

# 武隆鸡尾山滑坡滑带软岩微观结构与流变特性

邓茂林 许强 韩蓓 朱星 蔡国军 郑光

(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)

**摘 要:** 利用理学 DMAX-3C 衍射仪(CuK $\alpha$ , Ni 滤光)、偏光显微镜、扫描电镜(SEM)、岩石直接剪切蠕变试验系统等对武隆鸡尾山滑坡滑带软岩进行矿物成分、岩性鉴定并分析构造和组分,自然风干和饱水后两种状况的显微结构观察,并对其流变特性进行试验研究。其结果为:软弱带方解石含量占 68%、有机质 13%、滑石 9%、蒙脱石 5%、石英 4%、白云石 1%,滑动面的镜面物质没有变化。显微结构测试结果表明:自然风干后在扫描电镜下,样品中出现大量的线型擦痕、微孔隙和微裂隙,粘土矿物呈定向排列。充分饱水后试样出现新的微裂纹,并有扩张现象,孔隙明显增大,也较好的吻合了该滑坡滑动的一些基本事实。对直剪流变试验与快剪试验获得的抗剪强度参数相比较发现,前者的长期抗剪强度有显著降低,摩擦系数降低 31.53%,凝聚力降低 37.61%,且凝聚力对剪切流变特性的影响高于内摩擦系数。这些试验结果与野外对滑坡的调查结果相吻合,促进了对滑坡的机理研究;滑带软岩的微观结构及流变力学性质是该滑坡发生蠕滑效应的重要因素。

**关键词:** 滑带软岩;微观结构;矿物组成;流变特征;长期强度

中图分类号: P642

文献标志码: A

厚层灰岩构成的斜倾山体在我国重庆、湖北、贵州、云南、四川等西南灰岩山区分布较广,由于自然演化或人类活动的影响,许多这类山体形成滑坡灾害,对人类的生命财产和安全造成巨大的损失。1964 年,湖北秭归链子崖危岩,软弱带为炭质页岩、泥岩<sup>[1]</sup>;1988-01-10,重庆巫溪中阳村滑坡,体积为  $765.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,造成 26 人死亡,软弱带为煤层<sup>[2]</sup>;1994-04-30,  $424 \times 10^4 \text{ m}^3$  的重庆武隆鸡冠岭滑坡造成长江堵江,其软弱带为页岩<sup>[3]</sup>;1996-09-18,  $210 \times 10^4 \text{ m}^3$  的贵州印江岩口滑坡,造成 5 人死亡,经济损失达 1.5 亿元,滑带为薄层页岩<sup>[4]</sup>;2009-06-05,  $500 \times 10^4 \text{ m}^3$  的重庆武隆鸡尾山滑坡,74 人死亡<sup>[5]</sup>。这些滑坡的滑体均为厚层灰岩;其中,武隆鸡尾山滑坡为典型的处于斜倾厚层灰岩地区且具有二元结构的滑坡,滑体自 200 m 处的山崖滑向沟中,顺沟冲出 2 200 m;滑坡体主要由二叠

系厚层状灰岩、泥灰岩及作为滑带的薄层灰质板岩构成。野外调研结果表明,滑带软岩的微观结构及流变力学性质,对于促使该滑坡在采矿作用下漫长的蠕滑效应并最终迅速启动,起着至关重要的作用。

滑带的类型、物质组分、微观结构特征和形成机理等决定了滑带的应力状态和强度的变化,这些变化最终又会影响滑坡的活动,所以滑带分析也促进了对滑坡的深入研究。伏斯列夫和今井秀喜等对滑带粘土裂缝产生的机理研究,是滑带土研究的雏形<sup>[6]</sup>。李守定等对大型基岩顺层滑坡滑带形成演化过程与模式作了深入研究<sup>[7]</sup>。武隆鸡尾山滑坡发生后,中国不少专家学者都曾奔赴滑坡现场进行详细的调研工作并取得了丰富的研究成果<sup>[6,8-17]</sup>,不少学者对滑坡的形成机理作了深入研究<sup>[5,8-9,11-12,16-17]</sup>,也有部分学者对滑坡的高速远程运动特征作了分析<sup>[13-15]</sup>;然而,有关该滑坡的滑带

收稿日期(Received date): 2013-06-22; 改回日期(Accepted): 2013-08-21。

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展计划(2013CB733200), 国家杰出青年科学基金(41225011), 教育部长江学者特聘教授岗位资助。[The National Basic Research Program “973” Project of the Ministry of Science and Technology of the People’s Republic of China, No. 2013CB733200, China National Science Fund for Distinguished Young Scholars, No. 41225011, Changjiang Scholars Professor positions funded.]

