

DOI: 10.11779/CJGE201709021

大光包滑坡滑带碎裂岩体原位钻孔剪切试验研究

冯文凯¹, 易小宇¹, 葛 华², 王 琦¹, 刘志刚¹, 张光鑫¹

(1. 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), 四川 成都 610059; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘 要: 安县大光包滑坡是汶川地震触发的最大规模滑坡, 滑坡南侧暴露长约 1.8 km 顺层滑带, 其岩体高度碎裂化, 引起广泛关注。为准确评价滑带碎裂岩体的强度参数, 笔者在前人研究的基础上开展了细致的野外调查工作, 采用法国 Phicometre 岩土两用原位钻孔剪切试验仪对大光包滑坡滑带碎裂岩体进行了原位剪切试验。将试验结果与 Hoek-Brown 岩体强度准则估值和基于工程地质类比的力学参数建议值进行了对比分析。基于以上研究, 提出了大光包滑坡南侧顺层滑带碎裂岩体力学参数建议值: 内聚力为 245~480 kPa, 内摩擦角为 25.0°~26.5°。

关键词: 大光包滑坡; 碎裂岩体; 原位钻孔剪切试验; 抗剪强度; Hoek-Brown 强度准则

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)09-1718-06

作者简介: 冯文凯(1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事区域稳定与岩体稳定以及地质灾害防治方面的研究和教学工作。E-mail: fengwenkai@cdut.cn。

In-situ borehole shear tests on cataclastic rock mass of Daguangbao landslide

FENG Wen-kai¹, YI Xiao-yu¹, GE Hua², WANG Qi¹, LIU Zhi-gang¹, ZHANG Guang-xin¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059,

China; 2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, China)

Abstract: Daguangbao landslide is the largest landslide triggered by the Wenchuan earthquake. The exposed sliding zone with a length of 1.8 km and highly ruptured rock mass is located at the south side of the landslide, which has attracted great attention across the world. To evaluate the strength parameters of cataclastic rock mass in the sliding zone accurately, a detailed field survey work is carried out on the basis of previous researches by using a France Phicometre dual-purpose geotechnical in-situ borehole shear tester to investigate the cataclastic rock mass in Daguangbao landslide slip zone. A comparative analysis among the test results, the values of Hoek-Brown strength criterion and the mechanical parameter values based on the engineering geologic analogy method is performed. Finally, the mechanical parameter values of the rock mass of the Daguangbao landslide of the south side are proposed: its cohesion is from 245 kPa to 480 kPa, and its internal friction angle is from 25.0° to 26.5°.

Key words: Daguangbao landslide; cataclastic rock mass; in-situ borehole shear test; shear strength; Hoek-Brown strength criterion

0 引 言

大光包滑坡地处四川省安县高川乡, 其体积约为 $11.52 \sim 11.99 \times 10^9 \text{ m}^3$, 是汶川大地震触发的最大规模滑坡^[1]。该滑坡南侧暴露长约 1.8 km 顺层滑带, 其岩体高度碎裂化, 引起了国内外专家学者广泛关注。

黄润秋等^[2-3]首先提出并分析了大光包滑坡滑带岩体碎裂化问题, 指出大光包滑坡滑带岩体强震作用下碎裂化, 摩阻力急剧降低, 是滑坡骤然启动的原因。许向宁等^[4]在分析大光包滑坡形成机制时提出大光包滑带岩体碎裂化是白云岩强烈溶蚀砂化层形成和演化结果; 马艳波^[5]则认为滑带(床)岩体的碎裂是滑坡启动后厚重滑体振动、碾压的结果。殷跃平等^[6]运用

