

孟祥瑞, 裴向军, 黄润秋, 等. 2018. 大光包滑坡层间错动带岩体剪切特性研究[J]. 工程地质学报, 26(2): 309-318. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2016-562

Meng Xiangrui, Pei Xiangjun, Huang Runqiu, et al. 2018. Shear behaviors of rock mass in the interlayer fault zone of Daguangbao landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 26(2): 309-318. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2016-562

# 大光包滑坡层间错动带岩体剪切特性研究<sup>\*</sup>

孟祥瑞 裴向军 黄润秋 崔圣华 朱凌 詹威威

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学) 成都 610059)

**摘要** 大光包滑坡滑带发育于构造作用形成的层间错动带中,带中岩体由上而下碎裂化程度增加,且底部存在一层泥化带。本研究选取大光包滑坡层间错动带中不同层位的碎裂岩体,共计进行18组中剪试验;此外,选取错动带中泥化带及临近的糜棱质带岩体进行了不同含水率下的42组快剪试验。试验结果表明:层间错动带碎裂岩体的剪切特性同碎裂程度有关,碎裂程度较低的岩体应变软化特性更明显,碎裂程度较高的岩体抗剪强度则更差;糜棱质带土体抗剪强度和内摩擦角一般大于泥化带土体,且剪切特性受地下水的影响小于泥化带;泥化带土体的抗剪强度和黏聚力随含水率的升高迅速降低,其内摩擦角与含水率呈负相关的指数关系,在地震过程中,随着岩体扩容引起地下水入侵,泥化带的抗剪强度会大大降低。研究结果对理解大光包滑坡滑面发育层位和地震中含水率上升及错动带岩体进一步碎裂化对滑带岩体抗剪强度的影响有重要意义。

**关键词** 大光包滑坡; 层间错动带; 剪切特性; 碎裂程度; 含水率

中图分类号:P642.22 文献标识码:A doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2016-562

## SHEAR BEHAVIORS OF ROCK MASS IN THE INTERLAYER FAULT ZONE OF DAGUANGBAO LANDSLIDE

MENG Xiangrui PEI Xiangjun HUANG Runqiu CUI Shenghua ZHU Ling ZHAN Weiwei

(State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

**Abstract** The slide surface of Daguangbao landslide is developed in the interlayer fault zone where the fragmentation degree of rock mass is increased from the upper to the lower with a belt of mud at the bottom. 18 groups of medium-sized direct shear tests were carried out for the samples collected from Daguangbao interlayer fault zone. 42 groups of unconsolidated direct shear tests were carried for the samples collected from mud belt and mylonite belt by controlling the moisture content. The results show that the shear characteristics of the rock mass in interlayer fault zone are related to the degree of fragmentation. Characteristics of strain softening of rock mass with lower degree of fragmentation is more obvious while the shear strength of rock mass with higher degree of fragmentation is worse. The shear strength and the friction angle of mylonite are mostly greater than the soil in the mud belt and the shear characteristics of mylonite is less affected by the ground water than the mud. The shear strength and cohesive strength of the soil in the mud belt are decreased rapidly with the increase of moisture content. The internal friction angle has a negative exponential relation with the moisture content. The shear strength of the soil in mud belt can be greatly reduced with the intrusion of groundwater caused by the rock mass dilatancy during

\* 收稿日期: 2016-12-29; 收到修改稿日期: 2017-05-02.

基金项目: 国家重点研究计划(2017YFC1501000), 强震山区特大地质灾害致灾机理与长期效应研究, 国家自然科学基金项目(41572302), 国家自然科学基金创新研究群体项目(41521002)资助.

第一作者简介: 孟祥瑞(1993-), 男, 硕士生, 地质工程专业, 主要从事工程地质相关研究工作. Email: 452652713@qq.com

the earthquake. The results of this study are important for understanding the position of the slip surface. It is also important for understanding the influence of the increase of moisture percentage and the further fragmentation on the shear strength of the rock mass in the fault zone.

**Key words** Daguangbao landslide; Interlayer fault zone; Shear characteristics; Fragmentation degree; Moisture content

## 0 引言

大光包滑坡位于四川省安县高川乡,处于龙门山断裂带中段,紧邻 5·12 地震发震断裂,是汶川地震后发生的规模最大的巨型滑坡,滑坡长度达 4.6 km、最大宽度 3.4 km,据估计其滑体体积达到了  $11.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。作为国内外近 100 a 来发生的巨型滑坡之一,大光包滑坡一直是国内外地质工作者研究的焦点。

地震发生后,黄润秋等(2008, 2009)首先对滑坡进行了调查,首先提出并分析了大光包巨型滑坡滑带岩体碎裂化问题,并提出大光包滑坡形成机制为:坡体震裂→滑面碎裂化→摩阻力急剧降低→前部“锁固段”剪断→高速滑动→震动堆积;殷跃平等(2011, 2012)应用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟大光包滑坡变形失稳特征,模拟结果表明,其岩体碎裂化与垂直地震动力响应有密切相关。在大光包滑坡的研究过程中,滑坡滑带的碎裂岩体一直是大家研究的重点,裴向军等(2015),黄润秋等(2016)对大光包滑带碎裂化岩体的特征进行了详细的研究,发现层间错动带岩体有碎裂程度高、碎裂再胶结、震裂损伤严重的特征,且破碎带内岩体有从上到下碎裂化、糜棱化程度加剧,颗粒粒径减小的明显特征,其最底层为一个 0.2~5.0 cm 的黄褐色泥化带。目前的研究成果认为大光包滑坡滑带是在早期构造作用形成的层间错

动带基础上发育形成的,在地震过程中,强烈的垂向地震动(加速度)导致大光包山体沿相对软弱的层间错动带分离,并对层间错动带产生垂向振冲(夯击)作用,使得层间错动带岩体进一步碎裂化;此外,由于滑带的夯击扩容,地下水将强力挤入扩容空间,从而可能激发水击作用,导致孔隙水压力激增,滑带抗剪能力急剧降低,促使滑坡启动,产生高速滑动。

总结目前的研究成果,仍未有人系统的对该构造带岩体的剪切特征进行研究;此外,前人的研究成果认为地下水可能对滑坡的启动有影响,但仍没有实验数据支撑。基于此,本文着重对层间错动带岩体的剪切特性进行了研究,通过一系列试验探讨了层间错动带各构造层岩体剪切特性以及破碎程度和地下水对其剪切特性的影响,实验结果对于理解大光包滑坡滑面发育层位和地震中岩体含水率上升及错动带岩体进一步碎裂化对滑带岩体抗剪强度的影响有重要意义。