作者简介(Biography): 邓茂林(1980-),男,汉族,四川宣汉人,博士研究生,主要从事地质灾害预测与防治方面的工作。[Deng Maolin (1980-), male, Ph.D. majoring in geological disaster prediction and prevention. ] E-mail: dmltop@163.com

软岩微观结构及流变力学性质方面测试的系统研究很少<sup>[10]</sup>。近年来,随着科学技术水平的提高,岩石力学试验设备和技术手段均得到了很大改进,有关这方面的成果也日益深入。

武隆鸡尾山滑带软岩为一层 5~20 cm 厚的灰质板岩,坡体在下部采矿和前缘受阻的情况下,发生缓慢蠕滑,其时间超过半个世纪之久,滑带软岩结构必然发生变化,同时也受到拉、压、剪的作用,滑带的流变特征明显。因此,对鸡尾山滑坡滑带软岩的岩石微观结构及流变力学性质进行的测试研究,对我国西南厚层灰岩山区地质灾害的防灾减灾工作及采矿、河道、道路和城市建设等均有着重要的意义。基于此,在对鸡尾山滑坡野外宏观地质调查的基础上,利用理学 DMAX-3C 衍射仪(CuK $\alpha$ , Ni 滤光)、偏光显微镜和扫描电镜(SEM)及岩石直接剪切蠕变试验系统,分别对鸡尾山滑坡滑带软岩的矿物成分、显微结构及流变性质进行了一系列试验研究,得出了一些有价值的结论。

## 1 滑坡概况

2009-06-05T15:00 许,重庆市武隆县铁矿乡鸡尾山发生大型岩质滑坡,厚层灰岩沿缓倾软弱夹层发生整体滑动,从高程约 1 300 m 陡崖剪出,冲下约 200 m 的山崖,在对面沟谷受阻后转向并顺铁匠沟向下游滑出约 2 200 m(图 1);滑坡主要由厚层的二叠系灰白色厚层状微晶灰岩和深灰色、灰色中厚层状含沥青质灰岩、含泥质灰岩和灰质板岩夹层等构成。三维激光扫描仪精密测量表明,崩滑块体顺坡向总体长约 720 m,其中四边形段长约 480 m,三角形段长约 240 m。四边形南侧(后缘)宽约 152 m,北侧宽约 125 m。崩滑体平均厚度约 60 m,其平面面积约  $8.4 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,体积约  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

滑带大体顺着岩层面发育,产状  $330^\circ \sim 355^\circ \angle 22^\circ \sim 30^\circ$ ,滑面上存在大量同一方向的擦痕,且滑面上可见大量白色反光的镜面物质(图 2)。

## 2 试验装置及试样特征

矿物成分分析采用理学 DMAX-3C 衍射仪(CuK $\alpha$ , Ni 滤光),岩石微观试验分别按偏光显微镜和扫描电镜标准磨片制样,分别在成都理工大学材料化学学院和地质灾害防治与地质环境保护国家重

点实验室采用偏光显微镜(OLYMPUS CX21P)和扫描电镜(SEM)(日立公司的 S-3000N/H)进行微观试验,观察岩样的微观特征。

流变试验采用成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室研制的岩石直接剪切蠕变试验系统。流变试样采用边长 20 cm $\times$ 20 cm,高为 10 cm 的两个立方体钢模具制作试样,预留剪切厚度为 5 mm;将上部的钢模放在底座钢模上并填充混凝土,从而制成 20 cm $\times$ 20 cm $\times$ 20 cm 的立方体混凝土浇筑试样(图 3)。流变试验采用逐级加荷的办法,根据滑带板岩的快剪试验得到的岩石的凝聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ ,确定剪切流变试验对应的正应力和剪应力等级梯度。对比直剪试验中加载正应力的,天然状态下正应力按 3 级加载,压力分别为 2 MPa、4 MPa、10 MPa。

## 3 岩石矿物成分

采用理学 DMAX-3C 衍射仪(CuK $\alpha$ , Ni 滤光)对软岩试样作矿物成分分析, X 射线衍射谱图为图 4 所示。根据鉴定,软弱带方解石含量高达 68%、有机质为 13%、滑石 9%、蒙脱石 5%、石英 4%、白云石 1%(图 5)。该层上部依次为二叠系下统栖霞组( $P_1q^3$ )上段、二叠系下统茅口组( $P_1m$ ),在水的溶蚀、携带作用下方解石渗透、停滞在条纹状含钙质灰质板岩中。有机质含量高降低了该层条纹状含钙质灰质板岩的抗压强度和抗剪强度。滑石含量在该组条纹状含钙质灰质板岩中占 9%,质软细腻,手摸有滑润感,也为滑坡的漫长蠕滑和启动后的快速滑动提供了条件。对滑带软岩的现场调查和其剪切试样中均发现软岩滑移面会出现一层镜面反光的物质(见图 2),采用理学 DMAX-3C 衍射仪将这层镜面物质成分进行分析,结果发现其矿物成分与软岩完全一样<sup>[9]</sup>。

## 4 岩石微观结构特征

灰质板岩的结构及矿物成分均比较复杂,经历多期的变形与变质过程。偏光显微镜结构测试(视域直径 5.2 mm 平行偏光和视域直径 2.0 mm 正交偏光)结果表明,该滑带为条纹状含钙质灰质板岩,灰黑夹灰白色条带细粒不等粒不规则粒状及隐晶质结构,板状劈理较发育。岩石组分主要由灰白色细

