

文章编号: 1005-0523(2025)01-0045-07



断层破碎带黏性夹泥岩体与基岩接触 界面大型直剪试验研究

邹 弈^{1,2,3}, 朱碧堂^{1,2}, 吴颖彪^{1,2}, 周宇航^{1,2}

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学江西省地下空间技术开发工程研究中心, 江西 南昌 330013; 3. 江西交通职业技术学院建筑工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为了理解穿越断层带隧道的稳定和变形机理, 并为穿越断层破碎带隧道开挖的科学分析提供理论依据。通过室内大型直剪试验, 自制人工断层泥配制的黏性夹泥岩体与基岩接触界面, 研究法向应力、含石量、石块倾角对黏性夹泥岩体-基岩界面力学特性的影响。试验结果表明: 界面剪应力-应变关系在低法向应力下表现为软化特征, 随着法向应力增高, 由弱软化逐渐过渡到弱硬化, 法向应力与界面初始割线模量呈正相关; 随着含石量增大, 界面的抗剪强度、界面刚度都随之增大; 相比于石块倾角为 0° , 石块倾角为 90° 所对应的界面强度更高; 界面内摩擦角与含石量保持线性正相关, 黏聚力呈负相关。在分析穿越断层带隧道的稳定和变形机理时, 需要充分考虑界面法向应力、含石量和石块倾角对界面强度的影响。

关键词: 断层泥; 破碎带; 土石混合体; 直剪试验; 基岩界面

中图分类号: TU431

文献标志码: A

本文引用格式: 邹弈, 朱碧堂, 吴颖彪, 等. 断层破碎带黏性夹泥岩体与基岩接触界面大型直剪试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(1): 45-51.

Large-Scale Direct Shear Test Study of Contact Interface Between Viscous Mud-Rock Mass and Bedrock in Fault Fracture Zone

Zou Yi^{1,2,3}, Zhu Bitang^{1,2}, Wu Yingbiao^{1,2}, Zhou Yuhang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Engineering R&D Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. School of Civil Engineering, Jiangxi V&T College of Communications, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to understand the stability and deformation mechanism of tunnel through fault zone, and to provide theoretical basis for scientific analysis of tunnel excavation through fault fracture zone, a large-scale direct shear test was carried out on the contact surface between the viscous mud-rock mass and the bedrock with joint surface, and the influence of normal pressure, stone content and rock dip angle on the interface mechanical properties of the viscous mud-bedrock contact surface was studied. The test results show that: The interfacial stress-strain relationship shows softening characteristics at low normal stress, and gradually transitions from weak softening to weak hardening with the increase of normal stress; The normal stress is positively correlated with the initial tangential modulus of the interface. The shear strength and stiffness of the interface increase with

收稿日期: 2024-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972291); 江西省教育厅科技项目(GJJ2205202)

the increase of stone content; Compared with the block angle of 0° , the interface strength corresponding to the rock angle of 90° is improved; The internal friction angle of the interface has a linear positive correlation with the stone content, and the cohesion path has a negative correlation. When analyzing the stability and deformation mechanism of tunnel crossing fault zone, it is necessary to fully consider the influence of interface normal stress, stone content and rock inclination angle on interface strength.

Key words: fault gouge; crushing zone; earth-rock mixture; direct shear test; bedrock interface

Citation format: ZOU Y, ZHU B T, WU YB, et al. Large-scale direct shear test study of contact interface between viscous mud-rock mass and bedrock in fault fracture zone[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(1): 45-51.