## 1 滑坡概况

大光包滑坡所处区域属于龙门山逆冲推覆构造带,区域内发育高川推覆体、大水闸推覆体、金花推覆体、太平推覆体 4 次逆冲推覆构造,逆冲-推覆-滑脱-走滑是区内构造特色。大光包滑坡位于大水闸推覆体上,距发震断层(映秀—北川断裂)仅

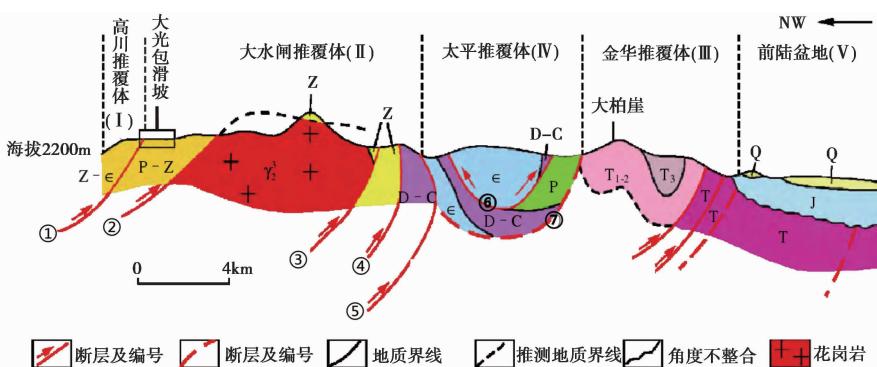


图 1 大光包滑坡区域构造示意图

Fig. 1 Regional structure sketch of Daguangbao landslide

- ①. 四道沟断裂; ②. 大水闸背斜; ③. 水磨沟东断层; ④. 仰天窝断层; ⑤. 大梁子断层; ⑥. 王家坪断层; ⑦. 映秀—北川断裂

4.5 km(图1)。

汶川地震中大光包滑坡溃滑而下,超过 $11 \times 10^9 \text{ m}^3$ 滑坡物质越过黄洞子沟撞对岸山梁,前缘受阻后向两侧扩离。滑坡后缘形成了近600 m直立断壁和1.5 km长的拉裂边界,在滑坡下游侧形成了长约1 km,产状N $80^\circ \sim 88^\circ \text{ E}$ /NW/ $30^\circ \sim 38^\circ$ 的滑动光面(图2)。

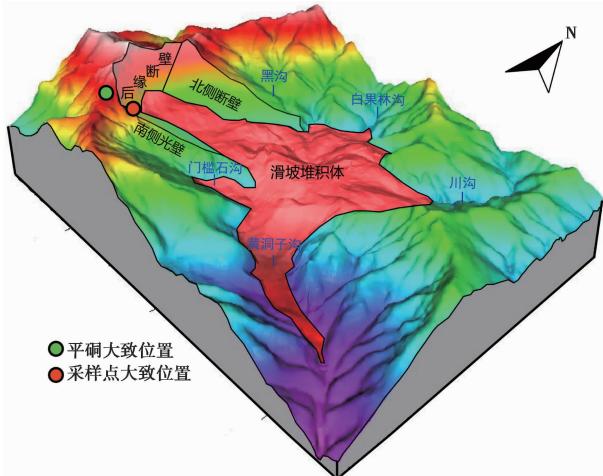


图2 大光包滑坡全景示意图

Fig. 2 Panoramagram of Daguangbao landslide

裴向军等(2015)通过滑带平硐勘探和构造解析得出该滑带发育于大光包山体内部构造形成的层间错动带。该错动带属于震旦系灯影组三段,岩性为白云岩,埋深达到400 m。崔圣华(2014)基于SEM扫描电镜对该层间错动带岩体进行了显微分析,认为其形成经历了早期海相沉积和之后的构造抬升、挤压破碎和淡水淋滤、热液充填与置换,并且在后期多期构造错动中,带内岩体发生糜棱化和泥化。

错动带碎裂岩体有从上到下碎裂化、糜棱化程度加剧,颗粒粒径减小的明显特征,其最下层为一层泥化带,由上而下的分带(图3)可概括为(裴向军等,2015):(1)受断层影响的破裂岩带;(2)角砾岩带和碎裂岩带,破裂霹雳发育,普遍被钙质胶结,可见大量白云石透镜体;(3)3~45 cm的糜棱质带,灰白色,由岩屑和细砾组成,内含少量白云石和泥质透镜体;(4)0.2~5.0 cm的泥化带,黄褐色、稍湿软塑状态。

试验样品取自大光包滑坡层间错动带,由于层间错动带的构造分带,对泥化带、糜棱质带和角砾岩带分别取样。由于角砾岩带内岩体碎裂程度有较大差异,上部颗粒较大,往下颗粒变小,故在上下部分

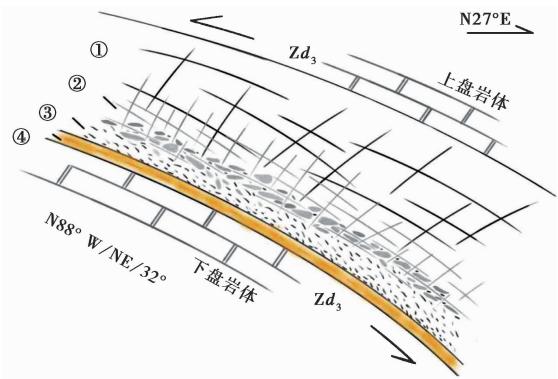


图3 层间错动带素描图(裴向军等, 2015)

Fig. 3 Sketch of inetrlayer fault zone



图4 取样位置及岩体特征

Fig. 4 Locations of the extracted samples

别取样。最终试样分为:泥化带试样(S1)、糜棱质带试样(S2)、角砾岩带下部试样(S3)、角砾岩带上部试样(S4)。

S1呈黄褐色,S2、S3、S4呈灰白色,后3组试样95%矿物成分为白云石,含石英和微量高岭石(图5)。图6为颗粒分析结果,从图可以看出S1及S2试样粒径较小,前者粒径分布范围为0.001~10 mm,分布范围大于后者,其中小于0.075 mm的黏粒含量S1为53%,S2为42%,前者大于后者,此外,S2虽然也有较多黏粒,但其粒径在黏粒范围内更多分布于靠近黏粒粒径上限的位置,在后续实验过程中也发现其性质更接近于粉砂,而呈现的黏土特性明显小于S1;S3的粒径多分布在0.25~5 mm之间,S4的粒径多分布于5 mm以上,后者粒径明显

