

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1220

深部硬岩剪切边界下应力诱发片帮的机制研究

高要辉¹, 张春生¹, 苏方声², 邱士利³

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 杭州市拱墅区拱宸桥街道办事处, 浙江 杭州 310015;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 深部工程开挖现场发现硬岩的剪切破坏过程对地下工程稳定性具有重要影响。深埋硬岩隧洞边墙处片帮或板裂主要为压致拉裂的结果, 可通过室内单轴压缩试验来模拟; 而拱肩和底角处的片帮或板裂多数是在剪切边界下形成的, 需通过室内完整硬岩直剪试验来再现。针对不同类型硬岩压致拉裂型片帮, 已进行了相当深入的研究, 但对完整硬岩剪切边界下应力诱发型片帮的直接研究还存在着不足。为了深入研究深埋硬岩隧洞片帮或板裂的形成机制, 采用 FLAC^{3D} 软件模拟隧洞不同位置处围岩受开挖扰动的应力调整过程, 根据中国锦屏地下实验室二期工程区域的片帮统计结果, 将深埋硬岩隧洞片帮划分为压致拉裂型和剪切边界应力诱发型两类, 提出剪切边界应力诱发型片帮形成过程的概念模型; 利用完整大理岩设计了不同正应力下压剪破裂到剪切滑移的连续性直剪试验, 试样典型片帮破坏结果验证了概念模型的合理性。

关 键 词: 剪切破坏; 完整大理岩; 片帮或板裂; 概念模型; 直剪试验

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 04-1103-10

Mechanism of stress-induced spalling of deep hard rocks under shear boundary condition

GAO Yao-hui¹, ZHANG Chun-sheng¹, SU Fang-sheng², QIU Shi-li³

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 310014, China; 2. Gongchenqiao Sub-district Office, Gongshu District, Hangzhou, Zhejiang 310015, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geomechanical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: It is found that the shear behavior of hard rock is important for the stability of deep rock engineering. In a deeply-buried hard rock tunnel, the splitting of rock results in the spalling or slabbing in the side wall, which can be evaluated by the uniaxial compression test. However, the spalling or slabbing in the arch shoulder and foot is the result of rock failure under shear boundary condition, which should be estimated by the direct shear test. Although a lot of research work on the spalling or slabbing caused by rock splitting have been conducted, there are few direct shear tests on intact rocks to study the shear stress-induced spalling or slabbing. In order to better understand the mechanism of spalling or slabbing, this paper divides the spalling into two forms: splitting failure and shear stress-induced failure under shear boundary, and establishes the conceptual model of two types of spalling based on the statistical results of spalling at Chinese Jinping underground laboratory and numerical results of the deviatoric stress distribution of laboratory section using the FLAC^{3D}. A series of direct shear tests of intact marbles, which can achieve the shear failure and shear slip continuously, is conducted to verify the proposed conceptual model of spalling or slabbing.

Keywords: shear failure; intact marble; spalling or slabbing; conceptual model; direct shear test

1 引 言

片帮是深埋地下工程中常见的一种高应力诱发的硬岩脆性破坏, 主要表现为片状剥落或规律性板裂, 其与深埋洞室开挖卸荷诱发的岩爆灾害密切

相关^[1]。片帮的破坏形态、分布特征以及机制分析是正确认知高应力诱发灾害的重要环节之一。

多年来, 国内外学者通过现场监测、室内试验、理论分析以及数值模拟等手段对围岩片帮问题进行了系统的研究, 并取得了大量的研究成果。一方面,

收稿日期: 2021-08-05

修回日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 41877256); 中国博士后科学基金资助 (No. 2021M691000)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41877256) and the China Postdoctoral Science Foundation (2021M691000)

第一作者简介: 高要辉, 男, 1991 年生, 博士, 博士后, 主要从事高应力硬岩破裂机制及硬性结构面影响效应的研究工作。E-mail: gao_yh@hdec.com

通讯作者: 邱士利, 男, 1980 年生, 博士, 副研究员, 主要从事高应力硬岩卸荷破坏机制及预测方法等方面的研究工作。E-mail: slqiu@whrsm.ac.cn

科研工作者重点揭示片帮的破坏规律和形成机制。如,李地元等^[2]总结了深部高应力硬岩开挖过程中与开挖面基本平行的片帮破坏的研究现状;刘国峰等^[3]针对金沙江白鹤滩水电站地下厂房频繁出现的片帮问题,分析了片帮在厂房不同位置处的分布规律,并揭示了片帮与开挖掌子面之间的关系;吴世勇等^[4]采用室内真三轴试验设备,探讨了锦屏Ⅱ级水电站洞壁板裂化破坏现象以及其对 TBM 开挖的影响;宫凤强等^[5-6]研究了真三向应力下直墙拱形和方形隧洞片帮破坏的发生过程和机制;刘云鹏等^[7]对片帮结构的强度参数各向异性属性和断裂断口微观特征进行了研究;Martin 等^[8]基于多个地下硬岩实验室片帮案例统计结果和室内试验结果,提出了片帮的评估方法,并确定了片帮发生的应力阈值;Cai^[9]通过数值模拟手段研究了洞壁围岩密集分布的洋葱状裂纹与岩体地应力、岩体强度以及岩石的非均质性的关系。另一方面,一些学者^[10-11]通过分析片帮的破坏特征,建立其与地应力的关系。然而,上述的片帮现象主要表现为平行于洞壁的片状剥落或者板裂化劈裂,是深埋隧洞或硐室开挖卸荷后围岩压致拉裂的结果。