粒碳酸盐和黑色含炭质泥质组成。岩石主体呈灰褐色夹白色条纹,细粒粒状鳞片变晶结构,半定向条带-条纹状构造,岩石组分主要由碳酸盐、较多鳞片状方解石及含少许细粒石英组成,以方解石为主。显微鳞片状集合体,常组成不规则、团粒-团斑状,粒间常含少许细粒不规则粒状石英,有时含细粒不规则粒状或团粒状碳酸盐之序穿插共生(图6(视域直径5.2 mm,平行偏光)、图7(视域直径2.0 mm,正交偏光))。干涉色彩因粒度细小及杂质影响不太鲜明,沿条带或团斑边缘可能由于构造而影响板状劈理发育,有机灰质重结晶形成黑色隐晶质炭质(隐晶质石墨)污手。石英少量不规则无序散布,穿插于方解石粒间,分布较普通,但含量较少。切片无色,干涉色一级灰白色,并具较发育的波状消光。含石英碳酸盐脉较发育,宏观呈白色带状并与围岩具同步褶皱,局部含黑色围岩包体,主要由中粒不规则粒状碳酸盐组成的带状集合体带,含较少量中粒不规则粒状石英无序穿插共生。局部穿切围岩构造;但又没有受到变质构造的影响,可能表明碳酸盐脉形成同构造发育为主(见图7)。



图1 鸡尾山崩滑体正射遥感影像

Fig. 1 Jiweishan landslide by orthogonal project on image



图2 试样破坏后及表面镜面物质

Fig. 2 Destruction of the sample and the surface of the mirror material



图3 试样的浇筑

Fig. 3 Pouring of the sample

在对鸡尾山滑坡野外宏观地质调查的基础上,利用扫描电镜(SEM)分析研究了10个滑坡滑动面的典型样品,对饱水前和饱水10 d 试验样品进行分析,滑动面微结构的特征为:样品中出现大量的线型擦痕、微孔隙和微裂隙、粘土矿物呈定向排列等,见图8~9。

模拟在降雨条件下,水侵入到滑带内部情况,进行饱水试验;选取5个样品在纯净水中浸泡10 d,充分饱水后,发现灰质板岩具有亲水性。在浸泡后,再烘干对其微观结构进行了SEM试验,发现微裂纹有扩张现象,孔隙增大明显,并出现有新的微裂纹,见图10~11。水会导致软弱带微裂缝的形成,这些微裂缝成为连续滑动拉裂的主要通道。显微结构测试结果表明,灰质板岩的结构及矿物成分均比较复杂,经历多期的变形与变质过程。软弱带以上几种微观特征是软岩滑带流变特性的内在结构。

## 5 流变力学性质试验

对于含软岩的边坡岩体,稳定性分析、设计、施工时应考虑其的流变力学特性<sup>[18-20]</sup>;国内外许多学者对软岩的流变特征作了试验研究<sup>[21-23]</sup>。据直剪试验得到滑带软岩的力学参数,内聚力 $C$ 为0.58~0.99 MPa,内摩擦角 $\varphi$ 值为22.2°~28.1°。水平荷载加载值初步设定方法:采用直剪试验所给出的 $C$ 、 $\varphi$ 建议值,根据上述预设的正应力,运用库伦公式: $\tau = \sigma \tan \varphi + C$ ,求取加载最大剪应力 $\tau_{\max}$ ,以 $(0.7 \sim 0.8) \times \tau_p$ 作为试验时最终剪应力量级预测的参考值。试验采用分级加载法,各级正应力下剪切荷载的施加采用分级加载法,其加载路径为

$$\tau = \tau_0 \theta(t) + \tau_1 \theta(t - \theta_1) + \tau_2 \theta(t - \theta_2) + \dots + \tau_n \theta(t - \theta_n) + 0.1 \quad (1)$$



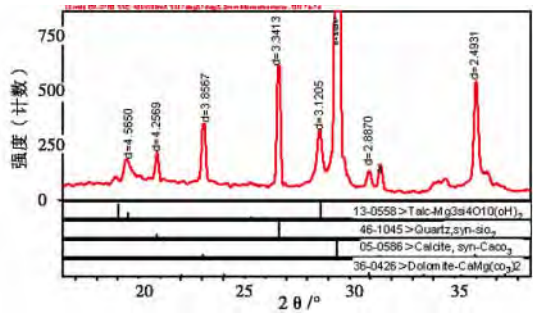


图 4 软岩及其镜面物质的位 X 射线衍射谱对比  
Fig.4 X-ray diffraction of the Soft rock and specular material

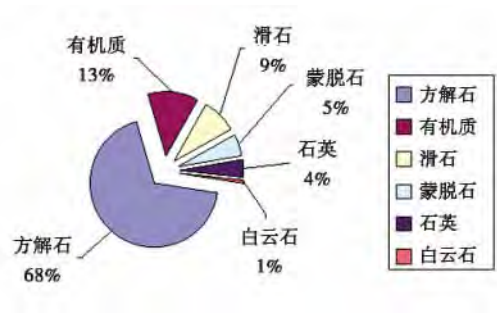


图 5 滑带和滑面上镜面物质的矿物成分  
Fig.5 Analysis results of SEM-EDX spectral configuration of sliding zone

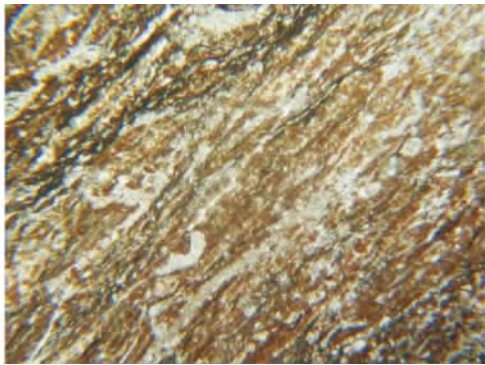


图 6 条带条状构造  
Fig.6 Banded and perthitic structure

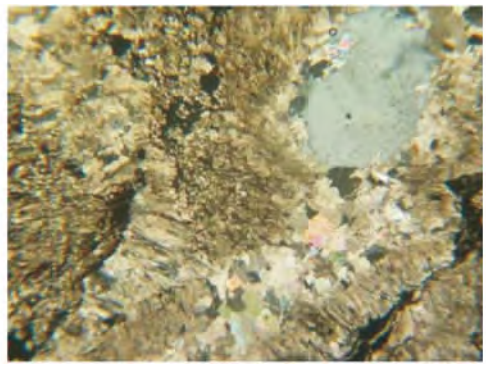


图 7 与围岩具同步褶皱的碳酸盐条带  
Fig.7 Contact Relationship between the Carbonate aggregate and surrounding rock

