先增加后减小的趋势,内摩擦角整体呈下降趋势。低强度组在 50% 含石量达到最高内摩擦角和最低黏聚力,分别为 52.69°

和 0.48 MPa;而高强度组在 40% 含石量达到最高内摩擦角和最低黏聚力,分别为 39.44° 和 3.41 MPa,两组均在 30% 含石量达到最低内摩擦角和最高黏聚力,分别为 49.07°、1.78 MPa 和 36.66°、5.76 MPa。

表 2 两种基质配比下不同含石量试样黏聚力和内摩擦角
Tab. 2 Cohesion and internal friction angle of samples with different block contents under two kinds of matrix ratio

基质配比	含石量/%	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
1 : 3	30	1.78	49.07
	40	1.13	50.80
	50	0.48	52.69
	60	0.73	49.79
3 : 1	30	5.76	36.66
	40	3.41	39.44
	50	4.23	38.76
	60	3.51	37.71

bimrocks 试样中块石在基质中充当骨架作用,含石量低时其强度主要由基质控制,含石量高时其强度主要由块石控制,含石量适中时试样强度由基质和块石共同控制。在含石量较低时,块石间接触较少,随着含石量的增加,胶结基质减少,胶结基质和块石之间的接触面增加,胶结物难以包裹住增加的块石,致使黏聚力降低。而随着含石量增加,在剪切过程中块石和块石之间咬合阻碍增大,滑动困难,使得内摩擦角增加。

高强度组和低强度组黏聚力和内摩擦角差别明显。相同含石量下,高强度组比低强度组黏聚力分别提高了 222.86%、200.36%、784.86%、383.14%;内摩擦角分别降低了 25.29%、22.35%、26.43%、24.26%。高强度组胶结程度更高,相同含石量下,基质胶结强度大,且基质强度相较于块石强度大,剪破时由基质强度主导,故其黏聚力明显增加。而低强度组的基质强度相较于块石强度小,在剪切过程中,剪切面上块石咬合摩擦作用更大,故低强度组内摩擦角更大。

2.2.2 直剪试验破坏形态

试样剪切带形态如图 10 所示,其中编号 1—4 分别为 4 种法向力下的试样。试样在剪切过程中,先在试样与剪切盒接触的两端发生应力集中。微裂隙发展过程中常伴随试样表层脱落,剪切带自两端向中间发展,剪切裂隙逐渐贯通形成完整剪切带,在主裂缝旁常有次裂缝发育。

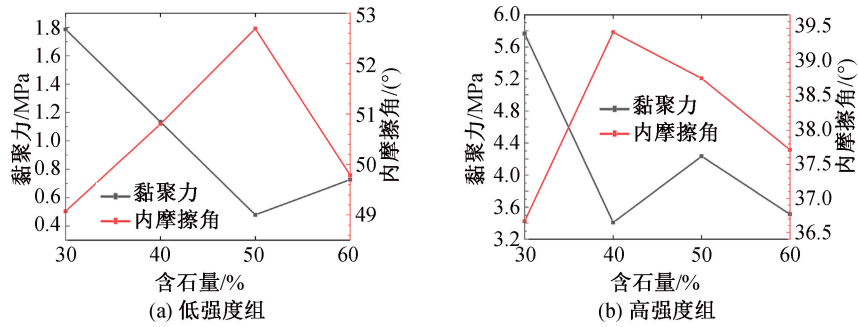


图9 两种基质配比试样强度参数随含石量的变化

Fig. 9 Variation of strength parameters of two matrix ratio samples with block content

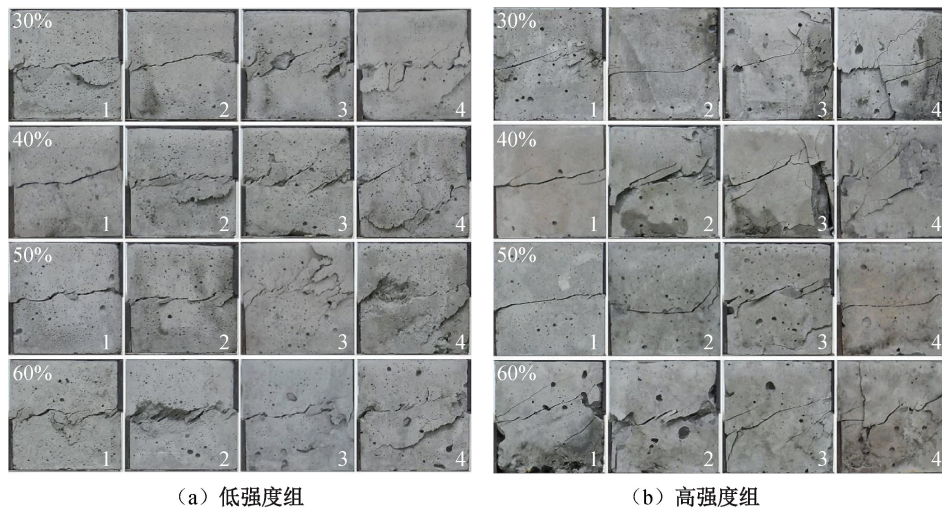


图10 两种基质配比的含石量不同试样剪切破坏形态

Fig. 10 Shear failure modes of samples with different block contents under two kinds of matrix ratios