穿越断层破碎带的隧道施工面临诸多挑战,如掌子面失稳、涌水、支护结构失效等工程问题。这些问题主要是由于断层带岩体破碎程度高、强度低、风化严重、渗透性变化大且富含地下水等特性所致^[1-3]。为了解决上述工程问题,施工过程中需要采取预注浆加固等多项措施,并通过现场监测及时采取补救措施。然而,由于缺乏科学理论和系统分析,采取以上施工方法会增加工程成本和工期^[4]。开展断层破碎带夹泥岩体与完整岩块接触面力学特性的研究,有助于理解穿越断层带隧道的稳定和变形机理,以及对穿越断层破碎带隧道开挖的科学分析提供理论依据。

破碎带主要由破碎的岩石和断层泥(黏土、砂土、泥浆等)组成, Medley^[5]将此种混合物定义为Bimrock(岩块-基质混合物)。破碎带夹泥岩体具有更强的黏性基质,为方向性排列的岩块^[6]。

成浩等^[7]通过土体与混凝土接触面剪切试验,发现土体类型对界面剪切形态有一定影响,界面粗糙度的增加对抗剪强度的提高有显著作用,粗糙度的增加能提高界面黏聚力而对摩擦角影响不大;周国庆等^[8]通过砂-混凝土接触面直剪试验,发现法向应力对接触面强度有一定增强作用;杨忠平等^[9]通过直剪试验得到土石混合物-基岩界面抗剪强度和黏聚力随含石量的增加先增大后减小,内摩擦角 φ 变化不大;安琪等^[10]通过大型直剪试验发现,碎石土-基岩接触面的黏聚力随碎石含量递增至一定程度后开始递减,内摩擦角与碎石含量呈正相关。

目前关于石块定向性对土石混合物-结构界面的强度影响的研究尚少,石块倾角对界面破坏的影响可参考大型三轴试验中土石混合物内石块倾角

对其强度的影响。邹畅宇^[11]通过室内大型三轴试验和数值模拟发现,土石混合物抗剪强度在石块定向角为 45° 时达到最小值;此外,相较于没有固定角度石块的土石混合物,含有定向性石块的土石混合物的抗剪强度更低。张声宇^[12]通过大型三轴试验和数值模拟发现当夹角接近土石混合体的破裂角时强度达到最小,并揭示了其原因在于石块为该角度的定向性对土石混合物破坏的剪切路径的阻碍程度最小。

综上所述,针对含有定向性石块的黏性夹泥岩体与基岩接触界面的研究尚不多见,且含石量与界面摩擦角、黏聚力之间的关系尚未达成一致结论。同时,破碎带夹泥岩体很难通过钻探方法取得完整试样。鉴于此,通过自制人工断层泥以及黏性夹泥岩体-基岩界面室内大型直剪试验,研究了法向应力、含石量、石块倾角对黏性夹泥岩体-基岩接触面界面力学特性的影响,可为穿越断层带隧道的稳定和变形机理分析提供参考。

1 大型直剪试验

1.1 人工断层泥的制备

人工断层泥的制备目标是模拟断层泥的宏观力学参数,黏性断层泥主要模拟的强度参数为黏聚力。人工断层泥由膨润土、水泥、水和砂按一定比例拌和,在已有断层泥强度的研究^[13-14]结果范围内,通过调整水泥的含量可实现不同黏聚力。膨润土为纳基膨润土,其参数见表1,水泥为海螺牌的PO42.5的普通硅酸盐水泥。砂土取自南昌市艾溪湖地区湖底7~12 m深处,其级配曲线和基本参数见文献[12]。

表1 膨润土的基本参数

Tab.1 Parameters of bentonite

测试项目	测试结果
颗粒度(200目)	97.2%
水分含量	10.5%
膨胀倍数	19 mL/g
亚甲基蓝吸附量	26.3 g/100 g
胶体指数	75 mL/15 g

考虑到黏性夹泥岩体中石块分布的均匀性,需要石块悬浮在基质中,因此基质的密度需要满足一定要求;而配置好的基质又必须具备一定的流动性,才能满足试样自密实的制作要求,否则试样内部很容易出现空洞,导致试样不均匀。经过多次试验确定,采用水:膨润土=1:0.2(质量比)配比的泥浆,均匀搅拌并密封放置24 h后,泥浆可承托住石块,且具备良好的自密实性。