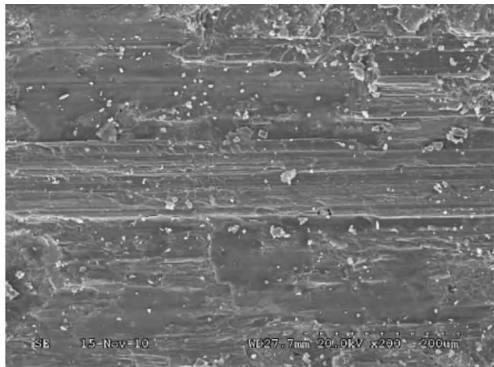


图 8 低倍下线性擦痕明显 ×200  
Fig.8 Linear scratches in low magnification ×200 Times

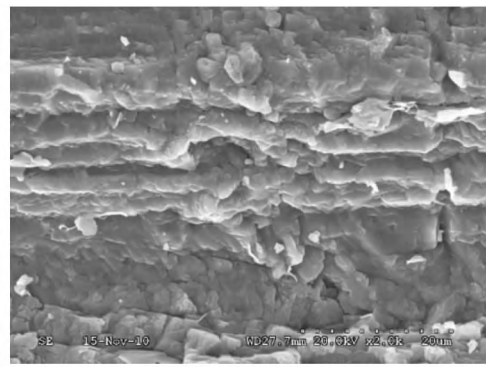


图 9 微观线性擦痕 ×2 000 倍  
Fig.9 Microcosmic Linear scratches × 2 000 Times

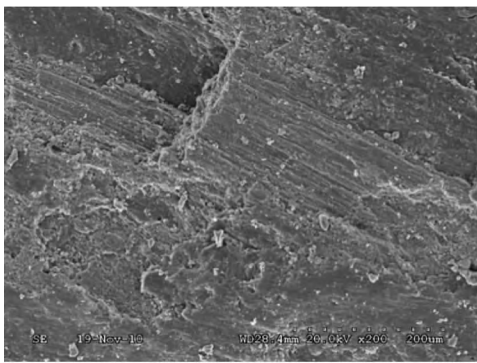


图 10 微孔隙增多 ×200 倍  
Fig.10 Microporosity becomes more ×200 Times

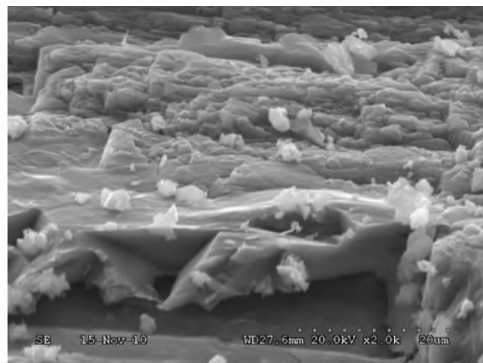


图 11 微孔隙存在 ×2 000 倍  
Fig.11 Microporosity exists ×2 000 Times

当  $t - \theta_i \geq 0$  时  $\theta(t - \theta_i) = 1$ ;  $\theta(t - \theta_i) < 0$  时  $\theta(t - \theta_i) = 0$ 。在试验过程中根据变形情况对  $\tau_i$  进行适当调整,一直增加剪应力等级,至最终试样破坏。

### 5.1 试验数据处理

通过计算机全自动采集海量数据(每 10 s 采一组数据),再对数据进行系统处理和分析。岩石的流变过程用剪切位移  $u$  和时间  $t$  的曲线表示,如图 12 所示,然后应用包尔茨曼叠加原理获取的  $u - t$  曲线求得在各级荷载下相同剪应力时的剪切位移叠加曲线,如图 13 所示,由这组  $u - t$  叠加曲线绘制各种时间的剪应力与剪切位移  $u$  等时曲线簇。

### 5.2 长期强度的确定

从图 13、14 可以看出,在正应力恒定的情况下板岩有一定的瞬时剪切位移,随着剪应力的逐级增加,当剪应力达到某一临界值时,岩石由初始剪切蠕变阶段过渡到稳定剪切蠕变阶段,此临界值即为板

岩的长期强度值。低于此临界值时岩石能维持长期稳定,而当剪应力高于此临界值时,板岩将从稳定剪切蠕变阶段过渡到加速剪切蠕变阶段,从而很快发生破坏。从图中还得知,在恒定的正应力作用下随着剪应力的增加,其瞬时剪切位移也逐渐增大。