大于前者, 分别计算试样级配的不均匀系数, 发现 S1 的不均匀系数为 40.14, 在 4 种试样中最大, S2、S3、S4 的不均匀系数分别为 15.63, 17.57 以及 13.98, 结果可表明 4 种试样的级配良好程度为 S1>S3>S2>S4。

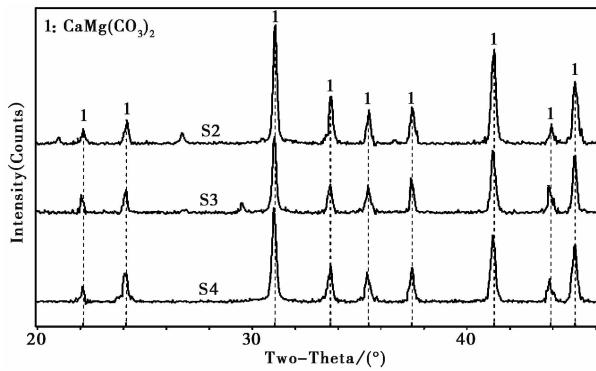


图 5 XRD 结果

Fig. 5 XRD results

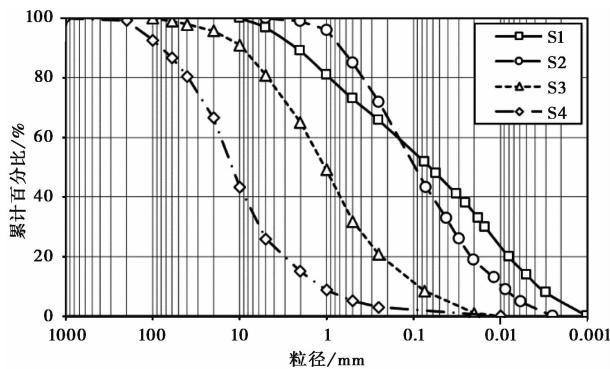


图 6 试样颗粒分析曲线

Fig. 6 Grain analysis curves

表 1 为 S2、S3、S4 天然密度, 可以看出 S2 密度大于 S1, S3 和 S4 密度大于 S2, 各层位岩体密度的差异可能与其颗粒组成、矿物成分、密实程度、含水性等有关; 表 2 列出了 S1 基本物理参数, 可以看出 S1 天然含水率达 12%。

表 1 试样密度

Table 1 Sample density

| 试样                      | S2   | S3   | S4   |
|-------------------------|------|------|------|
| 天然密度/g·cm <sup>-3</sup> | 2.44 | 2.51 | 2.53 |

表 2 泥化带(S1)试样物理性质参数

Table 2 Property parameters of the sample of the mud belt

| 天然含水率 /% | 干密度 /g·cm <sup>-3</sup> | 湿密度 /g·cm <sup>-3</sup> | 液限 /% | 塑限 /% |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------|-------|
| 12       | 2.13                    | 2.39                    | 24    | 11.8  |

## 2 试验方案及结果

### 2.1 试验方案

#### 2.1.1 中剪试验

对 S2、S3、S4 分别进行中剪试验。试验采用成都理工大学自行开发研制的携带式岩、土力学性质多功能试验仪, 剪切盒尺寸为 14 cm×15 cm×16 cm, 通过竖向活塞施加正应力, 水平活塞给试样施加剪应力。按天然密度控制中剪试验试样密度, 试样中保持正应力不变, 逐渐增大剪应力, 并记录对应剪应变。当剪应力超过峰值强度后试样破坏, 剪应变快速增加, 当剪切位移超过 1 cm(即应变达到或超过 0.05~0.06)时被认为进入残余状态, 停止试验。大光包层间错动带天然应力可达 11 MPa, 而由于试验仪器限制, 本试验正应力范围跨度为 0.3~1.5 MPa, 分为 6 个正应力等级。

#### 2.1.2 普通直剪试验

为研究含水率对层间错动带材料剪切特性的影响, 采用应变控制式直剪仪进行不固结快剪试验, 由于大粒径的碎裂岩体持水性不佳, 试验主要针对粒径较小的 S1 以及 S2 试样。不同含水率试样制作成标准环刀样后放入直剪仪进行试验, 每组试验至少进行 4 组不同正应力级别, 得到不同含水率下试样的强度参数。基于 S1 试样液塑限, 按照 8%、12% (天然)、16%、20%、24% 5 种含水率对其进行试验; S2 持水性相对较差, 设定 4%、6%、8% (天然)、10%、12% 5 种含水率进行试验。应当注意在配置含水率试样时, 含水率可能无法精确控制到所需要的值, 所以在制样时应适当多制备一些试样用于测量实际含水率。

### 2.2 试验结果

#### 2.2.1 中剪试验结果

图 7 为 S2、S3、S4 剪切过程中不同正应力水平下剪应力-剪应变曲线。在相同正应力水平下, 剪应变随着剪应力增加而增加, 达到峰值强度后, 剪应力逐渐降低。S2 不同正应力水平下应力-应变曲线形态基本相同(图 7a), 在 1.15 MPa 正应力下峰值强度可达 0.5 MPa; S3 在低正应力下没有出现明显峰值, 随着正应力水平提高, 表现出明显应变软化特征, 试验破坏后的残余强度同破坏前的峰值强度相比降低值较大, 在 1.45 MPa 正应力下峰值强度可达