FLAC^{3D}对大光包滑坡变形失稳特征进行了模拟, 结果表明, 其岩体碎裂化与垂直地震动力响应密切相关; Zhang等^[7]运用不连续变形分析(DDA)模拟了大光包滑坡运动过程, 结果表明, 近断层的强地震动对大光包滑坡滑带的形成和远距离滑动有重要影响。黄润秋等^[8]、裴向军等^[9]通过大量现场调查与测试工作提出: 大光包滑坡滑带发育形成于早期构造作用形成的层间错动带; 地震导致强大光包山体沿层间错动带分离, 对层间错动带产生的垂向振冲(夯击)作用导致了滑

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572291, 41302287); 四川省青年科技创新研究团队专项计划项目(2017TD0018); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室团队项目(SKLG2016Z001); 中国地质调查局项目(DD20160274)

收稿日期: 2016-05-25

带岩体的进一步碎裂。

这些研究主要集中于滑带碎裂化的成因机理方面,而对该滑坡滑带碎裂化岩体强度参数的研究仍然缺乏。主要原因在于滑带碎裂岩体具有胶结程度不均匀、节理裂隙极发育、应力环境复杂、空间连续性差的特点^[10],脱离其复杂赋存环境与结构特征进行的常规室内试验无法获得实际结果。

鉴于此,笔者在前人研究的基础上开展了细致的野外调查工作,采用Phicometre岩土两用原位钻孔剪切试验仪对大光包滑坡滑带碎裂岩体进行了原位剪切试验,并将试验值与Hoek-Brown准则的估值和基于工程地质类比法的建议值进行了对比研究。

1 滑带碎裂岩体特征

黄润秋等^[2]研究表明,大光包滑坡是强震触发的拉裂—滑移型滑坡,滑体沿岩层走向剪出。地质测绘与岩性鉴定成果表明大光包滑坡滑带位于震旦系灯影组三段(Zd^3),是一套浅灰色中厚层—块状富藻白云岩。

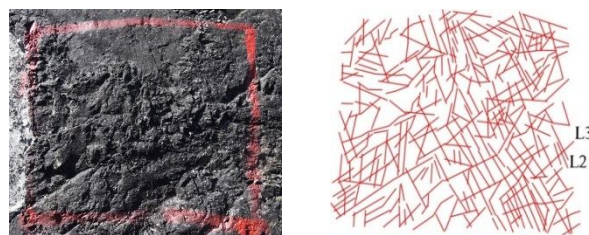
为查明岩体碎裂化特征,选取大光包滑坡南侧顺层滑带两处具有代表性调查试验点进行精细的野外地质调查和现场试验。具体点位如图1所示,其中#2点岩体较#1点破碎。



图1 调查试验点位置图

Fig. 1 Location of survey point

以#1点为例。#1位置为滑带岩体相对较完整处,对 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的正方形区域进行统计(图2): L1岩层面产状 $356^\circ \angle 42^\circ$,表面光滑,层间充填黏性矿物颗粒,强风化,锤击易碎,节理间距 $1.0 \sim 4.0\text{ cm}$; L2节理面平均产状 $55^\circ \angle 78^\circ$,触感较粗糙,砂质充填,弱风化,锤击可碎,节理间距 $1.1 \sim 8.0\text{ cm}$,延伸长度 $10 \sim 50\text{ cm}$; L3节理面平均产状 $117^\circ \angle 48^\circ$,与L2呈共轭剪节理,触感较粗糙,砂质充填,中风化,锤击易碎,节理间距 $3.5 \sim 10\text{ cm}$,延伸长度 $20 \sim 60\text{ cm}$ 。



(a) #1点实测图

(b) #1点素描图

图2 #1地质调查点节理裂隙发育情况

Fig. 2 Development of joints and fissures in geological survey site No. 1

通过节理玫瑰花图(图3)可知除岩层面产状,发育的两组优势节理产状在 55° 和 117° 倾向。通过极射赤平投影图(图4)可知岩体中节理的空间组合将岩体切割成岩块,在后期外荷载作用下节理将沿优势节理走向进一步扩展延伸劣化岩体。