高强度组和低强度组在低法向力下剪切带呈现出较为规则的曲线,随着法向应力的增加,试样边角出现基质碎裂脱落,且剪切带形状变得不规则。这是由于随着法向力的增大,竖向约束增加,颗粒的滑动翻滚不仅发生在剪切面上,而且向上下两侧发展,形成复杂的张拉-剪切裂隙。

低强度组剪切带呈现出锯齿状,而高强度组剪切带大多较为平滑,是由于低强度组块石强度大于基质强度,在剪切过程中,试样基质发生剪断后,剪切面上的块石仍存在抵抗剪切应力的能力,使得剪切面上的剪应力分布极不均匀,剪切带呈现出上下波动的曲线。随着含石量的增加,部分块石发生滑脱,使剪切带附近颗粒抬升,导致剪切带厚度增加。高强度组基质强度远高于块石,当基质发生剪断时,块石难以提供抗剪作用,试样由微裂隙发展到破坏的间隔较短,试样基质和块石同时被剪断。由于试样强度较大,表层脱落不明显。

由于直剪试样剪切面破坏形态相似性较大,故选取较有代表性的剪切面,如图11所示。低强

度组剪切面非常粗糙,其胶结程度差,剪切面上附着许多散落的基质颗粒,胶结物无法包裹完整块石,常发生块石脱落。且随着法向应力的增大,胶结物发生破坏导致块石滑脱的现象越发明显,且试样边缘出现碎块的迹象增多。剪切面上块石所在部位和块石旁基质往往存在起伏差,块石剪断面不光滑。说明在剪切过程中,基质发生剪破后块石仍提供一定的抗剪作用,试样上下两半不易拼成较完整试样块。随着含石量的增加,剪切面上块石间基质空隙增多,造成抗剪强度降低。

高强度组剪切面光滑平整,擦痕明显。剪切面上无基质颗粒附着,起伏程度较低。高强度组剪切破坏的两部分可以较好地拼成完整试样块,因其块石强度远低于基质强度,故发生剪切破坏时往往同时被剪破,块石翻滚现象不明显。随法向应力增大,试样边缘碎块增加,在法向应力压密作用下,试样位移时摩擦力增大,各个方向的咬合作用力导致试样破碎。

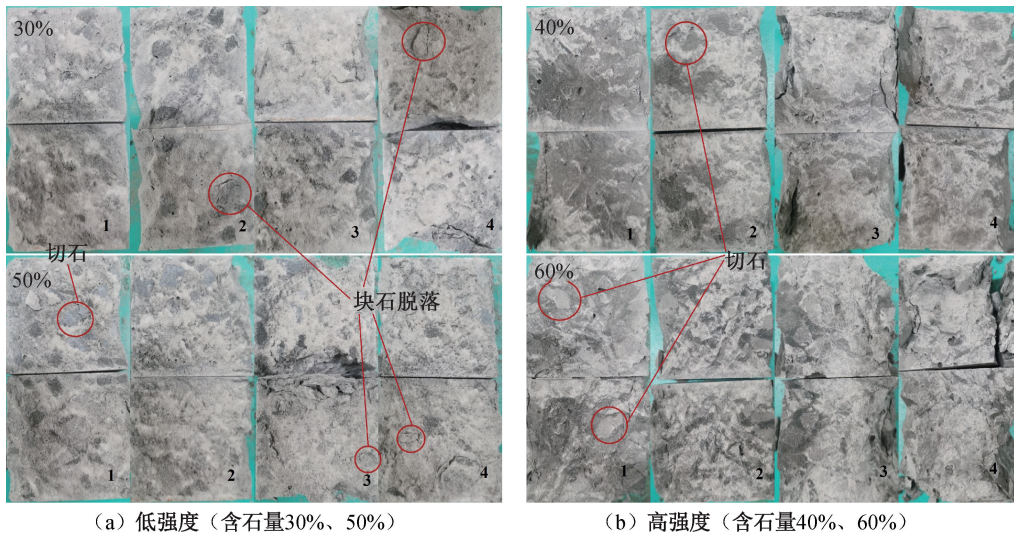


图 11 两种基质配比的不同含石量试样剪切破坏面

Fig. 11 Shear failure surfaces of samples with different block contents under two kinds of matrix ratios