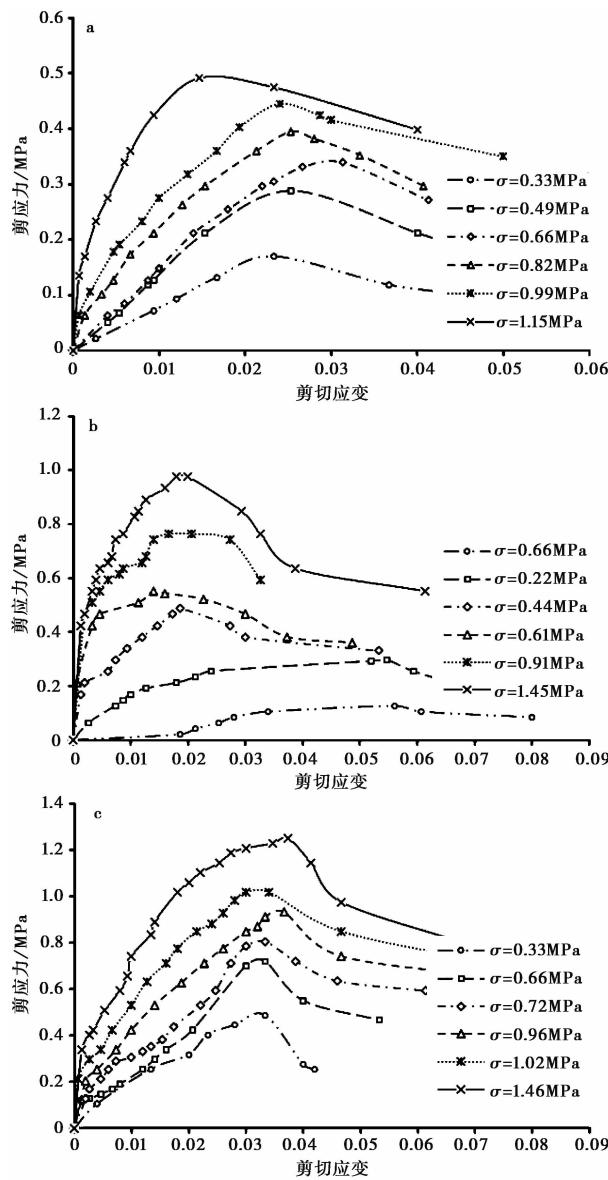


图 7 中剪试验应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves

a. S2 应力-应变曲线图(实验 A1-A5); b. S3 应力-应变曲线图(实验 B1-B5); c. S4 应力-应变曲线图(实验 C1-C5)

1 MPa; S4 无论正应力水平高低都表现出明显应变软化特征, 在 1.46 MPa 正应力下抗剪强度达 1.3 MPa。这是由于 S4 颗粒较大, 颗粒之间形成镶嵌结构, 能够承受更大的剪应力, 一旦超过颗粒抗剪强度或达到爬坡角, 试样将突然破坏, 颗粒重新定向排列, 剪切逐渐进入残余强度(李广信, 2004; 张倬元等, 2009)。值得注意的是, S3 峰值前应变均小于 S4, 说明 S3 具有更大剪切模量, 可能因为试样颗粒粒径与级配的差异引起的, 由颗粒级配曲线可得 S3 不均匀系数大于 S4, 较小的粒径和更好的级配使其装样时颗粒接触更加紧密, 影响了其剪切特

性。

## 2.2.2 普通直剪试验结果

图 8 为 S1、S2 普通直剪试验结果。随着正应力水平提高, 抗剪强度增加, S1 试样应力-应变曲线都没有明显峰值强度, 即表现出应变硬化型特征, 而 S2 试样在较高含水率下可见峰值。对于 S1, 随着含水率增加, 剪切初期应变量减小, 但强度降低, 在 3.9% 含水率时, S2 的峰值应力一般在应变达到 0.07~0.08 后到来, 而当含水率升高至 9.8% 时, 位移达到 0.04~0.05 左右时即可达到峰值强度(图 8a, 图 8b)。该特征未出现在 S2 的剪切试验中(图 8c, 图 8d), 这可能是因为 S1 黏粒含量大于 S2, 在不排水快剪过程中所产生的孔压来不及快速排出, 孔压存在致使 S1 变形能力减弱, 类似现象也被前人研究所证实(Vieira et al., 2013)。由此可以看出 S1 抗剪强度对水具有更强的敏感性。

## 3 结果讨论

### 3.1 层间错动带材料剪切强度特征

#### 3.1.1 泥化带与糜棱质带

对 S1、S2 试样在天然含水率下抗剪强度与正应力的关系进行拟合, 发现在实验的正应力范围内, 曲线符合直线型莫尔-库仑准则(图 9):

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

糜棱质带材料黏聚力和内摩擦角分别为 24.94 kPa 和 32°, 天然状态下泥化带材料内摩擦角和黏聚力均小于糜棱质带材料, 分别为 21.4 kPa 和 17°。

#### 3.1.2 角砾岩带

相同正应力下角砾岩带材料抗剪强度均大于其余材料, 且随着正应力增加, 抗剪强度差异逐渐增大。对 S2、S3、S4(峰值和残余)强度与正应力关系进行拟合发现曲线符合幂函数关系:

$$\tau = a\sigma^b \quad (2)$$

随着正应力增加, 包络线变得平缓, 说明试样塑性增加, 且试样粒径越大塑性增加越明显(图 10a)。残余强度与峰值强度大小关系相同, 与峰值强度包络线相比, 残余强度线更为接近, 这主要是因为试样破坏后, 材料颗粒发生碎裂, 颗粒重新定向排列, 残余强度决定于碎裂后颗粒粒径大小和级配等因素, 由于三者矿物组分基本一致, 所以正应力不断增加过程中, 剪切面材料特性逐渐趋于一致。