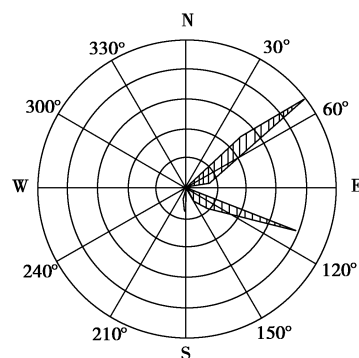


图3 节理倾向玫瑰花图

Fig. 3 Rose diagram of joint tendency

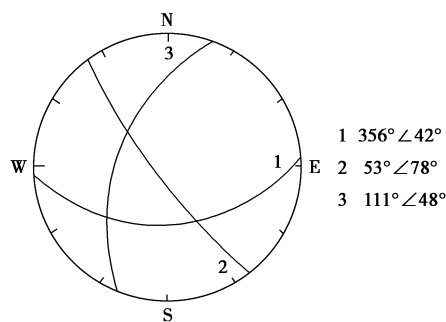


图4 优势节理极射赤平投影图

Fig. 4 Projection of superior joints

2 滑带碎裂岩体钻孔剪切试验研究

为进一步准确得到大光包滑坡南侧滑带碎裂岩体力学参数,对地质调查点位附近区域进行原位钻孔剪切试验。试验采用法国Phicometre原位岩土两用钻孔剪切试验仪进行。

2.1 钻孔剪切仪及其工作原理

法国Phicometre原位岩土两用钻孔剪切试验仪主要由剪切探头、法向应力气压控制装置、提供剪应力

的油压千斤顶和连杆以及油管等附属部分组成（图 5）。

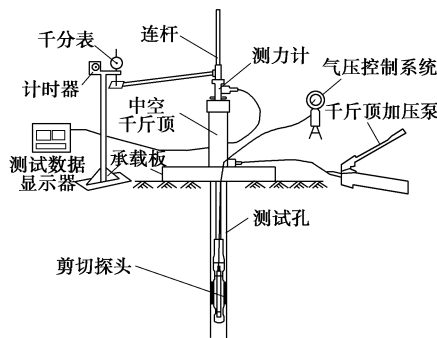


图 5 Phicometre 钻孔剪切试验仪

Fig. 5 Borehole shear tester of Phicometre

剪切探头（图 6）是钻孔剪切仪的核心部件。在一个开槽管体的中部，由 10 个突出的水平环形刀片形成 9 个可嵌入岩片的凹槽；管体内部为可在液压的作用下体积变大的橡胶膜，从而将刀片压入钻孔孔壁内。



图 6 钻孔剪切仪剪切探头

Fig. 6 Shear probe of borehole shear apparatus

法向应力气压控制装置（图 7）包括 1 个氮气瓶和 1 套控制系统。通过向膨胀单元（橡胶膜）内注水使其体积膨胀来施加法向应力；当法向应力使剪切探头上的水平环形刀片嵌入孔周岩体后，保持法向应力恒定。



图 7 法向应力液压控制装置

Fig. 7 Normal stress hydraulic control devices

通过液压千斤顶（图 8）提供向上的拉力（剪应力），来实现剪切探头上嵌入的岩片与孔周岩体的剪切作用。附属装置主要包括连杆、孔口固定装置以及油管等。剪切探头在孔中不同的深度可通过增减连杆来实现。

钻孔剪切仪试验原理（图 9）与室内和现场直剪试验类似，主要是探头上突出的水平环形刀片压入钻孔孔壁内，使上下平行的刀片之间形成一薄层的岩片，然后通过千斤顶提拉探头实现嵌入刀片的岩片直接剪切破坏。