此外,深埋隧洞或硐室的拱肩和底角位置处的应力由于掌子面的推进而不断调整,形成了不同于边墙处单轴压缩或双轴压缩的应力边界,而是形成了正应力和剪应力共存的剪切边界。另外,拱肩和底角位置是强应力集中区域且自由空间受限,因此,此位置易产生呈洋葱表皮状且带有一定曲率的片帮或板裂。本文称此破坏为剪切边界应力诱发片帮,其形态和形成机制与平行于边墙的片帮或板裂完全不同。

剪切边界应力诱发片帮的直接研究手段是直剪试验,而关于完整岩石剪切力学行为的研究还稍显不足。因此,本文利用中国锦屏地下实验室二期(CJPL-Ⅱ)工程^[12]区域片帮统计结果,并基于 FLAC^{3D} 软件模拟断面应力调整过程,提出剪切边界应力诱发型片帮形成过程的概念模型,并设计不同尺寸完整大理岩在不同正应力条件下的直剪试验,重点在于描述剪切破坏形态,验证概念模型的合理性。

2 锦屏地下实验室片帮特点

2.1 典型片帮特征

中国锦屏地下实验室二期(CJPL-Ⅱ)工程最大埋深约 2 400 m,地下实验室整体由 1[#]~9[#]实验室

和 1[#]~4[#]交通洞组成,本文分析的 7[#]~8[#]实验室区域位于背斜南东翼,岩性相对单一且完整,结构面不发育,工程区围岩以Ⅱ类为主^[13]。7[#]~8[#]实验室为城门洞型(14 m×14 m),采用钻爆法施工,且为分部开挖,具体分为中导洞开挖、边墙扩挖和下层开挖,如图 1 所示。

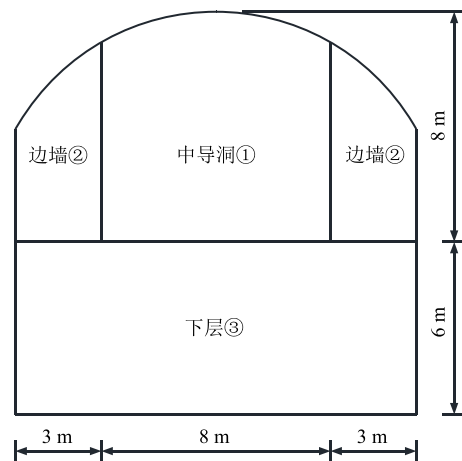


图 1 分部开挖法示意图(①→②→③)

Fig.1 Schematic diagram of partial excavation method (①→②→③)

在 7[#]~8[#]实验室分部开挖过程中,片帮发生的频率和剧烈程度存在差异。由于中导洞开挖的截面积和开挖进尺小以及支护及时,其发生片帮的概率低,且多为片状剥落;随着边墙扩挖和下层开挖的进行,实验室开挖断面越来越大,应力集中程度加剧,加之埋深大和构造运动引起高地应力的影响,其发生的片帮多为有规律性的板裂状破坏。图 2 给出了锦屏地下实验室 7[#]~8[#]实验室区域开挖期间现场典型片帮破坏照片。针对 7[#]~8[#]实验室片帮的破坏特征与分布规律进行统计分析,借助三维激光扫描仪的测量功能^[14-15],获得以下认识:

(1) 中导洞开挖过程中,片帮发生的频率小,且其多产生在边墙位置,表现为密集平行薄片状剥落,岩片厚薄不一,片帮面积在 1 m² 内。

(2) 边墙扩挖过程中,片帮发生频繁,在整个拱肩和边墙处均有出现,但破坏特征不同。在边墙处,片帮呈厚度均匀且平行于直边墙的片状或板状分布;在拱肩位置,片帮则为有规律性且呈弯曲状的板裂化破坏,弯曲的岩板类似洋葱表皮。

(3) 下层开挖过程一直伴随片帮的产生,且其密度和厚度有所增加,底角的破坏形态与边墙扩挖过程中拱肩的片帮形态相似。



(a) 8#实验室 K0+058 北侧边墙（中导洞开挖，右图为左图虚线框的局部放大图）



(b) 7#实验室 K0+012 北侧拱肩~边墙（边墙扩挖，右图为左图虚线框的局部放大图）



(c) 7#实验室 K0+062 南侧边墙（下层开挖，右图为左图虚线框的局部放大图）



(d) 7#实验室 K0+058 北侧底角（下层开挖，右图为左图虚线框的局部放大图）

图 2 锦屏地下实验室开挖现场典型片帮照片

Fig.2 Photos of typical spalling during the excavation of CJPL- II

2.2 片帮边界条件

为了进一步分析 7#~8#实验室断面不同位置片

帮形态差异的原因，采用 FLAC^{3D} 软件模拟 7#实验室 K0+030 m 桩号断面不同位置处偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)

随分部开挖进行的演化规律,如图3所示。数值计算采用考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型^[16],数值模型应力边界条件和基本力学参数详见文献^[17],分部开挖步骤如图1所示,开挖步距控制为3 m。图3表明断面不同位置处偏应力差异明显,在边墙位置,偏应力量值较小,此处片帮是压应力集中造成的,即压致拉裂,岩片或岩板平行于边墙,因此,边墙片帮的边界条件可简化为单轴或