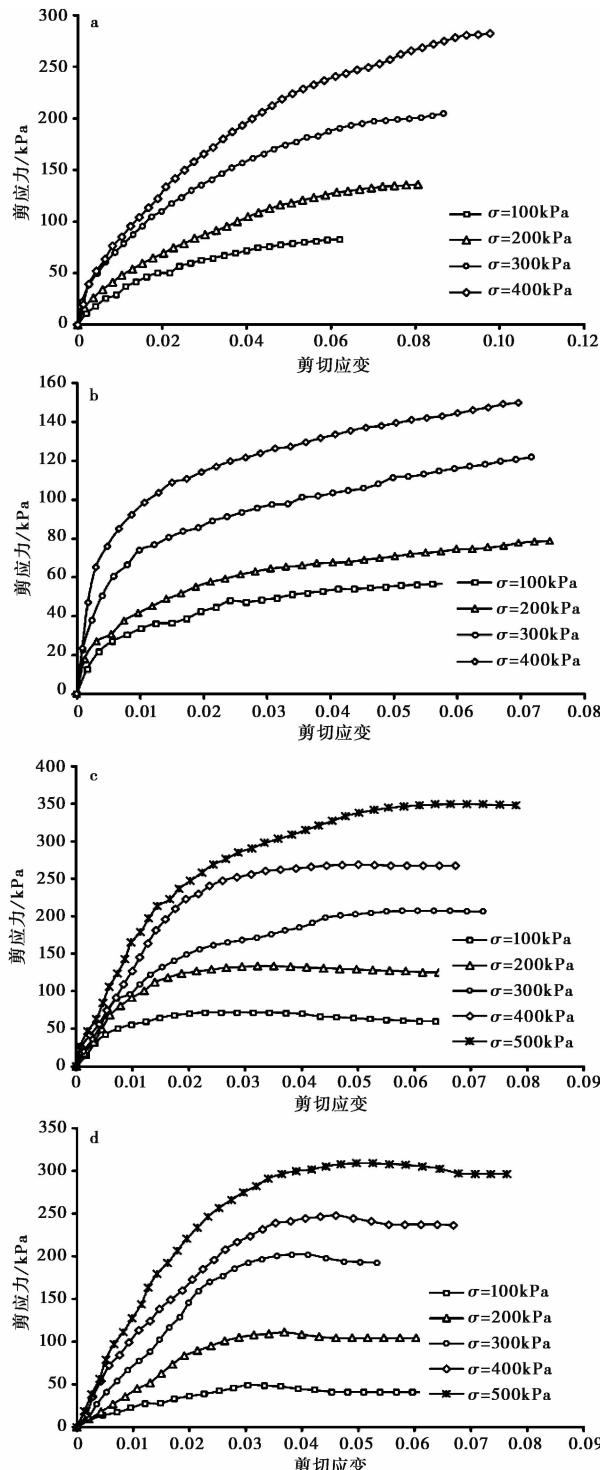


图 8 S1、S2 直剪应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves (S1, S2)

- a. S1 试样 8.3% 含水率应力-应变曲线(实验 D1);
- b. S1 试样 11.1% 含水率应力-应变曲线(实验 D2);
- c. S2 试样 3.9% 含水率应力-应变曲线(实验 E1);
- d. S2 试样 9.8% 含水率应力-应变曲线(实验 E4)

### 3.2 实验仪器对层间材料抗剪强度的影响

S2 试样同时进行了中剪实验和直剪试验,因此

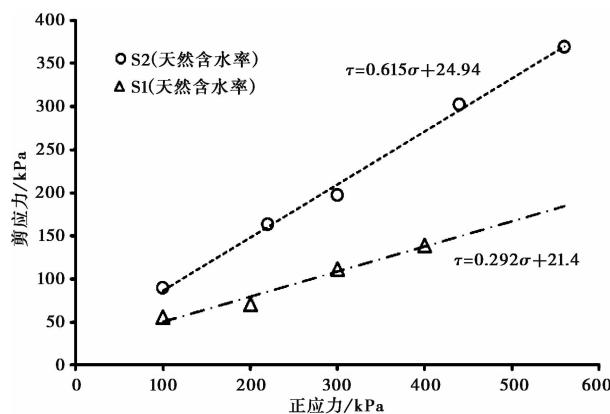


图 9 S1、S2 试样强度公式和包络线

Fig. 9 Strength envelope and formula

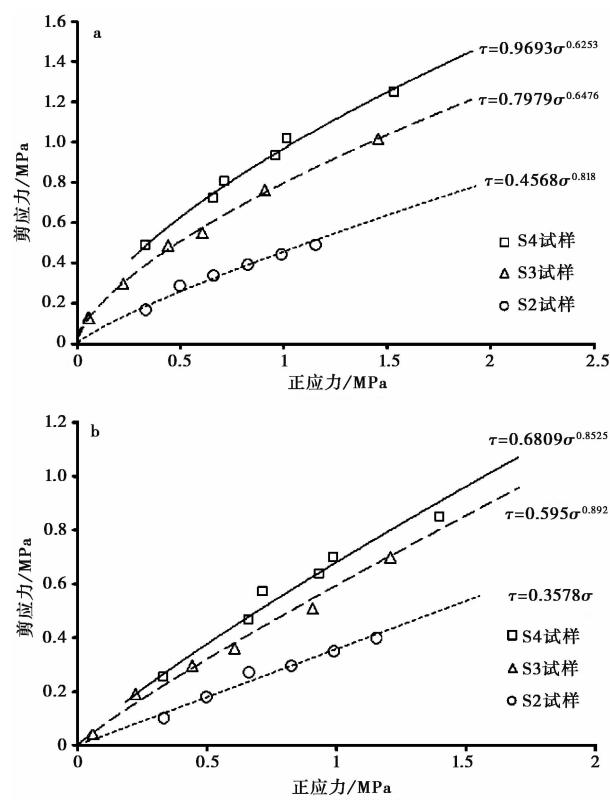


图 10 各组试样强度公式和包络线

Fig. 10 Strength envelope and formula

a. 峰值强度; b. 残余强度

可以选取两种实验仪器下的实验结果进行比较,可以讨论实验仪器对测得试样抗剪强度的影响,两组实验下 S2 试样强度包络线列于统一坐标系中(图 11)。

由图 11 实验结果可见,中剪试验下,试样可施加的正应力值更高,范围跨度也较大,S2 试样的内摩擦角随着正应力升高有所下降,这是由于岩土体的内摩擦角并不是一个不变的值,其会随着正应力

的变化而改变。汪斌等(2010)基于室内三轴加载及卸荷力学试验成果,对高应力下岩土体的非线性强度特性予以验证,确定岩土体具有幂函数关系的非线性特征;在普通小型直剪实验结果中,正应力范围较为集中,因而强度包络线近似为直线,试样内摩擦角变化不明显。

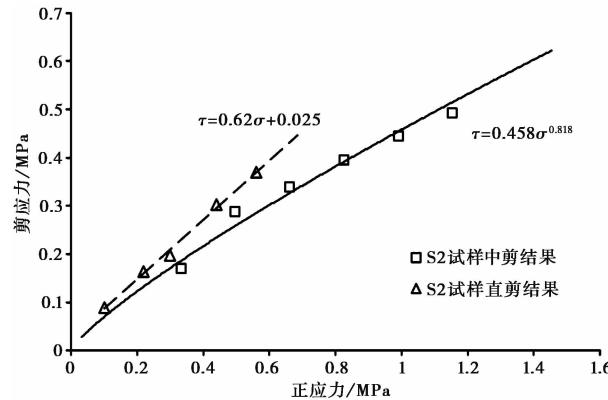


图 11 两种仪器下 S2 试样强度公式和包络线

Fig. 11 Strength envelope and formula for S2 in different test

其次,两组实验在正应力上的施加范围也有重叠的部分,在这一部分上,中剪实验的结果与普通直剪结果相对比较接近,说明两组实验可以较好地反映 S2 试样的真实力学性质;但是比较两者实验结果仍有一些差异,其中中剪试验结果相对偏小,这一现象在其他学者的研究中也有体现(刘炜等, 2008; Alias et al., 2014),这表明直剪试验的仪器,或者说仪器的尺寸对于实验结果存在影响。周志刚等(1999)在试验结果的基础上,采用轴对称有限元方法对大型直剪仪的尺寸效应进行分析,认为直剪仪的剪力盒壁存在不同程度的摩擦力,这种摩擦力将会影响试样中的应力分布。剪力盒壁的摩擦力将降低剪切面上的压力,其降低程度随直剪仪的尺寸而异。对于大型直剪仪,因摩擦力而造成剪切面上的正压应力误差相对明显,因此通常更大尺寸的直剪仪测得的岩土体剪切力学性质相对小于小型仪器的实验结果。