根据图 13,以不同  $t$  为参数,可得到一族  $\tau - u$  关系等时曲线;根据  $t \geq 0$  曲线变化趋势,剪应力与剪切位移  $u$  等时曲线簇的拐点反映了岩石剪切位移随剪应力增加而变化的转折点,此转折点就是长期流变情况下板岩的剪切屈服点(图 14),可求得  $\tau_\infty$ ,即长期强度。将各试样的法向应力  $\sigma$  和长期强度  $\tau_\infty$  对应地绘制在直角坐标系上,发现它们基本上呈线性关系(图 15),由此可求得试样的蠕变长期强度参数  $C_\infty$ 、 $\varphi_\infty$  值。

根据 Mohr - Coulomb 剪切破坏准则,得出岩石抗剪强度参数(表 1)。岩石剪切长期强度:板岩在

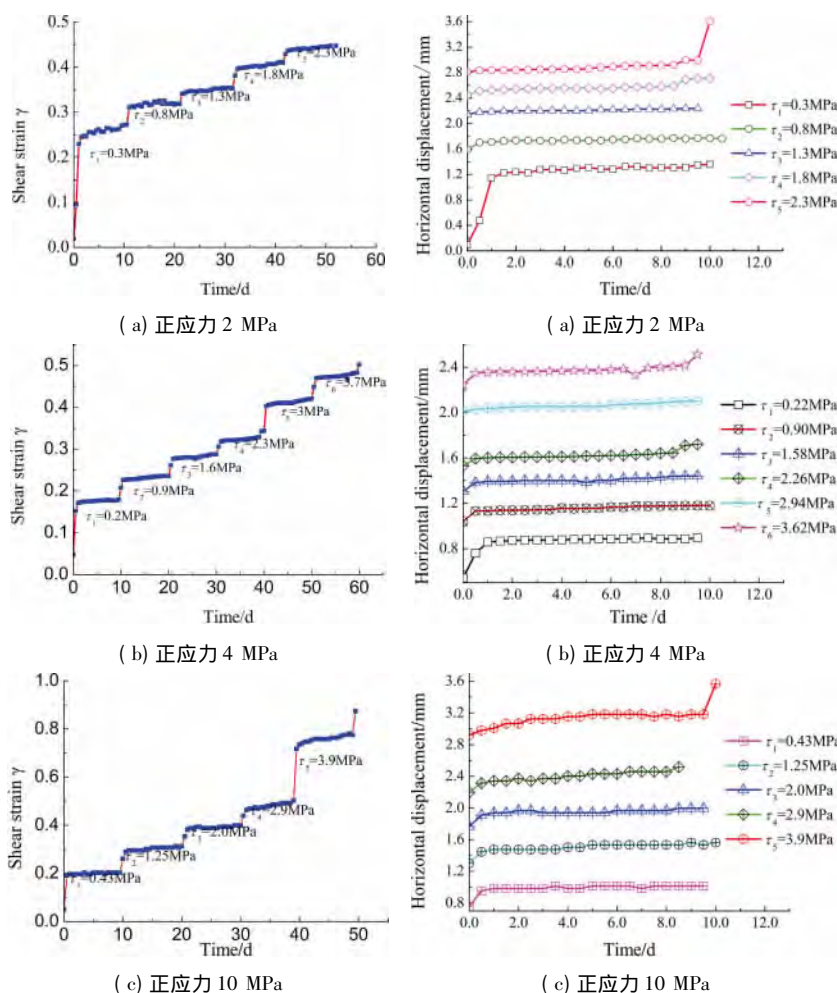


图 12 不同正应力分级加载剪切蠕变试验曲线

Fig. 12 The shear creep-testing curve under step normal stress loading

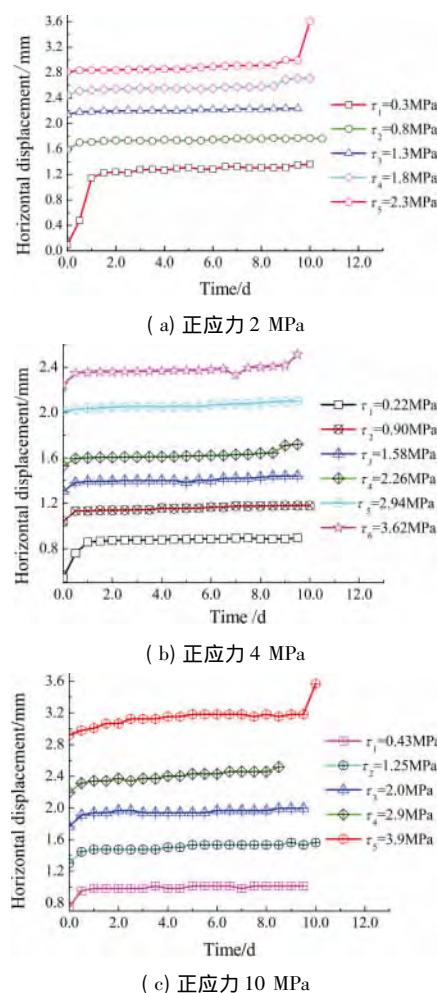


图 13 剪切位移叠加曲线

Fig. 13 The superimposed curves of the shear displacement

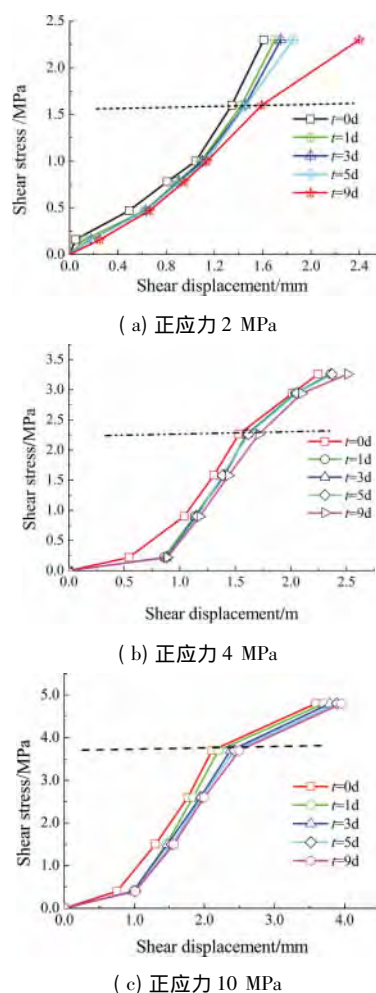


图 14 剪切流变等时簇曲线

Fig. 14 The isochronal cluster curve of the shear rheology



表 1 板岩快剪与剪切流变强度试验结果

Table 1 The test results of the saturated rheological strength ,natural rheological strength and instantaneous strength of the slate

法向应力 /MPa	快剪强度			剪切流变强度		
	直剪应力 /MPa	内摩擦角 /°	凝聚力 /MPa	长期强度 /MPa	内摩擦角 /°	凝聚力 /MPa
2	2.4	23.8	1.8	1.6	17.01	1.12
4	3.7	23.8	1.8	2.5	17.01	1.12
10	6.8	23.8	1.8	4.1	17.01	1.12

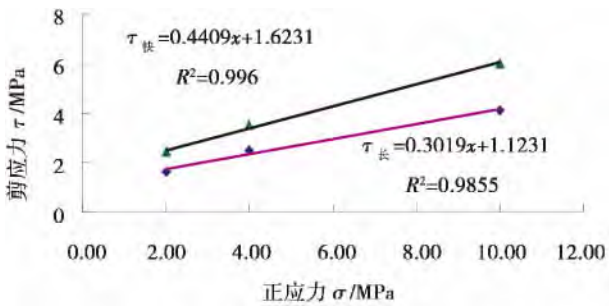


图 15 板岩快剪和剪切流变试验结果对比