双轴压缩^[8-9];拱肩和底角是强应力集中区,致使偏应力量值较大,此处片帮是在剪应力作用下产生的,岩片或岩板带有一定曲率,形状类似洋葱表皮。典型片帮的电镜扫描结果显示破裂面的穿晶破坏和沿晶破坏显著,如图4所示,表明拱肩和底角片帮的破坏本质依然是张拉破坏,然而,此处产生张拉应力的过程与边墙位置不同,因此,拱肩和底角片帮的边界条件可简化为直剪。

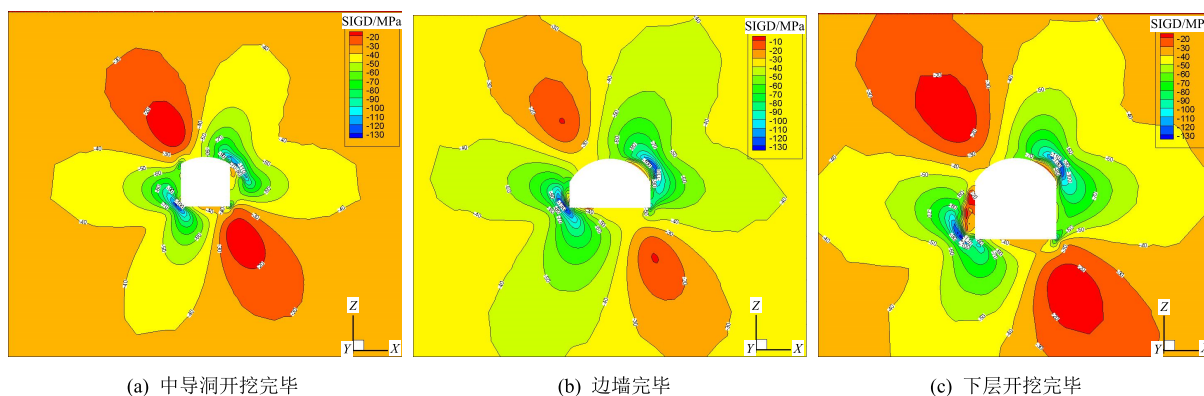


图3 7#实验室 K0+030 断面偏应力随分部开挖的演化

Fig.3 Variation of the deviatoric stress at section K0+030 with the partial excavation of #7 laboratory

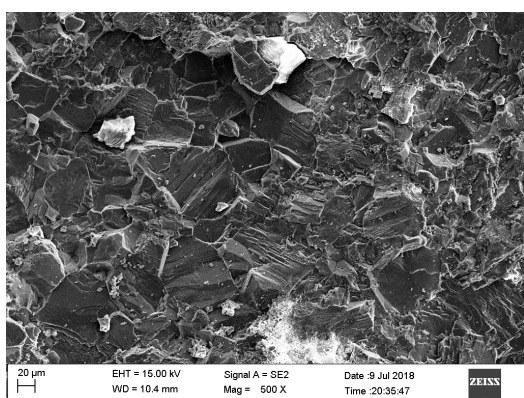


图4 现场片帮典型电镜扫描结果

Fig.4 Typical SEM photos of in-situ spalling

2.3 片帮概念模型

Diederichs^[18]总结了工程现场岩体不同破坏类型的现场强度包络线与室内试验试样不同破坏模式的强度包络线的相对关系,发现现场片帮强度阈值不小于试样损伤门槛值(起裂应力)而远小于试样长期强度极限(损伤应力),现场片帮发生的应力环境集中在零或低围压状态,如图5所示。如果将试样所受三维应力状态在潜在破坏面上分解,则可以得到垂直于特定破坏面的正应力和平行于特定破坏面的剪应力,只要试样剪应力超过剪切极限值,就会发生宏观破坏,因此,在不同围压下,试样的破坏可以通过偏应力状态来判断。

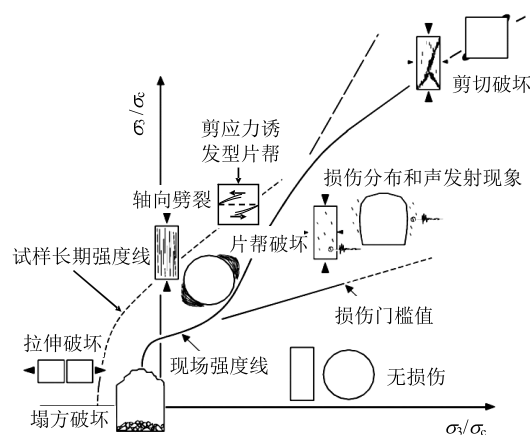
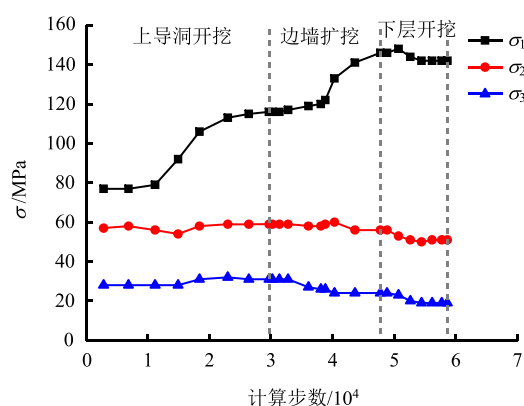