图 8 液压千斤顶及其附属测量装置

Fig. 8 Hydraulic jack and accessory measuring devices

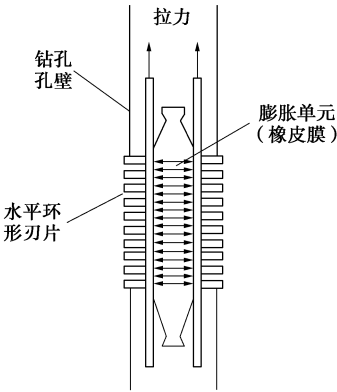


图 9 钻孔剪切试验原理示意图

Fig. 9 Sketch of principle of borehole shear tests

2.2 钻孔剪切试验步骤

大光包滑坡滑带碎裂岩体原位剪切试验的主要步骤如下：

（1）试验选点。根据野外调查情况，选取试验点如图 1 所示。

（2）钻孔准备（图 10（a））。利用便携式钻机辅以清水钻井液在 2 个试验点处各钻 4 个试验孔，孔径 63 mm，孔距 50 cm，孔深 1.5 m。钻孔孔壁应光滑完整，整个试验孔段的平直率应小于 2%，对于具有塌孔危险的试验孔段应先清洁孔壁浮石，并采取必要的防护措施。

- (3) 仪器检查与标定。检查仪器仪表、连接线路、剪切探头和其它部件是否正常。标定剪切探头，得出膨胀后探头直径与注水体积的关系。
- (4) 试验装置安装 (图 10 (b))。放置剪切探头到钻孔指定深度，安装地面辅助装置和测试装置。
- (5) 施加法向应力 (图 10 (c))。通过气压控制系统控制注水体积，对剪切探头匀速缓慢施加到指定法向应力，5 min 后调整法向应力，至 5 min 内应力值变化小于 0.1 MPa 时认为法向应力施加完成，并记录该时气压值 P 。
- (6) 施加剪应力 (图 10 (d)，图 11)。剪应力施加可按照分级多次缓慢施加，直至岩体破坏，终止试验。记录下在此过程中的剪应力读数 τ 。
- (7) 结束现场试验。完全卸压施加在剪切头上的法向力与剪切力，并取出剪切探头，卸下仪器装置，描述并清理剪切探头上岩屑。
- (8) 重复 (4) ~ (7)，进行同一深度不同位置或下一深度的钻孔剪切试验。
- (9) 试验数据整理。