在上述泥浆配置的基础上,掺入水泥和砂子以模拟断层泥的黏聚力以及摩擦角。对配比(水:膨润土:水泥:砂=1:0.2:0.4:0.2)的试样进行3个龄期的养护(室内温度为5~10℃),达到相应的龄期后对试样进行常规直剪试验。强度值取1组试样6个的平均值,采用3倍标准差法识别异常数据,剔除异常数据并补足合理的试验数据,结果如表2, φ 为摩擦角, c 为黏聚力。考虑到试验周期,确定采用1 d龄期的试样为大型直剪试验的基质。

表2 常规直剪试验的土体参数

Tab.2 Soil parameters of conventional direct shear test

龄期/d	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa
1	8.75	41.34
3	9.24	60.25
7	9.35	90.57

1.2 黏性夹泥岩体-基岩界面大型直剪试验

本试验将采用大型直剪仪测定不同石块含量和排列方向的夹泥岩体与基岩界面的剪应力-相对位移关系、剪胀软化等强度特性。

1.2.1 试验仪器

试验设备采用同济大学研制的大型直剪仪SJW-200。该仪器剪切箱尺寸为600 mm×400 mm×200 mm,可进行粗粒土的直剪试验和接触界面剪切试验。设备主要组成部分包括刚性框架、竖向加载系统、横向加载系统、剪切箱、伺服控制系统等,同时配备数据采集系统来收集和处理数据。该仪器

法向和切向最大压力均为800 kPa,最大法向位移为50 mm,最大剪切位移为150 mm,剪切速率为0.1~50 mm/min。

1.2.2 试验材料

黏性夹泥岩体中的基质采用1 d龄期人工断层泥。考虑到石块大小对试样的尺寸效应,黏性夹泥岩体中的石块最大粒径不超过试样尺寸的1/6~1/5,采用粒径为10~15 mm的天然砾石;基岩采用庐山市某采石场加工的天然黑山岩。基岩顶面保持劈裂形成的自然面,其余各面经加工处理以确保平整,便于放入剪切盒。通过三维扫描仪扫描基岩顶面,从扫描的模型中提取具有粗糙度的顶面进行分析,对不规则粗糙面采用灌砂法^[15]换算得到相应粗糙度指标:最大起伏高度为19.2 mm,粗糙度 $R=10.2$ mm。

1.2.3 试验方案和方法

夹泥岩体中石块含量 P_{vb} 为石块与试样总体积的比值,石块排列方向 α 为石块长轴倾角与水平面的锐角夹角。为研究含石量和石块排列方向对黏性夹泥岩体与基岩界面力学特性的影响,共设计4组试验方案。 α 均为 0° 的条件下3组, $P_{vb}=0.2, 0.4, 0.6$; α 为 90° 的条件下1组, $P_{vb}=0.4$ 。每组试样在3个不同法向应力50, 100, 150 kPa条件下的界面直剪试验。

将具有一定粗糙度的基岩放入下剪切盒。基岩与下剪切盒之间的空隙用环氧树脂玻璃钢填充,如图1(a)所示;在上剪切盒内制备黏性夹泥岩体,如图1(b)所示。黏性夹泥岩体分5层制备,每层断层泥分两次填入:第1次均匀填入断层泥,任其自然流淌并辅助用刮刀,使其在平面和厚度上保持均匀;第2次在放置石块后填入并凿毛。人工断层泥具有良好的流动性和可塑性,其塑性特征可有效稳定石块。按照预定角度放置石块后,使用电子量角器进行方向校核,确保角度误差控制在 $\pm 1^\circ$ 以内(图2)。后续逐层均按上述方法进行制样。待试样制作完成后用保鲜膜密封试样,等待24 h后对试样进行大型直剪试验。进行直剪试验时,首先将直剪盒推入至承压板正下方,确保直剪盒两端与横向加载系统连接牢固;随后采用液压加载系统施加法向应力,当法向应力达到目标值并稳定后,再启动横向加载系统,以1 mm/min的剪切速率施加剪