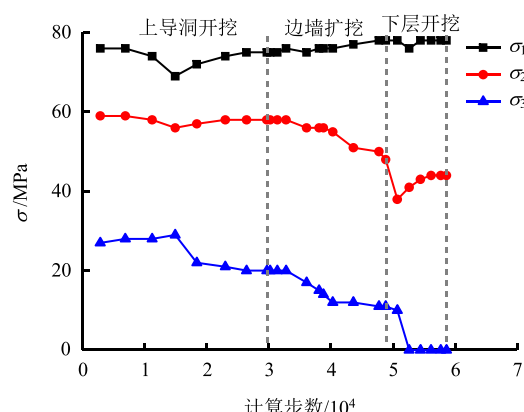
图5 现场破坏强度和试样强度关系示意图(修改文献^[18])

Fig.5 Schematic diagram of the relations between the in situ strength and the strength of lab samples (modified from reference [18])

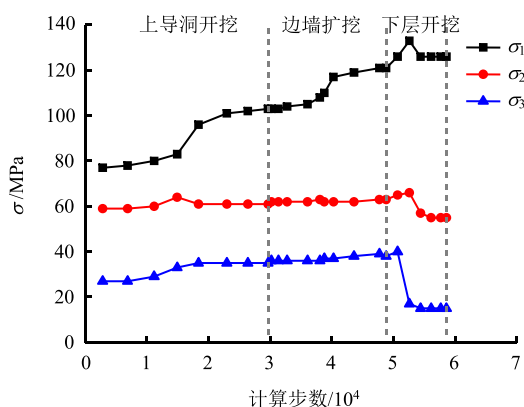
图6给出了在下层开挖后7#实验室 K0+030 m 桩号断面拱肩、边墙和底角位置主应力随开挖步数的变化情况。可以发现,在开挖完毕后,临空面附近边墙位置的应力状态近似为单轴压缩,最小主应力基本为0,此位置形成的片帮破坏类似于图5中的轴向劈裂;拱肩或底角位置的最小主应力基本保持不变且其偏应力较大,因此,本研究在图5中增加了剪切应力诱发型片帮的破坏模式,此破坏是在一定围压条件下偏应力或者说剪切应力作用环境导致的。



(a) 拱肩位置应力改变



(b) 边墙位置应力改变



(c) 底角位置应力改变

图6 7#实验室 K0+030 m 断面应力随开挖步数改变结果
Fig.6 Relations between the principal stresses and excavation steps at section of K0+030 m in #7 laboratory

根据 7#、8#实验室不同位置片帮统计分布规律和破坏特征、FLAC^{3D} 软件模拟的片帮边界条件以及经典片帮破坏准则示意图,将 7#、8#实验室片帮分为压致拉裂型和剪切边界应力诱发型两类,其分别对应边墙和拱肩或底角位置的破坏现象。图 7 给出了两种类型片帮的概念模型,压致拉裂型片帮为平行于边墙的片状或板状破坏,为单轴压缩应力边界;剪切边界应力诱发型片帮为类洋葱表皮弯曲的

片状或板状。

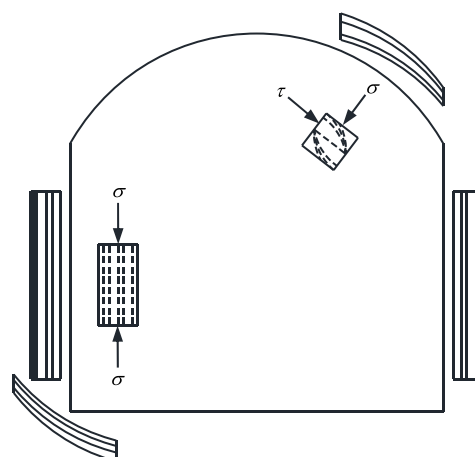


图7 片帮概念模型示意图

Fig.7 Schematic diagram of conceptual model of spalling

3 试验方案

试验所用完整大理岩试样取自中国锦屏地下实验室二期(CJPL-II)工程 7#、8#实验室区域^[12],单轴压缩试验的试样为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱试样,考虑到尺寸效应的影响^[19-22],直剪试验的试样尺寸分别为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 、 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 和 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的方样,岩性以灰色夹白色条带大理岩为主,岩石坚硬致密,试样密度为 $2.84 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

本文分别采用中国科学院武汉岩土力学研究所 MTS815.03 和 RMT-150C 试验系统完成完整大理岩的单轴压缩试验和直剪试验,单轴压缩试验装置在此不做详细介绍,剪切试验装置如图 8 所示。为了减小剪切盒与试验装置之间的摩擦阻力,在剪切盒的上下盘均安装辊轴。RMT-150C 试验系统采用 500 kN 力传感器测定法向力和剪切力,用 4 个竖向线性可变差动传感器(linear variable differential transformer, LVDT)同时测定法向位移,用 1 个水平向 LVDT 测定剪切位移,试验过程的所有数据由试验系统自动采集。另外,图 8 中的 4 个竖向 LVDT 分别位于方形剪切盒上盘的 4 个直角顶点,可根据其示数的差异判断试样法向变形的不均匀性,本文最终取 4 个 LVDT 的均值作为试样的法向变形量;水平的 LVDT 位于方形剪切盒的下盘,因其在图 8 中被遮挡而并未被标出。