Fig. 15 compare the fast shear and shear rheological test results of the slate

轴压  $\sigma$  分别为 2 MPa、4 MPa 和 10 MPa 时对应的长期强度  $\tau$  分别为 1.6 MPa、2.5 MPa 和 4.1 MPa。根据 Mohr - Columb 剪切破坏准则 ,通过一元线性回归得到板岩的长期抗剪强度表达式  $\tau = 0.3019\sigma + 1.12$  ,即可得出板岩的内摩擦角约为 17.01° ,摩擦系数为 0.3 ,凝聚力为 1.12 MPa。从表 1、图 13 可以看出 ,与室内快速剪切强度参数相比 ,长期强度明显降低 ,板岩摩擦系数降低 31.53% ,凝聚力降低 37.61%。无论是扫面电镜试样还是破坏后饱水流变试样 ,都追踪层面破坏。

6 结 论

滑坡软弱带的类型、微观结构特征、物质组分和形成机理决定了滑带的应力状态和强度变化 ,这些变化与滑坡的活动关系密切。在野外地质调查的基础上 ,通过一系列手段对鸡尾山岩质滑坡滑带特征进行了较详细的研究。

1. 软弱带方解石占 68%、有机质 13%、滑石 9%、蒙脱石 5%、石英 4%、白云石 1%。该层上部依次为二叠系下统栖霞组(  $P_1q^3$  ) 上段、二叠系下统茅口组(  $P_1m$  ) ,在水的溶蚀、携带作用下方解石渗透、停滞在条纹状含钙质灰质板岩中。有机质含量高降低了该层条纹状含钙质灰质板岩的抗压强度和抗剪强度。滑石含量在该组条纹状含钙质灰质板岩

中占 9% ,质软细腻 ,手摸有滑润感 ,也为滑坡的漫长蠕滑和滑坡滑动启动后的快速滑动提供了条件。对滑带软岩的现场调查和其剪切试样中 ,均发现软岩滑移面会出现一层镜面反光的物质 ,并采用理学 DMAX - 3C 衍射仪将这层镜面物质成分进行分析 ,结果发现其矿物成分与软岩一样。

2. 软弱带为条纹状含钙质灰质板岩 ,不规则粒状或团粒状之序的多种矿物穿插共生 ,岩石组分主要由灰白色细粒碳酸盐和黑色含炭质泥质组成 ,前者加冷稀盐酸强烈起泡( 碳酸盐) ;后者污手 ,岩性松软 ,加酸微弱起泡 ,具柔性 ,主要由泥质组成。软弱带饱水前后结果表明 ,自然风干条件下 ,样品中出现大量的线型擦痕、微孔隙和微裂隙、粘土矿物呈定向排列等 ;饱水后 ,微裂纹有扩张现象 ,孔隙增大明显 ,并出现有新的微裂纹 ,这些微裂缝成为连续滑动拉裂的主要通道。

3. 根据流变试验结果 ,得出滑带板岩的剪应力 - 剪切位移时间曲线 ,得出了岩石的长期强度参数。结果表明 :直剪流变试验与快剪试验获得抗剪强度参数相比较 ,前者获得的长期抗剪强度参数有显著降低 ,长期强度明显降低 ,摩擦系数降低 31.53% ,凝聚力降低 37.61%。