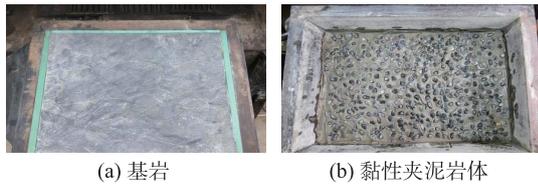


图1 基岩与黏性夹泥岩体
Fig. 1 Bedrock and mud-rock mass

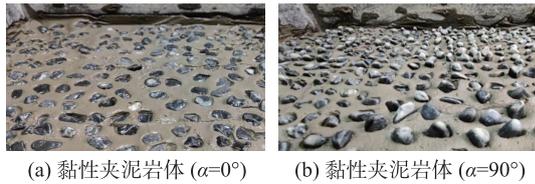


图2 不同石块角度的试样
Fig. 2 Samples of different rock angles

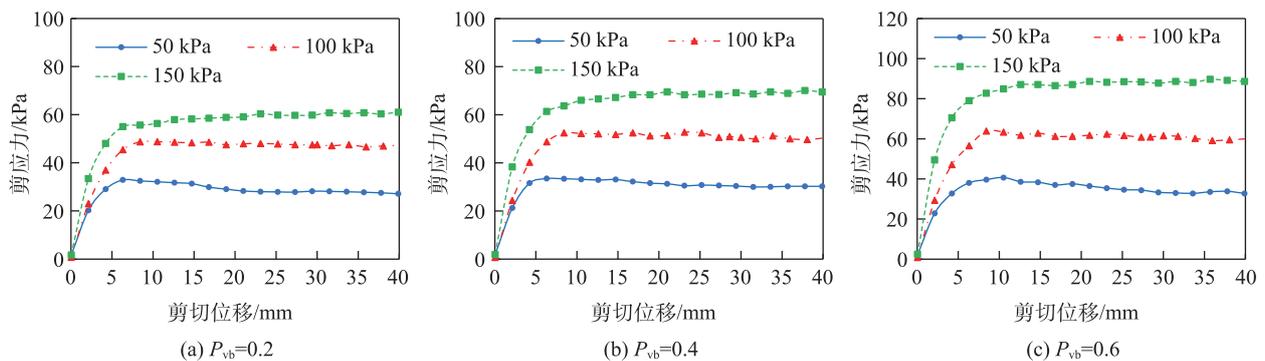


图3 不同法向应力水平下界面剪应力-剪切位移曲线($\alpha=0^\circ$)
Fig. 3 Shear stress-shear displacement curve of interface under different normal stress($\alpha=0^\circ$)

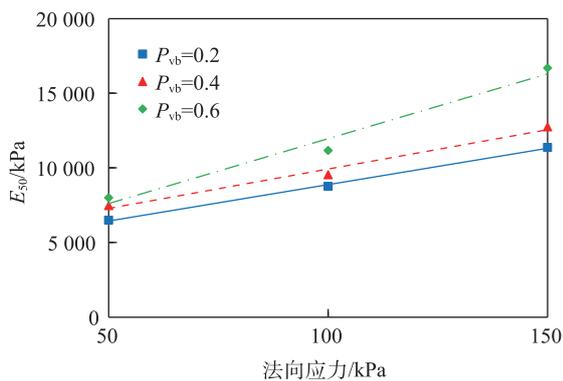


图4 E_{50} 与法向应力的关系
Fig. 4 Relationship of E_{50} and normal stress

造成上述两种现象的原因可能是法向应力的增加使得夹泥岩体和基岩之间的接触更加紧密,夹泥岩体中的石块与基岩的嵌固和咬合作用增加,这种效应在高含石量的试样中表现得更加明显。另