剪切过程采用位移控制,剪切速率为 0.001 mm/s ,剪切试验以达到峰后残余强度为停止条件。本文所用试样为完整大理岩,试样在直剪过程中需经历两个不同阶段:压剪断裂和剪切滑移。试样的两个剪

切阶段均在一个直剪试验过程中完成。

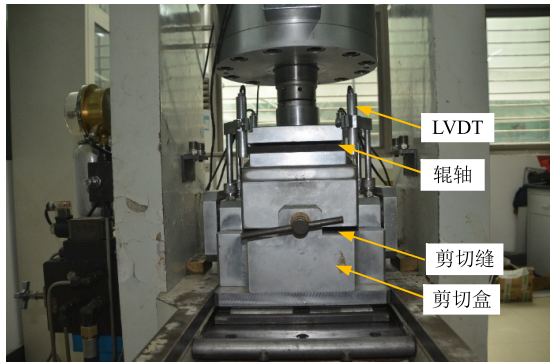


图 8 直剪试验装置
Fig.8 Direct shear test apparatus

4 试验结果与分析

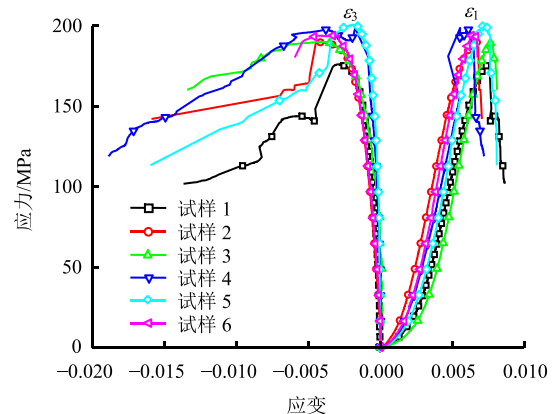
4.1 典型试验曲线

本文共开展 6 个圆柱样的单轴压缩试验，单轴压缩试验采用轴向位移控制，圆柱样平均单轴抗压强度为 191.55 MPa，弹性模量为 41.6 GPa，泊松比为 0.35。图 9(a)给出了圆柱样典型的应力-应变曲线，曲线可明显地划分为 3 个阶段：压密段、弹性段和应变硬化段。

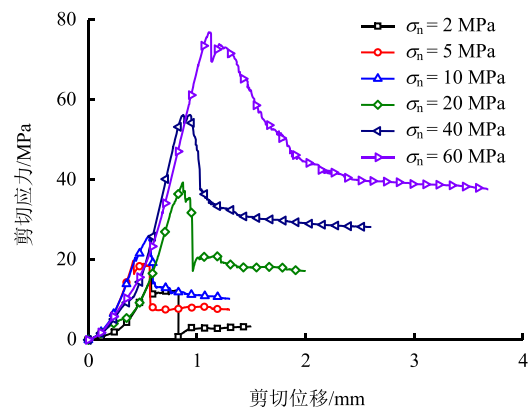
由于所用直剪试验系统剪切方向最大出力为 500 kN，随着试样剪切面积的增加，法向应力最大施加值逐渐减小。由图 9(b)~9(d)可知，不同方样剪切应力-剪切位移曲线总体都可分为完整试样的压剪破裂和剪断后试样的剪切滑移。在压剪破裂段，曲线经历初始压密段和弹性变形段，即存在明显的折点。在剪切滑移段，在高法向应力 ($\sigma_n \geq 10$ MPa) 下，曲线主要表现为从剪断段的峰值快速或缓慢地跌落到滑移段的峰值，应力跌落的快慢随着法向应力的增加而减小；在低法向应力 ($\sigma_n < 10$ MPa) 下，曲线则先是从剪断段的峰值跌落到零值左右然后增加到滑移段的峰值。此现象说明，随着法向应力的减小，试样剪断的剧烈程度不断加强。

4.2 试样破坏特征

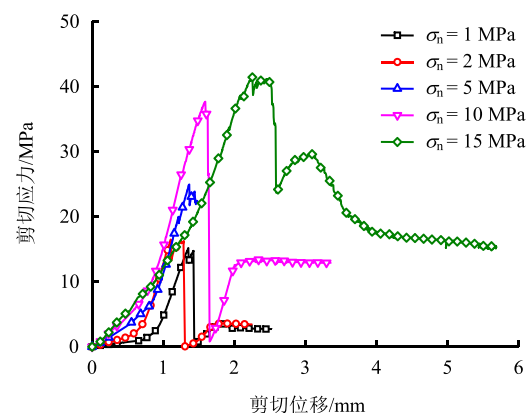
图 10 给出了试样的典型破坏照片。由图 10(a) 知，圆柱样劈裂破坏剧烈，整个试样完全板裂化，验证了图 7 边墙处压致拉裂型片帮的概念模型。由图 10(b) 得，方样压剪破裂到剪切滑移的破坏过程较为复杂，除剪断面外，还产生很多次生裂纹。为了更好地描述方样的剪切破坏形态，图 11 给出了不同尺寸方样的剪切破坏照片，图 12 标识出试样剪断面、表面裂纹以及各个侧面相对于法向应力和剪切应力方向的位置和分布示意图。