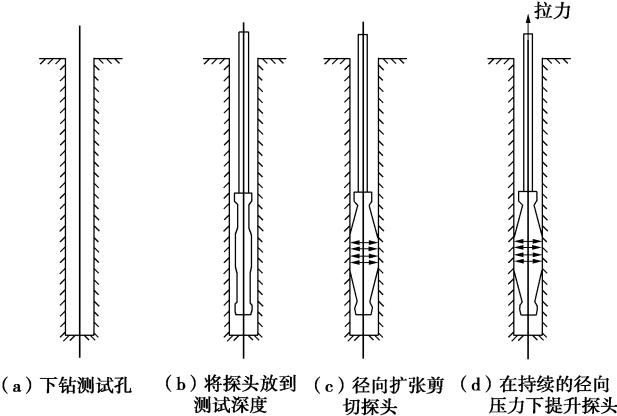


图 10 原位试验过程示意图

Fig. 10 Schematic diagram of borehole in-situ tests



图 11 大光包滑坡原位试验现场

Fig. 11 Borehole in-situ tests on Daguangbao landslide

2.3 钻孔剪切试验结果

本次试验对大光包滑坡南侧滑带碎裂岩体进行了

2 组共 8 次钻孔剪切试验。经数据分析与处理，钻孔剪切试验结果如图 12 所示。

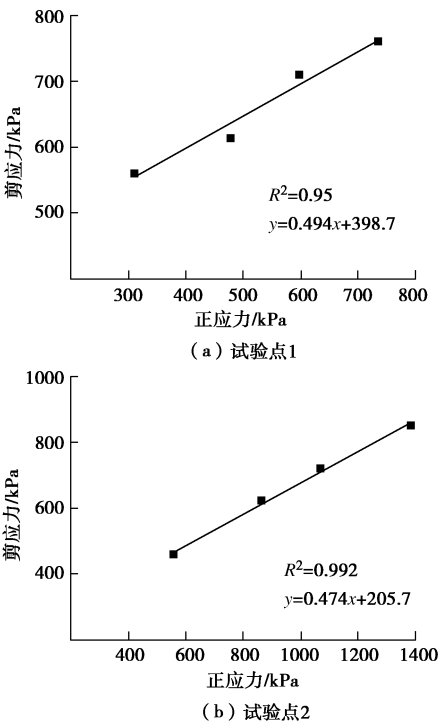


图 12 钻孔剪切试验结果

Fig. 12 Results of borehole in-situ tests

对钻孔剪切试验成果进行整理分析后可知：在试验点 1 处，碎裂岩体的内聚力 $c=398.7$ kPa，内摩擦角 $\varphi=26.3^\circ$ ，试验数据线性拟合优度值为 0.950；在试验点 2 处，碎裂岩体的内聚力 $c=205.7$ kPa，内摩擦角 $\varphi=25.4^\circ$ ，试验数据线性拟合优度值为 0.992。

3 原位试验结果与其它方法结果的对比分析

大型现场试验、室内试验等是获取岩体力学参数的常用方法，但因试验条件的限制，其发展受到一定的制约^[11-12]。1980 年，Hoek 等^[13]通过对大量室内和现场岩体试验成果的统计分析，提出了 Hoek-Brown 岩体强度准则。2002 年，Hoek 等^[14]提出了基于地质强度指标 GSI 和岩体扰动系数 D 的广义 Hoek-Brown 岩体强度准则。近年来，经过大量研究人员的不断发展和完善，形成了较为完整的体系。该方法广泛应用于估算岩石地基、隧道、地下洞室和边坡岩体的强度与变形参数以及岩体的稳定性^[15]。

为判断现场试验值的准确性，运用 Hoek-Brown 岩体强度准则及其不同的改进方案对大光包滑坡滑带进行岩体强度估值。估值所需室内岩石物理力学参数见表 1。

为使 GSI 的评价指标更加合理地反映大光包滑坡滑带碎裂岩体的实际情况，本文除用广义的 Hoek-

Brown 准则进行估值外, 还采用文献[15]、文献[16]提出的改进的 Hoek–Brown 岩体强度准则进行估值。为与工程地质类比法的估值结果对比, 引入文献[6, 17]岩体力学参数建议值。根据相关文献方法所得大光包滑坡滑带岩体力学参数建议值见表 2。

表 1 岩石物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rockmas					
位置	平均重度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	单轴抗压 强度/MPa	单轴饱和 抗压强度 /MPa	扰动带纵 波波速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	未扰动带 纵波波速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
#1	27.4	87.2	69.7	2923	3689
#2	27.2	81.2	65.0	2812	3813

表 2 大光包滑坡滑带岩体力学参数估值

Table 2 Predicted mechanical parameters of rock mass				
	文献/方法	位置	内聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
Hoek– Brown 准则估 值	Hoek–Brown	#1	933.0	31.7
	准则 (2002 年)	#2	667.0	24.7
	文献[15]	#1	894.0	26.7
		#2	633.2	19.5
	文献[16]	#1	843.1	25.6
		#2	568.5	17.9
工程地 质类 比法 估值	文献[6]	滑带	150.0	20.0
	文献[17]	滑带	300.0	21.0

对比原位钻孔剪切试验的岩体力学参数值与表 2 中基于各种方法的估值, 可以发现:

(1)大光包滑坡滑带碎裂岩体内聚力试验值小于 Hoek–Brown 准则估值。其中#1 调查试验点试验值比 Hoek–Brown 准则估值偏小约 450~530 kPa, #2 调查试验点实验值偏小约 360~460 kPa。