外,法向应力的增加也可能改变了夹泥岩体内部孔隙结构,导致材料整体变得更加坚硬。法向应力的增加使得界面力学特性趋于硬化,并且界面刚度也有所提高。文献[8]关于法向应力对界面强度的研究也得出类似结果。

2 大型直剪试验结果分析

2.1 法向应力对界面力学特性的影响

图3为3种含石量分别在3个不同法向应力水平下界面剪应力-剪切位移曲线。由图3可见,界面剪应力-应变关系在低法向应力表现为软化特征,随着法向应力的增加,由弱软化逐渐过渡到弱硬化。采用割线模量 E_{50} 来描述界面的刚度性质,图4绘制了不同含石量条件下, E_{50} 与法向应力的关系曲线。可以发现,随着法向应力的增加,界面刚度逐渐增加,几乎呈线性关系,当 $P_{vb}=0.6$ 时增幅更大。

外,法向应力的增加也可能改变了夹泥岩体内部孔隙结构,导致材料整体变得更加坚硬。法向应力的增加使得界面力学特性趋于硬化,并且界面刚度也有所提高。文献[8]关于法向应力对界面强度的研究也得出类似结果。

2.2 含石量对界面力学特性的影响

图5为相同法向应力水平下,不同含石量条件下界面剪应力-剪切位移曲线,由图5可见,随着含石量的增加,界面的抗剪强度随之增加。图6绘制了 E_{50} 与含石量的关系曲线,随含石量增加, E_{50} 逐渐增加,几乎呈线性关系。这种现象可从以下两个方面解释:首先,土体本身强度随含石量增加而增加,从而增强了界面抗剪特性;其次,含石量增加提高了石块与基岩的接触概率,增大了接触面积,进而增强了石块与基岩间的咬合和摩擦作用,最终增加了界面抗剪强度。

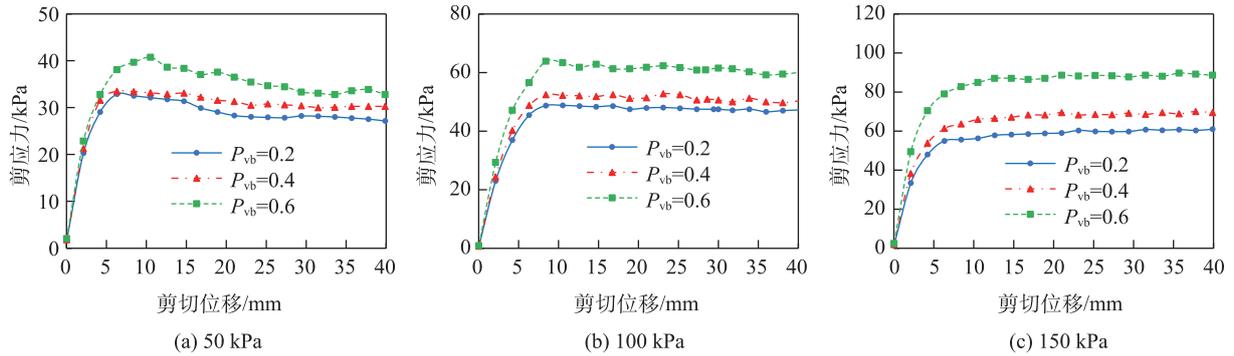


图5 不同含石量试样的界面剪应力-剪切位移曲线

Fig. 5 Curve of interface shear stress-shear displacement of specimens with different block proportion