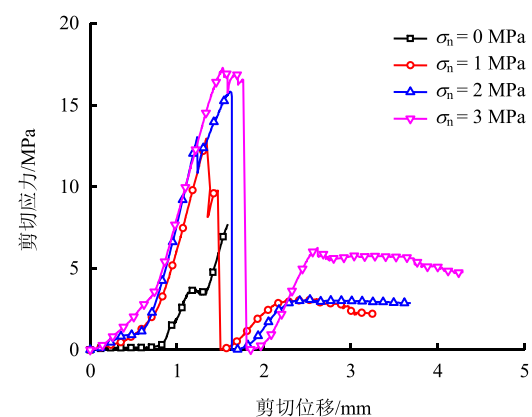
(a) 圆柱样单轴试验结果



(b) 50 mm×50 mm×100 mm 试样剪切试验结果

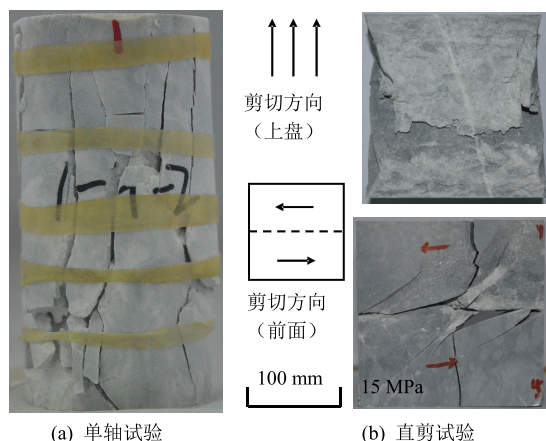


(c) 100 mm×100 mm×100 mm 试样剪切试验结果



(d) 150 mm×150 mm×150 mm 试样剪切试验结果

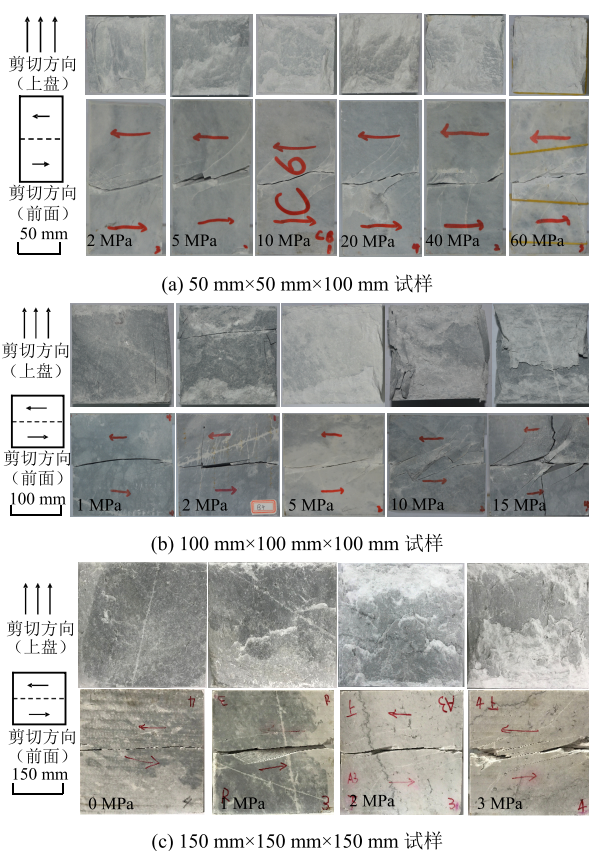
图 9 完整大理岩典型试验结果
Fig.9 Typical test results of intact marble specimens



(a) 单轴试验

(b) 直剪试验

图 10 试样典型破坏照片
Fig.10 Typical failure photos of specimens

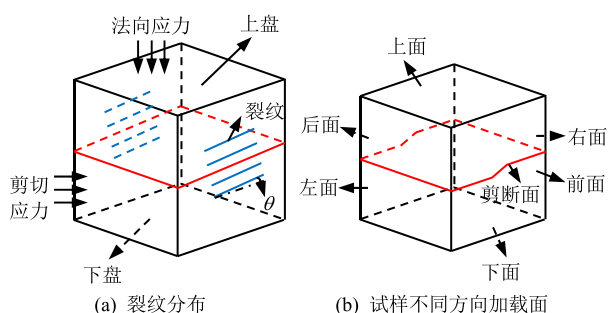


(a) 50 mm×50 mm×100 mm 试样

(b) 100 mm×100 mm×100 mm 试样

(c) 150 mm×150 mm×150 mm 试样

图 11 完整大理岩直剪试验剪切破坏
Fig.11 Failure photos of intact marble specimens in direct shear tests



(a) 裂纹分布

(b) 试样不同方向加载面

图 12 方样剪切破坏示意图
Fig.12 Shear failure diagram of cubic specimens

方样的前后面以剪断面为对称轴出现了成组对称分布的裂纹, 随着法向应力的增加, 裂纹与剪应力的夹角 (图 12 中的 θ) 不断增大, 裂纹分布的位置逐渐从试样剪断面向试样的上下面扩展, 裂纹组数先增多后减少, 裂纹面电镜扫描结果显示清晰晶体边界, 如图 13 所示, 说明这是张拉破坏的结果。方样在前后面产生的带有一定曲率的弯曲岩板验证了图 7 拱肩和底角处剪切边界应力诱发片帮的概念模型。