### 3.3 破碎程度对层间材料抗剪强度的影响

由于 S2、S3、S4 试样的矿物成分基本一致,所以对三者进行分析可以比较碎裂程度对抗剪强度的影响。研究选取颗粒分析曲线中的粒径中位数( $d_{50}$ )来表示试样颗粒的破碎程度,S2、S2、S3 试样粒径中位数分别为 12.23 mm、1.02 mm、0.09 mm,并用各试样强度包络线公式计算不同应力水平下峰值强度

和残余强度(图 12)。

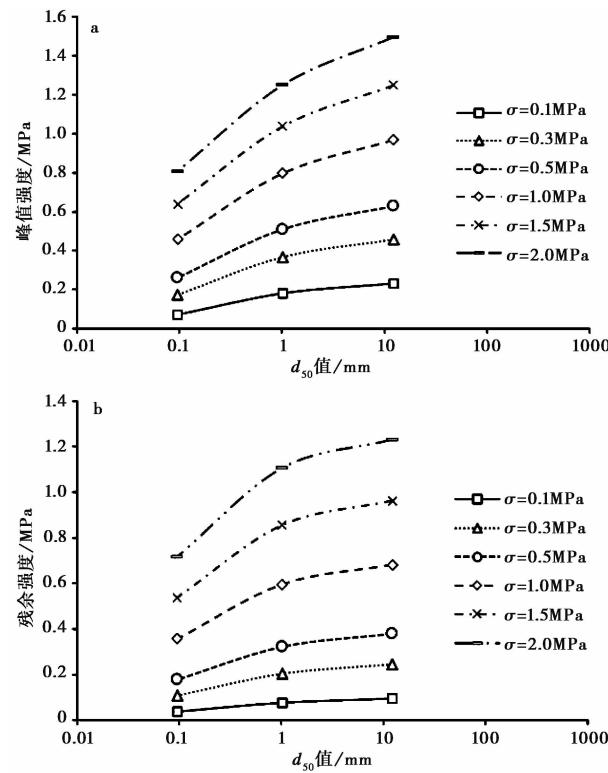


图 12 破碎程度同强度的关系

Fig. 12 Relationship between strength and fragmentation

a. 峰值强度; b. 残余强度

可以看出材料抗剪强度随颗粒粒径的增加而增加,表明层间错动带碎裂越严重的层位其抗剪强度越低。值得注意的是,随着正应力提高,粒径大小对强度影响变大,这可能是由于在更高的应力条件下,试样颗粒间的咬合作用更加显著,在受剪过程中,克服颗粒间咬合作用以及剪涨爬升时受到的阻碍更大,也就造成了强度增加。随着正应力增加,S3 和 S4 残余强度逐渐接近,这与前述剪切强度特征分析结果一致;但与峰值强度大小规律相同,S2 试样残余强度也始终小于 S3 和 S4,表明应力状态高低对角砾岩带影响更为突出,可以推测在一定范围的高应力状态下(如大光包原始应力状态),糜棱质带材料抗剪强度仍低于角砾岩带。

### 3.4 水对层间材料抗剪强度影响分析

图 13 和图 14 为不同含水率情况下 S1、S2 试样普通直剪试验抗剪强度包络曲线。对于 S1,当含水率为 8.3% 时,内摩擦角为  $27.42^\circ$ , 黏聚力为 26.1 kPa; 而当含水率增加到 22.5%, 内摩擦角为  $3.51^\circ$ , 黏聚力为 0。S1 黏聚力较低,而且随含水率

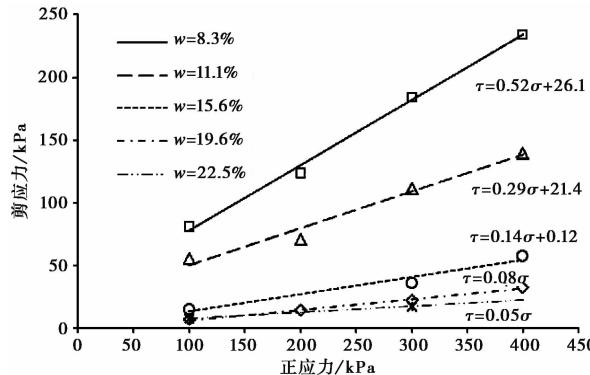


图 13 各组试样强度公式和包络线(S1)

Fig. 13 Strength envelope and formula (S1)

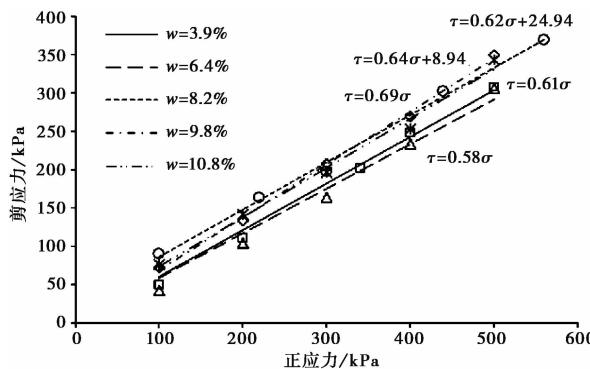


图 14 各组试样强度公式和包络线(S2)

Fig. 14 Strength envelope and formula (S2)

升高而丧失,当含水率升高至 15.6%时,黏聚力已下降至几乎为 0。随着含水率增加,S1 内摩擦角和黏聚力都快速降低,对内摩擦角影响更为明显,降幅达 80%以上。

对于 S2,当含水率为 3.9%时,内摩擦角为 34.57°,而当含水率增加到 10.8%,内摩擦角下降为 30.24°。S2 黏聚力也较小,仅当含水率达到 8.2%时出现最大值为 24.94 kPa。随着含水率增加,S2 内摩擦角和黏聚力变化相对较小。结果表明含水率对 S1 强度的影响要显著强于 S2。

图 15 为 S1 和 S2 内摩擦角与含水率关系曲线。可以看出,试验范围内,S2 内摩擦角普遍大于 S1;随着含水率增加,两试样内摩擦角均呈指数下降,S1 内摩擦角下降程度大于 S2。这可能是 S2 中黏粒含量小于 S1 且平均粒径大于 S1;且 S2 主要成分为白云石,基本无黏土矿物,其抗剪强度主要由颗粒间咬合作用及滑动摩擦提供,而 S1 中由颗粒咬合作用提供的抗剪力较小,其抗剪强度的来源中静电引力、范德华力和颗粒间胶结等因素的贡献相对较大(李广