4. 无论是扫面电镜试样还是破坏后饱水流变试样 ,都追踪层面破坏。这种破坏表现的特征是 :1. 沿基岩的层间裂隙充填为主的滑石和蒙脱石等对称分布呈藕状结构和带状构造 ,它是易于追踪的剪破坏面 ,在这些剪破坏面上具有明显的剪切擦痕。2. 炭质泥质饱水后泥化特征明显 ,使结构面的力学性质蜕化 ,追踪有机质和裂隙壁接触面剪破坏。这些剪破坏面具有泥化、剪碎等特征 ,因此它也是易于追踪、迁就的剪破坏面。

以上表明 :灰质板岩是一种被层面分割为主的软岩 ,它强度低 ,变形较大 ,力学性质复杂化、流动变形特征也较显著 ,水作用效应较强 ,其动态过程难于把握。对于含这类岩石的边坡岩体 ,稳定性分析、设

计、施工时应考虑板岩的流变力学特性。

## 参考文献(References)

- [1] Liu Chuazheng Shi Tao Zhan g Ming - xia. On the mechanism of deforming-cracking on the segment of cracks T8 - T12 of Lianzi cliff dangerous rock body [J]. Journal of Engineering Geology ,1995 ,3 (2) : 29 - 41 [刘传正 施韬 张明霞. 链子崖危岩体 T8 - T12 缝段开裂变形机制的研究 [J]. 工程地质学报 ,1995 ,3(2) : 29 - 41]
- [2] Man Zuowu. Analysis of the mechanism of landslide tanken place Zhongyang village ,Wuxi district ,Sichuan province [J]. Journal of geological hazard and control ,1991 2(1) : 71 - 77 [满作武. 四川巫溪中阳村滑坡发生机制分析 [J]. 地质灾害与防治 ,1991 2(1) : 71 - 77]
- [3] Liu Chuazheng ,Huang Xuebin ,Li Li. The JIguangling landslide Wujiang river blocking river and countermeasures [J]. Hydrogeology & Engineering Geology ,1995 4(4) : 6 - 11 [刘传正 黄学斌 黎力. 乌江鸡冠岭山崩堵江地质灾害及其防治对策 [J]. 水文地质工程地质 ,1995 4(4) : 6 - 11]
- [4] Huang Runqiu Xu Qiang. Chinese catastrophic landslide [M]. Science Press: Beijing 2008. [黄润秋 许强. 中国灾难性滑坡 [M]. 科学出版社: 北京 2008.]
- [5] Xu Qiang Fan Xuanmei Huang Runqiu et al. A catastrophic rock-slide-debris flow in Wulong ,Chongqing ,China in 2009: background ,characterization ,and causes [J]. Landslides 2010 ,7(1) : 75 - 87
- [6] Liu Xiaoli ,Deng Jjianhui ,Li Guangtao. Shear strength properties of slip soils of landslide: an overview [J]. Rock and Soil Mechanics , 2004 25(11) : 1849 - 1854 [刘小丽 邓建辉 李广涛. 滑带土强度特性研究现状 [J]. 岩土力学 2004 25(11) : 1849 - 1854]
- [7] Li Shouding ,Li Xiao ,Wu Jiang et al. Evolution process and pattern of sliding zone in large consequent bedding rock landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2007 26(12) : 2473 - 2480 [李守定 李晓 吴疆,等. 大型基岩顺层滑坡滑带形成演化过程与模式 [J]. 岩石力学与工程学报 2007 26(12) : 2473 - 2480]
- [8] Yin Yueping. Mechanism on apparent dip sliding of inclined bedding rockslide—a case study of Jiweishan rockslide in Wulong , Chongqing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2010 29(2) : 217 - 226 [殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例 [J]. 岩石力学与工程学报 2010 29(2) : 217 - 226]
- [9] Liu Chuazheng. Mechanism analysis on the Jiweishan rockfall disaster happened in Wulong ,Chongqing June 5 2009 [J]. Journal of Engineering Geology 2010 ,18(3) : 297 - 304 [刘传正. 重庆武隆鸡尾山危岩体形成与崩塌成因分析 [J]. 工程地质学报 2010 , 18(3) : 297 - 304]
- [10] Deng Maolin Xu Qiang Cai Guojun et al. Micro-characteristics of weak-soft zone of Jiweishan Rockslide in Wulong County , Chongqing June 5 2009 [J]. Geotechnical Investigation & Surveying 2012 4(4) : 5 - 10 [邓茂林 许强 蔡国军,等. 重庆武隆鸡尾山岩质滑坡软弱带微观特征 [J]. 工程勘察 2012 40(4) : 5 - 10]
- [11] Feng Zhen ,Yin Yueping ,Li Bin. Mechanism analysis of apparent dip landslide of Jiweishan in Wulong ,Chongqing [J]. Rock and Soil Mechanics 2012 33(9) : 2704 - 2712 [冯振 殷跃平 李滨. 重庆武隆鸡尾山滑坡视向滑动机制分析 [J]. 岩土力学 2012 , 33(9) : 2704 - 2712]
- [12] Feng Zhen ,Yin Yueping ,Li Bin et al. Centrifuge modeling of apparent dip slide from oblique thick bedding rock landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2012 31(5) : 890 - 897 [冯振 殷跃平 李滨,等. 斜倾厚层岩质滑坡视向滑动的土工离心模型试验 [J]. 岩石力学与工程学报 2012 , 31(5) : 890 - 897]
- [13] Li Shijia Li Wenping Wu Shang et al. Study on the accumulative characteristics for the elastic grain flow of Jiweishan high-speed distant landslide [J]. Safety and Environmental Engineering 2012 ,19(2) : 13 - 16 [李世佳 李文平 武尚,等. 鸡尾山高速远程崩滑碎屑流堆积特征研究 [J]. 安全与环境工程 2012 ,19(2) : 13 - 16]
- [14] Wang Lingmin Liu Zhigang Geng Xiewei et al. Numerical analysis on short-range flying of large-scale and high-speed Jiweishan landslide [J]. Yangtze River 2012 43(2) : 62 - 65 [王灵敏 刘志刚 耿协威,等. 鸡尾山大型高速滑坡近程飞行数值分析 [J]. 人民长江 2012 43(2) : 62 - 65]
- [15] Zhang Long Tang Huiming Xiong Chengren et al. Movement process simulation of high-speed long-distance Jiweishan landslide with PFC3d [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2012 31(Suppl. 1) : 2601 - 2611 [张龙 唐辉明 熊承仁,等. 鸡尾山高速远程滑坡运动过程 PFC3D 模拟 [J]. 岩石力学与工程学报 2012 31(增1) : 2601 - 2611]
- [16] Zou Zongxing Tang Huiming Xiong Chengren et al. Geomechanical Model of Progressive Failure for large consequent bedding rock-slide and its stability analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2012 31(11) : 2222 - 2231 [邹宗兴 唐辉明 熊承仁,等. 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报 2012 31(11) : 2222 - 2231]
- [17] Yin Yueping Sun Ping Zhang Ming et al. Mechanism on apparent dip sliding of oblique inclined bedding rockslide at Jiweishan , Chongqing ,China [J]. Landslides 2011 ,8(1) : 49 - 65
- [18] Zisichinsky U. On the deformation of high slope [J]. Proceed 1st Congr Int Soc Rock Meehanics ,1966(2) : 179 - 185
- [19] Savage W D Varnes. Meehanics of gravitation a spreading of steep-sided ridge ( "Saekung" ) [J]. Engineering Geology ,1987 35: 31 - 36
- [20] Yang Tianhong Rui Yongqin Tang Chunan et al. Study on deformation features and dynamic stability of creeping slope of Fushun west strip mine [J]. Rock and Soil Mechanics 2004 25(1) : 153 - 156 [杨天鸿 芮勇勤 唐春安,等. 抚顺西露天矿蠕动边坡变形特征及稳定性动态分析 [J]. 岩土力学 2004 25(1) : 153 - 156]
- [21] Burov E M Diamant. Isostasy equivalent elastic thickness and in-