方样的剪断面整体粗糙凹凸不平, 密集分布着呈小步距鳞片状的薄陡坎, 此陡坎整体走向与剪切力方向一致, 这是完整试样压剪破裂的产物。随着试样剪断面尺寸的增加, 单个陡坎的面积不断增大。另外, 同一法向应力条件下, 随着试样剪断面尺寸的增加, 剪断面形成的爬坡形态越加明显, 即剪断面相对剪切力方向的角度不断增加, 甚至试样的上下盘发生二次断裂, 如图 11(b) 15 MPa 法向应力条件下的破坏照片所示, 此现象再次说明试样尺寸增加了剪切破坏的程度。

剪断面表面有擦痕和岩石碎屑, 这是由于试样剪断后又经历一定程度的剪切滑移。另外, 剪断面在试样左右面上出露为一组平行的分别与上下剪切盒边缘重合的直线, 在前后面出露为一组近似平行的曲边, 曲边形态呈爬坡台阶状。

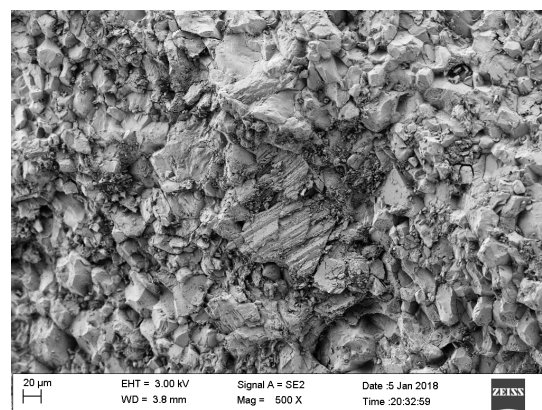


图 13 方样裂纹面典型电镜扫描结果
Fig.13 Typical SEM photos of fracturing of cubic specimens

5 讨论

高地应力硬岩隧洞边墙位置围岩容易发生压致拉裂型片帮或板裂, 破裂面平行于直边墙, 而其拱肩或底角位置围岩容易发生剪切边界应力诱发型片帮或板裂, 破裂面为带有弧度的类洋葱表皮形态。洞室断面形状越不规则、开挖方法造成的卸荷越发

明显、最大主应力与最小主应力差值越发显著、硬岩脆性越强则隧洞片帮或板裂破坏程度越发剧烈。尽管围岩片帮或板裂的形成机制均为张拉破坏,但是围岩产生张拉应力的应力边界不尽相同,致使围岩不同位置片帮或板裂的破裂形态存在差异。

基于完整大理岩方样直剪试验的剪切变形-剪切应力曲线和破坏结果,图 14 给出了其试验结果的概念模型,反映了本文直剪试验设计的压剪破裂到剪切滑移的连续试验过程。另外,方样前后面的类片帮破裂先与剪断面出现;剪断面出现在压剪破裂时刻,即第一个峰值时刻,此后阶段试样的裂纹形态基本稳定;之后进入剪切滑移阶段。

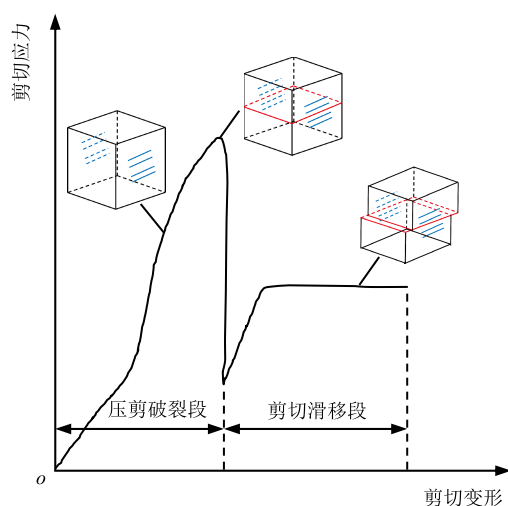


图 14 方样直剪试验结果概念模型示意图

Fig.14 Schematic diagram of conceptual model of cubic specimen in direct shear test

综合考虑,单轴压缩试验和直剪试验是分析片帮形成机制直接、便捷且有效的手段。然而,为了深入研究和验证本文提出的概念模型,需要 AE 发射技术以及 SEM 和 CT 扫描技术的帮助,这些工作将是作者接下来研究的目标。

6 结 论

本文利用现场案例分析、数值模拟和室内试验相结合的手段,研究中国锦屏地下实验室二期(CJPL-II)工程区域不同位置处片帮的分布特征、破坏规律以及形成机制,得到如下结论:

(1) 基于 7[#]~8[#]实验室现场片帮统计结果,发现边墙处片帮为平行于洞壁的片状或板状破坏,而拱肩和底角处片帮则为规律性板裂化破坏,岩板呈弯曲状,类似洋葱表皮。

(2) 基于 FLAC^{3D} 对 7[#]、8[#]实验室断面不同位

置偏应力分布的模拟结果,可将片帮分为压致拉裂型和剪切边界应力诱发型,边墙处压致拉裂型片帮的边界条件为单轴或双轴压缩,而拱肩和拱脚剪切边界应力诱发型片帮的边界条件为直接剪切。

(3) 基于现场片帮统计和 FLAC^{3D} 模拟结果,提出了断面不同位置片帮的概念模型,并通过圆柱样单轴劈裂破坏结果和方样在前后面形成的弯曲板裂验证了概念模型的正确性。