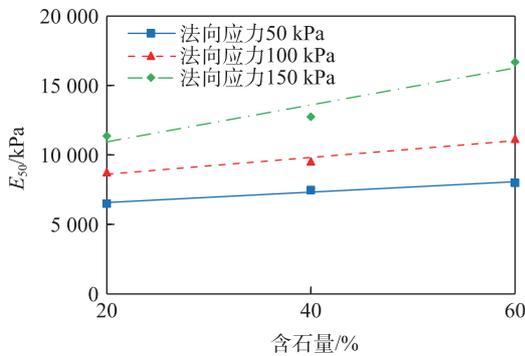


图6 E_{s0} 与含石量的关系

Fig. 6 Relationship of E_{s0} and block proportion

2.3 石块倾角对界面力学特性的影响

图7为含石量为40%条件下,不同石块倾角对应试样的界面剪应力-剪切位移曲线,由图可见,相较于石块倾角为0°对应的峰值应力,石块倾角为90°的峰值应力偏大。这可能是因为直剪试验的破坏面为水平面,石块倾角为90°(与水平方向正交)会阻碍剪切路径的发展,剪切路径发生“绕石”现象(石块阻碍剪切破坏面的发展),如图8。另一方面

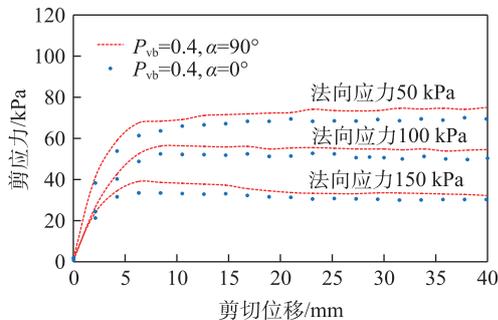


图7 不同石块倾角试样界面剪应力-剪切位移曲线

Fig. 7 Curve of interface shear stress-shear displacement of specimens with different block angle

面,不同的石块排列角会导致石块在空间中的分布方式发生变化,相比于石块倾角为0°,石块倾角为90°会减少每一层石块的堆叠数,从而增加石块与界面接触的数量,从而提高了界面抗剪强度,如图9。

2.4 黏性夹泥岩体-基岩界面强度参数分析

依照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—

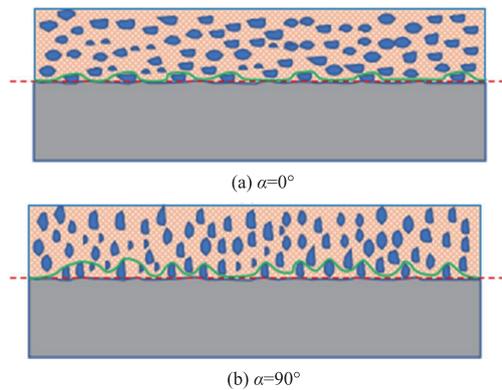


图8 剪切路径示意图

Fig. 8 Shear path diagram

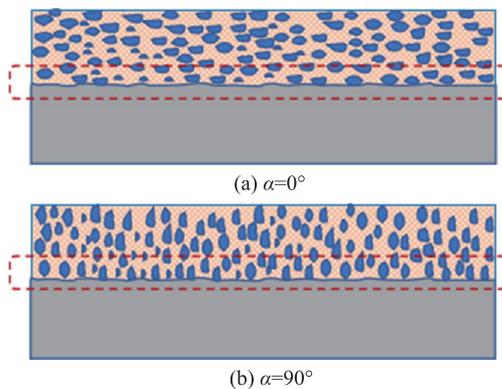


图9 石块空间分布示意图

Fig. 9 Distribution diagram of blocks

2019),对上述试验结果进行整理,对存在峰值的曲线提取其峰值作为抗剪强度,无峰值的曲线则取试样最大长度的1/10长度的剪切位移对应的应力作为抗剪强度,本试验由于试验设备限制问题,只能取剪切位移最大值40 mm对应的强度作为抗剪强度。

图10为不同含石量与界面内摩擦角和黏聚力的关系曲线。界面内摩擦角与含石量基本保持线性正相关,这是因为随着含石量的增加,石块密集度增加,石块与界面接触面积增加,发生接触、摩擦、错动和咬合,界面抗剪强度增加;同时随着含石量的增加,石块会从“孤立”到互相接触,而在接触面处同样会有群石围绕着界面摩擦、咬合,而石块之间又会互相咬合、牵制,从而增加界面的强度。这点与文献[10]的研究结果一致。而和上述文献结论不同的是黏聚力随着含石量的增加而下降,主要是因为石块的增加取代了界面处的黏土基质,而土体本身也因为石块的增加,隔断了断层泥的连续性,界面黏聚力下降。