- elastic rheology of continents and oceans [J]. *Geology*, 1996, 24 (5): 419 – 422
- [22] Burov E. B. Rheology and strength of the lithosphere [J]. *Marine and Petroleum Geology* 2011 28(8): 1402 – 1443
- [23] Griggs D. Creep of rocks [J]. *The Journal of Geology*, 1939, 47 (3): 225 – 251

## The Microscopic Structure and Rheological Characteristics of the Slip Zone Soft Rock of Jiweishan Landslide in Wulong of Chongqing ,China

DENG Maolin ,XU Qiang ,HAN Bei ,ZHU Xing ,CAI Guojun ,ZHENG Guang

( State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection ,Chengdu University of Technology ,Chengdu 610059 ,China)

**Abstract:** The stress state and the intensity which would affect the activities of a landslide are determined by the type ,material composition ,microstructural features and formation mechanism and others of the slip zone. So the research of the landslide is promoted by the research of the slip zone. For this reason ,the mineral composition and lithology of the slip zone soft rock of Jiweishan landslide in Wulong of Chongqing ,China are identified by using of DMAX – 3C diffractometer ( light filtering by CuK $\alpha$  ,Ni) ,polarizing microscope ,scanning electron microscope ( SEM) ,the rock direct shearing and creeping test system and etc. ,and the structures ,components and the microscopic structure of the natural dried or saturated water are analyzed ,then the rheological properties are studied according to the experiments. The result shows the composition in weak slip zone: the content of calcite reaches – 68% ,the organic matter – 13% ,the talcum – 9% ,the montmorillonite – 5% ,the quartz – 4% and the dolomite – 1% . The mirror material composition of the sliding surface is not changed. The microstructure test shows that there are a large number of linear scratches ,micropore ,microfissure and the clay mineral directional arrangement in the natural dried samples in the scanning electron microscope. Besides ,there are some micro-cracks and expansion in the slip surface of the fully saturated water sample ,the porosity increases significantly ,and new micro-cracks emerge ,and also coincide with the basic facts of landslide movements. The rheological test results show that the long-term shear strength of the direct shear rheological test significantly decreases by compared to the parameters of the shear strength of the rapid shear tests ,the friction coefficient decreases to 31.53% ,the cohesion decreases to 37.61% ,and also the influence of rock cohesion on shear rheological properties is greater than its internal friction coefficient. These test results are consistent with the understanding results of the field landslide survey ,and promoted the study of the landslide mechanism. Both microscopic structure of slip zone soft rock and rheological mechanical property play an important role in the promotion of landslide creep.

**Key words:** the slip zone soft rock; microscopic structure; mineral composition; rheological characteristics; long-term strength