(4) 方样剪切变形-剪切应力曲线整体可分为完整试样的压剪破裂和剪断后试样的剪切滑移两部分,每一部分对应试样的不同破裂阶段。

参 考 文 献

- [1] 周辉, 卢景景, 徐荣超, 等. 深埋硬岩隧洞围岩板裂化破坏研究的关键问题及研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2737-2749.
ZHOU Hui, LU Jing-jing, XU Rong-chao, et al. Critical problems of study of slabbing failure of surrounding rock in deep hard rock tunnel and research progress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(10): 2737-2749.
- [2] 李地元, 李夕兵. 高应力硬岩板裂破坏的研究现状与展望[J]. 矿业研究与开发, 2011(5): 82-86.
LI Di-yuan, LI Xi-bing. Advance and prospect of researches on spalling failure of highly-stressed hard rock[J]. **Mining Research and Development**, 2011(5): 82-86.
- [3] 刘国锋, 冯夏庭, 江权, 等. 白鹤滩大型地下厂房开挖围岩片帮破坏特征、规律及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 865-878.
LIU Guo-feng, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Failure characteristics, laws and mechanisms of rock spalling in excavation of large-scale underground powerhouse caverns in Baihetan[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(5): 865-878.
- [4] 吴世勇, 龚秋明, 王鸽, 等. 锦屏 II 级水电站深部大理岩板裂化破坏试验研究及其对 TBM 开挖的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1089-1095.
WU Shi-yong, GONG Qiu-ming, WANG Ge, et al. Experimental study of slabbing failure for deep-buried marble at Jinping II hydropower station and its influences on TBM excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(6): 1089-1095.
- [5] 宫凤强, 罗勇, 刘冬桥. 深部直墙拱形隧洞围岩板裂破坏的模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6):

- 1091-1100.
- GONG Feng-qiang, LUO Yong, LIU Dong-qiao. Simulation tests on spalling failure in deep straight-wall-top-arch tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(6): 1091-1100.
- [6] GONG Feng-qiang, WU Wu-xing, LI Tian-bin, et al. Experimental simulation and investigation of spalling failure of rectangular tunnel under different three-dimensional stress states[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2019, 122: 104081.
- [7] 刘云鹏, 邓辉, 黄润秋. 板裂结构岩石力学试验及破裂断口细观形貌特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 2): 3852-3861.
- LIU Yun-peng, DENG Hui, HUANG Run-qiu. Mechanical test of slab-rupture structure rock and mesoscopic morphology analysis of rupture surface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Suppl. 2): 3852-3861.
- [8] MARTIN C D, CHRISTIANSSON R. Estimating the potential for spalling around a deep nuclear waste repository in crystalline rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(2): 219-228.
- [9] CAI Ming. Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries-Insight from numerical modeling[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(5): 763-772.
- [10] 江权, 冯夏庭, 徐鼎平, 等. 基于围岩片帮形迹的宏观地应力估计方法探讨[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1452-1459.
- JIANG Quan, FENG Xia-ting, XU Ding-ping, et al. Evaluation method of general geostress based on spalling features of wall rock [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1452-1459.
- [11] 裴书锋, 赵金帅, 于怀昌, 等. 考虑洞室岩体应力型破坏特征的局部地应力反演方法及应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 4093-4104.
- PEI Shu-feng, ZHAO Jin-shuai, YU Huai-chang, et al. Inversion method for local in situ stress considering stress-induced damage of cavern surrounding rock and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(12): 4093-4104.
- [12] 冯夏庭, 吴世勇, 李邵军, 等. 中国锦屏地下实验室二期工程安全原位综合监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 649-657.
- FENG Xia-ting, WU Shi-yong, LI Shao-jun, et al. Comprehensive field monitoring of deep tunnels at Jinping underground laboratory(CJPL-II) in China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(4): 649-657.
- [13] 王广德. 复杂条件下围岩分类研究——以锦屏二级水电站深埋隧洞围岩分类为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- WANG Guang-de. Research for the surrounding rock mass classification in the complicated conditions-the surrounding rock mass classification of the deep buried tunnels in Jinping in China is as an example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [14] 许度, 冯夏庭, 李邵军, 等. 基于三维激光扫描的锦屏地下实验室岩体变形破坏特征关键信息提取技术研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 1): 488-495.
- XU Du, FENG Xia-ting, LI Shao-jun, et al. Research on key information extraction of rock mass deformation and failure characteristics in Jinping underground laboratory based on 3D laser scanning technique[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(Suppl. 1): 488-495.
- [15] 高要辉, 王才品, 王兆丰, 等. 激光扫描技术在隧洞轮廓时变监测中的应用[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(3): 266-273.
- GAO Yao-hui, WANG Cai-pin, WANG Zhao-feng, et al. Application of laser scanning technology to monitoring of tunnel cross-section with time[J]. **Journal of Zhejiang University of Technology**, 2021, 49(3): 266-273.
- [16] 江权, 冯夏庭, 陈国庆. 考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 144-152.
- JIANG Quan, FENG Xia-ting, CHEN Guo-qing. Study on constitutive model of hard rock considering surrounding rock deterioration under high geostresses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(1): 144-152.
- [17] FENG Xia-ting, YAO Zhi-bin, LI Shao-jun, et al. In situ observation of hard surrounding rock displacement at 2400-m-deep tunnels[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2018, 51(5): 873-892.