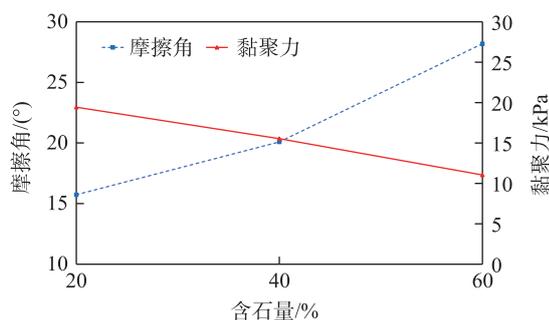


图10 界面强度参数与含石量关系曲线
Fig. 10 Relationship between interface strength parameters and volumetric block proportion

图11为不同含石量试样在不同法向应力条件下与界面抗剪强度的关系曲线,在相同法向应力条件下,界面抗剪强度随含石量增加而增加。结合图10和图11可以看出界面黏聚力下降的同时,界面强度依然有所增加,这是因为含石量对界面摩擦角以及土体自身的增加更加显著。随着法向应力的增加,界面强度随含石量的增加而显著增加,这也说明含石量的增加对界面强度的增加部分大于黏聚力对界面强度下降部分。

3 结论

1) 人工制备的断层泥在宏观力学性能上可更好地模拟原位断层泥,具有经济性、制备方便和土

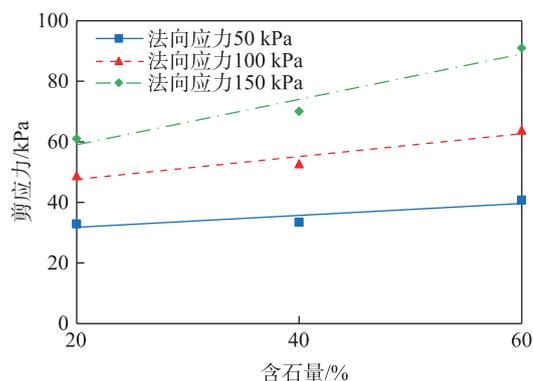


图11 含石量与抗剪强度关系曲线($\alpha=0^\circ$)
Fig. 11 Relationship between block proportion and shear strength($\alpha=0^\circ$)

体强度参数可控等优点,在室内试验中可部分取代取样困难、取样成本高的原位断层泥。

2) 界面剪应力-应变关系在低法向应力下表现为软化特征,随着法向应力的增加,由弱软化逐渐过渡到弱硬化;随着法向应力的增加,界面初始割线模量逐渐增加,高含石量试样对应的结果尤为明显。

3) 随着含石量的增加,界面的抗剪强度和界面刚度随之增加。含石量的增加不仅提高了黏性夹泥岩体的强度,也增加了石块和基岩接触的面积,从而增加石块与基岩的咬合和摩擦,增加了界面的抗剪强度。

4) 与石块倾角为 0° 相比,石块倾角为 90° 对应的界面强度更高。这可能是由于石块倾角为 90° 时,石块对剪切路径的阻碍作用更强,导致剪切路径发生“绕石”现象。

5) 界面内摩擦角与含石量保持线性正相关,而黏聚力随含石量的增加而下降。

参考文献:

- [1] 黄锋,朱涛,刘星辰,等.侧压系数对高应力破碎区隧道结构受力影响的试验研究[J].铁道学报,2023,45(12):174-181.
HUANG F, ZHU T, LIU X C, et al. Experimental study on influence of lateral pressure coefficient on stress of tunnel structure in high stress fracture area[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(12): 174-181.
- [2] 付艳斌,王福道,陆岸典,等.断层破碎带海底盾构隧道管片纵向沉降解析解及应用[J].岩土工程学报,2023,45(7):1393-1401.
FU Y B, WANG F D, LU A D, et al. Analytical solution to longitudinal settlement of segments of subsea shield tunnels in fault fracture zones and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(7):