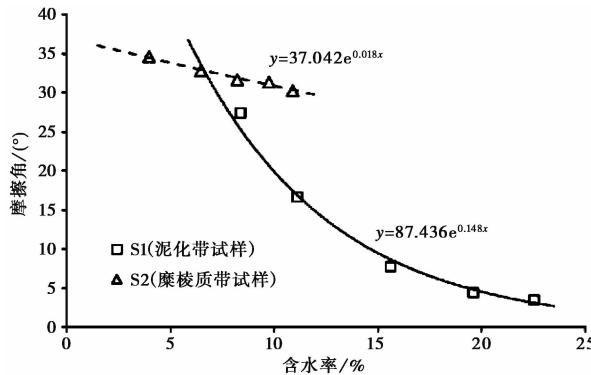


图 15 内摩擦角和含水率关系曲线

Fig. 15 Functional relation between friction angle and moisture content

信,2004),而这些颗粒间的力受水的影响非常明显。

### 3.5 试验结果影响因素分析

以上试验系统地分析了大光包滑坡层间错动带岩体的剪切特性以及一些影响其强度的因素,如破碎程度和含水率,有助于加深对层间错动带岩体的认识,也利于增进对大光包滑坡的认识。但是因实验条件的局限,取得的结果可能受到一些因素的影响。

#### 3.5.1 取样扰动的影响

由于取样时不可避免的扰动,使得取得的试样性状发生改变,岩体原有的胶结会有部分丢失,在中剪实验装样时,为达到或接近原密度,需采用击实的方法,也进一步造成了对试样的扰动;此外,在配置不同含水率的试样时,须由干燥散粒的试样加水配置,因此制成的式样也属于扰动试样,因为这些因素的影响,虽然实验结果可以较好地反映实际材料的特性,但在一定程度上仍可能存在差异。

#### 3.5.2 试验仪器的限制

由于试验仪器的限制,在安装试样时,部分粒径过大的颗粒需进行筛除,如中剪试验仪大于 20 mm 粒径的颗粒及直剪试验仪大于 2 mm 的颗粒;此外,试验仪器可以施加的正应力有限,而实际情况下层间错动带中岩体的应力环境最高可达 11 MPa,因此,这些试验仪器的制约也可能造成实验结果对实际情况反映的不足。

## 4 关于大光包滑坡的讨论

大光包滑坡得以暴露深埋于地下 400 m 的厚层

间错动带,提供了研究构造带岩体抗剪强度的契机。该层间错动带表现出明显的构造分带特征,即有细粒的泥化带和糜棱质带,也有粗颗粒的角砾岩带。大光包滑坡是沿该层间错动带剪出的,对于该带剪切特性研究就显得十分必要。

本文结果表明该层间错动带抗剪强度也具有分带特征,即相同正应力下,泥化带抗剪强度最小,其次为糜棱质带和角砾岩带,也即剪应力环境中泥化带是层间错动带最薄弱层带,可以推测大光包滑坡可能沿该层间错动带底部运动。此外,在地震动荷载作用下,滑坡层间错动带中的碎裂岩体进一步受到影响,从而引起碎裂岩体原有节理碎裂或产生新的断裂损伤,进而导致岩体碎裂化程度加剧,使得层间错动带岩体抗剪强度随之下降,大大增加滑坡发生失稳破坏的可能性。

对于大光包滑坡逐渐深入的认识是地下水在滑坡形成中起到了关键作用。天然状态下泥化带含水率已达到11%,表明地震前该层可能存在导水通道。本文试验结果表明,含水率对泥化带抗剪强度有明显影响,随着含水率增加,抗剪强度呈指数下降,当含水率达到8%时,内摩擦角降低到斜坡岩层倾角30°,而当含水率上升到11%时,泥化层内摩擦角已降到滑坡滑动方向视倾角16°。同时含水率的增加使得泥化层破坏的累计变形量大大减小,即更小的累计变形即可发生破坏,大大增加了滑坡启动的可能性和突然性。

## 5 结 论

(1) 层间错动带中碎裂岩体的抗剪强度与正应力大小有关,其抗剪强度与正应力呈幂函数关系。岩体的内摩擦角随着正应力的增加而减小,正应力越大,试样的内摩擦角越小。

(2) 层间错动带碎裂程度对抗剪强度有显著影响,岩体的抗剪强度与层间错动带岩体的碎裂程度负相关,碎裂化越严重,峰值抗剪强度越低,相应的残余强度也越低,因此在地震发生过程中,层间错动带碎裂岩体在地震动荷载下进一步碎裂化,会造成层间错动带岩体抗剪强度的进一步降低,从而大大增加滑坡发生滑动的可能性。

(3) 含水率对泥化夹层材料抗剪强度有显著影响,泥化带土体抗剪强度与含水率负相关,含水率越高,抗剪强度越低,黏聚力也相应降低。泥化带土体的内摩擦角与含水率呈负相关的指数关系,随着含

水率的升高,内摩擦角指数倍下降,强度损失严重。在地震动荷载过程中,随着岩体在动力荷载下扩容引起的地下水进入,泥化带抗剪强度会迅速降低,此时其强度不仅低于错动带中的碎裂岩体,也显著低于糜棱质带,推断该层泥化带可能是滑坡滑动时滑面的主要发育层位。