(2)大光包滑坡滑带碎裂岩体内摩擦角试验值较为接近 Hoek–Brown 准则估值。

(3)大光包滑坡滑带碎裂岩体抗剪强度参数与采用工程地质类比法给出的建议值较为接近。

(4)对比#1 点与#2 点试验抗剪强度参数, #1 点较#2 点大, 这与#2 点岩体较#1 点破碎的情况相符, 同时也符合通过 Hoek–Brown 准则对两点位估值结果。

可以看出, 钻孔剪切试验获取滑带碎裂岩体的内聚力存在偏小情况。其主要原因是钻孔剪切设备中的水平环形刀片尺寸和剪切岩片厚度较小造成的; 另外, 钻孔的竖直程度和孔壁完整性、加卸载速率等也有一定影响。而试验获取的碎裂岩体内摩擦角与 Hoek–Brown 准则估值和工程地质类比法建议值较为接近, 可认为是合理的试验结果。

由于室内和现场试验方法的局限性以及经验准则的人为性, 原位钻孔剪切试验是在工程现场方便快捷地得到岩体抗剪强度参数的重要方法, 可以逐渐成为弥补室内外岩体试验、Hoek–Brown 强度准则与工程地质类比法估值不足的一种重要手段。

4 讨 论

(1)钻孔剪切仪剪切探头水平环形刀片在嵌入钻孔岩壁过程中, 孔壁岩体已经发生了破坏, 会对试验成果造成一定的影响。此外, 因剪切厚度较小, 如果钻孔孔壁不完整, 则导致试验结果偏小。对剪切单元可以进行改进, 为岩体工程特性的确定提供较为可靠的参考依据。

(2)试验中, 钻孔剪切探头的膨胀单元在膨胀过程中两端因应力集中容易爆裂, 导致试验失败。对膨胀单元材料或者安装布置方式可以进行改进, 以减少或者消除爆裂可能。

(3)试验过程中钻孔利用率不高, 波速试验和钻孔剪切试验需不同设备进行, 不能利用一种仪器进行多种试验。此外, 剪切破坏过程和剪切破坏后孔壁特征也不能直观、实时地反映给地面试验人员。针对这些情况, 可对仪器予以改进, 增加波速试验和孔内成像功能, 提高钻孔利用率。

5 结 论

(1)原位钻孔剪切试验可以在工程现场方便快捷地得到岩体抗剪强度参数, 可以逐渐成为弥补室内外岩体试验、Hoek–Brown 强度准则与工程地质类比法估值不足的一种重要手段。

(2)在试验中也发现了钻孔剪切仪尚存在一些不尽人意之处, 通过进一步改进, 使试验流程和仪器设计更为合理, 为岩体工程特性的确定提供较为可靠的参考依据。

(3)根据原位钻孔剪切试验结果, 结合改进的 Hoek–Brown 准则估值和工程地质类比法建议值, 大光包滑坡滑带碎裂岩体的力学参数为: 内聚力建议值为 245~480 kPa, 内摩擦角建议值为 25.0° ~ 26.5° 。

参考文献:

[1] 殷跃平, 成余粮, 王 军, 等. 汶川地震触发大光包巨型滑坡遥感研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(5): 674 - 684. (YIN Yue-ping, CHENG Yu-liang, WANG Jun, et al. Remote sensing research on daguangbao gigantic rock-slide triggered by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(5): 674 - 684. (in Chinese))

[2] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 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, 2008, 16(6): 730 - 741. (HUANG Run-qiu, PEI Xiang-jun, LI Tian-bin. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at Dagungbao occurred during the Wenchuan

- earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(6): 730 - 741. (in Chinese))
- [3] 黄润秋, 裴向军, 张伟锋, 等. 再论大光包滑坡特征与形成机制[J]. 工程地质学报, 2009, **17**(6): 725 - 736. (HUANG Run-qiu, PEI Xiang-jun, ZHANG Wei-feng, et al. Further examination on characteristics and formation mechanism of Daguangbao landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(6): 725 - 736. (in Chinese))
- [4] 许向宁, 李胜伟, 王小群, 等. 安县大光包滑坡形成机制与运动学特征讨论[J]. 工程地质学报, 2013, **21**(2): 269 - 281. (XU Xiang-ning, LI Sheng-wei, WANG Xiao-qun, et al. Characteristics of formation mechanism and kinematics of Daguangbao landslide caused by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, **21**(2): 269 - 281. (in Chinese))
- [5] 马艳波. 强震条件下巨型滑坡滑带岩体损伤特性研究——以大光包滑坡为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2012. (MA Yan-bo. Study on damage features of the rock mass in the sliding belt of the giant landslide under the strong earthquake—a case of Daguangbaolandslide[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [6] 殷跃平, 王 猛, 李 滨, 等. 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, 2012, **31**(10): 1969 - 1982. (YIN Yue-ping, WANG Meng, LI Bin, et al. Dynamic response characteristics of Daguangbao landslide triggered by Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering Geology, 2012, **31**(10): 1969 - 1982. (in Chinese))
- [7] ZHANG Y, CHEN G, ZHENG L, et al. Effects of near-fault seismic loadings on run-out of large-scale landslide: a case study[J]. Engineering Geology, 2013, **166**(8): 216 - 236.
- [8] 黄润秋, 裴向军, 崔圣华. 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, 2016, **35**(1): 1 - 15. (HUANG Run-qin, PEI Xiang-jun, CUI Sheng-hua. Cataclastic characteristics and formation mechanism of rock mass in sliding zone of Daguangbao landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering Geology, 2016, **35**(1): 1 - 15. (in Chinese))
- [9] 裴向军, 黄润秋, 崔圣华, 等. 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, 2015, **34**(增刊): 3106 - 3115. (PEI Xiang-jun, HUANG Run-qiu, CUI Sheng-hua, et al. The rock mass cataclastic characteristics of daguangbao landslide and its engineering geological significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S1): 3106 - 3115. (in Chinese))
- [10] 崔圣华. 强震巨型滑坡滑带碎裂岩体微细观分析及静动力破坏机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012. (CUI Sheng-hua. Strong earthquake giant landslide slip zone cataclastic rock mass view of micro analysis and the static and dynamic damage mechanism research[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [11] HOEK E, DIEDERICHS M S. Empirical estimation of rock mass modulus[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, **43**: 203 - 215.
- [12] 晏鄂川, 唐辉明. 工程岩体稳定性评价与利用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2002: 1 - 15. (YAN E-chuan, TANG Hui-ming. Stability evaluation and utilization of engineering rock mass[M]. Wuhan: Publishing House of China University of Geosciences, 2002: 1 - 15. (in Chinese))
- [13] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980: 23 - 25.
- [14] HOEK E, CARRANZA T C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition[C]// Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium. Toronto, 2002.
- [15] 胡盛明, 胡修文. 基于量化的 GSI 系统和 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数的估计[J]. 岩土力学, 2011, **32**(3): 861 - 866. (HU Sheng-ming, HU Xiu-wen. Estimation of rock mass parameters based on quantitative GSI system and Hoek-Brown Criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(3): 861 - 865. (in Chinese))
- [16] 王新刚, 胡 斌, 王家鼎, 等. 基于 GSI 的 Hoek-Brown 强度准则量化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊 2): 3805 - 3812. (WANG Xin-gang, HU Bin, WANG Jia-ding, et al. Quantitative study of Hoek-Brown strength criterion based on GSI[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S2): 3805 - 3812. (in Chinese))
- [17] 朱 雷, 王小群. 大型岩质滑坡地震变形破坏过程物理试验与数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2013(2): 228 - 235. (ZHU Lei, WANG Xiao-qun. Physical modeling and numerical simulation of deformation and failure process of large rockslide in earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2013(2): 228 - 235. (in Chinese))