- 1393-1401.
- [3] 李建辉, 李洁, 王纯皎, 等. 开裂隧道衬砌有压渗水室内模型试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(1): 40-49.
LI J H, LI J, WANG C J, et al. Experimental study on water seepage of cracked tunnel lining under groundwater pressure[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(1): 40-49.
- [4] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041-1069.
LI S C, XU Z H, HUANG X, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1041-1069.
- [5] MEDLEY E W. The Engineering characterization of melanges and similar block-in-matrix rocks[D]. Berkeley: University of California, 1994.
- [6] SCHUBERT W, FASCHING A, GORICKI A. Tunnelling in fault zones-state of the art[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2006, 21(3): 376-377.
- [7] 成浩, 王暉, 张家生, 等. 考虑粗糙度影响的不同土与混凝土界面大型直剪试验研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(5): 117-125.
CHENG H, WANG X, ZHANG J S, et al. Large-scale direct shear tests of interfaces between different soils and concrete considering roughness effect[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(5): 117-125.
- [8] 周国庆, 夏红春, 赵光思. 深部土-结构接触面与界面层力学特性的直接剪切试验[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1157-1162.
ZHOU G Q, XIA H C, ZHAO G S. Direct shear experiment of deep soil-structure interface and interface layer mechanical characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1157-1162.
- [9] 杨忠平, 李进, 蒋源文, 等. 含石率对土石混合物-基岩界面剪切力学特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1443-1452.
YANG Z P, LI J, JIANG Y W, et al. Influences of stone content on shear mechanical properties of soil-rock mixture-bedrock interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(8): 1443-1452.
- [10] 安琪, 滕伟福, 李伟忠. 三峡库区巴东组岩-土接触面抗剪强度特性研究[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(2): 110-116.
AN Q, TENG W F, LI W Z. Shear strength characteristics of rock-soil interface in Badong formation in the Three Gorges reservoir of China[J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(2): 110-116.
- [11] 邹畅宇. 响应石块长轴定向角的土石体力学特性研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.
ZOU C Y. Study on mechanical properties of soil and rock with long axis orientation angle of response block stone[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2021.
- [12] 张声宇. 断层破碎带夹泥岩体力学特性试验与数值分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.
ZHANG S Y. Test and numerical analysis of mechanical properties of muddy rock mass in fault fracture zone[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.
- [13] 齐群, 包含, 兰恒星, 等. 断层泥剪切力学行为与应变软化特征研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1101-1109.
QI Q, BAO H, LAN H X, et al. Behavior of shearing mechanics and characteristics of strain softening of fault gouge[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1101-1109.
- [14] 王鹏飞, 谭文辉, 马学文, 等. 不同胶结度断层泥强度参数与含水率关系[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1657-1662.
WANG P F, TAN W H, MA X W, et al. Relationship between strength parameters and water content of gouges with different degrees of consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1657-1662.
- [15] 杨忠平, 蒋源文, 李诗琪, 等. 土石混合物-基岩界面剪切力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1947-1954.
YANG Z P, JIANG Y W, LI S Q, et al. Experimental study on shear mechanical properties of soil-rock mixture-bedrock interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1947-1954.
- [16] 钱建固, 陈宏伟, 贾鹏, 等. 注浆成型螺纹桩接触面特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1744-1749.
QIAN J G, CHEN H W, JIA P, et al. Experimental study of mechanical behaviors of grouting-screw pile interface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1744-1749.



第一作者: 邹弈(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: 275522636@qq.com。



通信作者: 朱碧堂(1974—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为岩土工程。E-mail: btangzh@hotmail.com。

(责任编辑: 姜红贵)