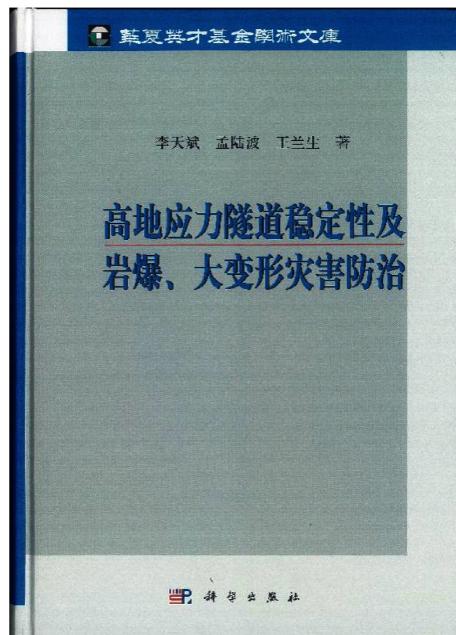
## 参 考 文 献

- Alias R, Kasa A, Taha M R. 2014. Particle size effect on shear strength of granular materials in direct shear test[J]. International Journal of Civil and Environmental Engineering, 8(11): 1144–1147.
- Cui S H. 2014. Microstructure and static and dynamics damage mechanism of the slipping cataclastic rock of largest scale landslide—A case of Dagungbao landslide in Anxian[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.
- Huang R Q, Pei X J, Cui S H. 2016. Cataclastic characteristics and formation mechanism of rock mass in sliding zone of Dagungbao landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 35(1): 1–15.
- Huang R Q, Pei X J, Li T B. 2008. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at Dagungbao occurred during the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 16(6): 730–741.
- Huang R Q, Pei X J, Zhang W F, et al. 2009. Further examination on characteristics and formation mechanism of Dagungbao landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 17(6): 725–736.
- Li G X. 2004. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press.
- Liu W, Wang Y M, Chen Y K, et al. 2008. Research on large size direct shear test for geocell reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 29(11): 3133–3138, 3160.
- Pei X J, Huang R Q, Cui S H, et al. 2015. The rock mass cataclastic characteristics of Dagungbao landslide and its engineering geological significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(S1): 3106–3115.
- Vieira C S, Lopes M L, Caldeira L. 2013. Soil-geosynthetic interface shear strength by simple and direct shear tests[C]//Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris: [s.n.] .
- Wang B, Zhu J B, Wu A Q, et al. 2010. Experimental validation of nonlinear strength property of rock under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 29(3): 542–548.
- Wang R X. 1988. Microscopic structural geology[M]. Beijing: Peking University Press.
- Wang X F, Nai L. 1984. The character of strength and the failure mechanism of clay intercalary strata[J]. Journal of Jilin University: Earth Science, 14(4): 90–97.
- Xu D P, Feng X T, Cui Y J, et al. 2012. Shear behaviors of interlayer staggered zone at Baihetan hydropower station[J]. Chinses Journal

- of Rock Mechanics and Engineering, 31(S1): 2692–2703.
- Yin Y P, Cheng Y L, Wang J, et al. 2011. Remote sensing research on Daguangbao gigantic rock-slide triggered by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 19(5): 674–684.
- Yin Y P, Wang M, Li B, et al. 2012. Dynamic response characteristics of Daguangbao landslide triggered by Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(10): 1969–1982.
- Zhang Z Y, Wang S T, Wang L S, et al. 2009. Principles of engineering geological analysis [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Zhou Z G, Li W S, Song Q D. 1999. The effect of size on tests by large direct shear apparatus [J]. Journal of Changsha Communications University, 15(1): 47–49.
- Zhu Z G, Wei Y J, Tao L J, et al. 2010. Formation mechanism of Yanjiatai cracked rock mass and engineering geological significance in Beijing [J]. Journal of Engineering Geology, 18(S1): 71–75.
- 崔圣华. 2014. 强震巨型滑坡滑带碎裂岩体微细观分析及静动力破 损机制研究——以安县大光包滑坡为例 [D]. 成都: 成都理工大学.
- 黄润秋, 裴向军, 崔圣华. 2016. 大光包滑坡滑带岩体碎裂特征及其 形成机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 35(1): 1–15.
- 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 2008. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本 特征及形成机理分析 [J]. 工程地质学报, 16(6): 730–741.
- 黄润秋, 裴向军, 张伟峰, 等. 2009. 再论大光包滑坡特征与形成机 制 [J]. 工程地质学报, 17(6): 725–736.
- 李广信. 2004. 高等土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社.
- 刘炜, 汪益敏, 陈页开, 等. 2008. 土工格室加筋土的大尺寸直剪试验 研究 [J]. 岩土力学, 29(11): 3133–3138, 3160.
- 裴向军, 黄润秋, 崔圣华, 等. 2015. 大光包滑坡岩体碎裂特征及其工 程地质意义 [J]. 岩石力学与工程学报, 34(增1): 3106–3115.
- 汪斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 2010. 高应力下岩石非线性强度特性的试 验验证 [J]. 岩石力学与工程学报, 29(3): 542–548.
- 王瑞珣. 1988. 显微构造地质学 [M]. 北京: 北京大学出版社.
- 王先锋, 佴磊. 1984. 各类泥化夹层的剪切破坏机制与强度特征 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 14(4): 90–97.
- 徐鼎平, 冯夏庭, 崔玉军, 等. 2012. 白鹤滩水电站层间错动带的剪切 特性 [J]. 岩石力学与工程学报, 31(增1): 2692–2703.
- 殷跃平, 成余粮, 王军, 等. 2011. 汶川地震触发大光包巨型滑坡遥感 研究 [J]. 工程地质学报, 19(5): 674–684.
- 殷跃平, 王猛, 李滨, 等. 2012. 汶川地震大光包滑坡动力响应特征研 究 [J]. 岩石力学与工程学报, 31(10): 1969–1982.
- 张倬元, 王士天, 王兰生, 等. 2009. 工程地质分析原理 [M]. 北京: 地 质出版社.
- 周志刚, 李文胜, 宋勤德. 1999. 大型直剪仪试验的尺寸效应 [J]. 长 沙交通学院学报, 15(1): 47–49.
- 朱志刚, 魏云杰, 陶连金, 等. 2010. 北京燕家台碎裂岩体的成因机制 及其工程地质意义 [J]. 工程地质学报, 18(增1): 71–75.

## 新书介绍

### 《高地应力隧道稳定性及岩爆、大变形灾害防治》一书出版



高地应力隧道稳定性及其灾害防治问题已成为我国重大工 程建设中亟待解决的重大技术难题。李天斌、孟陆波、王兰生所 著的《高地应力隧道稳定性及岩爆、大变形灾害防治》一书 2016 年由科学出版社出版发行。该书针对高地应力隧道减灾防灾 的重大国家需求,面对我国西部地区复杂地质条件对国际上长期使 用的新奥法(NATM)隧道修筑技术的挑战,突破了新奥法在隧道 岩爆和大变形灾害方面的局限性,系统建立了高地应力隧道稳定 性评价与岩爆、大变形灾害防治的理论和技术方法体系。

该书是作者近二十年研究成果的总结,是高地应力隧道稳定 性及其地质灾害防治领域的一本系统专著,由王思敬院士作序推 荐,华夏英才基金资助出版。该书理论、技术方法与工程实践相 结合,可供隧道与地下工程、地质工程、岩土工程、岩石力学与工 程及其相关领域的科技人员、工程师和管理者参考使用,也可作 为高等院校相关专业师生的教学参考书。

全书约 91 万字。定价: 258 元。