3 结论

通过使用水泥、石英砂材料制作 bimrocks 块石和基质,以不同配比来确定块石和基质强度差异,基质配比分分为两组,分别为水泥:砂=1:3(低强度组)和水泥:砂=3:1(高强度组);块石配比为水泥:砂=1:1;含石量为30%、40%、50%、60%;按以上比例制作试样,开展单轴压缩试验和直剪试验,以此研究不同基质强度和块石强度差下的 bimrocks 力学特性,得出以下结论:

1) 单轴压缩试验条件下,高强度组(水泥:砂为3:1)和低强度组(水泥:砂为1:3)都在含石量50%处达到最大单轴抗压强度和最大弹性模量。高强度组比低强度组试样单轴抗压强度和弹性模量在各含石量水平下均增加。低含石量试样弹性模量较小、峰值应变较大;高含石量试样反之。

2) 两种基质配比的试样单轴压缩试验破坏形态相差不大,均属于剪切破坏形式。随含石量的增大,试样向劈裂破坏过渡。由破坏面可看出,低强度组胶结程度较差,存在块石脱落现象;高强度组胶结程度高,破坏面平整,块石均被切断。

3) 直剪试验条件下,低强度组和高强度组试样都呈现出随着含石量的增加黏聚力先增加后减小的趋势,内摩擦角整体呈现下降趋势。高强度组和低强度组黏聚力和内摩擦角差别明显。

4) 对于直剪试验试样破坏形态,低强度组剪切带多呈现出锯齿状,剪切面非常粗糙,其胶结程度差,块石脱落明显;而高强度组剪切带大多较为

平滑,块石与基质胶结严密,无块石脱落现象。低强度组和高强度组随着法向应力的增加,剪切带逐渐变得不规则。

参考文献:

- [1] MEDLEY E W. The engineering characterization of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks) [D]. California: University of California, Berkeley, 1994: 387.
- [2] 孙华飞,鞠杨,王晓斐,等. 土石混合体变形破坏及微观机理研究的进展[J]. 中国科学:技术科学, 2014, 44(2): 172-181.
- [3] 苏阳. 胶结土石混合体力学特性与破坏机理[D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.
- [4] 于伟. 秦巴山区土石混合体力学性能及边坡稳定性研究[D]. 西安:长安大学, 2019.
- [5] 孔锐倩. 不同含石率松散土石混合体力学特性及边坡稳定性研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2023.
- [6] 涂义亮,刘新荣,任青阳,等. 含石量和颗粒破碎对土石混合料强度的影响研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 3919-3928.
- [7] 刘忠,朱俊高,刘汉龙. 水泥砾质土三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2013-2020.
- [8] 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.
- [9] 金磊. 基于三维不规则颗粒离散元的土石混合体变形破坏机理研究[D]. 武汉:武汉大学, 2020.
- [10] LINDQUIST E S. The strength and deformation properties of melange[D]. California: University of California,

- Berkeley, 1994:287.
- [11] 高玮,胡瑞林. 基质胶结对土石混合体强度变形特性影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(4):1164-1172.
- [12] 金磊,曾亚武,张森. 块石含量及形状对胶结土石混合体力学性能影响的大型三轴试验[J]. 岩土力学, 2017, 38(1):141-149.
- [13] HU Y R, SUN S R, WEI J H. Effect of cementation degree on shear characteristic and failure mechanism of bimrocks containing gravels of different sizes[J]. Lithosphere, 2022(Special 10):1334579.
- [14] 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.
- [15] AVŞAR E. An experimental investigation of shear strength behavior of a welded bimrock by meso-scale direct shear tests[J]. Engineering Geology, 2021, 294:106321.
- [16] MAHDEVARI S, MAAREFVAND P. An investigation into the effects of block size distribution function on the strength of bimrocks based on large-scale laboratory tests [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(7):509.
- [17] LIN Y X, PENG L M, LEI M F, et al. Mechanical properties of bimrocks with high rock block proportion[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(12):3397-3409.
- [18] NAPOLI M L, BARBERO M, RAVERA E, et al. A stochastic approach to slope stability analysis in bimrocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 101:41-49.
- [19] 周承京,王红鑫,陈群,等. 黏土-石膏胶结材料的强度试验[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S1):56-60.
- [20] 任明辉. 土石混合体剪切强度的尺寸效应研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2019.
- [21] LI K, SUN S R, LE H L, et al. Study on uniaxial compressive strength of double matrix bimrocks considering different block proportions[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(8):293.

(责任编辑 王利君)

(上接第 27 页)

- [15] BRACE W, PAULDING JR B, SCHOLZ C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks[J]. Journal of Geophysical Research, 1966, 71(16):3939-3953.
- [16] CAI M, KAISER P, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5):833-847.
- [17] BIENIAWSKI Z T. Mechanism of brittle fracture of rock: Parts I, II and III [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1967, 4(4):395-406.

(责任编辑 王利君)